

Untersuchungen zum Potenzial der Trajektorienbestimmung eines bewegten Laserscanners durch die Triangulation von Bildsequenzen

Frank LIEBOLD

Zusammenfassung

Der folgende Beitrag beschreibt einige Untersuchungen zur Trajektorienbestimmung eines bewegten Zeilenlaserscanners durch die Triangulation von Bildsequenzen einer mit auf der Plattform befindlichen Kamera. Mithilfe der aus der Bildsequenz bestimmten Trajektorie kann aus den relativ zur Kamera orientierten Laserscannermessungen eine Punktwolke generiert werden. Die Qualität der Bahnkurve und damit auch der Punktwolke ist stark abhängig von Geschwindigkeit und Beschleunigung der Plattform. Die Bildrate muss an diese Bedingungen angepasst werden. Bei den vorgestellten Experimenten lagen die Bildraten zwischen 3 und 6 Hz. Der Effekt einer verminderten Bildfrequenz wird für ein Beispiel dargestellt. Abschließend wird ein Experiment zur Überprüfung der Rotationen mit einer IMU ohne vorherige Feststellung der relativen Orientierung vorgestellt.

1 Motivation

Im Folgenden wird die Trajektorienbestimmung bewegter Plattformen, welche mit einem Laserscanner und einer Kamera ausgestattet sind, vorgestellt. Die Bahnkurve ist aufgrund der sequenziellen Datenaufnahme des Zeilenlaserscanners essenziell für die Auswertung seiner Messdaten. Auf den Einsatz von GNSS und INS, welche in den meisten Fällen zur Positionierung und Orientierungsbestimmung genutzt werden, wurde bei diesem Forschungsvorhaben verzichtet. Dafür gibt es mehrere Gründe. Zunächst kann GNSS nicht innerhalb von Gebäuden genutzt werden. Des Weiteren liegen die Genauigkeiten bei GNSS nur im Dezimeterbereich, während Kamera- und Laserscanner eher Zentimeterpotenzial besitzen. In Abbildung 1 sind die Sensoren dargestellt, die für die Experimente zur Verfügung standen.



Abb. 1: Links: Zeilenlaserscanner Hokuyo UTM-LX30 (Quelle: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/products/utm-30lx/>); rechts: Industriekamera AVT Mako G-419 (Quelle: <https://www.alliedvision.com/de/produkte/kameras/kamera-details/Mako%20G/G-419.html>)

Beide Messgeräte wurden zur Simulation einer bewegten Plattform auf einem Item-Profil fixiert. Dieses wurde wiederum auf einem Stativ als Träger befestigt. Die experimentelle Plattform ist in Abbildung 2 zu sehen.



Abb. 2:
Experimentelle Plattform mit Kamera und Zeilenlaserscanner

2 Methodik

Zunächst soll, wie in Abbildung 3 dargestellt, ein Überblick über den Messablauf gegeben werden. Die einzelnen Arbeitsschritte sind im Flussdiagramm dargestellt. Auf einige Teilschritte wird in den folgenden Unterkapiteln besonders eingegangen.

