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: 120 (2022)

Heft: 3-4

Artikel: Prototypische Entwicklung eines kinematischen Monitoringsystems

Autor: Hürzeler, Marius / Grimm, David E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-981176

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: 09.08.2025

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

Prototypische Entwicklung eines kinematischen Monitoringsystems

Es gibt viele Infrastrukturobjekte, bei denen neben Verschiebungen auch Schwingungen für die Überwachung des Zustandes von Interesse sind. Um diese Grössen bestimmen zu können, müssen die Objekte mit einer hohen Messfrequenz kinematisch überwacht werden. Dieser Bericht stellt ein prototypisch entwickeltes kinematisches Monitoringsystem vor, welches mehrere Punkte sequenziell mit einer Frequenz von 20 Hz mit einer Totalstation überwachen kann.

Il y a beaucoup d'objets d'infrastructure pour lesquels il est intéressant de connaître aux fins de la surveillance de leur état, à part les décalages, également les vibrations. Afin de pouvoir déterminer ces valeurs les objets doivent être surveillés cinématiquement avec une haute cadence de mesure. Dans cet article est présenté un système de monitoring cinématique développé comme prototype capable de surveiller à une fréquence de 20 Hz plusieurs points de façon séquencielle avec une station totale.

Al momento della verifica dello stato di tanti oggetti infrastrutturali conviene osservare non solo gli spostamenti ma anche le oscillazioni. Per definire questi parametri è necessario sorvegliare gli oggetti in modo cinematico con una frequenza di misurazione più alta. In quest'articolo si presenta un sistema di monitoraggio, sviluppato come un prototipo, che consente di sorvegliare con una stazione totale più punti in modo sequenziale con una frequenza di 20 Hz.

M. Hürzeler, D. Grimm

In der bebauten Umwelt gibt es viele Infrastrukturobjekte wie Brücken, Staumauern, Hochhäuser, Stützmauern etc. bei denen es wichtig ist, Veränderungen an der Bausubstanz rechtzeitig feststellen zu können. Daher ist es nötig, die Objekte hinsichtlich geometrischer Veränderungen zu überwachen und diese regelmässig zu kontrollieren. Nebst geometrischen Verschiebungen sind oft auch die Frequenz und Amplitude von Schwingungen in den Objekten von Interesse.

Ein kinematisches Monitoringsystem kann dazu genutzt werden, um an einem Objekt Punkte kontinuierlich zu überwachen. Kontinuierlich bedeutet, dass die einzelnen Punkte typischerweise mit einer Messfrequenz von bis zu 20 Hz mit GNSS und Totalstationen oder mit bis zu > 100 Hz bei Verwendung von Kameras und Schwingungsmessern überwacht werden. Dadurch kann aus den Messdaten beispielsweise die Schwingfrequenz eines Objektes bestimmt werden. Der bei Geomonitoringsystemen oft verwendete Ansatz, die Messsensoren von einem zentralen Server aus zu steuern, ist aufgrund der erforderlichen hohen Übertragungsgeschwindigkeiten und geringen Latenz für Messungen mit einer solch hohen Messfrequenz ungeeignet. Deshalb wird in diesem Projekt ein Ansatz aus dem Edge-Computing verwendet, wobei die Steuerung der MS60 und die Speicherung und Auswertung der Daten vor Ort erfolgt und nur die relevanten Daten an einen zentralen Server übermittelt werden. Das Projekt wurde vom Autor als Vertiefungsprojekt im Rahmen des Master of Science in Engineering MSE, Profil Geomatics, an der FHNW durchgeführt.

Stand der Technik

Mit modernen Totalstationen können Objekte kinematisch überwacht werden. Im Gegensatz zu GNSS-Empfängern braucht die Totalstation keine freie Sicht zu den Satelliten und kann dadurch auch in engen Häuserschluchten, in Innenräumen oder zum Beispiel auf der Unterseite von Brücken eingesetzt werden. Nachteile sind mögliche Messprobleme bei schlechten Wetterbedingungen und der Fakt, dass eine Sichtverbindung zwischen der Totalstation und dem Reflektor bestehen muss.

