

1998.9

ISSN 0011-846X

# 電総研ニュース

<http://www.etl.go.jp/publication-j/news-j.html>

1998年9月号 584号



写真 ESChER：能動両眼視覚システム

- 電圧感受性 Na チャンネルの立体構造の発見
- 人間型能動視覚システムによる複雑背景下での対象の発見と追跡
- その他

# 電圧感受性 Na チャンネルの立体構造の発見 (現代生物学と画像解析技術との融合領域)

## Discovery of 3D structure of voltage sensitive sodium channel

超分子部・分子システムラボ 佐藤主税<sup>\*1</sup> (e-mail:tisato@etl.go.jp)

超分子部・分子システムラボ 上野 豊<sup>\*2</sup>

知能情報部・遺伝子情報ラボ 浅井 潔<sup>\*3</sup>

伊藤ハム中央研究所 佐藤雅彦<sup>\*4</sup>、興和総合科学研究所 岩崎昭夫<sup>\*5</sup>、土肥 武<sup>\*6</sup>

バゼル大学(スイス) アンドリアス・エンゲル<sup>\*7</sup>

Molecular System Lab., Supermolecular Science Division Chikara Sato<sup>\*1</sup>, Yutaka Ueno<sup>\*2</sup>

Genome Informatics Lab., Machine Understanding Division Kiyoshi Asai<sup>\*3</sup>

Central Research Institute, Itoham Foods Inc. Masahiko Satou<sup>\*4</sup>

Kowa Research Institute Akio Iwasaki<sup>\*5</sup>, Takeshi Doi<sup>\*6</sup>

M.E. Mueller Institute for Microscopy, Biozentrum, University of Basel Klingelbergstrasse 70 Andreas Engel<sup>\*7</sup>

The voltage gated sodium channel generates the action potential. This 300 kDa protein has four homologous regions, which are also homologous to the voltage sensitive tetrameric potassium channel. We isolated sodium channels from *Electrophorus electricus* electroplax by detergent solubilization and immunoaffinity chromatography and studied their structure by electron microscopy of negatively stained specimens. Different projections were aligned, classified and averaged. In side view, the channel protein exhibits the shape of a truncated cone, 14 nm in height. One end has a diameter of 12 nm and is asymmetric, while the other is more symmetric and has a diameter of 7-10 nm. In top views, the sodium channel appears to consist of four domains of different size, and to have a stain-filled pore in the center.

### 1. まえがき

我々は車を運転している時でも、スポーツをしている時でも、目から入っている情報に対して数ミリ秒単位の反応を頻繁に行っている。それを可能にしているのが、神経細胞に存在するチャンネルである。このチャンネルは細長い形状の神経細胞の細胞膜中に存在している。細胞を取り囲む細胞膜は通常イオンなどの親水的な物質を通さない。それに対してチャンネルは親水的な物質を通す働きがある。特にイオンチャンネルは電荷を帯びた特定のイオンのみを通す(図1は今回得られたNaチャンネルの構造)。時には、急激に一種類のイオンのみを通すことで細胞膜の興奮状態を引き起こす。これは、通常我々が神経が興奮していると呼んでいる状態である。特に電圧感受性イオンチャンネルは隣が開くと自分自身も開くという性質がある。そのことでの細長い神経細

胞上において次から次へと刺激を伝達する。これが、人間の神経での情報伝達である。その速度が十分に早いため、痛みや感覚はあっという間に脳に伝わり、さらにそこからの素早い反応が可能になる。この機構により人間の神経における情報伝達は、電気回路上の電流に例えられ、あたかも電気を伝える電線の様に働いている印象を受ける。しかし、実際には、これまでに述べたように、興奮が細胞の外から内へのプラスイオンの流れという形で伝わって行くのである。そのため、後に述べるような短期的な情報(記憶)の蓄積が可能となる。

電圧感受性イオンチャンネルの隣が開くと自分自身が開くという機構は、実際には近くのチャンネルが開いたことによる正イオンの流入による膜の内外の電位差、即ち電圧を感受することにより行う。この時の開く速度はマイクロ秒の世界である。実際には、

