

Online-Roboterbahnplanung für unbekannte Bauteile Anwendungsbeispiel: Hochdruckreinigung durch Industrieroboter

Online robot path planning for unknown components Application example: High pressure cleaning by industrial robot

René Horstmann M.Eng., rene.horstmann@w-hs.de, Christian Demming M.Eng., christian.demming@w-hs.de, Prof. Dr. Antonio Nisch, antonio.nisch@w-hs.de, Prof. Dr.- Ing. Michael Bühren, michael.buehren@w-hs.de, Westfälische Hochschule Abt. Bocholt, Fachbereich Maschinenbau, 46397 Bocholt, Deutschland
Franz Borrmann, borrmann@ius-online.eu, Dr. Maarten Becker, becker@ius-online.eu, Institut für Umwelttechnologien und Strahlenschutz GmbH, 63743Aschaffenburg
Matthias Finkenberg, m.finkenberg@rst-gmbh.com, RST GmbH, 46499 Hamminkeln
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dieter Schramm, Univ. Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, dieter.schramm@uni-due.de

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Online-Roboterbahnplanung für die automatisierte Hochdruckwasserstrahlreinigung von unbekannt Bauteilen vorgestellt. Bei den unbekannt Bauteilen handelt es sich um regellose Geometrien, wie Bruchstücke oder aufgeschnittene Rohre, mit einem Bearbeitungsvolumen von 1 m³. Die robotergeführte Reinigung soll entweder an der gesamten Oberfläche oder an farblich markierten Stellen erfolgen. Eine Konstruktionszeichnung der Bauteile liegt dabei nicht vor. Die Arbeit teilt sich in die beiden Forschungsthemen 3D-Bildverarbeitung und Online-Bahnplanung des Roboters auf. Die Schnittstelle liegt somit bei der Beschreibung der Reinigungsprozessbahnen auf dem Bauteil. Für die Realisierung wurde eine Roboterzelle aufgebaut. Integriert ist dort ein 6-Achs-Knickarmroboter in Kombination mit einer Dreh-Kipp-Einheit. Die 3D-Datenerfassung erfolgt durch ein Stereoskopie-Kamerasystem, das an gleichbleibender Position das gesamte Scanvolumen des Drehtisches erfasst. Für die Farbdetektion wurde zusätzlich eine 2D-Farbkamera installiert. Die Entwicklung einer zuverlässigen Online-Roboterbahnplanung stand im Vordergrund eines Forschungsprojekts. Der Bearbeitungsprozess wurde unter Laborbedingungen validiert, da die Gegebenheiten der Hochschule keine reale Hochdruckreinigung in einer geschlossenen Kabine ermöglichen.

Abstract

This article presents an online robot path planning for an automated high pressure water jet cleaning of unknown components. The unknown components are random geometries, such as fragments or cut pipes, with a processing volume of 1 m³. The robot-guided cleaning should take place either on the entire surface or in colored areas. A construction drawing of the components does not exist. The work is divided into the two research topics: 3D image processing and online path planning of the robot. The cleaning paths on the components are the interface data between the two research area. A robot cell has been set up to realize this work. It consists of a 6-axis articulated arm robot in combination with a two-axis positioner. The 3D data acquisition is carried out by a stereoscopic camera system, which records the entire scan volume of the rotary table from a constant position. A 2D color camera was also installed for color detection. The development of reliable online robot path planning was the focus of a research project. The cleaning process was validated under laboratory conditions, because it is not possible to run a real high-pressure cleaning in a closed cabin at the university.



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung -Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0) genutzt werden.

Einleitung

In der Massen- und Serienproduktion haben sich bereits verschiedene Industrieroboter fest etabliert. Der Dauereinsatz sowie die hohe Genauigkeit dieser Roboter ermöglichen eine Produktions- und Qualitätssteigerung der Produkte [6]. Vorangetrieben durch die ständige Erhaltung der Konkurrenzfähigkeit und dem bestehenden Problem des Fachkräftemangels, entwickelt sich ein Trend, dass auch mittelständische Unternehmen über eine Automatisierung ihrer Prozesse nachdenken. Dazu zählen Unternehmen, die Kleinserien oder Einzelteile bearbeiten [7]. Folglich erhöht sich bei ständig wechselnden Bauteilen die Programmierhäufigkeit, die wiederum den wirtschaftlichen Betrieb des Roboters in Frage stellt. Gleiches gilt für die Bearbeitung von Bauteilen, die nicht in digitaler Form vorliegen. Damit die Programmierkosten nicht die Maschinenkosten übersteigen, ist die Programmierung weitestgehend zu automatisieren [6]. Die Entwicklung einer automatisierten Hochdruckreinigung von unbekanntem, kontaminierten Bauteilen durch einen Industrieroboter war Ziel eines Forschungsprojekts, das zusammen mit den Partnern iUS GmbH und RST GmbH erarbeitet wurde. Im Zuge des Rückbaus kerntechnischer Anlagen entwickelt die RST GmbH Nass- und Trockenstrahlkabinen, in denen gering kontaminierte Bauteile noch manuell dekontaminiert werden. Diese Tätigkeiten sind für die Mitarbeiter physisch sowie psychisch sehr fordernd und aufgrund der kurzen Einsatzzeiten von Unterbrechungen geprägt. Die Entwicklung der Nass- und Trockenzelle lag bei der RST GmbH, während die iUS GmbH die Aufgabe der Strahlenschutzauslegung und der automatisierten Dokumentation entsprechend den Anforderungen in der Kerntechnik verfolgte. Die durch die Hochschule entwickelte Online-Roboterbahnplanung hat das Ziel, die Mitarbeiter zu entlasten sowie die Effizienz der Reinigung durch Dauerbetrieb und Erhöhung des Fluiddrucks zu steigern. Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen des FORKA-Programms vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Neben der Hochdruckreinigung gibt es denkbare weitere Bearbeitungsprozesse, in denen die automatisierte Bahnplanung Programmierkosten einspart und eine Einzelteilfertigung ermöglicht.

Roboterzelle

Bei dem Roboter, der für das Forschungsprojekt verwendet wurde, handelt es sich um einen ABB IRB 2600ID mit der zusätzlichen Dreh-Kipp-Einheit IRBP 250A (**Bild 1**). Für die Erfassung von Objekten in einem kubischen Volumen von

maximal 1 m³, wurde das 3D-Kamerasystem Ensenso X3- 5CP ausgewählt, das nach dem Prinzip des räumlichen Sehens (Stereo Vision) arbeitet. Um die Bahnplanung zu validieren, wurde ein Zeigewerkzeug am Roboter installiert, das die Hochdruckdüse simuliert.



Bild 1: Roboterzelle der Westfälischen Hochschule Bocholt

Für die Erfassung detailreicher Punktwolken der Bauteile wurde die feststehende 3D-Kamera auf die Rotationsachse des Positionierers mithilfe von 3D-Bildverarbeitung kalibriert. Die geometrischen Formen des Kegels und Quaders dienen als Kalibrierkörper. Durch die Positionierung des Kegels auf dem Drehtisch und die Aufnahme von Einzelbildern bei verschiedenen Achsstellungen wird ein Raumpunkt auf der Kegelspitze jeder Szene ermittelt (**Bild 2**). Zur Bestimmung dieser Punkte wird auf den Random Sample Consensus Algorithmus (RANSAC) der 3D-Bildverarbeitungsbibliothek Point Cloud Library (PCL) [5] zurückgegriffen, sowie einem anschließenden Kegel-Fitting-Verfahren, um die Genauigkeit weiter zu erhöhen. Durch eine Regressionsrechnung lässt sich die Rotationsachse des Drehtisches mit mehr als drei Punkten berechnen. Das Koordinatensystem des Roboters wird durch die gleiche Methode mit der Drehtischpose abgeglichen.

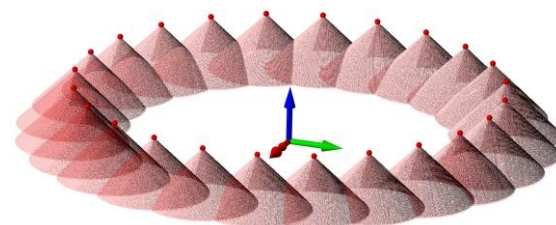


Bild 2: Erfassung der Kegelspitze zur Kalibrierung des Drehtisches

Zur Kalibration der X- und Y-Achse wurde ein Quader als Kalibrierkörper eingescannt. Die Ausrichtung erfolgte entlang der erkannten Flächen des Quaders in der Punktwolke. Die mit dem Roboter gemessene Gesamtgenauigkeit des Systems beträgt $\pm 0,3$ mm. Für die Generierung farbiger

Punktwolken wurde eine 2D-Farbkamera an dem Scansystem installiert. Die Überlagerung der 2D-Aufnahmen beider Kameras ermöglicht die Zuordnung eines Farbwerts für jeden Punkt der Punktwolke (**Bild 3**).

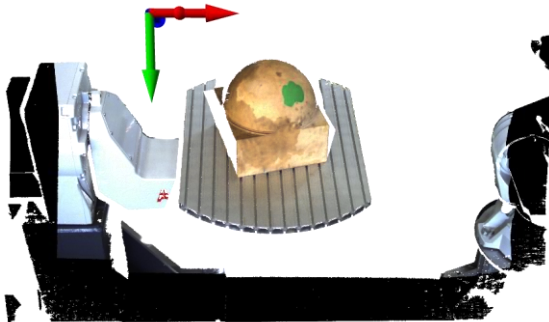


Bild 3: Aufgenommene Punktwolke des Kamerasystems mit Farbüberlagerung

Die Online-Bahnplanung benötigt zur Berechnung der Roboterbahnen eine virtuelle Abbildung der Roboterzelle (**Bild 4**). In dieser besitzen Roboter und Positionierer die eingemessenen IST-Posen der echten Zelle. Die virtuelle Zelle beinhaltet dabei die Posen der einzelnen Robotergelenke, des gescannten Bauteils und der weiteren Umgebung. Mithilfe der Vorwärtskinematik, von Roboter und Positionierer, werden durch Angabe von Roboterkonfigurationen alle Posen im Raum berechnet. Die inverse Kinematik, zur Berechnung der Roboterkonfiguration aus gegebener Werkzeugpose, wird mit dem Ik-Solver IKFast von OpenRAVE [1] durchgeführt. IKFast ermittelt die Achsstellungen analytisch und errechnet somit für eine gegebene Endeffektorpose jede verfügbare Roboterkonfiguration.

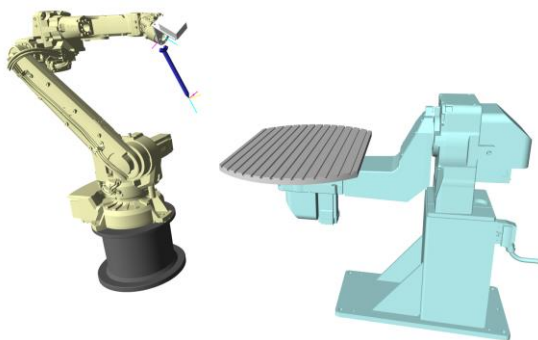


Bild 4: Virtuelle Roboterzelle

Datenaufbereitung

Durch Rotation des Drehtisches werden Einzelaufnahmen zu einer möglichst vollständigen Punktwolke kombiniert. Die Punktwolke wird mithilfe von Filtern auf die 3D-Daten des unbekanntes Bauteils reduziert. Eine Vielzahl von

Raumpunkten (X, Y, Z) , mit optionalem Farbwert (R, G, B) und Punktnormale (N_x, N_y, N_z) , liegen ohne Beziehungen zueinander im Speicher. Es zeigte sich, dass sechs bis zwölf Aufnahmen bei einer Vielzahl verschiedener Bauteile genügen, um eine detailreiche Punktwolke zu generieren. Die Grundlage der Reinigungsbahnplanung ist die zuverlässige, automatisierte Oberflächendarstellung, bei immer wechselnden Bauteilen. Zudem nutzt die Online-Bahnplanung bei der Kollisionsüberwachung die triangulierte Objektoberfläche als Kollisionskörper. Für die Erstellung einer triangulierten Objektoberfläche ist das Rauschen in den Objektpunkten zu minimieren, damit die Greedy-Triangulation aus PCL eine repräsentative Objektoberfläche erstellt. Dafür wird ein Algorithmus angewendet, der nah aneinander liegende Punkte mittelt und anschließend die Punktwolke auf eine einheitliche Dichte herunterfiltert und frei liegende Fehlpunkte entfernt. **Bild 5** zeigt das Ergebnis der Triangulation ohne und mit Rauschreduzierung der Punktwolke. Die Verbesserung zeigt im Vergleich eine geschlossene, glatte Objektoberfläche.

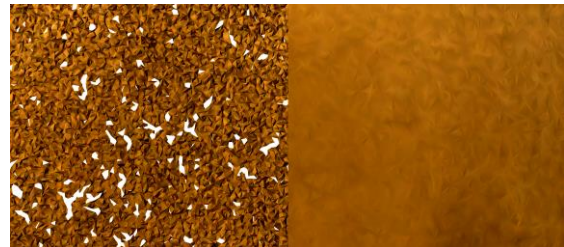


Bild 5: Vergleich einer Triangulation ohne (linke Bildhälfte) und mit (rechte Bildhälfte) Rauschreduzierung

Bahngenerierung

Bei der Hochdruckwasserstrahlreinigung lassen sich je nach Art der Strahldüsen verschiedene kreisförmige Strahldurchmesser einstellen. Dieser Durchmesser ist maßgebend für den Abstand zwischen den Bahnen und der Einstellung einer bestimmten Überlappung der Reinigung. Eine einzelne Reinigungsbahn wird durch eine enge Aneinanderreihung von Raumpunkten auf der Objektoberfläche abgebildet. Zur Erzeugung dieser Punktfolgen wird eine bekannte Schnitttechnik auf der triangulierten Objektoberfläche angewendet. Die Schnitttechnik ist Teil der bestehenden Mesh-Following-Technique (MFT) [4]. Das Objekt wird in Abhängigkeit des Strahldurchmessers von definierten Ebenen geschnitten. Aus dem Schnitt mit einem Dreieck der triangulierten Oberfläche ergeben sich mit den Dreiecksseiten zwei Schnittpunkte, die jeweils Start- und Endpunkt einer Teilbahn sind (**Bild 6**). Zudem wird jeder Teilbahn eine Normale zugeordnet. Die Richtung der Normalen ist für die Ausrichtung des

Reinigungswerkzeugs am Roboter notwendig. Auf diese Art und Weise entstehen Teilbahnen, die sortiert hintereinander eine durchgehende Reinigungsbahn ergeben.

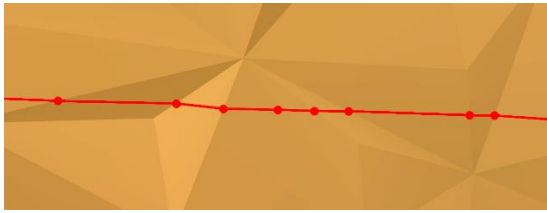


Bild 6: Schnittpunkte der Schnittebene mit der Oberfläche

Der Online-Bahnplanung wird diese Reinigungsbahn in Form einer Punktfolge mit Ausrichtung übergeben. Im Gegensatz zur MFT werden hier die Schnittpunkte der Ebenen als Grundlage für die Bahnplanung verwendet und speziell für diese Anwendung weiterentwickelt. Die Punkte und deren Normalen werden zur Vermeidung von sprunghaften Bewegungen des Roboters geglättet und schrittweise interpoliert. Die Installation und Kalibrierung der 2D-Kamera ermöglicht die Erfassung der Objekte in Farbe. Dadurch kann eine farbliche Segmentierung bestimmter Flächen auf dem Objekt erfolgen, sodass nur markierte Bereiche der simulierten Kontamination gereinigt werden (**Bild 7**).

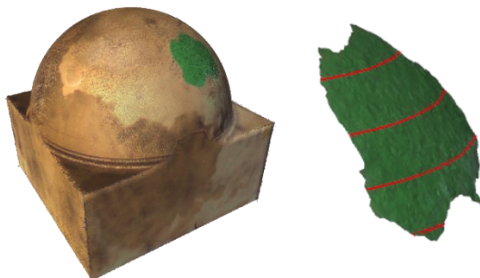


Bild 7: Bahnplanung auf markierter Oberfläche

Online-Bahnplanung

Die automatische Online-Bahnplanung des Roboters besteht aus einer Simulation zur Ermittlung von kollisionsfreien Trajektorien für den Prozess und weiteren Bewegungen. Um eine Bahn mithilfe der virtuellen Roboterzelle berechnen zu können, benötigt sie eine Kollisionserkennung von Roboter, Positionierer und Bauteil. Die C++-Bibliothek Flexible Collision Library (FCL) [2] ermöglicht unter anderem den Kollisionstest von triangulierten Körpern einzeln oder optimiert zwischen zwei Gruppen. Zur Einbindung von Toleranzen und einem Mindestabstand sind die Kollisionskörper vergrößerte konvexe Hüllen der Roboterarme (**Bild 8**). Grenzen des Arbeitsraumes wurden ebenfalls mit in der

Berechnung berücksichtigt. Zur Beschleunigung des Kollisionstests einer Roboterkonfiguration wurde im Vorfeld überprüft, welche Roboterarmgelenke mit welchen anderen Objekten oder anderen Gelenken kollidieren können.

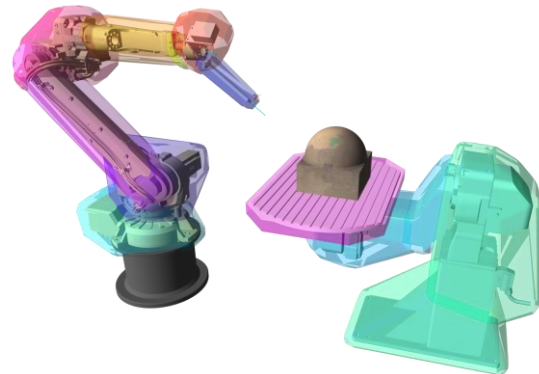


Bild 8: Virtuelle Zelle mit Kollisionskörper

Während der ersten Versuche der Online-Bahnplanung ergab sich das Problem, dass der Roboter das Endeffektorwerkzeug sehr nah an Objekten vorbei bewegt hat. Dies trat auf, wenn er sich nicht im Prozess bewegte, sondern auf den Zwischenwegen. Um eine mögliche Kollision auszuschließen, beinhaltet die Kollisionserkennung verschiedene Kollisionshüllen für freie Bewegungen und den Prozess selbst (**Bild 9**).

