

Verfahren zur Registrierung von 3D Punktwolken

Christoph Dold, Claus Brenner

2. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning
Donnerstag, 14. Juni 2007

Gliederung

- ▶ Einleitung
 - Prinzip der Registrierung
- ▶ Verfahren zur Registrierung
 - Direkte Georeferenzierung
 - Verwendung von Zielmarken
 - Datengetriebene Lösungen
 - Grobregistrierung
 - Feinregistrierung
- ▶ Zusammenfassung

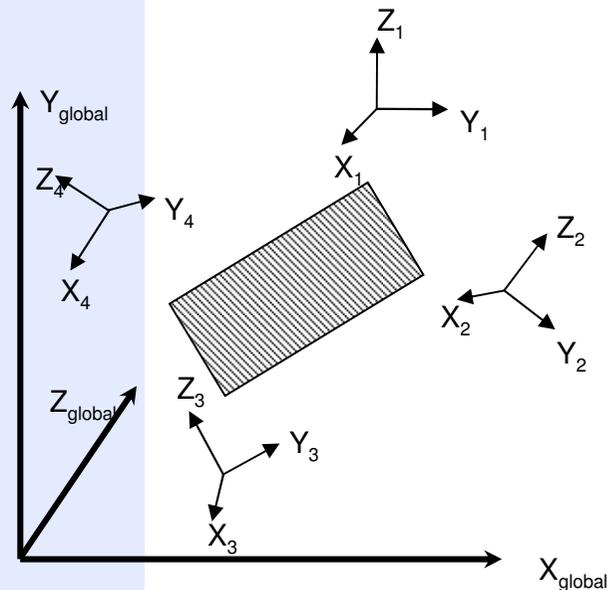
Sensoren und Registrierung

- ▶ Es existieren verschiedene Arten an Sensoren zur Erfassung von flächenhaften 3D Daten
 - Musterprojektionsverfahren
 - Interferometrie
 - Triangulationsverfahren
 - Laufzeitverfahren
- ▶ Entwicklung von zahlreichen Algorithmen für die Registrierung
- ▶ Im Bereich der Geoinformatik Forschungsthema mit dem Aufkommen terrestrischer Laserscanner
- ▶ Vollautomatische Registrierung von 3D-Punktwolken ist schwierig

Terrestrische Laserscanner

Prinzip der Registrierung

- ▶ Objekt wird von verschiedenen Standpunkten aus erfasst
- ▶ Jeder Standpunkt definiert ein lokales Koordinatensystem
- ▶ Überführung aller Standpunkte in ein übergeordnetes System bezeichnet man als Registrierung
- ▶ Registrierung erfolgt paarweise oder simultan für mehrere Standpunkte



