

Tanja Nuša Kočevar in Helena Gabrijelčič Tomc  
 Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, Snežniška 5, 1000 Ljubljana

## Primerjava 3D simulacij tekstilij z oceno uporabe dveh aplikacij in slikovno analizo upodobitev

### *Comparison of 3D Textile Simulations with Evaluation of Usability of Two Applications and Image Analysis of Renderings*

Izvirni znanstveni članek/Original Scientific Paper

Prispelo/Received 03-2013 • Sprejeto/Accepted 10-2013

#### Izvleček

Tekstilije so v programih za 3D modeliranje in animiranje obravnavane kot dinamični objekti, saj interagirajo z zunanjimi silami, kot so trk, veter, gravitacija, turbulenca in druge. Različne programske aplikacije rešujejo izzive modeliranja in simuliranja na različne načine. Eden izmed načinov je delitev določenega 3D modela s številnimi zaporednimi koraki na zelo veliko majhnih površin oz. segmentov. S tem model tekstilije pridobi virtualno gibkost in fleksibilnost, ki pod vplivom dinamičnih sil omogoča prikazovanje realističnega drapiranja in drugih oblik obnašanja tekstilije v prostoru. Cilj raziskave je primerjava uporabnosti in učinkovitosti orodij za modeliranje in simuliranje tekstilij dveh aplikacij različnih programskih paketov, in sicer 3ds Max in Blender. Primerjava odprtokodnega in profesionalnega programa, ki nista specializirana CAD programa za tekstilije, a ju v širšem kontekstu 3D računalniške grafike poznavalci uporabljajo za vizualizacijo tekstilij za različne namene (arhitektura, vizualizacija oblačil, avtomobilizem), je potekala z namenom analize uporabnosti (kot elementa uporabniške izkušnje) in vrednotenja končnih upodobitev drapiranja tekstilij. V virtualnem okolju obeh programov so bile simulirane tekstilije z različno surovinsko sestavo in različnimi parametri, ki jih ponujajo podatkovne baze uporabljenih programskih paketov. Upoštevan je bil vpliv sile gravitacije, ki je deloval med prostim padom tekstilije čez izbran objekt: kocko, valj in sfero. Uporabnost aplikacij je bila proučena s številom korakov priprave scene za kolizijski test virtualne tekstilije, številom uporabljenih vrst tekstilnih materialov, številom nastavitvev parametrov za določen tekstilni material, ki jih ponujajo podatkovne baze programov, in s časom ter številom slik za simuliranje trka in končnega drapiranja tekstilij. Ocenjena upodobitev in vrednotenje drapiranja analiziranih materialov sta potekala subjektivno in s slikovno analizo, in sicer z analizo površine in obsega ter njuno korelacijo. Rezultati so numerično in slikovno, tako v primeru uporabnosti aplikacij kot tudi v primeru kakovosti simulacij ter upodobitev, pokazali prednost rešitev simuliranja tekstilij, ki jih ponuja program 3ds Max.

Ključne besede: 3D modeliranje, simulacija tekstilij, uporabnost, trk, slikovna analiza

#### Abstract

*In 3D computer applications for modelling and animation, textile materials are considered as dynamic objects since they interact with different external forces, e.g. collision, wind, gravitation, turbulence etc. Different 3D computer graphics software resolves cloth modelling and simulation issues in various ways. When a given 3D model is subdivided into a large number of small areas (segments), it becomes virtually pliable and flexible. Consequently, the object can demonstrate realistic fabric drape or any other form of textile behaviour when it undergoes various influences of dynamic forces. The aim of the research was to compare the usability and effectiveness of two 3D computer applications for cloth modelling and simulation, i.e. 3ds Max and Blender. Blender as open source and 3ds Max as professional software were chosen, as they are not specialised CAD systems for 3D cloth simulation, yet they*

Korespondenčna avtorica/Corresponding author:  
**doc. dr. Helena Gabrijelčič Tomc**  
 Telefon: +386 2 200 3278  
 E-pošta: helena.gabrijelcic@ntf.uni-lj.si

*Tekstilec*, 2013, **56**(4), 323–334

DOI: 10.14502/Tekstilec2013.56.323–334

are extensively used for a textile visualisation in architecture, apparel visualization, car industry etc. Virtual textiles with a different material composition and different parameters offered by the databases of used 3D computer applications were simulated. In the research, the force of gravitation was examined, namely during the free fall of a cloth on a collision object, i.e. cube, sphere and cylinder. In the results, simulations and renderings of chosen cloth gravitation and collision were studied visually and by using image analysis. Moreover, the usability of both applications was estimated and compared with: 1) number of steps needed to prepare the set for the collision test of a virtual textile; 2) number of textile materials offered by an application; 3) number of possible parameter settings for a defined textile material; and 4) number of frames and time needed for the collision and final textile drape simulation. The analysis results demonstrate that in the field of cloth simulation, the use of Blender is restricted to nonprofessional users, whereas the solutions of 3ds Max application are more complex, with more specialized settings of textile and material parameters. Furthermore, a comparison with professional terms and solutions pointed out a higher level of the 3ds Max application. The analysis of the usability of two applications showed the advantage of 3ds Max; however, only in the case of settings of material parameters and visual estimation. The measurements of time, needed for the collision and draping showed that the simulation of one frame in 3ds Max is more time and processor consuming. The analysis of final drapes occurred with the help of a visual evaluation and image processing, i.e. with area and perimeter, and their correlation. The results presented that the simulations of Blender, though depending on the material used, in generally fit worse the shape of the collision object than the simulations of 3ds Max. The evidence is also greater scattering of the correlation point of area and perimeter around the linear trend line. In the conclusion, the estimation of results is presented visually and numerically. Both, in the case of application usability and the quality of drape simulations, the 3ds Max solutions are more corresponding and professional.

Keywords: 3D modelling, textile simulations, usability, collision, image analysis

## 1 Uvod

Simuliranje tekstilij med upogibanjem in drapiranjem je eden zahtevnejših procesov z vidika 3D računalniške grafike. Za realistično simuliranje tekstilij je bilo izvedenih veliko izčrpnih raziskav, ki so danes temelj raznovrstnih programskih aplikacij za modeliranje, simuliranje in animiranje tekstilij [1–9]. Obstajajo številni programi, ki so namenjeni izključno simuliranju oblačil in drugih tekstilnih izdelkov za tehnične namene in modno oblikovanje, kot na primer CAD-sistemi Optitex, Lectra, Gerber, Assyst [10–14]. Možnosti simuliranja in vizualiziranja tekstilij pa ponujajo tudi drugi programi za 3D modeliranje, animiranje in posebne učinke, ki imajo širši namen uporabe v arhitekturi, avtomobilizmu, produkciji vizualnih medijev in zabavni industriji [15–17]. V teh so tekstilije, tako kot v zgoraj omenjenih specializiranih programih, obravnavane kot dinamični objekti, saj se pri simuliranju računajo interakcije tako z notranjimi kot z zunanji silami. Na simulacijah lahko vrednotimo drapiranje na stičnih površinah upodobljene tekstilije, ki je rezultat padca tekstilije zaradi teže, trka s statičnim ali premikajočim se objektom ali rezultat vpliva delovanja naravnih sil. Aplikacije simuliranja tekstilij različnih programov rešujejo izzive

simuliranja na podoben način, tj. s funkcijami in orodji za spreminjanje topologije, dodajanjem preoblikovalcev (*ang. modifier, deformer*) in drugih efektov ter z izvajanjem določenih prostorskih transformacij, ki se uporabijo na osnovnem 3D modelu. Končna vizualizacija je odvisna od postopka dela in izbranih nastavitev, s katerimi nadzorujemo upodobitev tekstilij. Postopek dela mora vključevati učinkovito modeliranje, nato izbiro materiala oz. njegovih lastnosti, izbiro lastnosti objekta trka ali drugih sil ter na koncu tudi postavitev kamere in luči [18].

