

Algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika zasnovan na prostorno-vremenskim značajkama videosignala

Vranješ, Denis

Doctoral thesis / Doktorski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:256153>

Rights / Prava: [Public Domain Mark 1.0/Javno dobro](#). [Autorsko pravo je isteklo](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Denis Vranješ

**ALGORITAM ZA ADAPTIVNU VREMENSKU INTERPOLACIJU
SLIKA ZASNOVAN NA PROSTORNO-VREMENSKIM ZNAČAJKAMA
VIDEOSIGNALA**

Doktorska disertacija

Osijek, 2016.

Ova disertacija izrađena je na Zavodu za komunikacije
Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Mentorica: prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje

Disertacija ima 147 stranica i prilog od 11 stranica

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Dr.sc. Drago Žagar, red. prof. Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
2. Dr.sc. Snježana Rimac-Drlje, red. prof. Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
3. Dr.sc. Sonja Grgić, red. prof. Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Dr.sc. Sonja Grgić, red. prof. Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb
2. Dr.sc. Snježana Rimac-Drlje, red. prof. Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
3. Dr.sc. Tomislav Rudec, docent Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
4. Dr.sc. Irena Galić, docent Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
5. Dr.sc. Časlav Livada, docent Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Datum obrane disertacije: 20. rujna 2016. godine

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof.dr.sc. Snježani Rimac-Drlje na uvodu u ovo znanstveno područje i uspješnom vođenju do obrane doktorske disertacije

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POSTUPCI ZA INTERPOLACIJU SLIKA KOD POVEĆANJA VREMENSKE REZOLUCIJE VIDEOSIGNALA.....	5
2.1. Postupci za procjenu pokreta između slika.....	7
2.1.1. Načini pretraživanja područja pretrage kod procjene pokreta.....	10
2.1.2. Zaglađivanje vektora pomaka.....	15
2.2. Interpolacija slike na temelju procjene pokreta.....	20
2.2.1. Interpolacija slike na temelju jednosmjerne procjene pokreta.....	21
2.2.2. Interpolacija slike na temelju dvosmjerne procjene pokreta.....	25
3. ANALIZA PROSTORNO-VREMENSKIH ZNAČAJKI VIDEOSIGNALA.....	28
3.1. Prostorna i vremenska aktivnost videosadržaja.....	28
3.2. Videosadržaji korišteni za analizu prostorno vremenskih značajki.....	30
3.3. Teorijska analiza pogreške interpolacije.....	31
3.3.1. Matematički model videosignala.....	32
3.3.2. Pogreška interpolacije slike na temelju procjene pokreta.....	35
3.3.3. Pogreška interpolacije slike primjenom usrednjavanja.....	41
3.3.4. Usporedba pogreške interpolacije usrednjavajem i primjenom procjene pokreta.....	43
3.4. Utjecaj prostorno-vremenske aktivnosti sadržaja na duljinu vektora pomaka.....	44
3.5. Utjecaj prostorno - vremenske aktivnosti sadržaja na pogrešku procjene vektora pomaka.....	48
3.6. Utjecaj prostorno-vremenske aktivnosti sadržaja na pogrešku prilikom interpolacije.....	63
4. NOVI ALGORITAM ZA ADAPTIVNU VREMENSKU INTERPOLACIJU SLIKA ZASNOVAN NA PROSTORNO-VREMENSKIM ZNAČAJKAMA VIDEOSIGNALA.....	70
4.1. Adaptivnost algoritma za vremensku interpolaciju.....	72
4.2. Procjena pokreta.....	74
4.2.1. Određivanje cjelobrojne vrijednosti vektora pomaka BMA algoritmom.....	75
4.2.2. Određivanje decimalne vrijednosti vektora pomaka.....	77

4.2.3. Zaglađivanje polja vektora pomaka za interpoliranu sliku.....	82
4.3. Interpolacija slika prediktora zasnovana na kompenzaciji pokreta.....	84
4.3.1. Pozicioniranje blokova unutar interpolirane slike.....	84
4.3.2. Određivanje vrijednosti elemenata u područjima preklapanja.....	86
4.3.3. Određivanje vrijednosti elemenata u područjima šupljina.....	88
4.3.4. Određivanje konačnih vrijednosti interpolirane slike.....	90
5. VREDNOVANJE PERFORMANSI PREDLOŽENOG ALGORITMA ZA INTERPOLACIJU SLIKE.....	94
5.1. Videosadržaji korišteni za vrednovanje performansi predloženog algoritma.....	94
5.2. Subjektivne metode za ocjenu kvalitete videosignala.....	96
5.2.1. Double Stimulus Impairment Scale metoda.....	96
5.2.2. Double Stimulus Continuous Quality Scale metoda.....	96
5.2.3. Single Stimulus Continuous Quality Scale metoda.....	97
5.2.4. Subjective Assessment method for Video Quality Evaluation metoda.....	98
5.3. Objektivne metode za ocjenu kvalitete video signala.....	99
5.3.1. PSNR metrika.....	99
5.3.2. SSIM metrika.....	100
5.4. Objektivno ocjenjivanje kvalitete interpoliranih slika.....	102
5.5. Subjektivno ocjenjivanje kvalitete interpoliranih slika.....	108
5.5.1. Dizajn subjektivnih testova.....	108
5.5.2. Testno okruženje za provedbu subjektivnog ocjenjivanja.....	109
5.5.3. Gledatelji.....	110
5.5.4. Obrada rezultata subjektivnih testova.....	111
5.5.5. Rezultati subjektivnih testova.....	114
5.6. Analiza složenosti postupaka za interpolaciju slike.....	116
5.6.1. Analiza složenosti s obzirom na broj slika gdje se radi kompenzacija pokreta.....	117
5.6.2. Analiza složenosti s obzirom na način pretraživanja područja pretrage.....	118
5.6.3. Usporedba složenosti predloženog algoritma i postojećih rješenja.....	119
6. ZAKLJUČAK.....	128
LITERATURA.....	133
SAŽETAK.....	143

ABSTRACT.....	145
ŽIVOTOPIS.....	147
Prilog I.....	148
Prilog II.....	151
Prilog III.....	152
Prilog IV.....	153
Prilog V.....	156

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Sustav za prijenos videosignala s povećanjem prostorne i/ili vremenske rezolucije na prijemuniku.....	5
Slika 2.2.	Povećanje vremenske rezolucije interpolacijom slike.....	6
Slika 2.3.	Blok shema postupka za interpolaciju slike korištenjem prostornih i vremenskih značajki.....	7
Slika 2.4.	Načini predviđanja vektora pomaka.....	8
Slika 2.5.	Pretraživanje u tri koraka – TSS.....	11
Slika 2.6.	Pretraživanje u četiri koraka - 4SS.....	13
Slika 2.7.	Pretraživanje korištenjem strukture dijamanta – DS.....	13
Slika 2.8.	Pretraživanje uz adaptivno područje pretrage – ARPS.....	15
Slika 2.9.	Set prediktora za blokove veličine 8x8 i 4x4 elementa slike.....	17
Slika 2.10.	Područje pretraživanja za blokove veličine 8x8 i 4x4 elementa slike.....	17
Slika 2.11.	Podjela blokova na temelju vektora pokreta.....	19
Slika 2.12.	Promjenjiva veličina blokova u graničnim područjima.....	20
Slika 2.13.	Slika interpolirana korištenjem jednosmjerne procjene pokreta.....	21
Slika 2.14.	Set prediktora za OBMC.....	26
Slika 3.1.	Karakteristične slike iz analiziranih sekvenci.....	31
Slika 3.2.	Normirana autokorelacijska funkcija.....	34
Slika 3.3.	MSE_{MC} i σ_{eMC}^2 u ovisnosti o udaljenosti slika koje se koriste za interpolaciju po sadržajima.....	39
Slika 3.4.	MSE_{FA} i σ_{eFA}^2 u ovisnosti o udaljenosti slika koje se koriste za interpolaciju po sadržajima.....	42
Slika 3.5.	σ_{eFA}^2 i σ_{eMC}^2 uz tri različite vrijednosti parametra preciznosti Određivanja MV za sekvencu news.....	44
Slika 3.6.	Raspodjela vrijednosti TI_t po sadržajima i prosječnih duljina vektora pomaka za svaku sliku po sadržajima.....	45
Slika 3.7.	Ovisnost srednje duljine vektora pomaka o TI_t po sadržajima.....	47
Slika 3.8.	Pogreška procjene vektora pomaka zbog nelinearnog gibanja i gibanja nejednolikom brzinom.....	49
Slika 3.9.	Određivanje položaja bloka na temelju nelinearne procjene pokreta primjenom kubičnog spline-a.....	50

Slika 3.10.	Kumulativna funkcija raspodjele pogreške procjene vektora pomaka.....	51
Slika 3.11.	Određivanje položaja blokova uz promjenjivu brzinu gibanja.....	52
Slika 3.12.	Srednja pogreška proračuna MV linearnim predviđanjem uz stalnu i promjenjivu brzinu kretanja.....	56
Slika 3.13.	Ovisnost SAD o razini preciznosti procjene MV i veličini bloka prilikom procjene MV	58
Slika 3.14.	Ovisnost MSE o razini preciznosti procjene MV i veličini bloka prilikom procjene MV	60
Slika 3.15.	Originalna 15. slika iz sekvence <i>football</i>	62
Slika 3.16.	Interpolirana 15. slika iz sekvence <i>football</i> bez popunjavanja šupljina i nakon prostornog popunjavanja šupljina.....	62
Slika 3.17.	Ovisnost srednje kvadratne pogreške prilikom interpolacije o TI_t	66
Slika 3.18.	Ovisnost prosječne vrijednosti MSE o prosječnoj vrijednosti SI_{mean} za sve sadržaje.....	68
Slika 3.19.	Ovisnost prosječne vrijednosti MSE o prosječnoj duljini vektora pomaka za sve sadržaje.....	68
Slika 4.1.	Blok dijagram predloženog algoritma.....	71
Slika 4.2.	Ovisnost ukupne MSE o vrijednosti praga vremenske aktivnosti.....	74
Slika 4.3.	Logaritamsko pretraživanje područja veličine 32 elementa slike.....	76
Slika 4.4.	Blokovski prikaz procjene pokreta kombinacijom BMA i aproksimacijom razvojem u Taylorov red.....	80
Slika 4.5.	Uzastopne slike sekvence <i>football</i> i polja vektora pomaka.....	83
Slika 4.6.	Prediktori sa šupljinama i preklapanjima.....	85
Slika 4.7.	Slika interpolirana korištenjem prediktora sa šupljinama i preklapanjima.....	86
Slika 4.8.	Prediktori s različitim načinima određivanja elemenata.....	91
Slika 5.1.	Karakteristične slike video sadržaja korištenih za vrednovanje performansi predloženog algoritma.....	95
Slika 5.2.	Primjer prozora za dodjeljivanje ocjene korištenjem DSIS metode.....	97
Slika 5.3.	Primjer prozora za dodjeljivanje ocjene korištenjem DSCQS metode.....	97
Slika 5.4.	Primjer prozora za dodjeljivanje ocjene korištenjem SAMVIQ metode.....	98
Slika 5.5.	Sučelje za prikaz i subjektivno ocjenjivanje videosignala.....	110
Slika 5.6.	Primjer testa za ispitivanje vizualne oštine i normalnog opažanja boja.....	110
Slika 5.7.	Ovisnost rezultata subjektivne ocjene kvalitete o vremenskoj aktivnosti.....	115

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Vrijednost SI_{mean} i TI_{mean} za analizirane sadržaje.....	31
Tablica 3.2.	Vrijednosti $\rho_v, \sigma_q^2, \sigma_v^2$ te vrijednost TI_t	40
Tablica 3.3.	TI_{mean} i prosječna duljina MV odabranih slika.....	54
Tablica 5.1.	SI_{mean} i TI_{mean} sadržaja korištenih za vrednovanje performansi predloženog algoritma.....	95
Tablica 5.2.	Prosječna vremenska aktivnost, TI_{mean} , pojedinog sadržaja i ocjena kvalitete interpoliranih slika primjenom različitih postupaka interpolacije korištenjem PSNR metrike.....	103
Tablica 5.3.	Prosječna vremenska aktivnost, TI_{mean} , pojedinog sadržaja i ocjena kvalitete interpoliranih slika primjenom različitih postupaka interpolacije korištenjem SSIM metrike	103
Tablica 5.4.	Prosječne vrijednosti $DMOS_j$ za sve sekvence.....	114
Tablica 5.5.	Broj slika interpoliranih na temelju kompenzacije pokreta po metodama.....	117
Tablica 5.6.	Broj lokacija na kojima se traži odgovarajući blok s obzirom na veličinu i način pretraživanja područja pretrage.....	119
Tablica 5.7.	Usporedba predloženog algoritma s postojećim rješenjima.....	119
Tablica P1.1.	Ocjene subjektivnih testova za sekvencu <i>mobile</i>	148
Tablica P1.2.	Ocjene subjektivnih testova za sekvencu <i>football</i>	148
Tablica P1.3.	Ocjene subjektivnih testova za sekvencu <i>foreman</i>	149
Tablica P1.4.	Ocjene subjektivnih testova za sekvencu <i>news</i>	149
Tablica P1.5.	Ocjene subjektivnih testova za sekvencu <i>mother&daughter</i>	150
Tablica P1.6.	Ocjene subjektivnih testova za sekvencu <i>container</i>	150
Tablica P2.1.	Srednja vrijednost ocjena subjektivnih testova za sve sekvence.....	151
Tablica P2.2.	Standardna devijacija ocjena subjektivnih testova za sve sekvence.....	151
Tablica P3.1.	Kurtosis koeficijenti po sekvencama.....	152
Tablica P4.1.	DMOS za sekvencu <i>mobile</i>	153
Tablica P4.2.	DMOS za sekvencu <i>football</i>	153
Tablica P4.3.	DMOS za sekvencu <i>foreman</i>	154
Tablica P4.4.	DMOS za sekvencu <i>news</i>	154
Tablica P4.5.	DMOS za sekvencu <i>mother&daughter</i>	155
Tablica P4.6.	DMOS za sekvencu <i>container</i>	155
Tablica P5.1.	Vremenska aktivnost sekvenci po slikama.....	156

1. UVOD

Razvojem uređaja za snimanje i prikazivanje videomaterijala pojavila se potreba za još efikasnijim kodiranjem istoga kako bi se omogućila široka implementacija različitih digitalnih videosustava poput videokonferencija, televizije zasnovane na Internet protokolu (IPTV), strujanja videosignala Internetom, gledanja videosignala na zahtjev itd. Iako mrežni kapaciteti kao i kapaciteti medija za pohranu iz dana u dan rastu, oni su još uvijek skupi i potrebno ih je racionalno koristiti. Budući da moderni uređaji snimaju videomaterijal visoke prostorne i/ili vremenske rezolucije potrebna je velika količina resursa za njegov prijenos ili pohranu. U svrhu optimalnog korištenja resursa te osiguranja najveće moguće kvalitete signala, provodi se kompresija videomaterijala uz smanjenje prostorne i/ili vremenske rezolucije. Ovisno o vrsti sadržaja, odnosno njegovoj vremenskoj i prostornoj složenosti, smanjenje prostorne ili vremenske rezolucije videomaterijala prije kodiranja te povećanje rezolucije nakon dekodiranja, uz dobar odabir parametara, može dati bolju kvalitetu nego kompresija materijala originalne rezolucije. Prostorna rezolucija smanjuje se izbacivanjem određenog broja elemenata svake slike uz zadržavanje izvornog broja slika u sekvenci. Vremenska se rezolucija smanjuje izbacivanjem određenog broja slika iz sekvence uz zadržavanje svih elemenata slika koje u sekvenci ostaju.

Paralelno s razvojem uređaja za snimanje razvijali su se i uređaji za prikazivanje videomaterijala (pametni telefoni, tableti, prijenosna računala itd.). Bez obzira na veličinu zaslona oni mogu prikazivati videomaterijal visoke rezolucije. Budući da će zbog svojstava ljudskog vizualnog sustava (engl. *Human Visual System* - HVS) ista pogreška na zaslonu manjih dimenzija korisniku biti manje primjetna, pružatelji usluga suočavaju se s izazovom kako osigurati približno jednaku kvalitetu videomaterijala korisnicima koji koriste uređaje s različitim tipovima i veličinama zaslona. S obzirom na sve veće mogućnosti uređaja za prikazivanje videosignala, materijal sa smanjenom prostornom i/ili vremenskom rezolucijom nije pogodan za prikaz krajnjem korisniku. Stoga je materijalu prije prikazivanja na zaslonu korisničkog uređaja potrebno povećati prostornu i/ili vremensku rezoluciju, ovisno o tome koja je smanjena u postupku kodiranja. U fokusu ove disertacije je povećanje vremenske rezolucije videosignala.

U sustavima s vrlo malom brzinom prijenosa često se prilikom kodiranja videomaterijala smanjuje vremenska rezolucija, čime se smanjuje broj izmjene slike u sekundi (engl. *Frame rate*). Prilikom prikazivanja takvog materijala na modernim uređajima, koji mogu prikazivati signal visoke vremenske rezolucije, dolazi do „zapinjanja“, posebice ako je riječ o sekvenci s brzim i naglašenim pokretima. Zbog toga je prije prikazivanja potrebno kodiranom materijalu povećati vremensku rezoluciju kako bi kvaliteta prikazane sekvence na zaslonu korisničkog uređaja bila što je moguće veća.

U znanstvenoj literaturi predloženi su brojni algoritmi za povećanje vremenske rezolucije (engl. *Frame-Rate Up-Conversion* – FRUC), ali unatoč tome još uvijek ima prostora za poboljšanje njihove učinkovitosti. Učinkovitost FRUC algoritama može se promatrati sa stajališta kvalitete interpoliranih slika i sa stajališta složenosti samog postupka. Računalno jednostavni postupci mogu ostvariti zadovoljavajuću razinu kvalitete interpolirane slike samo u slučaju krajnje mirnih sekvenci s blagim pokretima. Takvi postupci prilikom interpolacije slike koriste samo prostorne značajke originalnih slika ne uzimajući u obzir pokrete objekata u sceni. Upravo iz tog razloga navedenim se postupcima ne može ostvariti zadovoljavajuća razina kvalitete interpoliranih slika u sekvencama u kojima su pokreti brzi i naglašeni. Prije same interpolacije slika u takvim sekvencama potrebno je procijeniti pokrete objekata, a zatim interpolaciju temeljiti na toj procjeni. Interpolacija slike zasnovana na kompenzaciji pokreta (engl. *Motion Compensated Frame Interpolation* - MCFI) računalno je osjetno složenija od interpolacije korištenjem samo prostornih značajki sekvence.

Procjena pokreta uvelike utječe na konačnu kvalitetu interpolirane slike i zbog toga je vrlo bitno pronaći što preciznije vektore pomaka (engl. *Motion Vectors* - MV). U nekim algoritmima koriste se vektori pomaka koji se procjenjuju u procesu kodiranja videosignala, [1-4]. Međutim ti vektori nisu dovoljno precizni za interpolaciju slike jer se u postupku kodiranja vektori pomaka određuju na način da se minimizira energija razlike nastale uslijed predviđanja. Tako predviđeni vektori pomaka ne prate trajektorije kretanja objekta i njihovim korištenjem ne može se ostvariti visoka razina kvalitete interpolirane slike, [5]. Zbog toga je potrebno u okviru postupka interpolacije slike procijeniti vektore pomaka koji prate kretanje objekata, [6-55]. Procjena pokreta može se provesti na razini elementa slike primjenom optičkog toka, [56], [57], ali je složenost takvog postupka prevelika za stvarnovremenske aplikacije. MCFI algoritmi najčešće koriste procjenu pokreta na temelju podudaranja dijelova

(blokova) slike (engl. *Block Matching Algorithm* - BMA) uz primjenu manje ili više složenih metoda za povećanje pouzdanosti na taj način dobivenih vektora pomaka. Kod procjene pokreta metode koriste ili dvosmjernu (bilateralnu) ili odvojenu jednosmjernu (unilateralnu) procjenu unaprijed i unatrag. Dvosmjernom procjenom pokreta računaju se vektori pomaka za sliku koja se interpolira usporedbom područja u prethodnoj i sljedećoj slici videosekvence niže vremenske rezolucije. Dvosmjerna procjena pokreta stvara interpoliranu sliku bez šupljina ili preklapanja, ali sam postupak ima veću pogrešku procjene vektora pomaka. Pokazalo se da se dvosmjernom procjenom pokreta u slikama s brzim pokretima ili rotacijskim gibanjima ne mogu precizno odrediti vektori pomaka, [16]. Za ostvarivanje veće točnosti vektora pomaka pri dvosmjernoj procjeni provodi se segmentacija pokretnih objekata klasteriranjem primjenom *k-means* algoritma [8].

Kod jednosmjerne procjene pokreta slika iz sekvence smanjene vremenske rezolucije se dijeli na blokove i traži se najbliži blok u referentnoj slici. Razlika pozicija blokova u trenutnoj i referentnoj slici čini vektor pomaka određenog bloka iz trenutne slike. Jednosmjerna procjena pokreta može se provoditi unaprijed ili unatrag, ovisno o tome koja se od slika, prethodna ili sljedeća u odnosu na sliku koja se interpolira, uzima kao trenutna slika. Kako bi se izbjegli neželjeni artefakti na granicama objekata ili blokova, potrebno je dodatno zagladiti dobivene vektore pomaka. Za određivanje vektora pomaka određenog bloka moguće je koristiti i vektore pomaka susjednih blokova kako bi se povećala njihova prostorna korelacija. U [6] je predložen prediktivni način određivanja *MV* te primjena medijan filtra na određene vektore pomaka. Metoda koja dodatno pojednostavljuje pristup u [6] koristi manji broj proračuna po bloku te koristi tri prostorna i tri vremenska kandidata kao prediktore za *MV* trenutnog bloka, [58]. Iako metode predstavljene u [6] i [58] daju zaglađenije polje vektora pomaka, može se dogoditi problem kod konvergencije u slučaju veoma različitih pokreta objekata zbog ograničenog područja dosega. Kako bi se poboljšala konvergencija, predstavljen je postupak [59]. Početna veličina bloka postavlja se na 32x32 elementa slike, a u svakom novom koraku se smanjuje za pola, do veličine 4x4 elementa slike. Za dobivanje pouzdanije putanje pokreta u [24] je predstavljen *Overlapped Block-based Motion Estimation* algoritam (OBME), koji koristi veće područje pretrage. U [37] zaglađivanje se radi primjenom medijan filtra, a u [46] koristi se visoko propusno filtriranje slike kako bi se dodatno poboljšala procjena pokreta na rubovima blokova i objekata. Budući da se svakom bloku iz trenutne slike

pridružuje njegov vektor pomaka, u slici interpoliranoj na temelju jednosmjerne procjene pokreta moguća je pojava područja preklapanja ili područja šupljina jer susjednim blokovima ne moraju biti pridruženi jednaki vektori pomaka. Tim područjima treba posvetiti dodatnu pažnju kako bi kvaliteta konačne interpolirane slike bila što veća. Neka od postojećih rješenja uključuju korištenje medijan filtra ([1], [37], [60]), segmentaciju objekata ([1], [60], [61]) te prostornu interpolaciju ([62]). Poboljšanje kvalitete interpoliranih slika kod povećanja vremenske rezolucije u navedenim algoritmima dobiva se uz povećanje složenosti algoritma. U okviru ove disertacije predložen je algoritam koji ostvaruje visoku kvalitetu interpoliranih slika uz smanjenu složenost koja je ostvarena pažljivim izborom pojedinih postupaka unutar algoritma na temelju rezultata analize vremenskih i prostornih značajki videosignala te utjecaja pojedinog parametra postupka procjene pokreta na kvalitetu interpolacije.

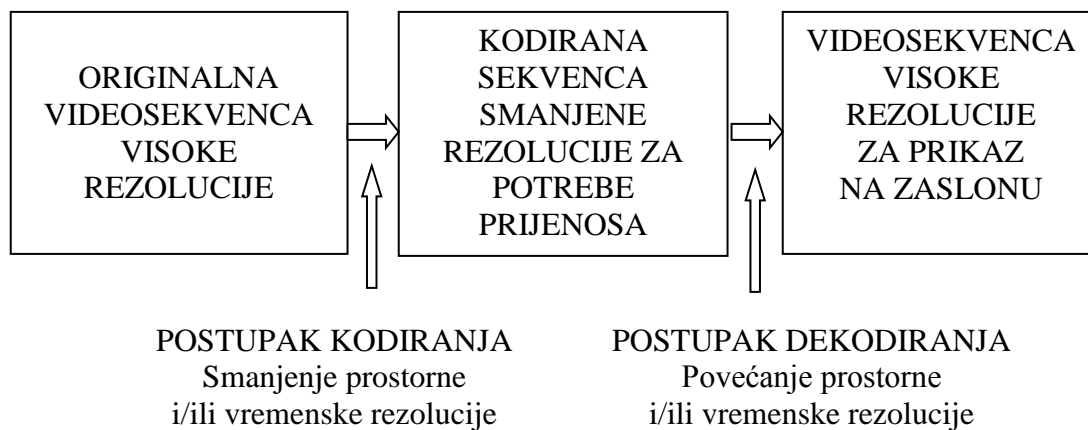
Disertacija je organizirana u šest poglavlja od kojih je prvo uvodno. U drugom poglavlju provedena je analiza postupaka za interpolaciju slike kod povećanja vremenske rezolucije. Navedena je i razrađena osnovna podjela postupaka te su opisani njihovi ključni dijelovi. Detaljnije su opisani algoritmi s kojima je predložen algoritam uspoređen u postupku vrednovanja njegovih performansi. Treće poglavlje donosi teorijsku i empirijsku analizu prostornih i vremenskih značajki videosignala na temelju koje je ustanovljeno da je moguće postići zadovoljavajuću kvalitetu interpoliranih slika korištenjem jednostavnijih metoda za sekvence s jednostavnijim pokretima te na taj način smanjiti računalnu složenost algoritma. U četvrtom je poglavlju predstavljen novi algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika zasnovan na prostorno-vremenskim značajkama videosignala. U njemu je opisan kriterij adaptivnosti predloženog algoritma, način procjene pokreta u slučajevima gdje se ista koristi te način interpolacije slike zasnovan na procjeni pokreta.

U petom poglavlju prikazani su rezultati vrednovanja predloženog algoritma u usporedbi s nekim od postojećih algoritama koji ukazuju da kvaliteta slika interpoliranih predloženim algoritmom značajno nadmašuje kvalitetu slika interpoliranih jednostavnijim algoritmima, dok je istovremeno usporediva s kvalitetom slika interpoliranih složenijim algoritmima. U završnom šestom poglavlju dana su zaključna razmatranja.

2. POSTUPCI ZA INTERPOLACIJU SLIKA KOD POVEĆANJA VREMENSKE REZOLUCIJE VIDEOSIGNALA

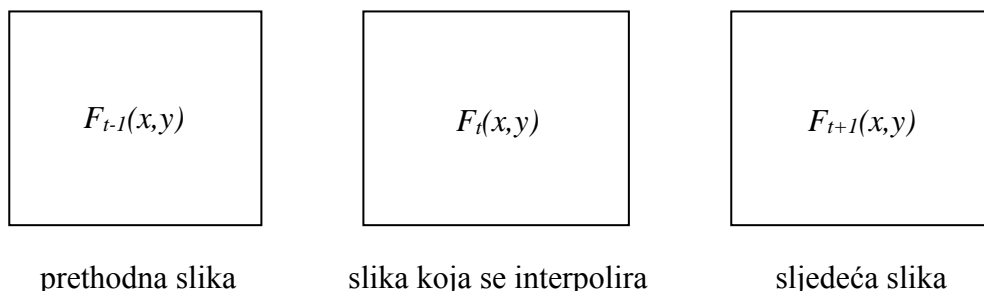
Videomaterijal snimljen korištenjem modernih uređaja ima veliku prostornu i vremensku rezoluciju. Iako mrežni kapaciteti iz dana u dan rastu, još uvijek ih je vrlo bitno racionalno koristiti. Zbog toga snimljeni videomaterijal s visokom rezolucijom nije pogodan za prijenos preko mreže s ograničenim kapacitetima, kao niti za pohranu na neki od medija. U [49] i [63] pokazano je da se smanjenjem prostorne i/ili vremenske rezolucije videosignala prije kodiranja (kompresije) i povećanjem rezolucije nakon dekodiranja, može postići bolja kvaliteta slike na malim brzinama prijenosa nego kompresijom na originalnoj rezoluciji. Nadalje, s obzirom na kontinuirani razvoj uređaja za prikazivanje, sve češće se pojavljuje potreba za povećanjem prostorne i/ili vremenske rezolucije videomaterijala nakon dekodiranja i bez njenog smanjenja prije kodiranja. Pojednostavljeni prikaz sustava za prijenos videosignala s povećanjem prostorne i/ili vremenske rezolucije na prijemu prikazan je na Slici 2.1. U fokusu ove disertacije je povećanje vremenske rezolucije videosignala.

Postupci za povećanje vremenske rezolucije mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine. Prvu skupinu čine postupci koji koriste isključivo prostorne značajke videosignala ne uzimajući u obzir pokrete objekata u sceni. Tim se metodama elementi interpolirane slike



Slika 2.1. Sustav za prijenos videosignala s povećanjem prostorne i/ili vremenske rezolucije na prijemu

predviđaju korištenjem informacija o elementima na istim pozicijama unutar prethodne i sljedeće slike u odnosu na sliku koja se interpolira. Najjednostavniji primjeri takvog pristupa su interpolacija slike ponavljanjem prethodne slike (engl. *Frame Repetition* - FR) i interpolacija slike korištenjem srednje vrijednosti elemenata na istim pozicijama u prethodnoj i sljedećoj slici (engl. *Frame Averaging* - FA) [5] kako je prikazano na Slici 2.2. te u izrazima (2-1) i (2-2).



Slika 2.2. Povećanje vremenske rezolucije interpolacijom slike

Kod interpolacije ponavljanjem prethodne slike elementi interpolirane slike određeni su sljedećim izrazom:

$$F_t(x, y) = F_{t-1}(x, y). \quad (2-1)$$

Kod interpolacije korištenjem vrijednosti elemenata prethodne i sljedeće slike na istim pozicijama unutar slike elementi interpolirane slike određeni su sljedećim izrazom:

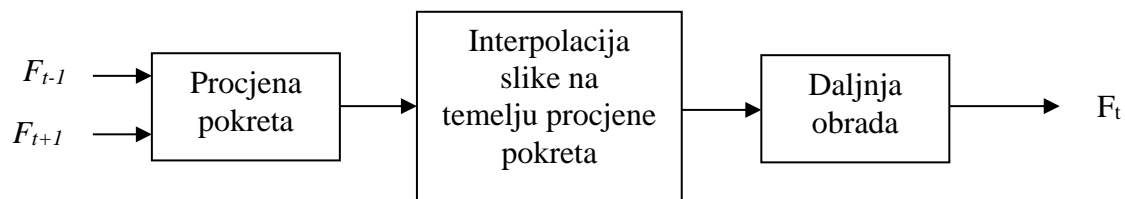
$$F_t(x, y) = \alpha \cdot F_{t-1}(x, y) + (1 - \alpha) \cdot F_{t+1}(x, y). \quad (2-2)$$

U izrazima (2.1) i (2.2) $F_{t-1}(x,y)$, $F_t(x,y)$ i $F_{t+1}(x,y)$ redom predstavljaju elemente prethodne, interpolirane i sljedeće slike na pozicijama (x,y) unutar slike, a α predstavlja omjer vremenske udaljenosti interpolirane slike od prethodne i vremenske udaljenosti sljedeće slike od prethodne. U slučaju da se između prethodne i sljedeće slike interpolira samo jedna slika, vrijednost parametra α iznosi 0,5 i izraz (2-2) može se zapisati kao

$$F_t(x, y) = 0.5 \cdot (F_{t-1}(x, y) + F_{t+1}(x, y)). \quad (2-3)$$

Metode koje koriste isključivo prostorne značajke računalno su vrlo jednostavne i postižu prihvatljivu kvalitetu interpoliranih slika u sekvencama gdje nema brzih i naglih pokreta. Međutim, u sekvencama gdje ima naglih i brzih pokreta takve metode će prouzrokovati „zapinjanje“ prilikom prikazivanja (osobito u slučaju ponavljanja prethodne slike) ili zamućivanje oko područja gdje ima puno pokreta.

Druga skupina metoda uz prostorne koristi i vremenske značajke videosekvence uzimajući u obzir pokrete objekata u sceni. Na taj način nadilaze se problemi koji se pojavljuju prilikom interpolacije korištenjem isključivo prostornih značajki. Korištenjem informacija o pokretima objekata dobivaju se vjernije informacije o položaju objekta u interpoliranoj slici, što u konačnici vodi ka boljoj kvaliteti. Postupci koji uz prostorne koriste i vremenske značajke računalno su složeniji od postupaka koji koriste samo prostorne značajke. Generalno, postupak interpolacije slike koji koristi prostorne i vremenske značajke može se podijeliti na tri dijela: procjena pokreta, interpolacija slike na temelju procjene pokreta i daljnja obrada, kao što je prikazano na Slici 2.3. Za svaki od prikazanih dijelova u postojećoj literaturi predložen je niz rješenja. Analizom tih rješenja ustanovljeno je da postoji prostor za dodatnim poboljšanjem, bilo u vidu povećanja kvalitete interpolirane slike ili u vidu smanjenja složenosti uz zadržavanje visoke razine kvalitete.



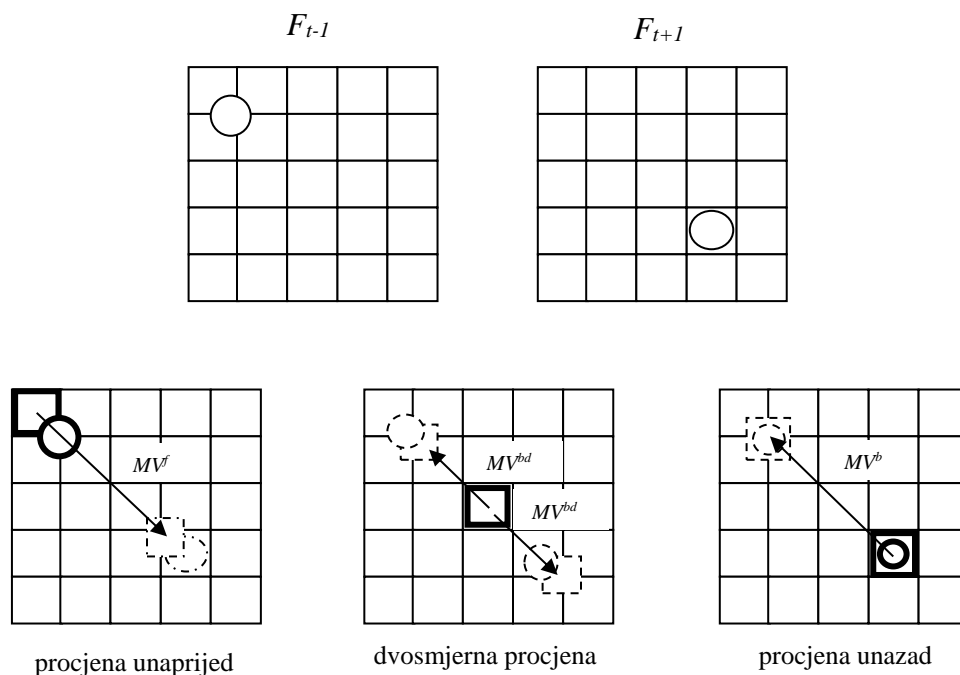
Slika 2.3. Blok shema postupka za interpolaciju slike korištenjem prostornih i vremenskih značajki

2.1. Postupci za procjenu pokreta između slika

Procjena pokreta prvi je korak u interpolaciji slika korištenjem prostornih i vremenskih značajki. Na taj način prati se promjena položaja objekata unutar scene, što se može ostvariti praćenjem pokreta objekata, optičkim tokom ili najčešće korištenim proračunom vektora

pomaka za blokove određene veličine unutar slike, [44]. Procjena pokreta uvelike utječe na konačnu kvalitetu interpolirane slike i zbog toga je vrlo bitno pronaći što točnije i pouzdanije vektore pomaka. Vektori pomaka mogu se računati za svaki pojedini element slike primjenom optičkog toka [56], [57], ali zbog složenosti ovog postupka, najčešći način procjene vektora pomaka je *Block Matching Algorithm* – BMA, [44]. Procjena pokreta korištenjem BMA može biti jednosmjerna ili dvosmjerna, a jednosmjerna procjena može se raditi procjenom unaprijed i unatrag, kao što je prikazano na Slici 2.4.

U slučaju jednosmjerne procjene pokreta unaprijed, prethodna slika, F_{t-1} , dijeli se na blokove određene veličine te se traži najsličniji blok iste veličine u sljedećoj slici, F_{t+1} . Razlika pozicija određenog bloka u prethodnoj slici i njemu najsličnijeg bloka u sljedećoj slici predstavlja vektor pomaka predviđen unaprijed. U slučaju jednosmjerne procjene pokreta predviđanjem unatrag, sljedeća slika, F_{t+1} , dijeli se na blokove određene veličine i traži se najsličniji blok iste veličine u prethodnoj slici, F_{t-1} . Razlika pozicija određenog bloka u sljedećoj slici i najsličnijeg bloka iste veličine u prethodnoj slici predstavlja vektor pomaka predviđen unatrag. Budući da se slika koja se interpolira nalazi između prethodne i sljedeće slike, dobivene vrijednosti vektora pomaka potrebno je skalirati ovisno o vremenskoj udaljenosti interpolirane slike od prethodne i sljedeće slike.



Slika 2.4. Načini procjene vektora pomaka

U slučaju da se između dviju slika interpolira samo jedna slika, vrijednosti vektora pomaka se množe sa 0.5, dok se u slučaju interpolacije više slika između prethodne i sljedeće slike taj faktor određuje ovisno o broju interpoliranih slika. Određivanje vektora pomaka jednosmjernom procjenom unaprijed prikazano je izrazom (2-4), a procjenom unatrag izrazom (2-5)

$$MV^f(B_{i,j}) = \beta \cdot [x_{t+1}(B_{i,j}^{odg}) - x_{t-1}(B_{i,j}), y_{t+1}(B_{i,j}^{odg}) - y_{t-1}(B_{i,j})], \quad (2-4)$$

$$MV^b(B_{i,j}) = (1 - \beta) \cdot [x_{t-1}(B_{i,j}^{odg}) - x_{t+1}(B_{i,j}), y_{t-1}(B_{i,j}^{odg}) - y_{t+1}(B_{i,j})], \quad (2-5)$$

gdje su $B_{i,j}$ i $B_{i,j}^{odg}$ redom blok u trenutnoj slici i njemu najbližiji blok u referentnoj slici, a β koeficijent koji ovisi o broju slika koji se interpolira između dvije postojeće originalne slike.

U slučaju dvosmjerne procjene pokreta, slika koja se interpolira dijeli se na blokove određene veličine, a najbližiji blokovi traže se istovremeno u prethodnoj i sljedećoj slici. Kod dvosmjerne procjene pokreta vektori pomaka procijenjeni unaprijed i unatrag moraju imati istu amplitudu, ali suprotan smjer. Određivanje vektora pomaka dvosmjernom procjenom prikazano je izrazom (2-6)

$$\begin{aligned} MV^{bd}(B_{i,j}) &= [x_t(B_{i,j}) - x_{t+1}(B_{i,j}^{odg}), y_t(B_{i,j}) - y_{t+1}(B_{i,j}^{odg})] = \\ &= -[x_t(B_{i,j}) - x_{t-1}(B_{i,j}^{odg}), y_t(B_{i,j}) - y_{t-1}(B_{i,j}^{odg})]. \end{aligned} \quad (2-6)$$

Jednostavna mjera koja se koristi za traženje najbližijeg bloka u referentnoj slici je suma apsolutnih razlika (engl. *Sum of Absolute Differences* - SAD) [8]. To je vrijednost koja predstavlja sumu apsolutnih vrijednosti razlika elemenata slike na istim pozicijama unutar trenutnog i referentnog bloka, a za slučaj jednosmjerne procjene pokreta definirana je izrazom:

$$SAD = \sum_{x,y} |F_{t-1}(x, y) - F_{t+1}(x + MV_x, y + MV_y)| \quad (2-7)$$

gdje je MV_x x komponenta vektora pomaka MV , a MV_y y komponenta MV . Najsličnijim blokom u referentnoj slici smatra se onaj blok za koji je, u području pretrage unutar referente slike, SAD minimalna. Nakon toga se na temelju razlike pozicija trenutnog bloka i odgovarajućeg bloka u referentnoj slici određuje vektor pomaka trenutnog bloka.

Dvosmjerna procjena pokreta radi se na način da se slika koja se interpolira dijeli na blokove, a zatim se traže najbliži blokovi u prethodnoj i sljedećoj slici. Vektori pomaka određeni prema prethodnoj i sljedećoj slici istog su iznosa, ali suprotnog smjera. U prvoj fazi određuju se vektori pomaka u odnosu na prethodnu i sljedeću sliku pa se elementi prethodne i sljedeće slike, $F_{t-1}(x,y)$ i $F_{t+1}(x,y)$ mogu prikazati kao

$$F_{t-1}(x, y) = F_t(x - MV^{bd}(x), y - MV^{bd}(y)), \quad (2-8)$$

$$F_{t+1}(x, y) = F_t(x + MV^{bd}(x), y + MV^{bd}(y)), \quad (2-9)$$

gdje je $F_t(x,y)$ element interpolirane slike, a MV_b^{bd} i MV_f^{bd} vektori pomaka predviđeni unatrag i unaprijed. Iz prethodnih izraza može se zaključiti da su $F_{t-1}(x,y)$ i $F_{t+1}(x,y)$ na suprotnim pozicijama u odnosu na $F_t(x,y)$. Za svaki od mogućih vektora pomaka računa se suma bilateralnih apsolutnih razlika (engl. *Sum of Bilateral Absolute Differences* - SBAD)

$$SBAD[B_{i,j}, MV] = \sum_{p \in B_{i,j}} |F_{t-1}[F_t - MV] - F_{t+1}[F_t + MV]|, \quad (2-10)$$

gdje je $B_{i,j}$ blok na poziciji (i,j) u interpoliranoj slici, p element bloka $B_{i,j}$, a F_{t-1} i F_{t+1} prethodna i sljedeća slika. Za svaki od blokova unutar interpolirane slike odabire se vektor pomaka za koji je $SBAD$ najmanja. Dvosmjernom procjenom pokreta mogu se precizno odrediti vektori pomaka za sadržaje s jednostavnim pokretima, ali u slučaju rotacijskih pokreta ili zumiranja ne postižu se dobri rezultati [16].

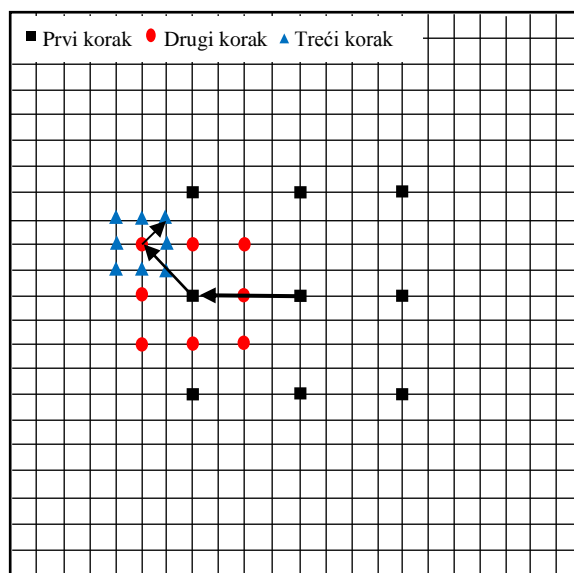
2.1.1. Načini pretraživanja područja pretrage kod procjene pokreta

Prije no što se počne tražiti odgovarajući blok u referentnoj slici potrebno je odrediti područje pretrage kao i način na koji će se to područje pretraživati. Veće područje pretrage omogućuje određivanje vektora pomaka s većom pouzdanošću, ali i povećava složenost postupka. Stoga je važno odrediti optimalnu veličinu područja pretrage kako bi se postigla

zadovoljavajuća točnost vektora pomaka, ali i zadovoljavajuća razina složenosti pretrage. Brojne su mogućnosti pretraživanja zadanog područja unutar referentne slike, a međusobno se razlikuju po preciznosti i složenosti. Neki od načina pretraživanja su:

- Potpuno pretraživanje (engl. *Full Search*)
- Logaritamsko pretraživanje (engl. *Log Search*)
- Pretraživanje u 3 koraka (engl. *Three Step Search* - TSS)
- Pretraživanje u 4 koraka (engl. *Four Step Search* – 4SS)
- Pretraživanje korištenjem strukture dijamanta (engl. *Diamond Search* - DS)
- Pretraživanje uz adaptivno područje pretrage (engl. *Adaptive Root Pattern Search* - ARPS).

Potpuno pretraživanje je najsloženije jer se u svakom koraku pretrage pomiče za po jedan element slike unutar područja pretrage i računa se *SAD* za svaki referentni blok u odnosu na trenutni. Iako takav oblik pretraživanja rezultira pronalaskom najtočnijih vektora pomaka, zbog svoje se složenosti iznimno rijetko koristi. Ostali navedeni načini značajno smanjuju broj točaka unutar područja pretrage u kojima se pronalazi odgovarajući blok. Dva vrlo slična pristupa su logaritamsko pretraživanje i pretraživanje u tri koraka koje je prikazano na Slici 2.5. Vrlo se često koriste jer ostvaruju približno jednaku točnost kao potpuno pretraživanje uz značajno smanjenje složenosti.

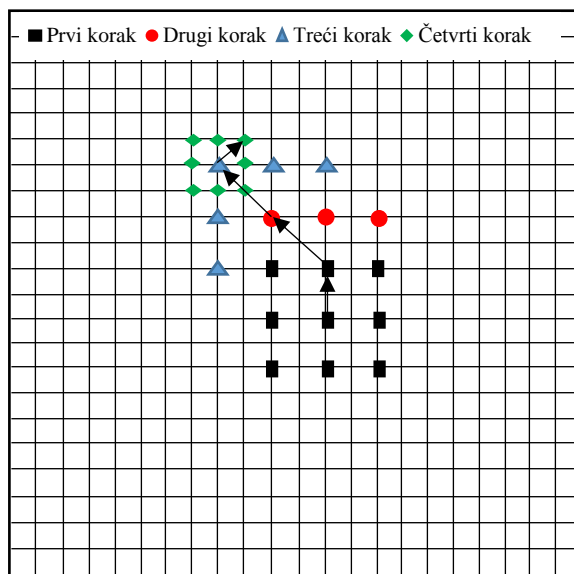


Slika 2.5. Pretraživanje u tri koraka – TSS

Navedeni način jedan je od prvih pokušaja ubrzanog pretraživanja referentne slike s ciljem pronalaska odgovarajućeg bloka. Područje pretrage je u okolini od 8 elemenata slike, a početno se korak pretrage postavlja na $S = 4$. Provjerava se osam okolnih susjednih lokacija udaljenih $\pm S$ elemenata slike od određene pozicije i traži se blok koji ima najmanju SAD u odnosu na blok iz trenutne slike. Pozicija na kojoj je SAD minimalna postaje središnja pozicija za pretragu u drugom koraku, a korak pretrage se smanjuje na $S=S/2$ i ponavlja se postupak iz prvog koraka. Pozicija s najmanjom SAD u drugom koraku postaje središnja pozicija u trećem koraku, a područje pretrage se ponovno smanjuje na $S=S/2$, što znači da je u trećem koraku $S=1$ te se vrši proračun SAD na novih 9 lokacija. Blok koji se nalazi na poziciji s najmanjom SAD u trećem koraku je odgovarajući blok, a razlika pozicije tog bloka i bloka u trenutnoj slici čini vektor pomaka. Za isto područje pretrage potpunim pretraživanjem SAD bi se računala 225 puta dok se korištenjem TSS SAD računa 25 puta, što smanjuje broj proračuna čak 9 puta [64]. Logaritamsko pretraživanje vrlo je slično pretraživanju korištenjem TSS algoritma. Ovisno o veličini područja pretrage (engl. *Search Range* – SR), povećava se broj koraka. Područje pretrage kod logaritamskog pretraživanja može biti veličine $\pm 2^n$ elemenata slike ($n=0,1,2,3,4,5\dots$) čime se dodatno može povećati točnost predviđanja uz neznatno povećanje broja proračuna SAD .

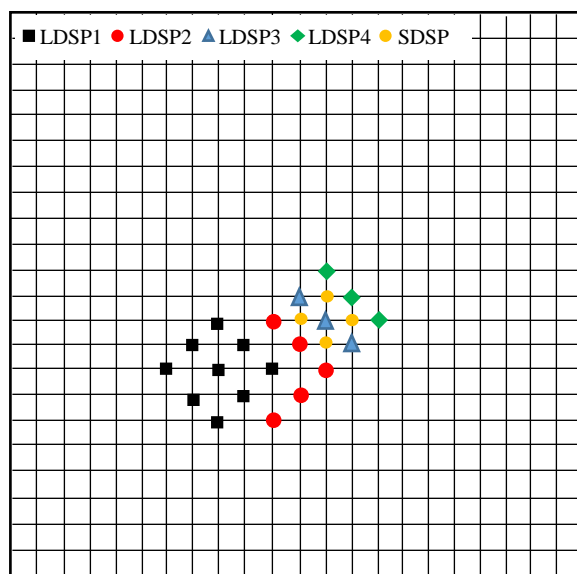
Osim navedenih metoda često se koristi i pretraživanje u četiri koraka prikazano na Slici 2.6. Za razliku od TSS u prvom koraku postavlja se $S=2$, tako da se u prvom koraku radi pretraga na 9 lokacija unutar područja 5×5 elemenata slike. Ukoliko je SAD najmanja za lokaciju koja se nalazi u središtu pretrage odmah se ide na četvrti korak. Ako je SAD najmanja za bilo koju od osam preostalih lokacija, tada ta lokacija postaje središte pretrage i oko nje se radi pretraga u području 5×5 elemenata slike. U drugom koraku se, ovisno o lokaciji s najmanjom SAD u prvom koraku, radi proračun na dodatnih 3 ili 5 lokacija, kao što je prikazano na Slici 2.6. Kao i nakon prvog koraka, ako je najmanja SAD u središtu pretrage drugog koraka, radi se odmah četvrti korak, a ako je najmanja SAD na bilo kojoj od osam preostalih lokacija radi se treći korak koji je identičan prethodnom. U posljednjem četvrtom koraku veličina područja se smanjuje na 3×3 elementa slike, odnosno pretražuje se na prvim susjednim lokacijama u odnosu na lokaciju za koju je najmanja SAD u prethodnom koraku. Lokacija s najmanjom SAD u četvrtom koraku je lokacija odgovarajućeg bloka, a razlika pozicija tog bloka i bloka u trenutnoj slici predstavlja

vektor pomaka za taj blok. Ovakav način pretraživanja u najboljem slučaju radi proračun *SAD* na 17 lokacija, a u najgorem na 27 lokacija [65].



Slika 2.6. Pretraživanje u 4 koraka – 4SS

Vrlo sličan način pretrage je pretraživanje korištenjem strukture dijamanta [66]. Algoritam se provodi na isti način kao kod 4SS pretrage, ali se ne koristi kvadratna raspodjela točaka pretrage već su točke raspoređene u strukturu dijamanta kao što je prikazano na Slici 2.7.

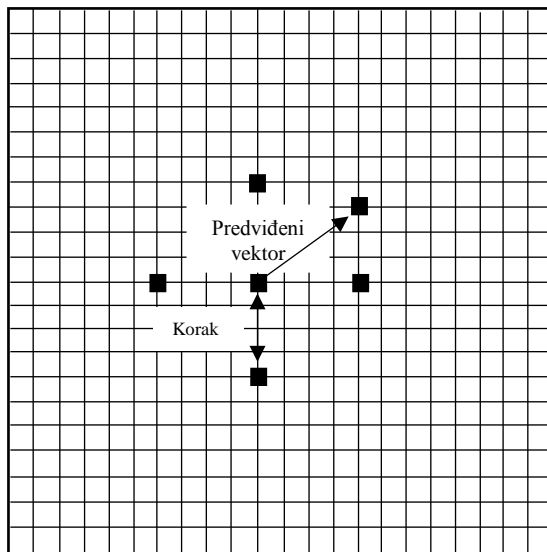


Slika 2.7. Pretraživanje korištenjem strukture dijamanta – DS

Osnovna razlika je što kod DS načina pretraživanja broj koraka u algoritmu nije ograničen. Koriste se dva fiksna područja pretrage, veliko (engl. *Large Diamond Search Pattern* – LDSP) i malo (engl. *Small Diamond Search Pattern* - SDSP). U prvom koraku pretraživanja DS algoritmom koristi se LDSP u okolini središnje lokacije. Ukoliko je najmanja SAD za poziciju u središtu pretraživanja, prelazi se na SDSP u okolini te točke i traži se odgovarajuća lokacija unutar manjeg područja. Ako je u prvom koraku SAD najmanja na bilo kojoj od osam preostalih lokacija, središte pretrage se pomiče u tu točku i definira se LDSP u njenoj okolini. U drugom i trećem koraku, kada se pomiče središte pretrage, radi se proračun na tri ili pet novih lokacija unutar LDSP, ovisno o poziciji na koju je središte pretrage pomaknuto. U zadnjem koraku DS algoritma koristi se SDSP područje pretrage, a pozicija s najmanjom SAD je pozicija na kojoj se nalazi odgovarajući blok u referentnom okviru. Razlika pozicija odgovarajućeg bloka u referentnoj slici i bloka u trenutnoj slici predstavlja vektor pomaka za taj blok. Točnost predviđanja pokreta DS algoritmom je približna točnosti predviđanja potpunim pretraživanjem, dok je računalna složenost osjetno manja [64].

