
Konzeption eines modularen MMS innerhalb der Robot Operating System (ROS)-Umgebung zur Produktion von Stadtmodellen

Eike BARNEFSKE, Harald STERNBERG und Finn LINZER
HafenCity Universität Hamburg, vorname.nachname@hcu-hamburg.de

Zusammenfassung

Stadt-, Straßen- und Bauwerksmodelle werden vielfach auf Grundlage von Punktwolken erstellt, die mittels eines Mobile Mapping Systemen (MMS) erhoben wurden. Für einen effizienten und sicheren Einsatz eines MMS sind die verwendeten Sensoren der Vermessungsaufgabe anzupassen. Hierbei kommen vermehrt auch Sensoren zur Anwendung, die für die automatische Überwachungen von Maschinen und zur Steuerung von Robotern entwickelt wurden. Diese Sensoren weisen i. d. R. eine geringe Genauigkeit und Zuverlässigkeit auf als Sensoren, die üblicherweise in der Vermessung eingesetzt werden. Aufgrund der großen Verfügbarkeit dieser Sensoren, verbesserter Auswertelgorithmen und variierender Genauigkeitsanforderungen an die Vermessungsdaten, sind diese low-cost Sensoren Gegenstand von Untersuchungen in der Geodäsie. Ein modulares MMS, in dem low-cost und high-end Sensoren parallel und kombiniert eingesetzt werden, ist die Grundlage für diese Untersuchungen. Neben der hardwareseitigen Modularität muss die Software, die zur Steuerung der Sensoren und zur Speicherung der registrierten Messwerte modular gehalten sein, damit die Daten einheitlich ausgewertet und Sensoren effizient ausgetauscht werden können. Für diese softwareseitige Umsetzung wird beim HCU_ROS MMS das Robot Operating System (ROS) eingesetzt, welches einen einheitlichen Rahmen für die Implementierung von Sensoren und die Datenverarbeitung vorgibt. In dieser Arbeit wird der Einsatz von ROS am Beispiel des HCU_ROS MMS vorgestellt. Die Entwicklung von Hardware-Packages (Treibern) und Untersuchungen in einem urbanen Prüfgelände werden detaillierter vorgestellt.

1 Einleitung

Moderne Vermessungssysteme sind häufig eine Kombination aus einer Vielzahl von Sensoren, die eine komplexe Umwelt erfassen. Diese Sensoren sind u.a. LIDAR-, Kamera-, Distanz- und Richtungsmesssysteme sowie das GNSS und Odometer. Eine Kombination aus verschiedenen Sensoren oder Systemen wird als Multisensorsystem (MSS) bezeichnet. Ein Mobiles Mapping System (MMS) ist ein MSS, das zur Erfassung der zu vermessenden Objekte, die gleichen Sensoren wie ein Roboter zur Navigation und Umgebungserfassung nutzt (STERNBERG & SCHWIEGER, 2014). Zur Steuerung von Robotern ist seit etwa zehn Jahren das Robot Operating System (ROS) verfügbar. Dieses Betriebssystem für Roboter ermöglicht, aufgrund seiner modularen Struktur für Treiber, Algorithmen und Schnittstellen, das sichere und effektive Kombinieren von verschiedenen Sensoren und Algorithmen.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines ROS-basierten MMS, das auf dem Grundkonzept des MMS von KELLER (2015) basiert, vorgestellt und untersucht. Neben der Einord-

nung von MMS und Robotern in Bezug auf aktuelle geodätische Entwicklungen werden elementare Module und das Konzept des HCU_ROS MMS vorgestellt. Untersuchungen zur Erstellung von Stadtmodellen mit dem HCU_ROS MMS unter Praxisbedingungen in einem Prüfgelände in der Hamburger HafenCity werden näher betrachtet.

2 Mobile Mapping Systeme und Messroboter

Roboter und MMS können mit der zunehmenden Automatisierung und Autonomisierung von technischen Instrumenten immer schwerer voneinander abgegrenzt werden. Roboter erfassen komplexe und ausgedehnte Umgebungen mit verschiedenen Sensoren, leiten geometrische Modelle für ihre Aktionen aus diesen Messwerten ab und führen diese (autonom) durch. Eine elementare Aufgabe von Robotern ist somit auch das dreidimensionale Erfassen von Szenen. Eine Vermessung mit einem MMS hat ebenfalls dieses Ziel. Messwerte zur Positionierung des MMS und zur Erfassung der Umgebung werden registriert und geometrische Modelle werden abgeleitet. Zentrale Anforderungen an diese, auf Vermessungsdaten basierenden Modelle, sind im Allgemeinen eine hohe Genauigkeit, eine große Zuverlässigkeit und eine vollständige Umgebungs- bzw. Objekterfassung. Die Nutzung von Messwerten oder Modellen zur Ausführung darauf aufbauender Aktionen hat in diesem Fall eine geringe Bedeutung.

Die zunehmende Verschmelzung der Technologien von Robotern und MMS kann an folgenden Entwicklungen beobachtet werden. In KOCH (2018) wird ein Konzept eines Aufklärungsroboters dargestellt, der nach Naturkatastrophen ein Krisengebiet erfasst sowie Personen und gefährliche Objekte lokalisiert. Zudem muss der Roboter möglichst autonom durch ein unbekanntes Gebiet navigieren. Diese Anforderungen werden auch an einen MMS-Roboter zur Erkundung und Erfassung von archäologischen Fundstätten gerichtet, der im Rovina Projekt entwickelt und eingesetzt wird. Eine Erforschung von Fundstätten ist so möglich, ohne dass diese durch einen Menschen betreten werden müssen. Die Sensoren des MMS-Roboters werden hier zum einen für die selbständige Steuerung und Fortbewegung und zum anderen zur Erfassung der Fundstätte in Form eines dreidimensionalen Modells und Bildern genutzt (SERAFIN ET AL., 2016). Bei der Entwicklung eines Kanalmesswagens für die regelmäßige geometrisch-hochauflösende und genaue Erfassung von Regen- und Abwassersystemen, ist die hohe Qualität der Messdaten von besonderer Bedeutung, damit Beschädigungen sicher detektiert werden können. Anforderungen an eine autonome Steuerung beim Kanalmesswagen liegen, u.a. wegen des (ungefähr) bekannten Einsatzgebietes, nicht vor (WELTZIEN ET AL., 2018).

