

DigSmart – Unterstützung beim Baggern durch Laserprojektion¹

DigSmart – Laserprojection Supports Excavation

Luca Anteunis, Andreas Nüchter

Jedes Jahr entstehen mehrere Millionen Euro an Schaden durch Bagger. Dies liegt unter anderem an den fehlenden Verlaufsplänen auf den Baustellen. Das Projekt „Digitalisierung und Smart Services im Tiefbau“ untersucht, inwiefern die Visualisierung von Leitungen mithilfe eines Laserprojektors zum Einsatz kommen kann. Hierbei kommt ein Livox-Laserscanner zum Einsatz, um die Umgebung in der Projektion zu berücksichtigen. Um die Projektion unverzerrt darstellen zu können, führt der Algorithmus ein Raytracing-Verfahren durch, um die Projektion anzupassen. Dies setzt jedoch die extrinsische Kalibrierung zwischen dem Laserscanner und -projektor voraus. Die Experimente zeigen, dass die hier vorgestellte Methode den Projektor und Laserscanner erfolgreich kalibrieren kann und dass mit einem Root Mean Square Error von weniger als 40 mm eine genaue Projektion möglich ist. Die Projektionen im DigSmart-Projekt dürfen maximal 100 mm abweichen.

Schlüsselwörter: Bagger, Laserprojektor, Augmented Reality

Every year, excavators cause several million euros in damage. One of the reasons for this is the lack of routing plans on construction sites. The “Digitalization and Smart Services in Civil Engineering” project is investigating the extent to which the visualization of pipelines can be used with the aid of a laser projector. A Livox laser scanner is used to take the surroundings into account in the projection. To be able to display the projection undistorted, the algorithm performs a ray tracing process to adjust the projection. However, this requires extrinsic calibration between the laser scanner and projector. The experiments show that the method presented here successfully calibrates the projector and laser scanner and that an accurate projection is possible with a root mean square error of less than 40 mm. The projections in the DigSmart project may deviate by a maximum of 100 mm.

Keywords: Excavator, laser projector, augmented reality

1 EINLEITUNG

Im Februar 2023 beschädigt ein Bagger bei Arbeiten der Deutschen Bahn eine Glasfaserleitung. Infolgedessen muss der Frankfurter Flughafen den Flugverkehr einstellen. Dies ist nur ein Beispiel von vielen, in welchem die Beschädigung durch einen Bagger größere Konsequenzen mit sich zieht. Allein in Hamburg gibt es 200 Beschädigungen von Gasleitungen pro Jahr /Hagebau 2020/. „Die Versicherungen verzeichnen jährlich etwa 100 000 Schadensfälle, für die sie Zahlungen in Höhe von rund 500 Mio. Euro leisten müssen“ /Hagebau 2020/. Solche Schäden sind nicht nur eine finanzielle

Belastung, sondern auch eine Gefahr, denn z.B. kann entströmendes Gas aus einer Gasleitung sich entzünden und Menschen verletzen. „Wie die Schadensermittlung ergab, lagen bei mehr als der Hälfte dieser Schäden den Verantwortlichen auf der Baustelle keine Lagepläne vor“ /Hagebau 2020/. Das unterstreicht die Notwendigkeit der Digitalisierung im Tiefbau. Für die Digitalisierung des Tiefbaus gibt es mehrere wichtige Punkte. Auf der einen Seite spielt die Dokumentation eine wichtige Rolle, wo befinden sich Hindernisse, was ist der aktuelle Stand, was war der vorherige Stand, welche

¹ Überarbeiteter und erweiterter Beitrag der Oldenburger 3D-Tage 2024.

Probleme gibt es. Bei der Ausgrabung ist es dann wichtig zu wissen, wo befinden sich die Hindernisse, wo soll (nicht) gegraben werden, wie tief soll gegraben werden. Es gibt erste Ansätze, welche die Dokumentation der Hindernisse angehen. Es gibt die Genossenschaft „Bundesweites Informationssystem zur Leitungsrecherche“, die es sich zur Aufgabe gemacht hat, diese Daten, wie die Position von Leitungen und Rohren, zu sammeln und zur Verfügung zu stellen. Offen ist aber, wie die Leitungen während der Arbeiten sichtbar gemacht werden.

Das Ziel des Projekts „Digitalisierung und Smart Services im Tiefbau“ (DigSmart) ist es, die Digitalisierung der gesamten Wertschöpfungskette im Tiefbau von der Planung bis zur Dokumentation zu etablieren. Die Dokumentation erfolgt über ein Webinterface, worauf sowohl die Bauleitung als auch die Arbeitskräfte vor Ort Zugriff haben. In der Baggerkabine befindet sich ein Tablet, worüber die Arbeitskraft ihre Aufgaben einsehen und den aktuellen Stand an die Bauleitung senden kann. Zusätzlich dazu sind auf dem Bagger mehrere Sensoren angebracht. Ein GNSS-System auf dem Bagger bestimmt dessen Position. Anschließend macht ein Laserprojektor den Verlauf der Leitungen sichtbar. Üblicherweise werden diese mit Farbe am Boden sichtbar gemacht. Dies ist aber zeitaufwendig, da eine Arbeitskraft die Markierung anbringen muss. Hinzu kommt, dass die Ausgrabung die Markierung zerstört. Der Laserprojektor kann hingegen durchgängig die Markierung visualisieren. Außerdem kann der Laserprojektor Zusatzinformationen anzeigen, z. B. wo zu graben ist und wo nicht gegraben werden darf. Dies ist auch z. B. für die Archäologie wichtig, da ein Bagger hier die Ausgrabung vereinfachen kann. Die Projektion kann Befunde visuell hervorheben, sodass die Arbeitskräfte vor Ort diese nicht aus Versehen beschädigen. Da der Erdboden nicht eben ist und beim Graben ein Loch entsteht, verändert sich die Projektion, wenn der Projektor die Projektion nicht an die Umgebung anpasst. *Abb. 1* stellt dieses Problem dar. Der Laserprojektor projiziert den Tannenbaum, ohne die Umgebung mit einzubeziehen. Das Hineinlegen einer Tasche sorgt dafür, dass der Tannenbaum einen Knick erhält. Dies ist ein Problem, falls die Projektion eine Leitung darstellen soll. Bei Grabungen mit dem Bagger kann das einen falschen Eindruck vermitteln und somit zu Beschädigungen führen. Um die Umgebung mit einzubeziehen, nutzt das DigSmart-Projekt einen 3D-Laserscanner. Hierfür wendet der

