

研究の課題名

油圧アクチュエータを用いた 人間パワー増幅ロボットの二足歩行制御手法の開発

立命館大学 総合科学技術研究機構
先端ロボティクス研究センター
チェアプロフェッサー

報告者 金岡 克弥

報告日 2013年(平成25年)8月20日

1. 本研究の意義・特色

報告者はかねてより、人間と機械の相乗効果を実現する「道具」としてのロボット、すなわち「ロボティックツール」というコンセプトを創出し、いわゆるロボットの枠内にとどまらない新たな概念、**マンマシンシナジーエフェクタ（人間機械相乗効果器）**として提唱してきた。

マンマシンシナジーエフェクタは、**人間のみに、あるいは機械のみでは実現できない機能を、人間と機械の相乗効果（マンマシンシナジー）によって実現する効果器**、と定義される。前述のように、その実体はロボット技術を導入することによって高度化された道具＝ロボティックツールである。



図1 パワーフィンガー（指パワー増幅）



図2 パワーエフェクタ（上肢パワー増幅）

現在までに、試作機としてパワーフィンガー（図1参照）、パワーエフェクタ（図2参照）を開発してきた。これらは「人間の臨機応変なスキル」と「ロボットの強大なパワー」の相乗効果を実現する高機能ツール、人間パワー増幅システムとして試作された。通常、このようなハイパワーロボットは、パワー増幅率を上げると挙動が不安定となり暴走を始める問題点があったが、我々は独自の制御技術である**仮想パワーリミッタシステム**を導入することによりこの問題を解決し、ハイパワーな人間パワー増幅システムを人が直接「持って」使うことを可能とした。

さらに 2006 年度からは、高増幅率の人間パワー増幅を下肢においても実現すべく、新たな試作機「パワーペダル」を開発中である（図 3, 4 参照）。これは人間の体重と機器の自重を支えた上で、人間の下肢のパワーを数倍から数十倍程度まで増幅する装置である。これまでの開発で、世界初の「人間機械の相乗効果によるパワー増幅歩行」を実現した。



