

Paper-ID: VGI\_199212



## Globale Punktbestimmung mit einem mobilen Stereo-Visionssystem

Kurt Novak <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, 1958 Neil Avenue, Columbus, Ohio 43210, U.S.A.*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **80** (4), S. 167–180

1992

Bib<sub>T</sub>E<sub>X</sub>:

```
@ARTICLE{Novak_VGI_199212,  
Title = {Globale Punktbestimmung mit einem mobilen Stereo-Visionssystem},  
Author = {Novak, Kurt},  
Journal = {{\0}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessungswesen und  
Photogrammetrie},  
Pages = {167--180},  
Number = {4},  
Year = {1992},  
Volume = {80}  
}
```





## Globale Punktbestimmung mit einem mobilen Stereo-Visionssystem

von Kurt Novak, Columbus, Ohio

### Zusammenfassung

Am Center for Mapping der Ohio State University wurde in den letzten beiden Jahren ein mobiles Vermessungssystem entwickelt, das auf einem Kleinbus installiert werden kann. Die Kombination von GPS mit einem digitalen Stereo-Visionssystem erlaubt die globale Positionierung aller Objekte, die in den aufgenommenen Bildpaaren erscheinen. Die relative und innere Orientierung der digitalen Kamern wird mittels einer erweiterten Bündelausgleichung bestimmt. Der Abstand zwischen den beiden Projektionszentren und der GPS-Antenne kann aus räumlichen Vorwärtsschnitten mit Theodoliten berechnet werden; diese Messungen dienen als zusätzliche Bedingungen für den Bündelausgleich. Während GPS die Position des Fahrzeuges festlegt, werden zwei Kreisel zur Orientierung des Kamerapaares verwendet. Das beschriebene System kann zur Datenerhebung für Geo-Informationssysteme und zur schnellen Vermessung von Straßenzügen eingesetzt werden. Dieser Aufsatz behandelt Probleme, die bei der Kalibrierung der Sensoren des mobilen Vermessungssystems auftreten, und beschreibt die Transformationen, die notwendig sind, um die gemessenen Bildkoordinaten in ein globales geographisches System zu übertragen.

### Abstract

At the Center for Mapping of the Ohio State University a vehicle-mounted mobile mapping system was developed. Integrating the global positioning system (GPS) with a digital stereo-vision system enables us to determine spatial coordinates of any object in the field of view of the camera-pair in a global coordinate system. The relative and interior orientations, as well as the offset of the GPS antenna, are calibrated before operation by a rigorous bundle adjustment. The offsets between the antenna and the perspective centers is measured by theodolite intersections and introduced as a constraint. Two gyros determine the orientation (viewing direction) of the stereo-vision system, while its position is fixed by the GPS antenna. The described system was implemented in a van and used for real-time mapping of highway features. This paper concentrates on the problems encountered during the calibration of the mobile mapping system, as well as on the transformations that must be applied to convert image coordinate measurements into global, geographic coordinates.

### 1. Einleitung

Die Erhebung genauer, räumlicher Daten ist eine der Hauptaufgaben von Geodäsie und Photogrammetrie. Obwohl sich die beiden Disziplinen schon seit langem ergänzen und Daten, wie zum Beispiel Paßpunktkoordinaten, austauschen, wurde eine volle Integration beider Technologien kaum angestrebt. Wie in diesem Aufsatz gezeigt wird, ermöglicht die Integration geodätischer und photogrammetrischer Methoden die Aufnahme raumbezogener Daten in einem globalen Koordinatensystem von einer mobilen Plattform aus. Das beschriebene System ist für die schnelle Vermessung und zeitgerechte Datenerhebung für Geo-Informationssysteme (GIS) von großem Wert.

Viele Institutionen haben in den letzten Jahren versucht, GPS in der Aerotriangulation einzusetzen, um die Anzahl der Bodenpaßpunkte zu verringern [1], [6]. Dabei wird GPS als ein unabhängiges Instrument betrachtet, welches die Position des Flugzeuges und damit die Koordinaten des Projektionszentrums bestimmt. Da normale Luftbildkamern eingesetzt werden, müssen die Bilder entwickelt und manuell gemessen werden. Eine geringe Anzahl von Paßpunkten ist dabei empfehlenswert. Ein anderes Konzept wurde am Center for Mapping der Ohio State University entwickelt: es wurde ein mobiles, terrestrisches Vermessungssystem gebaut, welches Satellitenpositionierung und digitale Bild-Sensoren



*Abb. 1: Der Vermessungsbus integriert ein digitales Stereo-Visionssystem mit GPS und einem Inertialsystem*

kombiniert [2]. Die Hauptaufgabe dieses Systems ist die Erhebung verschiedenster Daten in der Umgebung von Straßenzügen von einem fahrenden Bus aus (Abbildung 1).

Die globale Positionierung von Objekten erfolgt mit einem GPS-Empfänger und zwei digitalen Kameras. Zusätzlich wurden ein Inertialsystem und mehrere Farb-Videokameras im Fahrzeug installiert. Der GPS-Empfänger bestimmt die Straßelinien mit einer Genauigkeit von 1 bis 3 m. In Bereichen, in denen die Satellitenverbindung unterbrochen ist, übernimmt das Inertialsystem die Vermessung und verbindet bekannte GPS-Positionen mit glatten Kurven. Das Inertialsystem besteht aus zwei Kreisel – einem Richtungs- und einem Vertikalkreisel – und einem Distanzmesser. Der Richtungskreisel mißt die horizontale Richtungsänderung. Die absolute Richtung wird dann aus früheren GPS-Positionen abgeleitet. Der Vertikalkreisel steht immer senkrecht und mißt die relativen Neigungen des Fahrzeuges in einem Kardangelen. Es werden damit zwei Winkel, nämlich die vertikale Richtung der Fahrzeugachse und die Kippung des Fahrzeuges bestimmt. Der Distanzmesser zählt die Umdrehungen der beiden Vorderräder und ermittelt die gefahrene Strecke. Gemeinsam mit den Kreiseln ermöglicht er die Positionierung des Vermessungsbusses ohne GPS und dient zur Überbrückung von Gebieten, in denen die GPS-Satelliten abgeschattet sind (z.B. unter Brücken oder in Tunneln).

