

生体感覚系の構造に示唆を得た計測システム

三 橋 渉

Sensing systems motivated by the functional structures of the biological sensory systems

Wataru MITSUHASHI

Abstract

A bionic sonar for detecting a moving object in invisible environments and a foveated sensor for tracking a target in visual scenes have been studied in relation to biologically motivated sensing systems. In the bionic sonar a *linear period-modulated* (LPM) signal is designed to mimic the location sound of the big brown bats, whereas the foveated sensor with a *log-polar mapping* (LPM) yields a mock architecture of the spatial distribution of the retinal ganglion cells. A close similarity between these sensing systems is described with reference to the arrangement of sensor elements. A depth reconstruction system mimicking the functional architecture of ocular dominance columns in the mammalian visual cortex is also introduced.

Keywords : *linear period modulation, log-polar mapping, binocular stereo, shape from disparity, ocular dominance column, depth reconstruction*

1 はじめに

筆者の研究室では、因子分解法を用いた3次元空間の構造復元[1]やパノラマ合成の際の不要物体の除去[2]、交通標識の認識[3]や移動車両の追跡[4]など、画像処理に関する研究のほか、能動騒音制御[5]や音源分離[6]、エコーキャンセラー[7]、音声区間の検出[8]や信号源定位[9]などの信号処理に関する研究を大学院生らと共に手がけてきた。これら最近の研究の成果については学協会誌等に公表済みであるのでここでは述べないが、過去に手がけていたテーマの中で特に生体の感覚系の構造に範を得た計測法に関する研究について概略を紹介したい。

2 超音波を発射して空間を探索する動物

こうもりが夕やみにまぎれて川面の上を飛びながら蛾や虫を捕食するのを見たことがあるだろうか。こうもりの飛ぶ速度が1[m/s]だと仮定すると、音速340[m/s]に

対する速度の比は約0.003である。一方、国際線ジェット機の運航速度はただだか1000[km/h]と言われており、秒速に換算すると300[m/s]程度である。電波を利用するレーダー (RADAR: Radio Detection And Ranging) を使ってジェット機を探知する場合、ジェット機と電波伝搬の速度比は約0.000001でしかない。レーダーでジェット機を探知するときに受けるドップラー効果の影響よりも、こうもりが飛行する際に木立や木の葉などの静止する標的から受けるドップラー効果の影響の方がずっと大きいのである。

こうもりが餌を捕食する際に放射する超音波(定位音)の代表的な時間・周波数特性を図1に示した。同図(左)は一定周波数(CF: Constant Frequency)成分の終端部に周波数が下降する周波数変調(FM: Frequency Modulation)音が接続されている例であり、この種の定位音を用いるこうもりをCF-FMこうもりと呼ぶ。CF-FMこうもりの一次聴覚野ではCF周波数に選択的に応答する部位が特異に発達して肥大化しており、ドッ

Received on October 1, 2012.

Member of the Board of Directors (Research Strategy)

Professor Emeritus, The University of Electro-Communications (Department of Communication Engineering and Informatics)

理事 (研究戦略担当)

電気通信大学名誉教授 (前情報・通信工学科)

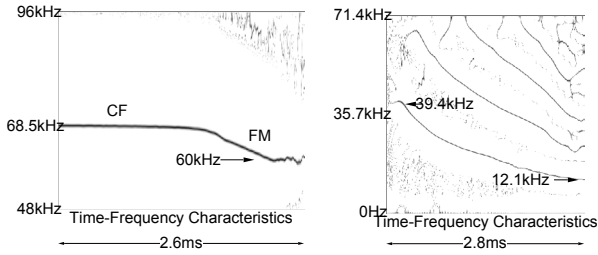


図1：代表的なこうもりが発射する定位音の時間・周波数特性の例

プラー効果による反射エコーの周波数のわずかな変化も検知できることが知られている[10]。このことは、自分と餌との速度差を敏感に察知できることを示唆している。また、内側膝状体にはFM成分の特定の遅延に選択的に同調する神経細胞が存在することが確認されており、内側膝状体からの神経投射を受ける皮質には餌までの距離を表示する座標が構成されていると考えられている[11]。こうして、CF-FMこうもりは飛行にともなうドップラー周波数偏移を察知して餌との速度差を知り、餌までの距離を的確に判断して捕食できるように、自ら発射する定位音の形式を選択しそれに適応するように聴覚系を形成してきたと考えられている。

一方、同図(右)に示した時間・周波数特性の例では高調波成分を豊富に含んでいるが、時間の経過とともに基本波の周波数が双曲線的に下降している。この種の定位音を用いるこうもりはFMこうもりと呼ばれる。CF成分がなくFM定位音だけを利用するFMこうもりはドップラー効果の影響、つまり餌と自分との速度差を知ることができないのだろうか？

