

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22700237

研究課題名（和文）

ヒューマノイドロボット搭載型神経温度制御高次視覚統合認識集積システム開発

研究課題名（英文）

Development of integrated vision systems for humanoid robots with neural temperature modulation function

研究代表者

佐藤 能臣（SATO YASUOMI）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・助教

研究者番号：40548442

研究成果の概要（和文）：顔認識の神経モデル Elastic Graph Matching の 2 つの問題点：「特徴量表現の複雑性」と「ガボールフィルタ処理にかかる高負担」を解消した物体検出アルゴリズムを提案し、既存の顔検出器との性能比較を試みた。この物体検出の初期アルゴリズムを FPGA 実装した。神経温度が関わる神経同期活動の数理解析では、定常電流上昇で saddle-node 分岐を示す Class I 型の Morris-Lecar 神経発火モデルの、温度低下による発火周波数増加の特殊な力学特性を見出した。

研究成果の概要（英文）：We proposed an object detection algorithm, which made up for two functional deficits in a neural model of face recognition, Elastic Graph Matching: One is the complexity of feature representation while one is the computational cost for Gabor filter. The objection detection algorithm was implemented into FPGA, testing the detection ability. In theoretical analysis of neuronal temperature- modulated synchronization transition, we found the unique neuronal property: frequency increases with temperature reduction in the Morris-Lecar neuron of class-I exhibiting saddle-node bifurcation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：物体認識，物体検出，ガボールピラミッド，FPGA 実装，神経温度，神経同期活動，日独学術研究交流

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、日本・北九州ードイツ・フランクフルト間の国際共同研究により、超高度なヒトの視覚機能を模した脳型(Brain-style) ロボットの眼『ヒューマノイドビジョン』の実現を目指し、体温（脳温・神経温度）に依

存した高次視覚認識メカニズムの本質的理解・革新的解明に向け、本研究課題を次の3つのサブタスクに分け、推し進めた：

- (1) 温度が関わる神経同期活動の数理解析。

- (2) ガボールピラミッド技術を利用した視覚野モデルのビジョンシステム開発：
  - ① 顔認識アルゴリズム開発.
  - ② 顔検出アルゴリズム開発.
  - ③ 物体追跡に関する FPGA 実装.
- (3) 日本ードイツ間共同研究・研究交流活動.

2. 研究の目的

- (1) 【温度が関わる神経同期活動の数理解析】：神経温度は、ヒトが生きていく上で必要不可欠、極めて重要な存在である。神経情報処理中のニューロン活性化による1℃近くの脳温度上昇や、生理温度(37℃)によるニューロン興奮性向上が報告されている。しかし、神経温度環境に依存してニューロン活動が規定されるという神経情報処理機構はこれまで報告がない。神経温度に依存した高次視覚統合認識処理のモデル化・神経温度制御機能をもつ高次視覚統合認識アーキテクチャの新規提案には、神経温度に依存した神経活動特性・神経同期活動遷移の非線形力学機構を明らかにする必要がある。

また、神経温度に依存した神経活動特性や同期活動遷移の力学機構を明らかにするには、位相縮約法と呼ばれる、決定論的神経振動子の位相記述から、位相応答曲線と呼ばれる神経発火特性を解析する必要がある。近年の電気生理学実験では、非常に大きな揺らぎがある位相応答曲線も測定されるようになった。そのため、確率論的非線形振動子にも適用可能な位相縮約法の提案は、急務の課題である。

神経温度に依存した神経同期発火活動機構の解明には、同期発火活動の背景にあるネットワーク構造も解明する必要がある。海馬 CA3 スライス実験では、温度上昇による、べき乗則分布に従うと思われる同期発火活動の活性化が見出された。この同期発火活動の活性化のネットワーク構造を明らかにすることは、神経情報処理の解明では、重要な役割を果たすと考えられる。

- (2) 【ガボールピラミッド技術を利用した視覚野モデルのビジョンシステム開発】：Elastic Graph Matching は、実用化に成功した顔認識処理の一次視覚野モデルの1つである。しかし、この顔認識アルゴリズムには、「特徴量表現の複雑さ」と「ガボールフィルタ処理にかかる高負担」の2つの技術的な問題があるため、昨今のコンピュータビジョンでは、

