Automatische Segmentierung von Herz-Kavitäten in mehrdimensionalen Ultraschallaufnahmen

Ivo Wolf, Gerald Glombitza, Raffaele De Simone*, Hans-Peter Meinzer

Deutsches Krebsforschungszentrum, Abt. MBI / H0100
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg
*Chir. Universitätsklinik Heidelberg, Abt. Herzchirurgie
Im Neuenheimer Feld 110, 69120 Heidelberg
Email: I.Wolf@dkfz-heidelberg.de

Zusammenfassung. Wir stellen hier ein neues Verfahren zur automatischen Detektion lückenhafter, annähernd konvexer Konturen vor. Entwickelt wurde das Verfahren zur Segmentierung von Herz-Kavitäten, um eine möglichst genaue Bestimmung des Volumens von Regurgitationsjets zu erreichen.

Schlüsselwörter: Algorithmen, Automatische Konturfindung, Echokardiographie, Segmentierung, Ultraschall Diagnostik

1 Motivation

Für die Bewertung von Herzklappendefekten stellt das Volumen der auftretenden Insuffizienzjets einen zentralen Anhaltspunkt dar. Für die Bestimmung dieser Volumina mittels Doppler-Echokardiographie [1] existiert bisher kein Standardverfahren. Zweidimensionale Verfahren sind aufgrund der darin enthaltenen Symmetrieannahmen nur beschränkt aussagekräftig. Am vielversprechendsten sind dreidimensionale oder gar vierdimensionale Methoden, die auf der gewichteten Summation der von den Jets in zweidimensionalen Schichtaufnahmen eingenommenen Flächen beruhen [2,3]. Dabei werden Bereiche hoher Blutfluß-Geschwindigkeiten und hoher Turbulenz als Jets interpretiert.

Da für die Beurteilung z.B. eines Rückflusses an einer defekten Mitralklappe nur die Flüsse im linken Vorhof interessieren, müssen diese isoliert werden. Dazu muß zunächst die relevante Herz-Kavität – in diesem Beispiel der linke Vorhof – segmentiert werden.

Bildgebungsbedingt muß ein Segmentierungsverfahren für Ultraschallaufnahmen tolerant gegenüber lückenhaften Konturen sein. Ein gängiger Ansatz für dieses Problem sind aktive Konturen. Wir stellen hier eine alternative Möglichkeit vor.

2 Konturdetektion

Das Verfahren wird schichtweise angewendet und besteht jeweils aus vier Stufen. In der ersten Stufe muß ein innerhalb der zu findenden Kontur liegender „Beobachtungspunkt“ gewählt werden. Von dort ausgehend werden in der nächsten Stufe (Scan) Punkte gesucht, die möglicherweise zur Kontur gehören. Im dritten Schritt (Classify)

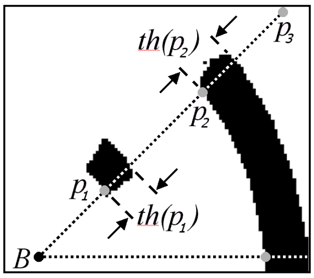

Abb. 1. Es ist $vi(p_1)=0$, $vi(p_2)=th(p_1)$, $vi(p_3)=th(p_1)+th(p_2)$, $th(p_3)=0$, $bp(p_3)=true$, $bp(p_1)=bp(p_2)=false$. Der Randpunkt auf dem unteren Strahl wird nicht akzeptiert.

werden diese zu Linienstücken gruppiert. Solche Punkt-Gruppen werden schließlich in der letzten Stufe (Connect) zur endgültigen Kontur verbunden.

2.1 Wahl des Beobachtungspunkts

Der Beobachtungspunkt muß im Inneren der zu segmentierenden Kavität liegen, möglichst in der Nähe des Zentrums. In der ersten Schicht geschieht dies zur Zeit manuell durch den Benutzer. Bei hinreichend standardisierten Aufnahmen ist auch ein fest gewählter Punkt denkbar. Nach Ablauf des restlichen Verfahrens ist die von der Kavität in dieser Schicht eingenommene Fläche und damit auch deren Schwerpunkt bekannt. Dieser wird als Beobachtungspunkt sowohl für die zeitlich, als auch für die räumlich folgende Schicht verwendet.

