

Simulation und Auswertung eines photogrammetrischen Bildverbandes aus Krankamerabildern

SYLVIA ACKERMANN¹ & LENA JOACHIM¹

Zusammenfassung: Zur Beschleunigung von Bauprozessen sollen autonome Transportprozesse eines Turmdrehkrans realisiert werden. Als Grundlage der Pfadplanung in der Baustellen-Umgebung wird hier ein aktuelles digitales Oberflächenmodell verwendet. Dieses wird mit Hilfe von am Ausleger des Krans montierten Kameras photogrammetrisch generiert. In dieser Arbeit wird die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion hinsichtlich deren Eignung für die automatisierte Pfadplanung untersucht. Zuerst wird eine Simulation zur Planung von Passpunktverteilung und Aufnahmekonfiguration des Bildverbandes implementiert. Die anschließende Auswertung des realen Bildverbandes, ergibt im Baustellenbereich eine mittlere Objektpunktgenauigkeit von 2,5 cm. Der Vergleich mit Laserscanning-Referenzdaten zeigt, dass Objekte mit einer Mindestbreite von 3 cm in der Rekonstruktion enthalten sind, sofern diese sich ausreichend vom Hintergrund abheben.

1 Einleitung

Durch Bevölkerungswachstum, Ressourcenknappheit und Klimawandel ergeben sich in Zukunft zahlreiche zu bewältigende Herausforderungen für das Baugewerbe. Problematisch ist allerdings, dass die Baubranche gegenüber anderen Wirtschaftsbereichen große Rückstände in der Produktivität aufzuweisen hat (STAT. BUNDESAMT 2018). Um Bauprozesse in Zukunft beschleunigen zu können, sollen autonome Transportprozesse eines Turmdrehkrans realisiert werden. Dafür wird die automatisierte Planung eines Pfades durch die Baustellen-Umgebung benötigt. Als Grundlage dieser Pfadplanung soll ein aktuelles digitales Oberflächenmodell (DOM) der Baustelle verwendet werden. Dieses wird photogrammetrisch generiert, wofür fünf Kameras am Ausleger des Turmdrehkrans montiert werden. Eine Analyse der Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion soll deren Eignung für die automatisierte Pfadplanung zeigen. Dabei werden die Faktoren Genauigkeit und Vollständigkeit betrachtet.

2 Datengrundlage

2.1 Photogrammetrischer Bildverband

Für die Aufnahme des photogrammetrischen Bildverbandes werden fünf Kameras am Ausleger des Turmdrehkrans in einer Höhe von etwa 45 m montiert. Bei den Kameras handelt es sich jeweils um das acA4112-8gc-Modell von Basler mit einer Brennweite von 16 mm und einem 12 Megapixel CMOS-Sensor (4096 × 3000 Pixel). Die Kameras werden in Nadirsicht montiert, sodass sich eine Bodenpixelgröße von 9,7 mm ergibt. Wie Abb. 1 zu entnehmen ist, werden die Kameras in einem Abstand von 10 m angebracht, wobei sich Kamera A nah am Rotationszentrum

¹ Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: st160591@stud.uni-stuttgart.de, lena.joachim@ifp.uni-stuttgart.de

