

## 解 説

# 両眼視差抽出機構のニューラルネットワークモデル

藤 井 真 人

NHK 放送技術研究所視覚情報研究部 〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11

(1991年7月31日受理)

## A Neural Network Model for Binocular Parallax Extraction

Mahito FUJII

Visual Science Research Division, NHK Science and Technical Research Laboratories,  
1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157

### 1. は じ め に

私達人間は、見るという行為を通して、3次元の形を知覚したり認識したりしている。これは簡単なことのように思われるが、視覚神経系の優れた情報処理なしには実現不可能である。視覚神経系は、左右の目の2次元網膜像を入力情報とし、その情報にさまざまな処理を施すことによって高度な機能を実現している。この視覚神経系の優れた情報処理様式を解明することができれば、現在の工学が不得意としているような情報処理、例えば、認識・学習などに応用することができる。3次元形状の知覚もこのような情報処理の一つと考えられる。

そこでわれわれは、人間の奥行き知覚のメカニズムに着目し、生理学・心理学の知見を基礎にした奥行き情報(両眼視差情報)を抽出するニューラルネットワークモデルを提案<sup>1,2)</sup>した。

ところで、従来から両眼立体視のメカニズムに関するモデルは数多く提案されてきている<sup>3-12)</sup>。特に、ランダムドットステレオグラムを用いた Julesz<sup>3)</sup>の心理実験に基づくモデルが多い。Julesz は、白黒のランダムな点からなる画像と、その画像の特定の部分をある量だけ水平にずらして作ったもう一枚の画像を用いて、奥行き手がかりが両眼で対応する点の位置の「ずれ」しかない視覚刺激を作り出した。そして、これらの画像が左右の目に別々に提示されると、人間は単眼では見ることのできない3次元的な仮想表面を知覚できるという事実を示した。このことは、両眼立体視を成立させている脳内のメカニズムが、図形的な認識等の処理結果を用いることな

く実現されていることを示しており、このメカニズムを単独で研究することの意義を与えた。ランダムドットステレオグラムを用いた Julesz の実験を説明する代表的なモデルは、Marr・Poggio らのステレオアルゴリズムである。Marr・Poggio らは、協調と競合(興奮性、抑制性の結合をもつ細胞集団)による第一アルゴリズム<sup>6)</sup>、および、 $\nabla^2$ -of-Gaussian フィルター(バンドパスフィルターの一種)を用いた多重解像度による第二アルゴリズム<sup>10)</sup>の二つの手法を提案している。現在でも、多くのステレオアルゴリズムが、これらの手法を基礎としている。ただし、第一アルゴリズムは多くの繰り返し計算を必要とするため、時間的な制約から脳の中で行われている情報処理とは考えにくいとされている<sup>13)</sup>。また、平井・福島<sup>4,5)</sup>、杉江・諏訪<sup>6)</sup>らも、同様なモデルを同じ頃独立に提案している。一方で、工学的な応用を目指したアプローチによっても、多くの視差抽出の手法が提案されている<sup>14-16)</sup>。しかし、いずれのアプローチによるものも、実際の応用においては限られた環境条件でしか適用できないのが現状であり、まだまだ、人間を含めた高等動物の優れた能力には追いついてはいない。

われわれは、視覚情報が流れる神経経路での各処理を、各々の階層で発見されている細胞の生理学的知見を基にモデル化し、両眼視差抽出の機能をシミュレーションした。その結果、本モデルによって抽出された奥行き情報が、物体の3次元表面の復元に有効であることを示した。

本モデルで奥行き情報を取り出すために中心的な働きをする視差抽出モジュール(4.1 参照)は、平井・福島

のモデル<sup>4)</sup>を参考にして構成しているが、処理の階層は平井・福島のモデルに比べて少なくなっている。また、本モデルの視差を取り出す方法は、Marr・Poggioらが用いている  $\nabla^2$ -of-Gaussian フィルター出力からのゼロクロス点による対応づけ<sup>10)</sup>に似た機能が基礎となっている。ただし、われわれは、先に述べたように生理学の知見を基にしたニューラルネットワークモデルとして、この視差抽出の機能を実現した。

