

Präzisionsfräsen mit Industrierobotern

Strategien zur Reduzierung und Kompensation von durch Prozesskräfte verursachten Genauigkeits-, Positionier- und Fertigungstoleranzabweichungen

Ulrich Berger, Marcel Halbauer,
Christian Lehmann,
Dirk Euhus und
J. Philipp Städter, Cottbus

Auf Grund ihres großen Arbeitsraums und ihrer Flexibilität bieten Industrieroboter konzeptionell eine gute Basis für die spanende Bearbeitung, insbesondere von großen Bauteilen. Auf Grund ihrer geringen Steifigkeit und den daraus resultierenden schlechten Ergebnissen bei der Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität sind praktische Anwendungen in der Industrie aber noch selten. In diesem Beitrag wird ein modularer Ansatz vorgestellt, um die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern unter dem Einfluss von Prozesskräften zu verbessern.*

Ausgangssituation und Zielstellung

Die Nutzung von Industrierobotern (IR) für Fräsbearbeitungen bietet verschiedene Vorteile im Vergleich zu konventionellen CNC-Maschinen, insbesondere für Anwendungen, bei denen letztere nicht ihr volles Potenzial ausschöpfen können [1]. Durch ihre hohe Flexibilität und Adaptivität, einen großen Arbeitsraum und verhältnismäßig geringen Anschaffungskosten bieten IR - konzeptionell gesehen - eine gute Basis für Zerspanungsaufgaben. Die Zielstellung des EU-Projekts COMET besteht darin, die zukünftigen Herausforderungen der europäischen Industrie in den Bereichen Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, Werkzeugbau sowie Fertigung von Präzisionsstrukturbauteilen mit der Entwicklung eines innovativen Fertigungssystems zu bewältigen. Dieses muss bei schwankenden Märkten, steigenden Rohstoffpreisen und hohem Konkurrenzdruck entspre-

chend flexibel, kosteneffizient und zuverlässig sein. Bei typischen sechsgelenkigen Industrierobotern mit serieller Kinematik reagiert das Gesamtsystem, impliziert durch die geringe Gesamtsteifigkeit, auf eingebrachte Schwingungen und Prozesskräfte während des Zerspanungsprozesses sensibler als eine CNC-Maschine. Weitere Herausforderungen sind die absolute Positioniergenauigkeit, da jeder Punkt auf dem zu bearbeitenden Bauteil nur einmalig angefahren wird, sowie die nutzerfreundliche Bedienung durch den Endanwender, gekoppelt mit einer zuverlässigen Zellsimulation für die prozesssichere und kollisionsfreie Bearbeitung der Bauteile bei vollständiger Nutzung der Sechssachskinematik. Zu diesem Zweck bildet die Basis des Projekts ein Plug-and-Produce-System, bestehend aus roboterspezifischen Kinematik- und Dynamikmodellen, einem Softwaretool zur adaptiven Roboterpfadgenerierung und Zellsimulation, einem adaptiven Trackingsystem, einer hochdynamischen Kompensationsplattform auf Piezo-Aktor-Basis [2] und einem zentralen Plug-and-Produce-Kontroller (Bild 1). Der Schwerpunkt des hier vorgestellten Ansatzes zur Erhöhung der geometrischen Genauigkeit für roboterbasierte Fräsbearbeitungen ist Teil der Komponente: Entwicklung roboterspezifischer Kinematik- und Dynamikmodelle. Die Modellierung und die Kompensation der während des Fräsprozesses auftretenden

Kräfte sind ein wesentlicher Kernbestandteil der Algorithmen und Modelle. Obwohl Prozesskräfte nur bis zu einem gewissen Genauigkeitsgrad vorhersagbar sind, werden große Teile der Korrekturen schon offline, also während der Erzeugung des Roboterprogramms, durchgeführt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die während der Ausführung des Programms notwendigen Korrekturen so gering wie möglich zu halten sowie den Bedarf für zusätzlich erforderliche Messausrüstung zu reduzieren. Im Fokus der Methode liegt insbesondere die Bearbeitung harter Materialien, wie z.B. gehärteten Stahls oder Nickellegierungen. Diese Materialien werden auf Grund der schlechten Ergebnisse bzgl. der Form- und Lagetoleranz sowie der erreichbaren Oberflächengüte aktuell nicht mit Robotern bearbeitet, da für diese Werkstoffe eine Aufspannsituation mit hoher Gesamtsteifigkeit typisch ist. Der im Folgenden aufgezeigte Lösungsweg zur Prozesskraftkompensation ist an die strukturellen Möglichkeiten des IRs angepasst und gliedert sich in drei Teilschritte, wobei zwei davon bereits offline angewendet werden. Der erste Schritt ist die Auswahl der für den Prozess am besten geeigneten Frässtrategien und Technologieparameter, welche nicht notwendigerweise die gleichen wie bei einer CNC-Fräse sind. Ungünstige Ausrichtungen des Roboters und Singularitäten müssen vermieden werden, um eine gute

*) Danksagung

Die dargestellten Entwicklungen wurden zum Teil im Forschungsprojekt des 7. Rahmenprogramms der Europäischen Union mit der Fördernummer #258769 (COMET: Plug-and-produce COmponents and METhods for adaptive control of industrial robots enabling cost effective, high precision manufacturing in factories of the future) gefördert.

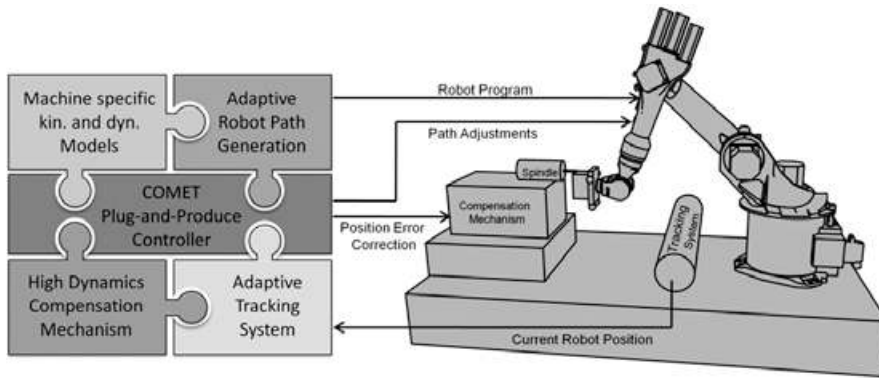


Bild 1. Fräszellenkonzept des EU-Projekts COMET

Basis für einen stabilen Fräsprozess zu gewährleisten. Im zweiten Schritt werden prozesskraftinduzierte Abdrängungen bei der Pfadstellung berechnet und kompensiert. Dazu sind ein Schnittkräftemodell und ein Steifigkeitsmodell des Roboters notwendig. Zur Berücksichtigung der nichtdeterministischen Anteile im Schnittkraftmodell sowie weiterer Fehler und Toleranzketten im realen Prozess wird darüber hinaus im dritten Schritt eine Online-Kompensation integriert. Unter Berücksichtigung der Parameter aus der Offline-Kompensation können die während des Prozesses auftretenden und von den berechneten Werten abweichenden Kräfte gemessen und zusätzlich adaptiert werden. Neben den im Zerspanungsprozess auftretenden Prozesskräften entstehen hochfrequente Schwingungen, die sich jedoch alleine durch den limitierten Interpolationstakt der Robotersteuerung nicht direkt kompensieren lassen. Fehler durch hochfrequente Schwingungen werden teilweise im zuvor erwähnten ersten Schritt mit berücksichtigt. Weitere Lösungsansätze, wie in [3, 4] dargestellt, führen über offene Schnittstellen eine Online-Pfadadaption durch. Diese Möglichkeit steht jedoch derzeit in der Industrie nicht zur Verfügung.

Prozesskraftmodellierung

Die Berechnung der Prozesskräfte während des Schneidvorgangs mit definierter Schneide basiert auf den Theorien von Kienzle [5]. Die Prozesskraft wird als Summe aller Prozesskraftvektoren $\{F_c, F_f, F_p, F_a\}$ während des aktiven Schneidvorgangs definiert [6]. Die Zerspanungsleistung P_c wird dabei aus dem Produkt der Schnittkraft F_c und der Schnittgeschwindigkeit V_c gebildet. Die Schnittkraft F_c ergibt sich dabei aus dem Produkt der Spanfläche $A = a_p \cdot f_z$ und

der spezifischen Schnittkraft k_c (Gleichung (1)). Dabei gilt der Zusammenhang, dass bei abnehmender mittlerer Spandicke h_m die spezifische Schnittkraft steigt (Gleichung (2)).

$$F_c = a_p \cdot f_z \cdot k_c \quad (1)$$

$$k_c = k_{c1.1} \cdot \frac{1}{h_m^m} \quad (2)$$

Während des Zerspanvorgangs beschreibt die Schneidecke auf Grund der Überlagerung der Rotations- und Translationsbewegung eine zyklische Bahnkurve. Für das hier beschriebene Prozesskraftmodell wird eine Kreisbahn approximiert. Gründe hierfür sind der geringe Einfluss des Zahnvorschubs und der entsprechend vernachlässigbare Fehler. Gleichung (3) zeigt den Zusammenhang zur Ermittlung der mittleren Spandicke bei sich verändernden Eintritts- ρ_e und Austrittswinkel ρ_a .

$$h_m = \frac{1}{\rho_a - \rho_e} \int_{\rho_e}^{\rho_a} f_z \cdot \sin(\rho) \, d\rho \quad (3)$$

Der dargestellte Zusammenhang in Gleichung (4) wurde verwendet, um die endgültige Vorschubkraft zu berechnen.

$$F_f = \frac{1}{4} (2\rho - \sin 2(\rho) - 2\cos^2(\rho)) + C \quad (4)$$

Dieses Verfahren vernachlässigt derzeit die durch die Schneidecke beschriebene Hyperbel, die im finalen Gesamtmodell implementiert sein wird. Dasselbe gilt für zusätzliche Einflussgrößen und Parameter, welche nach [7] die spezifische Schnittkraft betreffen.

Bestimmen der spezifischen Materialparameter

Viele der materialspezifischen Parameter sind in umfangreichen Experimenten er-

mittelt worden und in der gängigen Literatur [5, 7] und bei Werkzeugherstellern zu finden. Dessen ungeachtet, kommen regelmäßig neue Materialien und Materialkombinationen auf den Markt. Bei diesen sind die materialspezifischen Parameter, vor allem der $k_{f1.1}$ und $k_{p1.1}$ sowie die dazugehörigen m_f und m_p Werte, nicht bekannt. Hinzu kommt, dass einige dieser benötigten Parameter direkt durch die Werkstoff-Werkzeugkombination determiniert werden. Als Resultat des ersten Validierungszyklus der durchgeführten Experimente wurde entschieden, eine Methode zu entwickeln, um für einen Fräsroboter mit einer spezifischen Werkzeug-Werkstoffkombination im gewünschten Anwendungsfall eine möglichst schnelle und effiziente Bestimmung materialspezifischer Parameter zu ermöglichen. Dafür wurde ein Testzenario erstellt, welches unkompliziert vom Endanwender durchgeführt werden kann. Voraussetzung ist, dass die Werkstoff-Werkzeugkombination mit den entsprechenden Eigenschaften und Technologieparametern bekannt ist. Zur Bestimmung der auftretenden Kräfte wird ein 6-DOF-Kraft-Momente-Sensor benötigt. Bild 2 zeigt die gefrästen Nuten zur Bestimmung der Fräskräfte. Dabei werden zuerst gerade Nuten, anschließend Nuten mit steigender Eingriffstiefe und absatzweise zunehmender Eingriffsbreite gefräst. Mit den gemessenen Kräften können nach [5, 7] die Werte $k_{c1.1}$, $k_{f1.1}$, $k_{p1.1}$ und die zugehörigen Anstiege m_c , m_f und m_p berechnet werden. Mit diesen Parametern ist es möglich, anschließend die Kräfte für alle auftretenden Werkzeugeingriffsszenarien zu berechnen.

Frässtrategien für Industrieroboter

Die Auswahl einer geeigneten Frässtrategie mit angepassten Prozessparametern ist der erste Schritt zum Erreichen einer verbesserten Genauigkeit und Oberflächenqualität. Dabei stimmen diese Parameter nicht notwendigerweise mit Fräsparametern überein, die für die gleiche Bearbeitung auf einer Fräsmaschine genutzt werden würden. Wichtige Randbedingungen, die für eine gleichmäßige Bewegung berücksichtigt werden sollten, sind:

- die Anordnung des Werkstücks im Arbeitsbereich des Roboters,
- die Resonanzfrequenzen des Roboterarms (etwa 18-30 Hz) in den gewählten Ausrichtungen,

- die Auswahl geeigneter Vorschübe und
- der Punktabstand, der für die Pfadplanung berücksichtigt wird.

Es sollten Achsrichtungsänderungen und Situationen, in denen die Achsen entlastet werden, möglichst vermieden werden, da dies auf Grund von Getriebespielen zu Positionierungsfehlern führt.

Da die Struktur des Roboters weniger steif als die einer herkömmlichen Fräsmaschine ist, kommt der Reduzierung von Fräskräften senkrecht zur Vorschubrichtung eine besondere Bedeutung zu. Diese wirken sich insbesondere auf die Qualität des sogenannten „Wall-Finishing“ aus. Die Kraft senkrecht zur Vorschubkraft kann auf null reduziert werden, indem eine Gegenlauf-Frässtrategie gewählt wird, bei der die Eingriffsbreite die Hälfte des Werkzeugdurchmessers beträgt. Dieser Arbeitspunkt variiert abhängig vom gewählten Vorschub. Durch die Nutzung trochoider Bewegungen wird eine konstante Eingriffsbreite für den kompletten Werkzeugpfad gewährleistet.

Nach der Absicherung stabiler Schnittbedingungen durch die Optimierung der Frässtrategie kann die Offline-Korrektur die durch die Prozesskraft erzeugten Pfadabweichungen kompensieren. Nach der Erzeugung des Werkzeugpfads wird für jeden Pfadpunkt ein Kraftvektor errechnet, der die durchschnittliche Prozesskraft in der Umgebung dieses Punkts repräsentiert. Um die zu erwartenden Ablenkungen ausgleichen zu können, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein: Der Ausgleich der Abweichungen kann nur auf die Punkte des Werkzeugpfads Anwendung finden, daher ist ein ausreichend kleiner Abstand zwischen den Pfadpunkten nötig. Andererseits zwingt eine zu hohe Punktdichte die Robotersteuerung, welche in der Verarbeitungsgeschwindigkeit beschränkt ist, beim Abfahren des Programms, den Vorschub zu reduzieren oder Stützpunkte zu überspringen. Ersteres ist nicht erwünscht, da sich veränderte Schnittbedingungen in einer Verschlechterung der Oberflächenqualität und einer Erhöhung des Werkzeugverschleißes widerspiegeln, während Letzteres die Auflösung des Werkzeugpfads und damit direkt die Bauteilqualität verschlechtert. Um ein geeignetes Verhältnis zwischen Vorschub und Auflösung des Werkzeugpfads zu bestimmen, kann der minimale Abstand zwischen zwei Pfadpunkten DS [μm] mit Hilfe der Gl. (5) berechnet werden.

$$DS = f \cdot DT / 60 \quad (5)$$

Dabei ist f [mm/min] der maximal benötigte Vorschub und DT [ms] die Zykluszeit der Robotersteuerung. In Untersuchungen wurde der Einfluss der Zykluszeit der KRC1 mit ≤ 45 ms ermittelt. Für das Experiment ergibt sich nach Gl. (5) eine Punktverteilung von 0.5 mm. Als weitere Voraussetzungen müssen der Eingriffswinkel des Werkzeugs für jeden Punkt des Werkzeugpfads (als Differenz aus Eintritts- und Austrittswinkel ρ_e und ρ_a (3)) und ein Steifigkeitsmodell für den Roboter bekannt sein. Gelenkbasierte Steifigkeitsmodelle sind u. a. in [8, 9] beschrieben. Für die experimentelle Validierung der Prozesskraftkompensation wurde ein lineares Steifigkeitsmodell angenommen. Diese Annahme kann getroffen werden, da in diesen Experimenten nur ein kleiner Bereich des Arbeitsraums vom Roboter genutzt wurde und die auftretenden Prozesskräfte klein genug sind, um den Bereich der linearen Korrelation zwischen Kraft und Auslenkung nicht zu verlassen. Das Modell wurde mittels empirischer Daten aus den Fräsexperimenten parametrisiert. Der reine Offline-Korrekturansatz kann die Bearbeitungsgenauigkeit bis zu einem gewissen Grad steigern, allerdings werden Schwingungsperioden unterhalb der Zykluszeit, Änderungen der Prozesskraft oder nicht vorhersagbare Abweichungen der Schnittbedingungen nicht abgedeckt. Aus diesem Grund kommt zusätzlich eine Online-Korrektur zum Einsatz, die Abweichungen während des Fräsprozesses korrigiert. Die tatsächlich auftreten-

den Fräskräfte werden am TCP des Roboters mittels eines Kraft-Momente-Sensors gemessen. Anhand der Differenz der offline-berechneten Kraft und der gemessenen Kraft kann die Abweichung der Ablenkung des TCP mit einer externen Recheneinheit ermittelt und als Offset an die Robotersteuerung übergeben werden. Die Berechnung erfolgt auf Basis des aus der Offline-Korrektur bekannten Steifigkeitsmodells. Die dazu benötigte offline-berechnete Kraft wird im Roboterprogramm als ein Set aus drei Parametern gespeichert und über Schnittstellen an die externe Recheneinheit übergeben. Auf diese Weise ist keine zusätzliche Synchronisation zwischen der Recheneinheit und der Robotersteuerung nötig.

Wird nicht nur der aktuelle Kraftvektor, sondern auch die Vektoren für einen oder mehrere nachfolgende Punkte übergeben, bestehen die Möglichkeiten der Interpolation zwischen einzelnen Punkten und der Implementierung einer Look-Ahead-Funktionalität. Die Zuordnung der Korrekturrichtungen und des Koordinatensystems des Kraft-Momente-Sensors erfolgt mit Hilfe des TCP-Koordinatensystems. Die Online-Korrektur könnte auch als alleinestehender Korrekturmechanismus genutzt werden, allerdings würden sich dann die Grenzen der Robotersteuerung, vor allem bei der Reaktionszeit, deutlicher bemerkbar machen.

Experimentelle Validierung

Der Experimentalaufbau wurde so gewählt, dass dieser einem möglichen industriellen Aufbau so nah wie möglich

