

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	水本 武志
論文題目	Temporal Synchronization among Interacting Individuals in Human-Robot Ensembles and Frog Choruses (人とロボットの合奏及びカエルの合唱における相互作用する個体間の同期)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、相互作用する個体間の時間同期モデルの構築を目指して、実世界で見られる同相同期と逆相同期の2つのケースについて、具体的なモデル化とシステムの実装に関する研究をまとめたものである。同相同期については、人とロボットとの合奏を、逆相同期については、ニホンアマガエルの合唱を取り上げている。 第1章は序論で、本研究の背景として、相互作用する個体間の時間同期モデルの構築の研究動機について述べ、同相同期では、音楽演奏ロボットの開発、演奏中の楽曲のオンセット時刻予想、合奏中の主導権推定という課題を指摘し、時間同期モデル、及び、共演者ロボットの開発の必要性を述べるとともに、逆相同期では、ニホンアマガエルの合唱の夜間での観測システム、時空間構造解析という課題を指摘し、合唱可視化システムの必要性、及び、音-光変換デバイスの必要性を述べている。 第2章では、音楽ロボット、共演者ロボット、及び、動物の音声コミュニケーションに関する文献、特に、合奏同期、合奏主導権、及び、バイオロッガー、音響信号処理についての従来研究を概観し、そこで得られた知見を基に、音楽演奏ロボットの開発とその合奏への拡張、及び、音-光変換デバイスの開発と合唱可視化システムへの拡張の必要性を指摘している。 第3章では、電子楽器テルミン演奏ロボットシステムの開発について述べている。テルミンは演奏に物理的接触が不要であり、多様なロボットで演奏可能であるものの、周囲の環境に敏感に反応して音高・音量が変わる問題がある。この環境依存性に対して、テルミンの音高モデルとUnscented Kalman Filter (UKF) によるモデルパラメータ追従を用いた適応的音高制御法を開発している。動的環境を再現したシミュレーション実験により、本手法がExtended Kalman Filterと一定期間音高を蓄積してパラメータを再推定するブロック毎再推定法と比べて音高誤差をそれぞれ90%, 77%削減できることを示している。また、テルミン演奏システムは、ロボットに依存しないキャリブレーション部分とロボットに依存した手先移動部分に分けて設計しており、複数のヒューマノイドロボットに実装し、汎用性の高いシステムとなっていることを示している。 第4章では、結合振動子を用いた2人合奏モデルの構築について述べている。人とロボットにそれぞれ振動子を割り当て、人の演奏のオンセット時刻を用いて結合モデルを更新する。本モデルを用いて、人と合奏をするテルミン演奏ロボットを開発している。人との合奏実験により、従来の外挿による予測に比べて人の演奏のオンセット予測誤差を平均46%削減することを示している。 第5章では、前章までに開発してきた2人合奏モデルを多人数合奏モデルに拡張するために、合奏中の相互作用の強さを推定するリーダー度の設計と実装について述べている。2人組と3人組の被験者によるタッピング実験により、リーダー度が正しく主導権遷移を捉えること、及び、本手法が人と同程度のオンセット予測性能を持つこ			

とを確認している.

第6章では, 音-光変換デバイス「カエルホタル」と動画解析手法について述べている. カエルホタルがフィールド実験に耐えることを特性計測により示し, シミュレーション実験でカエルホタルを対象動物の密度より約6倍の密度で設置する必要があることを明らかにしている. また, ニホンアマガエルを用いた室内と屋外の実験で, 逆相同期, 1対2逆相同期の観測に成功しており, これより結合振動子による合唱の数理モデルが野外でも妥当であることを示唆している.

第7章では, 本研究のまとめを行い, 2つのケースに対して結合振動子のモデル化が有効であり, 相互作用する個体間の時間同期モデルに関する関連研究に対する, 本研究の主要な貢献について述べるとともに, 残された課題や今後の方向性についても考察を行っている.

第8章では, 本論文の結論を述べている.

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、相互作用する個体間の時間同期モデルの構築を目指して、実世界で見られる同相同期と逆相同期の2つのケースについて、具体的なモデル化とシステムの実装に関する研究をまとめたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. 電子楽器テルミン演奏ロボットに、人の演奏のオンセット時刻を用いて結合振動子のモデルを更新する機構を導入し、人と合奏するロボットを開発し、人との合奏実験により、従来法と比べて人の演奏のオンセット予測誤差を平均46%削減できることを示していること。さらに、テルミン演奏法として、ロボットに依存しないキャリブレーション部とロボットに依存する手先制御部に分割した実装法を開発したこと、及び、複数のロボットに容易に移植できる汎用性の高いシステムであることを実証したこと。
2. 多人数合奏モデルに拡張するために、合奏中の相互作用の強さを推定するリーダー度を設計し、リーダー度が合奏の主導権遷移をモデル化し、人と同程度のオンセット予測性能を有することを確認し、同相同期に対して、線形結合子によるモデル化が妥当であることを示していること。
3. 夜行動物の音声コミュニケーション観測システムとして、音-光変換デバイス「カエルホタル」とその動画解析技術を開発し、カエルホタルがカエルの合唱の観測に有効であることを確認し、さらに、同システムを使用して、ニホンアマガエルの合唱で、逆相同期、1対2逆相同期の観測に室内及び屋外で成功しており、結合振動子による数理モデルが野外でも妥当であることを示唆していること。特に、これらの成果は、Animal Behavior誌掲載の60周年記念エッセイでも引用されており、今後の動物の音声コミュニケーション観測への貢献が期待されている。

以上本論文は、結合振動子を用いて、相互作用する個体間の時間同期モデルの構築法を確立し、ロボットと人との合奏における同相同期、及び、ニホンアマガエルの合唱における逆相同期について、具体的なシステムを構築し、その有効性を実証したことに意義がある。特に、ロボット個体に依存しないテルミン演奏法の確立は、音楽共演ロボットの普及に対する重要な成果と考えられ、人とロボットとの共生への貢献が期待され、カエルホタルによる動物の音声コミュニケーション観測システムは、野外でロバストな観測法の確立という重要な成果と考えられ、動物音響学やフィールド情報学への貢献が大きく期待されており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成25年2月28日実施した論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。