

分散表現と自律ダイナミクスに基づく人間の情報処理の計算モデル

研究代表者 森田 昌彦 筑波大学・システム情報工学研究科・教授
研究分担者 田中 文英 筑波大学・システム情報工学研究科・准教授

1 研究の概要

研究目的 情報選択能力や学習・適応能力など、人間の高度かつ柔軟な知能に大きく頼る現在の IT 社会は、情報爆発時代において深刻なデジタル・デバイドをもたらすと考えられる。これを避けるためには、例えば盲導犬のように、いちいち明示的に指示しなくても、人間を自然にサポートしてくれる知的システムが求められるが、それを実現することは、現在の記号処理に基づく人工知能技術だけでは不可能である。本研究の目的は、こうした人間の意図を汲んで動作する支援システムの実現に向けて、人間の情報処理の計算モデルを構築することである。その際、人間の優れた知能の源だと考えられる分散表現と自律ダイナミクスの利点を生かした「脳型情報処理原理」に基づくことを重要視する。こうしたモデルは、人間の非言語的情報処理の性質を理解するのに役立つと共に、人支援技術の開発にも繋がると考えられる。本研究では、モデルを構築するだけでなく、その妥当性を心理実験などによって検証する。また、モデルを応用することによって、柔軟で人間的なロボットや人を支援する情報機器の開発も進める。

本年度研究成果の概要 本年度は、主に下記の課題に取り組んだ。

- 選択的不感化ニューラルネットを用いた強化学習による自律的行動獲得
- ロボットを利用したコミュニケーションダイナミクスの研究
- 表面筋電位信号からの動作意図推定
- 人間の情報統合過程のモデル化と検証

選択的不感化ニューラルネット[1]を用いた強化学習による自律的行動獲得に関しては、選択的不感化ニューラルネット(SDNN)の性質をより詳細に調べ、SDNN が強化学習の価値関数近似に非常に適していること、特に高次元の冗長な情報の中から価値評価に重要な情報だけを抽出する能力をもつことを明らかにした[2][1]。この成果は、膨大な情報の中から必要な情報だけを抽出する情報処理技術の開発にも繋がると考えられる。

ロボットを利用したコミュニケーションダイナミクスの研究に関しては、遠隔地間の人間同士が、ロボットをインタフェースとしてコミュニケーションする場面を対象とした基礎的研究を行った。遠隔地間ではデータ通信における遅延の発生が避けられず、また、インターネット等を用いる場合、遅延の大きさのみならずその変動(揺らぎ)も困難さを与える問題となる。こうした遅延の上で離れた人間同士がロボットを通じてスムーズにコミュニケーションするためには、各々ユーザのコミュニケーションダイナミクスをシステムが学習し、予測制御に活かすアプローチが必要である。今年度は、まず実証実験フィールド整備や遠隔ロボットシステムの設計を行った。また、このようなロボットによるコミュニケーションやインタラクションの研究は、乳幼児の教育に応用できることを指摘し[3]、その際に付随する課題や諸問題について考察した[4]。

表面筋電位信号からの動作意図推定については、SDNN をパターン識別器として用いることによって、少数のサンプルから多数の動作を高精度かつリアルタイムに識別することに成功した[5]。また、こ

れを応用し、手軽に「じゃんけん」の対戦が可能なデモシステムも作成した[6]。開発した手法は、従来の手法に比べて使用者の負担がはるかに少ないため、さまざまな人支援技術へ応用が可能である。

人間の情報統合過程のモデル化と検証に関しては、構築した対属性モデルの検証を進めた。その結果、左右眼に異なる刺激を次々と提示すると、全く提示されない図形が安定的に知覚されるなど、モデルから予測された現象が実験的に確かめられた[7]。また、いくつかの視覚現象が、このモデルによって統一的に説明されることもわかった。この結果は、認知神経科学における最も大きな問題の一つである結合問題の解決にも繋がる大きな成果である。

以下では、上記の第3・4番目の研究課題について詳細を述べる。

2 表面筋電位信号からの動作意図推定

背景と目的 手などの動作を表面筋電位信号(以下、EMG)から識別することは、筋電義手や新たなインタフェースの開発にも繋がる重要な問題である。これに関する研究の歴史はかなり長いですが、EMG から多数の複雑な動作を識別することには様々な困難がある[8]。

