
Genauigkeitsuntersuchungen zur photogrammetrischen Positionsbestimmung eines Multi-Kamera-Systems

Carsten GÖTZ, Sebastian TUTTAS, Konrad EDER, Ingo NEUMANN, Wolfgang LIEBL
und Uwe STILLA

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt einen Versuch zur Bestimmung der Position und Orientierung (6DOF) einer Kameraplattform im Raum. Die Plattform wird dabei innerhalb eines vorher photogrammetrisch eingemessenen Markenfeldes bewegt. Aus den Beobachtungen dieses Markenfeldes durch die auf der Platte montierten Industriekameras, werden die 6 DOF über räumlichen Rückwärtsschnitt oder Bündelblockausgleichung bestimmt. Mit Hilfe eines Lasertrackers wird die Position der Plattform, mit Hilfe von dort angebrachten CCR/TBR-Nestern, unabhängig eingemessen. Der Vergleich der beiden Messverfahren zeigt Übereinstimmungen der Position im Bereich von wenigen 1/10 mm.

1 Einleitung

Die photogrammetrische Bestimmung von Position und Orientierung eines Objektes (6DOF) wird häufig über dessen Beobachtung von ein oder mehreren Kameras gelöst. Dazu ist das Objekt mit photogrammetrischen Marken bestückt. Genauigkeitsuntersuchungen zu dieser Konfiguration finden sich z. B. in LUHMANN (2009). Die inverse Version dieser Methode ist ein Kamera-System, das fest mit dem zu positionierenden Objekt (z. B. für Werkzeugpositionierung an Roboter) verbunden ist. Das Kamera-System selbst bewegt sich dabei in einem dreidimensionalen Markenfeld. Der hier vorgestellte Versuch soll dazu dienen, das Genauigkeitspotenzial eines solchen Systems unter der Verwendung von Industriekameras zu untersuchen. Ein ähnlicher Versuch, bei dem das Kamera-System jedoch nur entlang einer Linearachse verschoben wurde, ist in GÖTZ ET AL. (2011) beschrieben. In diesem Fall wurde ein Interferometer als Referenz verwendet wohingegen hier als überprüfendes Messsystem ein Lasertracker eingesetzt wird. Die eingesetzte Kameraplattform wird an einem Roboter montiert und kann mit unterschiedlichen Kameraanordnungen bestückt werden.

2 Versuchsaufbau

Der Versuch wurde in einem klimatisierten Messraum durchgeführt, der mit einem 6-Achs-Roboter der Firma KUKA ausgestattet ist. Dieser Roboter eignet sich wegen seiner hohen Wiederholgenauigkeit und einem Arbeitsbereich von 5 m horizontal und 3 m vertikal insbesondere für die Simulation unterschiedlicher Positionen und Orientierungen.

Innerhalb des Raumes wurde ein Markenfeld mit über 1700 Marken (davon ein Viertel codiert) an 3 Ebenen erstellt (vgl. Abbildung 1, links). Die verwendeten Zielmarken haben einen Durchmesser zwischen 10 und 40 mm. Damit soll gewährleistet werden, dass bei unterschiedlichen Aufnahmeentfernungen (bis ~5 m) und Kamerakonfigurationen immer eine ausreichende Zahl an Marken mit mindestens 10 Pixel Durchmesser in den Bildern abgebildet werden. Die Zielmarken wurden nach einer vorgegebenen Systematik (vgl. Abbildung 1, rechts), mit einem sich auf jedem Quadratmeter wiederholenden Muster, an den Wänden und am Boden des Messraums verteilt.