hier vorgestellte Algorithmus ein Raytracing-Verfahren an, um die Projektion anzupassen. Das Raytracing bestimmt, wie der Projektor die Leitungen in die Umgebung projizieren muss, damit diese unverzerrt sind. Die Berücksichtigung der Laserscannerdaten setzt die Kalibrierung zwischen Laserprojektor und Laserscanner voraus. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Experimente zeigen, dass die Kalibrierung zwischen dem Laserprojektor und dem Laserscanner möglich ist und dass die Projektion für die Anwendung im DigSmart-Projekt genau genug ist. Für das DigSmart-Projekt darf die Projektion maximal 100 mm abweichen. Die Punktwolke des Laserscanners bietet auch die Möglichkeit, den aktuellen Stand vor Ort als 3D-Punktwolke zu visualisieren und die Veränderungen vor Ort als Dokumentation festzuhalten.

Der restliche Beitrag ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 2 stellt die verwendete Literatur vor, während Abschnitt 3 die verschiedenen Sensoren und deren Funktionsweise beschreibt. Anschließend geht Abschnitt 4 darauf ein, wie die Visualisierung der Verlaufspläne funktioniert. Während Abschnitt 5 sich mit der Kalibrierung der Sensoren befasst, stellt Abschnitt 6 vor, welche Qualität die Kalibrierung hat. Abschnitt 7 fasst die Ergebnisse dieses Beitrags zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf weitere Aufgaben.

2 VERWENDETE LITERATUR

Prinzipiell kann ein Projektor als inverse Kamera angesehen werden. Anstelle eines Punkts aus dem 3D-Raum in den 2D-Raum des Projektors abzubilden, projiziert der Projektor einen 2D-Punkt in den 3D-Raum. Es gibt bereits einige Ansätze. Die hier verwendete Methode ist die vom Hersteller, die auf einer OpenCV-Implementierung basiert. Angelehnt daran verwendet unsere Methode unter anderem den Direct-Linear-Transformation-(DLT)-Algorithmus und den Levenberg-Marquardt-Algorithmus, um die Extrinsik zwischen Laserprojektor und Laserscanner zu bestimmen. Dieser Algorithmus löst das sogenannte Perspective-n-Point-(PnP)-Problem und bestimmt anhand von der Intrinsik der Kamera bzw. des Projektors, Punktkorrespondenzen und optionalen Verzeichnungskoeffizienten die Extrinsik der Sensoren zueinander.

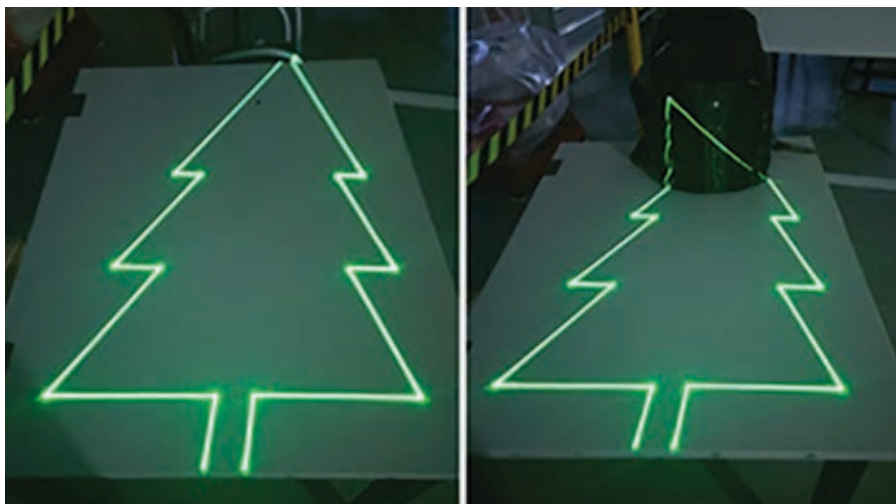


Abb. 1 | Auf beiden Bildern ist die Projektion eines Tannenbaums zu sehen. Links sieht man die Projektion ohne Tasche im Projektionsbereich, rechts mit Tasche, welche die Projektion verformt.

/Chai 2018/ stellt eine Methode zur extrinsischen Kalibrierung von Kamera und Laserscanner mittels eines Würfels mit Aruco-Markern vor. Eine andere Methode beschreiben /Gao et al. 2003/, bei der drei Punktpaare für die Lösung des PnP-Problems verwendet werden. /Lepetit et al. 2009/ stellt einen Algorithmus vor, der die Lösung des PnP-Problems in $O(n)$ Zeit löst.

Um Baumaschinen-Arbeitskräfte mittels Erweiterter/Gemischter Realität (Augmented/Mixed Reality) zu unterstützen, gibt es verschiedene Ansätze. Dabei kommen zum Beispiel verschiedenen Displaytypen zum Einsatz. /Wallmyr et al. 2019/ evaluieren virtuelle Benachrichtigungen bei der Baggerführung auf zwei Displaytypen der gemischten Realität im Vergleich zu typischen Head-down-Displays. /Wallmyr et al. 2018/ stellen einen Simulator bestehend aus einem Head-up- und einem Head-down-Display vor. Die Simulationsanwendung ist hier ein Bagger. /Su et al. 2013/ haben ein unsicherheitsbewusstes, georäumliches AR-System für die Echtzeitvisualisierung und Näherungsanalyse von z.B. Versorgungsleitungen entwickelt, wobei die Unsicherheiten als Wahrscheinlichkeitsbänder modelliert sind. Unsicherheiten bei der konkreten Lage der Leitungen können durch Messabweichungen oder auch Fehler in der Dokumentation entstehen. Dies ist insbesondere bei alten Leitungen der Fall.

