

Bibliografische Beschreibung

Richter, Markus:

Virtual Reality-unterstützte Optimierung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Chemnitz, 2012.

194 Seiten

63 Abbildungen

36 Tabellen

127 Quellen

4 Anlagen

Referat:

Die experimentelle Modalanalyse (EMA) gehört bei Werkzeugmaschinen für die Beschreibung des strukturdynamischen Verhaltens seit Jahren zum Stand der Technik. Ergebnisse sind die Eigenfrequenzen, modalen Dämpfungen und Eigenschwingformen (modale Parameter), auf deren Basis die Verantwortlichen eine Schwachstellenanalyse durchführen sowie evtl. erforderliche konstruktive Verbesserungsmaßnahmen (sog. Strukturmodifikationen) für das untersuchte Produkt oder dessen Nachfolgemodell erarbeiten müssen.

Mit dem erweiterten Workflow zur Virtual Reality (VR)-unterstützten Modalanalyse erfolgt im Hinblick auf die Optimierung von Werkzeugmaschinen die Verbindung der experimentellen Eigenschaftsanalyse mit der Virtuellen Realität. Aufgezeigt wird, wie VR-Technologien eine EMA vor, während und nach der Messung unterstützen. Durch die Implementierung von Algorithmen zur direkten und inversen Strukturmodifikation in eine VR-Szene können bei der Auswertung einer EMA geeignete Optimierungsmaßnahmen mit allen Beteiligten in einer Arbeitsumgebung quantitativ beurteilt und gemeinsam festgelegt werden.

Schlagwörter:

Werkzeugmaschine, Virtuelle Realität, Experimentelle Modalanalyse, Strukturmodifikation

Bibliografic Notes

Richter, Markus:

Virtual reality assisted optimization of the dynamic behaviour of machine tools

Doctoral thesis at the Faculty of Mechanical Engineering at Chemnitz University of Technology, Institute for Machine Tools and Production Processes, Chemnitz, Germany, 2012.

194 pages

63 figures

36 tables

127 references

4 appendices

Abstract:

The experimental modal analysis (EMA) is a state of the art method for the characterization of the structural dynamic behaviour of machine tools. Results are the eigenfrequencies, modal damping values and mode shapes (modal parameters). Based on these data responsible persons have to perform a weak-point analysis in order to decide on improvement measures (so-called structural dynamic modifications) for the investigated product or follow-up machines.

With respect to the optimization of machine tools, the extended workflow for virtual reality (VR)-assisted modal analysis allows the connection of experimental property analysis and virtual reality. It is shown how VR technologies can support an EMA prior to, during and after the measurement. By the implementation of algorithms for the direct and inverse structural dynamics modification within a VR scene all persons involved are enabled to determine applicable and quantifiable optimization steps in one working environment.

Keywords:

machine tool, virtual reality, experimental modal analysis, structural dynamic modification

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	13
Verzeichnis der Formelzeichen	17
1 Einleitung	23
2 Stand der Technik	27
2.1 Modalanalyse bei Werkzeugmaschinen	27
2.1.1 Mathematische Grundlagen	27
2.1.2 Experimentelle Modalanalyse	35
2.1.3 Rechnerische Modalanalyse und Modellverbesserung	38
2.1.4 Strukturmodifikationen zur Beeinflussung des dynamischen Ver- haltens	39
2.2 VR-Technologien im Maschinenbau	41
2.2.1 Virtuelle Realität	41
2.2.2 Praktische Anwendungen	42
2.2.3 Forschungsarbeiten mit produktionstechnischem Hintergrund	44
3 Aufgabenstellung und Zielsetzung	49
3.1 Fazit zum Stand der Technik	49
3.2 Vorgehensweise	52
4 VR-unterstützte Modalanalyse bei Werkzeugmaschinen	55
4.1 Erweiterung bestehender Workflows	55
4.2 Datenanalyse und Strukturierung	62
4.3 Visualisierungs- und Interaktionsalgorithmen	66
4.3.1 Genutzte VR-Software	66
4.3.2 VR-Visualisierung von Eigenschwingformen	68
4.3.3 Auswahl von Messpunkten	73

5	Parametrische Identifikation von Startmodellen	75
5.1	Bewertung der experimentell ermittelten Ausgangsdaten	75
5.2	Möglichkeiten zur Identifikation von Systemmatrizen	78
5.2.1	Struktur der Systemmatrizen	80
5.2.2	Modellbildung und -anpassung	84
5.3	Demonstrator Doppel-T-Träger	86
5.3.1	Messtechnische Untersuchungen	86
5.3.2	Rechnerische Modalanalyse	90
5.3.3	Modellabgleich	93
6	VR-unterstützte Strukturmodifikation	101
6.1	Strukturmodifikationsrechnung bei Systemen mit unvollständigen Modalinformationen	101
6.1.1	Ausgangssituation	101
6.1.2	Direktes und inverses Modifikationsproblem	102
6.2	Strukturmodifikationen an Drahtgittermodellen	107
6.2.1	Visualisierung an Fallbeispielen	107
6.2.2	Ingenieurmäßige VR-Lösungsansätze	112
6.3	Interaktionsfähige Modifikationsrechnung und Ergebnisvisualisierung	114
6.3.1	Programmtechnische Umsetzung	114
6.3.2	Datenaustausch zur Strukturmodifikationsrechnung	116
7	Verifizierung	123
7.1	Strukturmodifikation am Doppel-T-Träger	123
7.1.1	Anwendungsbeispiel zum direkten Modifikationsproblem	123
7.1.2	Anwendungsbeispiel zum inversen Modifikationsproblem	130
7.2	Berücksichtigung flächiger Substrukturen	136
7.3	Strukturmodifikation an einem Bearbeitungszentrum	146
7.3.1	Identifikation des Basissystems	146
7.3.2	Rechnerische Modalanalyse und Modellabgleich	151
7.3.3	Beispiele zur direkten Strukturmodifikation	157
7.4	Diskussion der Ergebnisse und weitere Handlungsfelder	161
8	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Literaturverzeichnis	171
	Anlagen	181
	Anlagenverzeichnis	181