2.1 周波数変調の意味

こうもりが飛翔しながら餌を探知・追尾して最終的に捕食するためには、木立や草木から反射してくる妨害音に打ち勝って餌の存在を検出する必要がある。この種の問題は信号検出問題として古くから理論的に分析されている[12]。妨害音に埋もれた微弱な反射エコーを検出するためには周波数変調や疑似雑音を用いて信号の帯域幅を拡大する方法が有効である[13]。しかし、単純に周波数変調を採用しただけでは信号を検出した後に標的の距離と速度を同時に正確に知ることは難しい[14]。その理由は、ドップラー効果によって反射波の時間軸が伸び縮みして周波数変調の構造が変化してしまうからである。このため、一般には距離と速度を独立に推定することができない (Range-Doppler ambiguity)。

ところが、時間の経過にしたがって周波数が下降する変調音の一つに線形周期変調 (LPM: Linear Period Mod-ulation) 信号[15]があり、これはドップラ効果の影響を受けずに距離を推定できる (Doppler tolerantな)

信号であることが知られている[16]。図1の右に示すFMこうもりの定位音は典型的なLPM信号であると言われている[17]。つまり、FMこうもりは飛行によって生じるドップラー効果の影響を受けずに餌までの距離を正確に知ることができる可能性がある。

CF-FMこうもりはドップラー効果、すなわち速度を知るために定位音と聴覚系を特異に構成する道を選んだが、FMこうもりにとって定位音を発射するたびに距離がわかるのならば容易にえさを追尾できるので、わざわざ彼我の速度差を知る必要は無いのかも知れない。しかし、工学者の立場からすればFM音を使って速度を求めする方法を探してみたい。その方法について考えてみよう。

2.2 聴覚系末梢における周波数分析機構

聴覚系の末梢である基底膜の周波数弁別能力はBékésyによって分析されているがその特性はブロードで、大脳皮質聴覚野への上行過程で側抑制により先鋭化されると説明されてきた[18]。しかし実際の周波数同調特性は基底膜において既に比較的先鋭であり、入力音圧によってその同調特性が能動的に変化することが観測されている。Johnstoneらの測定結果[19]によれば、基底膜の周波数同調特性は入力音圧に応じてQ値が変化する二次低域通過特性で近似でき、入力音圧レベルが低い場合には帯域通過特性を持つと見なせる。また、多くの哺乳類の基底膜では、蝸牛頂(helicotrema)から膜に沿って測った位置と対数周波数とがほぼ直線的な関係にあり、聴覚心理学的に推察された聴覚フィルタの帯域幅は中心周波数とほぼ線形関係にあることが知られている[20]。この場合、基底膜の振動を検出する有毛細胞の分布密度が一様でそれぞれの応答野特性が同一であると仮定すると、聴覚系末梢での周波数分析機能を定Qのバンドパスフィルタ群でモデル化できる (図2参照)。

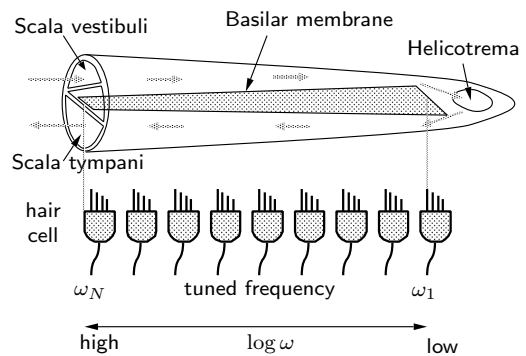


図2：基底膜の振動を検出する有毛細胞の配置

2.3 定QフィルタによるLPM信号の処理

雑音や妨害音に埋もれた微弱な信号を検出する装置は相関検波器（マッチトフィルタ）として実装されるが、受波したエコーに対する相関検波器がコウモリの聴覚系内部に備わっているかどうかについては従来より動物行動学の分野で様々な議論が行なわれてきた[21, 22, 23, 24, 25, 26]。それが工学的な意味でのパルス圧縮システムになっているとは考え難いが、ここでは定Qフィルタを使ってLPM信号を処理する方法を考えてみよう。

線形周期変調（LPM）信号は周期が時間に比例して増加する下降FM信号であり、その瞬時角周波数 ω_i は時間 t に逆比例し係数を Ω として $\omega_i = \Omega/t$ と表される。ここでは詳細を述べないが、LPM信号の位相が 2π づつ回転していく時刻の瞬時角周波数をバンドパスフィルタの中心角周波数に選ぶと、このフィルタ群は対数角周波数軸 $\log \omega$ 上で等間隔にならぶことがわかっている[27]。これは前述の基底膜の振動を検出する有毛細胞の配置と同一視できて、定Qのフィルタ群として実現できる。工学的には、図3に示すようにLPM信号の群遅延特性を補正する遅延線をこれら定Qフィルタ群の出力に接続して加算することで遅延加算に基づくパルス圧縮が実装でき、妨害音に埋もれた微弱な信号の検出が可能となる。

2.4 速度の知覚

LPM信号の瞬時角周波数が $\omega_i = \Omega/t$ であれば、その積分である位相は定数項を無視して $\Phi(t) = \Omega \log t$ と書ける。ドップラー効果は反射エコーの時間軸の伸び縮みとして現れるから、ドップラー係数を s とすれば反射エコーの位相は $\Omega \log st = \Omega \log t + \Omega \log s$ と表せる。標的との速

