

# Verbesserung der Detektion sphärischer Marker für die optische Navigationschirurgie

## für die 10. CURAC Jahrestagung 2011

E. Garcia<sup>1</sup>, C. Sülthrop<sup>1</sup>, T. Hausotte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik, Erlangen, Germany

Kontakt: [garcia@qfm.uni-erlangen.de](mailto:garcia@qfm.uni-erlangen.de)

### Abstract:

*In der computer- und roboterassistierten Chirurgie werden aufgrund ihrer Flexibilität und Genauigkeit vorwiegend optische Navigationssysteme eingesetzt. Hierbei handelt sich um Stereokameramesssysteme die an Patienten und OP-Instrumentarium angebrachte – normalerweise sphärische – retroreflektierende Marker messen, verfolgen und Lokalisationsaufgaben navigierter chirurgischer Eingriffe lösen. Die Grundlage dieses Messprozesses bildet die Markerdetektion in aufgenommenen Kamerabildern. Zur Verbesserung der erzielbaren Navigationsgenauigkeit müssen Marker auch bei unvollständiger Erfassung, z.B. aufgrund von Verdeckungen oder Verunreinigungen, zuverlässig und präzise detektiert werden können. In diesem Beitrag präsentieren wir einen Algorithmus zur robusten und genauigkeitssteigernden Erkennung sphärischer Marker in Grauwertbildern. Unser Ansatz kann zuverlässig hochgradig verdeckte Marker in Bildern lokalisieren und deren Mittelpunktskordinaten und Durchmesser präzise bestimmen.*

*Schlüsselworte: Optische Navigationschirurgie, Marker-basiertes Tracking, Maschinelles Sehen, Computer- und Roboterassistierte Chirurgie*

## 1 Problem

Die unzureichende Genauigkeit der Positionsbestimmung in der optischen Navigationschirurgie ist häufig in der unzuverlässigen oder unpräzisen Erkennung von Markerabbildungen in Kamerabilddaten begründet. In der klinischen Praxis werden zumeist sphärische, retroreflektierende Marker für die Lokalisierung und Verfolgung von Patient und OP-Instrumentarium verwendet [1]. Die Raumlage von Patient und chirurgischen Instrumenten werden hierbei unter Anwendung der Verfahren der Epipolargeometrie und des photogrammetrischen Bündelblockausgleiches aus den Markerpositionen in Kamerabilddaten berechnet [2]. Die wesentliche Herausforderung besteht hierbei in der zuverlässigen und präzisen Erkennung der Mittelpunktskordinaten der Marker. Insbesondere wenn diese verdeckt sind oder intraoperativ verunreinigt werden.

## 2 Methoden

Bei adäquater Beleuchtung erscheinen Marker aufgrund ihres hohen Reflektionsgrades als helle Bereiche im Kamerabild, welche sich deutlich von den übrigen Bildbereichen abheben. Für die Lokalisierung dieser hellen Bildbereiche wird das Kamerabild in ein Schwellwertbild gewandelt und anschließend zusammenhängende Pixelbereiche, sogenannte Blobs, gesucht [3]. Um diejenigen Blobs die sicher nicht Abbilder der Marker sein können auszusortieren, werden Vorkenntnisse über die Marker- und Kamerageometrie sowie den spezifizierten Messbereich verwendet.

Nach diesem Vorverarbeitungsschritt sind nur noch mögliche, d.h. ellipsenförmige, Abbildungen von sphärischen Markern in den Kamerabildern enthalten. Als nächstes müssen die Randpunkte der Markerabbildungen möglichst präzise bestimmt werden. Hierfür kommt eine Erweiterung des in [4] vorgeschlagenen Verfahrens zur Anwendung.

### Randpunktbestimmung

Für die zuvor ermittelten Blobs wird der Flächenschwerpunkt bestimmt. Anschließend werden im Originalbild vom Flächenschwerpunkt ausgehend Suchstrahlen festgelegt. Auf diesen Suchstrahlen wird derjenige Punkt gesucht, der den Übergang eines Markers zum Hintergrund markiert. Dieser Punkt wird als Randpunkt bezeichnet. Dieser Übergang erfolgt fließend, da zum einen der Reflektionsgrad von Markern zum Rand hin abnehmen und zum anderen das Auflösungsvermögen der einzelnen Elemente des Bildsensors begrenzt ist. Dies führt dazu, dass die Grenze zwischen dem

Marker und dem Hintergrund - so überhaupt ein genauer Grenzpunkt angegeben werden kann - zwischen zwei Bildpunkten liegt.

Eine Lösung besteht in der Verwendung eines modellbasierten Ansatzes zur Randpunktbestimmung. Die Helligkeitsverteilung entlang der Suchstrahlen wird mit einem Satz von Modellen verglichen. Der Modellparameter ist dabei die Position des Übergangs zwischen hellem Marker und dunklem Hintergrund. Diese Methode berücksichtigt viele diskrete Punkte auf einer Linie und ist dadurch robuster gegen Ausreißer und Störungen als die Untersuchung auf Basis des maximalen Gradienten zwischen Bildpunkten. Die Suche findet nicht im Schwellwertbild sondern im Originalbild statt und hat dadurch den Vorteil, dass die Randpunkte mit Subpixelauflösung gefunden werden können

### Eliminierung der Verdeckungskante

Nachdem die Randpunkte des Blobs identifiziert sind, soll mit deren Hilfe das Zentrum des Markers möglichst genau bestimmt werden. Die Marker werden auf der Sensorfläche in erster Näherung als Ellipsen abgebildet. Deren Zentrum wird als Zentrum des Markerabbilds in der Bildebene angenommen. Die Parameter der Ellipse sind also derart zu bestimmen, dass die gemessenen Randpunkte optimal approximiert werden. Hierfür kommen Optimierungsverfahren der Ellipsenausgleichsrechnung zur Anwendung [5-7].

Sind Marker verdeckt oder verunreinigt entsprechen die Randpunkte des abgebildeten Teils des Markers nicht mehr den Randpunkten des tatsächlichen Markers. In diesem Fall stimmt der Mittelpunkt der Ausgleichsellipse nicht mit dem Mittelpunkt des Markers überein. Die errechnete Ellipse weicht erheblich vom Rand des tatsächlichen Markers ab. Um eine Ellipse zu erhalten, die den Rand des Markers korrekt beschreibt ist es erforderlich, diejenigen Randpunkte zu identifizieren und zu eliminieren, die nicht auf dem Rand des Markers, sondern auf der Verdeckungskante liegen.

Als in der Praxis sehr zuverlässiges und präzises Verfahren hat sich das folgende Vorgehen erwiesen:

- Zuerst wird eine Ausgleichsellipse in die anfänglich vorliegenden, die Verdeckungskante einschließenden, Randpunkte eingepasst.
- Anschließend werden die Differenzvektoren zwischen der Ausgleichsellipse und den Randpunkten bestimmt und so ausgerichtet, dass sie vom Ellipsenmittelpunkt weg nach außen zeigen.
- Diese Differenzvektoren werden aufsummiert.
- Der Summenvektor zeigt dann vom Mittelpunkt der Ellipse in Richtung der Mitte der Verdeckungskante.

Von der Mitte der Kante wird jetzt nach links und nach rechts jeweils derjenige Randpunkt gesucht, der den größten Abstand zum Mittelpunkt der Ellipse hat. Alle Punkte zwischen diesen beiden Punkten werden eliminiert. In die verbleibenden Punkte kann jetzt erneut eine Ausgleichsellipse eingepasst werden. Ein großer Bereich des Blob-Umfangs ist jetzt ohne Randpunkte. Da die algebraische Ellipsenausgleichung in einem solchen Fall zu zu kleinen Ellipsen tendiert [7] und außerdem das Bild des Markers praktisch kreisförmig ist, kann stattdessen eine Kreisgleichung nach [6] durchgeführt werden. Das gesamte Verfahren ist in Algorithmus 1 dargestellt.

