(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2007-307663
(P2007-307663A)
(43)公開日　平成19年11月29日(2007.11.29)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
B23Q 5/28	(2006.01)	B23Q	5/28	C	3C001
B23B 5/36	(2006.01)	B23B	5/36		3C029
B23Q 15/00	(2006.01)	B23Q	15/00	C	3C045
B23Q 15/18	(2006.01)	B23Q	15/18		3C048
B23Q 1/34	(2006.01)	B23Q	1/34	Z	

審査請求 未請求　請求項の数 8　ＯＬ　（全 23 頁）　最終頁に続く

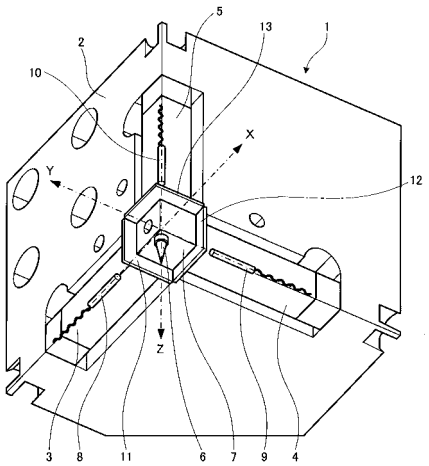
(21)出願番号　特願2006-139633 (P2006-139633)
(22)出願日　平成18年5月19日 (2006.5.19)

(71)出願人　000005821
松下電器産業株式会社
大阪府門真市大字門真１００６番地
(74)代理人　100113859
弁理士　板垣　孝夫
(74)代理人　100068087
弁理士　森本　義弘
(74)代理人　100096437
弁理士　笹原　敏司
(74)代理人　100100000
弁理士　原田　洋平
(72)発明者　高橋　正行
大阪府門真市大字門真１００６番地　松下電器産業株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】３軸工具ユニットおよび加工装置

(57)【要約】
【課題】工具を３次元的に高精度に動作させ、高速高精度に超精密加工を行うことができる３軸工具ユニットを提供する。
【解決手段】直交する３軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ）方向に動作するアクチュエータ３、４、５と、アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上の交点に設けられた工具ホルダ７と、アクチュエータ３、４、５の動作方向への変位量を測定するセンサ８、９、１０を備え、センサ８、９、１０を、それぞれのセンシング方向の延長線が一点に交わるように配置した構造とする。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
工具と、
前記工具が固定される工具ホルダと、
直交する３軸方向に動作して前記工具ホルダの位置を変位させる３つのアクチュエータと、
前記各アクチュエータの動作方向への変位量を示す信号を生成する３つのセンサと、
を備え、前記工具ホルダは、前記各アクチュエータの動作方向の軸線上の交点に設けられており、前記３つのセンサは、それぞれのセンシング方向の延長線が一点に交わるように配置されている
ことを特徴とする３軸工具ユニット。
【請求項２】
前記各センサは、前記各アクチュエータの動作方向の軸線上とは異なる位置に配置されていることを特徴とする請求項１記載の３軸工具ユニット。
【請求項３】
前記３つのセンサのうちの少なくとも１つのセンサのセンシング方向の延長線上に前記工具の刃先が位置することを特徴とする請求項１記載の３軸工具ユニット。
【請求項４】
前記３つのセンサのセンシング方向の延長線上の交点に前記工具の刃先が位置することを特徴とする請求項１記載の３軸工具ユニット。
【請求項５】
前記３つのアクチュエータのうちの少なくとも１つは圧電素子で構成されることを特徴とする請求項１記載の３軸工具ユニット。
【請求項６】
請求項１ないし５のいずれかに記載の３軸工具ユニットと、
被加工物に対して前記３軸工具ユニットを直交する３軸方向に相対移動させるリニアステージと、
前記被加工物に対して前記３軸工具ユニットを相対的に円運動させる回転ステージと、
前記リニアステージの３軸座標と前記回転ステージの角度座標に応じた前記３軸工具ユニットが備える３つのアクチュエータそれぞれの変位量の目標値を求めて、前記各アクチュエータへの指令信号を生成する目標値演算処理部と、
前記３軸工具ユニットが備える３つのセンサからの信号と前記各指令信号との偏差を基に前記各アクチュエータの動作を制御する信号を生成する３つの位置制御ループ回路と、
を備え、前記リニアステージにより前記３軸工具ユニットの前記被加工物に対する相対位置を調整しながら、前記回転ステージにより前記３軸工具ユニットを前記被加工物に対して相対的に円運動させるとともに、前記各位置制御ループ回路により前記各アクチュエータを駆動して、前記３軸工具ユニットが備える工具の刃先を前記被加工物に接触させて加工する
ことを特徴とする加工装置。
【請求項７】
前記目標値演算処理部は、
現在の前記リニアステージの３軸座標に対応する加工範囲における前記各アクチュエータの動作周波数を演算する加工周波数演算部と、
前記加工周波数演算部により演算された動作周波数と前記各位置制御ループ回路の周波数特性とを基に、前記各アクチュエータの動作を制御する信号の前記各指令信号に対する位相遅れを演算する位相遅れ演算部と、
前記各位相遅れと前記回転ステージの回転速度を基に、前記各アクチュエータの前記各指令信号に対する動作遅れ分の前記回転ステージの回転角度である回転遅れ角度を演算する回転遅れ角度演算部と、
前記加工範囲の前記回転ステージの角度座標よりも前記各回転遅れ角度分だけ前に前記

各目標値の演算を開始する目標値演算部と、
を有することを特徴とした請求項６記載の加工装置。
【請求項８】
請求項６記載の加工装置であって、
前記各目標値を基に、前記３軸工具ユニットの３軸の弾性ひずみによる力を求め、その求めた弾性ひずみによる力を基に、前記３軸工具ユニットが備える工具ホルダの３軸まわりの回転角度を演算する回転角度演算部と、
前記３つのセンサのセンシング方向の延長線上の交点と前記工具の刃先との間の距離と前記３軸まわりの回転角度とを基に、前記工具の刃先の位置決め誤差を演算する位置決め誤差演算部と、をさらに具備し、
前記目標値演算処理部は、前記位置決め誤差を基に前記各目標値を補正する機能をさらに有する、
ことを特徴とした加工装置。

【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、工具を独立に３軸方向に微小動作させることのできる３軸工具ユニット、および３軸工具ユニットを搭載した加工装置に関する。
【背景技術】
【０００２】
従来の工具の高速位置決め機構としては、圧電素子、ボイスコイルモータ、電磁力により１軸方向にダイレクトに工具台を移動させるものがあった（例えば、非特許文献１参照。）。図１６に、その従来の高速位置決め機構の内部構造図を示す。
【０００３】
この従来の高速位置決め機構は、図１６に示すように、ケーシング１００に円筒形圧電素子１０１が装着され、可動部である工具ホルダ１０２がダイヤフラム１０３により支持され、工具ホルダ１０２の変位を容量型変位センサ１０４により直接測定する構造となっている。また、工具ホルダ１０２、容量型変位センサ１０４、ダイヤモンド工具１０５は中心線が一致するように配置されている。
【０００４】
図１７に、上記従来の高速位置決め機構において工具の位置制御を行う位置制御ループ回路のブロック図を示す。この従来の高速位置決め機構は、容量型変位センサ１０４により工具ホルダ１０２の変位をフィードバックし、指令値との偏差を積分器１１０とノッチフィルタ１１１で構成する補償回路により位相補償し、アンプ（ブロック１１２に含まれる）により電力増幅して、円筒形圧電素子１０１を位置制御している。
【０００５】
しかし、位置制御ループ回路を用いて円筒形圧電素子１０１を位置制御すると、円筒形電圧素子１０１を制御する信号の位相が指令値に対して遅れるため、指令値に対して工具の動きが十分追従できず、加工誤差を生じる。そこで、この加工誤差を補正する方法として、目標位置や検出位置を波形として捉え、波形の振幅、位相、オフセット、歪に分けて誤差を補正することにより、工具の検出位置を目標位置に一致させるものが従来より提案されている（例えば、特許文献１参照。）。図１８に、その従来の加工誤差補正方法を実現する制御装置を示す。
【０００６】
この制御装置の概略を説明すると、目標位置データ記憶部１４７に記憶された工具の目標位置に従って工具を移動させたときの位置をＸ軸位置検出器１２８により検出し、検出位置データ書込部１４３により検出位置データ記憶部１４６に記憶させる。前記目標位置と前記検出位置との振幅比、位相差及びオフセット差を第１振幅比検出部１５２、第１位相差検出部１５３、オフセット差検出部１５１により検出し、そのうち少なくとも振幅比

及び位相差を求め、指令位置データ振幅／位相／オフセット補正部１４８によって指令位置を前記振幅比に基づいて拡大／縮小する処理、前記位相差に基づいて位相シフトする処理及び指令位置のオフセットを前記オフセット差に基づいて変更する処理のうち少なくとも拡大／縮小処理及び位相シフト処理をして第１の補正指令位置を求めることにより、加工誤差を補正している。

【０００７】

以上のような従来の高速位置決め機構は、比較的単純な軸対称形状を対象としており、１軸動作であっても、加工形状が軸対称形状であれば小さな計算量で済み大きな支障は無かった。