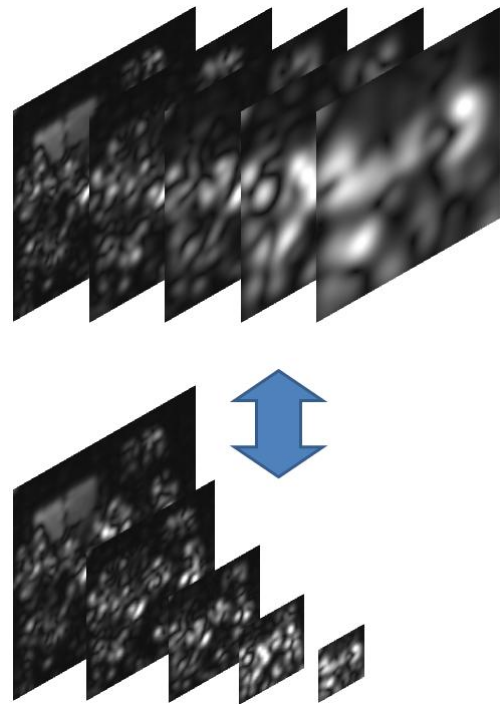


図 1

SIFT 特徴量や Viola & Jones 物体検出アルゴリズムに比べ、あまり重宝されていない。上記の技術的問題を解消することで、ヒトの視覚機能に更に近づき、コンピュータ上でのリアルタイム処理も可能になることが見込まれる。また、Viola & Jones 物体検出アルゴリズムや SIFT 特徴量に匹敵する機能を見出すことも大いに期待される。

上記の技術的問題の解消のために使われるガボールピラミッド画像処理技術は、視覚心理モデルとしても大変興味深い。目に映る視覚の遠近に関する情報(画像処理的には解像度に関する情報)が脳でどのように処理され、遠近に関する情報が視覚認識にどう関与するのは、未だに不明である。ガボールピラミッドの顕著な技術特性である「多重解像度ー多重フィルタスケールの対応性」(図1)を活かし、網膜上に映る視覚情報が、脳内に記憶される、種々のフィルタスケールを選択的に見つけるような情報処理モデルを新規提案することは、脳型ヒューマノイドビジョンの実現には必要不可欠である。

- (3) 【日独間共同研究・研究交流活動】：神経科学の成果に触発された知的システム開発研究の国際拠点化のためのネットワーク構築.

3. 研究の方法

- (1) 【温度が関わる神経同期活動の数理解析】: 位相縮約法と呼ばれる, 非線形振動子の位相応答曲線と結合振動子系の挙動を数理解析する手法を用い, 神経振動子内の温度に関わるパラメータを制御することで, 位相応答曲線や結合振動子系の同期活動の温度依存性を調べる.

位相縮約法の改良では, 従来使われてきた決定論的非線形振動子から, ノイズの影響下にある非線形振動子, 即ち, 確率論的非線形振動子にも適用可能なように位相縮約法を拡張する.

神経温度に依存した同期発火活動を活性化させるネットワーク構造の解明では, 海馬 CA3 培養スライスで測定されるスパイク時系列データから, 同期発火活動の累積分布  $F_s$  (即ち, ベキ乗則分布に従った神経同期発火活動) と発火率の累積分布  $F_f$  を算出. Izhikevich 発火モデルを利用し, 興奮性及び抑制性素子間の結合強度は対数正規分布に従い, 局所結合からランダム結合への張替え可能なネットワークモデルを構築し, 実験データから得られる累積分布の再現性をもっと高い結合強度の対数正規分布値を探索する.

- (2) 【ガボールピラミッド技術を利用した視覚野モデルのビジョンシステム開発】: ガボールピラミッドの技術特性である「多重解像度-多重フィルタスケール対応性」は, 特徴量表現の複雑さが生み出す不要な画像情報表現を取り除くだけでなく, ガボールフィルタ処理負担を軽減させる. この技術を基盤に,

- ① Elastic Graph Matching を改良し, 顔認識性能を評価する.
- ② モデル顔をシステムに記憶し, 顔検出用に Elastic Graph Matching を改良する.
- ③ 物体追跡用に FPGA に実装し, カメラと統合する.

- (3) 【日独間共同研究・研究交流活動】: ドイツの学術研究機関との共同研究契約の締結及び, その学術研究機関での研究交流活動.

#### 4. 研究成果

- (1) 【温度が関わる神経同期活動の数理解析】: 定常電流の上昇で saddle-node 分岐を示す Class I 型の Morris-Lecar (ML) 神経発火モデルを用い, 内在する神経温度に関するパラメータ  $\mu$  を小さくすると, スパイクのパルス幅が長くなることを数値シミュレーションで示

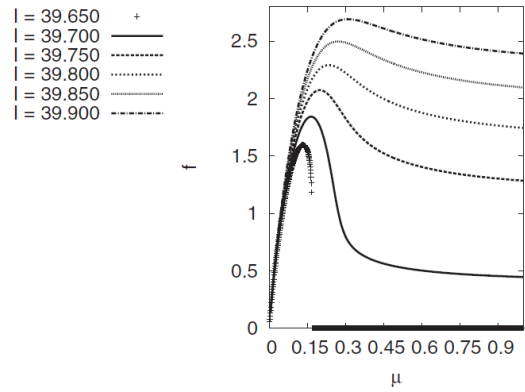


図 2

し, 発火周波数も単調に小さくなることを予想した. しかし, 詳細な解析により, Class I 型 ML 神経発火モデルは,  $\mu$  の減少で発火周波数が増加するという特殊な力学特性 (図 2) を持つことを見出し, この特殊な力学特性の機構には, カルシウムチャネル電流が深く関与することを示唆した. また, 相互にシナプス結合した一対の ML 神経発火モデル系の挙動の同期状態・非同期状態が,  $\mu$  制御により複雑に変化することを数値シミュレーションで示した.

位相縮約法の一般化では, 決定論的非線形振動子から確率論的非線形振動子まで適用可能な位相縮約法を提案した. この手法のメリットは, ノイズ強度に関係なく, 確率論的非線形振動子を決定論的非線形振動子として取り扱うことができることである.

神経温度に依存した同期発火活動を活性化させるネットワーク構造に関する研究での, 海馬 CA3 培養スライスで測定されるスパイク時系列データの累積分布の再現には, 「興奮性ニューロンのフィードバックによる抑制性素子の高頻度発火」の重要性を見出した.

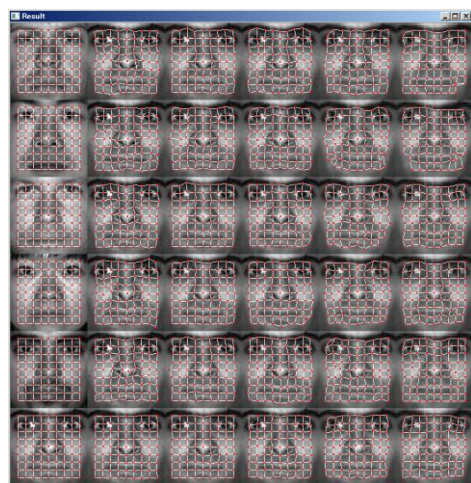


図 3



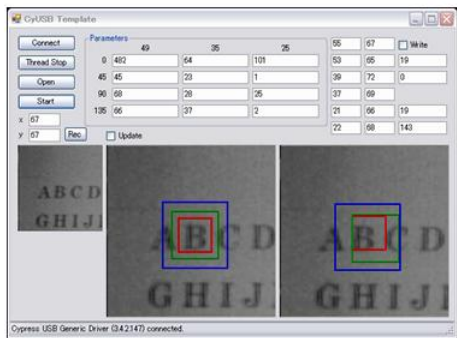
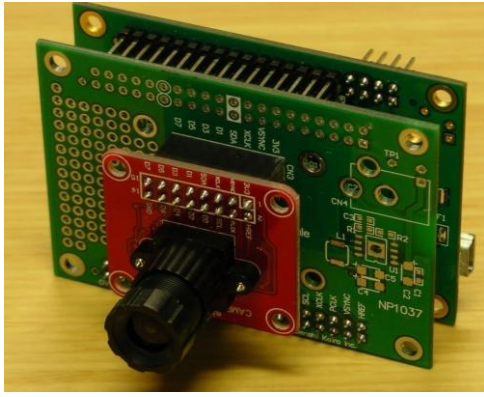


図 4

(2) 【ガボールピラミッド技術を利用した視覚野モデルのビジョンシステム開発】:

