

Optimierung von Schädelöffnungen mittels genetischer Algorithmen für die Behandlung subduraler Hämatome

C. Schröder¹, A. Mastmeyer¹, D. Fortmeier^{1,4}, C.-A. Bohn³, A. Nabavi², H. Handels¹

¹ Institut für Medizinische Informatik, Universität zu Lübeck, Lübeck, Germany

² Klinik für Neurochirurgie, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Kiel, Germany

³ Institut für Medieninformatik, University of Applied Sciences Wedel, Wedel, Germany

⁴ Graduate School for Computing in Medicine and Life Sciences, Universität zu Lübeck, Lübeck, Germany

Kontakt: schroedc@informatik.uni-luebeck.de, mastmeyer@imi.uni-luebeck.de

Abstract:

In diesem Beitrag wird eine Methode zur computergestützten Optimierung einer Kraniotomieöffnung bei der kurativen Behandlung von subduralen Hämatomen vorgestellt. Lage und Form der Öffnung werden mittels GPU-beschleunigter genetischer Algorithmen bestimmt und anschließend visualisiert. Im Vergleich zur manuellen Spezifikation kann eine Verkleinerung der Schädelöffnung bei gleichzeitiger Erhöhung der Sichtbarkeit erreicht werden. Im Durchschnitt kann bei den hier untersuchten Patientendaten computergestützt die Sichtbarkeit um 4 % erhöht und die Fläche der Schädelöffnung um 56 % verkleinert werden.

Schlüsselworte: Operationsplanung, Subduralhämatom, CUDA, Ray-Casting, genetische Algorithmen

1 Problem

Bei der operativen Behandlung von Subduralhämatomen wird der Schädel unter Narkose geöffnet. Bei der dazu notwendigen Kraniotomie wird ein Stück des Schädelknochens temporär entfernt, um das Hämatom nach dem Aufschneiden der Dura Mater durch diese Öffnung auszuräumen. Die Größe des entfernten Schädelstücks hat einen starken Einfluss auf die post-operative Dauer der Heilung und ggf. auftretende Komplikationen. Eine geringere Verletzung des Schädelknochens durch die Operation kann den Heilungsprozess positiv beeinflussen [1, 2].

In Abb. 1 werden der Operationssitus und das knöcherne Deckelstück gezeigt. Die Wahl der Form der Schädelöffnung bestimmt den einsehbaren und instrumentell erreichbaren Bereich, der maximiert werden soll. Für den Heilungsprozess hingegen ist eine kleine Öffnung wichtig. Diese zwei gegensätzlichen Anforderungen definieren das hier behandelte Optimierungsproblem. Das Problem wird im Folgenden durch form- und lagebeschreibende Parameter einer Ellipse in einem Kopfkoordinatensystem modelliert. Hierbei beschränken wir uns in dieser Arbeit auf das Finden einer einzigen, elliptischen Schädelöffnung, welche manuellen Öffnungen oft ähneln und der Parameterraum klein gehalten wird.



Abb. 1: Operationssitus (links) und der entfernte Deckel (rechts).

2 Methoden

CT-Aufnahmen von fünf Patienten mit Subduralhämatom werden untersucht. Bei allen Patienten ist eine Kraniotomie durchgeführt worden und es stehen sowohl pre- als auch postoperative CT-Aufnahmen zur Verfügung. Die Datensätze haben eine mittlere Auflösung von $512 \times 512 \times 60$ Voxeln und eine mittlere Voxelgröße von $0.4 \times 0.4 \times 2.7 \text{ mm}^3$. In vorverarbeitenden Schritten werden (1) die Bilddaten vom Gantry-Tilt befreit, (2) die Patientenliege entfernt und (3) der Knochen mit einer Schwellwert-Operation segmentiert. Anschließend werden (4) Gehirn inklusive Hämatom mittels Volumenwachstum segmentiert und schließlich (5) das Hämatom schichtweise mit einem Live-Wire-Verfahren [3] konturiert. In dem resultierenden Labeldatensatz sind der Knochen, das Gehirn und das Hämatom markiert. Für diese halbautomatische Vorverarbeitung eines CT-Datensatzes werden insgesamt ca. zwei Stunden benötigt.

