

明 細 書

発明の名称： マスタスレーブシステム

技術分野

[0001] 本発明は、力順送型バイラテラル制御が適用されるマスタスレーブシステムに関する。

背景技術

[0002] いわゆるマスタスレーブシステムは、マスタロボットとスレーブロボットとが機械的に結合し、連動する機械式マスタスレーブシステムが発端となっている。機械式マスタスレーブシステムには、操作者が直接的な操作感を得られるという長所があるが、操作者とマスタロボットおよびスレーブロボットとの幾何学的拘束から機構設計の自由が制限されるとともに、駆動源が人力であることから操作が重くならざるを得ず、また、異常時における安全確保に難があるという短所も存在する。

[0003] そこで、機械式マスタスレーブシステムの有用性は認めつつも、現在においては、マスタロボットとスレーブロボットとが電氣的に相互接続され、かつ機械的には分離されて、両者が独立に動作可能な電気式マスタスレーブシステムが主流となっている。一般的に、電気式とすれば、電氣的またはソフトウェア的手段による融通が利き、柔軟に機構を設計することができ、しかも、大出力アクチュエータの作業領域に操作者を入れないような、安全を確保しやすいシステムを構築することが可能となる。

[0004] このような特徴を持つ電気式マスタスレーブシステムは、遠隔操作（テレオペレーション）を主なアプリケーションとして発展してきたために、これまでは、位置や力の再現性、透明性、または通信時間遅延の改善を主眼として研究がなされてきた。以下、電気式マスタスレーブシステムにおける基本的なバイラテラル制御について俯瞰的に説明する。

[0005] まず、マスタロボットおよびスレーブロボットのダイナミクスを表現する運動方程式を、説明の便宜のため、一例として以下のように定める。

[数1]

$$J_m^T f_m + \tau_m = M_m \ddot{q}_m + r_m \quad (1)$$

[数2]

$$\tau_s = M_s \ddot{q}_s + r_s + J_s^T f_s \quad (2)$$

$f_m(t)$ は、時刻 t において操作者がマスタロボットに加えるマスタ操作力、 $f_s(t)$ は、同じく時刻 t においてスレーブロボットが環境（作業対象）に加えるスレーブ作業力である。また、マスタロボットおよびスレーブロボットのそれぞれについて、 $q_m(t)$ 、 $q_s(t)$ は関節変位、 $\tau_m(t)$ 、 $\tau_s(t)$ は関節駆動力、 $M_m(q_m)$ 、 $M_s(q_s)$ は慣性行列、 $r_m(\dot{q}_m, q_m)$ 、 $r_s(\dot{q}_s, q_s)$ は慣性以外の効果を集約した剰余項である。 $J_m(q_m)$ 、 $J_s(q_s)$ は微分運動学を表現するヤコビ行列であり、以下の関係を満たす。

[数3]

$$\dot{x}_m = J_m \dot{q}_m \quad (3)$$

[数4]

$$\dot{x}_s = J_s \dot{q}_s \quad (4)$$

$x_m(t)$ 、 $x_s(t)$ は、それぞれ $q_m(t)$ 、 $q_s(t)$ に対応するマスタロボットの操作端およびスレーブロボットの作業端の作業座標系における変位である。なお、本明細書では、関数の独立変数を示す“ (t) ”等の記述を省略して表記することがある。

[0006] [対称型バイラテラル制御]

対称型のバイラテラル制御は、マスタ・スレーブの双方向の変位誤差サーボである。この制御では力センサが不要となるため、比較的安定な系を簡単に構成することができる。作業座標系における比例制御を用いれば、マスタ

ロボットの制御則およびスレーブロボットの制御則は、例えば以下のようになる。

[数5]

$$\tau_m = J_m^T S_f^{-1} K_p (x_s - S_p^{-1} x_m) \quad (5)$$

[数6]

$$\tau_s = J_s^T K_p (S_p^{-1} x_m - x_s) \quad (6)$$

K_p は位置制御ゲインである。また、 S_f はマスタロボットからスレーブロボットへの力のスケール比、 S_p はスレーブロボットからマスタロボットへの変位のスケール比である。

[0007] マスタダイナミクス（１）、スレーブダイナミクス（２）、マスタ制御則（５）およびスレーブ制御則（６）から、次式が得られる。

[数7]

$$f_m - J_m^{-T} (M_m \ddot{q}_m + r_m) + S_f^{-1} J_s^{-T} (M_s \ddot{q}_s + r_s) + S_f^{-1} f_s \quad (7)$$

このように、対称型バイラテラル制御では、マスタ操作力 f_m にマスタダイナミクスの影響が等倍で加わるとともに、スレーブダイナミクスの影響とスレーブ作業力 f_s が S_f^{-1} 倍で加わる。

[0008] [力逆送型バイラテラル制御]

力逆送型のバイラテラル制御では、スレーブロボットの作業端にスレーブ作業力 f_s を計測する作業力センサを配置し、スレーブ作業力 f_s をマスタの駆動力へ「反射」させる。この場合、マスタ制御則は次式のようになる。なお、スレーブ制御則は対称型バイラテラル制御における式（６）と同じである。

[数8]

$$\tau_m = -J_m^T S_f^{-1} f_s \quad (8)$$

[0009] マスタダイナミクス（１）およびマスタ制御則（８）から、次式が得られる。

[数9]

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) + \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (9)$$

対称型バイラテラル制御と同様、力逆送型バイラテラル制御では、マスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ にマスタダイナミクスの影響が等倍で加わるとともに、スレーブ作業力 $\mathbf{f}_s$ が $\mathbf{S}_f^{-1}$ 倍で加わる。一方、マスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ は、スレーブダイナミクスの影響を受けない。

[0010] [力帰還型バイラテラル制御]

力帰還型のバイラテラル制御では、マスタロボットの操作端にマスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ を計測する操作力センサを配置するとともに、スレーブロボットの作業端にスレーブ作業力 $\mathbf{f}_s$ を計測する作業力センサを配置し、マスタ側で力誤差サーボを構成する。この場合、マスタ制御則は次式のようにになる。

[数10]

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_m^T \mathbf{K}_f (\mathbf{f}_m - \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s) - \mathbf{J}_m^T \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (10)$$

上式は、力逆送型のマスタ制御則（８）に力誤差サーボを追加したものである。なお、 $\mathbf{K}_f$ は力制御ゲインである。また、スレーブ制御則は対称型バイラテラル制御における式（６）と同じである。

[0011] マスタダイナミクス（１）およびマスタ制御則（１０）から、次式が得られる。なお、 $\mathbf{I}$ は単位行列である。

[数11]

$$\mathbf{f}_m = (\mathbf{I} + \mathbf{K}_f)^{-1} \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) + \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (11)$$

[0012] 上式において力制御ゲイン $\mathbf{K}_f$ を十分に大きくすれば、次式が得られる。

[数12]

$$\mathbf{f}_m \simeq \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (12)$$

このように、力帰還型バイラテラル制御では、力制御ゲイン K_f を十分に大きくすることで、マスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ へのマスタダイナミクスの影響は無視できる程小さくなり、マスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ にはスレーブ作業力 $\mathbf{f}_s$ のみが $\mathbf{S}_f^{-1}$ 倍で加わる。ただし、実装上は力制御ゲイン K_f を大きくするにつれてバイラテラル制御の安定性が損なわれるため、マスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ へのマスタダイナミクスの影響を完全に消すことは難しく、透明性を完全に実現することはできない。

[0013] [並列型バイラテラル制御]

宮崎らは、非特許文献1において、これまでのバイラテラル制御の直列的な接続方法を改良した並列型バイラテラル制御を提案した。並列型では、マスタロボットの操作端にマスタ操作力 $\mathbf{f}_m$ を計測する操作力センサを配置するとともに、スレーブロボットの作業端にスレーブ作業力 $\mathbf{f}_s(t)$ を計測する作業力センサを配置して、マスタ・スレーブで並列に変位誤差サーボを構成する。この場合、制御則は例えば以下ようになる。

[数13]

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_m^T \mathbf{K}_p (\mathbf{x}_d - \mathbf{S}_p^{-1} \mathbf{x}_m) \quad (13)$$

[数14]

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{J}_s^T \mathbf{S}_f \mathbf{K}_p (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_s) \quad (14)$$

[数15]

$$\mathbf{x}_d = \mathbf{K}_f (\mathbf{f}_m - \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s) \quad (15)$$

なお、 $\mathbf{x}_d(t)$ は、時刻 t におけるマスタロボットの操作端およびスレーブロボットの作業端の作業座標系での目標変位である。

[0014] マスタダイナミクス（１）、スレーブダイナミクス（２）、マスタ制御則（１３）、スレーブ制御則（１４）および目標変位演算（１５）から、次式が得られる。

[数16]

$$\begin{aligned} f_m = & (I + 2K_p K_f)^{-1} J_m^{-T} (M_m \ddot{q}_m + r_m) \\ & + (I + 2K_p K_f)^{-1} S_f^{-1} J_s^{-T} (M_s \ddot{q}_s + r_s) \\ & + (I + 2K_p K_f)^{-1} K_p (S_p^{-1} x_m + x_s) \\ & + S_f^{-1} f_s \end{aligned} \quad (16)$$

そして、上式において力制御ゲイン K_f を十分に大きくすれば、次式が得られる。

[数17]

$$f_m \simeq S_f^{-1} f_s \quad (17)$$

マスタ制御則とスレーブ制御則とを並列に構成することで位相遅れが減少し、バイラテラル制御の安定性が向上することが並列型バイラテラル制御の利点である。しかしながら、式（１６）右辺第１項、第２項のように、並列型バイラテラル制御では、マスタ操作力 f_m がマスタダイナミクスおよびスレーブダイナミクスの両方の影響を受ける。さらに、式（１６）右辺第３項のように、並列型バイラテラル制御では、マスタ操作力 f_m に元々のダイナミクスには存在しないバネ項まで付加される。力制御ゲイン K_f を大きくすればこれらの影響は無視できるほど小さくなるが、安定性が向上しているとはいえ、実装上は力制御ゲイン K_f を大きくするにつれてバイラテラル制御の安定性が損なわれるため、結局、並列型バイラテラル制御でも透明性は完全には実現できていない。

[0015] [力順送型バイラテラル制御]

ここまで、対称型、力逆送型、力帰還型および並列型を含む、基本的なバイラテラル制御について述べたが、これらをはじめとする従来のバイラテラ

ル制御は、以下の問題 1 ～ 6 を有していた。

[問題 1] . . . 力逆送型、力帰還型および並列型に共通する問題

制御にスレーブ作業力 f_s の情報を必要とするため、スレーブロボットに作業力センサを実装できないシステムには適用できない。

[問題 2] . . . 対称型および力逆送型に共通する問題

マスタロボットの変位誤差によってシステムが駆動される制御であるため、人力で簡単にマスタロボットの変位誤差を発生することができるように、すわなち、高いバックドライバビリティが保たれるようにマスタロボットの慣性および摩擦を極力小さくしておかなければならず、高精度な機構とすることが難しい。

[問題 3] . . . 力帰還型および並列型に共通する問題

透明性を目指す制御であるため、操作者が主に環境（作業対象）のダイナミクスのみを感じることになる。

[問題 4] . . . 対称型、力逆送型、力帰還型および並列型に共通する問題

スレーブロボットが常にマスタロボットに接続されているため、操作者がマスタロボットに対して何もしなくてもスレーブロボットに加えられる外力のみによってシステムに不安定な挙動が励起される危険がある。

[問題 5] . . . 対称型、力逆送型、力帰還型および並列型に共通する問題

スレーブロボットへの指令値が位置であり、位置制御によってスレーブダイナミクスをキャンセルしなければならないため、制御系への負荷が大きい。さらに、位置制御ベースの制御則では、必ずしも他の制御則を重畳することができるとは限らない。

[問題 6] . . . 対称型、力逆送型、力帰還型および並列型に共通する問題

スレーブロボットに作業座標系での位置制御を適用すると特異点問題が生じ、スレーブロボットの姿勢が特異点近傍となったときに制御が破綻する可能性がある。

[0016] これらの問題をエレガントに解決し得る新たなバイラテラル制御として、本発明者は、特許文献 1 において「力順送型バイラテラル制御」の基本構成

を提案した。力順送型では、マスタロボットの操作端にマスタ操作力 f_m を計測する操作力センサを配置し、計測したマスタ操作力 f_m をスレーブロボットの駆動力へ「投射」する。力順送型バイラテラル制御におけるマスタ制御則およびスレーブ制御則は、例えば以下になる。

[数18]

$$\tau_m = J_m^T K_p (S_p x_s - x_m) \quad (18)$$

[数19]

$$\tau_s = J_s^T S_f f_m \quad (19)$$

[0017] スレーブダイナミクス (2) およびスレーブ制御則 (19) から、次式が得られる。

[数20]

$$f_m = S_f^{-1} J_s^{-T} (M_s \ddot{q}_s + r_s) + S_f^{-1} f_s \quad (20)$$

このように、力順送型バイラテラル制御では、マスタ操作力 f_m にスレーブダイナミクスの影響とスレーブ作業力 f_s が S_f^{-1} 倍で加わる。すなわち、力順送型バイラテラル制御とは、スレーブロボットが環境（作業対象）に加えるスレーブ作業力 f_s を計測するのではなく、操作者がマスタロボットに加えるマスタ操作力 f_m を計測することで、マスタからスレーブへは力情報を順送り、スレーブからマスタへは変位情報を逆送する手法である。

[0018] 力順送型バイラテラル制御は、以下の特徴 1 ～ 6 を有している。

[特徴 1]

スレーブ作業力 f_s の情報を必要としないため、スレーブロボットに作業力センサを実装できないシステムにも適用することができる。

[特徴 2]

マスタロボットの变位誤差ではなく、操作者がマスタロボットに加えるマスタ操作力 f_m によってシステムが駆動されるため、マスタロボットにバック

ドライバビリティが必要とされず、その結果、マスタロボットを人力に対して堅牢で、かつ高精度な機構とすることができる。

[特徴3]

透明性ではなく後述する「投射性」を目指す制御であるため、操作者が環境（作業対象）のダイナミクスのみならずスレーブダイナミクスをも感じ、マスタダイナミクスは感じない。

[特徴4]

操作者がマスタロボットにマスタ操作力 f_m を加えなければ、マスタロボットからスレーブロボットへの接続は遮断される（バイラテラルでなくなり、ユニラテラルとなる）ので、スレーブロボットに加えられる外力のみによってシステムに不安定な挙動が励起される危険はない。

[特徴5]

スレーブロボットへの指令値が位置ではなく駆動力（力とトルク）なので、スレーブ制御則の実装が容易であり、制御系への負荷が小さい。また、駆動力制御ベースの制御なので、スレーブ制御則に駆動力制御ベースのあらゆる制御を重畳することができる。

[特徴6]

スレーブロボットが位置制御ではなく駆動力制御されるので、作業座標系での制御を適用しても特異点問題が生じず、スレーブロボットの姿勢が特異点近傍となっても制御が破綻することはない。

[0019] 以下、上記特徴1～6について、さらに詳しく説明していく。

[0020] まず、[特徴1]について説明する。

力逆送型、力帰還型、並列型等の従来の多くのバイラテラル制御では、マスタスレーブシステムの操作感を高めるために、スレーブロボットの作業端にスレーブ作業力 f_s を計測するための作業力センサを実装している。しかしながら、少なからぬシステムにおいて、スレーブロボットの作業端に作業力センサを実装することは困難である。

[0021] 例えばパワー増幅マスタスレーブシステムの場合、スレーブロボットには

大出力のアクチュエータが配置される。このため、スレーブロボットはこの大出力に耐えられるハードウェアでなければならない。しかしながら、一般に作業力センサとしての多軸力センサは繊細かつ高価なので、大出力スレーブロボットの作業端に実装するのは困難である。また、手術ロボットとしてのマスタスレーブシステムの場合、スレーブロボットは人体内部に侵襲することが必要であり、そのハードウェアには高いレベルの洗浄・消毒・滅菌が求められる（オートクレープ滅菌）。このようなスレーブロボットの作業端に、複雑な電子機器である多軸力センサを実装するのは困難である。

[0022] 力順送型バイラテラル制御では、このような実装上の困難の無いマスタロボットにのみ力センサ（操作力センサ）を実装すればよい。一方、スレーブロボットは、アクチュエータと変位センサのみの、これ以上は無い単純な構成にすることができる。以上のことから、力順送型バイラテラル制御は、多くのシステムに比較的容易に実装可能である。

[0023] 次に、〔特徴２〕について説明する。

従来のバイラテラル制御の多く、例えば対称型および力逆送型バイラテラル制御では、マスタロボットに加えられるマスタ操作力 f_m そのものではなく、マスタ操作力 f_m によって生じたマスタロボットの変位誤差によってシステムが駆動される。この場合、操作感を高めるためには、マスタロボットを人力でも楽に動かし得るように、いわゆるバックドライバブルにする必要があった。そして、そのために、マスタロボットの慣性質量および摩擦をできるだけ減らしておく必要があった。このような事情から、従来のバイラテラル制御では、マスタロボットが必然的に低い減速比を有する非力で華奢な機構となってしまうていた。これは、操作者に反力を高精度に提示するための剛性や出力が不足しがちであることを意味する。

[0024] これに対して力順送型バイラテラル制御では、マスタロボットに加えられるマスタ操作力 f_m によってシステムが駆動されるため、マスタ操作力 f_m さえ計測できればマスタロボットがバックドライバブルである必要はない。このため、力順送型バイラテラル制御では、マスタロボットを堅牢かつ高い減

速比を有する強力な機構とすることができるとともに、操作者に反力を高精度に提示することが可能となる。なお、マスタロボットの機構は、マスタであるが故に人力程度の力に対する堅牢さが確保されていれば十分である。このため、マスタ操作力 f_m を計測するための操作力センサを装備していることは、たとえ操作力センサが多軸力センサであっても、堅牢さを確保する上で不利にならない。

[0025] 次に、〔特徴３〕について説明する。

スレーブロボットに作業力センサを配置する力逆送型および力帰還型バイラテラル制御において、特に作業力センサをスレーブロボットの作業端に置く場合、式（９）や式（１１）から分かるように、操作者がスレーブダイナミクスを感じることはない。一方、操作者はマスタダイナミクスを感じるため、従来のバイラテラル制御において重要な規範であった透明性は、マスタダイナミクスの影響を無視できる程小さくすることで実現されることになっていた。すなわち、従来のバイラテラル制御では、〔特徴２〕の説明中で述べたのとは別の理由からも、マスタロボットを低い減速比を有する非力で華奢な機構とすることが必要であった。

[0026] しかし、この透明性という従来のマスタスレーブシステムの規範そのものに再考の余地があると本発明者は考えており、ここに新たな規範を提唱する。すなわち、マスタダイナミクスおよびスレーブダイナミクスの両方を「透明」とし、操作者が直接、環境（作業対象）のみを操る操作感を提示するための「透明性」という従来の規範に対して、操作者によるマスタ操作力 f_m をスレーブ駆動力として「投射」し、環境（作業対象）のダイナミクスをも含むスレーブダイナミクスをマスタ変位として「投射」することで、環境（作業対象）と共にスレーブロボットをも操る操作感を提示するための新たな規範である。この新たな規範を「投射性」と呼ぶことにする。マスタ操作力 f_m が正確にスレーブ駆動力に投射されているほど、また、環境（作業対象）のダイナミクスとスレーブダイナミクスが正確にマスタ変位に投射されているほど、投射性は高いと言える。

[0027] 定性的に表現すれば、透明性が高い従来のマスタスレーブシステムの場合、操作者は、マスタスレーブシステムの感覚が消えた結果、自分の身体で直接的に環境（作業対象）を操作しているように感じる。一方、投射性が高いマスタスレーブシステムの場合、操作者は、マスタロボットの感覚が消えた結果、自分の身体でスレーブロボットを動かし、そのスレーブロボットが環境（作業対象）を操作しているように感じる。つまり、透明性が「生身の身体で対象を操る感覚」を目標としているのに対し、投射性は「外骨格を介して対象を操る感覚」を目標としている、と言い換えることができる。

[0028] そこで、本発明者は、理想的な投射性が実現された状態を「外骨格投射」と名付ける。外骨格投射を実現することにより、少なくとも体幹以外はマスタロボットから機械的に独立して動作するはずのスレーブロボットが、体幹以外の部分においてもマスタロボットと機械的に連動するような感覚を操作者に感じさせることができる。さらに、操作装置に過ぎないマスタロボットの感覚を消した上で、作業装置であるスレーブロボットが、あたかも自らが実際に身に纏っている外骨格であるかのような感覚を操作者に与えることができる。「外骨格投射」の語は、このような作用効果に由来している。

[0029] 横小路らは、非特許文献2のp. 575において、透明性と同義の「理想応答」を以下のように定義している。

“オペレータがある操作力を加えたとき、マスタアームとスレーブアームの位置の応答 x_m 、 x_s と力の応答 f_m 、 f_s とが、扱う対象物によらず常に一致する。”

スケール比（ S_f 、 S_p ）を考慮した本明細書の表記に合わせれば、上記理想応答は以下のように表現することができる。

[数21]

$$x_m = S_p x_s \quad (21)$$

[数22]

$$S_f f_m = f_s \quad (22)$$

[0030] この理想応答が実現されている状態を、非特許文献2では遠隔知覚 (object teleperception) できる状態と呼んでいる。ただし、このような理想応答を実現するためにはマスタスレーブシステムのダイナミクスを慣性ごと全て消去しなければならず、制御系への負荷が大きく、バイラテラル制御が不安定になる可能性が高い (非特許文献3参照)。これは、力帰還型バイラテラル制御の式 (11) あるいは並列型バイラテラル制御の式 (16) において力の透明性 (22) を実現するためには、力制御ゲイン $K_f \rightarrow \infty$ としなければならないことから理解される。

[0031] これに対して、本発明者が定義した「投射性」の理想応答は以下のように表現することができる。

[数23]

$$x_m = S_p x_s \quad (23)$$

[数24]

$$J_s^{-1} S_f f_m = \tau_s \quad (24)$$

[0032] この理想応答が実現されている状態が「外骨格投射」である。外骨格投射を実現するためにスレーブダイナミクスを消去する必要はない。これは、パワー増幅マスタスレーブシステムにおいて、特に有利である。パワー増幅マスタスレーブシステムのスレーブロボットはマスタロボットよりも大型であることが多く、慣性もスレーブロボットが支配的である。その支配的なスレーブロボットの慣性を消去する分の負荷が軽くなることは、制御系の安定性向上に少なからず寄与する。

[0033] さらに、規範としての投射性は、特にマスタロボットとスレーブロボット

とが大きく異なるダイナミクスを持つマスタスレーブシステム（異構造・異自由度・異スケール）における「機械に優しい操作」を操作者が習得する場合において、透明性よりも有利である。

[0034] 例えば、マスタロボットとスレーブロボットのスケールが大きく異なる、異スケールのマスタスレーブシステムにおいては、投射性を規範とすることで、環境（作業対象）のみならずスレーブダイナミクスのスケール効果をも操作者に提示することができる。スレーブロボットがマスタロボットよりも大きい場合に生じる慣性の効果（具体的には、スレーブロボットが慣性により動き続けようとすることにより、マスタロボットが振り回されるような状態）を操作者に提示することで、操作者に適切な操作を促すことができ、操作者自身のスキルによる操作の効率化および最適化が期待できる。投射性でなく透明性を規範とするシステムではスレーブダイナミクスのスケール効果は操作者に提示されないため、このような、操作者による操作の効率化および最適化は期待できない。

[0035] 以上のように、力順送型バイラテラル制御では、マスタロボットの操作端に操作力センサを配置することによって、式（20）に示されているように、マスタダイナミクスを透明とし、スレーブロボットを介して環境（作業対象）を操る感覚を操作者に提示することができる高い投射性、すなわち外骨格投射を実現することができる。また、力順送型バイラテラル制御では、式（24）で表現された力の投射性を実現するために、力制御ゲイン K_f を無限大にする必要はない。

[0036] 次に、〔特徴4〕について説明する。

操作者がマスタロボットに対して何もしないマスタ操作力 $f_m = 0$ の場合、マスタスレーブシステムは外力 f_s のみによって駆動される。対称型では式（7）より、力逆送型では式（9）より、力帰還型では式（11）より、外力 f_s はそれぞれ以下のようなになる。

[数25]

$$-f_s = S_f J_m^{-T} (M_m \ddot{q}_m + r_m) + J_s^{-T} (M_s \ddot{q}_s + r_s) \quad (25)$$

[数26]

$$-f_s = S_f J_m^{-T} (M_m \ddot{q}_m + r_m) \quad (26)$$

[数27]

$$-f_s = S_f (I + K_f)^{-1} J_m^{-T} (M_m \ddot{q}_m + r_m) \quad (27)$$

[0037] 式(25)～(27)は、従来(対称型、力逆送型、力帰還型)のバイラテラル制御では、スレーブロボットが外力 f_s を受けると、操作装置にすぎないマスタロボットのダイナミクスの影響下でスレーブロボットが動作することを示している。そして、場合によっては、スレーブロボットに加えられた外力 f_s のみによってマスタスレーブシステムに不安定な挙動が励起される危険がある。説明は省略するが、並列型のバイラテラル制御についても同様のことが言える。この問題については、力逆送型および力帰還型バイラテラル制御において操作者がマスタロボットの操作端から手を離すと、システムが不安定な挙動を示す傾向が見られることが、非特許文献4のp. 24に指摘されている。特に、力帰還型および並列型バイラテラル制御において透明性を高めるために力制御ゲイン K_f を大きくしていると、その傾向が強くなる。

[0038] これに対し、力順送型バイラテラル制御では、式(20)より、外力 f_s は次式のようになる。

[数28]

$$-f_s = J_s^{-T} (M_s \ddot{q}_s + r_s) \quad (28)$$

スレーブロボットは、外力 f_s を受けた際に自分自身のダイナミクスの影

響下で動作する。また、外力 f_s がマスタダイナミクスの影響を全く受けないことから、マスタ操作力 $f_m = 0$ の場合は、マスタからスレーブへの接続が自動的に遮断され、力制御ゲイン K_f に関係なくユニラテラルとなることが分かる。このように、力順送型バイラテラル制御では、スレーブロボットに加えられる外力 f_s のみによってマスタスレーブシステムに不安定な挙動が励起される危険はない。

[0039] 次に、〔特徴5〕について説明する。

マスタスレーブシステムにおいては、マスタロボットは人間に操作されるためだけにあり、人間が操作しやすいスケールで作られ、人間にとって快適な環境下に置かれる。しかしスレーブロボットは、達成すべきタスクに応じて、多種多様な環境下で動作すべく多種多様なハードウェア構造を採用することが求められる。例えば、パワー増幅マスタスレーブシステムにおいてはスレーブロボットに大出力が求められるため、電磁アクチュエータの代わりに油圧アクチュエータが採用されることがある。また、手術ロボットとしてのマスタスレーブシステムにおいては、空圧アクチュエータが採用されることもある。そして、ほとんどの従来のバイラテラル制御では、操作者の意思はスレーブロボットの目標位置として指定され、スレーブロボットは位置制御される。

[0040] よく知られているように、電磁アクチュエータに比べ油圧／空圧アクチュエータの位置（軌道）制御性能は低い。このため、従来のバイラテラル制御を用いて操作者の意思を油圧／空圧アクチュエータに正確に反映させるためには、高度で複雑な位置制御則を適用しなければならず、実装に困難が予想される。

[0041] しかし、力順送型バイラテラル制御では、操作者の意思はスレーブロボットの目標駆動力として指定され、スレーブロボットは駆動力制御される。油圧／空圧アクチュエータを採用した力順送型バイラテラル制御では、油圧／空圧アクチュエータの目標位置ではなく目標圧力を指定することにより、スレーブロボットは駆動力制御される。このような油圧／空圧アクチュエータ

の圧力制御は、油圧／空圧制御弁を用いて一般的に行なわれていることであり、実装に困難はない。

[0042] もちろん、力順送型バイラテラル制御に駆動力制御を実装しても、操作者がスレーブロボットの位置制御を高精度に行なうことは保証されず、従来のバイラテラル制御でコンピュータが担っていた高度で複雑な位置制御則を、操作者のスキルに押し付けてしまっただけとも言える。しかし、駆動力制御の実装が容易であることは確かであり、操作者の意思はスレーブ駆動力として正確にスレーブロボットに反映される。しかも、従来のバイラテラル制御では位置制御則に隠されてしまう油圧／空圧アクチュエータの制御性の良し悪しまで、力順送型バイラテラル制御では操作者が直感的に判断することができる。

[0043] さらに、操作者のスキルに押し付けたものの操作者の手に余るスレーブダイナミクスの非線形性が存在するならば、ダイナミクス補償のアルゴリズム（重力補償、摩擦補償、他）をスレーブロボットの駆動力制御に重畳することで、操作者のスキルを支援することができる。スレーブロボットが駆動力制御される力順送型バイラテラル制御においては、制御則の単純な重ね合わせが可能であり、これまでロボット制御工学が営々と培ってきた成果としての駆動力制御ベースの膨大な知識を操作者のスキル支援のために利用することができる。例えば、操作に役立つスレーブロボットの慣性は操作者に感じさせつつ、操作をしにくくするスレーブロボットの非線形項は補償して消去するといった応用も可能である。あるいは、まるで外骨格上で操作者の手を取って誘導するようなスレーブロボットの低ゲインの軌道制御を重ね合わせたり、スレーブロボットの可動範囲を制限する仮想壁をスレーブロボット制御に重ね合わせたりすることもできる。スレーブロボットが位置制御ベースの場合は、前述の通り、このような制御則を単純に重ね合わせることができるとは限らない。

[0044] 次に、〔特徴6〕について説明する。

マスタスレーブシステムにおけるマスタロボットには操作性が求められ、

スレーブロボットには作業性が求められる。操作性向上のためには、いわゆる人間工学的なマスタロボット設計が必要であり、作業性向上のためには、達成すべきタスクに合わせたスレーブロボット設計が必要である。このため、マスタロボットとスレーブロボットの構造は、自ずと異なったものとなる。構造の異なるマスタロボットとスレーブロボットを備えたマスタスレーブシステムを、異構造マスタスレーブシステムと呼ぶ。

[0045] 同構造マスタスレーブシステムで操作性と作業性を共に高めるのには限界がある。このため、高度なマスタスレーブシステムは異構造とならざるを得ない。そして、異構造マスタスレーブシステムにおいては作業座標系で制御を行うのが一般的であり、本明細書におけるここまでの考察でも、作業座標系で制御を行うことを前提として制御則を構築してきた。

[0046] 一般に、ロボットを作業座標系で位置制御すると特異点問題が生ずる。特異点とは、ヤコビ行列が正則とならない（逆行列が得られない）ロボットの姿勢（特異姿勢）のことである。特異点においては、作業座標系におけるロボットの運動方向が制限される。特異点近傍においては、作業座標系でロボットの目標軌道を定めた場合に、その目標軌道を実現する関節速度が過大となる。そして、現実のロボットは有限の関節速度しか発生できないため、特異点近傍においては作業座標系での位置制御が破綻する可能性がある。これが特異点問題である。たとえ式（6）のように、計算上、ヤコビ行列の逆行列を経由しない位置制御則でも、やはり特異点近傍で位置制御は破綻する。これは、座標変換に伴う物理的な破綻である。このため、この位置制御の破綻を計算の工夫によって防ぐことはできない。

[0047] 従来のマスタスレーブシステムにおいてはスレーブロボットに位置制御がなされており、これを作業座標系での位置制御とすると特異点問題が発生する。つまり、特異点近傍を避けなければ、特異点近傍で位置制御が破綻してしまう。一方、破綻を嫌ってスレーブロボットが特異点近傍を避けて動くようにすると、

i) スレーブロボットの作業領域が狭くなり、必要以上にロボットが大型

化する。

i i) タスク達成のために、スレーブロボットの特異点を積極的に利用することができない。

という別のデメリットが発生し、これを解消することは容易ではなかった。

なお、特異点を積極的に利用する手法については、非特許文献5に詳細に記載されている。

[0048] 特異点問題への対策として、非特許文献6のp. 476には、マスタロボットおよびスレーブロボットの各関節が可動範囲の限界や特異点に近づいた場合、逆方向へ力が働くようにマスタ側へフィードバックする方法が記載されている。また、非特許文献7では、異構造マスタスレーブシステムにおける特異点問題を解決するために、特異点からの距離（可操作度）に応じてアシストゲインを調整する方法が提案されている。これらはいずれも、特異点近傍での操作感を重くすることで操作者に特異点に近づいていることを知らせる方法であり、特異点を避ける手法の一種である。つまり、非特許文献6および非特許文献7の手法を用いても、上記デメリットi)、i i)は依然として解消されない。

[0049] 特異点問題への別の対策として、非特許文献8では特異点適合法が提案されている。この手法は、ヤコビ行列の余因子行列を利用した制御法であり、この手法によれば、関節速度が過大になることが抑えられ、位置制御は破綻しなくなる。また、特異点を避けなくて済むため、上記デメリットi)、i i)も解消される。しかし、破綻はしないものの関節速度が有限であることに変わりなく、特異点近傍においては操作性の劣化が避けられない。非特許文献8では操作性を劣化させないための工夫がなされているが、劣化を抑えることはできても、劣化しないようにすることは非特許文献8の手法を使う限り不可能である。

[0050] これに対して、力順送型バイラテラル制御ではスレーブロボットに位置制御がなされず、駆動力制御がなされる。例えば、式(19)のようにスレーブロボットに駆動力制御を実装した場合は、微分運動学に基づきヤコビ行列

の転置行列 J_s^T さえ求められればよく、ヤコビ行列の逆行列 J_s^{-1} を求める必要はない。スレーブロボットに駆動力制御がなされる力順送型バイラテラル制御では、そもそもスレーブロボットには特異点問題が存在しないのでスレーブロボットの特異点を避ける必要はなく、上記問題 i)、ii) は存在しない。言い換えると、力順送型バイラテラル制御によれば、

ii') スレーブロボットの可動範囲全域（全作業領域）を使用することができる。

iii') タスク達成のために、スレーブロボットの特異点を積極的に利用することができる。

というメリットが得られる。

[0051] なお、非特許文献9のp. 116では、力逆送型および力帰還型バイラテラル制御とは逆向きの制御として「position-force loop」が示されているが、同文献にはこの制御に関するこれ以上の詳細な記載がないため、この制御が力順送型バイラテラル制御に相当する制御であるとは考えられない。

[0052] また、非特許文献9のp. 116には、“position-force loopの実装はうまくいかない”との記載があり、さらにその理由として、“スレーブロボットに対する力制御は不安定である”との記載がある。これらの記載は、「position-force loop」の実装は非常に困難であるか、または不可能であると考えるのが当業者の技術常識であったことを示唆している。

先行技術文献

特許文献

[0053] 特許文献1：特許第5105450号公報

特許文献2：特願2013-28989号

非特許文献

[0054] 非特許文献1：宮崎，萩原，“バイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式”，日本ロボット学会誌，vol. 7，no. 5，pp. 446-452，1989.

非特許文献2：横小路，吉川，“マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作

性”，計測自動制御学会論文集，vol. 26，no. 5，pp. 572－579，1990.

非特許文献3：舘，榊，“インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム（1）基本原理と伝送遅れへの応用”，日本ロボット学会誌，vol. 8，no. 3，pp. 241－252，1990.

非特許文献4：吉灘，“大形バイラテラルマニピュレータの研究”，東京工業大学博士学位論文，2012.

非特許文献5：琴坂，大滝，“多自由度ロボットにおける機構自由度の縮退を利用したアクチュエータの選択的利用”，日本ロボット学会誌，vol. 25，no. 8，pp. 1259－1265，2007.

非特許文献6：新井，中野，“異構造マニピュレータ間におけるバイラテラルマスタスレイブ制御”，日本ロボット学会誌，vol. 4，no. 5，pp. 469－479，1986.

非特許文献7：吉永，下川，尾崎，“産業用ロボットアームを用いた異構造マスタ・スレーブアームの構成”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2008講演論文集，1A1－G16，2008.

非特許文献8：妻木，小寺，ネンチェフ，内山，“6自由度マニピュレータの特異点適合遠隔操作”，日本ロボット学会誌，vol. 16，no. 2，pp. 195－204，1998.

非特許文献9：Thurston L. Brooks, "Teleroptic Response Requirements," Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 113-120, 1990.

非特許文献10：D.L. Pieper, "The Kinematics of Manipulators under Computer Control," Stanford Artificial Intelligence Report, memo no. AI-72, 1968.

非特許文献11：Ryo Kikuuwe, Satoshi Yasukouchi, Hideo Fujimoto, and Motoji Yamamoto, "Proxy-Based Sliding Mode Control: A Safer Extension of PID Position Control," IEEE Transactions on Robotics, Vol.26, No.4,

pp. 670-683, 2010.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0055] 以上のように、力順送型バイラテラル制御は、従来のバイラテラル制御にはない多くの利点を有しているが、その一方で解決を要する以下の問題を有している。

[0056] すなわち、〔特徴 6〕で述べた通り、力順送型バイラテラル制御ではスレーブロボットに位置制御がなされておらず、駆動力制御がなされているため、スレーブロボットに特異点問題は存在しない。しかしながら、力順送型バイラテラル制御ではマスタロボットに位置制御がなされているので、これを作業座標系での位置制御とするとスレーブロボットではなくマスタロボットに特異点問題が発生する。たとえ式 (18) のように、計算上、ヤコビ行列の逆行列を経由しない位置制御則でも、座標変換に伴う物理的な破綻は存在し、やはり特異点近傍で位置制御が破綻する。

[0057] 本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、その課題とするところは、マスタロボットおよびスレーブロボット双方の特異点問題を解決し得るマスタスレーブシステムを提供することにある。

課題を解決するための手段

[0058] 上記課題を解決するために鋭意検討した結果、本発明者は、

i) マスタロボットの大きさは高々人間サイズなので、マスタロボットの特異点近傍を除く操作領域内に人間の操作領域の全部が含まれる設計としても、マスタロボットが必要以上に大型化することはない。

i i) マスタロボットに求められる出力は高々人力であり、かつ、〔特徴 2〕で述べたように、力順送型バイラテラル制御ではマスタロボットを堅牢かつ高い減速比を有する強力な機構とすることができるので、マスタロボットの特異点を積極的に利用する必要はない。

ことを見だし、さらにこれらの知見 i)、i i) から、

i i i) 従来のバイラテラル制御が適用されるマスタスレーブシステムと

は異なり、力順送型バイラテラル制御が適用されるマスタスレーブシステムに限っては、マスタロボットが特異点近傍を避けて動くことがデメリットにはならない。

ことを見いだし、本発明を完成させるに至った。

[0059] すなわち、本発明に係るマスタスレーブシステムは、

操作者によって操られるアドミッタンス型の力覚提示装置であるマスタロボットと、前記マスタロボットに少なくとも電氣的に接続され、かつ前記マスタロボットから少なくとも体幹以外が機械的に独立して動作するスレーブロボットとからなる、バイラテラル制御されるマスタスレーブシステムであって、

前記マスタロボットを位置制御するマスタ駆動力を発生させる少なくとも一つのマスタアクチュエータと、前記スレーブロボットを駆動力制御するスレーブ駆動力を発生させる少なくとも一つのスレーブアクチュエータと、前記マスタロボットにおけるマスタ変位を計測する少なくとも一つのマスタ変位センサと、前記スレーブロボットにおけるスレーブ変位を計測する少なくとも一つのスレーブ変位センサと、前記操作者が前記マスタロボットに加えるマスタ操作力を計測する少なくとも一つの操作力センサと、前記スレーブ変位を写像することにより、当該スレーブ変位に対応する前記マスタ変位の目標値であるマスタ目標変位を求めるマスタ目標変位演算装置と、前記マスタ操作力に基づいて前記スレーブ駆動力の目標値であるスレーブ目標駆動力を求めるスレーブ目標駆動力演算装置と、を備え、

前記スレーブアクチュエータが前記スレーブ目標駆動力に基づいて前記スレーブ駆動力を発生させる一方、前記マスタアクチュエータが前記マスタ目標変位と前記マスタ変位とに基づいて前記マスタ駆動力を発生させることで、（１）前記スレーブロボットが環境に加えるスレーブ作業力を計測する前記バイラテラル制御のための作業力センサを不要とし、かつ（２）前記操作者にマスタダイナミクスを感じさせることなく、スレーブダイナミクスを感じさせるようにし、

さらに、前記マスタ目標変位演算装置における前記写像を、前記マスタ目標変位の集合が前記マスタロボットの特異点を含まないように予め定義しておくことで、（３）前記スレーブロボットと前記マスタロボットとが同構造であるか異構造であるかに関わらず、前記スレーブロボットの可動範囲全域において前記マスタロボットおよび前記スレーブロボット双方の特異点問題を解決し得るようにしたことを特徴とする。

[0060] 上記マスタスレーブシステムは、前記マスタ目標変位演算装置が、前記マスタロボットの逆運動学演算によって、前記スレーブ変位に対応する前記マスタ目標変位を前記マスタロボットのマスタ関節座標系において求めることで、前記マスタアクチュエータによる前記マスタロボットの位置制御が前記マスタ関節座標系において行われることが好ましい。

[0061] また、上記マスタスレーブシステムは、前記マスタロボットの機構が、数値的な反復収束演算を必要とすることなく解析的に前記マスタロボットの逆運動学演算が行われ得るように構成されていることが好ましい。

なお、このような構成としては、例えば、前記マスタロボットが６以下の自由度を有し、前記６以下の自由度のうちの連続した３つの自由度が、単一のシリアルリンク機構を構成する３つの回転関節によってもたらされたものであり、前記３つの回転関節の回転軸またはその延長線が一点で交わるような構成が考えられる。

[0062] また、上記マスタスレーブシステムは、前記マスタロボットが複数のマスタロボットの中から選ばれたものであり、前記スレーブロボットが前記複数のマスタロボットのいずれにも電氣的に接続可能な複数のスレーブロボットの中から選ばれたものであり、前記選ばれた各１つの前記マスタロボットおよび前記スレーブロボットが電氣的に接続されていることが好ましい。

発明の効果

[0063] 本発明によれば、マスタロボットおよびスレーブロボット双方の特異点問題を解決し得るマスタスレーブシステムを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0064] [図1]本発明に係る力順送型マスタスレーブシステムの概略図である。

[図2]本発明に係る力順送型マスタスレーブシステムの制御ブロック図である。

[図3]本発明に係る力順送型マスタスレーブシステムのマスタアームの一例を示す概略図である。

[図4]本発明に係る力順送型マスタスレーブシステムのマスタアームとして不適当なマスタアームの一例を示す概略図である。

発明を実施するための形態

[0065] 以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について説明する。

[0066] 図1に示すように、本発明に係る力順送型マスタスレーブシステム（正確には、力順送型バイラテラル制御が適用されるマスタスレーブシステム）1は、体幹Bの異なる位置に設けられるとともに、以下の要領で互いに電氣的に接続されたマスタアームMを含むマスタロボットとスレーブアームSを含むスレーブロボットとからなる。この力順送型マスタスレーブシステム1において、マスタアームMは、操作者Uによって操られるアドミッタンス型の力覚提示装置である。

[0067] マスタアームMとスレーブアームSは、それぞれ、一端側に操作端となるグリップGと作業端dを有するとともに、他端側が体幹Bの異なる位置に備えられている。また、マスタアームMとスレーブアームSは、それぞれ、2本のリンクを有するとともに、グリップGまたは作業端dに接続される一端、体幹Bに接続される他端、およびリンク同士の接続部分に各1つの関節（一例として、回転関節）を有している。したがって、マスタアームMとスレーブアームSは、それぞれ3自由度を有している。

[0068] これらの関節には、マスタ変位センサ $P_{m1\sim3}$ およびスレーブ変位センサ $P_{s1\sim3}$ 、マスタアクチュエータ $A_{m1\sim3}$ およびスレーブアクチュエータ $A_{s1\sim3}$ が備えられている。また、グリップGには、操作力センサ F_m が備えられている。さらに、図1に示すように、この力順送型マスタスレーブシステム1

には、位置制御系 PC_m 、マスタ目標変位演算装置 2、駆動力制御系 FC_s およびスレーブ目標駆動力演算装置 3 が備えられている。

[0069] なお、本明細書では、マスタアーム M 、マスタ変位センサ $P_{m1\sim3}$ 、マスタアクチュエータ $A_{m1\sim3}$ 、操作力センサ F_m （グリップ G ）、および位置制御系 PC_m がマスタロボットに含まれ、スレーブアーム S 、スレーブ変位センサ $P_{s1\sim3}$ 、スレーブアクチュエータ $A_{s1\sim3}$ 、および駆動力制御系 FC_s がスレーブロボットに含まれるものとする。

[0070] 操作力センサ F_m はマスタアーム M に設けられ、操作者 U からのマスタ操作力 f_m を計測する。マスタ変位センサ $P_{m1\sim3}$ はマスタアーム M の各関節に設けられ、マスタ変位 q_m および x_m を計測する。また、スレーブ変位センサ $P_{s1\sim3}$ はスレーブアーム S の各関節に設けられ、スレーブ変位 q_s および x_s を計測する。

[0071] マスタ目標変位演算装置 2 は、計測されたスレーブ変位 q_s および x_s に基づきマスタ変位 q_m および x_m の目標値であるマスタ目標変位を演算により求める。また、スレーブ目標駆動力演算装置 3 は、計測されたマスタ操作力 f_m に基づき後述するスレーブ駆動力 τ_s の目標値であるスレーブ目標駆動力を演算により求める。

[0072] スレーブアクチュエータ $P_{s1\sim3}$ は、スレーブアーム S の各関節に設けられ、スレーブ目標駆動力に基づきスレーブ駆動力制御系 FC_s を通じてスレーブ駆動力 τ_s を発生させ、これによりスレーブアーム S が駆動力制御される。一方、マスタアクチュエータ $A_{m1\sim3}$ は、マスタアーム M の各関節に設けられ、マスタ変位 q_m および x_m とマスタ目標変位とに基づきマスタ駆動力 τ_m を発生させ、これによりマスタアーム M が位置制御される。より詳しくは、マスタアクチュエータ $A_{m1\sim3}$ は、マスタ変位センサ $P_{m1\sim3}$ からの信号とマスタ目標変位演算装置 2 からの信号との偏差が 0 になるように位置制御系 PC_m を通じてマスタ駆動力 τ_m を発生させる。

[0073] このように、力順送型マスタスレーブシステム 1 では、スレーブ駆動力 τ_s を発生させるスレーブアクチュエータ $A_{s1\sim3}$ によってスレーブアーム S が駆

動力制御される一方、マスタ駆動力 τ_m を発生させるマスタアクチュエータ $A_{m1\sim3}$ によってマスタアーム M が位置制御される。

[0074] 図2は、この構成を制御ブロック図で表現したものである。図2のマスタロボットには、マスタアーム M 、マスタ変位センサ $P_{m1\sim3}$ 、マスタアクチュエータ $A_{m1\sim3}$ 、操作力センサ F_m （グリップ G ）、および位置制御系 PC_m が含まれる。また、スレーブロボットには、スレーブアーム S 、スレーブ変位センサ $P_{s1\sim3}$ 、スレーブアクチュエータ $A_{s1\sim3}$ 、および駆動力制御系 FC_s が含まれる。

[0075] 本発明者が特許文献1において提案した基本的な力順送型マスタスレーブシステムと本発明に係る力順送型マスタスレーブシステム1とは、マスタ目標変位演算装置2における演算が異なっている。より詳しくは、本発明に係る力順送型マスタスレーブシステム1のマスタ目標変位演算装置2は、マスタ目標変位 x_{md} の集合がマスタロボットの特異点を含まないように予め定義しておいた写像 ϕ を用いて、スレーブ変位 x_s に対応するマスタ目標変位 x_{md} を求める。

[0076] 本発明に係る力順送型バイラテラル制御では、マスタ制御則（18）に代えて、例えば次式のマスタ制御則を用いる。

[数29]

$$\tau_m = J_m^T K_p (x_{md} - x_m) \quad (29)$$

一方、スレーブ制御則は、前述のスレーブ制御則（19）をそのまま用いる。

[0077] また、本発明に係る力順送型バイラテラル制御では、マスタ目標変位演算装置2において、以下のようにして定義された写像 ϕ を用いる。

まず、マスタ操作領域の集合 X_m を $X_m \ni x_m$ とし、スレーブ作業領域の集合 X_s を $X_s \ni x_s$ とし、これらの集合間の写像 ϕ を次式のように定義する。

[数30]

$$\varphi: X_s \rightarrow X_m \quad (30)$$

さらに、マスタ操作領域内の全ての特異点近傍の集合 X_{ms} を、 $X_{ms} \subset X_m$ とする。このとき、写像 ϕ による集合 X_s の像 $X_{md} = \phi(X_s) \ni x_{md}$ について、次式が成り立つように写像 ϕ を定める。

[数31]

$$X_{md} \subset X_m \quad \text{and} \quad X_{md} \cap X_{ms} = \emptyset \quad (31)$$

[0078] このようにして定義した写像 ϕ によれば、スレーブ変位 x_s に対応するマスタ目標変位 $x_{md} = \phi(x_s)$ をマスタロボットの特異点近傍を回避して求めることができる。そして、これにより、マスタロボットおよびスレーブロボット双方の特異点問題を解決することができる。

[0079] なお、特異点近傍の集合 X_{ms} はマスタロボットの機構に依存するため、実装においては、マスタロボット毎に写像 ϕ を具体的に定義する必要があるが、スケール変換 $x_{md} = S_p x_s$ に x_{mdo} だけの平行移動（オフセット）を加えてなる次式の写像 ϕ において、 x_{mdo} をマスタ操作領域の中央付近に相当する位置とし、さらにスケール比 S_p をマスタ目標変位 x_{md} が特異点近傍を含まなくなるまで小さくしておけば、多くの場合は事足りると予想される。

[数32]

$$x_{md} = \varphi(x_s) = S_p x_s + x_{mdo} \quad (32)$$

[0080] 式 (32) で表される簡易的な写像 ϕ で事足りない場合は、単なるスケール変換（拡大縮小）と平行移動だけではなく、いわゆるアフィン変換によって回転・剪断を加えた線形変換により写像 ϕ を定義すればよい。その他、射影変換や適当な非線形変換により写像 ϕ を定義することもできる。

[0081] なお、非特許文献4のp. 78－85には、異構造マスタスレーブシステ

ムにおいてマスタ操作領域とスレーブ作業領域とを対応させる手法が記載されているが、この手法は、「形の異なるマスタとスレーブのほぼ全動作領域で、両者のおおよその運動方向を一致させる方法」であり、本発明のように特異点問題を解決し得るものではない。

[0082] ここで、上の説明では、マスタロボットの位置制御をマスタ制御則（２９）に従って作業座標系で行うこととしたが、マスタロボットの逆運動学を用いれば、例えばマスタ制御則（３３）に従ってマスタ関節座標系で位置制御を行うこともできる。

[数33]

$$\tau_m = K_p(q_{md} - q_m) \quad (33)$$

ただし、マスタ関節変位 q_m 、およびその目標値であるマスタ目標関節変位 q_{md} は、それぞれ以下の通りである。なお、マスタ関節変位 q_m はマスタロボットの姿勢と等価なので、本明細書では q_m を姿勢と呼ぶこともある。

[数34]

$$q_m = \psi_m^{-1}(x_m) \quad (34)$$

[数35]

$$q_{md} = \psi_m^{-1}(x_{md}) = \psi_m^{-1}(\varphi(x_s)) \quad (35)$$

式（３４）、（３５）において ψ_m^{-1} は、マスタロボットの逆運動学を表す非線形関数である。前述の通り、本発明では、写像 ϕ がマスタロボットの特異点を回避しつつもスレーブ作業領域 X_s を全てカバーするように定義されているため、逆運動学 $\psi_m^{-1}(\phi(x_s))$ は必ず解を持つ。

[0083] マスタ制御則（２９）では、作業座標系での位置制御のためにヤコビ行列 $J_m(q_m)$ が用いられているので、作業座標系での変位誤差に対するゲイン $J_m^T K_p$ がマスタロボットの姿勢 q_m に依存して変化することになる。すなわ

ち、ある姿勢において適切だったゲインが、別の姿勢においては適切でなくなる可能性がある。一方、上記のマスタ制御則（33）では、マスタ関節座標系での変位誤差に対するゲイン K_p がマスタロボットの姿勢 q_m に依存しない定数となるので、システムの安定性の向上が期待できる。

[0084] なお、マスタ制御則（33）において逆運動学 $\phi_m^{-1}(\phi(x_s))$ は必ず解を持つと述べたが、この解が解析的に導出できるとは限らない。特に、多くの自由度を有するリンク機構の逆運動学には一般的な解析解が存在しないことが多い。解析解が存在しない場合は、数値解法、すなわちコンピュータによる数値的な反復収束計算によって解を導出する必要があるが、この計算は制御系への負荷が非常に大きいものであった。

[0085] しかしながら、例えば産業用のロボットアームの多くは、その機構を工夫することによって数値解法に依らずに解析的に解を導出し得るようになってきている。これに関し、非特許文献10には、制御対象となるロボットが以下の2つの条件を満たせば、逆運動学の一般解が解析的に導出され得ることが示されている。

i) ロボットの自由度が6以下であること。

i i) 6以下の自由度のうちの連続した3つの自由度が、単一のシリアルリンク機構を構成する3つ以上の回転関節によってもたらされたものであり、かつその3つの回転関節の回転軸またはその延長線が一点で交わること。

したがって、本発明においても、マスタロボットをこのような機構とすることによって、マスタ制御則（33）における逆運動学 $\phi_m^{-1}(\phi(x_s))$ の解を解析的に導出することができるようになり、高速かつ簡便にマスタ制御則（33）に従ったマスタロボットの位置制御を行えるようになる。

[0086] なお、力順送型ではない従来のマスタスレーブシステムではスレーブロボットに位置制御がなされるので、逆運動学を用いてシステムの安定性を向上させ、かつ制御を高速かつ簡便なものとするためには、スレーブロボットが上記条件i) およびi i) を満たすような、逆運動学が解析的に導出可能な構造であることが好ましい。しかしながら、スレーブロボットにはタスク遂

行のための作業性能が第1に求められるところ、必要な作業性能を実現するための構造と、逆運動学を解析的に導出可能とするための構造との両立を図ることは困難である。この点、マスタロボットは、人間が操作し易い構造になっていれば十分なので、逆運動学を解析的に導出可能とし、かつ操作性に優れた構造とすることは、比較的容易である。

[0087] 上記条件 i) および ii) を満たすマスタロボット（マスタアーム M'）の一例を図3に示す。同図に示すように、マスタアーム M' は、 $\theta 1 \sim \theta 6$ で示された6つの回転関節を備え、これにより6自由度を有している。また、回転関節 $\theta 1 \sim \theta 6$ のうちの連続した3つの回転関節 $\theta 4 \sim \theta 6$ はシリアルリンク機構を構成し、さらに、回転関節 $\theta 4$ の回転軸の延長線と回転関節 $\theta 6$ の回転軸の延長線とが、回転関節 $\theta 5$ の回転軸上の一点で交わっている。

[0088] なお、例えば、回転関節 $\theta 1$ 、 $\theta 2$ および $\theta 4$ は連続しているとは言えない。また、例えば、回転関節 $\theta 1$ 、 $\theta 2$ および $\theta 3$ は連続しているものの、その回転軸（または延長線）が一点で交わっていない。

[0089] 次に、上記条件 i) および ii) を満たさないマスタロボット（マスタアーム M''）の一例を図4に示す。同図に示すように、マスタアーム M'' は、 $\theta 1 \sim \theta 3$ 、 $\theta 5 \sim \theta 8$ で示された7つの回転関節、および $\theta 4$ で示された1つの直動関節によってもたらされる8自由度を有しているので、条件 i) を満たさない。また、マスタアーム M'' には、連続する3つの回転関節の組が3つ（ $\theta 1 \sim \theta 3$ 、 $\theta 5 \sim \theta 7$ 、 $\theta 6 \sim \theta 8$ ）存在しているが、どの組においても回転軸（または延長線）は一点で交わっていない。したがって、マスタアーム M'' は、条件 ii) も満たしていない。

[0090] 本発明に係る力順送型マスタスレーブシステムは、複数のマスタロボットの中から選ばれた1つのマスタロボットと、複数のマスタロボットのいずれにも電氣的に接続可能な複数のスレーブロボットの中から選ばれた1つのスレーブロボットとを電氣的に接続してマスタスレーブシステムを構築したものであってもよい。上記の通り、マスタロボットには操作性が求められ、ス

レーブロボットには作業性が求められるところ、このような構成にすれば、自分の好みのマスタロボット（マイマスタロボット）を使いつつ、タスクに応じて複数のスレーブロボットを交換して使い分けることができるので、熟練のためのトレーニングを短縮しつつ、単にスレーブロボットの作業端に設けられたエンドエフェクタを交換するだけでは済まないような多種多様なタスクに対応できるというメリットが得られる。

[0091] この構成は、例えば手術ロボットとしてのマスタスレーブシステムに好適である。マスタについては、医師が自らの身体やスキル、好みに合わせて、良く調整されたマスタロボットを選択し、スレーブについては、予め準備しておいた多種多様なスレーブロボットの中から術式に応じたものを選択することができる。また、この構成は、1つのマスタロボットで手術ロボットのような小さなスレーブロボットおよびパワー増幅ロボットのような大きなスレーブロボットのいずれかを選択的に操作したい場合にも好適である。

[0092] なお、特異点問題を抱えている従来のマスタスレーブシステムでは、マスタロボットおよびスレーブロボットの組み合わせ毎に特異点問題に個別に対処せねばならないため、上記のような複数のマスタロボットおよびスレーブロボットの中から任意に選択した各1つのマスタロボットおよびスレーブロボットを接続してマスタスレーブシステムを構築することは、非常に困難であった。

[0093] しかしながら、本発明に係る力順送型マスタスレーブシステムによれば、マスタロボットおよびスレーブロボット双方の特異点問題が解決されるので、スレーブロボットについては可動範囲全域（全作業領域）の情報（つまり、スレーブ作業領域の集合 X_s の情報）、マスタロボットについては可動範囲全域（全操作領域）と特異姿勢近傍の情報（つまり、マスタ操作領域の集合 X_m とマスタ操作領域内の全ての特異点近傍の集合 X_{ms} の情報）を持たせておき、各々1つを選んで接続した時に、それらの情報から写像 ϕ を手動もしくは自動で定義するだけで、任意のマスタロボットおよびスレーブロボットを組み合わせるマスタスレーブシステムを容易に構築することができる。

なお、写像 ϕ の定義は、例えば式(32)の S_p と x_{md} を調節するような方法であれば、容易に自動化することができる。

[0094] [注意事項]

本明細書では、便宜上、マスタロボット、スレーブロボットという表現を使用した。必ずしも本発明はいわゆるロボットらしいロボットへの適用のみに限られない。マスタスレーブシステムおよびバイラテラル制御には広範な応用が期待されており、あらゆる電気式マスタスレーブシステムに本発明は適用することができる。例えばX-by-Wireシステム（バイワイヤシステム）と呼ばれるものは、全て電気式マスタスレーブシステムである。したがって、マスタスレーブロボットシステムのみならず、自動車、航空機、船舶、その他あらゆる操縦型機械のX-by-Wireシステムにおいてバイラテラル制御を使用する場合に、本発明をそのまま適用することができる。

[0095] 本明細書中の「変位」および「位置」は一般化変位を意味し、並進・回転の位置姿勢を含むものとする。同じく「力」は一般化力を意味し、並進力・回転力（トルク）を含むものとする。

[0096] 各バイラテラル制御における具体的な制御則は説明のための簡単な例であり、制御目的を変えなければ、より高度な制御則を用いることができる。例えば、位置制御則としては比例制御が用いられているが、もちろんPID制御や、PID制御を拡張したProxy-based Sliding Mode制御（非特許文献1参照）、あるいは、それをさらに拡張した特許文献2記載のような高度な制御則を用いることもできる。

[0097] 操作力センサはハードウェアとしての力センサでなくてもよく、電磁アクチュエータの電流や油空圧アクチュエータの圧力から操作力を推定する手段や、変位センサの信号等からオブザーバ等によって操作力を推定する手段であってもよい。

[0098] 力順送型バイラテラル制御では、操作結果が変位情報によって提示されるため、直流を下限、数百Hzから1kHz程度を上限とする広い周波数帯域

を使って操作結果の提示がなされる。この操作結果の提示は、必ずしも一種類のアクチュエータで行う必要はなく、例えば、提示できる周波数帯域の異なる複数のアクチュエータで分担して提示してもよい。複数のアクチュエータの組み合わせとしては、例えば、大モータと小モータの組み合わせ（いわゆるマクロ・マイクロシステム）や、あるいは低周波帯域を担うモータと高周波帯域を担う振動子またはスピーカまたはボイスコイルモータ等の組み合わせが考えられる。

符号の説明

[0099]	1	マスタスレーブシステム
	2	マスタ目標変位演算装置
	3	スレーブ目標駆動力演算装置
	M	マスタアーム
	S	スレーブアーム
	F_m	操作力センサ
	FC_s	駆動力制御系
	PC_m	位置制御系
	$Am_{1\sim3}$	マスタアクチュエータ
	$As_{1\sim3}$	スレーブアクチュエータ
	$Pm_{1\sim3}$	マスタ変位センサ
	$Ps_{1\sim3}$	スレーブ変位センサ

請求の範囲

[請求項1]

操作者によって操られるアドミッタンス型の力覚提示装置であるマスタロボットと、前記マスタロボットに少なくとも電氣的に接続され、かつ前記マスタロボットから少なくとも体幹以外が機械的に独立して動作するスレーブロボットとからなる、バイラテラル制御されるマスタスレーブシステムであって、

前記マスタロボットを位置制御するマスタ駆動力を発生させる少なくとも一つのマスタアクチュエータと、

前記スレーブロボットを駆動力制御するスレーブ駆動力を発生させる少なくとも一つのスレーブアクチュエータと、

前記マスタロボットにおけるマスタ変位を計測する少なくとも一つのマスタ変位センサと、

前記スレーブロボットにおけるスレーブ変位を計測する少なくとも一つのスレーブ変位センサと、

前記操作者が前記マスタロボットに加えるマスタ操作力を計測する少なくとも一つの操作力センサと、

前記スレーブ変位を写像することにより、当該スレーブ変位に対応する前記マスタ変位の目標値であるマスタ目標変位を求めるマスタ目標変位演算装置と、

前記マスタ操作力に基づいて前記スレーブ駆動力の目標値であるスレーブ目標駆動力を求めるスレーブ目標駆動力演算装置と、
を備え、

前記スレーブアクチュエータが前記スレーブ目標駆動力に基づいて前記スレーブ駆動力を発生させる一方、前記マスタアクチュエータが前記マスタ目標変位と前記マスタ変位とに基づいて前記マスタ駆動力を発生させることで、

(1) 前記スレーブロボットが環境に加えるスレーブ作業力を計測する前記バイラテラル制御のための作業力センサを不要とし、かつ(

2) 前記操作者にマスタダイナミクスを感じさせることなく、スレーブダイナミクスを感じさせるようにし、

さらに、前記マスタ目標変位演算装置における前記写像を、前記マスタ目標変位の集合が前記マスタロボットの特異点を含まないように予め定義しておくことで、

(3) 前記スレーブロボットと前記マスタロボットとが同構造であるか異構造であるかに関わらず、前記スレーブロボットの可動範囲全域において前記マスタロボットおよび前記スレーブロボット双方の特異点問題を解決し得るようにした

ことを特徴とするマスタスレーブシステム。

[請求項2] 前記マスタ目標変位演算装置が、前記マスタロボットの逆運動学演算によって、前記スレーブ変位に対応する前記マスタ目標変位を前記マスタロボットのマスタ関節座標系において求めることで、

前記マスタアクチュエータによる前記マスタロボットの位置制御が、前記マスタ関節座標系において行われるようにした

ことを特徴とする請求項1に記載のマスタスレーブシステム。

[請求項3] 前記マスタロボットの機構が、数値的な反復収束演算を必要とすることなく解析的に前記マスタロボットの逆運動学演算が行われ得るように構成されている

ことを特徴とする請求項2に記載のマスタスレーブシステム。

[請求項4] 前記マスタロボットが6以下の自由度を有し、

前記6以下の自由度のうちの連続した3つの自由度が、単一のシリアルリンク機構を構成する3つの回転関節によってもたらされたものであり、

前記3つの回転関節の回転軸またはその延長線が一点で交わる

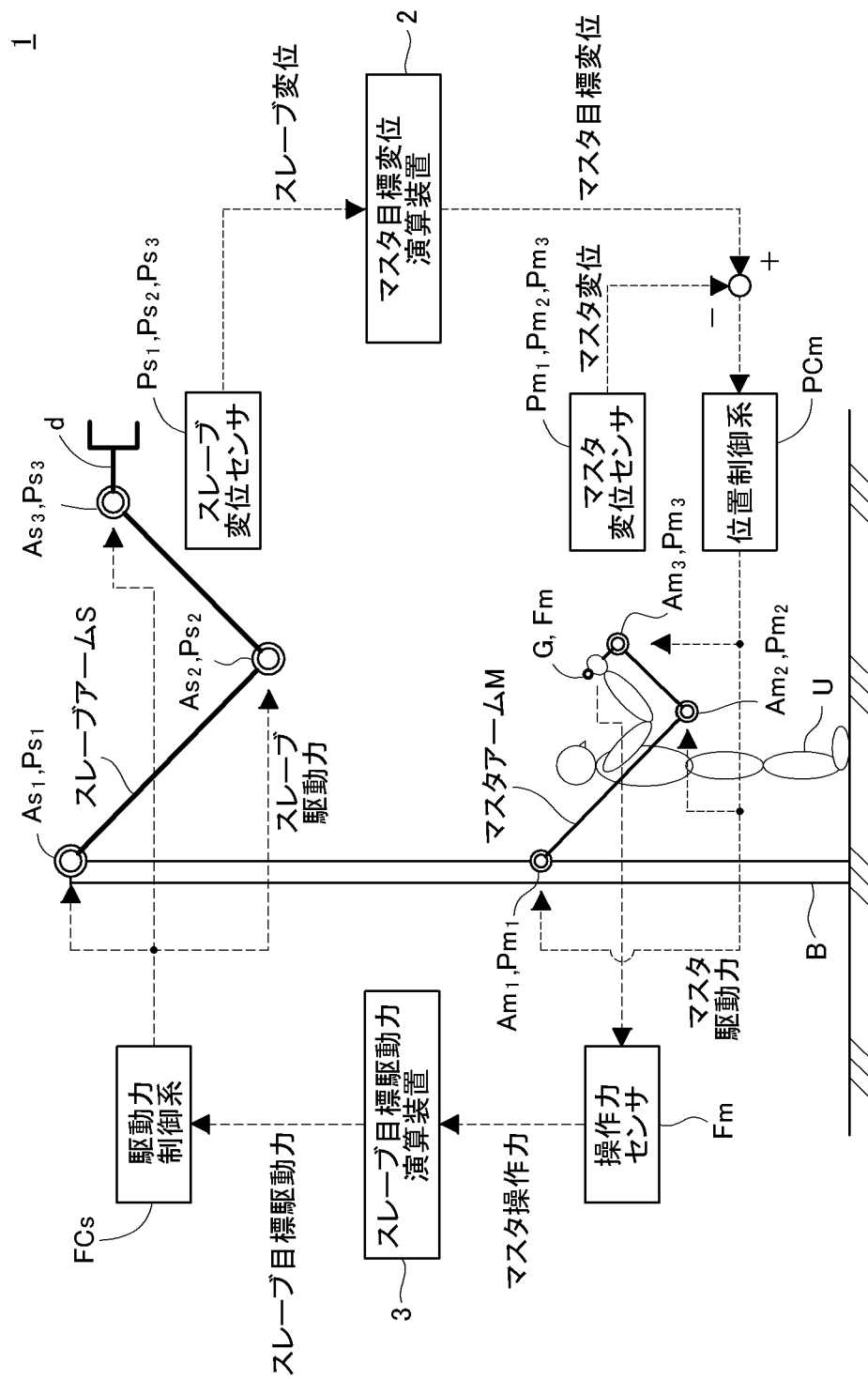
ことを特徴とする請求項3に記載のマスタスレーブシステム。

[請求項5] 前記マスタロボットは、複数のマスタロボットの中から選ばれたものであり、

前記スレーブロボットは、前記複数のマスタロボットのいずれにも電氣的に接続可能な複数のスレーブロボットの中から選ばれたものであり、

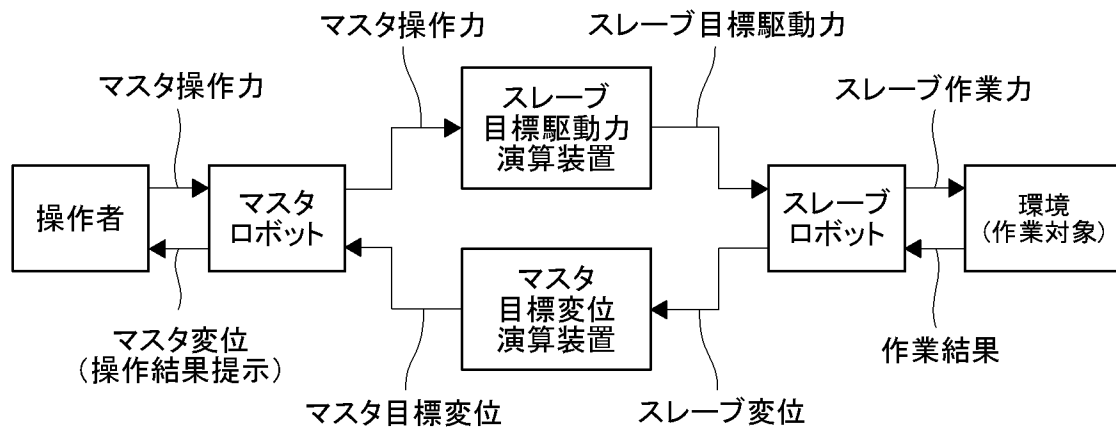
前記選ばれた各 1 つの前記マスタロボットおよび前記スレーブロボットが電氣的に接続されている
ことを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載のマスタスレーブシステム。

[図1]

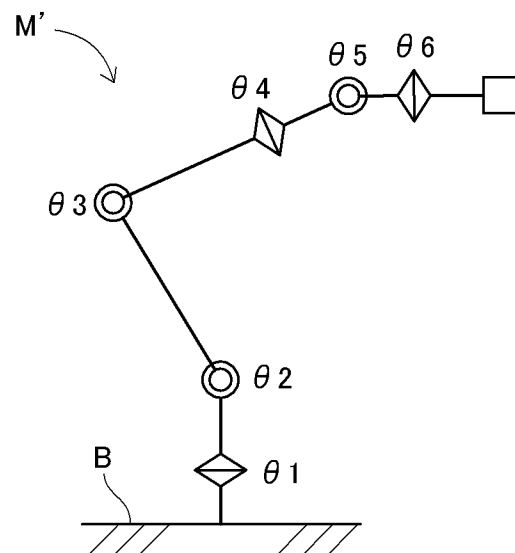


[図2]

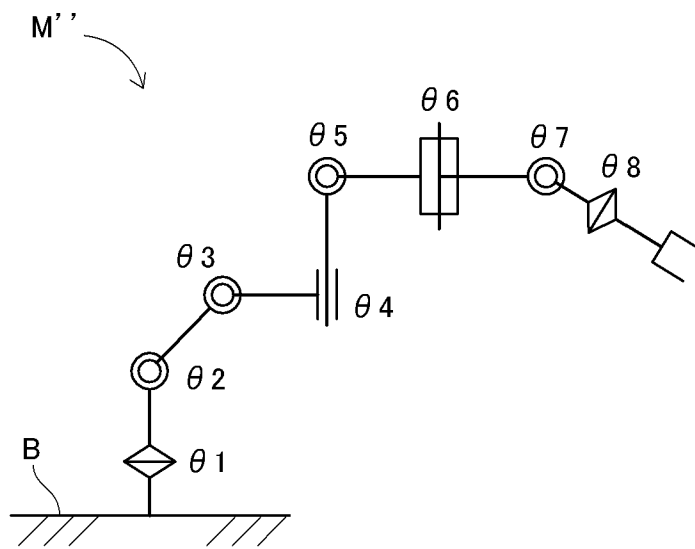
1



[図3]



[図4]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/079304

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J3/00(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B25J3/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2011-189445 A (Ritsumeikan), 29 September 2011 (29.09.2011), entire text; all drawings & WO 2011/115287 A	1-5
A	JP 2010-504127 A (Koninklijke Philips Electronics N.V.), 12 February 2010 (12.02.2010), paragraph [0037] & US 2010/0041991 A1 & EP 2104455 A & WO 2008/038184 A2 & CN 101610721 A & RU 2009115691 A & TW 200820945 A	1-5
A	JP 2009-12125 A (ShinMaywa Industries, Ltd.), 22 January 2009 (22.01.2009), entire text; all drawings (Family: none)	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
27 January 2015 (27.01.15)

Date of mailing of the international search report
10 February 2015 (10.02.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/079304

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2001-300871 A (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.), 30 October 2001 (30.10.2001), entire text; all drawings (Family: none)	1-5
A	JP 7-136949 A (Fujitsu Ltd.), 30 May 1995 (30.05.1995), entire text; all drawings (Family: none)	1-5

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. B25J3/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. B25J3/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 5 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 5 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 5 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2011-189445 A（学校法人立命館）2011.09.29, 全文, 全図 & WO 2011/115287 A	1-5
A	JP 2010-504127 A（コーニンクレッカ フィリップス エレクトロニクス エヌ ヴィ）2010.02.12, 【0037】 & US 2010/0041991 A1 & EP 2104455 A & WO 2008/038184 A2 & CN 101610721 A & RU 2009115691 A & TW 200820945 A	1-5

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 7 . 0 1 . 2 0 1 5

国際調査報告の発送日

1 0 . 0 2 . 2 0 1 5

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

鈴木 崇文

3 U

4 8 5 5

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 3 6 4

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2009-12125 A (新明和工業株式会社) 2009. 01. 22, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-5
A	JP 2001-300871 A (川崎重工業株式会社) 2001. 10. 30, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-5
A	JP 7-136949 A (富士通株式会社) 1995. 05. 30, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-5