

## Konzepte zur optischen 3D-Navigation von Sensoren

THOMAS LUHMANN & VOLKER SAHRHAGE, Oldenburg

**Keywords:** Remote Sensing, photogrammetry, sensor navigation, 6DOF, stereo camera, resection

**Summary:** *Concepts for optical 3D sensor navigation.* The paper discusses possibilities for the determination of position and orientation of measuring sensors by one or more cameras. The navigation of sensors usually provides six degrees of freedom (6 DOF) in real-time. The task can be solved by only one camera, by stereo vision systems or by multiple cameras. The required relation between different local and world coordinate systems is determined by reference points. Some example applications demonstrate the potential of optical 3D navigation.

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag werden Möglichkeiten zur Bestimmung von Lage und Orientierung von messenden Sensoren diskutiert durch eine oder mehrere Kameras. Die Navigation von Sensoren erfolgt üblicherweise in sechs Freiheitsgraden (6 degrees of freedom, 6DOF) und in Echtzeit. Die Aufgabe kann mit nur einer Kamera, mit Stereoaufnahmesystemen oder mit einer Vielzahl von Kameras gelöst werden. Der notwendige Bezug zwischen den verschiedenen lokalen und übergeordneten Koordinatensystemen erfolgt über Referenzpunkte. Einige exemplarische Anwendungsmöglichkeiten zeigen das Potential der optischen 3D-Navigation auf.

---

### 1 Einleitung

Bereits seit mehreren Jahren sind Messsysteme auf dem Markt, mit denen freihändig geführte Sensoren, Werkzeuge oder Maschinen (Roboter) im Raum orientiert und gemessen werden können. Das zur Navigation genutzte Aufnahmesystem variiert dabei von bildgebenden Ein- und Mehrkamerasystemen (z. B. AICON ProCam/TraceCam, AXIOS 3D CamBar, Steinbichler T-Scan, Metris K-Serie) bis zu Lasertracker-gestützten Lösungen (z. B. Leica T-Scan). Allen Systemen gemeinsam ist die Aufgabe, die sechs Freiheitsgrade (6 DOF) eines Körpers im Raum zu bestimmen, wobei die mathematischen Lösungen von der 3D-Transformation gemessener 3D-Punktgruppen (Zwei- oder Mehrkamerasysteme), über Methoden basierend auf Rückwärtsschnitten (Einkameralösungen) bis hin zu hybriden Sensorensystemen (Entfernungsmessungen, INS) reichen. Eine aktuelle Übersicht gibt KYLE (2005).

Derzeit verfügbare optische Navigationslösungen bestehen größtenteils aus zwei bis vier synchron arbeitenden digitalen Kameras mit nicht veränderbarer äußerer Orientierung, aus deren Aufnahmen die Orientierungswerte eines mobilen Sensors berechnet werden. Diese Systeme liefern in einem relativ kleinen, definierten Messvolumen gute Messgenauigkeiten von wenigen Zehntel Millimetern. Mehr Flexibilität erlauben photogrammetrische Online-Systeme, bei denen z. B. zwei Kameras frei positioniert und über ein Referenzfeld orientiert werden (z. B. GSI V-STARS/M).

Die Signalisierung der verschiedenen Sensoren (z. B. Handtaster, Oberflächenscanner) erfolgt dabei sowohl passiv (retroreflektierende Zielmarken) als auch aktiv (LEDs). Einschränkungen bestehen hier allerdings in der Größe des Messvolumens sowie in den von der Aufnahmeentfernung abhängigen Messgenauigkeiten. Weitgehend von der Entfernung unabhängige Systeme nutzen einen Lasertracker mit optischer

Einheit zur Navigation (DOLD 2004). Im Gegensatz zu den rein optisch arbeitenden Systemen bietet der Lasertracker ein weitaus größeres Messvolumen von bis zu 30 m rund um den Standpunkt bei relativ homogenen und hohen Genauigkeiten im gesamten Messvolumen. Eine Alternative zum Lasertracker stellen Indoor-GPS-Systeme dar. Der Sensor wird hier durch Laserlichtwellentriangulation navigiert (ArcSecond 2002).