/Kernbauer et al. 2024/ haben ebenfalls ein System entwickelt, um Baumaschinenarbeitskräfte mittels Laserprojektion zu unterstützen. Sie verwenden hierfür eine Kombination aus Laserprojektor und Kamera. Diese Kombination ermöglicht eine zeitsparende, autonome Kalibrierung, da die Kamera die Laserprojektion wahrnehmen kann und somit eine Kalibrierung wie zwischen zwei Kameras möglich ist. Unsere Kalibriermethode bzw. die vom Hersteller ist hingegen aufwendiger, da diese semiautonom ist und die Position der Punktkorrespondenzen im Projektor-Koordinatensystem per Hand anvisiert werden müssen. Dafür erhalten wir durch den Laserscanner direkt ein 3D-Abbild der Umgebung. Daher muss der Projektor kein zusätzliches Muster in die Umgebung projizieren, um die Umgebung zu triangulieren.

Unsere Methode verwendet OctoMap, um die Projektionspunkte zu bestimmen. Ein weiterer Ansatz ist es, ein Mesh aus der Punktwolke zu erzeugen und die Projektionspunkte auf dem Mesh zu bestimmen. Um den Mesh zu erzeugen, können zum Beispiel die Algorithmen von /Bernardini et al. 1999/ oder /Kazhdan 2006/ angewendet werden.

3 SYSTEMKOMPONENTEN

Abb. 2 zeigt den experimentellen Aufbau. Auf dem Dach des Baggers ist eine Box für die Elektronik montiert, deren Inhalt im unteren Bild zu sehen ist. Außen herum ist ein abgedichtetes Aluminiumprofil mit mehreren Sensoren montiert.

Zur Projektion der Verlaufspläne auf den Boden wird der ZLP1-Projektor des Unternehmens Z-Laser eingesetzt. Die technischen Spezifikationen stammen aus /Z-Laser 2022/. Der Projektor hat eine Genauigkeit von ± 3 mm in einem Arbeitsbereich zwischen ein bis drei Metern und eine Ausgabeleistung von 5 mW. Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abb. 3 dargestellt. Für die Projektion verwendet der Projektor zwei Spiegel: Spiegel X steuert den Laser entlang der x-Achse, Spiegel Y entlang der y-Achse. Es sei das Koordina-

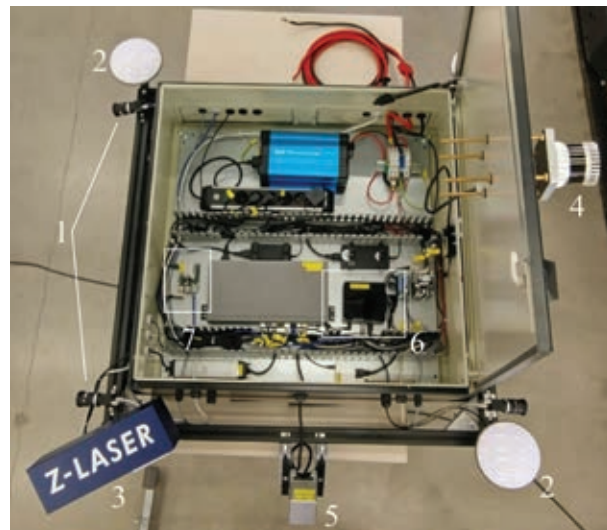


Abb. 2 | Modifikation des Baggers: (1) Blackfly-S-GigE-Kameras, (2) GNSS-Antennen und -Empfänger, (3) ZLP1-Laserprojektor, (4) Ouster-OS1-Laserscanner, (5) Livox-Mid-40-Laserscanner, (6) Intel NUC, (7) Raspberry PI 4

tensystem rechts-händisch und die z-Achse deute in Richtung Projektionsebene und die y-Achse nach oben. Spiegel X ist der erste Spiegel, auf den der Laserstrahl trifft. Dieser ist nur in der Lage, sich um die z-Achse zu drehen. Der Spiegel lenkt den Laserstrahl nach oben ab und der Strahl trifft anschließend auf Spiegel Y. Spiegel X ist so angebracht, dass die Ausrichtung festlegt, welchen x-Wert der Auftrittspunkt des Lasers auf Spiegel Y und somit auch auf der Projektionsebene hat. Der zweite Spiegel kann sich nur um die x-Achse drehen, d.h. der Spiegel lenkt den Laserstrahl je nach Ausrichtung in die positive bzw. negative y-Richtung ab. Somit ist Spiegel Y für den y-Wert des Auftrittspunkts verantwortlich. Im Allgemeinen kann nach /Leutert 2021/ der Laserprojektor als eine inverse Kamera modelliert werden. Anstelle 3D-Koordinaten auf 2D-Koordinaten abzubilden, also die Umgebung auf ein Bild abzubilden, bildet der Laserprojektor 2D-Koordinaten auf 3D-Koordinaten

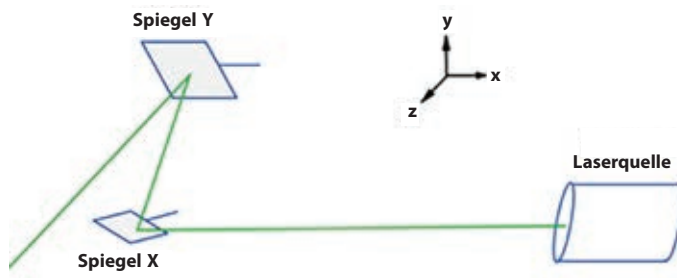


Abb. 2 | Funktionsweise des Laserprojektors: Spiegel X lenkt den Laserstrahl so ab, dass er entlang der x-Achse verschoben auf dem Spiegel Y auftrifft. Spiegel Y lenkt diesen wiederum ab, sodass dieser verschoben entlang der y-Achse nach außen gelangt.

