

Bewertung von inertialen Messsystemen mittels Laserscannern und bekannter Landmarken

ALEXANDER SCHLICHTING¹, CLAUD BRENNER² & STEFFEN SCHÖN³

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Bewertung von INS/GPS-Sensoren in einem mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-System vorgestellt. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Genauigkeit der Position und Orientierung. Zu deren Beurteilung wurde ein Algorithmus entwickelt, mit welchem Landmarken aus einer Punktwolke segmentiert und anschließend Referenzlandmarken zugeordnet werden. Die Abweichungen zwischen den segmentierten Landmarken und den korrespondierenden Referenzen geben Aufschluss über die äußere Genauigkeit des Systems. Die Wiederholgenauigkeit wird anhand der Streuung der Abweichungen und der Differenzen der Abweichungen der segmentierten Landmarken zueinander bestimmt. Das entwickelte Bewertungskonzept wird anschließend auf drei verschiedene INS/GPS-Systeme angewendet.

1 Motivation

Mobiles Laserscanning erlaubt die Erfassung großer Datenmengen innerhalb von kurzer Zeit. Mit den Aufnahmen einer einzelnen Messfahrt können beispielsweise 3D-Stadtmodelle erstellt oder Objekte des Straßenraums kartographisch erfasst werden. Mobiles Laserscanning bietet somit im Vergleich zu herkömmlichen, statischen Messverfahren eine hohe Steigerung der Effizienz.

Um die während der Fahrt aufgenommenen Punkte direkt mit Koordinaten eines einheitlichen Koordinatensystems zu versehen, ist es notwendig, kontinuierlich die lokale Position und Orientierung (Pose) des Fahrzeuges zu bestimmen. Soll eine direkte Transformation der lokalen Koordinaten in ein globales Koordinatensystem vorgenommen werden, so wird in diesem Kontext auch die aktuelle Fahrzeugpose in diesem System benötigt. Zur Bestimmung der Pose werden in der Regel mit GPS gekoppelte Inertiale Navigationssysteme (INS) verwendet. Die Verwendung eines INS/GPS-Systems bietet den Vorteil, dass die Kurzzeitcharakteristik der Inertialeinheit mit der Langzeitstabilität des GPS kombiniert werden kann. Darüber hinaus liegen durch die GPS-Messungen globale Koordinaten vor.

Im Zuge der Sensorauswahl eines mit Laserscannern ausgestatteten mobilen Messsystems stellt sich die Frage, welche INS/GPS-Sensorik für bestimmte Anwendungen geeignet ist. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich damit, die Eignung von inertialen Messsystemen für das Mobile Mapping mittels eines Testfelds festzustellen. Dies ist vergleichbar mit Untersuchungen zur Genauigkeit der direkten Georeferenzierung für luftgetragene Sensorsysteme, welche ebenfalls auf der Einrichtung von Testgebieten beruhen. Allerdings werden im vorliegenden Fall

1) Alexander Schlichting, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9A, 30167 Hannover; E-Mail: alexander.schlichting@ikg.uni-hannover.de

2) apl. Prof. Dr.-Ing. Claus Brenner, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9A, 30167 Hannover; E-Mail: claus.brenner@ikg.uni-hannover.de

3) Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 50, 30167 Hannover; E-Mail: schoen@ife.uni-hannover.de

vorhandene Merkmale des Straßenraums genutzt, wodurch keine Wartung des Testfelds anfällt. Dadurch entsteht ein sehr praktikables und kostengünstiges Verfahren.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt. Kapitel 2 gibt einen kurzen Überblick über verwandte Arbeiten. In Kapitel 3 wird das Bewertungskonzept vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung und Orientierung des Systems gelegt wird. In Kapitel 4 wird beschrieben, wie dieses Konzept umgesetzt werden kann. Exemplarische Ergebnisse von Messfahrten werden in Kapitel 5 präsentiert, Kapitel 6 fasst schließlich die Ergebnisse zusammen.

