

Polavtomatsko merjenje 3D Cobbovega kota na trikotniški mreži modela hrbtenice

Uroš Petković¹, Robert Korez¹, Stefan Parent², Samuel Kadoury³, Tomaž Vrtovec¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² CHU Sainte-Justine & University of Montréal, 2900 Edouard Montpetit Blvd, Montréal, QC H3T 1J4, Kanada

³ CHU Sainte-Justine & Polytechnique Montréal, 2900 Edouard Montpetit Blvd, Montréal, QC H3T 1J4, Kanada
E-pošta: tomaz.vrtovec@fe.uni-lj.si

Povzetek. Cobbov kot, ki se je sprva uveljavil kot glavni diagnostični parameter za stopnjo razvitosti skolioze, pozneje pa tudi za druge tipe deformacij hrbtenice, se ponavadi meri na dvodimenzionalnih čelnih rentgenskih slikah. Zaradi točnejših meritev obstaja težnja po merjenju Cobbovega kota v tridimenzionalnih (3D) slikah, kot so npr. slike, pridobljene s tehniko računalniške tomografije ali magnetne resonance, ali v 3D modelih, rekonstruiranih iz 3D slik. V tem članku predlagamo polavtomatsko metodo za oceno 3D Cobbovega kota iz trikotniške mreže 3D modela hrbtenice, kjer ročno izbranim vretencema zgornjega in spodnjega konca deformacije hrbtenice najprej določimo središče telesa. Prek središča telesa nato označimo trikotniška lica zgornje in spodnje krovne plošče vretenca, ki določata ravnini, prek katerih se izmeri Cobbov kot. Metodo smo preizkusili na 60 trikotniških mrežah skoliotičnih hrbtenic pri 17 različnih velikostih trikotniških lic. Pri modelih, kjer je bil rob trikotniškega lica krajši od 6 mm, je bila metoda robustna in točna, in sicer s povprečno napako $3,0^\circ$ in standardnim odklonom $2,2^\circ$ v primerjavi z referenčnimi meritvami.

Ključne besede: analiza slik, medicinske slike hrbtenice, Cobbov kot, razvrščanje, avtomatsko merjenje

Semi-automated 3D Cobb Angle Measurements from Scoliotic Mesh Models

The Cobb angle, which is the main diagnostic parameter for the evaluation of spinal deformities, is usually measured on two-dimensional coronal radiographic (X-ray) images. To provide more accurate measurements, there is a tendency for measuring the Cobb angle from three-dimensional (3D) images. In this paper we propose a semi-automated method for the evaluation of the 3D Cobb angle from 3D spine mesh models. From the manually selected upper-end and lower-end vertebra mesh models, we first identify the vertebral body centers, and then label faces of the superior and inferior endplates of the mesh model, which define the planes used for the measurement of the 3D Cobb angle. The results obtained on 60 mesh models of scoliotic spines at 17 different face-vertex densities indicate that the method is robust and accurate at the face-edge lengths below 6 mm with the corresponding mean absolute error of 3.0° and standard deviation of 2.2° when compared to reference measurements.

Keywords: image analysis, spine medical images, Cobb angle, classification, automated measurement

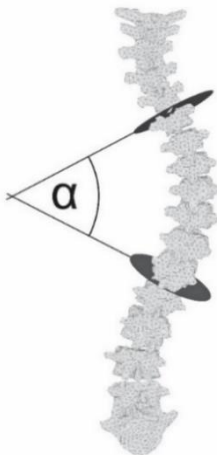
1 UVOD

Skolioza je ena najpogostejših deformacij hrbtenice, opisana kot neobičajna bočna in rotacijska ukrivljenost hrbtenice [1]. Eno prvih metod za kvantitativno

vrednotenje ukrivljenosti hrbtenice je leta 1948 predlagal Cobb [2] in je znana pod imenom Cobbov kot. Cobbov kot se načeloma meri na dvodimenzionalnih (2D) čelnih rentgenskih slikah hrbtenice, in sicer je to kot med premico vzdolž zgornje krovne plošče vretenca zgornjega konca deformacije in premico vzdolž spodnje krovne plošče vretenca spodnjega konca deformacije hrbtenice (slika 1). Čeprav so bile predlagane tudi druge metode za kvantitativno vrednotenje ukrivljenosti hrbtenice [3], Cobbov kot ostaja uveljavljen diagnostični parameter za oceno stopnje razvitosti skolioze.