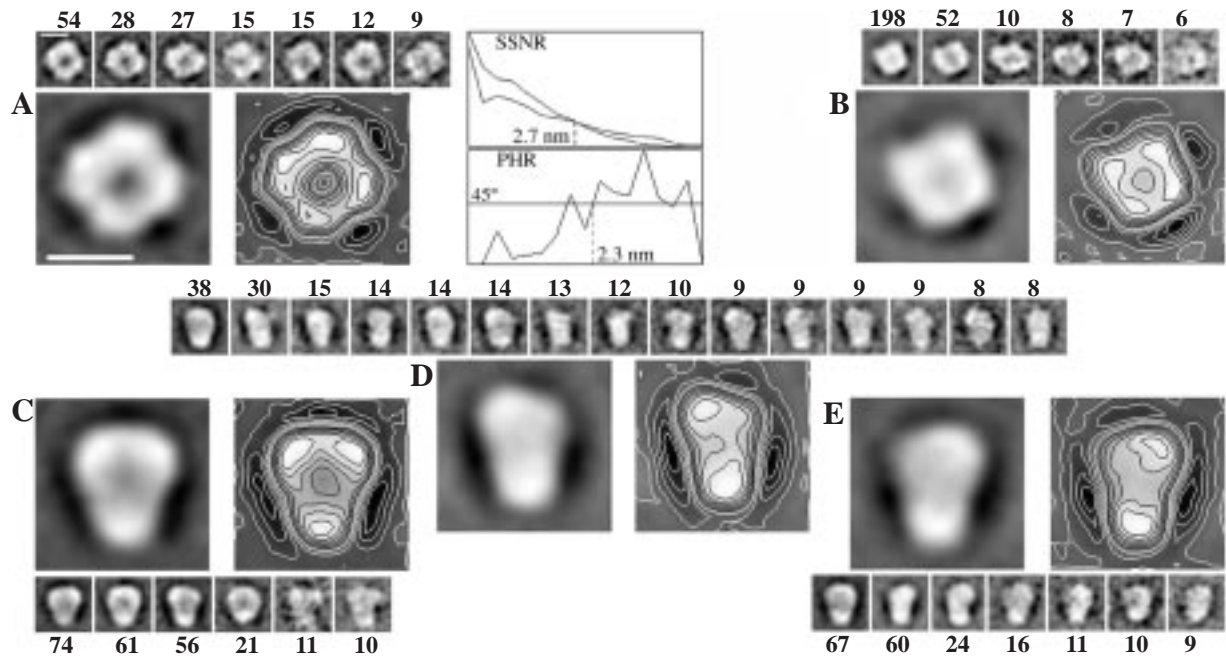


図1 単分子解析の結果得られたNaチャンネルの構造

Aは分子の上から見た図、Bは分子の下から見た図、C、D、Eは分子の横から見た図である。側方からの図はこの分子が見る方向性によって対称形と非対称形の両方の形態をとることを示す。上方の図は平均化に用いたグループをさらに小さなグループに分けた場合の各サブグループごとの平均化像であり、その上の数は平均化に用いた生データの数を示した。Aの白のスケールバーは10nmを表わす。

次から次へと情報は押し寄せて来るのであるから、当然、一度開いた電圧感受性Naチャンネルは直ちに閉じて前の状態に戻り次の刺激に備えなければならない。これも速やかに起こり、一度開いたチャンネルは1ミリ秒後には閉じる。さらには近年の研究から、この電圧感受性チャンネルは、もっと高度な神経の活動に関与しており、記憶の機構と考えられる神経の可塑性と深い関わりを持つことがUSAのカンデル等によって判明してきた。少なくとも神経組織が比較的単純な生物の短期的な記憶に関しては、電圧感受性イオンチャンネルのリン酸化がその実態であることが知られている。ここでリン酸化されたあるグループの電圧感受性Kチャンネルは興奮が来ても開かなくなる。そのため、共に情報伝達に働くNaチャンネルやCaチャンネルとのバランスが取れなくなり、次の神経細胞への情報伝達は過剰になる。

このように、イオンチャンネルは蛋白質分子として非常に魅力的な分子である。実際、その分子の存在の理論的予測、測定法の開発等はノーベル賞をはじめとする様々な賞に輝いている。そのため、遺伝情報を具体的に現す蛋白質の構造の研究系としては申し分なく思われるが、その構造研究は極めて難しい。と

言うのは細胞膜から取り出すと、きわめて壊れ易い柔らかい機械であるためである。特に、その中の電圧感受性チャンネルはその素早い動きを可能にするためにより柔軟な構造をとっているのか、生化学的な扱いが難しい。さらに結晶化の成功例が無い。そのため、これまでにその構造を見たものはいない。

## 2. 電圧感受性イオンチャンネルの基本構造

この電圧感受性チャンネルは、通すイオンの種類からK, Na, Caの3種類に分けられる。では、最初に、このチャンネルの構造研究、ひいては蛋白質の構造研究にどのような意味があり、その構造研究アプローチにどのような方法があるのかを説明したい。

蛋白質というものは全てアミノ酸が数珠状につながった紐からできている。遺伝子から合成された直後はただの紐であるが、それが、アミノ酸の構成によって様々な立体構造をとり、機能を果たす形態へと変化する。

電圧感受性チャンネル3種はシナプスで協調して働き、さらに皆似たアミノ酸配列をもっている。図2はそのアミノ酸の疎水性親水性から判断したチャンネル蛋白質の細胞膜貫通の様子であり、少なくとも

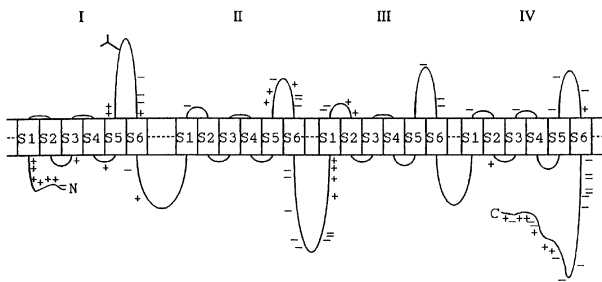


図2 Naチャンネルのアミノ酸配列から推定したその膜貫通の様子

Naチャンネルを構成するアミノ酸の疎水性、親水性から推定した、Naチャンネルの膜貫通の様子である。類似した4つの部位からなり、それぞれが最低6回の膜貫通部位を持つと考えられている。第5膜貫通部位(S5)と第6膜貫通部位(S6)の間の外側のループは部分的に疎水的であるため、膜に部分的に入り込んでいると考えられる。

疎水的なアミノ酸がある長い部分に渡って集中して存在する部分が膜貫通部、短く集中する部分を部分的に膜に入っている部分と考えるとこの様になる。現状では、この様な予測は時として大きく外れることも多く、真の構造決定が必要である。白いボックスは膜貫通部を表わす。

24回の膜貫通部位を持っていることがわかる。そのため、これらは似た構造と開閉の機構を持っていることが考えられる。

遺伝子操作技術の進歩から、そのアミノ酸配列を一部変化させることが可能になった。正確には、労力は要るが方法論的には完全に確立された。電圧感受性チャンネルはこの様なアミノ酸改変が最も集中的に行われた系と言え、世界中の恐らく100を超える研究室で集中的に行われていると思われる。しかし、そこからの結果は一つの変化がその分子機械全体の挙動を遠大に変えることを示唆するだけであった。どうやら、一つ一つのアミノ酸が全体の構造と機能を大きく変えてしまう場合が頻繁に起こるらしい。ところが構造情報が全く無い現状では、これらの情報から約2000個のアミノ酸からなるそのマシンとしての機構の解明は不可能に近い。構造情報が得られれば、これまでの膨大な世界中での労力の積み重ねが一気に機構と結びつく。

