

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 212

**INTERAKTIVNI KINEMATIČKI MODEL U OKRUŽENJU
DOPUNJENE STVARNOSTI**

Hrvoje Pađen

Zagreb, Lipanj 2011.

Zahvala

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Željki Mihajlović na poticaju, stručnom i znanstvenom usmjeravanju te podršci, pomoći i sugestijama. Zahvaljujem obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju.

Sadržaj

Uvod.....	1
Dopunjena stvarnost	2
Definicija	2
Osnovni uvjeti za ostvarivanje dopunjene stvarnosti	4
Statičke greške.....	5
Dinamičke pogreške	6
Tehnologije za izvedbu dopunjene stvarnosti.....	8
Tehnike prikaza.....	8
Tehnike slijeđenja	12
Optičko slijeđenje	13
Primjene dopunjene stvarnosti	14
Tehnike animacije likova	18
Animacija ključnim položajima	18
Interpolacija oblika	19
Tehnika snimanja pokreta	20
Simulacija gomile.....	21
Skeletalna animacija	23
Kinematika	24
Stupnjevi slobode	24
Modeliranje ljudske figure.....	25
Direktna kinematika	26
Inverzna kinematika	27
Analitičke metode.....	30
Numerička rješenja.....	31
Jacobijeva Matrica	31
Inverz Jacobijeve matrice	32
Pseudoinverz Jacobijeve matrice	32
Rješenje preko Jacobijeve pseudoinverzne matrice	33
Princip virtualnog rada	34
Rješenje preko Jacobijeve transponirane matrice	36

Metoda prigušenih najmanjih kvadrata	37
Rastav singularnih vrijednosti.....	39
Metoda pseudoinverznih prigušenih najmanjih kvadrata	40
CCD algoritam	41
Triangulacijski algoritam.....	44
Kombinacija analitičkih i numeričkih metoda u inverznoj kinematici.....	46
Rješenja pomoću tehnika strojnog učenja	47
ARKineMan	48
Upotrijebljene tehnologije	48
Okruženje dopunjene stvarnosti	49
Goblin XNA.....	49
Sustav inverzne kinematike	51
Rezultati i moguća poboljšanja.....	56
Zaključak	58
Literatura	59

Uvod

Ovaj rad se bavi problematikom animiranja likova kinematičkim postupcima. Kinematika je jedan od glavnih alata za animaciju ljudske figure zbog svoje mogućnosti realnog animiranja pokreta čovjeka. Fizikalno utemeljena, kinematika pruža visoki realizam animacije uz relativno malo korištenje računalnih resursa. Zbog činjenice da se cijela animacija može bez većih problema izvoditi u stvarnom vremenu, principi kinematike imaju široku primjenu u području računalne grafike. Osim grafike, principi kinematike se intenzivno koriste i u robotici pri modeliranju kretanja robota i robotskih ruku. U radu su obrađene dvije vrste kinematike, direktna i inverzna. Naglasak je stavljen na inverznu s obzirom na to da nudi bolje mogućnosti za animaciju od direktne. Navedeni su glavni algoritmi te predstavljene njihove prednosti i nedostaci.

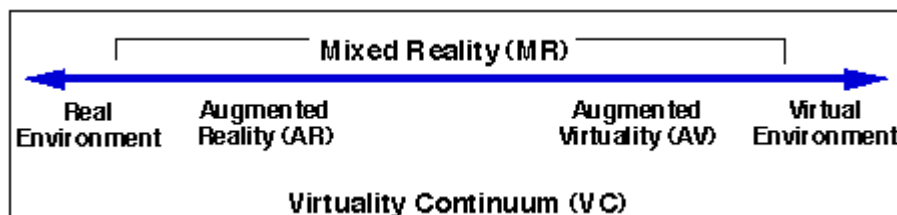
Osim kinematikom, rad se bavi i tehnologijama dopunjene stvarnosti. Izabrana je jedna od trenutno najperspektivnijih i brzorastućih tehnologija zbog svoje sve veće primjene u praksi. Sa širokim rasponom primjena od oglašivačke industrije do vojne industrije, dopunjena stvarnost se nudi kao potpuna zamjena virtualnoj stvarnosti u nekim područjima. Zbog toga je izabrana kao zamjena virtualnoj stvarnosti u ovom projektu.

U praktičnom dijelu rada izabran je jedan od algoritama predstavljenih u radu te implementiran. Okružje za rad je za razliku od većine dosadašnjih projekata umjesto virtualne stvarnosti bila dopunjena stvarnost. Na početku rada su objašnjeni principi ostvarivanja dopunjene stvarnosti te njezina primjena u raznim industrijama. Drugi dio sadrži pregled različitih tehnika animacije, dok se treći dio rada bavi problematikom kinematike posvećujući veći dio principima i izvedbama inverzne kinematike. Na kraju je opisana implementirana aplikacija te dan popis literature.

Dopunjena stvarnost

Definicija

Dopunjenu ili proširenu stvarnost (eng. *augmented reality*) možemo definirati kao percepciju stvarnosti u realnom vremenu koja je „dopunjena“ (proširena, obogaćena) računalno generiranim elementima. P. Milgram i F. Kishino [1] dopunjenu stvarnost opisuju kao dio pomiješane stvarnosti (eng. *mixed reality*) točnije dio „virtualnog kontinuuma“ (eng. *virtuality continuum*) koji povezuje potpuno stvarna okruženja s potpuno virtualnim okruženjima. Prema njihovom tumačenju, dopunjena stvarnost se odnosi na sve slučajeve u kojima se prikaz inače stvarnog okruženja dopunjuje virtualnim objektima pomoću metoda računalne grafike (slika 1.).



Slika 1. Podjela percepcija stvarnosti u računalnoj grafici

Na slici 1. na krajnjoj lijevoj strani osi se nalaze stvarna okruženja. Milgram i Kishino kao primjer ističu gledanje najobičnijeg video zaslona u stvarnom vremenu. Na suprotnoj strani se nalaze potpuno virtualna okruženja, npr. grafičke računalne simulacije na zaslonu. Između dvije krajnosti se nalazi pomiješana stvarnost dio koje je i dopunjena stvarnost te nužno uključuje miješanje elemenata stvarnih i virtualnih okruženja.

Ronald Azuma je u svom radu [2] dopunjenu stvarnost definirao kao varijaciju virtualnih okruženja koja omogućuje korisniku da na doživljaj stvarnog svijeta nadredi (eng. *superimpose*) ili s dotičnim pomiješa virtualne elemente. Dopunjena stvarnost, za razliku od virtualnog svijeta u koji je korisnik u potpunosti „uronjen“, dopušta korisniku

percepciju svijeta oko sebe, ali uz to kombinira virtualne elemente sa stvarnim svijetom kako bi „dopunila“ korisnikov doživljaj svijeta. Primjer je vidljiv na slici 2. na kojoj je prikazana stvarna soba sa stvarnim stolom i stvarnim telefonom na stolu. Dotičnom stvarnom okruženju su dodani stolci i lampa na stolu.



Slika 2. Primjer dopunjene stvarnosti

Definicije dopunjene stvarnosti uglavnom obuhvaćaju dodavanje virtualnih elemenata u stvarni svijet. Međutim, dopunjena stvarnost također može i ukloniti stvarne elemente iz svijeta na različite načine. Rezultati uglavnom nisu fotorealistični te je zbog toga taj dio dopunjene stvarnosti uglavnom manje zanimljiv. Također, dok u pravilu većina definicija dodaje samo vizualne virtualne elemente u doživljaj dopunjene stvarnosti, moguće je stvarnost proširiti i sa zvučnim elementima. Zvuk okoline je moguće pratiti mikrofonom te ga obogaćivati dodatnim informacijama ili maskirati pojedine zvučne signale. Osim zvuka, moguće je dopuniti stvarnost s haptičkim uređajima koji simuliraju silu na određene dijelove tijela. Tako bi npr. haptičke rukavice mogle simulirati određene podražaje koji postoje u dopunjenoj stvarnosti. Izvedba dopunjene stvarnosti s dopunjenim zvukom i simulacijom sile je komplicirana te je samo spomenuta u ovom radu kao mogućnost.

Osnovni uvjeti za ostvarivanje dopunjene stvarnosti

U svom radu [2] R. Azuma je izdvojio glavne karakteristike koje neki sustav mora ispunjavati da bi ga se moglo nazvati sustavom dopunjene stvarnosti:

- Mora kombinirati virtualni i stvarni svijet
- Mora biti interaktivan u stvarnom vremenu
- Virtualni objekti moraju biti u skladu sa stvarnim svijetom (odnosno moraju biti poravnati s ostatkom stvarnih elemenata u slici)

Prva karakteristika sačinjava samu definiciju dopunjene stvarnosti, kombinacija virtualnog i stvarnog svijeta odnosno prikaz stvarnog svijeta dopunjen virtualnim elementima.

Druga karakteristika razlikuje sustave dopunjene stvarnosti od sustava koji stvaraju virtualne elemente koji prekrivaju određen dio slike, nude neku informaciju, ali su statički tj. nemaju samostalnu koordinaciju sa slikom te nisu interaktivni. Primjer za takve sustave su informacije koje se dodaju u prikazima vijesti te sportskih događaja (slika 3.).



Slika 3. Prikaz dodanih virtualnih elemenata u stvarnu sliku

Jedna od glavnih karakteristika dopunjene stvarnosti je podrška za rad u stvarnom vremenu. Ovo isključuje mogućnost da se razni računalno generirani efekti vezani uz televizijsku ili filmsku produkciju (koji nisu u stvarnom vremenu) svrstavaju u dopunjenu stvarnost s obzirom na to da sustav dopunjene stvarnosti mora reagirati vrlo brzo na promjene (mjereno u milisekundama).

Treća bitna karakteristika dopunjene stvarnosti je poravnanje virtualnih objekata u slici stvarnog svijeta. Ono mora biti u stvarnom vremenu i predstavlja najveći problem kod izrade sustava dopunjene stvarnosti zbog velikih zahtjeva koji se stavljaju na preciznost prikaza i velikog broja mogućih izvora grešaka. Za razliku od dopunjene stvarnosti, greške u virtualnoj stvarnosti je mnogo lakše izbjeći. Čak i ako se dogode, teže ih je detektirati. U virtualnoj stvarnosti glavnina grešaka u poravnanju se dešava zbog vizualno – kinestetskog konflikta. Npr. ako korisnik pomakne ruku u stvarnom svijetu i taj podražaj se prenese u virtualni svijet u koji je trenutno uronjen te pri tome dođe do greške odnosno krivog položaja ruke u virtualnom svijetu, taj slučaj odnosno grešku je puno teže zapaziti nego isti slučaj u dopunjenoj stvarnosti. U dopunjenoj stvarnosti greške se događaju većinom zbog vizualno – vizualnog konflikta koji je puno uočljiviji zbog osjetljivosti ljudskog vizualnog sustava na razlike [2].

Greške u poravnanju se dijele na:

- Statičke
- Dinamičke

Statičke greške

Optička distorzija je devijacija rektilinearne projekcije¹. Ovakve greške postoje u svim optičkim sustavima, od kamera do zaslona na kojem se prikazuje slika. Ljudski vizualni sustav sam po sebi ne čini ove pogreške, no sustav prikaza dopunjenih virtualnih

¹ Rektilinearna projekcija je projekcija u kojoj ravne linije scene ostaju ravne i na slici odnosno nema devijacija slike zbog kojih bi ravne linije izgledale iskrivljeno.

objekata može uvesti distorziju te time izazvati grešku u poravnanju objekata u sustavu dopunjene stvarnosti. S obzirom na to da su optičke distorzije najčešće sistematske greške, moguće ih je ispraviti preslikavanjem (mapiranjem). Predložena rješenja su dodatni optički sustavi koji ispravljaju greške [3] te digitalno ispravljanje grešaka. Dokazano je međutim da digitalno ispravljanje grešaka uzrokuje kašnjenje u prikazu čime se stvaraju greške poravnavanja koje se ne mogu kompenzirati ispravljanjem optičke distorzije [4].

Mehaničke nepreciznosti opreme su razlike između modela tj. specifikacije mehaničkih sustava i stvarnih fizičkih svojstava dotičnih sustava. Takve nepreciznosti mogu uzrokovati promjene u poziciji i orijentaciji virtualnih objekata. Unatoč mogućim kalibracijama takvih sustava, najbolje rješenje je inicijalno konstruirati takve mehaničke sustave ispravno [2].

Greške slijeđenja su greške u sustavima za slijeđenje korisnika i najozbiljnije su greške od svih tipova statičkih grešaka. Ovakve greške su teške za praćenje jer su najčešće nesistematske i teško ih je opisati, a prate skoro sve veće sustave za dopunjenu stvarnost [2]. S obzirom na kompleksnost, raširenost i čestu pojavu, one neće biti detaljnije obrađene u ovom radu. Dotične greške su vrlo dobro obrađene u [4] i [2].

Pogrešni parametri virtualne kamere najčešće predstavljaju krive koordinate lokacije kamere u sustavu. Takvi parametri uključuju [2] centar projekcije, dimenzije gledišta, translacijski i orijentacijski pomak između lokacije kamere i očiju te polje pogleda. Tako npr. krivi razmak između kamere i očiju u sustavu može rezultirati greškom u prikazu virtualnih objekata (mogu biti više ili niže postavljeni od pozicije na kojoj bi trebali biti).

Dinamičke pogreške

Drugi tip grešaka koji se događaju u sustavima dopunjene stvarnosti su dinamičke greške. Takve greške nastupaju zbog kašnjenja u sustavu. U [2] su takve greške nazvane kašnjenje sustava od kraja na kraj (eng. *end-to-end system delay*), a definirane su kao

razlika u vremenu između mjerenja pozicije i orijentacije točke gledišta (eng. *viewpoint*) od strane sustava te prikaza dotične točke na zaslonu. Kašnjenja ovise o kompleksnosti sustava, a variraju od 100 milisekundi na jednostavnijih sustavima do 250 milisekundi na kompleksnijim. Greške u poravnanju se vide tek kod pomicanja objekata ili točke gledišta. Kod mirovanja kašnjenje može biti veliko, ali greške se neće uočiti jer tek pri pomicanju vremenska razlika između prikupljanja podataka i prikaza dolazi do izražaja. Kod pomicanja će se činiti da dodani objekti „vise u zraku“ jer će dolaziti do kasnijeg prikaza elemenata odnosno do ispravnog prikaza elemenata, ali u krivoj vremenskoj točki.

Smanjenje dinamičke pogreške se može izvesti idućim metodama [2] [28]:

- Smanjenje kašnjenja u sustavu
- Usklađivanje vremena zadržkom stvarne slike
- Predviđanje
- Translacija slike

Prva metoda je jednostavno smanjenje kašnjenja sustava. Premda je tehnički nemoguće potpuno ukloniti kašnjenje, raznim tehnikama ga je moguće smanjiti na najmanju moguću razinu [29] [30]. Osim ovoga, preciznim je mjerenjem moguće odrediti koliko je kašnjenje sustava te za dotični iznos zakasniti s prikazom stvarne slike. Na taj način bi stvarna slika i dodani virtualni elementi bili u istom vremenskom okviru te ne bi dolazilo do grešaka u poravnanju. Problem kod ovog pristupa je što je iskoristiv jedino kod zaslona s video miješanjem slike (objašnjeno kasnije u radu) te za veće greške može proizvesti niz negativnih efekata. Metoda predviđanja se zasniva na predviđanju budućih položaja objekata i budućih točaka gledišta. Za manja sustavska kašnjenja (< 80ms) se pokazalo da ova metoda može značajno smanjiti greške poravnanja [2].

