

Zur automatischen Modellwahl bei der Kalibrierung von CCD-Kameras

Steffen Abraham Wolfgang Förstner

Institut für Photogrammetrie Bonn, Nußallee 15, 53115 Bonn
Steffen.Abraham@ipb.uni-bonn.de

Zusammenfassung Wir diskutieren zwei Kriterien zur Bewertung verschiedener Abbildungsmodelle im Rahmen der Kalibrierung einer Kamera. Die Beschreibungslänge des Datensatzes und die Stabilität/Präzision der 3D-Rekonstruktion in Abhängigkeit vom verwendeten Modell erlauben eine automatische Wahl aus einer Menge vorhandener Modelle. Am Beispiel der Off-Line Selbstkalibrierung mit verschiedenen Modellen zur Beschreibung der inneren Orientierung der Kamera demonstrieren wir diese Verfahren.

1 Einleitung

Es existiert eine große Zahl von Modellen für die optische Abbildung in einer Kamera, allgemeiner für den funktionalen Zusammenhang zwischen 3D-Objekt- und 2D-Bildkoordinaten. Eine Systematisierung dieser Modelle wird in verschiedenen Arbeiten verfolgt z.B. [WCH92]. Beispiele sind orthografische, affine und projektive Abbildungen oder die aus der klassischen Photogrammetrie bekannte Kollinearitätsgleichung. Diese Modelle werden üblicherweise um funktionale Ansätze erweitert, um die Verzeichnung der Optik modellieren ([Bro76], [Tsa86]).

Für Applikationen, die metrische Informationen aus Bildern gewinnen sollen, ist in der Systementwicklung bzw. während der Kalibrierung die Frage zu beantworten: Welches Abbildungsmodell ist für die verwendete Kamera und für die beabsichtigte Anwendung am besten geeignet ?

In diesem Beitrag diskutieren wir zwei Kriterien, die für eine automatische Modellauswahl im Rahmen einer Selbstkalibrierung geeignet sind:

- Die **Effizienz der Beschreibung** eines Datensatzes mit Hilfe eines Modelles kann durch die *Beschreibungslänge*, im Sinne der Kodierungstheorie, charakterisiert werden. Sie erlaubt, das einfachste oder wahrscheinlichste Modell aus einem vorgegebenen Satz auszuwählen. Das Prinzip der Minimum-Description-Length (MDL) wurde von Rissanen [Ris87] für die Modellauswahl vorgeschlagen und seitdem vielfältig im Bereich der Computer-Vision eingesetzt (siehe [Lec88], [För89], [Axe96]).
- Die **Stabilität** des erzielten Ergebnisses kann mit Hilfe der *Präzision* (Kovarianzmatrix) der zu bestimmenden Parameter beurteilt werden. Die Optimierung der Genauigkeit ist Basis für Schätzverfahren (beste Schätzer) und wird bei vielen Ingenieur Anwendungen als Kriterium verwendet.

In der Literatur wird noch eine ganze Reihe weiterer Kriterien für die Modellwahl bei der Kameramodellierung diskutiert, u. a. der Rechenaufwand [WB96], die

Konvergenzgeschwindigkeit oder die Möglichkeit für direkte Lösungen [Tsa86]. Es werden auch Strategien vorgeschlagen, um möglichst schnell das günstigste Modell zu finden (z.B. [Kan96]).

Der vorliegende Beitrag möchte die Wahl des Kriteriums diskutieren, die von der Problemstellung abhängt. Wir werden zeigen, daß wir mehrere Fragestellungen mit den beiden o. g. Kenngrößen, der Beschreibungslänge und der Präzision, beantworten können. Dies hängt davon ab, ob wir ein optimales oder ein hinreichend gutes Ergebnis erreichen wollen und ob wir an einer Erklärung der Daten durch das Modell oder an der Qualität des Ergebnisses interessiert sind (siehe Tab.).

| | Ergebnis | |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | optimal | hinreichend |
| Erklärung der Daten | MDL | $DL \leq \text{Toleranz}$ |
| Qualität des Ergebnisses | Präzision $\rightarrow \min$ | Präzision $\leq \text{Toleranz}$ |

Wir werden zunächst die Kenngrößen und deren Bewertung beschreiben. Die Anwendung dieser Kriterien demonstrieren wir am Vergleich verschiedener Modelle der inneren Orientierung in einer Off-Line Selbstkalibrierung von CCD-Kameras.

