

Entwicklung eines automatisierten Aligniersystems

Jan SCHMIDT, Michael MÖSER und Hubert BÖHME

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten wurde durch stetige Weiterentwicklung der geodätischen Messtechnik ein enormer Sprung des Genauigkeitspotenzials erreicht. Der Trend der Entwicklung tendiert dabei immer stärker zu hochgenauen Instrumenten, die neben einfacher Handhabung den Messprozess zunehmend automatisieren, Echtzeitauswertungen ermöglichen und den Beobachter als potenzielle Fehlerquelle weitestgehend ersetzen.

Gerade im Bereich der Tachymetrie wurden diverse Konstruktionsmodelle entwickelt, die beispielsweise CCD-Sensoren im Messinstrument integrieren, direkt am Fernrohr anbringen oder autonom auf dem Fernrohr montieren. Allen gemein ist die Eigenschaft, definierte Ziele aus den Bilddaten extrahieren zu können und somit eigenständige Zielungen zu realisieren. Einhergehend mit der steigenden Rechenleistung moderner Computer können die anfallenden Datenmengen bewältigt und speziell für das Messprinzip entwickelte Auswertalgorithmen in Softwarepaketen integriert werden.

Durch das hohe Genauigkeitspotenzial bildgebender Sensoren erschließen sich zusätzlich neue Möglichkeiten zur Bestimmung zufälliger oder systematischer Messabweichungen, wie beispielsweise der Refraktion. Diese sind zwar seit langem bekannt, wurden in der Vergangenheit aber selten quantitativ aus den Messdaten selbst ermittelt, sondern deren Einflüsse lediglich durch die Einhaltung bestimmter Messanordnungen minimiert.

Um den speziell in der Bauwerksüberwachung geforderten hohen Genauigkeiten gerecht zu werden, bedürfen diese Effekte einer genaueren Betrachtung. Insbesondere in dem klassischen geometrischen Aligment stellen die Einflüsse der Refraktion die Grenze der zu erreichenden Genauigkeit dar. Dabei sind die Ursachen hauptsächlich in den Umgebungsbedingungen des Messraumes zu suchen.

Die konsequente Weiterführung der Kameraunterstützung bei geodätischen Messverfahren führt folglich zum Ansatz eines Aligmentverfahrens mithilfe bildgebender Sensoren, die durch moderne Bildauswertungsalgorithmen eine weitere Genauigkeitssteigerung versprechen.

2 Messsystem

Bei der Überwachung von Stauanlagen spielen Aligmentmessungen seit Jahrzehnten eine bedeutende Rolle. Mit ihnen lassen sich sehr einfach Bauwerksbewegungen senkrecht zur Längsachse der Mauerkrone erfassen. Beim geometrischen Aligment wird durch das schwenkbare Fernrohr des horizontierten Alignierinstrumentes eine vertikale Referenzebene aufgespannt, deren Lage durch das Instrument selbst und eine feste Mire am Endpunkt der

Alignementlinie definiert ist. Mit einer beweglichen Mire kann der orthogonale Abstand definierter Objektpunkte bezüglich dieser Ebene manuell bestimmt werden.

Um einerseits das vorhandene Instrumentarium weitestgehend zu erhalten, andererseits aber die Möglichkeit der automatischen Verschiebungsmessung zu realisieren, besteht die Idee der Entwicklung darin, einen CCD-Sensor direkt anstelle des Okulars des Fernrohrs anzubringen und die Miren durch photogrammetrische Zielzeichen zu ersetzen.

Die orthogonale Ablage der Objektpunkte von der Alignementslinie lässt sich mit einem solchen System nur bestimmen, wenn die eingesetzten Zielzeichen kameratechnisch auswertbare Merkmale aufweisen. Diese Merkmale müssen folgenden Forderungen genügen:

- Repräsentation eines eindeutigen Objektpunktes
- Ermittlung von Kalibrierparametern zur Umwandlung von Bildkoordinaten (in Pixeln) in Koordinaten im Objektraum (metrisch)
- Anwendbarkeit über den gesamten Entfernungsbereich der Alignementslinie

Mögliche Realisierungen können Zielzeichen mit Schachbrettmuster oder mit konzentrischen Ringen sein, wobei die Größe der einzelnen Schachbrettfelder bzw. die Radien der Ringe als kalibrierte Werte bekannt sein müssen.