2.2 Scan

In dieser Stufe wird eine Liste von Punkten erstellt, die möglicherweise zur Kontur gehören. Ausgehend vom Beobachtungspunkt *B* werden im binomialgefalteten Bild auf radialen Suchstrahlen, die einen Abstand von wenigen Grad voneinander haben, Punkte gesucht, die ein bestimmtes Kriterium erfüllen. Im Falle der Ultraschallaufnahmen hat sich als Kriterium ein einfacher Schwellwert bewährt, der mit Hilfe des Verfahrens von Otsu [4] aus dem Histogramm bestimmt wird. Es werden nur diejenigen Punkte akzeptiert (je Suchstrahl können das auch mehrere Punkte sein), die das Kriterium erfüllen, deren unmittelbare Nachbarn in Richtung des Beobachtungspunkts jedoch das Kriterium *nicht* erfüllen (vgl. Abb. 1). Zudem werden alle Punkte am Rand des Aufnahmebereichs aufgenommen, die das Kriterium *nicht* erfüllen.

Die Koordinaten der akzeptierten Punkte p_i (kartesische (x_i,y_i) und Polarkoordinaten $(r_i,\varphi_i)=:(r(p_i),\varphi(p_i))$ bzgl. des Beobachtungspunkts) werden sortiert nach dem Winkel in eine Liste aufgenommen. Zusätzlich werden zu jedem gefundenen Punkt p_i die folgenden Merkmale der „Wand“ an dieser Stelle gespeichert (vgl. Abb. 1):

- „Dicke“ $th(p_i)$: Abstand von p_i entlang des Suchstrahls zum nächsten Punkt, der das Kriterium nicht mehr erfüllt.

- „Sichtbarkeit" $vi(p_i)$: Summe der Dicken $th(p_j)$ der Punkte p_j, für die $\varphi_j=\varphi_i$ und $r_j<r_i$ gilt. Die Sichtbarkeit von p_i ist daher um so besser, je *kleiner* $vi(p_i)$ ist.
- „Randpunkt" $bp(p_i)$: Boolscher Wert, der wahr ist, wenn der Punkt am Rand des Aufnahmebereichs liegt und das Kriterium *nicht* erfüllt.
- Abstand zur Kontur der vorigen Schicht $pd(p_i)$: Falls es sich um die erste Schicht handelt, wird $pd(p_i)=0$ gesetzt.

2.3 Classify

Die Aufgabe dieser dritten Stufe ist es, die gefundenen Punkte zu Linienstücken zusammenzusetzen, die Punkte also als zugehörig zu Punkt-Gruppen zu *klassifizieren*. Dies geschieht mittels eines least-cost Algorithmus. Im folgenden bezeichnet

- P die Menge aller im zweiten Schritt gefundenen Punkte
- C die Menge der bereits klassifizierten Punkte, anfangs ist daher $C=\emptyset$
- $G_L=(p_s, p_{s+1}, ..., p_f)$ die L-te Gruppe, eine geordnete Liste von Punkten
- $p_s(G)$ den Startpunkt und $p_f(G)$ den Endpunkt der Gruppe G
- $[\varphi(G)]=[\varphi_s(G),\varphi_f(G)]$ den Winkelbereich, unter dem die Gruppe G vom Beobachtungspunkt B aus erscheint
- $A(G)=\{p\in P|\varphi(p)\notin [\varphi(G)]\}$ die Menge aller Punkte, die nicht im Winkelbereich von G liegen
- $\angle(p_i,p_j)$ den Winkel in mathematisch positiver Richtung zwischen p_i und p_j
- d_{max} eine Konstante, die den maximal erlaubten Punktabstand angibt
- $f_m(p):=max(f(p),d_{max})$, wobei f ein Merkmal wie z.B. th ist
- η entweder s oder f, also $\eta\in\{s,f\}$
- $c_{cl}(p,G,\eta)$ die Kostenfunktion, definiert als

$$c_{cl}(p,G,\eta):=|p-p_\eta(G)|+vi_m(p)+pd_m(p)-th_m(p) \qquad (1)$$

Das Anlegen einer neuen Gruppe G_L erfolgt durch Aufnahme eines Punkts $p\in P$, $p\notin C$ in die zunächst leere Gruppe G_L und in C. Es wird $s=f=0$ gesetzt, es ist also $p_s=p_f=p_0=p$, $G_L=(p_0)$.

