

Extrinsische Kalibrierung einer Multikameraanordnung mit nichtüberlappenden Sichtfeldern auf einer mobilen Plattform

Frank Pagel*

Zusammenfassung: Will man nicht nur das Fahrzeugvorfeld, sondern auch die Seitenbereiche und gegebenenfalls den rückwärtigen Bereich eines Fahrzeugs visuell erfassen, dann benötigt man mehrere Kameras. Zur ganzheitlichen, geometrischen Nutzung der Bildinformationen ist die Kenntnis der relativen Anordnung der Kameras von besonderer Bedeutung. Eine weitere Herausforderung ist dann gegeben, wenn sich die Sichtfelder der Kameras nicht überlappen, da dann herkömmliche Kalibriermethoden, die auf korrespondierenden Bildpunkten basieren, nicht mehr anwendbar sind. In dieser Arbeit werden zwei Verfahren anhand von Simulationen untersucht, die es ermöglichen, solche Kamerakonstellationen extrinsisch zu kalibrieren: Eine rein bewegungsbasierte und eine musterbasierte Kalibrierung.

Schlüsselwörter: Extrinsische Kalibrierung, Nichtüberlappende Sichtfelder, Mobile Plattform, Multikameraanordnung

1 Einleitung

Soll eine algorithmisch-geometrische Fusion und damit eine optimale Auswertung lokal verteilter Kameras erreicht werden, so muss die relative Anordnung der Kameras zueinander, also die sogenannten extrinsischen Parameter, bekannt sein. Die vorliegende Arbeit geht von von Kameras aus, die starr zueinander auf einer mobilen Plattform montiert sind. Um den gängigen Anforderungen an Energieverbrauch und Design gerecht zu werden, muss im vorliegenden Fall zusätzlich davon ausgegangen werden, dass sich die Sichtfelder der Kameras nicht überlappen (siehe Abb. 1).

Im vorliegenden Beitrag werden zwei Ansätze erläutert und in Tests mit simulierten Daten untersucht. Der erste Ansatz definiert anhand der Eigenbewegung der Kameras Begrenzungsfunktionen, die es erlauben, die extrinsischen Kameraparameter zu bestimmen. Der zweite Ansatz verwendet mehrere Kalibriermuster. Diese Muster erlauben es, die relative Lage zwischen Muster und Kamera zu bestimmen. Auf dieser Grundlage kann zunächst die relative Lage der Muster zueinander und anschließend zwischen den Kameras berechnet werden. Beide Verfahren sind bestimmten Restriktionen unterworfen, die insbesondere in der praktischen Anwendung relevant sind. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es vor allem, den Einfluss von durch Messungenauigkeiten bedingtem Rauschen zu untersuchen und somit eine Aussage über die Zuverlässigkeit in der Praxis treffen zu

*Fraunhofer IITB, frank.pagel@iitb.fraunhofer.de

können. Im weiteren Verlauf ist mit Kalibrierung stets eine extrinsische Kalibrierung gemeint.

2 Verwandte Arbeiten

Ein Großteil der bekannten Verfahren basiert auf der Existenz korrespondierender Bildpunkte zwischen den einzelnen Kameras. Idealerweise verwendet man hierzu bekannte Szeneneigenschaften wie bekannte Größen oder relative Anordnungen von Szenenpunkten (z. B. mittels eines Kalibrierkörpers). Solche Verfahren werden im Folgenden als musterbasierte Kalibrierung bezeichnet. Je nach Größe des Trägers und Verteilung der Kameras ist eine Kalibrierung mit einem einzigen Kalibrierkörper extrem aufwändig und umständlich, da dieser groß genug sein müsste, um in allen Kameras abgebildet zu sein. Zur extrinsischen Kalibrierung von Mehrkamerasystemen mit überlappenden Sichtfeldern existieren in der Literatur vielfältige Lösungsvorschläge, wie z. B. die Arbeiten von Zhang et al. [12] oder auch der klassische Bündelausgleich von Triggs et al. [10]. Grundlage für diese Verfahren ist die Existenz von korrespondierenden Bildpunkten zwischen den Kameras. Kumar et al. [6] z. B. kalibrieren stationäre Kameras mit nichtüberlappenden Sichtfeldern mit Hilfe eines einzigen Kalibrieremusters und Spiegeln. Der Ansatz, der hier vorgestellt wird, verwendet mehrere kleine Kalibrieremuster. In einem separaten Kalibrierschritt wird die extrinsische Anordnung der Kalibrieremuster berechnet. Sind diese einmal bekannt, so kann entsprechend bekannter Standardmethoden die extrinsischen Kameraparameter geschätzt werden.

Eine Kalibrierung, die auch ohne bekanntes Muster die gesuchten Parameter bestimmt, nennt man Selbstkalibrierung. Mit dem Stand der Kunst entsprechenden Algorithmen lassen sich monokulare Bewegungsparameter und -trajektorien rekonstruieren. Diese stellen den Ausgangspunkt für einen weiteren Lösungsansatz dar. Durch die Bedingung, dass alle Kameras zueinander über den Zeitraum der Kalibriersequenz unverändert angeordnet bleiben, lassen sich Bedingungsgleichungen formulieren, mit deren Hilfe sich die Positions- und Orientierungsparameter der Kameras bestimmen lassen. Somit lässt sich allein aus der Bewegung des Kamerarigs die extrinsische Anordnung bestimmen. Bei einer mobilen Plattform lässt sich die Bewegungsinformation nutzen. Verfahren zur bildgestützten Bewegungsschätzung werden u. a. von Broida et al. [1], Pollefeys [9], Davison et al. [3] oder Pagel [8] vorgestellt. Esquivel et al. [4] und Clipp et al. [2] nutzen die geschätzten Kameratrajektorien, um eine nichtüberlappende Kameraanordnung zu kalibrieren. In [4] wird hierfür zunächst der rotatorische Anteil der Kameras zueinander und anschließend der translatorische Abstand sowie eine Skalierung ermittelt. Konsistente relative Skalierungen der translatorischen Parameter werden im Folgenden durch Einführung einer zusätzlichen Skalierungsbedingung erreicht.

3 Bewegungsbasierte Kalibrierung

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Kameras bereits intrinsisch kalibriert sind, d. h. Linsenverzerrung, Brennweite und Durchstoßpunkt bekannt sind (z. B. mittels Standardverfahren wie dem von Zhang [11]).

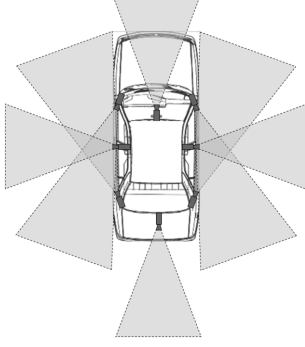


Abbildung 1: Beispiel einer Anordnung mehrerer Kameras auf einem mobilen Träger.

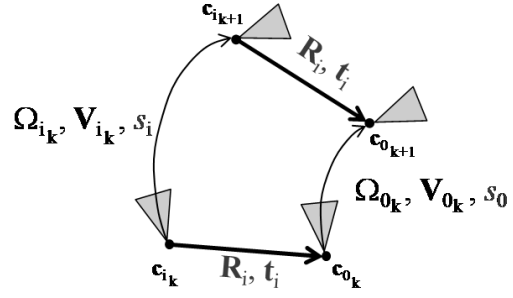


Abbildung 2: Grundlegende Kamerakonstellation für die bewegungsbasierte Kalibrierung mit Referenzkamera \mathbf{c}_0 . Die Bewegungsparameter $\Omega_{i_k}, \mathbf{V}_{i_k}, \Omega_{0_k}, \mathbf{V}_{0_k}$ werden als bekannt angenommen.

3.1 Das Bewegungsmodell

Sowohl die Bewegung der Kameras als auch die relative Anordnung lassen sich durch Euklidische Transformationen beschreiben. Die Lage zweier Kameras zueinander ist demnach durch eine Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ mit $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{R} \mathbf{R}^T = \mathbf{I}$ und einen Translationsvektor $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ bestimmt. Die Bewegung einer Kamera zwischen zwei Zeitpunkten lässt sich durch eine Rotationsmatrix $\Omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ und einen Translationsvektor $s \cdot \mathbf{V} = (v_x, v_y, v_z)^T$ mit $s \in \mathbb{R}$ beschreiben. Ohne Kenntnisse über die Szene oder zusätzliche Sensorinformation wie z. B. Odometriedaten kann die Kamerabewegung nur skaliert bestimmt werden, wobei s den Skalierungsfaktor bezeichnet. Dieser muss bei der Kalibrierung berücksichtigt werden¹.

