

Untersuchung automatisch generierter Merkmalskarten für Fahrerassistenzsysteme

Sabine HOFMANN und Claus BRENNER

Zusammenfassung

Die Entwicklung von aktiven Fahrerassistenzsystemen zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr spielt derzeit eine wichtige Rolle. Aktive Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit Hilfe von Sensoren wie Laserscannern, Kameras oder Radar die Umgebung des Fahrzeugs erfassen. Diese Informationen können neben der Erkennung von bewegten Objekten im Straßenraum auch zur Extraktion von Landmarken genutzt werden. Liegt zugleich eine Karte von georeferenzierten Landmarken vor, kann mittels einer Zuordnung von Sensorinformation und Karte die Position des Fahrzeugs bestimmt werden.

Im vorliegenden Beitrag wird dieser Ansatz untersucht. Zunächst wurde mittels eines Laserscanning Mobile Mapping Systems eine dichte Punktwolke einer 22 km langen Trajektorie erstellt. Daraus wurden vollautomatisch stangenförmige Objekte extrahiert und in einer Datenbank gespeichert. Die Genauigkeit dieser Daten wurde anhand von tachymetrischen Vergleichsmessungen ermittelt. Weiterhin wurde mittels eines zweiten Datensatzes, welcher mit einem robotischen Erfassungsfahrzeug mit geringerer Auflösung und Genauigkeit gewonnen wurde, untersucht, mit welcher Genauigkeit eine Positionsbestimmung auf Basis der extrahierten Landmarken möglich ist.

1 Einleitung

Wichtige Forschungsgebiete der Automobilbranche sind Fahrerinformations- und Sicherheitssysteme, z.B. Kollisionswarner und Spurhalteassistenten. Dazu muss dem Fahrzeug ein aktuelles Bild der Umgebung zur Verfügung stehen, welches z.B. mittels Kameras, Laserscanner oder Radar gewonnen werden kann. Verglichen mit heutigen Navigationsanwendungen benötigen diese Systeme sehr detaillierte Kenntnisse über ihre Umgebung. Das NextMAP Projekt (PANDAZIS 2002) untersuchte die Anforderungen, welche an zukünftige digitale Karten gestellt werden, sowie die Möglichkeiten, diese entsprechend der Anforderungen zu erfassen. Untersuchungen zur kommerziellen Herstellung solcher Karten wurden im Rahmen des „Enhanced Digital Mapping“ Projekts (EDMAP 2004) durchgeführt. Darin werden die Anwendungen von Assistenzsystemen hinsichtlich der Anforderungen an die Positionsgenauigkeit klassifiziert. Die für bestimmte Anwendungen erforderlichen Genauigkeiten lassen sich mit heutigen Methoden der Kartenherstellung nicht ökonomisch sinnvoll realisieren. An dieser Stelle muss jedoch eine Differenzierung je nach Anwendung stattfinden. So kann man feststellen, dass die herkömmliche Kartendarstellung in Form von Vektordaten für die spezielle Anwendung der genauen Positionsbestimmung nicht unbedingt erforderlich ist. Notwendig sind lediglich eine ausreichende Genauigkeit sowie die Kartierung der für die Anwendung erforderlichen Objekte. Damit genügen meist Low-Level Darstellungen, welche in der Regel vollautomatisch erzeugt werden können. Eine

weitere Frage ist, welche absoluten Genauigkeitsansprüche gestellt werden. Derzeit wird typischerweise sowohl die Position des Fahrzeugs als auch die Karte mittels (absoluter) Positionsmessung ermittelt, wobei das eigentliche Interesse in der relativen Position von Fahrzeug und Karte besteht. Positioniert sich ein Fahrzeug dagegen mittels relativer Messung zu bekannten, kartierten Objekten in der Umgebung, z.B. Ampelmasten oder Leitplanken, ist keine hohe absolute Genauigkeit der Karte und der Fahrzeugortung erforderlich. Daher besitzt die relative Positionsbestimmung geringere Anforderungen an Karte und (absolute) Ortung und es ist möglich, hohe Genauigkeiten ökonomisch sinnvoll zu realisieren. Ein Verfahren zur Erstellung solcher Karten stellt das Mobile Mapping mit Laserscannern dar. Heutige Systeme sind in der Lage, die Umgebung mit Messraten von mehreren 100.000 Punkten pro Sekunde zu erfassen (KUKKO 2007). Mittels GPS- sowie Inertialsensoren erreichen diese Systeme eine relative Genauigkeit der Punktwolke von wenigen Zentimetern. Verschiedene Lösungsansätze, wie diese Daten zur Repräsentation der Umgebung genutzt werden können, finden sich in der Robotik. Ikonische Repräsentationen, wie Belegungsgitter-Karten, werden ebenso genutzt wie symbolische Darstellungen, z.B. landmarkenbasierte Karten (BURGARD & HEBERT 2008). Allerdings erscheint die Bereitstellung einer dichten georeferenzierten Punktwolke für ein vollständiges Straßennetzwerk nicht sinnvoll, da dies die Speicherung und Übertragung von sehr großen Datenmengen bedeuten würde. Einen Ansatz, diese Datenmenge zu reduzieren, stellen landmarkenbasierte Karten dar. Im Folgenden wird die Nutzung von stangenartigen Objekten als Landmarken untersucht.

2 Datenerfassung

2.1 Referenzdaten

Der als Referenz genutzte Datensatz besteht aus einer sehr dichten Punktwolke, die mit einem Streetmapper-System im Stadtgebiet von Hannover erzeugt wurde. Das gescannte Gebiet umfasst dabei Straßen in dicht bebauten Gegenden sowie Umgehungsstraßen ohne Bebauung. Die Trajektorie hat eine Gesamtlänge von 21,7 km. Insgesamt wurden 70,7 Millionen Punkte aufgenommen, d.h. jeder Straßenmeter wird durch mehr als 3.200 Punkte abgebildet (**Abb. 1**, links). Die genutzten Scanner haben eine Reichweite von maximal 150 m und eine Entfernungsmessgenauigkeit von 25 mm. Die vier eingesetzten Scanner messen simultan mit einem Scanwinkel von 80° und einer Scanrate von 10.000 Punkten/s. Zur Positionsbestimmung des Messfahrzeugs wurden des GNSS/ IMU-System TERRAControl der Firma IGI genutzt (KREMER & HUNTER 2007).

2.2 Fahrzeugdaten

Der zweite Datensatz wurde mit RTS Hanna (**Abb. 1**, rechts), einem Fahrzeug des Instituts für Systems Engineering - Fachgebiet Echtzeitsysteme (RTS) der Leibniz Universität Hannover, erzeugt. Dieser Scan wurde entlang der bereits gemessenen Trajektorie aufgenommen. Den Hauptsensor bilden zwei „RTS-ScanDriveDuo“-Sensoren, die aus jeweils zwei gekoppelten 2D SICK LMS 291-S05-Sensoren bestehen. Diese haben eine Reichweite von 30 m, die Entfernungsmessgenauigkeit beträgt 60 mm. Die Scanner sind auf einer Rotationsseinheit, dem ScanDrive, montiert. In vertikaler Richtung wird mit einem Winkel von 90° und einer Winkelauflösung von 1° gescannt. Es werden, ausgehend vom Zentrum eines

einzelnen Scanners, 20° des oberen und 70° des unteren Halbraumes aufgenommen. Der horizontale Scanbereich jedes Scannerpaares beträgt 260° , die Winkelauflösung ca. 2° . Jeder 3D-Scan besteht aus 180 Scanspalten und ca. 6.000 Objektpunkten. Die Fahrzeugbewegung während der Aufnahme wird kompensiert, sodass sich alle Punkte eines Scans auf eine Position beziehen. Zur Positionsbestimmung wird ein Trimble AgGPS 114 ohne differentielle Korrektur genutzt. Die Odometrie wird aus einem Geschwindigkeitssensor am Getriebeausgang des Fahrzeugs und einem Winkelenkoder an der Lenkung bestimmt.



