

Farb- und Shadingkorrektur im speziellen Einsatzfeld der automatischen Kanalinspektion

Daniel Kapusi¹, Rainer Jahn¹, Rico Nestler^{1,2}, Karl-Heinz Franke¹

*¹Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e. V.
Werner-von-Siemens-Straße 10
D-98693 Ilmenau
<http://www.zbs-ilmenau.de>*

*²Technische Universität Ilmenau
FG Qualitätssicherung und industrielle Bildverarbeitung
Postfach 100565
D-98684 Ilmenau
<https://www.tu-ilmenau.de/qualitaetssicherung/>*

mailto:

{daniel.kapusi, rainer.jahn, rico.nestler, karl-heinz.franke}@zbs-ilmenau.de

Zusammenfassung In weitwinkligen Aufnahmen stark gekrümmter Oberflächen kommt es, bedingt durch das Zusammenspiel von Beleuchtung, Optik und Bildsensorik, zu Farbverschiebungen in Abbildern erfasster Objekte. Diese stören die nachfolgende Bildanalyse erheblich, wenn das Farbverhältnis für die Segmentierung und Klassifikation von Bildregionen in besonderer Weise informationstragend ist. Um derartige Einflüsse richtig korrigieren zu können, sind Analysen zu Ursachen und Wirkungsort der Farbverschiebungen notwendig. Im Beitrag wird am Beispiel einer kamera-basierten Kanalrohinspektion diese Problemstellung diskutiert. Shading und spezifische Farbeffekte, die abhängig vom Kanaldurchmesser und der Kameraposition im Kanalrohr sind, werden beschrieben. Die übliche Vorgehensweise einer Shadingkorrektur anhand zuvor aufgenommener Referenzbilder zur Charakterisierung der Aufnahmeanordnung ist hier nicht einsetzbar. Ein zur photometrischen Pixelkorrektur entwickeltes Verfahren, das benötigte Referenzbilder direkt aus den Eingangsbildern ohne einen separaten Einmessvorgang erzeugt, wird vorgestellt.

1 Einleitung

Im Jahr 2016 wurde das BMBF-Verbundprojekt AuZuKa (Automatisierte Zustandsanalyse von Abwasserkanälen durch virtuelle Begehung - FKZ 13N13895) mit dem Ziel gestartet, einen Inspektionsroboter zu entwickeln, der während seiner Fahrt durch Abwasserrohre rundherum Bilder aufzeichnet, aus denen das befahrene Rohr mittels farbtexturierter 3D-Tiefenkarten (RGB-D) virtuell wieder vollständig rekonstruiert werden kann. Eine nachgelagerte automatische Schadensdetektion verarbeitet diese Daten und lokalisiert Schäden, wie z. B. Rissbildungen, Wurzeleinwüchse, Muffenversätze, Abplatzungen, Ablagerungen, etc.

Hauptaufgabe des ZBS e. V. im Verbundprojekt ist die Konzeption des 3D-Messkopfes sowie die Aufbereitung, Registrierung und Fusion der Rohbilddaten zu verorteten Farbbildern mit Tiefeninformationen (RGB-D-Bilder).

2 Einsatzfeld automatische Kanalinspektion



Abb. 1 Messkopf

Zur Kanalinspektion werden Stereomodule wie in Abb. 1 eingesetzt, deren Sichtfelder von der Rohrmittelachse aus auf die Rohrwand gerichtet sind. Jedes Sichtfeld deckt etwa einen Winkel von 80° des Rohrumfangs ab. Mit sechs Modulen, die jeweils um 60° zueinander gedreht sind, wird somit der gesamte Rohrumfang überlappend abgebildet, so dass angrenzende Bilder registriert und vereinigt werden können.

Neben der stereoskopischen Oberflächenerfassung, die nicht Gegenstand dieser Ausführungen ist, werden die Module auch zur konventionellen Abbildung der Rohrwand (Textur-Abbildung) genutzt. Zur diffusen Ausleuchtung der Rohrwand dienen Weißlicht-LEDs ohne Zusatzoptik, die oberhalb und unterhalb der Objektivöffnungen im Modulgehäuse angebracht sind. Erwartungsgemäß ist die Ausleuchtung über das Sichtfeld der Kamera ungleichmäßig. Zusammen mit Vignettierungseffekten ergibt sich bereits bei Abbildung einer glatten, unifarbenen Rohrwand ein deutlich inhomogenes Hellbild. Es ist sinnvoll, diese systematische Intensitätsmodulation zu erfassen und aus den Texturbildern zu eliminieren.