ab. Die Werkskalibrierebene des Projektors ist 3,5334 m entfernt und parallel zu diesem. Die 2D-Koordinaten entsprechen der Position des Laserstrahls auf dieser Ebene. Der Projektor kann nur auf Flächen projizieren, d. h., die Projektion ist abhängig von der Geometrie der Projektionsfläche, in welchem Winkel der Projektor zur Fläche steht und wo sich der Beobachter befindet. Je nach Position des Beobachters und der Flächenform kann die Projektion verzerrt oder sogar lückenhaft sein. Die 3D-Koordinate ist also abhängig davon, wo der Laserstrahl als erstes auftrifft.

Um die Umgebung für die Projektion zu berücksichtigen, erfasst ein Laserscanner die Form der Umgebung. Ein Livox Mid-40 scannt kontinuierlich den Arbeitsbereich des Baggers, um die Umgebung zu erfassen. Der Laserscanner verwendet eine Laserwellenlänge von 905 nm und hat (bei 100 000 Lux) eine Reichweite von 90 m (bei 10 % Remission) /Livox 2023/. Der Livox scannt den Bereich mit einem sich nicht wiederholenden Muster. Wie Abb. 2 zeigt, ist der Scanner so angebracht, dass er nur den Bereich vor dem Bagger scannen kann. Für die grobe Lokalisierung sind auf dem Dach des Baggers drei GNSS-Antennen montiert, die zusammen mit den Empfängern eine 6-Freiheitsgrade-Pose liefern, d. h. es sind die x-, y- und z-Koordinaten bekannt sowie die Ausrichtung Roll, Pitch und Yaw. Hierdurch ist es möglich, je nachdem, in welche Richtung der Bagger orientiert ist, die richtigen Rohre mittels des Laserprojektors anzuzeigen und auch mittels der Laserscanner eine georeferenzierte Punktwolke als Dokumentation zu erstellen. Als Empfänger kommen ZED-F9P-Multiband-GNSS-Empfänger von u-blox zum Einsatz, die mit 20 Hz Rohdaten von mehreren GNSS-Systemen wie GPS, Galileo etc. liefern. In Abb. 2 unten befindet sich eine Antenne links oben, eine rechts oben und eine rechts unten. Die Antennen sind nahezu rechtwinklig angeordnet und ca. 0,9 m voneinander ent-

fernt. Zur Verbesserung nutzt das System eine GNSS-Basisstation. Durch diese erreichen die Empfänger eine zentimetergenaue Positionsbestimmung. Da Gebäude, Bäume etc. den Empfang der GNSS-Signale negativ beeinflussen, sind zusätzlich dazu noch vier Blackfly-S-GigE-Kameras (Model: BFS-PGE-23S3C-C) montiert, die im späteren Verlauf die Lokalisierung verbessern sollen. Hierfür sind jeweils zwei auf der linken und rechten Seite des Rahmens auf dem Bagger montiert. Ebenfalls befindet sich ein Ouster-OS1-64-Laserscanner oben auf der Kiste der Elektronik, welcher zur Verbesserung der Lokalisierung dient. Er hat eine vertikale Auflösung von 64 Strahlen und eine konfigurierbare horizontale Auflösung von 512, 1024 und 2048. Er hat eine Reichweite von mindestens 45 m bei 100 000 Lux. Die Experimente nutzen den Ouster-Laserscanner als Referenz für die Kalibrierung zum Projektor. An sich dient dieser Laserscanner der zusätzlichen Lokalisierung des Baggers in einer georeferenzierten Punktwolke und befindet sich deshalb im finalen Aufbau auf der Elektronikbox oben auf dem Bagger.

4 DATENVERARBEITUNG

Der Verlauf einer Leitung ist in viele kleine Abschnitte eingeteilt. Dabei hat jeder Abschnitt ein Anfangs- und ein Endpunkt. Die GNSS-Koordinaten sind bekannt. Die Algorithmen arbeiten in einem lokalen Koordinatensystem, dessen Ursprung in einer GNSS-Basisstation liegt. Auch auf Baustellen ist die Verwendung einer Basisstation realistisch, da Baustellen oft über längere Zeiträume an einem Ort sind und sich dies positiv auf die Positionsbestimmung der Basisstation auswirkt. Der Projektor stellt einen Abschnitt immer als eine Linie dar. Da der Bagger ebenfalls ein GNSS-System verwendet,

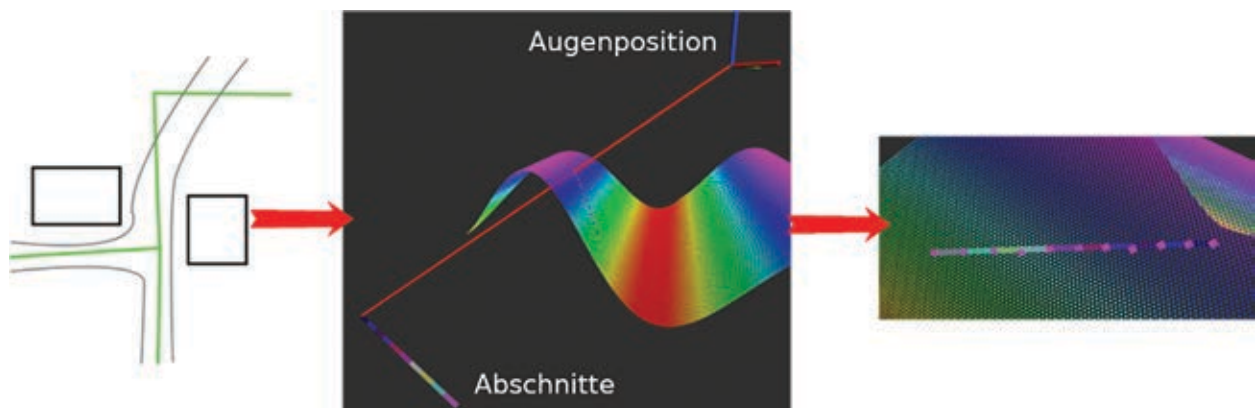


Abb. 4 | Links ist ein Verlaufsplan zu sehen. Die grüne Linie repräsentiert z. B. den Verlauf eines Rohrs. Der Verlauf des Rohrs verkleinert das Programm in viele kleine Abschnitte. Diese sind im mittleren Bild links unten zu sehen. Die Augenposition ist oben rechts zu sehen.

