

Robotikforschung

Beheizte Roboter zerspanen permanent präzise

05.11.2020 | Autor / Redakteur: E. Uhlmann, J. Polte und Ch. Mohnke / Peter Königsreuther

Roboter für die Zerspanung zu nutzen, bringt Vorteile mit sich. Das haben viele erkannt und setzen auf diese Alternative. Doch die thermische Drift macht Probleme. Forscher wollen das lösen.

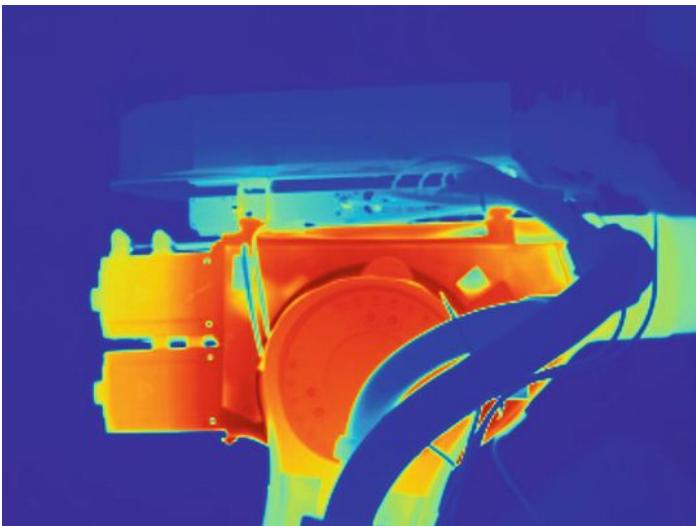


Bild 1: Wärmebildaufnahme einer sich im laufenden Betrieb mit der Zeit aufgewärmt habenden Roboterstruktur.

(Bild: Fraunhofer-IPK)

Der Vertikal-Knickarmroboter wird immer öfter im Bereich der Bearbeitung eingesetzt und ist Thema vielfältiger Publikationen [2, 5]. Die größten Vorteile von Industrierobotern auf diesem Einsatzfeld sind die deutlich geringeren Anschaffungskosten sowie eine erhöhte Flexibilität und Arbeitsgeschwindigkeit im Vergleich zu konventionellen Werkzeugmaschinen [7]. Insbesondere bei der Nutzung des Roboters für Bearbeitungsaufgaben spielt die Genauigkeit eine qualitätsbestimmende Rolle. Die Verformung der

Roboterstruktur durch Erwärmung bildet dabei den größten Einflussfaktor [2].

Zusätzlich ist dieser Einfluss unabhängig von der Nutzungsart sowohl für die Handhabung und Montage als auch für hochpräzise Bearbeitungsprozesse relevant. Verschiedenste Arbeiten haben gezeigt, dass der thermische Einfluss auf die Genauigkeit von 6-Achs-Industrierobotern eine große Auswirkung hat. In diesem Zusammenhang wurden Drift von $\Delta AP_t = 0,10$ mm bis $\Delta AP_t = 1,78$ mm erfasst [3, 6].

Bisher ist die thermische Drift nur mit viel Aufwand zu bändigen

Aktuell bestehen keine in der Praxis etablierten Verfahren und Methoden, welche die Auswirkungen der thermischen Drift ohne aufwendige Kalibrierungsmaßnahmen mit entsprechendem Systemstillstand kompensieren. Im Bereich der universitären und institutionellen Forschung bestehen einige wenige Ansätze zu kompensatorischen und konstruktiven Maßnahmen, jedoch existiert noch kein Entwicklungsansatz mit unmittelbarem Praxisbezug [1, 4]. Das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK und die Winkler AG haben nun ein System entwickelt, das die Reduktion der thermisch bedingten Verlagerung mittels geregelter Heizelemente vorsieht. Denn nach aktuellem Stand der Erkenntnisse zur thermischen Drift ist das Erwärmen betroffener Achsen einer Kühlung vorzuziehen [4, 6].



Bild 2: Blick auf die an den Achsen 1, 2 und 3 angebrachten Heizmatten am Roboter des Typs KR60 HA von Kuka.

(Bild: Fraunhofer IPK)

Ziel ist es, das gesamte Robotersystem auf einem permanent ausgeglichenen Temperaturniveau – also im Beharrungszustand – zu halten. Die Heizelemente werden an die Geometrie der jeweiligen Achse angepasst und erwärmen das Material auf eine

Temperatur nahe des Beharrungszustands. Die Heizelemente werden dann zu dem Zeitpunkt abgeschaltet, in welchem der Wärmeeintrag der Motoren und Getriebe das System selbstständig auf einem einheitlich konstanten Niveau halten kann. Anschließend muss das Robotersystem nur einmalig kalibriert werden. Es werden leistungsfähige Oberflächenheizmatten-Systeme verwendet, die über eine neuartige Material- und Heizdrahtbasis, resistente, für den Einsatz in einer Fertigungsumgebung geeignete, Deckmaterialien und eine angepasste Geometrie verfügen.

Die Flächenleistungen der einzelnen Heizelemente liegen zwischen $P_A = 0,16 \text{ W/m}^2$ und $P_A = 0,30 \text{ W/m}^2$. Die Heizfläche $A_H = 1,05 \text{ m}^2$ verteilt sich auf 14 Einzelmatten, die mit einer Spannung von $12 \text{ V} \leq U \leq 60 \text{ V}$ betrieben werden. Zur Steuerung der Heizleistung und individuellen Einstellung der einzelnen Heizmatten verfügen die Systeme über integrierte Regler, die über eine Infrarotschnittstelle parametrierbar sind.

Die Drift des verwendeten Roboters des Typs KR 60 HA von Kuka kann bei maximaler Verfahrgeschwindigkeit von $v_f = 1,2 \text{ m/s}$ und bei Prozesszeiten von $t = 4 \text{ h}$ bis zu $\Delta AP_t = 1,4 \text{ mm}$ betragen.

Heizsysteme können die Entscheidung bringen

Für eine reale Betrachtung der Erwärmung und der damit verbundenen Drift wird ein vereinfachter Fräsprozess an einer Prüfgeometrie untersucht. In einer Schleife wurde die Serienfertigung des Fräsbauteils und die damit verbundene realistische temperaturbedingte Fehlerentwicklung simuliert. Die zeitliche Fehlerentwicklung ist in Diagramm 1 dargestellt.

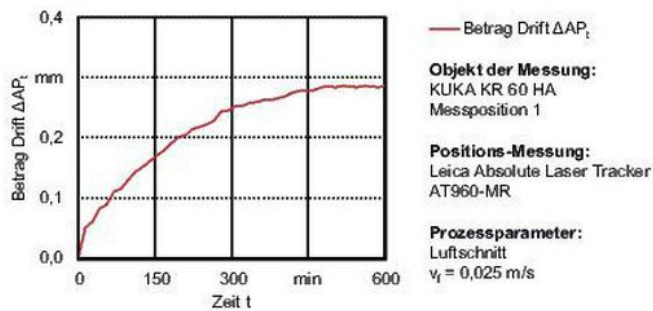


Diagramm 1: Das Bild zeigt die experimentell ermittelte Drift für die Musterbearbeitung.

(Bild: Fraunhofer iPK)

Was die Musterbearbeitung betrifft, so beträgt die maximale Drift $\Delta AP_{t,max} = 0,28$ mm. Dieser Wert wird nach der Zeit $t = 600$ min erreicht. Somit ergibt sich für eine reale Bearbeitung eine deutlich geringere Drift, jedoch eine längere Erwärmungsphase bis zum stationären Zustand.

Für eine reale Bearbeitung kann mit dem Heizsystem der stationäre Zustand bereits nach $t = 20$ min erreicht werden. Dafür wurden zusätzlich zu der Bewegungsschleife der Bearbeitung die Heizmatten am Robotersystem genutzt. Das Ergebnis veranschaulicht Diagramm 2.

Die Zeit, bis zum stationäre Zustand, kann so von $t = 600$ min auf $t = 20$ min und somit auf ein Dreißigstel verringert werden. Das Heizsystem wurde für $t = 11$ min aktiviert und dann abgeschaltet. Im Anschluss kam es zu einem Überschwingen wegen der noch vorhandenen Restwärme im System. Nach kurzer Abkühlung befindet sich das System aber im stationären Zustand. Für reale Prozesse und Bewegungsabläufe kann mithilfe des Heizsystems ein thermisch stabiler Zustand nach der Zeit

Diagramm 2: Die experimentell ermittelte thermische Drift für die Musterbearbeitung mit Heizmatten.

(Bild: Fraunhofer iPK)

$t = 20$ min erreicht werden.

Anhand einer Versuchsreihe wird auch noch eine Bearbeitung ohne Heizsystem simuliert. Das Robotersystem bearbeitet im kalten Zustand ein erstes Bauteil und erwärmt sich

dann in der programmierten Schleife über eine Zeit von $t = 10$ h. Im stationären Zustand wird dann ein weiteres Bauteil gefertigt. Im Anschluss daran werden die beiden Bauteile eingemessen und die Drift betrachtet.

An den geometrischen Formen und der Bohrung in Bild 3 zeigt sich, dass sich das gesamte Fräsbild in Driftrichtung verschiebt. Eine Verzerrung der Formen lässt sich nicht erkennen respektive messtechnisch erfassen.

Kompensation der thermischen Drift für einen Bruchteil der Kosten

Für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Heizsystems wird die Testreihe erneut durchgeführt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min wird ein Referenzbauteil gefertigt. Danach werden die Heizsysteme für $t = 11$ min verwendet und gewartet, bis der stationäre Zustand nach $t = 20$ min erreicht ist. Im stationären Zustand wird ein weiteres Bauteil gefertigt.

Bild 3: Thermisch bedingter Fehler beim Fräsen an ausgewählten Geometrien (a = Kreis, b = Viereck und c = Bohrung) zu den Zeitpunkten $t = 0$ min (grau) und $t = 600$ min (grün).

(Bild: Fraunhofer IPK)

Ein Vergleich der Drift durch das Heizsystem mit dem im Normalbetrieb auftretenden Fehler zeigt, dass die Drift des Heizsystems mit der normalen Erwärmung vergleichbar ist. Mit den Heizmatten erzeugt man einen thermisch bedingten Fehler von $\Delta AP_t = 0,234$ mm in $t = 20$ min.

Die erzielte Fehlerabweichung der Drift der Eigenerwärmung zur beheizten Variante ist nur minimal und beträgt $\Delta AP = 0,04$ mm. Die Investitionskosten (K_I) von bis zu 120 TSD Euro für einen Lasertracker stehen den K_I von rund 5000 Euro für das Oberflächenheizmatten-System gegenüber.

Diese Lösung spart bis zu 97 % der Investitionskosten. Demgegenüber stehen Stromkosten für die Nutzung des Systems (K_S) von rund 0,23 Euro/h. Für den durchgeführten Realversuch waren zum Aufheizen nur $t = 11$ min nötig. Demnach entstehen pro Aufheizung Kosten (K) von 0,04 Euro. Dies bedeutet im Umkehrschluss,

dass erst nach rund 2.875.000 Aufwärmzyklen (z) die Mehrkosten (K_M) von 115 TSD Euro für einen Lasertracker erreicht sind.

Driftkorrektur nur am Anfang des Zerspanungsprozesses nötig

Geht man davon aus, dass in einem normalen 5-Tages-Betrieb, in einem mittelständischen Unternehmen, ein Robotersystem täglich ein Mal aufgeheizt werden muss, gleichen sich die Kosten K nach 2.875.000 Tagen respektive 7877 Jahren aus.

Weiter muss betrachtet werden, dass durch die lange Aufwärmphase der Fehler stetig über einen Arbeitstag von $t = 8$ h zunimmt. Erst nach $t = 10$ h wird aber ein stationärer Zustand erreicht. Somit muss es ohne Heizsystem zwangsläufig innerhalb des Prozesses zu Standzeiten für die Kalibrierung kommen. Dabei kann man von etwa $t_s = 48$ min reiner Kalibrierzeit an einem Arbeitstag von $t = 8$ h ausgehen. Das heißt, in einem Jahr muss mit einem Stillstand (t_s) von 26 Tagen gerechnet werden! Im Vergleich dazu ergibt sich mit Heizen ein Stillstand t_s von 10 Tagen im Jahr. So kann an 16 Tagen mehr im Jahr produziert werden. Das Ergebnis macht das große wirtschaftliche Potenzial der angestrebten Lösung klar.

Das zeigt, dass gezieltes Heizen der Roboterstruktur eine schnellere, wirtschaftlichere und präzisere Fertigung mit dem Roboter ermöglicht. Das entwickelte System versetzt den Roboter schnell in einen thermisch stationären Zustand. Die Drift muss nur am Prozessbeginn korrigiert werden. Dann sind keine weiteren Korrekturen nötig. Vor allem für kleine- und mittelständische Unternehmen ist das eine große Chance, um Robotersysteme für eine exakte und flexible Fertigung zu integrieren. Waren bisher relativ teure, komplizierte Alternativen nötig, um die thermischen Einflüsse zu kompensieren, so ist das neu entwickelte System viel günstiger und einfacher zu bedienen. MM

Literatur

[1] Beyer, L.: Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern. Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik. Hrsg.: Wulfsberg, J., Aachen: Shaker, 2005.

[2] Ehm, A.: Mechanische Bearbeitung mit Industrierobotern in der automobilen Serienproduktion. Darmstadt: PT/TVM. 2014.

[3] Gräser, R.-G.: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern. Forschungsberichte IWB. Hrsg.: Reinhart, G., München: Utz1999.

[4] Mohnke, C.; Reinkober, S.; Uhlmann, E.: Constructive methods to reduce thermal influences on the accuracy of industrial robots. *Procedia Manufacturing* 33 (2019), S. 19 – 26.

[5] Puzik, A.: Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik. IPA-IAO Forschung und Praxis. Hrsg.: Westkämper, E., Heimsheim: Jost-Jetter, 2011.

[6] Reinkober, S.: Fräsbearbeitung von Nickelbasislegierungen mit Industrierobotern. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E., Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2018.

[7] Uhlmann, E.; Reinkober, S.; Mohnke, C.: Individuelle Fertigung durch den Einsatz von Industrierobotern. *wt Werkstatt online* 7/8 (2016) 106, S. 470 – 476.

* Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann ist Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), Dr.-Ing. Julian Polte ist Abteilungsleiter im Bereich Fertigungstechnologien und Christian Mohnke M. Sc. ist dort wissenschaftlicher Mitarbeiter. Weitere Informationen: Ch. Mohnke: Tel. (030) 30006354, christian.mohnke@ipk.fraunhofer.de, www.ipk.fraunhofer.de

(ID:46800057)