また、応用的な側面もこの蛋白質は大きい。神経症、筋肉症に対する薬としてこのチャンネルに対する薬は多く開発されている。しかし、構造情報の欠如からこれらの薬の結合部位さえわかっていない。これらの抗電圧感受性チャンネル薬の問題点として、

副作用が大きいことが挙げられる。やはり、その理由の一つに薬が結合する相手の構造がわかっていないことが挙げられる。本研究を突破口にした構造研究によってその薬の結合部位の構造が判明すれば、副作用の小さな特異的な薬の開発に大きく貢献することが期待される。また、本研究の直接のターゲットであるNaチャンネルは多くの麻酔薬の作用する相手である。その構造研究は安全な麻酔薬の開発へと直接つながる。

### 3. タンパク構造研究にはどのような方法があるか。

ではその構造研究にはどのような方法が可能であろうか。

以前からNaチャンネルの大きさは、球状ならばタンパク質の平均密度から直径100オングストローム位と考えられていた。

もちろん、この大きさなら結晶に対するX線解析が理想であるが、前述の様に現状では結晶作成は非常に困難である。

一見分解能だけ考えるならば、この100オングストロームという大きさは電子顕微鏡に向きそうである。しかし、蛋白質は極めて電子線照射に弱い。さらに、実際の電子顕微鏡写真はカーボンベース上で重金属の染色を行っているため、ノイズが多い。

そのため、タンパク分子自身が見える倍率では、短い照射時間のためシグナルが弱く、かつノイズだらけである。これでは普通の大きさの蛋白質の形態を議論するのは無理である。これが最近までは一般的な考えであった。蛋白質の構造は、結晶の作成が成功してから研究しようというのが普通であった。

しかし、結晶の作成が可能な蛋白質は限られており、特に膜タンパク質ではむしろ結晶作成が成功したもののほうがはるかに少数である。むしろもう一歩踏み込んで、結晶が簡単につくれる膜蛋白質は例外的な存在であるとさえ言える。

### 4. 単分子解析法

ところが近年、この積年の問題を部分的に解決する技術が登場した。それが単分子解析である。ノイズだらけの生の電子顕微鏡写真だけでは分子の輪郭すら定かではない(図3)。しかし、ノイズはさまざまな場所にのっているの、元画像が同じ物を判別できれば、平均化によってノイズを平均化し、画像の分解能を上げることが可能である。これを実現するために画像解析技術を駆使して像の分類を可能にし、

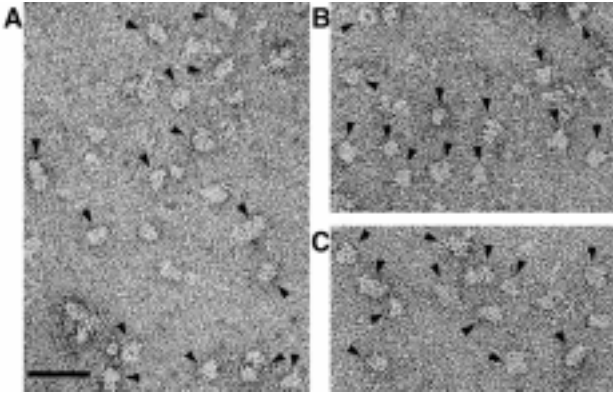


図3 生のNaチャンネルの電子顕微鏡像  
最初の電子顕微鏡像が如何に汚いかを示した。この像をピックアップし、重ね合わせが行われた。A、B、Cは異なる視野における像。スケールバーは30nmを表わす。実際に今回の分析に用いた粒子を矢印で示した。

さらに、ある一つの画像が3次元的にどこから見えているかを分類し、さまざまな角度からの像を重ね合わせることによって3次元構造を分析する方法である(図4)。最終像は同一方向からの画像を数百枚以上という単位で重ね合わせて平均化することで飛躍的にノイズが減り、蛋白質内の構造が見えるところまで分解能が向上する。

人によっては最近10オングストローム程度の空間分解能までこの方法で到達したと記述している場合もある。

#### 5. Naチャンネルの単分子解析

この様な方法はこれまでは主に蛋白質としてはかなり巨大な物に用いられてきたが、これを小さなNaチャンネルで試みた。さらにNaチャンネルの分子自体の特色は、アミノ酸の他に平均で約30%の糖鎖が結合している点にある。平均でという意味は、糖の長さや形態には、かなり分子ごとのばらつきがあるという意味である。Naチャンネルはそれ程糖の含有量が多く、そのため形態的なばらつきが多い。このような蛋白質で、この分析が成功した例は今までにない。そのため今回の成功は電圧感受性チャンネルの構造の発見の他に、単分子解析の適用範囲の拡大という意味をも有する。

もちろんこの実験のためには、膜から取り

出すとすぐに変成してしまうNaチャンネル蛋白質を、健全な状態で精製するというもう一つの生物学的課題を乗り越えなければならない。これに関しては、抗体ゲルを用いる独自の方法を開発し、解決した。この方法では、Naチャンネルは極めて温和に溶出され、精製される(しかし、ここではスペースの関係でウェット実験に関してはこの一行のみで省略する。抗体と結合したNaチャンネルの電子顕微鏡生画像を図5として示す。)そこで、単分子解析を行い、平均化像を得ることに成功した。

