

Ellipsenbasierte 3-D Rekonstruktion

Gudrun Socher Torsten Merz Stefan Posch

Technische Fakultät, AG Angewandte Informatik
Universität Bielefeld, Postfach 100131, 33501 Bielefeld
email: gudrun@techfak.uni-bielefeld.de

Zusammenfassung In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Schätzung der dreidimensionalen Lage von Kreisflächen vorgestellt. Die Ausnutzung projektiver Invarianten ermöglicht eine eindeutige Lösung für eine auf einem Stereobild abgebildete Kreisfläche bei bekannten Kameraparametern und bekanntem Radius. Aus zwei projizierten Kreisflächen mit bekanntem Radius kann neben der eindeutigen Lage auch die relative Lage der Kameras geschätzt werden, wenn die Kreisflächen komplanar sind oder ihre relative räumliche Lage bekannt ist.

Schlüsselwörter: Modellbasierte 3-D Rekonstruktion, Kamerakalibrierung, projektive Invarianten, Kreise und Ellipsen.

1 Einleitung

Diese Arbeit beschreibt ein Verfahren zur Rekonstruktion der dreidimensionalen Lage von Kreisflächen mit bekanntem Radius aus Stereobildern. Bei gegebenen Bildweiten und bekannter Lage einer Stereokamera ist die Lösung für eine projizierte Kreisfläche eindeutig. Aus zwei projizierten Kreisflächen mit bekanntem Radius können neben der eindeutigen Lage auch die externen Kameraparameter – die relative Lage der Stereokamera – geschätzt werden, wenn die Kreisflächen komplanar sind oder wenn ihre relative räumliche Lage bekannt ist.

Viele der vorgeschlagenen Rekonstruktionsverfahren schätzen die dreidimensionale Lage polyedrischer Körper. Auf der Basis von Punkt- oder Liniensegmentkorrespondenzen zwischen verschiedenen Bildern (z. B. Stereobildern vgl. [Posch 90]) oder zwischen Bild- und Modellpunkt bzw. Bild- und Modellkante (wie [Lowe 91, Goldberg 93]) wird punktweise die Tiefe oder Objektlage bestimmt. Für runde Objekte oder kreisförmige Merkmale ist ein derartiges Verfahren nicht direkt übertragbar. Aufgrund von Ungenauigkeiten in der Detektion der Bildellipsen – eine Bildellipse ist die Projektion einer Kreisfläche – sowie der Schätzung der Kameraparameter ergibt die Rückprojektion korrespondierender Bildellipsen einen Kegelschnitt, der im allgemeinen *kein* Kreis ist, selbst wenn die Bildellipsen die Projektion einer Kreisfläche sind.

[Dhome *et al.* 90] stellen ein lineares Verfahren zur Rekonstruktion von Kreisflächen mit bekanntem Radius vor. Eine Bildellipse ist der Schnitt des Kegels,

der durch die Kreisfläche im Raum und das optische Zentrum der Kamera bestimmt ist, mit der Bildebene. Bei gegebenen Kameraparametern – der Lage der Kamera im Raum, der Bildweite sowie dem Hauptpunkt und den Skalierungsfaktoren – läßt sich aus der Bildellipse der durch Kreisfläche und optisches Zentrum gebildete Kegel bestimmen. In diesem Kegel gibt es vier mögliche Lagen einer Kreisfläche mit dem bekannten Radius des Urbilds der Bildellipse. Je zwei Lagen sind symmetrisch. Zusätzliche Information ermöglicht die eindeutige 3-D Rekonstruktion der Kreisfläche. Die Lage des Kreismittelpunktes ist eine der verwendeten Einschränkungen. Jedoch wird der Kreismittelpunkt bei zur Bildebene nicht frontoparallelen Kreisflächen perspektivisch *nicht* auf den Ellipsenmittelpunkt abgebildet. [Safae-Rad *et al.* 92] und [Ma 93] schlagen ebenfalls einen linearen Ansatz basierend auf der Bestimmung des Kegels, der durch die Kreisfläche bestimmt ist, vor. [Ma 93] verwendet zur eindeutigen Lageschätzung den Schnitt der Kegel aus einem Stereobild.