Die Transformation des Punktes $\mathbf{X}_{i_k} \in \mathbb{R}^3$ vom Koordinatensystem (KoS) der Kamera \mathbf{c}_i in das KoS der Referenzkamera \mathbf{c}_0 (siehe Abb. 2) zum Zeitpunkt k ist folglich gegeben durch

$$\mathbf{X}_{0_k} = \mathbf{R}_i \mathbf{X}_{i_k} + \mathbf{t}_i. \quad (1)$$

Die Bewegung des Punktes $\mathbf{X}_{i_k} \in \mathbb{R}^3$ im KoS von \mathbf{c}_i zur Zeit k (welche der inversen Bewegung der Kamera entspricht) formuliert sich gemäß

$$\mathbf{X}_{i_{k+1}} = \Omega_{i_k} \mathbf{X}_{i_k} + s_i \mathbf{V}_{i_k}. \quad (2)$$

3.2 Geometrische Bedingungsgleichungen

Abb. 2 zeigt die fundamentale Konstellation, die als Ausgangslage für die gesamten Kalibrierungsgleichungen dient. Die Kamerakonfiguration besteht aus N Kameras, wovon eine o. B. d. A. als Referenzkamera \mathbf{c}_0 definiert wird. Es gilt nun für jede Kamera \mathbf{c}_i , $i \in 1, \dots, N-1$ die Euklidischen Parameter $\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i$ zu ermitteln, welche die Position und Orientierung von \mathbf{c}_i relativ zu \mathbf{c}_0 beschreiben. Das Verfahren basiert außerdem auf der Annahme, dass die Euklidischen Bewegungsparameter jeder Kamera zu jedem Zeitpunkt k bekannt sind, also die Rotation Ω_{i_k} und die Translation $s_i \mathbf{V}_{i_k}$. Mit Gl. 1 und 2 ergeben

¹Die Bewegung entspricht in diesem Fall einer ähnlichen Transformation.

sich in Zusammenhang mit Abb. 2 die Bedingungsgleichungen

$$\mathbf{0}_{3 \times 1} \stackrel{!}{=} \text{vec}(\mathbf{\Omega}_{i_k}^T \mathbf{R}_i^T \mathbf{\Omega}_{0_k} \mathbf{R}_i - \mathbf{I}) \quad (3)$$

$$\mathbf{0}_{9 \times 1} \stackrel{!}{=} s_i \mathbf{V}_{i_k} + \mathbf{R}_i^T (\mathbf{t}_i - \mathbf{\Omega}_{0_k} \mathbf{t}_i - s_0 \mathbf{V}_{0_k}), \quad (4)$$

wobei der $\text{vec}(\mathbf{M})$ -Operator die Spalten von \mathbf{M} “stapelt”, so dass $\text{vec}(\mathbf{M}_{m \times n}) = \mathbf{m} \in \mathbb{R}^{m \cdot n}$. Somit gibt es $9 + 3 = 12$ reellwertige Bedingungsgleichungen für jedem Zeitpunkt und für jede Kamera (mit Ausnahme der Referenzkamera). Um zu verhindern, dass die Skalierungsfaktoren gegen Null konvergieren, wird Gl. 3 und 4 um die Bedingungsgleichung

$$0 \stackrel{!}{=} c - \mathbf{s}^T \mathbf{s} \quad (5)$$

ergänzt mit dem konstanten Skalar $c \in \mathbb{R}$ und $\mathbf{s} = (s_0, \dots, s_{N-1})^T$.

Insgesamt müssen $1 + (N - 1) \cdot p$ Parameter geschätzt werden. Diese beinhalten den Skalar s_0 der Referenzkamera, wobei N die Anzahl der Kameras und p die Anzahl der Parameter je Kamera ist $(s_i, t_{x_i}, t_{y_i}, t_{z_i}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$. Zur Bestimmung der Parameter $\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i$ und s_i kann ein Standardverfahren zur nichtlinearen Optimierung wie z. B. die Levenberg-Marquardt-Optimierung (LM) [7] (für eine *Offline*-Kalibrierung) oder beispielsweise ein erweitertes Kalmanfilter (für eine *Online*-Kalibrierung) verwendet werden. Eine Initiallösung kann wie in [4] gefunden werden.

3.3 Einschränkungen

Das Verfahren basiert zum einen auf der Annahme, dass die Euklidischen Bewegungsparameter jeder Kamera zu jedem Zeitpunkt k bekannt sind. Zum anderen seien die extrinsischen Parameter, die die relative Anordnung der Kameras zueinander beschreibt, konstant. Wie aus Gl. 4 ersichtlich wird, muss $\mathbf{I} \neq \mathbf{\Omega}_{0_k}$ gelten, damit eine Bestimmung der translatorischen Parameter \mathbf{t}_i möglich ist. Ansonsten kürzt sich die translatorische Komponente \mathbf{t}_i aus der Gleichung heraus. D. h. die rotatorische Bewegung der gesamten Plattform ist essentiell zur Bestimmung der translatorischen Parameter. Dies bedeutet auch, dass für eine Bestimmung der longitudinalen Abstände der Kameras eine ausreichend große Nickbewegung um die x-Achse notwendig ist, was sich in der Praxis als schwierig erweisen kann. Darüber hinaus lassen konstante rotatorische Bewegungen wie reine Kreisfahrten keine eindeutige Bestimmung der Skalierungsparameter zu. Da für beliebige Skalierungsparameter die Bedingungsgleichungen erfüllt blieben, kann mit solchen Bewegungen die relative Anordnung der Kameras nicht ermittelt werden.

