

Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D Laserscannen

Correcting the Refraction at the Water Surface for Structured Light Based Laser Scanning

Joschka van der Lucht, Michael Bleier, Florian Leutert, Klaus Schilling, Andreas Nüchter

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D Laserscannen. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, um mit einem Structured Light (SL) System 3D-Daten von teilweise mit Wasser bedeckten Strukturen anzufertigen und die dabei entstehende Brechung an der Wasseroberfläche zu korrigieren. Diese wurde anschließend in einem Versuchsaufbau evaluiert. Der Scanner wurde dabei an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt, um den Scanner gleichmäßig, definiert und wiederholbar zu bewegen. Die Bewegungen des Scanners wurden dabei durch ein externes Trackingsystem erfasst. Ebenfalls wurde bei diesen Versuchen der Einfluss verschiedener Einstrahlwinkel betrachtet. Zu diesem Zweck wurde der Scanner in verschiedenen Winkeln relativ zur Wasseroberfläche positioniert. Durch die entwickelte Methode konnten Fehler durch die Brechung an der Wasseroberfläche erfolgreich korrigiert werden. Außerdem konnte die Lage der Wasseroberfläche ohne externe Markierungen aus den 3D-Daten bestimmt werden.

Schlüsselwörter: Laser, Brechungskorrektur, Unterwasser, Structured-Light, 3D Rekonstruktion, Laserscanner

In this work we look at 3D acquisition of semi-submerged structures with a triangulation based underwater laser scanning system. The motivation is that we want to simultaneously capture data above and below water to create a consistent model without any gaps. The employed structured light scanner consist of a machine vision camera and a green line laser. In order to reconstruct precise surface models of the object it is necessary to model and correct for the refraction of the laser line and camera rays at the water-air boundary. We derive a geometric model for the refraction at the air-water interface and propose a method for correcting the scans. Furthermore, we show how the water surface is directly estimated from sensor data. The approach is verified using scans captured with an industrial manipulator to achieve reproducible scanner trajectories with different incident angles. We show that the proposed method is effective for refractive correction and that it can be applied directly to the raw sensor data without requiring any external markers or targets.

Keywords: underwater laser scanning, refractive correction, structured light, 3D reconstruction

1 EINLEITUNG

In unzähligen Anwendungen ist es notwendig, 3D-Scans von teilweise im Wasser befindlichen Objekten anzufertigen. In diesen Fällen ist es meist unmöglich das Objekt aus dem Wasser zu entfernen, da es entweder zu groß ist oder durch eine Bergung zerstört oder beschädigt werden würde. Vor allem in der Archäologie ist es von großer Bedeutung das Objekt nicht weiter zu beschädigen und dennoch einen möglichst genauen und vollständigen Datensatz zu erstellen.

Ein weiteres interessantes Einsatzgebiet bietet die Dokumentation von havarierten Schiffen, wie zum Beispiel der Costa Concordia. Soll beispielsweise von einem solchen Schiff oder auch einer Statue, die nur zum Teil von Wasser bedeckt ist, ein 3D-Modell erstellt werden, so ist gerade hier der Grenzbereich zwischen Wasser und Luft wichtig für das gesamte Modell und die Verwertbarkeit der Punktwolke. Durch Wellen und Gezeiten können mit den momentan verwendeten Methoden, die entweder über

oder unter Wasser arbeiten, zusätzliche Probleme auftreten, da die Höhe der Wasserkante in kurzen Zeitintervallen stark variieren kann. Ohne die Verwendung von zusätzlich angebrachten Markern, die sowohl in den Über- als auch in den Unterwasserpunktwolken zu sehen sind, ist deren Kombination nicht möglich. Ein System, das in der Lage ist, 3D-Daten in beiden Medien gleichzeitig zu erfassen, würde diese Arbeit erheblich erleichtern und neue Einsatzmöglichkeiten schaffen.

Da es in der Literatur nur wenige Arbeiten zum Erstellen von 3D-Scans von teilweise versunkenen Strukturen gibt, wurde im Rahmen dieses Beitrags ein Laser-Based Structured Light System (LbSLS), das ursprünglich für die Anwendung unter Wasser konstruiert wurde, um 3D-Informationen durch die Wasseroberfläche hindurch zu gewinnen. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht mit einem über der Wasseroberfläche platzierten Structured Light (SL)-Laserscanner gleichzeitig Daten über und unter Wasser aufzuzeichnen. Dabei gilt es die, durch die Brechung an der Wasseroberfläche entstehenden Fehler, zu

korrigieren. Dies wurde zunächst in einem einfachen Versuchsaufbau mit einem statischen System für eine einzelne Laserlinie getestet. Anschließend wurde in einem größeren Aufbau der Scanner bewegt und so eine komplexe Szene aufgezeichnet. In diesem Schritt wurde ebenfalls der Einfluss verschiedener Winkel zwischen dem Scanner und der Wasseroberfläche betrachtet. Daraufhin wurde der so entstandene Datensatz mit der hier entwickelten Methode korrigiert und die Fehler vor und nach der Korrektur untersucht.



Abb. 1: Prototyp des Unterwasserlinienlaserscanners an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt, um die halb im Wasser liegende Szene zu scannen.

Im Laufe der Entwicklung stellte sich heraus, dass durch unterschiedliche Belichtungen der Kamera während der Aufnahme für die Detektierung der Wasseroberfläche keine externen Markierungen benötigt werden und diese aus den so entstandenen Aufnahmen extrahiert werden kann. In den Experimenten konnte der Einfluss des Winkels zwischen dem Scanner und der Wasseroberfläche anschaulich dargelegt werden, ebenso wie die Korrektheit der entwickelten Methode zur Korrektur. Sie wurde sowohl in den Rekonstruktionen, als auch in der Fehleranalyse sichtbar.

2 STATE OF THE ART

Verschiedene Wissenschaftler befassten sich bereits mit der Problematik des Scannens durch die Wasseroberfläche hindurch. Bei diesen kamen bereits verschiedene Methoden, von Structured-Light über Time of Flight (ToF) und Stereo Vision zum Einsatz. Häufige Anwendungen hierfür sind das Scannen aus Flugzeugen und Hubschraubern um Küstenlinien und Flüsse (/Hilldale & Raff 2008/, /Wang & Philpot 2007/, /Irish & Lillycrop 1999/, /Westaway et al. 2003/, /Saylam et al. 2017/) oder versunkene

Ausgrabungsstätten (/Doneus et al. 2013/) zu vermessen.