Die Aufgabe, eine optimal geformte elliptische Schädelöffnung zu finden, wird mit einem genetischen Algorithmus [4] gelöst. Die Merkmale der Individuen bestehen dabei aus den Form- und Lageparametern der Öffnung und werden mit einer Fitnessfunktion bewertet. Diese ist abhängig vom Umfang der Schädelöffnung u und dem prozentualen Anteil des erreichbaren Hämatoms v . Die zu maximierende Fitness f (Gl. 1) enthält den Steuerparameter α für die Gewichtung der Sichtbarkeit der Gehirnoberfläche. Als maximaler Umfang der Öffnung U_{max} wurden 30 cm gewählt; dieser Wert beschränkt gleichzeitig u nach oben.

$$f = \alpha \cdot v - \frac{u}{U_{max}} \quad (1)$$

Jede Generation besteht aus 30 am Anfang zufällig initialisierten Individuen (d. h. Öffnungen). Diese enthalten eine Kombination von fünf Spezifikationsparametern: zwei Positionswinkel und ein Torsionswinkel der Mittelpunktschwerachse sowie zwei Radien der Ellipse. Der Ursprung des verwendeten Koordinatensystems wird in den geometrischen Schwerpunkt des Kopfes gelegt. Die Achsen entsprechen in ihrer Ausrichtung den Systemachsen des bildgebenden Geräts. In jedem der 2000 Iterationsschritte des genetischen Algorithmus wird die Fitness der einzelnen Individuen berechnet. Auf dieser Grundlage wird die Selektion durchgeführt und eine neue Generation durch das Anwenden genetischer Operatoren (Kreuzung und Mutation) für die nächste Iteration erzeugt. Das Individuum mit der aktuell größten Fitness wird automatisch in die nächste Generation übernommen und gibt am Ende die Ergebnisparameter der optimierten Schädelöffnung an.

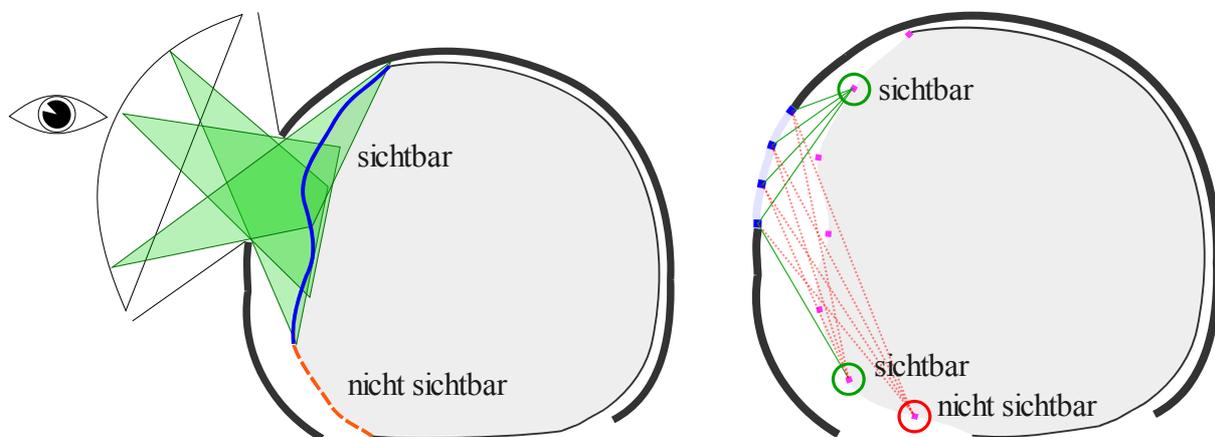


Abb. 2: Schematische Darstellung des Problems links: Der Operateur betrachtet durch die Schädelöffnung das ausgeräumte Hämatom (blaue durchgezogene Linie). Caudal befinden sich nicht sichtbare Anteile (orange gestrichelte Linie). Rechts: Mittels Strahlverfolgung (Ray-Casting) wird der einsehbare Bereich algorithmisch bestimmt (grün umrandete Voxel).

Bei der Simulation der realen Sichtbarkeitsverhältnisse wird ein virtueller Augpunkt auf einem Halbkreis um das Hämatom bewegt und alle von mindestens einer Position sichtbaren Voxel der Grenzfläche zwischen Hämatom und Gehirn werden markiert (Abb. 2 links). Bei einer derartigen Simulation müsste der Augpunkt rechenaufwändig auf einer Halbkugel um den Schädel bewegt werden, um alle möglichen Blickrichtungen zu erfassen. Deshalb wurde ein alternativer Ansatz entwickelt: Es wird ein Ray-Casting-Verfahren [5] genutzt (Abb. 2 rechts), bei dem voxelweise getestet wird, welche Teile der Grenzfläche zwischen Hämatom und Gehirn durch eine simulierte Öffnung im Schädel sichtbar sind. Hierbei wird von jedem Voxel der Grenzfläche ein Strahl zu jedem Voxel der Schädelöffnung verfolgt. Sobald ein Strahl ohne Kollision mit Knochen oder Hirn an der Schädelöffnung ankommt, ist das Voxel einsehbar. Falls für ein Voxel der

Grenzfläche kein Strahl ungehindert zur Schädelöffnung kommt, gilt dieses als uneinsehbar. Die Berechnungen wurden aufgrund der hohen Laufzeitkomplexität und starken Möglichkeit zur Parallelisierung auf der Grafikkarte in CUDA-C implementiert. Die hier gezeigten 3D-Visualisierungen in Abb. 3 wurden mit MeVis-Lab [6] realisiert.

Zur Evaluation des vorgestellten Verfahrens unter dem Aspekt klinischer Relevanz wurde die von Neurochirurgen vorgenommene Kraniotomie mit den mittels des Algorithmus gefundenen Öffnungen verglichen. Dieser Vergleich ist anhand der postoperativen Bilddaten möglich, in denen die Öffnungsparameter folgendermaßen gefunden wurden: (1) affine Registrierung der pre- und postoperativen Daten mit der Summe der quadrierten Differenzen als Distanzmaß, (2) Knochenextraktion durch Schwellwertbildung, (3) Segmentierung des Knochendeckels mittels Live-Wire-Konturierung. Die (4) Bestimmung der fünf Formparameter der Öffnung erfolgt ähnlich zum oben vorgestellten genetischen Optimierungsverfahren mit der Deckungsgleichheit computerbestimmter und realer Öffnungen als Fitnesskriterium. Die Sichtbarkeitswerte der real durchgeführten Kraniotomie wurden anschließend mit dem vorgestellten Ray-Casting-Verfahren berechnet. Unter Berücksichtigung der Rechenzeiten und um eine erste Orientierung zu erhalten, wurden für α sieben ganzzahlige Werte im Bereich von eins bis 100 ausgewählt und getestet (Abb. 4).

3 Ergebnisse

In Abb. 3 werden qualitative Ergebnisse des Verfahrens dargestellt. Die rechnerbestimmte Öffnung des Schädelknochens (rechts) ist weniger als halb so groß wie die operierte Öffnung (links). Der sichtbare Bereich unterscheidet sich quantitativ kaum. Bei beiden Varianten ist ein Teil über dem linken Auge nicht direkt einsehbar (Pfeil links).

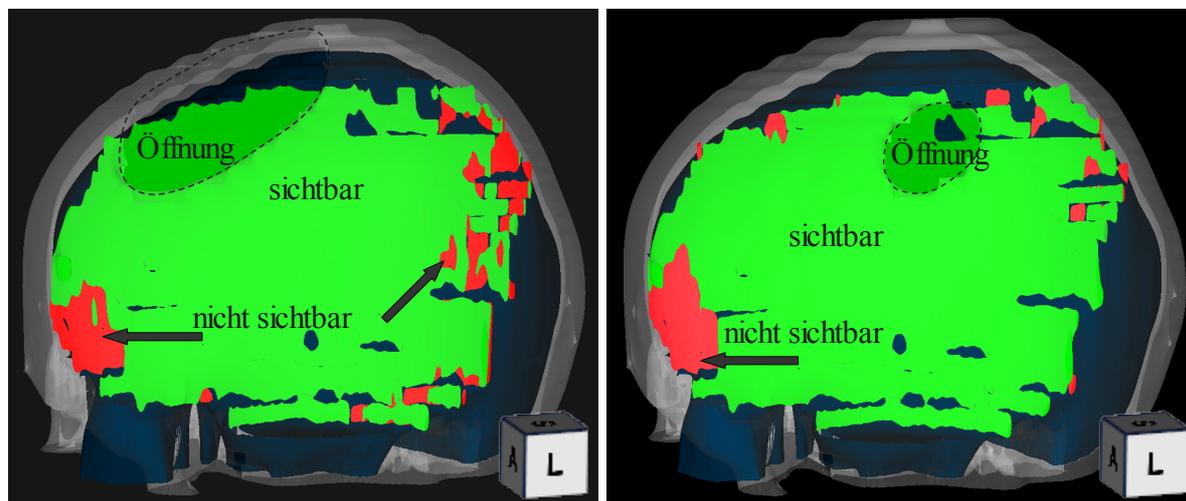


Abb. 3: Vorgehen des Chirurgen bei der Operation (links) und eine algorithmisch optimierte Öffnung (rechts): Markierte 3D-Darstellung der Zielregion (rot+grün), des durch die Öffnung sichtbaren Bereichs (grün) und des nicht sichtbaren Teils (rot). Das Gehirn ist dunkelblau, der Schädelknochen grau dargestellt (Patient 2).

In Tabelle 1 werden die vom Rechner gefundenen Öffnungen mit den real vorgenommenen Öffnungen verglichen. Die Dimensionen der computergestützt gefundenen Löcher unterscheiden sich z.T. deutlich von der ärztlichen Planung. Bei Patient 2 ist eine Halbierung der Öffnungsfläche erkennbar. Gleichzeitig kann die Sichtbarkeit um 4 % erhöht werden. Bei Patient 1 und 4 ermittelt der Algorithmus eine in der Form längliche Öffnung.

	Sichtbarkeit [%]		Öffnungsgröße [mm]		Differenz [%]	
	Arzt	Computer	Arzt	Computer	Sichtbarkeit	Fläche
Patient 1	88	96	67x67	32x75	8	-47
Patient 2	84	88	44x68	22x30	4	-78
Patient 3	49	51	38x56	32x37	2	-44
Patient 4	91	88	40x71	20x51	-3	-64
Patient 5	44	51	38x54	27x38	7	-50

Tabelle 1: Der sichtbare Anteil der Oberfläche zwischen Hämatom und Gehirn. Die Öffnungsgröße wird als Durchmesser der elliptischen Öffnung angegeben, die bei den postoperativen Öffnungen eingepasst wurde.

