

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2023年4月6日(06.04.2023)

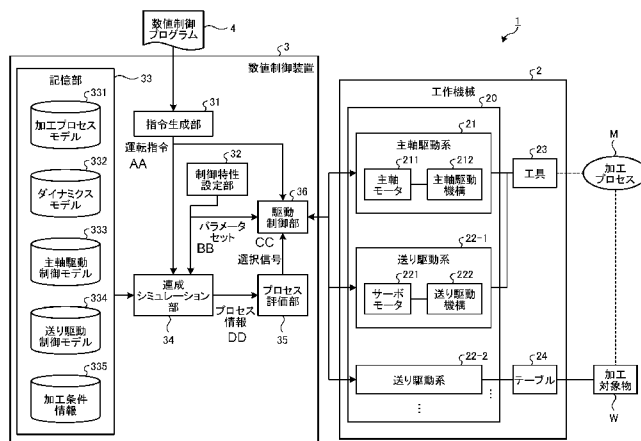


(10) 国際公開番号  
**WO 2023/053400 A1**

- (51) 国際特許分類:  
G05B 19/404 (2006.01) B23Q 15/00 (2006.01)  
G05B 19/4155 (2006.01)
- (72) 発明者: 高幣 一樹 (TAKAHEI, Kazuki);  
〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番  
3号三菱電機株式会社内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/036266
- (74) 代理人: 高村 順(TAKAMURA, Jun); 〒1000013  
東京都千代田区霞が関3丁目8番1号 虎  
の門三井ビルディング 弁理士法人酒井  
国際特許事務所 Tokyo (JP).
- (22) 国際出願日: 2021年9月30日(30.09.2021)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保  
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,  
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,  
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,  
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,  
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,  
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
- (71) 出願人: 三菱電機株式会社(MITSUBISHI ELEC-  
TRIC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008310 東  
京都千代田区丸の内二丁目7番  
3号 Tokyo (JP).

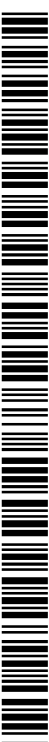
(54) Title: NUMERICAL CONTROL DEVICE, PROCESSING SYSTEM, NUMERICAL CONTROL METHOD, AND PROCESSING METHOD

(54) 発明の名称: 数値制御装置、加工システム、数値制御方法および加工方法



- |                                  |                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| 2 Machine tool                   | 212 Spindle drive mechanism          |
| 3 Numerical control device       | 221 Servo motor                      |
| 4 Numerical control program      | 222 Feed drive mechanism             |
| 21 Spindle drive system          | 331 Processing process model         |
| 22-1, 22-2 Feed drive system     | 332 Dynamics model                   |
| 23 Tool                          | 333 Spindle drive control model      |
| 24 Table                         | 334 Feed drive control model         |
| 31 Instruction generation unit   | 335 Processing condition information |
| 32 Control property setting unit | M Processing process                 |
| 33 Storage unit                  | W Workpiece                          |
| 34 Coupled simulation unit       | AA Operation instruction             |
| 35 Process evaluation unit       | BB Parameter set                     |
| 36 Drive control unit            | CC Selection signal                  |
| 211 Spindle motor                | DD Process information               |

(57) Abstract: A numerical control device (3) is characterized by comprising: a control property setting unit (32) for generating a parameter set that is a set of control property parameters indicating control properties of a controller for controlling a drive system (20); a coupled simulation unit (34) for calculating process information indicating a result of simulating processing when a machine tool (2) is controlled by using a controller having control properties indicated by the parameter set, in consideration of influence of operation of the drive system (20) and dynamics of a structure that



WO 2023/053400 A1

MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,  
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,  
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,  
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,  
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類 :

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

causes vibration during operation of the machine tool (2), on a processing process (M) of a workpiece (W) by a tool (23); and a process evaluation unit (35) for evaluating, on the basis of the process information, a magnitude of a processing error when the parameter set is used, and selecting a parameter set used to control the machine tool (2) on the basis of the evaluation result.

(57) 要約 : 数値制御装置 (3) は、駆動系 (20) を制御する制御器の制御特性を表す制御特性パラメータの組であるパラメータセットを生成する制御特性設定部 (32) と、パラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて工作機械 (2) を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、駆動系 (20) の動作と、工作機械 (2) の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが、工具 (23) による加工対象物 (W) の加工プロセス (M) に与える影響を含めて算出する連成シミュレーション部 (34) と、プロセス情報に基づいてパラメータセットを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、評価結果に基づいて工作機械 (2) の制御に用いるパラメータセットを選択するプロセス評価部 (35) と、を備えることを特徴とする。

## 明 細 書

発明の名称：

数値制御装置、加工システム、数値制御方法および加工方法

### 技術分野

[0001] 本開示は、工作機械を制御する数値制御装置、加工システム、数値制御方法および加工方法に関する。

### 背景技術

[0002] 工作機械は、工具を用いて加工対象物に力またはエネルギーを与えることで加工対象物から不要部分を除去する加工である除去加工を行うことができる加工装置である。工作機械は、工具または加工対象物を回転させる主軸駆動系と、工具および加工対象物の相対位置を変化させる送り駆動系とを有し、数値制御装置が数値制御プログラムに基づいて生成した運転指令に基づいて主軸駆動系および送り駆動系を駆動することで、加工対象物を加工する。ここで、数値制御プログラムに記述された指令の通りに工作機械を制御しても、様々な要因によって指令の通りに加工されず、加工誤差が生じることがある。

[0003] 特許文献1には、切削加工中に工具に加わる切削抵抗によって生じる工具の変位を演算することで、加工面の性状を再現する技術が提案されている。特許文献1に記載の方法では、工具の動特性を表すパラメータを予め記憶しておくことで、シミュレーションで計算した工具の切り取り厚さに応じた切削抵抗が発生したときの工具中心の変位を加工誤差とみなしている。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0004] 特許文献1：特開2013-132733号公報

### 発明の概要

#### 発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、上記従来技術によれば加工誤差を精度よく低減すること

ができないという問題があった。特許文献1に記載の技術では、工具のたわみ量を予測して、工具中心の変位を加工誤差とみなしていたが、実際には、工作機械の動作中には、加工プロセスと、駆動系の動作と、工作機械の動作中に振動を生じる構造物の機械ダイナミクスとが相互に影響し合う。ここで加工プロセスとは工具の刃先が加工対象物に侵入することで切りくずを生成しながら加工面を形成するという一連の過程を表し、機械ダイナミクスとは、工作機械内外の振動源から振動が伝搬したときに振動する構造物の動的な特性を表す。このため、特許文献1に記載の方法では、加工誤差を正確に評価することができず、加工誤差を精度よく低減することができなかった。

[0006] 本開示は、上記に鑑みてなされたものであって、工作機械の加工誤差を精度よく低減することが可能な数値制御装置を得ることを目的とする。

### 課題を解決するための手段

[0007] 上述した課題を解決し、目的を達成するために、本開示の数値制御装置は、加工対象物を加工するための工具または加工対象物を回転させる主軸を駆動する主軸駆動系と、工具および加工対象物の相対位置を変化させる送り軸を駆動する送り駆動系と、を含む駆動系を有する工作機械に運転指令を与えることによって、工作機械を制御する数値制御装置であって、駆動系を制御する制御器の制御特性を表す制御特性パラメータの組であるパラメータセットを生成する制御特性設定部と、パラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて工作機械を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、駆動系の動作と、工作機械の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが、工具による加工対象物の加工プロセスに与える影響を含めて算出する連成シミュレーション部と、プロセス情報に基づいてパラメータセットを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、評価結果に基づいて工作機械の制御に用いるパラメータセットを選択するプロセス評価部と、を備えることを特徴とする。

### 発明の効果

[0008] 本発明によれば、工作機械の加工誤差を精度よく低減することが可能であ

るという効果を奏する。

### 図面の簡単な説明

- [0009] [図1]実施の形態1にかかる加工システムの機能構成を示す図
- [図2]図1に示す工作機械の物理構成の一例を示す図
- [図3]図1に示す主軸駆動系と機械ダイナミクスと加工プロセスとの関係を示す図
- [図4]図3に示す物理量を工作機械の物理構成と共に示す図
- [図5]図1に示す送り駆動系と機械ダイナミクスと加工プロセスとの関係を示す図
- [図6]図5に示す物理量を工作機械の物理構成と共に示す図
- [図7]図1の主軸駆動制御モデルの一例を説明するための図
- [図8]図1の送り駆動制御モデルの一例を説明するための図
- [図9]図1に示す駆動系に運転指令が入力されたときの応答を周波数毎に表したゲイン曲線を示す図
- [図10]図1に示す駆動系に運転指令が入力されたときの応答を周波数毎に表した位相曲線を示す図
- [図11]図1に示す制御特性設定部が生成するパラメータセットの一例について説明するための図
- [図12]図1に示す工作機械の動作中における工具の状態と加工対象物の加工面の状態との関係の第1の例を示す図
- [図13]図1に示す工作機械の動作中における工具の状態と加工対象物の加工面の状態との関係の第2の例を示す図
- [図14]図1に示す工作機械の動作中における工具の状態と加工対象物の加工面の状態との関係の第3の例を示す図
- [図15]図1に示す数値制御装置の動作を説明するためのフローチャート
- [図16]実施の形態2にかかる加工システムの機能構成を示す図
- [図17]図16に示す数値制御装置の動作を説明するためのフローチャート
- [図18]図16に示す数値制御装置に関する学習装置の構成の一例を示す図

[図19]図 1 8 に示す学習装置の学習処理を説明するためのフローチャート

[図20]図 1 6 に示す数値制御装置に関する推論装置の構成の一例を示す図

[図21]図 2 0 に示す推論装置の動作を説明するためのフローチャート

[図22]実施の形態 3 にかかる加工システムの構成を示す図

[図23]実施の形態 1 ～ 3 にかかる数値制御装置、学習装置、および、推論装置の機能を実現するための専用のハードウェアを示す図

[図24]実施の形態 1 ～ 3 にかかる数値制御装置、学習装置、および、推論装置の機能を実現するための制御回路の構成を示す図

### 発明を実施するための形態

[0010] 以下に、本開示の実施の形態にかかる数値制御装置、加工システム、数値制御方法および加工方法を図面に基づいて詳細に説明する。なお、以下の説明中において、同様の機能を有する複数の構成要素に共通の数字の後にハイフンおよび数字を付して区別することがある。同様の機能を有する複数の構成要素のそれぞれを区別する必要がない場合、共通の数字のみを記す。

[0011] 実施の形態 1 .

図 1 は、実施の形態 1 にかかる加工システム 1 の機能構成を示す図である。加工システム 1 は、工作機械 2 と、数値制御装置 3 とを有する。数値制御装置 3 は、数値制御プログラム 4 に記述された指令に基づいて生成する運転指令を工作機械 2 に与えることによって、工作機械 2 を制御する。なお、工作機械 2 および数値制御装置 3 は、近接する場所に設置されてもよいし、数値制御装置 3 が工作機械 2 を制御することができるように接続されていれば、数値制御装置 3 は工作機械 2 と離れた場所に設置されてもよい。

[0012] 工作機械 2 は、1 つの主軸駆動系 2 1 と、1 または複数の送り駆動系 2 2 と、加工対象物 W を加工するための工具 2 3 と、加工対象物 W を保持するテーブル 2 4 とを有する。

[0013] 主軸駆動系 2 1 は、主軸モータ 2 1 1 と、主軸モータ 2 1 1 によって駆動される主軸駆動機構 2 1 2 とを有する。主軸駆動系 2 1 には、工具 2 3 が接続されており、主軸駆動系 2 1 は、工具 2 3 を回転させることができる。主

軸モータ 2 1 1 または主軸駆動機構 2 1 2 には、主軸駆動系 2 1 の角度情報を表すエンコーダ（不図示）が備わる。

[0014] 送り駆動系 2 2 は、サーボモータ 2 2 1 と、サーボモータ 2 2 1 によって駆動される送り駆動機構 2 2 2 とを有する。送り駆動系 2 2 は、工具 2 3 および加工対象物 W の相対位置を変化させることができる。サーボモータ 2 2 1 および送り駆動機構 2 2 2 には、送り駆動系 2 2 の位置情報を表すエンコーダ（不図示）が備わる。送り駆動系 2 2 には、加工対象物 W を載置するテーブル 2 4 または工具 2 3 が接続されており、送り駆動系 2 2 は、テーブル 2 4 または工具 2 3 を移動させることで、工具 2 3 および加工対象物 W の相対位置を変化させることができる。なお、図 1 に示す例では、工作機械 2 は、工具 2 3 を移動させる送り駆動系 2 2 - 1 と、テーブル 2 4 を移動させる送り駆動系 2 2 - 2 とを有し、工具 2 3 およびテーブル 2 4 の両方を移動させることとしたが、工具 2 3 だけを移動させてもよいし、テーブル 2 4 だけを移動させてもよい。工具 2 3 と、テーブル 2 4 に保持された加工対象物 W との相対位置を変化させることができればよい。送り駆動系 2 2 が工具 2 3 および加工対象物 W の相対位置を変化させることで、工具 2 3 が加工経路に沿って加工対象物 W を切削することになる。

[0015] 主軸駆動系 2 1 および送り駆動系 2 2 は、数値制御装置 3 に接続され、数値制御装置 3 から与えられる運転指令によって主軸モータ 2 1 1 およびサーボモータ 2 2 1 が制御される。以下では、主軸駆動系 2 1 および送り駆動系 2 2 の両方を指す場合、単に駆動系 2 0 と称する。なお、工具 2 3 の刃先が加工対象物 W に侵入することで切りくずを生成しながら加工面を形成するという一連の過程は、加工プロセス M と呼ばれる。

[0016] 図 2 は、図 1 に示す工作機械 2 の物理構成の一例を示す図である。テーブル 2 4 は、水平面を有し、この水平面に加工対象物 W が載置される。主軸駆動機構 2 1 2 は、工具 2 3 がテーブル 2 4 に保持された加工対象物 W の上方に位置するように設けられている。主軸モータ 2 1 1 は、主軸駆動機構 2 1 2 に隣接して設けられる。主軸モータ 2 1 1 および主軸駆動機構 2 1 2 を有

する主軸駆動系 2 1 の主軸は、テーブル 2 4 の水平面と垂直な方向であり、主軸駆動系 2 1 は、主軸を中心に工具 2 3 を回転させる。

[0017] 工具 2 3 を移動させる送り駆動系 2 2 - 1 の送り駆動機構 2 2 2 - 1 は、工具 2 3 が取り付けられた主軸駆動機構 2 1 2 を含む構造物を介して工具 2 3 と接続されている。送り駆動系 2 2 - 1 のサーボモータ 2 2 1 - 1 は、送り駆動機構 2 2 2 - 1 に隣接して設けられる。送り駆動系 2 2 - 1 の送り軸は、主軸と平行であり、送り駆動系 2 2 - 1 は、工具 2 3 を送り軸に沿って上下に移動させる。

[0018] テーブル 2 4 を移動させる送り駆動系 2 2 - 2 の送り駆動機構 2 2 2 - 2 は、テーブル 2 4 と接続されている。送り駆動系 2 2 - 2 のサーボモータ 2 2 1 - 2 は、送り駆動機構 2 2 2 - 2 に隣接して設けられる。送り駆動系 2 2 - 2 の送り軸は、テーブル 2 4 の水平面内の方向であり、送り駆動系 2 2 - 2 は、テーブル 2 4 を水平方向に移動させる。なお、ここでは、テーブル 2 4 を移動させる送り駆動系 2 2 を 1 つだけ説明したが、工作機械 2 は、送り駆動系 2 2 - 2 の送り軸と垂直であってテーブル 2 4 の水平面内の方向に送り軸を有する送り駆動系 2 2 をさらに有してもよい。

[0019] なお、ここで示す物理構成は説明を容易にするための一例であり、工作機械 2 の物理構成は図 2 に示す例に限定されるものではない。例えば、工作機械 2 の送り駆動系 2 2 は 1 つであってもよいし、3 つ以上であってもよい。主軸および送り軸の方向についても、一例である。また、テーブル 2 4 は加工対象物 W を保持する機構の一例であり、加工対象物 W を保持することができ、工具 2 3 に対する相対的な位置を制御可能な構成であればよい。

[0020] 図 1 の説明に戻る。数値制御装置 3 は、指令生成部 3 1 と、制御特性設定部 3 2 と、記憶部 3 3 と、連成シミュレーション部 3 4 と、プロセス評価部 3 5 と、駆動制御部 3 6 とを有する。

[0021] 数値制御プログラム 4 には、工作機械 2 の主軸および送り軸の運動を指示する複数の指令が含まれている。数値制御プログラム 4 に含まれる指令は、例えば、工具 2 3 が移動する経路を加工対象物 W に対する相対的な位置で指

定する指令である。工具 2 3 の経路を指定する指令は、経路上の位置を指定する複数の位置指令を含む。また、数値制御プログラム 4 は、各位置指令が示す位置における、主軸の回転速度を示す主軸回転速度指令と、送り軸の移動速度を示す送り速度指令とをさらに含む。数値制御プログラム 4 は、数値制御装置 3 の外部から数値制御装置 3 に対して与えられてもよいし、数値制御装置 3 が内部に保持していてもよい。

[0022] 指令生成部 3 1 は、数値制御プログラム 4 に記述された指令を解析し、工作機械 2 を制御するために工作機械 2 に与えられる時々刻々の運転指令を生成する。指令生成部 3 1 は、数値制御プログラム 4 に記述された指令を工作機械 2 に実行させるための運転指令を生成する。指令生成部 3 1 は、生成した運転指令を連成シミュレーション部 3 4 および駆動制御部 3 6 のそれぞれに出力する。

[0023] 制御特性設定部 3 2 は、後述する駆動制御部 3 6 に備わる制御器の特性を表すパラメータである制御特性パラメータの組を生成する。制御特性パラメータの組のことをパラメータセットと称する。制御特性パラメータの詳細については、後述する。制御特性設定部 3 2 は、1 または複数のパラメータセットを生成し、生成したパラメータセットを、連成シミュレーション部 3 4 および駆動制御部 3 6 のそれぞれに出力する。

[0024] 記憶部 3 3 は、加工プロセスモデル 3 3 1 と、ダイナミクスモデル 3 3 2 と、主軸駆動制御モデル 3 3 3 と、送り駆動制御モデル 3 3 4 と、加工条件情報 3 3 5 とを記憶する。記憶部 3 3 は、記憶された情報を連成シミュレーション部 3 4 に出力することができる。加工条件情報 3 3 5 は、例えば、工具 2 3 の刃数、工具径およびねじれ角を含む工具形状情報と、その工具 2 3 を用いた場合の切り込み量とを含む。加工プロセスモデル 3 3 1、ダイナミクスモデル 3 3 2、主軸駆動制御モデル 3 3 3 および送り駆動制御モデル 3 3 4 の詳細については後述される。

[0025] 工作機械 2 が実行する切削加工は、加工プロセス M と機械ダイナミクスとが相互に影響する物理現象であるため、加工状態を管理または制御するため

には、加工プロセスおよび機械ダイナミクスの両者を統合した解析を行うことが望ましい。ここで、加工プロセスとは、工具23の刃先が加工対象物Wに侵入することで切りくずを生成しながら加工面を形成するという一連の過程を表す。機械ダイナミクスとは、工作機械2の加工中に、内外の振動源によって振動を生じる構造物の動的な振る舞いを表す。ここでいう構造物は、工作機械2を構成する構造物に加えて、工具23および加工対象物Wを含むことができる。

[0026] 駆動系20が数値制御装置3によって制御されることで、工具23が回転しながら加工対象物Wに対して予め定められた経路を通過するように運動する。工具23が加工対象物Wを切削している間、工具23と加工対象物Wとの間で発生する切削力 $F_c$ が構造物を通じて外乱力 $F_d$ として送り駆動系22に伝達され、外乱トルク $T_d$ として主軸駆動系21に伝達される。送り駆動系22に外乱力 $F_d$ が加わるため、送り駆動系22の位置は、工具23が加工対象物Wを切削していない場合の位置を基準としたときに、外乱力 $F_d$ の振幅および周波数に応じて変動する。同様に、主軸駆動系21に外乱トルク $T_d$ が加わると、主軸駆動系21の回転角度は、工具23が加工対象物Wを切削していない場合の回転角度に対して変動する。