O uporabniški izkušnji in videzu končnih vizualizacij tekstilij v programih za 3D računalniško grafiko, kot so: 3ds Max, Blender, Maya, Cinema 4D in Lightwave [15–17, 19, 20], razpravljajo poznavalci na številnih forumih, dejstvo pa je, da za zahtevnejše uporabnike obstaja pomanjkanje referenc s področja analitičnih in raziskovalnih pristopov. Namen raziskave je bila primerjava dveh programskih paketov z uporabniškega vidika in z vidika kakovosti drapiranja. Tako sta bila izbrana odprtokodni in profesionalni program, ki sicer nista specializirana sistema za tekstilije, a sta zelo široko uporabljena za vizualizacijo tekstilij v oblačilne in dekorativne namene, v interjerjih in eksterjerjih, avtomobilizmu in 3D grafiki v realnem času.

## 2 Teoretični del

### 2.1 Teorija trka

Trk ali kolizija je fizikalni pojav, pri katerem dve telesi (ali več) vplivata drugo na drugo z določeno silo za določen čas. Trk teles je zelo kompleksen pojav, predvsem zaradi običajno različnih fizikalnih lastnosti teles, ki so udeležena v trku, pa tudi zaradi spremljajoče spremembe hitrosti in deformacije teles. Osnovne vrste trka so prožni, delno prožni in neprožni trk. Pri prožnem trku se vsa deformacijska energija spremeni v kinetično, kar omogoča po trku gibanje teles z določeno hitrostjo v različnih smereh. Pri delno prožnem trku se del vhodne kinetične energije porabi za deformacijo teles. Pri neprožnem trku pa se dve telesi »zlepita« in gibljeta naprej s skupno hitrostjo. Pri takem trku se del kinetične energije izgublja na račun deformacijske energije, ki ostane v telesih v obliki notranje energije. Čim večja je masa mirujočega telesa v primerjavi z maso vpadnega, tem več začetne kinetične energije se izgubi v deformiranem telesu kot notranja energija [21, 22]. Pri padcu tekstilije na mirujoč geometrijski objekt pride do neprožnega trka, kjer se skoraj vsa kinetična energija tekstilnega objekta porabi za njegovo deformacijo. Telo se »prilepi« na objekt, deformira in obmiruje.

### 2.2 Simulacije drapiranja tekstilij

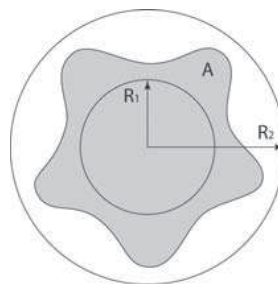
Drapiranje je deformacija tekstilij zaradi vpliva sile gravitacije in lastne teže. Ločimo dvo- in tridimenzionalno drapiranje, pri čemer se pri dvodimenzionalnem drapiranju tekstilija upogiba in guba zaradi svoje teže v eni ravnini, medtem ko se pri tridimenzionalnem v več ravninah [23, 24].

Vrednotenje drapiranja tekstilij lahko poteka subjektivno ali z eksperimentalnim določanjem parametrov drapiranja. Subjektivno ocenjujejo drapiranje predvsem oblikovalci tekstilij in oblačil, ko s pomočjo vida in otipa vrednotijo drapiranje. Objektivni parametri za vrednotenje drapiranja se določajo z merilnimi napravami in vključujejo koeficient drapiranja ter število, globino in porazdelitev gub [24–28].

Koeficient drapiranja je definiran kot razlika med velikostjo nedeformiranega vzorca tekstilije in pravokotno projekcijo oblike tekstilije po drapiranju ter se izračuna po enačbi 1:

$$K_D = \frac{(A - \pi R_1^2)}{\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)} \cdot 100 \quad (1)$$

Vrednotenje površin in oblik (slika 1) se izvede z zajemanjem podatkov projekcij: 1. površine drapirane tekstilije (A) na podlago posameznih statičnih slik ali zaporedja slik (pri premikajočem se kolizijskem objektu), 2. osnovne površine kolizijskega objekta (s polmerom  $R_1$ ) in 3. osnovne površine nedeformirane tekstilije (s polmerom  $R_2$ ) [27–29].



Slika 1: Shema projekcij za izračun koeficienta drapiranja [27, 28]

Metoda merjenja drapiranja se izvaja na okroglem vzorcu tekstilije, ki je centrično nameščen med dvema okroglima steklenima ploščama. Merilna naprava vključuje še vertikalno, nad preskušancem nameščeno svetilko ter parabolično ogledalo, od katerega se odbijajo žarki in padajo na tekstilijo. Senca drapirane tekstilije se pred končnim izrisom na papir projicira še skozi prosojno okroglo ploščo in stekleno ploščo [24, 25, 29].

Tekstilije so v 3D programih za modeliranje, animiranje in posebne učinke obravnavane kot dinamični objekti, saj interagirajo z zunanji silami. V to skupino spadajo še dinamika trdnih in mehkih teles (*ang. rigid, soft body*), dinamika tekočin in plinov (*ang. fluid dynamics*), proceduralni objekti, med katerimi so najprepoznavnejši sistemi delcev (*ang. procedural objects, particles*), ter trava in lasje (*ang. hair, fur*). Najpogosteje simulirane dinamične sile, ki interagirajo s 3D tekstilijami, so: gravitacija, kolizija, vlečenje, striženje, veter, raztezanje, stiskanje in upogibanje čez tog ali mehek objekt [30, 31].

Začetki računalniško podprtega simuliranja tekstilij segajo v devetdeseta leta 20. stoletja, ko so raziskovalci na tem področju predstavili nekaj zanimivih rešitev. Nekatere začetne rešitve so geometrijsko pristopale (*ang. geometric approaches*) k modeliranju in simuliranju tekstila ter niso upoštevale fizikalnih in mehanskih lastnosti tekstilij [1, 5]. Sledil je razvoj fizikalno natančnejših pristopov, tj. mehanike kontinuov (*ang. continuum approaches, continuum mechanics*), ki je tekstilije obravnavala kot energijsko-fizikalne modele ali pa kot elastično-deformabilne strukture. Matematično gledano so torej temeljili na teoriji

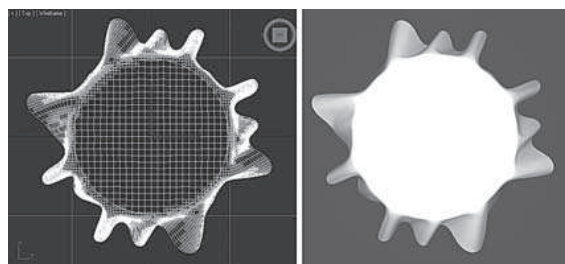
elastičnosti in diferencialni geometriji [2–4]. Sistem delcev (*ang. particles*) je leta 1994 pri svojih poskusih uporabil raziskovalec Breen D. E. s svojimi sodelavci [32] ter dosegel makroskopsko obnašanje z modeliranjem mikroskopske strukture tekstilij. Sistem delcev je temeljil na interakcijah sistema delcev na ravni niti, kjer so bili delci vezne točke osnovnih in votkovnih niti. Nadaljnje raziskave Eberhardta B. in njegove skupine [7] in Baraffa B. ter Witkina A. [9] so vodile v natančnejše upoštevanje dinamičnih lastnosti tekstilij, ki so v sodelovanju z različnimi matematičnimi modeli omogočale realnejše simuliranje deformacij tekstilij. V svoje modele so vključevali tudi lastnosti tekstilij, kot so raztezek, strig in upogib. Pomembno mesto med omenjenimi imajo za analizo drapiranja tekstilij tudi metode končnih elementov [33].