MMS werden nicht nur bei landgebundenen Anwendungen, sondern auch zu Wasser und in der Luft eingesetzt. Insbesondere UAVs sind seit einigen Jahren sehr populär als Träger für MMS (ELING ET AL., 2016). Neben diesen Messsystemen für den Außeneinsatz besteht ein hoher Bedarf an MMS, die in Gebäuden eingesetzt werden können. Anwendungen sind u.a. das Building Information Modeling (BIM) und die Nutzflächenermittlungen. Ein Erfassungssystem für Innenräume, das ebenfalls einen MMS-Roboter nutzt, wird bei BORRMANN ET AL. (2015) vorgestellt. Dieses kann sowohl als fahrendes System oder als getragenes System verwendet werden. Ein ähnliches System wird bei HESSE & VENNEGEERTS (2014) und HESSE ET AL. (2016) vorgestellt.

In Robotern, MMS-Robotern und MMS wird eine Kombination aus optischen, orientierungs- und entfernungs-bestimmenden Sensoren verwendet. Diese Sensoren werden additiv oder redundant eingesetzt. Beispiele für einen additiven Einsatz sind das Bestimmen einer Position und die Orientierung des MMS im Raum (Pose) mittels GNSS, Odometern und/oder inertialen Messsystemen. Kamera- und Laserscanningsysteme werden ausschließlich zur Umgebungserfassung verwendet (STERNBERG & SCHWIEGER, 2014). In der Robotik ist der redundante Ansatz, der heute in vielen Vermessungsanwendungen Einzug gehalten hat, populär. Algorithmen, die ein ganzheitliches Erfassen der Umgebung und ein Bestimmen der Pose vereinen, werden als SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) bezeichnet. Eine Übersicht und Beschreibung von üblichen SLAM-Verfahren wird in KOCH (2018) gegeben. Bei diesen Verfahren wird die Pose aus den Messungen der optischen Sensoren bestimmt und kann durch Messwerte von GNSS, Odometer und inertialem Messsystem ergänzt werden.

Die individuelle Anpassbarkeit eines MMS an die jeweilige Erfassungsaufgabe ist ein wichtiges Argument für den Einsatz eines modernen, modularen MMS. Um die flexible Adaptierung des Systems zu realisieren, kann beispielsweise die von der Open-Source Umgebung (ROS) bereitgestellte Software zur Multisensorkommunikation genutzt werden. WIEMANN ET AL. (2018) stellen einen Messroboter vor, der das ROS zur Kombination eines High End Laserscanners und einer Hyperspektralkamera mit der Trägerplattform nutzt. Die Messdaten dieses Systems werden während der Messung analysiert und können neben der hochgenauen hyperspektralen Umgebungserfassung zur Pfad- und Aufnahmestandpunktplanung verwendet werden.

Seit dem Jahr 2010 wird an der HafenCity Universität Hamburg (HCU) an der Entwicklung eines modularen MMS geforscht. Dieses MMS wird vorrangig zur Entwicklung von Algorithmen und neuen Sensorkombinationen eingesetzt (KELLER, 2015, STERNBERG ET AL., 2015). Ein Erfassen von Grundlagendaten für die Forschung und der Indoor-Navigation und der Methodenentwicklung ist mit dem MMS möglich. Aufgrund der Modularität und der an der HCU zur Verfügung stehenden low-cost und high-end Sensoren, stellt das MMS eine gute Grundlage für ein Forschungs-MMS mit ROS dar.

3 Robot Operating System

Das ROS, welches an der Stanford University im Jahre 2010 entwickelt wurde, stellt einen Rahmen für den Betrieb von Robotern dar. Das Projekt um ROS verfolgt das Ziel, ein einheitliches Dateien- und Kommunikationssystem für den Betrieb von Hardware und Algorithmen eines Roboters zur Verfügung zu stellen. Hierfür wird ein Rahmen bereitgestellt, der zum einen regelt welche Dateien und Parameter für eine Entwicklung eines Treibers oder eines Algorithmus vorhanden sein müssen und in welcher Form diese Dateien in einem ROS-Package gespeichert werden. Zum anderen wird ein zentrales Kommunikationssystem bereitgestellt, das die Kommunikation auf verschiedenen Wegen als Topic, Message, Service oder Bag zwischen den Packages ermöglicht. Jedes Package wird hierfür als ein Knoten (node) in einem Kommunikationsnetzwerk betrachtet, das durch einen zentralen Manager (roscore) verwaltet wird. Durch die Vorgaben vom ROS ist ein Austausch von Packages zwischen verschiedenen Entwicklern durch den ROS-Packagemanager möglich. Das ROS ist eine open-source Software und verdankt seine Popularität durch die Möglich-

keit des kooperativen Entwickelns von Packages in den Programmiersprachen C++, Python und Lisp. Packages der verschiedenen Programmiersprachen können gemeinsam in einem ROS Projekt verwendet werden (ROS Wiki, 2018).

