

WALKING LOCATION ALGORITHMS

submitted by
Ing. Roman Soukal

Content of the Dissertation

The dissertation is concerned with point location problem in a large triangle mesh which is one of the most frequent tasks in computational geometry. The dissertation is written in English on 114 pages and structured in two parts.

In the first part, a brief summary of research topics and achieved results are discussed. The introductory text provides a solid motivation for the work, states the goals to be achieved, and gives an overview of the ongoing research. Specifically, it addresses the development of walking algorithms which are offering low complexity, reasonable memory tradeoffs and are easy to implement. These algorithms are used in many applications with large data and they significantly influence the computational cost of solution.

In Chapter 2, the candidate gives an overview of his own contributions for planar walking algorithms and surface walking algorithms. Namely, he proposes several new algorithms improving existing solutions and also a thorough evaluation and comparison of planar walking algorithms. Finally, the Chapter 3 offers issues for future research.

The second part contains the collection of seven reviewed research papers written by the author and his colleagues.

Evaluation of the Dissertation

The dissertation presents the work on the walking algorithms for point location problem in the context of processing very large triangle meshes. It seeks the theoretically correct and practically verified solutions of algorithms that are used for searching triangles in triangle meshes, i.e. organized triangle sets with connectivity and neighborhood information.

The work is well motivated and the candidate distinctly states the main objective of research. Although the various approaches to the point location problem have been the extensively researched areas, the candidate has identified issues that are interesting from theoretical point of view and relevant in practice. The proposed techniques are technically sound and theoretically well developed.

The dissertation offers useful conclusions and accomplishes the main goals that the candidate has set:

- As the main contribution of the Thesis, several new algorithms based on the local tests are introduced.
- The experiments carried out on different types of data and comparing the proposed algorithms with existing solutions have confirmed their correctness and the advantages in specific context, e.g. visibility or haptics.

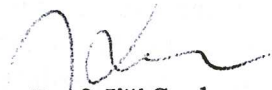
Different variants of these algorithms would be likely used by other researchers in the field, in particular, in applications where the complexity of surface meshes limits the practical solution. As rightfully pointed out by the candidate, the walking algorithms are important in a wide context and complexity and computational time play the key role in usage of these techniques. The selection of appropriate solution for searches in 2D, 2.5D and 3D meshes is

now supported by sound approaches compromising acceptable computational complexity and preserving the correctness and accuracy of results.

Conclusions

The Dissertation addresses an important and relevant problem in the areas of computational geometry. The candidate has well formulated the problem and proposed original solutions. The dissertation offers useful algorithms that are demonstrated on a set of experimental results and published in impacted journals and ranked conferences. Thus I conclude that the author of the thesis *proved* to have an ability to perform research and to achieve scientific results. I recommend the thesis for presentation with the aim of receiving the Degree of PhD.

Brno, Aug 3, 2015



Assoc.Prof. Jiří Sochor
Faculty of Informatics
Masaryk University

Posudek oponenta

Název disertační práce: *Walking Location Algorithms*

Autor: Ing. Roman Soukal

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Ivana Kolingerová

Disertační práce Ing. Romana Soukala je tematicky zaměřena do oblastí výpočetní geometrie a počítačové grafiky. Autor se zabývá problematikou Walking Algorithms (tzv. algoritmů procházky), a to zejména v souvislosti s 2D/3D triangulacemi, kdy jsou využity pro nalezení incidujícího trojúhelníku. Předkládaná disertační práce má formu uceleného souboru 7 článků věnovaných této problematice publikovaných v zahraničních časopisech, z toho tři články v prestižních časopisech s IF.

Zvolené téma práce považuji za zajímavé, aktuální, s teoretickou i praktickou aplikací dosažených výsledků v mnoha oborech. Triangulační algoritmy patří z pohledu výpočetní geometrie k často řešeným problémům, jejich vývoji je každoročně věnována řada publikací. Vlastní práce není směřována přímo na triangulační algoritmus, ale na jeho důležitou fázi řešící Point Location Problem mezi přidávaným bodem a trojúhelníky vytvářené triangulace. Autor vyvinul nové algoritmy procházek, popř. zdokonalil a zefektivnil metody stávající.