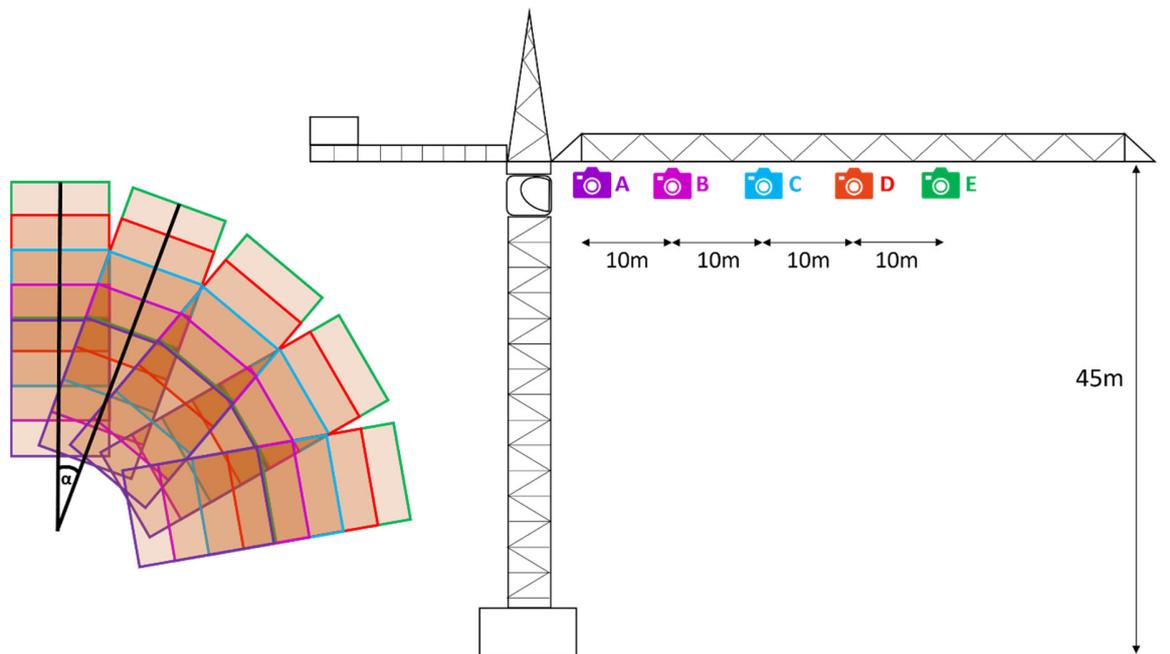


Abb. 1: Rechts: Montierung der Kameras A-E am Ausleger des Turmdrehkrans.
Links: Überdeckungen der Bilder benachbarter Kranpositionen mit inkrementellem Rotationswinkel α . Die Rechtecke einer Farbe symbolisieren die Bodenspuren der Bilder einer Kamera aus der Vogelperspektive.

des Krans befindet. Da die lange Sensorseite in Richtung des Auslegers verläuft, haben Bilder benachbarter Kameras eine Längsüberdeckung von 75%.

Die Querüberdeckung benachbarter Bilder derselben Kamera ergibt sich nach TUTTAS et al. (2016) aus Drehradius, Kameraparametern und inkrementellem Rotationswinkel α . Letzterer beschreibt den Rotationswinkel des Krans zwischen zwei Kranpositionen, an denen die Kameras A-E ausgelöst werden.

2.2 Passpunkte und Referenzdaten

Die Georeferenzierung der photogrammetrischen Punktwolke erfolgt mithilfe von Passpunkten, die tachymetrisch im UTM-Koordinatensystem eingemessen werden.

Neben der photogrammetrischen Aufnahme erfolgt auch eine Erfassung der Baustelle via Laserscanning. Zeitgleich mit der Aufnahme des photogrammetrischen Bildverbandes wird ein terrestrischer Laserscan (TLS) durchgeführt, der als Referenz der photogrammetrischen Punktwolke dient und für die Analyse der Vollständigkeit herangezogen wird.

3 Methodik

Zuerst erfolgt die Planung der Aufnahme des Bildverbandes anhand einer Simulation. Diese ermöglicht die Planung der Passpunktverteilung sowie die Festlegung des inkrementellen Rotationswinkels. Anschließend wird die Aufnahme des realen Bildverbandes und dessen photogrammetrische Auswertung im Hinblick auf Genauigkeit und Vollständigkeit durchgeführt.

3.1 Matlab-Simulation mit Schnittstelle zu Inpho UASMaster

Die in Matlab implementierte Simulation des Krankamerabildverbandes hat eine Schnittstelle zur photogrammetrischen Software UASMaster (TRIMBLE 2022). Das Schema in Abb. 2 stellt den Ablauf der Simulation dar. Als Eingabeparameter benötigt die Simulation Parameter des Bildverbandes und der Krangeometrie, sowie Angaben zu Messunsicherheiten. Außerdem wird als Input-File eine Punktwolke des Baustellenbereichs importiert, die vor der Aufnahme des Bildverbandes mit einem mobilen Laserscanner erfasst wird. Das Simulationsprogramm wählt einen Bruchteil dieser Punkte aus und betrachtet sie als Verknüpfungspunkte zwischen den einzelnen Bildern des simulierten Bildverbandes.

