

(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  
2011年3月3日(03.03.2011)

PCT

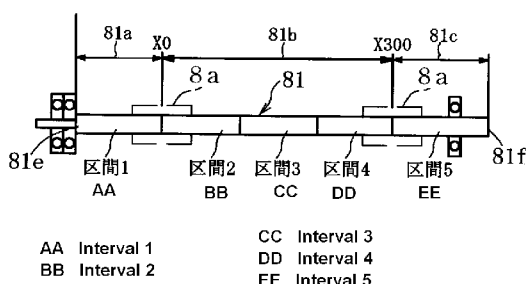
(10) 国際公開番号  
WO 2011/024833 A1

- (51) 国際特許分類:  
B23Q 15/18 (2006.01) G05B 19/404 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/064332
- (22) 国際出願日: 2010年8月25日(25.08.2010)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2009-198379 2009年8月28日(28.08.2009) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): ブラザー工業株式会社 (BROTHER KOGYO KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒4678561 愛知県名古屋市長区瑞穂区苗代町15番1号 Aichi (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 小林 治夫 (KOBAYASHI, Haruo) [JP/JP]; 〒4678561 愛知県名古屋市長区瑞穂区苗代町15番1号 ブラザー工業株式会社内 Aichi (JP). 倉橋 初 (KURAHASHI, Hajime) [JP/JP]; 〒4678561 愛知県名古屋市長区瑞穂区苗代町15番1号 ブラザー工業株式会社内 Aichi (JP).
- (74) 代理人: 山本 尚, 外 (YAMAMOTO, Hisashi et al.); 〒4600011 愛知県名古屋市中区大須4丁目10番32号上前津KDビル6階 Aichi (JP).
- (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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:  
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: METHOD FOR HEAT DISPLACEMENT CORRECTION IN MACHINE TOOL AND HEAT DISPLACEMENT CORRECTION DEVICE

(54) 発明の名称: 工作機械の熱変位補正方法及び熱変位補正装置

[図5]



(57) Abstract: Using an unsteady heat conduction equation, the CPU of the disclosed machine tool computes the temperature distribution of a plurality of intervals of a ball screw shaft (81), and computes the magnitude of thermal displacement of each interval from said temperature distribution. The heat conduction matrix of the unsteady heat conduction equation includes a first heat conduction matrix that reflects the shape and material of the ball screw shaft (81), a second heat conduction matrix that reflects the structure of the ball screw mechanism, and a heat dissipation function. The heat dissipation function is set to the characteristic of heat dissipation increasing in response to an increase in rotational frequency of a servo motor. Therefore, the CPU can correct for error caused by thermal displacement with high precision on the basis of the magnitude of thermal displacement taking into account the amount of heat dissipation from the ball screw shaft (81).

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2011/024833 A1

---

工作機械のCPUは非定常熱伝導方程式を用いて、ボール螺子シャフト（81）の複数の区間の温度分布を演算し、該温度分布から各区間の熱変位量を演算する。非定常熱伝導方程式の熱伝導マトリックスはボール螺子シャフト（81）の形状及び材質を反映する第1熱伝導マトリックスとボール螺子機構の構造を反映する第2熱伝導マトリックスと放熱関数を含む。放熱関数はサーボモータの回転数が増加するのに応じて、放熱性が増加する特性に設定してある。故に、CPUはボール螺子シャフト（81）からの放熱量を加味した熱変位量に基づいて、熱変位に起因する誤差を高精度に補正することができる。

## 明 細 書

**発明の名称**： 工作機械の熱変位補正方法及び熱変位補正装置

### 技術分野

[0001] 本発明は工作機械の熱変位補正方法及び熱変位補正装置に関する。より詳細には、工作機械においてボール螺子機構の運転中に生じるボール螺子シャフトの熱変位に起因する誤差を補正する方法及び装置に関する。

### 背景技術

[0002] ボール螺子機構は工作機械の位置決め機構として普及している。ボール螺子機構はボール螺子シャフトとナットとの摩擦抵抗、シャフトと軸受各部との摩擦抵抗及びサーボモータの発熱に起因して温度が上昇する。ボール螺子機構は前述した温度上昇に基づいて熱膨張を起こし、熱変位（伸び）を生じる。工作機械では、シャフトの熱変位はそのまま位置決め誤差となって現れる。

[0003] 工作機械は熱膨張に対する対策としてボール螺子シャフトに予張力を与え、熱膨張を吸収する予張力方式を使用してきた。最近の工作機械は太いボール螺子シャフトを使用し、且つ送り速度が非常に速い。故に、発熱量が増大するので、予張力方式を採用する場合、工作機械はボール螺子シャフトに非常に大きな張力を加えねばならない。工作機械に非常に大きな張力を加える場合、ボール螺子機構は変形するという問題がある。前述の場合、スラスト軸受に無理な力が加わり、ボール螺子機構は焼き付く問題があった。

[0004] 特許文献 1 が提案するボール螺子シャフトの熱変位補正方法はボール螺子シャフトに無理な予張力を与えず、且つ特別な測定装置を必要としない。該方法は工作機械稼動中に熱変位量を補正する。具体的には、第 1 工程はサーボモータの電機子電流と電圧との積からボール螺子シャフトの発熱量を求める。第 2 工程は非定常熱伝導方程式に基づく熱分布モデルを用いて、該発熱量から温度分布を求める。該熱分布モデルはボール螺子シャフトを複数の区間に分割したモデルである。第 3 工程は温度分布に基づいて、ボール螺子シ

シャフトの熱変位量を時々刻々に予想する。第4工程は該熱変位量を工作機械にピッチ誤差補正として与える。

## 先行技術文献

## 特許文献

[0005] 特許文献1：特開昭63—256336号公報

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0006] 特許文献1が提案する方法は発熱量を電流と電圧とから演算する。該方法はボールネジ機構の駆動に基づく熱量変動要因の検討をしていない。シャフトが回転駆動した場合、サーボモータ、軸受、ナット及び摺動面等の熱源は熱量を発生する。シャフトは回転駆動して周囲の風を切ることで、周囲へ放熱する。特許文献1は該放熱量について一切示唆していない。

[0007] 放熱量はシャフトの回転速度が速い時に大きく、回転速度が遅い時に小さくなる。特許文献1が提案する方法は前述した放熱量を考慮していないので、高精度な熱変位補正を行うことができない。

[0008] 本発明の目的は、工作機械において、ボールネジ機構の運転中に生じるシャフトの熱変位に起因する誤差を高精度に補正する熱変位補正方法及びその熱変位補正装置を提供することにある。

### 課題を解決するための手段

[0009] 請求項1の工作機械の熱変位補正方法は、シャフトとナットとを備える送り駆動用ボールネジ機構と、前記シャフトを回転駆動するサーボモータと、前記サーボモータを制御データに基づき制御する制御部とを有する工作機械の熱変位補正方法において、前記シャフトの全長を複数に分割した複数区間に夫々発生する発熱量を、前記サーボモータの回転速度と前記制御データとに基づいて、第一所定時間毎に求める第1ステップと、前記複数区間に夫々発生した前記発熱量を前記複数区間毎に前記第一所定時間より長い第二所定時間分累積した合計発熱量と、前記シャフトの回転速度の増大に応じて放熱

性が増加する特性に設定した熱伝導マトリックスを含む非定常熱伝導方程式とに基づいて、前記複数区間の温度分布を前記第二所定時間毎に演算する第2ステップと、前記温度分布から、前記シャフトの前記複数区間の夫々の熱変位量を前記第二所定時間毎に演算する第3ステップと、前記複数区間の夫々の前記熱変位量に基づいて、前記シャフトのナット移動範囲を複数に分割した複数の補正区間毎に前記制御データを夫々補正する為の補正量を前記第二所定時間毎に演算する第4ステップとを備えている。故に、請求項1の熱変位補正方法はボール螺子機構のシャフトの回転速度の増大に応じて増大する放熱性を考慮して、熱変位に起因する誤差を高精度に補正することができる。

[0010] 請求項2の工作機械の熱変位補正方法では、前記熱伝導マトリックスは、前記サーボモータの前記回転速度が増加するのに応じて増加する放熱関数を含む。故に、請求項2の熱変位補正方法はシャフトの回転速度に対応した放熱量を反映した熱変位量を求め、熱変位に起因する誤差を高精度に補正することができる。

[0011] 請求項3の工作機械の熱変位補正方法では、前記熱伝導マトリックスは、前記シャフトの形状及び材質を反映する第1熱伝導マトリックスと、前記ボール螺子機構の構造を反映する第2熱伝導マトリックスと、前記第2熱伝導マトリックスに乗算する前記放熱関数とを含む。故に、請求項3の熱変位補正方法は上記の諸項目とシャフトの回転速度を非定常熱伝導方程式に反映することができる。

[0012] 請求項4の工作機械の熱変位補正装置は、シャフトとナットとを備える送り駆動用ボール螺子機構と、前記シャフトを回転駆動するサーボモータと、前記サーボモータを制御データに基づき制御する制御部とを有する工作機械の熱変位補正装置において、前記サーボモータの回転速度を検出する速度検出機器と、前記シャフトの全長を複数に分割した複数区間に夫々発生する発熱量を、前記サーボモータの回転速度と前記制御データとに基づいて、第一所定時間毎に求める発熱量演算部と、前記複数区間に夫々発生した前記発熱

量を前記複数区間毎に前記第一所定時間より長い第二所定時間分累積した合計発熱量と、前記シャフトの回転速度の増大に応じて放熱性が増加する特性に設定した熱伝導マトリックスを含む非定常熱伝導方程式とに基づいて、前記複数区間の温度分布を前記第二所定時間毎に演算する温度分布演算部と、前記温度分布から前記複数区間の夫々の熱変位量を前記第二所定時間毎に演算する熱変位量演算部と、前記複数区間の夫々の前記熱変位量に基づいて、前記シャフトのナット移動範囲を複数に分割した複数の補正区間毎に前記制御データを夫々補正する為の補正量を前記第二所定時間毎に演算する補正量演算部とを備えている。故に、請求項4の熱変位補正装置はボール螺子機構のシャフトの回転速度の増大に応じて増大する放熱性を考慮して、熱変位に起因する誤差を高精度に補正することができる。

[0013] 請求項5の工作機械の熱変位補正装置では、前記熱伝導マトリックスは、前記サーボモータの前記回転速度が増加するに応じて増加する放熱関数を含む。故に、請求項5の熱変位補正装置はシャフトの回転速度に対応した放熱量を反映した熱変位量を求め、熱変位に起因する誤差を高精度に補正することができる。

[0014] 請求項6の工作機械の熱変位補正装置では、前記熱伝導マトリックスは、前記シャフトの形状及び材質を反映する第1熱伝導マトリックスと、前記ボール螺子機構の構造を反映する第2熱伝導マトリックスと、前記第2熱伝導マトリックスに乗算する前記放熱関数とを含む。故に、請求項6の熱変位補正装置は上記の諸項目とシャフトの回転速度を非定常熱伝導方程式に反映することができる。

### 図面の簡単な説明

- [0015] [図1]本実施例の工作機械の全体斜視図。  
[図2]工作機械の側面図。  
[図3] X軸ボール螺子機構の構成図。  
[図4]工作機械の制御系のブロック図。  
[図5]ボール螺子シャフトを複数に分割して得た複数区間を説明する説明図。

[図6]フラッシュメモリに記憶した複数区間の合計の発熱量等のデータを説明する説明図。

[図7]モータの回転速度と電流を一定とした場合のモータ本体温度と経過時間との関係を示す説明図。

[図8]モータ本体温度の演算方法を説明する図。(A)は駆動開始後0～t<sub>1</sub>までのモータ本体温度と経過時間の関係図。(B)は駆動開始後t<sub>1</sub>～t<sub>2</sub>までのモータ本体温度と経過時間の関係図。(C)は駆動開始後t<sub>2</sub>～t<sub>3</sub>までのモータ本体温度と経過時間の関係図。(D)は駆動開始後0～t<sub>3</sub>までのモータ本体温度と経過時間の関係図。