Tehnologije za izvedbu dopunjene stvarnosti

Tehnike prikaza

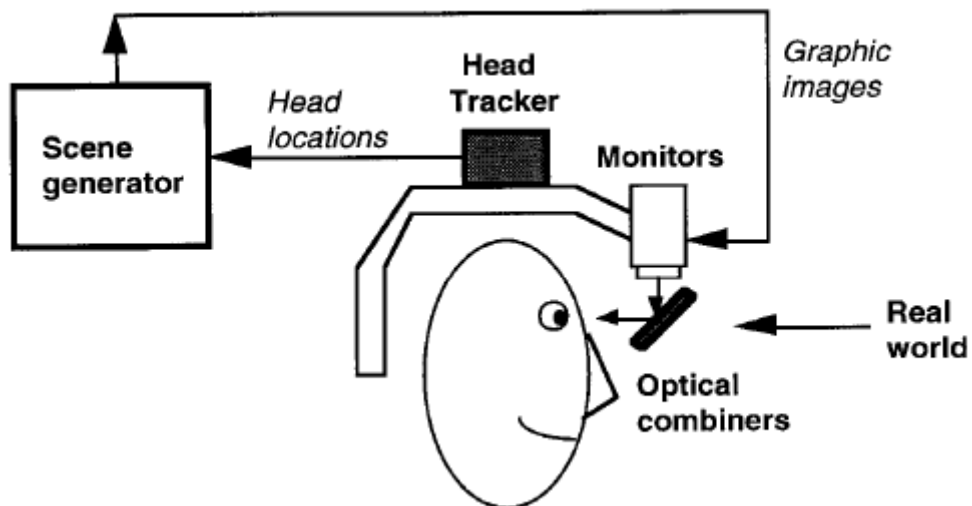
Tri su glavna načina prikaza dopunjene stvarnosti – zaslone nošeni na glavi (eng. *head mounted displays*, HMD), ručni zaslone i projekтивni zaslone. Zasad su najpopularniji zaslone nošeni na glavi, ali sve veća dostupnost mobilnih uređaja s naprednim mogućnostima poput *smartphone* uređaja uzrokuje rast popularnosti i primjena dopunjene stvarnosti u okruženju ručnih zaslona.

Unutar kategorije zaslona nošenih na glavi postoji podjela na dva načina funkcioniranja dotičnih zaslona s obzirom na miješanje realne i virtualne slike:

- Zaslone s optičkim miješanjem slike
- Zaslone s video miješanjem slike

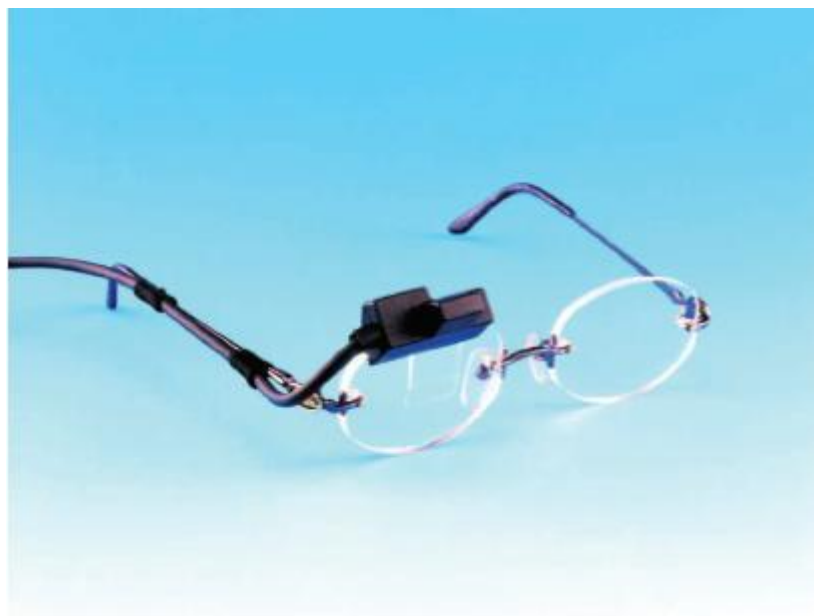
Premda ovakva podjela može postojati i u drugim načinima prikaza dopunjene stvarnosti, najviše do izražaja dolazi upravo kod zaslona nošenih na glavi te je u sklopu dotičnih i predstavljena. Oba pristupa miješanju slike imaju svoje prednosti i nedostatke koji će u nastavku biti objašnjeni.

Zaslone s optičkim miješanjem slike pred korisnikovo oko stavljaju optičku miješalicu, poluprozirno ogledalo. Korisnik kroz ogledalo prima sliku iz stvarnog svijeta na koju se potom aditivnim miješanjem dodaju virtualni elementi. Vizualni opis je predstavljen na slici 4. Glavna prednost ovakvih sustava je bolji pogled na realni svijet od zaslona s video miješanjem. Slika koju korisnik vidi je u stvarnom vremenu, pogled na stvarni svijet je nepromijenjen čime korisnik ima bolju rezoluciju i veći dinamički raspon slike te nema mogućih zastoja (eng. *lag*) u prikazu slike.



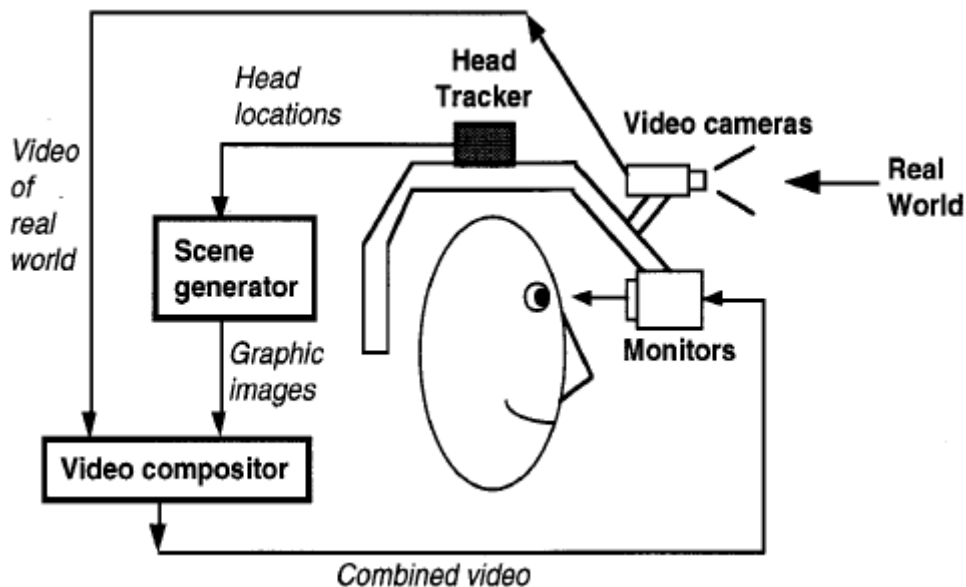
Slika 4. Zaslou s optičkim miješanjem slike

Glavni problem je lošiji prikaz virtualnih elemenata u konačnoj slici. Virtualni elementi nisu sinkronizirani sa stvarnim prikazom koji korisnik vidi te to dovodi do krivog razmještaja virtualnih objekata u sceni. Postoji i potreba za kalibracijom zaslona kako bi virtualni elementi bili pravilno prikazani. Također, s obzirom da je ogledalo poluprozirno, korisnik može imati problema s osvjetljenjem. Primjer jednog stvarnog sustava s optičkim miješanjem je prikazan na slici 5.



Slika 5. Sustav dopunjene stvarnosti s optičkim miješanjem

Zasloni s video miješanjem sadrže kameru koja prima sliku iz stvarnog svijeta te potom ju prikazuje na zaslonima ispred korisnikova oka. U postupku prikaza dolazi do miješanja video prikaza s elementima virtualne stvarnosti te na taj način stvaranja dopunjene stvarnosti. Sustav je prikazan na slici 6. Glavna prednost ovakvih sustava je veća preciznost kod registracije (poravnanja) virtualnih objekata odnosno manje greške u prikazu virtualnih objekata. Nema kašnjenja prikaza stvarne slike i virtualnih objekata jer sustav pazi da do toga ne dođe. Osim toga, moguće je stvaranje bogatijih scena kao i lakše uklanjanje stvarnih objekata iz scene.



Slika 6. Zaslone s video miješanjem slike

Nedostaci su pojava kašnjenja u odnosu na stvarnost, veća kompleksnost sustava te smanjena rezolucija i vidni kut. Također, nerijetko su ovakvi sustavi veći od sustava s optičkim miješanjem (nekad i osjetno veći) što može izazvati veći zamor te time neugodniji rad kod korisnika. Primjer jednog stvarnog sustava s video miješanjem je prikazan na slici 7. Prikaz dopunjene stvarnosti na monitoru također pripada sustavima s video miješanjem slike.



Slika 7. Sustav dopunjene stvarnosti s video miješanjem

Kao alternativa zaslonima nošenim na glavi, početkom '90-ih godina 20. stoljeća pojavio se virtualni zaslon na mrežnici oka. Takav zaslon djeluje na principu „crtanja“ po mrežnici pomoću lasera. Laserska zraka se modulira te potom skenira kako bi se pikseli ispravno smjestili na mrežnicu. Prednost ovakvih sustava je njihova iznimno mala veličina, veliko polje i kut pogleda, visoka rezolucija i bolja boja od konvencionalnih sustava, prava 3D stereo slika te slika koja je prilagodljiva raznim defektima oka [26]. Sustavi koriste laserske diode puno manjeg intenziteta od granice koja oštećuje oko te su laserske zrake raspršene po puno većem području nego je to slučaj s laserima koji uzrokuju oštećenja.

Ručni uređaji poput Tablet PC-a, osobnih digitalnih asistenata (eng. *personal digital assistant, PDA*) te u novije vrijeme pametnih mobitela (eng. *smartphone*) pružaju zbog svojih svojstava (integrirana kamera, radna memorija te zaslon) velike mogućnosti za dopunjenu stvarnost. Ovakvi sustavi spadaju u zaslone s video miješanjem slike gdje se stvarna slika dobiva iz kamere te se potom proširuje virtualnim elementima. Navedeni uređaji najčešće imaju i pristup Internetu što omogućuje konstantno dohvaćanje svježih podataka. Ovakvi uređaji dostupni su širokom krugu korisnika te trenutačno predstavljaju

komercijalno najisplativiju kategoriju uređaja za ostvarivanje dopunjene stvarnosti. Glavna prednost nad konkurencijom im je mala cijena u odnosu na ostale uređaje za ostvarivanje dopunjene stvarnosti te jednostavnost korištenja i pokretljivost. Osim toga, s većim razvojem tehnologija koje inicijalno nemaju veze s dopunjenom stvarnošću (poput brzog pristupa Internetu, geolokacijskih usluga itd.) rastu i mogućnosti za širu primjenu dopunjene stvarnosti.

Projekcioni sustavi dopunjene stvarnosti dodaju virtualne elemente ravno na fizičke objekte. Najjednostavniji primjer su dopune koje su koplanarne s objektom na kojem su prikazane, a projicirane su iz montiranog projektora koji ne mijenja poziciju [27]. U ovom slučaju nije potreban nikakav zaslon nošen na glavi. Prednost ovakvog sustava je činjenica da korisnik ne mora nositi nikakvu opremu na sebi kao što je to slučaj sa zaslonima nošenim na glavi. Moguća je kolaboracija više korisnika te prikaz može biti načinjen s više projektora čime se omogućava veća slika. Problem predstavljaju osvjetljenje odnosno sunčevo svjetlo koje može onemogućiti efikasan rad sustava te potreba za površinom na kojoj će virtualni elementi biti projicirani. Osim ovog pristupa, moguć je i pristup u kojem korisnik na glavi nosi projektor. U tom slučaju su objekti projicirani uzduž korisnikove linije pogleda (eng. *line of sight*) na objekte. Ukoliko su objekti načinjeni od retroreflektivnih materijala, moguća je podrška za više korisnika koji bi u tom slučaju vidjeli različite/nezavisne slike. Problem kod ovog pristupa je relativna neugodnost kod nošenja projektora na glavi zbog njihove težine.

Tehnike slijeđenja

Slijeđenje je postupak dobivanja pozicije i orijentacije predmeta u stvarnom vremenu [28]. Tehnike slijeđenja u sustavima dopunjene stvarnosti su slične tehnikama korištenima u sustavima virtualne stvarnosti. Međutim, za razliku od virtualne stvarnosti gdje su greške u poziciji i orijentaciji dopuštene, u dopunjenoj stvarnosti to nije slučaj zbog većih zahtjeva za preciznošću. S obzirom na to da ovaj rad koristi uglavnom tehnike optičkog slijeđenja, u nastavku je ponuđen detaljniji uvid u dotične. Osnove ostalih

tehnika slijeđenja se mogu vidjeti u [28]. Treba napomenuti da upotreba tehnika slijeđenja najviše ovisi o okruženju i praktičnosti primjene, npr. u otvorenim područjima je bolje upotrijebiti GPS nego metode optičkog slijeđenja.

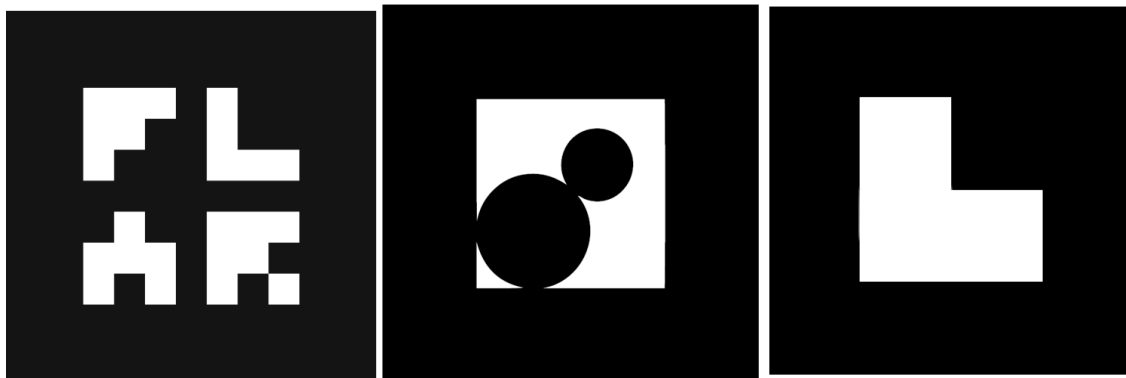
Optičko slijeđenje

Optičko slijeđenje je postupak dobivanja pozicije i orijentacije glave analizom prikaza dobivenog od video izvora. Ovaj način slijeđenja je izuzetno praktičan zbog velikog broja razvijenih metoda u području računalnog vida koje se mogu iskoristiti te zbog pristupačnosti i raširenosti video izvora. Dobar dio opisanih sustava za prikaz dopunjene stvarnosti već ima ugrađenu video kameru kojom nije teško upravljati. Unatoč tome, problemi ipak postoje, a rješenja se grubo mogu podijeliti u ona koja koriste markere za praćenje i ona koja ne koriste markere za praćenje.

Markeri za praćenje su se nametnuli kao logično rješenje u problemu dobivanja pozicije i orijentacije. Video prikaz nakon ulaska u sustav prolazi kroz komponentu za raspoznavanje uzoraka gdje se nekom od tehnika prepoznaju markeri te se potom određuju pozicija i orijentacija. Markeri se mogu generalno podijeliti na pasivne i aktivne [21].

Pasivni markeri su najčešće oznake isprintane na papiru. Postoje razni pristupi modeliranju i raspoznavanju isprintanih oznaka [21], ali najkorištenije oznake u većini današnjih sustava dopunjene stvarnosti se temelje na radu Katoa i Billinghursta [31]. Od drugih se razlikuju po postojanju posebne oznake koja je okružena debelim crnim slojem (slika 8). Analizom video slike iz kamere se određuju transformacijske matrice ovih markera iz sustava kamere. Marker se u video slici iz kamere pronalaze postupcima određivanja praga (eng. *thresholding*) te pronalaženjem regija u slici koje su okružene s četiri linijska segmenta. Regije slike unutar segmenata potom se normaliziraju te uspoređuju s uzorcima koji su otprije poznati sustavu (odnosno s uzorcima koje je korisnik predao sustavu za raspoznavanje). Nakon uspješnog raspoznavanja pristupa se određivanju transformacijskih matrica. Pritom je važno imati podatke o kameri odnosno

izvršiti kalibraciju kamere prije samog korištenja sustava. Sustav je iznimno popularan zbog jednostavnosti korištenja i pristupačnosti (potrebni su samo isprintani markeri i kamera s pripadajućom programskom podrškom (*softwareom*)).