Digitale Bildpaare werden in regelmäßigen Abständen entlang der Straße aufgenommen. Diese Bilder können sowohl zur Vermessung als auch zur Archivierung verwendet werden. Da für jedes Bildpaar die globale Position und die Orientierung bekannt sind, können Punkte, die in beiden Bildern erscheinen, sofort in geographischen Koordinaten angegeben werden. Diese Information wird in ein GIS übertragen, das durch eine Bilddatenbank erweitert wurde. Praktische Tests haben gezeigt, daß der Vermessungsbus ein ausgezeichnetes Werkzeug zur automatischen Inventarisierung von Straßenzügen ist [4], [7].

Dieser Artikel gliedert sich in drei Abschnitte: im ersten wird die Kalibrierung des Stereo-Visionssystems besprochen. Diese ist Voraussetzung für die relative Punktbestimmung in einem lokalen Koordinatensystem. Dabei werden auch die Abstände und die relative Lage der GPS-Antenne und der digitalen Kammern bestimmt. Die absolute Orientierung des Systems wird im zweiten Abschnitt beschrieben. Es werden jeweils Genauigkeiten angegeben, die mit dem integrierten System erreicht wurden. Im dritten Abschnitt wird der kommerzielle Einsatz des Systems besprochen. Hierzu wurde ein Bildanalyse-System entwickelt, welches die mit dem Vermessungsbuss erhobenen Daten direkt in einem GIS verarbeiten kann.

## 2. Kalibrierung des Stereo-Visionssystems

Die perfekte Kalibrierung aller Sensoren des mobilen Vermessungssystems ist die Voraussetzung für die genaue, räumliche Punktbestimmung. Dabei werden die Parameter abgeleitet, welche die Kamera-Geometrie bestimmen, und jene, die die relative Lage und Orientierung der beiden Kammern festlegen. Die Kalibrierung besteht aus zwei Schritten: im ersten werden innere und relative Orientierung gemeinsam berechnet, im zweiten wird die Transformation in ein absolutes Koordinatensystem ermittelt (absolute Orientierung). Die Orientierungsparameter werden in einem gemeinsamen Ausgleich mit einem erweiterten Bündelausgleich bestimmt. Dazu ist ein Testfeld mit Paßpunkten notwendig, die mit selbstreflektierenden Signalen markiert sind. Diese Punkte, die in den digitalen Bildern heller erscheinen als der Hintergrund, können automatisch gefunden und gemessen werden. Die korrekte Zuordnung von Punktnummern wird durch die Geometrie der Paßpunktanordnung am Testfeld vorgenommen. Das ermöglicht eine vollautomatische Kalibrierung des Stereo-Visionssystems. Sobald die Kalibrierungsparameter bekannt sind, kann die räumliche Position jedes Objektes im Blickfeld des Stereo-Visionssystems in einem lokalen Koordinatensystem (relativ zum Fahrzeug) bestimmt werden. Die Transformation in das globale System wird bei der absoluten Orientierung ermittelt.

Die innere Orientierung beschreibt die Geometrie der Kamera und besteht aus der Brennweite, dem Hauptpunkt und Linsenverzeichnungen. Für jede der beiden Kameras wird eine eigene innere Orientierung berechnet. Die relative Orientierung definiert die Lage der rechten Kamera relativ zum linken Bildkoordinatensystem. Die Z-Achse des lokalen Modellkoordinatensystems ist somit orthogonal zur linken Bildebene. Die fünf Parameter der relativen Orientierung sind maßstabsunabhängig. Die innere und relative Orientierung wird für mehrere Bildpaare in einem gemeinsamen Ausgleich ermittelt. Durch zusätzliche Bedingungen wird sichergestellt, daß die relative Orientierung aller Bildpaare gleich ist. Es ist dabei wichtig, daß die Bildpaare in verschiedenen Distanzen und Richtungen relativ zum Testfeld aufgenommen werden, um eine homogene Positionierungsgenauigkeit zu garantieren. Zusätzliche geodätische Beobachtungen der Projektionszentren werden hinzugefügt, um die Stabilität des Ausgleichs zu erhöhen. Dabei werden die Eintrittspupillen (Projektionszentren) der beiden Kameras mit Theodoliten eingemessen. Die Strecke zwischen diesen beiden Punkten bestimmt die Basis des Stereo-Visionssystems. Da sie den Maßstab des Modellkoordinatensystems definiert, muß die Basis sehr genau gemessen werden. Sie wird in einer Distanzgleichung als zusätzliche Beobachtung zur Bündelausgleichung hinzugefügt. Abbildung 2 zeigt zwei Aufnahmepositionen des Vermessungsbusses relativ zum Testfeld sowie die Theodolitenstandpunkte, von denen die Vorwärtsschnitte zu den Projektionszentren gemessen wurden.

In den folgenden Abschnitten wird die analytische Formulierung der gemeinsamen Ausgleichung wiedergegeben und die physikalische Bedeutung der ermittelten Parameter erklärt.

