

TR - A - 0102

陰影による形状知覚と単眼立体視モデル

早川 秀樹、乾 敏郎、川人 光男

1991.2.6

ATR 視聴覚機構研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町乾谷 ☎07749-5-1411

ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories

Inuidani, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-7749-5-1411

Facsimile: +81-7749-5-1408

Telex: 5452-516 ATR J

目次

1. はじめに	1
2. 従来の Shape from Shading アルゴリズム	2
3. 単眼立体視の心理学的知見	4
4. 単眼立体視モデルと計算理論モデル	5
5. 網膜からV3モジュールまでの具体化	6
6. 2次元シミュレーション	8
7. おわりに	8

1. はじめに

視覚情報処理の役割は、網膜に投影された2次元画像データから外界の3次元情報を推定することにある。しかし、2次元画像データの中には、両眼視差による情報・運動による情報・陰影の情報・テクスチャーの情報など、様々な要因が混在しており、これらを総合的に解明するのはかなり困難なことである。Marr⁽¹⁾ はこのような複雑な問題に取り組むために、モジュール設計の原則に基づいて、“視覚モジュールとその統合”という考え方を導入した。視覚モジュールには、立体視、運動からの構造復元、オプティカルフローからの奥行き推定などがあるが、中でも陰影からの形状復元を行っている部分は、その情報が認識を行う上で重要であると考えられている。

このような重要性を持っている陰影からの形状復元という課題は、“Shape from Shading”⁽²⁾として、コンピュータビジョンの分野でも、長い間、多くの人々によって研究されており、工学的に有意義な成果も幾つか出てきている。一方、心理学の分野では、人間が陰影などから3次元形状を知覚することを“単眼立体視”と呼んでおり、ここ数年ほどの間に Todd & Reichel⁽³⁾⁽⁴⁾ や Ramachandran⁽⁵⁾ によってその知覚に関する様々な心理学的知見が得られている。ここでは、従来の“Shape from Shading”とは違う立場を執り、視覚情報処理のモジュールとして、それらの心理学的知見を説明でき得るような新しい単眼立体視モデルを提案し、そのモデルに基づいて2次元シミュレーションを行ったので、ここに報告する。

2. 従来の Shape from Shading アルゴリズム

Shape from Shading の基本となる反射率モデルと、代表的なアルゴリズムである Ikeuchi & Horn の手法及び Pentland の手法を紹介する。

2-1 反射率モデル⁽⁶⁾

陰影から形状を復元しようとする時、基本となるのが図1に示すような幾何的な反射率モデルである。光源から入射して、観測者に向かって反射する光の量は、反射表面の微細構造に依存しており、さらに図中の3つの角度の関数として記述される。これらの角度は、光源方向と表面の法線ベクトルがなす入射角 i 、観測者に向かう観測方向と表面の法線ベクトルがなす反射角 e 、そして光源方向と観測方向のなす位相角 g である。

以下に記述する従来の Shape from Shading アルゴリズムでは、この一般的なモデルをより扱い易いようにアレンジしている。まず、Ikeuchi & Horn の手法ではコンピュータビジョンの領域でよく知られている (1) 式の Horn の画像放射照度方程式が基本として使われている。

$$E(x, y) = \rho(x, y) R(p, q) \quad (1)$$

E は画像平面 $x-y$ 上で観測される明るさ (照度)、 ρ は面固有の反射率、 R は勾配空間 $p-q$ 上での反射率関数である。ここでは、観測者の位置を十分離れた z 軸方向にとる、観測者中心の座標系となっている。ある表面 $z = f(x, y)$ の局所的な面の法線は、勾配空間の $p = -\partial z / \partial x$ 、 $q = -\partial z / \partial y$ によって記述することができるため、これらのパラメータによって、面の向きに依存する明るさ (照度) を反射率関数で定義することができる。

一方、Pentland の手法では、表面を拡散反射面とし、光源を十分遠くにある点光源と仮定することによって、(2) 式のような簡易な画像強度 I の式を導出している。

$$I = \rho \lambda (N \cdot L) \quad (2)$$

ρ は面の平均反射率、 λ は面に入射する光源からの光束、 N は面の単位法線ベクトル、 L は光源方向の単位ベクトルである。

2-2 Ikeuchi & Horn の手法⁽⁷⁾

前述のように、この手法では観測者の位置が物体から十分離れているという正射投影法を用いているため、観測方向またはそれに由来する位相角 g は、すべての物体の点で一定である。従って、固定された光源と視点の幾何学的配列に対し反射する光と、それによる画像の明るさは、面の法線すなわち勾配軸 p および q だけに依存する。図2に、いかなる視点からでも一定の明るさで見える完全な拡散反射面の

反射率関数（等照度線で表現）の一例を示す。以下このような反射率関数による局所的情報を用いて、面の向きを推定を行っていくが、簡単のために面固有の反射率 ρ は一定とする。

ここでは、基本的に反射率関数が面の向きに対する制約条件となり、面はなめらかであるというヒューリスティックな条件（なめらか拘束）をそれに加えている。画像平面上の点 (x, y) における面の法線の推定値を $(p(x, y), q(x, y))$ とすると、この推定された法線が実際の形状のそれと等しくなければ、(1)式は成立しない。従って、 $(I - R)^2$ を最小にする p, q を求めるということは適切なものであると言える。また、もうひとつの条件は $p(x, y)$ と $q(x, y)$ がなめらかであるというものであり、これはそれらの偏導関数の2乗の和で調べることができる。正しく推定されたなめらかな曲面に対しては、それらの値は両方とも小さくなるはずである。かくして、推定の目標は各点における誤差 e を最小にすることとなる。

$$e(x, y) = [I(x, y) - R(p, q)]^2 + \lambda (p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) \quad (3)$$

また、この手法でもうひとつ特徴的なのは、計算の境界条件として外縁線拘束を用いていることである。外縁線とは、画像上で輪郭線を形成する、3次元物体の線のことである。なめらかな物体の外縁線上においては、そこでの面の傾きが画像上の輪郭線の形状から一意的に決定される（図3）。従って、外縁線近傍の面の向きを記述できるような方法（ガウス座標系、極射影法）を用いることによって、推定計算の境界条件を決めることができる。以上の方法で推定された球の形状と、そのもとの濃淡画像を図4に示す。

2-3 Pentland の手法⁽⁸⁾

面の曲率線を直接観測できると仮定すれば、図5のように見えるはずである。球面を考えているため、主曲率線は任意の方向へ引くことができるが、直交する2つの曲率線（面の曲率線）の画像平面上での“長さ”が等しくなるようなものが、ここでは見えているものとする。まず、球状面を真上から見下ろしているとするれば、2つの曲率線は図5(a)のように垂直に見える。ここから、面がある方向に傾いて行くと、曲率線は次第に広がって行くように見え（図5(b)-(d)）、その広がって行く方向は、その面の tilt（画像平面上において、面の法線が“どちらの方向へ”向いているか）によって異なる。

もちろん、私たちは面の曲率線を直接見ることはできないが、(2)式に基づく画像強度の2階微分で光源と面の曲率の相互作用を見ることができる。ここで、画像強度の2階微分を表す(4)式を画像曲率と呼ぶことにする。

$$\begin{aligned} d^2 I &= d(\rho \lambda (dN \cdot L)) = \rho \lambda (d^2 N \cdot L) + \rho \lambda (dN \cdot dL) \\ &= \rho \lambda (d^2 N \cdot L) \end{aligned} \quad (4)$$

画像曲率は、画像平面上で回転する x' 軸、 y' 軸に沿った強度曲率の項 $I_{x'x'}$ 、 $I_{y'y'}$ 、そしてそれらの曲率の広がり（curvature）の項 $I_{x'y'}$ の3成分で構成される。面が等曲率であるという仮定でかつ、画像曲率の広がり（curvature）の項が最も大きくなる時、画像曲率の2つの強度曲率の項が等しくなり、図5で示したような面の曲率線の画像平面上での”長さ”が等しくなった状態と等価になる。