Abb. 2 zeigt schematisch das eingesetzte Objektiv mit Strahlengang eines äußeren Objektpunktes. Der Strahlengang ist idealisiert dargestellt und beschränkt sich auf die Pupillen sowie den Verlauf in Objekt- und Bildraum. Aus den bekannten Optikdaten ergibt sich ein bildseitiger Feldwinkel von 15° in den Ecken des Sensors. Weiterhin ist die mechanische Vignettierung der Optik veranschaulicht, die durch Begrenzung der Strahlenbündel an Fassungs- und Gehäuseteilen entsteht und oft zur Reduzierung der Abbildungsfehler erzwungen wird. Dabei kann durch Reflexion und Streuung an den Gehäuseelementen auch Falschlicht entstehen, das die reguläre Bildstruktur überlagert. Diese Einflüsse der Optik sind wellenlängenabhängig und wirken unterschiedlich auf die verschiedenfarbigen Pixel

$\beta(\mathbf{p}, t, \lambda)$ der Oberfläche und der Vignettierungsfunktion $V(\mathbf{p}, t, \lambda)$ nach (1) bestimmt. Der Einfluss von Fremdlicht ist im Kanal vernachlässigbar. Die örtliche Variabilität der Strahlungsfunktion der Lichtquelle $R(\mathbf{p}, t, \lambda)$ und der Vignettierungsfunktion $V(\mathbf{p}, t, \lambda)$ soll durch eine Shadingkorrektur beseitigt werden, um ein möglichst unverfälschtes Abbild der Remissionsfunktion $\beta(\mathbf{p}, t, \lambda)$ auf dem Bildsensor zu erhalten. Goldmann [2] nennt vier radial wirkende Vignettierungseinflüsse (natürliche (Kosinus-4-Gesetz), Pixel- (abhängig vom Lichteinfallswinkel), optische (blendenabhängig) und mechanische Vignettierung (blockierte Lichtwege)). Für die Shadingkorrektur ist es nicht notwendig $R(\mathbf{p}, t, \lambda)$ und $V(\mathbf{p}, t, \lambda)$ getrennt zu betrachten, daher werden sie nach (2) zu einer Shadingfunktion $S(\mathbf{p}, t, \lambda)$ zusammengefasst. Die spektrale Strahlungsverteilung auf dem Bildsensor wird gemäß (3) anhand der Sensorübertragungsfunktion f u. a. in Abhängigkeit von der Belichtungszeit k und des RGB-Bayer-Filters $F_{r,g,b}(\lambda)$ auf dem Sensor in ein elektrisches Signal und letztendlich diskrete Pixelwerte $I_{r,g,b}(\mathbf{p}, t)$ gewandelt.

$$C(\mathbf{p}, t, \lambda) = V(\mathbf{p}, t, \lambda)\beta(\mathbf{p}, t, \lambda)R(\mathbf{p}, t, \lambda) \quad (1)$$

$$S(\mathbf{p}, t, \lambda) = V(\mathbf{p}, t, \lambda)R(\mathbf{p}, t, \lambda) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_{r,g,b}(\mathbf{p}, t) &= f\left(k \int F_{r,g,b}(\lambda)C(\mathbf{p}, t, \lambda) d\lambda\right) \\ &= f\left(k \int F_{r,g,b}(\lambda)S(\mathbf{p}, t, \lambda)\beta(\mathbf{p}, t, \lambda) d\lambda\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Verschiedene Verfahren zur Ermittlung der Sensorübertragungsfunktion f werden in [3], [4] und [5] vorgestellt. In unserem Fall gehen wir von einem annähernd linearen Verlauf (Nichtlinearität < 0.26% [6]) und einer konstanten Belichtungszeit k aus, so dass für die diskreten Pixelwerte vereinfachend die Proportionalitätsbeziehung (4) formuliert werden kann. Aus einer plausiblen Annahme heraus folgt, dass das Integral kanalweise wie in (5) bezüglich der Wellenlänge λ gelöst werden kann. Somit wird mit (5) in (4) aus der wellenlängenabhängigen Proportionalitätsbeziehung eine farbkanalabhängige (6).

$$I_{r,g,b}(\mathbf{p}, t) \propto \int F_{r,g,b}(\lambda)S(\mathbf{p}, t, \lambda)\beta(\mathbf{p}, t, \lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$S_{r,g,b}(\mathbf{p}, t)\beta_{r,g,b}(\mathbf{p}, t) = \int F_{r,g,b}(\lambda)S(\mathbf{p}, t, \lambda)\beta(\mathbf{p}, t, \lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$I_{r,g,b}(\mathbf{p}, t) \propto S_{r,g,b}(\mathbf{p}, t)\beta_{r,g,b}(\mathbf{p}, t) \quad (6)$$

In [7] wird u. a. eine verbreitete Methode der sogenannten Shading- bzw. Flat-Field-Korrektur detailliert beschrieben, wobei die Shadingfunktion mit Hilfe von Hellbildern ermittelt wird. Diese Hellbilder werden durch die Bildaufnahme von einer homogenen weißen Fläche erzeugt, die sich während eines Einmessvorganges orthogonal zum Kameraobjektiv und idealerweise leicht außerhalb von dessen Tiefenschärfereich befindet. Die nachfolgend zitierten Literaturstellen konzentrieren sich auf die Vignettierung, sie beziehen sich auf Outdoorszenen mit natürlichem Umgebungslicht. In [2] wird angenommen, dass sich die Vignettierungsfunktion für alle Farbkanäle gleich verhält. Die Modellierung erfolgt rotationssymmetrisch anhand eines Polynoms 6. Grades mit ausschließlich geraden Exponenten. Kim und Pollefeys [8] bestimmen zunächst korrespondierende Bildpunkte in einer mit fahrender Kamera aufgezeichneten willkürlichen Bildsequenz. Unter Annahme gleicher spezifischer Intensitäten an korrespondierenden Punkten in sich überlappenden Bildern werden die Sensorübertragungsfunktion und die Vignettierung separat geschätzt. Letztere wird radialsymmetrisch als Polynom k -ter Ordnung mit ebenfalls ausschließlich geraden Exponenten modelliert. Die Farbkanäle werden jedoch dabei getrennt behandelt. Auch Alexandrov et al. [9] betrachten die Farbkanäle von Low-Cost RGB-D Kameras unabhängig voneinander. Zur Kalibrierung verwenden sie ein Kalibriertarget mit weißer Oberfläche, welches über das gesamte Bildfeld bewegt und getracked wird. In ihren Experimenten beobachteten sie, dass bei einigen Kameras das Zentrum der Vignettierung nicht mit dem optischen Zentrum übereinstimmt und empfehlen einen zusätzlichen Freiheitsgrad für einen verbesserten Fit der Modellparameter hinzuzunehmen.

4 Eigener Ansatz zur Farb- und Shadingkorrektur

4.1 Erzeugung eines RGB-Hellbildes

Die konventionelle Verwendung eines vorab aufgenommenen Hellbildes als allgemeingültige Shadingreferenz wie in [7] ist im hier genannten Anwendungsfall nicht

praxistauglich. Die Strahlungsfunktion der Lichtquelle in Relation zur Beobachterposition der Kamera ist aufgrund der besonderen Bildaufnahmegeometrie abhängig von der relativen Position der Bildaufnahmeeinrichtung bzgl. der Rohrrinnenwand und vom Rohrdurchmesser (Oberflächenkrümmung).