2 Kriterien zur Modellauswahl

2.1 Minimale Beschreibungslänge (MDL)

Das Prinzip der minimalen Beschreibungslänge (*Minimum Description Length* – *MDL*) ist aus Grundlagen der Informations- bzw. Kodierungstheorie abgeleitet. Es wird eine effektive Beschreibung der Daten mit möglichst wenigen Bits gesucht. Über die notwendige Anzahl an Bits zur Beschreibung eines Datensatzes mit einem vorgegebenen Modell können sehr einfach verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Parameterzahlen miteinander verglichen und eine Auswahl durchgeführt werden.

Das Gauß-Markoff-Modell in seiner nichtlinearen Form bildet die Grundlage für den Ansatz:

$$\mathbf{y} + \mathbf{e} = f(\boldsymbol{\beta}), \quad D(\mathbf{y}) = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (2.1-1)$$

Der Vektor \mathbf{y} beinhaltet die Beobachtungen (Bildkoordinaten), die Parameter des Modelles $f(\boldsymbol{\beta})$ sind im Vektor $\boldsymbol{\beta}$ zusammengefaßt. Der Residuenvektor \mathbf{e} enthält die Differenzen zwischen Modell und Beobachtungen. Weiterhin wird vorausgesetzt, daß die Genauigkeit der Beobachtungen \mathbf{y} (d. h. hier Punktmesungen im Bild) in Form einer Kovarianzmatrix $\sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1}$ bekannt ist.

Wenn man weiterhin annimmt, daß die Beobachtungen \mathbf{y} die Realisierung eines normalverteilten Zufallsvektor sind, dann kann man nach [Ris87] die Beschreibungslänge eines Datensatzes im Gauß-Markoff-Modell ableiten mit:

$$D_L = \frac{k}{2} \log_2(n) + \frac{\Omega}{2 \log_e 2}, \quad \Omega = \frac{\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e}}{\sigma_0^2} \quad (2.1-2)$$

Der erste Summand kennzeichnet die Komplexität des Modelles. Der Faktor k entspricht der Anzahl der Modellparameter, n ist die Anzahl der Beobachtungen

im Datensatz. Der zweite Summand beschreibt den Aufwand für die Darstellung im Modell. Dieser ist abhängig, wie gut das Modell die Daten erklärt, d.h. von den Abweichungen zwischen Modell und Daten (Quadratsumme der Residuen).

Das Prinzip der MDL ist vergleichbar zu dem in [WB96] eingeführten Konzept einer Modellauswahl. Die dort vorgeschlagenen Faktoren *Klarheit des Modelles*, sowie *Genauigkeit* sind auf die beiden Summanden in (2.1-2) übertragbar. Komplexere Modelle erfordern einen höheren Aufwand in der Modellbeschreibung, verkleinern jedoch die Fehler zwischen Modell und Datensatz.

Weiterhin ist der Einfluß der Varianzen σ_0^2 der Beobachtungen auf die Auswahl des Modelles sichtbar. Genauere Punktmessungen verkleinern den zweiten Summanden in (2.1-2), d.h. es würden Modelle mit einer größeren Parameterzahl bei einer automatischen Wahl bevorzugt. Dies entspricht praktischen Erfahrungen aus dem Gebiet der Kalibrierung von Kameras: je genauer eine Punktlokalisierung in der Bildebene möglich ist, desto sicherer sind z.B. die Parameter der Verzeichnung zu bestimmen.

2.2 Stabilität/Präzision der 3D-Rekonstruktion

Als zweites Bewertungskriterium für eine Modellauswahl kann die geschätzte Präzision einer ausgewählten Gruppe von Parametern dienen. Diese Vorgehensweise ist von der praktischen Seite klar motiviert. Die Anwendung fordert Genauigkeiten, die Einhaltung von Toleranzen. Es ergeben sich hieraus die Fragestellungen:

- (a) Erfüllt das Modell eine vorgegebene Forderung an die Präzision ?
- (b) Welches Modell liefert die beste Präzision für die Parameter ?

Das der Parameterschätzung zugrunde liegende Gauß–Markoff–Modell (2.1-1) liefert zusätzlich eine Aussage zur Präzision der geschätzten Parameter in Form einer Kovarianzmatrix:

$$\Sigma_{\hat{\beta}\hat{\beta}} = \hat{\sigma}_0^2(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}, \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\Omega}{n-u}, \quad \mathbf{A} = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial \beta_j} \end{pmatrix} \quad (2.2-3)$$

Instabilitäten, die sich aus der Geometrie der Aufnahmeanordnung ergeben, können ebenfalls durch eine Analyse der Kovarianzmatrix aufgedeckt werden.

Analyse, Vergleich von Kovarianzmatrizen Da die Parameter unterschiedliche physikalische Maßeinheiten und Größenverhältnisse besitzen können oder die Forderungen an die Präzision einzelner Parameter verschieden sind, ist für eine Bewertung die Festlegung einer Kriterien–Matrix \mathbf{H} notwendig, die i.a. nicht proportional zu einer Einheitsmatrix zu sein braucht. Mit dieser Matrix \mathbf{H} wird eine Vorstellung für die zu erzielende Präzision festgesetzt. Im nächsten Schritt wird die geschätzte Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\beta}\hat{\beta}}$ mit der Matrix \mathbf{H} verglichen.

Falls die zu erzielende Präzision besser sein soll als die spezifizierte, muß das durch die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\beta}\hat{\beta}}$ beschriebene Hyperellipsoid komplett innerhalb des der Kriterienmatrix \mathbf{H} liegen. Dann gilt für einen beliebigen Vektor \mathbf{e} :

$$\mathbf{e}^T\mathbf{H}\mathbf{e} < \mathbf{e}^T\Sigma_{\hat{\beta}\hat{\beta}}\mathbf{e}, \quad \forall \mathbf{e} \quad (2.2-4)$$

Dieser Vergleich der Kovarianzmatrizen läßt sich nach [Baa73] über die Beurteilung des größten Eigenwertes λ_{max} der Matrix $\mathbf{K} = \mathbf{H}^{-1/2} \widehat{\Sigma}_{\beta\beta} \mathbf{H}^{-1/2}$ oder des allgemeinen Eigenwertproblems $\widehat{\Sigma}_{\beta\beta} \mathbf{e} = \lambda \mathbf{H} \mathbf{e}$ durchführen. Der größte Eigenwert $\lambda_{max}(\mathbf{K})$ gibt das ungünstigste Verhältnis zwischen geschätzter und geforderter Präzision an. Die Forderung nach einer Mindestpräzision (Frage a) läßt sich formulieren mit $\lambda_{max}(\mathbf{K}) \leq 1$. Die Suche nach dem besten Modell (Frage b) führt auf die Forderung $\lambda_{max}(\mathbf{K}) \rightarrow \min$.

Präzision der 3D-Rekonstruktion Wir nehmen für unsere Beispiele an, daß wir an der Präzision der 3D-Rekonstruktion interessiert sind. Die in der Selbstkalibrierung ebenfalls geschätzten Orientierungen sind in diesem Falle nur Hilfsgrößen. Für eine Bewertung, d.h. den Vergleich der verschiedenen Kameramodelle wird die geschätzte Kovarianzmatrix $\widehat{\Sigma}_{\hat{k}\hat{k}}$ der 3D-Koordinaten der rekonstruierten Punkte betrachtet, die als Teilmatrix aus $\widehat{\Sigma}_{\beta\beta}$ herausgelöst wird.

Die Festlegung des Koordinatensystems (Datumsfestlegung), in dem die Rekonstruktion erfolgt, hat einen direkten Einfluß auf die Kovarianzmatrix $\widehat{\Sigma}_{\hat{k}\hat{k}}$. Ein direkter Vergleich verschiedener Rekonstruktionen ist nur bei Bezug auf ein Koordinatensystem möglich. Eventuell ist eine Transformation der Kovarianzmatrizen notwendig, die [Baa73] vorschlug.

Modellauswahl Die Auswahl eines geeigneten Modelles j aus einer Menge von Modellen ist jetzt über die Betrachtung der zu den einzelnen Modellen i bestimmten Faktoren λ_{max}^i möglich. Entsprechend einer der beiden obigen Fragestellungen wird entweder das Modell j mit der besten Präzision $j = \text{index}[\min_i(\lambda_{max}^i)]$ gewählt, oder wenn aus externen Gründen (Rechenaufwand) mit einem vereinfachten Modell gearbeitet werden soll, das im Sinne von Rechenaufwand einfachste Modell i gewählt, das die Forderungen an die Präzision erfüllt $\lambda_{max}^i \leq 1$.

Zu beachten ist jedoch der Hintergrund beider Kriterien (MDL, Präzision). Es erfolgt der Versuch der bestmöglichen Erklärung eines vorgegebenen Datensatzes, ohne notwendigerweise physikalisch vorhandene Gesetzmäßigkeiten zu beachten:

- Es ist nur die Auswahl eines Modelles aus einer gegebenen Menge von Modellen möglich. Die Beschaffung sinnvoller Modelle muß auf anderem Wege erfolgen.
- Die Bewertung erfolgt auf Basis eines speziellen Datensatzes. Nicht geklärt ist damit, ob die vorgegebenen Daten repräsentativ sind.

In dem hier vorgestellten Beispiel der Off-Line Selbstkalibrierung von CCD-Kameras wird über externe Kontrollmechanismen gesichert, daß die Daten repräsentativ sind und eine Generalisierung des Modelles vertretbar ist.

3 Automatische Modellwahl in einer Offline-Selbstkalibrierung von CCD-Kameras

Im nachfolgenden wird die Anwendung der vorgestellten Kriterien an Beispielen der Off-Line Kalibrierung von 3 verschiedenen CCD-Kameras (Tab. 1) demonstriert. Verglichen werden unterschiedliche Modelle zur Beschreibung der inneren Orientierung einer Kamera (Tab. 2).

| A | B | C |
|---------------------------------|--|--|
| Kleinbildkamera Kodak DCS 20 | Kamera: Grundig FA87 Grabber: DFG20 Optik: Ernitec $f = 8mm$ | XC-77CE (Sony) ICP (Imaging Technology Inc) Cosmicar $f = 12.5mm$ |

Tabelle1. Kalibrierte Systeme (Kamera, Optik, Framegrabber)

Die Kalibrierung erfolgt über eine Bündelausgleichung aus mehreren Aufnahmen eines einfachen Testfeldes, d.h. als unbekannte Parameter werden die innere und äußere Orientierung der Kamera, sowie die Koordinaten der signalisierten Punkte des Testfeldes bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs der Kalibrierung (automatische Punktdetektion, -zuordnung, Näherungswertbestimmung, Ausgleichung) ist in [AH97] zu finden.

Das Testfeld besitzt ein Volumen von etwa $700 \times 700 \times 300mm$. Dieses Testfeld wird bildfüllend aufgenommen. Entsprechend der Brennweite des Objektivs bewegt sich die Distanz zwischen Kamera und Testfeld im Bereich von $1000mm$ bis $1500mm$. Die Festlegung des Koordinatensystems für die 3D-Rekonstruktion erfolgt durch Festlegung von 7 Koordinaten ausgewählter Punkte. Die maßstäbliche Anbindung der 3D-Rekonstruktion ist begrenzt durch die Genauigkeit einer externen Streckenmessung.

