

# 網膜情報処理とハードウェア化

重松 征史

電子技術総合研究所生体機能研究室

〒305 つくば市梅園1-1-4

## 1. はじめに

視覚の情報処理は二次元的に変化する入力情報を空間的・時間的關係を考慮しながら効率よく処理をしなければならない。これを最も効果的に行っているのが、網膜の神経細胞であるともいえる。この生体の機能を電子素子として取り入れようとする場合、超並列処理をいかに工学的に実現するかが障壁となっていた。最近それを実現する方法として、いくつかの試みが各方面で行われている。

ここでは従来の平面的な素子の配置とは異なり、立体的に半導体回路を積み上げ、各層内または層間の演算を並列処理することにより、画像情報の前処理を高速に行う機能を持つ三次元集積回路素子が作られたので紹介する。また、網膜機能をハードウェア化するために必要とされる、視覚情報処理システムの持つべきいくつかの特性について考察する。

## 2. 視覚情報処理方式

まず、生体を持つ視覚情報処理系の特性を見ると、物理的計測による視覚情報処理系とは異なり、環境の変化に柔軟に対応する。すなわち自然光と人工照明のように分光組成が大きく変化しても、さして物の色が変化してしまったりとは認識しない。これは網膜が視覚情報を外界から取り入れる時、環境変化を自ら補正する役割を果たし、後続の中核で行う処理の負担を軽減している。それと同時に網

膜は、外界の三次元視覚情報から中枢の情報処理に必須の視覚要素を抽出する。それはただの前処理というのみでなく、視覚情報処理の重要な役割を担っている。

ここで視覚の情報処理の方式をみると、図1のように、写真的処理方式と絵画的処理方式が考えられる。視覚情報を一点ごと、正確にカメラでものを写すように全ての情報を入力し、中央の演算処理機構にまかせて知覚判断することを、ここでは写真的処理方式と呼ぶことにする。一方、絵画的処理方式とは視覚情報から絵を描くように形や色という要素を抽出し、それを伝えて内部イメージを構築し、そのイメージから知覚判断する方式をいう。

今までの画像処理技術は写真的処理方式を

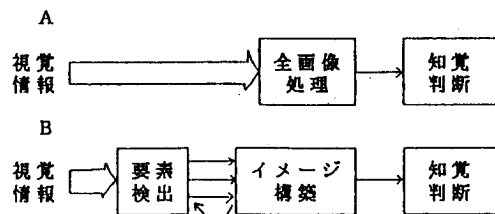


図1 視覚情報処理の方式  
A:写真的処理方式  
B:絵画的処理方式

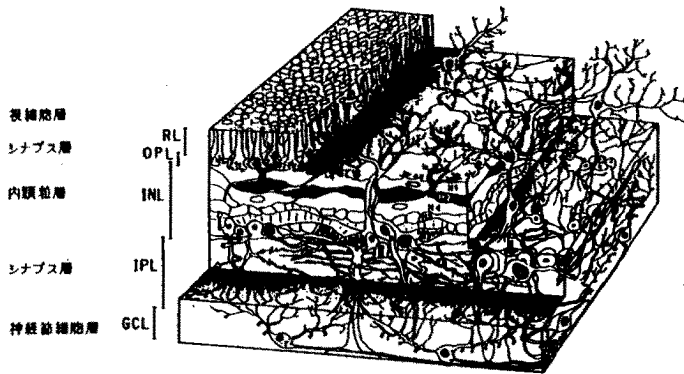


図2 網膜神経の立体構造(Naka). 視細胞層から神経節細胞層まで階層化構造をしている。

中心に発展してきた。一方、生体の視覚情報処理系は絵画的処理方式を自然に取り入れてきた。しかし、どちらの方式がより優れているとか、一方式に限られるというものではない。例えばヒトの視覚系が完全な絵画的処理方式ではなく、中心視のように写真的処理方式をも兼ね備えていると考えられる部分もあり、むしろ両者の優れたところを巧みに利用している。

まず、網膜の構造と機能を簡単に振り返ると、図2に示すように、視細胞（錐体・桿体）、水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞、ガングリオン細胞の五種類の主な神経細胞がある。視細胞は光刺激を受けて、神経細胞に視覚情報を発現する。水平細胞は空間的な積分をし、双極細胞との間で空間情報の処理を行い、双極細胞の受容野をつくる。アマクリン細胞は双極細胞とガングリオン細胞と結合を持ち、光刺激に継続的に応答するもの、光強度変化があるときのみ応答するものなど時間情報処理のいくつかの型に分けられる。ガングリオン細胞は、双極細胞・アマクリン細胞からの信号を受けインパルスに変換して、神経繊維を通して中枢に信号を伝達する網膜の出力細胞である。これら網膜の働きは時間・空間の情報処理であり、さらに動

き・輪郭・色覚情報など多くの視覚要素を抽出する機能を持っている。

以上のことから、網膜は、階層化された非線形・超並列処理を特徴とする三次元神経回路であり、その役目は視覚系の前処理器官と言うよりは、視覚情報の要素を作り出し中枢の理解を助ける大切な役割を担っている器官と言える。

### 3. 三次元集積回路素子

三次元集積回路素子プロジェクトは、1981年から10年間、新しい素子開発のために次世代研究開発プロジェクトのもとで、国立研と民間企業6社が参加して行われた。この研究開発の中では、半導体集積回路を何層にも積み上げるために必要な結晶成長プロセス技術、層間結線技術、微細加工技術等多くの基盤技術が開発され大きな成果をおさめた。その成果の一部として三次元集積回路の持つ可能性を実証するために、センサ層・変換層・演算層・メモリ層等を階層的に積み上げた画像処理型三次元集積回路素子が三菱電機、松下電器、シャープにより開発された。しかし、これらは網膜の機能を実現することを目的としたものではないので、これらの素子の機能を網膜と比較して論ずることは適切では

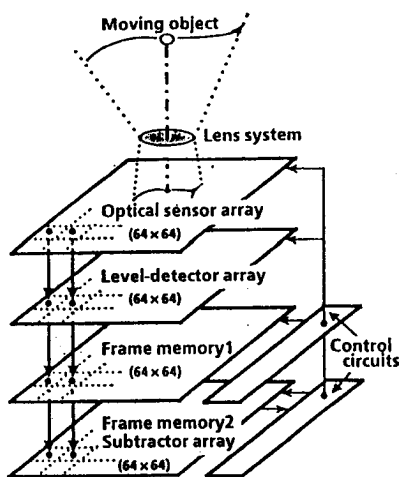


図3 移動物体検知機能をもつ三次元集積回路素子（松下電器）

ないが、将来、人工視覚を実現するためには大変役立つ基盤技術であると思われるのでその構造と特性を紹介する。これらの素子は、二次元的な画像入力を受取るセンサ層と、A/D変換層、それを演算し判断する層やメモリ層を積層した三次元回路構造をしている。それぞれの層は並列処理を行うことにより、今までの計算機ではできなかった高速の処理

が可能となり、実時間の画像の特徴抽出が出来るようになった。

図3は松下電器の移動物体検知機能をもつセンサ内臓型の画像信号並列処理素子である。10mm×9.2mmの大きさのチップの最上層に光センサ・アレイ（画素数64×64）を並べて光を受光し、次の層でレベル検出を行い、第3層と第4層ではフレム・メモリで各画素の前後の時間のデータを蓄積し、それぞれの減算をする事で移動画像情報のみの検出を行う仕組みになっている。64×64の要素それぞれが並列に信号処理を行い1フレーム当たり150 nsの高速な動作が確認できた。

図4は三菱電機の開発した64×64画素の4層積層型画像処理素子で、隣接画素間の差分演算を並列処理することにより輪郭抽出機能をもつ素子である。それを光切断法を用いた三次元物体形状計測に応用したものである。一回の計測に16フレームを使うとしても30 msで終了する能力をもっている。

