

パワー増幅マスタスレーブシステムのための 力順送型バイラテラル制御

○ 金岡 克弥 (立命館大学 & マンマシンシナジーエフェクタズ株式会社)

Force Projection Type Bilateral Control for Power-Amplifying Master-Slave Systems

*Katsuya KANAOKA (Ritsumeikan Univ. & MMSE Inc.)

Abstract— A new method of the bilateral control for master-slave systems is proposed. This has been termed the *force projection type* bilateral control, which is suitable for power-amplifying master-slave systems. The definition and some characteristics of the bilateral control are qualitatively described in this paper.

Key Words: Man-Machine Synergy Effector (MMSE), Power-Amplifying Master-Slave System (PAMSS), Force Projection Type, Bilateral Control, Admittance.

1. はじめに

本稿では、パワー増幅ロボットシステムにおける新たなバイラテラル制御手法を提案する。ここでいう「パワー増幅ロボット」とは、一般にパワーアシストロボットとして理解されるデバイスの内、人が生身では発揮できない大きなオーダーでロボットがパワーを発揮することによって、人だけではできない重作業をさせることを主な目的とするロボットを指す。

パワーアシストロボットは、ウェアラブル、つまり、人体に直接アクチュエータを装着する形態であることが多い。しかしパワー増幅ロボットに限定して考えれば、ロボットのリンク機構全体が人体に密着するスーツのような形状設計¹は適切ではない [3]。

上記の考えに基づき、筆者のマンマシンシナジーエフェクタ (以下 MMSE とする) の研究開発においては、操作者とロボットが体幹 (proximal end) と四肢末端 (distal end) のみで拘束される、人体と密着しない形状設計²が望ましいと主張 [3] し、試作機開発を行ってきた [2]。これらの試作機においては、制御系が正常に稼働している限り、高増幅率の人間パワー増幅が可能であることが既に示されている。

一方、これまでの MMSE 試作機においても人体とロボットは機械的に結合し、連動している。機械的な結合には、操作者がダイレクトな操作感を得られるという長所もあるが、操作者とロボットの幾何学的拘束から機構設計の自由が制限され、操作ミスや制御系の異常時における安全確保に難があるといった短所も存在する。MMSE 試作機ではスーツのように密着せず末端だけの拘束とすることによって、これらの短所は克服しうるレベルに緩和されているが、制限されていることには変わらない。

そこで、そのような機械的に結合したパワー増幅ロボットシステムの有用性は依然認めつつ、本稿では、操作者側の入力インターフェースとロボット側の出力インターフェースが機械的には分離しており、電氣的に

のみ結合しているようなパワー増幅ロボットシステムを考える。これなら、ソフトウェア的・電氣的手段によって融通が利き、柔軟に機構設計でき、かつ安全を確保しやすい (例えば、大出力のアクチュエータの可動範囲に操作者を入れないような) システムを構築することができる。

2. マスタスレーブシステムとしての視点

これは、いわゆるマスタスレーブシステム (以下 MSS とする) である。MSS がその黎明期に、米国アルゴンヌ国立研究所で機械式の Model M1 (1949) として開発され、後に電氣式の Model E1 (1954) に発展した [4] のと同じアイデアである。MSS 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た歴史から、位置・力の再現性 [5]、機構透明性 [6]、通信時間遅れへの対処 [7]、等を主眼として研究がなされてきた。

しかし、Fig.1 のようなパワー増幅ロボットとしてのマスタスレーブシステム (以下 PAMSS とする) を考えると、その視点は変化する。

まず、PAMSS においてはマスタスレーブそれぞれの末端は機械的に分離していても体幹は同一の機械システム上にあることを前提とするため、通信時間遅れはないと考えてよい。

また MMSE のコンセプトによれば、操作者とロボットの相乗効果のためには操作者の身体スキルをパワー増幅した上でロボットのダイナミクスに投射することが求められる [3]。これは、ダイナミクスを「消す」機構透明性という目標がむしろ望ましくない可能性を示唆する。横小路が、異スケール間でのバイラテラル制御においては理想応答の定義にも議論の余地がある、と指摘 [4] しているが、機構透明性についても、タスクによっては改めて議論の余地がある。

さらに PAMSS ではスレーブ側に大出力アクチュエータが配置される。実装上、スレーブ側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、一般に多軸力センサは繊細かつ高価である。例えば文献 [8] ではバックホウの出力に耐えられる 6 軸力セン

¹文献 [1] の能動装具・閉構造型外骨格、文献 [2] の並列接続。

²文献 [1] の開構造型外骨格、文献 [2] の直列接続。

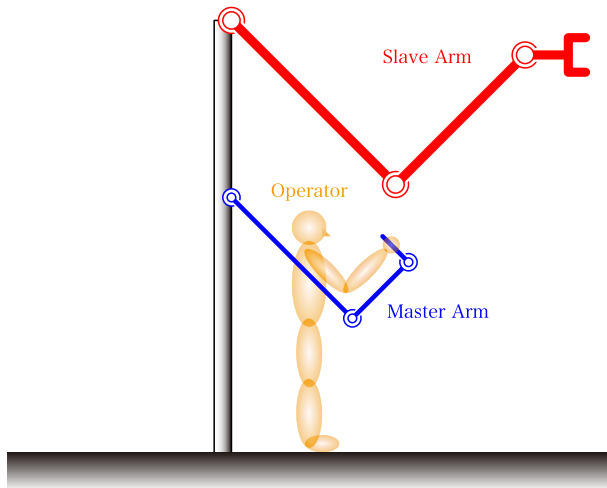


Fig.1 上肢パワー増幅マスタスレーブシステム概念図

サが存在しないことが指摘されている。したがって、多軸力センサをスレーブに付加するようなハードウェア構成は望ましくない。

最後に、PAMSS ではマスタは人間の可動範囲のスケールを持つが、スレーブは大出力に相応しく比較的大型のスケールであることが予想される。マスタ・スレーブが同構造か異構造かにかかわらず、減速比やスケール効果によるマスタ・スレーブ間のダイナミクスの相違が必ずしも無視できない。

3. 基本的なバイラテラル制御

比較のために、基本的なバイラテラル制御について復習する。まず、Fig.1 のマスタ・スレーブの運動方程式を以下のように定める。

$$\mathbf{J}_m^T \mathbf{f}_m + \boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s + \mathbf{J}_s^T \mathbf{f}_s \quad (2)$$

時刻 t において、操作者がマスタ末端に加える操作力を $\mathbf{f}_m(t)$ 、スレーブ末端が環境に加える作業力を $\mathbf{f}_s(t)$ とする。 $\mathbf{q}_m(t)$ 、 $\mathbf{q}_s(t)$ はマスタ・スレーブの関節変位、 $\boldsymbol{\tau}_m(t)$ 、 $\boldsymbol{\tau}_s(t)$ は関節駆動力、 $\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m)$ 、 $\mathbf{M}_s(\mathbf{q}_s)$ は慣性行列、 $\mathbf{r}_m(\dot{\mathbf{q}}_m, \mathbf{q}_m)$ 、 $\mathbf{r}_s(\dot{\mathbf{q}}_s, \mathbf{q}_s)$ は慣性以外の効果を集約した剰余項、 $\mathbf{J}_m(\mathbf{q}_m)$ 、 $\mathbf{J}_s(\mathbf{q}_s)$ はヤコビ行列であり、簡単のためこれらのヤコビ行列は正則であるとする。

なお、PAMSS を取り扱うため、変位と力のスケールリングを行なう。マスタからスレーブへの変位と力のスケール比をそれぞれ \mathbf{S}_p 、 \mathbf{S}_f とする。

3.1 対称型 (symmetric type)

対称型は、マスタ・スレーブ間の双方向の変位誤差サーボである。力センサが不要で、比較的安定な系を簡単に構成できる。例えば作業座標系における P 制御を用いれば制御則は以下ようになる。 $\mathbf{x}_m(t)$ 、 $\mathbf{x}_s(t)$ はそれぞれマスタ・スレーブ末端の作業座標系での位置、 \mathbf{K}_p は P 制御ゲインである。

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_m^T \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{K}_p (\mathbf{S}_p^{-1} \mathbf{x}_s - \mathbf{x}_m) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{J}_s^T \mathbf{K}_p (\mathbf{x}_m - \mathbf{S}_p^{-1} \mathbf{x}_s) \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) から次式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_m &= \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) \\ &+ \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{J}_s^{-T} (\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s) + \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \end{aligned} \quad (5)$$

操作力にはマスタのダイナミクスの影響が等倍で加わるとともに、スレーブのダイナミクスの影響とスレーブの作業力が \mathbf{S}_f^{-1} 倍に縮小されて加わる。

3.2 力逆送型 (force reflection type)

スレーブ末端に作業力 \mathbf{f}_s を計測する力センサを配置し、 \mathbf{f}_s をマスタの駆動力へ「反射」させる。マスタの制御則は以下の通りとなる。スレーブの制御則は式 (4) と同じである。

$$\boldsymbol{\tau}_m = -\mathbf{J}_m^T \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (6)$$

式 (1) と (6) から次式を得る。

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) + \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (7)$$

操作力にはマスタのダイナミクスの影響がやはり等倍で加わり、スレーブの作業力は \mathbf{S}_f^{-1} 倍に縮小される。

3.3 力帰還型 (force feedback type)

マスタ・スレーブそれぞれの末端に操作力 \mathbf{f}_m と作業力 \mathbf{f}_s を計測する力センサを配置し、マスタに力誤差サーボを構成する。マスタの制御則は以下の通りとなる。 \mathbf{K}_f は力制御ゲインである。スレーブの制御則は式 (4) と同じである。

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_m^T \mathbf{K}_f (\mathbf{f}_m - \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s) \quad (8)$$

式 (1) と (8) から次式を得る。 \mathbf{I} は単位行列である。

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

\mathbf{K}_f を無限大にすればマスタのダイナミクスの影響は無視小となり、スレーブの作業力のみが \mathbf{S}_f^{-1} 倍に縮小されて加わることとなる。

4. 提案するバイラテラル制御

PAMSS ではスレーブに多軸力センサを配置する構成は望ましくないため、力逆送型・力帰還型は適用しにくい。また、力センサを要しない対称型では高い操作性を保つことは難しい。

高い操作性を保つ妥当な方法は、マスタ末端に操作力 \mathbf{f}_m を計測する力センサを配置し、 \mathbf{f}_m をスレーブの駆動力へ「投射」することである。スレーブには力センサを配置せず、マスタは変位誤差サーボによって駆動される。これを力順送型 (force projection type) バイラテラル制御として提案する。力順送型の制御則は、例えば以下ようになる。

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

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{J}_s^T \mathbf{S}_f \mathbf{f}_m \quad (11)$$

式 (2) と (11) から次式を得る。

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{J}_s^{-T} (\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s) + \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (12)$$

操作力にはスレーブのダイナミクスの影響とスレーブの作業力が \mathbf{S}_f^{-1} 倍に縮小されて加わる。

5. 考察

力順送型における操作力は、式 (12) より、

$$\mathbf{S}_f \mathbf{f}_m = \mathbf{J}_s^{-T} (\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s) + \mathbf{f}_s \quad (13)$$

である。これは「自らの操作力を \mathbf{S}_f 倍に増幅した上でスレーブ末端を直接持って操作する」という、これまでの MMSE 試作機のパワー増幅 [3, 9] と同じアナロジー³の MSS への自然な拡張となっている。

力順送型では変位誤差サーボによって感覚が逆送される。類似の手法に形状帰還型マスタ・スレーブアーム [10] があるが、これは、低ゲインバイラテラル制御における感覚の逆送を別ルートで補助するために、高ゲインユニラテラル制御を行なう関節を別途付加する手法であり、バイラテラル制御の提案ではない。

5.1 主な特徴

力順送型の特徴を改めて考察する。まず、これまでの内容をまとめると以下ようになる。

1. マスタ側（末端）に力センサを要するが、スレーブ側には原則として力センサ不要
2. 操作力へのマスタダイナミクスの影響を消す（ことを目指す）
3. 操作力へのスレーブダイナミクスの影響を消さない（ただしスケール可能）

PAMSS では、マスタ側の操作力は人力であり、スレーブ側の作業力は大出力である。マスタ側では安全のために衝撃力は忌避されるが、スレーブ側では環境からの衝撃力は不可避である。つまり、マスタ側の条件は多軸力センサにとって適切だが、スレーブ側は劣悪である。上記 1. は PAMSS に適している。

上記 2., 3. の特徴は、マンマシンシナジーの観点から重要である。ここでは、インピーダンスマッチングを例に定性的考察を行なう。操作者には MSS を直感的にインピーダンスマッチングさせるスキルがあると仮定し、変位誤差サーボは 2. を満足する精度で機能しているとする。力逆送型・力帰還型では、操作者は主にマスタと環境に支配されるダイナミクスの機械インピーダンスに操作入力を整合させる。一方、力順送型では主にスレーブと環境に支配されるダイナミクスに整合させることとなる。

例えば、Fig.2 に示す PAMSS による歩行のようなタスクの場合、力逆送型・力帰還型では、操作者はマスタ装置に乗って（あるいは何にも乗らずに）楽に歩く周期に操作入力を整合させるが、スレーブ装置にとってはマッチングしない歩行周期に無理矢理追従させられるため、エネルギー伝送に無駄が生じる。一方、力順送型では、操作者は自らの操作力を増幅した上でスレーブ装置に乗って楽に歩く周期に操作入力を整合させる。これは、スレーブ装置にとってエネルギー伝送に無駄がない運動となるはずである。

すなわち、操作者の身体スキルに期待するマンマシンシナジーの観点からは、単なる操作装置にすぎないマスタのダイナミクスを感じさせる（あるいは何も感じさせない＝機構透明性）よりも、PAMSS において

³マスタからスレーブへ伝える操作力としては同じであるが、スレーブからマスタへの感覚の逆送については異なる。

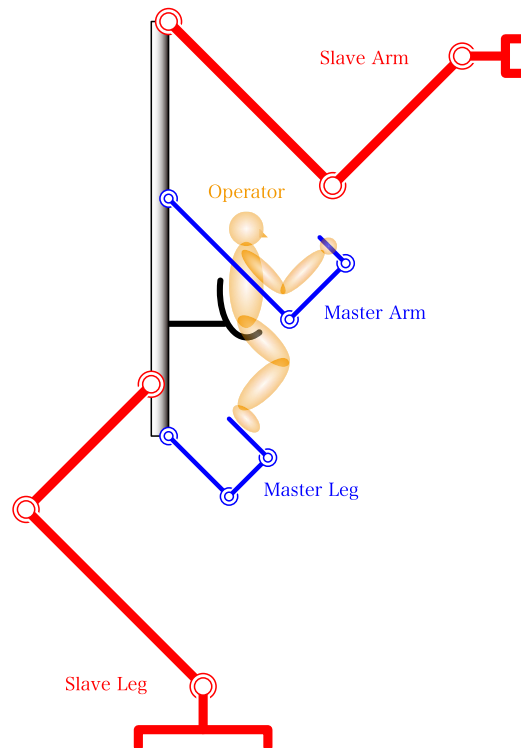


Fig.2 四肢パワー増幅マスタスレーブシステム概念図

支配的なスレーブのダイナミクスを感じさせる方が有利であると期待される。

5.2 外力による挙動

操作力を加えない $\mathbf{f}_m = \mathbf{0}$ のときの MSS の挙動について考える。MSS は外力 $-\mathbf{f}_s$ のみによって駆動される。

対称型の場合、式 (5) より、

$$-\mathbf{f}_s = \mathbf{S}_f \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) + \mathbf{J}_s^{-T} (\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s) \quad (14)$$

力逆送型の場合、式 (7) より、

$$-\mathbf{f}_s = \mathbf{S}_f \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) \quad (15)$$

力帰還型の場合、式 (9) より、

$$-\mathbf{f}_s = \mathbf{S}_f \mathbf{K}_f^{-1} \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) \quad (16)$$

となる。これらの手法では、スレーブが外力を受けると、やはり操作装置にすぎないマスタのダイナミクスの影響下で動作する。特に力帰還型で操作性を高めるために \mathbf{K}_f を大きくすると、少しの外力 $-\mathbf{f}_s$ によってマスタが大きく動かされる。

力順送型の場合は、式 (12) より、

$$-\mathbf{f}_s = \mathbf{J}_s^{-T} (\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s) \quad (17)$$

である。このときスレーブは、外力に対して自身のダイナミクスで動く。外力によってマスタ・スレーブが過大に動かされることはない。

対称型・力逆送型・力帰還型では式 (4) によってスレーブがマスタに連動する。外力によってマスタが動かされるとスレーブも連動し、それによって外力が変化する。これは MSS の不安定化の一因となる。つまり、操作者が何もしなくても外力のみによってバイラテラル制御が不安定化される可能性がある。

力順送型では、式 (10) によってマスタはスレーブに連動するが、操作力 $f_m = \mathbf{0}$ であれば式 (17) のようにスレーブはマスタから切り離される。つまり、操作者がマスタから手（足）を放せば、外力によってバイラテラル制御が不安定化されることはない。

5.3 インピーダンス型とアドミッタンス型

マスタ側から見ると、力逆送型・力帰還型はインピーダンス型、力順送型はアドミッタンス型の力覚提示である。

インピーダンス型の力覚提示の場合、マスタでは装置のどの部分からでも操作入力できる。スレーブでは力センサ部分からの反力でないと力覚提示されない。操作者は、スレーブの力センサ部分以外を使った作業は力覚なしで行なわなければならない。力センサ部分以外での環境との接触を認識できない可能性がある。

しかし、力順送型はアドミッタンス型であるため、スレーブ装置のどの部分からの反力でもマスタに提示することができる。一方、マスタでは力センサ部分からでないと操作入力できない。

これは、マスタの力センサ部分から手を滑らせた操作者が、スレーブと連動したマスタに押しつぶされるという危険もあることを意味する。しかし、安全については別の手段で対処すべきである。武居ら [11] はアドミッタンス型の力覚提示装置において、力センサ部分以外からの外力を推定して制御に利用している。このような手法を利用すれば、上記の危険も回避可能である。

5.4 一般形での表現

MSS のバイラテラル制御系には一般形での表現が与えられている [12, 5]。本稿の表記に合わせると一般形は次のように表現できる。 K_m , K_s はマスタ・スレーブのゲイン行列とした。

$$\tau_m = J_m^T K_m \begin{bmatrix} x_m^T & x_s^T & f_m^T & f_s^T \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

$$\tau_s = J_s^T K_s \begin{bmatrix} x_m^T & x_s^T & f_m^T & f_s^T \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

力順送型の制御則は、上記一般形において次のように表わされる。

$$K_m = K_p \begin{bmatrix} -I & S_p^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & S_f & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (21)$$

つまり力順送型では、一般形の特定のパラメータ設定における特殊な効果を主張しているにすぎない。

しかしながら、このような設定でバイラテラル制御が論じられている例は筆者の知る限り過去に存在しない。力順送型の利点を鑑みれば、新たな制御手法としての提案が妥当だと考える。

6. おわりに

本稿では、力順送型バイラテラル制御を提案し、その特徴を定性的に考察した。定量的考察や、本稿ではあまり言及しなかった不安定性の問題、操作性の評価等については今後の課題である。

本稿で定義した PAMSS についても、これまでスケールドテレオペレーションとして扱われてきた対象とは若干異なる問題設定であるため、さらなる検討が必要である。特に Fig.2 のようなシステムは、全身のマシナシナジーを目指す上での一つの目標である。本稿では詳述しなかったが、厳密には Fig.2 のシステムは運動方程式 (1) (2) で表現されない。Fig.1 の近似的な拡張としてだけでなく Fig.2 の特徴を陽に考慮した検討が求められよう。

なお、本研究は（財）油空圧機器技術振興財団の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 前田 太郎, “パワードスーツのサイエンス：創作と創造の狭間で”, 計測と制御, 43, 1, pp.38-45, 2004.
- [2] 金岡 克弥, “非定型重作業におけるマシナシナジーの効果に関する一考察”, 第 11 回 建設ロボットシンポジウム論文集, pp.119-124, 2008.
- [3] 金岡 克弥, “パワー増幅ロボットシステム設計概論 力学的相互作用にもとづく人と機械の相乗効果を実現するために”, 日本ロボット学会誌, 26, 3, pp.255-258, 2008.
- [4] 横小路 泰義, “マスタ・スレーブ制御の理論”, 日本ロボット学会誌, 11, 6, pp.794-802, 1993.
- [5] 横小路 泰義, 吉川 恒夫, “マスタ・スレーブ型遠隔縦横システムの操作性”, 計測自動制御学会論文集, 26, 5, pp.572-579, 1990.
- [6] D.A. Lawrence, “Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, 9, 5, pp.624-637, 1993.
- [7] 佐野 明人, 藤本 英雄, “マスタスレーブシステムの制御系設計の動向”, システム/制御/情報, 42, 7, pp.356-362, 1998.
- [8] 白石 哲也, 平林 丈嗣, “バイラテラル操作型水中バックホウの開発について”, システム/制御/情報, 50, 7, pp.248-253, 2006.
- [9] 金岡 克弥, “勝手に制御分析！あのロボットはどう動く？ 操縦者とロボットをつなぐ力学と制御 ～ パワードスーツの制御を分析”, ロボナブル, <http://robonable.typepad.jp/roboist/2009/06/11-1dfa.html>
- [10] 加藤 恵輔, 広瀬 茂男, “形状帰還型マスタ・スレーブアームの提案と基礎実験”, 日本ロボット学会誌, 18, 5, pp.752-757, 2000.
- [11] 武居 直行, 野畑 茂広, 藤本 英雄, “安定した接触を実現するアドミッタンス制御手法”, 日本ロボット学会誌, 26, 6, pp.635-642, 2008.
- [12] 福田 敏男, 谷江 和雄, 光岡 豊一, “マイクロマニピレータの制御 (第 1 報, マイクログリッパの基本特性とバイラテラル制御の一方)”, 日本機械学会論文集 C 編, 53, 493, pp.1950-1956, 1987.