2 Verwandte Arbeiten

Die Bewertung von INS/GPS-Sensoren findet zumeist durch die Analyse einer sich aus den Messungen des Positionierungssystems ergebenden Trajektorie statt. So wird in [DOROBANTU & ZEBHAUSER, 1999] die Trajektorie einer Low-Cost Inertialeinheit in Abhängigkeit der Updates der präzisen differentiellen GPS-Lösung verglichen. [NOURELDIN ET AL., 2009] wählen einen ähnlichen Ansatz. Sie erzeugen künstliche GPS-Ausfälle und betrachten die Drift des INS. [NIU ET AL., 2006] schlagen weiterhin eine Simulation der Navigationslösung vor. Hierzu wird das aus Labortests gewonnene Fehlverhalten der Sensoren simuliert und den wahren Werten zugeführt. Anschließend kann die wahre Lage, Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung mit den Werten verglichen werden, die der jeweilige Navigationsalgorithmus ausgibt. Nachteile dieses Verfahrens sind die Komplexität der verschiedenen Abweichungen sowie die Tatsache, dass hierbei auch das entsprechende GPS-Signal simuliert werden muss.

Die aufgezeigten Methoden betrachten lediglich die Kombination zwischen INS und GPS. Zur Bewertung eines solchen Sensorsystems in Kombination mit Laserscannern liegen bisher nur wenige Kriterien vor. Ein Konzept zur Bewertung der INS/GPS-Plattformen in einem mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-System wird im Folgenden vorgestellt.

3 Bewertungskonzept

Ziel des Bewertungskonzeptes ist es, Ergebnisse (Punktwolken, Fahrzeugpositionen) von Messfahrten eines beliebigen, kommerziellen Mobile-Mapping-Systems heranzuziehen, um möglichst einfach Aussagen über den Einfluss der verwendeten INS/GPS-Kombinationen zu erhalten. Dabei ist kein Zugang zur internen Verarbeitung der einzelnen Sensoren (GPS, INS, Laserscanner) oder deren Fusion notwendig.

Ein entscheidendes Kriterium zur Bewertung der INS/GPS-Sensoren ist die Genauigkeit des Systems. Für viele Anwendungsfälle ist vor allem die Richtigkeit der Pose relevant. Zu deren Beurteilung bedarf es einer Referenzlösung. Als Referenz dienen in unserer Arbeit Landmarken, welche vorab mit hoher Genauigkeit ($\sigma < 5$ cm) eingemessen wurden. Diese Landmarken werden in der sich aus den Messungen des Laserscanners ergebenden Punktwolke segmentiert. Anschließend wird die Abweichung zur Referenzposition untersucht. Die segmentierten Landmarken können gleichzeitig auch zur Bewertung der Wiederholgenauigkeit dienen, indem entweder die Streuung der Abweichungen zu mehreren Landmarken oder die Abweichungen zu derselben Landmarke zu unterschiedlichen Messzeitpunkten betrachtet wird.

Des Weiteren muss auch die Genauigkeit des Drehraten- und Beschleunigungssensors untersucht werden. Starke Beschleunigungen lassen sich in einem Fahrzeug durch Beschleunigungsvorgänge oder starke Bremsvorgänge erzeugen, hohe Drehraten im Gier-Winkel (Heading) durch enge Kurven. Werden parallel zu diesen Vorgängen Landmarken von den Laserscannern erfasst, so können anschließend wiederum die Abweichungen zu den Referenzlandmarken untersucht werden. Eine Möglichkeit zur Analyse starker Veränderungen im Roll- und Nick-Winkel ist das Fahren über eine Rampe oder Wippe. Hierbei können insbesondere die Auswirkungen auf die Form einer durch die Scanner erfassten Ebene betrachtet werden.

Weiter ist das Rauschen des Systems wichtig. Neben der direkten Betrachtung des Rauschens in der Position und der Orientierung des Fahrzeuges bietet es sich an, auch das Rauschen von Messpunkten auszuwerten, welche in einer Ebene liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass somit auch das Rauschen der Laserscanner und die Unebenheit des betrachteten Objektes, beispielsweise einer Häuserwand, mit einbezogen werden.

Insbesondere in Stadtgebieten mit großen Abschattungen spielt auch die Drift der Inertialeinheit eine bedeutende Rolle. Ist keine GPS-Lösung verfügbar, so wächst der Fehler in der Positionsbestimmung mitunter sehr schnell an. Dieses Verhalten kann untersucht werden, indem das GPS-Signal aus den Messungen entkoppelt wird.