Splošno uporaben modelirni postopek tekstilij v programih za 3D modeliranje in animiranje, ki so dostopni širši množici uporabnikov, je delitev osnovnega 3D modela ravne ploskve na veliko majhnih površin s številnimi zaporednimi delitvami površin poligonov. S tem se modelu zagotovi možnost sprememb izhodiščne oblike v topologijo, ki lahko pravilno simulira vpliv delovanja sil. Z nadaljnjo aplikacijo preoblikovalca površine v dinamični objekt (*ang. Cloth, Garment Maker, Reactor*) pridobi 3D model tekstilije virtualno gibkost in fleksibilnost. Posledično se virtualna tekstilija pri fizikalni simulaciji odziva na dinamične sile in simulira odzivnost oblike tekstilije [34, 35].

Dinamično obnašanje tekstilij in tridimenzionalno drapiranje se v virtualnem prostoru testira s kolizijskim testom. To je simulacija neprožnega trka tekstilije s kolizijskim objektom, pri čemer se tekstilija pod vplivom gravitacije spusti z višine na določeno telo. Testi, ki se jih običajno poslužujejo uporabniki, vključujejo kvadratno obliko virtualnega tekstila in oglato obliko kolizijskega telesa (kocko) ali okroglo obliko tekstila ter okroglo (valj) ali sferično obliko (sfero) kolizijskega telesa [18, 34, 35]. Med 3D simuliranjem drapiranja tekstilije po trku s kolizijskim objektom se s časovno in procesorsko potratnimi algoritmi preračunavajo kompleksne deformacije tekstilij in njihovo tridimenzionalno upogibanje. Končna vizualizacija tekstilije je v nadaljevanju odvisna od nastavitve svetlobnih virov, algoritmov za senčenje in tekstur ter nastavitve upodabljanja [35, 36].

Metoda zajemanja podatkov o projekcijah drapirane virtualne tekstilije je v programih, kot so Blender, 3ds Max, Maya ipd., ki imajo zelo široko uporabo na

področju 3D grafike in niso specializirani le za simulacijo tekstilij, preprostejša kot pri realnih tkaninah. Uporabniški vmesnik namreč omogoča pogled na sceno in simulacijo drapiranja s pomočjo različnih projekcijskih ravnin (*ang. viewport*), ki nam dajejo projekcije objektov iz tlorisa, stranskih risov in pogled od spodaj. V teh primerih gre za ortogonalen pogled na objekt, ki ga lahko upodobimo in tako dobimo slikovne podatke o projekciji drapiranja (slika 2). Drugi način zajema podatkov je upodabljanje skozi virtualno kamero, ki tako v nastavitvah kot v delovanju simulira delovanje realne kamere in/ali fotoaparata [34].



Slika 2: Upodobitev ortogonalnega tlorisa simulirane tekstilije v žični obliki in s pomočjo senčenja v programu 3ds Max

Tudi simulacije drapiranih tekstilij lahko vrednotimo subjektivno in objektivno. Pri objektivnem vrednotenju je poleg metod, ki so našete v prvem odstavku tega poglavja, zelo učinkovita slikovna analiza, ki se uporablja tudi pri dejanskih tekstilijah [37–42]. Slikovna analiza je procesiranje digitalnih slik s pomočjo specifičnih orodij in postopkov z namenom izločanja in obdelave pomembnih slikovnih podatkov. Slikovna analiza vključuje veliko tehnik, med katerimi so najpogostejše 2D in 3D prepoznavanje objektov, slikovno segmentiranje, detekcija gibanja, analiza barvnih in sivinskih histogramov itd. Najpogostejše meritve slikovnih elementov, ki jih vključuje slikovna analiza, so: površina, obseg, sivinska vrednost in 2D opisovalci oblik, kot so: okroglost, simetričnost, pokritost površine itd. [43, 44].

### 2.3 Uporabnost interaktivnih aplikacij

Pri uporabi različnih aplikacij in programov za simuliranje je poleg uporabniške izkušnje (*ang. user experience*) pomembna tudi uporabnost (*ang. usability*) aplikacije. Uporabnost vrednoti interaktivno uporabniško izkušnjo človeka z določenim interaktivnim medijem ali sistemom. Uporabnost je

kakovost sistema (aplikacije), ki naredi sistem uporaben za doseganje uporabnikovih ciljev, učinkovit, razumljiv in všečen. Uporabnost, ki na splošno vključuje vidike: koristnost (*ang. usefulness*), učinkovitost (*ang. effectiveness*), težavnost učenja aplikacije (*ang. learnable*) in všečnost (*ang. likeable*), se glede na namen in funkcijo sistema (aplikacije) meri z različnimi testi uporabnosti [45]. V programih za 3D računalniško grafiko se uporabnost določene aplikacije ali postopka meri z oceno kompleksnosti postopka in njegove razumljivosti za uporabnika, kar lahko vključuje štetje števila parametrov, vrednotenje razumljivosti parametrov, merjenje časa za izvajanje določene operacije ter oceno kakovosti rezultata uporabe določenega orodja oz. postopka [46].

Namen raziskave je bila primerjava uporabnosti (kot merilo uporabniške izkušnje) in vrednotenje simulacij drapiranja odprtokodnega programa Blender [15] in profesionalnega programa 3ds Max [16]. Primerjava in vrednotenje rešitev odprtokodnega in profesionalnega programa, ki ju poznavalci 3D računalniške grafike uporabljajo za vizualizacijo tekstilij za različne namene, je potekala z namenom analize uporabnosti in kakovosti končnih upodobitev drapiranja tekstilij. Izhodišče raziskave je bilo namreč dejstvo, da analizirana programa nista specializirana CAD-programa ali programa za simuliranje obnašanja tekstilij, se pa na trgu zelo široko uporabljata v arhitekturi, vizualizaciji tekstilij in oblačil, zabavni industriji in avtomobilizmu za grafične vizualizacije tekstilij.

### 3 Metode

Analiza uporabnosti aplikacij za pripravo in simuliranje je potekala z naslednjo strojno in programsko opremo: centralna procesna enota (CPU): Intel Core I7 950 3.03GHz, trdi disk: WD 1.5TB SATA2 64MB, grafično kartico: ATI HD 5870 1GB, RAM: 4GB, 3ds Max 2012 (Autodesk) in Blender 2.67 (Blender Foundation).

Ocena uporabnosti kot merila za uporabniško izkušnjo je potekala z merjenjem:

1. števila korakov priprave scene za kolizijski test virtualne tekstilije, ki jih zahteva program;
2. števila ponujenih tekstilnih materialov, ki so v podatkovnih bazah programov (npr. bombaž, volna, svila);

3. števila mogočih nastavitvev parametrov virtualnih tekstilij, ki jih ponuja aplikacija (npr. gostota, UV upogibanje itd.) in ocenjevanjem njihove razumljivosti glede na fizikalno-mehanske lastnosti dejanskih tekstilij;

4. časa simuliranja trka in drapiranja tekstilije, ki sta bila numerično ovrednotena s številom slik (*ang. frames*) ter časom računanja simulacije do trka in končne simulacije.

Ocena končnih upodobitev je vključevala slikovno analizo tlorisnih projekcij, katere namen je vrednotenje 3D oblike drapiranih tekstilij z določeno, v programu ponujeno surovinsko sestavo po trku z različnimi geometrijskimi telesi. Slikovna analiza je potekala z merjenjem ploščine in obsega, ki sta pri 2D projekcijah 3D objektov na različne projekcijske ravnine med najpomembnejšimi parametri slikovnega procesiranja. Za analizo morebitne povezave in soodvisnosti med površino in obsegom je bila določena tudi njuna korelacija. Poleg tega je bilo drapiranje analizirano tudi vizualno in s štetjem števila gub na slikah tlorisov drapiranih tekstilij.

