

Robot Operating System zur Steuerung eines modularen Mobile-Mapping-Systems – Aufbau, Validierung und Anwendungen

ROS for Controlling a Modular MMS – Setup, Validation and Applications

Finn Linzer, Eike Barnefske, Harald Sternberg

Die Vermessung von komplexen und großräumigen Objekten wird effizient und effektiv mit Mobile-Mapping-Systemen (MMS) durchgeführt. MMS sind gewöhnlich für spezielle Vermessungsaufgaben entwickelt und können nur mit erheblichem Aufwand umgebaut werden. Ein modulares MMS dagegen kann mit geringem Aufwand an sich verändernde Vermessungsaufgaben angepasst sowie zur Untersuchung von verschiedenen Sensoren und neuen Algorithmen verwendet werden. Viele Sensoren eines MMS sind ebenfalls in Robotern verbaut und dienen diesen zur Umgebungserfassung. Das Robot Operating System (ROS) ist eine Open-Source-Umgebung zur Steuerung von Robotern. Es wird durch eine modulare Struktur aufgebaut, daher sind verschiedene Sensoren und Algorithmen effizient miteinander kombinierbar. Die ROS-Umgebung sieht vor, dass Sensortreiber und Auswertelgorithmen als einzelne Aufgaben jeweils in Packages implementiert werden. Eigens entwickelt oder von anderen Entwicklern bereitgestellt, können diese effektiv in die eigene ROS-Umgebung implementiert werden. Packages verfügen zudem über einheitliche Datenschnittstellen, sodass alle Informationen zwischen den Packages ausgetauscht und verarbeitet werden können. Das Konzept und die Umsetzung für das modulare HCU_ROS-MMS werden beschrieben und diskutiert. Die Ergebnisse von drei Untersuchungen des HCU_ROS-MMS-Konzepts werden vorgestellt.

Schlüsselwörter: Robot Operating System, Mobiles Mapping-System, 3D-Punktwolken, ROS-Packages, In- und Outdooruntersuchungen

The surveying of complex and large-scale objects is carried out efficiently, effectively and safely with Mobile Mapping Systems (MMS). MMS are usually developed for special surveying applications and can only be modified with high effort. A modular MMS, on the other hand, can be adapted to changing surveying applications with little effort and can also be used to investigate different sensors and new algorithms. Many sensors of a MMS are also installed in robots and serve them for environmental registration. The Robot Operating System (ROS) is an open-source environment for controlling robots. It is designed with a modular structure, so different sensors and algorithms can be efficiently combined. The ROS environment allows to developed sensor drivers, implementations and evaluation algorithms as individual tasks (packages). In-house developed or provided by other developers, these packages can be effectively implemented into the individual ROS environment. All Packages provide a uniform data interface to exchange and process information. The concept and implementation for the modular HCU_ROS MMS is described and discussed in this paper. The results of three investigations of the HCU_ROS MMS concept are presented.

Keywords: Robot Operating System, Mobile Mapping System, 3D Point Clouds, ROS Packages, In- and Outdoor Investigations

1 EINLEITUNG

Moderne Vermessungssysteme bestehen nicht mehr ausschließlich aus einem Sensor zur Erfassung einer Objektgeometrie oder zur Bestimmung einer Position. Vielmehr sind diese Vermessungssysteme eine Kombination aus einer Vielzahl von Sensoren, die eine komplexe Umwelt erfassen. Sensoren, die kombiniert in der Geodäsie Anwendung finden, sind LIDAR-, Kamera, Distanz- und Richtungsmesssysteme sowie das GNSS und Odometer. Eine Kombination aus verschiedenen Sensoren oder Systemen wird als Multisensorsystem (MSS) bezeichnet. MSS in fest verbauter Form werden beispielsweise zur Bauwerksüberwachung, als tragbare Systeme in der Form eines Tachymeters oder als dynamisch messendes System in Form von Mobile-Mapping-Systemen (MMS) eingesetzt /Schwieger & Sternberg 2014/. Roboter nutzen dieselben Sensoren wie ein MMS zur Umgebungserfassung, eigenen Positionsberechnung, zum Path Planning und zur Bewegungssteuerung.

Das Robot Operating System (ROS) ist eine Open-Source-Umgebung zur Steuerung von Robotern mit verschiedenen Kombinationen von Sensoren und Algorithmen. In dieser Arbeit werden viele Sensoren des von /Keller 2015/ entwickelten MMS verwendet. Die Struktur der ROS-Umgebung ermöglicht, Treiber und Algorithmen als einzelne Packages zu definieren und zu implementieren. Diese Packages können isoliert, je nach Aufgabenstellung des MMS, abgerufen werden. Eine Analyse von einzelnen Hardwarekomponenten des HCU_ROS-MMS und verschiedener Algorithmen ist so möglich. Insbesondere die einheitliche Struktur der Datenschnittstellen und die gegebene Speicherfunktion für Messdaten, mit einem systemweiten Zeitstempel, vereinfachen die Entwicklung und Nutzung des HCU_ROS-MMS. Aufgrund der systemnahen Programmierung ist ROS performant und ein mittelklassiger Computer erfüllt die Systemanforderungen für den Einsatz. Die Prozesssicherheit ist jedoch nicht mit absoluter Zuverlässigkeit gegeben, daher ist ROS nicht echtzeitfähig. In zukünftigen Projekten ist es vorstellbar, dass ROS2 verwendet werden kann, um die Prozesssicherheit zu steigern, da dieses System echtzeitfähig ist /Gerkey 2018/.

Das HCU_ROS-MMS wird in der studentischen Ausbildung, zur Untersuchung der Messtechnik und zur effizienten Erzeugung von dreidimensionalen Punktwolken im Zusammenhang mit der Entwicklung von Auswertalgorithmen zur Punktwolkenklassifikation im Postprocessing eingesetzt.

Neben der Einordnung des ROS in aktuelle geodätische Entwicklungen wird die ROS-Umgebung beschrieben und Entwicklungen für das HCU_ROS-MMS werden vorgestellt. Die Entwicklung und die Kombination von Packages werden betrachtet sowie die Rosbag-Funktion näher beleuchtet. Erste Untersuchungen des HCU_ROS-MMS-Konzepts unter Laborbedingungen, in der Hamburger HafenCity und an der Hochbahnhaltestelle Landungsbrücken werden vorgestellt.