Als Kandidaten für die Erweiterung der Gruppe werden nur Punkte $p\in A(G_L)$ betrachtet. Zunächst wird zudem $\angle(p_f,p)<\angle(p,p_s)$ gefordert, d.h. es wird in mathematisch positiver Richtung gesucht. Unter diesen Punkten wird derjenige Punkt p' ausgewählt, für den $c_{cl}(p',G_L,f)$ minimal ist. Falls p' existiert und $p'\notin C$ sowie $|p'-p_f|<d_{max}$ gilt, wird p' an das Ende von G_L angehängt (also $f=f+1$, $G_L=(G_L, p_f=p')$), in C aufgenommen und dieser Teilschritt wiederholt.

Andernfalls gilt die Gruppe in mathematisch positiver Richtung als abgeschlossen, und es wird entsprechend in mathematisch negativer Richtung gesucht. Gefundene Punkte werden an den Anfang von G_L angefügt. Erfüllt kein Punkt mehr die Voraussetzungen, gilt die Gruppe G_L als komplett. Falls noch Punkte $p\in P$, $p\notin C$ existieren, wird eine neue Gruppe begonnen.

2.4 Connect

Diese vierte Stufe besteht aus dem Zusammensetzen geeigneter Linienstücke zur endgültigen Gesamtkontur. Zunächst wird das „beste“ Linienstück bestimmt: Eine Gruppe gilt als um so besser, je länger, dicker und näher sie an der in der vorigen Schicht gefundenen Kontur ist und je weniger Randpunkte sie enthält.

Ausgehend von dieser Gruppe werden, ebenfalls mit einem least-cost Verfahren, die nächst günstigsten Linienstücke gesucht. Als Kostenfunktion wurde gewählt

$$c_{con}(p,K,\eta):=|p-p_\eta(K)|+vi_m(G_\eta(p))+pd_m(G_\eta(p))+pd_m(p_\eta(G(p)))-th_m(G_\eta(p)) \qquad (2)$$

Es bedeutet :

- K die zunächst unvollständige Kontur, eine Vereinigung von Gruppen G
- $G(p)$ die Gruppe G, deren Element p ist, für die also $p \in G$ gilt
- $G_f(p)$ die Teilgruppe von $G(p)$, die bei p beginnt und bei $p_f(G(p))$ endet
- $G_s(p)$ die Teilgruppe von $G(p)$, die bei $p_s(G(p))$ beginnt und bei p endet
- N_{min} eine Konstante, die die Mindestanzahl von Punkten angibt, die eine Teilgruppe haben muß, um in K aufgenommen werden zu können
- $N(G)$ die Anzahl der Punkte in G
- $f(G)$ den durchschnittlichen Wert von $f(p)$ für $p \in G$

Es wird dasjenige Paar (p,η), $p \in A(K)$, $\eta \in \{s,f\}$, $N(G_\eta(p)) \geq N_{min}$ ausgewählt, für das $c_{con}(p,k,\eta)$ minimal ist. Falls ein solches Paar existiert und entweder K noch weniger als $270°$ überdeckt oder $|p_f(K)-p_s(K)|>|p-p_\eta(K)|$ ist, so wird die Teilgruppe $G_\eta(p)$ zu K hinzugefügt (bei $\eta=s$ an den Anfang von K, sonst ans Ende) und dieser Teilschritt wiederholt. Andernfalls ist das Verfahren, bis auf Korrekturen, beendet und die Kontur K geschlossen.