V virtualnem okolju programov Blender in 3ds Max je bil s postavitvijo na sredino kvadratnega prostora s stenami barvnih vrednosti  $H = S = 0$ ,  $V = 128$  simuliran kvadratni kos tekstilije kot objekt ravnine velikosti  $1 \times 1$  m in barvnih vrednosti  $H = S = 0$ ,  $V = 255$ . Kot kolizijski objekti so bila določena tri geometrijska telesa: kocka velikosti  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  m, valj višine in premera 0,5 m ter sfera premera 0,5 m. Barvne vrednosti kolizijskih objektov so bile  $H = 85$ ,  $S = V = 255$ . Lega težišča kosa tekstilije in kolizijskih objektov je bila  $x = y = z = 0$ . Na scenah s krogli je bila podlaga (okolica) pri upodabljanju znižana v smeri osi  $-z$ , saj je bilo v nasprotnem primeru drapiranje moteno zaradi kolizije s podlago virtualnega prostora. Proučen je bil učinek sile gravitacije na tekstilije.

Proces izdelave simulacije trka tekstila z drugim objektom je potekal pri obeh programih na podoben način, in sicer: 1. oblikovanje tekstilnega objekta kot začetne oblike; 2. delitev objekta na segmente; 3. modeliranje kolizijskega objekta; 4. določanje lastnosti za tekstilijo in kolizijski objekt (3ds Max: *ang. Cloth Modifier*, preoblikovalec tekstilije; Blender: *ang. Physics, Cloth, Collision*, fizika, tekstilija, kolizija); 5. preračunavanje simulacije in 6. glajenje površine drapirane tekstilije (3ds Max: *ang. Modifier HSDS*, preoblikovalec

za hierarhično subdivizijo površin; Blender: *ang. Smooth*, glajenje).

Zaradi zelo različnih nastavitvev, ki jih ponujata oba programa, smo tekstilijam spreminjali že prednastavljeno surovinsko sestavo: bombaž, svila in guma, ki so enotni obema programoma. Uporabili smo privzete vrednosti parametrov za določanje lastnosti tekstilij, ki jih ponujajo podatkovne baze uporabljanih programskih paketov za izbrano tekstilijo. Nastavitve parametrov za določanje lastnosti tekstilij, ki jih ponujata aplikaciji, so z nekaj izjemami v programu 3ds Max relativne in ne ponujajo natančnih vrednosti, ki bi primerljivo z dejanskimi fizikalno-mehanskimi lastnostmi vplivale na obnašanje tekstilije med njeno simulacijo.

Postavitev scene in objektov je bila pri obeh programih enaka. Simuliran je bil prosti pad tekstilije z višine 75 cm na objekt kolizije. Kamera s 50 mm lečami in lego  $x = -100$ ,  $y = -105$ ,  $z = 200$  je bila usmerjena v zgornje levo oglišče kocke ter temu pripadajoče mesto na valju in sferi.

Na sceno je bila pri vizualni analizi postavljena ena ambientalna luč (*ang. Omni*) v programu 3ds Max z intenziteto 1 in površinska difuzna luč (*ang. Area - Diffuse*) v programu Blender z energijo 0,2 ter lego  $x = -100$ ,  $y = -105$ ,  $z = 200$ . Uporabljen je bil tip sence s sledenjem žarku (*ang. Raytrace*) z barvnimi vrednostmi  $H = 0$ ,  $S = 0$ ,  $V = 108$  in pojemek intenzitete, ki simulira pojemek svetlobe v naravi (*ang. Inverse Square*). Ker vsaka od obeh aplikacij drugače poimenuje tip luči in njeno intenziteto, ki je označena relativno, je bila pri obeh programih izbrana tista vrsta osvetlitve, ki osvetljuje z razpršeno svetlobo, in intenziteta, ki daje podobne rezultate osvetlitve pri upodobitvi scene.

Za lažjo primerjavo so bile simulacije izdelane brez posebnih tekstur in algoritmov za senčenje. Ker namen raziskave ni bila barvna in/ali sivinska analiza slik, se naprednejših načinov osvetljevanja in upodabljanja nismo posluževali. Upodabljanje je potekalo s privzetimi upodobljevalniki programov (3ds Max: *Scanline*, Blender: *Blender Render*), brez mehčanja robov (za lažjo slikovno analizo), shranjevanje slik velikosti  $1920 \times 1080$  pixlov, brezkompresijski format tiff 300 dpi. Slikovna primerjava upodobitev je bila izvedena s programom za slikovno procesiranje in analizo slik ImageJ [43], s katerim smo slike primerno umerili na realno velikost, določili izris tlorisa (*ang. Outline*) ter površino in obseg drapiranega blaga po interakciji s kolizijskimi objekti.

## 4 Rezultati z razpravo

### 4.1 Analiza uporabnosti programov za simulacijo tekstilij

Glede na vrsto interaktivne aplikacije smo uporabnost testirali z vidika koristnosti in učinkovitosti.

Preglednica 1: Uporabnost priprave simulacij in simuliranja tekstilij v programih 3ds Max in Blender

Program	3ds Max	Blender
Število korakov	6	6
Število vrst materialov	17	5
Število parametrov	25	7
Čas simuliranja za trk (s)	8,50 ± 2,82	1,28 ± 0,39
Čas simuliranja za drapiranje (s)	32,56 ± 8,14	96,33 ± 26,69
Število slik za trk	3,44 ± 0,73	6,67 ± 0,50
Število slik za drapiranje	100,13 ± 24,21	143,33 ± 73,14

V preglednici 1 je predstavljena bistvena prednost aplikacije programa 3ds Max, ki ponuja večjo možnost izbire tekstilnih materialov in parametrov za definiranje njihovih lastnosti. V tem programu je 25 parametrov, s katerimi določamo lastnosti materialov tekstilij. Pri parametrih zasledimo na splošno rang priporočenih vrednosti, le nekaj parametrov pa ima enote. Nekateri parametri in njihove priporočene vrednosti so: U in V upogibanje (*ang. U, V bend*, vrednosti 15 do 50), U in V B-krivulja (*ang. U, V B-curve*, vrednosti od 0 do 180°), elastičnost (*ang. stretch*, vrednost 50), kompresija (*ang. compression*, vrednost 50), strig (*ang. shear*, vrednost 0,5), površinska masa (*ang. density*, v g/cm<sup>2</sup>), plastičnost (*ang. plasticity*, vrednost 100), debelina (*ang. tickness*, vrednosti od 0,2 do 1), zračni upor (*ang. air resistance*, vrednosti od 0 do 1), dinamično trenje (*ang. dynamic friction*, vrednosti 0 do 10) itd.

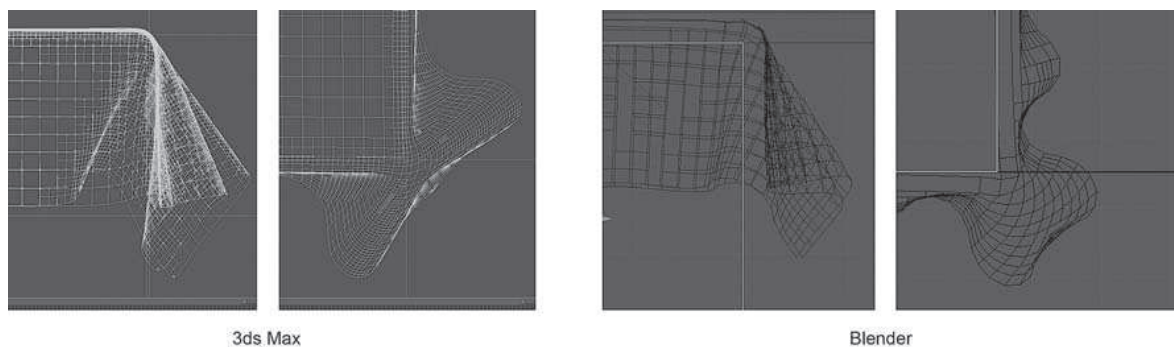
V programu Blender je na voljo šest parametrov, ki opisujejo lastnosti tekstilnega materiala: masa (*ang. mass*, vrednosti od 0 do 10), togost (*ang. structural*, vrednosti od 0 do 10 000), gubanje (*ang. bending*, vrednosti od 0 do 10 000), hitrost simulacije (*ang. spring*, vrednosti od 0 do 50), zračni upor (*ang. air*,

vrednosti od 0 do 10) in hitrost, s katero tekstilija doseže v procesu simulacije končni položaj (*ang. velocity*, vrednosti od 0 do 1).