Adolescentna idiopatska skolioza je najpogostejši tip skolioz. Pogostejša je pri dekletih kot pri fantih, razmerje je 6:1 [4]. Glavni diagnostični kriterij je Cobbov kot, ki mora presežati vrednost 10° na čelni rentgenski sliki. Dandanes, z razvojem in pogosto uporabo tridimenzionalnih (3D) slikovnih tehnik, kot so računalniška tomografija (CT) in magnetna resonanca (MR), merjenje Cobbovega kota pogosto poteka v 3D, kar je dokazano bolj natančno kot merjenje v 2D [3]. Merjenje v 3D je prilagojeno tako, da so ravnine, ki nadomeščajo premice, določene prek krovnih plošč vretenc, kar je velik izziv upoštevajoč kompleksno 3D naravo slik in obliko hrbtenice. Po drugi strani pa avtomatsko merjenje, ki temelji na tehnikah za obdelavo in analizo slik, ponavadi zahteva predhodno razgradnjo

vretenc za kvantitativno merjenje. Rezultat razgradnje vretenc so binarne maske, ki jih lahko predstavimo s trikotniško mrežo v 3D prostoru. Posledično je smiselno razvijati tudi algoritme, ki izvajajo merjenje na trikotniških mrežah 3D modelov.



Slika 1: Prikaz merjenja Cobbovega kota med zgornjo krovno ploščo vretenca zgornjega konca deformacije in spodnjo krovno ploščo vretenca spodnjega konca deformacije hrbtenice.

Nedavno so Huo idr. [5] opisali metodo za merjenje 3D Cobbovega kota z uporabo trikotniške mreže modela hrbtenice, pridobljenega iz CT slik, vendar je njihova metoda omejena na ročno izbiro vretenc zgornjega in spodnjega konca deformacije ter začetne določitve vozlišča trikotniške mreže. V tem članku predstavljamo alternativni algoritem za merjenje 3D Cobbovega kota iz trikotniške mreže 3D modela hrbtenice.

2 METODOLOGIJA

Vhodne podatke algoritma predstavljata trikotniški mreži vretenc zgornjega in spodnjega konca deformacije. Za vsako trikotniško mrežo ocenimo lokacijo središča telesa vretenca, ki jo nato uporabimo za prepoznavo trikotniških lic mreže, ki pripadajo telesu vretenca. Ta trikotniška lica z nenadzorovanim razvrščanjem trikotniških lic razvrstimo v učno množico za nadzorovano razvrščanje vseh lic iz trikotniške mreže celega vretenca. Nato sosednja lica trikotniške mreže združimo v skupine, kjer imajo vsi elementi posamezne skupine oznako razreda, dobljenega pri nadzorovanem razvrščanju. S primerjavo skupin z učno množico določimo lica, ki pripadajo zgornji in spodnji krovni plošči telesa vretenca. Nazadnje določimo ravnini, ki se prilegata zgornji krovni plošči vretenca zgornjega konca deformacije in spodnji krovni plošči vretenca spodnjega konca deformacije, med katerima izmerimo Cobbov kot.

2.1 Določitev središča telesa vretenca

Predlagani algoritem za prepoznavanje središča telesa vretenca, z razliko, da je prilagojen za trikotniške

mreže, temelji na delu avtorjev Štern idr. [6], kjer je opisan algoritem za avtomatsko določanje središčne linije hrbtenice v CT in MR slikah hrbtenice. Ker je 3D trikotniška mreža modela telesa vretenca sklenjena ploskev, vsaka premica, ki je pravokotna na katerokoli lice trikotniške mreže, seka površino vretenca vsaj dvakrat – v dveh nasprotnih trikotniških licih, ki ju seka premica, ko vstopa in izstopa iz telesa vretenca. Ker ima telo vretenca približno obliko valja, imajo normale nasprotnih trikotniških lic približno nasprotno smer; pričakovano je tudi, da se središčna linija telesa vretenca nahaja na sredini linije, ki povezuje dve nasprotni trikotniški lici telesa vretenca. Vendar pa vsaka premica, ki je pravokotna na neko lice trikotniške mreže, lahko seka površino vretenca večkrat (ko potuje tudi skozi vretenčni lok in vretenčne odrastke); tako obstaja več kandidatov za nasprotno trikotniško lice.

Za k -to vretence je 3D trikotniška mreža modela sestavljena iz množice vozlišč V_k in množice lic F_k :

$$\begin{aligned} V_k &= \{v_i \mid i = 1, 2, \dots, N_v\}, \\ F_k &= \{f_i \mid i = 1, 2, \dots, N_f\}, \quad f_i = \{v_p, v_q, v_r\}, \end{aligned} \quad (1)$$

kjer v_i pomeni i -to izmed N_v vozlišč, f_i pa i -to izmed N_f trikotniških lic. Vsakemu trikotniškemu licu f_i poiščemo v prostoru nasprotno trikotniško lice f_i^* . Kandidati za nasprotno lice so vsa lica $f_j \in F_{C,i}$, ki izpolnjujejo naslednje tri pogoje:

- vektor normale \mathbf{n}_j kandidata nasprotnega lica f_j je orientiran v približno nasprotni smeri normalnega vektorja \mathbf{n}_i trikotniškega lica f_i ;
- evklidska razdalja od središča \mathbf{c}_i lica f_i do središča \mathbf{c}_j lica f_j je med $d_{vb,min}$ in $d_{vb,max}$;
- evklidska razdalja od središča \mathbf{c}_j do premice $\mathbf{l}_i = \mathbf{c}_i + t \cdot \mathbf{n}_i$, $t \in \mathbb{R}$ je manjša kot $r_{vb,min}$.