[0027] 上記の関係について図を用いて説明する。図3は、図1に示す主軸駆動系21と機械ダイナミクスと加工プロセスMとの関係を示す図である。図4は、図3に示す物理量を工作機械2の物理構成と共に示す図である。数値制御装置3が運転指令を主軸駆動系21に与えると、主軸モータ211が主軸駆動機構212を駆動して、工具23を含めた工作機械2の構造物が回転し、加工対象物Wを加工する。ここで、主軸駆動系21が運転指令に基づいて主軸駆動系角度 $\theta_1$ に制御されると、実際の工具23の角度は、工具側機械ダイナミクスMD1の影響を受けて、工具角度 $\theta_2$ となる。工具23が加工対象物Wに侵入し、切りくずを生成しながら加工面を形成するという一連の加工プロセスMが実行される。このとき生じる切削トルク $T_c$ は、構造物を通じて工具側機械ダイナミクスMD1の影響を受けて外乱トルク $T_d$ として主軸駆

動系 2 1 に帰還する。工作機械 2 は、フィードバック信号を数値制御装置 3 へ出力する。外乱トルク  $T_d$  を受けた主軸駆動系 2 1 の状態が運転指令と異なる場合、数値制御装置 3 は、主軸駆動系 2 1 から伝達されるフィードバック信号に基づいて、運転指令を変化させる。

[0028] 図 5 は、図 1 に示す送り駆動系 2 2 - 2 と機械ダイナミクスと加工プロセス  $M$  との関係を示す図である。図 6 は、図 5 に示す物理量を工作機械 2 の物理構成と共に示す図である。数値制御装置 3 が運転指令を送り駆動系 2 2 - 2 に与えると、工具 2 3 と加工対象物  $W$  との相対運動によって加工対象物  $W$  が加工される。このとき、送り駆動系 2 2 - 2 のサーボモータ 2 2 1 - 2 が運転指令に基づいて送り駆動機構 2 2 2 - 2 を駆動した結果、テーブル 2 4 に駆動系変位  $r_1$  が生じる。加工対象物  $W$  において発生する実際の変位は、駆動系変位  $r_1$  が生じたときの加工対象物側機械ダイナミクス  $MD_2$  の影響を受けて、構造物変位  $r_2$  となる。このとき生じる切削力  $F_c$  は、構造物を通じて外乱力  $F_d$  として送り駆動系 2 2 - 2 に帰還する。外乱力  $F_d$  を受けた送り駆動系 2 2 - 2 の状態が運転指令と異なる場合、数値制御装置 3 は、送り駆動系 2 2 - 2 から伝達されるフィードバック信号に基づいて運転指令を変化させる。

[0029] なお、上記では説明のため図 3 から図 6 を用いて、主軸駆動系 2 1 および送り駆動系 2 2 のそれぞれを分けて説明したが、加工中における変位と力の伝搬とは主軸駆動系 2 1 および送り駆動系 2 2 で同時になされる。

[0030] このように、切削加工では、加工プロセス  $M$  と機械ダイナミクスと駆動系 2 0 とが連成した系を成し、数値制御装置 3 は、駆動系 2 0 および機械ダイナミクスを介して加工プロセス  $M$  に関与する。また、工具 2 3 と加工対象物  $W$  との間の切削プロセスにおいて、切削力  $F_c$  が発生している加工点は、切りくずの生成と共に消失するため、センサを設置して切削力  $F_c$  を直接的に検出することはできない。したがって、工具 2 3 および加工対象物  $W$  の運動を含めた切削加工を正確に評価するには、加工プロセス  $M$  および機械ダイナミクスに加えて、主軸駆動系 2 1 および送り駆動系 2 2 の動作を含めたシミュレ

ーションを行う必要がある。

[0031] 続いて、記憶部33が記憶する加工プロセスモデル331、ダイナミクスモデル332、主軸駆動制御モデル333および送り駆動制御モデル334の具体例について説明する。これらのモデルは、後述の連成シミュレーション部34がシミュレーションを行う際に使用される。

[0032] 加工プロセスモデル331は、工具23と加工対象物Wとの間の加工特性を表す。より具体的には、加工プロセスモデル331は、工具23および加工対象物Wの位置関係に応じて発生する切削力 $F_c$ を表現する数理モデルである。以下に示す数式(1)は、工具23の刃先が加工対象物Wに接触している間の切削力 $F_c$ を表現する数式の一例である。数式(1)は、比切削抵抗 $K_c$ 、エッジフォース係数 $K_e$ 、工具23の断面の微小厚さ $\Delta a$ 、加工対象物Wの切り取り厚さ $h$ 、工具23の回転角度 $\phi$ および時刻 $t$ を用いて工具23の断面あたりの微小切削力 $\Delta F_c$ を表している。工具23の切り込みによって発生する合計の切削力 $F_c$ は、数式(1)に示される微小切削力 $\Delta F_c$ を工具23の軸方向に足し合わせることで算出することができる。加工対象物Wの切り取り厚さ $h$ は、工具23の半径方向における前加工面と今回加工面との間の距離である。数式(1)は、切り取り厚さ $h$ に比例する力と、エッジフォースと呼ばれる一定量の力との和によって切削力 $F_c$ を算出することができることを表している。

[0033] [数1]

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

[0034] 切り取り厚さ $h$ は、以下に示す数式(2)によって表現することができる。切り取り厚さ $h$ は、1刃あたりの工具23の送り量 $c$ によって決定されるノミナルな切り取り厚さを表す成分と、工具23および加工対象物Wの相対的な振動を表す成分と、工具23が複数の刃先を備える場合に各刃先の回転半径の差異による切り取り厚さの増減を表す成分との和で表される。工具23および加工対象物Wの相対的な振動を表す成分は、今回加工面を切り取る瞬間の工具23および加工対象物Wの間の相対変位の工具23の半径方向成

分  $u_r$  と、前加工面に転写された工具 23 および加工対象物 W の間の相対変位の工具半径方向成分  $w_r$  との差異で表される。各刃先の回転半径の差異による切り取り厚さの増減を表す成分は、工具 23 の刃先の回転半径補正量  $\Delta e$  で表される。

[0035] [数2]

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

[0036] 数式 (1) は加工プロセスモデル 331 の一例であり、加工プロセスモデル 331 は、上記のものに限定されない。例えば、工具 23 の形状と加工対象物 W の形状とを表現したボクセルを用いて切削力  $F_c$  を算出するモデルであってもよい。

[0037] ダイナミクスモデル 332 は、工作機械 2 の動作中に振動を生じる構造物の動特性を表す。具体的には、ダイナミクスモデル 332 は、構造物に動的な力が加わったときにその構造物が動的に変位することを表す数理モデルである。例えば、駆動系 20 に接続された加工対象物 W に対して切削力  $F_c$  が加わったときの加工対象物 W の挙動は、以下に示す数式 (3) で表すことができる。

[0038] [数3]

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

[0039] 数式 (3) は、加工対象物 W の振動を表現する数式の一例である。工具 23 および加工対象物 W の間で発生した切削力  $F_c$  は、工具 23 および加工対象物 W の間の相対変位  $u$  と、駆動系 20 の相対変位  $v$  と、加工対象物 W の等価質量  $m$  と、加工対象物 W の等価粘性係数  $C$  と、加工対象物 W の等価ばね定数  $K$  とを用いて表される。数式 (3) は、切削力  $F_c$  が加工対象物 W を通じて駆動系 20 に外乱力  $F_d$  として伝達する機械ダイナミクスを表す。

[0040] なお、ダイナミクスモデル 332 は、数式 (3) に限定されない。例えば、加工対象物 W の形状をボクセルで表現し、FEM (Finite Element Method) 解析を用いて構造物が振動するときの変位を算出するモデルであっても

よい。なお、ここで説明したダイナミクスモデル332は加工対象物Wの振動のみを表現しているが、ダイナミクスモデル332は、加工対象物Wの代わりに工具23、またはその他の構造物の振動を表現してもよい。或いは、ダイナミクスモデル332は、工具23および加工対象物Wの両方の振動を表現してもよい。

[0041] 主軸駆動制御モデル333は、工作機械2が有する主軸駆動系21と、数値制御装置3の駆動制御部36内に存在し、主軸駆動系21を制御する制御器である主軸駆動制御器とを表す数理モデルである。図7は、図1の主軸駆動制御モデル333の一例を説明するための図である。主軸駆動制御モデル333は、主軸回転角度指令が与えられたときに、切削トルク $T_c$ に起因する外乱トルク $T_d$ が主軸駆動系21に伝達される状況下において、主軸駆動制御器が有する位置制御器および速度制御器によって、主軸駆動系21の位置および速度が制御される場合の数理モデルである。この数理モデルは、制御器に主軸回転角度指令 $\theta_r$ を入力すると、主軸実回転角度 $\theta$ を出力する。ここで、 $K_{pp1}$ 、 $K_{vp1}$ 、 $K_{vi1}$ は制御ゲインであり、それぞれ位置制御のための比例ゲイン $K_{pp1}$ 、速度制御のための比例ゲイン $K_{vp1}$ 、速度制御のための積分ゲイン $K_{vi1}$ である。 $P_1(s)$ は主軸駆動系21全体のトルクから位置の伝達関数であり、 $s$ は複素数である。 $P_1(s)$ は既知のシステム同定手法によって主軸駆動系21の実際の応答から同定することができる。なお、ここでは主軸駆動系21を1慣性系としてモデル化しているが、主軸駆動系21は多慣性系としてモデル化してもよい。また、主軸駆動制御器にフィードフォワード制御器を追加してもよい。また制御器は、回転角度または回転角度に応じた摩擦などの誤差要因を補正する補正量を加算する構造であってもよい。

[0042] 送り駆動制御モデル334は、工作機械2が有する送り駆動系22と、数値制御装置3の駆動制御部36内に存在し、送り駆動系22を制御する制御器である送り駆動制御器とを表す数理モデルである。図8は、図1の送り駆動制御モデル334の一例を説明するための図である。送り駆動制御モデル334は、送り駆動系位置指令が与えられたときに、切削力 $F_c$ に起因する外

乱力  $F_d$  が送り駆動系 22 に伝達される状況下において、送り駆動制御器が有する位置制御器および速度制御器によって、送り駆動系 22 の位置および速度が制御される場合の数理モデルである。この数理モデルは、送り駆動系位置指令  $x_r$  を入力すると、送り駆動系実位置  $x$  を出力する。ここで、 $K_{pp2}$ 、 $K_{vp2}$ 、 $K_{vi2}$  は制御ゲインであり、それぞれ位置制御のための比例ゲイン  $K_{pp2}$ 、速度制御のための比例ゲイン  $K_{vp2}$ 、速度制御のための積分ゲイン  $K_{vi2}$  である。 $P_2(s)$  は送り駆動系 22 全体の力から位置の伝達関数であり、 $s$  は複素数である。 $P_2(s)$  は既知のシステム同定手法によって送り駆動系 22 の実際の応答から同定することができる。なお、ここでは送り駆動系 22 を 1 慣性系としてモデル化しているが、送り駆動系 22 は多慣性系としてモデル化してもよい。また、送り駆動制御器にフィードフォワード制御器を追加してもよい。また制御器は、位置または速度に応じた摩擦などの誤差要因を補正する補正量を加算する構造であってもよい。この補正量は、例えば、位置または速度に係数パラメータを乗じた値である。また制御器は、周波数パラメータによって特定の帯域の振動を通過または除外するための信号処理フィルタを有する構造であってもよい。

[0043] ここで、制御特性パラメータについて説明する。制御特性パラメータとは、駆動系 20 を制御する制御器の制御特性を表すパラメータである。図 7 および図 8 においては、制御特性パラメータは、制御器の制御ゲインである。なお、制御特性パラメータは、制御ゲインに限定されず、制御器が誤差要因を補正する補正量を加算する構造である場合、補正量を決定する係数パラメータが制御特性パラメータに相当する。また、制御器が特定の帯域の振動を通過または除外するための信号処理フィルタを有する構造である場合、信号処理フィルタの帯域を指定する周波数パラメータが制御特性パラメータに相当する。なお、制御特性パラメータは、一定値であるとは限らず、経時変化する値であってもよい。

[0044] 制御特性パラメータの値が異なると、駆動系 20 は異なる周波数特性を示す。具体的には、駆動系 20 において、制御特性パラメータの値によって、

運転指令に対する追従性や外乱に対する抑制性が変化する。続いて制御特性パラメータと駆動系 20 の周波数特性の対応関係について説明する。図 9 は、図 1 に示す駆動系 20 に運転指令が入力されたときの応答を周波数毎に表したゲイン曲線を示す図である。図 9 には、第 1 組、第 2 組および第 3 組と称される 3 組のパラメータセットに対するゲイン応答が表されている。パラメータセット毎にゲイン応答が異なり、第 1 組、第 2 組および第 3 組のそれぞれのゲイン応答のピークとなる周波数は互いに異なる。

[0045] 図 10 は、図 1 に示す駆動系 20 に運転指令が入力されたときの応答を周波数毎に表した位相曲線を示す図である。図 10 には、図 9 と同様に、第 1 組、第 2 組および第 3 組と称される 3 種類のパラメータセットに対する位相応答が表されている。パラメータセット毎に位相応答が異なり、第 1 組、第 2 組および第 3 組のそれぞれの位相応答において、位相が変化する周波数はそれぞれ異なる。図 9 および図 10 に示したように、制御特性パラメータの値が異なると、駆動系 20 は異なる周波数特性を示す。

[0046] ここで、制御特性設定部 32 が生成するパラメータセットについて詳述する。制御特性設定部 32 は、上述の通り、1 つ以上のパラメータセットを生成する。制御器は、主軸駆動系 21 および送り駆動系 22 の数だけ存在する。パラメータセットは、工作機械 2 に備わる主軸駆動系 21 および送り駆動系 22 のそれぞれに対応する制御器の特性を決定づける制御特性パラメータの集合である。各パラメータセットは、1 つの制御器について 1 つの種類の制御特性パラメータを含んでもよいし、1 つの制御器について複数の種類の制御特性パラメータを含んでもよい。例えば、工作機械 2 が 1 つの主軸駆動系 21 と 2 つの送り駆動系 22 とを有する場合、数値制御装置 3 は、3 つの制御器を有する。この場合、1 つのパラメータセットは、3 つの制御器のそれぞれに対応して 1 種類、3 つの制御特性パラメータの値を含んでもよいし、制御器毎に複数の種類の制御特性パラメータの値を含んでもよい。上記の図 7 および図 8 に示す例では、工作機械 2 が 1 つの主軸駆動系 21 と 2 つの送り駆動系 22 とを有する場合、パラメータセットは、主軸駆動制御器につ

いて、位置制御のための比例ゲイン $K_{pp1}$ 、速度制御のための比例ゲイン $K_{vp1}$ 、および速度制御のための積分ゲイン $K_{vi1}$ の値を1つずつ含み、送り駆動制御器について、位置制御のための比例ゲイン $K_{pp2}$ 、速度制御のための比例ゲイン $K_{vp2}$ 、および速度制御のための積分ゲイン $K_{vi2}$ の値を2つずつ含むことができる。なお、図7および図8には、比例ゲインおよび積分ゲインを含む制御器を示しているが、微分ゲインを含む制御器が用いられてもよい。

[0047] 制御特性設定部32は、複数の制御器のそれぞれに対して同じ値の制御特性パラメータを設定することができる。なお、ここで制御特性パラメータの値が同じとは、複数の制御器の間で、同じ種類の制御特性パラメータの値が同一であることを指す。制御特性設定部32は、複数の制御器のそれぞれに対して同じ種類の制御特性パラメータを設定可能である場合、複数の制御器のそれぞれに設定する同じ種類の制御特性パラメータの値を同一にすることができる。例えば、制御特性設定部32は、送り駆動系22-1を制御するための送り駆動制御器と送り駆動系22-2を制御するための送り駆動制御器との間で、比例ゲイン $K_{pp2}$ 、比例ゲイン $K_{vp2}$ 、および積分ゲイン $K_{vi2}$ のそれぞれの値を同一にすることができる。このように、複数の制御器のそれぞれが同じ値の制御特性パラメータで動作する場合、複数の制御器が互いに等しい周波数特性を示すようになる。したがって、駆動系20と構造物とを含めた系は、加工対象物Wに対する工具23の相対的な送り方向によらず同じ周波数特性となる。

[0048] 或いは、制御特性設定部32は、複数の制御器のそれぞれに対して異なる値の制御特性パラメータを設定することができる。なお、ここで制御特性パラメータの値が異なるとは、複数の制御器の間で、同じ種類の制御特性パラメータの値が異なることを指す。1つの制御器について複数の種類の制御特性パラメータが設定可能である場合、制御特性設定部32は、複数の種類の制御特性パラメータの少なくとも一部に対して異なる値を設定することができる。このように、複数の制御器のそれぞれが異なる値の制御特性パラメータで動作する場合、複数の制御器がそれぞれ異なる周波数特性を示すように

なる。したがって、駆動系 20 と構造物とを含めた系は、加工対象物 W に対する工具 23 の相対的な送り方向によって異なる周波数特性となる。

[0049] また、制御特性設定部 32 は、制御器に対応する送り駆動系 22 の運動方向毎に異なる値の制御特性パラメータを設定してもよい。ここでは、図 2 に示すように 1 つの主軸駆動系 21 と、1 つの主軸駆動系 21 に対応する複数の送り駆動系 22 とを備える工作機械 2 について説明したが、工作機械 2 が複数の主軸駆動系 21 を有する場合、工作機械 2 は、運動方向が同一である複数の送り駆動系 22 を備える場合もある。運動方向が同一である複数の送り駆動系 22 を備える工作機械 2 については、制御特性設定部 32 は、運動方向が同一である複数の送り駆動系 22 には同一の値の制御特性パラメータを設定し、運動方向が互いに異なる複数の送り駆動系 22 には、異なる値の制御特性パラメータを設定することができる。この場合、工作機械 2 の動作中に振動を生じる構造物と送り駆動系 22 とを合成した系のゲイン応答または位相応答は、送り駆動系 22 の運動方向毎に互いに異なる。

[0050] さらに別の例として、制御特性設定部 32 は、加工対象物 W に対する工具 23 の相対的な軌跡に応じて、複数の制御器のそれぞれに対する制御特性パラメータを時々刻々経時的に変化させることができる。図 11 は、図 1 に示す制御特性設定部 32 が生成するパラメータセットの一例について説明するための図である。図 11 には、工作機械 2 の動作中に工具 23 が加工対象物 W に対して描く相対軌跡 L が示されている。相対軌跡 L 上の各位置 P における送り方向 R1 と、送り方向 R1 の法線方向 R2 とは、それぞれの位置 P において変化する。例えば、相対軌跡 L が曲線状であれば、位置 P-1 における送り方向 R1-1 と位置 P-2 における送り方向 R1-2 とは異なり、位置 P-1 における法線方向 R2-1 と位置 P-2 における法線方向 R2-2 とは異なる。ここで、法線方向 R2 とは、工具 23 のある位置 P における相対軌跡 L の法線方向を表し、その位置 P における送り方向 R1 に垂直である。制御特性設定部 32 は、工具 23 の送り方向 R1 と法線方向 R2 とで、周波数特性が互いに異なるように、各時点の制御特性パラメータを変化させる

。この場合、工作機械2の動作中に振動を生じる構造物と送り駆動系22とを合成した系のゲイン応答または位相応答は、加工対象物Wに対する工具23の相対的な送り方向R1と、法線方向R2とで互いに異なる。

[0051] ここで、機械ダイナミクスと連成した加工プロセスMのメカニズムについて説明する。図12は、図1に示す工作機械2の動作中における工具23の状態と加工対象物Wの加工面の状態との関係の第1の例を示す図である。図12には、加工対象物Wの第1の加工面a1と、第1の加工面a1を切削加工する際の工具23の移動軌跡b1とが示されている。移動軌跡b1は、切削加工中の工具23の振動を表している。第1の加工面a1を切削加工したときの切りくずの厚さv1は、第1の加工面a1と工具23の移動軌跡b1との差分で表される。

