

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-209399

(P2019-209399A)

(43) 公開日 令和1年12月12日(2019.12.12)

| (51) Int.Cl. | | | F I | | | テーマコード (参考) | |
|----------------|--------------|------------------|----------------------|-------|---|-----------------|--|
| B 2 3 B | 19/02 | (2006.01) | B 2 3 B | 19/02 | B | 3 C 0 2 9 | |
| F 1 6 C | 19/06 | (2006.01) | F 1 6 C | 19/06 | | 3 C 0 4 5 | |
| F 1 6 C | 41/00 | (2006.01) | F 1 6 C | 41/00 | | 3 J 1 0 2 | |
| F 1 6 C | 35/12 | (2006.01) | F 1 6 C | 35/12 | | 3 J 2 1 7 | |
| F 1 6 C | 32/04 | (2006.01) | F 1 6 C | 32/04 | A | 3 J 7 0 1 | |
| | | | 審査請求 未請求 請求項の数 7 O L | | | (全 15 頁) 最終頁に続く | |

(21) 出願番号 特願2018-105077 (P2018-105077)
 (22) 出願日 平成30年5月31日 (2018.5.31)

(71) 出願人 504258527
 国立大学法人 鹿児島大学
 鹿児島県鹿児島市郡元一丁目21番24号
 (74) 代理人 100095407
 弁理士 木村 満
 (74) 代理人 100162259
 弁理士 末富 孝典
 (74) 代理人 100133592
 弁理士 山口 浩一
 (74) 代理人 100168114
 弁理士 山中 生太
 (72) 発明者 近藤 英二
 鹿児島県鹿児島市郡元一丁目21番24号
 国立大学法人 鹿児島大学内
 Fターム(参考) 3C029 EE00

最終頁に続く

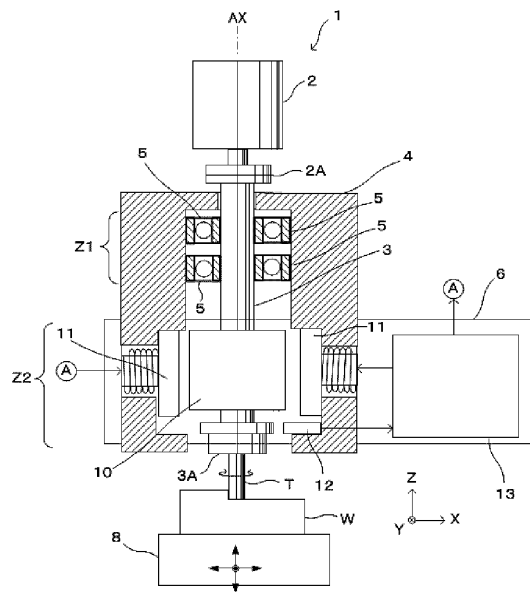
(54) 【発明の名称】 工作機械の主軸システム

(57) 【要約】

【課題】加工精度及び加工能率を向上することができる工作機械の主軸システムを提供する。

【解決手段】主軸システム1は、スピンドルモータ2と、スピンドル3と、スピンドル管体4と、転がり軸受5と、能動制御磁気軸受6と、を備える。スピンドル3は、回転軸AXの方向の+Z端でスピンドルモータ2と連結され、回転軸AXの方向の-Z端で回転工具Tが装着される。スピンドル管体4は、スピンドル3を収容する。転がり軸受5は、回転工具Tよりもスピンドルモータ2に近い第1の位置Z1で、スピンドル管体4とスピンドル3との間に挿入され、スピンドル3をラジアル方向に支持する。能動制御磁気軸受6は、スピンドルモータ2よりも回転工具Tに近い第2の位置Z2で、スピンドル管体4とスピンドル3との間に挿入され、スピンドル3のラジアル方向の変位を制御可能である。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

回転軸の方向の一端で回転工具が装着されるスピンドルと、
前記スピンドルを収容するスピンドル筐体と、
第 1 の位置で、前記スピンドル筐体と前記スピンドルとの間に挿入され、前記スピンドルをラジアル方向に支持する転がり軸受と、
前記第 1 の位置よりも前記回転工具に近い第 2 の位置で、前記スピンドル筐体と前記スピンドルとの間に挿入され、前記スピンドルの前記第 2 の位置でのラジアル方向の変位を制御可能な能動制御磁気軸受と、
を備える、工作機械の主軸システム。

10

【請求項 2】

前記能動制御磁気軸受は、
前記スピンドルの前記第 2 の位置の端部に固定された強磁性体と、
前記強磁性体に対して、前記スピンドルのラジアル方向に配置され、前記強磁性体を前記スピンドルのラジアル方向に吸引する電磁コイルと、
前記電磁コイルに流す電流を制御する制御部と、
を備える、
請求項 1 に記載の工作機械の主軸システム。

【請求項 3】

前記能動制御磁気軸受は、
前記スピンドルのラジアル方向の変位を検出する変位センサを備え、
前記制御部は、
前記変位センサで検出された変位に基づいて、フィードバック制御を行い、前記電磁コイルに電流を流す電流を制御する、
請求項 2 に記載の工作機械の主軸システム。

20

【請求項 4】

前記制御部は、
前記変位センサで検出された変位及びフィードバック制御の制御情報の少なくとも 1 つを記録又はモニタリング可能である、
請求項 3 に記載の工作機械の主軸システム。

30

【請求項 5】

前記制御部は、
比例要素及び積分要素の少なくとも一方を含むフィードバック制御を行う、
請求項 3 又は 4 に記載の工作機械の主軸システム。

【請求項 6】

前記制御部は、
前記フィードバック制御により生成された電流指令をバイアス電流値で補正し、
前記バイアス電流値で補正された電流指令に従って、前記電磁コイルに電流を流す、
請求項 5 に記載の工作機械の主軸システム。

