Bolus-Segmentation in Bildsequenzen des Schluckaktes

R. Blechschmidt[1], S. Braun, U. Lörcher[2], D. Richter

Fachhochschule Wiesbaden, FB Informatik, Kurt-Schumacher-Ring 18, 65197 Wiesbaden
[1] TU Darmstadt, Inst. f. Elektromech. Konstr., Merckstr. 25, 64283 Darmstadt
[2] Deutsche Klinik für Diagnostik, Aukammallee 33, 65191 Wiesbaden
Email : richter@informatik.fh-wiesbaden.de

Beschwerden im Bereich des Ösophagus (Speiseröhre) werden von Patienten sehr subjektiv wahrgenommen und beschrieben. Bildgebende Verfahren unterstützen den Arzt bei einer detaillierten Befundung. Ziel des vorliegenden Projekts ist eine Bolus-Segmentierung des Schluckaktes und damit eine Konturfindung des Ösophagus in einer zeitlichen Sequenz von Röntgendurchleuchtungsbildern und ihre Darstellung als Bewegtbildfolge.

Das entwickelte Programm unterstützt den Radiologen bei einer Befundung und erleichtert die Differentialdiagnose zwischen fixierten Engstellen, beispielsweise bei tumorbedingten Impressionen und temporären Einengungen, wie sie von atypischen Muskelkontraktionen hervorgerufen werden können, da die maximal erreichte Ausdehnung an jeder Stelle des Ösophagus dokumentiert ist.

Schlüsselwörter : Speiseröhre, Ösophagus, Schluckakt, Röntgendurchleuchtung, Bildauswertung, Bildfolgenauswertung, Segmentation, Konturfindung, Kinematographie, Breischluck.

1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Für die Diagnose von Erkrankungen der Speiseröhre ist die radiologische Durchleuchtung ein standardisiertes bildgebendes Verfahren. Der Patient schluckt ein Röntgenkontrastmittel, während der Arzt die Passage durch die Speiseröhre beobachtet und statische Aufnahmen mit einem Röntgenfilm anfertigt. Zunehmend werden digitale Aufzeichnungsverfahren eingesetzt, die von der Breischluckpassage eine Bewegtbildfolge aufzeichnen. Die digitale Bewegtbildfolge bietet sich für eine rechnergestützte Darstellung und Auswertung an. Hierzu sollen die folgenden zwei Fragestellungen beantwortet werden :

Welche Strukturen sind in der Bildfolge diagnostisch relevant ?

Zur übersichtlichen Darstellung kann die Speiseröhre in vier Bereiche eingeteilt werden : Lumen, Schleimhautoberfläche, Muskelschlauch und umliegendes Gewebe. Das Lumen sollte eine freie Kontrastmittelpassage ermöglichen, eingewachsene Strukturen oder Fremdkörper sind eindeutig pathologisch. Die Schleimhautoberfläche ist ein sehr wichtiges diagnostisches Kriterium, insbesondere Tumore können an ihrer veränderten Oberfläche erkannt werden. Die Beweglichkeit und Dehnbarkeit des Muskelschlauches hat eine hohe Aussagekraft bei Bindegewebserkrankungen, wie zum Beispiel der Sklerodermie, einer Verhärtung des Bindegewebes. Das dargestellte umliegende Gewebe wird vom Radiologen in die Befundung mit einbezogen und liefert

Hinweise auf anatomische Nachbarorgane, wie zum Beispiel degenerative Veränderungen der Halswirbelsäule, die auf die Speiseröhre drücken.

Wie kann die Auswertesoftware den Arzt bei der Befundung unterstützen ?

Die Auswertesoftware verwendet digitale Bilder, die sowohl von ihrer Orts- als auch Kontrastauflösung deutlich schlechter sind als klassische Röntgenfilmaufnahmen. Hieraus folgt, daß die Bewegtbildfolge hauptsächlich zur Beurteilung dynamischer Vorgänge wie der Bewegung und der Dehnbarkeit des Ösophagus geeignet ist. Für eine Beurteilung der Schleimhautoberfläche und des umliegenden Gewebes sind die Aufnahmen nicht geeignet. Von diesen Randbedingungen leitet sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab. Es soll die maximal erreichbare Aufweitung der Speiseröhre während des Schluckens dokumentiert und berechnet werden. Sie gibt dem Radiologen eine quantitative Grundlage, um zwischen fixierten (Tumor) oder temporären Engstellen (atypische Muskelkontraktionen) zu unterscheiden.