All diese Verfahren haben den Nachteil, daß zum einen das Einbringen einer Zusatzbedingung oft nicht so einfach realisierbar ist und zum anderen, daß sie sich von modellbasierten Rekonstruktionsverfahren (z. B. [Lowe 91, Goldberg 93]) in der Vorgehensweise derart unterscheiden, daß eine einfache Verbindung mit diesen Verfahren nicht möglich ist. Für Objekte, die sowohl polyedrische wie auch kreisförmige Merkmale aufweisen, ist eine Schätzung der Lage so nicht in einem Schritt möglich.

[Gengenbach 94] schlägt ein modellbasiertes Verfahren vor, das jedoch nur für orthographische Projektionen gilt, da von der Annahme ausgegangen wird, daß der Kreismittelpunkt auf den Ellipsenmittelpunkt abgebildet wird.

Das vorgestellte Verfahren paßt iterativ die Lage einer Modellkreisfläche an die korrespondierende Bildellipse an. Die Projektion der Modellkreisfläche ist durch die Anwendung des Theorems von Chasles (siehe [Semple & Kneebone 52]), einer projektiven Invariante, sehr einfach und für perspektivische Projektion gültig. Dem Verfahren liegt das Lochkameramodell zugrunde.

2 Projektion von Kreisen

Kreise sind ebene Figuren, deren perspektivische Projektion als eine Kollineation in der projektiven Ebene \mathbb{P}^2 aufgefaßt werden kann. Eine Kollineation ist eine projektive, geradentreue und invertierbare Transformation $\mathcal{K} : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P}^n$, für die das Doppelverhältnis invariant ist (siehe [Semple & Kneebone 52]).

Gegeben seien vier Punkte A, B, C und D einer projektiven Ebene, von denen keine drei Punkte kollinear sind, und ein Bündel von vier Geraden durch diese Punkte mit dem gemeinsamen Geradenschnittpunkt P . Das Doppelverhältnis k dieses Geradenbündels ist

$$k = [PA, PB; PC, PD] = \frac{\overline{A'C'}}{\overline{A'D'}} \cdot \frac{\overline{B'D'}}{\overline{B'C'}}, \quad (1)$$

wobei A', B', C', D' die Schnittpunkte des Geradenbündels mit einer nicht durch P verlaufenden Gerade sind.

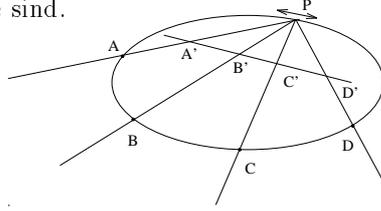


Abb.1.: Doppelverhältnis eines Geradenbündels auf einem Kegelschnitt

Bei gegebenem Doppelverhältnis k liegen alle möglichen Schnittpunkte P des gemeinsamen Bündels durch die Punkte A, B, C und D auf einem Kegelschnitt, auf dem A, B, C und D liegen (Theorem von Chasles, siehe [Semple & Kneebone 52, Mohr 93] und Abb. 1). Ein Kegelschnitt ist also eindeutig durch vier Punkte und ein Doppelverhältnis bestimmt. Die quadratische Form für Kegelschnitte lautet

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0. \quad (2)$$

Die Koeffizienten werden aus A, B, C, D und dem Doppelverhältnis k als

$$kL_{AB}L_{CD} + (1 - k)L_{AC}L_{BD} = 0 \quad (3)$$

mit $L_{IJ} = (x_I - x)(y_I - y_J) - (y_I - y)(x_I - x_J)$, $I, J \in \{A, B, C, D\}$ bestimmt (vgl. [Mohr 93]). Für die vier Punkte $(r, 0), (0, r), (-r, 0)$ und $(0, -r)$ einer Kreisfläche mit Radius r ergibt sich aus Gleichung (3): $-kr^2x^2 + (2kr^2 - 4r^2)xy - kr^2y^2 + kr^4 = 0$. In einer Kreisgleichung fallen die gemischtquadratischen Terme weg und für k folgt: $2kr^2 - 4r^2 = 0 \Rightarrow k = 2$. Die Projektion einer Kreisfläche läßt sich nun einfach durch die perspektivische Projektion von vier Punkten auf dem Kreisrand und ihr Doppelverhältnis bestimmen. Einsetzen in Gl. (3) liefert die quadratische Form der projizierten Kreisfläche.