【請求項 7】

前記スピンドルは、その他端に接続されたモータ又は前記第 1 の位置と前記第 2 の位置に挿入されたビルトインモータにより回転駆動される、
請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の工作機械の主軸システム。

40

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、工作機械の主軸システムに関する。

【背景技術】**【0002】**

マシニングセンタなどの回転工具用の工作機械に対する加工精度、加工能率の向上に対

50

する要求が一段と高まっている（例えば、特許文献1参照）。その上、工作機械には、複雑な形状の加工品を加工できるようにすることが求められるようになってきている。加工品を複雑な形状に加工するには、長くて小径な回転工具の使用が不可欠である。さらには、安定した加工を行うため、工作機械に対して加工状態を監視する機能を有することが求められている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2003-89026号公報

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

回転工具を用いた切削加工における加工精度、加工能率を低下させる主な要因は、びびり振動の発生と切削抵抗によるたわみである。回転工具に小径で長いものを用いた場合には、回転工具の特性、すなわち剛性及び減衰がどのようなものであっても、びびり振動及びたわみの影響がさらに大きくなるのは明らかである。

【0005】

回転工具の先端での剛性と減衰に影響を与えるのが、回転工具を保持するスピンドルを回転可能に支持する軸受である。スピンドルを支持する軸受は、スピンドルモータ側に1つ、回転工具側に1つ必要となり、少なくとも2つの軸受が必要となる。

20

【0006】

軸受として一般的なものに転がり軸受がある。スピンドルを受動的に接触支持する軸受である転がり軸受を用いた場合には、スピンドルの剛性を高めスピンドルを安定して回転させることができる。しかしながら、スピンドルを支持する軸受を2つとも転がり軸受とした場合には、長くて小径な回転工具に発生するびびり振動やたわみを低減するには限界がある。

【0007】

一方、非接触な方法で、能動的にスピンドルを軸支する軸受として、能動制御磁気軸受がある。スピンドルを支持する軸受として磁気軸受を使った場合には、回転工具の運動制御が可能となるため、長くて小径な回転工具のびびり振動の低減、回転工具のたわみの制御及び状態監視機能を期待することができる。しかしながら、スピンドルを支持する軸受を2つとも能動制御磁気軸受とした場合には、制御系が複雑となって、切削抵抗などの外乱に対する安定性が低下するおそれがある。また、能動制御磁気軸受は、高価であるという不都合もある。

30

【0008】

本発明は、上記実情に鑑みてなされたものであり、加工精度及び加工能率を向上することができる工作機械の主軸システムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的を達成するため、本発明に係る工作機械の主軸システムは、
 回転軸の方向の一端で回転工具が装着されるスピンドルと、
 前記スピンドルを収容するスピンドル筐体と、
 第1の位置で、前記スピンドル筐体と前記スピンドルとの間に挿入され、前記スピンドルをラジアル方向に支持する転がり軸受と、
 前記第1の位置よりも前記回転工具に近い第2の位置で、前記スピンドル筐体と前記スピンドルとの間に挿入され、前記スピンドルの前記第2の位置でのラジアル方向の変位を制御可能な能動制御磁気軸受と、
 を備える。

40

【0010】

この場合、前記能動制御磁気軸受は、

50

前記スピンドルの前記第 2 の位置の端部に固定された強磁性体と、
前記強磁性体に対して、前記スピンドルのラジアル方向に配置され、前記強磁性体を前記スピンドルのラジアル方向に吸引する電磁コイルと、
前記電磁コイルに流す電流を制御する制御部と、
を備える、
こととしてもよい。

【0011】

また、前記能動制御磁気軸受は、
前記スピンドルのラジアル方向の変位を検出する変位センサを備え、
前記制御部は、
前記変位センサで検出された変位に基づいて、フィードバック制御を行い、前記電磁コイルに電流を流す電流を制御する、
こととしてもよい。

10

【0012】

前記制御部は、
前記変位センサで検出された変位及びフィードバック制御の制御情報の少なくとも 1 つを記録又はモニタリング可能である、
こととしてもよい。

【0013】

前記制御部は、
比例要素及び積分要素の少なくとも一方を含むフィードバック制御を行う、
こととしてもよい。

20

【0014】

前記制御部は、
前記フィードバック制御により生成された電流指令をバイアス電流値で補正し、
前記バイアス電流値で補正された電流指令に従って、前記電磁コイルに電流を流す、
こととしてもよい。

【0015】

前記スピンドルは、その他端に接続されたモータ又は前記第 1 の位置と前記第 2 の位置に挿入されたビルトインモータにより回転駆動される、
こととしてもよい。

30

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、スピンドルの軸受として、回転工具に近い方は磁気軸受が用いられ、遠い方は転がり軸受が用いられる。これにより、転がり軸受によりスピンドルの安定した回転を確保しつつ、能動制御磁気軸受により、電磁力を用いた外乱に強い制御系を採用することにより、回転工具のびびり振動の低減、回転工具のたわみの制御をすることができ、さらには加工状態を監視することができる。この結果、加工精度及び加工能率を向上することができる。