2 Segmentierung

Die zur Verfügung stehenden Aufnahmen sind Röntgendurchleuchtungsbilder des Ösophagusbereichs stehender Patienten. Die Aufnahmen stellen 12 Zeitreihenbilder dar, die im Abstand von 125 ms während des Schluckens eines Röntgenkontrastmittels aufgenommen werden. Daher sind die Konturen in den Bildern weitgehend statisch, mit Ausnahme des aus Röntgenkontrastmittel bestehenden Bolus und der von der Schluckbewegung herrührende, sich ändernde Durchmesser des Ösophagus. Bei posterior-anteriorem Strahlengang verläuft der Ösophagus mit überwiegend senkrechter Ausrichtung in der Bildmitte, bei lateralem Strahlengang bildet der Verlauf des Ösophagus mit der Vertikalen einen Winkel deutlich kleiner als $\pm 45°$.

Das verwendete Röntgengerät, Modell Sireskop der Fa. Siemens, liefert ein digitalisiertes rechteckiges Bild im TIFF-Datenformat mit einer geometrischen Auflösung von 1056^2 Pixel und einer Grauwertauflösung von 8 Bit. Die eigentlichen Röntgenbilddaten sind in einem kreisförmigen Bildbereich enthalten. Für die Minimierung der Strahlenbelastung des Patienten wird während der Untersuchung der Röntgenstrahl für nicht relevante Körperbereiche durch vertikale Bleiblenden abgedeckt.

2.1 Modellierung

Aus der Durchführung der Aufnahme und aus der Aufnahmetechnik kann man a-priori-Wissen zur Bildauswertung heranziehen und auf weitgehende Interaktionen bei der Bildauswertung verzichten. Beispielsweise sind die ungefähre Lage und Richtung des Ösophagus im Bild beim lateralen und beim posterior-anterioren Strahlengang und dessen durchschnittlicher physiologischer Durchmesser im ausgedehnten Zustand bekannt. Mit Sicherheit ist in einigen Bildern der Bildsequenz der Bolus vorhanden. Der Bolus erzeugt im Bild einen signifikanten Grauwertgradienten senkrecht zur Ausdehnung des Ösophagus. Wegen des Röntgenkontrastmittels sind die Grauwerte des Bolus deutlich niedriger als der mittlere Grauwert des auszuwertenden Bildausschnittes. Die Aufnahmesequenz bezieht sich auf nur einen Schluckakt.

2.2 Segmentierungsschritte

In [1] wird zum gleichen Thema ein Schwellwert-basierter Ansatz vorgestellt, der mit einer Sobelfilterung eine große Anzahl Zwischenbilder erzeugt und daher zeitaufwendig sein dürfte. Die hier präsentierte Arbeit stützt sich mehr auf modellabhängiges Wissen, um eine einfache und möglichst interaktionsfreie Konturfindung zu erreichen. Die Segmentierung erfolgt in vier Stufen. Nach einer Reduzierung des Bildausschnittes auf relevante Bereiche wird eine globale horizontale Kantendetektion durchgeführt. Anschließend werden lokal die gefundenen Konturen anhand der Nachbarpixel der Ösophaguskontur zugeordnet und schließlich mit einer zeitlichen Korrelation in aufeinanderfolgenden Bildern als Ösophaguskontur definiert.

2.2.1 Reduzierung des Bildausschnittes

In einem ersten Schritt werden die durch die Bleiabdeckung nicht belichteten Bildbereiche durch einfache Auswertung eines spaltenweise aufgenommenen Grauwerthistogramms detektiert und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

2.2.2 Globale Kantendetektion

Da der Ösophagus im Bild eine vertikale Vorzugsrichtung hat, wird das Bild mit einem richtungsabhängigen Kantenfilter für vertikale Kanten gefiltert, wobei für die weitere Auswertung auch das Vorzeichen des Grauwertgradienten verwendet wird. Dieser Filter erzeugt Rauschpunkte und bildet auch weitere im Bild vorhandene vertikale Strukturen ab [Abb. 1]. Wegen der niedrigen Grauwerte des Bolus zwischen der linken und der rechten Ösophaguskontur wird die linke Ösophaguskontur mit einem negativen Grauwertgradienten und die rechte Kontur mit einem positiven Gradienten gefunden. Zwischen diesen beiden Gradienten müssen die Grauwerte kleiner als der mittlere Grauwert des Bildausschnittes und weitgehend strukturlos sein. Der Abstand zwischen negativem und positivem Gradienten darf einen empirisch ermittelten Abstand nicht überschreiten. Diese Bedingungen eliminieren eine Reihe der Rauschpunkte und der nicht relevanten vertikalen Konturen [Abb. 2].

2.2.3 Lokale und zeitabhängige Kontursuche

In den nun vorliegenden Zwischenbildern kann eine Kontursuche aufgrund der Pixelumgebung in lokaler und zeitlicher Hinsicht durchgeführt werden. Zunächst werden alle noch vorhandenen, mindestens doppelt auftretenden Konturpixel einer Zeile mit den mindestens doppelt auftretenden Konturpixeln einer Zeile oberhalb und unterhalb in Korrelation gesetzt und diejenigen Konturpixel entfernt, die keine angrenzenden Nachbarn oberhalb oder unterhalb besitzen.
Für eine zeitliche Korrelation zur Bestimmung von Konturpixeln in sequentiellen Aufnahmen werden die Bilder in quadratische Bildbereiche von 2^4 Pixeln Kantenlänge eingeteilt. Nur diejenigen Pixel werden als Konturpixel übernommen, wenn innerhalb der zeitlichen Folge eines Blockes innerhalb der Bildfolge Konturpixel in einer ununterbrochenen Sequenz auftreten. Dieses entspricht der Tatsache, daß der Schluckvorgang während der Aufnahme der Zeitreihenbilder einmalig stattfindet und der Bolus nur in hintereinander folgenden Aufnahmen zu sehen ist.

Abb. 1. Filterung eines Bildes mit posterior-anteriorem Strahlengang mit einem horizontalen Kantenfilter. Die durch die Bleiblenden erzeugten, nicht relevanten Bildbereiche wurden entfernt. Es sind außer der Ösophaguskontur in den seitlichen Bildbereichen noch die Konturen der Schlüsselbeine zu sehen. Das Bild enthält noch viele Rauschpunkte.

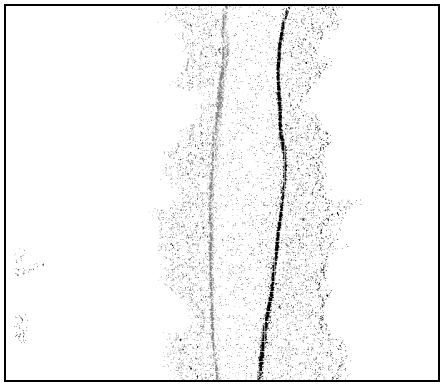

Abb. 2. Filterung eines Bildes mit posterior-anteriorem Strahlengang unter der Berücksichtigung der Vorzeichenfolge der Gradienten innerhalb eines empirisch ermittelten Bereichs. Weitere Strukturen und die Anzahl der Rauschpunkte sind deutlich vermindert. Graue Pixel haben einen negativen, schwarze Pixel einen positiven Gradienten.

3 Diskussion der Ergebnisse

Bei ausreichender Bildqualität wird der Bolus durch den Algorithmus mit großer Wahrscheinlichkeit erkannt. Nach der Analyse aller Bilder der Bildfolge können die gefundenen Konturen des Ösophagus in die Grauwertbilder oder in eine neue Bildfolge eingezeichnet werden. Diese Bildfolge ist dann in Originalgeschwindigkeit oder in variabler Zeitlupendarstellung betrachtbar.

Der befundende Radiologe sieht für jede Stelle des Ösophagus die maximal erreichte Aufweitung auf einen Blick. In Abb. 3 ist eine unauffällige Ösophaguskontur dargestellt. Der gleichmäßige Ösophagusdurchmesser ist eindeutig dokumentiert.

In Abb. 4 ist die Ösophaguskontur bei fortgeschrittener degenerativer Halswirbelsäulenerkrankung abgebildet. Bei dieser Erkrankung bilden sich von der Ober- und Unterkante des Wirbelkörpers knöcherne Ausziehungen, die von dorsal den Ösophagus imprimieren können. Anhand der eingezeichneten Konturlinie ist die eindeutige Korrelation der Ösophagusimpressionen mit den Zwischenwirbelräumen erkennbar. Hieraus folgt, daß die Einengungen des Ösophagus nicht für einen Tumor sprechen.

Jede nicht erklärbare Einengung muß wegen Tumorverdacht abgeklärt werden. Besonders hilfreich ist die Auswertung dann, wenn auf einem Bild eine eindeutige Einengung erkennbar ist. Eine mögliche Ursache könnte sowohl ein Tumor als auch eine atypische Muskelkontraktion sein. Wesentliches Merkmal eines Tumors ist, daß er zu einer dauerhaften Einengung führt. Weitet sich die verdächtige Stelle auch nur für kurze Zeit vollständig auf, dann spricht dieses gegen einen Tumor. Genau diese Information liefert der vorgestellte Auswertealgorithmus und unterstützt damit den

Radiologen bei der Auswertung und Befundung. Selbstverständlich müssen alle radiologischen Informationen - insbesondere die hochauflösenden Röntgenfilmaufnahmen - bei der Diagnose berücksichtigt werden, denn weitere charakteristische Merkmale eines Tumors sind die veränderte Schleimhautoberfläche und die Verdrängung des umliegenden Gewebes.

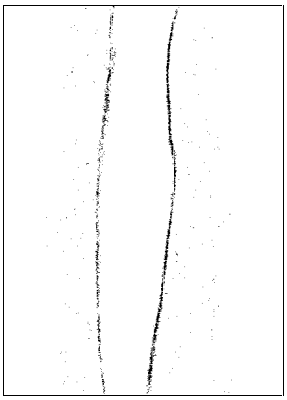

Abb. 3. Beispiel einer unauffälligen Ösophaguskontur im posterior-anterioren Strahlengang.

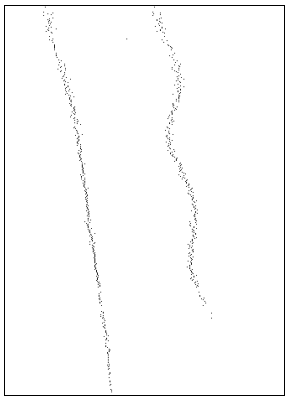

Abb. 4 (mitte). Ösophaguskontur bei fortgeschrittener degenerativer Halswirbelerkrankung im lateralen Strahlengang. Der Befund wird durch die dynamische Darstellung als Bewegtbildfolge oder durch die Korrelation mit dem Grauwertbild (rechts) besonders deutlich.

4 Implementierung

Das vorgestellte Segmentierungsverfahren wurde in Visual C++ erstellt und läuft auf Pentium-Rechnern unter den Betriebssystemen Windows 95 und Windows NT. Die Auswertezeit pro Bilderie beträgt je nach Bildausschnitt 5 bis 10 sec.

5 Geplante Weiterführung

Das Projekt soll mit einer quantitativen Auswertung des Ösophagusdurchmessers ergänzt werden. Die Ösophaguskontur soll in Bereichen, in denen sie nicht leicht durch den Bolusdurchmesser erkannt werden kann, durch eine Korrelation mit zeitlich vorherliegenden und nachfolgenden Bildern ausgedehnt werden.

6 Literatur

1. Vogelsang F., Weiler F., Wein B., Kilbinger M., Günther R.W. : Bolusverfolgung und Bewegungsanalyse in Bildsequenzen des Schluckaktes. 5. Freiburger Workshop Digitale Bildverarbeitung in der Medizin, 172 - 174, 1997