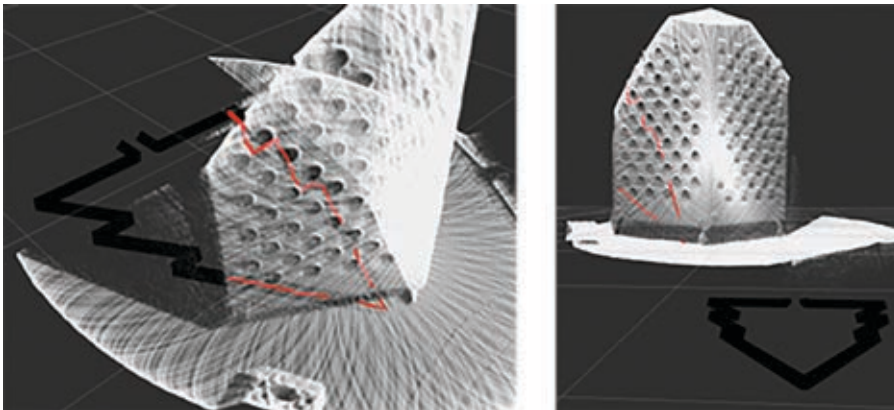


Abb. 5 | Links und rechts ist eine simulierte, angepasste Projektion zu sehen. Links entspricht der Sicht der Augen. Die rote Linie entspricht der Projektion des Projektors. Der schwarze Tannenbaum entspricht sinngemäß dem Verlauf eines Rohrs, das weiße Objekt ist die Punktwolke, die der Laserscanner aufzeichnet. Die Abbildung links zeigt, dass die rote projizierte Linie die schwarze überdeckt. Die Genauigkeit der tatsächlichen Projektion ist abhängig von der Kalibrierung zwischen Projektor und Laserscanner. Das Bild rechts zeigt, dass die Projektion sich auf einem Gegenstand befindet und nicht auf dem Boden. Der Boden ist durch diesen Gegenstand verdeckt, weshalb sich die Projektion auf diesem befindet.

transformiert der Algorithmus die Verlaufsdaten und die Punktwolke des Livox-Laserscanners in dasselbe lokale Koordinatensystem. Damit der Projektor die Umgebung und Position der Augen korrekt in die Projektion mit einbezieht, führt der Algorithmus für jeden Anfangs- und Endpunkt der Abschnitte ein Raytracing durch. Dabei geht der Strahl von der Position der Augen zu dem jeweiligen Punkt. Die Position der Augen liegt in der Baggerkabine ungefähr auf Höhe des Kopfs eines Durchschnittsmenschen. Der Schnittpunkt mit der Punktwolke entspricht dem Punkt, den der Projektor für die Projektion verwenden muss. Dabei erzeugt der Projektor dann eine Linie zwischen den jeweiligen Schnittpunkten. Der Algorithmus verwendet für das Raytracing OctoMap /Hornung et al. 2013/. OctoMap unterteilt den 3D-Raum in sogenannte Voxel, welche Würfel gleicher Größe sind. Ein Voxel kann zum Beispiel alle Punkte umfassen, die sich zwischen $(-0,5, -0,5, -0,5)$ cm und $(0,5, 0,5, 0,5)$ cm befinden. Der Voxel hat in diesem Fall eine Größe von einem Zentimeter. Liegt ein Punkt der Punktwolke in diesem Voxel, so ist dieser Voxel belegt. Ausgehend von der Position der Augen geht der Algorithmus alle Voxel durch, die in Richtung des Abschnittspunkts liegen. Beim Raytracing prüft der Algorithmus, ob der aktuell betrachtete Voxel belegt ist. Ist dies der Fall, so hat der Algorithmus den Schnittpunkt mit der Punktwolke gefunden. Der Projektor kann dann mittels dieser Punkte den Verlauf der Rohre projizieren. *Abb. 4* zeigt, wie das Prinzip funktioniert, und *Abb. 5* zeigt die Anwendung bezogen auf einen zu projizierenden Tannenbaum. Dies setzt voraus, dass bekannt ist, wo sich der Projektor in Relation zum Laserscanner befindet. Dies lässt sich durch die Kalibrierung der beiden Sensoren zueinander ermitteln.

