氏　　名	ソウ　イレン
所　　属	理工学研究科　機械工学専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	理工博　第245号
学位授与の日付	平成29年9月30日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	Coordination Control of Multi-Robot Systems with Time Delays むだ時間を持つマルチロボットシステムの協調制御　（英文）
論文審査委員	主査　教授　小口　俊樹 委員　教授　吉村　卓也 委員　教授　長谷　和徳 委員　教授　Nijmeijer, Henk(Eindhoven University of Technology)

【論文の内容の要旨】

センサーやアクチュエーターの廉価化とネットワーク通信技術の発達に伴い，個々のシステムが相互に情報交換をし，それぞれの相互作用によりネットワーク化されたシステムの大規模化が進んでいる．このようなシステムのネットワーク化により大規模・複雑化したシステムに対する制御問題は，マルチエージェントシステムの協調制御問題として，制御理論の観点からも近年，活発に研究が行われている．これらの研究は，自律移動型ビークルの群制御や，センサーネットワーク，電力ネットワークのスマートグリッド化などの工学的応用としてだけでなく，システムバイオロジーや社会ネットワークなど，自然科学から社会科学に至る広範な学際的研究課題と深く関係しており，グラフ理論や同期理論などと融合した新たな制御理論の創出を目指して研究が進められている．そのような中で，本論文では，マルチエージェントシステムの協調制御を実システムに適用する際の障害として現れる相互作用における遅延時間に着目し，その影響を明らかにするとともに，補償法について検討している．特に，小型の二輪車両ロボットをエージェントとしたマルチエージェントシステムを対象とし，エージェント間の通信における遅延時間が存在する場合について，基本的な協調制御問題である合意(コンセンサス)制御問題を中心に検討し，新たな制御手法として，同期に基づく状態予測を遅延補償として導入した制御手法を提案している．

本論文は，以下の通り全7章から構成されている．

第 1 章では，本論文の研究背景と目的についてのべ，多数の同一ダイナミクスを持つシ

ステムがネットワーク化されることで実現されるマルチエージェントシステムについて，その研究動向を紹介している．特に，本論文で検討する遅延結合マルチエージェントシステムついて，その協調制御の基礎となるコンセンサス問題に対する研究動向を概観し，本論文で扱う制御問題の意義を明確にしている．

第 2 章では，本論文を読み進めるために必要な事柄を簡潔にまとめている．さらに本論文で検討するコンセンサス問題の定式化を行い，さらに．情報通信遅延がコンセンサス問題に与える影響を明確にするため，代表的な積分器システムを対象とした結果について簡潔に紹介する．さらに，本論文を通じて扱う二輪車両ロボットの数学モデルと，そのダイナミクスのもつ特徴について述べている．

第 3 章では，入力むだ時間を持つマルチエージェントの無向グラフネットワークにおけるコンセンサス問題について検討し，その同期条件の導出を行っている．双方向遅延結合においては，ある完全グラフネットワークにおける同期条件に基づき，任意の双方向結合ネットワークシステムの同期条件が推定できるというスケーリング則が成り立つことが明らかにされているが，同様のことが線形化フィードバックを施して結合される二輪車両ロボットシステムのコンセンサス問題についても成り立つことを，理論と数値実験により検証している．

第 4 章では，むだ時間補償法として，各エージェントにおいて先行同期に基づく状態予測器を用いた協調制御問題を検討している．先行同期に基づく状態予測器は，予測可能な未来値については制約があるものの，非線形システムに対しても適用可能な状態予測器である．本章では，各二輪車両エージェントのコンセンサス問題について，異なるセンサー情報に基づく局所的な情報と大域的な情報が存在する場合を考え，各エージェントが独自に方向角を利用可能とした場合に，局所的な制御器と他のエージェントとの相対的な信号に基づく制御器に加え，先行同期に基づいて一部の状態に対する状態予測器を併用する制御器を提案している．このような予測器と線形化フィードバックを併用した制御器を用いた二輪車両ロボットの有向グラフネットワークにおけるコンセンサス問題について検討し，補償器を用いることで速応性の改善が可能であることを示している．

第 5 章では，4 章で検討した状態予測器を全状態予測器に拡張し，二輪車両エージェントの出力コンセンサス問題を検討している．この場合のコンセンサス条件は，非線形微分差分方程式となるため，必要十分条件を求めることはできないが，Lyapunov-Razumikhin アプローチを用いることで十分条件として，双線形行列不等式(BMI)の可解性に帰着できることを示した．さらに，Lyapunov-Krasovskii アプローチにより，より簡便で保守性の低い十分条件を導出している．加えて，ここでの手法の有用性を示すため，フォーメーション制御への応用を行っている．

第 6 章は，3 章から 5 章で検討した制御器と得られたコンセンサス条件の妥当性を検証するため，複数台の二輪車両ロボットを用いたコンセンサス制御とフォーメーション制御の実験検証を行っている．提案手法を実システムに適用するため，ロボット同士の衝突回避

アルゴリズムを併用した協調制御則を適用している．実験環境による影響はあるが，それぞれの章で得られた結果の妥当性を示している．

第 7 章は結論であり，本研究を通じて得られた成果を総括し，残された課題と今後の展望について述べている．