

Vergleich verschiedener Methoden zur automatischen Registrierung von terrestrischen Laserscandaten

Christoph DOLD, Nora RIPPERDA und Claus BRENNER

Zusammenfassung

Terrestrische Laserscanner werden für viele verschiedene Anwendungen eingesetzt. Ein entscheidender Vorteil des Verfahrens liegt in dem berührungslosen, schnellen und vollständigen Aufmaß von Objekten im Sichtfeld eines Laserscanners. Jedoch sind in der Regel mehrere Gerätestandpunkte erforderlich, um ein Objekt von allen Seiten zu erfassen. Die verschiedenen Standpunkte müssen in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert werden, in diesem Zusammenhang spricht man von der Registrierung der Scanpositionen. In diesem Beitrag werden verschiedene automatische Verfahren zur Registrierung von terrestrischen Laserscandaten miteinander verglichen. Die verschiedenen Verfahren werden erläutert und auf einen gemeinsamen Datensatz angewendet. Die Ergebnisse der automatischen Registrierung werden anhand von Referenzwerten überprüft sowie die Zuverlässigkeit der Verfahren untersucht.

1 Einleitung

Die Aufnahme und Registrierung von terrestrischen Laserscans kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Im Wesentlichen gibt es zwei Verfahren, welche auch in der Praxis Anwendung finden.

Die Standardmethode sieht eine statische Aufnahme von verschiedenen Standpunkten aus vor. Dabei werden in der Regel von jedem Standpunkt aus Zielmarken erfasst. Die identischen Marken werden für die Berechnung der Transformationsparameter verwendet. Bei einer ausreichenden Anzahl an identischen Punkten und einer guten geometrischen Anordnung liefert dieses Verfahren genaue und zuverlässige Ergebnisse. Entscheidender Nachteil ist jedoch der erhöhte Zeitaufwand, die Zielmarken müssen im Objektraum verteilt, in allen Standpunkten identifiziert und zusätzlich gescannt werden.

Eine weitere Methode zur Registrierung ist die direkte Georeferenzierung der Instrumente. Dieses Verfahren kommt vor allem bei dynamischen Messungen („mobile mapping“) zum Einsatz, bei denen der Scanner als „pushbroom“-Sensor betrieben wird. Dabei werden externe Sensoren zur Bestimmung der Position und Orientierung des Messinstrumentes verwendet. Üblicherweise wird die Position mit einem GPS Empfänger und die Orientierung über eine inertielle Messeinheit (IMU) gemessen (TALAYA et al. 2004).

Auch Kombinationen aus beiden Verfahren finden in der Praxis Anwendung. Die Datenerfassung erfolgt in diesem Fall von einer mobilen Plattform, z.B. einem Auto, in einem Stop & Go Modus. Gleichzeitig werden die Orientierungsdaten mittels externer Sensoren gemessen (ASAI et al. 2005). Allerdings sind externe Sensoren immer mit zusätzlichem Auf-

wand verbunden, insbesondere eine IMU verursacht hohe Kosten und die Synchronisation der Orientierungsdaten mit den Laserdaten ist schwierig.

In diesem Beitrag wird ausschließlich die statische Methode betrachtet. Ziel ist es automatisch eine Grobregistrierung durchzuführen, welche die Startwerte für eine folgende Feinregistrierung liefern kann.

In jedem Aufnahmestandpunkt wird durch das Messinstrument ein lokales Koordinatensystem definiert. Aufgabe der Registrierung ist die Bestimmung einer Transformationsvorschrift, welche die relative Beziehung zwischen zwei Systemen herstellt. Die Transformation eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems in ein entsprechendes Zielssystem ist durch sechs Parameter, drei Rotationen und drei Translationen¹, beschrieben. Wird die Rotation mit \mathbf{R} , die Translation mit \mathbf{T} bezeichnet, so lautet die Euklidische Transformationsvorschrift für einen Punkt \mathbf{x} nach \mathbf{x}' wie folgt:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{T} \quad (1)$$

Verschiedene Verfahren für die automatisierte Registrierung von Entfernungsdatsätzen wurden in der Vergangenheit vorgestellt. Oftmals werden existierende Algorithmen wie der *Iterative Closest Point* (ICP) Algorithmus (CHEN & MEDIONI 1991, BESL & MCKAY 1992) integriert. Für den ICP Algorithmus werden Näherungswerte benötigt, so dass dieser häufig für eine Verbesserung vorhandener Orientierungsdaten verwendet wird. Einen Überblick über Varianten von ICP geben beispielsweise RUSINKIEWICZ & LEVOY (2001) und GRÜN & AKCA (2005).