Neben dem allgemeinen Rahmen der Interprozesskommunikation, den ROS vorgibt, werden Packages und Sammlungen von Packages (Stack) bereitgestellt, die ein Lösen von allgemeinen Aufgaben für den Betrieb eines Roboters erledigen. Insbesondere sei hier auf das Package *tf* zur Verwaltung von Koordinatensystemen und der Durchführung von Transformationen (FOOTE, 2013) sowie den Stack *common_msgs*, das den Aufbau von Datentypen regelt, hingewiesen, da diese auch für den Betrieb von MMS von besonderem Interesse sind (FOOTE, 2018).

Die Interprozesskommunikation in einem ROS-Projekt kann während einer laufenden Messfahrt aufgezeichnet und in einer Rosbag-Datei abgespeichert werden (FIELD ET AL. 2018). Jede Kommunikation zwischen Knoten wird mit einem Zeitstempel der Systemzeit versehen, so dass diese Aufzeichnung dazu verwendet werden kann, Änderungen an Packages oder dem gesamten ROS-Projekt zu testen, ohne dass die Hardware angeschlossen und eine neue Messfahrt durchgeführt werden muss. Der Einfluss von verschiedenen Parametern, Algorithmen oder Betriebsmodi kann so effizient untersucht werden.

4. HCU_ROS MMS

Der Aufbau und die Funktionsweise eines MMS gleichen in großen Teilen denen eines Roboters (s. Abschnitt 2), so dass das ROS zum Betrieb eines MMS verwendet werden kann. Insbesondere der einheitliche Standard zum Austausch von Messwerten und die Option, diese während der Aufnahme zu fusionieren, stellen einen erheblichen Vorteil gegenüber anderer MMS dar. Bei diesen standardmäßigen MMS werden individuelle Lösungen zum Datenaustausch verwendet oder eine Fusionierung ist nur nach dem Beenden der Aufnahme möglich. Ein weiterer Vorteil, den ROS bietet, ist, dass eine große Anzahl der aktuell am Markt verfügbaren Sensoren zur Navigation und Umgebungserfassung durch ROS-Packages abgebildet werden und in eigenen ROS-Projekten implementiert werden können. Vornehmlich sind Packages für Sensoren im unteren Preissegment verfügbar, die für die Entwicklung von Robotern von besonderem Interesse sind. Zunehmend sind diese low-cost Sensoren auch Gegenstand von Untersuchungen und Entwicklungen bei mobilen und automatischen Vermessungssystemen, so dass durch das ROS ein effektives Forschungs-MMS aufgebaut werden kann.

Klassische geodätische Sensoren (z. B. Tachymeter), hochwertige Sensoren zur Navigation (z. B. Ringlaser IMU) und hochgenaue Sensoren zur Umgebungserfassung sind aktuell meist nicht als öffentliche ROS-Packages verfügbar. Ihre Entwicklung und die Bereitstellung dieser Packages sind eine aktuelle Forschungsaufgabe für ein ROS-basiertes MMS. Neben der Entwicklung von Hardware-Packages liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Entwicklung, der Modifikation und der Implementierung von Algorithmen-Packages zur Verarbeitung der registrierten Messwerte. Forschungsziel ist es, ein ROS-Projekt zu entwickeln in dem high-end und low-cost Sensoren parallel und kombiniert betrieben werden können. Dieses ROS-Projekt ermöglicht eine direkte Untersuchung des Verhaltens von low-cost Sensoren in Kombination mit verschiedenen nachgeordneten Algorithmen-Packages. Für einen Funktionstest des HCU_ROS MMS wurden erste Hardware-Packages

für hochwertige Sensoren und Algorithmen-Packages entwickelt, diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

4.1 Hardware-Packages

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung der Hardware-Packages liegt auf den hochwertigen Sensorsystemen, wie Tachymeter (z. B. Leica MS 60), und dem Inertialmesssystem iMAR-iNAV RQH-1003, an dem Odometer und verschiedene Globale Navigation Satelliten System (GNSS) Empfänger angeschlossen und betrieben werden können. Die softwareseitige Implementierung von Leica Tachymetern, über die von Leica definierte GeoCom-Schnittstelle und das Einbinden der strategischen IMU, über das XIO-Protokoll, sind in diesem Zusammenhang umgesetzt. Packages zur Ansteuerung von verfügbaren low-cost Systemen sind über den ROS-Packagemanager in das HCU_ROS MMS implementiert und kompletieren das MMS. Die Abb. 1 zeigt alle zurzeit verfügbaren Sensoren für das HCU_ROS MMS.

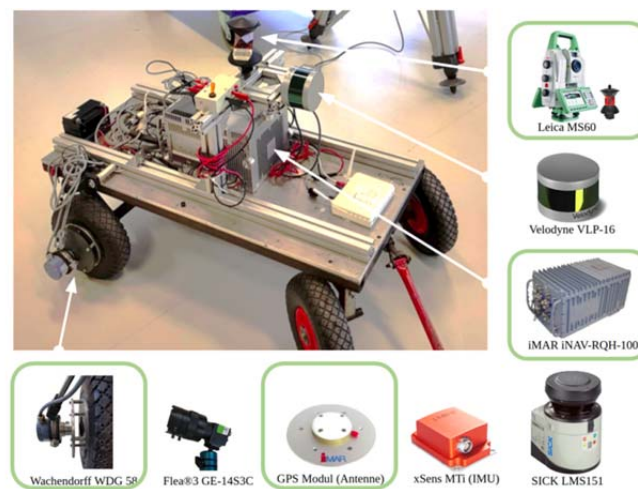


Abb. 1: Das HCU_ROS MMS auf einem Handwagen mit den implementierten Sensoren zur primären Positions- und Orientierungsbestimmung bzw. Umgebungserfassung. Für die umrandeten Sensoren wurden eigene Hardware-Packages entwickelt.