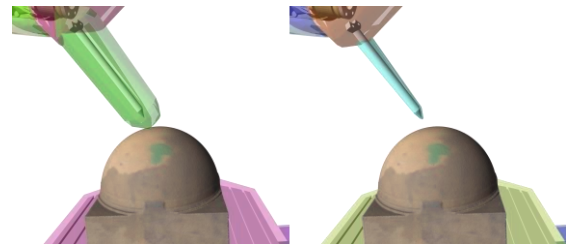


Bild 9: Kollisionshüllen für Zwischenweg (linke Bildhälfte) und Prozessbahn (rechte Bildhälfte)

Die eigentliche Bahnplanung hat nun das Ziel, durch Diskretisierung der Prozessbahn und mithilfe der virtuellen Roboterzelle, eine gültige und kollisionsfreie Roboterbahn zu generieren. Die Prozessbahnbeschreibung besteht aus aufeinanderfolgenden Posen des Prozesses, mit Angabe eines Bewegungsprofils, wie linear, zirkular oder direkte Punkt zu Punkt Bewegung. Die Diskretisierung, die die Robotersteuerung schon intern zur Regelung berechnet, muss nun in die virtuelle Roboterzelle übertragen werden. Hierzu wird die lineare Interpolation und der Spherical Linear Interpolation Algorithmus (Slerp) [9] angewendet, um in einstellbarer Schrittweite Zwischenposen des Endeffektors auf der Prozessbahn zu generieren.

Durch die inverse Kinematik des Roboters werden anschließend aus den Endeffektorposen die

passenden Roboterkonfigurationen berechnet. Mithilfe von IKFast lassen sich, im Vergleich zu rein numerischen Berechnungen, alle möglichen Roboterkonfigurationen für eine gegebene Endeffektorpose bestimmen. Das ermöglicht das Testen verschiedener Ausgangskonfigurationen für die Startpose der Prozessbahn. Vom Start aus wird nun jede der generierten Zwischenposen mit der passenden Roboterkonfiguration auf Kollision getestet. Führt eine Achsstellung zu einer Kollision, wird die nächste mögliche Startkonfiguration getestet. Schlägt die Prozessbahn dennoch fehl, werden weitere Achsstellungen des Positionierers getestet.

Zur Schonung der Hochdruckleitungen des Reinigungswerkzeuges sollte sich der Roboter möglichst wenig bewegen. Durch Einbindung der Positionierrotation in die Online-Bahnplanung des Reinigungsprozesses muss der Roboter bei einer bauteilumlaufenden Bahn nur noch die Endeffektororientierung nachregeln.

Ein weiteres Problem ist die Berechnung von Zwischenwegen. Wie auch bei der Bahnplanung mobiler Roboter, lassen sich dort verwendete Algorithmen anwenden, um kollisionsfreie Bahnen zwischen zwei Zielen zu ermitteln. Statt wie bei mobilen Robotern mit zwei Dimensionen, arbeitet die Online-Bahnplanung im sechs-dimensionalen Raum der Roboterachsen. Wenn die einfache synchrone Achsbewegung zwischen zwei Roboterkonfigurationen durch die diskretisierte Simulation eine Kollision bewirkt, wird mithilfe des Rapidly exploring Random Trees Connect Algorithmus (RTT-Connect) [3] ein kollisionsfreier Weg erzeugt. Da sein Ergebnis von zufällig generierten Roboterkonfigurationen abhängt, wird dieser Weg in einem Folgeprozess vereinfacht. Hierzu wird überprüft, ob Knotenpunkte ohne auftretende Kollision direkt übersprungen werden können. So kann sich die Anzahl anzufahrender Konfigurationen verringern. Um bei den Zwischenwegen einen größeren Abstand zwischen Werkzeug und Bauteil einzuhalten, wird die vergrößerte Kollisionshülle verwendet (Bild 9).

Roboterkommunikation

Nach erfolgreicher Simulation liegen die Trajektorien als aneinandergereihte Roboterkonfiguration vor. Dabei kann die Prozessbahn wieder aus Kombinationen von linearen, zirkularen und direkten Punkt-zu-Punkt-Bewegungen bestehen. Durch die Generierung von Roboterprogrammen, oder einer direkten Roboterkommunikation, wird die geplante Bahn schließlich ausgeführt. Der Roboter wartet in letzterem Fall stetig auf Befehle des Rechners, die über eine Netzwerkverbindung zu ihm gesendet werden. Bereits bestehende Kommunikations-

protokolle, wie das Robot Operating System Industrial Paket (ROS-Industrial) [8], erwiesen sich während der Projektbearbeitung als nicht flexibel genug. Aus diesem Grund wurde ein neues Kommunikationsprotokoll erstellt, das unter anderem auch für die Positionierung des Drehtisches verwendet werden kann und so auch bei der 3D-Datenerfassung des Bauteils nützlich ist.

Ergebnisse

Der Projektabschluss zeigte, dass die Reinigung unbekannter Bauteile durch die automatische Online-Bahnplanung unter den Laborbedingungen funktioniert und hinreichend genau ist. Neben einfachen Geometrien ermöglichen die entwickelten Algorithmen auch die Reinigung komplexer Bauteile (Bilder 10 und 11).

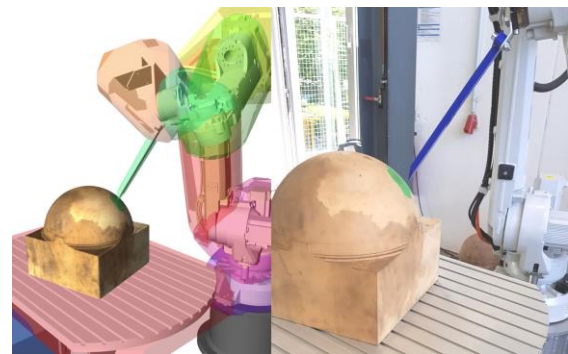


Bild 10: Ausführung der simulierten Reinigungsbahn

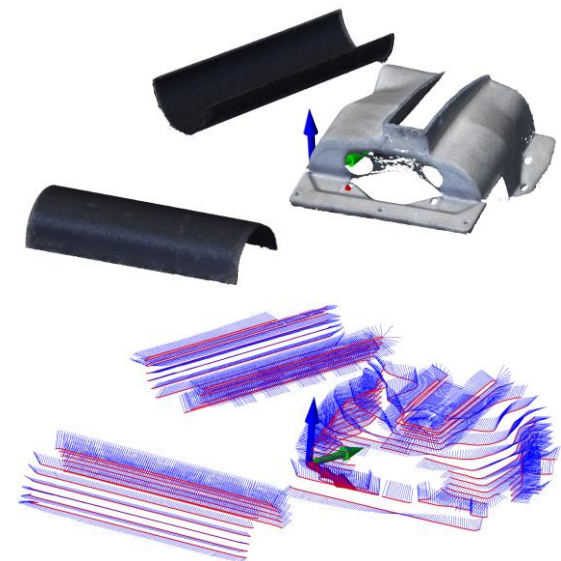


Bild 11: Bahnplanung auf komplexerem Bauteil und aufgeschnittenen Rohren

Der in diesem Projekt verfolgte Lösungsansatz stößt bei dünnwandigen und ansonsten schwer zu triangulierenden Bauteilen an seine Grenzen und erzielt keine zuverlässigen Ergebnisse mehr. Ein

alternativer Lösungsansatz für die Bahnplanung ist eine Simulation des Reinigungsprozesses. Dabei werden iterativ aus der zu reinigenden Punktwolke Posen für das Reinigungswerkzeug bestimmt. Diese entfernen anschließend die gereinigten Punkte aus der Punktwolke, bis alle möglichen Punkte gereinigt sind (**Bild 12**).

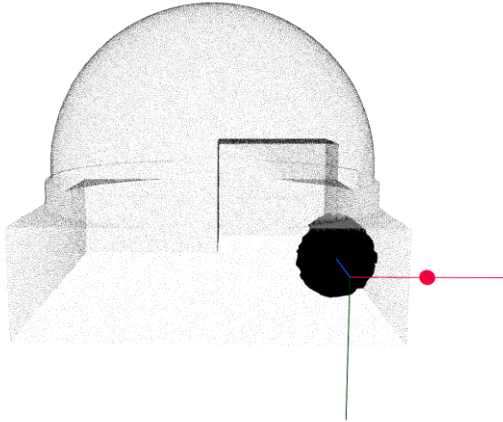


Bild 12: Bahnplanungskonzept RandomClean

Ausblick

Die entwickelten Systeme der 3D-Datenerfassung und Online-Bahnplanung lassen sich auch auf andere Problemstellungen anwenden, beispielsweise der Oberflächenkontrolle oder dem Lackieren unbekannter Bauteile. Aktuelle Forschungen beinhalten eine Erhöhung der Genauigkeit und die Einbindung der Ausnutzung von Prozess-Toleranzen und Freiheitsgraden. Ist eine Endeffektor-Prozess-Pose innerhalb der Online-Bahnplanung nicht direkt kollisionsfrei möglich, werden die Toleranzen und Freiheitsgrade genutzt, um diese Pose eventuell doch erreichbar zu machen. In einem aktuellen Forschungsprojekt wird untersucht, ob das Verfahren auch auf einen Trennprozess mit gegebener Konstruktionszeichnung und verzogenem Bauteil anwendbar ist. Im Fokus steht dabei die Bearbeitung von dünnwandigen Gussteilen.

Mit der entwickelten Online-Bahnplanung können auch teilautomatische Anwendungen realisiert werden, indem in einem Programm direkt auf dem gescannten Bauteil die Roboterbahn programmiert wird (**Bild 13**).

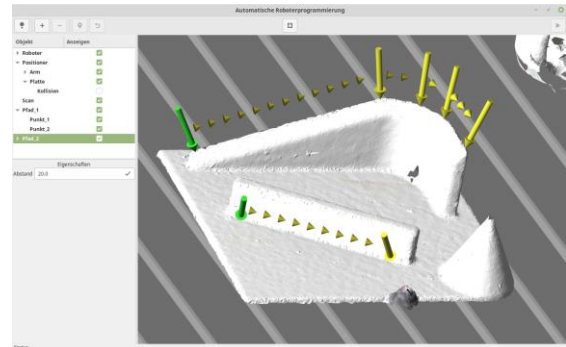


Bild 13: Konzept einer softwareunterstützten Roboterprogrammierung

Literatur

- [1] Diankov, R.: *Automated Construction of Robotic Manipulation Programs*. Doktorarbeit, Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania, 2010
- [2] Flexible Collision Library Repository auf Github, Webseite 2021, URL: <https://github.com/flexible-collision-library/fcl> (besucht am 09.02.2021)
- [3] Kuffner Jr., J. J.; LaValle, S. M.; *RRT-Connect: An Efficient Approach to Single Query Path Planning*. Paper, Conf. on Robotics and Automation, USA, 2000
- [4] Mineo, C.; Pierce, S. G.; Nicholson, P. I.; Cooper, I.: *Introducing a novel mesh following technique for approximation-free robotic tool path trajectories*. Paper, University of Strathclyde, Glasgow, 2017
- [5] Point Cloud Library, Webseite 2021, URL: <https://pointclouds.org> (besucht am 11.02.2021)
- [6] Pott, A.; Dietz, T.: *Industrielle Robotersysteme, Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019, S. 135, S. 69
- [7] Rose, C.: *Fachkräftemangel: Industrie ist auf Roboter angewiesen*. Artikel, Webseite, 2020, URL: <https://www.onetoone.de/artikel/db/977738cr.html> (besucht am 18.11.2020)
- [8] ROS-Industrial Homepage von ROS-Industrial, Webseite, 2020, URL: <https://rosindustrial.org/about/description/> (besucht am 09.11.2020)
- [9] Shoemake, K.: *Animation Rotation with Quaternion Curves*, Paper, Siggraph, San Francisco, USA, 1985

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts-
bibliothek

In: Siebte IFToMM D-A-CH Konferenz 2021

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/74036

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210216-163605-7



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0) genutzt werden.