Ein Verfahren für die automatische Registrierung von Punktwolken wird von RABBANI & VAN DEN HEUVEL (2005) präsentiert. Aus erfassten Industrieanlagen werden Körper wie Zylinder, Kugeln und Ebenen extrahiert und deren Geometrie anstelle von künstlichen Zielmarken für die Registrierung verwendet. Korrespondenzen werden über eine beschränkte Suche ermittelt. HE ET AL. (2005) präsentieren ein Verfahren, welches ausschließlich sogenannte „Complete Plane Patches“ für die Berechnung der Transformationsvorschrift verwendet. Die Ebenen werden mit den Einschränkungen extrahiert, dass sie immer im Vordergrund und nicht am Rand des Scans liegen. Die anschließende Zuordnung der Ebenen erfolgt ebenfalls über eine beschränkte Suche (GRIMSON & LOZANO-PÉREZ 1987). Eine Methode zur Grobregistrierung schlägt VON HANSEN (2006) vor, bei der zunächst lokale Flächenelemente zu Ebenen gruppiert werden. Ausgehend von lotrecht aufgestellten Messinstrumenten wird mittels einer vollständigen Suche ein Rotationswinkel ermittelt. Die Translation wird aus den Schwerpunkten der Ebenen berechnet. BAE und LICHTI (2004) schlagen ein Verfahren vor, welches als Merkmale die Krümmung, die Krümmungsänderung sowie die Normalenvektoren der Oberfläche an einem Punkt verwendet, um mögliche Korrespondenzen der Punktmengen zu bestimmen.

In diesem Beitrag werden drei unterschiedliche Ansätze zur automatischen Registrierung von terrestrischen Laserscandaten vorgestellt. Die entwickelten Verfahren werden auf einen im städtischen Bereich aufgenommenen Datensatz angewendet und die Ergebnisse mit Referenzwerten verglichen.

¹ Der Maßstab ist durch das Messinstrument definiert.

2 Verfahren zur Registrierung von Laserscandaten

2.1 Registrierung mit der „Normal Distribution Transform“

Ein Verfahren zur markerfreien Registrierung ist die Methode der Normal Distribution Transform (NDT), welche BIBER & STRABER (2003) im Kontext der Robotik für zweidimensionalen Daten vorgestellt. Sie bietet eine Möglichkeit, Punktwolken aneinander auszurichten. Die Grundidee des Verfahrens ist, die Punkte nicht durch ihre Koordinaten, sondern durch ihre Verteilung darzustellen. Hierzu wird jeder Scan in ein regelmäßiges Gitter aufgeteilt. Für jede Zelle wird die Verteilung der Punkte durch eine Normalverteilung modelliert. Dazu wird für jede Zelle Mittelwert und Varianz der zugehörigen Punkte berechnet. Diese Darstellung ist die NDT des Scans.

Für die Registrierung zweier Scans wird eine affine Transformation bestimmt. Dazu wird mit Hilfe der NDT eine Gütefunktion in Abhängigkeit der Transformationsparameter definiert. Optimiert man diese Funktion, so erhält man die gesuchten Parameter der Transformation. Um mit diesem 2D Verfahren 3D Daten zu registrieren wird aus den Daten eine Höhenschicht ausgeschnitten. Dabei wird angenommen, dass die Horizontalebene näherungsweise bekannt ist. Um mehr Informationen aus den 3D Daten zu nutzen wird das Verfahren in unterschiedlichen Höhenschichten ausgeführt. Für jede Schicht wird die gleiche Gittergröße verwendet. Die Gütefunktion ist in diesem Fall die Summe aller Gütefunktionen. Abbildung 1 zeigt eine Höhenschicht mit den zugehörigen NDTs verschiedener Zellgröße.

