
Wiedererkennung – zwei Lösungen für die strenge Deformationsanalyse flächenhafter Beobachtungen der Ingenieurgeodäsie

Thomas WUNDERLICH, Lukas RAFFL, Wolfgang WIEDEMANN
Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München · geodaesie@tum.de

Zusammenfassung

Die instrumentellen Möglichkeiten der flächenhaften Erfassung von Deformationen haben hohe Erwartungen in den Informationsgewinn geschürt. Diese haben sich eingestellt, bislang jedoch im reinen Vergleich verlagerter Punktwolken im Sinne von Starrkörperbewegungen. Der bei punktwieser Analyse in der Ingenieurgeodäsie seit langem etablierte Standard der Untermauerung der Aussagen durch statistische Signifikanztests, auch bei Verformungen, ist nur in Ausnahmefällen und über Umwege geglückt. Das Fundamentalproblem, nämlich in zwei Messepochen die Identität nicht signalisierter Punkte für eine Kongruenzanalyse zu bewerkstelligen, ist immer noch nicht bezwungen. Der Lehrstuhl für Geodäsie der TUM hat zwei unterschiedliche Strategien entwickelt, welche dieses Fundamentalproblem lösen: vorgestellt wird ein Ansatz, Identitäten in dichten Punktwolken zu finden, und ein weiterer, welcher Punktwolken zur Definition identischer Punkte für die strenge Kongruenzanalyse nutzt, jeweils mit Signifikanztest.

1 Ableitung signifikanter Deformationen aus Punktwolken

Die seit etwa 20 Jahren mögliche Gewinnung dichter 3D-Punktwolken mittels Laserscanning hat sich längst in der Geodäsie etabliert und in vielen Bereichen ungeheure Potentiale eröffnet. Im terrestrischen Laserscanning (TLS) haben insbesondere die bereits teilautomatisierte Ableitung von CAD-Modellen und die Bestimmung geometrischer Veränderungen der Lage und Form von Objekten Bedeutung erlangt. Monitoring mit TLS und anschließende Deformationsanalyse zweier unterschiedlicher Messepochen versprechen bisherige Randbedingungen zu überwinden. Einerseits entfallen wegen der reflektorlosen Abtastungstechnik die Vermarkung und Signalisierung ausgewählter Punkte und damit die u. U. mit Gefahren verbundene Notwendigkeit, das Objekt zu betreten, andererseits könnten durch die nun vollständige Erfassung der gesamten Oberfläche Deformationen auch in Bereichen aufgedeckt werden, wo sie womöglich gar nicht vermutet worden sind. (WUNDERLICH et al. 2016).

1.1 Stand der Technik und bisherige Grenzen

Es herrscht kein Mangel an praktischen Anwendungsbeispielen von TLS im Monitoring und auch die theoretischen Verfahren werden in zahlreichen Forschungsgruppen der Geodäsie, der Photogrammetrie und der Geoinformatik, z.B. in Berlin, Bonn, Delft, Graz, München, Wien und Zürich, vorangetrieben. Trotz der dabei über die Jahre erzielten beeindruckenden Erfolge, zeigt sich wegen des Fehlens von Signifikanztests noch weiterer Forschungsbedarf. Solche sind zwar vereinzelt gelungen, etwa beim Nachweis der Brennwei-

tenänderungen eines Radioteleskops mit der Elevation (HOLST et al. 2012), nicht jedoch allgemein.

Die Schwierigkeit der Prüfung der Signifikanz von Deformationen mit statistischen Tests liegt in der Tatsache begründet, dass, zum Unterschied zu den klassischen Analysen vermärkter und signalisierter Einzelpunkte, in zwei Punktwolken des TLS keine identischen Punkte existieren. Bei der Abtastung kann wohl die Rasterdichte voreingestellt werden, die Punkte fallen jedoch in unterschiedlichen Messepochen nicht streng auf denselben Ort, schon gar nicht, wenn sich dieser in der Folgepoche deformationsbedingt an anderer Stelle befindet.

1.2 Vergleich mit klassischer Gewinnung aus Einzelpunkten eines Netzes

Die Stärke der klassischen, auf in beiden Epochen identischen Einzelpunkten aufbauenden, Vorgangsweise liegt in der konsequenten Ausrichtung der Deformationsanalyse auf den Signifikanznachweis, um die Qualität der Punktbestimmung mit dem Deformationsausmaß in Abhängigkeit der gewählten Sicherheitswahrscheinlichkeit sorgfältig abzuwägen. Stellvertretend für eine ganze Reihe renommierter Ansätze weltweit, wird im Folgenden das von (PELZER 1971) in seiner Habilitation begründete und später kommerziell im Programmsystem PANDA (NIEMEIER et al. 1990) verwirklichte Hannoversche Verfahren verfolgt.

