Razvoj animiranog 3D avatara za analizu dinamičke pristalosti zaštitne odjeće

Tena Risek, Slavenka Petrak, Maja Mahnić Naglić*
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska
*Dopisni autor: maja.mahnic@ttf.unizg.hr

Prispjelo: 25. siječnja 2026.
Prihvaćeno: 18. ožujka 2026.
UDK 687.084.01:677.017

Ovaj je rad licenciran pod licencom
Creative Commons Attribution 4.0 International License

Izvorni znanstveni rad**

U radu je prikazan razvoj animiranog 3D avatara za analizu dinamičke pristalosti digitalnog prototipa uniforme za zaštitu od požara. Analiza dinamičke pristalosti podrazumijeva ispitivanje odjeće na tijelu u pokretu, pri čemu raspon pokreta u kojima se provodi ispitivanje ovise o vrsti i namjeni odjevnog predmeta. CAD sustavi za razvoj digitalnih 3D prototipova odjeće, omogućuju analizu dinamičke pristalosti na animiranim avatarima, ali je dostupnost avatara koji omogućavaju animaciju specifičnih pokreta još uvijek vrlo ograničena. To je ujedno i jedna od istaknutijih prepreka široj primjeni digitalnog prototipiranja u procesu razvoja novih modela odjeće s visokim funkcionalnim zahtjevima. U okviru istraživanja postavljena je metodologija za razvoj avatara, prilagođenog skeniranom 3D modelu ciljanog ispitanika i animaciju specifičnih pokreta, relevantnih za ispitivanje zaštitne uniforme, utvrđenih analizom kinematike pokreta djelatnika službe HGSS-a u interventnim situacijama na temelju video snimki. Razvojni proces po segmentima integrira 3D skeniranje tijela, aplikacije za 3D animaciju i baze podataka o kinematici različitih pokreta u CAD sustav za razvoj digitalnih prototipova. Time se ostvaruju vrlo dobri rezultati s aspekta antropometrijske prilagodbe avatara, a postupak animacije ciljanih pokreta se za krajnjeg korisnika značajno pojednostavljuje i ubrzava, što uvelike doprinosi široj primjeni i mogućnostima analize digitalnih prototipova odjeće u dinamičkim uvjetima.

Ključne riječi: *avatar, 3D animacija; zaštitna odjeća; dinamička pristalost*

Original scientific paper**

Development of an animated 3D avatar for dynamic fit analysis of protective clothing

The paper presents the development of an animated 3D avatar for the digital prototype dynamic fit analysis of a fire protection uniform. Dynamic fit analysis involves testing clothing on the body in motion, where the range of motion in which testing is performed depends on the type and purpose of the garment. CAD systems for the development of digital 3D prototypes of clothing allow the analysis of dynamic fit on animated avatars, but the availability of avatars that enable the animation of specific movements is still very limited. It is also one of the most prominent obstacles to the wider application of digital prototyping in the process of developing new clothing models with high functional requirements. As part of the research, a methodology for the development of an avatar adapted to a scanned 3D model of the target subject and the animation of specific movements, relevant for the examination of the protective uniform, determined by the analysis of the movement kinematics of the HGSS employees in intervention situations based on video recordings was set. The development process integrates 3D body scanning, 3D animation applications, and kinematics databases of various movements into a CAD system for developing digital prototypes. This achieves very good results from the aspect of anthropometric adjustment of avatars, and the process of animation of targeted movements is significantly simplified and accelerated for the end user, which greatly contributes to the wider application and possibilities of analyzing digital clothing prototypes in dynamic conditions.

Keywords: *avatar; 3D animation; protective clothing; dynamic fit*

**Izlaganje na 18. znanstveno-stručnom savjetovanju „Tekstilna znanost i gospodarstvo", 27. siječnja 2026., Zagreb, Hrvatska

1. Uvod

Računalni 3D modeli tijela primjenjuju se u različitim područjima istraživanja i razvoja te ovisno o namjeni moraju zadovoljiti potrebnu razinu realističnosti, kompleksnost geometrije te funkcionalnost s aspekta mogućnosti prilagodbe dimenzija i/ili animacije modela tijela. Ljudsko tijelo je izuzetno složen sustav te je postizanje realističnosti kod modeliranja i animacije računalnih modela ljudskog tijela izuzetno kompleksan zadatak i predstavlja jedno od glavnih ograničenja široj primjeni animiranih avatara u različitim područjima, gdje se razvijaju ergonomski oblikovani proizvodi čija funkcionalnost ovisi o prilagodbi ljudskom tijelu. U području računalnog projektiranja i razvoja digitalnih 3D prototipova odjevnih predmeta, postavljeni su visoki zahtjevi u smislu prilagodbe dimenzija i oblika računalnih modela tijela antropometrijskim karakteristikama ciljanog korisnika, obzirom da se kod 3D simulacije, računalna analiza odjevnog predmeta u dinamičkim uvjetima, odnosno na tijelu u pokretu, temelji na kontaktnoj mehanici između tijela i simuliranog odjevnog predmeta, pri čemu su ponašanje i deformabilnost odjevnog predmeta određeni definiranim parametarima fizikalnih i mehaničkih svojstva tekstilnog materijala [1-5]. Pristalost odjeće tijelu u dinamičkim uvjetima jedna je od atraktivnijih tema u području odjevnog inženjerstva. Dinamička pristalost direktno utječe na funkcionalnost odjevnog predmeta, kao jednog od najvažnijih elemenata u procesu projektiranja zaštitne odjeće. Ljudsko tijelo u pokretu mijenja se u smislu promjena dimenzija na površini, što zahtjeva dodatnu prilagodbu na odgovarajućim dijelovima odjevnog predmeta, kako ne bi došlo do ograničavanja pokreta, odnosno do osjećaja neugode kod korisnika zbog loše pristalosti [6-8]. Simulacijom modela odjevnog predmeta na animiranom modelu tijela, omogućava se analiza deformacije geometrije digitalnog prototipa odjevnog predmeta u kontaktu s tijelom i procjena funkcionalnosti u ciljanim pokretima, prije izrade stvarnih uzoraka modela, što s aspekta održivosti predstavlja značajnu uštedu vremena, materijalnih i financijskih resursa, te smanjenje proizvodnog otpada, u odnosu na tradicionalnu izradu i testiranje većeg broja fizičkih uzoraka.