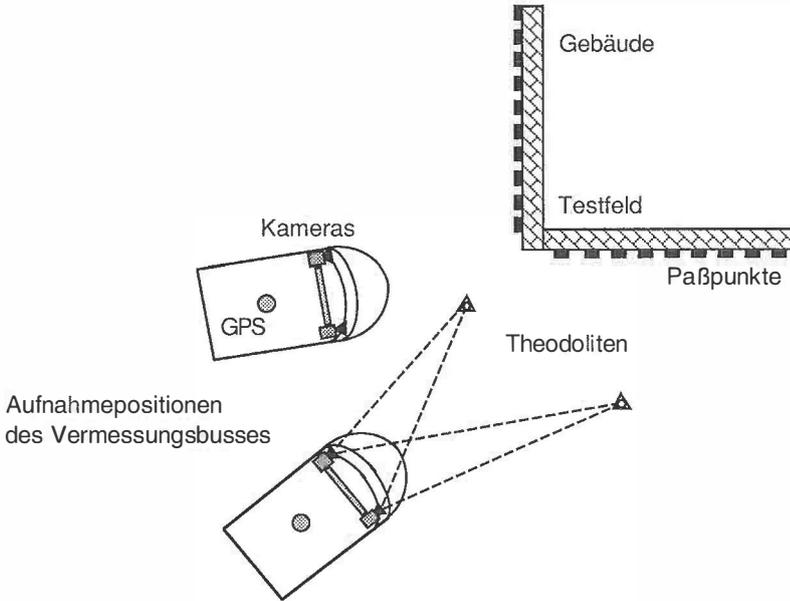


Abb. 2: Aufnahme von Stereobildpaaren des Testfeldes von verschiedenen Standpunkten aus und Einmessung der Projektionszentren mit Theodoliten

### 2.1 Innere Orientierung

Die Grundlage der Bündelausgleichung bildet die Kollinearitätsgleichung (1), welche die Bildkoordinaten als eine Funktion der Objektkoordinaten sowie der inneren und äußeren Orientierungsparameter ausdrückt [3]. Um dabei auch die innere Orientierung bestimmen zu können, müssen Hauptpunkt ( $x_p, y_p$ ) und Brennweite ( $c$ ) als Unbekannte eingeführt werden. Außerdem werden Funktionen zusätzlicher Parameter ( $\Delta_x, \Delta_y$ ) hinzugefügt (2), welche radiale, dezentrierende und affine Verzerrungen der Bilder korrigieren [5].

Kollinearitätsgleichungen:

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{Z_x}{N} + \Delta x \\ y &= -c \frac{Z_y}{N} + \Delta y \end{aligned} \tag{1}$$

$x, y$  .....Bildkoordinatenmessungen,  
 $c$  .....Brennweite,  
 $Z_x, Z_y, N$  .....Zähler und Nenner der Kollinearitätsgleichungen,

$$\begin{aligned} Z_x &= r_{11} (X - X_0) + r_{21} (Y - Y_0) + r_{31} (Z - Z_0) \\ Z_y &= r_{12} (X - X_0) + r_{22} (Y - Y_0) + r_{32} (Z - Z_0) \\ N &= r_{13} (X - X_0) + r_{23} (Y - Y_0) + r_{33} (Z - Z_0) \end{aligned}$$

$X, Y, Z$  .....Objektpunktkoordinaten,  
 $X_0, Y_0, Z_0$  .....Projektionszentren,  
 $r_{11}, \dots, r_{33}$  .....Elemente einer 3 x 3 Drehmatrix.

Funktionen zusätzlicher Parameter: (2)

$$\Delta x = x_p + x(r^2 - 1)a_1 + x(r^4 - 1)a_2 + (r^2 + 2x^2)a_3 + 2xya_4 + a_5x + a_6y$$

$$\Delta y = y_p + y(r^2 - 1)a_1 + y(r^4 - 1)a_2 + 2xya_3 + (r^2 + 2y^2)a_4 - a_5y$$

- $x_p, y_p$  .....Hauptpunktskoordinaten,
- $a_1, a_2$  .....radiale Verzeichnung,
- $a_3, a_4$  .....dezentrierende Verzeichnung,
- $a_5, a_6$  .....affine Parameter.

2.2 Relative Orientierung

Um die relative Orientierung der Bildpaare zu fixieren, werden sechs Bedingungen zum Bündelausgleich hinzugefügt. Diese bestimmen die fünf Parameter der relativen Ori-

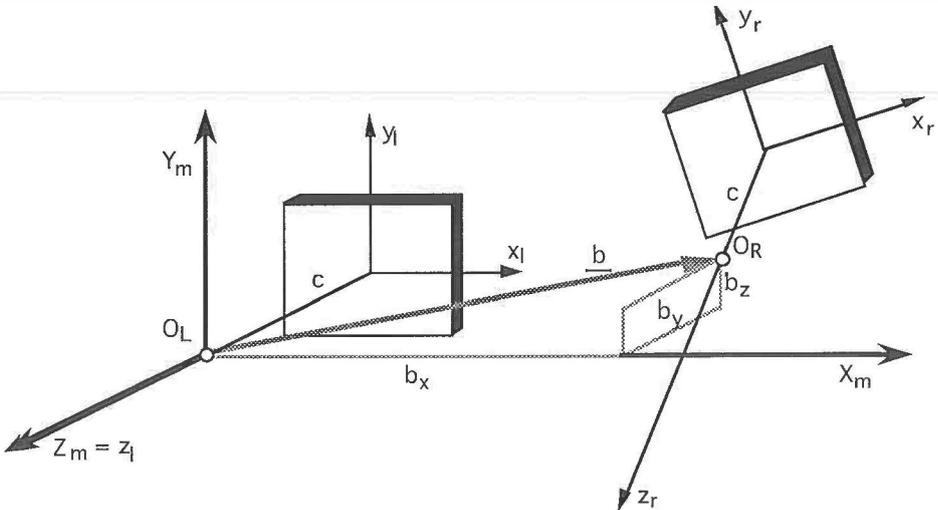


Abb. 3: Der Basisvektor ( $\underline{b}$ ) und die relative Drehmatrix ( $\underline{\Delta R}$ ) werden relativ zum linken Bildkoordinatensystem definiert

entierung, sowie den Maßstabsfaktor. Hierzu wird der Basisvektor ( $b_x, b_y, b_z$ ) vom linken ( $O_L$ ) zum rechten Projektionszentrum ( $O_R$ ) im linken Bildkoordinatensystem definiert. Im selben System werden auch die relativen Drehwinkel ( $d\omega, d\phi, d\kappa$ ) angegeben, welche die Drehmatrix  $\underline{\Delta R}$  bestimmen (Abbildung 3). Praktisch sind die relativen Drehwinkel und die  $b_y$ - und  $b_z$ -Komponenten der Basis klein, weil die Bildpaare fast dem Normalfall entsprechen.

Da die Kamern fix am Fahrzeug montiert sind, muß  $\underline{\Delta R}$  für alle Bildpaare gleich sein; das bedeutet, daß auch  $d\omega, d\phi$  und  $d\kappa$  konstant sind. Die relative Drehmatrix wird aus den Drehmatrizen der beiden Bilder berechnet (3). Formel (4) zeigt den Basisvektor  $\underline{b}$  im linken Bildkoordinatensystem.

$$\underline{\Delta R} = \underline{R}_L^T \cdot \underline{R}_R \tag{3}$$

- $\underline{\Delta R}$  .....relative Drehmatrix,
- $\underline{R}_L$  .....Drehmatrix des linken Bildes,
- $\underline{R}_R$  .....Drehmatrix des rechten Bildes,
- $\underline{R}_L$  und  $\underline{R}_R$  sind im Objektkoordinatensystem definiert.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \underline{R}_L^T \cdot \begin{pmatrix} X_R - X_L \\ Y_R - Y_L \\ Z_R - Z_L \end{pmatrix} \quad (4)$$

$\underline{R}_L$ .....Drehmatrix des linken Bildes,

$X_L, Y_L, Z_L$ .....linkes Projektionszentrum,

$X_R, Y_R, Z_R$ .....rechtes Projektionszentrum.

Die Basisvektoren und relativen Drehmatrizen können nun gleichgesetzt werden, um die relative Orientierung des Stereo-Visionssystems zu fixieren. Jede Kombination zweier Bildpaare (i und k) muß (5) befriedigen.

$$\begin{aligned} \underline{\Delta R}^{(i)} &= \underline{\Delta R}^{(k)} \\ \underline{b}^{(i)} &= \underline{b}^{(k)} \end{aligned} \quad (5)$$

Bevor diese sechs Gleichungen jedoch als Bedingungen zum Bündelausgleich hinzugefügt werden können, müssen die Formeln linearisiert werden. Man muß die partiellen Ableitungen bezüglich der äußeren Orientierungsparameter (Projektionszentren, Drehwinkel) jedes Bildes berechnen. Die Distanz ( $d_0$ ) zwischen den beiden Projektionszentren eines Bildpaares kann als zusätzliche Beobachtung in den Ausgleich eingeführt werden (6). Sie wird aus den Vorwärtsschnitten zu den Eintrittspupillen abgeleitet und kann mit einer Genauigkeit von 0,5 mm angegeben werden. Diese Beobachtung bestimmt den Maßstab des Modellkoordinatensystems ( $X_m, Y_m, Z_m$ ).

$$\begin{aligned} d_0 &= \sqrt{(X_L - X_R)^2 + (Y_L - Y_R)^2 + (Z_L - Z_R)^2} \\ &= \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$X_L, Y_L, Z_L$ .....linkes Projektionszentrum,

$X_R, Y_R, Z_R$ .....rechtes Projektionszentrum,

$d_0$ .....Distanz zwischen den beiden Projektionszentren,

$b_x, b_y, b_z$ .....Komponenten des Basisvektors.

Diese zusätzliche Beobachtung braucht nur für ein Bildpaar eingeführt werden; die Basis aller anderen Bildpaare wird durch Bedingung (5) konstant gehalten. Für m Stereo-Bildpaare sind deshalb (m-1)\*6 Bedingungsgleichungen (relative Orientierung und Maßstab) und eine Distanzgleichung notwendig.

### 2.3 Gemeinsamer Ausgleich

Die Beobachtungsgleichungen (1) und (6) sowie die Bedingungsgleichungen (5) werden jetzt in ein gemeinsames System zusammengefaßt (7). Die Ausgleichung nach der Kleinsten-Quadrate-Methode gelingt mittels (8).

$$\begin{aligned} \text{Beobachtungsgleichungen:} \quad \underline{v} &= \underline{A} \underline{x} - \underline{l} \\ \text{Bedingungsgleichungen:} \quad \underline{0} &= \underline{B} \underline{x} + \underline{t} \end{aligned} \quad (7)$$

$\underline{A}$ .....linearisierte Kollinearitätsgleichungen (1) und Distanzgleichung (6);

# *Trimble*

G P S – Global Positioning System



**Die einfachste und wirtschaftlichste Art der Vermessung**

**Mit der umfassendsten Produktpalette für alle Genauigkeitsansprüche vom weltweiten Marktführer**

**Beratung und Schulung, Verkauf, Leasing, Vermietung**

**Generalvertrieb für Österreich:**

## **AGIS Ges.m.b.H.**

A-1060 Wien, Linke Wienzeile 4  
Telefon: 0222/587 90 70, Fax: 0222/587 34 32

- $\underline{x}$  ..... unbekannte Orientierungsparameter:  
 $x_p, y_p, c, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  für jede Kamera,  
 $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$  für jedes Bild;  
 $\underline{l}$  ..... Diskrepanzen (Beobachtungen minus Näherungen);  
 $\underline{B}$  ..... linearisierte Bedingungsgleichungen (relative  
Orientierung);  
 $\underline{t}$  ..... Absolutterme der Bedingungen;  
 $\underline{v}$  ..... Verbesserungen der Beobachtungen;  
 $\underline{0}$  ..... Nullvektor.

$$\begin{pmatrix} \underline{A}^T & \underline{A} & \underline{B}^T \\ \underline{B} & \underline{0} & -\underline{t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x} \\ \underline{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A}^T & \underline{l} \\ -\underline{t} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Sobald die Orientierungsparameter ( $\underline{x}$ ) verfügbar sind, können für jeden Punkt dreidimensionale Koordinaten in einem lokalen System berechnet werden. Somit ist die Messung von Raumstrecken oder die Herstellung räumlicher Modelle von Objekten möglich. Die lokalen Modellkoordinaten ( $X_m, Y_m, Z_m$ ) beziehen sich allerdings auf den Vermessungsbus, ihr Ursprung liegt im linken Projektionszentrum. Sie müssen im nächsten Schritt in ein globales Koordinatensystem transformiert werden.

Die beschriebenen Algorithmen wurden auf einer Computer-Workstation implementiert. Die Ergebnisse der Kalibrierung unseres Stereo-Visionssystems werden im folgenden angegeben. Sie beziehen sich auf zwei Cohu 4110 digitale Kameras, die am Vermessungsbus installiert waren. Ihre CCD-Sensoren haben eine Auflösung von 732 horizontalen und 484 vertikalen Pixeln. Die nominale Brennweite der Objektive ist 6 mm. Die angegebene Kalibrierung wurde mit drei Bildpaaren durchgeführt. Diese wurden in verschiedenen Entfernungen vom Testfeld aufgenommen (von 9 m bis 19 m); außerdem wurden konvergierende Aufnahmerichtungen gewählt. Die Vielfalt von Aufnahmerichtungen und Abständen ist notwendig, um eine zuverlässige und genaue Berechnung der inneren Orientierungselemente und der zusätzlichen Parameter sicherzustellen. Sie trägt auch dazu bei, daß die räumliche Punktbestimmung im Stereobereich vor dem Bus homogene Koordinatengenauigkeiten liefert. Falls die zu vermessenden Objekte weit vom Bus entfernt sind, wird die Genauigkeit allerdings durch die schleifenden Schnitte der korrespondierenden Lichtstrahlen verringert.

Die Bildkoordinaten der Paß- und Verknüpfungspunkte wurden automatisch in den digitalen Bildern gemessen. Wir verwenden dazu eine Schwerpunktmethode, die aus den hellen Pixeln einer Signalmarke deren Lage im Bild berechnet. Sie liefert eine Bildkoordinatengenauigkeit von 1/4 Pixel. Wie oben erwähnt, wurde die Basislänge mittels Theodoliten und Vorwärtsschnitten bestimmt. Der Bündelausgleich wurde mit und ohne zusätzliche Parameter berechnet, um deren Beitrag zur Steigerung der Genauigkeit feststellen zu können. Die genannten geometrischen Bedingungen wurden immer im Ausgleich mitgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 gelistet. Sie zeigt die a-posteriori Standardabweichung ( $\sigma_0$ ), die als die mittlere Genauigkeit der Bildkoordinaten interpretiert werden kann. Die zusätzlichen Parameter verbessern das Ergebnis um den Faktor 2; die berechnete Bildkoordinatengenauigkeit ist 1/3 Pixel am Sensor, was mit unseren Annahmen konsistent ist. Die Genauigkeit der Verknüpfungspunkte ( $s_x, s_y, s_z$ ) wurde durch unabhängige Koordinatenmessungen verifiziert. Es zeigt sich, daß eine Punktgenauigkeit von einem Zentimeter mit diesen Kameras erreicht werden kann, falls Paßpunkte im Objektraum verfügbar

sind. Dies ist allerdings bei der mobilen Vermessung nicht der Fall. Hierbei muß die Orientierung der Kameras als bekannt angenommen werden, um die Koordinaten mit Vorwärtsschnitten berechnen zu können. Dadurch verschlechtert sich die zu erwartende Genauigkeit erheblich.

Kalibrierung	$\sigma_o$ [mm]	$\sigma_o$ [Pixel]	$s_x$ [cm]	$s_y$ [cm]	$s_z$ [cm]
ohne zusätzliche Parameter	0.0063	0.68	1.95	1.09	7.79
mit 6 zusätzlichen Parametern	0.0034	0.37	0.42	0.55	2.09

Tabelle 1: Vergleich der Bündelkalibrierung des Stereo-Visionssystems mit und ohne zusätzliche Parameter. Der Gewichtseinheitsfehler ( $\sigma_o$ ) beschreibt die mittlere Genauigkeit der Bildkoordinatenmessungen. Der mittlere Fehler der Objektpunkte ( $s_x, s_y, s_z$ ) wurde aus Kontrollpunkten abgeleitet.

#### 2.4 Positionierungsgenauigkeit im Modellkoordinatensystem

Um die Positionierungsgenauigkeit des mobilen Vermessungssystems zu ermitteln, wurden Punkte mittels Vorwärtsschnitten berechnet und die kalibrierten Orientierungsparameter als fix angenommen. Die resultierenden Koordinaten wurden mit den bekannten Werten des Testfeldes verglichen. Die Vorwärtsschnitte wurden für jedes Bildpaar unabhängig berechnet, und zwar für alle im Stereobereich enthaltenen Punkte des Testfeldes. Die Ergebnisse können in Tabelle 2 verglichen werden. Der mittlere Punktlagefehler ist mit und ohne zusätzliche Parameter angegeben. Außerdem wird der Tiefenwert ( $s_z$ ), der wegen der Geometrie des Stereo-Bildpaares am ungenauesten ist, seiner theoretischen Genauigkeit ( $\sigma_z$ ) gegenübergestellt.

Stereopaar	Kalibrierung (zusätzliche Parameter)	Objekt- distanz [m]	$s_x$ [cm]	$s_y$ [cm]	$s_z$ [cm]	$\sigma_z$ [cm]
1	ohne	19.0	3.1	2.0	8.9	9.3
2	ohne	11.8	1.3	1.9	4.2	3.6
3	ohne	9.2	1.3	0.7	3.9	2.2
1	mit	19.0	2.1	1.2	6.2	9.3
2	mit	11.8	0.4	1.1	3.4	3.6
3	mit	9.2	0.4	0.5	1.3	2.2

Tabelle 2: Die Genauigkeit der Stereo-Punktbestimmung wird unabhängig für jedes der drei Bildpaare ermittelt und getrennt nach Achsenrichtungen gelistet. Die theoretische Genauigkeit der Z-Komponente (Fahrtrichtung) ist in der letzten Spalte angegeben. Sie wurde aus der Parallaxengleichung berechnet.

Man sieht, daß auch hier die zusätzlichen Parameter die Genauigkeit steigern und daß alle abgeleiteten Werte ( $s_x, s_y, s_z$ ) besser sind als die Schätzungen ( $\sigma_z$ ). Allgemein kann festgestellt werden, daß man mit dem Stereo-Visionssystem Objekte mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm lokalisieren kann, falls diese Objekte nicht weiter als 20 m vom Vermessungsbus entfernt sind.

### 3. Absolute Orientierung

Um die lokalen Modellkoordinaten in ein globales Koordinatensystem transformieren zu können, muß die absolute Orientierung bekannt sein. Sie besteht in diesem Fall aus sechs Parametern (drei Translationen und drei Rotationen). Diese transformieren das Modellsystem  $(X_m, Y_m, Z_m)$  zuerst in ein Fahrzeugsystem  $(X_f, Y_f, Z_f)$  mit dem Ursprung in der GPS-Antenne, welches dann in ein topozentrisches System  $(X_t, Y_t, Z_t)$  rotiert wird. Die  $X_t$ -Achse weist nach Osten, die  $Y_t$ -Achse nach Norden und die  $Z_t$ -Achse ist vertikal zum Ellipsoid. Im letzten Schritt wechselt man mit Hilfe der bekannten GPS-Position bzw. der geographischen Länge und Breite der Antenne in ein geozentrisches oder geographisches Koordinatensystem  $(X_g, Y_g, Z_g)$ . Die Maßstäbe aller Koordinatensysteme sind gleich, weil die absolute Dimension des Stereomodells bereits durch die gemessene Basis festgelegt wurde.

Die absolute Orientierung besteht eigentlich aus zwei Komponenten: die erste stellt den Zusammenhang zwischen dem Stereo-Visionssystem und der Fahrzeugachse (Fahrtrichtung) her; sie ist nach der Installation aller Komponenten konstant. Die zweite berücksichtigt die momentane Lage des Vermessungsbusses relativ zum globalen Koordinatensystem. Die sechs Transformationsparameter werden von der GPS-Antenne (drei Koordinaten, die den drei Translationen entsprechen) und den Kreiselmessungen (horizontale und vertikale Richtung, Kippung des Fahrzeuges) abgeleitet.

#### 3.1 Die Transformation vom Modell- zum Fahrzeugsystem

Das Fahrzeugkoordinatensystem ist fest mit dem Vermessungsbuss verbunden. Es wird durch die Fahrzeugachse ( $Y_f$ ), die in die Fahrtrichtung weist, festgelegt. Diese ist orthogonal zur Hinterachse des Fahrzeuges, die wiederum parallel zur  $X_f$ -Achse ist. Die  $Z_f$ -Achse ist normal zu den beiden anderen. Wir nehmen an, daß das Fahrzeugsystem parallel zu den physikalischen Achsen der Kreisel des Inertialsystems ist. Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems wird in die GPS-Antenne gelegt. Wenn wir vom Modellsystem zum Fahrzeugsystem transformieren, wird der Ursprung vom linken Projektionszentrum zur GPS-Antenne verschoben (Abbildung 4). Dieser Abstand ( $\Delta X$ ) kann mit Theodolitenmessungen ermittelt werden. Da die beiden Kameras am Bus nach unten geneigt sind, muß auch eine Rotation ( $\tau$ ) berücksichtigt werden. Die Kameraneigung ( $8^\circ$ ) vermindert den Anteil des Himmels in den Bildern. Die mathematische Formulierung dieser Transformation ist in (9) angegeben.

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \tau' & -\sin \tau' \\ 0 & \sin \tau' & \cos \tau' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} \quad (9)$$

$X_f, Y_f, Z_f$ .....Fahrzeugkoordinaten,

$X_m, Y_m, Z_m$ .....Modellkoordinaten,

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ .....Translation vom linken Projektionszentrum

zur GPS-Antenne,

$\tau$ .....Kippung der Kameras,

$\tau' = 90^\circ - \tau$ .

3.2 Die Transformation vom Fahrzeugsystem in ein geozentrisches Koordinatensystem

Diese Transformation dreht das lokale Fahrzeugkoordinatensystem zunächst in ein topozentrisches System, mit dem Ursprung in der GPS-Antenne. Das topozentrische Koordinatensystem ist durch die Nord-, die Ost-Richtung sowie die Vertikale definiert. Die Drehwinkel werden von den Kreiseln des Inertialsystems gemessen. Die primäre Drehung um die  $Z_t$ -Achse wird vom horizontalen Richtungskreisel abgeleitet; die vertikale Richtung entspricht der sekundären Drehung und die Kippung der tertiären (Abbildung 5). Die letztgenannten Elemente werden vom Vertikalkreisel gemessen. Die komplette Drehmatrix ist

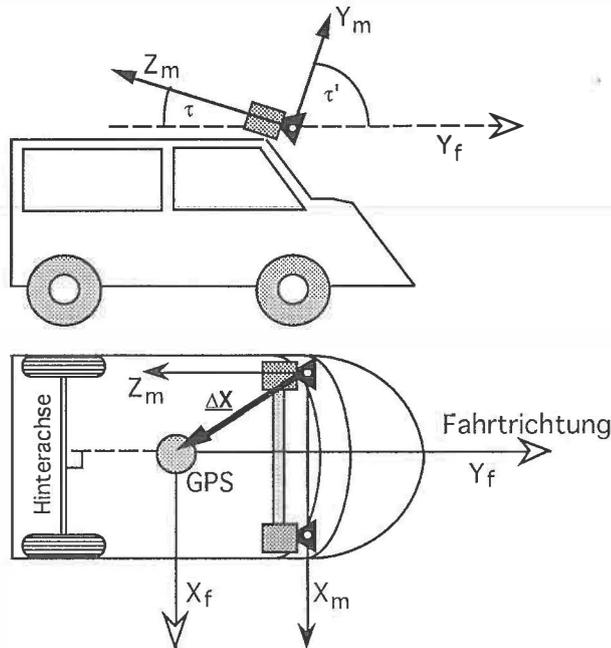


Abb. 4: Die Transformation vom Modellkoordinatensystem zum Fahrzeugsystem setzt sich aus drei Translationen und einer Drehung zusammen

in (10) angegeben. Die Hierarchie wird durch die physikalischen Achsen des Kreiselsystems bestimmt, die von der Installation her bekannt ist.

$$\begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} = R_{\alpha} \cdot R_{\zeta} \cdot R_{\kappa} \cdot \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{pmatrix} \quad (10)$$

- $X_f, Y_f, Z_f$  .....Fahrzeugkoordinaten,
- $X_t, Y_t, Z_t$  .....topozentrische Koordinaten,
- $R_{\alpha}$  .....horizontale Drehung,
- $R_{\zeta}$  .....Neigung in der Fahrtrichtung,
- $R_{\kappa}$  .....Kipping des Busses.

Die lokalen, topozentrischen Koordinaten können leicht in geozentrische ( $X_g, Y_g, Z_g$ ) transformiert werden, indem man den Ursprung zum Zentrum des Erdellipsoids verschiebt

(dieser Vektor entspricht den geozentrischen Koordinaten der GPS-Antenne) und die Drehungen bezüglich der geographischen Breite und Länge des Topozentrums anbringt (11). Von hier ist die Transformation in verschiedenste Landeskoordinatensysteme möglich, so daß die vom Vermessungsbus bestimmten Punkte mit existierenden Karten verglichen werden können.

Die beschriebenen Transformationen können miteinander verknüpft werden, sodaß die globalen Koordinaten für jeden gemessenen Punkt in einem Schritt verfügbar sind. Diese Transformationen werden während der Nachverarbeitung der Meßdaten durchgeführt und benötigen die ausgeglichenen GPS- und Inertialmessungen. Die Position, die Orientierung und der Aufnahmezeitpunkt jedes Bildpaares sind dann verfügbar und werden im Header der Bilddatei gespeichert.

$$\begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_z \\ Y_z \\ Z_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\sin \lambda & -\sin \varphi \cdot \cos \lambda & \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (11)$$

$X_g, Y_g, Z_g$  .....geozentrische Koordinaten,  
 $X_t, Y_t, Z_t$  .....topozentrische Koordinaten,  
 $X_z, Y_z, Z_z$  .....geozentrische Koordinaten der GPS Antenne,  
 $\varphi, \lambda$  .....geografische Breite und Länge.

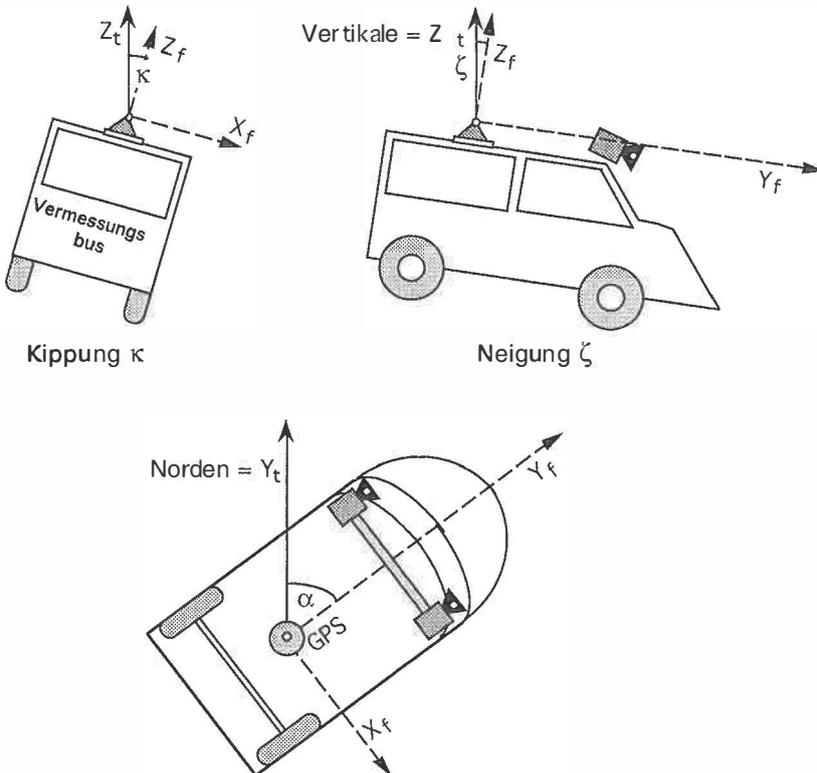


Abb. 5: Transformation der Fahrzeugkoordinaten ( $X_f, Y_f, Z_f$ ) in ein topozentrisches System ( $X_t, Y_t, Z_t$ )

### 3.3. Genauigkeit der absoluten Punktbestimmung

Um die absolute Genauigkeit der Koordinaten zu ermitteln, wurden wiederum die Punkte des Testfeldes herangezogen. Die globalen Koordinaten der Verknüpfungspunkte wurden von zwei verschiedenen Bildpaaren aus bestimmt. Da die Position und Orientierung des Busses aus GPS- und Inertialvermessung bekannt waren, wurden die Punkte mittels (9), (10) und (11) ins globale Koordinatensystem transformiert und dort miteinander verglichen. Der mittlere Koordinatenunterschied ist ein Maß für die Wiederholgenauigkeit der globalen Punktbestimmung. Die Verzeichnungsparameter der beiden Kameras wurden ebenfalls berücksichtigt. Das Ergebnis ist in Tabelle 3 angegeben. Man sieht, daß die globale Positionierungsgenauigkeit schlechter ist als die relative Genauigkeit des Stereovisionssystems. Das war zu erwarten, weil die Fehler von GPS- und Kreiselmessungen wesentlich größer sind als jene der photogrammetrischen Punktbestimmung.

Einheit	$s_x$	$s_y$	$s_z$
Zentimeter	39.6	2.6	28.8

Tabelle 3: Vergleich der Punktbestimmung im globalen Koordinatensystem. Die mittleren Koordinatenunterschiede sind in [cm] angegeben.

### 4. Ausblick

Die in diesem Aufsatz behandelten Algorithmen bilden die Grundlage für den praktischen Einsatz von mobilen Vermessungssystemen zur globalen Punktbestimmung. Die rigorose Kalibrierung aller Sensoren ist eine wichtige Voraussetzung für die genaue Positionierung. Sie wurde mit einer erweiterten Bündelausgleichung gelöst und kann vollständig automatisiert werden. Wenn einmal die Orientierungselemente bekannt sind, kann jeder Punkt, der in beiden Bildern erscheint, sofort in globalen Koordinaten angegeben werden.

Das wichtigste Ziel weiterer Forschungsarbeiten ist die Automatisierung der Stereo-Bildanalyse, d.h. korrespondierende Punkte eines Objektes sollen automatisch in den beiden Bildern gefunden werden. Wir konzentrieren uns dabei vor allem auf Objekte, die für Straßenverwaltungsbehörden von Interesse sind. So wurden zum Beispiel Funktionen entwickelt, die gut definierte Straßenränder automatisch finden und sie durch gerade Linien im Objektraum annähern. Mittels Bildkorrelation können einzelne Punkte im Bildpaar automatisch zugeordnet werden. Jedes Objekt, das im linken Bild ausgewählt wird, ist daher sofort in globalen Koordinaten verfügbar. Wenn man einen Punktraster im linken Bild definiert, ist es sogar möglich, ein Geländemodell der Straßenoberfläche herzustellen. Sehr viel Aufwand muß allerdings noch für die Identifikation von Verkehrszeichen investiert werden. Verkehrszeichen sollen dabei nicht nur gefunden und lokalisiert, sondern auch vom Computer gelesen werden können. Letzteres ist mit OCR (optical character recognition) Algorithmen möglich und wurde bereits zur Identifizierung von Meilensteinen erfolgreich eingesetzt.

Da alle Punkte direkt in globalen Koordinaten bestimmt werden, ist es naheliegend, diese Algorithmen direkt in ein Geo-Informationssystem zu integrieren; diese Arbeit ist momentan im Gange. Es können dabei nicht nur die Position und verschiedene Attribute für jedes Objekt ins GIS übertragen werden, sondern die in der Datenbank gespeicherte Information kann zur Unterstützung der Bildanalyse herangezogen werden. Sobald geeignete Hardware verfügbar ist, werden wir auch versuchen die „Nachverarbeitung“ in den Vermessungsbus zu verlegen, sodaß eine digitale Karte tatsächlich in Echtzeit generiert werden kann - während man die Straße entlang fährt.

Der Vermessungsbus wurde in mehreren Bundesstaaten in mehr als hundert Meßfahrten erprobt. Der erfolgreiche praktische Einsatz und die kontinuierliche Weiterentwick-

lung der Nachverarbeitungs-Software haben bei vielen privaten Firmen und bei Behörden Interesse an dieser neuen Technologie geweckt. Marktuntersuchungen haben gezeigt, daß unser mobiles Meßsystem ökonomischer und genauer ist als die manuelle Digitalisierung existierender Karten. Die Tatsache, daß die mit dem Vermessungsbuss erhobenen Daten am letzten Stand sind, wird von den Interessenten als eine der wichtigsten Eigenschaften bewertet. Das Center for Mapping ist gerade mit der Kommerzialisierung dieser Technologie beschäftigt. Ein System wurde an eine kanadische Firma verkauft und ist bereits im praktischen Einsatz, andere sind in Planung. Wir glauben, daß mobile Vermessungssysteme nicht nur ein technologischer, sondern auch ein kommerzieller Erfolg sein werden.

### Danksagung

Die Entwicklung des beschriebenen Vermessungsbusses wurde von 38 US-Bundesstraßenverwaltungsbehörden gemeinsam mit NASA und der Defense Mapping Agency finanziert. Der Autor dankt allen Kollegen, die zu diesem erfolgreichen Projekt beigetragen haben, vor allem Dr. John Bossler, dem Direktor des Center for Mapping, Dr. Clyde Goad, der die GPS- und Inertialauswertung erledigte, und Dr. Guangping He, dessen Enthusiasmus den Fortgang des Projektes immens beschleunigte.

### Literatur

- [1] Ackermann, F.; 1992: Operational Rules and Accuracy Models for GPS Aerotriangulation. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Part B3, pp. 691-700.
- [2] Bossler, J., Goad, C., Johnson, P., Novak, K.; 1991: Digital High-Technology Advances to Map the Nation's Highways. Geolnfo Systems, March, pp. 26-37.
- [3] Brown, D.C.; 1976: The Bundle Adjustment - Progress and Prospects. Invited paper, XIII th Congress of ISP, Commission III, Helsinki.
- [4] Goad, C.; 1991: The Ohio State University Highway Mapping System: The Positioning Component. Proceedings of the Institute of Navigation Conference, Williamsburg, VA, pp. 117-120.
- [5] Karara, H. M. (Editor); 1989: Non-Topographic Photogrammetry. Second Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, VA, (445 Seiten).
- [6] Lapine, L.; 1991: Analytical Calibration of the Airborne Photogrammetric System Using A Priori Knowledge of the Exposure Station Obtained from Kinematic Global Positioning System Techniques. Report No. 411, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University (188 Seiten).
- [7] Novak, K.; 1991: The Ohio State University Highway Mapping System: The Stereo Vision System Component. Proceedings of the Institute of Navigation Conference, Williamsburg, VA, pp. 121-124.

### *Anschrift des Autors:*

Novak, K., Asst.Prof., Dr.techn., Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, 1958 Neil Avenue, Columbus, Ohio 43210, U.S.A.