Slika 8. Primjeri pasivnih markera

Aktivni markeri najčešće su tvari koje emitiraju neku vrstu svjetlosti na temelju čega se onda stvarnost dopunjuje virtualnim elementima. Najbolji primjer su LED diode. Premda iskoristivi, ovakvi markeri zasad nemaju široku primjenu.

Primjene dopunjene stvarnosti

Premda još u fazi razvitka, dopunjena stvarnost je pokazala da je njen potencijal ogroman. U nastavku su navedene neke od mogućih primjena.

Oglašavačka industrija je jedna od najvećih industrija u kojoj se primjenjuju tehnologije dopunjene stvarnosti. Automobilske kompanije poput Minija, Toyote, Nissana i BMW-a su iskoristile dopunjenu stvarnost kako bi privukle nove kupce i približile svoje nove modele potencijalnim kupcima. Danska tvrtka Lego svojim je kupcima omogućila da jednostavnim prikazom proizvoda pred kamerom dobiju uvid u mogućnosti proizvoda koji kupuju.

Vojska koristi tehnologiju dopunjene stvarnosti pri obuci vojnika. Osim toga, koriste se i nosivi uređaji koji na zaslonu prikazuju razne informacije poput mapa područja, imena ulica, neprijateljskih pozicija, pozicija vlastitih trupa te omogućuju bolju povezanost i timski rad vojnika na terenu [5] (slika 9). Pojedini sustavi dopunjene stvarnosti se povezuju s termalnim kamerama i kamerama za noć kako bi se dobila funkcionalnost oba sustava u jednom smanjujući pritom broj stvari koje prosječni vojnik mora nositi sa sobom. U vojnim zrakoplovima se već odavno koriste slične tehnologije koje na prozirnim zaslonima prikazuju informacije relevantne za upravljanje.



Slika 9. Primjena sustava dopunjene stvarnosti u vojne svrhe

Vjerojatno najzahtjevnija upotreba dopunjene stvarnosti je pomoć pri kirurškim operacijama. U ovom slučaju, kirurg može vidjeti sliku pacijentovih nalaza na samom tijelu pacijenta te prema dotičnim nalazima odlučiti gdje će i kako operirati. Geisen u [22] daje kratki pregled zahtjeva koji se postavljaju na sustave dopunjene stvarnosti te opisuje interakciju između sustava, kirurga i pacijenta. U zaključku se kao glavna prednost navodi smanjenje ožiljaka, ubrzanje i veća preciznost operacija te smanjenje troškova kao posljedica veće brzine. U [23] se također predviđa uvođenje sustava dopunjene stvarnosti u kirurške zahvate te kao moguće korisne strane sustava navode se smanjenje vremena za

učenje laparoskopskih procedura i izvođenje kirurških postupaka, smanjenje traume za pacijenta te povećanje dostupnosti ovakvih procedura zbog lakšeg učenja. Tardif, Roy i Meunier su u svom radu [24] predstavili primjenu projekcionog sustava dopunjene stvarnosti u kirurgiji. Njihov sustav projicira podatke ravno na pacijenta izbjegavši tako opremu koju kirurg mora nositi u drugim sustavima dopunjene stvarnosti. Također, njihov sustav ne zahtijeva nikakvu kalibraciju i može se upotrijebiti s bilo kojim projektorom.

Osim navedenih primjena, postoji još čitav niz raznih primjena dopunjene stvarnosti u industriji zabave. Industrija video igara polako prepoznaje potencijal dopunjene stvarnosti te su igre u okruženju dopunjene stvarnosti na mobilnim uređajima koji posjeduju kameru sve češće. Dopunjena stvarnost i njena upotreba se može sve češće naći u muzejima, na izložbama, knjigama (slika 10) te u tematskim zabavnim parkovima.



Slika 10. Primjer dopunjene stvarnosti u zabavi

U industriji je već prisutna primjena dopunjene stvarnosti za sklapanje različitih dijelova, održavanje i popravke. Kao dobar primjer može se istaknuti [40] gdje su Regenbrecht, Baratoff i Wilke predstavili primjene dopunjene stvarnosti u automobilskoj, avio i astronautičkoj industriji (slika 11.).



Slika 11. Primjena dopunjene stvarnosti u popravcima

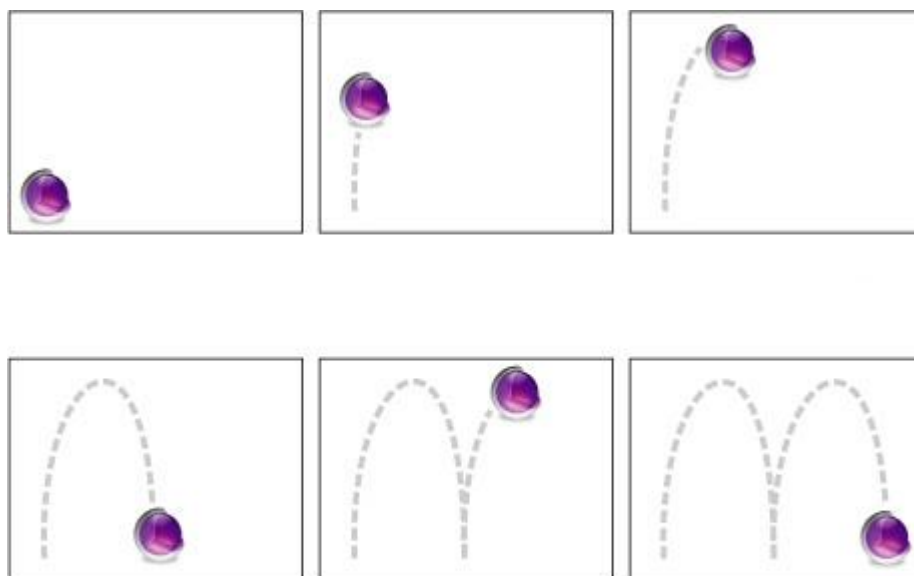
Tehnike animacije likova

U ovom dijelu rada će biti predstavljene neke od tehnika animacije likova. Tehnike će biti ukratko obrađene, a naglasak će biti na predstavljanju kinematičkih tehnika animacije likova.

Animacija ključnim položajima

Animacija ključnim položajima (eng. *keyframe animation*) je tehnika temeljena na postavljanju likova u željene poze (položaje) u određenim vremenskim trenucima. Sustav za animaciju potom interpoliran ostale položaje između dotičnih prethodno zadanih položaja. Npr. animator može dati početnu i završnu pozu nekog objekta i onda računati na sustav da će izračunati poze između početne i završne. Eberly [12] je animaciju po ključnim okvirima definirao kao interpolaciju translacijskih i rotacijskih informacija u nekom vremenu. Na slici 12 je prikazana primjena animacije ključnim položajima kako bi se animirala ljubičasta loptica. Animator postavlja lopticu na određene položaje (ključne položaje) u vremenu. Na slici se u gornjem lijevom kutu loptica nalazi u 0. sekundi, a u donjem desnom kutu u 5. sekundi. Sustav potom interpolira položaje loptice između ključnih te stvara animaciju.

Kod ovakvog pristupa animaciji postoje problemi. Najočitiiji problem je postavljanje ključnih pozicija koje su izrazito različite. U tom slučaju sustav može interpolirati između dvije pozicije na različite načine koji na kraju mogu biti neprihvatljivi odnosno animacija loše izgleda. Zbog toga se postavlja uvjet da ključni položaji budu relativno bliski jedan drugom. Također, linearna interpolacija ne uspijeva dovoljno prirodno animirati ljudsko kretanje te se moraju koristiti i drugi načini interpolacije [28].



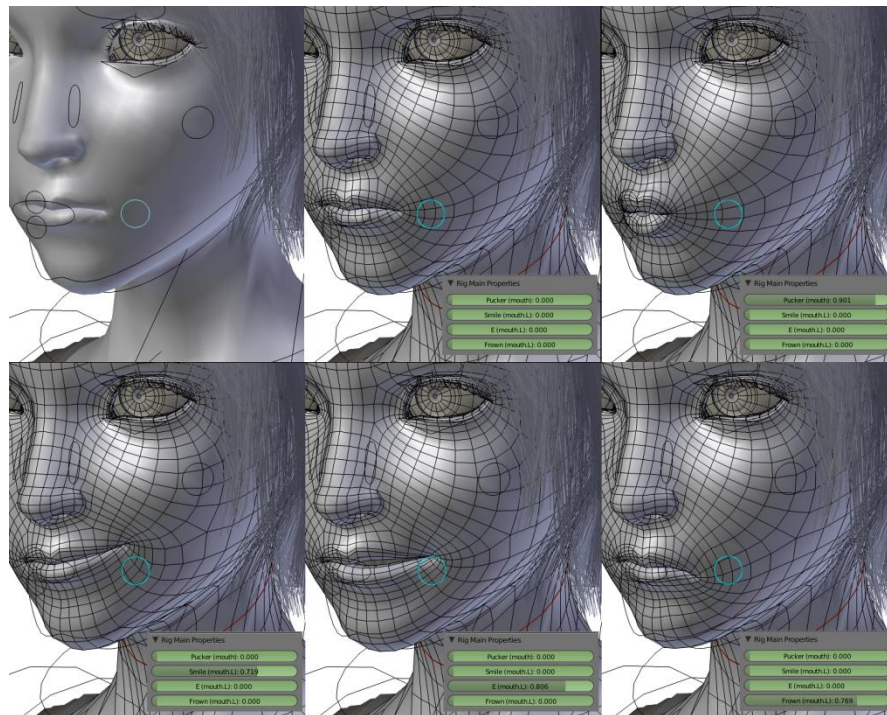
Slika 12. Animacija ključnim položajima

Interpolacija oblika

Interpolacija oblika (eng. *shape interpolation, morphing, blend shapes*) je tehnika animacije slična animaciji ključnim položajima. Animator prvo stvori početni oblik te zatim stvori druge željene oblike (ciljne deformacije). Potom za potrebe animacije sustav radi interpolaciju između početnog položaja i odabranih ciljnih deformacija odnosno između vrhova početnog oblika i vrhova ciljnog oblika [37]. Najčešća upotreba tehnike interpolacije oblika je u animaciji lica. Na slici 13 je pokazan neutralan položaj (gore lijevo) te neki od položaja lica koje animator želi postići. Animacija usta se potom izvodi interpolacijom između ovih položaja.

Prednosti ove metode animacije se gledaju kroz odnos sa skeletalnom animacijom [33]. Glavna prednost je bolja kontrola nad objektima koji su animirani ovom tehnikom zbog vlastoručnog definiranja oblika koji animator želi. U skeletalnoj animaciji zna doći do nepoželjnih i nestvarnih deformacija što se tehnikom interpolacije oblika može teže dogoditi. Interpolacija oblika se pokazala i boljom tehnikom u slučajevima kad animirani objekti ne mogu imati jednostavan kostur (koji je potreban za skeletalnu animaciju) poput

animacije kože, lica i tkanine [33]. Glavni nedostatak tehnike je količina rada potrebna za animaciju. Tehnika uključuje pomicanje svakog vrha objekta zasebno što ovisno o kompleksnosti objekta (količina vrhova) koji želimo animirati može biti izrazito vremenski zahtjevan posao.

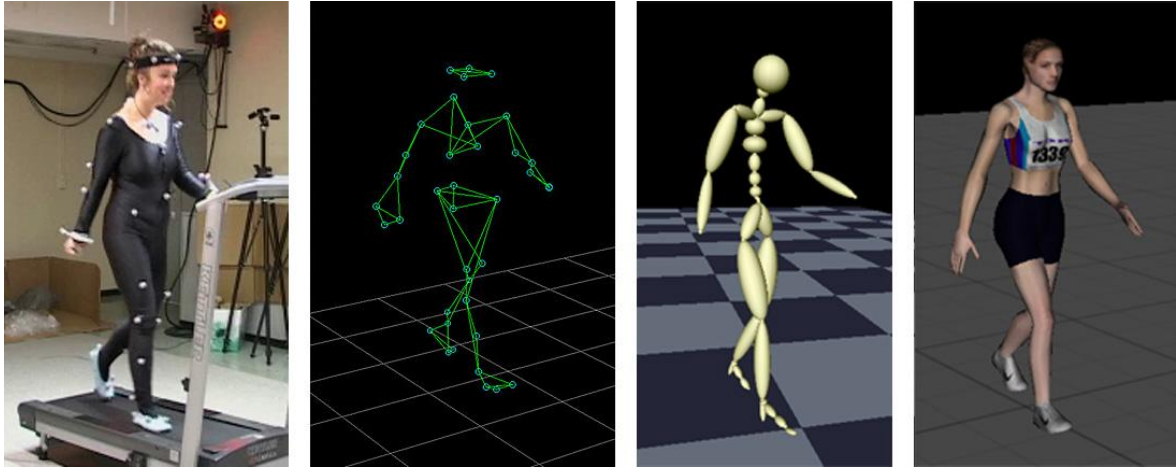


Slika 13. Interpolacija izraza lica

Tehnika snimanja pokreta

Tehnika snimanja pokreta (eng. *motion capture*, *motion tracking*) uključuje snimanje pozicija tijela čovjeka pomoću različitih postupaka slijeđenja. Najčešće je slijeđenje biti izvedeno pomoću elektromagnetskih, mehaničkih, inercijskih te optičkih slijednika. Na taj način je moguće dobiti prirodne i fizikalno ispravne pokrete te je stupanj realističnosti daleko najveći od svih ostalih tehnika animacije. Osim ovoga, prednosti su brzina animacije (moguće je u stvarnom vremenu dobiti rezultate animacije) te puno veća

količina podataka koji se mogu upotrijebiti. Primjer optičkog slijeđenja pomoću markera je prikazan na slici 14.



Slika 14. Optičko slijeđenje pomoću markera

Glavni nedostaci ove tehnike su potrebni alati (slijednici i sustavi za slijeđenje) za snimanje što povećava trošak te u nekim slučajevima može biti nepraktično. Također, ova tehnika je neprikladna za animaciju koja nije fizikalno bazirana odnosno koja ne poštuje zakone fizike (npr. animirani filmovi).

Simulacija gomile

Simulacija gomile je proces opisivanja ponašanja većeg broja jedinki u nekom prostoru. Kao što i samo ime kaže, ovakvi procesi se koriste uglavnom kod animacije velikog broja objekata. U simulacijama gomile nameću se dva oprečna zahtjeva za izvođenje u stvarnom vremenu: realističnost ponašanja simulirane mase te kvalitetna vizualizacija. Nemoguće je udovoljiti oboma zahtjevima u stvarnom vremenu, te se u slučaju industrije zabave simuliranje izvršava tako da se teži visokokvalitetnom prikazu uz manju realističnost ponašanja (osim u video igrama), dok je u drugim granama važnija realističnost ponašanja te kao rezultat toga dolazi manje kvalitetna vizualizacija. U odnosu

na ponašanje samostalne jedinice, ponašanje mase je puno teže modelirati jer se postavljaju zahtjevi raznolikosti i realnog međudjelovanja s ostalim jedinkama i okolinom. Svaka jedinka mora se ponašati samostalno na sebi svojstven način, u skladu sa svojim mogućnostima i osobnošću (raznolikost), mora uzimati u obzir druge jedinice, njihovo kretanje i sveobuhvatno ponašanje (interakcija s ostalim jedinkama) te u obzir uzeti ograničenja i elemente prostora u kojem se nalazi (interakcija s okolinom). Ovisno o zahtjevima koji se postavljaju na ponašanje jedinice te okolini koja ih okružuje, simulacija mase može biti problematična već s par desetaka jedinki. Svoju najveću primjenu simulacija gomile doživljava u industriji video igara te filmskoj industriji (slike 15. i 16.).



Slika 15. Scena iz video igre *Rome: Total War*



Slika 16. Scena iz filma *Gospodar Prstenova* u kojoj je korišten sustav *Massive*.

