

シリコン視覚野：脳に学んだ新しいロボットビジョン



技術解説

八木 哲也*

Silicon Visual Cortex : a novel robot vision inspired by the brain

Key Words : analog VLSI, image processing, visual cortex, robot vision

1. はじめに

視覚情報処理は、情報技術の根幹を成すノイマン型コンピュータと、CCDカメラに代表されるセンサーデバイスを組み合わせた現在のシステムが、不得意とする技である。この原因のひとつは、外界のアナログ情報をフロントエンドにおいていきなり直列逐次デジタル処理に合わせて計算しようとする事にある。特に自律ロボットなどの視覚を考えた場合、この無理から派生する計算量とシステム規模の拡大、消費電力の増大は決定的な欠陥である。このままではロボカップのロボットは、訓練されたネズミのチームにも勝てないだろう。視覚計算の新しいアーキテクチャとアルゴリズムの導入が必要である。

2. 脳視覚に学ぶわけ

私たちの研究室では、脳視覚系のアーキテクチャに学んだ視覚システムを構築することを一つの目標にしている。このような研究を行う理由は大きく3つある。一つ目は勿論、工学的な意味で役に立つものを作ることである。上記のとおり視覚等の感覚情報処理は、現在の直列逐次型コンピュータと相性が悪い。一方脳は感覚情報処理をいとも簡単に実行する。脳の機能と構造に学んだ視覚システムは、きっと社会の役に立つに違いない。2つ目は、過去の神経科学研究によって得られた知見を取り入れたシス

テムをハードウェアデザインし、そのシステムの視覚機能を脳のそれと比較検討することによって、脳に関して現在の知見が足りない部分やいまだ未知な問題を構成的な手段で発掘しようというものである。3つ目の理由は極めて単純で、とにかく“脳もどきの電子回路”をデザインするのは、理屈抜きに面白いのである。ある視覚機能をハードウェア実現しようとする、様々な障害に遭遇する。この障害を切りぬけることはチャレンジングで、ハード設計の醍醐味である。また出来上がったシステムが、思い通りに動く場合もあるが、そうでないことが多い。また出来上がったものをよく調べて見ると、思わぬ機能に気がついたりする。このあたりは、計算機によるシミュレーション実験とはかなり違う。また取扱い問題によってはソフトウェアを用いるよりハードウェアの方が効果的な場合があることも事実である。

3. シリコン視覚野の構成

高等脊椎動物の視覚系の情報処理をイメージした場合、さまざまなキーワードが浮かんで来る。並列処理、階層処理、視覚モジュールなどである^[1]。脳神経系から見た視覚の入口は、網膜である。網膜は単なる光センサーではなく、時々刻々変わる視覚環境に順応しながら、冗長な外界の視覚情報から脳の高次処理に必要な特徴を抽出する役割を担ったれっきとした中枢神経である。その証拠に網膜の神経節細胞において既に視覚情報経路の分化が始まっている。ネコ、サルなどの高等動物では、網膜出力の主力は外側膝状体を経て一次視覚野へ繋がる。一次視覚野においては方位選択、方向選択などの特徴抽出がモジュール化された神経回路構造によって実行される。最近の知見によれば、一次視覚野の機能はもっと複雑らしいが、とりあえず参考にしたいたいの、異なる属性を持った視覚情報が、階層的に配置された



* Tetsuya YAGI
1955年12月生
1985年名古屋大学大学院・医学研究科・生理系満了
現在、大阪大学大学院・工学研究科・電子工学専攻、教授、医学博士、生体電子工学・視覚神経科学
TEL 06-6879-7785
FAX 06-6879-7784
E-Mail yagi@ele.eng.osaka-u.ac.jp

モジュールによって処理されるという原則である。ちなみに下等動物では、脳本体が貧弱なため、より高次の特徴抽出機能が網膜に下りている。特徴抽出の後に必要となるのは、各々のモジュールによって処理された情報を統合する(バインドする)ことである。視覚系の特徴をかなり大雑把に簡略化してしまっただが、現時点で“脳もどきの電子回路”を設計する場合の骨組としては、許される範囲の理解であろう。

視覚をトップダウン的に理解する時のもうひとつ別の切口は、アナログ演算から論理演算への階層である^[2]。感覚に関わる外界の情報は、アナログである。しかしバインド問題のレベルになると、少なくとも問題を取扱う手法の面からみた場合、デジタル論理演算として処理した方が簡単である。以下にこのような大雑把な知見からヒントを得た脳型視覚システムについて述べる。

4. アナログシリコン網膜

まず本研究室において製作されたシリコン網膜について紹介したいと思う^[3]。脳もどき視覚システムの前処理デバイス機能として私たちが注目したのは、網膜において分化する2つの経路(チャンネル)、すなわち持続性チャンネルと一過性チャンネルである^[4]。下等脊椎動物の実験によれば、持続性細胞は、光刺激に対し持続的な応答を示し、空間フィルタとしては比較的是っきりしたラプラシアン-ガウシアン(∇^2G)型受容野を発現する^[5]。 ∇^2G は、入力画像の平滑化および輪郭強調機能を持ち、生体視覚系において最も基本的かつ不可欠なものである^[2]。一過性細胞は、光刺激強度の変化に敏感で比較的広い受容野を持つ。前者は空間解像度が高く静止画像の処理、後者は画像の時間的変化に対する感度が高く、運動する物を捉えるのに適していると考えられる。本研究室において製作されたシリコン網膜からは ∇^2G 型の空間フィルタ特性を持った持続性応答と、画像のフレーム間差分処理による一過性応答の2種類の出力が得られる。