| Algorithmus 1: Eliminierung der Verdeckungskante  |   |
|---|---|
| 1: finde Randpunkte $p_{i=1:N}$   |   |
| 2: führe Ellipsenausgleichung durch, bestimme Ellipsenmittelpunkt $z$   |   |
| 3: bestimme den Abstandsvektor $a_p^i = -z + p_i$ vom Ellipsenmittelpunkt zu jeden Randpunkt  |   |
| 4: bestimme den Abstandsvektor $a_e^i = -z + e_i$ vom Ellipsenmittelpunkt zu den Punkten $e_i$ auf der Ellipse, die auf der Geraden zwischen $z$ und $p_i$ liegen |   |
| 5: initialisiere Vektor der Abstände zwischen Ellipse und Randpunkten $d_s = 0$   |   |
| 6: <b>for</b> $i = 1 : N$ <b>do</b>   | 14: finde das $i_{min}$ , für das gilt $\angle(d_s, p_i) = \min$        |
| 7: <b>if</b> $\ a_p^i\ _2 < \ a_e^i\ _2$ <b>then</b>  | 15: <b>for</b> $j_{left} = i_{min} : i_{min} - N/4$ <b>do</b>           |
| 8: $d_i = -a_p^i + a_e^i$   | 16:     finde das $j_{left}$ , für das gilt $\ p_{j_{left}}\  = \min$   |
| 9: <b>else</b>  | 17: <b>end for</b>  |
| 10: $d_i = +a_p^i - a_e^i$  | 18: <b>for</b> $j_{right} = i_{min} : i_{min} + N/4$ <b>do</b>          |
| 11: <b>end if</b>   | 19:     finde das $j_{right}$ , für das gilt $\ p_{j_{right}}\  = \min$ |
| 12: $d_s = d_s + d_i$   | 20: <b>end for</b>  |
| 13: <b>end for</b>  | 21: <b>for</b> $i = 1 : N$ <b>do</b>                                    |
|   | 22: <b>if</b> $j_{left} < i < j_{right}$ <b>then</b>                    |
|   | 23:     entferne Punkt $p_i$ aus der Menge der Randpunkte               |
|   | 24: <b>end if</b>   |
|   | 25: <b>end for</b>  |
|   | 26: Ellipsen- oder Kreisgleichung für die verbliebenen Randpunkte       |

Abb. 1: Algorithmus zur Eliminierung der Verdeckungskante

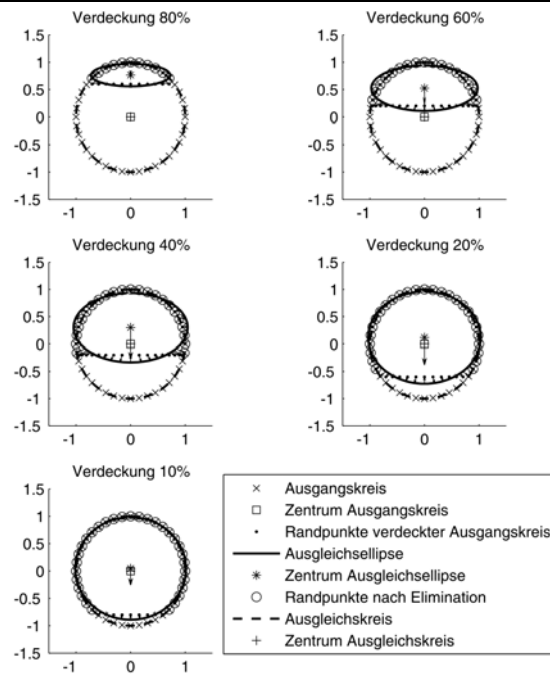
## 3 Ergebnisse

In einem Experiment wurden für einen teilverdeckten Einheitskreis Randpunkte errechnet. Die Verdeckung wird in Prozent des Durchmessers angegeben und wurde zwischen maximal 85% und minimal 15% in 5%-Schritten variiert.

Auf diese Randpunkte wurde der vorgeschlagene Algorithmus angewendet und der so ermittelte Kreis mit dem Einheitskreis verglichen. Die Resultate sind auszugsweise in Tabelle 1 und Abbildung 2 dargestellt.

**Tabelle 1:** Vergleich von Ellipsenausgleichung und Kreisausgleichung nach Eliminierung der Verdeckungskante bei verschiedenen Verdeckungsgraden eines Einheitskreises. Die Größen sind für das Beispiel dimensionslos.

| Verdeckung (in % des Durchmessers) | Abweichung des Ellipsenmittelpunkts vom Mittelpunkt des Ausgangseinheitskreises | Abweichung des Kreismittelpunkts vom Mittelpunkt des Ausgangseinheitskreises |
|------------------------------------|---|--|
| 85                                 | 0,812   | -0,682   |
| 80                                 | 0,749   | -0,306   |
| 75                                 | 0,687   | -0,145   |
| 70                                 | 0,627   | -0,064   |
| 65                                 | 0,568   | -0,020   |
| 60                                 | 0,511   | -0,005   |
| 55                                 | 0,456   | 0,000  |
| 50                                 | 0,400   | 0,000  |
| 45                                 | 0,350   | 0,000  |
| 40                                 | 0,299   | 0,000  |
| 35                                 | 0,249   | 0,000  |
| 30                                 | 0,204   | 0,000  |
| 25                                 | 0,160   | 0,000  |
| 20                                 | 0,188   | 0,000  |
| 15                                 | 0,080   | 0,000  |



**Abb. 1:** Ellipsenausgleichung, Randpunkteliminierung und anschließende Kreisausgleichung. Das Verfahren ist unabhängig von der Dimension der Werte und wird daher für einen Einheitskreis mit dem dimensionslosen Radius 1 gezeigt. Der vom Mittelpunkt der Ellipse ausgehende Vektor ist die Summe der nach außen zeigenden Vektoren zwischen den Randpunkten und der Ellipse. Er zeigt in Richtung der Verdeckungskante.