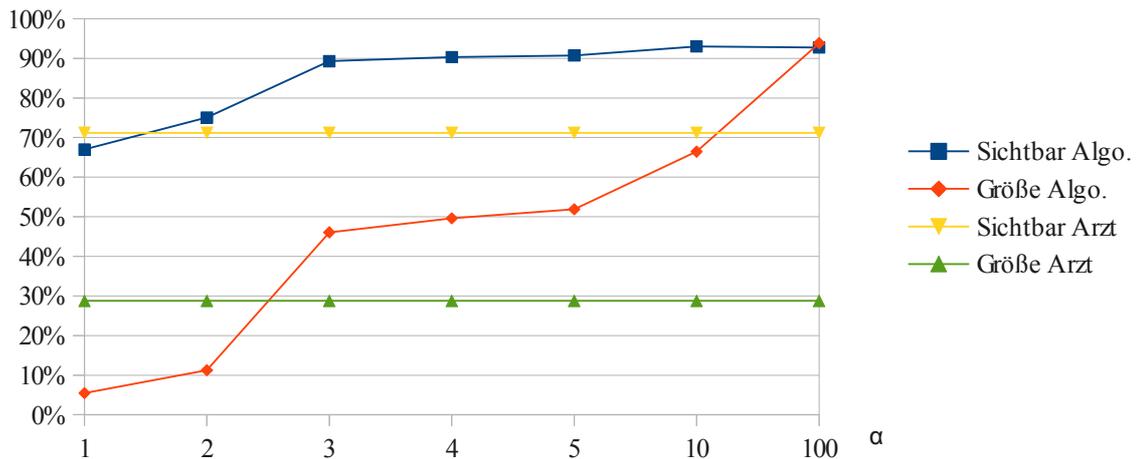


Abb. 4: Der sichtbare Anteil des Hämatoms und die Größe der Öffnung in % abhängig vom Parameter α gemittelt über die fünf untersuchten Patienten. Die Größen sind im Verhältnis zu U_{max} (entspricht 100 %) angegeben. Für $\alpha \geq 3$ ist ein deutlicher Anstieg in der Öffnungsgröße zu beobachten. Bei der Gewichtung mit $\alpha = 2$ ist die mittlere Größe wie auch der im Mittel sichtbare Anteil geringfügig größer als bei der chirurgischen Planung.

Abb. 4 verdeutlicht den Einfluss des Gewichtungsparmeters α . Es werden sieben Werte für α untersucht: 1, 2, 3, 4, 5, 10 und 100. Experimentell hat sich gezeigt, dass $\alpha = 1$ zu kleine Öffnungen präferiert hat und $\alpha \geq 3$ zu große Öffnungen erzeugt. Für die praktischen Anforderungen zeigt sich $\alpha = 2$ als geeignet. Zusätzlich zu zwei Stunden Zeitaufwand zur Vorverarbeitung der Daten wird ein GPU-gestützter Rechenaufwand von ca. 4 Stunden benötigt. Die Berechnungen wurden auf Standard-PCs mit 64-Bit Intel Xeon-Prozessoren (3 GHz) und einer NVIDIA Quadro 4000 Grafikkarte durchgeführt. Die Verlagerung des Ray-Castings auf die GPU beschleunigt die Berechnungen durchschnittlich um den Faktor 7.

4 Diskussion

Im Durchschnitt kann mit dem vorgestellten Ansatz eine Verbesserung der Sichtbarkeit unter gleichzeitiger Verkleinerung der Öffnungsgröße erzielt werden. Die Empfehlung von $\alpha = 2$ für die hier verwendete Fitnessfunktion fußt auf einer Parameterstudie mit den hier verwendeten Datensätzen. Die Betrachtung von Öffnungen für $\alpha = 1$ kann interessant sein, da die Größenreduktion dann signifikant ist ($p < 0.05$). Jedoch muss noch stärker als für die zu $\alpha = 2$ ermittelten Öffnungen, die Operierbarkeit vom Arzt kritisch hinterfragt werden. Außerdem wurden keine weiteren anatomischen Randbedingungen betrachtet, so dass vom vorgestellten System nur Vorschläge generiert werden können. Mit der aktuellen Implementierung könnte es auf der kommenden Hardware-Generation nach Generierung der Vorschläge möglich sein, diese interaktiv von einem Chirurgen an den Patienten anzupassen oder unabhängig eigene Szenarien auch mit mehreren Bohrlöchern zu planen.

5 Referenzen

- [1] DiMeco, F. et al., Craniotomies without burr holes using an oscillating saw, Acta Neurochirurgica 146(9), Springer Wien, 2004
- [2] Satoru, S. et al., Supratentorial Craniotomy Using a Threadwire Saw, Neurologia medico-chirurgica, 48(4), 2008
- [3] Färber, M., Ehrhardt, J., Handels, H., Live-wire-based segmentation using similarities between corresponding image structures, Comput Med Imaging Graph, 31, S. 549-560, 2007
- [4] Michalewicz, Z., Genetic algorithms + data structures = evolution programs (3rd ed.), Springer-Verlag, 1996
- [5] Preim, B., Bartz, D., Visualization in Medicine, Morgan-Kaufmann-Verlag, 2007
- [6] Ritter, F., Boskamp, T., Homeyer, A., Laue, H., Schwier, M., Link, F., Peitgen, H.-O., Medical Image Analysis: A visual approach. IEEE Pulse; 2(6):60–70, 2011