その像が文頭の図1である。

単分子解析法自体は確立された方法とは程遠い解析

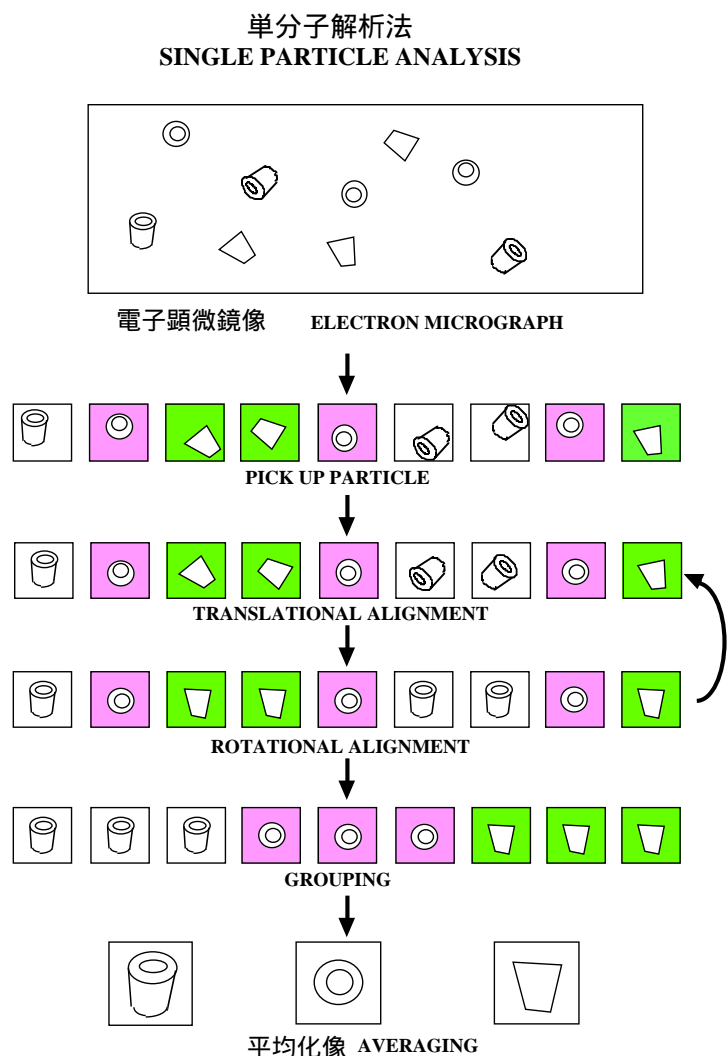


図4 単分子解析の概念図

電子顕微鏡で蛋白質を撮影した段階では、その粒子はさまざまな方向を向いており、さらに実際には図3のような多くのノイズを含んでいる。それを図のように計算機によって分類し、重ね合わせてノイズの少なく分解能の高い像にし、最終的に一つの三次元の構造へと再構成する。

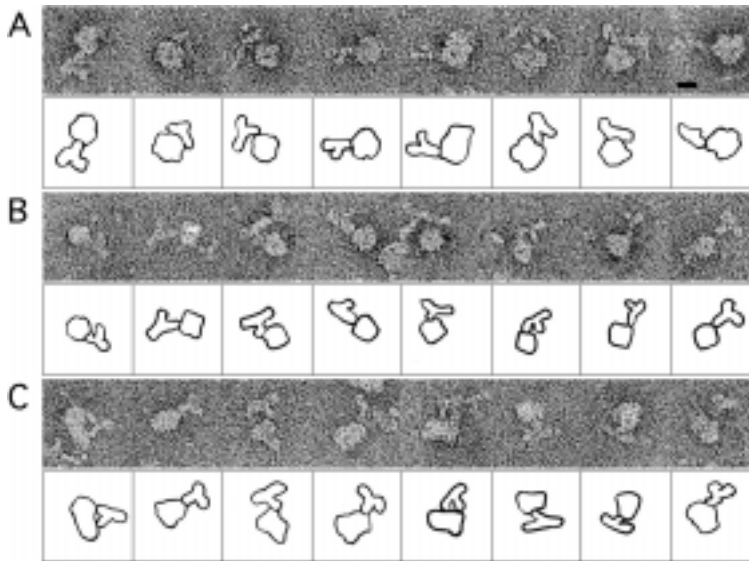


図5 生電子顕微鏡写真からの抗体とNaチャンネルの結合像  
 抗体はNaチャンネルのアミノ酸配列の一部に対してつくられた。抗体とNaチャンネルが結合していることが判る。Y字型のものが抗体であり、それが結合している円筒状のものがNaチャンネルである。右上のスケールバーは10nmを表わす。  
 A : Naチャンネルをほぼ上方から見た図、B : Naチャンネルを下方より見た図、C : Naチャンネルを側方より見た図

方法である。理論的には図4に示した通りであるが、解析法には現在世界でおよそ3通りぐらいの方法が行われている。ここでの実際の解析はパーゼル法に工夫を加えた形で、形態を識別する小道具を作りながら行った。いまだ、ソフトウェア的には試行錯誤の段階で、対象となるタンパク質の形体に合わせてソフトを作りながら分析を行った。

具体的な解析の手順は以下の様である。

(1) 最初に拾った分子像を平行移動と回転移動によって重ねあわせる。

この際、人為的に作成した基準形を基に、それとの類似性を計算し、その重心を移動させ、回転の向きを同じにして行く。

(2) これを何度か繰り返して重なり精度を上げた後、その類似性判定を行う。具体的には、図においての輝度の高い部分の分布を、座標軸を何本か設定し計算する。その際、ノイズに可能な限り振り回されず、かつより効果的に比較できる様に、座標軸を設定し、シグナルに荷重を与えなければならない。場所によってはノイズに左右されないように無視するという荷重も行う。これによって相関を計算、図形の類似性を数値化し、像の分類を行う。この際の座標軸の設

定は、像の形態に合わせ、5から10次元位の空間での分類が効果的であることが多い。

(3) 類似性の値から多面的に空間におけるグルーピングを行う。

(4) 最後に同じグループの各像を重ねて、ノイズの少ない平均化像を抽出する。

さらに、そこからのNaチャンネル分子の3次元形態を解釈したのが図6である。

### 6 . Naチャンネルの3次元構造の概要

実際に測定されたNaチャンネルの3次元構造は今回の単分子解析からコーン入りのアイスクリームの上のクリームを斜めになめ、下のコーンを軸と鉛直に切り取った様な概観であることがわかった。さらに穴は上に大きな穴を開け下に小さな穴を配置したような構造である。