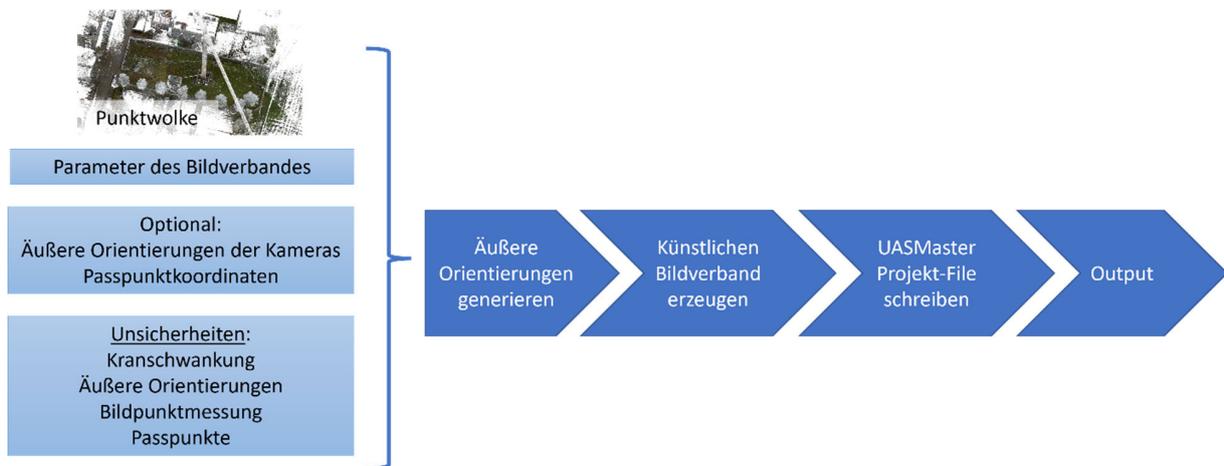


Abb. 2: Ablauf der Simulation des Krankamerabildverbandes

Anhand der Eingabeparameter berechnet die Simulation die äußeren Orientierungen der Kameras im Bildverband. Diese werden anschließend verwendet, um Objektpunktkoordinaten der Punktwolke über die Projektionsmatrix der Projektiven Geometrie in das Pixelkoordinatensystem im Bildraum zu überführen (LUHMANN et al. 2019). So ergeben sich schließlich Verknüpfungspunkte des simulierten Bildverbandes, die gemeinsam mit Informationen zu den äußeren Orientierungen der Kameras und den Passpunktkoordinaten in das UASMaster Projekt-File geschrieben werden. Mit dem Ausgabefile der Simulation kann im Anschluss eine Bündelblockausgleichung in UASMaster berechnet werden, die Ergebnisse zu den Objektpunktgenauigkeiten liefert. Anhand der Simulation werden die Objektpunktgenauigkeiten für verschiedene Passpunktverteilungen und inkrementelle Rotationswinkel des Krans untersucht. Basierend auf diesen theoretischen Voruntersuchungen wird für die reale Bildaufnahme mit den Krankeras ein inkrementeller Rotationswinkel von 5° festgelegt. Außerdem ergeben die Voruntersuchungen die in Abb. 3 dargestellte Konfiguration an 12 Pass- und 14 Kontrollpunkten.

Darüber hinaus wird die Simulation im Anschluss an die Auswertung des realen Bildverbandes mit optimierten Eingabeparametern durchgeführt. So kann auch die Objektpunktgenauigkeit außerhalb des Baustellenbereichs betrachtet werden, wo sich keine Kontrollpunkte befinden. Dazu wird die Differenz zwischen ausgeglichenen Objektpunktkoordinaten der Simulation und den tatsächlichen Koordinaten der Punktwolke betrachtet und graphisch visualisiert.



Abb. 3: Pass- und Kontrollpunktkonfiguration des Krankamerabildverbandes; Passpunkte, deren Name mit einem P beginnt, sind an einem Messpfleiler angebracht.

3.2 Auswertung des realen Bildverbandes

Im zweiten Schritt erfolgt die Aufnahme und Auswertung des realen Bildverbandes, wobei die Auswertung im Wesentlichen mit der photogrammetrischen Software Agisoft Metashape erfolgt (AGISOFT METASHAPE 2021). Betrachtet werden dabei die Genauigkeit und Vollständigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion.

Die **Objektpunktgenauigkeit** wird anhand der Residuen an den Kontrollpunkten bewertet. Die betrachtete Größe ist hierbei die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme bzw. der root-mean-square-error (RMSE). Die Objektpunktgenauigkeit wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Hier betrachtete Aspekte sind der inkrementelle Rotationswinkel, die Passpunktkonfiguration und die Kamerakalibrierung. Zur Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung und Verzeichnung der Kamera werden drei verschiedene Kalibrierverfahren betrachtet. In Var. 1 werden alle Parameter aus einer vorherigen Testfeldkalibrierung übernommen, in Var. 2 werden die Parameter ausschließlich aus einer Simultankalibrierung bestimmt und in Var. 3 erfolgt eine Simultankalibrierung der ‚leitenden Parameter‘, Kamerakonstante und Bildhauptpunkt, wobei die übrigen Parameter in der Testfeldkalibrierung bestimmt werden. Die Konstellation in Variante 3 ergibt sich aus Untersuchungen von CLEDAT et al. (2020), wo diese Kombination der Parameterschätzung zu besonders hohen Objektpunktgenauigkeiten führte.

Um die **Vollständigkeit** zu beurteilen, werden TLS-Daten als Referenz verwendet. Da die Pfadplanung auf Basis eines DOM erfolgen soll, wird sowohl aus der Laserscanning- als auch aus der photogrammetrischen Punktwolke ein DOM der Rastergröße 10 cm generiert. Ein Vergleich der beiden Oberflächenmodelle wird durch Bildung der Cloud-to-Cloud-Distance (C2C) durchgeführt, die in CloudCompare implementiert ist (CLOUD COMPARE 2021).

4 Ergebnisse

Untersuchungen der Residuen an den Kontrollpunkten zeigen, dass sich im Baustellenbereich Objektpunktgenauigkeiten unter 5 cm ergeben. Diese Genauigkeit wird unter Durchführung einer Simultankalibrierung der ‚leitenden Parameter‘ (Var. 3) erreicht. Bei Betrachtung der Objektpunktgenauigkeiten für verschiedene inkrementelle Rotationswinkel in Tab. 1 zeigt sich, dass auch

mit steigendem Rotationswinkel hohe Objektpunktgenauigkeiten erreicht werden können, obwohl weniger Bilder zur Verfügung stehen.

Tab. 1: Objektpunktgenauigkeit in Abhängigkeit vom inkrementellen Rotationswinkel α und der Querüberdeckung, welche sich jeweils auf benachbarte Bilder der mittleren Kamera C bezieht

Rotationswinkel α	5°	10°	20°	35°	50°
Querüberdeckung	93,3 %	86,7 %	73,9 %	56,2 %	41,5 %
Anzahl der Bilder	360	180	90	52	36
RMSE [cm]	2,7	2,6	2,7	2,1	2,4

Betrachtet man zusätzlich die Entfernung der Kontrollpunkte vom Rotationszentrum des Krans, sind für hohe Objektpunktgenauigkeiten in Krannähe große inkrementelle Rotationswinkel ausreichend. Wenn auch Objekte am Baustellenrand von Interesse sind, sollte der Rotationswinkel verringert werden, um diese mit hoher Genauigkeit lokalisieren zu können.

Außerhalb des Baustellenbereichs ergeben die Untersuchungen anhand der Simulation eine Abnahme der Objektpunktgenauigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion mit Vergrößerung des inkrementellen Rotationswinkels (Abb. 4).

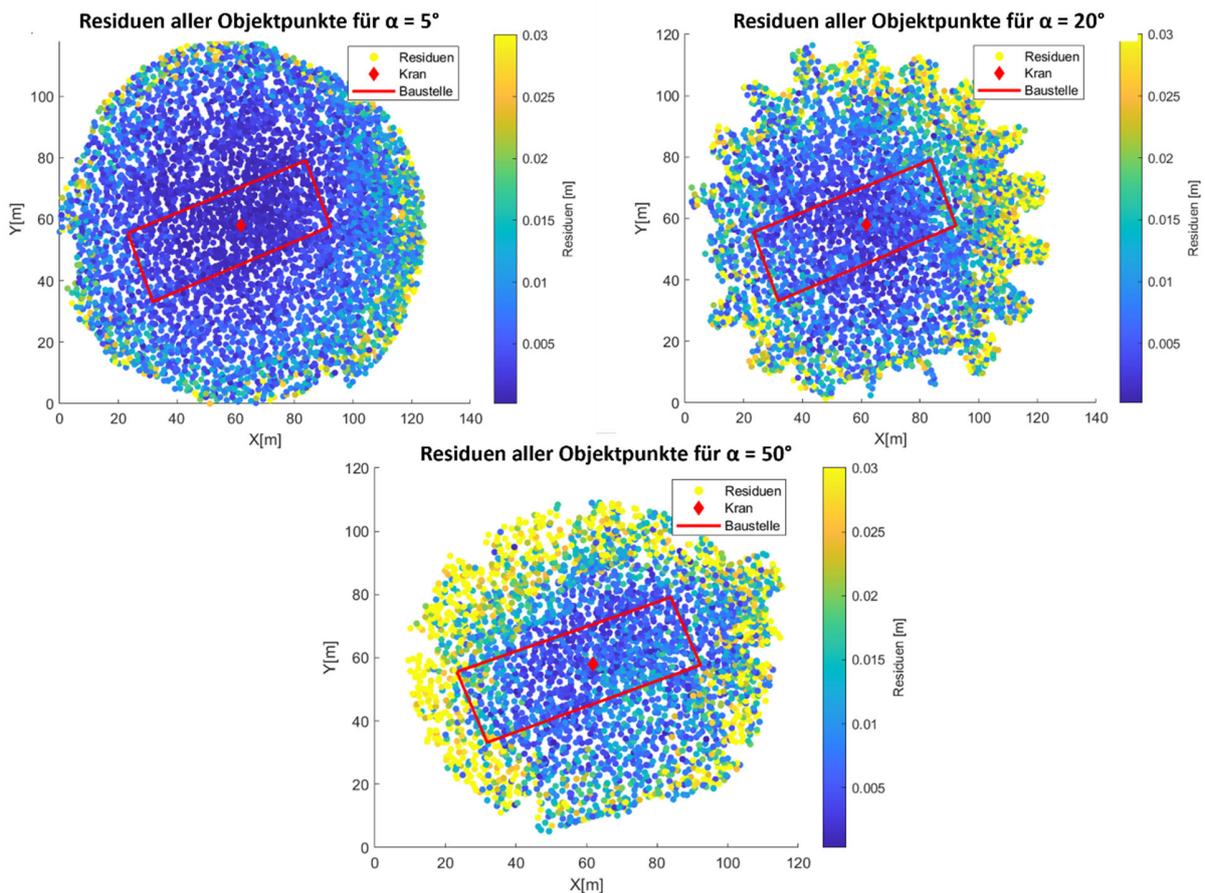


Abb. 4: Objektpunktgenauigkeiten außerhalb des Baustellenbereichs: Abweichungen zwischen den ausgeglichenen Objektpunktkoordinaten der Simulation aus UASMaster und den tatsächlichen Koordinaten der Punktwolke; dargestellt für verschiedene inkrementelle Rotationswinkel α des Krans; zur geeigneten Visualisierung wird eine Obergrenze von 3 cm festgelegt.

Untersuchungen der Vollständigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion zeigen eine Abnahme der Vollständigkeit mit Vergrößerung des inkrementellen Rotationswinkels α . Unabhängig vom Rotationswinkel zeigt sich in Abb. 5 die schwierige photogrammetrische Rekonstruierbarkeit von Vegetation, wie Bäumen oder der Grasfläche, die das gesamte Baustellengebiet durchzieht (rot). Die sich darauf befindenden Objekte wie Krangewichte, Holzpaletten oder Stangenketten können allerdings mit einer sehr hohen Genauigkeit von 5 cm und besser rekonstruiert werden (blau). Es zeigt sich, dass Objekte mit einer Mindestbreite von 3 cm in der photogrammetrischen Rekonstruktion enthalten sind, wenn diese sich ausreichend vom Hintergrund abheben können. Dies entspricht der Dicke des Bauzauns, an dem dieses Verhalten erkennbar wird.