U CAD sustavima za računalno projektiranje odjeće najčešće su dostupni parametarski modeli tijela koji omogućuju prilagodbu tjelesnih dimenzija, bilo interaktivnim unosom vrijednosti pojedinačnih tjelesnih mjera, što je poprilično kompleksan i dugotrajan proces s ograničenjem u smislu nedovoljno precizne prilagodbe obliku i držanju tijela, bilo direktnim unosom i preklapanjem s modelom tijela dobivenim 3D skeniranjem, pri čemu je potrebno paziti na kompatibilnost položaja tijela ispitanika prilikom skeniranja, dodatnu obradu skeniranih modela u smislu zatvaranja površina na zasjenjenim područjima, kompatibilnost lokalnog koordinatnog sustava unutar 3D objekta te konvertiranje modela u format zapisa i mjerne jedinice koji podržava pojedini CAD sustav [9,10]. No, takvi modeli najčešće ne omogućavaju kretanje ili su mogućnosti animacije ograničene na standardne kretnje poput ljudskog hoda, uobičajeno manekenskog hoda sa svrhom prezentacije modela u obliku virtualnih revija, ili jednostavnije pokrete gornjih i donjih ekstremiteta koji najčešće ne zadovoljavaju potrebe ispitivanja zaštitne odjeće u ciljanim, specifičnim pokretima. U tu svrhu, ovisno o namjeni odjevnog predmeta, razvijaju se animirani avatari, za što je potrebno dobro poznavanje i primjena matematičkih operacija u računalnoj grafici te visoka razina vještine 3D modeliranja i animacije objekata [11-14].

Animacija (lat. *animatio* = oživljavati) se definira kao brzi prikaz dvodimenzionalnih slika ili trodimenzionalnih objekata s ciljem dobivanja privida pokreta, koji nastaje zbog tromosti oka, pri čemu nam utisak slike koju vidimo ostaje u mrežnici oka približno 1/25 sekunde [11]. Intenzivan razvoj animacije započinje u 19. stoljeću s razvojem filmske industrije, dok s pojavom računala animacija pronalazi svoju primjenu u širim područjima poput medicine i inženjerstva, ali najviše je zastupljena u kreativnim industrijama poput filmske industrije te industrije video igara. Računalna 3D animacija je digitalni nasljednik tradicionalne animacijske tehnike kod koje se za animaciju koriste digitalni 3D modeli. 3D animacija podrazumijeva niz metoda i tehnika kojima se objekti u sceni kreću i/ili deformiraju. Kretanje uključuje translacije i rotacije objekata, dok se deformacijom smatra modifikacija oblika 3D objekta, pomicanjem vrhova poligonalne mreže koja definira njegovu površinu. Računalni modeli tijela za animaciju razlikuju se po svojoj kompleksnosti, ovisno o primjeni. Od prvih animiranih modela razvijenih još 70-ih godina prošlog stoljeća, koji se baziraju na jednostavnim geometrijskim primitivama, danas se uglavnom koriste slojeviti modeli, građeni od unutarnjeg kostura koji definira kretanje, na koji se nadograđuje vanjski površinski sloj, koji definira oblik tijela [11,12]. Unutarnji gibljivi kostur predstavlja apstraktni matematički model za upravljanje tijelom, građen od štapićastih, krutih segmenata povezanih gibljivim zglobovima, čiji su pokreti definirani kao set hijerarhijski povezanih transformacija kontroliranih pozicijama zglobova, a razlikuju se po broju krutih segmenata i zglobova te po stupnjevima slobode gibanja u zglobovima [15,16]. Unutarnji kostur kreira se metodom „rigginga“, pri čemu se određuju razina pokretljivosti modela i mogućnosti kod same animacije. Vanjski površinski model predstavlja površinski

sloj kože tijela, čiji su pokreti i deformacija uvjetovani kretnjama unutarnjeg kostura. Povezivanje unutarnjeg kostura s površinskim modelom naziva se „skinning“ tehnika, a podrazumijeva definiranje utjecaja pomaka unutarnjeg kostura na kretanje i deformaciju površinskog modela preko težinskih koeficijenata [11]. Svaka kost ima definiran težinski koeficijent u odnosu na svaki vrh poligona površinskog modela koji pomiče, a konačna pozicija pojedinog vrha je zbroj vrijednosti pomaka svih kostiju koje utječu na pomak tog vrha, pomnožen s težinskim koeficijentom utjecaja pomaka odgovarajuće kosti. Dodatno se primjenjuju različiti algoritmi za aproksimaciju fizikalnih parametara interakcije više anatomskih slojeva, najčešće mišićnog sloja i preslikavanje deformacija u jedinstveni deformabilni površinski model [11,16,17]. Danas se u komercijalnoj upotrebi mogu pronaći različiti plug-inovi primjenjivi u CAD programima za 3D animaciju, poput Autodesk Maye ili Motion Buildera koji više ili manje realistično aproksimiraju deformacije mišića te se pravilnim odabirom metoda i tehnika u razvoju animiranog modela tijela može postići zadovoljavajuća razina realističnosti deformacija ovisno o namjeni modela.