【図面の簡単な説明】

40

【0017】

【図 1】本発明の実施の形態に係る工作機械の主軸システムの構成を示す模式図である。

【図 2】能動制御磁気軸受におけるステータの構成を示す上面図である。

【図 3】打撃試験において制御磁気軸受のロータを打撃した場合のコンプライアンスの一例を示す図である。

【図 4】本発明の実施の形態に係る工作機械の主軸システムにおける自由振動のパラメータの一例を示す図である。

【図 5】スピンドルの能動制御磁気軸受の位置でのばね特性の一例を示す図である。

【図 6】能動制御磁気軸受の電磁コイルのステップ応答の一例を示す図である。

【図 7】電磁コイル電流とスピンドルのたわみとの関係を示す図である。

50

【図 8】能動制御磁気軸受の制御部の内部構成を示すブロック図である。

【図 9】能動制御磁気軸受のコントローラにおけるフィードバック制御系の構成を示す制御ブロック図である。

【図 10】(A)は、PID制御及びPI制御の制御パラメータの一例を示す図である。(B)は、PID制御のステップ応答の一例を示す図である。(C)は、PI制御のステップ応答の一例を示す図である。

【図 11】(A)は、スピンドルの変位が振動する様子を示すグラフである。(B)は、スピンドルの変位に対応する磁力の変化を示すグラフである。

【図 12】工作機械の主軸システムの構成の変形例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

10

【0018】

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。全図において、同一又は相当する構成要素には、同一の符号が付されている。本実施の形態に係る工作機械の主軸システムは、回転工具を用いて切削加工を行うマシニングセンタに適用される。この主軸システムは、回転工具を回転させるスピンドルに発生するびびり振動の低減又はたわみの制御及び加工状態の監視を実現すべく、回転工具を回転させるスピンドルを支持する軸受を、回転工具から遠い方では転がり軸受を採用し、近い方では能動制御磁気軸受を採用する点に特徴を有する。

【0019】

図 1 に示すように、主軸システム 1 は、主軸モータとしてのスピンドルモータ 2 と、回転体としてのスピンドル 3 と、回転軸筐体としてのスピンドル筐体 4 と、転がり軸受 5 と、能動制御磁気軸受 6 と、を備える。

20

【0020】

スピンドルモータ 2 は、不図示のマシニングセンタの筐体に収容されている。スピンドルモータ 2 の固定子は、マシニングセンタの筐体に固定されている。スピンドルモータ 2 の回転子は、連結部 2 A を介してスピンドル 3 の回転軸 A X の + Z 端に連結されている。スピンドルモータ 2 の回転子は、数千回転 [rpm] から、数万回転 [rpm] での回転が可能である。

【0021】

スピンドル 3 は、回転軸 A X の方向に延びる円柱状の部材であり、例えば金属製（例えば炭素鋼）である。スピンドル 3 は、スピンドルモータ 2 の回転、すなわち回転子の回転に従って、回転軸 A X 周りに回転する。

30

【0022】

スピンドル 3 の回転軸 A X の方向の - Z 側端には、チャック 3 A が取り付けられている。チャック 3 A には回転工具 T が取り付けられる。すなわち、スピンドル 3 の回転軸 A X の - Z 側端には回転工具 T が装着される。回転工具 T には、例えばエンドミルがある。スピンドルモータ 2 の回転により、スピンドル 3 及び回転工具 T が回転し、X、Y、Z 軸方向に可動な加工テーブル 8 に固定されたワーク W の切削加工が行われる。

【0023】

スピンドル筐体 4 は、マシニングセンタの筐体の一部である。スピンドル筐体 4 は、円筒状の筐体であり、その内部にスピンドル 3 を回転軸 A X 周りに回転可能に収容する。図 1 では、スピンドル筐体 4 は、一部が破断して、その断面が図示されている。

40

【0024】

転がり軸受 5 は、転動体（接触玉）を 2 つの部品の間置くことで荷重をラジアル方向に支持する軸受である。転がり軸受 5 は、回転工具 T よりもスピンドルモータ 2 に近い第 1 の位置 Z 1 で、スピンドル筐体 4 とスピンドル 3 との間に挿入されている。本実施の形態では、転がり軸受 5 が 2 つ取り付けられている。

【0025】

能動制御磁気軸受 6 は、回転体を磁気浮上によって能動的に支持する軸受である。能動制御磁気軸受 6 は、第 1 の位置 Z 1 よりも回転工具 T に近い第 2 の位置 Z 2 で、スピンドル

50

ル筐体 4 とスピンドル 3 との間に挿入されている。能動制御磁気軸受 6 は、スピンドル 3 の第 2 の位置 Z 2 でのラジアル方向の変位を制御可能である。能動制御磁気軸受 6 は、磁気浮上による非接触支持を行うため、摩耗が生じない。そのため、潤滑油が不要であり、軸受の寿命は半永久的である。

【 0 0 2 6 】

能動制御磁気軸受 6 は、強磁性体としてのロータ 1 0 と、電磁コイルを備えるステータ 1 1 と、変位センサ 1 2 と、制御部 1 3 と、を備える。

【 0 0 2 7 】

ロータ 1 0 は、スピンドル 3 の第 2 の位置 Z 2 に固定される強磁性体から成る部材である。ロータ 1 0 は、図 2 に示すように、スピンドル 3 と同心に取り付けられた円環状の部材である。強磁性とは、隣り合うスピニングが同一の方向を向いて整列し、全体として大きな磁気モーメントを持つ物質の磁性をいう。ロータ 1 0 としては、例えば、ケイ素鋼板が用いられる。ケイ素鋼板とは、鉄に少量のケイ素を加えた合金であり、透磁率が比較的高く、安価であることから変圧器やモータの鉄心用の磁性材料として最も多く用いられている。

10

【 0 0 2 8 】

ステータ 1 1 は、図 2 に示すように、スピンドル 3 及びロータ 1 0 と同心に配置された円環状の部材である。ステータ 1 1 とロータ 1 0 との間には、空隙が設けられている。ステータ 1 1 は、全体で 8 つの電磁石ユニット 2 0 を備える。8 つの電磁石ユニット 2 0 は、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 を中心とする円周上に均等に配列されている。ここで、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 の中心を X Y Z 直交座標系の原点とする。この場合、Z 軸とスピンドル 3 の回転軸 A X とが一致する。

