

Automatische Orientierung von zwei gemeinsam bewegten Stereosystemen ohne gegenseitige Korrespondenzen

Daniel MUHLE, Steffen ABRAHAM, Christian HEIPKE und Manfred WIGGENHAGEN

Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der gegenseitigen Orientierung zwischen zwei kalibrierten und starr miteinander verbundenen Stereokamerasystemen, die kein gemeinsames Sichtfeld haben, sich aber gemeinsam durch den Raum bewegen und die Bewegung aus Punktkorrespondenzen zwischen zwei Zeitpunkten bestimmen. Zunächst werden die Grundprinzipien dargestellt, die es erlauben die Orientierung zwischen den Systemen aus der gemeinsamen Bewegung zu bestimmen. Anschließend werden die Anforderungen an die Bewegungen dargestellt, die für eine eindeutige Bestimmung der Orientierung ausgeführt werden müssen und es wird der implementierte Ausgleichungsansatz beschrieben. Den Abschluss bildet eine Simulation, in der die mit diesem Ansatz erreichbare Genauigkeit der gegenseitigen Orientierung und die Auswirkung eingeschränkter Bewegungen auf die zu bestimmenden Parameter der gegenseitigen Orientierung untersucht werden.

1 Einleitung

Für die schnelle Kartierung eines Raumes und für die Navigation eines autonomen Roboters wird eine Messsystemanordnung eingesetzt, wie sie in der Abb. 1 dargestellt ist. Zwei Stereosysteme sind auf einer gemeinsamen Plattform so angebracht, dass sie in jeweils entgegengesetzte Richtungen schauen. Dieser Aufbau hat verschiedene Vorteile: 1.) Bei der Kartierung werden weniger Durchgänge benötigt als mit einem Messsystem, 2.) Das redundante Bestimmen der Roboterbewegung durch beide Systeme erhöht die Zuverlässigkeit der Navigation in Situationen, in denen die Bewegungsbestimmung eines Systems versagt.

Grundvoraussetzung dazu ist, dass die gegenseitige Orientierung zwischen den Systemen bekannt ist. Erste Ansätze zur Orientierung unterschiedlicher Sensoren aus gemeinsamen Bewegungen wurden bereits z.B. in SHIU (1987), CHOU (1988) oder ANDREFF (2001) im Zusammenhang mit der Orientierung eines Roboter-Greifens relativ zu einer Videokamera beschrieben. Die Übertragung der dort beschriebenen Ansätze auf die Bestimmung der gegenseitigen Orientierung eines Stereosystems aus gemeinsamen Bewegungen erfolgte dann z.B. in LUONG (1993) und CASPI (2002). Die in OSKIPER (2007) beschriebene Vorab-Kalibrierung zweier Stereosysteme mit nicht überlappendem Sichtfeld basiert ebenfalls auf dem Ansatz von SHIU.

In den bekannten Ansätzen wird die gegenseitige Orientierung zwischen den Systemen vorab bestimmt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die nötigen unterschiedlichen Bewegungen mit nicht zueinander parallelen Drehachsen ausgeführt werden können, um die Orientierung zwischen den Systemen komplett und zuverlässig zu bestimmen. Im Gegensatz dazu soll

im Folgenden der Fokus auf ein Szenario gelegt werden, in dem a) die gegenseitige Orientierung aus der Bewegung während der Messung bestimmt wird und b) die Bewegungsmöglichkeiten eingeschränkt sind und deshalb einige der Parameter der gegenseitigen Orientierung nicht, oder nur eingeschränkt bestimmt werden können.