Osim navedenih algoritama za pretraživanje često se koristi i pretraživanje uz adaptivno područje pretrage. Taj pristup polazi od pretpostavke da je pokret unutar slike koherentan i da je pokret određenog bloka sličan pokretu njemu susjednog bloka. ARPS algoritam koristi informaciju o vektoru pomaka prvog susjednog bloka s lijeve strane trenutnog bloka. Prvo se koristi informacija o vektoru pomaka susjednog bloka da bi se odredio korak pretrage koji se definira kao maksimalna vrijednost x i y komponente vektora pomaka susjednog bloka. S obzirom da je u primjeru na Slici 2.8. vektor pomaka određen komponentama (4,-3), korak pretrage je $S = \text{Max}(|X|, |Y|)$ gdje su X i Y vrijednosti x i y komponente vektora susjednog bloka, dakle $S=4$. Kada se pretragom unutar tog područja pronađe lokacija s najmanjom SAD, ta lokacija postaje središte područja pretrage, a područje se mijenja u SDSP. Postupak se nastavlja sve dok lokacija s najmanjom SAD ne bude smještena u središte SDSP. Glavna prednost ARPS algoritma je što se u slučaju kada je predviđeni vektor (0,0) uopće ne radi proračun unutar LDSP nego se odmah prelazi na SDSP, što značajno štedi računalne resurse. Također, ako je predviđeni vektor daleko od središta pretrage, ARPS se odmah pomiče na tu lokaciju i primjenjuje SDSP dok DS algoritam prvo radi pretragu unutar LDSP. Također, valja napomenuti da je za lokacije koje se nalaze u prvom stupcu slike postavljeno fiksno $S=2$, jer za te lokacije ne postoji lijevi susjedni blok čiji bi se vektor pomaka mogao koristiti [67].

Spomenuti su samo neki od postojećih od načina pretrage područja unutar referentne slike koji postižu prihvatljivu razinu preciznosti procjene MV u odnosu na potpuno pretraživanje uz osjetno manju računalnu složenost.



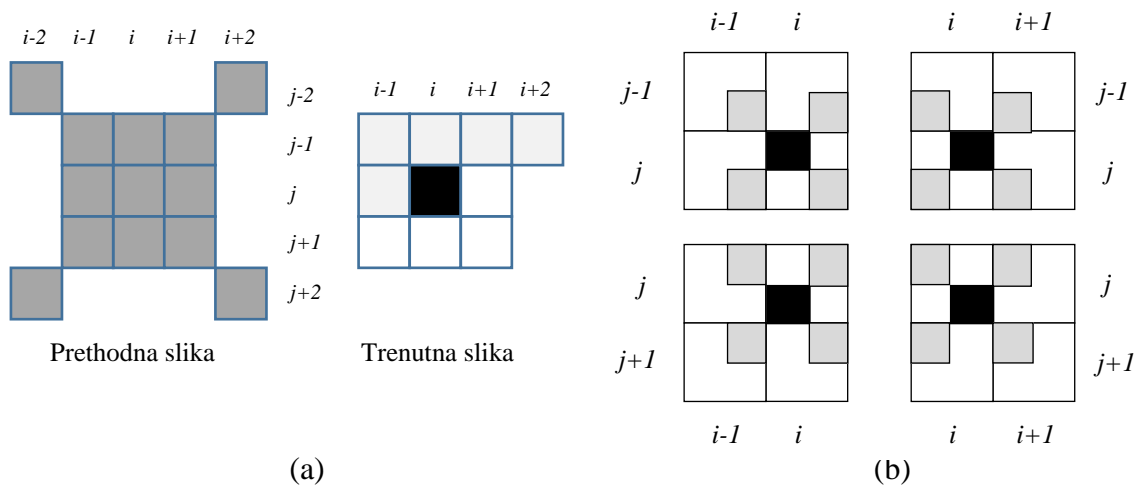
Slika 2.8. Pretraživanje uz adaptivno područje pretrage – ARPS

2.1.2. Zaglađivanje vektora pomaka

Korištenje vektora pomaka određenih za blokove uobičajeno je u postupcima povećanja vremenske rezolucije videosignala jer osigurava dobar omjer preciznosti i kompleksnosti procjene pokreta. Međutim, da bi se dobili vjerni vektori pomaka koji odgovaraju stvarnom kretanju objekata, potrebno je osigurati koherentno polje vektora pomaka u području koje zauzimaju objekti u pokretu. Uobičajeni postupci proračuna vektora pomaka koji se koriste u kodiranju imaju za cilj smanjiti vremensku redundanciju, odnosno rezidualnu pogrešku koja se naknadno kodira i šalje zajedno s vektorima pomaka. U postupcima interpolacije slike kod povećanja vremenske rezolucije nema informacije o rezidualnoj pogrešci te je potrebno provesti dodatne postupke koji osiguravaju da vektori pomaka daju vjernu trajektoriju gibanja objekata. U tu svrhu koriste se prostorna i vremenska korelacija vektora pomaka susjednih blokova koji pripadaju pojedinom objektu te se osigurava glatko polje vektora pomaka. U posljednjih desetak godina razvijeni su različiti načini na koje se u postupak procjene pokreta ugrađuje implicitno ili eksplicitno zaglađivanje polja vektora pomaka. Zaglađivanjem se značajno reduciraju artefakti pojave blokova u interpoliranoj slici jer se glatkim vektorima

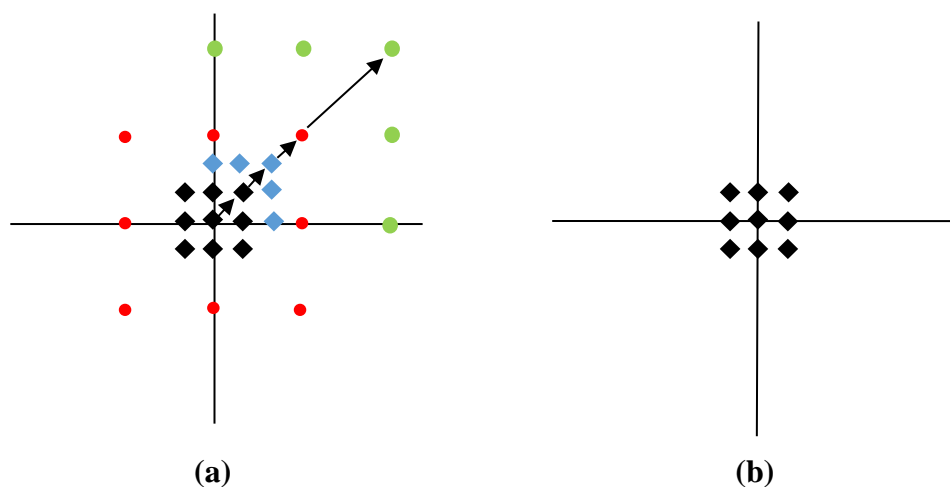
pomaka smanjuje razlika na rubovima blokova i objekata, što u konačnici vodi ka boljoj kvaliteti interpolirane slike.

Kod jednosmjerne procjene pokreta prethodna ili sljedeća slika dijeli se na blokove i traži se odgovarajući blok u sljedećoj ili prethodnoj slici na temelju mjere sličnosti između ta dva bloka. Implicitno zaglađivanje može se provesti multirezolucijskom analizom, kako je predstavljeno u [68]. Odvojena jednosmjerna procjena pokreta unaprijed i unatrag radi se na nekoliko razina piramidalne strukture, a konačni vektori pomaka dobiveni su kombinacijom vektora svake razine. Implicitno zaglađivanje može se provesti nakon proračuna vektora pomaka nekom vrstom filtriranja (npr. medijan filtrom) ili klasteriranjem vektora pomaka. Nadalje, zaglađivanje se može implicitno provesti modeliranjem funkcije mjere sličnosti, odnosno ugrađivanjem težina koje daju prednost npr. bližim blokovima ili blokovima sa sličnim sadržajem rubova. Implicitno zaglađivanje polja vektora pomaka, koje vodi ka smanjenju artefakta pojave oštih rubova na granicama blokova i objekata, za određivanje vektora pomaka određenog bloka koristi i vektore pomaka susjednih blokova. Algoritam NTME (engl. *Novel True-Motion Estimation algorithm*) za predviđanje vektora pomaka trenutnog bloka na temelju informacija o vektorima pomaka susjednih blokova iz referentne i trenutne slike predstavljen je u [50]. Osim toga uzima se u obzir i globalni pokret na način da se referentna slika podijeli na nekoliko većih dijelova veličine $N \times M$ elemenata slike i da se izračuna vektor pomaka za svaki od tih dijelova. Osim globalnog pokreta računa se i vektor pomaka za svaki blok unutar slike i to korištenjem *Eight Neighbor Search* – ENS [69] algoritma u dvije faze, prvo za blokove veličine 8×8 elemenata slike, a zatim za blokove 4×4 elementa slike. Na Slici 2.9. prikazan je set prediktora iz prethodne i trenutne slike koji se koriste za određivanje vektora pomaka trenutnog bloka. Za određivanje vektora pomaka bloka na poziciji (i, j) u trenutnoj slici koriste se blokovi na susjednim pozicijama u referentnoj i trenutnoj slici. U prethodnoj se slici, uz osam susjednih blokova koriste i četiri dodatna dijagonalna bloka radi dodatnog povećanja preciznosti. U trenutnoj se slici koristi 5 susjednih blokova (prikazanih sivom bojom) na Slici 2.9 a). Vektori pomaka ovih 13 blokova te nulvektor pomaka, postupkom klasteriranja se svrstavaju u 6 klastera čiji centri mase se uzimaju za prediktore. Od ovih 6 prediktora i globalnog vektora pomaka bira se konačni prediktor kao onaj koji ima minimalnu mjeru sličnosti.



Slika 2.9. Set prediktora za a) blokove veličine 8x8 elemenata slike b) blokove veličine 4x4 elemenata slike [50]

Nakon što su određeni vektori pomaka za svaki blok 8x8 elemenata slike, svaki od tih blokova dijeli se na četiri bloka 4x4 elemenata slike za koje se ponovo procjenjuju vektori pomaka s ciljem dodatnog povećanja preciznosti proračuna. Vektor pomaka za svaki blok veličine 4x4 elemenata slike određuje se korištenjem informacija o vektorima pomaka 4 susjedna bloka veličine 4x4 elemenata slike (označenih sivom bojom na slici 2.9 b)). Vektori pomaka za blokove veličine 8x8 elemenata slike određuju se u području oko prediktora primjenom ENS algoritma koji koristi do 27 točaka pretrage kako je prikazano na Slici 2.10. a).



Slika 2.10. Područje pretraživanja za a) blokove 8x8 elemenata slike b) blokove veličine 4x4 elemenata slike

Vektori pomaka za blokove veličine 4x4 elementa slike određuju se pretragom u 8 točaka u okolini prediktora, kako je prikazano na Slici 2.10. b). NTME algoritam koristi i dodatno zaglađivanje vektora pomaka primjenom funkcije distorzije $E_d(D)$ unutar koje je ugrađena mjera sličnosti blokova s obzirom na sadržaj rubova te mjera prostorne udaljenosti blokova prediktora.

U [8] autori predlažu jednostavniji pristup zaglađivanja vektora pomaka. Predloženi algoritam MCFI-AOBMC (engl. *Motion-Compensated Frame Interpolation using bilateral motion estimation and Adaptive Overlapped Block Motion Compensation*) radi procjenu pokreta u tri faze. Prvo se određuju vektori pomaka za blokove veličine 8x8 elemenata slike, zatim se postupkom grupiranja ovih vektora provodi segmentacija objekata te se u trećoj fazi u rubnim područjima ovih objekata blokovi 8x8 dijele na blokove manje veličine (4x4 ili 2x2 elementa slike). Prilikom određivanja vektora pomaka za blokove veličine 8x8 elemenata slike računa se *Side Match Distortion – SMD* mjera kojom se određuje prosječna apsolutna razlika elemenata slike na granici bloka za koji se određuje vektor pomaka i njemu susjednih blokova s gornje, donje, lijeve i desne strane

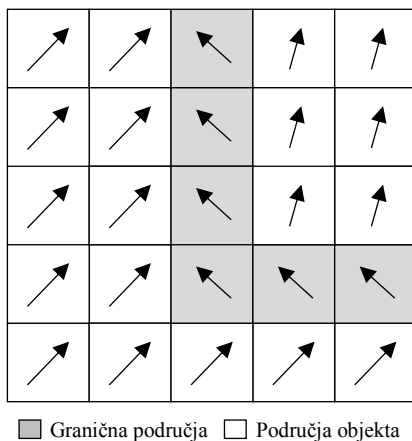
$$SMD[B_{i,j}, MV] = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} |\hat{F}_l[g_l, MV] - \hat{F}_l[h_l]|, \quad (2-11)$$

gdje su g_l i h_l pozicije k -tog elementa slike na granici trenutnog i njemu susjednog bloka redom, a M je broj graničnih elemenata slike. Nakon izračuna SMD vektor pomaka određuje se minimizacijom težinske sume $SBAD$ (2-10) i SMD prema sljedećem izrazu

$$v_{i,j} = \arg \min_v \{ \varepsilon * SBAD[B_{i,j}, MV] + (1 - \varepsilon) * SMD[B_{i,j}, MV] \}, \quad (2-12)$$

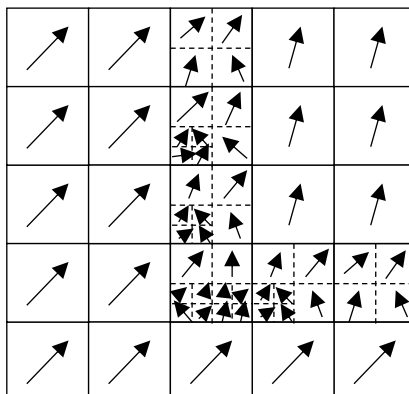
gdje je ε težinski koeficijent. Budući da su za proračun SMD nužne informacije o vrijednostima elemenata slike gornjeg, donjeg, lijevog i desnog susjednog bloka minimizacija funkcije (2-12) iterativno se ponavlja za sve blokove u interpoliranoj slici sve dok se vektor pomaka mijenja. Eksperimentalno je utvrđeno da vrijednost težinskog koeficijenta ε nema prevelik utjecaj na konačnu preciznost procjene vektora pomaka, ali su ipak najbolji rezultati postignuti uz vrijednost $\varepsilon=0.4$.

Nakon što su prema prethodnoj proceduri određeni vektori pomaka za svaki od blokova veličine 8x8 elemenata slike u interpoliranoj slici, susjedni blokovi koji imaju sličan vektor pomaka grupiraju se i predstavljaju jedan objekt. Između dva različita objekta nalazi se granično područje kao što je prikazano na Slici 2.11. Grupiranje blokova radi se u četiri koraka. U prvom koraku svaki se blok u interpoliranoj slici smatra zasebnim objektom sa svojim vektorom pomaka. U drugom koraku računa se razlika vektora pomaka određenog bloka i njemu susjednog bloka na temelju koje se odlučuje kojem objektu određeni blok pripada. Ako je razlika veća od prethodno definirane vrijednosti praga, blok sa svojim vektorom pomaka pripada novom objektu. Ako se unutar istog objekta nalazi više blokova, kao referentni vektor pomaka tog objekta uzima se srednja vrijednost vektora pomaka svih blokova koji mu pripadaju. U trećem koraku svaki je blok sa svojim vektorom pomaka raspoređen unutar nekog objekta, a u četvrtom je svakom objektu određen vektor pomaka na temelju srednje vrijednosti vektora pomaka svih blokova unutar objekta. Postupak se ponavlja sve dok se mijenja srednja vrijednost vektora pomaka unutar grupa blokova, a kada se ona prestane mijenjati postupak podjele blokova je završen. Budući da su vektori pomaka procijenjeni za blokove veličine 8x8 elemenata slike, vrlo je lako moguće, posebice u graničnim područjima, da se unutar jednog bloka nalaze elementi dvaju ili više različitih objekata, tako da se granice blokova nužno ne poklapaju sa stvarnim granicama objekata. S ciljem povećanja točnosti predviđanja vektora pomaka u graničnim područjima autori predlažu podjelu graničnih blokova 8x8 elemenata slike na blokove manje veličine, 4x4 pa čak i 2x2 elementa slike, tzv. *Variable-Size Block Motion Compensation* – VS-BMC.



Slika 2.11. Podjela blokova na temelju vektora pomaka

Primjer podjele graničnih blokova na blokove manje veličine prikazan je na Slici 2.12.



Slika 2.12. Promjenjiva veličina blokova u graničnim područjima

Proračunom vektora pomaka za blokove manje veličine mogu se bolje prikazati složeni pokreti na granicama dvaju ili više objekata. U prvom koraku definiraju se blokovi veličine $2^n \times 2^n$ elemenata slike, a budući da su početni blokovi veličine 8×8 elemenata slike početno se postavlja $n=3$. U sljedećem koraku svaki od blokova veličine $2^n \times 2^n$ elemenata slike dijeli se na 4 bloka veličine $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ elemenata slike i traži se vektor pomaka za svaki od tih manjih blokova minimizacijom *SBAD*. Podjela se vrši ako je *SBAD* svakog od četiri bloka veličine $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ elemenata slike manja od četvrtine *SBAD* bloka veličine $2^n \times 2^n$ elemenata slike i n se smanjuje za 1. U suprotnom se zadržava blok veličine $2^n \times 2^n$ elemenata slike i postupak podjele se završava. Postupak se iterativno ponavlja sve dok n ne poprimi vrijednost 1. Na taj način dobiju se vektori pomaka za blokove veličine 8×8 elemenata slike u područjima objekata, a u graničnim područjima vektori pomaka se određuju za blokove 8×8 , 4×4 ili 2×2 elementa slike, ovisno o složenosti pokreta (Slika 2.12).

2.2. Interpolacija slike na temelju procjene pokreta

Nakon procjene pokreta za svaki pojedini blok provodi se interpolacija slike korištenjem informacija o vektorima pomaka. S obzirom na dva osnovna načina procjene vektora pomaka (jednosmjerna ili dvosmjerna), postoje i dva osnovna pristupa za interpolaciju slike na temelju procjene pokreta, a to su interpolacija slike na temelju jednosmjerne i na temelju dvosmjerne procjene pokreta.

2.2.1. Interpolacija slike na temelju jednosmjerne procjene pokreta

Kod jednosmjerne procjene pokreta prvo se kompenzacijom pokreta formiraju dva prediktora, F_t^f i F_t^b , prema izrazima (2-13) i (2-14).

$$F_t^f(x, y) = F_{t-1}(x + MV_x^f, y + MV_y^f), \quad (2-13)$$

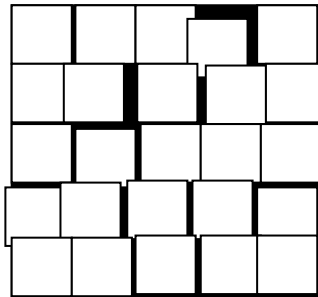
$$F_t^b(x, y) = F_{t+1}(x + MV_x^b, y + MV_y^b), \quad (2-14)$$

Konačna interpolirana slika dobiva se kao težinska suma ova dva prediktora prema

$$F_t(x, y) = w^f F_t^f(x, y) + w^b F_t^b(x, y). \quad (2-15)$$

Težine w^f i w^b mogu se odrediti na različite načine, a cilj im je da daju veću težinu onom prediktoru koji s većom pouzdanošću predviđa vrijednosti $F_t(x, y)$.

Osnovna razlika između interpolacije na temelju jednosmjerne i dvosmjerne procjene pokreta je u tome što se interpolacija slike na temelju jednosmjerne procjene pokreta vrši na način da se blokovi iz prethodne ili sljedeće slike pomiču za iznos vektora pomaka pojedinog bloka i pozicioniraju u interpoliranoj slici, dok se kod interpolacije korištenjem dvosmjerne procjene pokreta interpolirana slika dijeli na blokove u postupku procjene pokreta i pozicija tih blokova se u postupku interpolacije ne mijenja. Zbog toga se kod interpolacije korištenjem jednosmjerne procjene pokreta u interpoliranoj slici pojavljuju područja koja nisu prekrivena (šupljine) kao i višestruko prekrivena područja (preklapanja) kao što je prikazano na Slici 2.13.



Slika 2.13. Slika interpolirana korištenjem jednosmjerne procjene pokreta

Ta je područja potrebno adekvatno nadomjestiti s ciljem postizanja što veće kvalitete interpolirane slike. U dostupnoj literaturi mogu se pronaći brojna rješenja za adekvatno nadomještanje područja šupljina i preklapanja. Predloženo je popunjavanje korištenjem medijan filtra ([1], [37], [60]), segmentacijom objekata ([1], [60], [61]), prostornom interpolacijom ([62]), obradom područja šupljina ([23]) itd. Svi navedeni pristupi računalno su složeni i nisu jednostavni za implementaciju, a osim toga uzrokuju i neželjene artefakte [50]. Još neki jednostavniji pristupi predstavljeni su u [70] gdje autori predlažu nelinearno filtriranje na razini elementa slike i [71] gdje se koriste tri uzastopne slike za procjenu pokreta. Način interpolacije korištenjem jednosmjerne procjene pokreta koji postiže vrlo dobru kvalitetu interpoliranih slika prikazan je u [50], u okviru algoritma NTME. U dijelu 2.1.2. prikazan je način na koji se u istom radu procjenjuju vektori pomaka za blokove veličine 8x8 elemenata slike, a zatim zbog dodatnog povećanja preciznosti i za blokove 4x4 elemenata slike. Da bi se postigla bolja kvaliteta interpoliranih slika koristi se jednosmjerna procjena pokreta, a da bi problem šupljina i preklapanja bio manje izražen, radi se odvojena jednosmjerna procjena pokreta unaprijed i unatrag. Odvojenom procjenom dobiju se dva polja vektora pomaka (engl. *Motion Vector Field* - MVF), MVF_f i MVF_b , odnosno polje pokreta predviđeno unaprijed i polje pokreta predviđeno unatrag. Budući da se interpolirana slika nalazi između prethodne i sljedeće slike potrebno je skalirati vrijednosti vektora pomaka i napraviti projekciju interpolirane slike korištenjem skaliranih vrijednosti MVF_f i MVF_b . Zbog jednosmjerne procjene pokreta i činjenice da susjedni blokovi nemaju iste vektore pomaka dolazi do pojave šupljina i preklapanja u svakoj od dvije projekcije interpolirane slike. U područjima preklapanja određeni element slike interpolira se na način da se uzme vrijednost elementa slike onog bloka koji ima najmanju mjeru distorzije. Budući da područje preklapanja može biti veliko najviše onoliko elemenata slike kolika je veličina jednog bloka, autori predlažu podjelu blokova veličine 4x4 elemenata slike na četiri manja bloka veličine 2x2 elemenata slike ili čak podjelu na razini elementa slike kako bi se područja preklapanja smanjila. Iako bi podjela na razini elementa slike rezultirala najvećom kvalitetom interpolirane slike, ona se izbjegava jer je računalno složena. Kompromis između složenosti i kvalitete slike je podjela bloka 4x4 elemenata slike na četiri bloka veličine 2x2 elemenata slike. Svakom bloku 2x2 elemenata slike prvo je dodijeljen vektor pomaka bloka 4x4 elemenata slike kojem je pripadao te je napravljena projekcija

$$MVF_t^b [B_{i,j}] + (1 - \alpha)MVF_{t+1}^b [B_{i,j}] = MVF_{t+1}^b [B_{i,j}], \quad (2-16)$$

$$MVF_t^f [B_{i,j}] + \alpha MVF_{t-1}^f [B_{i,j}] = MVF_{t-1}^f [B_{i,j}], \quad (2-17)$$

gdje su MVF_{t+1}^b i MVF_{t-1}^f redom polja vektora pomaka predviđena unatrag iz sljedeće slike i unaprijed iz prethodne slike, $B_{i,j}$ indeks svakog bloka veličine 2x2 elementa slike, a α je omjer vremenske udaljenosti interpolirane slike od prethodne slike i vremenske udaljenosti prethodne i sljedeće slike. Nakon projekcije prema izrazima (2-16) i (2-17) moguće je da nekim blokovima unutar polja pokreta MVF_t^b i MVF_t^f nije dodijeljen vektor pomaka, odnosno da u tim poljima pokreta postoje šupljine. Da bi se te šupljine popunile primjenjuje se 2-D filtriranje prema sljedećem izrazu

$$MVF_t [B_{i,j}] = \frac{\sum_{B_{l,m} \in N} \psi [B_{l,m}] MVF_t [B_{l,m}]}{\sum_{B_{l,m} \in N} \psi [B_{l,m}]}, \quad (2-18)$$

gdje je oznaka smjera izostavljena jer je postupak identičan za polja vektora pomaka dobivena predviđanjem unatrag i unaprijed, a ψ predstavlja pouzdanost svakog bloka i definirana je kao

$$\psi = \begin{cases} 0, & \text{ako je } MVF [B_{l,m}] \text{ šupljina} \\ E_D(B_{l,m}) & \text{ako } MVF [B_{l,m}] \text{ nije šupljina} \end{cases}, \quad (2-19)$$

gdje $E_D(B_{l,m})$ predstavlja BDM bloka $B_{l,m}$, ali se zbog pojednostavljenja uzima da je $E_D(B_{l,m}) = 1$, tako da se šupljine zapravo popunjavaju srednjom vrijednošću elemenata koji nisu šupljine unutar prozora veličine 5x5. U nekim sekvencama je moguće da područje šupljina bude veće nego što filter može pokriti i u tom slučaju bi nazivnik u izrazu (2-18) bio jednak 0. Takve se situacije mogu izbjeći korištenjem filtra s većim područjem djelovanja, ali se zbog pojednostavljenja same implementacije u tim slučajevima takvim blokovima pridružuje nulvektor. Nakon što je svim blokovima veličine 2x2 elementa slike određen vektor pomaka, u

svrhu dodatne preciznosti MV na razini elementa slike radi se bilinearna interpolacija. MVF dobiveno na taj način koristi se za kreiranje interpolirane slike.

Nakon što su poznati vektori pomaka za sve blokove prethodne ili sljedeće slike, valja pristupiti kreiranju interpolirane slike. Konačna interpolirana slika sastoji se od kombinacije slike dobivene korištenjem polja vektora pomaka dobivenog predviđanjem unaprijed i slike dobivene korištenjem polja vektora pomaka dobivenog predviđanjem unatrag. Elementi slike koja se dobije korištenjem polja vektora pomaka predviđenog unaprijed, MVF^f , određeni su sljedećim izrazom

$$F_t^f[x, y] = (1 - \alpha)F_{t-1}[x - \alpha MVF_{t-1}^f[x], y - \alpha MVF_{t-1}^f[y]] + \alpha F_{t+1}[x + (1 - \alpha)MVF_{t+1}^f[x], y + (1 - \alpha)MVF_{t+1}^f[y]] \quad (2-20)$$

dok su elementi slike koja se dobije korištenjem polja vektora pomaka predviđenom unatrag, MVF^b , određeni sljedećim izrazom

$$F_t^b[x, y] = (1 - \alpha)F_{t-1}[x + \alpha MVF_{t+1}^b[x], y + \alpha MVF_{t+1}^b[y]] + \alpha F_{t+1}[x - (1 - \alpha)MVF_{t+1}^b[x], y - (1 - \alpha)MVF_{t+1}^b[y]] \quad (2-21)$$

Iz izraza (2-20) jasno je da se za sliku dobivenu predviđanjem unaprijed koristi kombinacija prethodne slike pomaknute za MVF^f i sljedeće slike pomaknute za $-MVF^f$. Analogno tome, prema izrazu (2-21) jasno je da se za sliku dobivenu predviđanjem unatrag koristi prethodna slika pomaknuta za $-MVF^b$ i sljedeća slika pomaknuta za MVF^b . Kombinacijom slika određenih izrazima (2-20) i (2-21) određuju se elementi konačne interpolirane slika prema izrazu

$$F_t[x, y] = \frac{F_t^f[x, y]}{1 + \Delta^f[x, y]} + \frac{F_t^b[x, y]}{1 + \Delta^b[x, y]} = \frac{(1 + \Delta^b[x, y])F_t^f[x, y] + (1 + \Delta^f[x, y])F_t^b[x, y]}{2 + \Delta^b[x, y] + \Delta^f[x, y]} \quad (2-22)$$

gdje su $\Delta^b[x,y]$ i $\Delta^f[x,y]$ razlike slika dobivenih korištenjem MVF^b i MVF^f koje su određene sljedećim izrazima

$$\Delta^b[x,y] = \sum_{l \in N_x} |F_{t-1}[l + \alpha MVF_{t+1}^b[l]] - F_{t+1}[l - (1 - \alpha) MVF_{t+1}^b[l]]|, \quad (2-23)$$

$$\Delta^f[x,y] = \sum_{l \in N_x} |F_{t-1}[l - \alpha MVF_{t-1}^f[l]] - F_{t+1}[l + (1 - \alpha) MVF_{t-1}^f[l]]|. \quad (2-24)$$

Radi povećanja robusnosti računa se razlika u susjedstvu N_x veličine 3x3 elementa slike umjesto na razini samo jednog elementa slike. Valja napomenuti da je u izrazu (2-22) razlikama $\Delta^b[x,y]$ i $\Delta^f[x,y]$ dodana vrijednost 1 kako bi se izbjegla eventualna vrijednost 0 u nazivniku [50].

2.2.2. Interpolacija slike na temelju dvosmjerne procjene pokreta

Iako je kod dvosmjerne procjene pokreta preciznost predviđanja vektora pomaka nešto manja nego kod jednosmjerne, posebice za područja gdje su brzi i naglašeni pokreti, takav način procjene često se koristi jer se njime izbjegavaju problemi šupljina i preklapajućih područja ([9], [12], [16], [18],[72-75]). Navedeni pristupi koriste metode interpolacije slike u kojima se za interpolaciju svakog bloka koristi isključivo njegov vektor pomaka. U naprednijim metodama za interpolaciju elementa slike koriste se, osim vektora pomaka bloka u kojem se taj element slike nalazi, vektori pomaka susjednih blokova uz različite težinske koeficijente ([6-8],[10],[15],[50]). Jedan od takvih pristupa u literaturi je poznat i kao *Overlapped Block Motion Compensation – OBMC*.

Neka je x element slike unutar bloka $B_{i,j}$ koji se nalazi u donjem desnom dijelu tog bloka (Slika 2.14.). Tada je svaki element slike koji se nalazi u tom kvadrantu određen korištenjem vektora pomaka bloka $B_{i,j}$ u kojem se element slike nalazi, ali i vektora pomaka tri susjedna bloka, desnog, donjeg i donjeg desnog bloka, odnosno $B_{i,j+1}$, $B_{i+1,j}$ i $B_{i+1,j+1}$ uz težinske koeficijente. Analogno tome, ako bi se element slike x iz bloka $B_{i,j}$ nalazio u gornjem lijevom dijelu tog bloka, koristili bi se vektori pomaka bloka $B_{i,j}$ te vektori pomaka njemu susjednih blokova s lijeve, gornje i gornje lijeve strane uz različite težinske koeficijente.

$B_{i,j}$	$B_{i,j+1}$
$x \bullet$	
$B_{i+1,j}$	$B_{i+1,j+1}$

Slika 2.14. Set prediktora za OBMC

Element interpolirane slike određen je sljedećim izrazom

$$F_t[x, y] = \frac{1}{2} \sum_{c=0}^1 \sum_{d=0}^1 w_{c,d}[x, y] (F_{t-1}[x - MV[x]_{i+c, j+d}, y - MV[y]_{i+c, j+d}] + F_{t+1}[x + MV[x]_{i+c, j+d}, y + MV[y]_{i+c, j+d}]) \quad (2-25)$$

gdje suma težinskih koeficijenata $w_{c,d}[x, y]$ iznosi 1, odnosno

$$\sum_{c=0}^1 \sum_{d=0}^1 w_{c,d}[x, y] = 1. \quad (2-26)$$

Težinski koeficijenti $w_{c,d}[x, y]$ određeni su isključivo relativnom pozicijom (x, y) elementa slike unutar bloka $B_{i,j}$. Ovakvim načinom interpolacije postiže se vrlo dobra kvaliteta interpolirane slike ako je razina pokreta niska. U suprotnom se u interpoliranoj slici često pojavljuju neželjeni artefakti koji značajno narušavaju njezinu kvalitetu. Budući da se kod OBMC težinski koeficijenti određuju isključivo na temelju relativne pozicije elementa slike unutar bloka, pogreške se najčešće događaju na granici dva objekta s različitim pokretima jer vektor pomaka jednog od njih ne opisuje dobro pokret drugog. U svrhu rješavanja tog problema predložen je modificirani OBMC pristup nazvan *Adaptive Overlapped Block Motion Compensation* – AOBMC [8]. Tim pristupom težinski koeficijenti se modificiraju uzimajući u obzir pouzdanosti prilikom određivanja vektora pomaka za trenutni blok i susjedne blokove čiji se vektori pomaka koriste. Težinski koeficijent za vektor pomaka bloka za kojeg je vektor

pomaka određen s većom pouzdanošću biti će veći i obrnuto. Pouzdanost susjednog vektora pomaka $MV_{i+c,j+d}$ za trenutni bloka $B_{i,j}$, prema [8], određena je izrazom

$$\Phi_{B_{i,j}}[MV_{i+c,j+d}] = \frac{SBAD[B_{i,j}, MV_{i,j}]}{SBAD[B_{i,j}, MV_{i+c,j+d}]} \quad (2-27)$$

Valja naglasiti da se vektor pomaka za određeni blok traži na temelju minimalne vrijednosti težinske sume $SBAD$ i SMD (izraz (2-12)). Zbog toga je najčešće $SBAD[B_{i,j}, MV_{i,j}]$ manja ili jednaka $SBAD[B_{i,j}, MV_{i+c,j+d}]$, tako da je pouzdanost uvijek u rasponu između 0 i 1. Kako raste pouzdanost određivanja vektora pomaka $MV_{i+c,j+d}$ za blok $B_{i,j}$ raste i težinski koeficijent koji je pridružen tom vektoru pomaka za određivanje bloka $B_{i,j}$. Uzimajući u obzir informacije o pouzdanosti, težinski koeficijenti $w_{c,d}[x,y]$ modificiraju se prema sljedećem izrazu

$$w'_{c,d}[x,y] = \frac{\Phi_{B_{i,j}}[MV_{i+c,j+d}] \cdot w_{c,d}[x,y]}{\sum_{e=0}^1 \sum_{f=0}^1 \Phi_{B_{i,j}}[MV_{i+e,j+f}] \cdot w_{e,f}[x,y]} \quad (2-28)$$

U nazivniku izraza (2-28) težinski faktori su sumirani kako bi se normirale njihove vrijednosti, odnosno kako bi se zadovoljio uvjet da je suma modificiranih težinskih koeficijenata jednaka 1, tj.

$$\sum_{c=0}^1 \sum_{d=0}^1 w'_{c,d}[x,y] = 1. \quad (2-29)$$

3. ANALIZA PROSTORNO-VREMENSKIH ZNAČAJKI VIDEOSIGNALA

Provedena istraživanja pokazala su da prostorno-vremenske značajke videosignala imaju značajan utjecaj na pogrešku prilikom interpolacije, neovisno o tome radi li se o interpolaciji korištenjem samo prostornih značajki ili interpolaciji korištenjem prostornih i vremenskih značajki videosekvence. Porastom vremenske aktivnosti povećava se i količina pokreta objekata u sceni, a povećani je pokret teže adekvatno kompenzirati. Zbog toga s porastom vremenske aktivnosti sekvence raste i pogreška prilikom interpolacije slike, što u konačnici vodi ka smanjenju kvalitete interpolirane slike. Poznavanje prostorno-vremenskih značajki videosignala i njihovog utjecaja na kvalitetu interpolirane slike osnova su za izradu efikasnog postupka za interpolaciju slike kod povećanja vremenske rezolucije.

3.1. Prostorna i vremenska aktivnost videosadržaja

Analizom postojećih postupaka za interpolaciju slike ustanovljeno je da utjecaj prostorno-vremenskih značajki videosekvence na kvalitetu interpolirane slike nije dovoljno proučen. Međunarodna Telekomunikacijska Unija (engl. *International Telecommunication Union* - ITU) u preporuci P.910 [76] definira parametar prostorne aktivnosti sadržaja videosekvence *Spatial Perceptual Information* – *SI*, i parametar vremenske aktivnosti *Temporal Perceptual Information* – *TI*.

$$SI = \max \{std[Sobel(F_t(x, y))]\}, \quad (3-1)$$

$$TI = \max \{std[F_t(x, y) - F_{t-1}(x, y)]\}, \quad (3-2)$$

gdje *std* označava standardnu devijaciju, a *Sobel* predstavlja Sobelov operator. Standardna devijacija definirana je izrazom

$$std = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N (F_t(x, y) - F_{t,mean})^2}, \quad (3-3)$$

u kojem je N ukupan broj elemenata slike, $F_t(x, y)$ element slike s koordinatama (x, y) , a $F_{t,mean}$ srednja vrijednost svih elemenata slike F_t . Sobelov operator koristi se prvom derivacijom i konvolucijskim kernelom veličine 3x3 koji je propušten kroz Gaussov filtar [76]. Izraz (3-4) prikazuje način primjene Sobelova operatora na sliku F_t

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * F_t, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * F_t, \quad (3-4)$$

gdje $*$ predstavlja operaciju konvolucije, G_x matricu vertikalnih rubova, a G_y matricu horizontalnih rubova. Parametri SI i TI određeni prema izrazima (3-1) i (3-2) ne opisuju dobro aktivnost sekvenci gdje primjerice jedna ili nekoliko slika imaju veliku prostornu i/ili vremensku aktivnost, a preostale slike malu, jer se informacija o SI i TI vrijednostima za cijelu sekvencu određuje na temelju maksimalne vrijednosti tih veličina za svaku sliku pojedinačno. Takvim načinom određivanja može se dogoditi da se dobije velika vrijednost SI i TI za sekvence gdje prostorna i/ili vremenska aktivnost nije velika. Zbog toga se u praksi često koristi nešto drugačiji način računanja navedenih veličina [77], [78] i to prema sljedećim izrazima

$$SI_{mean} = mean\{std[Sobel(F_t(x, y))]\}, \quad (3-5)$$

$$TI_{mean} = mean\{std[F_t(x, y) - F_{t-1}(x, y)]\}, \quad (3-6)$$

u kojima se umjesto maksimalne vrijednosti za SI i TI uzima srednja vrijednost kroz sekvencu. Na taj se način dobiva vjernija informacija o prostornoj i/ili vremenskoj aktivnosti određenog sadržaja.

Prostorna i vremenska aktivnost pojedine slike unutar videosekvence bit će određena parametrima SI_t i TI_t prema sljedećim izrazima

$$SI_t = std[Sobel(F_t(x, y))], \quad (3-7)$$

$$TI_t = std[F_t(x, y) - F_{t-1}(x, y)]. \quad (3-8)$$

Osim parametra SI_t u analizi prostorne aktivnosti videosekvence koristit će se i varijanca pojedine slike σ_v^2 .

3.2. Videosadržaji korišteni za analizu prostorno-vremenskih značajki

U svrhu dobivanja što pouzdanijih informacija o utjecaju prostorno-vremenskih značajki sadržaja na performanse algoritma za interpolaciju slike, u okviru ove doktorske disertacije provedena je analiza sadržaja s različitim prostornom i vremenskom aktivnošću. Pri tome je korišteno pet sadržaja s različitim značajkama: *mobile*, *football*, *foreman*, *news* i *container*. Riječ je o standardnim sadržajima koji se koriste u analizi i obradi videosignala. Iz svakog sadržaja izdvojena je 15. slika na kojoj su rađene analize, a izdvojene slike prikazane su na Slici 3.1. Sekvence su u *Common Intermediate Format*-u (CIF), s prostornom rezolucijom 352x288 elemenata slike te izmjenom 25 slika u sekundi. Sadržaji *mobile*, *foreman* i *container* imaju po 300 slika, *football* ima 260 slika, dok *news* ima 90 slika. Posljednja dva signala imaju manji broj slika (iako postoje i njihove varijante sa 300 slika) kako bi rezultati analiza bili usporedivi s onima prikazanim u postojećoj literaturi. Ove sekvence izabrane su zbog razlike u sadržaju te prostornoj i vremenskoj aktivnosti.

Sekvencu *mobile* karakterizira pokretna kamera i pokreti objekata u sceni u različitim smjerovima. Pokreti su uglavnom linearni i umjereno brzi. U pozadini ima mnoštvo detalja i boja. U sekvenci *football* također je prisutan pokret kamere. Riječ je o utakmici američkog nogometa s mnoštvom brzih pokreta, kako objekata u sceni tako i kamere. Sekvenca *foreman* također ima pokret kamere. U početku je u kadru glava koja govori, dok u nastavku slijedi prebacivanje kadra na zgradu u izgradnji. Kod sekvence *news* kamera je u potpunosti mirna. U prvom planu je dvoje voditelja koji čitaju vijesti, dok se pokretni objekti nalaze u pozadini, u manjem dijelu slike. Sekvenca *container* prikazuje brod s kontejnerima koji se sporo kreće. U toj sekvenci kamera je također mirna.



Slika 3.1. Karakteristične slike iz analiziranih sekvenci a)mobile b)football c)foreman d)news e)container

Iz opisa sadržaja može se zaključiti da su oni različiti po svojoj prostornoj i vremenskoj aktivnosti. Vrijednosti SI_{mean} i TI_{mean} za svaku od sekvenci izračunate su prema izrazima (3-5) i (3-6), a dobivene vrijednosti prikazane su u Tablici 3.1.

Tablica 3.1. Vrijednosti SI_{mean} i TI_{mean} za analizirane sadržaje

Sadržaj	SI_{mean}	TI_{mean}
<i>mobile</i>	168,36	38,49
<i>football</i>	83,46	33,58
<i>foreman</i>	78,90	20,90
<i>news</i>	122,72	7,95
<i>container</i>	125,98	5,39

3.3. Teorijska analiza pogreške interpolacije

U postupku interpolacije slike jedan od ciljeva je postići što bolju kvalitetu, odnosno što manju pogrešku pri interpolaciji. Kako bi se to postiglo, potrebno je analizirati parametre koji

utječu na pogrešku interpolacije. Na temelju matematičkog modela signala analizirana je i uspoređena pogreška interpolacije slika različitih sadržaja i prostorno-vremenskih značajki primjenom metode usrednjavanja i metode s procjenom pokreta. Također su uspoređene teorijske i empirijske vrijednosti pogreške za oba navedena načina interpolacije. Matematički model videosignala i rezultati navedenih analiza opisani su u nastavku.

3.3.1. Matematički model videosignala

Vremenska redundancija osnovno je svojstvo videosignala pa su uzastopne slike u sekvenci slične. Stoga se digitalni videosignal može prikazati kao vremenski slijed dvodimenzionalnih slika, odnosno $\{F_t(x, y)\}_{t=0}^T$. Uzastopne slike međusobno su vrlo slične, a do razlike između njih dolazi zbog pokreta objekata i određene količine šuma. Različiti modeli koji opisuju videosignal predstavljeni su u [79-90]. Budući da su navedeni modeli veoma složeni, u [49] je predložen jednostavniji model prema kojemu je slijed slika moguće prikazati sumom dva odvojena slijeda. Prvi je slijed dvodimenzionalnih slika s dodanim procijenjenim pokretom, $\{v_t(x, y)\}_{t=0}^T$, a drugi je slijed vremenski akumuliranog šuma, $\{n_t(x, y)\}_{t=0}^T$, koji predstavlja razliku između $\{v_t(x, y)\}_{t=0}^T$ i stvarnih slika. Navedena razlika uzrokovana je raznim čimbenicima poput kompresije, deformiranja objekata, šuma kamere i kvantizacijskog šuma. Sukladno prethodnim razmatranjima slika izdvojena iz videosignala u trenutku t može se prikazati kao

$$F_t(x, y) = v_t(x, y) + n_t(x, y). \quad (3-9)$$

Za određivanje slijeda $\{v_t(x, y)\}_{t=0}^T$ potrebno je najprije procijeniti pokret objekata unutar slike u trenutku t u odnosu na sliku u trenutku $t-1$. Moguće ga je prikazati vektorom pomaka MV svakog pojedinog bloka unutar slike

$$MV(t, t-1) = (MV_x(t, t-1), MV_y(t, t-1)). \quad (3-10)$$

Skup vektora pomaka za sve blokove unutar jedne slike čini polje vektora pomaka, MVF . Pokret u videosignalu može se opisati slijedom polja vektora pomaka, ali radi jednostavnosti

prikaza, umjesto za cijelu sliku, prikazat će se model za samo jedan blok i njemu pripadajući vektor pomaka. Za sve ostale blokove vrijedi isti način prikaza. Ako je slijed vektora pomaka $\{MV(i, i-1)\}_{i=1}^T$, pokret između dvije uzastopne slike može se prikazati kao

$$MV(t_2, t_1) = \begin{cases} \sum_{i=t_1+1}^{t_2} MV(i, i-1), t_1 < t_2 \\ - \sum_{i=t_2+1}^{t_1} MV(i, i-1), t_2 < t_1 \\ (0,0), t_1 = t_2 \end{cases} \quad (3-11)$$

Slika v_t u trenutku t , može se prikazati kao slika v za čije se blokove računaju vektori pomaka, pomaknuta za $(MV_x(t,0), MV_y(t,0))$

$$v_t(x, y) = v(x - MV_x(t,0), y - MV_y(t,0)). \quad (3-12)$$

Slika v može se predstaviti stacionarnim procesom, a prema [49] modelirana je korištenjem Markovljevog procesa prvog reda. Autokorelacija slike može se opisati izrazom

$$R_v(k, l) = \sigma_v^2 \cdot \rho_v^{|k|+|l|}, \quad (3-13)$$

gdje je σ_v^2 standardna devijacija slike, ρ_v koeficijent korelacije, a k i l redom horizontalna i vertikalna udaljenost elemenata slike.

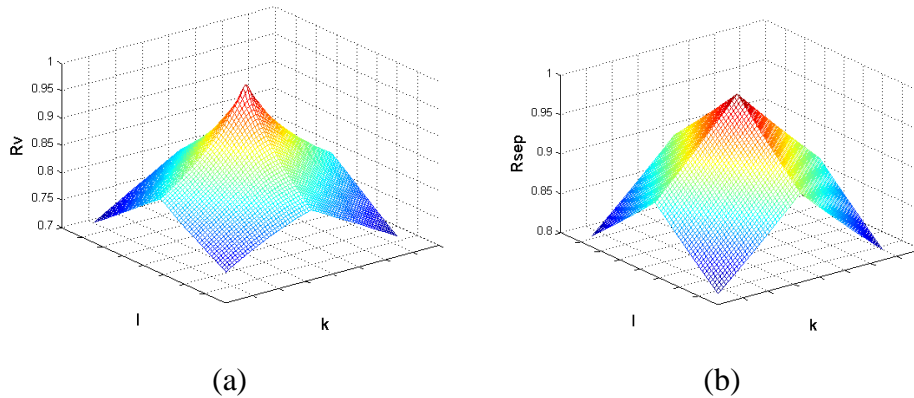
U analizi značajki videosignala može se koristiti i pojednostavljeni izraz za autokorelacijsku funkciju s odvojenom korelacijom po horizontalnoj i vertikalnoj dimenziji slike

$$R_{e_i}^{sep}(k, l) = R_{e_i}(0,0) \cdot \rho_{h,e_i}^{|k|} \rho_{v,e_i}^{|l|}, \quad (3-14)$$

gdje su

$$\rho_{h,e_i} = \frac{R_{e_i}(1,0)}{R_{e_i}(0,0)} \text{ i } \rho_{v,e_i} = \frac{R_{e_i}(0,1)}{R_{e_i}(0,0)}. \quad (3-15)$$

Na slici 3.2. a) prikazana je normirana autokorelacijska funkcija 15. slike sekvence *football*, a na slici b) teorijska normirana autokorelacijska funkcija za koju je koeficijent korelacije odabran kao srednja vrijednost ρ_h i ρ_v , određenih prema izrazu (3-15). Iako vrijednost realne autokorelacijske funkcije puno brže opada s k i l nego vrijednosti teorijske autokorelacije, izraz (3-13) daje dovoljno dobre rezultate za potrebe teorijskih razmatranja pogreške kod interpolacije.



Slika 3.2. Normirana autokorelacijska funkcija a)15. slike sekvence *football* b)teorijska autokorelacijska funkcija s $\rho = 0,988$

U razmatranom modelu videosignala šum se također sastoji od dva elementa. Prvi element je lokalni vremenski šum, w_t , koji predstavlja izobličenje slike u trenutku t . Ovom komponentom šuma može se predstaviti šum kompresije ili šum kamere. Drugi element je vremenski akumulirani šum i njime su predstavljene deformacije objekata. Taj je šum ovisan o vremenskim značajkama videosignala, kao što su brzina pokreta i trajanje scene, a predstavlja akumuliranu devijaciju duž L slika koja se može opisati translacijskim pokretom. Za prikaz šuma koristi se i slijed $\{q_t\}_{t=-L+1}^{\infty}$ gdje q_t predstavlja razliku između susjedne i slike nastale kompenzacijom pokreta, uzrokovanu dodatnom promjenom sadržaja u pomaknutim blokovima (npr. zbog promjene osvjetljenja, zaklanjanja objekata, deformacije objekata itd.) te se može

prikazati kao nezavisna varijabla s Gaussovom razdiobom i varijancom σ_q^2 . Elementi šuma vremenski su neovisni pa se u svakom vremenskom trenutku t šum može prikazati kao

$$n_t(x, y) = w_t(x, y) + \sum_{i=t-L+1}^t q_i(x - MV_x(t, i), y - MV_y(t, i)). \quad (3-16)$$

Budući da je $MV(t, t) = (0, 0)$ i da su vrijednosti q_i poznate za prethodne uzorke počevši od $t = -L + 1$, vremenski akumulirani šum u svakom trenutku t ima Gaussovu razdiobu s varijancom $L * \sigma_q^2$.

U konačnici se slika F_t može prikazati izrazom

$$F_t(x, y) = v(x - MV_x(t, 0), y - MV_y(t, 0)) + w_t(x, y) + \sum_{i=t-L+1}^t q_i(x - MV_x(t, i), y - MV_y(t, i)). \quad (3-17)$$

Varijanca šuma σ_q^2 pokazuje energiju razlike dvije uzastopne slike koja ostaje nakon kompenzacije pokreta. Za brzinu izmjene okvira (engl. *Frame Rate*), F_{rate} , vremenski interval između dvije uzastopne slike može se odrediti kao $\frac{1}{F_{rate}}$, a energija razlike između slika predstavljena sa σ_q^2 razmjerna je tom vremenskom intervalu, odnosno

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{F_{rate}} * \hat{\sigma}_q^2, \quad (3-18)$$

gdje je $\hat{\sigma}_q^2$ energija razlike dvije uzastopne slike uz brzinu izmjene od jedne slike u sekundi [91].

3.3.2. Pogreška interpolacije slike na temelju procjene pokreta

U slučaju povećanja vremenske rezolucije D puta, potrebno je između dvije postojeće slike interpolirati $D-1$ sliku. U budućim razmatranjima postojeće slike će biti označene kao F_0 i F_D , a interpolirane slike kao $\{F_j\}_{j=1}^{D-1}$. Razmatra se interpolacija bloka u j -toj interpoliranoj slici

označenoj kao F_j , gdje je $j \in \{1, \dots, D-1\}$. Prije interpolacije potrebno je procijeniti pokret između j -te slike i svake od postojećih slika F_0 i F_D . Vektori koji predstavljaju procijenjeni pokret između j -te i postojećih slika mogu se prikazati kao

$$MV(j,0 | F_0, F_D) = (MV_x(j,0) + \Delta x_0^{abs}, MV_y(j,0) + \Delta y_0^{abs}), \quad (3-19)$$

$$MV(D, j | F_0, F_D) = (MV_x(D, j) + \Delta x_D^{abs}, MV_y(D, j) + \Delta y_D^{abs}), \quad (3-20)$$

gdje su Δx_0^{abs} i Δx_D^{abs} pogreške procjene x komponente vektora pomaka u odnosu na slike F_0 i F_D , a Δy_0^{abs} i Δy_D^{abs} pogreške procjene y komponente vektora pomaka u odnosu na slike F_0 i F_D . Prema [49] te su pogreške nezavisne slučajne Gaussove varijable s varijancom

$$\sigma_{\Delta x^{abs}}^2 = \gamma_{abs} \cdot \sigma_{\Delta x}^2, \quad (3-21)$$

$$\sigma_{\Delta y^{abs}}^2 = \gamma_{abs} \cdot \sigma_{\Delta y}^2, \quad (3-22)$$

gdje su $\sigma_{\Delta x}^2$ i $\sigma_{\Delta y}^2$ varijance veličina Δx i Δy . Vrijednosti elemenata slike koja se interpolira nisu poznate pa to dodatno utječe na preciznost procjene pokreta, a taj utjecaj opisan je parametrom $\gamma_{abs} > 1$. Δx i Δy ovise o preciznosti procjene vektora pomaka i mogu se predstaviti nezavisnim slučajnim varijablama s konstantnom gustoćom vjerojatnosti u području $\left[-\frac{\Delta}{2}, \frac{\Delta}{2}\right]$, gdje je Δ razina preciznosti procjene pokreta (npr. $\frac{1}{2}$ elementa slike).

Varijance $\sigma_{\Delta x}^2$ i $\sigma_{\Delta y}^2$ su u tom slučaju

$$\sigma_{\Delta x}^2 = \sigma_{\Delta y}^2 = \frac{(2 \cdot \frac{\Delta}{2})^2}{12}. \quad (3-23)$$

Nakon procjene pokreta između slika F_0 i F_D interpolirana slika može se predvidjeti pomicanjem blokova jedne od tih slika za vrijednosti odgovarajućih vektora pomaka. Na taj način dobiju se dva različita prediktora, prediktor dobiven predviđanjem unatrag

$$F_j(x, y | F_0, MV(j,0 | F_0, F_D)) = F_0(x - MV_x(j,0 | F_0, F_D), y - MV_y(j,0 | F_0, F_D)) \quad (3-24)$$

i prediktor dobiven predviđanjem unaprijed

$$F_j(x, y | F_D, MV(D, j | F_0, F_D)) = F_D(x + MV_x(D, j | F_0, F_D), y + MV_y(D, j | F_0, F_D)). \quad (3-25)$$

Konačna predviđena slika može se dobiti linearnom kombinacijom prethodna dva izraza

$$\begin{aligned} F_j^{final}(x, y | F_0, F_D) &= \alpha \cdot F_j(x, y | F_0, MV(j,0 | F_0, F_D)) \\ &+ (1 - \alpha) \cdot F_j(x, y | F_D, MV(D, j | F_0, F_D)), \end{aligned} \quad (3-26)$$

gdje je α težinski parametar koji određuje relativni utjecaj svakog od prediktora na konačnu sliku, a može poprimiti vrijednosti u intervalu $[0,1]$. Pogreška predikcije slike može se prikazati kao

$$e_{j0,D}(x, y) = F_j(x, y) - F_j^{final}(x, y | F_0, F_D). \quad (3-27)$$

Prema [49] autokorelacijska funkcija pogreške predikcije može se prikazati sljedećim izrazom

$$\begin{aligned} R_{e_{j0,D}}(k, l) &= \alpha^2 \cdot R_{\Delta n_{j,0}}(k, l) + (1 - \alpha)^2 \cdot R_{\Delta n_{D,j}}(k, l) + \sigma_{\Delta x}^2 \cdot [\alpha^2 + (1 - \alpha)^2] \\ &\cdot [2R_v(k, l) - R_v(k - 1, l) - R_v(k + 1, l) + 2R_{n_0}(k, l) - R_{n_0}(k - 1, l) - R_{n_0}(k + 1, l)] \\ &+ \sigma_{\Delta y}^2 \cdot [\alpha^2 + (1 - \alpha)^2] \\ &\cdot [2R_v(k, l) - R_v(k, l - 1) - R_v(k, l + 1) + 2R_{n_0}(k, l) - R_{n_0}(k, l - 1) - R_{n_0}(k, l + 1)], \end{aligned} \quad (3-28)$$

gdje su R_v autokorelacijska funkcija slike, R_{n_0} autokorelacijska funkcija šuma, a $R_{\Delta n_{j,0}}$ autokorelacijska funkcija razlike šuma u trenutku t u odnosu na trenutak $t-1$ nastala zbog pokreta. Kada su vrijednosti $(k, l) = (0, 0)$, vrijednost autokorelacijske funkcije predstavlja

varijancu pogreške, što odgovara srednjoj kvadratnoj pogrešci koja se često koristi prilikom ocjenjivanja performansi različitih postupaka pa tako i postupka interpolacije slike

$$R_{e_{j|0,D}}(0,0) = \sigma_{eMC}^2 = \alpha^2 \cdot [2\sigma_q^2 j + \sigma_{w0}^2 + \sigma_{wj}^2] + (1-\alpha)^2 \cdot [2\sigma_q^2 (D-j) + \sigma_{w0}^2 + \sigma_{wj}^2] + 2(\sigma_{\Delta x^{abs}}^2 + \sigma_{\Delta y^{abs}}^2) \cdot [\alpha^2 + (1-\alpha)^2] \cdot [(1-\rho_v) \cdot \sigma_v^2 + L\sigma_q^2 + L\sigma_{w0}^2], \quad (3-29)$$

gdje su σ_{w0}^2 i σ_{wj}^2 varijance pogreški lokalnog vremenskog šuma, a ρ_v koeficijent korelacije.

Uz pretpostavku da je $\alpha = 0.5$ izraz (3-29) može se zapisati kao [49]

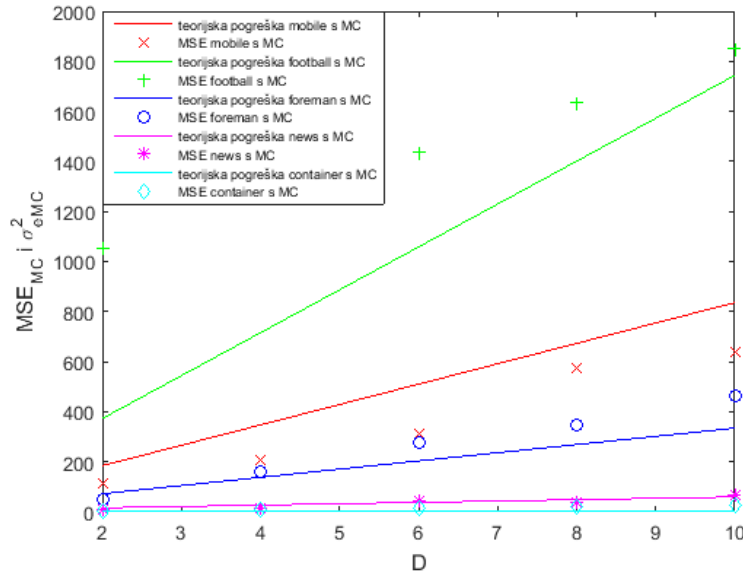
$$\sigma_{eMC}^2 = \frac{1}{2} \cdot [\sigma_q^2 D + \sigma_{w0}^2 + \sigma_{wj}^2] + (\sigma_{\Delta x^{abs}}^2 + \sigma_{\Delta y^{abs}}^2) \cdot [(1-\rho_v) \cdot \sigma_v^2 + L\sigma_q^2 + L\sigma_{w0}^2]. \quad (3-30)$$

U slučaju da se radi o interpolaciji slike u nekomprimiranom materijalu, što je predmet ove disertacije, utjecaj lokalnog vremenskog šuma (šuma kompresije ili šuma kamere) može se zanemariti. Tada je varijanca pogreške

$$\sigma_{eMC}^2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_q^2 D + (\sigma_{\Delta x^{abs}}^2 + \sigma_{\Delta y^{abs}}^2) \cdot [(1-\rho_v) \cdot \sigma_v^2 + L\sigma_q^2]. \quad (3-31)$$

Iz izraza (3-31) vidi se da je σ_{eMC}^2 linearna funkcija vremenske udaljenosti originalnih slika, D , te da će imati veće vrijednosti što je σ_v^2 veći i što je ρ_v manji. Utjecaj ovih veličina na ukupnu pogrešku ovisi o preciznosti procjene vektora pomaka te pada kako preciznost procjene raste. Utjecaj promjene sadržaja iz slike u sliku, iskazan sa σ_q^2 povezan je s vremenskom aktivnošću videosignala i značajno doprinosi ukupnoj pogrešci. Slijedi da prema izrazu (3-31) povećanje vremenske i prostorne aktivnosti uzrokuje povećanje σ_{eMC}^2 . Na Slici 3.3. prikazani su rezultati proračuna varijance pogreške σ_{eMC}^2 primjenom teorijskog izraza (3-31), te vrijednosti MSE_{MC} dobivenih postupkom interpolacije primjenom vektora pomaka za 15. sliku sekvenci *mobile*, *football*, *foreman*, *news* i *container*. Rezultati su dani za udaljenost

između slika F_0 i F_D $D = 2, 4, 6, 8, 10$, što odgovara interpolaciji 15. slike korištenjem 14. i 16. slike za $D = 2, 13$. i 17. slike za $D = 4$ itd.



Slika 3.3. MSE_{MC} i σ_{eMC}^2 u ovisnosti o udaljenosti slika koje se koriste za interpolaciju

Vrijednosti parametara ρ_v, σ_v^2 i σ_q^2 primijenjenih u izrazu (3-31) dobivene su iz originalne 15. slike pojedine sekvence. Parametar σ_v^2 je varijanca slike, a ρ_v je koeficijent korelacije izračunat iz dvodimenzionalne korelacije $R_v(k, l)$ slike kao

$$\rho_v = 0.5 \cdot \left(\frac{R_v(1,0) + R_v(0,1)}{R_v(0,0)} \right). \quad (3-33)$$

Parametar σ_q^2 predstavlja pogrešku uslijed promjene sadržaja blokova iz slike u sliku koja postoji kada nema pogreške procjene vektora pomaka. Ovaj parametar ovisi o sadržaju sekvence, odnosno njenoj vremenskoj i prostornoj aktivnosti. S obzirom da se kod interpolacije u realnom slučaju ova pogreška ne može odvojiti od pogreške procjene vektora pomaka, parametar σ_q^2 odabran je empirijski.

Analizom podataka utvrđeno je da se dobro poklapanje teorijskih i empirijskih rezultata postiže izborom parametra σ_q^2 na sljedeći način

$$\sigma_q^2 = \beta \cdot \frac{TI^2}{\sigma_v^2}, \quad (3-34)$$

pri čemu je TI parametar vremenske aktivnosti između 14. i 16. slike, a $\beta = 150$. U Tablici 3.2. dane su vrijednosti parametara σ_v^2 i ρ_v za 15. sliku te TI između 14. i 16. slike sekvenci *mobile*, *football*, *foreman*, *news* i *container*, koji su korišteni za proračun varijance pogreške interpolacije prema izrazu (3-31).

Tablica 3.2. Vrijednosti ρ_v , σ_q^2 , σ_v^2 te vrijednost TI_t

sekvenca	ρ_v	σ_q^2	σ_v^2	TI_t
<i>mobile</i>	0,976	4072	3969	26,85
<i>football</i>	0,988	8567	1681	29,68
<i>foreman</i>	0,996	1638	2809	14,30
<i>news</i>	0,982	272	2571	5,50
<i>container</i>	0,990	11	2304	3,69

Vrijednosti MSE, prikazane na Slici 3.3., izračunate su za interpolirane slike koje su dobivene korištenjem blokova veličine 16x16 elemenata slike, područja pretrage 32 elementa slike te logaritamskog načina pretraživanja. Usporedba rezultata procjene pogreške interpolacije primjenom teorijskog modela, odnosno izraza (3-31) i vrijednosti MSE_{MC} dobivenih interpolacijom pokazuje njihovo dobro slaganje za sekvence *container*, *news* i *foreman* te veća odstupanja za sekvence *mobile* i *football* koje imaju najveću vremensku aktivnost. Odstupanje je posebno veliko za sekvencu *football*, što se može objasniti većom promjenom sadržaja blokova iz slike u sliku, koja se ne može dobro opisati samo parametrom σ_q^2 prema izrazu (3-34). Dodatnu pogrešku u procjeni, σ_e^2 , unosi pogrešan izbor vektora pomaka, odnosno odgovarajućeg bloka pri procjeni pokreta, što nije obuhvaćeno primjenom teorijskog modela u izrazu (3-31).

Može se zaključiti da analizirani teorijski model kvalitativno dobro opisuje linearni porast varijance pogreške pri interpolaciji slike te da za sekvence s manjim TI daje i kvantitativno

dobre rezultate u širokom rasponu vremenskih udaljenosti, D , slika koje se koriste za interpolaciju.

3.3.3. Pogreška interpolacije slike primjenom usrednjavanja

Interpolacija slike primjenom usrednjavanja može se smatrati specijalnim slučajem interpolacije primjenom vektora pomaka. Vektori pomaka $MV(j,0 | F_0, F_D)$ i $MV(D, j | F_0, F_D)$ u izrazu (3-26) kod interpolacije usrednjavanjem jednaki su nuli, odnosno

$$\begin{aligned} F_j^{final}(x, y | F_0, F_D) &= \alpha \cdot F_j(x, y | F_0, (0,0)) + (1 - \alpha) \cdot F_j(x, y | F_D, (0,0)) \\ &= 2 \cdot F_0(x, y) + (1 - \alpha)F_D(x, y). \end{aligned} \quad (3-35)$$

U slučaju uzastopnih okvira α je jednak 0.5. Za procjenu pogreške kod interpolacije usrednjavanjem može se primijeniti izraz (3-31) uz određenu prilagodbu. Pogreška procjene vektora pomaka u slučaju usrednjavanja, Δx_{FA} i Δy_{FA} , jednaka je cijelom vektoru pomaka elementa slike (x,y) između F_j i F_0 , odnosno F_j i F_D , pa slijedi

$$\Delta x_{FA} = MV_x, \quad \Delta y_{FA} = MV_y, \quad (3-36)$$

a energija pogreške

$$\sigma_{\Delta x_{FA}}^2 = \sigma_{MV_x}^2, \quad \sigma_{\Delta y_{FA}}^2 = \sigma_{MV_y}^2. \quad (3-37)$$

S povećanjem udaljenosti D između F_0 i F_D može se očekivati porast $\sigma_{MV_x}^2$ i $\sigma_{MV_y}^2$ što se može prikazati kao

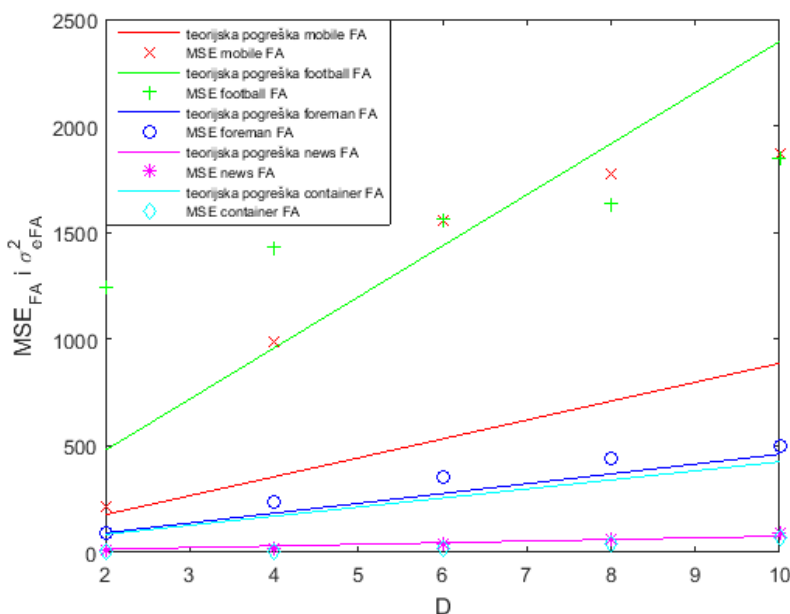
$$\sigma_{MV_{xD}}^2 = f(D) \cdot \tilde{\sigma}_{MV_x}^2, \quad \sigma_{MV_{yD}}^2 = f(D) \cdot \tilde{\sigma}_{MV_y}^2 \quad (3-38)$$

gdje su $\tilde{\sigma}_{MV_x}^2$ i $\tilde{\sigma}_{MV_y}^2$ energije pogreške x i y komponenti vektora pomaka između slike koja se interpolira i prvih susjednih slika. Ukoliko se u postupku interpolacije koriste samo slike iz

sekvence manje vremenske rezolucije, tada će L biti jednak 0, a izraz (3-31) u slučaju interpolacije usrednjavanjem mijenja se u

$$R_{e_{FA}}(0,0) = \sigma_{e_{FA}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_q^2 D + f(D)(\tilde{\sigma}_{MV_x}^2 + \tilde{\sigma}_{MV_y}^2)[(1 - \rho_v) \sigma_v^2]. \quad (3-39)$$

Provjera prikladnosti izraza (3-31) za procjenu pogreške interpolacije napravljena je usporedbom rezultata proračuna MSE_{FA} za interpolaciju usrednjavanjem 15. slike sekvenci *mobile*, *football*, *foreman*, *news* i *container*, pri čemu su korištene 14. i 16. slika za $D = 2, 13$. i 17. slika za $D = 4$ itd. Teorijski rezultati varijance pogreške, $\sigma_{e_{FA}}^2$, dobiveni su primjenom izraza (3-31) u koji su uvršteni parametri σ_q^2, σ_v^2 i ρ_v za pojedinu sekvencu na isti način kao i kod proračuna σ_e^2 interpolacije procjenom pokreta (Tablica 3.2.). Vrijednosti za $\tilde{\sigma}_{MV_x}^2$ i $\tilde{\sigma}_{MV_y}^2$ određene su kao srednje vrijednosti varijanci vektora pomaka između 14. i 15. te 16. i 15. slike odgovarajuće sekvence. Treba napomenuti da se u postupku usrednjavanja ne koriste vektori pomaka te da je određivanje vektora pomaka provedeno samo za procjenu $\tilde{\sigma}_{MV_x}^2$ i $\tilde{\sigma}_{MV_y}^2$ za primjenu u izrazu (3-31).



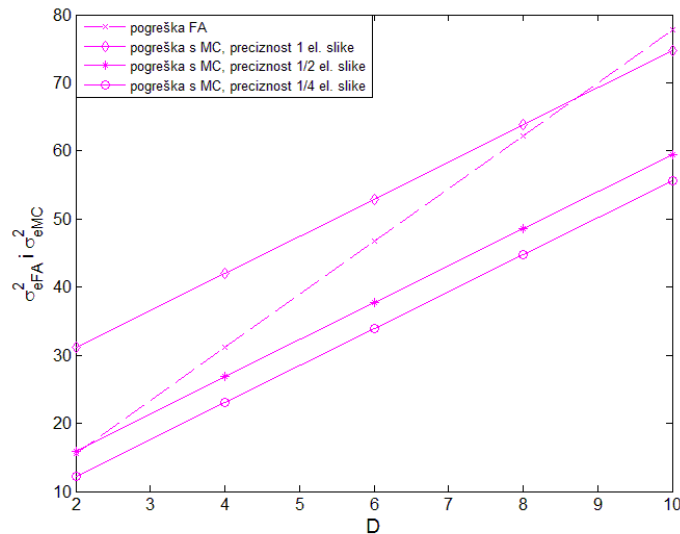
Slika 3.4. MSE_{FA} i $\sigma_{e_{FA}}^2$ u ovisnosti u udaljenosti slika koje se koriste za interpolaciju po sadržajima

Analizom podataka utvrđeno je da $f(D) = \frac{D}{TI}$ daje vrlo malu razliku između σ_{FA}^2 i MSE_{FA} za sekvence *foreman* i *news*, dok je za sekvencu *mobile* izabran $f(D) = D$. Kod sekvence *mobile* postoji linearni pokret kamere u jednom smjeru pa je porast veličine pokreta za cijelu sliku, a time i pogreška $\tilde{\sigma}_{MVx}^2$ i $\tilde{\sigma}_{MVy}^2$ s porastom D veća nego u slučaju sekvenci *foreman* i *news*. Za sekvencu *container* uz $f(D) = \frac{D}{TI}$ teorijski model precjenjuje pogrešku, što se može objasniti postojanjem pokreta na vrlo malom dijelu slike pa je realna pogreška vrlo mala.

3.3.4. Usporedba pogreške interpolacije usrednjavanjem i primjenom procjene pokreta

Pogreška interpolacije kako usrednjavanjem, tako i primjenom procjene pokreta, smanjuje se kako se smanjuje parametar TI vremenske aktivnosti videosekvence. To potvrđuju i teorijski i empirijski rezultati (Slika 3.3. i Slika 3.5.). Utjecaj na pogrešku ima u određenoj mjeri i prostorna aktivnost preko σ_v^2 , ali u manjoj mjeri nego vremenska aktivnost. Usporedbom rezultata σ_{eMC}^2 i σ_{eFA}^2 , kao i MSE_{MC} i MSE_{FA} može se uočiti da je za sekvence s malim TI i za male vrijednosti D pogreška interpolacije usrednjavanjem ista ili čak i manja od pogreške interpolacije primjenom procjene pokreta. S obzirom da je usrednjavanje višestruko jednostavniji i računalno manje zahtjevan postupak od procjene pokreta, interesantno je detaljnije analizirati u kojim će uvjetima postupak usrednjavanja biti po pogrešci usporediv s postupkom procjene pokreta. Na Slici 3.5. dani su teorijski rezultati za pogrešku usrednjavanjem, σ_{eFA}^2 , i pogrešku procjenom pokreta, σ_{eMC}^2 , s preciznošću procjene na 1, $\frac{1}{2}$ i $\frac{1}{4}$ elementa slike. Pri tome su korišteni parametri sekvence *news*, $\sigma_q^2 = 272$, $\sigma_v^2 = 2500$, $\rho_v = 0.98$ i $TI = 5.5$. Rezultati pokazuju da je pogreška interpolacije usrednjavanjem manja od pogreške interpolacije procjenom pokreta s preciznošću 1 elementa slike u širokom rasponu vrijednosti D te od pogreške procjenom pokreta s preciznošću $\frac{1}{2}$ elementa slike za $D = 2$. Ako se uzme u obzir da kod procjene pokreta s preciznošću manjom od 1 elementa slike složenost postupka dodatno raste, jer se mora provesti proširenje slike (obično bilinearnom ili bikubičnom prostornom interpolacijom), može se zaključiti da kod postupaka povećanja

vremenske rezolucije kod kojih postoji ograničenje na računalne resurse treba uzeti u obzir mogućnost korištenja jednostavnog usrednjavanja umjesto procjene pokreta. Pri tome vrijednost parametra TI može poslužiti kao informacija za izbor između usrednjavanja i procjene pokreta.

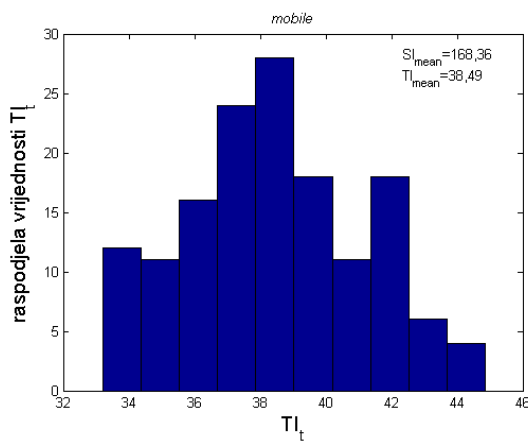


Slika 3.5. σ_{eFA}^2 i σ_{eMC}^2 uz tri različite vrijednosti parametra preciznosti određivanja MV za sekvencu *news*

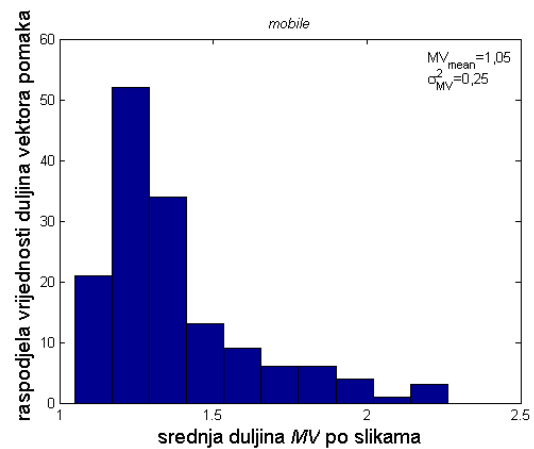
3.4. Utjecaj prostorno-vremenske aktivnosti sadržaja na duljinu vektora pomaka

Budući da je u središtu ove disertacije algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika, posebno će se razmatrati utjecaj vremenske aktivnosti sadržaja na performanse samog algoritma. Iz izraza (3-8) može se zaključiti da vrijednost TI_t raste s porastom razlike između dvije uzastopne slike. Veća razlika između dviju uzastopnih slika upućuje na veću promjenu slike, odnosno na veći pokret objekata unutar scene. Samim time može se očekivati da će u slučaju veće razlike između dvije uzastopne slike vektori pomaka između tih slika imati veći iznos. U okviru analize utjecaja prostorno-vremenskih značajki na performanse algoritma za interpolaciju slike proučena je ovisnost duljine prosječnog vektora pomaka i vrijednosti TI_t između svake dvije uzastopne slike. Za procjenu pokreta korišteno je jednosmjerno predviđanje unaprijed na razini manjoj od jednog elementa slike za blokove veličine 16x16 elemenata slike s područjem pretrage 32 elementa slike uz logaritamsko pretraživanje.

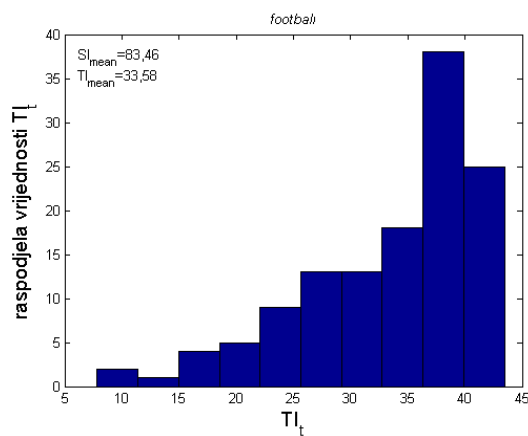
Rezultati analiza vidljivi su na Slici 3.6. gdje su prikazane raspodjele vrijednosti parametra TI_t i prosječne duljine vektora pomaka po okvirima za različite sadržaje (*mobile*, *football*, *foreman*, *news* i *container*). Iz dijagrama raspodjele vrijednosti parametra TI_t i raspodjele prosječne duljine vektora pomaka za pojedinu sekvencu vidi se da je za sekvence kod kojih parametar TI_t ima nisku vrijednost (*news* i *container*) prosječna vrijednost duljine vektora pomaka između susjedne dvije slike također vrlo mala. Za sekvencu *football* vrijednosti TI_t osjetno su veće nego kod sekvenci *news* i *container*, ali su i prosječne duljine vektora pomaka za sekvencu *football* također puno veće nego za spomenute dvije sekvence. Slična je situacija i za sekvencu *foreman*. Očito je da se ovisno o vrijednosti parametra TI_t može pretpostaviti hoće li prosječne vrijednosti vektora pomaka između slika biti male ili velike.



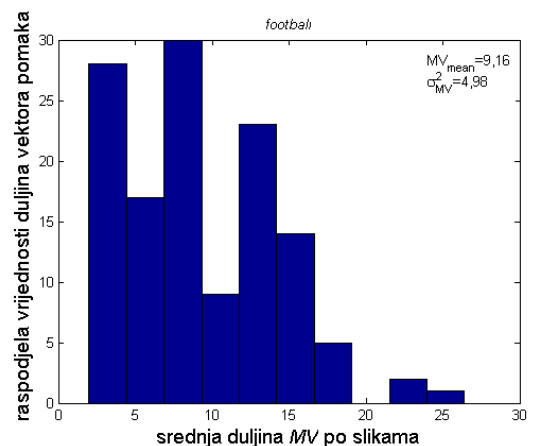
(a)



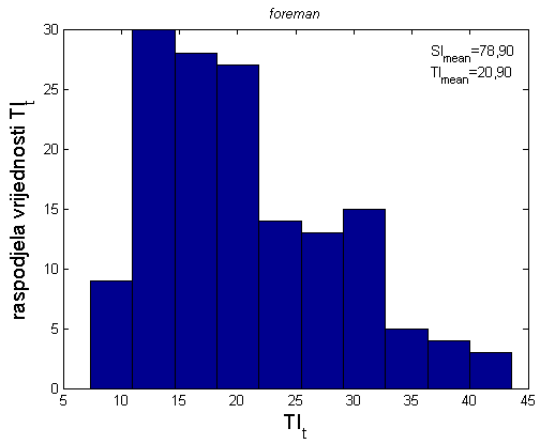
(b)



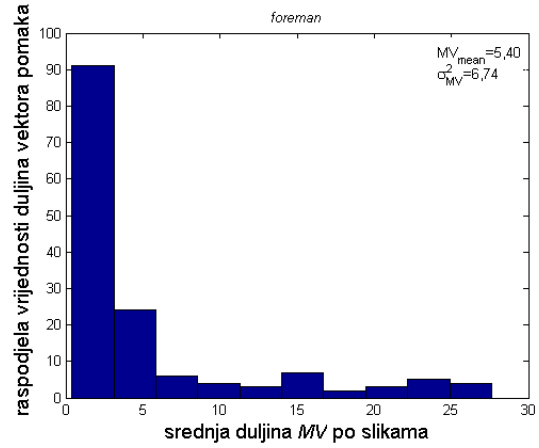
(c)



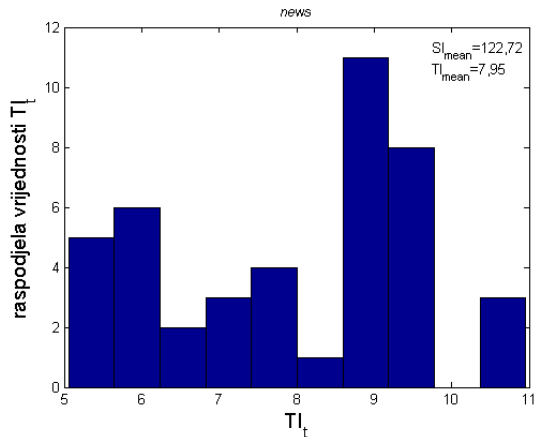
(d)



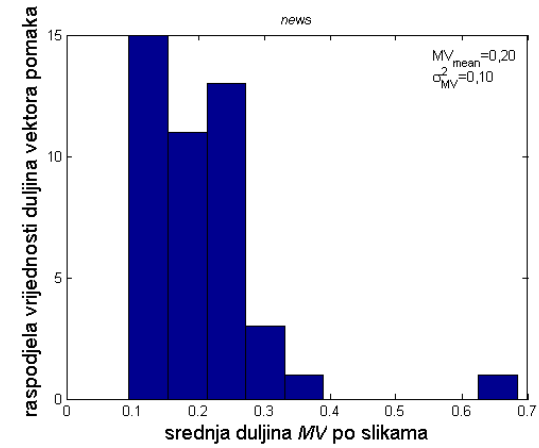
(e)



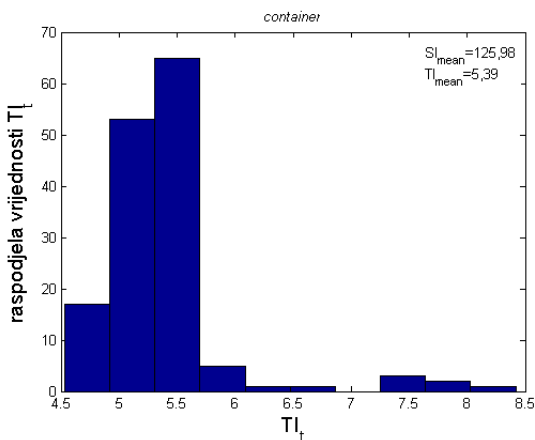
(f)



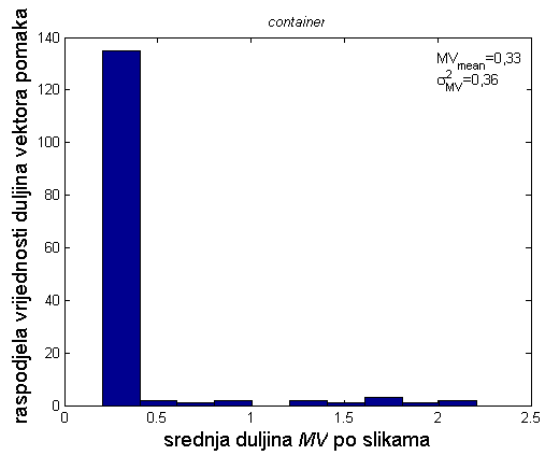
(g)



(h)

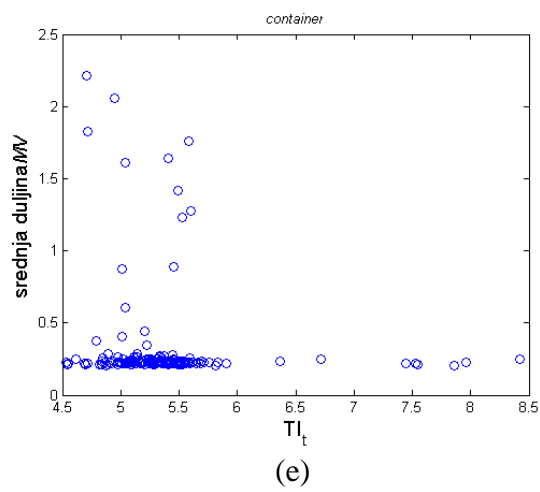
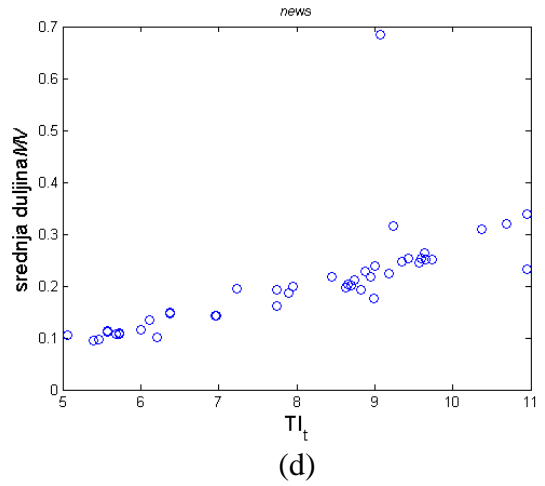
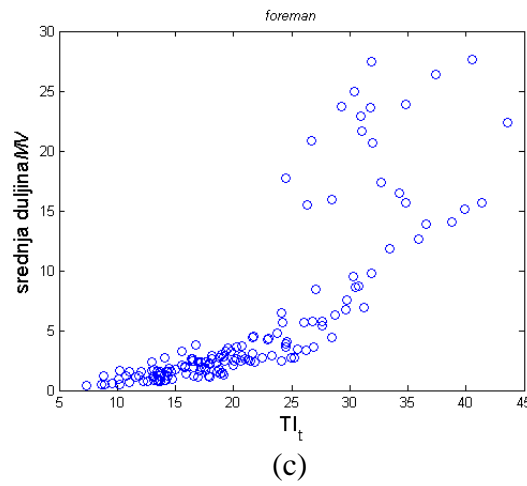
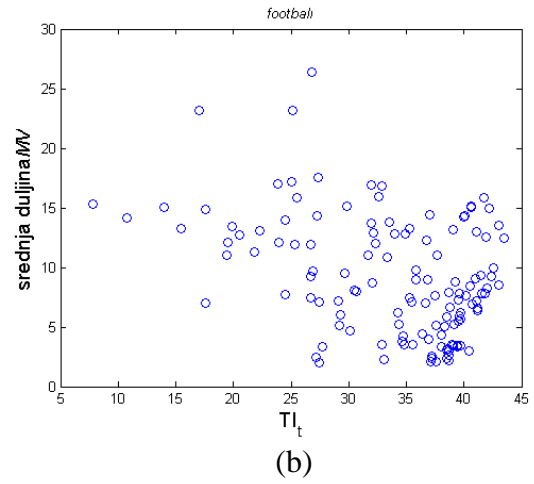
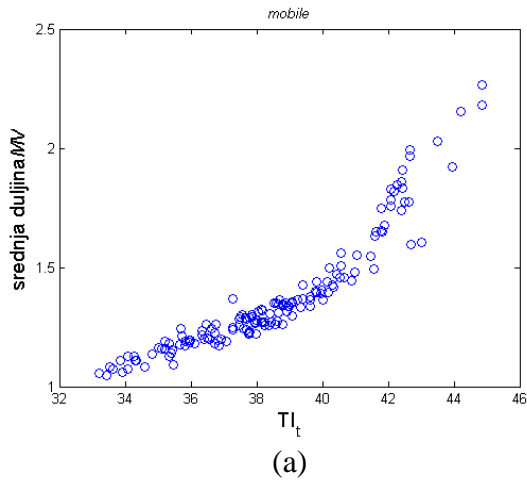


(i)



(j)

Slika 3.6. Raspodjela vrijednosti TI_t po sadržajima a) *mobile* c) *football* e) *foreman* g) *news* i) *container* i raspodjela prosječnih duljina vektora pomaka za svaku sliku po sadržajima b) *mobile* d) *football* f) *foreman* h) *news* j) *container*

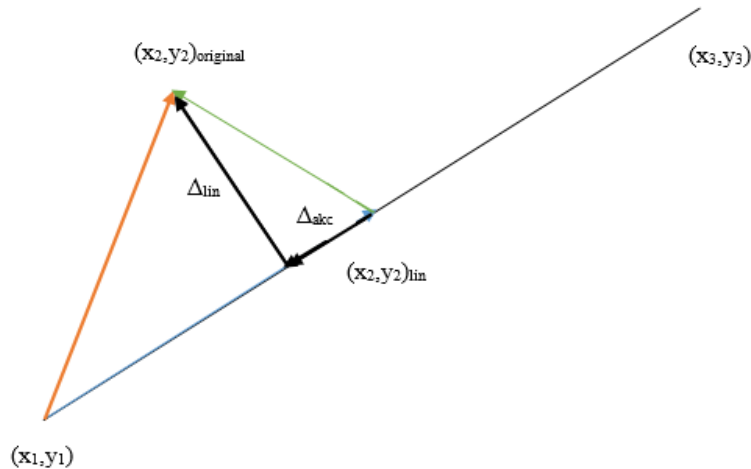


Slika 3.7. Ovisnost srednje duljine vektora pomaka o TI_t po sadržajima a) *mobile* b) *football* c) *foreman* d) *news* e) *container*

Iznimka u rezultatima prikazanim na Slici 3.6. je kod sekvence *mobile*. Iz raspodjele koja je prikazana na dijagramu 3.6. a) vidi se da je vrijednost parametra TI_t te sekvence vrlo visoka, a prosječne vrijednosti vektora pomaka prikazane na dijagramu 3.6. b) nisu očekivano visoke. Ta se iznimka može objasniti činjenicom da kod sekvence *mobile* postoji pomak kamere te uz vrlo visoku vrijednost SI_{mean} (Tablica 3.1) za tu sekvencu i mali pomak izaziva vrlo veliku vrijednost TI_t . Izneseni zaključci mogu biti dodatno potkrijepljeni Slikom 3.7. gdje je prikazana ovisnost vremenske aktivnosti sadržaja i prosječne duljine vektora pomaka. Općenito se može zaključiti da će sekvence s malim vrijednostima vremenske aktivnosti, odnosno parametra TI_t , imati i male srednje duljine vektora pomaka. Kod sekvenci s većim TI_t , na duljinu vektora pomaka utječe i prostorna aktivnost, ali i vrsta pomaka te izobličenje objekata prilikom pokreta. S obzirom da se za vektore pomaka malih duljina može očekivati i mala pogreška, parametar TI_t može poslužiti za procjenu pogreške kod interpolacije.

3.5. Utjecaj prostorno - vremenske aktivnosti sadržaja na pogrešku procjene vektora pomaka

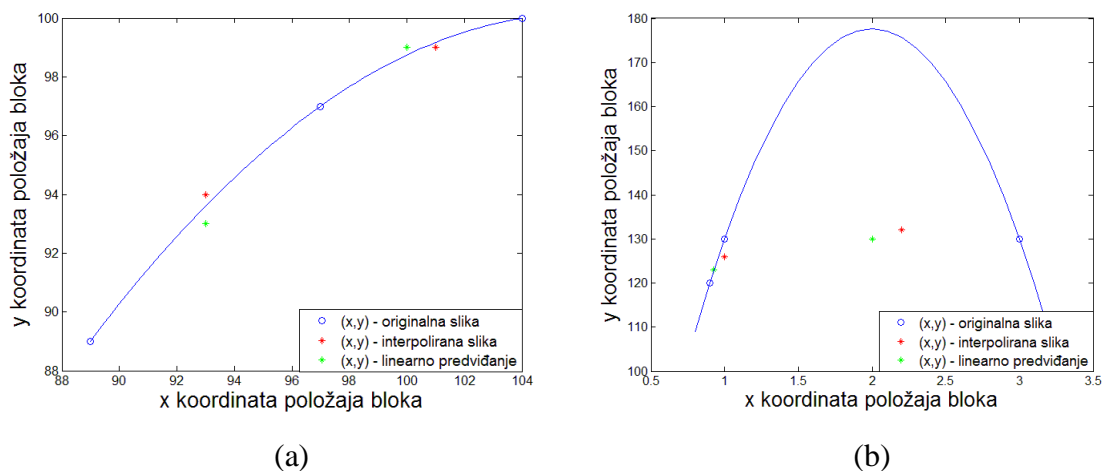
Osim utjecaja prostorno-vremenske aktivnosti na duljinu vektora pomaka, analiziran je i utjecaj na pogrešku prilikom procjene vektora pomaka. Analiza je provedena na način da su uspoređeni skalirani vektori pomaka koji su procijenjeni između slika iz sekvence sa smanjenom rezolucijom, s izmjenom $F_{rate}/2$ slika u sekundi i odgovarajući vektori pomaka između slika iz originalne sekvence s izmjenom F_{rate} slika u sekundi. Do pogreške u procjeni vektora pomaka može doći uslijed nelinearnog gibanja i gibanja promjenjivom brzinom, kao što je to prikazano na Slici 3.8. Točkama s koordinatama (x_1, y_1) i (x_3, y_3) redom su označene koordinate određenog bloka u slikama F_1 i F_3 koje pripadaju sekvenci s izmjenom $F_{rate}/2$ slika u sekundi. Točkom $(x_2, y_2)_{lin}$ označen je položaj bloka koji je određen na temelju linearne procjene pokreta između točaka (x_1, y_1) i (x_3, y_3) uz stalnu brzinu kretanja, dok je točkom $(x_2, y_2)_{original}$ određen položaj odgovarajućeg bloka u originalnoj slici F_2 koja se nalazi između slika F_1 i F_3 . Pogreška u procjeni vektora pomaka sastoji se od dvije komponente, pogreška zbog nelinearnosti pokreta, Δ_{lin} , i pogreška zbog nejednolike brzine gibanja bloka, Δ_{akc} , (Slika 3.8.).



Slika 3.8. Pogreška procjene vektora pomaka zbog nelinearnog gibanja i gibanja nejednolikom brzinom

Pogreška zbog nelinearnosti nastaje uslijed nelinearnog gibanja bloka za koji je vektor pomaka određen. Vektori pomaka određuju se linearno na temelju razlika pozicija dva najbližnja bloka u dvije uzastopne slike. Međutim, gibanje određenog bloka, posebice u slučaju brzog i naglog pokreta, ne mora nužno biti linearno te zbog toga dolazi do razlike između linearno procijenjenog položaja bloka u interpoliranoj slici i stvarnog položaja tog bloka u originalnoj slici. Moguće rješenje problema pogreške zbog nelinearnosti jest određivanje krivulje koja prolazi kroz 3 (ili više) točaka koje označavaju pozicije određenog bloka u 3 (ili više) uzastopne slike iz sekvence sa smanjenom rezolucijom, a koja bi bolje opisala prirodno kretanje objekata. Određivanjem položaja točke (x_2, y_2) na krivulji može se smanjiti pogreška zbog nelinearnosti u određivanju položaja bloka u interpoliranoj slici (Slika 3.9 a)). Ipak, ovakav pristup u određenim situacijama može povećati pogrešku prilikom određivanja položaja bloka u interpoliranoj slici koja može biti osjetno veća od same pogreške zbog nelinearnosti (Slika 3.9. b)). Na Slici 3.9. plavim su oznakama prikazani položaji određenog bloka u tri uzastopne slike iz sekvence sa smanjenom rezolucijom (F_1, F_3, F_5), crvenim oznakama prikazani su položaji tog bloka u originalnim slikama F_2 i F_4 , dok su zelenim oznakama prikazani položaji istog bloka određeni na temelju linearne procjene pokreta. Krivulja koja spaja točke iz slika F_1, F_3 i F_5 dobivena je korištenjem kubičnog splinea. Na Slici 3.9. a) vidi se da bi se u slučaju određivanja točke na krivulji koja bi označavala položaj bloka u interpoliranoj slici pogreška zbog nelinearnosti pokreta smanjila, ali ne i u potpunosti eliminirala. Međutim, na slici 3.9. b) prikazan je slučaj u kojem bi pogreška

određivanja položaja na temelju točke na krivulji bila osjetno veća od pogreške određene linearnim vektorom pomaka.

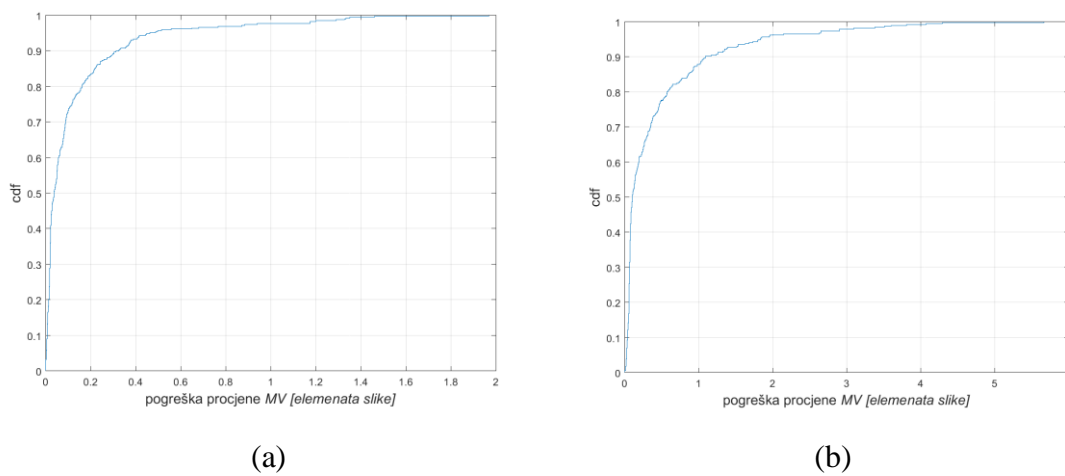


Slika 3.9. Određivanje položaja bloka na temelju nelinearne procjene pokreta primjenom kubičnog spline-a a) smanjenje pogreške procjene b) povećanje pogreške procjene

Kako je prikazano Slikom 3.9., određivanje položaja na temelju nelinearne procjene pokreta može doprinijeti blagom poboljšanju procjene pokreta u nekim slučajevima, ali također može značajno povećati pogrešku prilikom procjene vektora pomaka, kao što je prikazano na Slici 3.9. b). Iako je većina pokreta, posebice u dijelovima sekvence s velikom vremenskom aktivnošću, nelinearna, vrlo je teško odrediti njihovu točnu putanju te se zbog svega navedenog najčešće nelinearni pokret aproksimira linearnim.

U okviru analize pogreške zbog nelinearnosti i promjenjive brzine gibanja bloka određene su komponente pogreške koje nastaju uslijed linearne procjene pokreta uz stalnu brzinu gibanja za sve blokove unutar nekoliko različitih slika sekvence *football*. Navedena sekvenca odabrana je jer ima najveće vrijednosti vektora pomaka od svih testiranih sekvenci pa je samim time i očekivana pogreška prilikom procjene MV najveća. Na Slici 3.10. prikazana je kumulativna funkcija raspodjele, *cdf*, pogreške procjene vektora pomaka zbog nelinearnosti pokreta i zbog promjenjive brzine kretanja bloka za jednu od slika sekvence *football*. Na Slici 3.10. a) može se vidjeti da je u 90% slučajeva pogreška nastala zbog nelinearnosti gibanja manja od 0.3 elementa slike, a maksimalna pogreška je manja od 2 elementa slike. Kod pogreške nastale zbog promjenjive brzine gibanja bloka (Slika 3.10. b)) može se vidjeti da je

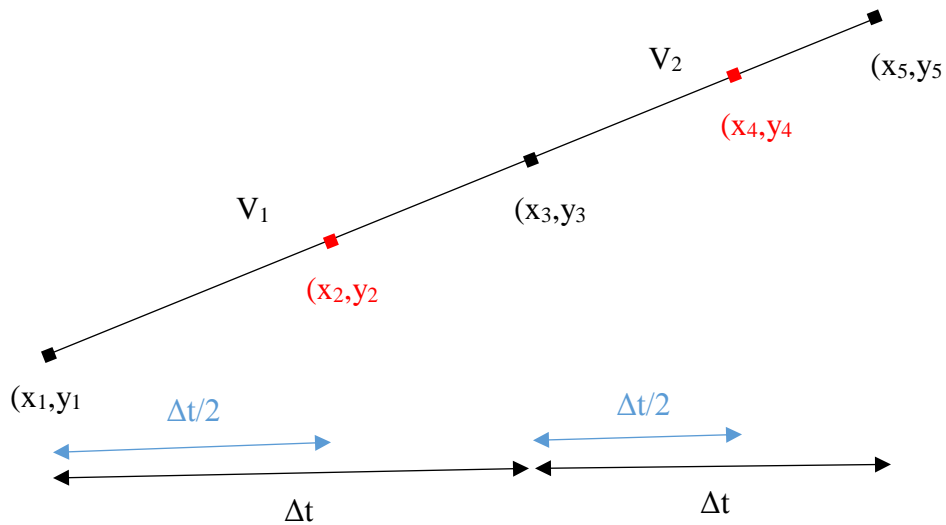
pogreška u čak 10% slučajeva veća od jednog elementa slike, a njezina maksimalna vrijednost seže čak i do 6 elemenata slike.



Slika 3.10. Kumulativna funkcija raspodjele pogreške procjene vektora pomaka zbog a)nelinearnosti pokreta b)promjenjive brzine kretanja bloka

Može se zaključiti da se nelinearno gibanje može aproksimirati linearnim jer to u konačnici neće značajno utjecati na ukupnu pogrešku procjene vektora pomaka. Međutim, pogreška koja nastaje zbog promjenjive brzine gibanja bloka nešto je veća, te će njezin utjecaj na ukupnu pogrešku procjene vektora pomaka biti detaljnije analiziran u nastavku.

Kod linearne procjene pokreta smatra se da je brzina kretanja blokova između slika konstantna te se položaji blokova u interpoliranoj slici određuju na temelju skaliranih vrijednosti vektora pomaka, ovisno o vremenskoj udaljenosti slike koja se interpolira u odnosu na postojeće slike. U slučaju da se između postojećih slika interpolira samo jedna slika, faktor koji se koristi prilikom skaliranja vektora pomaka iznosi 0.5, jer je interpolirana slika na jednakoj vremenskoj udaljenosti od obje postojeće. Međutim, brzina kretanja objekata, a samim time i blokova u slici, najčešće nije konstantna, posebice u dijelovima sekvence s velikom vremenskom aktivnošću. Kako bi se smanjila pogreška koja nastaje zbog promjenjive brzine gibanja bloka, potrebno je uzeti u obzir različite brzine kretanja bloka između dvije uzastopne originalne slike na temelju informacija o razlici tih brzina (akceleraciji) te preciznije odrediti položaje blokova u interpoliranim slikama. Primjer određivanja položaja blokova u interpoliranim slikama uzimajući u obzir promjenjivu brzinu kretanja blokova prikazan je na Slici 3.11.



Slika 3.11. Određivanje položaja blokova uz promjenjivu brzinu gibanja

Neka su točkama s koordinatama (x_1, y_1) , (x_3, y_3) i (x_5, y_5) određeni položaji bloka u tri uzastopne slike F_1 , F_3 i F_5 , Δt neka predstavlja vrijeme proteklo između dviju slika u sekvenci sa smanjenom rezolucijom, a $\Delta t/2$ vrijeme proteklo između dviju slika u originalnoj sekvenci. Te vrijednosti mogu se prikazati sljedećim izrazima:

$$\Delta t = \frac{2}{F_{rate}} [s], \quad \Delta t / 2 = \frac{1}{F_{rate}} [s]. \quad (3-40)$$

Budući da su te vrijednosti konstantne, a pomak između F_1 i F_3 je veći nego pomak između F_3 i F_5 , može se zaključiti da je brzina kretanja bloka između F_1 i F_3 , v_1 , veća nego brzina kretanja bloka između F_3 i F_5 , v_2 . U tom slučaju jasno je da brzina kretanja bloka opada pa shodno tome položaji blokova u interpoliranim slikama, označeni sa (x_2, y_2) i (x_4, y_4) , nisu na pola puta između položaja blokova u originalnim slikama, kao u slučaju konstante brzine kretanja bloka.

Općenito, brzina i akceleracija svake od komponenti vektora prikazana je sljedećim izrazima:

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad (3-41)$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}. \quad (3-42)$$

U slučaju da su položaji blokova u tri slike, F_1 , F_3 i F_5 , kao na Slici 3.12., komponente srednjih brzina i akceleracije u diskretnom prostoru slike mogu se prikazati sljedećim izrazima:

$$\bar{v}_{1x} = \frac{x_3 - x_1}{\Delta t}, \quad \bar{v}_{2x} = \frac{x_5 - x_3}{\Delta t}, \quad (3-43)$$

$$\bar{v}_{1y} = \frac{y_3 - y_1}{\Delta t}, \quad \bar{v}_{2y} = \frac{y_5 - y_3}{\Delta t}, \quad (3-44)$$

$$\bar{a}_x = \frac{v_{2x} - v_{1x}}{2 \cdot \Delta t}, \quad \bar{a}_y = \frac{v_{2y} - v_{1y}}{2 \cdot \Delta t}. \quad (3-45)$$

Kako bi se odredili pomaci nastali uslijed promjenjive brzine kretanja potrebno je poznavati vrijednosti početnih brzina u točkama (x_1, y_1) i (x_3, y_3) , koje su redom označene kao v_{01} i v_{02} , a određene su izrazima

$$v_{01x} = \bar{v}_{1x} - \frac{1}{2} \bar{a}_x \cdot \Delta t, \quad v_{02x} = \bar{v}_{2x} - \frac{1}{2} \bar{a}_x \cdot \Delta t, \quad (3-46)$$

$$v_{01y} = \bar{v}_{1y} - \frac{1}{2} \bar{a}_y \cdot \Delta t, \quad v_{02y} = \bar{v}_{2y} - \frac{1}{2} \bar{a}_y \cdot \Delta t. \quad (3-47)$$

Prema općem izrazu za pomak kod gibanja promjenjivom brzinom

$$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (3-48)$$

pomaci po x i y osi za segmente prikazane na Slici 3.12. određeni su izrazima

$$\Delta x_1 = v_{01x} \cdot \frac{\Delta t}{2} + \frac{1}{2} \bar{a}_x \cdot \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2, \quad \Delta x_2 = v_{02x} \cdot \frac{\Delta t}{2} + \frac{1}{2} \bar{a}_x \cdot \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2, \quad (3-49)$$

$$\Delta y_1 = v_{01y} \cdot \frac{\Delta t}{2} + \frac{1}{2} \bar{a}_y \cdot \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2, \quad \Delta y_2 = v_{02y} \cdot \frac{\Delta t}{2} + \frac{1}{2} \bar{a}_y \cdot \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2. \quad (3-50)$$

Pomaci $\Delta x_1, \Delta y_1$ te $\Delta x_2, \Delta y_2$ redom predstavljaju komponente vektora pomaka te vrijedi

$$x_2 = x_1 + \Delta x_1, \quad y_2 = y_1 + \Delta y_1, \quad (3-51)$$

$$x_4 = x_3 + \Delta x_2, \quad y_4 = y_3 + \Delta y_2. \quad (3-52)$$

Proračunom vektora pomaka prema izrazima (3-41) – (3-52), uzimajući u obzir da je brzina kretanja bloka promjenjiva, smanjuje se pogreška prilikom procjene vektora pomaka u odnosu na linearnu procjenu pokreta uz pretpostavku stalne brzine kretanja.