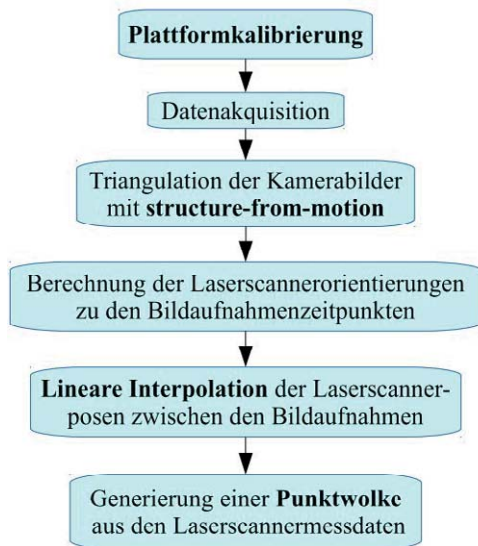


Abb. 3:
Ablaufschema

2.1 Plattformkalibrierung

Die Plattformkalibrierung setzt sich aus der Berechnung der inneren Orientierung der Kamera und der relativen Orientierung zwischen Kamera und Laserscanner zusammen. Ersteres kann durch eine Selbstkalibrierung erfolgen. Für die Berechnung der gegenseitigen Orientierung wurde der Testaufbau aus Abbildung 4 verwendet. Da der Zeilenlaserscanner nur innerhalb einer Ebene Streckenmessungen durchführt, ist eine Orientierungsbestimmung für den

Laserscanner unter anderem über Kegelschnitte möglich. Aus diesem Grund wurden im Testaufbau Kegel aufgestellt, auf deren Oberfläche Messmarken angebracht worden. Weitere Messpunkte und ein Maßstab wurden in den Testaufbau integriert. Sämtliche Koordinaten der Messpunkte wurden in einem photogrammetrischen Bildverband bestimmt. Mithilfe von Kegelausgleichungen auf Basis der auf den Kegeloberflächen befindlichen Messmarken konnten die Orientierungen der Kegel sowie deren Parameter berechnet werden. Anschließend konnte die Plattform innerhalb des Testaufbaus positioniert werden. Die Berechnung der absoluten Orientierung der Kamera im Koordinatensystem der Messmarken erfolgte durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt, die des Laserscanners durch die Messungen auf den Kegelschnitten (Ellipsen). Die relative Orientierung zwischen beiden Messgeräten wurde durch die Orientierung des Laserscanners im Kamerakoordinatensystem definiert.



Abb. 4:
Aufbau zur Plattformkalibrierung

Fließen die Bildkoordinaten der Messmarken und die Strecken- sowie Winkelmessungen der Messpunkte des Laserscanners auf dem Kegelschnitt als Beobachtungen in eine Bündelblockausgleichung ein, können für die Parameterbestimmung der relativen Orientierung auch mehrere Aufstellungen der Plattform verwendet werden (MADER et al. 2014). Die Beobachtungsgleichungen für die Bildpunkte der Kameraaufnahmen sind die Kollinearitätsgleichungen (SCHMID 1958). Für die Laserscannermesswerte (Strecken und Winkel) wird die Kegelausgleichung (1) als Bedingungsgleichung verwendet.

$$x^2 + y^2 - z^2 \cdot \tan^2 \alpha = 0 \quad (1)$$

mit der Transformation ins lokale Kegelsystem:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_{Kegel}^T \cdot (\vec{p}_{Mess,Kamera} - \vec{p}_{Kegelspitze}) \quad (2)$$

und dem Laserscannermesspunkt $\vec{p}_{Mess,Kamera}$ im Kamerakoordinatensystem:

$$\vec{p}_{Mess,Kamera} = \vec{p}_{Kamera} + R_{Kamera} \cdot \left(\vec{p}_{Laser,Kamera} + R_{Laser,Kamera} \cdot \begin{pmatrix} s \cdot \cos \delta \\ s \cdot \sin \delta \\ 0 \end{pmatrix} \right) \quad (3)$$

s : Streckenmessung des Laserscanners

$R_{Laser,Kamera}$: Drehmatrix des Laserscanners im Kamerakoordinatensystem

δ : Winkelmessung des Laserscanners

$\vec{p}_{Kegelspitze}$: Koordinaten Kegelspitze (Ursprung des Kegelkoordinatensystems)

\vec{p}_{Kamera} : Koordinatenvektor des Projektionszentrums der Kamera

R_{Kegel} : Drehmatrix des Kegels

R_{Kamera} : Drehmatrix der Kamera

α : Halber Öffnungswinkel des Kegels

$\vec{p}_{Laser,Kamera}$: Nullpunkt des Laserscanners im Kamerakoordinatensystem

2.2 Datenakquisition

Nach Durchführung der Plattformkalibrierung wird in diesem Abschnitt näher auf die Aufnahme der Messobjekte eingegangen. Die Plattform wird hierbei in gleichmäßiger Bewegung parallel vor dem Messobjekt entlang bewegt, sodass die simultane Datenaufzeichnung von Kamera und Laserscanner erfolgen kann. Dabei ist auf die zeitliche Synchronisierung der Messungen zu achten. Für die Skalierung der Kameradaten ist mindestens eine Maßstabsinformation in den Objektraum einzubringen.