/Narasimhan & Nayar 2015/ untersuchten die Anwendung von Structured Light für die 3D-Rekonstruktion durch eine Wasseroberfläche. Mithilfe eines Beamers projizierten sie ein Muster in ein mit Wasser gefülltes Aquarium auf ein Test-Objekt und filmten dies mit einer Kamera. Im Gegensatz zu ToF-Methoden, ist der Pfad des Lichtstrahls von der Lichtquelle zum Sensor hier nicht der gleiche, sondern es werden hier zwei unterschiedliche Wege verwendet. Dadurch wird es notwendig, den Winkel und Abstand von Kamera und Projektor zur Wasseroberfläche zu kennen und beide Brechungen in die Rekonstruktion mit einzubeziehen. Um das System möglichst präzise zur Oberfläche des Wassers und somit auch die beiden unterschiedlichen Brechungen zu kalibrieren, verwenden die Autoren zwei Ebenen an einer bekannten Position. Mit diesem Verfahren erzielten sie im Schnitt einen RMS - Fehler von 2,1%. Um den Einfluss der Trübheit des Wassers auf die Rekonstruktion zu beobachten, wurde das Wasser schrittweise mit Milch versetzt. Dabei war zu beobachten, dass mit erhöhter Verschmutzung des Wassers auch der Fehler zunimmt.

/Klopfer et al. 2015/ beschäftigten sich ebenfalls mit einem Structured Light Sensor, um mit diesem durch die Wasseroberfläche 3D-Daten zu rekonstruieren. Hierfür kam eine Microsoft Kinect zum Einsatz. In ihrem Aufbau befindet sich die Kinect zwischen 30 cm und 60 cm über der Wasseroberfläche, was das Scannen in bis zu 40 cm tiefes Wasser ermöglicht. Anschließend wurde die durch die Kinect bestimmte Punktwolke, basierend auf der Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche, korrigiert. Mit dieser Methode erreichten sie für eine Wassertiefe von bis zu 20 cm - entsprechend einer Gesamtdistanz von ca. 60 cm -

einen Root-Mean-Square (RMS) Fehler von 3 mm. Damit befinden sie sich im gleichen Genauigkeitsbereich, der auf diese Entfernung mit der Kinect auch über Wasser erreicht werden kann.

/Palomer et al. 2017/ beschäftigen sich zwar nicht mit dem Scannen durch die Wasseroberfläche, jedoch treten bei ihrem Unterwasserlaserscanner, auf Grund der Bauart, ähnliche Probleme auf. Da bei einem Structured Light Laser System, das eine Linie in die Umgebung projiziert, die Lichtstrahlen nicht parallel auf die Wasseroberfläche treffen, verändert sich für jeden Lichtstrahl der Brechungswinkel und die projizierte Linie wird dadurch gebeugt. Da bei dem Unterwasserlinienlaserscanner von /Palomer et al. 2017/ der Laser durch eine flache Glasscheibe vom

Wasser abgetrennt wird und er hinter dieser gedreht wird, lässt sich dies mit einem Linienlaserscanner vergleichen, der durch die Wasseroberfläche projiziert und dort gedreht wird. Damit strahlt der Laser nicht immer senkrecht auf die Wasseroberfläche. Da bei einem Linienlaser, aufgrund der geringen Distanz zur Wasseroberfläche, die Lichtstrahlen nicht parallel auf die Oberfläche treffen, sondern jeder Strahl einen anderen Einfallswinkel hat, variiert auch der Ausfallswinkel der Strahlen innerhalb der Linie, wenn diese nicht exakt senkrecht auf die Wasseroberfläche trifft. /Palomer et al. 2017/ untersuchten diesen Effekt auf eine Linie ausgiebig in ihrer Arbeit für unterschiedliche Einfallswinkel. Hierbei stellte sich heraus, dass sich die Form der Linie besonders gut durch einen elliptischen Kegel beschreiben lässt.



Abb. 2: Prototyp des Unterwasserlinienlaserscanners, der ein Kreuz in einen Wassertank projiziert.

3 METHODIK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein triangulationsbasierter Linienlaserscanner gebaut und anschließend dazu verwendet, um präzise 3D-Punktwolken von halb versenkten Strukturen anzufertigen. Hierzu wird zunächst ein 3D-Scan der Szene ohne Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche erstellt. Da der Scanner auf einem Linienlaser basiert, erstellt er zunächst nur ein Profil der Szene an einer bestimmten Stelle. Für einen vollständigen Scan ist es notwendig, ihn über die Szene zu bewegen. Die hierzu benötigte 6-DOF Bewegung des Scanners wird hierbei durch ein externes Trackingsystem aufgezeichnet. Anschließend wird die Wasseroberfläche aus den Sensordaten bestimmt und alle unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkte durch eine Rekonstruktion der Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche rekonstruiert. In diesem Abschnitt wird zunächst der Aufbau des Scanners und dessen Kalibrierung beschrieben. Anschließend wird auf Rekonstruktion und Korrektur der Brechung eingegangen und die entwickelte Methode dargelegt.

3.1 Unterwasserlaserscanner

Der Unterwasserlaserscanner besteht aus zwei wasserdichten Gehäusen, von denen das eine Gehäuse die Kamera und das andere den Laserprojektor enthält. Beide Gehäuse sind mit einer Inertial Measurement Unit (IMU) und einem kleinen Computer mit Netzwerkinterface ausgestattet. Die beiden Gehäuse sind auf einer 50cm langen Aluminiumstange befestigt. Das Lasergehäuse ist senkrecht und das Kameragehäuse in einem Winkel von 30° relativ zur Halterung ausgerichtet. Abbildung 2 zeigt das System während eines Tests. Für die nachfolgenden Experimente dieser Arbeit wurde nur eine Laserlinie des Kreuzprojektors verwendet.

In Abbildung 3 ist oben ein Querschnitt des CAD-Modells des Kameragehäuses abgebildet. Links beginnend markiert (a) das verwendete Objektiv mit einer Brennweite von 12,5 mm und (a) eine FLIR Blackfly 2.3 MP Color USB3 Vision (Sony Pregius IMX249) mit einer Sensorgröße von 1/1,2" und einer Auflösung von 1920 × 1200 Pixel bei 41 Bildern pro Sekunde. Mittig über der Kamera befindet sich (c) die IMU.

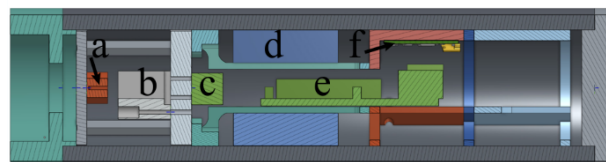
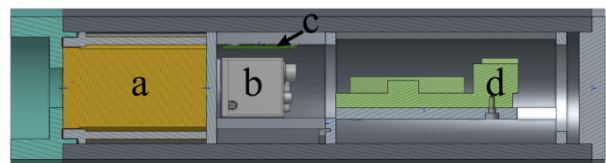


Abb. 3: Querschnitt der CAD Modelle: das obere Bild zeigt das Kameragehäuse und das untere das Gehäuse des Kreuzlinienlasersprojektors.

Die untere Grafik in Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt durch das CAD-Modell des Lasergehäuses. Das Gehäuse beinhaltet zwei Linienoptiken (a), je eine pro verbauter Laserdiode (c). Bei den verwendeten Laserdioden handelt es sich um zwei grüne Laserdioden mit je 1 W und einer Wellenlänge von 525 nm. Um die Qualität der Linien zu verbessern, wurde zwischen den Dioden und den Linienoptiken je zwei Strahlenkorrekturprismen (b) eingebaut. Die Laser werden über den verbauten Raspberry Pi 3 (e) gesteuert. Das Lasergehäuse verfügt ebenfalls über eine IMU, die an der Stelle (f) in der Abbildung 4.3 zu erkennen ist.