Die erreichbare Messfrequenz nahm mit neueren Instrumenten zu. Cosser et al. (2003) erreichten in ihren Untersuchungen mit einer Leica TCA 2003 eine Messfrequenz von etwa einem Herz. Später untersuchten Psimoulis & Stiros (2007) den Einsatz einer Leica TCA1201 für das kinematische Monitoring. Sie konnten feststellen, dass mit dem Instrument fünf bis sieben Messungen pro Sekunde ohne fixes Intervall möglich sind. Sie kamen daraus zum Schluss, dass mit der Totalstation die Amplitude von Schwingungen mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern und Frequenzen über zwei Herz bestimmt werden können. Lienhart et al. (2017) erwähnen die Distanzmessung, welche zu einem grossen Teil der limitierende Faktor für die Messgeschwindigkeit ist. Allerdings ist es für die Messung von Schwingungen, je nach Aufnahmegeometrie, nicht notwendig, die Distanz kontinuierlich zu messen und es würden auch Winkelmessung ausreichen. Bei einem Test mit einem Leica TS15, angesteuert über GeoCOM, erreichten Lienhart et al. (2017) für die reine Winkelmessung eine Messfrequenz von 20 Hz. Eine andere Lösung ist der Einsatz von Totalstationen mit einem schnelleren Distanzmesser, wie zum Beispiel der Leica MS60. Damit erreichten sie Messfrequenzen von 21–25 Hz. An der FHNW ermittelte Senn (2018) mit der Leica MS60, angesteuert über GeoCOM, eine maximale Messfrequenz von 20 Hz. Ein Nachteil ist die ATR-Auflösung im dynamischen Modus von nur 0.3 mgon, was sich stufenartig in den Messwerten abzeichnet

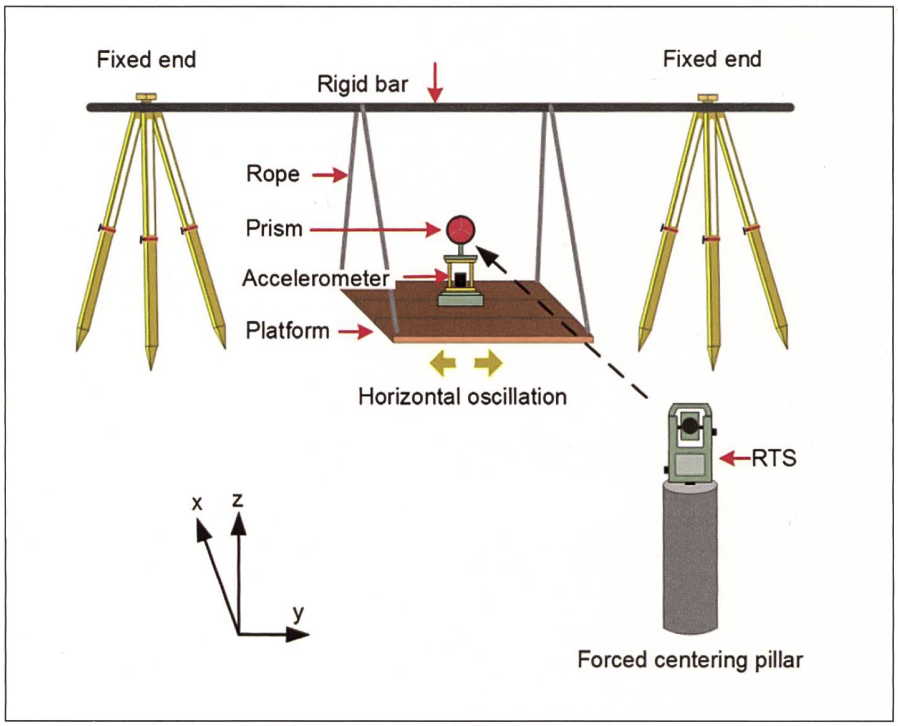

Abb. 1: Versuchsaufbau von J. Yu et al. (2017, S. 65. Verwendung der Abbildung vom Autor bewilligt).

(Lienhart et al., 2017). Eine Möglichkeit, um die maximale ATR-Auflösung zu umgehen, ist die Kombination einer Totalstation und der kamerabasierten Schwingungsmessung. Solche Systeme wurden von Bürki et al. (2010), Ehrhart & Lienhart (2015) und Zschiesche et al. (2020) beschrieben, an dieser Stelle wird darauf aber nicht weiter eingegangen.

In der Literatur sind auch verschiedene Versuchsaufbauten dokumentiert, um solche Systeme zu untersuchen. Psimoulis & Stiros (2007) benutzten einen Oszillator, der die linearen Schwingungen auf einen Wagen überträgt, welcher auf einer horizontalen Schiene gleitet. J. Yu et al. (2017) bauten eine einfache Holzplattform, welche mit Seilen an einem Balken befestigt, manuell in Schwingung versetzt wurde (Abb. 1). Die Frequenz kann durch die Länge der Seile gesteuert werden. Durch das Hinzufügen einer Feder zwischen der Aufhängung und den Seilen entstand eine Schwingung in vertikaler Richtung.

