Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47

Sensorbasierte Programmierung und Bahnadaption für Schweiß-Cobots

Vereinfachter Cobot-Einsatz dank Sensor-Add-on

J. Kapfer, J. Stoll, E. Schäfer, A. Schumacher

ZUSAMMENFASSUNG Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) können das Potenzial industrieller Cobots nur schwer ausschöpfen, da die Nutzung oft mit einem erhöhten Programmieraufwand verbunden ist und somit kleine Losgrößen nicht wirtschaftlich zu fertigen sind. Mit dem Ziel, die Vorteile der Automatisierung auch für Betriebe ohne Serienproduktion zur Verfügung zu stellen, arbeitet das Fraunhofer IPA an der Umsetzung eines automatisierten Schweißprozesses. Durch ein Sensor-Add-on wird die Schweißbahn in Echtzeit erkannt und passend zum Bauteil geregelt, während das vorliegende Bauteil real geschweißt wird.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Schweißen, Sensoren

Sensor add-on for simplified use of cobots

ABSTRACT For small and medium-sized enterprises (SME), exploiting the full potential of industrial cobots can be difficult, because their use is often associated with increased programming effort, making the production of small batch sizes economically unviable. To make the benefits of automation available to companies without mass production, Fraunhofer IPA is working on the implementation of an automated welding process in which a sensor add-on detects and controls the weld path in real-time while the part is being welded.

1 Einführung

Während in der aktuellen medialen Berichterstattung humanoide Roboter im Vordergrund stehen, haben in der industriellen Praxis in den letzten Jahren vermehrt kollaborative Roboter (Cobots) Einzug gehalten. Diese Kategorie von Robotern hat es vom konzeptionellen Prototyp zum Serienprodukt mit Zertifizierung geschafft. Die steigenden Absatzzahlen der letzten Jahre zeigen, dass Cobots einen akuten Bedarf bei den Nutzern decken. Die zunehmende Verbreitung lässt sich statistisch belegen. Seit 2017 ermittelt die „International Federation of Robotics“ die Anzahl weltweit verkaufter Cobots. So wurden im Jahr 2017 rund 389 000 ‚klassische‘ Roboter sowie 11 000 Cobots verkauft. 2022 war der Marktanteil von Cobots bezogen auf die weltweit neu installierten Roboter bereits auf zehn Prozent gestiegen und 498 000 verkauften Industrierobotern standen 55 000 Cobots gegenüber [1]. Das metallverarbeitende Gewerbe ist dabei ein wichtiger Treiber dieser Entwicklung. Dort werden Cobots vor allem für Schweißarbeiten eingesetzt.

Die Schweißrobotik ist in der Industrie schon lange ein Thema. Seit vielen Jahren werden industrielle Roboter eingesetzt, um Bauteile mit hoher Qualität und Genauigkeit zu schweißen. In der klassischen Roboterprogrammierung muss dabei aber jeder Punkt einzeln angefahren und im Roboterprogramm gespeichert werden (Teach-In-Programmierung). Neben den Koordinaten des jeweiligen Punktes müssen dem Roboter auch die Art der Bewegung, wie etwa eine gerade oder kreisförmige Bahn, und die Prozessparameter, wie die Geschwindigkeit, übergeben werden. Für viele Unternehmen ist dies nicht wirtschaftlich. Als Beispiel kann der Sondermaschinenbau genannt werden. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass Einzelstücke und Kleinstserien speziell nach Kundenwunsch gefertigt werden. Sollen dabei nur wenige Schweißnähte an einem Bauteil gesetzt werden, kommt der Einsatz eines Schweißroboters nur selten infrage.

Um Robotik und Automatisierung auch für KMU attraktiv zu machen, soll die Programmierung möglichst einfach und intuitiv gestaltet werden. Schweiß-Cobots eignen sich hierfür, da die Programmierung der Wegpunkte mittels Handführung schnell, das heißt in wenigen Stunden, für Schweißfachkräfte erlernbar ist und keine speziellen Schulungen nötig sind. In der Regel ist das Know-how zur Einstellung von geeigneten Schweißparametern bei den Schweißfachkräften bereits vorhanden. Damit sind alle Kompetenzen beim vorhandenen Personal gegeben und die Bewegungsbahnen für einfache Bauteile können effizient programmiert werden. Dennoch müssen alle Punkte von Hand geteacht werden, weshalb Losgrößen mit geringen Stückzahlen und komplexeren Konturen in der Praxis oft noch von Hand geschweißt werden.