20

【 0 0 2 9 】

電磁石ユニット 2 0 は、鉄心 2 1 と、コイル 2 2 とを備える。鉄心 2 1 は、例えばケイ素鋼板である。コイル 2 2 に電流が流れることにより、電磁石ユニット 2 0 には、ロータ 1 0 に対する磁界による吸引力が発生する。なお、8 つの電磁石ユニット 2 0 では、コイル 2 2 に電流が流れたときのスピンドル 3 の極性の向きは、原点 O を中心とする半径方向に関して同じである。

【 0 0 3 0 】

電磁石ユニット 2 0 は、2 つで一組のユニットを構成する。ステータ 1 1 は、このようなユニットとして、駆動部 1 1 x p、1 1 x n、1 1 y p、1 1 y n を備える。駆動部 1 1 x p は、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 の + X 側に配置されており、駆動部 1 1 x n は、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 の - X 側に配置されている。さらに、駆動部 1 1 y p は、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 の + Y 側に配置されており、駆動部 1 1 y n は、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 の - Y 側に配置されている。

30

【 0 0 3 1 】

駆動部 1 1 x p を構成する一対の電磁石ユニット 2 0 のコイル 2 2 に電流を流すと、それらが電磁石となり、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 を + X 方向に磁力 f_{EM} (図 8 参照) で吸引する。一方、駆動部 1 1 x n を構成する一対の電磁石ユニット 2 0 のコイル 2 2 に電流を流すと、それらが電磁石となり、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 を - X 方向に磁力 f_{EM} で吸引する。駆動部 1 1 x p、1 1 x n のいずれか一方がスピンドル 3 及びロータ 1 0 を吸引することにより、スピンドル 3 及びロータ 1 0 の X 位置を制御する。

40

【 0 0 3 2 】

また、駆動部 1 1 y p を構成する一対の電磁石ユニット 2 0 のコイル 2 2 に電流を流すと、それらが電磁石となり、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 を + Y 方向に磁力 f_{EM} で吸引する。一方、駆動部 1 1 y n を構成する一対の電磁石ユニット 2 0 のコイル 2 2 に電流を流すと、それらが電磁石となり、ロータ 1 0 及びスピンドル 3 を - Y 方向に磁力 f_{EM} で吸引する。駆動部 1 1 y p、1 1 y n のいずれか一方は、スピンドル 3 及びロータ 1 0 を吸引することにより、スピンドル 3 及びロータ 1 0 の Y 位置を制御する。

【 0 0 3 3 】

50

変位センサ 12 は、スピンドル 3 及びロータ 10 のラジアル方向の変位、具体的には X 軸方向の変位 X、Y 軸方向の変位 Y を検出する。変位センサ 12 は、静電容量センサ又は渦電流センサなどが用いられる。検出された変位 X、Y は、制御部 13 のフィードバック制御の観測量として用いられる。

【0034】

上述のように、ステータ 11 は、ロータ 10 の位置を、X 軸方向、Y 軸方向に制御する。

【0035】

このように、本実施の形態に係る主軸システム 1 は、スピンドル 3 が、回転工具 T から遠い方は転がり軸受 5、近い方は能動制御磁気軸受 6 で支えられたいわゆるハイブリッド主軸ともいべきものである。図 3 には、能動制御磁気軸受 6 のロータ 10 を打撃する打撃試験を行った場合のコンプライアンス（変位 / 力）が示されている。図 3 に示すように、ロータ 10 のコンプライアンスでは、2ヶ所にピークが見られる。振動数が低い方のピークはロータ 10 の固有振動数に対応し、振動数が高い方のピークは回転工具 T の先端の固有振動数に対応している。したがって、回転工具 T 及びスピンドル 3 は、2 自由度の振動系で近似することができる。

10

【0036】

図 4 には、主軸システム 1 における自由振動のパラメータの一例が示されている。図 4 に示すように、スピンドル 3（炭素鋼）の固有振動数 ω_1 は、590 Hz であり、回転工具 T（エンドミル）の固有振動数 ω_2 は、625 Hz である。また、スピンドル 3（炭素鋼）の減衰係数 γ_1 は、0.015 であり、回転工具 T（エンドミル）の減衰係数 γ_2 は、0.007 である。

20

【0037】

また、図 5 には、スピンドル 3 のばね特性が示されている。ロータ 10 に力 F を加えれば、スピンドル 3 は X 軸方向及び Y 軸方向にたわむ。力 F とたわみ δ の間には、図 5 に示すような線形関係（ $F = 3.503 \delta + 1.501$ ）がある。したがって、能動制御磁気軸受 6 のステータ 11 によりロータ 10 に対して X 軸方向及び Y 軸方向に力 F を加えることにより、スピンドル 3 の X、Y 位置を制御することができる。

【0038】

図 6 には、能動制御磁気軸受 6 の電磁石ユニット 20 のコイル 22 の応答特性の一例が示されている。図 6 に示すように、ステータ 11 の電磁石ユニット 20 のコイル 22 にステップ状の電流を流したときにコイルに流れるコイル電流の応答は、コイル 22 のインダクタンスのために実測値、理論値ともに一次遅れとなっている。その時定数は 0.5 秒程度であり、能動制御磁気軸受 6 は、スピンドル 3 の X 軸方向及び Y 軸方向の制御について、十分な応答性を有している。