Dabei wird aus sorgfältig ausgewählten, diskreten Stützpunkten (Stabilitätsvermutung) und (den Deformationsvorgang charakterisierenden) Objektpunkten ein Netzverband gebildet, welcher in mindestens zwei Epochen ausgemessen wird. Die Beobachtungen des Netzes werden jeweils einer freien Ausgleichung unterworfen und die Varianz der Gewichtseinheit auf Übereinstimmung getestet, um die Vergleichbarkeit der Realisierungen zu bestätigen. Dann folgt der globale Kongruenztest auf Basis der gewichteten Klaffungsquadratsumme und der Fisher-Verteilung für den gesamten Punktverband. Wird die fehlende Kongruenz angezeigt, so wird das Subnetz der Stützpunkte in gleicher Weise getestet. Beweist dieses – nach möglicher iterativer Elimination einzelner als verändert nachgewiesener Punkte – eine für das Datum und die Dimension ausreichende Punktschar als kongruent, beginnt die konsekutive Untersuchung der Objektpunkte (samt ausgeschiedener Stützpunkte) in Einzelpunkttests mit vereinfachtem stochastischen Ansatz; schlussendlich werden die nun signifikant nachgewiesenen Deformationen, bezogen auf das Datum der Stützpunkte, ausgewiesen.

Jetzt könnte noch eine weitergehende Untersuchung mit dem Ziel der Trennung von Starrkörperbewegungen und Verformungen anschließen. An dieser Stelle sei noch ein weiterer Vorzug des Verfahrens erwähnt, nämlich seine Eignung zur Simulation bis hin zu einer Sensitivitätsanalyse, um ein Überwachungsnetz gezielt für ein bestimmtes Objekt zu optimieren.

2 Problematik des Fehlens identischer Punkte in Punktwolken

Die Grundvoraussetzung identischer Objektpunkte fehlt nun für Punktwolken aus dem TLS. Um das Problem zu umgehen, hat man verschiedene Wege erdacht und erprobt, welche die Punktwolken (als Ganzes oder in definierten Teilen) oder bestangepasste Ersatzflächen (analytische Flächen oder Freiformflächen) heranziehen. Dann lassen sich entweder durch Anwendung des Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) (BESL et al. 1992) relative

Klaffungen oder durch Abstandsbestimmung von georeferenzierter Ersatzflächen absolute Differenzen bestimmen.

Selbst wenn man den gewünschten Signifikanztest zunächst hintanstellt, leiden die erwähnten Zuordnungen und Vergleiche an mehreren, nicht unbeträchtlichen Unzukömmlichkeiten. Primär offenbart sich dies dadurch, dass man entweder nur Starrkörperbewegungen (Translationen und Rotationen eines unverformten Objekts) ableiten kann oder ein Dimensionsverlust erlitten wird, weil in der Regel nur eindimensionale Abstände von Flächen resultieren (SCHÄFER et al. 2004; CHMELINA et al. 2012). Sekundär kämpft man mit Verfälschungseffekten, deren Vermeidung Voranalysen erfordert. Dazu zählen vorrangig die Abklärung grober Flächenveränderungen (Ausbrüche, Montagebauteile) und das Hintanhalten des Einflusses unterschiedlicher Objektdeckung oder –verdeckung wegen temporärer Hindernisse oder verschiedener Standpunkte in den beiden Messepochen. Als Beispiel der verfälschenden Wirkung möge eine lokale Verformung eines Objektes in der zweiten Epoche dienen, die – ohne vorherige Detektion und Elimination – die Qualität der mittels ICP abgeleiteten Parameter von Starrkörperbewegungen in Frage stellen würde.

3 Zwei Lösungen zur Gewinnung identischer Punkte

Der Nachweis signifikanter Deformationen aus flächenhaften Beobachtungen stellt einen Langzeit-Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls für Geodäsie der TUM dar, der auch in Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstandorten (z. B. TU Bratislava) und Gastforschern (REITERER 2013) beständig und konsequent vorangetrieben worden ist. Eine Besonderheit bildet dabei die bevorzugte kombinierte Nutzung von Scan und Bild, wie sie mit Laserscanner und Kamera oder Multistations (Image Assisted Total Station + Scanfunktion) möglich geworden ist. Auch an der TU Graz hat kürzlich die Dissertation (EHRHART 2017) neue Potentiale für die Anwendung von Multistations in der Deformationsmessung erschlossen.

3.1 Nutzung der Symbiose von Scan und Bild

Die Geräteklasse der Multistations erlaubt es, Laserscan- und Bilddaten des zu untersuchenden Objektes einfach und mit identischem Aufnahmezentrum zu erfassen. Diese lassen sich anschließend ohne Abschattungseffekte – wie sie z. B. durch die Parallaxe von Aufsatzkameras bei Laserscannern entstehen würden – zu RGB+D Bildern verschmelzen. In diesen RGB+D Bildern ist jedem Pixel über die bekannte absolute Orientierung der Kamerabilder (durch sorgfältige Kalibrierung, sowie die Tachymeterablesungen und entsprechende Stationskoordinaten) direkt eine Raumrichtung zugeordnet. So lassen sich Bildverbände eines Standpunktes direkt und nahtlos zusammenführen, ohne auf Verknüpfungspunkte zurückgreifen zu müssen. In die entstandenen Panoramabilder werden die erfassten Scanpunkte projiziert und anhand der einzelnen Objektdistanzen ein Tiefenwert für jedes RGB-Pixel interpoliert (Distanzkanal D des RGB+D Bildes). Durch diese Symbiose von Scan und Bild werden die Vorteile der beiden Aufnahmemethoden vereint: die Scandaten zeigen sich im Wesentlichen sensitiv für Distanzvariationen in Blickrichtung, wohingegen Objektbewegungen senkrecht zur Aufnahmerichtung (innerhalb der Bildebene) einfach über die Methoden der Bildverarbeitung aufgedeckt werden können (WAGNER 2016).

Für die weitere Verarbeitung werden mittels gängiger Bildverarbeitungsalgorithmen (SIFT, SURF, BRISK, etc.) Feature-Punkte aus den hochaufgelösten Farbkanälen der RGB+D Bilder der unterschiedlichen, frei wählbaren Standpunkte extrahiert und einander zugeordnet. Die so aufgedeckten identischen Punkte sind über ihre Pixel-Koordinate direkt mit einer Raumrichtung verknüpft. In Kombination mit der Tiefeninformation aus den interpolierten Scandaten entstehen Pseudobeobachtungen, die sich – zusammen mit klassisch gewonnenen Beobachtungen einer Netzmessung – mit den bekannten Methoden der Freien Netzausgleichung behandeln lassen. Daraus ergeben sich neben den Objektkoordinaten auch – dank Überbestimmung – statistisch belegte Genauigkeitsmaße für die identischen Feature-Punkte (siehe Abbildung 1). Gelingt es darüber hinaus die extrahierten Feature-Punkte über die Aufnahmen mehrere Epochen hinweg aufzufinden, sind alle Voraussetzungen für eine strenge Deformationsanalyse nach dem Hannoverschem Modell erfüllt. Gezeigt wurde dies anhand eines Beispiels mit über 500 Punkten, welches erfolgreich mit der Software PANDA ausgewertet wurde (WIEDEMANN et al. 2017). Durch die große Zahl der in den Bildern detektierbaren identischen Feature-Punkte, entsteht eine quasi flächenhafte Aussage über etwaige Deformationen mit Signifikanzinformation (siehe Abbildung 2).

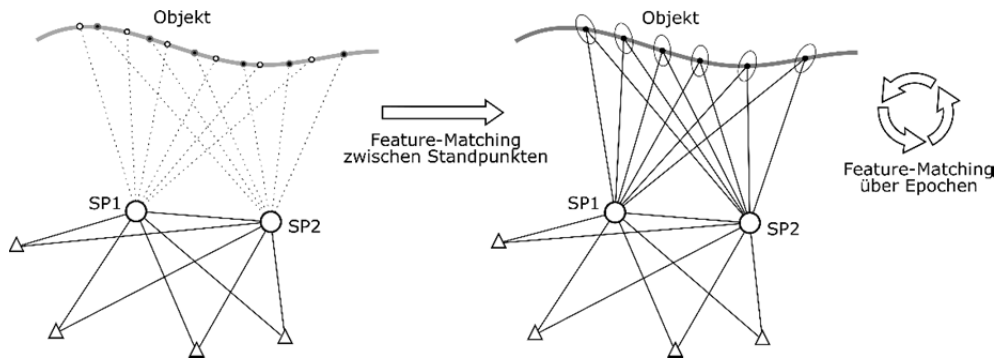


Abb. 1: Schematischer Ablauf der Deformationsanalyse in RGB+D Bildern: Korrespondierende Pseudobeobachtungen entstehen durch Feature-Matching zwischen den Aufnahmenstandpunkten innerhalb einer Epoche. Dieselben Features werden zur Erzeugung von Punktidentitäten über die Epochen hinweg herangezogen.

