(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4563512号
(P4563512)

(45)発行日　平成22年10月13日(2010.10.13)　(24)登録日　平成22年8月6日(2010.8.6)

(51)Int.Cl.		F I		
F15B 9/09	(2006.01)	F15B	9/09	F
F15B 15/10	(2006.01)	F15B	15/10	H
B25J 13/00	(2006.01)	B25J	13/00	Z
G05B 11/32	(2006.01)	G05B	11/32	F
G05B 13/02	(2006.01)	G05B	13/02	J

請求項の数 9　(全 29 頁)

(21)出願番号　特願2010-520353 (P2010-520353)
(86)(22)出願日　平成22年1月5日(2010.1.5)
(86)国際出願番号　PCT/JP2010/000009
(87)国際公開番号　WO2010/082452
(87)国際公開日　平成22年7月22日(2010.7.22)
審査請求日　平成22年5月21日(2010.5.21)
(31)優先権主張番号　特願2009-4585 (P2009-4585)
(32)優先日　平成21年1月13日(2009.1.13)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

早期審査対象出願

(73)特許権者　000005821
パナソニック株式会社
大阪府門真市大字門真１００６番地
(74)代理人　100081422
弁理士　田中　光雄
(74)代理人　100100158
弁理士　鮫島　睦
(74)代理人　100091524
弁理士　和田　充夫
(72)発明者　小松　真弓
大阪府門真市大字門真１００６番地　パナソニック株式会社内
(72)発明者　岡▲崎▼　安直
大阪府門真市大字門真１００６番地　パナソニック株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】弾性体アクチュエータの制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラム

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
弾性体アクチュエータの制御装置であって、
上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、
上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段とを備えるとともに、
さらに、上記適応目標内部状態補正手段を使用する状態又は使用しない状態又は上記適応目標内部状態補正手段からの出力の更新を停止する状態の間での切り替えを行う補正出力制御手段を備えて、

上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項２】

上記目標内部状態決定手段は、さらに上記弾性体アクチュエータの出力の計測値を取得し、上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する、請求項１に記載の弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項３】

上記適応目標内部状態補正手段は、判断手段を備えて、上記目標軌道生成手段から繰り返しの信号を上記適応目標内部状態補正手段で受け取り、上記弾性体アクチュエータの目標値を時系列に並べた上記弾性体アクチュエータの軌道が繰り返しであることを上記判断手段で判断したときに上記適応目標内部状態補正手段を使用することを決定する請求項１又は２に記載の弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項４】

上記適応目標内部状態補正手段を使用するとき、上記補正出力制御手段は、上記弾性体アクチュエータの出力誤差が予め決められた閾値を下回ったときに上記適応目標内部状態補正手段の出力の更新を停止することを決定する請求項３に記載の弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項５】

上記補正出力制御手段は、上記弾性体アクチュエータが物体に衝突したことを検知する衝突検知手段を備えて、上記衝突検知手段により衝突したことを検知したときに上記適応目標内部状態補正手段の出力の更新を停止することを決定する請求項１又は２に記載の弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項６】

上記補正出力制御手段は、弾性体アクチュエータの始動時に上記適応目標内部状態補正手段の使用をしないことを決定する請求項１又は２に記載の弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項７】

上記補正出力制御手段は、上記適応目標内部状態補正手段を使用しない状態から使用する状態に切り替えるとき、又は、上記適応目標内部状態補正手段の出力を更新せずに停止する状態から更新する状態に切り替えるときに一定時間出力を通して出力するローパスフィルタをさらに備える請求項１又は２に記載の弾性体アクチュエータの制御装置。

【請求項８】

弾性体アクチュエータの制御方法であって、

上記弾性体アクチュエータの内部状態を内部状態計測手段で計測し、

上記弾性体アクチュエータの出力を出力計測手段で計測し、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を出力誤差補償手段で補償し、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を目標内部状態決定手段で決定し、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を適応目標内部状態補正手段で決定し、

上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を内部状態誤差補償手段で補償し、

さらに、上記適応目標内部状態補正手段を使用する状態又は使用しない状態又は上記適

応目標内部状態補正手段からの出力の更新を停止する状態の間での切り替えを補正出力制御手段で行い、
上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御方法。
【請求項９】
弾性体アクチュエータの制御プログラムであって、
コンピュータを、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と、上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値と、が入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、
上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段と、
上記適応目標内部状態補正手段を使用する状態又は使用しない状態又は上記適応目標内部状態補正手段からの出力の更新を停止する状態の間での切り替えを行う補正出力制御手段として機能させて、
上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御プログラム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、流体圧駆動アクチュエータ等、弾性体の変形により駆動される弾性体アクチュエータの動作を制御する弾性体アクチュエータの制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラムに関する。
【背景技術】
【０００２】
近年、ペットロボットなどの家庭用ロボットの開発が盛んに行われており、将来は家事支援ロボット等、より実用的な家庭用ロボットが実用化されるものと期待されている。家庭用ロボットは、家庭内に入り、人間と共生する必要があるため、従来の産業用ロボットなどとは必要とされる仕様が異なる。
【０００３】
産業用ロボットでは、電気モータ又は減速器が用いられ、高ゲインのフィードバック制御により、繰り返し精度０．１ｍｍ等といった高い手先位置精度が実現されている。しかしながら、このような電気モータにより駆動される機構は、剛性が高く、柔らかさに欠ける場合が多く、安全性という面で問題が多い。
【０００４】
これに対し、家庭用ロボットでは、繰り返し精度０．１ｍｍ等といった高い精度は必ずしも必要とせず、人間との接触時に危害を与えないなど安全性が重視される。したがって、従来の産業用ロボットのように電気モータによる駆動される機構は、家庭用ロボットなど安全性が重視される分野に適しているとは言えず、柔軟で安全なロボットアームが必要とされている。
【０００５】

こうした課題に対し、例えば、マッキベン型の空気圧アクチュエータを利用したロボットアームが提案されている。マッキベン型の空気圧アクチュエータは、ゴム材料で構成された管状弾性体の外表面に繊維コードで構成された拘束手段が配設され、管状弾性体の両端部を封止部材で気密封止する構造となっている。流体注入出手段を通じて空気等の圧縮性流体により内圧を管状弾性体の内部空間に与えると、管状弾性体が主に半径方向に膨張しようとするが、拘束手段の作用により、管状弾性体の中心軸方向の運動に変換され、全長が収縮する。このマッキベン型のアクチュエータは主に弾性体で構成されるため、柔軟性があり、安全で軽量なアクチュエータであるという特徴を有する。

【０００６】

しかしながら、マッキベン型のアクチュエータ等、空気等の流体圧によって動作する流体圧駆動アクチュエータでは、流体の圧縮性による弾性的性質又は流路抵抗等の影響により応答性が悪い。このため、従来より存在する一般的なフィードバック制御では所望の精度が達成できない等、弾性体アクチュエータは制御が難しいという課題をかかえている。

【０００７】

こうした課題に対し、従来技術としては、内部状態誤差補償手段を配設して、上記弾性体アクチュエータの内部状態をフィードバックする制御系を構成し、そして目標内部状態決定手段を配設して、目標内部状態をフィードフォワードする制御系を構成し、応答性が良く、定常偏差の少ない、高速・高精度な制御ができる制御装置を開示している（特許文献１）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００８】

【特許文献１】特開２００５－９５９８９号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００９】

しかしながら、上記目標内部状態決定手段は、事前に実験を行い出力と内部状態の関係を計測した結果を、近似多項式等で表現するため、事前に想定した変動パラメータ以外の変化に対して、目標内部状態を変更することはできない。このため、家庭用ロボットのように、事前に全ての環境を想定することが困難な状況では、出力と内部状態の関係が事前に想定した環境と異なり、精度が低下するという課題があった。

【００１０】

本発明の目的は、上記従来の課題を解決し、弾性体アクチュエータで駆動されるロボットアーム等の可動機構を事前に想定した環境以外でも、位置又は力を精度良く制御できる、弾性体アクチュエータの制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【００１１】

上記従来の課題を解決するために、本発明は以下のように構成する。

【００１２】

本発明の第１態様によれば、弾性体アクチュエータの制御装置であって、

上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決

定する適応目標内部状態補正手段と、
上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段とを備えて、
上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。
【００１３】
このような構成により、事前に想定した環境以外でも、位置又は力の精度良く制御できる弾性体アクチュエータの制御が実現できる。
【００１４】
本発明の第１３態様によれば、弾性体アクチュエータの制御方法であって、
上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、
上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段とを備えて、
上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差と上記に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御方法を提供する。
【００１５】
このような構成により、事前に想定した環境以外でも、位置又は力の精度良く制御できる弾性体アクチュエータの制御が実現できる。
【００１６】
本発明の第１４態様によれば、弾性体アクチュエータの制御装置のプログラムであって、
コンピュータを、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、
上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段として機能させて、
上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差と上記に基づき上記弾性

体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御するための、弾性体アクチュエータの制御プログラムを提供する。

【００１７】

このような構成により、事前に想定した環境以外でも、位置又は力の精度良く制御できる弾性体アクチュエータの制御が実現できる。

【発明の効果】

【００１８】

本発明の弾性体アクチュエータの制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラムによれば、内部状態誤差補償手段を配設して、上記弾性体アクチュエータの内部状態をフィードバックする制御系を構成し、かつ、目標内部状態決定手段及び適応目標内部状態補正手段を配設して、適応的に補正した目標内部状態をフィードフォワードする制御系を構成することにより、応答性が良く、定常偏差の少ない、高速・高精度な制御が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【００１９】

本発明のこれらと他の目的と特徴は、添付された図面についての好ましい実施形態に関連した次の記述から明らかになる。この図面においては、

【図１】図１は、本発明の第１実施形態における弾性体アクチュエータの制御装置の概念を示すブロック図であり、

【図２】図２は、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御対象であるロボットアームの構造を示す図であり、

【図３】図３は、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御対象であるロボットアームを駆動する弾性膨張収縮構造体の構造及び動作を示す図であり、

【図４】図４は、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御対象であるロボットアームを圧縮性流体である空気により駆動するための空気圧供給系の動作を示す図であり、

【図５】図５は、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータ制御装置の制御ブロック図であり、

【図６】図６は、本発明の上記第１実施形態における目標圧力差計算の構造を示す図であり、

【図７】図７は、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御プログラムの実際の動作ステップのフローチャートであり、

【図８】図８は、本発明の第２実施形態における弾性体アクチュエータの制御装置の適応目標圧力差補正手段の構造を示す図であり、

【図９Ａ】図９Ａは、図２に示すロボットアームについて、適応目標内部状態補正手段を用いないで図６に示す目標圧力差計算手段のみを行う従来の制御装置により手先位置の軌道追従制御を行った場合の結果を示す図であり、

【図９Ｂ】図９Ｂは、図５に示す本発明の上記第１実施形態における弾性体アクチュエータの制御装置により手先位置の軌道追従制御を行った場合の結果を示す図であり、

【図１０】図１０は、本発明の上記第１実施形態における弾性体アクチュエータ制御装置の一つである導電性ポリマーアクチュエータを用いた場合の制御ブロック図であり、

【図１１Ａ】図１１Ａは、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御対象であるロボットアームを駆動する導電性ポリマーアクチュエータの構造及び動作を示す図であり、

【図１１Ｂ】図１１Ｂは、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御対象であるロボットアームを駆動する上記導電性ポリマーアクチュエータの構造及び動作を示す図であり、

【図１１Ｃ】図１１Ｃは、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置の制御対象であるロボットアームを駆動する上記導電性ポリマーアクチュエータの構造及び動作を示す図であり、

