Erzeugung hyperspektraler Punktwolken auf einem mobilen Roboter

Thomas WIEMANN, Christian HEIDEN, Rasmus DIEDERICHSEN, Sebastian PÜTZ und Joachim HERTZBERG

Zusammenfassung

In diesem Beitrag präsentieren wir ein Messsystem auf einem mobilen Roboter, mit dem sich Punktwolken eines terrestrischen Laserscanners mit den Daten einer hyperspektralen Zeilenkamera „einfärben“ lassen. Dazu wird aus den Zeilen der Kamera während der Drehung des Scanners ein hyperspektrales Panorama erzeugt. Mit Hilfe eines Referenzmusters kann dieses dann gegen die Punktwolke registriert werden. Durch eine geeignete Aufteilung der Scanbereiche ist es uns gelungen, das in OpenCV implementierte Kameramodell für diesen Ansatz zu nutzen, sodass sich die Kalibrierung vollständig mit frei verfügbarer Software realisieren lässt. Die so aufgenommenen Daten können direkt in der Roboterkontrollsoftware verarbeitet werden und lassen sich beispielsweise zur Pfad- und Scanposeplanung verwenden.

1 Einleitung

Die Aufnahme und Verarbeitung von hochaufgelösten 3D-Laserscandaten ist ein wichtiges Forschungsthema in der mobilen Robotik. Solche 3D-Punktwolken wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich eingesetzt, um polygonale Umgebungskarten (WIEMANN & MITSCHKE 2017) zu generieren, die dann für verschiedene Anwendungszwecke wie z.B. Befahrbarkeitsanalyse und Pfadplanung verwendet wurden (PÜTZ ET AL. 2016). Neben der reinen Geometrie lassen sich mit terrestrischen Laserscannern auch weitere Informationen über die Umgebung erfassen. Viele Systeme verfügen über die Möglichkeit, mittels einer hochaufgelösten RGB-Kamera Farbdaten auf die aufgenommenen Punktwolken zu übertragen. Auch andere Informationen, wie z.B. Thermaldaten (BORRMANN ET AL. 2014), wurden bereits erfolgreich mit 3D-Punktwolken verknüpft.

Um solche Kameradaten auf die 3D-Punktwolken eines Laserscanners übertragen zu können, muss die Kamera extrinsisch gegen das Koordinatensystem des Laserscanners kalibriert werden. Zur Kalibrierung wird dabei in der Regel ein Lochkameramodell verwendet, dessen Parameter durch lineare Optimierung aus Korrespondenzen zwischen Kamera- und Laserscandaten bestimmt werden. Dieses Modell funktioniert sehr gut für gängige RGB-Kameras und Methoden zur automatischen Kalibrierung mittels Referenzmustern sind bereits in frei Verfügbaren Software-Bibliotheken wie OpenCV[1] oder den proprietären Softwarepaketen der Laserscannerhersteller implementiert. In diesem Beitrag stellen wir einen Ansatz vor, mit dem sich die Daten einer Linien-Hyperspektralkamera auf 3D Punktwolken, die mit einem Riegl VZ-400i Laserscanner aufgenommen wurden, abbilden lassen.