画像曲率の広がり（curvature）の項と面の曲率線の状態にこのような関連があることから、画像曲率 $d^2 I$ が最大となる方向が面の tilt に一致することが数学的に証明されている。つまり、等曲率面では、a priori の知識がなくても直接的に画像曲率（画像強度の2回微分）から tilt を推定することができるのである（しかも、slant（画像平面の法線から、面の法線が”どれだけ”傾いているか）には依存していない）。

図5で言えば、面の曲率線のなす角の2等分線方向が面の tilt となっている。また、面の曲率線の広がり（or 画像曲率の広がり）の大小は、面の slant (depth) の程度を示しており、面の曲率に対するこの広がり（curvature）の程度を測ることによって、面の slant の指標を得ることができる。

slant と tilt の値によって、面の向きは一意的に記述することができる。また、求められる tilt が、光源の方向・強さや面の反射率・曲率が分かっている場合でも、解くことができるというのは、とても興味深いことである。図6に、以上の考え方に基づいて行われた、球の断面の形状復元の結果を示す。

3. 単眼立体視の心理学的知見⁽⁵⁾

ここでは、陰影からの形状復元に関する単眼立体視の心理学的知見として現れている、いくつかの現象を紹介する。

(a) 不安定な凹凸（図7）

a も b も、光源の位置を左右どちらに仮定するかによって、凹凸が反転する。また、 b で面白い点はどちらかの列が凸になれば、他方の列は必ず凹になる。 c でも、ある要因から”光源の方向は右からである”と推定してしまうと、内部にある円盤は凹凸が安定してしまう。以上のことから、次の2つの知見が得られる。陰影からの形状復元は純粋に局所的なオペレータではなく、どちらかという視野全体に近いような大局的なものを含んでいる。また、視覚システムにおいて光源は1つしか存在しないという暗黙の仮定が存在しているということである。

(b) 光源方向の傾向（図8）

a の物体は凸に、 b の物体は凹に見えているが、上下ひっくり返して見ると、奥行きが反転する。これは、光源は上方から照らしている傾向が強いという仮定が脳の中に存在しているためである。さらに、ここでいう上方とは外界ではなく、網膜上での方向に対応することが明らかになっている。

(c) 窪んでいる仮面 (図9)

実際には、鋳型のように窪んでいる仮面に上方から光を当てているのに、凸の仮面に下方から光を当てているように見える。脳では、前述のように光源は上方から照らしていると仮定するのが通常であるが、ここではその仮定が完全に否定されている。一方、あごの近くにある2つの円盤は、仮面の影響をほとんど受けずに、上方から照らされているように見える。しかし、これらの円盤を陰影になじむように頬の部分に挿入すると、下方から照らされているような見え方へと変化してしまう。

(d) 主観的輪郭・境界線 (図10)

主観的輪郭を生じる a の背景に b のように明るさの変化を持たせると、しばらく眺めているうちに中央の部分が次第に膨らんでくる。この現象は、実際の線がある c の場合では起こりにくい、明るさの変化によって生じた境界線が見える d の場合に強く起こる。これらのことから、主観的輪郭及び境界線が陰影からの形状復元において、重要な役割を果たしていることがわかる。

(e) 知覚におけるグルーピング (図11)

視覚システムは、 a の中から凸形状のみを取り出すことができる。しかし、同じ並び方でも、 b のような奥行きが全く得られない”明暗の極性”だと不可能になってしまう。これは、グルーピングが明暗ではなく、3次元形状の知覚に依存していることを示している。また、横から光源が照らされている c において、 90° 回転させた時の方が凸形状の抽出が容易となるのは、横からの光源よりも、上方からの光源の方が凹凸を安定させる傾向があるからである。

(f) 対称性の知覚 (図12)

左の図は、凹凸がまん中の水平線で上下対称的に同じ配置になっているように見えるが、2次元の明暗で言えばそうではなく、右の図の方が対称になっていることが分かる (90° 回転させれば明かである)。この現象から、陰影情報が視覚システムのわりと前の部分で処理されていることが分かる。

4. 単眼立体視モデルと計算理論モデル

陰影からの形状復元に関する単眼立体視モデルを考える時、まず大切なのはモデルへの入力情報と出力情報の表現である。まず、入力情報としては、光源の明るさの変化・傾いた平面の見え方など画像強度全体のバイアスなどを考慮すれば、直流成分を含んだ画像強度よりも、その変化量 (画像強度の微分値) を用いた方が適当であることは明白である。一方、出力情報としては、法線のベクトル成分や勾配空間などいろいろある中で、 $\text{slant } \theta$ と $\text{tilt } \phi$ を使うのが、最も合理的かつシンプルな表現になると判断した (図13)。これら2つの観点から考えれば、2章で説明した Pentland の手法が、人間の単眼立体視モデルに最も近いと思われる。しかし、

Pentland の手法も、局所的に球であるというもとでの近似計算であり、さらにその仮定が成り立つ上でも、slant の推定を行うために、あらかじめ形状の曲率半径を導出したりしている点などが、単眼立体視モデルとしての適切さを欠いている。

このような Pentland の手法の欠点を補う方法として、川人・乾の視覚大脳皮質の計算理論モデル⁽⁹⁾ は、合理的である (図 14)。仮定条件を満たさない場合に生じる近似計算 $R^{\#}$ の不正確さを順光学の計算 R によって、うまく誤差を減少させ、最終的にかなり正確な値が導出できるからである。また、このモデルに基づいて考えられた局所並列階層モデル (図 15) は、前章での心理学的知見として現れている様々な現象を説明するのにも、かなり有効である。特に、この局所並列階層モデルの中で視覚モジュールの役割として考えられている、 $2\frac{1}{2}$ スケッチを表現する $V2$ 、単眼立体視を表現する $V3$ 、照明光の波長と光源位置・物体の空間位置を表現する $V4$ の間の双方向性結合による首尾一貫性保持機構は、陰影からの形状復元において重要な意味を為していると考えている⁽¹⁰⁾。

5. 網膜から $V3$ モジュールまでの具体化

前章で述べた川人・乾の計算理論モデルに基づいて、陰影からの形状復元に関する具体的な単眼立体視モデルの構築を行う。実際のところ、陰影からの形状復元には、面の向き N (slant θ , tilt ϕ) と光源の方向 ν のそれぞれを推定する 2 つの計算が必要となるが、ここでは光源方向は既知として、面の向きを推定するアルゴリズムについて考察する。

5-1 推定アルゴリズム

網膜から入力される画像強度は、最初の段階で、その変化量としての 1 階微分・2 階微分を計算し、次にそれらの値から局所的な面の向き N (slant θ , tilt ϕ) を計算する。これらの計算結果は、それぞれ“なめらか拘束”のような内部モデルも持っている。このような階層構造モデルと脳の視覚野の関係を図 16 に示す。以後の記述においては、強度画像データの微分値を持っている段階を 1 次視覚野の部分 (Primary Visual Cortex)、面の向き N を持っている段階を高次視覚野の部分 (Higher Visual Cortex) と呼ぶことにする。

ここで、面の向き N と画像データ I の中間的表現を \hat{N} とすると、網膜から 1 次視覚野の部分まででは、方向性 η_i を持った画像データの 1 階微分 $dI(\eta_i)$ と 2 階微分 $d^2I(\eta_i)$ によって、(4)・(5) 式の \hat{N}_1, \hat{N}_2 を求めている。

$$\hat{N}_1 = \begin{pmatrix} \eta_1, dI(\eta_1) \\ \eta_2, dI(\eta_2) \\ \vdots \\ \eta_{2n}, dI(\eta_{2n}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{N}_2 = \begin{pmatrix} \eta_1, d^2I(\eta_1) \\ \eta_2, d^2I(\eta_2) \\ \vdots \\ \eta_n, d^2I(\eta_n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

dI, d^2I の近似計算 $R_{11}^#, R_{12}^#$ はなめらか拘束を含む(6)・(7)式で表されるものとする。また、 (x', y') は η_i 回転変換後の座標軸であり、 σ はガウス関数 G の標準偏差である。

$$R_{11}^# = \sum_{\epsilon} G(\epsilon, \sigma) d/dx' G(x', y' + \epsilon, \sigma) \quad (6)$$

$$R_{12}^# = \sum_{\epsilon} G(\epsilon, \sigma) \nabla^2 G(x', y' + \epsilon, \sigma) \quad (7)$$