[0052] 続いて、第2の加工面a2は、工具23によって第1の加工面a1の表面が除去された後の加工対象物Wの表面であり、第1の加工面a1を切削したときの工具23の移動軌跡b1に応じた形状となる。第1の例では、工作機械2の動作中に工具23が振動しているため、第2の加工面a2には、第1の加工面a1を切削加工したときの工具23の振動が転写される。また、この第2の加工面a2を切削加工するときの切りくずの厚さv2は、第2の加工面a2と工具23の移動軌跡b2との差分で表される。このため、第2の加工面a2を切削加工するときの切りくずの厚さv2は、第2の加工面a2の形状と、第2の加工面a2を切削加工するときの工具23の振動とによって異なる。したがって、加工対象物Wの切りくずの厚さは、各加工面を切削加工するときの工具23の振動によって変化する。

[0053] 図12に示す第1の例において、第1の加工面a1を加工するときの切りくずの厚さv1と、第2の加工面a2を加工するときの切りくずの厚さv2とは同程度となっている。このような加工プロセスMは安定しており、振動が発散する可能性は低い。

[0054] 図13は、図1に示す工作機械2の動作中における工具23の状態と加工対象物Wの加工面の状態との関係の第2の例を示す図である。図13には、

加工対象物Wの第3の加工面a3と、第3の加工面a3を切削加工する際の工具23の移動軌跡b3とが示されている。第3の加工面a3を切削加工したときの切りくずの厚さv3は、第3の加工面a3と工具23の移動軌跡b3との差分で表される。

[0055] 続いて、第4の加工面a4は、工具23によって第3の加工面a3の表面が除去された後の加工対象物Wの表面であり、第3の加工面a3を切削加工したときの工具23の移動軌跡b3に応じた形状となる。第2の例では、工作機械2の動作中に工具23が第1の例よりも大きな振幅で振動しており、第4の加工面a4には、第3の加工面a3を切削加工したときの工具23の振動が転写される。また、この第4の加工面a4を切削加工するときの切りくずの厚さv4は、第4の加工面a4と工具23の移動軌跡b4との差分で表される。

[0056] 工具23の振動の振幅は、図12に示す第1の例よりも図13に示す第2の例の方が大きい。このため、第3の加工面a3を加工するときの切りくずの厚さv3と、第4の加工面a4を加工するときの切りくずの厚さv4との差は、第1の例における厚さv1と厚さv2との差よりも大きくなっている。このような加工プロセスMは不安定であり、ビビリ振動を引き起こす可能性が高い。

[0057] 図14は、図1に示す工作機械2の動作中における工具23の状態と加工対象物Wの加工面の状態との関係の第3の例を示す図である。図14には、加工対象物Wの第5の加工面a5と、第5の加工面a5を切削加工する際の工具23の移動軌跡b5とが示されている。第5の加工面a5を切削加工したときの切りくずの厚さv5は、第5の加工面a5と工具23の移動軌跡b5との差分で表される。

[0058] 続いて、第6の加工面a6は、工具23によって第5の加工面a5の表面が除去された後の加工対象物Wの表面であり、第5の加工面a5を切削加工したときの工具23の移動軌跡b5に応じた形状となる。第3の例では、工作機械2の動作中に工具23が振動しており、第6の加工面a6には、第5

の加工面 a 5 を切削加工したときの工具 2 3 の振動が転写される。また、この第 6 の加工面 a 6 を切削加工するときの切りくずの厚さ  $v_6$  は、第 6 の加工面 a 6 と工具 2 3 の移動軌跡 b 6 との差分で表される。ここで、第 5 の加工面 a 5 を切削加工するときの工具 2 3 の振動の位相と、第 6 の加工面 a 6 を切削加工するときの工具 2 3 の振動の位相との差は、第 1 の例において、第 1 の加工面 a 1 を切削加工するときの工具 2 3 の振動の位相と、第 2 の加工面 a 2 を切削加工するときの工具 2 3 の振動の位相との差よりも大きくなっており、位相がほぼ逆転している。このため、第 5 の加工面 a 5 を切削加工するときの切りくずの厚さ  $v_5$  と第 6 の加工面 a 6 を切削加工するときの切りくずの厚さ  $v_6$  との差が、第 1 の例における厚さ  $v_1$  と厚さ  $v_2$  との差よりも大きくなっている。このような加工プロセス M は、第 2 の例と同様に不安定であり、びびり振動を引き起こす可能性が高い。

[0059] 図 1 2 から図 1 4 を用いて説明したように、工具 2 3 の振動状態によって、切りくずの厚さは変化する。特に、工具 2 3 の振動の振幅および位相が加工プロセス M の安定性に与える影響が大きい。したがって、工具 2 3 の振動の振幅および位相を適切に制御することで、加工プロセス M を安定化させることが可能である。

[0060] 連成シミュレーション部 3 4 は、指令生成部 3 1 が出力した運転指令を工作機械 2 に与え、制御特性設定部 3 2 が生成したパラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて工作機械 2 を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を算出する。プロセス情報は、加工誤差を比較可能なパラメータを含み、例えば、加工対象物 W の切り取り厚さ、切削力  $F_c$ 、外乱力  $F_d$  などを含む。ここで、加工対象物 W の切り取り厚さは、工具 2 3 により切り取られた切りくずの厚さとなる。連成シミュレーション部 3 4 は、主軸駆動系 2 1 および送り駆動系 2 2 を含む駆動系 2 0 の動作と、工作機械 2 の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが加工プロセス M に与える影響を含めて、工作機械 2 が行う加工をシミュレーションすることができる。連成シミュレーション部 3 4 は、制御特性設定部 3 2 が生成

したパラメータセットの数だけシミュレーションを行い、シミュレーション結果を示すプロセス情報をパラメータセットの数だけ生成する。連成シミュレーション部34は、生成したプロセス情報をプロセス評価部35に出力する。

[0061] 連成シミュレーション部34は、加工プロセスモデル331、ダイナミクスモデル332、主軸駆動制御モデル333、および、送り駆動制御モデル334を用いて、工作機械2が行う加工をパラメータセット毎にシミュレーションすることができる。具体的には、連成シミュレーション部34は、主軸駆動制御モデル333における主軸駆動制御器の制御特性パラメータと、送り駆動制御モデル334における送り駆動制御器の制御特性パラメータとを、制御特性設定部32が生成したパラメータセットが示す値とし、加工プロセスモデル331、ダイナミクスモデル332、主軸駆動制御モデル333、および、送り駆動制御モデル334に対して、指定された加工条件を用いて、指令生成部31が出力した運転指令を与えることで、工作機械2が行う加工をシミュレーションして、シミュレーション結果を示すプロセス情報を算出する。このとき連成シミュレーション部34は、記憶部33に記憶された加工プロセスモデル331、ダイナミクスモデル332、主軸駆動制御モデル333、送り駆動制御モデル334、および、加工条件情報335を用いることができる。記憶部33に記憶された加工条件情報335を用いる場合、指定された加工条件は、加工条件情報335が示す加工条件となる。

[0062] 連成シミュレーション部34は、工具23および加工対象物Wの間の加工プロセスMと、工作機械2の構造物の機械ダイナミクスと、主軸駆動系21の動作と、送り駆動系22の動作とが連成されたシミュレーションを実行する。連成シミュレーション部34では、図3から図6に示した関係に基づいて、加工プロセスモデル331、ダイナミクスモデル332、主軸駆動制御モデル333および送り駆動制御モデル334の各モデルを組み合わせた連成モデルに対して、パラメータセットが示す制御特性パラメータの値を用いて、加工条件情報335に記述された加工条件の下、運転指令を与えたとき

の駆動信号と主軸駆動系角度 $\theta_1$ と駆動系変位 $r_1$ と工具角度 $\theta_2$ と送り系の構造物変位 $r_2$ と加工対象物 $W$ の切り取り厚さ $h$ と切削トルク $T_c$ と切削力 $F_c$ と外乱トルク $T_d$ と外乱力 $F_d$ とフィードバック信号とをシミュレーションし、それらの時系列情報および周波数成分情報を演算する連成シミュレーションを行う。連成シミュレーション部34は、制御特性設定部32が生成したパラメータセットの数だけシミュレーションを行い、シミュレーション結果をプロセス情報として出力する。

[0063] プロセス評価部35は、連成シミュレーション部34が出力する複数のプロセス情報に基づいて、制御特性設定部32が生成したパラメータセットを用いたときの加工誤差の大きさをパラメータセット毎に評価し、評価結果に基づいて工作機械2の制御に用いるパラメータセットを選択する。プロセス評価部35は、選択したパラメータセットを示す選択信号を駆動制御部36に出力する。

[0064] 図12から図14を用いて説明したように、機械ダイナミクスと連成した加工プロセス $M$ は、加工面と工具23の振動との関係によって不安定化する場合がある。制御特性設定部32が生成するパラメータセットが示す制御特性パラメータの値によって、主軸駆動系21および送り駆動系22の特性は変化する。工具23と、加工対象物 $W$ が載置されるテーブル24とは、主軸駆動系21および送り駆動系22の少なくともいずれかに接続されているため、工具23および加工対象物 $W$ の機械ダイナミクスは、制御特性設定部32が生成するパラメータセットによって間接的に変化させることができる。したがって、連成シミュレーション部34が、制御特性設定部32により生成されたパラメータセット毎に連成シミュレーションを実行することで、プロセス評価部35は、パラメータセット毎に加工プロセス $M$ の安定性を評価することができる。プロセス評価部35は、生成された全てのパラメータセットのうち、最も加工プロセス $M$ が安定するパラメータセットを選択する。これにより、加工誤差が最小となるパラメータセットを用いて、工作機械2を制御することが可能になる。

[0065] 以下、プロセス評価部35における評価方法の一例を説明する。プロセス評価部35は、加工対象物Wの切り取り厚さhの時間変化に基づいて、加工誤差の大きさを評価することができる。連成シミュレーション部34が生成するプロセス情報は、運転指令に基づいて計算された加工対象物Wの切り取り厚さhを含むこととする。プロセス評価部35は、加工対象物Wの切り取り厚さhの増大が小さいほど加工誤差の大きさが小さいと評価する。プロセス評価部35は、切り取り厚さhの増大が最小となるパラメータセットを、工作機械2の制御に用いるパラメータセットとして選択することができる。ここで切り取り厚さhは、図12から図14を用いて説明した切りくずの厚さに相当し、加工面と工具23の移動軌跡との間の厚みを表す。工具23および加工対象物Wの間で、びびり振動と呼ばれる振動が発生すると、時間経過とともに振幅が増大して加工誤差の悪化を招く。このため、切り取り厚さhの経時変化を評価することで、プロセス評価部35は、工具23および加工対象物Wの間の振動が最小となるパラメータセットを選択することができる。工具23および加工対象物Wの間の振動が最小となるパラメータセットは、加工プロセスMを安定化させることができ、工具23および加工対象物Wの間の振動に起因する加工誤差を最小化することができる。

[0066] また、プロセス評価部35は、パラメータセット毎に運転指令を実行したときの外乱力 $F_d$ または外乱トルク $T_d$ の最大振幅に基づいて、加工誤差の大きさを評価することができる。プロセス評価部35は、外乱力 $F_d$ または外乱トルク $T_d$ の最大振幅が小さいほど加工誤差の大きさが小さいと評価する。プロセス評価部35は、最大振幅が最小となるパラメータセットを、工作機械2の制御に用いるパラメータセットとして選択することができる。外乱力 $F_d$ または外乱トルク $T_d$ の最大振幅が小さいほど、外乱力 $F_d$ または外乱トルク $T_d$ に起因する駆動系20の振動が小さくなる。このため、外乱力 $F_d$ または外乱トルク $T_d$ の最大振幅が最小となるパラメータセットを選択することで、駆動系20の振動に起因する加工誤差を最小化することができる。

[0067] また、プロセス評価部35は、連成シミュレーション部34が算出したプ

ロセス情報の時間波形を、予め設定された目標プロファイルと比較して、目標プロファイルとの乖離に基づいて、加工誤差の大きさを評価することができる。目標プロファイルは、加工誤差が許容値以下となるプロファイルであり、例えば、プロセス評価部 35 の内部に予め設定される。プロセス評価部 35 は、目標プロファイルとの乖離が小さいほど加工誤差の大きさが小さいと評価する。プロセス評価部 35 は、2乗和誤差などの損失関数に基づいて、目標プロファイルとの乖離を評価してもよいし、パターンマッチングなどの機械学習手法に基づいて、目標プロファイルとの乖離を評価してもよい。プロセス評価部 35 は、目標プロファイルとの乖離が最小となるパラメータセットを選択することで、加工誤差を最小化することができる。

[0068] プロセス評価部 35 は、上記の複数の評価方法のいずれか 1つを用いて加工誤差の大きさを評価してもよいし、上記の複数の評価方法を組み合わせて用いてもよい。

[0069] 駆動制御部 36 は、指令生成部 31 が生成した運転指令に従って、工作機械 2 の駆動系 20 を制御する。駆動制御部 36 は、主軸駆動系 21 を制御するための制御器である主軸駆動制御器と、送り駆動系 22 を制御するための制御器である送り駆動制御器とを内部に有する。主軸駆動制御器は、主軸駆動系 21 に備わるエンコーダの信号を監視しながら、主軸駆動系 21 の位置および速度が運転指令で指定された量になるように、主軸モータ 211 に対して指令を出力する。送り駆動制御器は、送り駆動系 22 に備わるエンコーダの信号を監視しながら、送り駆動系 22 の位置および速度が運転指令で指定された量になるように、サーボモータ 221 に対して指令を出力する。駆動制御部 36 は、プロセス評価部 35 が出力する選択信号に基づいて、制御特性設定部 32 が出力したパラメータセットのうち、工作機械 2 の制御に用いるパラメータセットを選択し、主軸駆動制御器および送り駆動制御器の制御特性パラメータの値を、選択されたパラメータセットが示す制御特性パラメータの値とする。

[0070] 図 15 は、図 1 に示す数値制御装置 3 の動作を説明するためのフローチャ

ートである。加工システム1が運転を開始すると、数値制御装置3の指令生成部31は、数値制御プログラム4を読み込んで、読み込んだ数値制御プログラム4を解析し、数値制御プログラム4に基づく運転指令を生成する。また、制御特性設定部32は、制御特性パラメータの組であるパラメータセットを1つ以上生成する（ステップS101）。指令生成部31は、生成した運転指令を連成シミュレーション部34および駆動制御部36に出力し、制御特性設定部32は、生成したパラメータセットを連成シミュレーション部34および駆動制御部36に出力する。

[0071] 連成シミュレーション部34は、指令生成部31が出力した運転指令と、制御特性設定部32が出力したパラメータセットとを用いて、パラメータセット毎に連成シミュレーションを実行してプロセス情報を算出する（ステップS102）。連成シミュレーション部34は、算出したプロセス情報をプロセス評価部35に出力する。

[0072] プロセス評価部35は、プロセス情報を評価して、パラメータセット毎に加工誤差の大きさを評価し、工作機械2の制御に用いるパラメータセットを選択する（ステップS103）。プロセス評価部35は、選択したパラメータセットを示す選択信号を駆動制御部36に出力する。

[0073] 駆動制御部36は、プロセス評価部35が出力した選択信号に基づいて、選択されたパラメータセットを用いて工作機械2の運転を制御する（ステップS104）。指令生成部31は、数値制御プログラム4に記述された全ての指令の読み取りが完了したか否かを判断する（ステップS105）。読み取りが完了していない場合（ステップS105：No）、指令生成部31は、ステップS101から処理を繰り返す。読み取りが完了した場合（ステップS105：Yes）、加工システム1は運転を終了する。

[0074] 以上説明したように、実施の形態1の加工システム1において、数値制御装置3は、数値制御プログラム4に基づいて生成した運転指令を工作機械2に与えた場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、駆動系20の動作と、工作機械2の動作中に振動を生じる構造物のダイナミク

スとが、工具 2 3 による加工対象物 W の加工プロセス M に与える影響を含めてパラメータセット毎に算出し、プロセス情報の評価結果に基づいて工作機械 2 の制御に用いるパラメータセットを選択する。数値制御装置 3 の駆動制御部 3 6 は、選択されたパラメータセットが示す制御特性パラメータを使用して、運転指令に基づいて工作機械 2 を制御する。したがって、数値制御装置 3 は、加工プロセスと、駆動系 2 0 の動作と、工作機械 2 の動作中に振動を生じる構造物の機械ダイナミクスとが相互に影響し合って加工誤差が生じる場合においても、加工誤差を低減することが可能になる。

[0075] 制御特性設定部 3 2 が駆動系 2 0 の制御特性を決定づける制御特性パラメータの組であるパラメータセットを生成するため、加工システム 1 の加工能率は変化しない。特に、加工対象物 W に対する工具 2 3 の送り方向 R 1 とその法線方向 R 2 とで制御特性が異なる制御特性パラメータの組を生成する場合、駆動系 2 0 の作用により、工具 2 3 の送り方向 R 1 の機械ダイナミクスの動特性と、法線方向 R 2 の機械ダイナミクスの動特性との比率を工具 2 3 の各位置で保ったままの運転を実現することができる。

[0076] 連成シミュレーション部 3 4 は、工具 2 3 と加工対象物 W との間の加工特性を表す加工プロセスモデル 3 3 1 と、工作機械 2 の動作中に振動を生じる構造物の動特性を表すダイナミクスモデル 3 3 2 と、主軸駆動系 2 1 と主軸駆動系 2 1 を制御する主軸駆動制御器とを表す主軸駆動制御モデル 3 3 3 と、送り駆動系 2 2 と送り駆動系 2 2 を制御する送り駆動制御器とを表す送り駆動制御モデル 3 3 4 と、に対して、制御特性設定部 3 2 が生成したパラメータセットを用いて、指定された加工条件で運転指令を与えたときのプロセス情報を算出する。数理モデルを用いて連成シミュレーションを行うことで、運転指令が駆動系 2 0 および機械ダイナミクスを介して加工プロセス M に与える影響を正確に評価することが可能になる。

[0077] 実施の形態 1 では、加工プロセスモデル 3 3 1 と、ダイナミクスモデル 3 3 2 と、主軸駆動制御モデル 3 3 3 と、送り駆動制御モデル 3 3 4 と、加工条件を示す加工条件情報 3 3 5 とを記憶する記憶部 3 3 は、数値制御装置 3

に備わることとしたが、記憶部 33 は、数値制御装置 3 の外部に備わっていてもよい。

[0078] なお、記憶部 33 は、数値制御プログラム 4 に記述された加工工程に応じて異なるモデルおよび加工条件を記憶してもよい。連成シミュレーション部 34 は、加工工程に応じて異なるモデルおよび加工条件を用いて、シミュレーションを行うことが可能になる。また、実施の形態 1 では、工作機械 2 が 1 つの主軸駆動系 21 と、1 または複数の送り駆動系 22 とを備えることとしたが、工作機械 2 は複数の主軸駆動系 21 を有してもよい。工作機械 2 が複数の主軸駆動系 21 を有する場合であっても、図 15 に示した動作を同様に行えばよい。

[0079] また、実施の形態 1 では、例えばマシニングセンタのように、主軸駆動系 21 に工具 23 が接続されており、工具 23 が回転する工作機械 2 について説明したが、工作機械 2 は、例えば NC (Numerically Control) 旋盤のように主軸駆動系 21 に加工対象物 W が接続され、加工対象物 W が回転する構成であってもよい。

[0080] 実施の形態 2.

