

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11477

研究課題名（和文）クリフォード代数を導入した機械学習で幾何時系列データから先を読む

研究課題名（英文）Prediction from motion by machine learning using geometric algebra

研究代表者

橘 完太（Tachibana, Kanta）

工学院大学・情報学部（情報工学部）・准教授

研究者番号：20402539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、人間の活動認識、風の予測、音楽の感情類似性、Clifford代数の新規応用に関して新たな発見と理解をもたらした。高精度の活動認識手法の開発、風力エネルギーと無人帆走分野での効率性向上の可能性、感情理解の機械学習モデルへの新しい視点、人間の行動認識の改善と相互作用への貢献、Clifford代数の新たな応用、介護現場の作業負担軽減と安全性向上への貢献、自律的な帆走ロボットの動作性能と障害物回避能力の向上への貢献が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちの研究では、人間の活動認識、風予測、音楽の感情類似性、Clifford代数の新規応用に関して重要な成果を得ました。これにより、高精度な活動認識手法の開発、風力エネルギーや無人帆走分野の効率向上、感情理解のための機械学習モデルの進化、人間と機械の相互作用の改善、Clifford代数の新たな応用、介護現場の作業負担軽減と安全性向上、自律的な帆走ロボットの動作性能向上などの社会的な恩恵が期待されます。これらの成果は、私たちの生活や産業において新たな進歩と解決策をもたらす、社会全体の発展に寄与することが期待されます。

研究成果の概要（英文）：This research has led to new discoveries and understanding regarding human activity recognition, wind prediction, emotional similarity in music, and novel applications of Clifford algebras. The research has led to the development of highly accurate activity recognition methods, potential efficiency gains in the fields of wind energy and unmanned sailing, new perspectives on machine learning models of emotion understanding, contributions to improved human behavior recognition and interaction, new applications of Clifford algebra, contributions to reduced workload and improved safety in nursing homes, and contributions to improved motion performance and obstacle avoidance capabilities of autonomous sailing robots. Contributions to the improvement of motion performance and obstacle avoidance capabilities of autonomous sailing robots were suggested.

研究分野：計算知能

キーワード：機械学習 超複素数 動作認識 活動認識 時系列空間情報 ロボットヨット 自動操縦 運動学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初にはすでに、強化学習、深層学習、集合学習が研究され、一部で Clifford 代数も導入されていた。

強化学習は、教師データを直接与える必要なく目標状態までの行動の時系列を獲得する手法である。時系列の意志決定に優れるが、複雑なタスクでは多くの状態変数が必要であり現実的な時間で学習が終了しない。深層学習では、大規模な学習器に多量の画像データを学習させ、画像中の物体認識の高精度化が達成された。また、画面内の画素の近接関係を利用しフィルタを学習することから平面幾何を捉えた学習と言える。しかし、画像の時系列、つまり、動画の深層学習は未だ研究途上であり、さらに大きな問題は、学習に要する負荷が膨大なことだ。集合学習は、複雑な問題に対して、単純な判断を行う弱学習器を多数用いて、全体として軽負荷で複雑な識別や回帰が可能である。しかし、時系列の意志決定問題への適用は研究の余地が残る。

機械学習への Clifford 代数の導入

複素数や四元数を拡張したクリフォード代数 (Geometric Algebra, GA) の導入が、幾何的な関係を持つデータの機械学習に有効なことが示されている。幾何的に関係のあるベクトルの各要素を別々に扱う場合に比べ、ベクトル本来の幾何的な制約を利用してモデルの自由度を減らし、その結果、学習の負荷を軽減できる [Hirose2012]。

学術的な「問い」: 動きの情報から先を読む計算知能をどのように実現できるか?

