

## 審査の結果の要旨

氏名 ピティ アレキサンドレ

本論文は、Phase Synchronization Between Internal and Body Dynamics for Exploration, Memory, and Control of Embodied Behavior(和訳:身体行動の探索・記憶・制御のための内部および身体ダイナミクス間の位相同期)と題し、8章からなる。本論文は、身体性に基づく知能のため、ダイナミカルシステム間の同期現象に基づき、探索、記憶、制御を統一的に扱うメカニズムを提示することを目指した研究である。まず、カオス振動子系と帰還共鳴による位相同期現象に基づき、脚歩行型や30自由度リング型などを含む任意の自由度と形態のロボット機構の未知の固有ダイナミクスに対し、固有モードを顕在化、分離して多様な行動を創発させる方法を提示した後、その原理を発展させて新たに提案した多層カオス結合格子(Multi-Layer CML)モデルが、位相同期現象に基づく適応的記憶・再生機能を有することを示し、これをテレビカメラ画像の記憶、人間型身体モデルでの運動の教示と再生、二脚ロボットモデルの歩行モードの自発探索と記憶と制御、に順次適用・解析することで、同モデルがダイナミクス構造の探索・記憶・制御の機能を併せ持つことを示した。また、これら実験の解析のため、高次元力学系の振る舞いの全体的構造の分析手法として、1)各自由度間の時空間相関構造を一括して抽出・表現するウェーブレット分岐ダイアグラム法、2)2信号間の各時間尺度ごと、および単一信号内の各時間尺度間、の因果関係測度を抽出する時間階層型因果解析法、を提案し活用している。第1章、Introduction(序論)では、本研究の背景、立場、目的について述べている。

第2章、Synchronization, a Central Role for Cognition(認知において中心的な役割を果たす同期現象)においては、近年の認知科学の知見を踏まえ、認知の中で同期現象が果たす役割について論じている。特に、神経科学で知られる、神経集団間のコミュニケーション、生理学で知られる、脳活動と身体運動の協調、および発達心理学で知られる、社会的相互作用等において、位相同期現象が重要な役割を果たしているとの知見を引用し検討している。

第3章、Emergence in Nonlinear Systems(非線形系における創発)では、複数のカオス写像を双方向結合して、連鎖構造とネットワーク構造の両方の特性を併せ持つようにした新たなモデルを提案している。そして、位相同期時には、このモデルが位相固定ネットワークとして振る舞うことで、各要素が情報の入出力と記憶の機能を有することを示している。

第4章、Analysis Methods(解析手法)では、高次元複雑系に現れる時空間パターンとサブシステム間の動的因果関係を解析する手法を提示、提案している。新規提案としては、要素間および要素集団間の時空間相関を抽出表示するウェーブレット分岐ダイアグラム法、および、2種類の多階層因果性指標がある。

第5章、Emergence and Exploration of Behavioral Patterns, Stability and Bifurcation(行動パターンの創発と探索、安定性と分岐)では、カオス振動子群の特性を活用して、任意の対象システムの固有振動数に同期し励起する方法を提案し、実験的に検証している。これにより、任意のロボット機構について、その固有ダイナミクスを探索し、カテゴリ化することができる。実験では、コンパス型2脚モデル(1自由度)の歩行、犬型2脚モデル(2自由度)の歩行や跳躍、環型バネマスダンパモデル(30自由度)の多様なロコモーションなどの行動創発が、対象システムに関する詳細知識なしに起こることを示した。

第6章、Implication of Synchronization for Development and Embodiment(発達と身体性における同期の意味)では、提案したカオスネットワークモデルを人体型モデルに適用し、他者が外部から四肢を動かす教示が、位相同期時にのみ、内部記憶に反映し、その後のネットワーク動作により様々な動作パターンに発展することを示した。これを踏まえて、発達論的な見解を展開した。

第7章、Control, the Dual View of Synchronization(制御:同期のもう一つの側面)では、前述の内部モデルを再びコンパス型2脚歩行モデルに適用し、歩行モードの探索、記憶、制御(安定化)が同一のモデルで実現されることを示した。運動パターンは、特定の位相関係を保持した内部振動パターンによって記憶されている。これにより、前章までの内容が統合され、身体性に基づく認知発達の基本要素(探索、記憶、制御)を提案モデルで統一的に扱えることを示した。

第8章、Conclusion(結論)では、上述の結果を総括し、身体の物理現象から記憶などの情報現象までを一貫した力学系的モデルで扱えたことを主張している。また、提案した解析手法が一般の高次元力学系の振る舞いの解析に有用であることを主張している。

以上要するに、本論文は、対象システムに関する詳細知識なしに、その物理特性を活用した運動を探索し、記憶し、制御することのできる統一的モデルを提示し実験的に検証し、また、その解析手段として高次元力学系の挙動を明快に抽出表示する新規手法を提案し、もって創発的知能システムに関する新たな知見を加え、知能機械情報学の発展に貢献したものである。

よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。