

RADLER – Ein Einrad als RADialer LasERscanner

RADLER – A Unicycle as a RADial LasERscanning Device

Dorit Borrmann, Sven Jörissen, Andreas Nüchter

Die Weiterentwicklung in der 3D-Messtechnik hat in den letzten Jahren eine Vielzahl an unterschiedlichen Multi-Sensor-Systemen zu 3D-Umgebungserfassung hervorgebracht, jedes davon mit seinen eigenen Vorzügen und Schwächen. Diese Arbeit stellt ein modifiziertes Einrad vor, bei dem ein an der Radachse befestigter 2D Laser Profils Scanner ein radiales 3D Scanpattern erzeugt. Dieses neuartige, kostengünstige Messgerät verbindet die Vorteile von radgetriebenen Scangeräten mit denen von Handscannern. Nach der Vorstellung des Hardwareaufbaus und der Sensorintegration werden die Ergebnisse anhand von vier Testscenarien aus-gewertet und mit den Daten eines terrestrischen 3D-Laserscanners verglichen.

Schlüsselwörter: Laserscanning, kostengünstig

In recent years a wide range of 3D multi sensor systems for various applications has been proposed. Each of them has its own benefits and limitations. This paper proposes a modified unicycle with a 2D laser profiler attached to the wheel axle, thus creating a radial 3D scanning pattern. This novel low-cost device combines the advantages of wheeled scanning equipment with those of wearable or hand-held devices. After presenting the hardware setup and the sensor integration, the results are evaluated using three test scenarios and a terrestrial laser scanner for comparison.

1 EINLEITUNG

Mit steigender Messrate und Genauigkeit auf der einen Seite und verringertem Gewicht und Hardwarekosten auf der anderen Seite entwickeln sich Messgeräte zur 3D-Umgebungserfassung zu Standardwerkzeugen in diversen Disziplinen. Die unterschiedlichen Messprinzipien sind mit Vor- und Nachteilen verbunden, die sie für bestimmte Anwendungsfelder befähigen. Mobile Geräte sind das Mittel der Wahl um große Bereiche in kurzer Zeit zu vermessen. Sowohl Laserscanner als auch Kameras auf Automobilen, Handwagen, Rucksäcken oder Fluggeräten wurden entwickelt um die spezifischen Anforderungen zu erfüllen.

In urbanen Umgebungen sind Mobile Mapping Systeme, bei denen Sensorik auf Automobilen verbaut wird, Stand der Technik. Diese sind aber beschränkt auf den Einsatz in befahrbaren Bereichen. Auf schmalere-n Wegen kommen mobile Roboter /Nüchter et. al 2013/ oder Handwagen ausgestattet mit Scannertechnologie, wie das VIAMetris iMMS /Thomson et al. 2013/, /VIAMetris 2015/ oder der Google Street View /Google 2011/ beziehungsweise der NavVis 3D Mapping Trolley /NavVis 2019/ zum Einsatz. An Treppen sowie Feld- und Schotterwegen stoßen diese Geräte jedoch an ihre Grenzen. Airborne Laser Scanning hat keinerlei Beschränkungen bezüglich des Unter-grunds, scheitert aber in überdachten Umgebungen und Tunneln und liefert in Umgebungen mit starker Bewachung nur unzureichende Ergebnisse. Rucksack-basierte Mobile-Mapping-Systeme, auch Personal Laserscanner genannt, wie der „Cartographer“ von Google /Lardinois 2015/, der Zebedee 3D Scanner /Bosse et al. 2012/, der Leica Pegasus:Backpack /Leica 2015/ oder ein durch die Autoren entwickeltes System /Lauterbach et al. 2015/, wurden als Lösungen für Innenraumanwendungen angeboten. Während jeder dieser Ansätze unter den entsprechenden Voraussetzungen gute Ergebnisse liefert, bringen sie klare Nachteile wie das Gewicht des Rucksacks, hohe Hardwarekosten oder geringe Reichweiten (Zebedee 3D, 15-30m) mit sich.

Ein anderer Ansatz wurde vor kurzem in Gestalt des „Classical Mechanics Scanners“ /Lehtola et al. 2015/ vorgestellt. Trotz der Einfachheit und der leichten Bedienbarkeit ist eine Steuerung des Rades nicht möglich, da die intrinsisch durchgeführte Lokalisierung einen geraden Pfad verlangt. Zusätzlich muss das Rad regelmäßig angeschoben werden um eine kontinuierliche Bewegung zu erzielen, wodurch die Bedienung über lange Strecken sehr anstrengend wird. Demzufolge ist das Anwendungsfeld stark eingeschränkt, insbesondere in Anbetracht von anspruchsvollem und unebenem Terrain.

Während Kamerasysteme bei wechselnden Lichtverhältnissen und in strukturarmen Umgebungen an ihre Grenzen stoßen, haben Laserscanner Probleme bei schwarzen oder stark spiegelnden Flächen. Die stärksten Einschränkungen eines 3D Laserscanners sind aber weiterhin Preis und Gewicht. Inspiriert von einem

Hodometer stellen wir ein modifiziertes Einrad vor, an dessen Radachse ein 2D Laserscanner montiert ist. Die Radumdrehungen erzeugen ein radiales 3D Scanpattern, daher die Bezeichnung RADLER (Abk.: RADialer LasER Scanner). Dieses neuartige, kostengünstige Instrument kombiniert die Vorteile von radgetriebenen Scannern mit denen von tragbaren Geräten. Die Bewegung auf dem Boden erzeugt eine ruhigere Trajektorie als Handgeräte oder Rucksacksysteme. Mit dem großen luftgefüllten Reifen kann RADLER dennoch auf unebenem Untergrund und, wenn gezogen, sogar auf Treppen betrieben werden. Es ist mit einem Gewicht von ca. 9 kg leichtgewichtig, portabel und einfach zu bedienen. Ideale Einsatzgebiete sind kleinere Vermessungsaufgaben in engen Umgebungen, bei denen die genaue Rekonstruktion kleiner Details keine Rolle spielt. Zur Bestimmung des 3D Scanpatterns kommen ein Inkrementalgeber und eine Intertialmesseinheit (IMU) zum Einsatz. Ein SLAM-Ansatz (Abk. engl. Simultaneous Localization and Mapping = gleichzeitige Lokalisierung und Kartierung), /Elseberg et al. (2013)/, errechnet aus den so gewonnenen Initialdaten die finale Punktwolke. Nach der Vorstellung des Hardwareaufbaus und der Sensorintegration folgen eine Auswertung anhand von vier Testszenarien und ein Vergleich mit den Daten eines terrestrischen 3D Laserscanners. Die Ergebnisse zeigen sowohl bei Innen- als auch bei Außenaufnahmen eine hohe Genauigkeit bei der Erstellung des Grundrisses der Umgebung. Typische Abweichungen liegen im Bereich von unter 20 cm. Die Nähe des Messaufbaus zum Boden führt zu Problemen bei der korrekten Bestimmung des Höhenprofils in Außenszenarien, was in den Randbereichen längerer gerader Strecke absoluten Höhenabweichungen von mehreren Metern verursachen kann.