【図１２】図１２は、本発明の第３実施形態における上記弾性体アクチュエータ制御装置の制御ブロック図であり、
【図１３】図１３は、本発明の上記第１実施形態における上記弾性体アクチュエータの制御装置に基づく制御プログラムの動作ステップを示すフローチャートである。
【発明を実施するための形態】
【００２０】
以下に、本発明にかかる実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。
【００２１】
本発明にかかる実施の形態を説明する前に、本発明の種々の態様について、まず、説明する。
【００２２】
本発明の第１態様によれば、弾性体アクチュエータの制御装置であって、
上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、
上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、
上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段とを備えて、
上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。
【００２３】
本発明の第２態様によれば、上記目標内部状態決定手段は、さらに上記弾性体アクチュエータの出力の計測値を取得し、上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する、第１の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。
【００２４】
本発明の第３態様によれば、上記目標内部状態決定手段の出力と上記適応目標内部状態補正手段の出力とを加算して、加算結果を上記内部状態誤差補償手段に出力する加算部をさらに備える第１又は２の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。
【００２５】
本発明の第４態様によれば、上記適応目標内部状態補正手段は、上記出力の目標値から出力値を減じた値にゲインを乗じた値を積分した適応オフセット値と、上記出力の目標値から初期値を減じた値に、上記出力の目標値から出力値を減じた値を乗じた値にゲインを乗じた値を積分した適応ゲイン値を算出し、上記適応ゲイン値に上記出力の目標値を乗じた値と、上記適応オフセット値とを加算した値を上記内部状態の目標補正値とする第１～３のいずれか１つの態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。
【００２６】
本発明の第５態様によれば、上記適応目標内部状態補正手段は、規範モデルを備え、上記出力の目標値と上記規範モデルの出力と上記弾性体アクチュエータの出力との間で誤差が生じた場合にその誤差を小さくするゲインを上記出力の目標値と上記規範モデルの状態変数に乗じた値を加算し、上記内部状態の目標補正値として決定する第１～４のいずれか

１つの態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００２７】

本発明の第６態様によれば、上記適応目標内部状態補正手段を使用する状態又は使用しない状態又は上記適応目標内部状態補正手段からの出力の更新を停止する状態の間での切り替えを行う補正出力制御手段をさらに備える第１～５のいずれか１つの態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００２８】

本発明の第７態様によれば、上記適応目標内部状態補正手段からの出力をローパスフィルタを通す状態又は通さない状態との間での切り替えを行う補正出力制御手段をさらに備える第１～６のいずれか１つの態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００２９】

本発明の第８態様によれば、上記適応目標内部状態補正手段は、判断手段を備えて、上記目標軌道生成手段から繰り返しの信号を上記適応目標内部状態補正手段で受け取り、上記弾性体アクチュエータの目標値を時系列に並べた上記弾性体アクチュエータの軌道が繰り返しであることを上記判断手段で判断したときに上記適応目標内部状態補正手段を使用することを決定する第６の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００３０】

本発明の第９態様によれば、上記適応目標内部状態補正手段を使用するとき、上記補正出力制御手段は、上記弾性体アクチュエータの出力誤差が予め決められた閾値を下回ったときに上記適応目標内部状態補正手段の出力の更新を停止することを決定する第８の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００３１】

本発明の第１０態様によれば、上記補正出力制御手段は、上記弾性体アクチュエータが物体に衝突したことを検知する衝突検知手段を備えて、上記衝突検知手段により衝突したことを検知したときに上記適応目標内部状態補正手段の出力の更新を停止することを決定する第６の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００３２】

本発明の第１１態様によれば、上記補正出力制御手段は、弾性体アクチュエータの始動時に上記適応目標内部状態補正手段の使用をしないことを決定する第６の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００３３】

本発明の第１２態様によれば、上記補正出力制御手段は、上記適応目標内部状態補正手段を使用しない状態から使用する状態に切り替えるとき、又は、上記適応目標内部状態補正手段の出力を更新せずに停止する状態から更新する状態に切り替えるときに一定時間出力を通して出力するローパスフィルタをさらに備える第６の態様に記載の弾性体アクチュエータの制御装置を提供する。

【００３４】

本発明の第１３態様によれば、弾性体アクチュエータの制御方法であって、

上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、

上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部

状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段とを備えて、

上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御する弾性体アクチュエータの制御方法を提供する。

【００３５】

本発明の第１４態様によれば、弾性体アクチュエータの制御装置のプログラムであって、

コンピュータを、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値と上記弾性体アクチュエータの出力を計測する出力計測手段により計測された上記弾性体アクチュエータの出力の計測値とが入力されることにより出力誤差を補償する出力誤差補償手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値より、上記弾性体アクチュエータの内部状態の目標値を決定する目標内部状態決定手段と、

上記弾性体アクチュエータの出力の目標値及び上記弾性体アクチュエータの出力の計測値との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように内部状態の目標補正値を決定する適応目標内部状態補正手段と、

上記出力誤差補償手段からの出力、及び上記目標内部状態決定手段から出力される内部状態の目標値、及び、上記適応目標内部状態補正手段から出力される内部状態の目標補正値、及び上記弾性体アクチュエータの内部状態を計測する内部状態計測手段からの出力が入力されることにより内部状態誤差を補償する内部状態誤差補償手段として機能させて、

上記内部状態誤差補償手段により補償された上記内部状態誤差に基づき上記弾性体アクチュエータの上記出力の計測値を上記出力の目標値とするように制御するための、弾性体アクチュエータの制御プログラムを提供する。

【００３６】

以下に、本発明にかかる実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。

【００３７】

（第１実施形態）

図１は本発明の第１実施形態にかかる弾性体アクチュエータの制御装置の概念を示すブロック図である。図１において、弾性体アクチュエータ１０２は、流体圧により駆動される流体圧駆動アクチュエータである。

【００３８】

弾性体アクチュエータ１０２の制御装置は、目標出力生成手段１０１と、出力計測手段１０４と、目標内部状態決定手段１０５と、出力誤差補償手段１０３と、適応目標内部状態補正手段１１１と、内部状態計測手段１０７と、内部状態誤差補償手段１０６と、出力誤差計算部１０８とを備えて構成している。

【００３９】

目標出力生成手段１０１は、各弾性体アクチュエータ１０２の出力の目標値１１３を生成する。

【００４０】

出力計測手段１０４は、各弾性体アクチュエータ１０２に接続され、各弾性体アクチュエータ１０２の出力を計測し、計測値１１２を、目標内部状態決定手段１０５と、出力誤差計算部１０８を介して出力誤差補償手段１０３と、適応目標内部状態補正手段１１１とにそれぞれ入力する。

【００４１】

出力誤差計算部１０８は、目標出力生成手段１０１からの出力目標値１１３と出力計測手段１０４からの出力（計算値１１２）とから出力誤差１１４を計算し、計算結果を出力誤差補償手段１０３に出力する。

【００４２】

出力誤差補償手段１０３は、出力誤差計算部１０８から出力誤差補償手段１０３に入力された出力誤差１１４を小さくするように補正し、出力計測手段１０４により計測される計測値１１２を、目標出力生成手段１０１からの出力目標値１１３に追従させるように制御を行う。

【００４３】

目標内部状態決定手段１０５は、目標出力生成手段１０１の出力目標値１１３と出力計測手段１０４からの計測値１１２とが入力され、出力目標値１１３及び計測値１１２により、各弾性体アクチュエータ１０２の内部状態目標値１１６を決定する。

【００４４】

適応目標内部状態補正手段１１１は、目標出力生成手段１０１の出力目標値１１３及び出力計測手段１０４からの計測値１１２が入力され、出力目標値１１３及び計測値１１２に基づいて適応アルゴリズムを用いた信号処理を行い、各弾性体アクチュエータ１０２の内部状態目標補正値１１７を決定する。より具体的には、各弾性体アクチュエータ１０２の出力の目標値及び各弾性体アクチュエータ１０２の出力の計測値より、弾性体アクチュエータ１０２の内部状態と弾性体アクチュエータ１０２の出力の関係との間で誤差が生じた場合に、その誤差を小さくするように信号合成操作を施すことにより得られる信号を、内部状態の目標補正値１１７として決定する。

【００４５】

加算部の一例としての内部状態誤差計算部１０９は、出力誤差補償手段１０３からの出力１１５と、目標内部状態決定手段１０５からの出力（内部状態目標値）１１６と、適応目標内部状態補正手段１１１からの出力（内部状態目標補正値）１１７と、内部状態計測手段１０７からの出力（内部状態計測値）１１８とから、内部状態誤差を計算し、内部状態誤差補償手段１０６に出力する。

【００４６】

内部状態誤差補償手段１０６は、出力誤差補償手段１０３からの出力、及び目標内部状態決定手段１０５からの出力、及び、適応目標内部状態補正手段１１１からの出力、及び内部状態誤差計算部１０９からの出力が入力されることによって、内部状態誤差を補償するように、すなわち、に基づいて各弾性体アクチュエータ１０２の内部状態計測値を目標値に追従させるように制御を行う。

【００４７】

内部状態計測手段１０７は、各弾性体アクチュエータ１０２に接続され、各弾性体アクチュエータ１０２の後述する各弾性膨張収縮構造体１の内部圧力である内部状態計測値１１８を測定して、内部状態誤差計算部１０９に入力する。

【００４８】

以上の原理に基づく制御プログラムの実際の動作ステップについて、図１３のフローチャートに基づいて説明する。

【００４９】

ステップＳ１０１では、出力計測手段１０４により計測された、弾性体アクチュエータ１０２の出力の計測値が上記制御装置に取り込まれる。

【００５０】

次いで、ステップＳ１０２では、目標出力生成手段１０１内に予め記憶されていた弾性体アクチュエータ１０２の動作プログラムに基づき、目標出力生成手段１０１は弾性体アクチュエータ１０２の出力目標値を計算する。

【００５１】

次いで、ステップＳ１０３では、目標出力生成手段１０１で計算された出力目標値と、出力計測手段１０４により計測された現在の出力の計測値との差である出力誤差が出力誤差計算部１０８により計算される。

【００５２】

次いで、ステップＳ１０４では、出力誤差計算部１０８により計算された出力誤差から出力誤差修正出力が出力誤差補償手段１０３により計算される。

【００５３】
次いで、ステップＳ１０５では、目標出力生成手段１０１で計算された出力目標値と、出力計測手段１０４により計測された現在の出力の計測値とに基づき、目標内部状態決定手段１０５が内部状態目標値を算出する。
【００５４】
次いで、ステップＳ１０６では、目標出力生成手段１０１で計算された出力目標値と、出力計測手段１０４により計測された現在の出力の計測値とに基づき、適応目標内部状態補正手段１１１が適応目標内部状態補正値を算出する。
【００５５】
次いで、ステップＳ１０７では、内部状態計測手段１０７により計測された、弾性体アクチュエータ１０２の内部状態の計測値が上記制御装置に取り込まれる。
【００５６】
次いで、ステップＳ１０８では、ステップＳ１０４で出力誤差補償手段１０３により計算された出力誤差修正出力とステップＳ１０５で目標内部状態決定手段１０５により算出された内部状態目標値とステップＳ１０６で適応目標内部状態補正手段１１１により算出された目適応目標内部状態補正値とを加算した値から、ステップＳ１０７で計測された内部状態の計測値を減算して、内部状態誤差を内部状態誤差計算部１０９で計算する。
【００５７】
次いで、ステップＳ１０９では、内部状態誤差計算部１０９で計算された内部状態誤差を基に、内部状態誤差補償手段１０６により内部状態誤差修正出力が計算される。
【００５８】
次いで、ステップＳ１１０では、内部状態誤差補償手段１０６で計算された内部状態誤差修正出力が、内部状態誤差補償手段１０６から弾性体アクチュエータ１０２に与えられ、弾性体アクチュエータ１０２が駆動する。
【００５９】
以上のステップＳ１０１～ステップＳ１１０が制御の計算ループとして繰り返し実行されることにより、弾性体アクチュエータ１０２の制御が実現する。
【００６０】
次に、第１実施形態の弾性体アクチュエータ１０２の制御装置の具体的な例について、制御対象としてロボットアーム１０を例に取り説明を行う。
【００６１】
図２は、本発明の第１実施形態にかかる弾性体アクチュエータ１０２の制御装置の制御対象となるロボットアーム１０の構成を示す図である。ロボットアーム１０は、２自由度のロボットアームであって、直交するｘ軸とｙ軸とを含むｘｙ平面内で正逆回転する第１関節軸６－１と、同じくｘｙ平面内で正逆回転する第２関節軸６－２とを備えて構成されている。
【００６２】
図２において、１－１ａ、１－１ｂ、１－２ａ、１－２ｂ（これらは個別の弾性膨張収縮構造体に対する参照符号であり、代表的に弾性膨張収縮構造体を指し示すときには参照符号１で示す。）は弾性膨張収縮構造体である。弾性膨張収縮構造体１は、図３に示すように、ゴム材料で構成されて駆動部として機能する管状の中空弾性体２の外表面に、材料的には伸びにくい樹脂又は金属の繊維コードで網目状に編んだ変形方向規制部材３が配設される。変形方向規制部材３は、管状弾性体２の膨張による半径方向の変形が軸方向の長さの収縮に変換される一方、管状弾性体２の収縮による半径方向の変形が軸方向の長さの膨張に変換されるように構成される。管状弾性体２の両端部は、封止部材４でそれぞれ気密封止する。封止部材４に備えられた管状の流体通過部材５は、内部に圧縮性流体が通過する流体の流路を有し、中空弾性体２の中空内部に対して流体の注入あるいは注出が可能となる。流体通過部材５を通じて空気等の圧縮性流体が中空の管状弾性体２に供給される。
【００６３】

供給された圧縮性流体により内圧を管状弾性体２の内部空間に与えると、管状弾性体２が主に半径方向に膨張しようとする。しかしながら変形方向規制部材３の作用により、管状弾性体２の中心軸方向の運動に変換され、全長が収縮するため、直動駆動の弾性体アクチュエータ１０２として利用可能である。

【００６４】

ロボットアーム１０では、１組の弾性膨張収縮構造体（１，１）を関節軸６－１又は６－２を支点に対向するように配設する。１組の弾性膨張収縮構造体（１，１）のうちのどちらか一方の弾性膨張収縮構造体１が収縮し、他方の弾性膨張収縮構造体１が伸張する。そして支点を介して力が作用して軸が回転する拮抗型駆動構造とすることにより、関節軸６－１又は６－２での正逆回転運動を実現することができる。具体的には、弾性膨張収縮構造体１－１ａと弾性膨張収縮構造体１－１ｂとの拮抗駆動により第１関節軸６－１は、正逆回転駆動する。弾性膨張収縮構造体１－２ａと弾性膨張収縮構造体１－２ｂとの拮抗駆動により第２関節軸６－２は、正逆回転駆動する。

【００６５】

支持軸（第２軸）３０３の上端の両側には、第１関節軸６－１と同心に２つの円形支持体３０２，３０２が回転自在に支持されている。支持軸３０３の下端の固定床３０１側には、支持軸３０３の長手方向と直交して支持体３０７，３０７が固定されている。２つの円形支持体３０２，３０２と支持体３０７，３０７との間には、弾性膨張収縮構造体１－１ａ及び１－１ｂが連結されている。よって、弾性膨張収縮構造体１－１ａ及び１－１ｂの拮抗駆動により、第１関節軸６－１の支持軸３１４の軸回りにｘｙ面内で２つの円形支持体３０２，３０２が正逆回転する。この結果、２つの円形支持体３０２，３０２に連結されたロボットアーム１０の第１腕３１１と駆動軸３１３とを一体的に正逆回転させることができる。

【００６６】

第１腕３１１の第１腕用リンク（第１軸）３０８は、２つの円形支持体３０２，３０２に一端が固定されて、２つの円形支持体３０２，３０２と一体的に回転可能となっている。第１腕用リンク３０８の円形支持体３０２側には、支持体３０７，３０７と同様な支持体３０９，３０９（図４参照）が第１腕用リンク３０８の長手方向と直交して固定される。

【００６７】

また、第１腕用リンク３０８の先端側には、第１腕用リンク３１１の長手方向に直交して固定された支持体３１０が第２関節軸６－２の軸芯回りに回転可能に連結されている。第１腕用リンク３０８の円形支持体３０２側の支持体（図示せず）と先端側の支持体３１０との間には、弾性膨張収縮構造体１－２ａ及び１－２ｂが連結されている。よって、弾性膨張収縮構造体１－２ａ及び１－２ｂの拮抗駆動により、第２関節軸６－２の支持軸３１５の軸回りにｘｙ面内でロボットアーム１０の駆動軸３１３を相対的に正逆回転させることができる。

【００６８】

圧力センサ９－１ａ，９－１ｂは、弾性膨張収縮構造体（１－１ａ、１－１ｂ）のそれぞれの内部状態（一例として、内部圧力）を計測する内部状態計測手段１０７の一例であり、それぞれの流体通過部材５（流体注入出口）に配設され、それぞれの弾性膨張収縮構造体（１－１ａ、１－１ｂ）内の圧力を計測する。同じく弾性膨張収縮構造体１－２ａ、１－２ｂにも内部状態計測手段１０７の一例である圧力センサ９－２ａ，９－２ｂ（図示省略）が配設されている。

【００６９】

弾性膨張収縮構造体１－１ａ及び１－１ｂと、弾性膨張収縮構造体１－２ａ及び１－２ｂとのそれぞれには、後述するように、流量比例電磁弁１８が接続され、全ての流量比例電磁弁１８は、制御部の一例としての一般的なパーソナルコンピュータにより構成された制御コンピュータ１９に接続されている。制御コンピュータ１９は、流量比例電磁弁１８を介して、弾性膨張収縮構造体１－１ａ及び１－１ｂと、弾性膨張収縮構造体１－２ａ及

び１－２ｂとのそれぞれの収縮及び伸張動作を制御する。また、各関節軸６－１，６－２には出力計測手段１０４の一例である変位計測手段（本実施形態では変位計測手段の一例としてのエンコーダ８）が配設されており、それぞれのエンコーダ８によりそれぞれの関節軸６－１，６－２の関節角度が測定可能である。各弾性膨張収縮構造体１には内部状態計測手段１０７の一例である圧力計測手段（本実施形態では圧力計測手段の一例として圧力センサ９）が配設されており、圧力センサ９により各弾性膨張収縮構造体１の内部圧力が測定可能となっている。

【００７０】

以上のような構造とすれば、多自由度を生かし、例えば駆動軸３１３の代わりに、物体を把持可能なハンドを取り付ければ、物体の把持及び運搬など、ロボットアーム１０として基本的な機能を実現することができる。このハンドの位置及び姿勢を、以下では手先位置及び姿勢として説明する。

【００７１】

図４は、本発明の第１実施形態にかかるロボットアーム１０を駆動するための空気圧供給系の構成を示す図である。図４ではロボットアーム１０の第２関節軸６－２を正逆回転駆動する部分のみを記し、他の部分は省略している。図４において、１６は例えばコンプレッサー等の空気圧源、１７は空気圧フィルタ１７ａ、空気圧減圧弁１７ｂ、及び空気圧用ルブリケータ１７ｃが１組になった空気圧調整ユニットである。１８は例えば電磁石の力でスプール弁などを駆動することで流量を制御する流量比例電磁弁の一例としての５ポート流量制御電磁弁である。制御コンピュータ１９は、Ｄ／Ａボードなどの入出力ＩＦ２０を搭載し、５ポート流量制御電磁弁１８に電圧指令値を出力することにより、それぞれの流体通過部材５を流れる各空気の流量を独立して制御可能とする。

【００７２】

次に、図４に示す空気圧供給系の動作について説明する。空気圧源１６により生成された高圧空気は、空気圧調整ユニット１７により減圧され、例えば６００[ｋＰａ]といった一定圧力に調整され、５ポート流量制御電磁弁１８に供給される。５ポート流量制御電磁弁１８の開度は、制御コンピュータ１９より入出力ＩＦ２０を介して出力される電圧指令値に比例して制御される。制御コンピュータ１９から５ポート流量制御電磁弁１８に正の電圧指令値が入力された場合には空気圧回路記号のＡで示した状態になり、空気圧源１６側から弾性膨張収縮構造体１－２ａ側への流路が開通し、電圧指令値の絶対値に比例した流量の空気が弾性膨張収縮構造体１－２ａ側に供給される。また、弾性膨張収縮構造体１－２ｂ側は、大気圧側への流路が開通し、電圧指令値の絶対値に比例した流量の空気流が弾性膨張収縮構造体１－２ｂ側から大気中へ排気される。したがって、図４に示すように、弾性膨張収縮構造体１－２ａの全長が縮み、弾性膨張収縮構造体１－２ｂの全長が伸びることにより、電圧指令値の絶対値に比例した速度で第２関節軸６－２は右回転運動を行う。一方、制御コンピュータ１９から５ポート流量制御電磁弁１８に負の電圧指令値が入力された場合には空気圧回路記号のＢで示した状態になり、弾性膨張収縮構造体１－２ａ，１－２ｂの動作は逆となり（すなわち、弾性膨張収縮構造体１－２ａの全長が伸び、弾性膨張収縮構造体１－２ｂの全長が縮むことにより）、第２関節軸６－２は左回転運動を行う。

【００７３】

すなわち、５ポート流量制御電磁弁１８から弾性膨張収縮構造体１側に供給された空気流は、流体通過部材５により封止部材４を通過し、管状弾性体２の内部に到達し、管状弾性体２の内圧を発生させる。管状弾性体２は発生した内圧により膨張するが、変形方向規制部材３の網目状に組まれた繊維コードの拘束作用（規制作用）により、膨張による半径方向の変形が規制されて軸方向の長さの収縮に変換され、図３の下側に示すように弾性膨張収縮構造体１の全長が短くなる。一方、５ポート流量制御電磁弁１８から空気を大気中に排気し、管状弾性体２の内圧を減ずれば、管状弾性体２の弾性力により復元して膨張が解消されて、弾性膨張収縮構造体１の全長は図３の上側に示すように伸張する。この結果、図３において、右端で固定されていると考えると、上記伸縮により、管状弾性体２の左

端では距離ｄの差があることになる。したがって、第１実施形態における弾性膨張収縮構造体１は、空気圧を供給制御することにより、直動変位のアクチュエータとして機能させることが可能である。伸張及び短縮量は弾性膨張収縮構造体１の内圧に概ね比例するので、図４のように制御コンピュータ１９で５ポート流量制御電磁弁１８を制御して弾性膨張収縮構造体１に供給される空気流量を制御すれば、弾性膨張収縮構造体１の全長を制御できる。

【００７４】

図２に示すロボットアーム１０では、弾性膨張収縮構造体１－１ａと１－１ｂによる拮抗駆動、及び、弾性膨張収縮構造体１－２ａと１－２ｂによる拮抗駆動のために、拮抗する弾性膨張収縮構造体１それぞれに対して５ポート流量制御電磁弁１８が配設されて同様の空気圧供給系が構成されている。そして制御コンピュータ１９よりＤ／Ａボード２０を介してそれぞれの５ポート流量制御電磁弁１８に出力される電圧指令値により、ロボットアーム１０の全ての関節軸６－１，６－２を同時に正逆回転駆動することができるようになっている。

【００７５】

図５は、本発明の第１実施形態にかかる弾性体アクチュエータ１０２の制御装置のより具体的な構成を示す図であり、上記制御装置は、例えば、上記制御コンピュータ１９内に備えられている。ただし、図５において、１０は弾性体アクチュエータ１０２の制御装置の制御対象である図２に示すロボットアームである。ロボットアーム１０からはそれぞれの関節軸６－１，６－２のエンコーダ８により計測される計測値１１２の一例としての関節角の現在値（関節角度ベクトル）$q=[q_1, q_2]^T$と、それぞれの弾性膨張収縮構造体１の圧力センサ９により計測される内部状態計測値１１８の一例としての弾性膨張収縮構造体１の内圧$P=[P_{1a}, P_{1b}, P_{2a}, P_{2b}]^T$とが出力される。ただし、$q_1$，$q_2$は、それぞれ、第１関節軸６－１、第２関節軸６－２の関節角度である。また、P_{1a}，P_{1b}，P_{2a}，P_{2b}はそれぞれ、弾性膨張収縮構造体１－１ａ、１－１ｂ、１－２ａ、１－２ｂの内圧である。

【００７６】

圧力差計算手段１３は、圧力センサ９により計測された内圧Ｐ（計測値Ｐ）が入力され、圧力センサ９の計測値Ｐより圧力差$\Delta P=[\Delta_{P1}, \Delta_{P2}]^T=[P_{1a}-P_{1b}, P_{2a}-P_{2b}]^T$が圧力差計算手段１３で計算されて内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。

【００７７】

順運動学計算手段２１は、各関節軸６－１，６－２のエンコーダ８により計測された関節角の現在値ｑである関節角度ベクトルｑがエンコーダ８から入力され、ロボットアーム１０の関節角度ベクトルｑから手先位置及び姿勢ベクトルｒへの変換の幾何科学的計算を行う。

【００７８】

近似逆運動学計算手段（２３ａ，２３ｂ，２３ｃ）は、近似式$u_{out}=J_r(q)^{-1}u_{in}$により、逆運動学の近似計算を行う。ただし、$J_r(q)$はヤコビ行列、$u_{in}$は近似逆運動学計算手段２３ａ，２３ｂ，２３ｃへの入力、u_{out}は近似逆運動学計算手段２３ａ，２３ｂ，２３ｃからの出力であり、入力u_{in}を手先位置・姿勢誤差r_eとし、出力u_{out}を関節角度誤差q_eとすれば、$q_e=J_r(q)^{-1}r_e$のように手先位置・姿勢誤差r_eから関節角度誤差q_eへの変換式となる。この近似逆運動学計算手段２３ａ，２３ｂ，２３ｃによれば、近似逆運動学計算が容易に可能となる。

【００７９】

近似逆運動学計算手段２３ａでは、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルの現在値ｑと、目標出力生成手段１０１の一例としての目標軌道生成手段１１より出力目標値１１３の一例として出力される手先位置及び姿勢目標ベクトルr_dとの現在の手先位置及び姿勢ベクトルｒとの手先位置・姿勢誤差r_eが入力されて、関節角度ベクトルの誤差q_eが出力される。

【００８０】
近似逆運動学計算手段２３ｂは、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルの現在値ｑと、位置誤差補償手段１２から位置誤差修正出力ΔP_{re}とが入力されて、関節誤差修正出力ΔP_{qe}が出力される。
【００８１】
近似逆運動学計算手段２３ｃでは、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルの現在値ｑと、目標軌道生成手段１１より出力される手先位置及び姿勢目標ベクトルｒｄとの現在の手先位置及び姿勢ベクトルｒとの誤差r_eが入力されて、関節角度ベクトルの誤差q_eが出力される。
【００８２】
目標軌道生成手段１１は、目標とするロボットアーム１０の動作を実現するための手先位置及び姿勢目標ベクトルr_dが出力される。目標とするロボットアーム１０の動作は、目的とする作業に応じて事前にそれぞれの時間（ｔ＝０、$t=t_1$、$t=t_2$、・・・）でのポイントごとの位置（r_{d0}、r_{d1}、r_{d2}、・・・）と繰り返し動作するかどうかのフラグが記録されており、目標軌道生成手段１１は、それぞれの時間（ｔ＝０、$t=t_1$、$t=t_2$、・・・）でのポイントごとの位置（r_{d0}、r_{d1}、r_{d2}、・・・）の情報と手先位置及び姿勢ベクトルｒとを基に多項式補間を使用し、各ポイント間の軌道を補完し、手先位置及び姿勢目標ベクトルr_dを生成する。
【００８３】
出力誤差計算部１０８は、手先位置及び姿勢目標ベクトルr_dと順運動学計算手段２１により計算される手先位置及び姿勢ベクトルｒとが入力され、手先位置・姿勢誤差$r_e=r-r_d$を計算し、出力誤差１１４の一例として手先位置・姿勢誤差r_eを出力する。
【００８４】
出力誤差補償手段１０３の一例である位置誤差補償手段１２は、出力誤差計算部１０８により出力される手先位置・姿勢誤差r_eが入力され、出力１１５の一例として位置誤差修正出力ΔP_{re}が近似逆運動学計算手段２３ｂに向けて出力される。
【００８５】
目標内部状態決定手段１０５は、一例として、出力誤差計算部１０８と目標圧力差計算手段１４と近似逆運動学計算手段２３ａとで構成される。目標圧力差計算手段１４には、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルの現在値ｑと関節角度ベクトルの誤差q_eとに基づく目標関節角度ベクトルq_dとして$q_d=q+J_r(q)^{-1}r_e$が入力され、目標関節角度ベクトルq_dより内部状態目標値１１６の一例としての目標圧力差（圧力差の目標値）$\Delta P_d=[\Delta P_{1d},\ \Delta P_{2d}]^T$が算出され、目標内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。ただし、ΔP_{1d}，ΔP_{2d}はそれぞれ、弾性膨張収縮構造体１－１ａと１－１ｂの、弾性膨張収縮構造体１－２ａと１－２ｂの圧力差の目標値である。
【００８６】
適応目標内部状態補正手段１１１は、一例として、出力誤差計算部１０８と適応目標圧力差補正手段２５と近似逆運動学計算手段２３ｃとで構成される。適応目標圧力差補正手段２５には、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルの現在値ｑと関節角度ベクトルの誤差q_eとに基づく目標関節角度ベクトルq_dとして$q_d=q+J_r(q)^{-1}r_e$と、関節角度ベクトルｑとが入力され、目標圧力差の調整補正値（内部状態目標補正値１１７の一例）$\Delta P_{da}=[\Delta P_{1da},\ \Delta P_{2da}]^T$が適応目標圧力差補正手段２５で算出され、算出された調整補正値ΔP_{da}が適応目標圧力差補正手段２５でから内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。ただし、ΔP_{1da}，ΔP_{2da}はそれぞれ、弾性膨張収縮構造体１－１ａと１－１ｂの、弾性膨張収縮構造体１－２ａと１－２ｂの圧力差の目標値（目標圧力差）の調整補正値である。
【００８７】
補正出力制御手段１２０は、目標軌道生成手段１１から入力される動作開始の信号と目標軌道の繰り返し信号と、後述する衝突検知手段１２１から入力される衝突検知信号と、

出力誤差計算部１０８から入力される出力誤差とに応じて、適応目標圧力差補正手段２５のＯＮ若しくはＯＦＦの指令（ＯＮモード用の指令若しくはＯＦＦモード用の指令）、又は、出力値のホールドの指令（ホールド（更新停止）モード用の指令）、又は、ローパスフィルタのＯＮ若しくはＯＦＦの指令を適応目標圧力差補正手段２５に出力する。ローパスフィルタは、適応目標圧力差補正手段２５内に例えばソフトウェアとして構成される。ローパスフィルタは、適応目標圧力差補正手段２５のＯＦＦモードからＯＮモードに切り替えるとき、又は、ホールド（更新停止）モードからＯＮモードに切り替えるとき、適応目標圧力差補正手段２５からの出力である目標圧力差が急変し、ロボットアーム１０の動作が不安定になることを防ぐために使用する。上記モードの切替時に、適応目標圧力差補正手段２５からの出力をローパスフィルタを経由させたのち出力させることで、目標圧力差を緩やかに変化させることができる。

【００８８】

内部状態誤差計算部１０９は、適応目標圧力差補正手段２５から出力される目標圧力差の調整補正値ΔP_{da}と、目標内部状態決定手段１０５から出力されるΔP_{d}と、近似逆運動学計算手段２３ｂから出力されるΔP_{qe}とを加算し、加算された値から、圧力差計算手段１３から出力されるΔＰを減算して算出する圧力差誤差（圧力誤差値）ΔP_{e}を圧力差誤差補償手段１５に向けて出力する。

【００８９】

内部状態誤差補正手段１０６の一例である圧力差誤差補償手段１５は、内部状態誤差計算部１０９から圧力差誤差ΔP_{e}が入力され、圧力差誤差修正出力ｕがロボットアーム１０に向けて出力される。圧力差誤差修正出力ｕは、Ｄ／Ａボードなどの入出力ＩＦ２０を介して5ポート流量制御電磁弁１８に電圧指令値として与えられ、各関節軸６－１，６－２が正逆回転駆動されてロボットアーム１０が動作する。

【００９０】

衝突検知手段１２１は、ロボットアーム１０が外部の物体と衝突したことを検知し、衝突検知信号を補正出力制御手段１２０に出力する。衝突を検知する一例として、図５ではロボットアーム１０の手先位置の誤差を用いている。これは手先位置の誤差を微分し、誤差の時間微分の値が、事前に決めた閾値よりも大きくなったときに、衝突が起こったと推定する方法である。衝突の検知方法は、他にもカメラを用いて検知する方法、又は、接触センサ又は力センサなどで検知する方法でもよい。

【００９１】

以上のように構成される制御装置に関して、制御動作の原理について説明する。

【００９２】

制御動作の基本は、位置誤差補償手段１２による手先位置・姿勢誤差r_{e}のフィードバック制御（位置制御）である。位置誤差補償手段１２として、例えば、ＰＩＤ補償器を使用すれば、手先位置・姿勢誤差r_{e}が０に収束するように制御が働き、目標とするロボットアーム１０の動作が実現する。

【００９３】

圧力差誤差補償手段１５には圧力差誤差ΔP_{e}が入力されるため、手先位置・姿勢誤差r_{e}が発生すると圧力差誤差補償手段１５が動作し、手先位置・姿勢誤差r_{e}が０に収束するように圧力差の制御が働く。図３に示す弾性膨張収縮構造体１では内部圧力の変化が発生して初めて変位が発生するため、時間的には位置の変化（変位）よりも圧力変化の方が早く観測されることになる。したがって、図５に示す制御系のように位置制御を行う位置フィードバックループの内側に、圧力差の制御を行う内部圧力フィードバックループを構成することにより、応答性の悪さを補償し、位置制御性能の向上を実現可能である。

【００９４】

次に、目標圧力差計算手段１４について説明する。図３に示す１組の弾性膨張収縮構造体１，１の拮抗駆動による関節軸６－１，６－２の正逆回転駆動を行う場合、関節角度と１組の弾性膨張収縮構造体１の内部圧力差との関係は、例えば、図６のようになる。図６は全長２５０ｍｍ、内径１０ｍｍの弾性膨張収縮構造体（マッキベン型空気圧人工筋）を

使用した場合の結果である。図６中に示したように、測定結果は、ほぼ直線で近似することができる。したがって、目標圧力差ΔＰ$_d$を計算する式として、直線を表す１次式

【００９５】

【数１】

$$\Delta P_d = A q_d + b \qquad \cdots\cdots \text{式（１）}$$

を使うことができる。ただし、Ａ、ｂは係数であり、図６の測定結果より求めることができる。したがって、目標圧力差計算手段１４において、式（１）により目標関節角度ベクトルｑ$_d$から目標圧力差ΔＰ$_d$を計算し、内部状態誤差計算部１０９を介して圧力差誤差補償手段１５に入力することにより、定常偏差の小さい高精度な位置制御が実現する。ここでは、関節角度と圧力差の関係を１次方程式で近似したが、これに限られるわけではなく、２次方程式など多次元の多項式でも近似可能である。また、上記弾性体アクチュエータ１０２の出力と上記弾性体アクチュエータ１０２の内部状態の関係（例えば、関節角度と圧力差の関係）をテーブルとして上記制御装置の記憶部（図示せず）に記憶させておき、記憶部に記憶したテーブルに基づき、上記弾性体アクチュエータ１０２の出力の目標値（例えば関節角度の目標値）から上記弾性体アクチュエータ１０２の内部状態の目標値（例えば圧力差の目標値）を内部状態目標値導出部（図示せず）で導出するという構成とすることもできる。

【００９６】

目標圧力差計算手段１４は、事前の実験にて関節角度と圧力差の関係を算出して、算出結果を上記したように記憶部（図示せず）に記憶している。しかし、ロボットアーム１０の先端にかかる負荷による重力の影響又はその他の外乱、弾性体アクチュエータ１０２の経年変化による特性変化により、出力と内部状態の関係（例えば、関節角度と圧力差の関係）は変化する。この結果として起こる弾性体アクチュエータ１０２の出力誤差を補正するため、適応目標圧力差補正手段２５は目標圧力差の調整補正値ΔＰ$_{da}$を出力する。

【００９７】

適応目標圧力差補正手段２５の一例を、以下の式（２）～（３）に示す。適応目標圧力差補正手段２５では、関節角度目標値ｑ$_d$と現在の関節角度ｑより関節誤差ｑ$_e$を算出し、関節誤差ｑ$_e$を用いて目標圧力差の調整補正値ΔＰ$_{da}$を算出することにより、適応的に目標圧力差を変化させる（言い換えれば、関節誤差ｑ$_e$が生じた場合に、その関節誤差ｑ$_e$を小さくするように目標圧力差を変化させる）ことができる。

【００９８】

【数２】

$$q_e = q_d - q \qquad \cdots\cdots \text{式（２）}$$

【００９９】

【数３】

$$\Delta P_{da} = \int K_P q_e dt + q_d \cdot \int K_I (q_d - q_o) q_e dt \qquad \cdots\cdots \text{式（３）}$$

ここで、Ｋ$_P$とＫ$_I$は事前の実験で決めたゲイン、ｑ$_o$は拮抗する２本の弾性体アクチュエータ１０２，１０２が中立であるとき（初期値）の関節角度である。式（３）は、式（１）の係数Ａ及び係数ｂをそれぞれ補正するように設計している。式（３）の前半部

【０１００】

【数４】

$$\int K_P q_e dt$$

【０１０１】

は関節誤差ｑ$_e$にゲインを掛けたものを積分して適応オフセット値を求めているが、これは、式（１）の係数ｂの補正値として機能する。また、式（３）の後半部のうち

【０１０２】

【数５】

$$\int K_I(q_d - q_o)q_e dt$$

【０１０３】

は適応ゲイン値であり、係数Ａの補正値として機能する。比例係数Ａの誤差による影響は、拮抗する２本の弾性体アクチュエータ１０２，１０２の中立点から離れたところほど大きくなるため、中立点からの距離に応じて関節誤差ｑｅに重みをかけ、その値を積分することで、係数Ａの補正ができる。

【０１０４】

以上のように、式（３）を現在の関節誤差ｑｅに応じて適応的に変化する（言い換えれば、現在の関節誤差ｑｅを小さくするように変化する）ことで、式（１）の補正をすることが可能となり、関節誤差ｑｅを減らす方向に働く。

【０１０５】

また、補正出力制御手段１２０から適応目標圧力差補正手段２５にローパスフィルタがＯＮの指令が入っている場合、適応目標圧力差補正手段２５の出力は、目標圧力差の調整補正値ΔＰｄａをローパスフィルタを通した値を出力する。補正出力制御手段１２０から適応目標圧力差補正手段２５にローパスフィルタがＯＦＦの指令が入っている場合、適応目標圧力差補正手段２５の出力は、ローパスフィルタを通さずに、目標圧力差の調整補正値ΔＰｄａをそのまま出力する。

【０１０６】

補正出力制御手段１２０は、

（ｉ）目標圧力差の調整補正値ΔＰｄａを出力する指令、若しくは、出力しない指令、又は、

（ｉｉ）ローパスフィルタを通して出力する指令、又は、

（ｉｉｉ）ΔＰｄａの値をある値でホールドする指令を、

適応目標圧力差補正手段２５に対して行う。具体的には以下の条件の少なくとも１つを用いて、目標圧力差の調整補正値ΔＰｄａを補正出力制御手段１２０が制御する。

【０１０７】

（１）ロボットアーム１０の始動時には適応目標圧力差補正手段２５は動作せず（使用せず）、始動時から一定時間経過した後から、適応目標圧力差補正手段２５の動作を始める（使用し始める）。これは、ロボットアーム１０の始動時には、正常な始動に必要な初期動作を行うケースがあり、この初期動作では、位置制御の精度よりも、例えばセンサの確認などが優先される。また、この初期動作が完了するまでは、ロボットアーム１０の動作自体が不安定であることも考えられる。そのため、適応的に（誤差が小さくなるように）動かそうとすると、ロボットアーム１０の安定性が損なわれる可能性がある。このため、始動しロボットアーム１０の初期動作が完了するまでは、適応目標圧力差補正手段２５を動作させない（言い換えれば、適応目標圧力差補正手段２５のＯＦＦモードを意味する）。

【０１０８】

（２）衝突検知手段１２１から衝突検知信号が入力されたときから一定時間の間、適応目標圧力差補正手段２５の出力値をホールドして更新しない。外部の物体との衝突により、軌道に沿って動けなくなっているロボットアーム１０に対して誤差を補正しようとすることにより、ロボットアーム１０もしくは衝突した物体が破損する可能性があるため、衝突が検知されてから一定時間の間は適応目標圧力差補正手段２５の出力を更新せず、出力値をホールドする。

【０１０９】

（３）目標軌道生成手段１１から繰り返し軌道である信号（目標軌道の繰り返し信号）が来たときに適応目標圧力差補正手段２５を動作させる（適応目標圧力差補正手段２５を使用する）（言い換えれば、適応目標圧力差補正手段２５のＯＮモードを意味する）。これは、適応目標圧力差補正手段２５の効果が最も優位に現れるのが繰り返し動作時である

ため、繰り返し動作のときだけ適応目標圧力差補正手段２５を使用するために適応目標圧力差補正手段２５を動作させる。このため、例えば、適応目標圧力差補正手段２５は、判断手段２５ａを備えて、目標軌道生成手段１１から目標軌道の繰り返し信号を適応目標圧力差補正手段２５で受け取り、弾性体アクチュエータ１０２の目標値を時系列に並べた弾性体アクチュエータ１０２の軌道が繰り返しであると判断手段２５ａで判断したとき（例えば、目標軌道生成手段１１からの信号内に繰り返し動作するとのフラグが記録されていると判断手段２５ａで判断したとき）に、適応目標圧力差補正手段２５を使用することを決定する。

【０１１０】

（４）目標軌道生成手段１１から繰り返し軌道である信号（目標軌道の繰り返し信号）が来ていて、かつ、ロボットアーム１０の手先位置誤差が閾値を下回ったとき、適応目標圧力差補正手段２５の出力値をホールドして更新しない。これは、適応的に圧力差を補正しても（誤差が小さくなるように圧力差を補正しても）、これ以上は誤差が小さくならない（手先位置誤差が閾値を下回った）と補正出力制御手段１２０により判断した場合、適応目標圧力差補正手段２５の更新を停止するために行う（言い換えれば、適応目標圧力差補正手段２５のホールド（更新停止）モードを意味する）。

【０１１１】

（５）適応目標圧力差補正手段２５の動作を開始するとき（ＯＦＦモードからＯＮモードに切り替えるとき）、及び、更新を停止した状態から再び更新を開始するとき（ホールド（更新停止）モードからＯＮモードに切り替えるとき）には、事前に決められた時間の間は、適応目標圧力差補正手段２５からの出力を適応目標圧力差補正手段２５のローパスフィルタを通してから出力する。これは、適応目標圧力差補正手段２５の上記モードの切替時に目標圧力差が急変し、ロボットアーム１０の動作が不安定になることを防ぐために行う。

【０１１２】

以上の原理に基づく制御プログラムの実際の動作ステップについて、図７のフローチャートに基づいて説明する。

【０１１３】

ステップＳ１では、エンコーダ８により計測された関節角度データ（関節変数ベクトル又は関節角度ベクトルｑ）が上記制御装置に取り込まれる。

【０１１４】

次いで、ステップＳ２では、ロボットアーム１０の運動学計算に必要なヤコビ行列J_r等の計算が近似逆運動学計算手段（２３ａ，２３ｂ，２３ｃ）により行われる。

【０１１５】

次いで、ステップＳ３では、ロボットアーム１０からの関節角度データ（関節角度ベクトルｑ）から、ロボットアーム１０の現在の手先位置及び姿勢ベクトルｒが順運動学計算手段２１により計算される（順運動学計算手段２１での処理）。

【０１１６】

次いで、ステップＳ４では、目標軌道生成手段１１内に予め記憶されていたロボットアーム１０の動作プログラムに基づき、目標軌道生成手段１１はロボットアーム１０の手先位置及び姿勢目標ベクトルr_dを計算する。

【０１１７】

次いで、ステップＳ５では、手先位置及び姿勢目標ベクトルr_dと現在の手先位置及び姿勢ベクトルｒの差である手先位置・姿勢誤差r_eが出力誤差計算部１０８により計算される。

【０１１８】

次いで、ステップＳ６では、手先位置・姿勢誤差r_eから位置誤差修正出力ΔP_{re}が位置誤差補償手段１２により計算される（位置誤差補償手段１２での処理）。位置誤差補償手段１２の具体例としてはＰＩＤ補償器が考えられる。ＰＩＤ補償器の場合、ステップＳ６では、手先位置・姿勢誤差r_eに比例ゲインを乗算した値、手先位置・姿勢誤差r_e

の微分値に微分ゲインを乗算した値、及び手先位置・姿勢誤差r_eの積分値に積分ゲインを乗算した値の３つの値の合計値が位置誤差修正出力ΔP_{re}となる。定数の対角行列である比例、微分、積分の３つのゲインを適切に調整することにより、位置誤差が０に収束するように制御が働く。

【０１１９】

次いで、ステップＳ７では、ステップＳ２で計算したヤコビ行列J_rの逆行列を乗算することにより、位置誤差修正出力ΔP_{re}を手先位置の誤差に関する値から関節角度の誤差に関する値である関節誤差修正出力ΔP_{qe}に近似逆運動学計算手段２３ｂにより変換する（近似逆運動学計算手段２３ｂでの処理）。

【０１２０】

次いで、ステップＳ８では、ヤコビ行列J_rの逆行列を乗算することにより、手先位置・姿勢誤差r_eを関節角度ベクトルの誤差q_eに近似逆運動学計算手段２３ａ、２３ｃにより変換する（近似逆運動学計算手段２３ａ、２３ｃでの処理）。

【０１２１】

次いで、ステップＳ９では、目標圧力差計算手段１４により、ステップＳ８で計算された関節角度ベクトルの誤差q_eとエンコーダ８により計測された現在の関節角度qとを加算した値を目標関節角度ベクトルq_dとし、目標圧力差ΔP_dを算出する。

【０１２２】

次いで、ステップＳ１０では、適応目標圧力差補正手段２５により、ステップＳ８で計算された関節角度ベクトルの誤差q_eとエンコーダ８により計測された現在の関節角度qとを加算した値を目標関節角度ベクトルq_dとし、適応目標圧力差の調整補正値ΔP_{da}を算出する。

【０１２３】

次いで、ステップＳ１１では、内部状態計測手段１０７の一例である圧力センサ９により計測された各アクチュエータ１０２の内部圧力値が上記制御装置に取り込まれ、拮抗駆動されるそれぞれ２本のアクチュエータ１０２，１０２の内部圧力間の現在の圧力差ΔPが圧力差計算手段１３により計算される。

【０１２４】

次いで、ステップＳ１２では、ステップＳ７で近似逆運動学計算手段２３ｂにより計算された関節誤差修正出力ΔP_{qe}とステップＳ９で目標圧力差計算手段１４により算出された目標圧力差ΔP_dとステップＳ１０で適応目標圧力差補正手段２５により算出された目標圧力差の調整補正値ΔP_{da}とを加算した値から、ステップＳ１１で圧力差計算手段１３により計算した現在の圧力差ΔPを減算して、圧力差誤差ΔP_eを圧力差誤差補償手段１５で計算する（圧力差誤差補償手段１５での処理）。さらに、ステップＳ１２では、圧力差誤差ΔP_eより圧力差誤差修正出力が圧力差誤差補償手段１５で計算される（圧力差誤差補償手段１５での処理）。圧力差誤差補償手段１５としては、例えば、ＰＩＤ補償器が考えられる。

【０１２５】

次いで、ステップＳ１３では、圧力差誤差修正出力が、圧力差誤差補償手段１５からＤ／Ａボードなどの入出力ＩＦ２０を通じ、電圧指令値として、それぞれの流量制御電磁弁１８に与えられ、それぞれの流量制御電磁弁１８がそれぞれのアクチュエータ１０２内の圧力を変化させることにより、ロボットアーム１０のそれぞれの関節軸６－１，６－２の回転運動が発生する。

【０１２６】

以上のステップＳ１～ステップＳ１３が制御の計算ループとして繰り返し実行されることにより、ロボットアーム１０の動作の制御が実現する。

【０１２７】

図９Ａ及び図９Ｂは、図２に示すロボットアーム１０について、適応目標内部状態補正手段１１１を用いないで図６に示す目標圧力差計算手段のみを行う従来の制御装置により手先位置の軌道追従制御を行った場合の結果、及び、図５に示す第１実施形態の制御装置

により手先位置の軌道追従制御を行った場合の結果を示している。一例として、図２に示すロボットアーム１０は、第１軸３０８、第２軸３０３とも自然長２９５ｍｍ、内径１０ｍｍの弾性膨張収縮構造体１を用いている。

【０１２８】

図９Ａ及び図９Ｂの結果は、２自由度ロボットアームの手先位置の目標値と測定結果を示している。今回の実験では、目標値として手先位置がｘｙ平面内で一辺の長さ０．２ｍの正方形を描く軌道を与えた。

【０１２９】

図９Ａは従来の制御装置による制御結果である。従来の制御装置では事前計測によって定めた目標圧力差と角度の関係に対し、実際の圧力差と角度の関係がずれている場合、図９Ａにあるように誤差は大きく、追従性は良くないことがわかる。

【０１３０】

一方、図９Ｂは、図５に示す第１実施形態の制御装置による制御結果である。適応目標内部状態補正手段１１１を付加した効果により、誤差は小さく、追従性に優れることがわかる。

【０１３１】

以上のように、上記第１実施形態の上記制御装置によれば、圧力差誤差補償手段１５を配設して、上記弾性体アクチュエータ１０２の内部状態をフィードバックする内部圧力制御系を構成し、かつ、目標圧力差計算手段１４と適応目標圧力差補正手段２５とを配設して、上記弾性体アクチュエータ１０２の目標内部状態の一例である目標圧力差をフィードフォワードする制御系を構成することにより、事前に想定した環境以外でも、応答性が良く、定常偏差の少ない、高精度なロボットアーム１０の制御が可能となる。

【０１３２】

（第２実施形態）

図８は、適応目標圧力差補正手段２５の一例を示す図である。５０はロボットアーム１０の関節角度が追従すべき規範モデル、５１ａ、５１ｂは可変ゲインである。規範モデル５０は、ロボットアーム１０に望む応答性などから事前に決定する。規範モデル５０は、伝達関数、又は、状態方程式の形で表現されるが、いずれも入力は関節角度目標値q_dであり、出力は関節角度ｑのモデルである。関節角度目標値q_dを入力としたときの規範モデル５０の出力と現在の関節角度ｑとの差e_qを適応目標圧力差補正手段２５で算出し、差e_qを用いて目標圧力差の調整補正値ΔP_{da}を適応目標圧力差補正手段２５で算出することにより、適応的に目標圧力差を変化させる（誤差が小さくなるように目標圧力差を変化させる）ことができる。可変ゲイン５１ａ、５１ｂは式（４）～式（５）により算出される。

【０１３３】

【数６】

$$K_x(t) = a_x x_m e_q + \int b_x x_m e_q dt \qquad \cdots\cdots\text{式（４）}$$

$$K_q(t) = a_q q_d e_q + \int b_q q_d e_q dt \qquad \cdots\cdots\text{式（５）}$$

ここで、a_xとa_qとb_xとb_qは、それぞれ、事前の実験で決めた固定値である。また、x_mは、規範モデル５０の状態ベクトルを示す。式（４）と式（５）は、単純適応制御などで知られる規範モデル５０に追従するためのフィードフォワード項の式であり、関節角度目標値q_d及び規範モデル５０の状態ベクトルx_mのそれぞれに、関節角度の差e_qにより変化するゲインをかけることで、現在の関節角度の差e_qに適応的に変化する（差e_qが小さくなるように変化する）ことが可能となる。規範モデル５０は、制御対象（弾性体アクチュエータ１０２）の使用する周波数帯では、目標値にほぼ追従できるモデルを選択することが多いため、関節角度の差e_qによって適応的に変化することは現在の関節誤差q_eに応じて適応的に変化することと等しい。よって、式（４）、式（５）により、適応目標圧力差補正手段２５は関節誤差q_eを減らすように機能する。

【０１３４】
また、適応目標圧力差補正手段２５の出力は、補正出力制御手段１２０からローパスフィルタがＯＮの指令が入っている場合には、目標圧力差の調整補正値ΔP_{da}をローパスフィルタを通した値を出力する。
【０１３５】
その他の構成は図５に示した第１実施形態の制御装置と同様であり、説明は省略する。
【０１３６】
上記第２実施形態においても、第１実施形態の効果と同様な効果を得ることができる。
【０１３７】
（第３実施形態）
図１２は、本発明の第３実施形態にかかる弾性体アクチュエータ１０２の制御装置のより具体的な構成を示す図であり、上記制御装置は、例えば、上記制御コンピュータ１９内に備えられている。ただし、図１２において、１０は弾性体アクチュエータ１０２の制御装置の制御対象である図２に示すロボットアームである。
【０１３８】
目標軌道生成手段１１は、目標出力生成手段１０１の一例としての機能し、目標とするロボットアーム１０の動作を実現するための目標関節角度ベクトルq_dが出力される。目標とするロボットアーム１０の動作は、目的とする作業に応じて事前にそれぞれの時間（$t=0$、$t=t_1$、$t=t_2$、・・・）でのポイントごとの位置（q_{d0}、q_{d1}、q_{d2}、・・・）と繰り返し動作するかどうかのフラグが記録されており、目標軌道生成手段１１は、それぞれの時間（$t=0$、$t=t_1$、$t=t_2$、・・・）でのポイントごとの角度（q_{d0}、q_{d1}、q_{d2}、・・・）の情報と関節角度ベクトルｑとを基に多項式補間を使用し、各ポイント間の軌道を補完し、目標関節角度ベクトルq_dを生成する。
【０１３９】
出力誤差計算部１０８は、関節角度目標ベクトルq_dとロボットアーム１０より出力される関節角度ベクトルｑとが入力され、関節角度誤差$q_e=q-q_d$を計算し、出力誤差１１４の一例として関節角度誤差q_eを出力する。
【０１４０】
出力誤差補償手段１０３の一例である角度誤差補償手段６０は、出力誤差計算部１０８により出力される関節角度誤差q_eが入力され、出力１１５の一例として角度誤差修正出力ΔP_{qe}が内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。
【０１４１】
目標内部状態決定手段１０５の一例である目標圧力差計算手段１４は、目標軌道生成手段１１の出力である目標関節角度ベクトルq_dが入力され、目標関節角度ベクトルq_dより内部状態目標値１１６の一例としての目標圧力差（圧力差の目標値）$\Delta P_d=[\Delta P_{1d}, \Delta P_{2d}]^T$が算出され、目標内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。ただし、ΔP_{1d}，ΔP_{2d}はそれぞれ、弾性膨張収縮構造体１－１ａと１－１ｂの、弾性膨張収縮構造体１－２ａと１－２ｂの圧力差の目標値である。
【０１４２】
適応目標内部状態補正手段１１１の一例である適応目標圧力差補正手段２５は、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルｑと目標軌道生成手段１１の出力である目標関節角度ベクトルq_dとが入力され、目標圧力差の調整補正値（内部状態目標補正値１１７の一例）$\Delta P_{da}=[\Delta P_{1da}, \Delta P_{2da}]^T$が適応目標圧力差補正手段２５で算出され、算出された調整補正値ΔP_{da}が適応目標圧力差補正手段２５でから内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。ただし、ΔP_{1da}，ΔP_{2da}はそれぞれ、弾性膨張収縮構造体１－１ａと１－１ｂの、弾性膨張収縮構造体１－２ａと１－２ｂの圧力差の目標値（目標圧力差）の調整補正値である。
【０１４３】
内部状態誤差計算部１０９は、適応目標圧力差補正手段２５から出力される目標圧力差の調整補正値ΔP_{da}と、目標圧力差計算手段１４から出力されるΔP_dと、角度誤差補

償手段６０から出力されるΔＰ$_{qe}$とを加算し、加算された値から、圧力差計算手段１３から出力されるΔＰを減算して算出する圧力差誤差（圧力誤差値）ΔＰ$_{e}$を圧力差誤差補償手段１５に向けて出力する。

【０１４４】

衝突検知手段１２１は、ロボットアーム１０が外部の物体と衝突したことを検知し、衝突検知信号を補正出力制御手段１２０に出力する。衝突を検知する一例として、図１２ではロボットアーム１０の関節角度誤差を用いている。これは関節角度誤差を微分し、誤差の時間微分の値が、事前に決めた閾値よりも大きくなったときに、衝突が起こったと推定する方法である。衝突の検知方法は、他にもカメラを用いて検知する方法、又は、接触センサ又は力センサなどで検知する方法でもよい。