図 16 は、実施の形態 2 にかかる加工システム 1a の機能構成を示す図である。実施の形態 1 と同様の機能を有する機能構成は実施の形態 1 と同一の符号を付して、重複する説明を省略する。以下、実施の形態 1 と異なる点について主に説明する。加工システム 1a は、シミュレーション結果に基づいて運転指令を生成する点が、加工システム 1 と異なる。

[0081] 加工システム 1a は、工作機械 2 と、数値制御装置 3a とを有する。数値制御装置 3a は、数値制御装置 3 と同様に、数値制御プログラム 4 に記述された指令に基づいて工作機械 2 を制御する。数値制御装置 3a は、指令生成部 31 と、制御特性設定部 32a と、記憶部 33a と、連成シミュレーション部 34a と、プロセス評価部 35 と、駆動制御部 36 とを有する。

[0082] 記憶部 33a は、記憶部 33 と同様に、加工プロセスモデル 331 と、ダイナミクスモデル 332 と、主軸駆動制御モデル 333 と、送り駆動制御モ

デル 3 3 4 と、加工条件情報 3 3 5 とを記憶し、記憶した情報を連成シミュレーション部 3 4 a に出力する。記憶部 3 3 a は、さらに、制御特性設定部 3 2 a にも記憶した情報を出力することができる。

[0083] 連成シミュレーション部 3 4 a は、連成シミュレーション部 3 4 と同様に、制御特性設定部 3 2 が生成したパラメータセットを用いて工作機械 2 を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を算出する。連成シミュレーション部 3 4 a は、算出したプロセス情報をプロセス評価部 3 5 に出力すると共に、制御特性設定部 3 2 a にも出力する。

[0084] 制御特性設定部 3 2 a は、パラメータセットを 1 つ生成し、連成シミュレーション部 3 4 a に出力する。さらに、制御特性設定部 3 2 a は、生成したパラメータセットを用いて連成シミュレーション部 3 4 a が生成したプロセス情報を取得し、取得したプロセス情報に基づいて、パラメータセットを修正する。

[0085] ここで、上記で説明した図 1 2 から図 1 4 を用いて、パラメータセットの修正について説明する。連成シミュレーション部 3 4 a から取得したプロセス情報が示すシミュレーション結果が、図 1 3 または図 1 4 のように、切りくずの厚さの変動が大きい場合、制御特性設定部 3 2 a は、駆動系 2 0 の周波数応答におけるゲインまたは位相の少なくとも一方が変化するように制御特性パラメータを変更する。例えば、図 1 3 に示した第 2 の例のように、工具 2 3 の振動の位相が同相であるが振幅が大きい場合、制御特性設定部 3 2 a は、制御ゲインを増減させたり、バンドストップフィルタの阻止帯域が当該周波数を含むように阻止帯域を変更したりする。このような変更を行うことで、制御特性設定部 3 2 a は、工具 2 3 の振動の周波数を含む帯域における振動の振幅を低下させることができる。

[0086] また、別の例として、図 1 4 に示す第 3 の例のように、工具 2 3 の振動の振幅は小さいが加工対象の加工面に転写された振動の位相と、その加工面を切削加工するときの工具 2 3 の振動の位相とが逆相である場合、制御特性設定部 3 2 a は、制御ゲインを増減したり、位相補償フィルタの位相補償量を

変更したりする。このような変更を行うことで、加工対象の加工面に転写された振動の位相と、その加工面を切削加工するときの工具 2 3 の振動の位相との位相差を減少させることができる。制御特性設定部 3 2 a は、プロセス情報に基づいて、パラメータセットを上記の例のように変更することで、図 1 2 に示したように、切りくずの厚さの変動を小さくし、加工プロセス M を安定化させ、加工誤差を低減することが可能である。

[0087] 図 1 7 は、図 1 6 に示す数値制御装置 3 a の動作を説明するためのフローチャートである。加工システム 1 a が運転を開始すると、数値制御装置 3 a の指令生成部 3 1 は、数値制御プログラム 4 を読み込んで、読み込んだ数値制御プログラム 4 を解析し、数値制御プログラム 4 に記述された指令を工作機械 2 に実行させるための運転指令を生成すると共に、第 1 のパラメータセットを生成する（ステップ S 2 0 1）。指令生成部 3 1 は、生成した運転指令を連成シミュレーション部 3 4 a および駆動制御部 3 6 に出力し、制御特性設定部 3 2 a は、生成した第 1 のパラメータセットを連成シミュレーション部 3 4 a および駆動制御部 3 6 に出力する。

[0088] 連成シミュレーション部 3 4 a は、制御特性設定部 3 2 a が生成した第 1 のパラメータセットを用いて、指令生成部 3 1 が出力した運転指令を工作機械 2 が実行するときの連成シミュレーションを実行してプロセス情報を生成する（ステップ S 2 0 2）。連成シミュレーション部 3 4 a は、生成したプロセス情報をプロセス評価部 3 5 および制御特性設定部 3 2 a のそれぞれに出力する。

[0089] 制御特性設定部 3 2 a は、ステップ S 2 0 2 を実行した結果出力されるプロセス情報に基づいてパラメータセットを修正して、第 2 のパラメータセットを生成する（ステップ S 2 0 3）。制御特性設定部 3 2 a は、生成した第 2 のパラメータセットを連成シミュレーション部 3 4 a および駆動制御部 3 6 に出力する。

[0090] 連成シミュレーション部 3 4 a は、制御特性設定部 3 2 a が出力した第 2 のパラメータセットを用いて工作機械 2 を制御したときの連成シミュレーシ

ョンを実行してプロセス情報を生成する（ステップS 204）。連成シミュレーション部34aは、生成したプロセス情報をプロセス評価部35および制御特性設定部32aのそれぞれに出力する。

[0091] プロセス評価部35は、複数のプロセス情報を比較評価して、各パラメータセットを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、工作機械2の制御に使用するパラメータセットを選択する（ステップS 205）。プロセス評価部35は、選択したパラメータセットを示す選択信号を駆動制御部36に出力する。

[0092] 駆動制御部36は、プロセス評価部35が出力した選択信号に基づいて、選択されたパラメータセットを用いて工作機械2の運転を制御する（ステップS 206）。指令生成部31は、数値制御プログラム4に記述された全ての指令の読み取りが完了したか否かを判断する（ステップS 207）。読み取りが完了していない場合（ステップS 207：No）、指令生成部31は、ステップS 201から処理を繰り返す。読み取りが完了した場合（ステップS 207：Yes）、加工システム1aは運転を終了する。

[0093] なお、上記の例では、制御特性設定部32aは、第1のパラメータセットを用いて工作機械2を制御した場合のシミュレーション結果を示すプロセス情報に基づいて第1のパラメータセットを修正した第2のパラメータセットを生成し、プロセス評価部35は、第1のパラメータセットおよび第2のパラメータセットの中から、工作機械2の制御に用いるパラメータセットを選択することとしたが、制御特性設定部32aは、3つ以上のパラメータセットを生成してもよい。例えば、制御特性設定部32aは、1つのプロセス情報に基づいて、複数のパラメータセットを生成してもよい。或いは、制御特性設定部32aは、パラメータセットの修正を繰り返してもよい。例えば、制御特性設定部32aは、第2のパラメータセットを用いて工作機械2を制御した場合のシミュレーション結果を示すプロセス情報に基づいてさらに第3のパラメータセットを生成してもよい。この場合、加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の振幅または位相を評価値として機械学習手法を用いて、

加工対象物Wの切り取り厚さの振動を低減することが可能なパラメータセットを探索する手法を採用することができる。

[0094] 図18は、図16に示す数値制御装置3aに関する学習装置50の構成の一例を示す図である。学習装置50は、例えば、図16に示す数値制御装置3aが備えてもよいし、数値制御装置3aと異なる情報処理装置であってもよい。学習装置50は、学習用データ取得部51とモデル生成部52とを有する。

[0095] 学習用データ取得部51は、制御特性設定部32aが生成したパラメータセットと、パラメータセットに対応するプロセス情報、つまり、パラメータセットが示す制御特性パラメータの値を用いて工作機械2を制御した場合のシミュレーション結果を示すプロセス情報とを学習用データとして取得する。学習用データ取得部51は、取得した学習用データをモデル生成部52に出力することができる。なお、学習用データ取得部51は、プロセス情報の全てを取得してもよいし、プロセス情報の一部を取得してもよい。例えば、学習用データ取得部51は、プロセス情報のうち、加工誤差の大きさを示すパラメータを学習用データとして取得することができる。例えば学習用データ取得部51は、加工対象物Wの切り取り厚さ、或いは、加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の振幅または位相を学習用データとして取得することができる。

[0096] モデル生成部52は、パラメータセットと、パラメータセットを用いて工作機械2を制御した場合のシミュレーション結果を示すプロセス情報とを含む学習用データに基づいて、新たなパラメータセットを学習する。すなわち、モデル生成部52は、数値制御装置3aのプロセス情報から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを生成する。モデル生成部52は、生成した学習済モデルを学習済モデル記憶部53に出力する。

[0097] モデル生成部52が用いる学習アルゴリズムは教師あり学習、教師なし学習、強化学習 (Reinforcement Learning) 等の公知のアルゴリズムを用いることができる。一例として、強化学習を適用した場合について説明する。強

化学習では、ある環境内における行動主体であるエージェントが、現在の状態を示す環境のパラメータを観測し、取るべき行動を決定する。エージェントの行動により環境が動的に変化し、エージェントには環境の変化に応じて報酬が与えられる。エージェントはこれを繰り返し、一連の行動を通じて報酬が最も多く得られる行動方針を学習する。強化学習の代表的な手法として、Q学習 (Q-Learning) やTD学習 (TD-Learning) が知られている。例えば、Q学習の場合、行動価値関数  $Q(s, a)$  の一般的な更新式は以下に示す数式 (4) で表される。

[0098] [数4]

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

[0099] 数式 (4) において、 $s_t$  は時刻  $t$  における環境の状態を表し、 $a_t$  は時刻  $t$  における行動を表す。行動  $a_t$  により、状態は  $s_{t+1}$  に変わる。 $r_{t+1}$  はその状態の変化によってもらえる報酬を表し、 $\gamma$  は割引率を表し、 $\alpha$  は学習係数を表す。なお、 $\gamma$  は  $0 < \gamma \leq 1$ 、 $\alpha$  は  $0 < \alpha \leq 1$  の範囲の値をとる。修正運転指令が行動  $a_t$  となり、プロセス情報が状態  $s_t$  となり、学習装置 50 は、時刻  $t$  の状態における最良の行動  $a_t$  を学習する。

[0100] 数式 (4) で表される更新式は、時刻  $t + 1$  における最も  $Q$  値の高い行動  $a$  の行動価値  $Q$  が、時刻  $t$  において実行された行動  $a$  の行動価値  $Q$  よりも大きければ、行動価値  $Q$  を大きくし、逆の場合は、行動価値  $Q$  を小さくする。換言すれば、時刻  $t$  における行動  $a$  の行動価値  $Q$  を、時刻  $t + 1$  における最良の行動価値に近づけるように、行動価値関数  $Q(S, a)$  を更新する。それにより、ある環境における最良の行動価値  $Q$  が、それ以前の環境における行動価値  $Q$  に順次伝搬していくようになる。

[0101] 上記のように、強化学習によって学習済モデルを生成する場合、モデル生成部 52 は、報酬計算部 54 と、関数更新部 55 とを備えている。

[0102] 報酬計算部 54 は、パラメータセットと、プロセス情報とに基づいて報酬を計算する。報酬計算部 54 は、報酬増大基準  $D1$  および報酬減少基準  $D2$  を含む報酬基準  $D$  に基づいて、報酬  $r$  を計算する。例えば、報酬基準  $D$  は、

プロセス情報が示す、加工誤差の大きさに基づいて定められる。加工誤差の大きさを示すパラメータとしては、例えば、加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の振幅が用いられる。例えば、報酬増大基準D1は、加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の振幅が閾値未満であることとし、報酬減少基準D2は、加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の振幅が閾値以上であることとすることができる。報酬計算部54は、報酬増大基準D1を満たす場合、例えば「+1」の報酬を与えることで、報酬rを増大させ、報酬減少基準D2を満たす場合、例えば「-1」の報酬を与えることで、報酬rを減少させる。報酬計算部54は、計算した報酬rを関数更新部55に出力する。また、別の例として、加工誤差の大きさを示すパラメータとしては、切りくず厚さの振動成分の振幅の他に、加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の位相を用いることもできる。ここで切り取り厚さの振動成分の位相とは、工具23の刃先が加工対象物Wを切り取り始める瞬間に切りくず形状に重畳する振動の位相である。この場合、報酬増大基準D1は加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の位相が予め定められた範囲内の値であることとし、報酬減少基準D2は加工対象物Wの切り取り厚さの振動成分の位相が上記の範囲外の値であることとすることができる。

- [0103] 関数更新部55は、報酬計算部54によって計算される報酬rに従って、パラメータセットを決定するための関数を更新し、学習済モデル記憶部53に出力する。例えばQ学習の場合、数式(4)で表される行動価値関数 $Q(s_t, a_t)$ を、修正運転指令を算出するための関数として用いる。
- [0104] 以上のような学習を繰り返し実行する。学習済モデル記憶部53は、関数更新部55によって更新された行動価値関数 $Q(s_t, a_t)$ 、すなわち、学習済モデルを記憶する。
- [0105] 次に、図19を用いて、学習装置50が学習する処理について説明する。図19は、図18に示す学習装置50の学習処理を説明するためのフローチャートである。
- [0106] 学習用データ取得部51は、制御特性設定部32aが生成したパラメータ

セットと、パラメータセットに対応するプロセス情報とを学習用データとして取得する（ステップS301）。

[0107] モデル生成部52は、学習用データ取得部51が取得した学習用データに含まれるパラメータセットと、プロセス情報とに基づいて、報酬 $r$ を計算する（ステップS302）。具体的には、報酬計算部54は、パラメータセットおよびプロセス情報を取得し、予め定められた報酬基準 $D$ に基づいて報酬 $r$ を増大させるかまたは報酬 $r$ を減少させるかを判断する（ステップS303）。

[0108] 報酬計算部54は、報酬 $r$ を増大させると判断した場合（ステップS303：増大）、報酬 $r$ を増大させる（ステップS304）。報酬計算部54は、報酬 $r$ を減少させると判断した場合（ステップS303：減少）、報酬 $r$ を減少させる（ステップS305）。

[0109] 関数更新部55は、報酬計算部54によって計算された報酬 $r$ に基づいて、学習済モデル記憶部53が記憶する行動価値関数 $Q(s_t, a_t)$ を更新する（ステップS306）。

[0110] 学習装置50は、以上のステップS301からステップS306までの処理を繰り返し実行し、生成された行動価値関数 $Q(s_t, a_t)$ を学習済モデルとして記憶する。

[0111] なお、図18では学習済モデル記憶部53は、学習装置50の外部に備わることとしたが、学習装置50が学習済モデル記憶部53を内部に備えていてもよい。なお、学習装置50が数値制御装置3aに備わっている場合、学習済モデル記憶部53は、記憶部33aと同一の記憶装置に備わっていてもよいし、別の記憶装置に備わっていてもよい。

[0112] 図20は、図16に示す数値制御装置3aに関する推論装置60の構成の一例を示す図である。推論装置60は、データ取得部61と、推論部62とを有する。推論装置60は、数値制御装置3aに備わっていてもよいし、数値制御装置3aと異なる情報処理装置であってもよい。推論装置60は、例えば数値制御装置3aの指令生成部31に備わる。

- [0113] データ取得部 6 1 は、連成シミュレーション部 3 4 a が出力するプロセス情報を取得する。データ取得部 6 1 は、取得したデータを推論部 6 2 に出力する。
- [0114] 推論部 6 2 は、学習済モデル記憶部 5 3 に記憶された学習済モデルを利用して、データ取得部 6 1 が取得したプロセス情報から新たなパラメータセットを推論する。すなわち、推論部 6 2 は、学習済モデルにデータ取得部 6 1 が出力するプロセス情報を入力することで、プロセス情報に適したパラメータセットを推論することができる。
- [0115] なお、上記では、推論装置 6 0 は、数値制御装置 3 a から取得したデータを用いて機械学習を行った結果の学習済モデルを用いて修正運転指令を出力することとしたが、他の数値制御装置 3 a から学習済モデルを取得して、この学習済モデルに基づいて新たなパラメータセットを出力するようにしてもよい。
- [0116] 図 2 1 は、図 2 0 に示す推論装置 6 0 の動作を説明するためのフローチャートである。推論装置 6 0 のデータ取得部 6 1 は、プロセス情報を推論用のデータとして取得し（ステップ S 4 0 1）、取得したデータを推論部 6 2 に出力する。
- [0117] 推論部 6 2 は、学習済モデル記憶部 5 3 に記憶された学習済モデルに、ステップ S 4 0 1 で取得された推論用のデータであるプロセス情報を入力する（ステップ S 4 0 2）。推論部 6 2 は、学習済モデルにプロセス情報を入力した結果であるパラメータセットを出力する（ステップ S 4 0 3）。なお、数値制御装置 3 a の指令生成部 3 1 は、推論部 6 2 が出力するパラメータセットを取得して、取得したパラメータセットを、連成シミュレーション部 3 4 a に出力する。
- [0118] なお、上記では、推論部 6 2 は学習アルゴリズムとして強化学習を用いることとしたが、推論部 6 2 が用いる学習アルゴリズムは強化学習に限られない。推論部 6 2 は、強化学習以外にも、教師あり学習、教師なし学習、または半教師あり学習等を学習アルゴリズムとして使用することもできる。

- [0119] また、モデル生成部52が用いる学習アルゴリズムとしては、特徴量そのものの抽出を学習する、深層学習（Deep Learning）を用いることもでき、他の公知の方法、例えばニューラルネットワーク、遺伝的プログラミング、機能推理プログラミング、サポートベクターマシンなどに従って機械学習を実行してもよい。
- [0120] なお、学習装置50および推論装置60のそれぞれは、例えば、ネットワークを介して数値制御装置3aに接続され、この数値制御装置3aとは別個の装置であってもよい。また、学習装置50および推論装置60のそれぞれは、数値制御装置3aに内蔵されていてもよい。さらに、学習装置50および推論装置60のそれぞれは、クラウドサーバ上に存在していてもよい。
- [0121] また、モデル生成部52は、複数の数値制御装置3aから取得される学習用データを用いて、パラメータセットを学習するようにしてもよい。なお、モデル生成部52は、同一のエリアで使用される複数の数値制御装置3aから学習用データを取得してもよいし、異なるエリアで独立して動作する複数の数値制御装置3aから収集される学習用データを利用してパラメータセットを学習してもよい。また、学習用データを収集する数値制御装置3aを途中で対象に追加したり、対象から除外することも可能である。さらに、ある数値制御装置3aに関してパラメータセットを学習した学習装置50を、これとは別の数値制御装置3aに適用し、当該別の数値制御装置3aに関してパラメータセットを再学習して更新するようにしてもよい。
- [0122] 以上説明したように、実施の形態2にかかる数値制御装置3aは、第1のパラメータセットと、プロセス情報を用いて第1のパラメータセットを修正した第2のパラメータセットとを生成し、それぞれのパラメータセットの評価結果に基づいて工作機械2の制御に用いるパラメータセットが選択される。制御特性設定部32aは、連成シミュレーション部34aで実行したシミュレーション結果に基づいて新たにパラメータセットを生成するため、駆動系20と機械ダイナミクスと加工プロセスMの特性に基づいたパラメータセットを生成することができる。したがって、数値制御装置3aは、効率的に

加工誤差を低減することが可能になる。

[0123] また、数値制御装置 3 a は、修正後のパラメータセットのシミュレーション結果からさらに別のパラメータセットを生成してもよい。この場合、修正を繰り返すたびに、加工誤差をより小さくすることが可能なパラメータセットを生成することができる。パラメータセットの修正を繰り返す場合、学習装置 5 0 を用いて、機械学習により修正後のパラメータセットを学習することができる。数値制御装置 3 a は、学習装置 5 0 の学習結果である学習済モデルを用いてパラメータセットを推論する推論装置 6 0 が出力するパラメータセットを利用することができる。機械学習を用いることで、数値制御装置 3 a は、探索的にパラメータセットを生成することができるため、加工システム 1 a は、事前にパラメータセットを修正する規則を準備することなく、加工誤差を低減することができるパラメータセットを生成することが可能になる。

[0124] 実施の形態 3.

