

Vaizdų technologijos T 111

SKELETAVIMO METODŲ APŽVALGA

Jarek Rokicki

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: jarek.rokicki@el.vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjami trimačiai skeletai, jų išgavimo būdai bei taikymo sritys. Pateikiami skeleto, centrinės ašies, centrinės linijos apibrėžimai. Apžvelgiami skeletavimo metodai: iteratyvus ploninimo, atstumų lauko, geometriniai, kelio planavimo, laukų bei bangos sklidimo. Nagrinėjami jų privalumai ir trūkumai. Skeleto kokybės vertinimas yra sudėtingas uždavinys, ypatingai jei norima aprašyti skeleto kokybę skaitiniais parametrais. Dėl to šiame straipsnyje suformuojami reikalavimai sudarytam trimačiam skeletui: centriškumas, plonumas, homotopiškumas, rišlumas, patikimumas, atsparumas triukšmui bei atstatomumas. Aptariami įvairūs skeleto tipai: geometrinis (centrinė ašis), kreivių skeletas.

Reikšminiai žodžiai: skeletavimas, reikalavimai skeletui, centrinė ašis, kreivių skeletas, topologija.

Įvadas

Skeleto išskyrimo problema iš trimačių objektų dar nėra iki galo išspręsta. Skeleto išskyrimas yra svarbus įvairiuose srityse: medicininių vaizdų apdorojime, vizualizavime, navigacijoje (Perchet 2004), virtualioje endoskopijoje (Frag 2004), kompiuterinėje grafikoje (Chuang 2000). Straipsnyje apsiribosime medicininių vaizdų apdorojimu, kur skeletas dažniausiai naudojamas kaip:

1. Tarpinis žingsnis nustatant kraujagyslių anomalijas, tokias kaip stenozė (kraujagyslių susiaurėjimas) ar aneurizma (išplėtėjimas) (Rokicki 2007).
2. Kampo tarp dviejų kraujagyslių nustatymui.
3. Kelio tarp dviejų kraujagyslių taškų radimui.
4. Išsišakojimo taško identifikavimui.
5. Dažnai skeletas naudojamas tiesiog kaip kompaktiška informacijos saugojimo forma.
6. Įvairių objektų registravimui.

Kartais vienas pacientas ištiriamas keliais metodais magnetinio rezonanso tomografu ir kompiuterine tomografija. Siekiant sutapatinti tyrimų rezultatus iš įvairių šaltinių užduoties palengvinimui trimačiai objektai verčiami į jų vienmatus formas.

Skeleto apibrėžimas

Kai kurie autoriai skeletą dažnai vadina centrine ašimi (angl. *medial axis*) (Golland 2000; Ogniewicz 1995; Gonzalez 2007). Centrinė ašis tai bent tarp dviejų paviršiaus taškų įbrėžtų maksimalių skritulių aibė. Maksimalus skritulys yra toks, kuris nėra pilnai įbrėžtas į jokią kitą

skritulį nagrinėjamo objekto O paviršiaus ribose (Cornea 2007). Trimatėje erdvėje, vietoje skritulių įbrėžiami maksimalūs rutuliai (Cornea 2007):

$$S_r = \{y \in R_3, d(x, y) < r\}, \quad (1)$$

čia r – rutulio (arba dvimačiu atveju, skritulio) spindulys; $x \in O$ – centrinis taškas, kai $O \subset R_3$; $d(x, y)$ – atstumas tarp x ir y taškų trimatėje erdvėje.

Netaikant jokių papildomų operacijų, centrinė ašis trimatėje erdvėje tampa centriniu paviršiumi. Galima teigti, kad kreivių skeletas yra centrinio paviršiaus poaibis. Tikslus kreivių skeleto apibrėžimas iki šiol nėra sukurta (Cornea 2007).

