
Effiziente Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken und deren Nutzung für Monitoringaufgaben

Jens-André Paffenholz

Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover

1. Einleitung und Motivation

Eine Reihe wissenschaftlicher, öffentlicher, kommerzieller und privater Nutzer benötigt umfangreiche 3D Daten für typische Anwendungen, beispielsweise in den Bereichen as-built Dokumentation, Bauwesen, Navigation und für forensische Untersuchungen. Die Erfassung von 3D Daten kann effizient mit laserbasierten Entfernungsmesssensoren erfolgen, die unmittelbar 3D Objektpunkte zur Verfügung stellen. Diese 3D Punktwolken liegen im lokalen Koordinatensystem des Light Detection and Ranging (LiDAR) Sensors, auch als Laserscanner bekannt, vor. Zur Erfassung von Objekten sind in der Regel mehrere Standpunkte notwendig. Dabei erfordern die meisten Anwendungen, neben einem gemeinsamen lokalen System, die Transformation in ein globales Koordinatensystem, kurz Geo-Referenzierung.

Die fortschreitende Entwicklung der Laserscanner eröffnet auch auf dem Gebiet des Monitorings neue Möglichkeiten. Im Vergleich zu den traditionell bei Monitoringaufgaben eingesetzten punktbasiert arbeitenden Sensoren (wie z. B. Tachymeter, Neigungssensoren und Extensometer) ermöglicht der Einsatz von Laserscannern eine schnelle linien- und flächenhafte Erfassung von Geometrieinformation (3D Punktwolke) an weitgehend beliebigen Oberflächen. Essentiell für Monitoringaufgaben ist ein gemeinsamer Referenzrahmen (z. B. ein globales Koordinatensystem) der Beobachtungen (hier der 3D Punktwolken), welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Messepochen) erfasst wurden.

Zum Einen stellt dieser Beitrag verschiedene Möglichkeiten zur Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken vor, die mit einem terrestrischen Laserscanner erfasst werden. Zum Anderen wird ein Überblick über die Nutzung von 3D Punktwolken für Monitoringaufgaben im Bereich der Ingenieurgeodäsie gegeben.

2. Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken

Der Laserscanner erfasst die 3D Punktwolke in einem sensor-definierten, lokalen Koordinatensystem (L-frame). Die x- und y-Achse bilden in der Regel eine horizontale Ebene und die z-Achse entspricht der Vertikalachse des Laserscanners. Die 3D Punktwolke ergibt sich aus den Beobachtungsgrößen des Laserscanners: der Strecke ρ , dem Horizontalwinkel β und dem Vertikalwinkel α , woraus sich die kartesischen Koordinaten eines einzelnen 3D Punktes $\mathbf{p}_j = [x_j \ y_j \ z_j]^T$ ableiten lassen.

Die Zusammenführung von 3D Punktwolken unterschiedlicher Aufnahmeorte erfordert auf Grund des sensor-definierten, lokalen Charakters des L-frames (in dem die 3D Punktwolke nach der Erfassung vorliegt) eine geeignete Transformation. Werden die 3D Punktwolken unterschiedlicher Aufnahmeorte in einen (durch eine beteiligte 3D Punktwolke definierten)

L-frame überführt, so wird dieser Prozess als Registrierung bezeichnet. Charakteristisch für die Registrierung ist, dass kein Bezug zu einem absoluten oder globalen Koordinatensystem besteht. Der Prozess der Registrierung wird häufig mit Hilfe (iterativer) Matching-Algorithmen durchgeführt, wie z. B. dem Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus [Besl und McKay (1992)]. Diese Algorithmen basieren auf der Anpassung zweier lokaler Szenen (hier 3D Punktwolken) auf der Basis von Korrelationen. Erfolgt die Transformation von 3D Punktwolken (dies schließt auch mehrere registrierte 3D Punktwolken ein) in ein absolutes oder globales Koordinatensystem, mit in der Regel bekanntem geodätischen Datum (G-frame), so wird dieser Prozess als Geo-Referenzierung bezeichnet.