Osim vrste digitalnog 3D modela za animaciju, vrlo je bitna i sama tehnika animacije. Najčešće se koristi animacija tehnikom ključnih položaja ili *key-frame* tehnika koja predstavlja digitalnu verziju klasične crtaće animacije. Bazira se na postavljanju digitalnog 3D modela tijela u ključne položaje na vremenskoj crti, pri čemu se u međukoracima izvodi interpolacija parametara i generira cjelovita animacija. Svaka sličica označava pomak objekta u određenom vremenskom razdoblju, stoga razmak između ključnih položaja definira brzinu kretanja tijela, odnosno animacije, a broj ključnih položaja na vremenskoj crti ovisi o kompleksnosti animacije. Metoda zahtjeva dobro poznavanje biomehanike pokreta ljudskog tijela i visoku razinu vještine 3D animacije, obzirom da se između definiranih ključnih položaja provodi linearna interpolacija kod koje lako dolazi do neprirodnih međupoložaja i mehaničkih pokreta. Obzirom na iskazane poteškoće, za animaciju se često koriste podaci o kretanju snimljeni primjenom *Motion Capture* (MoCap) sustava, koji sadrže parametre prirodne dinamike pokreta i mogu se prenijeti na računalni 3D model tijela, Kompleksna dodatna obrada MoCap podataka kao i visoka cijena takvih sustava uvelike ograničavaju primjenu ove metode uglavnom na filmsku i industriju video igara [11,12,18].

2. Eksperimentalni dio

2.1. Analiza kretanja djelatnika gorske službe spašavanja u interventnim situacijama i definiranje karakterističnih pokreta za ispitivanje dinamičke pristalosti odjeće

Zbog specifičnih uvjeta rada djelatnika HGSS-a i potrebe za izvođenjem preciznih i fizički zahtjevnih zahvata, vrlo je važno identificirati specifične pokrete u interventnim situacijama. Time se osigurava bolje razumijevanje potreba djelatnika i omogućava učinkovitije projektiranje i razvoj funkcionalne uniforme, uz poštivanje važećih aktualnih relevantnih normi zaštitne odjeće [19-22]. U tu svrhu, na temelju javno dostupnih videozapisa stvarnih intervencija djelatnika HGSS-a, provedena je analiza pokreta, pri čemu su identificirane karakteristične i ponavljajuće tjelesne kretnje, odnosno skupine pokreta relevantne za ispitivanje funkcionalnosti zaštitne HGSS uniforme u dinamičkim uvjetima, sl.1, [23,24].

Selektirano je pet skupina specifičnih pokreta koji uključuju povećano opterećenje pojedinih dijelova tijela te koji bi potencijalno mogli uzrokovati povećana naprezanja i deformacije zaštitne uniforme na određenim zonama, tab.1. Na temelju provedene analize definiran je set od osam specifičnih položaja tijela za daljnje istraživanje i razvoj animacija digitalnog avatara.



a. b. c. d. e.

Sl.1 Analiza kinematike kretanja pomoću video snimki interventnih akcija djelatnika službe HGSS-a: a. penjanje po užetu, b. spuštanje po užetu, c. podizanje i prenošenje nosila, d. pružanje prve pomoći, e. signalizacija helikopteru [23,24]

Tab.1 Skupine specifičnih kretnji utvrđene analizom video snimki interventnih akcija HGSS službe

Prva skupina pokreta - Penjanje i spuštanje po užetu, sl.1a i 1b [23]
Penjanje - Istovremeni pokreti ruku prema gore, pri čemu dlanovi dosežu i hvataju klin koji se nalazi na užetu. Povlačenjem klina prema dolje ruke se savijaju u zglobovima lakta, a šake približavaju području prsa, pri čemu se uz odgurivanje nogu od vertikalne površine i naizmjeničnim savijanjem i ispružanjem u zglobovima kukova i koljena tijelo podiže na višu razinu. *Spuštanje* - Tijelo je blago nagnuto unatrag radi održavanja ravnoteže. Jednom rukom se pridržava klin, dok se drugom kontrolirano otpušta uže, pri čemu su obje ruke savinute u laktovima. Noge su oslonjene na vertikalnu površinu te se naizmjenično savijaju i ispružuju u zglobovima kukova i koljena. - Ponavljajući, sinkronizirani pokreti ruku i nogu, izraženo savijanje i opružanje u zglobovima ramena, laktova, kukova i koljena.
Druga skupina pokreta - Pružanje prve pomoći, sl.1c [23]
- Iz uspravnog tjelesnog položaja izvodi se iskorak jednom nogom uz simultano savijanje koljena i postepeno spuštanje koljena druge noge do podloge, nakon čega se koljeno prve noge također prebacuje na tlo i tijelo ostaje u klečećem položaju. - Trup se savijanjem u području kukova naginje prema naprijed, uz spušnje zdjelice prema listovima, što dovodi do dodatnog savijanja nogu u području koljena. - Trup se po potrebi rotira u lijevu i desnu stranu, dok se rukama izvode razni pokreti iz ramena i laktova, poput posezanja, prenošenja i ispuštanja. - Pokreti ističu potrebu za funkcionalnim oblikovanjem zaštitne uniforme u području koljena, kukova, trupa i ruku, kako bi se osigurala komocija za fleksibilnost pokreta.
Treća skupina pokreta - Podizanje i prenošenje nosila s unesrećenom osobom, sl. 1d) [23]
- Iz uspravnog tjelesnog položaja trup se naginje prema naprijed te uz blago savijanje nogu u koljenima zauzima položaj polučučnja. - Iz položaja polučučnja jednom rukom se prihvaća nosilo, nakon čega se pozicija tijela vraća u uspravni položaj, uz istovremeno podizanje nosila. - Slobodna ruka, postavljena je pod kutom od približno 45° u svrhu održavanja ravnoteže.
Četvrta skupina pokreta - Prelazak preko prepreka poput debla stabla i stijena [23]
- Savijanje obje noge u zglobovima koljena pri čemu se jedna noga podiže, prebacuje preko prepreke i spušta na tlo sa druge strane, nakon čega naizmjenično slijedi ista kretnja suprotnom nogom. - Izraženo savijanje i pokretljivost u zglobovima kukova i koljena.
Peta skupina pokreta - Signalizacija i komunikacija s helikopterom, sl. 1e) [24]
- Iz uspravnog stojećeg položaja, ruke se podižu iznad glave formirajuci oblik slova „Y“, što zahtjeva slobodu pokreta na području ramena i nadlaktica te dobru pristajalost odjeće, osobito u uvjetima snažnog strujanja zraka. - U trenutku približavanja helikoptera, tijelo se radi održavanja stabilnosti spušta na tlo u poluklečeći ili čučeći položaj.