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vorgehensweise bei einer experimentellen Modalanalyse	36
2.2	Prinzipielles Vorgehen bei der rechnerischen Modalanalyse	38
2.3	Modellbezogene Modifikationsrechnung	40
2.4	VR-unterstütztes Produktmarketing von Werkzeugmaschinen	43
2.5	Forschungslösungen für innovative Entwicklungswerkzeuge	46
2.6	VR-Visualisierung von messtechnisch erfassten Energieflüssen	48
3.1	Experimentelle Modalanalyse und Strukturmodifikation	50
3.2	Strukturmodifikationsrechnung mit gemessenen modalen Parametern	53
4.1	Workflow zur VR-unterstützten Modalanalyse	56
4.2	Terrestrisches Laserscanning	57
4.3	VR-Visualisierung von Produktdaten verschiedener Quellsysteme	58
4.4	VR-unterstützte Definition von Messpunkten	59
4.5	Datentechnischer Workflow zur VR-unterstützten Modalanalyse	63
4.6	Normale und komplexe Eigenschwingformen	65
4.7	COVISE-Netz zur VR-Darstellung eines farbigen Volumenkörpers	67
4.8	Allgemeine Belegung der Ein- und Ausgänge von COVISE-Modulen	67
4.9	Schwingung eines Messpunktes im Raum	71
4.10	VR-Visualisierung einer Eigenschwingform in COVISE	72
4.11	Optisches Trackingsystem	73
4.12	Auswahl und Selektion von Messpunkten am VR-Drahtgittermodell	74
5.1	Berücksichtigung des Abtasttheorems in PULSE LabShop	76
5.2	Freiheitsgrade an einem 3D-Balkenelement mit beliebigem Querschnitt	80
5.3	Benachbarte Messpunkte in Drahtgittermodellen	83
5.4	Versuchsstand für Schwingungsuntersuchungen am Doppel-T-Träger	87
5.5	Querschnitt und Parameter des untersuchten Doppel-T-Trägers	87
5.6	Messpunkte bei der experimentellen Modalanalyse des Doppel-T-Trägers	88
5.7	Synthetisierte Nachgiebigkeitsfrequenzgänge des Doppel-T-Trägers	88
5.8	Gebundene Freiheitsgrade in den FE-Modellen des Doppel-T-Trägers	90
5.9	Massenpositionierung im Simulationsmodell des Doppel-T-Trägers	91
5.10	Vergleich der Eigenfrequenzen des Doppel-T-Trägers	94
5.11	Einstellungen für das Model Updating in FEMtools	96
5.12	MAC-Matrizen vor und nach dem Model Updating des Doppel-T-Trägers	97

5.13 Fiktive Geometrie des Doppel-T-Trägers	98
6.1 Übersicht zum direkten Modifikationsproblem	103
6.2 Übersicht zum inversen Modifikationsproblem	106
6.3 Beispielhaftes Drahtgittermodell	108
6.4 Beispielhafte Steifigkeitsmodifikationen zwischen Nachbarpunkten . . .	110
6.5 Beispielhafte Steifigkeitsmodifikationen im Raum	111
6.6 Massen- und Steifigkeitsmodifikation am VR-Drahtgittermodell	113
6.7 Einstellung der Zieleigenfrequenz und der Modifikationspunkte	114
6.8 Einlesen von UFF-Dateien in COVISE und MATLAB	116
6.9 COVISE-Netz zur Darstellung experimenteller Modalanalyseergebnisse	117
6.10 Beispielhafte inverse Strukturmodifikation	122
7.1 Beispielhafte Strukturmodifikation am Doppel-T-Träger	123
7.2 Direkte Strukturmodifikation am Doppel-T-Träger	124
7.3 Vergleich der Eigenvektoren beim Doppel-T-Träger	130
7.4 Inverse Strukturmodifikation am Doppel-T-Träger – Variante M	132
7.5 Beschreibung eines Schalenelements mit Balkenelementen	138
7.6 FE-Modelle zur Berechnung einer ebenen Platte	139
7.7 Vorgehensweise zur Strukturmodifikation einer ebenen Platte	143
7.8 Bearbeitungszentrum zur Verifizierung	147
7.9 Messpunkte am Bearbeitungszentrum	148
7.10 Nachgiebigkeitsfrequenzgänge des Bearbeitungszentrums	149
7.11 Nicht unterscheidbare Eigenschwingformen des Bearbeitungszentrums	150
7.12 Starrkörperschwingformen des Bearbeitungszentrums	150
7.13 FE-Modellierung des Kugelgewindetribs einer Vorschubachse	152
7.14 FE-Modellierung von Wälzlagern	153
7.15 FE-Modellierung von Kompaktführungseinheiten	154
7.16 Modifikationspunkte am Bearbeitungszentrum	158
7.17 Direkte Strukturmodifikation am Bearbeitungszentrum – Fall K	159
7.18 MAC-Matrizen nach der Strukturmodifikation am Bearbeitungszentrum	160
A.1 Messpunkte am Maschinenbett (Ansicht von oben)	191
A.2 Linearisierung der Federkennlinien von Linearführungen	193