Čas simuliranja trka tekstilij je bil merjen s številom slik in časom simuliranja (preglednica 1), pri čemer je razvidno, da potrebuje simulator v 3ds Maxu za procesiranje padca tekstilije do trka s kolizijskim objektom polovico manj slik, vendar skoraj osemkrat več časa. Prav tako je v 3ds Maxu potrebnih približno štirikrat manj slik za simulacijo drapiranja (32,56 slik 3ds Max, 143,33 slik Blender), pri čemer je simulacija spremembe v sliki časovno in procesorsko nekoliko potratnejša (100,13 s 3ds Max), tako da se konec drapiranja ocenjuje v približno enakem času kot pri programu Blender, v katerem je povprečno potrebnih 143,33 slik in 96,33 za končno simulacijo.

#### 4.2 Primerjava upogibanja

Upogibanje je prvi značilni parameter, ki se med dinamično simulacijo preračuna pri interakciji tekstilije s kolizijskim objektom. Pri tej interakciji pogosto nastane težava prehajanja ostrega roba kolizijskega objekta skozi deformirano mrežo tekstila. V programu 3ds Max se to lahko popravi z nastavitvijo *ang. subsample* v zavihku *ang. simulation parameters* ali pa z nastavitvijo zamika (*ang. offset*) od kolizijskega objekta. V programu Blender pa pri nastavitvi (*ang. cloth collision*) označimo minimalno razdaljo, pri kateri kolizijski objekt vpliva na gubanje tekstila. Tako se doseže ustrezen odmik tekstila od roba kolizijskega objekta, ki je neizogiben za kakovostno simulacijo, vendar vpliva na potek nadaljnega simuliranja drapiranja. Na sliki 3 je prikazana simulacija upogibanja tekstilij v obeh programih, ki jo je treba upoštevati pri slikovni analizi projekcije drapiranja, saj vpliva na prilaganje drapirane tekstilije s kolizijskim objektom.



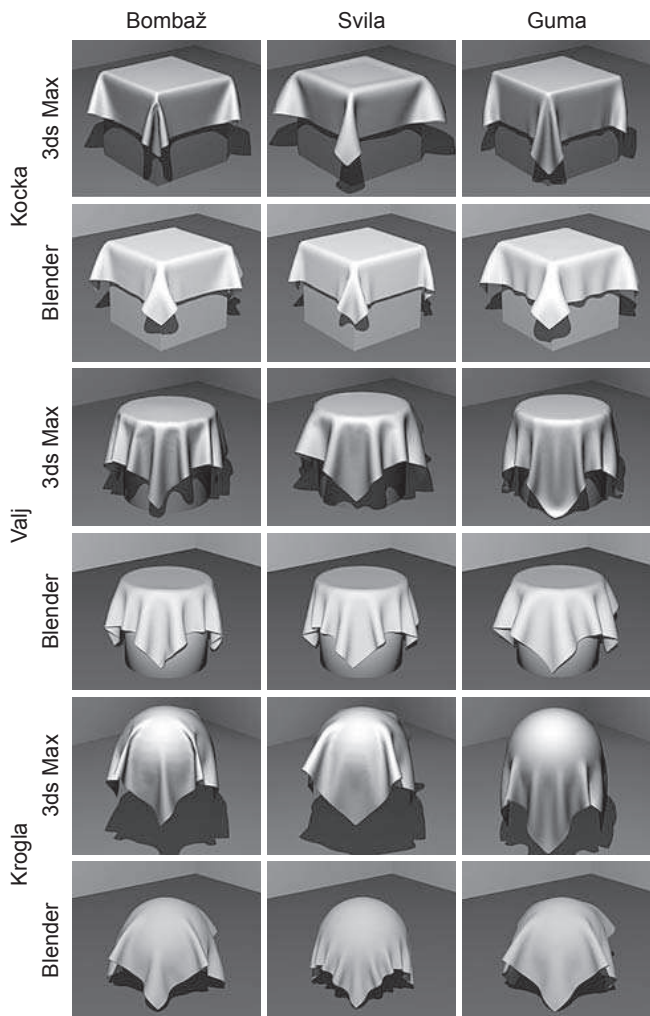
Slika 3: Simulacija upogibanja tekstilije v programu 3ds Max in Blender

#### 4.3 Primerjava upodobitev tekstilij na treh geometrijskih telesih

Na sliki 4 so prikazane upodobitve drapiranih tekstilij iz različnih surovinskih sestav na različnih geometrijskih telesih.

Vizualna primerjava je potekala na končnih upodobitvah trka tekstilije na treh geometrijskih telesih. Pri vseh treh geometrijskih telesih so se na robovih tvorile značilne gube, kot prikazuje slika 4. Iz te lahko povzamemo primerjavo gubanja čez oglate in sferične robove kolizijskih objektov v naslednjih alinejah:

- Surovinska sestava tekstilije pri prostem padu različno vpliva na interakcijo tekstilije s kolizijskim objektom, kar je bolj izrazito pri simulacijah programa 3ds Max.
- Razlike med analiziranimi materiali so najintenzivnejše na ogliščih pri simulacijah s programom 3ds Max, simulacije s programom Blender pa nakazujejo odzivnost in drapiranje tekstilije tudi na straneh in po površini kolizijskega objekta.
- Različno upogibanje tekstilij se izraža pri prehodu tekstilije čez robove kolizijskega objekta, pri čemer se guma (3ds Max) in svila (Blender) najbolj prilagajata objektu trka in zaradi teže in fleksibilnosti prilagajata njegovi obliki. Pri svileni tekstiliji je predvsem v primeru vizualizacij programa Blender očitno simulirano dodatno gubanje po stiku tekstilije s 3D objektom.
- Razlike v drapiranju tekstilij čez različna geometrijska telesa se kažejo v globinah senc in njihovih prehodih. Tudi upodabljanje simulacij tekstilij rezultira v različnih izrisih oblik senc na podlagi, kar je razvidno s slike 4.
- Ocena senc med gubami (nivoji sivin) drapiranih tekstilij je vizualno boljša pri programu 3ds Max.
- Vizualna analiza torej kaže, da je upodabljanje simulacij tekstilij s pomočjo privzetih upodobljevalnikov (3ds Max: *Scanline*; Blender: *Blender*



Slika 4: Drapiranje bombažne in svilene tekstilije ter gume po interakciji s kocko, valjem in kroglo

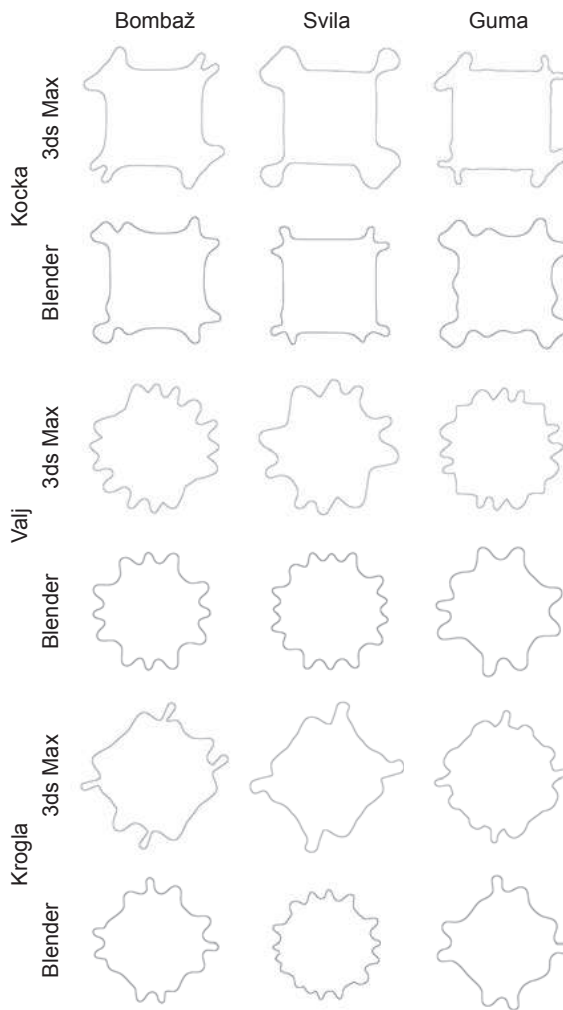
Render) učinkovitejše pri aplikaciji programa 3ds Max.