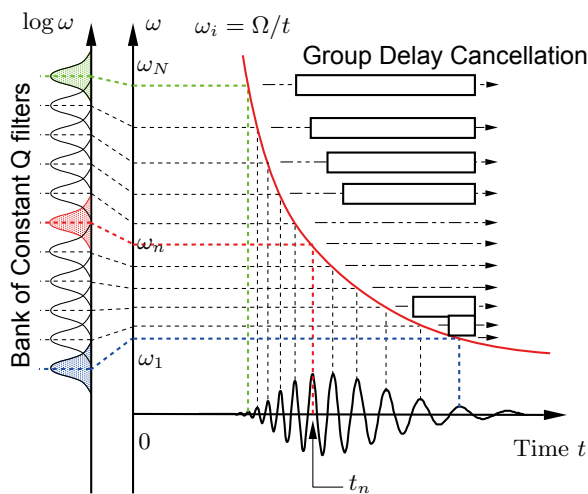


図3：LPM信号の位相が 2π 回転する時刻の瞬時角周波数を中心角周波数とするフィルタ群は対数角周波数軸上で等間隔に並ぶ

度差を v とし音波の伝搬速度を c とすれば $s \sim 1 + 2v/c$ だから、速度の影響は時刻に無関係に $\Omega \log s \sim 2\Omega v/c$ の位相回転として現れる。すなわち、図3に示す定Qフィルタ群のどのフィルタも 2π の整数倍を除いて同じ位相で駆動される。こうして、群遅延補正後のフィルタ出力を加算するとその包絡線が最大となる時刻は速度に無関係に餌（標的）までの距離を表しており、その時刻での位相から速度を知ることができる。

2.5 ダブルパルス化

ここまで述べてきたように、線形周期変調（LPM）信号を放射し餌からの反射エコーを定Qフィルタで処理して遅延加算すれば、包絡線が最大となる時刻を手がかりとして速度の影響を受けずに餌までの距離を推定できる。しかし、包絡線が最大となる時刻の推定に誤差があると位相を正確に求められず速度を知ることができない。これは時間の経過につれて位相が回転していくからである。

こうもりの定位音や聴覚系の構造からいったん離れて工学的な立場で考えてみると、この問題は図4に示すようにLPM信号 $u(t)$ に対して時間軸を反転した $u(-t)$ を組み合わせることでダブルパルス化することで位相の上昇と下降をキャンセルして解決できることが知られている[28]。この信号構成法は、古くはVチャープ信号としてレーダー工学の分野で速度計測に適した信号として用いられた方式に他ならない[29]。

2.6 運動情報に基づく物体の選択的抽出

40[mm]間隔で8個の受波子を配置しその中央に1個の走波子を置いてリニアアレイを構成し、前方で回転運動をする台上に設置した3本のアルミ角柱に向けてLPMダブルパルスを放射してエコーを観測した。

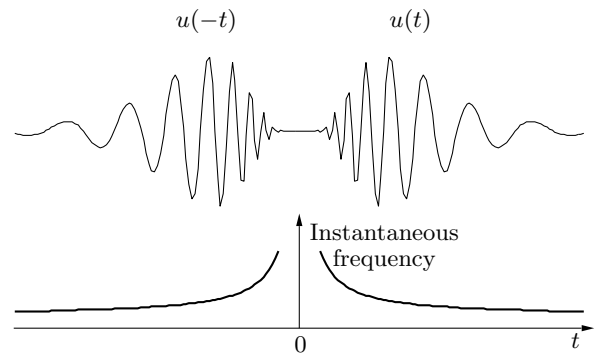


図4：LPM信号のダブルパルス構成

8個の受波子で観測されたエコー群を相関検波してパルス圧縮し、その後に簡単な等伝搬長加算により開口合成を行なって3本のアルミ角柱の像を再生した。図6左は相関検波出力の実部による再生像であり、同図右は同じく相関検波出力の虚部による再生像である。両者の二乗和の平方根が通常の意味での超音波開口合成による再生像となる。

ここで、図6右の相関検波出力の虚部による像再生の結果に注目してみよう。回転台上に設置された3本のアルミ角柱のうち、標的Aは送・受波子アレイから見て相対速度が0であり、虚部の再生像の振幅も0となっている。一方、標的Bは接近し標的Cは遠ざかる。再生像の振幅は速度の正負（接近か離遠）を反映するので標的Bの再生像の振幅は正となり、標的Cの振幅は負になっている。このように、相関検波出力の虚部による再生像の振幅には運動する物体の運動情報が含まれており、再生像の振幅が正の標的、すなわち自分に近づいてくる標的だけを選択的に抽出することが可能である。コウモリは自分から遠ざかる相手を追いかけてまで捕食しようとはしない。そのような相手は自分より速く飛翔するので追い付けないことがわかっているからであろう。