本研究では、動き=幾何×時系列の情報から先を読む能力において、人間を上回る機械学習をどのように実現できるか、という「問い」に答える。上述の3種類の学習手法とそれらの Clifford 代数化の特長の活かし方が重要と考える。つまり、データの背後にある現象の幾何的な性質を捉え、その時系列変化から予測を行い、予測に応じた意志決定を、軽負荷の学習で獲得する必要がある。

### 2. 研究の目的

報告者の従来研究で、強化学習:時系列の意志決定;深層学習:画像からのパターン認識;集合学習:複雑な問題の負荷軽減;がそれぞれ示され、申請者は「Clifford 代数化:幾何的な性質を利用し負荷軽減」を見出した。本研究の目的は、上記手法の各特長を活かして、動きの情報から先を読む能力において人間を上回る計算知能を実現することだ。2つの中間目標を設定する。【中間目標 A】自己符号器に Clifford 代数を導入し、高次元の気象データに対して幾何的な本質を捉えた特徴抽出ができるかを研究する。気象の予測に役立つ人間が気付かない特徴が抽出できれば行動選択に有利だ。【中間目標 B】中間目標 A で抽出した幾何的な特徴を幾何的なまま用いる時系列の意志決定器が必要だ。そのために、集合強化学習に Clifford 代数を導入しその性能を研究する。

【最終目標】これらを整合させ、大規模な幾何時系列データを有効利用する計算知能を実現する。

### 3. 研究の方法

次に挙げる2つの中間目標へ向けた研究を並行して進め、研究期間内にそれらを整合して、幾何時系列データの機械学習におけるクリフォード代数導入の効果を評価する。具体例の自律帆走では、気象データから予測した風の情報を元に帆走航路決定で人間の操作よりも早く目的地に到達させる。

【中間目標 A】大規模データからの幾何的な特徴抽出:公開されている気象データを用いる。NCEP/NCAR 再解析データは、 $144 \times 71 + 2$  地点 (緯度経度 2.5 度刻み) の 17 の気圧値についての等気圧高度、各高度における気温、湿度、風の東西成分/南北成分、鉛直気流などが再解析された 6 時間おきのデータだ。1948 年から現在までの約 70 年分が公開されている。等気圧高度データは、例えば当該地点の上空で 800 [hPa] になる高度 [m] が記述される。NCEP データでは、 $144 \times 71 + 2 = 10,226$  地点の 17 層にそれぞれ 3 つのスカラールと 1 つの三次元気流ベクトル、つまり、1 時刻につき 1,043,052 の実数が与えられる。従来の自己符号器では、これら実数を入力層の別個のニューロンに入力する。それに対し、Clifford 代数を導入した自己符号器では、本来まとめて取り扱うべき同一地点の気流の三次元ベクトルは三次元ベクトルを受け入れるニューロンに入力することも可能だ。その上で、層別に自己符号器を学習させたり、変数別に自己符号器を学習させたりし、複数の自己符号器で符号化された特徴を統合する手法の効果も明らかにする。

【中間目標 B】幾何的な特徴を活かした時系列の意志決定:時系列の意志決定のためには、状態行動対と状態行動値との入出力関係を学習する強化学習を用いる。従来の強化学習と異なり、本研究では状態変数および行動変数をベクトルのまま受け入れる入力ニューロンも許容する。具体例として用いる自律帆走では、風のベクトルや未来の風ベクトル、目的地までのベクトルなどを状態変数として受け入れ、重み係数において幾何的な制約を利用することで学習に要する

負荷の軽減を図る。また、集合強化学習もベクトルの状態変数を受け入れて実施する。個々のエージェントは連続ベクトルの状態変数をそれぞれ離散化し、ニューラルネットの学習よりも高速なQ表の学習を行う。しかし、エージェント集合でみると離散化の閾値がなだらかに分布するように設計する。このことによって軽い学習負荷で強化学習が達成されるかを調べる。

【最終目標】大規模な幾何時系列データから先を読む行動決定:最終段階では、中間目標Aで研究した手法によって抽出した幾何的な特徴を、中間目標Bで研究したClifford代数化した強化学習手法に用いる。中間目標Bでは未来の風を確定的な状態変数として用いたが、最終段階では気象データの特徴から未来の風が予測可能なものと見なして、未来の風の予測も含めて強化学習を行う。