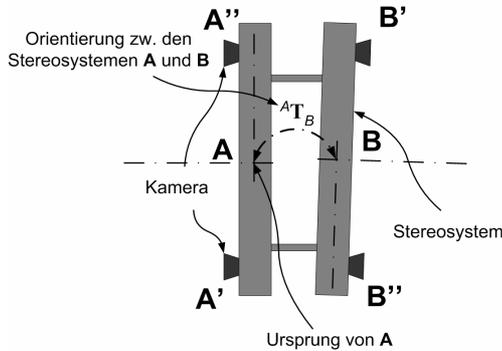


Abb. 1: Schema eines Messsystems ohne überlappende Sichtfelder

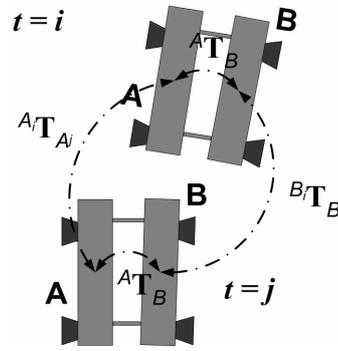


Abb. 2: Aus der Bewegung resultierende Transformationen

2 Notationen und Systemkonzept

Im Folgenden bezeichnen die dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensysteme **A** und **B** die lokalen, mitbewegten Koordinatensysteme der Stereosysteme und \mathbf{G}_A bzw. \mathbf{G}_B bezeichnen die fixen, globalen Koordinatensysteme, die von den jeweiligen Stereosystemen aus beobachtet werden.

Weiterhin wird angenommen, dass jedes Stereosystem kalibriert ist, d.h. die Transformationen ${}^A\mathbf{T}_{A'}$ und ${}^A\mathbf{T}_{A''}$ der beiden Bild-Koordinatensysteme **A'** und **A''** relativ zum Koordinatensystem des Stereosystems **A** und die Parameter der Inneren Orientierung der Kameras werden vorab bestimmt und für folgende Messungen als bekannt angenommen¹. Für die Modellierung wird weiterhin vorausgesetzt, dass beide Systeme den gleichen Systemmaßstab haben. Eine in **A** gemessene Strecke ist damit genauso lang wie eine Strecke in **B**.

Im Folgenden meint ${}^A\mathbf{x}$ einen Punkt im Koordinatensystem **A** und ${}^B\mathbf{x}$ einen Punkt im Koordinatensystem **B**. Die Koordinatentransformation

$${}^A\mathbf{x} = {}^A\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{x} + {}^A\mathbf{t}_B \quad (1)$$

bildet den Punkt ${}^B\mathbf{x}$ in das Koordinatensystem **A** ab. ${}^A\mathbf{R}_B$ ist eine (3×3)-Rotationsmatrix, und der (3×1)-Vektor ${}^A\mathbf{t}_B$ beschreibt den Richtungs-Vektor zum Ursprung des Koordinatensystems **B** im Koordinatensystem **A**. Aus Gründen der Lesbarkeit wird die Rotation ${}^A\mathbf{R}_B$ und die Translation ${}^A\mathbf{t}_B$ im Folgenden mit dem Symbol ${}^A\mathbf{T}_B$ zusammengefasst.

¹ Die beschriebenen Zusammenhänge gelten im Folgenden analog für das Stereosystem **B**

Die Verkettung zweier Transformationen ${}^{G_A}\mathbf{T}_A \circ {}^A\mathbf{T}_B$, bildet einen Punkt aus dem Koordinatensystem \mathbf{B} über das Koordinatensystem \mathbf{A} in das Koordinatensystem \mathbf{G}_A ab. Die aus der Verkettung resultierende Rotationsmatrix und der Translationsvektor ergeben sich gemäß den folgenden Gleichungen:

$${}^{G_A}\mathbf{R}_B = {}^{G_A}\mathbf{R}_A {}^A\mathbf{R}_B \quad (2)$$

$${}^{G_A}\mathbf{t}_B = {}^{G_A}\mathbf{R}_A {}^A\mathbf{t}_B + {}^{G_A}\mathbf{t}_A \quad (3)$$

Die Transformation ${}^A\mathbf{T}_{G_A}$ beschreibt die äußere Orientierung von \mathbf{A} relativ zu \mathbf{G}_A zum Zeitpunkt $t = i$ und wird im Folgenden auch als *Orientierung* bezeichnet.

3 Grundprinzipien der Orientierung aus Bewegung

3.1 Bewegung eines Einzelsystems

Für das Stereosystem \mathbf{A} wird zu den Zeitpunkten $t = j$ und $t = i$ die Orientierung relativ zu \mathbf{G}_A gemäß den Gleichungen in (4) bestimmt.