Úvod práce tvoří sjednocující text představující řešenou problematiku včetně používaných vztahů analytické geometrie ve 2D/3D. K této kapitole mám několik drobných připomínek. Autor uvádí, že "*Walking algorithms ... usually do not need any data preprocessing...*", str. 15. Efektivita těchto algoritmů je silně ovlivněna délkou procházky, proto randomizované přidávání bodů do triangulace není efektivní. Cílem je zpravidla dosažení co nejkratší cesty, což vyvolá požadavek na předzpracování vstupních dat. Na str. 15 proměnné t, u představují body definující polopřímku a v analyzovaný bod, na str. 16 pak t, u, v definují rovinu, což je poněkud matoucí (dtto trojúhelník někdy označený jako T , jindy jako τ). V celé práci by měl jeden symbol představovat jednu proměnnou a neměnit se podle kontextu. Chápu, že u souboru článků, které vznikaly v průběhu několika let, tento požadavek fakticky není možné dodržet. Obecně je matematická notace použitá v textu méně přehledná a místy matoucí. Autor důsledně nerozlišuje mezi bodem a vektorem (záměna hranatých a kulatých závorek), např. vzorec (2), str. 33, používá některé nepříliš srozumitelné zápisy, např. přímka $\lambda = \vec{tu}$, trojúhelník $\alpha = srl$, kde operátor $=$ evokuje přiřazovací operaci, str. 15, 32, atd. Tento nedostatek často prodlužoval dobu nutnou k pochopení textu. Doporučuji číslovat pouze vzorce, na které se v textu odkazujeme. Na str. 16 se pro označení 4 bodů ležících v rovině objevuje formulace "*... orientation of these points is ...neutral.*", což je v daném kontextu nepřesné.

První článek je věnován vylepšení algoritmu pro přímou procházku (Straight Walk). Autor navrhuje novou metodu inicializace algoritmu pracující v konstantním čase, nový test vzájemné polohy přímky a bodu používající 4 elementární aritmetické operace (oproti 5 stávajícím) s kombinací stochastického přístupu. Jak správně uvádí, tento test bude pro velké hodnoty souřadnic díky členu c zřejmě méně numericky stabilní. Modifikovaný algoritmus dosahuje lepších výsledků než stávající metody, což autor dokládá řadou testů. Drobnou poznámku mám k nesouladu textu $\alpha = srl$ s obr. 1, kde s, r, l tvoří vrcholy trojúhelníku τ , str. 32. Na str. 33 není uveden význam koeficientů λ_x, λ_y .

Druhý článek je věnován hybridnímu algoritmu kombinujícímu metody přímé a ortogonální procházky. Autor provádí natočení spojnice mezi přidávaným a výchozím bodem prvního trojúhelníku tak, aby byla kolmá k ose x , a mohla být použita rychlejší metoda ortogonální procházky. Jedná se o zajímavou a inovativní techniku, algoritmus dosahuje velmi dobrých výsledků. Jak bude metoda fungovat i pravidelných sítí, kde jsou hrany trojúhelníků rovnoběžné se souřadnicovými osami?

Třetí publikace popisuje návrh nového algoritmu, který modifikuje stávající řešení založené na barycentrických souřadnicích; Lawsonův algoritmus autor doplňuje o barycentrický test. Navržené řešení je rychlé, autor provádí jeho testování nad množinami s různým prostorovým uspořádáním bodů. Geometrická interpretace nemusí být na první pohled jasná, k lepšímu porozumění funkcionality algoritmu by prospěl obrázek.

Publikaci věnovanou procházkám v nekonvexní triangulaci s otvory považuji za nejzajímavější článek; v oblasti kartografie či GIS nabízí řadu praktických uplatnění. V topografických mapách se nachází řada míst, kde není žádoucí vytvářet při konstrukci digitálního modelu terénu trojúhelníkovou síť (zástavba, vodní plochy). Vyvinutý algoritmus je v současné době zřejmě jediným plně funkčním řešením. K článku mám drobné připomínky. Formulace "... *each triangle is connected with the rest of triangles by at least one edge* ...", str. 59, není přesnou definicí triangulace. Testování bylo, na rozdíl od předcházejících metod, provedeno pouze pro malá data, o cca dva řády menší než v ostatních případech. Proč? Prezentovaný algoritmus by bylo vhodné pro zpřehlednění upravit do 3 fází odpovídajícím textu článku, formalizovaný popis algoritmu s vnořenými cykly 4. úrovně je nepřehledný (str. 65).

Přehled navržených i stávajících algoritmů procházky v trojúhelníkových sítích přináší následující článek. Článek je věnován detailnímu testování kvalitativních i kvantitativních parametrů jednotlivých algoritmů na datech různé povahy. Výstupy považuji za originální a přínosné pro širokou geoinformatickou i kartografickou komunitu. Takto detailní analýza chování procházkových algoritmů nebyla doposud publikována; pro jejich testování autor musel vynaložit velké programátorské úsilí.

Problematikou procházek u hvězdicových polygonů se zabývá následující publikace. Toto téma považuji z teoretického hlediska za zajímavé, jeho praktický přínos lze najít při triangulaci objektů na sféře. Autorem navržená metoda procházky kombinuje algoritmy ortogonální a stochastické procházky, vlastní algoritmus ortogonální procházky byl navíc modifikován. Při porovnání se stávajícími algoritmy dosahuje nejlepších výsledků, je téměř o 50% rychlejší; výsledky považuji za velmi slibné. Připomínku mám k formulaci "...*line segment between two points in Cartesian coordinates is an arc in spherical coordinates*.", str. 96, která je nepřesná. Nejkratší spojnice dvou bodů na sféře (tj. geodetika) je ortodroma, tj. hlavní kružnice. Její průměty do souřadnicových os jsou také křivkou; tvar je invariantní vůči použitému souřadnicovému systému. Lze to snadno ilustrovat na následující příkladu. Křivky $r(\cdot, \lambda_0) = (\cos \varphi \cos \lambda_0, \cos \varphi \sin \lambda_0, \sin \varphi)$ a $r(\varphi_0, \cdot) = (\cos \varphi_0 \cos \lambda, \cos \varphi_0 \sin \lambda, \sin \varphi_0)$ představují poledníkový a rovnoběžkový oblouk a $r(x_0, \cdot, \cdot) = (x_0, y, z)$, $r(\cdot, y_0, \cdot) = (x, y_0, z)$, $r(\cdot, \cdot, z_0) = (x, y, z_0)$, jejich průměty do souřadnicových rovin (alespoň jeden z nich není úsečka).