【０００８】

しかしながら、近年、光学設計技術、加工技術の進展に伴い、非軸対称非球面形状が実用化できるようになった。非軸対称非球面形状の加工においても前記の１軸構成の高速位置決め機構を使用可能であるが、工具刃先が有限の大きさを有するので、刃先のどの位置で加工されるのかを事前に算出した上で制御する必要があった。非軸対称非球面形状加工時の刃先の干渉位置（接触位置）を計算するのは、収束計算を要し、算出時間、データ量も膨大となる。

【０００９】

そこで、非軸対称非球面形状の光学部品等の精密部品等を、旋盤加工に代表される軸対称加工法で高精度にかつ高速に加工するために、工具を独立に３軸方向に微小動作させることのできる３軸工具ユニット、および３軸工具ユニットを搭載した加工装置が提案されている。

【００１０】

従来の３軸工具ユニットは、３つのアクチュエータにより工具ホルダを直交する３軸方向へ変位させるとともに、各アクチュエータの変位量を３つのセンサにより測定する構造となっている。また、３軸工具ユニットを搭載した加工装置は、例えば直交する３軸方向に動作するリニアステージに３軸工具ユニットを載置し、回転ステージに被加工物を載置して、回転する被加工物の外周側から中心へ３軸工具ユニットを走査して、被加工物の被加工面を旋盤加工する構成となっている。

【００１１】

しかし、従来の３軸工具ユニットおよび加工装置では、３つのアクチュエータの動作により３軸に弾性ひずみが生じて工具ホルダが３軸まわりに回転運動するため、工具ホルダの動きが複雑になり、工具の刃先の位置決め誤差を補正するための演算にかかる時間が長くなるという問題があった。

【００１２】

また、実際にワーク（被加工物）を加工すると前述したように、指令値に対して工具の動きが十分追従できず加工誤差を生じるが、従来の加工誤差補正方法は、アクチュエータの動作波形を１度測定して、その後補正演算を行い、補正した目標値をメモリにストアした後、実際に加工を行うとき補正された指令値データをメモリから読み出してアクチュエータを動作させるため、加工と同じタイミングで指令値の補正を行うようなリアルタイム補正処理をできず、加工に時間がかかっていた。

【非特許文献１】「光学ガラスの微細切削における加工モードのインプロセス認識に関する研究」、精密工学会誌、６７巻、５号、２００１年、Ｐ８４４～８４９

【特許文献１】特開平５－１７３６１９号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【００１３】

本発明は、上記問題点に鑑み、３軸工具ユニットにおいて、各アクチュエータの変位量を測定する３つのセンサを、それぞれのセンシング方向の延長線が一点に交わるように配置することにより、工具の刃先の位置決め誤差を補正するための演算にかかる時間を短縮でき、工具を３次元的に高精度に動作させて高速に超精密加工を行うことのできる３軸工

具ユニットおよび加工装置を提供することを目的とする。

【００１４】

また、本発明は、上記問題点に鑑み、３軸工具ユニットを搭載した加工装置において、リニアステージの現在の３軸座標に対応する加工範囲におけるアクチュエータの動作周波数を演算し、その動作周波数を基に位置制御ループ回路での位相遅れを演算し、その位相遅れ分の回転ステージの回転角度を演算して、その回転角度分だけ前に目標値の演算を開始することにより、指令値（目標値）をリアルタイムで補正でき、工具を３次元的に高精度に動作させて高速に超精密加工を行うことのできる加工装置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】

【００１５】

本発明の請求項１記載の３軸工具ユニットは、工具と、前記工具が固定される工具ホルダと、直交する３軸方向に動作して前記工具ホルダの位置を変位させる３つのアクチュエータと、前記各アクチュエータの動作方向への変位量を示す信号を生成する３つのセンサと、を備え、前記工具ホルダは、前記各アクチュエータの動作方向の軸線上の交点に設けられており、前記３つのセンサは、それぞれのセンシング方向の延長線が一点に交わるように配置されていることを特徴とする。

【００１６】

また、本発明の請求項２記載の３軸工具ユニットは、請求項１記載の３軸工具ユニットであって、前記各センサが、前記各アクチュエータの動作方向の軸線上とは異なる位置に配置されていることを特徴とする。

【００１７】

また、本発明の請求項３記載の３軸工具ユニットは、請求項１記載の３軸工具ユニットであって、前記３つのセンサのうちの少なくとも１つのセンサのセンシング方向の延長線上に前記工具の刃先が位置することを特徴とする。

【００１８】

また、本発明の請求項４記載の３軸工具ユニットは、請求項１記載の３軸工具ユニットであって、前記３つのセンサのセンシング方向の延長線上の交点に前記工具の刃先が位置することを特徴とする。

【００１９】

また、本発明の請求項５記載の３軸工具ユニットは、請求項１記載の３軸工具ユニットであって、前記３つのアクチュエータのうちの少なくとも１つは圧電素子で構成されることを特徴とする。

【００２０】

また、本発明の請求項６記載の加工装置は、請求項１ないし５のいずれかに記載の３軸工具ユニットと、被加工物に対して前記３軸工具ユニットを直交する３軸方向に相対移動させるリニアステージと、前記被加工物に対して前記３軸工具ユニットを相対的に円運動させる回転ステージと、前記リニアステージの３軸座標と前記回転ステージの角度座標に応じた前記３軸工具ユニットが備える３つのアクチュエータそれぞれの変位量の目標値を求めて、前記各アクチュエータへの指令信号を生成する目標値演算処理部と、前記３軸工具ユニットが備える３つのセンサからの信号と前記各指令信号との偏差を基に前記各アクチュエータの動作を制御する信号を生成する３つの位置制御ループ回路と、を備え、前記リニアステージにより前記３軸工具ユニットの前記被加工物に対する相対位置を調整しながら、前記回転ステージにより前記３軸工具ユニットを前記被加工物に対して相対的に円運動させるとともに、前記各位置制御ループ回路により前記各アクチュエータを駆動して、前記３軸工具ユニットが備える工具の刃先を前記被加工物に接触させて加工することを特徴とする。

【００２１】

また、本発明の請求項７記載の加工装置は、請求項６記載の加工装置であって、前記目標値演算処理部は、現在の前記リニアステージの３軸座標に対応する加工範囲における前

記各アクチュエータの動作周波数を演算する加工周波数演算部と、前記加工周波数演算部により演算された動作周波数と前記各位置制御ループ回路の周波数特性とを基に、前記各アクチュエータの動作を制御する信号の前記各指令信号に対する位相遅れを演算する位相遅れ演算部と、前記各位相遅れと前記回転ステージの回転速度を基に、前記各アクチュエータの前記各指令信号に対する動作遅れ分の前記回転ステージの回転角度である回転遅れ角度を演算する回転遅れ角度演算部と、前記加工範囲の前記回転ステージの角度座標よりも前記各回転遅れ角度分だけ前に前記各目標値の演算を開始する目標値演算部と、を有することを特徴とする。

【００２２】

また、本発明の請求項８記載の加工装置は、請求項６記載の加工装置であって、前記各目標値を基に、前記３軸工具ユニットの３軸の弾性ひずみによる力を求め、その求めた弾性ひずみによる力を基に、前記３軸工具ユニットが備える工具ホルダの３軸まわりの回転角度を演算する回転角度演算部と、前記３つのセンサのセンシング方向の延長線上の交点と前記工具の刃先との間の距離と前記３軸まわりの回転角度とを基に、前記工具の刃先の位置決め誤差を演算する位置決め誤差演算部と、をさらに具備し、前記目標値演算処理部は、前記位置決め誤差を基に前記各目標値を補正する機能をさらに有する、ことを特徴とする。

【発明の効果】

【００２３】

本発明によれば、工具の刃先の位置決め誤差を補正するための演算にかかる時間を短縮できる。また、目標値に対して工具の動きが十分追従できないことから生じる加工誤差や３軸工具ユニットの構成および動作に起因する工具の位置決め誤差に対して、目標値の補正をリアルタイムで行うことができる。よって、工具を３次元的に高精度に動作させて、高速超精密加工を行うことができ、従来、非常に加工時間を要していた非軸対称な部品等を、旋盤加工に代表される軸対称加工法で高精度にかつ高速に加工することができる。

【００２４】

したがって、本発明は、非軸対称非球面形状の光学部品や精密機構部品等の微細な形状を有する精密部品を、旋盤加工に代表される軸対称加工法で高精度にかつ高速に加工するのに有用である。

【発明を実施するための最良の形態】

【００２５】

（実施の形態１）

以下、本発明の実施の形態１における３軸工具ユニットおよびその３軸工具ユニットを搭載した加工装置について、図面を参照しながら説明する。図１は本発明の実施の形態１における３軸工具ユニットの構成図である。

【００２６】

図１に示す３軸工具ユニット１において、支持体２には、３つのアクチュエータ３、４、５の一端が取り付け部材を介して固定されている。３軸工具ユニット１の直交する３軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ軸）を構成するアクチュエータ３、４、５は、Ｘ、Ｙ、Ｚ軸方向にそれぞれ動作して工具ホルダ７の位置を変位させる。

【００２７】

本実施の形態１では、アクチュエータを圧電素子で構成している。圧電素子としては、例えば、ＰＺＴ（$PbZrO_3$－$PbTiO_3$）を主成分とする積層型のものなどを用いることができる。なお、精密加工を行う場合、環境温度の変化による３軸工具ユニットの構成部材の伸縮が加工精度に影響するので、支持体２は低熱膨張材料で構成することが望ましい。

【００２８】

工具６が固定される工具ホルダ７は、アクチュエータ３、４、５の支持体２に固定された端とは異なる他端に取り付けられ、アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上の交点に設けられる。この工具ホルダ７も加工精度を向上させるために低熱膨張材料で構成す