Wir sind interessiert, die Rekonstruktion mit dem Genauigkeitskriterium $\sigma_0 = 1mm$ für die Koordinaten der Punkte zu vergleichen, was einer Kriterienmatrix von $\mathbf{H}^* = \sigma_0^2 \mathbf{I} = 1mm^2 \mathbf{I}$ entsprechen würde. Die Kriterienmatrix \mathbf{H} , die den direkten Vergleich zur Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{k}\hat{k}}$ der 3D-Rekonstruktion (entsprechend der Festlegung des Koordinatensystems der Rekonstruktion) ermöglicht, haben wir durch Transformation aus der Matrix \mathbf{H}^* gewonnen (siehe [Baa73], [Bil85]). Der Faktor $\sqrt{\lambda_{max}}$ beschreibt dann das Verhältnis zwischen erreichter und vorgegebener Genauigkeit und stellt in etwa die Genauigkeit der Rekonstruktion in mm dar.

Die Kameras wurden jeweils mit zwei unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen kalibriert. Die erste Konfiguration mit 7 Aufnahmen beruht auf einem Vorschlag aus [God93]. Zum Vergleich dazu wurde eine Kalibrierung mit 20 Testfeldaufnahmen gegenübergestellt.

Durch die hohe Redundanz des Systemes in der Ausgleichung, die geometrische Konfiguration und die Verteilung von Beobachtungen in allen Bereichen des Bildes ist sichergestellt, daß der Datensatz, der zur Kalibrierung verwendet wird, repräsentativ ist.

Als allgemeines Abbildungsmodell wird die Kollinearitätsgleichung verwendet (X, Y, Z -Objektpunkt, X_0, Y_0, Z_0 -Projektionszentrum, $\mathbf{R} = (r_{ij})$ -Rotationsmatrix, c -Kammerkonstante, $\Delta x, \Delta y$ -Verzeichnungskorrektur):

$$x = s_{xy}c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad (3.0-5)$$

$$y = c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y \quad (3.0-6)$$

Miteinander verglichen werden nachfolgende Modelle der inneren Orientierung:

| | $\Delta x =$ | $\Delta y =$ | zusätzliche Unbekannte |
|-----|--|--|--|
| (a) | 0 | 0, $s_{xy} = 1$ | 1 c |
| (b) | 0 | 0 | 2 c, s_{xy} |
| (c) | x_H | y_H | 4 c, s_{xy}, x_H, y_H |
| (d) | $x_H + \sum_i \sum_j a_{ij} T_i(x) T_j(y)$ | $y_H + \sum_i \sum_j b_{ij} T_i(x) T_j(y)$ | 5...69 $c, s_{xy}, x_H, y_H, a_{ij}, b_{ij}$ |
| (e) | $x_H + A_1 x_* (x_*^2 + y_*^2)$ | $y_H + A_1 y_* (x_*^2 + y_*^2)$ | 5 c, s_{xy}, x_H, y_H, A_1 |
| (f) | $\Delta x = x_H + A_1 x_* (r^2 - r_0^2) + A_2 x_* (r^4 - r_0^4)$ $+ B_1 (r^2 + 2x_*^2) + B_2 2x_* y$ $+ C_2 y$ $\Delta y = y_H + A_1 y_* (r^2 - r_0^2) + A_2 y_* (r^4 - r_0^4)$ $+ B_2 (r^2 + 2y_*^2) + B_1 2x_* y$ $r^2 = x_*^2 + y_*^2, \quad x_* = \frac{x}{s_{xy}}, \quad r_0 = \frac{1}{3} \text{Bilddiagonale}$ | | 9 $c, s_{xy}, x_H, y_H, A_1, A_2, B_1, B_2, C_2$ |

Tabelle2. Im Vergleich eingesetzte Modelle der inneren Orientierung der Kamera

- (a) Das für die innere Orientierung einfachste Abbildungsmodell ist eine ideale Kamera mit nur einem zusätzlichen Parameter, der Kammerkonstante c . Für dieses Modell wird vorausgesetzt, daß beide Achsen des Bildkoordinatensystems die gleiche Skalierung ($s_{xy} = 1$) besitzen und der Bildhauptpunkt sich in der Sensormitte befindet.
- (b) Das Modell (a) wird erweitert um den Faktor s_{xy} , der eine unterschiedliche Skalierung der Achsen des Bildkoordinatensystems beschreibt.
- (c) Der Bildhauptpunkt (x_H, y_H) wird zusätzlich kalibriert.
- (d) Die Verzerrung wird durch einen Satz von orthogonalen Polynomen (Tschebyscheff) korrigiert [Sch95]. Hier ist zusätzliche eine maximale Ordnung der Polynome festzulegen. In Abhängigkeit von der Ordnung der Polynome sind die Modelle mit (d1),..., (d7) bezeichnet, (d1) beinhaltet ein Modell mit nur linearen Termen, (d2) mit linearen und quadratischen, ...
- (e) Die Verzerrung wird mit einem einparametrischen Ansatz radialsymmetrisch korrigiert (Kameramodell nach [Tsa86]).
- (f) Ein physikalisch motivierter Ansatz enthält 2 Parameter zur Korrektur radialsymmetrischer, 2 Parameter zur Korrektur radial-assymmetrischer Verzerrung, sowie einen Parameter zur Korrektur einer affinen Scherung in der Bildebene (Adaption nach [Bro76]).

Die Kennzahlen der Kriterien, die sich bei einer Selbstkalibrierung der verschiedenen Systeme mit den vorgestellten Modellen ergeben haben, sind in den Tabellen 3, 4 zusammengestellt.

Kamera A: Das Modell (f) mit 9 Parametern ist nach beiden Kriterien das beste Modell aus der Menge der vorhandenen Modelle. Die Differenzen zu einigen anderen Modellen sind jedoch gering. Selbst mit dem einfachsten Modell (a) mit nur einem Parameter ist eine gute Beschreibung im Sinne des MDL-Kriteriums möglich. Die Präzision der 3D-Rekonstruktion ist brauchbar. Durch

| | (a) | (b) | (c) | (d1) | (d2) | (d3) | (d4) | (d5) | (d6) | (d7) | (e) | (f) |
|-------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|------------|-------|--------------|-------|-------|------------|--------------|
| u | 1 | 2 | 4 | 5 | 9 | 17 | 27 | 39 | 53 | 69 | 5 | 10 |
| Kalibrierung mit 7 Aufnahmen | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 266 | 2 266 | 890 | 892 | 887 | 889 | 929 | 980 | 1 044 | 1 114 | 866 | 860 |
| B | - | 35 164 | 30 560 | 30 428 | 30 199 | 912 | 949 | 918 | 980 | 1 051 | 1 892 | 1 154 |
| C | - | 2 956 | 1 513 | 1 510 | 1 514 | 817 | 861 | 909 | 970 | 1 040 | 779 | 780 |
| Kalibrierung mit 20 Aufnahmen | | | | | | | | | | | | |
| A | 6 258 | 6 097 | 2 050 | 2 040 | 1 988 | 1 874 | 1 924 | 1 961 | 2 028 | 2 109 | 1 906 | 1 824 |
| B | - | 128 943 | 122 164 | 122 002 | 121 191 | 1 864 | 1 896 | 1 699 | 1 767 | 1 849 | 4 900 | 2 613 |
| C | 2e6 | 8 249 | 3 833 | 3 838 | 3 836 | 1 492 | 1 544 | 1 586 | 1 592 | 1 673 | 1 489 | 1 466 |

Tabelle3. Kriterium Beschreibunslänge (D_L) für die drei Kamerasysteme **A**, **B**, **C**, u-Anzahl der Modellparameter innere Orientierung

| | (a) | (b) | (c) | (d1) | (d2) | (d3) | (d4) | (d5) | (d6) | (d7) | (e) | (f) |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|
| u | 1 | 2 | 4 | 5 | 9 | 17 | 27 | 39 | 53 | 69 | 5 | 10 |
| Kalibrierung, 7 Aufnahmen | | | | | | | | | | | | |
| A | 0.870 | 0.875 | 0.299 | 0.300 | 0.283 | 0.267 | 0.296 | 0.320 | 0.403 | 0.473 | 0.274 | 0.256 |
| B | - | 2.845 | 2.657 | 2.655 | 2.666 | 0.272 | 0.272 | 0.165 | 0.175 | 0.197 | 0.594 | 0.363 |
| C | - | 0.361 | 0.236 | 0.236 | 0.240 | 0.058 | 0.063 | 0.066 | 0.076 | 0.085 | 0.063 | 0.054 |
| Kalibrierung mit 20 Aufnahmen | | | | | | | | | | | | |
| A | 0.517 | 0.517 | 0.209 | 0.207 | 0.198 | 0.183 | 0.188 | 0.190 | 0.198 | 0.208 | 0.191 | 0.175 |
| B | - | 1.439 | 1.404 | 1.404 | 1.403 | 0.123 | 0.121 | 0.095 | 0.097 | 0.101 | 0.273 | 0.175 |
| C | 6.075 | 0.156 | 0.098 | 0.098 | 0.098 | 0.029 | 0.030 | 0.030 | 0.032 | 0.032 | 0.031 | 0.028 |

Tabelle4. Kriterium Präzision der 3D-Rekonstruktion ($\sqrt{\lambda_{max}}$) für die drei Kamerasysteme **A**, **B**, **C**, u-Anzahl der Modellparameter innere Orientierung, Referenz: $\mathbf{H} = 1mm^2 \cdot \mathbf{I}$

die geringe Auflösung des Sensors in Verbindung mit dem einfachen Aufbau der Kamera ist die Präzision der 3D-Rekonstruktion im Vergleich zu den anderen Kameramodellen jedoch vergleichsweise geringer.

Kamera B: Die preiswerte Optik dieses Systemes besitzt eine starke Verzeichnung. Die Modelle ohne Verzeichnungskorrektur beschreiben sowohl den Datensatz (MDL) schlecht bzw. die Präzision der 3D-Rekonstruktion ist im Vergleich gering.

Eine Konvergenz der Ausgleichung konnte mit Modell (a) nicht erreicht werden. Das Modell (d5) mit den orthogonalen Polynomen bis zur Ordnung 5 ist zu empfehlen. Bei dem physikalisch motivierten Modell (f) sind im Plot der Residuen (Abbildung 1) nicht erfaßte, systematische Fehler (Verzeichnungen) zu erkennen. Die Kriterien bestätigen die unvollständige Modellierung.

Kamera C: Die physikalisch motivierten Modelle (e), (f), sowie das Modell (d3) mit den orthogonalen Polynomen bis 3. Ordnung sind gut geeignet für eine Modellierung der Kamera. Dies zeigen beide Kriterien. Die Differenzen in der Bewertung der drei Modelle sind gering. Die geringe Differenz zwischen physikalisch motiviertem (e) und orthogonalen Polynomansatz (d3) wird auch am Plot der Residuen (Abbildung 2) deutlich.

Die unterschiedliche Anzahl an Aufnahmen, die für die Kalibrierung ge-

nutzt werden, beeinflusst eine automatische Modellwahl mit Hilfe des MDL-Kriteriums. Das Präzisionskriterium zeigt dagegen keine Empfindlichkeit.

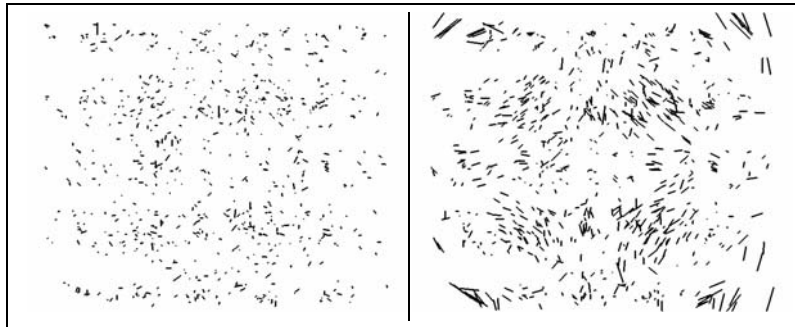


Abbildung 1. Kamera **B**: Plot der Residuen, Maßstab 1:100, links Modell (d5), rechts Modell (f)

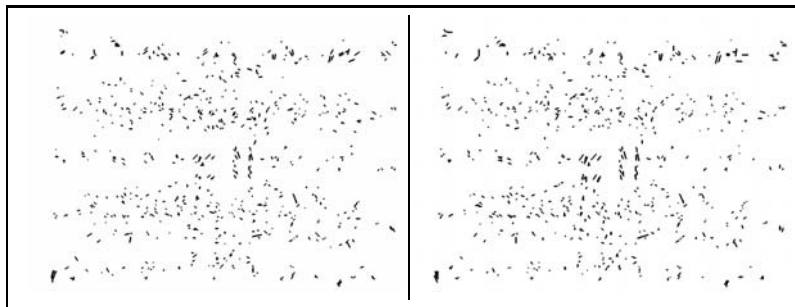


Abbildung 2. Kamera **C**: Plot der Residuen, Maßstab 1:100, links Modell (d3), rechts Modell (f)

Die Testserien zeigen, daß eine automatische Modellwahl auf Basis der beiden Kriterien zu ähnlichen und vernünftigen Entscheidungen führt, obwohl die Kriterien verschiedene Zielsetzungen beinhalten. Die Wahl des Kriteriums selbst sollte in Abhängigkeit von der Zielstellung in der Anwendung erfolgen.

4 Zusammenfassung

Wir haben zwei Kriterien diskutiert, die für die automatische Auswahl eines Abbildungsmodelles zur Beschreibung einer Kamera verwendet werden können. Demonstriert wurde dies mit verschiedenen Modellen zur Beschreibung der inneren Orientierung einer CCD-Kamera im Rahmen einer Selbstkalibrierung.

Geplant ist eine Nutzung der genannten Kriterien im Rahmen einer Selbstkalibrierung aus realen Szenen für eine automatische Modellwahl. Weiterhin vorgesehen ist ein Vergleich der hier vorgeschlagenen Kameramodelle zu verschiedenen projektiven Modellen [WB96].

References

- [AH97] S. Abraham and T. Hau. Towards autonomous high-precision calibration of digital cameras. In *Proceedings of SPIE Annual Meeting 1997*, San Diego (to appear), 1997.
- [Axe96] P. Axelsson. *Autonomous Decisions in Photogrammetry using Minimum Description Length*. PhD thesis, Dept. of Geodesy and Photogrammetry, Stockholm, Schweden, 1996.
- [Baa73] W. Baarda. *S-Transformations and Criterion Matrices*, volume 5 of 1. Netherlands Geodetic Commission, 1973.
- [Bil85] R. Bill. *Kriteriummatrizen ebener geodätischer Netze*. Reihe A, Heft Nr. 102. Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, 1985.
- [Bro76] D.C. Brown. The bundle adjustment — progress and prospects. In *XIIth Congress of the International Society for Photogrammetry, Helsinki, Commission III*, 1976.
- [För89] W. Förstner. Image analysis techniques for digital photogrammetry. In *Photogrammetrische Woche Stuttgart*, Schriftenreihe des Inst. für Photogrammetrie Stuttgart, Heft 13, 1989.
- [God93] R. Godding. Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, (2):82–89, 1993.
- [Kan96] K. Kanatani. Automatic singularity test for motion analysis by an information criterion. In *ECCV*, pages 697–708. Springer Verlag, 1996.
- [Lec88] Y. G. Leclerc. Image partitioning for constructing stable descriptions. In *Image Understanding Workshop, Cambridge*, 1988.
- [Ris87] I. Rissanen. Minimum description length principle. *Encyclopedia of Statistical Sciences*, 1987.
- [Sch95] U. Scheuß. Entwicklung eines autonomen Kalibrierungsverfahrens für das Stereokamerasystem eines Roboters. Master's thesis, Institut für Informatik, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, 1995.
- [Tsa86] R. Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In *proceedings, CVPR '86 (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, June 22–26, 1986)*, 1986.
- [WB96] C. Wiles and M. Brady. On the appropriateness of camera models. In *ECCV 96*, pages 228–237, 1996.
- [WCH92] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE PAMI*, 14(10):965–980, 1992.