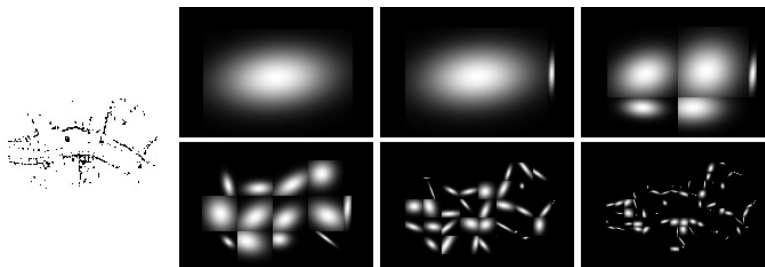


Abb. 1: Höhenschicht der Punktwolke und deren Verteilung in verschiedenen Zellgrößen für einen Standpunkt

Die Größe der Zellen spielt für das Ergebnis der Registrierung eine wichtige Rolle. Große Zellen führen zu einer groben Annäherung, kleine berücksichtigen auch die Details. Der Nachteil kleiner Zellen ist aber, dass sie bei weit auseinanderliegenden Daten zu keiner Registrierung führen. Wenn keine Zellen überlappen kann auch keine Optimierung der Transformationsparameter erfolgen. Deshalb wurde eine grob-zu-fein Strategie entwickelt, das Verfahren startet mit großen Zellen und verkleinert diese sukzessive. Hierdurch erhält man zunächst eine grobe Annäherung bevor die feinen Strukturen berücksichtigt werden. Die Methode besitzt einen deutlich größeren Konvergenzradius als bisherige Ansätze, die auf der iterativen Bestimmung nächster Nachbarn (ICP) basieren (RIPPERDA & BRENNER 2004).

2.2 Registrierung mittels „Extended Gaussian Images“

Ein „Extended Gaussian Image“ (EGI) ist die Darstellung eines 3D-Objektes als Gesamtheit seiner Oberflächennormalen. Sie wurde von HORN (1984) eingeführt. Das EGI basiert auf einer Einheitskugel, auf deren Oberfläche Einheitsvektoren projiziert werden, indem die Normalenvektoren des Objekts in den Ursprung der Kugel verschoben werden.

Das EGI kann für die Registrierung von 3D-Laserscandaten verwendet werden. Die Idee ist, die Scandaten in ebene Regionen zu segmentieren und anschließend die Normalenvektoren der Ebenen in einem EGI aufzutragen. Man erhält für jede Scanposition ein EGI. Die Registrierung erfolgt über die Verteilung der Normalenvektoren auf den EGIs. Zu diesem Zweck wird die Oberfläche der Kugel tesseliert. Dabei wird von einem platonischen Grundkörper ausgegangen, der schrittweise weiter so unterteilt wird, dass wiederum alle neu eingefügten Ecken auf der Kugeloberfläche liegen. Mit zunehmender Verfeinerung des Körpers nähert man sich der Kugeloberfläche an.

Jeder Normalenvektor fällt in ein Feld der angenäherten Kugel. Als zusätzliches Attribut wird die Fläche der jeweils geschätzten Ebene abgespeichert. Das Ergebnis ist ein für jeden Scan charakteristisches EGI. Die Abbildung 4 in Abschnitt 3.2 zeigt eine auf die Kugel übertragende Scanposition in verschiedenen feinen Stufen. Die Farbe eines Feldes gibt Auskunft über die Anzahl der Normalenvektoren innerhalb des Feldes.

Die Transformationsparameter ermittelt man über den Vergleich zweier Kugeln. Dabei werden die Kugeln relativ zueinander rotiert, bis sie bestmöglich übereinstimmen. Die Verdrehung der Einheitskugeln definiert schließlich die gesuchten Rotationswinkel. Ein Maß für die Übereinstimmung ist die Korrelation. Das Korrelationsmaximum wird durch ein Suchverfahren über alle möglichen Rotationswinkel ermittelt. Dabei startet man mit einer grob tesselierten Kugel und verfeinert diese zunehmend. Das zusätzliche Flächenattribut stützt die Berechnung der Korrelation. Durch diese grob-zu-fein Strategie können die gesuchten Extremwerte schnell ermittelt werden. Nachteilig ist, dass bei dem Übergang auf ein EGI die Information der Translation zwischen den Standpunkten verloren geht (DOLD 2005).