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 Roboter 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 gestellt, der im Rovina-Projekt /Serafin et al. 2016/ 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 selbstständige Steuerung und Fortbewegung und zum anderen zur Erfassung der Fundstätte in Form eines dreidimensionalen Modells und von Bildern genutzt. 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. Die Anforderungen an eine autonome Steuerung liegen beim Kanalmesswagen 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 UAV 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 entfernungsbestimmenden 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. Zur Umgebungserfassung werden Kamera- und Laserscanningsysteme

verwendet /Sternberg & Schwieger 2014/. Algorithmen, die ein ganzheitliches Erfassen der Umgebung und ein Bestimmen der Pose vereinigen, 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 MMS. Um eine flexible Adaptierung des Systems zu ermöglichen, kann beispielsweise die vom Robot Operating System (ROS, Open Source) bereitgestellte Software zur Multisensorkommunikation genutzt werden. /Vosselmann 2017/ stellt ein MMS zur Innenraumerfassung mit drei Profillaserscannern und einer Low-Cost-IMU vor, dessen Sensorkommunikation mit ROS erfolgt. Dieses tragbare Messsystem nutzt vorrangig Laserscanner für die Erfassung und Posenbestimmung in Kombination mit SLAM-Algorithmen. /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 Aufnahmezustandpunktplanung 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 in 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 System dar, das durch das ROS gesteuert werden kann (Abb. 1).

definierte Schnittstellen der Interprozesskommunikation sind die Vorteile des ROS für eine Vielzahl aktueller Forschungsanwendungen /Quigley et al. 2009/.

3.1 Modularer Aufbau

Ein modularer und adaptiver Aufbau wird in ROS durch den Einsatz von sogenannten Packages erreicht. In einem Package werden ähnliche Programmstrukturen sinnhaft zusammengefasst und verwaltet. Für den Aufbau eines MMS werden die Sensoren jeweils eigenständig integriert. ROS-Hardwaretreiber, als Packages modularisiert, abstrahieren die verwendete Hardware und erzeugte Messdaten bilden die Datengrundlage des ROS-Systems. In den Algorithmen-Packages werden die gemessenen Daten verarbeitet und hinsichtlich der geforderten Aufgabe strukturiert. Die Kommunikation zwischen den Packages (Interprozesskommunikation) wird über sogenannte ROS-Topics ermöglicht. ROS-Topics stellen die Ergebnisse der Packages zum Datenaustausch systemweit bereit.

Ein produktiver Prozess wird durch die Verkettung mehrerer Packages erzeugt. Mit der jeweils spezifischen Datenschnittstelle ausgestattet, manipulieren die in der Prozesskette nachfolgenden Algorithmen-Packages den einlaufenden Datenstrom, bis die gesamte Prozessstruktur des MMS durchlaufen ist. Durch die Verkettung von überschaubaren Packages können komplexe Aufgaben gelöst werden. ROS-Packages werden in den Programmiersprachen C++, Python oder Lisp programmiert.

Über den ROS-Paketmanager stellen Hersteller und Forscher Packages für bestimmte Treiber und Algorithmen bereit. Grundlegende und erweiterte Funktionen eines Systems können effizient angewendet werden, sodass eine Fokussierung auf eigentliche Forschungs- und Entwicklungsfragen gelegt werden kann. Für die Umsetzung eines MMS in ROS wurden, aufgrund des geodätischen Anspruchs, grundlegende Packages eigens entwickelt. Die

3 ROBOT OPERATING SYSTEM

ROS ist ein Open-Source-Framework, welches vornehmlich für Linux-Betriebssysteme entwickelt wurde und das Ziel hat, aufwendige Hard- und Softwarefunktionen (z. B. Filter oder Treiberimplementierungen) als Open-Source-Software zur Verfügung zu stellen. Das ROS stellt einen Rahmen und Schnittstellen für die Verwendung mit verschiedener Hardware und Algorithmen dar und kann für die einheitliche Datenverarbeitung von Messergebnissen eines MSS oder Roboters eingesetzt werden /ROS Wiki 2018/. Eine strukturierte Abbildung des komplexen Aufbaus eines MMS ist mit ROS möglich. Das Bewältigen von komplexen Aufgaben der Datenerfassung und -analyse in einer Struktur von Teilaufgaben, eine aktive Interessengemeinschaft zum ROS und klar

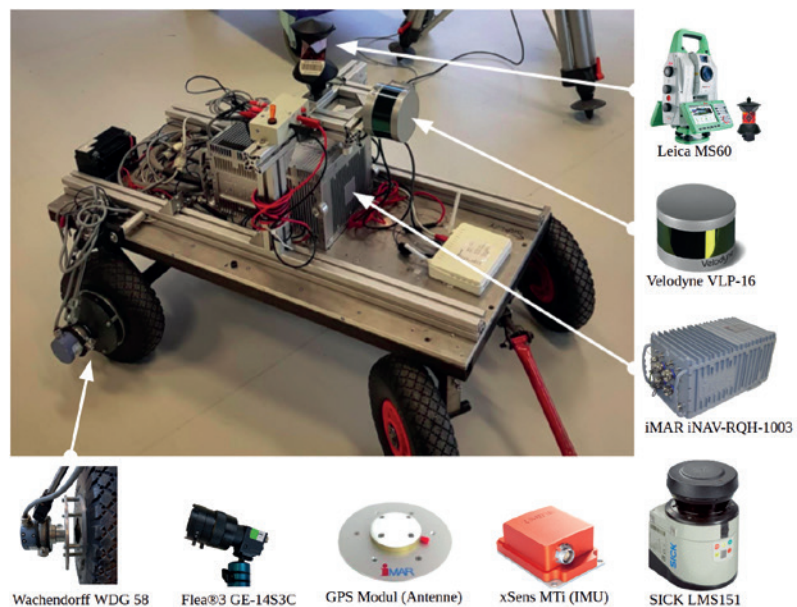


Abb. 1 | Das HCU_ROS-MMS auf einem Handwagen mit den implementierten Sensoren zur Positionsbestimmung, Orientierung und Umgebungserfassung

softwareseitige Implementierung von Leica-Tachymetern über die GeoCom-Schnittstelle und das Einbinden der strategischen IMU der Firma iMAR, über das XIO-Protokoll, wurden in diesem Zusammenhang umgesetzt. Die Vereinheitlichung der Sensor- und Datenschnittstellen ermöglicht es, dass die entwickelten Packages in anderen Projekten und Systemen integriert werden können. Ein Kernziel der Entwicklung des HCU_ROS-MMS ist der Austausch mit anderen Entwicklern der geodätischen Forschung.