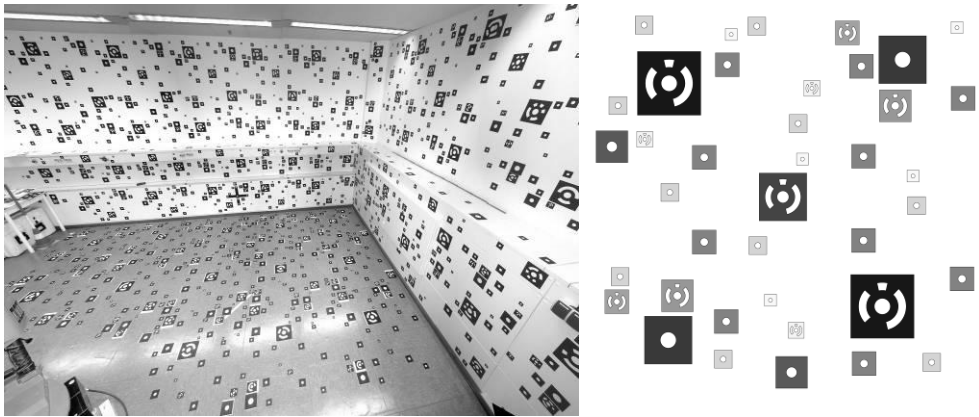


Abb. 1: Zielmarkenfeld im Versuchsraum (links) und verwendetes Markenschema, welches sich quadratemeterweise wiederholt (rechts)

Die verwendete Kameraplattform mit einer Größe von ca. 60 x 17 cm ist für die Montage von unterschiedlichen Kameraanordnungen geeignet. Für die Bestückung der Plattform wurden während des Versuchs vier Industriekameras des Types SVCam-ECO Line mit einer Auflösung von 2448 x 2050 Pixel verwendet. Es kamen je drei Objektive mit einer Brennweite von 6 bzw. 8 mm sowie zwei Fish-Eye-Objektive zum Einsatz.

Zur messtechnisch hochgenauen, unabhängigen Kontrolle der Kameraplattform im Raum wurde ein Lasertracker vom Typ LTD 500 der Firma *Leica* verwendet. Bei einem Lasertracker handelt es sich um ein hochpräzises polares 3D-Messsystem, das mit Hilfe zweier Richtungen und einer interferometrisch gemessenen Distanz die Koordinaten eines Punktes im Koordinatensystem des Lasertrackers bestimmt. Die typische Messgenauigkeit (1 sigma) einer 3D-Position liegt bei ca. $\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$, sodass bei den maximal auftretenden Entfernungen von ca. 7 m die Messgenauigkeiten bei ca. 0,05 mm (1 sigma) für eine Position liegen.

Der Laborraum ist zum Nachweis der Standsicherheit des Messinstruments mit einem stabilen Festpunktfeld für 1.5“ Corner-Cube-Reflektoren (CCR) ausgestattet. Die 11 Nester mit Magnet spannen einen dreidimensionalen Messraum auf, in dessen Mitte der Roboter mit ausgerichteter Arbeitsplatte montiert ist. Zur Verdichtung des Lasertracker-Referenznetzes wurden zusätzliche CCR-Nester temporär im Bereich der photogrammetrischen Zielzeichen angebracht. Durch Verwendung von speziell für die photogrammetrische Erfassung optimierten 1.5“ Kugelzielzeichen konnten die Nester auch

für die Kameras genutzt werden und ermöglichten somit einen hochgenauen Übergang zwischen dem Koordinatensystem des Lasertrackers und dem Koordinatensystem des Markenfeldes der Photogrammetrie.

3 Versuchsablauf

3.1 Referenzpunktfeld

Die Einmessung des Referenzpunktfeldes erfolgte photogrammetrisch mit einer Nikon D3x. Hierbei wurden sechs CFK Maßstäbe als Maßstabsinformation verwendet, deren Anordnung aus Abbildung 2 zu entnehmen ist. Die Bestimmung der Koordinaten der Referenzmarken erfolgte über einen Bündelblock mit über 400 Bildern, wobei jeder Objektpunkt durchschnittlich über 14,4 Strahlen verfügte.

