

生体の視覚に学ぶコンピュータビジョン

Computer Vision Inspired by Biological Visual Systems by Osamu HASEGAWA(Electrotechnical Laboratory, Machine Understanding Division).

長谷川 修¹

¹ 電子技術総合研究所知能情報部

1. はじめに

コンピュータがチェスの世界チャンピオンに勝ったというニュースは記憶に新しいが、私たちが日頃何気なく行っている「見る」ということを実世界で人間と同じようにこなせるコンピュータは今日でも実現されていない。この理由は、チェスではゲームに勝つという目標がユニークに設定でき、その目標に照準を合わせた研究や開発が進められるが、視覚の問題ではこうした目標の設定自体が困難なことにある。つまり現状では、視覚機能を実世界で実現させるために本質的に重要なことは何かほとんど明らかでないといつてよい。

こうしたことから、実際に実世界で機能している生体の視覚^{*}の機能や動作原理を学ぶことは、コンピュータビジョン(Computer Vision:以下CV)の研究を進める上できわめて重要と考える。そこで本稿では、生体の視覚に関する最近の研究動向や、新たな知見などについて概説する。

まず2章では、D.Marrにより提唱された視覚研究の計算論的アプローチとMarrの視覚のシナリオを振り返る¹⁾。3章では脳の視覚系に関する最近の研究動向や知見を概観する。4章では3章をベースに視覚的な注意に基づく視覚情報の結び付け問題などについて論じる。

2. Marrのアプローチと視覚のシナリオ

2.1 視覚研究の計算論的アプローチ

2.1.1 視覚研究における3つのレベル

視覚研究の計算論的アプローチは、Marrにより提唱された視覚研究の枠組みである。これにより、それまでCVや心理学、生理学といった分野で個別に行われてきた視覚研究に共通の基盤と指針が与えられ、各分野の研究者間で互いの研究の位置付けや意味を理解することが可能となったといつて過言ではない。以下に、その核心部をなす“視覚研究における3つのレベ

ル”を示す²⁾(図-1)。

- 計算理論のレベル：視覚の目標は何か、なぜそれが適切なのか、またそれを実現する論理はいかなるものかを計算論的に明らかにするレベル。
- 表現とアルゴリズムのレベル：計算理論を具体的に実現するアルゴリズムと扱われるデータの表現形態を明らかにするレベル。
- ハードウェアのレベル：上記のアルゴリズムがどのような神経回路で実現されているかを明らかにするレベル。

これらを航空機の実現過程を例に、工学的な見地から解釈してみよう³⁾。

計算理論のレベルは、飛ぶためには何が必要なのかを厳密に議論することを目的とし、空気力学を理解して飛行の基本的な原理(揚力発生メカニズム)を理論的に明らかにする過程に相当する。

表現とアルゴリズムのレベルは、飛行の原理を効率よく利用するにはどのような手段と手順がとれるかを検討するレベルであり、翼と飛行機のデザインの過程に相当する。つまり、揚力を得るためにはどのような翼(矩形翼、三角翼など)をどう使えばよいか(羽ばたかせる/滑空させる/回転させるなど)について、考え得る可能性の中から最適なものを、その目的やハードウェアの制約などに照らして探るのである。

ハードウェアのレベルは、上記のデザインをさまざまな物理的な制約を考慮しつつ実現する過程である。物理的な制約とは、飛行機の例では翼や機体に利用する素材の重量や強度などにあたる。

2.1.2 Marrのアプローチの意義

ここで重要なのは、現在私たちが目にする航空機はこうした段階を経て実現されたのであり、単に鳥の羽ばたきを真似し続けた結果ではないという点である⁴⁾。つまり航空機は、鳥の飛行の観察から空気力学

²⁾ Marrはこのうち「解こうとしている問題の性質から理解していく方が理解が容易になる」として計算理論のレベルの重要性を強調している。

³⁾ 工学的なモノ作りの観点からの解釈であるので、視覚研究について論じたMarrのオリジナルの考えとニュアンスが異なる点がある。オリジナルの詳細は文献1)を参照。

