

Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkameratheodolite für technische Präzisionsmessungen

Martin Schlüter, Stefan Hauth und Henning Heß

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Realisierung von motorisierten Digitalkameratheodoliten für technische Präzisionsmessungen (automatisierte trackende Kollimations- und Autokollimationszielungen) vorgestellt. Dargestellt werden das technische Anwendungsbeispiel, die mathematische Modellierung, das Konzept der Selbstkalibrierung und exemplarische Ergebnisse.

Summary

This paper presents the realisation of motorized digital camera theodolites for technical precision measurements (automatic tracking collimation and autocollimation targeting). A technical application, the mathematical background, the concept for self-calibration and exemplary results are given.

1 Hintergrund

Hochgenaue Richtungsmessungen stützen die präzise Montage, Ausrichtung und Justierung bei hohen Genauigkeitsanforderungen. Typische Anwendungsfelder reichen von der Satellitenendmontage bis zur Einrichtung von Druckmaschinen oder Walzstraßen. Kollimations- und Autokollimationszielungen mit Präzisionstheodoliten bestimmen die Ausrichtung von Planspiegeln oder Laserstrahlen im Raum mit einem Optimum an Genauigkeit, vgl. Schwarz 1995. Ergebnisse sind 3D-Richtungsvektoren oder rechnerisch abgeleitete Größen im Koordinatensystem des Auftraggebers.

Die am i3mainz realisierten Digitalkameratheodolite erlauben die hochgenaue Registrierung von Kollimationszielungen, sobald ein Ziel innerhalb des kalibrierten Bereichs des Fernrohrblickfelds des Theodoliten sichtbar ist. Das konkrete Anfahren des Zieles mit dem Fadenkreuz des Theodoliten ist nicht erforderlich. Dies hat zwei wichtige Konsequenzen:

- Hochgenaue Zielungen auf permanent bewegte Ziele sind möglich (Tracking).
- Klassische Zielungen auf statische Ziele werden erheblich vereinfacht und beschleunigt.

Auf der Hardwareseite wurden bislang zwei motorisierte Präzisionstheodolite Leica TM5100™ und TM5100A™ mit koaxial angeordneten digitalen Industriekameras kombiniert (Abb. 1). Das baukastenartige Design erlaubt einen zügigen Kamerawechsel und den Einsatz von Spezial-



Abb. 1: Prototypen der Digitalkameratheodolite auf Basis der motorisierten Präzisionstheodolite Leica TM5100™ und TM5100A™

objektiven für Messungen in Spektralbereichen außerhalb des sichtbaren Lichts. Die Selbstkalibrierung des Gesamtsystems erfolgt durch einige hundert automatisch durchgeführte Zielungen auf statische Ziele (in ca. fünf Minuten) und automatisierter Auswertung mittels subpixelgenauer digitaler Bildverarbeitung und Best-Fit-Algorithmen.

Eingesetzt werden die Digitalkameratheodolite zur Justierung und Kalibrierung von Laserterminals während der Fertigung und der Verifikation im System Test Bed. Laserterminals dienen der Datenübertragung zwischen Satelliten (Abb. 2). Durch die Nutzung von Laserlicht anstelle der bislang üblichen Radiowellen kann die Datenrate erheblich gesteigert werden: Bei ersten Tests seitens der Firma Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG liefen Daten vom deutschen Satelliten TerraSAR-X zum US-Satelliten NFIRE und zurück und überbrückten dabei fehlerfrei mehr als 5000 Kilometer Weltraum. Die erzielte Datenrate entspricht anschaulich etwa 400 DVDs pro Stunde. So könnten größere Datenpakete künftig über mehrere Satelliten hinweg übertragen werden – etwa um Bilddaten von Erdbeobachtungssatelliten zur Bodenstation zu senden.

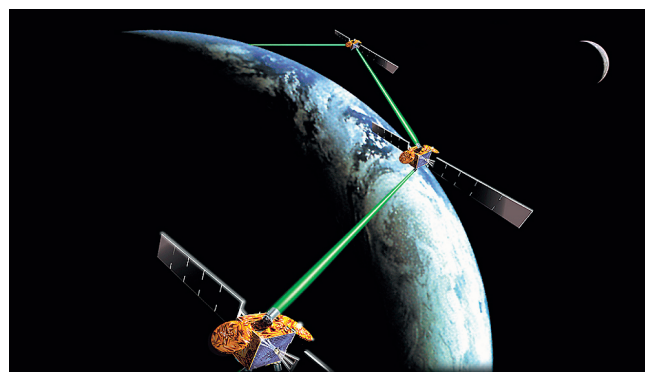


Abb. 2: Datenübertragung mit Laserterminals

Zu Videotheodoliten und Videotachymetern liegt eine Reihe ausführlicher Arbeiten vor. Wesentliche Vor- und Nachteile unterschiedlicher Kombinationen von Theodoliten und CCD-Kameras werden von Schirmer 1994 diskutiert. Einen breiten Überblick liefert Juretzko 2005. Die derzeit seitens des Anbieters Topcon verfügbare kommerzielle Lösung (Sakumura 2007) zielt vornehmlich auf klassische tachymetrische Anwendungen und ist unserem ersten Eindruck nach für die hier vorzunehmenden Kollimationsmessungen ungeeignet.