2.2. 3D skeniranje ispitanika u definiranim karakterističnim položajima tijela

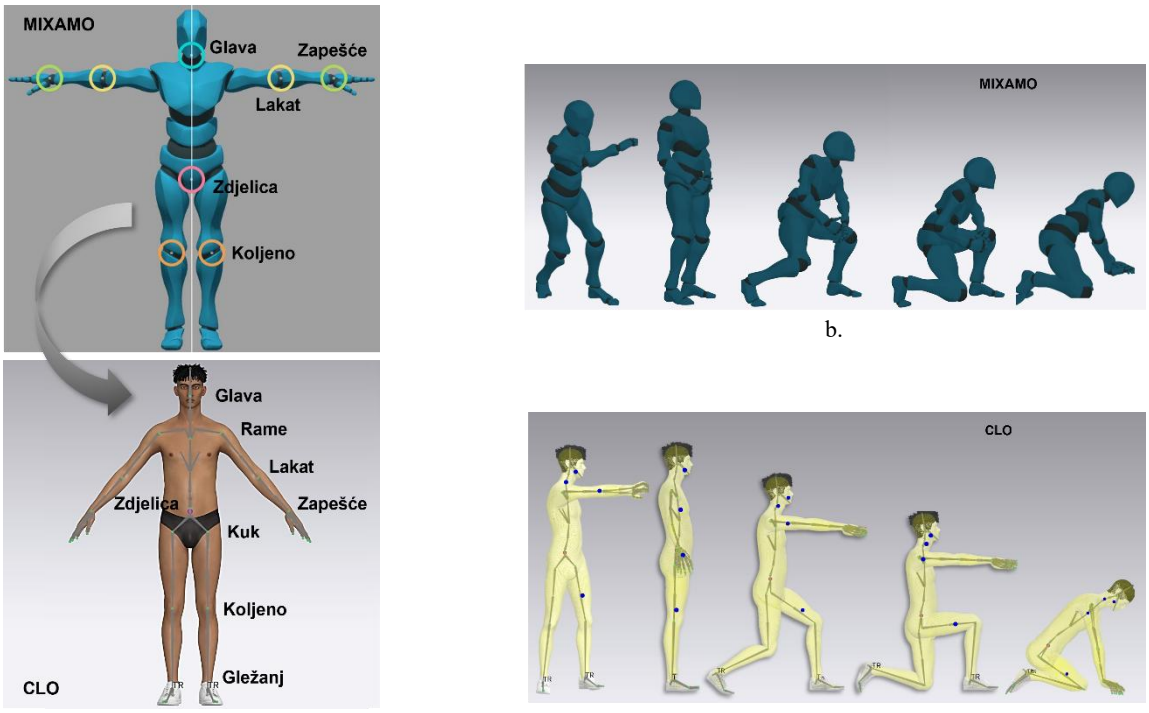
Primjenom 3D skenera tijela VITUS Smart i programskih paketa ScanWorx V2.7.2. i Anthroscan tvrtke Humanetics, izvedeno je skeniranje muškog ispitanika u uspravnom stajaćem položaju, te je na temelju utvrdenih tjelesnih mjera izvedena prilagodba parametarskog 3D modela prema individualnim antropometrijskim karakteristikama ispitanika. Ispitanik je dodatno skeniran u osam definiranih karakterističnih položaja, sa svrhom kontrole i komparacije krajnjih položaja tijela u procesu razvoja animacije.

