



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
 (87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2023/053399**
 in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
 IntPatÜbkG)
 (21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2021 008 301.5**
 (86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2021/036265**
 (86) PCT-Anmeldetag: **30.09.2021**
 (87) PCT-Veröffentlichungstag: **06.04.2023**
 (43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
 in deutscher Übersetzung: **01.08.2024**

(51) Int Cl.: **G05B 19/404 (2006.01)**
G05B 19/4155 (2006.01)

(71) Anmelder:
Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo, JP

(72) Erfinder:
Takahei, Kazuki, Tokyo, JP

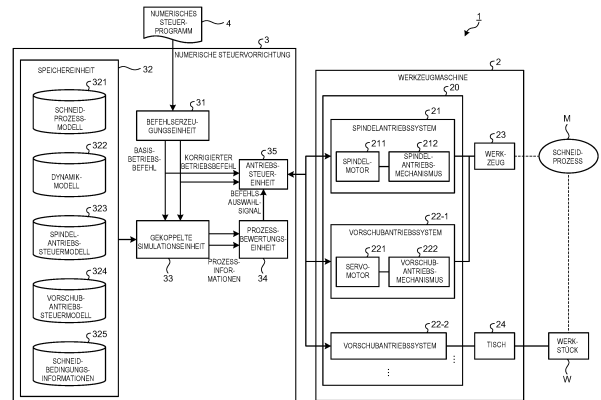
(74) Vertreter:
**Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte
 Partnerschaft mbB, 80538 München, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **NUMERISCHE STEUERVORRICHTUNG, BEARBEITUNGSSYSTEM, NUMERISCHES STEUERVERFAHREN UND BEARBEITUNGSVERFAHREN**

(57) Zusammenfassung: Eine numerische Steuervorrichtung (3) beinhaltet: eine Befehlserzeugungseinheit (31), die einen Basisbetriebsbefehl erzeugt, bei dem es sich um einen Betriebsbefehl auf Grundlage eines numerischen Steuerprogramms (4) handelt, und einen korrigierten Betriebsbefehl erzeugt, bei dem es sich um den Betriebsbefehl handelt, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird; eine gekoppelte Simulationseinheit (33), die Prozessinformationen berechnet, die einen Einfluss eines Betriebs eines Antriebssystems (20) und eine Dynamik einer Struktur, die während des Betriebs einer Werkzeugmaschine (2) bei einem Schneidprozess (M) eines Werkstücks (W) mit einem Werkzeug (23) Schwingung erzeugt, widerspiegeln, wobei die Prozessinformationen Ergebnisse einer Simulationsbearbeitung angeben, bei welcher der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils der Werkzeugmaschine (2) erteilt werden; und eine Prozessbeewertungseinheit (34), die auf Grundlage einer Vielzahl der Prozessinformationen eine Größe eines Bearbeitungsfehlers bei einer Verwendung jedes einer Vielzahl der Betriebsbefehle bewertet und den Betriebsbefehl, welcher der Werkzeugmaschine (2) zu erteilen ist, aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl auswählt.



Beschreibung**Kurzdarstellung**

Gebiet

Technisches Problem

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft eine numerische Steuervorrichtung, ein Bearbeitungssystem, ein numerisches Steuerverfahren und ein Bearbeitungsverfahren zum Steuern einer Werkzeugmaschine.

[0005] Die vorstehend beschriebene herkömmliche Technik ist jedoch dahingehend problematisch, dass der Bearbeitungsfehler nicht genau verringert werden kann. Bei der in Patentliteratur 1 beschriebenen Technik wird der Ablenkbetrag des Werkzeugs vorhergesagt und die Verschiebung des Werkzeugmittelpunkts als der Bearbeitungsfehler betrachtet. In der Praxis wirken sich jedoch während des Betriebs der Werkzeugmaschine der Schneidprozess, der Betrieb des Antriebssystems und die mechanische Dynamik einer Struktur, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine Schwingung erzeugt, aufeinander aus. Hierbei gibt der Schneidprozess eine Reihe von Prozessen wieder, bei denen die Schnittkante des Werkzeugs in das Werkstück eindringt, um eine bearbeitete Oberfläche zu bilden, während Späne erzeugt werden, und gibt die mechanische Dynamik dynamische Eigenschaften einer Struktur wieder, die schwingt, wenn sich Schwingungen von Schwingungsquellen innerhalb und außerhalb der Werkzeugmaschine ausbreiten. Daher kann mit dem in Patentliteratur 1 beschriebenen Verfahren der Bearbeitungsfehler nicht genau bewertet werden und kann der Bearbeitungsfehler nicht genau verringert werden.

Hintergrund

[0002] Werkzeugmaschinen sind Bearbeitungsvorrichtungen, die eine spanabhebende Bearbeitung durchführen können, d. h. eine Bearbeitung, bei der nicht benötigte Abschnitte von einem Werkstück entfernt werden, indem Kraft oder Energie unter Verwendung eines Werkzeugs auf das Werkstück ausgeübt wird. Eine Werkzeugmaschine beinhaltet ein Spindeltriebssystem, das ein Werkzeug oder ein Werkstück dreht, und ein Vorschubantriebssystem, das die relative Position zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ändert. Die numerische Steuervorrichtung treibt zum Bearbeiten des Werkstücks das Spindeltriebssystem und das Vorschubantriebssystem auf Grundlage eines Betriebsbefehls an, der auf Grundlage eines numerischen Steuerprogramms erzeugt wird. Hierbei können, selbst wenn die Werkzeugmaschine gemäß dem in dem numerischen Steuerprogramm beschriebenen Befehl gesteuert wird, verschiedene Faktoren verhindern, dass die Bearbeitung gemäß dem Befehl durchgeführt wird, und kann es zu einem Bearbeitungsfehler kommen.

[0006] Die vorliegende Offenbarung wurde in Anbetracht des Vorstehenden erstellt und eine Aufgabe davon besteht darin, eine numerische Steuervorrichtung zu erzielen, die imstande ist, den Bearbeitungsfehler einer Werkzeugmaschine genau zu verringern.

[0003] Patentliteratur 1 schlägt eine Technik zum Reproduzieren der Eigenschaft einer bearbeiteten Oberfläche durch Berechnen der Verschiebung des Werkzeugs vor, die durch einen Schnittwiderstand verursacht wird, der auf das Werkzeug beim Schneiden ausgeübt wird. Bei dem in Patentliteratur 1 beschriebenen Verfahren wird im Voraus ein Parameter gespeichert, der eine dynamische Eigenschaft des Werkzeugs wiedergibt, wodurch die Verschiebung des Werkzeugmittelpunkts, die auftritt, wenn ein Schnittwiderstand erzeugt wird, welcher der mittels Simulation berechneten ungeschnittenen Spandicke des Werkzeugs entspricht, als Bearbeitungsfehler betrachtet wird.

Lösung des Problems

[0007] Um das vorstehende Problem zu lösen und eine Aufgabe zu erfüllen, richtet sich die vorliegende Offenbarung auf eine numerische Steuervorrichtung, die eine Werkzeugmaschine steuert, indem sie der Werkzeugmaschine einen Betriebsbefehl erteilt, wobei die Werkzeugmaschine ein Antriebssystem beinhaltet, das ein Spindeltriebssystem, um ein Werkzeug zum Bearbeiten eines Werkstücks oder eine das Werkstück drehende Spindel anzutreiben, und ein Vorschubantriebssystem, um eine Vorschubachse anzutreiben, die eine relative Position zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ändert, beinhaltet, wobei die numerische Steuervorrichtung Folgendes beinhaltet: eine Befehlszeugungseinheit, um einen Basisbetriebsbefehl zu erzeugen, bei dem es sich um den Betriebsbefehl auf Grundlage eines numerischen Steuerprogramms handelt, und einen korrigierten Betriebsbefehl zu erzeugen, bei dem es sich um den durch Korrigieren des Basisbetriebsfehls erhaltenen Betriebsbefehl handelt; eine gekoppelte Simulationseinheit, um Prozessinforma-

Liste der Anführungen

Patentliteratur

[0004] Patentliteratur 1: Japanische Offenlegungsschrift Nr. 2013-132733

tionen zu berechnen, die einen Einfluss eines Betriebs des Antriebssystems und eine Dynamik einer Struktur, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine Schwingung erzeugt, auf einen Schneidprozess des Werkstücks mit dem Werkzeug widerspiegeln, wobei die Prozessinformationen Ergebnisse einer Simulationsbearbeitung angeben, bei welcher der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils der Werkzeugmaschine erteilt werden; und eine Prozessbewertungseinheit, um auf Grundlage einer Vielzahl der Prozessinformationen eine Größe eines Bearbeitungsfehlers bei einer Verwendung von jedem einer Vielzahl der Betriebsbefehle zu bewerten und den der Werkzeugmaschine zu erteilenden Betriebsbefehl aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl auszuwählen.

Vorteilhafte Wirkungen der Erfindung

[0008] Die vorliegende Erfindung kann die Wirkung erzielen, dass der Bearbeitungsfehler einer Werkzeugmaschine genau verringert wird.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist eine Darstellung, die eine funktionelle Konfiguration eines Bearbeitungssystems gemäß der ersten Ausführungsform veranschaulicht.

Fig. 2 ist eine Darstellung, die eine beispielhafte physische Konfiguration der in **Fig. 1** veranschaulichten Werkzeugmaschine veranschaulicht.

Fig. 3 ist eine Darstellung, die Zeitwellenformen der Spindeldrehzahl und der Vorschubrate bei dem Basisbetriebsbefehl veranschaulicht.

Fig. 4 ist eine Darstellung, die das Werkzeug und das Werkstück während einer Bearbeitung veranschaulicht, bei der die in **Fig. 3** veranschaulichte Spindeldrehzahl und Vorschubrate verwendet werden.

Fig. 5 ist eine Darstellung, die Zeitwellenformen der Spindeldrehzahl und der Vorschubrate bei dem korrigierten Betriebsbefehl veranschaulicht.

Fig. 6 ist eine Darstellung, die das Werkzeug und das Werkstück während einer Bearbeitung veranschaulicht, bei der die in **Fig. 5** veranschaulichte Spindeldrehzahl und Vorschubrate verwendet werden.

Fig. 7 ist eine Darstellung, welche die Beziehung zwischen dem in **Fig. 1** veranschaulichten Spindeltriebssystem, einer mechanischen Dynamik und dem Schneidprozess veranschaulicht.

Fig. 8 ist eine Darstellung, welche die in **Fig. 7** veranschaulichten physikalischen Größen zusammen mit der physischen Konfiguration der Werkzeugmaschine veranschaulicht.

Fig. 9 ist eine Darstellung, welche die Beziehung zwischen dem in **Fig. 1** veranschaulichten Vorschubantriebssystem, einer mechanischen Dynamik und dem Schneidprozess veranschaulicht.

Fig. 10 ist eine Darstellung, welche die in **Fig. 9** veranschaulichten physikalischen Größen zusammen mit der physischen Konfiguration der Werkzeugmaschine veranschaulicht.

Fig. 11 ist eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für das Spindeltriebsteuermodell in **Fig. 1**.

Fig. 12 ist eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für das Vorschubantriebsteuermodell in **Fig. 1**.

Fig. 13 ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs der in **Fig. 1** veranschaulichten numerischen Steuervorrichtung.

Fig. 14 ist eine Darstellung, die eine funktionelle Konfiguration eines Bearbeitungssystems gemäß der zweiten Ausführungsform veranschaulicht.

Fig. 15 ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs der in **Fig. 14** veranschaulichten numerischen Steuervorrichtung.

Fig. 16 ist eine Darstellung, die eine beispielhafte Konfiguration einer Lernvorrichtung in Bezug auf die in **Fig. 14** veranschaulichte numerische Steuervorrichtung veranschaulicht.

Fig. 17 ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Lernprozesses der in **Fig. 16** veranschaulichten Lernvorrichtung.

Fig. 18 ist eine Darstellung, die eine beispielhafte Konfiguration einer Inferenzvorrichtung in Bezug auf die in **Fig. 14** veranschaulichte numerische Steuervorrichtung veranschaulicht.

Fig. 19 ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs der in **Fig. 18** veranschaulichten Inferenzvorrichtung.

Fig. 20 ist eine Darstellung, die eine Konfiguration eines Bearbeitungssystems gemäß der dritten Ausführungsform veranschaulicht.

Fig. 21 ist eine Darstellung, die dedizierte Hardware zum Umsetzen der Funktionen der numerischen Steuervorrichtungen, der Lernvorrichtung und der Inferenzvorrichtung gemäß der ersten bis dritten Ausführungsform veranschaulicht.

Fig. 22 ist eine Darstellung, die eine Konfiguration der Steuerschaltung zum Umsetzen der Funktionen der numerischen Steuervorrichtungen, der Lernvorrichtung und der Inferenzvorrichtung gemäß der ersten bis dritten Ausführungsform veranschaulicht.

Beschreibung von Ausführungsformen

[0009] Nachfolgend werden eine numerische Steuervorrichtung, ein Bearbeitungssystem, ein numerisches Steuerverfahren und ein Bearbeitungsverfahren gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher beschrieben. In der folgenden Beschreibung kann eine Vielzahl von Komponenten, die ähnliche Funktionen aufweisen, voneinander unterschieden werden, indem sie durch eine gemeinsame Nummer, gefolgt von einem Bindestrich und einer Nummer, gekennzeichnet sind. In Fällen, in denen eine Vielzahl von Komponenten mit ähnlichen Funktionen nicht voneinander unterschieden werden muss, sind diese lediglich durch eine gemeinsame Nummer gekennzeichnet.

Erste Ausführungsform.

[0010] **Fig. 1** ist eine Darstellung, die eine funktionelle Konfiguration eines Bearbeitungssystems 1 gemäß der ersten Ausführungsform veranschaulicht. Das Bearbeitungssystem 1 beinhaltet eine Werkzeugmaschine 2 und eine numerische Steuervorrichtung 3. Die numerische Steuervorrichtung 3 steuert die Werkzeugmaschine 2, indem sie der Werkzeugmaschine 2 einen Betriebsbefehl erteilt, der auf Grundlage eines in einem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehls erzeugt wird.

[0011] Die Werkzeugmaschine 2 beinhaltet ein Spindeltriebssystem 21, ein oder mehrere Vorschubantriebssysteme 22, ein Werkzeug 23 zum Bearbeiten eines Werkstücks W und einen Tisch 24 zum Halten des Werkstücks W.

[0012] Das Spindeltriebssystem 21 beinhaltet einen Spindelmotor 211 und einen Spindeltriebsmechanismus 212, der durch den Spindelmotor 211 angetrieben wird. Das Werkzeug 23 ist mit dem Spindeltriebssystem 21 verbunden und das Spindeltriebssystem 21 kann das Werkzeug 23 drehen. Der Spindelmotor 211 oder der Spindeltriebsmechanismus 212 ist mit einem Drehgeber (nicht veranschaulicht) ausgestattet, der Winkelinformationen des Spindeltriebssystems 21 wiedergibt.

[0013] Das Vorschubantriebssystem 22 beinhaltet einen Servomotor 221 und einen Vorschubantriebsmechanismus 222, der durch den Servomotor 221 angetrieben wird. Das Vorschubantriebssystem 22 kann die relative Position zwischen dem Werkzeug

23 und dem Werkstück W ändern. Der Servomotor 221 und der Vorschubantriebsmechanismus 222 sind mit einem Drehgeber (nicht veranschaulicht) ausgestattet, der Positionsinformationen des Vorschubantriebssystems 22 wiedergibt. Der Tisch 24, auf dem das Werkstück W gehalten wird oder das Werkzeug 23 mit dem Vorschubantriebssystem 22 verbunden ist, und das Vorschubantriebssystem 22 können die relative Position zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W durch Bewegen des Tisches 24 oder des Werkzeugs 23 ändern. Bei dem in **Fig. 1** veranschaulichten Beispiel beinhaltet die Werkzeugmaschine 2 ein Vorschubantriebssystem 22-1, welches das Werkzeug 23 bewegt, und ein Vorschubantriebssystem 22-2, das den Tisch 24 bewegt, sodass sowohl das Werkzeug 23 als auch der Tisch 24 bewegt werden. Es ist jedoch zulässig, dass nur das Werkzeug 23 bewegt wird oder nur der Tisch 24 bewegt wird. Es ist eine beliebige Konfiguration verfügbar, welche die relative Position zwischen dem Werkzeug 23 und dem auf dem Tisch 24 gehaltenen Werkstück W ändern kann. Wenn das Vorschubantriebssystem 22 die relative Position zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W ändert, schneidet das Werkzeug 23 das Werkstück W entlang des Bearbeitungspfads.

[0014] Das Spindeltriebssystem 21 und das Vorschubantriebssystem 22 sind mit der numerischen Steuervorrichtung 3 verbunden und der Spindelmotor 211 und der Servomotor 221 werden durch einen Betriebsbefehl gesteuert, der durch die numerische Steuervorrichtung 3 erteilt wird. Nachfolgend werden das Spindeltriebssystem 21 und das Vorschubantriebssystem 22 gemeinsam als das Antriebssystem 20 bezeichnet. Es ist zu beachten, dass eine Reihe von Prozessen, bei denen die Schnittkante des Werkzeugs 23 in das Werkstück W eindringt, um eine bearbeitete Oberfläche zu bilden, während Späne erzeugt werden, als ein Schneidprozess M bezeichnet wird.

[0015] **Fig. 2** ist eine Darstellung, die eine beispielhafte physische Konfiguration der in **Fig. 1** veranschaulichten Werkzeugmaschine 2 veranschaulicht. Der Tisch 24 weist eine Tischform auf, die eine horizontale Ebene aufweist, auf der das Werkstück W platziert wird. Der Spindeltriebsmechanismus 212 ist derart bereitgestellt, dass das Werkzeug 23 über dem auf dem Tisch 24 gehaltenen Werkstück W positioniert ist. Der Spindelmotor 211 ist angrenzend an den Spindeltriebsmechanismus 212 bereitgestellt. Die Spindel des Spindeltriebssystems 21, das den Spindelmotor 211 und den Spindeltriebsmechanismus 212 beinhaltet, ist senkrecht zu der horizontalen Ebene des Tisches 24 und das Spindeltriebssystem 21 dreht das Werkzeug 23 um die Spindel.

[0016] Der Vorschubantriebsmechanismus 222-1 des Vorschubantriebssystems 22-1, welches das Werkzeug 23 bewegt, ist mit dem Werkzeug 23 über eine Struktur verbunden, die den Spindelantriebsmechanismus 212 beinhaltet, an dem das Werkzeug 23 angebracht ist. Der Servomotor 221-1 des Vorschubantriebssystems 22-1 ist angrenzend an den Vorschubantriebsmechanismus 222-1 bereitgestellt. Die Vorschubachse des Vorschubantriebssystems 22-1 ist parallel zu der Spindel und das Vorschubantriebssystem 22-1 bewegt das Werkzeug 23 entlang der Vorschubachse nach oben und unten.

[0017] Der Vorschubantriebsmechanismus 222-2 des Vorschubantriebssystems 22-2, das den Tisch 24 bewegt, ist mit dem Tisch 24 verbunden. Der Servomotor 221-2 des Vorschubantriebssystems 22-2 ist angrenzend an den Vorschubantriebsmechanismus 222-2 bereitgestellt. Die Vorschubachse des Vorschubantriebssystems 22-2 befindet sich in einer Richtung in der horizontalen Ebene des Tisches 24 und das Vorschubantriebssystem 22-2 bewegt den Tisch 24 in der horizontalen Richtung. Obwohl hier nur ein Vorschubantriebssystem 22 zum Bewegen des Tisches 24 beschrieben wurde, kann die Werkzeugmaschine 2 ferner das Vorschubantriebssystem 22 beinhalten, das eine Vorschubachse in einer Richtung aufweist, die senkrecht zu der Vorschubachse des Vorschubantriebssystems 22-2 ist und in der horizontalen Ebene des Tisches 24 verläuft.

[0018] Es ist zu beachten, dass die hier veranschaulichte physische Konfiguration ein Beispiel ist, das zur einfacheren Erläuterung dargestellt ist, und die physische Konfiguration der Werkzeugmaschine 2 nicht auf das in **Fig. 2** veranschaulichte Beispiel beschränkt ist. Beispielsweise kann die Anzahl der Vorschubantriebssysteme 22 der Werkzeugmaschine 2 eins sein oder kann drei oder mehr sein. Die Richtungen der Spindel und der Vorschubachse sind ebenfalls Beispiele. Der tischförmige Tisch 24 ist ein Beispiel für einen Mechanismus, der das Werkstück W hält, und kann eine beliebige Konfiguration aufweisen, mit der das Werkstück W gehalten und die relative Position zu dem Werkzeug 23 gesteuert werden kann.

[0019] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 1** beinhaltet die numerische Steuervorrichtung 3 eine Befehlszeugungseinheit 31, eine Speichereinheit 32, eine gekoppelte Simulationseinheit 33, eine Prozessbewertungseinheit 34 und eine Antriebssteuerungseinheit 35.

[0020] Das numerische Steuerprogramm 4 beinhaltet eine Vielzahl von Befehlen bezüglich der Bewegung der Spindel und der Vorschubachse der Werkzeugmaschine 2. Die in dem numerischen Steuerprogramm 4 enthaltenen Befehle sind bei-

spielsweise Befehle, die einen Pfad, auf dem sich das Werkzeug 23 bewegt, als eine relative Position zu dem Werkstück W vorgeben. Die Befehle, die den Pfad des Werkzeugs 23 vorgeben, beinhalten eine Vielzahl von Positionsbefehlen, die Positionen auf dem Pfad vorgeben. Das numerische Steuerprogramm 4 beinhaltet ferner einen Spindeldrehzahlbefehl, der die Drehzahl der Spindel angibt, und einen Vorschubratenbefehl, der die Bewegungsgeschwindigkeit der Vorschubachse an der Position angibt, die durch jeden Positionsbefehl angegeben wird. Das numerische Steuerprogramm 4 kann an die numerische Steuervorrichtung 3 von außerhalb der numerischen Steuervorrichtung 3 vergeben werden oder kann in der numerischen Steuervorrichtung 3 gehalten werden.

[0021] Die Befehlszeugungseinheit 31 analysiert die in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehle und erzeugt von Zeit zu Zeit einen Betriebsbefehl, welcher der Werkzeugmaschine 2 zu erteilen ist, um die Werkzeugmaschine 2 zu steuern. Die Befehlszeugungseinheit 31 erzeugt einen Basisbetriebsbefehl, bei dem es sich um einen Betriebsbefehl zum Veranlassen der Werkzeugmaschine 2, den in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehl unverändert ohne Korrektur auszuführen, handelt, und einen korrigierten Betriebsbefehl, bei dem es sich um einen Betriebsbefehl handelt, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird. Die Befehlszeugungseinheit 31 kann einen oder mehrere korrigierte Betriebsbefehle erzeugen. Der korrigierte Betriebsbefehl kann ein Betriebsbefehl sein, bei dem der relative Pfad, entlang dessen sich das Werkzeug 23 in Bezug auf das Werkstück W bewegt, der gleiche ist wie der des Basisbetriebsbefehls und mindestens eines von dem Vorschubbetrag der Vorschubachse und der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W geändert ist. Der Vorschubbetrag ist der Vorschubbetrag pro Prozesseinheit, zum Beispiel der Vorschubbetrag pro Zahn des Werkzeugs 23. In diesem Fall unterscheidet sich bei dem korrigierten Betriebsbefehl mindestens eines von dem Spindeldrehzahlbefehl und dem Vorschubratenbefehl zu dem Zeitpunkt, zu dem jede der Vielzahl von Schnittkanten des Werkzeugs 23 in das Werkstück W schneidet, für jede Schnittkante des Werkzeugs. Der Spindeldrehzahlbefehl und der Vorschubratenbefehl zu jedem Zeitpunkt werden gemäß dem Winkel von jeder der Vielzahl von Schnittkanten des Werkzeugs 23 und der relativen Position zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W moduliert. Die Befehlszeugungseinheit 31 kann als korrigierten Betriebsbefehl einen Betriebsbefehl, bei dem der Spindeldrehzahlbefehl und/oder der Vorschubratenbefehl zu jedem Zeitpunkt des Basisbetriebsbefehls geändert wird, gemäß dem Vorschubbetrag oder der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W pro Zahn für jede Schnittkante des Werkzeugs 23, die

innerhalb oder außerhalb der Befehlserzeugungseinheit 31 eingestellt ist, erzeugen. Die Befehlserzeugungseinheit 31 gibt den erzeugten Basisbetriebsbefehl und korrigierten Betriebsbefehl an sowohl die gekoppelte Simulationseinheit 33 als auch die Antriebssteuereinheit 35 aus.

[0022] Fig. 3 ist eine Darstellung, die Zeitwellenformen der Spindeldrehzahl und der Vorschubrate bei dem Basisbetriebsbefehl veranschaulicht. Hierbei wird der Einfachheit halber ein Beispiel beschrieben, bei dem zwei Positionen P1 und P2 in dem numerischen Steuerprogramm 4 vorgegeben sind und die Spindeldrehzahl und die Vorschubrate mit einem konstanten Wert in Bezug auf die befohlene Trajektorie zwischen den Positionen P1 und P2 vorgegeben sind. Fig. 3 veranschaulicht die Spindeldrehzahl und die Vorschubrate in Bezug auf die befohlene Trajektorie zwischen den Positionen P1 und P2. Der Basisbetriebsbefehl ist ein Betriebsbefehl zum Veranlassen der Werkzeugmaschine 2, die in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehle unverändert ohne Korrektur auszuführen. Daher sind, wie in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschrieben, die Spindeldrehzahl und die Vorschubrate, die durch den Basisbetriebsbefehl für die befohlene Trajektorie zwischen den Positionen P1 und P2 vorgegeben werden, konstant.

[0023] Fig. 4 ist eine Darstellung, die das Werkzeug 23 und das Werkstück W während einer Bearbeitung veranschaulicht, bei der die in Fig. 3 veranschaulichte Spindeldrehzahl und Vorschubrate verwendet werden. Das Werkzeug 23 bewegt sich von der Position P1 in Richtung der Position P2, während es sich in der Drehrichtung R1 dreht, und wenn es mit dem Werkstück W in Kontakt kommt, schneidet der Zahn des Werkzeugs 23 das Werkstück W. Bei dem Basisbetriebsbefehl sind sowohl die Spindeldrehzahl als auch die Vorschubrate konstant, und somit ist der Vorschubbetrag c pro Zahn konstant. In diesem Fall ist auch die Schnittfläche A1 pro Zahn konstant.

[0024] Fig. 5 ist eine Darstellung, die Zeitwellenformen der Spindeldrehzahl und der Vorschubrate bei dem korrigierten Betriebsbefehl veranschaulicht. Hierbei werden unter Beibehaltung der befohlenen Trajektorie des unter Bezugnahme auf die Fig. 3 und 4 beschriebenen Basisbetriebsbefehls die Spindeldrehzahl und die Vorschubrate sinusförmig in Bezug auf die in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen konstanten Werte variiert.

[0025] Fig. 6 ist eine Darstellung, die das Werkzeug 23 und das Werkstück W veranschaulicht, die eine Bearbeitung gemäß der in Fig. 5 veranschaulichten Spindeldrehzahl und Vorschubrate durchführen. Das Werkzeug 23 bewegt sich von der Position P1 in Richtung der Position P2, während es sich in der Drehrichtung R1 dreht, und wenn es mit dem Werk-

stück W in Kontakt kommt, schneidet der Zahn des Werkzeugs 23 das Werkstück W. Bei dem korrigierten Betriebsbefehl ändern sich die Spindeldrehzahl und die Vorschubrate ständig. Daher ändert sich der Vorschubbetrag c pro Zahn mit der Zeit und ändert sich infolgedessen auch die Schnittfläche A1 pro Zahn.

[0026] In dem Beispiel aus Fig. 5 erzeugt die Befehlserzeugungseinheit 31 einen korrigierten Betriebsbefehl durch Ändern von sowohl der Spindeldrehzahl als auch der Vorschubrate in ein sinusförmiges Variationsmuster in Bezug auf den Vorschubbetrag c oder die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W pro Zahn, die auf dem Basisbetriebsbefehl beruhen. Das zu verwendende Variationsmuster ist jedoch nicht auf eine sinusförmige Wellenform beschränkt, und es können verschiedene Variationsmuster, einschließlich einer dreieckigen Wellenform und einer zufälligen Wellenform, verwendet werden. Die Befehlserzeugungseinheit 31 kann zudem einen korrigierten Betriebsbefehl durch Überlagern einer vorbestimmten Profilvariation auf mindestens eines von der Spindeldrehzahl und der Vorschubrate des Basisbetriebsbefehls erzeugen. Die Befehlserzeugungseinheit 31 kann im Voraus Informationen enthalten, die das Variationsprofil angeben, das über den Basisbetriebsbefehl zu legen ist. Obwohl hier das Beispiel beschrieben wurde, bei dem die Befehlserzeugungseinheit 31 einen korrigierten Betriebsbefehl aus einem Basisbetriebsbefehl erzeugt, kann die Befehlserzeugungseinheit 31 eine Vielzahl von korrigierten Betriebsbefehlen aus einem Basisbetriebsbefehl erzeugen.

[0027] Unter erneuter Bezugnahme auf Fig. 1 sind in der Speichereinheit 32 ein Schneidprozessmodell 321, ein Dynamikmodell 322, ein Spindeltriebsteuermodell 323, ein Vorschubantriebssteuermodell 324 und Schneidbedingungsinformationen 325 gespeichert. Die Speichereinheit 32 kann die gespeicherten Informationen an die gekoppelte Simulationseinheit 33 ausgeben. Die Schneidbedingungsinformationen 325 beinhalten Werkzeugforminformationen, einschließlich der Anzahl von Zähnen, des Werkzeugdurchmessers und des Drallwinkels des Werkzeugs 23 und des Schnittbetrags bei Verwendung des Werkzeugs 23. Einzelheiten zu dem Schneidprozessmodell 321, dem Dynamikmodell 322, dem Spindeltriebsteuermodell 323 und dem Vorschubantriebssteuermodell 324 werden später beschrieben.

[0028] Da das durch die Werkzeugmaschine 2 ausgeführte Schneiden ein physikalisches Phänomen ist, bei dem sich der Schneidprozess und die mechanische Dynamik gegenseitig beeinflussen, ist es wünschenswert, eine Analyse durchzuführen, bei welcher der Schneidprozess und die mechanische Dynamik integriert sind, um den Bearbeitungszu-

stand zu verwalten oder zu steuern. Hierbei gibt der Schneidprozess eine Reihe von Prozessen wieder, bei denen die Schnittkante des Werkzeugs 23 in das Werkstück W eindringt, um eine bearbeitete Oberfläche zu bilden, während Späne erzeugt werden. Die mechanische Dynamik gibt ein dynamisches Verhalten einer Struktur wieder, die aufgrund von Schwingungsquellen innerhalb und außerhalb der Werkzeugmaschine 2 Schwingung erzeugt. Die Struktur kann im vorliegenden Zusammenhang das Werkzeug 23 und das Werkstück W zusätzlich zu den Strukturen, welche die Werkzeugmaschine 2 bilden, beinhalten.

[0029] Das Antriebssystem 20 wird durch die numerische Steuervorrichtung 3 gesteuert, sodass sich das Werkzeug 23 bewegt, um während des Drehens einen vorbestimmten Pfad in Bezug auf das Werkstück W zu durchlaufen. Während das Werkzeug 23 das Werkstück W schneidet, wird die zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W erzeugte Schnittkraft F_c als Störkraft F_d durch die Struktur auf das Vorschubantriebssystem 22 übertragen und wird als Störmoment T_d auf das Spindeltriebssystem 21 übertragen. Da die Störkraft F_d auf das Vorschubantriebssystem 22 ausgeübt wird, variiert die Position des Vorschubantriebssystems 22 je nach der Amplitude und Frequenz der Störkraft F_d in Bezug auf die Position, wenn das Werkzeug 23 das Werkstück W nicht schneidet. Ebenso variiert, wenn das Störmoment T_d auf das Spindeltriebssystem 21 ausgeübt wird, der Drehwinkel des Spindeltriebssystems 21 in Bezug auf den Drehwinkel, wenn das Werkzeug 23 das Werkstück W nicht schneidet.

[0030] Die vorstehende Beziehung wird unter Bezugnahme auf Zeichnungen beschrieben. **Fig. 7** ist eine Darstellung, welche die Beziehung zwischen dem in **Fig. 1** veranschaulichten Spindeltriebssystem 21, der mechanischen Dynamik und dem Schneidprozess M veranschaulicht. **Fig. 8** ist eine Darstellung, welche die in **Fig. 7** veranschaulichten physikalischen Größen zusammen mit der physischen Konfiguration der Werkzeugmaschine 2 veranschaulicht. Wenn die numerische Steuervorrichtung 3 dem Spindeltriebssystem 21 einen Betriebsbefehl erteilt, treibt der Spindelmotor 211 den Spindeltriebmechanismus 212 an, dreht sich die Struktur der Werkzeugmaschine 2, die das Werkzeug 23 beinhaltet, und wird das Werkstück W bearbeitet. Hierbei wird das Spindeltriebssystem 21 gemäß dem Spindeltriebssystemwinkel θ_1 auf Grundlage des Betriebsbefehls gesteuert und wird dann der Ist-Winkel des Werkzeugs 23 unter dem Einfluss der werkzeugseitigen mechanischen Dynamik MD1 zu dem Werkzeugwinkel θ_2 . Die Reihe von Schneidprozessen M, bei der das Werkzeug 23 in das Werkstück W eindringt, wird ausgeführt, um eine bearbeitete Oberfläche zu bilden, während Späne erzeugt werden. Das dabei erzeugte Schnitt-

moment T_c wird durch die werkzeugseitige mechanische Dynamik MD1 durch die Struktur beeinflusst und kehrt als Störmoment T_d zu dem Spindeltriebssystem 21 zurück. Die Werkzeugmaschine 2 gibt ein Rückkopplungssignal an die numerische Steuervorrichtung 3 aus. Falls sich der Zustand des Spindeltriebssystems 21, welches das Störmoment T_d empfangen hat, von dem Betriebsbefehl unterscheidet, ändert die numerische Steuervorrichtung 3 den Betriebsbefehl auf Grundlage des von dem Spindeltriebssystem 21 übertragenen Rückkopplungssignals.

[0031] **Fig. 9** ist eine Darstellung, welche die Beziehung zwischen dem in **Fig. 1** veranschaulichten Vorschubantriebssystem 22-2, der mechanischen Dynamik und dem Schneidprozess M veranschaulicht. **Fig. 10** ist eine Darstellung, welche die in **Fig. 9** veranschaulichten physikalischen Größen zusammen mit der physischen Konfiguration der Werkzeugmaschine 2 veranschaulicht. Die numerische Steuervorrichtung 3 erteilt dem Vorschubantriebssystem 22-2 einen Betriebsbefehl und dann wird das Werkstück W durch die relative Bewegung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W bearbeitet. Dabei treibt der Servomotor 221-2 des Vorschubantriebssystems 22-2 den Vorschubantriebmechanismus 222-2 auf Grundlage des Betriebsbefehls an und tritt folglich die Antriebssystemverschiebung r_1 in dem Tisch 24 auf. Die in dem Werkstück W erzeugte Ist-Verschiebung wird die Strukturverschiebung r_2 , die den Einfluss der werkstückseitigen mechanischen Dynamik MD2 widerspiegelt, wenn die Antriebssystemverschiebung r_1 auftritt. Die dabei erzeugte Schnittkraft F_c kehrt zu dem Vorschubantriebssystem 22-2 als Störkraft F_d durch die Struktur zurück. Falls sich der Zustand des Vorschubantriebssystems 22-2, welches die Störkraft F_d empfangen hat, von dem Betriebsbefehl unterscheidet, ändert die numerische Steuervorrichtung 3 den Betriebsbefehl auf Grundlage des von dem Vorschubantriebssystem 22-2 übertragenen Rückkopplungssignals.

[0032] Wenngleich das Spindeltriebssystem 21 und das Vorschubantriebssystem 22 vorstehend zur Erläuterung getrennt unter Bezugnahme auf die **Fig. 7** bis 10 beschrieben wurden, treten eine Verschiebung und Kraftausbreitung während der Bearbeitung gleichzeitig in dem Spindeltriebssystem 21 und dem Vorschubantriebssystem 22 auf.

[0033] Wie vorstehend beschrieben, bilden beim Schneiden der Schneidprozess M, die mechanische Dynamik und das Antriebssystem 20 ein gekoppeltes System und ist die numerische Steuervorrichtung 3 an dem Schneidprozess M durch das Antriebssystem 20 und die mechanische Dynamik beteiligt. Darüber hinaus verschwindet bei dem Schneidprozess zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W der Bearbeitungspunkt, an dem die Schnitt-

kraft F_c erzeugt wird, zusammen mit der Erzeugung von Spänen und ist es somit nicht möglich, die Schnittkraft F_c durch Installieren eines Sensors direkt zu erkennen. Daher ist es, um ein Schneiden, einschließlich der Bewegung des Werkzeugs 23 und des Werkstücks W, genau zu bewerten, notwendig, eine Simulation durchzuführen, die den Betrieb des Spindeltriebssystems 21 und des Vorschubtriebssystems 22 zusätzlich zu dem Schneidprozess M und der mechanischen Dynamik beinhaltet.

[0034] Als Nächstes werden konkrete Beispiele für das Schneidprozessmodell 321, das Dynamikmodell 322, das Spindeltriebssteuermodell 323 und das Vorschubantriebssteuermodell 324, die in der Speichereinheit 32 gespeichert sind, beschrieben. Diese Modelle werden verwendet, wenn die später beschriebene gekoppelte Simulationseinheit 33 eine Simulation durchführt.

[0035] Das Schneidprozessmodell 321 gibt eine Schneideigenschaft zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W wieder. Konkreter ist das Schneidprozessmodell 321 ein mathematisches Modell, das die Schnittkraft F_c ausdrückt, die gemäß der Positionsbeziehung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W erzeugt wird. Die nachfolgende Formel (1) ist ein Beispiel für eine Formel, welche die Schnittkraft F_c ausdrückt, die erzeugt wird, während die Schnittkante des Werkzeugs 23 mit dem Werkstück W in Kontakt steht. Die Formel (1) gibt die exakte Schnittkraft ΔF_c pro Querschnitt des Werkzeugs 23 unter Verwendung des spezifischen Schnittwiderstands K_c , des Kantenkraftkoeffizienten K_e , der exakten Dicke Δa des Querschnitts des Werkzeugs 23, der ungeschnittenen Spandicke h des Werkstücks W, des Drehwinkel φ des Werkzeugs 23 und der Zeit t wieder. Die durch Schneiden mit dem Werkzeug 23 erzeugte Gesamtschnittkraft F_c kann berechnet werden, indem die durch die Formel (1) angegebene exakte Schnittkraft ΔF_c in der axiale Richtung des Werkzeugs 23 addiert wird. Die ungeschnittene Spandicke h des Werkstücks W ist der Abstand zwischen der vorherigen bearbeiteten Oberfläche und der aktuellen Bearbeitungszielfläche in der radialen Richtung des Werkzeugs 23. Die Formel (1) gibt an, dass die Schnittkraft F_c durch die Summe einer Kraft proportional zu der ungeschnittenen Spandicke h und einem bestimmten Kraftbetrag berechnet werden kann, der als Kantenkraft bezeichnet wird.

Formel 1:

$$\Delta F_c = \Delta a (K_c h(\varphi(t)) + K_e) \quad (1)$$

[0036] Die ungeschnittene Spandicke h kann durch die untenstehende Formel (2) ausgedrückt werden. Die ungeschnittene Spandicke h wird durch die Summe aus einer Komponente, welche die ungeschnittene Nennspandicke wiedergibt, die durch

den Vorschubbetrag c des Werkzeugs 23 pro Zahn bestimmt wird, einer Komponente, welche die relative Schwingung des Werkzeugs 23 und des Werkstücks W wiedergibt, und einer Komponente, welche die Zunahme oder Abnahme der ungeschnittenen Spandicke aufgrund einer Differenz im Drehradius von Schnittkanten des Werkzeugs 23 wiedergibt, wenn das Werkzeug 23 eine Vielzahl von Schnittkanten beinhaltet, wiedergegeben. Die Komponente, welche die relative Schwingung des Werkzeugs 23 und des Werkstücks W wiedergibt, wird durch die Differenz zwischen der radialen Komponente u_r des Werkzeugs 23 der relativen Verschiebung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W zum Zeitpunkt des aktuellen Schneidens der Bearbeitungszielfläche und der radialen Komponente w_r des Werkzeugs der relativen Verschiebung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W, die auf die vorherige bearbeitete Oberfläche übertragen wurde, wiedergegeben. Die Komponente, welche die Zunahme oder Abnahme der ungeschnittenen Spandicke aufgrund der Differenz des Drehradius der Schnittkanten wiedergibt, wird durch den Drehradiuskorrekturbetrag Δe der Schnittkante des Werkzeugs 23 wiedergegeben.

Formel 2:

$$h(\varphi(t)) = c \sin\varphi(t) + \{u_r(\varphi, t) - w_r(\varphi, t)\} + \Delta e(\varphi, t) \quad (2)$$

[0037] Formel (1) ist ein Beispiel für das Schneidprozessmodell 321 und das Schneidprozessmodell 321 ist nicht auf das Vorstehende beschränkt. Ein Beispiel hierfür ist ein Modell, das die Schnittkraft F_c unter Verwendung von Voxeln berechnet, welche die Form des Werkzeugs 23 und die Form des Werkstücks W ausdrücken.

[0038] Das Dynamikmodell 322 gibt eine dynamische Eigenschaft einer Struktur wieder, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine 2 Schwingung erzeugt. Insbesondere ist das Dynamikmodell 322 ein mathematisches Modell, das zeigt, dass eine Struktur dynamisch verschoben wird, wenn eine dynamische Kraft auf die Struktur ausgeübt wird. Beispielsweise kann das Verhalten des Werkstücks W, wenn die Schnittkraft F_c auf das Werkstück W, das mit dem Antriebssystem 20 verbunden ist, ausgeübt wird, durch die untenstehende Formel (3) wiedergegeben werden.

Formel 3:

$$\begin{cases} F_c = m\ddot{u} + C(\dot{u} - \dot{v}) + K(u - v) \\ F_d = \quad + C(\dot{u} - \dot{v}) + K(u - v) \end{cases} \quad (3)$$

[0039] Formel (3) ist ein Beispiel für eine Formel, welche die Schwingung des Werkstücks W ausdrückt. Die zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W erzeugte Schnittkraft F_c wird unter Verwendung der relativen Verschiebung u zwischen

dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W, der relativen Verschiebung v des Antriebssystems 20, der äquivalenten Masse m des Werkstücks W, des äquivalenten Viskositätskoeffizienten C des Werkstücks W und der äquivalenten Federkonstante K des Werkstücks W wiedergegeben. Formel (3) gibt die mechanische Dynamik wieder, bei der die Schnittkraft F_c als Störkraft F_d durch das Werkstück W auf das Antriebssystem 20 übertragen wird.

[0040] Es ist zu beachten, dass das Dynamikmodell 322 nicht auf die Formel (3) beschränkt ist. Ein Beispiel ist ein Modell, bei dem die Form des Werkstücks W durch Voxel ausgedrückt wird und die Verschiebung, wenn eine Struktur schwingt, unter Verwendung einer Analyse mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet wird. Obwohl das hier beschriebene Dynamikmodell 322 nur die Schwingung des Werkstücks W ausdrückt, kann das Dynamikmodell 322 die Schwingung des Werkzeugs 23 oder einer anderen Struktur anstelle des Werkstücks W ausdrücken. Alternativ kann das Dynamikmodell 322 die Schwingungen sowohl des Werkzeugs 23 als auch des Werkstücks W ausdrücken.