図5はシャープの開発した4層構造の文字

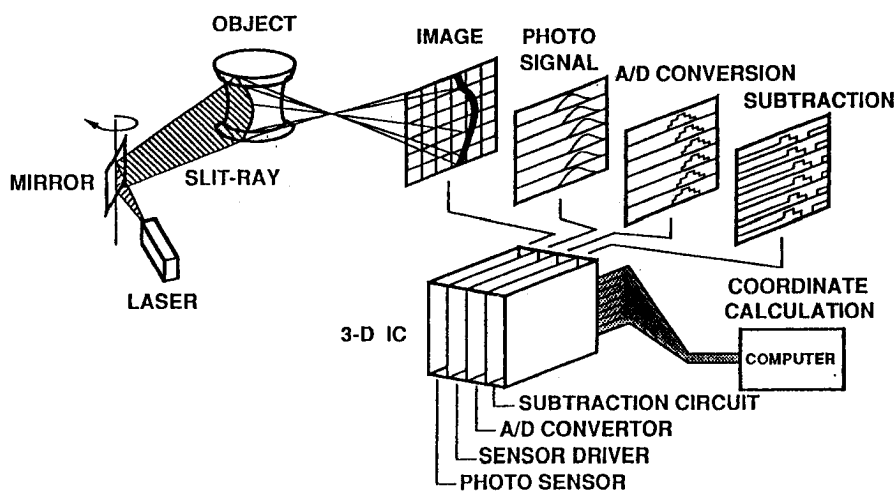


図4 光切断法による形状計測システムへの三次元集積回路素子の適用例（三菱電機）

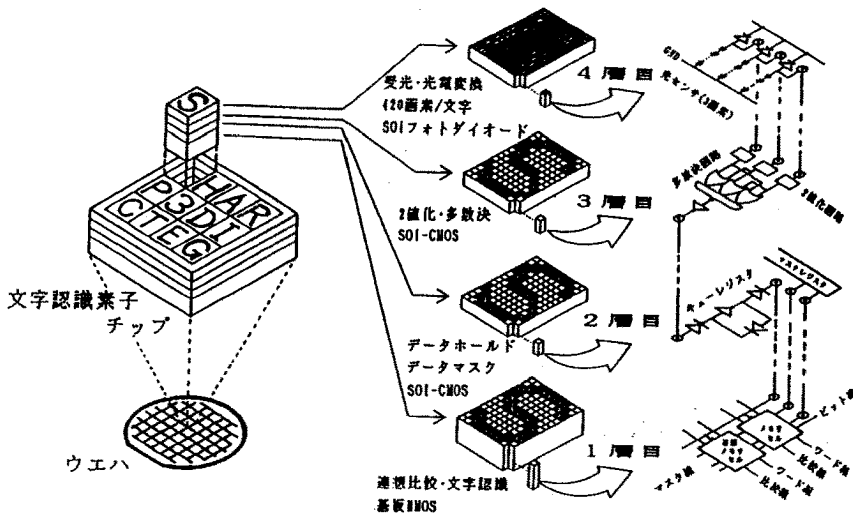


図5 文字認識機能をもつ三次元集積回路素子 (シャープ)

認識素子で、55,000個の光ダイオードで12個の文字を読みとり、データを処理し、記憶文字パターンと連想比較処理することにより高速に文字認識をするものである。

これらの三次元回路素子は、まだ機能的には画像処理の初步的な段階であるが、三次元回路は立体配線が可能な点から、画像情報の処理には大切な技術であると考えられる。また、ロボットなど実時間に情報処理をしなければならない小型のシステムに、将来は活用されるものと思われる。

#### 4. 網膜機能の実現

視覚系の網膜の各々の神経細胞は半導体素子と比べると処理速度や再現性で著しく劣るけれど、全体としては計算機でも出来ない高度な処理を短時間で行う優れた特徴を持っていることである。それには階層構造を持った超並列処理がおおきな要素となっているが、それ以外にもいくつかの特徴がある。例えば、アナログ処理・非線形応答・相対的処理・時空間処理・多重処理などがある。