図 3 パワーペダル 2006 年度モデル（左）2007 年度モデル（右）

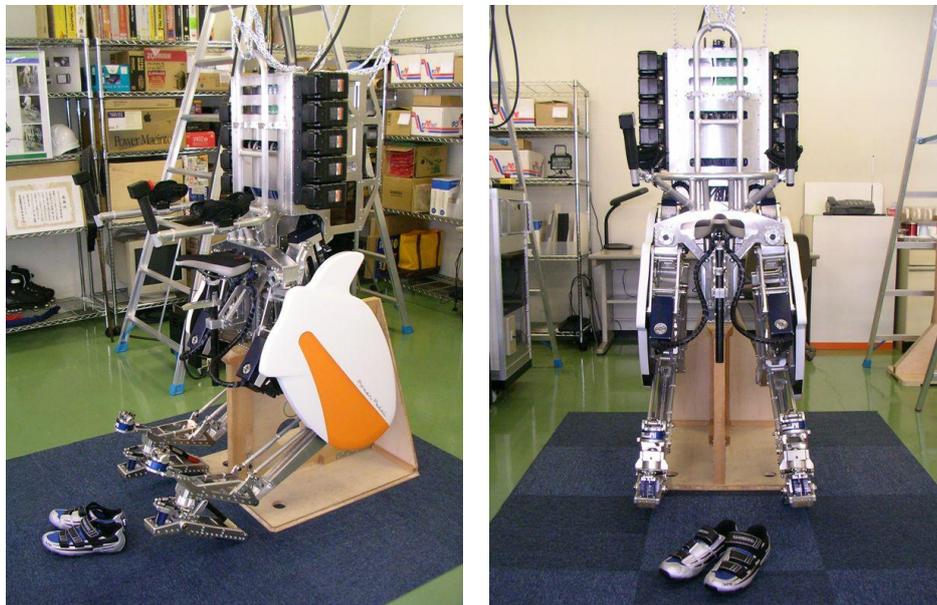


図 4 パワーペダル 2008 年度モデル

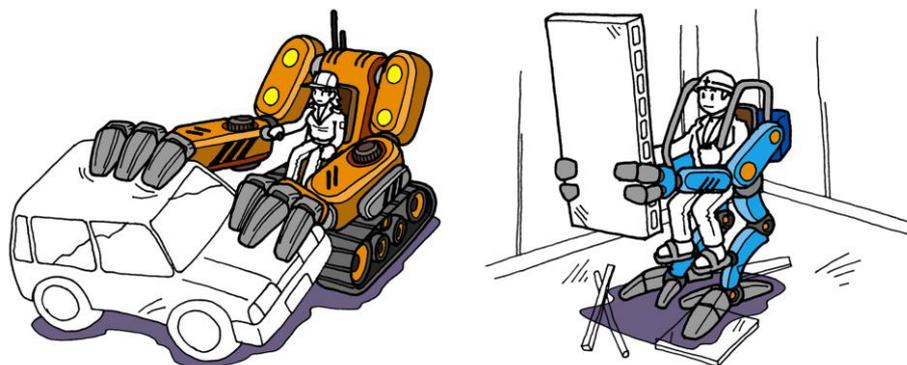


図 5 全身パワー増幅マンマシンシナジーエフェクタ構想図
（左）クローラ型，（右）二足歩行型

以上述べてきた研究は、先端ロボット開発の主流となっている自律化・知能化とは異なる我々独自の方向性である。

マンマシンシナジーエフェクタを操る人間には、例えば自動車の運転のように練習を重ね、強力なロボ

ットを熟練したスキルで取り扱うことが求められる。この特性は、いわゆる次世代ロボットが目指すような一般家庭等における実用化ではなく、図 5 に示す「次世代建設重機」のような、専門的スキルを持った作業者が、より高い生産性を発揮するためのイノベティブな新規デバイスとしての実用化にこそマッチするものである。特に、図 5 右のような二足歩行システムとすることにより、作業者の四肢のスキルを最大限発揮させることが可能となり、より高い生産性向上が期待される。

本研究は、図 5 右のような二足歩行のマンマシンシナジーエフェクタを実現させるためのボトルネックとなっている課題におけるブレークスルーを目的とするものである。

2. 実施した研究の具体的内容、結果

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。

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。

さて、先に図 1～5 に挙げたマンマシンシナジーエフェクタの試作機においては、そのパワー増幅性能は確保されていたものの、構造上、人間と大出力ロボットが稼働範囲を共有しなければならず、研究の進展につれて、操作者の安全確保が解決困難な課題として立ちはだかっていた。

そこで我々は、マンマシンシナジーエフェクタの概念を活かしつつ、操作者の安全を確保できる新たな枠組みとして、本研究において、**パワー増幅マスタスレーブシステム** [1] を提案した。

これは、前述の電気式マスタスレーブシステムの一つであるが、一般に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おり、パワー増幅マスタスレーブシステムに利用するためのバイラテラル制御手法として適当なものは従来手法には存在しなかった。

そこで我々は、パワー増幅マスタスレーブシステムに好適なバイラテラル制御手法として、新たな枠組みである**力順送型バイラテラル制御** [1][2] を提案した。これは、従来のバイラテラル制御手法の改良ではなく、従来には無かった新たなバイラテラル制御の枠組みの提案であり、特に油圧アクチュエータを用いた二足歩行ロボットシステムを、パワー増幅マスタスレーブシステムとして実現するための基盤技術である。

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、従来技術から俯瞰的に説明し、本研究の成果である力順送型バイラテラル制御の詳細について述べる。

まず、マスタロボットおよびスレーブロボットの運動方程式（ダイナミクス）を、説明の便宜のため、一例として次のように定める。

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

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

\mathbf{f}_m 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、 \mathbf{f}_s 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、 \mathbf{q}_m , \mathbf{q}_s は関節変位、 $\boldsymbol{\tau}_m$, $\boldsymbol{\tau}_s$ は関節駆動力、 \mathbf{M}_m , \mathbf{M}_s は慣性行列、 \mathbf{r}_m , \mathbf{r}_s は慣性以外の効果を集約した剰余項である。 \mathbf{J}_m , \mathbf{J}_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。

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

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

\boldsymbol{x}_m , \boldsymbol{x}_s は、それぞれ \boldsymbol{q}_m , \boldsymbol{q}_s 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。

[従来技術：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、例えば以下ようになる。

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{J}_m^T \boldsymbol{S}_f^{-1} \boldsymbol{K}_p (\boldsymbol{x}_s - \boldsymbol{S}_p^{-1} \boldsymbol{x}_m) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \boldsymbol{J}_s^T \boldsymbol{K}_p (\boldsymbol{S}_p^{-1} \boldsymbol{x}_m - \boldsymbol{x}_s) \quad (6)$$

\boldsymbol{K}_p は位置制御ゲインである。また、 \boldsymbol{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、 \boldsymbol{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。

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。

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

このように、対称型バイラテラル制御では、マスタ操作力 \boldsymbol{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 \boldsymbol{f}_s が \boldsymbol{S}_f^{-1} 倍で加わる。

[従来技術：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 \boldsymbol{f}_s を計測する作業力センサを配置し、スレーブ作業力 \boldsymbol{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。

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

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。

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

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 \boldsymbol{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 \boldsymbol{f}_s が \boldsymbol{S}_f^{-1} 倍で加わる。一方、マスタ操作力 \boldsymbol{f}_m は、スレーブダイナミクスの影響を受けない。

[従来技術：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 \boldsymbol{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 \boldsymbol{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なる。

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

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。

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。

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

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。

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

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 \mathbf{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 \mathbf{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。

[従来技術：並列型バイラテラル制御]

宮崎らは、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 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。

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

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

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

なお、 \mathbf{x}_d 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。

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。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_m = & (\mathbf{I} + 2\mathbf{K}_p \mathbf{K}_f)^{-1} \mathbf{J}_m^{-T} (\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{r}_m) \\ & + (\mathbf{I} + 2\mathbf{K}_p \mathbf{K}_f)^{-1} \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{J}_s^{-T} (\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{r}_s) \\ & + (\mathbf{I} + 2\mathbf{K}_p \mathbf{K}_f)^{-1} \mathbf{K}_p (\mathbf{S}_p^{-1} \mathbf{x}_m + \mathbf{x}_s) \\ & + \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \end{aligned} \quad (16)$$

そして、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。

$$\mathbf{f}_m \simeq \mathbf{S}_f^{-1} \mathbf{f}_s \quad (17)$$

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。

[新規技術：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させ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が不安定化される危険がある。

[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ぬため、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。

これらの問題1～6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、我々は本研究において**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。

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_m^T \mathbf{K}_p (\mathbf{S}_p \mathbf{x}_s - \mathbf{x}_m) \quad (18)$$

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

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。

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

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し、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。

本研究成果である力順送型バイラテラル制御を適用することで、従来のバイラテラル制御手法が抱えていた問題 1～6 を解決することができる。詳細の説明は文献 [1][2] に譲るが、これによって、従来技術では困難だったパワー増幅マスタスレーブシステムを実現することが可能となった。

力順送型バイラテラル制御はその性質上、大出力システム、特に油圧駆動されるシステムに好適である。つまり、大出力の油圧駆動系をスレーブとして使うパワー増幅マスタスレーブシステムに必須の技術であり、本研究で力順送型バイラテラル制御手法が確立されたことにより、油圧駆動系を用いたパワー増幅マスタスレーブシステムが実現できる。さらに、我々が保有する二足歩行制御技術（特許第 5268119 号「多脚歩行式移動装置の足部機構」、WO 2010/100746 A1「二脚歩行式移動装置」特許第 5268107 号「多脚歩行式移動装置のハイブリッド制御装置及び手法」等）との相性も良く、これらと組み合わせることで、先に図 5 右に示した二足歩行のマンマシンシナジーエフェクタを実現させるためのボトルネックとなっていた課題が解決され、ブレークスルーが可能となった。

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

氏名：金岡 克弥

役職：立命館大学 総合科学技術研究機構 先端ロボティクス研究センター
チェアプロフェッサー

4. 研究実施時期

2009 年（平成 21 年）から 2010 年（平成 22 年）まで。

本研究は上記研究期間終了後から現在まで別途資金を調達し、終了後にも成果（文献 [3][4] 等）を生み出している。なお、本報告書は、特許出願 [4] の完了を待って提出されたものであることを特記しておく。

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] 金岡, “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”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2009AC3C1-06, 2009.
- [2] 金岡, 特許第 5105450 号, “マスタスレーブシステム及びその制御方法”, 出願日 2010. 3. 15.
- [3] 公文, 菊植, 金岡, 山本, “非線形フィルタと位相進みによるパワー増幅マスタスレーブ制御の振動抑制”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2P1-K08, 2013.
- [4] 金岡, 菊植, 公文, 特願 2013-169669 号, “マスタスレーブシステム”, 出願日 2013. 8. 19.

6. 内外における関連研究の状況

我々は、マンマシンシナジーエフェクタというコンセプトを具現化するために、大出力のアクチュエータ利用、パワー増幅制御の実現、パワー増幅マスタスレーブシステムの提案、そして本研究におけるパワー増幅マスタスレーブシステムのための新たな「力順送型バイラテラル制御」の提案と、研究を重ねてきた。これは、本研究で掲げる大出力のパワー増幅二足歩行システムの実現のための基盤技術であり、本研究によって、ほぼ基盤技術は完成したと我々は考えている。このようなパワー増幅マスタスレーブシステムに関する他の研究は僅少である。数少ない例として、例えば吉灘（東工大）による、大形バイラテラルマニピュレータの研究があるが、これは前述の対称型および力逆送型を利用しており、問題1～6に挙げた従来のバイラテラル制御の欠点をそのまま引き継いでいる。現状では、本研究の力順送型バイラテラル制御に基づくシステムが、唯一、高性能なパワー増幅マスタスレーブシステムを実現し得ると考えている。

7. 今後の発展に対する希望

現在、パワー増幅マスタスレーブシステムおよび力順送型バイラテラル制御の研究を、継続して行なっている。複数の企業と協力し、既に実用化のための試作機を開発中である。このような、自律ロボットや介護ロボットとは違う、油圧アクチュエータのような大出力駆動系を用いたロボットの実用化が求められていることを認知して頂き、普及できるようにご協力頂ければ幸いである。