Tehnike oblikovanja ponašanja jedinki u simulacijama gomile su mnogobrojne. Najčešće su modeliranje ponašanja čestičnim sustavom te modeliranje multiagentskim sustavom. Modeliranje čestičnim sustavom je resursno manje zahtjevno od modeliranja agentskim sustavom, ali je postignuta animacija lošija (nestvarnija) od animacije dobivene agentskim sustavom.

Skeletalna animacija

Skeletalna animacija je tehnika kojom se lik modelira u dva dijela: površinskom prezentacijom odnosno kožom (eng. *skin*) koja je gledatelju vidljiva i hijerarhijom međusobno povezanih kosti (eng. *skeleton, rig*) odnosno kosturom koji je gledatelju nevidljiv, a služi za animaciju površinskog dijela lika [38]. Proces animacije se opisuje kroz deformaciju kože da odgovara novim pozicijama kostura (eng. *skinning*) dok se proces izrade kostura od kosti naziva *rigging*. Nakon izrade kostura, animacija dotičnog se izvodi raznim tehnikama od kojih je najpoznatija inverzna kinematika o kojoj će biti riječ kasnije. Tehnika skeletalne animacije se često koristi u kombinaciji s ranije navedenom tehnikom snimanja pokreta jer se snimanjem i prenošenjem pokreta na kostur može brže i jednostavnije dovesti do realističnih rezultata od klasične skeletalne animacije. Glavna prednost ove tehnike animacije je manji stupanj kontrole likova od strane animatora čime se fokus stavlja na veće pokrete (npr. hodanje, trčanje) za razliku od interpolacije oblika koja se uglavnom koristi za manje pokrete likova, ali uz veći stupanj kontrole. Nedostaci skeletne animacije su vidljivi kod aplikacija tipa pokreti mišića tijela ili lica gdje interpolacija oblika nudi puno bolje (stvarnije) rezultate.

Kinematika

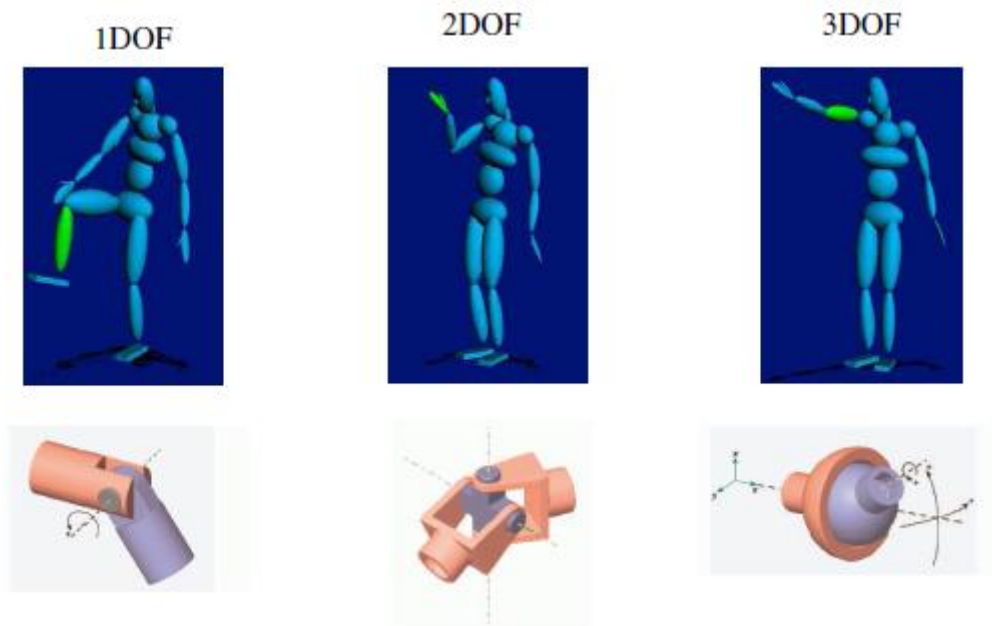
Kinematika se može opisati kao dio mehanike koji opisuje kretanja objekata pritom ne uzimajući u obzir fizička svojstva kao što su masa ili moment te zanemarujući djelovanje sila na objekt. U obzir se uzimaju geometrijska svojstva objekata poput pozicije, orijentacije, brzine itd. Kinematiku je moguće podijeliti na dva glavna područja: direktnu kinematiku te inverznu kinematiku.

Područja koja intenzivno koriste kinematičke principe su robotika i računalna animacija. Najbolji primjer primjene kinematičkih principa je robotska ruka. To je manipulator koji obavlja razne zadaće, a funkcije mu slične ljudskoj ruci. Ovakvi manipulatori imaju široku primjenu u različitim industrijama, npr. automobilske industriji, avio industriji, biomehanici itd.

Stupnjevi slobode

Stupnjevi slobode su skup neovisnih pomaka i rotacija koji mogu opisati poziciju i orijentaciju objekta u prostoru. Objekt koji se kreće u trodimenzionalnom prostoru može imati 3 translacijska stupnja slobode (kretanje odnosno translacija po x , y i z osi) te 3 rotacijska stupnja slobode (također rotacija oko x , y , i z osi) tj. ukupno 6 stupnjeva slobode. Primjer za sustav s 3 stupnja slobode bi mogao biti auto koji se može kretati uzduž i poprijeko (drifting) ravnine te može skretati. Vlak na tračnicama se može kretati samo uzduž tračnica te stoga ima jedan stupanj slobode [11].

Poseban slučaj su sustavi povezanih objekata. U tom slučaju ukupan broj stupnjeva slobode sustava je zbroj stupnjeva slobode svakog pojedinačnog objekta u sustavu. Robotska ruka je primjer sustava povezanih objekata. U tom slučaju, objekti su povezani zglobovima. Zglobovi se po stupnjevima slobode najčešće dijele na zglobove s jednim translacijskim stupnjem slobode (eng. *prismatic joint*), zglobove s jednim rotacijskim stupnjem slobode (eng. *revolute joint*) te na složene zglobove. Na slici 17. se vide zglobovi s različitim stupnjevima slobode.



Slika 17. Zglobovi s različitim stupnjevima slobode

Modeliranje ljudske figure

Ovaj rad se bavi animacijom kretanja ljudskog kostura odnosno ljudske figure. Kako bi kostur bio animiran, prvo je potrebno napraviti model. Welman [18] je predložio sljedeći intuitivni model: ljudske kosti se mogu zamisliti kao niz čvrstih tijela povezanih zglobovima s različitim stupnjevima slobode. Takav niz povezanih segmenata nazivamo kinematičkim lancem odnosno manipulatorom. Svaki manipulator ima svoj korijen i kraj. Korijen manipulatora je točka čije promjena (translacija, rotacija) utječe na sve ostale segmente u kinematičkom lancu. Kraj manipulatora je završna točka manipulatora koja je slobodna odnosno nije povezana zglobom za novi segment. Primjerice, rame predstavlja korijen manipulatora tj. ruke te svaka njegova promjena bi utjecala na sve segmente ruke bi šaka predstavlja kraj manipulatora tj. ruke. U robotici stupnjevi slobode manipulatora mogu biti rotacijske i translacijske prirode, no kod čovjeka su zglobovi samo rotacijske prirode (slika 17.). Također, zglobovi čovjeka imaju mnoga ograničenja na rotaciju. Svaki od ovih segmenata je postavljen u vlastitom koordinatnom sustavu te potom nizom transformacija prebačen u globalni koordinatni sustav.

Kompleksnije strukture ljudskog kostura uključuju izradu hijerarhije stabla [18]. Svaki čvor stabla sadrži jedan zglob i rotacije tog zgloba u odnosu na njegovog roditelja u stablu. Na taj način se osigurava da rotacije u višim slojevima stabla također budu primijenjene na niže čvorove stabla (primjer ramena i šake). Listovi stabla bi bili krajevi manipulatora dok bi korijen stabla bio korijen manipulatora.

Direktna kinematika

Direktna kinematika pronalazi poziciju vrha manipulatora ako su poznate translacije i rotacije svih segmenata kinematičkog lanca. Svaku transformaciju zglobova možemo zamisliti kao konkatenciju [18] translacije i rotacije u odnosu na koordinatni sustav roditelja zgloba i :

$$M_i = T(x_i, y_i, z_i)R(\theta_i) \quad (1)$$

gdje je $T(x_i, y_i, z_i)$ matrica translacije zgloba i u odnosu na njegovog roditelja $i-1$, a $R(\theta_i)$ matrica rotacije zgloba i oko neke od osi zgloba i . Vezu među transformacijama između dva zgloba i i j odnosno između dva koordinatna sustava i i j možemo stoga prikazati kao konkatenciju matrica M :

$$M_i^j = M_i M_{i+1} \dots M_{j-1} M_j \quad (2)$$

Direktnu kinematiku možemo stoga opisati [18] formulom (3):

$$x = f(q) \quad (3)$$

gdje je x konačna pozicija kraja manipulatora, q vektor varijabli zglobova. U slučaju animacije čovjeka, varijable zglobova su kutovi rotacije svakog od zglobova.

Inverzna kinematika

Inverzna kinematika se za razliku od direktne kinematike bavi proučavanjem kako da kraj manipulatora nekog kinematičkog lanca dođe do određene željene pozicije u prostoru odnosno bavi se problemom izračunavanja rotacija i translacija u kinematičkom lancu koje dovode do željene pozicije kraja manipulatora. Ovaj vid (?) kinematike je znanstveno i praktično zanimljiviji, ali i dosta kompliciraniji od direktne kinematike jer skup rješenja problema može biti beskonačan, a može biti i prazan (kad željenu poziciju nije fizički moguće dostići). Time se problem inverzne kinematike može svrstati u probleme planiranja puta (eng. path planning).

Primjena inverzne kinematike je najraširenija u robotici i računalnoj animaciji (kao što je i prije navedeno). U animaciji je lakše i brže odrediti željenu poziciju u prostoru gdje bi kraj manipulatora trebao biti te pustiti da algoritam za inverznu kinematiku izračuna kretanje manipulatora nego manualno postavljati kutove zglobova manipulatora. Primjer za ovakav slučaj je kretanje virtualne ruke u obavljanju neke radnje (npr. uzimanje jabuke sa stola) gdje je lakše odrediti željenu poziciju kraja manipulatora (u ovom slučaju bi ta pozicija bila jabuka na stolu) nego manualno računati svaku moguću pozu odnosno sve rotacije zglobova ruke kako bi animacija izgledala realno. Slična primjena je zastupljena u robotici također. U industrijskim postrojenjima radnici upravljaju robotskim rukama na način da samo postave završnu poziciju, a algoritmi za izračunavanje računaju kutove zglobova robotske ruke.

Problem inverzne kinematike je matematički postavljen u [11] na idući način:

$$\vec{G} = \vec{P}_n(\vec{\theta}) \quad (4)$$

U ovom slučaju, \vec{G} predstavlja željenu poziciju kraja manipulatora, \vec{P}_n je konačna pozicija kraja manipulatora odnosno kinematičkog lanca koji se sastoji od n segmenata, a $\vec{\theta}$ je vektor kutova zglobova u lancu. U slučaju formule (3), problem inverzne kinematike je formuliran kao:

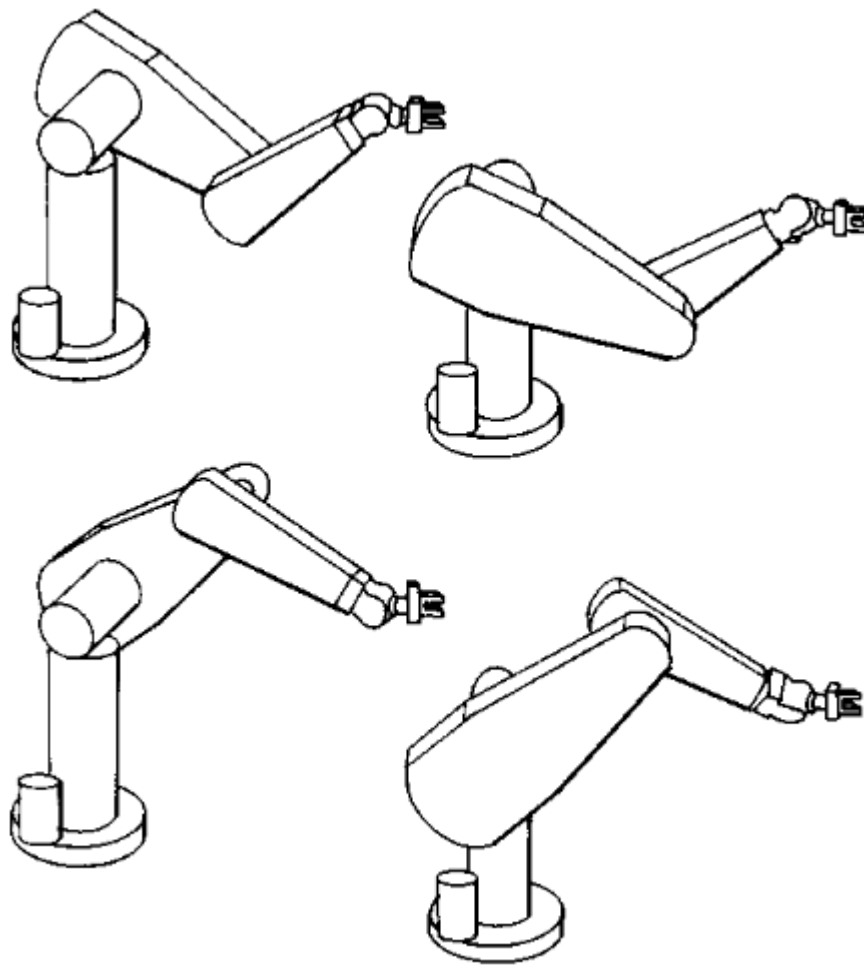
$$q = f^{-1}(x) \quad (5)$$

Funkcija f je nelinearna te kao i kod svake nelinearne funkcije postoje problemi s postojanjem rješenja, s višestrukim rješenjima te metodama rješavanja dotične.

Vidljivo je da rješenje ovog problema može biti višestruko (razne konfiguracije kutova zglobova, slika 5.), a problem može biti i nerješiv (npr. kada je željena točka izvan dosega kinematičkog lanca). Uvođenjem ograničenja odnosno uvjeta koji moraju cijelo vrijeme biti zadovoljeni se prostor rješenja smanjuje i dobiveni rezultati uz optimalne uvjeti bivaju realniji. Primjer za uvjete može biti modeliranje virtualne ljudske ruke. Ona se sastoji od 2 segmenta (nadlaktica i podlaktica) te 3 zglobova (rame, lakat i zapešće). Bez ograničenja svaki od zglobova bi imao 3 rotacijska stupnja slobode pri čemu bi rješenja algoritma inverzne kinematike davala nerealistične rezultate. Uvođenjem ograničenja, npr. davanje samo jednog stupnja slobode laktu, smanjuje broj rješenja algoritma inverzne kinematike te daje realističnije rezultate odnosno bolju animaciju u konačnici.

Dodatni problem može predstavljati postojanje većeg broja krajeva manipulatora koji moraju zadovoljiti jednadžbu (5). Primjer za veći broj krajeva može biti virtualna ljudska šaka u sustavu virtualne ruke gdje svaki prst predstavlja jedan kraj cijelog manipulatora (odnosno virtualne ruke). U tom slučaju prostor rješenja se može povećati.

Također, može se dogoditi da unatoč većem broju krajeva manipulatora, konačno rješenje ne postoji zbog složenosti manipulatora. Osim krajnje željene pozicije manipulatora, kao rješenje se može postaviti i neka ravnina odnosno pravac. U tom slučaju broj rješenja može se povećati, ali isto kao i kod većeg broja krajeva manipulatora, može se u potpunosti izgubiti zbog prevelike složenosti. U slučaju da nema rješenja, najčešće se uzimaju druga rješenja koja su najbliža konačnom po nekom kriteriju.



