

## 3D vizualizacija poroznosti tkanin

### *3D Visualisation of Woven Fabric Porosity*

#### Izvirni znanstveni članek/*Original Scientific Article*

Prispelo/Received 08-2015 • /Sprejeto/Accepted 02-2016

#### Izvleček

Namen raziskave je bila analiza vpliva priprave tekstur za 3D vizualizacijo poroznosti tkanin, in sicer vrednotenje vpliva osvetlitve tkanine pri zajemu slik in način določanja praga histograma vzorcev za pripravo map poroznosti. Vpeljan je bil delokrog za vizualizacijo poroznih tekstilnih struktur, ki vključuje slikovne informacije in slikovno analizo teh za pridobivanje točnejših podatkov o porah. Izbrana je bila tkanina, iz katere so narejeni »rokavci«, ki so del gorenjske ljudske noše. Tkanina z izrazitimi znaki obrabe zaradi nošenja je bila izdelana v vezavi platno, z, glede velikosti in oblike, zelo neenakomernimi porami med osnovnimi in votkovnimi nitmi. Za čim bolj realistično 3D upodobitev je slikovna informacija o porah izjemno pomembna, zato je bil s procesom analize in 3D upodabljanja določen delokrog priprave teksture za vizualizacijo poroznosti tkanin. Tkanina je bila s fotografiranjem zajeta pri sedmih različnih osvetlitvah. S pomočjo programa za slikovno analizo ImageJ so bile fotografije analizirane s tremi različnimi postopki določanja praga histograma, in sicer z algoritmom Yen, z določanjem lokalnega minimuma med vrhovoma na histogramu vzorcev ter z ročnim (vizualnim) določanjem praga. Na ta način so bile ustvarjene različne slike, mape poroznosti, s katerimi je bila vizualizirana poroznost tkanine. Izvedena je bila slikovna analiza velikosti por, njihovega števila ter pokritosti površine s porami. Rezultati so pokazali odvisnost kakovosti slikovnih informacij tekstur od vrste in načina osvetljevanja, pri čemer je bila za pridobivanje informacij o poroznosti pomembna predvsem vrsta luči (razpršena luč, direktna luč) ter tudi število, postavitev in kombinacija luči. Poleg tega je bilo ugotovljeno, da je za 3D vizualizacijo analizirane tkanine z neenakomerno strukturo najustreznejša uporaba mape poroznosti, katere priprava vključuje metodo ročnega (vizualnega) določanja praga histograma.

Ključne besede: poroznost tkanin, 3D vizualizacija, slikovna analiza, mapa alfa, upravljanje slik

#### Abstract

*The aim of the research was to analyse the influence of texture preparation for 3D visualisation of woven fabric porosity, i.e. the analysis of the lighting influence while taking photographs of a fabric and the analysis of histogram threshold methods for the alpha map preparation. We introduced the process for the 3D visualisation of porous textile structures, which included image information and image analysis for the generation of accurate information about pores. We analysed a woven fabric used for "rokavci", which is a part of a folk costume originating from the Gorenjska region. The fabric with visible signs of being worn-out is woven in plain weave and the pores between warp and weft threads are rather uneven considering their size and shape. For a realistic 3D visualisation, image information about pores is extremely important; therefore, the process of texture preparation for the 3D visualisation of fabric porosity was defined, including the process of image analysis and 3D visualisation. The fabric was photographed at 7 different lighting schemes. Using the application ImageJ for image analysis, the pictures were processed with 3 various threshold methods, i.e. Yen algorithm, the method for defining the local minimum between histogram peaks and the method with a manual (visual) definition of the threshold. As a result, various images – alpha maps – were obtained and used for the 3D visualisation of fabric*

porosity. We also implemented the image analysis of pore sizes, their number and the area coverage of pores. The results showed dependency of image information quality on the type and manner of lighting, where the type of lights was predominantly important (diffuse light, direct light), followed by the number of lights, their placement and their combination. Furthermore, it was also established that for the 3D visualisation of the fabric with a distinctly uneven structure, the use of alpha maps created with the method of manual (visual) definition of histogram threshold is the most suitable.

Keywords: woven fabric porosity, 3D visualisation, image analysis, alpha map, histogram threshold

## 1 Uvod

Tekstilije se predstavljajo v širokem spektru vizualnih podob s skupno značilnostjo strukture, ki jo oblikujejo vlakna in preje, prepleteni na najrazličnejše načine. Vsi optični parametri, ki so rezultat teh značilnosti, morajo biti upoštevani pri modeliranju in vizualizaciji tekstilij. 3D vizualizacija tekstilij je faza, ki sledi simulaciji mehansko-fizikalnih lastnosti tekstilij. Videz tekstilnega materiala se lahko ustvari na različne načine, ki so odvisni od namena upodabljanja in od dostopnosti uporabe različnih naprav, s katerimi lahko generiramo teksturo tekstilnega materiala. Eden najpomembnejših ciljev 3D računalniške grafike je realistična upodobitev. Upodobitev tekstilij s pomočjo 3D računalniške grafike je posebno kompleksen postopek, ki vključuje modeliranje, teksturiranje, osvetljevanje in upodabljanje tekstilnega materiala. Videz tekstilij je odvisen od številnih dejavnikov, kot so: surovinska sestava vlaken, konstrukcija preje, kompozicija (tkanin, pletiv) in vrste poobdelave, ki vplivajo tudi na lastnosti, kot so masa tekstilije, gostota, debelina, togost, strižna in upogibna togost, drapiranje in zračna prepustnost [1]. Poleg tega je videz odvisen od optičnih pojavov na tekstiliji: od odboja, loma, sipanja, absorpcije svetlobe in svetlobne prepustnosti [2].

### 1.1 Upodabljanje – teksturiranje tekstilij

Upodabljanje kompleksne 3D strukture in teksture tekstilij ter njihove interakcije s svetlobo se izvaja na različne načine. Način obravnave tekstilnega materiala je odvisen predvsem od namena upodobitve. Tekstilije so pri 3D upodabljanju obravnavane kot površine (mreže segmentov) brez debeline, kot tanke ploskovne tvorbe ali kot volumetrični modeli. Upodabljanje videza lahko poteka s pomočjo 2D slik ali pa se kompleksna struktura tekstilij upodobi s 3D volumetričnimi podatki, ki ustrezno simulirajo interakcijo svetlobe s tekstilijo, kar rezultira v precej realnih upodobitvah.

Če je tekstilni material obravnavan kot tanka površina, lahko simuliran 3D model tekstilije teksturiramo s pomočjo lepljenja 2D tekstur. Pri tem se poslužujemo projekcije 2D slike na model ali pa izvedemo UV-lepljenje tekstur. Pri UV-lepljenju tekstur se 2D slika oziroma tekstura popolnoma prilagodi površini objekta, tudi tedaj, ko le-tega animiramo ali izdelamo njegovo simulacijo [3]. Ta način teksturiranja je zelo primeren za tekstilni material, saj se le-ta zaradi svoje gibkosti guba, dodeljena tekstura pa se temu prilagaja. Ker je tekstura dejanske tekstilije zelo kompleksna, je treba v virtualnem prostoru pripraviti številne slike (mape), ki vplivajo na ustvarjanje različnih optičnih (vizualnih) učinkov na njeni površini. Pomembno je, da lahko takšne mape s pomočjo 3D računalniških aplikacij poljubno sestavljamo, nadgrajujemo in z različnimi ukazi spreminjamo njihov vpliv na končni videz. Mape, ki se najpogosteje uporabljajo za upodobitev tekstilnega materiala so [3]: difuzna mapa (*ang. diffuse map*), ki predstavlja osnovno barvo teksture; reliefna mapa (*ang. bump map, displacement*), ki simulira relief tkanine; mapa normal (*ang. normal map*), ki daje tri kanale, potrebne za vpliv na X, Y in Z koordinato; mapa poroznosti (*ang. alpha map*) – sivinska slika, ki vpliva na videz prosojnosti teksture; zrcalna mapa (*ang. specular map*), ki določa območje teksture objekta, kjer je večja refleksija. Poleg omenjenih map se v računalniški grafiki za specifične namene uporabljajo še naslednje mape: mapa sijaja (*ang. glossy map*), mapa loma (*ang. refraction map*), mapa, ki objektu omogoča lastno sevanje svetlobe (*ang. self-illuminant map*).