Verfahren zur Registrierung

I: Direkte Georeferenzierung

II: Verwendung von Zielmarken

III: Datengetriebene Lösungen

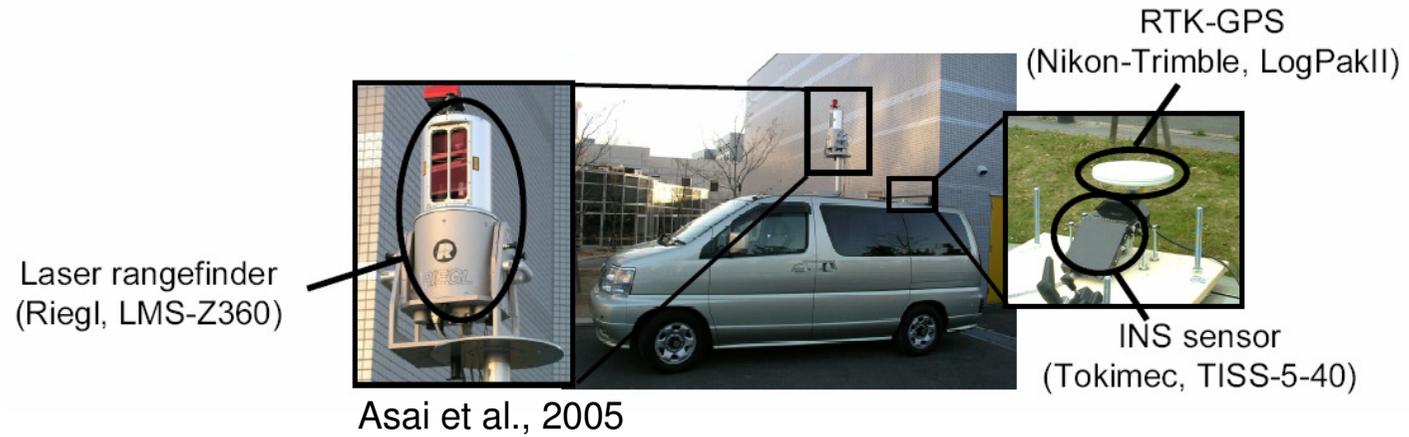
Direkte Georeferenzierung

Direkte Georeferenzierung

- ▶ Position und Lage des Aufnahmesensors wird direkt bestimmt
- ▶ Messpunkte werden an bekanntes System angehängt
- ▶ Erfordert die Verwendung von externen Sensoren auf einer Messplattform
- ▶ Benötigte Sensoren
 - (D)GPS liefert Position
 - Inertiales Messsystem (IMU) liefert Orientierung
- ▶ Relative Orientierung der Sensoren muss bekannt sein
- ▶ Zeitsynchronisation zwischen den Sensoren erforderlich
- ▶ Verfahren wird bei kinematischen Anwendungen eingesetzt

Direkte Georeferenzierung

► Beispiele



Verwendung von Zielmarken

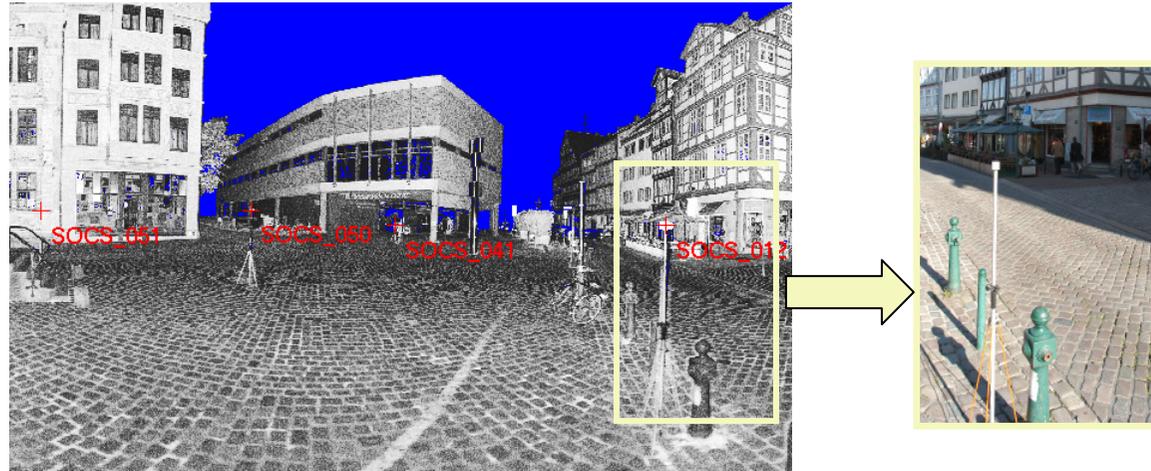
Verwendung von Zielmarken

- ▶ Derzeit Standardverfahren beim terrestrischen Laserscanning
 - Riegl, Leica, Zoller u. Fröhlich, ...
- ▶ Ausbringen spezieller Zielmarken erforderlich
- ▶ Zielmarken werden in verschiedenen Scans identifiziert und als Verknüpfungspunkte verwendet (semi-automatisch)
- ▶ Meist zusätzliche Erfassung mit hoher Auflösung nötig
- ▶ Zuordnung identischer Zielmarken