Abb. 1 Links: Extrahierte Stangen (blaue Punkte) für einen Teil der Trajektorie (gepunktete Linie). Rechts: RTS Hanna Fahrzeug (Mit freundlicher Genehmigung des ISE/RTS).

3 Extraktion stangenartiger Objekte

Im vorgestellten Ansatz werden ausschließlich stangenartige Objekte, z.B. Ampelmasten, Straßenschilder oder Baumstämme genutzt. Bereits von WEISS (2005) wurde gezeigt, dass die Position eines Fahrzeugs mit Hilfe einer vorliegenden Karte von Stangen geschätzt werden kann. Die dabei erreichten Genauigkeiten lagen in einem Bereich von wenigen cm.

3.1 Extraktion von Stangen aus Referenzdaten

Eine vollautomatische Extraktion einfacher geometrischer Formen, z.B. Zylinder, aus Punktwolken ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich, da einzelne Stangen nur von einer geringen Anzahl an Laserstrahlen getroffen werden (**Abb. 2**, links). Verfahren, die auf der Extraktion von Oberflächen bzw. deren Normalenvektoren oder der Krümmung basieren, sind daher nicht anwendbar.

Stattdessen werden folgende Bedingungen genutzt: Stangen weisen immer eine vertikale Richtung auf, in einer inneren Region sind Punkte vorhanden und in einem umschließenden Hohlzylinder dürfen keine Punkte vorhanden sein (**Abb. 2**, Mitte). Diese Struktur wird in Schichten analysiert. Bei einer definierten Minimalanzahl von passenden Schichten, wird ein Objekt als Stange angenommen. Aus den zugehörigen Punkten wird anschließend mit-

tels Kleinster-Quadrate-Schätzung der Mittelpunkt der Stange berechnet. Mittels dieses Verfahrens wurden entlang der Trajektorie 2.658 Stangen vollautomatisch extrahiert (**Abb. 1**, links). Betrachtet man die Datenreduktion, bezogen auf die ursprüngliche Punktwolke, bedeutet dies eine Stange pro 27.000 originalen Scanpunkten.

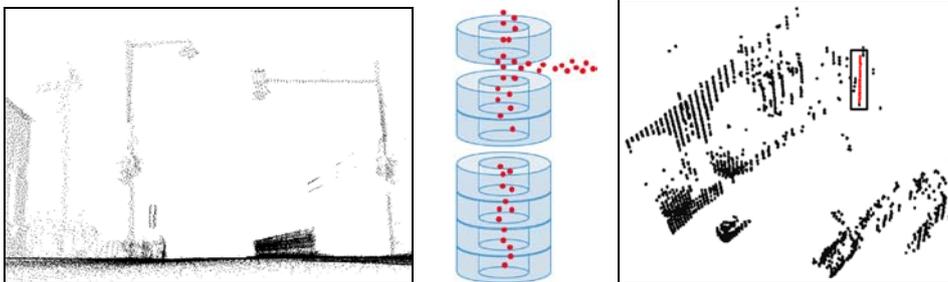


Abb. 2 Links: Detail der Streetmapper-Daten: Schild, Straßenlaterne (mit Ampel) und Ampel. Mitte: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Stangenextraktion in Schichten. Rechts: Detektierte Stange (Rahmen) in einem Scan von RTS Hanna.