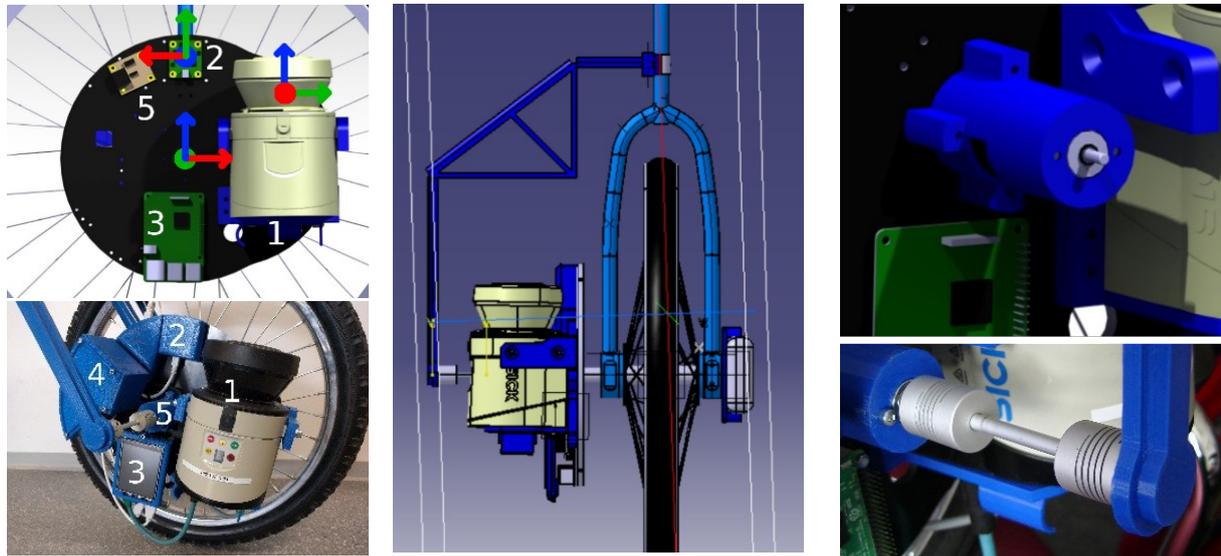
Abb. 1: Erstautorin bedient RADLER.

2 SYSTEMKOMPONENTEN

2.1 Hardware

RADLER ist ein modifiziertes Einrad, das zur einfachen Manövrierbarkeit mit einem Handgriff ausgestattet wurde (Abb. 1). Die Sensoren, ein SICK LMS141 2D Laserscanner, eine PhidgetSpatial Precision 3/3/3 Inertialmesseinheit, ein Raspberry Pi 3 Single Board Computer (SBC) mit Display und ein Phidget ISC3004 Inkrementalgeber sind, auf einer Basisplatte angebracht, welche an die Radachse des Einrades montiert wurde (Abb. 2). Gegengewichte auf der anderen Seiten helfen das Rad bei der Benutzung in Balance zu halten. Um beste Stabilität zu erzielen, verschieben die Gewichte den Schwerpunkt auf das Rad (vgl. rote Linie in Abb.

2(b)). Der Inkrementalgeber ist über eine Stützstruktur angebracht und mittels des PhidgetEncoders High Speed über USB mit dem SBC verbunden. Ein Kupplungsstück verringert die Axialbeanspruchung des Encoders während der Drehbewegungen. Der LMS141 mit seinem Messbereich von 0.5 bis 40 m bei einer Frequenz von 25/50 Hz und einer Winkelauflösung von 0.25/0.5° ist derart befestigt, dass die Scanebene parallel zur Radachse verläuft und ist über Ethernet mit dem SBC verbunden. Der Raspberry Pi 3 ist als WLAN Accesspoint konfiguriert, um einfache Kommunikation via *ssh* zu ermöglichen. Der Radencoder liefert einfache Odometriewerte, die anschließend mit den Daten der IMU zu einer genauen Trajektorie fusioniert werden. RADLER wird mit einem 1000 mAh Lithium Polymer Akku betrieben, der direkt auf der Basisplatte angebracht für eine Betriebsdauer von 40 bis 50 Minuten 11.1 V für den Laserscanner und über einen DC-DC Wandlers 5V für den SBC liefert.



(a) Sensorplatte

(b) Schwerpunkt

(c) Inkrementalgeber

Abb. 2: Der Sensoraufbau von RADLER (1) SICK LMS 141 Laserscanner, (2) PhidgetSpatial Precision 3/3/3 IMU, (3) Raspberry Pi 3 mit Display, (4) Kabelbox, (5) Phidget optischer Drehwinkelgeber ISC3004 und Encoder High Speed. Die schematische Zeichnung (oben links) zeigt die Koordinatensysteme von Laserscanner, IMU und Einrad. In der dargestellten Anfangsausrichtung sind globales Koordinatensystem und das Koordinatensystem des Einrads identisch.

2.2 Sensorintegration

Der Raspberry Pi 3 integriert die Sensoren mit ROS (Abk. engl. Robot Operating System, Roboterbetriebssystem). Der Laserscanner rotiert um die Radachse um bei gleichzeitiger Rollbewegung eine radiale 3D Punktwolke zu erzeugen. Auf diese Weise werden Mehrfachmessungen zwischen vollständigen 360 Grad-Umdrehungen und somit eine ausreichende Überlappung garantiert, die für den continuous-time SLAM Algorithmus /Elseberg et al. 2013/ unabdinglich ist. Die Genauigkeit der resultierenden 3D Punktwolke ist demzufolge stark von der Genauigkeit der Poseschätzung beim Abrollen der einzelnen 2D Scanprofile des Laserscanner abhängig.

Die Koordinatensysteme, die beim Abrollen der Scanprofile zum Einsatz kommen, sind in Abb. 2 skizziert. Das Einrad Koordinatensystem E habe seinen Ursprung im Mittelpunkt der Achse mit x in Vorwärtsrichtung. y zeigt in Richtung des Rades, also hinter die Sensorplatte. Das Scannerkoordinatensystem L liegt innerhalb des Scannerkopfes. In der in Abb. 2 dargestellten Position zeigt die x -Achse in Richtung des Betrachters, die y -Achse in Fahrtrichtung (rechts) des Einrades und die z -Achse nach oben. Die x -Achse des IMU-Koordinatensystems I hingegen, zeigt gegen die Fahrtrichtung (nach links), die y -Achse nach oben und die z -Achse hinter die Sensorplatte. Das globale Koordinatensystem G entspreche dem Einradkoordinatensystem zu Beginn einer Messfahrt, wobei die Startkonfiguration identisch zu der abgebildeten ist, d.h., die Koordinatensysteme sind parallel zum Untergrund ausgerichtet.

Die folgende Darstellung verwendet Transformationen als 4×4 Matrizen T mit Hilfe homogener Koordinaten, bestehend aus einer 4×4 Rotationsmatrix R und einem Translationsvektor $t = (x \ y \ z)^T$:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \vartheta \cos \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \vartheta \cos \psi & x \\ \sin \vartheta \cos \psi & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \vartheta \sin \psi & -\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \vartheta \sin \psi & y \\ -\sin \vartheta & \sin \varphi \cos \vartheta & \cos \varphi \cos \vartheta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

mit dem Rollwinkel φ (Rotation um die x -Achse), dem Nickwinkel ϑ (Rotation um die y -Achse) und dem Gierwinkel ψ (Rotation um die z -Achse).

Sei nun $T_{L \rightarrow E}$ die Transformation vom Scannerkoordinatensystem L in das Einradkoordinatensystem und $T_{E \rightarrow G}$ die Transformation von E in das globale Koordinatensystem G , dann berechnet sich die initiale Transformation eines jeden Punktes p_L in Scannerkoordinaten in das globale Koordinatensystem durch

$$p_G = T_{E \rightarrow G} \cdot T_{L \rightarrow E} \cdot p_L \quad (2)$$

Die Bestimmung der Transformationsmatrizen erfolgt mit Hilfe des Radumfangs L und der CPR (Abk. engl. counts per revolution; Anzahl der Ticks pro Umdrehung) C , d.h. des Zählerinkrements des Encoders für eine 360° Umdrehung.