30

【0039】

ただし、図 7 に示すように、電磁石ユニット 20 のコイル 22 に流れるコイル電流と、スピンドル 3 の撓みとの関係（バイアスなし）は、2 次曲線となっており、非線形（without bias）となっている。そこで、能動制御磁気軸受 6 では、制御部 13 が、コイル電流値 I_r をバイアス電流値 I_B で補正することにより、コイル 22 に流れるコイル電流と、スピンドル 3 の撓みとの関係を線形（with bias）とする必要がある。

40

【0040】

制御部 13 は、ステータ 11 に流す電流を制御する。制御部 13 は、変位センサ 12 で検出された変位 X、Y に基づいて、フィードバック制御を行い、電流指令 I_r を生成する。制御部 13 は、生成した電流指令に従った電流を、ステータ 11 の電磁石ユニット 20 のコイル 22 に流す。これにより、ステータ 11 がロータ 10 を磁力 f_{EM} で吸引し、スピンドル 3 及びロータ 10 のラジアル方向の変位 X、Y をキャンセルする。

【0041】

制御部 13 の詳細な構成について説明する。図 8 には、制御部 13 における、スピンドル 3 及びロータ 10 の X 位置を制御する制御系の構成が示されている。図 8 に示すように

50

、制御部 13 は、コントローラ 30 を中心に構成されている。制御部 13 は、コントローラ 30 と、ローパスフィルタ 31 と、電圧アンプ 32 と、スイッチ回路 33 と、バイアス付与手段 34 p、34 n と、加算部 35 p、35 n と、電流アンプ 36 p、36 n と、を備える。

【0042】

変位センサ 12 は、ロータ 10 の変位 X を検出し、その変位 X に関する電気信号を出力する。ロータ 10 の変位 X が 0 であるときの変位センサ 12 内のギャップは X_0 である。変位センサ 12 では、ギャップにおける X_0 からの変化が変位 X として検出され、その変位 X に対応する電気信号が出力される。ローパスフィルタ 31 は、変位センサ 12 から出力された電気信号を入力し、電気信号に含まれるカットオフ周波数以下の周波数成分を除去する。

10

【0043】

電圧アンプ 32 は、ローパスフィルタ 31 で高周波成分が除去された電圧信号を線形増幅して、出力する。

【0044】

コントローラ 30 は、電圧アンプ 32 で線形増幅された変位 X に対応する電圧信号を入力する。コントローラ 30 は、入力された電圧信号に基づいてフィードバック制御を行い、電流指令 I_r を出力する。

【0045】

スイッチ回路 33 は、コントローラ 30 から出力された電流指令 I_r の極性に基づいて、電流指令 I_r の出力先を切り換える。具体的には、電流指令 I_r が正である場合には、スイッチ回路 33 は、電流アンプ 36 p に電流指令 I_r を出力する。電流指令 I_r が正であるということは、変位センサ 12 で検出される x が負であり、スピンドル 3 を $+X$ 方向に変位させる必要があるためである。この一方、スイッチ回路 33 は、電流指令 I_r が負である場合には、電流アンプ 36 n に電流指令 I_r を出力する。電流指令 I_r が負であるということは、変位センサ 12 で検出される x が正であり、スピンドル 3 を $-X$ 方向に変位させる必要があるためである。

20

【0046】

バイアス付与手段 34 p、34 n から一定のバイアス電流値 I_B を出力する。加算部 35 p、35 n は、スイッチ回路 33 から出力された電流指令 I_r を、バイアス電流値 I_B で補正する。具体的には、電流指令 I_r が正である場合には、バイアス電流値 I_B は電流指令 I_r に加算され、電流指令 I_r が負である場合には、バイアス電流値 I_B は電流指令 I_r から減算される。図 7 に示すように、このバイアス電流値 I_B は、コイル電流とスピンドル 3 の変位 X 、 Y との線形性を向上するために用いられる。

30

【0047】

電流アンプ 36 p、36 n は、バイアス電流値 I_B が加算された電流指令 I_r' を線形増幅して出力する。出力された電流は、電磁石ユニット 20 のコイル 22 に流れる。電磁石ユニット 20 のコイル 22 に電流が流れると、ステータ 11 が、ロータ 10 を吸引してロータ 10 の X 位置を制御する。

【0048】

制御部 13 には、図 8 に示す X 位置の制御系に加え、同様の構成を有する Y 位置の制御系を備えている。制御部 13 は、 X 位置の制御系と、 Y 位置の制御系とをそれぞれ動作させて、スピンドル 3 の X 位置及び Y 位置の制御を行う。

40

【0049】

コントローラ 30 は、フィードバック制御として、PID (比例積分微分) 制御又は PI (比例積分) 制御を行う。図 9 には、制御部 13 において構築された制御ブロックが示されている。 X は、変位センサ 12 で検出された変位である。変位センサ 12 は、変位 X に対応する電気信号を出力する。その変換係数は H である。出力された電気信号は、ローパスフィルタ 31、電圧アンプ 32 を経て、コントローラ 30 に入力される。

【0050】

50

コントローラ 30 は、電圧アンプ 32 から出力された変位 X に対応する電気信号を入力し、その電気信号と目標値 I との偏差 e を算出する。コントローラ 30 は、PID 制御器 40 を備えている。算出された偏差 e は、PID 制御器 40 に入力される。

【0051】

PID 制御器 40 は、PID 制御を行って電流指令 I_r を生成して出力する。PID 制御器 40 は、比例要素による比例動作、積分要素による積分動作、微分要素による微分動作を行う。比例動作は、入力された変位 X に対応する信号の偏差に、予め設定された比例ゲイン K_p を乗算して、比例動作に基づく電流指令を生成する動作である。また、積分動作は、入力された変位 X に対応する信号の偏差の積分値に、積分ゲイン（積分時定数の逆数） K_I を乗算して、積分動作に基づく電流指令を算出する動作である。微分動作は、入力された変位 X に対応する信号の微分値に、微分ゲイン（微分時間） K_D を乗算して、微分動作に基づく電流指令を生成する動作である。PID 制御器 40 は、比例動作に基づく電流指令と、積分動作に基づく電流指令と、微分動作に基づく電流指令とを加算して、それらの加算値を電流指令 I_r として出力する。