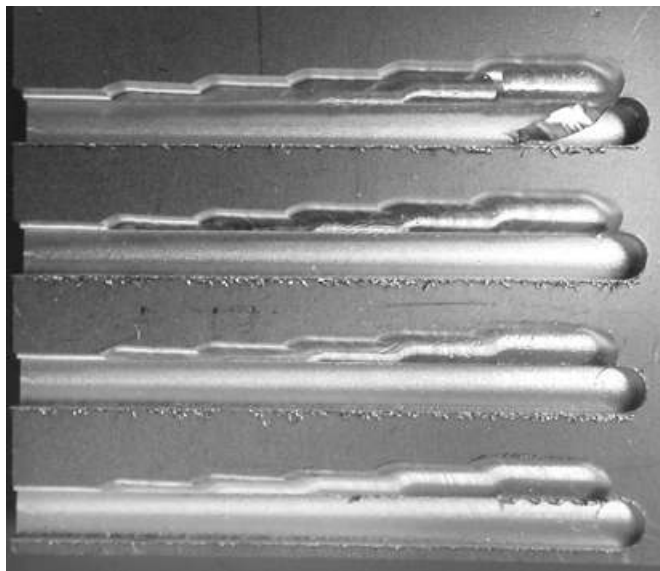


Bild 2. Teststück zur Bestimmung der materialspezifischen Parameter

Tabelle 1. Experimentell ermittelte Parameter für die Trockenbearbeitung

	V_c [m/min]	S [1/min]	f_z [mm/Z]	f [mm/min]
EN7075	300	17000	0,03	2040
X37CrMoV5-1	84	4450	0,008	140

Tabelle 2. Vergleich der errechneten spezifischen Schnittkräfte mit den Literaturangaben

Parameter	k_{c1} [N/mm ²]	m_c [N/mm ²]
Literaturangabe	780	0,23
Errechnet	776	0,274
Abweichung	0,5%	19%

kommt. Es wurde jedoch auf eine zusätzliche Kühlschmierstoffversorgung verzichtet, und alle Experimente wurden in Trockenbearbeitung gefahren. Zwei unterschiedliche Materialien fanden bei den Versuchen Verwendung: Aluminium (EN7075) als typischer Vertreter für Aluminiumbauteile in der Automobilindustrie und gehärteter Stahl (1.2343 X37CrMoV5-1) mit entsprechend hohen Prozesskräften. Die verwendeten Standardschaffräser haben einen Durchmesser von 6 mm und vier Zähne. Basierend auf dem Smart Robot Tooling-System [10] wurde eine Plug-and-Produce-Fräserzelle in eine bestehende flexible Roboterfertigungszelle integriert. Das Kernstück der Zelle bildet ein Roboter mit 125 kg Tragkraft, welcher mit einem programmable Automation Controller (PAC) gekoppelt ist. Ein 6-DOF-Kraft-Momente-Sensor liefert Messdaten an den PAC. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe spezieller Algorithmen. Das Werkstück befindet sich am TCP des IR und die Spindel auf einem Gestell. Die Ermittlung der materialspezifischen Parameter wurde für die Aluminiumlegierung EN7075 (Tabelle 1) mit dem beschriebenen Aufbau realisiert. Die ersten Resultate der Experimentreihe ergaben, dass die ermittelten spezifischen Schnittkräfte k_c nur äußerst geringe Abweichungen von dem in Literatur und Werkzeugherstellerkatalog hinterlegten Vergleichsparameter aufzeigen. Der Anstieg m hingegen weicht bis zu 19 Prozent von den genannten Quellen ab (Tabelle 2). Ein linearer Zusammenhang des Steifigkeitsmodells konnte mit der Experimentreihe nachgewiesen werden (0,1 mm Abweichung pro 10 N). Die Validierung der angepassten Bearbeitungsstrategie reduzierte zusätzlich die Passivkräfte und somit auch die Abwei-

chungen von der Soll-Position im Mittel um 30 Prozent. Zwischen den offline berechneten und online gemessenen Kräften ist eine gute Korrelation zu erkennen (Abweichungen bis 15 %).

Zusammenfassung

In dem Artikel wurde ein dreistufiges Verfahren zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit beim Fräsen mit Industrierobotern vorgestellt und teilweise validiert. In zukünftigen Arbeiten erfolgt die Validierung der Offline-Kompensation von generischen Werkzeugwegen auf Basis von Achsgelenkmodellen, die zum Beispiel Achsspiel enthalten, sowie der Online-Kompensation.

Literatur

- Minhas, S. H.; Lehmann, C.; Städter, J. P.; Berger, U.: Reconfigurable Strategies in Manufacturing Setups to Confront Mass Customization Challenges. In: Proceedings of the 21st International Conference on Production Research (ICPR 21), Stuttgart, Germany, 2011
- Puzik, A.; Pott, A.; Meyer, C.; Verl, A.: Industrial Robots for Machining Processes in Combination with an Additional Actuation Mechanism for Error Compensation. In: Proceedings of the 7th International Conference on Manufacturing Research (ICMR), University of Warwick, United Kingdom, 2009
- Sörnmo, O.; Olofsson, B.; Robertsson, A.; Johansson, R.: Increasing Time-Efficiency and Accuracy of Robotic Machining Processes Using Model-Based Adaptive Force Control. In: Proceedings of the 10th International IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik, Croatia, 2012
- Surdilovic, D.; Zhao, H.; Schreck, G.; Krüger, J.: Advanced Methods for Small Batch Robotic Machining of Hard Materials. In: Proceedings of the 7th German Conference on Robotics, Munich, Germany, 2012
- Kienzle, O.: Bestimmung von Kräften an Werkzeugmaschinen. VDI-Z 94 (1952) 11/12, S. 299-305
- ISO 3002-4 (1985-11-00): Basic Quantities in Cutting and Grinding; Part 4: Forces, Energy, Power, 1985
- Victor, K.: Schnittkraftberechnungen für das Abspannen von Metallen. wt-Zeitschrift für industrielle Fertigung 59 (1969) 7, S. 31-27
- Reiner, M. J.: Modellierung und Steuerung von strukturelastischen Robotern. Dissertation, TU München, 2010

- Pan, Z.; Zhang, H.: Robotic Machining from Programming to Process Control: A Complete Solution by Force Control. Industrial Robot: An Int. Journal 35 (2008) 5, S. 400-409
- Minhas, S. H.; Halbauer, M.; Berger, U.: A Multilevel Reconfiguration Concept to Enable Automotive Factories. In: Proceedings of the 7th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET), Athens, Greece, 2011

Die Autoren dieses Beitrags

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, geb. 1959, promovierte 1995 im Fachbereich Produktionstechnik an der Universität Bremen. Derzeit ist Ulrich Berger Direktor des Zentrums für Automatisierung und Inhaber des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus.

Dipl.-Ing. Christian Lehmann, geb. 1984, ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Automatisierungstechnik. Seine Aufgaben umfassen die Leitung des die Robotermodellierung betreffenden Arbeitspakets innerhalb des COMET-Projekts sowie die Integration von Robotern bei KMU.

M.Sc. Marcel Halbauer, geb. 1984, ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Automatisierungstechnik. Sein Tätigkeitsumfeld umfasst die Zerspanungstechnik mit Industrierobotern sowie das Handling biegeschlaffer Teile.

Dipl.-Ing. J. Philipp Städter, geb. 1983, ist Mitglied der Internationalen Graduiertenschule der BTU Cottbus. Sein Tätigkeitsfeld umfasst die Sensor/Aktor Integration in flexiblen Fertigungszellen.

Dipl.-Ing. (FH) Dirk Euhus, geb. 1967, absolvierte sein Studium der Feinwerktechnik an der FH Wilhelmsaven. Seit 2009 leitet er den Bereich Innovation Management bei der ARTIS GmbH.

Summary

Precise Milling with Industrial Robots – A Plug-and-produce Approach to Reduce and Compensate for Process Force Induced Accuracy and Positioning Errors. Industrial robots offer a good basis for machining from a conceptual point of view due to its huge workspace. However they are rarely utilized for machining applications in industry due to their low stiffness and the bad achievable work piece quality. Available solutions using position control of the tool require costly additional hardware, while force controlled solutions depend on low level controller access that is not commonly available. This article proposes a plug-and-produce approach to compensate for process force induced accuracy errors.

Den Beitrag als PDF finden sie unter:
www.zwf-online.de
Dokumentennummer: ZW 110793