以下、本稿では、2章においてモデルを構成するにあたって参考とした生理学・心理学の知見について概観し、3章・4章で提案したモデルについて解説する。5章では、モデルの出力結果を評価するために復元した3次元表面の合成結果を示す。

## 2. 参考にした生理学・心理学の知見

人間を含む高等動物の視覚神経系では、初期の段階において、脳内の複数の異なる領域で形・色・動き等に関する専門的な処理が並列的に行われている。そして、高次の情報処理を進めていく過程で、再びこれら専門化された領域からの情報が統合されていく。視覚神経系は、ある物体に対する統一された認識を得るために、このような分析・統合を繰り返す情報処理の戦略<sup>17,18)</sup>をとっているものと考えられる。図1は、視覚神経系の初期の段階で専門的な処理をする各領域とその結合の様子を表したものである。ここで、V1, V2等は、視覚神経系を主に解剖学的な見地から分類してつけられた大脳皮質領域の名称である<sup>19)</sup>。このように視覚神経系の大まかな構造は、並列的な階層構造になっているものと考えられている。

ここでV1に注目してみると、V1は視覚神経系の階層構造の低いレベルに位置し、他のすべての領域にその出力を直接的あるいは間接的に送り出している。したがって、V1での処理結果は、すべての視覚情報処理に

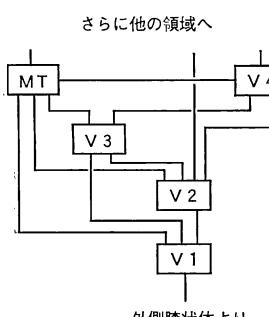


図1 視覚野の階層構造

関係しているものと考えられる。

また、このV1内の情報処理について多くの知見が得られている。図2は、V1の機能的構造の概略図である<sup>20)</sup>。V1の大脳皮質に沿ってある方向には、特定方位をもつエッジや線分刺激が網膜に与えられた時に大きな反応をする細胞が並んでいる。それと違う方向には、右眼からの入力が優位な細胞と左目からの入力が優位な細胞が交互に並んでいる。V1にはこのような基本的な処理をする細胞群が、その処理を受け持つ網膜上の位置