Zur Verknüpfung der photogrammetrisch eingemessenen Marken und des Lasertracker-Koordinatensystems wurden während der photogrammetrischen Messung die oben erwähnten Kugelzielzeichen in die CCR-Nester eingesetzt. Auf diese Weise wurden 10 Passpunkte realisiert, die sowohl photogrammetrisch als auch mit dem Lasertracker eingemessen werden können (vgl. Abbildung 2). Nach der Ausgleichung des photogrammetrischen Bündelblocks sind die so bestimmten Koordinaten der Referenzmarken über die Passpunkte in das Lasertracker-Koordinatensystem transformiert worden. Dazu wurden diese insgesamt 6-mal mit dem Lasertracker eingemessen. Dies diente weiterhin dazu die Stabilität des Lasertrackers nachweisen zu können.

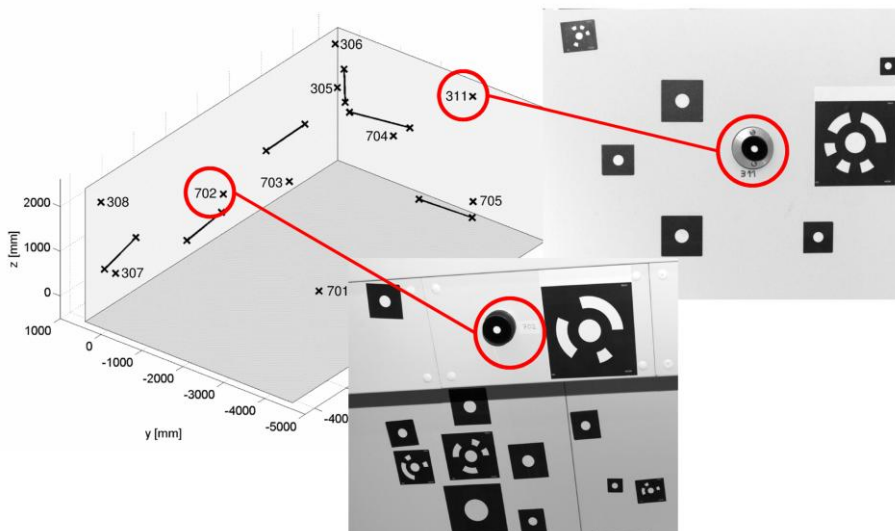


Abb. 2: Anordnung der CFK-Maßstäbe (Linien) sowie der identischen Passpunkte (Kreuze mit Punktnummern) für Lasertracker und Photogrammetrie

3.2 Messpositionen der Kameraplattform

Vor den eigentlichen Messungen wurde die innere Orientierung jeder Kamera mit Hilfe eines 3D-Kalibrierkörpers mit einem aus über 3000 Punkten bestehenden Punktfeld bestimmt.

Innerhalb des errichteten Referenzpunktfeldes wurden Aufnahmen mit dem Kamerasystem an vier verschiedenen Positionen (I bis IV) mit Entfernungen zwischen 1 und 5 m zum Markenfeld gemacht. Dabei wurde an jeder Position die Ausrichtung der Kameraplatte viermal leicht variiert (Varianten 1 bis 4 an jeder Position). Die an die Arbeitshand des Roboters befestigte Kamera-Plattform (vgl. Abbildung 3) wurde über ein einfaches Teach-In Programm an die festgelegten Positionen manövriert. So wurden insgesamt 16 Messepochen pro Versuch angefahren. Die Aufnahmeabfolge, mit Orientierungsvariationen an einer Position, soll ermöglichen, dass die Positioniergenauigkeit auch anhand ihres Abstandes zum Referenzmarkenfeld bewertet werden kann.