### 1.2 Napredni načini upodabljanja površine tekstilij

Volumetrični modeli so zelo primerni za upodabljanje tekstilij. Principe volumetričnega upodabljanja razvijajo od leta 1990 in so primerni predvsem za prikaz makrostrukture, saj zelo upočasnijo proces generiranja slike. Za poglede od daleč oziroma za

potrebe predupodobljenih animacij in animacij v realnem času lahko te principe uporabljamo tako, da s pomočjo topologije 3D modela ustvarimo realistično 2D teksturo, ki jo pozneje implementiramo v proces lepljenja tekstur [4]. Kajiya et al. [5] so se ukvarjali z upodabljanjem krzna, Xu et al. [6] z upodabljanjem tekstilij, medtem ko so Perlin et al. [7] raziskovali vizualiziranje drugih reliefnih kompleksnih materialov. 3D vizualizacija je mogoča tudi s pomočjo natančne virtualne rekonstrukcije vseh komponent objekta, kot so vlakna, preje in ploskovne (tkane, netkane, pletene) strukture. Vizualizacija se v takem primeru začne z osnovnim elementom – vlaknom ali prejo. Pri historičnih tekstilijah podatke o parametrih pridobimo z natančno analizo fragmentov ohranjenega tekstilnega materiala. Nato na podlagi določenih parametrov osnovnih elementov simuliramo videz tekstilije [8]. V takšnem primeru upodobitev tekstilije ne vključuje njenih morebitnih poškodb in ni posnetek njenega dejanskega stanja. Raziskovalec Ximn et al. [9] je v raziskavah vizualiziral relief površine tekstilije s pomočjo analize silhuet slik, ustvarjenih s fotografiranjem vzorca tekstilije, ki se je postopno pomikal in upogibal čez oster rob. Tako so ustvarili veliko slik, ki so jih sestavili v 3D profil površine tekstilije.

Shuang Zhao et al. [10] je ustvaril volumetričen model tekstilije s pomočjo podatkov, pridobljenih z računalniško tomografijo (CT) z x-žarki, informacije o optičnih lastnostih tekstilije so dodali s pomočjo referenčnih fotografij.

Teksturo tekstilij lahko upodobimo tudi s pomočjo metode, imenovane dvosmerna teksturna funkcija (ang. *Bidirectional Texture Functions – BTF*), pri kateri upodabljanje izvedemo s pomočjo velikanskega števila fotografij površine, ki jih posnamemo pri najrazličnejših pogojih osvetlitve iz sedmih različnih zornih kotov, kar je procesorsko precej potratna metoda [11].

Za upodobitev tekstilnega materiala je pomembna uporaba ustreznih algoritmov za senčenje. Za realistično upodabljanje tekstilij lahko uporabimo model microfacet (ang. *microfacet distribution function – MDF*), ki sta ga predstavila Torrance in Sparrow [12]. Na podlagi tega modela je bilo razvitih veliko različnih tehnik, ki so bile ustvarjene za predstavitev anizotropnih površin. Yasuda pa je s skupino soavtorjev ustvaril model senčenja za tkanine, kjer je apliciral anizotropni odboj svetlobe glede na smer preje [13].

### 1.3 Poroznost tkanin

Na splošno so v tkaninah vsi prostori, zapolnjeni z zrakom, obravnavani kot pore. Tako je poroznost v tkaninah definirana kot delež zraka v tkanini [14]. Nekateri modeli poroznosti ne obravnavajo z vidika porazdelitve por in njihove oblike [15], medtem ko drugi modeli dobro opisujejo geometrično strukturo por [16–18]. Ključnega pomena za definicijo poroznosti so vezava ter premer osnovnih in votkovnih niti tako v vertikalni, kot tudi v horizontalni smeri. Pri tem pa je največji izziv matematična definicija teh premerov, ki zaradi derformabilnosti v vsakem izračunu, predvsem pri 2D modelih, zahteva določeno stopnjo poenostavitve. Horizontalna poroznost je tako definirana iz čiste geometrije projekcije niti in jo izračunamo iz faktorja pokritosti, medtem, ko je vertikalna poroznost določena z vertikalnimi porami, ki se v vertikalni smeri formirajo v mestih daljših neprepletenih delov osnovnih in votkovnih niti [19]. Točnejši so izračuni pri 3D pristopih, ki obravnavajo volumen poroznosti [20]. Ker je poroznost tkanin (tekstilij) tesno povezana z zračno prepustnostjo, jo v raziskovalnem delu avtorji velikokrat obravnavajo povezano ter pri tem odkrivajo matematične soodvisnosti. Zupin et al. [21] so, vključujoč več vidikov poroznosti in tri tipe por v tkaninah, predstavili model za napovedovanje zračne prepustnosti iz konstrukcijskih lastnosti tkanin. Ogulata in Mezarciöz [22] sta prav tako razvila teoretični model poroznosti in napovedovanje zračne prepustnosti, pri čemer nista upoštevala le zračnega pretoka skozi prostore med nitmi, temveč tudi med vlakni. Zaradi razlik med idealno in realno geometrijo avtorjema sicer ni uspelo dokazati popolne korelacije med izmerjeno in teoretično napovedano zračno prepustnostjo, vsekakor pa ta preprosti model lahko uporabimo za napovedovanje zračne prepustnosti različnih vrst tkanin. Jakšič [23] je razvil metodo določanja poroznosti ploskih tekstilij, s katero je mogoče določiti maksimalni in povprečni hidravlični premer por in njihovo porazdelitev v odvisnosti od vrste tekstilije. Rezultati raziskave so pokazali dobro korelacijo z meritvami na mikroskopu in SEM.

Poroznost tkanin lahko merimo tudi s slikovno analizo, pri čemer iz digitaliziranih slik tkanin z ustreznimi algoritmi pridobimo podatke o pokritosti površine in porah. Zaradi deformabilnosti tkanin so postopki zahtevni, z ustrežno opremo in z razvojem ustreznega algoritma pa jih lahko avtomatiziramo

[24–26]. Kang et al. je v svoji metodi predstavil postopek, kjer je vzorec tkanine osvetljen s transmisijo, prag pa je bil določen kot povprečje intenzitete ozadja slike brez upoštevanja vzorca tekstilije [24]. Cardamone et al. so vzorce osvetljevali z refleksijo in transmisijo, prag pa je določala z ločevanjem ustreznih vrednosti bimodalnih razporeditev sivinskih intenzitet histogramov digitalnih slik tkanin [25]. Tãpias et al. so za določanje pokritosti površine tkanin s CCD kamero razvili metodo, ki je vzorce osvetljevala s transmisijo. V nadaljevanju so s Fourierjevimi transformacijami (FT) in uporabo nekoliko prilagojenega Otsujevega algoritma za določanje praga histograma dobili odlične rezultate za tkanine v platnovi vezavi različnih gostot niti, debelin in lastnosti niti [26]. Slikovna analiza za določanje por je bila uporabljena tudi v raziskavah na netkanjih in specialnih tekstilijah [27].