図 2 2 は、実施の形態 3 にかかる加工システム 1 b の構成を示す図である。なお、実施の形態 1 と同様の機能を有する構成要素は実施の形態 1 と同一の符号を付して重複する説明を省略する。以下、実施の形態 1, 2 と異なる部分について主に説明する。

[0125] 加工システム 1 b は、工作機械 2 b と、数値制御装置 3 b とを有する。工作機械 2 b は、主軸駆動系 2 1 と、送り駆動系 2 2 と、工具 2 3 と、テーブル 2 4 と、センサ 2 5 とを有する。

[0126] センサ 2 5 は、工作機械 2 b の動作中に振動を生じる構造物の振動を検知する。センサ 2 5 は、例えば、加速度センサ、力センサである。或いは、センサ 2 5 は、駆動系 2 0 のフィードバック制御のために予め駆動系 2 0 の内部に備わっているエンコーダであってもよい。センサ 2 5 は、数値制御装置 3 b に接続されており、センサ 2 5 が取得した信号であるセンサ信号は、数値制御装置 3 b に出力される。

[0127] 数値制御装置 3 b は、指令生成部 3 1 と、制御特性設定部 3 2 b と、記憶

部 3 3 と、連成シミュレーション部 3 4 と、プロセス評価部 3 5 と、駆動制御部 3 6 とを有する。数値制御装置 3 b は、センサ 2 5 の出力するセンサ信号に基づいてパラメータセットを生成する点が実施の形態 1, 2 と異なる。

[0128] 制御特性設定部 3 2 b は、実施の形態 1 にかかる制御特性設定部 3 2 と同様の方法で、第 1 のパラメータセットを生成することができる。また、制御特性設定部 3 2 b は、センサ 2 5 が出力するセンサ信号に基づいて、第 1 のパラメータセットを修正して新たなパラメータセットである第 2 のパラメータセットを生成することができる。具体的には、制御特性設定部 3 2 b は、センサ信号の振幅と、制御特性パラメータの値との対応表を予め内部に記憶しておき、その対応表に基づいて、センサ信号からパラメータセットを生成することができる。或いは、制御特性設定部 3 2 b は、センサ信号が入力されたときに、パターンマッチングなどの機械学習手法を用いて、制御特性パラメータの値を決定してもよい。

[0129] 数値制御装置 3 b の動作は、パラメータセットを修正する際にセンサ信号を用いる点以外は図 1 7 に示した数値制御装置 3 a の動作と同様であるため、ここでは詳細な説明を省略する。

[0130] なお、上記では、制御特性設定部 3 2 b は、センサ信号を用いて第 1 のパラメータセットを修正することで第 2 のパラメータセットを生成することとしたが、パラメータセットの修正は逐次的に行うこととしてもよい。すなわち、制御特性設定部 3 2 b は、センサ信号を用いて生成したパラメータセットを用いて工作機械 2 b を制御したときに検出したセンサ信号を用いて、さらにパラメータセットを修正してもよい。この場合、センサ信号の振動成分の振幅または位相を評価値として強化学習などの機械学習手法を用いて、センサ信号の振動を低減するパラメータセットを探索する手法を用いることができる。

[0131] 機械学習を用いる場合、例えば、図 1 8 に示した学習装置 5 0 を用いて学習済モデルを取得し、図 2 0 に示す推論装置 6 0 を用いて、学習済モデルからパラメータセットを得ることができる。この場合、上記の実施の形態 2 で

行った説明のうち、学習用データ取得部 5 1 およびデータ取得部 6 1 が取得する「プロセス情報」を「センサ信号」と読み替えることにより、実施の形態 3 にかかる数値制御装置 3 b が用いるパラメータセットを生成する方法の説明を省略する。この場合、学習用データ取得部 5 1 が取得するパラメータセットは、センサ信号に対応するパラメータセット、具体的には、センサ信号を取得したときに工作機械 2 b の制御に用いられているパラメータセットとなる。

[0132] 以上説明したように、実施の形態 3 にかかる数値制御装置 3 b は、工作機械 2 b がセンサ 2 5 を備え、数値制御装置 3 b の制御特性設定部 3 2 b は、センサ信号に基づいてパラメータセットを修正することができる。このため、制御特性設定部 3 2 b は、工作機械 2 b において実際に発生する振動の状態に応じてパラメータセットを修正することが可能であり、効率的に加工誤差を低減するパラメータセットを生成することができる。

[0133] また、機械学習を用いて探索的にパラメータセットを生成することで、加工システム 1 b は、事前にパラメータセットの修正則を準備することなく、加工誤差を低減するパラメータセットを生成することが可能になる。

[0134] 続いて、実施の形態 1～3 にかかる数値制御装置 3, 3 a, 3 b、学習装置 5 0、および、推論装置 6 0 のハードウェア構成について説明する。数値制御装置 3, 3 a, 3 b の指令生成部 3 1、制御特性設定部 3 2, 3 2 a, 3 2 b、連成シミュレーション部 3 4, 3 4 a、プロセス評価部 3 5、および、駆動制御部 3 6 と、学習装置 5 0 の学習用データ取得部 5 1 およびモデル生成部 5 2 と、推論装置 6 0 のデータ取得部 6 1 および推論部 6 2 とは、処理回路により実現される。これらの処理回路は、専用のハードウェアにより実現されてもよいし、CPU (Central Processing Unit) を用いた制御回路であってもよい。

[0135] 上記の処理回路が、専用のハードウェアにより実現される場合、これらは、図 2 3 に示す処理回路 9 0 により実現される。図 2 3 は、実施の形態 1～3 にかかる数値制御装置 3, 3 a, 3 b、学習装置 5 0、および、推論装置

60の機能を実現するための専用のハードウェアを示す図である。処理回路90は、単回路、複合回路、プログラム化したプロセッサ、並列プログラム化したプロセッサ、ASIC (Application Specific Integrated Circuit)、FPGA (Field Programmable Gate Array)、またはこれらを組み合わせたものである。

[0136] 上記の処理回路が、CPUを用いた制御回路で実現される場合、この制御回路は例えば図24に示す構成の制御回路91である。図24は、実施の形態1～3にかかる数値制御装置3、3a、3b、学習装置50、および、推論装置60の機能を実現するための制御回路91の構成を示す図である。図24に示すように、制御回路91は、プロセッサ92と、メモリ93とを備える。プロセッサ92は、CPUであり、演算装置、マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ、DSP (Digital Signal Processor) などとも呼ばれる。メモリ93は、例えば、RAM (Random Access Memory)、ROM (Read Only Memory)、フラッシュメモリ、EPROM (Erasable Programmable ROM)、EEPROM (登録商標) (Electrically EPROM) などの不揮発性または揮発性の半導体メモリ、磁気ディスク、フレキシブルディスク、光ディスク、コンパクトディスク、ミニディスク、DVD (Digital Versatile Disk) などである。

[0137] 上記の処理回路が制御回路91により実現される場合、プロセッサ92がメモリ93に記憶された、各構成要素の処理に対応するプログラムを読み出して実行することにより実現される。また、メモリ93は、プロセッサ92が実行する各処理における一時メモリとしても使用される。

[0138] なお、プロセッサ92が実行するプログラムは、記憶媒体に記憶されて提供されてもよいし、通信路を介して提供されてもよい。また、実施の形態1～3にかかる数値制御装置3、3a、3b、学習装置50、および、推論装置60の機能は、図23に示す処理回路90または図24に示す制御回路91のいずれか一方を用いて実現されてもよいし、処理回路90と制御回路91とが組み合わせて用いられてもよい。

[0139] 以上の実施の形態に示した構成は、一例を示すものであり、別の公知の技術と組み合わせることも可能であるし、実施の形態同士を組み合わせることも可能であるし、要旨を逸脱しない範囲で、構成の一部を省略、変更することも可能である。

### 符号の説明

[0140] 1, 1 a, 1 b 加工システム、2, 2 b 工作機械、3, 3 a, 3 b 数値制御装置、4 数値制御プログラム、20 駆動系、21 主軸駆動系、22, 22-1, 22-2 送り駆動系、23 工具、24 テーブル、25 センサ、31 指令生成部、32, 32 a, 32 b 制御特性設定部、33, 33 a 記憶部、34, 34 a 連成シミュレーション部、35 プロセス評価部、36 駆動制御部、50 学習装置、51 学習用データ取得部、52 モデル生成部、53 学習済モデル記憶部、54 報酬計算部、55 関数更新部、60 推論装置、61 データ取得部、62 推論部、90 処理回路、91 制御回路、92 プロセッサ、93 メモリ、211 主軸モータ、212 主軸駆動機構、221, 221-1, 221-2 サーボモータ、222, 222-1, 222-2 送り駆動機構、331 加工プロセスモデル、332 ダイナミクスモデル、333 主軸駆動制御モデル、334 送り駆動制御モデル、335 加工条件情報、a1 第1の加工面、a2 第2の加工面、a3 第3の加工面、a4 第4の加工面、a5 第5の加工面、a6 第6の加工面、b1~b6 移動軌跡、c 送り量、 $F_c$  切削力、 $F_d$  外乱力、L 相対軌跡、M 加工プロセス、MD1 工具側機械ダイナミクス、MD2 加工対象物側機械ダイナミクス、P, P-1, P-2 位置、R1 送り方向、r1 駆動系変位、R2 法線方向、r2 構造物変位、 $T_c$  切削トルク、 $T_d$  外乱トルク、v1~v6 厚さ、W 加工対象物、 $\theta_1$  主軸駆動系角度、 $\theta_2$  工具角度。

## 請求の範囲

### [請求項1]

加工対象物を加工するための工具または前記加工対象物を回転させる主軸を駆動する主軸駆動系と、前記工具および前記加工対象物の相対位置を変化させる送り軸を駆動する送り駆動系と、を含む駆動系を有する工作機械に運転指令を与えることによって、前記工作機械を制御する数値制御装置であって、

前記駆動系を制御する制御器の制御特性を表す制御特性パラメータの組であるパラメータセットを生成する制御特性設定部と、

前記パラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて前記工作機械を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、前記駆動系の動作と、前記工作機械の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが、前記工具による前記加工対象物の加工プロセスに与える影響を含めて算出する連成シミュレーション部と、

前記プロセス情報に基づいて前記パラメータセットを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、評価結果に基づいて前記工作機械の制御に用いる前記パラメータセットを選択するプロセス評価部と、

を備えることを特徴とする数値制御装置。

### [請求項2]

前記連成シミュレーション部は、前記主軸駆動系と前記主軸駆動系を制御する前記制御器である主軸駆動制御器とを表す数理モデルである主軸駆動制御モデル、および、前記送り駆動系と前記送り駆動系を制御する前記制御器である送り駆動制御器とを表す数理モデルである送り駆動制御モデルにおける前記制御特性パラメータを前記パラメータセットが示す値とし、前記工具と前記加工対象物との間の加工特性を表す数理モデルである加工プロセスモデル、前記構造物の動特性を表す数理モデルであるダイナミクスモデル、前記主軸駆動制御モデル、および、前記送り駆動制御モデルに対して、指定された加工条件を用いて前記運転指令を与えたときの前記プロセス情報を、前記パラメ

ータセット毎に算出することを特徴とする請求項1に記載の数値制御装置。

[請求項3] 前記加工プロセスモデルと、前記ダイナミクスモデルと、前記主軸駆動制御モデルと、前記送り駆動制御モデルと、前記加工条件を表す加工条件情報と、を記憶する記憶部、

をさらに備え、

前記連成シミュレーション部は、前記記憶部に記憶された前記加工プロセスモデル、前記ダイナミクスモデル、前記主軸駆動制御モデル、前記送り駆動制御モデル、および、前記加工条件情報を用いて、前記プロセス情報を生成することを特徴とする請求項2に記載の数値制御装置。

[請求項4] 前記制御特性設定部は、複数の制御器のそれぞれの前記制御特性パラメータの値が異なるパラメータセットを生成することを特徴とする請求項1から3のいずれか1項に記載の数値制御装置。

[請求項5] 前記制御特性設定部は、前記送り駆動系と前記構造物とを合成した系のゲイン応答または位相応答が、前記送り駆動系の運動方向毎に互いに異なる前記パラメータセットを生成することを特徴とする請求項1から4のいずれか1項に記載の数値制御装置。

[請求項6] 前記制御特性設定部は、制御特性パラメータを経時的に変化させることを特徴とする請求項1から5のいずれか1項に記載の数値制御装置。

[請求項7] 前記制御特性設定部は、前記送り駆動系と前記構造物とを合成した系のゲイン応答または位相応答が、前記加工対象物に対する前記工具の相対的な送り方向と、前記送り方向の法線方向とで互いに異なる前記パラメータセットを生成することを特徴とする請求項6に記載の数値制御装置。

[請求項8] 前記制御特性設定部は、前記プロセス情報に基づいて、前記パラメータセットを生成することを特徴とする請求項1から7のいずれか1

項に記載の数値制御装置。

[請求項9] 前記プロセス情報と、前記プロセス情報に対応する前記パラメータセットとを含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、  
前記学習用データを用いて、前記プロセス情報から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、  
をさらに備えることを特徴とする請求項8に記載の数値制御装置。

[請求項10] 前記プロセス情報を取得するデータ取得部と、  
前記プロセス情報から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを用いて、前記データ取得部で取得した前記プロセス情報から新たなパラメータセットを出力する推論部と、  
をさらに備えることを特徴とする請求項8または9に記載の数値制御装置。

[請求項11] 前記工作機械は、加工中の前記構造物の振動を検出してセンサ信号を出力するセンサ、  
をさらに備え、  
前記制御特性設定部は、前記センサ信号に基づいて、前記パラメータセットを生成することを特徴とする請求項1から7のいずれか1項に記載の数値制御装置。

[請求項12] 前記センサ信号と、前記センサ信号に対応するパラメータセットとを含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、  
前記学習用データを用いて、前記センサ信号から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、  
をさらに備えることを特徴とする請求項11に記載の数値制御装置。  
。

[請求項13] 前記センサ信号を取得するデータ取得部と、  
前記センサ信号から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを用いて、前記データ取得部で取得した前記センサ信号から新たなパラメータセットを出力する推論部と、

をさらに備えることを特徴とする請求項 11 または 12 に記載の数値制御装置。

[請求項14]

加工対象物を加工するための工具または前記加工対象物を回転させる主軸を駆動する主軸駆動系と、前記工具および前記加工対象物の相対位置を変化させる送り軸を駆動する送り駆動系と、を含む駆動系を有する工作機械と、

前記工作機械に運転指令を与えることによって、前記工作機械を制御する数値制御装置と、

を備え、

前記数値制御装置は、

前記駆動系を制御する制御器の制御特性を表す制御特性パラメータの組であるパラメータセットを複数生成する制御特性設定部と、

複数の前記パラメータセットのそれぞれについて、前記パラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて前記工作機械を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、前記駆動系の動作と、前記工作機械の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが、前記工具による前記加工対象物の加工プロセスに与える影響を含めて算出する連成シミュレーション部と、

複数の前記プロセス情報に基づいて、複数の前記パラメータセットのそれぞれを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、複数の前記パラメータセットの中から前記工作機械の制御に用いる前記パラメータセットを選択するプロセス評価部と、

を備えることを特徴とする加工システム。

[請求項15]

前記数値制御装置が生成した前記パラメータセットと、前記パラメータセットを用いて前記工作機械を制御した場合のシミュレーション結果を示す前記プロセス情報とを含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、

前記学習用データを用いて、前記プロセス情報から新たなパラメー

タセットを推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、  
を有する学習装置をさらに備えることを特徴とする請求項 1 4 に記載の加工システム。

[請求項16] 前記数値制御装置が生成した前記プロセス情報を取得するデータ取得部と、

前記プロセス情報から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを用いて、前記データ取得部で取得した前記プロセス情報から新たなパラメータセットを出力する推論部と、

を有する推論装置をさらに備えることを特徴とする請求項 1 4 または 1 5 に記載の加工システム。

[請求項17] 前記工作機械は、動作中の前記構造物の振動を検出してセンサ信号を出力するセンサをさらに有し、

前記数値制御装置が生成した前記パラメータセットと、前記パラメータセットを用いて前記工作機械を制御しているときの前記センサ信号とを含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、

前記学習用データを用いて、前記センサ信号から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、

を有する学習装置をさらに備えることを特徴とする請求項 1 4 に記載の加工システム。

[請求項18] 前記工作機械は、動作中の前記構造物の振動を検出してセンサ信号を出力するセンサをさらに有し、

前記工作機械が動作中の前記センサ信号を取得するデータ取得部と、

、

前記センサ信号から新たなパラメータセットを推論するための学習済モデルを用いて、前記データ取得部が取得する前記センサ信号から新たなパラメータセットを出力する推論部と、

を有する推論装置をさらに備えることを特徴とする請求項 1 4 または 1 7 に記載の加工システム。

[請求項19] 加工対象物を加工するための工具または前記加工対象物を回転させる主軸を駆動する主軸駆動系と、前記工具および前記加工対象物の相対位置を変化させる送り軸を駆動する送り駆動系と、を含む駆動系を有する工作機械に運転指令を与えることによって、前記工作機械を制御する数値制御方法であって、

前記駆動系を制御する制御器の制御特性を表す制御特性パラメータの組であるパラメータセットを複数生成するステップと、

複数の前記パラメータセットのそれぞれについて、前記パラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて前記工作機械を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、前記駆動系の動作と、前記工作機械の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが、前記工具による前記加工対象物の加工プロセスに与える影響を含めて算出するステップと、

複数の前記プロセス情報に基づいて、複数の前記パラメータセットのそれぞれを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、複数の前記パラメータセットの中から前記工作機械の制御に用いる前記パラメータセットを選択するステップと、

を含むことを特徴とする数値制御方法。

[請求項20] 加工対象物を加工するための工具または前記加工対象物を回転させる主軸を駆動する主軸駆動系と、前記工具および前記加工対象物の相対位置を変化させる送り軸を駆動する送り駆動系と、を含む駆動系を有する工作機械の前記駆動系を制御することで、前記加工対象物を加工する加工方法であって、

前記駆動系を制御する制御器の制御特性を表す制御特性パラメータの組であるパラメータセットを複数生成するステップと、

複数の前記パラメータセットのそれぞれについて、前記パラメータセットが示す制御特性を有する制御器を用いて前記工作機械を制御した場合の加工をシミュレーションした結果を示すプロセス情報を、前

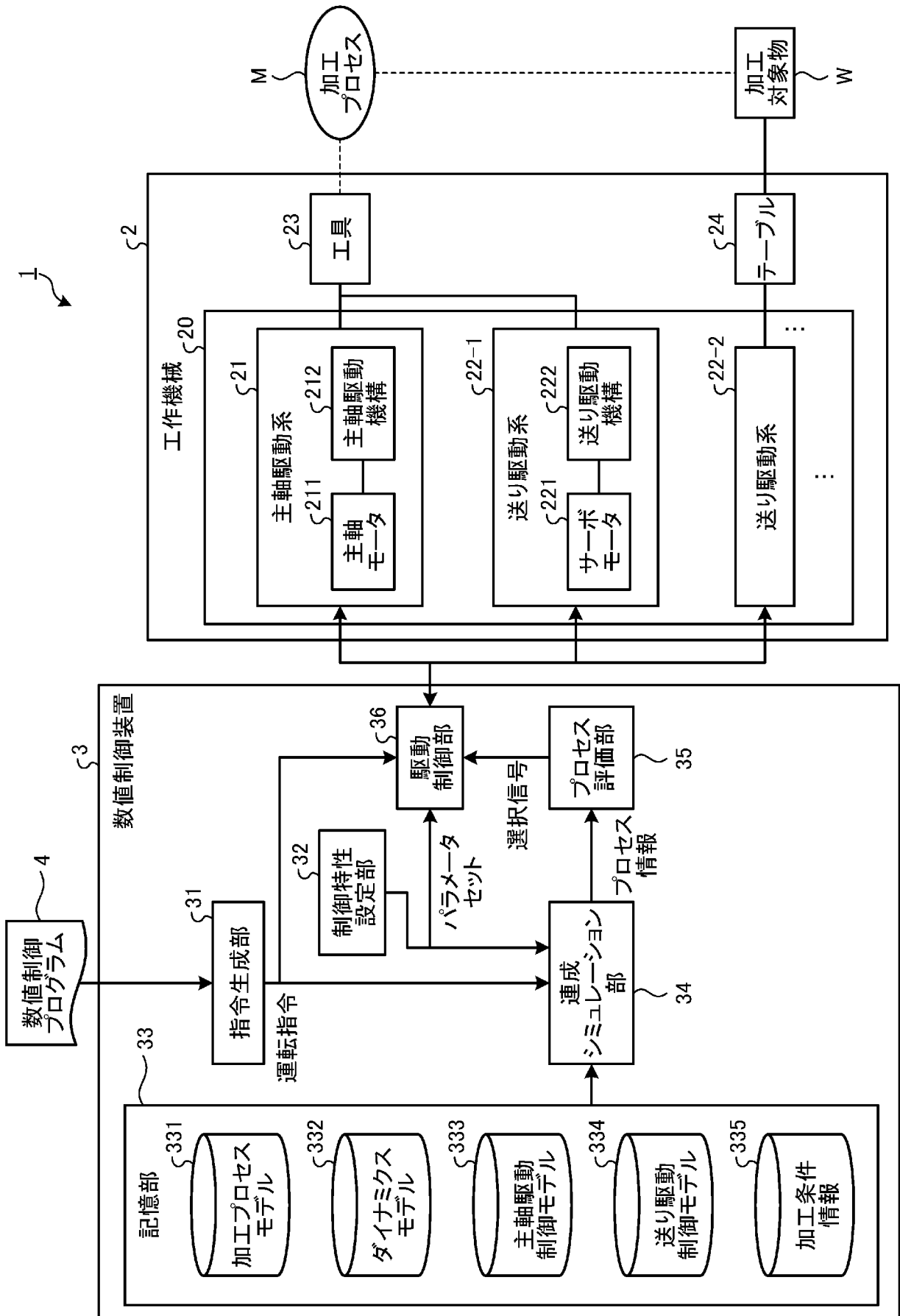
記駆動系の動作と、前記工作機械の動作中に振動を生じる構造物のダイナミクスとが、前記工具による前記加工対象物の加工プロセスに与える影響を含めて算出するステップと、

