Linguistische Modellierung zur Erkennung anatomischer Objekte

Frank Höwing[*†], Diederich Wermser[†] und Laurence Dooley[*]

[*]University of Glamorgan, School of Electronics,
Pontypridd, Mid Glamorgan, CF37 1DL. UK
Email: lsdooley@glamorgan.ac.uk
[†]Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, FB E
Salzdahlumer Str. 46/48, 38302 Wolfenbüttel
Email: {f.hoewing|d.wermser}@fh-wolfenbuettel.de

Zusammenfassung. Eine neue Methode wird vorgestellt, die es erlaubt unscharfes Vorwissen über Objektkonturen in ein Modell Aktiver Konturen ("Snakes") zu integrieren. Das neue Konzept der Fuzzy Snakes wurde entwickelt, um die Eigenschaften einer Objektkontur in intuitiver Weise beschreiben zu können. Zu diesen Eigenschaften zählen neben der durch das bildgebende Verfahren bestimmten Erscheinung eines Objektes im Bild auch Formmerkmale. Dies wird erreicht, indem unscharfe Energiefunktionen eingeführt werden, die zusammen mit einer linguistischen Regelbasis jeden Abschnitt einer Fuzzy Snake beschreiben. Weiterhin kann die ungefähre Länge jedes Abschnittes angegeben werden, was sowohl die Segmentation verbessert, als auch die Komplexität des Algorithmus verringert. Die abschnittsweise linguistische Beschreibung von Konturen ist besonders zur Erkennung starrer, aber auch verformbarer, anatomischer Objekte geeignet. Der Beitrag beschreibt ein Beispiel dafür, wie Fuzzy Snakes genutzt werden können, um Konturen anatomischer Objekte wie Handgelenksknochen in MRT- bzw. Röntgenbildfolgen detektieren zu können.

Schlüsselwörter: Konturmodellierung, Fuzzy Snakes

1 Einleitung

Aktive Konturen [1], oder "Snakes", stellen eine bekannte energieminimierende Methode dar, um das Konturmodell eines Objektes an Merkmale im Bild anzupassen und somit das Objekt zu segmentieren. Der Ansatz, der von einer polygonalen Objektrepräsentation ausgeht, hebt sich besonders durch seine Fähigkeit hervor, Variationen in der zu detektierenden Kontur zu berücksichtigen. Es ist daher möglich, auch verformbare Objekte in Bildfolgen zu segmentieren und zu verfolgen.

Eine Vielzahl von Verbesserungen des ursprünglichen Algorithmus wurden in den vergangenen Jahren publiziert. Oft blieb jedoch das explizite Einbeziehen von Vorwissen im Hintergrund. Vielfach wurde für alle Stützstellen der Aktiven Kontur dieselbe lokale Energiefunktion verwendet, was zu einer gobalen

Beschreibung des Objekts führte. Um dieses Problem zu lösen, führte Olstad [2, 3] eine grammatikalische Beschreibung der Energiefunktion E_{snake} ein. Eine Kontur kann nun definiert werden, als Folge verschiedener externer Energiefunktionen $E^{\mathtt{a}}_{ext}$, $E^{\mathtt{b}}_{ext}$, $E^{\mathtt{c}}_{ext}$ usw. Diese Energiefunktionen werden durch terminale Zeichen `a`, `b`, `c` usw. einer kontextfreien Grammatik repräsentiert. Somit ist es möglich, die Eigenschaften von Stützstellen einer Kontur durch einen regulären Ausdruck zu beschreiben, z.B. `a*b*a*c*`. Ein in die aktive Kontur integrierter Mustererkennungs-Algorithmus, beschränkt nun die möglichen Konturen, so daß nur Resultate möglich sind, die dem grammatikalischen Ausdruck entsprechen. Dieser Ansatz besitzt einige grundsätzliche Nachteile:

1. Die Energiefunktionen berücksichtigen nicht unscharfes Vorwissen.
2. Der Algortihmus ist rechenintensiv, da die Hüllenbildung (∗) eine große Anzahl möglicher Zustände in dem auf einem endlichen Automaten basierenden Mustererkennungsalgorithmus erzeugt.
3. Die Länge eines Kontursegmentes kann nicht angegeben werden, obwohl ein ungefährer Wert im Voraus bekannt sein könnte.

Die folgenden Abschnitte beschreiben neue Lösungen für diese Probleme.

2 Fuzzy Segmentlänge

Die Fuzzy Snake [4] erlaubt die Angabe der Anzahl zusammenhängender Stützstellen, für die dieselbe Energiefunktion verwendet werden soll; ein Parameter der den Suchraum stark verkleinert. Eine scharfe Vorgabe dieser Abschnittslänge würde jedoch unscharfes Vorwissen in dieser Hinsicht unberücksichtigt lassen, daher wird eine neue Methode vorgestellt.

Dazu wird eine Notation eingeführt, mit der die Länge eines Kontursegments durch eine (diskrete) Fuzzy Zahl [4] l angegeben wird (Mittelwert l_0, Einflußbreite s, definiert durch $\mu(l) > 0 \;\forall\; l \in \{l_0 - s, \ldots, l_0 + s\}$). Eine Beispielkontur könnte nun durch den Ausdruck (*6*a)(*6*b)(*1*c)(*4*d) genauer und dennoch flexibel beschrieben werden. Dabei bedeutet die Angabe (*6*a) für das erste Segment bei einer Fuzzy Länge von $l_0 = l_a = 6$ und einer Einflußbreite von $s = 2$, daß der Konturabschnitt aus 4 bis 8 Stützstellen bestehen darf, die dieselben durch die Energiefunktion $E^{\mathtt{a}}_{ext}$ definierten Eigenschaften aufweisen.

Um die *variable* Länge der Snake-Segmente zu berücksichtigen, ist eine Erweiterung des ursprünglichen Optimierungsalgorithmus [5] notwendig (Tab. 1). Die Längenangabe wird als zusätzliche Bedingung betrachtet, wobei $l_{\mathrm{z}}(n-1,k)$ analog zu $S_{\mathrm{z}}(n-1,k)$ die Anzahl vorhergehender Stützstellen angibt, die den Endzustand $\mathrm{z} \in \{\mathtt{a}, \mathtt{b}, \mathtt{c}, \ldots\}$ annehmen würden, wenn der Kandidat $\mathbf{c}_{n,m}$ ausgewählt werden würde. Dadurch werden Stützstellen bevorzugt, die dazu beitragen eine Kette der gewünschten Länge zu erzeugen. Zeile 4 in Tab. 1 aktualisiert die Längeninformation. T_{z} in Zeile 5 zeigt auf den Vorgänger von $\mathbf{c}_{n,m}$, der optimal sein würde, falls der Endzustand von Stützstelle n der Zustand z wäre.

Tabelle 1. Optimierungsalgorithmus (dynamische Programmierung) mit integrierter Fuzzy Segmentlänge.

1. **for** $n = 1 \ldots N-1$
2. **for** $m = 0 \ldots M-1$
3. $S_z(n,m) = \min_k \Big[w_{int} E_{int} + w_{ext} E^z_{ext}(\mathbf{c}_{n,m}) + S_z(n-1,k) + 1 - \mu(l_z(n-1,k)) \Big]$
4. $l_z(n,m) = l_z(n-1,k^{\min}) + 1$
5. $T_z(n,m) = k^{\min}$

3 Fuzzy Energiefunktionen

Das zweite neue Merkmal der Fuzzy Snake betrifft die unscharfe Repräsentation von Energiefunktionen, d.h. von Beschränkungen der visuellen und geometrischen Eigenschaften eines Objektes. Hier werden linguistische Variablen eingesetzt, die die Aktive Kontur mit einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle ausstatten, um das unscharfe Wissen von Experten wie z.B. Ärzten auszunutzen.

