



Doctoral Thesis

## Development and calibration of an image assisted total station

**Author(s):**

Walser, Bernd Hanspeter

**Publication Date:**

2004

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004845672> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 15773

**DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF AN  
IMAGE ASSISTED TOTAL STATION**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Bernd Hanspeter, Walser**

Dipl. El-Ing., ETH Zurich  
born 10 March 1972  
citizen of Wald / AR

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Armin Grün, examiner  
Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen, co-examiner  
Dr. Bernhard Braunecker, co-examiner

2004

# Abstract

There exists an increasing demand for higher accuracy, faster processing and ease of use of modern total stations. The purpose of my work is to combine the strength of traditional user controlled surveying with the power of modern data processing to satisfy the needs. The combination of the user's experience and a higher degree of automation retains the efficiency of a manually operated theodolite and enhances the reliability and accuracy of measurements through automation.

The user identifies his targets mainly by their 'structure', which he usually interprets as simple geometrical shapes. Such 'primitive' features, however, can be handled effectively by algorithms to either identify and measure single points or to guide the instrument to areas of interest.

Thus the main goal is to find the 3D coordinates of a non-cooperative but structured target by using a theodolite together with an imaging sensor. The surveyor no longer has to rely on active or cooperative targets like prisms, and this new freedom facilitates his work tremendously. However, the integration of 2D image sensors requires additional calibration effort. My thesis presents a prototype of such an "Image Assisted Total Station" (IATS), models the imaging process and outlines the calibration procedures. Image assisted measurements of artificial markers are compared with traditional measurements. The main effort, however, is focused on applications with natural objects: I try to assess the precision in terms of repeatability, the usability and the comfort of semi-automatic measurements.

A Leica Total Station of the TPS1100 Professional Series is modified into a prototype of an IATS. A 2D CCD sensor is placed in the intermediate focus plane of the objective lens, replacing the eyepiece and the reticle, and an autofocus unit to drive the focus lens is implanted. The image data from the sensor are transferred to a PC using a synchronized frame grabber. To maintain the mechanical stability, the connecting cables transmitting the video signals are guided through the hollow tilting axis. The pixel size of  $9.8 \mu\text{m}$  (Hz)  $\times$   $6.3 \mu\text{m}$  (V) corresponds to viewing angles of  $2.7 \text{ mgon}$  (Hz)  $\times$   $1.8 \text{ mgon}$  (V). To fulfill the specified precision requirements of  $0.5 \text{ mgon}$ , a resolution of better than 0.2 pixels is required.

Traditional optical total stations measure 'on-axis' objects, i.e. determine both pointing angles of the reticle crosshair. In case of an IATS viewing angles can be assigned to all CCD pixels inside the optical field of view. To describe the relation between sensors pixel coordinates and the angular viewing angles in the object space, a mathematical model is needed, which describes the optics used, and which specifies the contributions of various sources to the overall error budget. In particular, the optical mapping model has to include the theodolites tilting axis errors, the collimation error, the pointing error of the optical axis, and the vertical-index error. Further errors result from a displacement of the projection center from the intersection of the standing and tilting axis and from the optical distortions of field points.

The semi-automated measurement process is based on a permanent interaction between user and instrument. The user supervises the measurement sequence while the IATS executes the measurements. For example, the surveyor proposes a pattern – a geometrical 'primitive' – which adequately represents the object of interest. The processing software estimates the posi-

tion of the object by local and global template matching. This estimate is used to point the range finder to the selected target to get a valid estimate for the third dimension (depth, distance).

Since the required coordinates of an object point are deduced from the theodolite pointing angles, target distance and the image point location on the CCD, all sensors must be calibrated. It turned out to be useful to perform first a temperature calibration, then determine the exact value of the camera constant with respect to the distance and finally extend the geometrical calibration to all pixels in the optical field of view.

Temperature calibration is similar to the calibration of an optical tacheometer. Using its image processing capabilities, the IATS can automatically drive to measurement positions in both faces, which increases the reliability of the test campaign at different temperatures. The theodolite is positioned, that the object resides at the same sensor position within one pixel for all measurements. This allows us to ignore the influence of deformations caused by optical distortions and mechanical assembly during the calibration, because it is constant for all measurements.

The transformation of the pixel position into viewing angles depends on the camera constant  $c$  of the optical system. Its value is a function of the focus lens position, which is monitored by an encoder. During calibration we measure the encoder values at the best focus position for different target distances, using the autofocus option. Then  $c$  is determined from the optomechanical construction model.