$$\begin{aligned} {}^{A_j}\mathbf{x} &= {}^{A_j}\mathbf{T}_{G_A} {}^{G_A}\mathbf{x} & : \text{ mit } {}^{A_j}\mathbf{x} - \text{Punkt } \mathbf{x} \text{ zum Zeitpunkt } t = i \text{ in } \mathbf{A}, {}^{G_A}\mathbf{x} - \\ {}^{A_i}\mathbf{x} &= {}^{A_i}\mathbf{T}_{G_A} {}^{G_A}\mathbf{x} & \text{ Punkt } \mathbf{x} \text{ in } \mathbf{G}_A, {}^{A_j}\mathbf{x} \text{ entsprechend} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Bewegung ergibt sich somit aus der Verkettung der beiden Orientierungen zu den Zeitpunkten $t = j$ und $t = i$ gemäß der Gl. (5).

$${}^{A_i}\mathbf{T}_{A_j} = {}^{A_i}\mathbf{T}_{G_A} \circ {}^{A_j}\mathbf{T}_{G_A}^{-1} \quad (5)$$

3.2 Aus der gemeinsamen Bewegung resultierende Bedingungen

Wie in der Abb. 2 dargestellt, sind die Koordinatensysteme \mathbf{A} und \mathbf{B} durch die gesuchte Transformation ${}^A\mathbf{T}_B$ starr miteinander verbunden. Beide Systeme erfahren somit dieselbe Bewegung, die aber in den unterschiedlichen Koordinatensystemen wahrgenommen wird.

Es wird deutlich, dass es eine Zirkularität der Transformationen gibt, und ein Punkt ${}^{B_j}\mathbf{x}$ über zwei Verkettungen (s. Gl. (6) und (7)) in einen Punkt ${}^{A_i}\mathbf{x}$ transformiert werden kann.

$${}^{A_i}\mathbf{x} = {}^{A_i}\mathbf{T}_{A_j} \circ {}^A\mathbf{T}_B {}^{B_j}\mathbf{x} \quad (6)$$

$${}^{A_i}\mathbf{x} = {}^A\mathbf{T}_B \circ {}^{B_i}\mathbf{T}_{B_j} {}^{B_j}\mathbf{x} \quad (7)$$

Setzt man die Gl. (6) und (7) in einander ein und ersetzt die Verkettungen der Transformationen gemäß den Gl. (2) und (3), ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$\begin{aligned} {}^{A_i}\mathbf{R}_{A_j} &= {}^A\mathbf{R}_B {}^{B_i}\mathbf{R}_{B_j} {}^A\mathbf{R}_B^T \\ {}^{A_i}\mathbf{t}_{A_j} &= \left(\mathbf{I} - {}^A\mathbf{R}_{A_j} \right) {}^A\mathbf{t}_B + {}^A\mathbf{R}_B {}^{B_i}\mathbf{t}_{B_j} : \text{ mit } \mathbf{I} - (3 \times 3) \text{ Einheitsmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Aus den Gl. in (8) wird deutlich, dass die gesuchte Transformation ${}^A\mathbf{T}_B$ die Beziehung zwischen den in **A** und **B** wahrgenommenen Bewegungen und somit einen funktionalen Zusammenhang herstellt, der ohne direkte Korrespondenzen auskommt.

3.3 Anforderungen an die Bewegungen

Bereits in SHIU & AHMAD (1987) werden die notwendigen Bewegungen analysiert, die nötig sind um ${}^A\mathbf{T}_B$ eindeutig zu bestimmen. In CHEN (1991) wird geometrisch anschaulich gezeigt, dass dazu mindestens zwei Bewegungen mit nicht zueinander parallelen Drehachsen nötig sind. Mit nur einer Bewegung lässt sich die Transformation bis auf zwei Freiheitsgrade bestimmen. Die Rotation um die Drehachse der Bewegung und der Teil der Translation parallel zur Drehachse können nicht bestimmt werden.

Welche Teile der Orientierung bei unterschiedlichen Bewegungsformen bestimmbar sind, zeigt die Tabelle 1 (vgl. CHEN (1991) oder ANDREFF (2001)).