4 Umsetzung des entwickelten Bewertungskonzeptes

Zur Bestimmung der einzelnen in Kapitel 3 genannten Bewertungskriterien wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher Landmarken aus der mit Laserscannern aufgezeichneten Punktwolke segmentiert. Diese Position wird anschließend mit der Referenzposition verglichen, welche aus einer terrestrischen Aufnahme der Landmarken mit übergeordneter Genauigkeit bekannt ist. Um zusätzlich die Genauigkeit der Orientierung im Roll- und Nick-Winkel zu untersuchen, werden die Auswirkungen auf eine Ebene bei auftretenden Winkelveränderungen untersucht. Diese Veränderungen werden durch eine Fahrt über eine Rampe erzeugt. Während der Fahrt mit einer Fahrzeugseite über diese Rampe wird eine zur Fahrtrichtung parallele Ebene durch die Laserscanner erfasst.

4.1 Wahl eines Referenzgebietes



Abb. 1: Gewähltes Referenzgebiet
[GOOGLE, 2012]

Das in Abb. 1 dargestellte Referenzgebiet enthält sowohl Geradenabschnitte als auch Kurven. Zusätzlich bietet ein Kreisverkehr die Möglichkeit, Wiederholmessungen durchzuführen und die Genauigkeit der Orientierung zu untersuchen. Auf Grund der klaren und einfachen Zylinderform und der regelmäßigen Verteilung wurden Straßenlaternen als Landmarken gewählt. Abweichungen zwischen Referenzmessungen und den Messungen mit einem Mobile-Mapping-System erlauben so, die Genauigkeit der Positionsbestimmung abzuschätzen. In diesem Gebiet wurden 31 Straßenlaternen mit einer

Genauigkeit von unter fünf Zentimetern terrestrisch eingemessen. Diese Laternen dienen in der Auswertung als Referenzlandmarken.

4.2 Segmentierung der Landmarken

Zur Segmentierung der Landmarken ist es zunächst notwendig, potentielle stangenförmige Landmarken in der Punktmenge zu detektieren. Es muss validiert werden, ob die gefundenen Objekte den tatsächlichen Landmarken entsprechen, sodass anschließend die detektierten Punktmenge den Referenzlandmarken zugeordnet werden können. Um die Distanz der segmentierten Landmarke zu deren Referenz zu bestimmen, muss die Landmarke auf einen Punkt reduziert werden, beispielsweise durch eine Zylinderschätzung.

Der Algorithmus basiert im Wesentlichen darauf, dass für verschiedene Regionen in der Punktwolke die Anzahl der Fußpunkte in der Horizontalebene bestimmt wird. Regionen mit einer hohen Punktzahl kommen als Landmarken in Frage. Ein ähnliches Konzept zur Stangendetektion findet sich auch in [BRENNER, 2009]. Die potentiellen Landmarken werden in der Folge auf weitere Kriterien überprüft und anhand dieser bewertet. Das Objekt mit dem höchsten Bewertungsfaktor innerhalb eines Suchradius wird einer Referenzlandmarke zugeordnet.

Im ersten Schritt wird der Bereich um eine bekannte Landmarke in einem *Octree* (räumliche Datenstruktur) gespeichert. Anschließend wird für jedes *Voxel*, das heißt für jeden Knoten in der untersten Ebene des Octrees, die Anzahl der Punkte innerhalb eines vorgegebenen Radius r in der x/y -Ebene bestimmt. Als Radius erwies sich der doppelte gemessene Radius der jeweiligen Referenzlandmarke als geeignet. Die Entscheidung, welches gefundene Objekt der Landmarke zugeordnet wird, erfolgt auf Basis eines Bewertungsfaktors, welcher sich aus der Anzahl der enthaltenen Punkte und der Distanz zur Landmarke ergibt. Ist die Anzahl der enthaltenen Punkte groß und die Distanz niedrig, so ergibt sich ein hoher Bewertungsfaktor. Konnte einer Landmarke eine segmentierte Stange zugeordnet werden, so werden aus den enthaltenen Punkten die Parameter eines bestangepassten Zylinders geschätzt. Da die Parameter nicht in jedem Fall bestimmt werden können, wird außerdem der Schwerpunkt der Punktmenge gespeichert. Die Höhe der Landmarken bezieht sich auf deren Bodenpunkt. Aus diesem Grund wird für den Schwerpunkt und den Zylindermittelpunkt die Höhe des niedrigsten Punktes der extrahierten Punktmenge betrachtet.

