

ハプティクスのためのロボットモーションコントロール Robot Motion Control for Haptics

80223542 松本 雄一 (Yuichi Matsumoto) Supervisor 大西 公平 (Kohei Ohnishi)

1 序論

ロボットが私たち人間と触れ合い、私たちの生活環境で活躍するためにはロボットが物に触るための技術、すなわち「ハプティクス」の研究が必要である。本研究では、ハプティクス実現のためのロボットモーションコントロールを考える。そしてロボットが人と共存するための基礎技術の構築を目指す。

2 パイラテラル制御系の設計及び解析

人がロボットを介して環境に触る時のモデルを図1に示す。同時に図1は理想的なパイラテラル制御系における接触時のモデルを表していると言える。このとき、人の力入力から位置出力までの伝達関数は次式のようになる。

$$\frac{X}{F} = \frac{g_{sen}}{Ms^3 + (M + m_e)g_{sen}s^2 + d_e g_{sen}s + k_e g_{sen}} \quad (1)$$

本研究では、この人の力入力から位置出力までの伝達関数こそが人が感じる力覚を表していると考え、これを極配置で表現することを提案する。この極配置が環境の極に近ければ、操作者は環境に触ったような力覚を得ることができる。ロボットの等価質量 M 及び力計測帯域 g_{sen} が力覚に与える影響を図2に示す。ここで \diamond は環境の極を表す。パイラテラル制御などのロボットを介する接触において、等価質量を小さく、かつ力計測帯域が十分に大きく設定できないと、人は環境を直接触ったような力覚を得ることはできないことが分かる。

本研究では自然法則に基づいた完全並列型のパイラテラル制御系の設計を第1に掲げ、インピーダンス制御系を用いる。ロボット制御により、ロボット手先にこのような自然法則を実現するためには、加速度制御系が必要不可欠となる。しかし外乱オブザーバを用いても高周波

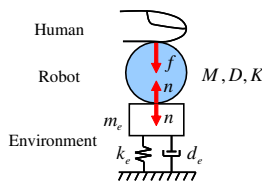


図1: 人がロボットを介して環境に触る時のモデル図

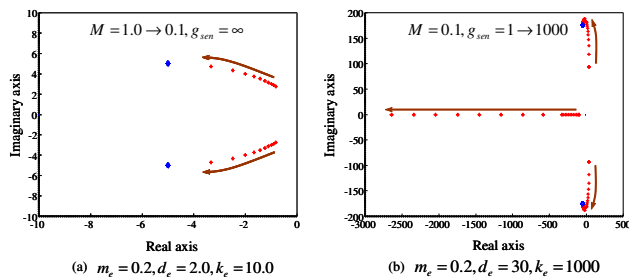


図2: 根軌跡

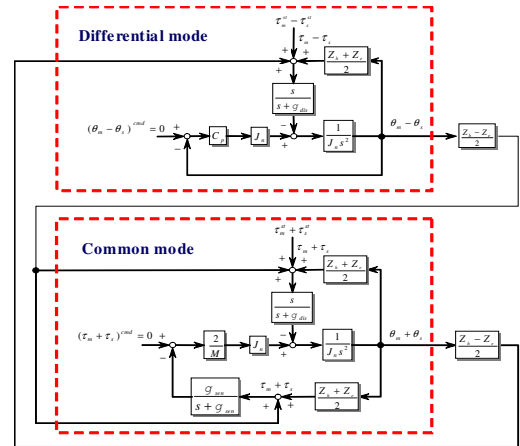


図3: パイラテラル制御系の和と差のモード

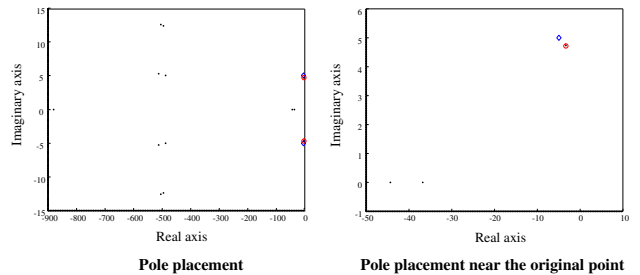


図4: 極配置 ($m_e = 0.2, d_e = 2.0, k_e = 10.0$)

外乱の影響により、インピーダンス制御だけではマスタとスレーブの位置誤差が生じてしまう。そこで、本研究では位置制御とインピーダンス制御を加速度次元でハイブリッドする制御系を用いた。また提案する制御系の和と差のモードを考えることで、図3のようなブロック線図で表すことができる。このように表現することで位置制御系とインピーダンス制御系の関係が明確になる。

提案する制御系の解析を行なうため、力計測の帯域、入力外乱の帯域を厳密に考慮して力覚の伝達関数を求める。そして、環境と接するときのこの極配置を図4に示す。高精度なパイラテラル制御系を構築するためには、図4のように位置制御の極集合、オブザーバゲインの極集合を複素平面のできるだけ左側に設計し、環境の極が支配極となることが重要である。このように設計できれば、操作者は環境に触ったときと同じような力覚を得ることができる。このためパイラテラル制御で再現できる環境の硬さの上限は、位置制御を行なったときに実現できる硬さであることが分かる。

提案する制御系の有効性を示すために実験を行った。人がロボットの操作を行い、硬い環境に接触させたときの位置と力の応答を図5に示す。操作性がよく、操作者は環境に触れた力覚を充分感じる事ができた。実験により、提案するパイラテラル制御系の有効性を確認した。

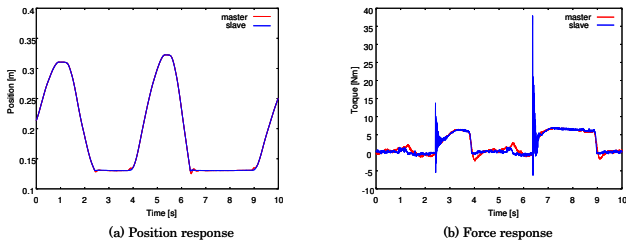


図 5: 位置, 力応答 (硬い環境)

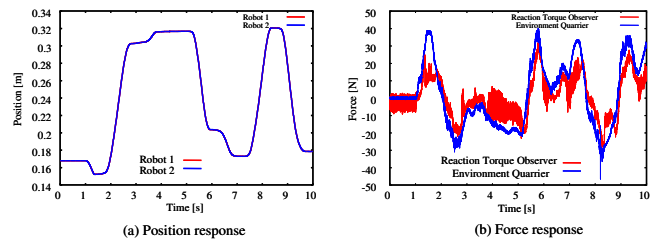


図 7: 反力推定オブザーバと環境クオリヤ

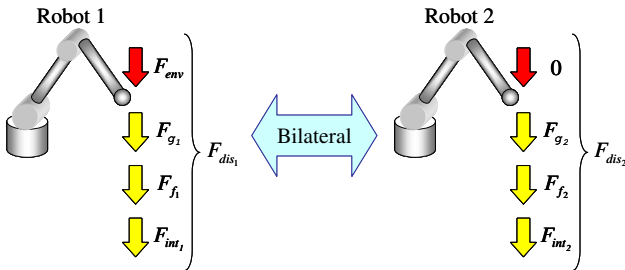


図 6: 環境クオリヤの概念図

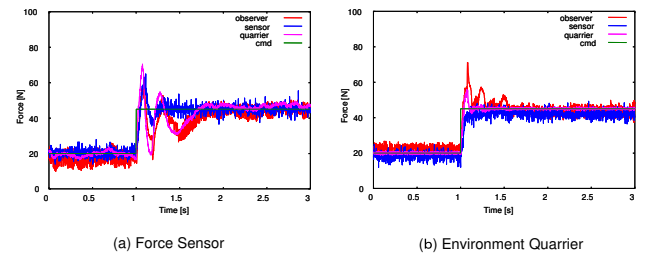


図 8: 力のステップ応答

3 環境クオリヤ

本章では、ツインロボットシステムを用いた環境クオリヤという新しい力計測法を提案する。環境クオリヤの概念図を図 6 に示す。Robot1 と同構造の Robot2 を用意し、Robot2 には外力を加えないようにする。そして Robot2 に重力や摩擦力などの外乱を外乱オブザーバを用いて計測し、それを Robot1 の全外乱から差し引くことで Robot1 の外力 F_{env} を求める。Robot1 と Robot2 はバイラテラル制御により、同じ位置、姿勢を保つように制御される。環境クオリヤは同定試験などを必要とせず、簡単に高精度で高帯域な力計測装置として用いることができる。

環境クオリヤの有効性を確かめるため、比較実験を行った。まず人がロボットを操作したときの反力オブザーバと環境クオリヤの力データを図 7 に示した。結果より、反力推定オブザーバより環境クオリヤの方がノイズの少なく、高精度な力計測ができていることが分かる。続いて環境クオリヤとカセンサを用いて力制御の実験を行った。その結果を図 8 に示す。結果より、環境クオリヤを用いる方が制御特性が良くなることが確認された。

環境クオリヤはカセンサをはるかに凌駕したセンシングの周波数帯域の確保が可能となる。広い力計測帯域を持つ力計測法は高精度な力制御系、バイラテラル制御系を構成する際に極めて有効な手段となる。

4 制御支点を用いたロボット制御

本章では制御支点を用いたロボット制御手法を提案する。本手法は機械的な支点を用いることなく、6 自由度ロボットの制御により制御支点を作り出すものである。機械的な支点を持たないので、装置が簡易化するだけでなく、支点到生ずる機械的摩擦を除去することができる。また操作可能な範囲を容易に限定することができるので、より安全な作業が可能となる。さらに本手法は制御支点を可変にすることも可能であり、支点が常に変化する作業に特に有効である。制御支点を用いたバイラテラル制御のイメージ図を図 9 に示す。この手法は内視鏡下手術に

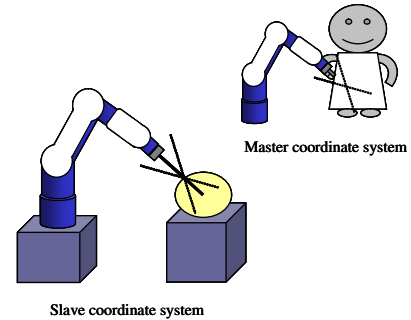


図 9: 制御支点を用いたバイラテラル制御

において極めて有効な手段になると思われる。

制御系は仮想支点での位置制御系、姿勢の力制御系で構成される。スラスト動作には運動学を積極的に変化させる独自の手法を用いる。シミュレーションにより、スラスト動作と姿勢動作は互いに干渉することなく実現できることを確認した。そして環境クオリヤを用いて力制御実験を行い、本手法の有効性を確かめた。

5 結論

新しい力覚表現法を提案し、それに基づき高精度なバイラテラル制御系を構築するために必要な事項の解析を行った。そして実験により、提案手法の有効性を示した。またハプティクスにおける力計測帯域の重要性を示し、新しい力計測法を提案した。従来法との比較を行い、その有効性を実験により確認した。さらにロボットの更なる可能性を追求し、仮想支点を用いたロボット制御という新しい手法を提案し、実験により実証した。

参考文献

- [1] Y. Matsumoto, S. Katsura, K. Ohnishi "An Analysis and Design of Bilateral Control Based on Disturbance Observer," *The 10th IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT'03-MARIBOR*, pp. 802-807, 2003.