**UNIVERZITET U BANJOJ LUCI**

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Srđan Jović

**IMPLEMENACIJA I OPTIMIZACIJA ALGORITMA ZA DETEKCIJU POMJERAJA OBJEKTA U VIDEU NA DSP PROCESORU**

Diplomski rad

**Banja Luka, oktobar 2019**

|  |  |
| --- | --- |
| **Tema:** | IMPLEMENTACIJA I OPTIMIZACIJA ALGORITMA ZA DETEKCIJU POMJERAJA OBJEKTA U VIDEU NA DSP PROCESORU |
|  | Ključne riječi:  Detekcija pomjeraja  Uparivanje blokova  DSP procesor |
| **Komisija:** | prof. dr Aleksej Avramović, predsjednik  prof. dr Vladimir Risojević, mentor  mr Vladan Stojnić, član |

Uz rad je priložen *CD* sa tekstom diplomskog rada i prilozima

**Kandidat:**

Srđan Jović

**UNIVERZITET U BANJOJ LUCI**

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**KATEDRA ZA RAČUNARSTVO I INFORMATIKU**

|  |  |
| --- | --- |
| **Predmet**: | MULTIMEDIJALNI SISTEMI |
| **Tema**: | IMPLEMENTACIJA I OPTIMIZACIJA ALGORITMA ZA DETEKCIJU POMJERAJA U VIDEU NA DSP PROCESORU |
| **Zadatak**: | Opisati arhitekturu TI DSP C66x procesora, kao i tehnike za optimizaciju te korištenje mogućnosti cl6x TI kompajlera u svrhu optimizacije koda. Opisati algoritam za detekciju pomjeraja objekta na videu korištenjem estimacije pokreta uparivanjem blokova u susjednim frejmovima. Realizovati, te prilagoditi algoritam za detekciju pomjeraja objekta korištenjem estimacije pokreta za TI DSP C66x procesor. Primijeniti taj algoritam na video koji dolazi sa kamere, te rezultate prikazati na HDMI displeju. Analizirati performanse inicijalnog i optimizovanog koda. |
| **Mentor**: | prof. dr Vladimir Risojević |
| **Kandidat**: | Srđan Jović |

**Banja Luka, oktobar 2019.**

**Sadržaj**

[1. UVOD 1](#_Toc22629553)

[2. RAČUNARSKI VID 3](#_Toc22629554)

[2.1 Istorija 4](#_Toc22629555)

[2.2 Primjena 5](#_Toc22629556)

[3. DETEKCIJA POMJERAJA OBJEKTA U VIDEU 6](#_Toc22629557)

[3.1 Razlika frejmova 7](#_Toc22629558)

[3.2 Estimacija pokreta uparivanjem blokova 9](#_Toc22629559)

[3.2.1 Iscrpna metoda pretrage 9](#_Toc22629560)

[3.2.2 Metoda pretrage od tri koraka 11](#_Toc22629561)

[3.2.3 Dijamanstka metoda pretrage 12](#_Toc22629562)

[4. UGRAĐENI SISTEMI 14](#_Toc22629563)

[4.1 TDA2Px evaluacioni modul 15](#_Toc22629564)

[5. DSP 17](#_Toc22629565)

[5.1 TMS320C66x DSP procesor 18](#_Toc22629566)

[6. IMPLEMENTACIJA ALGORITMA DETEKCIJE POMJERAJA OBJEKTA U VIDEU 21](#_Toc22629567)

[6.1 “Links and Chains” arhitektura 21](#_Toc22629568)

[6.2 Slučaj upotrebe sistema 23](#_Toc22629569)

[6.3 Koraci implementacije 24](#_Toc22629570)

[7. OPTIMIZACIJA ALGORITMA DETEKCIJE POMJERAJA 28](#_Toc22629571)

[7.1 Optimizacije na nivou algoritma 28](#_Toc22629572)

[7.1.1 Prag poređenja blokova 28](#_Toc22629573)

[7.1.2 Ograničenje dubine dijamantske pretrage 30](#_Toc22629574)

[7.1.3 Minimizacija broja alociranja memorije 30](#_Toc22629575)

[7.1.4 Odmotavanje petlji 31](#_Toc22629576)

[7.2 Optimizacije na nivou Processor SDK frejmvorka 31](#_Toc22629577)

[7.2.1 Upotreba intrinzika 33](#_Toc22629578)

[7.2.2 DMA kopiranje 34](#_Toc22629579)

[7.2.3 Upotreba pragma direktiva 34](#_Toc22629580)

[7.2.4 Poravnjanje memorijskih adresa uz \_nassert 35](#_Toc22629581)

[7.2.5 Pisanje inline funkcija 35](#_Toc22629582)

[7.2.6 Upotreba restrict ključne riječi 35](#_Toc22629583)

[8. TESTIRANJE I ANALIZA REZULTATA TESTIRANJA 36](#_Toc22629584)

[9. ZAKLJUČAK 37](#_Toc22629585)

[PRILOG 38](#_Toc22629586)

[Prilog 1 38](#_Toc22629587)

[Prilog 2 39](#_Toc22629588)

[Prilog 3 40](#_Toc22629589)

[LITERATURA 42](#_Toc22629590)

# 1. UVOD

Još početkom sedamdesetih godina dvadesetog vijeka naučnici u polju računarske tehnike pokazivali su interesovanje za pravac koji danas nazivamo “Računarski vid” (*eng. Computer vision*). Računarski vid jeste naučna disciplina koja se bavi razvojem i istraživanjem metoda koje računar koristi da bi dobio određen nivo shvatanja digitalnih slika ili digitalnog videa. Iz perspektive inženjeringa, pravac istražuje načine koji će automatizovati procese koje ljudski sistem za vid može da obavlja. Računarski vid jeste veoma širok pojam, a samo neke od pod-disciplina kojima se računarski vid bavi jesu: rekonstrukcije scena, prepoznavanje objekata, detekcija i estimacija pokreta objekta u videu, kao i mnoge druge.

Pod-disciplina na koju se ovaj rad jednim dijelom fokusira jeste detekcija pomjeraja objekta u videu. Kada se priča o detekciji pomjeraja objekta misli se na proces detekcije promijene pozicije objekta u videu u odnosu na njegovo okruženje, kao i detekcije promjene položaja okruženja objekta u odnosu na stacionaran objekat. Primjena detekcije pomjeraja objekta na videu je raznolika, a samo neka od značajnijih mjesta gdje je detekcija zastupljena jesu: sigurnosni sistemi koji detekciju pokreta korsite da bi se detektovale određene aktivnosti krivičnog karaktera kao što su neautoritzovani pristupi prostoru koji se smatra zaštićenim, automotiv industrija koja detekciju pomjeraja objekata koristi da bi se iz vozila mogla detektovati ostala vozila koja učestvuju u saobraćaju, kao i detekcija kretanja pješaka koji se nalaze u neposrednoj blizini vozila. Metoda detekcije pomjeraja koja će biti obrađena u nastavku rada jeste metoda bazirana na estimaciji pokreta uparivanjem blokova iz susjednih frejmova.

U prethodnom paragrafu može se vidjeti da neki slučajevi upotrebe detekcije pomjeraja objekta na videu zahtijevaju da se proces detekcije izvršava na lokacijama na kojima nekada i nije moguće imati veliku procesorsku moć i gdje su dimenzije računarske platforme na kojoj se proces detekcije odvija često ograničene. Za primjer možemo uzeti detekciju pomjeraja objekata u okolini automobila gdje se sama platforma koja izvršava detekciju nalazi u automobilu. Zbog toga se u ovakvim situacijama koriste sistemi koji se nazivaju ugrađeni sistemi (*eng. Embedded systems*), a njihova primarna uloga jeste da obavljaju neku određenu funkciju, najčešće u sklopu nekog većeg mehaničkog ili električnog sistema. Nešto više o ugrađenim sistemima biće rečeno u glavi 4 nazvanom “Ugrađeni sistemi”. Ugrađeni sistem na kojem će se bazirati ovaj rad zasnovan je na TSM320C66x procesorskoj arhitekturi, koja je razvijena od strane kompanije pod nazivom Texas Instruments i koja je specifična po tome što se programi mogu izvršavati na procesoru za digitalnu obradu signala (*eng. DSP - Digital Signal Processor*) koji je optimizovan za operacije koje su česte kada se radi o obradi digitalnih signala.

Predmet ovog rada jeste implementacija algoritma za detekciju pomjeraja objekta u videu i optimizacija istog za platformu koja je bazirana na TMS320C66x procesorskoj arhitekturi. U drugom poglavlju rada dat je pregled pravca računarske tehnike koji se naziva računarski vid i kratak pregled pod-disciplina kojima se računarski vid bavi. Kao jedna od pod-disciplina kojom se računarski vid bavi jeste detekcija pomjeraja objekta u videu i ona je opisana u trećem po redu poglavlju, gdje se u prvi plan stavlja metoda detekcije zasnovana na estimaciji pokreta uparivanjem blokova između susjednih frejmova video zapisa. Navedeni metod je zansnovan na više različitih metoda pretrage tokom uparivanja blokova, a tri metoda koja su obrađena u ovoj glavi jesu: iscrpna metoda pretrage (*eng. Exhaustive Search*), metoda pretrage od tri koraka (*eng. Three Step Search*) i dijamantska metoda pretrage (*eng. Diamond Search*). Dodatno će biti riječi i o dodatne dvije metode, a to su: šestougaona pretraga (*eng. Hexagon Search*) i logoritamska pretraga (*eng. Logarithmic Search*). Implementacija će se bazirati na prve tri navedene metode, dok se druge dvije spominju samo idejno. Četvrta glava govori uopšteno o ugrađenim sistemima, kao i o platformi TDA2Px koja se koristi kao platforma za realizaciju rada ,a služi kao podloga za glavu koja joj slijedi, galvu pet, koja govori uopšteno o DSP procesoru, a nakon toga daje uvid u arhitekturu i karaktersistike TMS320C66x procesora. Detalji implementacije algoritma za detekciju pomjeraja na datoj hardverskoj arhitekturi dati su u glavi šest, koja daje informativan pregled arhitekture softerskog *framework*-a pod nazivom Processor SDK-Vision u kojem je realizovana implementacija praktičnog dijela. Glava sedam sadrži uvid u metode optimizacija koje su korištene pri implementaciji praktičnog dijela, a uključuju optimizacije na nivou algoritma i optimizacije na nivou arhitekture na kojoj je praktični dio razvijen. Testriranje i analiza rezultata dobijenih testiranjem dati su u glavi osam. U posljednoj glavi nalazi se zaključak rada, gdje se još jednom ističu najznačajniji rezultati rada, mogućnost primjene ovog rada, kao i preporuke za dalji rad na obrađenom problemu.

# 2. RAČUNARSKI VID

Sam pojam detekcije pomjeraja objekta na videu ne bi se istraživao da naučnici u sedamdesetim godinama prošlog vijeka nisu pokazali određen nivo interesovanja u polju računarskog vida. Ljudska bića svakodnevno opažaju trodimenzionalnu strukturu svijeta oko sebe i to rade sa velikom lakoćom. Ljudi bez ikakvih problema mogu da zaključe kakvog je neki predmet obilika, koliko se ljudi nalazi na fotografiji, pa čak i kojega pola i koje starosti su ti ljudi sa fotografije.Perceptivni psiholozi proveli su decenije pokušavajući da shvate kako vizuelni sistem kod čovjeka funkcioniše i iako su uspjeli da shvate neke od osnonih principa, kompletan način funkcionisanja vizuelnog sistema čovjeka i danas ostaje misterija [1].

Naučnici u polju računarskog vida razvili su računarske metode za rekonstruisanje trodimenzionalnog oblika objekata sa slika na osnovu dovoljno velikog broja slika istog objekta iz različitih uglova posmatranja. Danas je moguće i pratiti kretanje objekata iza kojih se nalaze kompleksne pozadine. Moguće je čak i odrediti koje se osobe nalaze na fotografiji tako što se koriste kombinacije metoda za detekciju i prepoznavanje lica, odjeće i kose. Međutim, bez obzira na sva ova tehnološka dostignuća današnjice, i dalje je nezamslivo da računar analizira i interpretira fotografiju na nivou dvogodišnjeg djeteta [1].

Postavlja se pitanje zašto je računarski vid toliko komplkesan domen i težak za razumijevanje? Odgovor proizilazi iz činjenice da je vid „inverzan“ problem, što znači da je potrebno odrediti neke nepoznate varijable, a na raspolaganju su nam informacije koje nisu dovoljne da se te varijable odrede sa lakoćom. *Forward* modeli koji se korsite u polju računarskog vida potiču iz računarske grafike i fizike, polja koja modeluju kako se objekat kreće, kako se svjetlost prelama, odbija od reflektivne površine i na kraju projektuje na ravne ili zakrivljene površine. Sa druge strane u računarskom vidu isto tako pokušava se raditi obrnuta procedura, gdje se na osnovu jedne ili više fotografija dobijaju informacije kao što su oblik, osvjetljenost, distribucija boja na objektima, kao i način i pravac kretanja objekata sa fotografije ili videa [1].

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Slika 2.1 – Algoritam za praćenje kretanja osobe sa kompleksnom pozadinom | Slika 2.2 – Kombinacija algoritama za detekciju lica i odjeće |

## 2.1 Istorija

Ideja da bi računarski vid trebao biti jednostavan potiče još iz ranih dana vještačke inteligencije, kada se vjerovalo da je kognitivni dio inteligencije dosta kompleksniji za shvatanje od perceptualnog dijela. U to vrijeme naučnici vještačke inteligencije i robotike (na institutima kao što su MIT, Stanford i CMU) vjerovali su da će problem vizuelnog *inputa* biti samo jednostavan korak na putu do rješavanja nekih mnogo kompleksnijih problema kao što su svhvatanje na visokom nivou (*eng. high-level reasoning*).

