Lehrstuhl für Geodäsie
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Technische Universität München

Tachymetrisches 6 DoF Messverfahren

Konstruktion und Erprobung eines low-cost 3D-Messtasters für bild-unterstützte Totalstationen zur Erfassung der 6 Freiheitsgrade (6 DoF)

Bernhard-Julian Schestauer, Andreas Wagner, Wolfgang Wiedemann und Thomas Wunderlich

Einleitung

In der Industrievermessung ist der Einsatz von Lasertrackern in Verbindung mit Messtastern und der Bestimmung deren 6 Freiheitsgrade (Degree of Freedom) mittlerweile Standard. Es wird dabei nicht nur die Position (x, y, z), sondern auch die 3 Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)$ des Tasters bestimmt. Diese Messmethode ermöglicht die Erfassung von Punkten, wie z.B. auf Bauteilen während der Fertigung, ohne dass eine direkte Sichtverbindung zwischen Objektpunkt und Lasertracker vorhanden sein muss.

Dieses Messverfahren kann 1:1 auf eine bildunterstütze Totalstation bzw. Image Assisted Total Station (IATS) übertragen und somit zusätzliche Arbeitsfelder erschlossen werden. Moderne Totalstationen verfügen teilweise über zwei hochauflösende Kameras: einer Übersichtskamera und einem koaxial verbauten Sensor, der die Sicht durch das Teleskop aufnimmt. In Verbindung mit sehr genauen Distanzmesseinheiten ist es möglich, ähnliche Messtaster zu verwenden, wie sie für Lasertracker entwickelt wurden.

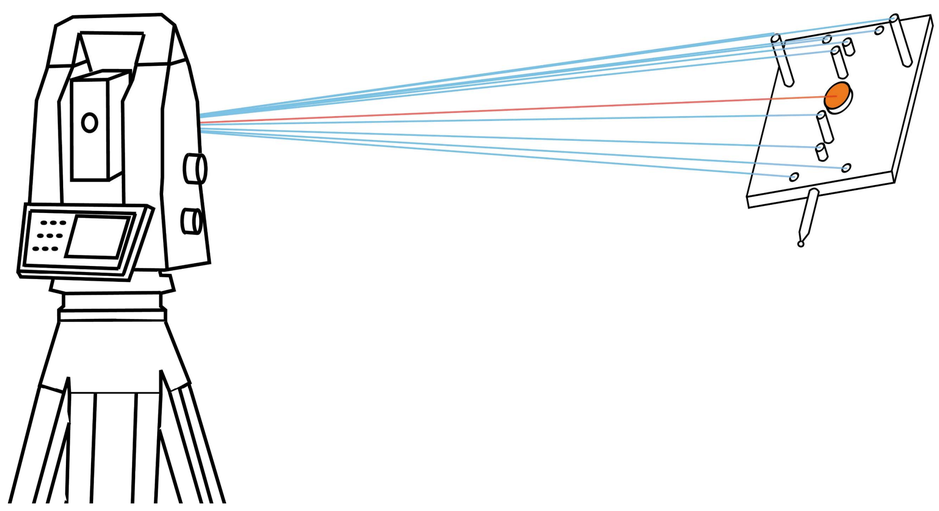

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messprinzips: Kombination aus IATS und dreidimensionalem Messtaster

Messtaster

Kommerzielle Messtaster wie z.B. die Leica T-Probe verwenden Infrarot-LEDs, die von der Kamera des Lasertrackers identifiziert werden, indem sie sequenziell aufleuchten. Um auf Hardware-Modifikationen zu verzichten, wurde ein eigener (passiver) Messtaster-Prototyp konstruiert, der mit allen bildunterstützten Totalstationen verwendet werden kann.

Die Anordnung der Passmarken des Prototyps ist der einer Leica T-Probe nachempfunden, siehe Abb. 2. Für ihre Signalisierung wurde weiße Farbe als Markierung vor schwarzem Hintergrund der Trägerplatte gewählt. Der Einfachheit halber wurde der Werkstoff Holz verwendet; in der Mitte der Tafel befindet sich ein Standard-Miniprisma.

Abbildung 2: Verwendeter Messtaster-Prototyp

Messablauf

Mithilfe der Standardmethoden moderner Totalstationen kann das zentrische Miniprisma automatisch verfolgt werden. Die eigentliche Datenerfassung beginnt mit der (Fein-)Anzielung des Prismas (ATR), der Bildaufnahme und der Registrierung des entsprechenden Horizontal- und Vertikalwinkels (Hz, V) sowie der Bestimmung der Distanz d.

Zur weiteren Verarbeitung werden das aufgenommene Bild und die dazugehörigen Messelemente auf einen externen PC übertragen. Dort wird das Bild zunächst auf die entfernungsabhängige Bildgröße des Messtasters zugeschnitten und die in Abb. 3 dargestellten Bildvorverarbeitungsschritte durchgeführt.

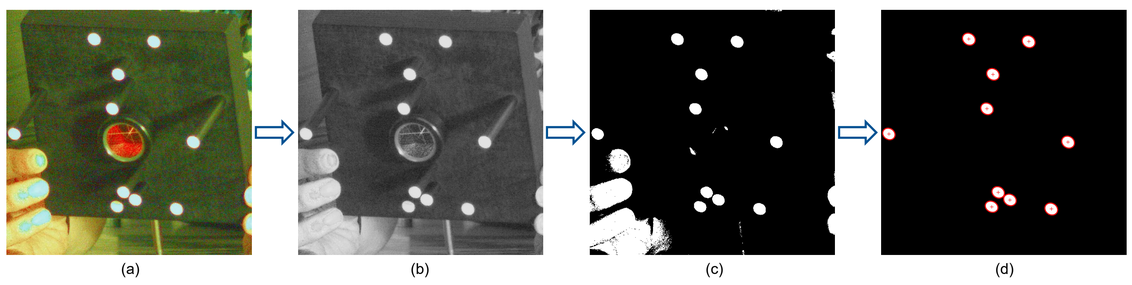

Abbildung 3: Bildvorverarbeitungsschritte (a) Farbbild (b) geglättetes Grauwertbild (c) Binärbild (d) extrahierte Passmarken (kreisförmige Objekte)

Das aufgenommene Farbbild (Abb. 3a) wird in ein Grauwertbild umgewandelt und mit einem Gaußfilter geglättet (Abb. 3b). Ein darauffolgender Schwellwertoperator erzeugt anschließend ein Binärbild (Abb. 3c). In diesem ist es einfach möglich, die eigentlichen Passmarken und deren Bildkoordinaten zu extrahieren (Abb. 3d). Mittels morphologischer Operatoren werden die Ränder kreisförmiger Elemente extrahiert und die Mittelpunkte der verbleibenden Kreise geschätzt. Die segmentierten Regionen werden dabei nach Rundheit und ihrer Fläche entfernungsabhängig gefiltert.

Die Berechnung der Position und die Orientierung des Messtasters erfolgen nach der Methode eines räumlichen Rückwärtsschnittes, wobei die genau gemessene Distanz d als zusätzliche Bedingung berücksichtigt wird. Die notwendigen Näherungswerte liefert das Restklaffen-Minimum eines Vergleichs der gemessenen Passpunktkoordinaten mit den Koordinaten virtueller, im Raum gedrehter Zieltafeln. Die resultierenden 6 DoF-Werte werden in das Tachymetersystem transformiert, der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem kann mittels einer geeigneten Stationierung des Tachymeters hergestellt werden.

Versuche

Die Funktionsweise und Genauigkeit der implementierten Methode und des Messtasters wurden u.a. mit Vergleichsmessungen zu einer Leica T-Probe und einem Lasertracker getestet. In einem Versuch wurden 6 Bohrungen einer Stahlplatte mit beiden Systemen in den jeweiligen lokalen Gerätekoordinatensystemen eingemessen und dann ineinander transformiert. Die Auswertung dieser Starrkörper-Transformation zeigt die innere Genauigkeit der Messergebnisse und ist nicht von Unsicherheiten der Stationierung überlagert. Die jeweiligen Messtaster wurden wie im täglichen Messeinsatz nach Augenmaß auf das Messinstrument ausgerichtet, d.h. es wurde nicht in Extremlagen gemessen. Tab. 1 zeigt die Residuen nach der Starrkörper-Transformation, die alle im Bereich eines Millimeters oder darunter liegen.

Tabelle 1: Residuen nach der Starrkörper-Transformation

Punkt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
1	0,4	-0,6	0,0	0,7
2	0,6	0,0	0,0	0,4
3	0,0	-0,4	0,0	0,2
4	0,2	1,0	0,0	1,1
5	-1,1	-0,3	-0,1	1,0
6	-0,2	0,2	0,0	0,2

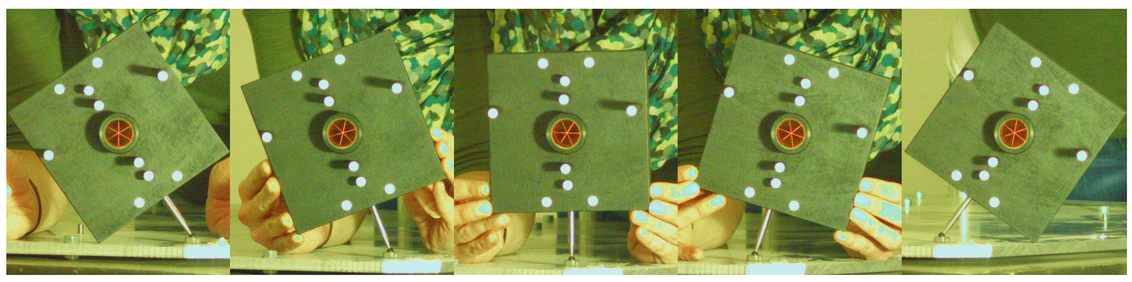

Abbildung 4: Aufnahmen der unterschiedlichen Zieltafelausrichtungen (Auswahl)

In einem zweiten Versuch wurden die berechnete Position der Tastspitze bei unterschiedlichen Orientierungen des Messtasters untersucht. Die Tastspitze wurde in ein Trackerkugel-Nest gesetzt und die Zieltafel in verschiedene Raumlagen gedreht, wie in Abb. 4 in Auszügen gezeigt. Die ausgewerteten Messergebnisse sind als Rekonstruktion virtueller Messtaster in Abb. 5 dargestellt.

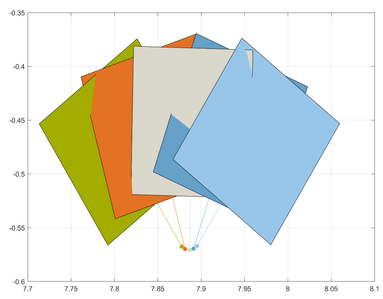

Abbildung 5: Rekonstruierte Zieltafelpositionen und -ausrichtungen (Auswahl)

Es ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Raumlagen des Messtasters gut bestimmt werden konnten, die Position der Tastspitze allerdings leicht variiert. Die Standardabweichung aller Orientierungen beträgt in der Lage 5 mm, in der Höhe 2 mm. Insbesondere in den Extremlagen, in denen alle Passmarken der Zieltafel gerade noch im Kamerabild sichtbar sind, ergeben sich die maximalen Abweichungen vom Mittelwert: in Lage von 15 mm, in Höhe 4 mm.

Fazit

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass es möglich ist, mit dem sehr einfach gestalteten, selbst angefertigten Messtaster und mit einer modernen bildgebenden Totalstation 6 DoF Probleme zu lösen. Die Messmethoden eines Tachymeters werden von reinen 3D-Koordinaten zu 3D-Raumvektoren erweitert. Die Abweichung der Einmessung der Stahlplatte liegt im Millimeterbereich. Die Koordinatenfehler während der Drehungen um denselben Punkt sind höher, aber in Bezug auf die Einfachheit der Zieltafel hinnehmbar. Die Zieltafel hatte einen Materialaufwand von wenigen Euro (abgesehen von dem Miniprisma, das meist beim Kauf eines Tachymeters als Standardzubehör mitgeliefert wird); die Fertigung in unserer Feinmechanischen Werkstatt benötigte eine Arbeitszeit von wenigen Stunden.

Technische Universität München
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Geodäsie
Arcisstraße 21, 80333 München

Bernhard-Julian Schestauer, B.Sc.
bernie.schestauer@tum.de

Dr.-Ing. Andreas Wagner
a.wagner@tum.de

Wolfgang Wiedemann, M.Sc.
w.wiedemann@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Wunderlich
th.wunderlich@tum.de

2017