図17に $R_{11}^#, R_{12}^#$ の近似計算を行う方向性を持ったフィルタの形状を示す。

次に、1次視覚野の部分と高次視覚野の部分の間の相互作用に関するアルゴリズムについて述べる。面の向き N は、slant θ 及び tilt ϕ で表現されるため、ガウス球と等価になり、半径1の極座標表示の3次元単位ベクトルとなる(図13)。

$$N(t) = (1, \theta, \phi) \quad (\text{in spherical coordinates}) \quad (8)$$

$$N(t) = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \\ (\text{in rectangular coordinates}) \quad (8')$$

観測者の位置を z 軸方向とする観測者中心の座標系なので、slant θ 及び tilt ϕ は $0 \leq \theta < \pi/2, 0 \leq \phi < 2\pi$ である。また、 t は1回目の推定からの時間経過を表している。

時間経過 $t=0$ すなわち1回目の近似計算による推定方法について述べる。 d^2I に関する η_i の方向は(5)式に示すとおり n 方向としているため、(9)式のようにポピュレーション・コーディングによって、任意の方向の tilt ϕ を表現することができる。但し、 ϕ_i の値は η_i or $\eta_i + \pi$ のあいまいさを持っており、この決定は occluding contour の情報及び $dI(\eta_i)$ の符号の変化に依存している(図18)。

$$N(0) \approx R_2^# (\hat{N}_2) = (1, \theta_0, \phi_0) \quad (9)$$

$$\theta_0 = (1/k) \left(\left(\sum^n \cos \phi_i \cdot \theta_i \right)^2 + \left(\sum^n \sin \phi_i \cdot \theta_i \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\phi_0 = \cos^{-1} \left(\sum^n \cos \phi_i \cdot \theta_i / (k \cdot \theta_0) \right)$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\left(\min |d^2I(\eta_i)| / |d^2I(\eta_i)| \right)^{1/3} \right) \\ (i=1, 2, \dots, n)$$

この依存性についてももう少し具体的に説明すれば、occluding contour の外向きの法線ベクトルを V 、方向 ϕ_i に沿った単位ベクトルを $e(\phi_i)$ とすると、その近傍で $V \cdot e(\phi_i) \geq 0$ を満たす η_i or $\eta_i + \pi$ をそれぞれ選び、検出方向の断面において、途中で $dI(\eta_i)$ の符号が反転すれば、 ϕ_i も反転する。これは、occluding contour

が、なめらかならば、その近傍の tilt の変化もなめらかでかつ、視覚世界で凸の物体が多いということを示している。

続いて、このモデルでは(10)式で記述される繰返し計算モードに入ることとなる。推定された面の向き N から、順光学の計算 R_2 によって推定画像強度に関する \hat{N}_1 及び \hat{N}_2 の推定値が計算され、誤差 $\hat{N}_2 - R_2(N)$ が求められる。この誤差は、逆光学によって、 $R_2^* [\hat{N}_2 - R_2(N)]$ が計算され、高次視覚野の部分に入力される。一方、この式の第2項は”なめらか拘束”を表す内部モデル $U(N)$ によるものである。

$$dN(t)/dt = R_2^* [\hat{N}_2 - R_2(N)] - \partial U(N) / \partial N \quad (10)$$

順光学 R_2 は、光源方向の単位ベクトルを (x_s, y_s, z_s) とし、面を拡散反射面と仮定することによって、 $I = x_s \cos \theta \sin \phi + y_s \sin \theta \sin \phi + z_s \cos \phi$ を使って、 R_{11}^*, R_{12}^* より、 $(\eta_1, dI(\eta_1)), (\eta_1, d^2I(\eta_1))$ を計算する。また、ここで用いる N の内部モデル $U(N)$ は膜のエネルギーである。

6. 2次元シミュレーション

前述の推定アルゴリズムに基づいて、球及び楕円体の断面形状（2次元形状）を推定する数値シミュレーションを行った。図19は、光源方向を変えた時の球の陰影と推定された面の向きである。推定された面の向きは、ニードル・マップのような法線で表されており、それぞれ中央の図は1回目に推定された面の向き、下の図は収束時の面の向きを示している。図の右端の数字は繰返しの回数を示している。同様に、図20に楕円体の陰影と推定された面の向きを示す。結果として、光源方向をかなり傾けても、また逆光学の近似計算の前提となっている局所的に球であるという条件を外れても、10回程度の繰返し計算で収束し、ほぼ正確な面の向きを推定することができた。

7. おわりに

視覚情報処理のモジュールの1つのモデル化として、新しい単眼立体視モデルを提案し、それを具体化した。我々が人間の脳の中で単眼立体視が行われているであろうと考えている視覚野 $V3$ に関して、生理学的見地からはまだあまり正確なことは分かっていない。しかし、今回行ったシミュレーションが、10回程度でほぼ正確な面の向きを推定したことは、眼球運動に関する固視時間が約300msecであることを考えれば、このモデルがある程度妥当となる可能性を十分に含んでいる。今後は、生理学的・心理学的知見の進展を十分考慮しながら、より適切な逆光学 R_2^* の設定及びより複雑な断面形状への対応や3次元形状復元への拡張など、残された多くの課題に取り組んで行きたいと考えている。

[謝辞]

研究の機会を与えて下さったATR視聴覚機構研究所淀川英司社長、認知機構研究室中根一成室長に感謝致します。そして日頃ご討論頂く、視覚研究室西田真也客員研究員をはじめATR視聴覚機構研究所の皆様に感謝致します。

—参考文献—

- (1) D. Marr: "Vision", Freeman(1982), 乾 敏郎, 安藤広志訳: "ビジョン
—視覚の計算理論と脳内表現—", 産業図書(昭62).
- (2) B.K.P.Horn and M.J.Brooks: "Shape from Shading", The MIT Press(1989).
- (3) J.T.Todd and F.D.Reichel: "Ordinal Structure in the Visual Perception
and Cognition of Smoothly Curved Surfaces", Psychological Review, 96,
4, pp.643-657(1989)
- (4) F.D.Reichel and J.T.Todd: "Perceived Depth Inversion of Smoothly
Curved Surfaces Due to Image Orientation", Journal of Experimental
Psychology: Human Perception and Performance, 16, 9, pp.653-664(1990)
- (5) V.S.Ramachandran: "Perceiving Shape from Shading", Scientific
American, 259, 2, pp.76-83(1988).
- (6) D.H.Ballard and C.M.Brown: "COMPUTER VISION", PRENTICE-HALL, INC.
(1982).
- (7) K.Ikeuchi and B.K.P.Horn: "Numerical Shape from Shading and Occluding
Boundary", Artificial Intelligence, 17, pp.141-184(1981).
- (8) A.P.Pentland: "Local Shading Analysis", FROM PIXELS TO PREDICATES,
pp.40-77(1986).
- (9) 川人光男, 乾敏郎: "視覚大脳皮質の計算理論", 信学論(D-II), J73-D-II,
8, pp.1111-1121(平2-08).
- (10) 乾敏郎, 川人光男, 本郷節之: "視覚再構成過程の計算理論とネットワーク
モデル", 信学技報, NC90-21(1990-07).