The geometrical transformation for field pixels outside the optical axis (crosshair) depends on the image deformation and on axis errors of the theodolite. Scanning a stationary object with the theodolite performs the ‘off-axis’ calibration. For different theodolite positions the CCD images are recorded and a “least squares template matching” algorithm is applied to increase the mapping accuracy. The scanning is done in both theodolite faces with different objects. The transformation parameters are calculated using the horizontal and vertical theodolite angles and the measured pixel locations.

In order to assess IATS capabilities and to check the calibration, a benchmark is used. Limits of operation are tested with the aid of reference markers of circular shape whose positions are known. Furthermore, the capability to measure non-cooperative targets is outlined. Finally, two field tests are performed by measuring a historic building, the Löwenhof in Rheineck/Switzerland, and by measuring the six degrees of freedom of a workpiece at different spatial positions.

The system described in this thesis can be profitably employed wherever today’s theodolite measurement systems or close-range photogrammetric systems are deployed: Surveying, vehicle construction, surveillance, industrial measurement and forensic.

## Zusammenfassung

Es existiert eine zunehmende Nachfrage nach höherer Genauigkeit, schnellerer und robusterer Verarbeitung der Messergebnisse und einfacherer Handhabung moderner Total Stationen. Ziel dieser Arbeit ist, die Stärken der traditionellen, benutzergesteuerten Vermessung mit den Vorteilen moderner Datenverarbeitung zu kombinieren. Man behält die Effizienz eines manu-

ell betriebenen Theodoliten bei and erhöht die Genauigkeit von Messungen mittels automatisch ablaufenden Bildverarbeitungsmethoden.

Ansatzpunkt ist die Beobachtung, dass ein Benutzer seine Ziele durch ihre ‘Struktur’ identifiziert, die er meistens als einfache geometrische Sachverhalte wahrnimmt. Diese ‘primitiven’ Merkmale können effizient durch Algorithmen zur Identifikation und Vermessung einzelner Punkte oder zur Steuerung des Instrumentes verwendet werden.

Ziel dieser Arbeit ist die 3D Koordinaten von nicht-kooperativen, aber strukturierten Zielen mittels eines Theodolits mit integriertem Bildsensor zu bestimmen. Der Anwender ist so nicht mehr auf kooperative Ziele wie Prismen angewiesen, was seine Arbeit erheblich vereinfacht. Es ist jedoch zu beachten, dass die Integration von 2D Kameras zusätzlichen Kalibrieraufwand erfordert. In dieser Arbeit werden ein Prototyp einer “Image Assisted Total Station” (IATS), die Modellierung des Abbildungsprozesses und die benötigten Kalibrierverfahren präsentiert. Bildgestützte Messungen von künstlichen Zielmarken werden mit traditionellen Messungen verglichen, um die zu erwartenden Genauigkeiten festzustellen. Das Hauptgewicht der experimentellen Arbeit liegt jedoch auf der Messung natürlicher Objekte. Dabei wird die Wiederholgenauigkeit, die Grenzen einer praktischen Anwendung und die Benutzerfreundlichkeit der halbautomatischen Messmethode untersucht.

Eine Leica Total Station der TPS1100 Professional Series wurde zu einem Prototypen einer IATS umgebaut. Ein 2D CCD Sensor wurde in der Zwischenbildebene des Fernrohres montiert. Er ersetzt damit das Okular und das Strichkreuz, während eine Autofokuseinheit die Fokussierlinse bewegt. Die Bilddaten des Sensors werden mit Hilfe eines synchronisierbaren Framegrabbers auf den PC übertragen. Um die Stabilität der Konstruktion zu gewährleisten, wurden die Kabel für die Bildübertragung durch die hohle Kippachse verlegt. Die Pixelgröße von  $9.8 \mu\text{m}$  (Hz)  $\times$   $6.3 \mu\text{m}$  (V) entspricht einem Bildwinkel von  $2.7 \text{ mgon}$  (Hz)  $\times$   $1.8 \text{ mgon}$  (V). Um die spezifizierte Genauigkeit von  $0.5 \text{ mgon}$  zu erreichen, wird eine Auflösung besser als 0.2 Pixel benötigt.

Traditionelle optische Total Stationen messen Objekte entlang der optischen Achse, das heisst, die polaren Zielwinkel entsprechen den Angaben der Hz- und V-Kreiswinkelsensoren, da der Theodolit vom Benutzer so eingestellt wird, dass das Fadenkreuz mit dem Objektbild koinzidiert. Im Falle einer bildunterstützten Total Station kann jedoch jedem Pixel im Bereich des optischen Bildfeldes eine Zielrichtung zugeordnet werden, so dass die genaue und zeitraubende manuelle Anzielung entfällt. Um die Zusammenhänge zwischen den Pixelkoordinaten und den polaren Zielwinkeln im Objektraum zu beschreiben, wird ein realistisches mathematisches Modell benötigt. Dieses hängt primär von den Optikparametern ab, aber auch von den Einflüssen unterschiedlicher Fehlerquellen. Speziell in der Beschreibung der optischen Abbildung müssen die Fehler des Theodolits, nämlich der Kippachsfehler, der Ziellinienfehler und der Vertikalindexfehler, berücksichtigt werden. Weitere Fehler resultieren aus der Abweichung des Projektionszentrums vom Schnittpunkt der Steh- und Kippachse und von der optischen Verzeichnung.

Der halbautomatische Messprozess basiert auf einer Interaktion von Benutzer und Instrument. Der Benutzer spezifiziert und überwacht die Messung, während die IATS die Messung ausführt. Ein Beispiel: Der Vermesser wählt eine Struktur, genannt eine geometrische ‘Primitive’, welche am besten zum gewünschten Objekt passt. Die Verarbeitungssoftware schätzt dann durch lokales und globales Template-Matching ihre Lage und somit im Rahmen der geometrischen Übereinstimmung die Position des Objekts im Bild. Zusätzlich kann der Laser-

Distanzmesser auf das selektierte Ziel gerichtet werden, um die Tiefeninformation beizubringen.

Da die benötigten Koordinaten eines Objektpunktes von der Bestimmung der Theodolit-Zielwinkel, der Zieldistanz und von der Position des Objekts auf dem Bildsensor abhängen, müssen alle Sensoren kalibriert werden. Es ist sinnvoll und üblich, zuerst eine Temperaturkalibrierung vorzunehmen. Danach wird der exakte Wert der Kamerakonstanten in Funktion der Distanz bestimmt, und schliesslich wird die geometrische Kalibrierung aller Pixel im Gesichtsfeld ermittelt.

Die Temperaturkalibrierung entspricht der Kalibrierung optischer Tachymeter. Dank Bildverarbeitung kann die Objektzielung in beiden Fernrohrlagen jedoch automatisiert werden, was die Zuverlässigkeit der Messung bei unterschiedlichen Temperaturen erhöht. Der Theodolit wird so positioniert, dass das Objekt immer an derselben Sensorposition, innerhalb eines Pixels, zu liegen kommt. Dies ermöglicht es, die Einflüsse von Deformationen des Bildes durch die optische Verzeichnung und fehlerhafte Justierung während der Kalibrierung zu vernachlässigen, da sie für alle Messungen konstant ist.

Die Transformation von Pixelablagen in Polarwinkel beruht auf der Kamerakonstanten  $c$  des optischen Systems. Dieser Wert ändert sich durch die Bewegung der Fokussierlinse, deren Position mittels eines Encoders überwacht wird. Während der Kalibrierung werden die Encoderwerte für die jeweils beste Fokusposition für Ziele bei unterschiedlichen Distanzen unter Verwendung der Autofokusfunktion bestimmt.

Die geometrische Transformation für Pixelpositionen ausserhalb der optischen Achse (Fadenkreuz) hängt von der optischen Verzeichnung und den Theodolitachsfehlern ab. Durch ‘scannen’ eines stationären Objekts mit dem Theodolit wird die ‘Off-Axis’ Kalibrierung durchgeführt. Für unterschiedliche Theodolitpositionen werden Bilder mit dem CCD aufgenommen und mittels “Least Squares Template Matching” Algorithmen analysiert. Dieses Vorgehen erhöht die Zielgenauigkeit. Die Scanprozedur wird in beiden Fernrohrlagen auf unterschiedliche Objekte durchgeführt. Die Transformationsparameter werden schliesslich mittels der Horizontal- und Vertikal-Winkel des Theodolits und der Ablagen im Bild berechnet.

Um die Leistungsfähigkeit des Prototyps zu bestimmen, aber auch um die Güte der Kalibrierung zu testen, wird ein ‘Benchmarking’ durchgeführt. Dieser Test zeigt die Vorteile hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer IATS auf. Die erreichbaren Grenzen werden durch die Auswertung bekannter, kreisförmiger Zieltafeln ermittelt. Weiter werden Möglichkeiten der Messung nicht-kooperativer Ziele untersucht. Abschliessend wird durch die Vermessung eines historischen Gebäudes, des Löwenhofs in Rheineck/Schweiz, und die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade eines Werkstücks an unterschiedlichen räumlichen Positionen die Praxistauglichkeit nachgewiesen.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System kann überall eingesetzt werden, wo heutige Theodolit-Messsysteme oder Nahbereichsphotogrammetrie-Systeme zu Einsatz kommen: Vermessung, Automobilherstellung, Überwachung, industrielle und gerichtsmedizinische Messtechnik.