3.2 Hardwareabstraktion

Die originären Messdaten eines Sensors werden innerhalb eines Packages vom Treiber erfasst und in einen geeigneten ROS-Datentyp überführt. Theoretisch ist die Struktur eines Datentyps frei wählbar, jedoch führt ein Quasi-Standard dazu, dass Sensortypen verschiedener Hersteller mit gleichen Beobachtungsgrößen dem gleichen ROS-Datentyp zugeordnet werden. Neben den definierten Beobachtungsgrößen werden von jedem ROS-Datentyp im Header Informationen, wie eine laufende Nummer, ein Zeitstempel und ein eventuell zugehöriges Referenzsystem (Frame) mitgeführt. Tab. 1 zeigt die passenden ROS-Datentypen für eine inertielle Messeinheit (IMU), das eingesetzte Tachymeter, den Zeilenlaserscanner, die verwendeten zwei Odometer und das Kamerasystem.

Die Position des MMS in einem absoluten Koordinatensystem kann direkt durch das Tracken des MMS mit einem Tachymeter ermittelt werden. Bei dieser Methode muss für eine Positionierung immer eine Sichtverbindung zwischen Tachymeter und MMS bestehen. Das MMS kann nur langsam bewegt werden, da die Aufzeichnungsrate des entwickelten Tachymeter-Packages aktuell nur 3 Hz beträgt. Eine schnellere Bewegung des MMS führt zu signifikanten Synchronisationsfehlern zwischen der Trajektorie und den Umgebungsdaten. Mit aktuellen Tachymetern ist eine Aufzeichnungsrate von 20 Hz möglich, welche aktuell mit dem HCU_ROS-MMS noch nicht erreicht werden kann. Diese Nachteile können durch einen kombinierten Einsatz eines Tachymeters als Stützung der relativen Messwerte einer IMU mithilfe der Koppelnavigation beseitigt werden. Ein zur IMU gehörendes Package abstrahiert mit einer solchen Berechnung die Positionsbestimmung, der beschreibende ROS-Datentyp bleibt derselbe (Geometry_msgs/PointStamped). Anknüpfende Prozesse werden vom Austauschen beider Packages nur hinsichtlich der

erreichbaren Qualität beeinflusst, denn die Schnittstellendefinition bleibt bestehen. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Ansätzen des MMS.

Leica-Tachymeter

Das Tachymeter ist im geodätischen Zusammenhang vielseitig einsetzbar. Die Stärken des Systems, etwa zur Validierung von Algorithmen zur Positionsbestimmung, sind im Bereich der Robotik jedoch weitgehend unbekannt. Daher steht in der ROS-Umgebung bisher kein geeignetes Package für das Einbinden eines Leica-Tachymeters zur Verfügung. Um Validierungen mit einem hohen Maß an Genauigkeit durchführen zu können, wurde eine eigene ROS-Implementation über die GeoCom-Schnittstelle realisiert (tachymeter_geocom). Der ROS-Datentyp sensor_msgs/PointStamped beschreibt neben dem Header eine 3D-Koordinate als Beobachtungsgröße, welche aus Richtungs- und Streckenmessungen bestimmt wird. Durch das Tracken eines auf dem MMS befindlichen Prismas kann der Bezug zwischen Messplattform und übergeordneten Koordinatensystem hergestellt werden. Zudem können relative Änderungen zwischen

Datentyp	Beobachtungsparameter	Abbildung des Messsystems
sensor_msgs/Imu Message std_msgs/Header header geometry_msgs/Quaternion orientation float64[9] orientation_covariance geometry_msgs/Vector3 angular_velocity float64[9] angular_velocity_covariance geometry_msgs/Vector3 linear_acceleration float64[9] linear_acceleration_covariance	header: [...] orientation: x: -0.0065678485147 y: -0.0207788581896 z: 0.112456790974 w: 0.993417622444 [...]	
geometry_msgs/PointStamped std_msgs/Header header geometry_msgs/Point point float64 x float64 y float64 z	header: [...] point: x: 1.93399705402 y: -0.343530434899 z: -0.913549388505	
sensor_msgs/PointCloud2 std_msgs/Header header uint32 height uint32 width sensor_msgs/PointField[] fields [...]	header: [...] height: 1 width: 16126 fields:[...] [...] data:[...]	
sensor_msgs/Twist std_msgs/Header header geometry_msgs/Vector3 linear float64 x float64 y float64 z geometry_msgs/Vector3 angular [...]	header: [...] linear: x: 0.69483762 y: 0.00000000 z: 0.00000000 angular: [...]	
sensor_msgs/Image std_msgs/Header header uint32 height uint32 width string encoding [...] uint8[] data	header: [...] height: 1288 width: 964 encoding:[...] [...] data:[...]	

Tab. 1 | Datentyp, Beobachtungsparameter und Abbildung von fünf im MMS implementierten Messsystemen

verschiedenen Punktmessungen bestimmt werden, sodass die kombinierte Auswertung mit anderen Sensoren des MMS durchgeführt werden kann.

IMU iNAV RQH-1003 von iMAR

Die Orientierung des MMS im Raum wird durch eine IMU bestimmt. Dafür werden mit der iNAV RQH-1003 hochpräzise und langzeitstabile Rotationswinkel und Beschleunigungen gemessen. Die iNAV RQH-1003 ist eine Ringlaser-IMU der strategischen Genauigkeitsklasse, daneben ist das System mit einem Zwei-Frequenz-GPS-Modul und einer Schnittstelle für die Erfassung der Wachendorff-Odometer ausgestattet. Systeme der Firma iMAR nutzen das XIO-Protokoll zum Datenaustausch zwischen den Sensorsystemen und der Arbeitsstation. Für diesen Sensortyp sieht der Hersteller keine native Unterstützung für ROS vor, da IMUs dieser Güteklasse nur selten für die klassische Aufgabenstellung eines Roboters benötigt werden. Damit die Sensorwerte in der ROS-Umgebung verfügbar gemacht werden können, wurde ein von iMAR bereitgestellter C++-Quellcode um den ROS-Layer erweitert.

Durch das Einbeziehen der GNSS-Funktionalitäten kann im Außenbereich eine Stützung der Position auch ohne Tachymeter erfolgen. Die Messwerte der Odometrie werden als Geschwindigkeit in Richtung der X-Achse ausgegeben und ergeben integriert die zurückgelegte Strecke. Durch die Montage von zwei gegenüberliegenden Odometern kann zusätzlich die Richtungsänderung bestimmt werden. Die Odometrie wird eingesetzt, um zusätzlich die Positionsbestimmung zu stützen oder auch um Näherungswerte für SLAM-Verfahren bereitzustellen.

Zeilenlaserscanner Velodyne VLP-16

Der Velodyne-Laserscanner ist ein Zeilenlaserscanner, der mit 16 Profilen innerhalb einer Umdrehung den umgebenden Raum abbildet. Die Profile sind fächerförmig angeordnet, sodass bei einer langsamen Fahrt mit dem MMS eine Überlappung der Profilbündel auftritt. Dieser Effekt ist insbesondere für das Testen von SLAM-Verfahren von besonderem Interesse. Für den Velodyne-Laserscanner wird ein geeignetes ROS-Package direkt vom Hersteller angeboten, sodass eine direkte Implementierung im MMS Projekt erfolgen kann.

Weitere Sensorik

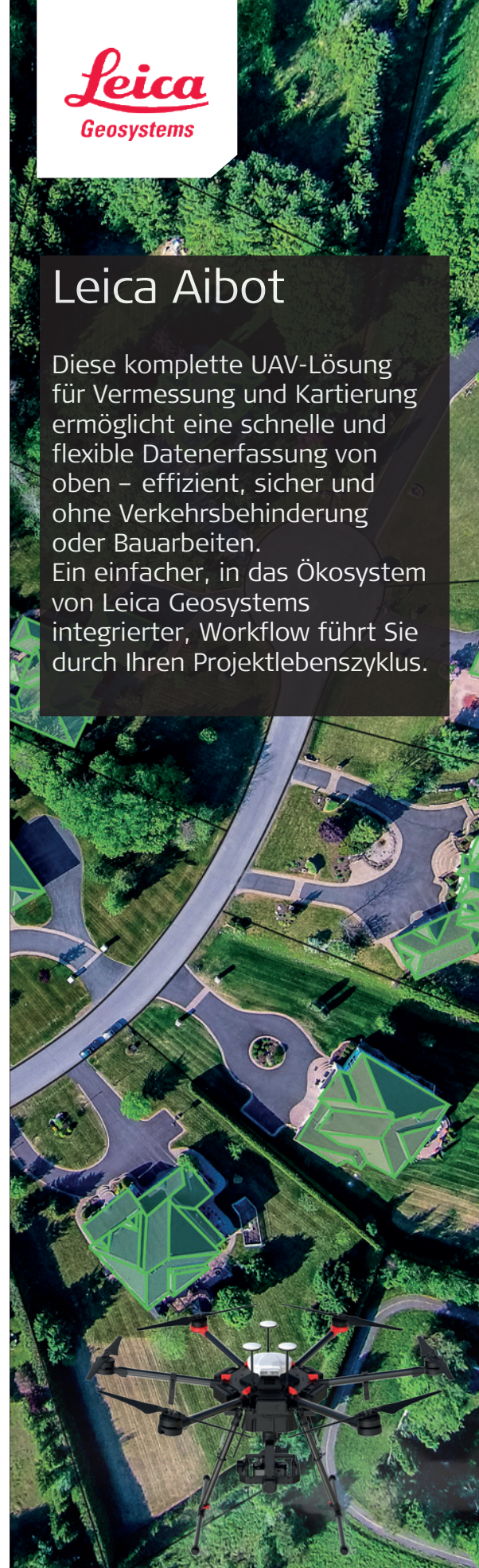
Eine oder mehrere Kameras können eingesetzt werden, um vorwärtsgerichtet visuelle Odometrie zu ermöglichen. Die Messergebnisse können dann mit der klassischen Odometrie oder der durch das Tachymeter bestimmten Trajektorie verglichen werden. Zusätzlich eignet sich der Einsatz von Kameras für die Kolorierung von Punktwolken. Diese und die weiteren abgebildeten Messsysteme aus *Abb. 1* zeigen auf, in welchem Umfang Messaufgaben mit ROS durchgeführt werden können. Bei der Auswertung der Daten entstehen Problemstellungen, bei denen sich die Ansprüche aus Robotik und Geodäsie überschneiden.

3.3 Algorithmen-Packages

Eine Vielzahl von Algorithmen, vorwiegend aus dem Bereich der Roboterforschung, steht über den ROS-Paketmanager zur Verfügung. Die eigene Quellcodeentwicklung, die Erweiterung von bestehenden Quellcodes oder das Einbinden von Projekten anderer Entwickler erleichtern die Möglichkeit, eine individuelle ROS-Umgebung aufzubauen.

Leica Aibot

Diese komplette UAV-Lösung für Vermessung und Kartierung ermöglicht eine schnelle und flexible Datenerfassung von oben – effizient, sicher und ohne Verkehrsbehinderung oder Bauarbeiten. Ein einfacher, in das Ökosystem von Leica Geosystems integrierter, Workflow führt Sie durch Ihren Projektlebenszyklus.



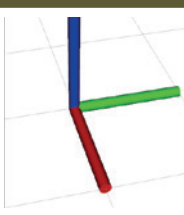
uav.leica-geosystems.com

INTELLIGENTE LUFTVERMESSUNG

Algorithmen, wie z. B. Filter und Transformationen, werden analog zur abstrahierten Hardware in Packages zusammengefasst und führen eine Teilaufgabe in der Datenverarbeitung und -auswertung durch. Packages können, über die abonnierten ROS-Topics, auf alle systemweit bereitgestellten Daten zugreifen. Innerhalb dieser werden die Daten verarbeitet und über ein neues ROS-Topic zur Verfügung gestellt. Beispielsweise werden für die Bestimmung der aktuellen Pose eines MMS die Position und die Lage im Raum aus dem jeweiligen ROS-Topic herangezogen und verarbeitet (Tab. 1). Die Pose wird als Frame (Koordinatensystem) zurückgegeben (Tab. 2), die Transformation der Punktwolke kann im Bezug dazu erfolgen. Erweiterungen der Datenverarbeitung sind in diesem Zusammenhang die Implementierung eines Filters, eine automatisierte Orientierung des Frames oder ein Algorithmus zur Validierung der Messergebnisse.

Neben der sich dynamisch ändernden Pose der MMS-Plattform, in Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem, gibt es weitere statische Frames der einzelnen verwendeten Messsensoren (Abb. 2). Die Bestimmung der geometrischen Offsets zwischen den einzelnen Koordinatenursprüngen der verwendeten Sensoren wird durch eine vorherige Kalibrierung, mit dem Leica-Absolute-Tracker 960 LR, bei einer Genauigkeit von < 0,5 mm durchgeführt. Für die Kalibrierung des MMS sind an der IMU Halterungen für 1,5-Zoll-CCR installiert, die den IMU-Koordinatenursprung definieren. Die Position des Prismas zum Tracken des MMS kann direkt bestimmt werden. Die Positionen der Odometer werden über die Hinterachse der Trägerplattform und die Gehäuse der Odometer bestimmt. Hierfür werden die Oberflächen mit dem Handscanner T-Scan erfasst und diskrete Punkte mit dem CCR bestimmt. Durch das Ableiten von Zylindern bzw. deren Hauptpunkten aus den Messergebnissen können die Hebelarme zum Koordinatenursprung bestimmt werden. Zur Bestimmung des Koordinatenursprungs eines Zeilenlaserscanners wird eine Kalibrierung mittels eines räumlichen Rückwärtsschnitts durchgeführt. Referenzflächen werden hierfür im Profil des Profillaserscanners installiert und mit diesem erfasst. Die Positionen der Referenzflächen werden in einem zweiten Schritt mit dem Handscanner im IMU-Koordinatensystem erfasst. Mittels einer Ausgleichung der beiden Punktwolken in einem Kalman-Filter werden die drei Hebelarme und die Drehwinkel bestimmt /Keller 2015/. Zur Kalibrierung der Kamera werden aktuell verschiedene Verfahren untersucht, die zum einen für die Kolorierung der Laserscannerpunktwolke und zum anderen für eine Stereobildauswertung geeignet sind.

Mit den bekannten Offsets und der Orientierung der einzelnen Frames zueinander können die gemessenen Punktwolken des Laserscanners in die übergeordneten Koordinatensysteme transfor-

Datentyp	Beobachtungsgrößen	Frame
<pre> geometry_msgs/Transform Message std_msgs/Header header string child_frame_id geometry_msgs/Vector3 translation float64 x float64 y float64 z geometry_msgs/Quaternion rotation float64 x float64 y float64 z float64 w </pre>	imu-Frame to velodyne-Frame At time 1537636233.373 – Translation: [0.043, 0.017, -0.085] – Rotation: [0.000, 0.707, 0.000, 0.707]	

Tab. 2 | Datentyp, Beobachtungsparameter und Abbildung eines ROS-Frames

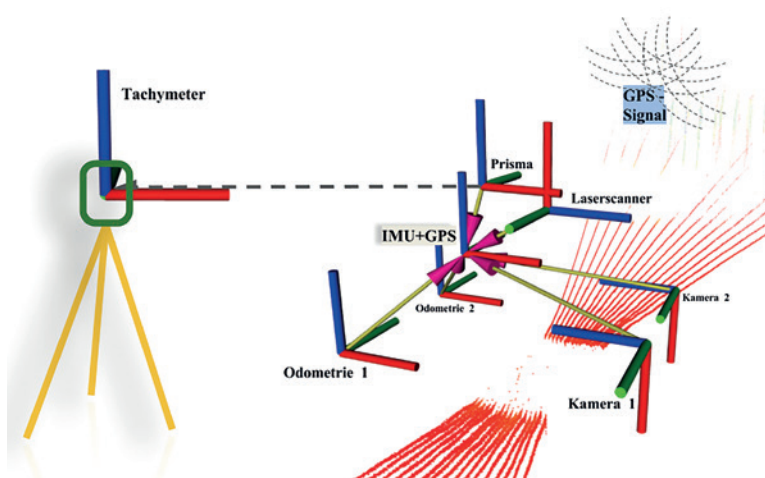


Abb. 2 | Abhängigkeit der zueinander ausgerichteten Koordinatensysteme, der verwendeten Sensoren und Systeme sowie ein referenzierter Laserscan aus 16 Profillinien

miert werden (Abb. 2). Auf der Plattform wird das Koordinatensystem der IMU als Plattformkoordinatensystem genutzt.

3.4 Parameter-Management & Launch-Files

In einem Launch-File werden alle in einem ROS-Projekt benötigten Packages, die Hardware-Abstraktionen, die verwendeten Algorithmen, Frames und dazu gehörenden Parameter zusammengefasst. Dies ermöglicht, das Messsystem in einer festgelegten, wiederholbaren Struktur zu starten. Das HCU_ROS-MMS kann so einfacher für Aufnahmen verwendet werden. Einzelne Packages können mit geringem Aufwand ausgetauscht werden, indem die beschriebene Prozedur angepasst wird. Über das Launch-File werden feste Parameter an einen systemweit verfügbaren Parameterserver übermittelt. Hierzu gehören zum Beispiel Schwellenwerte, aber auch Laufzeit- und Kalibrierwerte (Hebelarme und Drehwinkel).

3.5 Zeitabhängige Datenaufnahmen und Dateiwiedergabe

Die Interprozesskommunikation in einem ROS-Projekt kann während einer laufenden Messfahrt aufgezeichnet und in einer Rosbag-Datei

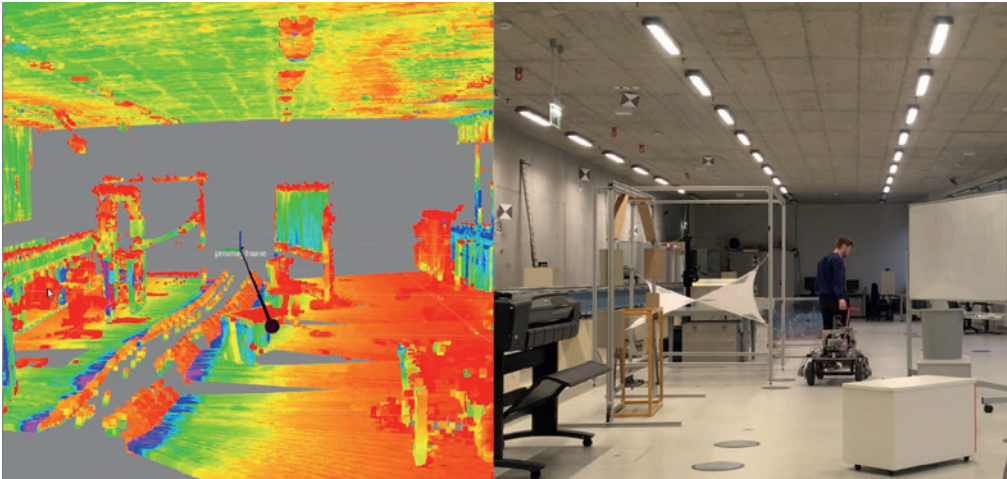


Abb. 3 | Geometrische Strukturen können mit dem HCU_ROS erfasst werden. Die Farbskala beschreibt die Intensität der Punktmessung /Linzer et al. 2018/.

(* .bag) abgespeichert werden. Die verwendeten ROS-Datentypen enthalten zusätzliche Informationen über die gesetzten Parameter und weiteren Services. Im Bezug zur Systemzeit wird über den Header jeder Messwert mit einem Zeitstempel versehen. Eine Rosbag-Datei stellt den zeitlichen Zusammenhang der Beobachtungen und der berechneten Werte bzw. die aufgenommene Interprozesskommunikation wieder her. Bei der Rosbag-Wiedergabe kann dieselbe Messsituation, unter Berücksichtigung der Änderungen, wieder und wieder abgespielt werden. Diese Funktion ist für die Entwicklung neuer Algorithmen und Packages förderlich. Die bei der Messfahrt nicht zur Verfügung gestandenen Funktionen können mit demselben Datenstrom ausgewertet und verglichen werden, ohne dass eine erneute Messfahrt nötig ist (Simulation von Messfahrten). Durch Rosbags können sowohl geringfügige als auch komplexe Änderungen eines Packages effektiv und effizient untersucht und unabhängig verglichen werden.

4 SYSTEMUNTERSUCHUNGEN

Die verwendeten Hardwarekomponenten des HCU_MMS wurden einzeln in ROS implementiert und auf ihre Funktionsfähigkeit hin überprüft. Die erfasste Datengrundlage ermöglicht zudem die Überprüfung der Algorithmen-Packages. Ziel ist es, die vom Laserscanner erfassten Punktwolken über die Trajektorie zu registrieren. Erste Messungen mit dem HCU_ROS-MMS wurden im geodätischen Labor der HafenCity-Universität durchgeführt. Die Funktion bei realen Umgebungsbedingungen in der Hamburger HafenCity und an der Hochbahnhaltestelle Landungsbrücken wurde untersucht. Für die Messung an den Hamburger Landungsbrücken existiert ein Referenzdatensatz aus terrestrischen Laserscanningdaten. Folgend wird der Messaufbau der Untersuchungen beschrieben, die auf eine Validierung der Funktionsfähigkeit des HCU_ROS-MMS abzielen.

4.1 Funktionsuntersuchung im Labor

In einem ersten Untersuchungsaufbau soll die Funktionsfähigkeit des Frameworks für den Nahbereich getestet werden. Das Testfeld, mit unterschiedlich detaillierten Objekten, ist in Abb. 3 dargestellt.

Das Programm ROS-Visualizer (RViz) ermöglicht die Visualisierung der Interprozesskommunikation und der fortlaufend über das Tachymeter registrierten Punktwolken (Abb. 4). Eine qualitative Bewertung der Systemleistung auf Grundlage der Punktwolke, die z. B. anhand der Intensität eingefärbt ist, ist so unmittelbar durchführbar (Abb. 3). Grobe Objektstrukturen können im Nahbereich geometrisch plausibel erfasst und abgebildet werden. Die Ergebnisse können sowohl während der Messung als auch durch das Abspielen eines aufgenommenen Rosbags im zeitlichen Zusammenhang analysiert werden. Eine Erfassung der räumlichen Situation ist mit dem aktuellen Aufbau des HCU_ROS-MMS möglich.

Der Ablauf der gewählten Steuerung für die erste Funktionsuntersuchung des HCU_ROS-MMS wird in Abb. 4 illustriert. Die Datenerfassung der Hardwarekomponenten (grün) wird algorithmisch verarbeitet (lila). Die Daten der Topics der IMU und des Tachymeters werden, wie zuvor beschrieben, zu einem 6-DOF-Frame zusammengesetzt. Die erfasste Punktwolke wird im nächsten Schritt in Bezug dazu transformiert und anschließend zusammen mit den erfassten Metadaten in ein offenes, lesbares Dateiformat exportiert.



TECHNIK
HOCHSCHULE MAINZ
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Der Fachbereich Technik der Hochschule Mainz
sucht einen / eine

Professor/in für das Fachgebiet
„Photogrammetrie“

(Besoldungsgruppe W 2 LBesG)

stellenangebote.hs-mainz.de



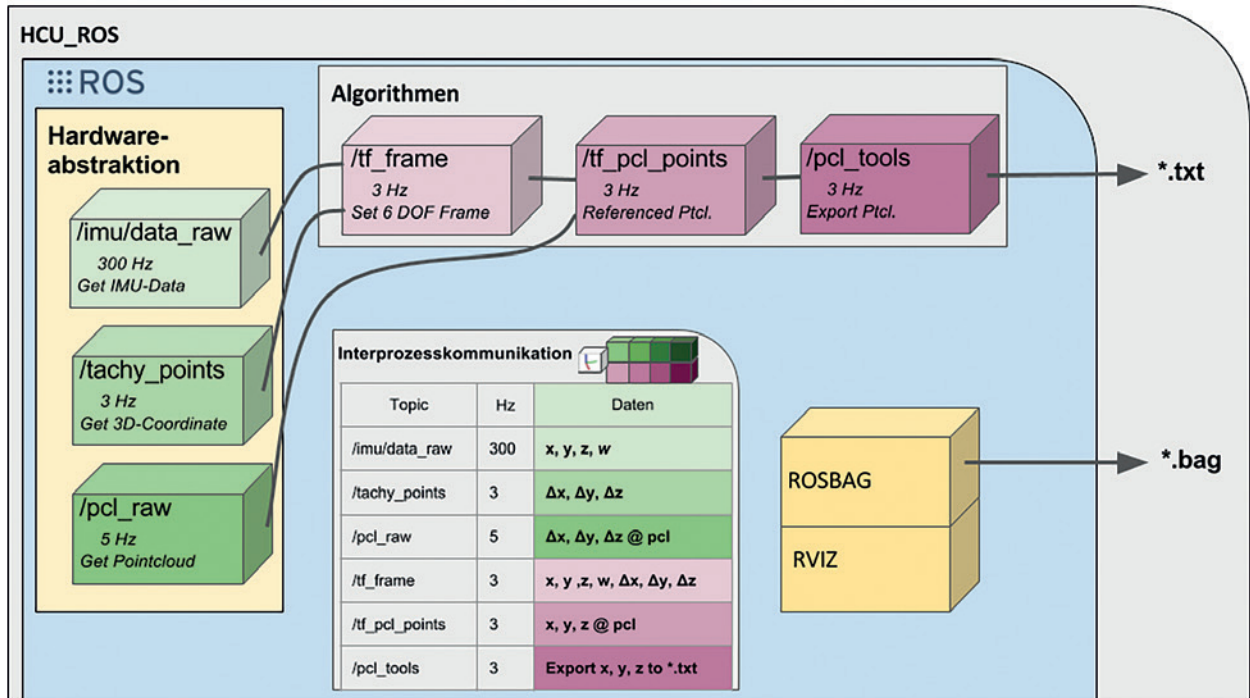


Abb. 4 | Der gewählte Datenfluss des Ansatzes /Linzer et al. 2018/

4.2 Praxisuntersuchung in der HafenCity und an der Haltestelle Landungsbrücken

In der Hamburger HafenCity und an der Hochbahnhaltestelle Landungsbrücken wurden Untersuchungen zum Einsatz des HCU_ROS-MMS unter realen Aufnahmebedingungen durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen konnten einige Rahmenbedingungen und Vorteile für den Einsatz des MMS ausgemacht werden. Der Arbeitsbereich ist durch die Reichweite des WLAN zwischen der mobilen Plattform und der ROS/Linux-Arbeitsstation, die über die Geocom-Schnittstelle mit dem Tachymeter verbunden, vorgegeben. In der momentanen Konfiguration muss eine stabile Sichtverbindung zwischen Plattform und Tachymeter gewährleistet sein und es können keine Barrieren mit dem MMS überwunden werden. Innerhalb weniger Minuten ist das MMS einsatzbereit und über das Launch-File werden die einzelnen Komponenten unter Berücksichtigung der gesetzten Parameter gestartet. Während und nach einer Messung

ist eine visuelle Kontrolle auf grobe Fehler und Vollständigkeit in RViz möglich. Veränderungen an der Aufnahmeconfiguration können durch den Austausch von Packages oder durch eine Anpassung der Parameter direkt im Feld durchgeführt werden.

Die Untersuchung zeigt, dass das System im Innen- und Außenbereich eingesetzt werden kann. Wegen der offenen Bauweise der MMS sollten moderate Wetterverhältnisse herrschen. Im Gegensatz zu Laborbedingungen ist jedoch die nötige Sichtverbindung zum Tachymeter nicht konsequent sichergestellt, unbeteiligte Personen könnten in den Strahlengang laufen. Bei der Erfassung von komplexeren Zusammenhängen im Bauwerk ist ein Einsatz von mehreren Standpunkten aus notwendig. Für den Einsatz im Freien ist ein Ergänzen vom GNSS zielführend und Gegenstand einer aktuellen Erweiterung des Vermessungssystems. Durch den Einsatz von GNSS vergrößert sich das mögliche Aufnahmegebiet, da auf eine freie Sicht- und Datenverbindung zwischen Tachymeter und Plattform verzichtet werden kann. Zusätzlich werden eine bessere



Abb. 5 | Punktwolke aus der HafenCity, Bereich vor dem Universitätsgebäude

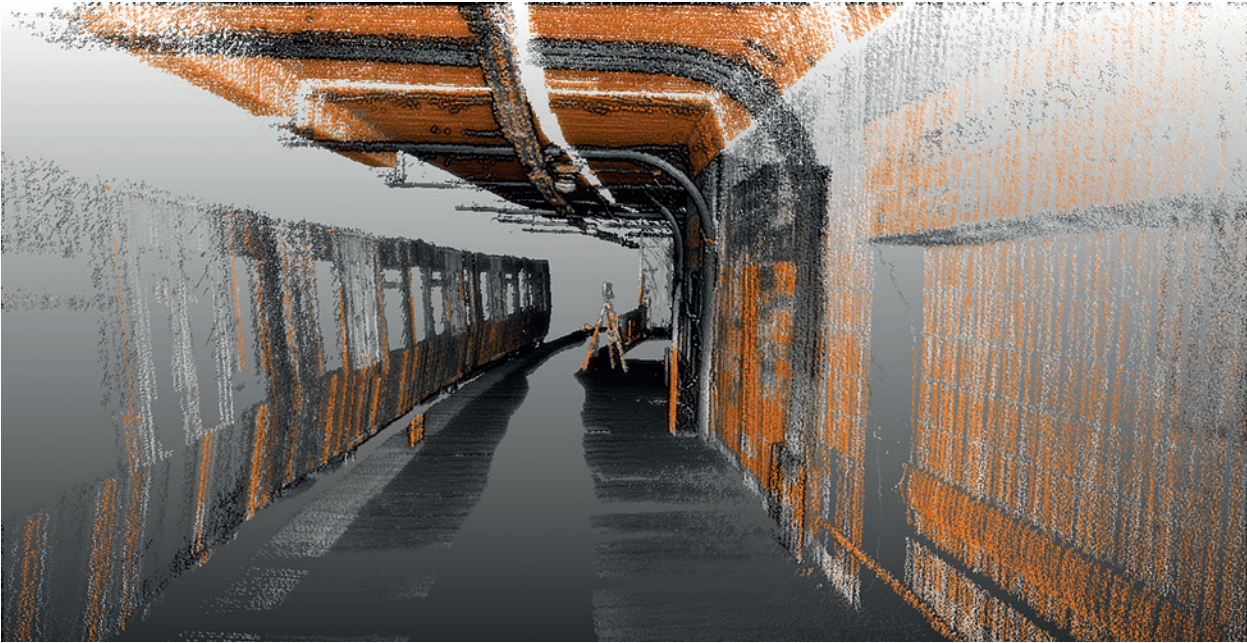


Abb. 6 | Die nach Intensität eingefärbte Punktwolke einer Messfahrt auf der Hochbahnhaltestelle Landungsbrücken (orange – hoch, weiß – mittel, grau – gering)

Synchronisation der Sensoren und ein Messen im globalen Koordinatensystem ohne zusätzliche Transformationen möglich.

Die Erfassungsleistung des HCU_ROS-MMS für weit entfernte Objekte (bis zu 50 m) konnte durch die Messung in der HafenCity qualitativ nachgewiesen werden. Typische Anwendungen, wie das Erfassen von Straßenzügen zum Erstellen von dreidimensionalen Stadtmodellen, können mit dem Vermessungssystem durchgeführt werden (Abb. 5). In der aktuellen Zusammensetzung des HCU_ROS-MMS sind diese Modelle nur mit einer groben Auflösung möglich. Ziel weiterer Entwicklungen ist es, die Qualität der erfassten Punktwolke zu verbessern. Diese wird zum einen durch das Verwenden von anderer Hardware (z.B. Laserscanner) und durch Implementieren und Entwickeln von anderen und ergänzenden Packages für SLAM, Koppelnavigation oder mittels Filter (z.B. Kalman-Filter) umgesetzt.

Ein Ausschnitt der erfassten Punktwolke der Hochbahnhaltestelle mit dem HCU_ROS-MMS ist in Abb. 6 dargestellt. Zu erkennen sind der Bahnsteig und ein Zug. Das Falschfarbenbild zeigt die Kolorierung der Punktwolken nach Intensität der Punkte. Diese Einfärbung kann für eine semantische Auswertung der Punktwolke als Hilfsmittel verwendet werden. Ein Punktwolkenvergleich zwischen der Punktwolke des MMS, basierend auf dem Velodyne-Laserscanner, und eines terrestrischen Scans, aufgenommen mit dem Laserscanner Z+F Imager 5010, zeigt, dass Abweichungen von 4 cm bis 10 cm zu erwarten sind. Die Aufnahmezeit der gezeigten Situation betrug ungefähr 45 Sekunden, dabei wurden bei mäßiger Schrittgeschwindigkeit etwa 40 m zurückgelegt. Die Auswertung erfolgt im direkten zeitlichen Zusammenhang und ist somit sofort zur Ansicht und Kontrolle verfügbar. Die Szene zeigt etwa sieben Millionen Punkte, die als lesbare Textdatei abgespeichert etwa 420 MB und als Binärdatei für das Programm CloudCompare 170 MB beanspruchen.