2 Konzeption und Kameramontage

Ziel ist ein Messsystem mit der Möglichkeit zur trackenden Richtungsmessung zu einem moderat bewegten Ziel. Zu diesem Zweck wird die Fadenkreuzebene mit einer extern am Theodolitgehäuse montierten Digitalkamera

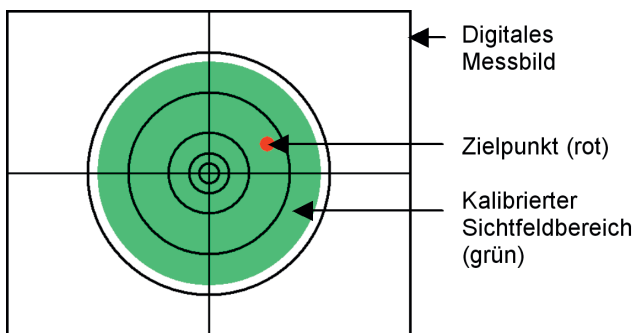


Abb. 3: Zielpunkt im kalibrierten Sichtfeldbereich (schematisch)

aufgenommen. Messungen erfolgen nur bei ruhendem Theodolit, während ein bewegtes Ziel die Fadenkreuzebene quert. Bei ruhendem Theodolit kann die Richtung zum Ziel hochgenau ermittelt werden, sofern sich das Ziel innerhalb des kalibrierten Sichtfeldbereichs befindet (Abb. 3).

Zur großräumigen Verfolgung eines Ziels kann der Theodolit softwareunterstützt schrittweise nachgeführt werden. In den Bewegungsphasen sind allerdings keine hochpräzisen Messungen möglich. Kamerakonfigurationen sind je nach Projektanforderung sowohl mit Theodolitokular (bei auf unendlich fokussierter Kamera) als auch ohne Theodolitokular (Kamera im Makromodus mit Objektivzwischenringen) möglich. Abb. 4 zeigt exemplarisch ein durch das Okular aufgenommenes Messbild samt dem Kollimationsbild eines Laserstrahls.

Die Zentrumskoordinaten des Laserflecks werden mittels digitaler Bildverarbeitung über einen Ellipsenoperator subpixelgenau berechnet. Wie in Abb. 4 angedeutet, werden die als problematisch erkannten Randpixel – hier aufgrund der dem Laserfleck überlagerten Fadenkreuzlinie – nicht berücksichtigt. Aus den Zentrumskoordinaten, den Theodolit- und Kompensatorablesungen und den Daten aus der Selbstkalibrierung wird die (virtuelle) Richtung zum Laserfleckzentrum rechnerisch ermittelt.

Bei der Konstruktion der Kamerahalterung gelingt es, die folgenden Vorgaben in ausreichendem Maße einzuhalten (Heß 2007):

- Schaffung einer möglichst starren Verbindung zwischen Kamera und Fernrohr,
- Beibehaltung des mechanischen Schwerpunkts nahe des Schnittpunkts von Kipp- und Zielachse durch geeignete Gegengewichte,
- Fixierung von Kamera und Gegengewichten ausschließlich an den für die Montage von Aufsatz-EDM-Geräten vorgesehenen Punkten,
- Unterschreitung des durch zugelassene Aufsatz-EDM-Geräte vorgegebenen zusätzlichen Maximalgewichts,
- einfacher Rückbau für manuelle Messungen möglich.

Die Schaffung einer starren Verbindung zwischen externer Kamera und Fernrohr gelingt aus mechanischen Gründen nur in gewissen Grenzen. Insbesondere nach

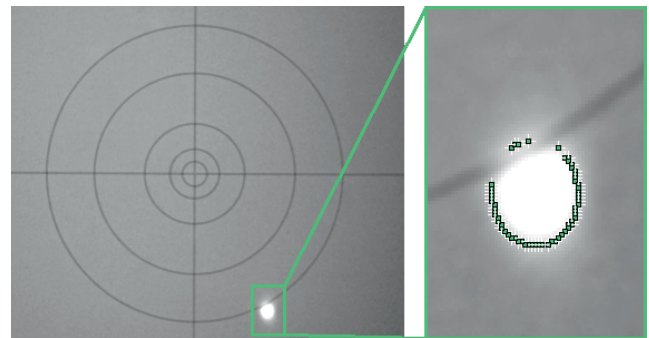


Abb. 4: Zielpunkt im Messbild (li.), Ausschnitt mit Zielpunkt und überlagertem Zwischenergebnis des Ellipsenoperators (re.)