4 Musterbasierte Kalibrierung

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem mittels einer Anordnung von bekannten und eindeutig identifizierbaren Mustern eine Multikameraanordnung auf einer mobilen Plattform extrinsisch kalibriert werden kann. Grundlage dieser Art der Kalibrierung ist, dass die relative Lage $\hat{\mathbf{A}}_{im}$ (siehe Abb. 3 und 4) des Kalibriermusters P_i zur Kamera C_m zuverlässig geschätzt werden kann. Hierfür können spezielle, eindeutig identifizierbare Kalibriermuster oder auch einfache Schachbrettmuster wie in z. B. Zhang [11] verwendet werden.

Die Kalibrierung wird in drei Schritten durchgeführt: Zunächst wird jede Kamera einzeln intrinsisch kalibriert (z. B. mit Zhang [11]). Danach werden die Euklidischen Parameter $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$, d. h. Rotation und Translation der Muster relativ zueinander berechnet mit

$$\tilde{\mathbf{T}}_{ij} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{ij_{rot}} & \mathbf{t}_{ij_{trans}} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}_{4 \times 4} \quad (6)$$

Zuletzt kann anhand der nun bekannten Musteranordnung die Kameraanordnung $\tilde{\mathbf{R}}_{mn}$ bestimmt werden, wobei

$$\tilde{\mathbf{R}}_{ij} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{mn_{rot}} & \mathbf{r}_{mn_{trans}} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}_{4 \times 4} \quad (7)$$

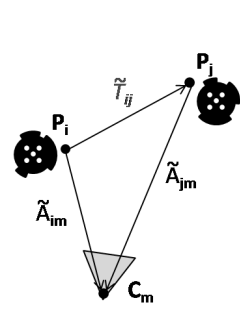


Abbildung 3: Basiskonstellation für die Berechnung der relativen Musteranordnung.

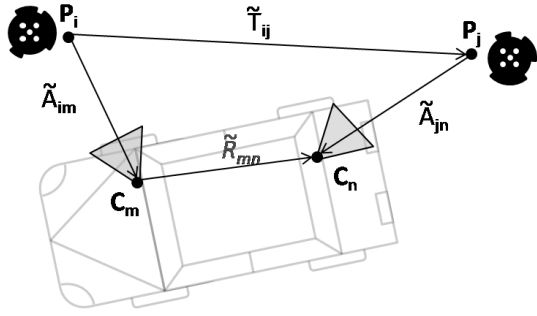


Abbildung 4: Basiskonstellation für die Berechnung der extrinsischen Kameraparameter bei bekannten Musterparametern $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$.

4.1 Bestimmung der Musteranordnung

Zur Bestimmung der extrinsischen Parameter $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$ wird der quadrierte Projektionsfehler minimiert, also der Abstand zwischen den gemessenen Bildpunkten und den projizierten 3D-Punkten in den jeweiligen Koordinatensystemen der Kalibriermuster. Entscheidend ist hierbei, dass das Paar von Kalibriermustern, deren extrinsische Parameter ermittelt werden, in *einer* Kamera sichtbar sind. Die Bestimmung der Musterparameter wird paarweise durchgeführt. Die Projektion des p ten Punkts in Muster P_i , $\tilde{\mathbf{P}}_{i_p} = (X_{i_p}, Y_{i_p}, Z_{i_p}, 1)^T$, im Koordinatensystem des Kalibrierusters erfolgt anhand der intrinsischen Kameramatrix

$$\tilde{\mathbf{K}}_m = \begin{pmatrix} f_{x_m} & 0 & c_{x_m} & 0 \\ 0 & f_{y_m} & c_{y_m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

der bekannten Parameter $\tilde{\mathbf{A}}_{im}^k, \tilde{\mathbf{A}}_{jm}^k$, die die Lage zwischen Muster und Kamera beschreiben (k ist der Positions- bzw. Zeitindex der Kameraplattform), und die über alle k konstante und gesuchte Transformationsmatrix $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$:

$$\tilde{\mathbf{X}}_{m_{i_p}}^k = \tilde{\mathbf{K}}_m \tilde{\mathbf{A}}_{im}^k \tilde{\mathbf{P}}_{i_p} =: (X', Y', Z', 1)^T \quad (9)$$

und

$$\mathbf{x}_{m_{ip}}^k = (X'/Z', Y'/Z')^T =: \pi(\tilde{\mathbf{X}}_{m_{ip}}^k) \quad (10)$$