ることが望ましい。

【００２９】

また、支持体２には、センサ８、９、１０が、図示しないセンサホルダを介して取り付けられている。センサホルダも、熱変形による誤動作を避けるために低熱膨張材料で構成することが望ましい。

【００３０】

また、本実施の形態１では、センサ８、９、１０の測定対象であるセンサターゲット１１、１２、１３が工具ホルダ７と一体となって設けられている。なお、センサターゲットは、工具ホルダの変位に従って変位するのであれば、工具ホルダと別異に設けてもよい。

【００３１】

支持体２にセンサホルダを介して固定されているセンサ８、９、１０は、工具ホルダ７の変位に従って変位するセンサターゲット１１、１２、１３までの距離をセンシングすることにより、アクチュエータ３、４、５のＸ、Ｙ、Ｚ軸方向（動作方向）への実際の変位量（アクチュエータの位置情報）を示す変位信号を生成する。

【００３２】

センサ８、９、１０としては、よく知られた静電容量形センサ、渦電流形センサ、光センサなどを用いることができる。より高精度にアクチュエータを動作させるためには静電容量形センサで構成することが望ましい。

【００３３】

図２にセンサ８、９、１０の配置を示す。図２に示すように、センサ８、９、１０は、支持体２にセンサホルダ１４、１５、１６を介して取り付けられており、それぞれのセンシング方向の延長線が一点に交わるように配置される。センサホルダ１４、１５、１６は、センサ取り付け時の調整のしやすさを考慮して、弾性変形を利用した微動機構となっている。

【００３４】

アクチュエータ３、４、５に圧電素子を用いた場合には、圧電素子に電圧を印加して圧電素子を伸縮させることで、アクチュエータ３、４、５をＸ、Ｙ、Ｚ軸方向へ動作させるが、圧電素子はヒステリシスをもった素子であるため、アクチュエータ３、４、５のＸ、Ｙ、Ｚ軸方向への変位量の目標値に即した電圧を圧電素子に印加するだけではその目標値に対して精度良くアクチュエータ３、４、５を駆動することはできない。そこで、一般的に、センサ８、９、１０が生成する変位信号を基に、センサ８、９、１０のセンサターゲット１１、１２、１３までの距離を一定に保つフィードバック制御を行うことで、ヒステリシスの無い特性を実現している。

【００３５】

また、３軸のアクチュエータ３、４、５を動作させると、工具ホルダ７が各軸から押し引きされ、３軸に弾性ひずみ（弾性変形）が生じ、その３軸の弾性ひずみによる力に起因して工具ホルダ７（工具６）が３軸まわりに回転運動する。この回転運動について、図３を用いて説明する。図３は、工具ホルダの回転運動を説明するための模式図である。例えば、図３に示すように、Ｘ軸から工具ホルダを押すことによってＹ軸がＺ軸まわりにたわみ、そのＹ軸のたわみ（弾性ひずみ）により、工具ホルダがＺ軸まわりに回転角度γで回転運動する。

【００３６】

このようにアクチュエータ３、４、５のＸ、Ｙ、Ｚ軸方向への動作により工具ホルダ７がＸ、Ｙ、Ｚ軸まわり（３軸まわり）に回転運動するため、工具６の刃先に位置決め誤差が生ずる。センサ８、９、１０を、各センシング方向の延長線が一点に交わらないように配置した場合、工具ホルダ７の３軸まわりの回転運動がそれぞれ別異の回転中心を中心に行われる。そのため、この場合、工具ホルダ７の動きが複雑になり、工具６の刃先の位置決め誤差を補正するための演算にかかる時間が長くなる。

【００３７】

そこで、本実施の形態１における３軸工具ユニットでは、センサ８、９、１０を各セン

シング方向の延長線が一点に交わるように配置している。この配置により３軸まわりの工具ホルダ７の回転運動は、その一点（交点）を中心に行われるので、工具ホルダ７の動きが複雑になるのを回避でき、工具６の刃先の位置決め誤差を補正するための演算にかかる時間を短縮することができる。

【００３８】

また、従来の１軸工具ユニットでは、工具ホルダと変位センサと工具刃先の中心線が一致するように配置してある。この配置は、ａｂｂｅの誤差が最小となる最も理想的な配置であり、かつ、アクチュエータによる駆動軸と加工点が一致して不要なモーメントの発生を回避できる点からも、望ましい配置である。

【００３９】

しかしながら、この１軸の構成を３軸工具ユニットに展開しようとすると、３軸工具ユニットが不必要に大きくなる。そのことから、実際の加工時においては、３軸工具ユニットと被加工物が干渉するなどの問題が生じ、実用上の制約が大きくなる。また、３つの変位センサの延長線にある交点と工具刃先との距離（オフセット量：図２中のｌｚ）が長くなるので、高精度な刃先の位置制御が困難になるという問題も生じる。

【００４０】

そこで、本実施の形態１における３軸工具ユニットでは、図１、２に示すように、センサ８、９、１０を、アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上とは異なる位置に配置している。しかしながら、この様な場合にも、３つのセンサのうちの少なくとも１つのセンサのセンシング方向の一直線上に工具刃先が位置するようにすることが良い。望ましくは、前述の３つのセンサのセンシング方向の延長線上の交点に工具刃先が位置することが最も良い。

【００４１】

また、図２に示すように、本実施の形態１では、Ｚ軸のアクチュエータ５に対するセンサ１０のセンシング方向の延長線上に工具６の刃先が位置するように構成している。この構成により、Ｚ軸まわりの回転運動の影響を小さくすることができる。同様に、センサ８、９のセンシング方向の延長線上に工具６の刃先が位置するように構成すれば、Ｘ、Ｙ軸まわりの回転運動の影響を小さくすることができる。

【００４２】

また、アクチュエータとして圧電素子を使用する場合、圧電素子は引張り力に弱く、引張り力が加わると破損するおそれがあるため、一般的に圧電素子にはプリロードを付与する。

【００４３】

図４は本実施の形態１におけるプリロードの構造を示す断面図である。図４に示すように、本実施の形態１における３軸工具ユニットは、３つのアクチュエータ３、４、５に対して１本のプリロードロッド１７によりＸ、Ｙ、Ｚ軸のいずれの軸とも平行でない方向からプリロードを付与する構造としている。具体的には、３軸工具ユニット１は３軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ軸）の対象構造であるので、Ｘ、Ｙ、Ｚ軸の各々と４５度をなす方向（工具ホルダ７の対角の方向）からプリロードを付与することで、アクチュエータ３、４、５に対して均等にプリロードを付与することができ、アクチュエータ３、４、５の特性を同等にすることができる。

【００４４】

続いて、３軸のアクチュエータ３、４、５の位置制御方法について、図５を用いて説明する。図５は、上記の３軸工具ユニット１を搭載した加工装置の構成図である。図５には、Ｚ軸のアクチュエータ５を位置制御するための位置制御ループ回路を例示している。

【００４５】

図５に示すように、この位置制御ループ回路は、センサ１０からの変位信号を入力し目標値（指令信号）との偏差を演算する加算器１８と、加算器１８からの信号に対して、例えば積分処理（Ｉ制御）や、比例積分処理（ＰＩ制御）、比例積分微分処理（ＰＩＤ制御）などを行うことで位相補償を施す位相補償部１９と、位相補償部１９からの信号を電力

増幅してアクチュエータ５の動作を制御する信号を生成するアンプ２０と、からなる。

【００４６】

この位置制御ループ回路により、上述したセンサターゲットの距離を一定に保つフィードバック制御をかけることができる。なお、Ｘ、Ｙ軸に関しても、同様の位置制御ループ回路を構成して、同様の位置制御を行えばよい。

【００４７】

続いて、３軸工具ユニット１を搭載した加工装置による被加工物の旋盤加工方法について、被加工物の被加工面を非円弧シリンドリカル形状に旋盤加工する場合を例に説明する。当該加工装置の加工機は、図５に示すように、被加工物（ワーク）に対して３軸工具ユニットを直交する３軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ軸）方向に相対移動させるリニアステージとして、３軸工具ユニット１をＸ軸方向およびＺ軸方向へ移動させるＸ・Ｚ軸テーブル２１と、３軸工具ユニット１をＹ軸方向へ移動させるＹ軸テーブル２２とを具備する。また、被加工物に対して３軸工具ユニットを相対的に円運動させる回転ステージとして、被加工物２４を回転させる回転テーブル２３を具備する。このリニアステージ（Ｘ・Ｚ軸テーブル２１とＹ軸テーブル２２）と回転ステージ（回転テーブル２３）は、その３軸（３軸座標）と中心軸（角度座標）が数値制御されるＮＣテーブルである。

【００４８】

なお、本実施の形態１では、３軸工具ユニットをリニアステージに搭載してＸ、Ｙ、Ｚ軸方向へ移動させることで、被加工物に対して３軸工具ユニットを相対移動させる場合について説明するが、被加工物を移動させてもよい。また、被加工物を回転ステージに搭載して回転させることで、被加工物に対して３軸工具ユニットを相対的に円運動させる場合について説明するが、３軸工具ユニットを円運動させてもよい。また、本実施の形態１では、回転テーブルが１軸を有する場合について説明するが、２軸以上を有してもよい。

【００４９】

当該加工装置は、加工プログラムを基にＸ・Ｚ軸テーブル２１とＹ軸テーブル２２の３軸座標と回転テーブル２３の角度座標を数値制御して、３軸工具ユニット１（工具６の刃先）の被加工物２４に対する相対位置を調整しながら、３軸工具ユニット１を被加工物２４に対して相対的に円運動させることで、被加工物２４の旋盤加工を行う。具体的には、回転している被加工物２４に対して、３軸工具ユニット１（工具６）を被加工物２４の外周側から中心へ走査する。

【００５０】

しかし、一般的にＸ・Ｚ軸テーブル２１とＹ軸テーブル２２をナノメートルオーダーで高速高精度に動作させることは困難である。そこで、当該加工装置では、リニアステージの３軸座標ごとに、その３軸座標に対応する加工範囲を３軸工具ユニット１の工具６を３次元方向に微小動作させることで旋盤加工する。加工範囲は回転ステージの角度座標で表すことができる。１つの３軸座標に対応する加工範囲は１つに限るものではなく、加工形状によっては１つの３軸座標に対応する加工範囲が複数存在する場合もある。本実施の形態１では、３軸工具ユニット１（工具６）を被加工物２４の外周側から中心へＸ軸方向に沿って走査するので、３軸座標のうちのＸ軸座標ごとに工具６を微小動作させて旋盤加工を行う。

【００５１】

工具６の微小な３次元動作は、リアルタイム目標値演算処理部２５がアクチュエータ３、４、５の指令信号（目標値）をリアルタイムに演算して、アクチュエータ３、４、５の位置制御ループ回路へ出力し、アクチュエータ３、４、５を駆動することで行う。

【００５２】

以下、リアルタイム目標値演算処理部２５について説明する。リアルタイム目標値演算処理部２５は、Ｘ・Ｚ軸テーブル２１とＹ軸テーブル２２の３軸座標と回転テーブル２３の角度座標に応じたアクチュエータ３、４、５の変位量の目標値をリアルタイムに求めて、アクチュエータ３、４、５の指令信号を生成する。

【００５３】

図５に示すように、リアルタイム目標値演算処理部２５は、現在位置演算部２６、加工周波数演算部２７、アクチュエータ位相遅れ演算部２８、スピンドル回転遅れ角度演算部２９、目標値演算部３０を具備する。

【００５４】

現在位置演算部２６は、加工機からのＸ・Ｚ軸テーブル２１とＹ軸テーブル２２の現在の３軸座標と回転テーブル２３の現在の角度座標を示す情報を入力して、リアルタイム目標値演算処理部２５で演算できるように、現在の３軸座標（ｘ、ｙ、ｚ）と角度座標（θ）を演算する。ここで、３軸座標（ｘ、ｙ、ｚ）は、被加工物２４の回転中心をプログラム原点とした場合の座標である。

【００５５】

例えば加工機から３軸座標と角度座標を示す情報がパルス列で入力される場合、現在位置演算部２６は、パルス列をカウンタでカウントし、加工機の機械仕様で定義される感度（１パルスあたりの距離）から、現在の３軸座標（ｘ、ｙ、ｚ）と角度座標（θ）を求める。

【００５６】

加工周波数演算部２７は、現在位置演算部２６により演算された現在の３軸座標（ｘ、ｙ、ｚ）に対応する加工範囲におけるアクチュエータ３、４、５の動作周波数をリアルタイムに演算する。以下、加工範囲における動作周波数を加工周波数と呼ぶことにする。

【００５７】

図６は、指令信号と実際のアクチュエータの動作を示す図である。図６において、実線は、工具６と被加工物２４が接触するある加工範囲におけるＺ軸のアクチュエータ５に対する指令信号を示し、破線はその指令信号に対する実際のアクチュエータ５の動作を示している。図６に示す波形が変位している区間が加工範囲であり、その加工範囲におけるアクチュエータの動作周波数が加工周波数である。図６に示すように、指令信号に対してアクチュエータ５の動作は遅れ、その遅れは加工周波数が高いほど大きくなる。

【００５８】

本実施の形態１では、工具６を被加工物２４の外周側から中心へ走査するので、Ｘ・Ｙ軸テーブル２１のＸ軸座標ｘごとにアクチュエータ３、４、５の加工周波数をリアルタイムに演算する。例えば、回転テーブル２３がＳ［ｍｉｎ$^{-1}$］で回転し、Ｘ軸座標（被加工物２４の回転中心から３軸工具ユニット１までのＸ軸方向の距離）がｘ１［ｍ］の位置において、被加工物を加工する距離がＷ［ｍ］であるとすると、アクチュエータ３、４、５の加工周波数ｆ１は（数１）の式により求められる。

【００５９】

【数１】

$$f1=\frac{\pi\times x1\times S}{60\times W}$$

回転テーブルの回転数Ｓと被加工物を加工する距離Ｗは、加工プログラムより求めて、図示しない記憶部に記憶させておくなどすればよい。本実施の形態１では、図５に示すように、１つのＸ軸座標に対応する加工範囲が２つ存在するが、被加工物を加工する距離Ｗは同じ長さであるものとして説明する。無論、１つのＸ軸座標に対応する複数の加工範囲ごとに被加工物を加工する距離Ｗが大きく異なるような場合には、加工範囲ごとに加工周波数を求める。

【００６０】

アクチュエータ位相遅れ演算部２８は、加工周波数におけるアクチュエータ制御の位相遅れ（位置制御ループ回路が生成するアクチュエータの動作を制御する信号の指令信号に対する位相遅れ）を演算する。アクチュエータ制御の位相遅れは、事前に３軸工具ユニット１の各位置制御ループ回路の閉ループ周波数応答を測定することにより、あるいは演算することにより求めておく。演算により求める方法はモデル誤差を含むので実測した方が

精度が良い場合が多い。以下、Ｘ、Ｙ、Ｚ軸のアクチュエータ３、４、５の位置制御ループ回路が同一構成である場合を例に説明する。

【００６１】

図７にアクチュエータ制御の位相遅れを示す。この周波数特性を周波数における多項式として、図示しない記憶部に予め記憶しておく。アクチュエータ位相遅れ演算部２８は、加工周波数演算部２７により演算された加工周波数ｆ１を前記多項式に代入して、加工周波数における位相遅れφをリアルタイムに演算する。

【００６２】

または、アクチュエータ制御の位相遅れのルックアップテーブルを事前に作成して図示しない記憶部に予め記憶してもよい。この場合、アクチュエータ位相遅れ演算部２８は、加工周波数演算部２７により演算された加工周波数ｆ１に対応した位相遅れφをルックアップテーブルを参照することで求める。なお、アクチュエータ３、４、５の位置制御ループ回路が同一の周波数特性を持たない場合には、各位置制御ループ回路ごとに位相遅れを求める。

【００６３】

このようにアクチュエータ位相遅れ演算部２８は、アクチュエータ３、４、５の加工周波数ｆ１と位置制御ループ回路の周波数特性とを基に、アクチュエータ３、４、５の動作を制御する信号の各指令信号に対する位相遅れφを演算する。

【００６４】

スピンドル回転遅れ角度演算部２９は、アクチュエータ位相遅れ演算部２８により演算された位相遅れφと回転テーブル２３の回転速度を基に、アクチュエータ３、４、５の各指令信号に対する動作遅れ分の回転テーブル２３の回転角度（回転遅れ角度）θ１を演算する。

【００６５】

つまり、スピンドル回転遅れ角度演算部２９は、位相遅れを考慮して、アクチュエータ３、４、５が指令信号通りに動作するためには、加工範囲に入るときの回転テーブル２３の角度座標より何度前に目標値を求める演算を開始する必要があるかを求める。

【００６６】

例えば、回転テーブル２３がＳ［ｍｉｎ$^{-1}$］で回転し、Ｘ軸座標がｘ１［ｍ］の位置において、加工周波数がｆ１、アクチュエータ制御の位相遅れがφの場合、スピンドルの回転遅れ角度θ１は（数２）の式により求められる。

【００６７】

【数２】

$$\theta 1 = \frac{5 \times \phi}{2 \times f1}$$

回転遅れ角度θ１は（数２）に示されるように位相遅れφと加工周波数ｆ１の比率によって決まる。なお、アクチュエータ３、４、５の位置制御ループ回路が同一の周波数特性を持たない場合には、各軸ごとに回転遅れ角度を求める。

【００６８】

図８に回転テーブル２３の回転数が一定の場合のＸ軸座標に対するスピンドルの回転遅れ角度の特性を示す。図８に示すように、被加工物の回転中心に近づくほどスピンドルの回転遅れ角度θ１が大きくなる。

【００６９】

なお、回転テーブルを線速度一定で回転させてもよい。ただし、この場合、外周の回転速度に内周の回転速度を合わせるためには、工具６が内周に近づくほど回転テーブル２３の回転速度を上げる必要があり、ある地点で回転テーブル２３が回転可能な限界の回転数になることが考えられる。そこで、そのような場合には、線速度一定の範囲を何段階かに

分けて、各段階ごとに加工周波数、スピンドルの回転遅れ角度を演算するようにすればよい。

【００７０】

このスピンドルの回転遅れ角度θ１を目標値演算部３０に入力する。目標値演算部３０は実際に加工範囲に入るときの回転テーブル２３の角度座標（加工範囲における角度座標）よりも回転遅れ角度θ１前に各目標値の演算を開始する。

【００７１】

実際に加工範囲に入るときの回転テーブル２３の角度座標は加工プログラムにより求める。また、目標値の演算は、加工プログラムと現在位置演算部２６により演算された座標（ｘ、ｙ、ｚ、θ）を基に行う。

【００７２】

目標値演算部３０は、アクチュエータ３、４、５の目標値をリアルタイム演算して、各位置制御ループ回路へ出力する。その結果、加工範囲に入ったと同時に指令信号通りにアクチュエータを動作させることができ、高精度に旋盤加工を行うことができる。

【００７３】

以上のように、本実施の形態１における加工装置によれば、Ｘ・Ｙ軸テーブル２１のＸ軸座標ごとに加工周波数、アクチュエータ制御の位相遅れをリアルタイムに求めて、そのＸ軸座標に対応する加工範囲に工具６が入る前に、あるいはその加工範囲の旋盤加工期間のできるだけ早い段階で、その加工範囲に入るときの回転テーブル２３の角度座標より何度前に目標値の演算を開始する必要があるかを求め、加工範囲に入る前に目標値の演算を開始することで、加工範囲に入ったと同時に指令信号通りにアクチュエータを動作させることができる。

【００７４】

続いて、図９、１０を用いて、本実施の形態１における３軸工具ユニットを搭載した加工装置の加工精度について説明する。図９は、本実施の形態１における３軸工具ユニットを搭載した加工装置により、回転している被加工物の外周側から中心に工具を移動させつつ各アクチュエータを駆動して、被加工面を被円弧シリンドリカル形状に旋盤加工した被加工物の例を示す。この例では、被加工面の大きさは、図９に示すＸ方向に４ｍｍ、Ｙ方向に６０ｍｍである。

【００７５】

なお、このような精密部品を旋盤加工する場合には、上記（数１）の式のパラメータである被加工物を加工する距離Ｗとして、図９に示すＷ（被加工物の厚み）を代入して、Ｘ軸座標ごとの加工周波数の近似値を求めるようにしてもよい。但し、図９に示す例では、被加工物を加工する距離Ｗとして被加工物の厚みを用いるが、実際に加工する距離が厚みより短い場合は、その実際の距離を用いる。

【００７６】

図１０（ａ）は、図９に示す加工後の被加工物の断面形状を、図９に示すＸ＝０ｍｍ、Ｘ＝１．５ｍｍ、Ｘ＝－１．５ｍｍの位置でＹ方向に走査して測定した結果を示す。また、比較のために、本実施の形態１におけるリアルタイム目標値演算処理部を用いずに旋盤加工を行った場合の測定結果の例を図１０（ｂ）に示す。

【００７７】

図１０に示すグラフにおいて、縦軸は設計値と加工結果の差を表す形状精度を示している。また、図１０に示すグラフは、前述したＸ＝０ｍｍ、Ｘ＝１．５ｍｍ、Ｘ＝－１．５ｍｍの位置での３つの断面形状の形状精度を重ね書きしている。

【００７８】

図１０（ｂ）に示すように、本実施の形態１におけるリアルタイム目標値演算処理部を用いずに旋盤加工した場合、被加工物の中央付近において３つの断面形状が同じ形状誤差とならないことが見て取れる。これは、加工周波数の特性が外周と中心付近で異なるためであると考えられる。

【００７９】

一方、本実施の形態１における加工装置により旋盤加工を行った場合、図１０（ａ）に示すように、図１０（ｂ）において見て取れたデータの中央付近の形状精度の差異を解消することができる。

【００８０】

（実施の形態２）

図１１は本発明の実施の形態２における３軸工具ユニットを搭載した加工装置の構成図である。但し、前述の実施の形態１で説明した部材と同一の部材には同一符号を付して、説明を省略する。

【００８１】

本実施の形態２における加工装置は、図１１に示す回転角度演算部３１と工具刃先の位置決め誤差演算部３２により、各アクチュエータ３、４、５の動作に起因して工具６の刃先に発生する位置決め誤差を求め、その求めた誤差量を用いてリアルタイム目標値演算処理部２５が各アクチュエータ３、４、５に対する目標値を補正する構成にした点が前述の実施の形態１と異なるが、それ以外の構成、例えば３軸工具ユニット１や、加工機、３軸工具ユニット１を制御するための基本的な位置制御ループ回路などは前述の実施の形態１と同様である。

【００８２】

前述の実施の形態１で説明したように、センサ８、９、１０を各センシング方向の延長線が一点に交わるように配置することによって、工具ホルダ６がその一点（交点）を中心に回転運動するようにしている。この交点を回転運動の中心と呼ぶことにする。

【００８３】

回転運動の中心と工具の刃先を一致させると、Ｘ、Ｙ、Ｚ軸まわりの回転運動の影響が少なく、高精度な刃先の位置制御が可能となるが、回転運動の中心と刃先を一致させる構成が困難な場合がある。例えば回転運動の中心と刃先を一致させる構成にすると、旋盤加工時に、センサと被加工物が接触する可能性がある。その場合には、図２に示すように、刃先の位置を回転運動の中心からオフセットする必要がある。

【００８４】

本実施の形態２における３軸工具ユニット１は、図２に示すように、刃先をＺ軸方向にｌｚだけオフセットした構成とする。このように刃先の位置を回転運動の中心からオフセットする場合でも、形状精度への影響が最も大きいＺ軸まわりの回転運動を小さくするために、Ｚ軸のアクチュエータ５に対するセンサ１０のセンシング方向の延長線上に刃先を配置することが望ましい。

【００８５】

図２に示す構成において刃先に生じる位置決め誤差をシミュレーションした結果を図１２に示す。このシミュレーションでは、Ｚ軸方向へのオフセット量ｌｚを６．５ｍｍとし、各アクチュエータ（圧電素子）３、４、５が同量変位した場合に刃先に生じる位置決め誤差を解析した。

【００８６】

図１２に示すように、例えば、Ｘ、Ｙ、Ｚ軸方向に各アクチュエータ３、４、５が＋０．０４ｍｍ変位した場合、Ｘ軸方向に約－０．３８μｍ、Ｙ軸方向に約－０．２８μｍ、Ｚ軸方向に０．１２μｍの位置決め誤差が生じた。本シミュレーション結果から理解できるように、回転運動の中心と刃先がオフセットすると、３軸まわりの回転運動の影響で、刃先に生じる位置決め誤差が無視できなくなる。特に、本実施の形態２では、Ｚ軸方向にオフセットしたため、刃先に生じる位置決め誤差としてＸ軸まわり、Y軸まわりの回転運動の影響が大きく、Ｘ軸、Ｙ軸の位置決め精度がＺ軸の位置決め精度より悪くなる。特に光学部品のようにサブミクロンオーダの形状精度を要求される場合、この誤差は無視できない。この位置決め誤差は、前述の実施の形態１で述べたように３軸工具ユニットの３軸の弾性ひずみによる力に起因する。そこで、本実施の形態２では、以下の手段でこの誤差の補償を行う。

【００８７】

すなわち、当該加工装置は、リアルタイム目標値演算処理部２５で演算した各軸（アクチュエータ３、４、５）の目標値（指令信号）を入力し、各目標値を基に前記回転運動の中心における工具ホルダ７のＸ軸まわりの回転角度α、Ｙ軸まわりの回転角度β、Ｚ軸まわりの回転角度γを演算する回転角度演算部３１と、回転角度演算部３１により演算された３軸まわりの回転角度α、γ、βと前記回転運動の中心から工具６の刃先までの間の距離とを基に工具６の刃先に生じる位置決め誤差を演算する工具刃先の位置決め誤差演算部３２をさらに具備しており、リアルタイム目標値演算部２５が、工具刃先の位置決め誤差演算部３２により演算された誤差量をリアルタイムに入力して、各目標値を補正する。

【００８８】

図１３は回転角度演算部３１および工具刃先の位置決め誤差演算部３２の処理内容の一例を示すブロック図である。例えばＸ軸に着目して説明すると、Ｘ軸の目標値に従いアクチュエータ３が工具ホルダ７をＸ軸方向へ押し引きすることによって、Ｙ、Ｚ軸が力を受け、Ｙ、Ｚ軸に弾性ひずみが発生し、Ｘ軸には、Ｙ、Ｚ軸からその弾性ひずみを戻す力が発生する。一例として、図１４に示す梁のたわみのモデルを使用した場合、Ｘ軸がδ変位することにより、Ｙ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｙは（数３）の式により求めることができる。

【００８９】

【数３】

$$\text{弾性ひずみによる力}Fxy=\frac{3EI}{\lambda y^{3}}\times\text{X軸の変位量}\delta$$

ここで、Ｅはアクチュエータのヤング率、Ｉはアクチュエータの断面２次モーメント、λｙはＹ軸のアクチュエータ４の支持体２側の端部から各アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上の交点までの距離である。

【００９０】

よって、各アクチュエータ３、４、５の支持体２側の端部から各アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上の交点までの距離が全て同じλである場合、Ｘ軸の目標値（変位量）に対してＹ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｙは「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｘ軸の目標値」となる。同様に、Ｘ軸の目標値（変位量）に対してＺ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｚは「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｘ軸の目標値」となる。他のＹ軸、Ｚ軸についても同様である。