Za upodobitev historične oziroma že nošene tekstilije ni primeren postopek modeliranja strukture tekstilnega materiala na osnovi strukture vlaken, preje in vezave, temveč posnetek (slikovna informacija) materiala, ki ga upodablamo. Za natančno upodobitev teksture materiala potrebujemo različne informacije o lastnostih njegove površine, ki jih pridobimo s pomočjo fotografij površine ter ustreznim slikovnim procesiranjem. Procesirane slike ali mape, ki jih potrebujemo za realistično upodobitev, dajejo informacije o barvi, reliefu, poroznosti, zrcalnosti, razpršenosti in o drugih lastnostih površine tekstilije.

Iz pregleda obstoječe literature ostaja neraziskano področje 3D vizualizacije poroznosti tekstilij, kjer je poroznost izrazito neenakomerna zaradi nošenja oziroma deformacij. Predstavljene metode se ukvarjajo le z rekonstrukcijo in simulacijo historičnih tekstilij brez očitnih znakov staranja, obrabe in deformacij. Poleg tega pa pregled stanja raziskav kaže, da so predstavljeni znanstveni postopki časovno zamudni in finančno potratni zaradi zajema točne topologije in geometrije modelov, ki lahko le omejeno in pri večji prosojnosti in zračnosti struktur upodobi prosojnost tekstilij.

Cilj predstavljene raziskave je uporaba novega delokroga za vizualizacijo poroznih tekstilnih struktur, ki vključuje slikovne informacije in slikovno analizo zadnjih za pridobivanje točnejših podatkov o porah. Namen raziskave so tudi analiza vpliva osvetlitve tkanine pri zajemu slik ter slikovna analiza in analiza izbranih operacij določanja praga histogramov slik za generiranje mape poroznosti. Analizirana

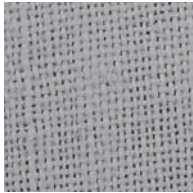
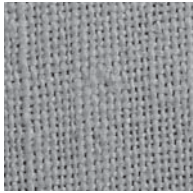
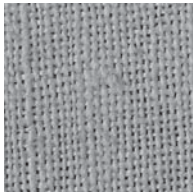
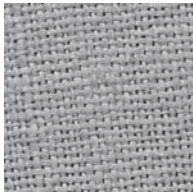
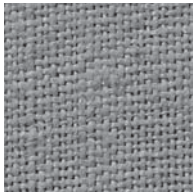
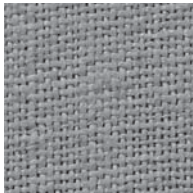
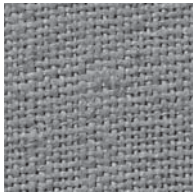
tkanina je del ljudske noše, ki smo jo predhodno modelirali in vizualizirali [28].

## 2 Eksperimentalni del

Pri 3D interpretaciji oblačil, predvsem kosov oblačil kulturne dediščine, potrebujemo zajem čim večje površine vzorcev (tekstilij), saj so za ustrezno upodobitev in vizualizacijo neenakomernosti v tekstilijah (odebelitve, obrabljenost itd.) ključnega pomena. Mikroskopska analiza je bila za našo raziskavo neustrezna. Zajemanje slikovnih informacij je pri vseh vzorcih potekalo na identični licni strani hrbtnega dela *rokavcev* gorenjske ljudske noše [28]. Analizirana je bila 100-odstotna bombažna tkanina z naslednjimi konstrukcijskimi parametri: platnova vezava, gostota osnovnih niti = 20 niti/cm, gostota votkovnih niti = 15 niti/cm, Z vitje osnovnih in votkovnih niti. Zajem je potekal s fotoaparatom Nikon (105 mm) pri sedmih različnih razpršenih in/ali direktnih osvetlitvah (ene in kombinacije dveh ali treh razpršenih in/ali direktnih luči) v fotostudiu Oddelka za tekstilstvo, grafiko in oblikovanje. Lastnosti luči so bile: moč 1000 W, tip IFF Q 1250, izdelovalec OSRAM. Na dveh lučeh z razpršenim osvetljevanjem (difuzne), ki sta tkanino osvetljevali z leve in desne strani, je bil nameščen razpršilec svetlobe Softbox. Na direktni luči, ki je tkanino osvetljevala frontalno, pa je bilo nameščeno senčilo za svetlobo. Vzorci za analizo velikosti 1500×1500 slikovnih točk so bili za nadaljnjo analizo izrezani iz sredine originalnih vzorcev formata .raw formata ter pretvorjeni v format .tiff.

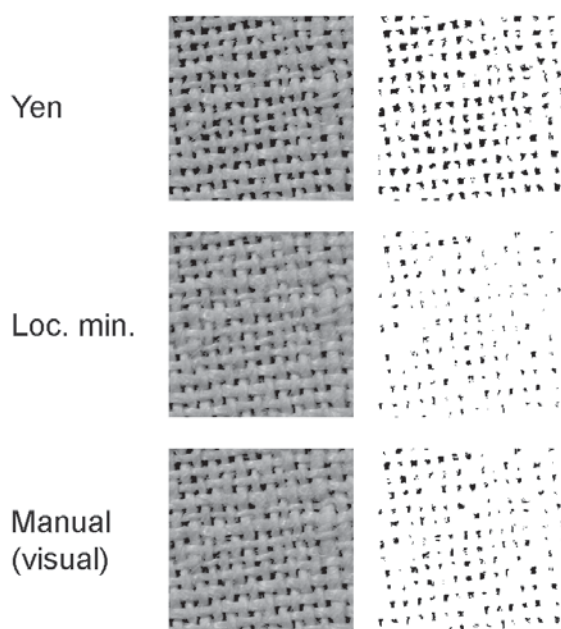
Eksperimentalni del smo z namenom pridobivanja ustreznih informacij za določanje mape poroznosti na različno osvetljenih vzorcih tkanin nadaljevali s pretvorbo v sivinske slike in izdelavo histogramov s programom za slikovno analizo ImageJ. Procesiranje slik ni bilo predmet te raziskave, saj smo želeli analizirati vpliv neobdelanih originalnih slik ter tako ohraniti informacijo vpliva različnega osvetljevanja na tkanine. Sledilo je določanje praga histogramov vzorcev, ki so bili osvetljeni s sedmimi različnimi kombinacijami razpršenih in direktnih luči. Izvedli smo operacijo globalnega določanja praga histogramov na celotnih slikah vzorcev ter tako z različnimi metodami segmentacije iz sivinskih slik ustvarili binarne slike [29]. V programu za slikovno analizo *ImageJ* smo testirali vse algoritme za določanje praga

Preglednica 1: Kombinacije luči, imena in slike vzorcev pri osvetljevanju identičnega hrbtnega dela rokavcev  
 Table 1: Combinations of lights, names and sample images acquired at different illumination settings of identical back part of "rokavci"

Vzorci / Samples	Razpršeno osvetljevanje / Diffuse lighting	Direktno osvetljevanje / Direct lighting	Slika vzorca / Sample image
1	desna in leva luč / right and left light	–	
2	desna luč / right light	–	
3	leva luč / left light	–	
4	desna luč / right light	direktna luč / direct light	
5	leva luč / left light	direktna luč / direct light	
6	desna in leva luč / right and left light	direktna luč / direct light	
7	–	direktna luč / direct light	



histogramov, ki jih ponuja funkcija *AutoThreshold*: *Huang*, *Intermodes*, *Isodata*, *Li*, *MaxEntropy*, *Mean*, *Min Error*, *Minimum*, *Moment*, *Otsu*, *Percentile*, *Reny-Entropy*, *Shanbhag*, *Triangle*. Z izjemo algoritmov *MaxEntropy*, *RenyEntropy* in *Yen* (ki so na naših slikah dali številčno zelo podobne rezultate) so preostali algoritmi pripeljali do neustreznih rezultatov mape poroznosti, saj je na slikah z različnim osvetljevanjem pri zajemu prišlo do čezmernega zapiranja por ali javljanja napake pri izračunu. Med omejenimi algoritmi smo izbrali algoritem *Yen* [30, 31]. Ker se je pri uporabi tega algoritma pri nekaterih vzorcih pokazala problematika prisotnosti dveh povezanih por, smo za določanje praga histogramov uporabili še dva dodatna postopka ter izvedli analizo in primerjavo.



