

Einsatz bewegungsreduzierender Hybridkinematiken für die Hochgeschwindigkeits- Fräsbearbeitung

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
Universität Bremen

Zur Erlangung des Grades
Doktor- Ingenieur

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Schenck

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß
Prof. Dr.-Ing. Gert Goch

Tag der mündlichen Prüfung: 25. April 2008

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Fertigungseinrichtungen
der Universität Bremen
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß

Christian Schenck

**Einsatz bewegungsreduzierender Hybridkinematiken
für die Hochgeschwindigkeits-Fräsbearbeitung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7475-7

ISSN 1864-578X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Parallelkinematische Werkzeugmaschinen sind seit ihrer Vorstellung Mitte der neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts stark in den Blickpunkt produktionstechnischer Forschung gerückt. Prinzipbedingt können parallelkinematischen Strukturen im Vergleich zu seriell aufgebauten Kinematiken spezifische Vorteile zugeschrieben werden. Diese sind z. B. parallele Kraftleitungswege mit daraus resultierenden geringeren Belastungen der Einzelachsen verbunden mit höherer Dynamik, die Verwendung vieler Gleichteile mit Vorteilen in Materialwirtschaft und Fertigung und die steuerungstechnische Kompensationsmöglichkeit von Fertigungs- und Montagetoleranzen bei Strukturen mit sechs unabhängigen Freiheitsgraden (Hexapoden). Als einer von mehreren Systemnachteilen parallelkinematischer Strukturen ist das ungünstige Verhältnis von Bauraum zu Arbeitsraum anzuführen. Damit würde sich diesen Maschinen zunächst grundsätzlich das äußerst interessante Anwendungsfeld der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Großwerkstücken, z. B. von Integralbauteilen in der Flugzeugindustrie, verschließen. Eine Aufhebung der Arbeitsraumbeschränkung gelingt, wenn man parallele und serielle Teilstrukturen zu Hybridmaschinen kombiniert. Dabei besteht die Möglichkeit, die benötigten Freiheitsgrade der Struktur eindeutig einer Teilkinematik zuzuordnen oder aber die Strukturen mit teilweise redundanten Achskonfigurationen aufzubauen. Dieser Thematik solcher bewegungsredundanten Hybridkinematiken wendet sich die folgende Schrift zu.

Zunächst steht im Vordergrund, die Soll-Bahn des Tool Center Point in geeigneter Weise auf die redundanten Teilstrukturen aufzuteilen. Dies gelingt durch die Entwicklung digitaler Filter auf Grundlage der Waveletpakete-Transformation, die vorzugsweise in der Maschinensteuerung integriert werden.

Ein weiterer Negativaspekt hinsichtlich der bisherigen Verbreitung von parallelkinematischen Werkzeugmaschinen in Industrieunternehmen ist die aufwändige geometrische Kalibrierung. Das vorgestellte Verfahren zur statischen Kalibration mittels neuronaler Netze ist verblüffend einfach in der Handhabung, aber um so überzeugender in den Ergebnissen. Der besondere Wert dieses Verfahrens liegt in der allgemeinen Übertragbarkeit auf Maschinenstrukturen beliebiger Kinematik. An einer realen 5-achsigen Hybridkinematik gelingt es, mit wenigen Iterationsschritten die verbleibende Radiusabweichung beim Kreisformtest um mehr als Faktor 10 zu verringern. Der experimentelle Nachweis der Leistungsfähigkeit von Hybridkinematiken mit redundanten Achsen zeigt, dass durch Überlagerung der Teilbewegungen von Tripod und Kreuztisch ein Radiusfehler erreichbar ist, der kleiner ist als die Einzelfehler der Teilkinematiken. Darüber hinaus können Kreisformtests mit Bahngeschwindigkeiten von ca. 10 m/min mit Fehlern kleiner 20 μm gefahren werden.

Zusammenfassend wird gezeigt, dass sich mit Redundanzen in der Maschinenkinematik z. T. erhebliche Produktivitätspotenziale realisieren lassen. Allerdings muss die Redundanz nicht zwangsläufig eine Hybridbildung zwischen parallelen und seriellen Teilkinematiken zur Folge haben. Vielmehr sind bei vielen realen Bearbeitungsoperationen serielle Kinematiken den Parallelkinematiken überlegen, da diese aufgrund der schlechten Achsauslastung sehr häufig bis an die Ruckgrenze beansprucht werden. Ein Vorteil ergäbe sich erst dann, wenn es gelänge, den zulässigen Ruck deutlich anzuheben.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. STAND DER KENNTNISSE UND ZIELSETZUNG.....	3
3. BAHNAUFSPALTUNG	10
3.1. ANFORDERUNGSPROFIL.....	10
3.2. DEFINITION VON MASCHINENKONZEPTEN.....	11
3.3. ÜBERFÜHRUNG DES PROBLEMS IN DEN FREQUENZBEREICH	13
3.4. AUFSPALTUNG DER SOLLBAHN MIT HILFE DER WAVELETTTRANSFORMATION	16
3.4.1. <i>Multiskalenanalyse der Bearbeitungstrajektorie</i>	<i>16</i>
3.4.2. <i>Definition eines Bahntrennungskennwertes.....</i>	<i>19</i>
3.4.3. <i>Untersuchung der Bahnaufspaltung an ausgewählten Beispielen.....</i>	<i>22</i>
3.5. BEREITSTELLUNG EINES DIGITALEN FILTERS.....	25
3.5.1. <i>Konstruktion des Bahnaufspaltungsfilters mit Wavelet- Paketen</i>	<i>25</i>
3.5.2. <i>Numerische Optimierung der Trennschärfe.....</i>	<i>30</i>
3.5.3. <i>Eigenschaften der Filter.....</i>	<i>32</i>
4. KINEMATISCHER VERGLEICH VON MASCHINENKONZEPTEN.....	38
4.1. DEFINITION VON SKALIERBAREN BASISKINEMATIKEN	39
4.2. BEARBEITUNGSZEITBERECHNUNGEN MIT IDEALISIRTER ANTRIEBSDYNAMIK.....	40
4.2.1. <i>Beschreibung der Rechenalgorithmen</i>	<i>40</i>
4.2.2. <i>Statistische Größen zur Beurteilung der Sollbahnen</i>	<i>44</i>
4.2.3. <i>Relevanz der Bauteilorientierung im Arbeitsraum.....</i>	<i>46</i>
4.2.4. <i>Einfluss der dynamischen Parameter auf die Prozesszeit.....</i>	<i>49</i>
4.2.5. <i>Einfluss der Koordinatentransformation auf die Prozesszeit</i>	<i>52</i>
4.2.6. <i>Einfluss der Bahnaufspaltung auf die Prozesszeit</i>	<i>58</i>
4.3. EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG DER BEARBEITUNGSZEITSIMULATIONEN	63
4.3.1. <i>Vergleichsmessungen an einer einzelnen Vorschubachse</i>	<i>63</i>
4.3.2. <i>Vergleichsmessung an einem Bearbeitungszentrum</i>	<i>65</i>
5. AUSFÜHRUNG EINER HYBRIDKINEMATISCHEN WERKZEUGMASCHINE ..	67
5.1. EXPERIMENTELLER AUFBAU	67
5.1.1. <i>Mechanischer Aufbau.....</i>	<i>67</i>
5.1.2. <i>Steuerungskonzept.....</i>	<i>71</i>
5.2. STATISCHE KALIBRIERUNG MIT NEURONALEN NETZEN	72
5.2.1. <i>Funktionsweise Neuronaler Netze.....</i>	<i>73</i>
5.2.2. <i>Strategie zum Einsatz und Auswahl eines Neuronalen Netzes</i>	<i>74</i>
5.2.3. <i>Bestimmung der Gewichte in der Lernphase</i>	<i>77</i>
5.2.4. <i>Einsatz des NN</i>	<i>78</i>
5.2.5. <i>Kalibrierung der Plattform mit reduziertem Eigengewicht</i>	<i>79</i>
5.2.6. <i>Kalibrierung des Kreuztisches</i>	<i>80</i>
5.3. NACHWEIS DER LEISTUNGSSTIEGERUNG DURCH KREISFORMTESTS	82
6. ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK	83
7. LITERATUR.....	88