まず、一つの動作に多数の筋肉が関与する上に信号の重畳があるため、動作と筋電センサ群との関係は非線形かつ複雑である。また、信号は個人ごとに大きく異なり、同じ人でも日や体調によって変動するため、多数の学習サンプルを用意することは難しい。さらに、同じ動作を行ったとしても、力の入れ具合や動かす速さによって筋電位信号は大きく変化する。

このため、従来の識別手法を用いた場合、

- 1) 事前に、1人の使用者からできるだけ多くのサンプルを取得する
- 2) 信号の冗長性は悪影響を及ぼすため、必要なセンサを厳選し、最も効果的に配置する
- 3) 使用する(センサ電極を貼る)たび、センサの位置決めを精密に行う
- 4) なるべく一定の信号を発生するよう、使用者の訓練を行う

などの必要性があり、使用者に大きな負担がかかっていた。また、多くの場合、

- 5) スペクトル解析など複雑な前処理を行う
- 6) 識別に適した特徴を動作ごとに抽出する

ことも必要であるため、リアルタイムの動作識別や、別の動作を新たに識別することが困難であった。

これに対して我々は、昨年度までに開発した選択的不感化ニューラル

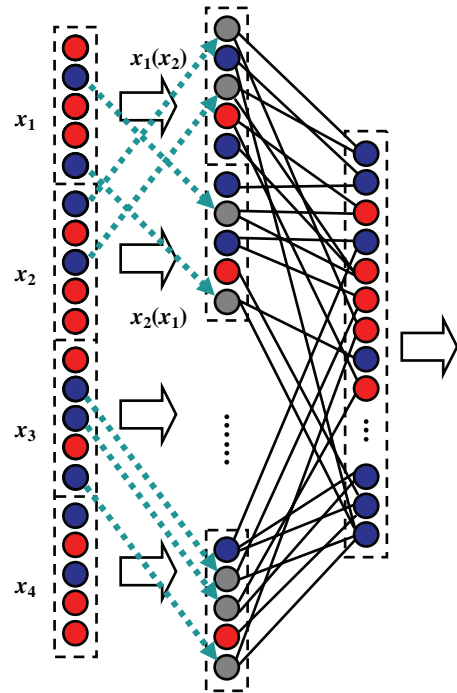


図1 選択的不感化ニューラルネット



図2 筋電センサ電極



図3 識別する動作

ネット(SDNN, 図1)をパターン識別器として用いることにより, 上記の問題を解決しようと試みた.

方法 図2のように腕の周囲に6chのセンサ電極を貼り, 得られたEMG信号から図3に示す6種類の動作の識別を行う実験を行った. 各動作を3通りの速さ(速い・普通・遅い)で2回ずつ行い, 合計36個のサンプルを取得して訓練データとした. 各チャンネルの信号について, フィルタリング, 積分, 正規化といった簡単な前処理を行った後, 2値パターンに符号化してSDNNの入力層に入力とする. 出力層は6種類の動作に対応する素子群からなり, 各素子群の出力が動きの速さに応じたパターンになるよう学習を行う. 学習後のシステムに, 別の90個のテストデータを入力し, 識別を行った.

結果と考察 図4は, 各チャンネルの積分EMG(IEMG)信号と, 識別された動作の例である. 訓練データに関しては, ほぼ100%正しく識別が行われている. また, 図5はテストデータに関する識別率(動作終了時点)を示したものである. 動作の種類はほとんど正しく識別でき, また3通りの動きの速さについても70%以上の確率で正解することができた. さらに, IEMG信号が検出されてから100ms後の時点でも, 動作種類の識別率は80%に達した. EMGの発生から実際に腕が動き始めるまでに30~100msかかることを考えると, 本手法により, 動作の意図をかなりの確率で正しく推定できると言える.

本手法は, 次のような既存の手法にない特徴があり, 使用者の負担が非常に少ない.

- 1) 非常に少ないサンプル(1動作につき2~3個)でよい.
- 2) センサの数が十分であれば, 位置はあまり関係ない. 冗長であっても全く構わない.
- 3) その都度サンプルを採取するので, センサの位置決めは大まかでよい.
- 4) 使用者の事前の訓練などは不要である. その日の体調や気候の変化による影響はない.
- 5) 複雑な前処理が不要であり, 識別器の計算量も多くないので, リアルタイムに動作識別ができる.
- 6) 動作に依存した特徴抽出を行わないため, 新たな動作でも容易に学習・識別できる.

また, このような特徴を生かしたデモシステムも作成している[6]. このシステムは, 筋電センサを付けた体験者が「じゃんけん」の手を出すと, ほぼ同時にそれに勝つ手を画面表示することができる. センサの貼付に数分かかかるが, サンプルの取得と学習には約1分しかかからず, 出す手の形やタイミングの制約も少ない. 今後さらに改良を進めれば, 実用的な課題への応用も十分可能だと思われる.

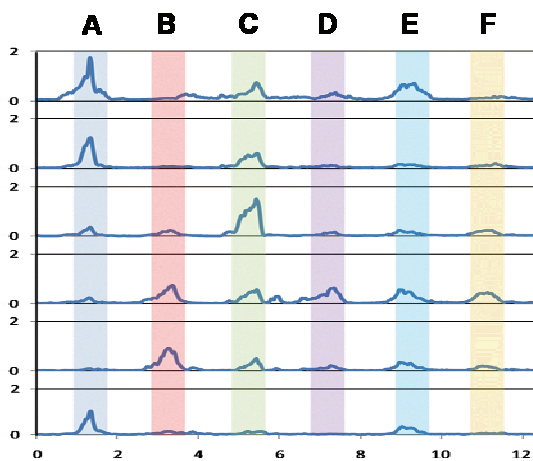


図4 各チャンネルの信号と識別された動作

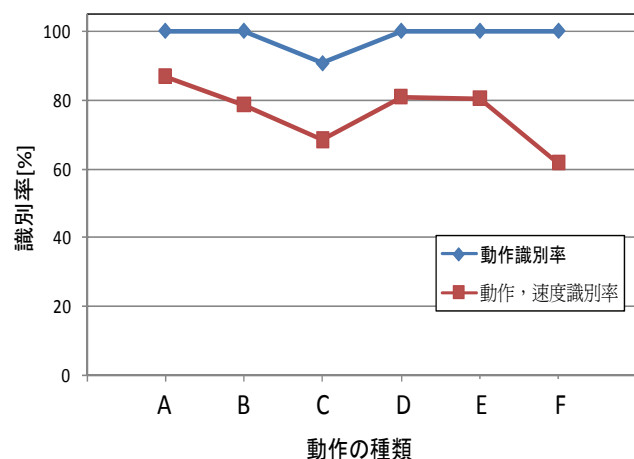


図5 テストデータの識別率

3 人間の情報統合過程のモデル化と検証

背景と目的 一般に、情報の種類(次元)が増えると、その組み合わせは爆発的に増加する。従来型の人工知能に比べて人間が優れている点の一つは、非常に多次元の情報をうまく扱うことができることである。従って、人間の情報処理をモデル化するためには、人間が行っている情報統合の過程をモデル化することが不可欠だと思われる。

脳において、異種情報の情報統合が行われている代表的なシステムが視覚系である。我々がある物体を見たとき、その物体の形、色、動きといった異なる属性(特徴次元)は脳内の異なる領域で別々に処理されるが、それらがどのように統合され、一つの物体として知覚され、その物体に特有の反応を引き起こすのか、というのは結合問題(binding problem)と呼ばれる未解決の大きな問題である[9]。視覚特徴統合の標準的な理論[10]によると、ある物体の全ての特徴は、そこに注意を向けることによって結合され、一つの統合された“物体表現”が作られて一時的に保存される。そこで、結合問題の解決に向けて、物体表現の実体とその神経機構を解明する努力が続けられてきた。しかし、これまで提案されたとのような仮説も、組み合わせ爆発のような計算論的な困難から逃れることはできなかった。

我々は、計算論的研究と従来の知見の再検討の結果から、物体表現が脳内に作られる前提が間違っていると考え、「一般の物体に対して、2つの属性間の特徴統合は行われるが、全属性を統合した一つの表現が作られることはない」という仮説を立てた。この仮説に基づいて構築したのが「対属性モデル」である。これは、一つの物体は2つの属性間結合の集合によって分散的に表現され、各結合を要素とするネットワークによって認識や記憶といった高次処理がなされるというものである。このモデルを検証するために、いくつかの心理物理実験を行った。

実験 1 モデルから直ちに予測されるのは、個々の属性対表現を活性化すれば、全属性が統合している知覚が生じる、というものである。但し、これを通常の下で客観的に示すのは容易ではない。そこで、左右眼に異なる画像を提示したときに生じる両眼視野闘争を用いることにした。具体的には、図6Aのような3通りの刺激画面を観察者に提示し、左右のどちらの図形が優位に知覚されるかをボタンで回答してもらった。また、試行後に口頭でも知覚を説明してもらった。

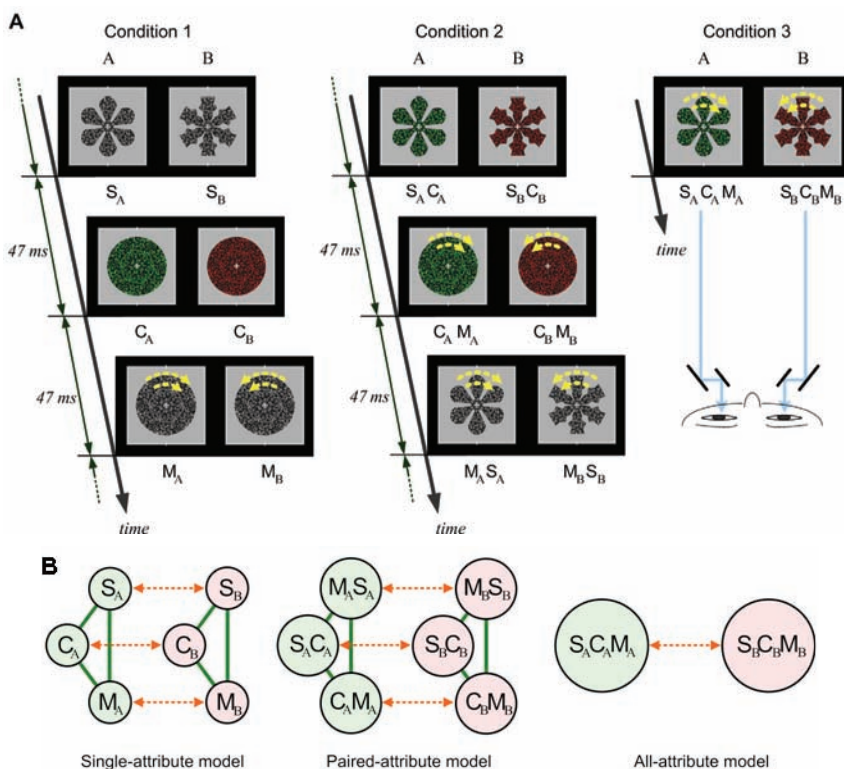


図6 実験1の実験刺激とモデル

3属性(形, 色, 動き)図形を継続的に提示する条件3では, 強い両眼視野闘争[11]が生じ, 物体 A と B が交互に知覚される. これに対して各属性の特徴を順に提示する条件1では, 3属性が統合した物体はあまり知覚されず, 両眼視野闘争もあまり強く生じなかった. 一方, 2属性図形を次々に提示する条件2では, 背景がちらついて見える点を除いて, 条件3とほぼ同じ知覚が生じた. また, 両眼視野闘争もほぼ条件3と同様に起こった. この結果は, 競合が特徴間で生じるといふ単属性モデルや物体表現間で生じるといふ全属性モデル(図6B)よりも, 2特徴が結合したものと生じるといふ対属性モデルと最も良く合致する.

実験 2 上記の結果は, 対属性モデル以外のモデルでも一応説明することができそうである. そこで, 対属性モデルのみから導かれる「3属性以上の多属性図形を複数提示したとき, 実際には提示されない属性対表現のセットが活性化されることにより, 錯覚が生じうる」という予測に着目した. そして, シミュレーションなどにより錯視が生じそうな条件を探し, 実験的に確認することにした. 具体的には, 試行ごとにランダムに選んだ3属性図形をターゲットとし, それと形, 色, 動きのいずれかが異なる3属性図形を次々に提示する(図7A).

同一の刺激系列を両眼に同時に提示するコントロール条件では, 提示した3つの図形が次々に切り替わって知覚され, 回答した特徴がターゲットと一致する割合はチャンスレベルであった. これに対して, 同じ刺激系列を左右眼に異なる位相で提示するテスト条件では, 多くの場合安定した知覚が生じ, 約半数の試行でターゲットが知覚された(図7B). 観察者によって差があるが, ターゲットが実際には提示されていないことに全く気づかない者も多かった. テスト条件で両眼視野闘争が生じなかったことを含めて, この結果は全属性モデルとは合致しない. また, コントロール条件では錯視が生じなかったこと

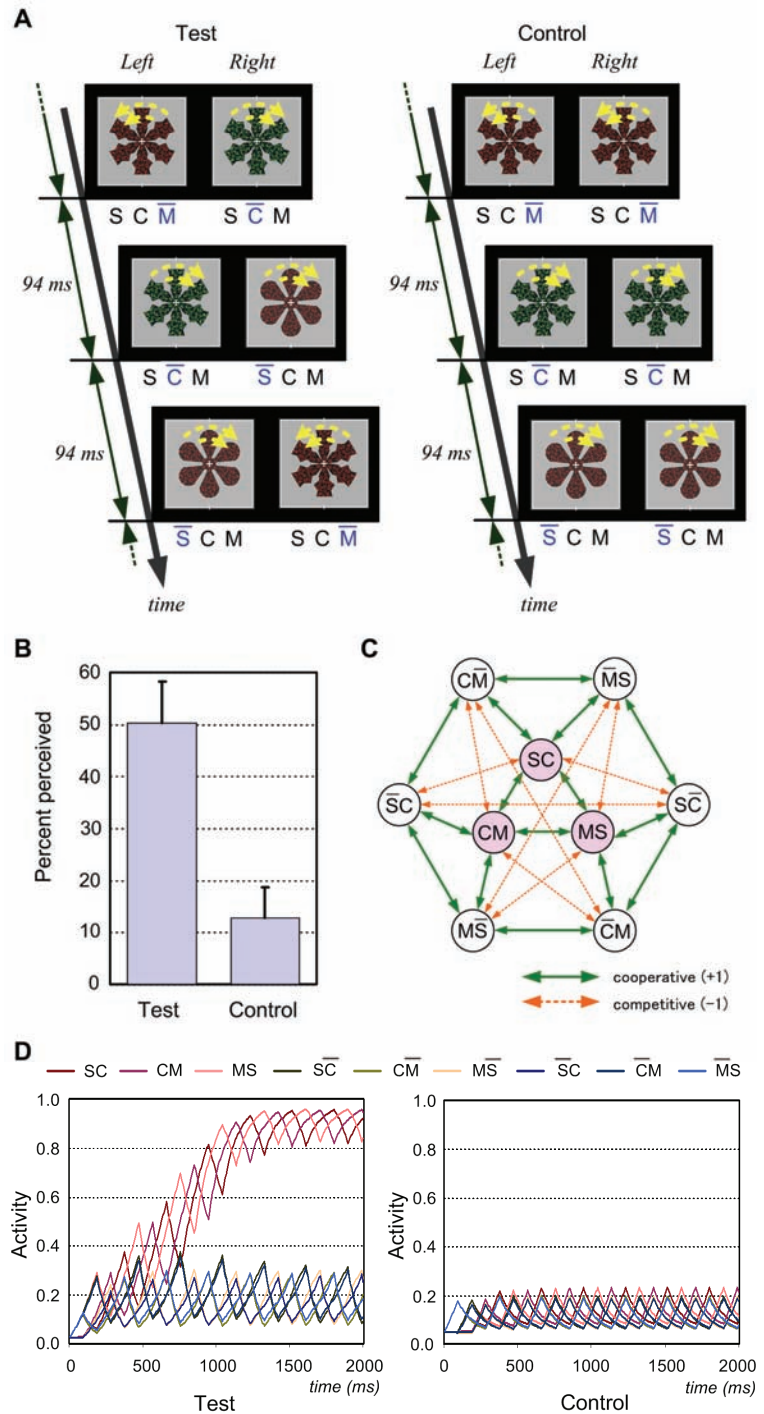


図7 実験2の方法と結果

などから、単属性モデルでも説明できない。

これに対して、対属性モデルに基づいて図7Cのような簡単なネットワークを構成し、各ユニットは対応する特徴対がどちらかの眼に提示されたとき刺激を受けると仮定すると、実験結果を説明することができる。すなわち、図7Dに示すように、コントロール条件ではユニットが3個ずつ活性化されるが、どのユニットも活動が十分高くなることはない。一方テスト条件では、ユニット間の競合および協調作用によって、ターゲット特徴の対に対応するユニットだけが高い活動を示すようになる。

結論 上記の実験結果は、対属性モデルを支持している。また、対属性モデルは視覚短期記憶に関する知見とも合致する[12]。従って、一つの物体の各属性は、相互に結合されて複数の属性対表現を形成し、少なくともいくつかの高次認知過程がそれに基づいていると考えられる。このことは、すべての属性を統合した一つの物体表現が、少なくとも一般の物体についてはつくられない可能性を示唆している。もしそうであるとするならば、組み合わせ爆発という結合問題の理論的困難さは大いに軽減されることになる。また、実験2の結果は、両眼視野闘争が主に単眼的に結合された特徴対の競合を反映することを示唆するが、このことは両眼視野闘争の原因が左右眼の間の競合なのか刺激間の競合なのかという長年の論争[11]を解決する可能性がある。このように、本研究の結果は、認知神経科学に多くの問題に新たな視点を与える大きな成果と言える。

4 今後の展望

上述したもの以外の研究課題も含めて、今後の展望は以下の通りである。

- **選択的不感化ニューラルネットを用いた強化学習による自律的行動獲得**：現在、これまでの成果を基に、実機による実空間・実時間での行動獲得の研究を進めつつある。また、選択できる action 値の連続化や、異なる複数の状況での行動獲得などにも取り組む予定である。また、動物の行動学習や人間の状況判断のモデルとしての妥当性も検証したいと考えている。
- **ロボットを利用したコミュニケーションダイナミクスの研究**：構築中の実証実験フィールドおよび遠隔ロボットシステムの上で、今後遠隔地間の被験者ユーザ同士でロボットを用いたコミュニケーション実験を行い、双方ユーザの発話タイミングとの関わりや、遅延の揺らぎが与える影響などを観察する。その上で、各ユーザ特定のコミュニケーションダイナミクスをニューラルネットにより学習し、自律プリミティブとして予測制御に用いることによって、遅延の影響を補償しながらスムーズなコミュニケーションが実現できるかどうかを検証する予定である。
- **表面筋電位信号からの動作意図推定**：現在、識別できる動作の種類を増やすと共に、加えようとする力の大きさの推定精度が向上するようシステムを改良しつつある。また、昨年度までの成果である、神経力学系を用いた状態予測システム[13,14]と組み合わせることによって、動作の系列を推測する研究も進めている。これらにより、「行動の意図を読む」ことができるようになると考えている。今後、高齢者や情報弱者などにも使いやすいインタフェースや人支援システムへの応用の可能性も探る予定である。
- **人間の情報統合過程のモデル化と検証**：情報統合は視覚だけでなく、人間が行っているほとんどすべての情報処理において重要な役割を果たしている。我々は、対属性モデルは人間の情報統合全般に適用できると考えている。今後、そのような観点からモデルの適用範囲を拡大すると共に、その妥当性を検証したいと考えている。

参考文献

- [1] 森田昌彦, 村田和彦, 諸上茂光, 末光厚夫: “選択的不感化法を適用した層状ニューラルネットの情報統合能力”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J87-D-II, No. 12, pp.2242-2252, 2004.
- [2] 新保智之, 山根 健, 田中文英, 森田昌彦: “選択的不感化ニューラルネットを用いた強化学習の価値関数近似”, 電子情報通信学会論文誌 (D) , submitted.
- [3] 田中文英, 小嶋秀樹, 板倉昭二, 開 一夫: “子どものためのロボティクス:教育・療育支援における新しい方向性の提案”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, in press, 2010.
- [4] Tanaka, F. and Kimura, T.: “Care-receiving robot as a tool of teachers in child education”, *Interaction Studies*, in press.
- [5] 森田昌彦, 川田浩史: “動作識別装置および動作識別システム”, 国立大学法人筑波大学, 特願 2009-167222, 2009.
- [6] 川田浩史, 山根 健, 末光厚夫, 森田昌彦: “選択的不感化ニューラルネットを用いた表面筋電位信号からの手の動作推定”, 情報処理学会創立50周年記念全国大会, in press.
- [7] Morita, M., Morokami, S., and Morita, H.: “Attribute pair-based visual recognition and memory”, *PLoS ONE*, submitted.
- [8] 横井浩史, 千葉龍介: “サイborgの現状と今後”, 計測と制御, Vol.47, No.4, pp.351–355, 2008.
- [9] Treisman, A.: “The binding problem”, *Curr. Opinion Neurobio.* Vol.6, pp.171–178, 1996.
- [10] Treisman, A. and Glede, G.A.: “A feature integration theory of attention”, *Cogn. Psych.* Vol.12, pp.97–136, 1980.
- [11] Lee, S.H. and Blake, R.: “Rival ideas about binocular rivalry”, *Vision Res.* Vol.39, pp. 1447–1454, 1999.
- [12] Davis, G. and Holmes, A.: “The capacity of visual short-term memory is not a fixed number of objects”, *Mem. Cognit.* Vol.33, pp.185–195, 2005.
- [13] Takashi Hasuo, Ken Yamane, and Masahiko Morita: “Context-dependent processing of spatiotemporal patterns based on interaction between neurodynamical systems”, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, pp.231–236, 2008.
- [14] Yamane, K. and Morita, M.: “Brain-like computing based on distributed representations and neurodynamics”, *New Generation Computing*, submitted.

研究成果リスト

著書・論文

1. Atsuo Suemitsu, Yasuhiro Miyazawa, and Masahiko Morita: “Model of the activity of the hippocampal neurons based on the theory of selective desensitization”, *Neural Information Processing (Part I), Lecture Notes in Computer Science*, Vol.5506, pp.383–390, 2009.

2. Fumihide Tanaka and Takeshi Kimura: “The use of robots in early education: A scenario based on ethical consideration”, Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp.558–560, 2009.
3. 田中文英, 小嶋秀樹, 板倉昭二, 開 一夫: “子どものためのロボティクス:教育・療育支援における新しい方向性の提案”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, in press, 2010.
4. Fumihide Tanaka and Takeshi Kimura: “Care-receiving robot as a tool of teachers in child education”, Interaction Studies, in press.
5. 田中文英: “ロボット技術を活かした保育環境“, 日本赤ちゃん学会学会誌ベビーサイエンス, in press.
6. Ken Yamane and Masahiko Morita: “Brain-like computing based on distributed representations and neurodynamics”, New Generation Computing, submitted.
7. 新保智之, 山根 健, 田中文英, 森田昌彦: “選択的不感化ニューラルネットを用いた強化学習の価値関数近似”, 電子情報通信学会論文誌(D), submitted.
8. Masahiko Morita, Shigemitsu Morokami, and Hiromi Morita: “Attribute pair-based visual recognition and memory”, PLoS ONE, submitted.
9. 新保智之, 山根 健, 田中文英, 森田昌彦: “選択的不感化ニューラルネットを用いた関数近似器による強化学習”, 情報処理学会創立50周年記念全国大会, in press.
10. 小林遼太, 山根 健, 森田昌彦: “観察角度に依存しない物体認識のニューラルネットモデル”, 情報処理学会創立50周年記念全国大会, in press.
11. 川田浩史, 山根 健, 末光厚夫, 森田昌彦: “選択的不感化ニューラルネットを用いた表面筋電位信号からの手の動作推定”, 情報処理学会創立50周年記念全国大会, in press.

特許

1. 森田昌彦, 川田浩史: “動作識別装置および動作識別システム”, 国立大学法人筑波大学, 特願2009-167222, 2009.