^{*} 本稿では霊長類の視覚を念頭に置く。他の動物や昆虫の視覚については文献2)に詳しい。

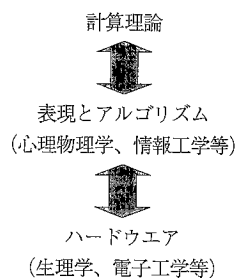


図-1 視覚研究における3つのレベル

に至り、そこから工学的に実現可能な形で発想するという問題への正しいアプローチがとられたことによって、初めて実現されたのである。

視覚研究は現在もその途上にあるが、Marrの計算論的視覚研究のアプローチは、視覚研究にこれに匹敵するインパクトをもたらしたといつてよい。

2.2 Marrによる視覚のシナリオ

2.2.1 Marrのシナリオ

Marrは、自らのアプローチに基づき、視覚系の目標を“網膜上の2次元画像から実世界の3次元構造を推測すること”として、3つの過程からなる脳の視知覚過程のシナリオも提唱している。以下にその概要を示す。

[初期視覚過程] 網膜上に投影された画像から、局所的な明るさの変化をエッジや線分、小塊などとして取り出し、それらをつなげたり、まとめたりして原始スケッチと呼ばれる絵画の下絵のような表現を作る。

[中期視覚過程] 原始スケッチから、(1) 両眼視差、(2) 運動視差、(3) 陰影、(4) 遮蔽輪郭、(5) テクスチャ、といった情報を並列独立に得て、これを統合して原始スケッチ上の物体の本来の凹凸をレリーフのように浮かび上がらせる^{*4}。このレリーフは2次元の原始スケッチと物体の3次元構造の表現の中間にあたるので2.5次元スケッチと呼ばれるが、これにより観察者が見た位置からの（観察者中心の）表現が構成される。

[高次視覚過程] 最後は3次元物体の脳内表現の過程である。Marrは、3次元物体は脳内において一般化円筒と呼ばれる円筒状のモデルの階層的な組合せによって表現されていると考えた。これによれば、たとえば人間は頭、胴、腕、足を表す大きな円筒と、腕、掌、指の小さな円筒が階層的に組み合わされて表現される。2.5次元スケッチはこうしたモデルをある方向か

*4 ちなみに羽ばたきによる人の飛行は、数千年にわたり飛行のための唯一の解と考えられてきたが、今日でも達成されていない。

*5 上記 (1) は右目で見えた画像と左目のそれとの差、(2) は片目で2地点から同じ物体を見た時の見えの差、(3) は物体にできる影、(4) は物体のシルエットの輪郭、(5) は遠くまで続く繰り返し模様見えの変化であり、いずれも物体の3次元形状を得る手がかりになる。CV分野で提案された画像から3次元の構造を復元するアルゴリズムは、多くがこれらのモジュールの工学的実現例となっている。

ら見た時の凹凸である。これにより、物体は固有の表現を獲得し、観察者との間の距離や見る方向によらず1つの物体として知覚されるとする。

2.2.2 Marrのシナリオの疑問点

Marrのシナリオは視覚に関連するさまざまな分野の研究者を大いに刺激し、後の視覚研究の進展に大きく寄与した。CV分野でも、その後80年代後半にかけて初期視覚過程が正則化理論により説明されたり^{3),4)}、結合MRFモデルをベースに複数の視覚モジュール出力を統合して2.5次元スケッチを構成する試み⁵⁾などが行われている。

しかし、Marrのシナリオにはいくつかの疑問（問題）点が指摘されている。

その第1は、Marrのシナリオが視覚を受動的で汎用的な3次元構造の復元システムとしすぎているという点である。このシナリオには、タスクによっては観測者が自ら動いて情報を獲得したり、必要がなければ3次元構造の復元過程を省略するといった柔軟性に欠けている^{*6}。

第2は、高次視覚過程における物体中心の3Dモデルの存在に関する疑問である。人が3次元物体を記憶する際、その物体をいくつかの方向から見た“見え”を覚えており、3Dモデルは作っていないことを示唆するデータが得られており^{*7}現在でも議論が続いている。