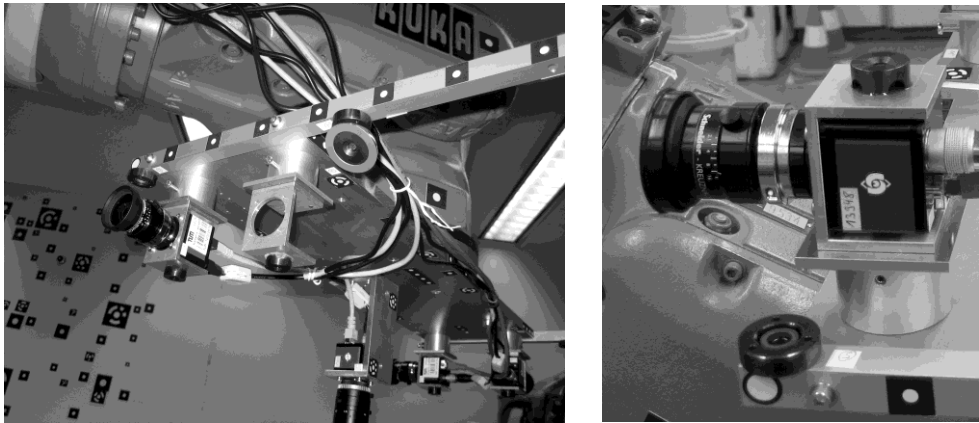


Abb. 3: Kameraplattform mit den CCR- und TBR-Nestern für den Lasertracker

Es wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt, zwei davon mit 6 mm Objektiven einer mit 8 mm Objektiven. Die Anordnung wurde so gewählt, dass die drei Kameras senkrecht zueinander stehende Aufnahmerichtungen aufweisen. Zusätzlich erfolgten zwei Aufnahmeserien unter der Verwendung von Fish-Eye-Objektiven, bei denen jedoch keine Kontrollmessung mit dem Lasertracker erfolgte.

In Abbildung 4 links sind die Aufnahmen des 3-Kamera-Systems an Position I (Variation 1) zu sehen. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 4 rechts die Aufnahmesituation mit einer Fish-Eye-Stereo-Anordnung an ähnlicher Position gezeigt. Die Blickrichtung entspricht dem Bild oben rechts in der Abbildung 4 links.

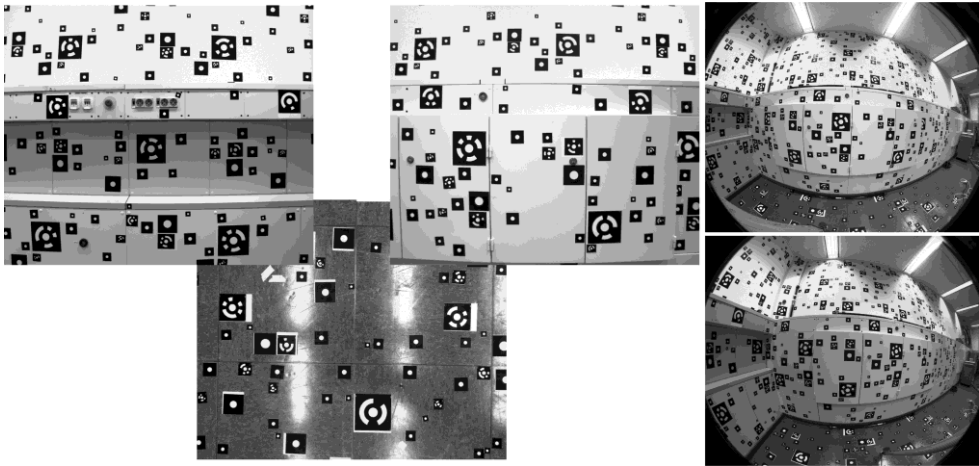


Abb. 4: Aufnahmen des 3-Kamera-Systems an Position I (Variation 1) (links) sowie Aufnahmen eines Fish-Eye-Stereo-Systems an ähnlicher Position (rechts)

3.3 Plattform-Messungen des Lasertrackers

Zur Bestimmung von Position und Orientierung der Kamera-Plattform sind auf dieser insgesamt 10 Passbohrungen eingebracht worden. Es wurde eine Einmessung der Kameraplattform über diese Punkte zu jeder Aufnahmesituation durchgeführt. Je nach Sichtbarkeit durch den Lasertracker und der Kameraanordnung konnten bis zu acht Magnetadapter für die Aufnahme eines 0,5“ Toolingball Reflectors (TBR) darin befestigt werden (siehe Abbildung 3). Für jeden Versuch wurde außerdem jeweils eine Referenzmessung durchgeführt, bei der die Plattform so gestellt wurde, dass alle 10 Punkte angemessen werden konnten.

4 Auswertung

4.1 Stabilität von Festpunktfeld und Kameraplattform

Die qualitative und quantitative Bewertung der Lasertrackermessungen muss die zeitliche Stabilität des Lasertrackers, des Festpunktfeldes sowie der Kameraplattform mit einbeziehen. Zunächst wurde die Stabilität des Festpunktfeldes und der Kameraplattform mit einer Deformationsanalyse untersucht (vgl. z. B. WELSCH ET AL. 2000). Dafür wurden alle Messungen des Festpunktfeldes und der Kameraplattform mittels 6 Parameter-Transformation jeweils in ein mittleres gemeinsames Koordinatensystem überführt. Die Gewichtung der Messungen für die Transformationen wurde anhand der Lasertracker-Genauigkeiten vorgenommen. Die Stabilität der Plattform und des Referenzfestpunktfeldes kann anhand der 3D-Restklaffungen (Abweichung der Einzelpunkte zum mittleren Datum) beurteilt werden. Hierbei ergaben sich maximale Abweichungen von 0,036 mm für das Festpunktfeld und 0,059 mm für die Plattform, sodass die innere Geometrie von Festpunktfeld und Plattform während eines Versuches eine hohe Genauigkeit aufweist. Die

einzelnen Abweichungen zu den Versuchen sind in Tab. 1 zusammengestellt. Dabei ist zu beachten, dass nur die Stabilität während der jeweiligen Versuche analysiert wurde.

Tabelle 1: 3D-Stabilität des Referenzfestpunktfeldes und der Plattform

Untersuchte Konfiguration	RMS	Mittlere Abw.	Max. Abw.
Referenzfestpunktfeld	0,012 mm	0,010 mm	0,036 mm
Plattform (Versuch 1)	0,014 mm	0,010 mm	0,055 mm
Plattform (Versuch 2)	0,015 mm	0,011 mm	0,059 mm
Plattform (Versuch 3)	0,014 mm	0,010 mm	0,053 mm

Die Restklaffungen der Passpunkte nach der Transformation vom photogrammetrischen Referenzpunktfeld in das mittlere Koordinatensystem der Festpunkte liegen im Mittel bei 0,023 mm und maximal bei 0,039 mm (ohne Punkt 701, vgl. Abbildung 2).

Zur Ermittlung der endgültigen Koordinaten der Plattformpunkte wurden die Messungen der Plattform den jeweils zeitnahesten Messungen des Lasertrackers im Festpunktfeld zugeordnet. Diese einzelnen Messabschnitte wurden dann mittels einer 6 Parameter Helmertransformation in das Koordinatensystem des Festpunktfeldes transformiert. Bei der Transformation der einzelnen Abschnitte in das Festpunktfeld wurden Bewegungen des Lasertrackers von bis zu 0,5 mm detektiert. Durch die zeitliche Zuordnung der Plattformmessungen und den geringeren Abständen der Plattformpunkte als das Festpunktfeld können die Genauigkeiten (1 Sigma) der Plattformpunkte mit ca. 0,2-0,3 mm für Versuch 1 und ca. 0,1 mm für Versuch 2 und 3 abgeschätzt werden.

4.2 Photogrammetrie

Für die Bestimmung der äußeren Orientierung der Kameras auf der Plattform aus dem Referenzpunktfeld sollen unterschiedliche Auswertemethoden getestet werden. Zunächst kann die Position jeder Kamera einzeln über einen Rückwärtsschnitt bestimmt werden. Alternativ können alle Bilder eines Messversuches gemeinsam über eine Bündelblockausgleichung ausgewertet werden. In diesem Fall bietet sich auch die Möglichkeit die relative Orientierung der Kameras zueinander mitzuschätzen. Da die Platte als starr gilt, können diese Orientierungen über alle Epochen eines Versuches hinweg als konstant angesehen werden. Daher geht die relative Orientierung zwischen der Referenzkamera und jeder weiteren Kamera mit nur jeweils 6 Unbekannten über alle Epochen ein. Somit wird zum Einen das Wissen über die konstante Kameraanordnung in die Bündelblockausgleichung mit eingeführt, zum Anderen wird die Überbestimmung erhöht, da die Unbekannten reduziert werden. Die Anzahl der Unbekannten u der äußeren Orientierung für n_{cam} Kameras und i Messepochen ergibt sich bei der Bestimmung für jede Kamera einzeln (Formel 1) zu

$$u_{\text{ä.o.}} = 6 \cdot i \cdot n_{cam} \quad (1)$$

und bei konstanten relativen Orientierungen (Formel 2) zu

$$u_{\text{ä.o.}} = 6 \cdot i + 6 \cdot (n_{cam} - 1) \quad (2)$$

Aus den beiden Gleichungen folgt, dass sich bei 16 Messepochen und der Verwendung von 3 Kameras eine Reduzierung von 288 auf 108 Unbekannte der äußeren Orientierung ergibt.

Des Weiteren soll überprüft werden, welche Auswirkungen die Veränderung von Markenanzahl und Markenverteilung auf die Genauigkeit hat. Werden ausreichend Marken für die Berechnung verwendet, kann auch eine Ausgleichung mit Selbstkalibrierung durchgeführt werden. Ansonsten wird auf die oben beschriebene Testfeld-Kalibrierung zurückgegriffen.

4.3 Abgleich von Lasertracker und photogrammetrischen Messungen

Für die Bestimmung quantitativer Genauigkeitsmaße für die Positioniergenauigkeit der Plattform aus den photogrammetrischen Messungen wurde folgende Vorgehensweise gewählt: Zunächst werden die einzelnen Messepochen auf das System der Referenzmessung der Kameraplatte transformiert (vgl. Abbildung 5). Dabei werden alle in einer Epoche beobachteten Punkte zur Bestimmung der Transformationsparameter herangezogen. Bei fehlerfrei bestimmten Projektionszentren der einzelnen Kameras ist zu erwarten, dass die Projektionszentren aller Messepochen für eine einzelne Kamera im Zielsystem im Rahmen der Messgenauigkeit des Lasertrackers die gleichen Koordinatenwerte aufweisen. Da die photogrammetrische Bestimmung der Kameraprojektionszentren jedoch selbst ebenso mit Unsicherheiten behaftet ist, ist deren Abweichung nach erfolgter Transformation als quantitatives Maß für die Genauigkeit der Position anzusehen.

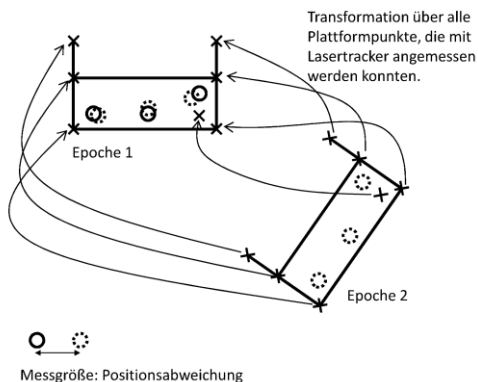


Abb. 5: Geometrische Interpretation des Vergleiches zwischen beiden Messsystemen

Der Wahl dieses Genauigkeitsmaßes wurden folgenden Überlegungen zu Grunde gelegt: Eine absolute Kontrolle der Kameraposition (X_0 , Y_0 , Z_0 der äußeren Orientierung) kann nicht erfolgen, da das Projektionszentrum der Kamera nicht direkt mit dem Lasertracker angemessen werden kann. Ebenso ist auch die direkte Überprüfung der Orientierung (ω , φ , κ) nicht möglich.