Die Darstellung einer Ellipse e als Mittelpunkt¹ \mathbf{m} , Radien l_1 und l_2 , und Orientierung θ ist anschaulicher als die Darstellung der quadratischen Form und ermöglicht den komponentenweisen Vergleich mit den Parametern einer detektierten Bildellipse. Aus der quadratischen Form (Gl. (2)) sind

$$\mathbf{m} = \frac{1}{\delta} \left(\begin{vmatrix} b & c \\ d & e \end{vmatrix}, - \begin{vmatrix} a & b \\ d & e \end{vmatrix} \right)^T \quad \text{und} \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2b}{a - c} \right) \quad \text{mit} \quad \delta = \begin{vmatrix} a & b \\ b & c \end{vmatrix} \quad (4)$$

bestimmt. Sind λ_1 und λ_2 die reellen Nullstellen der quadratischen Gleichung $\lambda^2 - (a + c) \cdot \lambda + \delta = 0$, dann berechnen sich die Radien der Ellipse zu

$$l_1 = \sqrt{\left| \frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_1} \right|} \quad \text{und} \quad l_2 = \sqrt{\left| \frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_2} \right|} \quad \text{mit} \quad \Delta = \begin{vmatrix} a & b & d \\ b & c & e \\ d & e & f \end{vmatrix}. \quad (5)$$

¹ Vektoren werden fett gedruckt notiert.

3 Modellbasierte 3-D Rekonstruktion

Das Ziel der modellbasierten 3-D Rekonstruktion ist die Schätzung von Parametern, so daß projizierte Modellmerkmale in der geschätzten parametrisierten Lage möglichst gut auf detektierte Bildmerkmale passen. Dies erfolgt durch Minimierung einer nicht linearen multivariaten Kostenfunktion

$$\mathbf{K}(\mathbf{a}) = (\mathbf{e}_b - \mathcal{P}_{b_o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o))^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (\mathbf{e}_b - \mathcal{P}_{b_o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o)), \quad (6)$$

die die Abweichung der projizierten Modellkreisfläche \mathbf{k}_o von der detektierten Bildellipse \mathbf{e}_b mißt. Die Bildellipse \mathbf{e}_b ist durch die fünf Parameter \mathbf{m}, l_1, l_2 und θ beschrieben. Die Darstellung der Modellkreisfläche \mathbf{k}_o gibt den Radius sowie die Lage des Mittelpunktes und der Kreisnormalen in Modellkoordinaten an. Die Funktion $\mathcal{P}_{b_o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o)$ beschreibt die Projektion der Modellkreisfläche in Abhängigkeit der Kreislageparameter \mathbf{a} und die anschließende Berechnung der Ellipsenparameter. Σ ist eine Kovarianzmatrix, die hier als ein Maß für die Fehlertoleranz für die zulässigen Abweichungen zwischen projizierten Modellmerkmalen und detektierten, zugeordneten Bildmerkmalen angesehen wird.

Die iterative Minimierung der Kostenfunktion erfolgt mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren (siehe [Press *et al.* 88]). Dieses Verfahren ist eine Kombination aus Gradientenabstiegsverfahren und Gauß-Newton-Verfahren. Für die Minimierung ist die Bestimmung der Jacobi-Matrix $\frac{\partial \mathcal{P}_{b_o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o)}{\partial \mathbf{a}}$ erforderlich, die unter Anwendung der verallgemeinerten Kettenregel auf die Konkatenation von Projektion und anschließender Bestimmung der Ellipsenparameter berechnet wird. Die Jacobi-Matrix wurde mit Hilfe von MAPLE² erstellt.