#### 4.4 Analiza drapiranja tekstilij na kocki, valju in sferi

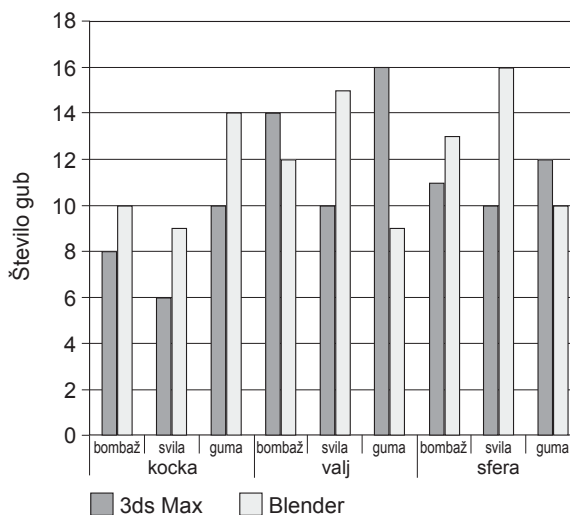
Na slikah 5 in 6 so prikazani obrisi projekcij drapiranih tekstilij in število gub pri različnih surovinskih sestavah po koliziji z različnimi geometrijskimi objekti.

- **3ds Max**

Na kocki je od 6 do 10 gub, pri čemer ima svilena tekstilija najmanj gub, so pa najgloblje. Zanimiva je različnost gub v diagonalnih smereh, kjer se po eni diagonali vseh treh surovinskih sestav očitno tvorijo manjše gube, ki so manj globoke, po drugi pa večje, ki so globlje. Pri kolizijskem objektu valju se tvori od 10 do 16 gub, pri čemer je ponovno najmanj gub pri



Slika 5: Tloris obrisa drapirane bombažne in svilene tekstilije ter gume po interakciji s kocko, valjem in kroglo



Slika 6: Število gub drapiranja različnih materialov po koliziji z različnimi geometrijskimi objekti



svili (10) največ pa pri gumi (16). Kolizijski objekt krogle podaja od 10 (svila) do 12 gub (guma).

Pri kocki in valju je pri svileni tekstiliji globina valov gubanja največja, medtem ko je najmanjša pri gumi, saj se v 3ds Maxu generirana guma s privzetimi nastavitvami zaradi elastičnosti zelo prilega tudi oglatim robovom podlage. Pri obrisih tlorisa drapiranja na kolizijskem objektu sfere pa so razlike v globini valov manjše, saj se zaradi večje površine stika tekstilije in kolizijskega objekta gube bolj porazdelijo po površini. Rezultati simulacij tekstilij različnih surovinskih sestav kažejo na očitno simetričnost računalniško generirane porazdelitve in oblike gub pri vseh treh geometrijskih telesih in analiziranih materialih, in sicer v smeri obeh diagonal zgornjih ploskev geometrijskega telesa.

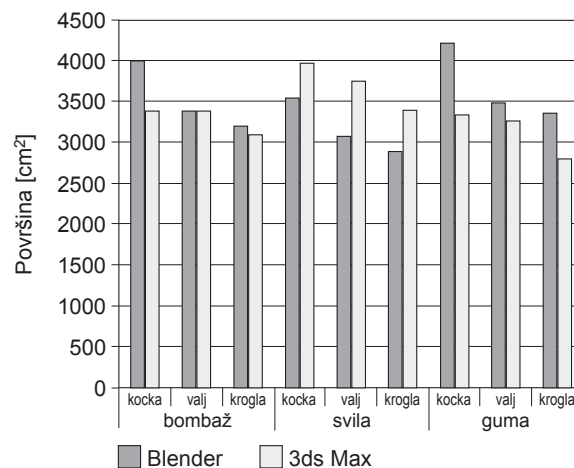
#### • Blender

Na kocki je od 10 do 13 gub (največ gub ima guma), ki so bolj ali manj izrazite. Pri gumi sta na stranicah globina in izrazitost gub največji, pri bombažni in svileni tekstiliji pa precej manjši. Na vogalih imajo gube prav tako različno globino in izrazitost. Nagubanost je pri vsakem vogalu pri istem materialu različna. Pri svileni tekstiliji so gube na vogalih ožje kot pri obeh drugih tekstilijah.

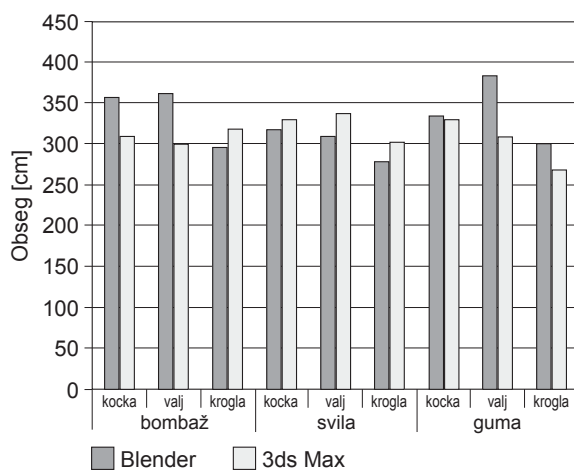
Pri kolizijskem objektu valju je pri bombažni 12 in svileni tekstiliji 15 gub ter gumi devet gub. Svilena tekstilija, ki je tudi dejansko najmehkejši material, tvori največ gub. Pri bombažni in svileni tekstiliji je gubanje precej enakomerno okoli valja, manj enakomerno je gubanje gume, kar potrjuje tlorisni obris, ki je neenakomeren. Stik s kroglo ima za posledico od 10 do 16 gub. V primerjavi s simulacijami tekstilij s programom 3ds Max je pri programu Blender splošno večje število gub prisotno le pri svileni tekstiliji, medtem ko je pri bombažni in gumi manj gub. Simetričnost porazdelitve in oblike gub je manjša kot pri simulacijah 3ds Max-a, prav tako pa so gube tudi bolj heterogenih oblik in različnih globin. Na kocki in valju se nakazuje simetričnost porazdelitve v diagonalni smeri, česar ne moremo trditi za svilo.

#### 4.5 Primerjava površine in obsega tlorisov drapiranja

S slikovno analizo smo primerjali tlorisne projekcije drapiranja bombažne in svilene tekstilije ter gume na kocki, valju in krogli, ki so bile izdelane s pomočjo obeh programov, in rezultate prikazali na slikah 7 in 8.

