

Diss. ETH No. 18382

Geometric and Dynamic Evaluation and Optimization of Machining Centers

A dissertation submitted to the
ETH ZÜRICH

for the degree of
Dr. sc. ETH Zürich

presented by
SERGIO BOSSONI
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born February 11th 1976
citizen of Italy and Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. K. Wegener, examiner
Prof. Dr. P. Hora, co-examiner
Dr. W. Knapp, co-examiner
Dr. S. Weikert, co-examiner

2009

Abstract

The geometric and dynamic properties of machining centers are both very important for productive precision manufacturing.

The first part of this thesis addresses the fact that no standardized test piece is available for testing of simultaneous 5-axis machining, which is directly applicable to different machine tool designs.

The cone geometry is derived to best meet the defined requirements of an ideal 5-axis test piece. How the resulting movements of the machine axes depend on the parameters of the test piece is derived in an analytical way and interpreted for practical usage. The resulting movements of the rotary axes are shown to be the same for any machine setup with three orthogonal linear axes and two orthogonal rotary axes (the nominal rotary axes are assumed to cross in one point). The movements of the linear axes on the other hand depend on whether the rotary axes are on the tool or on the workpiece side.

Parameters of proposed test pieces are derived for the three types of machine setups. A specific example of a test piece setup is presented for a characteristic machining center with a tilting rotary table setup. The calculation of the influence of geometric machine errors on the form error of the test piece geometry is explained and the resulting influences are interpreted for the presented example.

For the interpretation of the influence of the test piece parameters on the movements of the machine axes and for the analysis and interpretation of the influences of geometric errors of the test piece geometry novel types of visualization are presented. The entire analysis is also applicable for direct measurements (i.e. without test pieces) of the errors of the machine movements.

In the second part of this thesis the evaluation and optimization of the dynamic properties of machining centers is addressed for the early development phase.

The modeling process of a machining center with the rigid body approach is demonstrated with illustrations from a custom simulation environment. Through a comparison with

experimental results the calculation method is verified and the possibilities and limitations of the method are shown.

Evaluations of the dynamic reactions of machining centers to external forces and to inertial loads are both presented. The importance and possibilities of an analysis of the reactions of the displacements of a machine not only parallel but also orthogonal to the direction of the excitation (cross-talk) is demonstrated.

For the modeling process in the early development phase different recommendations can be derived. In the presented comparison of two alternative machine setups, the possibilities and advantages of being able to calculate the dynamic properties with a very efficient rigid body model become clear. Among other things, it allows to analyze the calculated properties in multiple positions of the tool center point throughout the working range of a machine. The analysis of the distribution with the presented form of visualization is shown to give important additional information for the evaluation process.

The general conclusion of the second part of this thesis is that a rigid body analysis is very well suited for the analysis of the dynamic properties of machining centers when looking at the machine setup and not at local details of components. This is especially the case in the early development phase.

This work was also published as “Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 672” [1].

Zusammenfassung

Sowohl geometrische als auch dynamische Eigenschaften von Werkzeugmaschinen sind sehr wichtig für produktive Präzisionsfertigung.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Tatsache angegangen, dass bis zum heutigen Zeitpunkt kein normiertes Prüfwerkstück für simultane 5-Achs Fräsbearbeitung existiert, das für verschiedene Maschinenarten direkt anwendbar ist.

Um den Anforderungen an ein ideales 5-Achs Prüfwerkstück gerecht zu werden wird die Kegelform als geeignetste Geometrie hergeleitet. Was für Achsbewegungen der Maschine dafür notwendig sind wird analytisch berechnet und für die praktische Anwendung interpretiert. Es kann gezeigt werden, dass die erforderlichen Bewegungen der Drehachsen für alle Maschinenarten mit drei orthogonalen Linearachsen und zwei sich nominell kreuzenden, orthogonalen Drehachsen gleich sind. Die erforderlichen Bewegungen der Linearachsen andererseits sind abhängig davon ob die Rotationsachsen Werkzeug- oder Werkstückseitig angeordnet sind.

Die vorgeschlagenen Prüfwerkstückparameter werden für die drei Maschinentypen hergeleitet. Ein konkretes Beispiel eines Prüfwerkstückaufbaus wird für eine Werkzeugmaschine mit Dreh-/Schwenktisch Kinematik dargestellt. Die Bestimmung der Einflüsse geometrischer Maschinenfehler auf die Formfehler des Prüfwerkstückes wird erläutert und die resultierenden Zusammenhänge für das gewählte Beispiel interpretiert.

Für die Interpretation der Einflüsse verschiedener Parameter des Prüfwerkstückes auf die erforderliche Bewegung der Maschinenachsen und für die Interpretation der Einflüsse geometrischer Maschinenfehler auf die Formfehler des Prüfwerkstückes werden neuartige Darstellungsformen präsentiert. Die Überlegungen zum Prüfwerkstück sind auch für direkte Messungen (d. h. ohne Prüfwerkstück) auf der Werkzeugmaschine anwendbar.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die Beurteilung und Optimierung der dynamischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen in der frühen Entwicklungsphase behandelt.

Der Modellierungsprozess von Werkzeugmaschinen mittels Starrkörperansatz mit einer ei-

genen Simulationsumgebung wird dargestellt. Anhand des Vergleichs mit Resultaten einer experimentellen Modalanalyse werden die Resultate der Starrkörperberechnungen verifiziert sowie die Möglichkeiten und Grenzen der Methode gezeigt.

Auswertungen der dynamischen Reaktionen von Werkzeugmaschinen auf externe Kräfte und Beschleunigungslasten werden behandelt. Die Bedeutung und die Möglichkeiten einer zusätzlichen Analyse der Reaktionen in die Richtungen quer zur Anregungsrichtung (cross-talk) wird verdeutlicht.

Für den Modellierungsprozess in der frühen Entwicklungsphase resultieren verschiedene Empfehlungen. Im dargestellten Vergleich zweier Maschinenkonzepte werden die Möglichkeiten und Vorteile einer sehr effizienten Berechnung der dynamischen Eigenschaften mittels Starrkörperansatz verdeutlicht. Unter anderem erlaubt er die Eigenschaften in einer Vielzahl von Werkzeugpositionen im Arbeitsraum der Maschine zu berücksichtigen. Eine geeignete Repräsentation der Verteilung der Eigenschaften wird gezeigt. Sie erlaubt wichtige zusätzliche Erkenntnisse für die Beurteilung.

Die allgemeine Schlussfolgerung des zweiten Teiles dieser Arbeit ist, dass der Starrkörperansatz sehr gut geeignet ist für die Beurteilung der dynamischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen mit einem Fokus auf den Gesamtaufbau und nicht auf die Details einzelner Komponenten. Dies ist vor allem in der frühen Entwicklungsphase der Fall.

Diese Arbeit wurde auch publiziert als "Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 672" [1].