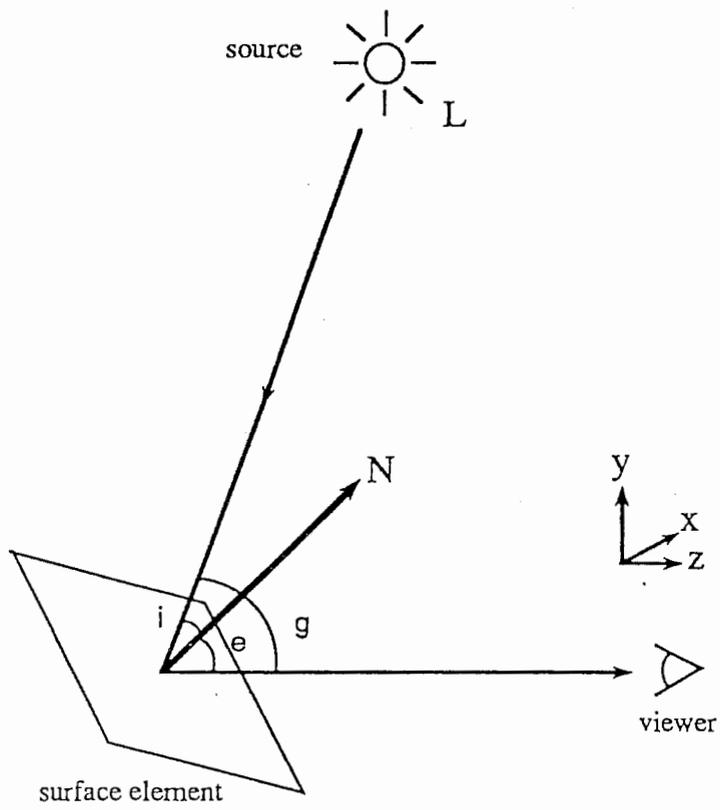


图 1

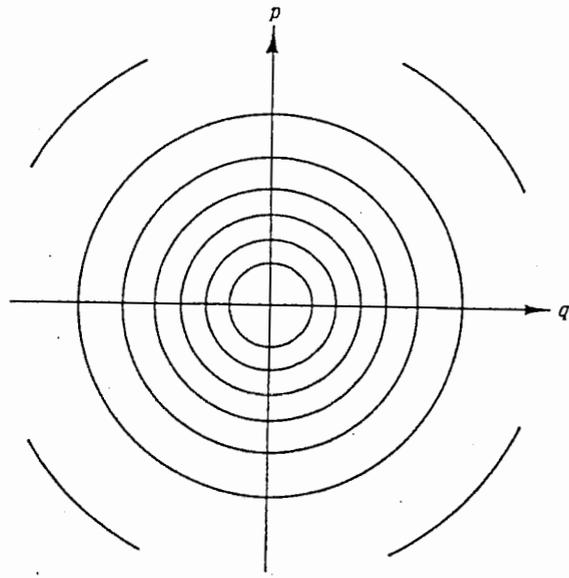


图 2

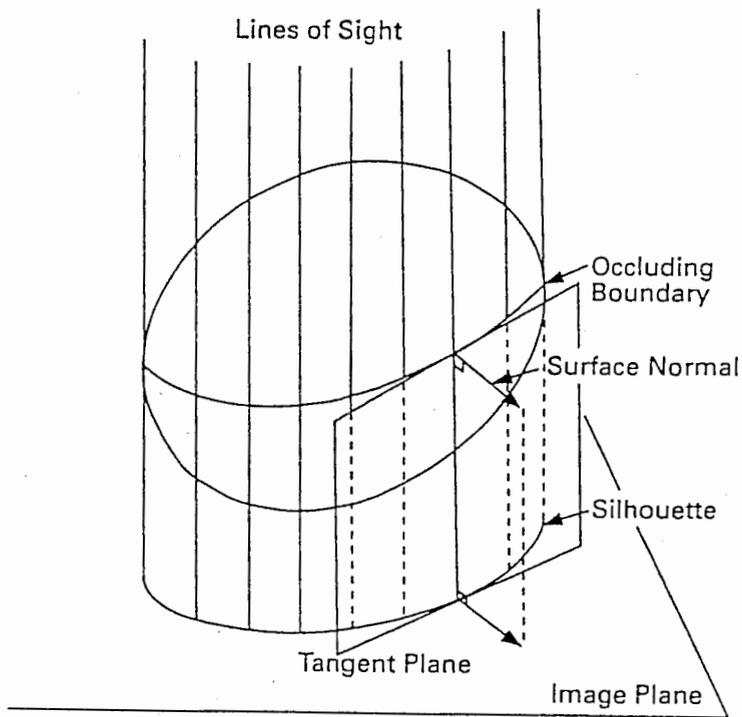


图 3

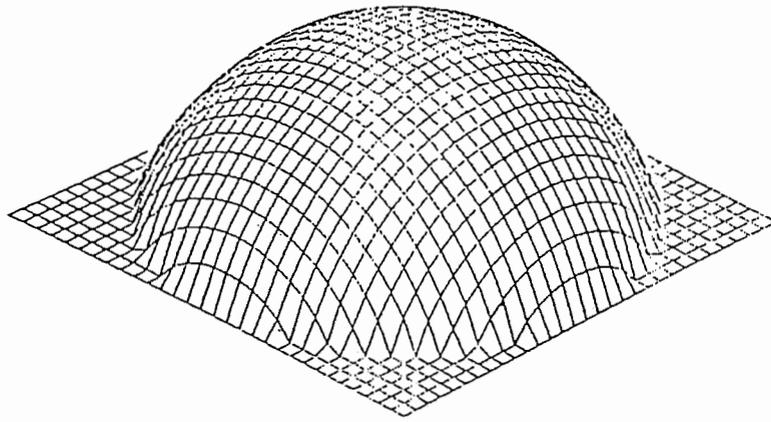
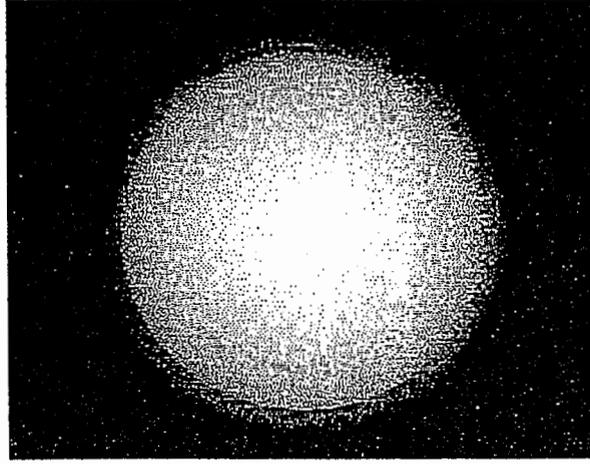


