

4D-Planung von Nadelpfaden für Punktionseingriffe mit der Ray-Casting-Methode

Tobias Hecht¹, Andre Mastmeyer¹, Dirk Fortmeier^{1,2}, Heinz Handels¹

¹Institut für Medizinische Informatik, Universität zu Lübeck

²Graduate School of Computing in Medicine and Life Sciences, Universität zu Lübeck

hecht@informatik.uni-luebeck.de

Kurzfassung. Die Nadelpunktion ist ein etabliertes Verfahren für die minimal-invasive Behandlung von Läsionen in der Leber. Nadelpunktionen werden präzise anhand von CT-Daten des Patienten geplant, um das Risiko einer Komplikation zu minimieren. Die vorliegende Arbeit hat die Planung von Nadelpfaden anhand von 4D-Bilddaten bei Punktionseingriffen unter Berücksichtigung der durch die Atmung hervorgerufenen Bewegungen zum Ziel. In allen Phasen des Atemzyklus berechnet ein Ray-Casting-Verfahren Verbindungspfade von der Haut zu der Läsion unter Berücksichtigung undurchdringlicher Strukturen. Ein Bewertungssystem bewertet jeden Pfad in allen Phasen. Schließlich wird der beste Pfad mit einem Zwei-Stufen-Min-Max-Schema gewählt. Die Planungsergebnisse werden anhand von 6 Patientendatensätzen getestet. Die einfache Planung anhand einer Phase wird mit der Planung unter Berücksichtigung der Atmung verglichen. In einer Studie konnte eine tendenzielle Verbesserung der Planung mit 4D-Bilddaten gegenüber der Planung mit 3D-Bilddaten erreicht werden.

1 Einleitung

Die Leber ist nach den Lymphknoten der zweithäufigste Ort für metastasierte Erkrankungen. In 80% der Fälle kommt ein chirurgischer Eingriff nicht in Frage und es muss auf alternative Methoden zugegriffen werden [1]. Eine dieser Methoden ist die Nadelpunktion. Nadelpunktionseingriffe müssen akkurat geplant werden, da die Genauigkeit sich positiv auf die Qualität der Ergebnisse dieser Eingriffe auswirkt [2].

Die Planung erfolgt anhand von 3D-Bilddaten des Patienten, so dass keine Atmung oder sonstige Bewegungen berücksichtigt werden. Jedoch wird die Behandlung von Lebertumoren, die sich oft dicht unter der Lunge befinden, durch die Atembewegung stark beeinflusst.

Baegert et al. [3] hat ein Konzept vorgestellt, bei dem die Berechnung eines optimalen Pfades in zwei Phasen aufgeteilt ist. In der ersten Phase werden die Pfade berechnet, die keine kritische Struktur beschädigen oder durch die Nadellänge gänzlich ausgeschlossen werden. In der zweiten Phase werden dann die übrigen Pfade mit Hilfe weiterer Kriterien bewertet.

Seitel et al. [4] und Engel et al. [5] haben dieses Konzept aufgegriffen und eine Implementierung vorgestellt, die einen optimalen Pfad nach dem Pareto-Prinzip auswählt. Ein Nadelpfad gilt als pareto-optimal, wenn er in keinem Kriterium verbessert werden kann, ohne in einem anderen Kriterium schlechter zu werden. In einer retrospektiven Evaluation wurden Testdaten verwendet, bei denen es im OP zu Komplikationen kam. In vier der zehn getesteten Datensätze hätte der von dem Arzt gewählte Pfad zu keiner Komplikation führen dürfen. Dennoch kam es in allen vier Fällen zum Pneumothorax. Als mögliche Ursache wurde die Bewegung durch die Atmung der Patienten genannt, welche in der statischen 3D-Planung nicht berücksichtigt wird [4]. Die berechneten Pfade beziehen sich nur auf eine einzige Atemphase.

Da die Leber sich unmittelbar unter der Lunge befindet, werden die Positionen von Lebertumoren von der Atmung beeinflusst. Die vorliegende Arbeit stellt eine Erweiterung der Planung von Nadelpfaden vor, welche einen optimalen Punktionspfad unter Berücksichtigung der Atmung des Patienten ermittelt. Hierbei wird mit Hilfe von segmentierten 4D-Daten eine Menge von Pfaden errechnet, welche in allen Atemphasen als mögliche Pfade in Frage kommen und anschließend unter Berücksichtigung aller Atemphasen bewertet werden.

2 Material und Methoden

In unserem Ansatz wurde das Konzept von Baegert et al. [3] verwendet. Es werden sogenannte Ausschlusskriterien (hard constraints) definiert. Jeder Pfad, der von mindestens einem dieser Ausschlusskriterien betroffen ist, wird aus der Menge der möglichen Pfade genommen und für die weiteren Berechnungen ignoriert. Alle übrigen Pfade werden mit Hilfe definierter Bewertungskriterien (soft constraints) bewertet (Seitel et al. [4]). In der vorliegenden Arbeit werden zwei Kriterien beispielhaft vorgestellt.

Das Verdeckungskriterium (Abb. 1(d)) schließt alle Pfade aus, die auf ihrem Weg von der Haut zum Tumor durch eine Risikostruktur blockiert werden. Der Tumor wird anschaulich von der Risikostruktur auf diesem Pfad verdeckt.

Der kritische Abstand (Abb. 1(e)) bewertet den Pfad P nach dem kleinsten Abstand zu einer Risikostruktur in Abhängigkeit vom Minimum $d_{r,\min}$ und dem Maximum $d_{r,\max}$ aller Pfade

$$w_1(P) = \frac{d_r(P) - d_{r,\min}}{d_{r,\max} - d_{r,\min}} \quad (1)$$

2.1 4D-Erweiterung der Planung

Die Berücksichtigung der Atmung wird durch die Verwendung eines 4D-Bildensatzes des Patienten ermöglicht. In jedem 3D-Bild, im folgenden Atemphase genannt, erfolgt die Nadelpfadplanung nach dem erwähnten Konzept mittels

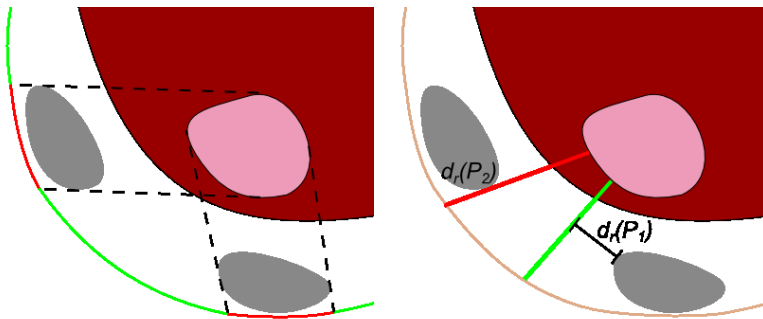
Ausschluss- und Bewertungskriterien. Eine Atemphase wird als Referenzbild gewählt. Für jeden Pfad werden die korrespondierenden Pfade in allen Atemphasen, ggf. mittels Interpolation, ermittelt und mit dem Minimum der Bewertungen aller gefundenen korrespondierenden Pfade bewertet. Der optimale Pfad der 4D-Planung ist somit derjenige, der unter Berücksichtigung der Atmung des Patienten am besten bewertet ist. Er wird am Ende am Referenzbild visualisiert.

2.2 Evaluation

Ziel der 4D-Planung ist es, die Planung von Nadelpfaden durch Berücksichtigung der Atembewegung des Patienten zu verbessern.

Hierzu wird bei allen Patienten in jeder Atemphase der optimale Pfad ermittelt und in den Bilddaten der übrigen Atemphasen eingesetzt. Die Bewertungen aller Pfade in allen Atemphasen wird ermittelt und die durchschnittliche Bewertung und das Minimum der Bewertungen der Pfade mit der Bewertung des optimalen Pfades aus der 4D-Planung verglichen. Beim Vergleich des Minimums wird bei der Einzelphasenplanung das Maximum der Minima aller Pfade in allen Atemphasen gewählt. Für den statistischen Vergleich der durchschnittlichen Bewertungen wird der Holm-Sidak-Test verwendet und alle besten Pfade aus der Einzelphasenplanung mit dem besten Pfad aus der Mehrphasenplanung verglichen. Als Ausgangslage wurden alle Bewertungskriterien gleich gewichtet. Die Nadellänge wurde auf 150 mm festgelegt. Als Referenzbild wurde eine Phase mit mittlerem Atemvolumen gewählt.

Zusätzlich zur Bewertung der Pfade wurde noch überprüft, ob ein einzelner, in einer Atemphase ermittelter Pfad in den Bilddaten der übrigen Atemphasen den Tumor treffen würden. Eine Bewertung mit dem Wert 0 wird dabei als



(d) Verdeckungskriterium

(e) Kritischer Abstand

Abb. 1. Schematische Darstellung ausgewählter Kriterien zur Bestimmung des optimalen Pfades. Der Tumor ist in rosa, die Leber in dunkelrot, die Risikostrukturen in grau und die Haut in orange dargestellt. In (d) wird die abgeschirmte Haut in rot dargestellt. In (e), wird ein guter Pfad (P_1) mit einem schlechten Pfad (P_2) verglichen.

„Ziel verfehlt“ definiert. Zur Normierung wird die Anzahl der Tumorgewebetreffer durch die Anzahl der Atemphasen dividiert und im folgenden als Trefferquote bezeichnet.

Die verwendeten 4D-CT-Testdaten kommen von der Washington University School of Medicine in St. Louis, USA [6]. Für die Studie wurden sechs Patienten mit 9-14 Atemphasen ausgewählt. Für jeden Patienten wurden in einer Atemphase die Haut, die Knochen, die Lungen und der Körper segmentiert. In jeder dieser Segmentierungen wurde ein kleiner, kugelförmiger Tumor künstlich unmittelbar unter die Lunge gesetzt. Die Segmentierung wurde durch eine nicht-lineare Registrierung [7] auf die Bilddaten zu den übrigen Atemphasen transferiert, da diese zur Bestimmung und Bewertung der Pfade in diesen Atemphasen benötigt werden. Hierbei wird beginnend von einer Atemphase auf die benachbarten Atemphasen des Zyklus registriert und die segmentierte Atemphase deformiert (Abb. 2).

3 Ergebnisse

In Abb. 3 sind qualitative Ergebnisse von Patient 3 beispielhaft dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, wie der rote Bereich (schlechte Pfade) im Ergebnis der Mehrphasenplanung 3(c) größer ist. Teile des roten Bereichs wären bei der Einzelphasenplanung nicht beachtet worden.

Tab. 1 stellt die quantitativen Ergebnisse in einer Tabelle dar und zeigt einen direkten Vergleich zwischen der Einzelphasenplanung und der Mehrphasenplanung. In allen Fällen ist das Minimum der optimalen Pfade der Einzelphasenplanung höchstens so groß, wie das Minimum des optimalen Pfades der Mehrphasenplanung. Für das Maximum gilt dies für vier Fälle. In fünf Fällen ist das Minimum des optimalen Pfades der Mehrphasenplanung sogar größer. Der Pfad der Mehrphasenplanung ist tendenziell besser, als die durchschnittliche Bewertung der Pfade der Einzelphasenplanung. In vier Fällen ist die Trefferquote der Mehrphasenplanung genauso hoch, wie die Trefferquote der Einzelphasenplanung. Bei zwei Fällen ist die Trefferquote der Mehrphasenplanung höher. In vier Fällen ist die Trefferquote der Mehrphasenplanung 100%. Bei der Einzelphasenplanung sind es drei Fälle.

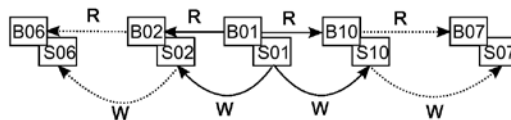


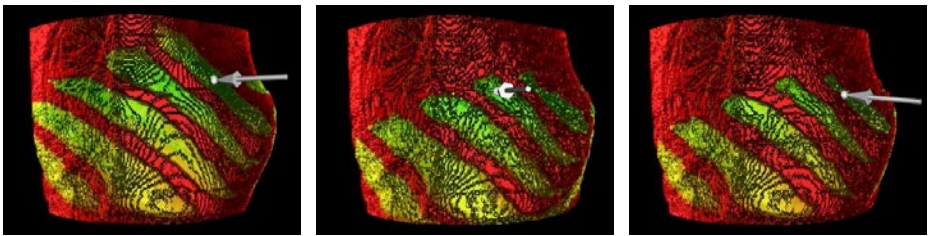
Abb. 2. Beginnend von Atemphase 1 wird in beide Richtungen des Atemzyklus von Atemphase zu Atemphase eine nicht-lineare Registrierung (R) auf die Bilddaten (B) vorgenommen und die Segmentierungen (S) verformt (W). Der Vorgang endet, sobald die mittlere Atemphase erreicht ist.

Tabelle 1. Diese Tabelle stellt den Mittelwert (MW) aller Bewertungen der Einzelphasenplanung (EP), des schlechtesten Pfades der EP (EP_{\min}), des besten Pfades der EP (EP_{\max}) und der Mehrphasenplanung (MP) jedes Patienten dar. Ein einseitiger Holm-Sidak-Test (HS) prüft den Anteil der Pfade der EP, die sich signifikant dem Pfad der MP unterscheiden. Außerdem werden die Minima (Min) und die Trefferquoten (TQ) der EP und der MP jedes Patienten verglichen.

	Pat. 1	Pat. 2	Pat. 3	Pat. 4	Pat. 5	Pat. 6
MW:						
EP_{\min}	$0,82 \pm 0,12$	$0,82 \pm 0,08$	$0,57 \pm 0,26$	$0,79 \pm 0,08$	$0,63 \pm 0,29$	$0,78 \pm 0,06$
EP_{\max}	$0,90 \pm 0,03$	$0,86 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,02$	$0,86 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,07$	$0,90 \pm 0,03$
EP	$0,86 \pm 0,07$	$0,85 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,09$	$0,83 \pm 0,06$	$0,79 \pm 0,11$	$0,84 \pm 0,08$
MP	$0,90 \pm 0,01$	$0,86 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,02$	$0,82 \pm 0,02$	$0,89 \pm 0,01$
HS:						
Anteil	0,00%	0,00%	0,07%	0,00%	0,07%	0,35%
Min:						
EP	0,83	0,84	0,72	0,74	0,71	0,83
MP	0,89	0,84	0,74	0,82	0,79	0,87
TQ:						
EP	100,00%	100,00%	100,00%	92,58%	69,23%	85,71%
MP	100,00%	100,00%	100,00%	92,58%	84,61%	100,00%

4 Diskussion

Die Planung unter Berücksichtigung der Atmung ist tendenziell besser, als die Planung anhand einer einzigen Atemphase. Die Trefferquote hat sich im Schnitt ebenfalls verbessert. Die Tumoren wurden künstlich an eine Position nahe der Lunge gesetzt, um eine relativ starke Bewegung der Tumoren durch Atembewegungen zu erzeugen. Durch die Bewegung des Tumors werden mehr Pfade



(a) Max. Ausatmung

(b) Max. Einatmung

(c) MP Ergebnis

Abb. 3. Beispielhafte Darstellung des Ergebnisses von Pat. 3. Es werden die Phasen der maximalen Ein- und der Ausatmung gezeigt und das Ergebnis der Mehrphasenplanung. In den grünen Bereichen liegen die Pfade mit einer guten und in den roten Bereichen die Pfade mit einer schlechten Bewertung. Ein Pfeil visualisiert den besten Pfad.

von Risikostrukturen verdeckt, als bei der Planung anhand einer einzigen Atemphase. Die Mehrphasenplanung ergibt im jeweils schlechtesten Fall eine bessere Bewertung als die Einzelphasenplanung. Auch diese Beobachtung unterstützt die Verbesserung der Planung unter Berücksichtigung der Atmung. Damit zeigen sich insgesamt viele Hinweise für die Verbesserung der Planung von Nadelpfaden unter Berücksichtigung der Atembewegung des Patienten. Dieses Verfahren lässt sich auch auf andere Organe anwenden. Für weitere Evaluationen sollten reale Fälle mit nicht kugelförmigen Tumoren und detailliertere Segmentierungen, u.a. von Gefäßen, verwendet werden. Es empfiehlt sich andere Gewichtungen für die Bewertungskriterien zu testen.

Literaturverzeichnis

1. Pereira PL. Actual role of radiofrequency ablation of liver metastases. *Eur Radiol.* 2007;17(8):2062–70.
2. Nath S, Chen Z, Yue N, et al. Dosimetric effects of needle divergence in prostate seed implant using 125I and 103Pd radioactive seeds. *Med Phys.* 2000;27(5):1058–66.
3. Baegert C, Villard C, Schreck P, et al. Multi-criteria trajectory planning for hepatic radiofrequency ablation. *Proc MICCAI.* 2007; p. 676–84.
4. Seitel A, Engel M, Sommer CM, et al. Computer-assisted trajectory planning for percutaneous needle insertions. *Med Phys.* 2011;38(6):3246–59.
5. Engel M, Seitel A, Fangerau M, et al. Schnelle Zugangsplanung für die perkutane Punktion der Leber. *Proc BVM.* 2010; p. 216–20.
6. Ehrhardt J, Werner R, Säring D, et al. An optical based method for improved reconstruction of 4D CT data sets acquired during free breathing. *Med Phys.* 2007;34(2):711–21.
7. Schmidt-Richberg A, Ehrhardt J, Werner R, et al. Diffeomorphic diffusion registration of lung CT images. *Proc MICCAI.* 2010; p. 55–62.