2.3 Triangulation der Bildsequenzen

Die äußeren Orientierungen der einzelnen Kameraaufnahmen wurden mithilfe des Structure-from-motion-Verfahrens (ULLMANN 1979) bestimmt. Dazu wurden die Kameraaufnahmen in die Software Agisoft PhotoScan eingelesen und ausgewertet. Es konnte somit für jedes Bild die äußere Orientierung berechnet werden. Mithilfe der relativen Orientierung zwischen Kamera und Laserscanner konnten im Folgenden die Parameter der äußeren Orientierung des Laserscanners an den jeweiligen Bildaufnahmezeitpunkten bestimmt werden. Abbildung 5 zeigt die Bewegung der Plattform vor einem Messobjekt.

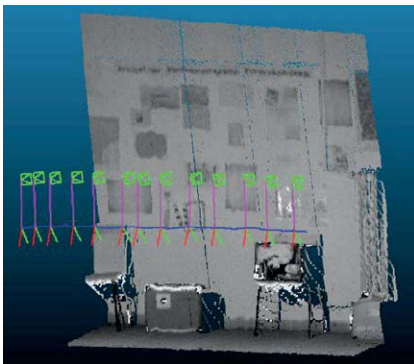


Abb. 5: Basen der relativen Orientierung (violett), Kameraaufnahmen (grüne Pyramiden), Laserscannerorientierung durch Koordinatenachsen dargestellt (x: rot, y: grün, z: blau), Hintergrund: Punkt Wolke koloriert mit Intensitätswerten

2.4 Interpolation der Trajektorie und Generierung der Punkt Wolke

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, war die äußere Orientierung des Laserscanners nur zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten der Bilder bekannt. Für die Zeiträume dazwischen wurden die Orientierungen linear interpoliert. Dabei kam für die Koordinaten des Ursprungs des Laserscannerkoordinatensystems das Standardinterpolationsverfahren zur Anwendung. Bei der Rotation hingegen wurde ein Verfahren zur linearen sphärischen Interpolation mit Quaternionen namens SLERP (SHOEMAKE 1985) verwendet. Durch Anhängen der Laserscannermessungen (siehe Gleichung (3)) erfolgte die Berechnung der Punkt Wolke. Abbildung 6 zeigt zwei Ansichten einer so berechneten Punkt Wolke (Software: CloudCompare).