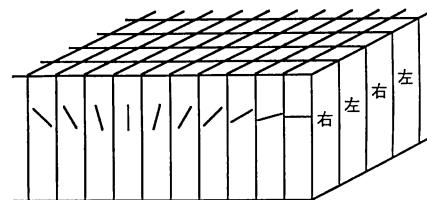


図2 V1の機能的基本構造

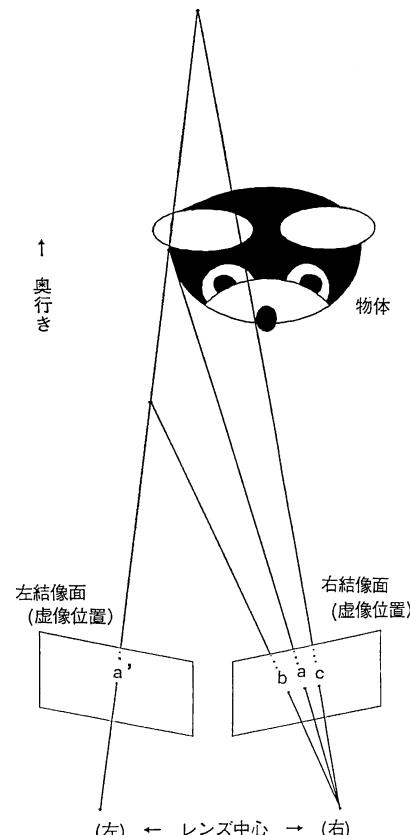


図3 視差の生ずる原理

a, a'は、各結像面で定義される座標が同じ。b, cは、奥行きにしたがって座標がずれている(視差)。

を少しづつ変えながら規則的に並んでいる。したがって、V1内では、局所・超並列的な情報処理が行われているものと考えられる。

ところで、実空間の点が左右の網膜に像を結ぶ位置は、奥行きに応じて相対的に座標がずれる（図3）。したがって、この「ずれ」を検出することができれば奥行き情報を取り出すことができる。この「ずれ」は両眼視差<sup>21)</sup>（本稿では、以下視差と略す）と呼ばれる。V1, V2では、視差に対応する左右網膜の位置に特定方位の線分刺激を与えた時のみ反応する細胞が見つかっている<sup>22-25)</sup>。これらの細胞は、特定の奥行きに存在する物を検出しているものと考えられる。

さて、この視差を抽出するためには、物体上の点が像を結んでいる左右網膜上の各位置を探し出す必要がある。これは難しい問題<sup>10,25)</sup>であり、対応問題と呼ばれている。対応問題を解くために、例えば画素の明るさを手がかりに点対点の対応づけを行った場合、一般に、多くの対応づけが可能となり正しい視差は抽出できない。一方、心理学的知見によると、両眼立体視に強く影響を与える刺激として、点より方位情報をもつ線分が有効であることを示唆する報告がある<sup>26)</sup>。以上のような知見を総合すると、対応問題を解くためには、方位情報を持つエッジ・線分等が有効であると考えられる。

### 3. モデルの概要

前章で述べたような知見を基に、方位情報をもつエッジを手がかりにして視差を抽出するニューラルネットワークモデルを提案した。提案したモデルは、階層構造をもち、局所的には超並列的に処理を行う構造になっている。

また、機能的には、以下に示す四つのモジュールから構成される。

- ① 視差抽出モジュール  
(水平に近い方位を除くエッジの視差を抽出する)
- ② エッジ検出モジュール  
(単眼画像から方位によらずエッジを検出する)
- ③ 視差補間モジュール  
(水平に近い方位のエッジの視差を補間する)
- ④ 視差決定モジュール  
(すべてのエッジ位置でユニークに視差を決定する)

本モデルにおいては、①の視差抽出モジュールの特定視差・特定方位のエッジに選択的に反応する細胞が中心的な働きをする。ただし、方位情報をもつエッジを手がかりにして視差を抽出する場合、原理的に水平に近い方

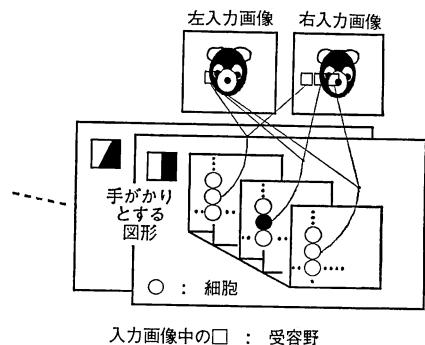


図4 差視を抽出する基本構造

位を持つエッジを用いることができない。したがって、水平に近い方位をもつエッジの視差は抽出できない。本モデルでは、②のモジュールによって検出されたエッジ情報を、視差抽出モジュールの出力と統合・処理（③のモジュール）し、水平に近い方位のエッジの視差を補間している。また、③のモジュールまでの処理では、入力画像で定義される各座標に対して複数の視差情報が取り出されてしまっている。④の視差決定モジュールによって各座標に対して一意に視差を決定している。

ここで、視差抽出モジュールの細胞群が視差を抽出する方法について概略的な説明をしておく。図4は、ある特定方位のエッジ（この図では垂直エッジ）を手がかりにどのように視差を抽出するかを模式的に表したものである。小さな四角の中の円は細胞を示している。この四角で示される面には、細胞が入力画像の座標に相当する分用意しており、座標の違いを除いては同じ働きをする。各細胞は、特定の視差に応じて決まる入力面上の領域（以下、このように各細胞が処理を受け持つ入力面上の限られた領域を「受容野」と呼ぶ）に、特定の图形的特徴が存在することを検出する。図4の例では、特定の图形的特徴は垂直エッジであり、反応していることを示す黒円の細胞の左右の両受容野内にちょうど垂直方向のエッジが存在している。このようなネットワークを、さまざまな方位のエッジに関して複数用意することで、これら全細胞の反応パターンから物体の基本的な3次元構造を知ることができる。