網膜内の神経細胞の情報処理はアナログ信号でされていることにより、帰還回路や相互干渉が簡単に実現でき、環境の変化にも柔軟に適應できる<sup>2,3)</sup>。また、時間・空間の相互関係を演算するのに、大きな自由度を持つことができる。非線形な応答と空間的な情報をうまく利用して、生体として必要な相対的な情報を抽出することができる。例えば、細胞の非線形応答を表す関数としてシグモイド関数があげられるが、これと背景光を組み合わせることにより、照明光強度が変化しても物体の明度が変わらない明るさ恒常性の機能を実現できる<sup>4)</sup>。

ここで紹介した三次元集積回路は、網膜を模擬することではなかったもので、デジタル処理回路であることなど今述べた網膜の特徴を備えていない。一方、網膜の機能を半導体素子で実現しようとする図6の Mahowald and Mead の試みがある<sup>5)</sup>。彼らは三次元集積回路ではないが、アナログ集積回路を二次元的に配置して、50x50の受光素子とそれの続く抵抗回路網・演算回路を作り、視細胞・水平細

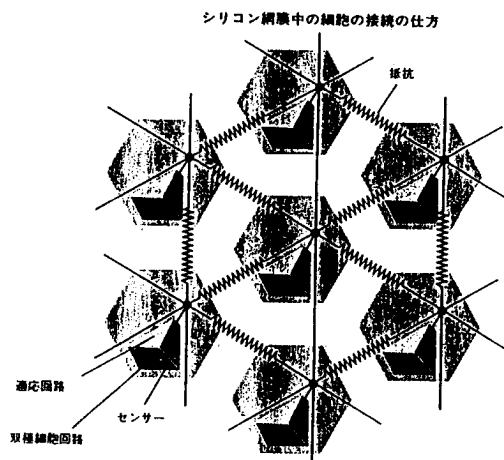


図6 半導体アナログ素子で構成した人工網膜 (Mashowald & Mead)

胞・双極細胞の機能を模擬した回路を作った。これは網膜の機能の一部を非常に簡略化して実現したものであるが、実際の網膜と同じように特徴抽出を高速でできることを実証し、同時対比やマッハ・バンドの錯視ができることを示した。今後、アマクリン細胞層・視神経節細胞層などの機能を取り入れた素子に発展するためには、三次元的なアナログ集積回路の構造が必要であると思われる。また、中枢神経回路網へと発展するためには、多数の神経結合を処理する技術や、シナプスの可塑性を実現する技術が必要となろう。

## 5. むすび

半導体素子技術の方面から画像情報処理に用いられる素子とその機能を述べたが、最近ではニューロ・コンピュータへの関心から、これらの三次元回路技術が必要とされており、さらに発展するものと思われる。また、半導体技術以外にも光ニューロ・コンピュータや、生体高分子を用いたバイオ素子など、神経の情報処理機構を実現するための多方面からのアプローチがなされるものと思われる。

最後に、1990年9月から工業技術院次世代産業技術企画官室に勤務し、新機能素子の研

究開発に係わり、これらの資料をまとめるに当たり参考にさせていただいた。これら次世代プロジェクトに関係される方々のご協力に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 新機能素子研究開発協会(編)：Abstract of the 9th Symposium on Future Electron Devices. Nov, 1990.
- 2) 重松征史：柔軟性を持った視覚入力モデル。電子情報通信学会研究会資料，MBE88-145，1989.
- 3) 重松征史：網膜における柔軟な視覚情報処理。電気学会研究会資料，LAV-89-12，1989.
- 4) 重松征史：生理的関数による明度変換関数の近似。電気学会論文誌A，110，267-274，1990.
- 5) M. A. Mashowald and C. Mead：人間の眼をもつシリコン網膜。日経サイエンス，21，No. 7，60-69，1991.