Slika 1: Interesna območja map poroznosti pri treh postopkih določanja praga histograma: Yen, lokalni minimum in ročno

Figure 1: Areas of interest of alpha maps generated with three methods of histogram thresholding: Yen, Local minimum and Visual

Določanje por je torej potekalo na tri načine:

1. z algoritmom Yen;
2. z določanjem lokalnega minimuma med vrhova na histogramu vzorcev (lok. min.), histogrami analiziranih vzorcev sicer niso imeli očitne bimodalne razporeditve sivinskih intenzitetnih

vrednosti; vseeno pa je detajlna (številčna) analiza histogramov omogočala določanje pragov na točki lokalnega minimuma;

3. z ročnim (vizualnim) določanjem praga, ki je potekalo na izbranem (reprezentativnem) levem spodnjem območju velikosti 250\*250 slikovnih točk vseh vzorcev pri različnih osvetlitvah; to mesto je bilo zanimivo za analizo, saj so bili na njem pri uporabi algoritma Yen prisotni fenomen tako zaprtih kot tudi povezanih por; vizualno določanje je potekalo izključno z opazovanjem strukture tkanine, predvsem smo bili pozorni na potek osnovnih in votkovnih niti (torej, da se pora ni zajedala v nit) ter da so bile upoštevane specifikke tistih por, kjer je bil prostor med osnovnimi in votkovnimi nitmi zelo majhen (zaprt).

Na sliki 1 so predstavljena območja map poroznosti (alfa map) pri treh postopkih določanja praga histograma.

Sledila je slikovna analiza binarnih slik s porami, pri kateri so bili določeni naslednji rezultati: število por, delež pokritosti z določenimi porami ter povprečna velikost por.

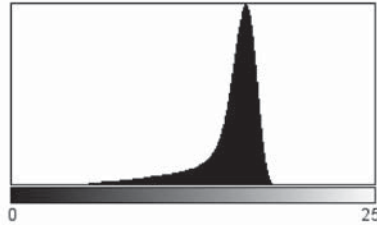
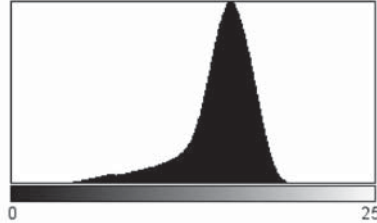
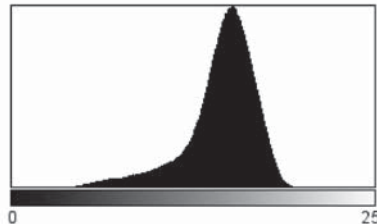
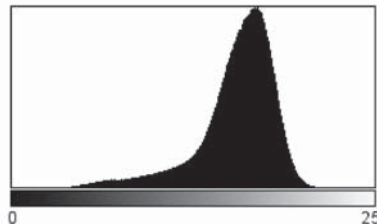
### 3 Rezultati z razpravo

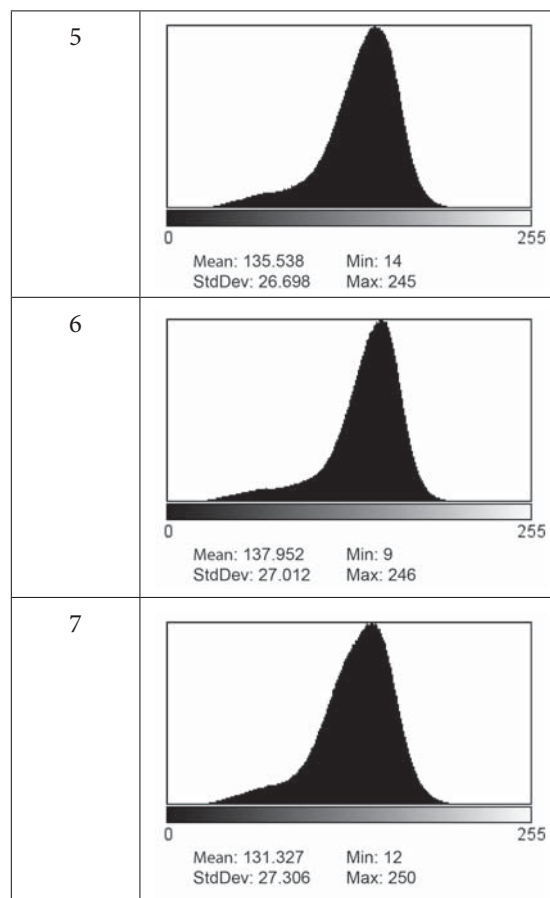
V preglednici 2 je prikazan vpliv osvetljevanja vzorcev na histograme slik tkanin, ki so bile pri zajemu osvetljene z različnimi kombinacijami razpršenih in direktnih luči. V preglednici 3 so prikazani rezultati slikovne analize binarnih slik poroznosti, ki so bile določene z algoritmom Yen, z določanjem lokalnega minimuma na histogramu ter z ročnim (vizualnim) določanjem praga na vzorcih pri različnih osvetlitvah. Rezultati vključujejo: sivinsko vrednost slikovne točke, na kateri je bil določen prag, število por, povprečno velikost por (št. slik. točk) in pokritost površine s porami (%).

Iz histogramov vzorcev tkanin, ki so bili osvetljeni z različnimi kombinacijami luči, vidimo razlike v njihovi obliki ter posledično zastopanosti sivin. Pri vzorcih, osvetljenih z direktnimi lučmi (vzorci 4, 5, 6, 7) je trend pojavljanja večjega števila slikovnih točk v srednje-sivinskem območju. Prav tako pri teh vzorcih histogrami tudi zavzemajo nekoliko širše območje porazdelitve sivinskih intenzitet slikovnih točk, saj so malo bolj kontrastni. Med temi vzorci nekoliko izstopa vzorec 4, ki ima povprečno vrednost sivinskih intenzitet najvišjo (157), prav

Preglednica 2: Histogrami vzorcev tkanin, ki so bile pri zajemu osvetljene z različnimi kombinacijami razpršenih in direktnih luči, kjer Mean, Min in Max pomenijo povprečne, minimalne in maksimalne vrednosti intenzitete histogramov, Stdev pa standardno deviacijo

Table 2: Histograms of woven fabric samples illuminated with different combinations of diffuse and direct lights, where Mean, Min and Max mean average, minimum and maximum values of histograms intensity and Stdev means Standard deviation

Vzorec / Sample	Histogram
1	 <p>Mean: 153.368    Min: 26 StdDev: 22.634    Max: 195</p>
2	 <p>Mean: 146.250    Min: 20 StdDev: 24.883    Max: 210</p>
3	 <p>Mean: 146.914    Min: 24 StdDev: 25.271    Max: 222</p>
4	 <p>Mean: 157.860    Min: 20 StdDev: 27.681    Max: 245</p>



tako pa se vrh histograma nahaja v najsvetlejši točki (173). Razlago za to lahko poiščemo le v morebitnem sovplivu vitja preje tkanine v smeri Z in direktnega osvetljevanja z desne strani (preglednica 1). Treba je omeniti, da so bile vse originalne slike po zajemu na splošno precej nekontrastne, s postopki procesiranja slik se namreč v tej raziskavi, kot je bilo že omenjeno, nismo ukvarjali in je predmet nadaljnjih raziskav. Glede na razporeditev sivin od največje do najmanjše intenzitete izstopata vzorca 1 in 7, pri čemer je razporeditev sivin pri vzorcu 1 (ki je bil osvetljen z dvema difuznima lučema) izrazito ožja od preostalih vzorcev, medtem ko je razporeditev pri vzorcu 7, ki je bil osvetljen le z direktno lučjo, razporeditev sivinskih intenzitet bistveno širša (najbolj kontrastna slika). Razpon intenzitetnih vrednosti, ki kaže na kontrast slike, je pri vzorcih od 1 do 3 manjši (razpršeno osvetljevanje) kot pri vzorcih od 4 do 7 (prisotnost direktne luči). Pri teh vzorcih se na histogramu tudi zelo rahlo nakazuje bimodalna razporeditev sivinskih intenzitet.