### 4. モデルの構造

本章では、各モジュールについて述べる。ただし、細胞の機能を近似するために用いた数式等の詳細については、各参考文献を参照されたい。

図5に、モデルの構造を示す。太線の四角は、細胞層

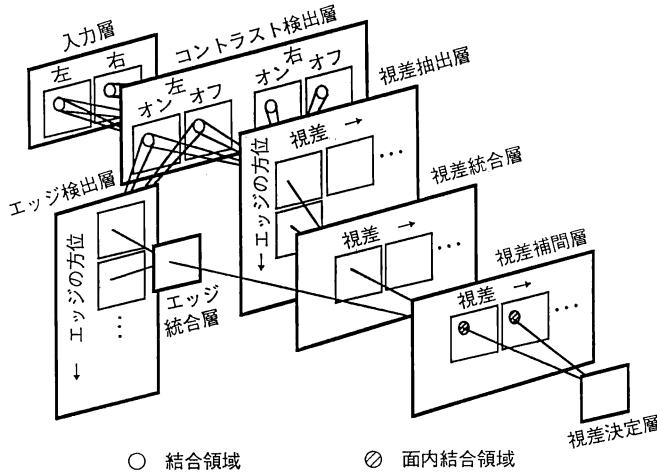


図 5 モデルの構造

と呼ぶ細胞の集団を表す。細胞層は、一つあるいは二つのパラメータ値が異なる複数の細胞面（細線の四角）からなる。この細胞面は、細胞層より小さい細胞の集団であり、構成要素は働きは同じで受容野の位置のみ違う細胞である。これら細胞面にある細胞は、入力面で定義される座標に相当する分用意されている。ここで、各細胞面の座標は、その座標に存在する細胞がもつ受容野（両眼から入力を受ける場合は左受容野）の中心の2次元座標に一致している。以下、・・層と表す場合は、細胞層に当たる細胞の集団であることを示し、・・面と表す場合は細胞面に当たる細胞の集団であることを示す。各モジュールは、このような細胞の集団から構成されている。

#### 4.1 視差抽出モジュール<sup>1)</sup>

本モジュールは、入力層、コントラスト検出層、視差抽出層および、視差統合層からなる。

##### 4.1.1 入力層

入力層は、左右の入力面からなる。左右の入力面は、左右眼に相当する位置からカメラ等で撮影した画像の輝度レベルを出力する細胞で構成される。

##### 4.1.2 コントラスト検出層

本細胞層は、網膜の出力細胞である網膜神経節細胞などで発見されているオン中心型細胞からなる細胞面と、オフ中心型細胞からなる細胞面で構成される。

各細胞が受容野内の細胞に対してもつ入力結合係数の空間分布は、例えばオン中心型細胞の場合、図6で表されるようなDOG関数で近似することができる<sup>27,28)</sup>（オフ中心型細胞の場合は、図6の正負が逆）。

DOG関数で画像をフィルタリングすると、入力画像

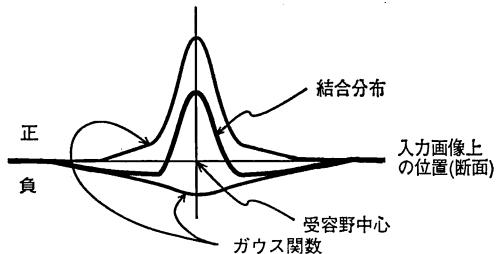


図 6 オン中心型細胞の入力結合分布 (DOG 関数)  
DOG 関数は、広がりの違うガウス関数の差として表される。

から直流分を除去することができる。したがって、細胞出力は照明条件の違いによる影響を受けにくくなる。また、この処理は、視差を抽出する際の画像照合を容易にすることにも役立っている。

##### 4.1.3 視差抽出層

3章で述べたように本モデルでは、視差抽出を、左右画像において特定視差量だけずれた同一方位のエッジ対を発見することで実現した。したがって、視差抽出をパターン認識の問題に置き換えることができた。本モデルでは、パターン認識の神経回路モデルとして知られるネオコグニトロンの細胞モデル<sup>29)</sup>を採用している。基本構造を図7に示す。この細胞モデルは、入力結合が可変で、認識したいパターンを学習によって記憶することができる。学習済みの細胞は、記憶したパターンと同一パターンが入力されれば最大値を出力し、類似したパターンに対しては正、類似していないパターンが入力されたときにはゼロを出力する。本モデルの場合には、学習パターンとして特定方位をもつステップエッジを用いた。

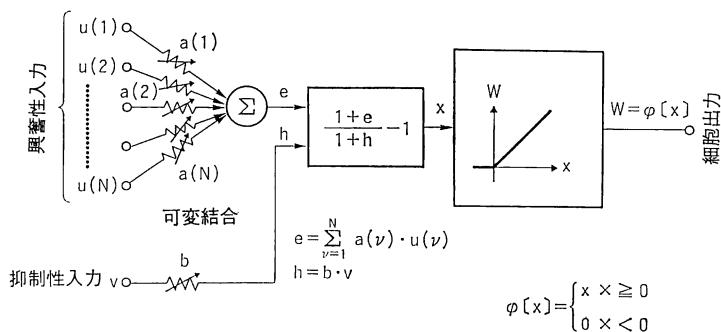


図7 ネオコグニトロンの細胞モデル

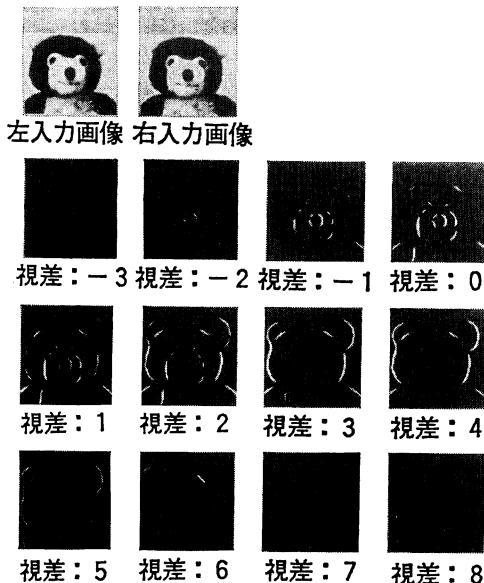


図8 視差統合層の出力例  
視差抽出面の反応のようすを視差の順に並べたもの（視差が大きいほど奥にあることを示す）。

したがって、本層の各細胞は、それぞれの視差に応じた位置にある受容野内に、記憶している方位のエッジが入力された時のみ反応するように学習されている。

#### 4.1.4 視差統合層

本層は、各方位にいったん分解して抽出した視差情報を、特定の視差について、方位によらない情報を統合する。この処理は、すべての視差について施される。したがって、本層の出力は、視差方向にスライスしたエッジ集合（輪郭）の形となる。この段階で、物体の3次元形状の基本構造が取り出される。本層の出力例を図8に示す。

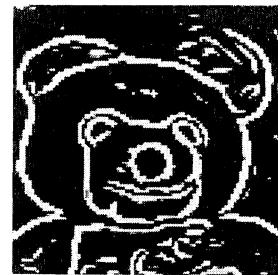


図9 エッジ検出モジュールの出力例

#### 4.2 エッジ検出モジュール<sup>30)</sup>

本モジュールは、視差抽出モジュールの構造とほぼ同じである。ただし、本モジュールは、単眼からの入力だけを受けており、視差には無関係に全方位のエッジを検出する。出力例を図9に示す。

#### 4.3 視差補間モジュール<sup>2)</sup>

本モジュールは複数の視差補間面で構成され、視差抽出層で取り出せなかった水平に近い方位のエッジの視差を補間する。生理学的な裏づけはないが、この補間が両眼情報と単眼情報の融合によってなされていると仮定している。

各視差補間面では、方位によらず抽出されたエッジに沿って各視差の情報を伝搬し、最終的に、エッジが連続して存在している座標の細胞ほとんどが視差を出力するようになる。その結果、水平に近い方位のエッジにも、視差が補間される。

#### 4.4 視差決定モジュール<sup>2)</sup>

本モジュールは、視差決定面一面で構成され、ユニークな視差を決定する。視差補間モジュールでは、同一座標にあり、扱う視差が異なっている複数の細胞が反応している。これは、視差補間層の補間方法、および視差抽出細胞の視差に対する同調度の低さによるもので、視差はあいまいな表現になっている。しかし、アナログ量で



図 10 視差決定モジュールの出力例

あるこれら細胞の各出力を、視差抽出に対する確からしさを表しているものと考えると、同一座標にある複数の細胞出力を総合的に評価することでより精度の高い視差を決定することも可能である。そこで、一座標に対するユニークな視差  $D(x, y)$  を、同一座標にある複数の細胞出力を用いて、次式により決定した。

$$D(x, y) = \frac{\sum_{j=1}^N d_j \cdot u_{\text{itp}}(x, y, d_j)}{\sum_{j=1}^N u_{\text{itp}}(x, y, d_j)} \quad (1)$$

ここで、 $u_{\text{itp}}(x, y, d_j)$  は視差補間モジュールの出力、 $x, y$  は入力面で定義される 2 次元座標、 $d_j$  は  $j$  番目の視差、 $N$  は抽出している特定視差の数である。

このような細胞集団による情報変換機構 (population coding) によって、奥行き知覚に関する心理物理的な実験事実が説明できるという報告<sup>31)</sup>もある。

本モジュールの出力を仮想的に 3 次元空間に配置し、それを撮影時とは別の角度から見た時の 2 次元画像例を図 10 に示す。ただし、視差情報を近似的に相対的な奥行き量として扱った。

### 5. 3 次元表面の復元例<sup>2)</sup>

視差抽出機構のニューラルネットワークモデルで取り出された奥行き情報を総合的に評価するために 3 次元表面の復元を試みた。

ところで、特徴を手がかりとして視差を抽出する場合、その特徴が持つ情報量が増加するほど誤対応が減る反面、視差を抽出できる箇所は減少する。本モデルもエッジを手がかりとして視差を抽出するため、視差が決まるのはエッジの存在する位置のみである。したがって、物体の 3 次元表面を復元するには、補間処理が必要となる。

ここでは、まず、左入力面の全画素に奥行き情報を与えるような補間を行い、3 次元形状を復元した。さらに、左入力画像をこの復元された 3 次元形状に投写し、明るさ情報をもつ 3 次元表面を復元した（復元方法の詳細については文献 2) を参照）。図 11 に復元結果の例を示す。図 11 は、撮影時とは違う方向から見た場合に相当する 2 次元画像を再構成したものである。これらの再構成された画像を見ると、くまの縫い包みの自然な印象が得られることがわかる。

### 6. おわりに

本モデルは、エッジの視差をかなり精度よく抽出する。これは、生理学・心理学の知見を参考にして、方位情報をもつエッジを手がかりに視差を抽出し、間違った対応づけを極端に少なくできたことによる。さらに、視覚神経系を参考にし、モデルに大まかな階層構造を取り入れたことで、画像情報の分析・統合が容易に実現できた。その結果、原理的に抽出することのできない水平エッジの視差の補間を可能にした。また、モデルは各処理を局所・超並列的に行うように設計されているため、並列処理に適した装置の出現によっては高速に奥行きを抽出することが可能となる。

以上のような特徴を持つ一方で、本モデルは、エッジのところでしか視差が決定できないという短所を持つ。人間は、物体表面の細かい 3 次元形状も知覚でき、そのために視差以外の奥行き情報を利用していると考えられる<sup>32,33)</sup>。実際、視差以外にも 3 次元の形状を知る手がかかる。



図 11 3 次元表面の復元例

りが画像中には存在しており、例えば、陰影<sup>34)</sup>などから3次元形状を復元する研究も行われている。したがって、さまざまな処理により奥行き情報を取り出し、それらを物体表面に関して統一化された表現に変換、統合することで、さらに細かい物体表面の復元が可能になるものと考えられる。

ところで、生理学、心理学の領域での両眼立体視に関する研究は精力的に続けられており、本モデルで参考にした知見以外にも、多くの注目すべき報告がある。例えば、視差を抽出する細胞の受容野の構造に関して、より詳細な分析を生理学的に行い、その結果が位相情報によるモデルで説明できるとする<sup>35,36)</sup>研究がある。また、左(右)目で見えるが右(左)目で見えない部分を、視覚神経系がどう扱っているかに関する心理学的な実験もある<sup>37,38)</sup>。この単眼でしか見えない部分の扱いは、対応問題をより複雑にするため工学的には難問であり、視覚神経系がこれをどう処理しているかの知見は大きな価値がある。ほかにも、視覚系が対応問題を解くために用いている画像特徴<sup>39)</sup>・物理的な制約条件<sup>8,40)</sup>に関する議論など、脳の両眼立体視の機能を推定するのに役立つ知見はたくさんある。われわれは、このような研究の成果を参考にしながら、人間の能力に少しでも迫るモデルを構築し工学に貢献したいと考えている。