Die Änderung des Nickwinkels $\Delta \vartheta$ und die Vorwärtsbewegung Δx_E des Einrades, berechnen sich mittels der Anzahl an Ticks c_t zwischen Zeitschritt $t - 1$ und t als

$$\Delta \vartheta = \frac{-2\pi}{C} \cdot c_t \text{ und } \Delta x_E = \frac{L}{C} \cdot c_t \quad (2)$$

Messwerte von IMUs unterliegen starkem Drift. Um den Einfluss des Drifts auf die Genauigkeit der 3D-Erfassung zu reduzieren, werden nur Gierwinkel ψ und Rollwinkel φ durch die IMU bestimmt. Sei $R_{I \rightarrow G}$ die Rotationsmatrix, welche die Orientierung der IMU im globalen Koordinatensystem beschreibt. Dann ist

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = R_{I \rightarrow G} \cdot \dot{c} \quad (3)$$

die z -Achse im globalen Koordinatensystem. Für die Orientierung des Einrads folgt:

$$\psi = \text{atan2}(p_y, p_x) \text{ und } \varphi = \angle(p_x, p_y, p_z), (p_x, p_y, 0), \quad (4)$$

wobei φ den Winkel dem Ortsvektor (p_x, p_y, p_z) und seiner Projektion in die xy -Ebene beschreibt und ψ die Ausrichtung innerhalb der xy -Ebene. Der Nickwinkel ergibt sich in einer ähnlichen Weise über die y -Achse im globalen Koordinatensystem:

$$\vartheta = \text{atan2}(q_y, q_z) \text{ mit } (q_x, q_y, q_z) = R_{I \rightarrow G} \cdot \dot{c} \quad (5)$$

ϑ aus Gleichung (5) wird ausschließlich für die im nächsten Abschnitt beschriebene Kalibrierung des Inkrementalgebers verwendet. Die Einradpose wird mittels Gleichung (2) bestimmt. Die Rotation von $T_{E \rightarrow G}$ ergibt sich folglich durch $(-\varphi, \vartheta, \psi)$ und die Translation durch Summation der Änderungen

$$\Delta x_G = \Delta x_E \cdot \cos \psi, \Delta y_G = \Delta x_E \cdot \sin \psi, \Delta z_G = 0. \quad (6)$$

Diese Anfangsschätzung berücksichtigt keinerlei Höhenunterschiede und ist durch die Genauigkeit von Inkrementalgeber und IMU beschränkt. Um den Einfluss dieser Beschränkungen zu verringern sind algorithmische Lösungen notwendig. Hier kommt der continuous-time SLAM Ansatz von /Elseberg et al. (2013)/ zum Einsatz. Da dieser Algorithmus auf dem ICP (Abk. engl.: iterative closest point, deutsch: Iterativer Algorithmus der nächsten Punkte) Prinzip /Besl & McKay 1995/ basiert, profitiert er vom Design von RADLER. Durch die radiale Rotation misst der Laserscanner Punkte vor und hinter dem Rad gleichzeitig, wodurch Dichte und Überlappung in der Szene erhöht werden.

2.3 Sensorkalibrierung

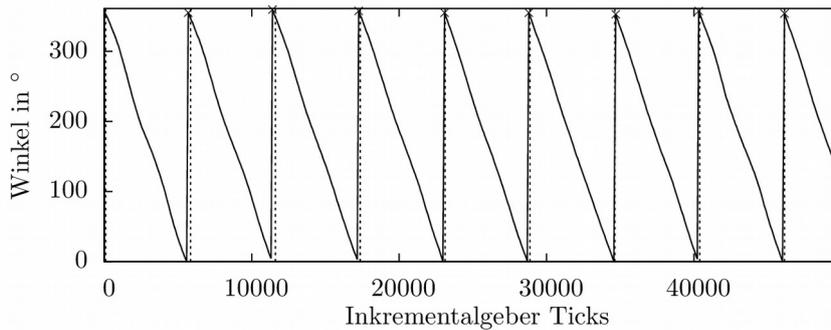


Abb. 3: Bestimmung der CPR des Inkrementalgebers. Die durchgezogene Linie zeigt den Nickwinkel der IMU, die Kreuze markieren dessen Maxima und die gestrichelten Linien kennzeichnen die Anhand der Kalibrierung des Inkrementalgebers berechneten Nulldurchgänge.

Die Qualität der Odometrieschätzung ist direkt abhängig von einer genauen Bestimmung von C und L aus Gleichung (1). Während der Radumfang L einfach zu messen ist, müssen die CPR durch Kalibrierung ermittelt werden. Hierfür wird die Orientierung durch Fusionierung mittels Madgwick-Filter /Madgwick et al. 2011/ aus den IMU-Messwerten berechnet. Abb. 3 zeigt beispielhaft den Nickwinkel der IMU abgetragen gegenüber der Ticks des Inkrementalgebers. Anhand der Maxima, beziehungsweise Nulldurchgänge, des Nickwinkels ergeben sich die CPR für eine jede Umdrehung. Ein Filter detektiert die Ausreißer aus diesen Messwerten als jene Werte mit großen Abweichungen zum Median und eliminiert diese. Der Durchschnitt der verbleibenden Werte ergibt den finalen Wert für C . Schließlich wird der Offset bezüglich der initialen Orientierung des Encoders berechnet. Die Pose des Einrades (Position und Orientierung) ergibt sich folglich aus der Odometrie für Bewegungen entlang der Radebene und den IMU-Daten für die Orientierung des Rades, wie im letzten Abschnitt beschrieben. Um systematische Fehler des Inkrementalgebers aufgrund von Umwelteinflüssen, wie Temperaturschwankungen, zu vermeiden wird der Kalibrierprozess für jedes Experiment wiederholt.

3 EXPERIMENTE UND AUSWERTUNG

Die Evaluation von RADLER erfolgt anhand von vier Testszenarien in unterschiedlichen Umgebungen. Die ersten beiden Umgebungen sind der erste Stock des Informatikgebäudes („Flur“) und des alten Mathematikgebäudes („Kreis“) der Julius-Maximilians Universität Würzburg. Zwei Außenexperimente finden um die Maria Schmerz Kapelle in den Weinbergen oberhalb von Randersacker („Kapelle“) und auf der Alten Mainbrücke in Würzburg („Brücke“) statt. Terrestrische Scans, aufgenommen mit einem Riegl VZ-400 /Riegl 2019/ dienen als Referenzdatensatz für „Flur“, „Kapelle“ und „Brücke“ (vgl. Abb. 4 und 7). Der Riegl VZ-400 erreicht im verwendeten Modus eine maximale Reichweite von 350 m (160 m) bei 90 % (20 %) reflektierender Oberfläche und eine Genauigkeit von 5 mm sowie eine Wiederholgenauigkeit von 3 mm. Laserstrahlaufweitung beträgt 0,35 mrad. Die Scans der einzelnen Positionen wurden mittels des ICP-basierten global konsistenten Scanmatchingverfahrens aus 3DTK /Nüchter et al. 2019, Nüchter et al. 2008/ registriert.