Preglednica 3: Rezultati slikovne analize na vzorcih z različnim osvetljevanjem pri zajemu ter tremi različnimi postopki določanja praga histogramov: sivinska vrednost, pri kateri je bil določen prag, število por, povprečna velikost por (št. slik. točk) in pokritost površine s porami (%)

Table 3: Results of image analysis of samples differently illuminated during photographing and processed with three different methods of histogram thresholding: intensity value, where the threshold was defined; number of pores; average pore size (number of pixels) and area covered by pores (%)

Vzorec / Sample	Metoda / Method											
	Yen				Lokalni minimum / Local minimum				Ročno (vizualno) / Manual (visual)			
	Prag / Threshold	Št. por $\times 10^2$ / Number of pores $\times 10^2$	Povp. velikost por (št. slik. točk) / Average pore size (number of pixels)	Pokritost površine s porami (%) / Area coverage (%)	Prag / Threshold	Št. por $\times 10^2$ / Number of pores $\times 10^2$	Povp. velikost por (št. slik. točk) / Average pore size (number of pixels)	Pokritost površine s porami (%) / Area coverage (%)	Prag / Threshold	Št. por $\times 10^2$ / Number of pores $\times 10^2$	Povp. velikost por (št. slik. točk) / Average pore size (number of pixels)	Pokritost površine s porami (%) / Area coverage (%)
1	128	61.3	43.8	11.9	72	35.4	8.6	1.3	95.0	55.9	16.2	4.0
2	117	64.6	39.5	11.3	73	50.0	10.3	2.3	99.0	64.3	22.3	6.4
3	115	63.7	37.8	10.7	73	46.9	10.2	2.1	97.0	62.3	21.0	5.8
4	121	67.2	32.8	9.8	75	48.9	10.0	2.2	94.0	61.5	16.0	4.4
5	98	72.0	29	9.3	74	66.2	13.7	4.0	87.0	70.0	20.5	6.4
6	104	72.5	32.6	10.5	72	69.0	13.1	4.0	85.0	73.0	18.6	6.0
7	92	74.1	26.7	8.8	74	68.6	15.1	4.6	75.0	69.3	15.5	4.8
Srednja vrednost / Average	110.7	67.9	34.6	10.3	73.3	55.0	11.6	2.9	90.3	65.2	18.6	5.4
Stand. dev.	13.0	5.0	6.1	1.1	1.1	13.0	2.4	1.2	8.5	5.9	2.7	1.0

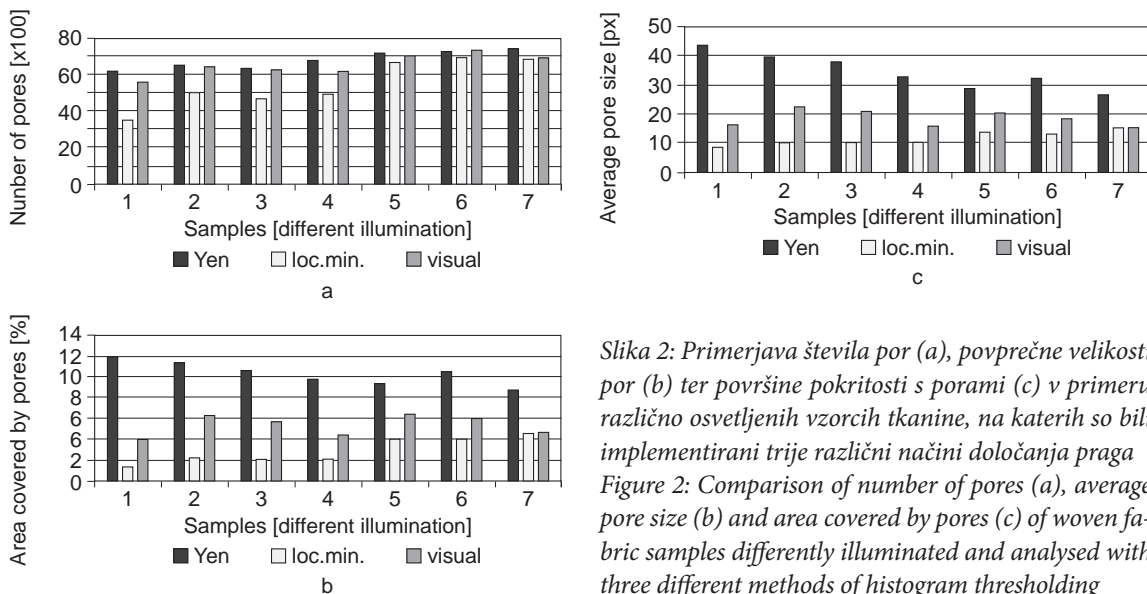
Na sliki 2 je prikazana primerjava števila por (a), povprečne velikosti por (b) in pokritost površine s porami (c) pri vzorcih tkanine *rokavcev*, ki je bila pri zajemu osvetljena z različnimi kombinacijami razpršenih in direktnih luči in na kateri so bili implementirani trije različni načini določanja praga.

Iz slike 2 lahko vidimo, da rezultati tvorijo trend dveh skupin vzorcev. Prvo skupino sestavljajo vzorci, ki so bili razpršeno osvetljeni (vzorci od 1 do 3), pridružuje se jim tudi vzorec 4. Drugo skupino tvorijo vzorci, ki so bili osvetljeni tudi ali samo z direktno lučjo (vzorci od 5 do 7). Rezultati vzorca 4 tudi

pri slikovni analizi teh parametrov kažejo sorodnost z vzorci 1, 2 in 3, ki so bili osvetljeni z razpršeno osvetlitvijo, to lahko ponovno razložimo s sovplivom učinkovanja odbojev svetlobe na Z vitju preje in direktne svetlobe z desne strani, kar se ujema z rezultati analize histogramov.