Die zentrale Funktion eines Hardware-Packages ist es, die originären Messwerte eines Sensors zu registrieren, diese in einen ROS-Datentyp zu überführen und in anderen Packages zur Verfügung zu stellen. Theoretisch ist der Aufbau eines Datentyps frei wählbar. Ein Quasi-Standard führt jedoch dazu, dass verschiedene Sensortypen mit gleichen Beobachtungsgrößen dem gleichen ROS-Datentyp zugeordnet werden. Neben den Messgrößen werden in einem ROS-Datentyp Informationen, wie ein Index oder ein Zeitstempel, in einem Header gespeichert. Für das HCU_ROS MMS wurden u. a. drei elementare Hardware-Packages für Tachymeter, Inertialmesssysteme und GNSS entwickelt.

4.1.1 Tachymeter-Package

Der Einsatz des Tachymeters bei einem Forschungs-MMS kann in zwei Formen erfolgen. Aufgrund seiner hohen und nahezu gleichbleibenden Positionsgenauigkeit kann das Ta-

chymeter nicht nur als Referenzsystem zur Überprüfung von anderen Trajektorien eingesetzt werden, sondern es können auch die Positionen oder Positionsunterschiede in Kombination mit anderen Sensoren zur Stützung der Trajektorie eines MMS eingesetzt werden. Hier bietet es sich an, eine Tachymetersteuerung zur Stützung der relativen und hochfrequenten Messwerte einer IMU in Form der Koppelnavigation zu implementieren, da das Instrument nur mit einer sehr geringen Messrate (hier etwa 3 Hz) misst.

Das entwickelte Package *tachymeter_geocom* realisiert mittels GeoCom-Abfragen zum einen, dass ein Prisma auf dem MMS verfolgt wird und zum anderen, dass Polarkoordinaten gemessen werden. Innerhalb des Packages werden diese in dreidimensionale kartesische Koordinaten im Tachymeterkoordinatensystem überführt, da Polarkoordinaten nicht als vordefinierter ROS-Datentyp vorhanden sind. Die kartesischen Koordinaten werden als ROS-Datentyp *PointStamped* anderen Packages zur Verfügung gestellt. Das Bereitstellen einer Package-Ausgabe in einem bekannten ROS-Datentyp hat den Vorteil, dass eine Übertragung und Weiterverarbeitung mit anderen Packages ohne weitere Anpassungen möglich ist. In der aktuellen Testkonfiguration des HCU_ROS MMS liefert das Package für das Tachymeter die absolute Position der mobilen Messplattform, so dass diese auch durch eine GNSS-Position vom selben Datentyp *PointStamped* des GNSS-Packages substituiert werden kann.

4.1.2 iMAR-iNAV RQH-1003 IMU

Die Messwerte der iNAV RQH-1003 IMU werden im HCU_ROS MMS auf verschiedene Art und Weise verwendet. Die Orientierung der Messplattform sowie der darauf befindlichen Laserscanner und Kamerasysteme zu einer initialen Ausrichtung des Messsystems, wird durch die Messwerte der IMU bestimmt. Die Orientierungs- und Beschleunigungsmessungen können zudem zur Bestimmung der Trajektorien mittels Koppelnavigation an ein geeignetes Algorithmus-Package übertragen werden. Gleichzeitig können die hochgenauen und stabilen Messwerte der IMU zum direkten Vergleich von low-cost IMUs verwendet werden. In der aktuellen Testkonfiguration wird die Orientierungsänderung ausschließlich zur Ausrichtung des Laserscanners verwendet.

Eine native Unterstützung der IMU für ROS lag nicht vor, so dass auf Grundlage eines C++-Quellcodes ein ROS-Package entwickelt wurde. Dieses Package stellt die Messwerte im Datentyp *sensor_msgs/IMU Message* bereit, der durch eine Vielzahl von vorhandenen Packages unterstützt wird. Die iNAV RQH-1003 IMU bietet zudem Schnittstellen für weitere Sensoren, wie Odometer und GNSS, die im Rahmen des HCU_ROS MMS sukzessiv implementiert werden.

4.1.3 GNSS

Eine Erweiterung des Aufnahmegebiets im Außenbereich wird durch das Package *GNSS* erzielt, welches die Messwerte eines Zwei-Frequenz GNSS-Moduls registriert. Über die in ROS vorhanden Packages werden die gemessenen geografischen Koordinaten in UTM-Koordinaten vom ROS-Datentyp *PointStamped* überführt. Diese Ausgabedaten geben die absolute Position der Messplattform mit einer ähnlichen Messrate wie das Tachymeter-Package wieder. Die Positionen sind für den Einsatz innerhalb eines MMS zumindest durch die IMU (z. B. Kalman-Filterung) zu stützen oder können einem vorhandenen Package zur Trajektorienberechnung aus dem ROS-Packagemanager übergeben werden. Das verwendete

te Novatel OEM 2 GNSS kann über eine Schnittstelle an die iNAV RQH-1003 IMU angeschlossen werden. Die Entwicklung des GNSS- Packages basiert, wie auch das der IMU, auf Grundlage des vom Hersteller bereitgestellten C++-Quellcodes.

4.2 Algorithmen Packages

Die weitere Verarbeitung der gemessenen Werte zu Trajektorien und zu orientierten Punktwolken erfolgt, wie bei den Hardware-Abstraktionen, über verschiedene Packages, die einen Knoten im ROS-Kommunikationsnetzwerk darstellen. Jedes Package bzw. jeder Knoten übernimmt eine individuelle Aufgabe, wie z. B. die Filterung von Daten. Knoten können, über die angemeldeten ROS-Topics, auf alle systemweit bereitgestellten Daten zugreifen. Innerhalb dieser werden die Daten verarbeitet und über ein neues ROS-Topic anderen Knoten zur Verfügung gestellt. Für den Betrieb eines MMS mit ROS sind Transformationen zwischen mehreren Koordinatensystemen (Frames) eine zentrale Aufgabe, die mit Hilfe von verschiedenen Packages umgesetzt werden (Abb. 2). Jede Transformation wird durch einen Knoten mit einem individuellen Parameterset (z. B. Hebelarm und Rotationen), das durch eine Labor- oder Feldkalibrierung bestimmt wird, durchgeführt.

