(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年10月1日(01.10.2020)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2020/195316 A1

(51) 国際特許分類:
*B25J 9/10* (2006.01)　*B25J 17/00* (2006.01)
*A61B 34/37* (2016.01)　*G05D 3/12* (2006.01)
*B25J 3/00* (2006.01)

(21) 国際出願番号：　PCT/JP2020/005970

(22) 国際出願日：　2020年2月17日(17.02.2020)

(25) 国際出願の言語：　日本語

(26) 国際公開の言語：　日本語

(30) 優先権データ：
特願 2019-065060　2019年3月28日(28.03.2019)　JP

(71) 出願人：ソニー株式会社 (**SONY CORPORATION**) [JP/JP]; 〒1080075 東京都港区港南１丁目７番１号 Tokyo (JP).

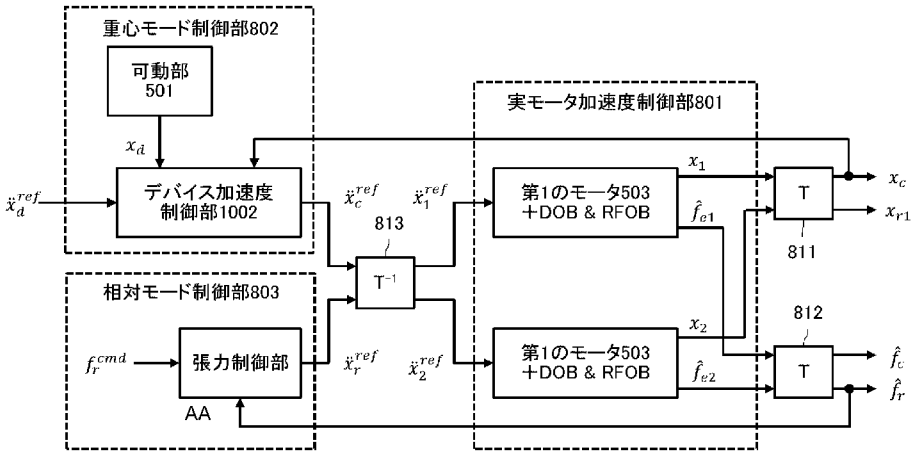
(72) 発明者：矢島　俊介 (**YAJIMA, Shunsuke**); 〒1080075 東京都港区港南１丁目７番１号 ソニー株式会社内 Tokyo (JP).

(74) 代理人：宮田 正昭，外(**MIYATA, Masaaki** et al.); 〒1040032 東京都中央区八丁堀三丁目２５番９号 Ｄａｉｗａ八丁堀駅前ビル西館８階 特許業務法人 大同特許事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能)：AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,

(54) **Title:** CONTROL DEVICE, CONTROL METHOD, AND MASTER-SLAVE SYSTEM

(54) 発明の名称： 制御装置及び制御方法、並びにマスタスレーブシステム




501 Movable part
503 First motor
801 Actual motor acceleration control unit
802 Center-of-gravity mode control unit
803 Relative mode control unit
1002 Device acceleration control unit
AA Tension control unit

(57) **Abstract:** Provided is a control device for controlling a parallel wire mechanism. In a parallel wire device that pulls a movable part using a plurality of wires, a control device decomposes a control model, that wire-drives the movable part with a pair of opposing motors, into a center-of-gravity mode in which a motor C is controlled so that the movable part reaches a desired acceleration, and a relative mode in which a motor R is controlled so that an elastic force acting on the wires becomes constant. The control device coordinate-transforms an acceleration reference value of the motor C

WO 2020/195316 A1

［続葉有］

DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

**(84)** 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告(条約第21条(3))

determined in the center-of-gravity mode and an acceleration reference value of the motor R determined in the relative mode to obtain acceleration reference values of the pair of motors.

**(57)** 要約:パラレルワイヤ機構を制御する制御装置を提供する。 可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御装置は、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルを、前記可動部が所望の加速度となるようにモータCを制御する重心モードと前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるようにモータRを制御する相対モードにモード分解し、前記重心モードにおいて決定した前記モータCの加速度参照値と、前記相対モードにおいて決定した前記モータRの加速度参照値を座標変換して、前記一対のモータの加速度参照値を得る。

# 明　細　書

## 発明の名称 ：

## 制御装置及び制御方法、並びにマスタスレーブシステム

## 技術分野

[0001] 本明細書で開示する技術は、パラレルワイヤ機構を制御する制御装置及び制御方法、並びにマスタ装置又はスレーブ装置の少なくとも一方がパラレルワイヤ機構を有するマスタスレーブシステムに関する。

## 背景技術

[0002] イナーシャの小さい駆動方式として、パラレルワイヤ方式並びにパラレルリンク方式が知られている。これらパラレル機構は、例えばマスタスレーブ方式のシステムにおいて、マスタ側でオペレータが操作するコントローラや、スレーブ側で出力端のデバイス（エンドエフェクタ）の駆動に使用することができる。一般には、パラレルワイヤ方式の方が、イナーシャがより小さい。

[0003] また、マスタスレーブシステムの制御方式として、マスタ装置からスレーブ装置を操作すると同時にスレーブ装置の状態をマスタ装置にフィードバックするバイラテラル方式が知られている（例えば、特許文献１を参照のこと）。

[0004] バイラテラル制御方式を実現するには、位置と力を同時に高精度に制御する必要がある。ところが、パラレルワイヤ機構の場合、ワイヤ特有の振動や伸びのために制御の精度が劣化することが懸念される。例えば、パラレルワイヤ駆動ロボットにおいて、振動を抑制しつつ位置制御と力制御をそれぞれ個別に実現する技術について提案がなされているが（例えば、非特許文献１を参照のこと）、位置制御と力制御を同時に実施するものではない。

## 先行技術文献

## 特許文献

[0005] 特許文献1：特開２０１９－０３４００２号公報

## 非特許文献

[0006] 非特許文献1：木野仁外著「パラレルワイヤ駆動システムの作業座標系制御法とそのロバスト性」（日本ロボット学会誌、Ｖｏｌ．１８，Ｎｏ．３，ｐｐ．　４１１－４１８、２０００）

## 発明の概要

## 発明が解決しようとする課題

[0007] 本明細書で開示する技術の目的は、ワイヤ特有の振動や伸びを抑制してパラレルワイヤ機構を制御する制御装置及び制御方法、並びにマスタ装置又はスレーブ装置の少なくとも一方がパラレルワイヤ機構を有し、バイラテラル制御を実施す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

[0008] 本明細書で開示する技術の第１の側面は、可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御装置であって、

前記可動部の力及び位置を加速度に基づいて制御する、制御装置である。

[0009] 第１の側面に係る制御装置は、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルを、前記可動部が所望の加速度となるようにモータＣを制御する重心モードと前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるようにモータＲを制御する相対モードにモード分解し、前記重心モードにおいて決定した前記モータＣの加速度参照値と、前記相対モードにおいて決定した前記モータＲの加速度参照値を座標変換して、前記一対のモータの加速度参照値を得る。

[0010] また、本明細書で開示する技術の第２の側面は、

可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御方法であって、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、

前記可動部が所望の加速度となるように重心モードのモータＣを制御するステップと、

前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるように相対モードのモータＲを制御するステップと、

前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施するステップと、

を有する制御方法である。

[0011] また、本明細書で開示する技術の第３の側面は、

マスタ装置又はスレーブ装置の少なくとも一方が、可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ機構を含み、

前記ワイヤの伸び及び振動を抑制して前記可動部の力及び位置を加速度に基づいて制御する制御装置を含む、

マスタスレーブシステムである。前記制御装置は、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、前記制御系から得られる加速度参照値に基づいて前記一対のモータを制御する。

## 発明の効果

[0012] 本明細書で開示する技術によれば、バイラテラル制御系とは独立してワイヤ特有の振動や伸びを抑制してパラレルワイヤ機構を制御する制御装置及び制御方法、並びにマスタ装置又はスレーブ装置の少なくとも一方がパラレルワイヤ機構を有し、バイラテラル制御とワイヤの伸び及び振動の抑制とを同時に且つ非干渉に実現するマスタスレーブシステムを提供することができる。

[0013] なお、本明細書に記載された効果は、あくまでも例示であり、本明細書で開示する技術によりもたらされる効果はこれに限定されるものではない。また、本明細書で開示する技術が、上記の効果以外に、さらに付加的な効果を奏する場合もある。

[0014] 本明細書で開示する技術のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する実施形態や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

## 図面の簡単な説明

[0015] [図1]図１は、パラレルワイヤ機構を有するマスタ装置又はスレーブ装置を制御する制御装置及び制御方法、並びにマスタスレーブシステムを示した図である。

[図2]図２は、パラレルワイヤ装置１００の構成例を示した図である。

[図3]図３は、マスタ装置を斜視した様子示した図である。

[図4]図４は、マスタ装置を俯瞰した様子を示した図である。

[図5]図５は、１自由度分を対象としたパラレルワイヤ機構のモデルを示した図である。

[図6]図６は、図５に示したパラレルワイヤ機構のモデルをモード分解した重心モードのモデルを示した図である。

[図7]図７は、図５に示したパラレルワイヤ機構のモデルをモード分解した相対モードのモデルを示した図である。

[図8]図８は、パラレルワイヤ制御系全体の制御ブロック図である。

[図9]図９は、モータ加速度制御系の制御ブロック図である。

[図10]図１０は、重心モード制御部８０２の構成例を示した図である。

[図11]図１１は、相対モード制御部８０３の構成例を示した図である。

[図12]図１２は、バイラテラル制御系のマスタスレーブシステムの制御ブロック図である。

## 発明を実施するための形態

[0016] 以下、図面を参照しながら本明細書で開示する技術の実施形態について詳細に説明する。なお、以下の順で、本実施形態について説明する。

[0017] Ａ．マスタスレーブシステムの構成

Ｂ．パラレルワイヤ機構の構成例

Ｃ．パラレルワイヤ機構を適用したマスタ装置の構成例

Ｄ．パラレルワイヤ機構を有するマスタスレーブシステムの技術的課題

Ｅ．パラレルワイヤ機構のモデル化

Ｆ．パラレルワイヤ制御系の構成

Ｇ．モータ加速度制御系

Ｈ．重心モード加速度制御系

Ｉ．相対モード張力制御系

Ｊ．パラレルワイヤ制御系全体の動作

Ｋ．パラレルワイヤ機構を含んだマスタスレーブシステムのバイラテラル制御

Ｌ．効果

[0018] Ａ．マスタスレーブシステムの構成

図１には、マスタスレーブシステム１の機能構成例を模式的に示している。図示のマスタスレーブシステム１は、例えば、腹腔や胸腔といった内視鏡外科手術を実施する医療ロボットシステムである。マスタ側でユーザがコントローラなどの入力装置を介して入力した指示に応じて、スレーブ側のアームに取り付けられた医療用器具などのエンドエフェクタが駆動され、当該医療用器具によって患者の術部に対して各種の処置が施される。

[0019] 図示のマスタスレーブシステム１は、マスタ装置１０と、スレーブ装置２０と、マスタ装置１０を介して入力されるユーザの指示に応じてスレーブ装置２０を駆動させる制御システム３０で構成される。ユーザがマスタ装置１０を操作すると、制御システム３０を通じて、スレーブ装置２０に対する操作指令が有線又は無線の通信手段により送信され、エンドエフェクタを駆動する。

[0020] マスタ装置１０は、術者などのユーザが入力操作を行なうための入力部１１と、この入力部１１を操作中のユーザに対して力を提示する力提示部１２を備えている。

[0021] 入力部１１は、例えば、レバー、グリップ、ボタン、ジョグダイヤル、タクトスイッチ、フット・ペダル・スイッチなどのさまざまな入力デバイスからなるコントローラと、コントローラを駆動するマスタアームによって構成され得る。本実施形態では、マスタアームの少なくとも一部分はパラレルワイヤ装置を用いて構成され得る。

[0022] また、力提示部１２は、例えば、マスタアームや駆動するサーボモータ、さらにはコントローラを駆動するサーボモータなどによって構成される。力提示部１２は、スレーブ装置２０側のエンドエフェクタに作用する力に応じて、例えばコントローラを操作するユーザに対して抵抗を与えるようにマスタアームやコントローラを駆動することにより、医療用器具などのエンドエフェクタに作用する力をユーザに対して提示する。

[0023] 一方、スレーブ装置２０は、スレーブアームと、スレーブアームに取り付けられたエンドエフェクタと、スレーブアーム並びにエンドエフェクタを駆動する駆動部２１と、エンドエフェクタやスレーブアームにおける状態を検出する状態検出部２２を備えている。

[0024] スレーブアームに取り付けられるエンドエフェクタは、例えば、腹腔鏡下手術において患者の体腔内に挿入して用いられる処置具からなる。処置具として、開閉式のエンドエフェクタが用いられてもよい。例えば、把持力を発生させるジョー、切断ブレード、ステープラなどが挙げられる。あるいは、処置具は、気腹チューブ、エネルギー処置具、攝子、レトラクタなどでもよい。エネルギー処置具は、高周波電流や超音波振動などの作用により、組織の切開や剥離、血管の封止などを行う処置具である。また、本実施形態では、スレーブアームの少なくとも一部分はパラレルワイヤ装置を用いて構成され得る。

[0025] 駆動部２１は、スレーブアームやエンドエフェクタを動作させるためのモータで構成される。制御システム３０によって算出された制御量に応じて当該モータが駆動することにより、術者などのユーザがマスタアームやコントローラを操作した量に応じて、スレーブアームやエンドエフェクタが動作する。

[0026] 状態検出部２２は、例えば、スレーブアームやエンドエフェクタの位置や姿勢を検出するセンサや、スレーブアームやエンドエフェクタに作用する外力を検出する力覚センサなどで構成され、スレーブアームやエンドエフェクタの状態を検出する。

[0027] 制御システム３０は、マスタ装置１０とスレーブ装置２０間で、スレーブ装置２０側のスレーブアームやエンドエフェクタの駆動制御とマスタ装置１０側への力提示に関する情報伝達を実現する。但し、制御システム３０の機能の一部又は全部が、スレーブ装置２０又はマスタ装置１０の少なくとも一方に装備されていてもよい。例えば、マスタ装置１０又はスレーブ装置２０の少なくとも一方のＣＰＵ（Ｃｅｎｔｒａｌ Ｐｒｏｃｅｓｓｉｎｇ Ｕｎｉｔ）（図示しない）が、制御システム３０として機能する。あるいは、マスタ装置１０及びスレーブ装置２０の各々のＣＰＵが連携して、制御システム３０として機能する。制御システム３０は、例えばバイラテラル方式によって、マスタ装置１０からスレーブ装置２０を操作すると同時にスレーブ装置２０の状態をマスタ装置１０にフィードバックする。

[0028] Ｂ．パラレルワイヤ機構の構成例

図２には、マスタアーム又はスレーブアームのうち少なくとも一方、若しくは少なくとも一方の一部に適用されるパラレルワイヤ装置１００の基本的な構成例を模式的に示している。ここでは、紙面をＸＹ平面とするとともに、紙面に垂直な方向にＺ軸を設定する。また、説明の便宜上、図２に示すパラレルワイヤ装置１００は、ＸＹの２方向の並進自由度とＺ軸の１軸回りの回転自由度の合計３自由度を有するものとする。

[0029] パラレルワイヤ装置１００は、６本の並列するワイヤ１０１～１０６と、これらワイヤ１０１～１０６によって支持される可動部１１０を備えている。また、可動部１１０の上面には、回転可動部１２０が、可動部１１０に対して少なくともＺ軸回りに回動可能に取り付けられている。なお、可動部１１０は、台の上（図示しない）など平面上を滑動自在に支持されることを想定している。

[0030] ワイヤ１０１は、先端部が可動部１１０の端部１１１に固定されるとともに、根元部はリニアアクチュエータ１３１に取り付けられている。リニアアクチュエータ１３１の駆動によって、ワイヤ１０１の長さを制御することができる。図示の例では、ワイヤ１０１を方向変換プーリ１４１に巻き掛けて

、リニアアクチュエータ１３１の駆動方向を変換して、ワイヤ１０１の先端部が端部１１１に取り付けられている。ワイヤ１０１の先端部は、ユニバーサルジョイントなどで、角度が自由に変化する継手で端部１１１に接合されていることが好ましい。

[0031] また、ワイヤ１０２は、先端部が可動部１１０の端部１１２に固定されるとともに、根元部はリニアアクチュエータ１３２に取り付けられている。リニアアクチュエータ１３２の駆動によって、ワイヤ１０２の長さを制御することができる。但し、ワイヤ１０２を方向変換プーリ１４２に巻き掛けて、リニアアクチュエータ１３２の駆動方向を変換して、ワイヤ１０２の先端部が端部１１２に取り付けられている。ワイヤ１０２の先端部は、ユニバーサルジョイントなどで、角度が自由に変化する継手で端部１１２に接合されていることが好ましい。

[0032] また、ワイヤ１０３は、先端部が可動部１１０の端部１１３に固定されるとともに、根元部はリニアアクチュエータ１３３に取り付けられている。リニアアクチュエータ１３３の駆動によって、ワイヤ１０３の長さを制御することができる。但し、ワイヤ１０３を方向変換プーリ１４３に巻き掛けて、リニアアクチュエータ１３３の駆動方向を変換して、ワイヤ１０３の先端部が端部１１３に取り付けられている。ワイヤ１０３の先端部は、ユニバーサルジョイントなどで、角度が自由に変化する継手で端部１１３に接合されていることが好ましい。

[0033] ワイヤ１０４は、先端部が可動部１１０の端部１１４に固定されるとともに、根元部はリニアアクチュエータ１３４に取り付けられている。リニアアクチュエータ１３４の駆動によって、ワイヤ１０４の長さを制御することができる。但し、ワイヤ１０４を方向変換プーリ１４４に巻き掛けて、リニアアクチュエータ１３４の駆動方向を変換して、ワイヤ１０４の先端部が端部１１４に取り付けられている。ワイヤ１０４の先端部は、ユニバーサルジョイントなどで、角度が自由に変化する継手で端部１１４に接合されていることが好ましい。

[0034] ワイヤ１０５の先端部は回転可動部１２０の側面部に巻き掛けて固定され、また、ワイヤ１０６の先端部はワイヤ１０５とは反対向きに回転可動部１２０の側面部に巻き掛けて固定されている。そして、ワイヤ１０５の根元部はリニアアクチュエータ１３５に取り付けられるとともに、ワイヤ１０６の根元部はリニアアクチュエータ１３６に取り付けられており、各リニアアクチュエータ１３５及び１３６の駆動によって、ワイヤ１０５及び１０６の長さをそれぞれ制御することができる。但し、ワイヤ１０５を方向変換プーリ１４５及び１４６に巻き掛けて、リニアアクチュエータ１３５の駆動方向を変換してから、回転可動部１２０の側面部に巻き掛けられている。また、ワイヤ１０６を方向変換プーリ１４７及び１４８に巻き掛けて、リニアアクチュエータ１３６の駆動方向を変換してから、回転可動部１２０の側面部に巻き掛けられている。

[0035] 各リニアアクチュエータ１３１～１３６は、図示しない制御部によって一元的にコントロールされるものとする。

[0036] ４本のワイヤ１０１～１０４は、可動部１１０をＸＹ平面内で並進運動させるためのパラレルワイヤである。制御部が各ワイヤ１０１～１０４の根元部のリニアアクチュエータ１３１～１３４を同期的に駆動して、各ワイヤ１０１～１０４の長さを変化させることで、可動部１１０をＸＹ平面内で並進移動させることができる。各ワイヤ１０１～１０４の長さを同期的に変化させることで、可動部１１０をＸＹＺ座標系上である程度の可動範囲でＺ軸回りに回転させることも可能である。

[0037] 具体的には、リニアアクチュエータ１３１及び１３２でワイヤ１０１及び１０２を牽引するとともに、ワイヤ１０１及び１０２の牽引と釣り合うように、リニアアクチュエータ１３３及び１３４でワイヤ１０３及び１０４を伸長させることによって、可動部１１０はＹプラス方向に移動し、リニアアクチュエータ１３３及び１３４でワイヤ１０３及び１０４を牽引するとともに、ワイヤ１０３及び１０４の牽引と釣り合うように、リニアアクチュエータ１３１及び１３２でワイヤ１０１及び１０２を伸長させることによって、可

動部１１０はＹマイナス方向に移動する。リニアアクチュエータがワイヤ巻き取り式の場合、ワイヤを巻き取ることによって牽引し、ワイヤを巻きだすことによって伸長する（以下、同様）。

[0038] 一方、リニアアクチュエータ１３１及び１３４でワイヤ１０１及び１０４を牽引するとともに、ワイヤ１０１及び１０４の牽引と釣り合うように、リニアアクチュエータ１３２及び１３３でワイヤ１０２及び１０３を伸長させることによって、可動部１１０はＸマイナス方向に移動し、リニアアクチュエータ１３２及び１３３でワイヤ１０２及び１０３を牽引するとともに、ワイヤ１０２及び１０３の牽引と釣り合うように、リニアアクチュエータ１３１及び１３４でワイヤ１０１及び１０４を伸長させることによって、可動部１１０はＸプラス方向に移動する。

[0039] また、２本のワイヤ１０５及び１０６は、可動部１１０上の回転可動部１２０をＺ軸回りに回転動作させるためのパラレルワイヤである。制御部がリニアアクチュエータ１３５及び１３６を同期的に駆動して、２本のワイヤ１０５及び１０６のうち一方の長さを短縮するとともに釣り合う長さだけ他方を伸長することによって、回転可動部１２０を可動部１１０に対して（若しくは、ＸＹＺ座標系上で）Ｚ軸回りに回転させることができる。

[0040] 具体的には、リニアアクチュエータ１３５でワイヤ１０５を牽引するとともに、ワイヤ１０５の牽引と釣り合うように、リニアアクチュエータ１３６でワイヤ１０６を伸長させることによって、回転可動部１２０を、図２の時計回りに回転させることができる。一方、リニアアクチュエータ１３６でワイヤ１０６を牽引するとともに、ワイヤ１０６の牽引と釣り合うように、リニアアクチュエータ１３５でワイヤ１０５を伸長させることによって、回転可動部１２０を、図２の反時計回りに回転させることができる。

[0041] なお、各ワイヤ１０１～１０４の長さを変化させることで、可動部１１０をＸＹ平面内で並進移動させることに加え、可動部１１０をある程度Ｚ軸回りに回転させることができる。したがって、可動部１１０及び回転可動部１２０の両方の回転機能を駆使することによって、より広い回転可動域を確保

することができる。

[0042] 図２では、可動部１１０を並進移動させるために並列に設置されたワイヤ１０１～１０４を黒で描き、回転可動部１２０を回転させるために並列に設置されたワイヤ１０５及び１０６をグレーで描いている。

[0043] リニアアクチュエータ１３１～１３６は、例えば、ボールねじやシャフトモータ、リニアモータ、モータとギア及びラック式の直動構造の組み合わせなどで構成することができる。但し、リニアアクチュエータ１３１～１３６は、それぞれワイヤ１０１～１０６の長さを伸縮させる動作を行うことが可能であれば、リニアアクチュエータである必要はない。例えば、回転式のモータと、モータの回転によってワイヤを巻き取る機構と組み合わせることによってリニアアクチュエータと置き換えることも可能である。

[0044] 回転可動部１２０を備えた可動部１１０を４本の並進用のワイヤ１０１～１０４と２本の回転用のワイヤ１０５及び１０６を取り付けて構成されるパラレルワイヤ装置１００において、ワイヤ１０１～１０６及び各ワイヤ１０１～１０６を駆動するリニアアクチュエータ１３１～１３６の配置は、図２に示した構成例には限定されない。また、各ワイヤ１０５～１０６を巻き掛ける方向変換プーリ１４１、１４２、…の個数や配置も、図２に示した構成例には限定されない。可動部１１０並びに回転可動部１２０の可動範囲や動作させ易さ、装置１００内の図示しない他の部材との干渉などを考慮して、リニアアクチュエータ１３１～１３６や方向変換プーリ１４１、１４２、…の配置を決定すればよい。

[0045] 本実施形態に係るパラレルワイヤ装置１００で使用されるワイヤ１０１～１０６は、例えば金属の紐（ステンレス製の撚り線からなるワイヤロープなど）や化学繊維を用いて製作することができる。金属の紐を用いれば、伸び難いという利点がある。また、化学繊維を用いる場合、伸び易いことが懸念されるが、馴染み易いという利点がある。また、使用されるすべてのワイヤが必ずしも同じ素材で統一される必要もない。

[0046] なお、図２では図示を省略したが、各リニアアクチュエータ１３１～１３

６の位置応答を取得できるエンコーダがそれぞれ装備されているものとする。また、可動部１１０の位置を取得できるエンコーダ、並びに可動部１１０の力応答を取得できる力センサなどの検出手段も装備されているものとする。

[0047] Ｃ．パラレルワイヤ機構を適用したマスタ装置の構成例

図３及び図４には、マスタスレーブシステムのマスタ装置において、パラレルワイヤ方式を適用した例を示している。但し、図３は、オペレータによって操作されているマスタ装置をオペレータの前方から斜視した様子を示し、図４は、オペレータが操作中のマスタ装置を俯瞰した様子を示している。マスタ装置は、図示しないスレーブ装置と双方向通信し、例えばバイラテラル方式によって、マスタ装置からスレーブ装置を操作すると同時にスレーブ装置の状態をマスタ装置にフィードバックするものとする。

[0048] マスタ装置本体は、上面が開いた箱状の構造体である。その箱の側面から箱内部に向かって複数本のワイヤが並列に延設されている。そして、これらのワイヤによって、左手用のコントローラ７０１Ｌ及び右手用のコントローラ７０１Ｒをそれぞれ空中に支持している。また、マスタ装置には、各ワイヤを根元側で牽引する複数のリニアアクチュエータが取り付けられている。

[0049] 図３及び図４に示すように、オペレータは、箱の中に左右の手を入れた状態で、左手用のコントローラ７０１Ｌ及び右手用のコントローラ７０１Ｒを操作することができる。後述するように、コントローラ７０１Ｌ及び７０１Ｒは、把持力覚提示装置を搭載しており、オペレータは、左右それぞれの手で把持力覚提示装置を掴んでコントローラ７０１Ｌ及び７０１Ｒを操作する。各コントローラ７０１Ｌ及び７０１Ｒは、ワイヤ牽引用のリニアアクチュエータなどの動力源を含まず、したがって小型且つ軽量に構成することができ、オペレータによる操作性もよい。左手用のコントローラ７０１Ｌと右手用のコントローラ７０１Ｒは、基本的には左右対称的な形状及び構造を備えている。以下では、右手用のコントローラ７０１に統一して説明することにする。

[0050] コントローラ７０１は、パラレルワイヤによって３次元空間を並進移動するコントローラ本体部と、コントローラ本体に対し少なくとも１軸回りに回転可能に取り付けられてパラレルワイヤによって回転動作する回転可動部を備えている。言い換えれば、コントローラ７０１を空中で支持するパラレルワイヤは、コントローラ本体を並進移動させるパラレルワイヤと、回転可動部を回転させるパラレルワイヤを含んでいる。また、図３及び図４では、コントローラ７０１の本体部を並進移動させるのに使用するワイヤを実線で描き、本体内の回転可動部を回転動作させるのに使用するワイヤを破線で描いている。但し、コントローラ７０１を並進移動及び回転動作させる仕組みの詳細については、後述する。各ワイヤは、それぞれの根元部のリニアアクチュエータで牽引される。

[0051] いずれのワイヤも、各々の根元部で対応するリニアアクチュエータの並進方向を向いている一方、先端部では並進移動又は回転動作させる対象物の動作方向を向いている。各ワイヤは、途中で１又は２以上のプーリ（図３及び図４では図示しない）に巻き掛けられて、適宜折り返され又は方向変換され、且つ、ワイヤ同士で干渉し合わないように配置されている。

[0052] マスタ装置で用いられるワイヤは、例えば金属の紐（ステンレス製の撚り線からなるワイヤロープなど）や化学繊維を用いて製作することができる。金属の紐を用いれば、伸び難いという利点がある。また、化学繊維を用いる場合、伸び易いことが懸念されるが、馴染み易いという利点がある。また、使用されるすべてのワイヤが必ずしも同じ素材で統一される必要もない。通常、１０ｋｇｆ程度までの張力がワイヤに作用することが想定される。但し、瞬間最大張力は個の値に留まらないことがある。

[0053] Ｄ．パラレルワイヤ機構を有するマスタスレーブシステムの技術的課題

マスタアームやスレーブアームの少なくとも一部にパラレルワイヤ装置を適用することで、軽量化が実現するとともに、可動域が拡大することが期待される。

[0054] また、本実施形態では、マスタスレーブシステムの制御方式として、マス

タ装置からスレーブ装置を操作すると同時にスレーブ装置の状態をマスタ装置にフィードバックするバイラテラル方式を適用することを想定している。

[0055] バイラテラル制御方式を実現するには、位置と力を同時に高精度に制御する必要がある。ところが、パラレルワイヤ装置を用いてマスタスレーブシステムを構成する場合、ワイヤ特有の振動や伸びのために制御の精度が劣化するという問題がある。また、バイラテラル制御系とワイヤの張力制御系が独立でないために、ワイヤの振動や伸びを抑制しようとするとバイラテラル制御系を干渉してしまうことが懸念される。

[0056] そこで、本明細書では、パラレルワイヤ機構を有するマスタ装置又はスレーブ装置において、バイラテラル制御系を構成したときのワイヤ特有の伸び及び振動を抑制する技術について、以下で提案する。また、本明細書では、バイラテラル制御とワイヤの伸び及び振動の抑制とを同時に且つ非干渉に実現する技術について、以下で提案する。

[0057] Ｅ．パラレルワイヤ機構のモデル化

図２には３自由度を有するパラレルワイヤ装置１００の構成例を示し、図３及び図４にはパラレルワイヤ機構を有するマスタ装置の外観を示した。ここでは、説明の簡素化のため、１自由度分を対象として、パラレルワイヤ機構を図５に示すようにモデル化した。パラレルワイヤ機構のその他の軸に関しても、同様に設計すればよいことを理解されたい。

[0058] 図５に示す１自由度モデル５００は、中央の可動部５０１（デバイス）と、可動部５０１を紙面左方向に牽引するためのワイヤ５０２と、ワイヤ５０２に牽引力を付与する第１のモータ５０３と、可動部５０１を紙面右方向に牽引するためのワイヤ５０４と、ワイヤ５０４に牽引力を付与する第２のモータ５０５で構成される。

[0059] なお、図５では図示を省略するが、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の位置応答を取得できるエンコーダがそれぞれ装備されているものとする。また、可動部５０１の位置を取得できるエンコーダ、並びに可動部５０１の力応答を取得できる力センサなどの検出手段も装備されているものと

する。

[0060] 図１２には、バイラテラル制御系のマスタスレーブシステムの制御ブロック図を示しているが、マスタ装置がパラレルワイヤ機構を有する場合（例えば、図３及び図４を参照のこと）には、マスタ装置のブロック内に図５に示すようなパラレルワイヤ機構の制御モデルが存在することになる。但し、図１２に示したマスタスレーブシステムの詳細については後述する。また、スレーブ装置がパラレルワイヤ機構を有する場合にも、同様に、スレーブ装置のブロック内に図５に示すような制御モデルが存在することになる。パラレルワイヤ機構におけるワイヤの振動や伸びのために、バイラテラル制御の精度が劣化することが懸念される。

[0061] そこで、本明細書では、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５で可動部５０１の加速度を制御する際のワイヤ５０２及びワイヤ５０４の伸びや振動といった問題を補償する技術について、以下で提案する。

[0062] ワイヤ５０２及びワイヤ５０４は、それぞれ第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５から牽引力を受けたときに伸びが発生するので、バネとしてモデル化する。ここでは、説明の簡素化のため、ワイヤ５０２及びワイヤ５０４のバネ定数は等しく、$K_s$とする。

[0063] 可動部５０１の質量及び位置をそれぞれ$m_d$、$x_d$とする。また、第１のモータ５０３の質量及び位置をそれぞれ$m_1$、$x_1$とする。同様に、第２のモータ５０５の質量及び位置をそれぞれ$m_2$、$x_2$とする。

[0064] 第１のモータ５０３が紙面左方向に牽引力$f_1$を発生したときに、ワイヤ５０２からは紙面右方向の弾性力$f_{e1}$を受ける。このとき、可動部５０１は、ワイヤ５０２から紙面左方向の弾性力$f_{e1}$を受ける。

[0065] また、第２のモータ５０５が紙面右方向に牽引力$f_2$を発生したときに、ワイヤ５０４からは紙面左方向の弾性力$f_{e2}$を受ける。このとき、可動部５０１は、ワイヤ５０４から紙面右方向の弾性力$f_{e2}$を受ける。このときのパラレルワイヤ系の運動方程式は、以下の式（１）～（５）に示す通りとなる。

[0066]

[数1]

$$m_1\ddot{x}_1 = f_1 - f_{e1} - f_1^{dis} \quad \cdots(1)$$

[0067] [数2]

$$m_2\ddot{x}_2 = f_2 - f_{e2} - f_2^{dis} \quad \cdots(2)$$

[0068] [数3]

$$m_d\ddot{x}_d = f_{e1} + f_{e2} - f_d^{ext} - f_d^{dis} \quad \cdots(3)$$

[0069] [数4]

$$f_{e1} = K_s(x_1 - x_d) \quad \cdots(4)$$

[0070] [数5]

$$f_{e2} = K_s(x_2 - x_d) \quad \cdots(5)$$

[0071] 但し、上式（１）～（５）において、ｆ$_d^{ext}$は可動部５０１に作用する外力、ｆ$_d^{dis}$は可動部５０１に作用する外力以外の摩擦などの外乱である。また、ｆ$_1^{dis}$は第１のモータ５０３に作用する外乱であり、ｆ$_2^{dis}$は第２のモータ５０５に作用する外乱である。

[0072] 上式（３）から分かるように、図５に示した制御モデルでは、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の各々からの弾性力で可動部５０１を駆動する。このような制御モデルでは、可動部５０１の加速度応答とワイヤ５０２及びワイヤ５０４の張力とを独立に制御することは困難である。

[0073] そこで、本明細書で提案する技術では、可動部５０１の加速度応答と、ワイヤ５０２及びワイヤ５０４の張力とを、独立に制御する制御系を構成するために、図５に示した制御モデルを、第１のモータ５０３と第２のモータ５０５の重心モードと相対モードにモード分解する。重心モードでは、可動部５０１が所望の加速度となるようにモータＣを制御する。一方、相対モードでは、弾性力が一定となるようにモータＲを制御する。重心モードと相対モ

ードは、それぞれ単一のモータのみからなる互いに独立した制御系である。

[0074] 図６には、パラレルワイヤ機構モデルの重心モード６００を概念的に示している。重心モード６００では、モータＣに、バネ定数２$K_s$を有するバネを介して、デバイス（可動部５０１）が結合している。以下では、モータＣの質量及び位置をそれぞれ$m_c$、$x_c$とし、バネからモータＣに作用する弾性力を$f_c$とする。図６と、上式（３）から、上式（５）において外乱を無視すると、重心モード６００における運動方程式は、下式（６）のように表すことができる。したがって、下式（６）から、重心モード６００を、モータＣとデバイスがバネで接続された２質点系の物理モデルとみなすことができる。モータＣとデバイス間を接続するバネは、ワイヤ５０２及びワイヤ５０４のバネ定数を合算した２$K_s$のバネ定数を有する。

[0075] [数6]

$$m_d\ddot{x_d} = K_s(x_1 - x_d) + K_s(x_2 - x_d) \quad \cdots(6)$$
$$= 2K_s\frac{x_1+x_2}{2} - 2K_s x_d$$
$$= 2K_s(x_c - x_d)$$

[0076] また、図７には、パラレルワイヤ機構モデルの相対モード７００を概念的に示している。相対モード７００は、ある壁に一端が取り付けられたバネの他端をモータＲで引っ張っている。モータＲが引っ張るバネのバネ定数は２$K_s$とする。以下では、モータＲの質量及び位置をそれぞれ$m_r$、$x_r$とし、バネを介してデバイス（可動部５０１）に作用する弾性力を$f_r$とする。図７と、上式（１）及び（２）から、相対モードの静特性は、下式（７）のように表すことができる。したがって、下式（７）からも、相対モード７００を、モータＲがバネを第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の発生力の合力（$-f_1+f_2$）で牽引している物理モデルとみなすことができる。モータＲが牽引するバネは、ワイヤ５０２及びワイヤ５０４のバネ定数を合算した２$K_s$のバネ定数を有する。

[0077]

[数7]

$$0 = f_1 - f_{e1} - (f_2 - f_{e2}) \quad \cdots(7)$$
$$= 2K_s \frac{x_1 - x_2}{2} - (-f_1 + f_2)$$
$$= 2K_s x_r - (-f_1 + f_2)$$

[0078] ここで、重心モードにおけるモータＣの運動学は、第１のモータ５０３と第２のモータ５０５の重心運動として表すことができる。したがって、重心モードでは、モータＣの位置$x_c$及び弾性力$f_c$はそれぞれ以下の式（８）及び（９）に示す通りとなる。

[0079] [数8]

$$x_c = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \quad \cdots(8)$$

[0080] [数9]

$$f_c = \frac{1}{2}(f_{e1} + f_{e2}) \quad \cdots(9)$$

[0081] また、相対モードにおけるモータＲの運動学は、第１のモータ５０３と第２のモータ５０５の相対運動として表すことができる。したがって、相対モードでは、モータＲの位置$x_r$及び弾性力$f_r$はそれぞれ以下の式（１０）及び（１１）に示す通りとなる。

[0082] [数10]

$$x_r = \frac{1}{2}(-x_1 + x_2) \quad \cdots(10)$$

[0083] [数11]

$$f_r = \frac{1}{2}(-f_{e1} + f_{e2}) \quad \cdots(11)$$

[0084] したがって、パラレルワイヤ駆動における重心モード及び相対モードの各モードでの制御目標を、それぞれ以下のように独立に設定することができる。

[0085] 重心モード：デバイスが任意の加速度を実現するためにモータＣを制御する。

相対モード：$f_r$が常に一定の値に収束するようにモータＲを制御する。

[0086] すなわち、重心モードでは、モータＣを駆動して、振動が発生することなく且つバネが伸びることなく、デバイスを制御すること（デバイス加速度制御）が制御目標になる。また、相対モードでは、モータＲを駆動して、バネを一定の力で引っ張ること（一定張力制御）が制御目標になる。

[0087] 上記の重心モード及び相対モードに対してそれぞれ個別に適切な制御系を設計することにより、バイラテラル制御系とは独立したワイヤ張力制御系によってワイヤの振動及び伸びを抑制し、且つ、位置と力を同時に高精度に制御可能なバイラテラル制御系を実現することができる、と本出願人は思料する。

[0088] ここで、上式（８）～（１１）をまとめて、下式（１２）～（１４）を得ることができる。

[0089] [数12]

$$\begin{bmatrix} x_c \\ x_r \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \cdots(12)$$

[0090] [数13]

$$\begin{bmatrix} f_c \\ f_r \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} f_{e1} \\ f_{e2} \end{bmatrix} \quad \cdots(13)$$

[0091] [数14]

$$T = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots(14)$$

[0092] 上式（１２）～（１４）において、Ｔは、実在する第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５のモータ空間を、重心モードにおけるモータＣ及び相対モードにおけるモータＲのモード空間へ座標変換するための変換行列である。上式（１４）で示すＴの１行目及び２行目の行ベクトル同士が直交して

いる。したがって、重心モードと相対モードは、干渉することなく、独立に制御系を構成することが可能である。なお、Ｔの逆行列$T^{-1}$を用いて、モード空間からモータ空間へ座標変換することができる（後述）。

[0093] Ｆ．パラレルワイヤ制御系の構成

図８には、パラレルワイヤ制御系全体の制御ブロック図を示している。なお、同図中で、変数を修飾するサーカムフレックス（若しくはハット記号）は、その変数の推定値であることを示す。また、変数の頭部に付けられるダブルドットは、その変数の加速度値であることを示す（以下、同様）。

[0094] 図示の制御ブロック図は、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の各加速度を制御する実モータ加速度制御部８０１と、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の重心モードを制御する重心モード制御部８０２と、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の相対モードを制御する相対モード制御部８０３を含んでいる。

[0095] 重心モード制御部８０２は、モータＣを駆動して、バネによる振動やバネの伸びなく、デバイス（可動部５０１）の加速度を制御することを制御目標とする。重心モード制御部８０２は、外部から与えられたデバイス（可動部５０１）の加速度参照値に基づいて、モータＣの加速度参照値を決定する。また、相対モード制御部８０３は、デバイス（可動部５０１）を一定の弾性力で引っ張ることを制御目標とする。相対モード制御部８０３は、あらかじめ定められた張力$f_r^{cmd}$に基づいて、モータＲの加速度参照値を決定する。重心モード制御部８０２と相対モード制御部８０３は独立した制御系として構成される。

[0096] 重心モード制御部８０２によるモータＣに対する加速度参照値と、相対モード制御部８０３によるモータＲに対する加速度参照値は、変換部８１３において逆行列$T^{-1}$を用いてモード空間からモータ空間への座標変換が施されて、第１のモータ５０３に対する加速度参照値及び第２のモータ５０５に対する加速度参照値として、実モータ加速度制御部８０１に与えられる。

[0097] 実モータ加速度制御部８０１は、変換部８１３を介して与えられた各加速

度参照値に基づいて、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５を制御する。第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５には、位置応答を取得できるエンコーダ、並びに力応答を取得できる力センサがそれぞれ装備されている。

[0098] 第１のモータ５０３の位置$x_1$及び第２のモータ５０５の位置$x_2$は、変換部８１１において行列Ｔを用いてモータ空間からモード空間への座標変換が施され、得られたモータＣの位置$x_c$が実モータ加速度制御部８０１から重心モード制御部８０２にフィードバックして、デバイス（可動部５０１）の加速度を制御するループを構成する。