10

【0052】

制御部 13 では、コントローラ 30 の PID 制御器 40 から出力された電流指令 I_r が、バイアス電流値 I_B で補正されて、電流アンプ 36p, 36n で線形増幅される。そして、制御部 13 は、電流アンプ 36p, 36n で電流に変換された電流指令 I_r' に対応するコイル電流を、駆動部 11xp 又は 11xn の電磁石ユニット 20 のコイル 22 に流す。そして、電磁石ユニット 20 で発生する磁力 f_{EM} により、ロータ 10 が吸引される。本実施の形態では、このようにして、変位 X が X_0 に維持される。

20

【0053】

また、図 3 のコンプライアンスに示す固有振動数 1240 Hz に対しては、制御部 13 に、ローパスフィルタ 31 を挿入することでフィードバック制御系の発振が抑制されている。そのカットオフ周波数は例えば 800 Hz である。

【0054】

Y 軸方向についても、図 9 に示すフィードバック制御系が構成されており、これにより、変位 Y が制御される。

【0055】

PID 制御器 40 の比例ゲイン K_p 、積分ゲイン K_I 、微分ゲイン K_D は、限界感度法により決定することができる。図 10 (A) には、PID 制御器 40 における比例ゲイン K_p 、積分ゲイン K_I 、微分ゲイン K_D の一例が示されている。

30

【0056】

図 10 (B) は、PID 制御器 40 において、変位 X を、ステップ状に変化させたときの工具変位のステップ応答である。図 10 (B) に示すように、PID 制御を行った場合のステップ応答の結果で、立ち上がり時間は約 4 ms で、オーバーシュートもほとんど見られなかった。すなわち、能動制御磁気軸受 6 において PID 制御を行うことにより、250 Hz 程度の応答性を期待することができる。

【0057】

本実施の形態では、コントローラ 30 において、PID 制御に代えて、PI 制御を行うことも可能である。図 10 (C) は、PI 制御を行った場合の工具変位のステップ応答の結果である。図 10 (A) には、PI 制御における比例ゲイン K_p 、積分ゲイン K_I の一例が示されている。図 10 (C) に示すように、PI 制御の場合には、立ち上がり時間は 9 ms となり、微分動作がないことにより応答性は低下し、立ち上がり時間は約 2 倍になった。

40

【0058】

なお、制御部 13 では、回転工具 T を用いた切削中の変位 X 、 Y 及び電流指令 I_r 、偏差 e を含むフィードバックの制御情報の少なくとも 1 つを記録又はモニタリングすることができる。これにより、制御部 13 は、マシニングセンタにおける回転工具 T による加工状態を監視することができる。

50

【 0 0 5 9 】

制御部 1 3 によれば、図 1 1 (A) 及び図 1 1 (B) に示すように、スピンドル 3 の変位 X の振動的な変動 (点線) に応じて、その変位 X を打ち消す磁力 f_{EM} を、スピンドル 3 に与える。これにより、太い実線に示すように、変位 X の変動を打ち消すことができる。これにより、回転工具 T の切削により発生するびびり振動の低減又は回転工具 T のたわみの制御を行うことができる。

【 0 0 6 0 】

以上詳細に説明したように、本実施の形態によれば、スピンドル 3 の軸受として、回転工具 T に近い方は能動制御磁気軸受 6 が用いられ、回転工具 T から遠い方は転がり軸受 5 が用いられる。これにより、転がり軸受 5 によりスピンドル 3 の安定した回転を確保しつつ、能動制御磁気軸受 6 の電磁力を用いた外乱に強い制御系を採用することにより、回転工具 T のびびり振動を低減し、回転工具 T のたわみを制御することができるうえ、加工状態を監視することができる。この結果、加工精度及び加工能率を向上することができる。

10

【 0 0 6 1 】

このように、回転工具 T のびびり振動を低減し、回転工具 T のたわみを制御することができるため、回転工具 T を長くて小径なものとし、複雑な形状の加工品の加工も可能となる。

【 0 0 6 2 】

また、能動制御磁気軸受 6 は、非接触にスピンドル 3 を支持するため、軸受の長寿命化を実現することができる。また、一方で、スピンドル 3 の上部では、転がり軸受 5 が採用されているので、主軸システム 1 の剛性の低減を抑制することができるうえ、主軸システム 1 を安価なものとする事ができる。

20

【 0 0 6 3 】

また、図 1 2 に示すように、スピンドルモータ 2 に代えて、ビルトインモータ 2 ' を備える主軸システム 1 ' を用いるようにしてもよい。ビルトインモータ 2 ' は、回転子 2 B と、固定子 2 C とを備える。回転子 2 B は、スピンドル 3 に同心に固定され、固定子 2 C は、マシニングセンサのスピンドル筐体 4 ' の内部空間に回転子 2 B に対向する位置に固定されている。固定子 2 C で発生する電磁力により、回転子 2 B が回転し、これに伴いスピンドル 3 が回転する。すなわち、スピンドル 3 は、ビルトインモータ 2 ' により回転駆動される。

