

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 25 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2014～2016

課題番号：26520202

研究課題名(和文) モース理論に基づく脳型タッチセンサーの設計

研究課題名(英文) Morse theoretic design of neuromorphic touch counters

研究代表者

三浦 佳二 (Miura, Keiji)

関西学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：60520096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において開発を目指したのは、タッチする手の形状や位置に依存せずに、正しくタッチ回数を数えられるようなカウンターである。このために我々は、連続変形によって変わらない不変量を教えてくれるトポロジーの数学を用いた。その中でも特に、(1)ポアンカレ・ホップ指数、及び(2)オイラー積分、を利用したタッチカウンターを2つの柱として開発を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a touch screen which can count touches irrespective of the hand shapes and positions. So we utilized the mathematics of topological invariants under continuous morphisms. Especially, we developed the algorithms utilizing (1) Poincare-Hopf index, and (2) Euler calculus, for two strains of our topological touch counters.

研究分野：計算論的神経科学、応用数学

キーワード：位相幾何学 タッチセンサー オイラー積分 ポアンカレ・ホップ指数

1. 研究開始当初の背景

ムーアの法則がもはや成り立たないことからわかるように、フォン・ノイマン型直列計算機の進化は飽和しつつあると言われており、必ずしも汎用型でなく特化型でも構わないので、並列計算機の開発へとシフトしつつある。特に、脳から学んだ全く新しいアルゴリズムを基盤とする計算機が期待されている。特に、分散された感覚センサーからの情報を並列分散処理を通して統合し、柔軟に物体・人を「ひとかたまり」として認識できる、脳の能力を学ぶことが重要である。

しかしながら、既存の構成論的な脳の数理モデルは、力学系や確率過程に手段が限られており、神経回路に創発的な機能を持たせるには不十分な面がある。なぜなら、個々の感覚センサーの情報から出発して、何らかのフィルターをかけていくという慣習的な方法では、感覚情報を大域的に統合して、不変的な実体として認識することが一般には難しいからである。例えば、画像処理やタッチパネルにおいて、画素情報をベースに画像やタッチの認識を行うことは今後益々重要になると考えられるが、個々のピクセルの情報を機械学習にぶちこむという既存の方法では限界があり、特に、物体の並進・回転運動、手の形の個体差、ノイズへの頑健性を、フィルターをつくりこんで達成することは容易ではない。むしろ、トポロジカルな不変量という形で数学的基盤を持つアルゴリズムにより、あらかじめ不変性を保証するのが自然であると考えられる。

2. 研究の目的

多くのセンサーからなるタッチパッドが一定時間内にタッチされた回数を数えるためには、一本の指で押されたセンサー群を「ひとかたまり」として捉えて1回分として数え上げる必要が出てくる。本研究においては、幾何学的不変量であるオイラー標数やモース指数を利用することで、個々の微小なセンサーがタッチされたかどうかのピクセル情報をもとにして、巨視的な全タッチ回数を計算する専用の集積回路を設計する。画素情報にアドホックなフィルターをかけるのではなく、位相幾何学的不変量を計算することで、安定した精度でタッチ回数を数えられるようにすることを目指す。また、特化型の集積回路を設計することにより、汎用計算機では達成できない高速な計算速度を実現することを目指す。工業数学・物理数学の講義の範疇では習わない現代幾何学の理論に基づく設計とすることによって、先駆的に、これまでにない画期的なタッチパッドを実現することを目指す。

3. 研究の方法

本研究において開発を目指すのは、タッチする手の形状や位置に依存せずに、正しくタッチ回数を数えられるようなカウンターである。このために我々は、連続変形によって変わらない不変量を教えてくれるトポロジーの数学を用いた。その中でも特に、(1) ポアンカレ・ホップ指数、及び(2) オイラー積分、を利用したタッチカウンターの開発を2つの柱とした。

4. 研究成果

(1) 1つ目の研究の柱においては、モース理論の亜種であるグラフのポアンカレ・ホップ指数を用いたタッチカウンターの開発を行った。トポロジカルなセンサー、すなわち、タッチする手の形状や位置に依存せずに、連続変形で不変な連結成分数や穴の数を認識できるセンサーを開発した。特に、モース理論を用いる事により、タッチされた画素の中でも、極値となる少数の点の数のみを数えるだけで計算できる並列アルゴリズムを開発した。これによりリアルタイムで演算できるようになり、実時間の手書き数字認識などへの応用が期待されるものである。またこのアルゴリズムは工学的に有用であるばかりでなく、分散された神経細胞から大域的整合性のある不変量を取り出す脳の情報処理のモデルともなっている。研究成果は IEEE Access(2015)などで発表した。

さらに、スクリーンの形状が必ずしも平面でなく、曲がった曲面状のタッチスクリーンに適用できるようにアルゴリズムを一般化することに成功した。このアルゴリズムは、任意の曲面状をしたタッチスクリーンに対して、連続変形で不変な特徴量である塊の数や穴の数を数えることができる。特に、ペットボトルを想定した円筒状や、平面型スクリーンを周期境界にしたとも見なせるトーラス型、ボールの握りなどに応用が期待される正多面体型のスクリーンに対しては、具体的なプログラムを Arduino や Processing 上で開発して、デモンストレーションを成功させることができた。この曲面型タッチスクリーンへのアルゴリズムの改良は、幾何学を対象とするトポロジーの数学を本質的に役立てる形となっているが、例えば、手の握りが「ペットボトルを巻いている」ことの検出などを可能とするなど将来的な応用がおおいに期待される。なお、本研究課題では高度な数学を用いるため、成果を広く理解して貰うための助けとなるようなレビュー論文が必須であると思われたため、和文の解説記事にまとめた(日本神経回路学会誌, Vol. 23, 2016)。

(2) もう一つの研究の柱においては、オイラー積分を利用した。なぜならば、従来のトポロジーでは、おはじきのようなかたまりの数

(連結成分数)や穴の数に注目するのが慣習的であったが、これらは画素値が0か1かの白黒画像に対してのみ有効であり、あるピクセルのタッチ数が0か1とは限らず一般の自然数であるような場合に拡張する必要が出てくるためである。マルチタッチと相性が良いオイラー標数の一般化であるオイラー積分を用いることで、タッチ回数を数学的に厳密に求めることができるアルゴリズムを設計することができた。我々はさらに、このアルゴリズムを並列化し、将来的に大規模なピクセル数に対しても高速に動作できるようにした。これは、ベクトル演算をニューラルネットワークとして実現することで、時間発展の末に不変量を出力する形で実現された。このアルゴリズムは工学的に有用であるばかりでなく、分散された神経細胞から大域的整合性のある不変量を取り出す脳の情報処理のモデルともなっている。本成果は、IEEE Access(2014)などで発表した。

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10件)

中田 一紀, 三浦 佳二,
“位相幾何学的アプローチに基づく3次元モーションジェスチャーからの特徴抽出”,
信学技法, 査読無,
2017, Vol. 116, pp. 17-22.
DOI: 無し

中田 一紀,
“位相幾何学的アプローチに基づくタッチセンシングアルゴリズムのニューラルアーキテクチャ”,
日本神経回路学会誌, 査読有,
2016, Vol. 23, pp. 68-78.
DOI: doi.org/10.3902/jnns.23.68

中田 一紀, 三浦 佳二,
“依頼講演 位相幾何学的アプローチに基づくネットワークセンシングとその応用(複雑コミュニケーションサイエンス)”,
信学技法, 査読無,
2016, Vol. 116, pp. 47-52.
DOI: 無し

Kazuki Nakada, Keiji Miura,
“Pulse-Coupled Spin Torque Nano Oscillators with Dynamic Synapses for Neuromorphic Computing”,
Nanotechnology (IEEE-NANO), 2016 IEEE 16th International Conference on, 査読有,
2016, pp. 397-400.

DOI: 10.1109/NANO.2016.7751403

Kazuki Nakada, Keiji Miura, Tetsuya Asai,
“Dynamical systems design of silicon neurons using phase reduction method”,
Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有,
2016, Vol. 7, pp. 95-109.
DOI: 10.1587/nolta.7.95

Keiji Miura, Takaaki Aoki,
“Scaling of Hodge-Kodaira decomposition distinguishes learning rules of neural networks”,
Proc. IFAC CHAOS 2015, 査読有,
2016, pp. 175-180.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.11.032

Keiji Miura, Takaaki Aoki,
“Hodge-Kodaira decomposition of evolving neural networks”,
Neural Networks, 査読有,
2015, Vol. 62, pp. 20-24.
DOI: 10.1016/j.neunet.2014.05.021.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Real-Time Computing of Touch Topology via Poincare-Hopf Index”,
IEEE Access, 査読有,
2015, Vol. 3, pp. 2566-2571.
DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2504387.

Takeshi Fujita, Koji Ohara, Keiji Miura, Akihiko Hirata, Motoko Kotani, Yasumasa Nishiura, Mingwei Chen,
“Visualization of topological landscape in shear-flow dynamics of amorphous solids”,
EPL (Europhysics Letters), 査読有,
2015, Vol. 110. No 3, 38002.
DOI: 10.1209/0295-5075/110/38002.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Neural Implementation of Shape-Invariant Touch Counter Based on Euler Calculus”,
IEEE Access, 査読有,
2014, Vol. 2, pp. 960-970.
DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2351832.

[学会発表](計15件)

Kazuki Nakada,
“Dynamical Systems Design for Spintronic Devices and its Applications”, (招待講演)
2016 EMN Meeting on Spintronics, Las Vegas (USA).

2016年10月13日.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Real-Time Computing of Touch
Topology via Poincare-Hopf Index”,
SIAM Annual Meeting 2016, Boston
(USA).
2016年7月11日.

三浦 佳二, 中田 一紀,
“位相幾何学的アプローチに基づくタ
ッチセンシングアルゴリズムのニューラル
アーキテクチャ”,
LSI とシステムのワークショップ 2016,
東京大学生産技術研究所(目黒区, 東京
都).
2016年5月16日.

三浦 佳二,
“データの見方を変える脳理論を現代幾
何学から探る”,
数理モデリング研究会, 湖邸滋びわこク
ラブ(大津市, 滋賀県).
2015年11月28日.

Kazuki Nakada, Keiji Miura, Takashi
Kimura,
“A Pulse Current Synchronization
Scheme for Spin Torque Nano
Oscillators”,
SSDM 2015, Sapporo Convention Center
(Sapporo, Hokkaido).
2015年9月20日.

Keiji Miura, Takaaki Aoki,
“Scaling of Hodge-Kodaira
decomposition distinguishes learning
rules of neural networks”,
ICIAM 2015, Beijing (China).
2015年8月10日.

Kazuki Nakada, Keiji Miura,
“Pulse-coupled Synchronization in an
Array of Spin Torque Nano
Oscillators”,
INTERMAG 2015, Beijing (China).
2015年5月15日.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Neural implementation of
shape-invariant touch counter based on
Euler calculus”,
The 3rd RIEC International Symposium
on Brain Functions and Brain Computer,
Tohoku University (Sendai, Miyagi).
2015年2月18日.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Neural Implementation of
Shape-Invariant Touch Counter Based on

Euler Calculus”,
Topics in Differential Geometry and
its Discretizations, Tohoku
University (Sendai, Miyagi).
2015年1月11日.

Keiji Miura, Takaaki Aoki,
“Hodge-Kodaira Decomposition of
Evolving Neural Networks”,
Topics in Differential Geometry and
its Discretizations, Tohoku
University (Sendai, Miyagi).
2015年1月11日.

Kazuki Nakada, Keiji Miura,
“Optimal Design of Silicon Spiking
Neurons based on Phase Description”,
BMEiCON 2014, Kyushu University
(Fukuoka, Fukuoka).
2014年11月27日.

Keiji Miura,
“Hodge-Kodaira Decomposition of
Evolving Neural Networks”,
2014 Bilateral Workshop between Tohoku
University and National Tsing Hua
University, Hotel Matsushima Taikanso
(Matsushima, Miyagi).
2014年11月21日.

三浦佳二,
“幾何学と統計学を応用した脳情報処理
機構の解明”, (招待講演)
第3回藤原洋数理学賞ノピアノコンサ
ート, 慶應義塾大学(横浜市, 神奈川県).
2014年10月26日.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Phase reductions of coupled
oscillators and its applications”,
Modeling, Simulation and Analysis of
Pattern Formation, Tohoku University
(Sendai, Miyagi).
2014年7月26日.

Keiji Miura, Kazuki Nakada,
“Neural Implementation of
Shape-Invariant Touch Counter Based on
Euler Calculus”,
SIAM Annual Meeting 2014, Chicago
(USA).
2014年7月9日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 佳二 (MIURA, Keiji)
関西学院大学・理工学部・准教授
研究者番号: 60520096

(2)研究分担者

中田 一紀 (NAKADA, Kazuki)
広島市立大学・情報科学研究科・特任助教
研究者番号：40404107

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()