Slika 18. Robotska ruka PUMA 560

Razvijene su razne metode izračuna pozicije kraja manipulatora. J. Lander [13][14] te J. Craig [15] dijele metode rješavanja problema na metode rješenja u zatvorenom obliku (eng. closed form solutions) i numeričke metode. Rješenja u zatvorenom obliku se

mogu izračunati korištenjem geometrijskih i algebarskih pristupa, a glavna prednost nad numeričkim metodama je brzina. Glavni nedostatak ovog načina rješavanja problema je što je neefikasan za veće kinematičke lance. Također, dokazano je da potpuno rješenje u zatvorenom obliku postoji samo za lance sa 6 stupnjeva slobode uz postojanje uvjeta [15] dok za manje od 6 stupnjeva slobode se treba izračunati neko rješenje koje je "blizu" željenog. Numeričke metode su iterativne metode odnosno djeluju na način da se primjenjuju male promjene sve dok se ne postigne željena pozicija. S obzirom na jako veliki broj tih malih promjena, vremenski su dosta zahtjevnije od metoda rješenja u zatvorenom obliku. Međutim, mogu se primijeniti na lance s velikim brojem segmenata i zglobova što im daje prednost nad ostalim rješenjima.

Analitičke metode

Kao što je navedeno, analitičke metode odnosno metode rješenja u zatvorenom obliku su prihvatljive kada se radi o jednostavnom kinematičkom lancu. U slučaju složenijeg lanca, analitičke metode ili traže rješenje predugo ili ga uopće ne nađu. Analitičke metode se mogu podijeliti na geometrijske i algebarske [15]. Geometrijske se uglavnom svode na rastavljanje prostornih problema na više planarnih te na korištenje zakona trigonometrije dočim algebarske ovise o transformacijskim matricama. Generalno gledano, nema puno razlike među ovim metodama i obje će naći rješenje za jednostavne kinematičke lance koji zadovoljavaju uvjete. Dokazano je da svaki kinematički lanac koja ima rotacijske i translacijske zglobove s 1 stupnjem slobode i sveukupno 6 stupnjeva slobode ima rješenje. Kako su ovakvi lanci prekomplikirani za analitičke metode (već se koriste numeričke metode), uvedeno je ograničenje da se osi tri susjedna rotacijska zgloba moraju sjeći u jednoj točki. Ukoliko je to ograničenje zadovoljeno, moguće je pronaći rješenje za kinematički lanac sa 6 stupnjeva slobode i analitičkim putem [15].

Numerička rješenja

Jacobijeva Matrica

Jacobijeva matrica (drugi naziv Jakobijan) je matrica svih parcijalnih derivacija prvog reda neke funkcije. Ako funkciju $y = f(x)$ koja sadrži m jednažbi s n nepoznanica x_1, x_2, \dots, x_n prikažemo kao

$$y = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix} \quad (6)$$

odnosno

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ y_m = f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (7)$$

Jacobijevu matricu možemo prikazati kao:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial y_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Matrica se može zapisati i u obliku

$$J_F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

te

$$\frac{\partial(y_1, y_2, \dots, y_m)}{\partial(x_1, x_2, \dots, x_n)} \quad (10)$$

Inverz Jacobijeve matrice

Prema teoremu o inverznoj funkciji [7], inverz Jacobijeve matrice inverzne funkcije je Jacobijeva matrica dotične inverzne funkcije [8]. Za funkciju $f: R^n \rightarrow R^n$ i točku p u R^n vrijedi:

$$J_{F^{-1}}(F(p)) = [J_F(p)]^{-1} \quad (11)$$

Pseudoinverz Jacobijeve matrice

Inverz Jacobijeve matrice je nedefiniran u slučaju da Jacobijeva matrica nije kvadratna. U tom slučaju, možemo definirati pseudoinverz. Prema Moore – Penroseovom matičnom inverzu [9], vrijedi:

$$B^+ = (B^H B)^{-1} B^H \quad (12)$$

odnosno

$$B^+ = B^T(BB^T)^{-1} \quad (13)$$

Rješenje preko Jacobijeve pseudoinverzne matrice

Eberly [12] je predložio da krajnju poziciju manipulatora \vec{P} možemo zapisati kao funkciju $\vec{P} = \vec{F}(\vec{\theta})$ gdje je $\vec{\theta}$ vektor kutova zglobova sustava. Ako poziciju \vec{P} zamislimo kao pokretnu odnosno ukoliko je prikažemo kao funkciju vremena t , onda derivaciju dotične pozicije možemo zapisati kao:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = D\vec{F} \frac{d\vec{\theta}}{dt} \quad (14)$$

U ovom izrazu $D\vec{F}$ je Jacobijeva matrica:

$$D\vec{F} = \left[\frac{\partial F_i}{\partial \theta_j} \right] \quad (15)$$

pri čemu je F_i i-ta komponenta funkcije \vec{F} , a θ_j je j-ta komponenta $\vec{\theta}$. Ako se s \vec{G} označi željena pozicija i ako se kao aproksimacija izraza $d\vec{P}/dt$ uzme izraz $\vec{G} - \vec{P} = \vec{G} - \vec{F}(\vec{\theta})$,

može se pisati:

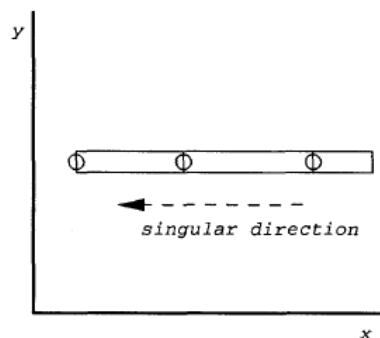
$$\vec{G} - \vec{F}(\vec{\theta}) = D\vec{F}(\vec{\theta}) \frac{d\vec{\theta}}{dt} \quad (16)$$

Upotrijebivši pseudoinverz Jacobijeve matrice, iz formule (16) proizlazi izraz:

$$\frac{d\vec{\theta}}{dt} = D\vec{F}^+(\vec{\theta}) (\vec{G} - \vec{F}(\vec{\theta})) \quad (17)$$

Uz poznatu vrijednost $\vec{\theta}$, gornja jednađba omogućava osvježavanje pozicije koristeći diferencijalni operator (eng. *forward difference operator*) za aproksimaciju vremenske derivacije kutova zglobova. Ovaj postupak se iterativno ponavlja dok se ne ostvari neki od kriterija.

Problemi kod ovog rješenja su vremenski spor izračun te nestabilnost oko singularnosti. Primjer za singularitet se može vidjeti na slici 19. U ovom slučaju mala promjena u kutovima zglobova će rezultirati uvijek istim pomakom kraja manipulatora u smjeru y-osi



Slika 19. Primjer singulariteta

Princip virtualnog rada

Rad se može zapisati na dva načina:

$$\Delta W = F \Delta x \quad (18)$$

$$\Delta W = \tau \Delta q \quad (19)$$

U prvom slučaju, rad ovisi o sili F primijenjenoj na nekom pomaku Δx . U drugom ovisi o okretnom momentu τ i promjeni kuta Δq . Dvije formule zbog očuvanja energije u svim koordinatnim sustavima možemo izjednačiti:

$$F \Delta x = \tau \Delta q \quad (20)$$

te zapisati kao:

$$F^T \Delta x = \tau^T \Delta q \quad (21)$$

Uzevši u obzir formulu za direktnu kinematiku preko Jacobijeve matrice:

$$\Delta x = J \Delta q \quad (22)$$

Supstitucijom se dolazi do:

$$F^T J \Delta q = \tau^T \Delta q \quad (23)$$

$$F^T J = \tau^T \quad (24)$$

odnosno nakon transponiranja:

$$\tau = J^T F \quad (25)$$

Rješenje preko Jacobijeve transponirane matrice

Drugi način koji iskorištava Jacobijevu matricu nema problema sa singularitetima. Ako se pretpostavi neka sila koja privlači kraj manipulatora k željenoj poziciji, ona se može zapisati kao u [27]:

$$F = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T \quad (26)$$

U jednadžbi f_x , f_y i f_z predstavljaju sile koje djeluju na vrh manipulatora dok su m_x , m_y i m_z uvijanje vrha. Spoerl u [32] je zapisao matricu sile identično, ali s obzirom na to da zanemaruje orijentaciju vrha, dio matrice s uvijanjem po osima je jednak 0:

$$F = [f_x \ f_y \ f_z \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (27)$$

Izraz (17) se može upotrijebiti u principu virtualnog rada pri čemu se okretni moment u formuli (25) može zapisati kao vektor brzina zgloba [32]:

$$\dot{q} = J^T F \quad (28)$$

Integracijom izraza (28) dobiva se vektor q koji sadrži vektore rotacije koji trebaju biti primijenjeni na svaki zglob kako bi rezultat (odnosno kraj manipulatora) bio bliži željenoj poziciji. Silu F je Spoerl [32] definirao kao razliku između trenutne pozicije

manipulatora i željene pozicije manipulatora odnosno kao ukupnu grešku koju treba minimizirati:

$$e(t) = x_e(t) - x_t(t) \quad (29)$$

gdje je $x_e(t)$ krajnja pozicija manipulatora, a $x_t(t)$ željena pozicija. Premda je prednost nepostojanje singulariteta i računalno jeftiniji izračun, može doći do neproporcionalnog kretanja zglobova koji su relativno udaljeni od kraja manipulatora (zbog većeg okretnog momenta) te generalno sporije konvergira k rješenju od metode koja koristi pseudoinverznu Jacobijevu matricu.

Metoda prigušenih najmanjih kvadrata

Metoda prigušenih najmanjih kvadrata (eng. *damped least squares method*) je poboljšanje metode preko pseudoinverzne Jacobijeve matrice. Ova metoda smanjuje probleme nestabilnosti rješenja oko singularnosti. Buss [39] rješenje preko Jacobijeve matrice opisuje slično kao (slično formuli (16)):

$$\vec{e} = J\Delta\theta \quad (30)$$

gdje je \vec{e} vektor razlike između željene pozicije i trenutnog vrha manipulatora, J Jacobijeva matrica, a $\Delta\theta$ vektor kutova zglobova manipulatora. Umjesto traženja minimalnog vektora $\Delta\theta$ koji daje najbolje rješenje, u ovoj metodi se traži takav $\Delta\theta$ koji minimizira izraz:

$$\|J\Delta\theta - \vec{e}\|^2 + \lambda^2\|\Delta\theta\|^2 \quad (31)$$

gdje je λ konstanta prigušenja, $\lambda \in \mathbb{R}, \lambda \neq 0$. Iz (31) može se pisati:

$$\left\| \begin{pmatrix} J \\ \lambda I \end{pmatrix} \Delta\theta - \begin{pmatrix} \vec{e} \\ 0 \end{pmatrix} \right\| \quad (32)$$

Odgovarajuća normalna jednačba je:

$$\begin{pmatrix} J \\ \lambda I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} J \\ \lambda I \end{pmatrix} \Delta\theta = \begin{pmatrix} J \\ \lambda I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \vec{e} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (33)$$

odnosno:

$$(J^T J + \lambda^2 I)\Delta\theta = J^T \vec{e} \quad (34)$$

Dokazano je da je izraz $J^T J + \lambda^2 I$ nesingularan [39] te se može pisati:

$$\Delta\theta = (J^T J + \lambda^2 I)^{-1} J^T \vec{e} \quad (35)$$

U (35) izraz $J^T J$ je $n * n$ matrica gdje je n broj stupnjeva slobode. Ukoliko se $(J^T J + \lambda^2 I)^{-1} J^T$ zapiše kao $J^T J J^T + \lambda^2 I^{-1}$, slijedi iz (35):

$$\Delta\theta = J^T(JJ^T + \lambda^2 I)^{-1} \vec{e} \quad (36)$$

Jednadžba (36) je pogodnija od (35) zbog manjih dimenzija matrica [39]. Konstanta prigušenja λ ovisi o karakteristikama manipulatora i potrebno ju je pažljivo izabrati tako da metoda daje dobre rezultate u blizini singularnosti te da relativno brzo konvergira.

Rastav singularnih vrijednosti

Rastav singularnih vrijednosti (eng. *singular value decomposition, SVD*) je metoda kojom se vrši faktorizacija realnih ili kompleksnih matrica. U [44] je Jacobijeva matrica rastavljena na:

$$J = UDV^T \quad (37)$$

gdje su U i V ortogonalne, a D dijagonalna matrica. U matrici D vrijednosti različite od 0 se nalaze na dijagonali matrice, $\sigma_i = d_{ii}$. Za Jacobijevu matricu dimenzija, $m \times n$, vrijedi da su matrice U i V dimenzija $m \times m$ i $n \times n$. U tom slučaju je matrica D dimenzija $m \times n$. Uz pretpostavku da vrijedi $m \leq n$ te $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$, rang matrice J je jednak najvećoj vrijednosti r gdje $\sigma_r \neq 0$ i $\sigma_i = 0$ za $i > r$. Rastav Jacobijeve matrice možemo pisati kao:

$$J = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (38)$$

gdje su u_i i v_i stupci matrica U i V . Pseudoinverz matrice D se može napisati kao:

$$d_{ij}^+ = \begin{cases} 1/d_{ij}, & \text{za } d_{ii} \neq 0 \\ 0, & \text{za } d_{ii} = 0 \end{cases} \quad (39)$$

Stoga se pseudoinverzna Jacobijeva matrica može napisati kao:

$$J^+ = VD^+U^T \quad (40)$$

odnosno:

$$J^+ = \sum_{i=1}^r \sigma_i^{-1} u_i v_i^T \quad (41)$$

Metoda pseudoinverznih prigušenih najmanjih kvadrata

Metoda pseudoinverznih prigušenih najmanjih kvadrata koristi rastav singularnih vrijednosti na rješenju koje nudi metoda prigušenih najmanjih kvadrata (formula (36)).

Izraz $JJ^T + \lambda^2 I$ se rastavlja:

$$JJ^T + \lambda^2 I = (UDV^T)(VD^T U^T) + \lambda^2 I = U(DD^T + \lambda^2 I)U^T \quad (42)$$

Izraz $DD^T + \lambda^2 I$ u (42) je dijagonalna nesingularna matrica s vrijednostima $\sigma_i^2 + \lambda^2$ čiji je inverz $m \times m$ dijagonalna matrica s vrijednostima $(\sigma_i^2 + \lambda^2)^{-1}$. Prema tome možemo izraz iz formule (36) pisati kao:

$$J^T(JJ^T + \lambda^2 I)^{-1} = VD^T(DD^T + \lambda^2 I)^{-1}U^T = VEU^T \quad (43)$$

gdje je E dijagonalna matrica dimenzija $m \times n$ za koju vrijedi:

$$e_{i,i} = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \quad (44)$$

Prema (43) i (44) se rješenje metode najmanjih kvadrata (43) može prikazati i kao:

$$J^T(JJ^T + \lambda^2 I)^{-1} = \sum_{i=1}^r \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} u_i v_i^T \quad (45)$$

Glavna prednost ovog pristupa nad „običnim“ je bolje ponašanje blizu singulariteta.

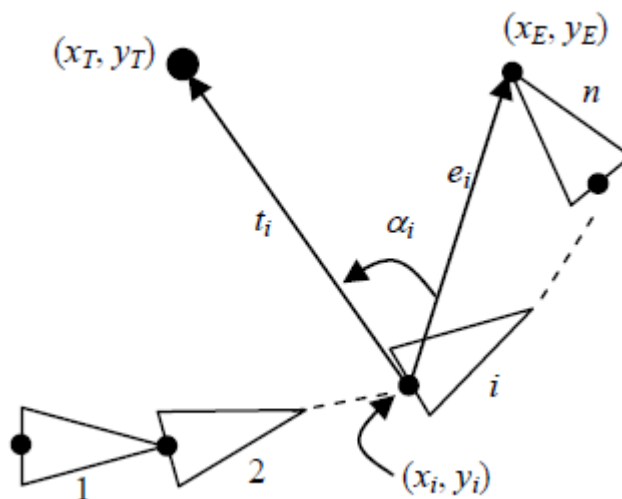
CCD algoritam

CCD (*cyclic coordinate descent*) je iterativni algoritam koji u minimizira udaljenost kraja manipulatora od željene pozicije na način da mijenja orijentaciju i poziciju svakog zgloba u kinematičkom lancu. U svakoj iteraciji se događa promjena varijabli zglobova kinematičkog lanca. Svaka promjena ima za cilj minimizirati funkciju pogreške. Rješenje (ako postoji) se nalazi relativno brzo. Algoritam počinje od krajnjeg segmenta (vrha manipulatora) i zaustavlja se na prvom segmentu (korijenu kinematičkog lanca). Algoritam je jednostavniji za implementaciju od do sada nabrojanih, ali pojedina rješenja koja nudi nisu pogodna za animaciju ljudskog kostura [16].