複数の前記プロセス情報に基づいて、複数の前記パラメータセットのそれぞれを用いたときの加工誤差の大きさを評価し、複数の前記パラメータセットの中から前記工作機械の制御に用いる前記パラメータセットを選択するステップと、

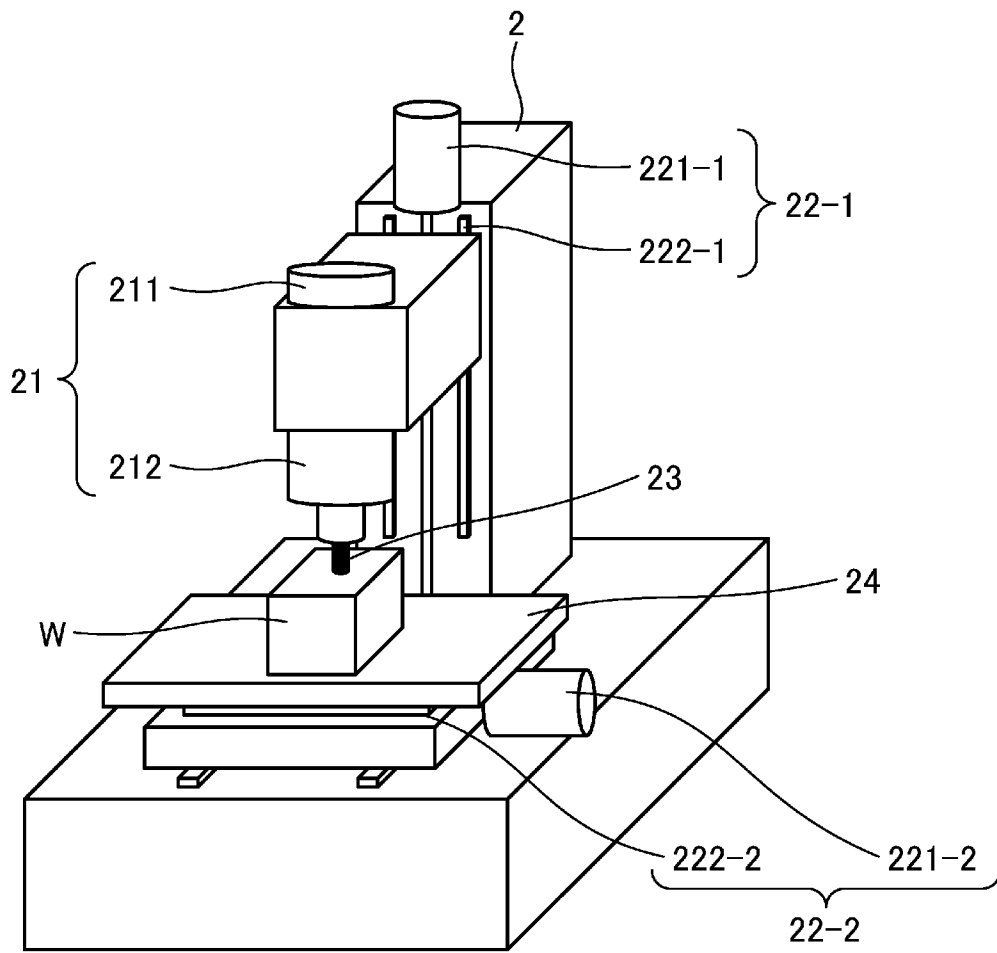
選択された前記パラメータセットを用いて前記工作機械を制御するステップと、

前記パラメータセットを用いた制御に従って、前記駆動系が動作し、前記工具を用いて前記加工対象物を加工するステップと、  
を含むことを特徴とする加工方法。

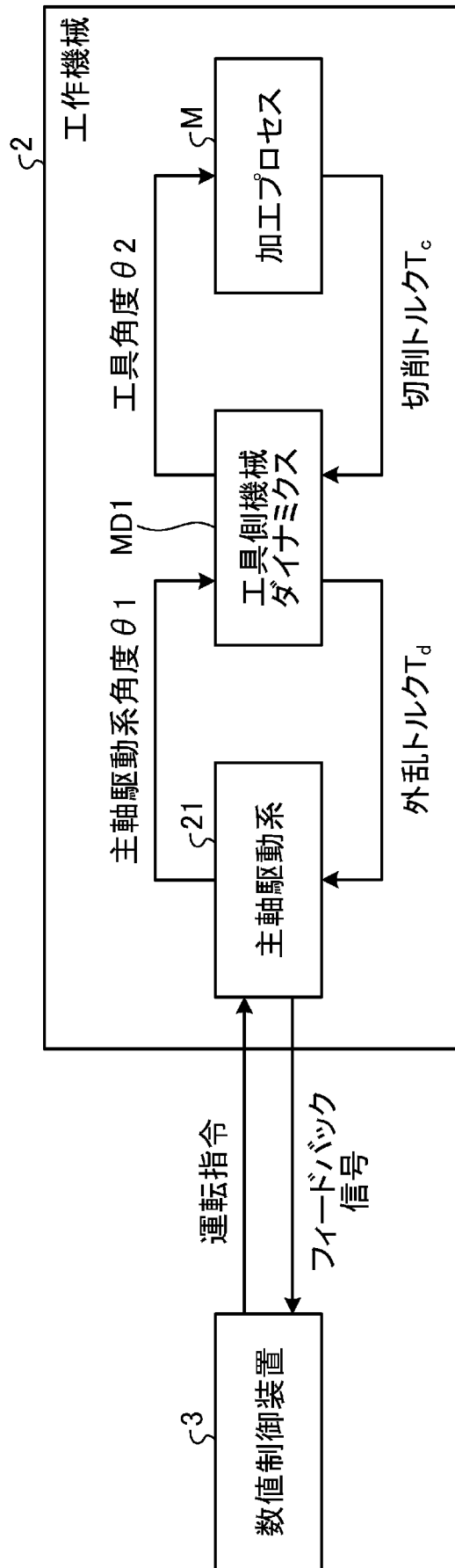
[図1]



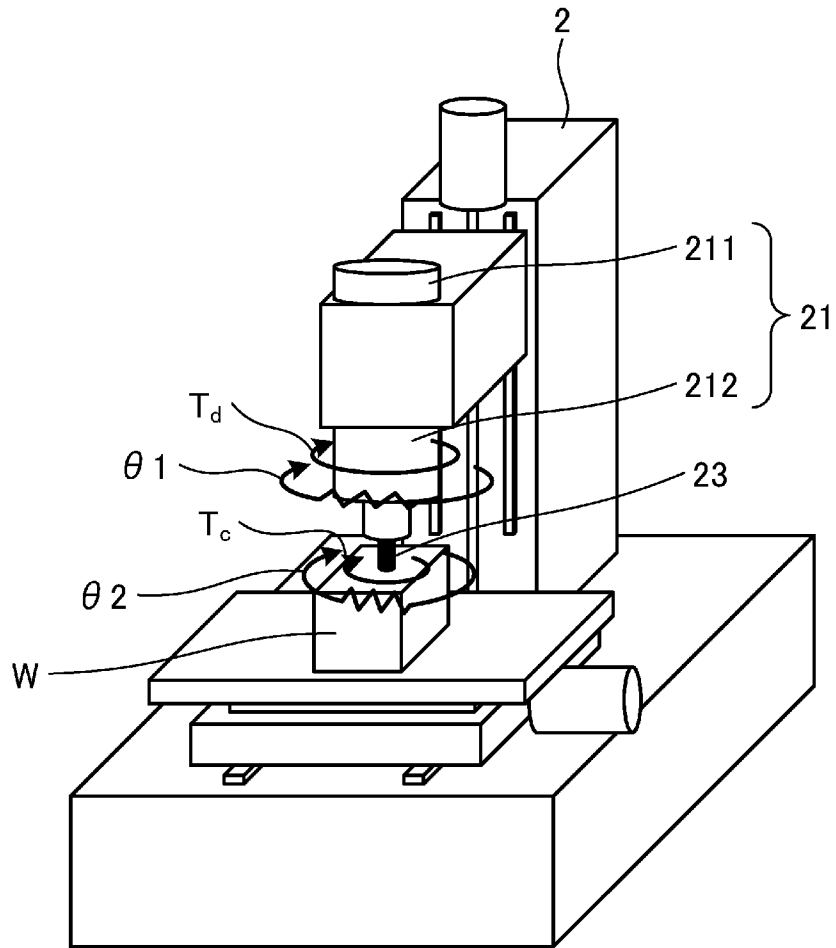
[図2]



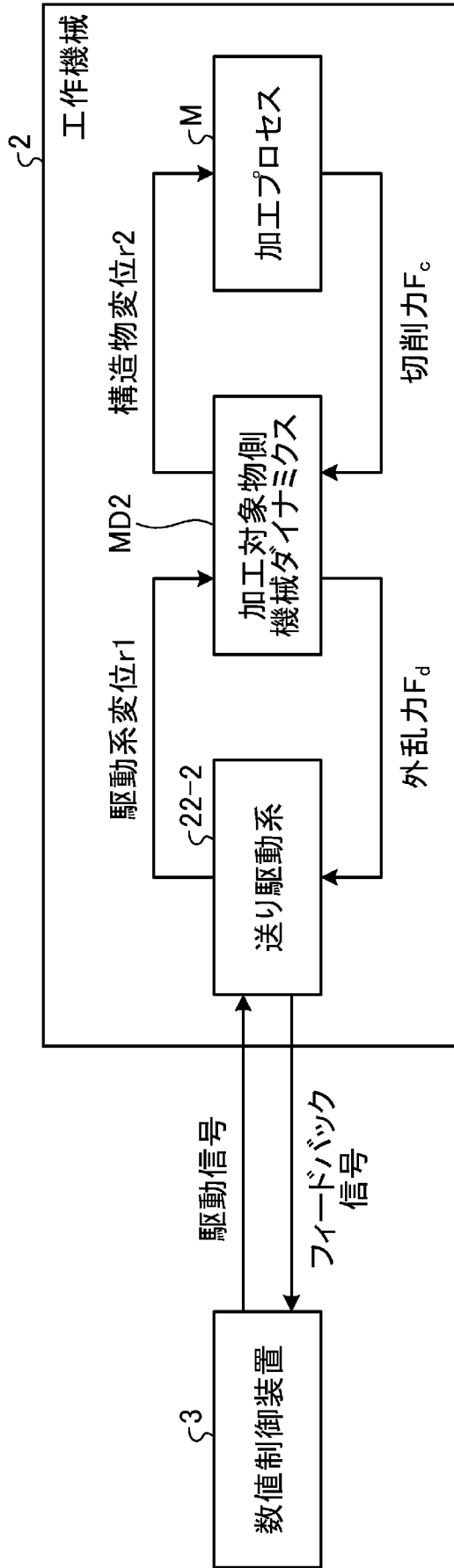
[図3]



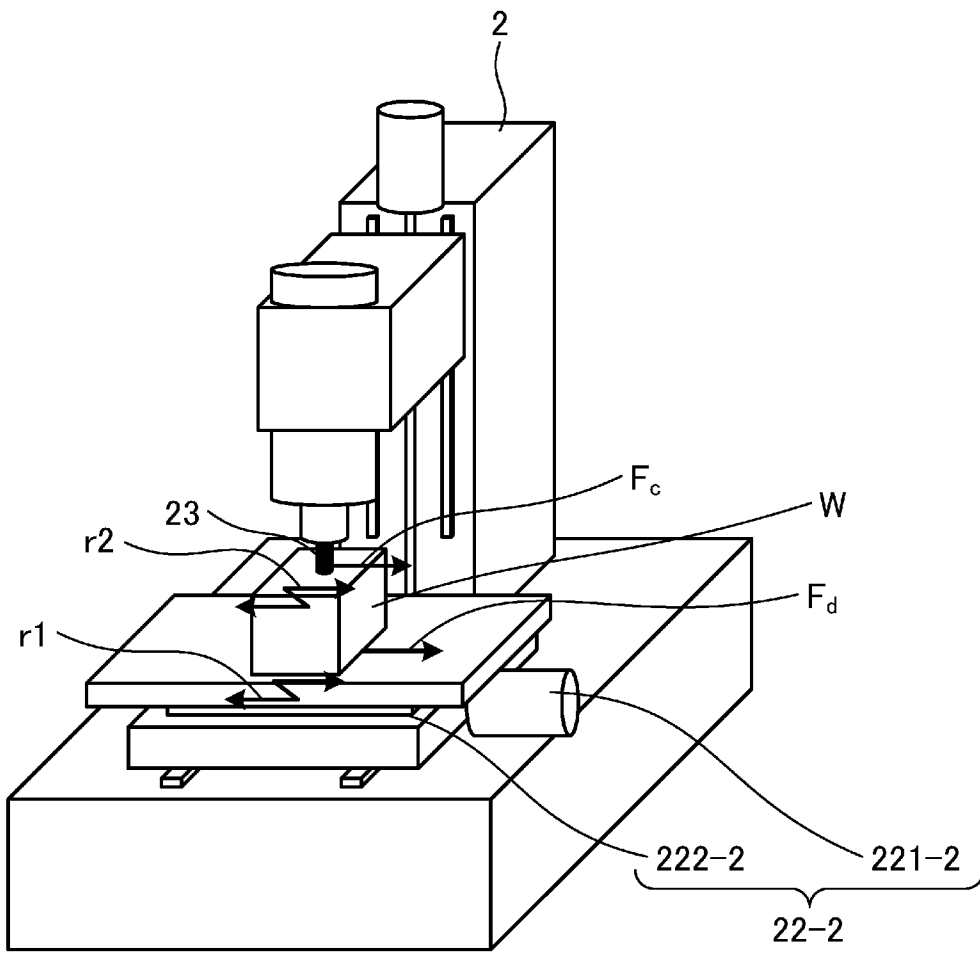
[図4]



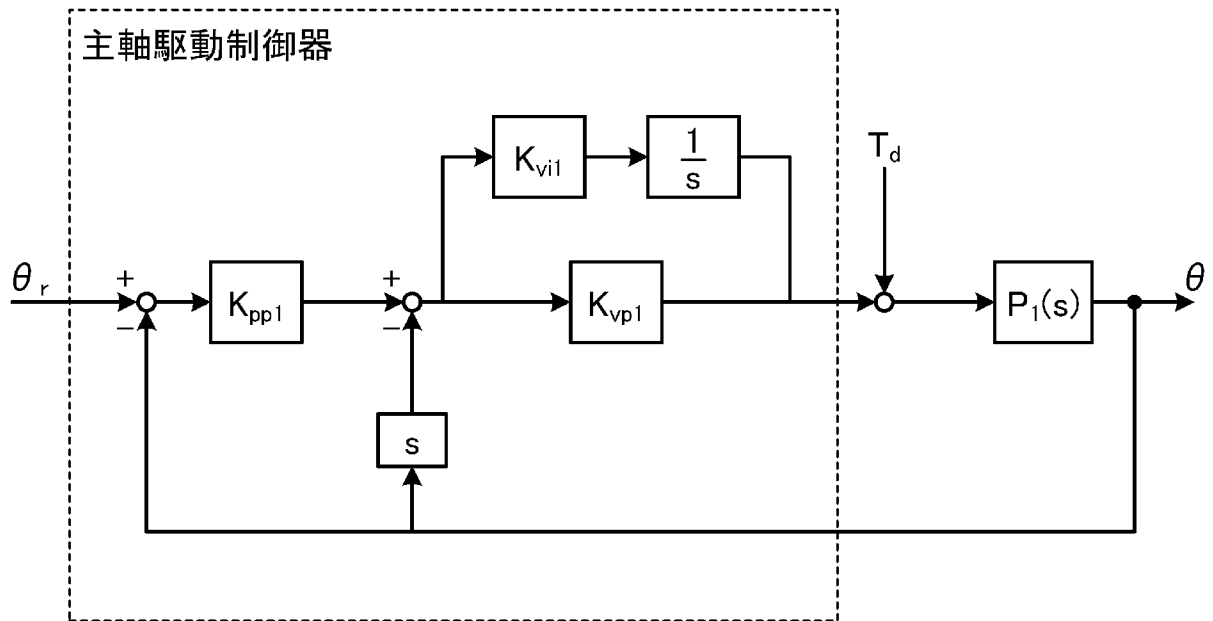
[図5]



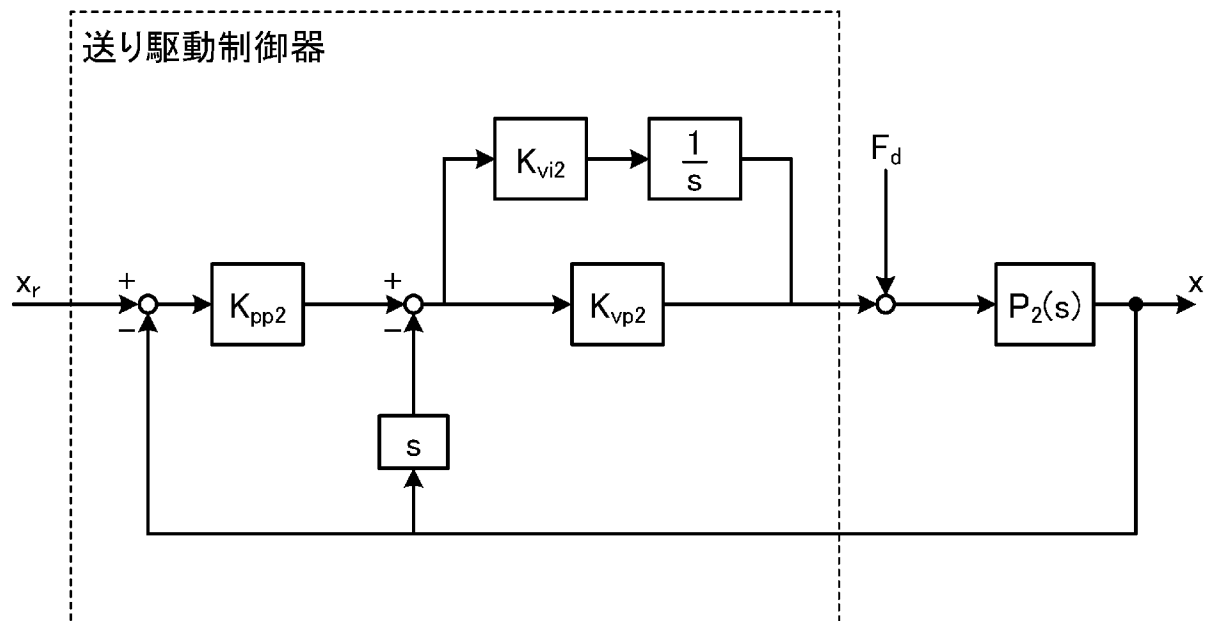
[図6]



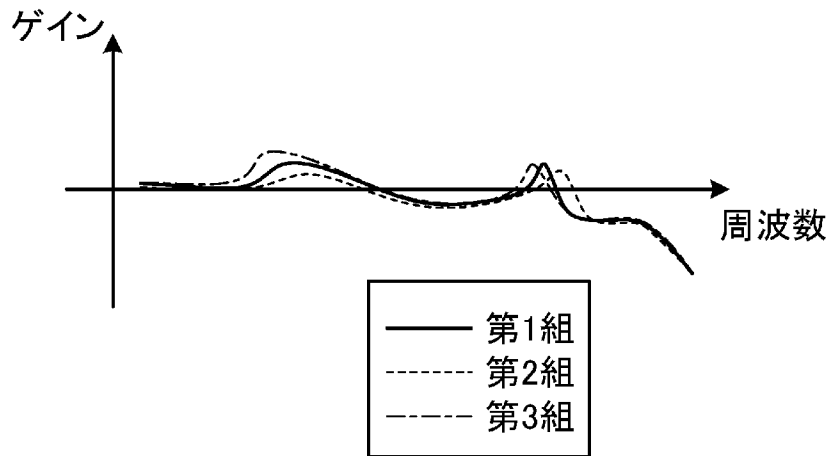
[図7]



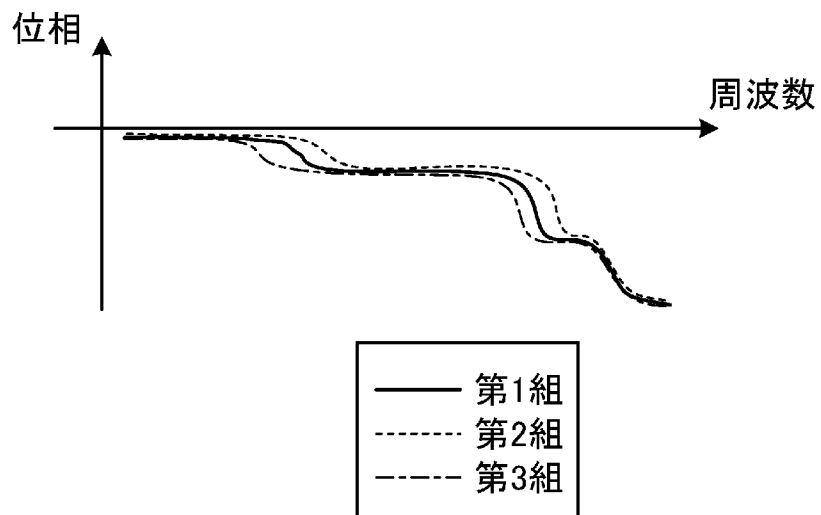
[図8]



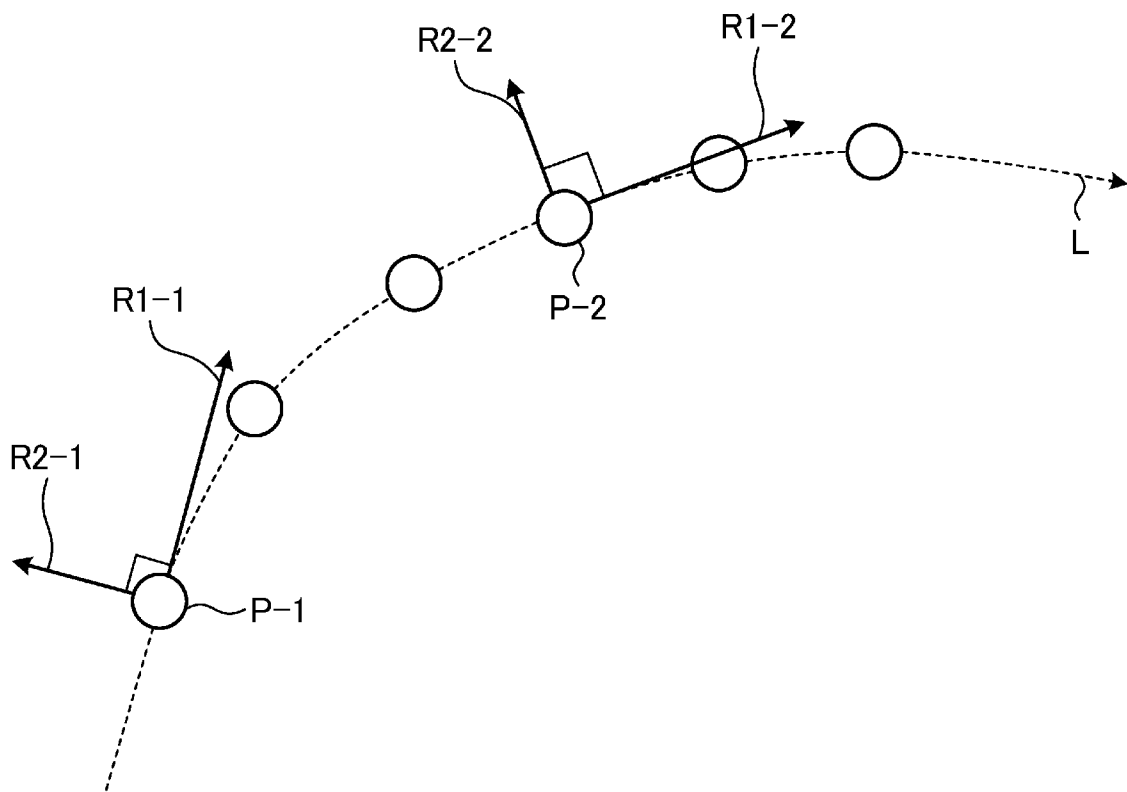
[図9]



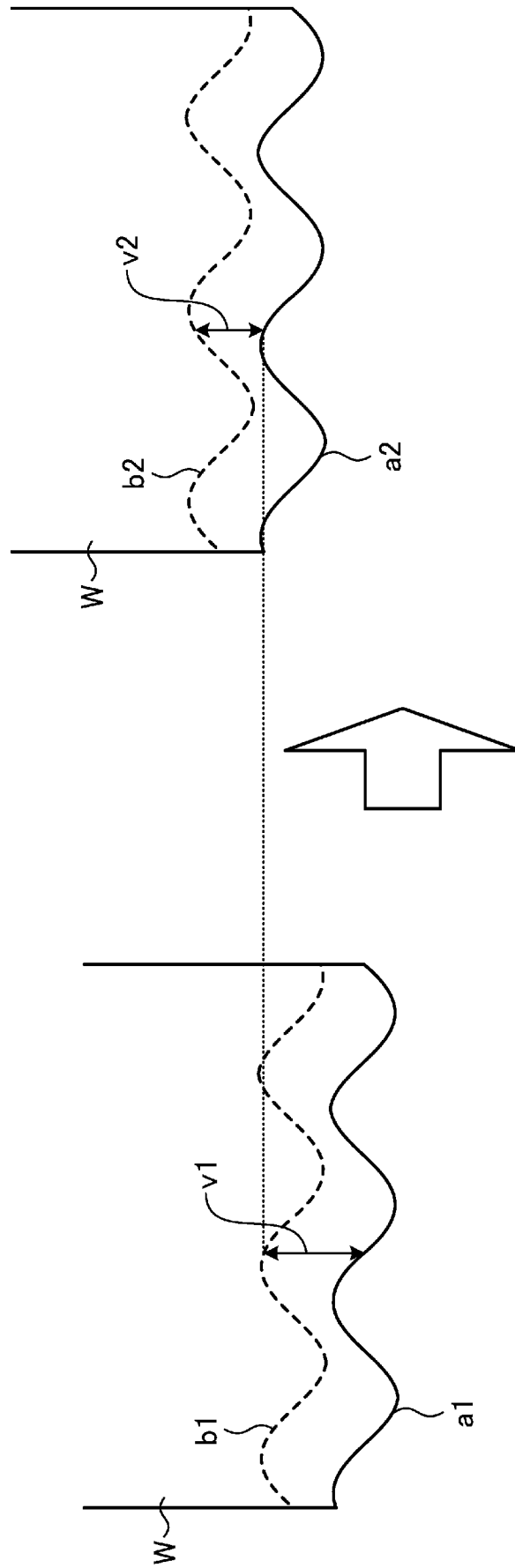
[図10]



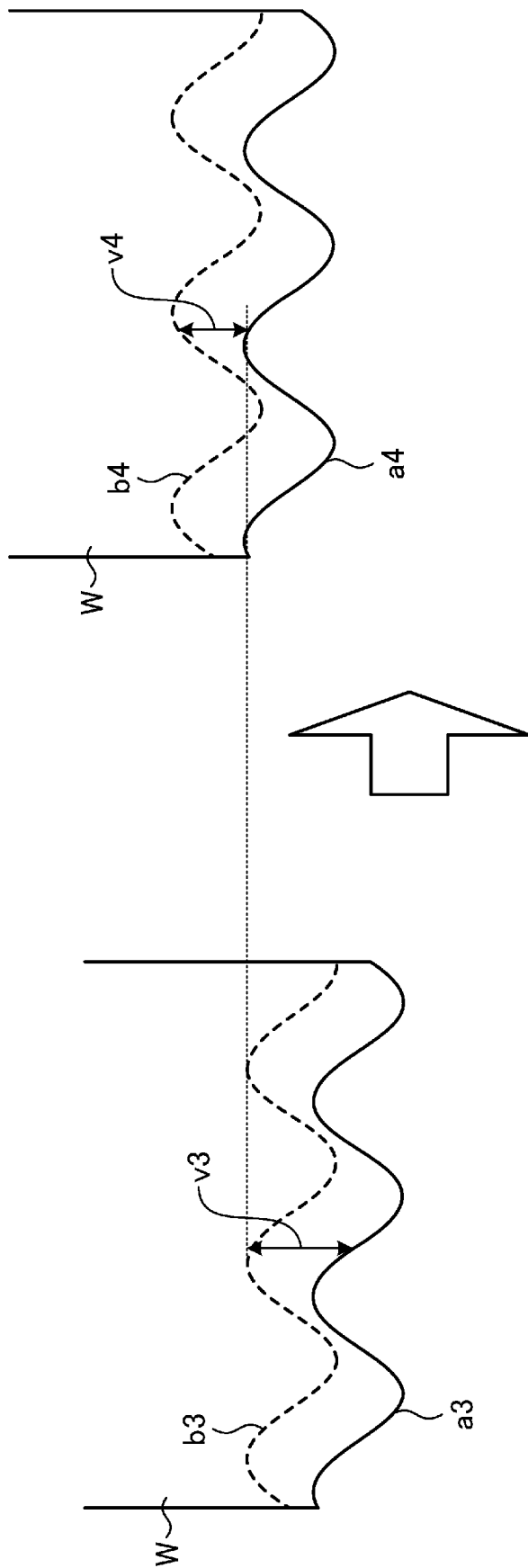
[図11]



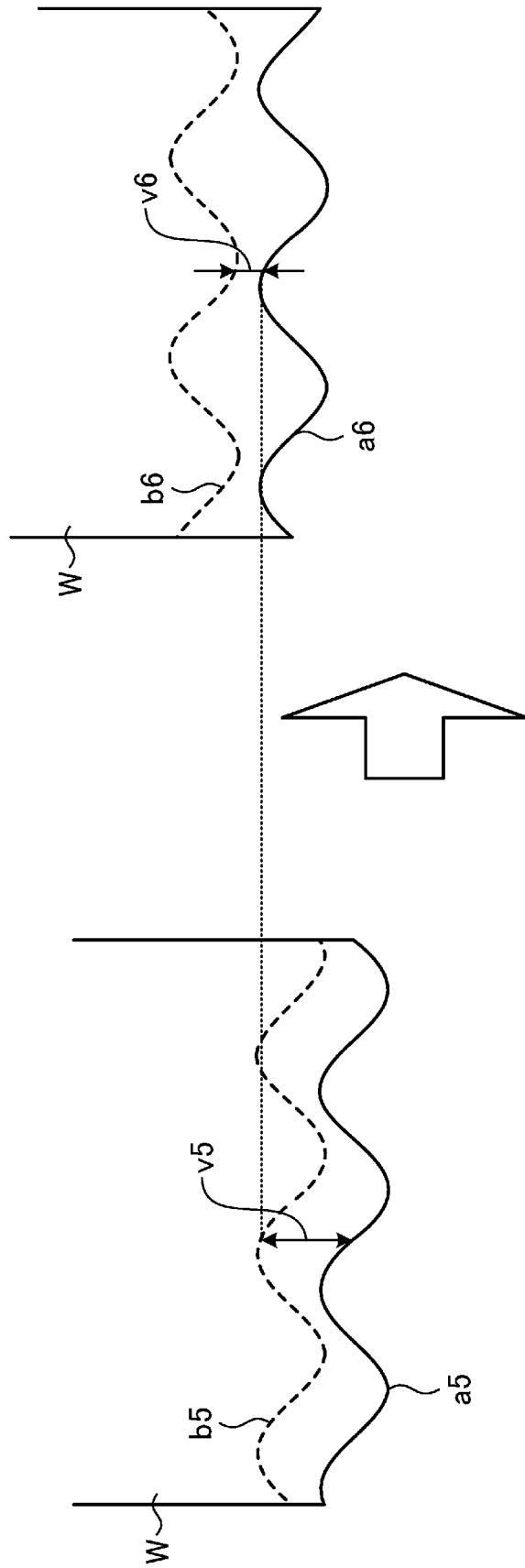
[図12]



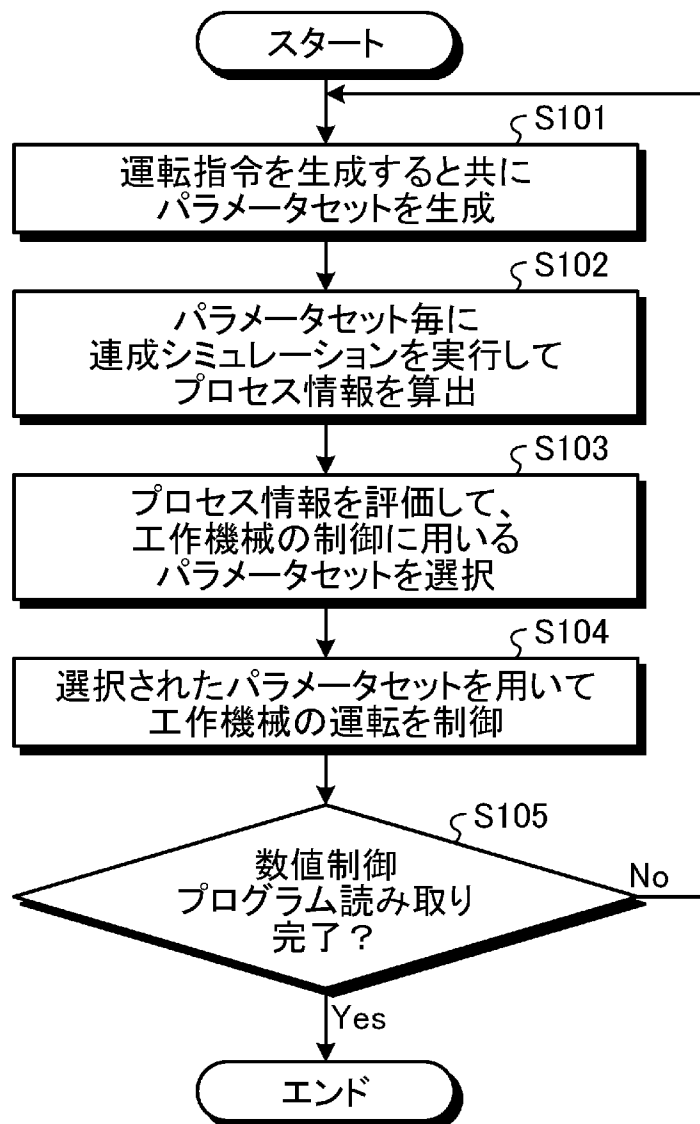
[図13]



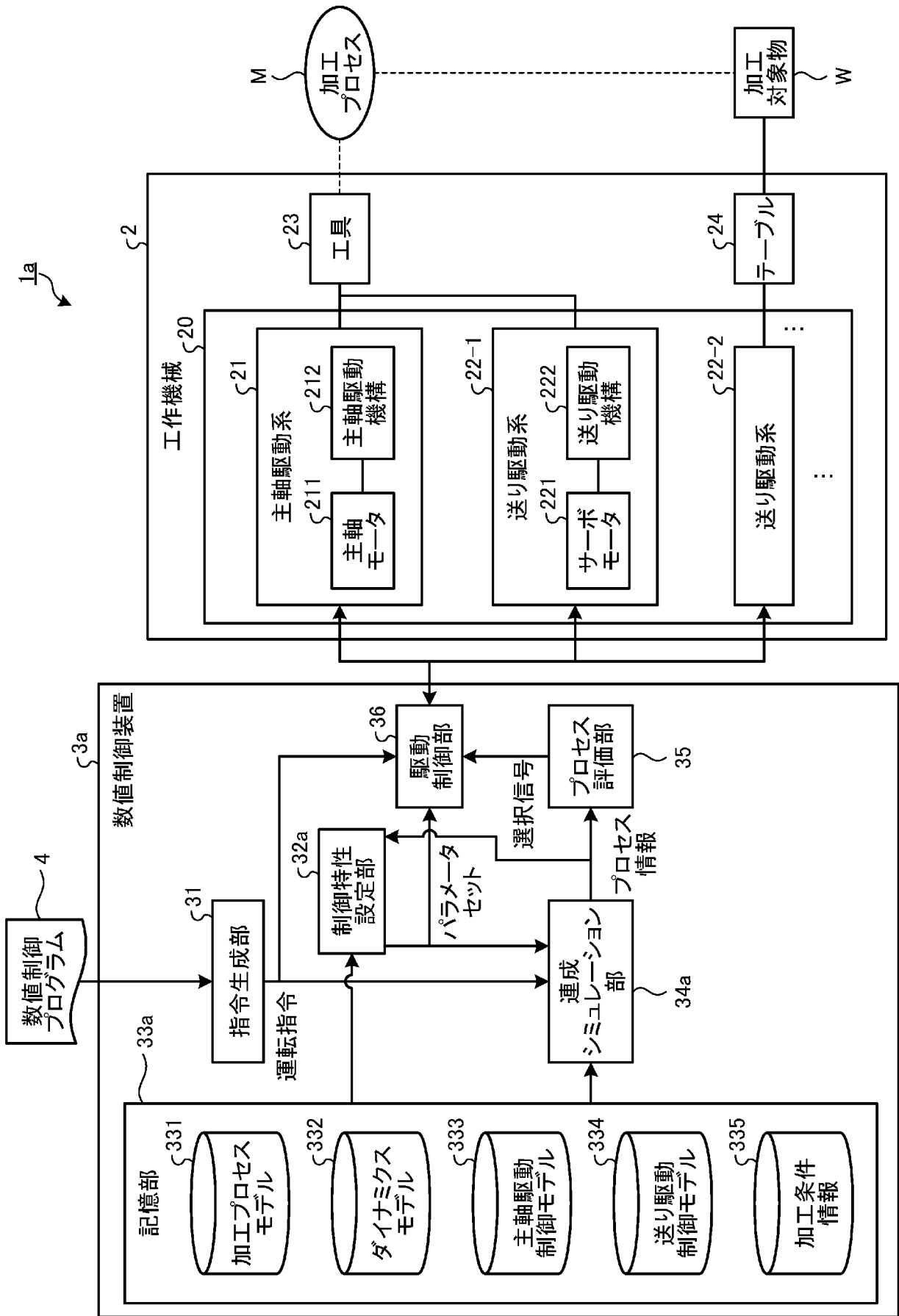
[図14]