これらの結果からNaチャンネルは確かに中心に20オングストローム以上の大きな穴が空いた円筒であることが判る。上の穴は下のものよりも大きい。これらの結果は、これまでの生化学的、電気生理学的結果と矛盾せず、それらの結果をよく説明する。

ず、それらの結果をよく説明する。

穴の形態に関しては、中心に入り口の大きな一つの穴が空いていると考えられる。この結果は近年結晶から決定された水チャンネル蛋白質(aquaporin)の形態と比較すると面白い。水チャンネル蛋白質はNaチャンネルと良く似た膜貫通部位をもっているが、一分子は4個の水を通す穴を持っていた。そこからの比較で、Naチャンネルも4個の穴を持っているの

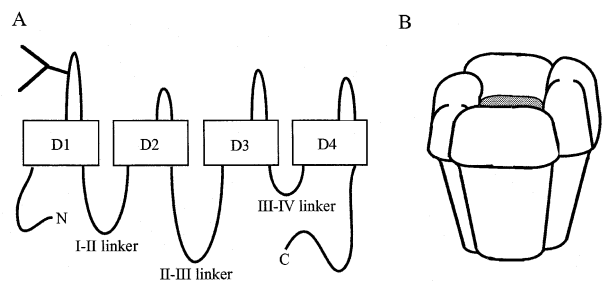


図6 平均化像からのNaチャンネル構造の模式図

Naチャンネルのアミノ酸配列上の4回の実際の擬似繰り返し部分(A)とNaチャンネルの3次元構造(B)。その3次元構造は今回の単分子解析から上下を切り取ったコーンの様な概観であることがわかった。さらに中心孔は上に大きな穴を開け下に小さな穴を配置したような構造である。

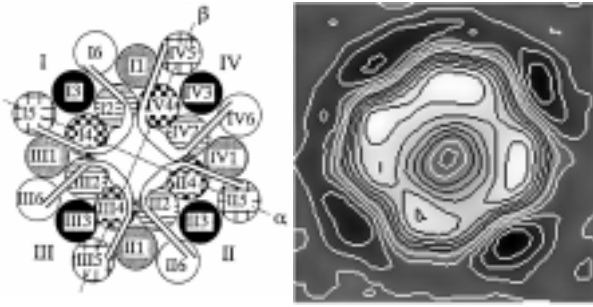


図7 正八角形モデルと平均化像の比較  
上から見た正八角形モデル(左)と平均化像(右)  
とを比較したもの

ではないかと考える構造生物学者も多かった。しかし、ここでの結果は、水チャンネルとはまったく異なった1つ穴構造であり、今後の更なる分解能での比較が楽しみである。

この穴の形態を素晴らしく速いNaチャンネルの開閉スピードと考え合わせると、下の小さい穴の部分に開閉機構が存在すると考えるのが自然であろう。その方が、エネルギー的に考えやすいからである。今後のさらなる分解能の向上によって、開閉機構および電圧感受機構が解明されることが期待される。

これらの結果を筆者等がアミノ酸配列より以前から提唱してきたNaチャンネル構造モデルと上方からの像で比較したのが図7である。これまでのどのモデルよりも今回の実際の構造に似ていると思われる。

## 7. 空間分解能について

今回の実際に解析の基となった像は1422個の像であり、本結果から逆推定される到達可能分解能から考えれば、究めて不十分な数と言える。そのため、多くの角度からの像を重ねあわせて分解能を上げることが今後可能であり、本発表におけるデータは未だ我々にとって過渡的な粗分解能のデータと考えている。それでも、およそ20オングストローム程度の空間分解能の結果が得られた。

未だ、その分解能はNaチャンネルを見る方向によって異なる。その理由はNaチャンネルが電子線照射方向に対して向き易い方向があるからである。今回はカーボン上に分子を置いて、重金属染色してその像を撮影した。当然分子には向き易い方向が存在し、向き易い角度の像は多く存在し、そのデータは分解能が高い。

もちろん理想的には究めて多くの分子像をピック

アップして全ての方向から分解能的に飽和するまで解析するのが理想である。暫定的に不十分な粒子数となっている理由の最も大きなものとして、画像のピックアップ等が挙げられる。現行の技術では手動の部分が多く、人間の労力がネックとなって多くの像を処理しきれない。今後システムの向上に伴い取り込む画像数も増え、解像度も飛躍的に向上することが考えられる。

## 8. まとめ

近年のバイオ研究においては遺伝子の技術も含めた生化学が急速に進歩し、これまでになかった様な機能を持つタンパク質が発見された。さらに、これまで難しくて全く扱えなかった蛋白質が扱え、大量に精製できるようになった。その構造研究による機構解明が、基礎科学はもちろんのこと、臨床薬の開発も含めて高く注目を集めるようになってきている。単分子解析法とNaチャンネルの組み合わせは、この方法が如何に柔らかくもろい蛋白質の構造解明に有効かを示した。単分子解析法による研究は、今後さらに増加していくことが確実で、扱いが難しいが故に解明が遅れていたタンパク質の解明に、日々重要性を増してゆくとと思われる。

## 9. 最後に

単分子解析技術自体は欧米で生まれ育ってきた。その科学の要点は、生物研究者と情報研究者の距離が近い点にあると思われる。その点、日本ではこのような研究が進む地盤は外には殆ど無いと言って良く、電総研にいて良かったと素直に思う今日この頃である。

# 人間型能動視覚システムによる複雑背景下での対象の発見と追跡 Target Detection and Tracking in Complex Background using an Anthropomorphic Active Vision System

知能システム部 國吉康夫<sup>\*1</sup>、セバスチャン・ルジョー<sup>\*2</sup>、喜多伸之<sup>\*3</sup>、末広尚士<sup>\*4</sup>

Intelligent Systems Division, Yasuo Kuniyoshi<sup>\*1</sup>, Sebastien Rougeaux<sup>\*2</sup>, Nobuyuki Kita<sup>\*3</sup>, Takashi Suehiro<sup>\*4</sup>  
e-mail:kuniyosh@etl.go.jp<sup>\*1</sup>, rougeaux@etl.go.jp<sup>\*2</sup>, nkita@etl.go.jp<sup>\*3</sup>, suehiro@etl.go.jp<sup>\*4</sup>

A robust real time detection and tracking of general objects on complex background has been realized on an anthropomorphic binocular active vision system. Target is segmented and its velocity is estimated using a confidence value based fusion of optical flow and phase-based zero-disparity information. Unique foveated wide-angle lenses of the system help the tracking performance.

## 1. はじめに

人間の振る舞いに反応して人間と共存・協調するロボットを考えたとき、本当に使い物になる視覚機能が必要不可欠であり、その最も基本的な機能が動く対象の発見と追跡である。それは、暗幕などの小細工をせず複雑な背景下で対象を区別でき、人間を指定位置に立たせたりせず、広い空間内を自由に動く対象を発見・追跡でき、人間や持ち物に特別なマーカーをつけたり、物の形や色を限定したりせず、どんな物にでも対応でき、しかも実時間で機敏に、かつ確実に機能しなければならない。ロボット視覚の研究は盛んに行われ、進歩も早いですが、このような統合的な性能を十分に有するシステムはこれまでなかった。

この問題解決は、単にアルゴリズムだけ、あるいはハードウェアだけ、という局所的な改善ではなし得ず、センサのハードウェアから処理アルゴリズム、そして全体の実時間動作といった、システム統合の観点からの全面的アプローチが必要不可欠である。

我々は、人間の視覚系にヒントを得ながら、独自に開発した能動両眼ロボット視覚機構の上に、高性能の視覚追跡機能を実現した。

## 2. 能動両眼ロボット視覚システム ESChER

ベースシステムとなった ESChER [ ETL S tereo C ompact H e ad for R obot V ision ] は、人間の眼球系を単純化して模した機構

である(表紙写真参照)。左右両眼に相当する2個の CCD カメラを各々独立に水平回転(輻輳軸) 共通に上下回転(チルト軸) そして全体が共通に水平回転(パン軸) するように DC モータ駆動している。

このシステムの最大の特徴は、当所が新情報処理技術開発機構つくば研究センターと共同で開発した特殊な多重解像度レンズにある。人間の視覚に似て、視野の中心部分で非常に解像度が高いが、そこから周辺に向かうにつれて急激にしかし滑らかに解像度が低下しながら、非常に広い視野をカバーしている(中心と周辺の最大倍率比は7.7倍)。もちろん視線を自由に振り向けて、興味ある対象を中心視野で捉える、いわば能動視覚機能が大前提となる。このレンズは、一旦対象物を捉えたら見失いにくいなど、視覚処理に有利な様々な性質を持つ。

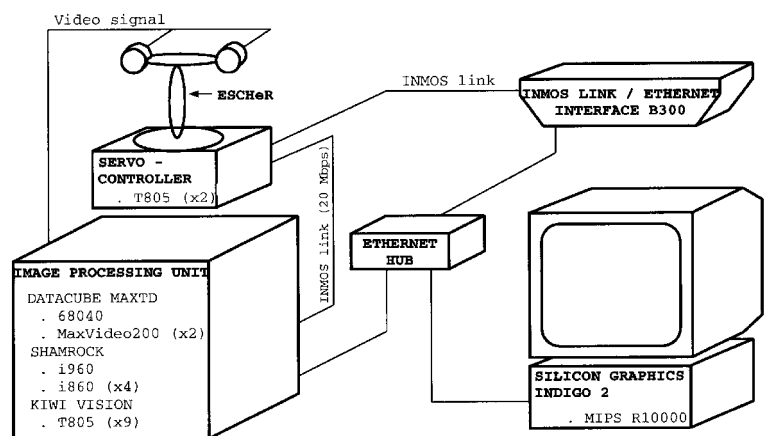


図1 ハードウェア構成

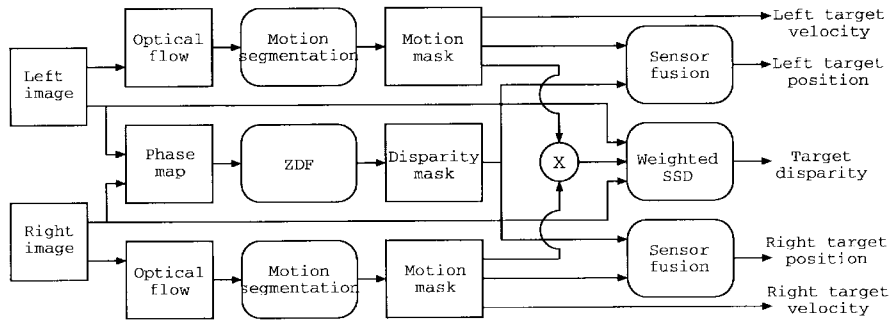


図2 視覚処理の構成

実験システム全体は、図1に示したように、視覚機構の運動制御装置、画像処理装置、グラフィックスワークステーションからなる。

### 3. 動きとゼロ視差情報の融合による対象の切り出しと運動情報抽出

視覚処理の流れを図2に示した。まず、左右カメラの画像から、各視野における動き情報(オプティカルフロー:速度ベクトル場)と両眼ゼロ近傍視差(位相差マップ)を抽出する。これらの情報を併用して物体像を背景から切り出し、対象の方位と奥行情報を得る。並行して、動き情報から対象の速度情報を得る。これらの位置と速度の情報を元に、発見した対象に視線を飛ばしたり、動く対象を追跡したりという視線運動制御を行う。全ての処理が実時間(画像入力周期30Hz)で行われる。