2.3 Symbolische Zuordnung von Ebenen

Als drittes Verfahren zur Registrierung terrestrischer Scandaten wird die Extraktion und Zuordnung von ebenen Flächen betrachtet. Besonders im Kontext der Aufnahme von Gebäuden kann damit gerechnet werden, dass in den Szenen eine Vielzahl ebener Flächenstücke vorhanden ist.

Das Verfahren geht in mehreren Schritten vor. Zunächst werden ebene Flächen aus den Laserscandaten abgeleitet. Hierzu wurde ein Verfahren implementiert, welches 3D Scandaten basierend auf einem Region Growing Ansatz in ebene Regionen segmentiert. Anschließend werden in den Überlappungsbereichen verschiedener Scans korrespondierende Flächen (Merkmalspaare) ausgewählt, um daraus die Transformationsparameter zwischen zwei Scanpositionen zu bestimmen. Um die Rotations- und Translationskomponente zu bestimmen, werden wenigstens drei Ebenenpaare benötigt. Eine Methode zur Bestimmung des Rotationsanteils ist das Lösen einer Optimierungsaufgabe. Aufgrund von mathematischen Vorteilen wird zu diesem Zweck häufig von Quaternionen Gebrauch gemacht, in diesem Fall lässt sich die Bestimmung der Rotationsparameter auf eine Eigenwertaufgabe zurück-

führen. Für die Bestimmung des Translationsanteils wird von der Eigenschaft Gebrauch gemacht, dass korrespondierende Ebenen einen bis auf den durch die Messung verursachten Fehler identischen Normalenvektor haben. Die Differenz zwischen den Ebenen definiert die Translation, welche über ein Ausgleichsmodell nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden kann.

Die Problematik bei dem vorgestellten Verfahren liegt zum Einen in der automatischen Zuordnung der korrespondierenden Ebenen und zum Anderen darin, dass für die erfolgreiche Bestimmung der Transformationsparameter Ebenenpaare vorliegen müssen, deren Normalenvektorrichtungen möglichst gut im Raum verteilt sind. Die Zuordnung der Ebenen erfolgt über Suchverfahren automatisch. Ab einer gewissen Anzahl von extrahierten Ebenen pro Scan muss die Suche eingeschränkt werden, da ansonsten der Suchraum schnell sehr groß wird. Hierzu wird eine Vorauswahl geeigneter Ebenen getroffen mit denen sich die gesuchte Transformation möglichst gut bestimmen lässt. Dies ist der Fall, wenn die drei Normalenvektoren der Ebenen möglichst senkrecht aufeinander stehen. Mathematisch betrachtet bedeutet dies, dass das Spatprodukt der normierten Normalenvektoren gleich eins ist. Damit nun geeignete Kombinationen zuerst berücksichtigt werden, wird für alle Ebenentripel von jedem Standpunkt das Spatprodukt berechnet und absteigend nach dessen Wert sortiert. Aus dieser Liste werden sukzessiv Ebenenpaare entnommen und daraus die Transformationsparameter berechnet. Über eine Gütefunktion wird entschieden, ob die bestimmte Transformation angenommen oder abgelehnt wird. Der Schlüssel zum Erfolg ist die Definition der Gütefunktion, korrekte Lösungen müssen zuverlässig akzeptiert und falsche Lösungen verworfen werden. Die verwendete Gütefunktion bestimmt die Anzahl der Ebenen, welche nach der Transformation ähnliche Ebenenparameter haben (DOLD & BRENNER 2006).

3 Anwendung der Verfahren und Ergebnisse

Ein Datensatz bestehend aus 20 Laserscans von der Innenstadt in Hannover („Am Holzmarkt“) wurde verwendet, um die vorgestellten Verfahren zur Registrierung zu evaluieren. Die Standpunkte wurden systematisch in einem Abstand von ca. 5 m gewählt. Abbildung 2 zeigt die Platzierung der Standpunkte in einer Katasterkarte.