1. „Flur“ Als einfachste Bewegung besteht der Datensatz aus einer geraden Linie von ungefähr 100 m auf ebenem Untergrund ohne jegliche Steigung. Dies liefert ca. 3,5 Millionen Punkte. Typisch für ein Bürogebäude besteht der Flur aus mehreren Türen und Glasfassaden, die zu Reflektionen und Fehlprojektionen führen (teilweise sichtbar in Abb. 4 (oben) und 5 (oben)). Der Referenzdatensatz besteht aus 12 Scanpositionen mit einer Winkelauflösung von 0,08 Grad.
2. „Kreis“ Ebenfalls auf ebenem Untergrund ohne Steigung besteht dieser Datensatz aus zwei vollständigen Kreisen, die Hin- und Rückweg abbilden und das eingeschränkte Sichtfeld des Scanners kompensieren sollen. Der Drift der IMU ist in der initialen Trajektorie stark ausgeprägt, wird aber durch den continuous-time SLAM Ansatz behoben. Der Datensatz resultiert in ca. 6,3 Millionen Punkten.
3. „Kapelle“ Der größte Datensatz ist gleichzeitig der herausforderndste mit Schotter, Kopfsteinpflaster und

einer leichten Steigung. Am höchsten Punkte beginnend führt der Pfad zu einer ebenen Umrundung der Kapelle und wieder zurück zum Startpunkt. Der SLAM Algorithmus wird benötigt um aus der initialen 2D Trajektorie die Steigungsunterschiede zu rekonstruieren und globale Konsistenz herzustellen. Der Datensatz umfasst ca. 3,5 Millionen Punkte. 10 Scans mit einer Auflösung von 0,04 Grad dienen als Referenz.

4. „Brücke“ Der letzte Datensatz mit ca. 4 Millionen Punkten ist ausgewählt um eine Evaluierung des finalen 3D Modells durchzuführen. Die steinerne „Alte Mainbrücke“ in Würzburg hat eine Länge von ca. 185 m. Zwölf Statuen schmücken die Brücke. Der Pfad führt über Kopfsteinpflaster zweimal über die leicht gebogene Brücke um beide Seiten zu erfassen. Kurven an beiden Enden schließen die Trajektorie. Die 8 Referenzscans haben eine Auflösung von 0,04 Grad.

Abb. 4 zeigt die terrestrischen Scans vom „Flur“ als Draufsicht und die „Kapelle“ in zwei Ansichten eingefärbt anhand der Intensitätswerte. Abb. 5 stellt die Ergebnisse von RADLER nach ca. 150 Iterationen des continuous-time SLAM Algorithmus dar. Die Bestimmung der Punkt-zu-Punkt-Distanz in Abb. 6 erfolgt nach vorheriger Registrierung der RADLER Daten mit den Referenzdaten mit der Implementierung des ICP-Algorithmus aus 3DTK /Nüchter et al. 2019/. Die abgebildete Farbskala spiegelt die Einfärbung der Punkte basierend auf der Punkt-zu-Punkt-Distanz mit Werten von 0 m (blau) zu 1 m (rot) wider.

Der „Flur“ schneidet im Vergleich mit den Referenzdaten gut ab, insbesondere in den ersten drei Vierteln des Weges von rechts nach links in Abb. 6, liegt ein Großteil der einzelnen Punkt-zu-Punkt-Distanzen deutlich unter 25 cm. Schwarz eingefärbte Punkte haben eine Punkt-zu-Punkt-Distanz über 1 m. Sie treten beinahe ausnahmslos im letzten Viertel auf, in Folge der großen Glasfassaden in diesem Bereich. Aufgrund der Tatsache, dass RADLER größtenteils in Fahrtrichtung rechts scannt, ist die Punktdichte auf der linken Wand sehr gering. Ohne einen Schleifenschluss führt die ungleiche Punktdichte beim ICP-Algorithmus zu einem Zusammenziehen der Daten auf einer Seite.

Abb. 5 zeigt die Draufsicht der drei Experimente mit initialer Trajektorie sowie nach wenigen Iterationen des continuous-time SLAM Algorithmus. Der Schleifenschluss in den letzten beiden Experimenten erzielt ein deutlich verbessertes Ergebnis durch die SLAM-Optimierung als beim „Flur“. Trotz der Länge der Trajektorie konvergiert der „Kreis“ zu einem Ergebnis, das die rechteckige Form des Gebäudes abbildet. Die unscharfen Kanten in der Draufsicht machen aber die Notwendigkeit einer weiteren Verbesserung der Kalibrierung deutlich. Für lange Trajektorien erscheinen ein einfacher Offset und statische CPR-Werte nicht ausreichend. Eine Lösung wäre hier die Integration der IMU-Messungen mittels Kalman Filter.

Auch die „Kapelle“ schneidet im Vergleich zum Referenzdatensatz gut ab, die Ausreißer sind deutlich weniger als beim „Flur“. Trotz des unebenen Terrains ermöglicht der Schleifenschluss eine Korrektur des Pfades, insbesondere bezüglich der Höhenunterschiede, mittels continuous-time SLAM. Eingeschränkt wird das Außenexperiment durch die geringe Reichweite des Laserscanners kombiniert mit der verringerten Punktdichte auf großen Entfernungen. Das Kapellendach ist nur sehr spärlich abgebildet. Zur Erhöhung der Punktdichte ist eine deutlich langsamere Drehgeschwindigkeit des Einrades oder das mehrfache Abfahren der Trajektorie von Nöten. Die Option den LMS 141 durch ein Gerät mit einer größeren Reichweite zu ersetzen wäre mit einem Anstieg der Hardwarekosten verbunden.

Anhand der „Brücke“ lässt sich die Performance des Ansatzes genauer analysieren. Abb. 7 zeigt die Referenzdaten. Hierin sind die Brücke mit den Brückenheiligen und das gegenüberliegende Ufer zu erkennen. Grün markiert sind die Personen, die mit Hilfe des *peopleremovers* /Schauer & Nüchter 2018/ entfernt wurden. Aufgrund der eingeschränkten Reichweite des Einrades wird der Datensatz für die weitere Verwendung abgeschnitten, so dass nur die Brücke verbleibt.

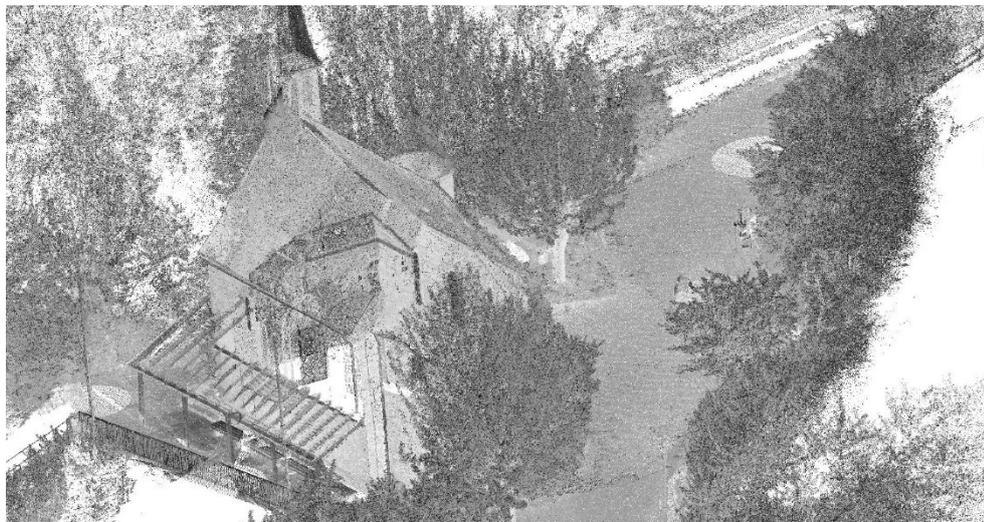
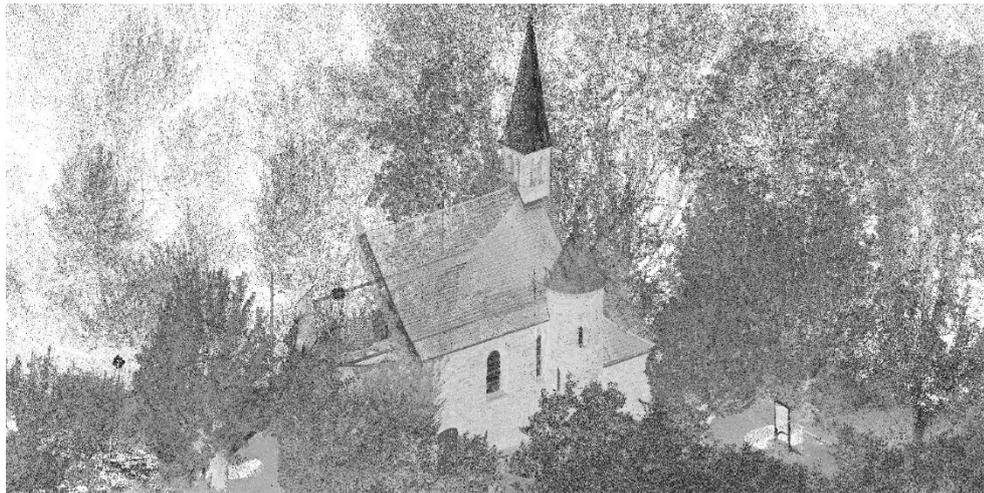
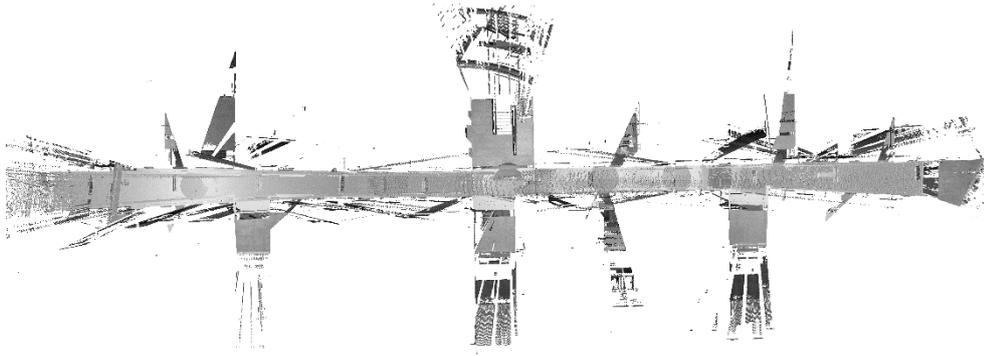