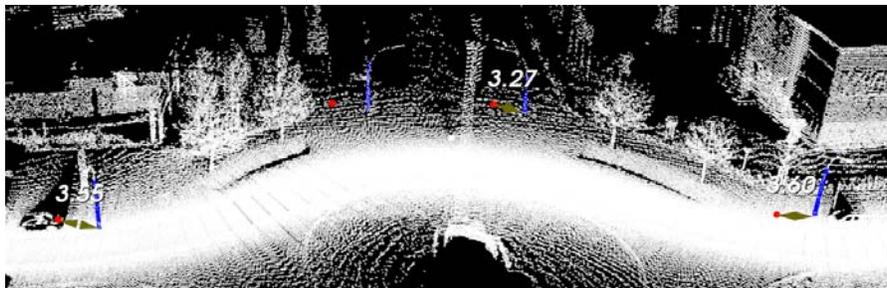


Abb. 2: Punktwolke mit segmentierten Landmarken (blau), deren Referenzpositionen (rot) sowie der jeweiligen Distanz.

Abb. 2 zeigt eine so durchgeführte Extraktion der Landmarken, wobei die Distanz zur Referenz hier nur für Stangen eingezeichnet ist, deren Zylinderparameter erfolgreich geschätzt werden

konnten. Zu den rot eingefärbten Referenzpositionen werden die jeweiligen Landmarken in der Punktwolke gefunden und zugeordnet. Allerdings können auch fehlerhafte Zuordnungen auftreten, wie in Abb. 3 (links) zu erkennen ist. In diesem Fall befindet sich ein Baum im Suchradius der als Referenz dienenden Landmarke. Für dessen Baumstamm ergibt sich ein

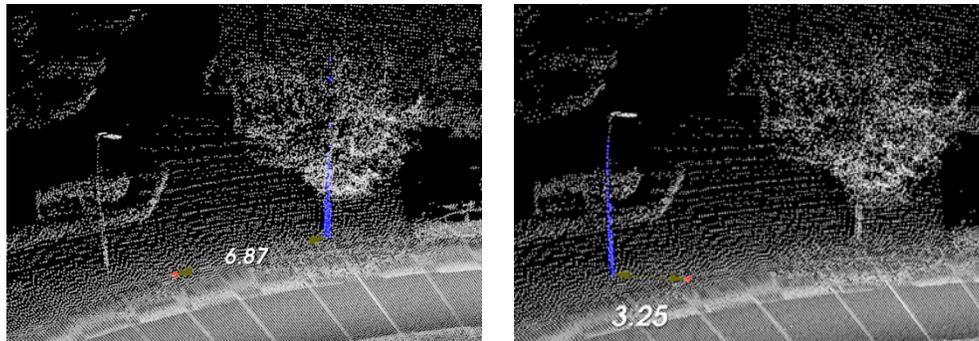


Abb. 3: Segmentierung ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung der Anzahl der Punkte in der Umgebung sowie des maximalen Abstandes zweier aufeinanderfolgender Punkte in der Höhe.

höherer Bewertungsfaktor als für die Punktmenge der Straßenlaterne. Diese fehlerhafte Zuordnung soll unterbunden werden, indem für jedes gefundene Objekt überprüft wird, wie viele Punkte sich in einem erweiterten Radius in der Umgebung des Objektes befinden. Überschreitet die Anzahl der Punkte, die zusätzlich in dem erweiterten Radius auftreten einen Grenzwert, so wird das Objekt als mögliche Landmarke verworfen. Weiter treten bei Bäumen oder Büschen hohe Punktabstände in der Höhe auf, sodass sich hier über einen maximalen Abstand ein weiteres Filterkriterium definieren lässt. In unserer Arbeit wurde dieser Grenzwert zu einem Meter bestimmt. Es ist zu beachten, dass für diese Überprüfung die Punktmenge der Höhe nach geordnet sein muss.

Werden diese Überprüfungen vorgenommen, so erfolgt wie in Abb. 3 (rechts) ersichtlich, eine Verbesserung der Zuordnung.

Um darüber hinaus falsche Zuordnungen zu verhindern, wird der *Iterative-Closest-Point-Algorithmus* (ICP) [BESL & MCKAY, 1992] eingesetzt, welcher der Zuordnung mehrerer geometrischer Objekte zueinander bei unbekanntem Korrespondenzen dient.

4.3 Ableitung von Qualitätsparametern

Zur Beurteilung eines INS/GPS-Sensors hinsichtlich dessen Genauigkeit müssen wie im Folgenden beschrieben die Werte der jeweiligen Kenngrößen bestimmt werden. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Bestimmung der Richtigkeit und der Wiederholgenauigkeit der Pose sowie einer hiervon getrennten Untersuchung der Genauigkeit der Orientierung.

4.3.1 Richtigkeit der Pose

Um die Richtigkeit der Bestimmung der Pose zu untersuchen, werden die segmentierten Landmarken mit deren Referenzen bezüglich der Position verglichen werden. Hierbei werden die Abstände in alle drei Koordinatenrichtungen und die euklidische 2D- (x,y) und 3D-Distanz (x,y,z) sowohl zu den geschätzten Zylindermittelpunkten als auch zu den Schwerpunkten der segmentierten Landmarken betrachtet. Anschließend wird aus den einzelnen Abweichungen der

quadratische Mittelwert (RMS) berechnet. Über eine Visualisierung lassen sich zusätzlich Landmarken mit weiterhin fehlerhaften Zuordnungen oder sonstigen Fehlern bestimmen, sodass diese Landmarken anschließend aus der Berechnung des RMS entfernt werden können.

4.3.2 Wiederholgenauigkeit der Pose

Zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit können die Abweichungen zwischen segmentierten Stangen betrachtet werden, die denselben Referenzen zugeordnet wurden. Eine Visualisierung der Abweichungen ist in Abb. 4 zu sehen, wobei die blau und gelb eingefärbten Punkte die aus der Punktwolke der jeweiligen Vorbeifahrt extrahierten Punkte darstellen. Auch hier werden die entsprechenden Standardabweichungen automatisch berechnet.

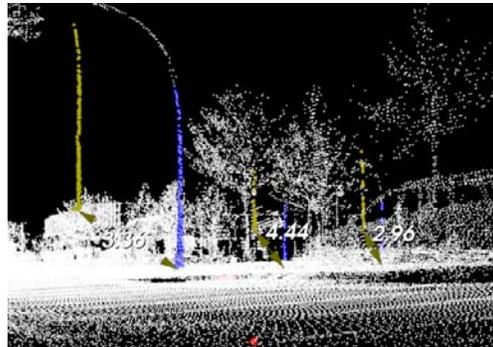


Abb. 4: Vergleich zweier Landmarken in verschiedenen Vorbeifahrten.

4.3.3 Genauigkeit der Orientierung

Die Genauigkeit der Orientierung wird in diesem Fall durch eine Analyse der Auswirkungen hoher Werte und starker Veränderungen im Roll- und Nick-Winkel während der Fahrt über eine Rampe untersucht. Der Algorithmus erkennt diese Veränderungen und teilt die Punktmenge in drei Abschnitte auf. Zur Segmentierung der Ebene aus der Punktwolke wird ein Region-Growing-Algorithmus verwendet. Abb. 5 zeigt die

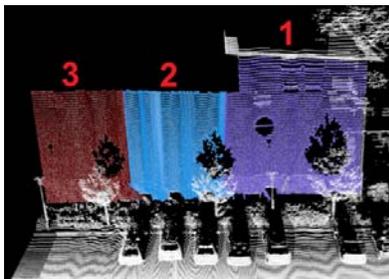


Abb. 5: Abschnitte der aufgenommenen Ebene.

Aufteilung der Ebene. Die relativ starken Drehraten treten hierbei während der Aufnahme des Abschnitts 2 auf, während die Abschnitte 1 und 3 die Ebenen bezeichnen, in denen keine hohen Winkel und Drehraten auftreten. Anschließend werden aus den Punktmengen der einzelnen Abschnitte Ebenenparameter geschätzt und die Standardabweichung der jeweiligen Punktmenge zu dieser Ebene bestimmt. Diese Standardabweichung wird als Indikator zur Beurteilung der Genauigkeit der Orientierung genutzt. Ist die Abweichung der Ebene zum Abschnitt 2 signifikant höher als für die übrigen

Abschnitte, so lässt dies auf einen verbleibenden Einfluss der hohen Drehraten und Orientierungswinkel schließen.

Neben der Standardabweichung werden auch die Winkel $\varphi_{i,j}$ der Abschnitte zueinander analysiert. Diese ergeben sich exemplarisch für den Winkel zwischen Abschnitt 1 und 2 aus Gleichung (1). Hierbei bezeichnen n_1 und n_2 die Normalenvektoren der entsprechenden Ebenen. Es ist zu erwarten, dass die Veränderungen der Orientierungswinkel des Fahrzeuges durch die Messungen der Drehratensensoren kompensiert werden. Je nachdem, wie hoch der Winkel zwischen den Abschnitten ist, desto schlechter ist diese Kompensation und damit die Genauigkeit des Sensors zu bewerten.

$$\varphi_{1,2} = \arccos\left(\frac{n_1 n_2}{|n_1| |n_2|}\right) \quad (1)$$

5 Anwendung der entwickelten Methoden

Das entwickelte Konzept wurde zur Bewertung der Genauigkeit dreier INS/GPS-Kombinationen unterschiedlicher Genauigkeitsklassen verwendet: Ein Sensor der Firma Oxford Technical Solutions (OXTS) mit einem Preis von etwa 30.000 Euro, ein weitaus günstigeren MEMS-Sensor der Marke XSens für etwa 4.000 Euro sowie einem Prototypen der Firma Northrop Grumman LITEF, zu dessen Preis noch keine Angaben gemacht werden können. Diese mit GPS gekoppelte Inertialsensoren waren in einem mit drei SICK-LMS511-Zeilenlaserscannern ausgestatteten VW Passat verbaut. Der systematische Fehler der Distanzmessung der Scanner beträgt bei einer Reichweite von 10-20 Metern 35 Millimeter, der zufällige Fehler acht Millimeter. Die Messkonfiguration ist in Abb. 6 schematisch abgebildet.



Abb. 6: Schematische Messkonfiguration

Zur Beurteilung der Sensoren wurden Fahrten bei unterschiedlicher Geschwindigkeit (15 km/h, 30 km/h) und in unterschiedlicher Richtung im Messgebiet durchgeführt, wobei stets alle drei Sensoren mitgeführt wurden. Die Messungen der Laserscanner erfolgten hierbei mit einer Frequenz von 100 Hz. Insgesamt konnten für drei Umfahrten zwischen 82 und 92 Landmarken (abhängig vom INS/GPS-System) aus den Punktwolken segmentiert und deren Referenzen zugeordnet werden. In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die horizontalen Abweichungen der segmentierten Stangen. Diese werden für die jeweiligen Sensoren in Abb. 6 dargestellt.

Des Weiteren wurden zur Untersuchung der Genauigkeit der Orientierung drei Fahrten mit jeweils einer Fahrzeugseite über eine Rampe durchgeführt, während die Laserscanner eine zur Fahrtrichtung parallele Gebäudewand aufgenommen haben. Der Abstand des Fahrzeuges zur Ebene blieb hierbei konstant.

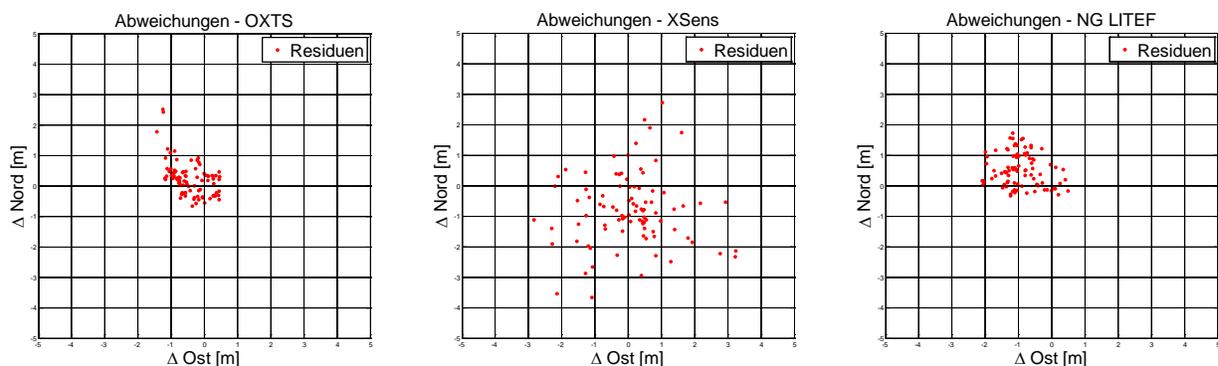


Abb. 7: Plot der Abweichungen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzpositionen.

5.1 Beurteilung der Richtigkeit

Die sich aus den Messungen ergebenden RMS-Werte der Zylindermittelpunkte sind in Tab. 1 aufgelistet. Hierbei beschreibt *PP* die verfügbare Postprocessing-Lösung der mit dem NG-LITEF-Empfänger gemessenen Trajektorie.

RMS [m]	OXTS	XSens	NG LITEF	NG LITEF PP
2D	0,90	1,84	1,34	1,33
Nord	0,61	1,40	0,74	0,74
Ost	0,66	1,20	1,12	1,11

Tab. 1: RMS der Abstände der segmentierten Landmarken zu deren Referenzpositionen. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen des OXTS-Sensors am geringsten sind. Hier beträgt der RMS-Wert zur Referenzposition einer Landmarke in der Lage 0,90 Meter. Die Abweichungen der XSens- und LITEF-Lösungen sind mit 1,84 bzw. 1,34 Meter deutlich höher.

5.2 Beurteilung der Wiederholgenauigkeit

Zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit des Systems sind verschiedene Ansätze möglich. An dieser Stelle wurden die Streuung der Abweichungen aus Abb. 6, die Abweichungen zwischen denselben segmentierten Landmarken bei Wiederholmessungen sowie die Veränderungen der Abweichungen in aufeinanderfolgenden Landmarken untersucht.

1 σ [m]	OXTS	XSens	NG LITEF	NG LITEF PP
2D	0,59	0,94	0,62	0,62
Nord	0,56	1,16	0,53	0,53
Ost	0,50	1,20	0,60	0,60

Tab. 2: Standardabweichung der Differenzen zu den Referenzlandmarken. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

Betrachtet man die Streuung zwischen den gemessenen und den Referenzpositionen der Landmarken, so ist ersichtlich, dass die Abweichungen des XSens-Sensors in etwa um den Faktor zwei höher sind, als die der übrigen Lösungen (siehe Tab. 2).

Die mittleren Standardabweichungen zwischen den jeweils selben Landmarken in drei unterschiedlichen Messfahrten sind in Tab. 3 aufgelistet.

1 σ [m]	OXTS	XSens	NG LITEF	NG LITEF PP
2D	1,14	1,42	1,36	1,18
Nord	0,73	0,98	0,87	0,77
Ost	0,82	1,03	1,04	0,89

Tab. 3: Mittlere Standardabweichungen der Abweichungen der segmentierten Landmarken in drei Vorbeifahrten. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

Tab. 4 zeigt die quadratischen Mittel der Veränderung der Abweichungen zweier aufeinander folgenden Landmarken L_i und L_{i+1} zur Referenzposition. Diese Veränderung ergibt sich aus

$$\Delta L_i L_{i+1} = \Delta L_i - \Delta L_{i+1}, \text{ mit } \Delta L_i = L_{\text{seg}} - L_{\text{ref}}. \quad (2)$$

L_{seg} bezeichnet hierbei die aus der Punktwolke segmentierte Landmarke, L_{ref} dessen Referenz. Die mittlere Distanz der betrachteten Landmarken beträgt 52,05 Meter.

Die INS/GPS-Plattform der Firma XSens liefert auch hier die höchsten Abweichungen, während wiederum die OXTS- und LITEF-Plattformen vergleichbare Ergebnisse liefern.

RMS [m]	OXTS	XSens	NG LITEF	NG LITEF PP
2D	0,21	0,71	0,24	0,24
Nord	0,19	0,83	0,24	0,24
Ost	0,20	0,90	0,24	0,25

Tab. 4: Quadratisches Mittel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Landmarken.

5.3 Beurteilung der Genauigkeit der Orientierung

Tab. 5 gibt das Rauschen der segmentierten Ebenen sowie die Winkel zwischen den Ebenen an. Es ist zu erkennen, dass weder das Rauschen unter Einfluss der Drehraten (Abschnitt 2) höher ist, noch die Winkel zwischen den Abschnitten 1 und 2 sowie 2 und 3 signifikant höher sind. Es ist anzumerken, dass sich auch die Beschaffenheit der Gebäudewandabschnitte auf die Ergebnisse auswirkt. Dennoch kann kein Einfluss der Drehraten und hohen Orientierungswinkel auf die Messgenauigkeit des Gesamtsystems festgestellt werden.

		OXTS	XSens	NG LITEF	NG LITEF PP
	1 (1 σ) [m]	0,046	0,043	0,041	0,039
Rauschen	2 (1 σ) [m]	0,021	0,032	0,018	0,015
	3 (1 σ) [m]	0,017	0,046	0,020	0,016
	1-2 [°]	0,48	0,41	0,69	0,64
Winkel	1-3 [°]	0,96	0,72	1,11	0,16
	2-3 [°]	0,67	0,77	0,21	1,02