图 4

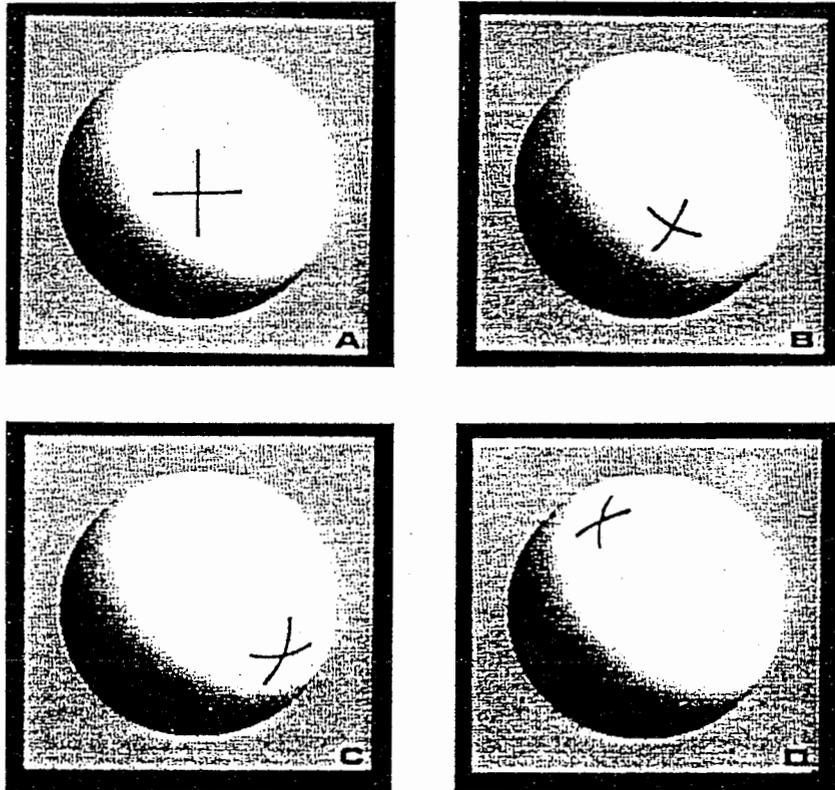


图 5

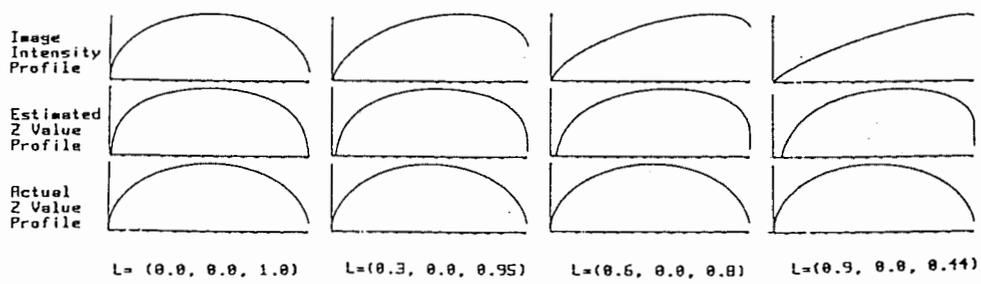


图 6

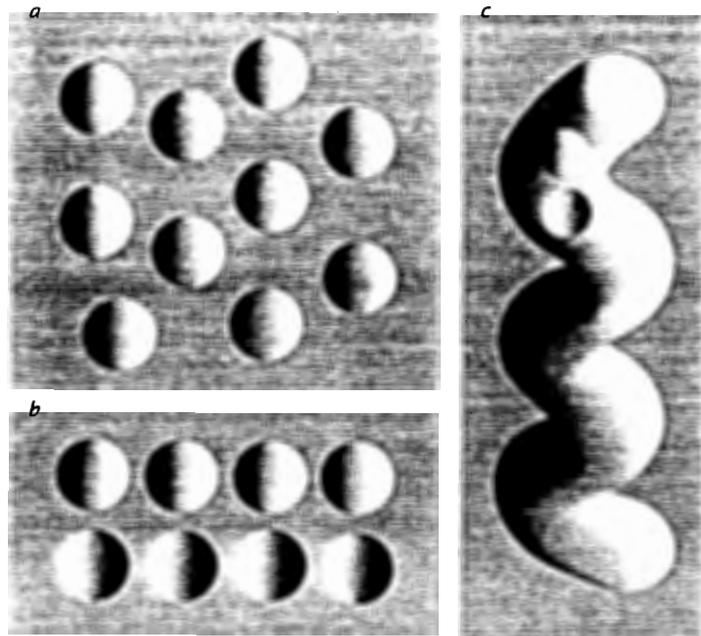


图 7

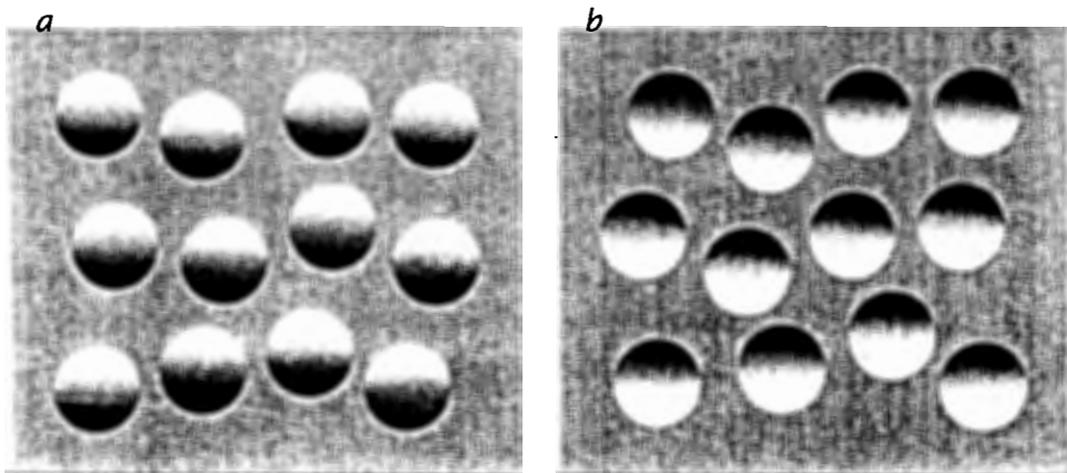


图 8



图 9