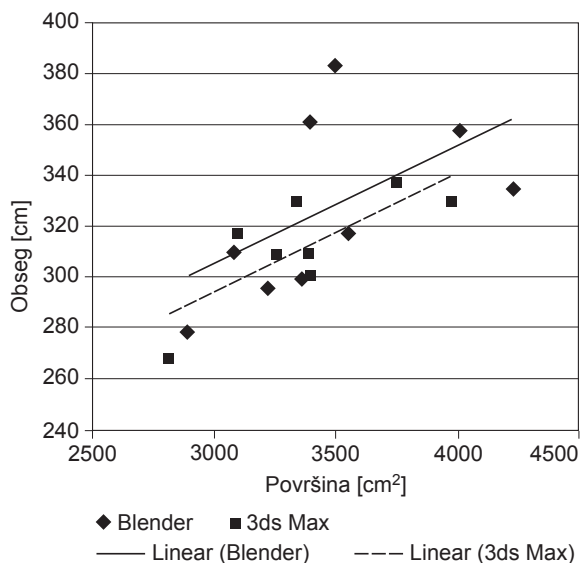


Slika 7: Primerjava površin drapiranih bombažnih in svilenih tekstilij ter gume na kocki, valju in krogli



Slika 8: Primerjava obsegov drapiranih bombažnih in svilenih tekstilij ter gume na kocki, valju in krogli

Iz slik 7 in 8 so razvidne večje vrednosti površine in obsega tlorisa drapiranja simulacij bombažnega materiala in gume programa Blender (izjema je le vrednost obsega na krogli pri bombažni tekstiliji). Medtem pa simulacije svilene tekstilije s programom 3ds Max rezultirajo v večjih vrednostih obeh merjenih lastnosti. Vzrok za to lahko najdemo tudi v vizualni analizi (slika 4), saj se tekstilije iz svile manj prilegajo obliki kolizijskega objekta pri simulacijah programa 3ds Max, medtem ko lahko to trdimo za bombažno tekstilijo in gumo pri simulacijah s programom Blender. Kritična faza simuliranja nastane, kot je omenjeno v poglavju Primerjava upogibanja, v točki upogiba tekstilije čez rob kolizijskega objekta. Pri bombažni tekstiliji in



Slika 9: Korelacija odvisnosti površine in obsega tlorisa vzorcev, določenih v programih 3ds Max in Blender

gumenem materialu s programom Blender ter svileni tekstiliji s programom 3ds Max je simuliran manjši upogib (torej odmik od kolizijskega objekta), posledica tega pa je večja površina drapiranja in tudi razlika z osnovno površino kolizijskega objekta.

Učinek drapiranja izbranih materialov na treh geometrijskih objektih smo v nadaljevanju ocenili tudi s korelacijo med površino in obsegom (slika 9).

Na sliki 9 je prikazano sipanje korelacije površine in obsega okoli linearne tendence pri uporabi obeh programov, kar je ocena za raznolikost prileganja drapiranih tekstilij na geometrijskih objektih. Sipanje okoli premice je večje pri simulacijah programa Blender, kjer sta bila tudi površina in obseg na splošno večja. Trendni liniji korelacij (s splošno enačbo  $y = k \cdot x + n$ ; Blender:  $0,046 x + 166,7$  in 3ds Max:  $0,047 x + 153,9$ ) se razlikujeta predvsem v začetni vrednosti  $n$ , medtem ko je v vrednosti smernega koeficienta razlika zelo majhna (na tretji decimalni). Naklon trendne linije nakazuje podobno intenziteto sprememb obsega v odvisnosti od sprememb površine drapiranja. Če na tem mestu rezultate analize korelacije obsega in površine primerjamo s številom gub in vrednostmi obsega in površine simulacij obeh programov, lahko trdimo, da se na splošno večje število gub in večje vrednosti obsega in površine simulacij v programu Blender odražajo tudi v večjem sipanju okoli trendne linije sprememb obsega v odvisnosti od površine.

## 5 Sklepi

Program Blender ponuja preprostejše rešitve za manj zahtevne simulacije z dodatnimi, uporabniku prijaznimi razlagami delovanja posameznih parametrov predvsem za nestrokovne uporabnike. Program 3ds Max kompleksnejše pristopa k nastavitvam ter vključuje veliko več specializiranih nastavitvev parametrov za simuliranje lastnosti tekstilij. Predstavljen raziskavo lahko na podlagi rezultatov strnemo v naslednje sklepe.

- Oba programa ponujata podoben postopek priprave modela za simuliranje tekstilij, pri čemer je treba parametrične in številčne vrednosti pri primerjavi na ustrezen način interpretirati. Nasprotno pa lahko zaradi enakih načinov upodabljanja tako vizualno kot tudi s slikovno analizo primerjamo rezultate končnih vizualizacij.
- V primerjavi s specializiranimi programi za simuliranje tekstila je v predstavljenih programih prisotna problematika razumevanja delovanja parametrov in njihovih vrednosti. Nastavitve parametrov za določanje lastnosti tekstilij, ki jih ponujata aplikaciji, so relativne, brez merskih enot, z izjemo nekaterih parametrov v 3ds Maxu. Nastavitve parametrov ne ponujajo natančnih vrednosti za primerjavo z realnimi fizikalno-mehanskimi lastnostmi, ki vplivajo na obnašanje tekstilije med njeno simulacijo.
- Analiza gub je pri programu Blender na splošno pokazala večje število gub le pri svileni tekstiliji, obenem pa tudi manjšo simetričnost gub in njihove porazdelitve ter večjo heterogenost oblike gub.
- V programu Blender se drapiranje poleg na splošno večjega števila gub in večje vrednosti obsega in površine simulacij odraža tudi v manjšem prileganju in večji razgibanosti oblike simulacij tekstilij okoli kolizijskega objekta. To dokazuje tudi večje sipanje korelacijskih točk okoli trendne premice med obsegom in površino.
- Analiza uporabnosti aplikacij za simuliranje tekstilij je potrdila prednost rešitev programa 3ds Max, vendar odločno le pri izbiri vrste tekstilije ter števila parametrov nastavitvev lastnosti tekstilij. Pri merjenju časa trka in simuliranja so rezultati pokazali veliko primerljivost programskih aplikacij za dosego končne simulacije. Rezultati pa vseeno dokazujejo, da je aplikacija programa 3ds Max pri simuliranju ene slike časovno in procesorsko bolj potratna, vendar natančnejša. Upoštevanje te in

- zgornjih alinej dokazuje večjo koristnost in učinkovitost postopka simuliranja v programu 3ds Max.
- Uporabnik, ki izbere aplikacijo 3ds Max za simulacijo tekstilij, izvede za pripravo scene za kolizijski test virtualne tekstilije enako število korakov, kot če bi izbral Blender. V približno enakem času bi se v obeh programih izvedla tudi končna simulacija drapiranja tekstilije. Vendar uporabnik v programu 3ds Max lahko izbira bistveno večje število ponujenih prednastavljenih vrst tekstilij in večje število nastavitvev parametrov za določeno vrsto tekstilnega materiala.
  - V nadaljnjih raziskavah bi bilo treba za primerjavo uporabnosti obeh 3D aplikacij za simuliranje tekstilij narediti tudi primerjavo z realnim drapiranjem tekstilij.

