
Visuelle Odometrie und SLAM für die Bewegungskompensation und mobile Kartierung mit einem optischen 3D-Unterwassersensor

Michael BLEIER, Christoph MUNKELT, Matthias HEINZE, Christian BRÄUER-BURCHARDT, Helge Andreas LAUTERBACH, Joschka VAN DER LUCHT und Andreas NÜCHTER

Zusammenfassung

Im Projekt UWSensor wurde ein neuartiger optischer 3D-Unterwassersensor basierend auf Streifenlichtprojektion mit einem GOBO-Projektor entwickelt. Das Sensorsystem ermöglicht eine flächige 3D-Erfassung mit hoher Genauigkeit und Abtastrate, sowie eine gleichzeitige Erfassung von Farbdaten. Dies erlaubt den Einsatz zur mobilen Kartierung und 3D-Erfassung mit einem Unterwasserfahrzeug. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Bewegungsschätzung sowie der Fusion der Einzelscans in ein global konsistentes 3D-Modell. Hierbei wird zunächst visuelle Odometrie in Kombination mit einem faseroptischen Gyroskop genutzt, um die Eigenbewegung des Sensors zu schätzen. Die daraus latenzarm abgeleiteten Posen werden dem Live-Aufnahmesystem des Sensors bereitgestellt, um eine online-Bewegungskompensation der den 3D Scans zugrundeliegenden Serie von Kamerabildern zu realisieren. Anschließend wird eine mehrstufigen Registrierungsstrategie angewendet, um die Schätzung der Trajektorie weiter zu verfeinern. Zunächst wird mittels des Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus jede 3D-Punktwolke sequentiell gegen ihre Vorgänger registriert. Da sich kleine Restfehler in der Registrierung akkumulieren, erfolgt im nächsten Schritt eine zweite Registrierung mittels eines zeitkontinuierlichen ICP-Verfahren. Hierbei werden mehrere Punktwolken zu Teilkarten zusammengefasst und gegeneinander registriert, wobei die Verbesserungen der Trajektorie im Anschluss wiederum auf die einzelnen Posen der Punktwolken verteilt werden, um die Kontinuität der Trajektorie zu bewahren. In diesem Registrierungsschritt werden auch Schleifen in der Trajektorie erkannt und geschlossen, um den Drift zu korrigieren. Für die Kalibrierung des Sensorsystems wurde eine Kombination von Aufnahmen in Luft und im Wasser eingesetzt. Das Verfahren wurde auf dynamischen Aufnahmen mit dem neuentwickelten Sensorsystem in einem Wasserbecken getestet und evaluiert. Hierbei wurden sowohl bekannte Testkörper mit bewegtem Sensor im Wasser eingescannt, als auch die berechneten Trajektorien anhand der Bewegungsdaten des Portalsystems validiert.

1 Einleitung

Das Projekt UWSensor¹ arbeitet an einer neuartigen Generation von 3D Unterwasser Sensoren für die mobile Offshore Vermessung. Der Sensor soll dabei für den Betrieb mittels Remote Operated Vehicle (ROV) konfiguriert werden. Das ROV soll den Sensor während des Betriebs im Greifarm halten oder der Sensor am Rahmen des ROV montiert werden. Der

¹ <https://www.searenergy.com/portfolio-item/r-d-project-3d-uw-sensor/>

Sensor arbeitet während das ROV in Bewegung ist und Einzelscans werden zu einem Gesamtmodell miteinander verschmolzen um das Scanfeld kontinuierlich zu erweitern. Ziel ist hierbei eine Bewegungsgeschwindigkeit des Sensors von ca. 1 m/s.

Das im Forschungsprojekt UWSensor entwickelte 3D Sensorsystem basiert auf aktivem Stereo mit Musterprojektion. Um bei schnellen Bewegungen im Wasser präzise zu messen und die einzelnen 3D-Scans zu Karten zusammensetzen, muss die Bewegung kompensiert werden. Hierzu ist eine möglichst gute Schätzung der Sensorbewegung notwendig. Es gibt verschiedene Ansätze zur Lokalisierung in einer Unterwasserumgebung. Einer der schwierigen Aspekte dieses Vorhabens ist, dass Ansätze, die an Land robust funktionieren, nicht unbedingt direkt in Unterwasserumgebungen umgesetzt werden können aufgrund eingeschränkter Sichtbedingungen und Medienwechsel. Aufgrund der Beschaffenheit des Sensors können kamerabasierte Ansätze der Unterwasserlokalisierung als auch Verfahren basierend auf der Registrierung der 3D-Daten einzeln oder in Kombination eingesetzt werden. In stark unstrukturierten Unterwasserumgebungen bleibt es jedoch herausfordernd.

Des Weiteren wird bei schnellen Sensorbewegungen die Annahme einer statischen Messumgebung verletzt, da das eingesetzte 3D-Messverfahren auf einer Mehrbildauswertung beruht, welche mit einem geringen zeitlichen Versatz einhergeht. Diese Probleme werden in dieser Arbeit dadurch adressiert, dass eine initiale Trajektorie anhand visueller Odometrie generiert wird. Anhand dieser wird eine Bewegungskompensation für die 3D-Rekonstruktion durchgeführt.

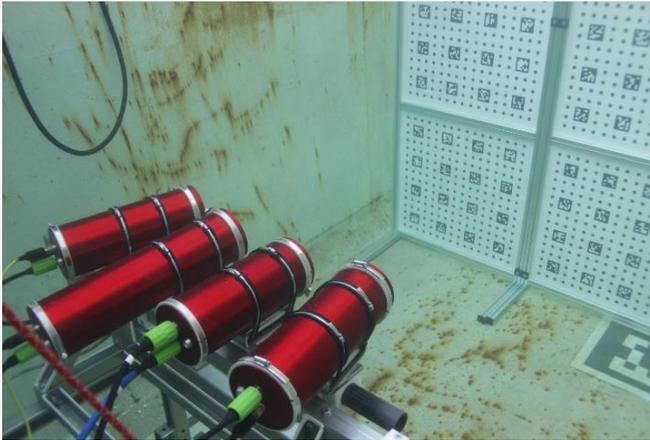


Abb. 1:
Unterwasser 3D-Sensor

2 Unterwasser 3D Sensor

Der Unterwassersensor verwendet ein Mehrbild 3D-Rekonstruktionsverfahren basierend auf aktivem Stereo mit Musterprojektion. Hierbei wird ein GOBO-Projektor mit einer leistungsfähigen LED als Lichtquelle eingesetzt. Der Sensor ist in Abbildung 1 dargestellt bei Kalibrierenaufnahmen in einem Wassertank. In den äußeren beiden Gehäusen sind die 3D-Messkameras als Stereopaar verbaut. In der Mitte befinden sich zwei Gehäuse: eines für den GOBO-Projektor und die Steuereinheit des Sensors. Ein zweites Gehäuse beinhaltet eine zusätzliche

Farbkamera und eine Inertial Measurement Unit (IMU) mit faseroptischem Gyroskop. Zusätzlich sind noch zwei LED-Blitzlichter für die Ausleuchtung der Farbaufnahmen am Sensor angebracht.

Die Steuereinheit triggert Kameras, Projektor und LED-Blitzlichter so, dass in einem konfigurierbaren Trigger-Schema im Wechsel Messreihen von Stereobildern mit Musterprojektion und Farbbilder mit LED-Blitzbeleuchtung aufgenommen werden. Das Sensorsystem liefert 3D-Punktwolken mit einer Scanrate von bis zu 60 Hz. Ein Einzelscan enthält dabei ca. eine Million Punkte. Bei einem Messabstand von ca. 2 m ergibt sich ein Messvolumen von ca. $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Synchron zu den Punktwolken werden Farbbilder mit 7 Megapixel mit einer Bildfrequenz von 25 Hz aufgenommen. Die Farbkamera hat dabei ein größeres Sichtfeld als der 3D-Messbereich. Bei einer Messentfernung von 2 m wird ein Bereich von ca. $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ erfasst. Parallel wird dazu der IMU-Sensordatenstrom erfasst und aufgezeichnet.

Die Sensordaten werden über ein Unterwasserglasfaserkabel übertragen. Die Auswertung der Sensordaten und 3D-Berechnung findet außerhalb des Wassers auf einem PC statt. Die 3D-Rekonstruktion und Weiterverarbeitung erfolgt dabei online, um eine direkte Qualitätskontrolle der 3D-Aufnahmen zu ermöglichen.

3 Bewegungskompensation und mobile Kartierung

Durch die hohe Scanrate und die flächige Antastung eignet sich der Unterwasser 3D Sensor sehr gut für die mobile Kartierung, da es möglich ist, direkt Einzelscans miteinander zu registrieren im Vergleich zu Linienlaserscannern, die nur einzelne 2D-Profile aufnehmen. Allerdings ergibt sich durch das begrenzte Messfeld von ca. $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ die Herausforderung, dass teilweise nicht genug Struktur für präzise Registrierung von Einzelscans im Blickfeld des Scanners vorhanden ist. Deshalb wird eine mehrstufige zeitkontinuierliche Registrierung, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, durchgeführt.

Die zum Einsatz kommende 3D-Rekonstruktion mittels aktiver Musterprojektion (HEIST ET AL. 2018) nutzt temporale Korrelation über eine Sequenz von Grauwertbildern zur genauen Korrespondenzbestimmung zwischen linker und rechter 3D Messkamera. Das mathematische Modell setzt dabei die Abbildung jedes Pixels eines Grauwert-Stapels auf den gleichen Objektpunkt voraus. Diese statische Messkonfiguration ist im geplanten kontinuierlichen Vermessungseinsatz mittel ROV nicht gegeben. Die Möglichkeit der Schaffung einer quasi-statischen Messsituation durch Hochgeschwindigkeits-Projektion und -Aufnahme ist aufgrund der herausfordernden Rahmenbedingungen unter Wasser (Trübung, Absorption, Leistungsbudget Scanner) nicht möglich. Dadurch kommt es bei den geplanten Messgeschwindigkeiten von 0,2 m/s bis 1 m/s zu Messartefakten.

Die typischen Szenarien sehen jedoch eine Erfassung von Großstrukturen unter Wasser durch Zusammensetzung von 3D-Einzelaufnahmen vor, welche durch „Überfliegen“ des Messobjektes durch das ROV samt Scanner in kontinuierlicher linearer Bewegung gewonnen werden. Ist für eine solche hauptsächlich lineare Bewegung in gleichbleibendem Messabstand eine latenzarme Bewegungsschätzung vorhanden, so kann die resultierende Bewegung innerhalb des Grauwertstapels aufwandsarm ausgeglichen werden. Das Vorgehen dazu wird in Abschnitt 3.3 näher erläutert.