Izmed vseh kandidatov $F_{C,i}$ je nasprotno trikotniško lice f_i^* tisto, katerega normalni vektor \mathbf{n}_j lica f_j tvori najmanjši skalarni produkt z normalnim vektorjem \mathbf{n}_i lica f_i :

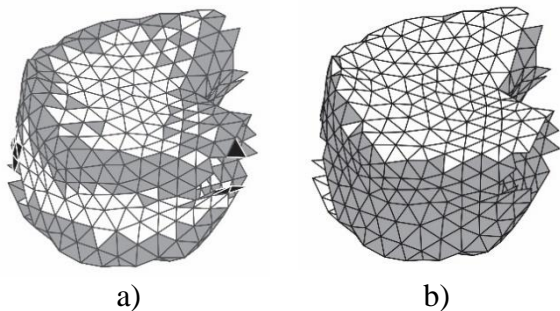
$$f_i^* = \underset{\mathbf{n}_j \rightarrow f_j}{\operatorname{argmin}} \left(\operatorname{dot}(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) \right), \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (2)$$

kjer je J število kandidatov za nasprotno trikotniško lice v množici $F_{C,i}$. Središče telesa vretenca se nahaja tam, kjer se linije, ki povezujejo vsak par $\{f_i, f_i^*\}$ nasprotnih lic, najpogosteje sekajo. Za iskanje lokacije teh presečišč je v koordinatnem sistemu opazovanega vretenca inicializirana nova 3D slika z ničelnimi vrednostmi, poimenovana 3D akumulator A . Vsaka daljica, ki povezuje nasprotni par lic $\{f_i, f_i^*\}$, je sprva preslikana z algoritmom Bresenham [7], tako da določimo M diskretnih točk $\mathbf{p}_m = (x_m, y_m, z_m)$, $m = 1, 2, \dots, M$ vzdolž daljice; nato je vsaki daljici dodeljena funkcija normalne porazdelitve v odvisnosti od evklidske razdalje D med središčema nasprotnih lic \mathbf{c}_i in \mathbf{c}_i^* , ki je dodatno utežena s skalarnim produktom $\operatorname{dot}(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_i^*)$ pripadajočih normalnih vektorjev \mathbf{n}_i in \mathbf{n}_i^* .

Vrednost 3D akumulatorja $A(\mathbf{p}_m)$ je nato povečana z vrednostjo te funkcije v vsaki točki $\mathbf{p}_m, m = 1, 2, \dots, M$ vzdolž daljice:

$$A(\mathbf{p}_m) = A(\mathbf{p}_m) + a(\mathbf{p}_m),$$

$$a(\mathbf{p}_m) = -\text{dot}(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_i^*) \exp\left(-\frac{(d(\mathbf{c}_i, \mathbf{p}_m) - \frac{D}{2})^2}{2\left(\frac{D}{6}\right)^2}\right), \quad (3)$$



Slika 2: a) Prikaz množice lic F_{body} (bela in črna) in množice F_{train} (siva in bela); množica belih lic je presek množic F_{body} in F_{train} . b) Prikaz množic lic $F_{B, TOP}$ (bela) ter $F_{B, BOTTOM}$ (bela) in $F_{B, SIDE}$ (siva).

kjer je $d(\mathbf{c}_i, \mathbf{p}_m)$ evklidska razdalja med \mathbf{c}_i in \mathbf{p}_m . Dobljeni 3D akumulator A je slika, ki predstavlja verjetnost, da posamezni slikovni element pripada središču telesa vretenca. Ker lahko dobimo največjo verjetnost tudi znotraj vretenčnega odrastka zaradi njegove valjaste oblike, 3D akumulator zgladimo s filtrom aritmetičnega povprečja velikosti $K_x \times K_y \times K_z$, določenega na podlagi najmanjše povprečne velikosti telesa vretenca pri človeku. Središče telesa vretenca \mathbf{c}_b je določeno kot slikovni element z najvišjo vrednostjo filtriranega 3D akumulatorja A .