Auf dem Markt weniger gut repräsentiert sind Einkamerasysteme. Die Orientierung der einzelnen Kamera wird über Rückwärtschnitte bestimmt. Es ergibt sich die Möglichkeit, entweder den Sensor mit der Kamera zu verbinden und über ein im Raum angebrachtes Passpunktfeld zu orientieren, oder den Sensor direkt mit der Kamera zu beobachten (ggf. vor einem Passpunktfeld). Gerade die erste Möglichkeit wäre für den Einsatz in räumlich eingeschränkten Situationen geeignet. Wenig eingesetzt werden bisher frei konfigurierbare Systeme mit (beliebig) vielen Kameras, die z. B. einen kompletten Messraum abdecken können. Da für die o. g. Aufnahmesysteme eine Reihe von Anwendungen denkbar sind, sollen im folgenden deren konzeptionellen Ansätze verdeutlicht und Anwendungsbeispiele aufgezeigt werden.

## 2 Navigation mit Ein- und Mehrkamerasystemen

### 2.1 Koordinatensysteme

Um einen Sensor navigieren zu können, sind je nach Aufnahmesystem eine entsprechende Anzahl an Koordinatensystemen zu verknüpfen (Abb. 1). Das Kamera- oder Navigatorsystem  $xyz_K$  ist ein örtliches, in der Kamera definiertes 3D-Koordinatensystem, in dem die Bildmessungen definiert sind. Mehrere Kameras können relativ zueinander orientiert in einem Modellkoordinatensystem  $xyz_M$  vorliegen, in dem lokale 3D-Koordinaten gemessen werden können. Das Sensorkoordinatensystem  $xyz_S$  ist das System, in dem der Sensor seine individuellen Messgrößen erzeugt (Distanzen, Richtungen, 3D-

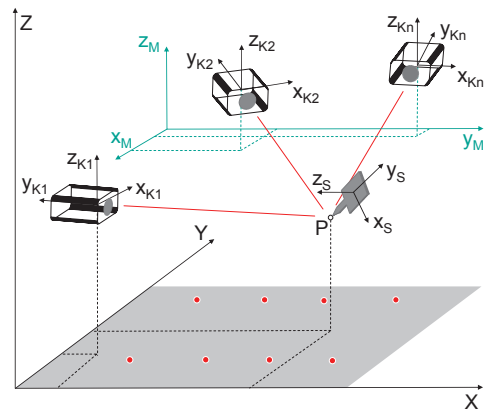


Abb. 1: Koordinatensysteme im Ein- und Mehrkamerasystem.

Koordinaten). Das Objekt- oder Gesamtkoordinatensystem  $XYZ$  schließlich ist das Koordinatensystem, in dem die gewonnenen 3D-Koordinaten für die Anwendung berechnet werden.

Jedes Navigationssystem wird über Passpunkte im Objektkoordinatensystem orientiert. Sowohl in einem Ein- als auch in einem Mehrkamerasystem kann dann ein entsprechend signalisierter Sensor online navigiert werden. Die Lage und Orientierung des Sensors wird über die geometrisch eindeutige Signalisierung (Lokatorpunkte) berechnet.

### 2.2 Zeitabhängige Größen

Zeit spielt in dynamischen Messaufgaben eine zentrale Rolle, da Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Navigation oder Online-Messung wesentlich von der Bewegungsgeschwindigkeit der beteiligten Komponenten abhängen.

Die maximale Messfrequenz des Navigationssystems ergibt sich im Wesentlichen aus

- der maximalen Bildfrequenz der einzelnen Kameras,
- der Bandbreite der digitalen Bilddatenübertragung,
- der Synchronisierung mehrerer Kameras,
- der Anzahl der gleichzeitig zu messenden Punkte,
- der zu erreichenden Messgenauigkeit,

- der Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Sensor und Navigationssystem
- und der verfügbaren Rechnerleistung.

Ein Synchronisationsfehler zwischen zwei oder mehr Kameras führt zu einem räumlichen Messfehler. Für eine Aufnahmekonfiguration nach dem Stereonormalfall beträgt der Fehler in Aufnahmerichtung  $\Delta Z$  (LUHMANN 2003, siehe Abb. 2):

$$\Delta Z = \frac{h}{b} \Delta S = \frac{h}{b} \cdot \Delta t \cdot v$$

mit

$\Delta t$ : Synchronisationsfehler

$v$ : Objektgeschwindigkeit

$\Delta S$ : Wegstrecke

$h$ : Aufnahmeabstand

$b$ : Basislänge

und parallel zur Bildebene

$$\Delta X = \frac{x'}{c} \Delta Z$$

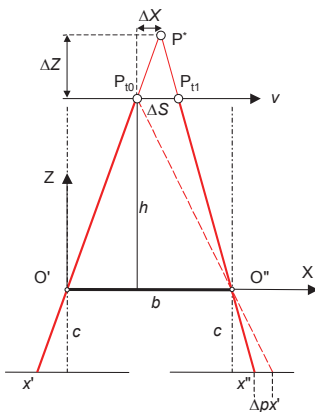
$$\Delta Y = \frac{y'}{c} \Delta Z$$

mit

$x', y'$ : Bildkoordinaten

$c$ : Kamerakonstante

Die erreichbare 3D-Messgenauigkeit ist weiterhin abhängig von zahlreichen Einflussfaktoren wie z. B. der optischen Abbil-



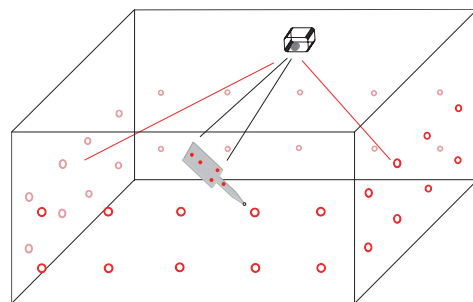
**Abb. 2:** Lage- und Distanzfehler durch Synchronisationsfehler bei zwei Kameras.

dingsqualität, Belichtungszeit (Bewegungsunschärfe), Kalibrierung und Orientierung, Aufnahmekonfiguration, Abbildungsmaßstab und Bildmessgenauigkeit.

### 2.3 Navigation mit einer Kamera

Einkamera-Navigationssysteme basieren grundsätzlich auf dem Prinzip des räumlichen Rückwärtsschnittes, mit dem die sechs Freiheitsgrade zwischen einer Kamera und einem räumlichen Referenzobjekt bestimmt werden. Das Prinzip wurde bereits von GODDING et al. (1997) zur Roboterkalibrierung eingesetzt. Einkamerasysteme sind frei von Synchronisationsproblemen und lassen sich durch Strahlteiler auch als Stereo- oder Mehrkamerasysteme realisieren (LUHMANN 2005a, PUTZE & HOYER 2005).

Ein Einkamerasystem kann auf verschiedene Arten konfiguriert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Kamera über im Raum verteilte Passpunkte direkt im Objektkoordinatensystem zu orientieren (Abb. 3). Eine Umsetzung dieses Prinzips besteht darin, dass die Kamera den Sensor vor einem Passpunktfeld beobachtet, so dass die 6DOF-Bestimmung zwischen Sensor/Lokator und Referenzobjekt erfolgt (z. B. AICON WheelWatch). Das Genauigkeitsverhalten eines Einkamerasystems zur 6DOF-Bestimmung wird in LUHMANN (2005) untersucht. Alternativ wird die Kamera direkt mit dem Sensor verbunden. In diesem Fall bilden Kamera und Sensor ein geschlossenes System, in dem die Orientierung zwischen Sensor und Kamera bekannt ist (AICON ProCam). Ist der Sensor



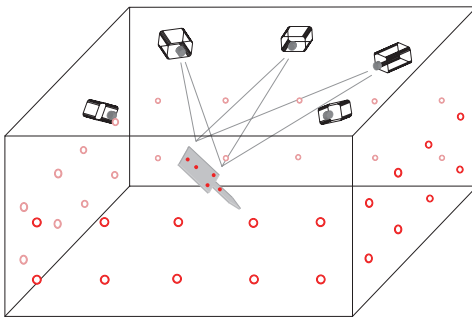
**Abb. 3:** Navigation mit einem Einkamerasystem.

mit hinreichend vielen ( $\geq 4$ ) Lokatorpunkten versehen, ist die Orientierung der Kamera auch relativ zum Sensor ohne zusätzliches Passpunktfeld möglich. Die Messwerte liegen in diesem Fall nur im Kamerakoordinatensystem vor.

Bei ausreichender räumlicher Verteilung der Objektpunkte lassen sich auch die Parameter der inneren Orientierung aus nur einem Bild kalibrieren. Werden alle üblichen Kameraparameter eingeführt, erhöht sich die Zahl der Bestimmungselemente auf 16 (sechs der äußeren und zehn der inneren Orientierung). Es sind für diesen Fall also mindestens acht räumlich verteilte XYZ-Passpunkte erforderlich.

#### 2.4 Navigation mit mehreren Kameras

Die einfachste Realisierung eines Mehrkameranavigationssystems ist durch eine Stereokamera gegeben, deren Einzelkameras über eine starre mechanische gegenseitige Verbindung und eine über einen längeren Zeitraum geltende relative Orientierung verfügen. Derartige Systeme werden verbreitet in der Medizintechnik als optische Navigationssysteme eingesetzt (z. B. NDI Polaris oder AXIOS 3D CamBar), sind aber auch im industriellen Umfeld als Trackingsysteme im Einsatz (z. B. Metris K-Serie). Erweiterte Systeme nutzen drei oder vier fest mit einander verbundene Kameras (z. B. AICON TraceCam). Hierbei ist eine Sensor- oder Objektverfolgung auch dann möglich,



**Abb. 4:** Navigation im verteilten Mehrkamera-System.

wenn eine Kamera zwischenzeitlich verdeckt wird.

Da ein verteiltes Mehrkameranavigationssystem (Abb. 4) nicht über eine bekannte, starre Verbindung der einzelnen Kameras verfügen würde, wird die Orientierung und Kalibrierung jeder Kamera durch Rückwärtschnitte, wie in 2.3 beschrieben, oder Bündelausgleichung gewonnen. Die Kalibrierung erfolgt dabei für jede Kamera separat im Vorfeld oder simultan. Mit Hilfe signalisierter Passpunkte kann die Orientierung permanent während der Messung überprüft oder aktualisiert werden.

### 3 Anwendungsbeispiele

Für die beschriebenen Ein- und Mehrkameranavigationssysteme ist die Navigation verschiedenster Sensoren denkbar. Je nach Messaufgabe kann der Sensor von einem taktilen Handtaster über distanzmessende oder flächenhaft messende Sensoren bis hin zu bildgebenden Sensoren variieren. Die folgenden Abschnitte zeigen gängige und neue Anwendungsbeispiele auf.

#### 3.1 Navigation taktiler Handtaster

Taktile Handtaster besitzen ein lokal kalibriertes Feld von Lokatorpunkten und eine dazu kalibrierte Tastspitze. Der in Abb. 5 dargestellte Handtaster besitzt neben vier Referenzpunkten eine weitere Zielmarke,



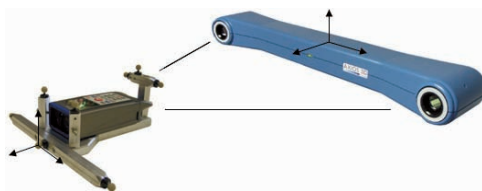
**Abb. 5:** Handtaster mit optischer Schaltfunktion (AXIOS 3D).

deren Bewegung gemessen und als Schaltimpuls interpretiert werden kann. Die Navigation eines taktilen Sensors ist für nahezu alle Stereomesssysteme üblich und auch in einem Mehrkamerasystem möglich. In Verbindung mit einem Einkamerasystem kann der Sensor entweder mit der Kamera verbunden und über ein im Raum angebrachtes Passpunktfeld orientiert (AICON ProCam) oder von der Kamera direkt beobachtet werden (Metronor Solo).

### 3.2 Navigation von distanzmessenden Sensoren

Ersetzt man die nur eingeschränkt variable Länge einer Tastspitze durch berührungslose Streckenmessungen, kann das Messvolumen deutlich vergrößert werden. Wie von SAHRHAGE et al. (2006) beschrieben, kann der Handtaster durch ein Laserdistanzmessgerät ersetzt werden (Abb. 6). Derartige Geräte verfügen über Funktechnologie und sind als kabelloser Sensor einsetzbar. Als Einheit mit der Aufnahmekamera werden sie wie in 3.1 dargestellt orientiert. Verfügt das Distanzmessgerät über Passpunkte, ist auch die Navigation durch eine oder mehrere im Raum angebrachte Kameras möglich.

Die mit einem solchen Sensor erreichbaren Genauigkeiten liegen deutlich unter denen des Handtasters. Dies liegt unter anderem an der Streckenmessgenauigkeit des Sensors und an Messunsicherheiten, die sich aus der polar angehängten Messung ergeben. Für Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsanforderungen, wie z. B. Innenaufnahmen, sind die erreichbaren Genauigkeiten von  $< 10$  mm jedoch ausreichend.



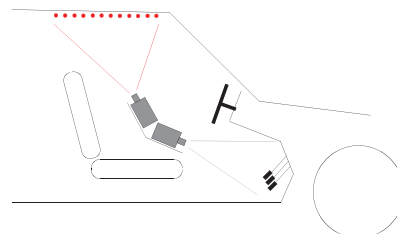
**Abb. 6:** Navigation eines Distanzmessers mit einem Stereokamerasystem (Axios 3D).

### 3.3 Navigation von flächenhaft messenden Sensoren

Auch für flächenhaft messende Sensoren macht eine Navigationslösung Sinn. Zu dieser Art von Sensoren gehören z. B. Streifenprojektoren oder Zeilenscanner. Der Nutzen der Echtzeitorientierung des Sensors wird hier deutlich. Die Orientierung von Zeilenscanneraufnahmen wäre ohne permanente Bestimmung der Orientierung nicht möglich, da hier nicht genügend Bildinformationen vorliegen. Die zeitaufwendige Rückführung einzelner Streifenprojektormessungen in ein einheitliches Koordinatensystem über Verknüpfungspunkte entfällt ebenfalls durch die Navigation. Für Streifenprojektionssysteme mit sequentieller Linienprojektion (Phasenverschiebung) dürfen sich Objekt und Scanner jedoch während einer Messung nicht relativ zueinander bewegen.

### 3.4 Navigation von bildgebenden Sensoren

Eine neuartige Anwendung ist die Navigation bildgebender Sensoren (Videokamera, High-Speed-Kamera). Interessant sind in diesem Zusammenhang z. B. die Echtzeitorientierung mitfahrender High-Speed-Kameras im Fahrzeugcrash, deren Orientierung im bewegten und sich verformenden Fahrzeug nur sinnvoll von einem abseits liegenden Standpunkt aus möglich ist. Die Aufnahme der Bewegung von verschiedenen Standpunkten entspräche der eines verteilten Mehrkamerasystems, für das auch ein simuliertes Mehrkamerasystem auf Basis eines Spiegelstereovorsatzes geeignet ist (LUHMANN 2005b).



**Abb. 7:** Einkamerasystem im Fahrzeuginneren.

Das Einkamerasystem kann dagegen im Fahrzeug mitfahrend eingesetzt werden. Gekoppelt mit einem Sensor (z. B. einer weiteren Kamera) betrachtet es ein innerhalb oder außerhalb des Fahrzeug liegendes, nicht den Auswirkungen des Crashes unterliegendem Passpunktfeld. Die zusätzliche Kamera ermöglicht Bildmessungen im Fahrzeuginneren im Koordinatensystem des verwendeten Passpunktfeldes (Abb. 7).

#### 4 Zusammenfassung

Die berührungslose und schnelle 3D-Navigation von messenden Sensoren gewinnt zunehmend an Bedeutung. Verschiedene Aufnahme Konzepte sind bereits in der Praxis zu finden, weitere Anwendungsmöglichkeiten werden zukünftig noch umgesetzt werden. Je nach Aufgabenstellung werden Systeme basierend auf einer Kamera, auf zwei oder auf beliebig vielen Kameras genutzt. Sie unterscheiden sich bezüglich der im Objekt-raum erforderlichen Referenzinformationen, der Messgenauigkeit und der Flexibilität, z. B. in Hinsicht auf Verdeckungen und die Messung komplexer Objekte.

Optische Navigationssysteme gehören in den Bereich der dynamischen Photogrammetrie und besitzen zeitabhängige Parameter. Neben der erreichbaren Messgenauigkeit im stationären Fall, haben daher auch maximale Aufnahme Frequenzen, Bewegungsgeschwindigkeiten, Belichtungs- und Verarbeitungszeiten einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis und damit auf die praktische Anwendbarkeit.

#### Literatur

- ARCSECOND, 2002: Error budget and specifications. [www.indoorgps.com/PDFs/wp\\_Error\\_Budget.pdf](http://www.indoorgps.com/PDFs/wp_Error_Budget.pdf), letzter Zugriff: 06. 06. 2006
- DOLD, J., 2004: Neue Laser-Technologien für die Industrievermessung. – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **2004** (8): 39–46.
- GODDING, R., LEHMANN, M. & RAWIEL, G. (1997): Robot adjustment and 3-D calibration – photogrammetric quality control in daily use. – In: GRUEN/KAHMEN (ed.): Optical 3-D Measurement Techniques IV. – Wichmann Verlag, Heidelberg: 158–165.
- KYLE, S. A., 2005: Alternatives in 6D Probing. – Coordinate Metrology Systems Conference, Austin, Texas.
- LOSER, R. & KYLE, S. A., 2003: Concepts and components of a novel 6DOF tracking system for 3D metrology. – Optical 3-D Measurement Techniques, Zurich.
- LUHMANN, T., 2005A: On the determination of objects rotation and translation in 3-D space (6 DOF) by a single camera. – Optical 3-D Measurement Techniques, 2005.
- LUHMANN, T., 2005b: Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung. – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **2005** (2): 101–110.
- PUTZE, T. & HOYER, K., 2005: Modellierung und Kalibrierung eines virtuellen Vier-Kamerasystems auf Basis eines verstellbaren Spiegelsystems. – In: LUHMANN (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. – Beiträge der 4. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 164–171.
- SAHRHAGE, V., RIEDE, R. & LUHMANN, T., 2006: Optische 3D-Navigation von Sensoren. – In: LUHMANN/MÜLLER (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. – Beiträge der 5. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 54–61.
- Internet-Adressen der im Text erwähnten Unternehmen:  
 AICON 3D Systems: [www.aicon.de](http://www.aicon.de)  
 AXIOS 3D Services: [www.axios3d.de](http://www.axios3d.de)  
 Leica Geosystems (jetzt Hexagon): [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com)  
 Metris: [www.metris.com](http://www.metris.com)  
 Steinbichler: [www.steinbichler.de](http://www.steinbichler.de)  
 GSI: [www.geodetic.com](http://www.geodetic.com)
- Anschriften der Autoren:  
 Prof. Dr.-Ing. THOMAS LUHMANN,  
 Dipl.-Ing. VOLKER SAHRHAGE  
 Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik  
 FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven  
 Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg  
 Tel.: 0441-7708-3172, Fax: 0441-7708-3170  
 e-mail: [luhmann@fh-oldenburg.de](mailto:luhmann@fh-oldenburg.de)  
[volker.sahrhage@fh-oldenburg.de](mailto:volker.sahrhage@fh-oldenburg.de)
- Manuskript eingereicht: Mai 2006  
 Angenommen: Juni 2006