[0099] また、第１のモータ５０３の駆動によってワイヤ５０２に発生する弾性力$f_{e1}$の推定値及び第２のモータ５０５の駆動によってワイヤ５０４に発生する弾性力$f_{e2}$の推定値は、変換部８１２において行列Ｔを用いてモータ空間からモード空間への座標変換が施され、得られたモータＲによる弾性力$f_r$の推定値が実モータ加速度制御部８０１から相対モード制御部８０３にフィードバックして、バネの張力が一定となるように制御するループを構成する。

[0100] Ｇ．モータ加速度制御系

続いて、実モータ加速度制御部８０１について詳細に説明する。図９には、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の各々に適用可能な、モータ加速度制御系の制御ブロック図を示している。但し、同図中のｓはラプラス演算子である（以下、同様）。図示のように、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５のそれぞれに外乱オブザーバ（Ｄｉｓｔｕｒｂａｎｃｅ Ｏｂｓｅｒｖｅｒ：ＤＯＢ）を実装して、ロバスト加速度制御を行うものとする。また、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の各々に印加される弾性力$f_{e1}$、$f_{e2}$を推定するために、反力推定オブザーバ（Ｒｅａｃｔｉｏｎ Ｆｏｒｃｅ Ｏｂｓｅｒｖｅｒ：ＲＦＯＢ）も併せて実装する。

[0101] 外部から入力される加速度参照値に質量の公称値$m_n$を掛けた弾性力$f_e$に外乱$f^{dis}$が加わった力が制御対象に作用して、位置ｘに変位する。外乱オブザーバ（ＤＯＢ）は、弾性力$f_e$と制御対象の速度から、弾性力$f_e$と外乱$f^{dis}$を推

定して、制御対象の入力へフィードバックする。また、反力推定オブザーバ（ＲＦＯＢ）は、弾性力$f_e$と制御対象の速度からを推定して、外部に出力する。

[0102] Ｈ．重心モード加速度制御系

続いて、重心モード制御部８０２について詳細に説明する。既に述べたように、重心モードは、モータＣにデバイス（可動部５０１）が結合している２質点系の物理モデルとして表すことができる。重心モード制御部８０２は、モータＣを駆動して、バネによる振動やバネの伸びなく、デバイス（可動部５０１）の加速度を制御することを制御目標とする。

[0103] 図１０には、重心モード制御部８０２の構成例を概念的に示している。重心モード制御部８０２は、制御対象１００１と、制御対象１００１内のモータＣの加速度を制御するデバイス加速度制御部１００２からなる。

[0104] 制御対象１００１は、図６に示した重心モードのパラレルワイヤ機構モデルに相当する２質点系の物理モデルであり、モータＣと、弾性係数が$2K_s$のバネと、デバイス（可動部５０１）からなる。デバイス加速度制御部１００２は、デバイス（可動部５０１）に対する任意の加速度参照値を入力して、重心モードにおけるモータＣに対する加速度参照値を与える。パラレルワイヤ機構がバイラテラル方式のマスタスレーブシステムに組み込まれている場合、デバイス（可動部５０１）に対する加速度参照値は、そのシステムから与えられる。

[0105] 第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５、並びに可動部５０１の（すなわち、実際の物理系の）運動方程式は、それぞれ上式（１）～（３）に示した通りである。これらの運動方程式をモード変換することによって（但し、外乱を無視する）、デバイス（可動部５０１）の運動方程式は上式（６）のように書き換えることができる。デバイス加速度制御部１００２は、上式（６）中の１行目の左辺にある、デバイスの加速度を制御することを目的とする。

[0106] ここで、上式（６）の１行目の左辺は、いわゆるフックの法則における弾

性力$f_t$である。したがって、デバイス（可動部５０１）の加速度を任意に制御するには、$2K_s(x_c-x_d)$とモデリングされた弾性力$f_t$を任意に制御すればよいことが分かる。そこで、上式（６）を、下式（１５）のように書き換える。

[0107] [数15]

$$\hat{f}_t = 2K_{sn}(x_c - x_d) \quad \cdots(15)$$

[0108] 上式（１５）から、重心モードにおけるモータＣの位置$x_c$と、デバイス（可動部５０１）の位置$x_d$と、バネ定数の公称値$K_{sn}$を用いて弾性力$f_t$を推定して、所望の弾性力$f_t$を実現するフィードバック制御系を構成すればよいことが分かる。所望の弾性力$f_t$を任意に制御することにより、ワイヤ５０２及びワイヤ５０４の振動と伸びを抑制した制御系を実現することができる。

[0109] また、デバイス（可動部５０１）の外力以外の摩擦などによってバネ定数が公称値$K_{sn}$からずれるなどの外乱$f_d^{dis}$が発生することが想定される。図１０に示す構成例では、各モータ５０３及び５０５と同様に、推定弾性力とデバイスの速度を用いた外乱オブザーバによって外乱$f_d^{dis}$を補償することができる。

[0110] そして、デバイス加速度制御部１００２は、推定弾性力とデバイスに作用する外乱$f_d^{dis}$の推定値を考慮して、デバイス（可動部５０１）に対する任意の加速度参照値から重心モードにおけるモータＣの加速度参照値を算出して、制御対象１００１に出力する。重心モードにおけるモータＣについては、各モータに負荷外乱を補償する外乱オブザーバ（Ｌｏａｄ　ＤＯＢ）が実装されており、理想的な加速度制御が成立しているとして、図１０では２重積分で表現している。

[0111] 図１０を参照すると、制御対象１００１内では、デバイス加速度制御部１００２から与えられるモータＣの加速度参照値に基づいてモータＣが駆動し、モータＣは位置$x_c$に変位する。この結果、デバイス（可動部５０１）には、バネ定数のバネ$2K_s$を介して弾性力$f_t$（$=2K_s(x_c-x_d)$）と外乱$f_d^{dis}$

が作用し、デバイスの位置$x_d$が変位する。デバイス加速度制御部１００２内では、デバイスに作用する弾性力は、バネ定数の公称値$2K_{sn}$を用いて推定される。外乱オブザーバ（ＤＯＢ）は、推定弾性力とデバイスの速度を用いて、デバイスに作用する外乱$f_d^{dis}$を推定する。そして、推定弾性力制御部１００３が、推定弾性力とデバイスに作用する外乱$f_d^{dis}$の推定値を考慮して、デバイス（可動部５０１）に対する任意の加速度参照値から重心モードにおけるモータＣの加速度参照値を算出して、制御対象１００１に出力する。

[0112] なお、デバイス加速度制御部１００２の実質的な機能は、パーソナルコンピュータなどの一般的な計算機を用いて実装することができる。

[0113] Ｉ．相対モード張力制御系

続いて、相対モード制御部８０３について説明する。既に述べたように、相対モードは、ある壁に一端が取り付けられたバネの他端を引っ張る物理モデルとして表すことができる（図７を参照のこと）。相対モード制御部８０３は、デバイス（可動部５０１）を一定の弾性力で引っ張ることを制御目標とする。

[0114] 図１１には、相対モード制御部８０３の構成例を概念的に示している。相対モード制御部８０３は、バネ定数$2K_s$のバネを含む制御対象１１０１と、制御対象１１０１内のバネの張力制御する張力制御器１１０２を備えている。そして、制御対象１１０１内でバネからモータＲに作用する弾性力$f_r$を張力制御器１１０２にフィードバックすることにより、バネ定数$2K_s$のバネに対してある一定の張力指令値$f_r^{cmd}$に追従する張力$f_r$の力制御系を構成している。また、モータＲに反力推定オブザーバ（ＲＦＯＢ）１１０３を実装しているため、それぞれの推定弾性力から相対モードの推定弾性力を、下式（１６）のように計算する。

[0115] [数16]

$$\hat{f}_r = \frac{1}{2}\left(-\hat{f}_{e1} + \hat{f}_{e2}\right) \quad \cdots(16)$$

[0116] 張力制御器１１０２は、上式（１６）に示す推定張力から、相対モードに

おけるモータＲの加速度参照値を算出する。

[0117] 図１１を参照すると、制御対象１１０１内では、張力制御部１１０２から与えられるモータＲの加速度参照値に基づいてモータＲが駆動し、モータＲは位置$x_r$に変位する。この結果、バネ定数のバネ２$K_s$に弾性力$f_r$が作用する。反力推定オブザーバ（ＲＦＯＢ）１１０３は、この弾性力$f_r$を推定する。そして、張力制御部１１０２は、推定弾性力があらかじめ定められた張力$f_r^{cmd}$に追従するように、モータＲの加速度参照値を算出して、制御対象１１０１に出力する。

[0118] Ｊ．パラレルワイヤ制御系全体の動作

再び図８を参照して、パラレルワイヤ制御系全体について説明する。上述したように、重心モード制御部８０２からは、デバイス（可動部５０１）が任意の加速度を実現するための、モータＣの加速度参照値が出力される。また、相対モード制御部８０３からは、モータＲによる弾性力$f_r$が常に一定の値に収束するための、モータＲの加速度参照値が出力される。

[0119] 上式（１２）に基づいて、下式（１７）に示すように、モータＣ及びモータＲの各加速度参照値からなるモード空間を、逆行列$T^{-1}$によって、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の各加速度参照値からなるモータ空間へと変換することができる。そして、実モータ制御部８０１は、得られた加速度目標値に従って、第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５の加速度の制御を実施する。

[0120] [数17]

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1^{ref} \\ \ddot{x}_2^{ref} \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c^{ref} \\ \ddot{x}_r^{ref} \end{bmatrix} \quad \cdots(17)$$

[0121] 重心モード制御部８０２と相対モード制御部８０３は独立した制御系として構成されており、それぞれモータＣ及びモータＲの加速度参照値を独立に設定することができる。既に述べたように、モータ空間からモード空間へ座標変換するための変換行列Ｔは、上式（１４）に示した通り、１行目及び２行目の行ベクトル同士が直交しており、重心モードと相対モードは、干渉す

ることなく、独立に制御系を構成することが可能である。したがって、実モータ制御部８０１は、上式（１７）によって座標変換して得られる各加速度参照値に基づいて第１のモータ５０３及び第２のモータ５０５を制御することによって、パラレルワイヤ制御系を干渉することなく、ワイヤの振動や伸びを抑制することができ、且つロバストなパラレルワイヤ制御を実現することができる訳である。

[0122] Ｋ．パラレルワイヤ機構を含んだマスタスレーブシステムのバイラテラル制御

バイラテラル方式のマスタスレーブシステムに組み込まれるパラレルワイヤ機構の場合、そのパラレルワイヤ制御系（図８を参照のこと）に対してデバイス（可動部５０１）の所望の加速度参照値を与えるだけで、バイラテラル制御系と干渉することなく、パラレルワイヤ機構におけるワイヤの振動や伸びを抑制して、高精度なバイラテラル制御を実現することができる。

[0123] 図１２には、バイラテラル制御系のマスタスレーブシステムの制御ブロック図を示している。本実施形態では、マスタ装置のブロック内にパラレルワイヤ機構が存在し、且つ上記Ｃ項で説明したパラレルワイヤ制御系（図８を参照のこと）を適用することを想定している。図８に示したパラレルワイヤ制御系によれば、デバイス（可動部５０１）の加速度参照値を入力することで、ワイヤ５０２及びワイヤ５０４の張力を一定に保つことかができるとともに、ワイヤの振動や伸びを抑制することができる。

[0124] マスタ装置にパラレルワイヤ機構を用いた場合、バイラテラル制御の制御目標は、以下の式（１８）及び（１９）のように表すことができる。

[0125] [数18]

$$\boldsymbol{f}_d + \boldsymbol{f}_s = 0 \in \boldsymbol{R}^n \quad \cdots(18)$$

[0126] [数19]

$$\boldsymbol{x}_d - \boldsymbol{x}_s = 0 \in \boldsymbol{R}^n \quad \cdots(19)$$

[0127] 上式（１８）及び（１９）において、ｆ∈Ｒⁿ、ｘ∈Ｒⁿはそれぞれ力応答ベクトル、位置応答ベクトルである。但し、Ｒⁿはｎ次の実数空間である。また、下付の添え字ｄはマスタ装置に組み込まれたパラレルワイヤ機構の可動部５０１を示し、下付の添え字ｓはスレーブ装置を示す。上式（１８）は、マスタ装置とスレーブ装置間の力の作用反作用則に関する制御目標であり、可動部５０１（マスタ装置）とスレーブ装置の力の和をゼロにすること（和のモード）を意味する。また、上式（１９）は、マスタ装置とスレーブ装置間の位置の追従性に関する制御目標であり、可動部５０１（マスタ装置）とスレーブ装置の位置の差をゼロにすること（差のモード）を意味する。

[0128] 上式（１８）及び（１９）に示した２つの制御目標を同時に実現するために、下式（２２）に示すマスタ装置（パラレルワイヤ機構）及びスレーブ装置の力応答ベクトル及び位置応答ベクトルを、変換行列Ｔ∈Ｒⁿˣⁿを用いて下式（２０）及び（２１）に従ってモード空間へと座標変換する。また、変換行列Ｔ∈Ｒⁿˣⁿを下式（２２）に示す。

[0129] [数20]

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_C \\ \boldsymbol{F}_D \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_d \\ \boldsymbol{f}_s \end{bmatrix} \quad \cdots (20)$$

[0130] [数21]

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_C \\ \boldsymbol{X}_D \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_d \\ \boldsymbol{x}_s \end{bmatrix} \quad \cdots (21)$$

[0131] [数22]

$$T = \begin{bmatrix} I_n & I_n \\ I_n & -I_n \end{bmatrix} \quad \cdots (22)$$

[0132] 上式（２０）及び（２１）において、Ｆ∈Ｒⁿ、Ｘ∈Ｒⁿはそれぞれモード空間の力応答ベクトル、位置応答ベクトルである。また、下付の添え字Ｃは和のモードを示し、下付の添え字Ｄは差のモードを示す。また、上式（２２）において、Ｉ$_n$はｎ次の単位行列である。

[0133] 図１２では、変換部１２１１がマスタ装置（パラレルワイヤ機構）及びスレーブ装置の力応答ベクトル（$f_d^{ext}$，$f_s^{ext}$）をモード空間へ座標変換し、和のモードの力応答$F_C$を力制御器１２０１にフィードバックしている。また、変換部１２１２がマスタ装置（パラレルワイヤ機構）及びスレーブ装置の位置応答ベクトル（$x_d^{ext}$，$x_s^{ext}$）をモード空間へ変換し、差のモードの位置応答$X_D$を位置制御器１２０２にフィードバックしている。

[0134] このとき、バイラテラル制御の制御目標は、以下の式（２３）及び（２４）のように書き換えることができる。

[0135] [数23]

$$\boldsymbol{F}_C = 0 \in \boldsymbol{R}^n \quad \cdots(23)$$

[0136] [数24]

$$\boldsymbol{x}_D = 0 \in \boldsymbol{R}^n \quad \cdots(24)$$

[0137] したがって、モード空間における力制御系及び位置制御系は、それぞれ以下の式（２５）及び（２６）に示す通りとなる。

[0138] [数25]

$$\ddot{X}_C^{ref} = C_f(0 - F_C) = -C_f F_C \quad \cdots(25)$$

但し、$\ddot{X}_C^{ref} \in R^n$は和のモードの加速度参照ベクトル、$C_f$はモード空間の力制御器である。

[0139] [数26]

$$\ddot{X}_D^{ref} = C_p(0 - X_D) = -C_p X_D \quad \cdots(26)$$

但し、$\ddot{X}_D^{ref} \in R^n$は差のモードの加速度参照ベクトル、$C_p$はモード空間の位置制御器である。

[0140] 図１２では、力制御器１２０１が、フィードバックされた和のモードの力応答$F_C$から、上式（２５）に従って、和のモードにおける加速度参照値を算出している。また、位置制御器１２０２が、フィードバックされた差のモードの位置応答$X_D$から、上式（２６）に従って、差のモードにおける加速度参

照値を算出している。

[0141] 下式（２７）に示すように、モード空間の加速度参照ベクトルを逆変換することで、マスタ装置及びスレーブ装置それぞれの加速度参照ベクトルを得る。

[0142] [数27]

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_d^{ref} \\ \ddot{x}_s^{ref} \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{X}_C^{ref} \\ \ddot{X}_D^{ref} \end{bmatrix} \quad \cdots(27)$$

[0143] 図１２では、力制御器１２０１による加速度参照値及び位置制御器１２０２による加速度参照値からなる加速度参照ベクトルを、逆変換部１２１３によって、可動部５０１に対する加速度参照値とスレーブ装置に対する加速度参照値からなる加速度参照ベクトルに、逆の座標変換を行なう。そして、得られた各加速度参照値は、それぞれマスタ装置及びスレーブ装置に入力される。マスタ装置に入力される加速度参照値は、図８に示したパラレルワイヤ制御系内の重心モード制御部８０２に与えられる加速度参照値となる。重心モード制御部８０２は、モータＣを駆動して、バネによる振動やバネの伸びを抑制しながら、可動部５０１を加速度に基づいて制御する。その際、重心モード制御部８０２は、可動部５０１の加速度がこの加速度参照値となることを制御目標として、

[0144] パラレルワイヤ機構を含むマスタ装置及びスレーブ装置ともに外乱オブザーバを適用したロバスト加速度制御を行うので、高精度なバイラテラル制御を実現することができる。

[0145] なお、本明細書ではマスタ装置のブロック内にパラレルワイヤ機構が含まれる実施形態を中心に説明してきたが、スレーブ装置のブロック内にパラレルワイヤ機構が存在する場合や、マスタ装置及びスレーブ装置の双方にパラレルワイヤ機構が含まれる場合も同様に、上記Ｃ項で説明したパラレルワイヤ制御系を適用することができる。

[0146] Ｌ．効果

最後に、本明細書で開示する技術の効果についてまとめておく。

[0147] 本明細書で開示する技術によれば、パラレルワイヤ機構を有するマスタ装置又はスレーブ装置の一方又は両方で、高精度なバイラテラル制御を実現することができる。

[0148] 本明細書で開示する技術によれば、パラレルワイヤ機構の可動部を小型且つ軽量にしたまま、ワイヤの長さを任意に設定することで、広い可動範囲を実現することが可能となる。これにより、バイラテラル方式のマスタスレーブシステムにおいて、優れた操作性を実現することができる。

[0149] 本明細書で開示する技術によれば、パラレルワイヤ機構のワイヤ特有の振動現象と伸びを抑制することができる。特に、医療用途では高精度な位置決め性能が求められるが、本明細書で開示する技術を適用したパラレルワイヤ機構によれば、ワイヤの振動及び伸びを抑制することができるので、高精度な位置決め性能を実現することが可能である。

[0150] 本明細書で開示する技術を適用したパラレルワイヤ制御系は、加速度レベルで制御を行い、ワイヤの振動や伸びの抑制と、ワイヤの一定張力制御とを、同時に且つそれぞれの制御目標に干渉することなく実現することができる。

[0151] 本明細書で開示する技術を適用したパラレルワイヤ機構は、高精度な位置決め性能が求められるバイラテラル制御系に適用することができ、医療を始めさまざまな産業分野のマスタスレーブシステムで了することができる。

## 産業上の利用可能性

[0152] 以上、特定の実施形態を参照しながら、本明細書で開示する技術について詳細に説明してきた。しかしながら、本明細書で開示する技術の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施形態の修正や代用を成し得ることは自明である。

[0153] 本明細書で開示する技術は、主にパラレルワイヤを利用したマスタスレーブシステムに適用することができる。特に、本明細書で開示する技術をバイラテラル方式のマスタスレーブシステムに適用した際に、バイラテラル制御と、ワイヤの伸び及び振動の抑制とを、同時に且つ非干渉に実現することが

できる。

[0154] 要するに、例示という形態により本明細書で開示する技術について説明してきたのであり、本明細書の記載内容を限定的に解釈するべきではない。本明細書で開示する技術の要旨を判断するためには、特許請求の範囲を参酌すべきである。

[0155] なお、本明細書の開示の技術は、以下のような構成をとることも可能である。

[0156] （１）可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御装置であって、

前記ワイヤの伸び及び振動を抑制して前記可動部の力及び位置を加速度に基づいて制御する、制御装置。

[0157] （１－１）前記ワイヤの伸び及び振動を抑制しながら、前記可動部の力及び位置を制御する、

上記（１）に記載の制御装置。

[0158] （２）対向する一対のモータで前記可動部をワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、前記制御系から得られる加速度参照値に基づいて前記一対のモータを制御する、

上記（１）に記載の制御装置。

[0159] （３）前記制御系は、前記可動部が所望の加速度となるようにモータＣを制御する重心モードと、前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるようにモータＲを制御する相対モードからなり、前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施する、

上記（２）に記載の制御装置。

[0160] （４）前記重心モードは、前記モータＣと前記可動部がばねで接続された２質点系の物理モデルからなる、

上記（３）に記載の制御装置。

[0161] （５）前記モータＣの運動学は、前記一対のモータの重心運動として表され

る、

上記（３）又は（４）のいずれかに記載の制御装置。

[0162] （６）前記相対モードは、前記モータＲがばねを前記一対のモータの発生力の合力で牽引する物理モデルからなる、

上記（３）乃至（５）のいずれかに記載の制御装置。

[0163] （７）前記モータＲの運動学は、前記一対のモータの相対運動として表される、

上記（３）乃至（６）のいずれかに記載の制御装置。

[0164] （８）前記可動部が所望の加速度となるように決定された前記モータＣの加速度参照値と前記弾性力が一定となるように決定された前記モータＲの加速度参照値を座標変換して、前記一対のモータの加速度参照値を得る、

上記（３）乃至（７）のいずれかに記載の制御装置。

[0165] （９）前記一対のモータはそれぞれ外乱オブザーバを実装する、

上記（２）乃至（８）のいずれかに記載の制御装置。

[0166] （１０）前記一対のモータはそれぞれ反力推定オブザーバを実装する、

上記（２）乃至（９）のいずれかに記載の制御装置。

[0167] （１１）前記制御系は、前記重心モードにおいて、前記モータＣから前記可動部に作用する推定弾性力を制御して、前記ワイヤの伸び及び振動を抑制する、

上記（３）乃至（１０）のいずれかに記載の制御装置。

[0168] （１２）前記制御系は、前記重心モードにおいて、前記モータＣから前記可動部に作用する推定弾性力と前記可動部の速度に基づいて前記可動部の外乱を推定する外乱オブザーバを備え、前記推定弾性力と前記推定された外乱を考慮して、前記可動部の所望の加速度から前記モータＣの加速度参照値を求める、

上記（１１）に記載の制御装置。

[0169] （１３）前記制御系は、前記相対モードにおいて、前記ワイヤに所定の張力が作用するように前記モータＲを制御する、

上記（３）乃至（１２）のいずれかに記載の制御装置。

[0170] （１４）前記制御系は、前記相対モードにおいて、前記モータＲによって前記ワイヤに作用する弾性力を推定する反力推定オブザーバを備え、所定の張力と前記推定された弾性力に基づいて前記モータＲの加速度参照値を求める、

上記（１３）に記載の制御装置。

[0171] （１５）前記制御系における前記モータＣ及び前記モータＲの加速度参照値からなるモード空間を座標変換して、前記一対のモータの加速度参照値を得る、

上記（３）乃至（１４）のいずれかに記載の制御装置。

[0172] （１６）モータ空間における前記一対のモータの位置をモード空間に座標変換して、算出された前記モータＣの位置を前記制御系の重心モードにフィードバックし、

モータ空間における前記一対のモータの発生力をモード空間に座標変換して、算出されたモータＲの推定弾性力を前記制御系の相対モードにフィードバックする、

上記（１５）に記載の制御装置。

[0173] （１７）可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御方法であって、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、

前記可動部が所望の加速度となるように重心モードのモータＣを制御するステップと、

前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるように相対モードのモータＲを制御するステップと、

前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施するステップと、

を有する制御方法。

[0174] （１８）マスタ装置又はスレーブ装置の少なくとも一方が、可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ機構を含み、

前記可動部の力及び位置を加速度に基づいて制御する制御装置を含む、

マスタスレーブシステム。

[0175] （１８－１）前記ワイヤの伸び及び振動を抑制しながら、前記可動部の力及び位置を制御する、

上記（１８）に記載のマスタスレーブシステム。

[0176] （１９）前記制御装置は、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、前記制御系から得られる加速度参照値に基づいて前記一対のモータを制御する、

上記（１８）に記載のマスタスレーブシステム。

[0177] （２０）前記制御系は、前記可動部が所望の加速度となるようにモータＣを制御する重心モードと、前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるようにモータＲを制御する相対モードからなり、前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施する、

上記（１９）に記載のマスタスレーブシステム。

[0178] （２０－１）前記モータＣの運動学は、前記一対のモータの重心運動として表され、前記モータＲの運動学は、前記一対のモータの相対運動として表される、

上記（２０）に記載のマスタスレーブシステム。

[0179] （２１）前記制御系は、前記重心モードにおいて、前記モータＣから前記可動部に作用する推定弾性力を制御して、前記ワイヤの伸び及び振動を抑制する、

上記（２０）に記載のマスタスレーブシステム。

[0180] （２２）前記制御系は、前記重心モードにおいて、前記モータＣから前記可動部に作用する推定弾性力と前記可動部の速度に基づいて前記可動部の外乱を推定する外乱オブザーバを備え、前記推定弾性力と前記推定された外乱を

考慮して、前記可動部の所望の加速度から前記モータＣの加速度参照値を求める、

上記（２１）に記載のマスタスレーブシステム。

[0181] （２３）前記制御系は、前記相対モードにおいて、前記ワイヤに所定の張力が作用するように前記モータＲを制御する、

上記（２０）に記載のマスタスレーブシステム。

[0182] （２４）前記制御系は、前記相対モードにおいて、前記モータＲによって前記ワイヤに作用する弾性力を推定する反力推定オブザーバを備え、所定の張力と前記推定された弾性力に基づいて前記モータＲの加速度参照値を求める、

上記（２４）に記載のマスタスレーブシステム。

## 符号の説明

[0183] １…マスタスレーブシステム

１０…マスタ装置、１１…入力部、１２…力提示部

２０…スレーブ装置、２１…駆動部、２２…状態検出部

３０…制御システム

１００…パラレルワイヤ装置、１０１～１０６…ワイヤ

１１０…可動部、１２０…回転可動部

１３１～１３６…リニアアクチュエータ

１４１～１４８…方向変換プーリ

５００…１自由度モデル、５０２…ワイヤ、５０３…第１のモータ

５０４…ワイヤ、５０５…第２のモータ

８０１…実モータ加速度制御部、８０２…重心モード制御部

８０３…相対モード制御部

１００１…制御対象、１００２…デバイス加速度制御部

１００３…推定弾性力制御部

１１０１…制御対象、１１０２…張力制御部

１１０３…反力推定オブザーバ（ＦＲＯＢ）

１２０１…加速度制御器、１２０２…位置制御器

# 請求の範囲

[請求項1] 可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御装置であって、

前記可動部の力及び位置を加速度に基づいて制御する、制御装置。

[請求項2] 対向する一対のモータで前記可動部をワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、前記制御系から得られる加速度参照値に基づいて前記一対のモータを制御する、

請求項１に記載の制御装置。

[請求項3] 前記制御系は、前記可動部が所望の加速度となるようにモータＣを制御する重心モードと、前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるようにモータＲを制御する相対モードからなり、前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施する、

請求項２に記載の制御装置。

[請求項4] 前記重心モードは、前記モータＣと前記可動部がばねで接続された２質点系の物理モデルからなる、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項5] 前記モータＣの運動学は、前記一対のモータの重心運動として表される、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項6] 前記相対モードは、前記モータＲがばねを前記一対のモータの発生力の合力で牽引する物理モデルからなる、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項7] 前記モータＲの運動学は、前記一対のモータの相対運動として表される、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項8] 前記可動部が所望の加速度となるように決定された前記モータＣの

加速度参照値と前記弾性力が一定となるように決定された前記モータＲの加速度参照値を座標変換して、前記一対のモータの加速度参照値を得る、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項9] 前記一対のモータはそれぞれ外乱オブザーバを実装する、

請求項２に記載の制御装置。

[請求項10] 前記一対のモータはそれぞれ反力推定オブザーバを実装する、

請求項２に記載の制御装置。

[請求項11] 前記制御系は、前記重心モードにおいて、前記モータＣから前記可動部に作用する推定弾性力を制御して、前記ワイヤの伸び及び振動を抑制する、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項12] 前記制御系は、前記重心モードにおいて、前記モータＣから前記可動部に作用する推定弾性力と前記可動部の速度に基づいて前記可動部の外乱を推定する外乱オブザーバを備え、前記推定弾性力と前記推定された外乱を考慮して、前記可動部の所望の加速度から前記モータＣの加速度参照値を求める、

請求項１１に記載の制御装置。

[請求項13] 前記制御系は、前記相対モードにおいて、前記ワイヤに所定の張力が作用するように前記モータＲを制御する、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項14] 前記制御系は、前記相対モードにおいて、前記モータＲによって前記ワイヤに作用する弾性力を推定する反力推定オブザーバを備え、所定の張力と前記推定された弾性力に基づいて前記モータＲの加速度参照値を求める、

請求項１３に記載の制御装置。

[請求項15] 前記制御系における前記モータＣ及び前記モータＲの加速度参照値からなるモード空間を座標変換して、前記一対のモータの加速度参照

値を得る、

請求項３に記載の制御装置。

[請求項16] モータ空間における前記一対のモータの位置をモード空間に座標変換して、算出された前記モータＣの位置を前記制御系の重心モードにフィードバックし、

モータ空間における前記一対のモータの発生力をモード空間に座標変換して、算出されたモータＲの推定弾性力を前記制御系の相対モードにフィードバックする、

請求項１５に記載の制御装置。

[請求項17] 可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ装置の制御方法であって、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、

前記可動部が所望の加速度となるように重心モードのモータＣを制御するステップと、

前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるように相対モードのモータＲを制御するステップと、

前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施するステップと、

を有する制御方法。

[請求項18] マスタ装置又はスレーブ装置の少なくとも一方が、可動部を複数のワイヤで牽引するパラレルワイヤ機構を含み、

前記可動部の力及び位置を加速度に基づいて制御する制御装置を含む、

マスタスレーブシステム。

[請求項19] 前記制御装置は、前記可動部を対向する一対のモータでワイヤ駆動する制御モデルにおける加速度応答とワイヤの張力をそれぞれ独立に制御する制御系を構成して、前記制御系から得られる加速度参照値に

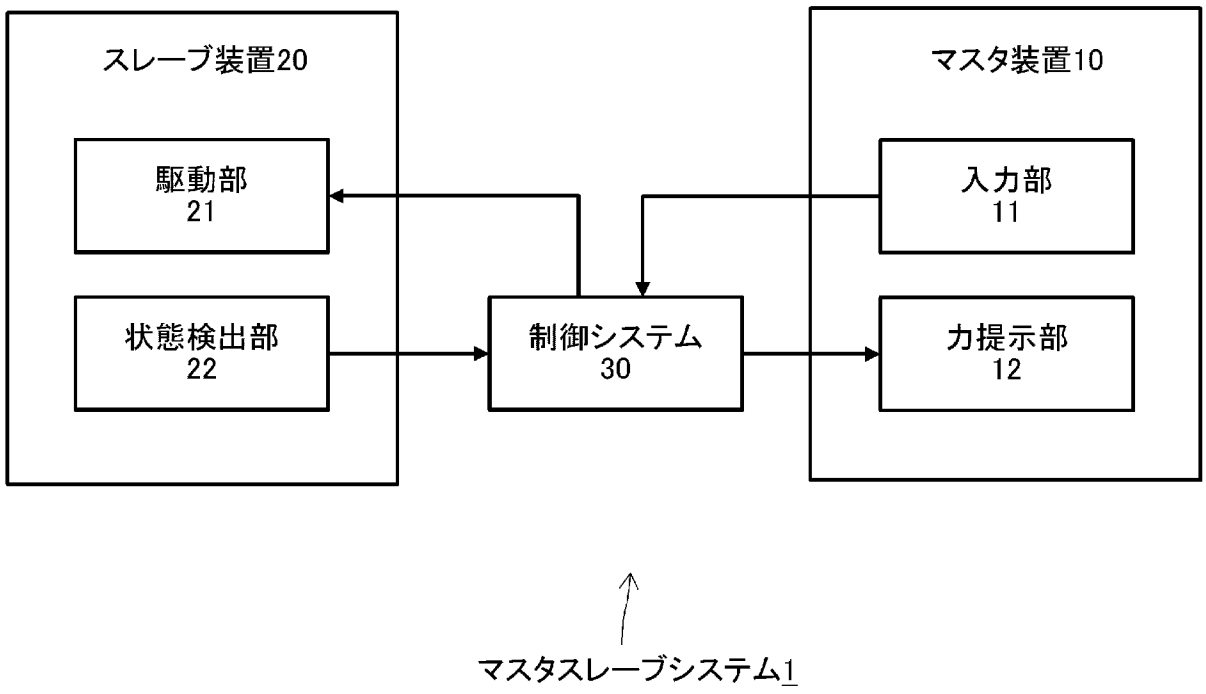
基づいて前記一対のモータを制御する、

請求項１８に記載のマスタスレーブシステム。

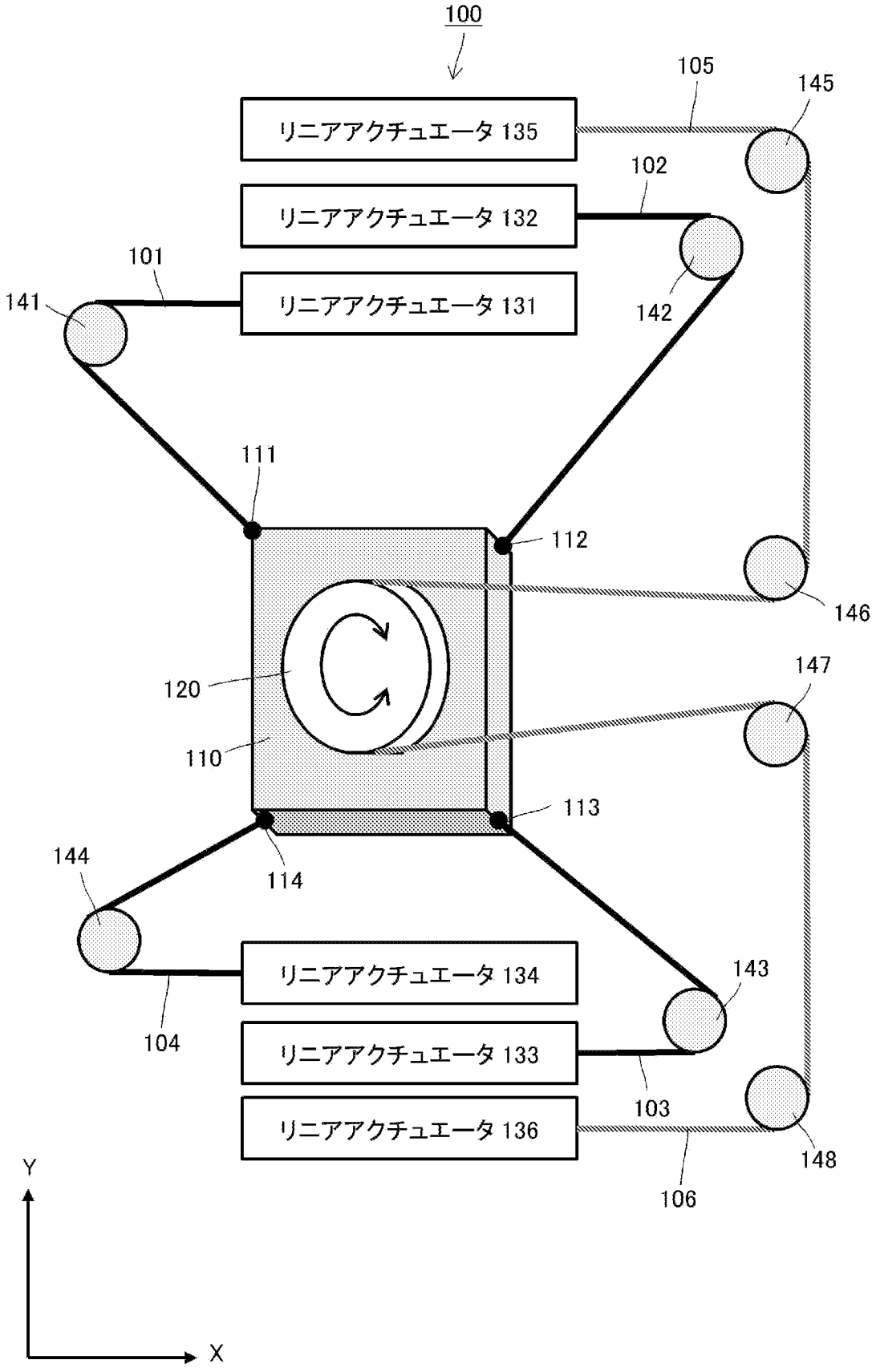
[請求項20] 前記制御系は、前記可動部が所望の加速度となるようにモータＣを制御する重心モードと、前記ワイヤに作用する弾性力が一定となるようにモータＲを制御する相対モードからなり、前記モータＣ及び前記モータＲに対する加速度参照値に基づいて前記一対のモータの加速度制御を実施する、

請求項１９に記載のマスタスレーブシステム。

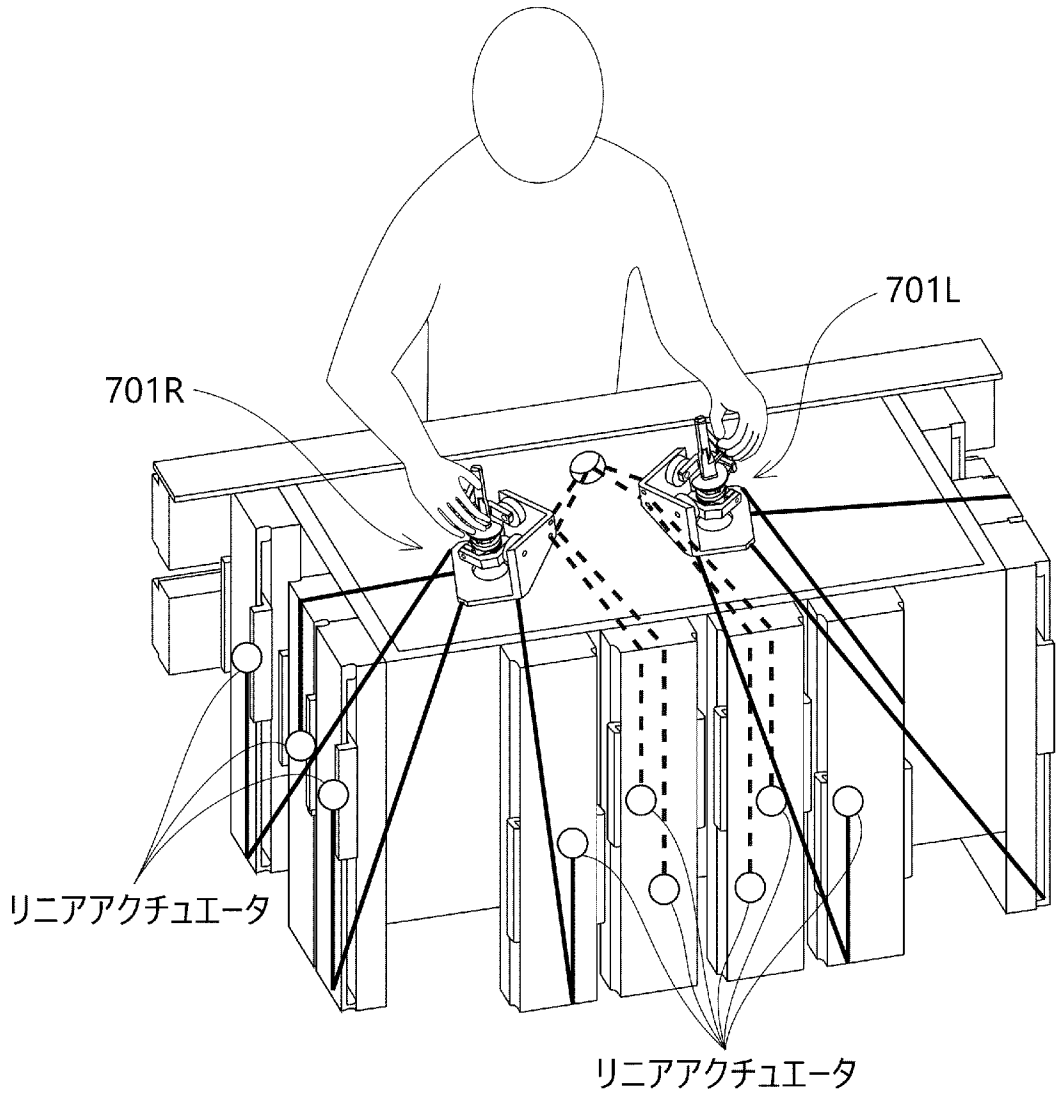
[図1]


スレーブ装置20
駆動部
21
状態検出部
22
制御システム
30
マスタ装置10
入力部
11
力提示部
12
マスタスレーブシステム1

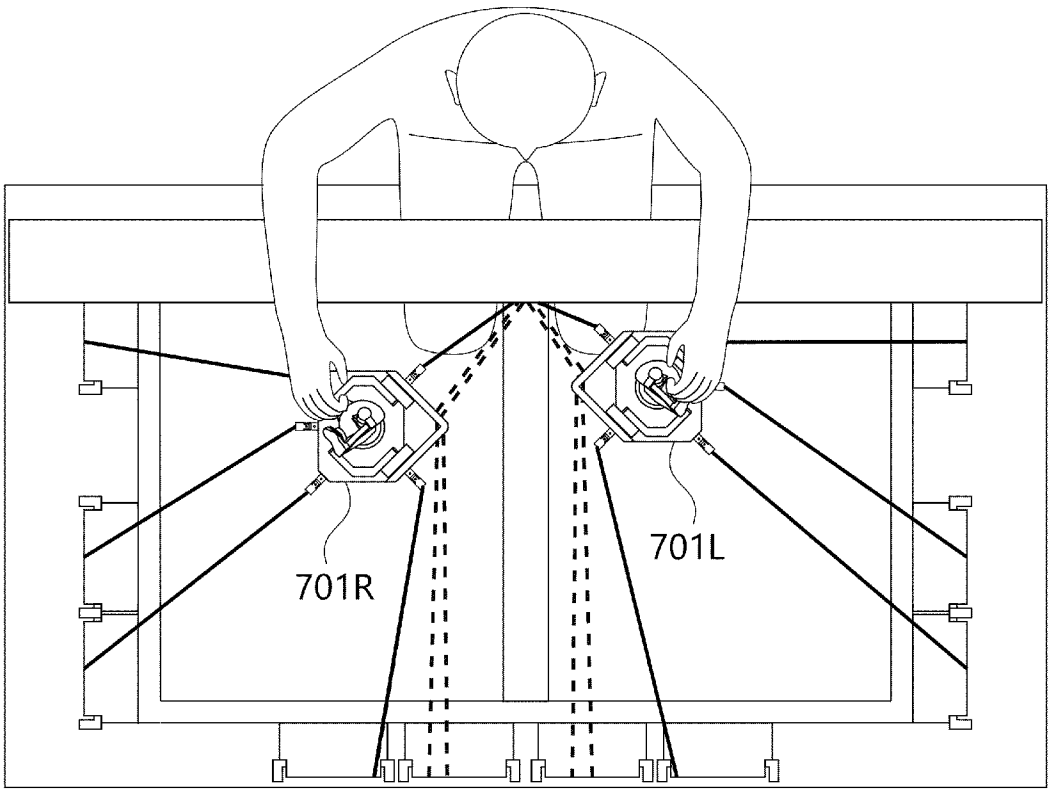
[図2]


100
リニアアクチュエータ 135
リニアアクチュエータ 132
リニアアクチュエータ 131
リニアアクチュエータ 134
リニアアクチュエータ 133
リニアアクチュエータ 136
101
102
103
104
105
106
110
111
112
113
114
120
141
142
143
144
145
146
147
148
Y
X

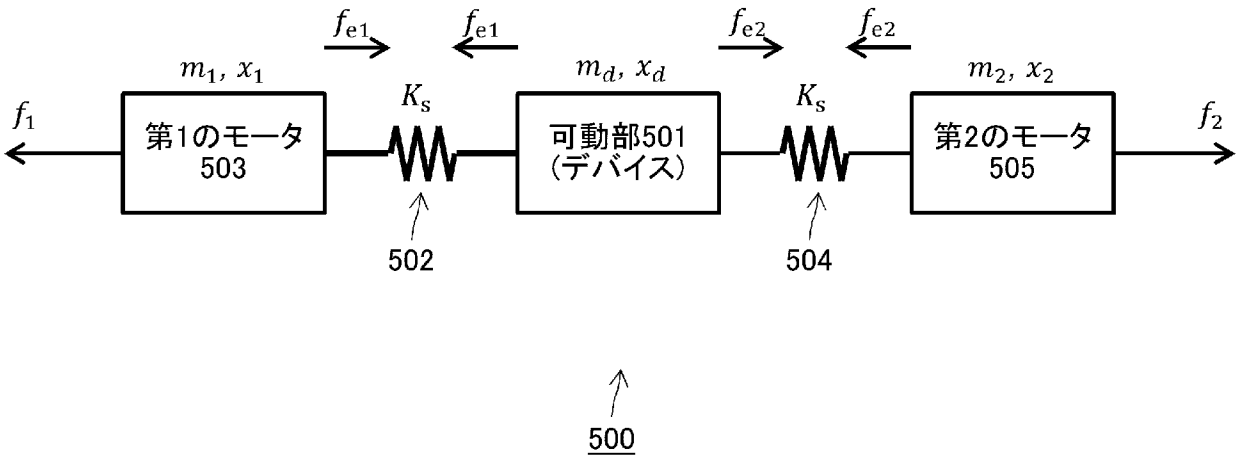
[図3]



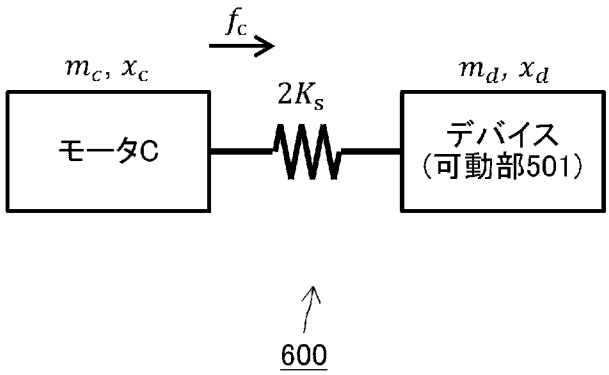
[図4]


701R
701L

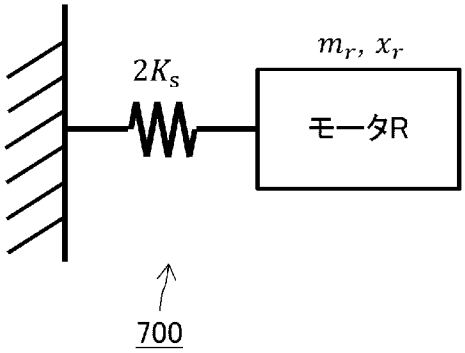
[図5]


$f_{e1}$
$f_{e1}$
$f_{e2}$
$f_{e2}$
$m_1, x_1$
$m_d, x_d$
$m_2, x_2$
$f_1$
第1のモータ
503
$K_s$
可動部501
(デバイス)
$K_s$
第2のモータ
505
$f_2$
502
504
500

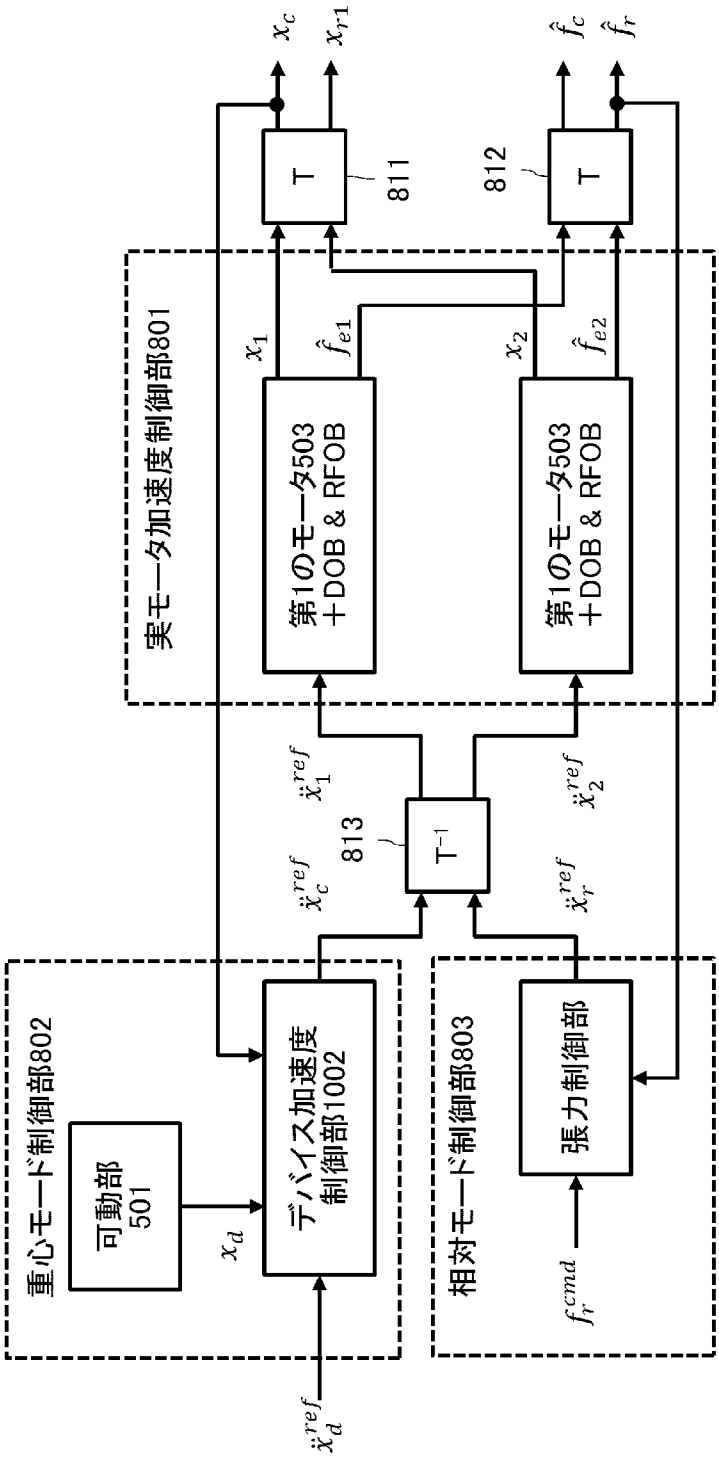
[図6]



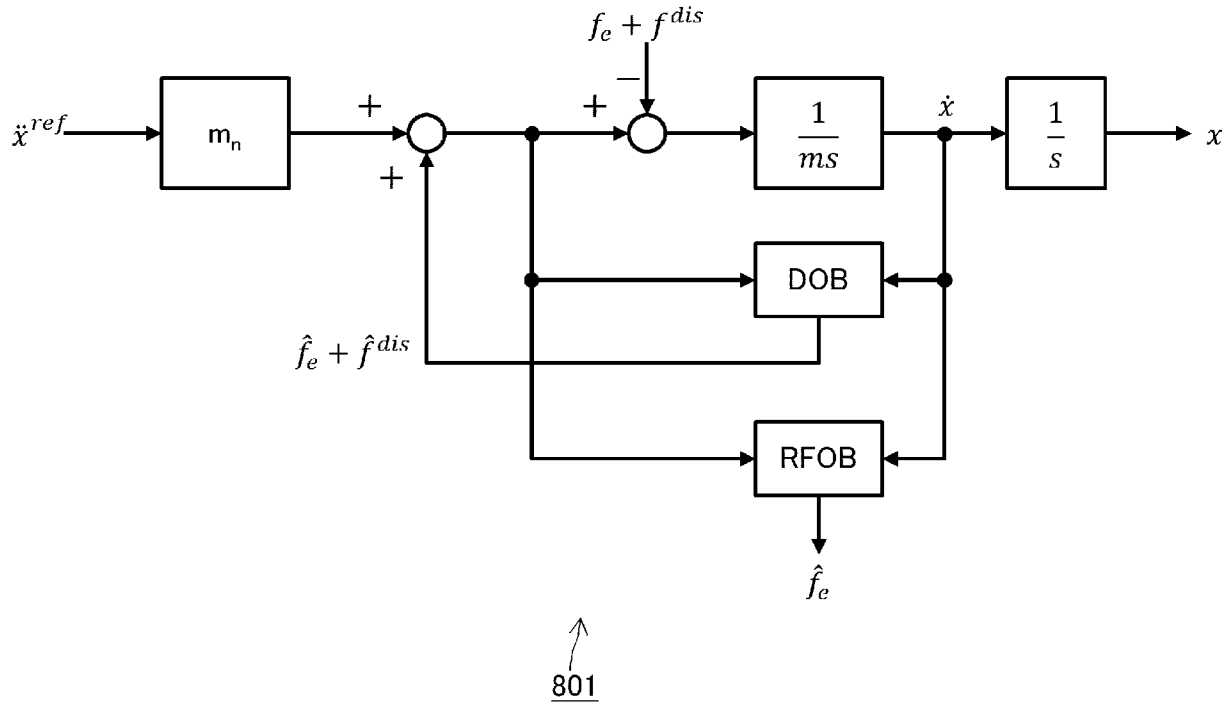

[図7]



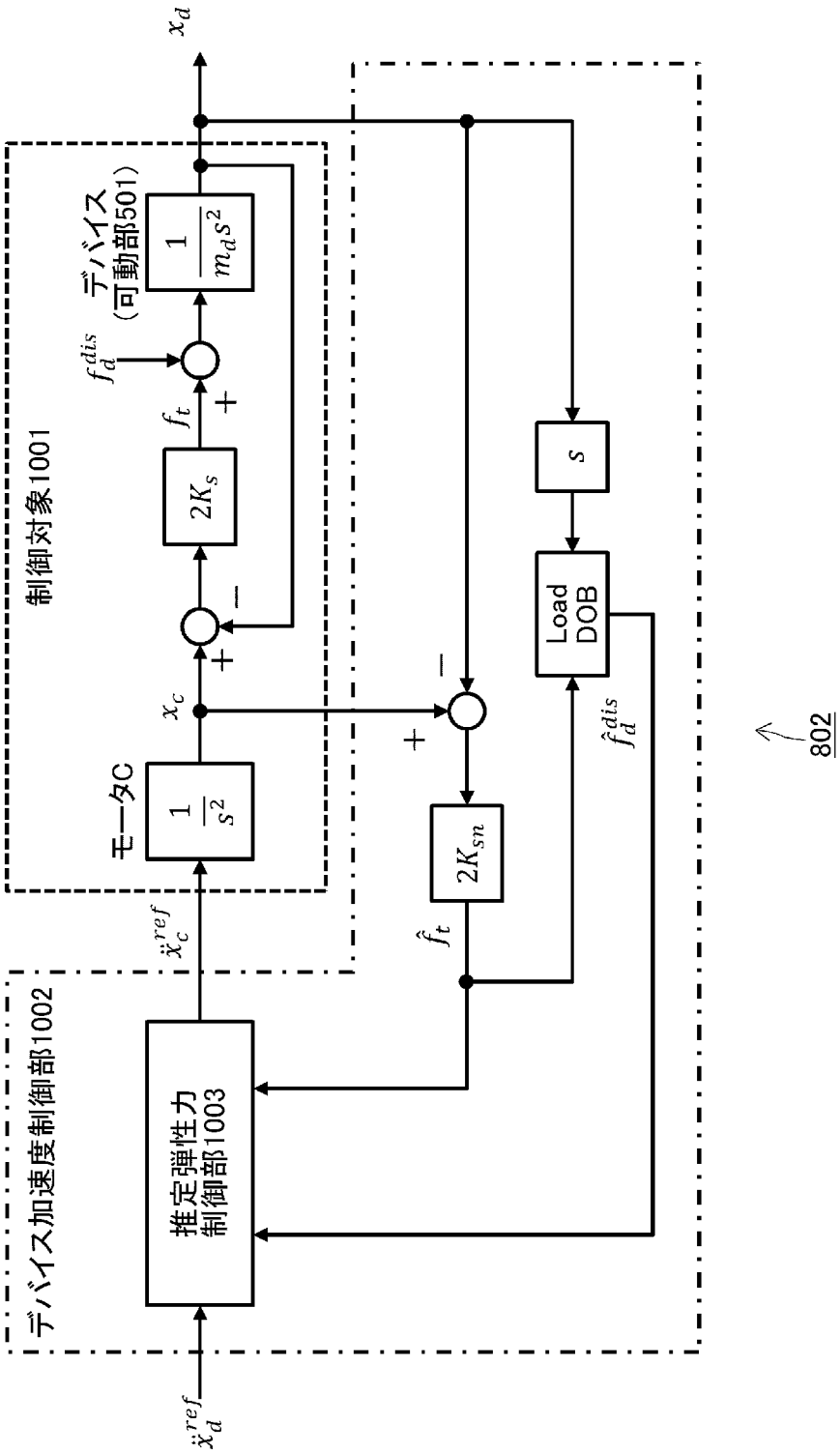
[図8]


重心モード制御部802
可動部
501
デバイス加速度
制御部1002
実モータ加速度制御部801
第1のモータ503
+DOB & RFOB
第1のモータ503
+DOB & RFOB
T
811
T
812
T-1
813
相対モード制御部803
張力制御部
$x_c$
$x_{r1}$
$\hat{f}_c$
$\hat{f}_r$
$x_1$
$\hat{f}_{e1}$
$x_2$
$\hat{f}_{e2}$
$\ddot{x}_1^{ref}$
$\ddot{x}_2^{ref}$
$\ddot{x}_c^{ref}$
$\ddot{x}_r^{ref}$
$x_d$
$f_r^{cmd}$
$\ddot{x}_d^{ref}$

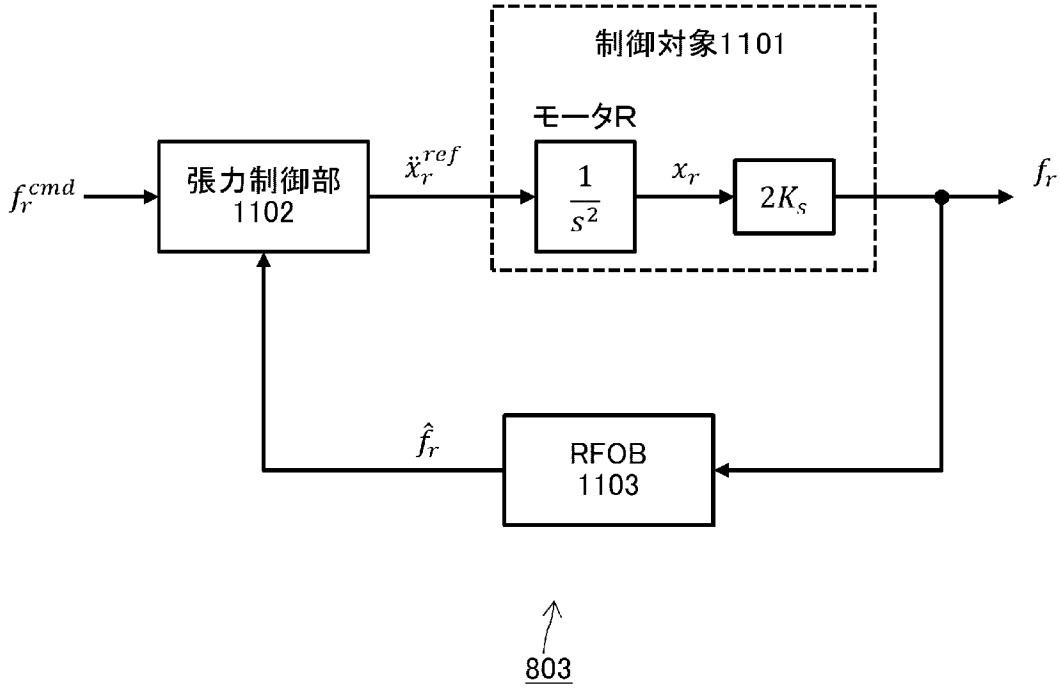
[図9]


$f_e + f^{dis}$
$\ddot{x}^{ref}$
$m_n$
+
+
+
−
$\frac{1}{ms}$
$\dot{x}$
$\frac{1}{s}$
$x$
DOB
$\hat{f}_e + \hat{f}^{dis}$
RFOB
$\hat{f}_e$
801

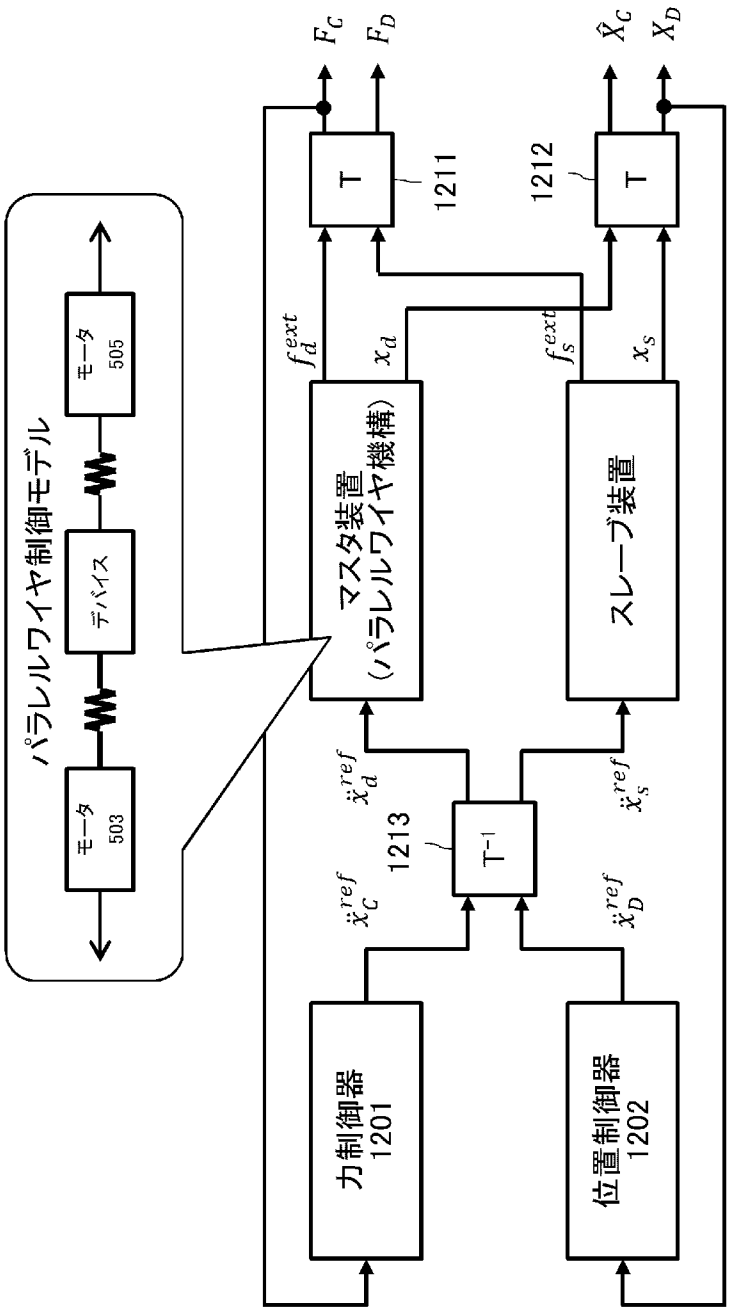
[図10]


$x_d$
制御対象1001
デバイス
(可動部501)
$\frac{1}{m_d s^2}$
$f_d^{dis}$
$f_t$
$2K_s$
モータC
$\frac{1}{s^2}$
$x_c$
$\ddot{x}_c^{ref}$
$\hat{f}_t$
$2K_{sn}$
$s$
Load DOB
$\hat{f}_d^{dis}$
デバイス加速度制御部1002
推定弾性力制御部1003
$\ddot{x}_d^{ref}$
802

[図11]


制御対象1101
モータR
$f_r^{cmd}$
張力制御部
1102
$\ddot{x}_r^{ref}$
$\frac{1}{s^2}$
$x_r$
$2K_s$
$f_r$
$\hat{f}_r$
RFOB
1103
803

[図12]


パラレルワイヤ制御モデル
モータ 503
デバイス
モータ 505
マスタ装置 (パラレルワイヤ機構)
スレーブ装置
T
1211
1212
T⁻¹
1213
力制御器 1201
位置制御器 1202
$F_C$
$F_D$
$\hat{X}_C$
$X_D$
$f_d^{ext}$
$x_d$
$f_s^{ext}$
$x_s$
$\ddot{x}_d^{ref}$
$\ddot{x}_s^{ref}$
$\ddot{x}_C^{ref}$
$\ddot{x}_D^{ref}$

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2020/005970

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
B25J 9/10(2006.01)i; A61B 34/37(2016.01)i; B25J 3/00(2006.01)i; B25J 17/00(2006.01)i; G05D 3/12(2006.01)i
FI: B25J9/10 A; A61B34/37; B25J17/00 G; G05D3/12 M; B25J3/00 A

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)
B25J9/10; A61B34/37; B25J3/00; B25J17/00; G05D3/12

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

| | |
|---|---|
| Published examined utility model applications of Japan | 1922-1996 |
| Published unexamined utility model applications of Japan | 1971-2020 |
| Registered utility model specifications of Japan | 1996-2020 |
| Published registered utility model applications of Japan | 1994-2020 |

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| Y | 木野 仁ほか，パラレルワイヤ駆動システムの作業座標系制御法とそのロバスト性，“A Motion Control Scheme in Task Oriented Coordinates and its Robustness for Parallel Wire Driven Systems”，日本ロボット学会誌 第18巻 第3号 Journal of the Robotics Society of Japan, 2000, vol. 18, no. 3, pp. 411-418, 5. Experiment with 4-wire robot, (KINO, Hitoshi et al.) | 1-2,9-10,18-19 |

☒ 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 | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| 16 March 2020 (16.03.2020) | 24 March 2020 (24.03.2020) |

| Name and mailing address of the ISA/ | Authorized officer |
|---|---|
| Japan Patent Office<br>3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,<br>Tokyo 100-8915, Japan | Telephone No. |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.
PCT/JP2020/005970

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| Y | 矢島俊介ほか，異構造マスタ・スレーブシステムにおけるモード空間オブザーバを用いた非干渉バイラテラル制御，第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM 2011 年，The 29th Annual Conference of the Robotics Society of Japan，一般社団法人日本ロボット学会，2011，1. Introduction to 3. Decoupled Bilateral Control，(YAJIMA, Shunsuke et al., "Decoupled Bilateral Control Based on Modal Space Observer in Master-Slave Systems with Different Masses", The Robotics Society of Japan) | 1-2,9-10,18-19 |
| A | | 1-20 |
| A | WO 2019/012812 A1 (SONY CORP.) 17.01.2019 (2019-01-17) entire text, all drawings<br><br>JP 2019-34002 A (KANAGAWA LNSTITUTE OF INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 07.03.2019 (2019-03-07) entire text, all drawings | 1-20 |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2020/005970

| Patent Documents referred in the Report | Publication Date | Patent Family | Publication Date |
|---|---|---|---|
| WO 2019/012812 A1 | 17 Jan. 2019 | (Family: none) | |
| JP 2019-34002 A | 07 Mar. 2019 | WO 2019/039612 A2 | |

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2020/005970

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

B25J 9/10(2006.01)i; A61B 34/37(2016.01)i; B25J 3/00(2006.01)i; B25J 17/00(2006.01)i; G05D 3/12(2006.01)i
FI: B25J9/10 A; A61B34/37; B25J17/00 G; G05D3/12 M; B25J3/00 A

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

B25J9/10; A61B34/37; B25J3/00; B25J17/00; G05D3/12

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

| | |
|---|---|
| 日本国実用新案公報 | １９２２－１９９６年 |
| 日本国公開実用新案公報 | １９７１－２０２０年 |
| 日本国実用新案登録公報 | １９９６－２０２０年 |
| 日本国登録実用新案公報 | １９９４－２０２０年 |

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

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献のカテゴリー* | 引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する請求項の番号 |
|---|---|---|
| Y | 木野 仁 ほか，パラレルワイヤ駆動システムの作業座標系制御法とそのロバスト性 A Motion Control Scheme in Task Oriented Coordinates and its Robustness for Parallel Wire Driven Systems，日本ロボット学会誌 第１８巻 第３号 Journal of the Robotics Society of Japan，2000，Vol.18 No.3 ，p.411-418<br>５．　４本ワイヤロボットによる実験 | １－２，９－１０，１８－１９ |
| Y | 矢島俊介 ほか，異構造マスタ・スレーブシステムにおけるモード空間オブザーバを用いた非干渉バイラテラル制御，第２９回日本ロボット学会学術講演会予稿集ＤＶＤ－ＲＯＭ ２０１１年 The 29th Annual Conference of the Robotics Society of Japan，一般社団法人日本ロボット学会，2011<br>１．序論－３．非干渉バイラテラル制御 | １－２，９－１０，１８－１９ |
| A | WO 2019/012812 A1（ソニー株式会社）17.01.2019（2019-01-17）<br>全文、全図 | １－２０ |
| A | JP 2019-34002 A（地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所）07.03.2019（2019-03-07）<br>全文、全図 | １－２０ |

☐ 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抵触するものではなく、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 | 国際調査報告の発送日 |
|---|---|
| 16.03.2020 | 24.03.2020 |

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
武市　匡紘 3U 4414

電話番号 03-3581-1101 内線 3364

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2020/005970

| 引用文献 | 公表日 | パテントファミリー文献 | 公表日 |
|---|---|---|---|
| WO 2019/012812 A1 | 17.01.2019 | （ファミリーなし） | |
| JP 2019-34002 A | 07.03.2019 | WO 2019/039612 A2 | |