2.2 Označba lic zgornje in spodnje krovne plošče

Vozlišča trikotniške mreže so preslikana z metodo glavnih komponent (ang. principal component analysis, PCA) iz koordinatnega sistema slike V v koordinatni sistem trikotniške mreže V^* . Vektorji $\{\mathbf{e}_x^*, \mathbf{e}_y^*, \mathbf{e}_z^*\}$, ki definirajo nov koordinatni sistem, so glavne komponente, določene z metodo PCA, ki zasuka trikotniško mrežo modela vretenca tako, da je vektor \mathbf{e}_z^* skoraj vzporeden z normalnima vektorjema na krovni plošči vretenca.

Za označevanje zgornje in spodnje krovne plošče dane trikotniške mreže 3D modela morajo biti prepoznana trikotniška lica telesa vretenca. S sledenjem žarkov, ki predstavljajo valje in izvirajo iz središča telesa vretenca, lahko določimo, ali se posamezno lice nahaja znotraj teh valjev. S Fibonnacijevim zaporedjem smo ustvarili najprej točke na enotski sferi s skoraj enakomerno porazdelitvijo [8]. Dobljena množica točk predstavlja enotske vektorje, ki definirajo žarke; vsak

enotski vektor predstavlja orientacijo pripadajočim valjem polmera r_c in višine h_c , kjer h_c predstavlja največjo evklidsko oddaljenost od prej določenega središča \mathbf{c}_b vretenčnega telesa. Ker so trikotniška lica $f_{cyl, j} \in F_{cyl}$ s pripadajočimi središči $\mathbf{c}_{cyl, j}$, ki se nahajajo znotraj valja, kandidati za površino telesa vretenca, izberemo za vsak i -ti žarek lice $f_{body, i}$, ki ima najmanjšo evklidsko razdaljo med središčem njegovega lica in središčem telesa vretenca \mathbf{c}_b :

$$f_{body, i} = \underset{c_{cyl, j} \rightarrow f_{cyl, j}}{\text{argmin}} \left(d(\mathbf{c}_b, \mathbf{c}_{cyl, j}) \right), \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (4)$$

Dobljena lica $f_{body, i} \in F_{body}$ predstavljajo meje telesa vretenca oziroma njegovo površino.

Ker pa telo vretenca ni povsem sklenjena ploskev, nekatera lica morda ne pripadajo telesu vretenca, ampak drugim vretenčnim strukturam. Po drugi strani pa obstajajo tudi lica, ki so del telesa vretenca, vendar niso bila najdena. Z aproksimacijo elipsoida množici središč C_{body} trikotniških lic F_{body} po metodi najmanjših kvadratov, kjer se množica središč C_{body} nahaja v koordinatnem sistemu, dobljenem po metodi PCA, predvidimo področje, kjer se v koordinatnem sistemu PCA nahaja telo vretenca; dobljeni elipsoid (območje) lahko opišemo s tremi lastnimi vektorji $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ in polosmi elipsoida $\{r_1, r_2, r_3\}$. Zaradi eliptične oblike krovnih plošč vretenca je aproksimacija najbolj točna v ravnini $X^* - Y^*$. Na podlagi vektorskih produktov vseh parov dobljenih lastnih vektorjev poiščemo tisti par, katerega vektorski produkt je najbolj vzporeden Z^* -osi oziroma enotskemu vektorju $(0, 0, 1)$:

$$\{\mathbf{e}_i^*, \mathbf{e}_j^*\} = \underset{\{e_i, e_j\}}{\text{argmax}} \left(\left| \text{dot} \left(\text{cross}(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j), (0, 0, 1) \right) \right| \right), \quad (5)$$

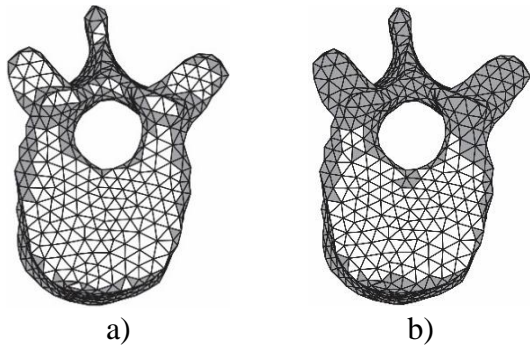
$$i, j \in \{1, 2, 3\}, \quad i \neq j.$$

Iz elipse, določene z lastnima vektorjema $\{\mathbf{e}_i^*, \mathbf{e}_j^*\}$ ter polosema $\{r_i^*, r_j^*\}$, projicirane na ravnino $X^* - Y^*$, določimo območje telesa vretenca. Vsako trikotniško lice $f_{body, i} \in F_{body}$ (enačba (4)), katerega projekcija središča $\mathbf{c}_{body, i}^*$ na ravnino $X^* - Y^*$ je znotraj projicirane elipse, je vključeno v učno množico trikotniških lic F_{train} za določanje krovnih plošč vretenca (slika 2a)).