Abb. 4: Referenzdaten, aufgenommen mit einem RiegI VZ-400 (RIEGL 2019) Laserscanner. Draufsicht auf den „Flur“ sowie zwei Ansichten der „Kapelle“. Graufarben visualisieren die Intensitätswerte.

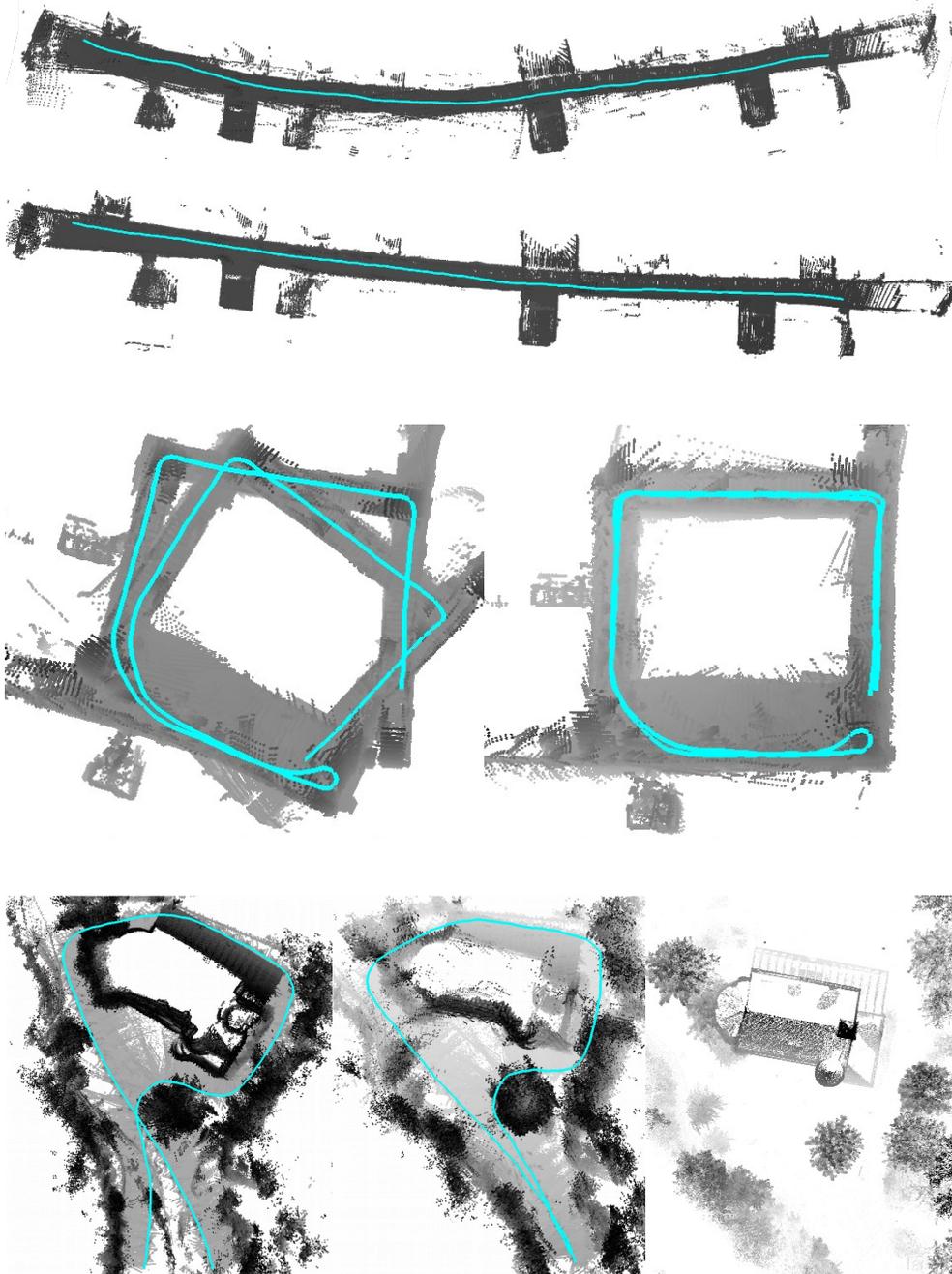


Abb. 5: Draufsicht auf die Ergebnisse der Experimente: das erste Bild zeigt jeweils die initiale Trajektorie gefolgt von den Ergebnissen des continuous-time SLAM Ansatzes. Von oben nach unten: „Flur“, „Kreis“, „Kapelle“. Die Datensätze im Gebäude erscheinen aufgrund von reflektierenden Oberflächen, wie Fensterscheiben, verwascht. Die initiale Trajektorie der „Kapelle“ ist planar. Nach der Korrektur wird durch die Einfärbung nach Höhe die wahre Geometrie der Szene deutlich. Da die Kapelle unterhalb der Startposition liegt, verliert die Schattierung nach Höhe ihren Einfluss auf das Dach der Kapelle, das dadurch heller erscheint. Das dritte Bild (unten rechts) zeigt den terrestrisch aufgenommenen Referenzdatensatz.