Für eine technologische Weiterentwicklung wurde am Fraunhofer IPA die sensorbasierte Programmierung und Bahnadaption „IPA Adapt“ entwickelt, die sowohl die Bedienung von Schweiß-Cobots weiter vereinfacht und beschleunigt als auch für andere Anwendungen, wie etwa das Kleben, eingesetzt werden kann. Anders als in den existierenden Systemen mit Industrierobotern, bei denen eine bereits vorab programmierte Roboterbahn um einen zusätzlichen Korrekturwert überlagert wird, erlaubt das Sensor-Add-on eine Online-Bahnregelung. Das bedeutet, dass

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

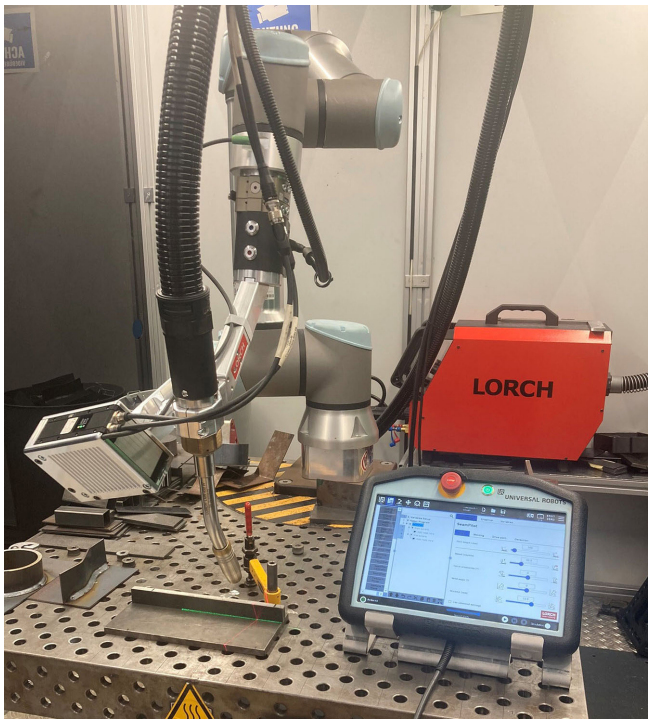


Bild 1. Hardwareaufbau der Schweiß-Anwendung mit Sensor-Add-on.
Foto: Fraunhofer IPA

ausgehend von einem Startpunkt in Echtzeit eine dreidimensionale Bahn bis ans Ende des Bauteils verfolgt wird. Dabei wird nicht nur die Position der Drahtspitze korrigiert, sondern es werden auch die gewählten Schweißwinkel entlang der gesamten Bahn gemäß den Einstellungen adaptiert und eingehalten.

Die Technologie richtet sich zum einen an Nutzer, die bereits einen Schweiß-Cobot haben und noch schneller programmieren, komplexere Schweißbahnen abfahren oder Probleme mit Schweißverzug automatisiert kontrollieren möchten. Zum anderen adressiert die Technologie Unternehmen, die den ersten Schritt in der Automatisierung durch Cobots anstreben und bisher keine Erfahrung auf diesem Gebiet haben. Die Teach-in-Programmierung über den Sensor richtet sich vornehmlich an KMU, wertet Arbeitsplätze auf und hilft so, dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken. Gleichzeitig ermöglicht die Technologie, auch kleine Losgrößen wirtschaftlich mit einem Cobot zu schweißen, die früher als nicht lohnend für das roboterbasierte Schweißen eingeschätzt wurden.

2 Übersicht Setup

Die Hardware des Systems besteht aus dem Cobot inklusive Teach-Pendant, auf dem die Bahnparameter eingestellt werden können. Hinzu kommen das Schweißgerät als Endeffektor, der Sensor zum Erkennen der Naht sowie ein externer Rechner zum Verarbeiten der Sensordaten und zur Berechnung der Bahnplanung (**Bild 1**).