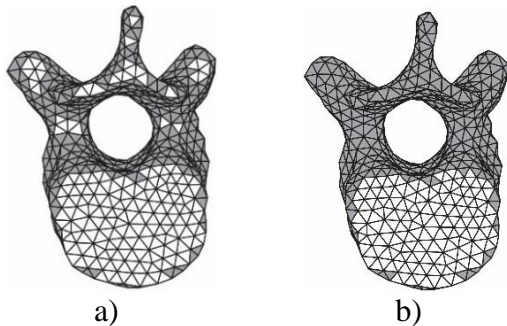
Trikotniška lica F_{train} lahko, če ponovno privzamemo, da je telo vretenca valjaste oblike, razvrstimo v tri skupine: lica $F_{B, TOP}$ zgornje osnovne eliptične ploskve valja (zgornja krovna plošča vretenca), lica $F_{B, BOTTOM}$ spodnje osnovne eliptične ploskve valja (spodnja krovna plošča vretenca) in lica $F_{B, SIDE}$ plašča valja (stena telesa vretenca). Če je glavna os valja, ki predstavlja telo vretenca, vzporedna z osjo Z^* , potem so normalni vektorji $(n_{B, x}^*, n_{B, y}^*, n_{B, z}^*)$ trikotniških lic $F_{B, TOP}$, $F_{B, BOTTOM}$ in $F_{B, SIDE}$ vektorji $(0, 0, 1)$, $(0, 0, -1)$ in $(x^*, y^*, 0)$. Torej je $n_{B, z}^*$ oziroma Z^* komponenta normalnih vektorjev na površino valja (telesa vretenca)

primerna značilnica za razvrščanje učne množice trikotniških lic F_{train} , ki poteka z nenadzorovano učno metodo k -tih povprečij (ang. k -Means++) [8]. Ker pa telo vretenca ni pravilne valjaste oblike in njegova os ni popolnoma vzporedna z osjo Z^* , so vrednosti $n_{B,z}^*$ porazdeljene okoli pripadajočega roja z neko varianco. Da bi se izognili slabemu rojenju, uporabimo kot seme $(1, -1, 0)$ za začetna središča rojev, saj predvidevamo, da je glavna os telesa vretenca približno vzporedna z osjo Z^* . Da bi poudarili razdalje med središči rojev, preslikamo $n_{B,z}^* \rightarrow n'_{B,z}$ s funkcijo $f: n'_{B,z} = f(n_{B,z}^*)$, ki mora biti liha funkcija, da ohrani predznak komponente $n_{B,z}^*$. Z razvrščanjem k -tih povprečij določimo tri roje s pripadajočimi središči, kjer roj z najvišjo vrednostjo središča predstavlja trikotniška lica $F_{B, TOP}$, roj z najnižjo vrednostjo pa trikotniška lica $F_{B, BOTTOM}$ (slika 2b)).

V naslednjem koraku z linearnim razvrščevalnikom razvrstimo lica trikotniške mreže celega vretenca v $F_{VB, TOP}$, $F_{VB, BOTTOM}$ in $F_{VB, SIDE}$ glede na $n'_{B,z}$ (sliki 3a) in 3b)). Nato sosednja lica (lica s skupnim robom), ki imajo enak razred, razvrstimo v skupine trikotniških lic $F_{A,1}, F_{A,2}, \dots, F_{A,J}$. Skupini, ki imata največje število sosednjih lic iz učne množice, predstavljata trikotniška lica zgornje in spodnje krovne plošče vretenca (sliki 4a) in 4b)):



Slika 3: Prikaz zgornjega dela vretenca, kjer je na a) vidna množica lic $F_{VB, TOP}$ (bela) in $F_{VB, SIDE}$ (siva) ter na b) množica lic F_{SUP} (bela) s preostalimi lici vretenca (siva).



Slika 4: Prikaz spodnjega dela vretenca, kjer je na a) vidna množica lic $F_{VB, BOTTOM}$ (bela) in $F_{VB, SIDE}$ (siva) ter na b) množica lic F_{INF} (bela) s preostalimi lici vretenca (siva).

$$F_{SUP} = \underset{F_{A,j}}{\operatorname{argmax}} \left(\operatorname{count}(F_{A,j} \cap F_{B, TOP}) \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, J, \quad (6)$$

$$F_{INF} = \underset{F_{A,j}}{\operatorname{argmax}} \left(\operatorname{count}(F_{A,j} \cap F_{B, BOTTOM}) \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, J.$$

2.3 Merjenje 3D Cobbovega kota

Z uporabo algoritma RANSAC (ang. random sample consensus) [10] na središčih trikotniških lic F_{SUP} in F_{INF} (enačba (6)) določimo parametre ravnine z napako tolerance e_d vzdolž zgornje krovne plošče zgornjega konca deformacije in spodnje krovne plošče spodnjega konca deformacije; dobljena parametra sta normalna vektorja \mathbf{n}_{sup} in \mathbf{n}_{inf} . 3D Cobbov kót je izmerjen kot (slika 1):

$$\alpha_{Cobb} = \arccos \left(\operatorname{dot}(\mathbf{n}'_{sup}, \mathbf{n}'_{inf}) \right), \quad (7)$$

kjer je \mathbf{n}'_{sup} projekcija normalnega vektorja \mathbf{n}_{sup} na ravnino $Y-Z$ vretenca zgornjega konca deformacije, \mathbf{n}'_{inf} pa je projekcija \mathbf{n}_{inf} na ravnino $Y-Z$ vretenca spodnjega konca deformacije.

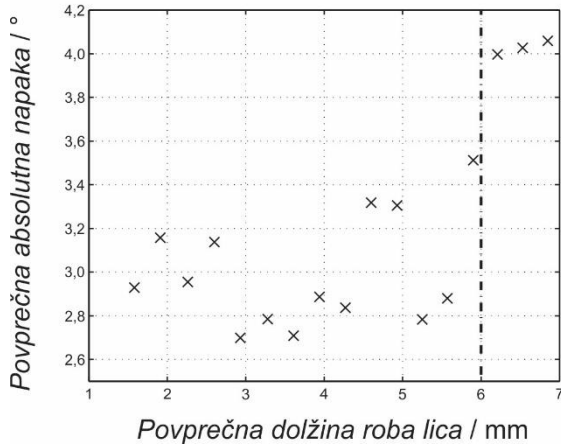
3 REZULTATI

Učinkovitost predlaganega algoritma smo vrednotili na 60 hrbtenicah, ki so bile diagnosticirane z adolescentno idiopatsko skoliozo (Sainte-Justine Hospital Research Center, Montréal, Quebec, Kanada), referenčni Cobbov kot pa je bil med $15,2^\circ$ in $80,9^\circ$ s povprečno vrednostjo $48,8^\circ$. Tehnika slikanja je bila dvoravnska (biplanarna) radiografija, modeli trikotniških mrež med vretenci T1 in L5 so bili dobljeni z dvoravnsko prostorsko (stereo) rekonstrukcijo [11] in modeliranjem [12]. Za oceno učinkovitosti algoritma je bilo za vsako hrbtenico narejenih in uporabljenih 17 trikotniških mrež z različnimi velikostmi trikotniških lic, kjer je bil razpon povprečne dolžine roba trikotniškega lica med 1,58 mm in 6,85 mm.

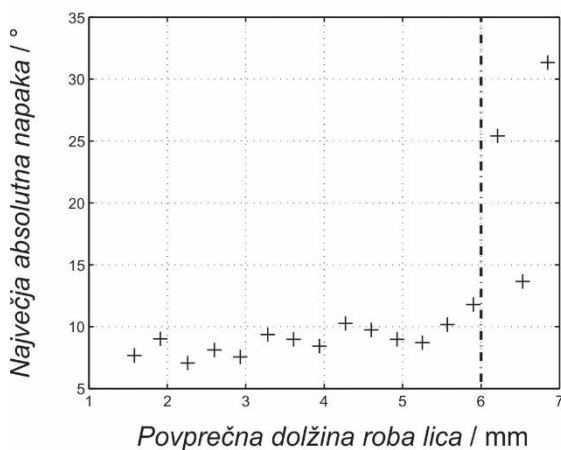
Za prepoznavanje središča telesa vretenca smo uporabili: $d_{vb, min} = 12$ mm, $d_{vb, max} = 60$ mm, $r_{vb, min} = 1,2 \times$ povprečna dolžina roba trikotniškega lica za določitev nasprotnih lic in filter aritmetične sredine velikosti $K_X \times K_Y \times K_Z = 15 \times 9 \times 9$ mm³ za določanje središča telesa vretenca. Za namen označevanja zgornje in spodnje krovne plošče vretenca so bili uporabljeni $r_c = 1,2 \times$ povprečna dolžina roba trikotniškega lica za valje, ki predstavljajo žarke, funkcija $f: n'_{B,z} = f(n_{B,z}^*) = (n_{B,z}^*)^5$ za poudarjanje razdalj med središči

rojev in $e_d = 1,35$ mm za napako tolerance pri algoritmu RANSAC.