Tabelle 1: Bestimmbare Elemente der Orientierung bei unterschiedlichen Bewegungen

Bewegung 1 Bewegung 2	${}^{A_1}\mathbf{R}_{A_0} \neq \mathbf{I}$ ${}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0} \neq \mathbf{0}$	${}^{A_1}\mathbf{R}_{A_0} \neq \mathbf{I}$ ${}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0} = \mathbf{0}$	${}^{A_1}\mathbf{R}_{A_0} = \mathbf{I}$ ${}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0} \neq \mathbf{0}$
${}^{A_2}\mathbf{R}_{A_1} \neq \mathbf{I}$ ${}^{A_2}\mathbf{t}_{A_1} \neq \mathbf{0}$	${}^A\mathbf{T}_B$ ${}^A\mathbf{R}_B, {}^A\mathbf{t}_B(2): {}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0} \parallel {}^{A_2}\mathbf{n}_{A_1}$	${}^A\mathbf{R}_B, {}^A\mathbf{t}_B(2)$	${}^A\mathbf{R}_B, {}^A\mathbf{t}_B(2): {}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0}, {}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0}$ ${}^A\mathbf{T}_B(4): {}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0} \parallel {}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0}$
${}^{A_2}\mathbf{R}_{A_1} \neq \mathbf{I}$ ${}^{A_2}\mathbf{t}_{A_1} = \mathbf{0}$		${}^A\mathbf{T}_B: {}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0}, {}^{A_2}\mathbf{n}_{A_1}$ ${}^A\mathbf{T}_B(4): {}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0} \parallel {}^{A_2}\mathbf{n}_{A_1}$	${}^A\mathbf{T}_B(4)$
${}^{A_2}\mathbf{R}_{A_1} = \mathbf{I}$ ${}^{A_2}\mathbf{t}_{A_1} \neq \mathbf{0}$			${}^A\mathbf{R}_B: {}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0}, {}^{A_2}\mathbf{t}_{A_1}$ ${}^A\mathbf{R}_B(2): {}^{A_1}\mathbf{t}_{A_0} \parallel {}^{A_2}\mathbf{t}_{A_1}$

Dabei meint ${}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0}$ die Drehachse der ersten in **A** beobachteten und ${}^{A_2}\mathbf{n}_{A_1}$ die Drehachse der zweiten Bewegung. Eine angehängte Zahl k in Klammern, z.B. „ ${}^A\mathbf{t}_B(2)$ “, gibt an, dass vom jeweiligen Parameter nur k Freiheitsgrade bestimmt werden können. ${}^A\mathbf{T}_B(4)$ meint den oben beschriebenen Fall, mit nur einer Bewegung. Folgen noch Angaben wie z.B. „: ${}^{A_1}\mathbf{n}_{A_0} \parallel {}^{A_2}\mathbf{n}_{A_1}$ “ stellen diese zusätzliche Bedingungen an die Bewegungen dar.

Aus der Tabelle 1 lässt sich direkt entnehmen, wie viele der sechs Freiheitsgrade der gegenseitigen Orientierung für unterschiedliche Bewegungsformen bestimmbar sind. Bei einer geradlinigen Roboterdurchfahrt über eine Ebene, können z.B. nur noch zwei Parameter der Rotation bestimmt werden.

4 Ausgleichungsansatz

4.1 Getrennte Bündelausgleichung in A und B

Die Orientierungen ${}^{A_i}\mathbf{T}_{G_A}$ und ${}^{B_i}\mathbf{T}_{G_B}$ in **A** und **B** für alle Zeitpunkte $t = i$ und die Punkte ${}^{G_A}\mathbf{x}$ und ${}^{G_B}\mathbf{x}$ in \mathbf{G}_A und \mathbf{G}_B werden getrennt für **A** und **B** im Rahmen einer Bündelausgleichung bestimmt.

Das für die Ausgleichung verwendete funktionale Modell entspricht der klassischen Bündelausgleichung und beschreibt die Abbildung eines Punktes ${}^{G_A}\mathbf{x}$ in das Koordinatensystem \mathbf{A} zum Zeitpunkt $t = i$, gemäß der Gl. (4), gefolgt von der Transformation in das Bildkoordinatensystem der Kameras \mathbf{A}' , \mathbf{A}'' und der anschließenden zentral-perspektivischen Abbildung des 3D-Punktes in einen 2D-Bildpunkt mit den bekannten Kollinearitätsgleichungen.