- ▶ Vorteile:
 - Einfaches und stabiles Verfahren
 - Gemessene Punktwolken müssen sich nicht überlappen
- ▶ Nachteile:
 - Zusätzlicher Zeitaufwand
 - Ausbringen von Zielmarken nicht immer möglich

Verwendung von Zielmarken

► Beispielszene:



► Beispiele für Zielmarken:



Kugeln



Papiermarken



planare Marken



zylindrische
Retromarken

Datengetriebene Lösungen

Datengetriebene Lösungen

- ▶ Registrierung erfolgt anhand der Messdaten
- ▶ Keine zusätzlichen Sensoren oder Zielmarken erforderlich
- ▶ Unterscheidung in Grob- und Feinregistrierung

Grobregistrierung:

- Ungenaue Bestimmung der Parameter
- Gute und robuste automatische Verfahren existieren noch nicht

Feinregistrierung:

- Bestmögliche Ausrichtung der Punktwolken
- Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) sehr populär
- In zahlreichen kommerziellen Softwarepaketen vorhanden

Verfahren zur Grobregistrierung

Merkmalsbasierte Verfahren

Registrierung über identische Merkmale

Beispiele:

- ▶ Punkte, Linien, Ebenen
- ▶ Zylinder, Kugeln, Tori

Lokale Verfahren

Registrierung über Teilmengen

Beispiele:

- ▶ Spin Image
- ▶ Lokale Deskriptoren z.B. Winkel von Normalenvektoren, Krümmungen

Globale Verfahren

Registrierung mittels aller Punkte

Beispiele:

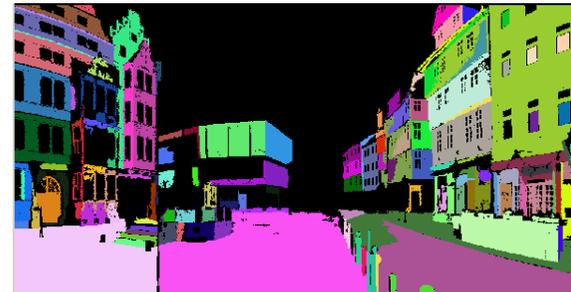
- ▶ Schwerpunkte und Hauptachsen
- ▶ Spherical Attribute Image (SAI)
- ▶ Extended Gaussian Image (EGI)
- ▶ Normal Distributions Transform (NDT)

Beispiel: Merkmalbasiertes Verfahren

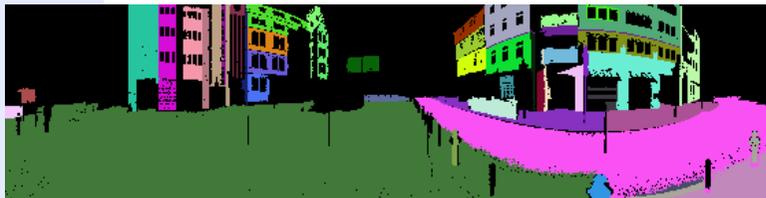
- ▶ Verwendung von Ebenen
- ▶ Segmentierung der Scans in ebene Regionen
- ▶ Region-Growing für 3D-Punktclouds



3D-Daten



Segmentierung



Beispiel einer Segmentierung zweier Scans

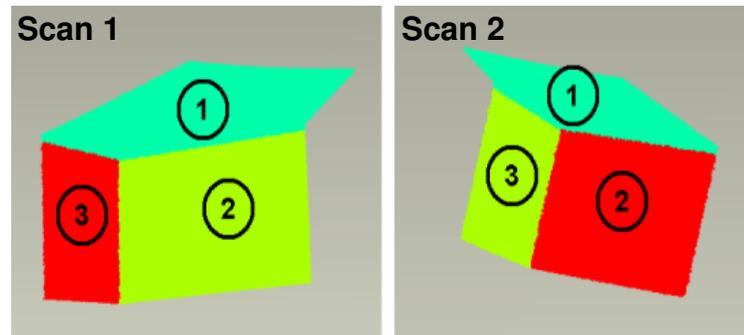
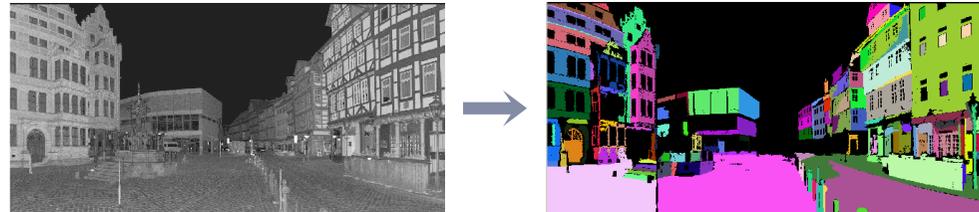
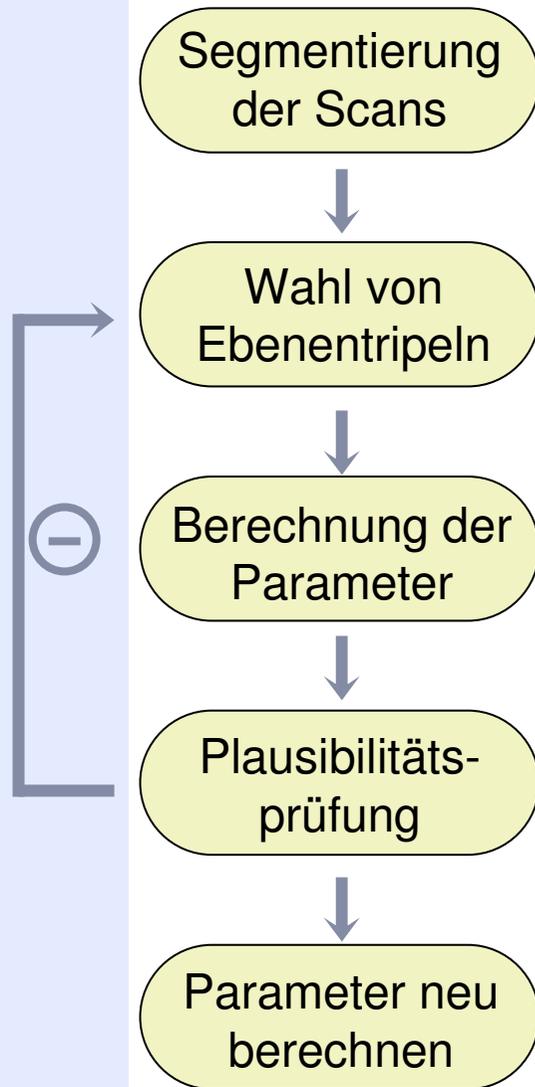


- ▶ Zugeordnete Ebenenpaare liefern Transformationsparameter

Symbolische Zuordnung von Ebenen

- ▶ Ebenengleichungen werden für die Bestimmung der Transformation verwendet
 - Rotationsbestimmung erfordert wenigstens zwei Ebenenpaare
 - Translation ist mit drei Ebenenpaaren definiert
- ▶ Zuordnung korrespondierender Ebenen erforderlich
 - Suchverfahren um Merkmalspaare zu finden

Übersicht: Symbolische Zuordnung von Ebenen



$$H = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ergebnis: Symbolische Zuordnung von Ebenen

- ▶ Erreichte mittlere Genauigkeit:
 - Rotationswinkel: $0,2^\circ$
 - Translationen: 10 cm
- ▶ Überlappung der Scans: mind. 15 %
- ▶ Segmentierung und Anordnung der Ebenen ist für den Erfolg des Verfahrens entscheidend

Feinregistrierung mittels ICP

Iterative Closest Point Algorithmus (ICP)

- ▶ Ausrichtung zweier Punktwolken P_1 und P_2
- ▶ Hinreichend genaue Startwerte sind erforderlich
- ▶ Algorithmus besteht aus vier wesentlichen Schritten:
 - 1) Ermittlung benachbarter Punktpaare aus P_1 und P_2
 - 2) Berechnung der Transformationsvorschrift (\mathbf{R}, \mathbf{t})
 - 3) Transformation der zu registrierenden Punktwolke
 - 4) Iteration bis zum Abbruch des Algorithmus
- ▶ Abbruchkriterien
 - Schwellwert aus Fehler der letzten Iterationen
 - Maximale Anzahl an Iterationen ist erreicht

Iterative Closest Point Algorithmus (ICP)

- ▶ Vorstellung des Algorithmus durch
 - Paul J. Besl und Neil D. McKay (1992)
- ▶ Anwendbar für verschiedene Repräsentationen geometrischer Daten
 - Punktdaten
 - Polylinien
 - Dreiecksvermaschungen
 - Kurven in impliziter Darstellung
 - Parametrisierte Kurven
 - Oberflächen in impliziter Darstellung
 - Parametrisierte Oberflächen

Definition der Abstandsfunktion

- ▶ Abstand: Punkt – Punkt

$$d(\vec{p}, Q) = \min_{q_i \in A} d(\vec{p}, \vec{q}_i) = \min_{q_i \in A} \|\vec{p} - \vec{q}_i\|$$

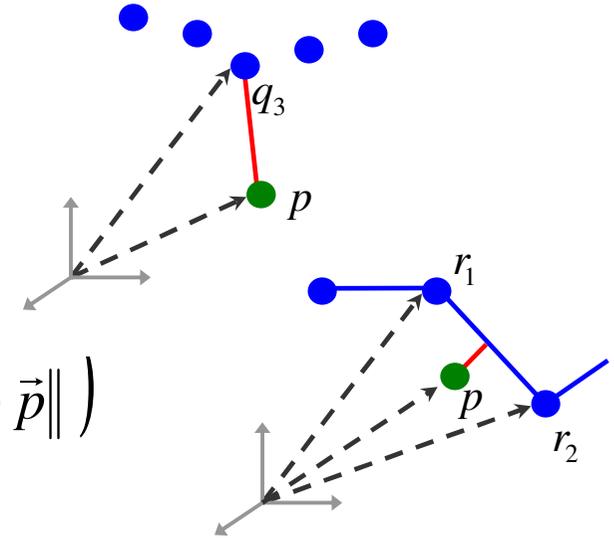
- ▶ Abstand: Punkt – Linie

$$d(\vec{p}, L) = \min_{l_i \in L} d(\vec{p}, l_i) = \min_{l_i \in L} \left(\min_{u+v=1} \|u\vec{r}_1 + v\vec{r}_2 - \vec{p}\| \right)$$

- ▶ Abstand: Punkt – Fläche

$$d(\vec{p}, T) = \min_{t_i \in T} d(\vec{p}, t_i) = \min_{t_i \in T} \left(\min_{u+v+w=1} \|u\vec{r}_1 + v\vec{r}_2 + w\vec{r}_3 - \vec{p}\| \right)$$

- ▶ Für implizite und parametrisierte Kurven und Flächen können die Abstände nicht direkt berechnet werden
 - Näherungsverfahren (z.B. Newton-Iteration) erforderlich



Transformationsgleichungen

- ▶ Euklidische Transformation (Translation und Rotation)

$$\vec{x}_1 = \mathbf{R} \cdot \vec{x}_2 + \mathbf{t} \quad \text{mit: } \vec{x}_1, \vec{x}_2 \in R^3$$

\mathbf{R} : 3x3 Rotationsmatrix
 $\mathbf{t} \in R^3$

- ▶ Bestimmung der Transformationsparameter
- ▶ Minimierung des Fehlerquadrats

$$E = \sum_i \left| \vec{x}_{1,i} - \mathbf{R} \vec{x}_{2,i} - \mathbf{t} \right|^2$$

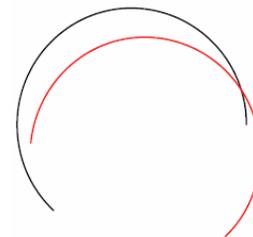
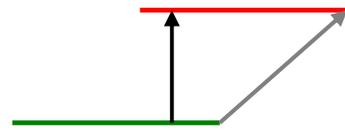
- ▶ Ausgleichung über die Methode der kleinsten Quadrate
- ▶ Geschlossene Lösung mittels Quaternionen [Sansò, Horn]

Varianten des ICP-Algorithmus

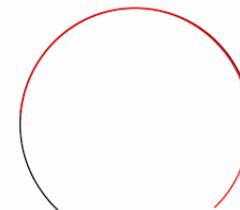
- ▶ Auswahl der Punkte
 - Weit entfernt liegende Punkte werden ignoriert
 - Detektion von Ausreißer → RICP(robust ICP) [Trucco]
- ▶ Auswahl und Suche der Korrespondenzen
 - Verwendung einer Datenstruktur (z.B. kD-Baum) [Johnson, Greenspan]
 - Nur bestimmte Korrespondenzen berücksichtigen
→ Elimination von falschen Korrespondenzen
 - Nutzung weiterer Informationen, z.B. Farb- oder Intensitätswert
→ ICCP (iterative closest compatible point) [Godin]
- ▶ Gewichtung der Korrespondenzen
 - Fehler der Punktpaare werden gewichtet
- ▶ Optimierungsstrategien
 - Reduktion des Suchraums über Pyramidenstufen [Jost, Zinsser]
- ▶ Anwendung von ICP für „Multi-View“ Registrierung
 - Simultane Registrierung mehrerer Scans [Pulli]

Zusammenfassung ICP

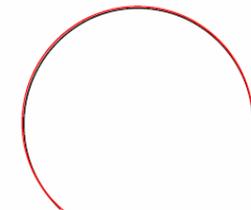
- ▶ Algorithmus ist für Punkte, Linien und weitere Darstellungsformen verwendbar
- ▶ Nur einfache mathematische Operationen notwendig
- ▶ Garantierte Konvergenz des Algorithmus
- ▶ Symmetrische Objekte können nicht ohne weiteres registriert werden



Ausgangssituation



falsch



korrekt

- ▶ Konvergenz in ein lokales Minimum möglich
- ▶ Überlappung der Punktwolke ist erforderlich

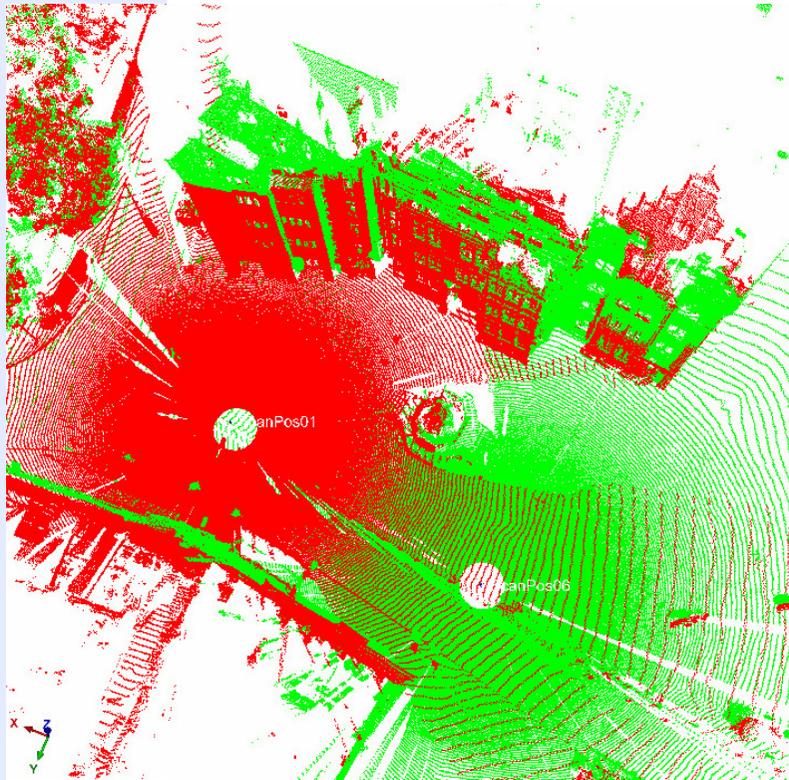
Beispiele ICP-Algorithmus

- ▶ In zahlreichen Softwarepaketen implementiert
 - Polyworks (InnovMetric)
 - Cyclone (Leica)
 - RiScanPro (Riegl)
 - Geomagic Studio
 - :

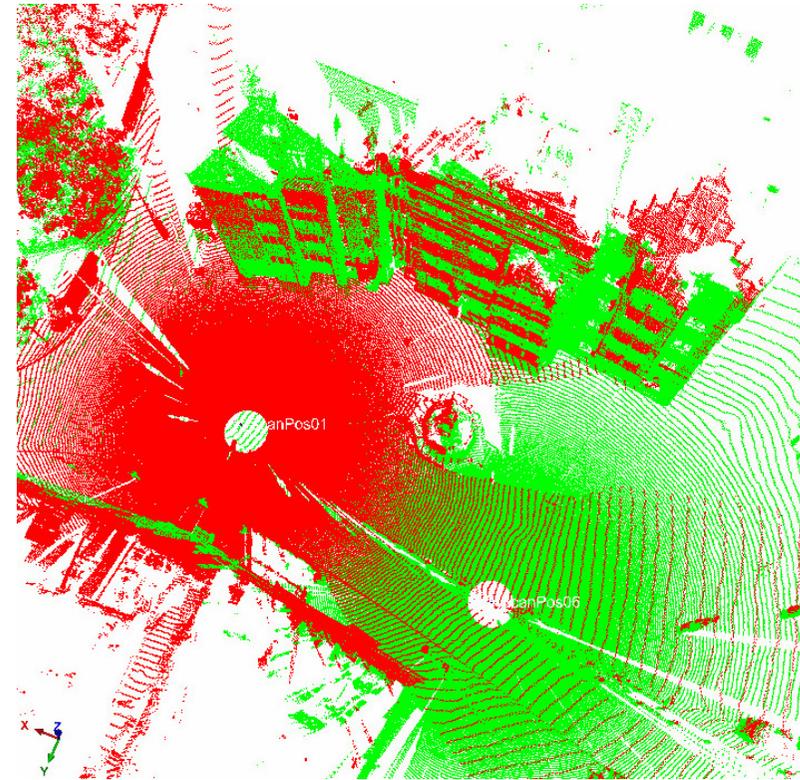

Leica Cyclone 5.7



Beispiel: Rieg-Software



Manuelle Grobregistrierung



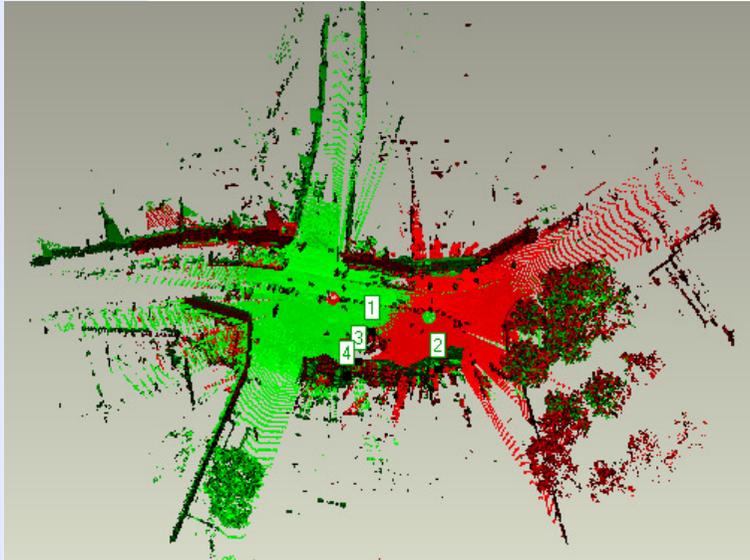
Automatische Feinregistrierung

Angegebene Standard-Abweichung: 0,030m

Änderungen: $\Delta x = 0,293\text{m}$; $\Delta y = -0,874\text{m}$; $\Delta z = 0,108\text{m}$

$\Delta\omega = 2,087^\circ$; $\Delta\varphi = -4,721^\circ$; $\Delta\kappa = -0,776^\circ$

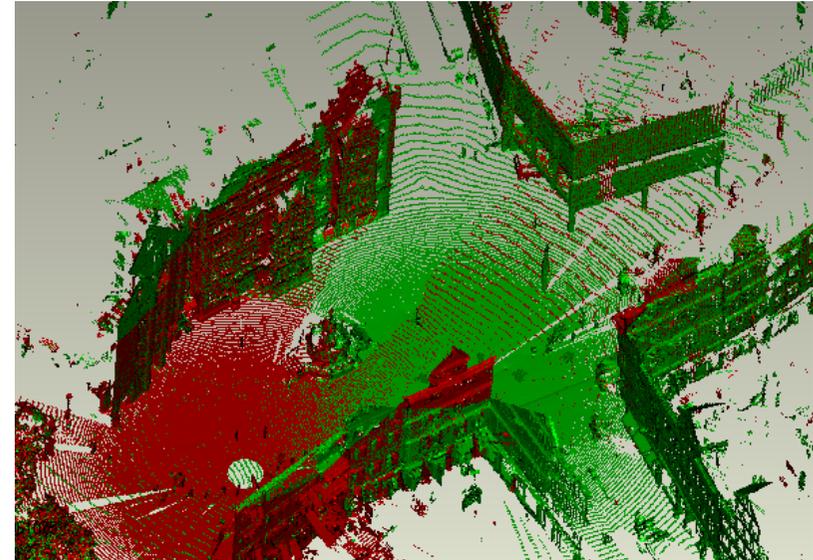
Beispiel: Geomagic-Studio Software



Manuelle Grobregistrierung

Mittlere Distanz: 0,120m

Standard-Abw.: 0,104m



Automatische Feinregistrierung

Mittlere Distanz: 0,076m

Standard-Abw.: 0,015m

Fazit

- ▶ Verschiedene Ansätze zur Registrierung von Punktwolken
- ▶ Datengetriebene und vollautomatische Registrierung von beliebig orientierten Punktwolken ist schwierig
- ▶ Unterteilung des Problems in Grob- und Feinregistrierung
- ▶ Bestehende Ansätze sind in der Regel anwendungsspezifisch
- ▶ ICP ist quasi Standard für Feinregistrierung

Referenzen

- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992: *A method for registration of 3-D shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (2), S. 239-256.
- Chen, Y., Medioni, G., 1991: *Object modeling by registration of multiple range images*. Int. Conference on Robotics and Automation, S.2724-2729.
- Godin, G. Laurendeau, D., Bergevin, R., 2001: *A method for the registration of attributed range images*. 3DIM, S. 179ff.
- Greenspan, M., Godin, G., 2001: *A nearest neighbor method for efficient ICP*. Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, S. 161-168.
- Horn, B.K.P., 1987: *Closed-form solution o absolute orientation using unit quaternions*. Optical Society of America 4 (4), S. 629-642.
- Johnson, A., Kang, S., 1997: *Registration and integration of textured 3D-Data*. In: NRC 97, IEEE Computer Society, S. 234ff.
- Jost, T., Hügli, H., 2002: *A multi resolution scheme ICP-algorithm for fast shape representation*. Symposium on 3D Data Processing. S. 540-543.
- Pulli, K., 1999: *Multiview registration for large data sets*. 3DIM, S. 160-168.
- Sansò, F., 1973: *An exact solution of the roto-translation problem*. Photogrammetria 29 (6), S. 203-206.
- Trucco, E., Fusiello, A., Roberto, V., 1999: *Robust motion and correspondences of noisy 3-D point sets with missing data*. Pattern Recognition Letters 20 (9), S. 889-898.
- Zinßer, T., Schmidt, J., Niemann, H., 2003: *A refined ICP algorithm for robust 3-D correspondence estimation*. IEEE Conference on Image Processing, S. 695-698.