3.2 Kalibrierung

Die Schätzung der Kameraparameter geschieht auf Basis des Lochkameramodells mit Verzeichnung. Dabei berechnet sich die Projektion des Punktes $X = (X, Y, Z)^T$ von Weltkoordinaten auf die Bildebene mittels

$$(X, Y, Z)^T \mapsto \left(f_x \frac{X}{Z} + p_x, f_y \frac{Y}{Z} + p_y \right)^T = (x, y)^T$$

wobei $x = (x, y)^T$ die Bildkoordinaten der Projektion darstellen, $p = (p_x, p_y)^T$ den Bildmittelpunkt und f_x, f_y die Brennweite darstellen. In die normalisierte Projektion des Lochkameramodells

$$x_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X/Z \\ Y/Z \end{pmatrix}$$

wird die tangentielle und radiale Verzerrung wie folgt eingefügt:

$$\tilde{x} = x_n (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) + \begin{bmatrix} 2k_3 x_n y_n + k_4 (r^2 + 2x_n^2) \\ k_3 (r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n \end{bmatrix}$$

wobei (k_1, k_2, k_5) die radialen und (k_3, k_4) die tangentialen Verzerrungsparameter darstellen. Im Folgenden stellt $\tilde{x} = (\tilde{x}, \tilde{y})$ die realen, verzerrten und normalisierten Punktkoordinaten dar, wobei $r^2 = x_n^2 + y_n^2$ gilt.

Die Kalibrierung der Kamera wird nach der Methode von /Zhang 2000/ mit einer 3D-Struktur durchgeführt, welche AprilTags (/Olson 2011/) als Referenzpunkte enthält. Dies ermöglicht eine automatische und zuverlässige Detektion der Punkte, auch wenn die Struktur nicht vollständig im Bild erfasst wurde. Nachdem die erkannten Punkte der Laserlinie im Bild extrahiert wurden, wird die Verzerrung bei diesen korrigiert. Daher müssen die Verzeichnungsparameter während des 3D-Rekonstruktionsschritts nicht berücksichtigt werden, was zu einer Vereinfachung der Gleichungen in den folgenden Abschnitten führt.

Für die Kalibrierung des Laserprojektors ist es notwendig, die Laserebenenparameter relativ zum Ursprung der Kamera zu bestimmen. Hierzu wird eine L-förmige 3D-Struktur, die in der Abbildung 4 zu sehen ist, verwendet. Diese besteht aus zwei, mit AprilTags versehenen, Ebenen. Daher ist es möglich, die Parameter der Laserebene aus einem einzelnen Bild zu bestimmen.

Im ersten Schritt wird die L-förmige Struktur im Kamerabild detektiert und deren relative Position zur Kamera bestimmt. Anschließend werden die Ebenenparameter der beiden Flächen der Struktur

bestimmt und die auf ihnen liegenden Punkte der Laserlinie extrahiert. Die 3D-Koordinaten der Punkte der Laserlinie können durch Schneiden der Geraden durch das Kamerazentrum und den erkannten Punkten auf der Bildebene mit der Ebene der 3D-Struktur bestimmt werden. Die Laserebene wird anschließend, unter Verwendung mehrerer Kalibrierungsbilder und eines RANSAC-Algorithmus, in die rekonstruierten 3D-Punkte der Laserlinie gelegt.

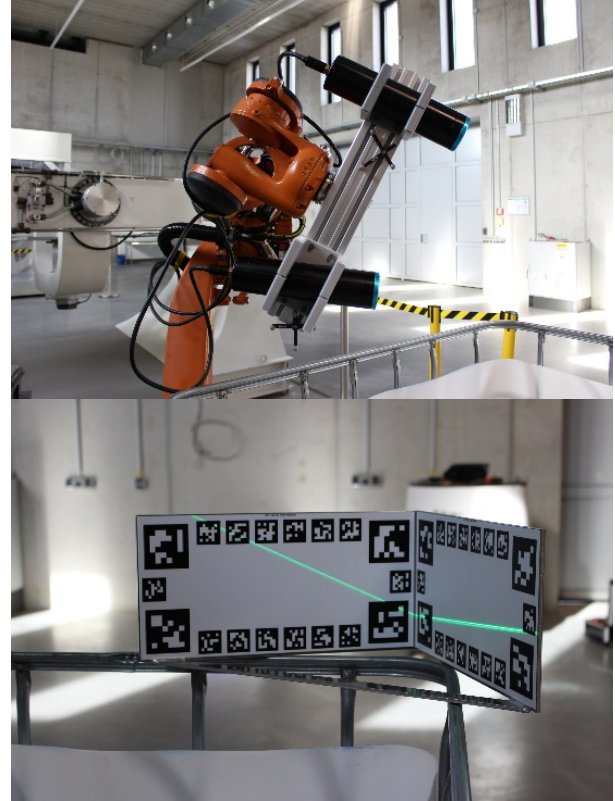


Abb. 4: Kalibrierung der Laserebene unter Verwendung einer L-förmigen 3D-Struktur.

3.3 3D Rekonstruktion

Nachdem das System kalibriert wurde und sowohl das Kameramodell, als auch die Parameter der Laserebene bekannt sind, wird für die 3D-Rekonstruktion das Lichtschnittverfahren zwischen Kamera und Laserebene verwendet. Die Laserebene π_i wird dabei beschrieben durch

$$\pi_i: a_i X + b_i Y + c_i Z = 1$$

wobei (a_i, b_i, c_i) die Ebenenparameter und $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ einen Punkt in Weltkoordinaten darstellt. Unter Verwendung des perspektivischen Kameramodells, das zuvor beschrieben wurde, lässt sich die Ebenengleichung wie folgt darstellen

$$\pi_i: a_i \frac{x - p_x}{f_x} + b_i \frac{y - p_y}{f_y} + c_i = \frac{1}{Z}$$

dabei sind $\mathbf{x} = (x, y)^T$ die Bildkoordinaten von \mathbf{X} auf der Bildebene, $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$ der Bildmittelpunkt und f_x, f_y die Brennweite.