Als einzelnes Beobachtungspaar L_k werden für die Ausgleichung die Bildkoordinaten $\mathbf{u}_k = [u_k, v_k]^T$ eines beobachteten Merkmals verwendet und es ergeben sich für einen Bildpunkt in \mathbf{A}' und \mathbf{B}' die folgenden Beobachtungsgleichungen²:

$$\begin{aligned} {}^{A_i}L_k + v &= F\left({}^{A_i}\mathbf{IOR}, {}^{A_i}\mathbf{T}_A, \underline{{}^{A_i}\mathbf{T}_{G_A}}, \underline{{}^{G_A}\mathbf{x}_k}\right) \\ {}^{B_i}L_k + v &= F\left({}^{B_i}\mathbf{IOR}, {}^{B_i}\mathbf{T}_B, \underline{{}^{B_i}\mathbf{T}_{G_B}}, \underline{{}^{G_B}\mathbf{x}_k}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

${}^{A_i}\mathbf{IOR}$ fasst die Parameter der inneren Orientierung der Kamera \mathbf{A}' und ${}^{A_i}\mathbf{T}_A$ die Parameter der Transformation zwischen \mathbf{A} und \mathbf{A}' in einem Symbol zusammen. Der Index i bezieht sich auf den Zeitpunkt $t = i$ und der Index k bezieht sich auf einen einzelnen gemessenen Bildpunkt. Im Rahmen der Ausgleichung geschätzt werden die unterstrichenen Parameter. Die anderen sind aus der Vorab-Kalibrierung bekannt und werden als fix angenommen.

Da sich die Bildkoordinaten als Funktion der Unbekannten darstellen, handelt es sich bei dem verwendeten Ausgleichungsansatz um eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen nach dem Gauss-Markov-Modell.

4.2 Datumsdefinitionen

Ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit soll angenommen werden, dass Ursprung und Ausrichtung von G_A identisch ist mit Ursprung und Ausrichtung von \mathbf{A} zum Zeitpunkt $t = 0$. Damit ergibt sich die Orientierung ${}^{A_0}\mathbf{T}_{G_A} = [\mathbf{I}; \mathbf{0}]$, wobei \mathbf{I} eine (3×3)-Einheits-Matrix und $\mathbf{0}$ der (3×1)-Null-Vektor ist. Weiterhin wird für die Bestimmung der Bewegung der Zeitpunkt $t = j$ mit dem Zeitpunkt $t = 0$ gleichgesetzt, so dass sich die Gl. (5) vereinfachen lässt. Die Bewegung entspricht damit der Orientierung ${}^{A_i}\mathbf{T}_{G_A}$ zum Zeitpunkt $t = i$.

4.3 Bedingungsgleichungen zur Verbindung von A und B

Die Verbindung der getrennten Bündelausgleichungen in \mathbf{A} und \mathbf{B} und die Integration der gegenseitigen Orientierung ${}^A\mathbf{T}_B$ wird über das Einführen von Restriktionen zwischen den Unbekannten erreicht. Die Restriktionen basieren auf den Gleichungen in (8), beziehen sich aber durch die gewählten Datumsdefinitionen, wie in Gl. (10) dargestellt, auf die Orientierungen relativ zu den globalen Koordinatensystemen G_A und G_B .

$$\begin{aligned} {}^{A_i}\mathbf{R}_{G_A} &= {}^A\mathbf{R}_B {}^{B_i}\mathbf{R}_{G_B} {}^A\mathbf{R}_B^T \\ {}^{A_i}\mathbf{t}_{G_A} &= (\mathbf{I} - {}^{A_i}\mathbf{R}_{G_A}) {}^A\mathbf{t}_B + {}^A\mathbf{R}_B {}^{B_i}\mathbf{t}_{G_B} \end{aligned} \quad (10)$$

² Analog gilt (9) auch für \mathbf{A}'' und \mathbf{B}''

Das Ausgleichsmodell erweitert sich somit zu einem Gauss-Markov-Modell mit Restriktionen zwischen den Unbekannten.

5 Simulationen

Im Rahmen einer Simulation wurden zwei Experimente durchgeführt, um a) die mit dem Ansatz erreichbare Genauigkeit in Form der Standardabweichungen der Rotation und Translation von ${}^A\mathbf{T}_B$, und b) die erreichbare Genauigkeit bei der Annäherung an degenerierte Bewegungen, wie z.B. einer reinen Translation, abschätzen zu können.