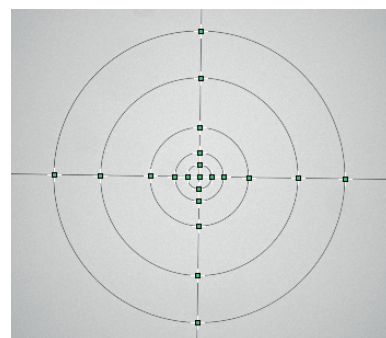


Abb. 5: Referenzbild – Markante Fadenkreuzpunkte dienen der Quantifizierung kleiner Kamerabewegungen.

dem Wechsel der Fernrohrlage treten Kamerabewegungen auf, die teilweise wohl schwerkraftbedingt sind, teilweise aber auch auf thermische oder andere Ursachen zurückgehen. Um die Auswirkungen der Kamerabewegungen zu eliminieren, wird nach einer Kameramontage zunächst ein Referenzbild der Fadenkreuzebene mit Blick auf einen diffusen Hintergrund aufgezeichnet (Abb. 5).

Bei dem dargestellten Fadenkreuz bieten sich die einundzwanzig markanten Linienschnittpunkte als Grundlage für eine zweidimensionale Transformation an. Jedes weitere Messbild wird also zunächst über eine einfache Koordinatentransformation zum Referenzbild in Bezug gesetzt, um die Auswirkungen eventueller Kamerabewe-

gungen zu eliminieren. Punktverschiebungen zwischen Referenzbild und Messbild werden über ein klassisches subpixelgenaues Kreuzkorrelationsverfahren in Anlehnung an (Kraus 2004) berechnet. Dieses einfache Vorgehen reicht aus, denn bei mehrstündigem Kamera- und Theodolitbetrieb in beiden Fernrohrlagen treten für die Gesamttransformation signifikante Änderungen lediglich in den beiden Translationen (sowohl in Zeilen- als auch in Spaltenrichtung) auf, wobei die Größenordnung dieser Translationen insgesamt zwei Pixel nicht überschreitet.

Der zentrale Schnittpunkt der Fadenkreuzlinien wird ebenfalls subpixelgenau mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung im Referenzbild ermittelt und der Zielachse zugeordnet. Durch den geometrischen Bezug jedes einzelnen Messbildes zum Referenzbild muss der zentrale Schnittpunkt der Fadenkreuzlinien nicht für jedes Messbild erneut bestimmt werden sondern darf im einzelnen Messbild z.B. auch überstrahlt sein (solange eine ausreichende Anzahl von Fadenkreuzschnittpunkten für den geometrischen Bezug zum Referenzbild sichtbar bleibt).

Nach der automatischen Auswertung von Referenzbild und digitalen Messbildern durch die digitale Bildverarbeitung liegen pro Bild die Bildkoordinaten des Zielpunkts vor, rechnerisch bereinigt um kleine Kamerabewegungen gegenüber dem Zeitpunkt der Referenzbildaufnahme:

x_B : Bildkoordinate in Spaltenrichtung
 y_B : Bildkoordinate entgegen der Zeilenrichtung

Das Konzept der externen Kameramontage lässt insgesamt nur gut beherrschbare Kamerabewegungen zu. Da sich die Kameramontage auf die für die EDM-Montage vorgesehenen Punkte nahe der Kippachse beschränkt, wirken keinerlei mechanische Kräfte auf äußere Bereiche des Theodolitfernrohrs. Somit sind auch keine signifikanten Veränderungen von Messergebnissen gegenüber der visuellen Beobachtung ohne Kamera zu erwarten.

3 Mathematisches Modell

Das algorithmische Design für die Selbstkalibrierung zielt ausschließlich auf die Durchführung von automatisierten Kollimations- und Autokollimationszielungen ab. Es gilt also stets die Ausrichtungen parallel ins Theodolitfernrohr einfallender Strahlenbündel hochgenau zu bestimmen. Der mathematische Zusammenhang zwischen einem solchen Strahl im Objektraum und den Bildkoordinaten im Kamerasystem wird im Folgenden zusammengestellt. Begonnen wird mit dem Übergang von einem horizontalisierten lokalen Koordinatensystem zu einem fernrohrfesten Koordinatensystem. Die Parameter hierfür werden allein durch die theodolitseitigen Kompensator- und Teilkreisablesungen geliefert. Der sich anschließende Übergang vom fernrohrfesten Koordinatensystem zum Kamerasystem erfolgt über Parameter, die im Rahmen einer Selbstkalibrierung bestimmt werden.