[1] https://opencv.org

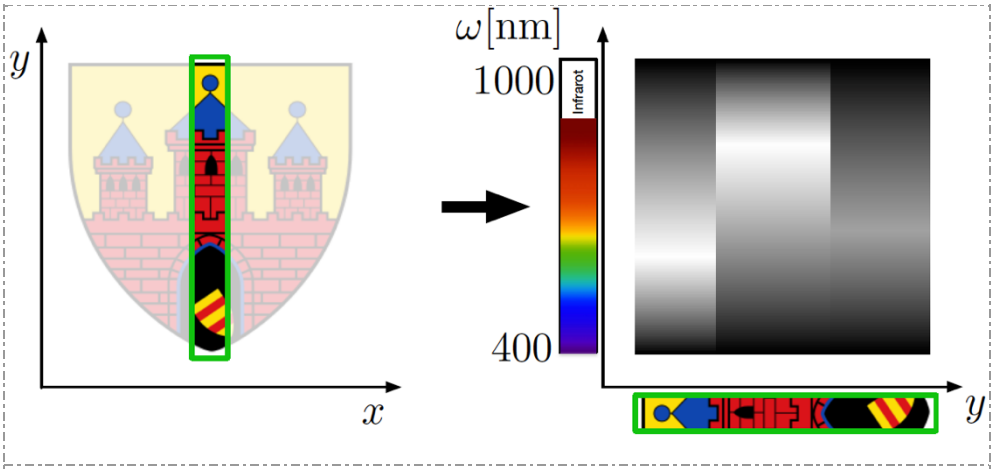

Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Hyperspektralbildes. Einer Zeile der räumlichen Domäne (grüner Ausschnitt links) werden die gemessenen Intensitäten in den vorhandenen Hyperspektralkanälen („Buckets“) zugeordnet.

Die Integration hyperspektraler Informationen auf 3D-Umgebungsmodelle eröffnet eine Reihe neuer Möglichkeiten im Bereich der Umgebungsklassifikation und Objekterkennung, insbesondere für Klassifizierung von Pflanzen und Pflanzenparametern in Agraranwendungen, wie dem automatischen Monitoring des Gesundheitszustands von Pflanzenbeständen (MAHESH ET AL. 2015). Hyperspektraldaten erlauben es zudem, unterschiedliche Materialien in der Umgebung zu bestimmen, die mit klassischen RGB-Kameras nicht unterschieden werden können, wie z.B. in TARABALKA ET AL. (2009) gezeigt wird.

Hyperspektralkameras teilen das Spektrum des einfallenden Lichts in diskrete Wellenlängenbereiche auf, in denen die Intensität des einfallenden Lichts pro Bereich detektiert wird. Dies erlaubt es, die charakteristische Intensitätsverteilung des von den in der Umgebung vorhandenen Materialien reflektierten Lichts über die verfügbaren Spektralbereiche zu erfassen. Technisch wird dazu das einfallende Licht mittels eines Prismas aufgeteilt und auf einen CCD-Chip geleitet, der die Intensität für jeden Pixel misst. Dabei spiegelt eine Dimension der Pixelmatrix die räumliche Verteilung wieder, die andere die spektrale Verteilung. Dementsprechend verhält sich so eine Kamera wie eine Zeilenkamera mit vielen Kanälen, wie in Abbildung 1 illustriert.

Die aufgenommenen Daten sollen direkt auf einem mobilen Roboter ausgewertet werden können, der mit Hilfe des Robot Operating Systems (ROS)[2]angesteuert wird. Dieses bietet bereits eine gute Anbindung an die frei verfügbare Bildverarbeitungssoftware OpenCV. Daher soll das Problem der Datenfusionierung mit Hilfe dieser Software gelöst werden, um die Kompatibilität mit bereits vorhandenen Modulen zu gewährleisten. Da das in OpenCV im-

[2] http://www.ros.org

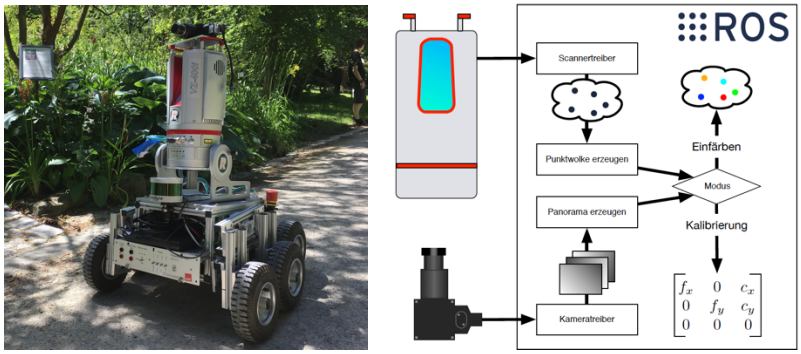

Abb. 2: Aufbau und Sensorik der Roboterplattform Pluto (links) sowie eine schematische Übersicht der implementierten Softwarekomponenten und des Ablaufs der Kalibrierung (rechts).

plementierte Lochkameramodell nicht mit den von der Hyperspektralkamera aufgenommenen Daten kompatibel ist, musste ein Weg gefunden werden, die in OpenCV vorhandenen Funktionalitäten auf den vorhandenen Systemaufbau anzuwenden.

Im Folgenden präsentieren wir zunächst den Aufbau des Roboters und die verwendeten Softwarekomponenten. Danach erläutern wir unseren Ansatz zur extrinsischen Kalibrierung von Laserscanner und Hyperspektralkamera mittels OpenCV. Anschließend präsentieren wird exemplarische Ergebnisse und schließen mit einer Bewertung des vorgestellten Verfahrens.

2 Aufbau des Systems

Der Aufbau des Roboters Pluto sowie die verwendeten Softwarekomponenten sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Roboter ist auf einer Volksbot XT Plattform aufgebaut, die für die Fortbewegung in unebenen Gelände geeignet ist. Als Laserscanner kommt ein Riegl VZ-400i zum Einsatz, auf dem eine Resonon Pika L Hyperspektralkamera montiert ist. Diese ist in der Lage, 297 unabhängige Kanäle im Bereich von 400 bis 1000 nm bei einer räumlichen Auflösung von 900 Pixeln pro Zeile zu erfassen. Als Objektiv kommt eine Schneider-Kreuznach-Linse mit 6 mm Brennweite zum Einsatz, die es erlaubt, ein horizontales Blickfeld von 47º zu erfassen. Die Verarbeitung der Daten geschieht auf einem Intel NUC Mini-PC mit Ubuntu-Linux und ROS.

Die Ansteuerung des Laserscanners erfolgt über einen ROS-Scannertreiber, der mittels der von Riegl zur Verfügung gestellten RIVLib via Ethernet mit dem Laserscanner kommuniziert. Mit Hilfe dieses Treibers ist es möglich, die Daten des Laserscanners mit Zeitstempel auszulesen. Die Daten der Hyperspektralkamera werden in einem eigenen Prozess ausgelesen. Die Anbindung erfolgt über USB 3.0. Leider liefert der vorhandene Hardwaretreiber keine Zeitstempel. In den Experimenten hat sich zudem gezeigt, dass die Kamera die Daten nicht mit einer festen Frequenz liefert und der Netzwerkversand in ROS weitere Schwankungen verursacht, sodass eine Synchronisation mit den Laserscannerdaten schwierig ist. Für eine exakte Synchronisierung müssten beide Zeitskalen möglichst hardwareseitig synchronisiert werden. Dies ist mit der momentan verfügbaren Hardware leider nicht möglich.

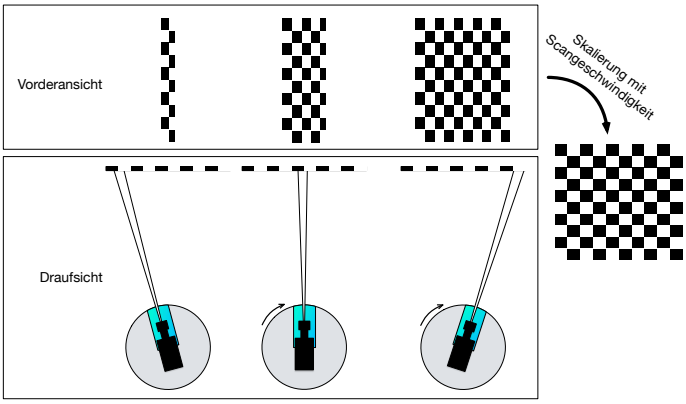

Abb.3: Schematischer Ablauf der Erzeugung von hyperspektralen Panoramabildern aus der Zeilenkamera, die beim Scannen auf dem Laserscanner mitrotiert.

Die vom Laserscanner erzeugten Daten werden zu einer 3D-Punktwolke zusammengesetzt; aus den Linienbildern der sich beim Scannen mitdrehenden Pika L wird ein Hyperspektralpanoramabild zusammengesetzt. Zur Fusionierung der Daten steht ein eigener Prozess zur Verfügung, der je nach gewähltem Modus entweder die Kalibrierung durchführt oder RGB-Werte (Pseudo-RGB aus den Hyperspektralinformationen oder Farbgradienten, die die Intensitäten in den einzelnen Buckets geeignet visualisieren) berechnet. Die eingefärbten 3D-Punktwolken dienen in erster Linie zur Visualisierung der Kalibrierungsergebnisse. Damit nach erfolgreicher Kalibrierung eine Weiterverarbeitung der Daten, z.B. zur Auswertung verschiedener Spektralbereiche, möglich ist, werden alle aufgenommenen Daten nach einem Scan standardmäßig auf der Festplatte gespeichert.

3 Extrinsische Kalibrierung von Laserscanner und Hyperspektralkamera

Zur Kalibrierung werden zunächst aus den Daten der Zeilenkamera und des Laserscanners Panoramabilder aufgebaut. In diesen wird jeweils nach einem Referenzmuster (Schachbrettmuster) gesucht. Das Schachbrettmuster kann sowohl in den Daten der Hyperspektralkamera als auch in den vom Laserscanner zurückgegebenen Reflektivitätswerten der einzelnen Scanpunkte automatisch gefunden werden, sodass eine extrinsische Kalibrierung möglich ist. Im Folgenden beschreiben wir zunächst, wie das Panoramabild der Hyperspektralkamera aufgebaut wird. Anschließend erläutern wir, wie wir die vorhandenen OpenCV-Funktionalitäten verwenden können, um die Informationen aus dem Hyperspektralpanorama auf die Laserscandaten zu übertragen.

Abb. 4: Beispiel eines Hyperspektralpanoramas mit Schachbrettmuster. Die Farbinformationen wurden aus den entsprechenden Spektralbändern extrahiert.

3.1 Erzeugung von hyperspektralen Panoramabildern zur Kalibrierung

Wie oben bereits angedeutet, ergeben sich bei der Erzeugung von Panoramabildern aus den Daten der Hyperspektralkamera mehrere Probleme. Zum einen liefert die Kamera keine Zeitstempel mit den einzelnen Zeilen. Daher muss eine Synchronisation bei der Fusionierung über die Annahme erfolgen, dass sich der Riegl-Laserscanner mit einer vorgegebenen konstanten Drehgeschwindigkeit bewegt, sobald eine Aufnahme gestartet wurde.

Unter dieser Annahme können dann die einzelnen Zeilen der Kamera direkt im Zielbild nebeneinandergelegt werden. Der schematische Ablauf der Panoramaerzeugung ist in Abbildung 3 dargestellt. Hier blickt die Kamera direkt auf ein Schachbrett in der Szene. Durch die Drehbewegung des Laserscanners baut sich das Gesamtbild nach und nach aus den einzelnen Zeilen auf. Das Problem ist, dass das so entstehende Bild je nach Scangeschwindigkeit unterschiedlich gestaucht wird. Das Problem ist, dass das so entstehende Bild je nach Scangeschwindigkeit unterschiedlich gestaucht wird. Für diese Art von variabler Verzerrung ist die Kalibrierung mit OpenCV jedoch nicht ohne weiteres anwendbar. Um die durch unterschiedliche Drehgeschwindigkeiten auftretenden Verzerrungen auszugleichen, wird das Bild daher nach der Aufnahme gemäß der Drehgeschwindigkeit skaliert.

Ein weiteres Problem ist, dass die Kamera aufgrund Latenzen bei der Übertragung der Daten und je nach Beleuchtung variierenden Integrationszeiten die Daten nicht mit einer konstanten Frequenz liefert. In der Regel ist die Frequenz der eintreffenden Daten aber höher, als sie durch die relativ langsame Drehung des Laserscanners zum Aufbau eines Panoramabildes benötigt werden. Daher lassen sich die einzelnen Frames relativ einfach im Kameratreiber puffern. Problematisch ist es, wenn die Daten nicht mit einer ausreichend hohen Frequenz geliefert werden. Dann kann es zu Artefakten in den entstehenden Panoramen kommen. Durch eine ausreichend niedrige Scangeschwindigkeit lässt sich dieses Problem allerdings weitestgehend vermeiden. Ein Beispiel für ein Hyperspektralpanorama, das mit dieser Methode erzeugt wurde, ist in Abbildung 4 gezeigt.

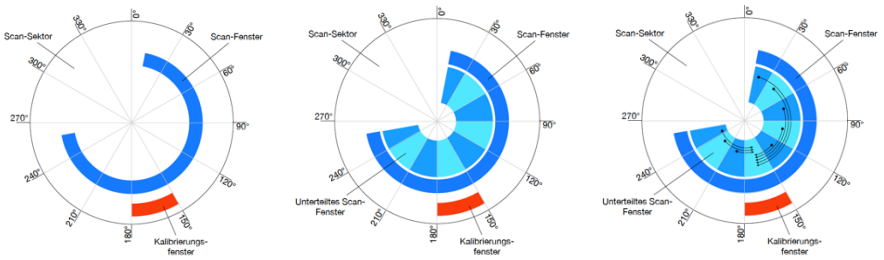

Abb. 5: Annotation der Punktwolken mittels des im Kalibrierungsfenster berechneten Lochkameramodells. Das Scanfenster wird in Segmente, die dem kalibrierten Bereich entsprechen, unterteilt. Die Daten aus den Segmenten werden in das Scanfenster transformiert und dort annotiert.

3.2 Kalibrierung und Einfärbung mittels OpenCV

Die Hyperspektralpanoramen, die mit der in 3.1 gezeigten Methodik erzeugt wurden, stimmen im Seitenverhältnis mit den Tiefenbildern des Laserscanners überein, so dass eine Kalibrierung mit einem Kameramodell für Panoramabilder möglich sein sollte. Da ein solches-Modell in OpenCV nicht implementiert ist, benutzen wir eine stückweise Approximation durch das vorhandene Lochkameramodell. Die Annahme ist, dass sich die virtuelle Panoramakamera für Scans, die mit gleicher Drehgeschwindigkeit aufgenommen wurden, in relativ kleinen Winkelausschnitten aus dem Gesamtbild durch ein Lochkameramodell annähern lässt. In der Praxis verwenden wir hier einen Öffnungswinkel von 30º. Innerhalb dieses Bereiches, dem Kalibrierungsfenster, platzieren wir die Referenzmuster an verschiedenen Positionen und nehmen Scans mit der gleichen Auflösung auf. Anschließend speichern wir die mit der OpenCV-Funktion `cv::findChessboardCorners` gefundenen Korrespondenzen zwischen den 3D Punkten im Laserscan und den zugeordneten Pixeln im Kalibrierungsfenster und berechnen nach einer Reihe von Messungen die Kalibrierungsparameter mittels der OpenCV-Funktionen `cv::calibrateCamera` und `cv::solvePnP`.

Die so ausgerechnete Kalibrierung ist natürlich nur in dem durch das Kalibrierungsfester gegebenen Ausschnitt der aufgenommenen Panoramen gültig. Daher teilen wir den gesamten abgescannten Bereich, das Scanfenster, in gleich große Segmente auf, die der Größe des verwendeten Kalibrierungsfensters entsprechen. Die Daten innerhalb der einzelnen Segmente werden dann in das Kalibrierungsfenster transformiert. In diesem Referenzbereich, für den die approximative Kalibrierung bekannt ist, werden dann die Werte aus dem entsprechenden Bereich das Panoramabildes auf die ins Kalibrierungsfenster transformierten Scanpunkte übertragen. Auf diese Art und Weise werden alle Punkte innerhalb des Scanfensters annotiert. Eine schematische Darstellung dieser Vorgehensweise ist in Abbildung 5 dargestellt.

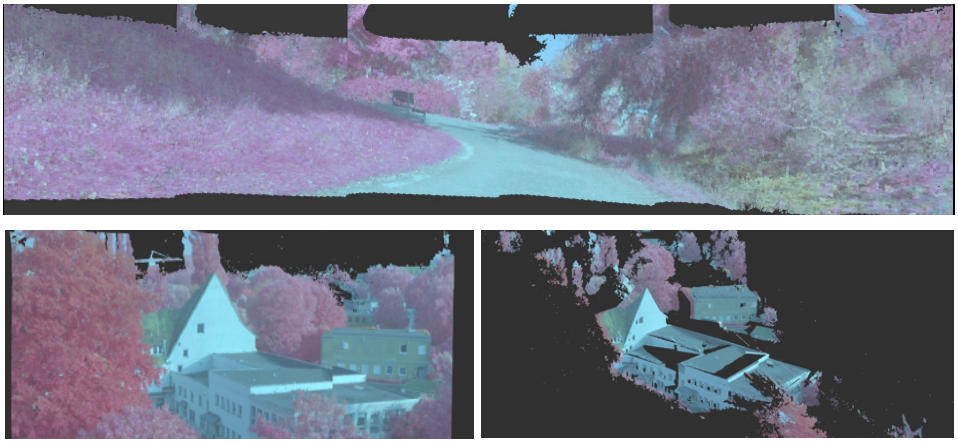

Abb. 6: Ein hyperspektral eingefärbtes Panorama unter Hervorhebung des nahen Infrarotbereichs. Die unteren beiden Abbildungen zeigen eine eingefärbte Punktwolke aus unterschiedlichen Perspektiven.

4 Experimentelle Ergebnisse

Einige Beispiele von Daten, die mit unserer Methode eingefärbt wurden, sind in Abbildung 6 dargestellt. Das obere Bild zeigt ein 180º-Panorama, das im Botanischen Garten der Universität Osnabrück aufgenommen wurde. Die Bilder unten zeigen die eingefärbte Punktwolke einer Stadtszene aus unterschiedlichen Perspektiven. Um die Vorteile der Hyperspektraldaten in der Klassifizierung zu demonstrieren, wurde der nahe Infrarotbereich in violett hervorgehoben, da sich in diesem Bereich Pflanzen mit einem hohen Chlorophyllanteil deutlich hervorheben.

Man kann deutlich erkennen, dass die Annotation der 3D-Punktwolken mit den Hyperspektraldaten im Großen und Ganzen stimmig ist. Im Panoramabild lassen sich zwar die Übergänge zwischen den einzelnen Scansegmenten deutlich erkennen. Es war allerdings zu erwarten, dass es durch die Approximation der Panoramakamera mit einem Lochkameramodell zu Ungenauigkeiten kommen würden. Insgesamt ist die Qualität der aufgenommenen Daten sicher für die Verarbeitung auf einem mobilen Roboter ausreichend. Insbesondere die Hervorhebung des Infrarotbereichs im oberen Teil von Abbildung 6 zeigt, dass unter Einbeziehung der Hyperspektralinformationen die Segmentierung des Weges, also des befahrbaren Bereichs, deutlich einfacher fallen wird, als auf den reinen RGB-Daten. In den unteren Abbildungen lassen sich deutliche Unterschiede in der Aktivität der aufgenommenen Pflanzen erkennen. Durch das Mappen der Hyperspektralinformationen lassen sich diese Informationen auch dreidimensional verorten. Dies kann insbesondere bei den in der Einleitung angesprochenen Anwendungen im Agrarbereich von besonderen Nutzen sein.

5 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Beitrag haben wir ein Verfahren vorgestellt, mit dem sich die Daten einer hyperspektralen Zeilenkamera auf 3D-Punktwolken übertragen lassen. Die Kalibrierung wurde ausschließlich mit Funktionen aus OpenCV realisiert. Durch die vorgestellten Ergebnisse wurde die prinzipielle Machbarkeit dieses Ansatzes gezeigt. Die Qualität der erhobenen Daten ist für den geplanten Einsatzbereich in der mobilen Robotik ausreichend. Die Präzision der Ergebnisse ist allerdings durch technische Störfaktoren (Synchronisation der Daten, unpassendes Kameramodell) beschränkt. So kann die Panoramaverzeichnung nicht vollständig ausgeglichen werden und an den Segmentgrenzen traten sichtbare Artefakte auf. Hier bleibt noch zu evaluieren, ob sich diese Artefakte durch eine geeignete Anpassung der Kalibrierungsfenstergröße minimieren lassen. Auch die geringe Auflösung der Kamera und der eigeschränkte Sichtbereich erschweren die Kalibrierung, da die Referenzmuster nur im Nahbereich ausreichend sicher detektiert werden können. Die Vorteile dieses Ansatzes liegen insbesondere darin, dass sich das beschriebene Verfahren exzellent in die vorhandene Roboterkontrollsoftware integrieren lässt, und sich die Kalibrierung daher auch bei Bedarf im Praxiseinsatz auf dem System direkt durchführen lässt.

Die gezeigten Anwendungsbeispiele machen deutlich, dass sich durch die Kombination von hyperspektralen und terrestrischen Daten eine Fülle neuer Anwendungsmöglichkeiten ergibt. Um die Reichhaltigkeit der Daten in Zukunft noch besser ausnutzen zu können, ist allerdings eine bessere Kalibrierungsqualität erstrebenswert. Daher werden wir weitere Experimente mit einem Panoramamodell wie in SCHNEIDER & MAAS (2006) beschrieben durchführen und geeignete Methoden zur Kalibrierung in einem solchen Modell implementieren.

Literatur

Borrmann, D. & Nüchter, A. & DJakulovi'c M. & Maurovi'c, I. & Petrovi'c, I. & Osmankovi'c, D. & Velagi'c, J. (2014): *A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping*. Journal Advanced Engineering Informatics (JAdvEI). 28, 425--440 (2014).

Wiemann, T & Mitschke, I (2017). *Massiv parallelisierte Oberflächenrekonstruktion aus großvolumigen und hochaufgelösten 3D-Punktwolken*. In: Luhmann/Müller (eds.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann Verlag, 2017

Pütz, S. & Wiemann, T. & Sprickerhof, J. & Hertzberg, J (2016). *3D Navigation Mesh Generation for Path Planning in Uneven Terrain. Proc*. IAV 2016 -- 9th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Leipzig, June 29-July 1st, 2016

Schneider, D. & Maas, H. G. (2006). *A geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras*. The Photogrammetric Record, 21(115), 198-210.

Tarabalka, Y. & Benediktsson & J. A. & Chanussot, J. (2009). *Spectral–spatial classification of hyperspectral imagery based on partitional clustering techniques*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(8), 2973-2987.

Mahesh, S. & Jayas, D. S. & Paliwal, J. & White, N. D. G. (2015). Hyperspectral imaging to classify and monitor quality of agricultural materials. *Journal of Stored Products Research*, *61*, 17-26.

Autoren:

Dr. Thomas Wiemann, Institut für Informatik, Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme, Universität Osnabrück, Wachsbleiche 27, 49090 Osnabrück, twiemann@uni-osnabrueck.de

Christian Heiden, B.Sc., Institut für Informatik, Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme, Universität Osnabrück, Wachsbleiche 27, 49090 Osnabrück, cheiden@uni-osnabrueck.de

Rasmus Diederichsen, B.Sc., Institut für Informatik, Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme, Universität Osnabrück, Wachsbleiche 27, 49090 Osnabrück, rdiederichse@uni-osnabrueck.de

Sebastian Pütz, M.Sc., Institut für Informatik, Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme, Universität Osnabrück, Wachsbleiche 27, 49090 Osnabrück, spuetz@uni-osnabrueck.de

Prof. Dr. Joachim Hertzberg, Institut für Informatik, Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme, Universität Osnabrück, Wachsbleiche 27, 49090 Osnabrück, joachim.hertzberg@uni-osnabrueck.de, und Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Robotics Innovation Center (RIC), Außenstelle Osnabrück, Albert-Einstein-Straße 1, 49076 Osnabrück