Statt nun die Position des Projektionszentrums zu bestimmen besteht die Möglichkeit die Vektoren der Positionsveränderung der Plattform aus Kamera- und Lasertracker-Messungen zu vergleichen. Doch auch diese Verschiebungsvektoren von Lasertracker-Plattformpunkten (x_{LTP} , y_{LTP} , z_{LTP}) und Kamerapositionen im Objektraum, auch wenn sie im gleichen Koordinatensystem vorliegen, sind nicht für einen Abgleich geeignet, da sie sich

bezüglich des gewählten Koordinatensystem (hier das System des Lasertrackers) unterschiedlich bewegen (die Indizes in Formel 3 stehen für die jeweilige Messepoche):

$$\begin{pmatrix} x_{LTP,2} - x_{LTP,1} \\ y_{LTP,2} - y_{LTP,1} \\ z_{LTP,2} - z_{LTP,1} \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} XO_2 - XO_1 \\ YO_2 - YO_1 \\ ZO_2 - ZO_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Der Zusammenhang in Formel 3 soll auch in Abbildung 6 verdeutlicht werden, in der die Verschiebungsvektoren unterschiedliche Längen aufweisen.

Was jedoch konstant bleibt, ist die relative Orientierung, beschrieben in Formel 4 mit homogenen Koordinaten, zwischen dem Koordinatensystem, das durch die Lasertracker-Plattformpunkte aufgespannt wird und dem Kamerakoordinatensystem jeder Kamera.

$$R_{LTP \rightarrow Cam_i} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = const \quad (4)$$

Diese relative Orientierung ist zwar wiederum unbekannt, weshalb aber auf das am Beginn des Abschnitts beschriebene Verfahren zurückgegriffen werden kann, bei der die Plattformpunkte jeder Epoche inklusive der äußeren Orientierungen der Kameras mit einer 6-Parameter-Transformation auf eine Referenzplattenepoche überführt werden. Es ergibt sich aus der Bedingung in Formel 4, dass dann die äußeren Orientierungen der Kameras konstant bleiben müssen. Ist dies nicht der Fall schließen die Abweichungen folgende Fehler mit ein:

- Messunsicherheiten des Lasertrackers und Instabilitäten der Plattform führen zu Restklaffungen bei der Transformation auf die Referenzplatten.
- Fehlerhaft bestimmte äußere Orientierungen aus der Photogrammetrie (umfasst die Schritte Einmessung Referenzpunktfeld und Berechnung der äußeren Orientierungen aus den Aufnahmen der Plattformkameras).
- Datumsveränderungen aufgrund von Bewegungen des Lasertrackers.

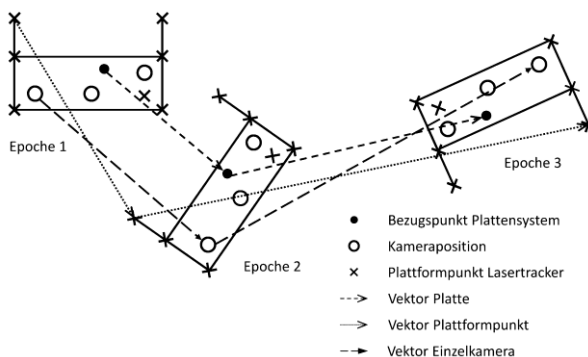


Abb. 6: Verschiebungsvektoren zwischen aufeinanderfolgenden Messepochen

4.4 Ergebnisse

Im Folgenden wird ein Ergebnis mit konstanter relativer Orientierung zwischen den Kameras gezeigt. Die Positionen der Referenzkamera wurde über eine Bündelblockausgleichung für alle Epochen bestimmt. Dabei lag die maximale geschätzte Standardabweichung für eine einzelne Position bei 0,024 mm. Abbildung 7 zeigt die Variationen der, auf die Referenzepeche transformierten, Koordinaten. Es sind die Abweichungen der jeweiligen Kameraposition von der mittleren Kameraposition über alle Epochen aufgetragen.