5 KALIBRIERUNG

Im Allgemeinen lässt sich die Kalibrierung in zwei Bereiche aufteilen: die intrinsische und extrinsische Kalibrierung. Die intrinsische Kalibrierung beschäftigt sich hier mit der Bestimmung der internen Projektionseigenschaften des Projektors und die extrinsische Kalibrierung bestimmt hier die geometrischen Eigenschaften zwischen

dem Projektor und dem LiDAR-Sensor. Der Projektor ist werkskalibriert auf eine Ebene, die 3,5334 m entfernt liegt. Der Projektor hat eine maximale Projektionshöhe und -breite von 2,1 m. Die Abbildung eines Punkts $p \in R^3$ in das Koordinatensystem des Projektors lässt sich wie in Gl. (1) beschreiben.

$$P = Ap = \begin{bmatrix} 3,5334 & 0 & 2,1 \\ 0 & 3,5334 & 2,1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} p = \begin{bmatrix} 3,5334 & 0 & 2,1 \\ 0 & 3,5334 & 2,1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Die Kalibrierung nutzt, um die geometrischen Eigenschaften des Projektors festzustellen, die wahrgenommenen und die tatsächlichen Eigenschaften der Referenzpunkte. Hierbei ist die Position der tatsächlichen Referenzpunkte im Allgemeinen in einem anderen Koordinatensystem als dem Projektor-Koordinatensystem angegeben. Die Transformation zwischen diesen beiden Koordinatensystemen ist durch eine Rotation und Translation definiert und beschreibt die Abbildung der Referenzpunkte in das Projektor-Koordinatensystem gemäß Gl. (2):

$$sx_i = AEp \begin{bmatrix} 3,5334 & 0 & 2,1 \\ 0 & 3,5334 & 2,1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13}t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23}t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33}t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

wobei r_{ij} der Rotation, t_i der Translation und s der Skalierung entspricht. Hierbei verwendet der Projektor ein 2D-Koordinatensystem und der Laserscanner ein 3D-Koordinatensystem. Um die gemeinsamen Referenzpunkte zu finden, kommt ein Kalibrierobjekt in Form eines Quaders zum Einsatz (*Abb. 6*). Dieses besteht aus drei Platten mit verschiedenen Mustern (z.B. Schachbrett, Kreismuster) und hat die Maße $0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ (Breite \times Tiefe \times Höhe). Der Quader besitzt vier Rollen, die jeweils 0,1 m hoch sind und die Konstruktion beweglich machen. Auf diesen Platten befinden sich Reflektoren, die das Licht des Projektors reflektieren können und deren Reflexion die Sensoren des Projektors wahrnehmen können. Diese sind für die Verbesserung der Genauigkeit gedacht. Der Nutzer muss für die Kalibrierung manuell die Reflektoren mit dem



Abb. 6 | Der Projektor projiziert zwei Linien für die Auswertung der Kalibrierung. Die Enden der grünen Linie soll im Zentrum der rot umstrichelten Felder liegen. Die Reflektoren befinden sich im Zentrum der grün gepunkteten Umrandung.

Projektor anvisieren. Damit legt er auch automatisch die Position der Reflektoren im 2D-Koordinatensystem des Projektors fest. Da die Position der Reflektoren fix am Kalibrierkörper ist, bestimmt der Algorithmus deren Position im Laserscanner-Koordinatensystem über die Position des Kalibrierkörpers, welche sich mit dem folgenden Algorithmus bestimmen lässt. Der Algorithmus ist in zwei Phasen aufgeteilt: die Bestimmung der initialen Pose und das Anpassen des Modells an die Punktwolke des Livox-Laserscanners. Um die initiale Pose zu bestimmen, schneidet der Algorithmus zunächst die Punktwolke mittels einer vom Nutzer definierten Begrenzung zu, sodass nur der Kalibrierkörper in der Punktwolke verbleibt. Anschließend reduziert der Algorithmus die Anzahl der Punkte mittels des Voxel-Down-Sampling-Verfahrens von /Zhou et al. 2018/. Daraufhin bestimmt der Algorithmus die drei Ebenen des Kalibrierkörpers und deren Ausrichtung. Je Ebene bestimmt der Algorithmus zunächst mittels des Random-Sample-Consensus-(RANSAC-)Algorithmus eine Ebene und deren dazugehörigen Punkte. Der Algorithmus reduziert wiederum die Anzahl der Punkte mittels des Voxel-Down-Sampling-Verfahrens und mittels des DBScan-Algorithmus. Der Algorithmus verwendet DBScan, um die Punktwolke einheitlicher zu machen. Für die verbleibenden Punkte bestimmt der Algorithmus die Normalen durch die Hauptkomponentenanalyse. Der Mittelwert der Normalen

ergibt die Normale der Ebene. Der Mittelpunkt und die Normalen des Körpers nutzt der Algorithmus als initiale Pose für den ICP-Algorithmus /Chen & Medioni 1991/, der die finale Pose liefert. Damit ist die Position des Kalibrierkörpers bestimmt und es lässt sich die Kalibrierung zwischen Projektor und LiDAR durchführen.

Wie bereits erwähnt, entspricht ein Projektor einer inversen Kamera, d.h. die gleichen Kalibrieralgorithmen sind nutzbar. Die hier verwendete Methode ist die von /Zhang 1999/, welche in OpenCV implementiert ist. Der Algorithmus lässt sich für die Kalibrierung wie folgt gliedern:

1. Bestimmung der Referenzpunkte, also Hauptmerkmale, wie z. B. die Position der Reflektoren.
2. Schätzen der intrinsischen und extrinsischen Parameter durch den Direct-Linear-Transformation-(DLT-)Algorithmus.
3. Parameter durch Minimierung der Abweichungen verbessern. Der DLT-Algorithmus liefert eine Schätzung der tatsächlichen Parameter, welche durch das Minimieren einer Fehlerfunktion verbessert wird (s. Gl. (3)).

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \|m_{ij} - \pi(A, R, t, M_j)\|^2, \quad (3)$$

wobei $\pi(A, R, t, M_j)$ die Projektion des Punkts M_j in Bild i ist, n entspricht der Anzahl an Bildern und m der Anzahl an Referenzpunkten im Bild. Hierbei handelt es sich um ein nichtlineares Minimierungsproblem, welches der Levenberg-Marquardt-Algorithmus löst. Der Algorithmus benötigt eine initiale Schätzung von A , R_i und t_i , welche eben die Lösung des DLT-Algorithmus ist.