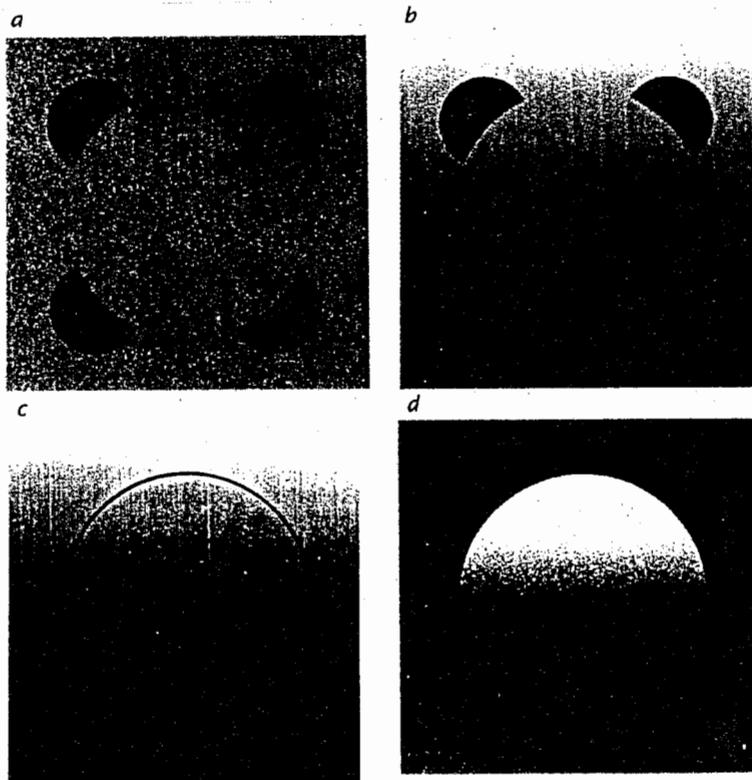


图 10

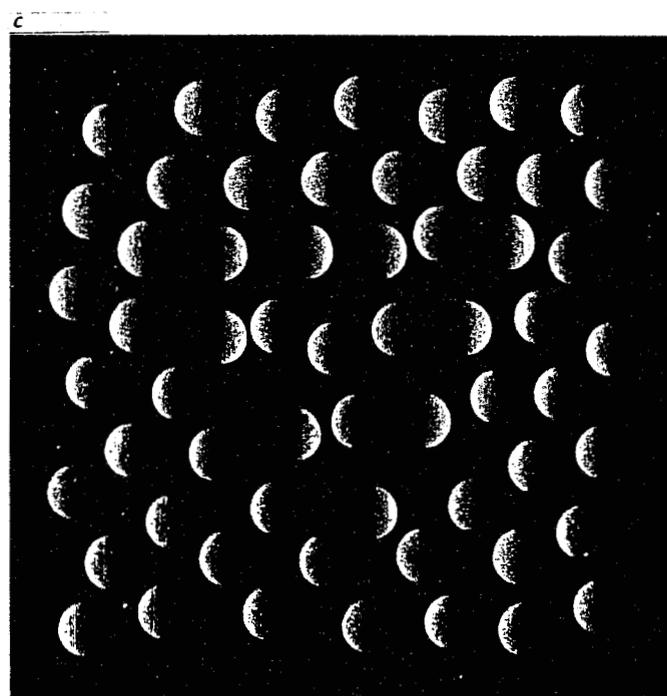
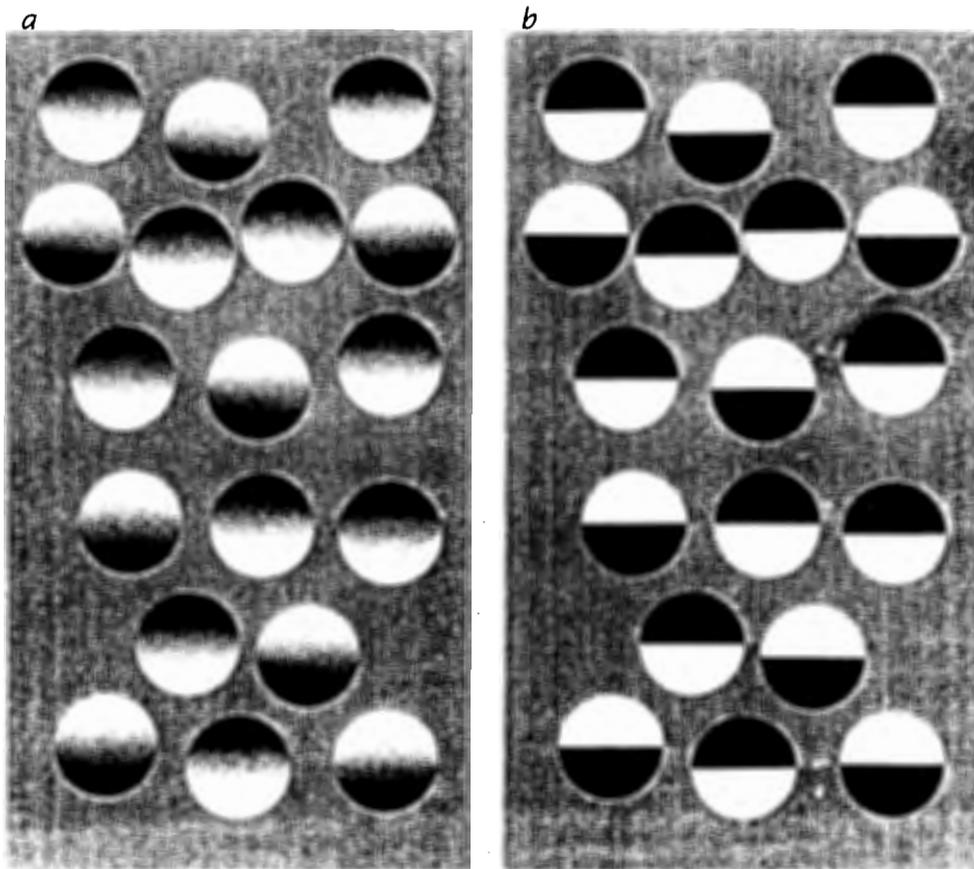


图 11

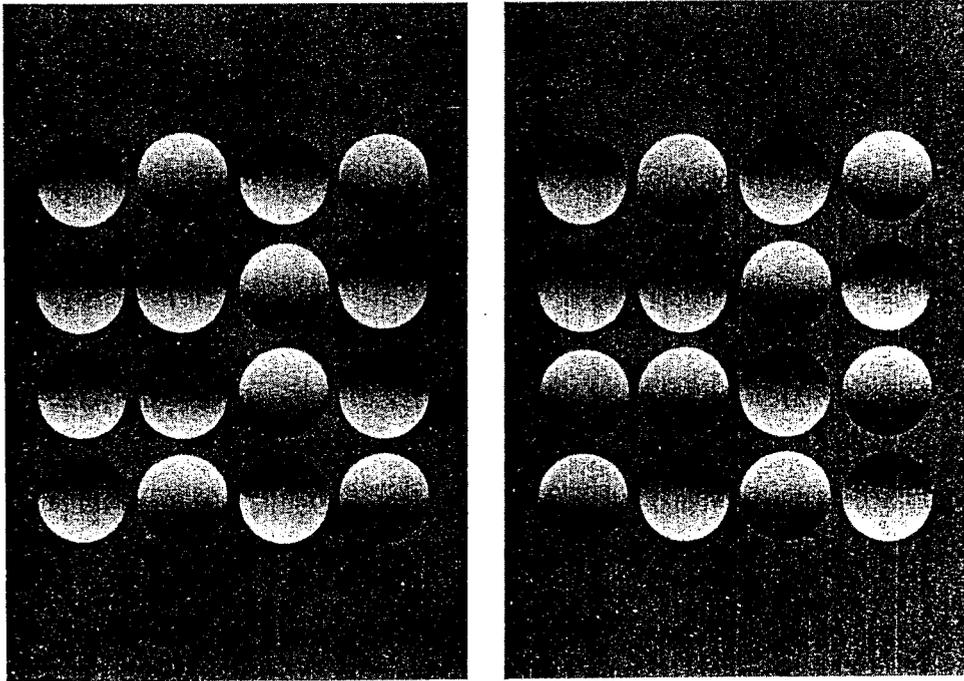
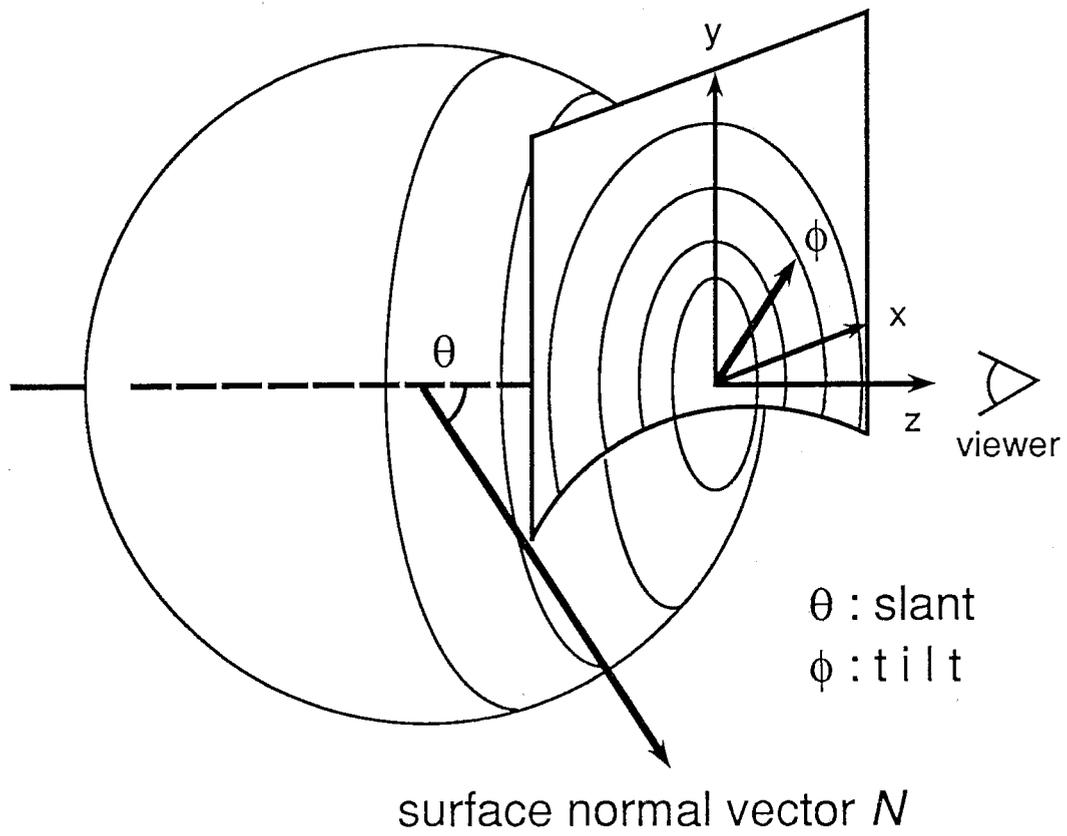