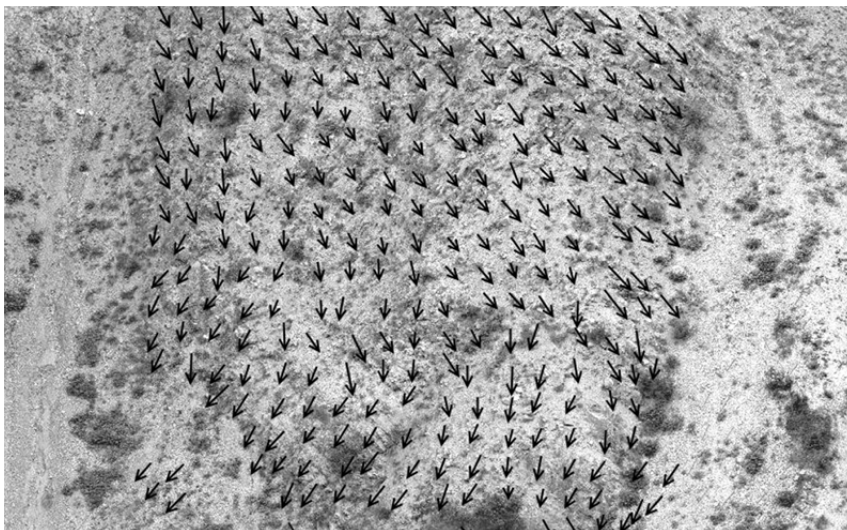


Abb. 2: Aus RGB-D Bildern abgeleitete Verschiebungsvektoren (gemittelt für einzelne Regionen) auf einen Rutschhang am Brechries, Bad Feilnbach (JUNG 2018).

3.2 Erzeugung mit Hilfe geometrischer Strukturen

Nachfolgend werden zwei geometrische Ansätze beschrieben, die die flächenhafte Abtastung nutzen, um identische Punkte ohne jegliche Vermarkung eindeutig und wiederauffindbar zu definieren. Im Vergleich zum vorherig beschriebenen RGB+D Ansatz basieren die geometrischen Verfahren ausschließlich auf Scandaten. Zudem werden lediglich besonders charakteristische Strukturen gescannt und auf einen Vollscan des Objektes verzichtet, sodass die Diskretisierung des Messobjektes bestehen bleibt. Jede ausgewählte Messstelle wird epochenweise kleinräumig gescannt (Scanfenster ca. 0,5 m x 0,5 m) und aus den erhaltenen Punktwolken ein und derselbe Zielpunkt über alle Epochen hergestellt. Die Ableitung korrespondierender Punkte glückt auch von zwei unterschiedlichen Standpunkten, sodass eine überbestimmte Beobachtung möglich ist. Im Gegensatz zu gängigen Feature-Deskriptoren (vgl. z. B. GOJCIC et al. (2018)) lässt sich für jeden erzeugten Zielpunkt eine zugehörige Genauigkeitsaussage aus der Punktwolke ableiten. Diese Information kann zusammen mit der erhaltenen Pseudobeobachtung in eine klassische Deformationsanalyse nach dem Hannoverschen Modell mit statistischen Signifikanztests integriert werden.

3.2.1 Ebenenschnitt zur Ableitung fiktiver Zielpunkte

Vor allem auf künstlichen Objekten (z. B. Gebäuden) sind häufig Strukturen zu finden, an denen sich drei Ebenen in einem Punkt räumlich schneiden. Bei Fensteröffnungen an Gebäuden beispielsweise definieren Fassadenfläche, Fenstersturz und Fensterleibung einen eindeutigen Schnittpunkt (siehe Abbildung 3). Diese Raumecke ist in allen Epochen wiederzufinden und kann durch geometrische Modellierung der drei Ebenen eindeutig und zuverlässig extrahiert werden, ohne diese jemals explizit für eine polare Messung anzuzielen.

Die Verwendung natürlicher Zielpunkte ist im Bereich des TLS bereits bekannt; extrahierte Schnittpunkte kommen beispielsweise zur Registrierung verschiedener Einzelscans zum

Einsatz. Beschränkt ist dieses Verfahren durch die Bedingung, dass dieselben drei Flächen in beiden zu registrierenden Scans sichtbar sein müssen und hat sich deshalb für Bestandsaufnahmen mit mehreren Standpunkten nicht etabliert. Für Monitoringaufgaben, bei denen das Überwachungsobjekt klassischerweise stets vom selben Standpunkt aus beobachtet wird, kann diese Bedingung strikt eingehalten werden. Sofern die Registrierung der verschiedenen Epochen bekannt ist, können folglich die extrahierten, identischen Punkte in die Deformationsbestimmung einfließen. Vorteil der Limitierung auf ausgewählte Scanbereiche ist die geringe Datenmenge und die vollständige Automatisierbarkeit der Ebenensuche, sodass das Verfahren auch für automatisierte Monitoringsysteme mit (Quasi-)Echtzeitauswertung geeignet ist.

Der zu jeder Epoche aufgenommene Scanbereich wird zunächst in Ebenen segmentiert. Es kommt dabei ein Voxel-Growing-Verfahren basierend auf dem Ansatz von RABBANI et al. (2006) zum Einsatz. Im Unterschied zu gängigen RANSAC-Algorithmen können nicht nur Schwellwerte für den maximalen Punktabstand zur Ebene, sondern echte Ebenheitsbedingungen – basierend auf den lokalen Normalenvektoren der Punkte – definiert werden. Die hier gewählte Ebenheitsbedingung fordert, dass die Normalenrichtungen aller Punkte auf einer Ebene in eine ähnliche Richtung zeigen. Ausgehend von einem Start-Voxel und seiner zugehörigen Normalenrichtung (Referenznormale) werden im Sinne des Voxel-Growings sukzessive Punkte zur Region hinzugefügt. Ein benachbartes Voxel wird aufgenommen, wenn sein Normalenvektor den vorgegebenen Winkelschwellwert zur Referenznormale nicht überschreitet. Um den Einfluss des Start-Voxels zu vermindern, wird die Referenznormale dynamisch angepasst (RAFFL 2017). Zusätzlich zur Ebenheitsbedingung können weitere Bedingungen formuliert werden, beispielsweise ein maximaler Distanzschwellwert senkrecht zur Ebene oder ein Wert für die maximal zulässige Variation des Intensitätswertes. Je nach Wahl der Schwellwerte ist eine gewisse Unebenheit der Flächen zulässig; größere Dellen und Erhebungen hingegen werden zuverlässig ausgespart (vgl. Abbildung 3, Mitte).

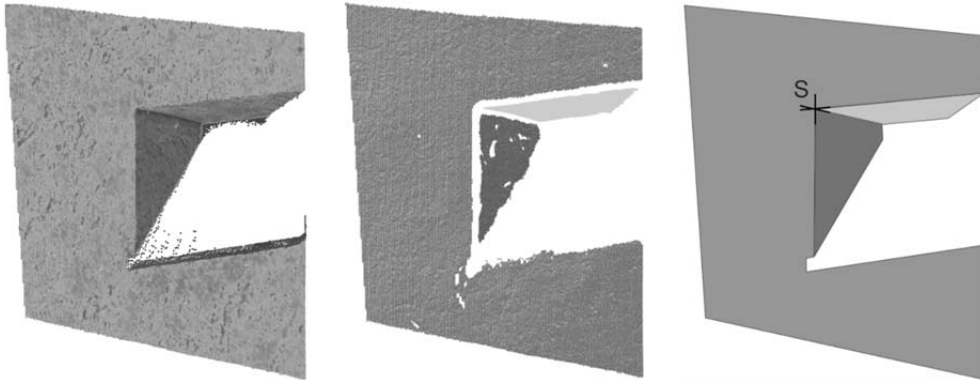


Abb. 3: Punktwolke einer Fensteröffnung (links), Ergebnis der Ebenensegmentierung (Mitte) und ausgleichende Ebenen, die zu einem wiederauffindbaren Punkt S geschnitten werden (rechts).

Nach abgeschlossener Segmentierung wird durch jede gefundene Punktmenge eine ausgleichende Ebene geschätzt. Werden mehr als drei Ebenen segmentiert, wird automatisch eine

passende Dreierkombination ausgewählt. Die Schätzung der Ebenenparameter erfolgt nach dem erweiterten Gauß-Marcov-Modell und minimiert die Residuen senkrecht zur Ebene (RAFFL 2017). Der gemeinsame Schnittpunkt ergibt sich schließlich aus einem eindeutig bestimmten, linearen Gleichungssystem und kann in jeder Epoche zuverlässig rekonstruiert werden (ohne, dass der Punkt tatsächlich physikalisch existieren muss).

Aus der Ebenenapproximation lässt sich zudem ein Genauigkeitsmaß auf den abgeleiteten Schnittpunkt fortpflanzen. Für jede Ebene wird die Genauigkeit in Normalenrichtung angegeben (Standardabweichung der orthogonalen Residuen). Über das Varianzfortpflanzungsgesetz ergibt sich aus der Standardabweichung aller drei Ebenen eine vollbesetzte Varianz-Kovarianz-Matrix für den Schnittpunkt. Diese widerspiegelt lediglich die innere Genauigkeit des Punktes, da systematische Effekte wie Auftreffwinkel, Oberflächenreflektivität oder Entfernung im Genauigkeitsbudget vernachlässigt werden. Solange ein Zielpunkt ausschließlich von einer einzigen Permanentstation beobachtet wird, ist dies legitim, da sich aufgrund des gleichbleibenden Messaufbaus systematische Einflüsse im Epochenvergleich weitgehend herauskürzen. Es verbleiben ausschließlich zufällige Modellierungseinflüsse wie Messrauschen und Oberflächenrauigkeit, welche durch die innere Genauigkeit der Ebenenschätzung abgebildet werden. Wird eine Ecke hingegen von mehreren Standpunkten gleichzeitig beobachtet, sollten bereits die Einzelpunkte mit einer a priori Messgenauigkeit versehen werden, um auch die systematischen Unsicherheiten zu berücksichtigen. Hierzu kann beispielsweise das intensitätsbasierte Genauigkeitsmodell nach WUJANZ et al. (2017) herangezogen werden.

Als finaler Schritt der automatisierten Auswertekette wird der extrahierte Schnittpunkt mitsamt seiner Varianz-Kovarianz-Matrix in eine tachymetrische Einzelbeobachtung umgewandelt. Aus dem Koordinatenvektor zwischen Instrumentenstandpunkt I und extrahiertem Eckpunkt S kann nach den Formeln (1) & (2) eine fiktive Polarbeobachtung (Pseudobeobachtung) abgeleitet werden.

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_S - \mathbf{x}_I \quad (1)$$

$$\mathbf{b}_S = \begin{bmatrix} Hz \\ V \\ SD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan(\Delta x / \Delta y) \\ \arccos(\Delta z / SD) \\ \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Die zugehörige Beobachtungsgenauigkeit ergibt sich durch Rotation der Varianz-Kovarianz-Matrix in Zielstrahlrichtung nach den Formeln (3) & (4).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos \epsilon & 0 & \sin \epsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \epsilon & 0 & \cos \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{mit } \alpha = 100^{\text{gon}} - Hz, \quad \epsilon = 100^{\text{gon}} - V$$

$$\mathbf{K}_{bb} = \mathbf{R} \mathbf{K}_{xx} \mathbf{R}^T \quad (4)$$

Schlussendlich entsteht so aus dem Scan eine polare Einzelbeobachtung und kann – evtl. zusammen mit Beobachtungen zu signalisierten Zielen – als gewöhnliche tachymetrische Punktmessung in das Überwachungsnetz, sowie in die strenge Deformationsanalyse integriert werden.

3.2.2 Structure-Matching

Bei natürlichen Objekten oder an historischen Fassaden mit zahlreichen Verzierungen ist es häufig nicht möglich, geeignete Strukturen für den Ebenenschnitt zu finden. Alternativ kann deshalb ein ICP-basiertes Verfahren zur Erzeugung korrespondierender Pseudobeobachtungen zum Einsatz kommen. Das Structure-Matching stellt weniger strenge Anforderungen an die ausgewählte 3D-Struktur; es muss lediglich eine gewisse räumliche Variation vorliegen, sodass das Punktwolken-Matching eindeutig Ergebnisse liefert (siehe Abbildung 4).

Die Starrkörperbewegung für eine Messstelle ergibt sich aus einem klassischen Cloud-to-Cloud-Matching mittels ICP-Algorithmus (siehe Abbildung 5). Da der Scanbereich sehr klein ist, darf die Annahme getroffen werden, dass keine Verformung der betrachteten Struktur vorliegt und die detektierte Starrkörperbewegung der Punktbewegung des Schwerpunktes entspricht. Ausgehend von dieser Prämisse können wiederum Pseudobeobachtungen abgeleitet werden. Als fiktiver Zielpunkt dient der Schwerpunkt der Punktwolke zur Nullepoche. Diese Koordinate wird festgehalten und dient als Referenz für alle Folgeepochen. Für das Punktwolken-Matching werden die Punktwolken der betrachteten Struktur nun jeweils im Referenzpunkt gelagert, sodass die erhaltene Transformationsvorschrift T der Starrkörperbewegung des Referenzpunktes entspricht. Wird der Ausgangspunkt P_0 nun entsprechend transformiert ergeben sich die Zielpunktkoordinaten P_1 zur Folgeepoche. Nach den Formeln (1) & (2) lassen sich nun jeweils wieder Pseudobeobachtungen erzeugen, die in das tachymetrische Überwachungsnetz integriert werden können. Gleiches Vorgehen gilt für die Beobachtung von einem zweiten Standpunkt: da der Zielpunkt des ersten Standpunktes nicht greifbar ist, wird wieder über das Punktwolken-Matching die Ablage T bestimmt, woraus sich die Zielpunktkoordinaten des zweiten Standpunktes berechnen lassen.