3.1 Kalibrierung

Die Stereokalibrierung des Sensors wird anhand eines Kreismusters durchgeführt (BRÄUER-BURCHARDT ET AL. 2017). Hierbei werden zusätzliche ArUco Marker eingesetzt, um jedem Kreis eine eindeutige ID zu geben. Die Kalibrierplatten sind hierbei durch Plattendirektdruck auf Floatglas umgesetzt und in Alurahmen als mechanischem Schutz verbaut. Für die Kalibrierung wird BINGO als Bündelblockausgleichssoftware eingesetzt.

Das Setup zur Kalibrierung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Kalibrierung von IMU zu Farbkamera wird dabei in Luft durchgeführt. Die Kalibrierung der Kameras und Stereokalibrierung wird im Wasser durchgeführt. Die äußere Orientierung der Farbkamera relativ zu den Messkameras wird im Stereokalibrierungsprozess bestimmt.

Die IMU-Einheit ist zusammen mit der Farbkamera in einem Unterwassergehäuse verbaut. Farbkamera und IMU sind mechanisch starr miteinander verbunden. Um die IMU Messungen zu den Beobachtungen der Kameras und den 3D-Messungen in Bezug setzen, muss die extrinsische Orientierung der Sensoren bestimmt werden. Hierzu wird die Rotation und Translation zwischen Farbkamera und IMU kalibriert. Die Verschiebung und Rotation zwischen Farbkamera und IMU wird über eine Optimierung zwischen IMU Messungen und der Kameratrajektorie ermittelt. Hierzu wird die intrinsisch kalibrierte Farbkamera vor einer bekannten, statischen Struktur mit optischen Marken bewegt. Hierdurch kann die Trajektorie der Farbkamera mit allen sechs Freiheitsgraden bestimmt werden.

Aus der Trajektorie können die zu erwartenden IMU Messungen bestimmt werden. Die lineare Verschiebung und Rotation der IMU relativ zur Farbkamera werden dann so bestimmt, dass die tatsächlichen Messungen möglichst wenig von den anhand der Kameratrajektorie vorhergesagten Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen abweichen. Das eingesetzte Verfahren basiert auf den Arbeiten von FURGALE ET AL. (2013) und wurde entsprechend an die Systemparameter des Unterwassersensors angepasst.

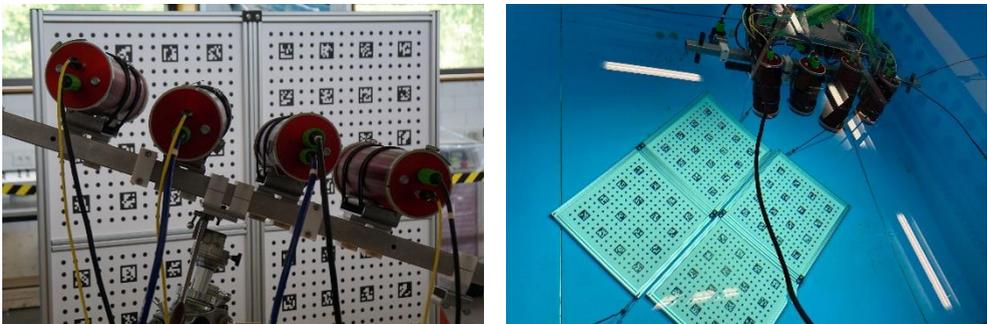


Abb. 2: Kalibrierung der Sensorik in Luft und im Wasser.

3.2 Visuelle Odometrie

Für den visuellen Ansatz ist ausreichend Sichtweite im Wasser und genügend Licht erforderlich. Da in der Tiefe keine ausreichende Beleuchtung durch die Sonne vorhanden ist, wird hier durch LED-Blitzlichter beleuchtet. Außerdem muss sich der Sensor in einer Umgebung

befinden, die ausreichend optische Merkmale enthält. Zur Auswertung der Bilder der Kameras ist die Erkennung von Merkmalen erforderlich. Features sind lokale, aussagekräftige und wiedererkennbare Teile des Bildes. Der visuelle Ansatz basiert hierbei auf (QIN ET AL. 2018) und verwendet den Harris-Feature-Detektor (auch als Shi-Tomasi Methode bekannt), um die Merkmale automatisch aus dem Bild zu extrahieren.

Zu Beginn der Aufnahme muss die Posenschätzung initialisiert werden. Dies bedeutet, dass die Methode nicht direkt aus dem Stillstand verwendet werden kann. Der Sensor muss zunächst bewegt werden, um genug Parallaxe zu erzeugen, dass eine unskalierte Structure from Motion (SfM) Rekonstruktion der Merkmalspunkte zu ermöglichen. Diese wird dann durch eine Anpassung mit den integrierten IMU-Daten skaliert. Sobald dieser Initialisierungsprozess abgeschlossen ist, kann mit der eigentlichen Aufnahme begonnen werden.

Die Zeitverschiebung zwischen Kamera und IMU-Datenstrom wird online bestimmt. Die relative Bewegung wird dann durch Ausgleich der visuellen und IMU Messungen in einer lokalen Umgebung bestimmt. Die Optimierung wird hier lokal über eine fortlaufende Gruppe von Keyframes durchgeführt. Keyframes werden selektiert anhand eines Schwellwerts auf die mittlere Parallaxe der einzelnen Merkmalspunkte. Zu beachten ist, dass in diesem Schritt keine Relokalisierung oder ein Schließen von Schleifen anhand visueller Merkmale eingesetzt wird. Das Ziel ist eine stetige Trajektorie ohne Sprünge zu erhalten. Die visuelle Odometrie soll primär zur lokalen Bewegungskompensation eingesetzt werden. Ein eventuell durch Restfehler entstehender Drift wird später in der 3D-Registrierung kompensiert.

3.3 Bewegungskompensation der 3D-Scans

Zur Bewegungskompensation im allgemeingültigen Fall sind mehrere schwer zu realisierende Randbedingungen einzuhalten:

1. Die Bewegung muss langsam im Verhältnis zur Belichtungszeit der einzelnen 2D-Bilder sein, um Bewegungsunschärfe auszuschließen,
2. Eine genaue Bewegungsschätzung ist für jedes einzelne 2D-Bild der 3D-Messsequenz notwendig, um Veränderungen in der Bewegung abbilden zu können, und
3. Die Messentfernung (und Position) jedes Objektpunktes muss für die Korrektur vor der 3D-Berechnung bekannt sein, um Parallaxen- (und Rotations-) Effekte ausgleichen zu können.

Aufgrund der in Abschnitt 3 eingeführten Einschränkungen für den typischen Unterwasser-Einsatz können jedoch folgende Vereinfachungen eingeführt werden: Bewegungsunschärfe wird durch auf die Bewegungsgeschwindigkeit angepasste Belichtungszeit und Bildfrequenz minimiert; es wird von einer gleichförmigen Bewegung ausgegangen; die Messobjekte werden mit einer vorwiegend translatorischen Bewegung in konstanter Messentfernung aufgenommen.

Auf diesen Spezialfall im UW-Kontext ist die entwickelte Bewegungskompensation ausgerichtet. Dafür wird mit visueller Odometrie latenzarm die Pose des Sensors zum aktuellen Zeitpunkt extrapoliert (siehe Abschnitt 3.2). Der 3D-Rekonstruktionsprozess interpoliert aus den vergangen und der aktuellen Sensor-Pose mitsamt ihren Zeitstempeln den aus der Bewegung resultierenden aktuellen mittleren Versatz $\Delta_{x,y}$ in Pixeln auf den Messkameras für alle Bilder der aktuellen 3D-Messsequenz. Dafür wird für jeden Kamera-Pixel ein Objektpunkt

auf einer orthogonal zur Sensorsichtachse positionierten Ebene in nominaler Messentfernung angenommen.

Zur eigentlichen Bewegungskompensation können nun die rektifizierten 2D-Ausgangs-Bilder einer 3D-Rekonstruktion um jeweils $n \cdot \Delta_{x,y}$ Pixel verschoben werden. Dadurch werden (unter den oben erläuterten Annahmen) zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Orte auf dem Messobjekt bei bekannter Bewegung auf den gleichen Bildpixel abgebildet. Damit können alle weiteren Berechnungsschritte (Korrelation, Filterung, Triangulation, etc., siehe (HEIST ET AL. 2018) wie gewohnt angewendet werden. Um den Mehraufwand der Verschiebung zu vermeiden, erweiterten wir das Korrelationsmodul um die direkte Berücksichtigung des Versatzes $\Delta_{x,y}$ während der Korrelation. Damit kann die Bewegungskompensation im Rahmen der in OpenCL implementierten zeitlichen Korrelation ohne Leistungseinbußen ausgeführt werden.

3.4 Registrierung der 3D-Daten

Aufbauend auf der initialen Schätzung der Trajektorie mittels visueller Odometrie wird eine mehrstufige Registrierungsstrategie angewandt, um die Trajektorie weiter zu verfeinern. Abbildung 3 gibt einen Überblick der Verarbeitungsschritte. Die ersten beiden Stufen werden Online ausgeführt und erlauben dem Operator eine erste Einschätzung der Ergebnisse. In der Nachverarbeitung erfolgt eine globale Optimierung der Punktwolke

Zur Vorbereitung für die Registrierung, werden die 3D Daten zunächst gefiltert, um die Größe der zu verarbeitenden Punktwolke zu reduzieren und dabei eine ausgewogene räumliche Verteilung der gewählten Punkte zu gewährleisten.

Mittels des Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus wird jede 3D Punktwolke sequentiell gegen ihre Vorgänger registriert. Ziel dieses Schrittes ist es, die Trajektorie lokal zu optimieren und damit die resultierende 3D Karte zu verbessern. Der Suchradius wird dabei in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Sensors sehr klein gewählt (im Bereich weniger cm) um der Gefahr von groben Registrierungsfehlern aufgrund des beschränkten Sichtfeldes sowie der zu erwartenden Strukturarmut der erfassten Szenerie zu begegnen.