[図9]複数区間に分配した分配発熱量と温度を説明する説明図。

[図10]ピッチ誤差補正の為の補正区間の説明図。

[図11]放熱関数 $h(\omega)$ の近似式を例示する説明図。

[図12]温度上昇 $\{\theta\}$ の演算方法を説明する説明図。

[図13]固定軸受からの各区間区切り位置における熱変位量を示す説明図。

[図14]熱変位補正制御処理のフローチャート。

[図15]補正量演算処理のフローチャート。

[図16](a)は500毎に区切った放熱関数 $h(\omega)$ のテーブルを示し、(b)は不等間隔に区切った放熱関数 $h(\omega)$ のテーブルを示す。

## 発明を実施するための形態

[0016] 以下、本発明を実施する為の形態について説明する。

### 実施例 1

[0017] 図1～図4に基づいて、工作機械Mの構成について説明する。図1の右下は工作機械Mの前方である。工作機械Mはワーク(図示略)と工具6がX-Y-Z直交座標系における各軸方向へ独立に相対移動してワークに所望の機械加工(例えば、「フライス削り」、「穴空け」、「切削」等)を施すことができる。工作機械M(機械本体2)のX軸方向、Y軸方向、Z軸方向は夫々工作機械M(機械本体2)の左右方向、前後方向、上下方向である。

[0018] 図1に示すように、工作機械Mはベース1、機械本体2、カバー(図示略)

)を構成の主体とする。ベース1はY軸方向に長い略直方体状の鋳造品である。機械本体2はベース1の上部に設けてある。機械本体2はワークに切削加工を行う。カバーはベース1上部に固定してある。カバーは機械本体2とベース1上部とを覆う箱状である。

[0019] 機械本体2について説明する。図1に示すように、機械本体2はコラム4、主軸ヘッド5、主軸(図示略)、工具交換装置7、テーブル8を構成の主体とする。コラム4は略角柱形状であり、ベース1後部に設けたコラム座部3に固定してある。主軸ヘッド5はコラム4の前面に沿って昇降可能である。主軸ヘッド5はその内部に主軸を回転可能に支持している。工具交換装置7は主軸ヘッド5の右側に設けてある。

[0020] 工具交換装置7は主軸の先端に取り付けた工具ホルダを他の工具ホルダに交換する。工具ホルダは工具6を装着している。テーブル8はベース1上部に設けてある。テーブル8はワークを着脱可能に固定する。箱状の制御ボックス9はコラム4背面側に設けてある。制御ボックス9はその内側に数値制御装置50を備えている。数値制御装置50は工作機械Mの動作を制御する。

[0021] テーブル8の移動機構について説明する。X軸モータ71(図4参照)及びY軸モータ72(図4参照)は夫々テーブル8をX軸方向及びY軸方向に移動する。X軸モータ71及びY軸モータ72はサーボモータである。テーブル8の移動機構は以下の構成を有する。直方体状の支持台10はテーブル8の下側に設けてある。支持台10はその上面にX軸方向に沿って延びる一対のX軸送りガイドレールを備えている。一対のX軸送りガイドレールはその上にテーブル8を移動可能に支持している。

[0022] 図3に示すように、ナット部8aはテーブル8下面に配置してある。X軸ボール螺子シャフト81はカップリング17を介してX軸モータ71から延びている。ナット部8aは該X軸ボール螺子シャフト81と螺合することで、ボール螺子機構を構成する。支持台10に固定した固定軸受18(前部軸受)はX軸ボール螺子シャフト81のX軸モータ71側の端部81eを支持



する。可動軸受 19（後部軸受）は X 軸ボール螺子シャフト 81 反対側の端部 81 f を支持する。

[0023] 一対の Y 軸送りガイドレール（図示略）は、ベース 1 上部に前後方向に沿って延びる。一対の Y 軸送りガイドレールは支持台 10 を移動可能に支持している。支持台 10 に設けた X 軸モータ 71 は X 軸送りガイドレール（図示略）に沿ってテーブル 8 を X 軸方向に移動駆動する。ベース 1 に設けた Y 軸モータ 72 は Y 軸送りガイドレールに沿ってテーブル 8 を Y 軸方向に移動駆動する。Y 軸の移動機構も X 軸と同様のボール螺子機構（図 3 参照）である。

[0024] カバー 11、12 はテーブル 8 の左右両側で X 軸送りガイドレールを覆う。カバー 13 と Y 軸後カバー（図示略）は夫々支持台 10 の前後で Y 軸送りガイドレールを覆う。カバー 11、12、13 と Y 軸後カバーは、テーブル 8 が X 軸方向と Y 軸方向の何れかの方向に移動した場合でも、X 軸送りガイドレールと Y 軸送りガイドレールを常に覆う。故に、カバー 11、12、13 と Y 軸後カバーは、加工領域から飛散する切粉及びクーラント液等が各ガイドレール上に落下するのを防止する。

[0025] 主軸ヘッド 5 の昇降機構について説明する。コラム 4 はその前面側に上下方向に延びるガイドレール（図示略）を備えている。該ガイドレールはリニアガイド（図示略）を介して主軸ヘッド 5 を昇降自在に案内する。コラム 4 はその前面側に上下方向に延びる Z 軸ボール螺子シャフト（図示略）を備えている。ナット（図示略）は該 Z 軸ボール螺子シャフトに螺合し、且つ主軸ヘッド 5 と連結している。Z 軸モータ 73（図 4 参照）が Z 軸ボール螺子シャフトを正逆方向に回転駆動することで、主軸ヘッド 5 は上下方向に昇降駆動する。軸制御部 63 a は数値制御装置 50 の CPU 51 からの制御信号に基づいて、Z 軸モータ 73 を駆動する。Z 軸モータ 73 が駆動することで、主軸ヘッド 5 は昇降駆動する。

[0026] 図 1、図 2 に示すように、工具交換装置 7 は工具マガジン 14 と工具交換アーム 15 を備える。工具マガジン 14 は、工具 6 を支持する工具ホルダを

複数格納する。工具交換アーム 15 は、主軸に取付けた工具ホルダと他の工具ホルダを掴み、且つ搬送して交換する。工具マガジン 14 はその内側に複数の工具ポット（図示略）と搬送機構（図示略）を備える。工具ポットは工具ホルダを支持する。搬送機構は工具ポットを工具マガジン 14 内で搬送する。

[0027] 図 4 に示すように、工作機械 M の制御部としての数値制御装置 50 は CPU 51、ROM 52、フラッシュメモリ 53、入出力インタフェース 54、軸制御部 61a～64a、75a、サーボアンプ 61～64、微分器 71b～74b 等を備えている。サーボアンプ 61～64 は夫々 X 軸モータ 71、Y 軸モータ 72、Z 軸モータ 73、主軸モータ 74 に接続している。軸制御部 75a はマガジンモータ 75 に接続している。

[0028] X 軸モータ 71 及び Y 軸モータ 72 は夫々テーブル 8 を X 軸方向及び Y 軸方向に移動させる為のモータである。マガジンモータ 75 は工具マガジン 14 を回転移動させる為のモータである。主軸モータ 74 は前記主軸を回転させる為のモータである。以下、X 軸モータ 71、Y 軸モータ 72、Z 軸モータ 73、主軸モータ 74 を総称して、モータ 71～74 という。モータ 71～74 は夫々エンコーダ 71a～74a を備えている。

[0029] 軸制御部 61a～64a は CPU 51 からの移動指令を受けて、電流指令（モータトルク指令）を夫々サーボアンプ 61～64 に出力する。サーボアンプ 61～64 は電流指令を受けて、夫々モータ 71～74 に駆動電流を出力する。軸制御部 61a～64a は夫々エンコーダ 71a～74a からの位置フィードバック信号を受けて、位置のフィードバック制御を行う。微分器 71b～74b は夫々エンコーダ 71a～74a が出力した位置フィードバック信号を微分して、速度フィードバック信号に変換する。エンコーダ 71a～74a は夫々軸制御部 61a～64a に速度フィードバック信号を出力する。

[0030] 軸制御部 61a～64a は夫々微分器 71b～74b が出力する速度フィードバック信号に基づいて、速度フィードバックの制御を行う。電流検出器

61b～64bは夫々サーボアンプ61～64がモータ71～74に出力する駆動電流を検出する。電流検出器61b～64bは駆動電流を夫々軸制御部61a～64aにフィードバックする。軸制御部61a～64aは電流検出器61b～64bがフィードバックした駆動電流に応じて、電流（トルク）制御を行う。軸制御部75aはCPU51からの移動指令を受けて、マジジンモータ75を駆動する。

[0031] ROM52は工作機械Mの加工プログラムを実行するメインの制御プログラム、後述する熱変位補正制御処理（図14及び図15参照）を実行する為のプログラムを記憶している。フラッシュメモリ53は機械構造に関するパラメータ、物理的性質に関するパラメータ、後述する熱分配係数（比率） $\eta_F$ 、 $\eta_N$ 、 $\eta_B$ 、ピッチ誤差補正量のテーブル等を記憶する。機械構造に関するパラメータとして、例えばボール螺子シャフト81の長さ、径、後述する基準位置等がある。物理的性質に関するパラメータとして、例えば密度、比熱、線膨張係数、熱容量、熱伝達係数、熱容量、熱伝達係数、式（3）、（4）で用いる $\gamma$ 、その他の定数等がある。フラッシュメモリ53は、図6に示す発熱量、合計発熱量、モータ71の回転速度及び駆動電流、図9に示す分配発熱量を更新しつつ記憶するデータ領域を有する。フラッシュメモリ53は種々のワークを機械加工する為の複数の加工プログラム等を適宜記憶する。

[0032] 次に、工作機械Mのボール螺子機構に発生する熱変位に起因する誤差を補正する熱変位方法及び熱変位量補正装置について説明する。本実施例は熱変位量を用いてピッチ誤差補正量を補正する例である。

[0033] 工作機械Mのボール螺子機構は製造時の寸法誤差等に起因して、ボール螺子シャフト81の回転量に対するナット部8aの目標移動量と実際の移動量との間にピッチ誤差が生じる。工作機械Mはピッチ誤差補正量のテーブルに基づいて、ピッチ誤差を補正する。ピッチ誤差補正量のテーブルは工作機械Mの出荷前調整段階で設定する。ピッチ誤差補正量のテーブルはX軸、Y軸、Z軸ボール螺子機構のピッチ誤差を夫々補正する為のテーブルである。本

実施例ではX軸ボール螺子シャフト81のピッチ誤差補正量を補正する例について説明するが、Y軸のボール螺子機構、Z軸のボール螺子機構についても基本的に同様である。

[0034] 図10に示すように、ナット部8aは、X軸ボール螺子シャフト81の全長のうちの、ナット移動範囲81bを移動可能である。ピッチ誤差補正は補正区間毎に行う。補正区間は、ナット移動範囲81b(300mm)を、例えば20mmの設定長で分割した15個の区間である。ピッチ誤差を補正する為のピッチ誤差補正量は、工作機械M製作後の調整段階に以下の手順で取得した値である。ナット部8aは、指令値に応じて、位置X0から位置X300までX軸方向へ20mm間隔にて補正区間毎に移動する。本実施例は、移動指令値に対する誤差、即ち(目標値-実移動量)である誤差を精密に測定する。本実施例は、測定結果に基づき、ピッチ誤差補正量のテーブルを作成する。本実施例は、作成したテーブルをフラッシュメモリ53に予め記憶して出荷する。本実施例は、Y軸及びZ軸方向についても同様にピッチ誤差補正量のテーブルを作成する。

[0035] 本実施例ではボール螺子シャフト81の前側軸部81a、ナット移動範囲81b、後側軸部81cの3領域の発熱量を求める。図5に示すように、ボール螺子シャフト81の端部81eから端部81fまでの区間を、例えば区間1~5に5分割する。該区間の数は5には限らない。上記の複数の区間について、所定時間(例えば、50ms)毎に区間毎の発熱量を求める。