3. 生体の視覚に関する最近の研究動向

本章では、生体の視覚系のうち、特に霊長類の視覚系に関する最近の研究動向について概説する。

3.1 霊長類の視覚系：概要

よく知られているように、脳には30以上の領野が存在し、それぞれの領野は他の多くの領野と連絡することによって、多種多様な機能を発現させている。

図-2は、このうち視覚に関係する領野や連合野の機能と連絡関係を最近の知見に基づいてまとめたものである^{8)~17), 27)~30)}。霊長類の脳を左側面から見ており、左下に眼球がある。それぞれの領野の位置関係はおおよそ正しいが、大きさと形状は不正確である。

図-3は基本的に図-2と同じものであるが、物体を受動的に見る際に活性化する部位とそれらの連絡関係を示している。図中円柱で示した部位は受動的に活性化する傾向が特に強い部位である。薄い網かけの部位には能動的な注意の影響が見られる。

図-3で、視覚情報は左下の眼球から中央付近を通過して大脳皮質視覚野に至り、そこから上下に分かれて頭頂連合野と側頭連合野に達する。このうち大脳皮質視覚野から上に向かい頭頂連合野に至る経路は“空間視

*6 こうした指摘は特にロボットの視覚の研究者からいち早くなされた⁶⁾。

*7 メンタルローテーションの実験として知られている⁷⁾。

経路”と呼ばれ、自分と他のものとの空間的な位置関係の把握が行われている。大脳皮質視覚野から下の側頭連合野に至る経路は“物体視経路”と呼ばれ、空間視経路とは並列独立に、視野中の物体が何であるかのパターン認識が行われている^{8),11),12)}。近年これらの情報は、中脳で統合されているのではないかといった議論がある^{26),32)}。その詳細は4章に述べる。

3.2 網膜から脳へ：視覚情報の入力部

まず網膜の構造と機能からみていこう^{13),18)}。人間の網膜は厚さ2~300ミクロン、面積が数平方センチの膜状をしている。網膜上の視細胞は1億個以上あるが、視軸と交わる中心部の半径200 μ mの領域はさらに細胞が密集しており、その密度は1mm²あたり16万個といわれている。これは他の領域に比べて格段に大きい値であり、中心重点主義の構造が窺える。またダイナミックレンジでは、夜道と炎天下の砂浜などでは10⁶以上の光量差があるが、2種類の視細胞の感度の違いによってこれをクリアしている。ちなみに近年のビデオカメラの画素数は、高精細カメラでも100万のオーダーであり、単純に計算して3桁少ない¹⁹⁾。ダイナミックレンジでは、露光量の異なる画像をフィールドレートで読み出すことによって10⁴程度の光量差を許容するシステムが開発されているが²⁰⁾、それでも2桁及ばない。

次に網膜から脳（大脳皮質視覚野）に至る経路であるが、これには図-3に示すように外側膝状体を経る経路と上丘から視床枕を経る経路がある。このうち後者の詳細についてはあまり知られていなかったが、近年、視床枕に関する新たな知見が得られつつあり、視覚的な注意や視覚情報の結び付け問題（ともに後述）などとの関連が論じられるようになってきている（4章参照）。