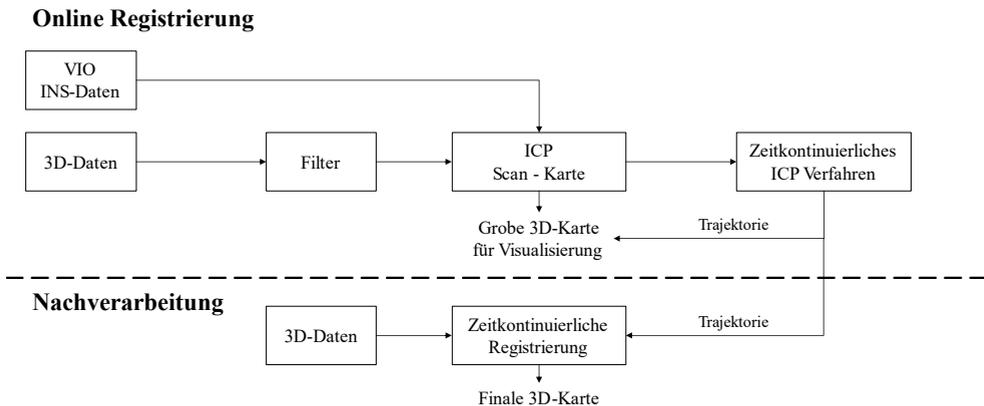


Abb. 3: Ablaufdiagramm der 3D Registrierung.

Da sich verbleibende Restfehler in der Registrierung akkumulieren und der bestehende Drift der visuellen Odometrie nicht vollständig eliminiert wird, erfolgt im nächsten Schritt eine zweite Registrierung mit einem zeitkontinuierlichen ICP-Verfahren. Grundgedanke ist, dass der Fehler der Trajektorie in zeitlicher Nähe einer betrachteten Pose vernachlässigbar ist. Die Trajektorie wird dann in Teilabschnitte zerlegt und mehrere aufeinanderfolgende 3D Scans um einen gewählten Referenzscan zu einer Teilkarte zusammengefasst. Die Teilkarten werden wiederum gegen ihre Vorgänger registriert. Die Änderung der Pose eines Referenzscans wird im Anschluss auf die Posen zwischen zwei Referenzscans verteilt, um die Kontinuität der Trajektorie zu wahren. Für kleine Änderungen ist dabei eine lineare Verteilung (Translation) bzw. mit SLERP (Rotation) ausreichend. Zur Korrektur des akkumulierten Drifts werden Schleifen erkannt und geschlossen (SPRICKERHOF ET AL 2011). Dazu werden die Posen der aggregierten Teilkarten optimiert und die Änderungen anschließend analog zu oben auf die Einzelposen verteilt. Die resultierende Karte dient der Visualisierung während des Messvorgangs.

Die Nachverarbeitung der Daten zur Erstellung der finalen 3D Punktwolke erfolgt mit zeitkontinuierlichem SLAM (ELSEBERG ET AL. 2013). Die überlappenden Teilkarten werden in diesem Schritt mit Graph basiertem SLAM rigide eingepasst. Das Resultat dient als Startwert für die semi-rigide Registrierung zur numerischen Minimierung des Trajektoriefehlers.

4 Experimente und Auswertung

Im November 2021 wurde der Unterwassersensor bei Fraunhofer IOSB AST in Ilmenau in der Unterwassertestanlage getestet. Hierbei wurden dynamische Aufnahmen an einem dreiachsigen Raumportal durchgeführt, das im linken Bild in Abbildung 4 zu sehen ist. Im Wasser wurde eine Rohrleitung sowie eine Kugelhantel und eine ebene Messplatte platziert. Die Unterwasserszene ist im rechten Bild von Abbildung 4 dargestellt. Es wurden Aufnahmen mit zwei Sensorgeschwindigkeiten von ca. 0,1 m/s und 0,7 m/s durchgeführt. Die Messungen wurden hierbei in klarem Wasser durchgeführt.

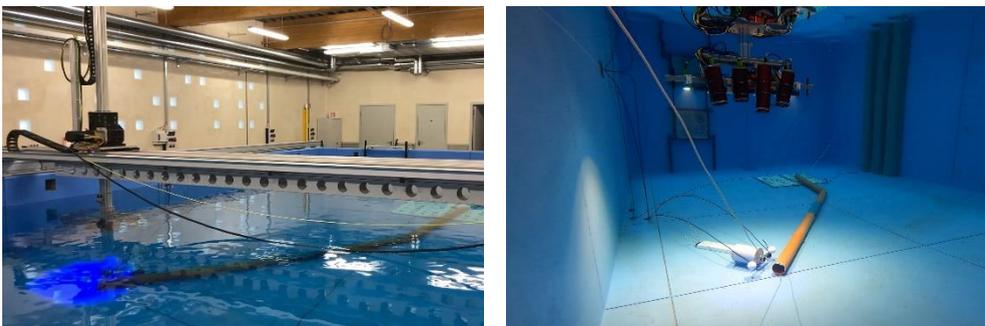


Abb. 4: Testumgebung bei Fraunhofer IOSB AST in Ilmenau. Links: Portalsystem. Rechts: Unterwasserszene mit Testkörpern und Rohrleitung.