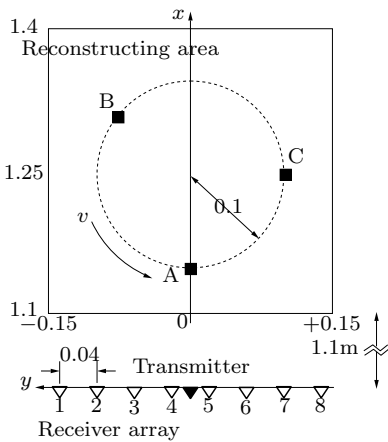


図5：送・受波子のアレイを用いた運動物体の可視化

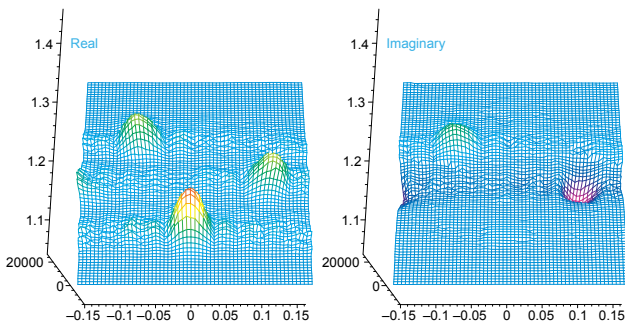


図6：3本のアルミ角柱の開口合成像

3 画像の流れの計測

航空写真を撮影する際、シャッターが開いている時間はゼロにできないのでその間に地表の像が流れてしまいブレの原因となる。これを避けてブレのない鮮明な写真を撮影するためには像の流れに同期して撮影フィルムも動かす必要がある。では、どうしたら像の流れの速度を簡単に知ることができるだろうか。

図7に示すように、撮影像面に平行スリット列（間隔ピッチ p ）を置いて地表を眺めてみると、地表の光景の像がスリット列で断続されて点滅して見える。その点滅の周波数は像の流れの速度 v のスリット列に直交する成分 $v \cos \phi$ に比例するから、スリットを通る光の量をフォトセルで電気信号に変換してその時間的に変化する周波数を計れば、像の流れに関する情報が得られる[30]。航空機のように直線的に飛行する場合の動き情報の取得には、この例のように平行スリット列が単純な構造でありながら有効である。そこで、動物の視覚系末梢の構造に似せてスリット列を変形させることで、3次元空間の動き情報を単純に求める方法について考えてみよう。

3.1 視覚系末梢の神経節細胞の配置

動物の視覚系末梢の網膜上にスポット状の光刺激を提示すると、一次視覚野の細胞が興奮する。光刺激の位置を網膜上で移動させると、一次視覚野で興奮する細胞の位置もそれに応じて移動する。光刺激を視角で1度移動させたとき、一次視覚野で興奮する細胞間の距離をミリメートル単位で計測した値を皮質拡大因子と呼ぶ[31]。網膜上に中心窩からの離心度 e と方位角 θ によって構成される極座標を取ると、皮質拡大因子の値は方位角 θ にはあまり依存しないが、光刺激位置の離心度 e にはほぼ逆比例するといわれている。網膜上での離心度 e に対応する一次視覚野の座標を E とすると、皮質拡大因子は

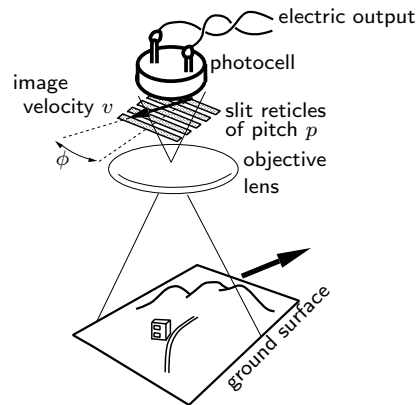


図7：地表光景の像の流れを電氣的に求める

dE/de で表され、比例定数を K として $dE/de=K/e$ より $E=K \cdot \log e$ の関係が成り立つ。すなわち、網膜上の像は対数極座標変換されて一次視覚野に投影されることになる[32]。

図8は、高等動物の網膜神経節細胞 (RGC: Retinal Ganglion Cell) の受容野分布を模式的に表したものである[33, 34]。図7のように平行スリット列を像面全体に置いてしまうと平均速度を知ることはできても速度場(像面内の速度の違いの分布)そのものを求めることはできない。ここでは、簡単のために図9に示すような像の拡大(dilation)と並進(translation)を求めることを考えてみよう。