图 12



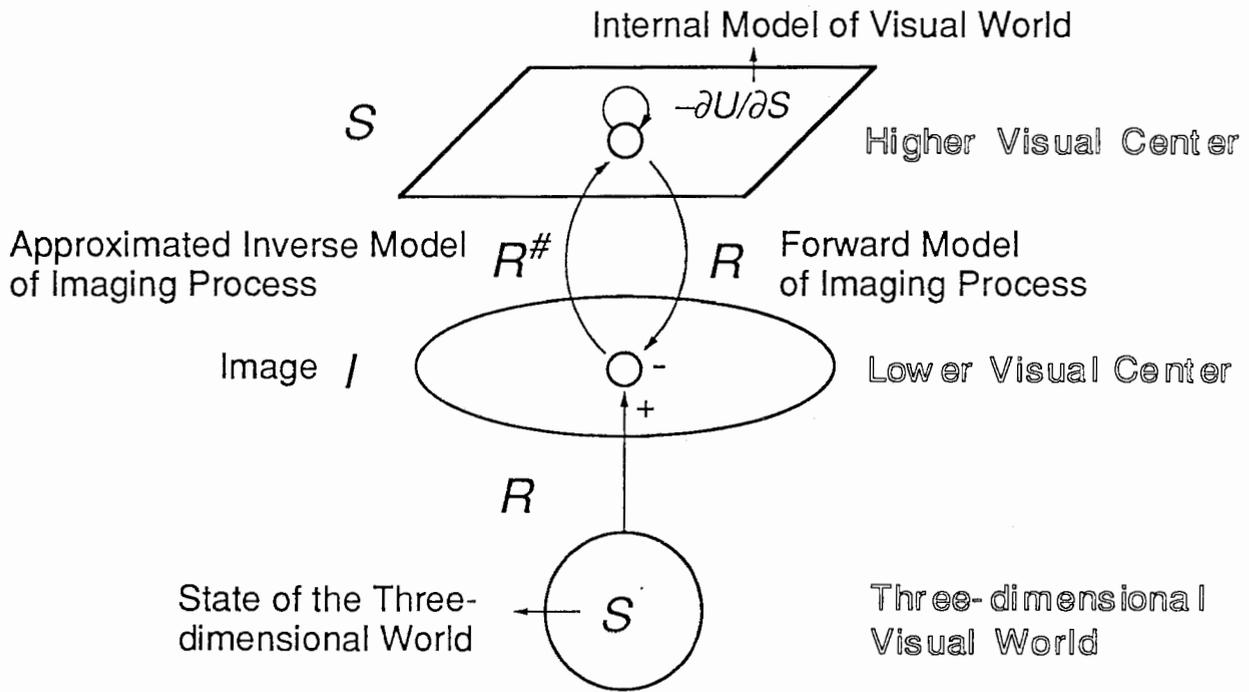
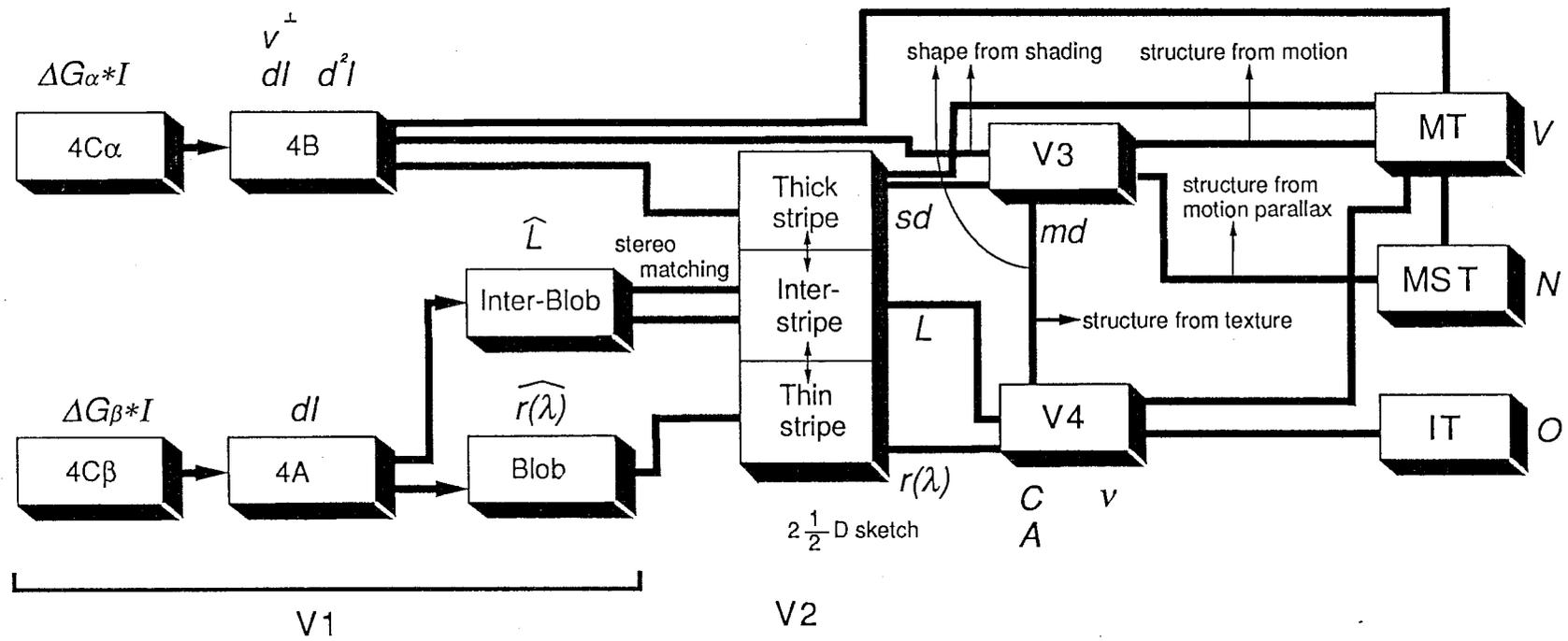


图14



⊠15

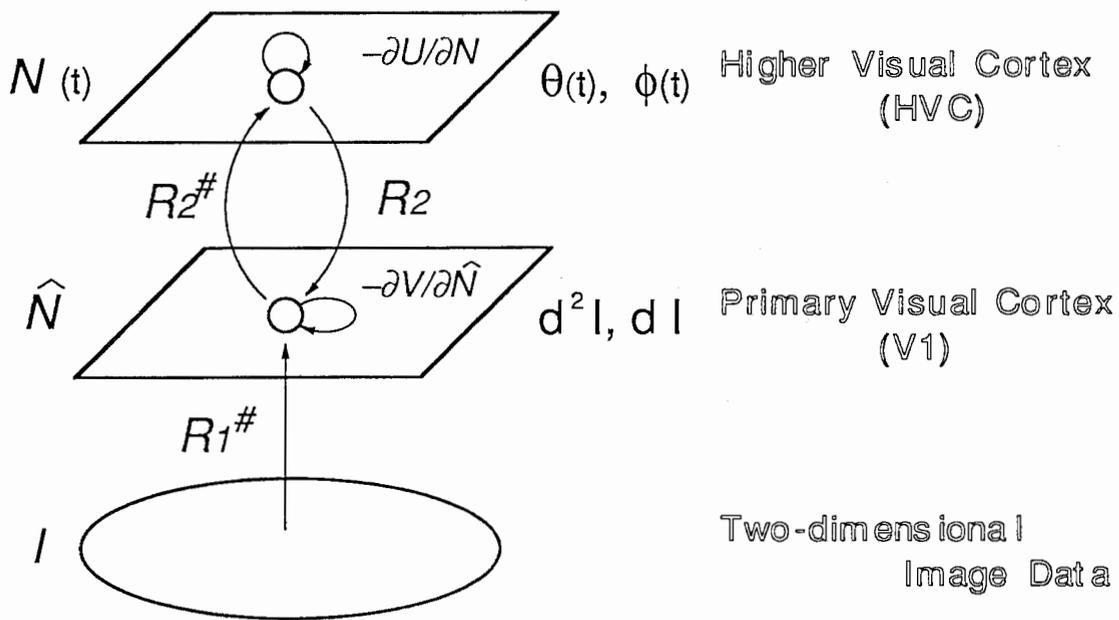
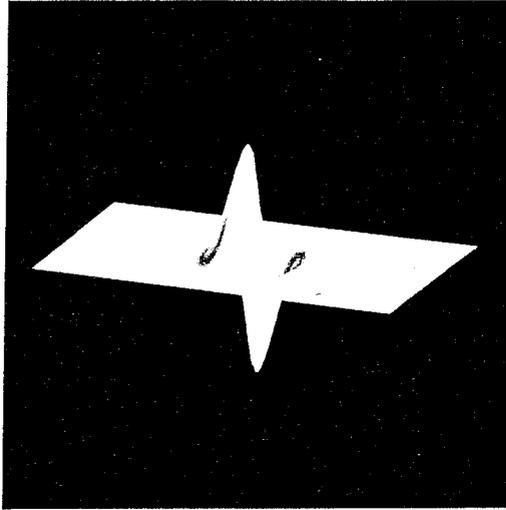
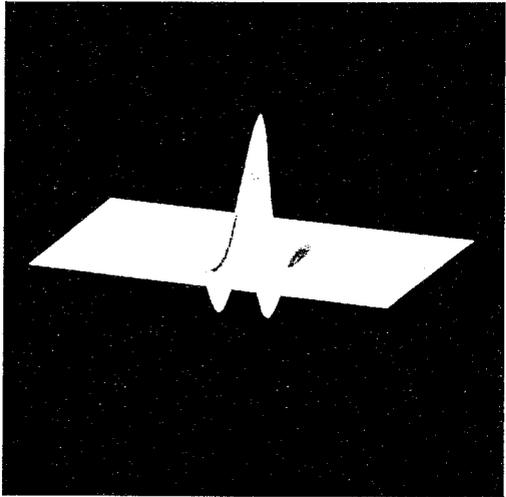