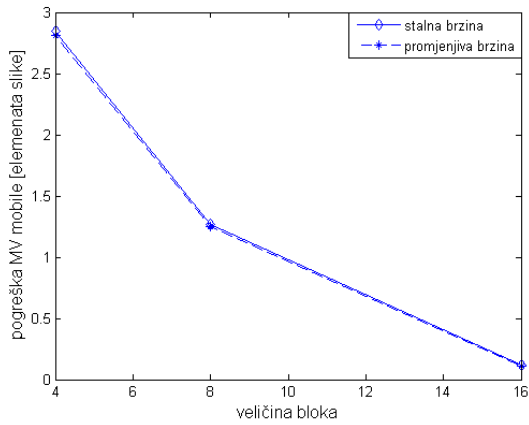
U svrhu analize pogreške procjene MV odabrane su po 4 interpolirane slike iz svakog od testiranih sadržaja (2., 4., 14. i 16. slika). Vremenska aktivnost i srednja vrijednost duljine vektora pomaka po slikama prikazani su u Tablici 3.3. Procjena vektora pomaka provedena je za tri veličine bloka: 16x16, 8x8 i 4x4 elementa slike za područje pretraživanja 32 elementa slike.

Tablica 3.3. TI_{mean} i prosječna duljina MV odabranih slika

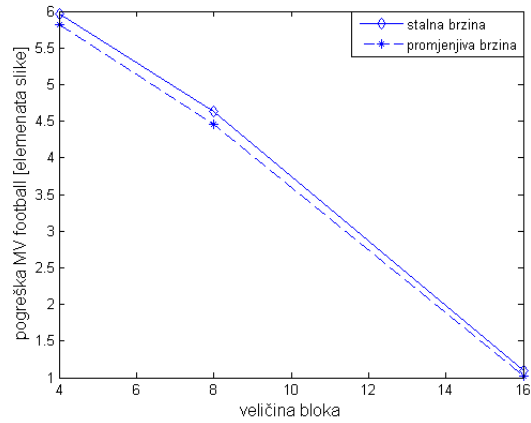
<i>mobile</i>				<i>football</i>				<i>foreman</i>			
TI_{mean}	$ MV _{16}$ <i>x16</i>	$ MV _{8x}$ <i>8</i>	$ MV _{4x}$ <i>4</i>	TI_{mean}	$ MV _{16x}$ <i>16</i>	$ MV _{8x}$ <i>8</i>	$ MV _{4x}$ <i>4</i>	TI_{mean}	$ MV _{16x1}$ <i>6</i>	$ MV _{8x}$ <i>8</i>	$ MV _{4x}$ <i>4</i>
39,83	0,6474	1,5316	2,8597	33,08	1,1593	2,4294	3,0397	16,76	2,2587	3,5869	4,7870
38,69	0,6459	1,4523	2,6961	35,52	1,5003	3,0944	3,5496	15,51	2,0672	3,1983	4,1899
40,29	0,7100	1,7868	2,8811	41,19	3,0540	5,9282	6,7304	21,63	2,2083	3,4609	5,0901
40,52	0,7392	1,6494	2,8272	41,16	3,6715	6,4447	8,4108	20,73	2,0561	3,1403	4,6667
Srednja vrijednost	0,6856	1,6050	2,8160	Srednja vrijednost	2,3463	4,4741	5,4327	Srednja vrijednost	2,1476	3,3466	4,6834
<i>news</i>				<i>container</i>				<i>prosječna vrijednost za sve sekvence</i>			
TI_{mean}	$ MV _{16}$ <i>x16</i>	$ MV _{8x}$ <i>8</i>	$ MV _{4x}$ <i>4</i>	TI_{mean}	$ MV _{16x}$ <i>16</i>	$ MV _{8x}$ <i>8</i>	$ MV _{4x}$ <i>4</i>	TI_{mean}	$ MV _{16x1}$ <i>6</i>	$ MV _{8x}$ <i>8</i>	$ MV _{4x}$ <i>4</i>
9,07	0,0903	0,5041	1,1011	5,83	0,1255	0,7997	1,3169	20,91	0,8562	1,7703	2,6209
6,01	0,0125	0,3675	0,8199	5,02	0,1368	0,6988	1,3268	20,15	0,8725	1,7623	2,5165
5,06	0,0849	0,4800	1,1692	5,34	0,1453	0,8372	1,4190	22,70	1,2405	2,4986	3,4580
7,95	0,0915	0,5761	1,1247	5,59	0,1465	0,7058	1,4059	23,19	1,3410	2,5033	3,6871
Srednja vrijednost	0,0698	0,4819	1,0537	Srednja vrijednost	0,1685	0,7604	1,3672	Srednja vrijednost	1,0776	2,1336	3,0706

Vremenska aktivnost izračunata je između slika iz sekvence s 12.5 slika u sekundi dok su vektori pomaka određeni između istih tih slika i originalnih slika koje se nalaze između njih u sekvenci s 25 slika u sekundi. Za sve sadržaje može se zaključiti da se prosječna duljina vektora pomaka povećava sa smanjenjem veličine bloka. Jedan od razloga tome leži u činjenici da je veća vjerojatnost pogrešne detekcije odgovarajućeg bloka manje veličine (4x4 elementa) nego odgovarajućeg bloka veće veličine (16x16 elemenata slike).

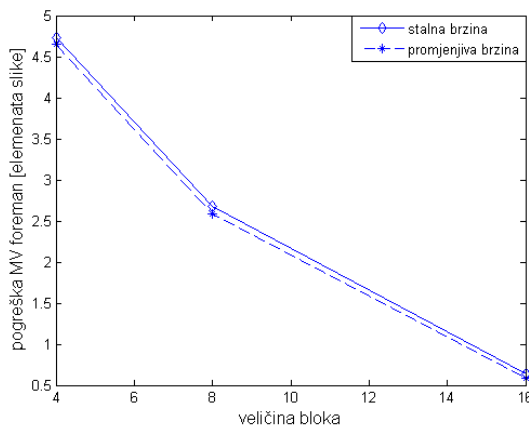
S vektorima pomaka koji su određeni iz originalne sekvence s izmjenom 25 slika u sekundi uspoređeni su odgovarajući vektori pomaka iz poduzorkovane sekvence s 12.5 slika u sekundi određeni na temelju linearne procjene pokreta s konstantnom i promjenjivom brzinom gibanja, uz preciznost procjene na razini elementa slike. Na Slici 3.12. prikazane su prosječne pogreške vektora pomaka dobivenih linearnim predviđanjem uz stalnu i promjenjivu brzinu kretanja blokova za tri različite veličine bloka, 4x4, 8x8 i 16x16 elemenata slike uz logaritamsko pretraživanje područja pretrage veličine 32 elementa slike. Može se zaključiti da su pogreške općenito najveće za sekvence *football* i *foreman*, koje imaju najveće vrijednosti vektora pomaka. Također valja primijetiti da je pogreška predviđanja uz promjenjivu brzinu kretanja za svaki sadržaj pojedinačno, a onda i za sve sadržaje zajedno, nešto manja od pogreške predviđanja uz pretpostavljenu stalnu brzinu kretanja. Valja naglasiti da pogreška procjene, neovisno o načinu predviđanja MV, opada s porastom veličine bloka. Razlog tome je činjenica da je veća vjerojatnost pogrešnog pronalaska sličnog područja ako je područje manje veličine. Suprotno u odnosu na procjenu pokreta u postupku kodiranja, gdje se smanjenjem veličine bloka smanjuje pogreška u procjeni vektora pomaka, u postupku interpolacije se smanjenjem veličine bloka povećava pogreška procjene vektora pomaka. Slika 3.12. ukazuje da srednja pogreška vektora pomaka u slučaju podjele na blokove veličine 16x16 elemenata slike za svaki sadržaj pojedinačno (osim *football*) i za sve sadržaje zajedno poprima vrijednosti do prihvatljivih 0.5 elemenata slike, neovisno o tome radi li se predviđanje uz stalnu ili promjenjivu brzinu kretanja. Uzimajući u obzir povećanje složenosti algoritma do kojeg dolazi smanjenjem veličine bloka, može se zaključiti da je i sa stajališta složenosti i sa stajališta preciznosti procjene vektora pomaka, podjela slike na blokove veličine 16x16 elemenata slike optimalno rješenje.



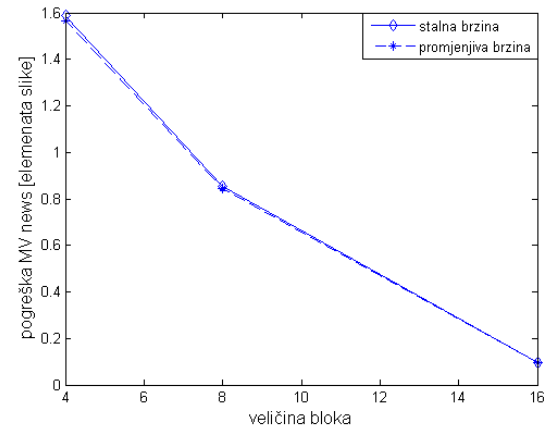
(a)



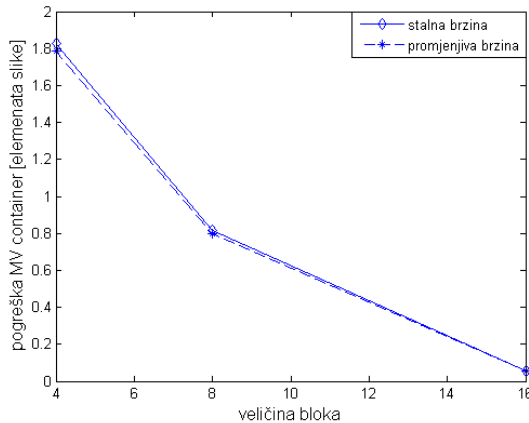
(b)



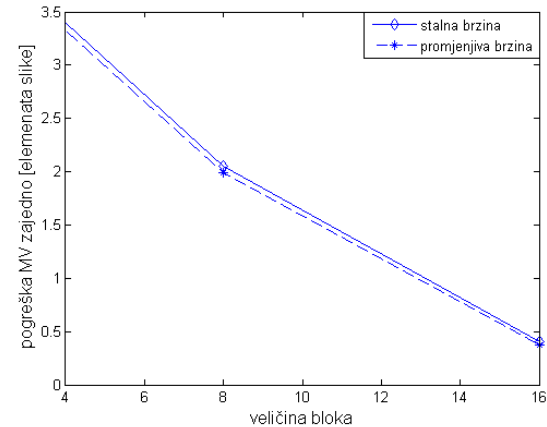
(c)



(d)



(e)

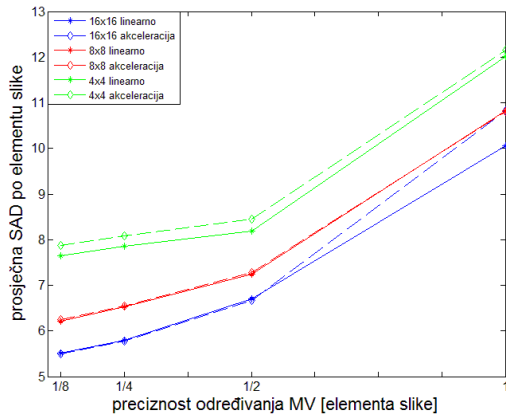


(f)

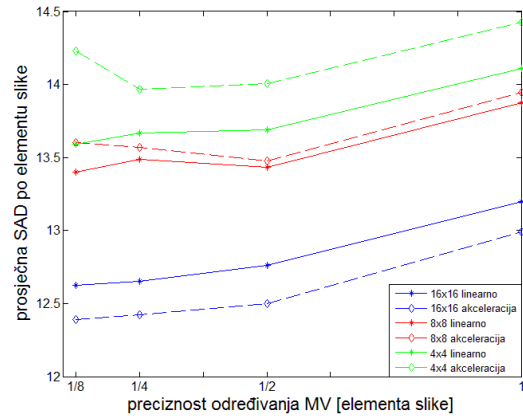
Slika 3.12. Srednja pogreška proračuna MV linearnim predviđanjem uz stalnu i promjenjivu brzinu kretanja a)mobile b)football c)foreman d)news e)container f)svi sadržaji

Također valja primijetiti i da razlika u pogrešci prilikom procjene korištenjem stalne i promjenjive brzine kretanja nije značajna, a složenost algoritma i potrebni memorijski resursi rastu u slučaju korištenja promjenjive brzine kretanja.

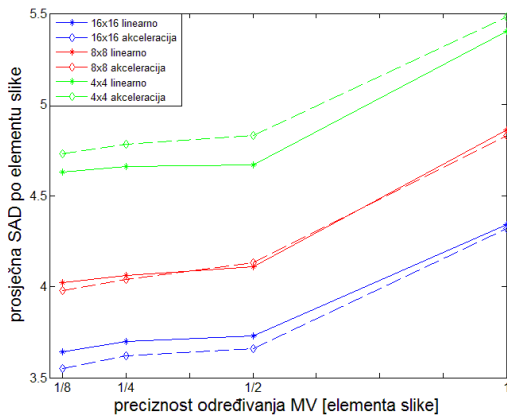
Osim utjecaja veličine bloka na pogrešku procjene MV analiziran je i utjecaj veličine bloka te razine preciznosti procjene MV na pogrešku interpolacije koja nastaje isključivo pomicanjem blokova originalne slike za odgovarajuće vrijednosti vektora pomaka. Blokovi iz originalne slike pomaknuti su za vrijednosti njima pridruženih vektora pomaka kako bi se kreirala interpolirana slika. Tako pomaknuti blokovi uspoređeni su s blokovima na odgovarajućim pozicijama unutar originalne slike koja se želi kreirati interpolacijom. Određena je MSE i SAD svakog pomaknutog bloka u odnosu na odgovarajući blok u originalnoj slici, ne uzimajući u obzir područja šupljina koja nastaju u interpoliranoj slici. Na taj se način analizira pogreška nastala isključivo pomicanjem blokova, odnosno zbog pogreške prilikom procjene vektora pomaka. Izračunata je SAD za svaki blok pojedinačno, a na grafovima je prikazana prosječna apsolutna razlika po elementu slike. Analiza je provedena za slike iz Tablice 3.3. uz tri različite veličine bloka (16x16, 8x8 i 4x4 elementa slike) i četiri različite razine preciznosti procjene MV (procjena na razini cijelog elementa slike, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ i $\frac{1}{8}$ elemenata slike). Rezultati provedenih analiza prikazani su na Slici 3.13. i Slici 3.14. Na Slici 3.13. a)-f) vidi se da je SAD za svaki sadržaj pojedinačno, ali i za sve sadržaje zajedno, najmanja za procjenu pokreta uz blokove veličine 16x16 elemenata slike. Proračun pokreta uz promjenjivu brzinu kretanja smanjuje pogrešku samo za podjelu na blokove veličine 16x16 elemenata slike, dok je za preostale dvije podjele pogreška korištenjem promjenjive brzine čak veća nego pogreška korištenjem konstantne brzine kretanja. Općenito, može se zaključiti da SAD raste s porastom vremenske aktivnosti sadržaja, bez obzira na veličinu bloka i razinu preciznosti. Ta činjenica u skladu je s prethodnim analizama koje su pokazale da veća vremenska aktivnost sadržaja upućuje na veće duljine vektora pomaka, a s većom duljinom vektora pomaka dolazi i do veće pogreške u procjeni, što u konačnici vodi ka većoj pogrešci nakon premještanja blokova. Povećanjem preciznosti kod proračuna MV s 1 na $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ i $\frac{1}{8}$ elementa slike smanjuje se i vrijednost SAD po elementu slike. Međutim, interpolacija slike u tom slučaju je osjetno složenija jer je sliku potrebno proširiti i nakon interpolacije smanjiti na originalnu veličinu. Osim SAD za svaki pomaknuti blok, izračunata je MSE za svaki blok pomaknute slike uz tri različite veličine bloka i četiri različite razine preciznosti. Rezultati navode na iste zaključke kao i kod SAD.



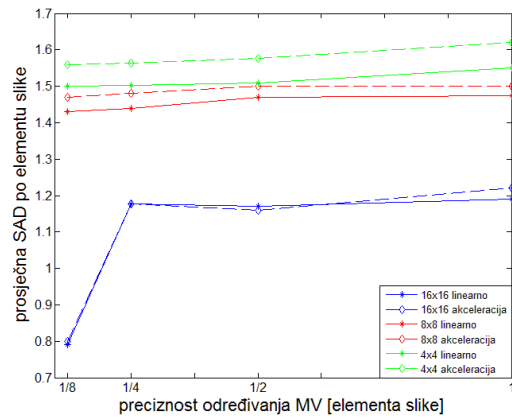
(a)



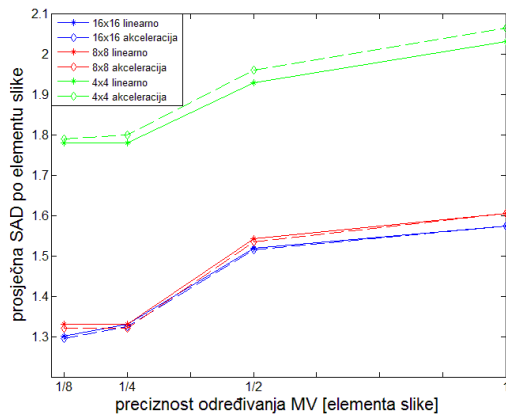
(b)



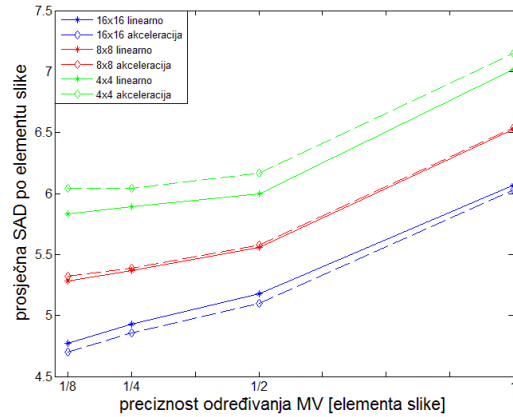
(c)



(d)



(e)

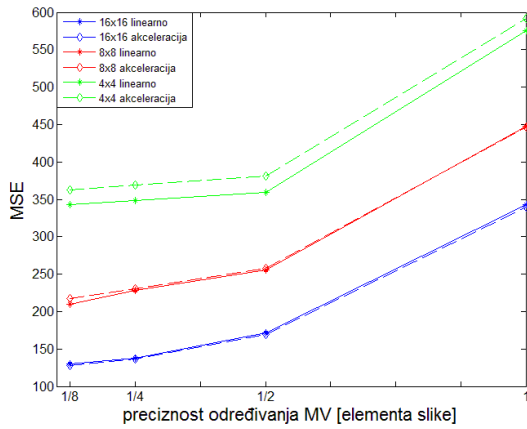


(f)

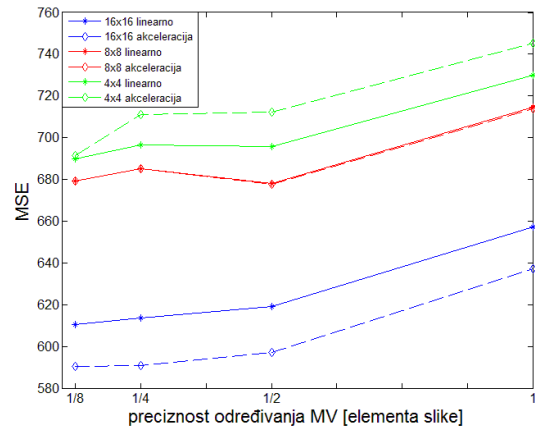
Slika 3.13. Ovisnost SAD o razini preciznosti procjene MV i veličini bloka prilikom procjene MV za sadržaj a)mobile b)football c)foreman d)news e)container f)svi sadržaji

MSE opada s porastom veličine bloka za svaki sadržaj pojedinačno, a samim time i za sve sadržaje zajedno. Razlog tome može se pronaći u rezultatima prethodnih analiza u kojima je utvrđeno da je pogreška prilikom procjene MV veća za blokove manje veličine jer je lakše pogrešno detektirati odgovarajuće područje manje nego veće veličine, a preciznost procjene MV uvelike utječe na pogrešku prilikom interpolacije slike. Procjena MV uz promjenjivu brzinu kretanja blago smanjuje MSE kod podjele na blokove veličine 16x16 elemenata slike, kod podjele na blokove 8x8 MSE je podjednaka za oba načina proračuna MV, dok je za blokove 4x4 elementa slike MSE veća kod procjene s promjenjivom brzinom kretanja. U slučaju korištenja promjenjive brzine kretanja, potrebno je u svakom trenutku koristiti informacije o najmanje tri uzastopne originalne slike, računati brzine i akceleracije svakog pojedinog bloka i na temelju toga odrediti vektore pomaka. Analiza je pokazala da takav način proračuna MV može poboljšati preciznost procjene, ali je i složenost takvog načina procjene osjetno veća. Kao i SAD, MSE za sve sadržaje pojedinačno i zajedno raste kako se smanjuje razina preciznosti procjene MV te je MSE najveća za procjenu MV na razini cijelog elementa slike. Također, valja naglasiti da je prilikom pomicanja blokova u slučaju korištenja razine preciznosti manje od elementa slike potrebno najprije prostornom interpolacijom proširiti sliku, a nakon pomicanja i smanjiti na originalnu veličinu, što u konačnici vodi ka povećanju složenosti postupka, a osim toga unosi i određenu pogrešku zbog proširenja i smanjenja slike. Općenito, može se reći da je MSE veća za sadržaje s većom vremenskom aktivnošću, što je u skladu s prethodnim analizama koje ukazuju na veće vrijednosti MV u slučajevima veće vremenske aktivnosti. Pokazalo se da je kod većih vrijednosti MV veća i pogreška prilikom procjene MV, a samim time veća je i srednja kvadratna pogreška prilikom pomicanja blokova. Može se zaključiti da i SAD i MSE rastu s porastom vremenske aktivnosti sadržaja, sa smanjenjem veličine bloka i sa smanjenjem razine preciznosti prilikom procjene MV.

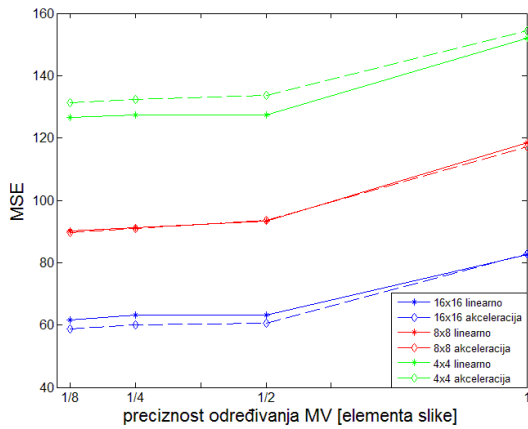
U okviru analize utjecaja veličine bloka na pogrešku prilikom interpolacije slike također treba reći da manja veličina bloka u konačnici dovodi do pojave većeg broja preklapanja, a samim time i šupljina, koje je kasnije potrebno adekvatno nadomjestiti. Bez obzira kakav način popunjavanja šupljina bio, uvijek se, u manjoj ili većoj mjeri, narušava kvaliteta interpolirane slike.



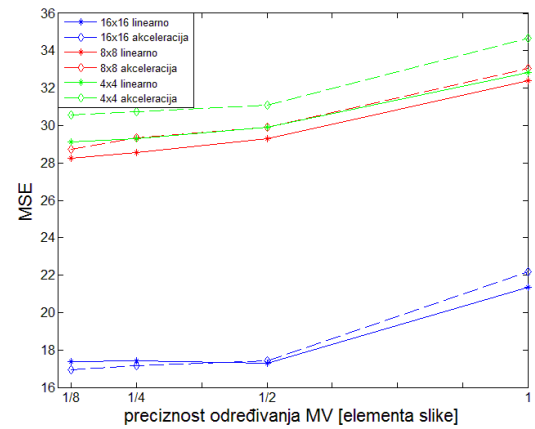
(a)



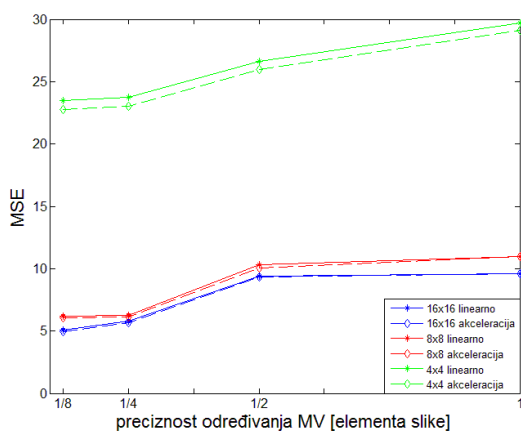
(b)



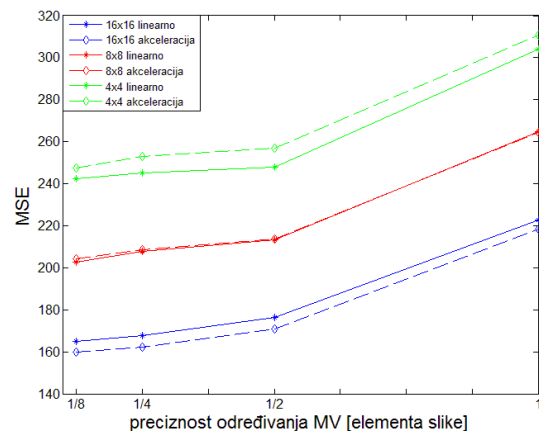
(c)



(d)



(e)



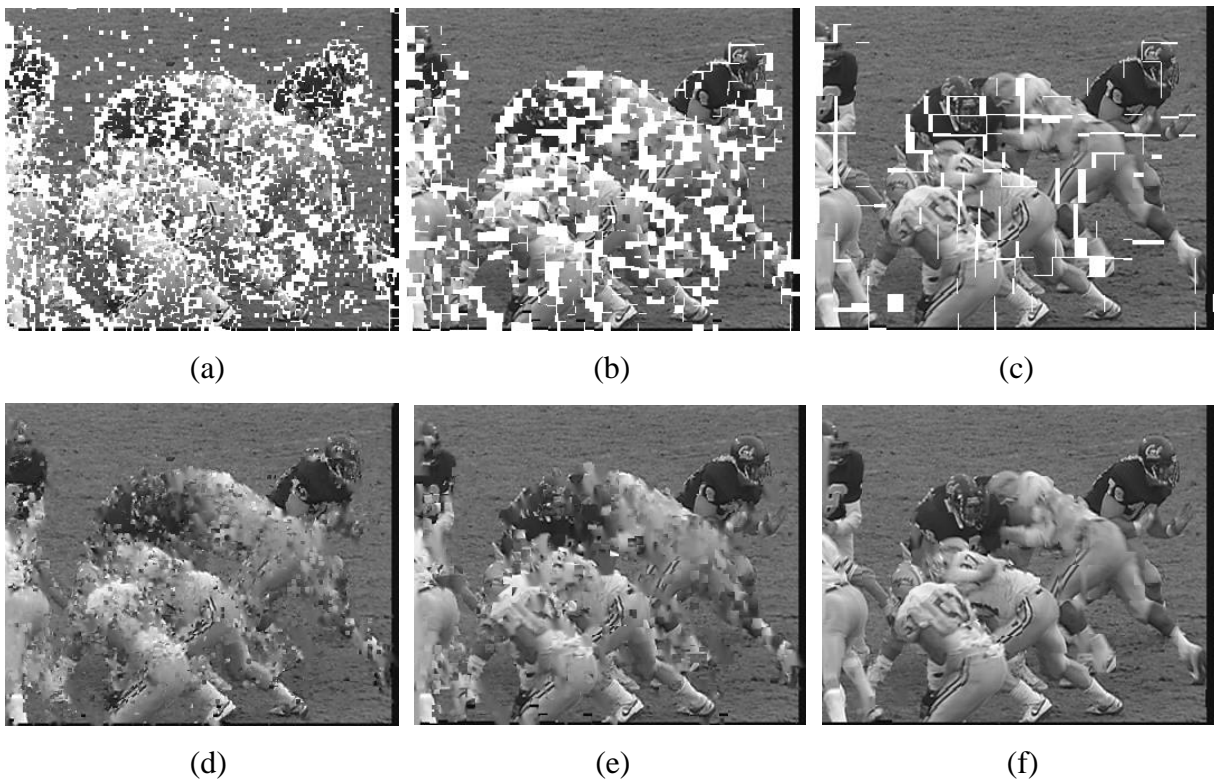
(f)

Slika 3.14. Ovisnost MSE o razini preciznosti procjene MV i veličini bloka prilikom procjene MV za sadržaj a) *mobile* b) *football* c) *foreman* d) *news* e) *container* f) svi sadržaji

Na Slici 3.15. prikazana je originalna 15. slika iz sekvence *football*, a na Slici 3.16. interpolirana 15. slika dobivena pomicanjem blokova različitih veličina za vektore pomaka određene s razinom preciznosti jednog elementa slike prije i poslije prostornog popunjavanja šupljina. Na Slici 3.16. a)-c) može se primijetiti da je područje šupljina kod najmanje veličine bloka vrlo gusto te se određeni broj šupljina pojavljuje i u gornjem mirnom dijelu slike, dok za preostale dvije veličine bloka u tom dijelu šupljina nema. Razlog tome je što je vrlo lako moguće pogrešno detektirati odgovarajući blok manje veličine i na taj način pogrešno procijeniti MV, što u konačnici vodi do pojave šupljina i na mjestima gdje ih ne bi trebalo biti. U slučaju podjele na blokove veličine 8x8 elemenata slike, područja šupljina još su uvijek relativno gusta, ali ih je osjetno manje nego u slučaju podjele na blokove veličine 4x4 elemenata slike. Osim toga, u mirnim dijelovima slike uz ovakvu podjelu nema područja šupljina. Kod podjele na blokove veličine 16x16 elemenata slike može se primijetiti da ima najmanje područja šupljina te se slika i bez popunjavanja tih dijelova donekle može prepoznati. Također treba reći da kod ovakve podjele u mirnim dijelovima slike šupljina nema. To je još jedna potvrda činjenice da je u slučaju veće veličine bloka veća vjerojatnost točne detekcije odgovarajućeg bloka prilikom procjene pokreta, a samim time i određivanje pouzdanijeg MV, što u konačnici vodi ka većoj kvaliteti interpolirane slike. Na Slici 3.16. d) - f) prikazane su slike s pomaknutim blokovima nakon popunjavanja šupljina prostorno, koristeći vrijednosti okolnih elemenata slike koji nisu šupljine. Očito je vizualna kvaliteta najslabija u slučaju podjele na blokove veličine 4x4 elemenata slike, a najbolja u slučaju podjele na blokove veličine 16x16 elemenata slike. Razlog tome je što je šupljine kod podjele na blokove male veličine puno teže adekvatno nadomjestiti budući da su područja šupljina vrlo gusta pa je lako moguće da su oko jednog područja šupljina nalaze i druga područja šupljina te je zapravo vrlo teško pronaći susjedne elemente koji nisu šupljine kako bi se područje šupljina adekvatno nadomjestilo. To u konačnici rezultira zamućenjem u područjima šupljina, a kako je takvih područja u slučaju podjele na blokove veće veličine puno manje nego u slučaju podjele na blokove manje veličine, tako će i vizualna kvaliteta interpolirane slike u slučaju podjele na veće blokove biti bolja.



Slika 3.15. Originalna 15. slika iz sekvence *football*



Slika 3.16. Interpolirana 15. slika iz sekvence *football* bez popunjavanja šupljina za veličine bloka a)4x4 elementa slike b)8x8 elemenata slike c)16x16 elemenata slike i nakon prostornog popunjavanja šupljina za veličine bloka d)4x4 elementa slike e)8x8 elemenata slike f)16x16 elemenata slike

Na temelju rezultata provedenih analiza najbolji kompromis između složenosti algoritma i pogreške prilikom premještanja blokova ostvaruje se korištenjem veličine bloka 16x16 elemenata slike s preciznošću na razini jednog elementa slike i konstantnom brzinom kretanja. Svi ti parametri vode ka prihvatljivoj razini pogreške uz relativno nisku razinu složenosti algoritma.

3.6. Utjecaj prostorno-vremenske aktivnosti sadržaja na pogrešku prilikom interpolacije

Osim utjecaja prostorno-vremenske aktivnosti sadržaja na vektore pomaka provedena je i analiza utjecaja vremenske aktivnosti sadržaja na pogrešku prilikom interpolacije slike. U ispitivanjima je korišteno pet sekvenci s različitom vremenskom aktivnošću: *mobile*, *football*, *foreman*, *news* i *container*. Vremenska aktivnost pojedine sekvence prikazana je Tablicom 3.1. Sekvence *mobile*, *foreman* i *container* imaju 300 slika dok sekvenca *football* ima 260, a sekvenca *news* 90 slika. Unutar provedenih istraživanja navedenim sadržajima najprije je smanjena vremenska rezolucija na način da su zadržane sve neparne, a izbačene sve parne slike te je tako broj slika unutar svake sekvence prepolovljen. Nakon smanjenja vremenske rezolucije provedena je interpolacija izbačenih slika korištenjem različitih metoda. Jedna od metoda je FA [5] koja koristi isključivo prostorne značajke i interpolira sliku na temelju srednjih vrijednosti elemenata na istim pozicijama unutar prethodne i sljedeće slike kao što je prikazano izrazom (2-2), uz vrijednost $\alpha=0.5$. Ostale metode uključivale su interpolaciju slike zasnovanu na procjeni pokreta (engl. *Motion Compensated Frame Interpolation* - MCFI), što osim prostornih uključuje i vremenske značajke video sekvence. U spomenutim metodama napravljena je jednosmjerna procjena pokreta na razini manjoj od elementa slike predložena u [91]. Korištena je veličina bloka 16x16 elemenata slike uz logaritamsko pretraživanje područja, dok je parametar veličine područja pretrage postavljen na 32 elementa slike. Napravljena je odvojena procjena pokreta unaprijed i unatrag između svake dvije slike što je rezultiralo dvama poljima pokreta. Na temelju procjene pokreta blokovi originalnih slika, prethodne i sljedeće, pomaknuti su za iznose odgovarajućih vektora pomaka dobivenih procjenom unaprijed i unatrag. Šupljine u interpoliranoj slici, koje nastaju zbog toga što susjedni blokovi originalnih slika nemaju jednake vektore pomaka, popunjene su korištenjem srednje vrijednosti susjednih elemenata interpolirane slike. Na taj način dobiju se dva

prediktora interpolirane slike, prediktor dobiven interpolacijom na temelju procjene pokreta unaprijed i prediktor dobiven interpolacijom na temelju procjene pokreta unatrag prema izrazima (3-53) i (3-54)

$$F_t^f(x, y) = F_{t-1}(x + MV_x^f, y + MV_y^f), \quad (3-53)$$

$$F_t^f(x, y) = F_{t+1}(x + MV_x^b, y + MV_y^b), \quad (3-54)$$

gdje F_{t-1} i F_{t+1} redom predstavljaju prethodnu i sljedeću sliku, MV_x^f i MV_y^f komponente vektora pomaka dobivenih predviđanjem unaprijed, a MV_x^b i MV_y^b komponente vektora pomaka određenih predviđanjem unatrag. Srednjom vrijednošću dva navedena prediktora dobiven je prediktor koji uzima u obzir prethodnu i sljedeću sliku kao i polja pokreta predviđena unaprijed i unatrag

$$F_t(x, y) = 0.5(F_t^f(x, y) + F_t^b(x, y)). \quad (3-55)$$

Metoda koja koristi prethodnu sliku i procjenu pokreta unaprijed označena je kao MCFI-FW dok je metoda koja koristi sljedeću sliku i procjenu pokreta unatrag označena kao MCFI-BW, a metoda koja koristi kombinaciju tih slika označena je kao MCFI-FWiBW. U okviru analize utjecaja vremenskih značajki na pogrešku prilikom interpolacije napravljena je usporedba parnih slika iz originalnih sekvenci i prediktora dobivenih korištenjem spomenute četiri metode. Za svaki od prediktora izračunata je srednja kvadratna pogreška (engl. *Mean Squared Error* - MSE) prema sljedećem izrazu

$$MSE = \frac{1}{X * Y} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y [F_t^o(x, y) - F_t^p(x, y)]^2, \quad (3-56)$$

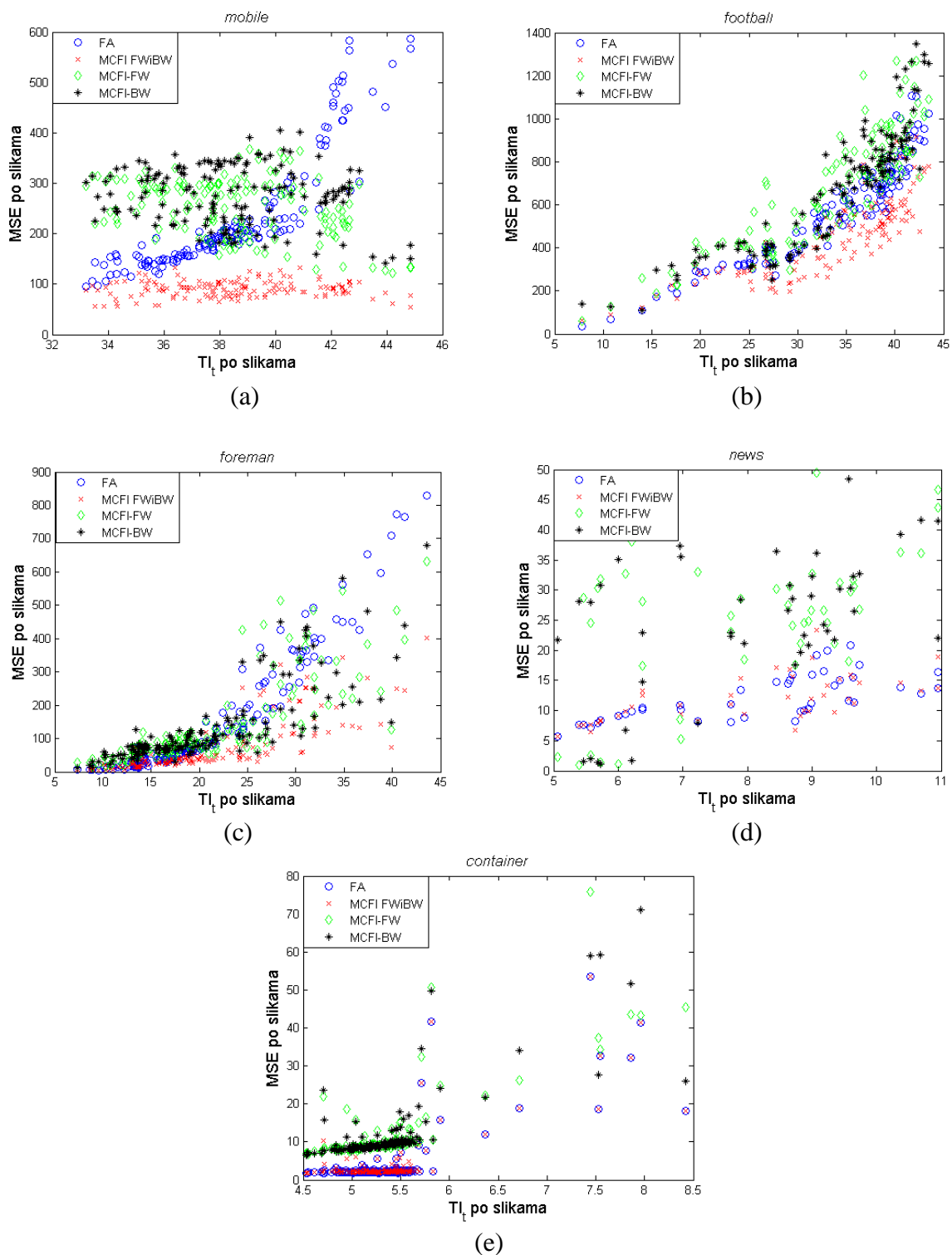
gdje su X i Y broj redaka odnosno stupaca unutar slike, F_t^o parna slika iz originalne sekvence, a F_t^p slika interpolirana nekom od metoda. Na Slici 3.18. a) – e) prikazana je ovisnost srednje kvadratne pogreške o vrijednosti TI_t za slike interpolirane svakom od četiri opisane metode za svaku sekvencu. Iz prikazanih slika jasno se vidi da je u slučaju male vremenske aktivnosti

srednja kvadratna pogreška mala za svaku od interpoliranih slika. To govori u prilog činjenici da je lakše ostvariti zadovoljavajuću kvalitetu interpolirane slike za mirnije sadržaje i da se u slučaju male vremenske aktivnosti ona može postići jednostavnom metodom interpolacije kao što je korištenje srednje vrijednosti prethodne i sljedeće slike.

Vidljivo je da za metodu koja koristi isključivo prostorne značajke za interpolaciju slike s porastom vremenske aktivnosti sekvence MSE raste kod svih ispitanih sadržaja. Porast je posebno naglašen kod visokih vrijednosti TI_t , što se jasno pokazuje na Slici 3.17. a)-c). Kod mirnijih sadržaja (*news i container*) porast MSE s porastom vremenske aktivnosti je također uočljiv, iako, zbog raspona vrijednosti unutar kojih se nalazi TI_t , nije tako naglašen kao kod preostalih sekvenci. Ovakvi su rezultati očekivani jer je i u prethodnim razmatranjima, gdje je promatrana ovisnost prosječne duljine vektora pomaka o vremenskoj aktivnosti sadržaja, utvrđeno da duljine vektora pomaka rastu s porastom vrijednosti TI_t . Povećane duljine vektora pomaka ukazuju na naglašeni pokret između dvije originalne slike, a kako spomenuta metoda interpolacije uopće ne uzima u obzir pokrete unutar scene, već samo prostorne značajke, jasno je da će u slučajevima povećane vremenske aktivnosti srednja kvadratna pogreška biti osjetno veća.

Slike interpolirane MCFI-FW i MCFI-BW metodama ostvaruju slične vrijednosti srednje kvadratne pogreške po sadržajima. Jasno je da je MSE svake od tih slika u pravilu veća nego MSE slike dobivene njihovom kombinacijom. Može se vidjeti da je MSE slike dobivene korištenjem samo prostornih značajki vrlo često manja od MSE slike interpolirane MCFI-FW i MCFI-BW metodom, iako je algoritam složeniji nego kod interpolacije FA metodom jer se radi procjena pokreta i interpolacija slike na temelju procjene pokreta. Razloge za takve rezultate treba tražiti u činjenici da se prilikom interpolacije slike korištenjem jednog od tih prediktora koriste elementi samo jedne od originalnih slika (prethodne ili sljedeće). Iako se vektori pomaka računaju na temelju razlike pozicija najbližijih blokova unutar prethodne i sljedeće slike, u interpoliranoj slici nalaze se blokovi samo jedne od tih slika, pomaknuti za odgovarajuće vektore pomaka. U slučaju da se između dviju originalnih slika pojavio objekt koji u jednoj od njih nije bio unutar scene, takav se objekt često ne može prikazati korištenjem elemenata samo jedne slike. Iako FA metoda uopće ne uzima u obzir kretanje objekata, MSE slike interpolirane tom metodom često je manja od MSE slike interpolirane korištenjem

MCFI-FW i MCFI-BW metoda. Porastom vremenske aktivnosti razlika u pogrešci se smanjuje jer performanse algoritma za interpolaciju slike korištenjem samo prostornih značajki opadaju.

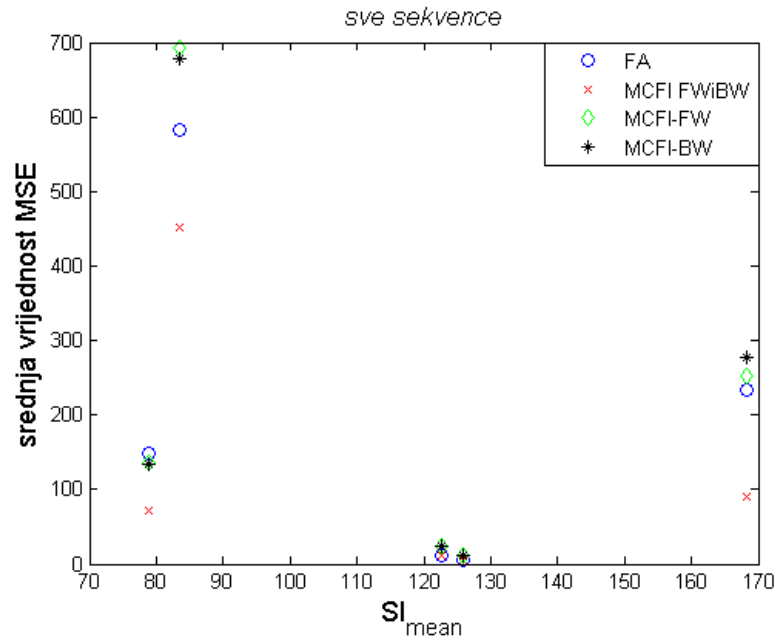


Slika 3.17. Ovisnost srednje kvadratne pogreške prilikom interpolacije o TI_t za sekvence a)mobile b)football c)foreman d)news e)container

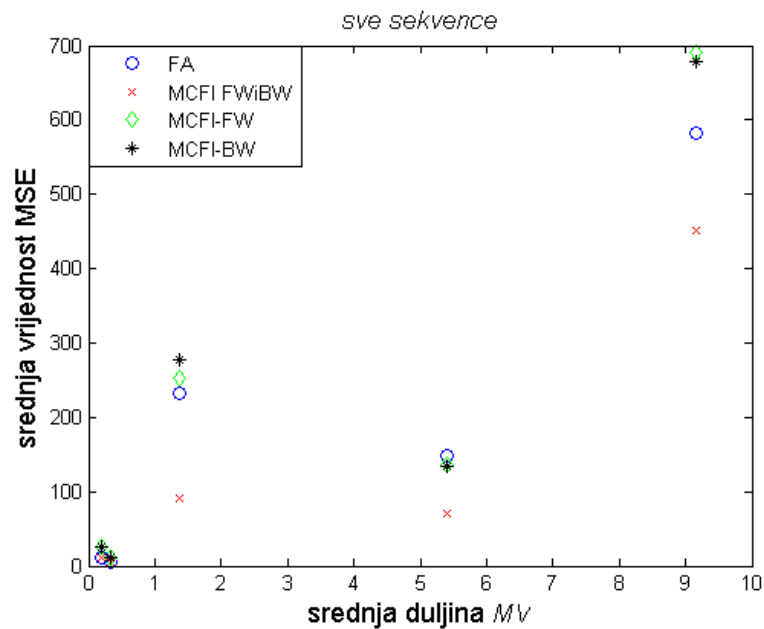
Sukladno očekivanjima, najmanja srednja kvadratna pogreška za svaki od sadržaja ostvarena je interpolacijom slike MCFI FWiBW metodom. Međutim, za male vrijednosti vremenske aktivnosti razlike u odnosu na FA metodu gotovo su zanemarive, jer i ta metoda za niske vrijednosti TI_t ostvaruje vrlo malu MSE (Slika 3.17. d) i e)). Međutim, kako TI_{mean} raste tako se i razlika MSE slika interpoliranih ovim dvama metodama povećava te je posebno izražena kod najvećih vrijednosti vremenske aktivnosti što se vidi na Slici 3.17. a)-c). Budući da FA metoda ne uzima u obzir pokrete objekata, jasno je da je MSE prilikom interpolacije slika gdje je vremenska aktivnost sadržaja velika osjetno veća nego prilikom interpolacije korištenjem MCFI FWiBW metode. Ipak, valja naglasiti da je smanjenje pogreške primjenom MCFI FWiBW metode ostvareno uz značajno povećanje složenosti postupka, jer se osim odvojene procjene pokreta unaprijed i unatrag radi i odvojena interpolacija kompenzacijom pokreta te se koristi srednja vrijednost dva prediktora. Sukladno očekivanom, srednja vrijednost dva prediktora dobivena korištenjem prethodne ili sljedeće slike i pripadnih vektora pomaka ostvaruje manju MSE nego svaki od tih prediktora pojedinačno. Također valja naglasiti da je i složenost postupka interpolacije korištenjem dva prediktora veća nego u slučaju korištenja jednog prediktora jer se i procjena pokreta i interpolacija na temelju procjene pokreta radi dva puta umjesto jednom.

Osim utjecaja vremenske aktivnosti na srednju kvadratnu pogrešku prilikom interpolacije analiziran je i utjecaj prostorne aktivnosti. Kao što je vidljivo na Slici 3.18., sama prostorna aktivnost sadržaja nema značajan utjecaj na vrijednost srednje kvadratne pogreške, ali velika vrijednost prostorne aktivnosti uzrokuje veliku vrijednost vremenske aktivnosti kod pomaka kamere čak i ako pokret između dvije uzastopne slike nije velik.

Također je analiziran utjecaj prosječne duljine vektora pomaka na srednju kvadratnu pogrešku prilikom interpolacije slike. Na Slici 3.19. vidljivo je da s porastom prosječne duljine vektora pomaka raste i srednja kvadratna pogreška. Takav rezultat je očekivan jer veće vrijednosti vektora pomaka upućuju na brži pokret kojega je teže adekvatno kompenzirati. Također valja primijetiti da porastom prosječne duljine vektora pomaka raste razlika srednje kvadratne pogreške slike interpolirane MCFI FWiBW metodom i ostalim metodama. Razlog tome je što navedena metoda najbolje procjenjuje pokret i koristi tu procjenu prilikom interpolacije slike.



Slika 3.18. Ovisnost prosječne vrijednosti MSE o prosječnoj vrijednosti SI_{mean} za sve sadržaje



Slika 3.19. Ovisnost prosječne vrijednosti MSE o prosječnoj duljini vektora pomaka za sve sadržaje

Iznimka u okvirima rezultata ove analize je sekvenca *mobile* kod koje je prosječna duljina vektora pomaka približno 1.4, a srednja kvadratna pogreška prilikom interpolacije za istu

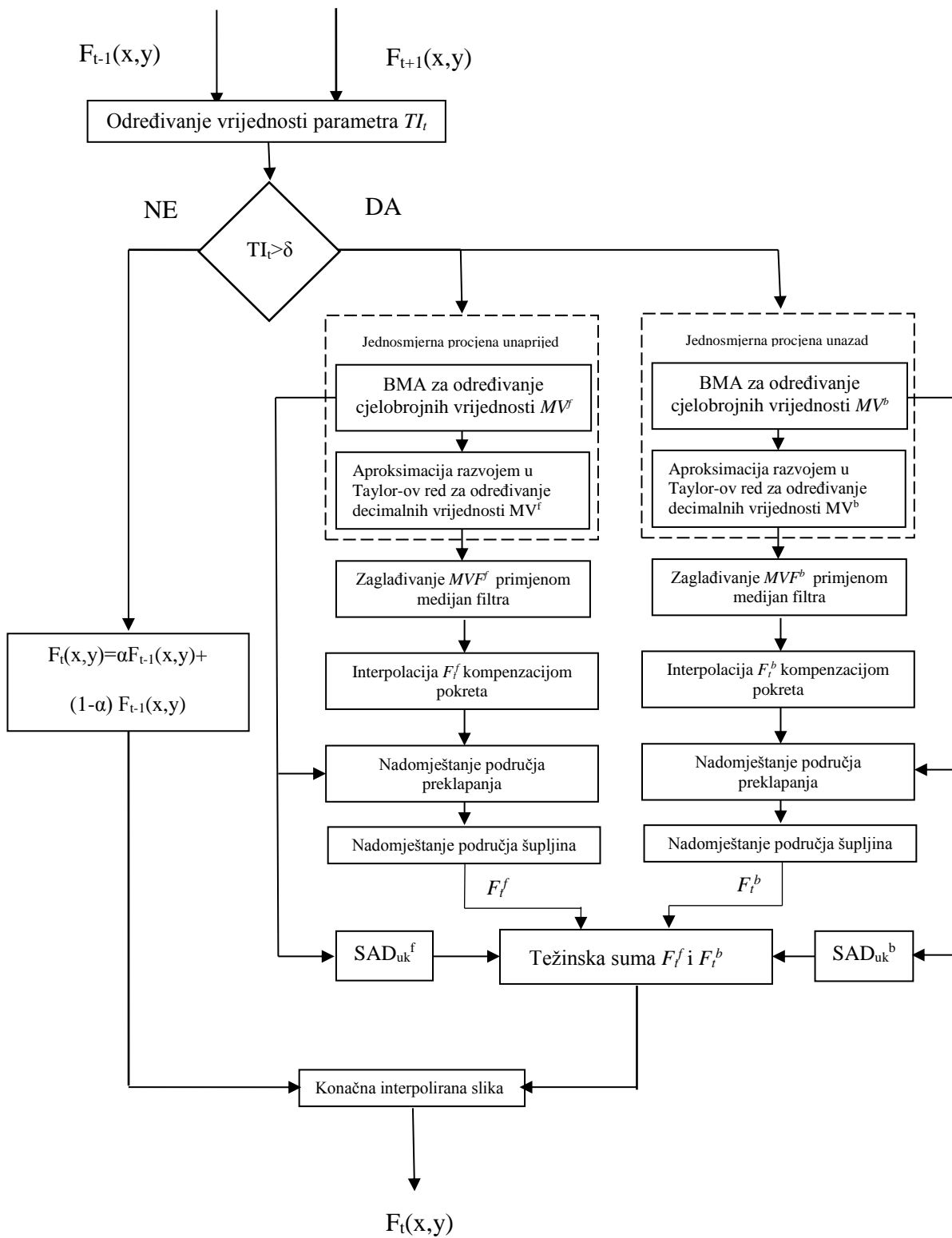
sekvencu je visoka. To se može objasniti činjenicom da navedena sekvenca ima vrlo veliku vremensku i prostornu aktivnost te je, unatoč malim vrijednostima duljina vektora pomaka, teško precizno interpolirati sliku. Provedene analize navode na zaključak da, za razliku od prostorne aktivnosti, vremenska aktivnost ima značajan utjecaj na srednju kvadratnu pogrešku prilikom interpolacije. Porastom vremenske aktivnosti rastu i prosječne duljine vektora pomaka kao i vrijednosti MSE interpoliranih slika. Takvi su rezultati očekivani jer velika vremenska aktivnost upućuje na veliku promjenu između dvije slike i zbog toga je teže precizno predvidjeti sliku koja se interpolira.

