

Zielführung beim Lasertracking via aktivem Corner Cube

Auto Tracking Using a Laser Tracker via Active Corner Cube

Otto Heunecke, Andreas Wehner, Wolfgang Liebl, Thorsten Strübing, Peter Wrba

Kinematische Messaufgaben im Bereich des Lasertrackings erfordern die kontinuierliche Ausrichtung des zu verfolgenden Reflektors zum Instrument. In Zusammenarbeit mit der Firma VCS Dr. Wrba, Obergünzburg, wurde am Geodätischen Labor der Universität der Bundeswehr München der Prototyp eines kostengünstig herzustellenden 1-Achs-Drehmoduls entwickelt, bei dem für die Echtzeit-Kommunikation mit dem Steuerrechner sowohl eine kabelgebundene serielle als auch alternativ eine Bluetooth-Verbindung implementiert ist.

Schlüsselwörter: Drehmodul, kinematische Messaufgaben, Regelkreissteuerung, Taumelfehler

Kinematic measuring tasks using laser trackers require a continuous alignment of the reflector in tracker direction. In cooperation with the company VCS Dr. Wrba, Obergünzburg, the prototype of a cost-effective producible 1-axis-rotating module is developed at the Geodetic Laboratory of the University of the Federal Armed Forces Munich. Real-time communication with the control device is established by the use of the standard interfaces of RS-232 cable connection and alternatively via Bluetooth.

Keywords: Kinematic measuring tasks, loop tracking, rotating module, wobbling error

1 AUFGABENSTELLUNG

Kinematische Messverfahren lassen sich prinzipiell in drei Bereiche einteilen:

- Von einem festen Standpunkt aus werden die veränderlichen Koordinaten bewegter Ziele erfasst.
- Das Messsystem ist in Bewegung und die statischen Koordinaten fester Ziele werden erfasst.
- Sowohl das Messsystem als auch das Ziel sind in Bewegung und es werden lediglich die relativen Positionen zueinander bestimmt.

Im Folgenden wird von dem erstgenannten Fall ausgegangen. Werden für kinematische Anwendungen Polarmesssysteme mit automatischer Zielerfassung benutzt, muss immer gewährleistet sein, dass eine unmittelbare Sichtverbindung zwischen dem Messinstrument und dem Reflektor besteht. Da gewöhnliche Reflektoren den Nachteil haben, dass bei größeren Veränderungen der Reflektororientierung der einfallende Messstrahl abbricht und es zu Positionsausfällen kommt, werden für solche Messaufgaben zumeist mehr oder weniger lotrecht ausgerichtete Rundumprismen bzw. 360°-Reflektoren verwendet. Solche Reflektoren ermöglichen

omnidirektionale Anzielungen, sofern die Visuren nicht zu steil einfallen. Untersuchungen zeigen stabile tachymetrische Messungen bis zu einem Höhenwinkel von ca. 50 gon /Favre & Hennes 2000/. Die zumindest genähert lotrechte Aufstellung eines Rundumprismas nutzt den Vorteil, dass sich in den meisten Anwendungen, z. B. der Baumaschinensteuerung mittels zielverfolgender Tachymeter, vor allem die Position und der Gierwinkel (Winkel um die Stehachse) ändern. Nick- und Rollwinkel unterliegen dagegen meist nur kleineren Variationen. Bei kurzen Unterbrechungen durch Abschattungen eines Rundumprismas dienen Regelalgorithmen dazu, die Trajektorie der bewegten Plattform zu präzisieren und das Polarmesssystem nachzuführen.

Rundumprismen bestehen im Regelfall aus einer Verbindung mehrerer Prismenkörper aus Glas. Problematisch sind die Übergänge zwischen den einzelnen Prismenkörpern, an denen der Zielstrahl des Polarmessinstruments eine sprunghafte Änderung erfährt. Dabei resultiert der Einfluss auf Positionssprünge nicht allein aus den verfälschten Distanzmessungen, sondern auch aus

Abweichungen der Winkelmessung, da sich auch diese auf das reflektierte Signal beziehen /Nindl & Mao 2009/. Es entstehen in den Spitzen je nach Situation Abweichungen, die ein Mehrfaches der spezifizierten Genauigkeit der Messsysteme ausmachen können. Untersuchungen hierzu siehe z. B. /Favre & Hennes 2000/.

Im Bereich der industriellen Messtechnik, z. B. beim Werkzeugmaschinenbau, werden im Regelfall Positionsgenauigkeiten im Bereich von 1/10 mm bis 1/100 mm gefordert, sodass der Einsatz von Präzisionstachymetern an Grenzen stößt und oft nicht möglich ist. Dieser Umstand führte zur Entwicklung von Lasertrackern. Das Design der beim Lasertracking verwendeten Reflektoren, dies sind Winkelspiegel, Winkelprismen oder Kugelreflektoren, ist einer der signifikanten Faktoren für die erreichbare Qualität der Positionsbestimmung. Insbesondere der nutzbare Aperturwinkel des verwendeten Reflektortyps stellt bei kinematischen Anwendungen einen limitierenden Faktor für das nutzbare Messvolumen und die Orientierung des zu messenden Objekts dar. Rundumprismen, wie sie z. B. bei der Baumaschinensteuerung zum Einsatz kommen, können angesichts der gestellten Genauigkeitsanforderungen keine Verwendung finden.

Gerade bei kinematischen Messaufgaben ist daher eine Vorrichtung zum selbstständigen Nachführen des benutzten Reflektors erstrebenswert. Ein Regelkreis, der den Reflektor kontinuierlich auf das Instrument ausrichtet, erweitert den Anwendungsbereich des Lasertrackings erheblich im Hinblick auf solche Messaufgaben, aber auch bezüglich des Komforts bei einer statischen Anzielung mit variierenden Orientierungen, z. B. der Vermessung von Posen eines Roboters. Nachfolgend beschrieben ist die Realisierung des Prototyps eines 1-Achs-Drehmoduls mit COTS-Low-Cost-Komponenten (COTS: Commercial Off The Shelf; „von der Stange“), bei dem mittels drahtloser oder kabelgebundener Kommunikation die regelkreisbasierte Nachführung möglich ist.