Die mit dem Gesamtsystem erreichbare Genauigkeit soll mindestens dem des bisherigen Verfahrens entsprechen. Hierfür wird in der Literatur ein Wert von 1 mm für die Standardabweichung einer Messung bei einer Gesamtlänge der Alignementslinie von kleiner 400 m angegeben.

3 Messablauf

Die Umsetzung des Alignements unter Verwendung von CCD-Technik kann, wie auch das klassische Verfahren, in die Bereiche Referenzmessung (Nullepoche) und nachfolgende Deformationsmessungen (Folgeepochen) gegliedert werden. Auch der Messablauf wird sich nur unwesentlich von dem bisherigen Vorgehen unterscheiden.

In jeder Messepoche muss zunächst die Referenzlinie definiert werden. Dies geschieht durch das Alignierinstrument (hier mit Okularkamera ausgerüstet) und das photogrammetrische Zielzeichen (anstelle der festen Mire) auf den Endpunkten der Alignementlinie. Das Template (konzentrische Kreise) stellt den Bezugspunkt am Zielzeichen dar. Dessen Position wird mittels Least-Squares-Matching im Koordinatensystem des CCD-Sensors bestimmt. Dieses Verfahren ermöglicht eine subpixelgenaue Positionsdetektion. Dazu werden die Parameter einer Affintransformation durch eine vermittelnde Ausgleichung derart bestimmt, dass die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen zwischen aufgenommenem Bild und gespeichertem Template minimal wird.

Die Umwandlung der Pixelkoordinaten des Koordinatensystems des CCD-Sensors in ein metrisches System geschieht mithilfe kalibrierter Geometrien auf dem Zielzeichen. Durch die Definition eines metrischen Hilfskoordinatensystems aus den gegebenen Werten des Zielzeichens können die Parameter einer Affintransformation berechnet werden. Sind diese bekannt, ist es möglich, Koordinaten aus dem System des CCD-Sensors in den Objektraum zu übertragen. Zu beachten ist dabei, dass die berechneten Affinparameter nur für die jeweilige Distanz Gültigkeit besitzen. Bei jeder Bewegung des Zielzeichens in Visurrichtung,

und damit auch der Fokussierlinse, müssen die Parameter erneut ermittelt werden. Das stellt bei der Realisierung eines Alignementsystems kein Problem dar, da die Distanz zum jeweiligen Messpunkt während des Messvorgangs zu jenem stets konstant ist.

4 Atmosphärische Einflüsse

Die Atmosphäre stellt das grundlegende Medium für geodätische Messungen dar. Messergebnisse werden dabei durch die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen gewonnen. Infolge der Strahlbrechung breiten sich diese Wellen jedoch nicht geradlinig aus, sondern beschreiben eine leicht gekrümmte Raumkurve. Zusätzlich sind Variationen der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu beobachten. Die Gesamtheit dieser Phänomene wird als Refraktion bezeichnet.

Insbesondere bei Messungen in bodennahen Luftschichten oder entlang angrenzender Objekte (insbesondere Mauern) machen sich entsprechende Einflüsse extrem bemerkbar. Ein entscheidender Faktor für die Stärke des Refraktionseinflusses ist die Intensität der Sonnenstrahlung im Messraum. Die hierdurch dem Boden (oder einem angrenzenden Objekt) zugeführte Energie wird von diesem wiederum an die angrenzenden Luftschichten als Wärme abgegeben. Dabei nimmt die Temperatur mit zunehmendem Abstand vom Objekt ab. Die Wärmeübertragung zwischen den einzelnen Temperaturschichten durch Konvektion führt zusätzlich zu Luftverwirbelungen (thermische Turbulenzen). Aufgrund dieses Sachverhaltes können zwei Refraktionskomponenten, eine quasistatische und eine szintillometrische, unterschieden werden.

Die quasistatische Refraktionskomponente spiegelt sich in systematischen Abweichungen der Messdaten wider. Ausschlaggebend für die Größe der Abweichung ist der Zustand der Atmosphäre, in der die Messung stattfindet. Je länger ein Messstrahl die Atmosphäre durchdringt, desto stärker wird er beeinflusst. Auf das Alignment übertragen bedeutet dies, dass bei konstanten Refraktionsverhältnissen während der gesamten Messung einer Epoche im Betrag unterschiedliche Abweichungen für die einzelnen Alignmentpunkte auftreten. Wird die Messung zum Endpunkt der Alignmentlinie als fehlerfrei angenommen, so ist der Einfluss der Seitenrefraktion für einen Punkt in der Mitte der Linie am größten.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der systematischen Abweichung, hervorgerufen durch den Einfluss der Seitenrefraktion, besteht in der Nutzung eines horizontalen Dreiecks am Ende der Alignmentlinie. Theoretische Untersuchungen sowie erste Tests unter Laborbedingungen zu diesem Verfahren zeigen, dass eine quantitative Bestimmung des Refraktionseinflusses möglich ist. Weiterführende praktische Untersuchungen sollen das noch bestätigen. Außerdem besteht die Möglichkeit, den quasistatischen Refraktionseinfluss durch die Methode der hochfrequenten Turbulenzmessung aus den Bilddaten des Sensors selbst zu bestimmen. Inwiefern dies für den hier angestrebten Anwendungsfall praktikabel ist, muss allerdings erst noch untersucht werden.

Die Szintillation ist ein zufälliger atmosphärischer Refraktionseinfluss, der durch zeitliche und räumliche Schwankungen des Brechungsindex verursacht wird. Der hieraus folgende Effekt ist ein Flimmern des Bildes, wodurch Zielpunkte bei der Beobachtung durch ein Fernrohr verschwommen dargestellt werden. Vor allem im Zuge der Integration von CCD-Sensoren in die geodätische Messtechnik konnten diese Flimmererscheinungen sehr viel

besser dokumentiert und Ansätze zur Minderung der Erscheinung entwickelt werden. Werden mehrere Bilder eines Zielpunktes nacheinander aufgenommen, kann der Einfluss der Szintillation durch Mittelung der Einzellösungen minimiert werden. Außerdem ist die ermittelte Varianz ein Maß für die Stärke des Einflusses.

5 Praktische Untersuchungen

Entscheidend für die Genauigkeit eines Punktes bzw. einer Punktlage sind die Qualität der Maßstabsbestimmung sowie das Template-Matching der Zentrumsmarkierung. Die Untersuchungen hierzu fanden mit einem Zielzeichen mit Schachbrettmuster im Messlabor der Geodätischen Instituts der TU Dresden statt. Hierfür wurden in 10 Bildern eines Zielzeichens mit einem Algorithmus die Bildpunktkoordinaten der Ecken der einzelnen Schachbrettfelder berechnet. Die dabei aus Mehrfachmessungen bestimmte Standardabweichung unter Wiederholbedingungen ist für die beiden Koordinatenrichtungen identisch und beträgt für die Punktlage 0,03 Pixel.

Zur Abschätzung der Genauigkeit der Punktkoordinaten im Objektraum müssen die Beobachtungsgleichungen der Affintransformation linearisiert werden. Die Standardabweichungen der drei Affinparameter wurden aus 50 Messungen ermittelt. Die so berechnete Standardabweichung der Punktlage im Objektraum beträgt 0,05 mm.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung des Messsystems ist das Auflösungsvermögen, d.h. die Fähigkeit, zwei sehr eng beieinander liegende Objekte getrennt voneinander abbilden zu können. Auf das Alignment übertragen bedeutet das, wie groß eine Punktverschiebung (Deformation) mindestens sein muss, um diese als solche zu erkennen. Hierfür wurde wiederum im Messlabor ein Zielzeichen auf einem Verschiebeschlitten angebracht und in einem Bereich von 0,3 mm in Schritten von 5 μm orthogonal zur Visurrichtung verschoben. Die Bildpunktkoordinaten der jeweiligen Template-Messung konnten mittels der Transformationsparameter (als metrische Ablagen zur Ausgangsmessung) in den Objektraum überführt werden. Der lineare Zusammenhang zwischen der Messschlittenverschiebung q_{ms} und des berechneten Verschiebebetrages des Zielzeichens q_{tm} ist in Abbildung 1 dargestellt.