3.3 空間視経路

本節では、大脳皮質視覚野から先の2つの経路のうち、頭頂連合野に至る空間視経路について述べる。

3.3.1 MT, MST

MT, MST野は、図-3に示されるように多くの領域から入力を受けている。

まずMT野の細胞であるが、受容野は視野中心では小さく、重なりあいながら互いにずれている。また細

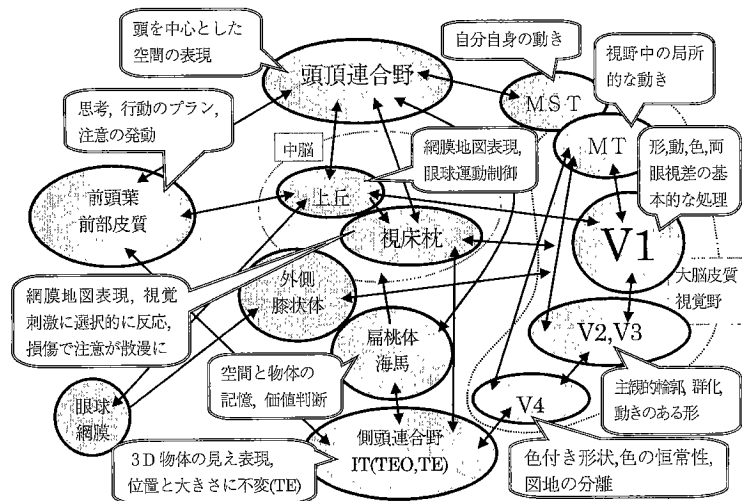


図-2 視覚認知過程にかかわりの深い脳の部位とその機能：左側面から見た霊長類の脳で左下が眼球である。

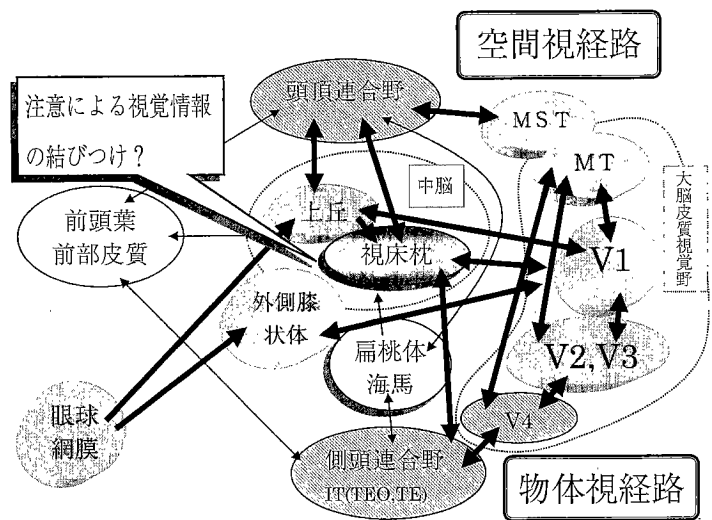


図-3 受動的視覚認知過程：左下の眼球から入った情報は、脳の中心部付近を通り、後頭部の視覚野に至る。ついで上下方向に分かれ、空間視（どこに）と物体視（何が）が行われる。これらの情報は、再び脳の中心部に戻されて統合されている可能性がある。

胞は視野内の刺激の動きの方に選択性を示し、0.5mmの間に最適な運動方向が180度回転するコラム構造を形成しているほか（運動方向性コラム）、刺激の速さや両眼視差にも選択性を示す。こうしたことから、MT野の細胞は主として視野内の局所的な動きに反応すると考えられている^{11),14),15)}。

MST野の細胞は、受容野が視野の半分以上を占めることもあることから、一般には自分自身の動きによる大きな動きに反応すると考えられている^{11),14),15)}。しかし最近では、大きな物体が接近してくるといった、像の拡大と視差の変化の組合せによって反応する細胞や、眼球の動き情報との組合せによって眼球運動に起因する網膜上の見かけの動きをキャンセルしてから反応する細胞なども見いだされている¹⁵⁾。

3.3.2 頭頂連合野

頭頂連合野では、以上の過程で抽出された動きや奥行きの情報に眼球運動や体性感覚といった非視覚系の情報を加え、さらに情報の統合が進められると考えられている。具体的には、頭に対してある位置に刺激を提示すると眼球の向きによらず反応する細胞や、注視点までの距離に応じて反応する細胞などが見い出されている¹⁵⁾。

これらのことから、空間視経路では“自らの視点位置(頭部)を中心とした3次元空間の記述”が行われていると考えられている¹⁵⁾。

3.4 物体視経路

本節では、大脳皮質視覚野以後のもう1つの視覚経路であり、側頭連合野に至る物体視経路について述べる¹⁶⁾。

3.4.1 V1：第一次視覚野

V1(第一次視覚野)は外側膝状体や上丘と双方向に連絡し、大脳における視覚情報処理の起点になっている。V1にも視野地図が投影されているが、ここでも中心重点主義となっており、そのほとんどは視野中心の約5度以内の情報の処理に使われている¹¹⁾。

またV1では場所により左右いずれの眼から情報を受けられるかが決まっており(眼優位性コラム)、さらにその中には線分の方位に選択的に反応する細胞のセット(方位選択性コラム)と、ブロップと呼ばれる円柱状の構造があることが知られている^{11),21)}。ブロップは色情報を符号化しているという説がある¹³⁾。

総じて、V1では形、動き、色、両眼視差に関する基本的な情報の処理が行われていると考えられている^{11),21)}。

3.4.2 V2, V3

V2の細胞群は方位、運動方向、色、コントラストなどに並列/独立に反応し、V1に似ているが、V1よりも受容野が大きく、両眼視差感受性が高い¹¹⁾。

一方で、V2では方位選択性を持つ細胞の1/3が主観的輪郭に反応するほか¹¹⁾、V2が破壊されると視覚刺激のグループ化ができなくなることがあり¹¹⁾、群化の機能も担っていると考えられる。これは、こうした機能が視覚のかなり初期の段階で発現していることを示唆している。

V3に関する報告は少ないが、動いている線分の集合から形状を抽出していると考えられている²¹⁾。

3.4.3 V4

人間はさまざまな色を蛍光灯、白熱灯、太陽光といった光源の違いによらず安定して知覚することができるが、これを色の恒常性という。V4にはこうした人間の主観的な色の見えに対応した反応をする細胞が見い出されている^{11),13),14)}。

ほかに、図形の輪郭の方位やテクスチャに選択的に

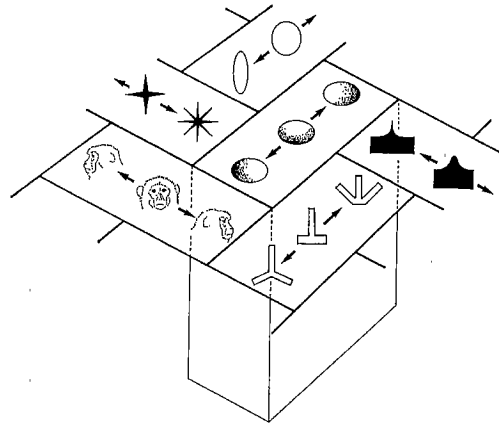


図-4 TE野の微小空間構造の模式図
(文献23)より許可を得て転載)

反応する細胞も見つかっているが、これらは対象を背景から切り出す“図形の図と地の分離”を行っていると考えられている¹³⁾。

さらに、V4では注意を向けるべき刺激と無視すべき刺激を同じ視野に提示すると、無視すべき刺激に対するニューロンの応答が抑制されるとの報告があり、ここに至り初めてトップダウン的な“注意”の影響が観察されている¹¹⁾。

3.4.4 IT：TEO, TE

IT野(下側頭葉皮質)は物体のパターン認識に関連が深いとされ、細胞構築学的区分によって大きく前半部のTEO野と後半部のTE野に分類されている。

TEO野の細胞は直径4~8度程度の受容野を持ち、視野の中心付近のものでも必ずしも中心視を含まない。しかしTE野の細胞の受容野は20~40度とかなり大きく中心視を含んでおり、位置と大きさに不変な処理が行われている¹⁴⁾。

またTEO野とTE野には“黄色の星型”といったある程度複雑な刺激に選択的に反応する細胞があり、TEOからTEに進むにつれてその数が増え、選択性も強くなる^{14),23)}。

さらにTE野では似た図形特徴に反応する細胞がコラム状に固まっているほか、少しずつ異なる特徴に反応する数個のコラムが隣接して全体として一段大きい認識の単位を構成しており、それらの出力の中心はさまざまな3次元物体を回転させつつ提示すると図-4に示すように皮質上を一方向にずれるという^{22),23)}。TE野のこうした細胞の刺激選択性は固定ではなく、大人の動物でも学習により変化するという報告もある¹⁴⁾。

3.4.5 2D見えモデルか3Dモデルか

以上のIT野に関する知見によれば、Marr以来続いている3次元物体の脳内表現に関する議論は、一見、複数の見えで表現する2D見えモデル説に分がありそうに見える。しかしIT野での表現は位置と大きさに不変な物体中心の表現となっており、3Dモデル説が否定されたわけではない。推測の域を出ないが、“複

*8 物体視経路の計算理論については文献8)参照。

数の観察位置からの、物体固有の座標系による2.5次元スケッチ群による表現”といった双方の中間的なものである可能性もあろう。今後のさらなる研究の進展が待たれる²⁴⁾。

