

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und
Landmanagement

Band: 111 (2013)

Heft: 10

Artikel: Welche Grenzen für die Winkelmessungen? Videotachymetrie im
industriellen Umfeld

Autor: Barras, V. / Jeanneret, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-349307>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Welche Grenzen für die Winkelmessungen? Videotachymetrie im industriellen Umfeld

Um die Herkunft der Ovalisierung von drei Gruppen einer unterirdischen elektrischen Zentrale zu ermitteln, hat der Betreiber das Institut G2C der HEIG-VD beauftragt, ein topometrisches Verfahren abzuschätzen. Die Aufgabe ist, die transversalen Bewegungen der Grössenordnung 0.15 [mm] in Bezug zu den fast 100 [m] entfernten Referenzen zu quantifizieren, was der Dicke eines vom anderen Ende eines Fussballfeldes beobachteten Blattes Papier entspricht! Nach mehreren diese Problematik betreffenden Forschungsarbeiten wurde eine Lösung der Messungen über einen Photo-Theodolit gewählt, der ursprünglich für astronomische Messungen vorgesehen war. Die Visierungen zielen auf LED-Punkte, die auf den zu überwachenden Elementen «Sterne» darstellen. Die Resultate zeigen, dass es möglich ist, mit Hilfe einer spezifischen Materialisierung, eines angepassten Messprozesses und einer grossen Wiederholung der Beobachtungen, die transversalen Verschiebungen mit der gesuchten Genauigkeit zu bestimmen. Die Entwicklung der Funktionen der Software QDAEDALUS lässt zahlreiche Anwendungen im industriellen Umfeld ins Auge fassen.

V. Barras, M. Jeanneret

1. Zusammenhang

Bei den regelmässigen Kontrollen stellen die Mechaniker einer Elektrizitätsgesellschaft eine Verminderung ihres Handlungsspielraums bei der Anpassung der verschiedenen Turbinenelemente in ihrer Zentrale fest. Die Ursache der Ovalisierung ist nicht bekannt.

Zur Ergänzung der schon vorhandenen relativen mechanischen Messungen wird vom Institut G2C [1] der Ingenieur- und Verwaltungsfachhochschule des Kantons Waadt (HEIG-VD) ein topometrisches Verfahren studiert. Die ersten in dieser Forschungsarbeit erwähnten Einschränkungen betreffen die Bestimmung der stabilen Sektoren dieser unterirdischen Anlage sowie die gesuchte Genauigkeit. Die Nord- und Südfüllung genannten, als fix betrachteten Mauern (Abb. 2) haben einen Abstand von ungefähr 100 [m]. Die gewünschte Genauigkeit der gesuchten transversalen Veränderungen beträgt ± 0.15 [mm] mit einer Zuverlässigkeit von 95 [%].

Die rasche Überschlagsrechnung des Geomatikers zeigt: 0.1 [mgon] genügt

nicht! Ist das mit einem Theodoliten realisierbar?

2. Messverfahren

Vier Träger sind auf der Nord- und Südfüllung befestigt. Diese zwei Mauern sind die einzigen als stabil angenommenen Elemente. Ein Theodolit ist auf diesen vier Bezugspunkten angebracht. Von da aus werden die Messungen auf zwei verschiedenen Linien ausgeführt. Oberhalb eines jeden Trägers sind drei Referenzpunkte an der Mauer befestigt. Diese dienen zur Bestimmung der Orientierung jeder Linie von der gegenüberliegenden Station aus. Am Boden sind auf den sensiblen Elementen der drei zu kontrollierenden Produktionseinheiten elf Kontrollpunkte pro Linie eingelassen.

Das Überwachungsprinzip besteht darin, Richtungen auf die verschiedenen Punkte zu messen. Eine zu jeder Station gehörende Referenzlinie entspricht einem über das Prinzip der unbekanntenen Orientierung berechneten fiktiven Norden (Beobachtungen auf die der gegenüberliegenden Mauer befestigten Punkte). Der Beta-Winkel zwischen jedem Kontrollpunkt und dem fiktiven Norden wird in einen metrischen Wert (als fix betrachtete Entfernung) umgeformt (vgl. Abb. 3).

Diese Methode erfordert, dass auf jeder darüber und darunter liegenden Seite zwei linke und voneinander unabhängige Linien errichtet werden. Für jeden Punkt werden zwei transversale Verschiebungen berechnet, die nicht miteinander verglichen werden können. (vgl. Abb. 4). Hingegen ist von einem Messzustand zum anderen die Differenz «Zustand X – Zustand X+1» der zwei transversalen Verschiebungen die gleiche bis auf die Genauigkeit der Messung und das Vorzeichen. Die erhaltenen Variationen werden via eine Gewichtung $1/d$ gemittelt.

