

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Fizika – 1. stopnja

Matjaž Drolc

Simulacija tkanin v realnem času

Seminar

Mentor: prof. dr. Rudolf Podgornik

Ljubljana, 2014

Kazalo

1	Uvod	4
2	Fizika tkanin	4
2.1	Elastomehanski model povesa	5
3	Fizikalni modeli tkanin za simulacije v realnem času	6
3.1	Splošne lastnosti modela	7
3.2	Zvezna obravnava	8
3.3	Geometrijski model	9
3.4	Sistem mas in vzmeti	11
3.4.1	Enačbe sistema	12
3.4.2	Izbira koeficientov vzmeti	12
4	Onstran diferencialnih enačb	14
4.1	Trki	14
4.2	Prilagajanje natančnosti	15
4.3	Pozicijske metode	15
5	Zaključek	16
	Literatura	17

Simulacija tkanin v realnem času

POVZETEK

V seminarju orišem zgodovino oblek v videoigrah. Preletim fizikalne lastnosti tkanin ter pregledam fizikalne modele. Obravnavam elastomehanski model povesa tkanine pod lastno težo. Nadaljujem z diskusijo o lastnostnih modela, ki ga naredijo primerne za uporabo v realno-časovnih aplikacijah. Podrobneje obravnavam kontinuumski model z metodo končnih elementov, geometrijski model z uvedbo potencialne energije v odvisnosti od deformacije ter model tkanine z omrežjem točkastih mas in vzmeti. Nadalje obravnavam še obvladovanje trkov, dinamično prilagajanje natančnosti in problem prekomernega raztezanje oblek in togosti diferencialnih enačb. Poleg fizikalnih modelov omenim še pozicijske metode.

1 Uvod

Današnji filmi ter računalniške igre se zahvaljujoč tehničnemu napredku od tistih s sredine prejšnjega stoletja bistveno razlikujejo. Napredek pri računski moči strojne opreme ter vedno boljši modeli in algoritmi so omogočili bistven napredek pri realističnosti virtualnega sveta [1]. Obleke, ki so bile nekoč toge, je danes mogoče v realnem času simulirati v nekaj tisoč točkah. Pri tem je ključna sestavina fizikalni model materiala [2].

Prvi članki na temo fizikalne simulacije oblek so iz leta 1987. Terzopoulos et al. opišejo sistem temelječ na Lagrangeovih enačbah gibanja in elastični energiji površine. Ta metoda je omogočala simulacijo enostavnih prizorov, kot je npr. plapolajoča zastava ali pa prost poves pravokotnega kosa blaga. Razvoj na področju modeliranja teles, animacije in zaznavanja trkov je kasneje omogočil simulacijo oblek na telesih [3].

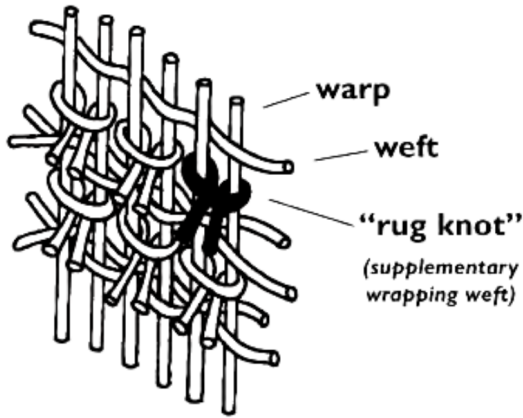
Sistemi za simulacijo oblek namenjeni tekstilni in modni industriji se od tistih v igrah močno razlikujejo. Prvi morajo biti splošnejši: kosi blaga so lahko veliki, blago je lahko v mnogo različnih oblikah, upoštevati je potrebno anizotropne lastnosti in nelinearnost. Nasprotno so sistemi za simulacijo tkanin in oblek v igrah bolj specializirani in poenostavljeni, kajti prioriteta je učinkovitost oz. hitrost.

2 Fizika tkanin

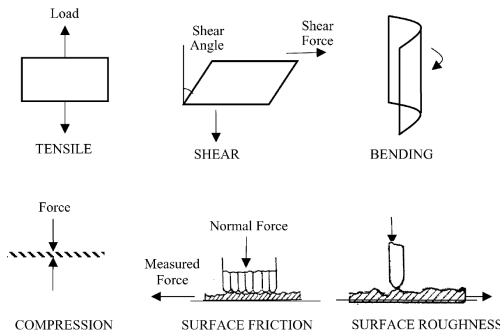
Tekstilni materiali niso enostaven sistem, njihovo vedenje pa je odvisno od številnih parametrov, kot so npr. vrsta vlaken (volna, bombaž, sintetika...), struktura niti, način pletenja, elastičnost, viskoznost, plastičnost in trdnost.