## Viri

- WEIL, Jerry. The synthesis of Cloth object. *Computer Graphics (Proc Siggraph)*, 1986, **20**(4), 49–54.
- FEYNMAN, Carl Richard. *Modelling the Appearance of Cloth. Master disertation*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1986.
- TERZOPOULOS, Demetri, PLATT, John, BARR, Alan, FLEISHER Kurt. Elastically deformable models. *Computer Graphics*, 1987, **21**(4), 205–214, doi: 10.1145/37402.37427.
- THALMANN, Nadia Magnenat, THALMANN, Daniel. Cloth animation with self-collision detection. *Modelling in Computer Graphics*. Kunii T. L. (ur.), Berlin, Springer-Verlag, 1991, 179–187.
- DHANDE, Sanjay Govind, RAO P. V. Madhusudhan, MOORE L. Chris. Geometric modelling of draped fabric surfaces. *Graphics, design and visualisation, Pros Int Conference on Computer Graphics*. Mudur S. P. (ur.), Pattanaik S. N. Bombay (ur.), Jaico Publishing house, 1993, 173–180.
- CHEN, Bijian, GOVINDARAJ, Muthu. A physical based model of fabric drape using flexible shell theory, *Textile Research Journal*, 1995, **65**(6), 324–330, doi: 10.1177/004051759506500603.
- EBERHARDT, Bernhard, WEBER, Andreas, STRASSER, Wolfgang. A fast flexible particle system model for cloth draping. *IEE, Computer Graphic and Application*, 1996, **16**(5), 51–59, doi: 10.1109/38.536275.
- SUL, In Hwan, KANG, Tae Jin. Improvement of drape simulation speed using constrained fabric collision. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2004, **16**(1/2), 43–50, doi: 10.1108/09556220410520342.
- BARAFF, David, WITKIN, Andrew. A large steps in cloth simulation. *Proceedings of Computer Graphics, Annual Conference Series*, 1998, 43–54.
- Optitex, 2D and 3D CAD/CAM Fashion Design Software [dostopno na daljavo], [citirano 15. 1. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.optitex.com>.
- Lectra, Fashion PLM, CAD/CAM solution and service [dostopno na daljavo], [citirano 15. 7. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.lectra.com/en/index.html>.
- Gerber Technology [dostopno na daljavo], [citirano 15. 7. 20]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.gerbertechnology.com>.
- Human Solution Assyst avm [dostopno na daljavo], [citirano 9.10.2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.human-solutions.com>.
- ŠTANC, Barbara, LUKAČ, Tjaša, JEVŠNIK, Simona, RUDOLF Andreja, STJEPANOVIČ, Zoran. Izdelava prototipa tekmovalnega dresa smučarja skakalca. *Tekstilec*, 2009, **52**(7–9), 206–221.
- Blender Foundation [dostopno na daljavo], [citirano 17.1.2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.blender.org>.
- Autodesk 3ds Max [dostopno na daljavo], [citirano 17. 1. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://usa.autodesk.com/3ds-max/>.
- Autodesk Maya [svetovni splet]. Dostopno na: <http://usa.autodesk.com/maya/> [17.1.2013].
- KOČEVAR, Tanja Nuša, GABRIJELČIČ TOMČ, Helena. Animiranje in primerjava 3D simulacij tekstilij v programih Blender in 3ds Max = Animation and comparison of 3D textile simulations in Blender and 3ds Max. V: SIMONČIČ, Barbara (ur.), GORJANC, Marija (ur.). 43. simpozij o novostih v tekstilstvu, *Tekstilna obzorja*, Ljubljana, *Tekstilna obzorja : zbornik izvlečkov*. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, 2012, 44.
- Maxon 3D for the real world, Cinema 4D [dostopno na daljavo], [citirano 9. 10. 2013] Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.maxon.net/>.

20. Newtek Lightwave [dostopno na daljavo], [citirano 9. 10. 2013] Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.lightwave3d.com/>>.
21. KLADNIK, Rudolf, Visokošolska Fizika, 1. del, mehanski in toplotni pojavi, Državna založba Slovenije, 1989, 231.
22. GOLDBERGER, L. Marvin, WATSON, M. Kenneth. *Collision Theory*. Dover Publications, 2004, 919.
23. HU, Jinlian. *Structure and mechanics of woven fabrics*. Boca Raton, Fla. : CRC Press; Cambridge : Woodhead Pub., 2004, 307.
24. GERŠAK, Jelka. *Mehanske in fizikalne lastnosti materialov*. Maribor, Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilstvo, 2006, 156.
25. KOBOVC, Dragica. *Simulacija obnašanja tkanin in pletiv : diplomsko delo*. Maribor, Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilstvo, 2010.
26. HEARLE, John W. S., BACKER, Stanley, GROSBURG, Percy. *Structural mechanics of Fibres, Yarn and Fabrics, Volume 1*. John Wiley & Sons Inc. 1969, 482.
27. CUSICK, G. E. The dependence of Fabric Drape on bending and Shear Stiffness. *Journal of Textile Institute*, 1965, **56**(11), 596–606, doi: 10.1080/19447026508662319.
28. CUSICK, G. E. The Measurement of Fabric Drape. *Journal of Textile Institute*, 1968, **56**(11), 253–260, doi:10.1080/00405006808659985.
29. CHU, C. Chauncey, CUMMINGS, L. Clinton, TEIXEIRA, A. Newton. Mechanics of elastic Performance of Textile Materials Part V: A Study of the Factors Affecting the Drape of Fabrics – The Development of a Drapemeter. *Textile Research Journal*, 1950, **20**, 539–548.
30. KERLOW, Isaac. *The art of 3D : computer animation and effects*. Wiley, 2009, 499.
31. PARENT, Rick. *Computer animation, Algorithms and Techniques*. Morgan Kaufmann, 2012, 542.
32. BREEN, E. David, HOUSE, H. Donald, WOZNY, J. Michael. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. *SIGGRAPH '94 Conference Proceedings*, 1994, Orlando, FL, USA, 365–72, doi: 10.1145/192161.192259.
33. LOJEN-ŽUNIČ, Darja, JEVŠNIK, Simona. Some Aspect of Fabric Drape. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2007, **15**(4), 39–45.
34. MURDOCK, L. Kelly. *3ds Max 2012 Bible*. 1 ed. Wiley, 2011, 1250.
35. CHOPINE, Ami. *3D Art Essentials : the Fundamentals of 3D Modeling, Texturing and Animation*. 2011, 274.
36. BIRN, Jeremy. *Digital Lightning and Rendering*. 2. ed. New Riders, 2006, 432.
37. JEONG, Y. J. A Study of Fabric-drape Behaviour with Image Analysis Part I: Measurement, Characterisation, and Instability. *Journal of the Textile Institute*, 1998, **89**(1), 59–69, doi: 10.1080/00405009808658597.
38. JEONG, Y. J. , PHILLIPS, D. G. A Study of Fabric-drape Behaviour with Image Analysis. Part II: The Effects of Fabric Structure and Mechanical Properties on Fabric Drape. *Journal of the Textile Institute*, 1998, **89**(1), 70–79, doi:10.1080/00405009808658598.
39. PLUMLEE, Traci May, EISCHEN, Jeffrey, KENKARE, Narahari, PANDURANGAN, Pradeep. Evaluating 3D shape simulations : Method and Metrics, [dostopno na daljavo], [citirano 20. 1. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: [http://www.ncsu.edu/project/ntcprojects/projects/F02-S08/Paper\\_Indedec\\_Sept03.pdf](http://www.ncsu.edu/project/ntcprojects/projects/F02-S08/Paper_Indedec_Sept03.pdf).
40. BEHERA, B. K., PATTANAYAK, Ajit Kumar. Measurement and modeling of drape using digital image processing. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 2008, **33**, 230–238, doi?
41. KENKARE, Narahari, PLUMLEE, Traci May. Fabric Drape Measurements: a modified Method Using Digital Image Processing. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Measurement*, 2005, **4**(3), [dostopno na daljavo], [citirano 25. 1. 2013] Dostopno na svetovnem spletu: [http://faculty.mu.edu.sa/public/uploads/1345907225.1717Plumlee\\_full\\_148\\_05.pdf](http://faculty.mu.edu.sa/public/uploads/1345907225.1717Plumlee_full_148_05.pdf).
42. HAMDJ, Thuraya, GHITH, Adel, FAYALA, Faten. *Study of drape parameter using image analysis. International Journal of Engineering Science and Technology*, 2013, **5**(7), 1456– 1464.
43. Image] [dostopno na daljavo], [citirano 23. 1. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://rsbweb.nih.gov/ij/>>.
44. RUSS, C. John. *The Image Processing Handbook*, 6th ed. CRC Press 2011, 885.
45. MOGGRIDGE, Bill. *Designing Interactions. The MIT Press, 1.ed, 2007, 766*.
46. VIDMAR, Žan. *Primerjava različnih upodobljivvalnikov v programu Autodesk Maya : diplomsko delo*. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, 2013, 49.