[0036] 図6に示すように、フラッシュメモリ53は発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ 、合計発熱量 $Q_T$ 、X軸モータ71の回転速度 $\omega$ 、駆動電流 $i$ を夫々記憶するデータ領域を有する。発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ は所定期間(例えば、6400ms)中に区間1~5に夫々発生した区間毎の発熱量である。合計発熱量 $Q_T$ は該発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ の合計量である。

[0037] [合計発熱量の演算]

本実施例では、ナット部8aは原点座標X0~X300までのナット移動範囲81bを移動する。加エプログラムのX軸送りデータ(制御データ)に

基づいて、ナット部 8 a が上記の所定時間（50ms）毎にどの区間に位置しているかを判別する。エンコーダ 7 1 a の検出信号から、X 軸モータ 7 1 によるテーブル送り速度 F を演算する。次の（1）式を用いて、該テーブル送り速度 F から発熱量を演算する。演算した発熱量はフラッシュメモリ 5 3 のデータ領域に記憶する。

$$[0038] \quad Q = K_1 \times F^T \quad \dots (1)$$

Q は発熱量、F は送り速度、 $K_1$  は所定の定数、T は所定の定数である。

[0039] 本実施例では区間 1 ~ 5 におけるナット部 8 a の移動に起因する発熱量を、所定時間毎に演算する。本実施例では 6400ms の間、50ms 毎に 128 回発熱量を演算する。該演算した 128 回分の発熱量を区間毎に合計して発熱量  $Q_1 \sim Q_5$  を演算する。図 6 に示すように、該発熱量  $Q_1 \sim Q_5$  を夫々フラッシュメモリ 5 3 の区間 1 ~ 5 に対応するデータ領域に記憶する。6400ms の間に発生した区間毎の発熱量  $Q_1 \sim Q_5$  を合計して、合計発熱量  $Q_T$  を演算する。6400ms の間における X 軸モータ 7 1 の 50ms 毎の回転速度  $\omega$ （即ち、 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{127}$ ）のデータを、フラッシュメモリ 5 3 の回転速度に対応するデータ領域に記憶する。6400ms の間における X 軸モータ 7 1 の 50ms 毎の駆動電流  $i$ （即ち、 $i_0, i_1, \dots, i_{127}$ ）のデータを、フラッシュメモリ 5 3 の駆動電流に対応するデータ領域に記憶する。

[0040] [合計発熱量の分配]

以下に示す合計発熱量  $Q_T$  の分配方法は、ナット移動範囲 8 1 b、前側軸部 8 1 a、後側軸部 8 1 c において互いに他の部分への熱伝導が生じず、熱的には近似的に独立しているとみなす。合計発熱量  $Q_T$  に対する発熱部（軸受 1 8、1 9 とナット部 8 a）の発熱量の比率は送り速度の変化に関係なく、ほぼ一定であるとする。

[0041] 所定期間（6400ms 間）の前側軸部 1 8 a の発熱量  $Q_F$  とナット移動範囲 8 1 b の発熱量  $Q_N$  と後側軸部 1 8 c の発熱量  $Q_B$  の内、発熱量  $Q_N, Q_B$  は次式を用いて演算することができる。

$$[0042] \quad Q_N = \eta_N \times Q_T$$

$$Q_B = \eta_B \times Q_T$$

比率  $\eta_N$  は、合計発熱量  $Q_T$  に対するナット移動範囲 8 1 b の発熱量  $Q_N$  の比率である。比率  $\eta_B$  は、合計発熱量  $Q_T$  に対する後側軸部 1 8 c の発熱量  $Q_B$  の比率である。比率  $\eta_N$ 、 $\eta_B$  は前述の通り一定である。故に、実機で  $Q_N$ 、 $Q_B$  を測定し、比率  $\eta_N$ 、 $\eta_B$  を予め求めておく。

[0043] [X軸モータのモータ本体の温度と発熱量  $Q_F$  の演算]

X軸モータ 7 1 のモータ本体の温度と前側軸部 1 8 a の発熱量  $Q_F$  の演算方法について説明する。図 7 を参照して、モータ本体の温度変化について説明する。X軸モータ 7 1 の回転速度  $\omega$ 、駆動電流  $i$  は一定とする。工作機械 M の駆動を開始すると、モータ本体温度  $\Theta_M$  は曲線 1 5 0 を描きながら上昇し、一定の温度で飽和する。該飽和時の温度を飽和温度  $L_{1a}$  という。飽和温度  $L_{1a}$  は、次の式で表すことができる。

$$L_{1a} = K_2 \cdot \omega + K_3 \cdot i^2 \quad \dots (2)$$

$K_2$ 、 $K_3$  はサーボモータ固有の定数である。 $\omega$  はモータ回転速度である。 $i$  は X 軸モータ 7 1 の駆動電流である。

[0044] モータ本体温度  $\Theta_M$  の上昇を示す曲線 1 5 0 は次の式で表すことができる。

$$\Theta_M = L_{1a} \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} \quad \dots (3)$$

$\gamma$  は X 軸モータ 7 1 に固有の定数である。 $t$  は駆動開始からの経過時間である。モータ本体温度  $\Theta_M$  が飽和温度  $L_{1a}$  に達した後（図 7 では  $t = 8$  時間の時点）工作機械 M を停止すると、モータ本体温度  $\Theta_M$  は曲線 1 5 1 を描きながら下降する。曲線 1 5 1 は次式で表すことができる。

$$\Theta_M = L_{1a} \cdot \exp(-\gamma \cdot t) \quad \dots (4)$$

$\gamma$  はサーボモータ固有の定数である。 $t$  は駆動停止からの経過時間である。

[0045] 工作機械 M の駆動開始から  $a$  分後のモータ本体温度  $\Theta_{M1a}$  は、(3) 式に基づいて次の式で表すことができる。

$$\Theta_{M1a} = L_{1a} \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot a / 60)\}$$

工作機械Mの駆動停止から a 分後のモータ本体温度  $\Theta_{M-1a}$  は、(4) 式に基づいて次の式で表すことができる。

$$\Theta_{M-1a} = L_{1a} \cdot \exp(-\gamma \cdot a / 60)$$

[0046] 以上では、X軸モータ71の回転速度  $\omega$  と駆動電流  $i$  を一定とした場合のモータ本体の温度変化について説明したが、実際の工作機械Mの駆動時には、X軸モータ71の回転速度  $\omega$  と駆動電流  $i$  が一定とは限らない。故に、本実施例では所定期間 (6400ms) 毎に、実際の回転速度  $\omega$  と駆動電流  $i$  (50ms 毎に実測した回転速度と駆動電流の夫々の平均値) から、式(2)を用いてX軸モータ71の飽和温度を演算する。本実施例では飽和温度と経過時間から、上記式(3)および式(4)を用いて、モータ本体の温度変化を演算する。本実施例では以下のように、演算した温度変化を加算することでモータ本体の温度を演算する。

[0047] 図8を参照して、モータ本体の温度の演算方法について説明する。以下の説明では、工作機械Mの駆動開始後、時刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\dots$  (分) と時間が経過したものとして説明する。時刻0、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\dots$  の夫々の間隔は夫々の処理における経過時間である。

[0048] モータ本体温度  $\Theta_M$  は上記経過時間中は前述の式(3)に従って上昇し、その後式(4)に従って低下するものとする。図8(A)に示すように、時刻0から時刻  $t_1$  までの間の経過時間に基づくモータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$  は時刻0から時刻  $t_1$  までは上昇し、時刻  $t_1$  を過ぎると下降する曲線301を描く。モータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$  の時刻  $t_1$  における値  $\Theta_{Mt1-1}$  は式(3)に従って、以下のように演算できる。

$$\Theta_{Mt1-1} = L_{t1} \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t_1 / 60)\}$$

$L_{t1}$  は時刻0～ $t_1$ 間のX軸モータ71の実際の回転速度  $\omega$  と駆動電流  $i$  から演算した飽和温度である。

[0049] モータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$  は時刻  $t_1$  以後は式(4)に従って低下するので、時刻  $t_2$  におけるモータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$  の値  $\Theta_{Mt1-2}$  は以下のように演算できる。

$$\Theta_{Mt1-2} = \Theta_{Mt1-1} \cdot \exp\{-\gamma \cdot (t_2 - t_1) / 60\}$$

同様に、時刻  $t_3$ 、 $t_4$  におけるモータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$  の値  $\Theta_{Mt1-3}$ 、 $\Theta_{Mt1-4}$  も式 (4) に従って、夫々以下のように演算できる。

$$\Theta_{Mt1-3} = \Theta_{Mt1-1} \cdot \exp \{-\gamma \cdot (t_3 - t_1) / 60\}$$

$$\Theta_{Mt1-4} = \Theta_{Mt1-1} \cdot \exp \{-\gamma \cdot (t_4 - t_1) / 60\}$$

[0050] 図 8 (B) に示すように、時刻  $t_1 \sim t_2$  までの間の経過時間に基づくモータ本体温度  $\Theta_{Mt2}$  は時刻  $t_1 \sim t_2$  までは上昇し、時刻  $t_2$  を過ぎると下降する曲線 302 を描く。時刻  $t_1 \sim t_2$  までの間の X 軸モータ 71 の実際の回転速度  $\omega$  と駆動電流  $i$  から飽和温度  $L_{t2}$  が演算できるので、時刻  $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  におけるモータ本体温度  $\Theta_{Mt2-1}$ 、 $\Theta_{Mt2-2}$ 、 $\Theta_{Mt2-3}$  は式 (3) 及び式 (4) を用いて、夫々以下のように演算できる。

$$[0051] \quad \Theta_{Mt2-1} = L_{t2} \cdot [1 - \exp \{-\gamma \cdot (t_2 - t_1) / 60\}]$$

$$\Theta_{Mt2-2} = \Theta_{Mt2-1} \cdot \exp \{-\gamma \cdot (t_3 - t_2) / 60\}$$

$$\Theta_{Mt2-3} = \Theta_{Mt2-1} \cdot \exp \{-\gamma \cdot (t_4 - t_2) / 60\}$$

図 8 (C) に示すように、時刻  $t_2 \sim t_3$  までの経過時間に基づくモータ本体温度  $\Theta_{Mt3}$  は時刻  $t_2 \sim t_3$  までは上昇し、時刻  $t_3$  を過ぎると低下する曲線 303 を描く。前述の  $\Theta_{Mt1}$  と  $\Theta_{Mt2}$  の場合と同様にして、時刻  $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$  におけるモータ本体温度  $\Theta_{Mt3-1}$ 、 $\Theta_{Mt3-2}$ 、 $\Theta_{Mt3-3}$  を演算する。

[0052] 前述のようにして演算したモータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$ 、 $\Theta_{Mt2}$ 、 $\Theta_{Mt3}$  …… の各時刻における値を加算して、実際のモータ本体温度  $\Theta$  を演算する。例えば、時刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  時のモータ本体温度  $\Theta_{Mt1}$ 、 $\Theta_{Mt2}$ 、 $\Theta_{Mt3}$  を演算したとする。この場合、時刻  $t_1$  におけるモータ本体温度  $\Theta$  の値  $\alpha_1$  は  $\Theta_{Mt1-1}$  である。時刻  $t_2$  におけるモータ本体温度  $\Theta$  の値  $\alpha_2$  は  $\Theta_{Mt1-2} + \Theta_{Mt2-1}$  である。時刻  $t_3$  におけるモータ本体温度  $\Theta$  の値  $\alpha_3$  は  $\Theta_{Mt1-3} + \Theta_{Mt2-2} + \Theta_{Mt3-1}$  である。同様に、各時刻におけるモータ本体温度  $\Theta$  の値を演算すると、モータ本体温度  $\Theta$  は図 8 (D) に示す曲線 304 で例示するように変化する。