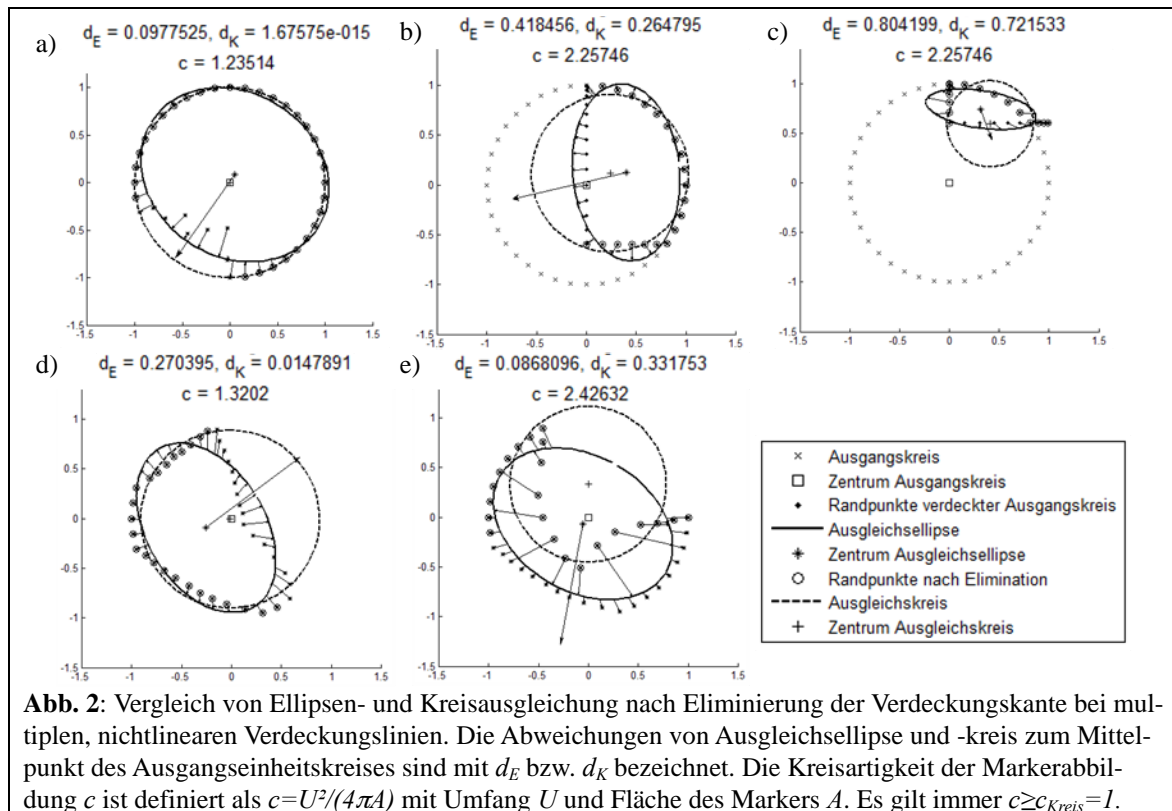
Für alle Verdeckungsgrade werden sehr gute Ergebnisse erzielt. Der Ausgleichskreis ist identisch mit dem ursprünglichen, unverdeckten Einheitskreis. Für eine Verdeckung von über 60% wurden nicht alle fehlerhaften Punkte entfernt. Dieses Verhalten ist nicht prinzipiell, sondern implementierungsbedingt. Bei einer Gesamtzahl von  $n$  Randpunkten wird nur unter  $n/4$  Punkten links und rechts des Mittelpunkts der Verdeckungskante nach dem Punkt mit dem größten Abstand zum Ellipsenmittelpunkt gesucht. Dieser Wert hat sich als in der Praxis ausreichend erwiesen. Ferner zeigte sich in Untersuchungen, dass erst ab einem definierten Verhältnis der Halbachsen der Ausgleichsellipse die Randpunkteliminierung durchgeführt werden sollte. Als guter Kompromiss zwischen Berechnungsaufwand und erzielbarer Genauigkeitssteigerung der Mittelpunktsbestimmung wurde ein Schwellwert von mindestens 10% Verdeckung ermittelt.

Zur Beurteilung der Robustheit des Algorithmus wurden in synthetischen Experimenten multiple, nichtlineare Verdeckungen untersucht. Eine auszugsweise Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 2 gegeben. Es zeigte sich, dass das Verfahren auch bei beliebigen Verdeckungslinien anwendbar ist. Die Markermittelpunkte wurden in den meisten Fällen genauer bestimmt als bei Anwendung der konventionellen Ellipsenausgleichung (Abb. 2a, b, d). Die Genauigkeitsverbesserung ist hierbei insbesondere von der Eindeutigkeit der Verdeckungskante und der Konvexität der Randpunkte abhängig. Je länger eine Kante im Verhältnis zu allen anderen Verdeckungskanten, desto genauer kann das Markermittelpunkt errechnet werden (Abb. 2a, b, d). Entartet die Markerabbildung zu einem Kreissegment ist zwischen Ausgleichsellipse und -kreis keine signifikante Verbesserung zu beobachten (Abb. 2c). Liegen stark konkave Randpunktanordnungen vor, können zum Teil sogar bessere Ergebnisse im Ellipsenausgleich erzielt werden (Abb. 2e). Diese beiden Fälle sind jedoch nicht praxisrelevant, da derart verformte Markerabbildungen in der Bildvorverarbeitung aufgrund der zu starken Abweichung von der Kreisform eliminiert werden würden.

## 4 Diskussion

Die erzielbare Lokalisierungsgenauigkeit und letztendlich die chirurgische Eingriffsqualität optisch navigierter Operationen hängen essentiell von der zuverlässigen und präzisen Bestimmung der Markerpositionen in Kamerabildern ab. In diesem Beitrag wurde ein Verfahren für die präzise Ermittlung von Randpunkten der Markerabbildungen in Kamerabil-

dem erarbeitet. Hierbei werden viele diskrete Punkte auf durch den Markermittelpunkt verlaufenden Suchstrahlen berücksichtigt. Das Verfahren ist dadurch robuster gegen Ausreißer und Störungen als es die Untersuchung auf Basis des maximalen Gradienten zwischen den Bildpunkten wäre. Die Suche findet nicht im Schwellwertbild, sondern im Originalbild statt und hat dadurch den Vorteil, dass die Randpunkte mit Subpixelauflösung gefunden werden können. Anschließend wurde ein Algorithmus zur Eliminierung der Verdeckungskante nur teilweise im Bild sichtbarer Marker präsentiert. Der Algorithmus wurde für den häufigen Fall einfacher Verdeckungen entwickelt, ist aber auch bei multiplen Verdeckungen robust und präzise anwendbar. In allen praxisrelevanten Fällen konnte das Markermittelpunkt genauer ermittelt werden als bei Anwendung konventioneller Ellipsenausgleichrechnungen. Inwiefern Art, Grad und Anzahl der Verdeckungen die Genauigkeit der Posenbestimmung eines Rigid Body allgemeingültig beeinflussen soll in nachfolgenden Untersuchungen geklärt werden.



## 5 Danksagung

Wir danken der Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG-Projekt Nummer WE 918/34-1) für die Förderung des Forschungsvorhabens. Die Untersuchungen wurden unter der Leitung von Prof. Weckenmann am Lehrstuhl „Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik“ der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt.

## 6 Referenzen

- [1] A. Schramm, N.-C. Gellrich und R. Schmelzeisen, *Navigational Surgery of the Facial Skeleton*. Springer, 2007.
- [2] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle und I. Harley, *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Wiley, 2007.
- [3] F. Chang, C.-jen Chen und C.-jen Lu, „A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique“, *Computer Vision and Image Understanding*, Bd. 93, S. 206–220, 2004.
- [4] N. C. Stache und H. Zimmer, „Robust Circle Fitting in Industrial Vision for Process Control of Laser Welding“, in *Proceedings of the 11th International Student Conference on Electrical Engineering POSTER 2007*, Prague, 2007.
- [5] A. W. Fitzgibbon, M. Pilu und R. B. Fisher, „Direct Least Squares Fitting of Ellipses“, *Proceedings of the 1996 International Conference on Pattern Recognition (ICPR '96) Volume I - Volume 7270*, S. 253–257, 1996.
- [6] T. B. Ay, W. Gander, G. H. Golub und R. Strebler, „Least-Squares Fitting of Circles and Ellipses“, *BIT*, Bd. 43, S. 558–578, 1994.
- [7] R. Halir und J. Flusser, „Numerically Stable Direct Least Squares Fitting Of Ellipses“, 1998.