Vor jedem Hinzufügen einer Teilgruppe und am Ende werden eventuell wieder Punkte aus K entfernt:

1. Das Hinzufügen von einer Teilgruppe $G_\eta(p)$ erfordert in der bisher beschriebenen Form die Interpolation einer Lücke der Länge $|p-p_\eta(K)|$. Existiert ein Punkt $p' \in K$ mit $|p-p'|<|p-p_\eta(K)|$, so werden die zwischen p' und $p_\eta(K)$ liegenden Punkte einschließlich $p_\eta(K)$ entfernt, so daß danach $p_\eta(K)=p'$ gilt und somit nur noch eine kleinere Lücke zu interpolieren ist.
2. K_1 sei eine unvollständige Kontur, zu der die Teilgruppe G_1 hinzugefügt werden soll. Die zu interpolierende Lücke sei d_1. Die Kontur – nach Hinzufügen evtl. weiterer Teilgruppen – sei K_2. Die nun (in derselben Richtung wie vorher G_1) hinzuzufügende Teilgruppe sei G_2 und die dabei zu interpolierende Lücke d_2. Ist nun d_1+d_2 kleiner als die Lücke zwischen K_1 und G_2, so wird G_1 und die evtl. noch danach (in derselben Richtung) hinzugefügten Teilgruppen wieder aus der Kontur entfernt und dann erst G_2 hinzugefügt.

Treten in der Kontur K noch größere Lücken (größer d_{max}) auf, wird im Winkelbereich dieser Lücken nach Gruppen gesucht, deren Einpassung in die Kontur (bei gleichzeitiger Entfernung anderer Gruppen) zu einem insgesamt geringeren Interpolationsaufwand führt.

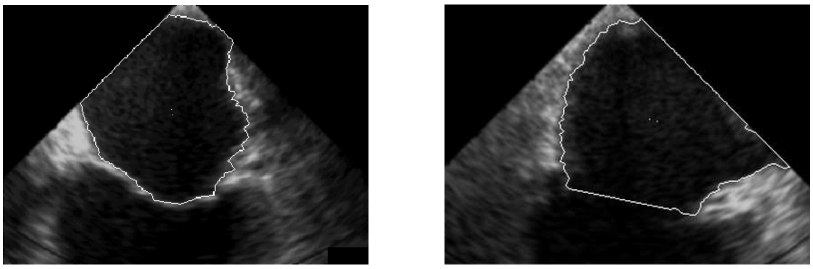

Abb. 2. Ergebnisse der Konturfindung

Im Winkelbereich verbleibender größerer Lücken wird mit einem schwächeren Kriterium, hier also einem niedrigeren Schwellwert, wie in Stufe zwei erneut gescannt und die Punkte wie in Stufe drei zu Gruppen zusammengefaßt. Dann wird versucht, diese neu gefundenen Gruppen in die Lücken von *K* einzupassen.

3 Diskussion und Ergebnisse

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht eine schnelle, stabile Detektion lückenhafter Konturen bei minimaler Benutzerinteraktion (ein einziger Mausklick) und läßt sich auf zwei-, drei- und auch vierdimensionale Aufnahmen anwenden. Abb. 2 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Konturfindung bei zwei Ultraschallaufnahmen mit unterschiedlich deutlich sichtbarer Mitralklappe.

Einzige Voraussetzung in der gegenwärtigen Implementierung ist eine annähernd konvexe Geometrie, eine Anpassung für andere Geometrien scheint unkompliziert. Die Anwendungsmöglichkeiten gehen weit über den beschriebenen Fall der Segmentierung von Herz-Kavitäten in der Echokardiographie hinaus.

4 Literatur

1. Feigenbaum H: Echocardiography. Lea & Febiger, Philadelphia, 5th Edition 1994.
2. Glombitza G, De Simone R, Merdes M, Mayer A, Vahl CF, Hagl S, Meinzer HP: Three-dimensional visualization and volumetric assessment of valvular regurgitant jets in echocardiography. Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery '98, Tokyo, 170-175, 1998.
3. Delabays A, Sugeng L, Pandian NG, Hsu TL, Chen CH, Marx G, Schwartz SL, Cao QL: Dynamic Three-Dimensional Echocardiographic Assessment of Intracardiac Blood Flow Jets. The American Journal of Cardiology, 76:1053-1058, 1995.
4. Otsu N: A threshold selection method from gray level histograms. IEEE SMC, 9:62-66, 1979.