[0053] 本実施例では次式 (5) に従って、前述のように演算したモータ本体温度  $\Theta$  を用いて、前側軸部 18a の発熱量  $Q_F$  を演算する。

$$Q_F = K_4 (\Theta - \Theta_s) \quad \dots (5)$$



$Q_F$  は所定期間（6400ms間）の前側軸部18aの発熱量である。 $K_4$  は係数である。 $\Theta_s$  はボール螺子シャフト端部81e（図5参照）の温度である。本実施例では説明を簡単にする為に、前回の処理で演算した区間1の右区切り位置の温度 $\theta_1$ の値を $\Theta_s$ として用いるものとする。

[0054] [ナット移動範囲における各区間への発熱量の分配]

ナット移動範囲81bの発熱量 $Q_N$ を5つの区間に分配する。フラッシュメモリ53のデータ領域が記憶する区間毎の発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ と合計発熱量 $Q_T$ から、次式に従って、発熱量 $Q_N$ を5つの区間1～5に分配する為の分配比率 $X_1 \sim X_5$ を演算する。

[0055]  $X_1 = \text{区間1の発熱量 } Q_1 / Q_T$

:

$X_5 = \text{区間5の発熱量 } Q_5 / Q_T$

上記式で演算した各区間への分配比率 $X_1 \sim X_5$ とナット移動区間81bの発熱量 $Q_N$ から、次式に従って、区間1～5の夫々に対して分配する分配発熱量 $Q_{N1} \sim Q_{N5}$ を演算する。

[0056]  $Q_{N1} = X_1 \times Q_N$

:

$Q_{N5} = X_5 \times Q_N$

図9に示すように、上記の結果を用いて区間1～5の夫々に対する総分配発熱量を表すことができる。具体的には、区間1に対する総分配発熱量は前側軸部18aの発熱量 $Q_F$ に発熱量 $Q_{N1}$ を加えた発熱量となる。区間2～区間4に対する総分配発熱量は夫々発熱量 $Q_{N2} \sim$ 発熱量 $Q_{N4}$ である。区間5に対する総分配発熱量は後側軸部81cの発熱量 $Q_B$ に発熱量 $Q_{N5}$ を加えた発熱量となる。

[0057] [温度分布の演算]

本実施例では以上のようにして5つの区間1～5の夫々の総分配発熱量（図9参照）を求めた後、該総分配発熱量から温度分布を演算する。温度分布は初期条件 $\{\theta\}_{t=0}$ 、 $d\{\theta\}/dt_{t=0}$ の下で次式（6）の非定常熱伝導方

程式を解くことで演算する。

$$[0058] \quad [C] \frac{d \{\theta\}}{dt} + [H] \{\theta\} + \{Q\} = 0 \quad \dots (6)$$

[C] は熱容量マトリックス、[H] は熱伝導マトリックス、{\theta} は温度分布、{Q} は入出力する発熱量マトリックス、t は時間である。

熱容量マトリックス [C] はボール螺子機構で決まる固定値であり、次式のように表すことができる。

[0059] [数1]

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 \end{bmatrix}$$

熱容量マトリックス [C] の要素  $c_1 \sim c_5$  は夫々所定の定数である。

温度分布に相当する温度上昇マトリックス {\theta}、ボール螺子シャフト 8 1 の回転速度  $\omega$ 、X 軸モータ 7 1 の電流値から演算する発熱量マトリックス {Q} は夫々次式のように表すことができる。

[0060] [数2]

$$\{\theta\} = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} \quad \{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{Bmatrix}$$

但し、 $Q_1$  は  $Q_F + Q_{N1}$  であり、 $Q_2$  は  $Q_{N2}$  であり、 $Q_3$  は  $Q_{N3}$  であり、 $Q_4$  は  $Q_{N4}$  であり、 $Q_5$  は  $Q_{N5} + Q_B$  である。

熱伝導マトリックス [H] は第 1 熱伝導マトリックス [K] とマトリックス [H<sub>F</sub>] から、次式 (7) のように示すことができる。第 1 熱伝導マトリックス [K] は分割した区間の形状、材質で決まる。マトリックス [H<sub>F</sub>] は X 軸モータ 7 1 が駆動するボール螺子シャフト 8 1 の回転速度で変化する。本実施例では、ボール螺子シャフト 8 1 の回転速度は X 軸モータ 7 1 の回転速度  $\omega$  と等しいものとする。

[0061] [数3]

$$[H] = [K] + [H_F] \quad \dots(7)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix}$$

第 1 熱伝導マトリックス [K] の要素  $k_{11} \sim k_{55}$  は夫々ボール螺子機構で決まる所定の定数である。マトリックス [H<sub>F</sub>] は放熱関数  $h(\omega)$  と第 2 熱伝導マトリックス [h<sub>F</sub>] から、次式 (8) のように表すことができる。放熱関数  $h(\omega)$  はボール螺子シャフト 8 1 の回転速度  $\omega$  をパラメータとする放熱の効果を表す関数である。

[0062] [数4]

$$[H_F] = h(\omega) \times [h_F] \quad \dots(8)$$

$$[h_F] = \begin{bmatrix} h_{f1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{f2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_{f3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{f4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{f5} \end{bmatrix}$$

第2熱伝導マトリックス  $[h_F]$  の要素  $h_{f1} \sim h_{f5}$  は夫々ボール螺子機構で決まる所定の定数である。放熱関数  $h(\omega)$  は次式(9)のように表すことができる。

$$h(\omega) = a\omega + b \dots (9)$$

式(9)の  $a$ 、 $b$  は予め実験で求めた値を近似して図11に例示するような特性図を作成することで、演算することができる。

[0063] 式(6)の非定常熱伝導方程式をボール螺子シャフト81の駆動による放熱特性を考慮して変形すると、次式(10)のように表すことができる。

[0064] [数5]

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} = -[C]^{-1} ([K] + h(\omega) \times [h_F]) \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} - [C]^{-1} \{Q\} \dots (10)$$

[0065] 時間  $t = 0$  の初期温度上昇  $\{\theta\}$  を演算する際、初期温度上昇  $\{\theta\}$  を  $\{\theta\}_{t=0}$  とし、演算周期を  $t = \Delta t$  (例えば、 $\Delta t = 50 \text{ms}$ ) として次のように定義する。

$t = 0 \sim \Delta t$  の入力熱量を  $\{Q\}_{t=0}$ 、平均速度  $\omega_{t=0}$ 、 $h(\omega_{t=0})$

$t = \Delta t \sim 2\Delta t$  の入力熱量を  $\{Q\}_{t=\Delta t}$ 、平均速度  $\omega_{t=\Delta t}$ 、 $h(\omega_{t=\Delta t})$

$t = n\Delta t \sim (n+1)\Delta t$  の入力熱量を  $\{Q\}_{t=n\Delta t}$ 、平均速度  $\omega_{t=n\Delta t}$ 、 $h(\omega_{t=n\Delta t})$

[0066] 式(10)の右辺に、 $t = 0$  における  $\{\theta\}_{t=0}$  及び  $\{Q\}_{t=0}$  を代入すると、 $t = 0$  における温度上昇速度を演算することができる。

[数6]

$$\frac{d}{dt} \{\theta\}_{t=0} = -[C]^{-1} ([K] + h(\omega_{t=0}) \times [h_F]) \{\theta\}_{t=0} - [C]^{-1} \{Q\}_{t=0}$$

[0067] 図12に示すように、 $t = 0$ における温度上昇速度  $d\{\theta\} / dt_{t=0}$  を用いて  $\{\theta\}_{t=\Delta t}$  を演算できる。次に、 $\{\theta\}_{t=\Delta t}$  と式(10)を次のように置き換える。

$$\begin{aligned} \{\theta\}_{t=0} &\Rightarrow \{\theta\}_{t=\Delta t} \\ h(\omega_{t=0}) &\Rightarrow h(\omega_{t=\Delta t}) \\ \{Q\}_{t=0} &\Rightarrow \{Q\}_{t=\Delta t} \end{aligned}$$

[0068] このように式(10)を変形した式から、同様に  $t = \Delta t$ における温度上昇速度  $d\{\theta\} / dt_{t=\Delta t}$  を演算する。前記のように求めた温度上昇速度  $d\{\theta\} / dt_{t=\Delta t}$  を用いて  $\{\theta\}_{t=2\Delta t}$  を演算する。同様の演算を繰り返すことで、 $\{\theta\}_{t=3\Delta t}$ 、 $\{\theta\}_{t=4\Delta t}$ 、・・・と各時間の温度上昇、即ち温度分布  $\{\theta\}$  を演算する。

[0069] [熱変位量の演算]

図9に示すように、ボール螺子シャフト81の5つの区間の温度  $\theta_1 \sim \theta_5$  を求めてから、該温度  $\theta_1 \sim \theta_5$  に基づいて、ボール螺子シャフト81の5つの区間区切り位置(図9の  $\theta_1 \sim \theta_5$  に対応する位置)の熱変位量を演算する。5つの区間区切り位置の熱変位量は次式(11)から演算することができる。

$$[0070] \quad \Delta L = \int^L_0 \beta \times \theta(L) dL \quad \dots \quad (11)$$

$\Delta L$ は熱変位量である。 $\beta$ はシャフト材料の線膨張係数である。

積分記号は0～Lの範囲についての積分を示し、Lは5つの区間に関する区間区切り位置までの長さを示す。各区間1～5の長さを100mmとすると、0～100、0～200、0～300、・・・等の範囲についての積分を示す。

[0071] [補正量の演算]

図10はボール螺子シャフト81のナット移動範囲81bを20mm間隔で分割した補正区間1～15を示す。ピッチ誤差補正量の補正は補正区間毎に行う。本実施例ではナット部8aの移動範囲がX0～X300(300mmの範囲)であり、各補正区間の長さが20mmであるので、15個の補正

区間がある。各補正区間に対応するピッチ誤差補正量を規定するピッチ誤差補正量のテーブルは、前述したように、予めフラッシュメモリ 53 に記憶してある。

[0072] 本実施例ではボール螺子シャフト 81 の 5 つの区間 1 ~ 5 の区切り位置の熱変位量を演算してから、15 個の補正区間のピッチ誤差補正量を夫々補正する為の補正量を演算する。

[0073] 図 13 を参照して、各区間のピッチ誤差補正量を補正する為の補正量の演算方法について説明する。図 13 のグラフの縦軸は固定軸受 18 の位置を基準とする熱変位量を示す。上側のグラフの横軸は固定軸受 18 を基準とするボール螺子シャフト 81 の各部の位置（ボール螺子シャフトの長さ）を示す。グラフの下側の横軸は 15 個の補正区間の区切り位置（X0、X20・・・、X300）を示す。

$D_{F1}$  は区間 1 における熱変位量。

$D_{F2}$  は区間 1 と区間 2 における熱変位量の合計。

:

$D_{F5}$  は区間 1 ~ 区間 5 における熱変位量の合計。

[0074] 本実施例では 15 個の補正区間の区切り位置（X20、・・・、X300）の補正量を次式から演算する。

[補正量演算式]

X0 の補正量 = (区間 1 の熱変位量) + (区間 2 の熱変位量) × { (区間 2 の左区切り位置と X0 間の長さ) / (区間 2 の長さ) }

X20 の補正量 = (区間 1 の熱変位量) + (区間 2 の熱変位量) × { (区間 2 の左区切り位置と X20 間の長さ) / (区間 2 の長さ) } - (X0 の補正量)

X40 の補正量 = (区間 1 の熱変位量) + (区間 2 の熱変位量) × { (区間 2 の左区切り位置と X40 間の長さ) / (区間 2 の長さ) } - (X20 の補正量)

X60 の補正量 = (区間 1 の熱変位量) + (区間 2 の熱変位量) × { (区

間 2 の左区切り位置と X 6 0 間の長さ) / (区間 2 の長さ) } - (X 4 0 の補正量)