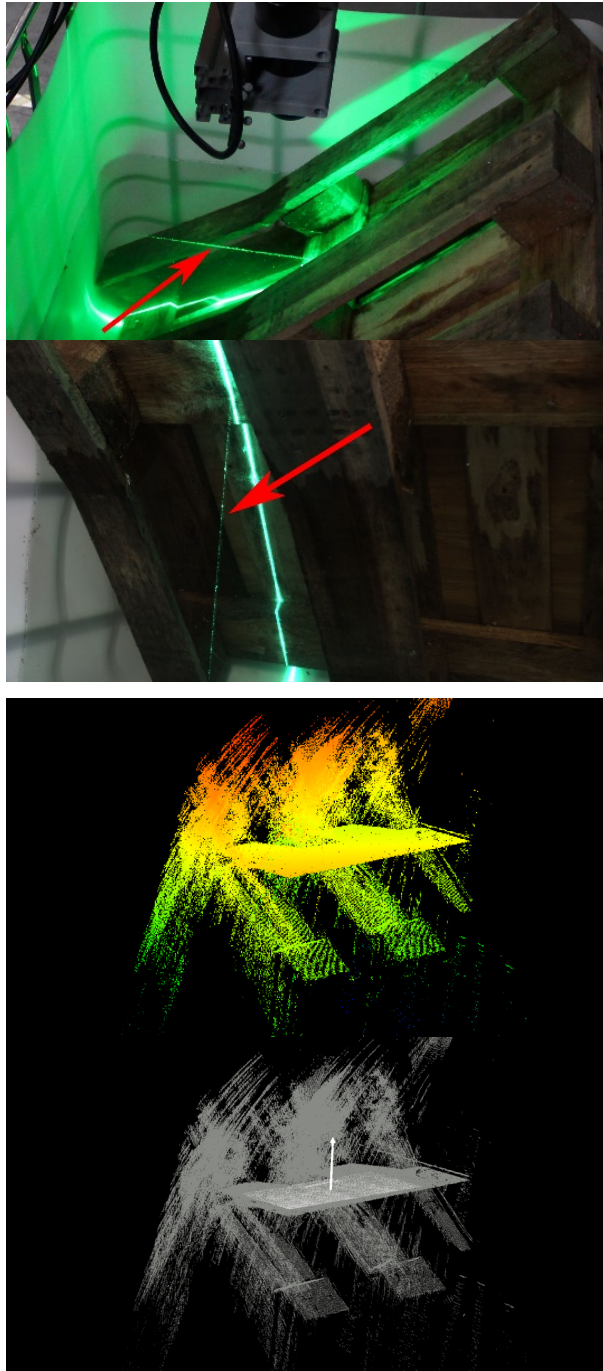


Abb. 5: Die Spiegelung der Laserlinie auf der Wasseroberfläche kann dazu benutzt werden, die Wasserebene zu bestimmen.

Die Koordinaten eines 3D Objektpunktes $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ lassen sich aus den Koordinaten eines Punktes $\mathbf{x} = (x, y)^T$ auf der Bildebene durch

Schneiden des Kamerastrahls mit der Laserebene berechnen:

$$Z = \frac{1}{a_i \frac{x-p_x}{f_x} + b_i \frac{y-p_y}{f_y} + c_i}$$

$$X = Z \frac{x-p_x}{f_x}$$

$$Y = Z \frac{y-p_y}{f_y}$$

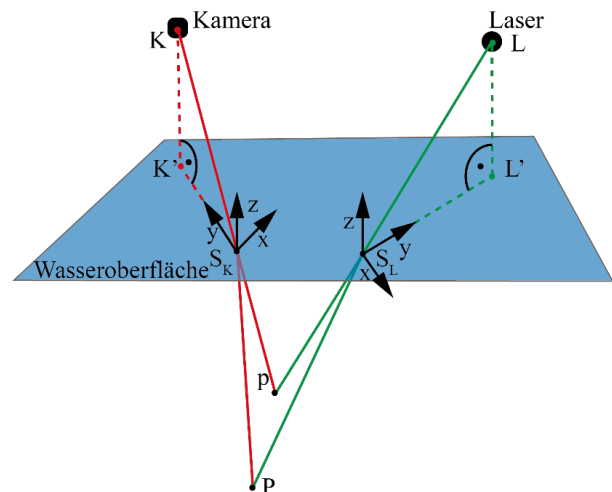


Abb. 6: Das Prinzip der strahlenbasierten Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche. Der Punkt p ist der zuerst, mittels Lichtschnittverfahren, ohne Beachtung der Brechung rekonstruierter Punkt. P beschreibt den korrigierten Punkt. K ist das Kamera- und L das Laserprojektionszentrum. K' und L' sind die Projektionen des Kamera- und Laserzentrums auf die Wasserebene entlang deren Normale. S_K und S_L beschreiben die Schnittpunkte des Kamera- und Laserstrahls mit der Wasseroberfläche.

3.4 Bestimmung der Wasseroberfläche

In dieser Arbeit wurde die Wasserfläche zunächst als glatte Ebene angenommen, die automatisch erkannt und aus den Laserpunkten bestimmt werden kann. In Abbildung 5 ist die Reflexion der Laserlinie an der Wasseroberfläche zu sehen. Wird der Schwellwert des Liniendetektors entsprechend gewählt, kann diese Reflexion erkannt und anschließend rekonstruiert werden. Die so entstandene Punktwolke ist in der unteren linken Grafik der Abbildung 5 zu sehen. Die Wasserebene ist hierbei deutlich zu erkennen. Anschließend können aus diesen Punkten die Ebenenparameter bestimmt werden. Das untere rechte Bild der Abbildung 5 zeigt die berechnete Ebene und deren Normale in Weiß und die Punkte des 3D-Scans in Grau. Die so bestimmten Parameter werden im späteren Verlauf gegen die mit dem Trackingsystem

bestimmte Wasserebene validiert und zur Korrektur der Daten verwendet.

3.5 Brechungskorrektur

Um korrekte Scans von halb versenkten Strukturen anfertigen zu können, ist es notwendig, die Lichtbrechung an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser zu korrigieren. Nachdem die 3D-Rekonstruktion mithilfe des in Abschnitt 3.3 beschriebenen Lichtschnittverfahrens und der 6DOF Trajektorie des Scanners durchgeführt wurde, wird die Punktwolke in über- und unterhalb der Wasseroberfläche liegende Punkte aufgeteilt. Im Folgenden werden die unterhalb der Wasserebene liegenden Punkte mit einem an /Klopfer et al. 2017/ angelehnten Verfahren korrigiert. Da der Kamera- und Laserstrahl nicht dem gleichen optischen Pfad folgen, ist es notwendig, die Brechung für beide getrennt zu betrachten.

Das zugrundeliegende Prinzip der strahlenbasierten Korrektur ist in der Abbildung 6 zu sehen. Unter Verwendung der 6DOF Trajektorie des Scanners und der nach Abschnitt 3.4 bestimmten Wasserebene ist für jede Scanlinie das Kamerazentrum K , die Position des Laserprojektionszentrums L und die Wasserebene im gleichen Koordinatensystem bekannt. Für jeden unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Punkt p kann mit der strahlenbasierten Korrektur nun der korrekte Punkt P bestimmt werden.

Zunächst werden jeweils die Schnittpunkte des Kamera- und Laserstrahls mit der Wasseroberfläche berechnet. Der Punkt S_K ist der Schnittpunkt zwischen der Geraden vom Kamerazentrum K zum Punkt p mit der Wasseroberfläche, in der Abbildung 6 in rot gekennzeichnet. S_L ist der Schnittpunkt der Geraden vom Laserzentrum L durch den Punkt p , in der Grafik 6 in grün dargestellt, mit der Wasseroberfläche.