Dazu wurden Durchfahrten der Stereosysteme mit einer Basisbreite von 0,5 m durch einen 3 m hohen, 3 m breiten und 5 m langen Gang simuliert, dessen Wänden mit einem dichten Raster von Punkten bedeckt sind. Das globale Koordinatensystem wurde so gewählt, dass die X-Achse der Länge, die Y-Achse der Breite und die Z-Achse der Höhe entsprechen. Für die Messgenauigkeit der simulierten Stereosysteme (Basisbreite: 0,5 m, Kamerakonstante: 300 Pixel, Messabstand: 1,5 m) kann in der X-Z-Ebene eine Standardabweichung des Strahlenschnittes von ca. 1,7 mm abgeschätzt werden.

5.1 Untersuchung der theoretisch erreichbaren Genauigkeit

Zur Untersuchung der theoretisch erreichbaren Genauigkeit wurde eine wellenförmige Durchfahrt simuliert, mit einer Amplitude von 0,3 m in Y- und Z-Richtung. Für die Rotation um die X- und Y-Achse wurde eine Amplitude von 10° und für die Rotation um die Z-Achse eine Amplitude von 30° gewählt. Die derart simulierte taumelnde Bewegung sollte ausreichend unterschiedliche Bewegungen enthalten, um ${}^A\mathbf{T}_B$ zuverlässig und vollständig bestimmen zu können. Im Schnitt waren in jedem Bild ca. 30 Punkte sichtbar. Um gleichzeitig den implementierten Ansatz zu testen, wurden vier Versuche durchgeführt, bei denen die simulierten Bildkoordinaten mit einer Standardabweichung von 0,1 bis 1 Pixel voraussetzt wurden.

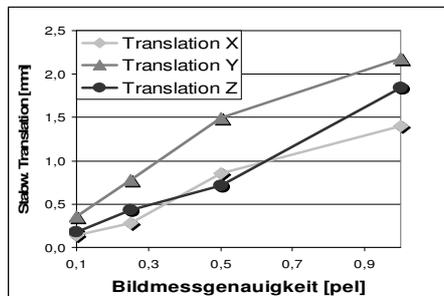


Abb. 3: Standardabweichung für ${}^A\mathbf{t}_B$

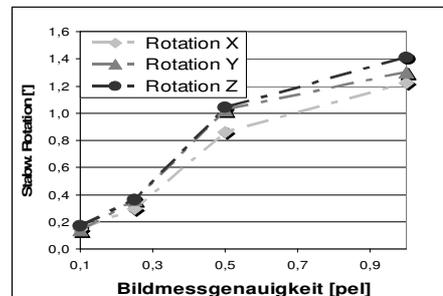


Abb. 4: Standardabweichung für ${}^A\mathbf{R}_B$

Wie die Abb. 3 zeigt, ist bei einer realistischen Bildmessgenauigkeit von 0,5 Pixel im optimalen Fall eine Standardabweichung von ca. 0,8 mm für die X- und Z-Komponente von ${}^A\mathbf{t}_B$ zu erwarten. In Richtung der Y-Achse kann für ${}^A\mathbf{t}_B$ eine Standardabweichung von ca.

1,5 mm erwartet werden. Die Standardabweichung für ${}^A\mathbf{t}_B$ ist somit etwas besser als die aus der Geometrie des Stereosystems resultierende theoretische Messgenauigkeit in der X-, Z-Ebene.

Für die in ${}^A\mathbf{R}_B$ enthaltenen Drehwinkel ist eine Standardabweichung von etwa einer Winkelminute zu erwarten (vgl. Abb. 4).

5.2 Untersuchung degenerierter Bewegungen

Um ${}^A\mathbf{T}_B$ nur aus Bewegungen während der Messung bestimmen zu können, ist eine Untersuchung der erreichbaren Genauigkeit bei degenerierten Bewegungen nötig. Dazu wurde in fünf Versuchen die taumelnde Bewegung des Systems immer weiter bis zu einer beinahe translatorischen Bewegung reduziert (s. Tabelle 2). Die in den einzelnen Versuchen ermittelten Standardabweichungen für die Komponenten von ${}^A\mathbf{T}_B$ sind in der Abb. 5 und Abb. 6 zusammengefasst. Die Reduktion des Taumelns wird anhand der Drehwinkel um die Z-Achse dargestellt, die auf der X-Achse des Diagramms aufgetragen sind. Im Schnitt waren in Versuch 5 ca. 18 Punkte sichtbar.

Tabelle 2: Bewegungsparameter der Versuchsreihe

Versuchsnummer	1	2	3	4	5
Orientierung					
Translation in Y-, Z-Richtung [m]	0,3	0,15	0,07	0,03	0,01
Rotation um X-, Y-, Z-Achse [°]	10 3 30	5 1,5 10	2,5 0,8 5	1,3 0,4 2	0,5 0,1 0,8

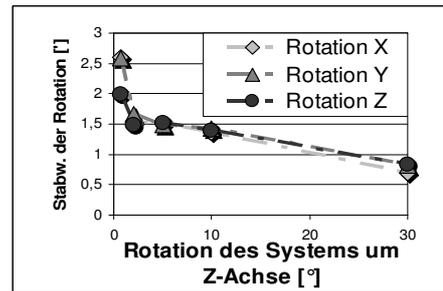
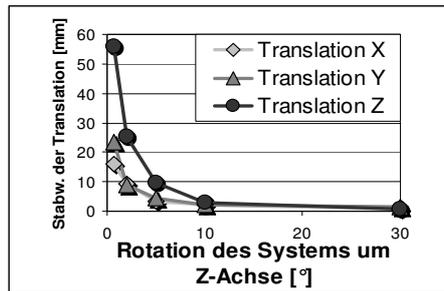


Abb. 5: Standardabweichung für ${}^A\mathbf{t}_B$ bei degenerierten Bewegungen

Abb. 6: Standardabweichung für ${}^A\mathbf{R}_B$ bei degenerierten Bewegungen

Bei einer rein translatorischen Bewegung können, wie in der Tabelle 1 dargestellt, von ${}^A\mathbf{T}_B$ nur noch zwei Parameter der gegenseitigen Rotation ${}^A\mathbf{R}_B$ bestimmt werden. Somit sollte mit der Reduktion des Taumelns die Standardabweichung der Translation stark zunehmen, aber mindestens zwei Parameter der Rotation bestimmbar bleiben.

Die Abb. 5 und 6 zeigen, dass die theoretischen Erwartungen nicht vollständig erfüllt werden. Die Standardabweichung der Translation nimmt bei der Reduktion des Taumelns sehr stark zu, aber es zeigt sich entgegen der Erwartung nicht, dass Komponenten von ${}^A\mathbf{R}_B$ bestimmbar bleiben. Als Grund werden numerische Probleme in der Implementierung vermu-

tet. Allerdings verhält sich die Standardabweichung der Rotation im Vergleich zur Translation auch bei geringem Taumeln noch linear.

6 Ausblick

Gezeigt wurde ein Ansatz, um die Orientierung zwischen zwei Stereosystemen aus der Bewegung zu bestimmen. Gesondert untersucht wurden die Grenzen des Ansatzes, die sich ergeben, wenn nur eingeschränkte Bewegungsformen möglich sind.

Für zukünftige Arbeiten muss die realisierte Implementierung überarbeitet werden, damit die theoretischen Erwartungen für eingeschränkte Bewegungen erfüllt werden. Ebenfalls steht eine Übertragung des Ansatzes auf reale Beispiele noch aus, wo als zusätzliche Herausforderung die Verknüpfung der zu allen Zeitpunkten $t = i$ gesehene Punktwolken zu einem globalen Punktfeld zu lösen ist.

7 Literatur

- Andreff, N., Horaud, R. & Espiau, B. (2001): *Robot Hand-Eye Calibration Using Structure-from-Motion*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 20
- Caspi, Y. & Irani, M. (2002): *Aligning Non-Overlapping Sequences*. International Journal of Computer Vision, Vol. 48.
- Chen, H. (1991): *A Screw motion approach to uniqueness analysis of head-eye geometry*. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Chou, J. & Kamel, M. (1988): *Quaternions approach to solve the kinematic equation of rotation, $A_A A_x = A_x A_b$, of a sensor-mounted robotic manipulator*. , Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Luong, Q., Faugeras, O. (1993): *Self-calibration of a stereo rig from unknown camera motions and point correspondences*. Rapports de recherche No. 2014, INRIA.
- Oskiper, T.; Zhu, Z.; Samarasekera, S. & Kumar, R. (2007): *Visual Odometry System Using Multiple Stereo Cameras and Inertial Measurement Unit*. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Shiu, Y., Ahmad, S. (1987): *Finding the mounting position of a sensor by solving a homogeneous transform equation of the form $AX=XB$* . Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.