2 LASERTRACKER

2.1 Allgemeines

Das erste als Lasertracker bezeichnete System wurde 1986 entwickelt /Lau et al. 1986/ und 1990 mit dem Leica Smart 310 ein erstes kommerzielles System vorgestellt /Riemensperger & Gottwald 1990/. Seitdem haben sich Lasertracker in der industriellen Messtechnik, auch als Large Volume Metrology bezeichnet, zur produktionsbegleitenden Qualitätskontrolle in der Fertigungsmesstechnik etabliert, insbesondere im Automobil- und Flugzeugbau.

Lasertracker sind polare Messsysteme, die in vielen Anwendungen nicht lotorientiert aufgebaut werden. Entweder werden die Objektpunkte im eigenen, lokalen Koordinatensystem bestimmt oder die Aufstellung wird durch Anschlusspunkte zu Messbeginn in ein Hallensystem transformiert. Zwei orthogonal

zueinanderstehende Achsen erlauben im Instrument die Ausrichtung eines schwenkbaren Spiegels, der den Laserstrahl eines Interferometers oder Absolutdistanzmessers auf einen zu führenden Reflektor lenkt. Das reflektierte Signal liefert die Distanz und die Richtungen zum Reflexionszentrum. Die Zielverfolgung des Reflektors erfolgt über eine positionsempfindliche Diode. Wird der Reflektor bewegt, entsteht auf dieser ein paralleler Versatz, der bei internen Messraten von bis zu 3 kHz bei Instrumenten neuester Generation zum Nachführen der Winkelencoder genutzt wird. Aktuelle Reichweiten betragen bis zu 80 m, wodurch über eine mittige Standpunktwahl Objektgrößen von bis zu 160 m ermöglicht werden (u. a. /Hexagon Metrology 2013/). Mit der Steuersoftware werden aus Distanzen und Winkelinkrementen unmittelbar kartesische Koordinaten berechnet. Daher werden Lasertracker auch als mobile Koordinatenmessmaschinen bezeichnet.

Bei Polarmesssystemen sind die Genauigkeitsverhältnisse zwischen Winkel- und Distanzmessung vom Abstand zum Ziel abhängig. Sowohl durch das absolute als auch das interferometrische Verfahren der Distanzmessung sind im Gegensatz zur Tachymetrie auch bei kurzen Zielweiten weit höhere Genauigkeiten in Längsrichtung als mit der Winkelerfassung in den Querrichtungen möglich. Exemplarisch sind die Genauigkeitsverhältnisse zwischen tachymetrischen Messungen, angenommen ist ein Tachymeter mit $\sigma_r = 0,3 \text{ mgon}$ sowie $\sigma_d = 0,1 \text{ mm}$, und dem Lasertracking anhand der Fehlerellipsen bei Zielweiten bis 40 m in *Abb. 1* dargestellt. Die Fehlerellipsen eines Lasertrackers entsprechen solchen, wie sie mit den Spezifikationen eines Leica AT901 entstehen würden. Dieser hat eine Winkelgenauigkeit $\sigma_r = 7,5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$. Die Messgenauigkeit der Absolutdistanz beträgt $\sigma_{ADM} = 5 \mu\text{m}$ und im interferometrischen Modus $\sigma_{int} = 0,2 \mu\text{m} + 0,15 \mu\text{m/m}$ /Hexagon Metrology 2013/.

Das Distanzmessprinzip der ersten Lasertracker basierte auf rein interferometrischen Messungen (IFM). Diese haben den Nachteil, dass Distanzen nur in Abhängigkeit einer vorher angezielten bekannten Basis in Relation zum Instrument gemessen werden können. Die Basis, auch als Vogelbad bezeichnet, wird durch eine kalibrierte Initialposition am Gehäuse des Lasertrackers realisiert. Ist die Initialposition bekannt, können weitere Positionen über das

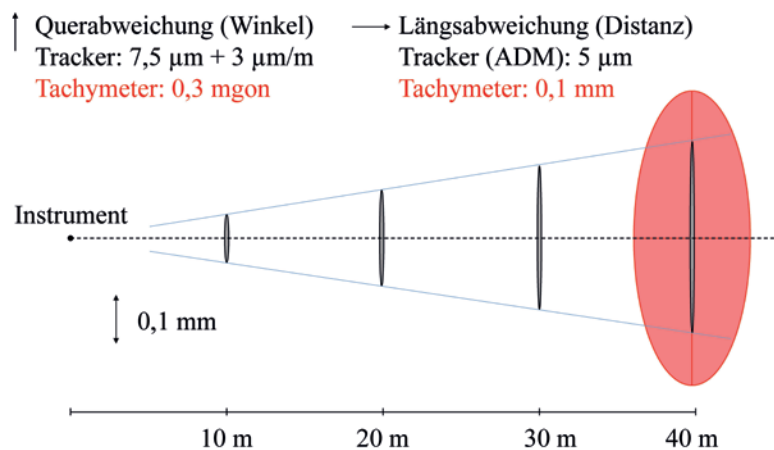


Abb. 1 | Genauigkeitsverhältnisse von Winkel- und Distanzmessung beim Lasertracking und der Tachymetrie (vgl. /Deumlich & Staiger 2002/)

Zählen der Maxima der überlagernden Wellen des ein- und ausgehenden Messstrahls erfasst werden. Jedes Maximum entspricht einer Distanzänderung einer halben Wellenlänge. Nach einer Unterbrechung des Messstrahls muss der Reflektor auf die Initialposition zurückgeführt werden. Neuere Instrumente besitzen zusätzlich einen Absolutdistanzmesser (ADM), mit welchem Distanzen direkt auch ohne Initialposition bestimmt werden können. Die dementsprechend bestimmten Distanzen sind jedoch geringfügig ungenauer als das interferometrische Verfahren. Zudem eignen sich ADM-Systeme nicht zur Beobachtung von schnellen Bewegungen. Abhilfe schafft das Prinzip des Absolute Interferometric Measurement (AIFM), einer Kombination von IFM und ADM. Dabei wird die über IFM gemessene Bewegung verwendet, um die reflektierte Wellenform zu verschieben. Genutzt wird der Effekt, dass die Wellenform bei dieser Translation ihre Form nicht ändert /Boeckem 2011/, /Hexagon Metrology 2012/.