An den Punkten S_K und S_L müssen im nächsten Schritt die Brechungswinkel bestimmt werden. Der Einfallswinkel eines Strahls \mathbf{r} ist

$$\delta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{n}_W \cdot \mathbf{r}}{\|\mathbf{n}_W\| \|\mathbf{r}\|} \right)$$

wobei \mathbf{n}_W die Normale der Wasseroberfläche ist. Für den Brechungswinkel δ_2 , berechnet nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz, ergibt sich

$$\delta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \delta_1}{n_2} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \cdot \mathbf{n}_W \cdot \mathbf{r}}{n_2 \cdot \|\mathbf{n}_W\| \|\mathbf{r}\|} \right)$$

wobei n_1 und n_2 die Brechungsindizes von Luft und Wasser sind.

Der gebrochene Strahl \mathbf{r}' wird nun durch eine Drehung um die Winkeldifferenz $\Delta_\delta = \delta_2 - \delta_1$ berechnet. Da das Snelliussche Brechungsgesetz davon ausgeht, dass sich der eintreffende und der gebrochene Strahl in der gleichen Ebene befinden, muss zunächst eine geeignete Transformation gefunden werden. Hierzu wird eine orthonormale Basis B gebildet, deren z -Achse in Richtung der Normalen der Wasserebene zeigt, die y -Achse zeigt in Richtung der Projektion des Kamerazentrums K' beziehungsweise des Laserzentrums L' auf die Wasseroberfläche. Der gebrochene Strahl \mathbf{r}' kann somit als Drehung um die x -Achse der Basis B mit dem Winkel Δ_δ beschrieben werden:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} T_B^{A^{-1}} R_{\Delta_\delta} T_B^A$$

Hierbei ist R_{Δ_δ} die Rotationsmatrix um den Winkel $\Delta_\delta = \delta_2 - \delta_1$ um die x -Achse und T_B^A eine Transformationsmatrix für den Basiswechsel von der ursprünglichen Basis A in die neu bestimmte Basis B .

Nachdem dies sowohl für den Kamerastrahl, als auch für den Laserstrahl berechnet wurde, ist der korrigierte Punkt P der Schnittpunkt der beiden gebrochenen Geraden. Im Laufe der Versuche stellte sich jedoch heraus, dass diese Lösung sehr anfällig für kleine Winkelfehler der gebrochenen Strahlen ist, aus denen größere Fehler in der Berechnung des Punktes P resultieren. Auch kleinere Fehler in der Kalibrierung des Laserzentrums bezüglich der Kamera haben eine Auswirkung auf den berechneten Laserstrahl. Um diesen Fehler zu minimieren, wurde der Punkt P nicht als Schnittpunkt zweier Geraden berechnet, stattdessen wurde aus dem gebrochenen Laserstrahl und der Wasserebene eine neue Laserebene aufgespannt, die anschließend mit dem gebrochenen Kamerastrahl geschnitten wurde.

4 EXPERIMENTE

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche diskutiert. Zunächst wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht die Wasseroberfläche ohne zusätzliche Hilfsmittel zu erkennen und anschließend mit den Ergebnissen des Trackingsystems verglichen. Daraufhin wird die zuvor vorgestellte Methode angewandt, um einen vollständigen 3D-Scan der Szene zu korrigieren. Hierbei werden auch unterschiedliche Einstrahlwinkel betrachtet. Dabei wird der Fehler vor und nach der Korrektur betrachtet und für eine Bewertung der Methode herangezogen.

4.1 Experimentaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 zu sehen. Es wurden drei verschiedene Szenen in einem zur Hälfte mit Wasser gefüllten Tank mit der Kantenlänge von 1m platziert. Die erste Szene besteht aus einer Euro-Palette aus Holz, zu sehen in Abbildung 1. Die zweite Szene besteht aus einem Gartenzwerge, einer Kaffeetasse, zwei Schachbrettern und einem Rohr, zu sehen in Abbildung 7. Die dritte Szene besteht lediglich aus dem an der Wand des Tanks hängenden Schachbrett aus der zweiten Szene.

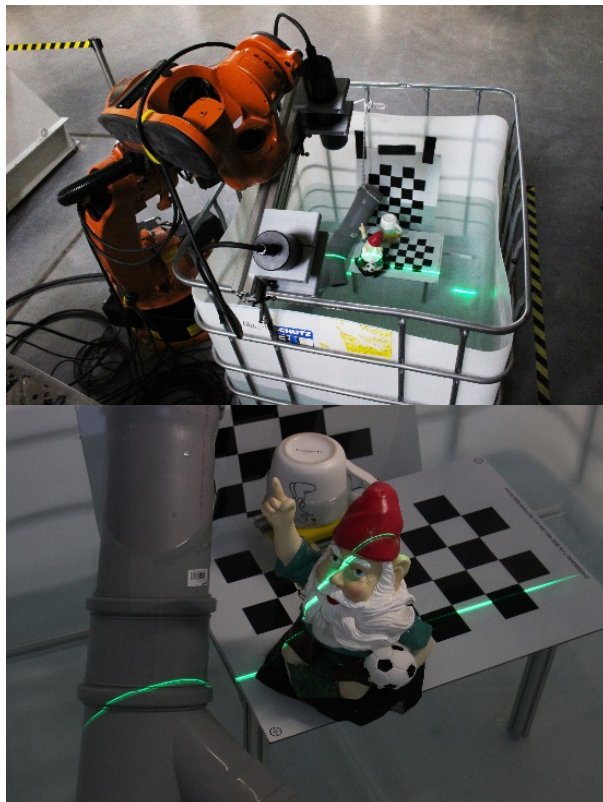


Abb. 7: Links: Aufzeichnung einer halb im Wasser versunkenen Szene mit dem an einem Manipulator befestigten Scanner. Rechts: Detailansicht der aufgezeichneten Szene mit der Laserlinie des Scanners im Bild.

Um den verwendeten Laserlinienscanner kontrolliert und wiederholbar zu bewegen, wurde er an einem KUKA KR-16 Manipulatorarm befestigt. Die während der Messungen gefahrene Trajektorie und die Position der Wasseroberfläche wurden mit einem OptiTrack:V120Trio Trackingsystem gemessen. Hierzu wurden an dem Scanner zwei Marker befestigt, die eine hochpräzise Messung der Positionen bezüglich des Trackingsystems ermöglichen. Die beiden angebrachten Marker sind im linken Bild der Abbildung 8 zu erkennen. Die Wasseroberfläche wurde mit einer Messspitze des Trackingsystems an

vier Punkten angetastet und daraus die Ebenengleichung bestimmt. Dies ist in dem rechten Bild von Abbildung 8 zu erkennen. Um die benötigte Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Trackers und der Kamera zu bestimmen, wurden die Ecken einiger Tags im Sichtfeld der Kamera, wie im mittleren Bild der Abbildung 8 zu sehen, angetastet. Somit ist es möglich, eine