Auch Roberts et al. (2004) nutzten einen einfachen Holzrahmen, welchen sie mit einem Bungee-Seil an einem hohen Stativ fixierten. Yigit & Gurlek (2017) verwendeten Stahlstäbe mit drei unterschiedlichen Längen, welche auf der einen Seite in einer festen Struktur fixiert wurden. Auf der anderen Seite wurde ein GNSS-Empfänger darauf montiert und die Stahlstäbe danach in vertikaler Richtung manuell in Schwingung versetzt. Yi et al. (2013) nutzten eine Konstruktion aus Stahl, mit der ein GNSS-Empfänger manuell in Schwingung versetzt wurde.

Entwickelte Monitoringsoftware

Das in der Folge beschriebene kinematische Monitoringsystem ist auf einen vollautomatischen Einsatz ausgelegt. Die Software für das Monitoringsystem wurde in Python geschrieben und kann über eine Einstellungsdatei aufgesetzt werden. Die Software ist in zwei Teile getrennt. Im ersten Teil werden die Messungen getätigt und in einer lokalen Datenbank gespeichert. Im zweiten Teil werden die Daten aus der Datenbank gelesen, ausgewertet und über MQTT publiziert.

Beim Starten des Programms wird eine neue SQLite-Datenbank erstellt, die Verbindung zur Totalstation initialisiert und die Standpunkt-Koordinaten der Totalstation ausgelesen. Daraufhin startet die Dauerschleife, worin zuerst die Orientierung auf den Fixpunkt gesetzt wird.

Im Programmabschnitt für die Messungen wird die Totalstation zu den Näherungskoordinaten der zu überwachenden Punkte gedreht und dort das Prisma mittels ATR gesucht und darauf eingelockt. Die Zeitdauer, mit der ein Punkt angemessen wird, kann in der Einstellungsdatei angegeben werden. Danach werden mit der maximal möglichen Geschwindigkeit die in der Einstellungsdatei definierte Anzahl Messungen durchgeführt und in einer Liste gespeichert. Zu jeder Messung wird die aktuelle Zeit des Raspberry Pi auf die Mikrosekunde genau gespeichert. Wenn alle Messungen durchgeführt wurden, werden die gesammelten Daten in die Datenbank geschrieben. Zur Datenanalyse werden die Beobachtungen zu einem einzelnen Punkt aus der Datenbank abgerufen und – um Schwingungen um die Nulllinie zu erhalten – werden die Koordinatenwerten um den Mittelwert reduziert. Für die Analyse der Daten wurden aktuell die Berechnung der Frequenz und Amplitude implementiert. Für die weitere Verwendung werden die Daten über das IoT-Protokoll MQTT übermittelt. Dabei werden die beiden Kenngrössen für alle drei Achsen nach der Datenanalyse mit einer JSON-Formatierung publiziert. Wenn dies abgeschlossen ist, wird der Messablauf beim nächsten Punkt wiederholt.

Wenn alle Punkte aus der Einstellungsdatei einmal während der vorgesehenen Zeitdauer kontinuierlich gemessen wurden, wird die Orientierung wieder neu gesetzt. Damit soll eine Verdrehung in der Orientierung der Totalstation verhindert werden. Danach starten die Messungen auf die Überwachungspunkte wieder von vorne.

Testaufbau

Für den Versuch wurde ein Raspberry Pi 3 Model B verwendet, auf dem Raspian OS (Version 10) installiert wurde. Als Total-

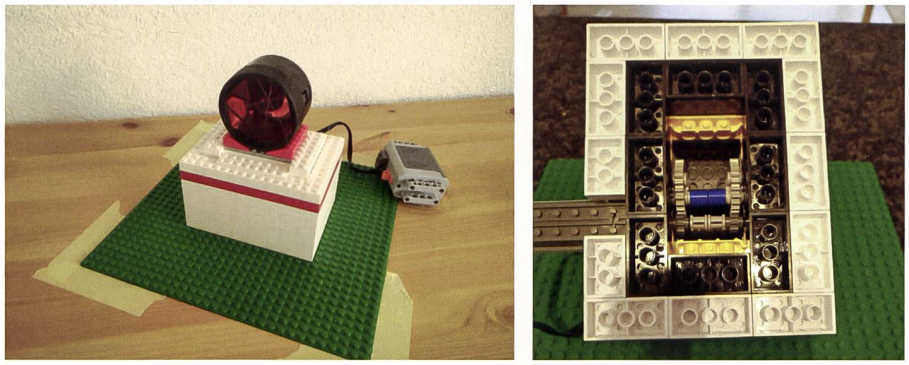

Abb. 2: Vorrichtung aus Legosteinen.

station wurde eine Leica MS60 verwendet, welche mit einem Y-Kabel mit dem USB-Anschluss des Rasperry Pi verbunden wurde. Zur Steuerung wurde ein Institut internes Python-Paket verwendet.