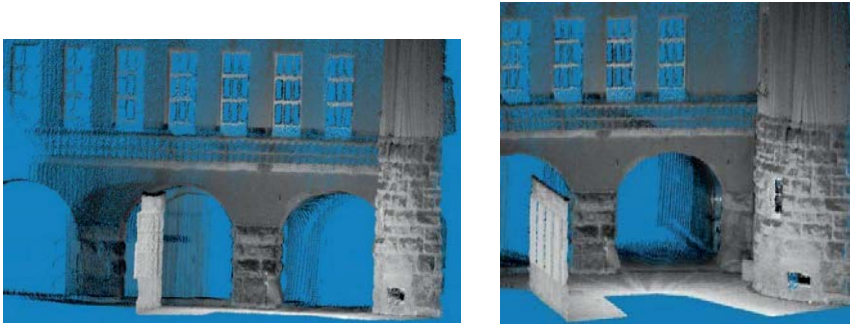


Abb. 6: Anwendungsbeispiel: Außenfassade mit Turm und Torbögen, 2 Ansichten

3 Weitere Untersuchungen

3.1 Untersuchungen zur Abhängigkeit von der Bildrate

Die Qualität der Punktwolke ist stark abhängig von Geschwindigkeit und Beschleunigung in Rotation und Translation der Plattform. Bei zu kleinen Bildraten und damit weit auseinanderliegenden Stützpunkten führt die Approximation der Trajektorie durch lineare Interpolation zu unbefriedigenden Ergebnissen. Im folgenden Beispiel (Abb. 7) wird der Effekt einer zu geringen Bildfrequenz visuell mithilfe von Intensitätsbildern, welche aus der Laserscannerpunktwolke berechnet wurden, verdeutlicht. Die Datenaufnahme erfolgte bei langsamer und möglichst gleichmäßiger Bewegung der Plattform. Ausgewertet wurde für den Vergleich ein Datensatz einmal mit 4 Hz und mit 0,8 Hz. Bei der zweiten Auswertung mit 0,8 Hz wurde nur jedes fünfte Bild für die Bestimmung der Trajektorie verwendet. In dem Intensitätsbild mit 0,8 Hz sind deutliche Deformationen zu beobachten. Vor allem bei dem Schachbrettmuster werden die Verformungen sichtbar.

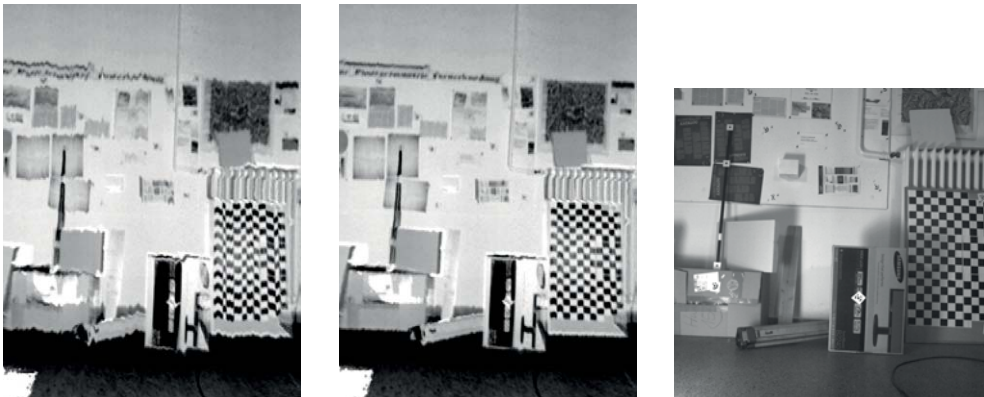


Abb. 7: Aus der Punktwolke generierte Intensitätsbilder (links, Mitte), Bildrate zur Trajektorie links 0,8 Hz, Mitte 4 Hz, rechts: Kameraaufnahme zum visuellen Vergleich

3.2 Experiment zur Überprüfung der Trajektorie mit einer IMU

Für die Überprüfung der einzelnen Rotationen der Bilder kann eine IMU verwendet werden. Ist die relative Orientierung zwischen Kamera und IMU nicht bekannt, können Rotationswinkel von Relativdrehungen zwischen zwei Epochen nach dem Winkel-Achse-Rotationsmodell (siehe Abb. 8) verglichen werden. Das Winkel-Achse-Rotationsmodell definiert eine räumliche Drehung durch eine räumliche Achse (2 Freiheitsgrade) und einen Drehwinkel (1 Freiheitsgrad), mit dem um die Achse rotiert wird.

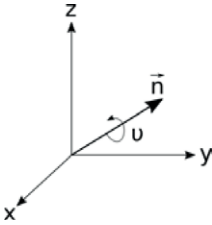


Abb. 8:
Rotationsachse n und Drehwinkel v

Für den Vergleich der Rotationsänderung zwischen den Kameraaufnahmen und den entsprechenden Daten der IMU wurden die Drehwinkel der Relativrotationen von Bild zu Bild für Kamera und IMU ausgewertet (siehe Abbildung 9). Im oberen Teil des Diagramms sind die Verläufe der Drehwinkel der Relativrotationen für Kamera und IMU dargestellt, im unteren Teil deren Differenzen. Im ersten Messabschnitt (bis etwa Bildindex 250) sind die berechneten Abweichungen mit bis zu 0,1 rad relativ groß. Danach stimmen die Verläufe deutlich besser überein. Die Differenzen ab Bildindex 251 bis zum Ende der Messreihe liegen meist unter 0,02 rad. Als Maß für die Übereinstimmung beider Datenreihen wurde der Korrelationskoeffizient bestimmt. Bei der Berechnung über die gesamte Zeitreihe beträgt dieser 0,71. Bei separater Berechnung für die genannten Abschnitte liegt mit 0,53 für den ersten Abschnitt bis Bildindex 250 eine eher mäßige Korrelation und für den zweiten Abschnitt mit 0,91 eine hohe Korrelation vor.

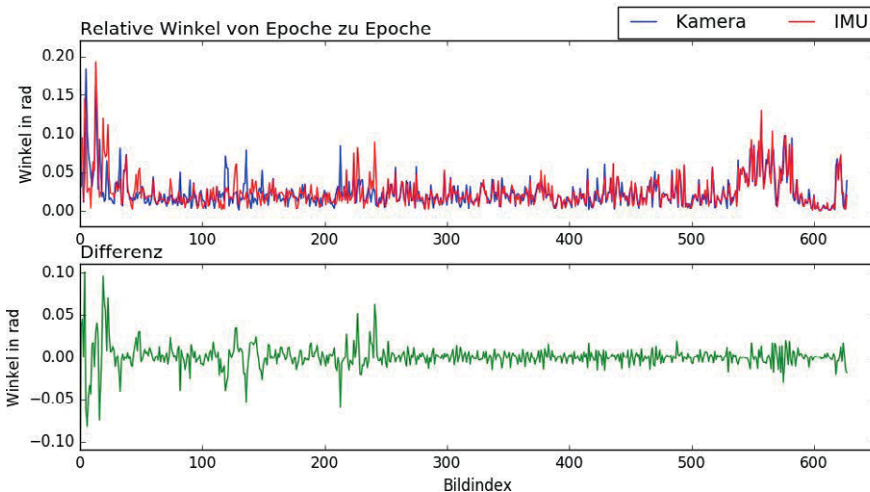


Abb. 9: Oben: Drehwinkel für Relativrotationen von Bild zu Bild für Kamera und IMU; unten: Differenzen

Um weitere Effekte darzustellen, wurden außerdem die Drehwinkel der Relativrotationen mit Bezug zum ersten Bild betrachtet. Abbildung 10 zeigt den Verlauf und die Differenzen der Winkel. In diesem Diagramm ist anfangs (bis Sekunde 40) ein zeitlicher Versatz der beiden Zeitreihen zu beobachten, was auf einen möglichen Zeitsynchronisationsfehler hindeuten könnte. Ab Sekunde 40 verkleinert sich dieser zeitliche Versatz, stattdessen zeigt sich ein vertikales Auseinanderklaffen.

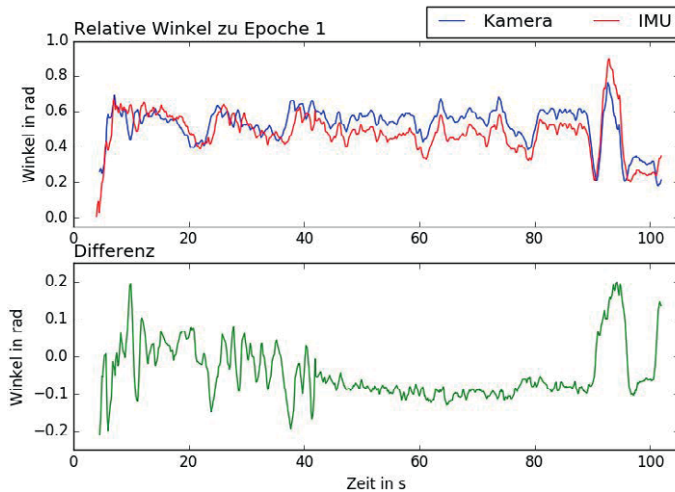


Abb. 10: Oben: Drehwinkel für Relativrotationen zu Bild 1 für Kamera und IMU; unten: Differenzen