Das System befindet sich in einer Schweißzelle auf einem Schweißtisch, auf den die Bauteile gelegt werden. Soll ein Bauteil geschweißt werden, muss die Sensorlinie, die sich etwa 3 cm vor der Schweißdüse befindet, im Free-Drive-Modus lediglich an die Startposition gefahren und die gewünschten Schweißparameter müssen über das Teach-Pendant des Roboters eingestellt werden. Nach dem Starten des Programms führt der Roboter eine initiale Scanfahrt durch, bei der die Naht und der Startpunkt der Bahn erkannt werden. Anschließend wird die eigentliche adaptive Online-Nahtverfolgung ab dem Startpunkt durchgeführt, bei welcher der initiale Scanbereich kontinuierlich erweitert wird, bis die Bahn vollständig mit den zuvor eingestellten Parametern abgefahren wurde. Durch den Abstand zwischen Sensorlinie und Schweißdüse hat der Laserliniensensor stets einen Vorlauf und befindet sich nicht direkt im Schweißbad.

3 Hand-Auge-Kalibrierung

Bevor der Lasertriangulationssensor zuverlässig eingesetzt werden kann, ist eine exakte Kalibrierung der Sensorposition in Bezug auf seine Position zum Roboter nötig. Die neu entwickelte Hand-Auge-Kalibrierung [2] kann der Nutzer selbstständig durchführen. Dabei führt der Roboter ein Kalibrierprogramm aus, bei dem im ersten Schritt eine ebene Kalibrierplatte aus verschiedenen Winkeln abgetastet wird. Mit der gegebenen Information, dass die Oberfläche aus jedem Winkel betrachtet die gleiche Ebene darstellt, kann die Rotation des Sensors relativ zum Roboterflansch berechnet werden. Dies ist wichtig, damit die Bauteil-Scans später im digitalen Abbild entsprechend zugeordnet werden können, wie es in der Realität der Fall ist.

Im nächsten Schritt ist die Position des Lasertriangulationssensors relativ zum Roboter zu bestimmen, indem eine Kugel mehrfach gescannt wird. Auch hier kann die Information, dass sich die Kugel immer an der gleichen Stelle befindet, genutzt werden, um die Position zu kalibrieren. Nach erfolgreicher Hand-Auge-Kalibrierung bestehend aus Rotations- und Positionskalibrierung entspricht das digitale Abbild hinreichend genau dem bisher gescannten, auf dem Schweißtisch liegenden Blech und die Software kann die automatische Programmerstellung übernehmen.

4 Bahnadaption

Die sensorbasierte Programmierung und Bahnadaption ermöglicht dem Roboter, sein Umfeld visuell zu erfassen, um so die Bahn relativ zum Bauteil abfahren zu können. Am Brennerhals wird dazu ein Lasertriangulationssensor montiert. Der Sensor detektiert in einer Ebene den Abstand der Messpunkte, wenn diese innerhalb seines Messbereichs auf ein Objekt treffen, das die Strahlung nicht reflektiert. **Bild 2** zeigt einen Ausschnitt des Roboters mit Sensor.

Links ist der Sensor mit roter Laserlinie zu sehen. Rechts ist die zugehörige Darstellung in einem Simulationsprogramm abgebildet. Wird der Sensor nun über das Bauteil bewegt, entstehen viele, dicht nebeneinanderliegende Schnittebenen, auf denen wiederum Messpunkte liegen, eine sogenannte Punktwolke.

Grundsätzlich lässt sich die Software in zwei Komponenten aufteilen: eine Nahtdetektion und eine Nahtadaption. Die Detektion besteht aus der Erzeugung der Rohdaten durch den Laserscanner. Dieser ist derart positioniert, dass er sich in Bewegungsrichtung vor dem Schweißbrenner befindet und kontinuierlich 2D-Scan-Linien erzeugt. Diese sendet der Scanner dann an den Rechner, auf dem die Messdatenauswertung durch den entwickelten OnlineFeatureDetection-Algorithmus stattfindet.

Durch eine Interpolation der 2D-Scan-Linien wird eine 3D-Punktwolke erzeugt, aus der die entsprechenden Merkmale

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

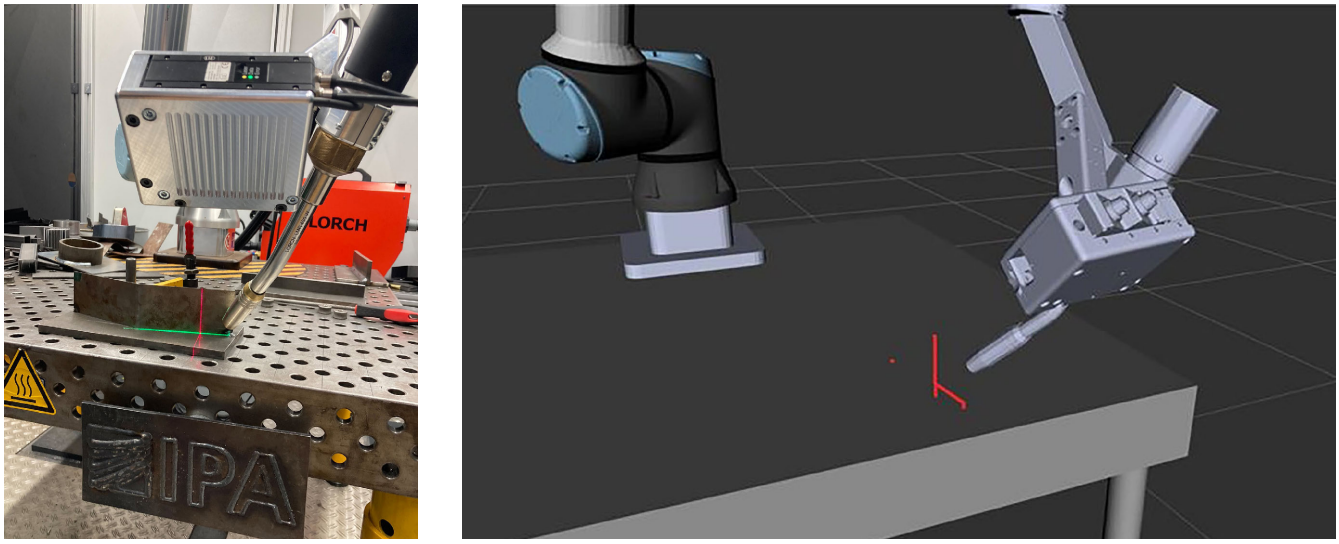


Bild 2. Der Roboter mit Sensor ist auf die abzufahrende Kehlnaht eines Bauteil ausgerichtet. Die rote Linie ist die Sensorlinie, die die Messpunkte repräsentiert. *Foto: Fraunhofer IPA*

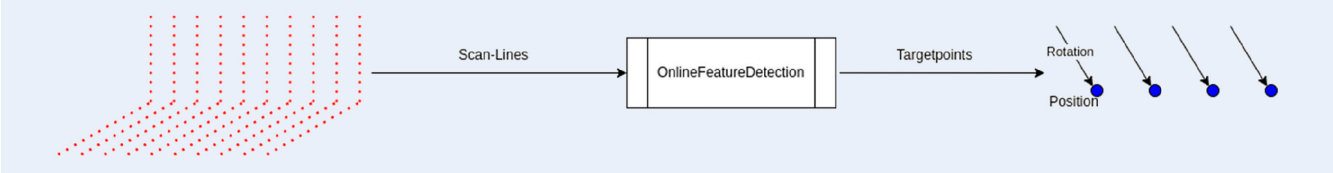


Bild 3. OnlineFeatureDetection-Algorithmus als Black-Box mit Eingangs- und Ausgangsgrößen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