In der Fuzzy Snake werden die Energiekomponenten E_{image} und E_{con} der aktiven Kontur separat durch linguistische Variablen und Fuzzy Sets repräsentiert. Die üblichen Berechnungen der Bildmerkmale die der E_{image} zugrundeliegen werden zwar prinzipiell beibehalten, jedoch werden sie zu linguistischen Variablen.

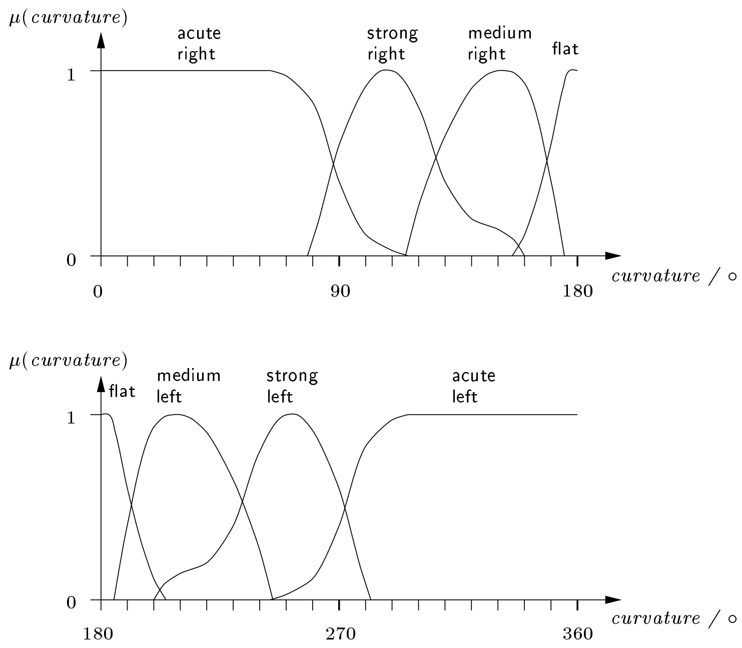

Abb. 1. Fuzzy Repräsentation eines Krümmungsmerkmals.

Ein Beispiel dafür, wie eine geometrische Bedingung (*constraint*), die bisher durch E_{con} ausgedrückt wurde, in die Fuzzy Snake integriert werden kann, zeigt Abb. 1. Das geometrische Merkmal wird zur linguistischen Variable *curvature* (Krümmung), deren Zugehörigkeitsfunktionen empirisch bestimmt wurden, um eine Abbildung eines lokalen Krümmungswinkels zu sprachlichen Begriffen zu erhalten.

Algebraische Energiefunktionen die üblicherweise zur Definition von E_{image} und E_{con} verwendet werden, können nun durch eine Fuzzy Inferenz ersetzt werden. Formale Regeln mit aussagekräftigen linguistischen Termen nehmen so den Platz von oft unklaren und experimentell zu bestimmenden Gewichtungsfaktoren ein.

Jede Energiefunktion für ein Kontursegment mit konstanten Eigenschaften besteht aus einer Regelbasis, die sowohl verschiedene Evidenzen aus dem Bild als auch Einschränkungen über z.B. die Form eines Objektes enthält. Die Ausgabe der Inferenz die diese Regelbasis verwendet, ist ein Qualitätsmerkmal, welches die Übereinstimmung einer Stützstelle mit der Regelbasis angibt.

4 Anwendungsbeispiel

Ein Beispiel für die Anwendung von Fuzzy Snakes stellt die Segmentation von Handwurzelknochen in MRT-Bildfolgen dar. Bei der in [6] näher ausgeführten Problemstellung sind die zu segmentierenden Objekte bekannt und besitzen charakteristische Formen, die jedoch individuelle Variationen aufweisen.

Verfahren, bei denen die Segmentation primär auf Bildmerkmalen basiert, liefern in vielen Fällen bereits gute Resultate [6]. Weisen unterschiedliche benachbarte Objekte jedoch zu große Ähnlichkeiten in ihren Merkmalen auf, kommt es zu Fehlern (Abb. 2a), die nur unter Einbeziehung von Formwissen zu vermeiden sind.

Reichen dazu globale Einschränkungen wie sie herkömmliche Aktive Konturen (vgl. [5] und Abb. 2b) machen nicht aus, kann das Objekt mit Hilfe von Fuzzy Snakes präziser modelliert werden. Eine korrekte Segmentation wird so möglich.

Das Ergebniss in Abb. 2c wurde mit der folgenden Prototypendefinition erzielt: (*3*c)(*2*d)(*1*f)(*2*a)(*3*e)(*1*f)(*1*e)(*4*b), wobei den terminalen Zeichen die Regelbasen aus Tab. 2 zugeordnet sind.

Tabelle 2. Regelbasen zum vereinfachten Anwendungsbeispiel.

a: IF *edge* rising strong AND *curvature* medium left THEN *quality* very good
b: IF *edge* rising medium AND *curvature* flat THEN *quality* very good
c: IF *edge* rising strong AND *curvature* flat THEN *quality* very good
d: IF *edge* rising medium AND *curvature* medium right THEN *quality* very good
e: IF *edge* rising strong AND *curvature* medium right THEN *quality* very good
f: IF *edge* rising medium AND *curvature* strong right THEN *quality* very good

Derselbe Knochen anderer Probanden kann ebenfalls mit dieser Modellierung segmentiert werden (Abb. 2d).

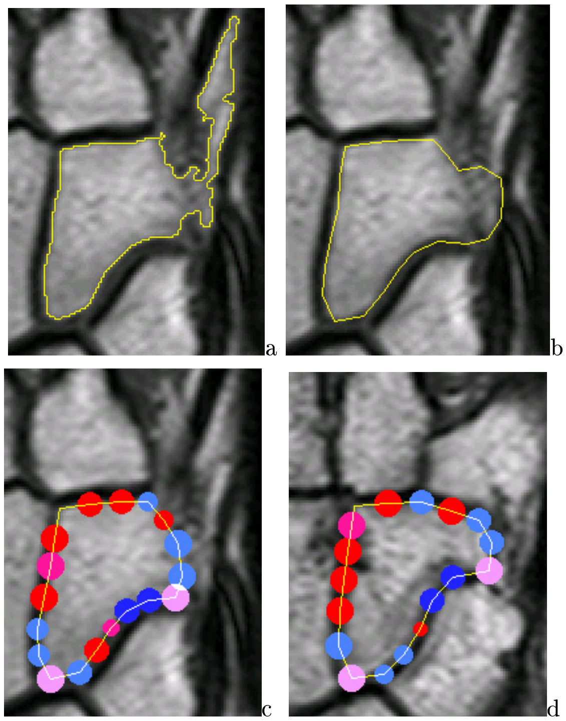

Abb. 2. Verbesserung der Segmentation durch Fuzzy Snakes. a) Histogrammbasiertes Verfahren aus [6], b) Aktive Kontur mit globalen Formbeschränkungen, c) und d) Segmentation verschiedener Probanden mit Fuzzy Snakes (die Kreisdurchmesser veranschaulichen die maximalen Zugehörigkeitsgrade einer Stützstelle, die Graustufen geben die entsprechende Fuzzy-Menge wieder).

Literatur

1. Kass M, Witkin A, Terzopoulos D: Snakes: Active contour models. Int. Conf. on Computer Vision, London, 259–268, June 1987
2. Olstad B: Automatic wall motion detection in the left ventricle using ultrasonic images. Electronic Imaging, San Jose, 1991
3. Olstad B, Torp A H: Encoding of a priori Information in Active Contour Models. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 863–872, 1996
4. Bezdek J C, Pal S K (eds.): Fuzzy models for pattern recognition, IEEE Press, New York, 1992
5. Höwing F, Dooley L, Wermser D: Zungenverfolgung in medizinischen Röntgenbildern. Bildverarbeitung für die Medizin, Springer, 1998
6. Höwing F, Bülow H, Wermser D, Dooley L, Thoma W: Analyse komplexer Knochenbewegungen in Folgen von MRT Aufnahmen. Bildverarbeitung für die Medizin, Springer, 1998