Das mathematische Modell für ein Bündel paralleler Strahlen im Objektraum ist ein Richtungsvektor im Weltsystem, einem horizontalisierten lokalen Koordinatensystem. Der Übergang für einen Richtungsvektor vom nicht streng horizontalisierten Theodolitsystem in das Weltsystem erfolgt über die Kompensatorablesungen. Um später nicht nur die Zielachsrichtung des Theodoliten, sondern auch andere Richtungswinkel transformieren zu können, wird der Zusammenhang zwischen den beiden Systemen in Anlehnung an Walser 2004 über eine Rotationsmatrix ausgedrückt. Ausnahmsweise wird hier also auf die üblicherweise geräteseitig vorgesehene automatische Kompensatorkorrektur verzichtet. Über die transponierte Rotationsmatrix liegt sofort auch die Rücktransformation vor.

$$\mathbf{r}_{\text{Welt}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \text{ Richtungsvektor im Weltsystem} \quad (1)$$

H_z Horizontalrichtung Theodolitzielachse, korrigiert um Achsabweichungen, ohne Kompensatorkorrektur
 Z_d Zenitdistanz Theodolitzielachse, korrigiert um Höhenindexabweichung, ohne Kompensatorkorrektur

$$\mathbf{r}_{\text{Theodolit}} = \begin{bmatrix} \sin H_z \cdot \sin Z_d \\ \cos H_z \cdot \sin Z_d \\ \cos Z_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

Richtungsvektor im Theodolitsystem

I_L Inklination in Zielachsrichtung
 I_T Inklination transversal zur Zielachsrichtung
 $I_P = \arctan\left(\frac{I_T}{I_L}\right) + H_{z_{\text{Theo}}}$ (3)

$$I_A = \sqrt{I_L^2 + I_T^2} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{I_P} = \begin{bmatrix} \cos I_P & \sin I_P & 0 \\ -\sin I_P & \cos I_P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{I_A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I_A & \sin I_A \\ 0 & -\sin I_A & \cos I_A \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Inklination}} = \mathbf{R}_{I_P} \cdot \mathbf{R}_{I_A} \cdot \mathbf{R}_{I_P}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_{\text{Welt}} = \mathbf{R}_{\text{Inklination}} \cdot \mathbf{r}_{\text{Theo}} \quad \text{und} \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_{\text{Theo}} = \mathbf{R}_{\text{Inklination}}^T \cdot \mathbf{r}_{\text{Welt}} \quad (9)$$

Den Gleichungen liegen die folgenden Konventionen zu Grunde: Der Drehsinn der Theodolitablesenungen wird entsprechend der geodätischen Konventionen im Uhrzeigersinn laufend gewählt, vgl. Abb. 6. Als Koordinatensystem wird entsprechend den mathematischen Konventionen ein kartesisches Rechtssystem verwendet.

Die angegebenen Formeln gelten nur für betragsmäßig kleine Inklinationen. Wegen des auskragenden Ka-

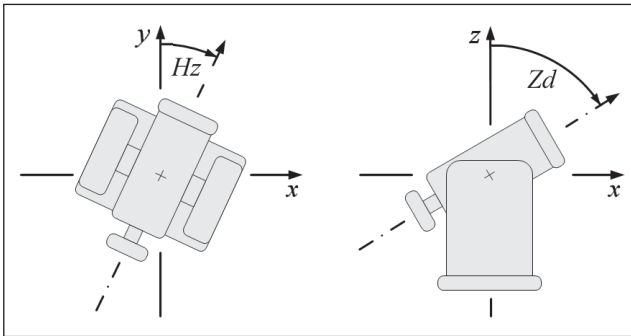


Abb. 6: Konventionen Theodolitsystem: Aufsicht (li.), Seitenansicht (re.)

meranbaus sollte der herstellerseitig vorgesehene Kompensatorenmessbereich beim Einsatz der Digitalkameratheodolite nicht ausgeschöpft werden. Vielmehr wird eine adäquate manuelle Horizontierung vorausgesetzt. Für die verbleibenden Restneigungen sind die angegebenen Formeln geeignet.

Nun wird der Richtungsvektor vom theodolitfesten System in ein fernrohrfestes System verschwenkt. Die Transformationsbeziehung besteht wiederum in einer Drehmatrix, welche aus den (um die Achsabweichungen korrigierten) Theodolitablesenungen Horizontalrichtung H_z und Zenitdistanz Z_d gegeben ist:

$\mathbf{r}_{\text{Fernrohr}}$ Richtungsvektor im fernrohrfesten Koordinatensystem

$$\mathbf{R}_{H_z} = \begin{bmatrix} \cos H_z & -\sin H_z & 0 \\ \sin H_z & \cos H_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{Z_d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin Z_d & \cos Z_d \\ 0 & \cos Z_d & -\sin Z_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Blickrichtung}} = \mathbf{R}_{Z_d} \cdot \mathbf{R}_{H_z} \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_{\text{Theo}} = \mathbf{R}_{\text{Blickrichtung}}^T \cdot \mathbf{r}_{\text{Fernrohr}} \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_{\text{Fernrohr}} = \mathbf{R}_{\text{Blickrichtung}} \cdot \mathbf{r}_{\text{Theo}} \quad (14)$$

Für die Transformation zwischen Richtungsvektoren im Fernrohrsystem und den Bildkoordinaten der digitalen Messbilder wird die photogrammetrische Kollinearitätsbeziehung als Modell gewählt:

m Maßstabsfaktor

c_k Kamerakonstante

$\mathbf{R}_K$ Drehmatrix; Verschwenkung zwischen Fernrohr- und Kamerasystem

$\Delta x; \Delta y$ Verzeichnungspolynome

$$\mathbf{r}_{\text{Fernrohr}} = m \cdot \mathbf{R}_K \cdot \begin{bmatrix} x_B + \Delta x \\ c_k \\ y_B + \Delta y \end{bmatrix} \quad (15)$$

Im Rahmen der Selbstkalibrierung sind die drei Winkel der Drehmatrix, die Kamerakonstante sowie die Koeffizienten der Verzeichnungspolynome inkl. Hauptpunktverschiebung als unbekannte Parameter im Rahmen einer Parameterschätzung nach Kleinsten Quadraten zu berechnen. Der Maßstabsfaktor wird so festgelegt, dass sich für den Richtungsvektor im Fernrohrsystem ein Einheitsvektor ergibt.