- ① ガボールピラミッド技術を取り入れた **Elastic Graph Matching** では、入力画像サイズに関係なかったり、視線が正面でない顔の入力画像を用い同一の顔と判断したりする顔認識を実現した (図 3)。
- ② ガボールピラミッド技術を使い、顔認識の神経モデル **Elastic Graph Matching** の 2 つの問題点: 「特徴量表現の複雑性」と「ガボールフィルタ処理にかかる高負担」を解消した物体検出アルゴリズムを提案した。また、**SIFT** 特徴量とのアルゴリズム上の相違性を比較検証し、**Viola & Jones** 物体検出との性能比較を試みた。
- ③ ガボールピラミッド技術を利用し物体検出の初期アルゴリズムの **FPGA** 実装をした (図 4)。

(3) 日独共同研究・研究交流活動: 「5. 主な発表論文等」の [その他] に参照されるように、(2)の研究課題に関連し、2010年度に、ドイツ・フランクフルトの **Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS)** と共同研究契約を新規

に締結し、2011年度はその契約を更新した。(2)の研究課題の成果は、国際共同研究の成果として、国際会議論文で発表した。

研究代表者は、2011年度初めに **FIAS** を訪問しセミナー発表をした。2011年度の終わりには、**FIAS** から研究者を招聘し、**Brain System Technology** に関する合同ワークショップを運営した。九州工業大学・脳情報専攻と **FIAS** 間の学術研究交流の活性化を図った。

#### 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 13 件)

- ① Y.D.Sato, (他 4 名): “Temperature Modulated Synchronization Transition in Coupled Neuronal Oscillators.” *Phys. Rev. E* **85**(3) 031910, (2012) 査読有. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.031910
- ② Y.D.Sato & Y.Kuriya: “Effective and Efficient Gabor Feature Representation for Face Detection.” *World Academy of Science, Engineering and Technology* **63**, pp.149-152 (2012) 査読有. <http://www.waset.org/journals/waset/v63/v63-28.pdf>
- ③ T.Samura, Y.D.Sato\*, (他 2 名): “Power Laws for Spontaneous Neuronal Activity in Hippocampal CA3 Slice Culture.” In B.-L. Lu, L. Zhang, and J. Kwok (Eds.): *ICONIP 2011, Part I*, LNCS **7062**, pp.370-379, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-24955-6\_45
- ④ Y.D.Sato & Y.Kuriya: “Visual Constructed Representation for Object Recognition and Detection.” In B.-L. Lu, L. Zhang, and J. Kwok (Eds.): *ICONIP 2011, Part III*, LNCS **7064**, pp.611-620, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-24965-5\_69
- ⑤ Y.D.Sato & Y.Kuriya: “Scale Correspondence for Gabor Feature and Maximum Operation in Elastic Graph Model.” *Proc. 2011 7<sup>th</sup> Int. Conf. Nat. Comput.*, Vol. **1**, pp.536-540, (IEEE, 2011) 査読有 ISBN: 978-1-4244-9951-9.
- ⑥ Y.D.Sato, (他 2 名): “Singular Perturbation Approach with Matsuoka