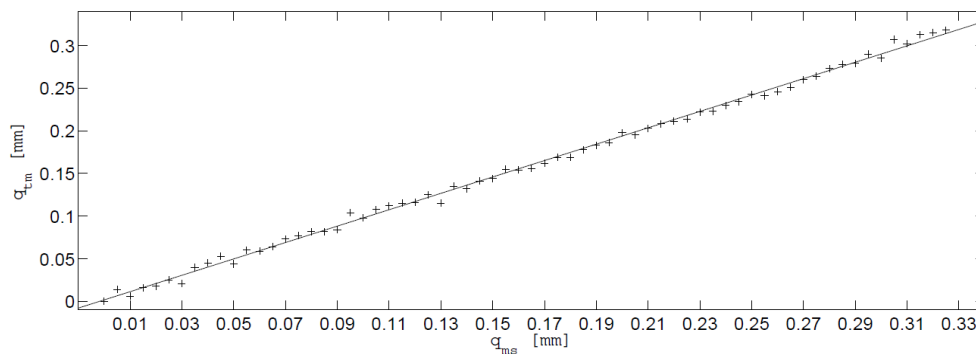


Abb. 1: Bestimmung des Auflösungsvermögens durch horizontale Verschiebung

Abschließend erfolgte im Labor noch die Untersuchung der atmosphärischen Einflüsse und deren Korrekturmöglichkeiten. Es wurde in der Mitte der Alignementlinie eine Wärmequelle installiert, die ein extrem turbulentes Feld erzeugte, was wiederum zu dem bereits erwähnten Bildpunktanzug führte. Zunächst erfolgten Messungen auf das Zielzeichen ohne die Störquelle, und zum Vergleich dazu die gleichen nach Inbetriebnahme dieser. Dabei sollte untersucht werden, ob das Mittel aus mehreren Bildern die Genauigkeit der Koordinatenlösung steigern, und somit den Effekt der Szintillation eliminieren kann. Die Anzahl der verwendeten Bilder wurde dabei in Einzelschritten von einem bis 51 erhöht. Die berechneten Standardabweichungen sind zusammen mit der Anzahl der verwendeten Bilder (Iterationen) in Abbildung 2 dargestellt.

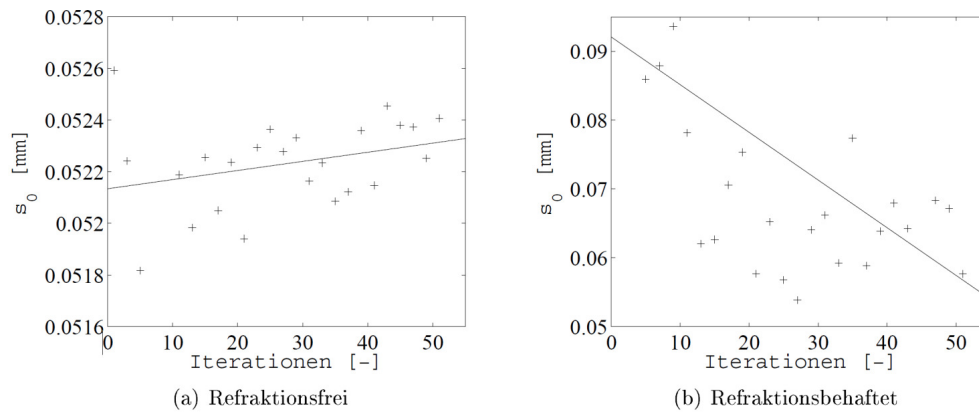


Abb. 2: Genauigkeit der Punktbestimmung in Abhängigkeit der genutzten Bildanzahl

Bei refraktionsfreien Bedingungen wird mit steigender Iterationsanzahl keine Steigerung der Genauigkeit erzielt. Die lineare Regression in Abbildung 2b zeigt die Genauigkeitssteigerung mit zunehmender Anzahl der Iterationen. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass unter den konkreten Bedingungen ab ca. 20 genutzten Bildern ein einheitliches Genauigkeitsniveau erreicht wird, was nur unwesentlich schlechter ist als jenes der refraktionsfreien Lösung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Einsatz der Okularkamera direkt am Fernrohr stehen als Beobachtungsgrößen Bildkoordinaten zur Verfügung, die mittels der für jeden Objektpunkt separat anhand der kalibrierten Zielzeichen berechneten Transformationsparameter in den Objektraum überführt werden können. Die unter Laborbedingungen erzielten Ergebnisse lassen auf das hohe Potenzial des Messsystems zur Umsetzung eines kameragestützten Alignements schließen. Weiterführende praktische Untersuchungen mit einem Prototyp eines kameraunterstützten Alignierfernrohrs, welches durch die FPM Holding GmbH (Freiberger Präzisionsmechanik) entworfen und konstruiert wurde, sollen dies belegen.