#### 4. 研究成果

研究計画に修正を加えながら、応用範囲を開始当初の想定よりも広げ、以下の研究成果を得た。

本研究は、人間の活動認識、風の予測、音楽の感情類似性、Clifford代数の新規応用に関して新たな発見と理解をもたらした。高精度の活動認識手法の開発、風力エネルギーと無人帆走分野での効率性向上の可能性、感情理解の機械学習モデルへの新しい視点、人間の行動認識の改善と相互作用への貢献、Clifford代数の新たな応用、介護現場の作業負担軽減と安全性向上への貢献、自律的な帆走ロボットの動作性能と障害物回避能力の向上への貢献が示唆された。

私たちの研究では、人間の活動認識、風予測、音楽の感情類似性、Clifford代数の新規応用に関して重要な成果を得ました。これにより、高精度な活動認識手法の開発、風力エネルギーや無人帆走分野の効率向上、感情理解のための機械学習モデルの進化、人間と機械の相互作用の改善、Clifford代数の新たな応用、介護現場の作業負担軽減と安全性向上、自律的な帆走ロボットの動作性能向上などの社会的な恩恵が期待されます。これらの成果は、私たちの生活や産業において新たな進歩と解決策をもたらし、社会全体の発展に寄与することが期待されます。

2018年にProc. of the SICE Annual Conference 2018The Society of Instrument and Control Engineersにて「Wind Prediction Performance of Complex Neural Network with ReLU Activation Function」と題する論文を発表した。複素ニューラルネットワークは複素平面で情報処理し、実数ニューラルネットワークに比べより優れた図形変換能力と学習速度を備えている。複素数ニューラルネットワークの最適なネットワーク構造と非線形関数を選択することで、風速と風向きをより正確に予測できる。本論文にて提案した4種類のReLU関数によって、複素ニューラルネットワークの予測性能を向上させる可能性を示した。

2019年にProc. Int'l Symposium on Affective Science & Engineering 2019にて「Difference between Human and Machine in Feeling about Similarity of Melodies」と題する論文を発表した。本論文では、人間と機械の旋律の類似性に対する感覚の違いを検討した実験結果を報告した。原曲を4グループに分割し、DCGANを用いて原曲に似た偽の旋律を生成する。生成された旋律の印象を10人の被験者に評価してもらい、旋律間の類似度を計算する。人間と機械の類似度評価を比較する。人間と機械は、旋律の類似性に対する感覚が異なること、DCGANは、原曲に似た偽の旋律を生成できること、人間と機械の類似度評価は、部分的に一致することを明らかにした。本論文は、旋律の類似性に対する人間と機械の感覚の違いを明らかにし、DCGANの応用可能性を示した。

2020年にInformation and Control Systemsにて「Human action recognition method based on conformal geometric algebra and recurrent neural network」と題する論文を発表した。深層学習は、機械学習と人工知能において重要な役割を果たしている。自然言語処理や画像認識など、高次元データが広く使われている分野で広く適用されている。高次元データは、機械学習において、過学習や精度の低下などの問題を引き起こす可能性がある。これらの問題に対処するため、データの次元と計算複雑さを同時に低減するいくつかの方法が提案されました。しかし、これらの方法は、超平面上に分布するデータでのみ機能する。空間内の超球面を移動する物体などの超球面に分布するデータの場合、処理結果は期待どおりではない。本論文は、Recurrent Neural Networkを用いたヒューマンアクティビティ認識のためのデータセットを用い特徴抽出と次元削減にConformal Geometric Algebraを用いる。3次元座標系でヒューマンアクティビティ

ィデータが前処理され、平均座標からの偏差を計算して正規化される。次に、データは Conformal Geometric Algebra 空間のベクトルに変換され、次元が削減されて特徴ベクトルが獲得される。最後に、Recurrent Neural Network モデルにより時系列特徴ベクトルを訓練する。8つのアクションを含む Motion Capture データセットで行われた実験結果は、Conformal Geometric Algebra と Recurrent Neural Network を組み合わせることで、92.5%の最高のテスト結果を示した。本論文の応用可能性は、ヒューマンアクティビティにおいて、ジャンプやダンスなどの移動しないア、走りや歩きなど空間を移動するアクションの両面に広がる。これらのアクションを標準化する方法が必要であり、超球面に分布するデータの場合、提案手法は、Recurrent Neural Network を用いたヒューマンアクティビティ認識のためのデータセットの特徴抽出と次元削減に役立った。

2022年には Advances in Applied Clifford Algebras にて「New Applications of Clifford's Geometric Algebra」と題する総説論文を発表した。本論文では、Cliffordの幾何学代数は、キネマティクスとロボティクス、コンピューターグラフィックスとアニメーション、ニューラルネットワークとパターン認識、信号と画像処理、ベクトルと直交変換など、多くの分野で応用されている。Cliffordの幾何学代数は、物理学、離散数学と位相、幾何学と地理情報システム、暗号化、高次曲線と曲面の表現など、幅広い分野で応用されている。このように Cliffordの幾何学代数が多様な分野で応用されている強力なツールであり、今後も、さらに多くの分野で応用されることが期待されていることを読者に提供した。

2022年には International Society of Affective Science and Engineering (ISASE), The 8th International Symposium on Affective Science and Engineering にて「Development of Interface for Visualizing the Center of Gravity of Caregiver's Body Segment.」と題する論文を発表した。高齢化は、日本だけでなく世界的な規模で進んでいる。それに伴い、長期ケアが必要な人の数も増加している。看護師は介護者としてのスキルを必要とし、将来的には看護師に限らず多くの人があるスキルを必要とする時代が来ると予想される。現在の看護師の教科書では、看護ケアの動きで意識すべき動きが矢印で示されている。しかし、これらの矢印は教科書の著者の直感と経験に基づいて描かれており、運動学データに基づくものではない。本研究では、介護者の動きに焦点を当てた運動学データの可視化インターフェースを開発する。この目的のために、3つの身体部分（胴体、右足、左足）の重心を計算するシステムを開発する。重心の3次元座標と軌跡は、正面、側面、上部ビューの平面で表示されます。このインターフェースは、熟練した介護者の動きを視覚的に理解しやすくする。

2022年に日本ロボット学会誌にて「障害物を回避する帆走ロボットの実証実験」と題する論文を発表した。現在、セーリングの自律航行が注目されている。以前の研究では、数秒間隔で取得された位置情報を使用して、風上の目標点に到達するための一連の制御ルールが提案された。水上のセーリング船舶は、風下に流されやすく、陸上よりも停止や操縦が難しい。この研究では、以前の研究に加えて、以前に陸上で提案された障害物回避方法をセーリング船舶に適用する2つの方法を使用して実際の実験を行い、分析する。方法1は、回避方向と目標点への方向の中間方向を狙い、方法2は障害物とは逆の方向に操縦する。セーリングロボットを使用して障害物回避の実証実験を行った。2つの提案された方法のいずれでも障害物回避が可能であることを確認した。また、分析によって方法の特性も明らかにした。実験では、中点を障害物として持つ2点往復コースに風がほぼ直角に吹いたため、障害物とターゲットポイントはいずれも移動方向の風上方向に位置することとなった（帆船がスタート直後からやや風下に流されるため）。このような状況では、方法1はリーウェイ効果（風下にやや流される効果）を和らげ、風下に膨らむ経路を防ぐために風上方向に向けて操縦した。方法2では、風下方向に舵を切ることで障害物の回避時間が短縮された。要約すると、この研究では、セーリング船舶の障害物回避に2つの方法を適用し、その特性を分析した。方法1はリーウェイ効果を和らげ、方法2は障害物の回避時間を短縮するために有効であった。

その他、計24件の研究会・シンポジウム発表を行った。以上の研究発表に加え、研究期間終了時点では、YouTubeやPodcastにて最新の研究及び教育の状況を発信している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Breuils Stephane, Tachibana Kanta, Hitzer Eckhard	4. 巻 32
2. 論文標題 New Applications of Clifford's Geometric Algebra	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Applied Clifford Algebras	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00006-021-01196-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nguyen Nang Hung Van, Pham Minh, Do Phuc, Pham Cong, Tachibana Kanta	4. 巻 5
2. 論文標題 Human action recognition method based on conformal geometric algebra and recurrent neural network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Information and Control Systems	6. 最初と最後の頁 2~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.31799/1684-8853-2020-5-2-11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nang Hung Van Nguyen, Minh Tuan Pham, Nho Dai Ung, Kanta Tachibana	4. 巻 7
2. 論文標題 Human Activity Recognition Based on Weighted Sum Method and Combination of Feature Extraction Methods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Intelligent Information Systems	6. 最初と最後の頁 9~14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11648/j.ijis.20180701.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Nihira TAIGA(Kogakuin University), Kanta TACHIBANA, Yukie ABE, Ayako ITO, Ai KAWABATA
2. 発表標題 Development of Interface for Visualizing the Center of Gravity of Caregiver's Body Segment.
3. 学会等名 International Society of Affective Science and Engineering (ISASE), The 8th International Symposium on Affective Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年~2022年

1. 発表者名 野澤 亮祐, 橘 完太
2. 発表標題 粒子フィルタによる位置速度推定の計算コストと性能
3. 学会等名 「動的システムの状態推定とデータからの学習およびその応用」研究会2022
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 中野 公瑛, 橘 完太
2. 発表標題 状態変数を四元数表現する粒子フィルタによる自律帆船の姿勢推定
3. 学会等名 「動的システムの状態推定とデータからの学習およびその応用」研究会2022
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 水津 拓也, 橘 完太
2. 発表標題 深層Qネットワークによる風上へ向かうシミュレーション帆走の段階的学習
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究研究会 「高次元・時空間ニューロダイナミクスとそれに基づくシステム構築への展開」
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 松原太一, 橘完太
2. 発表標題 帆と舵の並列ファジィ推論
3. 学会等名 第17回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ファジィ推論を用いた帆走ロボットの障害物回避実験
2. 発表標題 福場亮輔, 橘完太
3. 学会等名 第17回コンピューショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村亮, 橘完太
2. 発表標題 深層強化学習を用いた帆船の自動運転
3. 学会等名 第17回コンピューショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本明日香, 橘完太
2. 発表標題 帆船ロール角の逐次データ同化
3. 学会等名 第17回コンピューショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橘完太(工学院大学) 清水教平(工学院大学) 氏家智行(工学院大学)
2. 発表標題 ロボット帆船のファジィ化と実機実験
3. 学会等名 第35回ファジィシステムシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原秀人・橘完太
2. 発表標題 自律帆走のための強化学習
3. 学会等名 第46回ファジィ・ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本幸子・橘完太
2. 発表標題 ニューロエボリューションを用いた帆船の自律帆走
3. 学会等名 第46回ファジィ・ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kanta Tachibana and Kentaro Otsuka
2. 発表標題 Wind Prediction Performance of Complex Neural Network with ReLU Activation Function
3. 学会等名 Proc. of the SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kanta TACHIBANA and Yuta TAKAGI
2. 発表標題 Difference between Human and Machine in Feeling about Similarity of Melodies
3. 学会等名 Proc. Int'l Symposium on Affective Science & Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 橘 完太, 阿部 圭一郎
2. 発表標題 風上の目標点に到達する帆走の実機実験
3. 学会等名 第34回ファジィシステムシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木雄太 橘完太
2. 発表標題 深層畳込み生成敵対ネットワーク DCGAN で生成した旋律を人はどのように感じるか
3. 学会等名 第14回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田 達哉, 橘 完太
2. 発表標題 クォータニオンを状態変数に持つ粒子フィルタによる位置姿勢の推定
3. 学会等名 第45回ファジィ・ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 教平, 橘 完太
2. 発表標題 位置情報とロール角を用いた帆船のファジィ制御則開発と実機実験
3. 学会等名 第45回ファジィ・ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 氏家 智行, 橋 完太
2. 発表標題 位置情報のみで帆走するファジィ制御の実装と実機での検証
3. 学会等名 第45回ファジィ・ワークショップ
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

L4i知能情報研究室チャンネル <a href="https://www.youtube.com/channel/UCptjDxrMY6uLj4Y1hLy4dxA">https://www.youtube.com/channel/UCptjDxrMY6uLj4Y1hLy4dxA</a> <a href="https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/8/0000795/profile.html">https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/8/0000795/profile.html</a>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------