Daher wird das Hellbild direkt aus den n mit Shading behafteten Aufnahmen, die während der Rohrdurchfahrt aufgezeichnet worden sind, mit Hilfe heuristischer Methoden erzeugt. Es werden ausschließlich unifarbene Objektoberflächen angenommen, wie sie im hier gezeigten Anwendungsfall vorliegen. Die Remissionsfunktion kann dann zwar noch lokal ortsabhängig sein, aber im Mittel existiert ein repräsentativer Farbwert für den kompletten betrachteten Rohrabchnitt. Die gemittelte Remission $\overline{\beta_{r,g,b}}$ nach (8) ist dann nicht mehr ortsabhängig. Eine weitere Annahme fordert, dass die Shadingfunktion im betrachteten Zeitraum konstant bleibt. Unter diesen beiden Hypothesen folgt aus (6) und (7), dass sich die Shadingfunktion näherungsweise proportional zur mittleren Pixelintensität über n Bilder verhält (9).

$$\overline{I_{r,g,b}(\mathbf{p})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{r,g,b}(\mathbf{p}, i) \propto \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{r,g,b}(\mathbf{p}) \beta_{r,g,b}(\mathbf{p}, i) \quad (7)$$

$$\overline{\beta_{r,g,b}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{r,g,b}(\mathbf{p}, i) \quad (8)$$

$$\overline{I_{r,g,b}(\mathbf{p})} \propto S_{r,g,b}(\mathbf{p}) \cdot \overline{\beta_{r,g,b}} \propto S_{r,g,b}(\mathbf{p}) \quad (9)$$

In den Bildern gibt es insbesondere an Muffen, lokalen Schadstellen oder auch bei Reflexionen große Abweichungen zwischen den Remissionen, welche der oben genannten Voraussetzung, dass das Rohr im Mittel unifarben ist, entgegenstehen. Das mittlere Bild $\overline{I_{r,g,b}}$ wird daher in einem zweiten Durchlauf j des Bildstapels zum Hellbild $\overline{J_{r,g,b}}$ optimiert, indem Intensitäten, die vom Mittelwert eine größere Distanz als die lokale Standardabweichung $\sigma_{r,g,b}(\mathbf{p})$ über $I_{r,g,b}(\mathbf{p}, t)$ aufweisen, entsprechend niedriger mit $w_{r,g,b}(\mathbf{p}, j)$ gewichtet werden (siehe (9) und (10)). Dieser Vorgang lässt sich auch mit weiteren Durchläufen wiederholen, wobei dadurch das Hellbild iterativ optimiert wird.

$$w_{r,g,b}(\mathbf{p}, j) = \min \left(\frac{\sigma_{r,g,b}(\mathbf{p})^2}{(I_{r,g,b}(\mathbf{p}, j) - \bar{I}_{r,g,b}(\mathbf{p}))^2}, 1 \right) \quad (10)$$

$$\bar{J}_{r,g,b}(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{j=1}^N w_{r,g,b}(\mathbf{p}, j) I_{r,g,b}(\mathbf{p}, j)}{\sum_{j=1}^N w_{r,g,b}(\mathbf{p}, j)} \quad (11)$$

Das Hellbild \bar{J} (Abb. 4) enthält im Vergleich zum gemittelten Bild \bar{I} (Abb. 3) viel weniger Artefakte (helligkeits- und kontrastverstärkte Darstellung). Die Reflexionen sind unterdrückt. Auffällig sind die in \bar{J} verbliebenen Strukturen in Fließrichtung (vertikal),



Abb. 3 gemitteltetes Bild \bar{I}



Abb. 4 statistisch optimiertes Hellbild \bar{J}

die mutmaßlich durch Auswaschungen und Ablagerungen im Kanalrohr entstanden sind und die sich über die komplette Rohrlänge ausdehnen. Diese Strukturen sind vom Hellbild zu separieren. Dazu wird im nächsten Abschnitt 4.2 ein Modellansatz vorgestellt, welcher aufgrund der begrenzten Freiheitsgrade diese Art von Strukturen außen vor lässt.

4.2 Synthese des parametrischen RGB-Hellbildes

Jeder Farbkanal wird weiterhin unabhängig voneinander betrachtet, d. h. es wird für



Abb. 5 param. RGB-Hellbild ($k=5$)

jeden Farbkanal eine separate Shadingfunktion modelliert. Abb. 5 (überhöhte Sättigung zu Darstellungszwecken) zeigt ein solches parametrisches RGB-Hellbild. In diesem spiegelt sich der in Abschnitt 2 erwähnte Purpur-Effekt in den Randbereichen wider.