Algoritam se pseudokodom može prikazati:

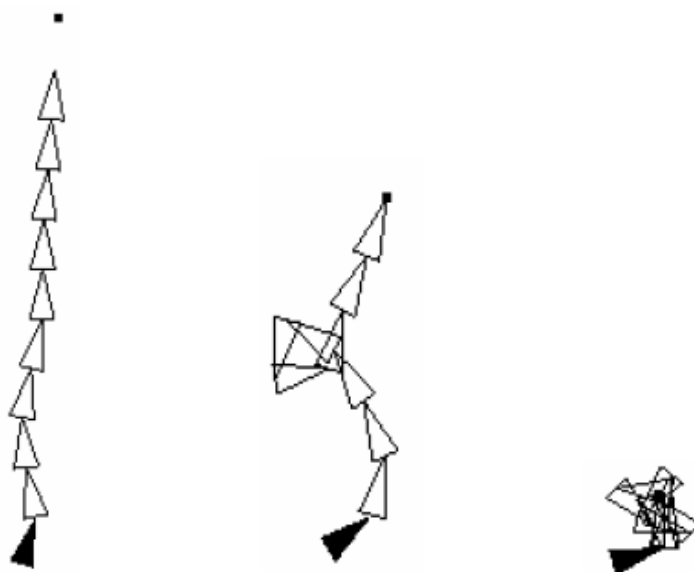
```
Dok vrh manipulatora prilazi bliže željenoj poziciji  
{  
    Za svaki segment od kraja do korijena  
        Za svaki stupanj slobode  
            Izračunaj kut koji približava  
            kraj manipulatora željenoj poziciji;  
        }  
}
```

Slika 20 preuzeta iz [19] opisuje algoritam. Na slici točka $T(x_T, y_T)$ je željena završna točka, točka $E(x_E, y_E)$ je vrh manipulatora, e_i je vektor od zgloba i do vrha manipulatora, t_i je vektor od zgloba i do željene točke, a α_i kut između vektora e_i i t_i . Vidljivo je da je u svakoj iteraciji potrebno odrediti kut α_i kako bi kraj manipulatora bio bliži željenoj poziciji odnosno kako bi algoritam konvergirao k rješenju.



Slika 20. Grafički prikaz CCD algoritma

Problemi u izvođenju CCD algoritma su objašnjeni u [19] te su prikazani na slici 21:



Slika 21. Problemi u izvođenju CCD algoritma

U lijevom slučaju na slici 21. jednostavno rješenje može biti postignuto samo rotacijom korijena kinematičkog lanca. Međutim, kako CCD algoritam kreće od kraja manipulatora, izvode se mnoga izračunavanja koja nisu potrebna. U srednjem slučaju moguće je naći jednostavnije rješenje koje ne tvori petlju drugim algoritmima. U desnom slučaju sa slike se vidi problem kad je završna točka preblizu korijenu te dolazi do stvaranja višestrukih petlji što može biti nepoželjno. Generalno CCD za neke relativno jednostavne slučajeve računa preveliki broj koraka te time troši računalne resurse. Prednosti i nedostaci CCD algoritma dani su u tablici 1.

Valja napomenuti da u svakom od slučajeva u [19] kinematički lanac je predstavljen s 10 zglobova što najčešće neće biti slučaj kod modeliranja ljudske figure. Također, ne postoje ograničenja na zglobovima što i dovodi do pojave petlji.

Prednosti	Nedostaci
Troši malo računalnih resursa	Može dovesti do čudnih rješenja (petlje i sl.)
Efektivan u većini slučajeva	Nema nužno glatko kretanje manipulatora
Stabilan oko singularnosti	U nekim slučajevima postoje bolje metode zbog manjeg broja koraka – manjeg vremena računanja rješenja
Jednostavna implementacija	
Može biti kombiniran s drugim optimizacijskim metodama	

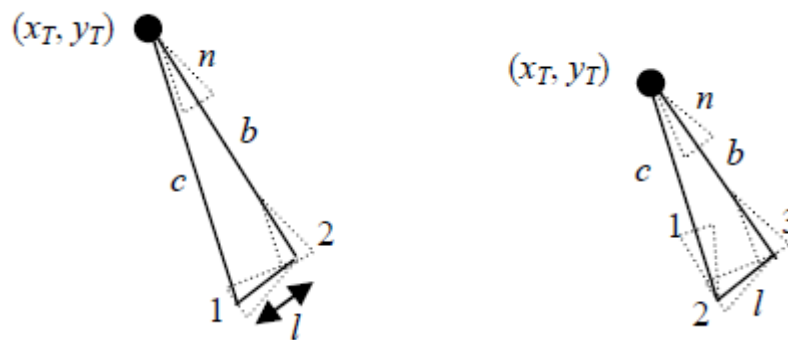
Tablica 1. Prednosti i nedostaci CCD algoritma

Triangulacijski algoritam

Muller – Cajar i Mukundan [20] su razvili triangulacijski algoritam te dokazali njegovu iskoristivost u slučajevima kada je CCD algoritam bio problematičan (slika 21). Triangulacijski algoritam uzima u obzir ukupnu udaljenost željene pozicije od korijena kinematičkog lanca te rotira cijeli manipulator prema željenoj točki. U slučaju kad kraj manipulatora ne može doseći željenu poziciju, najbolje rješenje je postignuto kada je lanac „izravnat“. U slučaju da je željenu poziciju moguće doseći, algoritam pokušava stvoriti trokut koji ima takvu konfiguraciju da je kraj manipulatora na željenoj poziciji (slika 22). Na slici je brojem 1 označen prvi zglobov u lancu odnosno korijen, brojem 2 drugi itd.

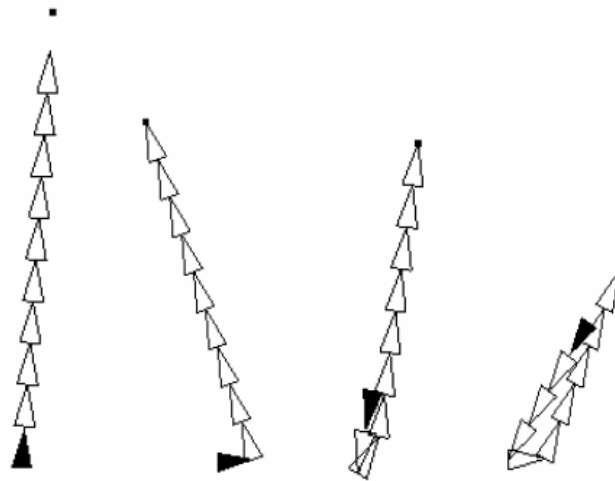
Slovo l predstavlja duljinu jednog zgloba, a b i c duljine stranica trokuta. Da bi kraj manipulatora uspio doseći željenu poziciju, mora biti ispunjen uvjet:

$$b - l \leq c \leq b + l \quad (46)$$

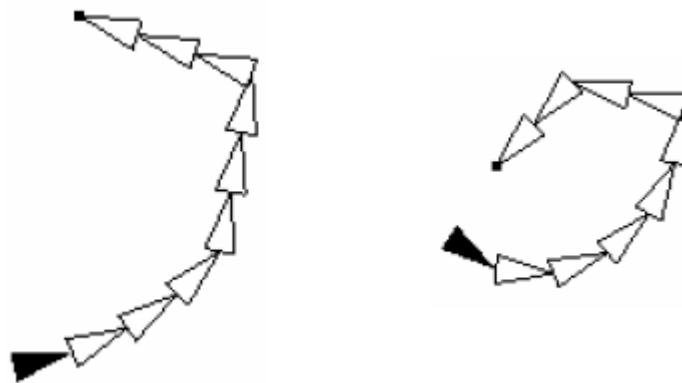


Slika 22. Rješenja triangulacijskog algoritma

Ukoliko je željena pozicija relativno udaljena od korijena kinematičkog lanca, rješenje će biti jednako lijevoj strani slike 22. U suprotnom slučaju, kad je željena pozicija relativno blizu korijenu kinematičkog lanca, rješenje algoritma će biti slično desnoj strani slike. U tom slučaju se prvi segment lanca (korijen) okreće u suprotnom smjeru od vektora prema željenoj poziciji. Problem kod ovakvih rješenja su relativno veliki kutovi zglobova čime uz puno ograničenja kutova i manji broj segmenata u lancu algoritam postaje neupotrebljiv. U [19] je predloženo poboljšanje kako da se izbjegnu veliki kutovi na način da se prvi segment ne okreće suprotno od vektora prema željenoj poziciji već da kraj manipulatora pod drugim (manjim) kutom pokuša doseći željenu poziciju. Na slici 23. su prikazana rješenja dobivena običnim triangulacijskim algoritmom dočim su na slici 24. prikazana rješenja dobivena poboljšanim triangulacijskim algoritmom.



Slika 23. Rješenja dobivena triangulacijskim algoritmom



Slika 24. Poboljšani algoritam triangulacije

Kombinacija analitičkih i numeričkih metoda u inverznoj kinematici

U svom radu, D. Tolani, A. Goswami i N.I. Badler [6] su predstavili skup algoritama za inverznu kinematiku ljudske noge ili ruke. Njihov model odnosno kinematički lanac ljudske ruke posjeduje 7 stupnjeva slobode. Osim same pozicije, algoritam rješava probleme prostorne orijentacije i probleme ciljanja. Premda njihov skup algoritama većinom analitički rješava problem inverzne kinematike, u nekim slučajevima su bili primorani koristiti numeričke metode. Pritom su analitičkim metodama uspjeli smanjiti dimenziju numeričkih problema na samo jednu nepoznanicu i time smanjiti prostor

rješenja algoritma te ubrzati rad sustava. Usporedba metoda je pokazala brže izvođenje nego kod običnih numeričkih i optimizacijskih algoritama te vizualno bolje rezultate.

Rješenja pomoću tehnika strojnog učenja

Algoritmi strojnog učenja zbog svoje sposobnosti da na temelju relativno malog broja ulaznih podataka mogu raspoznati kompleksne uzorke ponašanja te generalizirati u donošenju odluka predstavljaju zanimljiv odabir načina rješavanja problema inverzne kinematike. Grochow, Martin, Hertzmann i Popović su u svom radu [33] predstavili zanimljiv način rješavanja problema inverzne kinematike pomoću naučenog vjerojatnosnog modela ljudskih poza pri čemu su korišteni principi Gaussovih procesa učenja. Glavna ideja je učenje funkcije distribucije vjerojatnosti (eng. *probability distribution function*) iz podataka o kretanju te korištenje naučenog sustava za izbor novih poza tijekom izvođenja inverzne kinematike. Njihov sustav kao ulaz prima 42-dimenzionalni vektor koji se sastoji od kutova zglobova te pozicije i orijentacije korijena kinematičkog lanca. Izlaz is sustava predstavljaju nove poze koje su određene ulazom i parametrima naučenog sustava. Grochow, Martin, Hertzmann i Popović pokazali su da ovako naučen sustav može raditi u stvarnom vremenu te da daje realistične rezultate (poze ljudskog tijela). U području robotike je također bilo uspješnih pokušaja primjene tehnika strojnog učenja na probleme inverzne kinematike. Primjeri se mogu naći u [34], [35] i [36].

ARKineMan

Za potrebe ovog rada je izrađeno programsko rješenje odnosno aplikacija koja je nazvana *ARKineMan*. Aplikacija prezentira dio mogućnosti inverznih kinematičkih sustava u animaciji likova. Nakon proučavanja već navedenih algoritama za probleme inverzne kinematike, odlučeno je da će implementirani algoritam biti CCD (*cyclic coordinate descent*) zbog činjenice da pokriva velik broj slučajeva koji se mogu dogoditi, male potrošnje računalnih resursa te stabilnosti i jednostavnosti implementacije.

Upotrijebljene tehnologije

Programsko rješenje rada je izvedeno u programsku jeziku *C# 3.0*. Korišteno je *Microsoftovo* programsko okruženje (eng. *programsko okruženje*) *.NET 3.5*, a razvojno okruženje je bilo *Microsoft Visual C# 2008 Express Edition*. Cilj je bio prvo implementirati inverzni kinematički sustav u okruženju virtualne stvarnosti te ga potom prenijeti u okruženje dopunjene stvarnosti. Za izradu okruženja virtualne stvarnosti korišten je *Microsoft XNA Game Studio 3.1*.

Microsoft XNA Game Studio je programsko okruženje koje služi za izgradnju interaktivnih video igara. *XNA* je napravljen od strane *Microsofta* kako bi oslobodio programere video igara od pisanja kôda koji se ponavlja. Video igre mogu biti pisane u bilo kojem jeziku koji podržava *.NET* programsko okruženje, ali je službeni jezik *XNA* programskog okruženja *C#*. *XNA* osim iscertavanja ima mnogo više mogućnosti poput podrške za zvuk ili mrežnu komunikaciju te je kompatibilan s raznim fizikalnim i grafičkim pogonima.

Za ostvarivanje dopunjene stvarnosti je korišteno programsko okruženje *Goblin XNA* [41]. To je platforma korištena za istraživanje trodimenzionalnih korisničkih sučelja u okruženjima virtualne i dopunjene stvarnosti. Platforma koristi mogućnosti već navedenog *XNA* programskog okruženja te je vrlo lako integrirati njene mogućnosti u projekte rađene u *XNA Game Studio*. Jezik u kojem su pisane komponente *Goblin XNA*

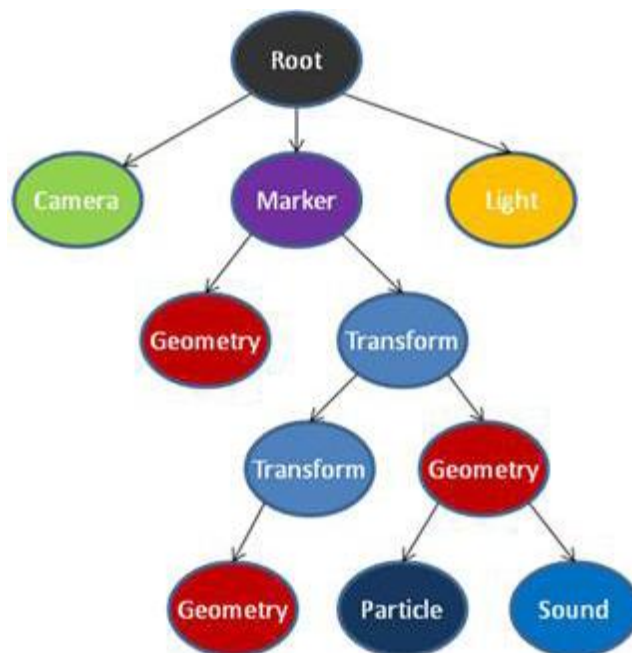
programskog okruženja je *C# 3.0* te su ova činjenica kao i mogućnost korištenja u okruženju *XNA Game Studio* glavni razlozi zbog kojih je ovo programsko okruženje odabrano za implementaciju rada.

Okruženje dopunjene stvarnosti

Kao što je spomenuto, dopunjena stvarnost je ostvarena korištenjem *Goblin XNA* programskog okruženja. U nastavku će ukratko biti objašnjene osnove ovog programskog okruženja.

Goblin XNA

Glavni dio *Goblin XNA* tvori hijerarhijski usmjereni graf scene. Graf scene je struktura pomoću koje se slaže logički prikaz scene. Dotični graf u *Goblin XNA* nema cikluse, odnosno svaka grana ima svoj kraj (list). Graf se sastoji od čvorova različitih vrsta. Primjer jednog takvog grafa je dan na slici 25.



Slika 25. Primjer grafa u programskom okruženju *Goblin XNA*

Trenutni graf scene u *Goblin XNA* može biti napravljen od 10 vrsta čvorova:

- *Geometry*
- *Transform*
- *Light*
- *Camera*
- *Particle*
- *Marker*
- *Sound*
- *Switch*
- *LOD (Level Of Detail)*
- *Tracker*

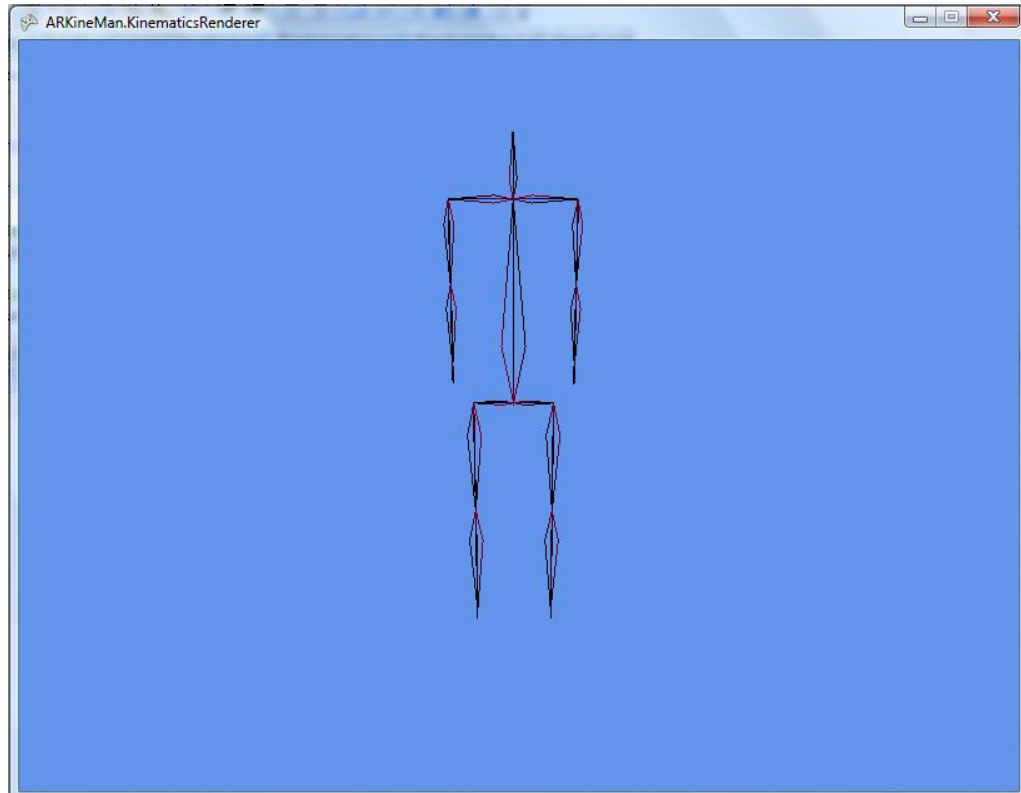
Od ovih 10 čvorova, 6 ih može imati djecu: *Geometry*, *Transform*, *Marker*, *Switch*, *Level Of Detail* i *Tracker*. *Geometry* čvor predstavlja geometrijske objekte odnosno geometrijske modele u sceni. Oni mogu biti učitani ili napravljeni od definiranih grafičkih primitiva. Svaki čvor može predstavljati samo jedan objekt te njegove karakteristike poput materijala, fizikalnih svojstava, prozirnosti itd. *Transform* čvor je zadužen za geometrijske transformacije (translacija, skaliranje i rotacija) svih čvorova koji su mu djeca, dok *Camera* i *Light* predstavljaju kameru u okruženju te izvor svjetla. Čvor *Marker* je također zadužen za transformacije svoje djece, no za razliku od *Transform* čvora, transformacija se određuje na temelju matrice sa šest stupnjeva slobode koja se računa za jedan ili polje markera [42]. Marker se raspoznavaju pomoću algoritama računalnog vida iz slike koja dolazi iz kamere, a uzorci markera u sustav se unose različitim konfiguracijskim datotekama s parametrima koji su svojstveni svakom jedinstvenom markeru odnosno polju markera. Ostali čvorovi nisu u ovom slučaju toliko zanimljivi jer nisu upotrijebljeni u ovom radu. Više o čvorovima i općenito o funkcioniranju i karakteristikama *Goblin XNA* programskog okruženja može se naći u [42] i [43].

Sustav inverzne kinematike

Sustav inverzne kinematike kao algoritam za rješavanje problema inverzne kinematike koristi CCD algoritam. Za potrebe simulacije je izrađen žičani model čovjeka (slika 26.). Također, razvijena je virtualna okolina kao testno okruženje za CCD algoritam prije integracije sustava u okruženje dopunjene stvarnosti.

Model čovjeka (slika 26.) se sastoji od devet cjelina:

- Glava
- Torzo
- Lijeva i desna ruka
- Lijeva i desna noga
- Lijevo i desno rame
- Zdjelica



Slika 26. Izgled modela u okruženju virtualne stvarnosti

Glavni dio modela je torzo i on je korijen cijelog modela. Ukoliko dolazi do promjena u položaju torza (odnosno do translacije ili rotacije), svi ostali dijelovi tijela pratit će promjene odgovarajućim transformacijama. Torzo, oba ramena, glava i zdjelica su predstavljeni kao kinematički lanac s jednim segmentom i dva zgloba. Svaki od ostalih dijelova modela predstavlja zaseban kinematički lanac s tri segmenta. Kinematički lanac ruke se sastoji od segmenata koji predstavljaju nadlakticu, podlakticu i šaku. Zbog jednostavnosti modela izostavljeni su prsti na šaci. Slično je napravljen i model noge, od natkoljenice, potkoljenice i stopala. Svaki od zglobova u kinematičkim lancima noge i ruke je na početku imao 3 rotacijska stupnja slobode, no ograničeni su tako da krajnji zglob (kraj manipulatora) ima 2 stupnja slobode, nagib (eng. *pitch*) i skretanje (eng. *yaw*), srednji zglob (koljeno ili lakat) ima jedan stupanj slobode (nagib), a korijen cijelog lanca ima sva 3 moguća rotacijska stupnja slobode. Sveukupno svaki od ovih lanaca ima 6 stupnjeva slobode što je dosta da kraj manipulatora može doći do željene poziciju (ako je ona u dosegu).

Programsko rješenje ovakve logičke strukture je stablo. Korijen lanca predstavlja i korijen stabla. Svaki segment u lancu je predstavljen s čvorom. Svaki od čvorova može imati više djece, a listovi su vrhovi manipulatora. Svaki od čvorova može imati samo jednog roditelja te zna zglobove koji utječu na njegovu poziciju u prostoru. Ovakva struktura je odabrana zbog prikladnosti za implementaciju CCD algoritma. Osnovni zadatak ovog modela je određivanje konfiguracije zglobova i segmenata kinematičkog lanca kako bi se dosegla određena pozicija u prostoru. S obzirom da svako dijete zna svog roditelja, CCD je implementiran pomoću rekurzije gdje svaki čvor nakon izvršavanja algoritma poziva istu funkciju i predaje joj kao argument svog roditelja. Sam algoritam određuje optimalnu konfiguraciju zgloba i poziciju kraja segmenta te u skladu s ograničenjima postavljenima na njega obavlja rotaciju segmenta. Algoritam je opisan pseudokodom:

Izračunaj novu poziciju (segment)

{

Izračunaj vektor od pozicije početka segmenta do pozicije kraja manipulatora;

Izračunaj vektor od pozicije početka segmenta do željene pozicije u prostoru;

Izračunaj kut rotacije i os rotacije;

Rotiraj;

Ako je segment korijen lanca

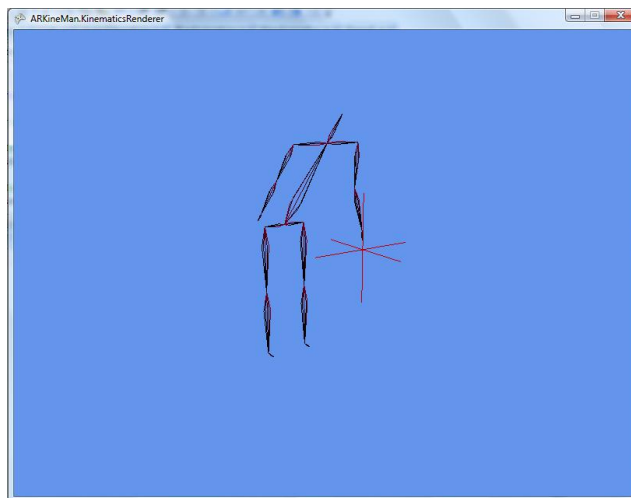
Kraj;

Inače

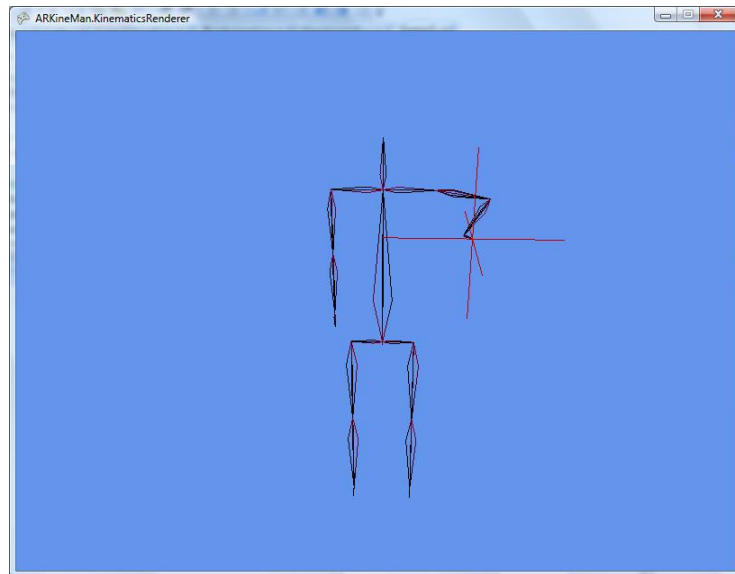
Izračunaj novu poziciju (roditelj);

}

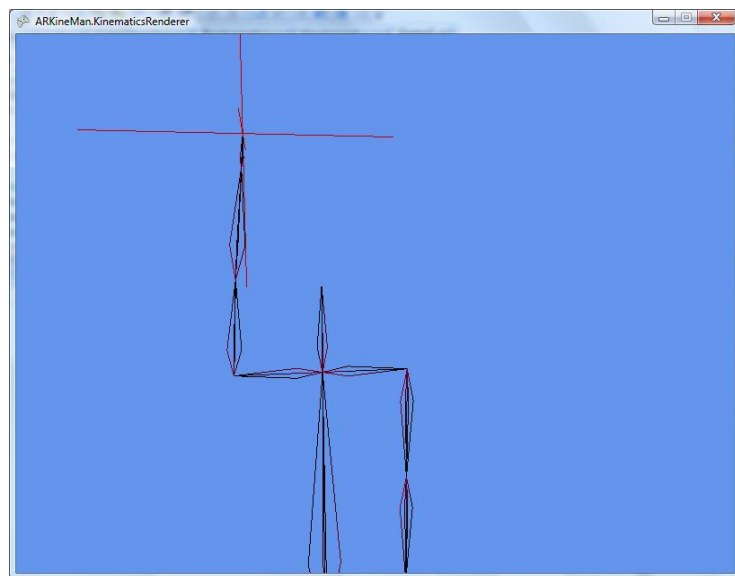
Funkcija *Rotiraj()* osim rotacije samog segmenta koji ju poziva se brine i o djeci dotičnog segmenta tako da se i ostatak lanca rotira u skladu sa segmentom. Pokazan je primjer na slikama 27., 28. i 29. gdje model dohvaća točku.



Slika 27. Implementacija modela u virtualnoj stvarnosti



Slika 28. Implementacija modela u virtualnoj stvarnosti



Slika 29. Implementacija modela u virtualnoj stvarnosti

Uvjet za zaustavljanje sustava inverzne kinematike je dosezanje željene pozicije, a on se postiže minimizacijom euklidske udaljenosti između kraja manipulatora i željene točke.

Uz sustav koji implementira CCD algoritam, izgrađeni su i sustav odlučivanja te sustav za animaciju pojedinih stanja. Sustav odlučivanja donosi odluke o konkretnim akcijama koje model treba izvršiti da bi došao do cilja (dohvaćanja željene pozicije). Odluke ovise o pozicijama modela te željene točke odnosno cilja. Skup odluka uključuje sljedeće naredbe:

- *Skači*
- *Dosegni*
- *Sagni se*
- *Prošetaj*
- *Ne čini ništa*

Svaka naredba sustava za odlučivanje ovisi o mogućnostima modela da dosegne ciljnu točku u prostoru. Tako da ukoliko je točka inicijalno u dosegu jedne od ruku, sustav za odlučivanje izdaje naredbu *Dosegni*. Ukoliko je točka u dosegu samo ako se model sagne odnosno skoči, sustav izdaje jednu od naredbi *Skači/Sagni se*. Naredba *Ne čini ništa* se izdaje ako ciljna točka ne postoji odnosno nije u radnom prostoru sustava, a *Prošetaj* ako je ciljna točka u radnom prostoru sustava, ali ne i u dosegu modela te je potrebno doći do nje. Sustav za animaciju je usko povezan sa sustavom za odlučivanje jer se animacije izvršavaju na temelju odluka koje on donese. Također, vezan je sa sustavom inverzne kinematike jer se animiranje modela izvršava pomoću dotičnog sustava.

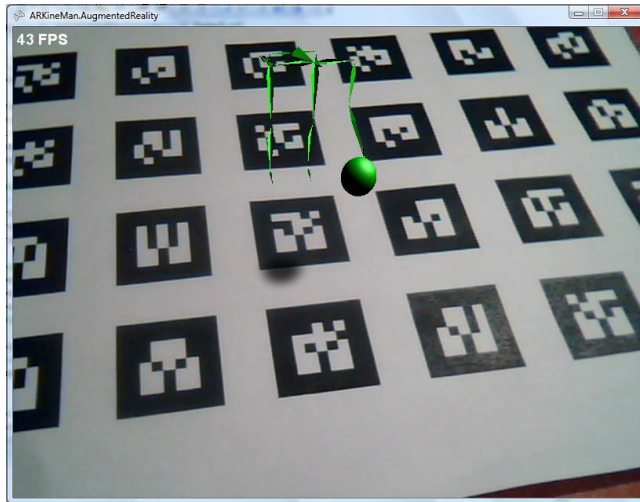
U okruženju dopunjene stvarnosti model je pokazao iste karakteristike kao i u okruženju virtualne stvarnosti što je bilo i očekivano. Najveći problemi pri preseljenju iz jednog okruženja u drugo su bili različito postavljene osi u okruženjima te različiti tip podatka kojim se bilježi pozicija u prostoru.

Rezultati i moguća poboljšanja

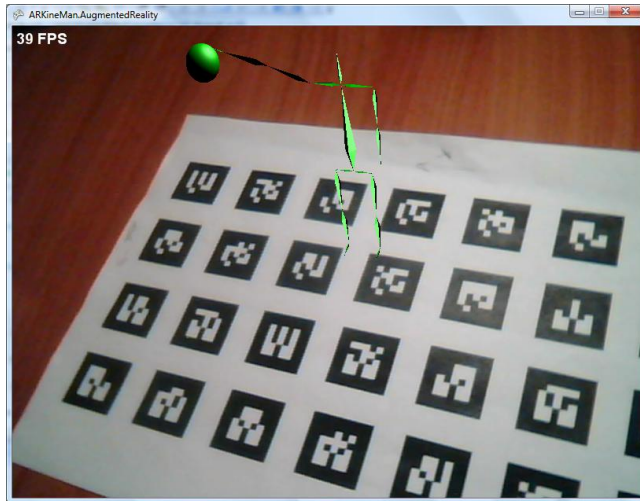
Rezultat ovog rada je aplikacija koja u okruženju dopunjene stvarnosti implementira interaktivni kinematički model koji svoje kretanje ostvaruje preko sustava inverzne kinematike koji implementira CCD algoritam. Dotični algoritam se pokazao kao dobro rješenje u danim uvjetima (broj stupnjeva slobode, broj kinematičkih lanaca, ograničenja zglobova). Problemi su se javili kod nemogućnosti doseg predmeta. U takvim slučajevima je problem bio kod određivanja osi rotacije u algoritmu jer se događalo da vektori između početka segmenta i kraja manipulatora te početka segmenta i željene pozicije budu kolinearni, odnosno da je njihov vektorski produkt bude jednak nuli. Problem je nestao uvođenjem sustava za odlučivanje koji određuje da li je željena pozicija u doseg manipulatora. Drugi problem koji je riješen, također uvođenjem sustava za odlučivanje, je odabir manipulatora koji treba doseći željenu poziciju. Prije uvođenja su oba manipulatora primjenjivala algoritam za doseganje, nakon uvođenja sustava za odlučivanje to radi samo onaj koji je bliži. Primijećeno je i da algoritam sporo konvergira odnosno „usporava“ te radi nepotrebno velik broj koraka što je bliži konačnom rješenju.

Kao moguće proširenje CCD algoritma u obzir dolaze navedene tehnike strojnog učenja kojima bi se mogla povećati stvarnost animacije. Uz ovo se zahtijeva i opširnije proučavanje biomehanike čovjeka (ako se želi postići što realističniji model) te kompleksniji kostur od onog prezentiranog u ovom radu. Postoje slučajevi u kojima model izračuna ispravno rješenje, ali ono ne izgleda uvjerljivo odnosno nije rješenje koje bi čovjek odabrao u stvarnosti. Primjer je slika 28. na kojoj se vidi da je željena pozicija dosegnuta, ali da postoje puno bolja rješenja odnosno prirodnije pozicije ruke za ovakav slučaj. Također, kao moguće proširenje treba spomenuti i uvođenje orijentacije. U tom slučaju funkcija cilja odnosno uvjet za zaustavljanje algoritma postaje kompleksniji.

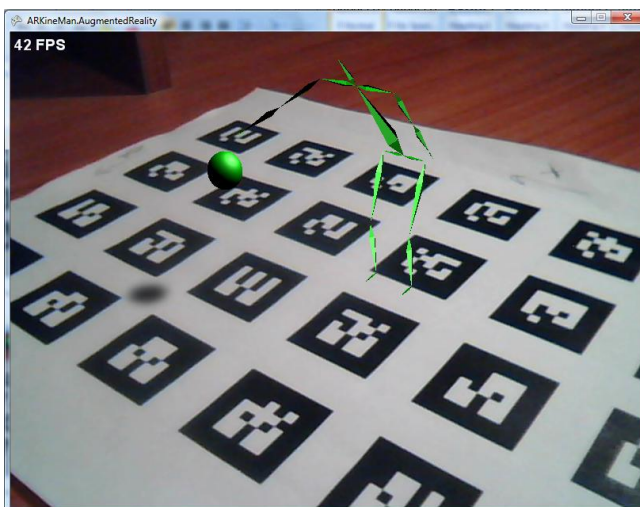
Programsko okruženje za razvijanje dopunjene stvarnosti se pokazao kao zahvalan izbor te nije zadavao veće probleme u radu. Problemi koji su povezani s njim su općeniti problemi sustava dopunjene stvarnosti i već su navedeni na početku ovog rada. Rezultati se mogu vidjeti na slikama 30., 31. i 32.



Slika 30. Model u okolini dopunjene stvarnosti



Slika 31. Model u okolini dopunjene stvarnosti



Slika 32. Model u okolini dopunjene stvarnosti

Zaključak

U ovom radu predstavljena je tehnika animacije likova unutar okruženja dopunjene stvarnosti. Animacija likova je s obzirom na svoj obujam jedno od većih područja unutar računalne animacije te je interesantna velikoj populaciji i ima širok spektar primjena. Tehnike animacije su zasnovane na različitim principa od kojih su fizikalno temeljeni modeli najprihvatljiviji za stvaranje realnih animacija u stvarnom vremenu. U ovom radu su obrađene tehnike animacije zasnovane na principima direktne i inverzne kinematike.

Kinematički principi su se pokazali kao zahvalan način animiranja likova u slučajevima kada se postavlja zahtjev za realnošću animacije. Za postavljanje i rješavanje kinematičkih problema najboljima su se pokazali analitički i numerički postupci. Premda sporiji, numerički postupci u rješavanju kinematičkih problema ipak pokazuju najbolje rezultate te su u najširoj primjeni. U kombinaciji sa sve prisutnijim tehnikama strojnog učenja i umjetne inteligencije te s povećanjem snage prosječnih računala nameću se kao najbolje rješenje za animaciju likova koji zahtijevaju visoku realističnost.

Dopunjena stvarnost je tehnologija koja se rapidno širi i ulazi u velik broj područja. Svojim mogućnostima pruža usluge u raznim djelatnostima inicijalno nevezanim za područje računalne grafike te se zbog svojih prednosti nameće kao alternativa virtualnoj stvarnosti. S obzirom na ogroman potencijal, može se bez problema konstatirati kako je dopunjena stvarnost budućnost kako računalne grafike, tako i drugih polja računarске znanosti te je ova činjenica bila glavni razlog izbora dopunjene stvarnosti kod izrade i implementacije ovog rada.

Literatura

- [1] Milgram, P., Kishino, A. F. Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information and Systems, E77-D, 12 (1994), str. 1321-1329.
- [2] Azuma, R. T. A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, 4 (1997), str. 355-385.
- [3] Robinett, W., Jannick, R. A Computational Model for the Stereoscopic Optics of a Head-Mounted Display. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 1, 1 (1992), str. 45-62.
- [4] Holloway, R. Registration Errors in Augmented Reality. Doktorska disertacija. UNC Chapel Hill Department of Computer Science, 1995.
- [5] Livingston, M. A., Rosenblum, L., Julier, S., Brown, D., Baillot, Y., Swan, J., Gabbard, J., Hix, D. An Augmented Reality System for military operations in urban terrain. Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference 2002, Orlando, FL, (2002), str. 868-875.
- [6] Tolani, D., Goswami, A., Badler, N. Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs. Graphical Models, Volume 62, 5 (2000), str. 353-388.
- [7] *Teorem o inverznoj funkciji*, 14. kolovoza 2006, <http://lavica.fesb.hr/mat1/predavanja/node8.html>, 27. svibnja 2011.
- [8] Wikipedia, *Jacobian matrix and determinant - Wikipedia, the free encyclopedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Jacobian_matrix_and_determinant#Inverse, 27. svibnja 2011.
- [9] Wolfram MathWorld, 30. lipnja 2008., *Moore-Penrose Matrix Inverse -- from Wolfram MathWorld*, <http://mathworld.wolfram.com/Moore-PenroseMatrixInverse.html>, 27. svibnja 2011.

- [10] Das, H. Slotine, J.-E. Sheridan, T.B. Inverse kinematic algorithms for redundant systems. *Robotics and Automation*, 1988. Proceedings, 1988 IEEE International Conference on, Philadelphia, PA, (1988), str. 43-48.
- [11] Wikipedia, *Degrees of freedom (mechanics)* - *Wikipedia, the free encyclopedia*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Degrees of freedom %28engineering%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_%28engineering%29), 27. svibnja 2011.
- [12] Eberly, D. 3D game engine design: A practical approach to real-time computer graphics. 1. izdanje. Morgan Kaufmann, 2000.
- [13] Lander, J. "Graphic Content: Oh My God, I Inverted Kine!", *Game Developer*, (rujan 1998.), str 9-14.
- [14] Lander, J. "Graphic Content: Making Kine More Flexible", *Game Developer*, (studeni 1998.), str 15-22.
- [15] Craig, J.: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 2. izdanje. Addison-Wesley Publishing, Inc., 1989.
- [16] Kim, J.O., Lee, B. R., Chung, C. H., Hwang, J., Lee, W. The inductive inverse Kinematics Algorithm to manipulate the posture of an articulated body. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, Volume 2657/2003, 650, (2003), str. 305-313
- [17] Wang, C., Chen, C.C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Volume: 7, Issue:4, (1991.), str. 489-499.
- [18] Welman, C. *Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation*. Magistarski rad. Simon Fraser University, 1993.
- [19] Mukundan, R. A robust inverse kinematics algorithm for animating a joint chain. *Journal International Journal of Computer Applications in Technology*. Volume 34, 4 (2009), str. 303-308.
- [20] Muller-Cajar, R., Mukundan, R. Triangulation: A New Algorithm for Inverse Kinematics. *Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand 2007*,

Hamilton, Novi Zeland (2007), str. 181–186

[21] Klein, G. Visual Tracking for Augmented Reality. Doktorski rad. King's College, University of Cambridge, 2006.

[22] Geissen, S., Augmented Reality in Surgery, ARSurgeryAusarbeitung2, 3. studenog 2005., *Augmented Reality in Surgery*, [http://www.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-](http://www.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-Domik/teaching/seminar/medical_images/ARSurgeryAusarbeitung2.pdf)

Domik/teaching/seminar/medical_images/ARSurgeryAusarbeitung2.pdf, 1. lipnja 2011.

[23] Fuchs, H., Livingston, M., Raskar, R., State, A., Crawford, J., Rademacher, P., Drake, S. Meyer, A. Augmented Reality Visualization for Laparoscopic Surgery. Proceedings of the First International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Cambridge, MA, SAD (1998), str. 934-943.

[24] Tardif, J.-P., Roy, S., Meunier, J. Projector-Based Augmented Reality in Surgery without Calibration. Engineering in Medicine and Biology Society, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE, Cancun, Mexico (2003), str. 548-551.

[25] Kanbara, M., Okuma, T., Takemura, H., Yokoya, N. A Stereoscopic Video See-through Augmented Reality System Based on Real-time Vision-based Registration. VR '00 Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference, Berkeley, California (2000), str. 255-262.

[26] Wikipedia, *Virtual retinal display - Wikipedia, the free encyclopedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_retinal_display, 1. lipnja 2011.

[27] Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., MacIntyre, B. Recent Advances in Augmented reality. Computer Graphics and Applications, IEEE. Volume: 21, 6 (2001.), str. 34-37.

[28] Pandžić, I.S. Virtualna Okruženja: Računalna grafika u stvarnom vremenu i njene primjene. 1. izdanje, Zagreb: Element, 2004.

[29] Olano, M., Cohen, J., Mine, M., Bishop, G. Combatting Graphics System Latency. Proceedings of 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey, CA, (1995), str. 19-24.

- [30] Wloka, M. M. Lag in Multiprocessor Virtual Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 4, 1 (1995), str. 50-63.
- [31] Kato, H., Billinghurst, M. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99), San Francisco, CA, (1999), str. 85-94.
- [32] Spoerl, M. The Jacobian Transpose Method For Inverse Kinematics. Game Programming Gems 4. Izdanje 4. (2004), str. 193-204.
- [33] Grochow, K., Martin, S., Hertzmann, A., Popović, Z. Style-Based Inverse Kinematics. ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2004. Volume 23, Issue 3 (2004)
- [34] D'Souza, A., Vijayakumar, S., Schaal, S. Learning Inverse Kinematics. Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on, Maui, HI, (2001), str. 298-303.
- [35] Qin, C., Carreira-Perpiñán, M.A. Trajectory Inverse Kinematics by Conditional Density Modes. Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, Pasadena, CA, (2008), str. 1979-1986.
- [36] Daya, B., Khawandi, S., Akoum, M. Applying Neural Network Architecture for Inverse Kinematics Problem in Robotics. *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol.3, No.3, (2010), str. 230-239.
- [37] Wikipedia, *Morph target animation* - *Wikipedia, the free encyclopedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Morph_target_animation, 31. svibnja 2011.
- [38] Wikipedia, *Skeletal animation* - *Wikipedia, the free encyclopedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Skeletal_animation, 31. svibnja 2011.
- [39] Buss, S. Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares methods, <http://www.math.ucsd.edu/~sbuss/ResearchWeb/ikmethods/iksurvey.pdf>, 31. svibnja 2011.
- [40] Regenbrecht, H., Baratoff, G., Wilke, W. Augmented Reality Projects in Automotive and Aerospace Industry. Computer Graphics and Applications, IEEE, Volume 25, Issue 6 (2005), str. 48-56.

- [41] Goblin XNA, *Goblin XNA: A Platform for 3D AR and VR Research and Education*, <http://graphics.cs.columbia.edu/projects/goblin/>, 2. lipnja 2011.
- [42] Goblin Xna User Manual, <https://goblinxna.svn.codeplex.com/svn/doc/User%20Manual.pdf>, 2. lipnja 2011.
- [43] Goblin XNA, <http://goblinxna.codeplex.com/documentation>, 2. lipnja 2011.
- [44] Aristidou, A., Lasenby, J. Inverse Kinematics: A Review of Existing Techniques and Introduction of A New Fast Iterative Solver. <http://www.andreasaristidou.com/publications/CUEDF-INFENG,%20TR-632.pdf>, 1. lipnja 2011.

Sažetak

Interaktivni kinematički model u okruženju dopunjene stvarnosti

U radu su proučeni osnovni načini animacije likova. Detaljnije su proučeni kinematički postupci animacije s naglaskom na inverznu kinematiku. Definiran je problem inverzne kinematike te su opisani razni matematički postupci rješavanja tog problema. Za svaki postupak su opisani njegove prednosti i nedostaci. Izabran je jedan od postupaka te implementiran u virtualnom okruženju. Opisani su prednosti, nedostaci te moguća poboljšanja.

Uz proučavanje kinematičkih postupaka, rad se bavi i okruženjem dopunjene stvarnosti. Ukratko su opisane osnove dopunjene stvarnosti, njezine prednosti te nedostaci te primjena. Kinematički sustav je na kraju uspješno preseljen iz okružja virtualne u okružje dopunjene stvarnosti.

Ključne riječi

Animacija likova, kinematički modeli, inverzna kinematika, CCD algoritam, dopunjena stvarnost

Abstract

Interactive kinematic model in augmented reality environment

This thesis examines character animation techniques with greater emphasis on kinematic techniques, particularly inverse kinematics. The main inverse kinematics problem was defined and mathematical procedures for its solution were presented. Main advantages and disadvantages of each procedure were described and then one of the algorithms, cyclic coordinate descent algorithm, was accordingly selected for further presentation and implementation.

Along with inverse kinematics, this thesis examines the possibilities, advantages and disadvantages of augmented reality environments. Main techniques and technologies for augmented reality realization were presented and discussed. The inverse kinematic system, originally implemented in virtual reality environment, was transferred to augmented reality environment.

Keywords

Character animation, kinematic models, forward kinematics, inverse kinematics, cyclic coordinate descent, augmented reality

Privitak A

Priloženo je programsko rješenje rada. Potrebno je imati kameru spojenu na računalo. Od programske podrške, potrebno je instalirati programske pakete *XNA Game Studio 3.1*, *Microsoft .NET Framework 3.5* i *Goblin XNA 3.5* te odgovarajuću programsku podršku za kameru kao i kalibracijsku datoteku za kameru koja se može dobiti pomoću *Goblin XNA* okruženja. Za prikaz objekata u okruženju proširene stvarnosti potrebno je također tiskati i marker koji je priložen uz programsko rješenje na CD-u.

Model u programskom rješenju ima dva načina rada, aktivni i pasivni. U aktivnom načinu rada model u stvarnom vremenu računa poziciju loptice do koje treba doći i slijedi ju po mapi dok ju korisnik može pomicati. U pasivnom načinu rada korisnik prvo postavi lopticu i zatim pokrene animaciju. Za vrijeme animacije korisnik ne može više pomaknuti lopticu sve dok ne izađe iz pasivnog načina rada. Odabir aktivnog i pasivnog načina rada vrši se pritiskom tipke „I“. Tipkom „Space“ se pokreće animacija ukoliko se model nalazi u pasivnom načinu rada. Tipka „R“ vraća model i lopticu na početne pozicije. Strelicama za gore i dolje loptica se pomiče po y osi, strelicama za lijevo i desno po x osi dok se tipkama „W“ i „S“ određuje visina loptice u sceni. Sve promjene pozicije loptice kao i način rada modela se prate na zaslonu preko sučelja. Sučelje je moguće isključiti i uključiti tipkom „L“.