Tab. 5: Standardabweichungen der Gebäudewandabschnitte und Winkel zwischen den entsprechenden Ebenen für die einzelnen Sensoren.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Konzept vorgestellt, um die Genauigkeit von INS/GPS-Systemen in mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-Systemen zu bewerten. Hierzu wurden insbesondere die Richtigkeit und die Wiederholgenauigkeit der Pose sowie die Genauigkeit der Orientierung als wesentliche Bewertungskriterien festgelegt. Es wurden Methoden entwickelt, um aus den Messungen der Laserscanner die entsprechenden Kenngrößen zu bestimmen. In diesem Zusammenhang wurden in einem Referenzgebiet Landmarken mit übergeordneter Genauigkeit eingemessen. Durch einen entsprechenden Algorithmus ließen sich diese Landmarken in Form von Straßenlaternen aus den in Messfahrten aufgezeichneten Punktwolken segmentieren und die Position der segmentierten Objekte mit den Referenzen vergleichen. Kern dieses Algorithmus ist die Projektion der Punktwolke auf die x/y -Ebenen. Zur Segmentierung einer Landmarke werden Gebiete mit einer hohen Punktdichte gewählt und die zugehörigen dreidimensionalen Punkte extrahiert. Anhand der Anzahl der Punkte und der Distanz zur Referenz wird anschließend entschieden, welche Punktmenge der jeweiligen Landmarke zugeordnet wird. Fehlerhafte Zuordnungen werden durch die Betrachtung der Anzahl der Punkte in einem erweiterten Radius und der maximalen Distanz aufeinanderfolgender Punkte verhindert. Mit diesem Algorithmus kann eine automatische Segmentierung und Zuordnung der Landmarken aus einer aufgenommenen Punktwolke erfolgen.

Aus den Abweichungen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzen lässt sich auf die äußere Genauigkeit (Richtigkeit) des verwendeten INS/GPS-Sensors schließen, aus der Streuung der Abweichungen auf die Wiederholgenauigkeit (Präzision).

Die Genauigkeit der Orientierung wurde durch eine Fahrt über eine Rampe und anschließender Analyse der parallel von den Laserscannern aufgenommenen Ebene untersucht.

Das entwickelte Konzept wurde auf drei verschiedene Systeme angewendet. Hierbei zeigte sich, dass die Kenngrößen zur Bewertung der Genauigkeit bestimmt werden konnten. Für die Richtigkeit und die Wiederholgenauigkeit ergaben sich für die Sensoren der Firma OXTS und NG LITEF vergleichbare Ergebnisse, für den deutlich preiswerteren XSens-Sensor wie erwartet geringere Genauigkeiten. Bezüglich der Orientierungswinkel und Drehraten konnte kein signifikanter Einfluss auf die Genauigkeit des Gesamtsystems ermittelt werden.

Für eine gesamte Bewertung eines Sensors gilt es weitere Bewertungskriterien zu definieren und Methoden zu entwickeln, diese automatisch aus Messungen des Mobile-Mapping-Systems zu ermitteln.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine Methode entwickelt werden konnte, um eine automatische Bewertung der Genauigkeit von INS/GPS-Sensoren mit Hilfe von Laserscannern und bekannter Landmarken in einem Mobile-Mapping-System erfolgreich durchzuführen.

7 Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei Dr.-Ing. Kay Fuerstenberg, Dr.-Ing. Roland Krzikalla sowie Dipl.-Ing. Marc Sowen für die Durchführung der Messungen und die Unterstützung während der Auswertung der Ergebnisse bedanken.

8 Literaturverzeichnis

- BESL, P. & MCKAY, N., 1992: A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14** (2), S. 239-256.
- BRENNER, C., 2009: Extraction of features from mobile laser scanning data for future driver assistance systems. *Advances in GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer Berlin Heidelberg, S. 25-42.
- DOROBANTU R, & ZEBHAUSER, B. R, 1999: Field Evaluation of a Low-Cost Strapdown IMU by means GPS. *Ortung und Navigation*, 1/1999, S. 51-65.
- GOOGLE INC., 2012: Google Earth. 03.12.2012.
- NIU, X.; GOODALL, C.; NASSAR, S. & EL-SHEIMY, N., 2006: An efficient method for evaluating the performance of MEMS IMUs. *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, PLANS 2006*, San Diego, USA, S. 766-771.
- NOURELDIN, A.; KARAMAT, T.B.; EBERTS, M.D. & EL-SHAFIE, A., 2009: Performance enhancement of MEMS-based INS/GPS integration for low-cost navigation Applications. *IEEE Transactions on vehicular Technology*, **58** (3), S. 1077-1096.