Pri rezultatih števila por se pri vzorcih od 1 do 4 kažejo večje razlike glede na uporabljen postopek določanja praga (povprečna vrednost razlik števila por med uporabljenimi postopki določanja praga histogramov je za vzorce od 1 do 4 enaka 10,2). Pri vzorcih od 5 do 7 pa so te razlike bistveno manjše, kar kaže na to, da

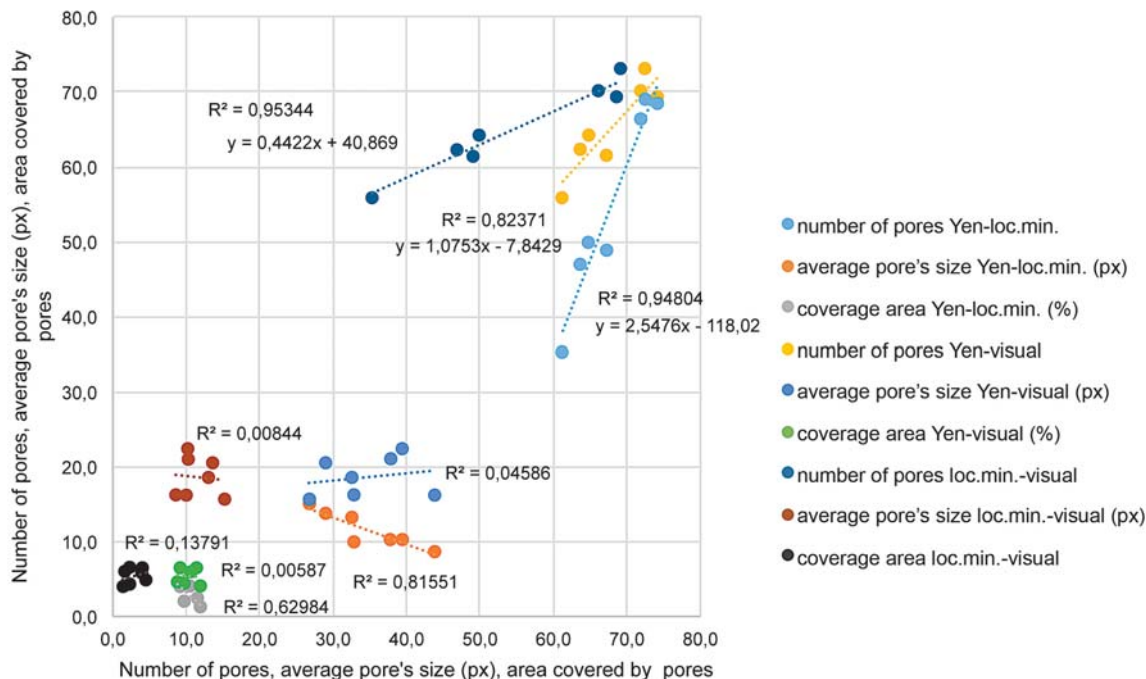




Slika 2: Primerjava števila por (a), povprečne velikosti por (b) ter površine pokritosti s porami (c) v primeru različno osvetljenih vzorcih tkanine, na katerih so bili implementirani trije različni načini določanja praga  
 Figure 2: Comparison of number of pores (a), average pore size (b) and area covered by pores (c) of woven fabric samples differently illuminated and analysed with three different methods of histogram thresholding

so trije uporabljeni postopki določanja praga histogramov pri teh vzorcih pripeljali do številčno bolj pomenjenih rezultatov (povprečna vrednost razlik števila por med uporabljenimi operacijami določanja praga histograma je za vzorce od 5 do 7 enaka 2,7).

Iz slike 2 je razvidno tudi, da sta povprečna velikost por in površina pokritosti s porami največji pri določanju praga histograma z algoritmom Yen (34,6 slikovne točke), najmanjši pa pri postopku z določanjem praga na lokalnem minimumu (11,6

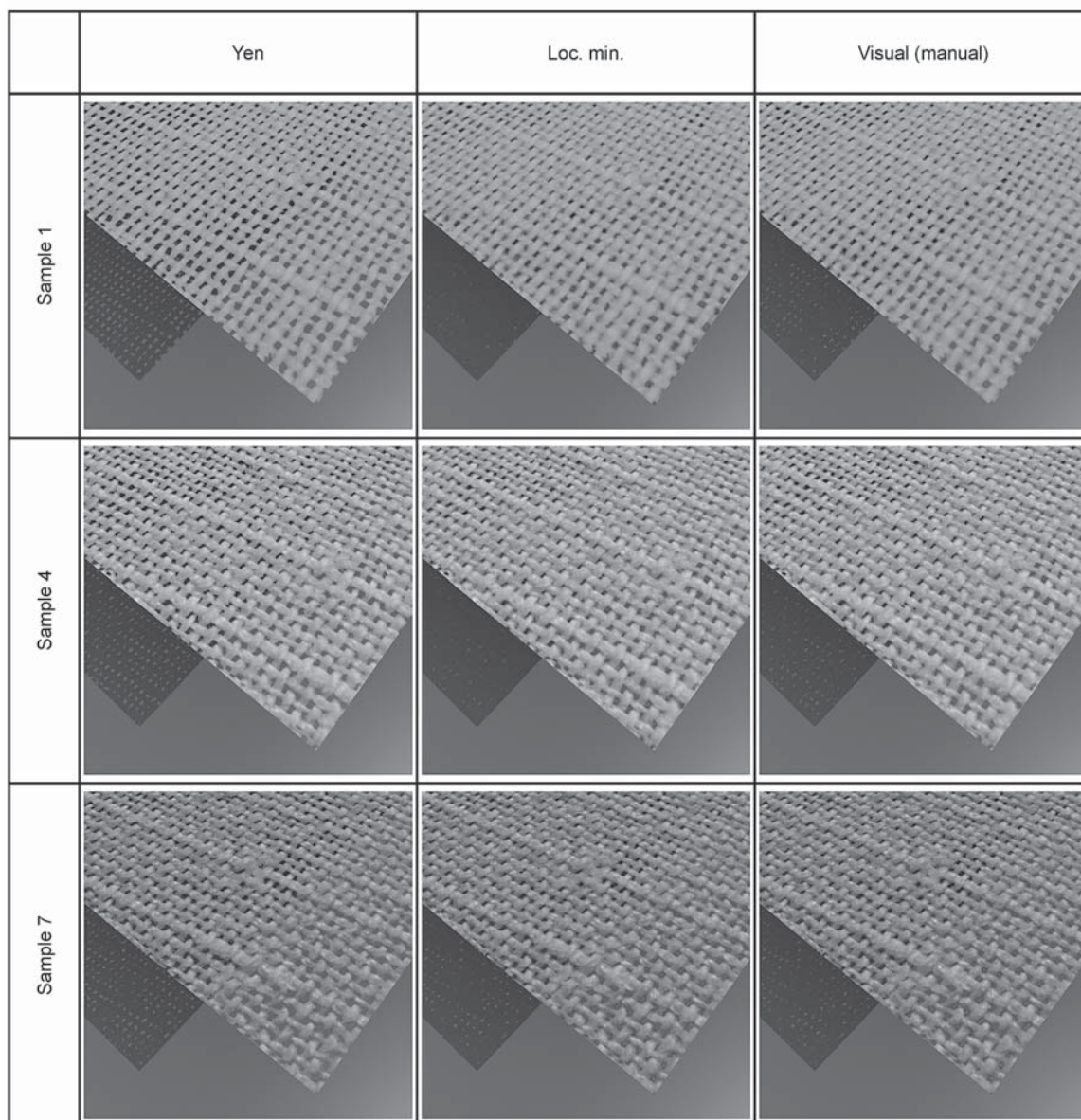


Slika 3: Korelacija med rezultati slikovne analize map poroznosti različno osvetljenih vzorcev s tremi postopki določanja praga  
 Figure 3: Correlation between results of pore image analysis of woven fabric samples differently illuminated and analysed with three different methods of histogram thresholding

slikovne točke). Pri zadnjem postopku je pri rezultatih pri povprečni velikosti pore ter pokritosti s porami opazen trend manjše povprečne velikosti pore in manjše površine pokritosti s porami pri vzorcih od 1 do 4 (povprečna velikost pore  $_{1-4} = 9,8$  slik. točke; pokritost s porami  $_{1-4} = 2$  %), medtem ko so vrednosti pri vzorcih od 5 do 7 na splošno višje (povprečna velikost pore  $_{5-7} = 14$  slik. točke; pokritost s porami  $_{5-7} = 4,2$  %).