Als Modellfunktion M zur Abbildung des Shadings wird jeweils ein zweidimensionales

Polynom k -ter Ordnung verwendet. Die Ordnung k wird dabei gerade nur so hoch gewählt, dass auch asymmetrische und dezentrierte Helligkeitsverteilungen dargestellt werden können. Dadurch gelingt es, die unerwünschten Einflüsse von unstetigen Strukturen auf das Shadingmodell, wie die im bereits vorangegangenen Abschnitt 4.1 erwähnten Verfärbungen in Fließrichtung, aufgrund der Kontinuität der Polynomfunktion weitestgehend zu minimieren. Das verwendete 2D-Polynom lässt sich allgemein wie in (12) beschreiben. Zu beachten ist, dass nur die Terme $a_{r,g,b}(i,j)x^i y^j$ summiert werden, deren Summe der Potenzen $i+j$ die vorgegebene Ordnung k nicht übersteigen.

$$M(\mathbf{a}_{r,g,b}, x, y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-i} a_{r,g,b}(i, j) x^i y^j \quad (12)$$

Die Anzahl der Koeffizienten $\mathbf{a}_{r,g,b}$ kann mit Hilfe der Gaußschen Summenformel in Abhängigkeit von der gewählten Polynomordnung k berechnet werden:

$$\dim(\mathbf{a}_{r,g,b}) = \sum_{i=1}^{k+1} i = \frac{(k+2)(k+1)}{2} \quad (13)$$

Exemplarisch ergibt sich für ein Polynom 2. Ordnung nach (12) mit 6 Koeffizienten:

$$\begin{aligned} M(\mathbf{a}_{r,g,b} | k = 2, x, y) \\ &= a_{r,g,b}(2,0)x^2 + a_{r,g,b}(1,1)xy + a_{r,g,b}(1,0)x \\ &+ a_{r,g,b}(0,2)y^2 + a_{r,g,b}(0,1)y + a_{r,g,b}(0,0) \end{aligned} \quad (14)$$

Nach der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate werden die Koeffizienten $\mathbf{a}_{r,g,b}$ gesucht, die den mittleren quadratischen Fehler $\overline{\epsilon_{r,g,b}}$ zwischen dem Eingangsbild und dem Modellbild $M(\mathbf{a}_{r,g,b})$ minimieren. Als Zielgröße für die Shadingkorrektur dient der normierte Mittelwert des korrigierten Hellbildes $\overline{J_{r,g,b}}$ (siehe Abschnitt 4.1), wodurch der Gesamthelligkeitseindruck nach der Shadingkorrektur unverändert bleibt. $\overline{J_{r,g,b}}$ wird dazu mit seinem globalen Mittelwert (15) über alle Pixel normiert und als Eingangsbild für die Modellbildung (16) verwendet.

$$\text{Mean}(\overline{J_{r,g,b}}) = \frac{\sum_{x=1}^{\text{cols}} \sum_{y=1}^{\text{lines}} \overline{J_{r,g,b}}(x, y)}{\text{cols} \cdot \text{lines}} \quad \text{Mean}(\overline{J_{r,g,b}}) \in \mathbb{R}^{>0} \quad (15)$$

$$\overline{\epsilon}_{r,g,b} = \frac{1}{cols \cdot lines} \cdot \min_{\mathbf{a}_{r,g,b}} \sum_{x=1}^{cols} \sum_{y=1}^{lines} \left(\frac{\overline{J_{r,g,b}(x,y)}}{Mean(\overline{J_{r,g,b}})} - M(\mathbf{a}_{r,g,b}, x, y) \right)^2 \quad (16)$$

4.3 RGB-Shadingkorrektur

Das shadingkorrigierte Bild $I_{r,g,b}^*$ wird nach (17) durch inhomogene Punktoperationen bestimmt. Dabei wird das zu korrigierende Bild $I_{r,g,b}$ pixelweise mit dem Modellbild $M(\mathbf{a}_{r,g,b})$ (siehe Abschnitt 4.2) dividiert. Dies wirkt sich als eine Verstärkung der dunklen und eine Dämpfung der hellen Regionen jeweils in Relation zum globalen Mittelwert $Mean(\overline{J_{r,g,b}})$ des jeweiligen Farbkanals im Hellbild aus.

$$I_{r,g,b}^* = I_{r,g,b} \cdot \frac{1}{M(\mathbf{a}_{r,g,b})} \quad M(\mathbf{a}_{r,g,b}) \in \mathbb{R}^{>0} \quad (17)$$



Abb. 6 zu korrigierendes Bild $I_{r,g,b}$

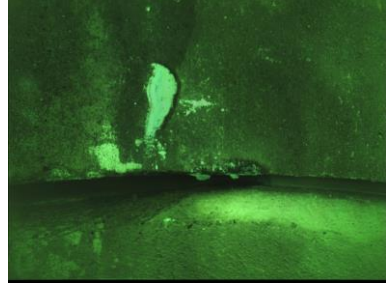


Abb. 7 shadingkorrigiertes Bild $I_{r,g,b}^*$

4.4 Farbkorrektur

Anhand von Aufnahmen weißer planarer Oberflächen wurden vorab die globalen Referenzfarbwerte R_{ref} , G_{ref} und B_{ref} für Weiß ermittelt.

Der farbkorrigierte Wert $I_{r,g,b}^{**}(\mathbf{p})$ berechnet sich nach (19) kanalweise über eine Skalierung des ursprünglichen Farbwertes $I_{r,g,b}^*(\mathbf{p})$ im shadingkorrigierten Bild mit dem Quotienten aus dessen Intensität $I_{r,g,b}^*(\mathbf{p})$ nach (18) und den konstanten Referenzfarbwerten R_{ref} , G_{ref} bzw. B_{ref} . Die Farbkorrektur erhebt nicht den Anspruch auf Farbrichtigkeit. Angestrebt wird der richtige Farbeindruck.

$$I_{r,g,b}^{**}(\mathbf{p}) = \frac{I_r^*(\mathbf{p}) + I_g^*(\mathbf{p}) + I_b^*(\mathbf{p})}{3} \quad (18)$$

$$I_{r,g,b}^{**}(\mathbf{p}) = \begin{pmatrix} I_r^{**}(\mathbf{p}) \\ I_g^{**}(\mathbf{p}) \\ I_b^{**}(\mathbf{p}) \end{pmatrix} = I_{rgb}^*(\mathbf{p}) \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{R_{ref}} \\ \frac{1}{G_{ref}} \\ \frac{1}{B_{ref}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_r^*(\mathbf{p}) \\ I_g^*(\mathbf{p}) \\ I_b^*(\mathbf{p}) \end{pmatrix} \quad (19)$$

5 Ergebnisse

Die Überlegungen in Abschnitt 2 legen eine separate Behandlung der Farbkanäle bei der Shadingkorrektur nahe. Wird diese jedoch nur einkanalig durchgeführt, d. h. mit nur einem gemeinsamen Hellbild $M(\overline{a_{rgb}})$ für alle Farbkanäle, kann es insbesondere in den intensitätsschwachen Randbereichen zu einer überhöhten Verstärkung des



Abb. 8 einkanalige Shadingkorrektur ($k=5$)



Abb. 9 RGB-Shadingkorrektur ($k=3$)

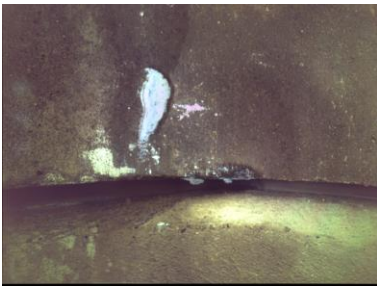


Abb. 10 RGB-Shadingkorrektur ($k=4$)



Abb. 11 RGB-Shadingkorrektur ($k=5$)

Rot- und Blaukanals kommen und damit zur Ausprägung von purpurnen Ecken (siehe Abb. 8). Wie Abb. 9 bis Abb. 11 zeigen, sind erst ab einer Polynomordnung von $k=5$ genügend Freiheitsgrade für die mehrkanalige Modellierung des Shadingverlaufes erreicht, um Farbverfälschungen, wie die hier gezeigten Purpureffekte in den Bildzentren von Abb. 9 und Abb. 10, zu vermeiden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im hier vorgestellten Anwendungsfall der automatisierten Kanalinspektion entstehen, bedingt durch unterschiedliche Rohrdurchmesser und variable Abstände der Bildaufnahmeeinrichtung von der Rohrrinnenwand, verschiedenste Aufnahmesituationen, welche zu variierenden Shadingverläufen führen können. Die übliche Vorgehensweise zur Shadingkorrektur mittels einer für jede Aufnahmesituation gültigen Weißreferenz ist für diesen Anwendungsfall nicht praxistauglich. Es wurde stattdessen eine weißreferenzfreie Modellierung des Shadings entwickelt, welche das Referenz-Hellbild direkt aus den Messdaten synthetisiert. In Abhängigkeit vom Lichteinstrahlwinkel kommt es außerdem zu Farbverfälschungen, den sogenannten „chromatic flares“, die sich bei einkanaliger Shadingkorrektur als Farbverschiebung ins Purpurne in den Eckbereichen der Bilder ausdragen. Um diesen Effekt zu vermeiden, wird die Shadingkorrektur für alle Farbkanäle unabhängig durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Farbstichigkeit basierend auf eingemessenen RGB-Weißreferenzwerten. Abb. 12 zeigt die nach dem hier vorgestellten Ansatz korrigierten sowie gestitchten und fusionierten RGB-D-Daten, die den in Abb. 6 bis Abb. 11 gezeigten Ausschnitt einer Rohrmuffe beinhalten.

Ist eine Adaption der Shadingverläufe bereits während der Durchfahrt erforderlich (z. B. durch einen schwankenden Abstand der Kamera zur Rohrrinnenwand), dann kann der hier gezeigte Ansatz noch verbessert werden, indem das Hellbild nicht wie in Abschnitt 4.1 beschrieben über die komplett betrachtete Rohrlänge gemittelt wird sondern gleitend über einen Rohrabschnitt.

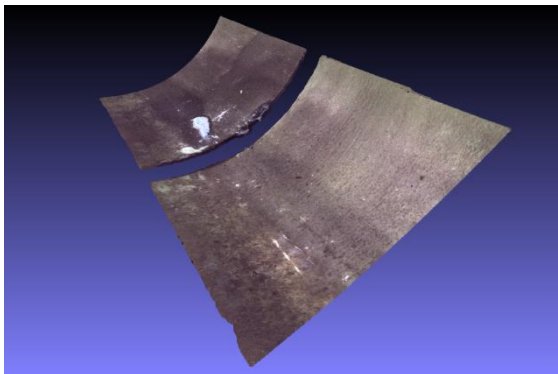


Abb. 12 Beispielszene in 3D-Darstellung (Meshlab)

7 Literaturverzeichnis

- [1] O. Skorka, D. Jasinski, R. Ispasoiu und V. Korobov, „Method for Quantifying Image Sensor Susceptibility to Chromatic Flare Artifacts,“ in *IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2016 Digital Photography and Mobile Imaging XII*, 2016.
- [2] D. B. Goldman, „Vignette and Exposure Calibration and Compensation,“ in *ICCV*, 2005.
- [3] P. Debevec und J. Malik, „Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,“ in *SIGGRAPH*, 1997.
- [4] T. Mitsunaga und S. K. Nayar, „Radiometric Self Calibration,“ in *CVPR*, 1999.
- [5] M. D. Grossberg und S. K. Nayar, „Determining the Camera Response from Images: What is Knowable?,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Bd. 25, Nr. 11, pp. 1455-1467, 2003.
- [6] Matrix Vision, „EMVA 1288 Summary Sheet m0547,“ 20 June 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/2KJNHXq>. [Zugriff am 20 08 2019].
- [7] T. C. Williams und C. R. Shaddix, „Simultaneous correction of flat field and nonlinearity response of intensified charge-coupled devices,“ *Review of Scientific Instruments*, Bd. 78, pp. 123702-1 - 123702-6, 13 December 2007.
- [8] S. J. Kim und M. Pollefeys, „Robust Radiometric Calibration and Vignetting Correction,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Mai 2008.
- [9] S. V. Alexandrov, J. Prankl, M. Zillich und M. Vincze, „Calibration and correction of vignetting effects with an application to 3D mapping,“ in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea, 2016.