3. Genauigkeit des Vorgangs

Mit einem Theodolit der nominalen Genauigkeit von 0.5" werden auf jeder Station sieben Sätze gemessen. Der mittlere endgültige Winkelfehler beträgt 0.04 [mgon], d.h. 0.06 [mm] auf 100 [m].

Bei einem solchen Projekt spielt die Materialisierung eine übergeordnete Rolle. Um ihren Einfluss zu beschränken, wird nach Demontage und Wiederaufbau der ganzen Materialisierung der Kontrollpunkte eine zweite Messserie für jeden Kontrollpunkt vorgenommen. Der mittlere Zentrierfehler der Kontrollpunkte wird dementsprechend auf 0.07 [mm] geschätzt.

Die Zentrierung des Theodolits ist bei dieser Arbeit ebenfalls ein wichtiges Element. Letzter ist auf mit den Trägern bleibend verbundenen Grundplatten befestigt. Dieserart ist es möglich, die Zentrierung mit einer Genauigkeit von 0.2 [mm] zu wiederholen, indem bei jedem Aufstellen des Instrumentes eine systematische Stützung auf der gleichen Seite erfolgt (vgl. Abb. 6).

Diese Methode erlaubt eine transversale Bewegung mit einer Präzision von vornherein 0.11 [mm] mit einer Zuverlässigkeit von 95% abzuschätzen.

4. Instrumentierung

Im Ganzen müssen in jedem Zustand 1680 Beobachtungen durchgeführt werden. Deswegen scheint es unmöglich, die Messungen mit optischer Zielung aus-

zuführen. Die heutzutage auf dem Markt befindlichen automatischen Lösungen beruhen hauptsächlich auf einem gleichen Verfahren: die Verarbeitung der Reflektion eines Laserspots auf einem Prisma.

Nun haben uns die Probleme der Refraktion und Diffraktion des Lasers auf dem Hin- und Rückweg gezwungen, die Lösung des Führungssystems eines QDAEDALUS genannten Foto-Theodolits des GGL [2] der ETHZ zu untersuchen.

4.1 Das System QDAEDALUS

Ursprünglich für die Verfolgung von Sternen bei astronomischen Beobachtungen vorgesehen, besteht das System QDAEDALUS aus einem computergesteuerten Foto-Theodolit und einer Software für die Verarbeitung der erhaltenen Bilder und Beobachtungen.

In der jetzigen Konfiguration besteht das Material aus:

- einem Theodolit TCA 2003 von Leica Geosystems,
- einer Kamera CCD Guppy mit 1032 x 778 Pixel,
- einer Zerstreuungslinse,
- einem Autofokusbildmotor, der das Bild in der Brennebene der Kamera CCD scharf stellt,
- der Software QDAEDALUS

Mit diesem System besteht die Messung auf einem Punkt in zwei Teilen:

- Die angenäherten Horizontalablesungen und Zenit Winkel werden mit dem Theodolit ausgeführt
- Der genaue Punkt entspricht der Verschiebung des gemessenen Punktes in Bezug zum Referenzbild (Principal Point). Letzteres kann mit dem Fadenkreuz für den Sensor CCD verglichen werden.

Eine Theodolitmessung umfasst 10 bis 15 «shots» CCD in Abhängigkeit der Entfernung der Punkte. Mit diesem Vorgehen wird so jeder Punkt zwischen 560- und 840-mal «fotografiert». Total werden 21 560 «genaue Zielungen» pro Zustand gemacht.

4.2 Die Ziele

Jetzt müssen in der Fabrik noch unsere «Sterne» auf den Kontrollpunkten angebracht und die Referenzen geschaffen

werden, damit das Programm in der Lage ist, die Bilder zu verarbeiten.

Die Konfiguration der Örtlichkeiten und die Kompatibilität mit anderen Messmethoden zwingen uns, ein mechanisches Zentrum der Leuchtpunkte mit der oben erwähnten Genauigkeit festzulegen.

Schlussendlich besteht die gewählte Lösung aus LED, die ein Pauspapier beleuchten, um einen «heissen» Punkt einer definierbaren Tiefe zu erzeugen: dies in der Absicht, die Probleme mit der Orientierung zu begrenzen. Um eine mechanische Zentrierung zu erhalten, erlaubt eine kreisförmige Abdeckung mit je nach Distanz variablem Durchmesser das Zentrum des beleuchteten Kreises geometrisch zu bestimmen.