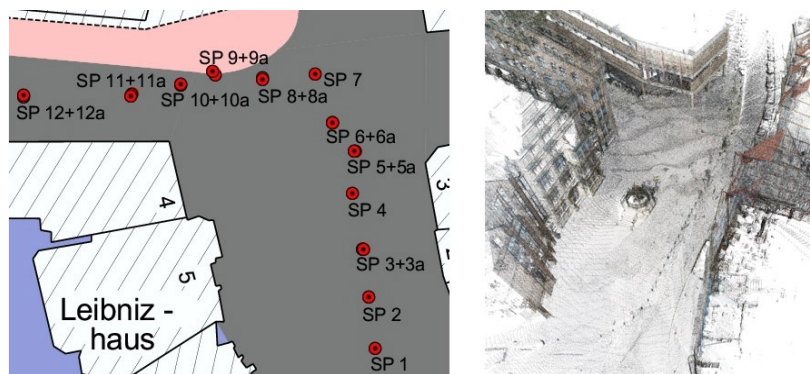


Abb. 2: Wahl der Standpunkte und Ansicht der registrierten Punktwolke

Die Scans wurden mit einem Riegl Scanner LMS Z360I erfasst, welcher einen Messbereich von $360^\circ \times 90^\circ$ und eine Messgenauigkeit einer Einzelmessung von 12 mm aufweist. Bei einer Schrittweite von $0,12^\circ$ wurden im Mittel 1,9 Mio. Punkte pro Scan erfasst. Von den 20 Scans wurden acht mit gekippten Aufbau erfasst, welche in der Abbildung 2 mit einem „a“ gekennzeichnet sind. Diese konnten nur im Test der Registrierung über Ebenen verwendet werden, da die anderen beiden Verfahren einen aufrecht stehenden Scanner voraussetzen.

In den folgenden Tests wird die Berechnung der Transformationsparameter von den Standpunkten zwei bis zwölf relativ zum Ersten für die drei Methoden untersucht. Aufgrund der systematischen Anordnung der Standpunkte sinkt die Überlappung zwischen den Scans mit steigender Standpunktnummer. Anhand der Referenzwerte für die Registrierung wurde die Überlappung der Scans berechnet, indem die Punktwolken jeweils in das Koordinatensystem des ersten Scans transformiert wurden. Falls ein Punkt im ersten Scan innerhalb einer Entfernung von 0,5 m von den transformierten Punkten gefunden wurde, gilt dieser als überlappend. Das Verhältnis überlappenden Punkte zu allen Messpunkten ergibt die Überlappungen, welche in der Tabelle 1 angegeben sind.

Tabelle 1: Überlappungen zwischen den Standpunkten

SP	2	3	3a	4	5	5a	6	6a	7
1	83,1%	77,7%	73,3%	68,8%	63,0%	59,7%	50,5%	54,5%	50,7%
8	8a	9	9a	10	10a	11	11°	12	12a
43,6%	45,7%	27, %3	28,8%	16,2%	11,4%	9,9%	12,2%	3,6%	2,3%

3.1 NDT

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben wird das NDT-Verfahren in verschiedenen Höhenschichten ausgeführt. Die Abbildung 3 zeigt einen Teil von einem Aufnahmestandpunkt, in dem die verwendeten Schichten farblich gekennzeichnet sind. Die Schnitte wurden in den Höhen 0 m, 4,5 m, 9 m und 13,5 m (bezogen auf den Nullpunkt des Instruments) entnommen. In den ersten zwei Schichten sind im Mittel 30000 Punkte und in den oberen 15000 bzw. 5000 Punkte enthalten.