Iz provedene analize može se zaključiti da je srednja kvadratna pogreška interpolirane slike u pravilu manja ako se koriste elementi i prethodne i sljedeće slike nego ako se koriste elementi samo jedne od tih slika, bez obzira uzima li se u obzir pokret objekata unutar scene ili ne. Za male vrijednosti vremenske aktivnosti razlika srednje kvadratne pogreške metode koja uzima i metode koja ne uzima u obzir pokrete osjetno se smanjuje što govori u prilog činjenici da je u tim slučajevima kvaliteta slika interpoliranih tim metodama približno jednaka uz značajnu razliku u složenosti metoda. Sukladno provedenim analizama, u okviru ove disertacije predložen je novi algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika zasnovan na prostorno-vremenskim značajkama videosignala koji uključuje težinsku kompenzaciju pokreta za dijelove sekvence s većom vremenskom aktivnošću, dok u dijelovima sekvence s malom vremenskom aktivnošću koristi jednostavni postupak interpolacije usrednjavanjem.

4. NOVI ALGORITAM ZA ADAPTIVNU VREMENSKU INTERPOLACIJU SLIKA ZASNOVAN NA PROSTORNO-VREMENSKIM ZNAČAJKAMA VIDEOSIGNALA

Na osnovu provedene sustavne analize utjecaja prostorno-vremenskih značajki videosekvence na vektore pomaka i pogrešku prilikom interpolacije slike, u okviru ove disertacije predlaže se novi algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika zasnovan na prostorno-vremenskim značajkama videosignala (engl. *Algorithm for Adaptive Temporal Frame Interpolation based on video signal spatio-temporal features - AATFI*). Novi algoritam koristi informaciju o vremenskoj aktivnosti signala na temelju koje se radi adaptivna vremenska interpolacija slike. Osnovni cilj predloženog algoritma je smanjenje složenosti u odnosu na postojeće algoritme uz zadržavanje visoke razine kvalitete interpoliranih slika, a njegov blok dijagram prikazan je na slici 4.1.

Adaptivnost predloženog algoritma zasnovana je na rezultatima provedene analize prostorno vremenskih značajki videosignala koji pokazuju da je za male vrijednosti parametra TI pogreška interpolacije usrednjavanjem manja od pogreške interpolacije uz procjenu pokreta. Budući da je usrednjavanje značajno jednostavnije od procjene pokreta, uvođenjem adaptivnosti smanjuje se cjelokupna složenost algoritma bez povećanja pogreške interpolacije. Prema kriteriju adaptivnosti, ako je trenutna vrijednost parametra TI između dvije uzastopne slike iz poduzorkovane sekvence manja ili jednaka prethodno definiranoj vrijednosti praga δ , radi se interpolacija usrednjavanjem, dok se u suprotnom radi interpolacija zasnovana na procjeni pokreta. Provode se odvojene jednosmjerne procjene pokreta predviđanjem unaprijed i unatrag korištenjem kombinacije BMA i optičkog toka, prema modelu predstavljenom u [91]. Kako bi se izbjegla pojava blokova, filtrira se MVF medijan filtrom veličine 3×3 . Budući da je riječ o jednosmjernoj procjeni vektora pomaka, nakon pomicanja blokova trenutne slike u interpoliranoj slici doći će do pojave područja preklapanja i šupljina koja je potrebno adekvatno nadomjestiti. Područja preklapanja nadomještaju se težinskom sumom elemenata koji se preklapaju uz težinske koeficijente, ovisno o pouzdanosti procjene vektora pomaka bloka kojem pripadaju. Težinski koeficijenti koji se koriste za nadomještanje svakog elementa slike koji se preklapa su normirani tako da je njihova suma jednaka 1.



Slika 4.1. Blok dijagram predloženog algoritma AATFI

Područja šupljina nadomještaju se srednjom vrijednošću elemenata koji nisu šupljine u okruženju 3x3 elementa slike. Opisanim postupkom dobiju se dva prediktora interpolirane slike, prediktor dobiven predviđanjem unaprijed, F_t^f , i prediktor dobiven predviđanjem unatrag, F_t^b . Vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike određuju se na temelju težinske sume elemenata prediktora. Vrijednosti težinskih faktora koje su dodijeljene svakom od prediktora određene su na temelju pouzdanosti procjene vektora pomaka svih njihovih blokova i normirane su tako da je njihova suma jednaka 1. Na taj način veći utjecaj na vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike imaju vrijednosti elemenata prediktora čiji su vektori pomaka određeni s većom pouzdanošću.

4.1. Adaptivnost algoritma za vremensku interpolaciju

Rezultati analize utjecaja vremenskih značajki videosignala na prosječnu duljinu vektora pomaka i srednju kvadratnu pogrešku prilikom interpolacije slike opisani u prethodnom poglavlju pokazali su da je prosječna duljina vektora pomaka za dijelove sekvence s malom vremenskom aktivnošću vrlo mala (Slike 3.7. i 3.8.). Isto tako može se uočiti da je za dijelove sekvence s malom vremenskom aktivnošću pogreška prilikom interpolacije vrlo mala te da je razlika u pogrešci slika interpoliranih ispitivanim metodama gotovo neznatna, iako se metode osjetno razlikuju po složenosti. I teorijska i empirijska analiza je pokazala da za slike s malom vremenskom aktivnošću (malim TI) interpolacija usrednjavanjem postiže manju pogrešku od interpolacije procjenom pokreta s preciznošću 1 elementa slike te $\frac{1}{2}$ elementa slike kod malih vremenskih udaljenosti slika koje se koriste za interpolaciju. Male vrijednosti vektora pomaka ukazuju da se radi o malom pomaku objekata unutar scene te se pokazalo da se takav pomak može adekvatno kompenzirati korištenjem samo prostornih značajki prethodne i sljedeće slike, odnosno interpolacije usrednjavanjem, FA. Porastom vremenske aktivnosti videosekvence rastu srednje vrijednosti vektora pomaka što upućuje na brže i naglašenije pokrete. Takav pokret teže je adekvatno kompenzirati, stoga s porastom vremenske aktivnosti dolazi i do porasta srednje kvadratne pogreške interpoliranih slika, bez obzira o kojoj se metodi interpolacije radi. Međutim, valja istaknuti da je kod FA metode rast vrijednosti MSE s porastom TI , osjetno veći nego kod MCFI FWiBW metode pa tako s porastom vremenske

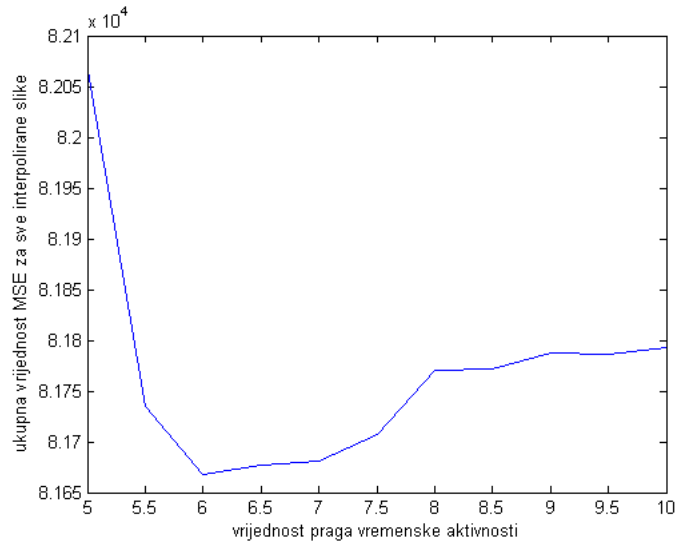
aktivnosti razlika srednje kvadratne pogreške slika interpoliranih FA i MCFI FWiBW metodom postaje sve veća.

Sukladno provedenim analizama može se zaključiti da FA metoda nije pogodna za interpolaciju slika u dijelovima sekvence s velikom vremenskom aktivnošću. U takvim je slučajevima, unatoč osjetnom povećanju složenosti algoritma, potrebno primijeniti interpolaciju slike zasnovanu na procjeni pokreta, jer je kod slike interpolirane tom metodom MSE osjetno manja što u konačnici vodi ka puno boljoj kvaliteti slike.

U svrhu postizanja visoke kvalitete interpoliranih slika uz smanjenje složenosti cjelokupnog algoritma, a na temelju rezultata provedene analize, predlaže se algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika. U okviru predloženog algoritma, ovisno o vrijednosti parametra TI_t , kojim se opisuje vremenska aktivnost, donosi se odluka o načinu interpolacije slike. U slučaju da je TI_t manji ili jednak prethodno definiranoj vrijednosti praga, δ , radi se interpolacija slike korištenjem isključivo prostornih značajki. U slučaju da je vrijednost TI_t veća od prethodno definirane vrijednosti praga radi se interpolacija slike na temelju procjene pokreta. Kriterij adaptivnosti predloženog algoritma prikazan je sljedećim izrazom

$$F_t(x, y) = \begin{cases} \alpha \cdot F_{t-1}(x, y) + (1 - \alpha) \cdot F_{t+1}(x, y), & TI_t \leq \delta \\ MCFI, & TI_t > \delta \end{cases} \quad (4-1)$$

Optimalna vrijednost praga δ određena je minimizacijom ukupne srednje kvadrate pogreške (MSE) interpoliranih slika iz testnih sekvenci *mobile*, *football*, *foreman*, *news*, *mother&daughter* i *container*. Na Slici 3.19. može se uočiti da se razlika između srednje kvadratne pogreške slika interpoliranih FA i MCFI FWiBW metodom počinje pojavljivati za vrijednosti parametra TI_t između 5 i 10. Upravo na tom intervalu napravljena je optimizacija vrijednosti δ s ciljem minimizacije srednje kvadratne pogreške interpolacije na temelju 769 interpoliranih slika testnih sekvenci. Dobivene vrijednosti ukupne srednje kvadratne pogreške, ovisno o vrijednosti praga vremenske aktivnosti na temelju koje se odlučuje o načinu interpolacije slike, prikazane su Slikom 4.2. Vidi da je unutar zadanog intervala pretrage najmanja vrijednost MSE svih interpoliranih slika za vrijednost praga $\delta=6$.



Slika 4.2. Ovisnost ukupne MSE o vrijednosti praga vremenske aktivnosti

S obzirom da se vrijednost MSE ne mijenja značajno za $5.5 \leq \delta \leq 10$, vrijednost praga, δ , se može koristiti u tom opsegu, pri čemu će se za veće vrijednosti δ povećati broj slika koje će se interpolirati usrednjavanjem, a smanjenjem vrijednosti praga δ neznatno će se smanjiti MSE.

4.2. Procjena pokreta

Za slike kod kojih je $TI_t > \delta$, za ostvarivanje dobre kvalitete prilikom interpolacije, potrebno je primijeniti postupak s procjenom pokreta. U okviru predloženog algoritma predložen je novi postupak interpolacije s procjenom pokreta sa smanjenjem složenosti u odnosu na postojeće. Procjena pokreta prvi je korak u postupku interpolacije slike na temelju kompenzacije pokreta, a o točnosti procjene uvelike ovisi i kvaliteta interpolirane slike. U svrhu ostvarenja što je veće moguće kvalitete interpolirane slike potrebno je procijeniti pokret sa što većom točnošću i pouzdanošću. Ipak, prilikom procjene pokreta treba voditi računa i o složenosti algoritma. Najčešće korišten način procjene pokreta u postupcima interpolacije je *Block Matching Algorithm* – BMA, jer je računalno jednostavan i lako ga je implementirati. Kod proračuna pokreta korištenjem BMA trenutna se slika dijeli na blokove određene veličine te se u referentnoj slici traži najbliži blok unutar zadanog područja pretrage. Najbliži blok određuje se na temelju minimizacije *SAD* koja se računa prema izrazu (2-8). Jasno je da se

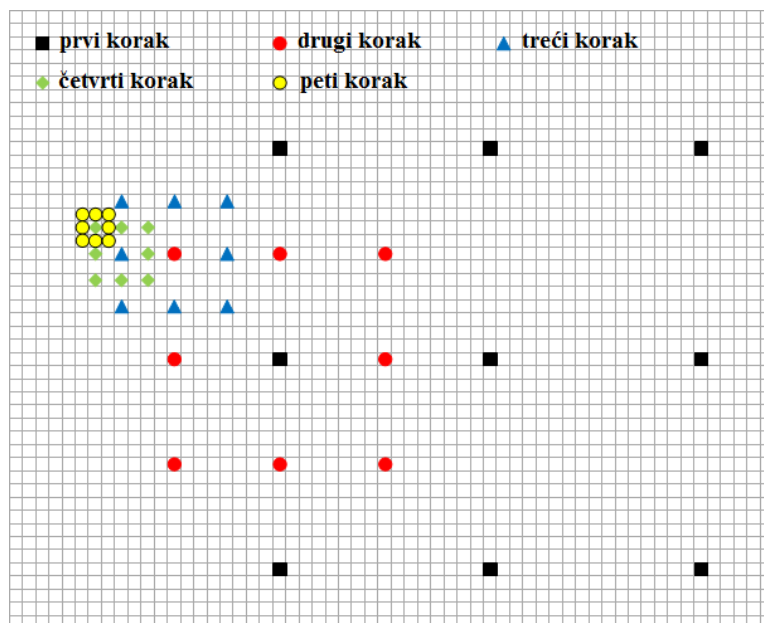
korištenjem BMA mogu procijeniti vektori pomaka na razini elementa slike, međutim za postizanje visoke kvalitete interpolirane slike to najčešće nije dovoljno precizno. U slučaju da se korištenjem BMA želi postići razina preciznosti od $1/M$ elementa slike potrebno je prilikom interpolacije proširiti sliku M puta u obje dimenzije te je nakon toga smanjiti na originalne dimenzije. Takav proces osjetno povećava računalnu složenost i iz tog razloga nije pogodan za primjenu [91]. U okviru predloženog algoritma procjena pokreta radi se kombinacijom primjene BMA i optičkog toka (engl. *optical flow*), prema [56],[57]. Najprije se korištenjem BMA odrede grubi vektori pomaka s preciznošću na razini elementa slike, a nakon toga se ti vektori pomaka zaglađuju korištenjem lokalne aproksimacije pomoću razvoja u Taylor-ov red. Na taj se način u samom postupku procjene pokreta postiže preciznost na razini manjoj od elementa slike uz osjetno smanjenje složenosti [91]. Uz spomenuti kriterij adaptivnosti, ovo je drugi korak u smanjenju složenosti predloženog algoritma za interpolaciju slike.

4.2.1. Određivanje cjelobrojne vrijednosti vektora pomaka BMA algoritmom

Za svaki blok određene veličine iz trenutne slike traži se odgovarajući blok u referentnoj slici unutar zadanog područja pretrage (engl. *Search Range* - SR). Veće područje pretrage rezultira većom pouzdanošću procjene vektora pomaka, ali i povećava složenost postupka. Određeno područje može se pretraživati korištenjem različitih metoda, kao što je opisano u dijelu 2.1. Metode pretrage razlikuju se po pouzdanosti pronalaska najbližijeg bloka, ali i po računalnoj složenosti i trajanju pretrage. Stoga je vrlo bitno odrediti adekvatno područje i metodu pretrage kako bi se osigurala zadovoljavajuća razina složenosti i preciznosti procjene pokreta.

Najpouzdaniji način pretrage jest onaj gdje se traži najbližiji blok na svakoj poziciji unutar područja pretrage, a to je potpuno pretraživanje (engl. *Full Search* - FS). Međutim, takav način pretrage računalno je vrlo složen i iziskuje najviše resursa za pronalazak adekvatnog bloka i određivanje vektora pomaka. Stoga se vrlo često koriste jednostavniji i brži načini pretraživanja područja pretrage (TSS, 4SS itd.). Neki od tih načina opisani su u dijelu 2.1., a njihovim se korištenjem uz osjetno manju složenost pronalaze gotovo podjednako precizni vektori pomaka. U okviru algoritma predloženog u ovoj disertaciji radi se odvojena jednosmjerna procjena pokreta unaprijed i unatrag između prethodne i sljedeće slike. Veličina

bloka postavljena je na 16x16 elemenata slike jer se u analizi pokazalo da se uz tu veličinu bloka dobiva manja pogreška u odnosu na blokove veličine 8x8 i 4x4 elementa slike. Za metodu pretraživanja odabrano je logaritamsko pretraživanje jer je po preciznosti procjene pokreta vrlo blizu potpunom pretraživanju [91], a računalno je značajno jednostavnije. Broj lokacija pretrage određen je veličinom područja pretrage. U slučaju veličine područja pretrage od 32 elementa slike, u prvom se koraku uspoređuje trenutni blok s blokom na istoj poziciji unutar referentne slike te s blokovima na osam susjednih pozicija udaljenih 16 elemenata slike od početne pozicije (Slika 4.2.). Pozicija na kojoj je najmanja *SAD* u odnosu na blok iz trenutne slike postaje središte pretrage za sljedeći korak u kojem se područje pretrage smanjuje na pola, odnosno na 8 elemenata slike. Od devet ispitivanih blokova traži se blok koji ima najmanju *SAD* u odnosu na blok iz trenutne slike i njegova lokacija postaje središte pretrage za sljedeći korak u kojem se područje pretrage ponovno smanjuje za pola, odnosno na 4 elemenata slike. Postupak se nastavlja sve dok se područje pretrage ne smanji na 1 element slike i odredi se blok s najmanjom *SAD* u odnosu na trenutni blok (Slika 4.3.). Tada razlika pozicija bloka iz trenutne slike i bloka sa najmanjom *SAD* iz referentne slike čini vektor pomaka.



Slika 4.3. Logaritamsko pretraživanje područja veličine 32 elementa slike

Označi li se sa BTP ukupan broj točaka pretrage područja veličine 2^N elemenata slike tada za potpuno pretraživanje vrijedi

$$BTP_{FS} = (2 \cdot 2^N - 1)^2, \quad (4-2)$$

a za logaritamsko pretraživanje

$$BTP_{LS} = N \cdot 2^3 + 1. \quad (4-3)$$

Sukladno izrazima (4-2) i (4-3) uz područje pretrage 2^5 elementa slike vrijednost parametra $N=5$, pa su u tom slučaju

$$BTP_{FS} = (2 \cdot 2^5 - 1)^2 = 63^2 = 3969, \quad (4-4)$$

$$BTP_{LS} = 5 \cdot 2^3 + 1 = 41. \quad (4-5)$$

Iz izraza (4-2)-(4-5) može se zaključiti da bi se unutar područja pretrage od 32 elementa slike primjenom FS načina pretraživanja odgovarajući blok tražio na 3969 lokacija, dok se primjenom LS načina on traži na svega 41 lokaciji što je smanjenje broja točaka pretrage za gotovo 100 puta uz približno jednaku preciznost procjene.

BMA metodom procjene pokreta uz prethodno navedene vrijednosti parametara određeni su vektori pomaka na razini elementa slike, odnosno određen je cjelobrojni pomak svakog bloka veličine 16x16 elemenata slike. Međutim, kako je pokazano u poglavlju 3., smanjenje MSE, a time i povećanje kvalitete interpolirane slike može se osigurati povećanjem preciznosti procjene pokreta na razinu manju od jednog elementa slike. Klasičan način povećanja preciznosti na razinu manju od jednog elementa slike zahtijeva proširenje slike prostornom interpolacijom koja je računalno zahtjevna. Predloženi algoritam koristi optički tok s kojim se može ostvariti preciznost ispod 1 elementa slike bez dodatnog proširenja slike.

4.2.2. Određivanje decimalne vrijednosti vektora pomaka

Nakon proračuna cjelobrojnog pomaka korištenjem BMA metode, radi dodatnog povećanja preciznosti proračuna vektora pomaka radi se proračun na razini manjoj od

elementa slike. Kako bi se to napravilo bez dodatnog proširenja slike u obje dimenzije i na taj način se smanjila složenost proračuna, koristi se pojednostavljena verzija klasičnog optičkog toka (engl. *optical flow*), prema [56]. Ako su F_{t-1} i F_{t+1} dvije uzastopne slike iz originalne sekvence, tada se slika F_{t+1} može opisati pomoću slike F_{t-1} i pomaka koji se dogodio između te dvije slike

$$F_{t+1}(x, y) = F_{t-1}(x + \Delta x, y + \Delta y), \quad (4-6)$$

gdje su Δx i Δy pomaci po x i y osi. Vrijednosti F_{t+1} mogu se aproksimirati razvojem u Taylor-ov red pa se dobije

$$F_{t+1}(x, y) = F_{t-1}(x, y) + \Delta x \frac{\partial}{\partial x} F_{t-1}(x, y) + \Delta y \frac{\partial}{\partial y} F_{t-1}(x, y). \quad (4-7)$$

Kako bi se odredio optimalan pomak potrebno je minimizirati funkciju $\Phi(\Delta x, \Delta y)$ koja je određena izrazom

$$\Phi(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x,y} (F_{t+1}(x, y) - F_{t-1}(x, y) - \Delta x \frac{\partial}{\partial x} F_{t-1}(x, y) - \Delta y \frac{\partial}{\partial y} F_{t-1}(x, y))^2. \quad (4-8)$$

Budući da je riječ o linearnoj sumi najmanjih kvadrata, optimalni Δx i Δy mogu se odrediti izjednačavanjem parcijalnih derivacija funkcije $\Phi(\Delta x, \Delta y)$ s nulom prema sljedećem izrazu

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta x} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta y} = 0. \quad (4-9)$$

U skladu s prethodnim izrazom može se postaviti sustav linearnih jednadžbi

$$\begin{pmatrix} \sum_{x,y} \left(\frac{\partial F_{t-1}}{\partial x}\right)^2 & \sum_{x,y} \frac{\partial F_{t-1}}{\partial x} \frac{\partial F_{t-1}}{\partial y} \\ \sum_{x,y} \frac{\partial F_{t-1}}{\partial x} \frac{\partial F_{t-1}}{\partial y} & \sum_{x,y} \left(\frac{\partial F_{t-1}}{\partial y}\right)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{x,y} (F_{t+1} - F_{t-1}) \frac{\partial F_{t-1}}{\partial x} \\ \sum_{x,y} (F_{t+1} - F_{t-1}) \frac{\partial F_{t-1}}{\partial y} \end{pmatrix}. \quad (4-10)$$

Rješavanjem sustava linearnih jednadžbi mogu se odrediti optimalne vrijednosti Δx i Δy . Prilikom proračuna parcijalne derivacije se aproksimiraju konačnim razlikama

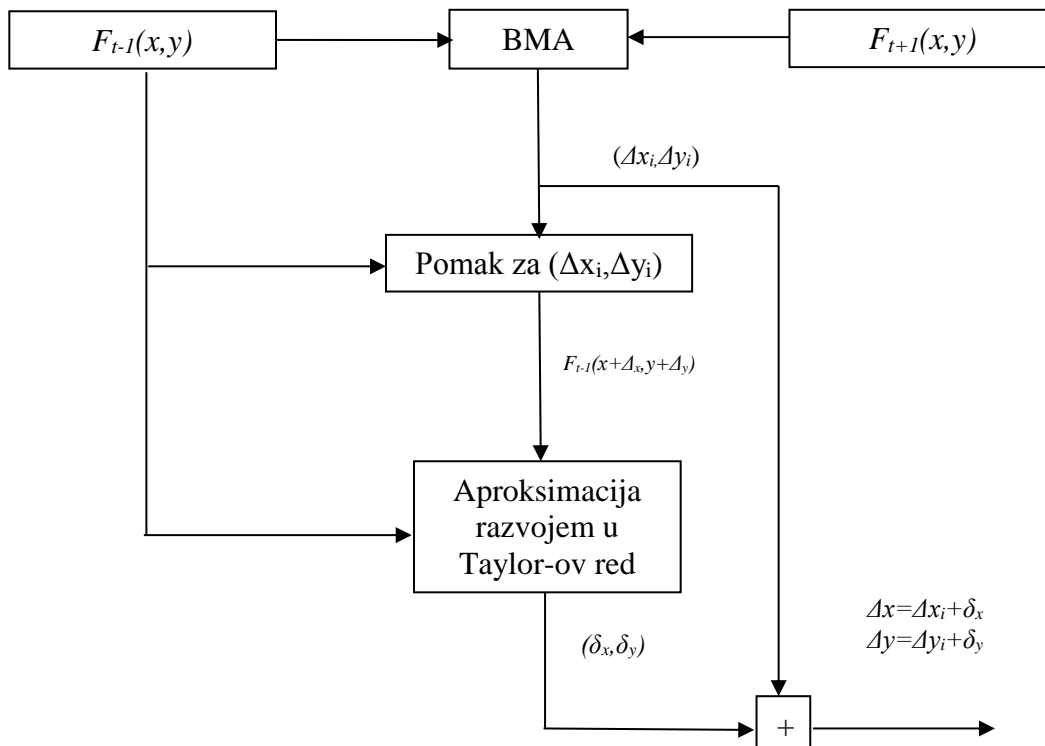
$$\frac{\partial F_{t-1}}{\partial x} = F_{t-1}(x+1, y) - F_{t-1}(x, y) \quad \text{i} \quad \frac{\partial F_{t-1}}{\partial y} = F_{t-1}(x, y+1) - F_{t-1}(x, y). \quad (4-11)$$

Metoda procjene pokreta korištena u predloženom algoritmu koristi kombinaciju BMA i pojednostavljenog optičkog toka, predloženu u [91], kako bi se dobio vektor pomaka na razini manjoj od jednog elementa slike (Slika 4.4.). Najprije se korištenjem BMA algoritma odrede cjelobrojne komponente vektora pomaka Δx_i i Δy_i . Navedene komponente predstavljaju cjelobrojni dio stvarnog vektora pomaka $(\Delta x, \Delta y)$. Budući da je stvarni pomak na razini manjoj od jednog elementa slike, komponente vektora pomaka mogu se prikazati kao

$$\Delta x = \Delta x_i + \delta_x \quad \text{i} \quad \Delta y = \Delta y_i + \delta_y, \quad (4-12)$$

gdje su δ_x i δ_y decimalni dijelovi vektora pomaka koji za koje vrijedi da je $|\delta_x| < 1$ i $|\delta_y| < 1$ pa se oni mogu aproksimirati razvojem u Taylor-ov red.

Valja naglasiti da je u prvom koraku moguće koristiti bilo koji BMA algoritam, a procjena pokreta na razini manjoj od elementa slike korištenjem Taylor-ovog reda znatno smanjuje složenost i ubrzava postupak u odnosu na povećanje preciznosti procjene u postupku interpolacije gdje se slika mora proširivati M puta u svakoj dimenziji da bi se postigla preciznost na razini $1/M$ elementa slike, [91]. Osim smanjenja složenosti, predloženi način procjene pokreta ostvaruje veću preciznost procjene u odnosu na bilo koji klasični BMA. Proračun pogreške prilikom procjene pokreta bit će prikazan samo za jednodimenzionalni pokret po x osi, ali na sličan način može se napraviti i za dvodimenzionalni pokret.



Slika 4.4. Blokovski prikaz procjene pokreta kombinacijom BMA i aproksimacijom razvojem u Taylorov red

Optimalni pomak po x osi, Δx_{opt} , dobije se rješavanjem sljedeće jednadžbe

$$\frac{d}{d\Delta x} \Phi(\Delta x) = 0, \quad (4-13)$$

gdje je

$$\Phi(\Delta x) = \sum_x (F_{t+1}(x) - F_{t-1}(x) - F'_{t-1}(x)\Delta x)^2. \quad (4-14)$$

Optimalni pomak tada se može odrediti kao

$$\Delta x_{opt} = \frac{\sum_x F'_{t-1}(x)[F_{t+1}(x) - F_{t-1}(x)]}{\sum_x [F'_{t-1}(x)]^2}. \quad (4-15)$$

Uz pretpostavku da je pravi pomak označen s Δx , apsolutna pogreška prilikom proračuna pokreta određena je sljedećim izrazom

$$\begin{aligned}
 |\Delta x_{opt} - \Delta x| &= \left| \frac{\sum_x F'_{t-1}(x)[F_{t+1}(x) - F_{t-1}(x)]}{\sum_x [F'_{t-1}(x)]^2} - \Delta x \right| \\
 &= \left| \frac{\sum_x F'_{t-1}(x)[F_{t+1}(x) - F_{t-1}(x)] - \Delta x \sum_x [F'_{t-1}(x)]^2}{\sum_x [F'_{t-1}(x)]^2} \right| \\
 &= \left| \frac{\sum_x F'_{t-1}(x)[F_{t+1}(x) - F_{t-1}(x) - \Delta x F'_{t-1}(x)]}{\sum_x [F'_{t-1}(x)]^2} \right| \\
 &= \left| \frac{\sum_x F'_{t-1}(x) \left[\frac{1}{2} F''_{t-1}(\xi) (\Delta x)^2 \right]}{\sum_x [F'_{t-1}(x)]^2} \right| \\
 &\leq \frac{1}{2} \max_{\xi} |F''_{t-1}(\xi)| \frac{\sum_x |F'_{t-1}(x)|}{\sum_x [F'_{t-1}(x)]^2} (\Delta x)^2, \tag{4-16}
 \end{aligned}$$

gdje je na četvrti red u izrazu (4-16) primijenjen opći teorem srednje vrijednosti prema kojem postoji ξ takav da vrijedi

$$F_{t+1}(x) = F_{t-1}(x + \Delta x) = F_{t-1}(x) + \Delta x F'_{t-1}(x) + \frac{1}{2} F''_{t-1}(\xi) (\Delta x)^2. \tag{4-17}$$

U [91] pokazano je da je pogreška procjene vektora pomaka uz preciznost na razini jednog elementa slike primjenom ove metode manja od pogreške procjene vektora pomaka s preciznošću $\frac{1}{8}$ elemenata slike klasičnom metodom. Zbog toga je opisani način procjene

pokreta izuzetno pogodan za korištenje u algoritmu za interpolaciju slike kod povećanja vremenske rezolucije i sa aspekta točnosti i sa aspekta složenosti.

4.2.3. Zaglađivanje polja vektora pomaka za interpoliranu sliku

Nakon procjene vektora pomaka za sve blokove iz prethodne, F_{t-1} , ili sljedeće, F_{t+1} , slike dobije se polje vektora pomaka, MVF . Budući da se zbog dodatnog povećanja točnosti radi odvojena jednosmjerna procjena pokreta unaprijed i jednosmjerna procjena pokreta unatrag, dobiju se i dva odvojena MVF , polje vektora pomaka dobiveno predviđanjem unaprijed – MVF^f i polje vektora pomaka dobiveno predviđanjem unatrag – MVF^b , kako je prikazano na Slici 4.5. c) i d). Budući da se pokret procjenjuje između dvije originalne slike, a vektori pomaka koriste se za interpolaciju slike između njih, potrebno je dobivene vrijednosti vektora pomaka unutar MVF^f i MVF^b skalirati ovisno o vremenskoj udaljenosti interpolirane slike od prethodne i sljedeće slike. S obzirom da je analiza pogreške određivanja vektora pomaka pokazala da je razlika u pogrešci kod aproksimacije linearnim pokretom bez promjenjive brzine tek nešto malo veća nego pogreška aproksimacije s uzimanjem promjene brzine u obzir, zbog smanjenja složenosti algoritma odabran je prvi navedeni način aproksimacije pokreta. Skaliranje vrijednosti vektora pomaka može se prikazati sljedećim izrazom

$$MVF'_f = \alpha \cdot MVF_f \quad \text{i} \quad MVF'_b = (1 - \alpha) \cdot MVF_b. \quad (4-18)$$

gdje je α omjer vremenske udaljenosti interpolirane slike od prethodne i vremenske udaljenosti sljedeće slike od prethodne. Ako se između prethodne i sljedeće slike interpolira jedna slika, $\alpha = 0.5$. Kako bi se umanjio eventualni efekt pojave blokova u interpoliranoj slici nakon skaliranja polja pokreta, na isto se primjenjuje medijan filter veličine 3x3. Na određenoj poziciji unutar MVF'_f i MVF'_b vrijednost vektora pomaka jednaka je medijanu vrijednosti tog vektora i njemu susjednih 8 vektora pomaka.

$$MVF''_f = \text{medfilt}MVF'_f \quad \text{i} \quad MVF''_b = \text{medfilt}MVF'_b. \quad (4-19)$$

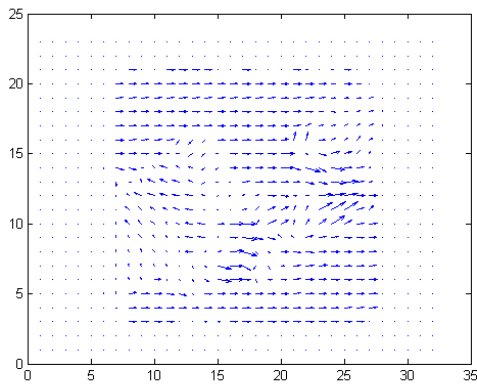
Na taj se način dobiju dodatno izgladana polja vektora pomaka čije su vrijednosti procijenjene na razini manjoj od jednog elementa slike (Slika 4.5. e) i f)).



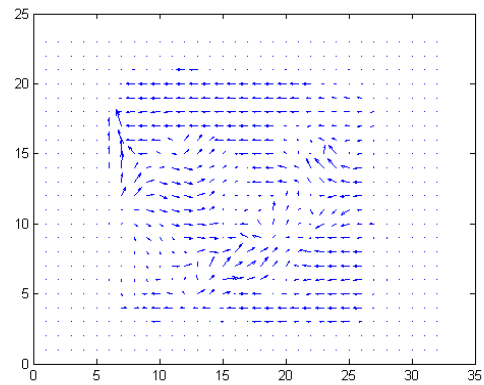
(a)



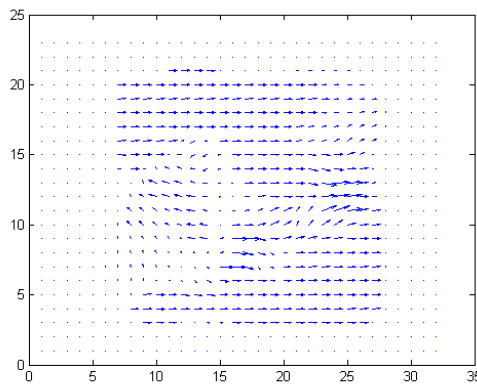
(b)



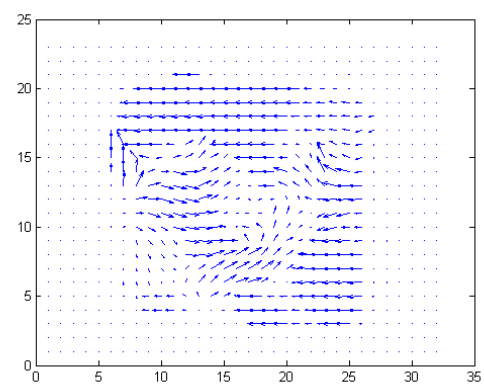
(c)



(d)



(e)



(f)

Slika 4.5. Uzastopne slike sekvence *football* i polja vektora pomaka a) prethodna slika F_{t-1} b) sljedeća slika F_{t+1} c) polje vektora pomaka unaprijed d) polje vektora pomaka unatrag e) polje vektora pomaka unaprijed nakon filtriranja f) polja vektora pomaka unatrag nakon filtriranja

4.3. Interpolacija slika prediktora zasnovana na kompenzaciji pokreta

Nakon što su određena polja vektora pomaka za svaku od dvije originalne slike, provodi se interpolacija slike. Primjenom polja vektora pomaka dobivenih predviđanjem unaprijed, MVF^f , i unatrag, MVF^b , prvo se određuju dva neovisna prediktora, F_t^f i F_t^b . Vrijednosti elemenata prediktora određuju se kompenzacijom pokreta, odnosno pomicanjem svakog bloka iz prethodne ili sljedeće slike za njemu odgovarajući vektor pomaka. Budući da se zbog veće preciznosti predviđanja vektora koristila jednosmjerna procjena pokreta u kojoj se jedna od originalnih slika dijeli na blokove, a susjedni blokovi nemaju jednake vektore pomaka, jasno je da će se nakon njihovog pozicioniranja unutar svakog od prediktora pojaviti nepokrivena područja (šupljine) i višestruko pokrivena područja (preklapanja) kao što je prikazano na Slici 2.13. Upravo tim područjima treba posvetiti posebnu pažnju kako bi se dobili što točniji prediktori, a samim time i konačna interpolirana slika.

4.3.1. Pozicioniranje blokova unutar interpolirane slike

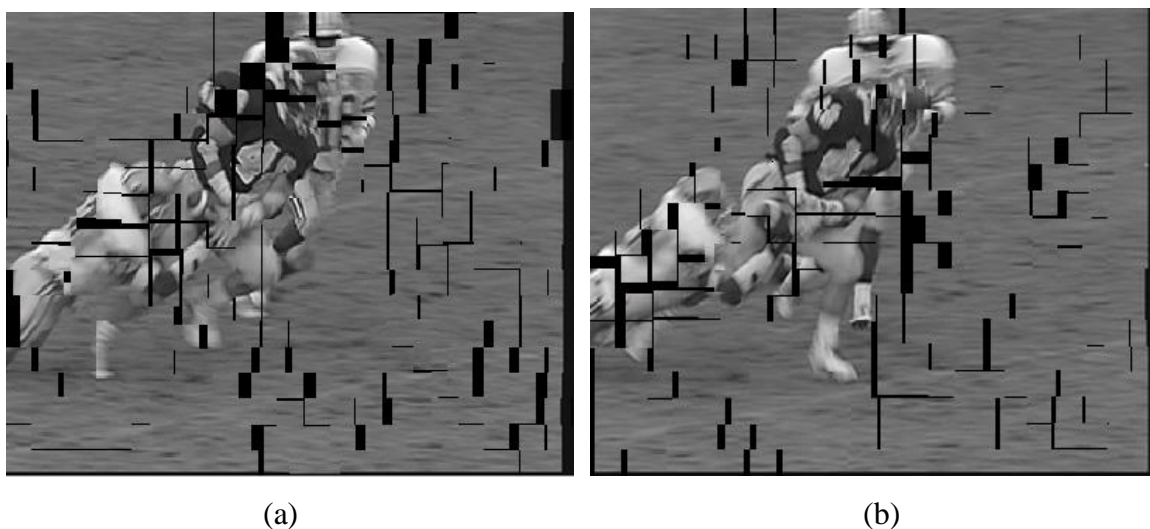
U predloženom algoritmu korištena je jednosmjerna procjena pokreta jer se na taj način mogu odrediti točniji vektori pomaka, posebice u dijelovima sekvence s velikom vremenskom aktivnošću te kadrovima s rotacijskim pokretima ili zumiranjem. Radi dodatne točnosti interpolirane slike radi se odvojena jednosmjerna procjena pokreta unaprijed i unatrag. Korištenjem prethodne, F_{t-1} , i sljedeće, F_{t+1} , slike te dva odgovarajuća polja vektora pomaka, prema sljedećim izrazima dobiju se dva prediktora interpolirane slike: prediktor dobiven predviđanjem unaprijed

$$F_t^f(x, y) = F_{t-1}(x + MVF_x^f, y + MVF_y^f) \quad (4-20)$$

i prediktor dobiven predviđanjem unatrag

$$F_t^b(x, y) = F_{t+1}(x + MVF_x^b, y + MVF_y^b). \quad (4-21)$$

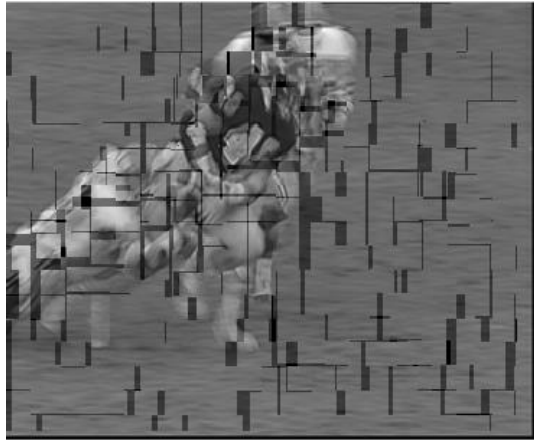
U svakom od prediktora se, zbog jednosmjerne procjene pokreta i činjenice da su susjednim blokovima pridruženi različiti vektori pomaka, pojavljuju nepokrivena područja (šupljine) i višestruko pokrivena područja (preklapanja) kao što je prikazano na Slici 4.6. Na Slici 4.6. a) prikazan je prediktor dobiven korištenjem prethodne originalne slike i polja vektora pomaka procijenjenog unaprijed, dok je na Slici 4.6. b) prikazan prediktor dobiven korištenjem sljedeće slike i polja vektora pomaka predviđenog unatrag. Slika prikazuje prediktore samo za komponentu svjetline, ali se na isti način dobiju prediktori i za krominantne komponente.



**Slika 4.6. Prediktori sa šupljinama i preklapanjima a)predviđanje unaprijed
b)predviđanje unatrag**

Iako u samoj slici preklapanja ne utječu na vizualni dojam kao šupljine, u sekvenci se zbog njih, kao i zbog šupljina narušava kvaliteta. Stoga je neophodno adekvatno odrediti vrijednosti elemenata prediktora na mjestima preklapanja i šupljina kako bi u konačnici kvaliteta interpolirane slike bila što bolja. Vrijednosti spomenutih elemenata određuju se neovisno za svaki od prediktora kako bi prije određivanja vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike svi elementi oba prediktora bili poznati. Iako bi složenost algoritma bila manja kada bi se vrijednosti elemenata u područjima šupljina ili preklapanja određivale samo u konačnoj slici umjesto u svakom prediktoru posebno, kvaliteta slike interpolirane na takav način ne bi bila zadovoljavajuća. Najveći problem stvorio bi se na pozicijama gdje je u jednom od prediktora šupljina, a u drugom ne. Kombinacijom vrijednosti elemenata prediktora na toj poziciji dobila bi se određena vrijednost elementa u interpoliranoj slici tako da element na toj poziciji ne bi

bio označen kao šupljina, ali njegova vrijednost ne bi bila adekvatna. Na Slici 4.7. prikazana je interpolirana slika čiji su elementi dobiveni na temelju srednje vrijednosti elemenata oba prediktora prije nego su u njima određeni elementi na pozicijama gdje dolazi do pojave šupljina ili preklapanja.



Slika 4.7. Slika interpolirana korištenjem prediktora sa šupljinama i preklapanjima

S obzirom da su šupljine u prediktorima većinom na različitim pozicijama, u interpoliranoj slici pojavljuju se područja koja nisu šupljine, ali vrijednosti elemenata u tim područjima nisu adekvatne i to značajno narušava kvalitetu slike. Zbog toga je potrebno vrijednosti elemenata u područjima šupljina i preklapanja odrediti u svakom prediktoru posebno. U predloženom algoritmu najprije se odrede elementi u područjima preklapanja, a zatim elementi u područjima šupljina. Postupak određivanja vrijednosti elemenata u područjima preklapanja i šupljina detaljnije je pojašnjen u nastavku.

4.3.2. Određivanje vrijednosti elemenata u područjima preklapanja

Elementu na poziciji (x,y) unutar interpolirane slike, uslijed korištenja jednosmjerne procjene pokreta može biti pridruženo više od jednog elementa iz originalne slike. U tom slučaju govori se o području preklapanja. Područje preklapanja može biti veličine od jednog elementa slike pa do veličine bloka koja je određena prilikom procjene pokreta. Neadekvatnim nadomještanjem takvih područja može se osjetno narušiti kvaliteta interpolirane slike. Razne su mogućnosti nadomještanja spomenutih područja. Najjednostavniji način je da se preklapajući element nadomjesti elementom koji je zadnji pridružen njegovoj poziciji unutar interpolirane slike, ali takav način nadomještanja znatno narušava kvalitetu interpolirane slike.

Budući da se svakom od blokova originalne slike vektor pomaka pridružuje na temelju minimalne vrijednosti *SAD* tog bloka i ispitivanih blokova u području pretrage, smatra se da je vektor bloka koji ima najmanju *SAD* procijenjen s najvećom pouzdanošću. Stoga je jedan od načina određivanja vrijednosti elementa gdje dolazi do preklapanja na poziciji (x,y) unutar interpolirane slike pridruživanje vrijednosti elementa koji se nalazi unutar bloka koji ima najmanju *SAD* u usporedbi s ostalim blokovima koji se preklapaju na toj poziciji, budući da se smatra da je vektor pomaka upravo tog bloka procijenjen s najvećom pouzdanošću. Za razliku od prethodna dva načina gdje se elementu interpolirane slike na poziciji (x,y) pridružuje vrijednost samo jednog elementa originalne slike, isti element moguće je interpolirati korištenjem vrijednosti elemenata svih blokova koji se preklapaju na toj poziciji uz korištenje težinskih faktora. Najjednostavniji način primjene ovakvog pristupa je interpoliranje elementa slike (x,y) pridruživanjem jednakih težinskih faktora svim elementima slike koji se na toj poziciji preklapaju. Označi li se sa $P(x,y)$ element interpolirane slike na kojem dolazi do preklapanja posljednji pristup može se odrediti izrazom

$$P_t(x,y) = \frac{1}{N_p} \sum_{z=1}^{N_p} F_{t_z}(x,y). \quad (4-22)$$

U prethodnom izrazu N_p predstavlja broj blokova koji se preklapaju na poziciji (x,y) i može poprimiti vrijednosti $N_p = \{2,3,\dots,N_b\}$, gdje je N_b ukupan broj blokova u slici. Prednost prethodno opisanog pristupa je što za interpolaciju elementa gdje dolazi do preklapanja koristi vrijednosti više elemenata iz originalne slike te se na taj način može postići bolja kvaliteta interpolirane slike u odnosu na pristupe koji koriste samo jedan element originalne slike. Nedostatak pristupa opisanog izrazom (4-22) je što korištenjem srednje vrijednosti elemenata originalne slike svim elementima koji se preklapaju pridružuje jednak težinski koeficijent bez obzira s kolikom pouzdanošću su određeni vektori pomaka blokova kojima pripadaju.

U predloženom algoritmu vrijednost elementa na poziciji (x,y) određuje se kombinacijom vrijednosti svih elemenata slike koji se na toj poziciji preklapaju uz korištenje težinskih faktora koji su određeni prema pouzdanosti procjene vektora pomaka za svaki od blokova koji se preklapaju. S obzirom da suma apsolutnih razlika, *SAD*, koja se koristi u postupku procjene vektora pomaka za izbor odgovarajućeg bloka predstavlja i mjeru pouzdanosti procjene, u

predloženom algoritmu koristi se za proračun težinskih faktora. Pri tome se ne povećava složenost samog postupka jer informacija o SAD već postoji. Pristup se može opisati sljedećim izrazom

$$P_t(x, y) = \frac{\sum_{z=1}^{N_p} \frac{1}{SAD_z} \cdot F_{t_z}(x, y)}{\sum_{z=1}^{N_p} \frac{1}{SAD_z}} . \quad (4-23)$$

N_p predstavlja broj preklapajućih blokova na poziciji (x, y) , a SAD_z predstavlja sumu apsolutnih razlika za z -ti preklapajući blok. Suma u nazivniku izraza (4-23) služi u svrhu normiranja težinskih koeficijenata, odnosno njome se osigurava da suma svih težinskih koeficijenata bude jednaka 1. Prednost pristupa predstavljenog izrazom (4-23) u odnosu na pristup predstavljen izrazom (4-22) je u tome što su težinski koeficijenti dodijeljeni elementima slike koji se preklapaju određeni na temelju pouzdanosti procjene vektora pomaka za blok kojem pripadaju. Smatra se da je vektor pomaka za blok koji ima najmanju SAD u odnosu na ostale blokove koji se preklapaju određen s najvećom pouzdanošću pa je stoga elementu koji pripada tom bloku pridružen najveći težinski koeficijent. Analogno tome, u slučaju da određeni element slike pripada bloku koji ima najveću SAD u odnosu na ostale blokove koji se preklapaju smatra se da je vektor pomaka tog bloka određen s najmanjom pouzdanošću te se njegovom elementu pridružuje najmanji težinski faktor. Na ovaj se način određuju elementi koji se preklapaju unutar svakog od prediktora prikazanih izrazima (4-20) i (4-21).

4.3.3. Određivanje vrijednosti elemenata u područjima šupljina

Do pojave šupljina u prediktorima, kao i do pojave preklapanja, dolazi zbog jednosmjerne procjene pokreta i činjenice da susjedni blokovi nemaju iste vektore pomaka. Šupljine u slici značajno narušavaju kvalitetu i neophodno ih je adekvatno nadomjestiti. Najjednostavniji način određivanja elementa interpolirane slike na poziciji (x, y) koji nije popunjen je popunjavanje s vrijednošću elementa na istoj poziciji unutar prethodne ili sljedeće slike. Osim toga moguće je koristiti i težinsku sumu tih dvaju elemenata slike. Osim korištenja po jednog elementa iz prethodne ili sljedeće slike moguće je koristiti i njima susjedne elemente kako bi se povećala preciznost. Iako su navedeni pristupi zbog svoje jednostavnosti pogodni za

korištenje s aspekta složenosti, budući da ne koriste nikakvu informaciju o pokretu objekata u sceni, njihovim korištenjem ne može se postići visoka razine kvalitete, posebice u slučajevima brzih i naglašenih pokreta. Zbog toga je za određivanje vrijednosti elemenata u prediktorima koje nisu određene (šupljine) pogodnije koristiti okolne vrijednosti prediktora koje su određene na temelju kompenzacije pokreta. Prethodno se odrede vrijednosti elemenata u područjima preklapanja unutar prediktora kako bi vrijednosti koje se koriste za popunjavanje šupljina bile što preciznije.

U okviru predloženog algoritma vrijednosti elemenata prediktora koje su nakon pomicanja blokova originalne slike za odgovarajuće vektore pomaka ostale neodređene, izračunavaju se na temelju težinske sume vrijednosti okolnih elemenata prediktora čije su vrijednosti prethodno definirane. Element interpolirane slike na poziciji (x,y) koji nije popunjen (šupljina) označen je sa $\check{S}_t(x,y)$ i može se definirati kao

$$\check{S}_t(x, y) = \frac{\sum_{u=1}^n w_s \cdot F_{t_u}}{n}, \quad (4-24)$$

gdje je n broj elemenata prediktora u okruženju $[x-r, x+r]$ i $[y-r, y+r]$ čije su vrijednosti prethodno određene, tj. koji nisu šupljine, F_{t_u} vrijednost elementa, a w_s težinski koeficijent definiran kao

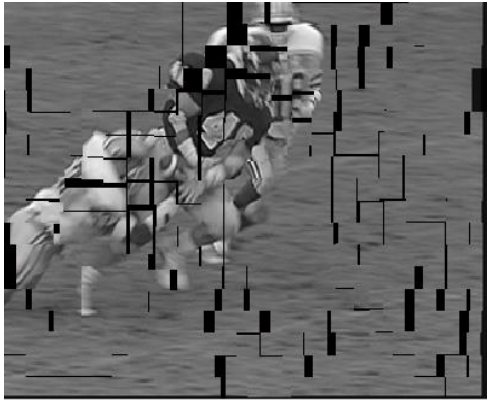
$$w_s = \begin{cases} 1, & \text{ako element } F_{t_u} \text{ nije šupljina} \\ 0, & \text{ako je element } F_{t_u} \text{ šupljina} \end{cases}. \quad (4-25)$$

Drugim riječima vrijednost elementa prediktora koji nije određen (šupljina) određuje se kao srednja vrijednost elemenata slike u zadanom okruženju koji nisu šupljine. U predloženom algoritmu vrijednost parametra $r=1$ pa je okruženje unutar kojeg se koriste vrijednosti za popunjavanje šupljine u prediktoru veličine 3×3 elementa slike. Iz tog okruženja od ukupno 9 elemenata slike odrede se elementi koji nisu šupljine, a šupljina na poziciji (x,y) u prediktoru nadomjesti se njihovom srednjom vrijednošću. Postupak je identičan za svaki od prediktora definiranih izrazima (4-20) i (4-21). Na Slici 4.8. a) i b) prikazani su prediktori čije su

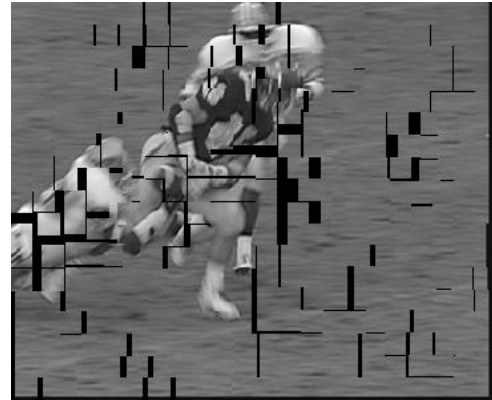
vrijednosti dobivene isključivo pomicanjem blokova prethodne i sljedeće originalne slike za odgovarajuće vrijednosti vektora pomaka iz polja vektora pomaka MVF''^f i MVF''^b . U tim prediktorima postoje područja preklapanja blokova i područja šupljina koja je puno lakše primijetiti. Vrijednosti elemenata gdje dolazi do preklapanja određene su vrijednostima zadnjeg od elemenata koji je pridružen toj poziciji. Na Slici 4.8. c) i d) prikazani su prediktori sa Slike 4.8. a) i b) nakon što su prema izrazu (4-23) određene vrijednosti elemenata na kojima dolazi do preklapanja. Vidi se da je došlo do zaglađivanja određenih rubova u područjima preklapanja, ali još su uvijek prisutne šupljine koje zapravo puno više narušavaju kvalitetu slike. Na Slici 4.8. e) i f) prikazani su prediktori sa Slike 4.8. c) i d) nakon što su prema izrazu (4-24) određene vrijednosti elemenata gdje su prethodno bile šupljine. To su ujedno i konačne vrijednosti svakog od prediktora koji se koristi za određivanje vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike prema postupku opisanom u nastavku.

4.3.4. Određivanje konačnih vrijednosti interpolirane slike

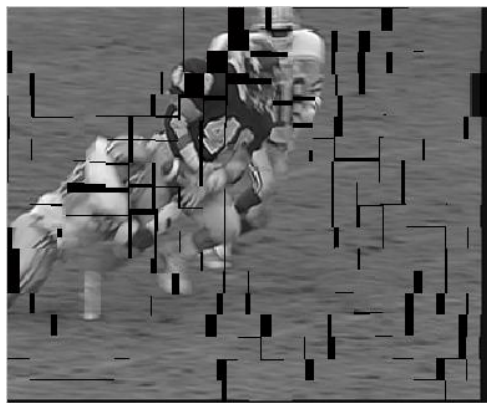
Kao što je u prethodnim dijelovima navedeno, zbog povećanja preciznosti procjene pokreta korištena je odvojena jednosmjerna procjena pokreta unaprijed i unatrag. Na temelju dva odvojena polja vektora pomaka te prethodne i sljedeće originalne slike određene su vrijednosti elemenata dva prediktora interpolirane slike. Određivanjem vrijednosti konačne interpolirane slike na temelju samo jednog od ta dva prediktora, sukladno rezultatima analize provedene u trećem poglavlju, ne postiže se zadovoljavajuća razina kvalitete interpolirane slike. Stoga se u predloženom algoritmu vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike određuju težinskom sumom elemenata prediktora dobivenih procjenom pokreta unaprijed i procjenom pokreta unatrag. U okviru analize provedene u trećem poglavlju u postupku označenom kao MCFI FWiBW oba prediktora imaju jednak težinski faktor prilikom određivanja vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike, odnosno koristi se njihova srednja vrijednost. Iako je srednja kvadratna pogreška prilikom određivanja vrijednosti interpolirane slike tom metodom manja od pogreške procjene bilo kojom od metoda korištenih za usporedbu, posebice za dijelove sekvence s velikom vremenskom aktivnošću, treba napomenuti da ta metoda ne uzima u obzir pouzdanost procjene polja vektora pomaka koji se koriste za dobivanje svakog od dva prediktora.



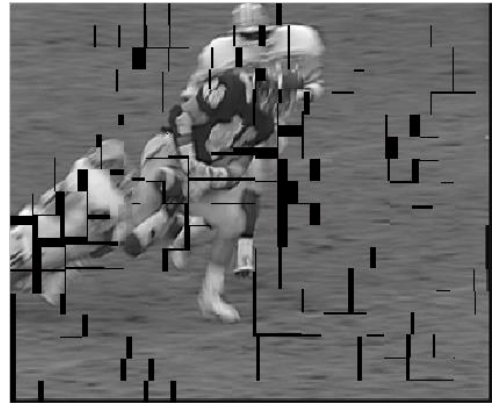
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Slika 4.8. Prediktori čije su vrijednosti određene a) pomicanjem blokova prethodne slike za MVF''^f ; b) pomicanjem blokova sljedeće slike za MVF''^b ; c) određivanjem vrijednosti u područjima preklapanja slike a); d) određivanjem vrijednosti u područjima preklapanja slike b); e) određivanjem vrijednosti u područjima šupljina slike c); f) određivanjem vrijednosti u područjima šupljina slike d)

U okviru predloženog algoritma težinski koeficijenti pridruženi svakom od dva prediktora određuju se upravo na temelju pouzdanosti procjene polja vektora pomaka koja su korištena za dobivanje tih prediktora jer se smatra da je prediktor koji je određen na temelju pouzdanijih polja vektora pomaka točniji prikaz konačne slike i kao takvom mu se pridružuje veći težinski koeficijent. Element konačne interpolirane slike na poziciji (x,y) određen je sljedećim izrazom

$$F_i^{final}(x, y) = \alpha^f \cdot F_i^f(x, y) + \alpha^b \cdot F_i^b(x, y), \quad (4-26)$$

α^f i α^b su težinski koeficijenti određeni izrazima

$$\alpha^f = \frac{\frac{1}{SAD_{uk}^f}}{\frac{1}{SAD_{uk}^f} + \frac{1}{SAD_{uk}^b}}, \quad \alpha^b = \frac{\frac{1}{SAD_{uk}^b}}{\frac{1}{SAD_{uk}^f} + \frac{1}{SAD_{uk}^b}}, \quad (4-27)$$

gdje je SAD_{uk}^f ukupna suma SAD svih blokova prilikom predviđanja pokreta unaprijed, a SAD_{uk}^b ukupna suma SAD svih blokova prilikom predviđanja pokreta unatrag i mogu se prikazati kao

$$SAD_{uk}^f = \sum_{i,j} SAD(B_{i,j})^f, \quad (4-28)$$

$$SAD_{uk}^b = \sum_{i,j} SAD(B_{i,j})^b, \quad (4-29)$$

gdje su $(B_{i,j})^f$ i $(B_{i,j})^b$ blokovi korišteni za procjenu vektora pomaka unaprijed i unatrag. Prediktor koji ima manju ukupnu sumu SAD_{uk} smatra se pouzdanijim te mu je pridružen veći težinski koeficijent, dok se prediktor koji ima veću ukupnu sumu SAD_{uk} smatra manje pouzdanim te mu je pridružen manji težinski koeficijent. Suma u nazivniku izraza (4-27) osigurava normizaciju težinskih koeficijenata, tj. da je suma težinskih koeficijenata jednaka 1.

Iz prethodnih poglavlja može se zaključiti da se u okviru predloženog algoritma težinski faktori i prilikom definiranja vrijednosti elemenata gdje dolazi do preklapanja unutar prediktora i prilikom definiranja vrijednosti konačne interpolirane slike određuju na temelju pouzdanosti procjene vektora pomaka koja je označena najvažnijim čimbenikom kvalitete

interpolirane slike. Sukladno tome, slike interpolirane predloženim algoritmom ostvaruju vrlo dobru kvalitetu čak i u dijelovima sekvence s velikom vremenskom aktivnošću. Valja naglasiti da osim zadovoljavajuće razine kvalitete interpoliranih slika, zbog svoje adaptivnosti i načina procjene pokreta, predloženi algoritam ima manju računalnu složenost u odnosu na algoritme s kojima se uspoređuje.

5. VREDNOVANJE PERFORMANSI PREDLOŽENOG ALGORITMA ZA INTERPOLACIJU SLIKE

U okviru vrednovanja performansi predloženog algoritma provedena je usporedba s postojećim rješenjima sa stajališta kvalitete interpolirane slike i složenosti samog postupka. Predloženi algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slike primijenjen je na šest sadržaja s različitom prostornom i vremenskom aktivnošću, *mobile*, *football*, *foreman*, *news*, *container* i *mother&daughter*, kojima su prethodno izbačene parne slike, a zadržane neparne. Primjenom predloženog algoritma na navedene sekvence interpolirane su slike koje su prethodno uklonjene. Nakon toga napravljena je usporedba kvalitete interpoliranih slika u odnosu na odgovarajuće originalne slike. Provedeni su subjektivni i objektivni testovi kvalitete slika interpoliranih predloženim algoritmom, a rezultati su uspoređeni s postojećim algoritmima koji spadaju među najbolje predstavljene u literaturi. Osim kvalitete interpolirane slike uspoređena je i složenost predloženog algoritma u odnosu na postojeća rješenja.

5.1. Videosadržaji korišteni za vrednovanje performansi predloženog algoritma

Za vrednovanje performansi algoritma za adaptivnu vremensku interpolaciju slike u okviru ove disertacije korišteno je šest videosadržaja s različitom prostornom i vremenskom aktivnošću, *mobile*, *football*, *foreman*, *news*, *container* i *mother&daughter*. Podatci o prostorno-vremenskoj aktivnosti svakog od sadržaja mogu se pronaći u Tablici 5.1., a po jedna karakteristična slika iz svakog od sadržaja na Slici 5.1. Svi sadržaji su u *Common Intermediate Format* – CIF formatu što znači da je njihova prostorna rezolucija 352x288 elemenata slike. Sekvence su nekomprimirane, u formatu YUV, s 4:2:0 shemom poduzorkovanja krominantnih komponenti U i V. Sekvenca *news* izvorno ima 90 slika, sekvenca *football* 260 slika, dok preostale sekvence *mobile*, *foreman*, *container* te *mother&daughter* imaju 300 slika, uz izmjenu $F_{rate} = 25$ slika u sekundi. Prilikom kodiranja sadržaja unutar svake od sekvenci zadržane su neparne slike, a odbačene parne te je time smanjena vremenska rezolucija na 12,5 slika u sekundi. Na taj je način broj slika unutar svake sekvence upola smanjen pa je sekvenca *news* smanjena na 45 slika, *football* na 130 slika, a preostale četiri sekvence na 150 slika.

Tablica 5.1. SI_{mean} i TI_{mean} sadržaja korištenih za vrednovanje performansi predloženog algoritma

Sadržaj	SI_{mean}	TI_{mean}
<i>mobile</i>	168,36	38,49
<i>football</i>	83,46	33,58
<i>foreman</i>	78,90	20,90
<i>news</i>	122,72	7,95
<i>container</i>	125,98	5,39
<i>mother&daughter</i>	54,57	5,42



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Slika 5.1. Karakteristične slike video sadržaja korištenih za vrednovanje performansi predloženog algoritma a) *mobile* b) *football* c) *foreman* d) *news* e) *container* f) *mother&daughter*

Primjenom predloženog algoritma između svake dvije slike unutar sekvenci smanjene vremenske rezolucije interpolirana je jedna slika kako bi se broj slika izjednačio s brojem slika originalne sekvence. Nakon interpolacije napravljena je usporedba kvalitete interpoliranih slika u odnosu na odbačene slike iz originalne sekvence koja ukazuje na točnost predviđanja elemenata interpolirane slike. Načini ocjene kvalitete interpoliranih slika kao i rezultati provedenih testova prikazani su u nastavku.

5.2. Subjektivne metode za ocjenu kvalitete videosignala

U subjektivnim metodama za ocjenu kvalitete videosignala skupina gledatelja ocjenjuje kvalitetu izobličenog signala na odgovarajući način. Iako su takvi postupci vremenski vrlo zahtjevni i za njihovu provedbu potrebno je puno ljudskih resursa, oni se ipak provode jer daju najpreciznije i najpouzdanije ocjene kvalitete videosignala jer su u konačnici ljudi korisnici videoaplikacija. Prilikom provedbe subjektivnih testova veći broj gledatelja ocjenjuje kvalitetu videosignala, a proračun kvalitete radi se na unaprijed propisan način korištenjem ocjena svih gledatelja. Testovi se provode uz precizne upute i kontrolirane okolišne uvjete. Postoje različite subjektivne metode za ocjenjivanje kvalitete videosignala, a u praksi se vrlo često koriste metode preporučene od strane ITU [76],[92].

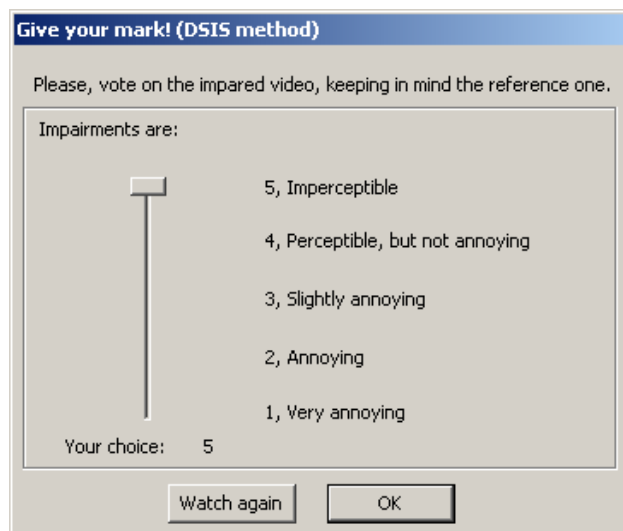
5.2.1. Double Stimulus Impairment Scale metoda

Double Stimulus Impairment Scale (DSIS) metoda opisana je u ITU-R BT.500-11 preporuci. U okviru ove metode gledatelju se najprije pokaže referentni signal, a nakon toga izobličeni. Kvaliteta izobličenog signala ocjenjuje se korištenjem sljedeće skale: 1 = vrlo neugodno, 2 = neugodno, 3 = blago neugodno, 4 = primjetno, ali ne i neugodno, 5 = neprimjetno. Prije svakog izobličenog signala gledatelju se ponovo prikazuje referentni signal kako bi mu bilo lakše načiniti usporedbu. Dodatni detalji vezani uz provedbu samog testiranja opisani su u [93]. Provedba ocjenjivanja kvalitete navedenom metodom moguća je primjenom MSU Perceptual Video Quality alata [94]. Prozor za ocjenjivanje kvalitete DSIS metodom prikazan je na Slici 5.2.

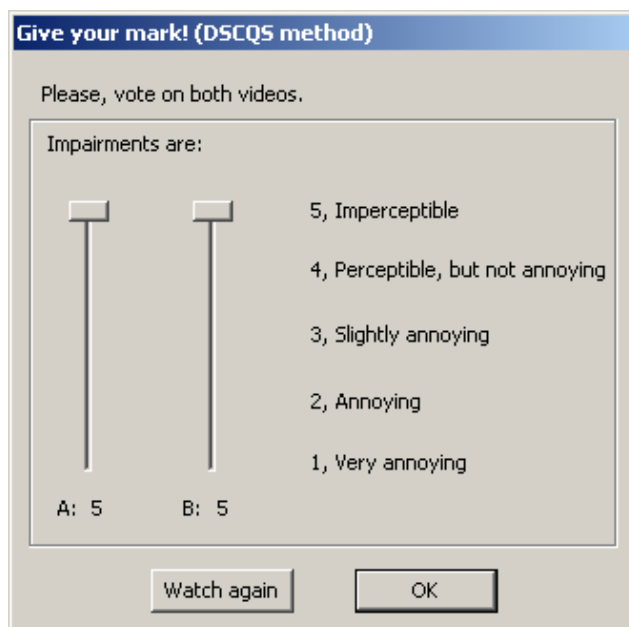
5.2.2. Double Stimulus Continuous Quality Scale metoda

Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS) metoda također je opisana u ITU-R BT.500-11 preporuci [93]. Za razliku od DSIS metode, gledatelj istovremeno gleda dva videosignala istog sadržaja od kojih je jedan referentni, a drugi izobličeni. U okviru ove metode gledatelj ne zna koji je signal referentni, a koji izobličeni te se od njega traži da istovremeno ocjeni oba signala. Gledatelj se može prebacivati s jednog signala na drugi sve dok ne ocjeni kvalitetu oba signala na kontinuiranoj skali koja je identična skali prethodno opisane DSIS metode. Dodatni detalji vezani uz provedbu samog testiranja korištenjem DSCQS metode

opisani su u [93], a prozor za ocjenjivanje korištenjem MSU Perceptual Video Quality alata [94] prikazan je na Slici 5.3.



Slika 5.2. Primjer prozora za dodjeljivanje ocjene korištenjem DSIS metode [94]



Slika 5.3. Primjer prozora za dodjeljivanje ocjene korištenjem DSCQS metode [94]

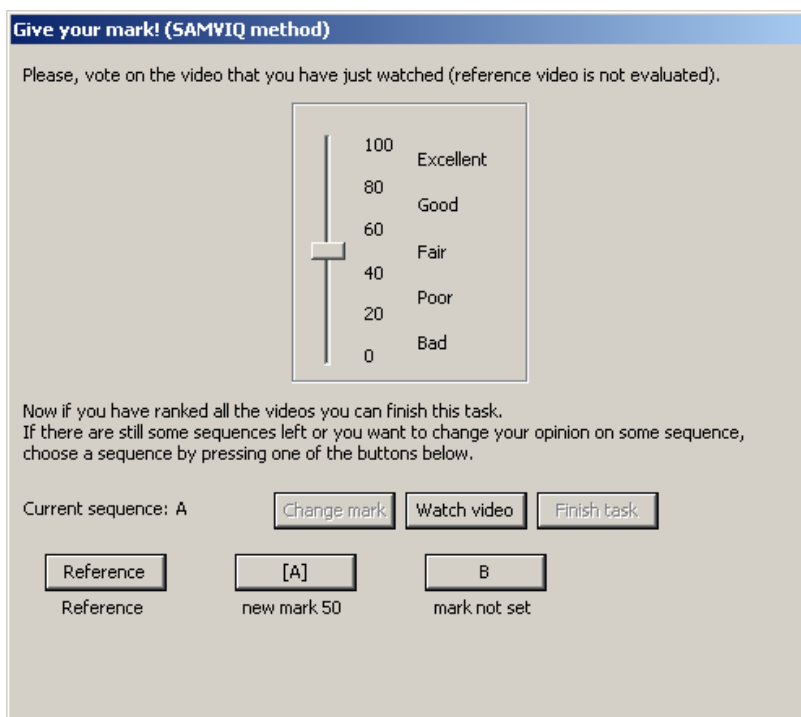
5.2.3. Single Stimulus Continuous Quality Scale metoda

Unutar *Single Stimulus Continuous Scale* (SSCQS) metode standardizirane u [93] kontinuirana ocjena subjektivne kvalitete digitalno-kodiranog videosignala daje se bez gledanja referentnog signala i na temelju samo jednog gledanja izobličenog signala. Ocjena kvalitete

dodjeljuje se na kontinuiranoj skali. Dodatni detalji vezani uz provedbu samog testiranja korištenjem DSCQS metode opisani su u [93].

5.2.4. Subjective Assessment method for Video Quality Evaluation metoda

Subjective Assessment Method for Video Quality evaluation (SAMVIQ) metoda opisana je u okviru ITU-T P.910 preporuke [76]. Ta metoda dizajnirana je upravo za multimediju gdje se koristi širok spektar kodeka, prostornih i vremenskih rezolucija kao i raznih formata slike. Razlika u odnosu na prethodno opisane metode je ta da gledatelj može ispraviti ocjenu ranije ocjenjenog signala te da može sam odabrati redoslijed prikazivanja signala. Metoda je zasnovana na slučajnom redoslijedu izobličenih signala koji gledatelj može sam odabrati. Ocjenjivanje se provodi na način da se gledatelju najprije pokaže referentni signal, s čime je on i upoznat. Među izobličenim signalima gledatelju se još jednom prikaže referentni signal, ali tada on ne zna da se radi o referentnom signalu. Gledatelj može pokrenuti i prekinuti proces ocjene kad god poželi, može ponavljati gledanje određene sekvence i mijenjati ocjene po potrebi. Prednost ove metode je što prikaz sekvenci nije neprekidan pa se na taj način smanjuje pogreška pri ocjenjivanju zbog smanjenja koncentracije.



Slika 5.4. Primjer prozora za dodjeljivanje ocjene korištenjem SAMVIQ metode [94]

S ciljem stabilizacije ocjene gledatelja ova metoda nudi veliki raspon ocjena kvalitete (od 0 do 100) gdje je: 0-20 = loša kvaliteta, 20-40 = slaba kvaliteta, 40-60 = korektna kvaliteta, 60-80 = dobra kvaliteta, 80-100 = izvrsna kvaliteta. Zbog navedenih karakteristika za subjektivne eksperimente u okviru ove disertacije korištena je SAMVIQ metoda, a primjer prozora u kojem se od gledatelja traži da dodijeli ocjenu korištenjem ove metode unutar MSU Perceptual Video Quality alata [94] prikazan je na Slici 5.4.

5.3. Objektivne metode za ocjenu kvalitete videosignala

Objektivne metode, za razliku od subjektivnih u kojima gledatelji ocjenjuju kvalitetu videosignala, koriste matematičke modele s ciljem da predvide kvalitetu videosignala bez potrebe za ljudskim resursima. Ovisno o različitoj zahtijevanoj količini informacija o referentnom signalu (za koji se smatra da je izvrsne kvalitete) objektivne metode dijele se u tri skupine: metrike koje ne zahtijevaju nikakve informacije o referentnom signalu (engl. *No-Reference* - NR), metrike koje zahtijevaju potpune informacije o referentnom signalu (engl. *Full-Reference* - FR) i metrike koje zahtijevaju dostupnost samo nekih značajki referentnog signala (engl. *Reduced-Reference* - RR). Glavne mane FR metrika su zahtjevi za potpunom dostupnošću referentnog signala i za vremenskim poravnanjem referentnog i izobličnog signala jer se ocjenjivanje vrši slika po slika. Najpoznatije metrike iz navedene skupine su srednja kvadratna pogreška – MSE te njezina logaritamska inačica, omjer vršne snage signala i snage šuma, (engl. *Peak Signal to Noise Ratio* – PSNR [95],[96]). U FR metrike spadaju i neke metrike koje su zasnovane na oponašanju ljudskog vizualnog sustava [78],[97-105]. Osim PSNR metrike, u okviru ove disertacije provedeno je objektivno ocjenjivanje video signala mjerenjem indeksa strukturalne sličnosti, (engl. *Structural SIMilarity index* - SSIM) [106] koji je široko rasprostranjen i koja ima višu korelaciju sa subjektivnim ocjenama gledatelja.

5.3.1. PSNR metrika

Objektivne metrike na temelju načina analize dekodiranog videosignala mogu se razvrstati u tri skupine: podatkovne metrike, slikovne metrike i metrike zasnovane na paketima i toku bita. PSNR metrika spada u podatkovne metrike koje vjernost izobličnog signala u odnosu na referentni signal mjere bez razmatranja njegova sadržaja. Omjer vršne snage signala i snage šuma iskazan preko MSE definiran je sljedećim izrazom

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(2^R - 1)^2}{MSE}, \quad (5-1)$$

gdje je $2^R - 1$ maksimalna vrijednost koju element slike može poprimiti za R -bitnu sliku. U okviru ove disertacije korišteno je $R = 8$ bita/elementu slike pa je maksimalna vrijednost elementa slike 255. Ukupna MSE proračunata je za sve tri komponente signala, Y , U i V . Iz izraza (3-31) i (5-1) jasno je da su MSE i PSNR vrlo jednostavne za implementaciju te se zbog toga vrlo često koriste. Neke od metrika zasnovane na PSNR/MSE predstavljene su u [107],[108]. Takve metrike ne mogu dati objektivnu mjeru kvalitete koja se dobro podudara s rezultatima subjektivnih metrika jer ne uzimaju u obzir svojstva ljudskog vizualnog sustava koja upućuju na to da HVS ne pokazuje jednaku osjetljivost na različite tipove i značajke izobličenja. Osim toga, bitna je i činjenica u kojem se dijelu slike izobličenje pojavljuje, a MSE i PSNR to ne uzimaju u obzir. Zbog toga je, osim ocjenjivanja jednostavnom i često korištenom PSNR metrikom, u okviru ove disertacije provedeno i ocjenjivanje SSIM metrikom.

5.3.2. SSIM metrika

SSIM metrika spada u FR slikovne metrike orijentirane prirodnim vizualnim karakteristikama. Osnovu inženjerskog pristupa u okviru ove metrike čini izdvajanje i analiza određenih značajki (konture i obrisi) ili artefakata nastalih zbog kompresije ili prijenosa određenim sustavom (stvaranje blokova, zamagljenje). Za ocjenu ukupne kvalitete videosignala ovom metrikom mjeri se upravo izraženost tih značajki [106]. Temelj ove metrike je činjenica da su prirodne slike strukturirani signali čiji uzorci imaju snažnu međusobnu ovisnost, posebno ako su prostorno blizu. Za proračun mjere strukturnog izobličenja, navedena metrika koristi informacije o srednjim vrijednostima (μ i μ'), varijancama (σ i σ') i kovarijanci (cov) referentnog i izobličenog signala. Navedene vrijednosti računaju se za blokove veličine 8×8 elemenata slike referentnog okvira $B_i(x,y,t)$ i izobličenog okvira $B'_i(x,y,t)$. Vrijednost SSIM indeksa za blok $B_i(x,y,t)$ određena je izrazom

$$SSIM_i(t) = [l_i(t)]^\alpha \cdot [c_i(t)]^\beta \cdot [s_i(t)]^\gamma, \quad (5-2)$$

gdje su

$$l_i(t) = \frac{2 \cdot \mu_i(t) \cdot \mu_i'(t) + C_1}{\mu_i^2(t) + \mu_i'^2(t) + C_1}, \quad (5-3)$$

$$c_i(t) = \frac{2 \cdot \sigma_i(t) \cdot \sigma_i'(t) + C_2}{\sigma_i^2(t) + \sigma_i'^2(t) + C_2}, \quad (5-4)$$

$$s_i(t) = \frac{\text{cov}_i(t) + C_3}{\sigma_i(t) \cdot \sigma_i'(t) + C_3}. \quad (5-5)$$

U prethodnim izrazima parametri $l_i(t)$, $c_i(t)$ i $s_i(t)$ redom daju mjeru razlike luminancije, kontrasta i strukturne razlike između blokova referentne i izobličene slike videosignala. Konstante C_1 , C_2 i C_3 uvedene su kako bi se poboljšala stabilnost proračuna, a α , β i γ su parametri koji definiraju relativni utjecaj svake od komponenti. Valja naglasiti da se SSIM indeksi računaju za odabrani broj blokova, R , a ne za cijelu sliku čime se umanjuje vrijeme proračuna, a performanse ostaju dobre. Na osnovu vrijednosti SSIM indeksa određenog bloka označenog kao $SSIM_i(t)$ računa se indeks kvalitete za svaki okvir korištenjem težinskih vrijednosti w_i . Sukladno tome, indeks kvalitete okvira, $Q(t)$, određen je sljedećim izrazom

$$Q(t) = \frac{\sum_{i=1}^R w_i(t) \cdot SSIM_i(t)}{\sum_{i=1}^R w_i(t)}. \quad (5-6)$$

Ukupni SSIM indeks kvalitete cijele videosekvence dobiva se vremenskim združivanjem rezultata SSIM indeksa kvalitete za sve slike unutar video sekvence. Postupak proračuna SSIM indeksa detaljno je opisan u [106].

5.4. Objektivno ocjenjivanje kvalitete interpoliranih slika

U okviru ove disertacije ukupno je interpolirano 769 slika iz šest različitih prethodno opisanih sadržaja. Slike su interpolirane raznim metodama koje se razlikuju po svojoj složenosti. Od postojećih rješenja korištene su dvije metode koje koriste isključivo prostorne značajke, a to su ponavljanje prethodne slike (FR) i interpolacija korištenjem srednje vrijednosti prethodne i sljedeće slike (FA). Nadalje, za usporedbu su izabrane dvije metode s procjenom pokreta iz postojeće literature, i to MCFI-AOBMC [8] kao predstavnik metoda s dvosmjernom procjenom pokreta i NTME [50] koja koristi jednosmjernu procjenu pokreta unatrag i unaprijed i koja prema recentnoj literaturi spada među najbolje metode interpolacije u postupku povećanja vremenske rezolucije videosignala. Uz navedene metode uspoređena je kvaliteta slike interpolirane primjenom tri inačice predloženog algoritma. Najjednostavnija inačica predloženog algoritma je AATFI-FR (*Algorithm for Adaptive Temporal Frame Interpolation based on video signal spatio-temporal features with Frame Repetition*), kod koje se u slučaju trenutne vrijednosti vremenske aktivnosti manje od prethodno određene vrijednosti praga δ slika interpolira ponavljanjem prethodne slike. Druga inačica, AATFI-FA (*Algorithm for Adaptive Temporal Frame Interpolation based on video signal spatio-temporal features with Frame Averaging*), u slučaju trenutne vrijednosti vremenske aktivnosti manje od prethodno određene vrijednosti praga δ , interpolira sliku korištenjem srednje vrijednosti elemenata prethodne i sljedeće slike. Treća, ujedno i najsloženija inačica, ATFI (*Algorithm for Temporal Frame Interpolation based on video signal spatio-temporal features*), eliminira kriterij adaptivnosti te svaku sliku, neovisno o vrijednosti vremenske aktivnosti, interpolira na temelju kompenzacije pokreta predstavljene u okviru novog predloženog algoritma.

Kvaliteta slika interpoliranih različitim metodama ocijenjena je usporedbom tih slika s odgovarajućim slikama iz originalne sekvence primjenom objektivnih metrika za ocjenu kvalitete videosignala, PSNR i SSIM. Rezultati objektivnih ocjena kvalitete interpoliranih slika PSNR metrikom, kao i informacija o prosječnoj vremenskoj aktivnosti ispitivanih sadržaja prikazani su Tablicom 5.2., a rezultati objektivnih ocjena kvalitete interpoliranih slika SSIM metrikom i informacija o prosječnoj vremenskoj aktivnosti ispitivanih sadržaja prikazani su Tablicom 5.3. Vrijednosti PSNR i SSIM za MCFI-AOBMC i NTME preuzete su iz [50].

Tablica 5.2. Prosječna vremenska aktivnost, TI_{mean} , pojedinog sadržaja i ocjena kvalitete interpoliranih slika primjenom različitih postupaka interpolacije korištenjem PSNR metrike

Sekvenca	TI_{mean}	PSNR [dB]						
		FR	FA	MCFI-AOBMC [8]	NTME [50]	ATFI	AATFI-FR	AATFI-FA
<i>mobile</i>	38,49	22,01	26,20	25,66	28,99	30,34	29,50	30,34
<i>football</i>	33,58	20,31	22,12	22,66	24,14	23,32	23,32	23,32
<i>foreman</i>	20,90	25,46	28,08	34,13	33,25	31,44	31,06	31,44
<i>news</i>	7,95	35,19	38,93	32,88	38,21	38,92	38,41	38,91
<i>mother&daughter</i>	5,39	38,52	40,58	37,41	42,71	42,15	40,51	41,94
<i>container</i>	5,42	39,22	43,35	43,77	43,00	42,4	39,49	43,35
Prosječno		30,12	33,21	32,75	35,05	34,76	33,72	34,88

Tablica 5.3. Prosječna vremenska aktivnost, TI_{mean} , pojedinog sadržaja i ocjena kvalitete interpoliranih slika primjenom različitih postupaka interpolacije korištenjem SSIM metrike

Sekvenca	TI_{mean}	SSIM						
		FR	FA	MCFI-AOBMC [8]	NTME [50]	ATFI	AATFI-FR	AATFI-FA
<i>mobile</i>	38,49	0,749	0,862	0,842	0,957	0,956	0,956	0,956
<i>football</i>	33,58	0,487	0,534		0,746	0,630	0,630	0,630
<i>foreman</i>	20,90	0,751	0,803	0,832	0,940	0,901	0,901	0,901
<i>news</i>	7,95	0,973	0,984	0,965	0,984	0,984	0,983	0,984
<i>mother&daughter</i>	5,42	0,946	0,963	0,949	0,980	0,974	0,966	0,973
<i>container</i>	5,39	0,979	0,988		0,988	0,987	0,979	0,988
Prosječno		0,814	0,856	0,897	0,933	0,905	0,903	0,905

Rezultati prikazani Tablicom 5.2. potvrdili su da u pravilu kvaliteta interpoliranih slika opada s porastom vremenske aktivnosti sekvence, bez obzira o kojoj se metodi interpolacije radi. Također se potvrdila činjenica da s porastom vremenske aktivnosti sekvence raste i razlika u kvaliteti slika interpoliranih metodama različite složenosti. Sukladno očekivanjima, ponavljanjem okvira interpolirane slike su najlošije kvalitete. Ta je metoda interpolacije najjednostavnija od svih ispitivanih metoda, ali je i kvaliteta slika puno lošija. Treba reći i da razlika u kvaliteti slika interpoliranih FR metodom i ostalim metodama opada sa smanjenjem vremenske aktivnosti sadržaja. To je očekivano jer je u prethodnim analizama utvrđeno da veća vremenska aktivnost sadržaja u pravilu upućuje na veći pokret između dvije originalne slike. Metoda ponavljanja okvira koristi samo prostorne značajke videosignala i uopće ne uzima pokret u obzir, a osim toga ona samo ponavlja elemente prethodne slike pa se prilikom interpolacije elementi sljedeće slike u potpunosti zanemaruju. S obzirom da je riječ o ponavljanju slike, sama interpolirana slika vrlo je oštra. Problem se pojavljuje prilikom

usporedbe interpolirane slike s originalnom jer je zbog pokreta u odnosu na prethodnu sliku došlo do promjene kadra, a interpolirana slika u potpunosti je jednaka prethodnoj. Zbog toga se pregledom cijele sekvence pojavljuje efekt „zapinjanja“ koji značajno utječe na percepciju gledatelja. Ipak, valja naglasiti da je metoda interpolacije slike ponavljanjem okvira daleko najjednostavnija, a samim time i najbrža u odnosu na sve ostale ispitane metode. S obzirom da razlika u kvaliteti interpoliranih slika u odnosu na ostale metode opada s padom vrijednosti vremenske aktivnosti, ova metoda može se koristiti za interpolaciju slike unutar mirnih sekvenci u sustavima gdje je brzina interpolacije ključni faktor, a kvaliteta samog sadržaja ne mora biti na visokoj razini.

Metoda koja je nešto složenija od FR metode, a postiže osjetno bolje rezultate, je interpolacija korištenjem srednje vrijednosti elemenata prethodne i sljedeće slike, FA. Iako i ta metoda koristi isključivo prostorne značajke videosignala, ne uzimajući u obzir pokrete objekata, kvaliteta interpoliranih slika u odnosu na one interpolirane FR metodom prosječno je veća za više od 3 dB. Valja naglasiti da razlika u složenosti dvije navedene metode nije tako velika kao što je razlika u kvaliteti. U sekvencama s malom vremenskom aktivnošću (*news*, *mother&daughter* i *container*) kvaliteta slika interpoliranih FA metodom gotovo je usporediva s kvalitetom slika interpoliranih metodom koja koristi procjenu pokreta. Rezultati dani u Tablici 5.2. pokazuju da spomenuta metoda čak ostvaruje najbolju kvalitetu interpoliranih slika za sekvencu *news*. Treba naglasiti kako je u okviru FA metode, koja koristi samo prostorne karakteristike prethodne i sljedeće slike, u potpunosti izbjegnuta procjena pokreta, što navedenu metodu interpolacije čini vrlo jednostavnom, brzom i lakom za primjenu. Ipak, treba reći da je kvaliteta slika interpoliranih navedenom metodom u sekvencama s većom vremenskom aktivnošću (*foreman*, *football* i *mobile*) osjetno manja od kvalitete slike interpoliranih MCFI metodama. Razlog tome je što su, sukladno provedenoj analizi, u dijelovima sekvence s velikom vrijednošću vremenske aktivnosti prosječne vrijednosti duljina vektora pomaka veće, što upućuje na značajniji pomak između dvije originalne slike. Takav pomak ne može se adekvatno kompenzirati korištenjem samo prostornih značajki videosignala ako se želi postići visoka razina kvalitete interpolirane slike. Sukladno rezultatima pokazanim u Tablici 5.2. može se zaključiti kako je FA metoda pogodna za korištenje u slučaju male vremenske aktivnosti sekvence jer je kvaliteta interpoliranih slika usporediva s kvalitetom slika interpoliranih osjetno složenijim metodama, a značajno je bolja od kvalitete slika interpoliranih samo malo manje

složenom FR metodom. Također se može zaključiti da FA metoda nije pogodna za interpolaciju slika u dijelovima sekvence s velikom vremenskom aktivnošću jer se njenim korištenjem ne može adekvatno kompenzirati veći pokret.

Od postojećih MCFI metoda u okviru ove disertacije izdvojene su dvije metode. Jedna od njih, MCFI-AOBC, predstavljena je u [8] dok je druga, NTME, predstavljena u [50]. Prva razlika između te dvije metode je u načinu procjene pokreta. Iako obje metode koriste BMA, u okviru MCFI-AOBMC koristi se dvosmjerna procjena pokreta, dok NTME metoda koristi odvojenu jednosmjernu procjenu pokreta. Osim razlike u samom načinu procjene pokreta postoji razlika i u veličini blokova korištenih za procjenu pokreta u okviru BMA za dvije navedene metode. Kao što je prikazano u dijelu 2.3., prilikom dvosmjerne procjene pokreta u okviru MCFI-AOBMC metode slika je inicijalno podijeljena na blokove veličine 8×8 elemenata slike. Nakon prvotne procjene pokreta za blokove te veličine i grupiranja blokova s približno istim pripadajućim vektorima pomaka u objekte, dodatna podjela na blokove veličine 4×4 i 2×2 elementa slike napravljena je samo za rubna područja koja se nalaze na granici dvaju objekata, dok je u preostalom dijelu slike zadržana podjela na blokove veličine 8×8 elemenata slike (Slika 2.12). U okviru NTME metode prilikom odvojene jednosmjerne procjene pokreta slika je inicijalno također podijeljena na blokove veličine 8×8 elemenata slike. Međutim za razliku od MCFI-AOBMC metode gdje su samo blokovi na granici dvaju objekata podijeljeni na blokove veličine 4×4 ili 2×2 elementa slike, u okviru NTME metode svi blokovi veličine 8×8 elemenata slike dijele se na blokove veličine 4×4 a zatim na blokove veličine 2×2 elementa slike. Podjela većeg broja blokova na blokove manje veličine i veći broj koraka procjene pokreta čine postupak procjene pokreta u okviru NTME metode složenijim nego postupak procjene pokreta u okviru MCFI-AOBMC metode. Složenost NTME metode dodatno povećava znatno složenija funkcija distorzije na temelju koje se provodi procjena pokreta. Razlika u složenosti između navedene dvije metode je i u samom postupku interpolacije slike. MCFI-AOBMC metoda za svaki element slike koristi vektor pomaka bloka u kojem se taj element slike nalazi, ali i vektore pomaka njemu 3 susjedna bloka uz različite težinske koeficijente koji se određuju na temelju pouzdanosti procjene svakog od tih blokova. Kod NTME metode koriste se dva polja vektora pomaka dobivena odvojenom jednosmjernom procjenom pokreta. Blokovi svake od dviju originalnih slika, prethodne i sljedeće, pomiču se za vrijednosti dvaju dobivenih polja vektora pomaka što u konačnici čini četiri prediktora

konačne interpolirane slike. Kombinacijom vrijednosti elemenata ta četiri prediktora uz različite težinske koeficijente koji su određeni na temelju pogreške procjene pokreta unaprijed i unatrag određuju se elementi konačne interpolirane slike. Korištenje dva odvojena polja vektora pomaka i četiri prediktora čini postupak interpolacije u okviru NTME metode složenijim nego postupak interpolacije u okviru MCFI-AOBMC metode.

Sukladno opisanoj razlici u složenosti dvije MCFI metode, slike interpolirane NTME metodom, očekivano, ostvaruju bolju kvalitetu u odnosu na slike interpolirane MCFI-AOBMC metodom za sve ispitane sadržaje, osim za sekvencu *foreman* i *container*, gdje MCFI-AOBMC metoda ostvaruje veći PSNR. Razlika u kvaliteti slika interpoliranih navedenim metodama može se objasniti činjenicom da se korištenjem odvojene jednosmjerne procjene pokreta mogu odrediti točniji vektori pomaka nego korištenjem dvosmjerne procjene pokreta, posebice u slučaju brzog pokreta. Osim toga razlika je i u veličini blokova korištenih u okviru BMA načina procjene pokreta, a i u samom postupku interpolacije. Može se zaključiti da NTME metoda ostvaruje prosječno bolje rezultate prilikom ocjene kvalitete interpoliranih slika od MCFI-AOBMC, ali uz cijenu povećane složenosti.

Osnovni cilj ove disertacije bio je razviti novu metodu interpolacije slike čijom bi se primjenom ostvarila kvaliteta interpoliranih slika na visokoj razini uz smanjenje složenosti postupka. Da bi se postigla bolja preciznost procjene, korištena je odvojena jednosmjerna procjena pokreta kao i u NTME metodi. Razlika je što se u okviru predložene metode slika dijeli na blokove veličine 16x16 elemenata slike, čineći ukupan broj blokova u slici i pripadajućih vektora pomaka manjim. Sami postupak interpolacije je jednostavniji u odnosu na NTME metodu jer se umjesto četiri koriste dva prediktora za određivanje vrijednosti elemenata konačne interpolirane slike, a težinski koeficijenti određeni su prema pouzdanosti procjene vektora pomaka. AATFI koristi jednostavnu SAD funkciju kod procjene pokreta, što značajno smanjuje složenost u odnosu na NTME. Rezultati u Tablici 5.2. pokazuju da je prosječna PSNR vrijednost slika interpoliranih ATFI metodom 2,01 dB veća od PSNR vrijednosti slika interpoliranih MCFI-AOBMC metodom, a 0,29 dB manja od PSNR vrijednosti slika interpoliranih osjetno složenijom NTME metodom. Toliko poboljšanje u odnosu na MCFI-AOBMC metodu može se objasniti korištenjem jednosmjerne procjene pokreta i interpolacijom korištenjem dva prediktora. Također se može zaključiti da je prosječna kvaliteta slika interpoliranih ATFI i

NTME metodama približno jednaka uz različit stupanj složenosti koji će u nastavku biti detaljnije analiziran.

Dodatno smanjenje složenosti ATFI metode napravljeno je na temelju provedene analize utjecaja prostorno-vremenskih značajki videosignala na pogrešku prilikom interpolacije slike. Uveden je kriterij adaptivnosti algoritma na temelju kojeg se, ovisno o vrijednosti vremenske aktivnosti između dviju originalnih slika odlučuje o načinu interpolacije. U slučaju da je trenutna vremenska aktivnost veća od prethodno određene vrijednosti praga, pristupa se interpolaciji opisanoj u AATFI metodi. U slučaju da je vrijednost trenutne vremenske aktivnosti manja ili jednaka vrijednosti praga, u prvoj izvedbi, AATFI-FR, radi se interpolacija ponavljanjem prethodnog okvira, dok se u drugoj izvedbi, AATFI-FA radi interpolacija korištenjem srednje vrijednosti elemenata dvije originalne slike. AATFI-FR metoda jednostavnija je od AATFI-FA metode jer je postupak interpolacije ponavljanjem okvira nešto jednostavniji od postupka interpolacije korištenjem srednje vrijednosti dvije susjedne originalne slike. Za slike gdje se koristi MCFI postupak u okviru AATFI-FR i AATFI-FA je identičan. Rezultati prikazani u Tablici 5.2., sukladno očekivanjima, ukazuju na to da je za sve sekvence bolja kvaliteta interpoliranih slika korištenjem AATFI-FA metode nego korištenjem AATFI-FR metode. Budući da je kvaliteta slika interpoliranih FA metodom bolja od kvalitete slika interpoliranih FR metodom, kvaliteta slika interpoliranih AATFI-FA metodom bolja je od kvalitete slika interpoliranih AATFI-FR metodom.

Usporedbom prosječne kvalitete slika interpoliranih ATFI, AATFI-FR i AATFI-FA metodama može se vidjeti da je najveća prosječna ocjena kvalitete slika interpoliranih AATFI-FA metodom, iako je ona čak manje složena od ATFI metode. Usporedbom sve tri navedene metode sa ostalim metodama čiji su rezultati prikazani Tablicom 5.2. vidi se da je prosječna ocjena kvalitete slika interpoliranih tim metodama bolja od ocjene slika interpoliranih FR, FA i MCFI-AOBMC metodama. Prosječna PSNR vrijednost slika interpoliranih AATFI-FA metodom redom nadmašuje prosječnu PSNR vrijednost slika interpoliranih FR, FA i MCFI-AOBMC metodom za 4,76, 1,67 i 2,13 dB.

Usporedbom AATFI-FA i NTME metode, koja od svih ispitivanih metoda ostvaruje najbolju prosječnu kvalitetu interpoliranih slika, može se vidjeti blaga prednost u korist NTME metode koja ima za 0,17 dB veći prosječni PSNR od AATFI-FA metode. Ta razlika je u konačnici gotovo zanemariva, pogotovo ako se uzme u obzir činjenica da se u okviru

AATFI-FA metode određeni broj slika nadomješta bez procjene pokreta. Osim toga, i u slučajevima nadomještanja korištenjem procjene pokreta AATFI-FA metoda je manje složena od NTME, kako će biti pokazano u analizi složenosti primijenjenih metoda.

Rezultati ocjene kvalitete interpoliranih slika korištenjem PSNR metrike prikazani u Tablici 5.2. dodatno su potkrijepljeni rezultatima ocjene kvalitete korištenjem SSIM metrike koja, kako je prethodno opisano, uzima u obzir određena svojstva ljudskog vizualnog sustava. Vrijednosti SSIM indeksa prikazane su u Tablici 5.3. te one potvrđuju sve zaključke proizašle iz analize rezultata ocjene kvalitete interpoliranih slika dobivenih korištenjem PSNR metrike. Na temelju rezultata prikazanih u Tablici 5.2. i Tablici 5.3. može se zaključiti da se korištenjem AATFI-FA metode u odnosu na NTME metodu za interpolaciju slika, uz značajno smanjenje složenosti, ostvaruje približno jednaka prosječna ocjena kvalitete interpoliranih slika.

5.5. Subjektivno ocjenjivanje kvalitete interpoliranih slika

Kako bi se dobila što vjernija informacija o kvaliteti interpoliranih slika, osim objektivnog napravljeno je i subjektivno ocjenjivanje kvalitete. Subjektivni testovi uključuju veći broj gledatelja koji ocjenjuju izobličene videosignale. Testovi su zbog toga dugotrajni i složeni, ali daju najbolju informaciju o kvaliteti slike jer ju ocjenjuju gledatelji koji su ujedno i krajnji korisnici videoaplikacija. S referentnom videosekvencom uspoređene su sekvence unutar kojih su slike interpolirane metodama, FR, FA, ATFI, AATFI-FR i AATFI-FA.

5.5.1. Dizajn subjektivnih testova

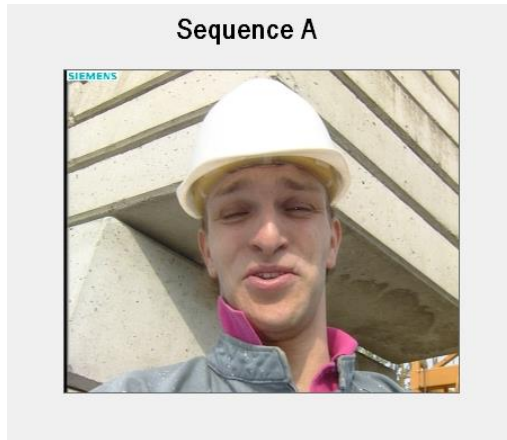
U okviru ove disertacije provedeno je subjektivno ocjenjivanje kvalitete interpoliranih slika korištenjem SAMVIQ metode opisane u dijelu 5.2.4. Navedena metoda spada u *Single Stimulus* metode pa je vrijeme provođenja u odnosu na *Double Stimulus* metode osjetno smanjeno jer se referentni signal ne prikazuje svaki puta uz izobličeni signal (ili prije njega). Budući da je skala za ocjenu kvalitete kontinuirana, to omogućuje fino vrednovanje vizualne kvalitete. Osim toga, u okviru navedene metode među izobličanim signalima gledatelji gledaju i referentni signal bez da znaju da se radi o njemu, a kasnije se ocjene referentnih signala koriste za proračun DMOS vrijednosti. Na taj se način povećava pouzdanost rezultata subjektivnih testova.

Cjelokupno testiranje bilo je provedeno u jednoj sesiji gdje su gledatelji odgledali 48 videosignala 6 različitih sadržaja i dali ocjenu svakom od njih. Za ocjenjivanje svih videosignala gledatelju je bilo potrebno oko 30 minuta. Svakom je gledatelju prvo pokazan referentni videosignal pojedinog sadržaja koji se nije ocjenjivao. Nakon toga gledatelj je sam birao redoslijed kojim će gledati sekvence među kojima je bio ponovljen referentni signal (s čime gledatelj nije bio upoznat). U svakom trenutku bilo je moguće zaustaviti sadržaj, ponovno ga pogledati ili naknadno ispraviti prethodno danu ocjenu. Na taj su način smanjeni učinci zamora ili manjka koncentracije gledatelja prilikom ocjenjivanja, što rezultate testova čini pouzdanijima.

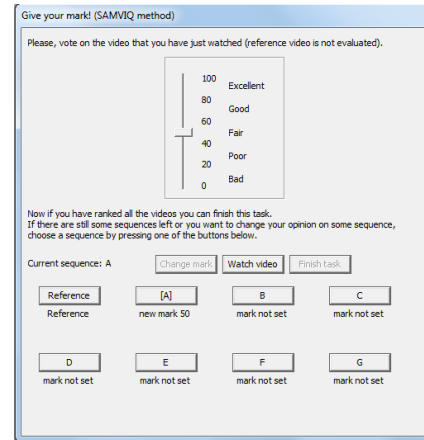
5.5.2. Testno okruženje za provedbu subjektivnog ocjenjivanja

Subjektivni testovi provedeni su na osobnom računalu s Windows operacijskim sustavom. Osigurano je da se videosignal prikazuje u kontinuitetu, bez zaustavljanja ili kašnjenja budući da takvi događaji mogu značajno utjecati na ocjenu kvalitete koju dodjeljuje svaki od korisnika. Za samu provedbu testova korišten je MSU Perceptual Video Quality Tool [94] koji je zbog svog jednostavnog korisničkog sučelja vrlo prihvatljiv.

Budući da kvaliteta multimedijских usluga treba biti ocjenjivana koristeći multimedijске ekrane i platforme, a ne konvencionalne TV ekrane, kako bi se izbjegli artefakti treperenja ili artefakti koji se pojavljuju u signalima s proredom, subjektivni testovi provedeni su na računalu uz korištenje zaslona s tekućim kristalima (engl. *Liquid Cristal Display* - LCD) veličine 21". Rezolucija navedenog zaslona je 1920x1080 elemenata slike, razmak elemenata slike 0,025mm, a omjer širine i visine slike 16:9. Na Slici 5.5. prikazano je sučelje za provođenje subjektivnog testiranja gdje se vidi da je dio zaslona koji nije pokriven videosignalom bio siv. Nakon što je odgledao videosignal, gledatelj je pomicanjem miša određivao ocjenu na prikazanoj skali. Prije dodjeljivanja ocjene pokazivač je bio postavljen na sredinu skale kako se ne bi utjecalo na gledateljevu ocjenu.



(a)

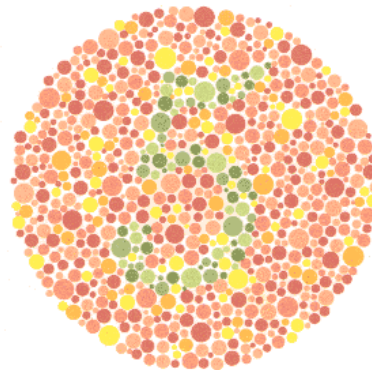
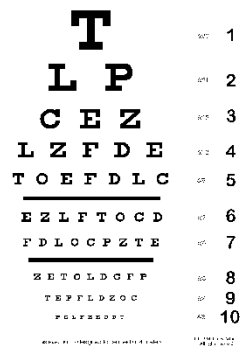


(b)

Slika 5.5. a) Sučelje za prikaz video signala pri subjektivnom ocjenjivanju b) sučelje za ocjenjivanje kvalitete odgledanog videosignala [94]

5.5.3. Gledatelji

U eksperimentima vezanim za subjektivno ocjenjivanje videosignala sudjelovao je 21 gledatelj u dobi od 19 do 47 godina. Od navedenog broja 5 gledatelja bilo je ženskog spola, a 16 gledatelja bilo je muškog spola. Sukladno preporukama, prije samog eksperimenta gledatelji su bili podvrgnuti testiranju njihove vizualne oštine kao i testiranju sposobnosti opažanja boja. Primjer testova koji su korišteni u navedene svrhe prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6. Primjer testa za a) ispitivanje vizualne oštine b) ispitivanje normalnog opažanja boja

Utvrđeno je da svi gledatelji raspoznaju boje i imaju korektnu vizualnu oštinu. Prije provođenja eksperimenta gledateljima je objašnjen cilj eksperimenta te su pogledali trening sekvence, a nakon toga su pristupili gledanju i ocjenjivanju 48 sekvenci raspoređenih na 6

različitih sadržaja. Nakon ocjenjivanja, rezultate testova potrebno je dodatno obraditi prema postupku opisanom u nastavku.

5.5.4. Obrada rezultata subjektivnih testova

Obrada rezultata provedena je u skladu s ITU-R BT.500-11 preporukom [93]. Nakon prikupljanja ocjena svih gledatelja za sve sekvence, za svaku od sekvenci izračunata je srednja ocjena prema sljedećem izrazu

$$\bar{x}_j = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G x_{i,j}, \quad (5-7)$$

gdje je j indeks izobličene sekvence, i indeks gledatelja, G ukupni broj gledatelja koji su odgledali određenu izobličenu sekvencu. Osim srednje vrijednosti, za svaku izobličenu sekvencu izračunata je i standardna devijacija prema sljedećem izrazu

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^G \frac{(\bar{x}_j - x_{ij})^2}{(G-1)}}. \quad (5-8)$$

Ocjene subjektivnih testova za sve gledatelje i sve sekvence nalaze se u Prilogu I, a srednja vrijednost i standardna devijacija za svaku sekvencu u Prilogu II.

Prilikom prikazivanja rezultata testa ovakvog tipa, svim srednjim vrijednostima treba biti pridružen interval pouzdanosti koji se izvodi iz veličine samog uzorka i iz standardne devijacije. Sukladno preporuci [93] koristi se 95 %-tni interval pouzdanosti koji se može prikazati kao

$$[\bar{x}_j - \delta_j, \bar{x}_j + \delta_j], \quad (5-9)$$

gdje je

$$\delta_j = 1.96 \frac{\sigma_j}{\sqrt{G}}. \quad (5-10)$$

Uz ovakav interval pouzdanosti osigurava se da je apsolutna razlika između eksperimentalne i stvarne srednje vrijednosti manja od 95%-tnog intervala pouzdanosti.

Sukladno preporuci [93], rezultate svakog gledatelja potrebno je usporediti s rezultatima svih ostalih gledatelja s ciljem utvrđivanja njihove razlike od prosječne vrijednosti. U slučaju da se rezultati pojedinog gledatelja značajno razlikuju od prosječne vrijednosti rezultata preostalih gledatelja, rezultati tog gledatelja trebaju biti odbačeni. Kao što je već navedeno, u provedenim testovima 21 gledatelj gledao je po 48 sekvenci uz jedinstvene uvjete testiranja i

jedno ponavljanje. Prvo je na temelju vrijednosti kurtosis koeficijenta ocjena, koji se dobije kao omjer momenta četvrtog reda i kvadrata momenta drugog reda, trebalo utvrditi je li raspodjela ocjena za svaku izobličenu sekvencu normalna (Gaussova) ili nije. Kurtosis koeficijent određen je sljedećim izrazom

$$\beta_{2j} = \frac{m_4}{(m_2)^2}, \quad (5-11)$$

gdje je

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^G (x_{ij} - \bar{x}_j)^x}{G}. \quad (5-12)$$

Iznosi kurtosis koeficijenata za skup ocjena svake izobličene sekvence dani su u Prilogu III. Raspodjela rezultata može se smatrati normalnom ako je kurtosis koeficijent u rasponu od 2 do 4. U tom slučaju rezultati x_{ij} svakog gledatelja za svaku izobličenu sekvencu moraju biti uspoređeni s pridruženom srednjom vrijednošću, \bar{x}_j , uvećanom za dvostruku pridruženu standardnu devijaciju, a ako raspodjela nije normalna za standardnu devijaciju pomnoženu s $\sqrt{20}$. Ta uvećana vrijednost označava se s P_j . Usporedbu treba napraviti i kada je srednja vrijednost umanjena za spomenute iznose, a ta se umanjena vrijednost označava s Q_j . Svaki put kada je ocjena pojedinog gledatelja manja od Q_j , brojač pridružen svakom gledatelju, Q_i , povećava se za 1. Analogno tome, svaki put kada je ocjena pojedinog gledatelja veća od P_j , brojač pridružen svakom gledatelju, P_i , povećava se za 1. Prethodno opisani postupak može se prikazati sljedećim izrazom

ako je $2 \leq \beta_{2j} \leq 4$ tada

ako je $x_{ij} \geq \bar{x}_j + 2 \cdot \sigma_j$ onda $P_i = P_i + 1$

ako je $x_{ij} \leq \bar{x}_j - 2 \cdot \sigma_j$ onda $Q_i = Q_i + 1$

u suprotnom

ako je $x_{ij} \geq \bar{x}_j + \sqrt{20} \cdot \sigma_j$ onda $P_i = P_i + 1$

ako je $x_{ij} \leq \bar{x}_j - \sqrt{20} \cdot \sigma_j$ onda $Q_i = Q_i + 1$

kraj postupka.

(5-13)

Nakon provedbe postupka prikazanog prethodnim izrazom potrebno je odrediti dva omjera: (1) omjer sume P_i+Q_i i ukupnog broja ocjena svakog gledatelja (2) apsolutna vrijednost omjera $P_i - Q_i$ i P_i+Q_i . Rezultati i -tog gledatelja se odbacuju ako je prvi omjer veći od 0.05, a drugi istovremeno manji od 0.3, dok se u suprotnom ne odbacuju. Uvjet odbacivanja rezultata pojedinog gledatelja prikazan je sljedećim izrazom

$$\text{Ako je } \frac{P_i + Q_i}{B} > 0.05 \text{ i } \left| \frac{P_i - Q_i}{P_i + Q_i} \right| < 0.3 \text{ onda odbaci rezultate gledatelja } i, \quad (5-14)$$

gdje je B broj izobličenih sekvenci koje je gledatelj odgledao (u ovom slučaju 42, jer je 6 referentnih). U slučaju da je za gledatelja i zadovoljen prvi uvjet, to upućuje na činjenicu da više od 5% njegovih ocjena previše odstupa od prosječne ocjene. Drugi uvjet uveden je kako se ne bi odbacile ocjene gledatelja koje su dosljedno niske ili dosljedno visoke, iako značajno odstupaju od prosječne ocjene za pojedinu sekvencu. Provođenjem prethodno opisanog postupka analize ocjena svih gledatelja, utvrđeno je da niti za jednog gledatelja oba uvjeta iz izraza (5-14) nisu istovremeno bila zadovoljena, što upućuje na činjenicu da ne treba odbaciti rezultate niti jednog gledatelja.

Za svaku ocjenjivanu sekvencu određena je *MOS* (engl. *Mean Opinion Score*) vrijednost kao aritmetička sredina ocjena svih gledatelja. U skladu s izvješćem VQEG (engl. *Video quality expert group*) grupe stručnjaka za ocjenu kvalitete videosignala [109], izračunate su *DMOS* (engl. *Degradation Mean Opinion Score*) vrijednosti za svakog gledatelja po svakoj izobličenoj sekvenci, $DMOS_{i,j}$. Prilikom proračuna tih vrijednosti korištene su ocjene gledatelja dodijeljene pojedinom odgovarajućem referentnom signalu, $MOS_i(RVS)$ i pojedinom izobličenom video signalu, $MOS_{ij}(TVS)$ prema sljedećem izrazu

$$DMOS_{i,j} = MOS_{i,j}(TVS) - MOS_i(RVS) + 100, \quad (5-15)$$

gdje „100“ predstavlja maksimalnu moguću ocjenu kvalitete koju je bilo moguće dodijeliti izobličenom signalu tijekom eksperimenta. $DMOS_{ij}$ vrijednosti za svakog gledatelja i svaku sekvencu nalaze se u Prilogu IV.

Konačni rezultati subjektivnih testova za svaku izobličenu sekvencu izraženi su kao prosječni $DMOS_{ij}$ svih gledatelja a mogu se odrediti sljedećim izrazom

$$DMOS_j = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G DMOS_{ij} . \quad (5-16)$$

Valja istaknuti da veća vrijednost $DMOS_j$ upućuje na veću vizualnu kvalitetu opaženu od strane gledatelja. Također treba naglasiti kako prilikom ovakvog načina određivanja $DMOS_j$ postoji mogućnost da vrijednost bude i veća od 100, iako je maksimalna ocjena koju je bilo moguće dodijeliti upravo 100. To se može dogoditi u slučaju da je pojedini gledatelj izobličenoj sekvenci dao veću ocjenu nego pripadnoj referentnoj sekvenci.

5.5.5. Rezultati subjektivnih testova

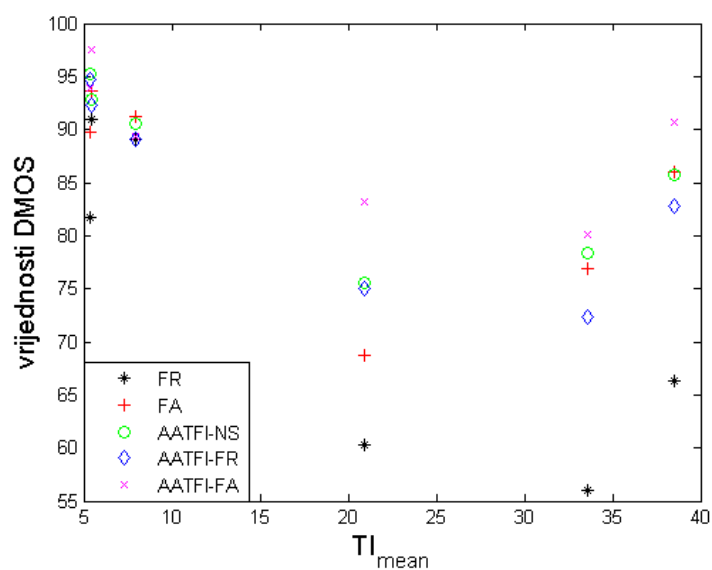
U okviru subjektivnih testova svaki od 21 gledatelja ocjenjivao je po 42 sekvence 6 različitih sadržaja, *mobile*, *football*, *foreman*, *news*, *mother&daughter* i *container*. Navedeni sadržaji razlikuju se po svojoj prostornoj i vremenskoj aktivnosti. Navedenim je sadržajima povećavana vremenska rezolucija za 2 puta korištenjem metoda, FR, FA, ATFI, AATFI-FR i AATFI-FA. Svako od sekvenci povećane vremenske rezolucije gledatelji su davali ocjene u rasponu od 0 do 100, gdje veća vrijednost ukazuje na bolju kvalitetu.

Nakon provedene analize zaključeno je da rezultati ocjena niti jednog gledatelja na trebaju biti odbačeni te su prema postupku opisanom u prethodnom dijelu izračunate $DMOS_j$ vrijednosti za svaku ocjenjivanu sekvencu. Veća vrijednost $DMOS_j$ ukazuje na bolju ocjenu kvalitete dodijeljenu od strane gledatelja. U Tablici 5.4. prikazane su prosječne vrijednosti $DMOS_j$ za sve sadržaje čija je vremenska rezolucija povećana različitim metodama za interpolaciju slike.

Tablica 5.4. Prosječne vrijednosti $DMOS_j$ za sve sekvence

Sekvenca	TI _{mean}	FR	FA	ATFI	AATFI-FR	AATFI-FA
<i>mobile</i>	38,49	66,29	86,00	85,67	82,81	90,71
<i>football</i>	33,58	56,05	76,86	78,33	72,33	80,14
<i>foreman</i>	20,90	60,29	68,76	75,62	75,05	83,13
<i>news</i>	7,95	89,10	91,24	90,52	89,14	89,38
<i>mother&daughter</i>	5,39	81,76	89,81	95,19	94,71	93,90
<i>container</i>	5,42	91,00	93,62	92,81	92,33	97,57
Prosječno		74,08	84,38	86,35	84,40	89,14

Analizom rezultata subjektivnih ocjena prema sadržajima može se zaključiti, slično kao i za rezultate objektivnih testova, da u pravilu subjektivna ocjena raste sa smanjenjem vremenske aktivnosti sadržaja. To je očekivano jer manja vremenska aktivnost, sukladno razmatranjima u dijelu 3.5., upućuje na manju količinu pokreta koju je lakše adekvatno kompenzirati. Iznimka je, kao i kod rezultata objektivnih testova, sekvenca *mobile* kojoj su gledatelji, unatoč najvećoj vremenskoj aktivnosti od svih testiranih sadržaja, dali visoke ocjene. Rezultati iz prethodne tablice prikazani su na Slici 5.7. na kojoj je također vidljivo da su najveće vrijednosti subjektivnih ocjena pridružene malim vrijednostima vremenske aktivnosti, dok s porastom vremenske aktivnosti u pravilu opadaju vrijednosti ocjene kvalitete dobivene subjektivnim testovima.



Slika 5.7. Ovisnost rezultata subjektivne ocjene kvalitete o vremenskoj aktivnosti

Usporedbom rezultata za svaki sadržaj posebno može se zaključiti da su gledatelji najmanju ocjenu dali sekvencama čija je vremenska rezolucija povećana FR metodom (Slika 5.7.). Takvi su rezultati očekivani jer navedena metoda prilikom interpolacije slika ponavlja prethodni okvir čime se uzimaju u obzir samo prostorne značajke samo jedne slike te na taj način nije moguće adekvatno kompenzirati čak ni manje pokrete. FA metoda koja koristi samo prostorne značajke, ali uzima u obzir prethodnu i sljedeću sliku, ostvaruje osjetno više ocjene

kvalitete dobivene subjektivnim testovima od FR metode, a u nekim slučajevima čak mjerljive i sa rezultatima dobivenim osjetno složenijim metodama.

Kvaliteta sekvenci čija je vremenska rezolucija povećana primjenom MCFI metoda koje su korištene u okviru ovog eksperimenta (ATFI, AATFI-FR i AATFI-FA) očekivano u pravilu nadmašuje kvalitetu sekvenci kod kojih je interpolacija slika rađena korištenjem samo prostornih značajki. Povećanje kvalitete ostvareno je povećanjem složenosti algoritma. Uspoređujući tri navedene MCFI metode može se zaključiti da je, sukladno očekivanjima, najmanja ocjena od strane gledatelja dodijeljena sekvencama u kojima su slike interpolirane AATFI-FR metodom. To je očekivano jer spomenuta metoda u dijelovima sekvence s malom vremenskom aktivnošću ponavlja prethodnu sliku, što u konačnici narušava kvalitetu sekvence. Zanimljivo je da sekvence čije su slike interpolirane AATFI-FA metodom ostvaruju bolje ocjene subjektivne kvalitete od sekvenci čije su slike interpolirane ATFI metodom iako je posljednja metoda osjetno složenija. To potvrđuje i rezultate objektivnih testova kvalitete gdje je AATFI-FA metoda imala neznatno veći PSNR od ATFI, dok je SSIM indeks tih dviju metoda bio izjednačen. Može se zaključiti da je AATFI-FA metoda vrlo pogodno rješenje za povećanje vremenske rezolucije video signala jer zbog svoje adaptivnosti za određene sadržaje može biti osjetno jednostavnija od postojećih MCFI metoda, a iz rezultata dobivenih subjektivnim i objektivnim ocjenjivanjem kvalitete interpolirane slike vidljivo je da je kvaliteta slika interpoliranih AATFI-FA metodom usporediva s kvalitetom slika interpoliranih ostalim MCFI metodama.

5.6. Analiza složenosti postupaka za interpolaciju slike

Složenost nekog postupka za interpolaciju slike ovisit će o više parametara. Postupci koji koriste samo prostorne značajke slike u pravilu su manje složenosti od postupaka koji koriste procjenu pokreta. Nadalje, postupci procjene pokreta koji se primjenjuju kod interpolacije slike, odnosno povećanja vremenske rezolucije videosignala, značajno su složeniji od onih koji se koriste kod kodiranja videosignala. Složenost algoritma predloženog u ovoj doktorskoj disertaciji analizirana je s obzirom na broj slika za koje se radi interpolacija na temelju procjene pokreta, način pretraživanja područja pretrage kod procjene pokreta, složenosti postupka procjene pokreta te složenosti samog postupka interpolacije. Složenost predloženog algoritma uspoređena je sa složenošću algoritama FR, FA te MCFI-AOBMC i NTME.

Uspoređena je i složenost inačica predloženog algoritma, AATFI-FA, AATFI-FR i ATFI.

5.6.1. Analiza složenosti s obzirom na broj slika gdje se radi kompenzacija pokreta

Sukladno podjeli algoritama na one koji koriste samo prostorne značajke i na one koji koriste prostorne i vremenske značajke, prvo je napravljena analiza s obzirom na broj slika kod kojih se radi kompenzacija zasnovana na procjeni pokreta. Ukupni broj interpoliranih slika za svaku metodu bio je 769, a u Tablici 5.5. prikazano je koliko od njih je, uz vrijednost praga vremenske aktivnosti $\delta=6$, interpolirano na osnovi kompenzacije pokreta koja, u odnosu na korištenje samo prostornih značajki, povećava složenost postupka. Vrijednosti parametra vremenske aktivnosti, TI_i , za sve slike originalnih sekvenci nalazi se u Prilogu V.

Tablica 5.5. Broj slika interpoliranih na temelju kompenzacije pokreta po metodama

FR	FA	MCFI-AOBMC	NTME	ATFI	AATFI-FR	AATFI-FA
0	0	769	769	769	537	537

Iz navedene tablice vidljivo je da su najjednostavnije metode koje za interpolaciju koriste samo prostorne značajke (FR i FA) jer se u okviru tih metoda niti za jednu sliku ne radi procjena pokreta niti interpolacija zasnovana na procjeni iste. MCFI metode (MCFI-AOBMC, NTME i ATFI) rade interpolaciju slike zasnovanu na procjeni pokreta za sve slike i na taj način se značajno povećava složenost. Iz rezultata ocjene kvalitete interpoliranih slika subjektivnim i objektivnim metodama jasno je da MCFI metode ostvaruju znatno bolju kvalitetu slike od FR i FA metoda, ali iz Tablice 5.5. jasno je i da je razlika u složenosti vrlo velika. Uvođenjem kriterija adaptivnosti u okviru AATFI-FR i AATFI-FA, uz vrijednost praga $\delta=6$, broj slika kod kojih se radi interpolacija zasnovana na kompenzaciji pokreta smanjen je za 30%, čime se značajno smanjuje složenost samog algoritma. Ovaj postotak ovisi o udjelu sekvenci s manjom vremenskom aktivnošću u testnom setu i može biti i veći za određeni tip sadržaja (npr. „glava koja govori“). S obzirom da testne sekvence korištene u ovoj analizi predstavljaju dobar presjek različitih sadržaja koji se pojavljuju u realnim sustavima, može se očekivati i sličan postotak slika za koje se ne mora raditi procjena pokreta. Analiza ocjena subjektivnih i objektivnih testova kvalitete pokazala je da te metode, a posebno metoda AATFI-FA, postižu vrlo visoke ocjene kvalitete sekvence. Može se zaključiti da je spomenuta metoda, s aspekta kvalitete

interpoliranih slika i broja slika interpoliranih na temelju kompenzacije pokreta, najbolje rješenje od svih ispitanih metoda.

5.6.2. Analiza složenosti s obzirom na način pretraživanja područja pretrage

Prilikom procjene pokreta trenutna slika dijeli se na blokove i za svaki se blok traži njemu najbliži unutar zadanog područja u referentnoj slici, a na temelju razlika pozicija tih blokova određuju se vektori pomaka. Veličina područja pretrage kao i način njegova pretraživanja utječu na točnost i pouzdanost procjene pokreta. Jasno je da se korištenjem većeg područja pretrage mogu pronaći pouzdaniji vektori pomaka, ali povećavanjem područja pretrage povećava se i broj lokacija na kojima se traži odgovarajući blok, što u konačnici vodi ka povećanju složenosti postupka. Na složenost također utječe i način pretraživanja područja pretrage. Prethodno su spomenuti razni načini pretraživanja od kojih je najpouzdanije potpuno pretraživanje, FS, gdje se najbliži blok traži na svakoj lokaciji unutar područja pretrage. Takav način, posebice ako je područje pretrage veliko, nikako nije pogodan jer je vrlo složen i dugotrajan. Zbog toga su uvedeni različiti jednostavniji načini pretrage od kojih su neki predstavljeni u dijelu 2.1. U algoritmu predloženom u okviru ove disertacije korišteno je logaritamsko pretraživanje opisano u dijelu 4.2.1. Razlog odabira LS je značajno smanjenje broja lokacija na kojima se traži odgovarajući blok, uz zadržavanje približne razine preciznosti procjene vektora pomaka kao i kod FS načina pretraživanja. Broj lokacija na kojima se traži odgovarajući blok unutar područja pretrage 2^n elemenata slike korištenjem FS načina pretraživanja može se odrediti korištenjem izraza

$$N_{lok}^{FS} = (2 \cdot 2^n - 1)^2, \quad (5-17)$$

a broj lokacija na kojima se traži odgovarajući blok unutar područja pretrage 2^n elemenata slike korištenjem LS načina pretraživanja može se odrediti izrazom

$$N_{lok}^{LS} = n \cdot 2^3 + 1. \quad (5-18)$$

U Tablici 5.6. prikazan je broj lokacija na kojima se traži najbliži blok unutar područja pretrage različite veličine i uz dva različita načina pretrage, FS i LS. Prikazani su rezultati samo jedan blok.

Tablica 5.6. Broj lokacija na kojima se traži odgovarajući blok s obzirom na veličinu i način pretraživanja područja pretrage

Veličina područja pretrage [elemenata slike]	N_{lok}^{FS}	N_{lok}^{LS}	$\frac{N_{lok}^{FS}}{N_{lok}^{LS}}$
$2^5 = 32$	3969	41	96,80
$2^4 = 16$	961	33	29,12
$2^3 = 8$	225	25	9,00
$2^2 = 4$	49	17	2,88
$2^1 = 2$	9	9	1,00

Broj lokacija na kojima se traži odgovarajući blok raste s povećanjem područja pretrage, pri čemu kod FS broj lokacija raste eksponencijalno s porastom n , dok je kod LS taj porast linearan.

5.6.3. Usporedba složenosti predloženog algoritma i postojećih rješenja

Budući da su u okviru objektivnog ocjenjivanja kvalitete interpoliranih slika uspoređene slike interpolirane predloženim algoritmom i dva odabrana MCFI algoritma, NTME [50] i MCFI-AOBMC [8], u ovom će dijelu biti prikazana usporedba navedenih algoritama po složenosti. Sukladno rezultatima objektivnih i subjektivnih testova prikazanim u dijelovima 5.4 i 5.5.5. te analizi složenosti s obzirom na broj slika gdje se radi kompenzacija pokreta, s postojećim će se rješenjima usporediti AATFI-FA algoritam uz vrijednost praga vremenske aktivnosti $\delta=6$ kao najadekvatnije rješenje sa stajališta složenosti algoritma i kvalitete interpolirane slike (Tablica 5.7.).

Tablica 5.7. Usporedba predloženog algoritma s postojećim rješenjima

Metoda	Broj slika za MCFI	Procjena pokreta	Veličina bloka	Broj prediktora	Prosječni PSNR [dB]	Prosječni SSIM
MCFI-AOBMC	769	dvosmjerna	8x8-2x2	1	32,75	0,897
NTME	769	odvojena jednosmjerna	8x8-2x2	4	35,05	0,933
AATFI-FA	537	odvojena jednosmjerna	16x16	2	34,88	0,905

Numerička složenost algoritma obično se iskazuje brojem numeričkih operacija koje se moraju provesti. Složenost algoritama za povećanje vremenske rezolucije videosignala koji koriste proračun vektora pomaka ovisit će o broju točaka pretrage i složenosti proračuna mjere distorzije kod određivanja vektora pomaka, složenosti dodatnih postupaka za obradu vektora pomaka te složenosti postupka same interpolacije slike. Algoritam AATFI-FA koristi jednosmjernu procjenu pokreta unaprijed i unatrag za blokove veličine 16x16 elemenata uz primjenu logaritamskog pretraživanja. Prikazani rezultati su za područje pretrage 32 elementa slike za koje je ukupan broj točaka pretrage

$$BTP_{AATFI-FA} = 5 \cdot 2^3 + 1 = 41. \quad (5-19)$$

Pri procjeni vektora pomaka minimizira se funkcija SAD pa je ukupan broj operacija jednak

$$NS_{AATFI-FA}^{ME} = \frac{M \cdot N}{16 \cdot 16} \cdot (41 \cdot 16 \cdot 16 \text{ oduzimanja} + 41 \cdot (16 \cdot 16 - 1) \text{ zbrajanja} + 41 \cdot 16 \cdot 16 \text{ apsolutnih vrijednosti}) \quad (5-20)$$

Operacije oduzimanja i zbrajanja jednake su složenosti, dok je apsolutna vrijednost puno manje složenosti od prethodne dvije pa će se u svim sljedećim razmatranjima zanemariti. Ukupni broj operacija za procjenu pokreta za algoritam AATFI-FA po slici koja se interpolira bit će jednak

$$NS_{AATFI-FA}^{ME} = \frac{M \cdot N}{16 \cdot 16} \cdot 20951 \text{ oduzimanja / zbrajanja} \approx \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} \cdot 5238 \text{ oduzimanja / zbrajanja} \quad (5-21)$$

Kako je ovo broj operacija za procjenu pokreta u jednom smjeru, za procjenu pokreta unaprijed i unatrag trebat će $2 \cdot NS_{AATFI-FA}^{ME}$ operacija.

Algoritam MCFI-AOBMC koristi dvosmjernu procjenu pokreta za blokove veličine 8x8 i područje pretrage 16 elemenata slike, pri čemu je mjera distorzije (2-13) kombinacija sume bilateralnih apsolutnih razlika, *SBAD* (2-11), i srednje distorzije rubnog područja, *SMD* (2-12). Uz pretpostavku logaritamskog pretraživanja broj točaka pretrage će biti

$$BTP_{MCFI-AOBMC} = 4 \cdot 2^3 + 1 = 33. \quad (5-22)$$

Broj operacija za *SMD* za svaku točku pretrage proporcionalan broju rubnih elemenata u bloku 8x8 jednak je

$$NS_{SMD}^{ME} = 29 \text{ zbrajanja} + 30 \text{ oduzimanja} + 30 \text{ apsolutnih vrijednosti}. \quad (5-23)$$

Uz zanemarivanje proračuna apsolutnih vrijednosti, ukupan broj operacija može se izraziti kao

$$NS_{SBAD}^{ME} + NS_{SMD}^{ME} = 33 \cdot (127 + 59) = 33 \cdot 186 = 6138 \text{ zbrajanja / oduzimanja} \quad (5-24)$$

za svaki blok. Broj blokova za sliku veličine $N \times M$ elemenata slike je $N \times M$ / veličina bloka. Postupak procjene pokreta se kod algoritma MCFI-AOBMC ponavlja iterativno zbog načina određivanja mjere distorzije *SMD*, tako da je ukupni broj proračuna za procjenu pokreta

$$NS_{MCFI-AOBMC}^{ME} = k \cdot \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} \cdot 6138 \text{ zbrajanja / oduzimanja}, \quad (5-25)$$

gdje je k broj iteracija i mora biti veći ili jednak 2. Nakon bilateralne procjene pokreta na blokovima veličine 8x8, MCFI-AOBMC provodi segmentaciju za blokove na rubovima, odnosno unutar objekata, *k-means* postupkom klasteriranja vektora pomaka. Za blokove na rubovima objekata radi se dodatna podjela na blokove veličine 4x4 ili 2x2 elementa slike te se za njih ponovo računa *SBAD* mjera. S obzirom da rubovi objekata obično pokrivaju manji dio slike, u proračunu složenosti će se složenost ovog dijela postupka zanemariti.

NTME algoritam provodi proračun vektora pomaka tako da koristi vektore pomaka 13 blokova prethodne slike, 5 blokova trenutne slike i nulti vektor pomaka kao prediktore, kako

je opisano u 2.1.2. Ovih 19 blokova (veličine 8x8) postupkom klasteriranja svrstava u 6 klastera čiji su centri mase konačni prediktori za proračun vektora pomaka trenutnog bloka. Dodatno se proračunava i globalni vektor pomaka za dio slike veličine $NI \times MI$ te služi kao sedmi prediktor. Konačni prediktor se bira između ovih sedam kao onaj koji ima najmanju mjeru distorzije $E_d(d)$, odnosno

$$\hat{d}_u = \arg_d \min E_d(d) \quad (5-26)$$

$$E_d(d) = \left(\sum_{x,y} \left| I_k[x,y] - I_{k-1}[x + MV_x, y + MV_y] + \lambda \sum_{l \in N_n} w(x,y,x_l,y_l) \| d(x,y) - d(x_l,y_l) \| \right| \right) \quad (5-27)$$

gdje je

$$w(x,y,x_l,y_l) = e^{-\frac{(g(x,y) - g(x_l,y_l))^2}{2\kappa_1^2}} \min\left(1, e^{-\frac{E_d(x_l,y_l) - Th}{2\kappa_2^2}}\right) \quad (5-28)$$

težinska funkcija kojom se opisuje interakcija između susjednih blokova. $\lambda = 2\sigma^2$, gdje je σ^2 varijanca razlike pomaknute i originalne slike, E_d predstavlja mjeru distorzije bloka, Th vrijednost praga pouzdanosti, a κ_1 i κ_2 parametre raspršenja kojima se kontrolira količina interakcije između susjednih blokova. U okolini prediktora ispituje se primjenom ENS algoritma [69] do 26 točaka i određuje vektor pomaka koji minimizira funkciju cilja, $E_d(d)$. Ukupan broj proračuna funkcije distorzije, $E_d(D)$, za blok veličine 8x8 je prema tome 33. Nadalje, svaki se blok veličine 8x8 dijeli na 4 bloka 4x4 elementa slike za koji se određuje najbolji prediktor iz 4 kandidata u okolini te se procjena pokreta provodi u 8 točaka u okolini ovog prediktora. Ukupan broj proračuna funkcije $E_d(d)$ za blok 4x4 elementa slike je 12.

Najveći utjecaj na povećanje složenosti NTME algoritma u odnosu na MCFI-AOBMC i AATFI-FA je u složenosti same funkcije $E_d(d)$. Kako ona obuhvaća proračun sume apsolutnih razlika elemenata bloka, za blok 8x8 to čini:

$$NS_{B18 \times 8}^{ME} = 33 \cdot 127 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 33 \cdot 8 \cdot 8 \text{ apsolutnih vrijednosti}, \quad (5-29)$$

a za blok veličine 4x4

$$NS_{B14x4}^{ME} = 12 \cdot 31 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 12 \cdot 4 \cdot 4 \text{ apsolutnih vrijednosti}. \quad (5-30)$$

Za cijelu sliku ukupan broj operacija za proračun sume apsolutnih razlika bloka (uz zanemarivanje apsolutne vrijednosti) će biti jednak

$$NS_{B1}^{ME} = \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (NS_{B18x8} + NS_{B14x4}) = \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} \cdot 4563 \text{ zbrajanja / oduzimanja}. \quad (5-31)$$

Nadalje, za svaki se blok za proračun težina $w(x,y,x_l,y_l)$ računa maksimum lokalne varijance, $g(x,y)$. Za lokalno područje $L \times L$ i bez proračuna varijance za rubno područje bloka, proračun $g(x,y)$ obuhvaća za blok 8x8 elemenata slike

$$NS_{gBxB}^{ME} = L \cdot L \cdot (B-1) \cdot (B-1) \text{ zbrajanja} + L \cdot L \cdot (B-1) \cdot (B-1) \text{ zbrajanja / oduzimanja} + \\ + L \cdot L \cdot (B-1) \cdot (B-1) \text{ kvadriranja} \quad (5-32)$$

Za blok veličine 8x8 to znači da je

$$NS_{g8x8}^{ME} = 1323 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 441 \text{ kvadriranja}, \quad (5-33)$$

a za blok veličine 4x4

$$NS_{g4x4}^{ME} = 243 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 81 \text{ kvadriranja}. \quad (5-34)$$

Kada se NS_{g8x8}^{ME} i NS_{g4x4}^{ME} pomnože s brojem odgovarajućih blokova dobije se ukupan broj operacija za proračun $g(x,y)$

$$\begin{aligned}
NS_g^{ME} &= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (33 \cdot 1323 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 33 \cdot 441 \text{ kvadriranja} + \\
&\quad + 12 \cdot 243 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 12 \cdot 81 \text{ kvadriranja}) \quad . \quad (5-35) \\
&= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (46575 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 15525 \text{ kvadriranja})
\end{aligned}$$

Proračun $w(x,y,x_l,y_l)$ nadalje zahtijeva proračun dvije eksponencijalne funkcije za svaki blok, što daje 90 proračuna, ali s obzirom na broj operacija za $g(x,y)$ može se zanemariti. Također se može zanemariti i broj operacija za proračun $\|d(x,y)-d(x_l,y_l)\|$, dok je za proračun σ^2 razlike blokova, uz veličinu bloka 8x8 elemenata slike, potrebno još dodatno

$$NS_{\sigma B \times B}^{ME} = B \cdot B \text{ oduzimanja} + (B \cdot B - 1) \text{ zbrajanja} + B \cdot B \text{ kvadriranja} , \quad (5-36)$$

što ukupno daje

$$\begin{aligned}
NS_{\sigma}^{ME} &= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (33 \cdot 127 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 33 \cdot 8 \cdot 8 \text{ kvadriranja} + \\
&\quad + 12 \cdot 31 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 12 \cdot 4 \cdot 4 \text{ kvadriranja}) \quad . \quad (5-37) \\
&= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (4563 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 2304 \text{ kvadriranja})
\end{aligned}$$

Ukupan broj operacija za procjenu pokreta u algoritmu NTME (uz manja zanemarenja) bit će

$$\begin{aligned}
NS_{NTME}^{ME} &= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (NS_B + NS_q + NS_{\sigma}) \\
&= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (4563 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 46575 \text{ zbrajanja / oduzimanja} \\
&\quad + 15525 \text{ kvadriranja} + 4563 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 2304 \text{ kvadriranja}) \\
&= \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (55701 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 17829 \text{ kvadriranja}). \quad (5-38)
\end{aligned}$$

Ovaj broj operacija treba pomnožiti s 2 jer se radi odvojena procjena pokreta unatrag i unaprijed pa je ukupan broj operacija za procjenu pokreta jednak $2 \cdot NS_{NTME}^{ME}$. Usporedbom

broja operacija za procjenu pokreta za tri razmatrana algoritma, može se zaključiti da je NTME višestruko složeniji od AATFI-FA i MCFI-AOBMC algoritama te da AATFI-FA zahtijeva najmanje operacija od sva tri algoritma.

Za ocjenu ukupne složenosti algoritma potrebno je usporediti i ostale postupke osim procjene pokreta. AATFI-FA uz procjenu pokreta proračunava medijan vektora pomaka te težine kod proračuna preklapajućih elemenata slike, srednje vrijednosti u prozoru 3x3 kod proračuna šupljina te težine kod konačne interpolacije. Kod proračuna težina za sve navedene postupke koriste se vrijednosti *SAD* koje su prethodno proračunate u postupku procjene pokreta te ne zahtijevaju dodatne numeričke operacije, već samo dodatno korištenje memorije. Proračun preklapajućih elemenata slike prema izrazu (4-23) radi zbrajanje vrijednosti elemenata blokova koji se preklapaju i dijeljenje sa *SAD* bloka te normiranje suma recipročnim vrijednostima *SAD* blokova koji se preklapaju. Vrijednosti elemenata na mjestu šupljina se računaju kao srednje vrijednosti okolnih elemenata koji nisu šupljine u prozoru 3x3 elementa slike, što znači maksimalno 9 zbrajanja po elementu koji je šupljina. S obzirom da je u pojedinoj slici prediktoru (nastaloj procjenom pokreta unaprijed ili unazad) mali postotak elemenata koji se preklapaju ili su šupljine te se za svaki od tih elemenata provodi mali broj operacija u odnosu na ukupni broj operacija, ovaj dio proračuna je zanemarive složenosti.

Konačna interpolirana slika je težinska suma dva prediktora gdje se težine također računaju preko već proračunatih *SAD* vrijednosti, tako da je složenost i ovog dijela postupka zanemariva. U proračun složenosti AATFI-FA algoritma svakako treba dodati i složenost proračuna parametra vremenske aktivnosti, *TI*. Ako se radi na slici veličine $M \times N$ elemenata slike, tada je broj operacija potreban za proračun *TI* jednak

$$NS_{TI} = M \cdot N \text{ oduzimanja} + M \cdot N \text{ kvadriranja} + (M \cdot N - 1) \text{ zbrajanja} + 1 \text{ korjenovanje} . \quad (5-39)$$

Proračun drugog korijena nije nužno potrebno provesti pa se NS_{TI} može izraziti kao

$$NS_{TI} = \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (127 \text{ zbrajanja} / \text{oduzimanja} + 64 \text{ kvadriranja}). \quad (5-40)$$

Iako proračun TI u određenoj mjeri povećava složenost AATFI-FA, s obzirom da omogućava selekciju slika za koje nije potrebno provoditi procjenu pokreta, ukupno smanjuje složenost predloženog algoritma.

Algoritam MCFI-AOBMC, uz procjenu pokreta, provodi postupak bilateralnog proračuna vektora pomaka za blokove veličine 4×4 ili 2×2 elementa slike za blokove na rubovima objekata te proračun težina za preklapanje blokova kod konačne interpolacije slike. U proračunu težina preklapajućih blokova koriste se vrijednosti $SBAD$ koje su već proračunate kod procjene pokreta, tako da se složenost ovog proračuna može zanemariti. Iako svi ovi dodatni postupci povećavaju ukupnu složenost algoritma MCFI-AOBMC, u odnosu na složenost postupka procjene pokreta iskazan za blokove veličine 8×8 elemenata slike, njihova se složenost može zanemariti.

Algoritam NTME nakon procjene pokreta provodi postupak određivanja vektora pomaka za preklapajuća područja te proračun elemenata na mjestu šupljina. Konačna interpolirana slika dobije se kao težinska srednja vrijednost prediktora dobivenih procjenom pokreta unaprijed i unatrag, pri čemu se težine računaju iz razlike prediktora dobivenih pomakom slika F_{t-1} i F_{t+1} primjenom vektora pomaka unatrag, MV^b , i razlike prediktora dobivenih iz slike F_{t-1} i F_{t+1} primjenom vektora pomaka unaprijed, MV^f . Ukupno, za ovu interpolaciju je potrebno

$$NSI_{NTME} = \frac{M \cdot N}{8 \cdot 8} (384 \text{ zbrajanja / oduzimanja} + 128 \text{ množenja} + 64 \text{ dijeljenja}). \quad (5-41)$$

Iako doprinosi ukupnoj složenosti, ovaj dio algoritma može se zanemariti u odnosu na složenost procjene pokreta. Također se može zanemariti i složenost postupka proračuna preklapajućih područja i elemenata na mjestima šupljina. Proračun broja operacija za sve razmatrane algoritme napravljen je za preciznost određivanja vektora pomaka od jednog elementa slike. Povećanje preciznosti povećava složenost i procjene pokreta i interpolacije primjenom kompenzacije pokreta. AATFI-FA i NTME koriste za preciznost ispod 1 elementa slike brzi postupak primjenom razvoja u Taylorov red. Međutim, kompenzacija pokreta zahtijeva povećanje slike prostornom interpolacijom, što povećava složenost proračuna. Ipak, kada se međusobno uspoređuju algoritmi povećanje složenosti je jednako za sve, tako da u ovoj analizi nije detaljnije razmatrano.

Sukladno provedenoj analizi može se zaključiti da, neovisno o metodi, najveći utjecaj na složenost cijelog postupka ima složenost procjene pokreta. Broj računskih operacija u ostatku svakog od postupaka zanemariv je u odnosu na broj računskih operacija u samom postupku procjene pokreta. Usporedbom broja operacija potrebnog za procjenu pokreta u okviru svakog od tri analizirana postupka može se zaključiti da je AATFI-FA najjednostavniji, dok je NTME algoritam višestruko složeniji od oba preostala postupka. Treba napomenuti i da se, zbog adaptivnosti, u okviru AATFI-FA algoritma za približno 30% slika ne radi procjena pokreta, što navedeni postupak čini dodatno jednostavnijim. Iako je složenost AATFI-FA algoritma manja od složenosti MCFI-AOBMC algoritma (jer k može poprimiti vrijednost 2 ili više), kvaliteta slika interpoliranih AATFI-FA algoritmom osjetno nadmašuje kvalitetu slika interpoliranih MCFI-AOBMC algoritmom. Također treba reći i da je kvaliteta slika interpoliranih AATFI-FA algoritmom usporediva s kvalitetom slika interpoliranih NTME algoritmom unatoč višestruko većoj složenosti NTME algoritma. Može se zaključiti da predloženi AATFI-FA algoritam ima najbolji omjer složenosti i kvalitete interpolirane slike.

6. ZAKLJUČAK

S obzirom na činjenicu da videomaterijal snimljen modernim uređajima za snimanje ima visoku prostornu i vremensku rezoluciju, on kao takav, zbog ograničenosti i visoke cijene resursa, nije pogodan kod malih brzina prijenosa. Zbog toga se u postupku kodiranja snimljenom materijalu često smanjuje prostorna i/ili vremenska rezolucija. Nakon dekodiranja potrebno je povećati prostornu i/ili vremensku rezoluciju videosignala ovisno o mogućnostima uređaja za reprodukciju. U okviru ove disertacije napravljena je sustavna analiza postojećih algoritama za povećanje vremenske rezolucije te je predložen novi algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika kojim se postiže kvaliteta interpoliranih slika usporediva s kvalitetom dobivenom najboljim algoritama, uz značajno smanjenje složenosti postupka.

Sustavnom analizom postojećih postupaka za povećanje vremenske rezolucije utvrđena je osnovna podjela na algoritme koji koriste prostorne značajke videosignala i na algoritme koji, uz prostorne, koriste i vremenske značajke videosignala. Utvrđeno je da algoritmi koji koriste samo prostorne značajke (npr. FR ili FA) imaju izrazito nizak stupanj složenosti, ali je kvaliteta slika interpoliranih takvim algoritmima vrlo niska, posebno u sekvencama u kojima su pokreti brzi i naglašeni. Kako bi se povećala kvaliteta interpoliranih slika, primjenjuju se algoritmi koji koriste i prostorne i vremenske značajke videosignala. Međutim, složenost takvih algoritama je znatno veća jer se u okviru njih najprije treba napraviti procjena pokreta između dviju uzastopnih slika, a potom i interpolacija zasnovana na procjeni pokreta. Procjena pokreta smatra se najvažnijim dijelom algoritma za povećanje vremenske rezolucije jer njezina točnost značajno utječe na kvalitetu interpolirane slike. U okviru postupka procjene pokreta trenutna se slika dijeli na blokove određene veličine za koje se, pronalaskom najslabijeg bloka u zadanom području pretrage referentne slike, određuju vektori pomaka. Procjena pokreta može biti jednosmjerna ili dvosmjerna. Osnovna prednost dvosmjerne procjene pokreta nad jednosmjernom je u tome što se slika koja se interpolira dijeli na blokove, a vektori pomaka se traže istovremeno u odnosu na prethodnu i sljedeću sliku pa se nakon provedenog postupka interpolacije u interpoliranoj slici ne pojavljuju područja šupljina i preklapanja. Ipak, u praksi se često koristi jednosmjerna procjena pokreta jer se njezinim korištenjem mogu odrediti točniji i pouzdaniji vektori pomaka. Osim toga, kako bi se dodatno povećala točnost jednosmjerne procjene pokreta, vrlo često se radi odvojena jednosmjerna procjena pokreta predviđanjem

unaprijed i predviđanjem unatrag. Glavni nedostatak jednosmjernе procjene pokreta je što se nakon interpolacije blokova trenutne slike pomaknutih za pripadajuće vektore pomaka u interpoliranoj slici pojavljuju područja preklapanja blokova i područja šupljina. Kako bi se povećala kvaliteta interpolirane slike, daljnjom obradom potrebno je adekvatno nadomjestiti ta područja.

Videosignal može se prikazati kao slijed slika koje se izmjenjuju određenom brzinom. Razlika u kvaliteti originalne slike (prije kodiranja) i slike interpolirane na njenom mjestu može nastati uslijed šuma izazvanog postupkom kodiranja, uslijed pokreta objekata u sceni te promjenom sadržaja od slike do slike (deformacija objekata ili zaklanjanje objekata, promjena osvjetljenja i sl.). Budući da je u okviru ove disertacije rađena interpolacija na nekomprimiranom videosignalu, cjelokupna pogreška prilikom interpolacije nastaje zbog pokreta objekata i promjene sadržaja. Primjenom teorijskog modela videosignala analiziran je utjecaj vremenske udaljenosti, D , između slika koje se koriste za interpolaciju te utjecaj prostornih i vremenskih značajki videosignala na pogrešku interpolacije primjenom postupaka jednosmjernih procjena pokreta unaprijed i unazad. Teorijski rezultati uspoređeni su s empirijski dobivenom vrijednošću srednje kvadratne pogreške, MSE, za primjer jedne slike iz 6 testnih sekvenci. Za analizu je korišteno 6 sadržaja (*mobile, football, foreman, news, mother&daughter* i *container*) koji se značajno razlikuju po svojoj prostornoj i/ili vremenskoj aktivnosti. Utvrđeno je dobro poklapanje teorijskih i empirijskih rezultata za sekvence s malim TI , te približno linearan porast varijance pogreške i MSE s porastom vrijednosti D . Veće odstupanje teorijskih rezultata od MSE-a za sekvence s većim TI uzrokovano je time što model ne obuhvaća slučaj kada je vektor pomaka pogrešno određen te točnim određivanjem parametara samog modela za promjenu sadržaja blokova iz slike u sliku, σ_q^2 . Predložen je i teorijski model za postupak interpolacije usrednjavanjem, FA, te je izveden izraz za autokorelacijsku funkciju pogreške interpolacije. Rezultati teorijskog modela uspoređeni su s vrijednostima MSE za 15. sliku iz testnih sekvenci interpoliranu metodom usrednjavanja. I ovdje je utvrđeno dobro poklapanje teorijskih i empirijskih rezultata za sekvence s manjim TI . Veće odstupanje za sekvence s većim TI može se također objasniti točnim određivanjem parametra σ_q^2 . I teorijski modeli i empirijski rezultati pokazali su da za sekvence s malom vremenskom aktivnošću jednostavni postupak usrednjavanja, FA, može ostvariti podjednaku (u nekim slučajevima i manju) pogrešku od znatno složenijeg postupka koji koristi procjenu

pokreta. Ova je činjenica iskorištena u predloženom algoritmu za interpolaciju u svrhu smanjenja njegove složenosti. Utvrđeno je da su, u slučaju male vrijednosti parametra vremenske aktivnosti, TI_t , srednje vrijednosti vektora pomaka za pojedinu sliku vrlo male. To navodi na zaključak da je malim parametrom vremenske aktivnosti, TI , predstavljen mali pokret između dvije slike. Porastom parametra TI rastu i srednje vrijednosti vektora pomaka.

Provedena je analiza utjecaja veličine bloka prilikom procjene pokreta na pogrešku procjene vektora pomaka. Ispitivanja su provedena uz tri različite veličine bloka, 4x4, 8x8 i 16x16 elemenata slike. Pokazalo se da pogreška procjene vektora pomaka opada s porastom veličine bloka jer je veća mogućnost pogrešne detekcije odgovarajućeg bloka manje veličine zbog manje količine informacija koju on sadrži. Sukladno provedenim analizama, u predloženom algoritmu koristi se podjela slike na blokove veličine 16x16 elemenata slike. Nadalje, budući da je prirodno kretanje objekata, posebice kod brzih pokreta, nelinearno i često s promjenjivom brzinom, analiziran je utjecaj tih dviju pojava na točnost vektora pomaka. Pokazano je da nelinearnost pokreta unosi znatno manju pogrešku u odnosu na promjenu brzine. Uz odabranu veličinu bloka 16x16 elemenata slike, uvođenjem promjenjive brzine kretanja može se povećati točnost procjene vektora pomaka u slučaju brzog pokreta. U slučaju kada pokret nije brz, uvođenje promjenjive brzine gibanja objekata ne povećava zamjetno točnost procjene. Budući da bi uvođenje promjenjive brzine kretanja dodatno povećalo složenost algoritma, a može unijeti blago poboljšanje samo u slučaju brzog pokreta, u okviru predloženog algoritma koristi procjena pokreta uz pretpostavku konstantne brzine kretanja objekata.

Na temelju provedene analize prostorno-vremenskih značajki videosignala i njihovog utjecaja na pogrešku interpolacije, u okviru ove disertacije predložen je algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika zasnovan na prostorno-vremenskim značajkama videosignala čijom se primjenom zadržava visoka razina kvalitete interpoliranih slika uz značajno smanjenje složenosti. Budući da je analizom utvrđeno da je u dijelovima sekvence s malom vremenskom aktivnošću pogreška prilikom interpolacije FA metodom i metodom koja radi kompenzaciju pokreta približno jednaka, a složenost FA metode je značajno manja, u okviru predloženog algoritma uvedena je adaptivnost na temelju trenutne vrijednosti parametra vremenske aktivnosti, TI_t . U slučaju kada je parametar vremenske aktivnosti slika manji ili jednak prethodno određenoj vrijednosti praga radi se interpolacija korištenjem FA metode, a u

suprotnom slučaju interpolacija se zasniva na procjeni pokreta. Optimizacijom je utvrđeno da je najveća prosječna ocjena kvalitete interpoliranih slika ostvarena uz vrijednost praga $\delta = 6$, uz koju se za 232 od 769 slika radi interpolacija FA metodom, čime je u 30% slika izbjegnuta proračun vektora pomaka i interpolacija zasnovana na procjeni pokreta.

U slučajevima kada se u okviru predloženog algoritma radi procjena pokreta to se radi korištenjem kombinacije procjene pokreta za blokove (BMA) i optičkog toka. Korištenjem BMA pristupa mogu se odrediti vrijednosti vektora pomaka uz razinu preciznosti od jednog elementa slike, što nije dovoljno za ostvarivanje visoke kvalitete interpoliranih slika. Kako bi se osigurala mala složenost, u predloženom algoritmu preciznost procjene vektora pomaka na razini manjoj od jednog elementa slike ostvaruje se razvojem u Taylorov red, prema [91].

Budući da se u okviru predloženog algoritma koristi odvojena jednosmjerna procjena pokreta, njezin konačni rezultat su dva odvojena polja vektora pomaka: polje vektora pomaka dobiveno predviđanjem unaprijed i polje vektora pomaka dobiveno predviđanjem unatrag. Radi dodatnog izgladivanja procijenjenih polja vektora pomaka na njih je primijenjen medijan filter s veličinom prozora 3×3 . Na temelju prethodne i sljedeće originalne slike te polja vektora pomaka dobivenih procjenom unaprijed i unatrag formiraju se dva prediktora konačne interpolirane slike. S obzirom na jednosmjernu procjenu pokreta, u svakom od prediktora dolazi do pojave preklapajućih područja i područja šupljina. Preklapajuća područja nadomještena su korištenjem vrijednosti svih elemenata slike koji se na toj lokaciji preklapaju uz korištenje različitih težinskih faktora određenih na temelju pouzdanosti procjene vektora pomaka bloka kojem pripadaju. Na ovaj se način povećava kvaliteta interpolirane slike jer se veći težinski koeficijent dodjeljuje elementu za čiji je blok pokret procijenjen s većom preciznošću. Područja šupljina nadomještena su srednjom vrijednošću u okruženju 3×3 elementa interpolirane slike koji nisu šupljine. Konačna interpolirana slika dobiva se kombinacijom dobivenih prediktora na način da se svakom prediktoru dodijeli težinski koeficijent u ovisnosti o pouzdanosti procjene vektora pomaka svih blokova unutar njega. Na taj se način veći težinski koeficijent dodjeljuje prediktoru za čije su blokove vektori pomaka procijenjeni s većom pouzdanošću, što u konačnici vodi povećanju kvalitete interpolirane slike. Za mjeru pouzdanosti koristi se recipročna vrijednost sume apsolutnih razlika koja se proračunava u postupku procjene pokreta. Time se ne povećava složenost postupka, a postiže se bolja kvaliteta interpolirane slike.

U okviru vrednovanja performansi predloženog algoritma za interpolaciju slike u odnosu na postojeća rješenja napravljeno je ocjenjivanje kvalitete interpoliranih slika i usporedba složenosti algoritama. Ocjenjivanje kvalitete napravljeno je provedbom objektivnih i subjektivnih testova. Iako su dugotrajni i nepraktični, subjektivni testovi ipak su najbolje mjerilo kvalitete jer ocjene dodjeljuju gledatelji koji su krajnji korisnici videoaplikacija. Subjektivni testovi i obrada rezultata provedeni su u skladu s preporukama koje je dala ITU. Rezultati testova pokazali su da algoritmi koji rade interpolaciju slike zasnovanu na kompenzaciji pokreta postižu osjetno veću kvalitetu interpoliranih slika od algoritama koji koriste samo prostorne značajke, uz značajno povećanje složenosti. Usporedbom složenosti algoritama koji koriste procjenu pokreta utvrđeno je da je predloženi algoritam, zbog svoje adaptivnosti te parametara i načina procjene pokreta, jednostavniji i od MCFI-AOBMC i od NTME algoritma. Osim što je jednostavniji, prosječna PSNR ocjena slika interpoliranih predloženim algoritmom za više je od 2 dB veća nego prosječna ocjena ostvarena korištenjem MCFI-AOBMC algoritma. Slike interpolirane NTME algoritmom ostvaruju za 0,17 dB bolji PSNR od slika interpoliranih predloženim algoritmom, ali je i složenost NTME algoritma višestruko veća. Analizom složenosti algoritama i kvalitete slika interpoliranih predloženim algoritmom te NTME i MCFI-AOBMC algoritmima može se zaključiti da je predloženi algoritam zadržao kvalitetu slike gotovo na razini NTME algoritma uz osjetno smanjenje složenosti, što je bio osnovni cilj istraživanja u okviru ove disertacije.

Analiza je pokazala da je moguće dodatno povećati kvalitetu slika interpoliranih predloženim algoritmom uz dodatno povećanje složenosti postupka. Povećanjem preciznosti procjene vektora pomaka na razinu manju od elementa slike može se ostvariti manja pogreška prilikom procjene pokreta, a samim time i bolja kvaliteta interpolirane slike. Osim toga, preciznost procjene vektora pomaka, posebice u slučaju brzih pokreta, može se, uz povećanje složenosti postupka, povećati uvođenjem promjenjive brzine kretanja objekata. Daljnja istraživanja usmjerit će se i prema poboljšanju mjere pouzdanosti vektora pomaka, koje bi u konačnici također vodilo ka povećanju kvalitete interpolirane slike.

LITERATURA

- [1] T.Y. Kuo, C.-C.J. Kuo, **Motion-compensated interpolation for low-bit-rate video quality enhancement**, U: *Proc. SPIE Vis. Commun. Image Process*, vol. 3460, 1998, str. 277-288
- [2] G. Dane, T.Q. Nguyen, **Motion vector processing for frame rate up conversion**, U: *Proc. ICASSP04*, vol. 3, 2004, str. 309-312
- [3] J.N. Zhang, L.F. Sun, S.Q.Y. Y.Z.Z, **Position prediction motion-compensated interpolation for frame rate up-conversion using temporal modeling**, U: *Proc. ICIP*, vol. 1, 2005, str. 11-14
- [4] A.-M. Huang, T. Nguyen, **Motion vector processing based on residual energy information for motion compensated frame interpolation**, U: *Proc. ICIP*, vol. 8, 2006, str. 2721-2724
- [5] Y. Ling, J. Wang, Y. Liu, W. Zhang, **A novel Spatial and Temporal Correlation Integrated Based Motion-Compensated Interpolation for Frame Rate Up-Conversion**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 54, no. 2, 2008, str. 863-869
- [6] G. de Hann, P.W. Biezen, H. Hujigen, O.A. Ojo, **True-motion estimation with 3-D recursive search block matching**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 3, no. 5, 1993, str. 368-379
- [7] S.-H. Lee, Y.-C. Shin, S.-J. Yang, H.-H. Moon, R.-H. Park, **Adaptive MC interpolation for frame rate up-conversion**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 48, no. 3, 2002, str. 444-450
- [8] B.D. Choi, J.W. Han, C.S. Kim, S.J. Ko, **Motion-compensated frame interpolation using bilateral motion estimation and adaptive overlapped block motion compensation**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 17, no. 4, 2007, str. 407-416
- [9] Y.-K. Chen, S.Y. Kung, **Rate optimization by true motion estimation**, U: *Proc. IEEE Workshop Multimedia Signal Processing*, 1997, str. 187-194
- [10] C.-C. Cheng, W.-L. Hwang, Z. Shen, T. Xia, **Advanced motion compensation techniques for blocking artifacts reduction in 3-D video coding systems**, U: *Proc. ICIP*, vol. 3, 2005, str. 89-92

- [11] Y.K. Chen, A.Vetro, H. Sun, S.Y. Kung, **Frame-rate up-conversion using transmitted true motion vectors**, U: *Proc. IEEE Workshop Multimedia Signal Processing*, vol. 2, 1998, str. 622-627
- [12] S.-J. Kang, K.-R. Cho, Y.H. Kim, **Motion compensated Frame Rate Up-Conversion Using Extended Bilateral Motion Estimation**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 4, 2007, str. 1759-1767
- [13] Y.T. Yang, Y.-S. Tung, J.-Ling Wu, **Quality enhancement of Frame Rate Up-Converted Video by Adaptive Frame Skip and Reliable Motion Extraction**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 17, no. 12, 2007, str. 1700-1713
- [14] R. Castagno, P. Haavisto, G. Ramponi, **A method for motion adaptive frame rate up-conversion**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, no. 5, 1996, str. 436-446
- [15] K. Kawaguchi, S.K. Mitra, **Frame rate up-conversion considering multiple motion**, U: *Proc IEEE ICIP*, vol. 1, 1997, str. 727-730
- [16] B.T. Choi, S.-H. Lee, S.-J. Ko, **New frame rate up-conversion using bidirectional motion estimation**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 46, no. 3, 2000, str. 603-609
- [17] K. Hilman, H.W. Park, Y. Kim, **Using motion-compensated frame-rate conversion for the correction of 3:2 pulldown artifacts in video sequences**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 10, no. 6, 2000, str. 869-877
- [18] T. Chen, **Adaptive temporal interpolation using bidirectional motion estimation and compensation**, U: *Proc. IEEE ICIP*, vol. 2, 2002, str. 313-316
- [19] M.E. Al-Mualla, **Motion field interpolation for frame rate conversion**, U: *IEEE ISCAS*, vol. 2, 2003, str. 652-655
- [20] T.Y. Kuo, C.C. Kuo, **Motion-compensated interpolation for low-bit-rate video quality enhancement**, U: *Proc. SPIE Appl. Digital Image Processing*, vol. 3460, 1998, str. 277-288
- [21] H.A. Karim, M.Bister, M. Siddiqi, **Low rate video frame interpolation – Challenges and solution**, U: *Proc. IEEE ICASP*, vol 3, 2003, str. 117-120

- [22] S.-H. Lee, O.Kwon, R.-H. Park, **Weighted-adaptive motion-compensated frame rate up-conversion**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, no. 3, 2003, str. 485-492
- [23] B.W. Jeon, G.I. Lee, S.H. Lee, R.H. Park, **Coarse-to-fine frame interpolation for frame rate up-conversion using pyramid structure**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, no. 3, 2003, str. 499-508
- [24] T. Ha, S. Lee, J.Kim, **Motion compensated frame interpolation by new block-based motion estimation algorithm**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 2, 2004, str. 752-759
- [25] R. Krishnamurthly, J.W. Woods, P. Molin, **Frame interpolation and bidirectional prediction of video using compactly encoded optical-flow fields and label fields**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 9, no. 5, 1999, str. 713-726
- [26] S. Liu, J. Kim, C.-C.J. Kuo, **MCI-embedded motion compensated prediction for quality enhancement of frame interpolation**, *Pres. SPIE International Symposium Voice, Video, Data Communications, Multimedia Systems Applications Boston*, 2000
- [27] S. Liu, J. Kim, C.-C.J. Kuo, **Non-linear motion-compensated interpolation for low bit rate video**, *Pres. SPIE International Symposium Optical, Science, Engineering, Instrumentation, Appl. Digital Image Processing, San Diego*, 2000
- [28] S. Liu, J. Kim, C.-C.J. Kuo, **Global/local motion-compensated frame interpolation for low-bit-rate video**, U: *Proc. SPIE Image Visual Communication Processing*, 2000, str. 223-234
- [29] S. Liu, J. Kim, C.-C.J. Kuo, **Hybrid global/local motion-compensated frame interpolation with segmentation for low-bit-rate video**, *J. Vis. Commun. Image Represent*, vol. 14, no. 1, 2003, str. 61-79
- [30] T. Liu, K.-T. Lo, J. Feng, X. Zhang, **Frame interpolation scheme using inertia motion interpolation**, U: *Proc. Signal Processing: Image Communications*, vol. 18, 2003, str. 221-229
- [31] H. Sasai, S. Kondo, S. Kadono, **Frame-rate up-conversion using reliable analysis of transmitted motion information**, U: *Proc IEEE ICASSP*, 2004, str. 17-21
- [32] J. Zhai, K.Yu, J.Li, S. Li, **A low complexity motion compensated frame interpolated method**, U: *Proc IEEE ISCAS*, 2005, str. 23-26

- [33] T.-Y. Kuo, J. Kim, C.-C.J. Kuo, **Motion-compensated frame interpolation scheme for H.263 codec**, U: *Proc. IEEE ISCAS*, vol. 4, 1999, str. 491-494
- [34] R.L. Lagendijk, M.I.Sezan, **Motion compensated frame rate conversion of motion picture**, U: *Proc. IEEE ICASSP*, vol. 3, 1992, str. 453-456
- [35] M.F. Fu, O. Au, W.C. Chan, **Temporal interpolation using wavelet domain motion estimation and motion compenstaion**, U: *Proc. IEEE ICIP*, vol. 3, 2002, str. 393-396
- [36] C.W. Tang, O.C. Au, **Comparison between block-based and pixel-based temporal interpolation for video coding**, U: *Proc. IEEE ISCAS*, vol. 4, 1998, str. 122-125
- [37] B.-D. Choi, J.-W. Han, C.-S. Kim, S.-J. Ko, **Frame rate up-conversion using perspective transform**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 3, 2006, str. 975-982
- [38] H. Lim, H. W. Park, **A symmetric motion estimation method for motion-compensated frame interpolation**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 12, 2011, str. 3653-3658
- [39] S.-J. Kang, S. Yoo, Y.H. Kim, **Dual motion estimation for frame rate up-conversion**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 20, no. 12, 2010, str. 1909-1914
- [40] G. Dane, T.Q. Nguyen, **Optimal temporal interpolation filter for motion-compensated frame rate up conversion**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 15, no. 4, 2006, str. 978-991
- [41] Y.-H. Cho, H.-Y. Lee, D.-S. Park, **Temporal Frame Interpolation Based on Multiframe Feature Trajectory**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 23, no. 12, 2013, str. 2105-2115
- [42] A.-M. Huang, T.Q. Nguyen, **A multistage motion vector processing method for motion-compensated frame interpolation**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 17, no. 5, 2008, str. 694-708
- [43] S.-G. Jeong, C. Lee, C.-S. Kim, **Motion-compensated frame interpolation based on multihypothesis motion estimation and texture optimization**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 11, 2013, str. 4497-4509

- [44] Z. Yu, H. Li, Z. Wang, Z. Hu, C.W. Chen, **Multi-level video frame interpolation: Exploiting the interaction among different levels**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 23, no. 7, 2013, str. 1235-1248
- [45] R. Han, A. Men, **Frame rate up-conversion for high-definition video applications**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 59, no. 1, 2013, str. 229-236
- [46] C. Wang, L. Zhang, Y. He, Y.P. Tan, **Frame rate up-conversion using trilateral filtering**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 20, no. 6, 2010, str. 886-893
- [47] T.-S. Wang, K.-S. Choi, H.-S. Jang, A.W. Morales, S.-J. Ko, **Enhanced frame rate up-conversion method for UHD video**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 2, 2010, str. 1108-1114
- [48] A.-M. Huang, T. Nguyen, **Correlation-based motion vector processing with adaptive interpolation scheme for motion-compensated frame interpolation**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 4, 2009, str. 740-752
- [49] Y. Dar, A. M. Bruckstein, **Motion-compensated coding and frame rate up-conversion: models and analysis**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 24, no. 7, 2015, str. 2051-2066
- [50] S. Dikbas, Y. Altunbasak, **Novel true-motion estimation algorithm and its application to motion-compensated temporal frame interpolation**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 8, 2013, str. 2931-2945
- [51] U.S. Kim, M.H. Sunwoo, **New frame rate up-conversion algorithm with low computational complexity**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 24, No. 3, 2014, str. 384-393
- [52] G.G. Lee, C.-F. Chen, C.J. Hsiao, J.C. Wu, **Bi-directional trajectory tracking with variable block-size motion estimation for frame-rate up-conversion**, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol 4., no. 1., 2014, str. 29-42
- [53] D. Wang, L. Zhang, A. Vincent, **Motion-compensated frame rate up-conversion part I: fast multi-frame motion estimation**, *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol 56., no. 2., 2010, str. 133-141

- [54] Y.B. Zhang, D. Zhao, S. Ma, R. Wang, W. Gao, **A motion aligned auto-regressive model for frame rate up conversion**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 19, No. 5, 2010, str. 1248-1258
- [55] Y.B. Zhang, D. Zhao, X. Ji, R. Wang, W. Gao, **A spatio-temporal auto regressive model for frame rate up conversion**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 19, No. 9, 2009, str. 1289-1301
- [56] M. Irani, S. Peleg, **Improving resolution by image registration**, U: *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, vol. 55, 1993, str. 324-335
- [57] X. Li, **Video processing via implicit and mixture motion models**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 17, No. 8, 2007, str. 953-963
- [58] J. Wang, D.Wang, W.Zhang, **Temporal compensated motion estimation with simple block-based prediction**, *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 49, no. 3, 2003, str. 241- 248
- [59] A. Beric, G.de Haan, J. van Meerbergen, R. Sethurman, **Toward and efficient high quality picture-rate up-converter**, U *Proceedings of International conference on Image Processing*, vol. 2., 2003, str. 363-366
- [60] R. Thoma, M. Bierling, **Motion compensating interpolation considering covered and uncovered background**, *Signal Processing, Image Communication*, vol. 1, no. 2, 1989, str. 191-212
- [61] C.-L. Huang, T.-T. Chao, **Motion-compensated interpolation for scan rate up-conversion**, *Opt. Eng.* vol. 35. no. 1, 1996, str. 166-176
- [62] A. Kaup, T. Aach, **Efficient prediction of uncovered background in interframe coding using spatial extrapolation**, U: *Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech, signal Processing*, vol. 5, 1994, str. 501-504
- [63] A. M. Bruckstein, M. Elad, R. Kimmel, **Down-scaling for better transform compression**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 12, no. 9, 2003, str. 1132-1144
- [64] A. Barjatya, **Block matching algorithms for motion estimation**, *DIP 6620 Spring 2004 Final Project Paper*, 2004
- [65] L.-M. Po, W.-C. Ma, **A novel four-step search algorithm for fast block motion estimation**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, no. 3, 1996, str. 313-317

- [66] S. Zhu, K.-K. Ma, **A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, no. 2, 2000, str. 287-290
- [67] Y. Nie, K.-K. Ma, **Adaptive rood pattern search for fast block-matching motion estimation**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 12, 2002, str. 1442-1448
- [68] J.-G. Kim, D. Lee, **Frame rate upconversion using pyramid structure and dense motion vector fields**, *Journal of Electronic Imaging*, vol. 25, no. 3. 2016.
- [69] S. Dikbas, T. Arici Y. Altunbasak, **Fast motion estimation with interpolation-free sub-sample accuracy**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 20, No. 7, 2010, str. 1047-1051
- [70] O. Ojo, G. de Haan, **Robust motion-compensated video upconversion**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 43, no. 4, 1997, str. 1045-1056
- [71] E. Bellers, J. van Gurp, J. Janssen, J. Braspenning, R. Witterbrood, **Solving occlusion in frame-rate up-conversion**, U: *Proc. International conference on Consumer Electronics*, 2007, str. 1-2
- [72] R. Witterbrood, G. de Haan, R. Lodder, **Tackling occlusion in scan rate conversion systems**, U: *Proc. IEEE International Conference on Consumer electronics*, 2003, str. 344- 345
- [73] S.-J. Kang, D.-G. Yoo, S.-K. Lee, Y.Kim, **Multiframe-based bilateral motion estimation with emphasis on stationary caption processingfor frame rate up-conversion**, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 54, no. 4, 2008, str. 1830-1838
- [74] V. Munoz-Jimenez, A. Mokraoui-Zergainoh, J.-P. Astruc, **Bidirectional motion estimation approach using warping mesh combined to frame interpolation**, U: *Proc. IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 2008, str. 249-253
- [75] H. Song, A. Men, G. Shi, **A method for halo artifact reduciotn im MEMC**, U: *Proc. IEEE International Conference on Consumer electronics*, 2009, str. 1-2
- [76] ITU-T Recommendation P.910, **Subjective video quality assessment methods for multimedia applications**, *International Telecommunications Union*, Geneve, Switzerland, 1999.

- [77] J. Sogaard, S. Forchhammer, J. Korhonen, **No-reference video quality assessment using codec analysis**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 25, No. 10, 2015, str. 1637-1650
- [78] S. Rimac-Drlje, M. Vranješ, D. Žagar, **Foveated mean squared error – a novel video quality metric**, *multimedia Tools and Applications*, vol. 49, 2010, str. 425-445
- [79] B.Girod, **The efficiency of motion-compensating prediction for hybrid coding of video sequences**, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 5, no 7, 1987, str. 1140-1154
- [80] B. Girod, **Efficiency analysis of multihypothesis motion-compensated prediction for video coding**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, no. 2, 2000, str. 173-183
- [81] M. Flierl, T. Wiegand, B.Girod, **Rate-constrained multihypothesis prediction for motion-compensated video compression**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 12, no. 11, 2002, str. 957-969
- [82] F. Kamisli, J.S. Lim, **Transoforms for the motion compensation residual**, *U Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech, signal Processing, 2009*, str. 789-792
- [83] K.-C. Hui, W.-C. Siu, **Extended analysis of motion compensated frame difference for block based motion prediction error**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 5, 2007, str. 1232-1245
- [84] W. Niehsen, M. Brunig, **Covariance analysis of motion compensated frame differences**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 9, no. 4, 1999, str. 536-539
- [85] C.-F. Chen, K.K. Pang, **The optimal transform of motion compensated frame difference images in a hybrid coder**, *IEEE Transactions on circuits and Systems II, Analog Digital Singal Processing*, vol. 40, no. 6, 1993, str. 393-397
- [86] H.J. Leu, S.-D. Kim, W.-J. Kim, **Statistical modeling of inter-frame prediction error and its adaptive transform**, *IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology*, vol. 21, no. 4, 2011, str. 519-523
- [87] W. Zheng, Y. Shishikui, M. Naemura, Y. Kanatsugu, S. Itoh, **Analysis of space-dependent characteristics of motion-compensated frame differences based on a statistical motion distribution model**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 4, 2002, str. 377-386

- [88] L. Guo, O.C. Au, M. Ma, Z. Liang, P.H.W. Wong, **A novel analytic quantization-distortion model for hybrid video coding**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 19, no. 5, 2009, str. 627-641
- [89] C.-F. Chen, K.K. Pang, **Hybrid coders with motion compensation**, *Multidimensional Systems Signal Processing*, vol. 3, nos. 2-3, 1992, str. 241-266
- [90] B. Tao, M.T. Orchard, **Prediction of second order statistics in motion-compensated video coding**, U: *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 3, 1998, str. 910-914
- [91] S.H. Chan, D.T. Vo, T.Q. Nguyen, **Subpixel motion estimation without interpolation**, U: *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2010, str. 722-725
- [92] ITU-T Recommendation P.911, **Subjective Audiovisual Quality Assessment Methods for Multimedia Applications**, International Telecommunication Union, Ženeva, Švicarska, 1998.
- [93] ITU-R Recommendation BT.500-11, **Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures**, International Telecommunication Union, Ženeva, Švicarska, 2002.
- [94] **MSU Graphic&Media Lab**, Video Group, MSU codecs, www.compression.ru/video
- [95] A.M. Eskicioglu, P.S. Fisher, **Image quality measures and their performance**, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, 1995, str. 2959-2965
- [96] M. Vranješ, S. Rimac-Drlje, D. Žagar, **Subjective and Objective Quality Evaluation of the H.264/AVC coded Video**, U: *Proc. Of International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, Slovačka, 2008, str. 287-290
- [97] S. Daly, **The visible difference predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity**, U: *A.B. Watson (eds), Digital images and human vision*, The MIT, Cambridge, str. 179-206.
- [98] Z. Wang, L. Lu, A.C. Bovik, **video quality assessment based on structural distortion measurement**, *Signal processing: Image Communication*, vol. 19, no. 2, 2004, str. 121-132
- [99] A.B. Watson, J. Hu, J.F. McGowan III, **DVQ: A digital video quality metric based on human vision**, *Journal of Electronic Imaging*, vol. 10, no. 1, 2001, str. 20-29

- [100] C.J. van den Branden Labmrecht, O. Verscheure, **Perceptual quality measure using a spatio-temporal model of the human visual system**, U: *Proc. SPIE Digital Video Compression: Algorithms and Technologies*, vol. 2668, 1996, str. 450-461
- [101] S. Winkler, **A perceptual distortion metric for digital color video**, U: *Proc. SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV*, vol. 3644, 1999, str. 175-184
- [102] K.T. Tan, M. Ghanbari, **A Multi-metric objective picture quality measurement model for MPEG video quality**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 10, 2000, str. 1208-1213
- [103] D.M. Chandler, S.S. Hemami, **VSNR: A wavelet-based visual signal-to-noise-ratio for natural images**, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, 2007, str. 2284-2297
- [104] Z. Wang, E.P. Simoncelli, A.C. Bovik, **Multi-scale structural similarity for image quality assessment** (invited paper), U: *proc. Of the IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, SAD*, 2003.
- [105] K. Seshadrinatan, A.C. Bovik, **Motion-based perceptual quality assessment of video**, U: *Proc. SPIE Human vision and Electronic Imaging*, vol. 7240, 2009.
- [106] Z. Wang, L. Lu, A.C. Bovik, **Video quality assessment based on structural distortion measurement**, *Signal Processing: Image Communication*, vol. 19, no. 2, 2004, str. 121-132
- [107] A.M. Eskicioglu, P.S. Fisher, **Image quality measures and their performance**, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, 1995, str. 2959-2965
- [108] M. Vranješ, S. Rimac-Drlje, D. Žagar, **Subjective and objective quality evaluation of the H.264/AVC coded video**, U: *Proc. Of International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, Slovačka, 2008, str. 287-290
- [109] VQEG, **Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of multimedia quality assessment, Phase I**, v2.6, rujan 2008.

SAŽETAK

Videosignal snimljen modernim uređajima zbog svoje veličine nije pogodan za prijenos ili pohranu na neki od medija. Zbog toga je u postupku kodiranja potrebno smanjiti njegovu veličinu, što se može učiniti primjenom efikasnih postupaka kompresije, ali i smanjenjem prostorne i/ili vremenske rezolucije. Paralelno s razvojem uređaja za snimanje razvili su se i uređaji za prikazivanje videosignala (pametni telefoni, tableti, prijenosna računala) koji, neovisno o veličini zaslona, mogu prikazivati video signal visoke rezolucije. Zbog svega navedenog sve više je primjera kod kojih je nakon dekodiranja potrebno povećati prostornu i/ili vremensku rezoluciju videosignala.

Kod povećanja vremenske rezolucije interpolacijom slika u nekomprimiranom videosignalu, što je problem kojim se bavi ova disertacija, cjelokupna pogreška prilikom interpolacije nastaje zbog pokreta objekata i promjene sadržaja. Primjenom teorijskog modela videosignala analiziran je utjecaj vremenske udaljenosti, D , između slika koje se koriste za interpolaciju te utjecaj prostornih i vremenskih značajki videosignala na pogrešku interpolacije primjenom postupaka jednosmjernih procjena pokreta unaprijed i unazad. Predložen je i teorijski model za postupak interpolacije usrednjavanjem, FA, te je izveden izraz za autokorelacijsku funkciju pogreške interpolacije. Oba modela pokazuju dobro poklapanje teorijskih i empirijskih rezultata za sekvence s malim TI , te približno linearan porast varijance pogreške i MSE s porastom vrijednosti D . Također, teorijski i empirijski rezultati pokazali su da za sekvence s malom vremenskom aktivnošću jednostavni postupak usrednjavanja, FA, može ostvariti podjednaku (u nekim slučajevima i manju) pogrešku od znatno složenijeg postupka koji koristi procjenu pokreta, što je iskorišteno u predloženom algoritmu za interpolaciju u svrhu smanjenja njegove složenosti. Utvrđeno je i da su u slučaju male vrijednosti parametra vremenske aktivnosti, TI_t , srednje vrijednosti vektora pomaka za pojedinu sliku vrlo male, što navodi na zaključak da je malim parametrom vremenske aktivnosti, TI , predstavljen mali pokret između dvije slike. Analizom utjecaja veličine bloka (za koji se računa vektor pomaka) na pogrešku procjene vektora pomaka utvrđeno je da je pogreška najmanja za blok veličine 16×16 elemenata slike, a najveća za blok veličine 4×4 elementa slike. Budući da je prirodno kretanje objekata nelinearno, posebice u slučaju brzih pokreta, i često s promjenjivom brzinom, analiziran je utjecaj tih dviju pojava na točnost vektora pomaka te je pokazano je da nelinearnost

pokreta unosi znatno manju pogrešku u odnosu na promjenu brzine. U slučaju kada pokret nije brz, uvođenje promjenjive brzine gibanja objekata ne povećava zamjetno točnost procjene, pa se s ciljem izbjegavanja povećanja složenosti algoritma predloženog u disertaciji koristi procjena pokreta uz pretpostavku konstantne brzine kretanja objekata.

Na temelju provedene analize prostorno-vremenskih značajki videosignala i njihovog utjecaja na pogrešku interpolacije, u okviru ove disertacije predložen je algoritam za adaptivnu vremensku interpolaciju slika zasnovan na prostorno-vremenskim značajkama videosignala. Njegovom se primjenom zadržava visoka razina kvalitete interpoliranih slika uz značajno smanjenje složenosti jer je na temelju provedenih analiza prostorno-vremenskih značajki videosignala uvedena adaptivnost u ovisnosti o trenutnoj vrijednosti parametra vremenske aktivnosti, TI_t . U slučaju kada je parametar vremenske aktivnosti između slika manji ili jednak prethodno određenoj vrijednosti praga, δ , radi se interpolacija korištenjem FA metode, a u suprotnom slučaju interpolacija se zasniva na procjeni pokreta. U slučajevima kada je $TI_t > \delta$, rade se odvojene jednosmjerne procjene unaprijed i unazad kombinacijom procjene pokreta za blokove (BMA) i optičkog toka. Kako bi se osigurala mala složenost, u predloženom algoritmu preciznost procjene vektora pomaka na razini manjoj od jednog elementa slike ostvaruje se razvojem u Taylorov red. U svrhu zaglađivanja vektora pomaka, polje vektora pomaka filtrira se medijan filtrom. Kompenzacijom pokreta dobiju se dvije slike prediktora čijom se težinskom sumom dobije konačna interpolirana slika. Predloženi algoritam uspoređen je s dva postojeća algoritma, koji su među najboljima u dostupnoj literaturi, po složenosti postupka i kvaliteti interpolirane slike. Rezultati su pokazali da predloženi algoritam ima najbolji omjer složenosti postupka i kvalitete interpolirane slike.

KLJUČNE RIJEČI

procjena pokreta, interpolacija slike, prostorno-vremenska aktivnost videosignala, kvaliteta slike, složenost algoritma

ABSTRACT

Video signal recorded using modern devices is not suitable for transmission or storage on some media. Therefore it is necessary to decrease its size during the encoding process. It can be done by decreasing spatial and/or temporal resolution. There is also a rapid development of video displaying devices (smart phones tablets, laptops..) which, independently of screen size, can display high resolution video signal. Therefore it is necessary, during the decoding process, to increase spatial and/or temporal resolution of video signal. Since in the focus of this research frame interpolation is done on uncompressed videosignal, interpolation error is caused by object motion and the content change. Using theoretical model an influence of the temporal distance, D , and spatio-temporal features of the videosignal on interpolation error using unidirectional forward and backward motion estimation is analyzed. Besides that, the theoretical model for interpolation using frame averaging, FA, is proposed and the formula for the autocorrelation function of the interpolation error is derived. Both models perform good matching of theoretical and empirical results for sequences with low TI and approximately linear increasing of error variance and MSE with increasing of D . Moreover, theoretical and empirical models performed that in case of low TI value simple FA method can achieve similar interpolation error in comparison to more complex MCFI, which is used for complexity reduction in the proposed algorithm. It is determined that in case of low TI value mean values of MV are also small, so it can be concluded that low TI value indicates small motion between two frames. Analyses of the influence of the block size on the motion estimation error performed that error is the lowest for the biggest size (16x16 pixels), and the highest for the smallest size (4x4 pixels). Since the natural motion of objects is non-linear and with the variable velocity, the influence of these two factors on the MV accuracy is analyzed, and the results performed that non-linear motion causes significantly lower error in comparison to velocity change. When the motion is not fast, introducing of variable velocity does not increase significantly accuracy of motion estimation, so the velocity is considered as constant in order to reduce the complexity of the proposed algorithm. According to described analyses, an algorithm for adaptive frame interpolation based on spatio-temporal features of the videosignal is proposed. Using the proposed algorithm high quality of interpolated images is maintained, while the complexity is reduced since, based on analyses of spatio-temporal

features, the adaptivity criterion depending on TI parameter value is introduced. When the parameter of the temporal activity between frame is lower than predefined threshold value, δ , interpolation is done using FA method, while in contrary MCFI is done. If $TI_t > \delta$, separated forward and backward unidirectional motion estimation is done as the combination of the BMA and optical flow. In order to ensure low complexity, motion estimation accuracy on the level lower than 1 pixel is achieved using Taylor series. In order to smooth MVs , the median filter is applied on MVF . Using MCFI two predictors of interpolated frame are given and their weighting sum is used for creating final interpolated frame. The proposed algorithm is compared with algorithms from the literature which show good performances, from the aspect of interpolated image quality and algorithm complexity. The results showed that the proposed algorithm performed the best trade of between interpolated image quality and algorithm complexity.

KEYWORDS

motion estimation, image interpolation, spatio-temporal activity of the video signal, image quality, algorithm complexity

ŽIVOTOPIS

Denis Vranješ rođen je 23. srpnja 1986. godine u Osijeku. Po završetku osnovne škole i Prirodoslovno-matematičke gimnazije u Osijeku, 2005. godine upisuje Elektrotehnički fakultetu u Osijeku gdje 2008. godine završava preddiplomski, a 2010. godine i diplomski studij obranom diplomskog rada na temu „Simulacija UMTS sustava u NS-2 simulacijskom paketu“ te stječe zvanje magistar inženjer elektrotehnike – summa cum laude. Za vrijeme trajanja preddiplomskog i diplomskog studija ostvario je pravo na državnu stipendiju za nadarene studente. Tijekom diplomskog studija dobitnik je dekanske nagrade Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku za akademsku godinu 2008/2009, nagrade za najboljeg studenta prve godine diplomskog studija elektrotehnike, smjer komunikacije i informatika te priznanja i nagrade Lions kluba Osijek kao najboljem studentu Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku. Po završetku diplomskog studija zapošljava se na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku kao znanstveni novak – asistent.

Aktivno sudjeluje u izvođenju nastave iz kolegija Multimedijaska tehnika na stručnom studiju elektrotehnike, Komunikacijski sustavi i Elektronika II na preddiplomskom studiju elektrotehnike te Multimedijски sustavi i Mobilne komunikacije na diplomskom studiju elektrotehnike. Također je i član Povjerenstva za unaprjeđenje i osiguranje kvalitete visokog obrazovanja na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.

Područje njegovog znanstvenog istraživanja je ocjena kvalitete video signala, obrada video signala, prijenos video signala u heterogenom mrežnom okruženju te prijenos multimedijских sadržaja fiksnim i mobilnim mrežama. U svom znanstvenom istraživanju kao autor ili suautor publicirao je 6 znanstvenih radova i jedan udžbenik, a još 3 znanstvena rada su u postupku recenzije. Za vrijeme trajanja poslijediplomskog studija sudjelovao je na 3 znanstvena i/ili stručna projekta. Član je udruge ELMAR, IEEE Young Professionals i IEEE Signal Processing Society.

Prilog I

Tablica P1.1. Ocjene subjektivnih testova za sekvencu *mobile*

	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	100	59	45	55	66	62	24
Gledatelj 2	99	92	91	75	94	69	60
Gledatelj 3	85	60	75	69	66	74	40
Gledatelj 4	83	69	66	73	66	65	45
Gledatelj 5	90	73	84	81	78	92	82
Gledatelj 6	85	79	76	79	78	92	91
Gledatelj 7	52	35	30	79	50	34	35
Gledatelj 8	100	89	76	85	75	69	71
Gledatelj 9	100	70	60	80	75	95	50
Gledatelj 10	100	72	83	85	71	66	57
Gledatelj 11	98	69	68	69	64	54	58
Gledatelj 12	73	89	66	67	79	75	86
Gledatelj 13	90	87	76	87	82	86	73
Gledatelj 14	78	73	67	73	72	70	10
Gledatelj 15	80	86	85	82	50	59	37
Gledatelj 16	100	79	83	95	68	97	56
Gledatelj 17	44	37	44	66	41	72	31
Gledatelj 18	90	71	77	72	67	55	54
Gledatelj 19	73	50	40	73	40	60	27
Gledatelj 20	90	80	70	80	75	70	55
Gledatelj 21	90	80	77	80	70	90	50

Tablica P1.2. Ocjene subjektivnih testova za sekvencu *football*

	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	90	74	65	65	61	50	34
Gledatelj 2	100	76	74	75	78	61	54
Gledatelj 3	73	61	55	59	59	56	30
Gledatelj 4	80	65	51	56	51	90	37
Gledatelj 5	85	58	63	63	62	78	67
Gledatelj 6	82	68	61	60	62	86	70
Gledatelj 7	91	75	65	70	55	50	15
Gledatelj 8	100	80	81	86	78	74	66
Gledatelj 9	90	80	70	80	65	65	70
Gledatelj 10	92	76	69	78	58	62	28
Gledatelj 11	100	79	67	75	59	91	29
Gledatelj 12	100	79	70	77	70	79	72
Gledatelj 13	94	70	65	81	60	80	50
Gledatelj 14	100	67	60	71	40	94	60
Gledatelj 15	86	70	57	58	40	27	22
Gledatelj 16	100	60	55	65	50	62	39
Gledatelj 17	76	60	59	63	56	40	53
Gledatelj 18	90	75	62	70	54	74	30
Gledatelj 19	76	52	55	51	47	25	21
Gledatelj 20	60	30	20	50	15	55	45
Gledatelj 21	60	15	20	55	45	40	10

Tablica P1.3. Ocjene subjektivnih testova za sekvencu *foreman*

	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	100	56	60	60	60	50	30
Gledatelj 2	97	87	70	71	90	50	38
Gledatelj 3	81	68	73	79	50	89	45
Gledatelj 4	89	59	50	83	58	79	37
Gledatelj 5	88	64	66	76	66	57	44
Gledatelj 6	90	88	75	81	80	68	65
Gledatelj 7	95	68	64	74	69	51	40
Gledatelj 8	97	88	81	88	85	66	63
Gledatelj 9	90	75	90	95	85	85	90
Gledatelj 10	83	37	69	80	65	60	56
Gledatelj 11	95	44	48	66	42	40	60
Gledatelj 12	69	66	68	69	66	57	56
Gledatelj 13	95	73	68	73	73	65	60
Gledatelj 14	85	68	64	68	69	55	10
Gledatelj 15	88	71	76	80	77	74	59
Gledatelj 16	96	67	73	82	72	54	69
Gledatelj 17	83	62	64	70	59	50	71
Gledatelj 18	92	53	47	50	59	42	32
Gledatelj 19	85	82	68	80	59	55	59
Gledatelj 20	90	50	45	60	55	55	45
Gledatelj 21	100	40	45	50	55	30	25

Tablica P1.4. Ocjene subjektivnih testova za sekvencu *news*

	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	100	75	70	77	70	85	70
Gledatelj 2	96	89	97	95	89	92	92
Gledatelj 3	89	80	72	76	69	72	62
Gledatelj 4	89	90	76	89	83	90	76
Gledatelj 5	90	90	79	86	90	81	80
Gledatelj 6	89	84	87	88	89	82	89
Gledatelj 7	97	85	90	82	74	85	85
Gledatelj 8	96	98	98	98	99	95	97
Gledatelj 9	100	100	50	100	100	100	100
Gledatelj 10	93	89	92	91	86	69	79
Gledatelj 11	90	81	60	82	75	86	76
Gledatelj 12	75	82	76	73	66	76	69
Gledatelj 13	100	85	91	89	85	88	88
Gledatelj 14	66	58	97	41	50	55	87
Gledatelj 15	100	50	90	56	59	98	70
Gledatelj 16	98	98	98	91	98	100	96
Gledatelj 17	85	80	67	77	78	55	72
Gledatelj 18	85	96	77	76	90	99	84
Gledatelj 19	100	69	63	68	73	76	72
Gledatelj 20	95	75	85	85	80	85	90
Gledatelj 21	100	80	90	90	85	80	70

Tablica P1.5. Ocjene subjektivnih testova za sekvencu *mother&daughter*

	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	100	60	70	70	45	24	50
Gledatelj 2	99	97	89	90	95	95	95
Gledatelj 3	88	62	59	34	32	72	44
Gledatelj 4	91	80	78	75	82	76	80
Gledatelj 5	92	91	92	91	82	82	70
Gledatelj 6	93	85	89	89	93	93	88
Gledatelj 7	95	89	85	85	86	73	90
Gledatelj 8	98	90	94	89	92	86	83
Gledatelj 9	100	100	100	95	100	100	100
Gledatelj 10	92	92	85	94	90	72	91
Gledatelj 11	75	58	90	82	83	80	75
Gledatelj 12	90	95	98	93	80	94	78
Gledatelj 13	100	90	84	90	84	94	80
Gledatelj 14	71	98	65	88	70	92	60
Gledatelj 15	98	75	82	81	100	49	62
Gledatelj 16	97	97	95	95	94	94	85
Gledatelj 17	42	78	83	70	47	50	30
Gledatelj 18	82	92	92	90	80	73	47
Gledatelj 19	78	99	78	80	58	86	63
Gledatelj 20	95	60	80	80	65	80	75
Gledatelj 21	90	80	70	80	80	90	40

Tablica P1.6. Ocjene subjektivnih testova za sekvencu *container*

	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	89	86	70	86	75	42	55
Gledatelj 2	100	84	92	95	92	100	95
Gledatelj 3	80	79	70	82	74	76	74
Gledatelj 4	79	72	79	91	71	82	65
Gledatelj 5	84	64	75	72	82	81	79
Gledatelj 6	95	80	89	80	90	91	95
Gledatelj 7	80	75	70	80	70	55	50
Gledatelj 8	95	91	95	97	95	98	95
Gledatelj 9	98	95	95	100	95	90	98
Gledatelj 10	100	94	100	100	93	100	100
Gledatelj 11	93	85	82	98	81	96	95
Gledatelj 12	95	80	87	95	95	94	96
Gledatelj 13	100	90	95	100	96	90	95
Gledatelj 14	64	60	58	68	79	62	64
Gledatelj 15	99	88	77	81	85	89	81
Gledatelj 16	100	92	94	90	85	95	91
Gledatelj 17	54	61	74	69	44	56	78
Gledatelj 18	67	70	50	66	72	79	70
Gledatelj 19	100	80	79	76	96	77	77
Gledatelj 20	70	65	50	60	65	55	40
Gledatelj 21	70	70	70	75	70	70	30

Prilog II

Tablica P2.1. Srednja vrijednost ocjena subjektivnih testova za sve sekvence

Sekvenca	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
<i>mobile</i>	85,71	71,38	68,52	76,43	67,95	71,71	52,00
<i>football</i>	86,90	65,24	59,24	67,05	55,48	63,76	42,95
<i>foreman</i>	89,90	65,52	64,95	73,10	66,38	58,67	50,19
<i>news</i>	92,05	82,57	91,19	81,43	80,38	83,29	81,14
<i>mother&daughter</i>	89,00	84,19	83,71	82,90	78,00	78,81	70,76
<i>container</i>	86,29	78,10	78,62	83,86	81,19	79,90	77,29

Tablica P2.2. Standardna devijacija ocjena subjektivnih testova za sve sekvence

Sekvenca	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
<i>mobile</i>	15,40	15,86	16,33	8,75	13,34	15,92	21,05
<i>football</i>	12,46	16,49	14,85	10,38	13,85	20,32	19,57
<i>foreman</i>	7,39	14,80	12,18	11,50	12,32	14,57	18,27
<i>news</i>	8,90	12,56	13,78	13,93	13,06	12,99	10,73
<i>mother&daughter</i>	13,46	13,91	10,86	13,52	18,77	18,59	19,63
<i>container</i>	14,31	11,05	14,60	12,61	13,33	17,22	20,41

Prilog III

Tablica P3.1. Kurtosis koeficijenti po sekvencama

Sekvenca	Referentni signal	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
<i>mobile</i>	4,5402	4,2661	4,0479	3,0708	3,1111	3,0345	2,1425
<i>football</i>	2,6611	5,8720	3,6088	1,8227	2,1887	2,7561	1,7383
<i>foreman</i>	2,4215	2,7531	2,4163	2,9298	2,0502	1,8225	2,0834
<i>news</i>	1,8394	2,4913	2,0302	5,4896	2,8911	2,3232	2,2377
<i>mother&daughter</i>	6,0424	1,4746	1,9441	9,8239	3,8505	5,1880	2,8946
<i>container</i>	2,3257	1,7988	2,3955	1,8216	3,7923	2,3345	2,6926

Prilog IV

Tablica P4.1. DMOS za sekvencu *mobile*

	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	59	45	55	66	62	24
Gledatelj 2	93	92	76	95	70	61
Gledatelj 3	75	90	84	81	89	55
Gledatelj 4	86	83	90	83	82	62
Gledatelj 5	83	94	91	88	102	92
Gledatelj 6	94	91	94	93	107	106
Gledatelj 7	83	78	127	98	82	83
Gledatelj 8	89	76	85	75	69	71
Gledatelj 9	70	60	80	75	95	50
Gledatelj 10	72	83	85	71	66	57
Gledatelj 11	71	70	71	66	56	60
Gledatelj 12	116	93	94	106	102	113
Gledatelj 13	97	86	97	92	96	83
Gledatelj 14	95	89	95	94	92	32
Gledatelj 15	106	105	102	70	79	57
Gledatelj 16	79	83	95	68	97	56
Gledatelj 17	93	100	122	97	128	87
Gledatelj 18	81	87	82	77	65	64
Gledatelj 19	77	67	100	67	87	54
Gledatelj 20	90	80	90	85	80	65
Gledatelj 21	90	87	90	80	100	60

Tablica P4.2. DMOS za sekvencu *football*

	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	84	75	75	71	60	44
Gledatelj 2	76	74	75	78	61	54
Gledatelj 3	88	82	86	86	83	57
Gledatelj 4	85	71	76	71	110	57
Gledatelj 5	73	78	78	77	93	82
Gledatelj 6	86	79	78	80	104	88
Gledatelj 7	84	74	79	64	59	24
Gledatelj 8	80	81	86	78	74	66
Gledatelj 9	90	80	90	75	75	80
Gledatelj 10	84	77	86	66	70	36
Gledatelj 11	79	67	75	59	91	29
Gledatelj 12	79	70	77	70	79	72
Gledatelj 13	76	71	87	66	86	56
Gledatelj 14	67	60	71	40	94	60
Gledatelj 15	84	71	72	54	41	36
Gledatelj 16	60	55	65	50	62	39
Gledatelj 17	84	83	87	80	64	77
Gledatelj 18	85	72	80	64	84	40
Gledatelj 19	76	79	75	71	49	45
Gledatelj 20	70	60	90	55	95	85
Gledatelj 21	55	60	95	85	80	50

Tablica P4.3. DMOS za sekvencu *foreman*

	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	56	60	60	60	50	30
Gledatelj 2	90	73	74	93	53	41
Gledatelj 3	87	92	98	69	108	64
Gledatelj 4	80	61	94	69	90	48
Gledatelj 5	76	78	88	78	69	56
Gledatelj 6	98	85	91	90	78	75
Gledatelj 7	73	69	79	74	56	45
Gledatelj 8	91	84	81	88	69	66
Gledatelj 9	85	100	105	95	95	100
Gledatelj 10	54	86	97	82	77	73
Gledatelj 11	49	53	71	47	45	65
Gledatelj 12	97	99	100	97	88	87
Gledatelj 13	78	73	78	78	70	65
Gledatelj 14	83	79	83	84	70	25
Gledatelj 15	83	88	92	89	86	71
Gledatelj 16	71	77	86	76	58	73
Gledatelj 17	79	81	87	76	67	88
Gledatelj 18	61	55	58	67	50	40
Gledatelj 19	97	83	95	74	70	74
Gledatelj 20	60	55	70	65	65	55
Gledatelj 21	40	45	50	55	30	25

Tablica P4.4. DMOS za sekvencu *news*

	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	75	70	77	70	85	70
Gledatelj 2	93	101	99	93	96	96
Gledatelj 3	91	83	87	80	83	73
Gledatelj 4	101	87	100	94	101	87
Gledatelj 5	100	89	96	100	91	90
Gledatelj 6	95	98	99	100	93	100
Gledatelj 7	88	93	85	77	88	88
Gledatelj 8	102	102	102	103	99	101
Gledatelj 9	100	50	100	100	100	100
Gledatelj 10	96	99	98	93	76	86
Gledatelj 11	91	70	92	85	96	86
Gledatelj 12	107	101	98	91	101	94
Gledatelj 13	85	91	89	85	88	88
Gledatelj 14	92	131	75	84	89	121
Gledatelj 15	50	90	56	59	98	70
Gledatelj 16	100	100	93	100	102	98
Gledatelj 17	95	82	92	93	70	87
Gledatelj 18	111	92	91	105	114	99
Gledatelj 19	69	63	68	73	76	72
Gledatelj 20	80	90	90	85	90	95
Gledatelj 21	80	90	90	85	80	70

Tablica P4.5. DMOS za sekvencu *mother&daughter*

	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	60	70	70	45	24	50
Gledatelj 2	98	90	91	96	96	96
Gledatelj 3	74	71	46	44	84	56
Gledatelj 4	89	87	84	91	85	89
Gledatelj 5	99	100	99	90	90	78
Gledatelj 6	92	96	96	100	100	95
Gledatelj 7	94	90	90	91	78	95
Gledatelj 8	92	96	91	94	88	85
Gledatelj 9	100	100	95	100	100	100
Gledatelj 10	100	93	102	98	80	99
Gledatelj 11	80	112	104	105	102	97
Gledatelj 12	105	108	103	90	104	88
Gledatelj 13	80	84	90	84	94	80
Gledatelj 14	127	94	117	99	121	89
Gledatelj 15	77	84	83	102	51	64
Gledatelj 16	100	98	98	97	97	88
Gledatelj 17	136	141	128	105	108	88
Gledatelj 18	110	110	108	98	91	65
Gledatelj 19	121	100	102	80	108	85
Gledatelj 20	65	85	85	70	85	80
Gledatelj 21	90	80	90	90	100	50

Tablica P4.6. DMOS za sekvencu *container*

	ATFI	AATFI-FR $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=6$	AATFI-FA $\delta=14$	FA	FR
Gledatelj 1	97	81	97	86	53	66
Gledatelj 2	84	92	95	92	100	95
Gledatelj 3	99	90	102	94	96	94
Gledatelj 4	93	100	112	92	103	86
Gledatelj 5	80	91	88	98	97	95
Gledatelj 6	85	94	85	95	96	100
Gledatelj 7	95	90	100	90	75	70
Gledatelj 8	96	100	102	100	103	100
Gledatelj 9	97	97	102	97	92	100
Gledatelj 10	94	100	100	93	100	100
Gledatelj 11	92	89	105	88	103	102
Gledatelj 12	85	92	100	100	99	101
Gledatelj 13	90	95	100	96	90	95
Gledatelj 14	96	94	104	115	98	100
Gledatelj 15	89	78	82	86	90	82
Gledatelj 16	92	94	90	85	95	91
Gledatelj 17	107	120	115	90	102	124
Gledatelj 18	103	83	99	105	112	103
Gledatelj 19	80	79	76	96	77	77
Gledatelj 20	95	80	90	95	85	70
Gledatelj 21	100	100	105	100	100	60

Prilog V

Tablica P5.1. Vremenska aktivnost sekvenci po slikama

Redni broj slike	<i>mobile</i>	<i>football</i>	<i>foreman</i>	<i>news</i>	<i>mother& daughter</i>	<i>container</i>
1	39,83	33,08	16,76	9,07	3,97	5,83
2	38,70	35,52	15,51	6,01	2,62	5,02
3	39,40	34,86	12,93	8,45	4,26	5,59
4	39,07	36,37	16,47	5,73	2,17	5,18
5	40,88	38,30	17,17	7,89	3,46	5,51
6	40,17	39,52	18,79	7,74	2,40	5,40
7	40,29	41,19	21,63	5,06	2,32	5,34
8	40,52	41,16	20,73	7,95	2,29	5,59
9	39,39	41,06	17,21	5,57	2,35	5,65
10	38,87	38,53	15,58	8,88	2,12	5,62
11	40,02	38,78	21,48	8,74	2,12	5,51
12	41,55	40,71	24,58	5,58	4,22	5,52
13	43,01	41,47	19,16	8,99	6,34	5,35
14	42,70	41,84	10,73	5,68	7,40	5,42
15	40,67	42,55	12,07	8,95	6,88	5,36
16	39,23	41,51	17,55	8,82	5,80	5,28
17	38,39	43,00	20,67	5,39	4,50	5,47
18	38,65	42,42	21,29	7,74	3,67	5,28
19	39,62	42,98	19,95	5,47	3,56	5,53
20	40,35	43,44	17,48	8,66	3,50	5,37
21	41,00	40,54	16,42	9,01	3,92	5,58
22	40,15	42,02	13,15	5,73	5,56	5,40
23	37,86	40,12	15,82	8,70	6,50	5,53
24	35,01	39,53	21,66	6,22	6,70	5,53
25	34,35	35,50	17,92	9,18	6,84	5,35
26	33,84	35,30	13,15	9,34	7,15	5,69
27	33,53	34,30	17,11	6,38	6,45	5,44
28	34,30	35,83	18,55	9,23	5,07	5,61
29	34,26	36,85	20,25	6,38	10,56	5,45
30	34,07	39,63	20,98	9,60	12,43	5,49
31	35,20	38,71	18,78	9,74	11,24	5,52
32	35,72	41,00	16,58	6,96	10,07	5,27
33	37,28	39,27	18,11	8,62	8,02	5,55
34	38,18	37,51	16,47	6,11	6,64	5,49
35	38,62	36,61	16,90	9,43	5,39	5,67
36	37,94	40,10	19,31	9,64	4,72	5,48
37	37,68	41,07	14,09	6,97	5,18	5,38
38	37,61	42,19	19,49	9,65	6,41	5,56
39	37,99	41,70	24,09	7,23	6,40	5,49
40	39,63	36,71	24,21	10,37	6,20	5,51
41	38,97	26,74	20,27	10,68	5,49	5,20
42	38,40	13,95	18,98	9,57	6,29	5,47
43	38,95	7,84	19,80	10,95	6,01	5,42
44	37,95	10,76	20,11	10,61	6,19	5,19
45	35,44	15,45	20,68		6,88	5,45
46	36,11	17,05	24,50		7,05	5,44
47	35,82	17,60	28,41		6,82	5,58
48	36,56	17,54	18,15		6,42	5,56
49	37,48	19,38	14,38		5,97	5,60
50	36,72	19,56	13,62		6,58	5,58
51	35,98	19,84	11,61		6,03	5,49
52	36,63	20,50	15,83		5,65	5,41
53	37,65	22,33	13,14		6,32	5,39
54	37,46	23,98	10,10		5,53	5,19
55	37,86	24,46	13,77		5,28	5,38
56	38,06	21,86	14,23		5,54	5,34
57	38,52	23,84	14,64		5,30	5,46

58	40,22	25,10	11,85		5,64	5,48
59	40,56	27,30	8,86		5,90	5,31
60	41,78	27,38	10,21		5,77	5,41
61	42,39	26,73	11,07		6,00	5,42
62	42,27	27,43	12,99		5,52	5,41
63	42,06	29,07	14,43		6,20	5,42
64	42,08	29,65	13,71		7,03	5,26
65	42,66	31,92	13,02		6,99	5,43
66	42,67	32,85	15,93		6,81	5,35
67	42,45	32,60	17,55		6,08	5,48
68	42,19	32,01	19,25		4,31	5,35
69	42,07	30,15	22,99		4,62	5,23
70	41,90	27,41	23,80		5,48	5,28
71	41,63	27,20	24,54		3,26	5,24
72	41,84	27,74	25,52		5,00	5,21
73	42,39	29,18	22,88		6,47	5,26
74	42,51	29,32	26,81		7,50	5,14
75	42,64	30,71	21,75		8,31	5,28
76	41,79	33,37	28,70		8,70	5,23
77	41,04	33,50	31,18		9,66	5,18
78	40,56	37,00	30,32		10,40	5,07
79	39,82	40,00	27,64		8,76	5,34
80	39,78	40,63	14,36		7,57	5,53
81	39,94	41,91	17,91		7,57	5,46
82	39,99	40,62	14,97		7,28	5,46
83	39,07	39,03	13,45		7,07	5,33
84	38,26	37,68	26,05		7,56	5,09
85	38,23	35,83	27,05		7,86	4,99
86	38,15	33,97	33,39		8,47	5,01
87	38,43	34,87	36,57		7,07	5,06
88	38,36	35,32	35,88		6,62	5,11
89	37,49	32,15	38,80		4,52	5,10
90	37,70	31,96	39,91		4,62	5,25
91	36,45	32,29	41,32		5,38	5,05
92	35,70	31,66	43,60		6,40	5,23
93	36,33	29,86	40,49		7,45	5,17
94	36,77	26,84	37,42		7,78	5,08
95	37,80	26,85	34,81		8,73	5,04
96	38,92	26,66	31,82		10,39	5,04
97	38,18	25,52	30,96		8,12	5,02
98	38,14	25,09	28,42		8,19	5,14
99	37,58	25,37	26,30		8,14	5,22
100	38,66	24,48	24,49		7,43	5,20
101	39,07	30,46	26,69		6,47	5,09
102	38,61	34,33	29,32		5,64	5,12
103	37,29	34,63	30,40		6,04	5,15
104	36,83	32,88	31,86		5,03	5,08
105	36,84	34,69	31,03		4,15	4,97
106	37,77	38,00	32,00		4,47	4,97
107	38,79	37,55	32,66		3,66	4,85
108	37,79	39,58	34,22		3,68	4,95
109	37,76	39,74	34,81		3,21	5,01
110	37,07	39,70	31,86		2,84	5,04
111	36,91	39,13	29,64		2,71	5,08
112	36,73	36,94	29,75		2,14	4,94
113	35,46	38,59	30,73		2,18	4,97
114	34,60	39,75	30,50		2,51	4,86
115	35,39	39,42	27,59		3,40	4,92
116	34,07	38,03	21,81		5,44	4,84
117	34,82	39,10	18,62		5,81	4,69
118	35,82	39,42	22,44		3,40	4,71
119	35,94	38,51	23,32		2,88	4,72
120	35,68	38,66	24,93		2,84	4,79
121	36,51	38,68	26,88		2,63	4,84
122	36,41	38,46	26,23		3,08	5,10
123	35,35	37,62	25,20		3,27	5,26

124	33,45	37,09	24,15		3,29	5,46
125	33,91	38,73	14,15		3,37	5,50
126	33,64	39,99	13,19		3,42	5,69
127	33,19	40,41	12,57		3,08	5,90
128	34,30	37,19	19,09		3,30	5,76
129	35,33	36,64	16,53		6,36	5,71
130	35,19		13,75		8,66	6,37
131	35,12		17,96		7,96	6,72
132	35,96		13,48		7,18	7,54
133	36,34		13,60		6,78	7,53
134	37,27		14,04		4,21	7,96
135	37,98		8,90		5,11	8,42
136	38,57		12,21		4,96	7,86
137	39,62		8,63		2,08	7,44
138	40,43		7,36		3,05	5,82
139	41,59		9,59		2,75	5,13
140	42,44		11,05		2,16	4,72
141	43,49		10,25		2,07	4,61
142	44,21		18,90		2,01	4,54
143	44,86		19,14		2,04	4,53
144	44,86		17,84		1,86	4,55
145	43,95		16,92		2,08	4,82
146	41,46		13,43		2,67	4,87
147	39,33		14,74		2,43	4,70
148	38,78		13,66		3,11	4,89
149	38,51		13,33		3,34	6,11