3.2 Extraktion von Stangen aus Fahrzeugdaten

RTS Hanna-Daten liegen als einzelne Scans vor, wobei ein Scan aus einer vollständigen horizontalen Bewegung eines der vier Scanner besteht. Für jeden dieser Einzelscans gibt es einen Satz Orientierungsparameter. Eine Extraktion der Stangen auf Basis des in Abschnitt 3.1 erläuterten Algorithmus ist auf Grund der geringeren Punktdichte nicht möglich. Anhand der 3D Punktwolke eines einzelnen Scans ist es meist nicht möglich zu beurteilen, ob eine Spalte von übereinander liegenden Punkten zu einer Stange gehört oder nur die Folge einer zu geringen Scandichte ist (**Abb. 2**, rechts). Andererseits können aufeinanderfolgende Scans nicht direkt anhand der gegebenen Orientierung verknüpft und so die Punktdichte erhöht werden, da auf Grund der geringen Genauigkeit der Orientierung zusammengehörende Punkte einer Stange nicht an der gleichen Position liegen würden. Die Extraktion von Stangen erfolgt daher nicht in den vorverarbeiteten 3D Punktwolken sondern anhand der Rohdaten. Da die Punkte als Folgen von Spalten aufgenommen werden, lässt sich über die Zeilen- und Spaltenindizes eine Nachbarschaft definieren. Die Analyse der Daten erfolgt dann in einem Tiefenbild, indiziert durch horizontale und vertikale Scanwinkel. Berücksichtigt werden muss, dass es sich auf Grund der Fahrzeugbewegung nicht um eine perfekte polare Repräsentation der Umgebung handelt. Zur Detektion der Stangen werden nun solche vertikalen Spalten gesucht, an deren linken und rechten Rändern ein Tiefensprung zu benachbarten Spalten auftritt. Insgesamt wurden in der ersten Trajektorie 1.248 Stangen aus 1.384 Einzelscans und in der zweiten Trajektorie 1.794 Stangen aus 3.237 Einzelscans extrahiert. Auf Grund der beschränkten Reichweite und Auflösung der Scanner konnten in 50% (Trajektorie 1) bis 60% (Trajektorie 2) der Scans keine Stangen detektiert werden. In 30% der Scans wurde jeweils nur eine Stange gefunden, maximal konnten sechs Stangen pro Scan detektiert werden. **Abb. 5**, links vergleicht die Referenzstangen mit den von RTS Hanna detektierbaren Stangen. Letztere wurden aus Einzelscans extrahiert. Anschließend erfolgte die Transformation in das globale Koordinatensystem mittels der für jeden Scan

vorliegenden Orientierungsparameter. Besonders deutlich ist eine systematische Verschiebung in **Abb. 5**, links, auf dem Parkplatz erkennbar (korrespondierende Stangen sind mit Kreisen markiert). Eine einzelne Stange tritt auf Grund der geringeren Lagegenauigkeit mehrfach auf.

4 Analyse der Referenzdaten

Um die Streetmapper-Daten als Referenzdatensatz nutzen zu können, ist eine Aussage über die Genauigkeit der Daten erforderlich. Zur Analyse der Lagegenauigkeit der extrahierten Stangen wurde die tachymetrische Geländeaufnahme einer innerstädtischen Kreuzung genutzt. Die Genauigkeit dieser Vergleichsobjekte liegt bei < 10 cm. Von den manuell gemessenen 90 Stangen konnten zu 28 extrahierten Stangen Korrespondenzen gefunden werden. Die maximalen Residuen liegen bei 22,9 cm, die minimalen Residuen bei 1,4 cm. Der RMS-Fehler liegt bei 12,1 cm (**Abb. 3**, links).