5. Resultate

Seit Januar 2012 sind fünf Zustandsmessungen ausgeführt worden. Im Allgemeinen sind die Bewegungen kleiner als die Messgenauigkeit. Allerdings erscheint eine gewisse Systematik in diesen Verschiebungen. Dies erlaubt die Behauptung, dass die erreichte Genauigkeit besser ist als die geforderten 0.15 [mm].

Ein bisher nicht erwähnter Punkt, der aber in dieser Art von Arbeiten von grösster Wichtigkeit ist, ist die Kenntnis der Bedingungen des Messumfeldes. In diesem Submillimeterbereich hat der Temperaturgradient einen wichtigen Einfluss auf die gemessenen Richtungen. Im Falle, wo dieser zwischen zwei Messzuständen nicht identisch ist, wären die berechneten transversalen Veränderungen davon beeinflusst. Dieser Parameter zwang die Zentrale, den Betrieb während den Messungen anzupassen.

6. Schlussfolgerungen

Diese Forschungen haben ermöglicht, an die Grenzen unserer Instrumentierung zu gehen. Diese Arbeiten zeigen ebenfalls die ausserordentliche Wichtigkeit der zu entwickelnden Materialisierung, um vom Anfang bis zum Ende der Verfahrenskette die maximalen Anforderungen zu garantieren und die Resultate in dem vom

Auftraggeber verlangten Qualitätsniveau zu liefern.

Das in dieser Anwendung verwendete System bleibt ein dem Prototyp nahes Modell. Mit der Entwicklung von mit einer oder mehreren Kameras ausgerüsteten Stationen könnten die mit QDAEDALUS angebotenen Software-Optionen auf weitere Instrumentierungen erweitert werden. Diese Perspektiven eröffnen zahlreiche Applikationswege.

Am Anfang stand bildlich gesprochen die Frage: ist es möglich, Bewegungen in der Grössenordnung der Dicke eines Blattes Papier mit am anderen Ende eines Fussballfeldes platzierten Referenzen zu bestimmen? Heute können wir antworten, dass es in diesem speziellen Fall möglich ist!

Dank

- an die ganze Mannschaft des G2C, vor allem unsere technischen Mitarbeiter, die ihre Kompetenzen und ihr Können für die Realisation des Materials eingebracht haben,
- den Auftraggeber für die Realisierung der Tests bei wirklichkeitsnahen Bedingungen dank der Zurverfügungstellung der Örtlichkeiten und der Unterstützung durch seine Mitarbeiter,
- Sébastien Guillaume vom GGL-Labor für seine Unterstützung und die raschen Eingriffe bei der Korrektur und Anpassung der Software.

Referenzen:

- [1] Institut Géomatique, Gestion de l'environnement Construit et surveillance d'ouvrages de la Heig-VD, g2c.heig-VD.ch (Institut für Geomatik, Management der bebauten Umwelt und Bauwerküberwachung)
- [2] Geodesy and geodynamics lab, www.ggl.baug.ethz.ch

Vincent Barras, Professor
 Martin Jeanneret,
 wissenschaftlicher Mitarbeiter
 HEIG-VD, Institut G2C
 Route de Cheseaux 1
 CH-1401 Yverdon-les-Bains
vincent.barras@heig-VD.ch
martin.jeanneret@heig-VD.ch

Quale limite per le misure angolari? La videotacheometria nell'ambito industriale

Per individuare la provenienza dell'ovalizzazione di tre gruppi di una centrale elettrica sotterranea, il gestore ha incaricato l'Istituto G2C della Alta scuola di ingegneria e gestione del canton Vaud (HEIG-VD) di vagliare la possibilità di prendere in considerazione un processo topometrico. Lo scopo consiste nel quantificare i movimenti trasversali nell'ordine di 0.15 [mm] rispetto ai riferimenti che si trovano a circa 100 [m] di distanza, il che corrisponde allo spessore di un foglio di carta osservato dall'altra estremità di un campo di calcio! Dopo aver esaminato diversi lavori di ricerca incentrati su questa problematica, si è optato per una soluzione di misurazione tramite un fototeodolite, inizialmente concepito per le misure astronomiche. Le prese di mira sono puntate su dei punti LED che fungono da «stelle» posizionate sopra gli elementi da sorvegliare. I risultati mostrano che, con l'aiuto di una materializzazione specifica, un processo di misurazione adattato e una grande ripetizione delle osservazioni, è possibile determinare gli spostamenti trasversali con la precisione richiesta. Lo sviluppo delle funzionalità del software QDAEDALUS permette di prevedere svariati utilizzi in campo industriale.

V. Barras, M. Jeanneret

1. Contesto

Durante i controlli regolari, i meccanici di una centrale elettrica scoprono una riduzione del loro margine di manovra per l'aggiustamento dei diversi elementi delle turbine nella loro centrale. L'origine dell'ovalizzazione non è stata identificata. Per completare le misure meccaniche relative già disponibili, l'Istituto G2C [1] della (HEIG-VD) ha studiato un processo topometrico. I primi vincoli incontrati in questo lavoro di ricerca riguardano la determinazione dei settori stabili di questa struttura sotterranea nonché la precisione ricercata: i muri a nord e sud, chiamati «timpani», (cfr. fig. 2) sono considerati fissi e distano circa 100 [m]. La precisione delle variazioni trasversali ricercate auspicata è di ± 0.15 [mm] con un tasso di affidabilità del 95 [%].

Il geomatico ha fatto in fretta il suo calcolo: 0.1 [mgon] non basta! È realizzabile con il teodolite?

2. Concetto di misura

Si installano 4 supporti sui timpani nord e sud. Questi due muri sono gli unici elementi stabili. Un teodolite viene postato su questi quattro punti di riferimento. A partire da questo punto le misure sono realizzate su due linee distinte.

Sopra ogni supporto sono fissati al muro 3 punti di riferimento che servono a determinare l'orientamento di ogni linea dalla stazione opposta.

Sul suolo, 11 punti di controllo per linea sono fissati sugli elementi sensibili delle tre unità di produzione da controllare.

Il principio della sorveglianza consiste nel misurare le direzioni sui vari punti. Una linea di riferimento specifica per ogni stazione corrisponde a un nord fittizio, calcolato tramite il principio dell'incognita d'orientamento (osservazioni sui punti fissati sul muro opposto).

L'angolo tra ogni punto di controllo e il nord fittizio è trasformato in valore metrico (distanza calcolata come fissa) (cfr. fig. 3).

Questo metodo implica che, su ogni lato a monte e a valle, si vengono a creare due linee a sinistra, indipendenti l'una dall'altra. Per ogni punto si calcolano due spostamenti trasversali, impossibili da confrontare. (cfr. figura 4).

Per contro, da uno stato di misura all'altro, la differenza «stato X – stato X+1» dei due spostamenti trasversali è la stessa a livello di precisione della misurazione e del segno. Le variazioni ottenute sono ovviate attraverso una ponderazione di 1/d.

3. Precisione del procedimento

Con un teodolite con una precisione nominale di 0.5" per ogni stazione si realizzano sette serie di misure. L'errore medio angolare finale è di 0.04 [mgon], cioè 0.06 [mm] a 100 [m].

In un progetto di questo genere, la materializzazione occupa un posto determinante. Per limitare il suo influsso, si realizza una seconda sessione di misurazioni per ogni stazione dopo aver smontato e rimontato tutta la materializzazione dei punti di controllo. L'errore medio di centraggio dei punti di controllo è quindi valutato a 0.07 [mm].

Un altro elemento fondamentale di questo lavoro risiede nel centraggio del teodolite. Infatti, il teodolite è collocato su bracci di sostegno dotati di treppiedi fissati definitivamente. In tal modo è possibile ripetere il suo centraggio con una precisione di 0.02 [mm] creando un sostegno sistematico in occasione di ogni montaggio dello strumento (cfr. fig 6).

Questo metodo consente di valutare un movimento trasversale con una precisione a priori di 0.11 [mm] con un tasso di affidabilità del 95%.

4. Strumentazione

In totale è necessario effettuare 1680 osservazioni di ogni stato. Risulta quindi impossibile realizzare delle misure con un puntatore ottico. Le soluzioni che si trovano attualmente sul mercato si basano prevalentemente sullo stesso processo:

l'elaborazione del riflesso di uno spot laser su un angolo del cubo.

Problemi di rifrazione e diffrazione del laser sul percorso di andata e ritorno ci hanno indotto a esplorare la soluzione del sistema di pilotaggio di un fototeodolite del GGL [2] del Politecnico di Zurigo, chiamato QDAEDALUS.

