

Integration automatischer Abstandsberechnungen in die Interventionsplanung

Bernhard Preim¹, Christian Tietjen², Milo Hindennach¹
und Heinz-Otto Peitgen¹

¹MeVis – Centrum für Medizinische Diagnosesystem und Visualisierung,
Universitätsallee 29, 28359 Bremen, Email: {preim, milo, peitgen}@mevis.de
²Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Simulation und Graphik,
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Email: tietjen@mail.cs.uni-magdeburg.de

Zusammenfassung. Wir stellen ein Verfahren aus der Robotik vor, mit dem minimale Abstände zwischen polygonalen 3D-Objekten effizient bestimmt werden können. Dabei beschreiben wir eine empirisch bestimmte Parametrisierung, die sich als besonders günstig erwiesen hat. Für das bei der Interventionsplanung wichtige Problem der Bestimmung eines minimalen Abstandes zwischen Gefäßen und Tumoren wird eine spezielle Lösung beschrieben, die eine Filterung der Gefäßvoxel basierend auf einem Kriterium für den Gefäßdurchmesser beinhaltet.

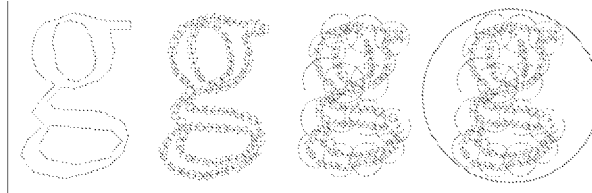
1 Einleitung

Für die Planung lokaler Interventionen sind Lageverhältnisse zwischen krankhaften Veränderungen und angrenzenden Strukturen wichtig, um über das Vorgehen zu entscheiden. Neben einer anschaulichen 3D-Visualisierung ist eine quantitative Analyse wesentlich. Eine exakte interaktive Vermessung von Abständen ist aufwändig. Basierend auf einer Segmentierung relevanter Objekte können minimale Abstände automatisch bestimmt werden. Aufgrund der großen Datenmenge bei medizinischen Visualisierungen muss das Verfahren effizient sein. Zudem muss es in der Lage sein, Objekte mit beliebiger Form zu analysieren. Im Vergleich zu dem ursprünglich entwickelten Verfahren [3] der Abstandsberechnung ist das hier vorgestellte Verfahren durch die effiziente Nutzung einer Hierarchie von Hüllkörpern deutlich schneller und uneingeschränkt anwendbar (auch auf Objekte, deren konvexe Hüllen sich überlappen).

2 Verwandte Arbeiten

Als Orientierung für die Entwicklung unserer Methode wurden Verfahren der Abstandsberechnung aus den Gebieten Algorithmische Geometrie und Robotik untersucht. In der Robotik richtet sich das praktische Interesse auf die Detektion von Kollisionen zwischen 3D-Objekten in dynamischen Systemen. Ein verbreitetes Verfahren ist in der Bibliothek V-COLLIDE realisiert [1]. Es beruht darauf, dass für alle Objekte achsenorientierte und objektorientierte Bounding Boxen

Abb. 1. Ein einfaches geometrisches Objekt und seine Repräsentation durch umschließende Kreise bzw. eine Hierarchie umschließender Kreise, aus [5]



berechnet werden (AABB bzw. OBB), wobei aus den geometrischen Informationen hierarchische Datenstrukturen aufgebaut werden (OBB-Bäume). Sie dienen dazu, schnell zu entscheiden, welche Objekte mit Sicherheit nicht kollidieren, um aufwändigere Berechnungen auf wenige Kandidatenpaare zu konzentrieren. Die hier beschriebene Aufgabenstellung ist dazu stark verwandt, aber in zwei wichtigen Details unterschiedlich: (1) Es handelt sich nicht um dynamische Objekte, die ihre Position verändern. (2) Nur zwei vom Benutzer selektierte Objekte werden betrachtet.

Aus diesen Gründen ist der erhebliche Vorverarbeitungsaufwand für die Berechnung objektorientierter Bounding-Boxen hier nicht gerechtfertigt, weil die berechnete Information nur ein einziges Mal verwendet wird.

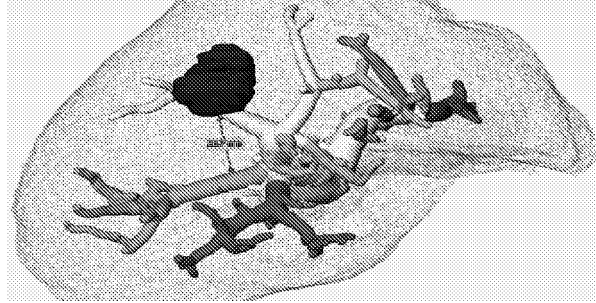
Die Mehrheit der existierenden Verfahren zur Abstandsbestimmung ist auf konvexe Objekte beschränkt. Abstandsberechnungen zwischen nicht-konvexen polygonalen Oberflächen wurden in [2] und [5] vorgestellt. Das Verfahren von KAWACHI [2] ist bei beweglichen Objekten besonders geeignet. Für die einmalige Abstandsberechnung zwischen statischen Objekten ist das Verfahren von QUINLAN [5] günstiger. Abb. 1 zeigt eine Prinzipskizze in 2D.

3 Abstandsberechnung auf Basis umschließender Kugeln

Das im folgende vorgeschlagene Verfahren orientiert sich an [5]. Die beiden betrachteten Objekte werden durch die Eckpunktmengen $V_1 = \{v_{1i}, i=1, \dots, m\}$ und $V_2 = \{v_{2j}, j=1, \dots, n\}$ (*vertices*) beschrieben. Für eine effiziente Abstandsberechnung werden diese Punktmengen in einer hierarchischen Datenstruktur repräsentiert. Dabei werden Teilobjekte bzw. ihre zugehörigen Punkte v_{1i} und v_{2j} zu Knoten n_{1r}^h und n_{2s}^g zusammengefasst und für jeden Knoten eine umschließende Kugel S_{1r}^h bzw. S_{2s}^g auf der jeweiligen Hierarchieebene g bzw. h bestimmt. Das Verfahren besteht aus folgenden Schritten:

1. *Aufbau einer hierarchischen Datenstruktur.* Initial wird für V_1 und V_2 die Bounding Box (AABB) bestimmt. Die v_{1i} werden solange in einen Behälter einsortiert, bis ihre Anzahl größer ist als der Parameter *maxEntries*. Wenn dieser Wert erreicht ist, wird $AABB(V_1)$ in gleich große Quader unterteilt. Entsprechend dem Parameter *partition* wird $AABB(V_1)$ in $2^3, \dots, 5^3$ Quader unterteilt und jeder Punkt seiner Box zugeordnet. Das Einsortieren der v_{1i} und die Unterteilung werden rekursiv fortgesetzt, bis alle v_{1i} einsortiert sind

Abb. 2. Minimaler Abstand zwischen einem Tumor und einem Gefäßsystem in der Leber, wobei nur Gefäße ab einem Durchmesser von 2 mm berücksichtigt werden.



- und jeder Behälter höchstens $maxEntries$ Punkte enthält. Die v_{2j} werden analog in Behälter einsortiert, die durch Unterteilung von $AABB(V_2)$ entstehen. Die Behälter entsprechen den Knoten der hierarchischen Struktur.
2. *Bestimmung umschließender Kugeln.* Für alle Knoten n_{1r} und n_{2s} wird die kleinste umschließende Kugel bestimmt, deren Mittelpunkt dem Mittelpunkt der AABB des jeweiligen Knotens entspricht. Es entsteht eine Hierarchie von Kugeln, wobei S_1^{root} die Kugel von V_1 darstellt.
 3. *Bestimmung einer Schätzung des minimalen Abstandes d_{guess} .* S_1^{root} und S_2^{root} werden betrachtet. Für die Kugel mit dem größeren Durchmesser werden die Unterkugeln betrachtet. Für jede dieser Unterkugeln wird der Abstand der Oberfläche zu der anderen Kugel bestimmt und das Minimum gebildet. Wir nehmen an, es tritt für die Kugel S_1^{root} und S_2^g auf. Wiederum wird für die größere der beiden Kugeln die Menge der Unterkugeln durchlaufen und der Abstand berechnet. Dies wird bis zu den Kugeln fortgesetzt, die den Blättern der Hierarchie entsprechen. Für das gefundene Kugelpaar $(S_{1r}^h; S_{2s}^g)$ werden die Abstände zwischen allen Punkten berechnet. Das Minimum dieser Abstände d_{guess} ist eine erste Schätzung des minimalen Abstandes.
 4. *Bestimmung des minimalen Abstandes d_{min} durch Analyse aller Punkte in Kugelpaaren $(S_{1r}^h; S_{2s}^g)$ mit Abstand $j d_{guess}$.* Ausgehend von d_{guess} werden alle Kugelpaare betrachtet, bei denen der Abstand der Kugeloberflächen $j d_{guess}$ ist. Alle anderen Kugelpaare können ausgeschlossen werden. In den verbleibenden Kugelpaaren werden alle Abstände zwischen den Punkten berechnet und mit d_{guess} verglichen. Danach steht das Minimum fest.

Die Berechnung des euklidischen Abstandes beinhaltet die Bestimmung der Quadratwurzel. Dieser zeitaufwändige Schritt kann eingespart werden, solange nur bestimmt werden muss, zwischen welchen Eckpunkten das Minimum auftritt.

Parameterbestimmung. Durch umfangreiche Laufzeittests mit Objekten, die aus hochaufgelösten CT-Daten segmentiert wurden, wurden die für die Effizienz wesentlichen Parameter *partition* und *maxEntries* empirisch bestimmt. Sie passen sich an die Größe der jeweiligen Punktmenge (*size*) an, wobei *partition* Werte von 2^3 , 3^3 , 4^3 oder 5^3 annimmt. Die Kubikzahlen als Werte für *partition* sind dadurch motiviert, dass in allen Richtungen (x -, y - und z) die Bounding

Box in gleich große Teile eingeteilt werden soll. *MaxEntries* muss so gewählt werden, dass einerseits die Zahl der Einträge pro Kugel nicht zu groß wird; andererseits so, dass die Zahl der Kugeln nicht zu groß wird. Werte zwischen 200 und 1000 haben sich als günstig erwiesen. In diesem Intervall wird *maxEntries* an den Wert von *size* angepasst. Die durchschnittliche Belegung liegt weit unter dem Maximum (z.B. 200 bei *maxEntries* = 1000).

Validierung. Die naive Methode zur Berechnung des minimalen Abstandes besteht darin, alle Abstände zwischen den Eckpunkten beider Objekte zu betrachten und das Minimum zu bilden. Die Korrektheit der hier vorgestellten Abstandsberechnung wurde sichergestellt, indem die Übereinstimmung der Ergebnisse der naiven Methode mit denen der vorgestellten festgestellt wurde.

4 Einschränkung der Vermessung auf Teile des Gefäßbaumes

Bei der Abstandsberechnung zwischen Tumoren und Gefäßen besteht der Wunsch chirurgischer Anwender darin, nur Gefäße mit einem bestimmten Mindestdurchmesser zu betrachten. Daher wurde ein Modul `VESSELFILTER` entwickelt, das zwei Eingänge besitzt: einen segmentierten Gefäßbaum und das abgeleitete Skelett zusammen mit den Durchmesserinformationen für jedes Skelettvoxel. Der `VESSELFILTER` bestimmt daraus alle Gefäßabschnitte, deren Durchmesser oberhalb des Schwellwertes d_{thresh} liegen und die dazugehörigen Teile des segmentierten Gefäßbaumes (Abb. 2). Die Filterung wird so durchgeführt, dass ein zusammenhängender Gefäßbaum nicht in mehrere Teile zerfällt. Aufgrund von Diskontinuitäten im Gefäßdurchmesser von der Wurzel des Gefäßbaumes zur Peripherie wäre dies möglich. Der Gefäßbaum wird daher unter Berücksichtigung der Hierarchie durchsucht. Dies geschieht ausgehend von den Blättern. Sowie auf dem Weg zur Wurzel erstmals ein Gefäßabschnitt mit $d > d_{thresh}$ auftaucht, werden alle weiteren Gefäßabschnitte nicht gefiltert.

5 Ergebnisse und Diskussion

Das beschriebene Verfahren wurde detailliert erprobt. Dabei wurden z.B. Abstände zwischen Gefäßbäumen und Tumoren bestimmt. Der minimale Abstand konnte bei allen Messungen in maximal 600 Millisekunden bestimmt werden. Im Unterschied zu [5] werden Punktmengen und keine Polyeder benutzt. Dadurch kann der minimale Abstand zwischen Objekten bestimmt werden, von denen eines im anderen enthalten ist.

Tab. 1 fasst einige Messergebnisse zusammen. In Spalten 2 und 3 ist die Zahl der Eckpunkte der beiden selektierten Objekte dargestellt. In den folgenden beiden Spalten ist die durchschnittliche Zahl der Einträge pro Kugel und die Maximalzahl dargestellt. Bei den Messungen 1-3 ist aus der Objektanzahl ein Maximum von 200 Einträgen bestimmt worden (aufgetreten sind daher Werte bis zu 199). Bei den Messungen 4-6 waren Gefäßsysteme beteiligt (mehr

Tabelle 1. Parameter und Ergebnisse der Abstandsbestimmung

Nr.	Obj ₁ , Punkte	Obj ₂ , Punkte	Obj ₁ , Entries (Avg., Max.)	Obj ₂ , Entries (Avg., Max)	Obj ₁ , Kugeln	Obj ₂ , Kugeln	Zeit in Sek.
1	5244	2147	79.4; 191	46.7; 119	66	46	0.06
2	10540	5703	48.8; 190	59.4; 195	216	96	0.04
3	18785	7759	48.7; 199	44.3; 199	386	175	0.11
4	25078	5703	272.6 ; 903	59.4; 195	92	96	0.10
5	49911	5703	253.2 ; 967	59.4; 195	197	96	0.14
6	88887	22298	189.9 ; 970	126.2; 997	468	177	0.59

als 20 000 Eckpunkte). Die 4. und 5. Messung beziehen sich auf den Abstand zwischen Tumoren und Gefäßen; die 6. Messung bezieht sich auf den Abstand von zwei Gefäßsystemen zueinander – eine besonders aufwändige Messung, die die Leistungsfähigkeit des Algorithmus bei großen Datenmengen zeigt. Für die Gefäßsysteme wurde ein zulässiger Maximalwert von 1000 Einträgen pro Kugel bestimmt. In den Spalten 6 und 7 wird die Zahl der verwendeten Kugeln angegeben. Die Tiefe des Baumes lag in allen Beispielen zwischen 3 und 5; es ist also nicht zu entarteten Bäumen gekommen. Die letzte Spalte enthält den Gesamtaufwand auf einem Intel Pentium IV-Prozessor.

Das Verfahren ist in den bei MeVis entwickelten INTERVENTIONPLANNER integriert [4]. Dieser auf chirurgische Anwender zugeschnittene Softwareassistent enthält neben Möglichkeiten zur Resektionsplanung ein Modul mit interaktiven und automatischen Vermessungsmöglichkeiten und wird an 4 Kliniken zur Planung von Leberoperationen eingesetzt. Die automatische Abstandsbestimmung wird genutzt, um Abstände zwischen Tumoren und Blutgefäßen abzuschätzen.

Für den klinischen Einsatz ist wichtig, dass die Verbindungslinie zwischen den Objekten, an denen der minimale Abstand berechnet wurde, erkennbar ist. Dazu wird die Kamera des 3D-Viewers auf den Mittelpunkt der Linie gerichtet und die Kamera auf diesen Mittelpunkt zubewegt (Abb. 2).

Literaturverzeichnis

1. Hudson TC, Lin MC, Cohen J, Gottschalk S, Manocha D: V-COLLIDE: Accelerated Collision Detection with VRML, *Symposium on the Virtual Reality Modeling Language*, 1997.
2. Kawachi K und Suzuki H: Distance Computation between Non-convex Polyhedra based on Voronoi Diagrams, *Geometric Modeling and Processing*, S. 123-130, 2000.
3. Preim B, Sonnet H, Spindler W, Peitgen HO: Interaktive und automatische Vermessung von 3D-Visualisierungen für die Planung chirurgischer Eingriffe, *Bildverarbeitung für die Medizin*, Springer, S. 19-23, 2001.
4. Preim B, Hindennach M, Spindler W, Schenk A, Littmann A und Peitgen HO: Visualisierungs- und Interaktionstechniken für die Planung lokaler Therapien, *Simulation und Visualisierung* (Magdeburg, März 2003), erscheint im SCS-Verlag, 2003.
5. Quinlan S: Efficient Distance Computation between Non-Convex Objects, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994.