So lässt sich mittels einer LM-Optimierung (siehe [7]) die Gleichung

$$f_{Muster}(\tilde{\mathbf{T}}_{ij}) = \sum_p^M \sum_k^\tau \left(\mathbf{x}_{m_{ip}}^k - \pi(\tilde{\mathbf{K}}_m \tilde{\mathbf{A}}_{im}^k \tilde{\mathbf{T}}_{ij}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_{jp}) \right)^2 + \left(\mathbf{x}_{m_{ip}}^k - \pi(\tilde{\mathbf{K}}_m \tilde{\mathbf{A}}_{jm}^k \tilde{\mathbf{T}}_{ij} \tilde{\mathbf{P}}_{ip}) \right)^2 \quad (11)$$

über alle τ Plattformpositionen und M Musterpunkte minimieren. Hierbei kann $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$ gemäß

$$\tilde{\mathbf{T}}_{ij}^{init} := \tilde{\mathbf{A}}_{jm}^{k^{-1}} \tilde{\mathbf{A}}_{im}^k \quad (12)$$

für ein $k \in \{1, \dots, \tau\}$ initialisiert werden.

4.2 Bestimmung der Kameraanordnung

Ist die relative Anordnung der Muster einmal bekannt, so kann ähnlich wie bei der Kalibrierung der Muster mit den Kameras verfahren werden. Sobald zu einem Zeitpunkt k ein Muster P_i in Kamera C_m und Muster P_j in Kamera C_n zu sehen ist, lässt sich die Lage $\tilde{\mathbf{R}}_{mn}$ zwischen C_m und C_n bestimmen (siehe Abb. 4). Die intrinsischen Kameramatrizen $\tilde{\mathbf{K}}_m$ und $\tilde{\mathbf{K}}_n$ seien bekannt. Ebenso die relative Lage $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$ der Muster P_i und P_j sowie die Orientierung und Lage der Kameras zu den Mustern $\tilde{\mathbf{A}}_{im}^k$ und $\tilde{\mathbf{A}}_{jn}^k$ zu den τ Messungen. Analog zu Gl. 11 lässt sich eine Minimierungsfunktion über \mathbf{R}_{mn} formulieren:

$$f_{Kamera}(\tilde{\mathbf{R}}_{mn}) = \sum_p^M \sum_k^\tau \left(\mathbf{x}_{n_{jp}}^k - \pi(\tilde{\mathbf{K}}_n \tilde{\mathbf{R}}_{mn} \tilde{\mathbf{A}}_{im}^k \tilde{\mathbf{T}}_{ij}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_{jp}) \right)^2 + \left(\mathbf{x}_{m_{ip}}^k - \pi(\tilde{\mathbf{K}}_m \tilde{\mathbf{R}}_{mn}^{-1} \tilde{\mathbf{A}}_{jn}^k \tilde{\mathbf{T}}_{ij} \tilde{\mathbf{P}}_{ip}) \right)^2 \quad (13)$$

Eine Initialisierung von \mathbf{R}_{mn} ist gemäß

$$\tilde{\mathbf{R}}_{mn}^{init} := \tilde{\mathbf{A}}_{jm}^k \tilde{\mathbf{T}}_{ij} \tilde{\mathbf{A}}_{im}^{k^{-1}} \quad (14)$$

möglich.

5 Bewertung mittels simulierter Daten

5.1 Untersuchung der bewegungsbasierten Kalibrierung

Zur Evaluierung der bewegungsbasierten Kalibrierung wurde eine Simulationsumgebung erstellt. Bei der Simulation wurden nur ebene Kameraanordnungen und Bewegungen modelliert, da die bewegungsbasierte Kalibrierung aus den oben erwähnten Gründen auf die Bestimmung der ebenen translatorischen Parameter beschränkt bleiben muss. Dies beinhaltet die translatorischen Parameter in der xz -Ebene t_x, t_z bzw. v_x, v_z und die Rotationswinkel um die y -Achse β bzw. ω_y . Die Bewegungsdaten wurden interaktiv erzeugt und skaliert und dienen als Eingangsgröße für die Kalibrieroutine. Versuche wurden mit

3, 6 bzw. 8 Kameras sowie unterschiedlichem additiv normalverteiltem Bewegungsrauschen mit Standardabweichung σ durchgeführt². Abb. 5 zeigt die drei simulierten Kalibrierfahrten. Abb. 6 zeigt zur Veranschaulichung des Rauscheinflusses den rekonstruierten Bewegungspfad aus Abb. 5a.

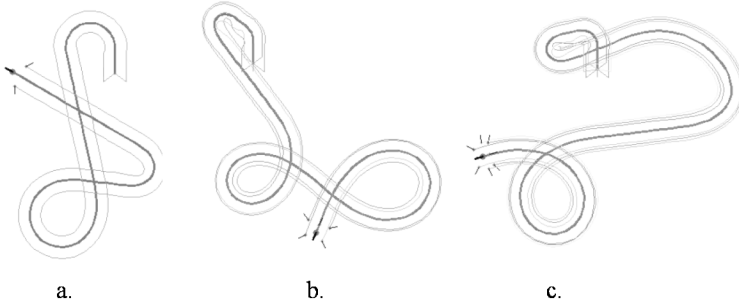


Abbildung 5: Drei simulierte Kalibrierfahrten mit 3, 6 bzw. 8 Kameras.

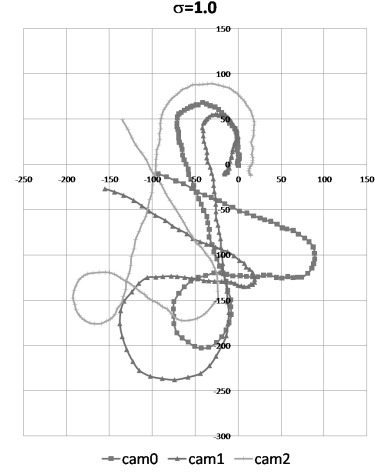


Abbildung 6: Rekonstruierter, simulierter Bewegungspfad dreier Kameras mit einem Bewegungsrauschen von $\sigma_{rot} = \sigma_{trans} = 1, 0$.

Die Startwerte für die LM-Optimierung wurden mit 20% Abweichung von den Referenzwerten gewählt. Die unnormierten Initialwerte für die Skalierungsparameter von Kamera c_i ($i = 1, \dots, 7$) relativ zur Initialkamera c_0 wurden wie folgt gewählt:

Kameraindex	0	1	2	3	4	5	6	7
c_i	1	5	2	3	1	5	3	4
s_i	0,04	0,21	0,08	0,125	0,04	0,21	0,125	0,17

Obwohl Referenzdaten zur Verfügung stehen, kann lediglich der Winkel β direkt verglichen werden, da die Translationsparameter nur in deren kameraabhängigen Skalierung bekannt sind. Stattdessen zieht man als Gütekriterium für die translatorischen Parameter die Verhältnisse $R_{xx}(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j) = t_x^i/t_x^j$, $R_{zz}(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j) = t_z^i/t_z^j$ und $R_{xz}(\mathbf{c}_i) = t_x^i/t_z^i$ heran. Diese müssen unabhängig von der Skalierung nach der Kalibrierung den Verhältnissen der Referenzdaten entsprechen. Als Fehlermaß, zum Vergleich mit den simulierten Referenzwerten, dient die mittlere, prozentuale Abweichung der Verhältnisse

$$\epsilon(R) = \frac{100}{\kappa} \sum_{i=1}^{\kappa} |1.0 - (R_{ref}/R_{est})|. \quad (15)$$

κ ist die Anzahl aller untereinander vorgenommenen Vergleiche.

Zur Generierung der Werte wurden die Versuche 20 mal je Rauschintensitätsstufe durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt. Tab. 1 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit des Rauscheinflusses. Man sieht, dass das Kalibrierergebnis stark von der Güte der Bewegungsparameter abhängt.

²Die Einheit der Winkel ist $^\circ$, die Translationparameter sind –wegen deren unbestimmter Skalierung– ohne Einheit und bewegen sich im Intervall $[0, 15]$.

Anz. Kameras	τ	σ	$\epsilon(\beta)$	$\epsilon(R_{xx})$	$\epsilon(R_{zz})$	$\epsilon(R_{xz})$
3	137	0.1	0.05	0.63	0.01	0.79
		0.3	0.20	1.99	2.08	2.37
		0.5	0.34	3.72	5.07	4.07
		1.0	0.77	11.87	15.42	9.35
6	119	0.1	0.09	0.90	0.68	0.92
		0.3	0.20	3.24	2.85	2.66
		0.5	0.40	4.78	5.47	5.75
		1.0	0.81	17.35	23.26	14.78
8	124	0.1	0.10	1.02	1.47	1.20
		0.3	0.31	3.26	5.33	3.81
		0.5	0.42	7.44	9.22	6.04
		1.0	1.03	20.89	23.95	18.39

Tabelle 1: Mittlere prozentuale Abweichungen für drei simulierte Kamerakonstellationen mit unterschiedlichem Bewegungsrauschen σ . τ gibt die Anzahl der Zeitschritte je Szenario an.