2.2 Reflektortypen

Da es sich bei Lasertrackern um kooperative Messsysteme mit einem Zusammenspiel aus Messinstrument und Reflektor handelt, müssen die möglichen Reflektortypen dekliniert werden. Prinzipiell ist es die Aufgabe des Reflektors, den Zielstrahl zur Distanzmessung ohne Verzerrung und mit möglichst hoher Intensität zurück zum Lasertracker zu projizieren. Um eine leichte Adaptierung und Zuordnung zum eigentlichen Objekt mittels einer konischen Ringlagerung, sogenannte Nester, zu ermöglichen, haben sich Reflektoren durchgesetzt, deren Reflexionszentren in einer Sphäre angeordnet sind.

Die am häufigsten verwendeten Reflektortypen stellen CatEye-Reflektoren, nur auf Wiederholbarkeit ausgelegte sphärische Reflektoren und exakt sphärisch montierte Reflexionsspiegel (Spherically Mounted Retroreflectors – SMR) dar /Faro 2012/. Weiter zu unterscheiden nach Größe, Material und Öffnungswinkel sind Corner-Cube-Reflektoren (CCR), Tooling-Ball-Reflektoren (TBR), Red-Ring-Reflektoren (RRR) und Target-Moderator-Reflektoren (TMR). Alle Varianten gehören zur Gruppe der SMR. Verfügbar sind solche SMR mit den Durchmesser 1,5 Zoll, 0,875 Zoll und 0,5 Zoll. Vor allem 0,5-Zoll-Reflektoren haben jedoch bei größeren Distanzen das Problem, nicht den gesamten Laserstrahl zu reflektieren, sodass unbemerkt systematische Messabweichungen entstehen können.

Nachstehend nicht behandelt ist die Reduktionsaufgabe, die entsteht, wenn von dem Sphärenzentrum bei Führung eines SMR entlang einer Oberfläche auf den Berührungspunkt zurückgerechnet werden muss. Um dies gerade bei unregelmäßigen Oberflächen zu ermöglichen, gibt es Artefakte wie die Leica T-Probe /Hexagon Metrology 2013/.

Die teuerste Gruppe der Reflektoren stellen CatEyes dar (Abb. 2). Sie besitzen mit einem Öffnungswinkel von

$\pm 60^\circ$ den größten Arbeitsbereich. Der Aufbau besteht aus zwei aneinander gesetzten Halbkugeln mit unterschiedlichen Radien. Die Aufgabe der vorderen kleineren Halbkugel ist es, den einfallenden Laserstrahl so zu bündeln, dass er auf einen Reflexionspunkt auf der hinteren größeren Halbkugel zentriert wird. Dort wird er durch beide Halbkugeln zurückgeworfen /Deumlich & Staiger 2002/. CatEyes müssen speziell auf die verwendete Wellenlänge des Lasertrackers hin konzipiert sein. Ist diese Abstimmung zwischen Laserwellenlänge und Reflexionspunkt nicht gegeben, kommt es Abweichungen bei der Distanzmessung.

CCR sind aus drei planen Spiegeln aufgebaut, die die Ecke eines Würfels bilden und den einfallenden Laserstrahl über eine Dreifachreflexion parallel zum Zielstrahl reflektieren. Ein Streckenfehler, hervorgerufen durch den Weg durch einen Glaskörper, kann hierbei nicht auftreten. Es ergeben sich Aperturwinkel von ca. $\pm 30^\circ$. Entscheidende Unterschiede bei den SMR liegen in der Präzision, mit der der Mittelpunkt der Kugel mit dem Schnittpunkt der drei Spiegel übereinstimmt. Sind lediglich Koordinatenänderungen zu bestimmen, reichen die sogenannten Wiederholbarkeitsreflektoren aus. Bei diesen stimmt der Mittelpunkt mit den Schnittpunkten nicht exakt überein bzw. er wird von den Herstellern nicht zertifiziert. Der Vorteil solcher Reflektoren liegt darin, dass sie weit kostengünstiger als CatEyes oder auch zentrierte SMR sind. Bei zentrierten SMR wird versucht, den Kugelmittelpunkt mit dem Schnittpunkt der Planspiegel zu vereinen, sodass allenfalls ein minimaler Versatz zustande kommt. Neben dieser Optikzentrierung spielen auch die Kugeleigenschaften, z.B. Rundheit, eine Rolle bei der erreichbaren Messgenauigkeit /Faro 2012/.

Für die Wahl eines Reflektors zur Bestimmung optimaler Messergebnisse sind drei Bereiche zu beachten. Diese betreffen die Handhabung, die Geometrie und die Optik /Herrmann 2014/. Bei der Handhabung ist u.a. auf die Sauberkeit des Nests zu achten. Zudem sollte der Reflektor immer gleich ausgerichtet sein. Ausnahmen bilden lediglich kinematische Messungen von rauen Oberflächen. Hier sollte der zu führende Reflektor gleichmäßig gedreht werden, um einen Abrieb bei wiederkehrender Verwendung und einer dadurch auftretenden Formveränderung zu minimieren. Hinsichtlich der Geometrie sind Formtoleranz, Zentrierung und Abmessung sowie die optischen Eigenschaften des Reflektors von Bedeutung. Optische Parameter, etwa Brechungsindex und Aperturwinkel, können zumindest teilweise durch eine Kalibrierung erfasst werden und in Form von z.B. Additionskonstanten auf die Messergebnisse angebracht werden. Je nach Reflektortyp variieren die Unsicherheitsbeträge für die verschiedenen Parameter, die gemäß Guide for

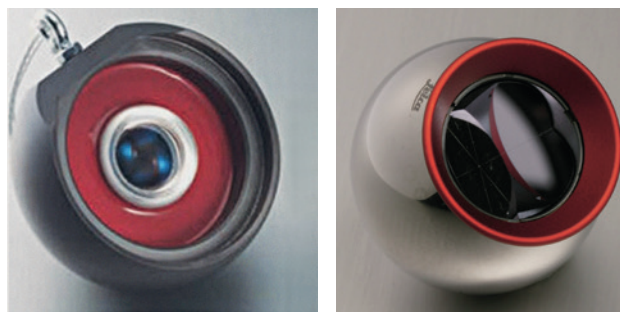


Abb. 2 | Leica 1,5-Zoll-RRR und CatEye /Hexagon Metrology 2014/

the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) neben den Spezifikationen des Instruments bei der Angabe einer Messunsicherheit für die Positionsbestimmung zu berücksichtigen sind.