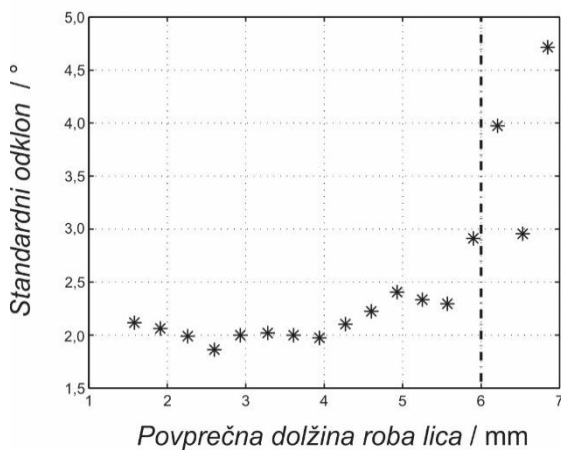
Predlagana metoda je bila uspešno uporabljena na 3D trikotniških modelih vseh 60 hrbtenic. Podrobna statistična analiza je prikazana na sliki 5.



a)



b)



c)

Slika 5: Grafi statističnih vrednosti meritev 60 modelov hrbtenic v odvisnosti od povprečne dolžine roba lica trikotniške mreže pri 17 različnih dolžinah. (a) Povprečna absolutna napaka. (b) Največja absolutna napaka. (c) Standardni odklon.

4 RAZPRAVA

V tem članku smo predstavili polavtomatsko metodo za merjenje Cobbovega kota iz trikotniške mreže 3D modela hrbtenice. Edina ročno določena začetna parametra pri metodi sta vretenci zgornjega in spodnjega konca skoliočne deformacije; drugače je metoda popolnoma avtomatska in sodeč po meritvah dosega relativno točne rezultate pri prostorskem načinu merjenja Cobbovega kota.

Iz rezultatov, predstavljenih na sliki 5, lahko povzamemo, da so meritve pri predlagani metodi primerljive z ročno določenimi referenčnimi meritvami pri povprečni dolžini roba lica trikotniške mreže med 1,58 mm in 5,90 mm, kjer skupaj dosegajo povprečno absolutno napako $3,0^\circ$ in standardni odklon $2,2^\circ$. Ko povprečna dolžina roba trikotniškega lica preseže 6 mm, nastanejo večja odstopanja od referenčnih meritev, kar se kaže v večji povprečni absolutni napaki (slika 5a)), največji absolutni napaki (slika 5b)) in standardnemu odklonu (slika 5c)). Pri takšnih dolžinah roba trikotniškega lica je model trikotniške mreže vretenca neprimeren, saj se ne prilega dobro dejanskemu vretencu. Upoštevajoč, da ima najmanjše telo vretenca T1 s povprečno širino 23,5 mm, dolžino 15,0 mm in višino 15,1 mm pri ženskah [13], je pričakovano, da je trikotniška mreža s povprečno dolžino roba lica v območju velikosti telesa vretenca netočna in posledično so tudi izmerjeni rezultati 3D Cobbovega kota neprimerni. Kljub temu sta natančnost in robustnost predlagane metode primerni pri modelih z manjšo gostoto lic in vozlišč (vse tja do 6 mm povprečne dolžine roba trikotniškega lica) in uporabni za skrajšanje časa izvajanja algoritma zaradi njegove kvadratične kompleksnosti; v povprečju je izvajanje trajalo 40 sekund (Intel(R) Core(TM) i7 - 4720HQ procesor) pri največji gostoti trikotniških lic in vozlišč.

Metodo, ki meri Cobbov kot iz 3D trikotniške mreže modela hrbtenice, so predlagali tudi Huo idr. [5], vendar rezultatov ne moremo neposredno primerjati zaradi različne zbirke hrbtenic, različne tehnike rekonstrukcije hrbtenice v trikotniško mrežo in različne gostote trikotniških lic ter vozlišč. Meritve, ki so jih izvedli, so imele standardni odklon med $4,56^\circ$ in $4,67^\circ$ pri merjenju Cobbovega kota na podatkovni zbirki 22 hrbtenic, kar sicer ni večje od standardnega odklona med $1,9^\circ$ in $2,1^\circ$ pri licih z dolžino roba krajšega od 4 mm, ki je bil dosežen v tej študiji. Najbolj opazna razlika med metodama je sicer v stopnji avtomatizacije; medtem ko obe metodi potrebujeta ročno določitev vretenc zgornjega in spodnjega dela deformacije, metoda avtorjev Huo idr. zahteva tudi ročno izbiro začetnega vozlišča za določitev ravnin, ki pomenijo krovno ploščo telesa vretenca. Metoda, predlagana v tej študiji, je po določitvi vretenc zgornjega in spodnjega dela deformacije popolnoma avtomatska.