## 文 献

- 1) 藤井真人：“両眼視差抽出の神経回路モデル—等視差面における輪郭線の特定—”，信学論誌，J73-D-II (1990) 1288-1296.
- 2) 藤井真人、三宅 誠：“両眼視差抽出と3次元表面の復元”，テレビ誌，45 (1991) 315-322.
- 3) B. Julesz: *Foundations of Cyclopean Perception* (The University of Chicago Press, Chicago, 1971).
- 4) 平井有三、福島邦彦：“両眼視差抽出機構の神経回路モデル”，信学論誌，56-D (1973) 465-472.
- 5) 平井有三、福島邦彦：“両眼像の対応を見いだす神経回路網モデル”，信学論誌，59-D (1976) 133-140.
- 6) D. Marr and T. Poggio: “Cooperative computation of stereo disparity,” Science, 194 (1976) 283-287.
- 7) N. Sugie and M. Suwa: “A scheme for binocular depth perception suggested by neurophysiological evidence,” Biol. Cybern., 26 (1977) 1-15.
- 8) S. B. Pollard, J. E. W. Mayhew and J. P. Frisby: “PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit,” Perception, 14 (1985) 449-470.
- 9) K. Prazdny: “Detection of binocular disparities,” Biol. Cybern., 52 (1985) 93-99.
- 10) デビッド・マー：ビジョンー視覚の計算理論と脳内表現一，乾 敏郎、安藤広志訳（産業図書、東京、1987）pp. 122-174.
- 11) M. Nomura, G. Matsumoto and S. Fujiwara: “A binocular model for the simple cell,” Biol. Cybern., 63 (1990) 237-242.
- 12) 緒形昌美、佐藤隆夫：“位相検出による両眼立体視モデル”，信学論誌，MBE 89 (1990) 29-36.
- 13) デビッド・マー：ビジョンー視覚の計算理論と脳内表現一，乾 敏郎、安藤広志訳（産業図書、東京、1987）p. 118.
- 14) S. T. Barnard and M. A. Fischler: “Computational stereo,” Comput. Surv., 14 (1982) 553-572.
- 15) U. R. Dhond and J. K. Aggarwal: “Structure from stereo—A review,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC-19 (1989) 1489-1510.
- 16) S. T. Barnard and M. A. Fischler (坂上勝彦訳)：“両眼視”，人工知能大辞典、大須賀節雄監訳（丸善、東京、1991）pp. 1162-1169.
- 17) D. C. Van Essen: “Functional organization of primate visual cortex,” *Cerebral Cortex, 3: Visual Cortex*, ed. A. Peters and E. G. Jones (Plenum Press, New York, London, 1985) pp. 259-329.
- 18) S. Zeki and S. Shipp: “The functional logic of cortical connections,” Nature, 335 (1988) 311-317.
- 19) 齊藤秀明：“視覚”，日本臨床—特集：脳研究の動向と進歩一, 45 (1987) 28-39.
- 20) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: “Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex,” J. Neurosci., 4 (1984) 309-356.
- 21) 乾 敏郎：視覚情報処理の基礎（サイエンス社、東京、1990）pp. 95, 96.
- 22) D. H. Hubel and T. N. Wiesel: “Cells sensitive to binocular depth in area 18 of the macaque monkey cortex,” Nature, 22 (1970) 41, 42.
- 23) D. Ferster: “A comparison of binocular depth mechanisms in areas 17 and 18 the cat visual cortex,” J. Physiol., 311 (1981) 623-655.
- 24) G. F. Poggio and W. H. Talbot: “Mechanisms of static and dynamic stereopsis in foreveal cortex of the rhesus monkey,” J. Physiol., 315 (1981) 469-492.
- 25) G. F. Poggio and T. Poggio: “The analysis of stereopsis,” Ann. Rev. Neurosci., 7 (1984) 379-412.
- 26) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: “Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth,” J. Neurosci., 7 (1987) 3416-3468.
- 27) 福島邦彦：神経回路と情報処理（朝倉書店、東京、1989）pp. 32-35.
- 28) 乾 敏郎：視覚情報処理の基礎（サイエンス社、東京、1990）pp. 20-23.
- 29) 福島邦彦：神経回路と情報処理（朝倉書店、東京、1989）pp. 112-152.
- 30) 藤井真人、福島邦彦、伊藤崇之：“視覚神経系に学んだエッジ検出”，The 3rd Symposium on Biological Physiological Engineering (計測自動制御学会、1988) pp. 333-336.
- 31) S. R. Lehky and T. J. Sejnowski: “Neural model of stereoacluity and depth interpolation based on a distributed representation of stereo disparity,” J. Neurosci., 10 (1990) 2281-2299.
- 32) P. Cavanagh: “Reconstructing the third dimension: interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape,” Comput. Vision, Graphics, Image Processing, 37 (1987) 171-195.
- 33) 塩入 諭：“立体視における両眼視差情報と陰影情報の相互作用”，応用物理学学会視覚研究会抄録 (Jan. 1990) p. 15.
- 34) B. K. P. Horn and M. J. Brooks: *Shape from Shading*

- (The MIT Press, Cambridge, 1989).
- 35) I. Ohzawa, G.C. DeAngelis and R.D. Freeman : "Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neurons ideally suited as disparity detectors," *Science*, **249** (1990) 1037-1041.
- 36) G.C. DeAngelis, I. Ohzawa and R.D. Freeman : "Depth is encoded in the visual cortex by a specialized receptive field structure," *Nature*, **352** (1991) 156-159.
- 37) S. Shimojo and K. Nakayama : "Real world occlusion constraints and binocular rivalry," *Vision Res.*, **30** (1990) 69-80.
- 38) K. Nakayama and S. Shimojo : "Da Vinci stereopsis: depth and subjective occluding contours form unpaired image points," *Vision Res.*, **30** (1990) 1811-1825.
- 39) J.E.W. Mayhew and J.P. Frisby : "Psychophysical and computational studies towards a theory of human stereopsis," *Artif. Intell.*, **17** (1981) 349-386.
- 40) S.B. Pollard and J.P. Frisby : "Transparency and the uniqueness constraint in human and computer stereo vision," *Nature*, **347** (1990) 553-556.