3 AUTOMATISCHE REFLEKTORNACHFÜHRUNG

Um das Genauigkeitspotenzial des Lasertrackings im kinematischen Bereich auszunutzen, ist es notwendig, einen Reflektor in geeigneter Art und Weise zu führen. CatEyes haben zwar den Vorteil eines Öffnungswinkels von $\pm 60^\circ$, der aber auch nicht alle Situationen abdeckt. Nachteilig ist zudem ihre Anfälligkeit in Bezug auf Unterschiede der Wellenlänge zwischen IFM und ADM. Erstrebenswert ist es daher, einen SMR mit einer geeigneten Mimik kontinuierlich zum Lasertracker auszurichten. Für eine automatische Reflektornachführung sind im Wesentlichen zwei Aufgaben zu lösen:

- Für das ständige Alignieren zum Lasertracker müssen über einen Regelkreis die Orientierungen des Reflektors bekannt sein.
- Die mechanische Führung des SMR muss so umgesetzt werden, dass Exzentrizitäten und Taumelfehler möglichst klein gehalten werden.

3.1 1-Achs-Drehmodule

Viele Messaufgaben finden in einem relativ ebenen Arbeitsbereich mit genähert vertikal verbleibender Stehachse des angezielten Reflektors statt. Ein Beispiel wäre die Zielverfolgung von bewegten Plattformen wie einem Gleismesswagen. Solche Aufgaben vereinfachen die Konzeption eines Drehmoduls, wenn angenommen werden kann, dass lediglich der Gierwinkel größere Veränderungen erfährt. Nick und Rollwinkel werden dagegen eher geringfügig variieren, sodass dieser Bereich über die Apertur des Reflektors abgedeckt ist. Das bedeutet, dass ein Modul zur Ausrichtung des Reflektors mit einer vertikalen Drehachse für den Gierwinkel auskommt. Zusätzlich muss für die algorithmische Ausrichtung nicht die 3D-Orientierung des SMR bekannt sein. Kenntnisse hinsichtlich der Orientierung um die Z-Achse reichen aus.

Das GIK hat eine mechanische 1-Achs-Version eines solchen Moduls unter dem Namen „Active Hub“ entwickelt /GIK 2014/. Bei diesem koinzidiert das Reflektorzentrum mit einer drehbaren Vertikalachse. Durch die Verkabelung ist dieses Modell auf einen Arbeitsbereich von 270° begrenzt. Die Steuerung des Drehmoduls erfolgt entweder manuell oder es wird eine Routine vorgegeben. Die Sinnfälligkeit der automatischen Reflektorausrichtung ist auch auf tachymetrische Netzmessungen übertragbar, um den logistischen (personellen) Aufwand während einer Messung zu reduzieren. /Horst & von Gösseln 2013/ beschreiben den Prototypen eines „Active Prism“, bei dem die Ausrichtung eines Standardreflektors auf den jeweiligen Tachymeterstandpunkt anhand bekannter Koordinaten oder alternativ durch Einbezug eines Kompasses mittels eines Schrittmotors für die Stehachse erfolgt. Die nötige Kommunikation geschieht auf Basis von XBee, was eine kabellose Verbindung von Endgeräten über Reichweiten von bis zu 100 m erlaubt.

3.2 2-Achs-Drehmodule

Bei Anwendungen der industriellen Messtechnik, wie dem Kalibrieren eines Roboterarms in verschiedenen Posen, ist es nicht mehr möglich, von einem genähert ebenen Arbeitsraum zu sprechen. Eine automatische Zielverfolgung mit Hilfe von 1-Achs-Drehmodulen ist damit nicht mehr ausreichend. Es werden zweiachsige Drehmodule benötigt, um die Orientierung eines SMR zu steuern. Eine Möglichkeit zur Umsetzung eines zweiachsigen drehbaren SMR besteht darin, zwei einachsige Drehmodule

GNSS garantiert zukunfts- sicher

GNSS UNLIMITED

Modulare Aufrüstbarkeit sichert
Ihre Investition bis über das Jahr
2020 hinaus ab.

- RTK Software-Update für BeiDou
- Vorrüstbar für Galileo und BeiDou
- Erweiterbar auf mehr als 500 Kanäle

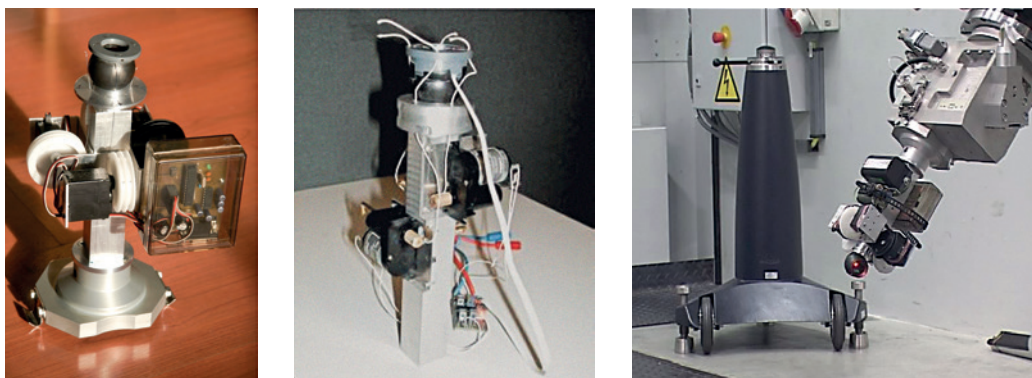


Abb. 3 | Prototypen von 2-Achs-Drehmodulen mit Seilzug-Kugelantrieb der UniBw München

orthogonal zueinander anzuordnen. Die Problematik bei einem solchen zweiachsigen Drehmodul ist die Zentrumstabilität sowie die mechanische Realisierung der sich streng orthogonal schneidenden Drehachsen, die mit dem Reflektorzentrum zusammenfallen müssen. Auch hierzu hat das GIK einen Prototypen entwickelt, welcher mit entsprechender Justierung eine Zentrumstabilität von 0,1 mm zeigt /GIK 2014/.

Einen Ansatz für ein zweiachsiges Drehmodul stellt ein über Seilzüge bewegter SMR dar. Der SMR ist möglichst reibungsarm in einem Nest gelagert. Eine solche Mimik eines Marionettenkopfs wurde am im Geodätischen Labor der Universität der Bundeswehr konzipiert. Die Prototypen sind in *Abb. 3* dargestellt. Der Vorteil der Konstruktion besteht in der stabilen zentrischen Lagerung, wie sie durch das Nest gegeben ist. Jedoch ist der Arbeitsbereich durch die Abwicklungsphysik der Seilzüge derzeit auf etwa $360^\circ \times 180^\circ$ beschränkt. Gesteuert wird das Modul in seiner bisherigen Ausführung trotz motorisierter Achsen lediglich durch manuelle Interaktion mittels Tastatur oder Joystick.

Ein patentiertes, kommerzielles Produkt wird von Automated Precision Inc. (API), einem der führenden Anbieter von Lasertrackern, unter dem Produktnamen „Active Target“ vertrieben /API 2014/. Bei diesem System ist der in einem Gehäuse verbaute Reflektor kardanisch und zentrisch gelagert. Über zwei Motoren werden die rechtwinklig aufeinander stehenden Achsen betrieben und der Reflektor rotiert. Die Verfolgung und Ausrichtung hin zum Lasertracker erfolgt vollautomatisch. Weitere Details hierzu behält sich API allerdings vor. Das „Active Target“ ist nur in Kombination mit API-Lasertrackern einsetzbar.

3.3 Regelkreissteuerung

Die automatische Reflektorausrichtung erfordert einen Regelkreis, der auf einer echtzeitnahen Kommunikation zwischen Drehmodul, Steuerrechner und Lasertracker basiert. Damit der Reflektor korrekt ausgerichtet werden kann, muss die Pose des Messobjekts bzw. die Ausrichtung der sich bewegenden Plattform in Relation zum Koordinatensystem des Lasertrackers bekannt sein. Während die Translationsparameter direkt über die Messelemente des Laser-

trackers als Koordinatendifferenzen verfügbar sind, müssen die Orientierungsparameter über zusätzliche Sensoren auf der Plattform ermittelt oder aus der Trajektorie abgeleitet werden.

Möglichkeiten zur direkten Bestimmung der Orientierungsparameter existieren bereits. Unter dem Begriff „A-TOM“ wurde am GIK eine Vorrichtung zur echtzeitnahen Bestimmung der Ausrichtung entwickelt /Hennes & Richter 2008/. Damit können über Kreisbewegungen die Orientierung und die Position eines Objekts bestimmt werden. Kommerziell bietet zum Beispiel die Firma Leica mit ihren 3D-Artefakten „T-Mac“, „T-Probe“ und „T-Scan“ Möglichkeiten zur simultanen Erfassung der Orientierungsparameter. Der Ansatz besteht aus der Kombination einer photogrammetrischen Auswertung zusätzlicher Dioden, die auf dem Artefakt angeordnet sind, mit den polaren Messungen des Lasertrackers zu einem ebenfalls montierten SMR /Hexagon Metrology 2013/. Dazu muss das Messsystem um eine Kamera erweitert werden. Der Nachteil beider genannter Verfahren besteht darin, dass der Reflektor zur Bestimmung der „6 Degrees of Freedom“ (6DOF) in ein mehr oder weniger aufwendiges Subsystem integriert ist. Ergo muss statt eines SMR dieses Subsystem verbaut werden, wie es mit der „T-Mac“ bei der Roboterkalibrierung gemacht wird. Für einen Regelkreis zur Steuerung eines Drehmoduls ist es auch prinzipiell denkbar, zusätzliche Stützsensoren in Form von Beschleunigungssensoren und Drehratengebern zu verwenden.

Für den Einsatz von 1-Achs-Drehmodulen bei kinematischen Anwendungen kann auch die Trajektorie zur Nachführung genutzt werden. Probleme treten jedoch auf, wenn das bewegte Objekt während der Bewegung auch rotiert. Den einfachsten Fall stellt eine nahezu rotationsfreie Trajektorie des Messobjekts dar, bei dem dann lediglich mit entgegengesetztem Vorzeichen um den zurückgelegten Winkel des Reflektors in Relation zum Instrument gedreht werden muss. Der zurückgelegte Winkel φ um die Stehachse lässt sich über den Bezug

$$\varphi = \operatorname{atan} \left(\frac{y_{R, t_2} - y_T}{x_{R, t_2} - x_T} \right) - \operatorname{atan} \left(\frac{y_{R, t_1} - y_T}{x_{R, t_1} - x_T} \right) \quad (1)$$

berechnen. x_T und y_T beschreiben die Position des Lasertrackers innerhalb einer Arbeitsebene; mit x_{R, t_x} und y_{R, t_x} sind die Positionen des Reflektors zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 bezeichnet.

4 PROTOTYP EINES COTS-1-ACHS-DREHMODULS

4.1 Anwendungsszenario

Die Notwendigkeit für ein zu entwickelndes 1-Achs-Drehmodul beruht auf folgender Messaufgabe: Mit einem Lasertracker soll ein Kuka-Roboter youBot navigiert werden. Da der Antrieb dieser bewegten Plattform über Mecanum-Räder erfolgt, ist eine Bewegung in alle Richtungen um die Stehachse möglich, ohne dabei die Orientierung der Plattform zu verändern. Um auch bei größeren Positionsänderungen eine Messung durch den Lasertracker zu gewährleisten, ist ein Drehmodul erforderlich, das den Reflektor automatisch zum Lasertracker ausrichtet.

Die Regelung des Drehmoduls erfolgt über den mit Gl. (1) beschriebenen Weg. Die konzipierte Anwendung des Drehmoduls ist die Zielführung der Kuka-youBot-Plattform, um am Zielort Punkte mithilfe des auf der Plattform installierten Roboterarms abzustecken (Abb. 4). Da das Drehmodul am vorderen Ende der Plattform angebracht und nach hinten verschattet ist, reduziert sich der sichtbare Arbeitsbereich in Bezug auf den Lasertracker auf etwa 180° in der Horizontalen. Dabei dient das Drehmodul nur zur Navigation der Plattform. Wenn die Plattform im Bereich des Arbeitsraums des Roboterarms erreicht hat, erfolgt die präzise Markierung von Objektpunkten am Hallenboden. Dazu ist an der Messspitze des Roboterarms ein weiterer 0,5-Zoll-SMR montiert. Auf diesen zweiten Reflektor wird vor Beginn der Markierung durch den Arm automatisch gewechselt /Naundorf 2013/.

Das Drehmodul sollte kostengünstig sein und einen Arbeitsbereich von 360° besitzen. Um den Anforderungen gerecht zu werden, bildet das Kernelement ein handelsüblicher Modellbau-Servo des Typ TowerPro MG995. Dieser Motor hat jedoch einen auf 180° beschränkten Rotationsbereich. Zur Erweiterung auf den Vollkreis wurde das Potenziometer, das ursprünglich als Drehgeber eingebaut war, durch ein magnetisches Bauteil ersetzt. Dieser Drehgeber bietet zudem den Vorteil, dass Winke-



Abb. 4 | Kuka-youBot-Markiersystem

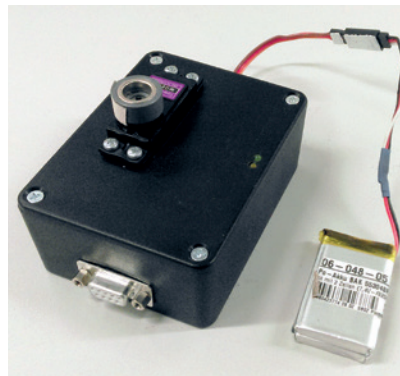


Abb. 5 | Prototyp des 1-Achs-Drehmoduls

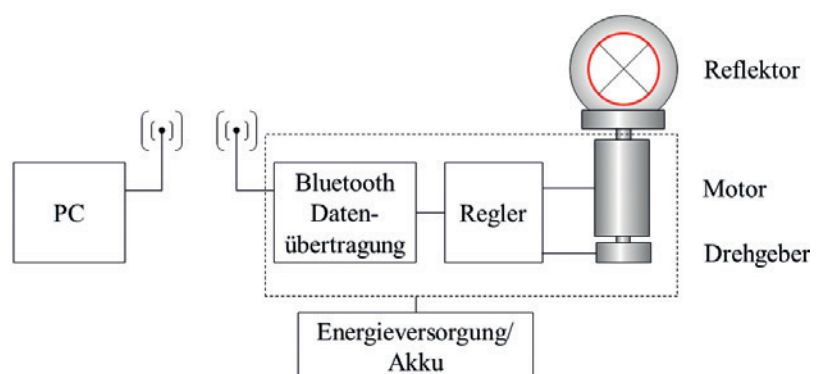


Abb. 6 | Schematischer Aufbau des Drehmoduls (Bluetooth-Variante)

linkmentierungen deutlich präziser durchgeführt werden können und ein verschleißfreier Betrieb gewährleistet ist. Durch die Modifikation sind Winkelauflösungen von unter 1° im gesamten Arbeitsbereich von 360° möglich. Die Drehgeschwindigkeit des Servomotors beträgt bei einer Spannung von 4,8 V etwa $300^\circ/s$ und erlaubt dadurch schnelle Bewegungen eines Messobjekts. Die ca. 4 cm lange Motorachse, welche das Nest trägt und als Stehachse des Reflektors dient, ist durch ein Metallgetriebe und einer zweifachen

Kugellagerung realisiert. Dadurch wird der Taumelfehler der Stehachse minimiert. Da es sich bei dem Motor um eine sehr leichte Bauweise handelt, wird vorzugsweise ein 0,5-Zoll-SMR eingesetzt.

Gesteuert wird der Servo über einen in das $100\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ große Chassis eingebauten Micro-Controller. Am Micro-Controller ist ein Datenübertragungsmodul angebunden, welches es ermöglicht, das Modul entweder über eine serielle Schnittstelle oder über Bluetooth zu steuern. Da die Energieversorgung über