最初に動くものを発見するときや追跡が完全でないときは、視野の中での対象物の動きを手がかりにする。左右の視野のオプティカルフローを、入力画像の時間的空間的变化から、局所最適推定法で抽出し、ベイズ推定法を適用して信頼度分布を付加する。見回しや対象追跡中は、カメラの動きによって全視野オプティカルフローが発生する。視覚機構のセンサ



図3 追跡中の画像(左)と分離済オプティカルフロー(右)

から自己運動を計測し、自己と独立に動く対象物によるフロー成分を信頼度付で分離する(図3右で、赤が独立運動成分、緑が自己運動成分)。

追跡がほぼ完全なときは、対象は視野内で静止するので、フローは使えない。代わりにゼロ視差フィルタ法が有効になる。左右のカメラがあ

る一点を見つめている時、その点は各カメラの視野中心に映る。すなわち、視差ゼロとなる。実は、左右カメラ中心と注視点を通る円周上(ホロプタと呼ばれる)の全ての点は視差ゼロとなり、それ以外の全ての点は、視差がゼロでない(図4)。この性質から、左右の像のずれがゼロ付近になる画素だけを抽出すれば、ホロプタ上の対象だけが見える。さらに、多重解像度レンズは中心部分を強調するので、注視点付近の物だけが見えて、それより奥や手前や脇にあるものには反応しない選択的注視ができる。我々は、初めに2値化したエッジ特徴などを手がかりに上記の処理を実現したが、複雑なシーン中では曖昧性が発生して間違いが多い。現在は、画像の濃淡情報をフルに活用しつつ、照明条件の影響を受けない方法として、位相差視差法を採用している。ガウシアン<sup>1</sup>の1次微分を実部に、2次微分を虚部に持つ複素フィルタをかけることで、一定範囲の周波数成分に関する左右画像の位相差を検出している。この微分ガウシアンフィルタは、Gaborフィルタ(より一般的に使われている)と似ているが、DC成分への応答がゼロであるので照明条件に影響を受けない、小さなコンボリューションカーネルで済むために計算が高速などの利点がある。

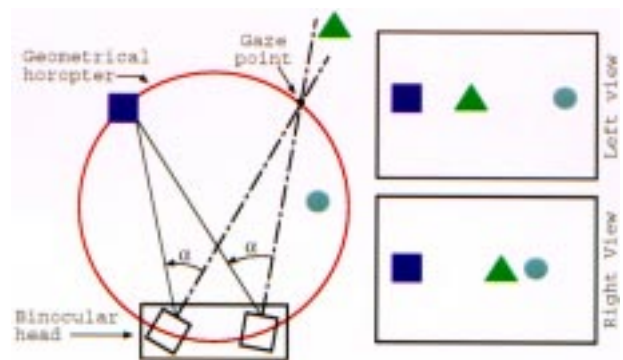


図4 ゼロ視差フィルタの原理

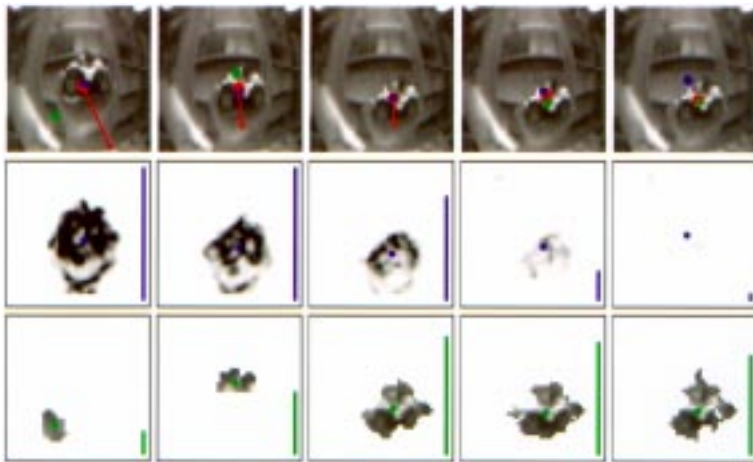


図5 動き情報と視差情報の相補的融合

この結果についても、フローの場合と同様に信頼度分布が計算される。

上述のフローに基づく物体検出とゼロ視差フィルタの出力領域を各々が持つ信頼度情報で重み付け平均することで、最終的な対象切りだし結果を得ている。このように、相補的な情報を連続的に融合することで、追跡が安定せずに対象がカメラに対して動いているときはフローが、追跡・注視が安定して対象をしっかりと捉えているときはゼロ視差フィルタが優勢に働き、また中間的狀態では両者が協力して、常に安定な対象物切り出しが達成される。おもちゃを持った手が視野内に入ってきて注視点で停止したときの情報融合の様子を図5に示す。中段が動きからの対象切り出し結果で、下段がゼロ視差による結果である。枠内の右端の棒は信頼度を表す。

### 3. 眼球運動制御

何も動きが無いときは、周囲を見回すモードになる。新たに発見された場合や、追跡中の誤差によって、対象物が視野中心から一定距離以上離れていると判定すると、サッケードモードに切り替わり、急速な視線運動によって対象を捉え直す。それ以外の場合は、追従視線制御を行う。追従視線制御の目標値は、フローから得られる対象物の速度情報と、フローとゼロ視差フィルタの融合から得られる対象物の位置情報を、カルマンフィルタによって統合、平滑化することで、500Hz周期で運動制御に与えられる。

なお、実時間視覚システム特有の問題として、処理の時間遅れや異種データ間の時間間隔の違いによる動作の不安定化がある。本システムでは、入力画像の各フレームと、それに同期して取得したカメラ回転

センサ値にタイムスタンプ情報を付加し、複雑な処理の経路を経て異なる処理の結果を融合する際や、カルマンフィルタなどの時間的演算を行う際の一貫性保持を実現している。

### 4. おわりに

本システムは、普通の環境内で、広範囲を自由に動く人間や日常の事物を発見し、確実に追跡できる。たとえば、部屋に入ってくる人に気づき、じっと追跡して机の前に座るまで追いつづけ、今度は顔の動きや手の動きに着目し、さらに、手に持ったおもちゃを発見して追いつづける。手を止めてしばらくすると、他の動くものを探してあたりを見回す。といった一連の動作が可能である。

視野内に二つ以上の対象領域が検出された際や、対象物が二つに分離された際は、多重解像度レンズの特性によって、視野中心に近い対象が勝手に選ばれてそちらに注視する。このような場合、一方を積極的に選択するような注意の機能はまだ入っていない。現在はまだ、動きに反応し追いかける、という受動的な眼である。いろいろな対象から、状況や文脈に応じて注目すべき対象を選んだり、以前見た対象を思い出したり、といった注意制御の機能が、これからの研究課題である。

本システムは、日常的な状況における人間の振る舞いを視覚認識するのに特に適した性質を持つ。将来は、人間のいろいろな振る舞いを見て認識し、手助けをしたり警告を発したりするロボットシステムの核になる技術として改良を続け発展させていきたい。

#### 研究課題名

柔らかなロボット技術の研究  
大域情報処理技術に関する研究  
協調能動センシングシステムに関する研究  
注視行動の文脈主導組織化と行為認識機能の研究

#### 参考文献

S. Rougeaux and Y. Kuniyoshi, "Robust Real-Time Tracking on an Active Vision",  
Proc. of IEEE Int'l Conf. Intelligent Robots and Systems, 1997.

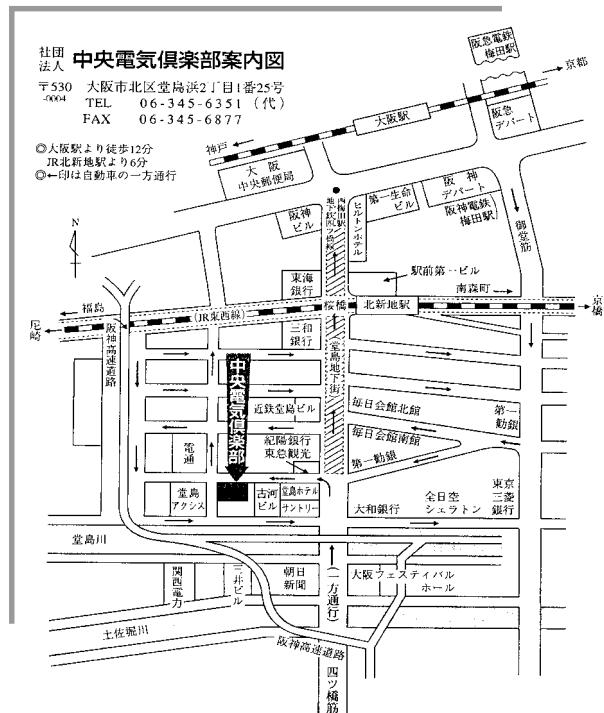
大阪ライフエレクトロニクス研究センター  
平成10年度**研究講演会** 1998.11.20 開催

今回の講演会では、大阪ライフエレクトロニクス研究センターの研究成果と最近の情報工学等の話題を紹介  
します。

日 時：平成10年11月20日(金) 13:00～17:00  
場 所：中央電気倶楽部 5階大ホール 電話(06)345-6351  
(大阪市北区堂島浜2-1-25 JR大阪駅下車徒歩12分)  
主 催：工業技術院 電子技術総合研究所  
共 催：(財)日本産業技術振興協会  
内 容：  
挨 拶

	次 長	諏訪	基
感性を考慮する情報処理技術をめざして			
知能システム部	主任研究官	坂本	隆
ニオイ受容細胞の優れたニオイ分子識別能			
大阪ライフエレクトロニクス研究センター	主任研究官	佐藤	孝明
人間の hochi 脳情報処理			
「認知・注意・情動制御」に対する脳磁図計測			
大阪ライフエレクトロニクス研究センター	総括主任研究官	外池	光雄
最重度難聴者でも超音波が聞こえる！			
難聴と超音波聴覚			
近畿大学医学部	助教授	細井	裕司

定 員：150名(聴講無料)  
申込方法：希望者は郵便はがき又はFAXにて聴講券希  
望と書き、氏名・勤務先(住所、名称、所属、  
電話番号)を記入の上、下記にお申込み下さい。  
申 込 先：通商産業省工業技術院電子技術総合研究所  
大阪ライフエレクトロニクス研究センター  
〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-46  
電話(06)494-7854, FAX(06)491-5028



## 人事異動

氏名	(新)	(旧)
平林 正之	企画室企画班に併任 工業技術院国際研究協力企画官に併任	材料科学部主任研究官  (平成10年7月1日付)
太田 敏隆	企画室エネルギー技術研究調整官の 併任解除	エネルギー基礎部主任研究官兼企画室企画班 長兼企画室エネルギー技術研究調整官
小原 春彦	企画室エネルギー技術研究調整官に併任	極限技術部主任研究官 (平成10年8月1日付)
平井 成興	工業技術院総務部研究開発官に併任	知能システム部総括主任研究官
太田 敏隆	企画室企画班長の併任解除	エネルギー基礎部主任研究官兼企画室企画班長
桐生 昭吾	企画室国際班長の併任解除 企画室国際班国際研究係長の併任解除 国際研究協力推進室国際企画係長の 併任解除 企画室企画班長に併任	基礎計測部主任研究官兼企画室国際班長兼企 画室国際班国際研究係長兼国際研究協力推進 室国際企画係長
小原 春彦	企画室国際班長に併任 企画室国際班国際研究係長に併任 国際研究協力推進室国際企画係長に併任	極限技術部主任研究官兼企画室エネルギー技 術研究調整官  (平成10年9月1日付)