

Diss. ETH No. 19801

Parallelization of Design and Simulation: Virtual Machine Tools in Real Product Development

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Dr. sc. ETH Zürich

presented by
PASCAL MAGLIE
M. Sc. Mechanical Engineering, EPFL
born August 28th 1980
citizen of Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. K. Wegener, examiner
Dr. P. Pahud, co-examiner
Dr. G. Kress, co-examiner

2012

Abstract

A machine tool is a mechatronic system, whose complexity and precision requirements, necessary to the current strategic and technologic differentiation in the global market, are becoming increasingly challenging. The design of machine tool structures is subject to the usual conflicts present in product development: high productivity and efficiency require shorter machining times, leading to the construction of lightweight axes, in order to achieve higher accelerations. On the other hand, the increasing requirements regarding surface quality and precision necessitate high static and dynamic stiffness, leading inevitably to larger masses.

The combination of a multitude of contradicting conditions requires detailed design criteria, whose reliability is adapted to the complexity of modern multi-axis machine tools, in order to reduce the number of real prototypes before the series production. The precept of the *right first time* has become indispensable in the reality of Swiss small and medium-sized enterprises, because production is often characterized by small series, in order to offer customized solutions to the client.

These aspects have led to the increasing interest of the machine tool industry for simulation. The systematic integration of detailed virtual studies of the structural dynamic behavior into the design process aims at simultaneously improving the product quality and shortening the time to market launch. To achieve this, there is a need for tools and guidelines embedded into the development concept, without impinging on existing procedures.

Hence, during the work on the present thesis, industrial applicability represents a constant priority. The focus is set on five main issues: the modeling of coupling elements, the automation of simulation models creation, the reduction of computation times, the flexibility of the analyses and the relevance of the obtained results.

A test-bed is developed for the targeted investigation of linear guiding systems properties in various configurations. This helps to establish how the specifications provided by the component manufactures are best integrated into a finite element model. Among different variants, the optimal modeling guidelines with regard to the elasticity module of the carriages and rails, as well as the boundary conditions at the coupling interfaces are determined. From a selection of frequency responses measured on the same test-bed, an efficient identification process for the guideway damping coefficients is illustrated with the help of a finite element model. The validation of the models is then performed on two multi-axis machines, a tool-grinding center and a machining center. Both structures are loaded statically and dynamically. The deformations, resp. the harmonic responses resulting from the measurements and from the simulations are compared and demonstrate an excellent concordance of results. The method is also applied to the bearings of spindles and rotary axes and to the ballscrews.

The computation time of finite element models is too high for them to be realistically integrated into the design process, which usually requires many simulations in order to improve various aspects of the structure. To support the use of simulation tools at the different design stages, two methods aiming to reduce the model size are discussed: the first is of physical nature and reproduces the structural behavior by means of a rigid body model. The second is based on a mathematical order reduction of the matrices generated by the finite element model.

A stand-alone program is developed and serves as an efficient environment for rigid body simulations. By means of static, modal and harmonic analyses focusing on the relative deviations between the tool tip (TCP: Tool Center Point) and the workpiece center (WPP: Workpiece Point), it is possible to explore the influence of selected parameters on the dynamic behavior of the structure. A sensitivity and a parametric analysis enable the determination of the optimal kinematic configuration by acting on the fundamental characteristics of the machine. With help of the *Strain Energy Ratio*, defining the ratio between the energy stored in the coupling elements and the deformation energy of the structure, a scaling factor for the coupling stiffness coefficients is derived. Its role is to compensate for the compliance loss at the interfaces between the rigid bodies of the model. The objective is to establish rules which are valid for any machine tool and for all loading conditions, in order to improve the reliability of rigid body analyses.

In the next phase, a higher complexity level is necessary so as to generate advanced models including the axis controls. A toolbox, composed of a series of grouped Matlab macros, is developed to perform mechatronic analyses of the entire machine structure. A dimensional reduction by means of the program *MOR for ANSYS* is applied to the finite element mat-

rices of the different volumes and the resulting systems are subsequently automatically assembled, connected by the coupling elements and completed by the control algorithms. The validity of the method is first verified by comparing the results of the original finite element simulation and the corresponding reduced order simulation. The cross-talk deviations on a real two-axis machine are investigated by means of measurements. The experimental conditions are then reproduced in the compact model and the obtained results are confronted with the measurements. The observed concordance is very promising for further applications of reduced coupled simulations of machine tools in the time-domain.

The concept of *Structure Gateway Interface* (SGI) is introduced so as to centralize the creation of the various simulation models, including the implementation of the coupling parameters. This central platform based on ANSYS Workbench relies on a discretized geometry of a structure with an arbitrary number of linear and rotary axes and spindles. A series of macros uses the predefined components of the volumes and interfaces in order to automatically build the complete machine tool model. After these pre-processing operations, three options are available: simulate the unaltered model in ANSYS (option *ANS*), export the mechanical and geometrical data required for simulation in the rigid body stand-alone program (option *RBS*) or export the matrices which, after order reduction, are used to perform the mechatronic simulation in Matlab with the dedicated toolbox (option *CRS*).

Kurzfassung

Eine Werkzeugmaschine ist ein mechatronisches System, dessen Anforderungen an Komplexität und Genauigkeit, bedingt durch die aktuell notwendige strategische und technologische Differenzierung im globalen Markt, immer anspruchsvoller werden. Die Auslegung von Werkzeugmaschinen-Strukturen kommt nicht um die Konflikte herum, die in der üblichen Produktentwicklung vorkommen: Hohe Produktivität und Effizienz verlangen kürzere Werkstückbearbeitungszeiten, was die Konstruktion von leichten Achsen erfordert, um hohe Beschleunigungen erreichen zu können. Andererseits benötigen die wachsenden Anforderungen an Oberflächenqualität und Genauigkeit hohe statische und dynamische Steifigkeit, was unvermeidbar zu grösseren Massen führt.

Die Kombination einer Vielzahl von widersprechenden Bedingungen erfordert detaillierte Design-Kriterien, deren Zuverlässigkeit für die Komplexität moderner mehrachsiger Werkzeugmaschinen geeignet ist, um die Anzahl realer Prototypen vor der Serienfertigung zu minimieren. Das Motto des *right first time* ist in den Realitäten der Schweizerischen kleinen und mittleren Unternehmen unumgänglich geworden, weil die Produktion sich oft durch kleine Serien auszeichnet, um den Kunden massgeschneiderte Lösungen anzubieten.

Diese Aspekte begründen das zunehmende Interesse der Werkzeugmaschinenindustrie für die Simulation. Die systematische Integration von umfassenden virtuellen Analysen des dynamischen Verhaltens im Designprozess zielt darauf ab, sowohl die Produktqualität zu verbessern, als auch die Markteinführungszeit zu verkürzen. Um dies zu erreichen müssen allerdings Werkzeuge und Richtlinien vorhanden sein, die vollkommen im Entwicklungskontext eingebunden sind, ohne die schon existierenden Abläufe durcheinanderzubringen.

Somit stellt während den Entwicklungsarbeiten in der vorliegenden Doktorarbeit die industrielle Anwendbarkeit stets eine Priorität dar. Der Fokus liegt auf fünf Hauptpunkten: Die Modellierung von Kopplungselementen, die Automatisierung der Erstellung der Simulationsmodelle, die Reduktion der Rechenzeiten, die Flexibilität der Analysen und die Relevanz der gewonnenen Resultate.