X 8 0 の補正量 = (区間 1 の熱変位量) + (区間 2 の熱変位量) × { (区間 2 の左区切り位置と X 8 0 間の長さ) / (区間 2 の長さ) } - (X 6 0 の補正量)

:

X 3 0 0 の補正量 = (区間 1 の熱変位量) + (区間 2 の熱変位量) + (区間 3 の熱変位量) + (区間 4 の熱変位量) + (区間 5 の熱変位量) × { (区間 5 の左区切り位置と X 3 0 0 間の長さ) / (区間 5 の長さ) } - (X 2 8 0 の補正量)

- [0075] 図 1 4 のフローチャートを参照して、数値制御装置 5 0 の CPU 5 1 が実行する熱変位補正制御処理について説明する。図中 S<sub>i</sub> (i = 1, 2, ...) は各ステップを示す。該熱変位補正制御処理は以上に説明した熱変位補正方法の内容と重複する部分が多いので、簡単に説明する。CPU 5 1 はワークの加工を、該熱変位補正制御処理と並行的に実行する。
- [0076] CPU 5 1 は最初に初期設定を実行する (S 1)。CPU 5 1 は該初期設定において、パラメータ等の設定データから有限要素法による演算に必要なマトリックスの設定、雰囲気温度 (例えば、室温) の設定をする。CPU 5 1 はボールネジシャフト 8 1 の端部 8 1 e から端部 8 1 f までの区間を 5 つの区間 1 ~ 5 (図 5 参照) に分割する (S 2)。
- [0077] CPU 5 1 はカウンタ I を 0 に設定する (S 3)。CPU 5 1 は X 軸送りデータとエンコーダ 7 1 a の検出信号を読み込む (S 4)。CPU 5 1 は区間 1 ~ 5 の 5 0 m s 毎の発熱量とモータ本体温度  $\theta$  を演算して、フラッシュメモリ 5 3 の所定のデータ領域に記憶する (S 5)。CPU 5 1 は X 軸モータ 7 1 の回転速度  $\omega$  のデータもフラッシュメモリ 5 3 に記憶する。
- [0078] CPU 5 1 はカウンタ I を「1」増加する (S 6)。CPU 5 1 は、カウンタ I のカウンタ値が「127」であるか否かを判定する (S 7)。CPU 5 1 は、カウンタ値が「127」より小さい間は (S 7 : No)、ステップ

S 4へ戻ってステップS 4～S 6の処理を繰り返す。CPU 5 1は、カウンタ値が「1 2 7」になると（S 7：Y e s）、ステップS 8の処理へ移行する。CPU 5 1は、6 4 0 0 m s間の区間1～5の区間毎の発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ と該発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ を合計した合計発熱量 $Q_T$ を演算する（S 8）。CPU 5 1は発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ と合計発熱量 $Q_T$ をフラッシュメモリ 5 3の所定のデータ領域に記憶する。

[0079] CPU 5 1は前側軸部 1 8 aの発熱量 $Q_F$ とナット移動区間 8 1 bの発熱量 $Q_N$ と後側軸部 1 8 cの発熱量 $Q_B$ を演算する（S 9）。CPU 5 1は該発熱量 $Q_F$ と発熱量 $Q_N$ と発熱量 $Q_B$ をフラッシュメモリ 5 3の所定のデータ領域に記憶する。CPU 5 1は発熱量 $Q_N$ から区間1～5の夫々に対して分配する分配発熱量 $Q_{N1} \sim Q_{N5}$ を演算する（S 9）。CPU 5 1は該分配発熱量 $Q_{N1} \sim Q_{N5}$ をフラッシュメモリ 5 3の所定のデータ領域に記憶する。CPU 5 1は区間1～5の夫々に対する総分配発熱量（図9参照）を演算する（S 9）。CPU 5 1は該総分配発熱量をフラッシュメモリ 5 3の所定のデータ領域に記憶する。CPU 5 1は発熱量 $Q_F$ を演算する場合、フラッシュメモリ 5 3が記憶している所定期間（6 4 0 0 m s）の1 2 8個のモータ本体温度 $\theta$ の平均値をモータ本体温度 $\theta$ として用いる。CPU 5 1は前回の $\theta_1$ を $\theta_5$ として用いる。CPU 5 1は図9に示す総分配発熱量に基づいて、区間1～5の上昇温度 $\theta_1 \sim \theta_5$ を演算する（S 1 0）。CPU 5 1は該上昇温度 $\theta_1 \sim \theta_5$ をフラッシュメモリ 5 3に記憶する。

[0080] CPU 5 1は前記の（1 1）式に基づいて、5つの区間の区間区切り位置の熱変位量を演算する（S 1 1）。CPU 5 1は該熱変位量をフラッシュメモリ 5 3に記憶する。CPU 5 1は前述した補正量演算式に基づいて、1 5個の補正区間区切り位置における補正量を演算する（S 1 2）。CPU 5 1はステップS 1 2において演算した該補正量を用いて、ピッチ誤差補正量に対する補正処理を実行する（S 1 3）。該ピッチ誤差補正量は1 5個の補正区間区切り位置に対して予め設定し、ピッチ誤差補正量のテーブルに記憶してある。CPU 5 1は補正処理した該ピッチ誤差補正量に基づいて、送り量



補正処理を実行する。CPU 51は熱変位補正の処理を終了するか否を判定する（S 14）。CPU 51は熱変位補正の処理を終了しない場合（S 14 : No）、ステップS 3へ戻り、ステップS 3以降の処理を繰り返し実行する。CPU 51は熱変位補正の処理を終了する場合（S 14 : Yes）、図 14に示す制御処理を終了する。

- [0081] 図 15のフローチャートを参照して、熱変位補正制御処理（図 14参照）のステップS 12の補正量演算処理について説明する。該補正量演算処理はピッチ誤差補正量を補正する補正量を演算する処理である。図中S<sub>i</sub>（i = 20、21・・・）は各ステップを示す。CPU 51はカウンタnを0にリセットする（S 10）。CPU 51は位置X<sub>n</sub>の補正量ΔM<sub>n</sub>を次式により演算する（S 21）。

$$\Delta M_n = D_F + \Delta D_n \times \{ (X_n - X_F) / L_n \} - \Delta M_{n-20}$$

- [0082] 上記式は、前述した補正量演算式を簡単に表した式である。D<sub>F</sub>は位置X<sub>n</sub>よりも固定軸受18側の演算区間で発生した熱変位量の合計である。ΔD<sub>n</sub>は位置X<sub>n</sub>を含む演算区間で発生した熱変位量である。X<sub>F</sub>は位置X<sub>n</sub>を含む演算区間の左区切り位置である。L<sub>n</sub>は位置X<sub>n</sub>を含む演算区間の長さである。ΔM<sub>0</sub>を演算する場合に用いるΔM<sub>-20</sub>は0とする。CPU 51は最初に上記式に従って、位置X<sub>0</sub>（n = 0）の補正量ΔM<sub>0</sub>を演算する。

- [0083] CPU 51はnを20増加する（S 22）。CPU 51はnが320であるか否か判定する（S 23）。nが320でない場合（S 23 ; No）、CPU 51は位置X<sub>300</sub>までの補正量についての演算を終了していないものと判定する。CPU 51はステップS 21へ戻って位置X<sub>n</sub>の補正量ΔM<sub>n</sub>を演算する。CPU 51は位置X<sub>300</sub>の補正量ΔM<sub>300</sub>を演算するまで、ステップS 21～S 23の処理を繰り返し実行する。CPU 51は補正量ΔM<sub>300</sub>を演算する（S 21）。CPU 51がnを20増加すると（S 22）、nは320となる（S 23 ; Yes）。CPU 51は図 15に示す処理を終了して、図 12のステップS 14の処理へ移行する。

- [0084] エンコーダ71aは「速度検出機器」に相当する。ステップS 3～S 7の

処理を実行する数値制御装置50のCPU51は「発熱量演算部」に相当する。ステップS8～S10の処理を実行するCPU51は「温度分布演算部」に相当する。ステップS11の処理を実行するCPU51は「熱変位量演算部」にする。ステップS12の処理を実行するCPU51は「補正量演算部」に相当する。

[0085] 以上に説明した工作機械Mの熱変位補正方法及び熱変位補正装置（数値制御装置50）の作用及び効果について説明する。該方法及び装置は非定常熱伝導方程式の熱伝導マトリックスをボール螺子シャフト81の回転速度の増大に応じて放熱性が増加する特性に設定してある。該方法及び装置は所定時間毎に複数区間1～5の夫々の発熱量を演算する。該方法及び装置は該複数区間1～5の夫々の発熱量を所定期間分累積した発熱量 $Q_1 \sim Q_5$ を用いて、複数区間の夫々に対する分配発熱量を演算する。

[0086] 該方法及び装置は該分配発熱量と上記の非定常熱伝導方程式を用いて、複数区間の温度分布 $\theta_1 \sim \theta_5$ を演算する。該方法及び装置は該温度分布 $\theta_1 \sim \theta_5$ から複数区間の熱変位量 $D_{F1} \sim D_{F5}$ を演算する。該方法及び装置は該熱変位量 $D_{F1} \sim D_{F5}$ に基づいて、予め設定してあるピッチ誤差補正量を補正する為の補正量 $\Delta M_0$ 、 $\Delta M_{20}$ 、 $\Delta M_{40}$ 、 $\dots$ 、 $\Delta M_{300}$ を演算する。該方法及び装置はボール螺子機構のボール螺子シャフト81の回転速度 $\omega$ の増大に応じて増大する放熱性を考慮して、精度良く熱変位補正処理を行うことができる。

[0087] 前記熱伝導マトリックスはX軸モータ71の回転速度 $\omega$ が増加するのに応じて増加する放熱関数 $h(\omega)$ を含む。故に、該方法及び装置はボール螺子シャフト81の回転速度に対応した放熱量を反映した熱変位量を求め、精度良く熱変位補正を行うことができる。前記熱伝導マトリックスはボール螺子シャフト81の形状及び材質を反映する第1熱伝導マトリックスと前記ボール螺子機構の構造を反映する第2熱伝導マトリックスと該第2熱伝導マトリックスに乗算する前記放熱関数を含む。故に、該方法及び装置は上記の諸項目とボール螺子シャフト81の回転速度を非定常熱伝導方程式に反映することができる。

[0088] 次に、前記実施例を部分的に変更した変更例について説明する。

[1] 放熱関数  $h(\omega)$  はボールネジシャフト 81 の回転速度の増大に応じて周囲に放熱する放射熱量を反映できるものであれば良い。放熱関数  $h(\omega)$  は例えば次の 2 つの式のうちいずれか一方を用いてもよい。

$$h(\omega) = a\omega^2 + b$$

$$h(\omega) = a \cdot (1 - \exp(-\omega/b)) + c$$

[0089] [2] 図 16 (a) に示すように、放熱関数  $h(\omega)$  は近似式ではなく、回転速度  $\omega$  と  $h(\omega)$  の値との対応関係を設定したデータに基づいてもよい。図 16 (b) に示すように、放熱関数  $h(\omega)$  としてデータを用いる場合、回転速度  $\omega$  による区切りは不等間隔であってもよい。放熱関数  $h(\omega)$  としてデータを用いる場合、近似式の場合に必要な演算処理は不要である。

[0090] [3] 熱変位補正方法及び熱変位補正装置はピッチ誤差補正とは独立に、熱変位量に基づいて、複数の補正区間毎に加工プログラムの制御データを補正してもよい。

[4] 発熱量を演算する演算周期は必ずしも 50ms でなくてもよい。熱変位量に基づく補正を行う所定期間は 6400ms ではなく、数十秒単位であってもよい。

## 請求の範囲

- [請求項1] シャフトとナットとを備える送り駆動用ボール螺子機構と、前記シャフトを回転駆動するサーボモータと、前記サーボモータを制御データに基づき制御する制御部とを有する工作機械の熱変位補正方法において、
- 前記シャフトの全長を複数に分割した複数区間に夫々発生する発熱量を、前記サーボモータの回転速度と前記制御データとに基づいて、第一所定時間毎に求める第1ステップと、
- 前記複数区間に夫々発生した前記発熱量を前記複数区間毎に前記第一所定時間より長い第二所定時間分累積した合計発熱量と、前記シャフトの回転速度の増大に応じて放熱性が増加する特性に設定した熱伝導マトリックスを含む非定常熱伝導方程式とに基づいて、前記複数区間の温度分布を前記第二所定時間毎に演算する第2ステップと、
- 前記温度分布から、前記複数区間の夫々の熱変位量を前記第二所定時間毎に演算する第3ステップと、
- 前記複数区間の夫々の前記熱変位量に基づいて、前記シャフトのナット移動範囲を複数に分割した複数の補正区間毎に前記制御データを夫々補正する為の補正量を前記第二所定時間毎に演算する第4ステップと、
- を備えた工作機械の熱変位補正方法。
- [請求項2] 前記熱伝導マトリックスは、前記サーボモータの前記回転速度が増加するのに応じて増加する放熱関数を含む請求項1に記載の工作機械の熱変位補正方法。
- [請求項3] 前記熱伝導マトリックスは、前記シャフトの形状と材質を反映する第1熱伝導マトリックスと、前記ボール螺子機構の構造を反映する第2熱伝導マトリックスと、前記第2熱伝導マトリックスに乗算する前記放熱関数とを含む請求項2に記載の工作機械の熱変位補正方法。
- [請求項4] シャフトとナットとを備える送り駆動用ボール螺子機構と、前記シ

シャフトを回転駆動するサーボモータと、前記サーボモータを制御データに基づき制御するための制御部とを有する工作機械の熱変位補正装置において、

前記サーボモータの回転速度を検出する速度検出機器と、

前記シャフトの全長を複数に分割した複数区間に夫々発生する発熱量を、前記サーボモータの回転速度と前記制御データとに基づいて、第一所定時間毎に求める発熱量演算部と、

前記複数区間に夫々発生した前記発熱量を前記複数区間毎に前記第一所定時間より長い第二所定時間分累積した合計発熱量と、前記シャフトの回転速度の増大に応じて放熱性が増加する特性に設定した熱伝導マトリックスを含む非定常熱伝導方程式とに基づいて、前記複数区間の温度分布を前記第二所定時間毎に演算する温度分布演算部と、

前記温度分布から、前記複数区間の夫々の熱変位量を前記第二所定時間毎に演算する熱変位量演算部と、

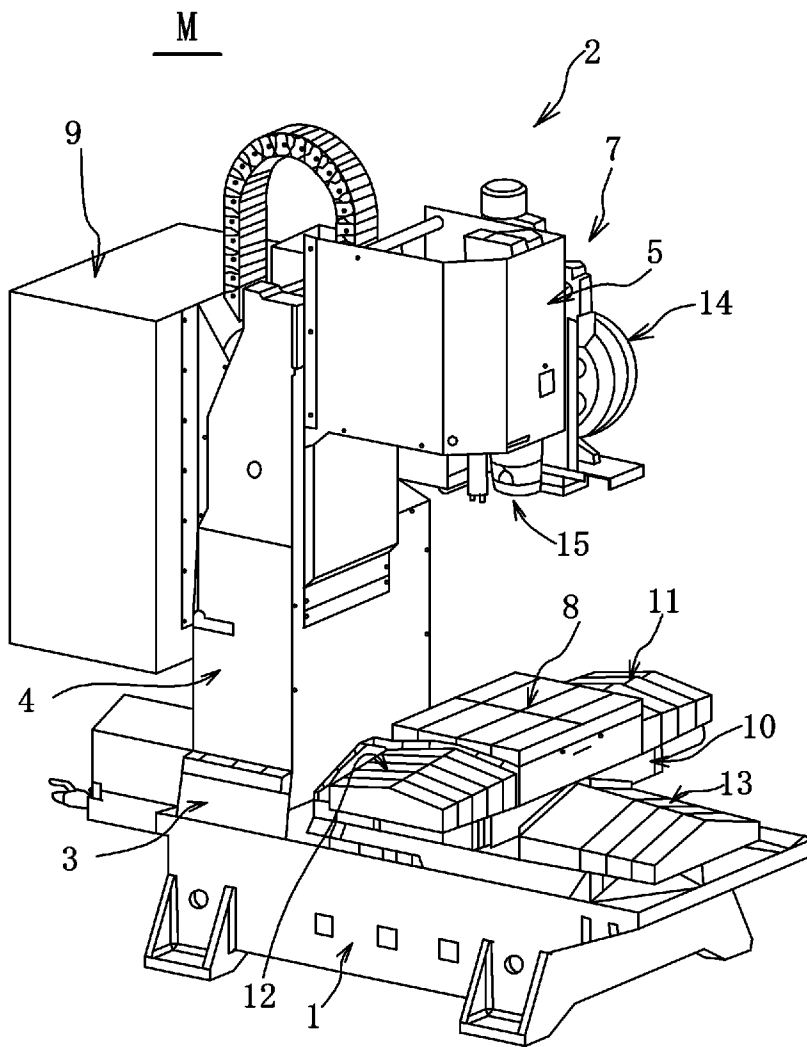
前記複数区間の夫々の前記熱変位量に基づいて、前記シャフトのナット移動範囲を複数に分割した複数の補正区間毎に前記制御データを夫々補正する為の補正量を前記第二所定時間毎に演算する補正量演算部と、

を備えた工作機械の熱変位補正装置。

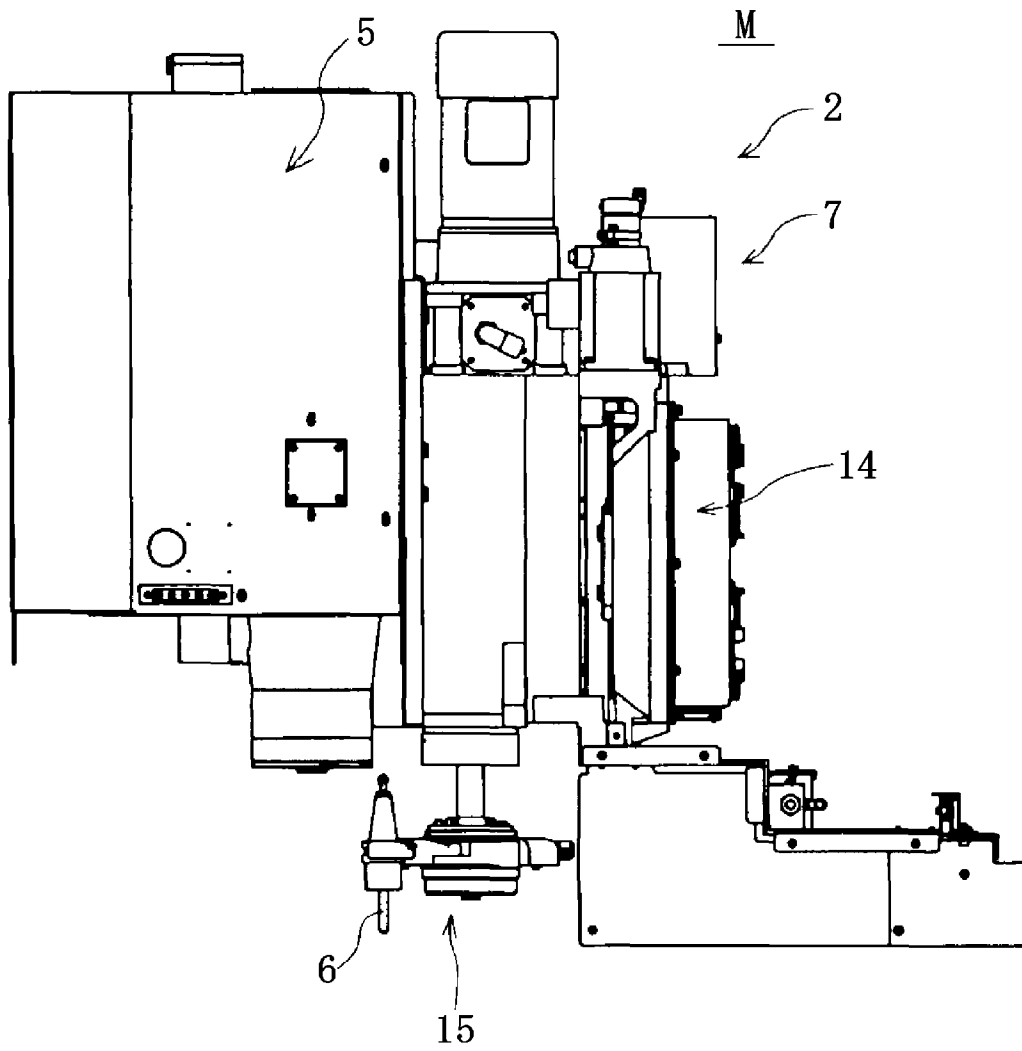
[請求項5] 前記熱伝導マトリックスは、前記サーボモータの前記回転速度が増加するのに応じて増加する放熱関数を含む請求項4に記載の工作機械の熱変位補正装置。

[請求項6] 前記熱伝導マトリックスは、前記シャフトの形状及び材質を反映する第1熱伝導マトリックスと、前記ボール螺子機構の構造を反映する第2熱伝導マトリックスと、前記第2熱伝導マトリックスに乗算する前記放熱関数とを含む請求項5に記載の工作機械の熱変位補正装置。

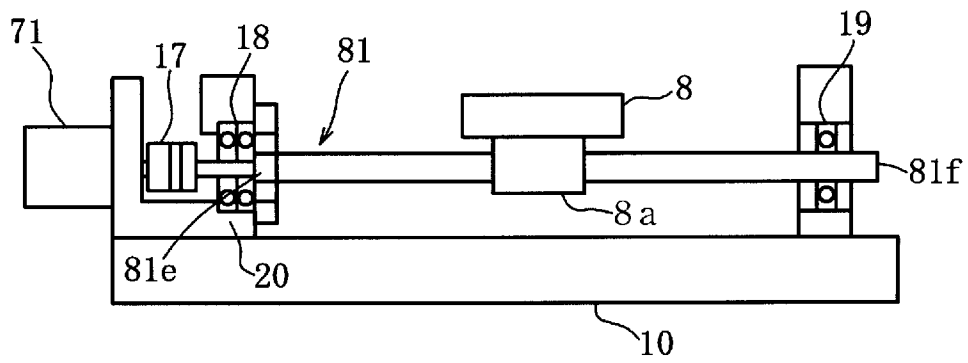
[図1]



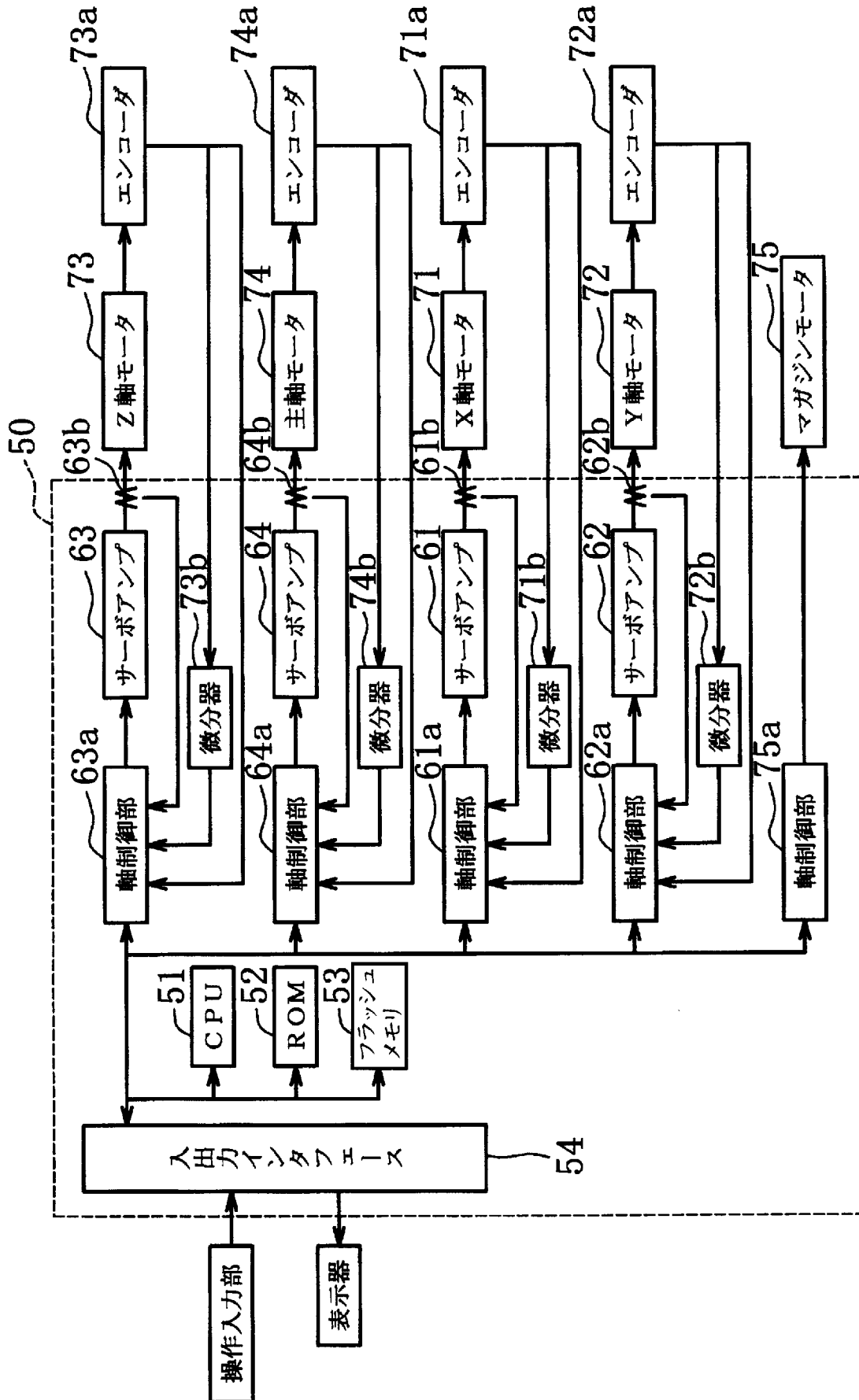
[図2]



[図3]

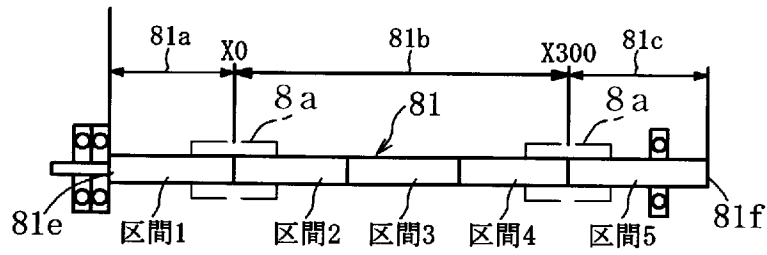


[図4]





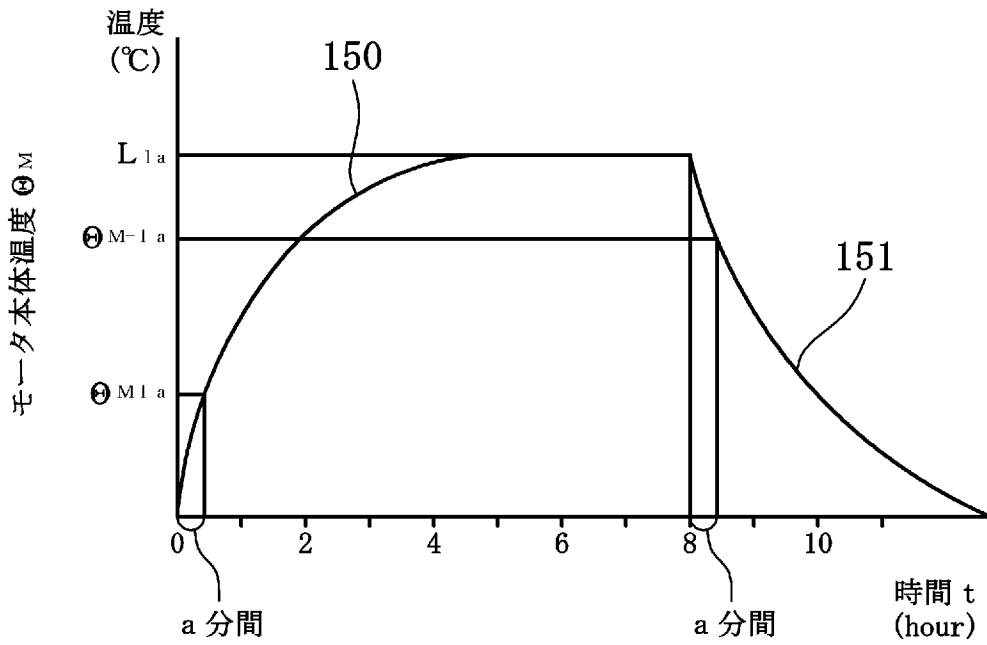
[図5]



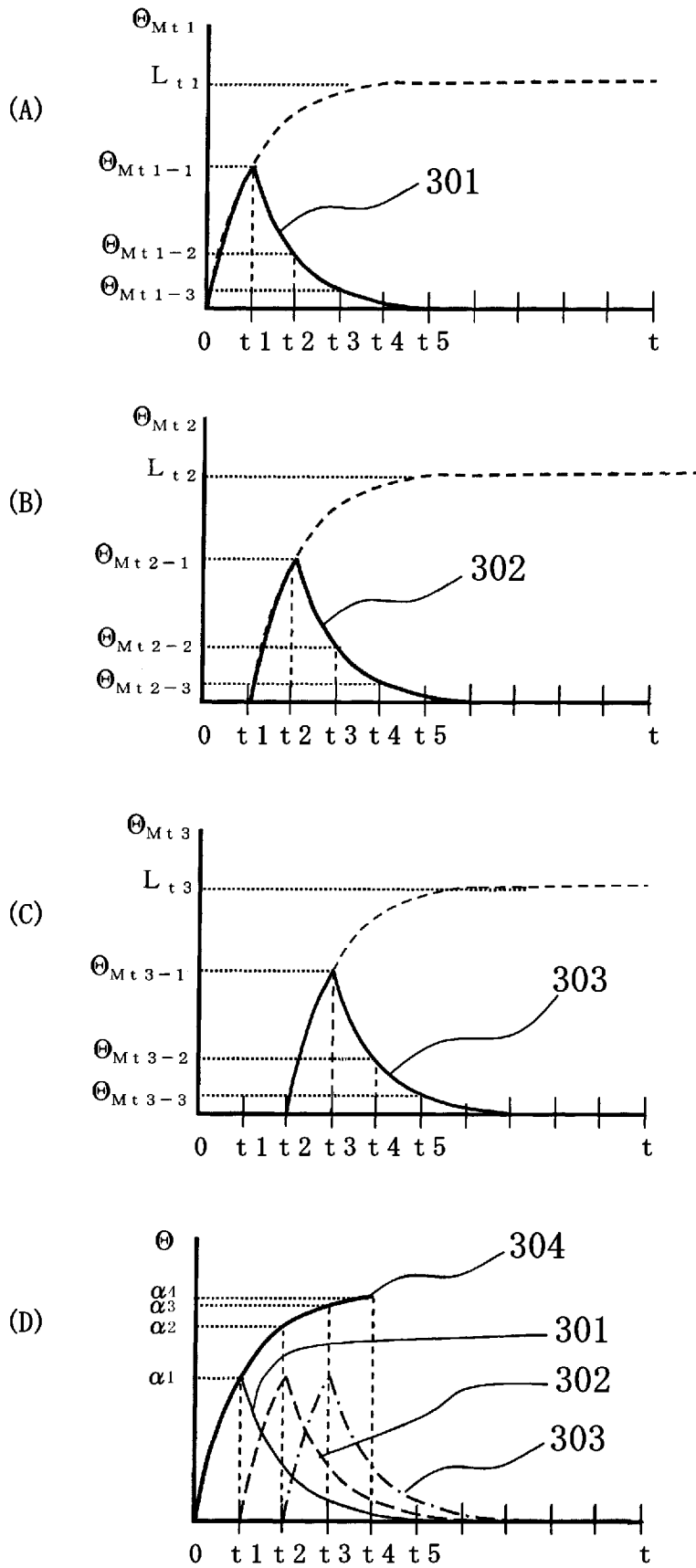
[図6]

区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	合計 発熱量	回転 速度	駆動 電流
$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_T$	$\omega_0$	$i_0$
						$\omega_1$	$i_1$
						:	:
						$\omega_{127}$	$i_{127}$

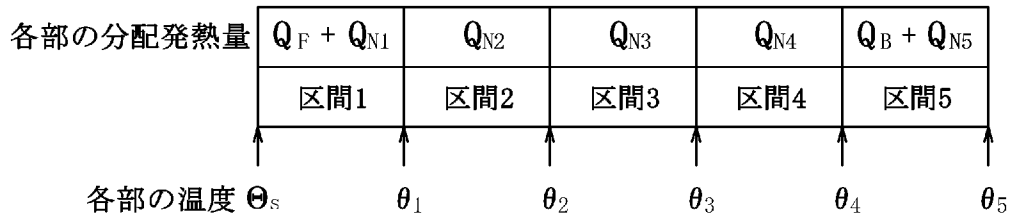
[図7]



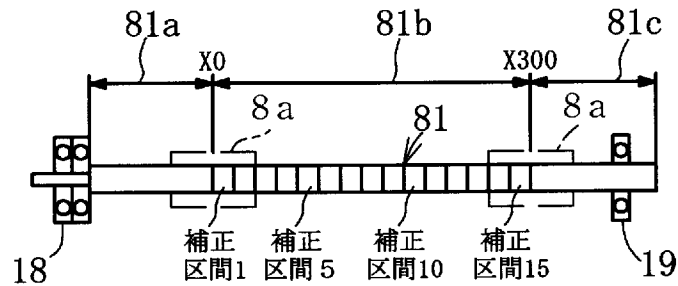
[図8]



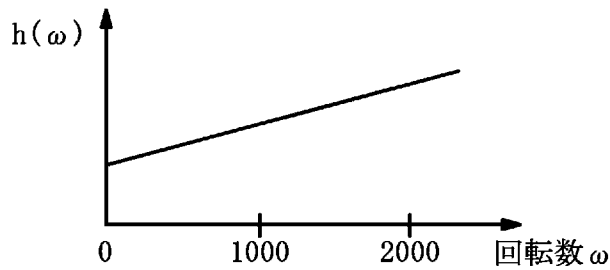
[図9]



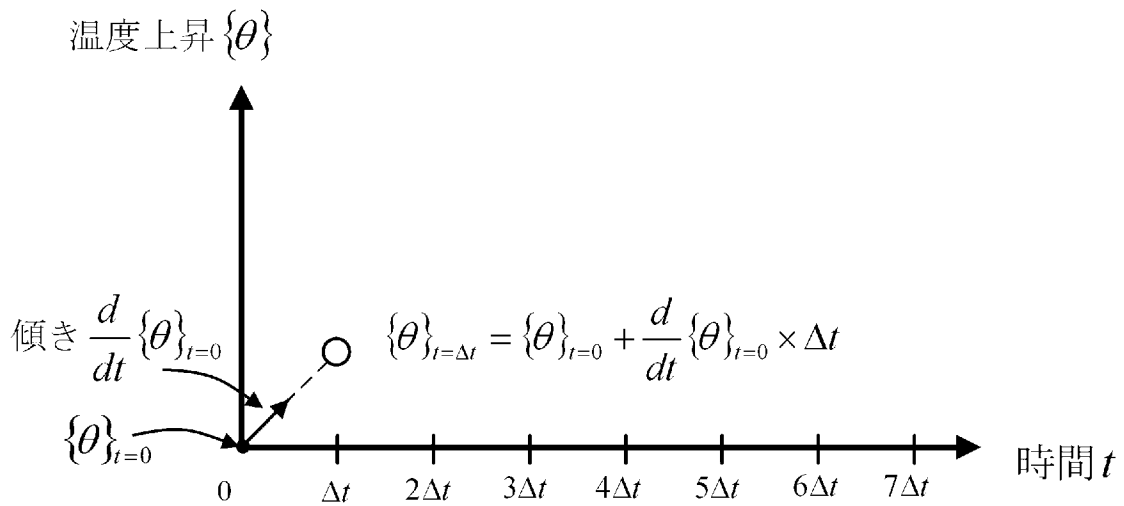
[図10]



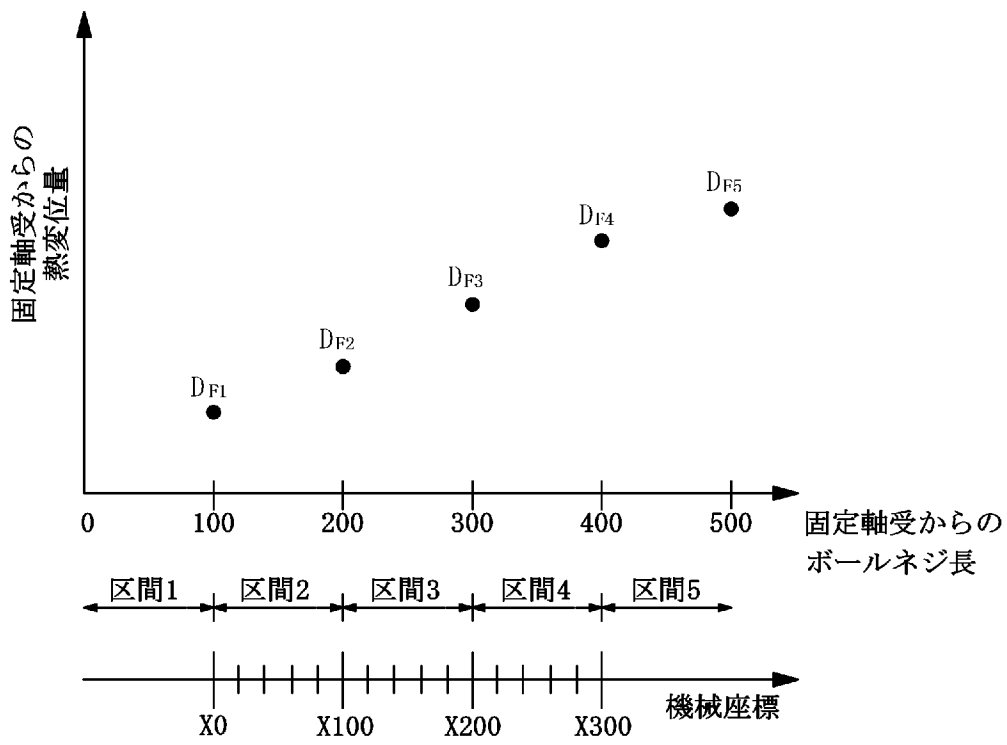
[図11]



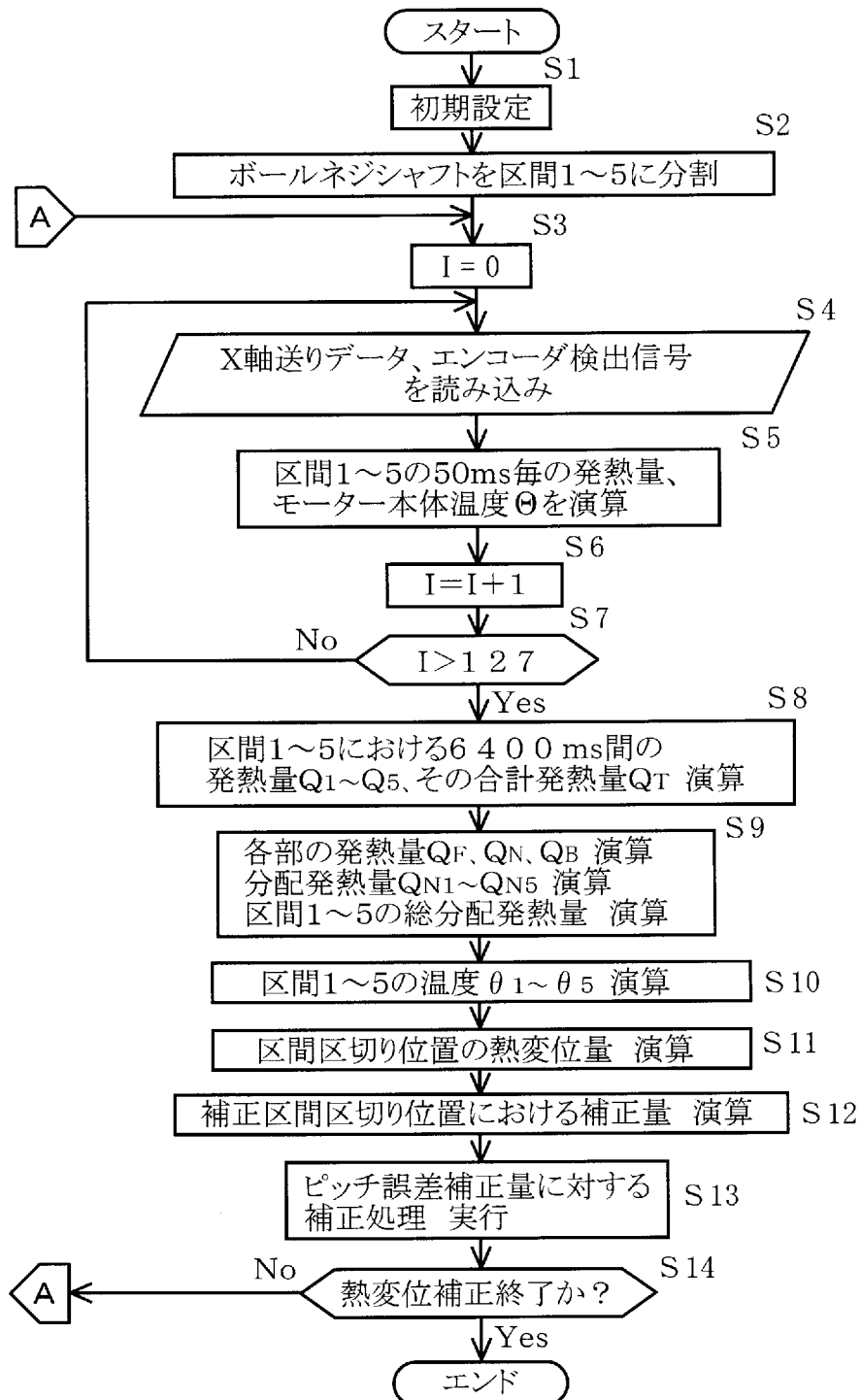
[図12]



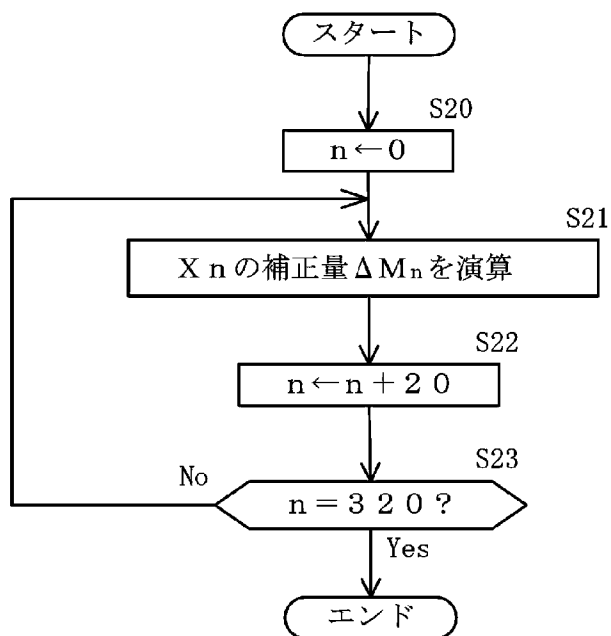
[図13]



[図14]



[図15]



[図16]

(a)

モータ回転数	$h(\omega)$
0	0.001
$0 < \omega \leq 500$	0.002
$500 < \omega \leq 1000$	0.003
$1000 < \omega \leq 1500$	0.004
$1500 < \omega \leq 2000$	0.005

(b)

モータ回転数	$h(\omega)$
0	0.001
$0 < \omega \leq 250$	0.0015
$250 < \omega \leq 1000$	0.003
$1000 < \omega \leq 1300$	0.004
$1300 < \omega \leq 2000$	0.005

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/064332

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER B23Q15/18(2006.01) i, G05B19/404(2006.01) i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B23Q15/18, G05B19/404		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2010 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2010 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2010		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2002-018677 A (Fanuc Ltd.), 22 January 2002 (22.01.2002), paragraphs [0023] to [0033] & US 2002-0004688 A1 & EP 1170647 A2 & DE 60116192 T	1-2, 4-5
Y	JP 10-138091 A (Fanuc Ltd.), 26 May 1998 (26.05.1998), paragraph [0031]; fig. 9 & US 6456896 B1 & EP 0878267 A1 & WO 1998/021006 A1 & DE 69736221 D	1-2, 4-5
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input 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 27 October, 2010 (27.10.10)		Date of mailing of the international search report 09 November, 2010 (09.11.10)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/064332

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2004-042260 A (Mori Seiki Hitech Co., Ltd.), 12 February 2004 (12.02.2004), entire text; all drawings & US 5623857 A1 & EP 0687522 A1 & DE 69525683 T & CN 1126130 A	1-6
E,A	JP 2009-214283 A (Brother Industries, Ltd.), 24 September 2009 (24.09.2009), entire text; all drawings & DE 102009013043 A & CN 101530974 A & KR 10-2009-0098709 A	1-6



A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. B23Q15/18(2006.01)i, G05B19/404(2006.01)i		
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)) Int.Cl. B23Q15/18, G05B19/404		
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 1971-2010年 日本国実用新案登録公報 1996-2010年 日本国登録実用新案公報 1994-2010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	JP 2002-018677 A (ファナック株式会社) 2002.01.22, 【0023】段落～【0033】段落 & US 2002-0004688 A1 & EP 1170647 A2 & DE 60116192 T	1-2、4-5
Y	JP 10-138091 A (ファナック株式会社) 1998.05.26, 【0031】段落, 【図9】 & US 6456896 B1 & EP 0878267 A1 & WO 1998/021006 A1 & DE 69736221 D	1-2、4-5
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input 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矛盾するものではなく、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 27. 10. 2010	国際調査報告の発送日 09. 11. 2010	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 金丸 治之 電話番号 03-3581-1101 内線 3324	3U 9535

C (続き) . 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 2004-042260 A (株式会社森精機ハイテック) 2004. 02. 12, 全文, 全図 & US 5623857 A1 & EP 0687522 A1 & DE 69525683 T & CN 1126130 A	1 - 6
E A	JP 2009-214283 A (ブラザー工業株式会社) 2009. 09. 24, 全文, 全図 DE 102009013043 A & CN 101530974 A & KR 10-2009-0098709 A	1 - 6