U posljednjih četrdeset godina polje računarskog vida znatno je napredovalo, a kratak istorijski pregled najznačajnijih dostignuća u polju računarskog vida dat je u Tabeli 2.1.

Tabela 2.1 – Istorijski pregled dostignuća u polju računarskog vida [1]

|  |  |
| --- | --- |
| Period | Dosignuća |
| 1970e | Winston (1975) i Hanson i Riesman (1978) objavljuju radove na temu rekonstrukcije trodimenzionalne strukture svijeta na osnovu fotografija;  Huffman (1971), Clowes (1971), Waltz (1975) objavljuju radove na temu razvoja algoritama za linearno labeliranje |
| 1980e | Canny (1986), Nalwa i Binford (1986) objavljuju radove o detekciji ivica i kontura;  Procesiranje trodimenzoinalnih podataka (*eng. Three dimensional data processing*), uključuje pribavljanje, spajanje, modelovanje i prepoznavnaje, aktivno se istražuje tokom osamdesetih godina i obrađeno je u radovina koje objavljuju Besl i Jain (1985), Faugeras i Hebert (1987)i mnogi drugi; |
| 1990e | Metode optičkog toka (*eng. Optical Flow*) nastavljaju da se obrađuju u radovima koje objavljuju Nagel i Enkelmann (1986);  Aktivno se istražuju *multi-view stereo* algoritmi u radovima koje objavljuju Seitz i Dyer (1999), kao i Kutulakos i Seitz (2000);  Algoritmi za praćenje (*eng. tracking algorithms*) su se također unaprijedili i obrađeni su u radovima koje objavljuju Kass, Witkin i Terzopoulos (1988), kao i Balke i Isard (1998); |
| 2000e | Razvijaju se mnogobrojne tehnike koje danas spadaju pod dispilinu koja se naziva komputaciona fotografija (*eng. computational photography*), a u koje spadaju spajanje slika (*eng. image stiching*), fotografije visokog dinamičkog opsega (*eng. HDR – High Dynamic Range*);  Sinteza tekstura i *quilting* obrađeni u radovima koje objavljuju Efros i Freeman (2001), Kwatra, Shodl, Essa (2003);  Tehnike proepoznavanja zasnovane na odlikama (*eng. feature based recognition*) obrađene su u radovima Ponce, Hebert i Schmid (2006);  Metode računraskog vida bazirane na mašinskom učenju; |

## 2.2 Primjena

Pojam računarskog vida je širok i obuhvata veliki broj pod-disciplina, pa je samim tim i način na koji se znanja iz ove oblasti primjenjuju raznolik. Samo neke od primjena računarskog vida u današnje vrijeme jesu:

* Optičko prepoznavanje karaktera (*eng. OCR - Optical character recognition*) – korsiti se za automatsko prepoznavanje registarskih tablica na slikama;
* Inspekcija mašina (*eng. Machine Inspection*) – brza inspekcija dijelova koji se koriste u auto i avio industriji da bi se osigurao maksimalni kvalitet konačnog proizvoda;
* Izgradnja trodimenzionalnih modela (*eng. 3D Model Building*) – automatizovani sistemi koji generišu trodimenzionalne modele reljefa na osnovu aero fotografija;
* Automotiv sigurnost (*eng. Automotive safety*) – detekcija neočekivanih prepreka kao što su pješaci na ulici u uslovima gdje klasične tehnike vida nisu baš najbolje rješenje;
* Obrada medicinskih fotografija (*eng. Medical imaging*) – obrada slika u cilju proučavanja morfologije ljudkog mozga dok stari;
* Prepoznavanje otiska prsta i biometrija (*eng. Fingerprint Recognition and Biometrics*) – za automatsku autentikaciju baziranu na skeniranju otiska prsta, kao i za forenzičke aplikacije;
* Nadzor (*eng. Surveillnace*) – detekcija pomjeraja objekta u videu koristi se za nadgledanje uljeza, analizu saobraćaja, kao i na primjer za praćenje stanja bazena u svrhu detekcije utapanja;

Ovaj rad će se primarno fokusirati na posljednju primjenu navedenu u prethodnoj listi, a to je detekcija pomjeraja objekta u videu. Naredna glava daje detaljan uvid u detekciju pomjeraja objekta u videu, kao i u tehnike i algoritme koji se koriste za postizanje ovog cilja.

# 3. DETEKCIJA POMJERAJA OBJEKTA U VIDEU

Potreba da se vrši detekcija pomjeraja objekta u video zapisu postaje sve češća, a broj discpilina koje imaju koristi od metoda detekcije pomjeraja raste svakodnevno. Skoro svi moderni sistemi za nadgledanje (*eng. surveillance systems*) danas posjeduju mogućnost praćenja objekta koji se kreće na sceni, a da bi praćenje objekta bilo moguće potrebno je detektovati svaki vid kretanja tog objekta u videu. Video sistemi za nadzor koji rade u realnom vremenu imaju najviše koristi od metoda detekcije pomjeraja objekta, mada, nije ni rijetkost da se metodi detekcije pomjeraja koriste i za obradu već snimljenog video sadržaja. Na slici 3.1 je prikazan jedan interesantan primjer takve primjene - detekcija pomjeraja i kretanja igrača na video snimku fudbalske utakmice, gdje se dobijene informacije o kretanju objekata (u ovom slučaju igrača) korsiti za analizu i poboljšavanje pozicioniranja individualnih igrača, kao i cijelog tima.



Slika 3.1 – Detekcija pomjeraja igrača na fudbalskoj utakmici

Generalno, proces detekcije pomjeraja objekta na videu smatra se procesom kojim se potvrđuje promjena pozicije objekta ili objekata u odnosu na položaj pozadine, ili promjena pozadine u odnosu na objekat [3]. Kroz prethodnih nekoliko decenija, predloženo je i razvijeno nekoliko tehnika da bi se ispunio ovaj cilj. Naravno, ne postoji savršena metoda detekcije pomjeraja koja je otporna na sve probleme sa kojima se susreće tokom procesa detekcije, a koji se najčešće tiču uslova osvjetljena scene i dinamične promjene istog, brzine kretanja objekta ili objekata na sceni, kao i otpornost na razne vidove šuma koji neprestano ometaju proces detekcije. U nastavku glave obrađene su dvije metode detekcije pomjeraja objekta u videu: detekcija pomjeraja bazirana na razlici frejmova (*eng. Image Substraction*) i detekcija pomjeraja bazirana na estimaciji pokreta uparivanjem blokova (*eng. Block-matching Motion Estimation*). Prva metoda je obrađena samo teorijski, dok se implementacija u nastavku rada (Glava 6) bazira na drugoj metodi, koja je iz toga razloga obrađena u većem detalju.

## 3.1 Razlika frejmova

Razlika frejmova (*eng. Image substraction*) jeste jedna od jednostavnijih i popularnijih tehnika koje se danas koriste da bi se detektovao pomjeraj u videu. Jednostavno, razlika frejmova se može predstaviti izrazom:

|  |  |
| --- | --- |
| *∆I(i,j) = ICurr(i,j) – IPrev(i,j),* | (3.1) |

gdje *i* predstavlja ideks reda frejma, *j* predstavlja indeks kolone frejma, *ICurr(i,j)* predstavlja matricu intenziteta piskela trenutnog frejma, a *IPrev(i,j)* predstavlja matricu intenziteta piksela prethodnog frejma. *∆I(i,j)* predstavlja matricu koja se dobije razlikom intenziteta piksela na odgovarajućim pozicijama za dva uzastopna frejma.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  | |

Slika 3.2 – Rezultat razlike dva uzastopna frejma u videu

Kao što se može vidjeti na Slici 3.2, rezultat razlike dva uzastopna frejma u videu jeste intenzitetska slika na kojoj vrijednost intenziteta piksela na pozicijama gdje nije bilo razlike iznosi nula ili približno nula, dok se pozicijama gdje je postojala određena razlika između frejmva nalaze pikseli intenziteta koji je veći od nula. Na osnovu intenziteta piskela na rezultantnoj slici može se zaključiti da li je došlo do pomjeraja objekata na slici, i ako jeste, na kojoj lokaciji frejma se taj pomjeraj desio.

Iako prilikom detekcije pomjeraja baziranoj na razlici dva uzastopna frejma dobijamo zadovoljavajuće rezulate kada se radi o statičnom frejmu (pomjeraj pozadine i objekata u pozadini je nepostojeći ili minimalan), ovaj način detekcije pomjeraja ne daje zadovoljavajuće rezultate kada se isti princip korsiti na video sa pozadinom koja se pomjera. Isto tako, problem predstavlja i promjena osvjetljenja scene, a tada je razlika intenziteta piksela postojeća na svim pozicijama na frejmu. Ovaj problem se može ublažiti tako što se korsiti metoda usrednjavanja razlika više uzastopnih frejmova, ali ovaj rad se u nastavku neće osvrtati na navedeno poboljšanje. Jedan od problema na koji ovaj pristup takođe nailazi jeste šum pozadine koji ne treba da bude detektovan kao pomjeraj. Način nakoji se ovaj šum može otkloniti jeste korištenjem praga intenziteta na frejmu rezlike intenziteta. Korištenje praga dato je izrazom:

|  |  |
| --- | --- |
| *∆I(i,j) = 0, ako važi ∆I(i,j) < t,* | (3.2) |
| *∆I(i,j) = 1, ako važi ∆I(i,j) > t,* |  |

gdje *t* predstavlja prag odbacivanja šuma. U zavisnosti od vrijednosti praga, rezultantna razlika će biti manje ili više tolerantna na šum. Prevelika vrijednost praga *t* može da odbaci i korsine informacije pa ne postoji najbolja vrijednost praga, te se ta vrijednost određuje eksperimentalno u zavisnosti od situacije.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Slika 3.3 – Rezultantni frejm prije i nakon filtriranja šuma uz pomoć praga

## 3.2 Estimacija pokreta uparivanjem blokova

Estimacijom pokreta smatra se proces kojim se određuju vektori pomjeraja koji opisuju pomijeranje objekata između dva uzastopna frejma. Isto tako se može reći da vektori pomjeraja opisjuju kako se jedan frejm transformiše u drugi. Ovaj problem nije dobro definisan zato što slike zapravo predstavljaju projekciju trodimenzionalne scene u dvodimenzionalnu ravan pa korespondencija između pokreta objekata u 3D okruženju i 2D ravni nije jednoznačna. Međutim ako je broj frejmova u videu veliki, onda se može pretpostaviti da je količina pomjeraja objekata između dva uzastopna frejma mala što omogućava dovoljno dobru estimaciju koja se može iskoristiti da bi se detektovao pomjeraj objekta u videu [2]. Veliki je broj algoritama koji se korsite da bi se odredili vektori pomjeraja kao što su: uparivanje blokova, određivanje optičkog toka, fazna korelacija, piksel-rekurzivni algoritmi, algoritmi zasnovani na detekciji i uparivanju obilježja, itd. Ovaj rad se u nastavku fokusira na algoritam uparivanja blokova. Estimacija pokreta pored detekcije pomjeraja objekta ima i druge primjene, a primarno se korsiti kao korak prilikom kompresije video sadržaja. U nastavku, rad se isključivo fokusira na primjenu estimcije pokreta radi detekcije pomjeraja objekta u videu.

Algoritam uparivanja blokova u opštem slučaju pronalazi vektore pomjeraja blokova između dva frejma – referentni frejm i trenutni frejm. U slučaju primjene estimacije pokreta radi detekcije pomjeraja, smatra se da su ta dva frejma uzastopna ako nije drugačije naglašeno, a referenciraće se kao trenutni i prethodni frejm. Prvi korak algoritma jeste da se trenutni frejm podijeli na blokove fiksne veličine. Veličina blokova se bira pod pretpostavkom da se prostorno bliski pikseli kreću na sličan način. Za svaki blok *B* na trenuntom frejmu potrebno je odrediti odgovarajući blok sa prethodnog frejma tako da mjera nesličnosti blokova poprima minimalnu vrijednost. Za mjeru nesličnosti blokova najčešće se koriste suma apsolutnih razlika intenziteta piksela između frejmova ili suma kvadrata razlika. Suma apsolutnih razlika definisana je izrazom:

|  |  |
| --- | --- |
| *D(d1, d2) =* | (3.3) |

dok je suma kvardata razlika data izrazom:

|  |  |
| --- | --- |
| *D(d1, d2) =* | (3.4) |

gdje *k* predstavlja indeks trenutnog frejma, a [*d1, d2*] predstavlja vektor pomjeraja između blokova koje posmatramo. U nastavku rada razmotrene su tri metode određivanja najsličnijeg bloka sa prethodnog frejma, a to su: iscrpna(sekvencijalna) metoda pretrage, metoda pretrage od tri koraka i dijamantska metoda pretrage.

### 3.2.1 Iscrpna metoda pretrage

U opštem slučaju da bi algoritam uparivanja blokova našao blok sa prethodnog frejma koji najbolje odgovara referentnom bloku sa trenutnog frejma, potrebno je da se poredi sa svim blokovima prethodnog frejma, što je veoma zahtjevno računarski pa se prostor pretrage u praksi ograničava takozvanim prozorom pretrage. Prozor pretrage je prostor koji se dobija tako što se na blok sa prethodnog frejma koji odgovara pozicijom bloku trenutnog frejma doda fiksno određeno proširenje sa svake od četiri strane bloka, čime površina prozora pretrage postaje veća od površine bloka. Ograničavanje oblasti koja se pretražuje zasniva se na pretpostavci da su pomjeraji objekta mali između susjednih frejmova i da će upareni blok biti pronađen u neposrednoj blizini referentnog bloka [2]. Uobičajeno je da se proširenje u horizontalnom i vertikalnom pravcu ograniči na veličinu bloka. Tako da ako se uzme da su dimenzije bloka *p* × *p,* onda horizontalne i vertikalne vrijednosti proširenja mogu imati vrijednosti iz intervala [-*p, p*], pa je oblast pretrađivanja dimenzija (2*p +* 1) × (2*p +* 1) [2].

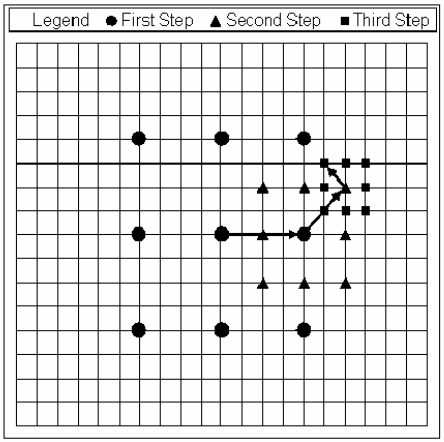


Slika 3.4 – Lijevo je prikazan treuntni frejm i blok koji se obrađuje, desno je prikazan prethodni frejm sa određenim prozorom pretrage i uparenim blokom [2]

Proces pretrage unutar prozora odvija se klizanjem referentnog bloka sa trenutnog frejma preko svih blokova koji se nalaze unutar prozora pretrage i za svaki par se računa mjera nesličnosti. Blok iz prozora pretrage koji je dao minimalnu vrijednost mjere nesličnosti uzima se kao najbolji rezultat, a vektor pomjeraja za referentni blok dobija se kao razlika koordinata u lijevom gornjem uglu referentnog bloka i bloka koji je određen kao najbolje poklapanje unutar prozora pretrage. Uzmimo za primjer referentni blok sa ugaonom koordiantom (200, 216), ako je najbolje poklapanje određeno za blok sa koordiantama (205, 212) vektor pomjeraja za dati referentni blok izosi [5, -4]. Na isti princip se određuje vektor pomjeraja za svaki blok koji je dobijen dijeljenjem referentnog frejma na blokove, a kao rezultat cijelog procesa dobija se matrica vektora pomjeraja čiji je broj redova jednak broju redova blokova kada se referentni frejm podijeli na blokove fiksnih dimenzija, a broj kolona samim tim jednak broju kolona blokova u referentnom frejmu nakon dijeljenja na blokove. I sa ograničenim prostorom pretrage iscrpna metoda je i dalje računarski zahtjevna metoda pa su predložene mnoge varijacije optimizacije pretrage, a u nstavku su obrađene pretraga od tri koraka i dijamantska metoda pretrage.

### 3.2.2 Metoda pretrage od tri koraka

Smatra se jednim od najranijih pokušaja da se implementira brza metoda za uparivanje blokova, a po prvi put se pojavljuje još sredinom osamdesetih godina prošloga vijeka [5]. Na Slici 3.5 prikazana je generalna ideja iza ovog algoritma.



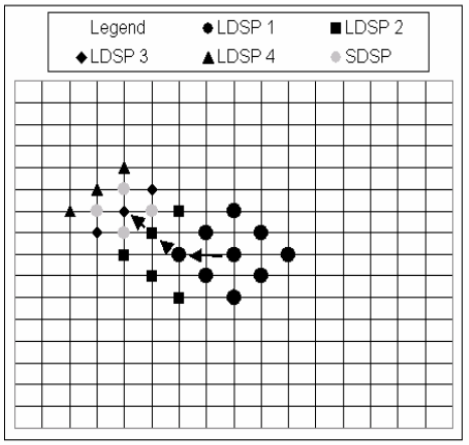
Slika 3.5 – Procedura metode pretrage od tri koraka. Tačkama su označene lokacije pretrage tokom prve faze, troulgovi predstavljaju lokacije pretrage tokom druge faze pretrage, a pravougaonici lokacije pretrage treće faze. Strelicama je označen pravac napredovanja algoritma kroz faze [5]

Pretraga bloka se ovaj put ne odvija unutar prozora pretrage, nego se u tri uzastopna koraka algoritma definišu fiksne lokacije na kojima se blokovi porede sa referentnim blokom sa trenutnog frejma. Pretraga na prostoru prethodnog frejma započinje na istoj lokaciji na kojoj se nalazi i referentni blok na trenutnom frejmu, tačnije iz centra lokacije referentnog bloka. Za izvšavanje algoritma bitan je parametar *step\_size (S)* koji se na početku postavlja na vrijednost *S =* 4. Pored izračunavanja mjere nesličnosti za centralnu lokaciju, mjera nesličnosti se računa i za sedam okružujućih blokova koji se od centralnog bloka nalaze na distancama – *S*  i *S* po horizontalnoj i vertikalnoj osi tako da se ukupno vrši devet poređenja u prvoj fazi algoritma. Blok za koji je izračunata minimalna vrijednost mjere nesličnosti uzima se kao novi centralni blok i prelazi se u drugu fazu algoritma. U drugoj fazi algoritma vrijednost koraka pomjera se polovi i dobija vrijednost *S =* 2. Kao i kod prve faze algoritma, računa se mjeru nesličnosti za referentni blok i za novi centralni blok sa svojih osam okružujućih blokova koji se kao i u prvoj fazi od centralnog bloka nalaze na distancama od – *S* i *S* po horizontalnoj i vertiklanoj osi. Kada se odredi blok sa minimalnom vrijednošću mjere nesličnosti prelazi se na finalnu treću fazu koja je ista kao i prve dvije faze, samo što se vrijednost koraka pomjeraja polovi i uzima vrijednost *S =* 1. Blok koji je u trećoj fazi određen kao blok sa minimalnom mjerom nesličnosti u odnosu na referentni blok uzima se kao najbolje poklapanje, a vektor pomjeraja se računa za njegovu poziciju i za poziciju referentnog bloka.

Ova implementacija algoritma daje značajno poboljšanje u perofrmansama u odnosu na iscrpnu metodu pretrage, a izvršava se čak i do devet puta brže [5]. U situaciji iscrpne metode pretrage sa proširenjem *p =* 7, da bi se pronašlo najbolje poklapanje za samo jedan blok sa referentnog frejma potrebno je izračunati vrijednosti mjere nesličnosti za 225 različitih blokova iz prozora pretrage sa prethodnog frejma. Sa druge strane, metoda pretrage od tri koraka svaki put fiksno radi dvadeset i sedam izračunavanja mjere nesličnosti prilikom pretrage jednog bloka. Za manu ovoga algoritma može se uzeti to što zbog ograničenog broja blokova nad kojima će se računati mjera nesličnosti ne pronalazi uvijek blok sa minimalnom mjerom nesličnosti. U slučaju detekcije pomjeraja objekata ova mana ne predstavlja veliki problem ali u slučaju primjene algoritma kao koraka kompresije video sadržaja (koja je prethodno navedena kao jedna od čestih primjena za algoritme estimacije pokreta) mogu se dobiti lošiji rezultati u odnsu na iscrpnu metodu pretrage. Poboljšanje ovog algoritma dato je u vidu takozvane nove pretrage od tri koraka (*eng. NTSS – New Three Step Search*) [5] koji je jedan od prvih široko rasprostranjenih brzih algoritama za uparivanje blokova ali koji neće biti obrađen u nastavku rada.

### 3.2.3 Dijamanstka metoda pretrage

Dijamanstka metoda pretrage jeste algoritam čiji je šablon pretrage sličan pretrazi kod metode pretrage od tri koraka, samo što se umjesto šablona pravougaonika koristi šablon dijamanta. Na Slici 3.6 prikazana je generalna ideja iza ovog algoritma.



Slika 3.6 – Procedura dijamantske metode pretrage. Na slici je crnim tačnakma označen šablon velikog dijamanta, dok je sivim tačkama označen šablon malog dijamanta. Strelicama je označen pravac napredovanja algoritma kroz faze [5]

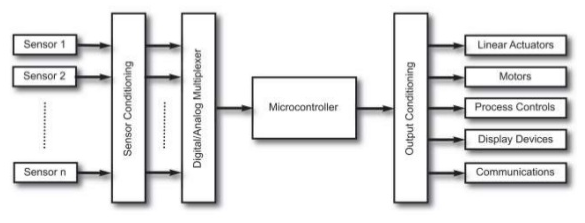
Kao i kod metode pretrage od tri koraka, ni ova metoda ne posjeduje prozor pretrage. Dijamantska metoda pretrage tokom pretraživanja korsiti dva fiksna šablona pretrage, a to su šablon velikog dijamanta pretrage (*eng. LDSP – Large Diamond Search Pattern*) i šablon malog dijamanta pretrage (*eng. SDSP – Small Diamond Search Pattern*). Slično kao i kod pretrage od tri koraka, u prvoj fazi algoritma vrši se izračunavnaje mjere nesličnosti između referentnog bloka sa trenutnog frejma i 9 blokova sa prethodnog frejma koji se nalaze na lokacijama koje odgovaraju tačkama šablona velikog dijamanta pretrage. Lokacija bloka sa najboljim poklapanjem uzima se kao nova centralna lokacija i prelazi se u drugu fazu algoritma u kojoj se izračunava mjera nesličnosti između referentnog bloka sa trenutnog frejma i 5 blokova sa prethodnog frejma koji se nalaze na lokacijama koje sada odgovaraju tačkama šablona malog dijamanta pretrage. Ako se ispostavi da je minimalna vrijendost mejere nesličnosti izračunata za centralni blok dijamanta, algoritam se prestaje izvršavati i blok se uzima kao blok sa najboljim poklapanjem. U suprotnom, lokacija sa najboljim poklapanjem postaje nova centralna lokacija i ponavlja se druga faza algoritma. Algoritam uobičajeno nema ograničen broj koraka da bi mogao sa što većom preciznošću odrediti blok sa najboljim poklapanjem.

U situacijama kada se pozicija objekata u videu mijenja sporo iz frejma u frejm, algoritam daje dobre rezultate uz znatno manji broj koraka potrebnih da se odredi najbolje poklapanje u odnosu na iscrpnu metodu pretrage. Sa druge strane, ako se pozicija objekata u videu mijenja brzo algoritam mora da obradi znatno veći broj koraka da bi pronašao najbolje poklapanje pa se u takvim situacijama performanse algoritma degradiraju [5].

# 4. UGRAĐENI SISTEMI

Paralelno sa napretkom računarskih tehnologija, sve više se javljaju električni uređaji koji zavise od interno ugrađenih računarskih sistema (*eng. Embedded System*). Mogućnosti koje ti električni uređaji koji zavise od ugrađenih sistema posjeduju prevazilaze mogućnosti koje se ostvaruju implementacijom na isključivo hardverskom nivou. Iz tog razloga, ugrađeni sistemi se danas mogu naći u širokom opsegu namjenskih uređaja, od onih najmanjih kao što su električni tajmeri gdje se ugrađeni sistemi korsite za male količine procesiranja, pa sve do znatno kompleksnijih kao što su igračke konzole i mnogi drugi industrijski proizvodi.

Ugrađeni sistem nije standardan sistem kao što je personalni računar koji može da izvršava veliki broj različitih programa i obavlja još veći broj pozadinskih zadataka. Ugrađeni sistem uvijek se fokusira na izvršavanje jednog specifičnog programa ili zadatka za koji je isprogramiran. Da bi se ispunila ova potreba, uređaji koji u sebi sadrže ugrađene sisteme na njima imaju preinstaliran softver koji se ne mijenja često ali postoji mogućnost ažuriranja sa vremena na vrijeme [6].



Slika 4.1 – Uprošćena arhitektura ugrađenog sistema

Generalno, ugrađeni sistemi definišu se kao bilo koji računarski sistemi sadržani unutar nekog proizvoda ili sistema koji se ne klasifikuje kao računarski sistem [6].

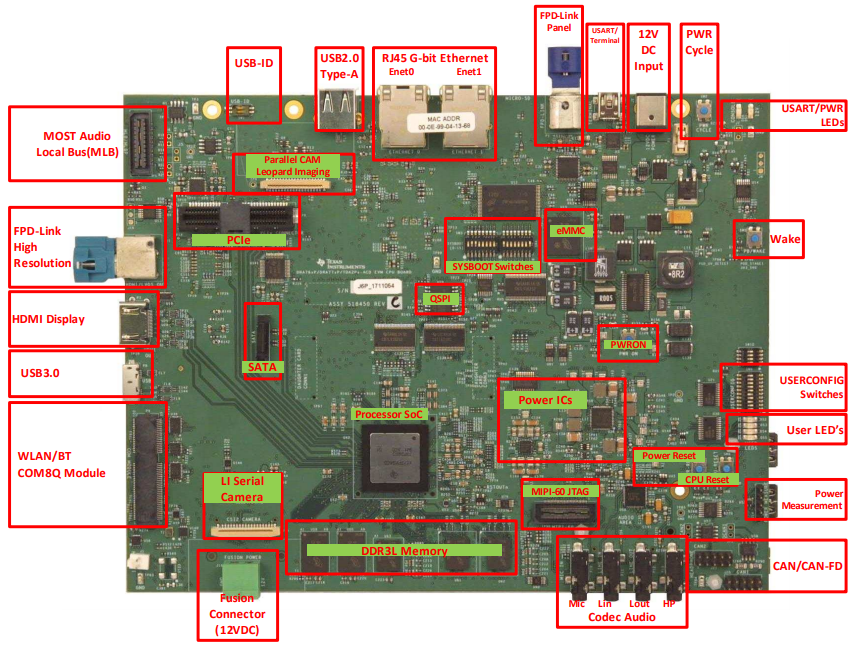
Softver ugrađenog sistema klasično se naziva *firmware.* Za razliku od standardnog softvera na računarima koji se čuva na diskovima, *firmware* se čuva na samome čipu [6]. Ugrađeni sistemi sastoje se od dvije glavne komponente, a to su: hardverska komponenta i softerska komponenta. Hardverska komponenta je hardverska platforma na kojoj se softverska komponenta izvršava. Hardvarska komponenta može biti bazirana na mikroprocesoru i na mikrokontroleru. Uz to, hardverska komponenta uključuje i ostale elemente kao što su: memorija, interfejsi za ulaz i izlaz i slično.

## 4.1 TDA2Px evaluacioni modul

TDA2Px evaluacioni modul (*eng. EVM – Evaluation Module*) predstavlja evaluacionu platformu dizajniranu da bi se ubrzao razvoj aplikacija baziranih na naprednim sistemima za pomoć vozačima (*eng. ADAS – Advanced Drvier Assist Systems*) i smanjilo vrijeme potrebno za uvođenje istih. TDA2Px EVM baziran je na TDA2Px *sistem na čipu* (*eng. SoC – System on Chip*) arhitekturi koja je heterogena i skalabilna po prirodi, a uključuje mješavinu TI procesora koji mogu da rade sa podacima fiksnog formata kao i sa podacima u pokretnom zarezu. Procesori koji se nalaze na evaluacionoj platformi jesu:

* TMS320C66x procesor za obradu digitalnih signala (*eng. DSP – Digital Signal Processor*)
* Vision AccelerartionPac (EVE – Embedded Vision Engine) procesor
* ARM® Cortex®-A15 MP Core procesor
* Dvojezgarni Cortex®-M4 procesor

Pored navedenih procesora koji se nalaze na TDA2Px evaluacionoj platformi, ona uključuje i set korisnih periferija kao što su: nekolicina interfejsa za kamere (serijski i paralelni), CSI2 interfejs, CAN interfejs kao i GigBEthernet AVB interfejs. Na Slici 4.1 prikazana je prednja strana ploče sa označenim interfejsima.



Slika 4.1 – TDA2Px evaluacioni modul sa označenim interfejsima [7]

TDA2Px EVM se u industiji najčešće koristi kao evaluaciona platforma za aplikacije u koje spadaju:

* Automotiv aplikacije za zabavu (eng. Automotive Infotainment applications)
* Automotiv aplikacije za vid (eng. Automotive Vision Applications)

U svrhe ovoga rada, TDA2Px EVM korištena je kao evaluaciona platforma za razvoj aplikacije za detekciju pomjeraja objekta u videu na DSP procesoru, a u nastavku rada kada se pomene izraz *evaluaciona platforma* odnosiće se na TDA2Px EVM evaluacionu platformu. Kao što je u prethodnom paragrafu navedeno, jedan od procesora koji je dostupan na TDA2Px EVM platformi jeste TMS320C66x DSP procesor, a naredna glava (Glava 5) daje opšti pregled arhitekture i primjene DSP procesora, kao i specifičnog modela koji se nalazi na korištenoj evaluacionoj platformi. Od periferija dostupnih na ploči, korišten je MIPI CSI-2 interfejs za kameru na koji je spojena RDACM41-16 kamera, HDMI izlaz na koji se šalje obrađen video signal, UART interfejs preko kojeg se vršila komunikacija sa aplikacijom koja se izvršava na ploči. Evaluaciona platfroma spojena je na 12V DC napajanje.

# 5. DSP

Procesor za obradu digitalnih signala (*eng. DSP – Digital Signal Processor*) jeste specijalizovana vrsta procesora koja uzima signale iz realnog vremena kao što su glas, audio, video, temperatura, pritisak, pa čak i pozicija u prostoru, koji su prije dolaska na DSP pretvoreni u digitalnu formu uz pomoć analogno-digitalnog konvertora da bi bili obrađeni. DSP je dizajniran da se na njemu veoma brzo izvršavaju operacije koje se često primjenjuju pri obradi digitalnih signala u koje se prije svega ubrajaju aritmetičke operacije sabiranja, oduzimanja, množenja i dijeljenja, a isto tako i logičke opetacije i, ili, negacija.



Slika 5.1 – Uprošćen slučaj upotrebe DSP procesora [8]

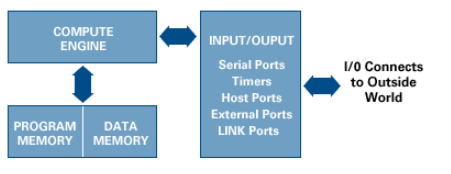
Na Slici 5.1 dat je prikaz sistema koji predstavlja uprošćen slučaj upotrebe DSP procesora. Sve počnije fazom snimanja sadržaja, u ovom slučaju to je audio sadržaj. Audio signal koji dolazi u ovaj sistem analognog je oblika pa je potrebno da se pretvori u digitalni oblik kako bi se mogao obraditi na DSP procesoru. Konverziju iz analognog u digitalni oblik obavlja analogno-digitalni konvertor (*eng. ADC – Analog-to-Digital Converter*). Nakon konverzije, digitalni signal pristiže na DSP procesor gdje se obrađuje i enkoduje u neki od formata prikladnih za reprodukovanje audio sadržaja, u ovom slučaju to je MP3. Kada je potrebno reprodukovati audio sadržaj iz memorije, enkodovani sadržaj se dekoduje na DSP procesoru prije nego što se takav u digitalnom obliku pošalje na digitalno-analogni konvertor (*eng. DAC – Digital-to-Analog Converter*) koji sadržaj pretvara u analogni oblik koji se dalje prosljeđuje uređaju za reprodukciju zvuka.

Primjene DSP procesora su raznolike, a može se susresti u sistemima za sigurnost, telefonske komunikacije, kućna kina, video i audio kompresiju, itd. Signali se mogu kompresovati da bi se brže i efikasnije prenosili u realnom vremenu, signali se mogu nadograditi ili modifikovati da bi im se poboljšale određene karakterisitke koje utiču na to kako ih čovijek percepuje. Iako se signali mogu obrađivati i u svom analognom obliku, procesiranje signala u njihovom digitalnom obliku nosi određene prednosti kao što su brzina i precisznost [8].

DSP procesor sadrži nekoliko ključnih komponenti, a među njih spadaju:

* Programska memorija – momorija u kojoj se nalazi program koji se izvršava na DSP procesoru
* Memorija podataka – čuva informacije koje će biti obrađene programima koji se izvršavaju na DSP procesoru
* Komputaciono jezgro – izvršava matematičke operacije nad podacima iz memorije podataka
* Ulaz/Izlaz – zaduženi za komunikaciju sa ostalim komponentama sistema

Navedene komponente i njihove veze date su na Slici 5.2.



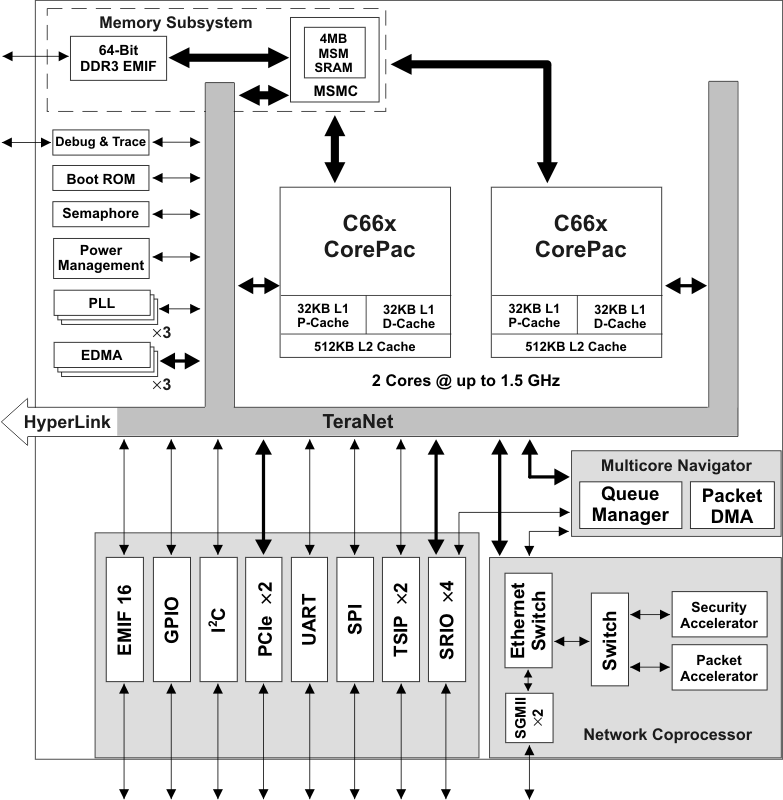
Slika 5.2 – Pojednostavljena šema kompomenti DSP procesora [8]

## 5.1 TMS320C66x DSP procesor

U prethodnoj glavi bilo je riječi o evaluacionoj platformi na kojoj će da se izvršava implementacija praktičnog dijela ovog rada. Riječ je o TDA2Px evalucionom modulu na kojem se između ostalog nalazi i TMS320C66x DSP procesor. U nastavku rada kada se bude pominjao DSP procesor podrazumijevaće se da se radi o TMS320C66x procesoru ako drugačije ne bude naglašeno.

Texas Instrumentsov TMS320C66x procesor je višejezgarni DSP procesor koji omogućava dobre performanse u realnom vremenu, a najčešća primjena ovog procesora je u sistemima za naprednu analizu videa sistema za nadzor i sigurnost [9]. Iz tog razloga je odabran kao najprikladniji procesor za realizaciju aplikacije opisane ovim radom. Procesor karakterišu niska potrošnja i visoke performanse pa je idealan za sisteme kao što su: pametne IP kamere, digitalni video rekorderi (*eng. DVR – Digital Video Recorders*), umreženi video rekorderi (*eng. NVR – Networked Video Recorders*), serveri za video analitiku (*eng. Video analytics servers*).

Dimenzije procesora iznose 21x21*mm* uz visinu koja iznosi samo 2.99*mm* i omogućavaju da se sistemi bazirani na ovom procesoru pakuju u minimalne dimenzije pakovanja, kao i minimalne težine sistema. Na Slici 5.3 dat je funkcionalni blok dijagram TMS320C66x procesora.



Slika 5.3 – Funkcionalni blok dijagram TMS320C66x procesora [9]

Najznačajnije karakteristike procesora uključuju:

* Dva TMS320C66x DSP CorePac podsistema koji redom rade na brzinama od 1.00*Ghz* i 1.25 GHz
  + Procesori posjeduju 32KB L1P keš memorije, 32KB L1D keš memorije i po 512KB L2 keš memorije po jezgru procesora
* Multicore Navigator koji je zadužen za kontrolu i kretanje paketa kroz sistem
* TeraNet Switch Fabric zaduženu za brzu komunikaciju između CorePac podsistema sa podsistemima za memoriju, brzine do 2Tb
* 64-Bit DDR3 memorijski interfejs prema 8 gigabajtnom adresabilnom memorijskom prostoru
* 16-Bit interfejs za eksternu memoriju (*eng. EMIF – External Memory Interface*)
* UART interfejs
* I2C interfejs
* 16 GPIO pinova
* SPI interfejs
* 16 64bit tajmera
* 3 On-Chip kontrolna sistema fazno-zaključanih petlji (*eng. PLL – Phase-locked loop*)

# 6. IMPLEMENTACIJA ALGORITMA DETEKCIJE POMJERAJA OBJEKTA U VIDEU

Za svrhe realizacije praktičnog dijela ovog rada korišten je Processor SDK-Vision (Vision SDK) set alata razvijen od strane Texas Instruments, a predstavlja set alata za razvoj softvera (*eng. SDK – Software Development Kit*) koji će se izvršavati na TDAx procesorskoj arhitekturi. Ovaj softverski frejmvork dozvoljava korisnicima da kreiraju različite aplikacije koje će da se koriste u naprednim automotiv sistemima sa različitim tokovima podataka koji uključuju: snimanje radara, snimajne videa, preprocesiranje video sadržaja, obradu videa raznim algoritmima za analizu videa, kao i prikazivnje videa na izlaz nekog sistema. Processor SDK-Vision baziran je na C programskom jeziku. Vision SDK je baziran na frejmvorku po imenu *Links and Chains,* a korisnički interfejs za pristup (*eng. API – Application Programming Interface*) naziva se *Links API.*

Neki od glavnih ciljeva ovog alata jesu:

* Obezbjeđivanje konzistentih intefejsa za razvoj aplikacija da bi se kreirali novi sistemi tokova podataka koje je naknadno lako izmijeniti
* Omogućavanje brzog razvoja prototipa algoritama na DSP/EVE procesorima i kreiranje tokova podataka u kontekstu cijelog sistema
* Omogućavanje optimizacije i kontrole parametara kao što su potrošnja, efikasnost, performanse i opterećenje sistema
* Mogućnost da korsinik razvije algoritam van frejmvorka i da koristi samo interfejse prema SDK modulima koji su njemu potrebni

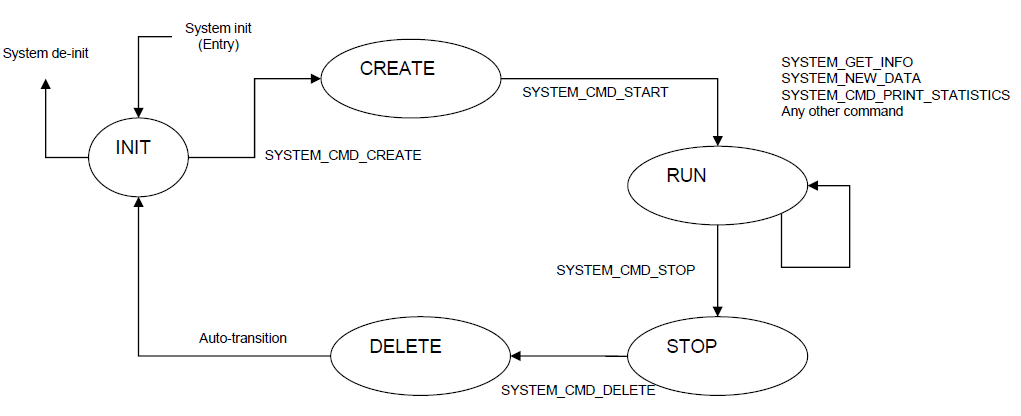
## 6.1 “Links and Chains” arhitektura

Prethodno je pomenuto da je Processor SDK-Vision baziran na *Links and Chains* frejmvorku, a da korsinik mogućnostima frejmvorka pistupa preko interfejsa koji se naziva *Links API.*

Link predstavlja osnovni gradivni element cijele arhitekture koja stoji iza *Links and Chains* frejmvorka. Link se može posmatrati kao jedan od više koraka u procesiranju podataka koji prolaze kroz sistem za obradu video sadržaja. Svaki link u sistemu zadužen je da obavlja neku specifičnu funkcionalnost. Jedan link se korsiti za dohvatanje video sadržaja sa kamere, neki drugi link se može koristiti za analizu i obradu dohvaćenog video sadržaja, dok se neki treći link koristi da bi se taj obrađen video sadržaj prikazao na ekranu. Svaki od linkova posjeduje takozvanu kutiju za poruke (*eng. message box*) koji mu služi da komunicira sa ostalm linkovima u sistemu. Svaki link se izvršava na posebnoj procesorskoj niti pa se tako na sistemima koji posjeduju više procesora/procesorskih jezgri linkovi mogu izvršavati paralelno jedan sa drugim. Link implementira poseban interfejs koji omogućava drugim linkovima da sa njima direktno razmjenjuju video sadržaj na bazi frejmova ili na bazi bajtovskog toka podataka. Implementacija algoritma obrađenog ovim radom podrazumijevaće da se radi o razmijeni sadržaja na bazi frejmova.

*Link API* dozvoljava korisnicima da kreiraju nove linkove, kontrolišu njihove parametre, kao i da ih povezuju sa drugim linkovima. Veza između više linkova naziva se lanac. Lanac se kreira na procesoru koji se određen kao domaćinski (*eng. HOST*) procesor, a u slučaju evaluacione platforme i DSP procesora koji se koriste u svrhe ovog rada to je IPU1-M4-0. Kontrolni kod piše se na jednom procesoru, a interno, *Link API* koristi mehanizme međuprocesorske komunikacije (*eng. IPC – Inter-process communication*) da bi se ostvarila komunikacija između linkova koji se izvršavaju na različitim procesorima, tako da korisnik ne mora da brine o detaljima koji se tiču komunikacije linkova na niskom nivou.

Link se tokom svog životnog ciklusa može da nađe u nekoliko stanja kao što se može vidjeti na Slici 6.1.



Slika 6.1 – Dijagram stanja životnog ciklusa linka [10]

Početno stanje linka jeste INIT stanje u kojem se nalazi nakon inicijalizacije sistema. Informacija o tome da link treba da pređe iz jednog stanja u drugo komunicira se komandama. Komande kojima link prelazi u naredno stanje ciklusa jesu:

* SYSTEM\_CMD\_CREATE – faza kreiranja linka u kojoj se poziva *create* funkcija linka gdje se vrši inicijalna konfiguracija parametara linka
* SYSTEM\_CMD\_START – faza izvršavnja linka u kojoj se poziva *start* funkcija linka koja obrađuje logiku implementiranu datim linkom. Dok se nalazi u fazi izvršavanja link može da prima i neke druge komande dostupne u frejmvorku a to su:
  + SYSTEM\_GET\_INFO – komanda zadužena za dohvatanje trenutnih informacija o linku
  + SYSTEM\_NEW\_DATA – komanda koja obavještava sistem da link može da primi nove podatke na obradu
  + SYSTEM\_CMD\_PRINT\_STATISTICS – komanda koja obavještava sistem da je zatražen pregled trenutne statistike izvršavanja sistema
* SYSTEM\_CMD\_STOP – faza zaustavljanja linka u kojoj se poziva *stop* funkcija linka koja zaustavlja izvršavanje logike
* SYSTEM\_CMD\_DELETE – faza brisanja linka u kojoj se poziva *delete* funkcija koja je najčešće zadužena za oslobađanje memorije koju je zauzimao linkm kao i oslobađanje memorije koja je bila rezervisana za pomoćne strukture korištene u fazi izvršavanja linka. Nakon što je link obrisan automatski se vrši i deinicijalizacija likna iz sistema

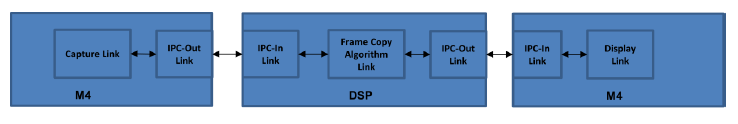
Svaki od linkova u sistemu posjeduje jedan ili više ulaznih konekcija, a isto tako posjeduje i jednu ili više izlaznih konekcija. Svaka konekcija, bila da je ulazna ili izlazna, u sebi sadrži jedan ili više logičkih kanala koji su zapravo baferi preko kojih se razmjenjuju podaci između linkova. Isto tako, ako link ima više ulaznih ili izlaznih konekcija, svaka od tih konekcija može da ima različit broj kanala. Numerisanje kanala počinje indeksom nula. Svaki kanal je povezan sa baferom podataka, a taj bafer može biti različitih tipova pa se njime mogu prenositi video frejmovi, bitski tokovi podataka, korisnički definisani podaci (*eng. Meta Data*), pa čak i kompozicije video frejmova i korisnih podataka.

Da bi se dva linka povezala i da bi se kreirala struktura lanca, potrebno je da se povežu izlazna konekcija prethodnog linka sa ulaznom konekcijom narednog linka. Ove veze moraju da poštuju određena pravila:

* Ulazna konekcija narednog linka mora da posjeduje onoliko kanala koliko posjeduje izlazna konekcija prethodnog linka, u suprotnom konekcija neće biti moguća
* Vrsta bafera za dati kanal ulazne konekcije narednog linka mora odgovarati vrsti bafera odgovarajućeg kanala izlazne konekcije prethodnog linka
* Prethodni link i naredni link moraju da se izvršavaju na istom procesoru, a izuzetak predstavljaju IPU OUT i IPC IN linkovi koji su zaduženi za komunikaciju likova koji su na različitim procesorima

## 6.2 Slučaj upotrebe sistema

Processor SDK-Vision daje mogućnost korisniku da na jednostavan način specifikuje kako će mu izgledati struktura aplikacije, koji linkovi će biti iskorišteni i kako će oni međusobno biti povezani. Način na koji se to speciikuje jeste upotrebom slučaja upotrebe (*eng. Use Case*). Slučaj upotrebe zapravo predstavlja isprojektovanu šemu linkova i međusobnih veza linkova unutar aplikacije. Svaki od linkova unutar Processor SDK frejmvorka posjeduje jedinstveno ime, koje se koristi tokom specifikovanja slučaja upotrebe kada se taj link koristi. Primjer jednog jednostavnog slučaja upotrebe dat je na Slici 6.2.



Slika 6.2 – Primjer slučaja upotrebe [11]

Primjerom je prikazan sistem koji na početku lanca sadrži Capture Link za dohvatanje video sadržaja (izvršava se na IPU procesoru), koji komunicira sa linkom za kopiranje frejmova (izvršava se na DSP procesoru), koji dalje komunicira sa linkom za prikazivanje videa na ekranu (izvršava se na IPU procesoru). Na Slici 6.2 takođe se mogu primijetiti IPC-OUT i IPC-IN linkovi koji su zaduženi za razmjenu podataka na različitim procesorima (slanje sa IPU na DSP procesor i obrnuto). Slučaj upotrebe na osnovu kojeg frejmvork korisniku generiše potrebne fajlove definiše se u tekstualnom fajlu, a formatira se tako što se jedan iza drugog navode likovi koji se nalaze u lancu, a između njih se stavlja strelica formirana kao “->”. Uz naziv linka u zagradama je moguće specifikovati na kojem procesoru treba da se izvršava dati link. Moguće je granati lanac tako da jedan link ima dvije izlazne konekcije gdje se svaka veže za po jedan novi link. Takvo granje se specifikuje u novom redu tekstualnog fajla gdje se kao prvi link navodi link koji se granao, te se na njega nadovezuje druga grana lanca koja je specifikovana slučajem upotrebe. IPC-IN i IPC-OUT linkove nije potrebno eksplicitno specifikovati. Tako na primjer slučaj upotrebe definisan na Slici 6.2 specifikujemo na sljedeći način:

|  |  |
| --- | --- |
| *Capture -> Alg\_FrameCopy (DSP1\_0) -> Display* | (6.1) |

Na primjeru koji je prikazan Slikom 6.2 korištena je posebna vrsta linkova koji se nazivaju algoritam linkovi (*eng. Algorithm Link*) i koji imaju ulogu da obrađuju video nekim određenim algoritmom, a u slučaju ovog primjera radi se o algoritmu kopiranja frejmova koji ulazni frejm kopira u izlazni bafer. Da bi se bilo koji eksterni algoritam koristio unutar Processor SDK frejmvorka potrebno je implementirati algoritam link koji će se ponašati kao interfejs za taj algoritam.

## 6.3 Koraci implementacije

Prije kreiranja slučaja upotrebe za sistem koji će da detektuje pomjeraj objekta u videu implementiran je algoritam detekcije pomjeraja objekta u videu baziran na estimaciji pokreta uparivanjem blokova. Implementirane su tri varijacije algoritma o kojima je bilo riječi u poglavlju 3.2. U implementirane metode spadaju: iscrpna metoda pretrage, metoda pretrage od tri koraka i dijamantska metoda pretrage.

Zajedničko za tri navedene implementacije jeste dimenzija blokova koji se korsite za metodu estimacije uparivanjem blokova, a njihova dimenzija pedstavljena je konstantom *MACRO\_BLOCK\_DIM* koja je postavljena na 16, a vrijenost veličine prozora pretrage predstavljena je konstantom *SEARCH\_WIDNDOW\_P* koja iznosi 7. Interfejst prema algoritmu omogućen je jednistvenom funkcijom koja kao parametre uzima širinu i visinu frejma, trenutni frejm, prethodni frejm, mod algoritma, adresu prostora na koju će biti smješten rezultat algoritma, kao i *fleg* kojim se specifikuje da li će se koristiti *threshold* optimizacija o kojoj će više biti rečeno u Glavi 7. Deklaracija fuknckije data je izrazom (6.2).

|  |  |
| --- | --- |
| Int8\*\*\* calculateMotionVectorMatrix(Int32 video\_w, Int32 video\_h,  UInt8\* currentFrame, UInt8\* prevFrame,AlgorithmLink\_MotionDetection\_Mode  mode, Int32 treshold\_optimization, Int8\*\*\* res\_mvm) | (6.2) |

Funkcija je implementirana tako da se parametri propagiraju u nove pozive funkcija u zavisnosti od izabranog moda algoritma. Izračunavanje mjere nesličnosti za sva tri moda algoritma realziovano je preko računanja sume apsolutnih razlika iz prostog razloga što je za izračunavanje potrebno koristiti samo operacije sabiranja i oduzimanja koje se nešto brže izračunavaju u odnosu na operaciju množenja koja je potrebna da bi se izračunala suma kvadrata razlika, koja se nameće kao alternativa odabranoj metodi. Kompletne implementacije navedene tri varijacije algoritma date su na CD-u koji je priložen uz rad, te se rad u nastavku glave neće fokusirati na detalje implementacija. Više riječi o navedene tri implementirane varijacije biće u Glavi 7 gdje je pažnja posvećena metodama za optimizaciju algoritma.

Naredni korak jeste da se kreira algoritam link koji će da se korsiti kao interfejs za implementirani algoritam. Da bi se implementirao algoritam link potrebno je da se implementiraju dva njegova dijela a to su kostur algoritam linka (*eng. Algorithm Link Skeletal*) i *plug-in* funkcija linka. Processor SDK omogućava korsiniku da se kostur linka i svi potrebni fajlovi generišu automatski, a u generisanim fajlovima se definišu funkcije za kreiranje, kontrolisanje, pokretanje, izvršavanje, zaustavljanje i brisanje linka. Ako korsinik ima potrebu da unutar linka koristi neke korisnički definisane strukture ili enumeracije, potrebno je da ih doda unutar predefinisanih struktura algoritam linka koje su definisane unutar kostura algoritam linka. Za potrebe izvršavanja algoritma struktura algoritam linka za detekciju pomjeraja objekta na videu definisana je na sljedeći način:

|  |  |
| --- | --- |
| typedef struct  {      UInt32 frameWidth;      UInt32 frameHeight;      UInt8\* previousFrame;      Int8\*\*\* motionVectorMatrix;      UInt8 firstFrame;      AlgorithmLink\_MotionDetection\_Mode mode;      AlgorithmLink\_MotionDetection\_DrawMode drawMode;  } Alg\_MotionDetection\_Obj; | (6.3) |

gdje su enkapulirane vrijednosti koje su od značaja za vrijeme izvršavanje algoritma. Vrijednosti uključuju širinu i visinu frejma, pokazivač na niz bajta koji predstavljaju reprezentaciju prethodnog frejma koji je potreban da bi se izračunala matrica vektora pomjeraja, sama matrica vektora pomjeraja u kojoj se čuva rezultat jedne iteracije algoritma da bi se taj rezultat kasnije mogao koristiti pri vizuelizaciji detekcije pomejraja objekta, varijabla koja daje informaciju o tome da li se radi o čitanju prvog frejma sa ulaza, mod algoritma kojim se navodi koja od tri implementacije algoritma treba da se koristi i na kraju mod iscrtavanja. Varijable *mode* i *drawMode* su enumeracije koje sadrže moguće izbore za mod izvršavanja i mod iscrtavanja. Nakon kreiranja i modifikovanja kostura algoritam linka, implementirane su *plug-in* funkcije. Lista funkcija koje su implementiraje uključuje:

* AlgorithmLink\_AlgPluginCreate - zadužena za kreiranje instance algoritma
* AlgorithmLink\_AlgPluginProcess - zadužena za obradu novih podataka, interno će pozivati funkciju algoritma
* AlgorithmLink\_AlgPluginControl - zadužena za kontrolisanje parametara algoritma za vrijeme izvršavanja
* AlgorithmLink\_AlgPluginStop - zadužena za obavljanje procesa koji su predviđeni da se obave na kraju izvršavanja algoritma
* AlgorithmLink\_AlgPluginDelete - zadužena za brisanje instance algoritma na kraju izvršavanja

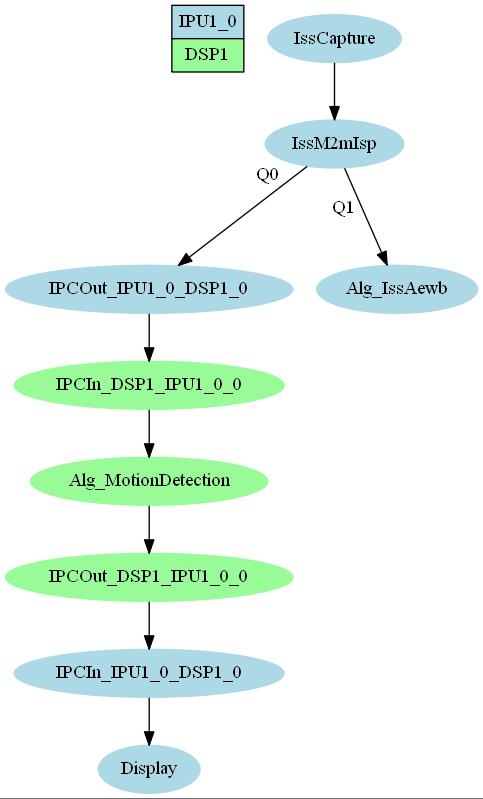
Nakon kreiranja algoritam linka, naredni korak jeste da se kreira slučaj upotrebe za projektovani sistem. Slučaj upotrebe sistema za detekciju pomjeraja objekta u videu definisan je na sljedeći način:

|  |  |
| --- | --- |
| *UseCase: chains\_MotionDetection*  *IssCapture -> IssM2mIsp -> Alg\_MotionDetection(DSP1) -> Display*  *IssM2mIsp -> Alg\_IssAewb* | (6.4) |

Sistem predstavljen izrazom (6.4) definisan je kao lanac sljedećih linkova:

* IssCapture – link zadužen za dohvatanje toka frejmova
* IssM2mlsp – link zadužen za prilagođavanje videa na odgovarajući format boje (YCrBr420 u slučaju ovog sistema)
* Alg\_MotionDetection(DSP1) – implementirani algoritam link koji vrši obradu dobijenog videa algoritmom za detekciju pomjeraja
* Alg\_IssAewb – algoritam link koji je zadužen za brzu korekciju osvjetljenja videa koji dolazi sa kamere u situacijama kad se osvjetljenje kadra naglo promijeni

Na osnovu izraza (6.4) izgenerisan je slučaj upotrebe za koji je izgenersana i šema koja je data na Slici 6.3.



Slika 6.3 – Šema slučaja upotrebe za sistem detekcije pomjeraja objekta u videu

# 7. OPTIMIZACIJA ALGORITMA DETEKCIJE POMJERAJA

Implementacija algoritma detekcije pomjeraja objekta u videu u početku je realizovana i testirana na računarskoj platformi čije performanse daleko prevazilaze perofromanse evaluacionog modula koji je ciljana platforma ove implementacije. Iako je početna implementacija pokazala zadovoljavajuće rezulatate na hardverski znatno snažnijoj arhitekturi, nakon kratkog prilagođavanja i testiranja implementacije na ciljanoj evaluacionoj platformi bilo je jasno da početna implementacija algoritma nije prilagođena za arhitekturu koja se bazira na DSP procesoru i da će zahtijevati dodatne modifikacije i optimizacije da bi zadovoljila određene zahtijeve, a to je da se algoritam izvršava u šezdeset frejmova po sekundi za video visoke rezolucije (*eng. FHD – Full HD*). U nastavku glave dat je pregled optimizacija koje su primijenjene na algoritam da bi se dostigli zadovoljavajući rezultati, a u Glavi 8 dat je detaljan pregled rezultata nakon testiranja algoritma prvo bez optimizacija, pa nakon toga sa primjenjenim optimizacijama.

## 7.1 Optimizacije na nivou algoritma

### 7.1.1 Prag poređenja blokova

Kao što je u Glavi 7 naglašeno, algoritam detekcije pomjeraja objekta u videu implementiran je sa ciljem da radi na videu visoke rezolucije širine 1920 i visine 1080 piksela. Dimnzija blokova na koje se trenutni i prethodni frejm dijele tokom izvršavanja algoritma iznosi 16 piskela tako da se samo jedan frejm dijeli na 120 blokova po horizontali i 67 blokova po vertikali, a to ukupno izlazi na 8,040 blokova. Da bi se jedna iteracija algoritma izvršila potrebno je da se za svaki od blokova izvrši pretraga za blokom sa najboljim poklapanjem, a za proširenje prozora pretrage koje iznosi 7 piskela sa svake strane bloka, ako se radi o iscrpnoj metodi pretrage, potrebno je da se blok trenutnog frejma uporedi sa ukupno 225 blokova prethodnog frejma. Ako se sve to uzme u obzir ukupno je potrebno izvršiti tačno 1,809,000 poređenja u samo jednoj iteraciji algoritma, a da bi se zadovoljili uslovi koji su postavljeni potrebno je izvršiti bar 60 iteracija algoritma u jednoj sekundi.

Tokom izvršavanja jedne iteracije algorima za slučaj kada se radi o statičnoj pozadini frejma u kojem se pomjera jedan ili više objekata, može se primijetiti da većina blokova trenutnog frejma zadržava istu poziciju i na prethodnom frejmu videa, a radi se o blokovima koji obuhvataju pozadinu koja je statična. Izvršavanje algoritma nad blokovima koji ne mijenjaju svoju trenutnu poziciju u odnosu na prethodni frejm postaje redudantno jer će rezultat vektora pomjeraja za takve blokove uvijek iznositi [0, 0]. Iz tog razloga se uvodi optimizacija praga poređenja blokova (*eng. Threshold Optimization*) koja se primjenjuje prije izvršavanja algoritma pretrage bloka sa najboljim poklapanjem, a koja provjerava kolika je razlika između bloka sa trenutnog frejma i njemu korespondirajućeg bloka sa prethodnog frejma. Ako je razlika blokova manja od praga poređenja blokova *block\_similarity\_thresh,* može se pretpostaviti da se radi o istom bloku koji se nije pomjerio sa svoje originalne loakcije i da nije potrebno vršiti pretragu za dati blok, nego se kao rezultat pretrage automatski uzima vektor pomjeraja [0, 0] koji označava da se blok nije pomjerio. U suprotnom, ako razlika blokova iznosi više nego što je definisano pragom *block\_similarity\_thresh* onda se algoritam pretrage izvršava za dati blok trenutnog frejma. Kao metod izračunavnaja razlike blokova koristi se usrednjena suma apsolutnih razlika piskela na odgovarajućim blokovima a definiše se kao:

|  |  |
| --- | --- |
| *D =* | (7.1) |

gdje *dim* predstavlja dimenziju bloka, a *b1* i *b2* predstavljaju blokove trenutnog frejma i prethodnog frejma uporedo. Na osnovu izraza (7.1) može se definisati i izraz kojim se definišu dva slučaja optimizacije praga poređenja kao:

|  |  |
| --- | --- |
| *D > block\_similarity\_thresh,* izvršiti pretragu  *D < block\_similarity\_thresh,* ne izvršiti pretragu | (7.2) |

Na Slici 7.1 predstavljena je binarna reprezentacija podjele frejma na blokove gdje su bijelom bojom predstavljeni blokovi za koje nije izvršena pretraga, a crnom bojom predstavljeni blokovi za koje jeste izvršena pretraga nakon optimizacije algoritma pragom poređenja blokova. Sa slike se može vidjeti da se za veliki broj blokova pretraga neće odvijati, a time će se drastično smanjiti ukupan broj pretrage koje će se izvršiti tokom jedne iteracije algoritma. U Prilogu 1 nalazi se izvorni kod funkcije koja se odnosi na optimizaciju pragom poređenja blokova.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  | |

Slika 7.1 – Trenutni frejm, prethodni frejm i binarna reprezentacija frejma podijeljenog na blokove u zavisnosti od toga da li je vršena pretraga nakon optimizacije pragom poređenja blokova

Manje vrijednosti praga znače da će se tolerisati manje razlike frejmova i da će detekcija pomjeraja iz tog razloga biti preciznija, dok se kod većih vrijednosti praga tolerišu veće razlike blokova pa se iz toga razloga dobijaju bolje performanse ali uz smanjenu preciznost detekcije pomjeraja objekata na videu.

### 7.1.2 Ograničenje dubine dijamantske pretrage

U poglavlju 3.2.3 definisana je dijamantska metoda pretrage gdje je opisana kao metoda koja se izvršava rekurzivno dok se ne pronađe blok prethodnog frejma koji je najsličniji bloku sa trenutnog frejma koji se pretražuje. U situacijama kada se radi o malim pomjerajima objekata na videu blokovi sa najboljim poklapanjem sa trenutnim blokom pretrage nalaze se najčešće na istoj lokaciji na prethodnom frejmu ili u neposrednoj blizini do koje se dolazi u nekoliko iteracija algoritma. U slučaju kada se radi o većim pomjerajima objekata na videu, broj poređenja blokova raste i time degradira performanse. Ograničavanje dubine dijamanstske pretrage predstavlja kompromis kojim se ograničava degradiranje performansi uz cijenu gubitka preciznosti detekcije pomjeraja objekta u videu.

Kako svaka osim prve rekurzivne iteracije vrši ukupno pet poređenja blokova (prva iteracija vrši 9 poređenja) vrijednost ograničenja dubine dijamanstke pretrage postavljena je na 25 čime su u najgorem slučaju performanse dijamantske pretrage i dalje dva puta bolje od prosječnih performansi iscrpne pretrage koja za jedan blok vrši 225 pretraga. Sa druge strane mana ove optimizacije jeste to što se u ograničenom broju rekurzivnih koraka može pretražiti ograničen broj blokova među kojima se možda blok koji se traži ne nalazi, ali to je cijena koja se mora platiti da bi se algoritam izvršavao na zadovoljavajućem nivou.

### 7.1.3 Minimizacija broja alociranja memorije

Tokom prvobitne implementacije algoritma koji se izvršavao na računarskoj platformi, trajanje alokacije memorije nije predstavljao značajen problem za performanse algoritma, ali se nakon prilagođavanja i pokretanja programa na ciljanoj platformi pokazalo da trajanje alokacije memorije primjetno degradira performanse. Prvobitna implementacija algoritma je tokom svake iteracije algoritma alocirala novi prostor za prethodni frejm, kao i novi prostor za smještanje rezultata algoritma detekcije pomejraja. Kod je optimizovan na način da su se u sturkturu algoritam linka (Poglavlje 6.3) dodale reference na prostor koji je samo jednom tokom inicijalizacije algoritam linka alociran za prethodni frejm i rezultat pretrage, a svaki sljedeći put vrijednosti prethodnog frejma i rezultata pisane su na te iste lokacije. Pisanje vrijednosti prethodnog frejma prvobitno se vršilo pozivom metode standardne biblioteke *memcpy()* koja je kopirala bafer trenutnog frejma u bafer prethodnog frejma. Zbog veličine memorijskog bloka koji se kopira, ova operacija je takođe predstavljala prepreku kod dostizanja željenih performanski. Problem je otklonjen optimizacijom kopiranja pomoću modula za direktni pristup memoriji (*eng. DMA – Direct Memory Acccess*) koja je obrađena u narednom poglavlju koje se odnosi na optimizacije algoritma na nivou Processor SDK frejmvorka.

### 7.1.4 Odmotavanje petlji

Odmotavanje petlji (*eng. Loop unrolling or loop unwinding*) jeste metoda transformacije petlji koja se koristi za optimizaciju brzine izvršavanja programa po cijenu malo veće veličine binarnih fajlova, kompromis poznat kao kompromis prostora i vremena (*eng. space-time tradeoff*) [12]. CIlj odmotavanja petlji jeste da se poveća brzina izvršavanja programa tako što se smanjuje broj ili se potpuno eliminišu instrukcije koje kontrolišu petlje, kao što su aritmetika pokazivača za kretanje kroz petlju i testovi koji se vrše nakon svake iteracije petlje. Da bi se eliminisao ovaj komputacioni višak petlje se mogu pisati tako što se umjesto jednog izvršavanja operacija u petlji izvrši više istih nezavisnih operacija tokom jedne iteracije petlje. Odmotavanje petlji postaje još efikasnije kada se u obzir uzme količina podataka koje procesor kešira kada pročita određen memorijski prostor. Primjer odmotavanja petlji dat je izrazom (7.3).

|  |  |
| --- | --- |
| for(int i = 0; i < 16; i++){  array[i] += 10;  } | (7.3) |
| for(int i = 0; i < 16; i += 4){  array[i] +=10;  array[i + 1] +=10;  array[i + 2] +=10;  array[i + 3] +=10;  } |

Prvi blok koda na primjeru (7.3) jeste kod bez primjenjene optimizacije odmotavanja petlji gdje se operacija povećavanja članova niza odvija jedna po iteraciji petlje. Drugi blok koda je optimizovan djelemičnim odmotavanjem petlje gdje se sada uzastopno odvijaju po četiri operacije uvećavanja članova niza. Drugi blok koja je idealno optimizovan ako uzmemo u obzir da su nakon čitanja i-tog člana niza iz memorije keširana i naredna tri pa se operacije povećavanja odvijaju znatno brže. Odmotavanje petlji ima efekta samo ako su operacije koje će se odvijati tokom jedne iteracije petlje međusobno nezavisne jer ih u tom slučaju procesor može izvršavati paralelno.

## 7.2 Optimizacije na nivou Processor SDK frejmvorka

Iako su poboljšale sveukupne performanse programa, optimizacije na nivou algoritma i samog programskog jezika C nisu bile dovoljne da bi se postigle zadovoljavjauće performanse algoritma. Srećom, Texas Instrumesnts (skraćeno TI) je u svojoj implementaciji C jezika uveo mnoge načine da se perofrmanse programa poboljšaju, počevši od optimizacija koje nudi samo kompajler, pa do optimizacija preko takozvanih intrinzika, pragmi, specijalnih ključnih riječi i sličnih mehanizama.

Kompajler koji je TI razvio u svrhe razvijanja programa prilagođenih za platforme sa DSP procesorom jeste *cl6x* kompajler. Moć ovog kompajlera ogleda se u mnogobrojnim opcijama koje je moguće navesti prilikom kompajliranja programa i koje kontrolišu način rada kompajlera. Među mnogobrojnim opcijama dostupnim korsiniku koji koristi kompajler dostupne su i opcije za optimizaciju programa. Neke od značajnijih opcija za optimizaciju date su u tabeli 7.1.

Tabela 7.1 – Optimizacione opcije kompajlera

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Opcija | Alias | Opis |
| *--opt\_level=0* | *-O0* | koristi se za optimizaciju iskorišćenja registara  alocira varijable na registre  obavlja rotacije petlji ako je moguće  izbacuje neiskorišten kod  proširuje pozive funcijama koje su naznačene kao *inline* |
| *--opt\_level=1* | *-O1* | koristi O0 optimizacije i optimizuje lokalno  obavlja propagaciju lokalnih kopija i konstanti  odbacuje nekorištene dodjele |
| *--opt\_level=2* | *-O2 ili –O* | koristi O1 optimizacije i optimizuje globalno, ovo je podrazumijevani nivo optimizacije  obavlja optimizacije petlji  odbacuje globalne nesikorištene dodjele, obavlja automatsko odmotavanje petlji |
| *--opt\_level=3* | *-O3* | korsiti O2 optimizacije i optimizuje navedeni fajl  odbacuje sve funkcije koje se nikada ne pozivaju  pojednostavljuje funkcije koje imaju povratne slučajeve koji se nikada ne izvršavaju  automatski dodaje *inline* ključnu riječ za male funckije |
| *--auto\_inline=[size]* | *-oi* | postavlja veličinu automatskog pretvaranja funkcije u *inline* ako se korsiti –O3 optimizacija |
| *--single\_inline* |  | pretvara funkcije u *inline* ako su samo jednom pozvane |
| *--opt\_for\_speed[=n]* | *-mf* | kontroliše odnos brzine i memorijskog zauzeća u opsegu od 0 do 5, podrazumijevano je 4 |
| *-gen\_opt\_info=1* | *-on1* | nakon kompajliranja se kreira informacioni fajl o izvršenim optimizacijama koji je koristan prilikom analize efekta korištenih optimizacija |

U nastavku poglavlja dat je pregled korištenih optimizacija na nivou Processor SDK frejmvorka koje uključuju: upotrebu intrinzika, DMA kopiranje, upotrebu programskih pragma direktiva, poravnanje memorijskih adreska uz pomoć *\_nassert()* poziva, pisanje *inline* funkcija i upotrebu ključne riječi *restrict*.

### 7.2.1 Upotreba intrinzika

Svojstvene funkcije (*eng. Intrinsic functions*) ili intrinzici (kako će biti oslovaljavani u nastavku rada) jesu funkcije koje su ugrađene u kompajler. Ako se funkcija smatra intrinzikom, izvorni kod te funckije posmatra se kao *inline* i ugraćuje se kompajlerski na mjesto gdje je taj intrinzik pozvan. To omogućava znatno efikasnije izvršavanje programa jer se odbacuje mogući *overhead* prilikom poziva standardne funckije i dozvoljava da se visoko efikanse mašinske instrukcije emtuju kroz poziv datog intrinzika. Intrinzik je često brži i od *inline* asemblera jer kompajler koji nudi određene intrinzike zna unaprijed kako se oni ponašaju pa je optimizovan za takve operacije [13]. C6000 (*cl6x*)kompajler podržava veliki broj intrinzika ,a u Tabeli 7.2 dat je pregled intrinzika korištenih tokom optimizacije algoritma za detekciju pomjeraja objekta u videu. U Prilogu 2 dat je isječak koda koji obuhvata korištenje navedenih intrinzika.

Tabela 7.2 – Lista primjenjenih intrinzika

|  |  |
| --- | --- |
| Intrinzik | Opis |
| *\_amem4\_const* | omogućava poravnata čitanja dužine 4 bajta iz memorije. Pokazivač u ovom slučaju mora da bude poravnat na adresu djeljivu sa četiri. Ovaj intirnizk je korišten da bi se zajedno mogla učitati i paralelno obrađivati po četiri piksela (njihove luminantne komponente) tokom procesa izračunavnaja mjerne nesličnosti blokova. |
| *\_subabs4* | omogućava izračunvanje vrijednosti apsolutne razlike za svaki par pakovanih osmobitnih vrijednosti nad četvorobajtnom vrijednošću čija se adresa proslješuje kao parametar intrinzika. Ovaj intrinzik je korišćen da bi se izračunale apsolutne razlike prethodno učitanih nizova od po četiri piskela za trenutni i prethodi frejm, u procesu određivanja mjere nesličnosti blokova. |
| *\_unpkhu4* | omogućava raspakivanje dvije neoznačene osmobitne vrijenosti gornjeg dijela četvorobajtnog podatka u jedan neoznačeni šesnaestobitni pakovani podatak. Korišteno da bi se rezultati osmobitnih operacija kombinovali u šesneastobitne podatke. |
| *\_unpklu4* | omogućava raspakivanje dvije neoznačene osmobitne vrijenosti donjeg dijela četvorobajtnog podatka u jedan neoznačeni šesnaestobitni pakovani podatak. Korišteno da bi se rezultati osmobitnih operacija kombinovali u šesneastobitne podatke. |
| *\_add2* | omogućava operaciju dodavanja gornje i donje polovine podatka koji je prosljeđen kao prvi argument na gornju i donju polovinu podatka koji je prosljeđen kao drugi argument i vraća rezultat kao novu vrijednost. Korsiti se da bi se izračunala ukupna suma šesnaestobitnih vrijednosti koje su sadržale rezultate osmobitnih operacija absolutne razlike. |
| *\_nassert* | detaljnije objašnjen u poglavlju 7.2.4 |

### 7.2.2 DMA kopiranje

U poglavlju 7.1.3 koje govori o optimizaciji minimizacije učestalosti alociranja memorije pomenut je sličan problem, a to je kopiranje sadržaja memorije u slučaju kada se kopira sadržaj trenutnog frejma u bafer koji je zadužen da reprezentuje prethodni frejm. Prvobitna implementacija algoritma kopiranje sadržaja memorije obavljala je preko standarnde funkcije *memcpy* koja je za kopiranje frejma dimenzija videa visoke rezolucije djelimično degradirala performanse toka programa, jer ovaj način kopiranja memorije opterećuje procesor.

Kontorler direktrnog pristupa memoriji (*eng. DMA – Direct Memory Access*) sa druge strane omogućava transfer podataka između regiona u memoriji bez intervencije procesora. DMA kontorler dozvoljava kretanje podataka iz i do interne memorije, internih periferija ili eksternih uređaja u pozadini rada procesora, nezavisno od njega [14]. DMA kontroler dostupan na TMS320C66x procesoru posjeduje četiri kanala i tako dozvoljava da se četiri različita konteksta dovijaju istovremeno.

DMA kontroler TMS320C66x procesora posjeduje sljedeće značajne karakteristike:

* Pozadinski rad – DMA kontorler radi nezavisno od procesora
* Visok protok podataka – Elementi se prenose brzinama koje odgovaraju taktu procesora
* Četiri kanala – DMA kontorler može da prati kontekst četiri nezavisna transfera podataka
* Puni 32-bitni adresni opseg – DMA kontroler može da pristupi bilo kojoj regiji memorijske mape
* Generisanje prekida (*eng. interrupt*) – Na kraju prenosa svakog frejma moguće je procesoru poslati prekid

Iz razloga što posjeduje ove karakteristike, prvenstveno što ima mogućnost da radi nezavisno od procesora, DMA je iskorišten da se izvrši kopiranje trenutnog frejma u prethodni frejm. Za ovu optimizaciju iskorišten je specijalizovan DMA kontorler koji je dostupan na TMS320C66x procesoru pod nazivom unaprijeđeni DMA (*eng. EDMA – Enhanced DMA*) koji je zadužen za transfer podataka izmeđuju L2 keš memorije i periferija uređaja i omogućava korisnički programiranje transfere podataka. U Prilogu 3 dat je isječak koda u kojem je prikazan proces konfiguracije EDMA transfer strukture i pokretanje procesa transfera podataka pomoću EDMA kontrolera.

### 7.2.3 Upotreba pragma direktiva

U opštem slučaju, pragma direktive predstavljaju metod specifikovan C standardom kojim se kompajleru prosljeđuju dodatne informacije, pored onoga što je definisano samim jezikom. Pragma direktive nagovještavaju kompajleru kako da tretira neki dio koda, bilo to funkcija, neki objekat ili neka posebna sekcija koda. C6000 (cl6x) kompajler podržava značajan broj pragma direktiva a od značaja za ovaj rad jeste *MUST\_ITERATE* direktiva. Sintaksa date direktive data je izrazom (7.4).

|  |  |
| --- | --- |
| #pragma MUST\_ITERATE(min, max, multiple); | (7.4) |

Implementacija i optimizacija algoritma detekcije objekta u videu baziranoj na estimaciji pokreta bazirana je na velikom broju iteracija kroz mnogobrojne petlje pa se dosta vremena utroši na mašinske instrukcije koje rade sa petljama. U nekim slučajevima, da bi kompajler uspješno odmotao petlju, potrebno mu je obezbijediti minimalan i maksimalan broj iteracija koje se mogu desiti tokom izvršavanja *for* petlje. Iz tog razloga *MUST\_ITERATE* direktiva kao parametre uzima minimalan i maksimalan broj iteracija, kao i parametar *multiple* koji kompajleru govori sa kojim brojem je broj prolaza djeljiv. Svi parametri su opcioni i potrebno je biti siguran u tačnost vrijednosti koje šaljemo za date parametre, jer je u suprotnom ishod programa nepredvidiv. Ako minimalna vrijednost nije specifikovana koristiće se nula, a ako maksimalna vrijednost nije specifikovana koristiće se najveća moguća cjelobrojna vrijednost.

U Prilogu 2 može se vidjeti primjena *MUST\_ITERATE* direktive koja za parametre minimalnog i maksimalnog broja iteracija uzima 16, što kompajleru garantuje da će se petlja sigurno izvršiti tačno 16 puta.

### 7.2.4 Poravnjanje memorijskih adresa uz \_nassert

Da bi kompajler što bolje mogao optimizovati izvršavanje petlji i operacija koje se odvijaju u petljama, potrebno mu je obezbijediti što više informacija koje on onda može iskoristiti da sa sigurnošću izvrši neke optimizacije koje inače ne bi mogao sam zaključiti. Kao što se sa *MUST\_ITERATE* kompajeru govori sa koliko iteracija i podataka će da radi nekapetlja, tako se sa intrinzikom *\_nassert* kompajleru daje do znanja da su podaci poravnati na neki specifičan način. Izrazom (7.5) se kompajelru daje do znanja da je adresa na koju pokazuje *ptr* poravnata po osmobajtnoj granici.

|  |  |
| --- | --- |
| \_nassert( (int) ptr % 8 == 0 ); | (7.5) |

Poravnjanje memorijskog prostora je od značaja jer kompajler može da iskoristi tu informaciju da proizvede kod koji izvršava određenu operaciju na više podataka istovremeno (*eng. SIMD – Single Instruction Multiple Data*). Bitno je naglasiti da *\_nassert* samo nagovještava kompajleru da se radi o nekoj vrsti poravnanja, a korisnik je dužan da obezbijedi poravnanje memorije. Ova optimizacija korištena je tokom izračunavanja mjere nesličnosti blokova da bi se pokušalo nametnuti izvršavanje jedne operacije nad više uzastopnih osmobitnih podataka odjednom. Primjer primjene optimizacije dat je u Prilogu 2.

### 7.2.5 Pisanje inline funkcija

Razvoj kompleksnih sistema sa velikim brojem funkcionalnosti zahtijeva pisanje modularnog koda i time povlači pisanje velikog broja funkcija specijalizovane namjene koje se interno pozivaju iz drugih opštijih funkcija. U sistemima čiji procesi nisu striktno ograničeni vremenom izvrašavanja pisanje takvog koda je prihvatljivo. Ali kada se radi o sistemima gdje je vrijeme izvršavanja procesa ograničeno, česti pozivi funkcija mogu značajno usporiti sistem zog takovzvanog *overhead*a koji se generiše iz razloga što svaki poziv funckije sa sobom povlači cijelu proceduru kreiranja pozivnog steka, prenosa parametara u poziv funckije, kao i skidanja funkcije sa pozvinog steka i skidanje povratnih parametara sa steka.

Rješenje za ovaj problem jeste *inline* ključna riječ koja se navodi ispred naziva funckije pri definisanju iste. Ključna riječ *inline* govori kompajleru da kod pozivane funkcije direktno ugradi na mjesto odakle se funckija poziva i na taj način izbjegne *overhead* koji sa sobom nosi stvarni poziv funkcije. Preporuka je da se *inline* korsiti za jednostavne funkcije koje se često pozivaju. Kompromis na koji se pristaje kada se koristi *inline* ključna riječ jeste dobitak na brzini izvršavanja po cijeni veće dužine generisanog koda od strane kompajlera. Bitno je naglasiti da, kao i sve ostale specijalizovane ključne riječi, *inline* samo nagovještava kompajleru da bi trebao da ugradi kod pozvane funkcije na mjesto odakle je pozvana, a krajnji ishod zavisi od kompajlera i zaključka koji on donosi nakon detaljne analize koda.

Primjer primjene *inline* optimizacije dat je u Prilogu 2 gdje je funkcija *calculateSumOfAbsoluteDifferences* proglašena kao *inline* iz razloga što obavlja jednostavne aritmetičke operacije i interno ne vrši pozive prema drugim funkcijama (pozivaju se intrinzici koji su takođe *inline*).

### 7.2.6 Upotreba restrict ključne riječi

Da bi se dodatno pomoglo kompajleru da predividi memorijske zavisnosti moguće je označiti neki pokazivač, referencu ili niz ključnom riječi *restrict*. Na ovaj način se kompajeru daje garancija da se nekom memorijskom prostoru iz određenog programskog opsega može prsitupiti samo preko referene označene sa *restrict*. Ovo pomaže kompajleru jer se lakše definiše *alijasovanje* informacija. Primjer *restrict* optimizacije dat je izrazom (7.6) kojim se kompajleru govori da funkcija *func* nikada neće biti pozvana sa pokazivačima *arr1*  i *arr2* čiji se objekti na koje oni pokazuju poklapaju u memoriji.

|  |  |
| --- | --- |
| void func(int \* arr1, int \* arr2){  //tijelo funkcije func  } | (7.6) |

Na ovaj način se kompajleru garantuje da pisanje na jednu lokaciju neće uticati na čitanje druge lokacije i obrnuto. Primjer upotrebe *restrict* optimizacije dat je u Prilogu 2 gdje je naznačeno da se parametri funkcije koji pokazuju na početak blokova u memoriji neće preklapati tokom izvršavanja funkcije.

# 8. TESTIRANJE I ANALIZA REZULTATA TESTIRANJA

# 9. ZAKLJUČAK

Grana računarskog vida svakodnevno podliježe inovativnim idejama, radovima i implementacijama o kojima je čovjek prije nešto manje od pedeset godina mogao samo razmišljati, teoretisati i pitati se kada će tako nešto biti moguće, ako ikad. Kontinualan razvoj i rast industrije hardvera i komputacione moći računara uopšte otvorio je nove puteve razvoja i implementacije rješenja koja se danas smatraju ključnima u polju računarskog vida, bili to raznoliki metodi detekcije objekata, oblika, lica ili pomjeraja, ili čak metodi većeg nivoa komplesnosti kao što je ekstrakcija trodimenzionalnog modela objekata na osnovu fotografija istih. Sve prethodno navedeno naravno ne bi bilo moguće realizovati bez računarske moći koja je danas dostupna.

Cilj ovog rada jeste da se suprostavi gore navedenoj tvrdnji i pokaže da se uz detaljno planiranje i implementaciju popraćenu adekvatnom optimizacijom sistema mogu postići zavidni rezultati i performanse čak i na sistemima ograničene računarske snage. Da bi se ova tvrdnja pokazala kao tačna, na sistemu TMS320C66x procesorske arhitekture implementiran je sistem za detekciju pomjeraja objekta u videu baziran na metodi estimacije pokreta uparivanjem blokova. Prvobitna implementacija koja nije bila prilagođena radu na ciljanoj platformi pokazala se loše po pitanju performansi pa je naredni korak bio da se sistem optimizuje za evaluacionu platformu sa ciljem izvršavnja u visokom broju frejmova po sekundi, za video visoke rezolucije koji u sistem dolazi u realnom vremenu.

Sistem je prvobitno optimizovan na nivou algoritma gdje je primarni cilj predstavljao detekciju i odbacivanje redudantnih koraka i izračunavanja u algoritmu. Uvedena optimizacija praga poređenja blokova pokazala se kao adekvatna optimizacija koja je znatno unaprijedila performanse sistema po cijeni zanemarljivo manje preciznosti detekcije pomjeraja u slučaju kada su pomjeraji mali i čak i za čovijeka teško uočljivi. Takođe je smanjen broj memorijskih alokacija, a gdje god je to bilo moguće, petlje su zamijenjene ponavljanjem niza nezavisnih instrukcija koje se optimizovane izvršavaju u paraleli. Rezultati prve grupe optimizacija pokazali su se zadovoljavajućim i postali su dobra podloga za dalje optimizacije, na nivou razvojnog frejmvorka i arhitekture. Druga grupa optimizacija koje uključuju intrinzike, DMA kopiranje, kao i određen broj sugestija kompajleru da se određeni dio koda može optimizovati, podigla je performanse sistema na očekivan nivo i time je završen proces optimizacije.

Rad može biti korsitan kao referenca za mikro i makro optimizacije sličnih sistema koji se razvijaju za sličnu ili istu procesorsku arhitekturu. Iako je faza optimizacije zaustavljena nakon što je sistem pokazao zadovoljavajuće rezultate, prostor za dodatni napredak sistema postoji u vidu mnogobrojnih optimizacija koje nisu obrađene ovim radom, a među kojima se kao najznačajnije ističu utilizacija višestrukih procesorskih jezgri (rad se bazirao na utilizaciji samo jednog DSP jezgra) i izvršavanje algoritma na videu smanjene rezolucije (*eng. downscaling*).

# PRILOG

## Prilog 1

#define BLOCK\_SIMILARITY\_TRESH 12

Int32 blockDidMoveGray(Int32 frame\_w, Int32 frame\_h, Int32 block\_row,   
Int32 block\_col, UInt8\* current\_frame, UInt8\* prev\_frame) {

    Int32 k;

    Int32 temp\_difference = 0;

    #pragma MUST\_ITERATE(16,16)

    for (k = 0; k < MACRO\_BLOCK\_DIM; k++) {

        UInt8\* restrict currentMacroBlockStart = &current\_frame[(block\_row \*   
 MACRO\_BLOCK\_DIM + k) \* frame\_w + (block\_col)\* MACRO\_BLOCK\_DIM];

        UInt8\* restrict prevMacroBlockStart = &prev\_frame[(block\_row \*   
 MACRO\_BLOCK\_DIM + k) \* frame\_w  + (block\_col)\* MACRO\_BLOCK\_DIM];

temp\_difference +=   
calculateSumOfAbsoluteDifferences(currentMacroBlockStart,   
prevMacroBlockStart);

    }

    temp\_difference /= MACRO\_BLOCK\_DIM \* MACRO\_BLOCK\_DIM;

    return temp\_difference > BLOCK\_SIMILARITY\_TRESH;

}

## Prilog 2

inline Int32 calculateSumOfAbsoluteDifferences(UInt8\* restrict

currentMacroBlockStart, UInt8\* restrict prevMacroBlockStart){

    \_nassert((int)currentMacroBlockStart % 4 == 0);

    \_nassert((int)prevMacroBlockStart % 4 == 0);

    UInt32 currentMacroBlockPart\_1 = \_amem4\_const(currentMacroBlockStart);

    UInt32 currentMacroBlockPart\_2 =

\_amem4\_const(currentMacroBlockStart + 4);

    UInt32 currentMacroBlockPart\_3 =

\_amem4\_const(currentMacroBlockStart + 8);

    UInt32 currentMacroBlockPart\_4 =

\_amem4\_const(currentMacroBlockStart + 12);

    UInt32 prevMacroBlockPart\_1 = \_amem4\_const(prevMacroBlockStart);

    UInt32 prevMacroBlockPart\_2 = \_amem4\_const(prevMacroBlockStart + 4);

    UInt32 prevMacroBlockPart\_3 = \_amem4\_const(prevMacroBlockStart + 8);

    UInt32 prevMacroBlockPart\_4 = \_amem4\_const(prevMacroBlockStart + 12);

    UInt32 subabsPart\_1 = \_subabs4(currentMacroBlockPart\_1,

prevMacroBlockPart\_1);

    UInt32 subabsPart\_2 = \_subabs4(currentMacroBlockPart\_2,

prevMacroBlockPart\_2);

    UInt32 subabsPart\_3 = \_subabs4(currentMacroBlockPart\_3,

prevMacroBlockPart\_3);

    UInt32 subabsPart\_4 = \_subabs4(currentMacroBlockPart\_4,

prevMacroBlockPart\_4);

    UInt32 addPartH\_12 = \_add2(\_unpkhu4(subabsPart\_1),

\_unpkhu4(subabsPart\_2));

    UInt32 addPartL\_12 = \_add2(\_unpklu4(subabsPart\_1),

\_unpklu4(subabsPart\_2));

    UInt32 addPartH\_34 = \_add2(\_unpkhu4(subabsPart\_3),

\_unpkhu4(subabsPart\_4));

    UInt32 addPartL\_34 = \_add2(\_unpklu4(subabsPart\_3),

\_unpklu4(subabsPart\_4));

    UInt32 tempRes = \_add2(\_add2(addPartH\_12, addPartL\_12),

\_add2(addPartH\_34, addPartL\_34));

    UInt32 total = ((tempRes & 0xFFFF0000U) >> 16) + (tempRes & 0x0000FFFFU);

    return total;

}

## Prilog 3

//setting the options bit flags for EDMA transfer configuration

    opt  =

            (EDMA3\_CCRL\_OPT\_ITCCHEN\_ENABLE << EDMA3\_CCRL\_OPT\_ITCCHEN\_SHIFT)

               |

            ((pAlgHandle->tccId << EDMA3\_CCRL\_OPT\_TCC\_SHIFT)

                        & EDMA3\_CCRL\_OPT\_TCC\_MASK

             )

               |

            (EDMA3\_CCRL\_OPT\_SYNCDIM\_ABSYNC << EDMA3\_CCRL\_OPT\_SYNCDIM\_SHIFT)

               |

            (EDMA3\_CCRL\_OPT\_TCINTEN\_ENABLE

                        << EDMA3\_CCRL\_OPT\_TCINTEN\_SHIFT);

      //setting all the necessary parameters required for EDMA data transfer

      pAlgHandle->pParamSet->destAddr   = (UInt32)prevFrame;

      pAlgHandle->pParamSet->srcAddr    = (UInt32)currentFrame;

      pAlgHandle->pParamSet->srcBIdx    = inPitch[0];

      pAlgHandle->pParamSet->destBIdx   = inPitch[0];

      pAlgHandle->pParamSet->srcCIdx    = 0;

      pAlgHandle->pParamSet->destCIdx   = 0;

      pAlgHandle->pParamSet->aCnt       = lineSizeInBytes;

      pAlgHandle->pParamSet->bCnt       = height;

      pAlgHandle->pParamSet->cCnt       = 1;

      pAlgHandle->pParamSet->bCntReload = height;

      pAlgHandle->pParamSet->opt        = opt;

      pAlgHandle->pParamSet->linkAddr   = 0xFFFF;

      //checking the EMDA transfer code complete flag

      EDMA3\_DRV\_checkAndClearTcc(pAlgHandle->hEdma,

                                  pAlgHandle->tccId,

                                  &tccStatus);

      EDMA3\_DRV\_clearErrorBits (pAlgHandle->hEdma,pAlgHandle->edmaChId);

      //starting the EDMA data transfer

      EDMA3\_DRV\_enableTransfer (pAlgHandle->hEdma,pAlgHandle->edmaChId,

                                              EDMA3\_DRV\_TRIG\_MODE\_MANUAL);

      //waiting in the background for the transfer to end and clearing TCC

      EDMA3\_DRV\_waitAndClearTcc(pAlgHandle->hEdma,pAlgHandle->tccId);

# LITERATURA

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | R. Szeliski, “*Computer Vision: Algorithms and Applications*”, 2011 |
| [2] | V. Risojević, “*Multimedijalni sistemi*”, 2018 |
| [3] | S. Alavi, “*Comparation of Some Motion Detection Methods in cases of Single and Multiple Moving Objects*”, 2012 |
| [4] | B. Pesquet-Popescu, M. Cagnazzo, “*Motion Estimation Techniques*”, 2015 |
| [5] | A. Barjatya, “*Block Matching Algorithms for Motion Estimation*”, 2004 |
| [6] | “Underestanding Embedded Systems”, <https://www.electronics-notes.com/articles/digital-embedded-processing/embedded-systems/basics-primer.php>, posjećeno 10.10.2019 |
| [7] | “TDA2PxACD CPU EVM Board User’s Guide (Rev. A)”, <http://www.ti.com/lit/ug/spruii4a/spruii4a.pdf>, revizija Novembar 2018 |
| [8] | “*A Beginner’s Guide to Digital Signal Processing (DSP)*”, [https://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/beginners-guide-to-dsp.html#](https://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/beginners-guide-to-dsp.html), posjećeno 14.10.2019 |
| [9] | Texas Instruments, “*TMS320C66x high-peroformance multicore DSPs for video surveillance*”, 2012 |
| [10] | Texas Instruments, “*Vision SDK Links Framework – Deep Dive*”, 16 Mart 2015 |
| [11] | Texas Instruments, “*Vision SDK (v03.xx) Development Guide*”, 2017 |
| [12] | “*Loop unrolling*”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Loop_unrolling>, posjećeno 21.10.2019 |
| [13] | “*Compiler intrinsics*”, <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/intrinsics/compiler-intrinsics?view=vs-2019>, posjećeno 21.10.2019 |
| [14] | Texas Instruments, “*TMS320C6000 Peripehrals Reference Guide*”, Februar 2001 |
| [15] | Texas Instruments, “*TMS320C6000 Optimizing Compiler v8.2.x – User’s Guide*”, Maj 2017 |