図1Aにシリコン網膜の持続性応答を示す。人の手を実験室背景の前で動かした時のシリコン網膜の応答である。室内照明下(3.5[W/m²])で実験を行った。持続性応答チャンネルは、手の輪郭の部分で強く応答しているのが分る。素子特性のばらつきに起因した回路ノイズの影響が抑えられており、工学的応

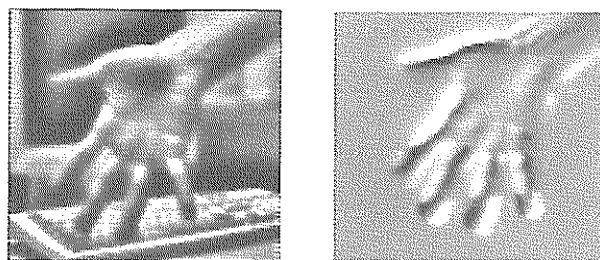
用に十分な出力精度が得られていることが分かる^[6]。過去のシリコン網膜は、素子のバラツキによるノイズのため、画像処理に応用できる程の出力は得られていなかった^[7]。

連続したフレーム間の差分をとることで対象の動きに対応した一過性の応答が得られる。本シリコン網膜は、アナログ回路網により平滑化された画像のフレーム間時間差分を計算するので、フレーム間差分出力も比較的雑音に強い。図1Bにフレーム間差分処理でのシリコン網膜の応答を示す。先の図1Aと同じ背景において手を動かし、一過性応答チャンネルによって処理したものである。動く手のみに応答し、静止している背景には応答がないことが確認できる。本シリコン網膜は、工学的応用には役立ちそうである。

5. シリコン視覚野へ

以上述べたとおり、本研究室において製作されたシリコン網膜は、画像の空間微分と時間微分を精度よく実時間(生物が物体を知覚する速さ)で実行する。

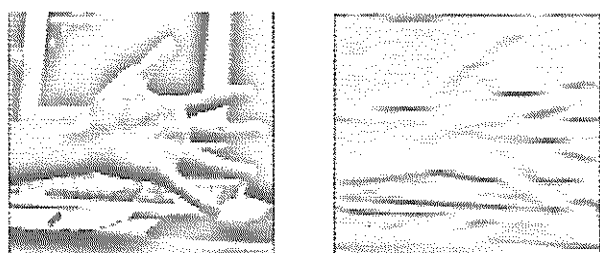
シリコン網膜の出力を用いて、視覚野にある単純型細胞層の応答を再構築した(図2)。ここでは、シリコン網膜の出力をデジタル信号に変換し、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて統合することによって、方位選択性の受容野を構成した^[8]。左図は、先の持続性応答で見たシーンである。このシーンを、0°方位に扁平した受容野を持つ回路モジュールでフィルターすると右図のようになる。このフィルター画像は、視覚野V1の単純型細胞のニューラルイメージを実時間で近似的に表現したものである。それぞれの方位に選択性を持った細胞の集合をモジュール化し、さらにこれらのモジュールを集積回路化することによって、まさに“シリコン視覚野”と呼べるシステムが構築できる。シリコン視覚野ができるまで、まだいくらかの時間を必要とするであろう。しかしこうした“オブジェクト指向”でデザインされたハードウェアは、簡単に組み上げ組換えることが可能で、様々な実時間画像計算を試行することが可能となる。画像計算はそれ自体現在のコンピュータにはたいへん計算コストが高く、計算機上のモデルを用いて心理物理実験をシミュレートすること等は容易ではない。ハードウェア化されたシリコン視覚野は、神経科学や心理物理実験による知見を構成



A 持続性応答

B 一過性応答

図1 シリコン網膜の2種類の応答



A シリコン網膜の応答

B 方位選択性受容野の応答

図2 方位選択性受容野の応答

的な方法で解析する手段としても有効な段階に近づいていると私たちは考えている。

参考文献

- [1] S.Zeki(1993) : A Vision of the Brain. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- [2] D. Marr (1982) : Vision, W. H. Freeman, San Francisco, CA.
- [3] S.Kameda and T.Yagi(2003) : An Analog VLSI Chip Emulating Sustained and Transient Response Channels of the Vertebrate Retina. IEEE Trans. on Neural Net. Vol.14, No.5, 1405-1412.
- [4] J.E.Dowling(1987) : Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- [5] 八木哲也, 大島成通, 舟橋康行(1995) : 初期視覚における網膜双極細胞の機能について, 電子通信学会論文誌D-II, J78-D-II, 7, pp.1123-1133.
- [6] 八木哲也, 亀田成司, 飯塚邦彦(1998) : 可変受容野を備えた超並列アナログ知能視覚センサ, 電子通信学会論文誌, J81-D-1, 2, pp.104-113.
- [7] C.Mead(1989) : Analog VLSI and Neural Systems, Addison-Wesley, Reading, MA.
- [8] 下ノ村和弘, 八木哲也 : 視覚野V1を模倣するアナログ・デジタル混在システム, 映像情報メディア学会研究会情報センシング/電子情報通信学会研究会ICD豊橋, 2003/9/11-12, 映像学技報Vol.27, No.48, pp.25-28.

この記事をお読みになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6395-4895 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前、ご所属、希望日時(選択の幅をもたせてください)、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。