Die Anpassung der Lage einer Modellkreisfläche an eine Bildellipse liefert fünf einschränkende Terme. Die Lage einer Kreisfläche ist aufgrund der Rotations-symmetrie eindeutig durch fünf Parameter – zwei Rotationswinkel und drei Translationsparameter – beschrieben. Jedoch gibt es vier Kreisflächen mit gleichem Radius, deren Projektion in dieselbe Bildellipse resultiert (zum Beweis siehe [Ma 93] und [Dhome *et al.* 90, Safae-Rad *et al.* 92]). Die Lage von je zwei dieser Kreisflächen ist bis auf das Vorzeichen der Kreisnormalen identisch, was aufgrund der Sichtbarkeit der projizierten Kreisfläche bestimmt werden kann.

Aus einem Stereobild ist die Lage einer Kreisfläche bei bekannten Kameraparametern eindeutig rekonstruierbar. Die Projektion $\check{\mathbf{e}}_{b_i}$ der Modellkreisfläche in Modellkoordinaten o in die erste Bildebene b_i geschieht durch homogene Transformationen³ und die Funktionen C_b – diese bestimmt $\mathbf{m}, l_1, l_2, \theta$ aus der quadratischen Form – und C_k – diese extrahiert aus der vektoriellen Kreisflächendarstellung die vier zu projizierenden Punkte –

$$\check{\mathbf{e}}_{b_i} = \mathcal{P}_{b_i o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o) = C_b(\mathcal{T}_{b_i k_i} \cdot \mathcal{T}_{k_i o} \cdot C_k(\mathbf{k}_o)).$$

² MAPLE V Release 3 © by Waterloo Maple Software and the University of Waterloo

³ Eine homogene Transformation eines rechtsdrehenden Koordinatensystems j in ein rechtsdrehendes Koordinatensystem i wird hier als \mathcal{T}_{ij} beschrieben.

Für die Projektion $\tilde{\mathbf{e}}_{b_r}$ in die zweite Bildebene b_r wird die bekannte relative Lage der Kameras $\mathcal{T}_{k_r k_l}$ ausgenutzt:

$$\tilde{\mathbf{e}}_{b_r} = \mathcal{P}_{b_r o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o) = C_b(\mathcal{T}_{b_r k_r} \cdot \mathcal{T}_{k_r k_l} \cdot \mathcal{T}_{k_l o} \cdot C_k(\mathbf{k}_o)).$$

Eine zweite Bildellipse derselben Modellkreisfläche liefert fünf zusätzliche Terme in der Kostenfunktion, was eine eindeutige Schätzung der dreidimensionalen Lage der Kreisfläche ermöglicht. Die Kostenfunktion lautet dann

$$K(\mathbf{a}) = \sum_{j \in \{l, r\}} (\mathbf{e}_{b_j} - \mathcal{P}_{b_j o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o))^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (\mathbf{e}_{b_j} - \mathcal{P}_{b_j o}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_o)). \quad (7)$$

4 Schätzung der Kameraparameter

Weitere Kreisflächen mit bekannten Radien im Raum, die nicht konzentrisch zueinander liegen, sind zusätzliche Einschränkungen für die Lageschätzung. Auf die Annahme gegebener externer Kameraparameter kann verzichtet werden, wenn mindestens zwei komplanare Kreisflächen oder Kreisflächen mit bekannten Relativpositionen auf mindestens zwei Bildern aufgenommen sind. Für eine Stereokamera resultiert dies in sechs zusätzlich zu schätzenden Kameraparametern im Vektor \mathbf{a} . Die Lage einer zweiten komplanaren Kreisfläche, d.h. einer Kreisfläche mit gleicher Kreisnormalen, fordert die Schätzung von drei zusätzlichen Translationsparametern. [Ma 93] zeigt, daß für zwei komplanare Kreisflächen die Lösung schon aus einem Bild eindeutig ist. Die Anpassung von zwei Modellkreisflächen an je zwei Bildellipsen liefert 20 einschränkende Terme für 14 Lageparameter, d.h. aus einem Stereobild sind genügend Einschränkungen für die eindeutige Schätzung der Lage und der externen Kameraparameter vorhanden.