6 EXPERIMENTE

Die Güte der Projektorkalibrierung lässt sich wie in Gl. (2) mittels des Root Mean Square Errors (RMSE) berechnen (s. Gl. (4)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \|x_{ij} - \Pi_P(X_{ij})\|^2}{nm}}, \quad (4)$$

$$\text{mit } \Pi_P(X_{ij}) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{E} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Hierbei bildet $\Pi_P(X_{ij})$ den Punkt X_{ij} vom Koordinatensystem des Lidar-Sensors in das Koordinatensystem des Projektors ab, n entspricht der Anzahl an Scans, m der Anzahl an Punkten je Scan und x_{ij} dem Punkt im Projektorkoordinatensystem, \mathbf{A} der intrinsischen Matrix des Projektors und \mathbf{E} der extrinsischen Matrix. Die Matrix \mathbf{E} setzt sich aus Translation und Rotation zusammen.

Um die Kalibrierung des Laserprojektors zum Laserscanner auszuwerten, kommen hier zwei Experimente zum Einsatz. Experiment 1 verwendet zur Kalibrierung das Software Development Kit (SDK) der Firma Z-Laser für die Kalibrierung und betrachtet die Kalibrierung in drei Teilerperimenten. Hierbei steht in jedem Teilerperiment der Kalibrierkörper für die Kalibrierung an einer von drei verschiedenen Positionen. Die Position „vorne“ hat einen Abstand von 3–3,6 m zum Laserscanner, „mittig“ hat einen Abstand von 4,4–5 m und

„hinten“ hat einen Abstand von 6,5–8 m. Zur Auswertung projiziert der Laserprojektor zwei Linien auf das Schachbrettmuster des Kalibrierkörpers, wobei nur die Start- und Endpunkte der Linie für die Auswertung relevant sind. Diese vier Punkte markieren die Mitte der äußeren, weißen Felder des Schachbrettmusters, welche in *Abb. 6* gestrichelt umrandet sind. Wie diese Projektion aussehen kann, zeigt *Abb. 6*. Die Abweichung des projizierten Punkts von der tatsächlichen Mitte wird mithilfe eines Geodreiecks gemessen. Jedes Teilexperiment untersucht mittels der gleichen Methode die Abweichung der Projektion in den anderen zwei Bereichen. Für die Teilexperimente verwendet der Ouster-Laserscanner eine horizontale Auflösung von 512 bei den Positionen „vorne“ und „Mitte“, jedoch verwendet er eine Auflösung von 1024 für die Position „hinten“ als Ausgleich für die geringere Anzahl an Punkten, die mit der Position einhergeht.

Experiment 2 verwendet für die Kalibrierung eine eigene Implementierung, welche auf OpenCV basiert. OpenCV verwendet den DLT-Algorithmus, um eine initiale Pose zu bestimmen, und verbessert diese mittels der Levenberg-Marquardt-Optimierung. Da der Livox-Laserscanner im Gegensatz zum Ouster-Laserscanner ein viel kleineres Sichtfeld hat, kann der Kalibrierkörper nur in einer Entfernung von 1,7–2,3 m stehen. Hierbei erfasst der Laserscanner den Kalibrierkörper nur zu einem gewissen Teil, sodass die obere Seite z.B. nur zum Teil zu sehen ist. Das Experiment kann die Qualität der Kalibrierung nur in diesem Bereich überprüfen. Im Experiment hat der Kalibrierkörper drei verschiedene, unterschiedlich ausgerichtete Posen 1, 2 und 3.

Die Ergebnisse von Experiment 1 sind in *Tab. 1* aufgelistet. Die Kalibrierung im Bereich „hinten“ ist fehlgeschlagen, da der Projektor die Reflektoren nicht alle erkennen konnte, weshalb hier keine Ergebnisse vorliegen. *Tab. 1* zeigt, dass die Projektion mit einem RMSE von 1,6 mm und 2,41 mm am Kalibrierort am genauesten ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kalibrierung im Bereich „vorne“ die besten Ergebnisse auch außerhalb des Kalibrierorts liefert, da der RMSE im Vergleich zum Kalibrierort „Mitte“ um ca. 15 mm besser ist. Dies lässt sich durch die Dichte der Punkte im Laserscan erklären, da diese beim Ouster-Laserscanner im hinteren Bereich geringer ist. Hinzu kommt noch, dass der empfohlene Arbeitsbereich des Laserprojektors zwischen ein bis drei Meter ist und dieser somit außerhalb von diesem Bereich arbeitet.

Wie die Ergebnisse des Experiments 2 in *Tab. 2* zeigen, liegt der RMSE zwischen 21,3 mm und 23,8 mm. Dies lässt sich damit erklären, dass sich der Kalibrierkörper sehr nahe zum Laserscanner

Kalibrierort	vorne	Mitte	hinten	Insgesamt
vorne	1,60	16,61	28,15	18,89
Mitte	43,51	2,41	40,28	34,26