4. 視覚情報の結び付けと情景の記述：考察

3章では観察者中心の空間の記述（空間視）と物体の認識（物体視）について述べたが、これらは並列独立に処理されるため、“どこに何があるか”といった情報に高めるにはこれらを統合しなければならない。これは視覚情報の結び付け問題と呼ばれ、近年視床枕や視覚的な注意などの関連が示唆されている^{26),32)}。本章では、この結び付け問題や情景の記憶過程などについて、筆者の考察を交えつつ論じる。

4.1 受動的な注意と視覚情報の結び付け

4.1.1 視覚的な注意とは

一般に、注意とは状況に応じて有用な情報を選択するフィルタリング・プロセスであるといつてよい¹⁷⁾。このうち視覚的な注意には受動的な注意と能動的な注意があるが、結び付け問題では、これに加えて空間的な位置に関する注意が関与するといわれている¹²⁾。

そこで以下では、まず“受動的で空間的な注意”に基づいた視覚情報の結び付け過程を論じる。ついで次節では、これに“能動的で空間的な注意”を導入する。

4.1.2 視床枕視野地図上での注意による結び付け

視床はたまごを2つ並べ真中で接したような形をしており、視床枕は視床後部の3分の1程度を占めている^{9),10)}。これまで視床枕の機能の詳細は明らかではなかったが、近年、

- 頭頂連合野や側頭連合野、大脳皮質視覚野などと双方向に密な連絡があること
 - 視野地図表現があること
 - 視覚の空間的/属性的な注意に応じて活性化すること
 - 特定の視覚刺激に選択的に反応する細胞があること
- などが明らかにされつつある^{27)~29)☆9)}。

そこで、以下のプロセスを考える。

- (1) 視床枕の視野地図上に注意（注目）すべき個所と注意する順番が逐次的・受動的に表現される。これには空間視経路からの情報も統合される。

☆9) 視野地図とは、視野の中心部を強調（拡大）した映像による地図である。右（左）の視床枕には左（右）の視野地図があると考えられる。

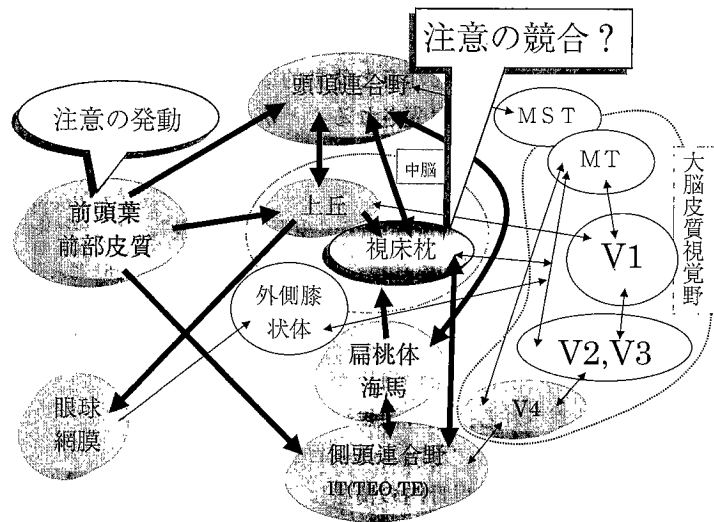


図-5 能動的視覚認知過程：
前頭葉での思考に基づき能動的な注意に基づく視覚認知過程が発動される。能動的な注意は受動的な注意と視床枕で競合している可能性がある（図-3参照）。

- (2) “注意個所の物体を切り出して認識せよ”というタスクが視床枕と物体視経路の間で繰り返し実行される。

- (3) (2) の認識結果が視野地図上の該当個所に随時上書きされる。

これにより、視野地図上で視覚情報の結び付けが達成されるとは考えられないだろうか。

なお、受動的な注意過程で自動的に選択されるのは、色や線分方向、大きさなどの基本的（初期視覚的）な特徴が他と異なる個所であるが^{☆10)}、それらの注意は大脳皮質視覚野で処理された後、視野地図上に直接書き戻されている可能性もあろう。