5 SKLEP

Predstavili smo metodo za merjenje 3D Cobbovega kota iz trikotniške mreže modela hrbtenice. Pridobljeni rezultati na 60 hrbtenicah kažejo, da je metoda relativno točna, robustna in do določene mere neobčutljiva na gostoto lic in vozlišč trikotniške mreže modela hrbtenice.

LITERATURA

- [1] Stedman's Medical Dictionary, <http://www.medilexicon.com/dictionary/80286> (20.8.2017).
- [2] J. Cobb, "Outline for the study of scoliosis," *Instructional Course Lectures*, 5:261–275, 1947.
- [3] T. Vrtovec, F. Pernuš, B. Likar, "A review of methods for quantitative evaluation of spinal curvature," *European Spine Journal*, 18(5):593–607, 2009.
- [4] P. Trobisch, O. Suess, F. Schwab, "Idiopathic scoliosis," *Deutsches Ärzteblatt International*, 107(49):875–884, 2010.
- [5] X. Huo et al., "An integrative framework for 3D Cobb angle measurement on CT images," *Computers in Biology and Medicine*, 82:111–118, 2017.
- [6] D. Štern, B. Likar, F. Pernuš, T. Vrtovec, "Automated detection of spinal centrelines, vertebral bodies and intervertebral discs in CT and MR images of lumbar spine," *Physics in Medicine and Biology*, 55(1): 247–264, 2010.
- [7] J. E. Bresenham, "Algorithm for computer control of a digital plotter," *IBM Systems Journal*, 4(1):25–30, 1965.
- [8] J. H. Hannay, J. F. Nye, "Fibonacci numerical integration on a sphere," *Journal of Physics*, 37(48):11591–11601, 2004.
- [9] D. Arthur, S. Vassilvitskii, "k-means++: The advantages of careful seeding," *Proceedings of the 18th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, s. 1027–1035, 2007.
- [10] M. Fisher, R. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, 24(6):381–395, 1981.
- [11] S. Kadoury, F. Cheriet, C. Laporte, H. Labelle, "A versatile 3-D reconstruction system of the spine and pelvis for clinical assessment of spinal deformities," *Communications of the ACM*, 45(6):591–602, 2007.
- [12] S. Kadoury, F. Cheriet, H. Labelle, "Personalized X-ray 3-D reconstruction of the scoliotic spine from hybrid statistical and image-based models," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 28(9):1422–1435, 2009.
- [13] Y. Masharawi, K. Salame, Y. Mirovsky, S. Peleg, G. Dar, N. Stenberg, I. Hershkovitz, "Vertebral body shape variation in the thoracic and lumbar spine: characterization of its asymmetry and wedging," *Clinical Anatomy*, 21(1):46–54, 2008.

Uroš Petković je diplomiral leta 2017 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in je študent podiplomskega programa Elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Robert Korez je diplomiral leta 2012 na Fakulteti za matematiko in fiziko, doktoriral pa leta 2016 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Kot raziskovalec je zaposlen v Laboratoriju za slikovne tehnologije na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer se ukvarja z obdelavo in analizo medicinskih slik, predvsem s tehnikami za avtomatsko razgradnjo medicinskih slik hrbtenice in uporabo globokega učenja na podlagi konvolucijskih nevronske mreže.

Stefan Parent je magistriral leta 2000 in doktoriral leta 2003 na Univerzi v Montréalu v Kanadi. Kot izredni profesor je zaposlen na Medicinski fakulteti Univerze v Montréalu, kot ortopedski kirurg pa v bolnišnici Sainte-Justine v Montréalu, kjer se raziskovalno ukvarja s splošno ortopedijo ter biomehaniko, morfometrijo in 3D rekonstrukcijo hrbtenice.

Samuel Kadoury je diplomiral leta 2002 na École Polytechnique, magistriral leta 2005 na Univerzi McGill ter doktoriral leta 2008 na École Polytechnique, vse v Montréalu v Kanadi. Kot docent je zaposlen na Fakulteti za računalništvo, École Polytechnique, Univerza v Montréalu, kjer se raziskovalno ukvarja z obdelavo in analizo medicinskih slik in računalniško podprtimi operativnimi posegi.

Tomaž Vrtovec je diplomiral leta 2002 in doktoriral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, leta 2011 pa je doktoriral tudi na Medicinski fakulteti Univerze v Utrechtu na Nizozemskem. Kot izredni profesor je zaposlen v Laboratoriju za slikovne tehnologije na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer se poleg izvajanja pedagoškega procesa raziskovalno ukvarja z obdelavo in analizo medicinskih slik.