像面のそれぞれの場所での速度を知るために、透過率

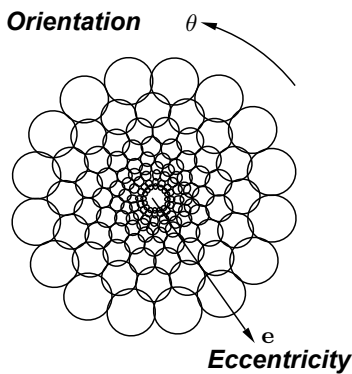


図8：網膜神経節細胞の受容野分布の模式図

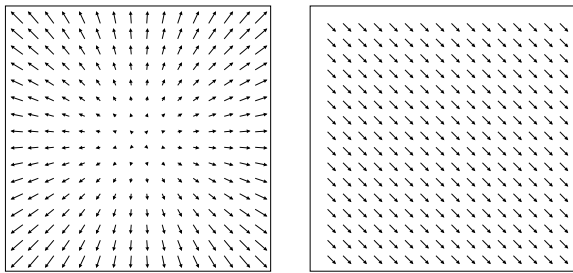


図9：像面内での拡大と並進による像の流れ

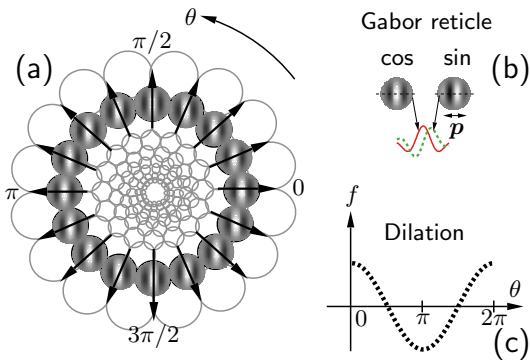


図10：離心度 e が一定の円周上に配置した複素Gaborレティクル群

分布がピッチ p の複素Gabor関数で表されるレティクルを図10(a)に示すようにRGCの受容野分布に対応して同心円状に配置する。ただし、各レティクルの透過率分布は同図(b)に示す複素Gabor関数にしたがうものとする。

対象に接近してその像が拡大するとき、注視点から視野周辺に向けて像が流れる。このとき、 $\theta=0$ と $\theta=\pi$ の方位ではレティクル上を像が流れて透過光の断続が生じるが、 $\theta=\pi/2$ と $\theta=3\pi/2$ の方位では透過光の強さは変化しない。すなわち、像が拡大するときには複素Gaborレティクルを透過する光強度の時間変化の周波数 f は同図(c)に示すように方位角 θ に沿って余弦波的に変化する。

一方、顔を振るように単に視点を移動させる場合は、網膜上の像は場所によらず同一方向に並進運動する。このとき、複素Gaborレティクルを透過する光強度の時間変化の周波数 f は方位角 θ によらず一定である。したがって、同心円上に配置した複素Gaborレティクルの透過光強度の時間変化の周波数がわかれば、その平均値から像の並進(平行)移動量がわかり、余弦成分から像の拡大・縮小率を知ることができる。

以上に述べた操作を離心度 e の異なるすべての円周上で実行することで、拡大・縮小運動と平行移動を分離して測定できる。ここでは述べないが、注視点回りの回転運動も同様にして分離可能である。

3.2 平板物体の追尾

対象物体の像の平行移動や拡大・縮小などが推定できれば、それに応じてカメラの姿勢を変化させることで対象物体を追尾できる。そこで、プロッタで平板を駆動し、その動きを追尾するシステムを構築した[35]。対象物体の像が常に像面内の中央に同じ大きさで撮影できるよう

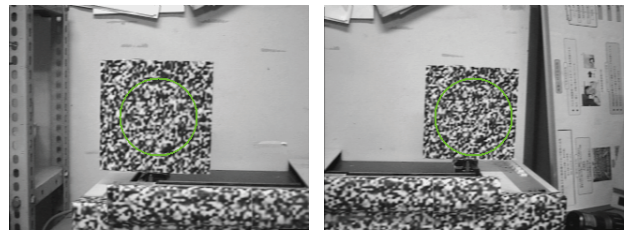


図11：プロッタで駆動する平板がほぼ画像の中央に位置して見えている

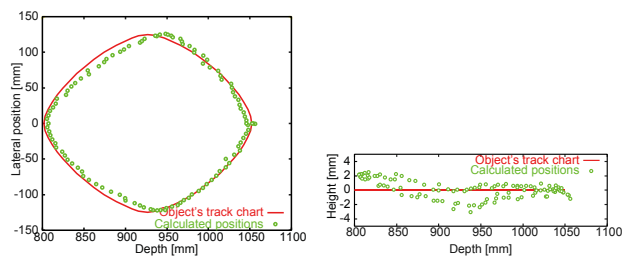


図12：平板の位置推定

にカメラのパン、ティルト、およびズーム量を制御した。図11は追尾実験の結果の一例であり、対象物体が移動してもその像は画面の中央部にほぼ同じ大きさで維持されている（静止しているプロッタの位置が動いているように見えることに注意）。

像の動きを正確に追尾できればカメラの姿勢制御量から距離の不定性を除いて相対的な対象物体の位置を推定できる。その結果を図12に緑マークで示した。左はプロッタ上で推定した平板位置であり、右は側面から見たときの高さの推定値である。赤で示した実際の運動軌跡をほぼ正確に追尾していることが確認できる。

4 両眼視差の検出と奥行き知覚

動物が生活していく上で環境の奥行き知覚は極めて重要な意味を持つ。視覚による奥行き知覚にはさまざまな手がかりが利用されるが、比較的近距离で人が奥行きの違いを弁別する能力としては両眼視差を利用する方法が最も感度が高いことが知られている[36]。異なる視点から観測された複数の画像間の視差を抽出する方法は、画像中で対応する特徴点同士を探索して視差地図を求める方法[37, 38]と、画像輝度分布の空間勾配と視差に関する微分恒等式から解析的に密な視差分布を求める方法[39]に大別できる。