4.2 能動的な注意過程の導入

以上の結び付け過程は、Marrのシナリオに似てやや受動的/汎用的である。そこで図-5に示す能動的な注意を導入する。

一般に、人は記憶情報を前頭葉に読み出して思考し、状況に応じてさまざまな注意を発動するといわれる^{30)~32)}。こうした注意は能動的な注意と呼ばれ、視床枕をはじめ上丘、頭頂葉、側頭葉などを活性化することがPET（陽電子断層撮影法）などにより調べられている³²⁾。

そこで、先のプロセスに以下を加える。

- (4) 能動的な注意も、頭頂連合野や側頭連合野を通じて視床枕の視野地図上に表現される。
- (5) 能動的な注意と受動的な注意は視野地図上で“競合”する。
- (6) 視覚情報の結び付けは競合に勝ち残った注意（個所）から順に行われる。

これにより、意識的に注意個所を選んだり、急に何かが視野に入るとそちらに注意が向くといった、状況

☆10) 詳細は心理物理学の視覚探索分野で研究されている¹⁷⁾。

の変化に応じた柔軟で適応的な反応の過程^{12),33)}も達成されるとは考えられないだろうか。

なお人間の場合、受動的な注意と能動的な注意が競合すると、受動的な注意が優先されることが知られている¹²⁾。

4.3 一連の情景の記述

以上述べてきた過程は、今見ている“視野内の情景”の記述過程といえる。では、それらはどのようにして、自宅から職場までといった“一連の情景”に構成されるのであろうか。

これには、記憶と関連の深い海馬が何らかの役割を担っていると推測される。最近海馬には特定の場所に行った時にだけ反応する“場所ニューロン”が見い出されている¹⁶⁾が、個々の視野内の情景はこうした場所ニューロンを介して関連付けられているのかもしれない。また海馬と同じ中脳にある扁桃体は、生物学的な価値評価基準から情報に意味付けをする器官といわれるが^{16),30)}、こうした情景(記憶)の中で重要なものにマーキングしている可能性も考えられる。

4.4 注意に関するその他の知見

ほかにも、空間的な注意の持続や解放には頭頂連合野と前頭連合野が関わっていることや、脳の右半球では広範囲で包括的な注意が処理され、左半球では局所的な注意が処理されるといった報告がなされている³²⁾。

今後さらに研究が進展し、こうした知見も考慮された統一的な脳内の注意のモデルが確立されることが期待される。

5. おわりに

本稿では、最近の生体の視覚研究の動向などを概説した。最近こうした分野に関する良書が多数出版されているので^{8),11)~14),17),23),25),32),34),35)}興味を持たれた方はぜひそれらに読み進んでいただきたい。実世界で人間の視覚と同じように機能するビジョンシステムの実現には、Marrのいうように、生体の視覚に関する知見を計算理論のレベルで記述・解釈し、そこから工学的に発想するのが最良かつ最短の方向であらう。

本稿で述べてきたように、生体の視覚は確実に明らかにされつつあり、特に近年は計測技術の長足の進歩によりそのペースが加速されている。この意味で、昨今のCV分野はかつてないほど研究する素材に恵まれているといえよう。

文末だが、筆者の浅学により、記述中に考え違いや重要な研究の見落としがあるかもしれぬ。お気づきの点をご叱正いただければ幸いです。

参考文献

- 1) Marr, D.: Vision, W.H. Freeman and Co., San Francisco(1982).
(邦訳:乾敏郎, 安藤広志訳:ビジョン, 産業図書(1987).)
- 2) 鈴木光太郎:動物は世界をどう見るか, 新曜社(1995).

- 3) Poggio, T., Torre, V. and Koch, C.: Computational Vision and Regularization Theory, Nature, Vol.317, No.6035, pp.314-319(1985).
- 4) 坂上勝彦, 横矢直和:弛緩法と正則化, 情報処理, Vol.30, No.9, pp.1047-1057(Sep.1989).
- 5) Poggio, T., Gamble, E.B. and Little, J.J.: Parallel Integration of Vision Modules, Science, 242, pp.436-440(1988).
- 6) 池内克史:タスクオリエンテッド・ビジョン, 信学誌, Vol.74, No.4, pp.360-335(1991).
- 7) Cooper, L.A. and Shepard, R.N., (大山・高城訳):イメージ上の物体の回転, (別冊日経サイエンス)色・運動・イメージ, pp.96-104, 日経サイエンス社(1986).
- 8) 川人光男:脳の計算理論, 産業図書(1996).
- 9) 時実利彦:目で見える脳, 東大出版会(1969).
- 10) 半田智久:脳-心のプラットフォーム, 新曜社(1994).
- 11) 川人光男他:視覚と聴覚(岩波講座, 認知科学3), 岩波書店(1994).
- 12) 安西祐一郎他:注意と意識(岩波講座, 認知科学9), 岩波書店(1994).
- 13) 平井有三:視覚と記憶の情報処理, 培風館(1995).
- 14) 田中啓治:形と動きの脳内表現, 伊藤正男編:(続)脳のはたらき, pp.52-109, 講談社サイエンティフィック(1994).
- 15) 小松英彦:空間と運動の脳内表現, 宮下・下條編, 脳から心へ, 岩波書店, pp.73-82(1995).
- 16) 小野武年:立花隆著, 脳を極める, pp.164-176, 朝日新聞社(1996).
- 17) 横澤一彦:視覚的注意, 乾敏郎編:知覚と運動(認知心理学1), pp.169-192, 東京大学出版会(1995).
- 18) 池田光男:目はなにを見ているか, 平凡社(1988).
- 19) 寺田利之他:高精細ランダムアクセスカメラ, 第2回画像センシングシンポジウム予稿集, pp.159-160(1996).
- 20) 稲垣修他:広ダイナミックレンジカメラ, 第2回画像センシングシンポジウム予稿集, pp.151-154(1996).
- 21) Zeki, S., 赤瀬・外山訳:脳と視覚, (別冊日経サイエンス)脳と心, pp.78-89(1993).
- 22) Wang, G. et al.:Optical Imaging of Functional Organization in the Monkey Inferotemporal Cortex, Science, Vol.272, pp.1665-1668, 14(June 1996).
- 23) 田中啓治:視覚認知の高次情報処理, 外山敬介・杉江昇編, 脳と計算論, pp.144-169, 朝倉書店(1997).
- 24) Poggio, T. and Edelman, S.: A Network that Learns to Recognize Three Dimensional Objects, Nature, 343, pp.263-266(1990).
- 25) 乾敏郎:Q & A でわかる脳と視覚, サイエンス社(1993).
- 26) Crick, F.著, (中原・佐川訳):DNAに魂はあるか, 講談社(1995).
- 27) Colby, C.L.: The Neuroanatomy and Neurophysiology of Attention, Journal of Child Neurology, Vol. 6, pp. S90-S118(1991).
- 28) Niebur, E. and Koch, C.: A Model for the Neuronal Implementation of Selective Visual Attention Based on Temporal Correlation Among Neurons, Journal of Computational Neuroscience, 1, pp.141-158(1994).
- 29) Visual Attentionホームページ:
<http://www.ee.gatech.edu/users/386/visual.attention/title.html>
- 30) Mishkin, M., Appenzeller, T.著, (塚田訳):記憶の解剖学, (別冊日経サイエンス)脳と心, pp.126-138(1993).
- 31) Goldman-rakic, P.S., (久保田訳):ワーキングメモリ, (別冊日経サイエンス)脳と心, pp.140-149(1993).
- 32) Posner, M.I. and Raichle, M.E.著, (養老孟司他訳):脳を顧る, 日経サイエンス社(1997).
- 33) 長谷川修, 横澤一彦, 石塚満:自然感の高いビジュアル・ヒューマンインタフェースの実現のための人物動画画像の実時間並列協調的認識, 信学論, Vol. J77-D-II, No.1 pp.108-118(1994).
- 34) 村上元彦:どうしてもが見えるのか, 岩波書店(1995).
- 35) 松本元, 大津展之共編:ニューロコンピューティングの周辺, 培風館(1991).

(平成9年12月19日受付)



長谷川 修 (正会員)

1988年東京理科大学工学部機械工学科卒業。1990年同大学大学院修士課程修了。1993年東京大学大学院電子工学専攻博士課程修了, 博士(工学)。同年電子技術総合研究所入所。現在知能情報部主任研究官。画像理解, ヒューマンインタフェースなどの研究に従事。電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本顔学会, AAAI各会員。