[0041] Das Spindeltriebssteuermodell 323 ist ein mathematisches Modell, welches das in der Werkzeugmaschine 2 enthaltene Spindeltriebssystem 21 und eine Spindeltriebssteuerung, die in der Antriebssteuereinheit 35 der numerischen Steuervorrichtung 3 vorhanden ist und das Spindeltriebssystem 21 steuert, wiedergibt. **Fig. 11** ist eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für das Spindeltriebssteuermodell 323 in **Fig. 1**. Das Spindeltriebssteuermodell 323 ist ein mathematisches Modell für den Fall, dass die Position und Geschwindigkeit des Spindeltriebssystems 21 durch die Positionssteuerung und die Geschwindigkeitssteuerung, die in der Spindeltriebssteuerung enthalten sind, in einer Situation gesteuert werden, in der das Störmoment T_d , das durch das Schnittmoment T_c verursacht wird, auf das Spindeltriebssystem 21 übertragen wird, wenn der Spindeldrehwinkelbefehl erteilt wird. Dieses mathematische Modell gibt den Ist-Spindeldrehwinkel θ als Reaktion auf den in die Steuerung eingegebenen Spindeldrehwinkelbefehl θ_r aus. Hierbei sind K_{pp1} , K_{vp1} und K_{vi1} Verstärkungen, bei denen es sich um die proportionale Verstärkung K_{pp1} für die Positionssteuerung, die proportionale Verstärkung K_{vp1} für die Geschwindigkeitssteuerung und die integrale Verstärkung K_{vi1} für die Geschwindigkeitssteuerung handelt. $P_1(s)$ ist eine Übertragungsfunktion von Drehmoment zu Position für das gesamte Spindeltriebssystem 21, wobei s eine komplexe Zahl ist. $P_1(s)$ kann anhand der tatsächlichen Reaktion des Spindeltriebssystems 21 durch Verwendung eines bekannten Systemidentifizierungsverfahrens identifiziert werden. Obwohl das Spindeltriebssystem

21 hier als ein System mit einfacher Trägheit modelliert ist, kann das Spindeltriebssystem 21 als ein System mit mehrfacher Trägheit modelliert werden. Darüber hinaus kann eine Vorwärtskopplungssteuerung zu der Spindeltriebssteuerung hinzugefügt werden.

[0042] Das Vorschubantriebssteuermodell 324 ist ein mathematisches Modell, welches das Vorschubantriebssystem 22 der Werkzeugmaschine 2 und eine Vorschubantriebssteuerung, die in der Antriebssteuereinheit 35 der numerischen Steuervorrichtung 3 vorhanden ist, wiedergibt. **Fig. 12** ist eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für das Vorschubantriebssteuermodell 324 in **Fig. 1**. Das Vorschubantriebssteuermodell 324 ist ein mathematisches Modell für den Fall, dass die Position und Geschwindigkeit des Vorschubantriebssystems 22 durch die Positionssteuerung und die Geschwindigkeitssteuerung, die in der Vorschubantriebssteuerung enthalten sind, in einer Situation gesteuert werden, in der die Störkraft F_d , die durch die Schnittkraft F_c verursacht wird, auf das Vorschubantriebssystem 21 übertragen wird, wenn der Positionsbefehl für das Vorschubantriebssystem erteilt wird. Als Reaktion auf die Eingabe des Positionsbefehls x_r für das Vorschubantriebssystem gibt das mathematische Modell die Ist-Position x des Vorschubantriebssystems aus. Hierbei sind K_{pp2} , K_{vp2} und K_{vi2} Verstärkungen, bei denen es sich um die proportionale Verstärkung K_{pp2} für die Positionssteuerung, die proportionale Verstärkung K_{vp2} für die Geschwindigkeitssteuerung bzw. die integrale Verstärkung K_{vi2} für die Geschwindigkeitssteuerung handelt. $P_2(s)$ ist eine Übertragungsfunktion von Kraft zu Position für das gesamte Vorschubantriebssystem 22, wobei s eine komplexe Zahl ist. $P_2(s)$ kann anhand der tatsächlichen Reaktion des Vorschubantriebssystems 22 durch Verwendung eines bekannten Systemidentifizierungsverfahrens identifiziert werden. Obwohl das Vorschubantriebssystem 22 hier als ein System mit einfacher Trägheit modelliert ist, kann das Vorschubantriebssystem 22 als ein System mit mehrfacher Trägheit modelliert werden. Darüber hinaus kann eine Vorwärtskopplungssteuerung zu der Vorschubantriebssteuerung hinzugefügt werden.

[0043] Die gekoppelte Simulationseinheit 33 simuliert eine Bearbeitung, bei der jeder einer Vielzahl von Betriebsbefehlen, die von der Befehlserzeugungseinheit 31 ausgegeben wird, der Werkzeugmaschine 2 erteilt wird, und berechnet Prozessinformationen, die das Simulationsergebnis angeben. Die Prozessinformationen beinhalten Parameter, die einen Vergleich von Bearbeitungsfehlern ermöglichen, und beinhalten zum Beispiel die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W, die Schnittkraft F_c , die Störkraft F_d und dergleichen. Hierbei ist die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W zum

Beispiel die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W pro Zahn des Werkzeugs 23. Die gekoppelte Simulationseinheit 33 kann die Bearbeitung simulieren, die durch die Werkzeugmaschine 2 durchgeführt wird, wobei der Einfluss des Betriebs des Antriebssystems 20, welches das Spindeltriebssystem 21 und das Vorschubantriebssystem 22 beinhaltet, und der Einfluss der Dynamik der Struktur, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine 2 Schwingung bei dem Schneidprozess M erzeugt, widergespiegelt werden. Die gekoppelte Simulationseinheit 33 führt die Anzahl von Simulationen durch, die gleich der Anzahl von Betriebsbefehlen ist, die durch die Befehlszeugungseinheit 31 erzeugt werden, und erzeugt die Anzahl von Prozessinformationen, die Simulationsergebnisse angeben, die gleich der Anzahl von Betriebsfehlern sind. Die gekoppelte Simulationseinheit 33 gibt die Vielzahl von erzeugten Prozessinformationen an die Prozessbewertungseinheit 34 aus.

[0044] Die gekoppelte Simulationseinheit 33 erteilt den von der Befehlszeugungseinheit 31 ausgegebenen Betriebsbefehl unter der vorgegebenen Schneidbedingung an das Schneidprozessmodell 321, das Dynamikmodell 322, das Spindeltriebsteuermodell 323 und das Vorschubantriebsteuermodell 324, wodurch die gekoppelte Simulationseinheit 33 eine Bearbeitung simuliert, die durch die Werkzeugmaschine 2 durchgeführt wird, und Prozessinformationen, die das Simulationsergebnis angeben, berechnet. Dabei kann die gekoppelte Simulationseinheit 33 das Schneidprozessmodell 321, das Dynamikmodell 322, das Spindeltriebsteuermodell 323, das Vorschubantriebsteuermodell 324 und die Schneidbedingungsinformationen 325 verwenden, die in der Speichereinheit 32 gespeichert sind. Wenn die in der Speichereinheit 32 gespeicherten Schneidbedingungsinformationen 325 verwendet werden, ist die vorgegebene Schneidbedingung die Schneidbedingung, die durch die Schneidbedingungsinformationen 325 angegeben wird.

[0045] Die gekoppelte Simulationseinheit 33 führt eine Simulation aus, bei welcher der Schneidprozess M zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W , die mechanische Dynamik der Struktur der Werkzeugmaschine 2, der Betrieb des Spindeltriebssystems 21 und der Betrieb des Vorschubantriebssystems 22 gekoppelt sind. Auf Grundlage der in den **Fig. 7 bis 10** veranschaulichten Beziehungen führt die gekoppelte Simulationseinheit 33 eine gekoppelte Simulation in der Situation durch, dass der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils einem gekoppelten Modell unter der in den Schneidbedingungsinformationen 325 beschriebenen Schneidbedingung erteilt werden, und berechnet die gekoppelte Simulationseinheit 33 die Zeitreiheninformationen und die Frequenzkompo-

nenteninformationen davon. Das gekoppelte Modell ist ein Modell, das durch Kombinieren des Schneidprozessmodells 321, des Dynamikmodells 322, des Spindeltriebsteuermodells 323 und des Vorschubantriebsteuermodells 324 erhalten wird. Die gekoppelte Simulation ist eine Simulation des Antriebssignals, des Spindeltriebssystemwinkels θ_1 , der Antriebssystemverschiebung r_1 , des Werkzeugwinkels θ_2 , der Strukturverschiebung r_2 des Vorschubsystems, der ungeschnittenen Spandicke h des Werkstücks, des Schnittmoments T_c , der Schnittkraft F_c , des Störmoments T_d , der Störkraft F_d und des Rückkopplungssignals.

[0046] Die Prozessbewertungseinheit 34 bewertet die Größe des Bearbeitungsfehlers durch die Verwendung jedes der Vielzahl von Betriebsbefehlen auf Grundlage der Vielzahl von Prozessinformationen, die von der gekoppelten Simulationseinheit 33 ausgegeben wird, und wählt einen Betriebsbefehl, welcher der Werkzeugmaschine 2 zu erteilen ist, aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl aus, die durch die Befehlszeugungseinheit 31 erzeugt werden. Die Prozessbewertungseinheit 34 gibt ein Befehlsauswahlsignal, das den ausgewählten Betriebsbefehl angibt, an die Antriebssteuereinheit 35 aus.

[0047] Nachfolgend wird ein Beispiel für ein Bewertungsverfahren in der Prozessbewertungseinheit 34 beschrieben. Die Prozessbewertungseinheit 34 kann die Größe des Bearbeitungsfehlers auf Grundlage der zeitlichen Änderung der ungeschnittenen Spandicke h des Werkstücks W bewerten. Die Prozessbewertungseinheit 34 bewertet, dass je kleiner die Zunahme der ungeschnittenen Spandicke h des Werkstücks W ist, desto kleiner die Größe des Bearbeitungsfehlers ist. Die Prozessbewertungseinheit 34 kann einen Betriebsbefehl, der die Zunahme der ungeschnittenen Spandicke h minimiert, als der Werkzeugmaschine 2 zu erteilenden Betriebsbefehl auswählen. Die ungeschnittene Spandicke h gibt die Schwingung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W wieder. Wenn eine als Ratterschwingung bezeichnete Schwingung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W auftritt, erhöht sich die Amplitude mit Ablauf der Zeit, was zu einer Verschlechterung des Bearbeitungsfehlers führt. Daher kann die Prozessbewertungseinheit 34 einen Betriebsbefehl auswählen, der die Schwingung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W minimiert, indem die zeitliche Änderung der ungeschnittenen Spandicke h bewertet wird. Der Betriebsbefehl, der die Schwingung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W minimiert, kann den Bearbeitungsfehler minimieren, der durch die Schwingung zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W verursacht wird.

[0048] Die Prozessbewertungseinheit 34 kann zudem die Größe des Bearbeitungsfehlers auf Grundlage der maximalen Amplitude der Störkraft F_d oder des Störmoments T_d bewerten, die erhalten werden, wenn jeder Betriebsbefehl ausgeführt wird. Die Prozessbewertungseinheit 34 bewertet, dass je kleiner die maximale Amplitude der Störkraft F_d oder des Störmoments T_d ist, desto kleiner die Größe des Bearbeitungsfehlers ist. Die Prozessbewertungseinheit 34 kann einen Betriebsbefehl, der die maximale Amplitude minimiert, als der Werkzeugmaschine 2 zu erteilender Betriebsbefehl auswählen. Je kleiner die maximale Amplitude der Störkraft F_d oder des Störmoments T_d ist, desto kleiner ist die Schwingung des Antriebssystems 20, die durch die Störkraft F_d oder das Störmoment T_d verursacht wird. Daher ist es durch Auswählen des Betriebsbefehls, der die maximale Amplitude der Störkraft F_d oder des Störmoments T_d minimiert, möglich, den Bearbeitungsfehler zu minimieren, der durch die Schwingung des Antriebssystems 20 verursacht wird.

[0049] Darüber hinaus kann die Prozessbewertungseinheit 34 die Zeitwellenform der von der gekoppelten Simulationseinheit 33 berechneten Prozessinformationen mit einem voreingestellten Zielprofil vergleichen und die Größe des Bearbeitungsfehlers auf Grundlage der Abweichung von dem Zielprofil bewerten. Das Zielprofil ist ein Profil, bei dem der Bearbeitungsfehler kleiner oder gleich einem zulässigen Wert wird, und wird zum Beispiel im Voraus in der Prozessbewertungseinheit 34 eingestellt. Die Prozessbewertungseinheit 34 bewertet, dass je kleiner die Abweichung von dem Zielprofil ist, desto kleiner die Größe des Bearbeitungsfehlers ist. Die Prozessbewertungseinheit 34 kann die Abweichung von dem Zielprofil auf Grundlage einer Verlustfunktion, wie etwa einer Residuenquadratsumme, bewerten oder kann die Abweichung von dem Zielprofil auf Grundlage eines Verfahrens zum maschinellen Lernen, wie etwa musterbasierte Suche, bewerten. Die Prozessbewertungseinheit 34 kann den Bearbeitungsfehler durch Auswählen eines Betriebsbefehls minimieren, der die Abweichung von dem Zielprofil minimiert.

[0050] Die Prozessbewertungseinheit 34 kann die Größe des Bearbeitungsfehlers unter Verwendung eines beliebigen der vorstehend beschriebenen Vielzahl von Bewertungsverfahren bewerten oder kann eine Kombination der vorstehend beschriebenen Vielzahl von Bewertungsverfahren verwenden.

[0051] Die Antriebssteuereinheit 35 steuert das Antriebssystem 20 der Werkzeugmaschine 2 auf Grundlage des Betriebsbefehls, der durch das von der Prozessbewertungseinheit 34 ausgegebene Befehlsauswahlsignal aus der durch die Befehlserzeugungseinheit 31 erzeugten Vielzahl von Betriebsbefehlen angegeben wird. Die Antriebssteuereinheit

35 beinhaltet in sich die Spindeltriebssteuerung zum Steuern des Spindeltriebssystems 21 und die Vorschubantriebssteuerung zum Steuern des Vorschubantriebssystems 22. Während sie Signale von dem Drehgeber überwacht, der in dem Spindeltriebssystem 21 bereitgestellt ist, gibt die Spindeltriebsteuerung einen Befehl an den Spindelmotor 211 derart aus, dass die Position und Geschwindigkeit des Spindeltriebssystems 21 Beträge aufweisen, die durch den Betriebsbefehl vorgegeben sind. Während sie Signale von dem Drehgeber überwacht, der in dem Vorschubantriebssystem 22 bereitgestellt ist, gibt die Vorschubantriebssteuerung einen Befehl an den Servomotor 221 derart aus, dass die Position und Geschwindigkeit des Vorschubantriebssystems 22 Beträge aufweisen, die durch den Betriebsbefehl vorgegeben sind.

[0052] Fig. 13 ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs der in Fig. 1 veranschaulichten numerischen Steuervorrichtung 3. Sobald das Bearbeitungssystem 1 mit dem Betrieb beginnt, liest die Befehlserzeugungseinheit 31 der numerischen Steuervorrichtung 3 das numerische Steuerprogramm 4 aus und analysiert das ausgelesene numerische Steuerprogramm 4. Dann erzeugt die Befehlserzeugungseinheit 31: einen Basisbetriebsbefehl zum Veranlassen der Werkzeugmaschine 2, den in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehl auszuführen, und einen korrigierten Betriebsbefehl, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird (Schritt S101). Nach dem Erzeugen eines Basisbetriebsbefehls und eines oder mehrerer Muster von korrigierten Betriebsbefehlen gibt die Befehlserzeugungseinheit 31 die erzeugten Betriebsbefehle an die gekoppelte Simulationseinheit 33 aus.

[0053] Die gekoppelte Simulationseinheit 33 führt eine gekoppelte Simulation für jeden der von der Befehlserzeugungseinheit 31 ausgegebenen Betriebsbefehle aus, um eine Vielzahl von Prozessinformationen zu berechnen (Schritt S102). Die gekoppelte Simulationseinheit 33 gibt die berechneten Prozessinformationen an die Prozessbewertungseinheit 34 aus.

[0054] Die Prozessbewertungseinheit 34 vergleicht und bewertet die Vielzahl von Prozessinformationen, bewertet die Größe des Bearbeitungsfehlers bei der Verwendung jedes Betriebsbefehls und wählt einen Betriebsbefehl, welcher der Werkzeugmaschine 2 zu erteilen ist, aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl aus (Schritt S103). Die Prozessbewertungseinheit 34 gibt ein Befehlsauswahlsignal, das den ausgewählten Betriebsbefehl angibt, an die Antriebssteuereinheit 35 aus.

[0055] Die Antriebssteuereinheit 35 steuert den Betrieb der Werkzeugmaschine 2 unter Verwendung

des ausgewählten Betriebsbefehls auf Grundlage des von der Prozessbewertungseinheit 34 ausgegebenen Auswahlsignals (Schritt S104). Die Befehlserzeugungseinheit 31 bestimmt, ob das Auslesen sämtlicher der in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehle abgeschlossen ist (Schritt S105). Als Reaktion darauf, dass bestimmt wird, dass das Auslesen nicht abgeschlossen ist (Schritt S105: Nein), wiederholt die Befehlserzeugungseinheit 31 die Verarbeitung aus Schritt S101. Als Reaktion darauf, dass bestimmt wird, dass das Auslesen abgeschlossen ist (Schritt S105: Ja), beendet das Bearbeitungssystem 1 den Betrieb.

[0056] Wie vorstehend beschrieben, berechnet die numerische Steuervorrichtung 3 in dem Bearbeitungssystem 1 gemäß der ersten Ausführungsform Prozessinformationen, die den Einfluss des Betriebs des Antriebssystems 20 und die Dynamik der Struktur widerspiegeln, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine 2 Schwingung bei dem Schneidprozess M des Werkstücks W mit dem Werkzeug 23 erzeugt, wobei die Prozessinformationen ein Ergebnis einer Simulation einer Bearbeitung angeben, bei welcher der auf Grundlage des numerischen Steuerprogramms erzeugte Basisbetriebsbefehl und der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhaltene korrigierte Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt werden. Dann wählt die numerische Steuervorrichtung 3 auf Grundlage des Bewertungsergebnisses der Prozessinformationen einen Betriebsbefehl aus, welcher der Werkzeugmaschine 2 zu erteilen ist. Daher kann die numerische Steuervorrichtung 3 den Bearbeitungsfehler verringern, auch wenn der Bearbeitungsfehler aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung des Schneidprozesses, des Betriebs des Antriebssystems 20 und der mechanischen Dynamik der Struktur, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine 2 Schwingung erzeugt, auftritt.

[0057] Die gekoppelte Simulationseinheit 33 berechnet die Prozessinformationen, wenn der Betriebsbefehl unter einer vorgegebenen Schneidbedingung dem Schneidprozessmodell 321, das eine Schneideigenschaft zwischen dem Werkzeug 23 und dem Werkstück W wiedergibt, dem Dynamikmodell 322, das eine dynamische Eigenschaft der Struktur wiedergibt, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine 2 Schwingung erzeugt, dem Spindeltriebsteuermodell 323, welches das Spindeltriebssystem 21 und die das Spindeltriebssystem 21 steuernde Spindeltriebsteuerung wiedergibt, und dem Vorschubantriebsteuermodell 324, welches das Vorschubantriebssystem 22 und die das Vorschubantriebssystem 22 steuernde Vorschubantriebsteuerung wiedergibt, erteilt wird. Durch Durchführen der gekoppelten Simulation unter Verwendung der mathematischen Modelle ist es möglich, den Einfluss des Betriebsbefehls auf

den Schneidprozess M durch das Antriebssystem 20 und die mechanische Dynamik genau zu bewerten.

[0058] In der ersten Ausführungsform ist die Speichereinheit 32, in der das Schneidprozessmodell 321, das Dynamikmodell 322, das Spindeltriebsteuermodell 323, das Vorschubantriebsteuermodell 324 und die Schneidbedingungsinformationen 325 gespeichert sind, welche die Schneidbedingungen angeben, in der numerischen Steuervorrichtung 3 bereitgestellt; die Speichereinheit 32 kann jedoch außerhalb der numerischen Steuervorrichtung 3 bereitgestellt sein.

[0059] Die Befehlserzeugungseinheit 31 kann als korrigierten Betriebsbefehl einen Befehl erzeugen, bei dem der relative Pfad, entlang dessen sich das Werkzeug 23 in Bezug auf das Werkstück W bewegt, dem des Basisbetriebsbefehls entspricht und der Vorschubbetrag oder die ungeschnittene Spandicke h des Werkstücks W pro Zahn geändert ist. Beispielsweise kann die Befehlserzeugungseinheit 31 als den korrigierten Betriebsbefehl einen Befehl einstellen, bei dem die Spindeldrehzahl und/oder die Vorschubrate des Basisbetriebsbefehls gemäß dem Vorschubbetrag oder der ungeschnittenen Spandicke h des Werkstücks W pro Zahn geändert ist. Konkret kann die Befehlserzeugungseinheit 31 einen korrigierten Betriebsbefehl durch Überlagern einer vorbestimmten Profilvariation auf die Spindeldrehzahl und/oder die Vorschubrate des Basisbetriebsbefehls erzeugen. Durch Erzeugen des korrigierten Betriebsbefehls auf diese Weise ist es möglich, den Betriebsbefehl zu erzeugen, der den Bearbeitungsfehler verringert, ohne die Form des Werkstücks W zu ändern.