【０１４５】

その他の構成は図５に示した第１実施形態の制御装置と同様であり、説明は省略する。

【０１４６】

上記第３実施形態においても、第１実施形態の効果と同様な効果を得ることができる。

【０１４７】

また、上記各実施形態では、出力を関節角度としたが、これに限られるわけではなく、出力計測手段１０４を変位速度計測手段の一例としての変位速度センサとし、出力値を変位速度として変位速度制御を行う場合でも同様である。

【０１４８】

また、上記各実施形態では、出力を関節角度としたが、これに限られるわけではなく、出力計測手段１０４を力計測手段の一例としての力センサとし、出力値を力として力制御を行う場合でも同様である。

【０１４９】

また、上記各実施形態では、内部状態計測手段１０７の一例としてセンサを設けるとしたが、オブザーバ（観測器）を設け、オブザーバにより、内部状態を推定し、内部状態の推定値を使用する場合でも同様の効果を発揮する。

【０１５０】

また、上記各実施形態では弾性体アクチュエータ１０２として、流体圧により駆動される流体圧駆動アクチュエータを例に説明を行ったが、これに限られるわけではなく、導電性ポリマー、誘電体ポリマー、又は、各種ゲル等の弾性体を電気的刺激により駆動するアクチュエータの場合でも、内部状態として電界又は電荷量等を採用することにより同様の効果を発揮する。

【０１５１】

図１１Ａ～図１１Ｃは、弾性体アクチュエータ１０２の一例である導電性ポリマーアクチュエータの構造と動作説明図である。このアクチュエータは、導電性高分子膜であるポリアニリン膜体８０ａ、８０ｂで固体電解質成形体８１を挟み込む構造となっている（図１１Ａ参照）。スイッチ８３をオンすることで、電源８２において設定された電位差がポリアニリン膜体８０ａ、８０ｂ間に与えられ、一方のポリアニリン膜体８０ｂには陰イオンが挿入されて伸長し、もう一方のポリアニリン膜体８０ａからは陰イオンが離脱して縮小し、結果として、たわみ変形が発生するようになる（図１１Ｂ参照）。この場合、一方のポリアニリン膜体８０ｂは、もう一方のポリアニリン膜体８０ａに対して電解質形成体８１を介して接続された電極として作用していることになる。電位差が逆の場合には、図１１Ｃに示すようにポリアニリン膜体８０ａ、８０ｂが逆方向に変形する。

【０１５２】

図１０は、ロボットアーム１０Ａの弾性体アクチュエータとして、導電性ポリマーアクチュエータを使用した際の弾性体アクチュエータの制御装置の構成を示す図である。図５の構成図と異なるのは、圧力センサ９と適応目標圧力差補正手段２５と圧力差計算手段１３と目標圧力差計算手段１４と圧力差誤差補償手段１５とが、それぞれ、電流計７２と適応目標電荷量補正手段７０と電荷量計算手段７３と目標電荷量計算手段７１と電荷量誤差補償手段７４とに置き換わった点である。

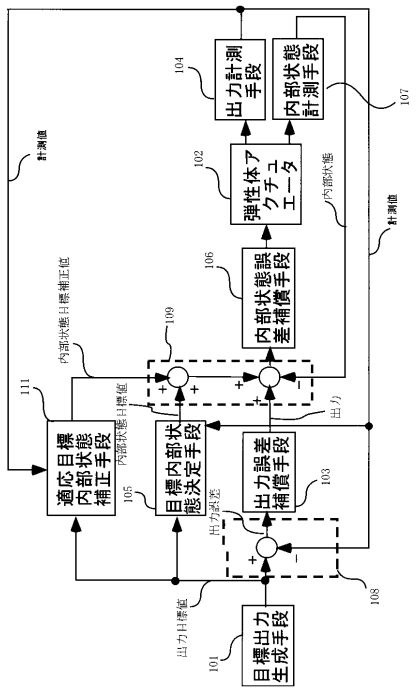
【０１５３】
目標電荷量計算手段７１は目標内部状態決定手段１０５の一例であり、目標角度ベクトルｑ$_{d}$から目標電荷量ｃ$_{d}$を計算して、内部状態誤差計算部１０９に向けて出力する。
【０１５４】
適応目標電荷量補正手段７０は、適応目標内部状態補正手段１１１の一例である。適応目標電荷量補正手段７０は、導電性ポリマアクチュエータの出力誤差を補正するために目標電荷量の補正値ｃ$_{da}$を内部状態誤差計算部１０９に向けて出力する。
【０１５５】
電流計７２は、内部状態計測手段１０７の一例であり、各導電性ポリマーアクチュエータに流れる電流ｉを計測する。電流計７２で計測される電流ｉが電荷量計算手段７３において積分されることにより、現在の電荷量ｃが計算でき、計算された現在の電荷量ｃを内部状態誤差計算部１０９に向けて出力する。
【０１５６】
位置誤差補償手段１２は、出力誤差計算部１０８から出力される手先位置・姿勢誤差ｒｅが入力され、位置誤差修正出力Δｃ$_{re}$が近似逆運動学計算手段２３ｂに向けて出力される。
【０１５７】
近似逆運動学２３ｂは、ロボットアーム１０において計測される関節角度ベクトルの現在値ｑと、位置誤差補償手段１２から位置誤差修正出力Δｃ$_{re}$とが入力されて、関節誤差修正出力Δｃ$_{qe}$が内部状態誤差計算部１０９に向けて出力される。内部状態誤差計算部１０９では、関節誤差修正出力Δｃ$_{qe}$と目標電荷量ｃ$_{d}$と目標電荷量の補正値ｃ$_{da}$とを加算した値から、電荷量計算手段７３で求められた現在の電荷量ｃを減算した値（電荷量誤差ｃ$_{e}$）が計算され、電荷量誤差補償手段７４に出力される。
【０１５８】
電荷量誤差補償手段７４は、内部状態誤差計算部１０９から電荷量誤差ｃ$_{e}$が入力され、電荷量の誤差を補正するように、電荷量誤差修正出力ｕがロボットアーム１０に向けて出力される。
【０１５９】
以上のように構成することで、導電性ポリマーアクチュエータでも、本発明の実施は可能である。
【０１６０】
なお、上記様々な実施形態のうちの任意の実施形態を適宜組み合わせることにより、それぞれの有する効果を奏するようにすることができる。
【０１６１】
また、適応的に制御することで、一般的に、そうでない（適応的に制御しない）場合と比べ、安定性が損なわれる場合がある。しかしながら、上記第１実施形態の上記制御装置によれば、基本となる目標圧力差ΔＰ$_{d}$は目標圧力差計算手段１４を含む目標内部状態決定手段１０５で計算を行い、それによって修正できない誤差を、適応目標圧力差補正手段２５を含む適応目標内部状態補正手段１１１によって補っている。そのため、目標圧力差計算手段１４が存在しない場合と比べ、適応目標圧力差補正手段２５内の固定値（ａ$_{x}$とａ$_{q}$とｂ$_{x}$とｂ$_{q}$）を小さくすることができ、安定性を損なわず、かつ、適応的に目標圧力差を補正できる（誤差が小さくなるように目標圧力差を補正できる）。さらに、補正出力制御手段１２０により、適応目標圧力差補正手段２５の機能が不要なときには、適応目標圧力差補正手段２５の機能を停止することもできるため、安定性を損なわない効果を発揮できる。
【０１６２】
なお、上記様々な実施形態のうちの任意の実施形態を適宜組み合わせることにより、それぞれの有する効果を奏するようにすることができる。
【産業上の利用可能性】
【０１６３】

本発明の弾性体アクチュエータの制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラムは、弾性体アクチュエータにより動作するロボットアームの手先位置の軌道制御等の位置制御を行う制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラムとして有用である。また、ロボットアームに限らず、生産設備等における弾性体アクチュエータによる回転機構の制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラム、又は、リニアスライダ又はプレス装置等の弾性体アクチュエータによる直動機構の制御装置及び制御方法、並びに、制御プログラムとしても適用が可能である。

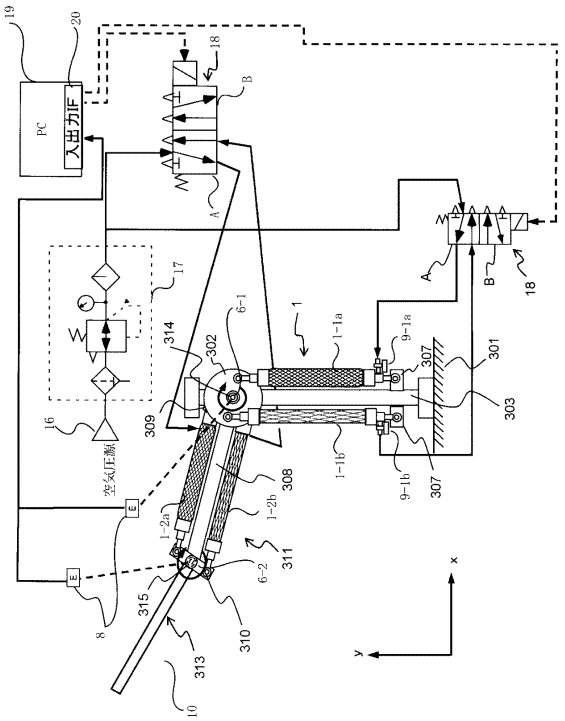
【０１６４】

本発明は、添付図面を参照しながら好ましい実施形態に関連して充分に記載されているが、この技術の熟練した人々にとっては種々の変形又は修正は明白である。そのような変形又は修正は、添付した請求の範囲による本発明の範囲から外れない限りにおいて、その中に含まれると理解されるべきである。

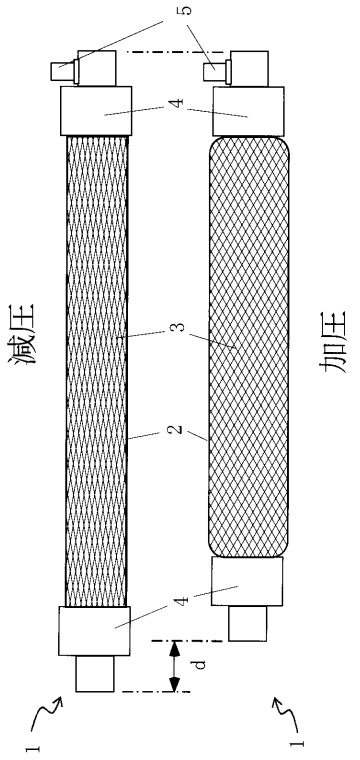
【図１】



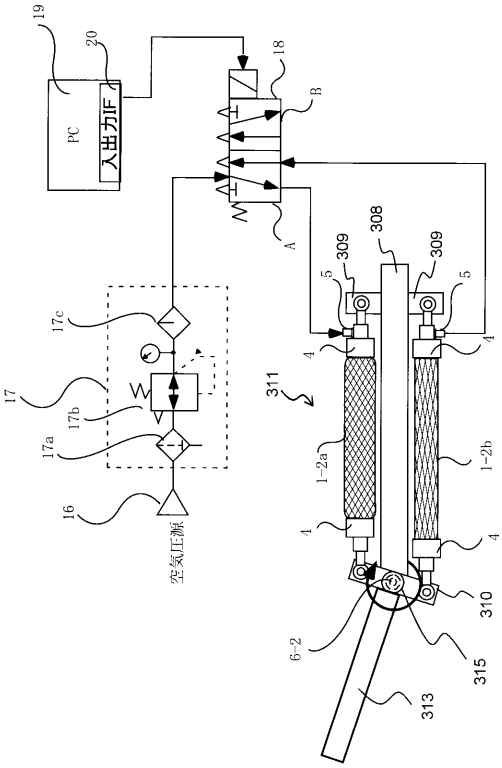
【図２】



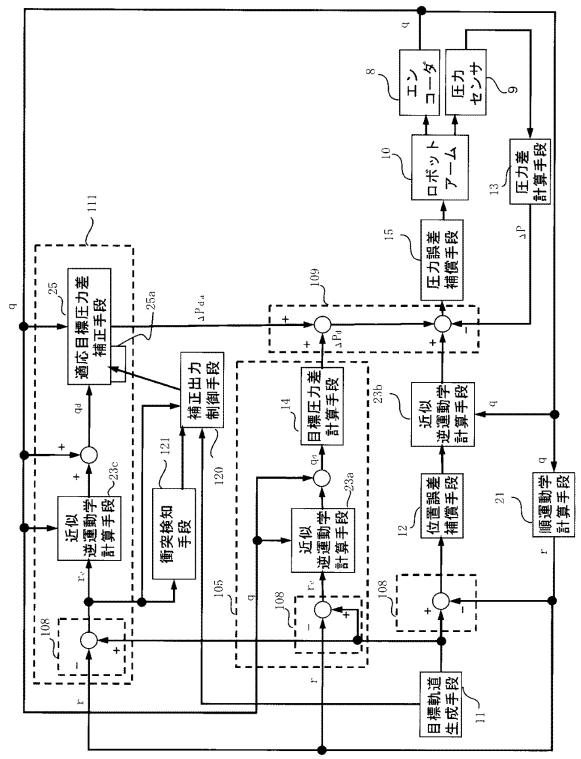
【図３】


減圧
加圧
1
2
3
4
5
d

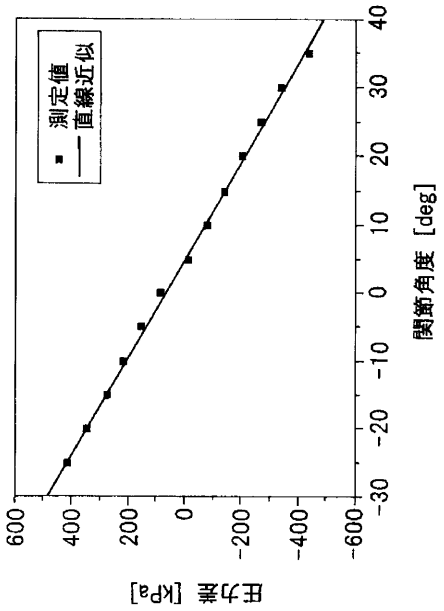
【図４】


PC
入出力IF
空気圧源
A
B
1
1-2a
1-2b
2
3
4
5
6-2
16
17
17a
17b
17c
18
19
20
308
309
310
311
313
315

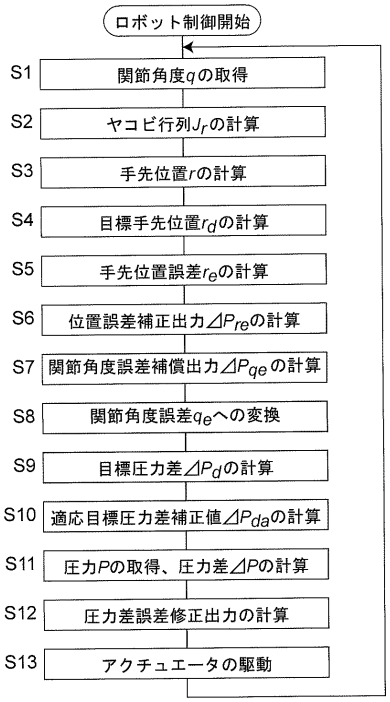
【図５】


適応目標圧力差補正手段
近似逆運動学計算手段
衝突検知手段
補正出力制御手段
近似逆運動学計算手段
目標圧力差計算手段
近似逆運動学計算手段
位置誤差補償手段
順運動学計算手段
目標軌道生成手段
圧力誤差補償手段
ロボットアーム
エンコーダ
圧力センサ
圧力差計算手段

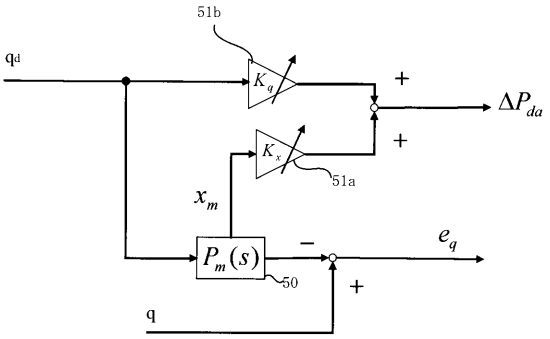
【図６】


測定値
直線近似
圧力差 [kPa]
関節角度 [deg]
600
400
200
0
-200
-400
-600
40
30
20
10
0
-10
-20
-30

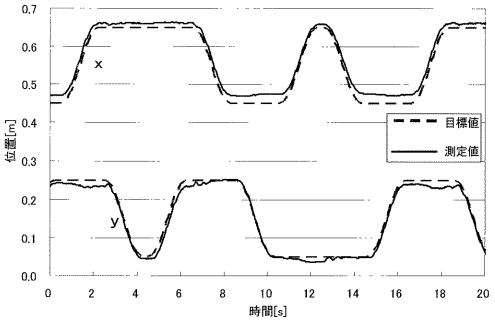
【図７】



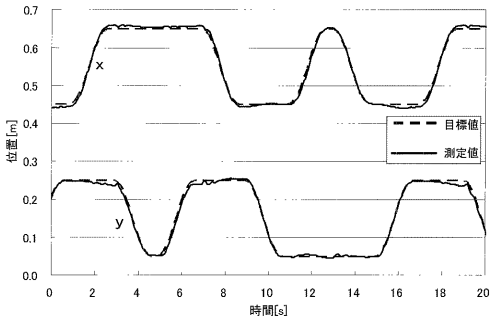
【図８】



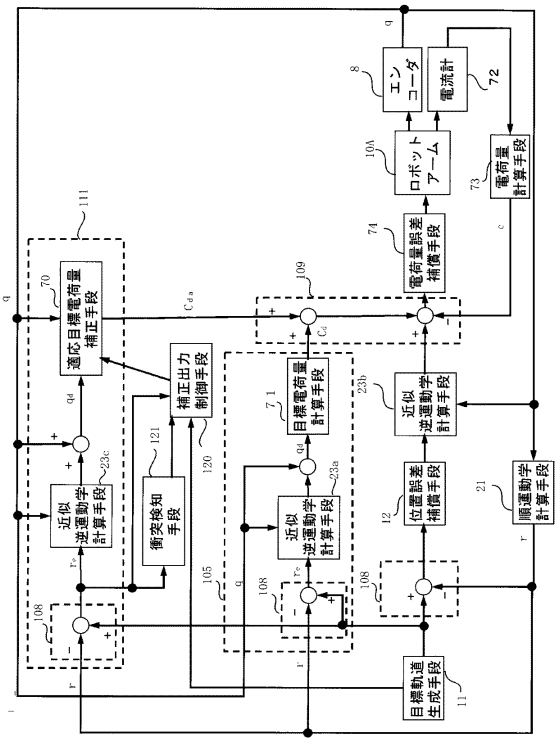
【図９Ａ】



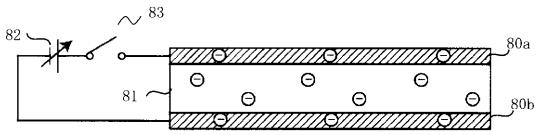
【図９Ｂ】



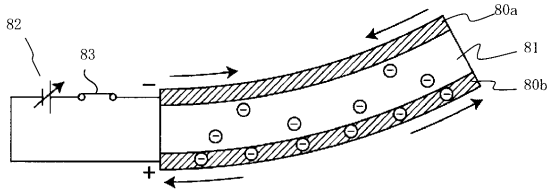
【図１０】



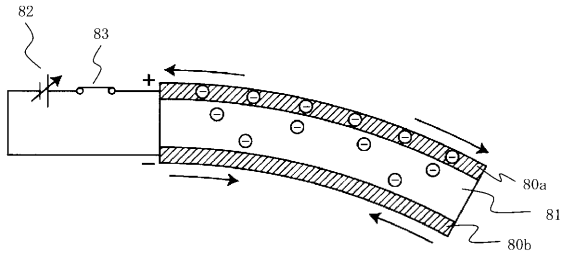
【図１１Ａ】



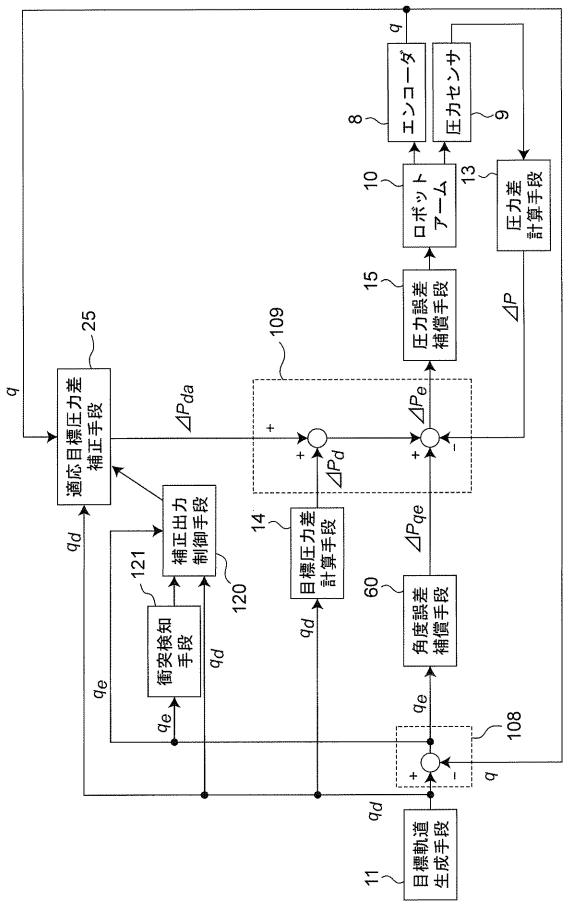
【図１１Ｂ】



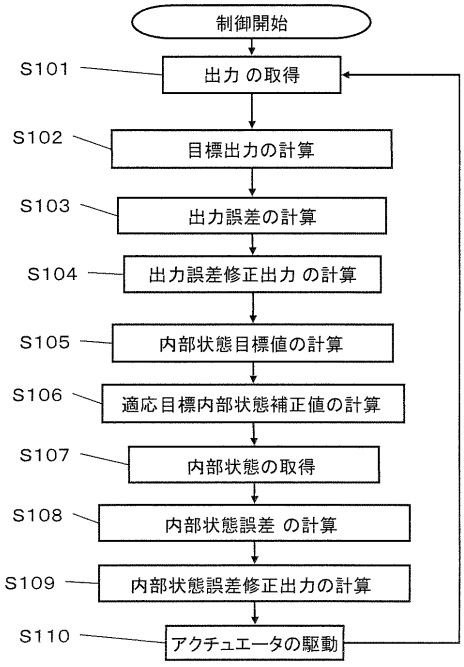
【図１１Ｃ】



【図１２】



【図１３】



フロントページの続き

審査官　熊谷　健治

(56)参考文献　特開２００５－０９５９８９（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－０１８４３１（ＪＰ，Ａ）
実開平０２－１１６３０８（ＪＰ，Ｕ）
特開平０３－００３７９１（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－２３６９５７（ＪＰ，Ａ）
特開平０４－００４３０２（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
F15B　9/00- 9/17
F15B　15/10
B25J　13/00
G05B　11/32
G05B　13/02