

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560421

研究課題名(和文) 階層分散型最適制御とその運動制御モデルへの応用

研究課題名(英文) Hierarchical and distributed optimal control and its application to a motor control model

研究代表者

若佐 裕治 (WAKASA YUJI)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：60263620

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模最適化問題の分解手法である主分解、または双対分解をマルチエージェント系のフォーメーション問題、コンセンサス問題などの制御問題に適用し、階層分散構造をもつ制御アルゴリズムを提案した。また、主分解と双対分解を同時に実行することで、全体システムの安定性を保証しつつ、エージェント間の通信負荷を低減できるアルゴリズムを提案した。さらに、双対分解による階層分散型制御の応用として、脊髄を中心とした運動制御系の構造との類似性に着目し、新たな運動制御モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have applied a primal or dual decomposition technique for large-scale optimization problems into control problems such as formation and consensus problems for multi-agent systems and have proposed control algorithms with hierarchical and distributed structures. Moreover, we have proposed an algorithm in which primal and dual decomposition algorithms are simultaneously performed, so that the stability of the overall system is guaranteed and the computational burden is reduced. Exploiting the analogy between dual decomposition and motor control systems, we have a novel motor control model that contains hierarchical and distributed structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：最適制御、双対分解、運動制御モデル

1. 研究開始当初の背景

動的システムである複数のエージェントが情報交換を行って、全体システムとして何らかの目的を達成するという、いわゆるマルチエージェント系の研究が研究開始当初、盛んに行われていた。このような研究において、階層的、分散的な計算構造を考えることが必要であった。

一方、古くから大規模最適化問題の分解手

法として、主分解、および双対分解が知られており、主に当時の計算機能力の負荷分散を目的として、最適化問題のみならず制御問題への応用も検討されていた。これらの分解手法は元の大規模問題を各エージェントに対応する複数の小規模問題に分解し、個々にそれらの問題を解くことと、エージェント間の情報交換の繰り返しによって実行される。また、その手法において生じる計算構造は、階

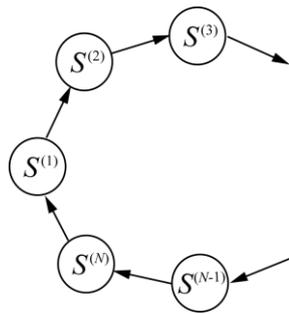


図1: 主分解におけるネットワーク構造

層的、分散的であるという特徴をもっている。しかし、フォーメーション問題、コンセンサス問題などのマルチエージェント系の制御問題に対して、主分解、双対分解を用いた研究はあまり行われておらず、このような分解手法の応用には意義があると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、主分解、および双対分解という最適化における分解手法をマルチエージェント系の制御問題に応用することを試みる。これによって、大規模制御問題を小規模の部分問題に分解し、各エージェントにおける負荷の小さい計算とエージェント間の負荷の小さい通信で実現できる制御系が構築される。この制御系は一つの目的に対して、目的を二つのレベルに階層化したと捉えることができる。また、目的が複数に分散化されたと考えることもできる。

上述のマルチエージェント系の制御の研究は理論的な研究であるが、具体的な応用としては、移動ロボットや無人移動体のフォーメーションや協調作業がある。本研究では、視点を少し変え、神経筋骨格系の運動制御に対する応用を検討する。人間を含む動物においては、脳からの指令信号が神経を介して骨格筋に伝達され、なめらかな運動が実現されている。この運動制御の計算原理を解明することを目指して、さまざまな研究が行われているが、生物学的な知見により、脳神経系には機能的な階層構造があり、並列分散的な処理が行われている。とくに、脊髄では脳からの運動指令を受けるとともに、複数の脊髄分節にまたがる介在ニューロン間で運動指令を加工、処理し、運動ニューロンを通して多くの

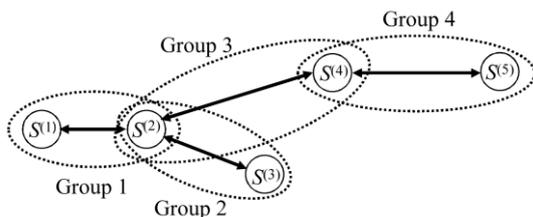


図2: 双対分解におけるネットワーク構造

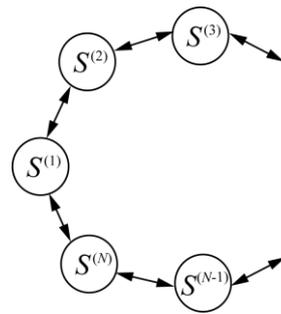


図3: 主双対分解におけるネットワーク構造

筋の協調的活動を生み出している。このように脊髄は並列分散的な運動制御において重要な働きをしていると考えられている。ここで注目すべきなのは、脊髄を中心とした運動制御システムの信号や処理構造が、双対分解による並列分散的な制御問題の解法と多くの類似点をもっていることである。本研究では、このことに着目し、神経筋骨格系に対する双対分解による分散型運動制御モデルを提案する。