Der vertikale Versatz kann durch Drifteffekte der IMU, aber auch durch Fehlerfortpflanzung der Bildorientierungen zu Stande gekommen sein, da der Bildverband nicht geschlossen wurde. Die Korrelationskoeffizienten betragen bei der Berechnung über die gesamte Zeitreihe 0,76, für die Berechnung bis Bildindex 250 0,63 (mäßige Korrelation) und für den Abschnitt von Bildindex 251 bis zum Ende der Messreihe 0,82 (hohe Korrelation).

In Abbildung 11 werden die Verläufe der Drehwinkel der Relativrotationen mit Bezug zum ersten Bild für verschiedene Bildraten dargestellt. Bei den kleineren Bildraten wurden die Orientierungen der fehlenden Bilder interpoliert. Deutlich zu erkennen ist die Glättung des Winkelverlaufes für die Kamera. In den Korrelationskoeffizienten lässt sich die Glättung nicht ablesen, da sich diese bei kleinerer Bildfrequenz kaum ändern, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten bei verschiedenen Bildfrequenzen

Bildrate in Hz	gesamte Zeitreihe	bis Bildindex 250	ab Bildindex 250
6	0,76	0,63	0,82
2	0,77	0,68	0,81
1	0,76	0,72	0,78

Um aussagekräftigere Schlussfolgerungen zu ziehen, ist zwingend eine größere Anzahl an Experimenten nötig. Diese sollten zur Analyse von Drifteffekten auch zeitlich längere Messreihen enthalten.

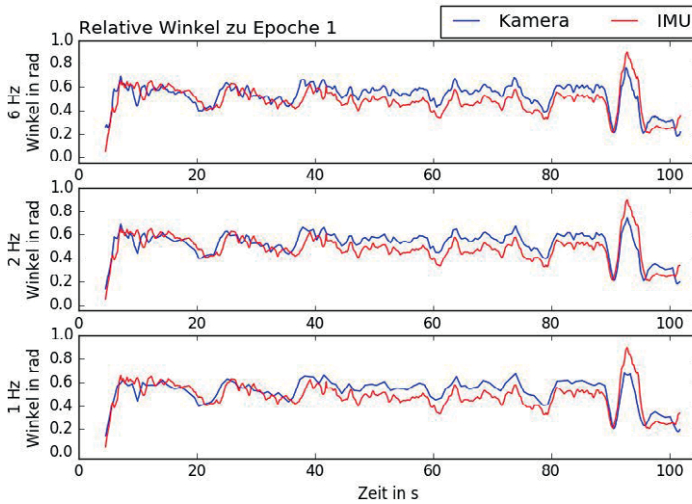


Abb. 11: Drehwinkel für Relativrotationen zu Bild 1 für Kamera und IMU für verschiedene Bildfrequenzen

Literatur

- Mader D., Westfeld, P. & Maas, H.-G. (2014): *An Integrated Flexible Self-calibration Approach for 2D Laser Scanning Range Finders Applied to the Hokuyo UTM-30LX-EW*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5, S. 385-393, doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-385-2014.
- Schmid, H., H. (1958): *Eine allgemeine analytische Lösung für Aufgabe der Photogrammetrie*. Bildmessung und Luftbildwesen, S. 103-113.
- Shoemake, K. (1985): *Animating Rotation with Quaternion Curves*. Computer Graphics, 19 (3), S. 245-254 (Proceedings of SIGGRAPH 1985). doi:10.1145/325334.325242.
- Ullman, S. (1979): *The Interpretation of Structure from Motion*. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 203 (1153), S. 405-426.