Mit der Wahl der photogrammetrischen Kollinearitätsbeziehung als Modell werden u. a. die folgenden Modellannahmen getroffen: Die Kamerakonstante fasst alle optischen Bauteile, also Fernrohrobjektiv, ggf. Fernrohrkular, Kameraobjektiv und ggf. Zwischenringe oder Zwischenlinsen in einer rechnerischen Größe zusammen. Kameraoptik und Fernrohr-optik sind zueinander nicht präzise koaxial ausgerichtet. Die Auswirkungen werden – ähnlich wie bei Kameraobjektiven mit unsauber ausgerichteten optischen Einzelkomponenten – über den Verzeichnungsansatz kompensiert. Von daher sind auch nicht-radiale Verzeichnungsanteile zu erwarten. Hier werden ausgewählte Verzeichnungsparameter des Ansatzes nach Beyer 1992 angesetzt. Weiterhin werden mit diesem Ansatz die Auswirkungen der Kamerabewegung auf die Verzeichnung vernachlässigt. Dies ist hier zulässig, da ein verzeichnungskorrigiertes Kameraobjektiv verwendet wird und auch für die langbrennweitige Fernrohr-optik im achsnahen kalibrierten Sichtfeldbereich nur minimale Auswirkungen geometrischer Verzeichnung zu erwarten sind. Die ortsabhängige Veränderung der Verzeichnung in der Bildfläche ist so gering, dass die Koordinatenkorrektur wegen Kamerabewegung keine signifikanten Änderungen hervorruft. Von daher wird der Verbildungsansatz nicht streng separat pro einzelner Optik, sondern zusammenfassend für alle optischen Komponenten zwischen Objektraum und Bildebene angesetzt. Damit ist der Übergang vom fernrohrfesten zum kamerafesten Koordinatensystem erfolgt.

Alternativ zur hier beschriebenen Vorgehensweise kann statt der photogrammetrischen Kollinearitätsbeziehung eine zweidimensionale Transformationsbeziehung

zwischen zwei Komponenten des Richtungsvektors im Fernrohrsystem und den Bildkoordinaten angesetzt werden. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen führen beide Wege zum Erfolg.

4 Selbstkalibrierung des Fernrohrblickfelds

Um Daten für die Berechnung der unbekannten Parameter der photogrammetrischen Kollinearitätsbeziehung zu gewinnen, wird ein feststehendes Ziel wiederholt so angemessen, dass sich das Ziel gut verteilt über den zu kalibrierenden Bereich der Fadenkreuzebene abbildet. Jede Zielung liefert mit einer neuen Kombination von Theodolitabletungen und Bildkoordinaten des Ziels zwei Verbesserungsgleichungen zur Bestimmung der unbekannten Parameter, wobei die Sollzielrichtung unverändert bleibt.

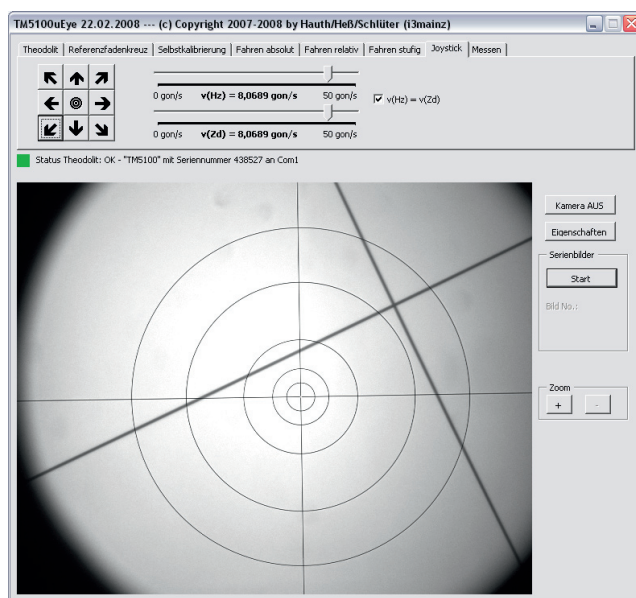


Abb. 7: Softwareoberfläche bei Zielung auf Kollimator

Als mögliche Ziele kommen z.B. das Fadenkreuz eines Kollimationsfernrohres (Abb. 7) oder ein kollimierter Laser (Abb. 4) in Frage. Durch die Motorisierung des Präzisionstheodoliten lässt sich dieser Vorgang gut auto-

omatisieren. Der kalibrierte Sichtfeldbereich wird kreisförmig um den Fadenkreuzmittelpunkt herum festgelegt. Alle Zielungen werden in der Fokussstellung »∞« durchgeführt; die Fokussstellung »∞« wird vorab durch Autokollimation des Theodolitfadenkreuzes auf einen Planspiegel gefunden.

Für die Selbstkalibriermessungen werden dem Theodoliten Winkelpositionen vorgegeben, bei denen die Abbildung des feststehenden Ziels eine optimale Punktgenauigkeit erwarten lässt. Dies ist dann der Fall, wenn der Zielpunkt nicht von den Fadenkreuzlinien überdeckt oder tangiert wird. Fasst man alle Theodolitzielungen während einer Kalibriermessung zu einem festen Ziel in einer Grafik (Abb. 8) zusammen, erhält man das Selbstkalibrierschema:

Das Selbstkalibrierschema wird vom Benutzer je nach Okular oder Messanforderung softwareseitig ausgewählt. Der Benutzer hat zwei vorgegebene Zielungen auf ein feststehendes Ziel manuell vorzunehmen, alle übrigen Zielungen werden vollautomatisch vorgenommen. Auch die Messung des feststehenden Ziels in der zweiten Fernrohrlage ist automatisiert. Die Winkelablesungen zu dem feststehenden Ziel werden nicht direkt gemessen sondern folgen rechnerisch aus den Pixelkoordinaten des Referenzfadenkreuzes unter Anwendung der ausgeglichenen Transformationsparameter.

Sollen mit den Ergebnissen der Selbstkalibriermessungen auch die geräteseitig eingestellten Werte für Höhenindexabweichung, Zielachsabweichung und Kippachsabweichung überprüft bzw. korrigiert werden, dann müssen zwei feststehende Ziele (einmal mit etwa Nivellierblick, also Zenitdistanz ~100 gon; einmal mit Steilsicht nach oben oder unten etwa wie in den geplanten Messungen) in beiden Lagen mit dem Selbstkalibrierschema gemessen und ausgewertet werden. Nivellierblick und Steilsicht können von zwei unterschiedlichen Standpunkten aus erfolgen. Die Berechnung der Achsabweichungen

- ν Höhenindexabweichung
- c Zielachsabweichung
- i Kippachsabweichung

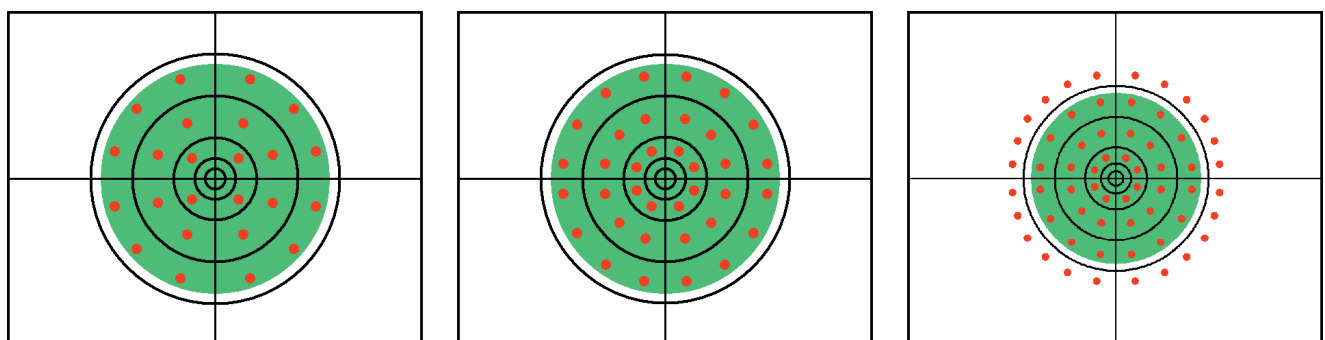


Abb. 8: Exemplarische Selbstkalibrierschemata – 24 Zielungen (li.), 36 Zielungen (mi.), 60 Zielungen (re.) je nach Okularbrennweite

(z.B. nach Stahlberg 1997) schließt sich an die Berechnung der Selbstkalibrierparameter an. Gegebenenfalls erfolgt anschließend eine erneute Berechnung der Selbstkalibrierparameter mit den um die Achsabweichungen korrigierten Theodolitbeobachtungen.

Für die softwareinterne rechnerische Umrechnung von Pixelkoordinaten im digitalen Messbild bis zur korrigierten Theodolitablesung werden zusammengefasst die folgenden Transformationsschritte vorgenommen:

1. Transformation der Pixelkoordinaten vom digitalen Messbild in das Bild mit dem Referenzfadenzkreuz (vier Parameter pro Messbild, überbestimmte Ausgleichung mit ~18 bis 21 identischen Punkten). Elimination der Auswirkungen eventueller Kamerabewegungen.
2. Transformation der Pixelkoordinaten vom digitalen Referenzbildsystem in das Fernrohrsystem (neun Parameter insgesamt, aus überbestimmter Ausgleichung von 24 oder mehr Theodolitzielungen in beiden Lagen zu zwei festen Zielen, mindestens 192 Beobachtungen).
3. Transformation des Richtungsvektors vom Fernrohrsystem in das Theodolitsystem (über eine Rotationsmatrix; eindeutig festgelegt durch die Theodolitablesungen ohne Kompensatorkorrektur).
4. Transformation des Richtungsvektors aus dem Theodolitsystem in das Weltsystem mit lokalem Schwerebezug (über eine Rotationsmatrix, eindeutig festgelegt durch die Theodolitablesungen und die Kompensatorablesungen).
5. Je nach Anwendung: Rückrechnung des Richtungsvektors im Weltsystem in kompensatorkorrigierte Theodolitablesungen.

5 Diskussion einer Verifikationsmessung

Exemplarisch sei hier das Ergebnis einer Verifikationsmessung für die Punktdichte eines Selbstkalibrierschemas für eine konkrete Digitalkamera mit 1280×1024 Pixel Auflösung und C-Mount-Kameraoptik dargestellt und diskutiert. Dabei werden zwei vollständige Selbstkalibriermessungen zu zwei Kollimatoren in beiden Fernrohrstellungen mit dem Standardokular durchgeführt. Bei der ersten Selbstkalibrierung wird das Fadenkreuzreferenzbild in der ersten Fernrohrstellung aufgenommen. Anschließend wird das Selbstkalibrierschema mit je 24 Zielungen gemäß Abb. 8 gemessen, aus diesen 96 Zielungen wird der erste Parametersatz (neun Transformationsparameter) berechnet. Bei der zweiten Selbstkalibrierung wird das Fadenkreuzreferenzbild in der zweiten Fernrohrstellung aufgenommen, anschließend wird das Selbstkalibrierschema mit je 36 Zielungen gemäß Abb. 8 gemessen, aus diesen 144 Zielungen wird der zweite Parametersatz (neun Transformationsparameter) berechnet. Zur Kontrolle der Parameter werden neben den Restklaffungen der an der Parameterberechnung beteiligten Zielungen auch die Restklaffungen aller übrigen (nicht an der Parameterberechnung beteiligten) Zielungen verwendet. Dadurch ergibt sich eine durchgreifende Kontrolle des Selbstkalibrieransatzes, da das 24er und das 36er Schema keine übereinstimmenden Zielungen aufweisen sondern sich vielmehr symmetrisch ergänzen. Abschließend wird zum Vergleich ein dritter Transformationsparametersatz aus allen Zielungen berechnet.

In Tab. 1 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Der mittlere Restklaffungsbetrag (markiert in grün) von jeweils ca. 0,1 mgon (entspricht 1σ) stimmt für alle Transformationsparametersätze etwa überein. Kleine Unterschiede werden lediglich in den minimalen/maximalen Restklaf-

Tab. 1: Ergebnis einer Verifikationsmessung, alle Winkel in Neugrad

Zielung	Hz	Zd	v	c	i	Hz (korr.)	Zd (korr.)	Restklaffungen dHz	Restklaffungen dZd	
2x2x24=96 Zielungen für Transformationsparameter; Referenzbild in Fernrohrlage I; 2x2x36=144 Zielungen zur zus. Kontrolle der Parameter										
Niv.blick, Lage I	59,9488	99,5427	-0,0002	0,0001	-0,0002	59,9489	99,5425	240		Anzahl Zielungen
Niv.blick, Lage II	259,9490	300,4575				259,9489		-0,00056	-0,00035	minimale Restklaffung
Steilsicht, Lage I	385,2924	131,6563				385,2926	131,6561	0,00034	0,00041	maximale Restklaffung
Steilsicht, Lage II	185,2928	268,3443				185,2926		0,00011	0,00010	mittlerer Restklaffungsbetrag
Horizontalwinkel						325,3437		-0,00005	-0,00001	mittlere Restklaffung
2x2x36=144 Zielungen für Transformationsparameter; Referenzbild in Fernrohrlage II; 2x2x24=96 Zielungen zur zus. Kontrolle der Parameter										
Niv.blick, Lage I	59,9494	99,5427	-0,0002	-0,0004	0,0000	59,9490	99,5425	240		Anzahl Zielungen
Niv.blick, Lage II	259,9486	300,4576				259,9490		-0,00036	-0,00037	minimale Restklaffung
Steilsicht, Lage I	385,2932	131,6564				385,2927	131,6562	0,00042	0,00032	maximale Restklaffung
Steilsicht, Lage II	185,2922	268,3442				185,2927		0,00011	0,00010	mittlerer Restklaffungsbetrag
Horizontalwinkel						325,3437		0,00003	0,00000	mittlere Restklaffung
2x2x(24+36)=240 Zielungen für Transformationsparameter; Referenzbild in Fernrohrlage II; keine weiteren Zielungen zur zus. Kontrolle der Parameter										
Niv.blick, Lage I	59,9494	99,5427	-0,0002	-0,0004	-0,0001	59,9490	99,5425	240		Anzahl Zielungen
Niv.blick, Lage II	259,9485	300,4576				259,9490		-0,00042	-0,00034	minimale Restklaffung
Steilsicht, Lage I	385,2931	131,6563				385,2927	131,6561	0,00034	0,00028	maximale Restklaffung
Steilsicht, Lage II	185,2922	268,3442				185,2927		0,00011	0,00010	mittlerer Restklaffungsbetrag
Horizontalwinkel						325,3437		0,00000	0,00000	mittlere Restklaffung