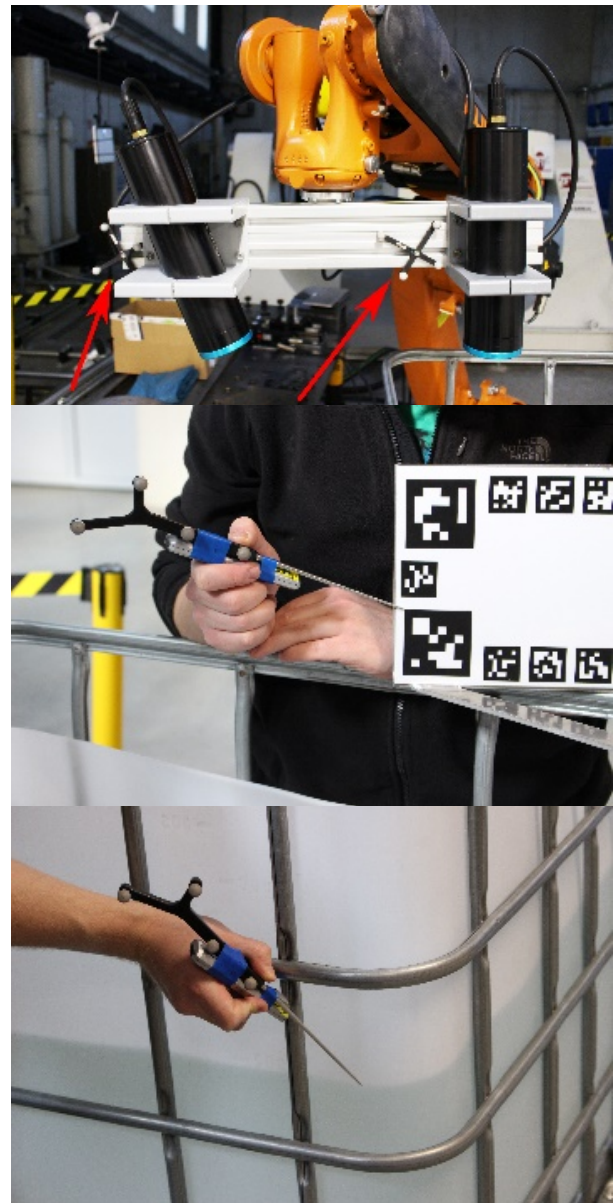


Abb. 8: Links: Zwei Marker zum Aufzeichnen der Trajektorie wurden am Scanner befestigt. Mitte: Messung der Referenzpunkte für die Kalibrierung zwischen Trackingsystem und Kamera. Rechts: Einmessen der Wasseroberfläche als Referenz für die aus dem Scan bestimmten Parameter.

Transformation zwischen den angetasteten Punkten auf den Tags und den Koordinaten der Tags im

Kamerakoordinatensystem zu bestimmen. Dies wird benötigt, um sowohl die Wasseroberfläche in Kamerakoordinaten zu transformieren, als auch um die Transformation zwischen den einzelnen Linienscans zu bestimmen, um diese zu einem vollständigen 3D-Scan zusammenzufügen.

4.2 Verifikation der erkannten Wasseroberfläche

Wie bereits im Abschnitt 3.4 beschrieben, wurde die Wasseroberfläche aus den aufgezeichneten Daten bestimmt. Um diese Parameter zu validieren, wurde mit dem OptiTrack Trackingsystem die Wasseroberfläche händisch an mehreren Punkten angetastet und daraus eine Ebene als Referenz bestimmt. Der Winkel zwischen den Normalenvektoren dieser beiden Ebenen beträgt dabei lediglich $0,21^\circ$. Weiter wurde, durch Verwendung der Hesseschen Normalform, der Abstand der beiden Ebenen zum Ursprung bestimmt. Der daraus resultierende Abstand der beiden Ebenen zueinander beträgt 1cm.

Der sehr kleine Winkelfehler von $0,21^\circ$ zusammen mit dem geringen Abstand von 1 cm der Ebenen zueinander lässt sich durch einen minimalen Kalibrierfehler zwischen der Kamera des Scanners und dem externen Trackingsystem erklären. Da in dem Kalibrierprozess mehrere händische Messungen und eine Reihe von Transformationen durchgeführt werden müssen, ist von kleineren Fehlern auszugehen. Werden solche Fehler berücksichtigt, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wasseroberfläche auch aus den Aufnahmen des SL-Scanners bestimmen lassen.

4.3 Ergebnisse der 3D Scans

Die 3D-Punktwolken aus den Scans der drei unterschiedlichen Szenen sind in Abbildung 9 zu sehen, die linke Seite zeigt dabei die nicht korrigierten und die rechte Seite die korrigierten Daten. Jeder Scan einer Szene besteht dabei aus ca. 800 einzelnen Linien, die anhand der Bewegungsdaten aus dem Trackingsystem zusammengefügt wurden. Die im Folgenden gezeigten Bilder des 3D-Scans wurden mit der Software *3DTK* erstellt. Es wurden dabei zwei Methoden zur farblichen Kennzeichnung der Punkte gewählt, die erste ist eine Einfärbung nach Höhe, von Blau nach Rot. Die zweite Einfärbung unterscheidet zwischen den über dem Wasser gelegenen Punkten in Rot und den unter der Wasseroberfläche liegenden Punkten in Blau.

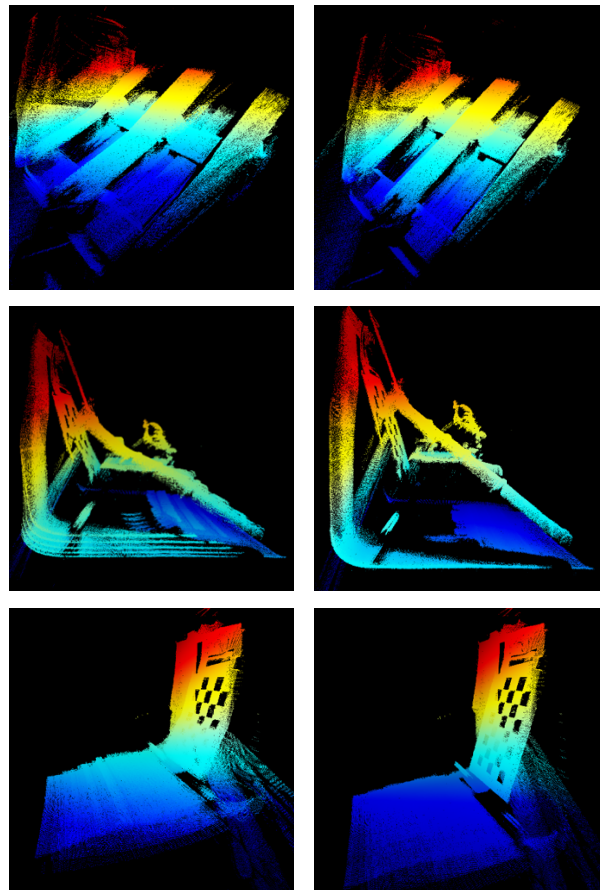


Abb. 9: Punktwolken der nicht korrigierten Daten auf der linken Seite und der Korrekturen auf der rechten Seite. Die Punktwolken sind nach Höhe farblich eingefärbt. Der Fehler durch die Brechung an der Wasseroberfläche ist in den linken Abbildungen deutlich zu erkennen, beispielsweise am Boden der mittleren Szene, der sich vor der Korrektur deutlich in mehrere Schichten aufteilt. Rechts wurde dies korrigiert.

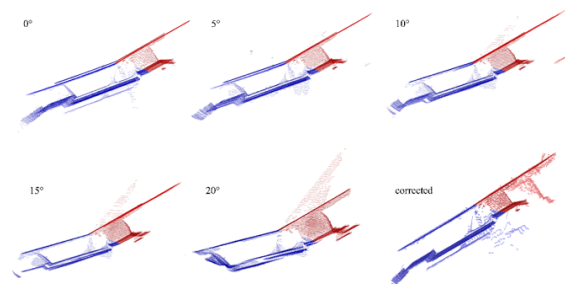


Abb. 10: Querschnitt durch den 3D-Scan einer Holzpalette. Die Punkte unterhalb der Wasseroberfläche sind hierbei in blau, die oberhalb in rot eingefärbt. Beginnend oben links mit 0° wurde der Scanner hierbei immer weitergedreht, um verschiedene Einfallswinkel zu betrachten. Das letzte Bild zeigt den Scan nach der Korrektur. Die Bretter der Palette bilden hierbei wieder eine Ebene.

Da die Verwendung eines KUKA Manipulators es ermöglicht, den Scanner in einem vorher festgelegten Winkel konstant über die gesamte Szene zu bewegen, wurde zuerst der Einfluss unterschiedlicher Einfallswinkel betrachtet. Die erste Aufnahme erfolgte mit einem senkrecht zur Wasseroberfläche ausgerichteten Scanner, anschließend wurde der Winkel in 5° Schritten bis auf 20° erhöht. Die aus diesen Scans resultierenden Daten sind in Abbildung 10 zu sehen. Sie zeigt einen Querschnitt durch die Palette. Beginnend oben links finden sich die Aufnahmen für 5°, rechts davon 10°, bis hin zu unten links 20° und unten rechts die Aufnahmen nach der Korrektur. Die Steigerung der Brechung und die damit verbundene Stauchung des Scans wird dabei besonders gut erkennbar. Ebenfalls ist der Erfolg der Korrektur im letzten Bild deutlich sichtbar. Während der Winkel zwischen der über- und unter dem Wasser liegenden Linien in den vorherigen Abbildungen immer größer wird, liegen die beiden Linien nach der Korrektur wieder in einer Ebene.

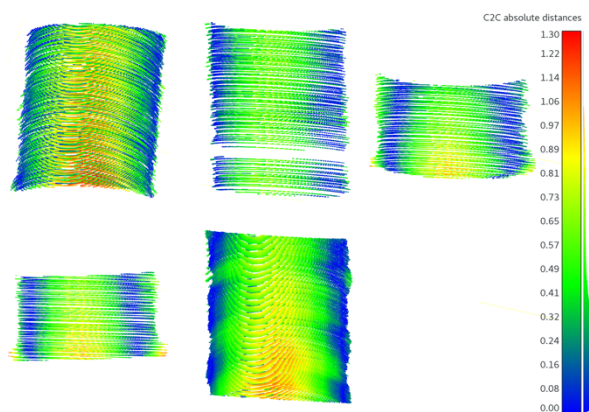


Abb. 11: Ein Ausschnitt aus den nicht korrigierten Daten eines Rohres mit einem Durchmesser von 11cm aus der Szene. In der oberen Reihe befinden sich, links beginnend, die Ausschnitte für 0°, 5° und 10°. Die untere Reihe zeigt 15° und 20°. Die Einfärbung stellt die Abweichung zum idealen Rohr in cm dar. Hierbei ist zu erkennen, dass das Rohr in allen Scans verformt ist.

Nachdem die Funktionsfähigkeit der hier erklärten Methode zur Korrektur der Lichtbrechung an der Wasseroberfläche in 3D-Scans nun durch die Anwendung auf einem Datensatz visuell gezeigt wurde, werden im Folgenden nochmals die Scans der Szene mit dem Zwerg und dem Rohr verwendet, um Fehlermessungen durchzuführen. Hierbei wird ein Ausschnitt des Rohrs näher betrachtet. Bei dem Rohr handelt es sich um ein HTU DN 110 nach DIN 4102-B1, somit kann davon ausgegangen werden, dass es eine glatte Oberfläche und einen konstanten Durchmesser von 11cm besitzt. Zunächst wird in ein

unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Teil des Rohres ein Zylinder mit dem idealen Durchmesser von 11cm gelegt. Anschließend wird der Punkt-zu-Punkt Abstand zwischen dem Ausschnitt des Rohrs und dem Zylinder berechnet und das Rohr entsprechend farblich eingefärbt. Dies wird für jeden Winkelschritt der korrigierten und nicht korrigierten Aufnahmen wiederholt.

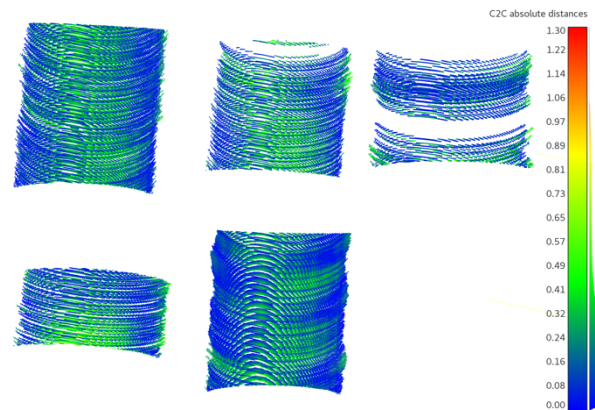


Abb. 12: Ein Ausschnitt aus den korrigierten Daten eines Rohres mit einem Durchmesser von 11cm aus der Szene. In der oberen Reihe befinden sich, links beginnend, die Ausschnitte für 0°, 5° und 10°. Die untere Reihe zeigt 15° und 20°. Die Einfärbung stellt die Abweichung zum idealen Rohr in cm dar. Im Vergleich zu den nicht korrigierten Daten aus Abb. 11 ist hier zu erkennen, dass die Abweichung über alle Scans im gesamten Bereich zwischen 0cm und 0,5cm liegt.

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse für die nicht korrigierten Daten, oben links beginnend bei dem Scan bei 0°, nach unten rechts zu dem Scan bei 20°. Die Skala in cm am rechten Rand zeigt den Fehler der Daten im Vergleich zum idealen Zylinder mit einem Durchmesser von 11cm an. Hierbei ist eine deutliche Verformung und Abweichungen bis zu 1,3cm zu erkennen. Im Vergleich hierzu sind in Abbildung 12 die zuvor korrigierten Daten zu sehen. Die Abweichungen sind hier deutlich geringer und liegen zum großen Teil unterhalb von 0,1cm. In den mittleren Bereichen sind die größten Fehler zu erkennen, doch auch diese liegen unterhalb von 0,5cm. Dahingegen liegt in den nicht korrigierten Daten ein Großteil der Fehler deutlich sichtbar zwischen 0,5cm und 1,3cm.

Weiter wurde in den über- und unterhalb der Wasseroberfläche liegenden Teil des Schachbretts, dass in Abbildung 9 zu erkennen ist, je eine Ebene gelegt und der Winkelfehler zwischen diesen beiden berechnete. Da es sich bei dem gesamten Schachbrett um eine Ebene handelt, sollte der Winkel zwischen den Normalen der beiden Ebenen im Idealfall 0°

ergeben. Auch bei dieser Auswertung war zu beobachten, dass der Fehler größer wird, je größer der Winkel zwischen Scanner und Wasseroberfläche ist. Parallel zur Wasseroberfläche, also bei 0° , trat ein Winkelfehler von $5,56^\circ$ auf. Dieser erhöhte sich schrittweise bis auf $14,53^\circ$ für die Position des Scanners bei 20° . Diese Beobachtung deckt sich auch mit den vorherigen Auswertungen. Nach Anwendung der Korrektur konnte der Fehler im besten Fall auf $0,19^\circ$ für die Scannerposition bei 0° und im schlimmsten Fall auf $0,53^\circ$ für die Scannerposition bei 20° , korrigiert werden. Somit konnten die auftretenden Fehler für alle Einstrahlwinkel weitestgehend korrigiert und damit die Funktionalität der entwickelten Methode aufgezeigt werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde eine Methode vorgestellt, um korrekte 3D-Scans von halbversunkenen Strukturen mit Hilfe eines triangulationsbasierten 3D Laserscanners anzufertigen. Hierzu wurde ein geometrisches Modell der Brechung für den verwendeten Linienlaserscanner gezeigt und eine Methode zur Korrektur, der durch die Brechung entstandenen Fehler in der Punktwolke erläutert. In einem Versuchsaufbau mit Hilfe eines industriellen Manipulators konnte gezeigt werden, dass die Brechung an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft vollständig erfasst und korrigiert werden kann und es somit möglich ist, korrekte 3D-Scans von halbversunkenen Strukturen anzufertigen. Weiter konnte gezeigt werden, dass dies ohne jegliche externen Marker möglich ist und die Wasseroberfläche direkt aus den aufgezeichneten Daten des Scanners bestimmt werden kann. In einer weiterführenden Arbeit ist es notwendig, die Genauigkeit mittels einiger Prüfkörper exakter zu untersuchen. Ebenfalls wurde für diese Arbeit eine flache Wasseroberfläche angenommen, da unter realen Bedingungen die Wasseroberfläche jedoch meist einen minimalen Wellengang aufweist, gilt es diesen Einfluss genauer zu untersuchen. Weiterführend sollen Daten in Feldversuchen aufgezeichnet und untersucht werden, mit dem Ziel die Methode auch für unruhiges Wasser weiterzuentwickeln. Ebenfalls soll hierbei der Effekt der Trübheit des Wassers auf die Genauigkeit der Scans untersucht werden.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde gefördert aus dem Horizon2020 Projekt ¡VAMOS! unter der Projekt-ID 642477.

LITERATUR

- Fryer, J. & Kniest, H. (1985): *Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry*. The Photogrammetric Record 11(66), pp. 745–753.
- Hilldale, R. C. and Raff, D. (2008): *Assessing the ability of airborne lidar to map river bathymetry*. Earth Surface Processes and Landforms 33(5), pp. 773–783.
- Irish, J. L. and Lillycrop, W. J. (1999): *Scanning laser mapping of the coastal zone: The shoals system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54(2), pp. 123–129.
- Klopper, F., Hämmerle, M. and Höfle, B. (2017): *Assessing the potential of a low-cost 3-D sensor in shallow-water bathymetry*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.
- Maas, H.-G. (2015): *On the accuracy potential in underwater/multimedia photogrammetry*. Sensors 15(8), pp. 18140–18152.
- Menna, F., Nocerino, E., Troisi, S. and Remondino, F. (2013): *A photogrammetric approach to survey floating and semi-submerged objects*. SPIE Optical Metrology 8791, pp. 87910H–87910H.
- Menna, F., Nocerino, E., Troisi, S. and Remondino, F. (2015): *Joint alignment of underwater and above-the-water photogrammetric 3D models by independent models adjustment*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40(5), pp. 143.
- Narasimhan, S. G. and Nayar, S. K. (2005): *Structured light methods for underwater imaging: light stripe scanning and photometric stereo*. In: OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, IEEE, pp. 2610–2617.
- Okamoto, A. (1982): *Wave influences in two-media photogrammetry*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48, pp. 1487–1499.
- Olson, E. (2011): *Apriltag: A robust and flexible visual fiducial system*. In: Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 3400–3407.
- Palomer, A., Ridao, P., Ribas, D. and Forest, J. (2017): *Underwater 3D laser scanners: The deformation of the plane*. In: Sensing and Control for Autonomous Vehicles, Springer, pp. 73–88.
- Sarafraz, A. and Haus, B. K. (2016): *A structured light method for underwater surface reconstruction*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 114, pp. 40–52.
- Saylam, K., Brown, R. A. and Hupp, J. R. (2017): *Assessment of depth and turbidity with airborne lidar bathymetry and multiband satellite imagery in shallow water bodies of the alaskan north slope*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 58, pp. 191–200.
- Wang, C.-K. and Philpot, W. D. (2007): *Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters*. Remote Sensing of Environment 106(1), pp. 123–135.
- Westaway, R., Lane, S. and Hicks, D. (2003): *Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis*. International Journal of Remote Sensing 24(4), pp. 795–815.



M.Sc. Joschka van der Lucht
Zentrum für Telematik e.V.
Magdalene-Schoch-Straße 5
97074 Würzburg
j.van-der-lucht@telematik-zentrum.de



Dipl.-Ing. Michael Bleier
Zentrum für Telematik e.V.
Magdalene-Schoch-Straße 5
97074 Würzburg
m.bleier@telematik-zentrum.de



Dipl.-Inf. Florian Leutert
Zentrum für Telematik e.V.
Magdalene-Schoch-Straße 5
97074 Würzburg
f.leutert@telematik-zentrum.de



Prof. Dr. Klaus Schilling
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Informatik VII – Robotik und Telematik
Am Hubland
97074 Würzburg
Und
Zentrum für Telematik e.V.
Magdalene-Schoch-Straße 5
97074 Würzburg
k.schilling@telematik-zentrum.de



Prof. Dr. Andreas Nüchter
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Informatik VII – Robotik und Telematik
Am Hubland
97074 Würzburg
Und
Zentrum für Telematik e.V.
Magdalene-Schoch-Straße 5
97074 Würzburg
andreas@nuechti.de