5.2 Untersuchung der musterbasierten Kalibrierung

Im Folgenden wird der Einfluss des Rauschens auf den Kalibrierfehler untersucht. Der Kalibrierfehler ϵ ist hierbei definiert als die Wurzel des Mittels der quadratischen Projektionsfehler, also entsprechend Gl. 11 und 13

$$\epsilon_{Muster} = \sqrt{\frac{f_{Muster}(\tilde{\mathbf{T}}_{ij})}{M \cdot \tau}}, \epsilon_{Kamera} = \sqrt{\frac{f_{Kamera}(\tilde{\mathbf{R}}_{mn})}{M \cdot \tau}} \quad (16)$$

Jede Kalibrierung wurde 20 mal wiederholt und die Ergebnisse gemittelt. Die Kalibrierergebnisse der Muster ($\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$) und der Kameras ($\tilde{\mathbf{R}}_{mn}$) wurden getrennt untersucht.

Für die Musterkalibrierung wurden neun verschiedene Kamerapositionen \mathbf{A}_{im}^k definiert. Die Bildgröße ist auf 640×480 festgelegt und die intrinsischen Parameter waren gesetzt mit den Brennweiten $f_x = 580, f_y = 580$ für C_m bzw. $f_x = 600, f_y = 600$ für C_n sowie dem Durchstoßpunkt ($c_x = 320, c_y = 240$). Die Projektionsfehler wurden auf den Einfluss von Bild-, Rotations-, Translations- und Brennweitenrauschen hin untersucht (siehe Abb. 7). Man erkennt, dass verrauschte Transformationsparameter den stärksten Einfluss auf die Güte der Kalibrierung haben. Rauschen in den rotatorischen Parametern bewirkt insbesondere in Schritt 3, der Bestimmung der extrinsischen Kameraparameter, einen großen Restfehler. Ein verrauschter Wert der Brennweite hingegen wirkt sich nur schwach auf den resultierenden Fehler aus, verglichen mit dem Einfluss der extrinsischen Größen.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Verfahren zur extrinsischen Kalibrierung von auf einer mobilen Plattform rigide justierten Kameraanordnung untersucht. Im ersten Verfahren kann die Berechnung der extrinsischen Parameter alleine aus der Bewegung der Kameras erfolgen, die in der Regel nur bis auf einen skalaren Faktor bekannt ist. Kalibriermuster