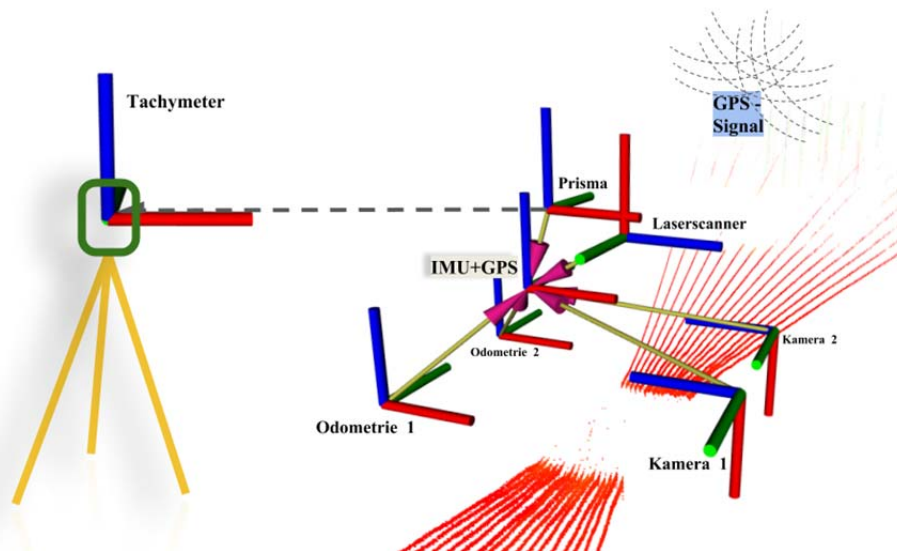


Abb. 2: Abhängigkeit der zueinander ausgerichteten Koordinatensysteme, der verwendeten Sensoren und Systeme sowie eines referenzierten Laserscans aus 16 Profillinien.

Neben den Algorithmen-Packages, die für die Datenverarbeitung verwendet werden, stellt ROS Packages bereit, die eine Visualisierung der Messdaten ermöglichen und so bereits im Feld eine Kontrolle der Messergebnisse zulassen.

Eine Vielzahl von Algorithmen, vorwiegend aus dem Bereich der Roboterforschung, steht über den ROS-Packagemanager zur Verfügung. Die Entwicklung eines eigenen Quellcodes, die Erweiterung von bestehenden Quellcodes oder das Einbinden von Projekten anderer Entwickler vereinfachen den Aufbau eines individuellen ROS-Projekts.

5 Untersuchungen zum Erstellen von Stadtmodellen

Vermessungen mit MMS stellen häufig die Grundlage für digitale mehrdimensionale Modelle dar. Anwendung finden diese Modelle in der Vermessung des Straßenkörpers (KNOSPE & RICHTER, 2018, HESSE ET AL., 2016) sowie bei der Erfassung von technischen Anlagen (WELTZIEN ET AL., 2018), einzelnen Bauwerken oder Gebieten von bis zu mehreren Quadratkilometern Ausmaß (GRÄFE, 2018). Klassische Anwendungen der Ingenieurvermessung, wie Überwachungsmessungen, das Erstellen von datierten Planungs- und Simulationsdaten oder Grundlagendaten für BIM, stellen hohe Anforderungen an die geometrische Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messdaten. Liegt der Fokus der Anwendung auf einer reinen Visualisierung der erfassten Objekte, so ist eine geometrische Genauigkeitsanforderung von einigen Dezimetern ausreichend. Zu diesen Anwendungen können Visualisierungen zur Entscheidungsfindung oder Klärung von Forschungsfragen durch Virtuelle-Realität-Systeme (LÜTJENS ET AL., 2018) und Grundlagendaten für Produkte der Tourismusförderung sowie der Computerspielentwicklung zählen. Um den wachsenden Bedarf an dreidimensionalen Daten effektiv bedienen zu können, sind MMS mit Sensoren von low-cost bis high-end ein wichtiges Werkzeug, das den jeweiligen Aufgaben entsprechend konfiguriert und evaluiert werden muss. Das HCU_ROS MMS ist aufgrund seines modularen Aufbaus ein geeignetes MMS für Untersuchungen zu variierenden Sensorkonfigurationen. Um diese Untersuchungen unter realen Messbedingungen durchführen zu können, wurde in der Hamburger HafenCity ein Prüfgelände im urbanen Raum eingerichtet. Das Ergebnis einer ersten Messfahrt mit dem HCU_ROS MMS soll im Folgenden kurz vorgestellt werden. Die hier verwendete Sensorkonfiguration besteht aus einer Kombination von hochwertigen Sensoren zur Trajektorienbestimmung und einem low-cost Zeilenlaserscanner.

5.1 Prüfgelände für MMS

Die Grundlage des Prüfgeländes stellt ein etwa 300 m² großer Platz mit angrenzenden Hochhäusern von sechs bis 14 Stockwerken dar. Die Fassaden der Bauwerke sind teilweise verglast und bestehen zu großen Teilen aus Metallelementen und Betonoberflächen in weißer und schwarzer Farbe. Zur Elbeseite (Süden) ist der Platz unverbaut und ermöglicht einen guten GNSS Empfang. Andere Bereiche des Prüfgeländes liegen in tiefen Häuserschluchten. Auf dem Platz sind ebene, gepflasterte Wege und ein kleiner Erdhügel angelegt, der einen erhöhten Standpunkt für ein Tachymeter und andere Referenzmesssysteme ermöglicht. Bäume, Laternen und rechteckige Betonbänke können als Prüf- und Kalibrierungsobjekte verwendet werden und stellen kleine Sichthindernisse dar (Abb. 3).

