

# 生体感覚系を模擬した運動知覚系の工学的実現 に関する研究

三橋 渉

電気通信大学 電気通信学部  
電子情報学科 講師

## 1. はじめに

移動ロボットや無人搬送車などの運行制御においては、行動環境を実時間で知覚できることが望ましい。近年の計算機の小型化や撮像装置の高性能化によって、いわゆるコンピュータビジョン技術による環境認識手法の発展にはめざましいものがあるとはいえ、移動体の自己運動パラメータを実時間で求めることは、依然・難しい課題である。

一方、水中や夜間などの不可視環境下での対象に対するセンシング手段としては、電波や音波の使用は今なお有効であり、実用的である。ところが対象空間に向けてこれらの波動を放射し、観測される反響波を分析して運動パラメータの推定や対象の空間的構造の復元を行うとき、一般的には、自己と対象空間との間の相対速度が測定結果に悪影響を及ぼす。このことは波動伝搬速度が低速な空中音波を利用せざるを得ない場合に極めて顕著である。したがって、彼我の相対速度の影響を受けることなく、対象までの距離情報を正確に取得できる (Doppler tolerantな) 信号を設計する必要がある、その上でなお、相対速度も推定可能 (Doppler resolvent) な信号処理法の開発が望まれていた。

哺乳類は、長い進化の過程を経て、対象世界の網膜上への投影や、音波の反射・回折等の物理現象に適応し、それによってもたらされるできるだけ多くの情報を獲得できるように、感覚器官を組織的に構築してきた。本研究は、これら哺乳類の視覚・聴覚情報処理系に特徴的な機能的構成に着目し、回転や拡大運動の知覚機構、両眼立体視機構、および反響定位機構などの計算論的なモデルを構築するとともに、その結果を対象空間の構造復元と運動情報の推定などの工学的分野に応用することを目的として行われた。現在、これらのモデルを統合したシステムを完成させるには至っていないので、以下では個別に報告する。

## 2. 空間フィルタによる回転、拡大・縮小運動パラメータの推定

動画像の動き情報を検出する方法としては、(a): 連続フレーム間での特徴点の対応付けにより変位ベクトルを求める、(b): 画素濃淡値の時間・空間勾配を記述する微分恒等式を解く、などの方法があるが、計算量が大きい、大域的な計測が困難、などの欠点がある。また、たとえこれらの手法で変位ベクトルが求められても、運動パラメータは未知のまま残されており、改めて計算する必要がある。対象が静止した背景内を大きな変形をせずに並進運動する場合の速度推定法としては、工業計測の分野で発展を遂げた空間フィルタ法が実時間計測可能な計測法として知られている。しかし、この方法の時間・空間分解能は低く、本来、並進運動の計測法として発展してきたために、一般に任意の運動を対象とするには不相当であると考えられてきた。

高等動物の視覚系末梢から外側膝状体を経て、皮質の第一次視覚野に至る網膜神経節細胞の受

容野の分布は、複素対数変換で近似的にモデル化できる。動画像の動きの無限遠点を原点とする像面の直交座標を複素対数変換すると、回転、拡大・縮小は互いに直交する並進に写像される。したがって複素対数変換面上で空間フィルタ法を適用すれば、回転と拡大・縮小運動パラメータを分離して直接に測定できる。しかし、像の複素対数変換は計算量が多い。そこで、複素対数変換面上での並進計測に必要な空間荷重を、あらかじめ動画像の座標上に逆写像しておき、像面上で荷重計算を施すようにすれば、実時間で回転運動や拡大・縮小運動のパラメータを測定できる。

従来の空間フィルタ法は速度の計測法であり、変位計測は不可能とされていたが、コヒーレントな空間荷重を設計することで、変位計測も可能な方法を開発した。ブロックダイアグラムを図1に示す計測系は、像と空間荷重とのフレーム内積和を出力し、その瞬时周波数が像の速度を、瞬时位相が変位に対応する。これらのチャンネルを並列接続することで、並進、回転、拡大・縮小運動などの同時計測が可能である。一例として、カメラの光軸に沿って正弦波状に接近・離遠を繰り返す物体変位の実時間計測結果を図2に示す。

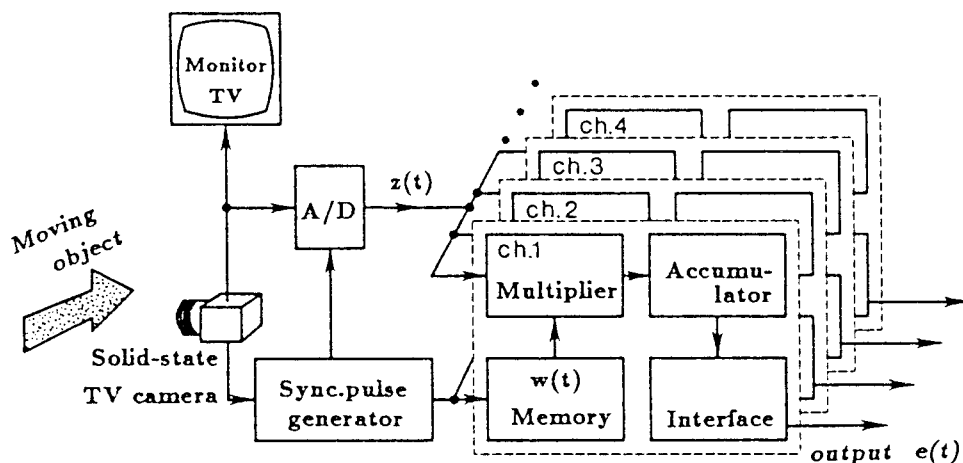


図1：運動パラメータ計測システムの概念的構成。像と空間荷重の積和で一つの空間フィルタ計測系が実現される。処理系を並列に接続し、適切な空間荷重を設計すれば、並進、回転、拡大・縮小運動を同時に計測できる。

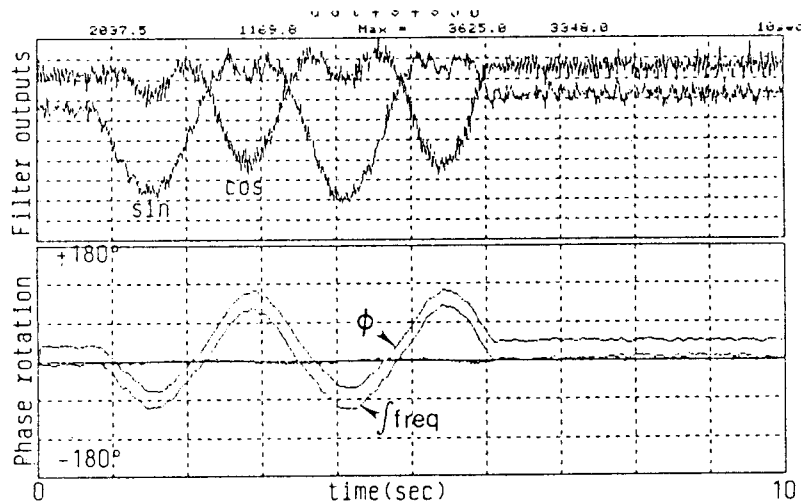


図2：光軸に沿って接近・離遠を繰り返す物体の変位計測結果の例。像は像面内で拡大・縮小運動を繰り返す。上はコヒーレント空間フィルタの出力。下は物体変位に対応する瞬时位相。

### 3. 眼優位性コラム構造をモデルとする奥行き知覚モデル

動き情報を利用すると外界の奥行き情報を取得できるが、移動ロボットなどの行動環境下では、静止状態でも外界構造の知覚が必要となる。これには主に両眼立体視が利用されるが、複数のカメラで観測された画像間の視差抽出法は、動き情報検出法と理論的な共通性を持つ。しかし、高等動物の一次視覚野に見られる眼優位性コラム構造の単位ユニットの大きさと、両眼視差を単一像に融合可能なPanum領域の広がりとの関連が指摘されており、本研究では、眼優位性コラム構造をモデルとした視差抽出アルゴリズムの導出を試みた。

一次視覚野では、左あるいは右眼からの神経投射が優位な部位が交互に並んでコラムを構成している。これは、工学的には、左右のTVカメラの水平走査線を交互に抜き出して一枚の画像フレームを合成したものと見ることができよう。隣接する走査線上の画素値に視差があれば、走査線間隔の二倍を周期とする高周波信号成分が発生する。視差がなければこのような不要信号は発生しない。したがって、合成画像フレーム上の任意の位置に、適当な大きさの受容野を持つ細胞があるものと仮定すると、この細胞が出力する信号の高域通過成分のエネルギーを最小化する問題として、視差抽出法を定式化できる。交互に配列された左右のカメラの走査線関数とその周波数スペクトルを、概念的に図3に示す。走査線周期が $W$ であるとき、周波数 $\frac{1}{2}W$ の位置に左右の視差の影響が現れる。推定された視差分布による木製半球の形状復元結果と断面プロファイルの例を図4に示す。

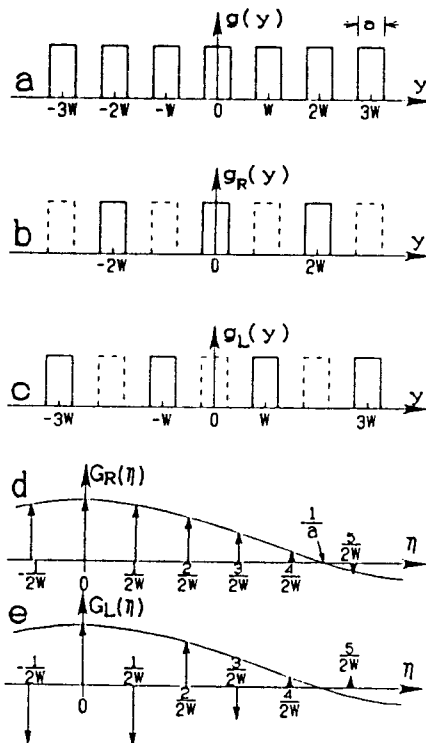


図3：交互に配列した左右カメラの走査線関数 $g_R(y)$ ,  $g_L(y)$ とその周波数スペクトル $G_R(\eta)$ ,  $G_L(\eta)$

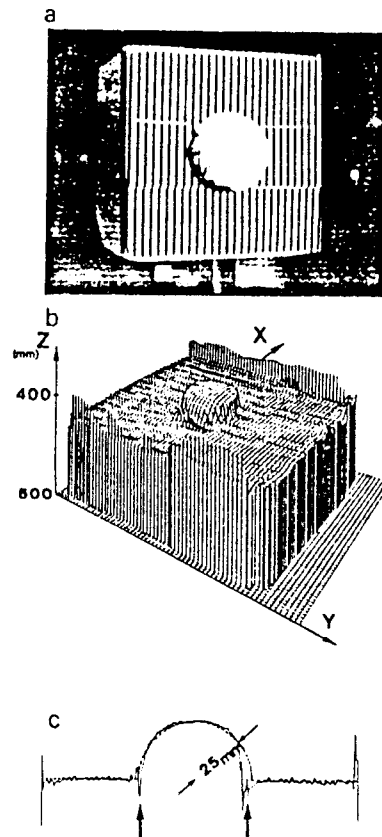


図4：縞様板の上に配置した木製半球と、推定視差による形状の復元結果

#### 4. 反響定位と標的パラメータの推定

周囲の対象物が比較的近接して存在する環境下で動き回る移動体が、これらを回避しつつ彼我の相対距離や相対速度を求める方法として、音波の利用は有効な手段である。一般に、相対運動する対象の検出やパラメータ推定が合理的な規模の装置で効果的に実行できるためには、それらの計算に要するコストが低いことが望まれる。対象物の大きさや表面形状などは無視し、推定すべきパラメータを距離と相対速度に限定したとしても、これらのパラメータ推定の誤差が互いに影響することなく、互いに独立に推定可能な方式が必要である。

周囲環境への探索プローブとして音波を利用し反響定位する生物としては、小翼手類（コウモリ）が良く知られているが、本研究では、相対運動の存在下で、速度の影響を受けずに対象までの距離を安定に推定できるように定位音を持つべき条件について検討を加えた。

運動に伴って生じるDoppler効果のため、発射定位音の波形に比べると、観測されるエコー波形は時間軸に沿って速度に応じた伸縮を受ける。この伸縮を計測できることが相対速度の推定を可能にする要件である。この目的のためにMellin変換を採用し、Mellin変換の位相回転に基づく速度推定法を開発し、この方法に適した信号が線形周期変調（LPM）波であることを導いた。一般にMellin変換は計算時間を要し、実時間計測の目的にとっては必ずしも有用な方法ではない。しかし、LPM波を定位音とする場合、Mellin変換の位相回転に基づく速度推定法がコヒーレント相関波出力の位相回転の推定に帰着できることを明らかにした。

#### 5. 定Qフィルタ群と相関受信機

コウモリなどの聴覚系内で相関検波が行われているのか否かについては、従来より主として動物行動学に基づいた実験結果を巡って、多くの議論が行われているものの、確たる証拠が見出されているわけではない。聴覚系末梢での周波数選択特性を近似的に二次系の帯域通過特性とみなす生理学的知見に基づいて、LPM波に対して聴覚系が相関検波と等価な機能を果たすために必要な条件について検討を加え、具体的な設計アルゴリズムを導出した。

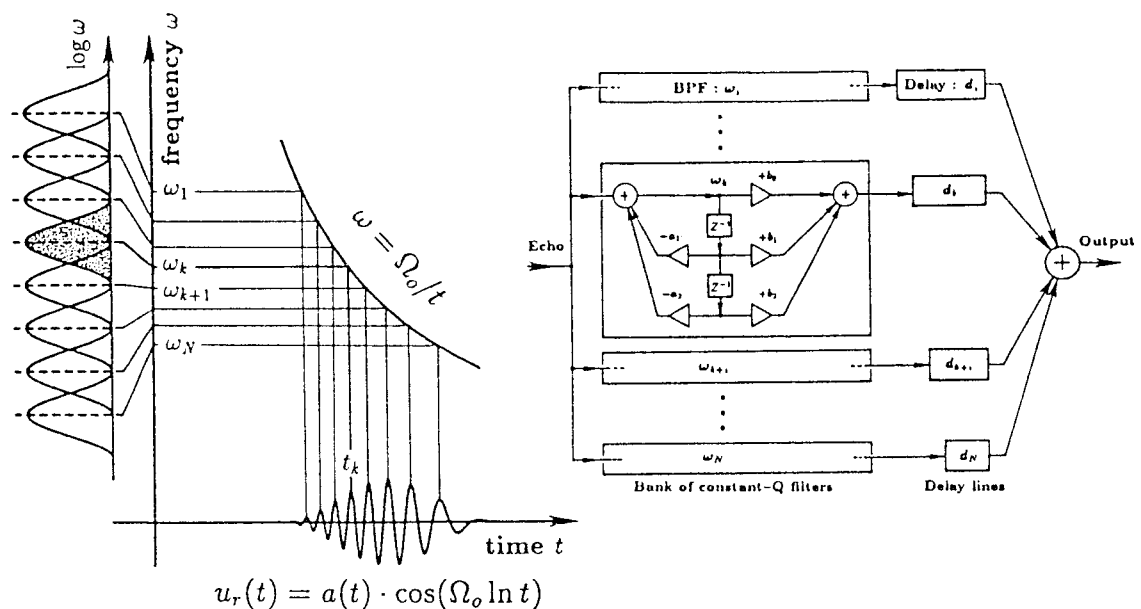


図5：LPM信号と帯域通過フィルタの配置。

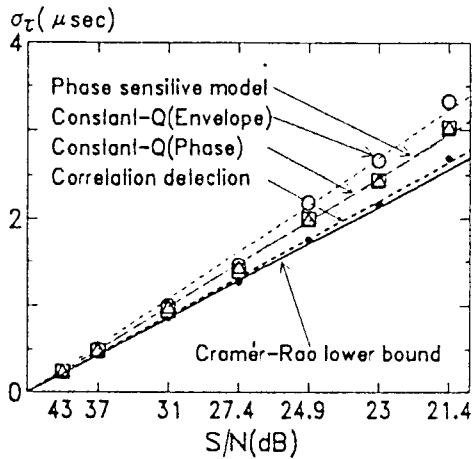


図6：対象までの距離に対応した伝搬遅延の推定精度

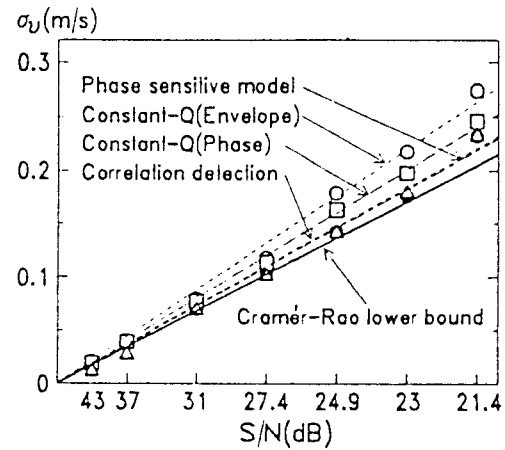


図7：相対速度の推定精度

以上の成果を基にして設計した速度・距離測定系は、図5に示すように、従来より音声情報処理の分野で広く使用されている定Qフィルタ群を対数周波数軸上に一様に配列させ、発射した定位音のスペクトルの非線形位相特性をキャンセルするための遅延器を各フィルタに接続してそれらの出力を遅延合成するものであり、定Qフィルタ群を構成する個々のフィルタの出力位相が一致する時刻を標的までの距離の推定値とし、その時刻での出力位相の平均値で標的との相対速度を推定可能である。数値実験の結果、標的が高速運動していても距離の推定になんらの影響もないこと、低S/N比の下でも標的検出が可能であること、距離と速度の推定精度がCramer-Raoの下界に近く十分な推定精度が得られることなど、生体ソナーの工学的モデルとして有用であることが確かめられた。図6、7に本方法（Phase sensitive model）と他の方法とのパラメータ推定精度を比較して示す。

## 6. おわりに

本研究で得られた成果は、移動体の運動パラメータ推定や環境の空間構造復元への応用等に適し、多様な環境下での作業ロボットのセンサシステムとして有用であると考えられる。

最後に、本研究の遂行に多大なご支援を頂いた、故高柳先生をはじめ、(財)高柳記念電子科学技術振興財団および財団の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 三橋 渉, 岡 和彦, 山崎弘郎: 電子的に構成した空間フィルタによる運動計測, 計測自動制御学会論文集24-11, 1111-1117 (1988)
- [2] 三橋 渉, 大村和元: 眼優位性コラム構造をモデルとする視差抽出法による形状計測, 計測自動制御学会論文集28-1, 136-144 (1992)
- [3] 三橋 渉, 望月 仁, 田村正孝, 山崎弘郎: 線形周期変調波とセンサアレイを用いた運動物体群の速度ベクトル計測, 計測自動制御学会論文集23-7, 665-670 (1987)
- [4] 三橋 渉, 望月 仁: 生体ソナーの工学的モデル—FMコウモリの定位音の性質と速度の知覚について, 計測自動制御学会論文集に投稿中
- [5] 三橋 渉, 望月 仁: 聴覚処理系をモデルとする定Qフィルタ群を用いた標的パラメータ推定法, 計測自動制御学会論文集に投稿中