- Oscillator and Synchronization Phenomena.” In T. Honkela et al. (Eds.): ICANN 2011, Part II, LNCS **6792**, pp.269-276, (Springer, Heidelberg, 2011) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-21738-8\_35
- ⑦ Y.D.Sato, (他 5 名): “A Gabor Wavelet Pyramid Based Object Detection Algorithm.” In D. Liu et al. (Eds.): ISSN 2011, Part II, LNCS **6676**, pp.232-240, (Springer, Heidelberg, 2011) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-21090-7\_28
- ⑧ Y.D.Sato, (他 3 名): “Thermal Effects on Phase Response Curves and Synchronization Transition.” In D. Liu et al. (Eds.): ISSN 2011, Part I, LNCS **6675**, pp.287-296, (Springer, Heidelberg, 2011) 査読有. CI: 1. DOI: 10.1007/978-3-642-21105-8\_34
- ⑨ A.Ichiki & Y.D.Sato: “A Phase Reduction Method for Weakly Coupled Stochastic Oscillator Systems.” In D. Liu et al. (Eds.): ISSN 2011, Part I, LNCS **6675**, pp.251-259, (Springer, Heidelberg, 2011) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-21105-8\_30
- ⑩ Y.D.Sato, (他 3 名): “Dynamic Link Models for Global Decision Making with Binding-by-Synchrony.” Proc. NaBIC 2010, pp.201-208, (2010) 査読有. DOI: 10.1109/NABIC.2010.5716291
- ⑪ Y.D.Sato, (他 2 名): “Object Detection by Specifying Scale and Rotation Transformations.” In K. W. Wong et al. (Eds.): ICONIP 2010 Part II, LNCS **6444**, pp.616-624, (2010) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-17534-3\_76
- ⑫ Y.D.Sato, (他 2 名): “Model Studies: Time Scaled Phase Response Curves and Synchronization Transition.” In K. W. Wong et al. (Eds.): ICONIP 2010 Part I, LNCS **6443**, pp.91-98, (2010) 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-17537-4\_12
- ⑬ Y.D.Sato: “Effects of Temperature on Synchronization Phenomena in Coupled Spiking Neuron Models.” In R. Wang and F. Gu (Eds.): Advances in Cognitive Neurodynamics Vol. 2 – Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Cogn. Neurodynamics, Chapter 41, pp.261-264, (Springer Press, 2010) 査読有. DOI: 10.1007/978-90-481-9695-1\_41
- ① Y.D.Sato: “神経振動子の発火特性に関する数理解析 II.” 67<sup>th</sup> Annual Meetings of the Japanese Physical Society, Kansei Gakuin University, Mar. 21<sup>st</sup> – 24<sup>th</sup> 2012.
- ② Y.D.Sato, (他 2 名): “Theoretical Analysis on Synchronization between Coupled Matsuoka Oscillators.” (Poster) 3<sup>rd</sup> bilateral German-Japanese Workshop on Comput. Neurosci. (Okinawa, Japan, March 2<sup>nd</sup> – 5<sup>th</sup> 2011).
- ③ Y.D.Sato, (他 5 名): “A Visual Object Detection System Based on Correspondence of Multi-scale Gabor Features.” (Poster) 3<sup>rd</sup> bilateral German-Japanese Workshop on Comput. Neurosci. (Okinawa, Japan, March 2<sup>nd</sup> – 5<sup>th</sup> 2011).
- ④ Y.D.Sato & H.Cateau: “神経振動子の発火特性に関する数理解析.” 2011 Autumn Meeting of the Japanese Physical Society, Toyama University, Sep. 21<sup>st</sup> – 24<sup>th</sup> 2011.
- ⑤ Y.D.Sato, (他 3 名): “海馬 CA3 培養スライス自発活動の統計的性質を再現したネットワークモデル.” 2011 Autumn Meeting of the Japanese Physical Society, Toyama University, Sep. 21<sup>st</sup> – 24<sup>th</sup>, 2011.
- ⑥ Y.D.Sato & Y.Kuriya: “Gabor Pyramid 画像処理技術を利用した Elastic Graph Dynamic Link Model.” Neuro-Computing Meeting (NC), Kobe University, Jul. 25<sup>th</sup> – 26<sup>th</sup>, 2011.
- ⑦ Y.D.Sato, (他 5 名): “An Object Detection System Based on a Physiologically Plausible Gabor Pyramid.” 2010 Autumn Meeting of the Japanese Physical Society, Osaka City University, Sep. 23<sup>rd</sup> – 26<sup>th</sup> 2010.
- ⑧ Y.D.Sato, (他 3 名): “Computational analysis on temperature dependent synchronization transitions in neurons.” Neuro 2010, Kobe Convention Center, Sep. 2<sup>nd</sup> – 4<sup>th</sup> 2010.

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.brain.kyutech.ac.jp/~sato-y/>

共同研究契約  
May 2010 – March 2012: KIT-FIAS Cooperative Research Agreement: “Software and Hardware Developments for a Brain Style Visual Object Recognition System.”

セミナー発表

Y.D.Sato: “Software and Hardware Developments for Visual Object Recognition – Systems and Practical Applications.” FIGSS Seminar Summer Semester 2011/12 at Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) (Frankfurt am Main, Germany, June 20<sup>th</sup> 2011).

ワークショップ運営

The Kyutech-FIAS Joint Workshop on Brain System Technology (Kitakyushu, 8<sup>th</sup> February, 2012).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 能臣 (SATO YASUOMI)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・  
助教

研究者番号：40548442