Ein Prüfstand wird für die gezielte Untersuchung der Eigenschaften von Wälzführungseinheiten in verschiedenen Anordnungen entwickelt. Es wird festgelegt, wie die Steifigkeitsangaben der Komponentenhersteller am besten in ein Finite-Elemente-Modell integriert werden. Unter verschiedenen Varianten werden die optimalen Modellierungsrichtlinien bezüglich der Elastizitätsmodule der Wagen und der Schienen und der Randbedingungen der Kopplungsschnittstellen bestimmt. Mittels einer Auswahl von gemessenen Frequenzantworten auf dem gleichen Prüfstand wird ein effizientes Verfahren zur Identifikation von Dämpfungskoeffizienten der Führungen mit Hilfe eines reduzierten Finite-Elemente-Modells erläutert. Die Validierung der Modelle erfolgt dann an zwei mehrachsigen Werkzeugmaschinenstrukturen, einer Werkzeugschleifmaschine und einem Fräsbearbeitungszentrum. Hierbei werden die Strukturen statisch und dynamisch belastet. Die Verformungen, bzw. die Frequenzgänge aus Messung und Simulation werden miteinander verglichen, woraus eine sehr gute Übereinstimmung resultiert. Die Validierungsmethode wird dabei auch auf Rotationslager von Spindeln und Rotationsachsen und auf Kugelgewindetriebe angewandt.

Die Rechenzeit von Finite-Elemente-Modellen ist zu hoch, um in den Entwicklungsprozess konkret integriert werden zu können, weil eine Vielzahl Simulationen üblich erforderlich ist, um diverse Aspekte der Struktur zu verbessern. Um die Anwendung von Simulationen während den verschiedenen Stadien der Entwicklung zu unterstützen, werden zwei Methoden zur Reduktion der Größe des Modells diskutiert: die erste ist physikalisch motiviert und bildet das Strukturverhalten als Starrkörpermodell ab. Die zweite besteht darin, eine mathematische Ordnungsreduktion der Systemmatrizen durchzuführen, die aus dem Finite-Elemente-Modell generiert werden.

Ein Stand-alone Programm wird entwickelt und dient als Umgebung für Starrkörpersimulationen. Anhand von statischen, modalen und harmonischen Analysen, die auf die relativen Verlagerungen zwischen Werkzeugspitze (TCP: Tool Center Point) und Werkstück Mittelpunkt (WPP: Workpiece Point) fokussieren, wird das dynamische Strukturverhalten untersucht. Eine Sensitivitätsstudie und eine parametrische Studie erlauben darauf, die optimale kinematische Konfiguration bezüglich den wesentlichen Parametern der Maschine zu bestimmen. Die Kennzahl *Strain Energy Ratio* definiert das Verhältnis zwischen der in den Kopplungselementen eingelagerten potentiellen Energie und der in der Struktur gespeicherten Deformationsenergie. Daraus wird insbesondere ein Anpassungsfaktor bestimmt, um die Steifigkeitswerte der Verbindungsstellen für Starrkörpermodelle zu skalieren. Er zielt darauf ab, den Nachgiebigkeitsverlust an den Schnittstellen zwischen den starren Körpern des Modells auszugleichen. Das Ziel ist somit, Regeln zu ermitteln, um die Zuverlässigkeit von Starrkörperanalysen für beliebige Werkzeugmaschinen und bei beliebigen Lastfällen zu erhöhen.

In der darauffolgenden Phase ist ein höherer Komplexitätsgrad erforderlich, um fortgeschrittene Modelle inklusive Achsenregelung zu generieren. Eine Toolbox, bestehend aus einer Reihe von Matlab Makros, wird entwickelt, um mechatronische Simulationen von gesamten Maschinenstrukturen durchzuführen. Eine dimensionale Reduktion wird mit Hilfe des Programms *MOR for ANSYS* auf die Finite-Elemente Matrizen der einzelnen Volumen angewandt und die resultierenden Systeme werden dann auf automatisierter Weise zusammengesetzt, durch die Kopplungselemente verbunden und um die Regelungsalgorithmen ergänzt. Die Gültigkeit der Methode wird zuerst geprüft, indem die Resultate von originalen Finite-Elemente Simulationen und von entsprechend ordnungsreduzierten Simulationen verglichen werden. Anhand von Messungen, werden Cross-Talk Abweichungen auf einer realen zweiachsigen Maschine untersucht. Die experimentellen Bedingungen werden im kompakten Modell abgebildet und die gewonnenen Simulationsergebnisse mit den Resultaten der Messungen gegenübergestellt. Die gute festgestellte Übereinstimmung ist für weitere Anwendungen von reduzierten gekoppelten Simulationen von Werkzeugmaschinen im Zeitbereich sehr erfolgversprechend.

Das Konzept von *Structure Gateway Interface* (SGI) wird zur Vereinheitlichung der Erstellung der verschiedenen Modelle und zur Implementierung der Kopplungsparameter entwickelt. Diese ANSYS Workbench -basierte zentrale Plattform beruht auf einer diskretisierten Geometrie einer Struktur mit beliebig vielen Linear- und Rotationssachsen und Spindeln. Eine Reihe von Makros verwenden vordefinierte Komponenten der Volumen und Schnittstellen, um das gesamte Modell der Werkzeugmaschine automatisch zu erstellen. Nach diesen Pre-processing Operationen stehen drei Optionen zur Verfügung: Das Modell in ANSYS unverändert simulieren (Option *ANS*), die mechanischen und geometrischen Eigenschaften exportieren, die für die Simulation im Stand-alone Starrkörperprogramm erforderlich sind (Option *RBS*) oder die Matrizen exportieren, die nach Ordnungsreduktion, für die mechatronische Simulation in Matlab, mit der dafür vorgesehenen Toolbox, verwendet werden (Option *CRS*).

Résumé

Une machine-outil est un système mécatronique dont la complexité et la précision suivent des tendances toujours plus exigeantes, nécessaires à une différenciation stratégique et technologique dans le marché global actuel. La conception des structures de machines-outils n'échappe pas aux conflits présents habituellement dans le développement de produits: haute productivité et efficacité exigent des temps de passage de la pièce à usiner aussi courts que possible, ce qui se traduit par la nécessité de concevoir des axes légers, pouvant être soumis à d'importantes accélérations. D'un autre côté, les exigences sur la qualité de surface et la précision revues indéfiniment à la hausse requièrent haute rigidité statique et dynamique, ce qui entraîne inévitablement des masses plus élevées.

La combinaison d'une multitude de contraintes souvent contradictoires fait appel à des critères de design, dont la fiabilité doit être à la hauteur de la complexité des machines-outils multi-axes modernes, afin de minimiser le nombre de prototypes réels avant la mise en série. La devise du *right first time* est devenue incontournable dans les réalités des petites et moyennes entreprises suisses, vu que la production est souvent caractérisée par des séries limitées, pour offrir aux clients des solutions sur mesure.

Ces aspects justifient l'intérêt croissant que porte l'industrie des machines aux outils de simulation. L'intégration systématique de l'étude virtuelle détaillée du comportement structurel dans le processus de conception a pour but d'en améliorer la qualité, tout en abrégant le temps nécessaire à la mise sur le marché. Pour atteindre cela, il est nécessaire d'avoir à disposition des outils et des directives qui s'insèrent dans le contexte de développement, sans en bouleverser les procédures déjà en vigueur.

C'est ainsi que tout au long des développements dans la présente thèse, l'applicabilité au niveau industriel constitue constamment une priorité. L'accent est mis sur cinq points principaux: la modélisation des éléments de couplage, l'automatisation de l'élaboration des modèles de simulation, la réduction des temps de calcul, la flexibilité des analyses et la pertinence des résultats obtenus.

Un banc d'essai est développé pour l'étude ciblée des propriétés des guidages linéaires à corps roulants. Il est établi comment intégrer les valeurs des rigidités fournies par les fabricants des composants dans un modèle éléments finis. Parmi différentes variantes, les règles de modélisation optimales concernant le module d'élasticité des chariots et des rails, ainsi que les caractéristiques des contraintes aux interfaces sont déterminées. A partir d'une sélection de réponses en fréquence mesurées sur le même banc d'essai, un procédé efficace d'identification des coefficients d'amortissement dans les guidages à l'aide d'un modèle éléments finis est illustré. La validation des modèles est ensuite effectuée sur deux machines multi-axes, dont un centre de meulage d'outils et un centre d'usinage. Les deux structures sont soumises à des charges statiques et dynamiques. Les déformations, respectivement les réponses harmoniques découlant des mesures et des simulations sont comparées, démontrant une très bonne concordance des résultats. Par le biais de ces analyses, la méthode de validation est en outre appliquée aux paliers rotatifs des broches et des axes de rotations et aux vis à billes.

Le temps de calcul des modèles éléments finis est trop élevé pour pouvoir être concrètement intégré dans le processus de conception, qui requiert en général une multitude de simulations servant à améliorer divers aspects de la structure. Pour favoriser l'emploi d'outils de simulation pendant les différents stades de la conception, deux méthodes de réduction de la taille des modèles sont discutées: la première est de nature physique et reproduit le comportement de la structure à l'aide d'un modèle corps-rigide. La deuxième se base sur une méthode mathématique de réduction dimensionnelle des matrices générées par le modèle éléments finis.

Un programme stand-alone est développé et sert d'environnement pour simulations corps-rigide. A l'aide d'analyses statiques, modales et harmoniques focalisant sur les déviations relatives entre la pointe de l'outil (TCP: Tool Center Point) et le centre de la pièce (WPP: Workpiece Point), il est possible d'explorer l'impact de paramètres sélectionnés sur le comportement dynamique de la structure. Une étude de sensibilité et une étude paramétrique permettent d'établir la configuration cinématique optimale en agissant sur les caractéristiques essentielles de la machine. A l'aide du *Strain Energy Ratio*, définissant le rapport entre l'énergie potentielle emmagasinée dans les éléments de couplage et l'énergie de déformation dans la structure, un facteur d'ajustement des coefficients de rigidité dans les joints pour les modèles corps-rigide est déterminé. Son rôle est de compenser la perte d'élasticité aux interfaces entre les corps rigides du modèle. L'objectif est ainsi d'émettre une règle valable pour toute machine-outil et dans tous les cas de charge envisageables pour conférer une meilleure fiabilité aux analyses corps-rigide.

Dans la phase suivante, un degré de complexité plus élevé est nécessaire pour générer des modèles plus avancés incluant la commande des axes. Une toolbox, composée d'une série de macros Matlab, est développée pour effectuer des simulations mécatroniques de l'entière structure des machines. Les matrices éléments finis des différents volumes sont soumises à une réduction dimensionnelle à travers le programme *MOR for ANSYS* et les systèmes résultants sont assemblés, interconnectés par les éléments de couplage et complétés par les algorithmes de commande, le tout de manière hautement automatisée. La validité de la méthode est tout d'abord vérifiée en comparant les résultats des simulations éléments finis originales et des simulations réduites correspondantes. En se basant ensuite sur des essais, les déviations dues au cross-talk sur une machine réelle deux-axes sont étudiées. Les conditions expérimentales sont reproduites dans le modèle compact et les résultats obtenus sont confrontés avec les mesures. La bonne correspondance constatée est très prometteuse dans l'optique d'ultérieures applications de simulations couplées réduites de machines-outils.

Le concept de *Structure Gateway Interface* (SGI) est introduit pour centraliser l'élaboration des différents modèles, y compris l'implémentation des paramètres de couplage. Cette plateforme centrale basée sur *ANSYS Workbench* s'appuie sur une géométrie discrétisée d'une structure avec un nombre quelconque d'axes linéaires et rotatifs et de broches. Une série de macros utilise des composants prédéfinis des volumes et interfaces pour construire automatiquement le modèle complet de la machine-outil. Au terme de ces opérations de pre-processing, trois options sont à disposition: simuler le modèle tel quel dans ANSYS (option *ANS*), exporter les données mécaniques et géométriques requises pour la simulation dans le programme stand-alone corps-rigide (option *RBS*) ou exporter les matrices, qui après réduction, sont utilisées pour effectuer la simulation mécatronique dans Matlab à l'aide de la toolbox prévue à cet effet (option *CRS*).