Die Geo-Referenzierung sowie auch die Registrierung lassen sich durch die 3D Starrkörpertransformation

$$\mathbf{p}_j^G = \mathbf{R}_L^G(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \mathbf{p}_j^L + \mathbf{t}_L^G$$

beschreiben. Diese 3D Transformation hat im Allgemeinen sechs Freiheitsgrade und ist definiert durch seine Transformationsparameter: den Translationsvektor $\mathbf{t}_L^G \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ und die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_L^G \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$; ω , φ und κ bezeichnen die Rotationswinkel um die x -, y - und z -Achse.

Für die im Folgenden vorgestellte Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken (Abbildung 1) wird von einer hinreichenden Horizontierung des Laserscanners sowie von einer Parallelität der z -Achsen des L- und G-frames ausgegangen. Dieses führt zu $\omega=0$ und $\varphi=0$ sowie einer Reduktion der Freiheitsgrade auf vier. Neben den drei Komponenten des Translationsvektors ist weiterhin das Azimut κ zu bestimmen, welches die Rotation des L-frames gegenüber dem G-frame beschreibt. In Abhängigkeit der Art und Weise der Bestimmung der gesuchten Transformationsparameter wird der Prozess der Geo-Referenzierung als indirekte oder direkte Geo-Referenzierung bezeichnet.

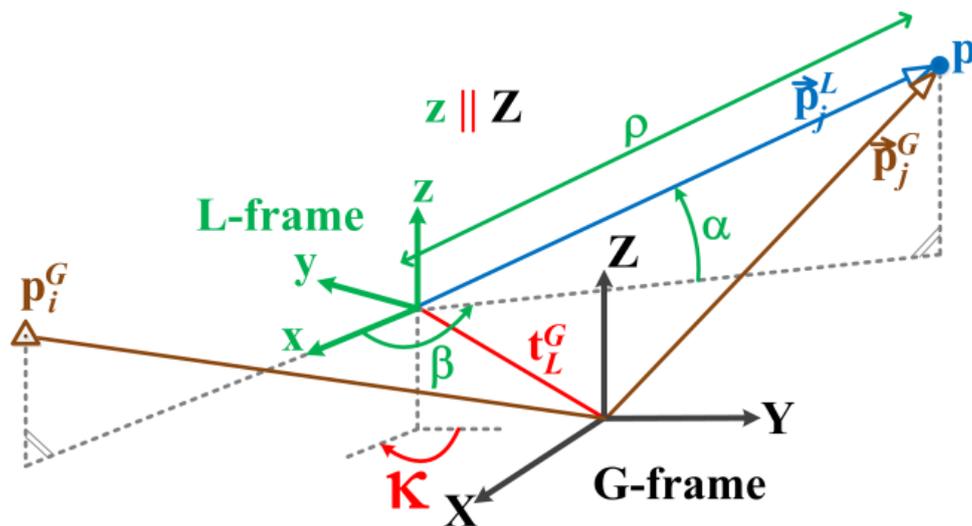


Abbildung 1: Lokales Koordinatensystem des Laserscanners (L-frame) mit den Beobachtungen des Laserscanners: Strecke ρ , Horizontalwinkel β und Vertikalwinkel α . Das Azimut κ beschreibt die Rotation des L-frames gegenüber dem G-frame, welcher das globale Koordinatensystem mit einem in der Regel bekanntem geodätischen Datum

definiert. Für die z-Achsen des L- und G-frames wird Parallelität angenommen, so dass keine weiteren Rotationen auftreten [Paffenholz (2012)].

2.1. Indirekte Geo-Referenzierung – klassische Vorgehensweise

Die indirekte Geo-Referenzierung beschreibt die klassische Vorgehensweise der Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken. Das Vorgehen ist identisch mit der freien Stationierung und den damit verbundenen Beobachtungen mit einem Tachymeter in geodätischen Netzen.