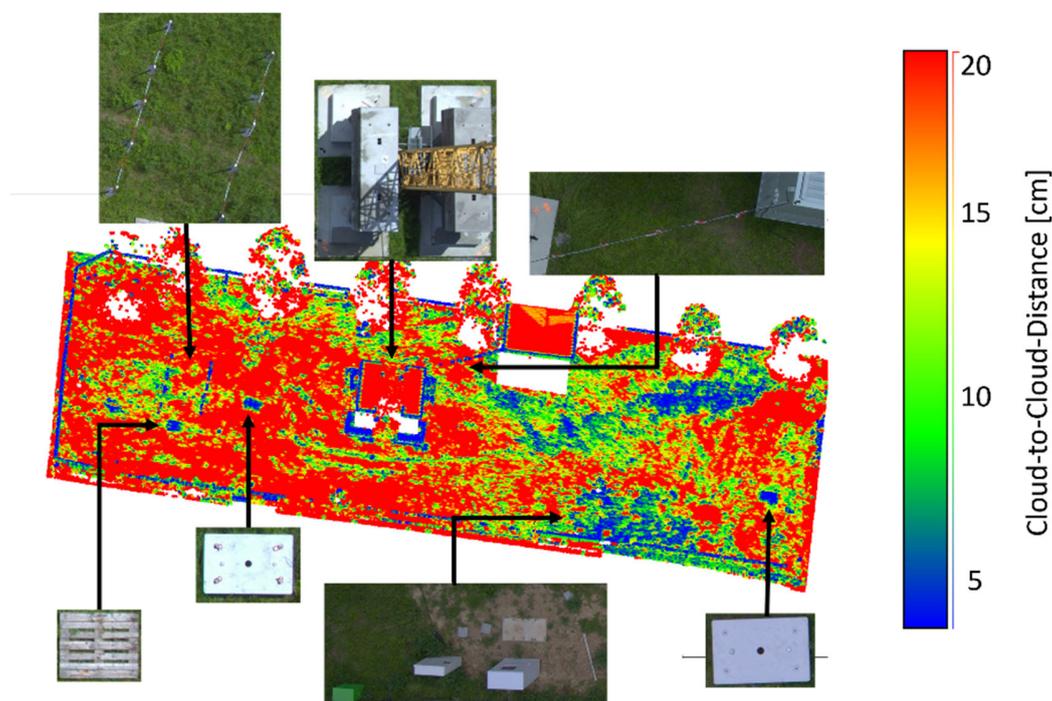


Abb. 5: Vollständigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion: Differenz zwischen Photogrammetrischem-DOM ($\alpha = 5^\circ$) und Laserscanning-DOM mit festgelegter Obergrenze von 20 cm.

5 Fazit & Ausblick

Die Betrachtungen der Residuen an den Kontrollpunkten zeigen, dass im Baustellenbereich eine mittlere Objektpunktgenauigkeit von 2,5 cm erreicht wird. Diese Genauigkeiten sind erreichbar, wenn die Parameter der Kameraverzeichnung mit einer Simultankalibrierung der ‚leitenden Parameter‘ bestimmt werden. Der Vergleich mit den Laserscanning-Referenzdaten zeigt, dass Objekte mit einer Mindestbreite von 3 cm in der photogrammetrischen Rekonstruktion enthalten sind, sofern diese sich ausreichend vom Hintergrund abheben. Untersuchungen verschiedener inkrementeller Rotationswinkel des Krans zeigen, dass für eine vollständige Rekonstruktion der Objekte kleine Rotationswinkel zu wählen sind. Die erreichten Objektpunktgenauigkeiten liegen innerhalb des Genauigkeitsbereichs, in der die Regelung des Krans arbeitet. Aufgrund der Pendelbewegung

des Hubseils ist ohnehin keine Positionierung des Kranhakens im mm-Bereich möglich. Daher bildet ein solches photogrammetrisch generiertes DOM eine geeignete Grundlage der automatisierten Pfadplanung durch die Baustellenumgebung. Um ein aktuelles Oberflächenmodell zu erhalten, muss dieses allerdings in Echtzeit generiert werden. Es wird sich zeigen, welche Qualität der Rekonstruktion unter diesen Umständen erreichbar ist.

6 Danksagung

Vielen Dank an die Firma Trimble Inpho für die Bereitstellung ihrer Software UASMaster für die Nutzung in dieser Arbeit. Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2120/1 – 390831618.

7 Literaturverzeichnis

- AGISOFT METASHAPE, 2021: <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>, Version 1.7.2.
- CLEDAT, E., CUCCI, D., A. & SKALLOUD, J., 2020: Camera Calibration models and methods for corridor mapping with UAVs. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., V-1-2020.
- CLOUD COMPARE, 2021: <http://www.cloudcompare.org/>, Version 2.10.2
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. & BOEHM, J., 2019: Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter, 277-295.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2018: Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigenstunde im Vergleich 1991-2018, <https://www.capmo.de/baulexikon/baubranche/>, letzter Zugriff am 14.11.21.
- TRIMBLE, 2022: Trimble Inpho UASMaster. <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-inpho-uasmaster>, letzter Zugriff am 08.02.2022.
- TUTTAS, S., BRAUN, A., BORMANN, A. & STILLA, U., 2016: Evaluation of acquisition strategies for image-based construction site monitoring. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5, 733-740, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-733-2016>.