Die Schätzung der Lage zweier Kreisflächen mit bekannter relativer räumlicher Lage ist ebenfalls überbestimmt. [Han & Rhee 92] zeigen, daß eine Kreisfläche, ihr Mittelpunkt und ein weiterer Punkt mit bekanntem Abstand vom Kreismittelpunkt als Kalibrieremuster zur Bestimmung der externen Kameraparameter für eine Kamera ausreichen. Eine zusätzliche Kreisfläche mit bekannter relativer Lage restringiert stärker als ein Punkt mit bekanntem Abstand zum Kreismittelpunkt. Die Verwendung eines Stereobildes erhöht die Robustheit der Lösung. Die Modellierung der relativen räumlichen Lage schreibt allerdings die Lage beider Kreisflächen eindeutig vor, so daß jetzt sechs Parameter die 3-D Lage der Kreisflächen bestimmen.

Sei B die Menge der Bilder einer Szene, für ein Stereobild ist $|B| = 2$. Für N Kreisflächen abgebildet in $|B|$ Bildern ist die Modellanpassung an $N \cdot |B|$ Bildellipsen als Summe der Einzelanpassungen realisiert,

$$K(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in B} (\mathbf{e}_{b_{ji}} - \mathcal{P}_{b_{ji} o_i}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_{o_i}))^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (\mathbf{e}_{b_{ji}} - \mathcal{P}_{b_{ji} o_i}(\mathbf{a}, \mathbf{k}_{o_i})). \quad (8)$$

Restriktionen, wie gleiche Kreisnormalen oder die bekannte relative Lage von Kreisflächen, sind im Parametervektor \mathbf{a} geeignet zu modellieren. Die

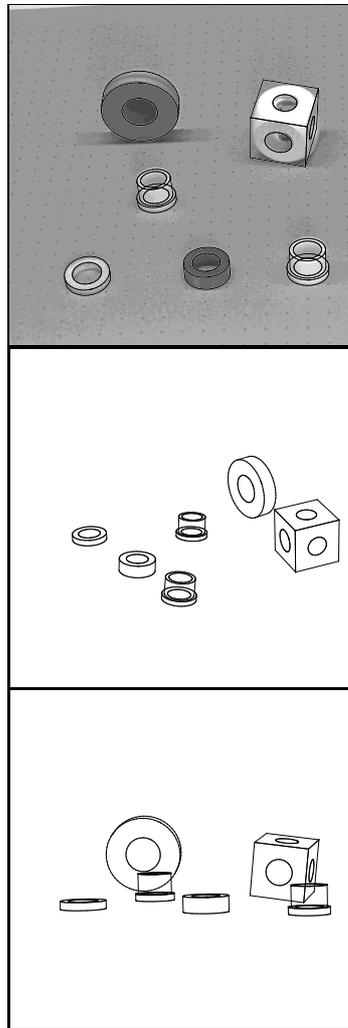


Abb.2.: a) Szene aus Objekten mit kreisförmigen Löchern und die projizierten Modelle der rekonstruierten Objekte. b) Seiten- und c) Frontalansicht der rekonstruierten Szene.

Rekonstruktion erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird die Lage jedes Modells einzeln zur Ermittlung guter Startwerte für die Szenenrekonstruktion an die korrespondierende Bildellipse(n) angepaßt. Als Startwerte für die externen Kameraparameter werden übliche, beobachtete Werte verwendet. Auf eine vorherige Schätzung dieser Parameter aus den Stereokorrespondenzen wird verzichtet, da die Wahl der Startwerte dieser Parameter sich als unkritisch gezeigt hat. Im zweiten Schritt wird die Kostenfunktion (Gl. 8) für alle detektierten Bildellipsen in allen Bildern minimiert.

5 Ergebnisse

Die Güte der Lageschätzung einer einzelnen Kreisfläche ist stark von den Ergebnissen der Kamerakalibrierung abhängig. Daher ist die Qualität der Lagerekonstruktion schwer von der Qualität der Kalibrierung zu trennen. Die vorgestellten Ergebnisse verwenden die bekannte relative Lage oder die Komplanarität von Kreisflächen und setzen nur bekannte Bildweiten voraus. Diese sind mit einem Kalibrierverfahren nach [Tsai 85] geschätzt. Die externen Kameraparameter werden, wie in Abschnitt 4 beschrieben, geschätzt.

Abbildung 2a) zeigt eine Szene aus Objekten mit kreisförmigen Löchern und die Anpassung der Objektmodelle an die Bildellipsen. Für die Modellanpassung wurden aufgrund der besseren Detektierbarkeit nur die Bildellipsen der Löcher verwendet. Die dargestellte Szene wurde vor der Bildaufnahme vermessen. Bei den Objekten handelt es sich um Holzspielzeug, nicht um Präzisionswerkstücke, daher liegen Messungenauigkeiten durchaus im Bereich von $\pm 1\text{mm}$.

In Tabelle 1a) und b) ist ein Vergleich der Rekonstruktionsergebnisse mit den vorliegenden Objektabständen d und Winkelabweichungen der Flächennormalen $\Delta\nu$ zusammengestellt. Tabelle 1a) zeigt die Ergebnisse der Szenenrekonstruktion bei Ausnutzung der bekannten relati-

ven Lage der beiden sichtbaren Lochellipsen des Würfels. Die Abweichung der Objektabstände Δd liegt unter 6% von den gemessenen. Die Winkelabweichung $\Delta\nu$ ist weniger als 10° . Die Ergebnisse sind stark von der Genauigkeit der Bildellipsen abhängig. Eine dafür spezielle Auswahl der Bilder wurde vermieden.

Objekte	$\Delta\nu[^\circ]$	$d[\text{mm}]$	$\Delta d[\text{mm}]$	$\frac{\Delta d}{d}[\%]$
1, 2	2.3	81.2	2.0	2.5
1, 3	8.0	82.3	1.5	1.8
1, 4	9.8	101.8	3.5	3.4
1, 5	6.3	144.0	3.8	2.6
1, 6	9.0	110.1	2.8	2.6
2, 3	7.1	51.5	2.9	5.6
2, 4	8.3	142.3	5.4	3.8
2, 5	2.3	113.2	5.3	4.7
2, 6	6.1	117.8	4.7	4.0
3, 4	3.1	100.0	2.6	2.6
3, 5	5.0	67.9	2.6	3.9
3, 6	2.9	67.4	1.8	2.6
4, 5	6.2	110.5	2.1	1.9
4, 6	2.2	50.4	1.0	1.9
5, 6	4.0	60.1	1.2	2.0

a)

Objekte	$\Delta\nu[^\circ]$	$d[\text{mm}]$	$\Delta d[\text{mm}]$	$\frac{\Delta d}{d}[\%]$
1, 2	2.8	81.2	3.2	4.0
1, 3	9.0	82.3	3.3	4.1
1, 4	9.0	101.8	5.6	5.5
1, 5	9.0	144.0	7.4	5.1
1, 6	9.0	110.1	5.8	5.3
2, 3	7.1	51.5	4.2	8.1
2, 4	7.1	142.3	7.3	5.1
2, 5	7.1	113.2	8.5	7.5
2, 6	7.1	117.8	7.1	6.0
3, 4	0.0	100.0	3.4	3.4
3, 5	0.0	67.9	4.5	6.6
3, 6	0.0	67.4	2.9	4.3
4, 5	0.0	110.5	3.0	2.7
4, 6	0.0	50.4	1.4	2.8
5, 6	0.0	60.1	1.6	2.7

b)

Tabelle1.: Abweichung Δd der gemessenen Objektabstände d von den rekonstruierten und Abweichung $\Delta\nu$ zwischen gemessenen und rekonstruierten Flächennormalen in der Szene aus Abb. 2a). Objekt 1 ist der Würfel, Objekt 2 die stehende Scheibe, Objekt 3 die hintere Buchse, Objekt 4 die vordere rechte Buchse, Objekt 5 die flache linke Scheibe und Objekt 6 die hohe mittlere Scheibe.

a) Rekonstruktion unter Ausnutzung der bekannten relativen Lage der Würfelellipsen.
b) Für die Rekonstruktion wurde die Komplanarität der kleinen Scheiben und der Buchsen sowie die bekannte relative Lage der Würfelellipsen verwendet.