Abb. 4: Markante Struktur an der Fassade, die für das Structure-Matching geeignet ist.

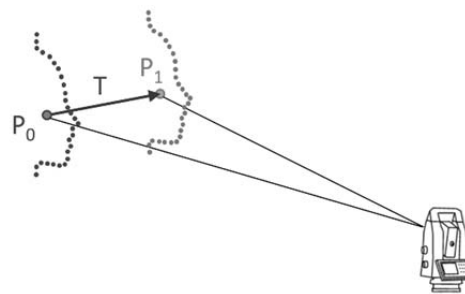


Abb. 5: Prinzipskizze zur Ableitung von Einzelpunktbeobachtungen mittels Structure-Matching.

Das ICP-Verfahren ist i. Allg. sehr anfällig gegenüber Ausreißern und Messrauschen. Aufgrund der Beschränkung auf ausgewählte Zielbereiche und des gleichbleibenden Scanfensters der automatisierten Multistation, werden Ausreißer auf ein Minimum beschränkt und das Messrauschen bleibt konstant. Vorsicht ist lediglich beim Messen von zwei Standpunkten geboten; hierbei muss gewährleistet werden, dass der ICP die beiden Punktwolken trotz unterschiedlicher Blickwinkel noch zuverlässig registrieren kann. Im Vergleich zum Ebe-

nenschnittverfahren ist es beim Structure-Matching nun nicht möglich, Genauigkeitsaussagen für die Zielpunkte durch geometrischen Vergleich mit einer Referenzfläche abzuleiten. Die verbleibenden Residuen des Matchings lassen lediglich eine Aussage zur relativen Punktgenauigkeit zwischen den Epochen zu. Zur Ableitung der Varianz-Kovarianz-Matrix für die Pseudobeobachtungen müssen Annahmen getroffen werden. Hierzu kann erneut das Modell von WUJANZ et al. (2017) herangezogen werden, um die zu erwartende Punktgenauigkeit aus den Intensitätswerten abzuschätzen. Unproblematisch ist die Annahme beim Beobachten von zwei Standpunkten, da hier durch die Überbestimmung die Punktgenauigkeit in der Netzausgleichung a posteriori angepasst wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz zur Deformationsanalyse über fusionierte Scan- und Bilddaten mittels RGB+D Bildern vereint die Vorteile beider Methoden. Mit dichten Laserscannepunktewolken werden Distanzänderungen in Sichtrichtung erfasst; hochauflösende Bilder zeigen dagegen hohe Sensitivität für Verschiebungen senkrecht zur Aufnahme-richtung. Durch die Extraktion von Bildmerkmalen lassen sich nicht signalisierte identische Objektpunkte, sowohl zwischen unterschiedlichen Standpunkten, als auch über mehrere Messepochen hinweg, gewinnen. Durch die Erzeugung von polaren Pseudobeobachtungen zu den Feature-Punkten können die Daten mit den gewohnten Methoden der strengen Deformationsanalyse behandelt und Punktverschiebungen signifikant nachgewiesen werden. Der flächenhafte Charakter des Laserscannings bleibt erhalten. Eine Modellierung oder Signalisierung der Punkte ist für dieses Verfahren nicht nötig. Deformationen können dadurch auch in Bereichen aufgedeckt werden, wo sie womöglich gar nicht vermutet worden sind. Allerdings ist eine ausreichende Beleuchtung für die Bildaufnahme und eine hinreichende Texturierung des Objektes von Nöten.