【００９１】

そこで、本実施の形態２では、回転角度演算部３１が、図１３に示すように、Ｘ軸の目標値に対してＹ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｙ「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｘ軸の目標値」をブロック３３により、Ｘ軸の目標値に対してＺ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｚ「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｘ軸の目標値」をブロック３４により演算する。同様に、Ｙ軸の目標値に対してＸ軸からＹ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｙｘ「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｙ軸の目標値」をブロック３５により、Ｚ軸からＹ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｙｚ「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｙ軸の目標値」をブロック３６により演算する。また、Ｚ軸の目標値に対してＸ軸からＺ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｚｘ「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｚ軸の目標値」をブロック３７により、Ｙ軸からＺ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｚｙ「（３ＥＩ／λ^{3}）×Ｚ軸の目標値」をブロック３８により演算する。

【００９２】

また、Ｘ軸の目標値に従いアクチュエータ３が工具ホルダ７をＸ軸方向へ押し引きすることによって、Ｙ、Ｚ軸はそれぞれＺ軸まわり、Ｙ軸まわりにたわみ、工具ホルダ７がＺ軸まわり、Ｙ軸まわりに回転運動する。そのときの、Ｚ軸まわりの回転角度γ１は、Ｙ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｙにより、（数４）の式により求めることができる。

【００９３】
【数４】

$$回転角度\gamma 1=\frac{\lambda y^2}{2EI}\times Y軸からX軸にかかる力Fxy$$

ここで、λｙはＹ軸のアクチュエータ４の支持体２側の端部から各アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上の交点までの距離である。
【００９４】
同様にＹ軸まわりの回転角度β１は、各アクチュエータ３、４、５の支持体２側の端部から各アクチュエータ３、４、５の動作方向の軸線上の交点までの距離が全て同じλである場合、Ｚ軸からＸ軸にかかる弾性ひずみによる力Ｆｘｚにより、「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｘｚ」となる。
【００９５】
そこで、本実施の形態２では、回転角度演算部３１が、図１３に示すように、Ｘ軸のアクチュエータ３の動作に起因するＹ軸のたわみによるＺ軸まわりの回転角度γ１「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｘｙ」をブロック３９により、Ｚ軸のたわみによるＹ軸まわりの回転角度β１「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｘｚ」をブロック４０により演算する。また、Ｙ軸のアクチュエータ４の動作に起因するＸ軸のたわみによるＺ軸まわりの回転角度γ２「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｙｘ」をブロック４１により、Ｚ軸のたわみによるＸ軸まわりの回転角度α１「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｙｚ」をブロック４２により演算する。また、Ｚ軸のアクチュエータ５の動作に起因するＸ軸のたわみによるＹ軸まわりの回転角度β２「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｚｘ」をブロック４３により、Ｙ軸のたわみによるＸ軸まわりの回転角度α２「（λ^2／ＥＩ）×Ｆｚｙ」をブロック４４により演算する。
【００９６】
３軸工具ユニット１の直交する３軸（Ｘ、Ｙ、Ｚ軸）の座標を右手系にとった場合、例えば、Ｚ軸のアクチュエータ５の動作に起因するＹ軸のたわみによるＸ軸まわりの回転角度α２からＹ軸のアクチュエータ４の動作に起因するＺ軸のたわみによるＸ軸まわりの回転角度α１を引いた差（α２－α１）を求めることにより、Ｘ軸まわりの回転角度αを求めることができる。同様に、Ｘ軸のアクチュエータ３の動作に起因するＺ軸のたわみによるＹ軸まわりの回転角度β１からＺ軸のアクチュエータ５の動作に起因するＸ軸のたわみによるＹ軸まわりの回転角度β２を引いた差（β１－β２）を求めることにより、Ｙ軸まわりの回転角度βを求めることができる。また、Ｙ軸のアクチュエータ４の動作に起因するＸ軸のたわみによるＺ軸まわりの回転角度γ２からＸ軸のアクチュエータ３の動作に起因するＹ軸のたわみによるＺ軸まわりの回転角度γ１を引いた差（γ２－γ１）を求めることにより、Ｚ軸まわりの回転角度γを求めることができる。
【００９７】
そこで、本実施の形態２では、回転角度演算部３１が、図１３に示すように、加算器４５で（α２－α１）の演算を行うことによりＸ軸まわりの回転角度αを求める。また、加算器４６で（β１－β２）の演算を行うことによりＹ軸まわりの回転角度βを求める。また、加算器４７で（γ２－γ１）の演算を行うことによりＺ軸まわりの回転角度γを求める。
【００９８】
工具刃先の位置決め誤差演算部３２は、図１３に示すように、回転角度演算部３１により演算された３軸まわりの回転角度α、β、γを入力し、ブロック４８により、Ｙ軸まわりの回転角度βに前記回転運動の中心から工具６の刃先までのＺ軸方向の距離ｌｚを乗算してｅｘ１を求める。また、ブロック４９により、Ｚ軸まわりの回転角度γと前記回転運動の中心から工具６の刃先までのＹ軸方向の距離ｌｙを乗算してｅｘ２を求める。また、ブロック５０により、Ｘ軸まわりの回転角度αに前記回転運動の中心から工具６の刃先ま

でのＺ軸方向の距離ｌｚを乗算してｅｙ１を求める。また、ブロック５１により、Ｚ軸まわりの回転角度γに前記回転運動の中心から工具６の刃先までのＸ軸方向の距離ｌｘを乗算してｅｙ２を求める。また、ブロック５２により、Ｘ軸まわりの回転角度αに前記回転運動の中心から工具６の刃先までのＹ軸方向の距離ｌｙを乗算してｅｚ１を求める。また、ブロック５３により、Ｙ軸まわりの回転角度βに前記回転運動の中心から工具６の刃先までのＸ軸方向の距離ｌｘを乗算してｅｚ２を求める。

【００９９】

そして、工具刃先の位置決め誤差演算部３２は、図１３に示すように、加算器５４で（ｅｘ１－ｅｘ２）を演算することにより、工具６の刃先に生じるＸ軸方向の位置決め誤差ｅｘを演算する。また、加算器５５で（－ｅｙ１－ｅｙ２）を演算することにより、工具６の刃先に生じるＹ軸方向の位置決め誤差ｅｙを演算する。また、加算器５６で（－ｅｚ１－ｅｚ２）を演算することにより、工具６の刃先に生じるＺ軸方向の位置決め誤差ｅｚを演算する。

【０１００】

リアルタイム目標値演算処理部２５は、工具刃先の位置決め誤差演算部３２により演算された各軸方向の位置決め誤差ｅｘ、ｅｙ、ｅｚを基に、その誤差を無くす方向に当初演算した各軸の目標値をそれぞれ補正して、各軸の位置制御ループ回路へ補正後の目標値を出力する。この補正により、工具の刃先を目標値通りに動作させることができるので、高精度に加工を行うことができる。なお、本実施の形態２ではＸ、Ｙ、Ｚ軸の目標値を補正したが、加工形状によっては少なくともいずれか一つの軸の目標値を補正するのみでもよい。

【０１０１】

上記実施の形態１、２を組合せることにより高精度な加工が可能となる。上記実施の形態１、２を組合せた加工装置により前述の図９に示すように被加工物を正面旋削して、その被加工物の断面形状を、図９に示すＸ＝０ｍｍ、Ｘ＝１．５ｍｍ、Ｘ＝－１．５ｍｍの位置でＹ方向に走査して測定した結果を図１５に示す。

【０１０２】

図１５に示すように、被加工物の外周側から中心に向けて正面旋削した結果、各アクチュエータの制御の位相遅れ等に起因する形状誤差、および各アクチュエータの駆動によって生じる刃先の回転運動に起因する位置決め誤差が良好に補償され、高精度な形状精度を得ることができた。

【０１０３】

また、上記実施の形態１、２における加工装置を用いて図９に示すように被加工物を正面旋削した場合、従来のラスター方式での切削加工（ラスターフライカット）によって加工した場合に比べて１／８の短時間（加工時間1時間）で加工を終了した。

【０１０４】

以上のように、実施の形態１、２によれば、目標値に対して工具の動きが十分追従できないことから生じる加工誤差や３軸工具ユニットの構成および動作に起因する工具の位置決め誤差に対する目標値の補正および目標値の演算をリアルタイムで行うことができ、従来に比べて圧倒的に短時間で加工を行うことができる。よって、工具を３次元的に高精度に動作させて、高速超精密加工を行うことができ、微細な形状を有する光学部品や精密機構部品等の精密部品を、旋盤加工に代表される軸対称加工法で高精度にかつ高速に加工することができる。

【０１０５】

なお、上記実施の形態１、２では３軸とも圧電素子を用いた場合について説明したが、例えば３軸のうちの１つが圧電素子で、他の２軸に圧電素子以外の素子を用いる構成でもよい。圧電素子以外の素子として、例えば磁歪素子やボイスコイルモータなどを用いることができる。

【産業上の利用可能性】

【０１０６】

本発明にかかる３軸工具ユニットおよび加工装置は、工具を３次元的に高精度に動作させて、高速超精密加工を行うことができ、微細な形状を有する光学部品や精密機構部品等の精密部品加工用の加工装置に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【０１０７】

【図１】本発明の実施の形態１、２における３軸工具ユニットの構成図

【図２】本発明の実施の形態１、２における３軸工具ユニットのセンサ配置を示す構成図

【図３】本発明の実施の形態１、２における３軸工具ユニットが備える工具の３軸まわりの回転運動を説明するための模式図

【図４】本発明の実施の形態１、２における３軸工具ユニットのプリロードの構造を示す断面図

【図５】本発明の実施の形態１における３軸工具ユニットを搭載した加工装置の構成図

【図６】本発明の実施の形態１における指令信号と実際のアクチュエータの動きを示す波形図

【図７】本発明の実施の形態１におけるアクチュエータ制御の位相遅れを示す周波数特性図

【図８】本発明の実施の形態１におけるスピンドルの回転遅れ角度を示す特性図

【図９】本発明の実施の形態１、２における被加工物を説明するための模式図

【図１０】本発明の実施の形態１における加工結果を表すグラフを示す図

【図１１】本発明の実施の形態２における３軸工具ユニットを搭載した加工装置の構成図

【図１２】本発明の実施の形態２における刃先の位置決め誤差のシミュレーション結果の一例を示す図

【図１３】本発明の実施の形態２における回転角度演算部および工具刃先の位置決め誤差演算部のブロック図

【図１４】本発明の実施の形態２におけるたわみのモデルの説明図

【図１５】本発明の実施の形態１および２を組み合せた加工装置による加工結果を表すグラフを示す図

【図１６】従来の高速位置決め機構の内部構造を示す内部構造図

【図１７】従来の高速位置決め機構の制御ブロック図

【図１８】従来の非真円形状加工装置における加工誤差補正方法を実現する制御装置の一例を示すブロック図

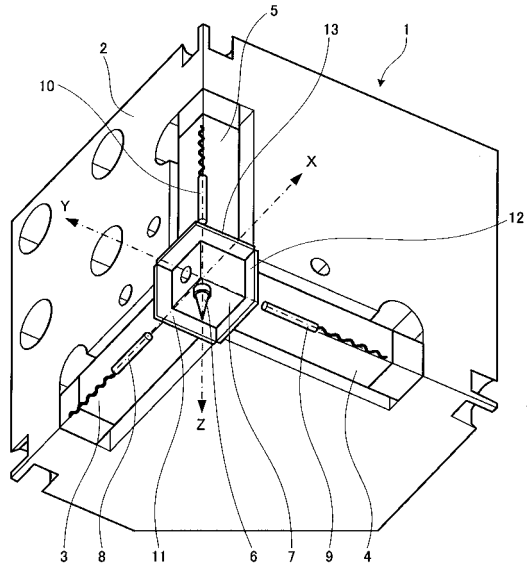
【符号の説明】

【０１０８】

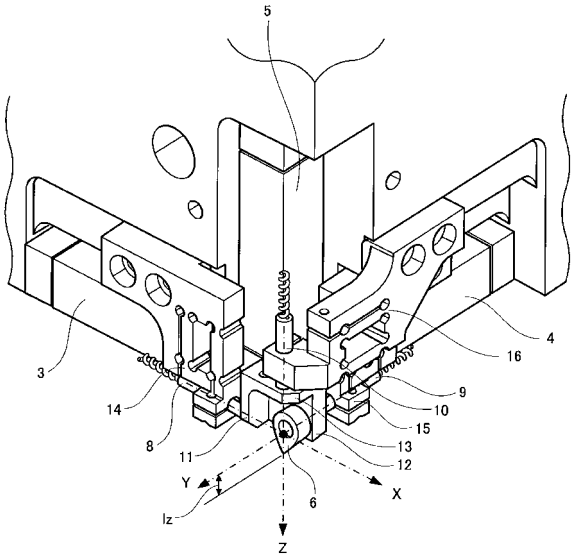
１　３軸工具ユニット
２　支持体
３～５　アクチュエータ
６　工具
７　工具ホルダ
８～１０　センサ
１１～１３　センサターゲット
１４～１６　センサホルダ
１７　プリロードロッド
１８　加算器
１９　位相補償部
２０　アンプ
２１　Ｘ・Ｚ軸テーブル
２２　Ｙ軸テーブル
２３　回転テーブル
２４　被加工物
２５　リアルタイム目標値演算処理部

２６　現在位置演算部
２７　加工周波数演算部
２８　アクチュエータ位相遅れ演算部
２９　スピンドル回転遅れ角度演算部
３０　目標値演算部
３１　回転角度演算部
３２　工具刃先の位置決め誤差演算部
１００　ケーシング
１０１　円筒形圧電素子
１０２　工具ホルダ
１０３　ダイヤフラム
１０４　容量型変位センサ
１０５　ダイヤモンド工具
１１０　積分器
１１１　ノッチフィルタ
１１２　アンプおよびＰＺＴの伝達関数
１２２　Ｘ軸サーボ装置
１２５　主軸モータ
１２６　パルスジェネレータ
１２７　Ｘ軸駆動モータ
１２８　Ｘ軸位置検出器
１４１　カウンタ
１４２　指令位置データ読出部
１４３　検出位置データ書込部
１４４　指令位置データ歪補正部
１４５　指令位置データ記憶部
１４６　検出位置データ記憶部
１４７　目標位置データ記憶部
１４８　指令位置データ振幅／位相／オフセット補正部
１４９　第２位相差検出部
１５０　弟２振幅比検出部
１５１　オフセット差検出部
１５２　第１振幅比検出部
１５３　第１位相差検出部
１５４　予測検出位置データ算出部
１５５　予測誤差位置データ算出部

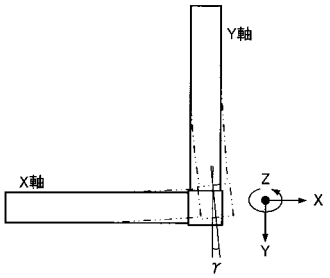
【図１】


5
13
1
2
10
X
Y
12
Z
3
8
11
6
7
9
4

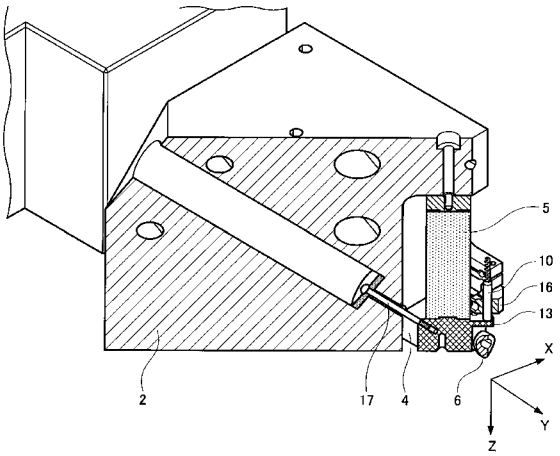
【図２】


5
4
16
3
9
14
10
15
8
11
13
12
Y
X
6
Iz
Z

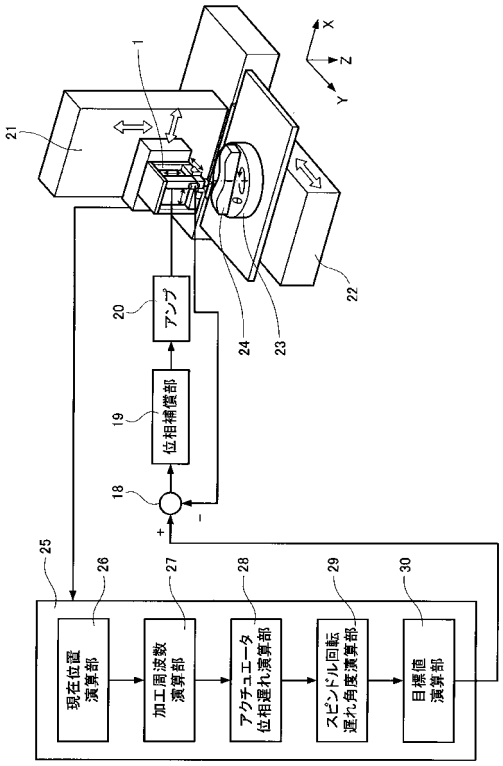
【図３】


Y軸
X軸
Z
X
Y
γ

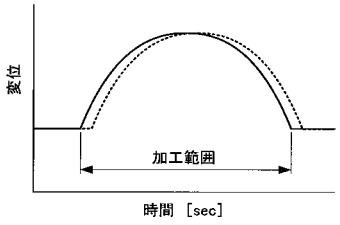
【図４】


5
10
16
13
X
2
17
4
6
Y
Z

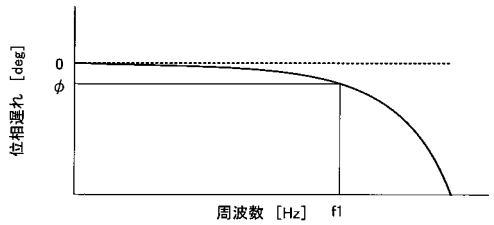
【図５】


X
Z
Y
1
21
22
24
23
20
アンプ
19
位相補償部
18
+
-
25
26
27
28
29
30
現在位置
演算部
加工周波数
演算部
アクチュエータ
位相遅れ演算部
スピンドル回転
遅れ角度演算部
目標値
演算部

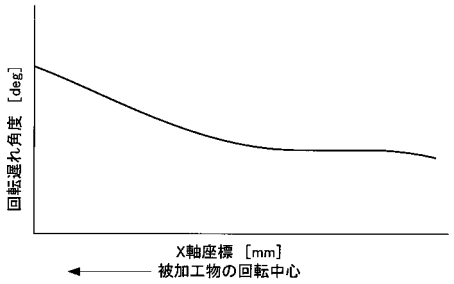
【図６】



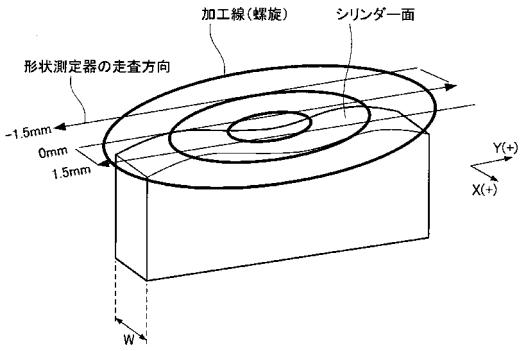
【図７】



【図８】

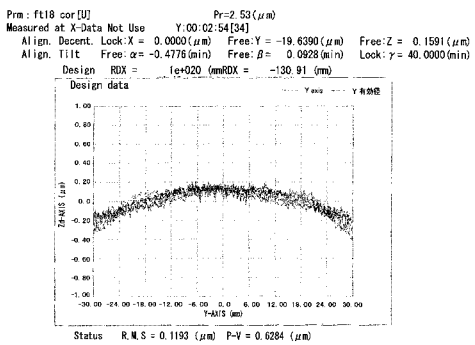


【図９】

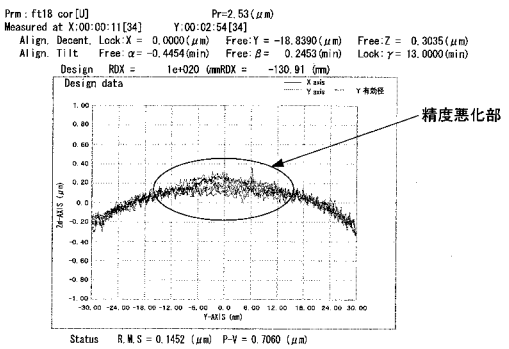


【図１０】

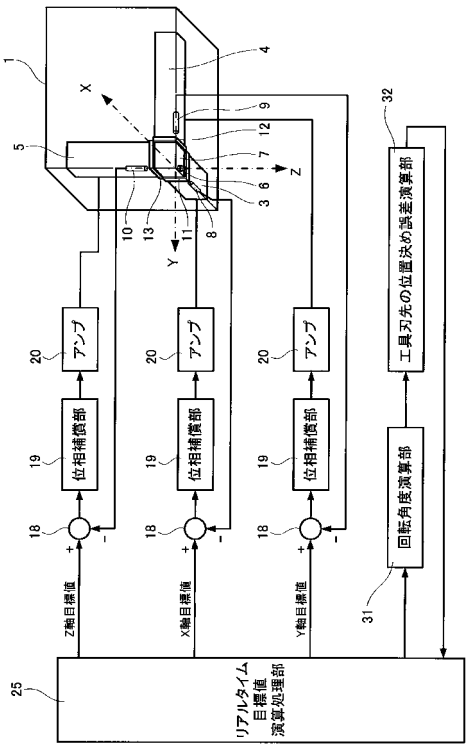
(a) 補正有り



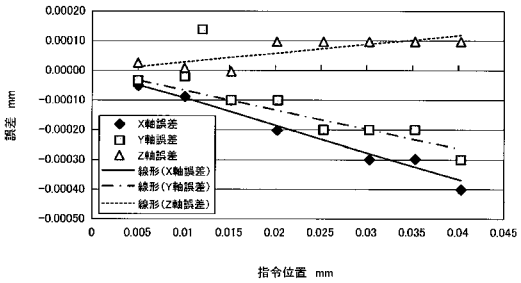
(b) 補正無し



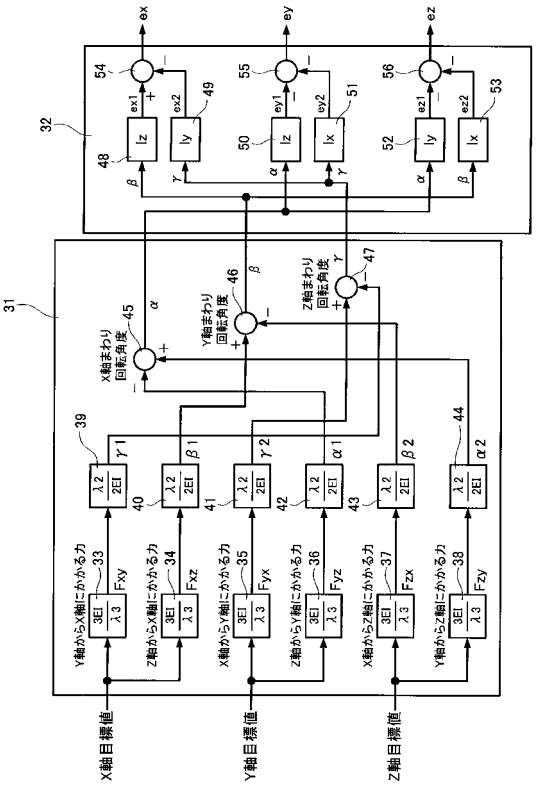
【図１１】



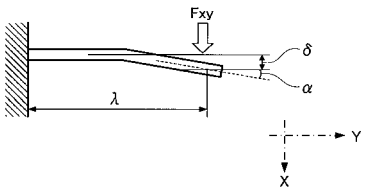
【図１２】



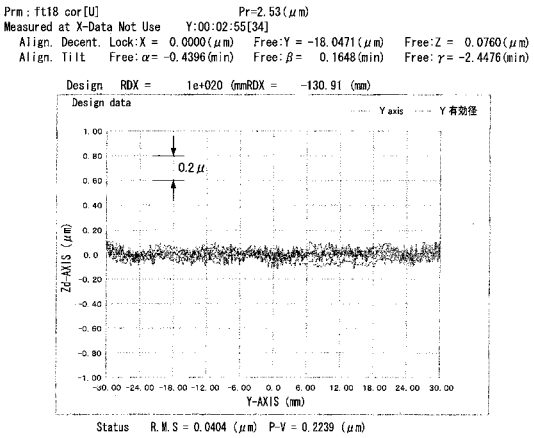
【図１３】



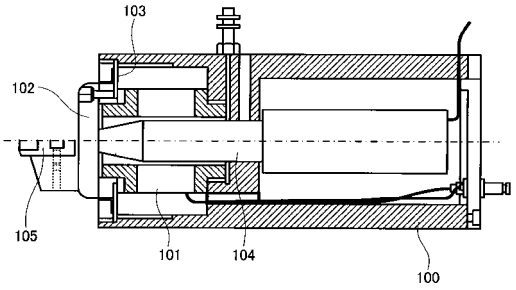
【図１４】



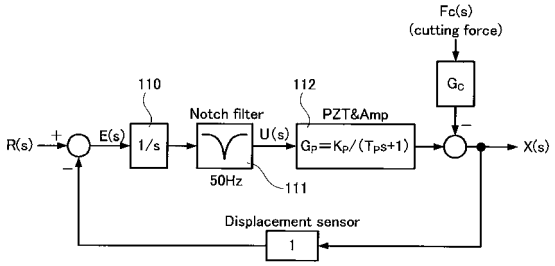
【図１５】



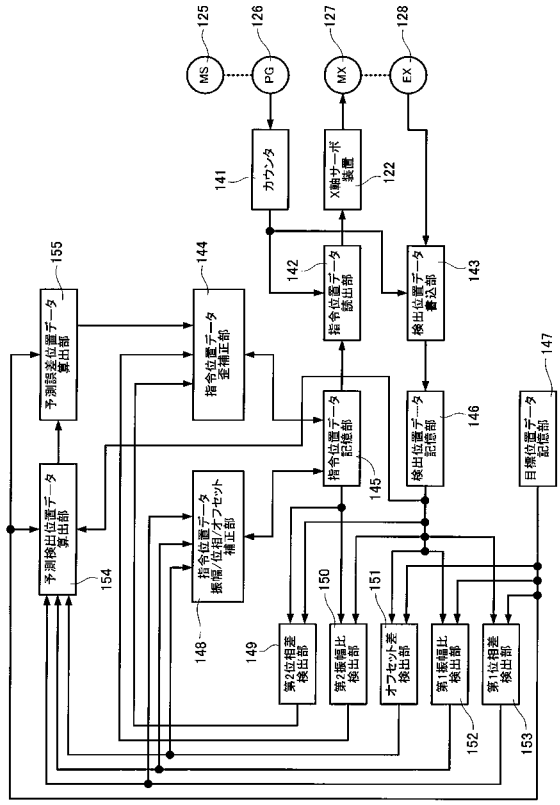
【図１６】



【図１７】



【図１８】


125
126
127
128
MS
PG
MX
EX
141
カウンタ
X軸サーボ装置
122
142
指令位置データ読出部
検出位置データ書込部
143
155
予測誤差位置データ算出部
144
指令位置データ全補正部
指令位置データ記憶部
145
検出位置データ記憶部
146
147
目標位置データ記憶部
予測検出位置データ算出部
154
指令位置データ振幅/位相/オフセット補正部
148
149
第2位相差検出部
150
第2振幅比検出部
151
オフセット差検出部
第1振幅比検出部
152
第1位相差検出部
153

フロントページの続き

(51)Int.Cl.	F I	テーマコード（参考）
B23Q 17/22 (2006.01)	Ｂ２３Ｑ 17/22	Ｅ

(72)発明者 田代 功
大阪府門真市大字門真１００６番地 松下電器産業株式会社内
(72)発明者 和田 紀彦
大阪府門真市大字門真１００６番地 松下電器産業株式会社内

Ｆターム(参考) 3C001 KA01 KB01 TA02 TB02
3C029 AA31
3C045 CA18
3C048 BB20