Na sliki 3 je prikazana korelacija (korelacijski koeficienti ter linearna korelacijska enačba) med rezultati slikovne analize map poroznosti različno osvetljenih vzorcev, ki so nastale s tremi postopki določanja praga.

Iskali smo tudi morebitne korelacije med rezultati števila por, povprečne velikosti por in površine pokritosti s porami, ki smo jih dobili s tremi različnimi postopki določanja praga histograma, kar je prikazano



Slika 4: Vizualizacije vzorcev 1, 4 in 7, katerih mapa poroznosti je bila določena s tremi različnimi postopki (Yen, lok. min. in vizualno)

Figure 4: Visualization of samples 1, 4 and 7, alpha maps of which were analysed and defined with three different methods of histogram thresholding (Yen, local minimum and visual)

na sliki 3. Očitno je, da so statistično relevantne le korelacije rezultatov pri številu por ( $R^2 = 0,95$  v primerih korelacije rezultatov operacij Yen / lok. min. in lok. min. / vizualno ter nekoliko nižja  $R^2 = 0,82$  v primeru rezultatov operacij Yen / vizualno), medtem ko so statistično nepomembne korelacije med rezultati povprečnih velikosti por in pokritosti s porami, kar je pričakovan rezultat glede na različne postopke določanja praga histogramov za določanje mape poroznosti. Vsi postopki sicer zaznajo pore na določenem mestu slik, saj je intenziteta slikovnih točk na teh območjih najmanjša, območja večjih svetlostnih intenzitet okoli središča pore pa so glede na postopek določanja različno velika (slika 1), kar se posledično kaže v različni povprečni velikosti por in površini pokritosti s porami.

Vizualizacija vzorcev 1, 4 in 7 z uporabo tekstur (slik) tkanin pri različnem osvetljevanju zajema uporabo različnih map poroznosti (Yen, lok. min. in ročno določanje) in je potekala v programu za 3D računalniško grafiko Blender (slika 4). Pri vizualizaciji so bile uporabljene naslednje mape: alfa mapa (določena s postopki Yen, določanjem lokalnega minimuma intenzitet – lok. min. ter ročnim določanjem) ter difuzna (barvna) mapa. Vizualizacija je v vseh primerih potekala v enakih razmerah. Sprememba scene in osvetljevanja v 3D prostoru ni bila predmet te raziskave. Izbrana vrsta luči v 3D prostoru je dajala usmerjeno svetlobo konstantne jakosti, z zrcalnim in razpršenim načinom osvetljevanja. Materialu je bilo odvzeto senčenje – ukaz ang. »Shadeless«.

Iz slike 4 vidimo, da gre pri vizualizacijah z algoritmom Yen za preveliko odprtost por, saj se v nekaterih primerih sosednji pori celo povežeta (povezane pore), posledično pa se na vizualizacijah upodobi konstrukcijsko nedejanski pojav. Čezmerna odprtost por je dobro razvidna tudi iz sence, ki jo tkani na meče na podlago. Nasproten pojav je prisoten pri vizualizacijah, katerih kanal alfa je bil generiran s pomočjo iskanja lokalnega minimuma sivinskih intenzitet histogramov. V teh primerih je prisotnih preveč zaprtih por, kar je prav tako vidno tudi na sencah vzorcev.

V naši raziskavi se je za vizualizacijo tkanin za najprimernejše pokazalo ročno (vizualno) določanje praga, saj se v tem primeru na upodobitvah ne pojavljajo povezane pore, poleg tega pa je tudi zaprtih por manj kot pri določanju praga z lokalnim minimumom. Na vizualizacijah vidimo tudi zanimiv sovpiliv načina osvetljevanja in postopka določanja

mape poroznosti. Pri vzorcu 1, kjer je bila tkanina osvetljena le z razpršeno svetlobo, opazimo največjo razliko v vizualizacijah, ki so bile upodobljene z mapami pozornosti treh uporabljenih operacij. Razlike so manj izrazite pri uporabi kombiniranega osvetljevanja pri zajemu z razpršeno in direktno lučjo (vzorec 4) in skoraj minimalne pri uporabi le direktne luči (vzorec 7). Ne glede na uporabljen postopek določanja mape poroznosti iz vizualizacij tudi vidimo, da je za korektnost upodobitev primernejše osvetljevanje z direktno svetlobo (slika 4: vzorci 4, 7). V tem primeru je pri uporabi le dveh map, torej difuzne mape (barvne) ter mape poroznosti zaradi večjega kontrasta, ki ga na zajetih slikah omogočajo direktne luči, vizualiziranih več optičnih pojavov (izrazitejša zrcalnost in reliefnost). Učinek bi seveda bil še izrazitejši, če bi uporabljenim mapam dodali še specifične mape za generiranje drugih optičnih učinkov.

## 4 Sklepi

Raziskali smo področje 3D vizualizacij poroznosti tekstilij s poudarkom na historični tkanini, kjer je poroznost izrazito neenakomerna zaradi nošenja in deformacij. Vpeljan je bil nov delokrog priprave tekstur za vizualizacijo poroznosti tkanine, ki je vključeval sistematično spreminjanje parametrov osvetljevanja, zajem slikovnih informacij, analizo treh različnih metod slikovne analize za pridobivanje točnejših podatkov o porah v mapi poroznosti in končno 3D vizualizacijo tkanin. V raziskavi sta bila dokazana pomen vrste, kombinacije in postavitve luči pri zajemu slikovnih informacij in pomen načina določanja praga slikovnih podatkov, ki bodo predstavljali poroznost v 3D vizualizaciji. Dokazana je bila optimalna metoda določanja mape poroznosti, ki bi ustrezno delovala na celotni površini neenakomerne strukture tkanine.

Rezultati zajema tekstur so bili odvisni od vrste in načina osvetljevanja (osvetljevanje samo z razpršeno svetlobo oziroma s kombinacijo razpršene in direktne svetlobe), kar je vplivalo na kakovost slikovnih informacij in posledično na histogram vzorcev. Pri nadaljnjem vizualiziranju v virtualnem prostoru je nujno treba upoštevati dejstvo, da je virtualna tkanina v 3D prostoru ponovno osvetljena z virtualnimi lučmi, njene optične lastnosti pa so ustvarjene s seštevkom map. Nadaljnja uporaba različno

osvetljenih tekstur pri zajemu je torej odvisna od namena upodabljanja in ciljev vizualiziranja.

Zaradi specifične reprodukcije izbranega vzorca v naši raziskavi, tj. večja površina tkanine in neenakomernost strukture tkanine, preje ter porazdelitve por izbor algoritma za določanje praga slik ni bil enoznačna rešitev. Izbor določenih prednastavljenih postopkov (algoritmov) za določanje praga, ki nam jih ponuja programska oprema za slikovno analizo ImageJ, je namreč pripeljal do neustreznih rezultatov (čezmerno odprtih por, povezanih por) in celo neuporabnih rezultatov (javljanje napake pri izračunu mape poroznosti itd.).

Rezultati slik vzorcev, katerih prag je bil določen ročno (z vizualno oceno), niso sledili trendom preostalih dveh postopkov (z algoritmom Yen in z določanjem lokalnega minimuma histograma), ki sta numerično zasnovana. V raziskavi smo tudi dokazali, da je za vizualizacijo analizirane tkanine z neenakomerno strukturo najustreznejša metoda priprave kanala alfa z ročnim (vizualnim) določanjem praga histograma, kjer sta bila prag in posledično zajem informacij na reprezentativnem območju slike tkanine vizualno ocenjena. Pri analizi je bil dokazan tudi sovpliv vitja preje -Z in delovanja usmerjene svetlobe z desne strani ter posledično njun vpliv na rezultate slikovne analize, ki so bili sorodni rezultatom pri zajemu slik z razpršenimi lučmi.

Možnost nadaljnjih raziskav vidimo v smeri ustreznega postopka predpriprave slik za vizualizacijo in implementacijo lokalnega (adaptivnega) določanja praga histograma, ki bi na manjših površinah takšne tkanine upošteval neenakomernost strukture in dinamično spreminjal vrednosti praga. Prav tako ostaja izziv priprave map, ki opisujejo druge optične in strukturne lastnosti tkanine in preje (zrcalnost, reliefnost).

## Viri

1. DORSEY, Julie, RUSHMEIER, Holly, SILLION, François X. *Digital modeling of material appearance*. 1. izdaja. Burlington . Morgan Kaufmann/ Elsevier, 2007, str. 147–150.
2. GABRIJELČIČ TOMC, Helena. Barva in optični pojavi na tkanini = Colour and optical phenomena on fabric. *Tekstilec*, 2007, **50**(4/6), 93–132.
3. ERZETIČ, Blaž, GABRIJELČIČ Helena. *3D od točke do upodobitve*. 2. izdaja. Ljubljana : Pasadena, 2010, str. 89–91.
4. GRÖLLER, Eduard, RAU, T. René, STRASSER, Wolfgang. Modeling textiles as three dimensional textures. V: *Rendering Techniques '96. Proceedings of the Eurographics Workshop*. Uredila X. Pueyo in P. Schröder. Porto : Eurographics, Wien, NewYork : Springer, 1996, str. 205–214.
5. KAJIYA, T. James, KAY, L. Timoty. Rendering fur with three dimensional textures. V: *Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York : ACM SIGGRAPH, 1989, 271–280, doi: 10.1145/74333.74361.
6. XU, Ying-Qing, CHEN, Yanyun, LIN, Stephen, ZHONG, Hua, WU, Enhua, GUO, Baining, SHUM, Heung-Yeung. Photorealistic rendering of knitwear using the lumislice. V: *Computer graphics and interactive techniques*. New York : ACM SIGGRAPH, 2001, 391–398, doi: 10.1145/383259.383303.
7. PERLIN, Ken, HOFFERT, Eric M. Hypertexture. V: *Computer graphics and interactive techniques*, New York : ACM SIGGRAPH, 1989, **23**(3), 253–262.
8. CYBULSKA, Maria. Reconstruction of archeological textiles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2010, **18**(3(80)), 100–105.
9. XIN, Binjie, HU, Jinlian, BACIU, George. Visualisation of textile surface roughness based on silhouette image analysis. *Textile Research Journal*, **80**(2) 2010, 166–176, doi: 10.1177/0040517508093779.
10. ZHAO, Shuang, JACOB, Wenzel, MARCHNER, Steve, BALA, Kavita. Building volumetric appearance models of fabric using micro CT imaging. *Communications of the ACM*, 2014, **57**(11), 98–105, doi: 10.1145/2670517.
11. DANA, J. Kristin, GINNEKEN van Bram, NAYAR, K. Shree, KOENDRINK, J. Jan. Reflectance and texture of real-world surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 1999, **18**(1), 1–34.
12. TORRANCE, E. Kenneth, SPARROW, M. Ephraim. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, **57**(9), 1105–1112, doi: 10.1364/JOSA.57.001105.
13. YASUDA, Takami, YOKOI, Shigeki, TORIWAKI, Jun-ichiro, INAGAKI, Katsuhiko. A shading model for cloth objects. *Computer Graphics and Applications, IEEE* 1992, **12**(6), 15–24, doi: 10.1109/38.163621.



14. HAVLOVÁ, Marie. Model of vertical porosity occurring in woven fabrics and its effect on air permeability. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2014, **22**(4(106)), 58–63.
15. MILITKÝ, Jiří, HAVRDOVÁ, Marie. Porosity and air permeability of composite clean room textiles. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2001, **13**(3/4), 280–289, doi: 10.1108/09556220110396533.
16. GOOIJER, Henk, WARMOESKERKEN, M.C.G. Marijn, GROOT WASSINK, J. Flow resistance of textile materials – Part I: Monofilament fabrics. *Textile Research Journal*, 2003, **73**(5), 437–443, doi: 10.1177/004051750307300511.
17. ROBERTSON, A.F. Air porosity of open-weave fabric. *Textile Research Journal*, 1950, **20**(12), 838–857, doi: 10.1177/004051755002001203.
18. LU, Wei-Ming, TUNG, Kuo-Lun, HWANG, Kuo-Jen. Fluid flow through basic weaves of monofilament filter cloth. *Textile Research Journal*, 1996, **66**(5), 311–323, doi: 10.1177/004051759606600505.
19. HAVRDOVÁ, Marie. Air permeability and a structure of woven fabrics. *Vlákna a Textil*, 2003, **10**(2), 86–90.
20. DUBROVSKI DOBNIK, Polona. Volume porosity of woven fabrics. *Textile Research Journal*, 2000, **70**(10), 915–919, doi: 10.1177/004051750007001011.
21. ZUPIN, Živa, HLADNIK, Aleš, DIMITROVSKI, Krste. Prediction of one-layer woven fabrics air permeability using porosity parameters. *Textile Research Journal*, 2012, **82**(2), 117–128, doi: 10.1177/0040517511424529.
22. OGULATA, R. Tugrul, MEZARCIOZ, (Mavruz) Serin. Total porosity, theoretical analysis, and prediction of the air permeability of woven fabrics. *The Journal of The Textile Institute*, 2012, **103**(6), 654–661, doi: 10.1080/00405000.2011.597567.
23. JAKŠIĆ, Danilo, JAKŠIĆ, Nikola. Assessment of porosity of flat textile fabrics. *Textile Research Journal*, 2007, **77**(2), 105–110, doi: 10.1177/0040517506065892.
24. KANG, Jin Tae, CHOI, Soo Hyun, KIM, Sung Min, OH, Kyung Wa. Automatic structure analysis and objective evaluation of woven fabric using image analysis. *Textile Research Journal*, 2001, **71**(3), 261–270, doi: 10.1177/004051750107100312.
25. CARDAMONE, M. Jeanette, DAMERT, C. William, PHILLIPS, C. John, MARNER, N. William. Digital image analysis for fabric assessment. *Textile Research Journal*, 2002, **72**(10), 906–916, doi: 10.1177/004051750207201009.
26. TÀPIAS, Montserrat, RALLÓ, Miquel, ESCOFET, Escofet, ALGABA, Inés, RIVA, Ascensión. Objective measure of woven fabric's cover factor by image processing. *Textile Research Journal*, 2010, **80**(1), 35–44, doi: 10.1177/0040517509104471.
27. AYDILEK, H. Ahmet, OGUZ, H. Seyfullah, EDIL, B. Tuncer. Digital image analysis to determine pore opening size distribution of non-woven geotextiles. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, **16**(4), 280–290, doi: 10.1061/(asce)0887-3801(2002)16:4(280).
28. NAGLIČ, Barbara, KOČEVAR, Tanja Nuša, GABRIJELČIČ TOMC, Helena. Digitalna vizualizacija gorenjske ljudske noše. *Tekstilec*, 2015, **58**(1), 67–79.
29. HLADNIK, Aleš, MUCK, Tadeja. *Obdelava digitalnih slik v grafiki – Prvi del*. Uredila D. Gregor Svetec. Ljubljana : Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 2010, str. 18–32.
30. YEN, Jui-Cheng, CHANG, Fu-Juay, CHANG, Shyang. A new criterion for automatic multilevel thresholding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(3), 370–378, doi: 10.1109/83.366472.
31. SEZGIN, Mehmet, SANKUR, Bülent. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1), 146–165, doi: 10.1117/1.1631315.