[0060] Die Speichereinheit 32 kann unterschiedliche Modelle und Schneidbedingungen je nach dem in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Schneidprozess speichern. Die gekoppelte Simulationseinheit 33 kann eine Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Modelle und Schneidbedingungen je nach dem Schneidprozess durchführen. In der ersten Ausführungsform beinhaltet die Werkzeugmaschine 2 ein Spindeltriebssystem 21 und ein oder mehrere Vorschubantriebssysteme 22, jedoch kann die Werkzeugmaschine 2 eine Vielzahl von Spindeltriebssystemen 21 beinhalten. Selbst wenn die Werkzeugmaschine 2 eine Vielzahl von Spindeltriebssystemen 21 beinhalten, kann der in **Fig. 13** veranschaulichte Betrieb ähnlich durchgeführt werden.

[0061] In der ersten Ausführungsform wurde die Werkzeugmaschine 2 beschrieben, in der das Werkzeug 23 mit dem Spindeltriebssystem 21 verbunden ist und sich das Werkzeug 23 dreht, wie etwa ein Bearbeitungszentrum. Die Werkzeugmaschine 2

kann jedoch eine Konfiguration aufweisen, bei der das Werkstück W mit dem Spindeltriebssystem 21 verbunden ist und sich das Werkstück W dreht, wie etwa eine numerisch gesteuerte (NC) Drehmaschine. In diesem Fall kann die Befehlszeugungseinheit 31 durch Ersetzen des Vorschubbetrags pro Zahn durch den Vorschubbetrag pro Drehung der Spindel einen Betriebsbefehl auswählen, der den Bearbeitungsfehler unter einer Vielzahl von Betriebsbefehlen verringert, ohne den durch das numerische Steuerungsprogramm 4 bestimmten Pfad zu ändern.

Zweite Ausführungsform.

[0062] Fig. 14 ist eine Darstellung, die eine funktionelle Konfiguration eines Bearbeitungssystems 1a gemäß der zweiten Ausführungsform veranschaulicht. Funktionelle Komponenten mit den gleichen Funktionen wie in der ersten Ausführungsform sind mit den gleichen Bezugszeichen wie in der ersten Ausführungsform gekennzeichnet und auf redundante Erläuterungen wird verzichtet. Nachfolgend werden hauptsächlich Unterschiede zu der ersten Ausführungsform beschrieben. Das Bearbeitungssystem 1a unterscheidet sich von dem Bearbeitungssystem 1 dadurch, dass ein Betriebsbefehl auf Grundlage eines Simulationsergebnisses erzeugt wird.

[0063] Das Bearbeitungssystem 1a beinhaltet die Werkzeugmaschine 2 und eine numerische Steuervorrichtung 3a. Ebenso wie die numerische Steuervorrichtung 3 steuert die numerische Steuervorrichtung 3a die Werkzeugmaschine 2 auf Grundlage des in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehls. Die numerische Steuervorrichtung 3a beinhaltet eine Befehlszeugungseinheit 31a, eine Speichereinheit 32a, eine gekoppelte Simulationseinheit 33a, die Prozessbewertungseinheit 34 und die Antriebssteuereinheit 35.

[0064] Beim Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls kann die Befehlszeugungseinheit 31a die Prozessinformationen verwenden, welche die gekoppelte Simulationseinheit 33a ausgibt. Die Befehlszeugungseinheit 31a kann einen Betriebsbefehl, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls auf Grundlage der Prozessinformationen erhalten wird, als korrigierten Betriebsbefehl einstellen. Dabei kann die Befehlszeugungseinheit 31a das Schneidprozessmodell 321, das Dynamikmodell 322, das Spindeltriebssteuermodell 323, das Vorschubantriebssteuermodell 324 und die Schneidbedingungsinformationen 325 verwenden, die in der Speichereinheit 32a gespeichert sind. Konkreter erzeugt die Befehlszeugungseinheit 31a einen korrigierten Betriebsbefehl durch Hinzufügen, zu dem Basisbetriebsbefehl, einer Variation, welche die Amplitude oder Phase der dynamischen Schwingungskomponente ausgleicht, die auf die unge-

schnittene Spandicke des Werkstücks W, die in den Prozessinformationen enthalten ist, gelegt wird. Die dynamische Schwingungskomponente entspricht dem zweiten Ausdruck auf der rechten Seite der vorstehenden Formel (2). Die Befehlszeugungseinheit 31a kann auf den Basisbetriebsbefehl eine Variation anwenden, welche die Amplitude oder Phase der Schwingungskomponente unter Verwendung eines Bandsperrfilters, der die Amplitude der dynamischen Schwingungskomponente dämpft, die auf die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W gelegt wird, oder unter Verwendung eines Phasenausgleichsfilters, der die Phasenverzögerung der Schwingungskomponente in Bezug auf den Zeitpunkt, zu dem die Schnittkante des Werkzeugs 23 schneidet, ausgleicht.

[0065] Ebenso wie die Speichereinheit 32 speichert die Speichereinheit 32a das Schneidprozessmodell 321, das Dynamikmodell 322, das Spindeltriebsteuermodell 323, das Vorschubantriebssteuermodell 324 und die Schneidbedingungsinformationen 325 und gibt die gespeicherten Informationen an die gekoppelte Simulationseinheit 33a aus. Die Speichereinheit 32a kann ferner die gespeicherten Informationen an die Befehlszeugungseinheit 31a ausgeben.

[0066] Ebenso wie die gekoppelte Simulationseinheit 33 berechnet die gekoppelte Simulationseinheit 33a Prozessinformationen, die Ergebnisse einer Bearbeitungssimulation angeben, bei welcher jeweils der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt werden. Die gekoppelte Simulationseinheit 33a gibt die berechneten Prozessinformationen an die Prozessbewertungseinheit 34 und auch an die Befehlszeugungseinheit 31a aus.

[0067] Fig. 15 ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs der in Fig. 14 veranschaulichten numerischen Steuervorrichtung 3a. Sobald das Bearbeitungssystem 1a mit dem Betrieb beginnt, liest die Befehlszeugungseinheit 31 der numerischen Steuervorrichtung 3a das numerische Steuerprogramm 4 aus, analysiert das ausgelesene numerische Steuerprogramm 4 und erzeugt einen Basisbetriebsbefehl zum Veranlassen der Werkzeugmaschine 2 dazu, den in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehl auszuführen (Schritt S201). Die Befehlszeugungseinheit 31a gibt den erzeugten Basisbetriebsbefehl an die gekoppelte Simulationseinheit 33a aus.

[0068] Die gekoppelte Simulationseinheit 33a führt eine gekoppelte Simulation aus, bei welcher der von der Befehlszeugungseinheit 31a ausgegebene Basisbetriebsbefehl durch die Werkzeugmaschine 2 ausgeführt wird, um Prozessinformationen zu erzeugen (Schritt S202). Die gekoppelte Simulationsein-

heit 33a gibt die erzeugten Prozessinformationen sowohl an die Prozessbewertungseinheit 34 als auch die Befehls erzeugungseinheit 31a aus.

[0069] Die Befehls erzeugungseinheit 31a korrigiert den Basisbetriebsbefehl auf Grundlage der infolge des Ausführens von Schritt S202 ausgegebenen Prozessinformationen und erzeugt einen korrigierten Betriebsbefehl (Schritt S203). Die Befehls erzeugungseinheit 31a gibt den erzeugten korrigierten Betriebsbefehl an die gekoppelte Simulationseinheit 33a aus.

[0070] Die gekoppelte Simulationseinheit 33a führt eine gekoppelte Simulation aus, bei welcher der von der Befehls erzeugungseinheit 31a ausgegebene korrigierte Betriebsbefehl durch die Werkzeugmaschine 2 ausgeführt wird, um Prozessinformationen zu erzeugen (Schritt S204). Die gekoppelte Simulationseinheit 33a gibt die erzeugten Prozessinformationen sowohl an die Prozessbewertungseinheit 34 als auch die Befehls erzeugungseinheit 31a aus.

[0071] Die Prozessbewertungseinheit 34 vergleicht und bewertet die Vielzahl von Prozessinformationen, bewertet die Größe des Bearbeitungsfehlers bei der Verwendung jedes Betriebsbefehls und wählt einen Betriebsbefehl, welcher der Werkzeugmaschine 2 zu erteilen ist, aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl aus (Schritt S205). Die Prozessbewertungseinheit 34 gibt ein Befehlsauswahlsignal, das den ausgewählten Betriebsbefehl angibt, an die Antriebssteuereinheit 35 aus.

[0072] Die Antriebssteuereinheit 35 steuert den Betrieb der Werkzeugmaschine 2 unter Verwendung des ausgewählten Betriebsbefehls auf Grundlage des von der Prozessbewertungseinheit 34 ausgegebenen Auswahlsignals (Schritt S206). Die Befehls erzeugungseinheit 31a bestimmt, ob das Auslesen sämtlicher der in dem numerischen Steuerprogramm 4 beschriebenen Befehle abgeschlossen ist (Schritt S207). Als Reaktion darauf, dass bestimmt wird, dass das Auslesen nicht abgeschlossen ist (Schritt S207: Nein), wiederholt die Befehls erzeugungseinheit 31a die Verarbeitung aus Schritt S201. Als Reaktion darauf, dass bestimmt wird, dass das Auslesen abgeschlossen ist (Schritt S207: Ja), beendet das Bearbeitungssystem 1a den Betrieb.

[0073] Bei dem vorstehenden Beispiel erzeugt die Befehls erzeugungseinheit 31a einen korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage der Prozessinformationen, die ein Simulationsergebnis angeben, wenn der Basisbetriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt wird. Die Befehls erzeugungseinheit 31a kann jedoch ferner einen korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage der Prozessinformationen erzeugen, die ein Simulationsergebnis angeben, wenn der korrigierte Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt

wird. In diesem Fall ist es möglich, ein Verfahren zum Suchen nach einem korrigierten Betriebsbefehl, der imstande ist, die Schwingung der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W zu verringern, unter Verwendung eines Verfahrens zum maschinellen Lernen anzuwenden, während die Amplitude oder Phase der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W als ein Bewertungswert eingestellt wird.

[0074] Fig. 16 ist eine Darstellung, die eine beispielhafte Konfiguration einer Lernvorrichtung 50 in Bezug auf die in Fig. 14 veranschaulichte numerische Steuervorrichtung 3a veranschaulicht. Beispielsweise kann die Lernvorrichtung 50 in der in Fig. 14 veranschaulichten numerischen Steuervorrichtung 3a enthalten sein oder kann eine Informationsverarbeitungsvorrichtung sein, die sich von der numerischen Steuervorrichtung 3a unterscheidet. Die Lernvorrichtung 50 beinhaltet eine Lerndatenerfassungseinheit 51 und eine Modellerzeugungseinheit 52.

[0075] Die Lerndatenerfassungseinheit 51 erfasst als Lerndaten den durch die Befehls erzeugungseinheit 31a erzeugten Betriebsbefehl und die dem Betriebsbefehl entsprechenden Prozessinformationen, d. h. die Prozessinformationen, die ein Simulationsergebnis angeben, wenn der Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt wird. Die Lerndatenerfassungseinheit 51 kann die erfassten Lerndaten an die Modellerzeugungseinheit 52 ausgeben. Es ist zu beachten, dass die Lerndatenerfassungseinheit 51 sämtliche der Prozessinformationen erfassen kann oder einen Teil der Prozessinformationen erfassen kann. Beispielsweise kann die Lerndatenerfassungseinheit 51 als Lerndaten einen Parameter erfassen, der die Größe des Bearbeitungsfehlers in den Prozessinformationen angibt. Beispielsweise kann die Lerndatenerfassungseinheit 51 als Lerndaten die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W oder die Amplitude oder Phase der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W erfassen.

[0076] Die Modellerzeugungseinheit 52 erlernt einen neu korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage der Lerndaten, einschließlich des Betriebsbefehls und der Prozessinformationen, die ein Simulationsergebnis angeben, das erhalten wird, wenn der Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt wird. Das heißt, die Modellerzeugungseinheit 52 erzeugt ein erlerntes Modell zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus den Prozessinformationen der numerischen Steuervorrichtung 3a. Die Modellerzeugungseinheit 52 gibt das erzeugte erlernte Modell an eine Speichereinheit 53 für gelernte Modelle aus.

[0077] Der Lernalgorithmus, der von der Modellgenerationseinheit 52 verwendet wird, kann ein bekannter Algorithmus sein, wie etwa überwachtes Lernen, unüberwachtes Lernen oder bestärkendes Lernen. Als ein Beispiel wird ein Fall beschrieben, bei dem bestärkendes Lernen angewandt wird. Beim bestärkenden Lernen beobachtet ein Agent (Subjekt einer Aktion) in einer Umgebung einen Umgebungsparameter, der den aktuellen Zustand angibt, und bestimmt die zu ergreifende Aktion. Die Umgebung ändert sich aufgrund des Verhaltens des Agenten dynamisch und dem Agenten wird eine Belohnung gemäß der Änderung in der Umgebung gegeben. Der Agent wiederholt dies, um eine Aktionsrichtlinie zu erlernen, welche die Belohnung durch eine Reihe von Aktionen maximiert. Q-Lernen und TD-Lernen sind als repräsentative Verfahren des bestärkenden Lernens bekannt. Im Falle des Q-Lernens wird beispielsweise ein allgemeiner Aktualisierungsausdruck für die Aktionswertfunktion $Q(s, a)$ durch die untenstehende Formel (4) wiedergegeben. Formel 4:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left(r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right) \quad (4)$$

[0078] In der Formel (4) gibt s_t den Zustand der Umgebung zu einem Zeitpunkt t wieder und gibt a_t die Aktion zu dem Zeitpunkt t wieder. Die Aktion a_t ändert den Zustand zu s_{t+1} . Darüber hinaus gibt r_{t+1} die Belohnung wieder, die durch die Änderung des Zustands erhalten werden kann, gibt γ eine Diskontierungsrate wieder und gibt α einen Lernkoeffizienten wieder. Es ist zu beachten, dass γ einen Wert im Bereich von $0 < \gamma \leq 1$ aufweist und α einen Wert im Bereich von $0 < \alpha \leq 1$ aufweist. Der korrigierte Betriebsbefehl dient als die Aktion a_t , die Prozessinformationen dienen als der Zustand s_t und die Lernvorrichtung 50 erlernt die beste Aktion a_t bei dem Zustand zu dem Zeitpunkt t .

[0079] Der durch die Formel (4) wiedergegebene Aktualisierungsausdruck erhöht den Aktionswert Q , wenn der Aktionswert Q der Aktion „a“ mit dem höchsten Q -Wert zu dem Zeitpunkt $t+1$ größer ist als der Aktionswert Q der Aktion „a“, die zu dem Zeitpunkt t ausgeführt wird, und verringert andernfalls den Aktionswert Q . Mit anderen Worten wird die Aktionswertfunktion $Q(S, a)$ derart aktualisiert, dass der Aktionswert Q der Aktion „a“ zu dem Zeitpunkt t näher an den besten Aktionswert zu dem Zeitpunkt $t+1$ gebracht wird. Infolgedessen propagiert sich der beste Aktionswert Q in einer bestimmten Umgebung nacheinander auf die Aktionswerte Q in den vorherigen Umgebungen.

[0080] Wie vorstehend beschrieben, beinhaltet die Modellerzeugungseinheit 52 in dem Fall, dass ein erlerntes Modell durch bestärkendes Lernen erzeugt

wird, eine Belohnungsberechnungseinheit 54 und eine Funktionsaktualisierungseinheit 55.

[0081] Die Belohnungsberechnungseinheit 54 berechnet eine Belohnung auf Grundlage des Betriebsbefehls und der Prozessinformationen. Die Belohnungsberechnungseinheit 54 berechnet eine Belohnung r auf Grundlage von Belohnungskriterien D , einschließlich eines Belohnungserhöhungskriteriums $D1$ und eines Belohnungsverringerungskriteriums $D2$. Beispielsweise werden die Belohnungskriterien D auf Grundlage der Größe des Bearbeitungsfehlers bestimmt, der durch die Prozessinformationen angegeben wird. Als der Parameter, der die Größe des Bearbeitungsfehlers angibt, wird zum Beispiel die Amplitude der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W verwendet. Beispielsweise kann für das Belohnungserhöhungskriterium $D1$ definiert sein, dass die Amplitude der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W kleiner als ein Schwellenwert ist, und kann für das Belohnungsverringerungskriterium $D2$ definiert sein, dass die Amplitude der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W größer oder gleich einem Schwellenwert ist. Beispielsweise erhöht die Belohnungsberechnungseinheit 54 die Belohnung r , indem sie eine Belohnung von „+1“ vergibt, wenn das Belohnungserhöhungskriterium $D1$ erfüllt ist, und verringert die Belohnung r , indem sie eine Belohnung von „-1“ vergibt, wenn das Belohnungsverringerungskriterium $D2$ erfüllt ist. Die Belohnungsberechnungseinheit 54 gibt die berechnete Belohnung r an die Funktionsaktualisierungseinheit 55 aus. Als ein anderes Beispiel kann als der Parameter, der die Größe des Bearbeitungsfehlers angibt, die Phase der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W zusätzlich zu der Amplitude der Schwingungskomponente der Spandicke verwendet werden. Hierbei ist die Phase der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke die Phase der Schwingung, die über die Spanform in dem Moment gelegt wird, in dem die Schnittkante des Werkzeugs 23 mit dem Schneiden des Werkstücks W beginnt. In diesem Fall kann für das Belohnungserhöhungskriterium $D1$ definiert sein, dass die Phase der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W ein Wert innerhalb eines vorbestimmten Bereichs ist, und kann für das Belohnungsverringerungskriterium $D2$ definiert sein, dass die Phase der Schwingungskomponente der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W ein Wert außerhalb des vorstehenden Bereichs ist.

[0082] Die Funktionsaktualisierungseinheit 55 aktualisiert die Funktion zum Bestimmen eines korrigierten Betriebsbefehls gemäß der Belohnung r , die durch die Belohnungsberechnungseinheit 54 berechnet wird, und gibt die aktualisierte Funktion

an die Speichereinheit 53 für erlernte Modelle aus. Beispielsweise wird in dem Falle von Q-Lernen die durch Formel (4) wiedergegebene Aktionswertfunktion $Q(s_t, a_t)$ als eine Funktion zum Berechnen eines korrigierten Betriebsbefehls verwendet.

[0083] Das vorgenannte Lernen wird wiederholt ausgeführt. Die Speichereinheit 53 für erlernte Modelle speichert die Aktionswertfunktion $Q(s_t, a_t)$ die durch die Funktionsaktualisierungseinheit 55 aktualisiert wird, das heißt, das erlernte Modell.

[0084] Als Nächstes wird der Lernprozess durch die Lernvorrichtung 50 unter Bezugnahme auf **Fig. 17** beschrieben. **Fig. 17** ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Lernprozesses der in **Fig. 16** veranschaulichten Lernvorrichtung 50.

[0085] Die Lerndatenerfassungseinheit 51 erfasst als Lerndaten den durch die Befehlserzeugungseinheit 31a erzeugten Betriebsbefehl und die Prozessinformationen, die ein Simulationsergebnis angeben, wenn der Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2 erteilt wird (Schritt S301).

[0086] Die Modellerzeugungseinheit 52 berechnet die Belohnung r auf Grundlage des Betriebsbefehls und der Prozessinformationen, die in den durch die Lerndatenerfassungseinheit 51 erfassten Lerndaten enthalten sind (Schritt S302). Konkret erfasst die Belohnungsberechnungseinheit 54 den Betriebsbefehl und die Prozessinformationen und bestimmt auf Grundlage der vorbestimmten Belohnungskriterien D , ob die Belohnung r zu erhöhen ist oder die Belohnung r zu verringern ist (Schritt S303).

[0087] Als Reaktion darauf, dass bestimmt wird, dass die Belohnung r zu erhöhen ist (Schritt S303: erhöhen), erhöht die Belohnungsberechnungseinheit 54 die Belohnung r (Schritt S304). Als Reaktion darauf, dass bestimmt wird, dass die Belohnung r zu verringern ist (Schritt S303: verringern), verringert die Belohnungsberechnungseinheit 54 die Belohnung r (Schritt S305).

[0088] Die Funktionsaktualisierungseinheit 55 aktualisiert die Aktionswertfunktion $Q(s_t, a_t)$, die in der Speichereinheit 53 für erlernte Modelle gespeichert ist, auf Grundlage der Belohnung r , die von der Belohnungsberechnungseinheit 54 berechnet wird (Schritt S306).

[0089] Die Lernvorrichtung 50 führt wiederholt die vorstehende Verarbeitung von Schritt S301 bis Schritt S306 aus und speichert die erzeugte Aktionswertfunktion $Q(s_t, a_t)$ als ein erlerntes Modell.

[0090] In **Fig. 16** ist die Speichereinheit 53 für erlernte Modelle außerhalb der Lernvorrichtung 50 bereitgestellt, jedoch kann die Lernvorrichtung 50

die Speichereinheit 53 für erlernte Modelle darin beinhalten. Wenn die Lernvorrichtung 50 in der numerischen Steuervorrichtung 3a bereitgestellt ist, kann die Speichereinheit 53 für erlernte Modelle in derselben Speichervorrichtung wie die Speichereinheit 32a bereitgestellt sein oder kann in einer anderen Speichervorrichtung bereitgestellt sein.

[0091] **Fig. 18** ist eine Darstellung, die eine beispielhafte Konfiguration einer Inferenzvorrichtung 60 in Bezug auf die in **Fig. 14** veranschaulichte numerische Steuervorrichtung 3a veranschaulicht. Die Inferenzvorrichtung 60 beinhaltet eine Datenerfassungseinheit 61 und eine Inferenzeinheit 62. Die Inferenzvorrichtung 60 kann in der numerischen Steuervorrichtung 3a bereitgestellt sein oder kann eine Informationsverarbeitungsvorrichtung sein, die sich von der numerischen Steuervorrichtung 3a unterscheidet. Die Inferenzvorrichtung 60 ist zum Beispiel in der Befehlserzeugungseinheit 31a der numerischen Steuervorrichtung 3a bereitgestellt.

[0092] Die Datenerfassungseinheit 61 erfasst die von der gekoppelten Simulationseinheit 33a ausgegebenen Prozessinformationen. Die Datenerfassungseinheit 61 gibt die erfassten Daten an die Inferenzeinheit 62 aus.

[0093] Die Inferenzeinheit 62 verwendet das erlernte Modell, das in der Speichereinheit 53 für erlernte Modelle gespeichert ist, um aus den durch die Datenerfassungseinheit 61 erfassten Prozessinformationen einen neu korrigierten Betriebsbefehl abzuleiten. Das heißt, die Inferenzeinheit 62 kann einen korrigierten Betriebsbefehl ableiten, der für die Prozessinformationen geeignet ist, indem die durch die Datenerfassungseinheit 61 ausgegebenen Prozessinformationen in das erlernte Modell eingegeben werden.

[0094] In der vorstehenden Beschreibung gibt die Inferenzvorrichtung 60 den korrigierten Betriebsbefehl unter Verwendung des erlernten Modells infolge der Durchführung von maschinellem Lernen unter Verwendung der von der numerischen Steuervorrichtung 3a erfassten Daten aus. Das erlernte Modell kann jedoch von einer anderen numerischen Steuervorrichtung 3a erfasst werden und der korrigierte Betriebsbefehl kann auf Grundlage des erlernten Modells ausgegeben werden.

[0095] **Fig. 19** ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs der in **Fig. 18** veranschaulichten Inferenzvorrichtung 60. Die Datenerfassungseinheit 61 der Inferenzvorrichtung 60 erfasst die Prozessinformationen als Inferenzdaten (Schritt S401) und gibt die erfassten Prozessinformationen an die Inferenzeinheit 62 aus.

[0096] Die Inferenzeinheit 62 gibt die Prozessinformationen, bei denen es sich um die in Schritt S401 erfassten Inferenzdaten handelt, in das in der Speichereinheit 53 für erlernte Modelle gespeicherte erlernte Modell ein (Schritt S402). Die Inferenzeinheit 62 gibt einen korrigierten Betriebsbefehl als Ergebnis des Eingebens der Prozessinformationen in das erlernte Modell aus (Schritt S403). Es ist zu beachten, dass die Befehls erzeugungseinheit 31 der numerischen Steuervorrichtung 3a den korrigierten Betriebsbefehl erfasst, der durch die Inferenzeinheit 62 ausgegeben wird, und den erfassten korrigierten Betriebsbefehl an die gekoppelte Simulationseinheit 33a ausgibt.

[0097] Obwohl die Inferenzeinheit 62 bestärkendes Lernen als den Lernalgorithmus in der vorstehenden Beschreibung verwendet, ist der Lernalgorithmus, der von der Inferenzeinheit 62 verwendet wird, nicht auf bestärkendes Lernen beschränkt. Neben bestärkendem Lernen kann die Inferenzeinheit 62 zudem überwachtes Lernen, unüberwachtes Lernen, semiüberwachtes Lernen oder dergleichen als den Lernalgorithmus verwenden.

[0098] Der Lernalgorithmus, der von der Modellgenerationseinheit 52 verwendet wird, kann auch Deep Learning sein, das die Merkmalsextraktion direkt erlernt. Alternativ können andere bekannte Verfahren wie etwa neuronale Netzwerke, genetische Programmierung, funktionale Programmierung mit Schlussfolgerungen und Stützvektormaschinen verwendet werden, um maschinelles Lernen auszuführen.

[0099] Es ist zu beachten, dass die Vorrichtung 50 zum maschinellen Lernen und die Inferenzvorrichtung 60 jeweils eine Vorrichtung sein können, die von der numerischen Steuervorrichtung 3a getrennt ist und zum Beispiel über ein Netzwerk mit der numerischen Steuervorrichtung 3a verbunden ist. Darüber hinaus können die Lernvorrichtung 50 und die Inferenzvorrichtung 60 jeweils in die numerische Steuervorrichtung 3a eingebaut sein. Weiterhin können die Lernvorrichtung 50 und die Inferenzvorrichtung 60 jeweils auf einem Cloud-Server vorhanden sein.

[0100] Die Modellerzeugungseinheit 52 kann einen korrigierten Betriebsbefehl unter Verwendung der von einer Vielzahl numerischer Steuervorrichtungen 3a erfassten Lerndaten erlernen. Es ist zu beachten, dass die Modellerzeugungseinheit 52 Lerndaten von einer Vielzahl von numerischen Steuervorrichtungen 3a, die in demselben Bereich verwendet werden, erfassen kann oder einen korrigierten Betriebsbefehl unter Verwendung von Lerndaten erlernen kann, die von einer Vielzahl von numerischen Steuervorrichtungen 3a gesammelt wurden, die unabhängig in unterschiedlichen Bereichen arbeiten. Darüber hinaus ist es mitten während des Lernens möglich,

mit dem Sammeln von Lerndaten von einer neuen numerischen Steuervorrichtung 3a zu beginnen oder mit dem Sammeln von Lerndaten von einer numerischen Steuervorrichtung 3a aufzuhören. Darüber hinaus kann die Lernvorrichtung 50, die den korrigierten Betriebsbefehl für eine numerische Steuervorrichtung 3a erlernt hat, auf eine andere numerische Steuervorrichtung 3a angewandt werden und kann der korrigierte Betriebsbefehl für die andere numerische Steuervorrichtung 3a erneut erlernt und aktualisiert werden.

[0101] Wie vorstehend beschrieben, erzeugt die numerische Steuervorrichtung 3a gemäß der zweiten Ausführungsform einen Basisbetriebsbefehl, der aus dem numerischen Steuerprogramm 4 erzeugt wird, und einen korrigierten Betriebsbefehl, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls unter Verwendung der Prozessinformationen erhalten wird, und wählt einen Betriebsbefehl aus, welcher der Werkzeugmaschine 2 auf Grundlage des Bewertungsergebnisses jedes Betriebsbefehls zu erteilen ist. Da die Befehls erzeugungseinheit 31a einen korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage des durch die gekoppelte Simulationseinheit 33a ausgeführten Simulationsergebnisses neu erzeugt, ist es möglich, einen korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage der Eigenschaften des Antriebssystems 20, der mechanischen Dynamik und des Schneidprozesses M zu erzeugen. Daher kann die numerische Steuervorrichtung 3a den Bearbeitungsfehler effizient verringern.

[0102] Aus einem korrigierten Betriebsbefehl kann die numerische Steuervorrichtung 3a einen weiteren korrigierten Betriebsbefehl erzeugen. In diesem Fall wird der korrigierte Betriebsbefehl auf Grundlage der Lerndaten, einschließlich des korrigierten Betriebsbefehls und der Prozessinformationen, durch maschinelles Lernen unter Verwendung der Lernvorrichtung 50 erlernt. Die numerische Steuervorrichtung 3a kann den korrigierten Betriebsbefehl verwenden, der durch die Inferenzvorrichtung 60 ausgegeben wird, die den korrigierten Betriebsbefehl unter Verwendung des erlernten Modells, bei dem es sich um das Lernergebnis der Lernvorrichtung 50 handelt, ableitet. Durch die Verwendung von maschinellem Lernen kann die numerische Steuervorrichtung 3a einen korrigierten Betriebsbefehl auf eine explorative Weise erzeugen, sodass das Bearbeitungssystem 1a einen korrigierten Betriebsbefehl erzeugen kann, der imstande ist, den Bearbeitungsfehler zu verringern, ohne eine Regel zum Korrigieren des Betriebsbefehls im Voraus zu erstellen.

Dritte Ausführungsform.

[0103] Fig. 20 ist eine Darstellung, die eine Konfiguration eines Bearbeitungssystems 1b gemäß der dritten Ausführungsform veranschaulicht. E ist zu

beachten, dass Komponenten mit den gleichen Funktionen wie jene in der ersten Ausführungsform mit den gleichen Bezugszeichen wie jene in der ersten Ausführungsform gekennzeichnet sind und auf redundante Erläuterungen verzichtet wird. Nachfolgend werden hauptsächlich Unterschiede zu der ersten und der zweiten Ausführungsform beschrieben.

[0104] Das Bearbeitungssystem 1b beinhaltet eine Werkzeugmaschine 2b und eine numerische Steuervorrichtung 3b. Die Werkzeugmaschine 2b beinhaltet das Spindeltriebssystem 21, das Vorschubtriebssystem 22, das Werkzeug 23, den Tisch 24 und einen Sensor 25.

[0105] Der Sensor 25 erkennt eine Schwingung einer Struktur, die Schwingung während des Betriebs der Werkzeugmaschine 2b erzeugt. Der Sensor 25 ist zum Beispiel ein Beschleunigungssensor oder ein Kraftsensor. Alternativ kann der Sensor 25 ein Codierer sein, der im Voraus innerhalb des Antriebssystems 20 zur Rückkopplungssteuerung des Antriebssystems 20 bereitgestellt ist. Der Sensor 25 ist mit der numerischen Steuervorrichtung 3b verbunden und ein durch den Sensor 25 erfasstes Signal wird als ein Sensorsignal an die numerische Steuervorrichtung 3b ausgegeben.

[0106] Die numerische Steuervorrichtung 3b beinhaltet eine Befehlserzeugungseinheit 31, die Speichereinheit 32, die gekoppelte Simulationseinheit 33, die Prozessbewertungseinheit 34 und die Antriebssteuereinheit 35. Die numerische Steuervorrichtung 3b unterscheidet sich von der ersten und der zweiten Ausführungsform beim Erzeugen eines Betriebsbefehls auf Grundlage des Sensorsignals, das von dem Sensor 25 ausgegeben wird.

[0107] Die Befehlserzeugungseinheit 31b erzeugt einen Basisbetriebsbefehl ähnlich der Befehlserzeugungseinheit 31 in der ersten Ausführungsform. Weiterhin kann die Befehlserzeugungseinheit 31b einen korrigierten Betriebsbefehl durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls auf Grundlage des Sensorsignals, das von dem Sensor 25 ausgegeben wird, erzeugen. Konkret bestimmt die Befehlserzeugungseinheit 31b auf Grundlage des Sensorsignals den Vorschubbetrag oder die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W pro Zahn zum Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls. Beispielsweise wird das Lernen für den Vorschubbetrag oder die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W pro Zahn entsprechend der Zeitwellenform oder dem Frequenzspektrum des Sensorsignals im Voraus durchgeführt und bestimmt die Befehlserzeugungseinheit 31b, wenn das Sensorsignal eingegeben wird, den Vorschubbetrag oder die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W pro Zahn unter Verwendung eines Verfahrens zum maschinellen Lernen, wie etwa Mustervergleich. Alternativ kann eine Entsprechungsta-

belle mit der Amplitude des Sensorsignals und dem Vorschubbetrag oder der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks W pro Zahn im Voraus ausgezeichnet werden und kann die Befehlserzeugungseinheit 31b den Vorschubbetrag oder die ungeschnittene Spandicke des Werkstücks W pro Zahn auf Grundlage der Entsprechungstabelle bestimmen.

[0108] Da der Betrieb der numerischen Steuervorrichtung 3b dem Betrieb der in **Fig. 13** veranschaulichten numerischen Steuervorrichtung 3a ähnelt, mit der Ausnahme, dass das Sensorsignal zum Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls verwendet wird, wird hier auf eine detaillierte Beschreibung davon verzichtet.

[0109] In der vorstehenden Beschreibung erzeugt die Befehlserzeugungseinheit 31b einen korrigierten Betriebsbefehl durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls unter Verwendung des Sensorsignals, wobei der Betriebsbefehl jedoch sequenziell korrigiert werden kann. Das heißt, die Befehlserzeugungseinheit 31b kann ferner einen korrigierten Betriebsbefehl unter Verwendung eines Sensorsignals erzeugen, das erkannt wird, wenn der unter Verwendung des Sensorsignals erzeugte korrigierte Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine 2b erteilt wird. In diesem Fall ist es möglich, ein Verfahren zum Suchen nach einem korrigierten Betriebsbefehl, der die Schwingung des Sensorsignals verringert, unter Verwendung eines Verfahrens zum maschinellen Lernen, wie etwa bestärkendem Lernen, unter Verwendung der Amplitude oder Phase der Schwingungskomponente des Sensorsignals als Bewertungswert zu verwenden.

[0110] Im Falle der Verwendung von maschinellem Lernen kann beispielsweise das erlernte Modell unter Verwendung der in **Fig. 16** veranschaulichten Lernvorrichtung 50 erfasst werden und kann ein korrigierter Betriebsbefehl aus dem erlernten Modell unter Verwendung der in **Fig. 18** veranschaulichten Inferenzvorrichtung 60 erhalten werden. In diesem Fall wird in der in der zweiten Ausführungsform bereitgestellten Beschreibung auf die Beschreibung des Verfahrens zum Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls, der durch die numerische Steuervorrichtung 3b gemäß der dritten Ausführungsform verwendet wird, verzichtet, indem die „Prozessinformationen“, die durch die Lerndatenerfassungseinheit 51 und die Datenerfassungseinheit 61 erfasst werden, durch das „Sensorsignal“ ersetzt werden. In diesem Fall ist der durch die Lerndatenerfassungseinheit 51 erfasste Betriebsbefehl der Betriebsbefehl, der dem Sensorsignal entspricht, insbesondere der Betriebsbefehl, welcher der Werkzeugmaschine 2b erteilt wird, wenn das Sensorsignal erfasst wird.

[0111] Wie vorstehend beschrieben, beinhaltet bei der numerischen Steuervorrichtung 3b gemäß der dritten Ausführungsform die Werkzeugmaschine 2b den Sensor 25 und kann die Befehlszeugungseinheit 31b der numerischen Steuervorrichtung 3b einen korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage des Sensorsignals erzeugen. Daher kann die Befehlszeugungseinheit 31b den Betriebsbefehl gemäß dem tatsächlich in der Werkzeugmaschine 2b erzeugten Schwingungszustand korrigieren und kann den Betriebsbefehl erzeugen, der den Bearbeitungsfehler wirksam verringert.

[0112] Darüber hinaus kann das Bearbeitungssystem 1b durch Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls auf eine explorative Weise unter Verwendung von maschinellem Lernen einen korrigierten Betriebsbefehl erzeugen, der den Bearbeitungsfehler verringert, ohne im Voraus eine Korrekturregel für den Betriebsbefehl zu erstellen.

[0113] Als Nächstes wird eine Hardwarekonfiguration der numerischen Steuervorrichtungen 3, 3a und 3b, der Lernvorrichtung 50 und der Inferenzvorrichtung 60 gemäß der ersten bis dritten Ausführungsform beschrieben. Die Befehlszeugungseinheiten 31, 31a und 31b, die gekoppelten Simulationseinheiten 33 und 33a, die Prozessbewertungseinheit 34 und die Antriebssteuerungseinheit 35 der numerischen Steuervorrichtungen 3, 3a und 3b, die Lerndatenerfassungseinheit 51 und die Modellerzeugungseinheit 52 der Lernvorrichtung 50 und die Datenerfassungseinheit 61 und die Inferenzeinheit 62 der Inferenzvorrichtung 60 sind durch eine Verarbeitungsschaltung umgesetzt. Die Verarbeitungsschaltung kann durch dedizierte Hardware umgesetzt sein oder kann eine Steuerschaltung unter Verwendung einer zentralen Verarbeitungseinheit (CPU) sein.

[0114] Wenn die vorstehende Verarbeitungsschaltung durch dedizierte Hardware umgesetzt ist, wird die Verarbeitungsschaltung durch die in **Fig. 21** veranschaulichte Verarbeitungsschaltung 90 umgesetzt. **Fig. 21** ist eine Darstellung, die dedizierte Hardware zum Umsetzen der Funktionen der numerischen Steuervorrichtungen 3, 3a und 3b, der Lernvorrichtung 50 und der Inferenzvorrichtung 60 gemäß der ersten bis dritten Ausführungsform veranschaulicht. Die Verarbeitungsschaltung 90 ist eine Einzelschaltung, eine Verbundschaltung, ein programmierter Prozessor, ein parallel programmierter Prozessor, eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC), ein feldprogrammierbares Gatter-Array (FPGA) oder eine Kombination daraus.

[0115] Wenn die vorstehende Verarbeitungsschaltung durch eine Steuerschaltung unter Verwendung einer CPU umgesetzt ist, ist diese Steuerschaltung zum Beispiel eine Steuerschaltung 91 mit der in

Fig. 22 veranschaulichten Konfiguration. **Fig. 22** ist eine Darstellung, die eine Konfiguration der Steuerschaltung 91 zum Umsetzen der Funktionen der numerischen Steuervorrichtungen 3, 3a und 3b, der Lernvorrichtung 50 und der Inferenzvorrichtung 60 gemäß der ersten bis dritten Ausführungsform veranschaulicht. Wie in **Fig. 22** veranschaulicht, beinhaltet die Steuerschaltung 91 einen Prozessor 92 und einen Speicher 93. Der Prozessor 92 ist eine CPU und wird auch als arithmetische Vorrichtung, Mikroprozessor, Mikrocomputer, digitaler Signalprozessor (DSP) oder dergleichen bezeichnet. Zu Beispielen für den Speicher 93 gehören ein nichtflüchtiger oder flüchtiger Halbleiterspeicher, eine Magnetplatte, eine flexible Platte, eine optische Platte, eine Compact Disc, eine Mini Disc, eine Digital Versatile Disc (DVD) und dergleichen. Zu Beispielen für nichtflüchtige oder flüchtige Halbleiterspeicher gehören ein Direktzugriffsspeicher (RAM), ein Festwertspeicher (ROM), ein Flash-Speicher, ein löschbarer programmierbarer ROM (EPROM), ein elektrisch betriebener EPROM (EEPROM, eingetragenes Warenzeichen) und dergleichen.

[0116] Wenn die vorstehende Verarbeitungsschaltung durch die Steuerschaltung 91 umgesetzt ist, liest und führt der Prozessor 92 das Programm aus, das dem Prozess jeder in dem Speicher 93 gespeicherten Komponente entspricht, wodurch die Verarbeitungsschaltung umgesetzt wird. Der Speicher 93 wird zudem als temporärer Speicher für jeden Prozess verwendet, der von dem Prozessor 92 ausgeführt wird.

[0117] Es ist zu beachten, dass das Programm, das durch den Prozessor 92 ausgeführt wird, bereitgestellt werden kann, indem es auf einem Speichermedium gespeichert ist, oder über einen Kommunikationspfad bereitgestellt werden kann. Darüber hinaus können die Funktionen der numerischen Steuervorrichtungen 3, 3a und 3b, der Lernvorrichtung 50 und der Inferenzvorrichtung 60 gemäß der ersten bis dritten Ausführungsform unter Verwendung einer beliebigen der in **Fig. 21** veranschaulichten Verarbeitungsschaltung 90 und der in **Fig. 22** veranschaulichten Steuerschaltung 91 oder unter Verwendung einer Kombination der Verarbeitungsschaltung 90 und der Steuerschaltung 91 umgesetzt werden.

[0118] Die in den vorstehend erwähnten Ausführungsformen beschriebenen Konfigurationen geben Beispiele an. Die Ausführungsformen können mit einer anderen hinreichend bekannten Technik und miteinander kombiniert werden und einige der Konfigurationen können in einem Bereich, der nicht vom Kern abweicht, weggelassen oder verändert werden.

Liste der Bezugszeichen

[0119] 1, 1a, 1b Bearbeitungssystem; 2, 2b Werkzeugmaschine; 3, 3a, 3b numerische Steuervorrichtung; 4 numerisches Steuerprogramm; 20 Antriebssystem; 21 Spindeltriebssystem; 22, 22-1, 22-2 Vorschubantriebssystem; 23 Werkzeug; 24 Tisch; 25 Sensor; 31, 31a, 31b Befehls erzeugungseinheit; 32, 32a Speichereinheit; 33, 33a gekoppelte Simulationseinheit; 34 Prozessbewertungseinheit; 35 Antriebssteuereinheit; 50 Lernvorrichtung; 51 Lerndatenerfassungseinheit; 52 Modellerzeugungseinheit; 53 Speichereinheit für erlernte Modelle; 54 Belohnungsberechnungseinheit; 55 Funktionsaktualisierungseinheit; 60 Inferenzvorrichtung; 61 Datenerfassungseinheit; 62 Inferenzeinheit; 90 Verarbeitungsschaltung; 91 Steuerschaltung; 92 Prozessor; 93 Speicher; 211 Spindelmotor; 212 Spindeltriebssystemmechanismus; 221, 221-1, 221-2 Servomotor; 222, 222-1, 222-2 Vorschubantriebssystemmechanismus; 321 Schneidprozessmodell; 322 Dynamikmodell; 323 Spindeltriebssystemsteuermodell; 324 Vorschubantriebssystemsteuermodell; 325 Schneidbedingungsinformationen; A1 Schnittfläche pro Zahn; c Vorschubbetrag; F_c Schnittkraft; F_d Störkraft; M Schneidprozess; MD1 werkzeugseitige mechanische Dynamik; MD2 werkstückseitige mechanische Dynamik; P1, P2 Position; R1 Drehrichtung; r1 Antriebssystemverschiebung; r2 Strukturverschiebung; T_c Schnittmoment; T_d Störmoment; W Werkstück; θ_1 Spindeltriebssystemwinkel; θ_2 Werkzeugwinkel.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- JP 2013132733 [0004]

Patentansprüche

1. Numerische Steuervorrichtung, die eine Werkzeugmaschine steuert, indem sie der Werkzeugmaschine einen Betriebsbefehl erteilt, wobei die Werkzeugmaschine ein Antriebssystem beinhaltet, das ein Spindeltriebssystem, um ein Werkzeug zum Bearbeiten eines Werkstücks oder eine das Werkstück drehende Spindel anzutreiben, und ein Vorschubantriebssystem, um eine Vorschubachse anzutreiben, die eine relative Position zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ändert, beinhaltet, wobei die numerische Steuervorrichtung Folgendes umfasst:

eine Befehlszeugungseinheit, um einen Basisbetriebsbefehl zu erzeugen, bei dem es sich um den Betriebsbefehl auf Grundlage eines numerischen Steuerungsprogramms handelt, und einen korrigierten Betriebsbefehl zu erzeugen, bei dem es sich um den Betriebsbefehl handelt, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird;

eine gekoppelte Simulationseinheit, um Prozessinformationen zu berechnen, die einen Einfluss eines Betriebs des Antriebssystems und eine Dynamik einer Struktur widerspiegeln, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine bei einer Bearbeitung des Werkstücks mit dem Werkzeug Schwingung erzeugt, wobei die Prozessinformationen Ergebnisse einer Simulationsbearbeitung angeben, bei welcher der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils der Werkzeugmaschine erteilt werden; und

eine Prozessbewertungseinheit, um auf Grundlage einer Vielzahl der Prozessinformationen eine Größe eines Bearbeitungsfehlers bei einer Verwendung von jedem aus einer Vielzahl der Betriebsbefehle zu bewerten und den der Werkzeugmaschine zu erteilenden Betriebsbefehl aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl auszuwählen.

2. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 1, wobei die gekoppelte Simulationseinheit die Prozessinformationen bei einer Verwendung des Betriebsbefehls unter einer vorgegebenen Schneidbedingung für ein Schneidprozessmodell berechnet, wobei das Schneidprozessmodell ein mathematisches Modell, das eine Schneideigenschaft zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück wiedergibt, ein Dynamikmodell, das ein mathematisches Modell ist, das eine dynamische Eigenschaft der Struktur wiedergibt, ein Spindeltriebssteuermodell, das ein mathematisches Modell ist, welches das Spindeltriebssystem und eine das Spindeltriebssystem steuernde Spindeltriebssteuerung wiedergibt, und ein Vorschubantriebssteuermodell, das ein mathematisches Modell ist, welches das Vorschubantriebssystem und eine das Vorschubantriebssystem steuernde Vorschubantriebssteuerung wiedergibt, ist.

3. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 2, ferner umfassend eine Speichereinheit, um das Schneidprozessmodell, das Dynamikmodell, das Spindeltriebssteuermodell, das Vorschubantriebssteuermodell und Schneidbedingungsinformationen, welche die Schneidbedingung wiedergeben, zu speichern, wobei die gekoppelte Simulationseinheit die Prozessinformationen unter Verwendung des Schneidprozessmodells, des Dynamikmodells, des Spindeltriebssteuermodells, des Vorschubantriebssteuermodells und der Schneidbedingungsinformationen, die in der Speichereinheit gespeichert sind, berechnet.

4. Numerische Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Befehlszeugungseinheit als den korrigierten Betriebsbefehl einen Befehl erzeugt, bei dem ein relativer Pfad, entlang dessen sich das Werkzeug in Bezug auf das Werkstück bewegt, gleich dem des Basisbetriebsbefehls ist und mindestens eines von einem Vorschubbetrag der Vorschubachse und einer ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks geändert ist.

5. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 4, wobei die Befehlszeugungseinheit als den korrigierten Betriebsbefehl einen Betriebsbefehl einstellt, bei dem mindestens eines von einer Spindeldrehzahl und einer Vorschubrate des Basisbetriebsbefehls gemäß dem Vorschubbetrag oder der ungeschnittenen Spandicke des Werkstücks geändert ist.

6. Numerische Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Befehlszeugungseinheit den korrigierten Betriebsbefehl durch Überlagern einer vorbestimmten Profilvariation auf mindestens eines von einer Spindeldrehzahl und einer Vorschubrate des Basisbetriebsbefehls erzeugt.

7. Numerische Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Befehlszeugungseinheit den korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage der Prozessinformationen erzeugt.

8. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 7, wobei die Befehlszeugungseinheit ferner einen korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage der Prozessinformationen erzeugt, wenn der korrigierte Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine erteilt wird.

9. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, ferner umfassend: eine Lerndatenerfassungseinheit, um Lerndaten zu erfassen, welche die Prozessinformationen und den Betriebsbefehl, der den Prozessinformationen entspricht, beinhalten; und

eine Modellerzeugungseinheit, um unter Verwendung der Lerndaten ein erlerntes Modell zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus den Prozessinformationen zu erzeugen.

10. Numerische Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 9, ferner umfassend: eine Datenerfassungseinheit, um die Prozessinformationen zu erfassen; und eine Inferenzeinheit, um einen neu korrigierten Betriebsbefehl aus den durch die Datenerfassungseinheit erfassten Prozessinformationen unter Verwendung eines erlernten Modells zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus den Prozessinformationen auszugeben.

11. Numerische Steuervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Werkzeugmaschine ferner einen Sensor beinhaltet, um eine Schwingung der Struktur während des Betriebs zu erkennen und ein Sensorsignal auszugeben, und die Befehls erzeugungseinheit den korrigierten Betriebsbefehl auf Grundlage des Sensorsignals erzeugt.

12. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 11, ferner umfassend: eine Lerndatenerfassungseinheit, um Lerndaten zu erfassen, welche das Sensorsignal und den Betriebsbefehl, der dem Sensorsignal entspricht, beinhalten; und eine Modellerzeugungseinheit, um unter Verwendung der Lerndaten ein erlerntes Modell zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus dem Sensorsignal zu erzeugen.

13. Numerische Steuervorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, ferner umfassend: eine Datenerfassungseinheit, um das Sensorsignal zu erfassen; und eine Inferenzeinheit, um einen neu korrigierten Betriebsbefehl aus dem durch die Datenerfassungseinheit erfassten Sensorsignal unter Verwendung eines erlernten Modells zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus dem Sensorsignal auszugeben.

14. Bearbeitungssystem, umfassend: eine Werkzeugmaschine, die ein Antriebssystem beinhaltet, das ein Spindeltriebssystem, um ein Werkzeug zum Bearbeiten eines Werkstücks oder eine das Werkstück drehende Spindel anzutreiben, und ein Vorschubantriebssystem, um eine Vorschubachse anzutreiben, die eine relative Position zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ändert, beinhaltet, wobei die Werkzeugmaschine dazu konfiguriert ist, das Werkstück auf Grundlage eines Betriebsbefehls zu bearbeiten, der auf Grundlage eines numerischen Steuerprogramms erzeugt

wird; und eine numerische Steuervorrichtung, um die Werkzeugmaschine durch Erteilen des Betriebsbefehls an die Werkzeugmaschine zu steuern, wobei die numerische Steuervorrichtung Folgendes beinhaltet:

eine Befehls erzeugungseinheit, um einen Basisbetriebsbefehl zu erzeugen, bei dem es sich um den Betriebsbefehl auf Grundlage des numerischen Steuerungsprogramms handelt, und einen korrigierten Betriebsbefehl zu erzeugen, bei dem es sich um den Betriebsbefehl handelt, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird; eine gekoppelte Simulationseinheit, um Prozessinformationen zu berechnen, die einen Einfluss eines Betriebs des Antriebssystems und eine Dynamik einer Struktur widerspiegeln, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine bei einem Schneidprozess des Werkstücks mit dem Werkzeug Schwingung erzeugt, wobei die Prozessinformationen Ergebnisse einer Simulationsbearbeitung angeben, bei welcher der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils der Werkzeugmaschine erteilt werden; und eine Prozessbewertungseinheit, um auf Grundlage einer Vielzahl der Prozessinformationen eine Größe eines Bearbeitungsfehlers bei einer Verwendung von jedem aus einer Vielzahl der Betriebsbefehle zu bewerten und den der Werkzeugmaschine zu erteilenden Betriebsbefehl aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl auszuwählen.

15. Bearbeitungssystem nach Anspruch 14, ferner umfassend eine Lernvorrichtung, die Folgendes beinhaltet:

eine Lerndatenerfassungseinheit, um Lerndaten zu erfassen, die den durch die numerische Steuervorrichtung erzeugten Betriebsbefehl und die Prozessinformationen, die ein Simulationsergebnis angeben, wenn der Betriebsbefehl der Werkzeugmaschine erteilt wird, beinhalten; und eine Modellerzeugungseinheit, um unter Verwendung der Lerndaten ein erlerntes Modell zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus den Prozessinformationen der numerischen Steuervorrichtung zu erzeugen.

16. Bearbeitungssystem nach Anspruch 14 oder 15, ferner umfassend eine Inferenzvorrichtung, die Folgendes beinhaltet:

eine Datenerfassungseinheit, um die durch die numerische Steuervorrichtung erzeugten Prozessinformationen zu erfassen; und eine Inferenzeinheit, um einen neu korrigierten Betriebsbefehl aus den durch die Datenerfassungseinheit erfassten Prozessinformationen unter Verwendung eines erlernten Modells zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus den Prozessinformationen auszugeben.

17. Bearbeitungssystem nach Anspruch 14, wobei die Werkzeugmaschine ferner einen Sensor beinhaltet, um eine Schwingung der Struktur während des Betriebs zu erkennen und ein Sensorsignal auszugeben, und das Bearbeitungssystem ferner eine Lernvorrichtung umfasst, die Folgendes beinhaltet: eine Lerndatenerfassungseinheit, um Lerndaten zu erfassen, welche das während einer Steuerung der Werkzeugmaschine durch die numerische Steuervorrichtung erhaltene Sensorsignal und den Betriebsbefehl, der dem Sensorsignal entspricht, beinhalten; und eine Modellerzeugungseinheit, um unter Verwendung der Lerndaten ein erlerntes Modell zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus dem Sensorsignal zu erzeugen.

18. Bearbeitungssystem nach Anspruch 14 oder 17, wobei die Werkzeugmaschine ferner einen Sensor beinhaltet, um eine Schwingung der Struktur während des Betriebs zu erkennen und ein Sensorsignal auszugeben, und das Bearbeitungssystem ferner eine Inferenzvorrichtung umfasst, die Folgendes beinhaltet: eine Datenerfassungseinheit, um das Sensorsignal zu erfassen, wenn die numerische Steuervorrichtung der Werkzeugmaschine den Betriebsbefehl erteilt; und eine Inferenzeinheit, um einen neu korrigierten Betriebsbefehl aus dem durch die Datenerfassungseinheit erfassten Sensorsignal unter Verwendung eines erlernten Modells zum Ableiten eines neu korrigierten Betriebsbefehls aus dem Sensorsignal auszugeben.

19. Numerisches Steuerverfahren, das durch eine numerische Steuervorrichtung ausgeführt wird, die eine Werkzeugmaschine steuert, indem sie der Werkzeugmaschine einen Betriebsbefehl erteilt, wobei die Werkzeugmaschine ein Antriebssystem beinhaltet, das ein Spindeltriebssystem, um ein Werkzeug zum Bearbeiten eines Werkstücks oder eine das Werkstück drehende Spindel anzutreiben, und ein Vorschubantriebssystem, um eine Vorschubachse anzutreiben, die eine relative Position zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ändert, beinhaltet, wobei das numerische Steuerverfahren Folgendes umfasst: einen Schritt zum Erzeugen eines Basisbetriebsbefehls, bei dem es sich um den Betriebsbefehl auf Grundlage eines numerischen Steuerungsprogramms handelt; einen Schritt zum Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls, bei dem es sich um den Betriebsbefehl handelt, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird; einen Schritt zum Berechnen von Prozessinforma-

tionen, die einen Einfluss eines Betriebs des Antriebssystems und eine Dynamik einer Struktur widerspiegeln, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine bei einem Schneidprozess des Werkstücks mit dem Werkzeug Schwingung erzeugt, wobei die Prozessinformationen Ergebnisse einer Simulationsbearbeitung angeben, bei welcher der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils der Werkzeugmaschine erteilt werden; und einen Schritt zum Bewerten, auf Grundlage einer Vielzahl der Prozessinformationen, einer Größe eines Bearbeitungsfehlers bei einer Verwendung von jedem aus einer Vielzahl der Betriebsbefehle und Auswählen des der Werkzeugmaschine zu erteilenden Betriebsbefehls aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl.

20. Bearbeitungsverfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks durch Erteilen eines Betriebsbefehls an eine Werkzeugmaschine, wobei die Werkzeugmaschine ein Antriebssystem beinhaltet, das ein Spindeltriebssystem, um ein Werkzeug zum Bearbeiten eines Werkstücks oder eine das Werkstück drehende Spindel anzutreiben, und ein Vorschubantriebssystem, um eine Vorschubachse anzutreiben, die eine relative Position zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ändert, beinhaltet, wobei das Bearbeitungsverfahren Folgendes umfasst: einen Schritt zum Erzeugen eines Basisbetriebsbefehls, bei dem es sich um den Betriebsbefehl auf Grundlage eines numerischen Steuerungsprogramms handelt; einen Schritt zum Erzeugen eines korrigierten Betriebsbefehls, bei dem es sich um den Betriebsbefehl handelt, der durch Korrigieren des Basisbetriebsbefehls erhalten wird; einen Schritt zum Berechnen von Prozessinformationen, die einen Einfluss eines Betriebs des Antriebssystems und eine Dynamik einer Struktur widerspiegeln, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine bei einem Schneidprozess des Werkstücks mit dem Werkzeug Schwingung erzeugt, wobei die Prozessinformationen Ergebnisse einer Simulationsbearbeitung angeben, bei welcher der Basisbetriebsbefehl und der korrigierte Betriebsbefehl jeweils der Werkzeugmaschine erteilt werden; einen Schritt zum Bewerten, auf Grundlage einer Vielzahl der Prozessinformationen, einer Größe eines Bearbeitungsfehlers bei einer Verwendung von jedem aus einer Vielzahl der Betriebsbefehle und Auswählen des der Werkzeugmaschine zu erteilenden Betriebsbefehls aus dem Basisbetriebsbefehl und dem korrigierten Betriebsbefehl; einen Schritt zum Erteilen des ausgewählten Betriebsbefehls an die Werkzeugmaschine; und einen Schritt zum Bearbeiten des Werkstücks unter Verwendung des Werkzeugs, während das

Antriebssystem gemäß dem Betriebsbefehl betrieben wird.

Es folgen 17 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

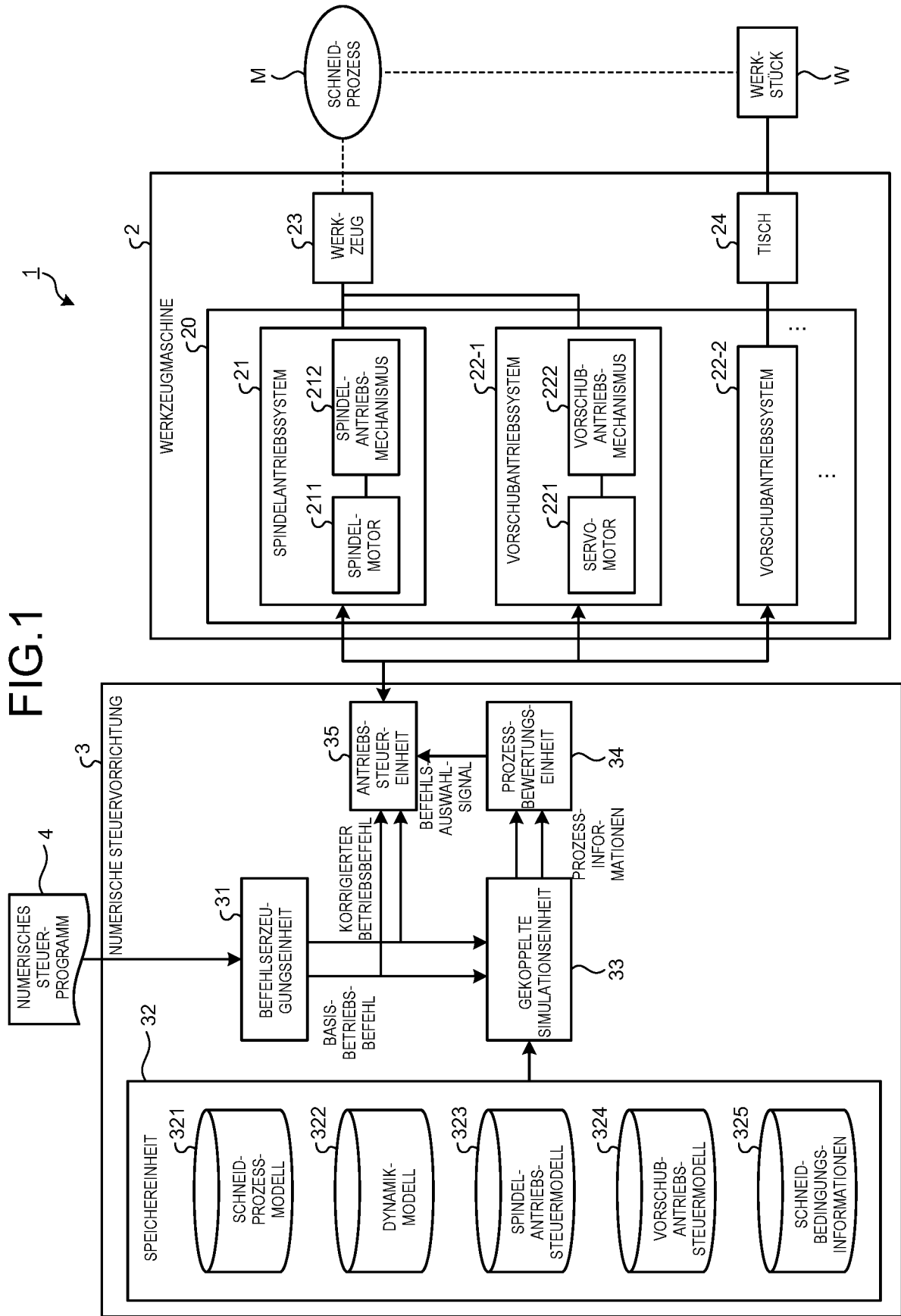


FIG.2

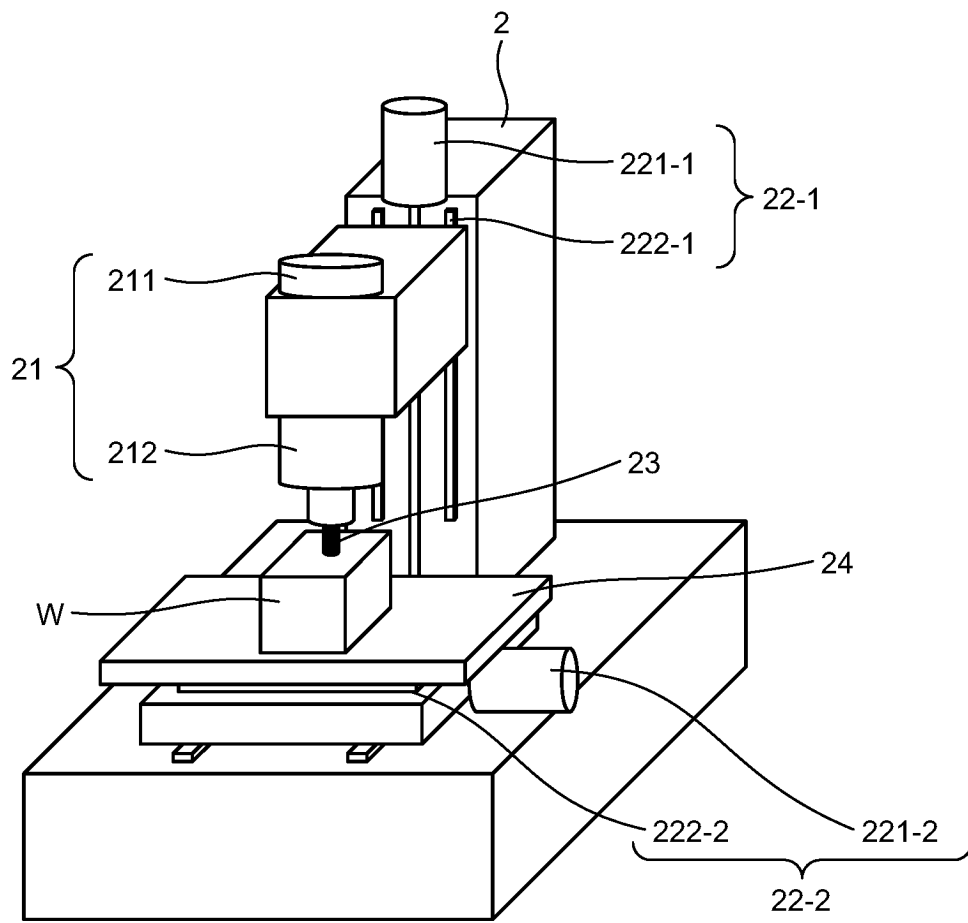


FIG.3

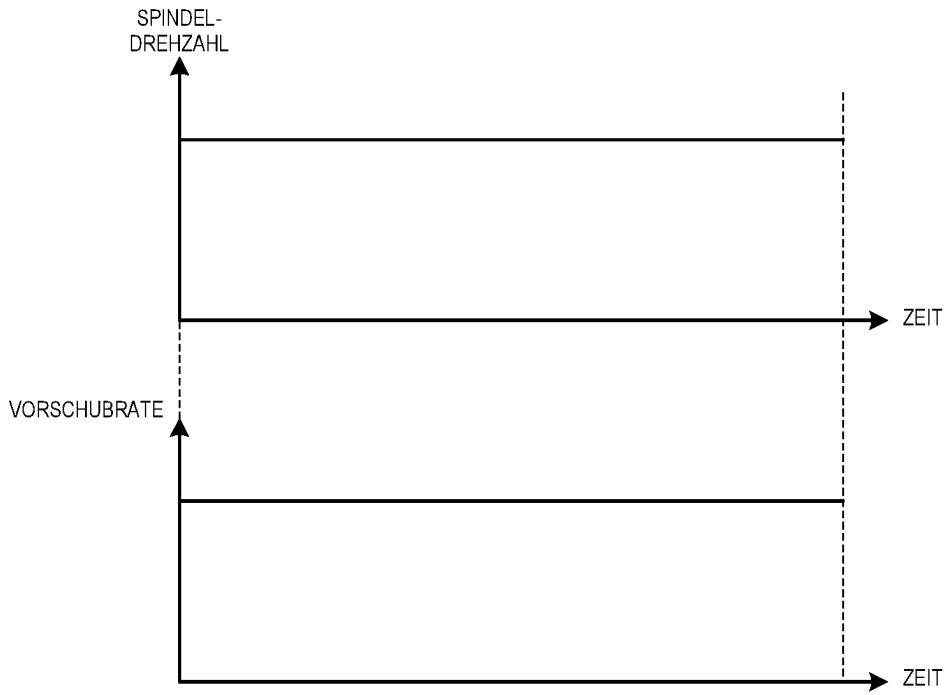


FIG.4

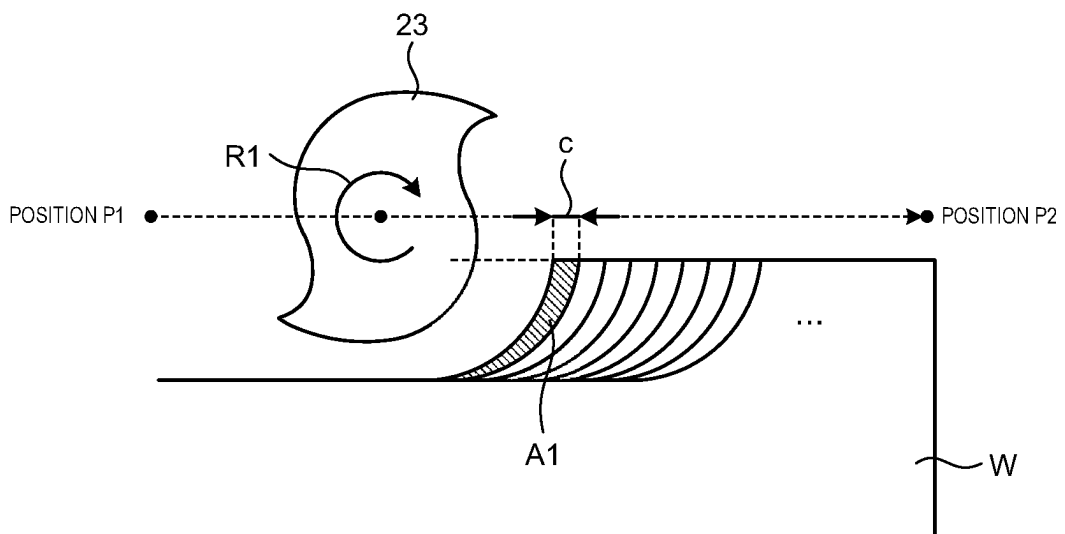


FIG.5

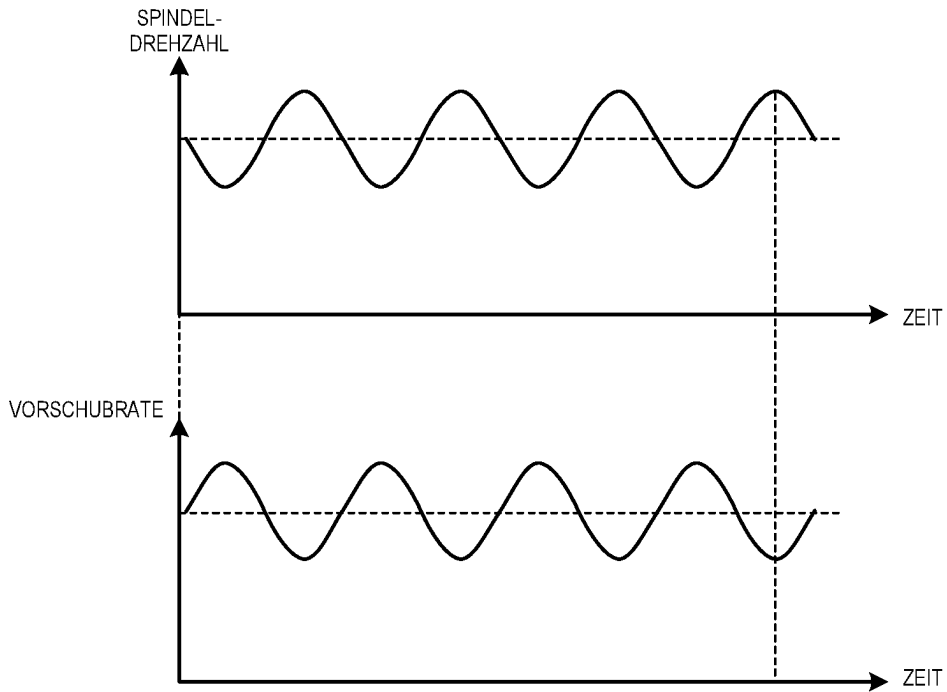


FIG.6

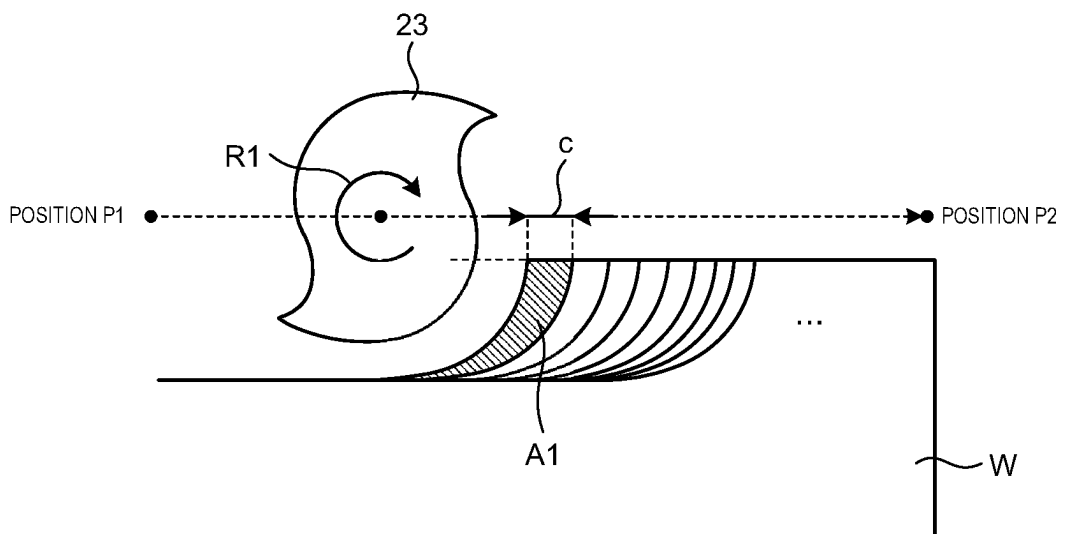


FIG.7

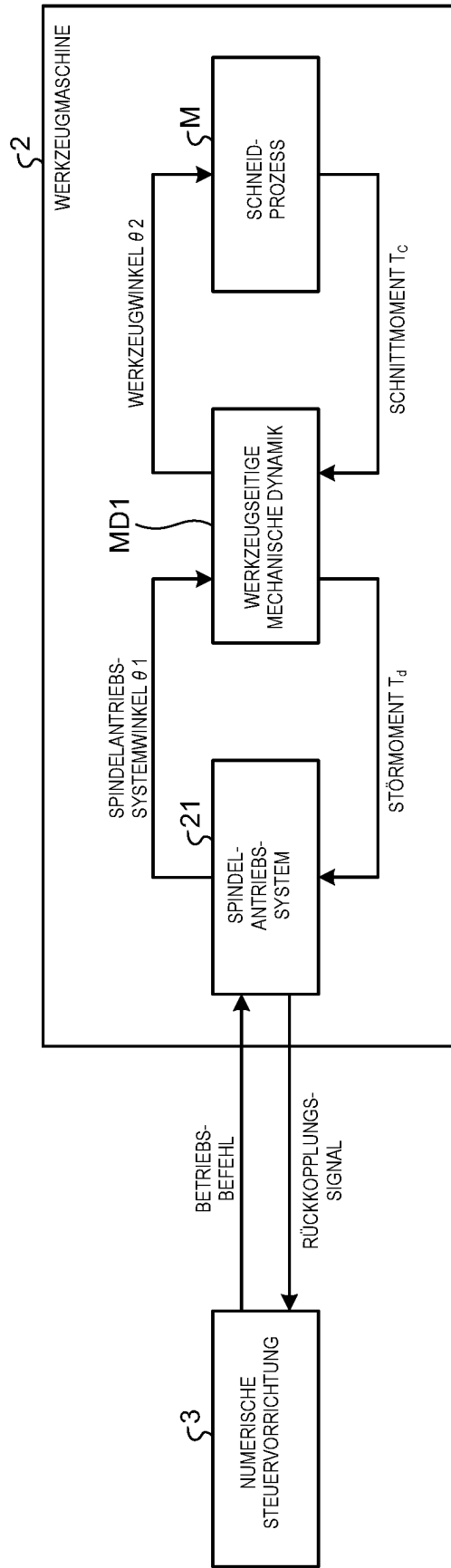


FIG.8

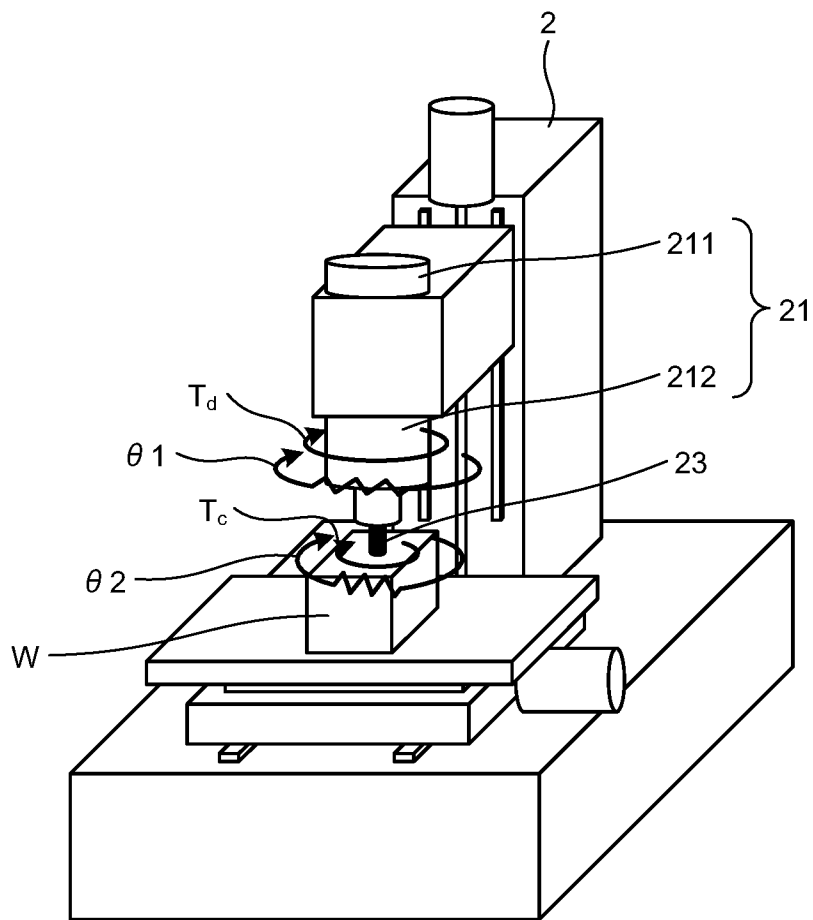


FIG.9

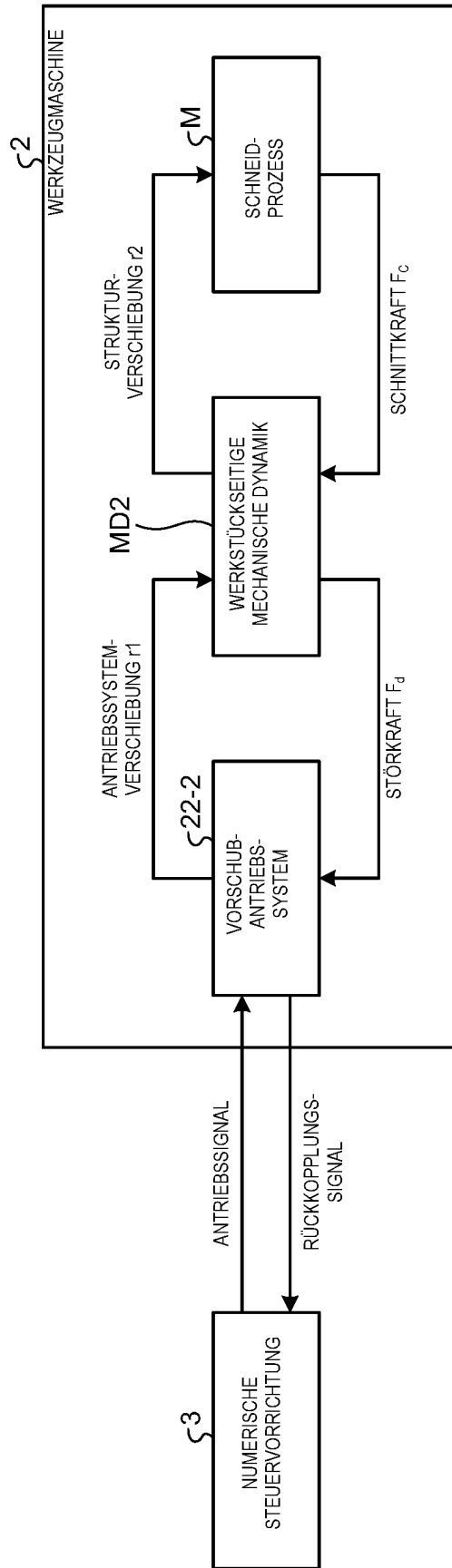


FIG.10

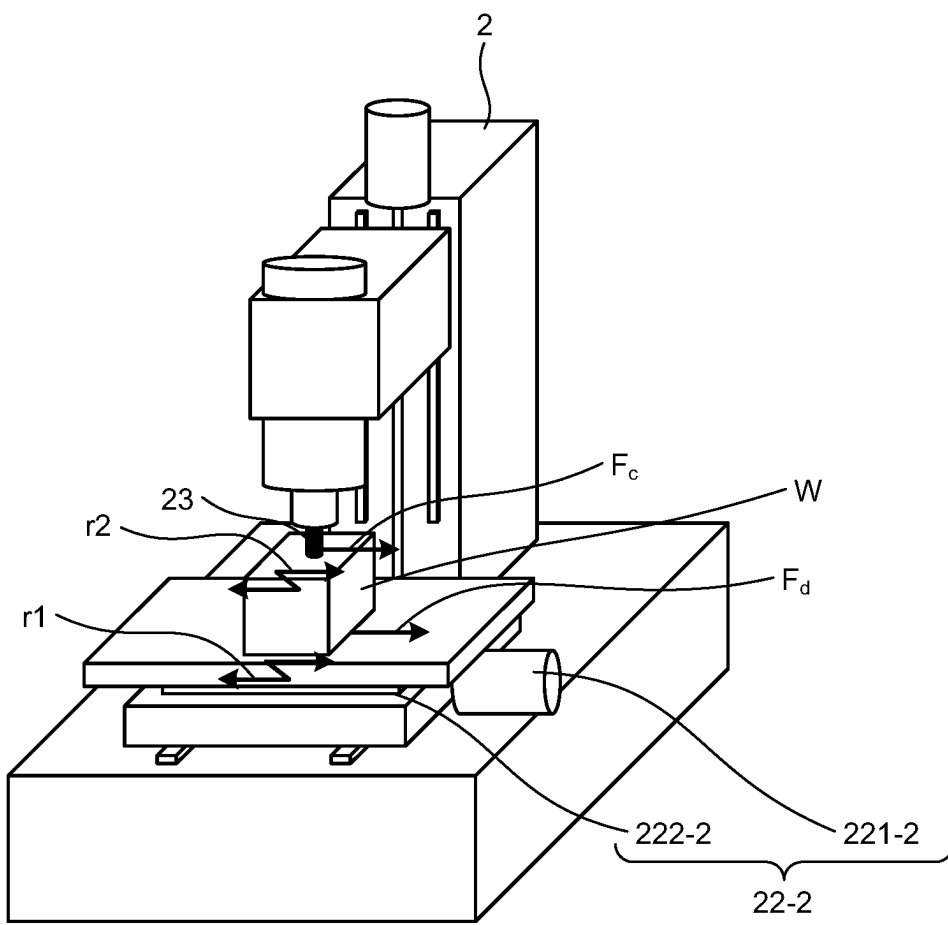


FIG.11

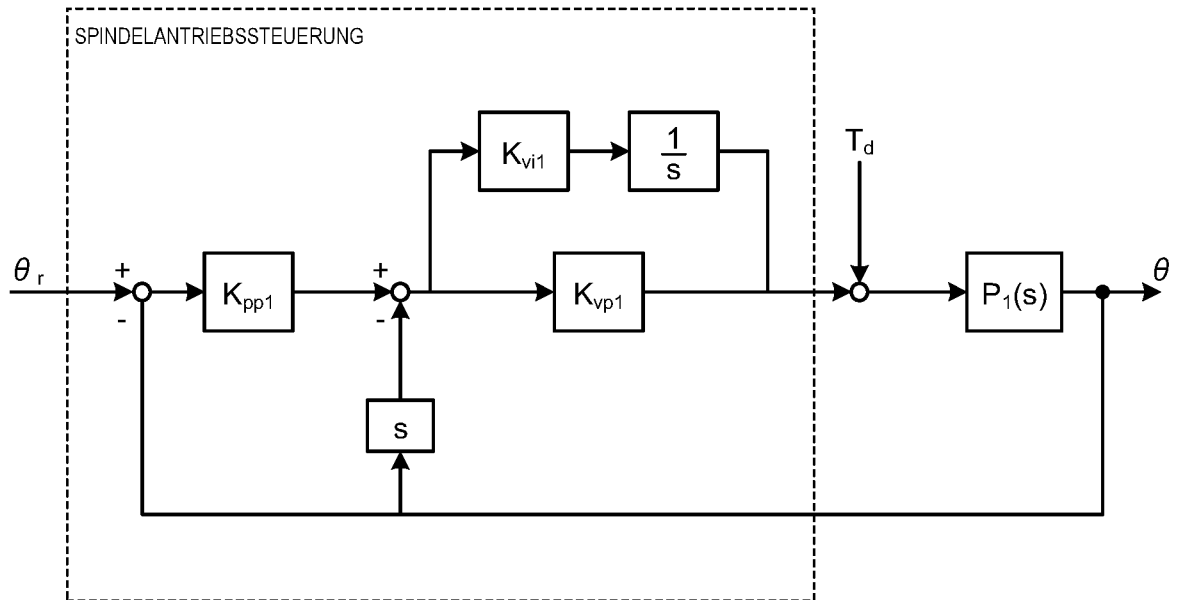


FIG.12

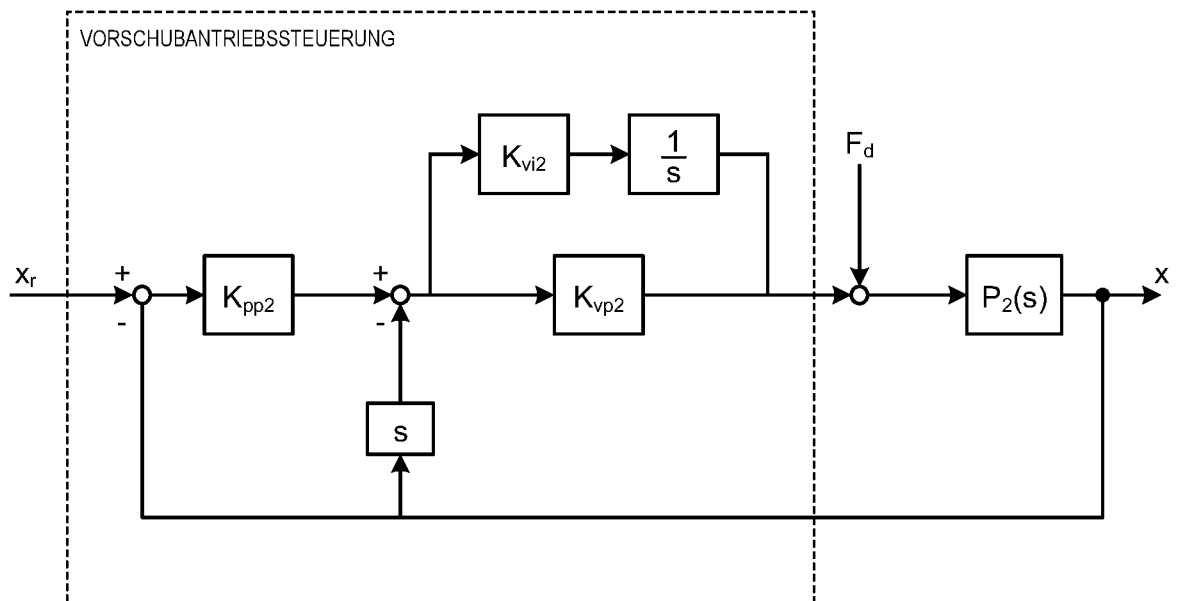


FIG.13

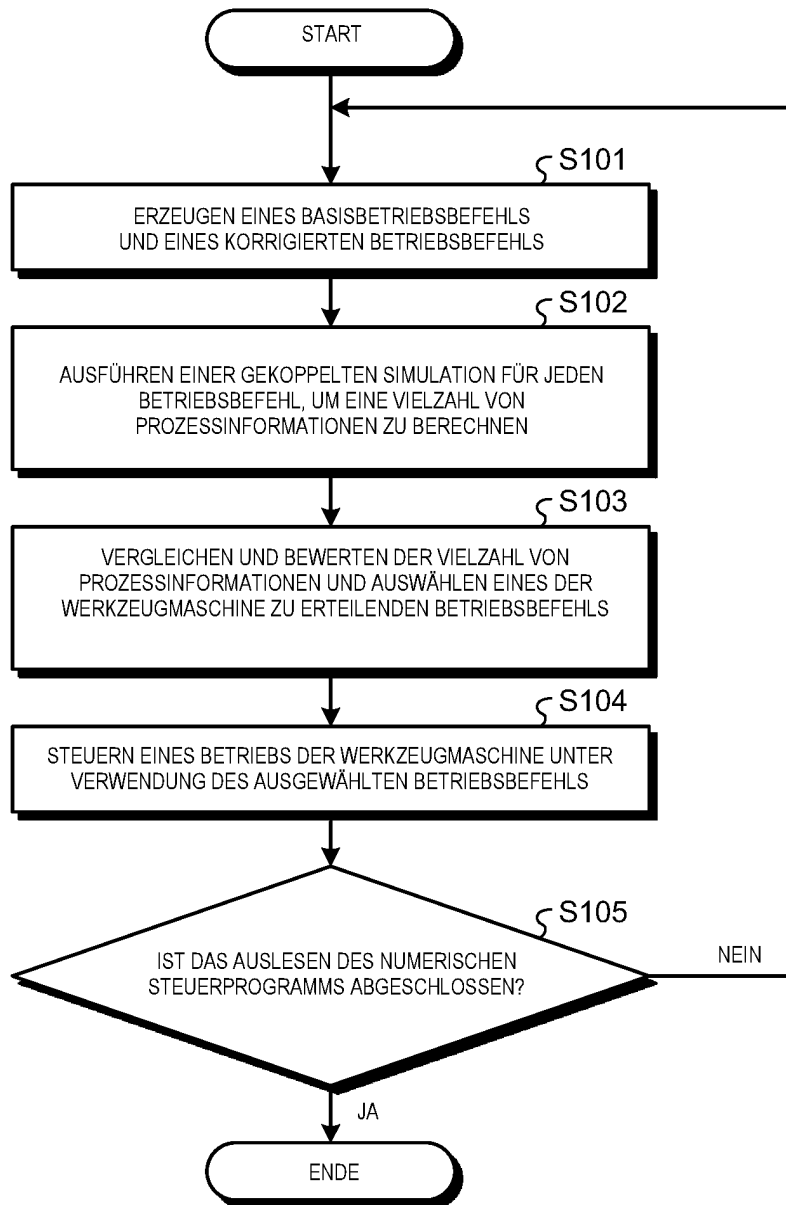


FIG.14

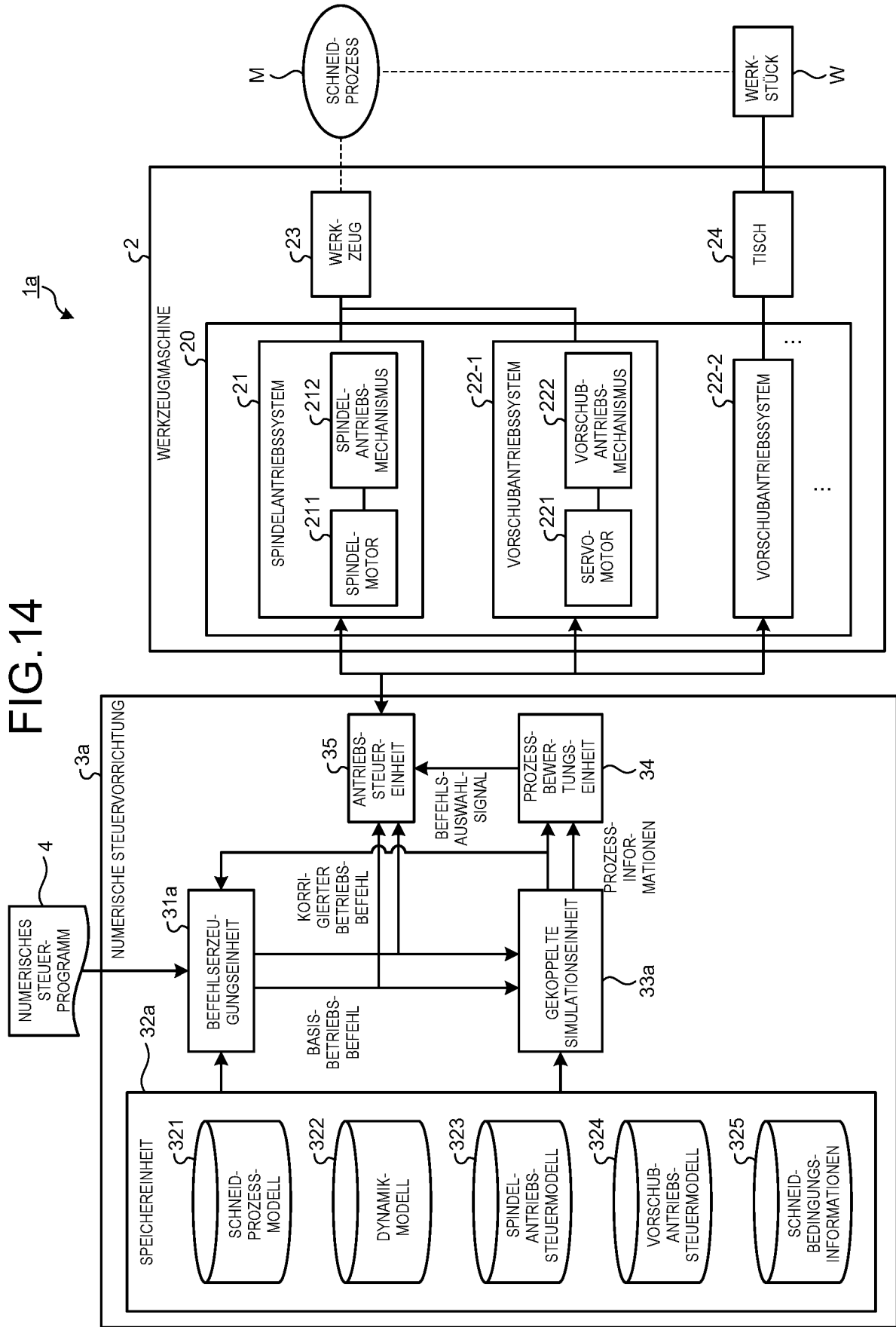


FIG.15

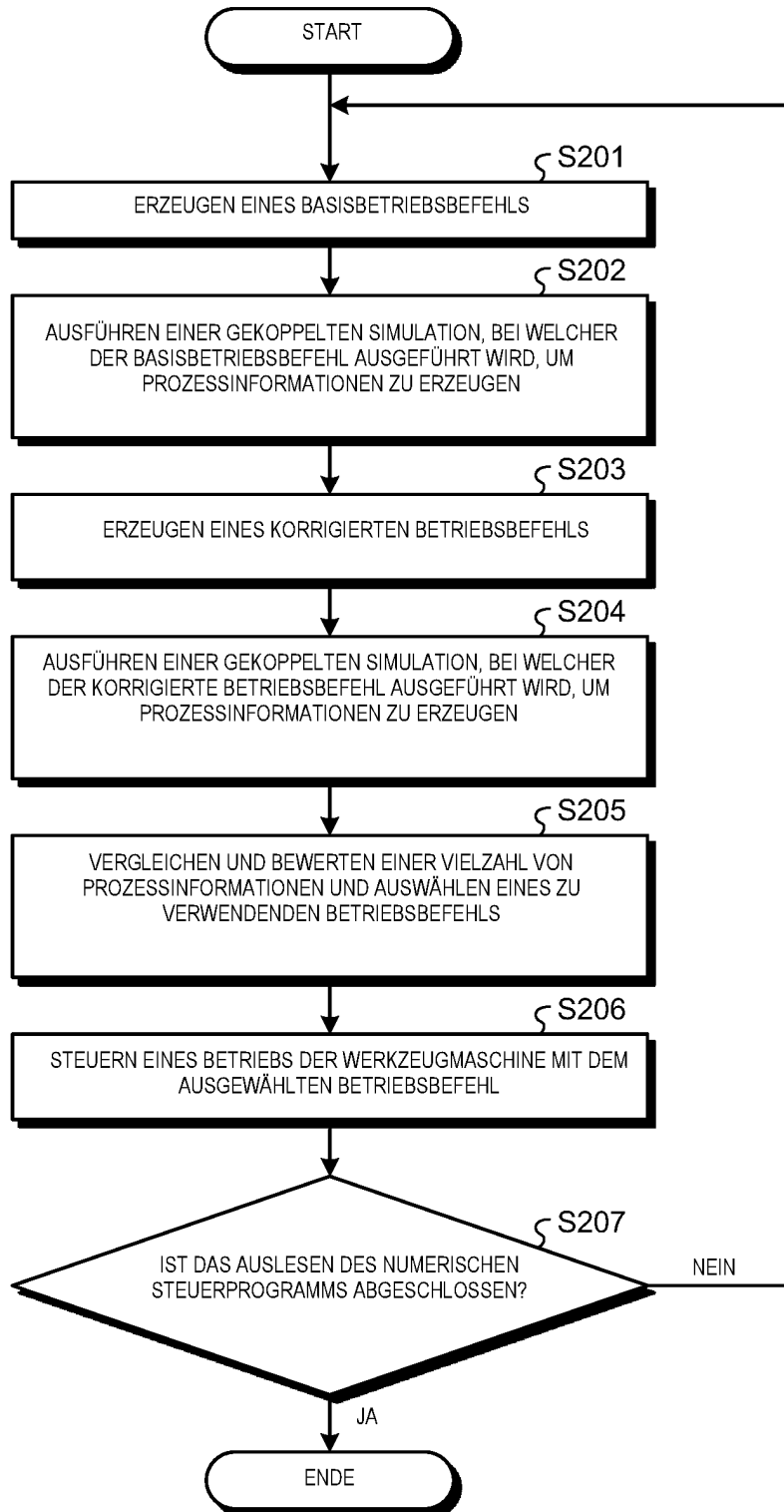


FIG.16

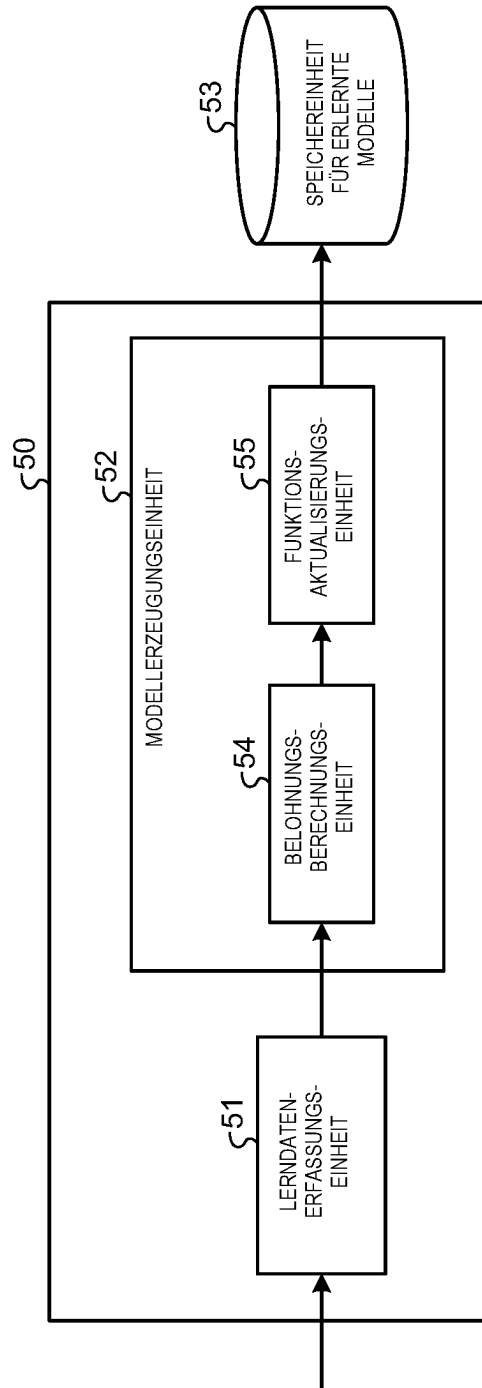


FIG.17

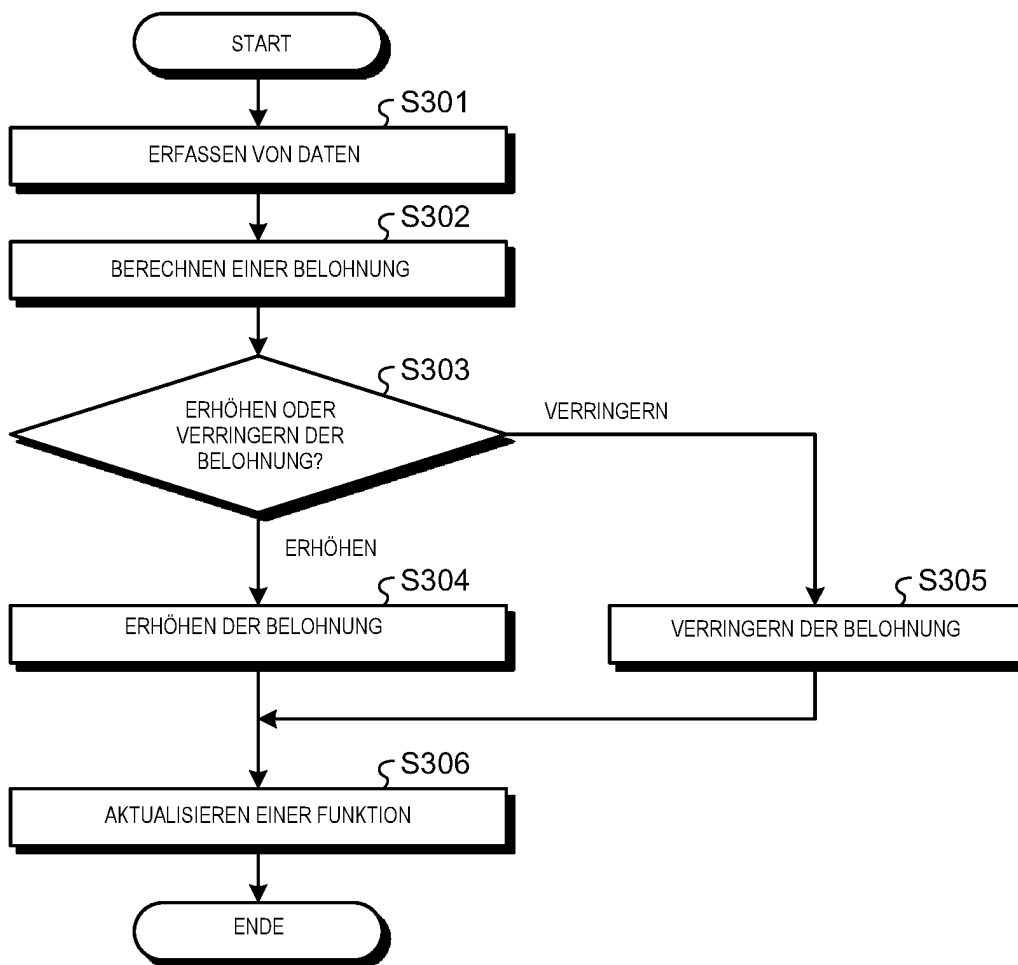


FIG.18

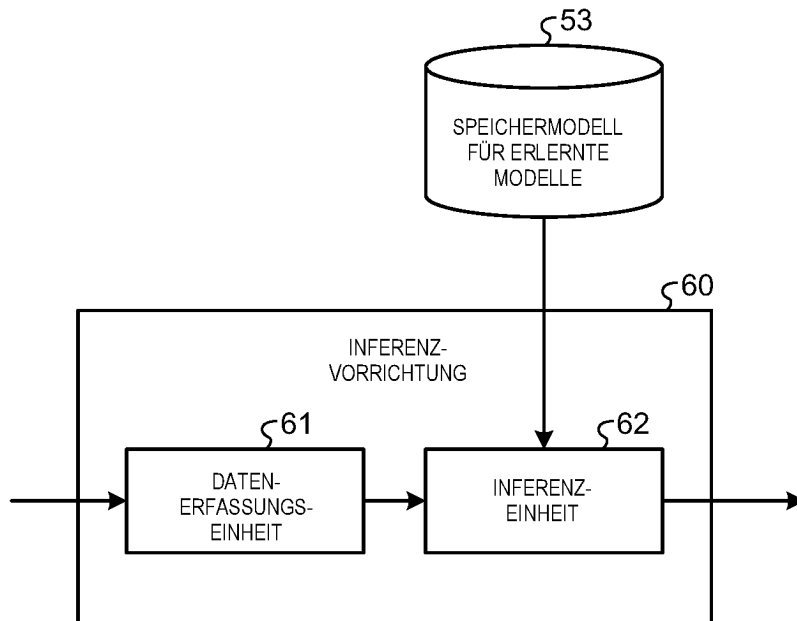


FIG.19

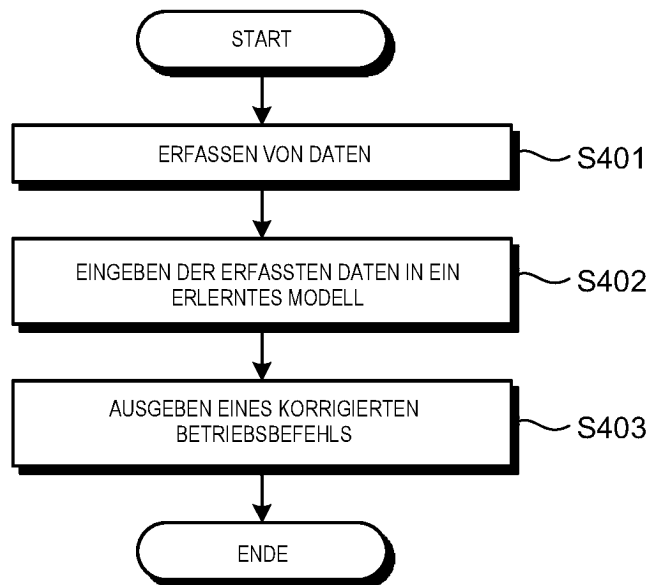


FIG.20

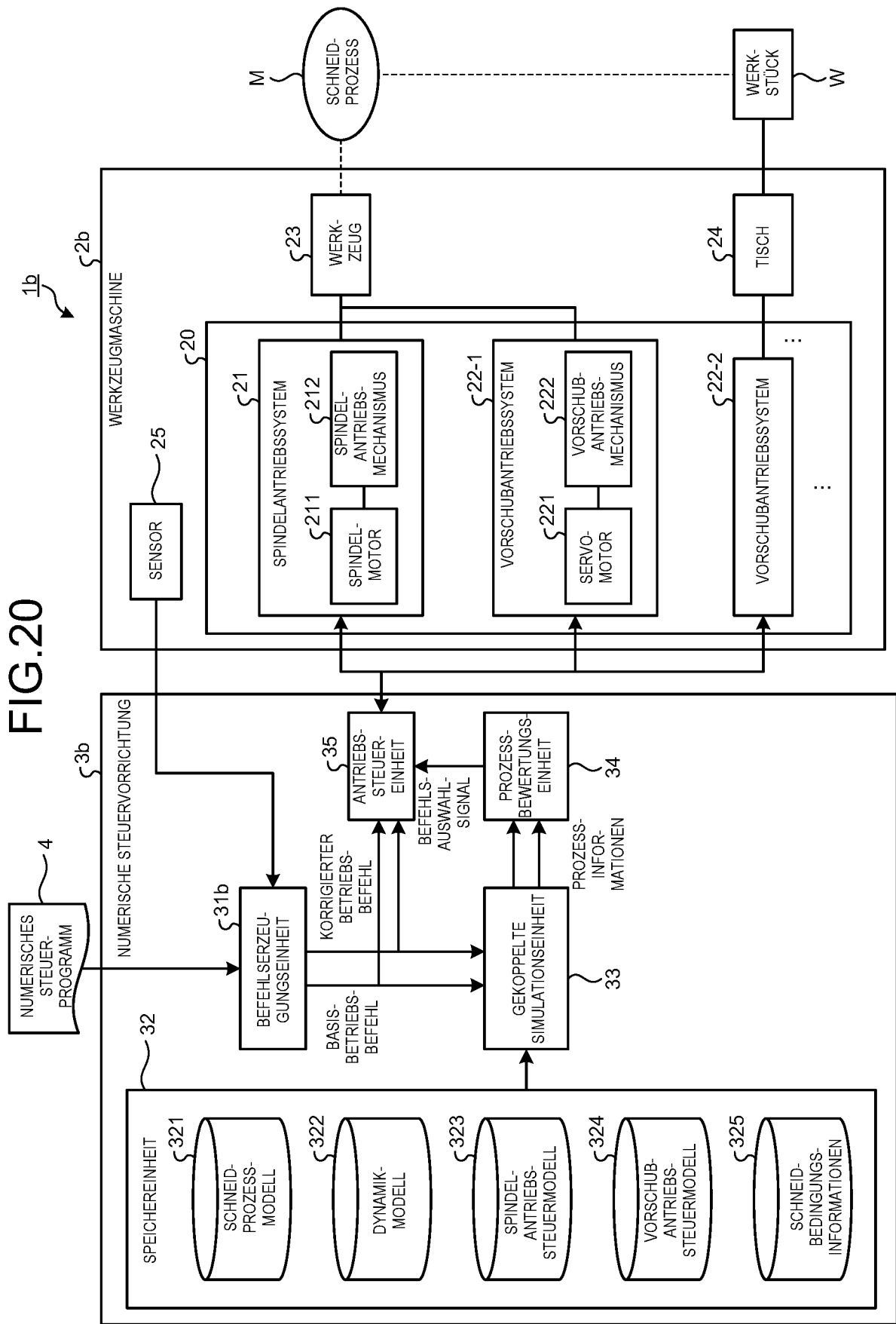


FIG.21



FIG.22