fungen (markiert in gelb) deutlich: Die aus $2 \times 2 \times 36$ Zielungen berechneten Transformationsparameter schneiden etwas besser ab als die aus den $2 \times 2 \times 24$ Zielungen berechneten Transformationsparameter, sind aber nur marginal schlechter als die Transformationsparameter aus der Gesamtausgleichung. Insgesamt erscheint das Kalibriereschema mit den 36 Zielungen als ausreichend, um die Winkelmessgenauigkeit des verwendeten Leica TM5100 von 0,15 mgon (2σ) auch im automatisierten Kameramodus weitgehend auszuschöpfen.

Den ersten beiden Auswertevarianten liegt jeweils ein anderes Referenzfadenkreuzbild zu Grunde, einmal aus der ersten und einmal aus der zweiten Fernrohrlage. Die Fadenkreuzmittelpunkte aus beiden Referenzbildern differieren im Zehntelpixelbereich. Ursachen dafür können kleine Kamerabewegungen, aber auch zufällige Restfehler aus der digitalen Bildverarbeitung sein. Kleine Abweichungen in der Zentrumsbestimmung des Mittelpunkts des Referenzfadenkreuzes wirken wie kleine Zielachsabweichungen (wie sie auch durch die unterschiedlichen Sehgewohnheiten zweier menschlicher Beobachter auftreten können). Nach der abschließenden Achskorrektur stimmen die jeweils resultierenden Winkel (markiert in blau) für die Kollimatorachsen im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit überein.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es gelingt die Realisierung hochgenau messender Digitalkameratheodolite für automatische Kollimationsmessungen zu statischen und moderat bewegten Zielen. Ergänzend sind statische Autokollimationsmessungen möglich.

Der Betrieb der Digitalkameratheodolite erfolgt sowohl für den Selbstkalibrierzyklus als auch für die eigentlichen Messungen über eine kabelgebundene Fernsteuerung am Notebook ausschließlich über Standardschnittstellen (USB 2.0). Damit ist der mobile Einsatz an unzugänglichen Orten gut möglich.

Während vorliegende Veröffentlichungen zu Video-tachymetern meist eine Kameraintegration propagieren, sind im Umfeld unserer Arbeiten zahlreiche Ideen hinsichtlich einer stark modularen Anordnung von Digital-kamera, Optik und Fokussteuerung entstanden. Unserem ersten subjektiven Eindruck nach nehmen wir beim klassischen Geräteanwender bzw. Messdienstleister eine höhere Akzeptanz zum Umstieg auf einen modularen Digitalkameratheodolit oder -tachymeter als zum Umstieg auf ein vergleichbares vollständig gekapseltes System wahr. Insgesamt sehen wir hier einen interessanten Impuls für zukünftige Arbeiten.

Dank

Wir bedanken uns bei Dr. Frank Heine, Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG für die unkomplizierte und professionelle Zusammenarbeit. Weiterhin gilt unser Dank Herrn Waldemar Mordwinzew für Geduld und Sorgfalt bei der Zusammenstellung der Softwaredokumentation.

Literatur

- Beyer, H.: Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. Mitteilungen Nr. 51, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 1992.
- Heß, H.: Realisierung eines hochpräzisen Videotheodolits für die Vermessung von Satellitenkomponenten. Diplomarbeit Nr. 1718, Fachhochschule Mainz, 2007.
- Juretzko, M.: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 588, München, 2005.
- Kraus, K.: Photogrammetrie Band 1. De Gruyter Lehrbuch, Berlin, 2004.
- Sakumura, R., Maruyama, K.: Development of a New Generation Imaging Total Station System. Journal of Surveying Engineering 133:1, S. 14–22, 2007.
- Schirmer, W.: Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 427, München, 1994.
- Schwarz, W.: Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Schriftenreihe des DVW, Bd. 13, Wittwer, Stuttgart, 1995.
- Stahlberg, C.: Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. ZfV 5, S. 225–235, 1997.
- Walser, B.H.: Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Diss. ETH no. 15773, Zürich, 2004.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter | Dipl.-Ing. (FH) Stefan Hauth
Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz
Fachhochschule Mainz University of Applied Sciences
Holzstraße 36, 55116 Mainz
schlueter@geoinform.fh-mainz.de
hauth@geoinform.fh-mainz.de

Dipl.-Ing. (FH) Henning Heß
57567 Daaden
henning.hess.daaden@gmx.de