2.3. Animacija avatara u definirani set pokreta

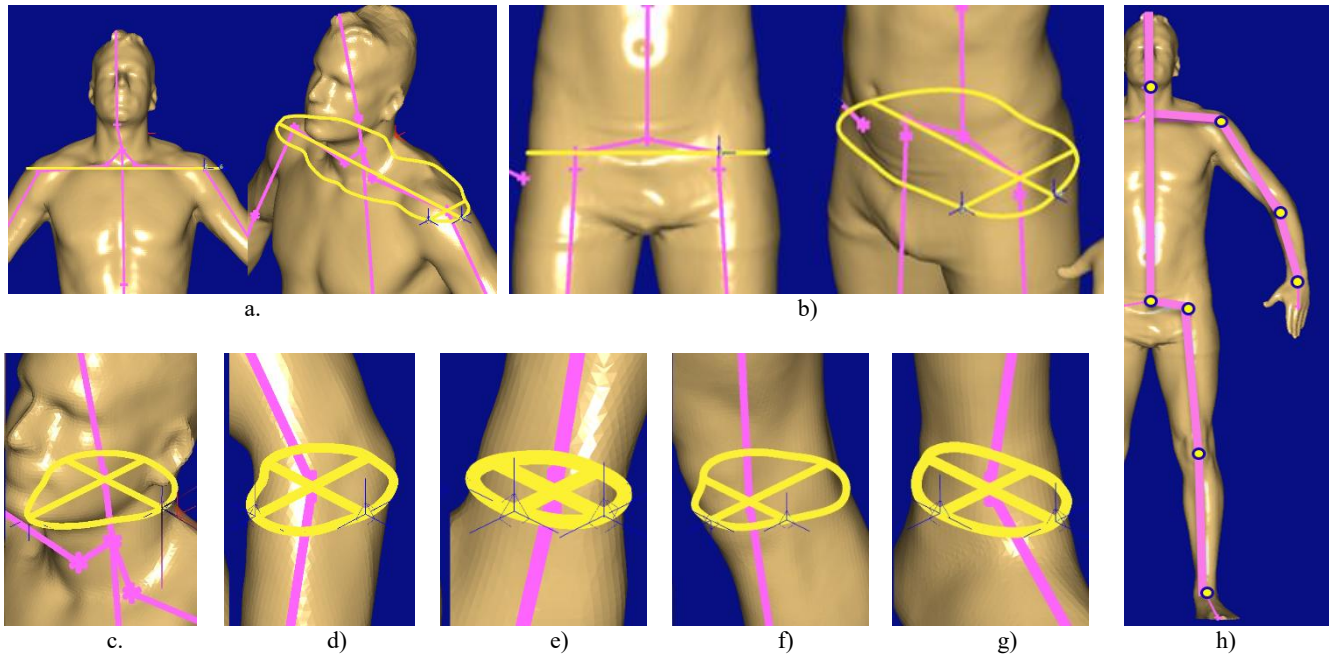
Za animaciju avatara korišteni su podaci o kinematici pokreta dostupni u bazi platforme Mixamo. Mixamo je aplikacija tvrtke Adobe, koja omogućuje automatsku tehniku rigginga i primjenu unaprijed definiranih animacija na 3D modele tijela. Aplikacija koristi algoritme za prepoznavanje morfologije ljudskog tijela, na temelju kojih se generira unutarnji hijerarhijski model kostura i automatsku skinning tehniku za povezivanje kinematičkih pomaka unutarnjih zglobova s površinskim modelom. Kroz aplikaciju je dostupna velika baza podataka o kinematici različitih pokreta u fbx formatu zapisa, koji se dodatno mogu prilagođavati u različitim CAD programima za 3D animaciju [25].

U tom smislu, iz Mixamo baze selektirani su pokreti koji najbliže odgovaraju setu prethodno definiranih pokreta i položaja tijela, relevantnih za ispitivanje zaštitne odjeće, sl. 2b). Podaci o pojedinom pokretu učitani su u program za računalno projektiranje i razvoj digitalnih prototipova odjeće CLO i primijenjeni na parametarski 3D model tijela, prethodno prilagođen antropometrijskim karakteristikama skeniranog ispitanika [26].

Pri tome je prvotno analizirana hijerarhijska struktura kinematičkog modela koju generira Mixamo algoritam, u odnosu na hijerarhiju kinematičkog unutarnjeg kostura parametarskog modela tijela koji primjenjuje CLO, sl.2a. Na temelju 3D skeniranog modela tijela i primjenom algoritma za biomehaničku analizu u programu Anthroscan, sl.3, analizirana je hijerarhijska struktura unutarnjeg kostura te su utvrđene koordinate pojedinog zgloba u početnom položaju, na temelju



Sl.2 Razvoj animacije: a. analiza hijerarhije kinematičkog modela u Mixamu i parametarskog CLO modela, b. prikaz animacije i različitih položaja tijela iz Mixamo baze, c. prilagodba krajnjih položaja tijela avatara u programu CLO



Sl.3 Analiza i utvrđivanje koordinata točaka zglobova unutarnjeg kostura skeniranog 3D modela tijela: a. ramena, b. kukovi, c. glava/vrat, d. lakat, e. zapešće, f. koljeno, g. gležanj, h. hijerarhijska struktura unutarnjeg kostura

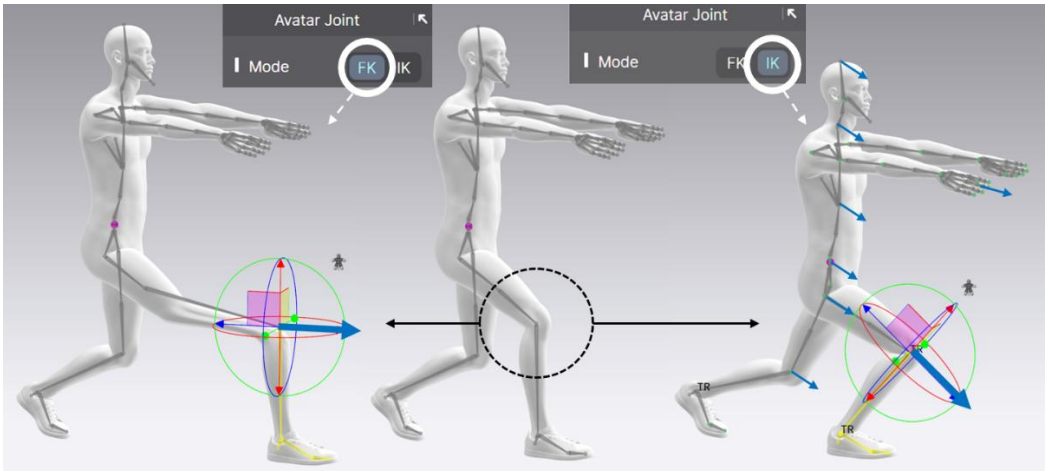
Tab.2 Pomaci koordinata zglobova u odnosu na ishodište hijerarhijske strukture unutarnjeg kostura definirani prema skeniranom 3D modelu

Početni položaj P0	Pomaci koordinata u odnosu na ishodište (zdjelicu) [m]			Položaj P6, sl.3f	Pomaci koordinata u odnosu na ishodište (zdjelicu) [m]		
Zglob	x	y	z	Zglob	x	y	z
Zdjelica / ishodište	0	0	0	Zdjelica/ishodište	0	0	0
Glava / vrat	0,582	0,018	0,001	Glava / vrat	0,582	0,018	0,001
Rame L	0,539	0,003	0,201	Rame L	0,539	0,003	0,201
Lakat L	0,284	-0,014	0,372	Lakat L	0,539	0,231	0,201
Zapešće L	0,075	0,093	0,424	Zapešće L	0,539	0,440	0,201
Kukovi L	-0,020	0,000	0,107	Kukovi L	-0,020	0,000	0,107
Koljeno L	-0,458	0,001	0,134	Koljeno L	-0,020	0,459	0,134
Gležanj L	-0,878	-0,055	0,155	Gležanj L	-0,420	0,459	0,155

kojih su izračunati i definirani interaktivni pomaci za dodatnu prilagodbu pozicija zglobova u krajnjim položajima prilagođenog avatara u programu CLO, primjenom funkcija Avatar (Joint) Editor i Animation Editor, kako bi se dobila animacija definiranih pokreta, sl.2c, tab.2.