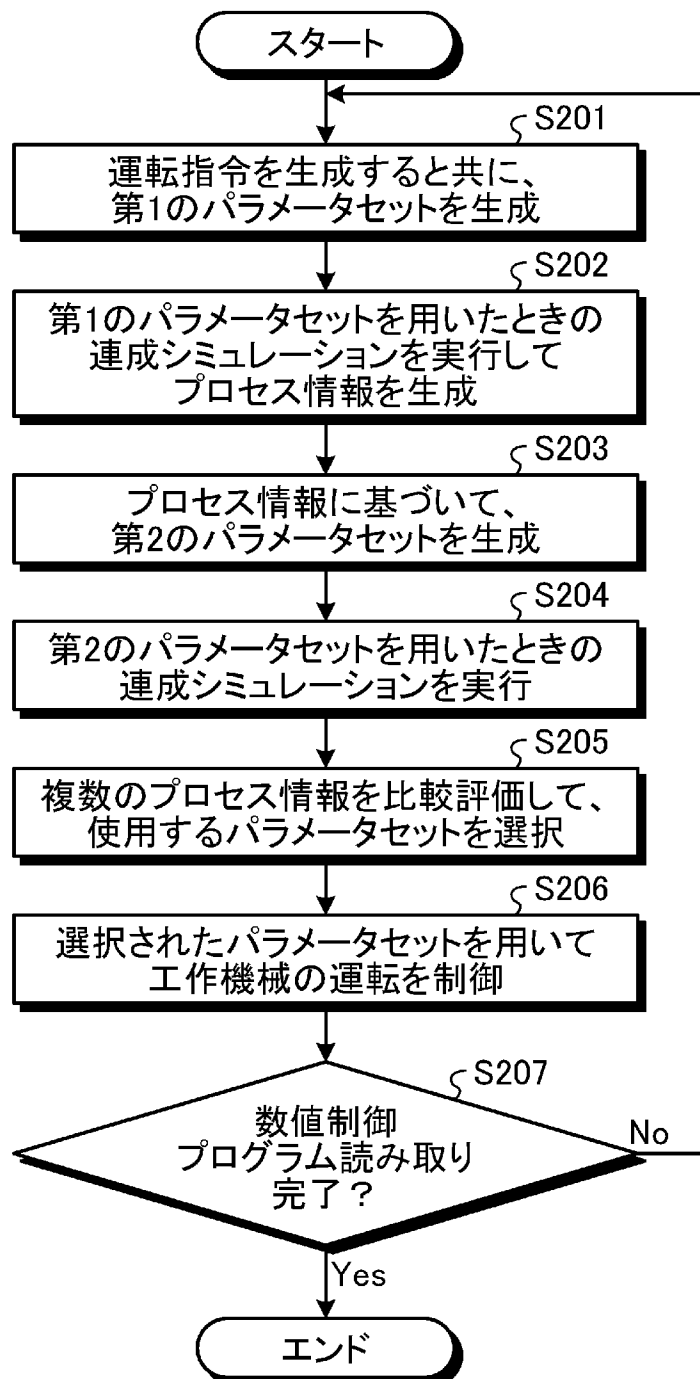
[図15]



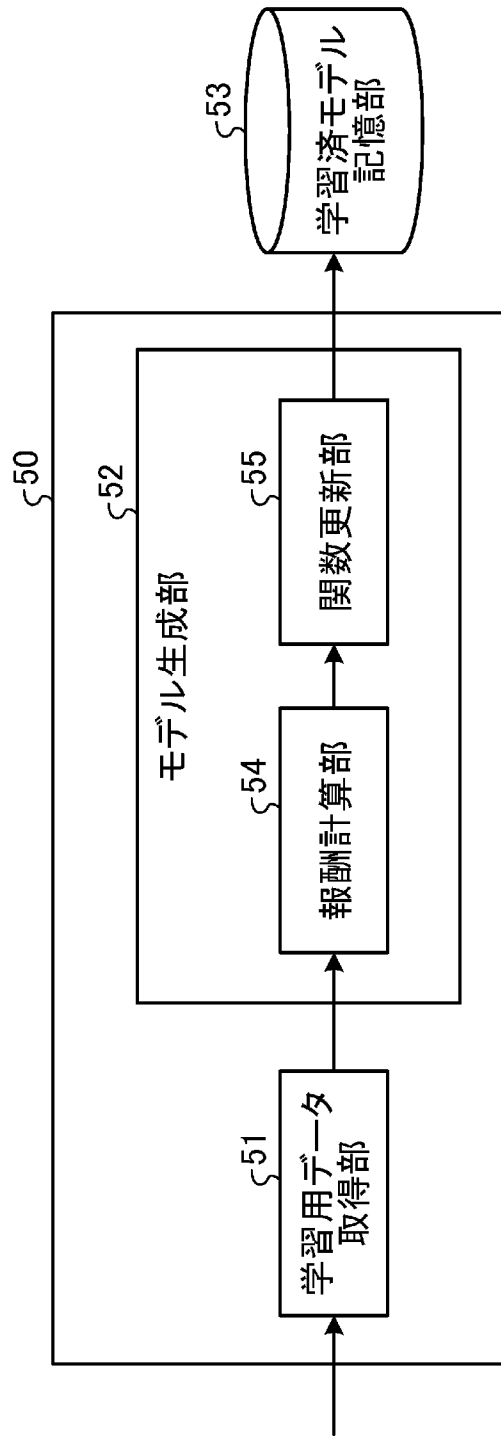
[図16]



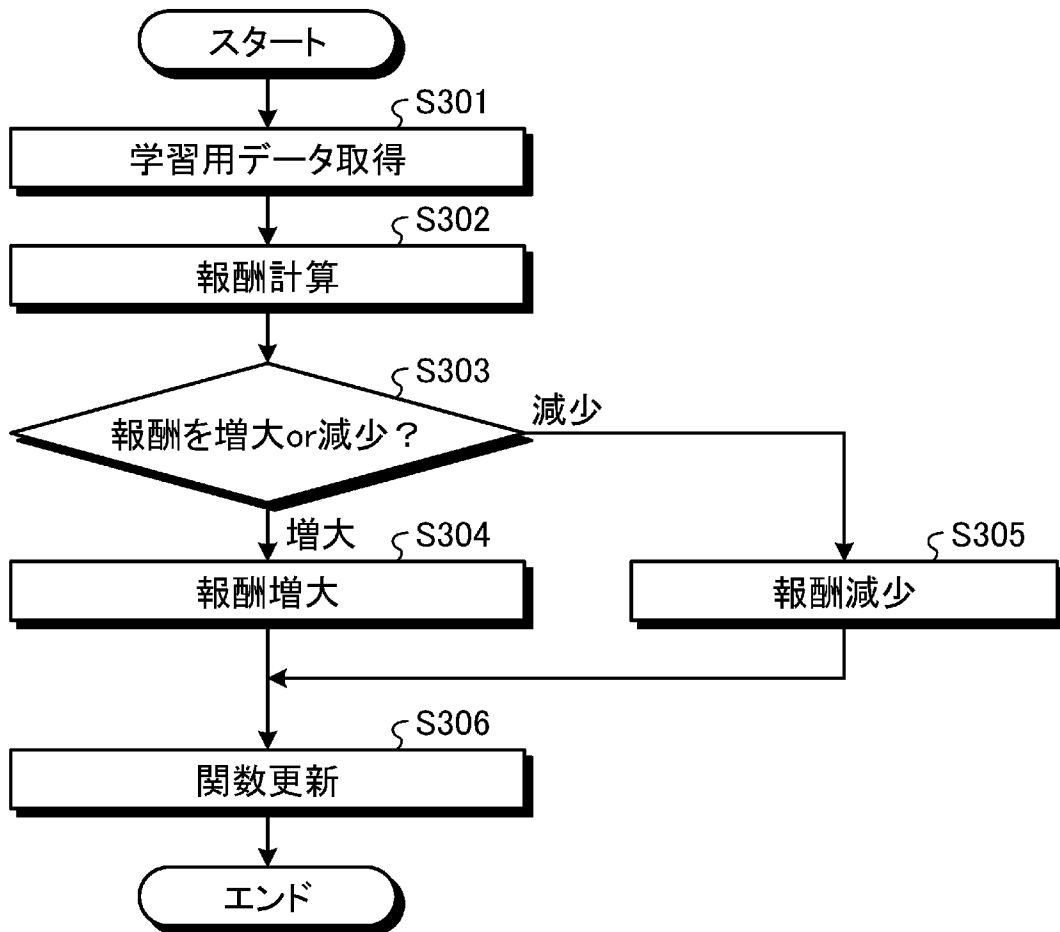
[図17]



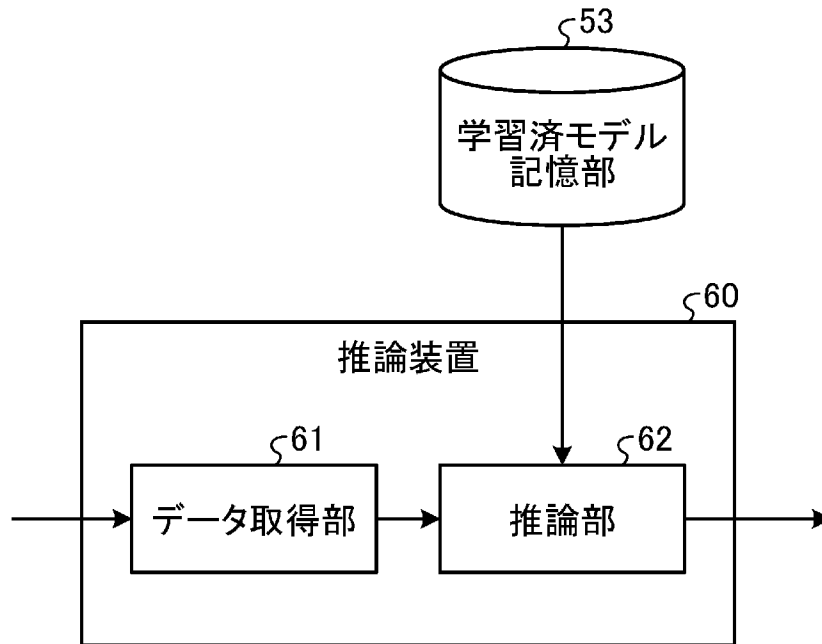
[図18]



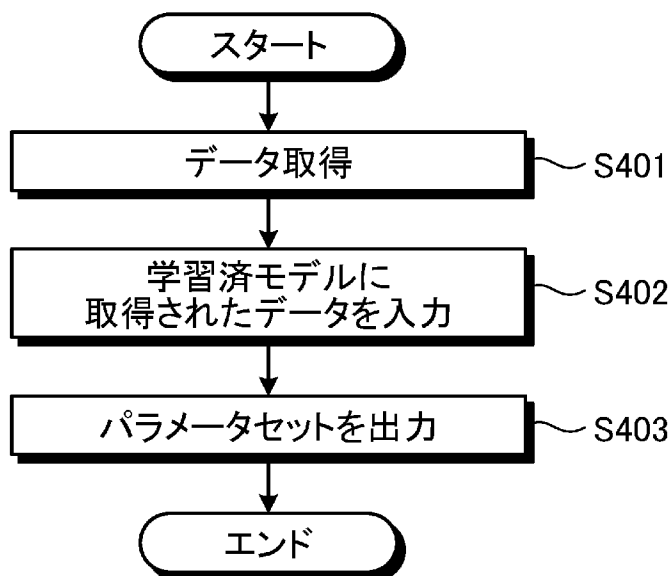
[図19]



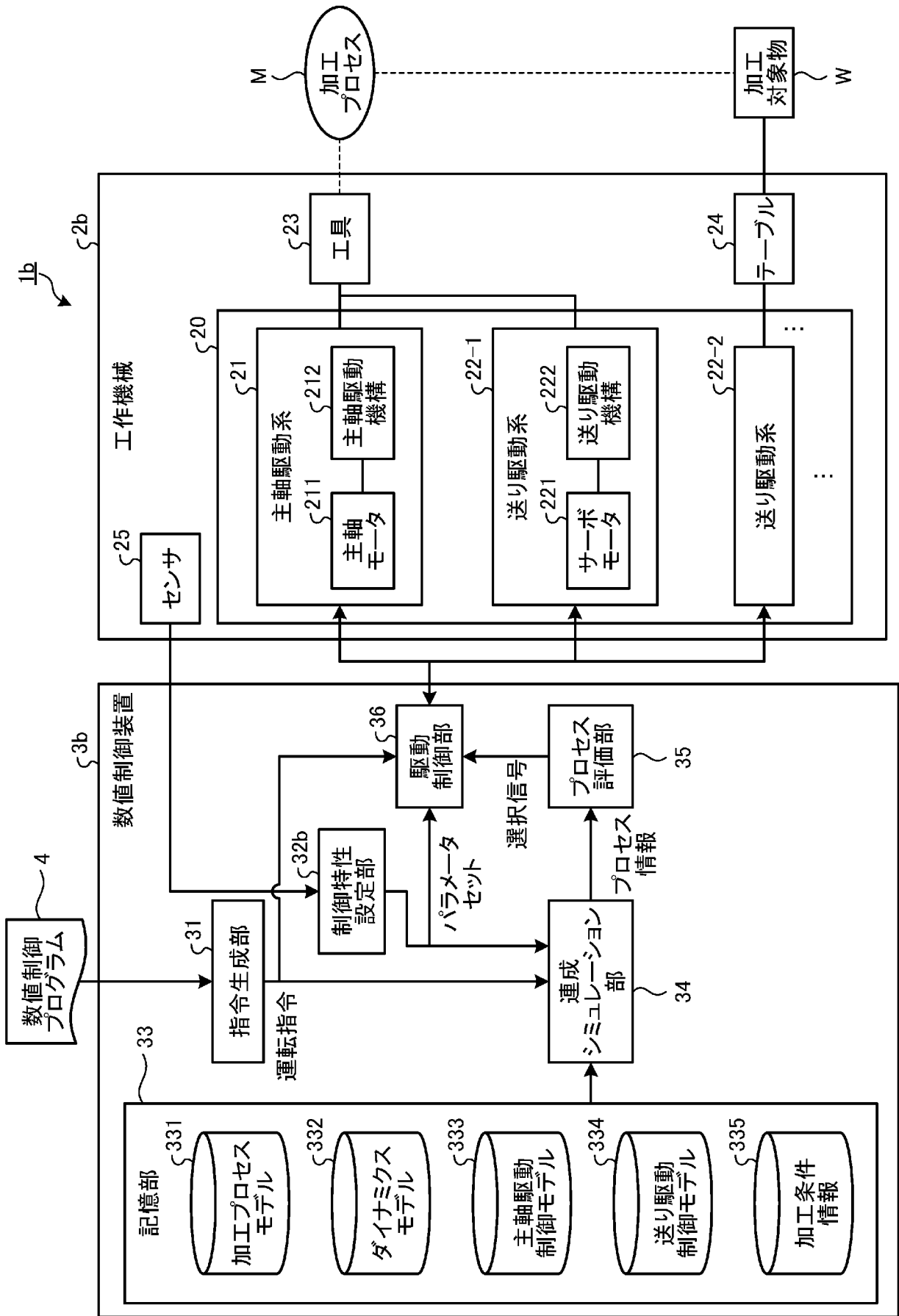
[図20]



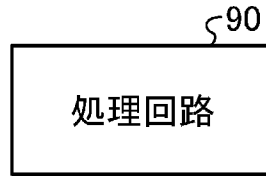
[図21]



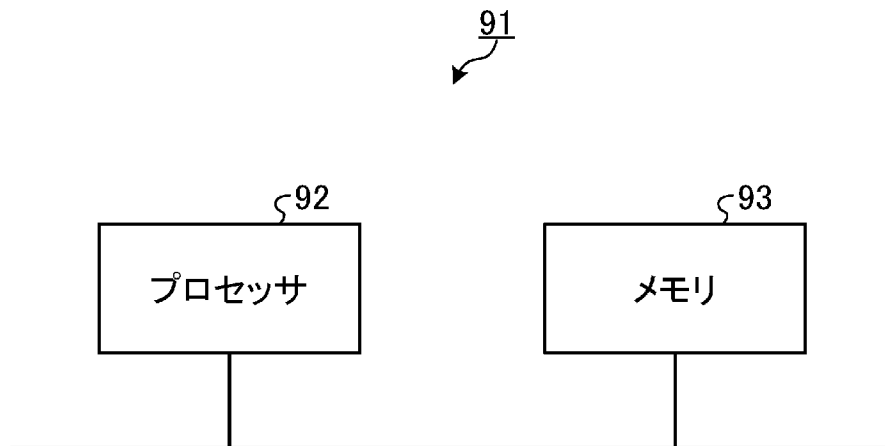
[図22]



[図23]



[図24]



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/036266

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>G05B 19/404</i> (2006.01)i; <i>G05B 19/4155</i> (2006.01)i; <i>B23Q 15/00</i> (2006.01)i FI: B23Q15/00 307Z; G05B19/4155 V; G05B19/404 Z		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G05B19/18-19/416; B23Q15/00-15/28		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	WO 2019/043852 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 07 March 2019 (2019-03-07) paragraphs [0115]-[0131], fig. 18-19	1-4, 6, 8, 11, 14, 19-20 5, 7, 9-10, 12-13, 15-18
Y A	JP 2016-93882 A (JTEKT CORP.) 26 May 2016 (2016-05-26) paragraph [0042]	1-4, 6, 8, 11, 14, 19-20 5, 7, 9-10, 12-13, 15-18
Y A	JP 3-95605 A (TOSHIBA MACH. CO., LTD.) 22 April 1991 (1991-04-22) fig. 1-2	2-3 5, 7
A	JP 2004-188541 A (YAMAZAKI MAZAK CORP.) 08 July 2004 (2004-07-08) paragraphs [0024]-[0026]	5, 7
A	JP 2019-21235 A (FANUC LTD.) 07 February 2019 (2019-02-07) paragraph [0092]	9-10, 12-13, 15-18
A	JP 2002-287816 A (YASKAWA ELECTRIC CORP.) 04 October 2002 (2002-10-04) entire text, all drawings	1-20
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search <b>07 December 2021</b>		Date of mailing of the international search report <b>14 December 2021</b>
Name and mailing address of the ISA/JP <b>Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan</b>		Authorized officer  Telephone No.



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/JP2021/036266**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2019/043852	A1	07 March 2019	US 2020/0333764 A1 paragraphs [0124]-[0140], fig. 18-19	
				CN 111052015 A	
JP	2016-93882	A	26 May 2016	US 2016/0129511 A1 paragraph [0080]	
				DE 102015119000 A1	
				CN 105583472 A	
JP	3-95605	A	22 April 1991	(Family: none)	
JP	2004-188541	A	08 July 2004	(Family: none)	
JP	2019-21235	A	07 February 2019	US 2019/0025794 A1 paragraph [0114]	
				DE 102018211682 A1	
				CN 109283887 A	
JP	2002-287816	A	04 October 2002	US 2004/0083010 A1 entire text, all drawings	
				WO 2002/077735 A1	
				EP 1376284 A1	
				KR 10-0721642 B1	
JP	2009-122779	A	04 June 2009	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G05B 19/404(2006.01)i; G05B 19/4155(2006.01)i; B23Q 15/00(2006.01)i FI: B23Q15/00 307Z; G05B19/4155 V; G05B19/404 Z		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G05B19/18-19/416; B23Q15/00-15/28 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2021年 日本国実用新案登録公報 1996-2021年 日本国登録実用新案公報 1994-2021年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	WO 2019/043852 A1（三菱電機株式会社）07.03.2019（2019-03-07） 段落[0115]-[0131], 図18-19	1-4, 6, 8, 11, 14, 19-20 5, 7, 9-10, 12-13, 15-18
Y A	JP 2016-93882 A（株式会社ジェイテクト）26.05.2016（2016-05-26） 段落[0042]	1-4, 6, 8, 11, 14, 19-20 5, 7, 9-10, 12-13, 15-18
Y	JP 3-95605 A（東芝機械株式会社）22.04.1991（1991-04-22） 図1-2	2-3
A	JP 2004-188541 A（ヤマザキマザック株式会社）08.07.2004（2004-07-08） 段落[0024]-[0026]	5, 7
A	JP 2019-21235 A（ファナック株式会社）07.02.2019（2019-02-07） 段落[0092]	9-10, 12-13, 15-18
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日	
07.12.2021	14.12.2021	
名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官）  岩▲崎▼ 優 3U 1573  電話番号 03-3581-1101 内線 3364	

C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2002-287816 A (株式会社安川電機) 04.10.2002 (2002 - 10 - 04) 全文, 全図	1-20
A	JP 2009-122779 A (三菱電機株式会社) 04.06.2009 (2009 - 06 - 04) 全文, 全図	1-20

国際調査報告  
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/036266

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
WO	2019/043852	A1	07.03.2019	US	2020/0333764	A1	
					段落[0124]-[0140], 図18-19		
				CN	111052015	A	
JP	2016-93882	A	26.05.2016	US	2016/0129511	A1	
					段落[0080]		
				DE	102015119000	A1	
				CN	105583472	A	
JP	3-95605	A	22.04.1991	(ファミリーなし)			
JP	2004-188541	A	08.07.2004	(ファミリーなし)			
JP	2019-21235	A	07.02.2019	US	2019/0025794	A1	
					段落[0114]		
				DE	102018211682	A1	
				CN	109283887	A	
JP	2002-287816	A	04.10.2002	US	2004/0083010	A1	
					全文, 全図		
				WO	2002/077735	A1	
				EP	1376284	A1	
				KR	10-0721642	B1	
JP	2009-122779	A	04.06.2009	(ファミリーなし)			