

研究課題別研究評価

1. 研究課題名 学習・生成・予測に基づく能動的な視覚認知の神経計算様式

2. 研究者名 安藤広志

3. 研究の狙い

人間の脳は、高度に発達した視覚認知システムを有しており、外界の多様な変化を瞬時に把握できるその柔軟性において、現存する人工の視覚システムを遥かに凌いでいる。このような生体の優れた情報処理システムの計算機構を解明するために、視覚認知の研究はこれまで様々な発展を遂げてきた。しかし、まだ十分に解明されていない脳の仕組みに「能動的な視覚認知」の機構がある。すなわち、生体の視覚処理には、低次から高次へと段階的に入力情報の解釈を進める受動的な処理機構だけでなく、高次の環境認識や行動制御のシステムと協調して処理を進める能動的な視覚認知の機構が存在すると考えられる。特に、能動的な視覚認知では、入力情報を固定的に解釈するだけでなく、課題に応じた「学習」により視覚表現を獲得し、獲得した表現から視覚イメージを「生成」して情報の補完や選択を行なうとともに、迅速に行動制御を行なうために視覚環境が将来どのように変化するかを「予測」する機能を持つと考えられる。

本研究のねらいは、このような学習・生成・予測に基づく能動的な視覚認知機構に焦点を当て、その神経計算の仕組みを探ることにある。具体的には、視覚イメージ生成に基づく3次元情景認識や3次元動体予測の神経機構を研究テーマとして取り上げ、神経計算モデルの構築・シミュレーション、および視覚心理実験・脳活動計測といった複数の研究手法を用いて、これらの神経計算機構を探る。特に、本研究では、VR技術を用いた広視野立体ディスプレイによる視覚心理実験やfMRI(機能的磁気共鳴撮像)装置を用いた非侵襲脳計測実験などの新しい研究手法の開発も目標とする。このように、本研究では、モデル構成と視覚実験の両手法を用いることにより、従来の受動的な視覚処理の枠組みを打ち破って、高次の認知機能や行動制御と密接に関連した、よりダイナミックな視覚認知の枠組みの基盤を創り出すことを目指す。

4. 研究結果

本研究の成果は、次の4つに集約される。

1) **生成に基づく「認識」モデルの構築と展開**。低次の画像処理と高次の認識処理の間で情報を双方向的に循環させる「生成に基づく「認識」モデル」を構築するとともに、属性を操作した画像を新規に生成する統計的手法を開発した。このモデルでは、複雑な3次元環境に対処するため、低次と高次の処理系の情報を融合した「中間統合表現」を明示的に生成しながら物体認識を行なう。特に、高次視覚系における「連続視点表現への引き込み」と低次視覚系における「画像分析(物体領域推定と注視点制御)」を同時に最適化する。このような双方向ダイナミクスに基づく計算様式は、物体画像の変換補正や分節化に役立つとともに、複数の物体が互いに重なり合っている複雑な3次元情景の認識に対して特に有効に機能すると考えられる。そのため、画像の一部が遮蔽された物体像や複数の物体が重なり合った画像の認識を計算機実験により評価し、本モデルが有効に機能することを確認した。さらに、視覚イメージ生成の新しい手法として、単一の画像に含まれる属性値を操作してさまざまな新規の画像を生成する統計的な手法を構成した。

この手法では、多数の画像から属性値の統計的な特徴を抽出し、その特徴を操作することで、与えられた画像に対してさまざまな新規の画像を合成することが可能になる。この手法を計算機に実装し、年齢の属性値を操作した顔画像の生成を試み、その有効性を確認した。

2) **生成イメージが構造推定に与える効果の実験的検証。** 記憶像から生成された心的な視覚イメージが外界構造の推定に与えるトップダウン効果を視覚心理実験により検証した。生成に基づく「認識」モデルで仮定したような「階層モジュール間の強い相互作用」が存在するとすれば、記憶から生成された高次の視覚情報も立体再構築に貢献するはずである。そこで、記憶表現から脳内で新規に生成された心的イメージ (Mental Imagery) が3次元構造知覚に与える効果について検証する実験を行なった。特に、心的回転 (Mental Rotation) を活用した新しい実験手法を考案し、運動情報から3次元形状を知覚する「運動立体視 (Structure-from-Motion)」に対して、視覚イメージが影響を与えるか否かを調べた。この実験から、3次元環境の推定には、物体の剛体性など外界の自然規則 (物理的拘束条件) だけでなく、記憶表現から内的に生成された視覚イメージ情報も貢献することが示唆され、従来考えられてきた受動的な視覚機構だけではなく、高次の学習生成過程と画像理解過程との協調処理が脳内に存在する可能性が示された。

3) **動体予測における学習効果の視覚心理実験による検証。** VR (3次元仮想空間) 技術を活用した3次元動体予測の視覚心理実験を行ない、人間の動体予測における学習効果を確認した。本研究では、高輝度広視野 (視角で $65^{\circ} \times 81^{\circ}$) の立体提示システムを構築し、ヒトの3次元動体予測の精度を測定するとともに、「視覚学習の効果」を調べる実験を行った。このような実験を行ったところ、以下の結果が得られた。1) 観察者は、物体が終点に到達する時刻より前に、終点位置を一撃的に予測することができる。2) 物体消失位置が観察者に近いほど、予測の精度と確信度は高まる傾向がある。3) 学習前後の実験結果の比較から、予測の精度と確信度は、純粋な視覚学習により向上した。4) 動体予測の学習効果は、フィードバックを与えた運動方向のみ顕著に現われ、汎化効果は限定的であった。5) 脳内では、一定の重力加速度が仮定されて、動体予測の計算が行なわれている。これらの実験結果により、人間の動体予測能力は、従来、想定されてきた以上に柔軟であり、個別の環境刺激に対応して適応的な処理が行なわれていることが示された。

4) **脳活動計測による動体予測に係わる脳領野の特定。** 体性感覚と連携し、能動的な視覚処理に係わると考えられる「頭頂連合野」(特に頭頂間溝周辺) が、動体予測においては中枢的な役割を果たすという仮説を提案し、fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging 機能的磁気共鳴撮像) 装置を用いて、その検証を試みた。本実験では、予測課題と非予測課題を行なった場合の脳活動を統計的に比較することで、動体予測に関わる皮質領野の特定を行なった。実験データの統計的分析の結果、以下の領野に有意な脳活動が認められた。1) 頭頂間溝 (intraparietal sulcus: IPS) 前部および上下の頭頂小葉 (BA7 と BA40 に対応) 2) 運動前野背側部 (BA6) 3) 下前頭回 (BA44; Broca 野、BA47) 4) 小脳外側部 (lateral cerebellum)。この結果は、頭頂連合野を中心とした神経ネットワークが動体予測に強く関与することを示唆している。

5. 自己評価

本研究では、従来の受動的かつ固定的な脳の視覚認知機構の枠組みを打開し、学習による視覚情報の獲得、生成イメージに基づく視覚処理、行動制御のための動体予測といった、より能動的でダイナミックな視覚認知機構の解明を目指してきた。そのために、神経計算モデルの構成と

新しい実験パラダイムの開発を行ない、能動的な視覚認知の枠組みを構築するための「基盤」をこの3年間で確立できたと考えている。特に、1) 視覚イメージ生成の計算モデルを構成し、物体認識と構造知覚を結ぶ新しい枠組みを構築できた点、2) VRを用いた新しい視覚実験手法を開発し、行動制御に係わる高次視覚を明らかにする有効な手段を切り開いた点、3) fMRI 脳活動イメージングの実験技術を駆使し、動体予測の脳領域の特定に初めて成功した点、において、重要な成果を得ることができたと考える。これらの成果は、今後、論文・学会等においてさらに積極的に公表していく予定である。

一方、能動的な視覚認知の計算様式の全容を解明し、統一的な枠組みを構築するためには、本研究で得た成果を踏まえて、さらに研究を推進する必要がある。特に、物体認識の計算モデルに関しては、モデルの頑健性を高め、より複雑な実環境下で機能するための機構を工夫していく必要がある。また、このモデルで仮定している効果が脳内に実在するかを、より広範囲の刺激パターンを用いて、視覚心理実験および脳活動計測実験により検証していく予定である。動体予測の視覚心理実験に関しては、より現実世界に近い環境下でのヒトの動環境予測の精度と学習能力を明らかにしていきたい。特に、複数の物体が衝突を引き起こす状況、自己運動をともなう状況での動体予測など、より複雑な動環境をVRで生成し、視覚実験を進めていく予定である。さらに、動体予測の脳活動計測に関しても、活動が認められた各領域の機能特性の解明、学習により脳活動が変化する領域の特定などを今後の研究目標にしている。最終的には、環境認識と行動制御に係わる視覚処理モデルを統合して、より統一的な視覚認知の枠組みの構築を目指していきたい。

6. 研究総括の見解

人間情報科学の分野において、これまで解明が進んでいなかった高次の能動的視覚認知機構という複雑な研究対象に挑戦し、理論と実験の両面から重要な成果をあげたことを高く評価したい。特に、VRを用いたfMRI脳活動計測など、新しい研究技法を積極的に開拓した。本研究の成果の発展に一層努力すれば、人間の「知」の解明に向けて、将来大きな貢献が期待できる。

7. 主な論文等

Ando, H. (2003). Internal representation of gravity for visual prediction of an approaching 3D object. To be published in VSS03.

安藤広志 (2002) 仮想立体視空間を用いた動体予測の脳機構の研究 .VR 学会「手」探り研究会招待講演 .

Ando, H. (2002). Human Brain Regions Involved in Visual Motion Prediction. NeuroImage Human Brain Mapping 2002 Meeting, 599.

Mukaida, S., Ando, H., Kinoshita, K., Kamachi, M. and Chihara, K. (2002). Facial Image Synthesis Using Age Manipulation based on Statistical Feature Extraction. Visualization, Imaging, and Image Processing. 12-17.

- 向田茂,安藤広志,木下敬介,蒲池みゆき,千原國宏 (2002).顔画像生成のための統計的な年齢特徴抽出.日本顔学会誌 2(1). 15-24.
- 桑山妙子,金子寛彦,安藤広志 (2002) 両眼視差とテクスチャの3次元情報統合における視覚学習の効果. Forum on Information Technology 2002. K-21.
- Ando, H. (2001). Visual Learning in the Spatial Prediction of an Approaching 3D Object. Journal of Vision, 1 (3), 313.
- 安藤広志 (2001) 3次元動体の運動予測と視覚学習. 生理学会招待講演:視覚のメカニズム (生理,心理物理,計算論的アプローチ).
- Ando, H. (2000). Visual Imagery Influences Perception of 3D Structure from Motion. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 41(4), S717
- 安藤広志 (2000) 3次元環境の視覚認知 階層間ダイナミクスと神経計算様式. 東京工業大学理工学研究科 特別講演会.