图16



$$R_{11}^{\#} = \Sigma G(\epsilon, \sigma) d/dx' G(x', y' + \epsilon, \sigma)$$



$$R_{12}^{\#} = \Sigma G(\epsilon, \sigma) \nabla^2 G(x', y' + \epsilon, \sigma)$$

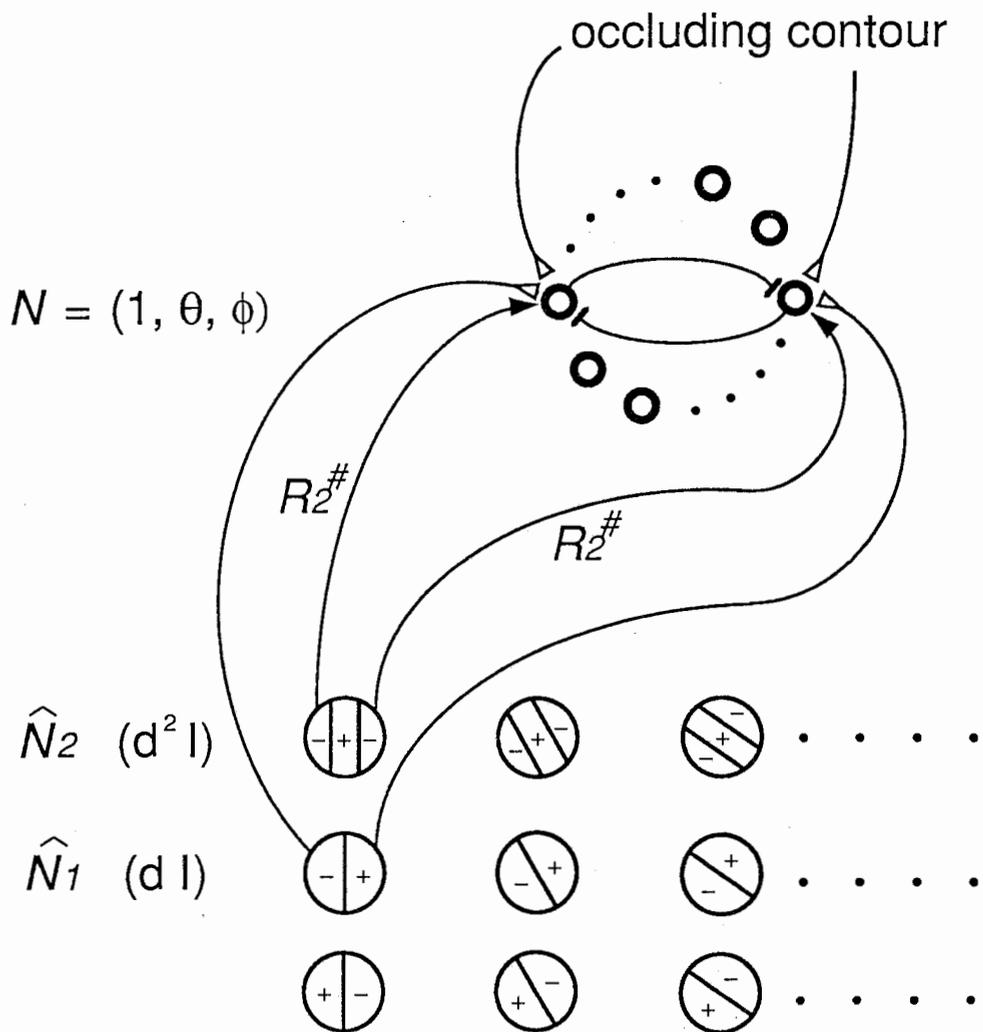
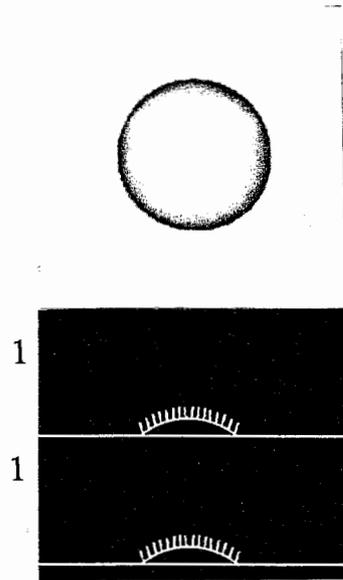
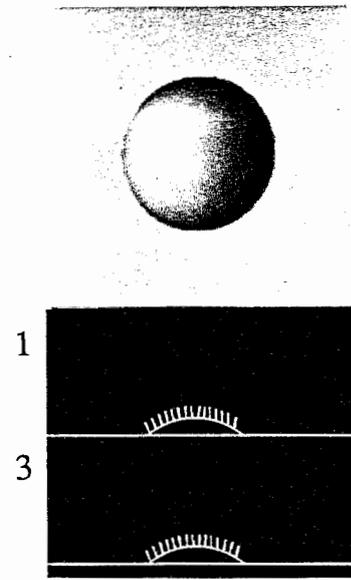


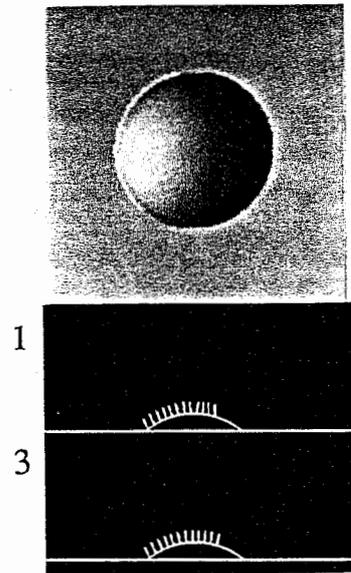
图18



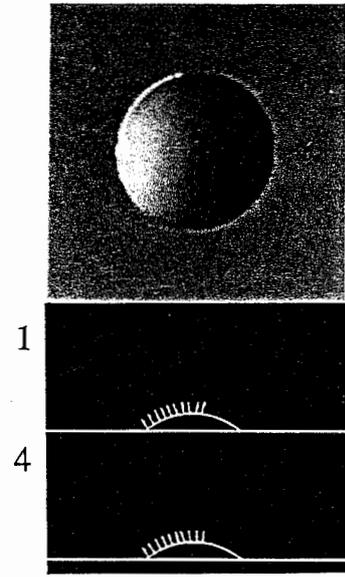
$$v = (0, 0, 1)$$



$$v = (-0.5, 0, 0.87)$$



$$v = (-0.71, 0, 0.71)$$



$$v = (-0.87, 0, 0.5)$$