In einem zweiten Versuch wurde auch die Komplanarität, d.h. die gleichen Kreisflächennormalen, der vier auf der Arbeitsfläche liegenden runden Objekte modelliert. Die Rekonstruktion hat sich dadurch eher verschlechtert. Tabelle 1b) zeigt die Ergebnisse. In diesem Fall hat die Hinzunahme der Einschränkungen, die möglicherweise den verrauschten Daten nicht entsprechen, die Rekonstruktionsergebnisse nicht verbessert. Dieses ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die perspektivische Projektion bildet Kegelschnitte auf Kegelschnitte ab. Jedoch ist nicht gewährleistet, daß die Triangulation von Bildellipsen, die die Projektion einer Kreisfläche sind, bei verrauschten Daten zu einer Kreisfläche führt. Daher unterscheiden sich Verfahren zur Schätzung der dreidimensionalen Lage von Kreisflächen von Rekonstruktionsverfahren polyedrischer Körper. Lineare Verfahren zur Kreisflächenrekonstruktion sind schlecht mit modellbasierten iterativen Rekonstruktionsverfahren verbindbar.

Das hier vorgestellte iterative Verfahren schätzt die dreidimensionale Lage von Kreisflächen durch Modellanpassung an Bildellipsen in mindestens zwei Bildern,

z.B. einem Stereobild, unter Ausnutzung projektiver Invarianten. Für mindestens zwei komplanare Kreisflächen oder Kreisflächen mit bekannter relativer räumlicher Lage können so auch die externen Kameraparameter geschätzt werden. Dieses Verfahren kann leicht in ein modellbasiertes Verfahren zur Lageschätzung polyedrischer Körper integriert werden. Auch eine Erweiterung von Kreisflächen auf allgemeine Ellipsen ist einfach denkbar. Die Ergebnisse zeigen eine gute Modellanpassung. Die Verbesserung der Rekonstruktionsgenauigkeit ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Danksagungen

Diese Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des SFB 360 „Situierete Künstliche Kommunikatoren“ gefördert. Anregungen von M. Tonko waren für die Entwicklung des Verfahrens sehr hilfreich.

References

- [Dhome *et al.* 90] M. Dhome, J. T. Lapreste, G. Rives, M. Richetin, Spatial Localization of Modelled Objects of Revolution in Monocular Perspective Vision. *Proc. First European Conference on Computer Vision*, 1990, pp. 475–485.
- [Gengenbach 94] V. Gengenbach, *Einsatz von Rückkopplungen in der Bildauswertung bei einem Hand-Auge-System zur automatischen Demontage*. Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI 72). infix-Verlag, Sankt Augustin, 1994.
- [Goldberg 93] R. R. Goldberg, Pose determination of parameterized object models from a monocular image. *Image and Vision Computing* **11**:1, January/February 1993, pp. 49–62.
- [Han & Rhee 92] Min-Hong Han, Sangyong Rhee, Camera Calibration for Three-dimensional Measurement. *Pattern Recognition* **25**:2, 1992, pp. 155–164.
- [Lowe 91] D. G. Lowe, Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* **PAMI-13**:5, 1991, pp. 441–450.
- [Ma 93] Song De Ma, Conics-Based Stereo, Motion Estimation, and Pose Determination. *International Journal of Computer Vision* **10**:1, 1993, pp. 7–25.
- [Mohr 93] R. Mohr, Projective Geometry and Computer Vision. C. H. Chen, L. F. Pau, P. S. P. Wang (Hrsg.): *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision*, Kap. 2.4, World Scientific Publishing Company, 1993, pp. 369–393.
- [Posch 90] Stefan Posch, *Automatische Tiefenbestimmung aus Grauwertstereobildern*. Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden, 1990.
- [Press *et al.* 88] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 1988.
- [Safaei-Rad *et al.* 92] R. Safaei-Rad, I. Tchoukanov, K. C. Smith, B. Benhabib, Constraints on quadratic-curved features under perspective projection. *Image and Vision Computing* **10**:8, October 1992, pp. 532–548.
- [Semple & Kneebone 52] J. G. Semple, G. T. Kneebone, *Algebraic Projective Geometry*. Oxford Science Publication, 1952.
- [Tsai 85] R. Tsai, A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, Research Report, 1985.