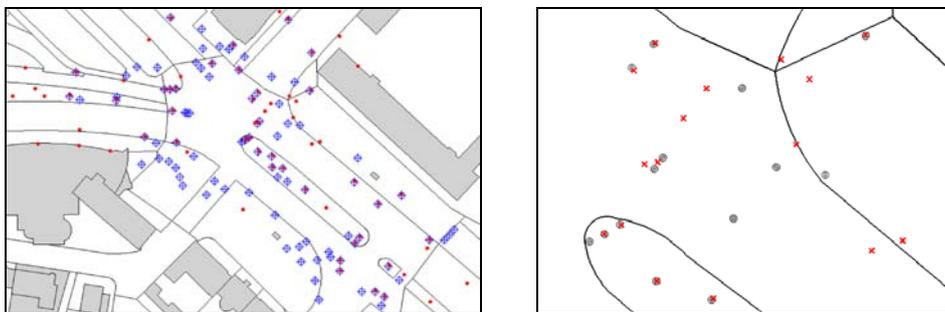


Abb. 3 Links: Vergleich von Referenz- und automatisch extrahierten Stangen. Rechts: Detail einer Kreuzung: Die teilweise großen Distanzen zwischen automatisch extrahierten Stangen (Kreuz) und Vergleichsdaten (Kreis, innerer: 25 cm, äußerer: 50 cm) sind Folge einer Umgestaltung des Kreuzungsbereichs.

Der Vergleich der extrahierten Objekte mit dem Vergleichsdatensatz zeigt zusätzlich das Problem der Aktualität. Wie in **Abb. 3**, rechts, gezeigt, weisen einige extrahierte Stangen, rote Kreuze, einen großen Abstand zu Vergleichsstangen, schwarze Kreise (der äußere Kreis hat eine Distanz von 50 cm zum Mittelpunkt), auf. In diesem Fall liegen keine groben Fehler in der Extraktion vor, die Kreuzung war zwischen der Aufnahme des Scans und der Vergleichsmessung umgestaltet worden.

Zusätzlich wurde eine Simulation zur Beurteilung der möglichen Positionsgenauigkeit auf Basis der Stangen durchgeführt. Entlang der Trajektorie wurden 2.141 Fahrzeugpositionen, beschrieben durch zwei ebene Koordinaten sowie eine Richtung, festgelegt. Mit Hilfe eines Modells des Fahrzeugsensors wurden für jede dieser Positionen alle sichtbaren Stangen für die Berechnungen ausgewählt. Unter Annahme von Fehlern in Strecken- und Richtungsmessung sowie in den Stangenpositionen wird die Genauigkeit der Fahrzeugposition bestimmt (BRENNER 2009). Für die Simulation wurden folgende Standardabweichungen (1σ)

angenommen: Entfernungsmessung: 5 cm, Richtungsmessung: 1° , Stangenposition der Referenzkarte: 10 cm. Die Berechnungen werden für einen fiktiven, in Fahrtrichtung zeigenden, Fahrzeugsensor für verschiedene Öffnungswinkel und Reichweiten durchgeführt. **Abb. 4**, links, zeigt beispielhaft die Fehlerellipsen für einzelne Fahrzeugpositionen entlang einer großen Kreuzung bei einem Öffnungswinkel von 100° und variierten Reichweiten von 50 m und 150 m. Sind genügend Landmarken in der Szene vorhanden, kann eine Lokalisierung auch auf Basis eines Scanners mit kurzer Reichweite erfolgen. Betrachtet man dagegen **Abb. 4**, rechts, zeigt sich, dass die Lokalisierung fehlschlägt, wenn nicht genügend Stangen vorhanden sind. In diesem Fall wird die beste Positionsgenauigkeit mit einem Sensor der Reichweite 150 m erreicht. Anhand dieser Ergebnisse kann man eine „Qualitätskarte“ erzeugen, die die maximal erreichbare Positionsgenauigkeit für gegebene Sensorcharakteristiken angibt.

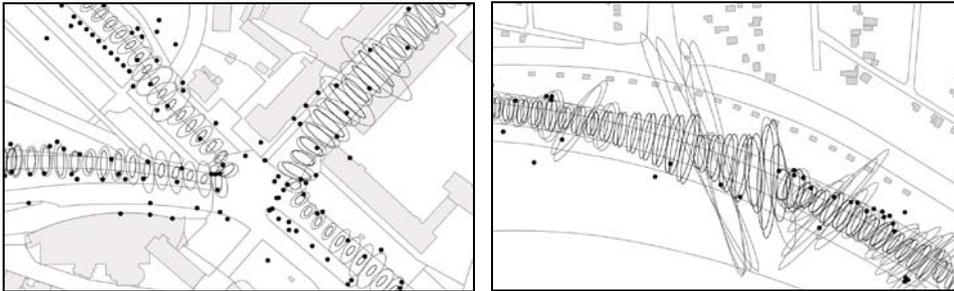


Abb. 4 Fehlerellipsen für Öffnungswinkel von 100° , Scanerentfernung 50 m (schwarz) und 150 m (grau). Alle Ellipsen sind mit dem Faktor 100 skaliert. Links: Kreuzung in dicht bebautem Gebiet. Rechts: Umgehungsstraße.