Im Gegensatz dazu arbeitet das zweite vorgestellte Verfahren zur Erzeugung von Punktidentitäten aus geometrischen Strukturen ausschließlich auf Basis der Laserscandaten. Anstelle herkömmlicher Zielpunktvermarkungen werden dafür gezielt charakteristische Strukturen gescannt und als natürliche Ziele verwendet, sodass die Anzahl der signalisierten Zielpunkte am Überwachungsobjekt deutlich reduziert werden kann. Die aus den Scandaten modellierten Einzelpunkte liegen im gleichen Genauigkeitsniveau wie Messungen zu Prismen, wodurch bereits Punktverschiebungen von wenigen Millimetern signifikant aufgedeckt werden können (RAFFL 2017).

Nach Möglichkeit sollte stets das Verfahren des Ebenenschnitts verwendet werden – vor allem beim Monitoring von nur einem Standpunkt – da ihm ein fundiertes Genauigkeitsmodell hinterlegt ist. Das Structure-Matching hingegen hat den Vorteil, dass auch unregelmäßige Strukturen als nicht-signalisierte Zielpunkte verwendet werden können. Beiden Methoden ist zugute zu schreiben, dass sowohl die approximierten Ebenen als auch der ICP-Algorithmus Aussagen über Orientierungsänderungen der Normalenrichtungen ermöglichen. So ergeben sich nicht nur reine Punktverschiebungen, sondern zu jeder Beobachtung zusätzlich eine Aussage über eventuelle Rotationen.

Literatur

- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. (1992): Method for Registration of 3-D Shapes. In: *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*. International Society for Optics and Photonics (Vol. 1611), S. 586–607.
- CHMELINA, K.; JANSKA, J.; HESINA, G.; TRAXLER, C. (2012): A 3-D Laser Scanning System and Scan Data Processing Method for the Monitoring of Tunnel Deformations. In: *Journal of Applied Geodesy* 6 (3-4), S. 177–185. DOI: 10.1515/jag-2012-0013.
- EHRHART, M. (2017): Applications of Image-Assisted Total Stations: Concepts, Experiments, Results and Calibration. Dissertation, Graz University of Technology.
- GOJIC, Z.; ZHOU, C.; WIESER, A. (2018): Learned Compact Local Feature Descriptor for TLS-Based Geodetic Monitoring of Natural Outdoor Scenes. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2*, S. 113–120. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-113-2018.
- HOLST, C.; ZEIMETZ, P.; NOTHNAGEL, A.; SCHAUERTE, W.; KUHLMANN, H. (2012): Estimation of Focal Length Variations of a 100-m Radio Telescope’s Main Reflector by Laser Scanner Measurements. In: *Journal of Surveying Engineering* 138 (3), S. 126–135. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000082.
- JUNG, M. (2018): Messung und Auswertung von kombinierten Bild- und Laserscandaten mit der Trimble SX10. Master’s Thesis, Hochschule für angewandte Wissenschaften, München.
- NIEMEIER, W.; TENGEN, D. (1990): Panda - The Software for Precise Engineering Networks. In: *Proceedings of Second Accelerator Workshop*, S. 245–263, DESY, Hamburg, Sept. 1990.
- PELZER, H. (1971): Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen. In: *Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C: Dissertationen* (164).
- RABBANI, T.; HEUVELB, F. A. van den; VOSSELMAN, G. (2006): Segmentation of Point Clouds using Smoothness Constraint. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - IAPRS Volume XXXVI, Part 5*, S. 248–253.
- RAFFL, L. (2017): Bauwerksüberwachung mit scannenden Tachymetern. Master’s Thesis, Technische Universität München.
- REITERER, A. (2013): Novel Observation Concepts for Image Assisted Total Stations in Applied Geodesy - Development Steps and Applications. Habilitation, Technische Universität München.
- SCHÄFER, T.; WEBER, T.; KYRINOVIC, P.; ZAMECNIKOVA, M. (2004): Deformation Measurement using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo. In: *Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, Slowakei, 2004.

- WAGNER, A. (2016): A new Approach for Geo-Monitoring using Modern Total Stations and RGB+D Images. In: *Measurement* 82, S. 64–74. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.12.025.
- WIEDEMANN, W.; WAGNER, A.; WUNDERLICH, T. (2017): Ableitung von 3D-Verschiebungsvektoren aus fusionierten Laserscan- und Bilddaten. In: *avn - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 124 (11-12), S. 362–369.
- WUJANZ, D.; BURGER, M.; METTENLEITER, M.; NEITZEL, F. (2017): An Intensity-Based Stochastic Model for Terrestrial Laser Scanners. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 125, S. 146–155. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006.
- WUNDERLICH, T.; NIEMEIER, W.; WUJANZ, D.; HOLST, C.; NEITZEL, F.; KUHLMANN, H. (2016): Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – The Challenge. In: *avn - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 123, S. 340–351.