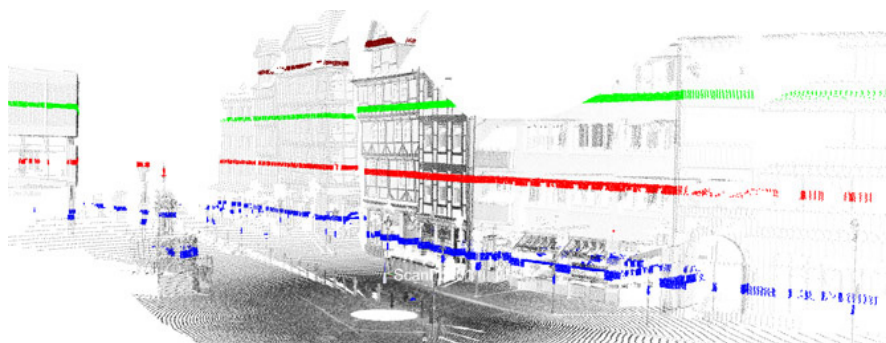


Abb. 3: Ausgewählte Höhenschichten von einem Standpunkt farblich gekennzeichnet

Die angesprochene grob-zu-fein Strategie wurde mit einer Zellgröße von 250 m x 250 m gestartet und in acht Schritten auf 2 m x 2 m verkleinert. Die Abbildung 1 in Abschnitt 2.1 zeigt eine Schicht der Punktwolke des ersten Scans sowie die zugehörige NDT für verschiedenen Zellgrößen. Mit diesem Verfahren konnten die Standpunkte zwei bis sieben relativ zum Ersten registriert werden. Untersuchungen zum Konvergenzradius des Verfahrens haben gezeigt, dass sich stärker überlappende Scans einen größeren Konvergenzradius haben. Der Konvergenzradius reduziert sich drastisch, wenn Symmetrien wie z. B. an Kreuzungen in der Szene auftreten. Im Vergleich zu den Referenzwerten wurde für die Registrierung eine Genauigkeit (RMS) von $0,8^\circ$ für den Rotationswinkel sowie 30 cm für die Translation erreicht.

3.2 EGI

Bei diesem Verfahren wurden die tesselierten Kugeln der zu registrierenden Scans nur um eine Achse verdreht. Für jeden Rotationswinkel wurde die Korrelation berechnet, das Maximum liefert schließlich den gesuchten Winkel. Dabei führte die Registrierung der Standpunkte 2-8 mit Ausnahme von Nr. 4 zu korrekten Ergebnissen. Das Diagramm in Abbildung 4 zeigt die Korrelation der auf die Kugel projizierten Normalenvektoren in Abhängigkeit des Rotationswinkel in verschiedenen Stufen der Tessellation.

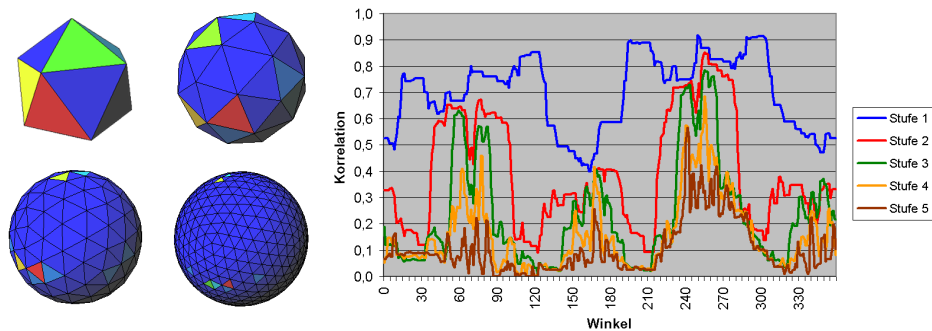


Abb. 4: Gauss-Kugeln und deren Korrelation zwischen den Standpunkten 1 und 5

Mit dem Verfahren können auch gekippte Standpunkte registriert werden, indem man die Kugeln um alle drei Rotationswinkel verdreht und jeweils die Korrelation berechnet. Allerdings verlängern sich die Rechenzeiten und die einfache Maximumsuche beruhend auf den Korrelationswerten führt aufgrund von Mehrdeutigkeiten nicht zum Erfolg. Korrekte Lösungen müssten mit einer zuverlässigen Gütefunktion verifiziert werden. Ferner wird mittels der EGIs nur die Rotation und nicht die Translation bestimmt. Diese könnte wie bei VON HANSEN (2006) über die Schwerpunkte der extrahierten Ebenen ermittelt werden, sofern extrahierte Flächen eine ähnliche Ausprägung haben. Die zu erwartende Genauigkeit hängt von der Tessellationsstufe der Kugeln und von den Korrelationswerten ab. Für den verwendeten Datensatz konnte der gesuchte Rotationswinkel bei den erfolgreich registrierten Standpunkten im Mittel auf ein Grad genau ermittelt werden.