以上のように、本研究の目的は大きく分けて二つあり、一つは最適化の分解手法によるマルチエージェント系の制御法に関する理論的な考察、もう一つは運動制御モデルへの応用研究である。

3. 研究の方法

本研究では主に4つのテーマを扱った。以下、テーマ別に研究の方法を述べる。

(1) 主分解による分散型制御

図1のように各エージェント $S^{(i)}$ の情報伝達がサイクリックに行われる場合を扱う。これは主分解の手法自体が要求する仮定である。また、各エージェントは同一の線形離散

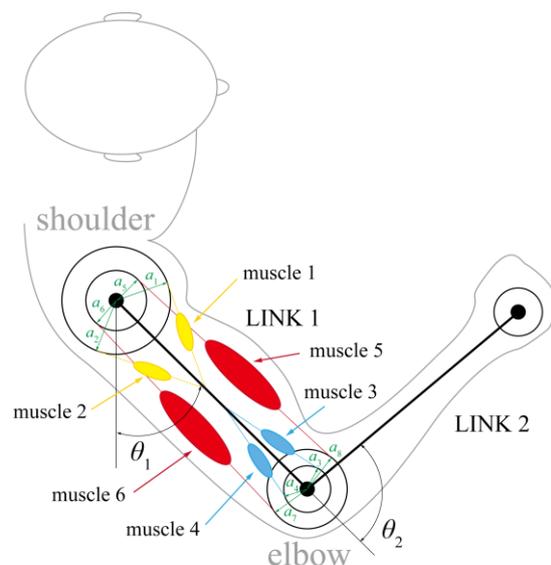


図4: 2関節6筋腕モデル

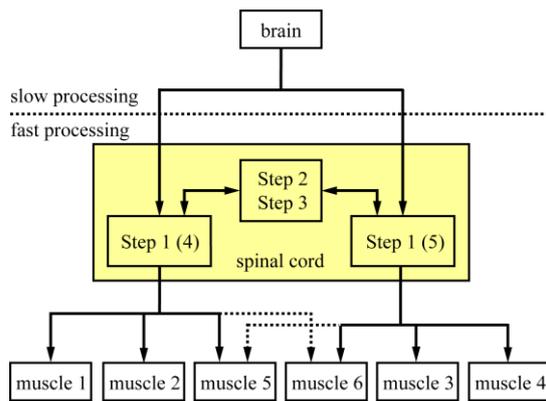


図 5: 双対分解による運動制御モデル

時間システムである。先行研究において 1 重、あるいは 2 重積分器のダイナミクスをもつシステムを扱っているものが多いことを考えれば、より一般的な場合を扱っていることに注意する。このようなマルチエージェント系に対するコンセンサス問題を考察した。コンセンサス問題はすべてのエージェントの状態を共通点に収束するように制御する問題である。共通点が事前に与えられているならば、この問題はサーボ問題となるが、共通点はエージェントの任意の平衡点となり得る点が異なっている。コンセンサス問題は適切な問題設定の変更によって、フォーメーション問題に帰着できるなど、さまざまな応用が考えられる。

この問題に対して、共通点への収束速度と制御コストを考慮して、まず線形行列不等式 (LMI) に基づくモデル予測制御法により定式化した。この方法はフィードバックゲインを逐次変更するため、収束性がよく、また入力ハード制約を扱うことが可能などの特長がある。定式化された問題が凸最適化問題であることに注意して、これを主分解により、各エージェントに対応した小規模問題に分解する。ここで、元の問題を解くためには、各エージェント間でサイクリックに情報を伝達する必要性が生じる。理論的な保証として、提案法によってエージェントが共通点に収束するという定理を与えた。

以上のようにして導出したアルゴリズムの有効性を数値例を用いて検証した。[雑誌論文⑤]では、状態のコンセンサス問題を扱ったが、出力のコンセンサス問題に拡張することも可能である。

(2) 双対分解による分散型制御

本テーマでは、双対分解を扱うため、エージェント間の情報交換のトポロジーは主分解に比べ、制約が緩やかになる。例えば図 2 のようなサイクリックではない情報交換の構造をもつシステムの取り扱いが可能となる。このようなネットワーク構造の仮定のみ

でなく、雑誌論文②では、各エージェントのダイナミクスが同一であるという仮定を取り除くとともに、状態ではなくより一般的な出力のコンセンサス問題を扱った。制御に用いる方法としては、主分解と同様、LMI に基づくモデル予測制御法であり、定式化された凸最適化問題の双対分解による解法を導出した。共通点への収束性に関する定理は主分解の場合と同様に与えた。また、[雑誌論文④、⑥]では、フォーメーション問題を扱った。これらのアルゴリズムの有効性を数値例によって検証した。

(3) 主双対分解による分散型制御

分解主分解、あるいは双対分解のいずれによっても、各サンプリング時間において、複数回の最適化の反復実行が必要であり、またエージェント間での情報交換、すなわち通信が必要である。この通信負荷を低減させるために、主分解、あるいは双対分解の単独利用ではなく、これらを同時に実行する方法を提案する。この方法が適用できるエージェントのネットワーク構造は図 3 のようにサイクリックな構造となる。基本的なアイデアは主分解が全体の最適化問題の最適値の上界を与え、双対分解は下界を与えるということである。このことを利用し、最適化の反復を途中で打ち切っても、コンセンサス問題において共通点への収束性を保証することのできるアルゴリズムを提案する。[雑誌論文①、③]では数値例によって提案アルゴリズムの有効性を検証した。

(4) 双対分解による神経筋骨格系の運動制御モデル

図 4 の 2 関節 6 筋の腕モデルを用いて、脳から与えられた運動指令トルクに基づいて、分散的に筋の活動度を計算する構造を考察する。生体の運動においては、何らかの最適な計算が行われていると仮定し、筋の活動度に関する最適化問題を定式化し、これを双対分解によって解く方法を示す。このとき、計算の処理過程には、脊髄を中心とした階層構造、および並列分散的な構造が現れる (図 5 参照)。従来の計算論的な運動制御モデルと比較しつつ、新たなモデルを提案した。

4. 研究成果

本研究の成果はつぎのようにまとめられる。大規模最適化問題の分解手法である主分解、または双対分解をマルチエージェント系のフォーメーション問題、コンセンサス問題などの制御問題に適用し、階層分散構造をもつ制御アルゴリズムを提案した。また、主分解と双対分解を同時に実行することで、全体システムの安定性を保証しつつ、エージェント間の通信負荷を低減できるアルゴリズム

を提案した。これらのアルゴリズムの有効性を数値例によって検証した。さらに、双対分解による階層分散型制御の応用として、脊髄を中心とした運動制御系の構造との類似性に着目し、新たな運動制御モデルを提案した。

以上のように、本研究は最適化問題の主分解、双対分解という、他分野ではあまり知られていない技法を分散型制御、および運動制御モデルに適用し、新たな研究の方向性を示したことに意義があると考えている。

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 7 件)

- ①Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura: A distributed consensus algorithm via LMI-based model predictive control and primal-dual decomposition, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 4, 2011 (to appear). 査読有.
- ②Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura: Distributed output consensus via LMI-based model predictive control and dual decomposition, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 7, no. 10, 2011 (to appear). 査読有.
- ③Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura: A distributed consensus algorithm via LMI-based model predictive control and primal/dual decomposition methods, *Proc. 2010 IEEE International Conference on Control Applications, Parts of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pp. 2047-2052, 2010. 査読有.
- ④若佐裕治, 荒川瑞恵, 田中幹也, 明石卓也: 双対分解による分散型モデル予測制御, システム制御情報学会論文誌, vol. 22, no. 10, pp. 357-363, 2009. 査読有.
- ⑤Yuji Wakasa and Kanya Tanaka: A decentralized consensus algorithm via LMI-based model predictive control and primal decomposition, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 2, no. 5, pp. 277-282, 2009. 査読有.
- ⑥Yuji Wakasa, Mizue Arakawa, Kanya Tanaka, and Takuya Akashi: Decentralized model predictive control via dual decomposition, *Proc. 47th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 381-386, 2008. 査読有.
- ⑦Yuji Wakasa, Yuya Watanabe, Akira

Yoshida, Kanya Tanaka, and Takuya Akashi: Response improvement of shape memory alloy actuators with Peltier elements, *Proc. 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (CD-ROM)*, 2008. 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

- ①浜田美智典, 岩本明文, 若佐裕治, 田中幹也, 西村悠樹: 神経筋骨格系に対する双対分解に基づく分散型運動制御モデル, 第19回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 128-129, 2010. 11. 28, 松江(島根大学).
- ②若佐裕治: 双対分解に基づく神経筋骨格系の分散型運動制御モデル, SICE中国支部グループ研究会(インテリジェント制御研究会), 2010. 11. 25, 総社(岡山県立大学).
- ③若佐裕治, 田中幹也, 西村悠樹: 双対分解に基づく神経筋骨格系の分散型運動制御モデル, 第39回制御理論シンポジウム資料, pp. 75-78, 2010. 9. 27, 大阪(ホテルコスモスクエア国際交流センター).
- ④岩本明文, 荒川瑞恵, 若佐裕治, 田中幹也, 西村悠樹: マルチエージェントシステムの分散型モデル予測制御, 第11回IEEE広島支部学生シンポジウム予稿集, pp. 472-475, 2009. 11. 21-22, 宇部(山口大学).
- ⑤若佐裕治, 荒川瑞恵, 岩本明文, 田中幹也, 西村悠樹: 主双対分解による分散型モデル予測コンセンサス, 第38回制御理論シンポジウム資料, pp. 285-288, 2009. 9. 16, 大阪(ホテルコスモスクエア国際交流センター).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若佐 裕治 (WAKASA YUJI)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 60263620

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし