

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 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008～2012

課題番号：20220003

研究課題名（和文）身体図式を基礎とした動的イメージ生成の脳内メカニズムの解明

研究課題名（英文）Brain mechanisms of dynamic image generation based on body schema

研究代表者

乾 敏郎（INUI TOSHIO）

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：30107015

研究成果の概要（和文）： 心的回転に関わる Inui と Ashizawa(2011)の神経回路モデルを脳イメージング研究により実証した。さらに心的回転機構に関して一般化動径基底関数を用いた未知物体の景観予測モデルと視点不変な認知と視覚的類似度に基づくカテゴリ化を行う下側頭葉のネットワークモデルを構築した。視点変換に関する他視点シーン生成モデルや認知地図内の移動モデルの構築などを行った。さらに視点変換と心的回転に共通する脳部位の特定などをおこなった。

研究成果の概要（英文）： Our brain imaging studies of mental rotation demonstrated a pattern of brain activation consistent with the neural network model proposed by Ashizawa and Inui (2011). We then presented a generalized radial basis function (GRBF) network that can generate rotated views of novel objects as a form of view prediction. We also presented a hierarchical neural network model of the functions of inferior temporal cortex. This model can achieve not only view-independent object recognition but also object categorization based on view similarity. We further formulated a computational model of visual scene transformations to generate spatial imagery of novel places. In addition, a biologically plausible algorithm for grid cell computation is proposed that enables calculation of a homing vector to a specific location with a cognitive map. Finally, we identified the shared and distinct neural substrates for mental rotation and perspective taking.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	35,400,000	10,620,000	46,020,000
2009年度	33,600,000	10,080,000	43,680,000
2010年度	33,100,000	9,930,000	43,030,000
2011年度	32,800,000	9,840,000	42,640,000
2012年度	27,100,000	8,130,000	35,230,000
総計	162,000,000	48,600,000	210,600,000

研究分野：認知神経科学

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：脳認知科学・身体性情報学

1. 研究開始当初の背景

生後 2-3 歳までの認知機能の獲得過程においてイメージの生成・変換機能の重要性が知られている。また催眠誘導を含む臨床心理学のさまざまな療法もイメージ生成機能が重

要な役割を果たしている（たとえば，Blakemore et al., 2003）。また最近，社会的に注目されている離人症などを含む精神疾患においても，イメージ化機能の障害が重要な要因の一つであることが指摘されている。こ

のように思考やコミュニケーション機能の中心的役割を果たすイメージの生成や変換の神経基盤を解明することは、健全な社会的営みをおくる上でも、教育や発達を考える上でもきわめて重要である。一方、近年認知における身体性(embodiment)の重要性が指摘され、認知における身体制御の役割が明らかにされつつある。このような研究の流れの中で、イメージ生成や変換に自己の運動制御機能や身体図式が重要な役割を果たしていることが指摘されている(乾, 2007)。

2. 研究の目的

具体的には、本研究では2つの機能、すなわち

- (1) 物体認知におけるイメージ生成・変換・照合過程の解明
- (2) 認知地図の動的形成過程とイメージ変換過程の解明

を並行して研究を進め、これらの共通性と差異を明確にすることにより、上記の諸機能が身体図式を基礎としていかに実現されているかを明らかにする。さらに脳機能イメージングの新技术を創出するとともに、これを用いて心的イメージの生成・変換・比較照合といった機能の神経基盤を明らかにする。

3. 研究の方法

上記(1) および(2)において行動実験、fMRI 実験と脳波の同時計測などの方法により、それぞれの実験データを集積する。また実験データに基づき計算論的神経科学の手法を導入し、それぞれの脳内プロセスのモデルを構築する。

4. 研究成果

心的イメージの生成・変換・照合に関わる脳内メカニズム

運動前野からの運動指令がイメージの変換に利用されていることが示唆された(Sasaoka et al., 2011)。さらに、心的回転を行っているとき、右前・後部頭頂間溝、左下頭頂小葉および左運動前野においてβ波が抑制されるタイミングで皮質ネットワークを形成していることを示している。そして前部頭頂間溝で視覚運動情報の統合が行われ、後部頭頂間溝で表現された心的イメージが更新されていることが示唆される(Sasaoka et al., submitted)。以上の結果は Inui & Ashizawa (2011)のモデルと矛盾しない。また能動的に景観の変化を観察することが後の景観の比較照合過程に及ぼす効果について調べた。その結果、被験者が手を回しやすくと回答した回転方向に対して、景観の比較照合が促進された。このことは、物体認知という従来視覚情報に基づくと考えられてきた認知過程に

手の生体力学的拘束が影響を及ぼすことを示唆している(Sasaoka et al., 2011)。

視点変換・心的回転に関わる脳内メカニズム

物体の未知の見えを推測する心的イメージ変換は、物体を心的に回転することでも、異なる視点に移動するイメージを作ること(視点変換)でも可能である。そこで、心的回転/視点変換課題中の実験協力者の脳活動を fMRI によって計測した(笹岡・乾, 2012; Sasaoka & Inui, 2013)。視点変換、心的回転に共通した活動が両側上・下頭頂小葉、両側腹側運動前野で見られ、これらは時計を刺激とした心的回転実験で見られた脳部位とも一致していた。また、心的回転においてはこれらの領域に加え、両側背側運動前野や左補足運動野に活動が見られた。これらの活動は、手の運動イメージがイメージ変換に利用されたことを示唆している。一方、視点変換において島皮質や、海馬、楔前部、紡錘状回にも活動が見られた。島皮質や楔前部はそれぞれ自己主体感、自己中心座標系での情報の環境中心座標への変換に関わっていることが知られており、視点変換において物-場所記憶を利用しつつ、身体運動情報を用いたイメージ変換が行われていたことを反映していると考えられる。環境内での移動を伴う視点変換については、数理モデルにより検討した。遠景の視覚情報については視覚シーンの拡大・縮小変換により、他視点イメージを視覚像として生成できることを示した (Sato, 2011a)。また、近景の視覚情報については、視覚シーンの逆パースペクティブ変換を用いることで他視点の視覚像を生成できることを示した (Sato, 2010)。さらに、逆パースペクティブ変換は網膜-皮質の結線構造である Log-polar 変換により実現しうることを示した(朝倉ら, 2013)。また、同変換がグリッド細胞で環境情報と移動情報との統合に寄与することから (Sato, 2011b)、海馬認知地図を介した他視点イメージの生成にも役立つことを示唆した。

動的イメージ生成における空間参照枠の役割

回転軸が曖昧な心的回転刺激に対して、回転角度の大きさによらず環境内の垂直軸回りの回転が極めて優勢にイメージされること、および垂直軸回りの回転が不可能な場合には物体固有軸回りの最小回転運動が選択的にイメージされることを明らかにした。そして、各参照枠で生じる物体運動を予測するための内部モデルの機能に基づき、心的回転および仮現運動における空間参照枠の最適選択方略を統一的に説明する計算理論をベイズ推定の枠組みから構築した。さらに、心的回転における物体固有軸の効果について

動力学的側面から検討し、最小回転軸が最大慣性モーメント軸と一致する場合にはその軸回りの回転はイメージされにくくなり、より慣性モーメントの小さい環境軸の効果が大きくなることを明らかにした。

一般化動径基底関数を用いた物体のカテゴリ表現の自己組織化および景観予測

一般化動径基底関数ネットワーク(GRBFN: Generalized Radial Basis Function Network)を拡張した複数の物体形状の脳内表現を学習する神経回路モデルを構築した。このモデルにより、単一物体の典型的景観が個々のGRBFNに学習されるとともに、類似度の高い物体が格子上の近傍に表現されるという下側頭葉における物体形状表現が再現されることを確認した。さらに、初期視覚野から下側頭葉に至るまでの階層的視覚ネットワークをモデルに取り入れることで、実画像を入力として局所的な形状カテゴリー表現が自己組織化されることを明らかにした。また、物体が回転運動する際の景観の変化を予測するモデルをGRBFNを用いて構築した。このモデルでは、物体のある景観とその物体を回転させた際の景観を入力とし、さらに同じ回転を行った後の景観が予測できるようにGRBFNを学習させる。この学習により、GRBFNは学習物体のみならず未学習の物体に関しても景観予測が可能になることを明らかにした。

自己と他者の身体イメージに基づく自他認識

指のタッピング課題中の被験者に対し、被験者の手の映像にさまざまな遅延を加えた映像を呈示したときの脳活動をfMRIによって測定した。その結果から、体性感覚野や小脳の活動は遅延を補償して手の映像の自分の手に帰属する過程を反映しており、予測誤差の補償ができず、運動主体感が保たれなかった場合に右角回が活動すると考えられた(笹岡・乾, 2011)。

多物体配置の他視点シーン生成モデル

多物体イメージの回転に関して、視覚シーンの変換に関する数理モデル化を提案した。パノラマシーンは遠景の視覚特徴の配置として身体位置を表現することを利用し、任意位置におけるパノラマシーンを身体移動に対応した拡大/縮小変換として推定することで、視覚像として身体移動イメージを生成できた(Sato, 2011a)。環境における複数物体のそれぞれの位置のパノラマシーンを記憶貯蔵すると仮定することで、任意位置での多物体配置の他視点シーンを生成することができた。一方、地面上などの近景の視覚特徴については、視覚シーンの逆パースペクティ

ブ変換が、他視点の視覚像の生成に有効であることを示した(Sato, 2010)。逆パースペクティブ変換像では、身体移動情報が画像シフトと対応するため、拡大・縮小変換と比べて任意地点のシーンの生成がより容易とある。これらの成果によれば、自然画像など近景・遠景の両方を含むシーンから他視点視覚像を生成するためには、これらのアルゴリズムを相補的な利用が必要であることを示唆する。

海馬認知地図の脳内プロセスモデルの構築

グリッド細胞は海馬の入力部位である内嗅野に存在し、リアルタイムに得られる身体移動情報・環境入力と、海馬に記憶貯蔵された認知地図とのインターフェースとして働くと考えられている。身体移動情報と認知地図との関連について、グリッド細胞の3Dモデル化数学的拡張として関係式を得た(Islam, 2009, 2010)。また海馬シータリズムの振幅が0.7ヘルツで振動しており、迷路空間や行動のスケジュールが位相にコードされることを見つけた。海馬の場所細胞により表現された認知地図とグリッド細胞のメトリックな性質をあわせることで認知地図上での2点間の道をみつける問題(homing Vector)の答えを提案した。一方、環境入力と海馬認知地図との対応づけについて、逆パースペクティブ視覚像のハフ変換が有効であることを明らかにした(Sato, 2011b)。ハフ変換像によれば、任意の方向の視覚シーンについて海馬認知地図と対応づけすることが可能となる。これら成果により、海馬認知地図に基づく視点変換について、海馬と関連皮質のこれまでのモデルをまとめた統合モデル化が以上より可能になった(Yamaguchi et al. 2013 in preparation)。

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23件)

1. 朝倉 暢彦, 笹岡 貴史, 佐藤 直行, 乾 敏郎 (2013) 視空間イメージの生成と変換の脳内メカニズム. 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無. (in press)
2. Molter, C., O'Neill, J., Yamaguchi, Y., Hirase, H. and Leinekugel, X. (2012) Rhythmic modulation of theta oscillations supports encoding of spatial and behavioral information in the rat hippocampus. *Neuron*, 75, 889-903, 査読有. DOI:10.1016/j.neuron.2012.06.036
3. 佐藤 直行, 大森 敏明, 我妻 広明 (2012) 海馬の理論研究: ニューロンから行動まで. 情報・システムソサイエティ

- 誌, 17(2), 査読無.
URL:http://www.ieice.org/iss/jpn/Publications/society_mag/pdf/Vol17No2.pdf
4. 三津沢 将司, イスラム・タンビル, 佐藤 直行, 乾 敏郎, 山口 陽子 (2012) 身体図式を基礎とした動的イメージ生成の脳内メカニズム(5):内嗅野グリッド細胞のモジュラスコードからガウス法を用いて homing vector を求める手法の提案. 電子情報通信学会技術研究報告, 111(483), 281-285, 査読無.
 5. 植野 徹, 朝倉 暢彦, 笹岡 貴史, 乾 敏郎 (2012) 3次元物体認識に関わる景観予測機能のモデル化. 電子情報通信学会技術研究報告, 112(298), 51-56, 査読無.
 6. Asakura, N. and Inui, T. (2011) Disambiguation of mental rotation by spatial frames of reference. *i-Perception*, 2(5), 477-485, 査読有.
DOI: 10.1068/i0425
 7. Sato, N. (2011) Spatial imagery of novel places based on visual scene transformation. *Cognitive Systems Research*, 14(1), 26-36, 査読有. DOI:10.1016/j.cogsys.2010.12.010
 8. 佐藤 直行, タンビル イスラム, 乾 敏郎, 山口 陽子 (2011) 身体図式を基礎とした動的イメージ生成の脳内メカニズム(3):内嗅野グリッド細胞を考慮した空間情報処理の計算論. 電子情報通信学会技術研究報告, 110(461), 125-130, 査読無.
 9. Sasaoka, T., Asakura, N., and Kawahara, T. (2010) Effect of active exploration of 3-D object views on the view-matching process in object recognition. *Perception*, 39(3), 289-308, 査読有. DOI:10.1068/p5721
 10. Sato, N. and Yamaguchi, Y. (2010) Simulation of human episodic memory by using a computational model of the hippocampus. *Advances in Artificial Intelligence*, 2010(4), 査読有.
DOI:10.1155/2010/392868
 11. Sato, N. (2010) Integration of visual scenes and motion signals by entorhinal grid cells during spatial imagery. *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems*, 11(1), 1-6, 査読有.
 12. Islam, T. and Fukuzaki, R. (2010) A model of path integration and navigation based on head direction cells in entorhinal cortex. *Neural Information Processing Theory and Algorithms ICONIP 2010 Proceedings Part I*, 6443, 82-90, 査読有.
DOI:10.1007/978-3-642-17537-4_11
 13. 樋口 靖晃, 朝倉 暢彦, 乾 敏郎 (2010) 複数三次元物体の認識を実現する神経回路モデル. 電子情報通信学会技術研究報告, 110(246), 11-16, 査読無.
 14. Sasaoka, T., Asakura, N., and Inui, T. (2009) A visuomotor contribution to enhanced object recognition: compatibility between object rotation and hand movement during active exploration. *Perception* 38 ECVF Abstract Supplement, 145, 査読有.
DOI:10.1068/v090693
 15. Sato, N. and Yamaguchi, Y. (2009) Spatial-area selective retrieval of multiple object-place associations in a hierarchical cognitive map formed by theta phase coding. *Cognitive Neurodynamics*, 3, 131-140, 査読有. DOI:10.1007/s11571-008-9074-9
 16. Sato, N. and Yamaguchi, Y. (2009) A computational predictor of the human episodic memory based on a theta phase precession network. *PLoS ONE*, 4(10), e7536, 査読有.
DOI:10.1371/journal.pone.0007536
 17. Sato, N., Ozaki, T. J., Someya, Y., Anami, K., Ogawa, S., Mizuhara, H., and Yamaguchi, Y. (2009) Subsequent memory-dependent EEG theta correlates to parahippocampal BOLD response. *NeuroReport*, 21(3), 168-172, 査読有.
DOI:10.1097/WNR.0b013e328332072a
 18. Sato, N. (2009) A computational model of spatial imagery based on object-centered scene representation. *Neural Information Processing ICONIP 2009 Proceedings Part I*, 5863, 49-56, 査読有.
DOI:10.1007/978-3-642-10677-4_6 (ICONIP 2009, Best poster award)
 19. Islam, T. and Yamaguchi, Y. (2009) Some computational predictions on the possibilities of three-dimensional properties of grid cells in entorhinal cortex. *Neural Information Processing ICONIP 2009 Proceedings Part I*, 5863, 26-33, 査読有.
DOI:10.1007/978-3-642-10677-4_4
 20. Islam, T. and Yamaguchi, Y. (2009) Representation of an environmental space by grid fields: a study with a computational model of the grid cell based on a column structure. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, 1357-1364, 査読有.
DOI: 10.1109/IJCNN.2009.5178755
 21. 朝倉 暢彦, 乾 敏郎 (2009) 物体の心的操作における多重の参照枠. 電子情報通信学会技術研究報告, 109(261), 25-30, 査読無.
 22. Sato, N. (2008) Computational model-based prediction of human episodic memory from eye movement. *IEICE Transactions on*

Communications, E91-B, 2142-2143, 査読有. URL:
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e91-b_7_2142

23. Sato, N. (2008) EEG theta regulates eye saccade generation during human object-place memory encoding. Proceedings of the International Conference on Cognitive Neurodynamics 2007, 429-434, 査読有. URL:
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8387-7_73

〔学会発表〕 (計 21 件)

1. Mitsuzawa, M. S. and Yamaguchi, Y. : A computational model of homing vector in grid cell-place cell system based on modular mathematics. Neuroscience 2012, in New Orleans, USA, October 16, 2012.
2. Yamaguchi, Y. : Amplitude modulation of theta oscillations in cognitive controls. The 12th Japan-Korea-China Joint Workshop On Neurobiology and Neuroinformatics, in Seoul, Korea, November 21-23, 2012.
3. 笹岡 貴史, 乾 敏郎 : 視点変換・心的回転に関わる脳内基盤の検討: fMRI 研究, 日本認知心理学会第 10 回大会, 岡山市 (岡山大学), 2012 年 6 月 2-3 日.
4. 朝倉 暢彦, 乾 敏郎 : 物体の心的回転における運動学および動力学的拘束. 日本認知心理学会第 10 回大会, 岡山市 (岡山大学), 2012 年 6 月 2-3 日.
5. Efremova, N., Asakura, N., and Inui, T. : Natural object recognition with the view-invariant neural network. The Fifth International Conference on Cognitive Science, in Kaliningrad, Russia, June 18-24, 2012.
6. Efremova, N., Asakura, N., Inui, T., and Abdikeev, N. : The visual cortex model for object recognition and classification. XIV All-Russian conference on Neuroinformatics 2012, in Moscow, Russia, January 23, 2012.
7. Sato, N. : A computational framework of large-scale space representation based on entorhinal grid cells”, The 11th Japan-Korea-China Joint Workshop On Neurobiology and Neuroinformatics, in Okinawa, Japan, December 18-19, 2011. (招待講演)
8. Mitsuzawa, M. S. and Yamaguchi, Y. : A theoretical study on space computation in grid cell- place cell system of rat brain. The 11th Japan-Korea-China Joint Workshop On Neurobiology and Neuroinformatics, in Okinawa, Japan, December 18-19, 2011.
9. Sato, N. : A computational model of grid cells based on the Hough transform of egocentric scenes. Neuroscience 2011, in Washington DC., USA, November 12-16, 2011.
10. Islam, T. and Yamaguchi, Y. : Grid field formation in the entorhinal cells simulated by a computational model with hypercolumn structures. Neuroscience 2011, in Washington DC., USA, November 15, 2011.
11. Sasaoka, T., Asakura, N., and Inui, T. : Embodied object recognition: biomechanical constraints of hand rotation affect facilitation of the view matching process. ECV2011 (34th European Conference on Visual Perception), in Toulouse, France, August 28 - September 1, 2011.
12. 笹岡 貴史, 乾 敏郎 : 遅延・変換フィードバック下での自他認識に関わる脳内基盤 1. 日本認知心理学会第 9 回大会, 東京都豊島区 (学習院大学), 2011 年 5 月 28-29 日.
13. Islam, T. and Yamaguchi, Y.: Computational model and prediction of three-dimensional properties of grid cells in entorhinal cortex. Neuroscience 2010, in San Diego, USA, November 16, 2010.
14. Sasaoka, T., Mizuhara, H., and Inui, T. : Dynamic parieto-premotor network for mental imagery transformation: a simultaneous EEG-fMRI study. The 16th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, in Barcelona, Spain, June 7, 2010.
15. 佐藤 直行 : グリッド細胞表現に基づく他者視点シーン生成の計算理論. 日本認知心理学会第 9 回大会, 福岡市 (西南学院大学), 2010 年 5 月 29-30 日.
16. Asakura, N. and Inui, T. : Spatial frames of reference for imagining and perceiving visual motion. The 3rd international workshop on KANSEI, in Fukuoka, Japan, February 22-23, 2010.
17. Sato, N. : A computational model of spatial imagery based on object-centered scene representation. 16th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP), in Bangkok, Thailand, December 1-5, 2009.
18. 佐藤 直行: 物一場所連合記憶の他視点変換メカニズム. 日本神経回路学会第 19 回全国大会, 仙台市 (東北大学), 2009 年 9 月 24-26 日.
19. Sato, N. : Relationship between an input sequence and asymmetric connections

formed by theta phase precession and STDP, 15th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP), in Auckland, New Zealand, November 27, 2008.

20. Sato, N., Ozaki, T., Someya, Y., Anami, K., Ogawa, S., Mizuhara, H., and Yamaguchi, Y.: An episodic memory encoding pathway emerges with subsequent memory dependent EEG theta synchronization. The 31st Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, in Tokyo, Japan, July 11, 2008.
21. Sato, N., Ozaki, T., Someya, Y., Anami, K., Ogawa, S., Mizuhara, H., and Yamaguchi, Y. : A cortico-hippocampal network emerging with subsequent memory dependent theta oscillation. 14th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, in Melbourne, Australia, June 16, 2008.

[図書] (計 2 件)

1. Sasaoka, T., Mizuhara, H., and Inui, T. : The interaction between the parietal and motor areas in dynamic imagery manipulation : an fMRI study, Advance in cognitive neurodynamics (II), Wang R, Gu F(eds.), Springer, 345-349, 2011.
2. Naoyuki Sato : Dynamic Brain-from Neural Spikes to Behaviors: 12th International Summer School on Neural Networks, Springer-Verlag, 13-27, 2008.

[その他]

ホームページ等

<http://www.cog.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

乾 敏郎 (INUI TOSHIO)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号 : 30107015

(2)研究分担者

山口 陽子 (YAMAGUCHI YOKO)

独立行政法人理化学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号 : 00158122

水原 啓暁 (MIZUHARA HIROAKI)

京都大学・大学院情報学研究科・講師

研究者番号 : 30392137

佐藤 直行 (SATO NAOYUKI)

公立ほこだて未来大学・公私立大学の部局等・准教授

研究者番号 : 70312668

笹岡 貴史 (SASAOKA TAKAFUMI)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号 : 60367456