30

【 0 0 6 4 】

スピンドル 3 の駆動源としてビルトインモータ 2 ' を用いる場合には、ビルトインモータ 2 ' は、転がり軸受 5 と、能動制御磁気軸受 6 との間に挿入される。このような構成を有する主軸システム 1 ' においても、転がり軸受 5 によりスピンドル 3 の安定した回転を確保しつつ、能動制御磁気軸受 6 の電磁力を用いた外乱に強い制御系を採用することにより、回転工具 T のびびり振動を低減し、回転工具 T のたわみを制御することができるうえ、加工状態を監視することができる。

【 0 0 6 5 】

なお、上記実施の形態では、能動制御磁気軸受 6 では、変位センサ 1 2 で検出される変位 X、Y に基づいてフィードバック制御を行った。しかしながら、本発明はこれには限られない。電磁石ユニット 2 0 のコイル 2 2 を流れる電流の変化に基づいて、スピンドル 3 の変位 X、Y を検出するようにしてもよい。

40

【 0 0 6 6 】

また、上記実施の形態では、限界感度法により P I D 制御の各種ゲイン等の制御パラメータを調整した。しかしながら、本発明はこれには限られない。例えば、ステップ応答法により、P I D 制御の各種ゲインを調整するようにしてもよい。

【 0 0 6 7 】

また、上記実施の形態では、能動制御磁気軸受 6 における制御方式として、P I D 制御又は P I 制御を用いた。しかしながら、本発明はこれには限られない。例えば、比例動作よりも積分動作を重視する I - P D 制御を行うようにしてもよい。他に、比例動作のみの

50

P制御や、積分動作を除くPD制御を行うようにしてもよい。すなわち、制御部13は、比例要素及び積分要素の少なくとも一方を含むフィードバック制御を行うようにすればよい。また、フィードバック制御にフィードフォワード制御を組み合わせるようにしてもよい。また、ファジイ理論に基づく非線形制御を採用するようにしてもよい。このように、本発明は、制御方式には限定されない。

【0068】

なお、上記実施の形態では、マシニングセンタのスピンドルに本発明を適用する場合について説明したが、本発明はこれには限られない。旋盤のスピンドルに本発明を適用することができる。また、回転工具Tを用いる他の工作機械（例えばフライス盤）に本発明を適用することができる。

10

【0069】

この発明は、この発明の広義の精神と範囲を逸脱することなく、様々な実施の形態及び変形が可能とされるものである。また、上述した実施の形態は、この発明を説明するためのものであり、この発明の範囲を限定するものではない。すなわち、この発明の範囲は、実施の形態ではなく、特許請求の範囲によって示される。そして、特許請求の範囲内及びそれと同等の発明の意義の範囲内で施される様々な変形が、この発明の範囲内とみなされる。

【産業上の利用可能性】

【0070】

本発明は、マシニングセンタ等の工作機械のスピンドルに適用することができる。特に、長くて小径な回転工具を用いた複雑な形状の加工品の切削加工に適用することができる。

20

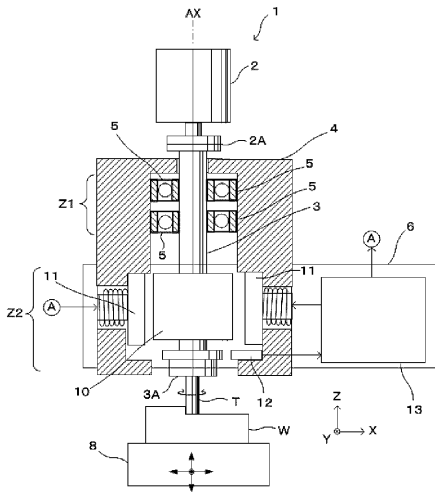
【符号の説明】

【0071】

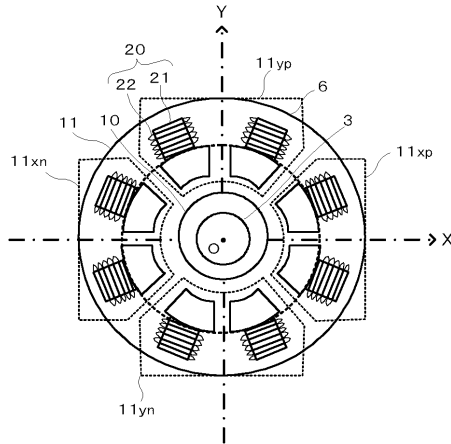
1, 1' 主軸システム、2 スピンドルモータ、2' ビルトインモータ、2A 連結部、2B 回転子、2C 固定子、3 スピンドル、3A チャック、4, 4' スピンドル筐体、5 転がり軸受、6 能動制御磁気軸受、8 加工テーブル、10 ロータ、11 ステータ、11xp, 11xn, 11yp, 11yn 駆動部、12 変位センサ、13 制御部、20 電磁石ユニット、21 鉄心、22 コイル、30 コントローラ、31 ローパスフィルタ、32 電圧アンプ、33 スイッチ回路、34p, 34n バイアス付与手段、35p, 35n 加算部、36p, 36n 電流アンプ、40 PID制御器、T 回転工具、W ワーク