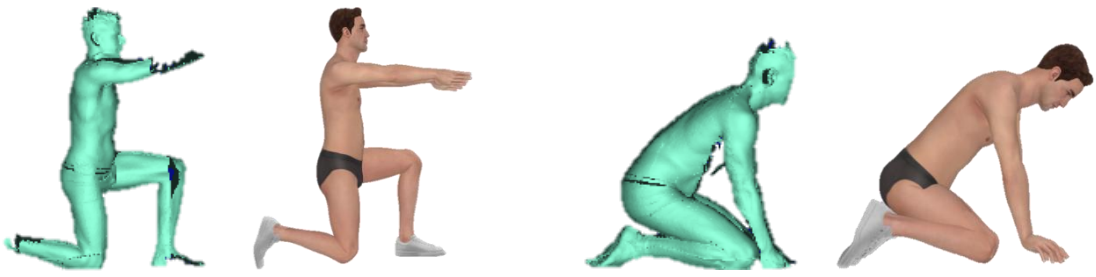
Kod prilagodbe pozicija zglobova u programu CLO primjenjena je metoda inverzne kinematike koja povezuje hijerarhijsku strukturu na način da na temelju postavljene pozicije krajnjeg zgloba, hijerarhijski prilagođava položaj svih povezanih segmenata, sl.4b. Za razliku od direktne kinematike, kod koje su pojedinačni pomaci zglobova neovisni o hijerarhijskoj strukturi te je potrebno prilagođavati svaki pojedinačni zglob što je izuzetno vremenski zahtjevno i dovodi do neprirodnih deformacija geometrije površinskog modela sl.4a, inverzna kinematika osigurava hijerarhijsku kontinuiranost pomaka geometrije što rezultira visokom razinom realističnosti površinskog modela, te onemogućava pomake koji dovode do nerealnih položaja i deformacija [11,12,26].

Kontrola pozicija zglobova izvedena je usporedbom prilagođenog avatara sa skeniranim 3D modelima ispitanika u definiranim položajima, sl.5.



a. b.

Sl.4 Metode prilagodbe pozicija zglobova kinematičkog kostura i primjeri pomaka koljenog zgloba: a. direktna kinematika, b. inverzna kinematika



a. b.

Sl.5 Komparativna analiza skeniranih 3D modela u definiranim položajima i prilagođenog avatara: a. položaj P6, b. položaj P8

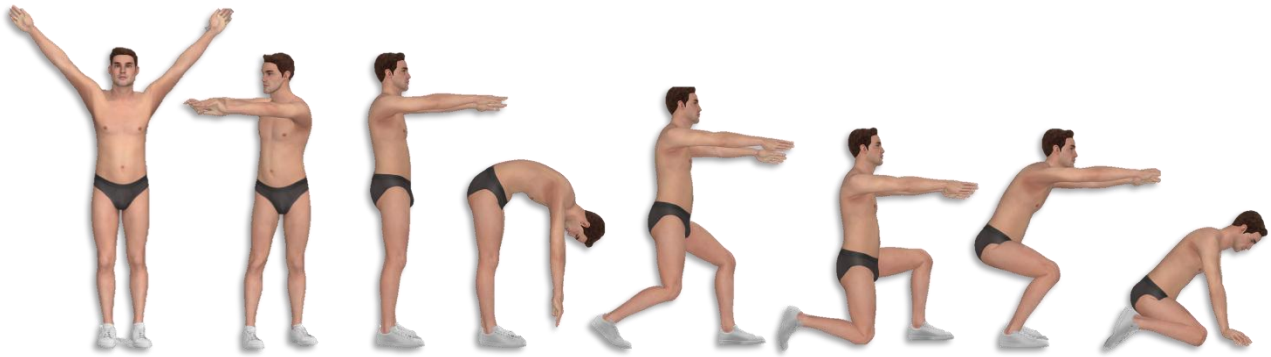
3. Rezultati

Primjenom predložene metodologije razvijen je animirani 3D avatar prilagođen ciljanom ispitaniku, koji omogućuje izvođenje specifičnih pokreta, relevantnih za ispitivanje funkcionalnosti zaštitne uniforme HGSS-a u dinamičkim uvjetima. Integracijom podataka dobivenih 3D skeniranjem tijela i parametarskog modela tijela postignuta je visoka razina usklađenosti geometrije avatara s individualnim tjelesnim mjerama ispitanika. Analiza kinematičke strukture i prilagodba položaja zglobova rezultirala je animacijama koje reproduciraju definirane karakteristične položaje tijela, sl. 6, uz zadržavanje kontinuiteta pokreta i funkcionalne stabilnosti modela unutar CAD sustava.