Není mi jasný smysl a cíl výpočtů spojených se vzorci 4) -7), str. 100. Obr. 97 má znázorňovat icosahedron, tj. dvacetistěn v polárních souřadnicích. Je to prostorové těleso bez ohledu na jeho prostorovou parametrizaci, obrázek nejspíš znázorňuje nějakou variantu jeho 2D průmětu, zřejmě izocylindrické zobrazení. Zajímavý je fakt, že nemá 20 stěn. Totéž se týká i ostatních obrázků. Jsou to tedy prostorové útvary "rozbalené" do roviny? K popsané metodice mám následující dotaz: Pokud sférický trojúhelník obsahuje nějaký bod, jeho aproximace v rovině (tj. přímá spojnice) tento bod obsahovat nemusí a naopak.

Poslední publikace se věnuje procházkám pro potřeby lokalizace nejbližšího trojúhelníku na povrchu triangularizovaného 3D modelu vzhledem k haptickému zařízení (je znám směrový vektor). Může existovat více průsečíků s modelem, v takovém případě je zvolen jako vstupní bod nejbližší průsečík, úloha však také nemusí mít žádné řešení. Algoritmus je modifikací přímé procházky a využívá před zpracování dat. Je navržen s cílem nalézt odpovídající trojúhelník v čase pod 10 ms tak, aby reakce modelu na haptické zařízení byla plynulá a přirozená. Prezentovaný algoritmus je komplikovanější než běžné procházky, jeho vývoj a odladění zabraly autorovi více času. Výkonnost navrhovaného řešení se prokázala na řadě testů, kdy detekční doba byla o řád nižší než vstupní požadavek.

Připomínku mám ke struktuře textu, zejména u starších článků, kdy absence/nadbytek obrázků ztěžují orientaci v textu. Článek věnovaný triangulacím nekonvexních oblastí obsahuje textový popis jednotlivých fází algoritmu, některé pasáže se pro čtenáře stávají obtížněji pochopitelné. Obecně bych také doporučil upravit matematickou notaci v souladu s výše uvedenými připomínkami. K formální úpravě práce mám připomínku týkající se absence závěru. Ačkoliv se jedná o soubor publikovaných článků, práce by měla mít závěr, ve kterém by autor shrnul řešenou problematiku, výsledky či nastínil další možnosti výzkumu v této oblasti.

Na autora mám ještě následující dotaz. Jakým způsobem u jednotlivých procházek řeší častý problém, kdy v důsledku numerických nepřesností při polohových testech (byť je použita double precision aritmetika) může pro body ležící blízko hran dojít ke vzniku nekonečného cyklu? Tato situace nastává např. u Lawson Oriented Walk, kdy se nemusí podařit takový nalézt trojúhelník, pro který trojice polohových testů vydá stejné znaménko...

Disertační práce uceleným a komplexním způsobem zpracovává problematiku Point Location Problem, za její největší přínos považuji prezentaci několika různých variant řešení této úlohy dokazující invenční přístup autora k tomuto problému. O originalitě řešení a jeho akceptaci vědeckou komunitou svědčí fakt, že autor výsledky publikoval v několika prestižních vědeckých člancích. Počet a kvalitu publikací považuji za dostatečnou. Předložená disertační práce má podstatný přínos pro obor výpočetní geometrie, přináší nové vědecké poznatky, a to zejména ve formě nových algoritmů, které překonávají stávající metody. Jazykovou úroveň práce považuji za velmi dobrou a nemám k ní připomínky.

Předložená disertační práce obsahuje originální autorské myšlenky vedoucí k řešení zadaného problému. Práce ing. Romana Soukala splňuje podmínky kladené na doktorskou disertační práci, představuje původní vědecké dílo s mezinárodním přínosem v oblasti teoretické i aplikační. Autor prokázal schopnost tvořivého myšlení, systematického a logického přístupu, schopnost samostatného řešení vědeckého problému a výrazně posunul stav řešené problematiky. Připomínky obsahového i formálního charakteru nesnižují úroveň této práce.

Doporučuji, aby Ing. Romanu Soukalovi bylo umožněno obhájit jeho doktorskou disertační práci.

V Praze dne 14. září 2015

Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy