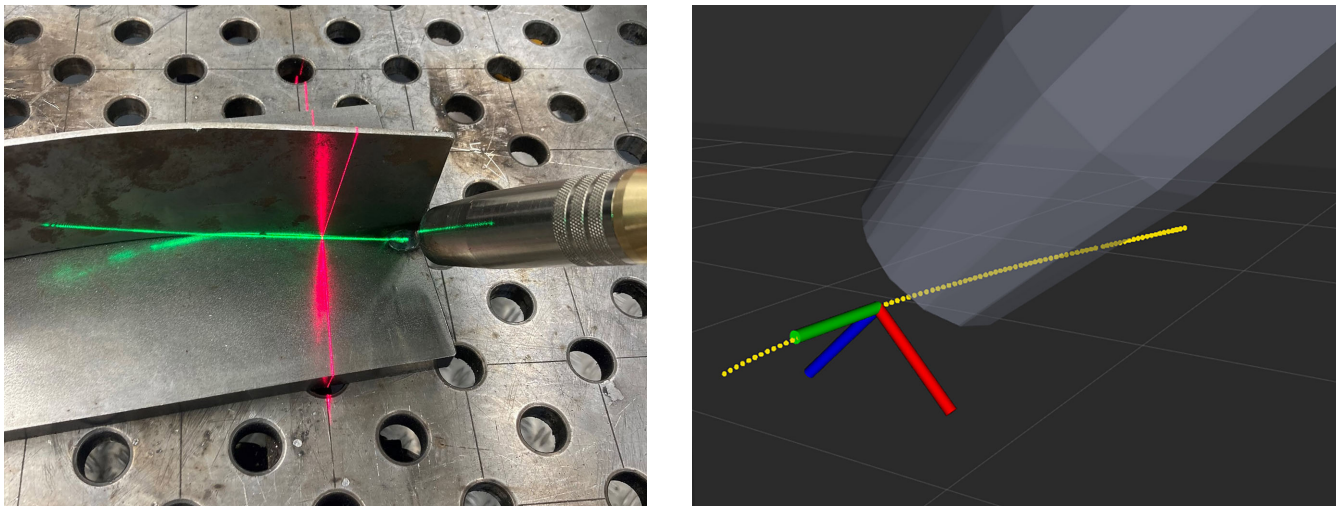


Bild 4. Stickout in der realen Welt und in der Simulation. *Foto: Fraunhofer IPA*

der zu schweißenden Naht abgeleitet werden können. Diese Merkmale enthalten die Information über die Position der Naht im Raum sowie einen Richtungsvektor, welcher die Rotation des Schweißbrenners relativ zum Bauteil vorgibt. **Bild 3** zeigt schematisch den OnlineFeatureDetection-Algorithmus mit Ein- und Ausgangsgrößen.

Die ermittelten Positionen und Rotationen werden zu Vektoren zusammengefasst, die der Roboter im nächsten Schritt, der Nahtadaption, anfahren soll. Dabei findet zunächst eine weitere Interpolation statt, um eine stetigere Roboterbewegung zu erhalten und die ermittelten Rotationen zu einem vollständigen Koordinatensystem, dem Stickout-Frame, zu ergänzen. Das Stickout-Frame ist das zu regelnde Koordinatensystem, das sich konstant an der Spitze des Schweißbrenners befindet. **Bild 4** zeigt links den Stickout an einem Bauteil in der realen Welt. Rechts ist das Stickoutframe in einem Simulationsprogramm, inklusive eines Ausschnitts des ermittelten Pfads (gelb gepunktete Linie), abgebildet.

Der Regler des Systems hat die Aufgabe, einen Soll-/Istwert-Vergleich durchzuführen und daraus die Stellgröße zu berechnen, die an den Roboter übermittelt wird. Dabei wird vor allem auf das Framework „ROS“ und dessen Paket „MoveIt“ zurückgegriffen, welches speziell für die Bewegungsplanung und Manipulation von Robotern entwickelt wurde. Zu berücksichtigen sind dabei

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

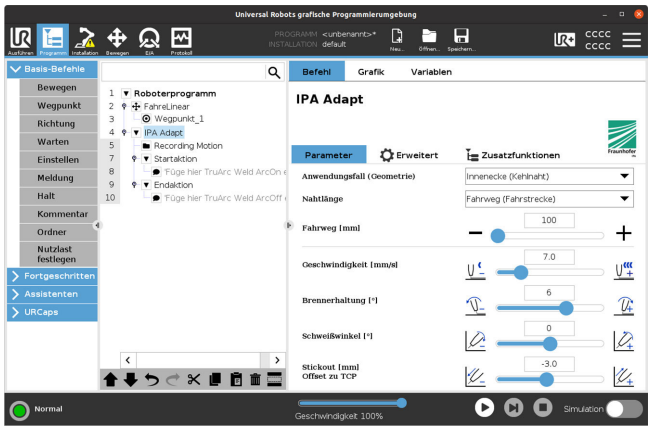


Bild 5. URCap: IPA Adapt – Tab Parameter. *Grafik: Fraunhofer IPA*

die Stellgrößen- und Prozessbeschränkungen, wie die maximalen Geschwindigkeiten und Verdrehungen, sowie eine endliche Rechenkapazität. Durch die aufgebrachte Bewegung des Roboters bewegt sich der Laserscanner synchron mit und erkennt so kontinuierlich neue Scans, die wiederum zu Punkten im Raum interpoliert und angefahren werden, bis das zu schweißende Bauteil vollständig bearbeitet wurde.

5 Software zur Programmausführung und Mensch-Maschine-Interaktion

Die Parametrisierung der Schweißbahn erfolgt über das Graphical User Interface (GUI) des Roboter-Teach-Pendants. Für eine einfache Bedienbarkeit lag der Fokus in der GUI-Entwicklung darauf, eine möglichst intuitiv parametrisierbare Software zu erstellen. Dabei führt der Endnutzer einzelne Programmknoten (Nodes) zu einem Programmbaum zusammen und parametrisiert diese individuell, teilweise über spezielle URCaps, wie **Bild 5** zeigt.

Ein URCap (Universal Robots Cap) ist eine Softwareerweiterung für Roboter von Universal Robots. URCaps ermöglichen es Entwicklern, benutzerdefinierte Funktionalitäten und Schnittstellen in die UR-Robotersteuerung zu integrieren. Ein in Eigenentwicklung implementiertes URCap stellt in diesem Fall die Nodes zur Hand-Auge-Kalibrierung und zur adaptiven Nahtverfolgung bereit. Die GUI ist mittels des Frameworks „Swing“ in Java implementiert. Beim Ausführen des Roboterprogramms werden aufseiten des Rechners bereitgestellte ROS-Services aufgerufen. Dabei werden die in der GUI gewählten Parameter übergeben, die in prozessspezifische Parameter geparst werden. Folgende Parameter sind, wie in Bild 5 dargestellt, definierbar:

- Geometrie-Anwendungsfall (Kehlnaht/Außenkante)
- Nahtlänge (euklidische Distanz („Luftlinie“)/Verfahrweg entlang des Bauteils/Teach-In (Roboterpose))
- Schweißgeschwindigkeit
- Brennerhaltung (schleppend/stechend)
- Schweißwinkel (Standard in der Winkelhalbierenden)
- Stickout (Z-Abstand)

Für eine intuitive Bedienung werden piktogrammartige Icons eingesetzt. Zudem sind alle Texte in der Sprache der Systemeinstellungen dargestellt. Derzeit ist die Software auf Englisch und Deutsch verfügbar. Eine dynamische Eingabevalidierung ist implementiert, die technisch illegale sowie technisch mögliche, aber nicht sinnvolle Parameterkombinationen verhindert.

Zusätzlich zur Kernfunktionalität der Bahnadaption wurden weitere Funktionen implementiert, die für den Einsatz in der Praxis erforderlich sind:

- Eingrenzung Sensorsichtfeld: Häufig kommt es vor, dass Geometrien nahe der eigentlich gewünschten Schweißnaht detektiert und verfolgt werden. Um diese Problematik aufzugreifen, wurde eine Eingrenzung des Sichtfeldes für die Nahtsuche in die Software integriert. Durch eine entsprechende Benutzereingabe kann der Scanbereich nun auf einen Abstand um die Mitte des Sensorsichtfelds herum reduziert werden. So werden Geometrien, die außerhalb des reduzierten Scanbereichs liegen, bei der Nahtsuche nicht beachtet.
- Steppnaht: Entsprechend den Wünschen der ersten Beta-Tester werden neben einem Verschweißen mittels durchgängiger Nähte auch Steppnähte angeboten. Die Parametrisierung erfolgt mittels der Anzahl der Teilnähte und deren Abstand oder mittels der Gesamtnahtlänge. Beim Verfahrweg zwischen den Teilnähten besteht keine Bindung an die Schweißgeschwindigkeit, was eine Zeitersparnis durch schnellere Bewegungen ermöglicht.
- Ein-/Ausschwenken: Schweißnähte sollen oft in einer Ecke – dem Schnittpunkt dreier Innenkanten – starten oder enden. Mit der Standard-Nahtverfolgung ist es jedoch nur möglich, mit konstanter Brennerhaltung entlang der Bahn zu fahren. Um bei aktiver Nahtverfolgung dennoch in einer Ecke starten oder enden zu können, kann der Nutzer ein Ausdrehen am Nahtanfang oder ein Eindrehen des Brenners am Nahtende manuell aktivieren.
- Kombination mehrerer Schweißnähte mittels Eckwinkel: Häufig sind zu verschweißende Kanten nicht alleinstehend am Bauteil, sondern in 90° oder 180° zueinander angeordnet. Beispielhafte Anwendungsfälle sind das Verschweißen eines Rechteck-Profils auf einer Platte (bei vier Nodes mit jeweils 90°-Schwenkbewegungen) oder das beidseitige Verschweißen zweier Platten (bei zwei Nodes mit 180°-Schwenkbewegung). Hier wurde das Potenzial einer noch weiteren Vereinfachung der Nutzereingabe erkannt. Durch Definition der Blechdicke, der Blechhöhe und des Eckwinkels zwischen zwei Nähten können mehrere Nodes mit einer Schwenkbewegung des Brenners verbunden werden.
- Recording Motion: Trotz einiger Vorteile bringt die Online-Nahtverfolgung, bedingt durch die Kopplung von Sensoreinfallwinkel und Schweißwinkel, einen wesentlichen Nachteil mit sich: Reguläre, prozessgebunden aufgenommene Punktwolken stoßen an ihre Grenzen, zum Beispiel bei Hinterschnitten oder kleinen Radien, bei denen der Sensor nicht die zu verschweißende Kante erreicht. Um dies zu kompensieren, wurde die „Recording Motion“ implementiert, bei welcher der Scanvorgang und der Schweißvorgang nacheinander durchgeführt werden. Diese Funktion ermöglicht das Schweißen von komplexeren Bauteilgeometrien, bei denen die Pose für die Sensordetektion manuell gewählt werden muss.

In **Bild 6** sind die Einstellmöglichkeiten dieser Sonderfunktionen dargestellt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

6 Fazit und Ausblick

Die beschriebene sensorbasierte Programmierung und Bahnadaption ist nicht nur eine weitere Implementierung von Ansätzen, die bereits in den 1980er-Jahren vorgestellt wurden [3–7], sondern unterscheidet sich von diesen in mehrfacher Hinsicht: Die ursprünglichen Umsetzungen adaptieren meist nur eine bestehende, vorab bereits per Teach-In fest programmierte Roboterbahn mittels 2D-Korrekturwert an ein reales Bauteil. Dabei findet oft nur eine Adaption der Position der Drahtspitze, nicht aber der Orientierung des Schweißbrenners statt. Auch verkompliziert sich meist die Programmierung eines Schweißroboters deutlich, wenn ein zusätzlicher Sensor eingesetzt wird. Bereits bei einfacher Bahnadaption sind viele zusätzliche Eingabeparameter durch den Bediener zu definieren, was höhere Fachkenntnisse des Bedieners und einen erhöhten Zeitaufwand erfordert.

Die vorgestellte Technologie hingegen erlaubt es, mit dem Robotersystem unbekannte Bauteile ohne vordefinierte Roboterbahnen oder CAD-Daten initial zu verfolgen und zu schweißen. Dabei verfolgt das Robotersystem nicht nur gerade Nähte mit konstanter Orientierung des Brenners, sondern auch gekrümmte Geometrien. Deren Durchmesser sollte jedoch mindestens 80 bis 100 mm betragen, da ansonsten der Sensor das Bauteil nicht mehr detektieren und somit die Bahn nicht mehr in Echtzeit geregelt werden kann. Die Orientierung des Schweißbrenners wird dank Closed-Loop-Regelung stets in Echtzeit konstant zu den detektierten Oberflächen ausgerichtet.

Die technisch weniger anspruchsvolle, aber für den Technologietransfer vermutlich größte Bedeutung, kommt der einfachen Nutzung dieser Funktionen zu. Es genügt die manuelle Programmierung eines Startpunkts und die Einstellung der dem Bediener – in der Praxis meist einem gelernten Schweißer – bekannten Schweiß- und Bahnparameter. Ausgehend von diesem Startpunkt kann die sensorbasierte Programmierung und Bahnadaption Bauteile detektieren, verfolgen und schweißend abfahren. Ein Bediener beherrscht die Nutzung schon nach kurzer Einweisung vor Ort, es sind keine besonderen Vorkenntnisse zur Roboterprogrammierung oder mehrtägige Schulungen notwendig.

Ausgehend von der sensorbasierten Programmierung und Bahnadaption für eine einzelne Schweißnaht lassen sich viele verschiedene Stoßrichtungen für weitere Entwicklungen ableiten. Zunächst ist es naheliegend, Programmbausteine für ähnliche, eher einfache, Bauteile zu entwickeln (etwa Vierkantrohr auf Grundplatte). Bei stark reflektierenden Blechen, meist aus Edelstahl, lassen die Daten, die der Lasertriangulationssensor liefert, eventuell keine ausreichend genaue Detektion der Flächen zu. Darum wird bereits an einer Optimierung der Sensorparameter und der Datenauswertung gearbeitet, um für die jeweils vorliegenden Oberflächen die bestmögliche Datenqualität zu erreichen und somit das Spektrum an sicher nutzbaren Werkstoffen zu erhöhen.

Darüber hinaus ist die sensorbasierte Bahnadaption auch für das Mehrlagenschweißen nutzbar. Für die Verbindung dickwandiger Bleche ist häufig eine zweistellige Anzahl an Schweißnähten notwendig. Um beim Mehrlagenschweißen die einzelnen Nähte in hoher und gleichbleibender Qualität zu schweißen, müssen die zuvor geschweißten Nähte sicher detektiert werden. Das Mehrlagenschweißen bedeutet bei manueller Ausführung eine bekanntermaßen hohe monotone Belastung für die Physis des Werkers und könnte in Zukunft mit der sensorbasierten Bahnadaption in hoher Qualität automatisiert werden. Die Prozesszeit im Verhältnis zum genutzten Arbeitsraum ist beim Mehrlagenschweißen besonders hoch, was eine Automatisierung mit Robotern zusätzlich attraktiv macht. Zuletzt ist auch ein Übertrag der Technologie auf andere bahngeführte Roboterprozesse, wie den Auftrag von Kleb- und Dichtstoffen, denkbar.

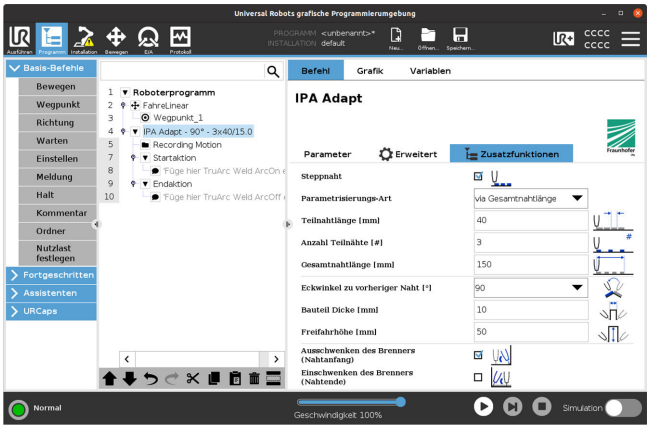


Bild 6. URCap: IPA Adapt – Tab Zusatzfunktionen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

Literatur

[1] Müller, C.; Kraus, W.; Graf, B. et al. (Hrsg.): World Robotics 2023 – Service Robots. Frankfurt am Main: IFR Statistical Department, VDMA Services GmbH, 2023

[2] Paschke, U.; Landgraf, C.; Ernst, K. et al.: An easy hand-eye calibration method for laser profile scanners in high precision applications using optimized view poses. 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Mexico City, Mexico, 2022, pp. 348–355

[3] Nayak, N.; Ray, A.; Vavreck, A. N.: An adaptive real-time intelligent seam tracking system. Journal of Manufacturing Systems 6 (1987) 3, pp. 241–245

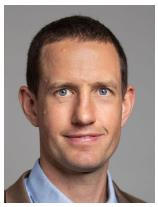
[4] Baudot, W.; Clermont, G.; Gaspart, P. et al.: Visually Guided Arc-Welding Robot With Self-Training Features. Proceedings, SME Technical Paper, MS 83–356, 1983

[5] Nayak, N.; Thompson, D. R.; Ray, A. et al.: Conceptual Development of An Adaptive Intelligent Seam Tracking System for Welding Automation. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh, North Carolina, 1987, pp. 1019–1024

[6] Thompson, D. R.; Ray, A.; Kumara, S.: Knowledge-Based System for Continuous Seam Welding in an Autonomous Manufacturing Environment. Proceedings of the Symposium on Knowledge-based Expert Systems for Manufacturing, ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, California, 1986, pp. 339–350

[7] Smati, Z.; Smith, C. J.; Yapp, D.: An Industrial Robot Using Sensory Feedback for an Automatic Multipass Welding System. Proceedings of the 6th British Robot Association Annual Conference, British Robot Association, Kempston, Bedfordshire, England, 1983, pp. 91–100

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY



Dr.-Ing. Johannes Stoll
johannes.stoll@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-3738
Foto: Fraunhofer IPA

Johannes Kapfer, M.Sc.
johannes.kapfer@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-3738
Foto: Autor

Erik Schäfer, M.Sc.
erik.schaefer@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-1582
Foto: Autor

Axel Schumacher, M.S.
axel.schumacher@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-3551
Foto: Autor

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-47 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -