

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19560439
 研究課題名（和文） 通信遅延と情報スケーリングを考慮した受動性に基づく
 テレオペレーションの協調制御
 研究課題名（英文） Passivity-based Cooperative Control of Teleoperation Systems
 Considering Communication Time Delay and Scaling
 研究代表者
 滑川 徹 (NAMERIKAWA TORU)
 金沢大学・電子情報学系・准教授
 研究者番号：30262554

研究成果の概要：

本研究では、時変の通信遅延と情報スケーリングを考慮したテレオペレーションシステムに対して、理論的に漸近安定性を保証した協調制御則を提案し、その有効性を実験的に検証した。

具体的には、まず2007年度に小型マスターロボットアームの構築と数理モデルの導出を行い、更に協調制御則に関する理論研究を実施した。その結果を受けて2008年度には提案する協調制御則の漸近安定性の証明を行い、更に時変の通信遅延へ対応出来るよう制御則の拡張を行った。最後に 統合的な制御環境の構築と制御実験による検証を行い、提案制御則の有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野： 制御工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学・制御工学

キーワード： 制御システム, テレオペレーション, 協調制御, 通信遅延, スケーリング

1. 研究開始当初の背景

テレオペレーションシステムはオペレータが指令するマスターロボットの動きを、遠隔地のスレーブロボットに追従させるロボットシステムである。特にスレーブからマスターへのフィードバックを行なうバイラテラルテレオペレーションシステムは遠隔地での作業性能の改善に極めて有効であり、近年盛んに研究されている。

バイラテラルテレオペレーションシステムは未知の環境及びオペレータに接触する

ことから、様々な環境及びオペレータ特性に対して安定性を保証することが最も基本的かつ最も重要な課題である。これはマスターロボットとスレーブロボットが通信路によって結合されるため通信遅延によりシステムが不安定化することがあるからである。

この問題に対して受動性に基づくスキュアリング変換を用いた手法が有効であることが知られている。スキュアリング変換を用いた制御[1]は安定性の確保に有効であるが位置のドリフトや信号の反射などの問

題がある。この問題に対して今までに様々な方法が提案されてきているが、位置誤差の収束を保証していないことや代数ループ計算を含むという問題があった。最近になってイリノイ大のグループが、通信遅延を有するネットワーク結合された受動的システムに対してグラフ理論に基づく同調制御則を提案し、この問題を解消した[2]。Spongらは簡単な制御則により複数のエージェントが互いに同調することを示し、これにより通信遅延を有するテレオペレーションの位置誤差の収束性を明らかにした。これはロボット制御の分野において、世界的にも極めて大きなブレイクスルーであり、賞賛すべき結果である。

しかしながら完全な研究は存在しない。この結果に対しても幾つか改善すべき点が考えられる。1つは、文献[2]においては、通信遅延としては時間的に変化しない遅れしか考えられていないこと。2つ目はオペレータの操作性が悪いことである。

一方、テレオペレーションが必要となる様々な作業では、人間に適した「構造」と「スケール」のマスタロボットを用いて、作業内容に適した「構造」と「スケール」のスレーブロボットを操作することが望ましい。例えばこの制御手法をマイクロマニピュレーションに応用する場合には、微小環境下でのマイクロマニピュレータのダイナミクスは通常の我々の世界とは慣性/摩擦の割合が大きく異なり、その状況に合わせたダイナミクス表現とその制御が必要となる。

運動と力に対してスケーリングを行うことをパワースケーリングといい、文献[3]で提案されている。文献[3]では、スキュタリング変換[1]を用いたテレオペレーションに対してパワースケーリングを行った場合にも受動性が保証されることを示しているが、位置誤差が残るといった問題があった。

上記を勘案し、以下の研究目的を掲げるに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時変の通信遅延とスケーリングを考慮したテレオペレーションシステムに対して、漸近安定性を保証した協調制御則を理論的に提案することにある。更にはその提案法の有効性を実験的に検証することにある。本研究の具体的な目標として以下の4点を目指した。

1. [2]の同調制御則を発展させ、時間的に変化する通信遅延に対応し、また操作性を改善した協調制御則を提案する。
2. パワースケーリングについては、任意のスケーリング要素を導入し、個々の制御信号のスケーリング要素を自由に变化可能な手法へと発展させる。

3. 提案法の安定性を解析し、フィードバック系の漸近安定性を証明する。
4. 小型で異構造のロボットアームと既存の比較的大型のロボットアームを接続したテレオペレーションシステムを構築し、提案法の有効性を実験的に示す。

本研究により、「構造」と「大きさ」の異なるロボットを用いたテレオペレーションが「時変の通信時間遅れ」に対して実現され、「操作性」も向上すれば、遠隔地での医療業務やマイクロ/ナノマニピュレーション、などへの貢献が大いに期待される。

本研究はロボット制御、遠隔操縦、制御理論において理論的にも応用的にも世界的に先駆的な内容であり、制御理論における学術的な意義も大きい。一方でロボット応用技術としても重要な意味を持っていた。

参考文献

- [1] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501, May, 1989.
- [2] M. W. Spong and N. Chopra, "Synchronization of Networked Lagrangian Systems," 3rd IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, pp.1-9, Nogoya 2006.
- [3] 小菅一弘, 伊藤友孝, 他, "通信遅れを有するテレマニピュレーションシステムの受動性に基づく安定なパワースケーリング手法," 日本機械学会論文集, C編, Vol. 64, No. 621, pp. 304-309, 1998.

3. 研究の方法

3. 1. 2007年度の研究内容

(1) 小型ロボットの作成と数理モデルの導出
本科研費補助金でロボットのアームと固定台、更にはDCサーボモータおよびエンコーダ、サーボアンプ、小型フォーストルクセンサ等を購入し、小型の平行リンク機構を有する2軸ロボットアームを作成した。さらに実時間デジタル制御装置を購入し既存の高速リアルタイムDSP装置、RT-Linuxに基づく制御装置も利用して、高速・高精度実時間デジタル制御環境の構築を試みた。研究代表者の研究室の既存の比較的大型のDDロボットアームとの通信環境を整備し、テレオペレーションシステムを完成させた。更には作成したロボットアームの運動学、動力学モデルを計算し、そのモデルを元に同定実験を行い、小型アームのモデルパラメータを同定した。

(2) 協調制御則に関する研究

参考文献[2][6]の制御則は単純な完全グラフを用いた、平均合意アルゴリズムを用いていたが、そのため、オペレータの操作性が悪いことが我々の先行研究[6]で確認されていた。ここでは操作性を改善した協調制御則の提案を試みた。

制御則の提案とその試行錯誤の際には、本補助金で購入した数値・行列演算用ソフトウェアライブラリを用いて数値実験を行い、検証を行った。

3. 2. 2008年度の研究内容

(3) 漸近安定性の証明

提案手法を用いて複数台かつ異構造でスケールも異なるマルチテレオペレーションシステムの安定性と漸近安定性の証明を試みた。数学的証明のための主な道具としては、グラフラプラシアン の性質、リアプノフの安定定理と、ラサールの不変定理、バーバラの補題などを用いた。

(4) 時変の通信遅延への対応

従来研究では時不変の通信遅延を扱っていたが、ここでは、時変の通信遅延を含めるように理論を拡張した。そのためには各ロボットアームが受動性を有している必要があるため、各ロボットでローカルに非線形フィードバックを施してみた。このようにすることで時変の通信遅延への対応が可能となり、提案法を用いた際の漸近安定性を示すことが可能となると思われた。

(5) 統合的な制御環境の構築と制御実験による検証

(1)で構成した「高速・高精度実時間デジタル制御環境」を用いて制御実験を行った。実験の目的は(2), (3), (4)で提案した制御則と導出した定理の検証であった。さらには従来法と比較検討し、提案法の有効性、問題点を検証した。

(6) 得られた実験結果の解析・考察・検討

理論結果と実験結果を分析し、理論と制御系設計にフィードバックをかけた。更には研究成果をまとめ、国内外での研究発表・論文誌への投稿を行った。

参考文献

[4] 滑川徹, 林鋭渠, 伊藤智, 河田久之輔, "環境の不確かさと通信遅延を考慮したマスタ・スレーブシステムのロバスト制御," 日本機械学会論文集, C編, Vol.72, No. 721, pp. 2821-2828, 2006.

[5] Toru Namerikawa and Hisanosuke Kawada, "Symmetric Impedance Matched Teleoperation with Position Tracking," Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA, Dec. 13-15, 2006 (to be published).

[6] Hisanosuke Kawada and Toru

Namerikawa, "Passivity-based Synchronized Control of Teleoperation with Power Scaling," Proc. of the SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Busan, Korea, Oct. 18-21, 2006.

4. 研究成果

本研究では、時変の通信遅延と情報スケールリングを考慮したテレオペレーションシステムに対して、理論的に漸近安定性を保証した協調制御則を提案し、その有効性を実験的に検証した。具体的な成果は以下の5点である。

(1) 小型マスターロボットアームの構築と数値モデルの導出 (2007年度実施)

まず、ロボットアームと固定台等を導入し、小型の2軸マスターロボットアームを構築した。さらに実時間デジタル制御装置を既存の高速リアルタイム DSP 装置, RT-Linux に基づく制御装置と併合し、高速・高精度実時間デジタル制御環境へと発展させた。次に研究代表者の研究室の既存の大型 DD ロボットアームとの通信環境を整備し、上記の小型ロボットアームと大型の DD ロボットアームから構成されるテレオペレーションシステムを完成させた。作成したロボットアームの運動学、動力学モデルを計算し、そのモデルを元に同定実験を行い、小型アームのモデルパラメータを同定した。

(2) 協調制御則に関する研究 (2007年度実施)

本研究では、通信遅延を有する異構造テレオペレーションに対して、漸近安定性を保証した受動性に基づく協調制御手法を提案した。具体的には制御手法における同調制御則のマスタおよびスレーブのゲインを、異構造を考慮して個々に設計できるコントローラを提案した。これにより、先行研究で問題であった追従誤差を小さくすることが出来た。加えて、位置と力のスケールリングの大きさを別々にすることを可能とした。また実際に構築とスケールの異なる2台の2自由度アームを用いた実験により、提案手法の有効性を検証した。

(3) 漸近安定性の証明 (2008年度実施)

2007年度に提案した協調制御則を用いて複数台かつ異構造でスケールも異なるマルチテレオペレーションシステムの漸近安定性の証明を行った。数学的証明のための主な道具として、リアプノフの安定定理と、ラサールの不変定理、バーバラの補題などを用いた。

(4) 時変の通信遅延への対応 (2008年度

実施)

更に提案手法を時変の通信遅延を含めるように拡張した。そのためには各ロボットアームが受動性を有している必要があるため、各ロボットでローカルに非線形フィードバックを施し、各アーム (エージェント) を受動化する。このようにすることで時変の通信遅延への対応が可能となった。

(5) 統合的な制御環境の構築と制御実験による検証 (2008年度実施)

2007年度に構成した「高速・高精度実時間デジタル制御環境」を用いて制御実験を行った。これにより上記で提案した制御則と導出した定理の有効性が検証された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

① K. Yoshida, T. Namerikawa, O. Sawodny, A State Predictor for Bilateral Teleoperation with Communication Time Delay, 47th IEEE Conference on Decision and Control, pp.4590-4595, Cancun, 2008, 査読有

② H. Kawakami, T. Namerikawa, Consensus Filter Based Target-enclosing Strategies for Multiple Nonholonomic Vehicles, 47th IEEE Conference on Decision and Control, pp.2282-2287, Cancun, 2008, 査読有

③ H. Kawakami, T. Namerikawa, Virtual Structure Based Target-enclosing Strategies for Nonholonomic Agents, Proc. of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 1043-1048, San Antonio, 2008, 査読有

④ C. Yoshioka, T. Namerikawa, Observer-based Consensus Control Strategy for Multi-Agent System with Communication Time Delay, Proc. of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 1037-1042, San Antonio, 2008, 査読有

⑤ T. Namerikawa, C. Yoshioka, Consensus Control of Observer-based Multi-Agent System with Communication Delay, Proc. of the SICE Annual Conference 2008, pp. 2414-2419, Tokyo, 2008, 査読有

⑥ K. Yoshida, T. Namerikawa, Predictive PD Control for Teleoperation with Communication Time Delay, Proc. of the 17th IFAC World Congress, pp. 12703-12708, Seoul, 2008, 査読有

⑦ C. Yoshioka, T. Namerikawa, Formation Control of Nonholonomic Multi-vehicle Systems Based on Virtual Structure, Proc. of the 17th IFAC World Congress, pp. 5149-5154, Seoul, 2008, 査読有

⑧ Y. Nakaso, Toru Namerikawa, GMC-based Fault Detection and Its Application to Magnetic Suspension System, Proc. of the 17th IFAC World Congress, pp. 7363-7368, Seoul, 2008, 査読有

⑨ H. Kawada, T. Namerikawa, Bilateral Control of Nonlinear Teleoperation with Time Varying Communication Delays, Proc of the 2008 American Control Conference, pp. 189-194, Seattle, 2008, 査読有

⑩ 河田久之輔, 吉田航瑛, 滑川 徹, 通信遅延を有する異構造バイラテラルテレオペレーションの同調制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 10, pp. 802-808, 2008, 査読有

⑪ 吉岡愛, 滑川 徹, マルチエージェントシステムの合意問題とそのフォーメーション制御への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 8, pp. 663-669, 2008, 査読有

⑫ 中曾裕次郎, 滑川 徹, GMC 構造による故障検出とその磁気浮上システムへの応用, システム制御情報学会論文集, Vol. 21, No. 9, pp. 277-284, 2008, 査読有

⑬ H. Kawada, K. Yoshida, T. Namerikawa, Synchronized Control for Teleoperation with Different Configurations and Communication Delay, Proc. of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2546-2551, New Orleans, 2007, 査読有

⑭ T. Namerikawa, C. Yoshioka, Formation Control of Nonholonomic Multi-Vehicle Systems via Virtual Structure, Proc. of the Fourth International Conference on Computational Intelligence Robotics and Autonomous Systems, pp. 202-207,

Palmerston North, 2007, 査読有

⑮ H. Satoh, T. Namerikawa, Robust Stabilization of Running Self-Sustaining Two-wheeled Vehicle, Proc. of the 2007 IEEE Conference on Control Applications, pp. 539-544, Singapore, 2007, 査読有

⑯ T. Namerikawa, J. Miyakawa, GIMC Structure Considering Communication Delay and Its Application to Mechatronic System, Proc. of the 2007 American Control Conference, pp.1532-1537, New York, 2007, 査読有

⑰ 瀬戸洋紀, 滑川 徹, 周期的外乱を考慮した H^∞ DIA 制御と磁気軸受による回転性能の検証, 日本 AEM 学会, Vol.15, No.3, pp. 333-340, 2007, 査読有

⑱ 瀬戸洋紀, 滑川 徹, 補償器の初期状態を考慮した H^∞ DIA 制御と磁気軸受による過渡特性の検証, 日本 AEM 学会, Vol.15, No.4, pp. 422-428, 2007, 査読有

[学会発表] (計 17 件)

① 川上 裕樹, 滑川 徹, 動的ネットワーク下でのマルチピークルシステムによる協調取り囲み行動, 第 51 回自動制御連合講演会, pp.1136-1139, 米沢, (2008. 11. 23)

② 中島 裕介, 滑川 徹, GIMC 構造に基づく L2 性能を考慮した Anti-Windup 制御, 第 51 回自動制御連合講演会, pp. 1162-1167, 米沢, (2008. 11. 23)

③ 武田 孝史, 滑川 徹, センサネットワークの状態推定誤差と通信エネルギーを考慮したネットワークの切り替え, 第 51 回自動制御連合講演会, pp. 1144-1149, 米沢, (2008. 11. 23)

④ 藤田 裕之, 滑川 徹, 時変の通信遅延を有するテレオペレーションの遅延の大きさに依存しない安定化, 第 51 回自動制御連合講演会, pp. 1126-1131, 米沢, (2008. 11. 23)

⑤ Do Duc Nam, Toru Namerikawa, An Impedance Control Based Force-Reflection Algorithm of Bilateral Teleoperation with Communication Delay, 第 51 回自動制御連合講演会, pp.174-179, 米沢, (2008. 11. 22)

⑥ 吉田 航瑛, 滑川 徹, 通信遅延を有するテレオペレーションの適応予測に基づくバイラテラル制御, 第 51 回自動制御連合講演会, pp.168-173, 米沢, (2008. 11. 22)

⑦ 滑川 徹, マルチエージェント問題への制御理論的アプローチ, 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング(NC)研究会, 金沢, (2008. 5. 23)

⑧ 藤田 裕之, 滑川 徹, 時変の通信遅延を有するテレオペレーションの定数ゲインを用いたバイラテラル制御, 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング(NC)研究会, 金沢, (2008. 5. 23)

⑨ 武田 孝史, 滑川 徹, 拡張カルマンフィルタを用いたセンサスケジューリング則とその実験的検証, 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング(NC)研究会, 金沢, (2008. 5. 23)

⑩ 中曾 裕次郎, 滑川 徹, GIMC 構造に基づく耐故障制御系のための故障検出, 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, (2008. 3. 5)

⑪ 川上 裕樹, 滑川 徹, Consensus Filter を用いた対象物の協調取り囲み行動, 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, (2008. 3. 5)

⑫ 吉田 航瑛, 滑川 徹, 通信遅延を有するテレオペレーションの状態予測に基づく同調制御, 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, (2008. 3. 5)

⑬ 滑川 徹, 河田 久之輔, 藤田 裕之 通信遅延の変化率に依存しないテレオペレーション制御, 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, (2008. 3. 5)

⑭ 吉田 航瑛, 滑川 徹, 通信遅延を有するテレオペレーションの予測型 PD 制御, 第 50 回自動制御連合講演会, 横浜, (2007. 11. 24)

⑮ 河田 久之輔, 滑川 徹, 時変の通信遅延を有する非線形テレオペレーションのバイラテラル制御, 第 36 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム 資料, pp. 429-432, 札幌, (2007. 9. 7)

⑯ 川上 裕樹, 滑川 徹, 仮想構造を用いた非ホロノミックエージェントによる取り囲み行動, 第 36 回計測自動制御学会 制御理論シンポジウム 資料, pp. 499-502, 札幌,

(2007. 9. 7)

⑰ 吉岡 愛, 滑川 徹, 通信遅延を考慮したマルチビークルシステムの Flocking 制御, 第 36 回計測自動制御学会 制御理論シンポジウム 資料, pp.19-22, 札幌, (2007. 9. 5)

[その他]

○招待講演 (計 1 件)

① 滑川 徹, マルチエージェントシステムとフォーメーション制御～合意問題とビークルフォーメーション制御～, SICE 第 7 回特別チュートリアル講演会, 米沢, (2008. 11. 22)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

滑川 徹 (NAMERIKAWA TORU)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号: 30262554