Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

06/2025

HN 131

Ausbildung mit Inhalten der Hydrographie HYDROGO DHyG

Georeferenzierung von 3D-Unterwasserstrukturen mittels Photogrammetrie durch wissenschaftliche Taucher

Ein Beitrag von CASSANDRA JANY

Die Georeferenzierung von 3D-Unterwasserstrukturen mittels Photogrammetrie stellt aufgrund der besonderen Unterwasserbedingungen eine erhebliche Herausforderung dar. Die Studienarbeit untersucht die Anwendung der Photogrammetrie in Unterwasserumgebungen, beschreibt die dabei auftretenden Herausforderungen und zeigt Lösungsansätze zur Datenerhebung auf. Durch Genauigkeitsuntersuchungen und Fehleranalysen mit Hilfe eigens entwickelter Python-Codes sowie der Auswertung in Agisoft Metashape wird die Leistungsfähigkeit der Methode der Datenerhebung unter Wasser mittels Photogrammetrie bewertet.

> Unterwasserphotogrammetrie | wissenschaftlicher Taucher | Georeferenzierung | numerische Triangulation | Agisoft Metashape | Structure-from-Motion (SfM) | Bündelblockausgleichung underwater photogrammetry | scientific diver | georeferencing | numerical triangulation | Agisoft Metashape | structure-from-motion (SfM) | bundle block adjustment

> The georeferencing of 3D underwater structures using photogrammetry poses a considerable challenge due to the special underwater conditions. The thesis examines the application of photogrammetry in underwater environments, describes the challenges that arise and shows possible solutions for data collection. Accuracy tests and error analyses using specially developed Python codes and evaluation in Agisoft Metashape are used to assess the performance of the method of underwater data collection using photogrammetry.

Autorin

Cassandra Jany studierte Markscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg. Seit März 2025 ist sie im Referendariat zur Assessorin des Markscheidefachs. Außerdem ist sie Geschäftsführerin der Milan Geoservice GmbH in Spremberg.

c.jany@milan-geoservice.de

Einleitung und Motivation

Die Unterwasserwelt bleibt eines der am wenigsten erforschten und faszinierendsten Ökosysteme unseres Planeten. Es offenbaren sich nicht nur eine erstaunliche biologische Vielfalt, sondern auch wichtige historische Artefakte und Ressourcen von unschätzbarem wissenschaftlichem und kulturellem Wert. Die Erfassung und Vermessung dieser Umgebung ist jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden, die von begrenzter Sichtbarkeit bis zur Unzugänglichkeit der zu untersuchenden Objekte reichen. Traditionelle Methoden stoßen somit aufgrund der speziellen Bedingungen unter Wasser an ihre Grenzen.

Die Photogrammetrie unter Wasser (Abb. 1) bietet eine vielversprechende Lösung unter den Rahmenbedingungen und eröffnet ein weites Spektrum von Anwendungen, die von der Untersuchung mariner Lebensräume über Ressourcenmanagementzwecke bis zur Erhaltung von Unterwasser-Kulturerbe reichen. Diese Technik ermöglicht es, präzise 2D- und 3D-Modelle von Unterwasserstrukturen zu erstellen sowie unsere Fähigkeit zur Kartierung und Dokumentation zu revolutionieren. Dabei handelt es sich um eine Messmethode, welche in ihrer Anwendung den Lebensraum nicht beeinflusst oder modifiziert (Piazza et al. 2018).

Zielstellung

Die Studie zielt darauf ab, die Genauigkeit und Anwendbarkeit der Photogrammetrie zur Georeferenzierung von Unterwasserstrukturen zu evaluieren und zu bewerten. Hauptschwerpunkt gilt der Analyse der Fehlerquellen und der Entwicklung von einem Konzept zur Datenerfassung und -auswertung.

Herausforderungen der Unterwasserphotogrammetrie

Die Unterwasserphotogrammetrie ist eine anspruchsvolle Technik, die durch die besonderen Bedingungen der Unterwasserumgebung geprägt ist. Diese Herausforderungen betreffen ver-



schiedene physikalische (Abb. 2) und technische Aspekte, die für die präzise Aufnahme und Analyse von Bildern unter Wasser berücksichtigt werden müssen. In Tabelle 1 sind einige dieser Aspekte aufgelistet.

Orientierung und Georeferenzierung mittels geschleppter GPS-Boje

Als Taucher befindet man sich in einem Medium, in dem die Reichweite elektromagnetischer Wellen sehr klein ist. Somit ist die direkte Nutzung von GPS-Signalen nicht möglich. Eine mögliche Lösung ist die geschleppte GPS-Boje (Abb. 3). Das zugrunde liegende Prinzip der geschleppten GPS-Boje beruht auf der Integration von GPS-Technologie in Verbindung mit der Fortbewegung des Tauchers. Der mit einem GPS-Empfänger ausgestattete Bojenkomplex empfängt Satellitensignale



Abb. 3: Prinzip der geschleppten GPS Boje (Niedzwiec und Schories 2020)



und nutzt diese, um die exakte Position der Boje mit Hilfe mehrerer GPS-Satelliten zu bestimmen. Die geschleppte GPS-Boje zeichnet in kontinuierlicher Abfolge die empfangenen Positionsdaten

Aspekt	Problem	Ursache
Absorption von Licht	Mit zunehmender Tiefe nimmt die Lichtmenge ab, was die Farb- wiedergabe und die Bildqualität beeinträchtigt.	Wasser absorbiert Licht unterschied- lich je nach Wellenlänge; rote Farben verschwinden bereits in 5 Metern Tiefe, während Blau erst ab etwa 60 Metern verschwindet. Dies führt zu Farbverfäl- schungen in den Aufnahmen.
Trübheit des Wassers	Unscharfe Bilder und einge- schränkte Sichtweite.	Schwebeteilchen, Algen oder Sedi- mente streuen das Licht. In maritimen Gewässern schwanken die Sichtweiten stark je nach Bedingungen.
Brechungseffekt	Objekte erscheinen größer und näher, als sie tatsächlich sind, was zu Verzerrungen in den Aufnah- men führt.	Der höhere Brechungsindex von Was- ser im Vergleich zu Luft (1,33 vs. 1,00) und die Wirkung des Kameragehäuses verursachen optische Verzerrungen.
Luftverbrauch und Tauchzeit	Begrenzte Luftmenge und ein- geschränkte Arbeitszeit unter Wasser.	Abhängig von Flaschengröße, Tauch- tiefe und individuellem Atemvolumen des Tauchers, kann die verfügbare Zeit variieren. Einfache Berechnungen helfen, die benötigte Luftmenge für geplante Tauchgänge zu bestimmen.
Medizinische Aspekte	Tiefenrausch und Stickstoffsätti- gung können die Leistungsfähig- keit und Sicherheit des Tauchers beeinträchtigen.	Stickstoff im Atemgas wirkt bei größe- rer Tiefe auf das Gehirn und Nerven- system und kann zu Wahrnehmungs- störungen führen.
Orientierung unter Wasser	Die präzise Lokalisierung und Na- vigation unter Wasser ist schwie- rig. Für wissenschaftliche Arbeiten ist die präzise Lokalisierung des Arbeitsorts für Messungen und Probenahmen von höchster Re- levanz (Niedzwiedz und Schories 2020).	Eingeschränkte Sichtverhältnisse und fehlende GPS-Signale erfordern alternative Methoden wie Kompass und Orientierungslinien. Die Genauig- keit der Positionierung kann durch Strömungen und Bewegungen be- einträchtigt werden (Niedzwiedz und Schories 2020).

 Tabelle 1: Auflistung der verschiedenen Aspekte, welche die Unterwasserphotogrammetrie beeinflussen



Abb. 4: Datenerfassung am Untersuchungsobjekt »Abwasserrohr«

auf. Jedoch unterliegt die Navigation der GPS-Boje bestimmten Fehlern, da sie sich nicht präzise über dem Taucher oder dem zu vermessenden Objekt befindet. Aufgrund von Wind, Wellen und Strömung kommt es zu einer Verdriftung (Abweichung), die durch Cx und Cy veranschaulicht ist. Diese Abweichung ist insbesondere abhängig vom Verhältnis der Länge der Schleppleine S zur Wassertiefe WT des Tauchers. Um die Verdriftung auf ein Minimum zu reduzieren, werden Messungstage ausgewählt, an denen geringe Wellenund Windbedingungen herrschen. Zusätzlich ist der Taucher angehalten, die Schleppleine am Referenzpunkt unter Wasser für einen Zeitraum von 2 bis 3 Minuten straff zu halten, um zufällige Fehler möglichst gering zu halten (Niedzwiedz und Schories 2020).

Datenerfassung und -auswertung

Das Untersuchungsgebiet befindet sich an der kroatischen Adriaküste auf der Halbinsel Istrien, genauer gesagt in Sveta Marina (UTM-Koordinaten (WGS-84): Zone: 33T 433232.141E 4987243.483N). Diese Region zeichnet sich durch eine vielfältige Unterwasserlandschaft mit klaren Gewässern und einer abwechslungsreichen Topografie aus, die ideale Bedingungen für die geplanten Studie bietet. Im Rahmen der Exkursion werden drei Objekte photogrammetrisch erfasst und ausgewertet: das Knollen-Kalkrotalgen-Feld in etwa 17 m Wassertiefe, ein Abwasserrohr in 15 m bis ca. 20 m Wassertiefe (Abb. 4) und eine Unterwasserstruktur namens »Pilz/Burger« in ca. 23 m. Ziel der Untersuchung ist es, ein valides Konzept zur Referenzierung dieser Objekte zu entwickeln. Hierbei werden Marker und verschiedene Methoden zur Orientierung, Lagebestimmung und Konstellation der Objekte zueinander eingesetzt, um die Genauigkeit des lokalen Koordinatensystems unter Wasser zu verbessern. Zusätzlich wird bei allen Objekte der Einsatz einer GPS-Boje getestet und implementiert.

Das Messkonzept wird in diesem Artikel nicht weiter thematisiert. Für einen kleinen Einblick in die Datenerfassung ist auf der Webseite der TU Freiberg ein Video verlinkt (https://tu-freiberg.de/ sdc/forschung/kroatien-sveta-marina).

Für die Datenauswertung wurde die Software Agisoft Metashape verwendet. Agisoft Metashape gilt im Bereich der photogrammetrischen Bildverarbeitung als führende Software, die sich auf die automatisierte Rekonstruktion dreidimensionaler Modelle aus zweidimensionalen Bildern spezialisiert hat. Die Software verwendet fortschrittliche Bildverarbeitungsalgorithmen, um automatisch korrespondierende Punkte in den Bildern zu identifizieren und daraus 3D-Modelle zu generieren.

Workflow der Datenverarbeitung in Agisoft Metashape

Fotos ausrichten

Bündelblockausgleichung

Automatische Passpunkterkennung

Skalierung des Modells

- Händisches Eintragen der vermessenen
- Maße zwischen den Festpunkten

Erzeugung der Dichte-Punktwolke

Äußere und innere OrientierungsparameterTiefenkarten

Numerische Triangulation

- Bündelblockausgleichung
- Dreiecksvermaschung

Texturierung

Analyse der Skaliergenauigkeit

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Skalierung und der Positionsgenauigkeit waren am Beispiel des Abwasserrohrs dargestellt.

Skalierungsfehler

Der Skalierungsfehler bezieht sich auf die Anpassung der Größe und Proportionen von 3D-Modellen an reale Maße.

Er setzt sich aus dem Control Scale Error und dem Check Scale Error zusammen. Der Control Scale Error gibt an, wie sehr sich die geschätzten Abmessungen eines Referenzobjekts nach der Skalierung durch Metashape von den tatsächlich bekannten Abmessungen unterscheiden. Der Fehler dient als Maß für die Genauigkeit der Skalierung. Eine geringere Abweichung deutet auf eine präzisere Anpassung hin. Der Check Scale Error ist eine Kennzahl, die die Differenz zwischen den nach der Skalierung berechneten Abmessungen eines Referenzobjekts und den tatsächlich bekannten Abmessungen dieses Objekts darstellt. Er fungiert als zusätzliche Überprüfung, um sicherzustellen, dass die Skalierung des Objektes korrekt durchgeführt wurde.

In allen untersuchten Objekten lagen die Fehler in ähnlicher Größenordnung. Am Beispiel des Objektes Abwasserrohr, welches in durchschnittlich 15 m Wassertiefe liegt, sind die Ergebnisse veranschaulicht:

- Control Scale Bar: 1,68 cm,
- Check Scale Bar: 0,24 cm.

Eine Genauigkeit von 1,68 cm in der Unterwasserphotogrammetrie kann als durchaus akzeptabel und effektiv betrachtet werden, insbesondere angesichts der Herausforderungen, die mit der Durchführung von Photogrammetrie unter Wasser verbunden sind. Dabei handelt es sich um den absoluten Fehler, der die Abweichung zwischen den gemessenen und den tatsächlichen Werten beschreibt. Zum Beispiel beträgt der relative Fehler bei einer Distanz von 2 m (200 cm) zwischen den Passpunkten etwa 0,84 %, während er bei einer Distanz von 3,5 m (350 cm) auf etwa 0,48 % sinkt. Diese relativen Fehler verdeutlichen, dass der absolute Fehler von 1,68 cm im Verhältnis zur gemessenen Distanz gering ist und die Messung daher eine hohe Messgenauigkeit aufweist.

Zur Veranschaulichung der erzielten Resultate werden im Folgenden zwei Abbildungen präsentiert. Abb. 5 zeigt das digitale Höhenmodell des Abwasserrohrs, basierend auf etwa 13,4 Millionen Punkten. Die hohe Genauigkeit wird durch die Vermessung zahlreicher Strukturen und präzise gemessener Abstände erreicht. Um die Struktur und vor allem der Höhenunterschied des Abwasserrohres zu verdeutlichen, wird in Abb. 6 das 3D-Modell in seitlicher Ansicht präsentiert.

Positionsgenauigkeit

Die Positionsgenauigkeit bezieht sich auf die Präzision der relativen Positionen der Marker (Passpunkte) zueinander, die durch den entwickelten Python-Code bewertet wird. Dieser Python-Code berechnet die Positionsgenauigkeit anhand der Abstände und Richtungen zwischen vier Markern sowie deren gemessener Wassertiefe.

Zu Beginn wird das lokale Koordinatensystem ermittelt, indem die räumlichen Koordinaten von drei Markern erfasst und in einem 2D-Koordinatensystem visualisiert werden. Diese Marker dienen als Referenzpunkte (RefP), deren Positionen relativ zu einem festgelegten Ursprung dargestellt werden. Die resultierenden X-, Y- und Z-Koordinaten werden ausgegeben und visualisiert, um die Anordnung zu überprüfen. In Abb. 7 werden die berechneten lokalen Koordinatensysteme der Referenzpunkte (RefP) des Abwasserrohrs veranschaulicht. Dabei wurden die Richtungen und Abstände von jeder der vier Markerpositionen zu





den anderen drei Markern ermittelt. Jeder Marker wurde einmal in den Koordinatenursprung gelegt, wodurch die Positionen der Marker anhand der erfassten Winkel und Abstände bestimmt werden konnten.





Abb. 8: Einheitliches Bezugssystem der Referenzpunkte aus dem lokalen Koordinatensystem



Um eine bessere Vergleichbarkeit aller Abbildungen der vier Referenzsysteme zu gewährleisten, wurde in jedem System der Schwerpunkt berechnet und das gesamte System auf diesen Schwerpunkt verschoben und anschließend im einheitlichen Bezugssystem dargestellt (Abb. 8).



Im nächsten Teil wird der Code des ersten Schrittes zur Erstellung des lokalen Koordinatensystems verwendet. In diesem Schritt werden die gemessenen Werte, insbesondere die Abstände und Richtungen zwischen den Markern, berücksichtigt. Der Code wird unter der Berücksichtigung von verschiedenen Abweichungen wiederholt: ±5° bei den Richtungsangaben und ±0,5 cm bei den Abständen. Diese Variationen sind gewählt, um die Toleranz der tatsächlichen Messungen zu überprüfen und deren Einfluss auf die berechneten Koordinaten zu analysieren. Die Größenordnung von ±5° ergibt sich aus der begrenzten Genauigkeit des verwendeten Kompasses, der eine Einteilung in 5°-Schritten aufweist. Die Abweichung von ±0,5 cm spiegelt die begrenzte Genauigkeit des Maßbands wider, das keine präziseren Messungen zulässt. Dieser systematische Ansatz ermöglicht eine robuste Bewertung der Positionsgenauigkeit und zeigt auf, wie Sensitivitäten gegenüber unterschiedlichen Messabweichungen in den Ergebnissen berücksichtigt werden können. Das Ergebnis ist eine klare und anschauliche Darstellung (Abb. 9), die es ermöglicht, die Auswirkungen der unterschiedlichen Abweichungen auf die Positionen der gemessenen Punkte (Original in Rot dargestellt) zu vergleichen.

Erster Test der Georeferenzierung

Bei einem Tauchgang wurde die GPS-Boje an zehn Unterwasser-Markern getestet. Abb. 10 zeigt eine Skizze des Festlands und der Unterwasserumgebung mit den zu vermessenden Strukturen. Die drei Unterwasserstrukturen sind in Rot mit ihren durchschnittlichen Wassertiefen markiert, die zehn GPS-Positionen sind in Lila als Vierecke in der gemessenen Reihenfolge gekennzeichnet.

Die Aufgabe besteht darin, diese spezifischen Positionen präzise aus den etwa 2200 während des Tauchgangs erfassten GPS-Messpunkten zu extrahieren. An jedem Vermessungspunkt wurde über einen Zeitraum von etwa drei Minuten gemessen, wobei darauf geachtet wurde, das Bojenseil möglichst gespannt zu halten. Insbesondere in küstenfernen und brandungsnahen Bereichen stellte dies aufgrund der erheblichen Welleneinwirkungen an der Wasseroberfläche eine Herausforderung dar.

Im Rahmen der Auswertung wurden die GPS-Daten ausgelesen und in Microsoft Excel gespeichert. Die Daten umfassen zeitliche Angaben, teilweise auch Informationen zu Höhe, Tiefe, Temperatur und Geschwindigkeit, wobei sporadische Ausreißer auf zeitweiligen Empfangsverlust hindeuten. Hauptsächlich sind Breitengrad und Längengrad für die geografische Lokalisierung relevant. Zunächst wurden Messpunkte außerhalb der Tauchzeit entfernt, danach die verbleibenden Daten analysiert. Ein Ansatz zur Identifikation der zehn Markierungen anhand einer Geschwindigkeit von 0 m/s erwies sich als wenig erfolgreich. Trotz einer Genauigkeit des GPS-Geräts von 3 Metern führte zusätzliche Drift zu einer Koordinatenabweichung von etwa 5 bis 6 Metern, wodurch nur eine grobe Positionierung möglich war.

Dennoch wurde die Studie von Niedzwiedz und Schories (2020) bestätigt bzw. übertroffen. In der Studie wurde die Genauigkeit der geschleppten GPS-Boje in Abhängigkeit von der Tiefe untersucht. Es wurden GPS-Verschiebungen von 2,3 Meter in 5 Metern Tiefe, von 3,2 Meter in 10 Metern Tiefe, von 4,6 Meter in 20 Metern Tiefe und von 5,5 Meter in 30 Metern Tiefe gemessen.

Die Positionen des Abwasserrohrs (N 45° 1.8790; E 14° 9.6460), des Untersuchungsfelds (N 45° 1.9050; E 14° 9.7260) und des Burgers (N 45° 1.8900; E 14° 9.7370) wurden durch Mittelung der relevanten GPS-Daten bestimmt und in QGIS mit den tatsächlichen Unterwasserpositionen abgeglichen, was eine Übereinstimmung ergab (Abb. 11).

Diskussion

Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch eine sorgfältige Planung und Ausführung der Datenerfassung präzise 3D-Modelle von Unterwasserstrukturen erstellt werden können. Die systematische Analyse der Fehlerquellen und die entsprechende Anpassung der Methoden führten zu signifikanten Verbesserungen in der Genauigkeit. Die Auswertung der Skalierung zeigt, dass ein präzises und konzentriertes Einmessen von entscheidender Bedeutung ist. Mit Hilfe von Metashape konnten Modelle und Orthofotos mit einer Genauigkeit von bis zu 1,68 cm erstellt werden. Die erstellten Modelle und Orthofotos bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Sie können für die detaillierte Analyse, Vermessung und Kartierung von Unterwasserstrukturen genutzt werden. Zudem ermöglichen sie die Überwachung von Umweltveränderungen. Insgesamt stellen sie eine wertvolle Grundlage für eine umfassende Erforschung und Nutzung der Unterwasserumgebung



dar. In der Positionsgenauigkeit hat sich herausgestellt, dass die präzise Messung der Richtung mit dem Kompass von großer Bedeutung ist. Während die innere Genauigkeit des Modells aus der Software Metashape gute Ergebnisse liefert, wurden bei der Georeferenzierung einige Herausforderungen festgestellt, die weitere Untersuchungen erfordern, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu verbessern.

Schlussfolgerung

Unterwasserphotogrammetrie erweist sich als vielversprechendes Werkzeug für die präzise Erfassung und Analyse von Unterwasserstrukturen. Zukünftige Forschung in diesem Bereich bietet erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Genauigkeit und Effizienz. Der Einsatz eines hochauflösenden Kompasses sowie gezielte Übungen in der Handhabung der Ausrüstung könnten die Ergebnisse weiter optimieren. Abschließend lässt sich festhalten, dass die vorgestellten Ergebnisse einen wichtigen Grundstein für zukünftige Forschungen im Bereich der Unterwasserphotogrammetrie legen. //

Literatur

Piazza, Paola; Vonda Cummings; Drew Lohrer et al. (2018): Divers-operated underwater photogrammetry: Applications in the study of antarctic benthos. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, DOI: 10,5194/

Niedzwiedz, Gerd; Dirk Schories (2020): Georeferenzierung von Unterwasserdaten: Iststand und Perspektiven. Rostocker Meeresbiologische Beiträge, Heft 30, S. 65–79

isprs-archives-XLII-2-885-2018