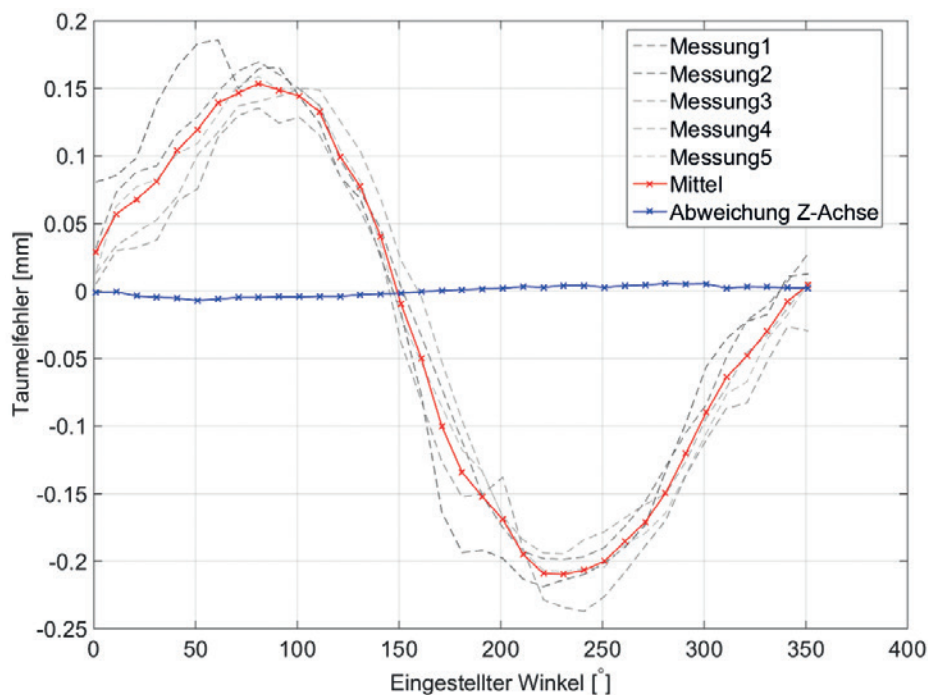


Abb. 7 | Taumelfehler und Abweichung der gemessenen z-Komponenten vom Mittelwert mit einem 0,5-Zoll-Reflektor

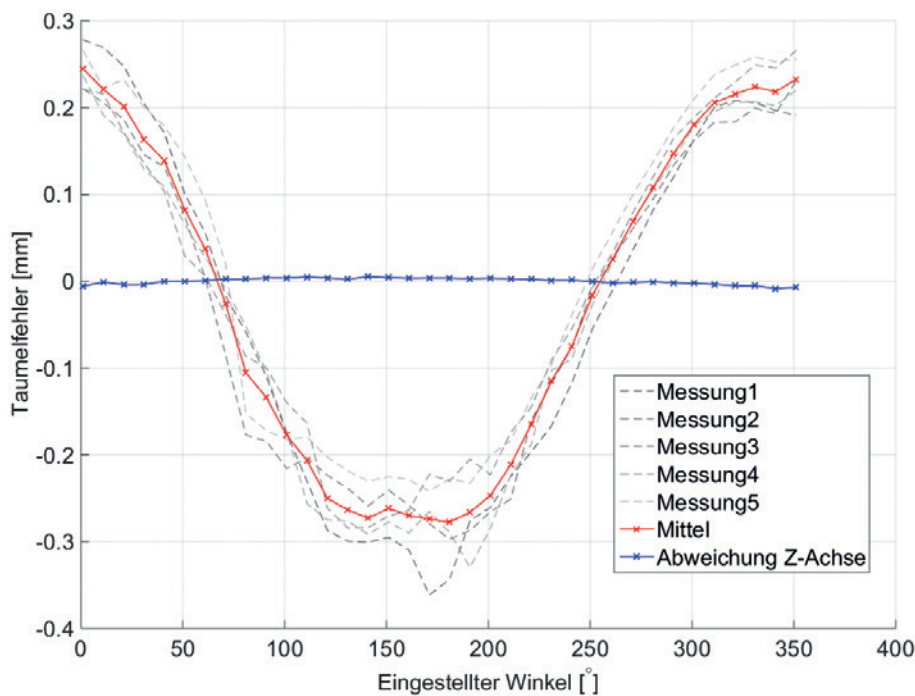


Abb. 8 | Taumelfehler und Abweichung der gemessenen z-Komponenten vom Mittelwert mit einem 1,5-Zoll-Reflektor

externe Lithium-Akkus mit 7,4 V bei 1 A erfolgt, kann das Modul unabhängig befestigt und mit jedem Bluetooth-fähigen Steuerrechner kontrolliert werden. In *Abb. 5* ist der Prototyp dargestellt, *Abb. 6* zeigt den entsprechenden schematischen Aufbau.

Die Steuerung erfolgt über die Programmierumgebung Labview von National Instruments. Das Steuerprogramm kann in andere Programme eingebettet oder vorab fest durch Ablaufroutinen definiert werden. Die berechneten Drehwinkel werden an den Mikrocontroller des Drehmoduls geschickt. Dieser Controller fragt kontinuierlich den Positionencoder des Drehmoduls ab und regelt über den Antriebsmotor den Winkel des Reflektors. Über die serielle Schnittstelle können auch der Batterieladestand und der aktuelle Ist-Winkel abgefragt werden. Alternativ ist eine manuelle Ansteuerung über Eingabegeräte wie Tastatur, Maus oder Joystick möglich.

4.2 Untersuchungen zur Genauigkeit

Um die Eigenschaften des Drehmoduls zu bestimmen, wurden Untersuchungen zum Taumelfehler durchgeführt. Dazu wird das Modul auf einem präzise horizontalen Drehtisch befestigt, welcher in definierten Winkelschritten bewegt wird. Das Drehmodul wird gleichzeitig in entgegengesetzter Drehrichtung gesteuert, der SMR sitzt dabei exzentrisch zur Stehachse. Nach jedem Drehintervall erfolgt eine Messung mit dem ebenfalls horizontalen Lasertracker. Da das Drehmodul bei diesem Aufbau wegen der Exzentrizität idealerweise eine Kreisbewegung um die Rotationsachse des Drehtisches vollzieht, wird der Taumelfehler als Abweichung der tatsächlichen x , y -Messwerte von einem ausgeglichenen Kreis mit der Drehtischrotationsachse als Mittelpunkt angenommen. Die mitbestimmten Werte für die z -Koordinate müssen bei idealer Horizontalisierung einen konstanten Wert haben.

Mit den aufgezeichneten Messwerten wird der beschriebene Kreis um die als fest angenommene Drehachse des Drehtisches berechnet. Die ausgeglichene Unbekannte ist der Radius r als Maß für die Exzentrizität. Der Taumelfehler Θ wird in Abhängigkeit der Ausrichtung α des Drehmoduls gemäß

$$\Theta(\alpha) = \sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2} - r \quad (2)$$

berechnet, wobei x_A , y_A die Position der Rotationsachse des Drehtisches in der horizontalen Ebene und x_M , y_M , die entsprechenden Koordinaten der Messwerte des SMR bezeichnen.