4.1 Il sistema QDAEDALUS

Originariamente era stato concepito per seguire le stelle durante le misurazioni astronomiche, il sistema QDAEDALUS è composto da un fototeodolite comandato da un computer e da un software per l'elaborazione delle immagini e delle osservazioni fatte.

Nell'attuale composizione, il materiale è composto da:

- un teodolite TCA 2003 della Leica Geosystems,
- una fotocamera CCD Guppy di 1032 x 778 pixels,
- una lente divergente,
- un motore autofocus che consente la messa a fuoco dell'immagine nel piano della fotocamera CCD,
- un software QDAEDALUS

Con questo sistema, la misura su un punto si suddivide in due parti:

- le letture della direzione orizzontale e dell'angolo zenitale sono realizzate con il teodolite
- il punto preciso corrisponde allo spostamento del punto misurato rispetto al riferimento dell'immagine (Principal Point). Quest'ultima può essere paragonata al reticolo per il ricettore CCD.

Una misura con il teodolite è composta da 10 a 15 «shots» CCD in funzione della distanza dei punti. Con questo processo, ogni punto viene «fotografato» tra 560 e 840 volte. In totale si fanno 21 560 «puntature precise».

4.2 Le mire

Adesso rimane da allestire all'interno della centrale le nostre «stelle» sui punti di controllo e le referenze in modo tale che il software sia in grado di elaborare le immagini.

La configurazione dei luoghi e la compatibilità con altri metodi di misura ci obbli-

gano a definire un centro meccanico dei punti luminosi con le precisioni summenzionate.

Alla fine la soluzione prescelta prevede dei LED che illuminano una carta lucida per generare un punto «caldo» con una profondità definibile: questo allo scopo di limitare i problemi di orientamento. Per ottenere un centraggio meccanico si è prevista una copertura circolare, con un diametro variabile a dipendenza della distanza, che consente di determinare geometricamente il centro del disco luminoso.

5. Risultati

Dal gennaio 2012, sono stati effettuate cinque misurazioni dello stato. In generale, i movimenti sono inferiori alla precisione delle misure. Tuttavia, sugli spostamenti appare una certa sistematicità. Questo consente di affermare che la precisione raggiunta è migliore dei 0.15 [mm] ricercati.

Un punto non ancora menzionato ma che riveste un'importanza capitale in questo genere di lavoro è la conoscenza delle condizioni ambientali. Su questa scala submillimetrica, il gradiente di temperatura svolge un effetto determinante sulle direzioni misurate. Nel caso in cui il gradiente tra i 2 stati di misura non sia identico, ci sarà un influsso sulle variazioni trasversali calcolate. Questo parametro ha richiesto alcuni adeguamenti nel funzionamento della centrale durante le misurazioni.

6. Conclusioni

Queste ricerche hanno permesso di avvicinarsi ai limiti dei nostri strumenti. I lavori dimostrano anche la grande rilevanza della materializzazione da sviluppare per garantire, dall'inizio alla fine della catena, massime esigenze e per fornire dei risultati a livello della qualità auspicata dal committente.

Il sistema utilizzato in questa applicazione rimane un modello vicino al prototipo. Con lo sviluppo delle stazioni dotate di diverse fotocamere, le opzioni di software

offerte da QDAEDALUS potrebbero essere estese ad altri strumenti. Queste prospettive aprono la via a tante alte applicazioni.

Il quesito iniziale: è possibile determinare i movimenti dell'ordine di grandezza dello spessore di un foglio di carta con dei riferimenti collocati all'altra estremità di un campo di calcio? Oggi è possibile rispondere questo è fattibile in questo caso specifico!

Ringraziamento

Ringraziamo il team del G2Ce, in particolare, i nostri collaboratori tecnici che hanno messo a disposizione le loro competenze e le loro conoscenze nella realizzazione del materiale.

Un sentito grazie è rivolto anche al committente per averci messo a disposizione i locali e il sostegno dei suoi collaboratori per poter realizzare tutti i test in condizioni reali.

Grazie anche a Sébastien Guillaume del laboratorio GGL per il suo sostegno e il suo tempismo nella correzione e nell'adattamento del software.

Referenze:

- [1] Institut Géomatique, Gestion de l'environnement Construit et surveillance d'ouvrages de la Heig-VD, g2c.heig-VD.ch
- [2] Geodesy and geodynamics lab, www.ggl.baug.ethz.ch

Vincent Barras, professore
Martin Jeanneret,
collaboratore scientifico
HEIG-VD
Istituto G2C
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
vincent.barras@heig-VD.ch
martin.jeanneret@heig-VD.ch