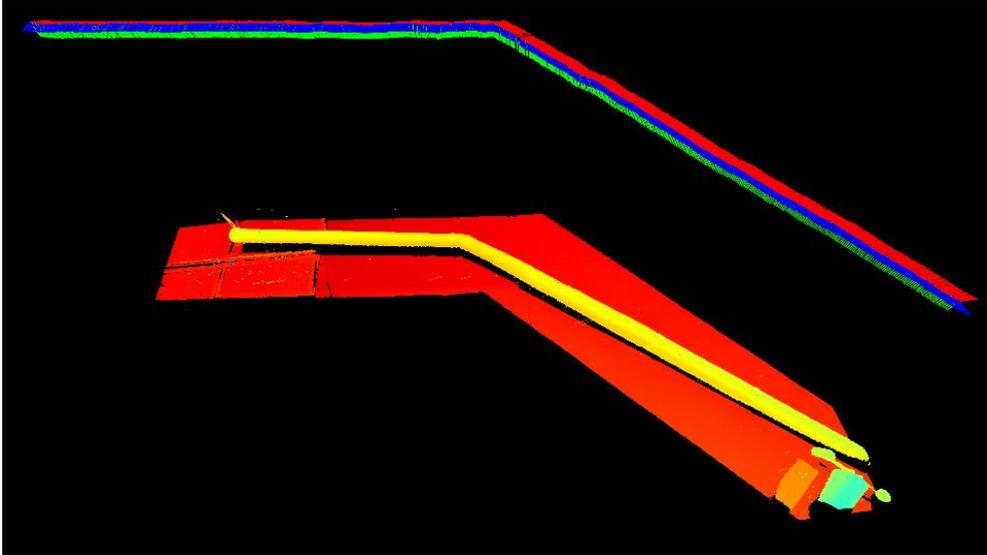


Abb. 5: Erzeugte 3D Punktwolke eingefärbt nach der Höhe und Visualisierung der Sensortrajektorie.

Abbildung 5 zeigt die erzeugte Punktwolke, die aus 680 Einzelscans anhand der mit visueller Odometrie bestimmten Trajektorie zusammengesetzt wurde. Die Punktwolke ist eingefärbt anhand der Höhe. Im oberen Teil des Bildes sind die bestimmten Sensorposen visualisiert.

4.1 Ergebnis der Bewegungskompensation

Die Wirksamkeit der implementierten automatischen Bewegungskompensation („Automatisch“) wurde im Vergleich zur unkompensierten 3D-Rekonstruktion („Keine“) und zur durch einen Experten bestimmten Bewegung („Manuell“) untersucht. Dabei werden einzelne 3D-Scans, welche im gewählten Messmodus ungefähr einen Bereich von $0,9\text{ m} \times 0,7\text{ m}$ abdecken, analysiert. Als Referenzobjekte kommen die Kugeln eines Kugelabstandsnormals, sowie ausgewählte Bereiche des vermessenen Rohrabschnitts zum Einsatz. Aus dem gleichen Ausgangsdatensatz wurde dazu mit den drei zu vergleichenden Bewegungskompensations-Methoden jeweils die 3D-Rekonstruktion durchgeführt.

Abbildung 6 zeigt die graphische Darstellung eines bei ca. $0,7\text{ m/s}$ aufgenommenen Rohrabschnitts. Die Markierung zeigt ein Detail einer Muffenstruktur, an welcher man deutlich die erzielte Verbesserung sowohl in der Rekonstruktionsqualität als auch in der Vollständigkeit der Punktwolke ablesen kann. Dabei sind zwischen der manuellen und der automatischen Korrektur kaum Unterschiede erkennbar.

In Tabelle 1 sind Messwerte bei bewegtem Sensor in zwei Geschwindigkeiten aufgeführt. Dabei werden im Datensatz zum gleichen Zeitpunkt in der 3D Rekonstruktion jeweils eine Kugel bzw. Zylinder nach der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme bei freiem Radius

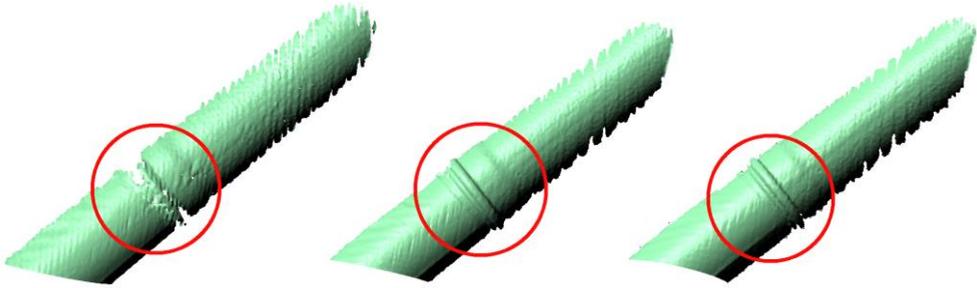


Abb. 6: Ergebnisse der 3D-Rekonstruktion eines Rohrabschnitts mit Muffe bei Sensorbewegung mit $0,7 \text{ m/s}$. Links: Deutlich sichtbare, bewegungsinduzierte Rekonstruktionsartefakte („Keine“). Mitte: Deutliche Artefaktreduktion und Verbesserung der Detailauflösung bei manueller Bestimmung der Sensorbewegung („Manuell“). Rechts: Vergleichbare Ergebnisse bei Bewegungskompensation mit automatischer Posenschätzung („Automatisch“).

in den jeweiligen Referenzkörper eingepasst. Angegeben sind die jeweiligen Standardabweichungen und die Anzahl der rekonstruierten 3D-Punkte, welche die gesetzten Qualitätsschwellwerte erfüllen.

Zwei Ergebnisse sind dabei ableitbar. Zum einen ist der Vorteil sowohl der manuellen als auch der automatischen Bewegungskompensation bei größerer Geschwindigkeit im Vergleich zum unkompensierten Ansatz deutlicher. So sind bei $0,1 \text{ m/s}$ die Vorteile mit ca. +20% geringer als bei $0,7 \text{ m/s}$ mit ca. +60% verbesserter Messunsicherheit beim Kugelfit. Zum Vergleich: im unbewegten Zustand werden hier bei äquivalenten Messbedingungen ca. $0,25 \text{ mm}$ Standardabweichung beim Kugelfit erreicht. Andererseits können bei stärker strukturierten Objekten, wie z.B. der Kugel, bei schnelleren Bewegungen bis zu ca. 90% mehr 3D-Punkte mit erfüllten Qualitätskriterien rekonstruiert werden. Die Vollständigkeit der Punktwolke kann also signifikant erhöht werden.

Somit kann die automatische Bewegungskompensation bei latenzarmer und vertrauenswürdiger Sensorposenschätzung unter den erläuterten speziellen Bedingungen im Wasser deutlich verbesserte Ergebnisse im Vergleich zur unkompensierten 3D-Rekonstruktion erzielen.

Tabelle 1: Antastabweichungen der Referenzkörper

Geschwindigkeit	Kompensationsmethode	Kugelfit StdAbw.	Kugelfit Punktzahl	Zylidnerfit StdAbw.	Zylinderfit Punktzahl
$0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Keine	0,39 mm	6800	0,31 mm	69000
	Manuell	0,31 mm	7100	0,32 mm	69000
	Automatisch	0,33 mm	7100	0,32 mm	69000
$0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Keine	0,52 mm	3200	0,39 mm	47500
	Manuell	0,36 mm	5200	0,34 mm	49600
	Automatisch	0,32 mm	6000	0,34 mm	49600

4.2 Vergleich der Trajektorienschätzung

Die bestimmte Trajektorie durch die visuelle Odometrie wird verifiziert durch einen Vergleich mit der vom Portalsystem aufgezeichneten Bewegung. Vom Portal wird hierbei die Translation über Encoder der einzelnen Linearachsen präzise bestimmt. Im Gegensatz dazu liefert die visuelle Odometrie sowohl Translation als auch Rotation des Sensors. In diesem Vergleich wird somit nur die Schätzung der Translation überprüft.

Hierbei wurde keine Kalibrierung zwischen Portalsystem und Unterwassersensor durchgeführt. Die Trajektorien werden verglichen, indem die beiden Trajektorien im Startpunkt gegeneinander ausgerichtet werden. Die Referenztrajektorie des Portalsystems ist dabei planar. Die Trajektorie der visuellen Odometrie liegt ebenfalls näherungsweise in einer Ebene mit einer maximalen Abweichung von ca. ± 1 cm. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die Draufsicht auf die Trajektorie und die Abweichung zwischen Portaldaten und der Lösung der visuellen Odometrie für zwei verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten. Die Abweichung berechnet sich hierbei als der Abstand der beiden 3D-Trajektorien. Die Aufnahme startet im Nullpunkt.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis für die langsame Verfahrensgeschwindigkeit von ca. 0,1 m/s. In der linken Grafik ist zu sehen, dass die beiden Trajektorien gut übereinander liegen. In der rechten Grafik zeigen sich kleine Abweichungen zu Beginn der linearen Trajektorie, die dann um den Knickpunkt deutlich ansteigen. Dies ist vermutlich zum einen auf einen Restfehler in der Skalierung der visuellen Odometriedaten zurückzuführen. Zum anderen weisen die Bilder im mittleren Teil der Aufnahme weniger Struktur auf, da hier nur das Rohr vor gleichfarbigem Hintergrund sichtbar ist.

Das Ergebnis für die höhere Geschwindigkeit von 0,7 m/s ist vergleichbar, allerdings sind die Fehler hier allgemein höher, wie in Abbildung 8 zu sehen. Die Trajektorie ist hier aufgrund des unterschiedlichen Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der Linearachsen nicht identisch zur Aufnahme bei langsamer Geschwindigkeit.

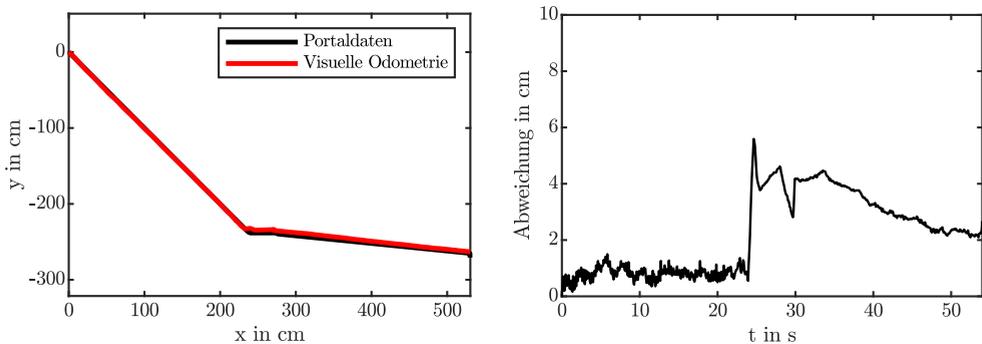


Abb. 7: Trajektorie und Abweichung zwischen Portaldaten und visueller Odometrie für eine Geschwindigkeit von ca. 0,1 m/s.

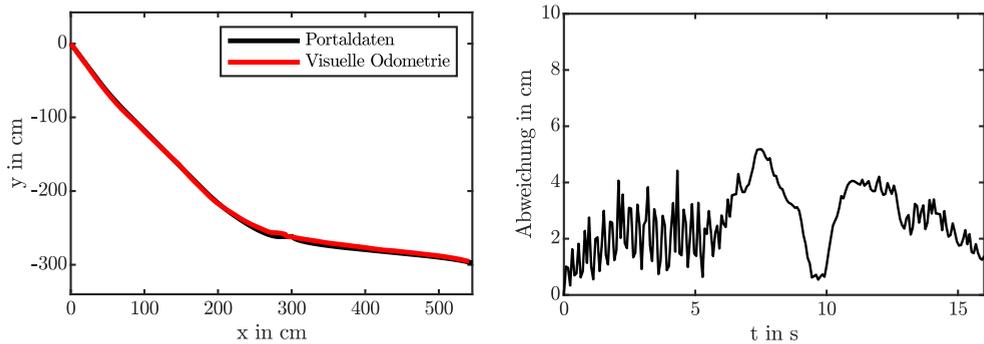


Abb. 8: Trajektorie und Abweichung zwischen Portaldaten und visueller Odometrie für eine Geschwindigkeit von ca. 0,7 m/s.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde visuelle Odometrie und SLAM mit einem 3D Unterwassersensor vorgestellt. Der in UWSensor entwickelte 3D Unterwasser Scanner ermöglicht eine flächige Antastung und hohe Abtastrate und ist somit sehr gut für mobile 3D-Kartierung im Wasser geeignet. Bei schnellen Sensorbewegung wird die Annahme einer statischen Messszene für die 3D Rekonstruktion im Mehrbildverfahren verletzt. Bei einer linearen Sensorbewegung von 1 m/s bewegt sich der Sensor ca. 1-2 cm innerhalb einer 3D- Bildsequenz je nach gewählter Aufnahmefrequenz und der Anzahl der Bilder. Für präzise Messungen bei schnellen Geschwindigkeiten muss diese Bewegung somit berücksichtigt werden. Die vorgestellte Kompensation über Verschiebung im Bildraum erzielt bereits eine deutliche Verbesserung in der Anwendung. Dies konnte durch Experimente mit einem Portalsystem für verschiedene Geschwindigkeiten der Datenaufnahme im Wasser gezeigt werden. Des Weiteren erlauben die durch die Bewegungskompensation verbesserten 3D-Ausgangsdaten eine feinere Registrierung und damit die Aufnahme genauerer 3D-Modelle.

Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Verbundprojekts UWSensor - Unterwasser-3D-Sensor. Die Autoren bedanken sich bei den Partnern des Konsortiums OKTOPUS, 3plusplus und SeaReEnergy für die Zusammenarbeit. Sowie bei Fraunhofer IOSB AST in Ilmenau für die Unterstützung bei den Experimenten mit dem Portalsystem.

Literatur

- Bräuer-Burchardt, C., Heinze, M., Schmidt, I., Kühmstedt, P. & Notni, G. (2015): *Compact handheld fringe projection based underwater 3d-scanner*. The International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W5, S. 33–39.
- Bräuer-Burchardt, C., Ölsner, S., Kühmstedt, P. & Notni, G. (2017): *Comparison of calibration strategies for optical 3D scanners based on structured light projection using a new evaluation methodology*. Proceedings of SPIE Vol. 10332, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV, 103320F; <https://doi.org/10.1117/12.2269971>
- Elseberg, J., Borrmann, D. & Nüchter, A. (2013): *Algorithmic solutions for computing accurate maximum likelihood 3D point clouds from mobile laser scanning platforms*. Remote Sensing, 5(11), S. 5871-5906.
- Furgale, P., Rehder, J. & Siegwart, R. (2013): *Unified Temporal and Spatial Calibration for Multi-Sensor Systems*. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan.
- Heist, S., Dietrich, P., Landmann, M., Kühmstedt, P. & Notni, G. (2018): *High-speed 3D shape measurement by GOBO projection of aperiodic sinusoidal fringes: a performance analysis*. Proceedings of SPIE Vol. 10667, Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII, 106670A; <https://doi.org/10.1117/12.2304760>
- Sprickerhof, J., Nüchter, A., Lingemann, K. & Hertzberg, J. (2011): *A heuristic loop closing technique for large-scale 6d slam*. Automatika, 52(3), S. 199-222.
- Qin, T., Li, P. & Shen, S. (2018): *VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator*. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 34, Nr. 4, S. 1004-1020.

Autoren

Bleier, Michael

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII - Robotik und Telematik

michael.bleier@uni-wuerzburg.de

Munkelt, Christoph

Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena

christoph.munkelt@iof.fraunhofer.de

Heinze, Matthias

Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena

matthias.heinze@iof.fraunhofer.de

Bräuer-Burchardt, Christian

Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena

christian.braeuer-burchardt@iof.fraunhofer.de

Lauterbach, Helge Andreas

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII - Robotik und Telematik

helge.lauterbach@uni-wuerzburg.de

van der Lucht, Joschka

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII - Robotik und Telematik

joschka.lucht@uni-wuerzburg.de

Nüchter, Andreas

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Informatik VII - Robotik und Telematik

andreas.nuechter@uni-wuerzburg.de