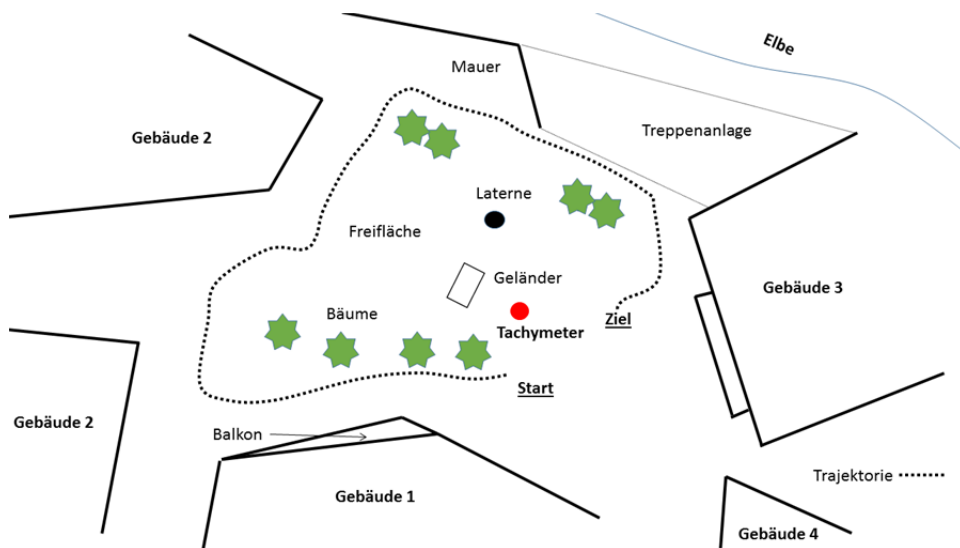


Abb. 3: Prüfgelände für MMS im urbanen Raum.

Ein auf hochauflösenden terrestrischen Laserscans basierendes Referenzmodell des gesamten Platzes wird zur Evaluierung der Punktwolke, die mit dem MMS erzeugt wird, herangezogen. Einzelne vorhandene Objekte (Fassaden, Bänke, Laternen, etc.) sind durch tachymetrische Vermessung im lokalen Koordinatensystem des Prüfgeländes koordinatenmäßig bestimmt. Für zukünftige Untersuchungen des MMS mit dem entwickelten GNSS-Package wird das Prüfgelände zusätzlich im WGS84 Koordinatensystem (UTM) gelagert.

5.2 Aufnahmefahrten im Prüfgelände

Das HCU_ROS MMS ist so konfiguriert, dass im Feld ein Start über Launch-Dateien erfolgen kann. In diesen Launch-Dateien werden alle für die Aufnahme notwendigen Knoten und Kommunikationswege in der notwendigen Reihenfolge mit hinterlegten (Kalibrierungs-) Parametern gestartet. Ein Bestimmen der Parameter (Hebelarme und Rotationswinkel) zwischen einzelnen Sensorkoordinatensystemen erfolgte durch eine vorherige Laborkalibrierung. Anhand der Visualisierung mit dem Package *rviz* kann die Aufnahme im Feld überwacht werden (Abb. 4). Zur Speicherung der Messwerte wird zwischen zwei Aufnahmemodi unterschieden. Zum einen können die orientierten Punktwolken oder einzelne andere gemessene Werte gespeichert werden. Zum anderen kann der gesamte Kommunikationsprozess zu allen aktiven Topics des ROS-Projektes gespeichert werden und für die Weiterentwicklung des Vermessungssystems verwendet werden.

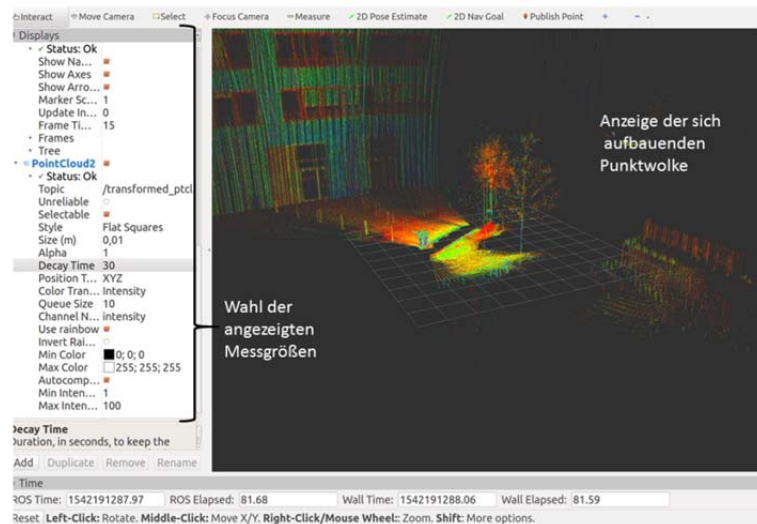


Abb. 4: Kontrollanzeigen für Aufnahme­größen während der Aufnahme mit dem MMS in ROS-Package rviz.

Die Aufnahme­fahrt im Prüf­gelände verfolgt das Ziel eine Punktwolke bereitzustellen, auf deren Grundlage ein dreidimensionales Stadtmodell erstellt werden kann. Der Fokus während der Aufnahme liegt im Test des Zusammenwirkens der Sensoren unter realen Messbedingungen in Gebieten, in denen kurvige Trajektorien von mehreren hundert Metern abgefahren werden. Des Weiteren soll getestet werden, ob Sichtbehinderung durch kleinere Objekte zum Abriss der Verbindung zwischen Messplattform und Tachymeter führen.

Der Weg der Aufnahme­fahrt wurde so gewählt, dass kleinere Objekte von Nahem und aus der Ferne erfasst wurden. Objekte und Fassaden wurden in verschiedenen Aufnahme­winkeln erfasst. Bei der Aufzeichnung wurde jede Punktwolke (bestehend aus 16 Profillinien) zu jedem Trajektorienpunkt als einzelne Datei gespeichert, so dass eine abschnittsweise Untersuchung möglich ist.

5.3 Datenauswertungen

Die einzelnen orientierten Punktwolken werden, nach einer visuellen Prüfung auf grobe Fehler, zu einer gesamten Punktwolke vereinigt. Hierbei kann beobachtet werden, dass grob falsch orientierte Punktwolken bei starken Kurven auftreten. Dies ist auf die geringe Messrate bei der Bestimmung der absoluten Position mit dem Tachymeter und dem zurzeit verwendeten Fusions-Algorithmus zurückzuführen. Abweichungen von bis 500 mm treten in diesen Bereichen auf. In Bereichen in denen eine gerade Trajektorie abgefahren wird, die Abstände zum Aufnahmeobjekt kürzer 20 m sind und der Messstrahl des Laserscanners nahe 100 gon zum Aufnahmeobjekt auftrifft (optimale Aufnahmebedingungen), sind die Abweichungen zur Referenzpunktwolke kleiner 60 mm (~ 50 % alle Punkte) (Abb. 5). Auf Grundlage dieser Punktwolke, die in weniger als 15 Minuten (inkl. Aufbau, Messungen und Prüfung der Messwerte im Feld) erstellt wurde, ist eine grobe Modellierung oder Oberflächenrekonstruktion für Visualisierungsanwendungen möglich.

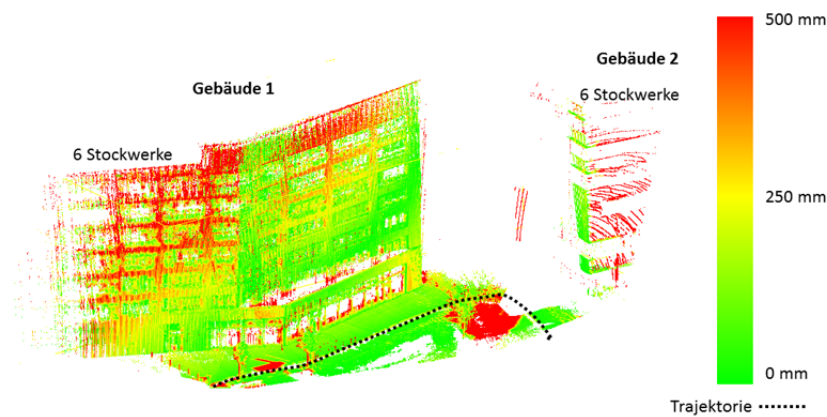


Abb. 5: Vergleich der Punktwolke des MMS mit terrestrischem Referenzscan.

Die Größe jeder einzelnen Punktwolke im pcd-Format beträgt etwa 1 MB, so dass eine Punktwolke, bestehend aus etwa 1500 einzelnen Punktwolken (etwa 1,5 GB), das gesamte Prüfgebiet darstellt. Punktwolken dieser Größe können mit aktuellen Computern effizient ausgewertet und für weitere Modellierungsarbeiten verwendet werden.

5.4 Weiterentwicklungen des HCU_ROS MMS

Die Untersuchung des HCU_ROS MMS am Anwendungsbeispiel Stadtmodelle hat gezeigt, dass mit einem ROS-basierten MMS effizient ein kleines Stadtmodell mit einer geringen Auflösung und Genauigkeit erstellt werden kann. Insbesondere die schnelle Aufnahmezeit und die noch ausreichende Qualität der Punktwolken, die mit einem low-cost Laserscanner erzeugt werden können zeigen, dass ROS ein geeignetes System für den Betrieb einer MMS ist. Für einen produktiven Einsatz des MMS ist aber eine Weiterentwicklung in zwei Themenfeldern zwingend notwendig.

Das erste Themenfeld ist die Entwicklung weiterer Hardware-Packages. Hierzu zählt ein Praxistest des entwickelten GNSS-Packages. Durch den Einsatz von GNSS-Empfängern vergrößert sich das mögliche Aufnahmegebiet. Zusätzlich werden eine bessere Synchronisation der Sensoren und ein Messen im globalen Koordinatensystem ohne zusätzliche Transformationen möglich. Ein zweiter Punkt ist die Entwicklung von Packages für geodätische Laserscanner. Die aktuelle Qualität der Punktwolke ist maßgeblich aufgrund des verwendeten low-cost Laserscanners gering. Hierfür sind alternative Packages für Laserscanner und Kamerasysteme zu entwickeln.

Das zweite Themenfeld ist die Entwicklung von Fusionsalgorithmen, die in der Geodäsie übliche Messgrößen verarbeiten und den Eigenschaften der hochwertigen Sensoren angepasst sind. Weitere Aufgaben in diesem Zusammenhang sind Untersuchungen der Laufzeiten von ROS-Topic (Datenübertragung) und die Entwicklung von Methoden der softwareseitigen Synchronisation bei variierenden Leistungen des Aufnahmecomputers.

6 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte modulare und ROS-basierte MMS stellt eine Grundlage dar für das produktive Erstellen von hochwertigen dreidimensionalen Punktwolken und zur Untersuchung von verschiedenen Sensoren bei Mobile-Mapping-Anwendungen. Aufgrund des klaren Rahmens, den das ROS für Packages, Knoten und Kommunikationswegen vorgibt, ist eine sichere Datenübertragung zwischen verschiedenen Entwicklungen, die als eigenständige und unabhängige Packages in ein ROS-Projekt eingebracht werden, sichergestellt. Eigene ROS-Projekte werden durch die Vielzahl an verfügbaren Algorithmen und Hardware-Abstraktionen des ROS-Packagemanagers erleichtert und beschleunigt.