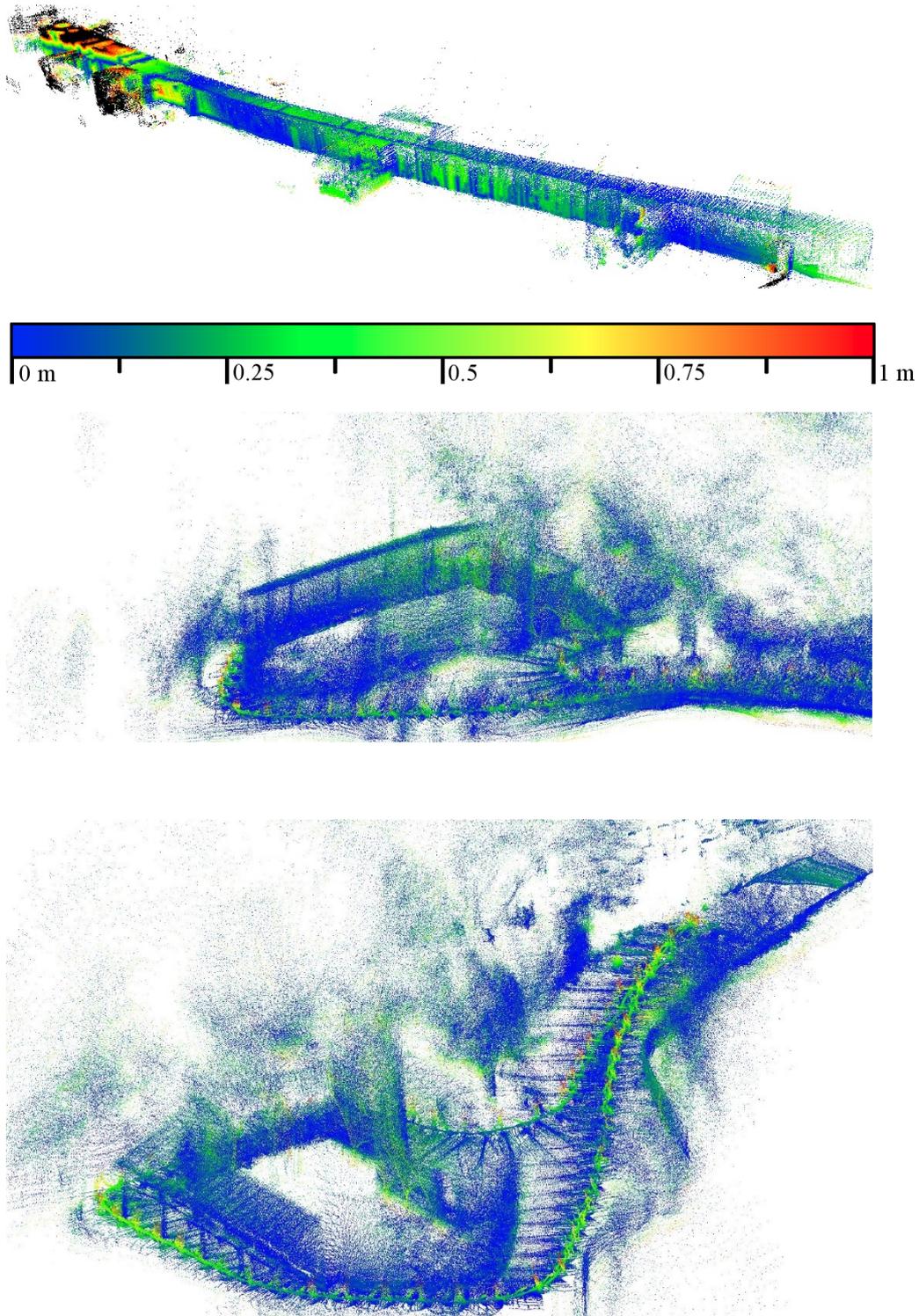


Abb. 6: Registrierte Punktwolken für den „Flur“ und zwei Ansichten für die „Kapelle“ entsprechend zu Abb. 4. Die Farbe zeigt die Punkt-zu-Punkt-Distanz entsprechend der abgebildeten Skala von 0 m (blau) zu 1 m (rot).



Abb. 7: Referenzdatensatz der „Brücke“, eingefärbt anhand der Intensitätswerte des Riegl VZ-400 Laserscanners. Grün markiert sind dynamische Objekte, die mittels des *pepleremovers* /Schauer & Nüchter 2018/ entfernt wurden.

Abb. 8 zeigt eine Draufsicht der „Brücke“. Neben den Referenzdaten in 8(a) ist der finale Datensatz mit der RADLER zurückgelegten Trajektorie in Abb. 8(b) abgebildet. Abb. 8(c) veranschaulicht wie der continuous-time SLAM Algorithmus in ca. 100 Iterationen die initiale Trajektorie korrigiert hat. Zum Vergleich wurden die finale Punktwolken von RADLER mit dem ICP-Algorithmus aus 3DTK /Nüchter et al. 2019/ in das Koordinatensystem der Referenzscans überführt. Wie bereits bei den vorherigen Experimenten weist die initiale Trajektorie eine Krümmung auf. Die Kurve am Ende der Brücke ist gut erfasst. Durch die Rechtskrümmung der beiden Brückenüberquerungen weichen Start und Ziel deutlich voneinander ab. Dies wird auch hier vom continuous-time SLAM Algorithmus korrigiert. Die Länge der Brücke ist korrekt erfasst, was man deutlich an den Ausbuchtungen der Brückenheiligen und an den Häusern am Ende der Brücke sieht. Die Höhe der Brücke und ihre Krümmung bereiten jedoch Schwierigkeiten. Im mittleren Teil liegt die Punktwolke bis ca. 30 cm oberhalb der Referenz, während sie an den Enden unterhalb liegt, am am Beginn der Messstrecke (rechts) ca. 2 m oberhalb, am Ende (links) knapp 4 m. Dies ist in der Seitenansicht in Abb. 9 deutlich erkennbar. Die initiale Punktwolke verfügt über keine Krümmung entlang des Bodens. Durch die Ausrichtung basierend auf der Startposition kommt es so zu Abweichungen von mehreren Metern am Ende der Brücke. Dies ist in der finalen Trajektorie korrigiert, jedoch ist die Krümmung dort zu stark, was in der Seitenansicht deutlich wird. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der Nähe des Laserscanner zum Boden. Da der Laserscanner erst ab einer Mindestweite von 0.5 m zuverlässig misst werden Bodenpunkte mit einem flachen Auftreffwinkel gemessen. Die dadurch entstehende große Auftrefffläche des Laserstrahls begünstigt Fehlmessungen. Systematische Fehler im Bodenbereich erklären die Krümmung. Diese Vermutung wird auch durch die quantitative Auswertung in Abb. 10 bestärkt. Während der Boden der Brücke am Ende der Brücke (links) Abweichungen von über 4 m aufweist, bleiben die Abweichungen am Geländer ca. 30 cm geringer, wie der Versatz des Farbverlaufes zeigt. Die korrekte Länge der Brücke wird auch an den geringen Abweichungen im Bereich der Statuen sichtbar. Eine genauere Betrachtung eines Brückenheiligen erfolgt in Abb. 11. Auch wenn die Punktdichte geringer ist und die Streuung der Daten es unmöglich macht Details zu erkennen, so ist dennoch die Statue klar als solche zu erkennen, ebenso wie die Bank. Im unteren Bereich weisen sowohl die Statue als auch die Bäume Fehler von unter 10 cm auf. Im oberen Bereich hingegen treten zahlreiche Streupunkte auf, von denen wenige sogar Abweichungen von über 50 cm haben. Ein Grund hierfür sind die zunehmenden Fehler mit steigender Entfernung. Ein Blick auf Abb. 9 zeigt, dass der continuous-time SLAM-Algorithmus trotz der klaren Fehler in der initialen Trajektorie in der Lage ist im Bereich der Statuen zwar verrauschte aber kompakte Punktwolken zu erzeugen.