In einem automatisierten Modus zum Verdrehen des Drehtisches und des Drehmoduls sowie zur Auslösung der Lasertrackermessungen wurden Untersuchungen mit 1,5-Zoll- und 0,5-Zoll-SMR durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten in Schrittweiten von 1°, 5°, 10° und 20°, wobei sich eine Schrittweite von 10° als ausreichend für die Auswertung erwies. Die Messreihen wurden mehrfach wiederholt. In *Abb. 7* und *Abb. 8* sind neben den Taumelfehlern (rot) als Mittel von fünf Messreihen die Abweichungen der aufgezeichneten z -Koordinate (blau) dargestellt.

Wie erwartet, sind die Ergebnisse mit dem leichteren 0,5-Zoll-SMR aufgrund der kleineren Last für die Drehachse besser als die des 1,5-Zoll-Reflektors. Der Taumelfehler beträgt 0,3 mm bis 0,4 mm für den kleinen Reflektor. Die Abweichungen der aufgezeichneten z -Koordinate von ihrem Mittel sind im Gegensatz dazu klein und betragen rund $\pm 0,01$ mm. Sie bestätigen das korrekte Horizontalisieren des Lasertrackers und des Drehmoduls. Der Einsatz eines 1,5-Zoll-RRR (dieser besitzt die besten Reflektoreigenschaften) verschlechtert dieses Ergebnis in etwa um einen Faktor 1,5. Der Taumelfehler steigt auf rund 0,5 mm an. Die Abweichungen der z -Koordinaten bleiben aber auch hier mit Werten von $\pm 0,015$ mm klein.

Die durch den Taumelfehler beschränkte Genauigkeit des Drehmoduls ist für die in Abschnitt 4.1 beschriebene Aufgabe mehr als ausreichend. Jedoch muss festgehalten werden, dass dieser Effekt das Unsicherheitsbudget des Lasertrackings signifikant belastet und sonst übliche Messaufgaben somit kaum zu bearbeiten sind.

GNSS präzise bei Daten- ausfall

GNSS UNLIMITED

SmartLink Korrekturen erlauben die Überbrückung von Unterbrechungen des RTK-Signals.

- bis zu 10 Minuten
- +/- 5 cm rms
- Empfang über Satellitenantenne

5 FAZIT

Bei dem vorgestellten Low-Cost-Drehmodul hängt die erreichbare Zentriergenauigkeit von der Qualität der Lagerung der Drehachse ab. Da ein preiswerter Modellbau-Servo genutzt wurde, welcher aber den Genauigkeitsansprüchen für die Kuka-youBot-Navigation genügt, sind die erreichten Taumelfehler akzeptabel, sodass deren Einfluss vernachlässigt werden kann. Sollen jedoch Aufgaben wie die Kalibrierung eines Industrieroboterarms durchgeführt werden, wird die aktuelle Achslagerung dem nicht gerecht. Um entsprechende Messaufgaben durchzuführen, ist eine Weiterentwicklung im Hinblick auf eine stabilere und parallel zur Motorachse stehende Reflektorachse erforderlich. Dies kann beispielsweise durch eine kürzere Achse zur Lagerung des Reflektors oder den Einsatz von präziseren Lagern erfolgen. Sowohl der Antrieb als auch die drahtlose Kommunikationsumgebung sind durch das bestehende Drehmodul bereits gegeben.

LITERATUR

API – Automated Precision Inc. (2014): Active Target – Motorized Laser Tracking Target. API product specifications.

Boeckem, B. (2011): Messprinzipien von Interferometrie, ADM, AIFM und deren technologische Realisierung. Vortrag auf dem GKG-Workshop Kalibrierung geodätischer Messmittel; Schwerpunkt: Hochgenaue Messung langer Strecken. Neubiberg, 27./28.10.2011.

Deumlich, F.; Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage. Wichmann, Heidelberg.

Faro (2012): Lasertracker-Reflektoren. White paper 3.

Favre, C.; Hennes, M. (2000): Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. In: Mensuration Photogrammetrie Genie Rural, 98(2000)2, 72 – 78.

GIK – Geodetic Institute (2014): Active Hub. <http://www.gik.edu/english/hardwareentwicklung.php> (08.01.2015).

Hennes, M.; Richter, E. (2008): A-TOM – eine neuartige instrumentelle Lösung für die hochpräzise und echtzeitnahe 6DOF-Bestimmung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 115(2008)8-9, 301 – 310.

Herrmann, C. (2014): Retroreflektoren in der Industrievermessung. Beitrag zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, 14.–17.01.2014, Zürich (Poster).

Hexagon Metrology (2012): Leica absolute interferometer – A new Approach to Laser Tracker Absolute Distance Meters. White paper.

Hexagon Metrology (2013): Systemspezifikationen für mobile KMG – Leica Absolute Tracker AT901 und Leica T-Produkte.

Hexagon Metrology (2014): Leica Geosystems Metrology Products Catalog Version 1.2. Product Catalog.

Horst, S.; von Gösseln, I. (2013): Active Prism for Total Station Measurements. In: allgemeine vermessungs-nachrichten, 120(2013)4, 129 – 136.

Lau, K.; Hocken, R. J.; Haight, W. C. (1986): Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology. In: Precision Engineering, 8(1986)1, 3–8.

Naundorf, T. (2013): Entwicklung von Regelstrategien zur hochpräzisen Positionierung eines Kuka-youBot-Roboters. Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München (unveröffentlicht).

Nindl, D.; Mao, J. (2009): Surveying Reflectors – Characteristics and Influences. Leica White Paper.

Riemensperger, M.; Gottwald, R. (1990): Kern Smart 310 – Leica's Approach to High Precision Dynamic 3D Coordinate Determination. In: Second International Workshop on Accelerator Alignment, Hamburg.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
otto.heunecke@unibw.de



M. Sc. Andreas Wehner

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
andreas.wehner@unibw.de



Dipl.-Ing Wolfgang Liebl

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
wolfgang.liebl@unibw.de



Dipl.-Ing Thorsten Strübing

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
thorsten.struebing@unibw.de



Dr.-Ing Peter Wrba

VCS DR. WRBA

Gutbrodstraße 58 | 87634 Obergünzburg
mail@vcs-dr-wrba.de