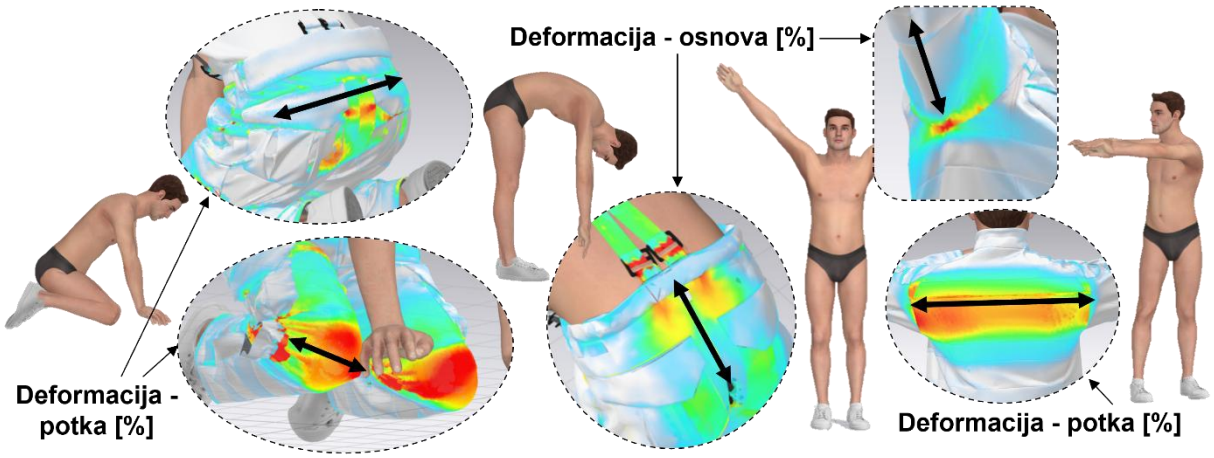
Rezultati istraživanja potvrđuju da korištenje unaprijed definiranih animacijskih podataka, uz dodatnu prilagodbu kinematičkog kostura, temeljenu na biomehaničkoj analizi skeniranog 3D modela tijela ciljanog ispitanika, omogućuje učinkovit i vremenski racionalan razvoj animacija u usporedbi s klasičnim tehnikama ručne animacije, bez značajnog narušavanja razine realističnosti potrebne za analizu dinamičke pristalosti digitalnih prototipova odjeće. Razvijeni avatar uspješno je implementiran u proces računalne simulacije digitalnog prototipa zaštitne uniforme, pri čemu je omogućena analiza deformacija odjevnog predmeta i identifikacija kritičnih zona povećanog naprezanja u ciljanim pokretima, sl.7.

5. Zaključak

U prikazanom istraživanju je razvijena i evaluirana metodologija za razvoj animiranog 3D avatara prilagođenog individualnim antropometrijskim karakteristikama korisnika, s ciljem analize dinamičke pristalosti digitalnog prototipa zaštitne uniforme Hrvatske gorske službe spašavanja. Istraživanje je usmjereno na prevladavanje ograničenja postojećih CAD sustava za projektiranje odjeće, osobito u pogledu dostupnosti antropometrijski prilagodljivih avatara s mogućnošću izvođenja specifičnih pokreta.



Sl.6 Animirani avatar u osam karakterističnih položaja tijela: a. P1 - nadručenje „Y“, b. P2 - rotacija torza, c. P3 -predručenje, d. P4 - pretklon, e. P5 - iskorak sa savijanjem koljena, f. P6 - klečanje s iskorakom, g. P7 - čučanj, h. P8 - klečanje s nagibom trupa prema naprijed



Sl.7 Analiza deformacija digitalnog prototipa zaštitne uniforme HGSS-a u dinamičkim uvjetima kretanja

Provedenom analizom kinematike interventnih aktivnosti djelatnika HGSS-a identificirani su karakteristični pokreti relevantni za ispitivanje funkcionalnosti zaštitne odjeće u dinamičkim uvjetima. Na temelju definirane metodologije, integrirani su postupci 3D skeniranja tijela, prilagodbe parametarskog modela prema individualnim tjelesnim mjerama te primjene unaprijed definiranih animacijskih podataka, uz dodatnu prilagodbu kinematičke strukture unutar CAD sustava. Takav pristup omogućio je generiranje animacija koje u dovoljnoj mjeri reproduciraju stvarnu dinamiku pokreta, uz zadržavanje kontrole nad krajnjim položajima tijela, što se pokazalo kao funkcionalno i vremenski učinkovito rješenje za razvoj animacija koje značajno doprinosi široj primjeni digitalnog prototipiranja u razvoju zaštitne odjeće s visokim funkcionalnim zahtjevima.

Rezultati istraživanja pokazuju da predložena metodologija osigurava visoku razinu geometrijske prilagodbe avatara te omogućuje učinkovitu analizu deformacija i ponašanja digitalnog prototipa odjevnog predmeta u kontaktu s tijelom u pokretu. Time se stvara pouzdana osnova za procjenu funkcionalnosti zaštitne odjeće u ranoj fazi razvoja proizvoda, prije izrade fizičkih prototipova. Analiza digitalnih prototipova odjeće na animiranom modelu tijela omogućuje uvid u deformacije odjevnog predmeta, potencijalna područja ograničenja pokreta i smanjene udobnosti, što značajno doprinosi optimizaciji konstrukcijskih rješenja u skladu s funkcionalnim zahtjevima i održivosti razvojnog procesa, kroz smanjenje materijalnih i financijskih resursa potrebnih za izradu većeg broja fizičkih prototipova.

Objava rada proizašla je iz provedbe institucijskog istraživačkog projekta „Održivi razvoj odjeće dodane vrijednosti: Digitalno prototipiranje, primjena umjetne inteligencije i biomaterijala“, AI3D-BioWear, šifra projekta: TTF-IIP-02, koji financira Europska unija – NextGenerationEU.

Funded by the European Union
NextGenerationEU

Izjava o korištenju alata UI: Pri izradi rada nije korišten je alat UI.

L i t e r a t u r a :

[1] Gupta, D. New directions in the field of anthropometry, sizing and clothing fit. Chapter 1, In: N.Zakaria, D.Gupta (Eds) The Textile Institute Book Series: *Anthropometry, Apparel Sizing and Design* (2nd Edition), Woodhead Publishing, 2020, pp. 3-27. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102604-5.00001-9

[2] Dabolina I.; Lapovska E.; Vilumsone A. Dynamic anthropometry for investigation of body movement comfort in protective jacket, In Majumdar, A., Gupta, D., Gupta, S. (eds) *Functional Textiles and Clothing*. Springer, Singapore **2019**. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7721-1_20

[3] Zhang, D. Krzywinski, S.; Kyosev, Y. Possibilities for simulating clothing in motion on person-specific avatars. In *Proceedings of 3DBODY.TECH 2021 12th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies*, Lugano, Switzerland, **2021**. p.08, https://doi.org/10.15221/21.08

[4] Jevšnik, S.; Stjepanovič, Z.; Rudolf, A. 3D Virtual Prototyping of Garments: Approaches, Developments and Challenges. *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics* **2017**, 10, 51-63.

[5] Sayem, A.S.M. *Digital Fashion Innovations Advances in Design, Simulation, and Industry;* CRC Press: Boca Raton, **2023**. https://doi.org/10.1201/9781003264958

[6] Choi, C. 3D dynamic fashion design development using digital technology and its potential in online platforms. *Fashion and Textiles* **2022**, 9. https://doi.org/10.1186/s40691-021-00286-1

[7] Klepster, A.; Morlock, S.; Loercher, C.; Schenk, A.. Functional measurements and mobility restriction (from 3D to 4D scanning), Chapter 7 in *Anthropometry, Apparel Sizing and Design*; Elsevier, 2020. pp. 169-199. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102604-5.00007-x

[8] Klepster, A.; Mahr-Erhardt, A.; Morlock, S. Investigating Fit in Motion with a 4D Photogrammetry Scanner System. In *Proceedings of 3DBODY.TECH 2021 12th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies*, Lugano, Switzerland, **2021**, p.13. https://doi.org/10.15221/21.13

[9] Petrak, S.; Mahnić, M.; Rogale, D. Impact of Male Body Posture and Shape on Design and Garment Fit. *Fib Text East Eur* **2015**, 23, 150-158.

[10] Petrak, S.; Mahnić, M.; Ujević, D. Research of 3D Body Models Computer Adjustment Based on Anthropometric Data Determined by Laser 3D Scanner. In *Proceedings of 3rd International Conference on 3D Body Scanning Technologies*,

Lugano, Switzerland, **2012**, pp. 115-126, https://doi.org/10.15221/12.115
[11] Parent, R. *Computer Animation Algorithms and Techniques*, Morgan Kaufmann, Elsevier, **2012**.
[12] Pandžić, I. S.; Pejša, T.; Matković, K.; Benko, H.; Čereković, A.; Matijašević, M.: *Virtualna okruženja: Interaktivna 3D grafika i njene primjene*, Element: Zagreb, Hrvatska, **2011**.
[13] Jolly, K.; Krzywinski, S.; Rao, P.; Gupta, D. Kinematic modelling of a motorcycle rider for design of functional clothing. *International Journal of Clothing Science and Technology*, **2019**, 31(6), pp. 859-873. https://doi.org/10.1108/IJCST-02-2019-0020
[14] Mahnić Naglić, M.; Petrak, S.; Tomljenović, A. Analysis of Woven Fabric Mechanical Properties in the Context of Sustainable Clothing Development Process. *Polymers* **2025**, 17, 2013. https://doi.org/10.3390/polym17152013
[15] Magnenat-Thalmann, N. *Modeling and simulating bodies and garments*, Springer-Verlag, **2010**. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-263-6
[16] O'Hailey, T. *Rig it Right! Maya Animation Rigging Concepts*, CRC Press Taylor & Francis Group, **2018**.
[17] Arnold, E.M.; Ward, S.R.; Lieber, R.L.; Delp, S.L. A model of lower limb for analysis of human movement, *Annals Biomechanical Engineering*, **2010**, 38, pp. 269-279. https://doi.org/10.1007/s10439-009-9852-5
[18] Menache, A. *Understanding Motion Capture for Computer animation*, Elsevier, **2011**.
[19] HRN EN 15614:2008 – Zaštitna odjeća za gašenje požara na otvorenom prostoru – Zahtjevi za svojstva i ispitne metode. HZN, 2008.
[20] HRN EN ISO 15384:2020 – Zaštitna odjeća za vatrogasce - Laboratorijske metode ispitivanja i zahtjevi za svojstva vatrogasne odjeće za gašenje požara na otvorenom prostoru. HZN, 2020.
[21] HRN EN ISO 13688:2013 – Zaštitna odjeća – Opći zahtjevi. HZN, 2013.
[22] Norme i preporuke za izbor zaštitne odjeće. U *Osobna zaštitna oprema – OZO, vol. 6.*, Zagreb: Hrvatski zavod za zaštitu zdravlja i sigurnost na radu (HZZZSR), 2019. Dostupno na: https://www.hzzzsr.hr/wp-content/uploads/2019/06/OZO-VOL-6.pdf, Pristupljeno 23/12/2025.
[23] Hrvatska gorska služba spašavanja. *Without Daylight - WE ARE A TEAM!*, Dostupno na: https://youtu.be/npir2XDzWM0 Pristupljeno 23/12/2025.
[24] Hrvatska gorska služba spašavanja. *Helikopter-sko spašavanje HGSS i HRZ*, Dostupno na: https://www.youtube.com/watch?v=2jei69I1o3Y , Pristupljeno 23/12/2025.
[25] Mixamo, Dostupno na: https://www.mixamo.com/#/, Pristupljeno 03/09/2025.
[26] CLO. Dostupno na: https://www.clo3d.com/en/ Pristupljeno 03/03/2025.