Aus Lego wurde eine Vorrichtung gebaut (Abb. 2), welche ein Prisma, angetrieben durch einen Lego Motor, mit einer konstanten Frequenz hoch und runter bewegt. Der Weg der Bewegung beträgt etwa 1 cm und die Frequenz ca. 2 Hz. Zudem wurde ein 360°-Prisma an einer Schnur pendelnd unter einem Stativ aufgehängt (Abb. 3). Die Frequenz lässt sich aus der Länge der Schnur berechnen und beträgt ca. 0.5 Hz.

Aufgrund der andauernden Coronakrise wurde der Testaufbau zuhause durchgeführt (Abb. 4). Im Abstand von ca. 7 m zur Totalstation wurden die beiden Versuchsvorrichtungen und ein weiteres Prisma als Fixpunkt und Anschlussrichtung aufgebaut.

Diskussion der Resultate

Es wurden verschiedene Tests mit dem Monitoringsystem durchgeführt. Ein Dauerbetrieb über 4.5 Stunden lief ohne Probleme. Auch ein Verschieben des Prismas um 10 cm störte den Betrieb nicht. Bei Sichtbehinderungen kann es vorkommen, dass danach das Prisma nicht mehr gefunden wird. Dies tritt insbesondere bei längeren Sichtbehinderungen auf, wobei beim nächsten Messdurchgang die Messung aber wieder ohne Probleme durchgeführt wird.

Das Testen des kinematischen Monitoringsystems gab einen Einblick in das Potenzial eines solchen Messsystems. So beträgt das Messrauschen bei der Messung auf ein ruhendes Prisma nur wenige Zehntelmillimeter. Mit der Lego-Versuchsvorrichtung konnten Frequenzen bis zu zwei Hertz gut erkannt werden. Höhere Frequenzen konnten mangels einer geeigneten Versuchsvorrichtung im Homeoffice nicht getestet werden. Laut dem Nyquist-Theorem sollten bei einer Messfrequenz von 20 Hz theoretisch Schwingungen bis 10 Hz detektiert werden können. Auch Schwingungen mit tiefen Frequenzen wie zum Beispiel bei der Pendel-Versuchsvorrichtung mit ca. 0.5 Hz sind in den Messungen gut ersichtlich. Mit dem Pendel konnten auch sehr kleine Amplituden getestet werden. Dabei konnten Amplituden von unter einem Millimeter noch gut abgebildet werden. Das Messrauschen war dabei allerdings bereits deutlich stärker.

Fazit

Das kinematische Monitoringsystem erreicht eine Messfrequenz zwischen 19.5 und 20 Hz und kann verschiedene Punkte sequenziell überwachen. Die Auswertung der Daten konnte auf einem Rasperry Pi

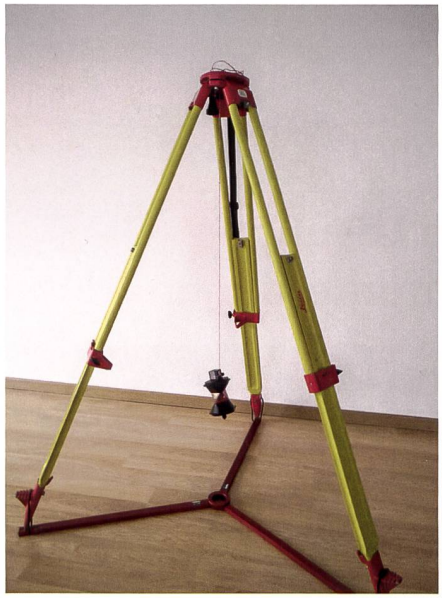

Abb. 3: Versuchsvorrichtung mit einem pendelnd aufgehängten Prisma.

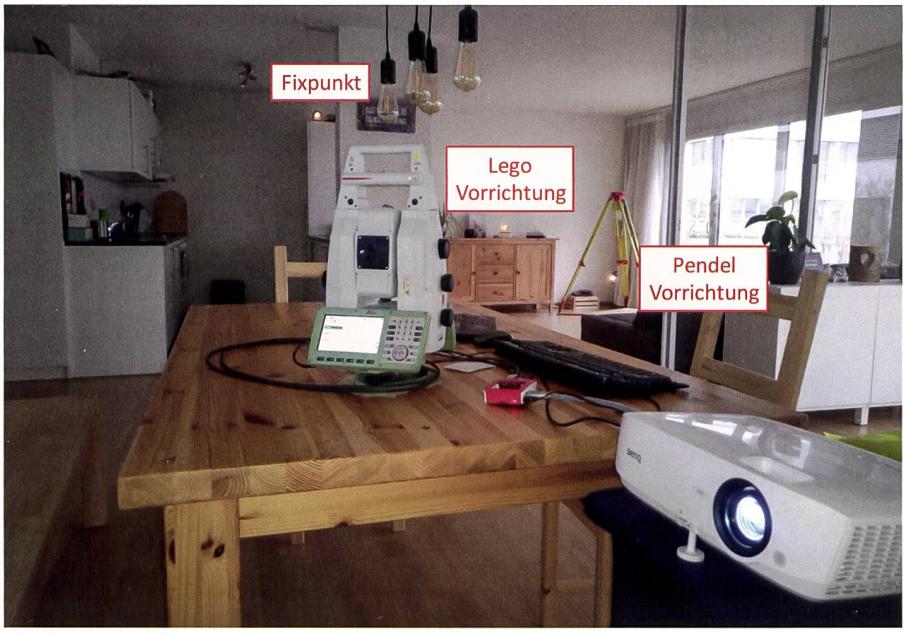

Abb. 4: Versuchsaufbau im Homeoffice.

direkt bei der Totalstation umgesetzt werden und die abgeleiteten Daten über MQTT an einen Server gesendet werden. Die Bedienung des Monitoringsystems ist einfach und es kann über eine übersichtliche Einstellungsdatei aufgesetzt werden.

Mithilfe zweier Versuchsvorrichtungen wurde das Monitoringsystem erfolgreich getestet und es konnte ein Einblick in die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems gewonnen werden. Für einen produktiven Einsatz müsste das System insbesondere in den Bereichen der Zeitsynchronisation und Datenauswertung noch erweitert werden. Zudem wäre es interessant, zu untersuchen, wo die Grenzen eines solchen Systems liegen.

Referenzen:

Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P., & Oesch, H.-P. (2010). DAEDALUS: A versatile usable digital clip-on measuring system for Total Stations. 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 1–10.

Cosser, E., Roberts, G., Meng, X., & Dodson, A. (2003). Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station. Proc., 11th Fédération Internationale des Géomètres (FIG) Symp. Deform. Monitor.

Ehrhart, M., & Lienhart, W. (2015). Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station. Journal of Applied Geodesy, 9(3), 174–182.

Lienhart, W., Ehrhart, M., & Grick, M. (2017). High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations. Journal of Applied Geodesy, 11(1), 1–8.

Psimoulis, P. A., & Stiros, S. C. (2007). Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS). Engineering Structures, 29(12), 3312–3324.

Roberts, G. W., Cosser, E., Meng, X., & Dodson, A. (2004). High frequency deflection monitoring of bridges by GPS. Journal of Global Positioning Systems, 3(1–2), 226–231.

Senn, J. (2018). Kinematisches Tracking für Echtzeitanwendungen [Masterarbeit (unveröffentlicht)]. Institut Geomatik FHNW, Muttenz.

Yi, T.-H., Li, H.-N., & Gu, M. (2013). Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. Measurement, 46(1), 420–432.

Yigit, C. O., & Gurlek, E. (2017). Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2), 893–904.

Yu, J., Zhu, P., Xu, B., & Meng, X. (2017). Experimental assessment of high sampling-rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses. Measurement, 104, 60–69.

Zschiesche, K., Rau, L., & Schlüter, M. (2020). Optische Schwingungsmessungen: Status, Integration, Pros und Contras. Tagungsband Geomonitoring 2020.

Marius Hürzeler
Prof. Dr. David E. Grimm
Institut Geomatik IGEO
Fachhochschule Nordwestschweiz
FHNW
Hofackerstrasse 30
CH-4132 Muttenz
marius.huerzeler@fhnw.ch
david.grimm@fhnw.ch

Unsere präzisen Lösungen erfüllen Ihre Anforderungen.

Steigern Sie die Produktivität durch präziseres und effizienteres Arbeiten sowie einer exakten Planung im Vorfeld. Vom Konzept bis zur Fertigstellung bieten unsere Geodatenlösungen eine sichere Vernetzung, intuitive Software und präzise Messinstrumente, von denen Sie profitieren.

FIELDWORK
Maschinenkontroll- und Vermessungssysteme AG
Bleichelistrasse 22, CH-9055 Bühler, www.fieldwork.ch

TOPCON AUTHORIZED DEALER