一方、*E. L. Schwartz*は、高等動物の大脳皮質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に着目し、眼優位性コラムの構造を模擬した視差抽出法を提案している[40]。この方法は上述の微分恒等式を用いる視差抽出法と同一の原理に基づいているので、実対象に適用して視差を抽出する実験を行い、得られた視差から奥行き距離を求めて対象物体の形状を復元した結果について紹介する。

4.1 眼優位コラム構造の実現

網膜に投影された外界の像情報は網膜神経節細胞によって眼球外部に出力され、外側膝状体で左右視野毎に再整理された後、主に大脳皮質一次視覚野の4C層に到達する。左・右眼から出力された神経節細胞は外側膝状体の異なる層で中継され、高等動物では4C層の細胞は片眼優位であることが知られている。図13に示すようにこの眼優位性細胞は一次視覚野の皮質表面に交互に現れ、左右一対で約1mm程度の幅のコラムを構成し、これに直交する方向には特定の傾きの図形に選択的に応答する細胞が存在して全方向の傾きが約1mmの幅で秩序良く並んだ方位コラムを構成していると言われている[41]。

*Schwartz*は網膜から一次視覚野への神経投射によ

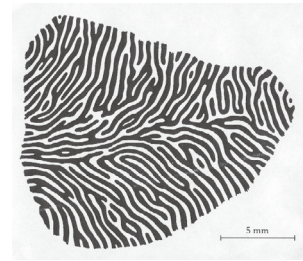


図13：眼優位性コラム構造の皮質表面でのパターン[42]



図14：中央部矩形領域に視差を持つランダムドットパターンの対

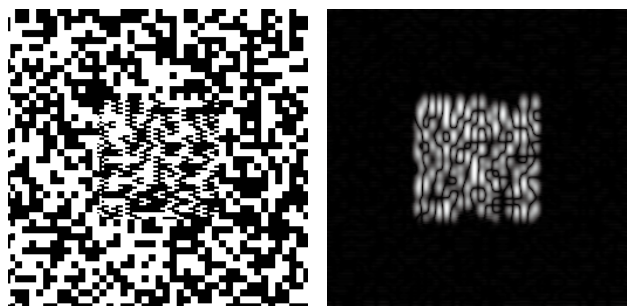


図15：図14の画像対から交互に走査線を間引いて作ったコラム画像（左）とその高域抽出画像（右）。視差のある部分だけが明瞭に見えてとれる

る像座標の幾何学的変換を対数極座標変換で記述し、*Levay*らが報告したマカクサル眼優位性コラム構造に関する解剖学的データ[42]を網膜座標上に逆投影すると、視野内の水平軸に平行で、垂直軸では周期的なコラム構造のパターンが得られると述べている[43]。このことに示唆を得て、左右のカメラで撮影した2枚の画像走査線を交互に抜き出して一つの画像を作ってみよう。図14の2枚のランダムドットパターンから走査線を交互に抜き出して合成した画像（以下、コラム画像という）を図15の左に示した。この図を見ると、2枚の画像中で視差がある部分だけ空間周波数が高い模様になっている。そこでこのコラム画像にハイパスフィルタを施すと同図右に示すように視差のある部分だけが浮き上がってくることになる。この結果から対象物体の標高・奥行き情報を求める方法については紙幅の都合でここでは説明を省略し、実験の結果だけを紹介する。

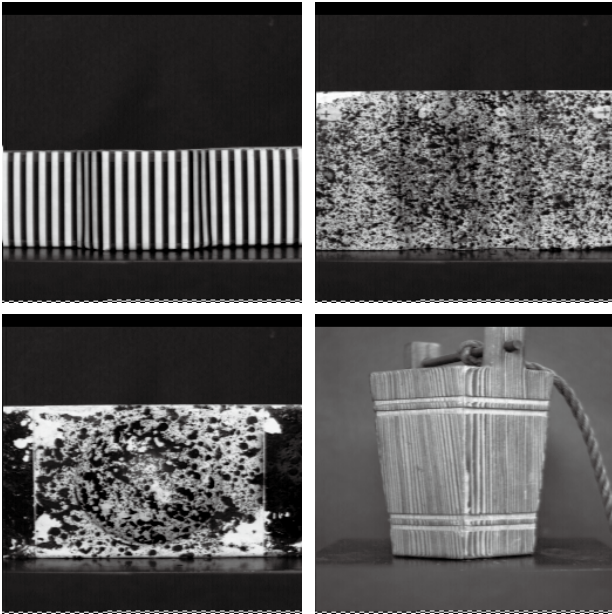


図16：奥行き情報の復元実験に用いた4種の物体

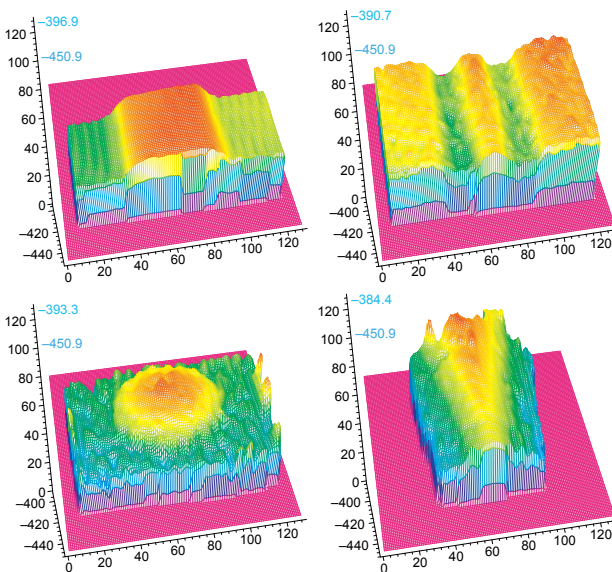


図17：4種の物体の奥行き推定結果

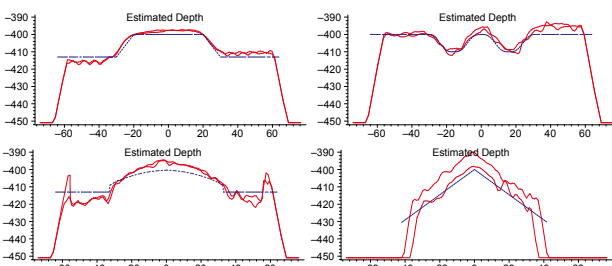


図18：奥行き推定結果の断面プロファイル

4.2 奥行き情報の復元

図16に示す4種の物体の最近点をカメラの前方400[mm]の場所に置き、輻輳ステレオカメラで撮影して得られた2枚の画像から走査線を交互に抜き出しコラム画像を作成して標高を計算した。得られた結果を図17に示す。また、物体中央近くの断面プロファイルを図18に示した。

この方法は対応点探索を行わず、画像の輝度勾配を手がかりに計算を行う。このため、標高を密に求めることができるが対象表面に適度なテクスチャが存在する必要がある。そこで、対象物体表面に縞模様を添付する、ほぼランダムに墨をばらまく、あるいは木目模様の対象物体を選んでいることに注意されたい。

5 おわりに

いささか賞味期限を過ぎてしまった過去の研究の中から生体の感覚系の構造にヒントを得て取り組んで開発してきた計測システムについて紹介した。紙幅の都合で理論的な詳細は大幅に省略せざるを得なかったし最近の知見を反映していないので、今となっては過ちが含まれている可能性も高い。これらのことごとについては筆者の責任である。どうか御許し願いたい。

参考文献

- [1] 洪沢英次郎, 三橋渉: “カメラ基底拘束条件に基づく射影復元の効率的な統合法”, 電子情報通信学会論文誌, J-93D(3), pp. 345-354, 2010.
- [2] 飯吉建彰, 三橋渉: “画像モザイク生成のための部分的な前景の自動除去”, 電子情報通信学会論文誌, J-92D(8), pp. 1403-1413, 2009.
- [3] Jun Yuyama and Wataru Mitsuhashi: “Shape invariant recognition of polygonal road signs by deforming reference templates,” ICSPCS 2008, S12-3, 15-17 Dec. 2008 (Gold coast, Australia).
- [4] Tomoaki Hirooka and Wataru Mitsuhashi: “Multiple vehicle detection and tracking under various brightness conditions,” RISP NCSP2010, pp. 437-440, 3-5, March 2010 (Hawaii, USA).
- [5] Akihisa Oishi, Muhammad Tahir Akhtar, and Wataru Mitsuhashi: “Feedforward active noise control systems with controlled injection of probe noise for secondary modelling,” RISP NCSP2012, 6PM1-2-1, 4-6 March 2012 (Hawaii, USA).
- [6] Marko Kanadi, Muhammad Tahir Akhtar, and Wataru Mitsuhashi: “Generalized Cauchy distribution (GCD)-based score functions for a fast and flexible subband decomposition ICA,” ICSPCS 2010, 2.3, 10-15 Dec. 2010 (Gold Coast, Australia).
- [7] Kana Akahori, Yoshihiro Sakai, Muhammad Tahir Akhtar, and Wataru Mitsuhashi: “Application of blind source separation to acoustic echo canceller,” RISP

- NCSP 2010, 3AM1-2-5, 3-5 March 2010 (Hawaii, USA).
- [8] Tohru Usukura and Wataru Mitsuhashi: "Voice activity detection using Adaboost with multi-frame information," ICSPCS 2008, S8-5, 15-17 Dec. 2008 (Gold Coast, Australia).
- [9] Ichiro Shudo and Wataru Mitsuhashi: "Source localization for a spherical acoustic wave using matrix pencil method," RISP NCSP2012, 6PM2-2-5, 4-6 March 2012 (Hawaii, USA).
- [10] 菅 乃武男: "脳における聴覚情報の表示(I),(II)", 自然, vol. 5, pp. 26-41 および vol. 6, pp. 70-81, 1979.
- [11] 力丸 裕, 菅 乃武男: "コウモリの生物ソナーの神経機構", 科学, vol. 60, no.12, pp. 802-811, 1990.
- [12] P. M. Woodward: *Probability and Information Theory with Application to Radar*, Pergamon Press, 1953.
- [13] H. L. Van Trees: *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*, John Wiley, 1968.
- [14] J. R. Klauder et al.: "The theory and design of chirp radars," *BSTJ*, vol. 39, pp. 745-808, 1960.
- [15] J. J. Kroszczyński: "Pulse compression by means of linear-period modulation," *Proc. IEEE*, vol. 57, pp. 1260-1266, 1969.
- [16] E. J. Kelly and D.P. Wishner: "Matched filter theory for high-velocity, accelerating targets," *IEEE Trans. Military Electron.*, vol. MIL-9, pp. 56-69, 1965.
- [17] R. A. Altes and E. L. Titlebaum: "Bat signal as optimally Doppler tolerant waveforms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 48, pp. 1014-1020, 1970.
- [18] Georg von Békésy: *Experiments in Hearing*. McGraw-Hill, 1960.
- [19] B. M. Johnstone, R. Patuzzi, and G. K. Yates: "Basilar membrane measurement and the travelling wave," *Hear. Res.*, vol. 22, pp. 147-153, 1986.
- [20] D.D Greenwood: "A cochlear frequency-position function for several species - 29 years later," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, pp. 2529-2605, 1990.
- [21] J. A. Simmons: "The resolution of target range by echolocating bats," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 54, pp. 157-173, 1973.
- [22] J. A. Simmons: "Perception of echo phase information in bat sonar," *Science*, vol. 204, pp. 1336-1338, 1979.
- [23] H. Hackbarth: "Phase evaluation in hypothetical receivers simulating ranging in bats", *Biol. Cybern.*, vol. 54, pp. 281-287, 1986.
- [24] D. Menne and H. Hackbarth: "Accuracy of distance measurement in the bat *Epitesicus fuscus*: theoretical aspects and computer simulations," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 79, pp. 386-397, 1986.
- [25] B. Möhl: "Detection by a pipistrelle bat of normal and reversed replica of its sonar pulse," *Acustica*, vol. 61, pp. 75-82, 1986.
- [26] D. Menne: "Is the structure of bat echolocation calls an adaptation to the mammalian hearing system ?" *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, pp. 2447-2449, 1988.
- [27] 三橋 渉: 生体ソナーの機構とその解析, 日本物理学会誌, vol. 48, pp. 10-16, 1993.
- [28] R.A. Altes and D.P. Skinner: "Sonar-velocity resolution with a linear-period modulated pulses," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 61, pp. 1019-1030, 1977.
- [29] C. E. Cook and B. Bernfeld: *Radar Signal*, Academic Press, 1967.
- [30] L. M. Biberman: *Reticles in Electro-Optical Devices*, Pergamon Press, 1965.
- [31] P.M. Daniel and D. Whitteridge: "The representation of the visual field on the cerebral cortex in monkeys," *J. Physiol.*, vol. 159, pp.203-221, 1961.
- [32] E.L. Schwartz: "Spatial mapping in the primate sensory projection: analytic structure and relevance to perception," *Biol. Cybern.*, vol. 25, pp.181-194, 1977.
- [33] J.J. Koenderink and A.J. Van Doorn: "Visual detection of spatial contrast: influence of location in the visual field, target extent and illuminance level," *Biol. Cybern.*, vol. 30, pp.157-167, 1978.
- [34] G. Sandini and V. Tagliasco: "An anthropomorphic retina-like structure for scene analysis," *Comput. Graphics Image Process.*, vol. 14, pp.365-372, 1980.
- [35] 三橋 渉, 小林 健二, 国谷 晋二: "空間レティクルの局所配置による運動パラメータ抽出—リアルタイム物体追尾への応用—", 電気学会電子・情報・システム部門誌, vol. 124, no.2, pp.446-452, 2004.
- [36] 長田 昌次郎: "視覚の奥行距離情報とその奥行き感度", テレビジョン学会誌, vol. 31, no. 8, pp. 649-655, 1977.
- [37] D. C. Marr and T. Poggio: "A computational theory of human stereo vision," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. B 204, pp. 301-328, 1979.
- [38] W. E. L. Grimson: "A computer implementation of a theory of human stereo vision," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. B 292, pp. 217-253, 1980.
- [39] B. D. Lucas and T. Kanade: "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," *Proc. of IJCAI-81*, pp. 674-679, 1981.
- [40] E. L. Schwartz: "Columnar architecture and computational anatomy in primate visual cortex: segmentation and feature extraction via spatial frequency coded difference mapping," *Biol.Cybern.*, vol. 42, pp. 157-168, 1982.
- [41] D. H. Hubel and T. N. Wiesel: "Functional architecture of macaque monkey visual cortex," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. 198, pp. 1-59, 1977.
- [42] S. Levay, D. H. Hubel and T. N. Wiesel: "The pattern of ocular dominance columns in macaque visual cortex revealed by a reduced silver stain," *J. Comp. Neurol.*, vol. 159, pp. 559-576, 1975.
- [43] E. L. Schwartz: "Afferent geometry in the primate visual cortex and the generation of neuronal trigger features," *Biol. Cybern.*, vol. 28, pp. 1-14, 1977.