Tab. 1 | Kalibrierergebnisse Ouster OS1-64 – RMSE in mm

Pose	1	2	3	Insgesamt
RMSE	23,5	21,3	23,8	22,9

Tab. 2 | Kalibrierergebnisse Livox Mid-40 – RMSE in mm – Kalibrierort vorne

befindet und dadurch ein stärkeres Rauschen entsteht. Die Ergebnisse sind im Vergleich zum Experiment 1 ähnlich gut, jedoch lassen sich die beiden Experimente nur teilweise vergleichen. Der Livox Mid-40 hat im Vergleich zum Ouster ein viel kleineres Sichtfeld, weshalb der Kalibrierkörper sich in Experiment 2 nur im Bereich vorne befindet. Der RMSE ist wie bei Experiment 1 geringer als 100 mm. Somit sind beide Experimente erfolgreich und zeigen, dass das System genau genug für die Anwendung im DigSmart-Projekt ist.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Was die Kalibrierung des Laserprojektors betrifft, so zeigen die Experimente, dass die Kalibrierung mit dem SDK und den Ouster-OS1-64-Projektionen ermöglichen, die eine Abweichung von maximal 40 mm ermöglichen. Ebenfalls zeigen die Experimente, dass der Livox Mid-40 und die eigene Implementierung mit OpenCV ähnliche gute Ergebnisse liefern. Im Vergleich zur Größe eines Baggers sind die Projektionsfehler von 40 mm gering. Die Versuche zeigen also das Potenzial des Systems zur Visualisierung von Rohren und Leitungen für den Baggerführer. Somit ist das hier vorgestellte System aktuell in der Lage, die Verlaufspläne unverzerrt aus der Augenposition zu visualisieren. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt *Abb. 7*. In dieser ist eine an die Umgebung angepasste Projektion eines Tannenbaums zu sehen sowie die Projektion eines Abwasserrohrs mit Beschriftung. Die Projektion ist im Sonnenlicht jedoch schwer bis gar nicht zu erkennen, weshalb eine Nutzung des Systems nur im Schatten bzw. nachts sinnvoll ist. Hier gebe es laut Hersteller auch bisher keine Lösung. Dennoch zeigt das System das Potenzial auf, wie die Arbeitskräfte im Hoch- und Tiefbau bei Ausgrabungen unterstützt werden können. Alternativ kann z.B. ein transparentes Display oder ein Hightech-Helm als Ersatz dienen. Die Firma BAE Systems produziert z.B. Hightech-Helme für Kampfpiloten. Das GNSS des Baggers liefert die erste Pose des Baggers. Jedoch beeinträchtigen z.B. Gebäude und Bewegung die Genauigkeit. Das nächste Ziel ist es, die Genauigkeit der Lokalisierung mittels der Kameras und des Ousters OS1-64 zu verbessern. Hierfür ist geplant, dass das System zum einen Visual Odometry und zum anderen den



Abb. 7 | An die Umgebung angepasste Projektion eines Tannenbaums (links) und eines Abwasserrohrs inkl. Beschriftung (rechts). Wenn eine Linie nicht projiziert werden kann, da z.B. ein Objekt im Weg ist, so wird der Teil der Projektion ausgelassen.

Ouster-Laserscanner für die Lokalisierung in einer großen Punktwolke eines hochauflösenden Mobile-Mapping-Systems verwendet.

DANKSAGUNG

Das Projekt DigSmart wurde unter dem FKZ KK5150104GM1 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- Behzadan, A. H.; Kamat, V. R. (2009): Interactive Augmented Reality Visualization for Improved Damage Prevention and Maintenance of Underground Infrastructure. In: Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future, 1214–1222.
- Chai, Z.; Sun, Y.; Xiong, Z. (2018): A Novel Method for LiDAR Camera Calibration by Plane Fitting. In: 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 286–291.
- Chen, Y.; Medioni, G. (1991): Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings 3, 2724–2729.
- Gao, X.-S.; Hou, X.-R.; Tang, J.; Cheng, H.-F. (2003): Complete solution classification for the perspective-three-point problem. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 25(2003)8, 930–943.
- Hagebau (2020): Wenn Bagger daneben greifen. In: TIEFBAU + STRASSENBAU Aktuell (Winter 2020), 4–6. https://www.hagebau.com/content/wissen/downloads/brosch%C3%BCrencenter/tiefbau/fachbl%C3%A4tter/fb_tief_strassenbau_2_2020_web.pdf (22.08.2025).
- Hornung, A.; Wurm, K. M.; Bennewitz, M.; Stachniss, C.; Burgard, W. (2013): OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees. In: Autonomous Robots 34(2013)3, 189–206.
- Kernbauer, T.; Tschulik, M.; Fleck, P.; Arth, C. (2024): Spatial Augmented Reality for Heavy Machinery Using Laser Projections. In: 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), Orlando, FL/USA, 235–243.
- Lepetit, V.; Moreno-Noguer, F.; Fua, P. (2009): EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem. In: International Journal of Computer Vision 81(2009), 155–166.
- Leutert, F. (2021): Flexible Augmented Reality Systeme für robotergestützte Produktionsumgebungen. Dissertation, Institut für Informatik, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Würzburg (Forschungsberichte in der Robotik/Research Notes in Robotics 24. Würzburg).

Livox (2023): Livox Mid-40 – Technische Daten. <https://www.livoxtech.com/de/mid-40-and-mid-100/specs> (03.07.2023).

Su, X.; Talmaki, S.; Cai, H.; Kamat, V. R. (2013): Uncertainty-aware visualization and proximity monitoring in urban excavation: a geospatial augmented reality approach. In: Visualization in Engineering 1(2013), 2.

Wallmyr, M.; Sitompul, T. A.; Holstein, T.; Lindell, R. (2019): Evaluating Mixed Reality Notifications to Support Excavator Operator Awareness. In: Lamas, D.; Loizides, F.; Nacke, L.; Petrie, H.; Winckler, M.; Zaphiris, P. (Hrsg.): Human-Computer Interaction – INTERACT 2019. Springer International Publishing, Cham, 743–762.

Zhang, Z. (1999): Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Griechenland (1999)1, 666–673.

Zhou, Q.-Y.; Park, J.; Koltun, V. (2018): Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. arXiv:1801.09847. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.09847>.

Z-Laser (2022): Datasheet ZLP1. https://z-laser.com/wp-content/uploads/download/Datasheets/English/Z-LASER_Datasheet_ZLP1.pdf (02.05.2023).

AUTOREN



M. Sc. Luca Anteunis

UNIVERSITÄT WÜRZBURG
LEHRSTUHL FÜR
INFORMATIK XVII ROBOTIK

Sanderring 2 | 97070 Würzburg | Deutschland
luca.anteunis@uni-wuerzburg.de | ORCID: 0009-0000-6921-7759



Prof. Dr. Andreas Nüchter

UNIVERSITÄT WÜRZBURG
LEHRSTUHL FÜR
INFORMATIK XVII ROBOTIK

Sanderring 2 | 97070 Würzburg | Deutschland
andreas.nuechter@uni-wuerzburg.de | ORCID: 0000-0003-3870-783X