30

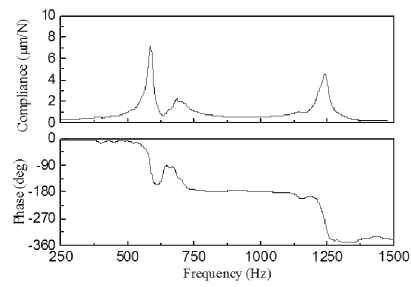
【 図 1 】



【 図 2 】



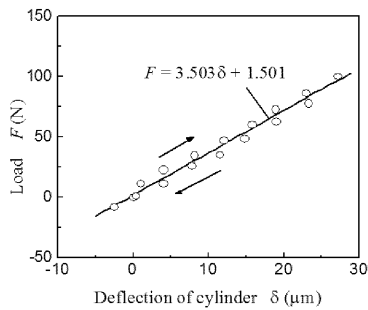
【 図 3 】



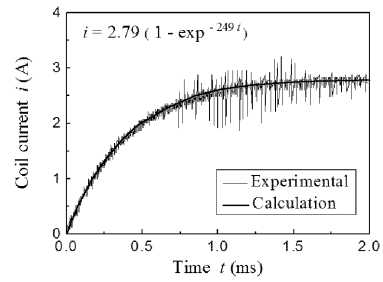
【 図 4 】

| | | |
|-----------------------------------|------------|---------|
| Natural frequency (Silicon steel) | Ω_1 | 590 Hz |
| Natural frequency (End mill) | Ω_2 | 625 Hz |
| Natural frequency | Ω_3 | 1240 Hz |
| Damping ratio (Silicon steel) | ζ_1 | 0.015 |
| Damping ratio (End mill) | ζ_2 | 0.007 |
| Damping ratio | ζ_3 | 0.007 |

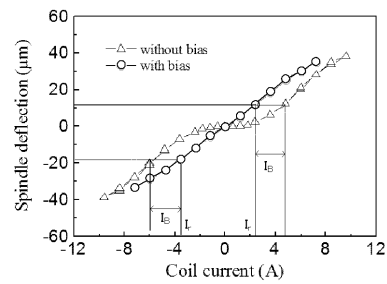
【 図 5 】



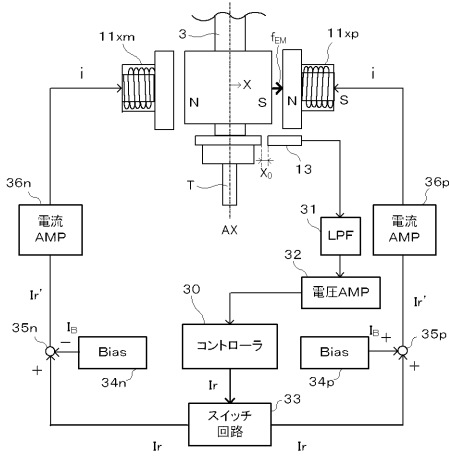
【 図 6 】



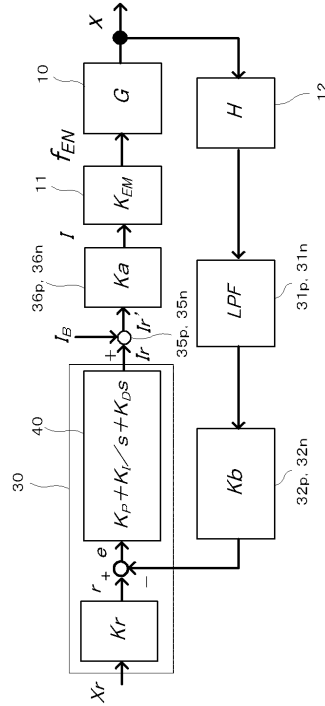
【 図 7 】



【図 8】



【図 9】

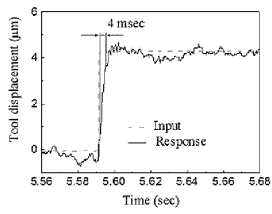


【図 10】

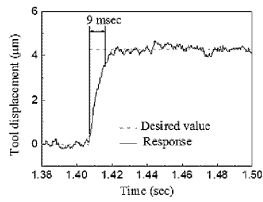
(A)

| Type of controller | K_p [V/m] | K_i [V/(m·sec)] | K_D [V·s/m] |
|--------------------|----------------|----------------------|------------------|
| PID | 2.79 | 190 | 0.0013 |
| PI | 2.09 | 114 | - |

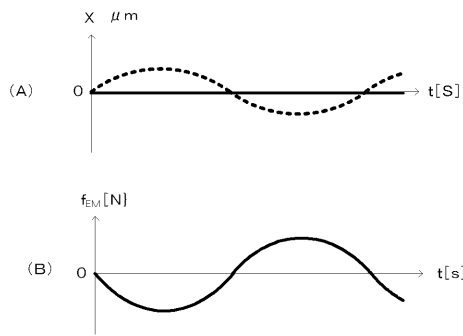
(B)



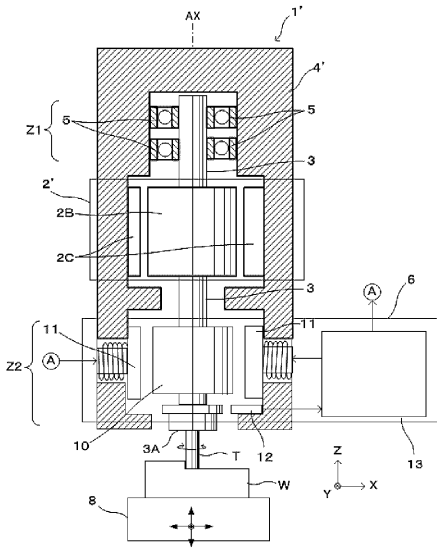
(C)



【図 11】



【 図 1 2 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)
B 2 3 Q 17/00 (2006.01) B 2 3 Q 17/00 A

F ターム(参考) 3C045 FD03 FD12 FD16 FD23
3J102 AA01 AA09 BA03 BA17 CA02 CA11 CA22 DA03 DA18 DB01
DB05 DB10 DB18 DB29 DB37 GA07
3J217 JA02 JA12 JA24 JB23 JB26 JB68 JB84
3J701 AA02 AA42 AA52 AA62 AA81 EA74 FA01 FA41 GA31