Mehanične lastnosti nekega materiala lahko eksperimentalno določimo s standardiziranim sistemom testov Kawabata [4]. Ta sistem predpostavlja, da je tkanina homogen anizotropen material z dvema značilnima smerema: osnovna smer (*warp*) ter smer votka (*weft*). Anizotropnost je močno odvisna od načina pletenja. V primerjalni analizi 18 vzorcev tkanin [5] se razmerje med prožnostnima moduloma v obeh smereh giblje v razponu med 0,67 in 0,97. V sistemu Kawabata v obeh smereh merimo odvisnost sile od deformacije pri

- *tenziji*: enoosna sila v ravnini materiala,
- *strigu*: strižna sila v ravnini materiala,
- *upogibu*: sila izven ravnine materiala in
- *kompresiji*: enoosna sila pravokotno na ravnino materiala.



Slika 1: Mikrostruktura tkanine, ki prikazuje dve značilni smeri: smer osnovne niti (*warp*) in smer votka (*weft*) [6].



Slika 2: Eksperimenti po sistemu Kawabata. Merimo odvisnost sile in deformacije za a) sile v ravnini blaga: osonno silo (tenzija) in b) strižne sile, c) sile izven ravnine materiala, ki povzročajo upogib, d) kompresijske sile pravokotne na ravnino materiala ter e) in f) površinske lastnosti [7].

Ti štirje kvalitativno različni tipi deformacije nam potem služijo kot osnova za izpeljavo modelov, ki jih lahko uporabimo za simulacijo.

2.1 Elastomehanski model povesa

Obravnavajmo tanko okroglo elastično izotropno ploskev, ki je v nedeformiranem stanju ravna. Ploskev ima debelino h , gostoto ρ , polmer R , Youngov modul E in Poissonovo razmerje ν . Obesimo jo na sredini (slika 3a) ter opazujemo, kako se povesi. Zanima nas število zavihkov v odvisnosti od razmerja med velikostjo in težo ploskve. Predpostavimo, da se material ne razteguje, zato upoštevamo samo napetost zaradi upogiba. Celotno energijo sistema, ki je sestavljena iz potencialne energije zaradi gravitacije in energije zaradi upogiba, zapišemo kot integral po površini ploskve A :

$$E = E_{\text{upogib}} + E_{\text{gravitacija}} = \frac{B}{2} \int_A \frac{1}{R_c^2} dA - h\rho g \int_A z dA.$$

$\frac{B}{2} \frac{1}{R_c^2}$ predstavlja ploskovno gostoto elastične energije zaradi upogiba. Merilo upogiba je v tem primeru krivinski radij R_c . Izraz je izpeljan kot projekcija



Slika 3: a) Poves elastične ploskve vpete v eni točki. b) Poves elastične ploskve položene na mizo [8].

enačb linearne elastičnosti na ploskev. B je upogibna togost, ki se s prej omenjenimi lastnostmi ploskve izraža kot $B = Eh^3/12(1 - \nu^2)$. Iskanje minimuma energije si bolje predstavljamo, če ploskev obravnavamo kot plašč stožca. Ker je neraztegljiva, ima ta stožec konstantno dolžino stranskega roba. Če bo ploskev imela več gub, se bo zmanjšal obseg roba osnovne ploskve (krog), višina stožca pa se bo povečala. To pa pomeni, da se bo znižalo težišče in potencialna energija. Tako smo z nekaj sklepi demonstrirali, kako povečanje števila gub sicer poveča elastično energijo zaradi upogiba, po drugi strani pa se težišče in potencialna energija znižata. Podrobnejšo izpeljavo s podobnimi predpostavkami najdemo v [8]. Avtor s pomočjo dimenzijske analize zgoraj zapisanega integrala definira karakteristično dolžino $l_g = (B/h\rho g)^{1/3}$, ki odraža uravnotežanje med gravitacijsko in upogibno energijo. Nato pa za velike ploskve, kjer je $R/l_g \gg 1$ oceni število zavihkov n z izrazom

$$n \sim \frac{(R/l_g)^{3/4}}{\ln(R/R_*)^{1/4}},$$

kjer je R_* radij konice. Podobne kvalitativne zakone je mogoče izpeljati še za druga vpetja.

3 Fizikalni modeli tkanin za simulacije v realnem času

V tem poglavju si bomo v splošnem ogledali zahtevane lastnosti za fizikalni model, ki ga lahko uporabimo v računalniški simulaciji v igrah ali film, nato

pa sledi konkretnjša obravnava treh modelov, s katerimi lahko izvedemo dinamično simulacijo tkanin:

- zvezni model,
- geometrijski model,
- model mas in vzmeti.

3.1 Splošne lastnosti modela

Fizikalni model, ki je primeren za uporabo v filmu ali igri, mora biti enostaven, hiter in stabilen ter mora dajati vizualno zadovoljive rezultate. Vse te lastnosti si med sabo nasprotujejo, zato je potrebno najti primeren kompromis.

Hitrost in robustnost Z vidika programiranje je centralni del igre igralna zanka (*game loop*). V tem kosu kode igra 30-60 krat na sekundo prebere vhodne podatke s tipkovnice, miške, omrežja ter ostalih naprav, posodobi stanje virtualnega sveta in ga izriše na zaslon [9, str. 15-16]. Zaradi interaktivnosti se morajo simulacije v igrah izvajati hitro, hkrati pa morajo biti robustne, saj igralec ves čas vpliva na razvoj dogodkov v virtualnem svetu.

Napake Za računalniško simulacijo model kar se da poenostavimo. Poleg odstopanj od realnosti zaradi nenatančnosti modela so v simulaciji tudi napake zaradi diskretizacije zveznih enačb in pa zaokroževanja. Napake lahko razdelimo v naslednje kategorije [10]:

- *Neopazljive*. To so napake, ki jih povprečen človeški opazovalec ne opazi.
- *Vidne, a omejene*. To so napake, ki jih je mogoče opaziti, a v omejenem obsegu.
- *Katastrofalne*. Napake, ki destabilizirajo simulacijo. Zgodi se t.i. numerična eksplozija. V tem primeru simulacija preide v stanje, iz katerega jo je težko popraviti.

Analiza opaznosti napak je pomemben del načrtovanja fizikalnega modela igre, saj lahko tako prihranimo nekaj računske moči za natančnejšo simulacijo tam, kjer je to bolj vidno.

3.2 Zvezna obravnava

Tkanino obravnavamo kot 2D ploskev, ki se giblje v 3D prostoru. Ločimo obravnavo raztezanja in strižnih deformacij ter upogiba [11].

Razteg in strižne deformacije Razteg in strižne deformacije obravnavamo v ravnini materiala s pomočjo Hookovega zakona. Lastnosti materiala opišemo z Youngovima moduloma v dveh smereh (E_x in E_y), Poissonovima razmerjema v dveh smereh (ν_{xy} , ν_{yx}), strižnim modulom E_s ter gostoto ρ . Uvedemo naslednje koordinate

$\mathbf{m} \in \mathbb{R}^2$	položaj točke na ploskvi v nedeformiranem stanju
$\mathbf{u}(\mathbf{m}) \in \mathbb{R}^2$	deformacija ploskve
$\mathbf{x}(\mathbf{m}) = \mathbf{m} + \mathbf{u}(\mathbf{m})$	deformiran položaj točke na ploskvi

Razteg in strižno deformacijo opišemo z deformacijskim tenzorjem ϵ :

$$\epsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{m}} + \frac{\partial \mathbf{u}^T}{\partial \mathbf{m}} \right) = \begin{pmatrix} \epsilon_x & \gamma_{xy} \\ \gamma_{xy} & \epsilon_y \end{pmatrix}.$$

To je 2×2 simetrični tenzor, kjer diagonalna elementa ϵ_x in ϵ_y predstavljata relativne raztezke v smereh x in y . Izvendiagonalni element γ_{xy} pa opisuje strižno deformacijo. Zaradi simetričnosti lahko tri različne elemente tenzorja zapišemo kot vektor $\tilde{\epsilon}$:

$$\tilde{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}.$$

Deformacijo z mehansko napetostjo σ povežemo z zakonom

$$\sigma = \mathbf{c} \tilde{\epsilon}.$$

Tenzor \mathbf{c} v tej relaciji opisuje elastične lastnosti materiala. S prej omenjenimi lastnostmi materiala se izraža kot

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_x\nu_{xy}}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{E_y\nu_{xy}}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ 0 & 0 & E_s \end{pmatrix}.$$

Iz napetosti σ lahko potem izračunamo sile.

Upogib Upogib obravnavamo s predpostavko, da se površina ne razteguje. To se zdi protislovno s prejšnjim odstavkom, a taka predpostavka ima za posledico, da je energija upogiba odvisna od kvadrata položajev, sila pa linearna, kar močno pomaga pri simuliranju. Gre za izometrične modele upogiba, o katerih si bralec lahko prebere več v [12].

Upogib obravnavamo v 3D prostoru. V tem primeru ga merimo s povprečno ukrivljenostjo H , ki jo povežemo z divergenco normale ploskve $\nabla \cdot \hat{n}$:

$$H = -\frac{1}{2}\nabla \cdot \hat{n}.$$

Za tako izražen prispevek k energiji zaradi elastičnega upogiba E_b velja naslednja sorazmernost:

$$E_b \propto \int H^2 dA,$$

kjer je dA diferencialni element površine. Sorazmernostna konstanta je odvisna od materiala. Prispevek k sili zaradi upogiba je odvod energije po koordinatah.

Simulacija Po zapisu osnovnih enačb za kontinuum le te diskretiziramo z metodo končnih elementov. Površino razdelimo v trikotnike in ustrezno prepisemo gornje enačbe v diskretno obliko. Ko imamo enačbe v diskretni obliki, lahko tudi združimo prispevke sil zaradi raztega, striga in upogiba, iz česar lahko simuliramo gibanje ogljišč trikotnikov. Ker smo razteg in upogib obravnavali v 2D prostoru, moramo poskrbeti še za ustrezno projekcijo v 3D prostor.

3.3 Geometrijski model

Predstavljajmo si, da je tkanina mreža majhnih trikotnikov, ki imajo skupna ogljišča in robove. Medsebojni položaji teh trikotnikov v prostoru ter raztegi njihovih robov so povezani z deformacijo. Določeni konfiguraciji trikotnikov lahko pripišemo potencialno energijo na podlagi deformiranosti. Iščemo tak zapis energije, ki bo odvisen od položajev ogljišč trikotnikov. Gradient tako izražene energije nam da sile, ki delujejo na točke trikotne mreže. Skupno potencialno energijo E^{skupna} sestavimo iz prispevkov, ki predstavljajo strig, razteg in upogib [13]. Pri zapisu posameznega prispevka si pomagajmo z izrazom za energijo raztegnjene vzmeti v 1D prostoru

$$E_{\text{vzmet}} = \frac{k}{2}\Delta x^2.$$

Energija je sorazmerna kvadratu raztega in pripadajočemu koeficientu vzmeti, ki raztezek povezuje s silo po Hookovem zakonu. V 3D prostoru bi podoben izraz za energijo zapisali kot

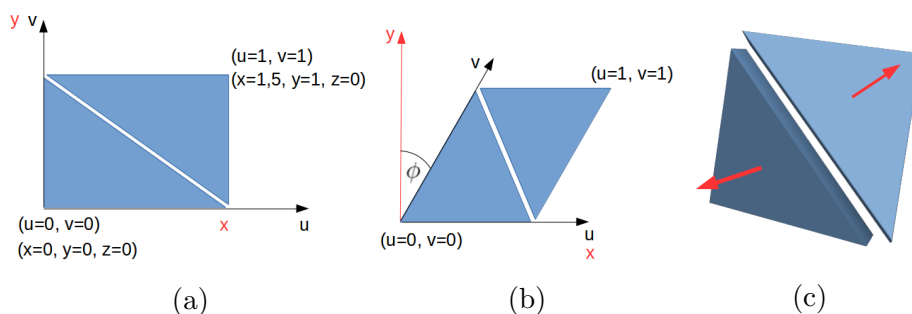
$$E_{\text{vzmet}} = \frac{k}{2} \|\Delta \mathbf{x}\|^2 = \frac{k}{2} \Delta \mathbf{x}^T \cdot \Delta \mathbf{x}.$$

Po analogiji poskusimo zapisati vse tri tipe deformacij (razteg, strig, upogib) v podobni obliki. Torej, vsaki vrsti deformacije bomo za vsak trikotnik pripisali posplošeno koordinato deformacije \mathbf{C} , sorazmernosti koeficient k in pripadajočo energijo

$$E = \frac{k}{2} \mathbf{C}^T \mathbf{C}.$$

Koeficiente k lahko dobimo eksperimentalno s sistemom testov Kawabata.

2D ploskev materiala je parametrizirana s koordinatama u in v , ki ustrežata dvema značilnima smerema nedeformirane tkanine; položaj točke (u, v) v 3D prostoru po deformaciji nam daje vektorsko polje $\mathbf{w}(u, v)$. V nadaljnjih enačbah bom obravnaval \mathbf{w} in (u, v) zaradi preglednosti kar v zvezni obliki, vendar so v resnici te vrednosti diskretizirane v trikotno mrežo. Ker so trikotniki majhni, lahko med oblikama prehajamo brez težav.



Slika 4: Deformacije v trikotniškem modelu: a) razteg, kjer se dolžine v sistemih uv in xyz razlikujejo, b) strig s strižnim kotom ϕ , c) upogib z označenima normalama trikotnikov

Razteg Označimo $\mathbf{w}_u = \partial \mathbf{w} / \partial u$ in $\mathbf{w}_v = \partial \mathbf{w} / \partial v$. Ta dva odvoda opisujeta razteg posameznega trikotnika v smeri u in v . Če je blago neraztegnjeno v smeri u , velja $\|\mathbf{w}_u\| = 1$; podobno za smer v . Posplošena koordinata raztega je potem

$$\mathbf{C}_i^{\text{razteg}} = a \begin{pmatrix} \|\mathbf{w}_u\| - 1 \\ \|\mathbf{w}_v\| - 1 \end{pmatrix}.$$

$\|\mathbf{w}_u\| - 1$ in $\|\mathbf{w}_v\| - 1$ predstavljata relativna raztežka trikotnika v smereh u in v , a pa označuje površino trikotnika v koordinatah uv .

Strig Kot posplošeno koordinato striga uporabimo kar strižni kot. Ker so koti striga majhni in ker sile, ki nasprotujejo raztegovanju, zagotavljajo, da sta $\|\mathbf{w}_u\| \approx \|\mathbf{w}_v\| \approx 1$, lahko strižni kot, ki je v ravnovesju 0, izrazimo kar s skalarnim produktom

$$\mathbf{C}_i^{\text{strig}} = a\mathbf{w}_u^T \mathbf{w}_v.$$

Upogib Upogib merimo prek kota med normalama \mathbf{n}_1 in \mathbf{n}_2 sosednjih trikotnikov, ki imata skupni rob s smerjo \mathbf{e} . Koordinato upogiba za par j zapišemo kot $\mathbf{C}_j^{\text{upogib}} = \Theta$. Velja $\sin(\Theta) = \|\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2\|$ in $\cos(\Theta) = \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2$.

Energija sistema in sile Skupna energija sistema trikotnikov dobimo tako, da seštejemo prispevke k energiji zaradi raztega, striga in upogiba. Prispevke zaradi raztega in striga seštevamo po posameznih trikotnikih, prispevke zaradi upogiba pa moramo sešteti po parih sosednjih trikotnikov:

$$\begin{aligned} E^{\text{skupna}} &= \sum_i \frac{k_{\text{razteg}}}{2} \mathbf{C}_i^{\text{razteg}T} \mathbf{C}_i^{\text{razteg}} \\ &+ \sum_i \frac{k_{\text{strig}}}{2} \mathbf{C}_i^{\text{strig}T} \mathbf{C}_i^{\text{strig}} \\ &+ \sum_j \frac{k_{\text{upogib}}}{2} \mathbf{C}_j^{\text{upogib}T} \mathbf{C}_j^{\text{upogib}} \end{aligned}$$

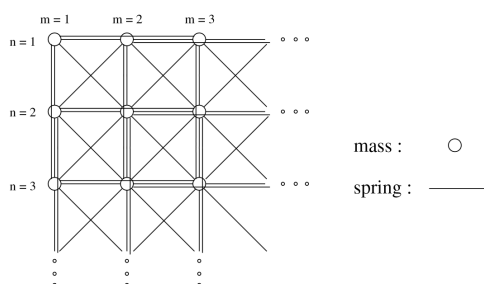
kjer i teče po vseh trikotnikih in j po vseh parih sosednjih trikotnikov. Po diskretizaciji enačb potencialna energija postane odvisna zgolj od koordinat oglišč trikotnikov. Z izračunom divergence energije torej dobimo silo, ki deluje na vsako oglišče trikotnikov, s silo pa potem lahko izračunamo premikanje oglišč.

3.4 Sistem mas in vzmeti

Elastično snov si je mogoče predstavljati tudi kot sistem točkastih mas, med katere napnemo vzmeti (slika 5). Prednost takega sistema je enostavnost enačb za tak sistem, saj je sila vzmeti odvisna samo od raztezka. Vendar pa je vprašljiva ustreznost take poenostavitve: [14]:

- vedenje materiala je odvisno od načina, kako mrežo točkastih mas povežemo z vzmetmi;
- včasih je težko uskladiti konstante vzmeti na način, da dosežemo želen učinek;

- sistem mas in vzmeti ne vsebuje informacije o volumnu snovi. Fizika sistema mas in uteži ne preprečuje, da bi tkanina penetrirala sama vase. Take probleme moramo reševati z dodatnimi koraki v postopku simulacije.



Slika 5: Omrežje vzmeti s kvadratno osnovno celico. V nedeformiranem stanju je omrežje ravninsko [15].

3.4.1 Enačbe sistema

Tak sistem lahko fizikalno opišemo z uporabo Hookovega in Newtonovega zakona. Sila med točkastima masama je sorazmerna raztežku.

Najprej zapišemo silo med masama i in j , ki sta povezani z vzmetjo s koeficientom $k_{i,j}$ in dolžino v neobremenjenem položaju l^0 .

$$\mathbf{f}_{i,j} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = k_{i,j} \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|} (|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| - l^0), \mathbf{f}_{j,i} = -\mathbf{f}_{i,j}.$$

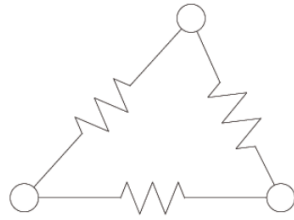
$\mathbf{f}_{i,j}$ je vektor sile na maso i , ki jo povzroča vzmet med masama i in j . S seštevanjem sil potem dobimo vsoto vseh sil na maso i : $\mathbf{f}_i = \sum_j \mathbf{f}_{i,j}$.

3.4.2 Izbira koeficientov vzmeti

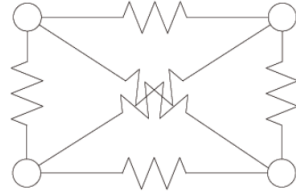
V tem razdelku se ukvarjamo z vprašanjem, kako moramo postaviti omrežje vzmeti in kakšni naj bodo njihovi koeficienti v odvisnosti od materialnih lastnosti (Youngovega modula E , Poissonovega razmerja ν). V tem primeru obravnavamo izotropno snov.

Trikotna mreža Obravnavamo trikotno mrežo (slika 6a). V nedeformiranem stanju so trikotniki enakostranični. Na vsakem robu trikotnika je med oglišči napeta vzmet. Enačbe iz zveznega modela z metodo končnih elementov za tako mrežo pripeljemo do linearne oblike [16]. Podobno storimo še z enačbami modela z vzmetmi, nato pa primerjamo rezultata. Če je Poissonovo razmerje $\nu = 1/3$, je koeficient vzmeti

$$k = Eh \frac{\sqrt{3}}{4}.$$



(a) Trikotna mreža



(b) Pravokotna mreža

Slika 6: Ko ustvarjamo simulacijo s sistemom mas in vzmeti, se moramo odločiti, kako bomo zasnovali povezave med točkastimi masami [16].

h je debelina materiala. Za ostala Poissonova razmerja analitične rešitve ni, lahko pa zgornji izraz pri majhnih deformacijah vzamemo kot ustrezen približek. Poissonovo razmerje je posledica težnje snovi, da pri deformaciji ohranja svoj volumen oziroma v primeru ploskev svojo površino. Model s točkastimi masami in vzmetmi ohranitve površine ne vsebuje. Neničelno Poissonovo razmerje je posledica strukture mreže.

Pravokotna mreža Zamislimo si lahko pravokotno mrežo mas in vzmeti, kjer slednje povezujejo le ogljišča vzdolž robov pravokotnika. Če deformiramo tako mrežo v smeri vzporedni robovom, deformacije v transverzalni smeri ne bo. Poissonovo razmerje take mreže bi bilo 0. Ta problem rešimo z dodatkom vzmeti napetih vzdolž diagonal pravokotnika (slika 6b). Celica torej vsebuje 6 vzmeti: 4 med sosednjimi ogljišči in 2 diagonalno. Spet izpeljemo vse enačbe za sistem na dva načina: prek metode končnih elementov in s seštevanjem sil vzmeti. Izkaže se [16], da mora biti tako kvadratno omrežje prednapeto, če želimo zadostiti dobljenim enakostim. Torej, dolžina nenapete vzmeti l^0 razdalja med točkama d^0 kvadratne celice v statičnem ravnovesju nista več enaki. Za prenapeto konstrukcijo in Poissonovo razmerje $\nu = \frac{1}{3}$ enačbe lahko rešimo analitično. Ugotovimo:

$$k_{\text{rob}} = \frac{5}{16}hE, \quad l_{\text{rob}}^0 = \frac{6}{5}d_{\text{rob}}^0$$

$$k_{\text{diagonala}} = \frac{7}{16}hE, \quad l_{\text{diagonala}}^0 = \frac{6}{7}d_{\text{diagonala}}^0.$$

k_{rob} in $k_{\text{diagonala}}$ označujeta koeficienta vzmeti, l_{rob}^0 in $l_{\text{diagonala}}^0$ dolžino neraztegnjenih vzmeti, d_{rob}^0 in $d_{\text{diagonala}}^0$ pa razdalje med ogljišči kvadrata v statičnem ravnovesju. Vzmeti vzdolž robov so torej v ravnovesju skrčene, vzmeti vzdolž diagonal pa raztegnjene.

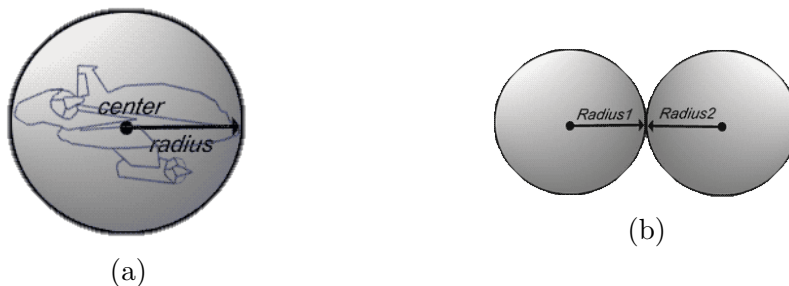
4 Onstran diferencialnih enačb

Z obravnavanimi modeli smo opisali sam material oz. njegove lastnosti povezane z deformacijami, a to še ni vse. V simulacijah v igrah visijo obleke na likih, zato moramo obravnavati trke med tkaninami in drugimi objekti. Čim bolje izkoristiti računsko moč z dinamičnim prilagajanjem natančnosti in skrbeti za stalnosti sistema diferencialnih enačb.

4.1 Trki

Diferencialne enačbe opisujejo zvezni del gibanja, ne vsebujejo pa opisa trkov, zato moramo po vsakem koraku simulacije pregledati vse objekte in ugotoviti ali je kak par objektov trčil. Če virtualni svet v igri vsebuje n objektov, je parov n^2 . Proces detekcije trkov torej pohitrimo tako, da čim hitreje iz pregledovanja izločimo čim več parov. To lahko storimo tako, da prostor razdelimo v podprostore. Ko iščemo kandidate za trk z nekim objektom lahko potem pregledamo samo podprostor z objektom in sosednje podprostore, ostalih pa ne. Nadalje zaznavanje trkov pohitrimo tudi s poenostavljanjem geometrije objektov, npr. tako da vsakemu objektu pripišemo orisano sfero. Tako lahko mnoge pare zelo hitro izločimo, ko ugotovimo, da je razdalja med središčema krogel večja od vsote radijev.

Ko najdemo pare objektov, ki so trčili, imamo na izbiro fizikalne metode: v sistem umetno dodamo silo ali potencial, ki objekta odbije, ali pa malo manj fizikalne metode: izven okvira fizikalne simulacije spremenimo koordinate objektov.

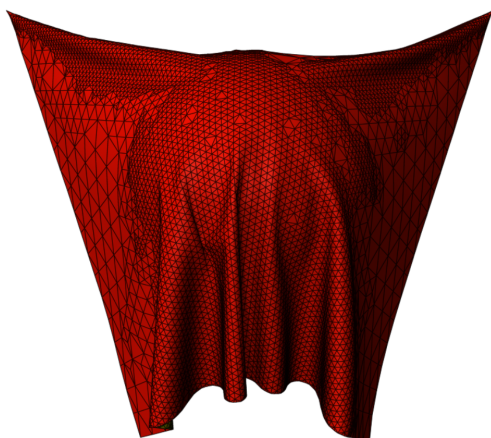


Slika 7: a) Objekt in njegova orisana krogla. b) Stanje, ko se dve orisani krogli stikata. [17]

4.2 Prilagajanje natančnosti

Pri realnočasovni simulaciji je procesorski čas močno omejen, zato ga mora simulator kar se da učinkovito izkoristiti. Natančnost simulacije nekega objekta je odvisna od zornega kota, okoliških objektov in deformacije. Vsi ti parametri se spreminjajo med samim potekom igre, zato se mora simulacija prilagajati.

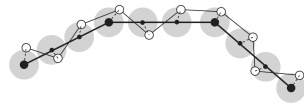
Prostorsko ločljivost (slika 8) spreminjamo tako, da površino tkanine sestavimo iz še več točk, a je pri tem potrebna pazljivost. Če bi v modelu z masami in vzmetmi na isti površini zgostili število vzmeti in mas, bi se spremenile lastnosti materiala, zato je potrebno prilagajati tudi mase in koeficiente.



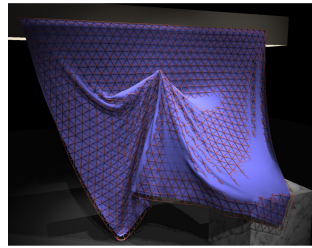
Slika 8: Kos blaga obešen na sfero. Slika prikazuje dinamično prilagajanje gostote končnih elementov (trikotnikov) [11].

4.3 Pozicijske metode

V modernih igrah se dosti uporabljajo pozicijske metode, za katere je značilna kvazistatična obravnava sistemov. Primer take metode so *geometrijske podatkovne metode*. Geometrijo obleke lahko ločimo na grobi in fini del. Grobi del simuliramo s fizikalnim modelom v realnem času. Tako dobimo opis obleke, ki pa mu manjkajo podrobnosti kot so npr. gubice. Če problem obravnavamo kvazistatično, lahko gubice definiramo kot funkcijo grobe strukture. Preslikavo med grobo in fino strukturo naračunamo pred zagonom igre, potem pa tako bazo uporabljamo kot nekakšen slovar [18].



(a)



(b)

Slika 9: a) Princip delitve na grobo in fino strukturo. Sive točke so simulirane fizikalno, nato pa je nanje dodana finejša struktura. b) Vizualizacija zgubane tkanine (pobarvano) in grobega modela (žičnati model) [18]

5 Zaključek

V tem seminarju smo videli nekaj najpogostejših načinov simuliranja oblek v izdelkih zabavne industrije. Računalniška znanost, fizikalni modeli in vedno hitrejši računalniki so mogočili velik napredek na tem področju. Obleke, ki so bile pred 30 leti togo telo, so danes kompleksna struktura iz več tisoč točk. Poleg tega so simulacije vedno bolj podobne realnim oblekam, tako da bo v prihodnosti mogoče tudi vizualno v igri oceniti vrsto blaga. Natančnejše simulacije oblek so pomembne tudi za tekstilno industrijo, nekatere sorodne metode pa se uporabljajo za simulacije mehkih tkiv v medicini.

Literatura

- [1] Wikipedia. History of video games — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2014. [Splet; dostopano 12. 3. 2014]. URL: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_video_games&oldid=599327408.
- [2] Justin Towell. A brief history of cloth physics, 2012. [Splet; dostopano 23. 3. 2014]. URL: <http://www.gamesradar.com/a-brief-history-of-cloth-physics>.
- [3] Nadia Magnenat-Thalmann and Pascal Volino. From early draping to haute couture models: 20 years of research. 2005.
- [4] Z Wu, CK Au, and Matthew Yuen. Mechanical properties of fabric materials for draping simulation. 2002.
- [5] Tatjana Mihailovic and Ljiljana Simovic. Comparative Analysis of the Elasticity of Clothing Fabrics. 2003.
- [6] An Introduction to Textile Terms. [Splet; dostopano 9. 4. 2014]. URL: <http://www.textilemuseum.org/PDFs/TextileTerms.pdf>.
- [7] C.K. Chan, X.Y. Jiang, K.L. Liew, L.K. Chan, W.K. Wong, and M.P. Lau. Evaluation of mechanical properties of uniform fabrics in garment manufacturing. 2006.
- [8] E. Cerda, L. Mahadevan, and J. M. Pasini. The elements of draping. 2003.
- [9] Loki Software, John R. Hall, and Loki Software Inc. *Programming Linux Games*. No Starch Press, 2001.
- [10] Thomas Y. Yeh, Glenn Reinman, Sanjay J. Patel, and Petros Faloutsos. Fool me twice: Exploring and exploiting error tolerance in physics-based animation. 2009.
- [11] Jan Bender and Crispin Deul. Efficient Cloth Simulation Using an Adaptive Finite Element Method. 2012.
- [12] Miklós Bergou, Max Wardetzky, David Harmon, Denis Zorin, and Eitan Grinspun. A quadratic bending model for inextensible surfaces. 2006.
- [13] David Baraff and Andrew P. Witkin. Large Steps in Cloth Simulation. 1998.

- [14] Matthias Müller, Jos Stam, Doug James, and Nils Thürey. Real Time Physics: Class Notes. 2008.
- [15] Xavier Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour. 1995.
- [16] B. A. Lloyd, G. Szekely, and M. Harders. Identification of Spring Parameters for Deformable Object Simulation. 2007.
- [17] Robert Dunlop. Using Bounding Spheres. [Splet; dostopano 21. 3. 2014]. URL: http://www.mvps.org/directx/articles/using_bounding_spheres.htm.
- [18] Jan Bender, Matthias Müller, Miguel A Otaduy, and Matthias Teschner. Position-based methods for the simulation of solid objects in computer graphics. 2012.