5 Positionsbestimmung durch Zuordnung von Stangen

Für die Positionsbestimmung wurde der folgende Algorithmus verwendet. Zu jedem Zeitpunkt liegt dem Fahrzeug eine aktuelle Transformation T sowie ein aktueller Satz von Stangen in einem lokalen Sichtbarkeitshorizont P vor. Bewegt sich das Fahrzeug weiter, werden neue Scans aufgenommen. Darin detektierte Stangen werden dem aktuellen Horizont zugefügt. Gleichzeitig werden Stangen mit einer Distanz größer eines Schwellwerts ε_h entfernt. Der Hintergrund hierfür ist, dass aufgrund der Fehler in der Positionsbestimmung die Positionen der Stangen nur innerhalb einer gewissen Distanz mit ausreichender Genauigkeit vorliegen. Nach jeder Aktualisierung des Horizonts werden Korrespondenzen in der globalen Stangendatenbank Q gesucht. Für jede detektierte Stange werden in der Datenbank alle Nachbarn innerhalb einer Distanz kleiner als die Suchdistanz ε_s überprüft. Für jeden Verschiebungsvektor zwischen einer Stange im aktuellen Horizont und einem korrespondierenden Element in der Datenbank, werden alle Stangen im Horizont transformiert und die Anzahl der „Treffer“ zu Datenbankobjekten gezählt. Ein „Treffer“ wird dann gewertet, wenn der Abstand unterhalb des Schwellwertes ε_m liegt. Diese Vorgehensweise ist ähnlich wie beim random sampling consensus (RANSAC) Verfahren, allerdings wird beim vorliegenden Algorithmus aufgrund der relativ geringen Anzahl eine erschöpfende Suche

vorgenommen, anstatt (wie bei RANSAC) eine zufällige Auswahl zu treffen. Die Parameter der Ähnlichkeitstransformation T' mit der größten Übereinstimmung werden mittels Kleinste-Quadrate-Ausgleichung geschätzt. Diese wird dann als neue lokale Transformation T genutzt. Als Schwellwerte wurde in den Experimenten $\varepsilon_h = 100$ m, $\varepsilon_s = 15$ m und $\varepsilon_m = 2$ m gewählt.



Abb. 5 Links: Vergleich von Referenzstangen (grüne Quadrate) mit aus RTS Hanna Scans extrahierten Stangen (rote Punkte). Rechts: Vergleich der Originaltrajektorie (rote Punkte) mit der korrigierter Trajektorie (grüne Quadrate).

Die Ergebnisse zu der in **Abb. 5**, links, dargestellten Szene finden sich in **Abb. 5**, rechts, die die gemessenen Fahrzeugpositionen (rote Punkte) und die korrigierten Positionen (grüne Quadrate) darstellen. Die Trajektorie beginnt auf einem Parkplatz, gemessene und korrigierte Position sind am Anfang identisch (sichtbar sind nur die roten Punkte). Nach wenigen Metern werden Stangen detektiert und die grüne Trajektorie korrigiert. Diese ist auch im linken und unteren Bereich besser, die Qualität der Originaltrajektorie ist durch Abschattung des GPS-Signals entlang der Allee vermindert. Da es keine Referenzbeobachtungen für die Trajektorie (in übergeordneter Genauigkeit) gibt, konnte eine quantitative Gesamtbeurteilung der Trajektorie nicht vorgenommen werden. Teilweise versagt die lokale Zuordnung von Stangen bisher, zum Einen auf Grund einer zu geringen Anzahl Stangen, zum Anderen entlang von Alleen, in denen es zu viele Stangen gibt, was zu falschen Zuordnungen führt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Ansatz zur Verwendung automatisch extrahierter Landmarken zur Lokalisierung von Fahrzeugen vorgestellt. Der Fokus lag dabei auf der Extraktion stangenartiger Objekte in einem hochaufgelösten, hochgenauen Scan (der späteren Referenzdatenbank) sowie in einem Scan mit geringer Auflösung und Genauigkeit. Es wurden zwei verschiedene Algorithmen zur Extraktion verwendet. Weiterhin wurde die Genauigkeit der extrahierten Stangen untersucht und erste Experimente zur Verbesserung der Trajektorie unter Nutzung einer lokalen Zuordnung von Stangen wurden durchgeführt.

Die Zuordnung der Objekte war nicht in allen Fällen erfolgreich. Sowohl zu wenige als auch zu viele Stangen verursachen Probleme. Fehlerhaft detektierte Stangen führen zu

falschen Objektzuordnungen und damit zu fehlerhaften Transformationen. Ein Lösungsansatz für die erfolgreiche Zuordnung ist die Nutzung der Kurzzeitstabilität der Fahrzeugtrajektorie. Können Stangen lokal mit hoher Präzision beobachtet werden, lassen sich Schwellwerte (wie ε_m) entsprechend eng wählen und falsche Zuordnungen einfacher ausschließen. Es verbleibt die Schwierigkeit, dass an einigen Stellen zu wenige Stangen in der Datenbank vorliegen. Eine zuverlässige Positionierung ist dann nur möglich, wenn andere Objekte zusätzlich herangezogen werden.

In zukünftigen Arbeiten sollen daher weitere Objektarten, z.B. lokale Ebenen, in die Auswertungen einbezogen werden. Weiterhin sollte der lokale Zuordnungsalgorithmus erweitert werden und eine Kalman Filterung zur Schätzung der Fahrzeugposition erfolgen.

7 Danksagung

Wir danken Herrn Dipl.-Ing. Matthias Hentschel vom Institut für Systems Engineering - Fachgebiet Echtzeitsysteme der Leibniz Universität Hannover für die Durchführung und Bereitstellung der RTS Hanna Scans.

8 Literatur

- Brenner, C. (2009): *Extraction of Features from Mobile Laser Scanning Data for Future Driver Assistance Systems*. M. Sester et al. (eds.), *Advances in GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer, S. 25-42
- Burgard, W. & Hebert, M. (2008): *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Kapitel World Modeling, S. 853-869
- EDMap (2004): *Enhanced digital mapping project final report*. Technical Report, United States Department of Transportation, Federal Highway Administration and National Highway Traffic and Safety Administration, http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/14161.htm (zuletzt besucht 25.01.2010)
- Kremer, J. & Hunter, G. (2007): *Performance of the streetmapper mobile lidar mapping system in real world projects*. Photogrammetric Week 2007, Wichmann, S. 215-225
- Kukko, A., Andrei, C.-O., Salminen, V.-M., Kaartinen, H., Chen, Y., Rönnholmen, P., Hyypä, H., Hyypä, J., Chen, R., Haggrén, H., Kosonen, I. & Capek, K. (2007): *Road environment mapping system of the finnish geodetic insitute – FGI roamer*. IAPRS (ed.), *Proc. Laser Scanning 2007 und SilviLaser 2007*, Vol. 36 Part3/W 52, S. 241-247
- Pandazis, J.-C. (2002): *NextMap: Investigation the future of digital map databases*. E-Safety Congress, Lyon. http://www.ertico.com/en/projects/completed_projects/nextmap.htm (zuletzt besucht 25.01.2010)
- Weiss, T., Kaempchen, N. & Dietmayer, K. (2005): *Precise ego localization in urban areas using laserscanner and high accuracy feature maps*. Proc. 2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, USA, S. 284-289