Die Qualität der Punktwolke aus den Aufnahmen des MMS ist aufgrund von Synchronisationsfehlern und des verwendeten Velodyne-Laserscanners gering. Die Aufnahmegeschwindigkeit mit dem MMS ist im Gegensatz dazu hoch. Die erfasste Punktwolke des MMS eignet sich bereits für Untersuchungen der Punktwolkenklassifizierung und zum Erkennen von größeren Objekten. Abmaße von Objekten oder Raumgrößen können direkt in RViz bestimmt werden. Gegenstand weiterer Entwicklungen ist eine Steigerung der Punktwolkenqualität. Hierfür sollen alternative Sensoren (z.B. Z+F Imager 5010), eine Synchronisation aller Sensoren und andere Auswertelgorithmen in ROS entwickelt und getestet werden.

5 FAZIT UND AUSBLICK

MMS sind aktuell Gegenstand von Forschung und Entwicklung an Universitäten und von kommerziellen Instrumentenherstellern. Am Markt werden Komplettsysteme und Dienstleistungen angeboten, die Mobile Mapping als Teil der Ingenieurgeodäsie ermöglichen. Die zumeist geschlossenen Systeme ermöglichen das Anwenden, nicht aber das Weiterentwickeln und Untersuchen der vielseitig einsetzbaren Plattformen.

ROS stellt ein offenes Framework zur Verfügung, das alle wichtigen Werkzeuge für die Entwicklung eines eigenen MMS beinhaltet. Eine allgemeingültige Dokumentation, der modulare Aufbau, die implementierte Visualisierung und die Speicherung der Daten zur Aufnahme sind entscheidende Argumente für das Einbinden geodätischer Sensoren und Systeme in diese Entwicklungsumgebung.

Konzepte für MMS können effizient getestet und unterschiedlichste Algorithmen flexibel angepasst werden. Die einzelnen Bestandteile lassen sich vom Gesamtsystem unabhängig untersuchen. Der Arbeitsprozess, vom wahren Aufnahmeraum zur dreidimensionalen Punktwolke, wird vollständig nachvollziehbar dargestellt. Die

vereinheitlichten Strukturen komplexer Systeme öffnen den Zugang, sodass sie auch in der Lehre eingesetzt werden können.

Die erzeugten Punktwolken eignen sich schon heute für den Einsatz in BIM oder zu Klassifizierungsuntersuchungen. Die schon heute aufgenommenen Daten können als Benchmark dienen. Neue Ansätze können effizient getestet werden, sodass das Framework bereit ist für die Zukunft.

DANKSAGUNG

Ein besonderer Dank gilt Rudolf Metzler für seine Unterstützung, das Geben von neuen Impulsen und der intensiven Pflege des HCU_ROS-Wikis auf Github.

LITERATUR

Borrmann, D.; Hess, R.; Eck, D.; Nüchter, A.; Schilling, K. (2015): Proceedings of the 6th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2015 "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Avila, Spanien, 9–16.

Eling, C.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2016): Warum UAVs und warum jetzt? In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn. Wißner, Augsburg.

Gerkey, B. (2018): Why ROS 2.0? https://design.ros2.org/articles/why_ros2.html (27.09.2018).

Hesse, C.; Vennegeerts, H. (2014): Referenzierung kinematischer Laserscansysteme mit IMU und Tachymeter. In: Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunft. Beiträge zum 138. DVW-Seminar am 18. und 19. September 2014 in Hamburg. Wißner, Augsburg.

Hesse, C.; Cieslik, B.; Weltzien, K. (2014): Hochpräzise Bestandsvermessung des A7 Elbtunnels. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Keller, F. (2015): Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden. Dissertation, HafenCity-Universität Hamburg. Shaker, Aachen.

Koch, R. (2018): Sensor Fusion for Precise Mapping of Transparent and Specular Reflective Objects. Dissertation, Universität Würzburg. Schriftenreihe Würzburger Forschungsberichte in Robotik und Telematik 16.

Linzer, F.; Barnefske, E.; Sternberg, H. (2018): Konzeption eines modularen MMS innerhalb der Robot-Operating-System(ROS)-Umgebung im geodätischen Zusammenhang. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Naber, H. (1991): Grundlagen mobiler Roboter. In: Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente. iwB Forschungsberichte (Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, 36). Springer, Berlin/Heidelberg.

Quigley, M.; Conley, K.; Gerkey, B. P.; Faust, J.; Foote, T.; Leibs, J.; Wheeler, R.; Ng, A. Y. (2009): ROS: an open-source Robot Operating System. ICRA Workshop on Open Source Software.

ROS Wiki (2018): Open Source Robotics Foundation. <http://wiki.ros.org> (30.01.2018).

Schwieger, V.; Sternberg, H. (2014): Multi-Sensor-Systeme in der Ingenieur-geodäsie – Grundlagen und Überblick. In: Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunft. Beiträge zum 138. DVW-Seminar am 18. und 19. September 2014 in Hamburg. Wißner, Augsburg.

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. In: Hanke, K.; Weinold, T. (Hrsg.): 18. Internationale Geodätische Woche Oberurgl 2015. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Vosselmann, G. (2017): Indoor mapping with three laser scanners – system design und calibration. Workshop Mobiles Laserscanning im Innenraum (Vortrag) vom 23.03.2017. Braunschweig.

Weltzien, K.; Willemsen, T.; Saretzki, A.; Hilpert, M.; Hesse, C. (2018): Aufbau eines funktionsgesteuerten Messsystems zur dreidimensionalen Erfassung enger tunnelförmiger Räume. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Wiemann, T.; Heiden, C.; Diederichsen, R.; Pütz, S.; Herzberg, J. (2018): Erzeugung hyperspektraler Punktwolken auf einem mobilen Roboter. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, Berlin/Offenbach.

B. Sc. Finn Linzer

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg
finn.linzer@hcu-hamburg.de



M. Sc. Eike Barnefske

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg
eike.barnefske@hcu-hamburg.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg
harald.sternberg@hcu-hamburg.de



Manuskript eingereicht: 30.09.2018 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet