

多自由度バイラテラル遠隔操作におけるヒューマンセントリックコントロール Human Centric Motion Control for Multi-Degrees-of-Freedom Bilateral Systems

80816370 田井秀昭 (Hideaki Tai) Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

バイラテラル遠隔操作は、遠隔地における位置情報のみでなく力情報も双方向に伝達することが可能な遠隔操作システムである。しかしこれまでのバイラテラル遠隔操作では、遠隔操作者である人間の存在には焦点を当てられておらず、異構造多自由度のマスタスレーブシステムもあまり扱われていない。そこで本研究では、異構造多自由度バイラテラル遠隔操作システムにおける人間の操作支援を目的とし、人間が操作のし易い遠隔操作システムを目指す。ここで、人間の操作し易い遠隔操作システムを以下のように定義する。

- バイラテラル制御器が高い透明性を持つ。
- システムスケールに見合う力・位置がマスタで再現される。
- 危険操作を行っていることを操作者が認知できる。

以上の定義に基づき、本研究では二つの提案を行う。一点目の提案は多自由度バイラテラルシステムの基本構成である。これにより、人の操作性に直接関連する作業空間においても高い透明性を持つバイラテラル制御器が実現される。二点目の提案は、提案する多自由度バイラテラル制御における位置・力情報のスケールリングである。これにより、マスタではシステムスケールに見合った位置・力情報が再現され、かつ危険操作を人間に反力として認知させることが可能となる。以上二点の提案についてそれぞれ実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

2 等価質量に基づく多自由度バイラテラル制御

一点目の提案は、等価質量行列を考慮した多自由度バイラテラル制御系の設計である。本研究では、操作者はマスタシステムの先端を把持して遠隔操作を行うものとしているため、その先端における動力学的非干渉性が重要となる。そのため、従来の関節空間におけるバイラテラル制御では、人間の把持しているマスタシステム先端において透明性が下がってしまう。しかし提案手法を用いることにより、マスタスレーブシステム先端の透明性を高く保つことが可能となる。さらに、関節空間でのバイラテラル制御は完全に同一のマスタスレーブシステムでしか用いることができない。一方で提案手法においては、異構造マスタスレーブシステムに対しても、容易に適用することが可能である。等価質量行列 M は、ヤコビ行列 J と慣性行列 I を用いることで以下のように書き表すことができる。

$$M = (JI^{-1}J^T)^{-1} \quad (1)$$

関節空間におけるバイラテラル制御では、この等価質量行列 M が対角化されていないため、作業空間における各軸方向に干渉が起こってしまう。そのため、提案手法では作業空間外乱オブザーバ (DFOB) を用いて M を対角化し、ロバストな制御系を設計する。この際、作業空間反力推定オブザーバ (RFOB) を用いて、力センサレスな制御系を実現している。提案手法のブロック線図を図 1 に示す。これにより、従来の関節空間におけるバイラテラル制御に比べ、人間の把持点において高い透明性を保つことができる。また、作業空間外乱オブザーバは特異点付近において関節空間外乱オブザーバ (DFOB) よりも安定性が高い。そのため、人間が操作をするデバイスにとっては、DFOB よりも DFOB を用いることが望ましいと考えられる。

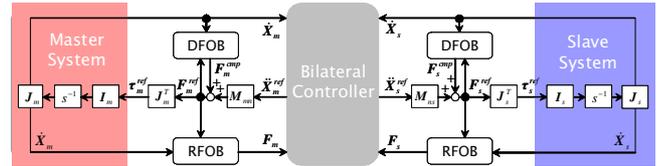


図 1: Proposed MDOF bilateral control based on DFOB.

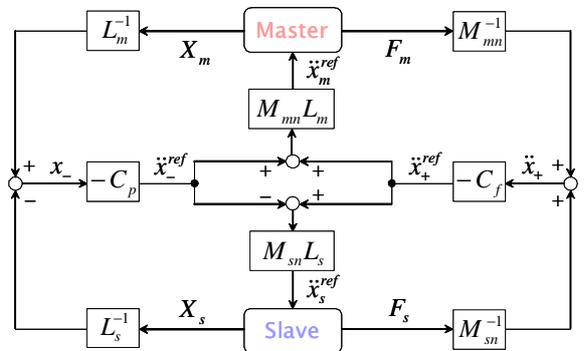


図 2: Bilateral controller with proposed scaling.

3 遠隔操作支援制御

異構造多自由度バイラテラルシステムにおいては、様々な操作者に対する支援制御が必要である。例えば、マスタスレーブシステム間においてシステムのスケールが異なる場合を考える。この場合、全く同じ動作をすれば可操作範囲を逸脱してしまう、極端に大きな力を発生してしまう、といった問題が考えられる。そこで、作業空間におけるバイラテラル遠隔操作における、力情報と位置情報のスケールリングを二点目の提案とする。力情報と位置情報のスケールリングは、以下に示すスケールリング Quarry 行列 Q_s における位置スケールリング比 α 、カスケールリング比 β を設計することで実現できる。

$$Q_s^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ I & -I \end{bmatrix} \quad (2)$$

これにより、マスタ側ではスレーブ側の力情報・位置情報を、それぞれ α 倍・ β 倍した情報が再現される。したがって、これらの設計によって任意のスケールでバイラテラル遠隔操作を実現することが可能となる。本論文ではこれらのスケールリング比を、物理モデルに基づいて設計することにより、マスタスレーブのスケールに合った情報をマスタ側で再現させる。

3.1 操作範囲スケールリング

位置情報に関するスケールリングは、操作可能範囲を用いて実現される。これによりバイラテラルに制御される位置情報は、操作可能領域中の作業点の割合となる。 L_m, L_s をマスタスレーブシステムそれぞれの到達し得る最大の距離とすると、位置スケールリング比 α は次のようになる。

$$\alpha_i = L_m/L_s \quad (3)$$

表 1: Parameter Settings for Experiment

Parameter	Description	Value
K_p	P gain of bilateral controller	625.0
K_v	D gain of bilateral controller	50.0
K_f	Force gain of bilateral controller	0.4
g_d	Cut-off frequency of DTOB/RTOB	100.0
g_r	Cut-off frequency of DFOB/RFOB	70.0

3.2 等価質量スケール

力情報に関するスケールでは、等価質量を用いる。これにより、バイラテラル制御における力情報は加速度次元となり、システムのスケールに依存しないものとなる。 M_{mn} , M_{sn} をそれぞれマスタスレーブシステムのノミナル等価質量とすると、カスケール比 β は次のようになる。

$$\beta = M_{mn} M_{sn}^{-1} \quad (4)$$

以上二点の位置と力のスケールを用いることで、マスタスレーブ間のスケールを合わせてバイラテラル制御系を構成することが可能となる。このとき、作業空間におけるバイラテラル制御器を図 2 に示す。

3.3 作業空間外乱オブザーバを用いた操作支援

前述したように、DTOB を用いた場合に比べて DFOB を用いた場合の方が特異点付近において安定である。この性質を利用することにより、スレーブの可操作範囲をマスタ側へ反力として教示することができる。もしスレーブが可操作範囲を超過するような指令を操作者がマスタを通じて与えた場合、スレーブ側では大きな操作力が生じる。DTOB を用いた場合には、そのような大きな操作力が生じる領域では、制御器を安定にできず発散してしまう。しかし DFOB を用いた場合には大きな操作力は生じるが、制御器が不安定にならないよう補償をすることが可能である。そして、その操作力はバイラテラル制御器を通じてマスタ側で反力として再現される。このため、提案する DFOB に基づくバイラテラル制御系を用いることで、操作範囲を超過しないよう操作者を支援することが可能となる。

4 実験

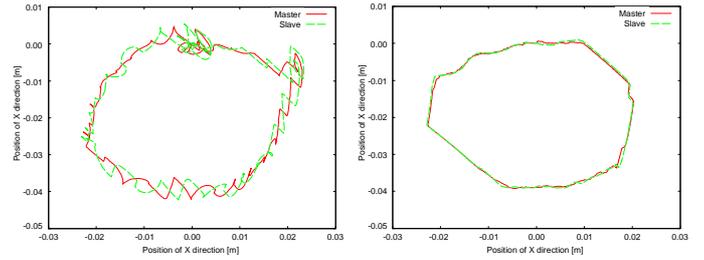
二リンク平面マニピュレータをマスタスレーブとし、実験を行った。この際に用いたパラメータを表 1 に示す。

4.1 従来手法と提案手法の比較

本実験では、従来手法である関節空間バイラテラル制御と、一点目の提案手法である作業空間バイラテラル制御の比較を実験により行った。このときマスタは人間が操作をし、10 秒間で半径 20mm の円軌道を描かせる。そしてスレーブ側への環境反力はないものとする。さらに、マスタスレーブシステムは完全に同一の姿勢をとっていることとする。この実験結果を図 3 に示す。従来手法では等価質量行列が考慮されていないため、操作者が把持している点の応答が振動的である。これは操作者に多くの操作力を必要とし、目標軌道の追従性能も悪いことから、透明性が低いということは明らかである。一方で提案手法を用いることで、より透明性が高い遠隔操作が実現され、滑らかにかつ誤差も少なく円軌道が描れていることが分かる。これにより、一点目の提案手法の有効性が確認された。

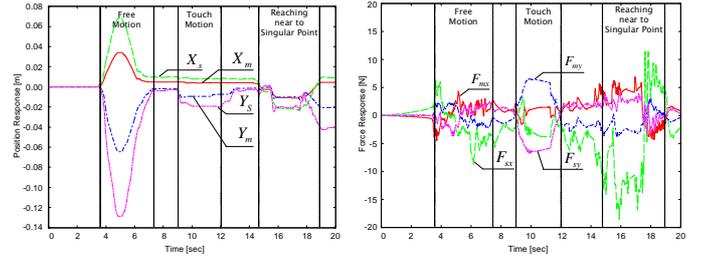
4.2 スケール適用

本実験では、二点目の提案手法であるスケールを前述のマスタスレーブシステムに適用し、その有効性を確認する。ここで前述のマスタスレーブシステムは同構造であるが、マスタスレーブ間の姿勢を異なる姿勢とすることで、システム間の等価質量が同一にはならない。そのため、非同一致勢のマスタスレーブシステムも異構造であるとみなすことが可能である。また、このマスタスレーブシステムは可操作領域が同一であるが、



(a) Conventional(joint space). (b) Proposed(operational space).

図 3: Comparison between conventional and proposed.



(a) Position responses. (b) Force responses.

図 4: Bilateral control with proposed scaling.

仮想的にスレーブシステムはマスタシステムの二倍の可操作領域を持つとし、位置スケール比を $\alpha = 1/2$ と設定した。また、本実験においてもマスタシステムは人間が操作する。この際の操作者は、自由動作、接触動作、限界特異点への接近という順でマスタシステムの操作を行う。この実験結果を図 4 に示す。

まず操作者は、スレーブシステムを 4-7 秒程の間、自由動作させている。この際、スレーブの位置応答がマスタの二倍となっていることが分かる。そしてその後の 9-12 秒程の間、スレーブシステムは環境と接触している。このときの力応答に関して、ノミナル等価質量に基づきスケールされている。この結果に関しては、特に X 軸方向が顕著であり、これはノミナル等価質量の設定が X 軸方向に関して相違が大きいためであると考えられる。これにより、位置情報・力情報ともにマスタスレーブのスケールに合ったスケールが実現されており、その有効性が確認できていると言える。この操作の際、スレーブシステムは既に限界特異点に十分接近している。そしてさらに、操作者はスレーブシステムを限界特異点の方向へと移動させている。しかしその際にスレーブシステムはより限界特異点へと近づくため、さらに大きな操作力が発生し、それがマスタシステムへと伝搬されていることが分かる。これにより、作業空間外乱オブザーバを用いた危険操作の認知ができていていると言える。

以上の結果により、二点目の提案手法の有効性が確認された。

5 結論

本研究では、異構造多自由度バイラテラル制御における二点の提案を行った。一点目の提案により、多自由度バイラテラル制御系の安定性と透明性の向上が達成された。二点目の提案により、システムスケールに見合う位置・力情報がマスタで再現され、さらに操作者の危険認知により、操作支援を行うことが可能となる。以上の提案により、操作者にとって操作のし易い多自由度遠隔操作システムを実現することが可能である。実験により、提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] 田井秀昭, 村上俊之: “異構造異自由度を考慮した作業空間バイラテラル制御の一提案法”, 電気学会産業計測制御研究会資料, Vol. IIC-09, No.112-126, pp. 19-24, March, 2009
- [2] 田井秀昭, 村上俊之: “作業空間における力センサレスバイラテラル制御系の考察”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (DVD-ROM), 3H2-04, September, 2009