Packages für hochwertige Sensoren, die bei geodätischen Erfassungssystemen eingesetzt werden, stehen aktuell nur in einem geringen Umfang zur Verfügung und stellen einen Schwerpunkt von weiteren Entwicklungen am HCU_ROS MMS dar. Neben der Entwicklung von Hardware-Packages, hat sich am Beispiel der Testmessungen zur Erstellung von Stadtmodellen gezeigt, dass ein weiterer Schwerpunkt in der Entwicklung von Algorithmen-Packages liegen wird. Packages zur Datenfilterung, -fusion und -synchronisation müssen individuell für die eingesetzten Sensoren angepasst werden.

Die bisher entwickelten Packages für die Sensoren und die Datenverarbeitung stellen zusammen mit dem Prüfgelände eine Grundlage für die effektive Weiterentwicklung des HCU_ROS MMS dar.

Literatur

- BORRMANN, D., HESS, R., ECK, D., NÜCHTER, A., SCHILLING, K. (2015): Robotic Mapping of Cultural Heritage Sites. Proceedings of the 6th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2015: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Avila, Spain.
- ELING, C., KLINGBEIL, L. & KUHLMANN, H. (2016): Warum UAVs und warum jetzt?, UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar in Bonn, Wißner-Verlag.
- FIELD, T., LEIBS, J., & BOWMAN, J. (2018): Rosbag-ROS Wiki.: <http://wiki.ros.org/rosbag>, Besucht am 14.11.2018.
- FOOTE, T. (2013): tf: The transform library. Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), International Conference on Technologies for Practical Robot Applications.
- FOOTE, T (2018): geometry_msgs ROS Wiki, http://wiki.ros.org/geometry_msgs. Besucht am 14.11 2018.
- GRÄFE, G. (2018): Hochgenaue Qualitätssicherung für Trajektorien und deren Anwendung in Projekten der kinematischen Ingenieurvermessung, Multisensortechnologie – Low-Cost Sensoren im Verbund Beiträge zum 176. DVW-Seminar am 13. und 14. September 2018 in Hamburg, Wißner-Verlag.

- HESSE, C. & VENNEGEERTS, H. (2014): Referenzierung kinematischer Laserscansysteme mit IMU und Tachymeter, Multi-Sensor-Systeme - Bewegte Zukunft, Beiträge zum 138. DVW-Seminar am 18. und 19. September 2014 in Hamburg, Wißner-Verlag.
- HESSE, C., CIESLIK, B. & WELTZIEN, K. (2016): Hochpräzise Bestandsvermessung des A7 Elbtunnels, Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016, Wichmann, VDE Verlag GmbH.
- KELLER, F. (2015): Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden, Dissertation, HafenCity Universität Hamburg, Shaker Verlag.
- KOCH, R (2018): Sensor Fusion for Precise Mapping of Transparent and Specular Reflective Objects, Dissertation, Schriftenreihe Würzburger Forschungsberichte in Robotik und Telematik, Band 16, Würzburg Universität Würzburg.
- KNOSPE, F. & RICHTER, R. (2018): Erfassung, Analyse und Auswertung mobiler Multisensoren im Straßenraum: Ein Erfahrungsbericht, Multisensortechnologie – Low-Cost Sensoren im Verbund Beiträge zum 176. DVW-Seminar am 13. und 14. September 2018 in Hamburg, Wißner-Verlag.
- LÜTJENS, M., KERSTEN, TH., DORSCHHEL, B., TSCHIRSCHWITZ, F., (2018): Virtual reality in hydrography - Immersive visualisation of the Arctic Clyde Inlet (Canada) using bathymetric and terrestrial data. Hydrographische Nachrichten - Journal of Applied Hydrography, HN 111.
- ROS WIKI (2018): <http://wiki.ros.org/>, Open Source Robotics Foundation. Besucht am 14.11 2018.
- SCHWIEGER, V. & STERNBERG, H. (2014): Multi-Sensor-Systeme in der Ingenieurgeodäsie - Grundlagen und Überblick, Multi-Sensor-Systeme - Bewegte Zukunft, Beiträge zum 138. DVW-Seminar am 18. und 19. September 2014 in Hamburg, Wißner-Verlag.
- SERAFIN, J., DI CICCO, M., BONANNI, T. M., GRISETTI, G., IOCCHI, L., NARDI, D., STACHNISS C. & ZIPAR, V. A. (2016): Robots for Exploration, Digital Preservation and Visualization of Archeological Sites, Artificial Intelligence for Cultural Heritage.
- STERNBERG, H., KELLER, F., LEITZ, S., KAGERAH, S., THIE, G. (2015): Aktuelle Entwicklungen des HCU 'Mobile Mapping Systems' und dessen Einsatz in der Forschung und in der Lehre, 18. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Österreich, 08.-14. Februar 2015, Wichmann, VDE Verlag GmbH.
- WELTZIEN, K., WILLEMSSEN, T., SARETZKI, A., HILPERT, M., & HESSE, C. (2018): Aufbau eines funkferngesteuerten Messsystems zur dreidimensionalen Erfassung enger tunnelförmiger Räum. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018, Wichmann, VDE Verlag GmbH.
- WIEMANN, T., HEIDEN, C., DIEDERICHSEN, R., PÜTZ, S., & HERZBERG, J. (2018): Erzeugung hyperspektraler Punktwolken auf einem mobilen Roboter. Photogrammetrie, Laserscanning ,Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018, Wichmann, VDE Verlag GmbH.