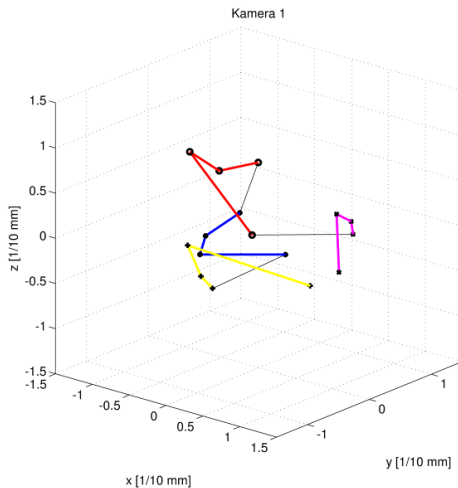


Abb. 7: Variation der Koordinaten des Kamera-projektionszentrums bzgl. des Mittelwertes über alle Epochen nach Transformation auf die Referenzplattenposition. Die farblich gruppierten Werte gehören jeweils zu den vier Varianten einer Position.

Die maximale Variation der Koordinaten liegt bei 0,274 mm für die x-Komponente (Standardabweichung 0,097 mm), 0,182 mm für die y-Komponente (Standardabweichung 0,058 mm) und 0,171 mm für die z-Komponente (Standardabweichung 0,054 mm). Diese Streuung kann jedoch nicht eindeutig in die Bestandteile von Lasertracker und photogrammetrischer Positionsbestimmung aufgeteilt werden, da, wenn man von der Messgenauigkeit des Lasertrackers absieht, auch die Bewegungen des Lasertrackers zwischen den einzelnen Messpositionen in die gezeigten Abweichungen mit eingehen.

5 Fazit und Ausblick

Wir haben einen Versuchsaufbau zur Kontrolle der photogrammetrischen Positioniergenauigkeit einer Kameraplattform mit einem Lasertracker vorgestellt. Dazu wurden fest mit der Kameraplattform verbundene Lasertracker-Nester angebracht. Das Maß für die Genauigkeit, die Variation der Position der Kameras nach Transformation auf eine Plattform-Referenzposition, wurde aus der Bedingung hergeleitet, dass sich Kamerapositionen und Lasertracker-Plattformpunkte zueinander nicht bewegen und somit ein starres System bilden. Die maximale Variation der Position bei konstanter relativer Orientierung zwischen drei zueinander senkrecht blickenden Kameras wurde mit 0,37 mm (3D) bestimmt.

Im weiteren Verlauf sollen alle Variationen bezüglich der Parameter bei der Bestimmung der photogrammetrischen Lösung, insbesondere die Variation der Markenzahl, untersucht werden.

Es zeigte sich, dass für den Abgleich von photogrammetrischer und Lasertracker Messung eine wesentliche Unsicherheitsquelle in der zeitlichen Stabilität des Lasertrackers lag, womit die oben beschriebene Variation die gemeinsame Unsicherheit von Photogrammetrie und Lasertracker beschreibt. Für einen weiteren Versuch dieser Art müssten deshalb häufigere Festpunktfeld-Messungen und ggf. eine Überwachung des Lasertrackers mittels Neigungsmesser durchgeführt werden.

Als alternative Überprüfungsmethode könnte die Einmessung der Platte über eine externe Photogrammetrie in Frage kommen. Dabei würden die Plattformpunkte für den Lasertracker durch photogrammetrische Marken ersetzt werden.

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des von der Bayerischen Forschungstiftung (BFS) geförderten Vorhabens AZ-876-09 durchgeführt.

Das Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München bedankt sich bei Ingo Neumann und Wolfgang Liebl vom Geodätischen Labor der UniBw München für die Bereitstellung des Messraums sowie die Durchführung der Lasertracker-Messungen und der Robotersteuerung.

Literatur

Götz, C., Tuttas, S., Hoegner, L., Eder, K. & Stilla, U. (2011): *Accuracy evaluation for a precise indoor multi-camera pose estimation system*. In: Stilla U, Rottensteiner F, Mayer H, Jutzi B, Butenuth M (eds) PIA11 - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII (3/W22), S. 97-102.

Luhmann, T. (2009): *Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64(3), S. 275-284.

Welsch, W., Heunecke, O. & Kuhlmann, H. (2000): *Handbuch Ingenieurvermessung - Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Wichmann Verlag, Heidelberg.