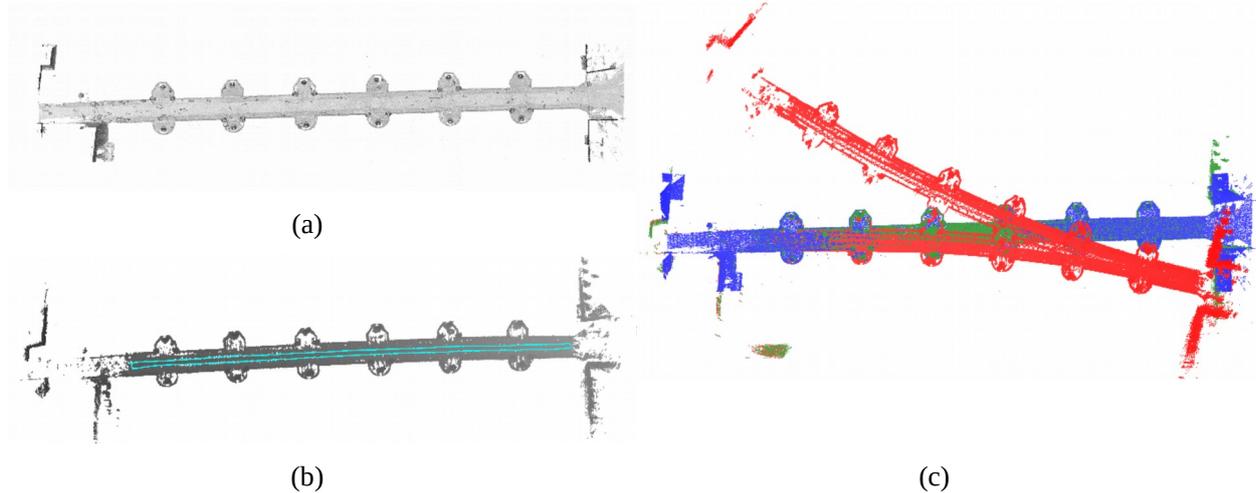


Abb. 8: Draufsicht auf die Ergebnisse der „Brücke“. (a) Die auf den Bereich der Brücke begrenzten Referenzdaten. (b) Die finale Trajektorie, die mittels des Continuous-time SLAM Ansatzes erzeugt wurde. (c) Die Referenzdaten (blau) mit der initialen (rot) und der finalen (grün) Punktwolke von RADLER.

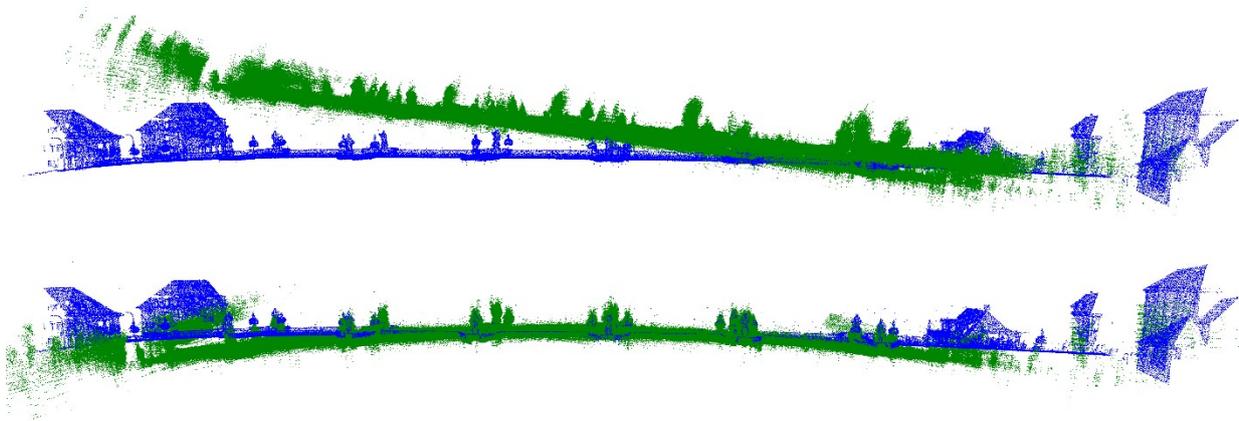


Abb. 9: Seitenansicht der „Brücke“. Die initiale (oben) und die finale Punktwolke (unten) verglichen mit den Referenzscans (blau). Die finale Punktwolke wurde mittels ICP-Algorithmus aus 3DTK /Nüchter et al. 2019/ an die Referenzdaten registriert. Die Ausrichtung der initialen Punktwolke entspricht der Ausrichtung des Starts der finalen Punktwolke (rechts).

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit präsentiert eine neue, kostengünstige Methode 3D Punktwolken ohne einen terrestrischen 3D Laserscanner zu erzeugen. Ein modifiziertes Einrad mit einem 2D Laserprofiler, einer IMU und einem Inkrementalgeber generiert die 3D Punktwolken durch ein radiales 3D Scanpattern und das Ergebnis wird mit einem continuous-time SLAM Ansatz optimiert. Die Ergebnisse und die Diskussion zeigen bereits vielversprechende 3D Punktwolken. Ideale Einsatzgebiete sind kleinere Vermessungsaufgaben in engen Umgebungen, bei denen die genaue Rekonstruktion kleiner Details keine Rolle spielt. Das Innenaufmaß von Gebäuden zur Erstellung von Grundrissen oder für BIM-Prozesse (Abk. engl. Building Information Modelling) oder auch die 3D-Modellierung von historischen Altstädten oder Gebäudeanlagen, die aufgrund ihrer engen Bauweise für mobiles Laserscanning prädestiniert sind und gegebenenfalls durch Steigungen und unebenen Untergrund schwer zugänglich sind. Typische Abweichungen liegen im Bereich von unter 20 cm. Die Nähe des Messaufbaus zum Boden führt zu Problemen bei der korrekten Bestimmung des Höhenprofils in

Außenszenarien, was in den Randbereichen längerer gerader Strecke absoluten Höhenabweichungen von mehreren Metern verursachen kann.

Dennoch stehen einige Verbesserungen für weitere Arbeiten aus. Ein Kalman Filter zur Fusion der Daten des Inkrementalgebers und der IMU soll die Genauigkeit der Odometrie verbessern. Zusätzlich könnte ein GNSS Sensor integriert werden um die initiale Trajektorie für den continuous-time SLAM Algorithmus bei Außenaufnahmen zu verbessern. Eine Verbesserung der Aufhängung der Sensorplatte kommt in Betracht um einige Nachteile wie das Spiel der Radachse, zu kompensieren.

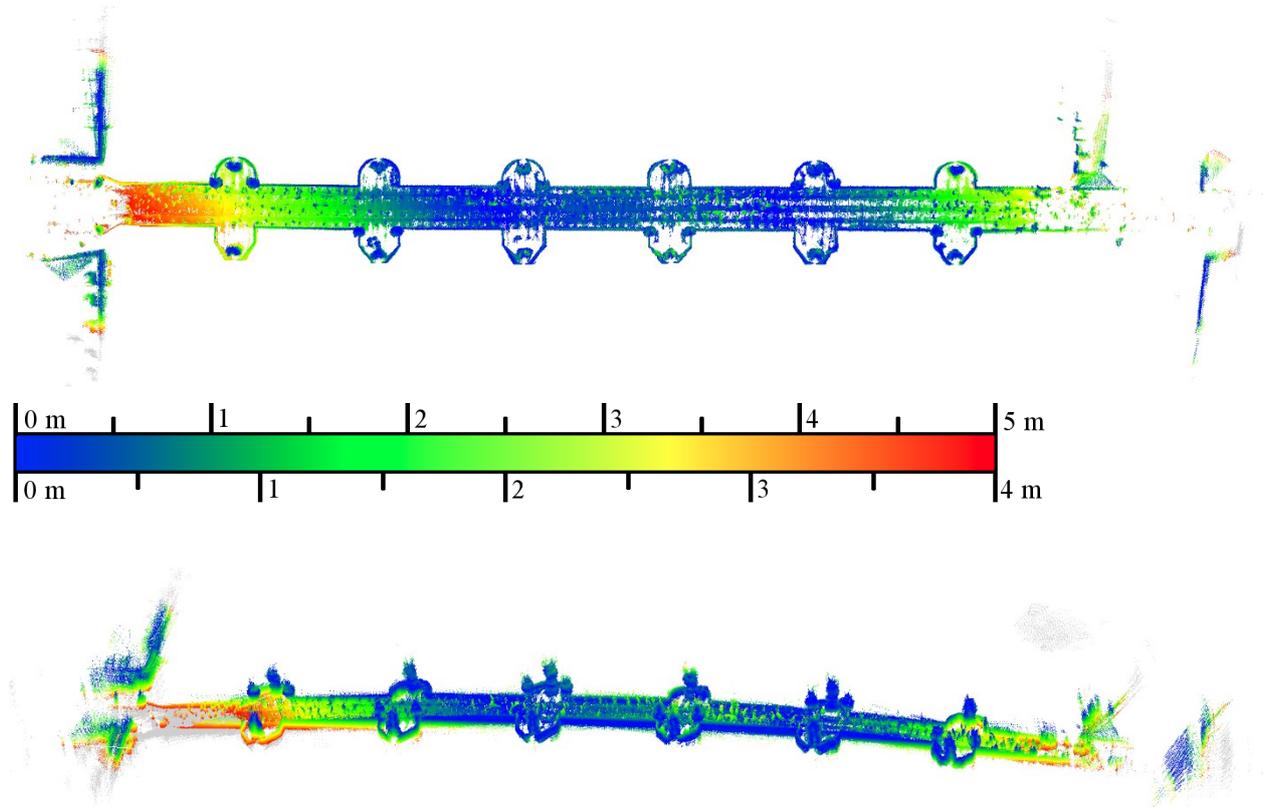


Abb. 10: Finale Punktwolken der „Brücke“ in zwei Ansichten. Die Farbe zeigt die Punkt-zu-Punkt Distanz entsprechend der abgebildeten Farbskala. Die Draufsicht (oben) hat einen Farbverlauf von 0 m (blau) zu 5 m (rot) während die Schrägansicht bei 4 m (rot) abschließt um bessere Details in der Brückenmitte zu erkennen.

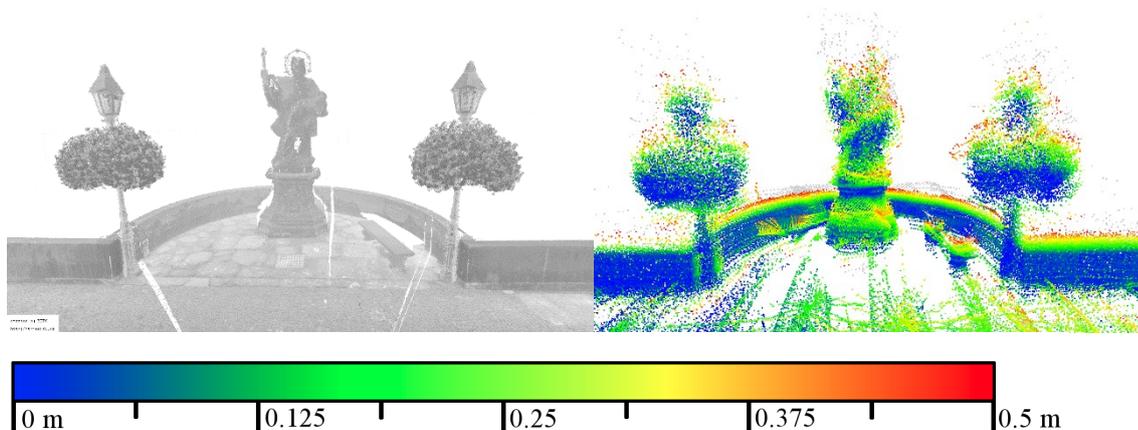


Abb. 11: Der Brückenheilige Johannes von Nepomuk in der Nahansicht (obere Reihe, 3. von links in Abb. 10). Links: die Referenzdaten aufgenommen mit einem Riegl VZ-400 Laserscanner. Rechts: die finale Punktwolke von RADLER. Die Farbe zeigt die Punkt-zu-Punkt Distanz entsprechend der abgebildeten Farbskala mit einem Farbverlauf von 0 m (blau) zu 0,5 m (rot).

DANKSAGUNG

Die Autoren danken Rahul Bhandari für das mechanische Design und die Konstruktion von RADLER.

LITERATUR

- Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992). *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2), S. 239-256.
- Bosse, M.; Zlot, R.; Flick, O. (2012). *Zebedee: Design of a spring-mounted 3-d range sensor with application to mobile mapping*. IEEE Transactions on Robotics, 28(5), S. 1104-1119.
- Elseberg, J.; Borrmann, D.; Nüchter, A. (2013). *Algorithmic Solutions for Computing Precise Maximum Likelihood 3D Point Clouds from Mobile Laser Scanning Platforms*. Remote Sensing, 5(11), S. 5871-5906.
- Google (2011). *Street View takes you inside museums around the world*. Official Blog – MAPS . News about Google Maps. <https://maps.googleblog.com/2011/02/street-view-takes-you-inside-museums.html>, abgerufen am 23.12.2019.
- Lauterbach, H.A.; Borrmann, D.; Hess, R.; Eck, D., Schilling, K; Nüchter, A. (2015). *Evaluation of a Backpack-Mounted 3D Mobile Scanning System*. Remote Sensing, 7(10), S. 13753-13781.
- Lardinois, F.T.C. (2015). *Google Unveils The Cartographer, Its Indoor Mapping Backpack*. <http://techcrunch.com/2014/09/04/google-unveils-the-cartographer-its-indoor-mapping-backpack/>, abgerufen am 01.10.2019.
- Lehtola, V.V.; Virtanen, J.-P.; Kukko, A.; Kaartinen H.; Hyypä, H. (2015). *Localization of mobile laser scanner using classical mechanics*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 99, S. 25-29.
- Leica (2015). *Leica pegasus:backpack*. http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-PegasusBackpack_106730.htm, abgerufen am 01.10.2019
- NavVis (2019). *M6 trolley*. <https://navvis.com/m6>, abgerufen am 23.12.2019.
- Madgwick, S. O. H.; Harrison, A. J. L.; Vaidyanathan, R. (2011). *Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, S. 1 - 7.
- Nüchter, A. et al. (2019). *3DTK - The 3D Toolkit*. <http://threedtk.de>, abgerufen am 01.10.2019.
- Nüchter, A.; Elseberg, J.; Borrmann, D. (2013). *Irma3D - An Intelligent Robot for Mapping Applications*. Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Telematics Applications (TA '13), S. 119-124.
- Nüchter, A.; Lingemann, K.; Borrmann, D.; Elseberg, J.; Böhm, J. (2008). *Global Konsistente 3D-Kartierung mit Scanmatching*. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Wichmann Verlag, S. 194-201.
- Riegl Laser Measurement Systems (2019). *Datenblatt VZ-400*. <http://riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>, abgerufen am 25.02.2019.
- Schauer, J.; Nüchter, A.: *Removing non-static objects from 3D laser scan data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (JPRS). 143, 15--38 (2018).
- Thomson, C.; Apostolopoulos, G.; Backes, D.; Boehm, J. (2013). *Mobile laser scanning for indoor modelling*. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W2: S. 289-293.
- VIAmetris (2015). *Mobile Mapping Technology*. <http://www.viametris.com>, abgerufen am 01.10.2019.