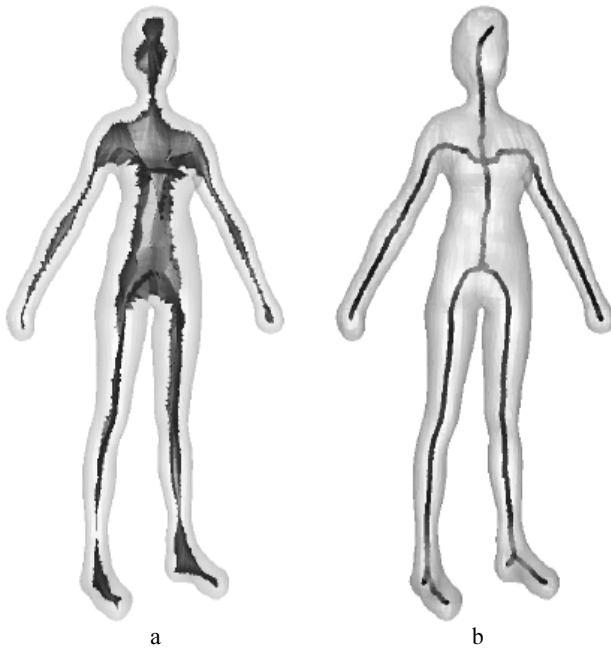
Kadangi skritulio centras yra taškas, rutulio skersmuo diskrečioje aplinkoje privalo būti nelyginis skaičius. Tam tikrais atvejais (kai atstumas tarp objekto kraštų yra lyginis taškų kiekis) maksimalus rutulys vienu metu gali liesti objekto ribą tik viename taške. Tokių maksimalių rutulių centrų sudaryta aibė sukurs skeletą, kurio plotis viršys vieną tašką.

Ši problema gali būti sprendžiama išskiriant paviršių iš diskrečios erdvės ir aprašant jį tolydziomis funkcijomis, pavyzdžiui sferinėmis harmonikomis (Paulinas 2008) ar kitokiais būdais.

Galima išskirti du pagrindinius skeleto tipus:

Geometrinis skeletas – pavaizduoja objekto centrą. Ne visada privalo būti vieno taško pločio (1 pav.). Dažnai geometrinis skeletas vadinamas centrine ašimi (Bloomenthal 1999), taigi geometrinis skeletas nebūtinai privalo būti vieno pikselio pločio, tačiau jis visados atitinka objekto centrą.

Centrinė linija – vienmatė linija, atitinkanti objekto atšakos centrą ir išsaugojanti jos topologiją.



1 pav. Objekto geometrinis (a) ir kreivių (b) skeletai (Dey 2006)
Fig. 1. The geometrical (a) and curve (b) skeletons (Dey 2006)

Kreivių skeletas – apjungtų centrinių linijų aibė vadiname kreivių skeletu. Skeleto atšakų kiekis nebūtinai privalo sutapti su skeleto objekto atšakomis, todėl ne kiekvienas kreivinis skeletas yra tuo pat metu ir topologiniu skeletu. Kreivių skeletas yra visur vienmatis išskyrus išsišakojimo vietas, nes tose vietose susikerta vienmatės centrinės linijos.

Reikalavimai kreivių skeletui

Išgauti objekto skeletą galima įvairiais būdais, tačiau jo kokybės vertinimas yra sudėtingas uždavinys, ypač jei kokybę bandoma išreikšti skaičiais (Kruszyński 2005). Taigi, suformuluosime savybes, kuriomis turėtų pasižymėti skeletas (Cornea 2007):

Centriškumas – skeleto išsidėstymas objekto centre. Kartais centriškumas apibrėžiamas taip, kad objekto skeletas privalo būti centrinės ašies poaibiu. Žinoma vien tokios sąlygos nepakanka centriškumui apibūdinti. Skeleto centriškumą galima įsivaizduoti taip: jei statmename skeleto kryptčiai objekto pjūvyje, nubrėžtume daug spindulių jungiančių skeleto tašką su objekto pakraščiais, tai priešprieša esančių spindulių ilgai privalėtų sutapti. Ne visada visiškai centriškumas yra pageidautinas. Esant dideliame triukšmui išilgai objekto senelių kai kuriose srityse (navigacijoje, išsišakojimų identifikavime) svarbesne savybe laikomas glotnumas.

Plonumas. Skeletas privalo būti vienmatis, išskyrus išsišakojimo vietas. Kraujagyslėse galima tiksliai apibrėž-

ti kiekvieno skeleto taško kaimynų kiekį pagal jo padėtį. Jei taškas priklauso išsišakojimui – trys kaimynai (žmogaus kraujagyslės išsišakoja daugiausiai į dvi dalis), kraujagyslės dalis – du kaimynai, galūnė – vienas kaimynas.

Homotopiškumas – tai yra objekto topologijos išsaugojimas, t. y. objektas ir jo skeletas turi vienodą atšakų, tunelių ir kiaurymių kiekį. Tuo pačiu visos skeleto atšakos privalo atitikti objektą. Kitaip tariant, negali būti naujų atšakų (1 pav.). Taigi topologinis skeletas gali būti gaunamas tik redukuojant objektą sudarančių taškų skaičių, nauji taškai negali būti kuriami.

Atsparumas triukšmui. Dauguma algoritmų yra neatsparūs triukšmui. Smulkus skirtumas objekto paviršiuje gali stipriai įtakoti skeleto formą (ypatingai triukšmui neatspari yra centrinė ašis). Idealiu atveju nepaveikto triukšmu objekto skeleto forma privalėtų nesiskirti nuo to paties objekto paveikto tam tikru triukšmo lygiu.

Glotnumas. Judant išilgai kreivių skeleto apskaičiuojama antroji jos išvestinė kiekvienam taškui, kuri nusakoma greitį arba skeleto kitimo dinamiką. Esant didelėms antrosios išvestinės reikšmėms reiškia, kad skelete yra daug vingių, šuolių. Taigi antrosios išvestinės reikšmė turėtų būti kuo mažesnė.

Rišlumas. Visi skeleto taškai privalo būti tarpusavyje susieti. Pageidautina žinoti, kuris taškas po kurio seka. Tai reiškia, kad paėmus bet kurį tašką, svarbu nustatyti jo padėtį skeleto atžvilgiu: kokiai atšakai jis priklauso, kiek jis yra nutolęs nuo atšakos pradžios, koks yra šio taško tipas (galūnė, kraujagyslės dalis ar išsišakojimas).

Patikimumas – skeleto savybė, užtikrinanti, kad tarp kiekvieno objekto paviršiaus taško ir bent vieno skeleto taško egzistuoja tiesi linija. Tai reiškia, kad visi paviršiaus taškai yra matomi iš skeleto taškų.

Atstatymas – galimybė atstatyti pradinę objekto formą iš turimo skeleto. Medicininių vaizdų atveju ši savybė nėra tokia svarbi, nebent skeletas naudojamas kompaktiškam duomenų saugojimui.

Metodai

Yra sukurta daug skeleto išskyrimo algoritmų. Algoritmus, įgyvendinančius skeletavimą, galima suskirstyti į tokias grupes (žinoma tai nėra vienintelis klasifikavimo būdas (Žitkevičius 2007)):

Iteratyvus ploninimo. Pagrindinis šios grupės algoritmų principas yra paprastųjų taškų (Bertrand 1995) (angl. *simple points*) identifikavimas ir naikinimas. Paprastojo taško panaikinimas neįtakoja objekto topologijos. Visi iteratyvus ploninimo algoritmai veikia diskrečioje erdvėje. Ploninimo iteracijos atliekamos, kol

objekte nelieka paprastųjų taškų (Palagyi 2003). Pagrindinis šių algoritmų privalumas yra greitis, nes paprastojo taško nustatymui pakanka išnagrinėti jo 3×3 kaimynystę. Pagrindinės šių algoritmų grupės problema yra galūnių nuėdinimas, todėl įvedamos papildomos sąlygos joms išsaugoti. Taip pat gaunamas skeletas ne visados būna geometrinis, tai yra centruotas (Farang 2004).

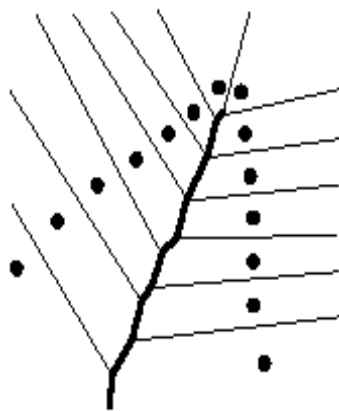
Atstumų laukas sudaromas kai kiekvienam O objekto P taškui yra priskiriama atstumo reikšmė iki artimiausio $B(O)$ paviršiaus Q taško:

$$d(P) = \min_{P \in O} \min_{Q \in B(O)} (d(P, Q)), \quad (2)$$

čia $d(P, Q)$ yra pasirinkta metrika (Cornea 2007).

Apskaičiavus atstumų lauką, bandoma nutiesti kelią per taškus, kuriuose atstumas iki objekto ribų yra maksimalus. Būtent šie taškai ir atitinka objekto skeletą. Taškų apjungimas vykdomas taikant gradientinę paiešką arba grafų teoriją (ieškant trumpiausio kelio tarp pasirinktų maksimumų). Dažnai papildomai naudojami ploninimo metodai. Kitas sprendimo būdas yra palikti tik nedidelę tarpusavyje neapjungtų maksimaliai nutolusių nuo paviršiaus taškų aibę ir po to juos iš naujo apjunginėti (Wright 1994). Pagrindinis šių algoritmų privalumas yra tai kad atstumų laukas yra greitai apskaičiuojamas.

Geometriniai metodai dažniausiai naudojami tokiais atvejais kai objekto paviršių pateikiamas naudojant išsklaidytų taškų aibę arba paviršiaus tinklas. Šie taškai panaudojami Voronojaus diagramos konstravimui, tai yra Voronojaus ląstelių sukūrimui. Kiekviena Voronojaus ląstelės siena yra nutolusi vienodu atstumu nuo ją konstruojančių tinklelio viršūnių ar taškų (2 pav.). Vidinės Voronojaus briaunos gali būti naudojamos geometrinio skeleto aproksimavimui. Norint išskirti vienmatį skeletą būtini papildomi ėsdinimo žingsniai (Ogniewicz 1992).



2 pav. Skeleto išskyrimas taikant Voronojaus diagramą (pastorinta linija pažymėtas objekto skeletas)

Fig. 2. Skeleton extracted by means of Voronoi diagram (the thick line represents skeleton itself)

Kelio planavimo metodai. Dažnai būna pusiau automatiniai, kai skeletas inicializuojamas pasirinktame taške, o vėliau taikant tam tikrą taisyklių rinkinį, vykdomas judėjimas išilgai objekto. Tas judėjimas gali būti atliekamas išilgai ilgiausio įmanomo netrukaus spindulio tarp pradinio taško ir objekto paviršiaus. Papildomai apibrėžiamos taisyklės judėjimo stabdymui, taškų centriškumo tikslinimui, išsišakojimų nustatymui (Rokicki 2007).

Laukų metodai. Šiuose algoritmuose kiekvienas paviršiaus taškas kuria tam tikrą lauką (potencinį, elektrostatinį ar stūmos). Kiekvienas objekto vidaus taškas atitinka tam tikrą paviršiaus taškų kuriamų laukų kombinaciją. Skeleto išskyrimas vykdomas apjungiant taškus, kur laukai įgauna maksimalias vertes. Šių metodų privalumas yra tikslus skeleto išskyrimas, nes kiekvienas taškas yra įtakojamas ne tik artimiausių paviršiaus taškų (kaip atstumų lauko atveju) bet ir visų kitų paviršiaus taškų (Chuang 2000). Žinoma, dėl tos priežasties šio grupės metodai yra lėtesni.

Bangos sklidimo metodai modeliuoja bangos sklidimą objekte. Visiems taškams apskaičiuojamas bangos atsklidimo laikas, naudojant gradientą bangos sklidimas yra atsekamas atgal. Su problemomis susiduriama pasirenkant taškus nuo kurių reikia pradėti atsekimą. Algoritmo rezultatas yra neapjungtų taškų aibė, kuri papildomai apjunginėjama. Pagrindiniai šios metodų grupės privalumai yra atsparumas triukšmui, tačiau gaunamas skeletas ne visados atitinka objekto centrą. Taip pat inicializuojant algoritmą nustatoma nemažai parametrų, kurių parinkimas priklauso nuo objekto pobūdžio (Farang 2004).

Išvados

Joks iš aptartų metodų nesugeba sukurti skeleto, tenkinančio visus aptartus reikalavimus sudarytam skeletui. Tinkamas metodas turi būti parenkamas atsižvelgiant į duomenų ir taikymo sritį (triukšmas, koku būdu aprašomas objekto paviršius, objekto forma, ar ribojamas skaičiavimų laikas).

Žinoma ne visais atvejais visos skeleto savybės yra pageidautinos. Dažnai atsisakoma centriškumo, ypač esant dideliame triukšmo kiekiui paviršiuje. Daug svarbesnė tokiais atvejais yra kita skeleto savybė – glotnumas.

1. Greičiausi skaičiavimų atžvilgiu yra iteratyvus ploninimo, geometriniai bei atstumų transformacijos metodai.
2. Laukų ir bangos sklidimo metodai pasižymi atsparumu triukšmui bei glotnia skeleto forma.
3. Kelio planavimo metodai išgauna rišlų ir suindeksuotą skeletą.

4. Homotopiją garantuoja iteratyvus ploninimo metodai, nes skeletą sudarantys taškai gaunami vykdant objekto redukciją.
5. Geometriniai metodai tinka kai paviršius aprašomas kaip neorganizuotų taškų aibė.
6. Bangos sklidimo ir kelio planavimo metodai tinka pailgiems objektams, tokiems kaip kraujagyslių sritis.

Literatūra

- Bertrand, G.; Aktouf, Z. 1995. Three-dimensional thinning algorithm using subfields, in *Proc. SPIE*, 2356(113): 113–124.
- Bloomenthal, J.; Lim, C. 1999. Skeletal methods of shape manipulation, in *Proc. of the International Conference on Shape Modeling and Applications*, 44–47.
- Chuang, J. H.; Tsai, C. H.; Ko, M. C. 2000. Skeletonization of three-dimensional object using generalized potential field, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(11): 1241–1251. doi:10.1109/34.888709
- Cornea, N. D.; Min, P. 2007. Curve-skeleton properties, applications, and algorithms, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13(3): 530–548. doi:10.1109/TVCG.2007.1002
- Dey, T. K.; Sun, J. 2006. Defining and computing curve-skeletons with medial geodesic function, in *Proc. of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 256: 143–152.
- Farag, A.; Hassouna, S.; Falk, R.; Hushek, S. 2004. Reliable Fly-Throughs of Vascular Trees, *Technical report*.
- Golland, P. E.; Grimson, L. W. 2000. Fixed topology skeletons, in *Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition*, 1(1): 10–17.
- Gonzalez, C. R.; Woods R. E. 2007. *Digital Image Processing*. NJ: Prentice Hall. 976 p. ISBN 0131-68-728-X.
- Kruszyński, K. J.; van Lier, R.; Kaandorp, J. 2005. Quantifying differences in skeletonization algorithms: A case study, in *Proc. Of Visualization, Imaging, and Image Processing (VIIP 2005)*, ACTA PRESS, 666–673.
- Ogniewicz, R. L. 1995. *Automatic Medial Axis Pruning by Mapping Characteristics of Boundaries Evolving under the Euclidean Geometric Heat Flow onto Voronoi Skeletons*. Technical report.
- Ogniewicz, R.; Ilg, M. 1992. Voronoi skeletons: Theory and applications, in *Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 63–69.
- Palagyi, K.; Tschirren, J.; Sonka, M. 2003. Quantitative analysis of intrathoracic airway trees: Methods and validation, in *Proc. of Information Processing in Medical Imaging*, 2732: 222–232.
- Paulinas, M.; Rokicki, J. 2008. Panašios formos paviršių, centrinės ašies radimo ir filtravimo metodika, iš konferencijos „Biomedicinė inžinerija“ pranešimų medžiaga, 209–212.
- Perchet, S.; Fetita, C. I.; Preteux, F. 2004. Advanced navigation tools for virtual bronchoscopy, in *Proc. Of SPIE Conf. On Image Processing: Algorithms and Systems III*, (5298): 147–158.
- Rokicki, J.; Miniotas, D.; Meilūnas, M.; Ušinskas, A. 2007. An algorithm for step-wise skeletonization of blood vessel network, *Electronics and Electrical Engineering* 8(80): 87–90.
- Wright, M. W.; Cipolla, R.; Giblin, P. J. 1994. Skeletonisation using an extended Euclidean distance transform, in *Proc. of the Conference on British Machine Vision*, 2: 559–568.
- Žitkevičius, E.; Grigaitis, D.; Navakauskas, D. 2007. On skeletonization of blood vessels in angiographic MRI images of human brain, *Information Technology and Control* 36(4): 372–376.

SURVEY OF SKELETONIZATION METHODS

J. Rokicki

Abstract

In this article we present a brief survey on skeletons. The skeleton types are reviewed and definitions given for each of them. The desirable skeleton properties are named: centred, thin, robust, connected, indexed, smooth, reliable and reconstructable. Also different methods groups of skeleton extraction are discussed based on: topological thinning, distance transform, geometrical, path planning, general field and propagating waves. Advantages and disadvantages are discussed for each of them.

Keywords: skeleton extraction, skeleton requirements, topology, curve skeleton.