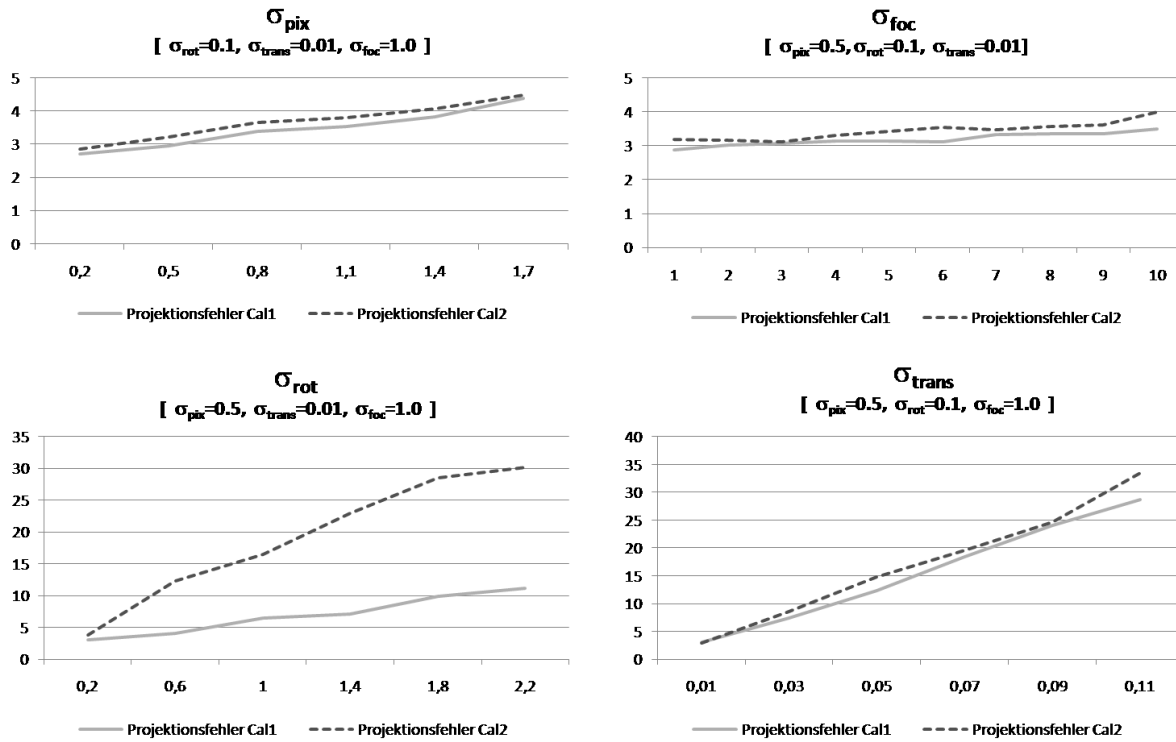


Abbildung 7: Projektionsfehler bei unterschiedlich starkem Rauschen der Bildmessungen, gemessenen Euklidischen Parametern und Brennweite. *Cal1* bezeichnet die Kalibrierung der Muster, *Cal2* die der Kameras.

sind in diesem Fall nicht notwendig. Das Kalibrierprinzip kann sowohl für eine *Offline*-Kalibrierung als für eine *Online*-Kalibrierung angewandt werden. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass bei rein planaren Rotationsbewegungen der Plattform (z. B. bei Landfahrzeugen) die longitudinalen Abstände und Winkel der Kameras zueinander nicht bestimmt werden können, was in der Praxis eine erhebliche Einschränkung darstellt. Die Ergebnisse anhand der Simulationen zeigen, dass die Güte der Kalibrierparameter stark vom Bewegungsrauschen abhängt. Eine robuste Datenselektion wie z. B. RANSAC (siehe Fischler und Bolles [5]) scheint daher sinnvoll. Darüber hinaus ergibt sich aber ohne Kenntnis der Grundwahrheit kein physikalisches Maß, das die Güte der Kalibrierung und damit ein Abbruchkriterium definiert.

Das zweite Verfahren eignet sich insbesondere zur *Offline*-Kalibrierung, da hier durch die Kenntnis der Mustergeometrie absolute translatorische Größen in allen drei Koordinatenrichtungen bestimmt werden können. Durch Minimierung des Projektionsfehlers steht darüber hinaus ein Gütemaß zur Bewertung des Kalibrierergebnisses zur Verfügung. In Simulationen wurde der Einfluss von verrauschten Bildpunkten, Brennweiten, Rotations- sowie Translationsparameter auf den resultierenden Projektionsfehler untersucht.

Untersuchungen und Experimente an Realdaten werden Gegenstand zukünftiger Aktivitäten sein.

Literatur

- [1] Yt. J. Broida, Zs. Ch, T. J. Broida und S. Ch, *Recursive 3-D motion estimation from a monocular image sequence*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990.
- [2] B. Clipp, J. Kim, J. M. Frahm, M. Pollefeys und R. Hartley, *Robust 6DOF Motion Estimation for Non-Overlapping, Multi-Camera Systems*, Proceedings of the 2008 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Washington, DC, USA, 2008.
- [3] A. J. Davison und N. D. Molton, *MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007.
- [4] S. Esquivel, F. Woelk und R. Koch, *Calibration of a Multi-camera Rig from Non-overlapping Views*, DAGM-Symposium, 2007.
- [5] M. A. Fischler und R. C. Bolles, *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*, Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms, Kaufmann, Los Altos, CA., 1987.
- [6] R.K. Kumar, A. Ilie, J.M. Frahm und M. Pollefeys, *Simple calibration of non-overlapping cameras with a mirror*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.
- [7] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling und B. Flannery , *Numerical Recipes in C*, 2. Aufl. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.
- [8] F. Pagel, *Robust Monocular Egomotion Estimation Based on an IEKF*, IEEE Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2009.
- [9] M. Pollefeys, *Self-Calibration and Metric 3D Reconstruction from Uncalibrated Image Sequences*, Dissertation, 1999.
- [10] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley und A. W. Fitzgibbon, *Bundle Adjustment - A Modern Synthesis*, ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms, Springer-Verlag, London, UK, 2000.
- [11] Z. Zhang , *A flexible new technique for camera calibration*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000.
- [12] L. Zhang, B. Li und Y. Jia , *A Practical Calibration Method for Multiple Cameras*, IEEE International Conference on Image and Graphics, 2007.