Zur Bestimmung der notwendigen Transformationsparameter sind mindestens drei gutverteilte Passpunkte in der Umgebung notwendig. Passpunkte sind signalisierte Punkte in der Örtlichkeit, deren Koordinaten sowohl im L-frame (der erfassten 3D Punktwolke) als auch im G-frame (absolutes Koordinatensystem) bekannt sind. Typischerweise werden Passpunkte mit künstlichen Zielzeichen (Abbildung 2) in der Örtlichkeit gekennzeichnet. Deren Identifikation in der 3D Punktwolke erfolgt weitestgehend mit automatischen Algorithmen. Die Bestimmung der Passpunktkoordinaten im G-frame erfolgt in einem separaten Arbeitsschritt mit Hilfe von z. B. Tachymetern. Je nach Ausdehnung des Scangebietes und der Anzahl der Passpunkte ist deren koordinatenmäßige Bestimmung im G-frame eine komplexe, zeitintensive und somit auch kostenintensive Aufgabe. Auf Grund der präzisen Bestimmungsmöglichkeit der Passpunkte (z. B. mit Tachymetern) sind im Vergleich zur direkten Geo-Referenzierung in der Regel höhere Genauigkeiten für die Transformation zu erwarten und somit bessere Koordinatengenauigkeiten nach der Transformation.

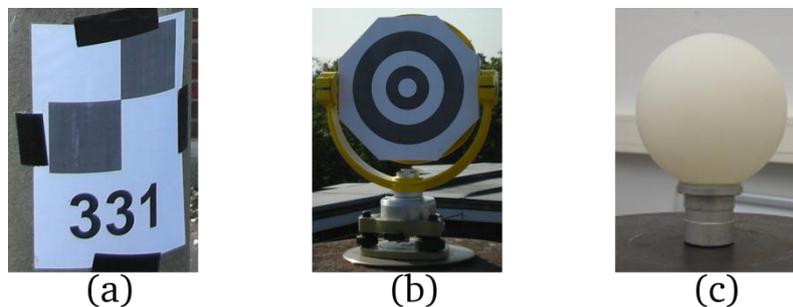


Abbildung 2: Übersicht klassischer Zielzeichen bei der indirekten Geo-Referenzierung: (a) Papiertarget von Zoller+Fröhlich. (b) Zentrisches Spezialtarget [Eling (2009)]. (c) Passkugel mit bekanntem Radius.

2.2. Direkte Geo-Referenzierung – effiziente Vorgehensweise

Die direkte Geo-Referenzierung ist charakterisiert durch die Nutzung externe Sensoren, die typischerweise am Laserscanner adaptiert sind (Abbildung 3), und unmittelbar die gesuchten Transformationsparameter liefern. Typische Sensoren zur direkten Geo-Referenzierung sind 3D Positionssensoren (z. B. Tachymeter und GNSS Ausrüstung), Neigungssensoren, Inertialmesseinheiten und Kompass. Die Effizienz der direkten Geo-Referenzierung liegt in einer deutlichen Minimierung der Passpunkte bis hin zum

vollständigen Verzicht sowie in der Parallelisierung der Arbeitsabläufe durch eine Fusion von Laserscannern und referenzierenden Sensoren (u. a. GNSS Ausrüstung).

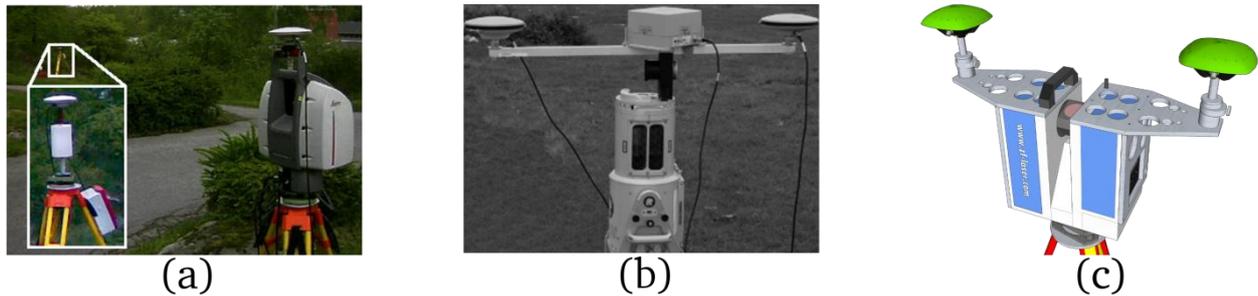


Abbildung 3: Übersicht von Multi-Sensor-Systemen zur direkten Geo-Referenzierung: (a) Eine zentrisch adaptierte GNSS Antenne [Reshetyuk (2010)]. Zwei exzentrisch adaptierte GNSS Antennen (b) Wilkinson et al. (2010) und (c) Paffenholz (2012).

Abbildung 3 zeigt ausgewählte Multi-Sensor-Systeme zur direkten Geo-Referenzierung, die im Wesentlichen aus einem Laserscanner sowie adaptierter GNSS Ausrüstung bestehen. Sie lassen sich in zwei Gruppen einteilen: (1) Nutzung einer zentrisch adaptierten GNSS Antenne und (2) Nutzung zweier exzentrisch adaptierter GNSS Antennen.

(1) Die Nutzung einer zentrisch adaptierten GNSS Antenne auf dem Laserscanner und eines zusätzlichen Zielzeichens mit bekannten (globalen) Koordinaten im Scangebiet wird von Reshetyuk (2010) vorgeschlagen. Dabei erfolgt die Bestimmung des Translationsvektors mit Hilfe der auf dem Laserscanner nahezu zentrisch adaptierten GNSS Antenne. Das Azimut wird mit Hilfe einer langen Basislinie zwischen dem Laserscanner und dem zusätzlichen (mit GNSS referenzierten) Zielzeichen im Scangebiet bestimmt (Abbildung 3 (a)). Der Autor gibt für sein vorgeschlagenes Verfahren eine Koordinatengenauigkeit von ≤ 1 cm in einer Objektentfernung von bis zu 70 m an, wobei die Koordinaten des Zielzeichens mit statischen GNSS Messungen bestimmt wurden. Anzumerken ist zu diesem Verfahren, dass beim Einsatz eines Zielzeichens eine vergleichsweise geringe Redundanz bei der Bestimmung des Azimutes vorliegt. Hinzu kommt der zusätzliche Arbeitsschritt der Positionierung des zusätzlichen Zielzeichens.

(2) Die Nutzung zweier exzentrisch adaptierter GNSS Antennen in Bezug auf die Rotationsachse des Laserscanners ohne weitere Zielzeichen im Scangebiet wird von Wilkinson et al. (2010) und Paffenholz (2012) vorgeschlagen. Der physikalische Aufbau beider Autoren ist nahezu identisch, jedoch unterscheiden sich die beiden vorgeschlagenen Verfahren in der Art und Weise der Datenerfassung der referenzierenden GNSS Ausrüstung und deren Verarbeitung.

Wilkinson et al. (2010) nutzen statische GNSS Messungen vor oder nach der 3D Punktwolkenerfassung an beliebig vielen Horizontalwinkelstellungen des Laserscanners, woraus sich zwei separate Arbeitsabläufe ergeben. Der Translationsvektor und das Azimut ergeben sich aus der Auswertung der Positionen des GNSS Antennenpaares auf dem Laserscanner. Die Autoren geben eine Genauigkeit für das Azimut im Bereich von 0.05° an. Dies ergibt eine metrische Abweichung von 3 cm in 30 m Entfernung. Die Anzahl der notwendigen Horizontalwinkelstellungen wurde in Simulationen ermittelt und in Feldexperimenten validiert.

Der Ansatz von Paffenholz (2012) zeichnet sich durch eine zeitgleich Erfassung der 3D Punktwolke und deren räumlichen Bezug durch kinematische GNSS Messungen aus. Der vorgeschlagene Algorithmus basiert auf der Modellierung der Bewegung des Laserscanners in einem rekursiven Filter im Zustandsraum. Es wird die bekannte kreisförmige Bewegung des Laserscanners um seine Stehachse genutzt, um Zeitreihen von 3D Positionen durch die exzentrisch adaptierte GNSS Ausrüstung zu generieren. Diese Zeitreihen ermöglichen eine redundante Bestimmung der Transformationsparameter und ihrer Varianzmatrizen, wodurch die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des vorgeschlagenen Algorithmus erhöht wird. In durchgeführten Feldexperimenten hat der Autor Genauigkeiten für das Azimut im Bereich von $0.06 - 0.1^\circ$ erzielt, woraus sich eine metrische Abweichung von $3 - 5$ cm in einer Entfernung von 30 m ergibt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine effiziente, direkte Geo-Referenzierung möglich ist, jedoch sind die Koordinatengenauigkeiten nach der Geo-Referenzierung im Bereich von mehreren Zentimetern deutlich größer im Vergleich zur klassischen, indirekten Geo-Referenzierung mit einigen Millimetern bis zu wenigen Zentimetern. Daher ist für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsansprüchen eine klassische, indirekte Geo-Referenzierung das Mittel der Wahl.

3. Monitoring von Objekten basierend auf 3D Punktwolken

Der Einsatz von 3D Punktwolken (erfasst mit terrestrischen Laserscannern) für Monitoringaufgaben hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Der Mehrwert der 3D Punktwolke ist ihre hohe räumliche Auflösung durch die flächenhafte Datenerfassung sowie ihre hohe zeitliche Auflösung durch die technische Weiterentwicklung der Laserscanner (für eine Übersicht von verfügbaren Laserscannern wird auf z. B. Petrie und Toth (2009) verwiesen). Im Vergleich zum klassischen Monitoring in der Ingenieurgeodäsie, bei dem eine klare Definition und Zuordnung von homologen Objekt- und Stützpunkten gegeben ist, kann bei 3D Punktwolken a-priori keine eindeutige Zuordnung von identischen Objektpunkten in unterschiedlichen Messepochen angegeben werden. Den Stützpunkten im klassischen, geodätischen Monitoring entspricht bei der Nutzung von 3D Punktwolken die Geo-Referenzierung (bzw. die Registrierung). Dabei beeinflusst die Güte der Geo-Referenzierung entscheidend die Aussagekraft des durchgeführten Monitorings und die Möglichkeit der Aussage über signifikante Objektveränderungen. Es soll weiterhin angemerkt werden, dass der eingesetzte Laserscanner auf die Art der Monitoringaufgabe abgestimmt sein muss. Weiterhin sind der Fehlerhaushalt des verwendeten Sensors und des zugrunde liegenden Messverfahrens zu beachten.

Die flächenhafte Objektrepräsentation in 3D Punktwolken erfordert eine entsprechende Berücksichtigung bei der Modellierung von Objektveränderungen im Rahmen des Monitorings. Diese unterscheidet sich von der klassischen Zuordnung identischer Objektpunkte in unterschiedlichen Messepochen. Einen Überblick über unterschiedliche Ansätze zur Ableitung von Deformation aus 3D Punktwolken geben Ohlmann-Lauber und Schäfer (2011). Die Autoren identifizieren fünf Modelle zur Modellierung von

Deformationen: punktbasierte, punktwolkenbasierte, oberflächenbasierte, geometriebasierte und parameterbasierte Modelle.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Nutzung von 3D Punktwolken für Monitoringaufgaben im Bereich der Ingenieurgeodäsie gegeben. Der Fokus liegt auf der Art und Notwendigkeit der Geo-Referenzierung. Für detaillierte Informationen insbesondere auch zur Modellierung der Objektveränderung wird auf die jeweiligen Autoren verwiesen.

Eling (2009) entwickelt in seiner Arbeit eine Methode zur Bauwerksüberwachung mit terrestrischem Laserscanning (TLS) und zeigt die Anwendung am Beispiel einer Talsperre. Für den epochalen Vergleich der durchgeführten Messungen ist eine Geo-Referenzierung in Bezug auf einen übergeordneten, stabilen Referenzrahmen essentiell. Um Objektveränderungen weniger Millimeter nachweisen zu können, wendet der Autor die indirekte Geo-Referenzierung an. Dabei kommen speziell entwickelte Zielmarken (Abbildung 2 (b)) zum Einsatz, die auf Referenzpunkten mit einer Messentfernung von bis zu 100 m installiert werden. In die Bestimmung der Transformationsparameter fließen nicht die kartesischen Koordinaten der identischen Punkte ein, sondern deren polare Messelemente. Dieses Vorgehen ermöglicht die Schätzung von Korrekturparametern für die Messgrößen des Laserscanners bei der Transformation. Es gelingt dem Autor absolute, reproduzierbare Deformation am Messobjekt mit seiner entwickelten Methode nachzuweisen. Möglichkeiten zur Verbesserung der Geo-Referenzierung sieht Eling (2009) in einem kombinierten Ansatz von Referenzpunkten zur Anbindung an den stabilen Referenzrahmen und flächenbasierten Matching Verfahren zur Ausnutzung der Information der 3D Punktwolke.

Monserrat und Crosetto (2008) schlagen den Einsatz von Techniken des Oberflächen-Matchings zur Bestimmung von Deformationen zwischen zwei 3D Punktwolken vor. Diese Vorgehensweise beschränkt sich auf eine Registrierung von 3D Punktwolken anstelle einer Geo-Referenzierung. Von entscheidender Bedeutung für unverfälschte Ergebnisse ist die Identifikation stabiler Regionen in der 3D Punktwolke zur Bestimmung der Transformationsparameter. In einem Feldversuch haben die Autoren die Anwendbarkeit ihrer vorgeschlagenen Methode erfolgreich nachgewiesen. Anzumerken ist, dass die Größe und Verteilung der stabilen Regionen im Vergleich zu den deformationsbeeinflussten Regionen in der 3D Punktwolke einen Einfluss auf die Bestimmung der Transformationsparameter haben. Dies wirkt sich daher unmittelbar auf die Detektierbarkeit von Objektveränderungen aus.

Das terrestrische Monitoring natürlicher Zielobjekte adressiert Wunderlich (2009) in seinem Beitrag und stellt unter anderem das Monitoring von Deformationen im Tunnelbau mit TLS vor. Zur Geo-Referenzierung multitemporaler 3D Punktwolken im Tunnel kommen Passpunkte wie in Abbildung 2 zum Einsatz um einen Nachweis von Deformationen im Bereich von einigen Zehnermillimetern zu gewährleisten. Für weiterführende Informationen sei auf Ohlmann-Bartusel (2009) verwiesen.

Das kombinierte Monitoring zweier Laserscanner zur Beschreibung dreidimensionaler Bewegungen am Beispiel einer Windenergieanlage wird von Rink (2010) anhand von 2D Profilschans gezeigt. 2D Profilschans ergeben sich durch eine Beschränkung der Rotation des Laserscanners um seine Stehachse. Für einen gemeinsamen Referenzrahmen der beiden 2D Profilschans wurde ein klassisches geodätisches Netz angelegt, so dass auch hier von einer

klassischen, indirekten Geo-Referenzierung gesprochen werden kann. Der gemeinsame zeitliche Bezug wurde realisiert durch die Nutzung der GPS-Zeit als gemeinsame Zeitskala und eine entsprechende Synchronisation der Laserscanner. Der Autor konnte so als Monitoringresultat Zeitreihen zur Beschreibung der Bewegung im Raum für charakteristische Punkte an der Windenergieanlage bestimmen.

4. Fazit

Dieser Beitrag stellt zwei Varianten zur Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken vor: Die indirekte Geo-Referenzierung, welche die klassische Vorgehensweise mit Hilfe künstlicher Zielzeichen beschreibt, und die direkte Geo-Referenzierung, die einen effizienteren Arbeitsablauf durch eine deutliche Minimierung bis hin zum Verzicht von Zielzeichen charakterisiert. Die Notwendigkeit der Geo-Referenzierung wurde an ausgewählten Beispielen der Ingenieurgeodäsie gezeigt, wobei festzuhalten ist, dass in der Regel auf die klassische, indirekte Geo-Referenzierung zurückgegriffen wird. Dies begründet sich in den größeren Koordinatenungenauigkeiten bei der Transformationsparameterbestimmung mit Hilfe der direkten Geo-Referenzierung, so dass Objektveränderungen von wenigen Zentimetern im Rahmen eines Monitorings nur schwer nachzuweisen sind. Die gezeigten Ansätze zur effizienten, direkten Geo-Referenzierung zeigen jedoch deutlich das Potential der Methode. Durch Optimierungen der von Wilkinson et al. (2010) und Paffenholz (2012) vorgeschlagenen Multi-Sensor-Systeme sowie Weiterentwicklungen der Auswertalgorithmen ist ein zukünftige Einsatz bei Monitoringaufgaben denkbar.

5. Literatur

- Besl, P. J. und McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), S. 239-256.
- Eling, D. (2009). *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Dissertation. Reihe C, 641. München: DGK.
- Monserrat, O. und Crosetto, M. (2008). Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1), S. 142–154.
- Ohlmann-Bartusel, J. (2009). Bestimmung flächenhafter Deformationen einer ausgebrochenen Tunnellaubung mit multitemporalen Laserscanning-Daten. In: Luhmann, T. und Müller, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tag 2009*. Heidelberg: Wichmann, S. 110–117.
- Ohlmann-Lauber, J. und Schäfer, T. (2011). Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS-Challenge*. 106. DVW-Seminar. Augsburg: Wißner-Verlag, S. 147–157.
- Paffenholz, J.-A. (2012). *Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors*. Dissertation. Reihe C, 689. München: DGK. (in Vorbereitung).
- Paffenholz, J.-A. (2013). Effiziente Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken und deren Nutzung für Monitoringaufgaben. In: Ruppel, U. (Hrsg.): *2. Darmstädter Ingenieurkongress. Bau und Umwelt*. Aachen: Shaker, S. 581–588.

- Petrie, G. und Toth, C. K. (2009). Terrestrial laser scanners. In: Shan, J. und Toth, C. K. (Hrsg.): *Topographic laser ranging and scanning. Principles and processing*. Boca Raton, Fla, London: CRC Press; Taylor & Francis [distributor], S. 87–126.
- Reshetyuk, Y. (2010). Direct georeferencing with GPS in terrestrial laser scanning. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 135(3), S. 151–159.
- Rink, C. (2010). *Verknüpfung von Profilschans zweier Laserscanner zur Beschreibung dreidimensionaler Bewegungen*. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Hannover.
- Wilkinson, B. E., Mohamed, A. H., Dewitt, B. A. und Seedahmed, G. H. (2010). A novel approach to terrestrial LiDAR georeferencing. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(6), S. 683–690.
- Wunderlich, T. A. (2009). Terrestrisches Monitoring natürlicher Zielobjekte. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 97(3), S. 325–334.