3.3 Ebenen

Die Anwendung der beschriebenen Methode führte zu einer zuverlässigen und genauen Registrierung. Insgesamt konnten 14 (Standpunkte 2-10) der 20 Standpunkte zueinander registriert werden. Dabei weisen die Standpunkte 1 und 10 noch eine Überlappung von ca. 16% auf. Für die fehlerhaft registrierten Standpunkten wurden Überlappungen von kleiner 12% ermittelt. Bei den korrekt registrierten Standpunkten wurden Genauigkeiten (RMS) für die Rotation von $0,2^\circ$ und 10 cm für die Translation ermittelt.

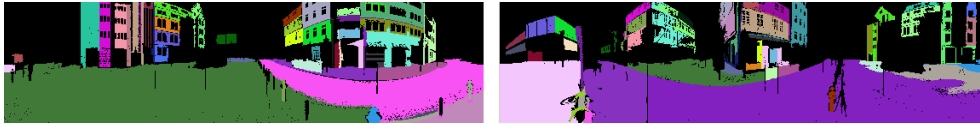


Abb. 5: Segmentierte Ebenen für den Standpunkt 1 und 5

Der Erfolg des Verfahrens hängt entscheidend von der Segmentierung der Scandaten in ebene Regionen ab. Die Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Segmentierung für die Standpunkte 1 und 5. Die Segmentierungen enthalten jeweils die 50 Ebenen, welche mit der höchsten Anzahl an Messpunkten geschätzt wurden. Untersuchungen haben ergeben, dass lediglich 53% der segmentierten Fläche in den beiden Scans Korrespondenzen haben, obwohl sie sich um 63% überlappen. Dieser Unterschied ist durch die verworfenen kleinen Ebenen sowie durch Messpunkte zu erklären, welche keiner ebenen Fläche zugeordnet werden konnten. Von den Korrespondenzen können wiederum allein 40% der Bodenfläche zugeordnet werden, so dass lediglich 7% Prozent des segmentierten Scans übrig bleiben, um weitere Zuordnungen zu finden

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden drei Verfahren zur automatischen Registrierung von terrestrischen Laserscandaten kurz vorgestellt und auf einen im städtischen Bereich erfassten Datensatz angewendet. Die NDT stellt die Punktwolken als Verteilungen dar und die Datensätze werden iterativ unter Verwendung einer Gütefunktion registriert. Das EGI ist ein einfaches Verfahren basierend auf dem Korrelationsmaximum zwischen zwei Gauss-Kugeln, allerdings gehen Informationen für die Translation beim Übergang auf das EGI verloren. Die symbolische Zuordnung von Ebenen basiert auf einer klassischen merkmalsorientierten Objekterkennung. Zusammengehörige Ebenen werden über deren räumlichen Anordnung und einer Gütefunktion identifiziert. Die Tabelle 2 fasst zusammen, bei welchen Standpunkten das jeweilige Verfahren erfolgreich war.

Tabelle 2: Registrierte Standpunkte mit den vorgestellten Verfahren

SP 1 -	2	3	3a	4	5	5a	6	6a	7	8	8a	9	9a	10	>10
NDT	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✗	-	✗	-	✗	✗
EGI	✓	✓	-	✗	✓	-	✓	-	✓	✓	-	✗	-	✗	✗
Ebenen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗

✓ erfolgreiche Registrierung ✗ fehlerhafte Registrierung

Vorteil des NDT-Verfahrens ist die Unabhängigkeit von geometrischen Strukturen wie ebene Flächen in den Datensätzen. Außerdem ist das Verfahren schnell, da im Vorfeld keine Objekterkennung durchgeführt werden muss. Im Gegensatz sind sowohl für das EGI-Verfahren als auch für die symbolische Zuordnung von Ebenen extrahierte Ebenen erforderlich. Bei dem EGI-Verfahren wird die Translation nicht bestimmt und ohne die Verwendung einer Gütefunktion für die Verifikation der Ergebnisse ist es besonders bei Symmetrien im Datensatz fehleranfällig. Für das Verfahren können anstelle von den Normalenvektoren der extrahierten Ebenen auch lokal geschätzte Richtungsvektoren auf die Kugeln projiziert werden. Dadurch entfällt die zeitintensive Objekterkennung. Die symbolische Zuordnung der Ebenen hat sich als ein stabiles Verfahren erwiesen, welches auch von der Genauigkeit her die besten Ergebnisse liefert. Ein entscheidender Vorteil ist die Möglichkeit die gekippten Standpunkte zuverlässig zu registrieren. Auch kommt das Verfahren noch mit einer geringen Überlappung zurecht. Ein Nachteil ist, dass für die erfolgreiche Bestimmung der Translation Ebenen vorhanden sein müssen, welche die drei Raumrichtungen abdecken.

5 Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten erfolgten im Rahmen der von der VolkswagenStiftung geförderten Nachwuchsgruppe „Automatische Verfahren zur Fusion, Reduktion und konsistenten Kombination komplexer heterogener Geoinformation“.

6 Literatur

- Asai, T., M. Kanbara & N. Yokoya (2005): *3D Modeling of Outdoor Environments by Integrating Omnidirectional Range and Color Images*. In: Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Ontario, Canada, June 13-16, S. 447–454
- Bae, K.-H. & D. Lichti (2004): *Automated Registration of unorganised point clouds from terrestrial laser scanners*. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Band XXXV, Part B5, Istanbul, July, 12-23 2004. Proceedings of the ISPRS working group V/2, S. 222–227

- Besl, P. J. & N. D. McKay (1992): *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2), S. 239–256
- Biber, P. & W. Straßer (2003): *The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching*. In: IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems
- Chen, Y. & G. Medioni (1991): *Object Modeling by Registration of Multiple Range Images*. In: International Conference on Robotics and Automation
- Dold, C. (2005): *Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data*. In: Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12-14
- Dold, C. & C. Brenner (2006): *Registration of Terrestrial Laser Scanning Data using Planar Patches and Image Data*. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings of the ISPRS Com. V Symposium, Vol. XXXVI, pp. 78-83
- Grimson, W. E. L. & T. Lozano-Pérez (1987): *Localizing Overlapping Parts by Searching the Interpretation Tree*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Band 9(4), July 1987, S. 469–482
- Grün, A. & D. Akca (2005): *Least squares 3D surface and curve matching*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(3) S. 151–174
- Hansen, W. v. (2006): *Robust automatic marker-free registration of terrestrial scan data*. In: Förstner, Wolfgang und Richard Steffen (Hrsg.): Proceedings of Photogrammetric Computer Vision, Band XXXVI, S. 105–110
- He, W., W. Ma & H. Zha (2005): *Automatic Registration of Range Images Based on Correspondence of Complete Plane Patches*. In: Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, S. 470–475
- Horn, B. K. P. (1984): *Extended Gaussian Images*. In: Proc. IEEE, Band 72(12) der Reihe A.I. Memo No. 740, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, S. 1671–1686
- Rabbani, T. & F. van den Heuvel (2005): *Automatic Point Cloud Registration Using Constrained Search for Corresponding Objects*. In: 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques
- Ripperda, N. & C. Brenner (2005): *Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans using the Normal Distribution Transform*. In: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 3D Arch, Mestre-Venice, Italy, 22-24 August, ISPRS WG V/4 - Virtual Reality and Computer Animation.
- Rusinkiewicz, S. & M. Levoy (2001): *Efficient Variants of the ICP Algorithm*. In: Proceedings of the Third Intl. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, S. 142–152
- Talaya, J., R. A., E. Bosch, A. Serra, W. Kornus & A. Baron (2004): *Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU orientation sensors*. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Band Commission 5, ThS 17, Istanbul, July, 12-23