

濃淡情報を利用した曲面物体の運動と形状の解析 (円筒状物体の場合)

INFERRING MOTION OF CYLINDRICAL OBJECT FROM SHADING

浅田 稔 辻三郎

Minoru Asada and Saburo Tsuji

大阪大学 基礎工学部

Department of Control Engineering

Osaka University

ABSTRACT

Computational analysis of image shading in time-varying imagery for estimating motion of cylindrical object is explored. At first each image is segmented into spherical, cylindrical, or planar surfaces by analyzing local shading. With knowledge on lighting conditions, motion of the cylindrical object between frames is determinable by the local shading analysis or the reflectance map method. An additional constraint on surface orientations obtained from important global information, the brightest generating line, augments the reflectance map method as follows. (1) Estimation of base orientation from image intensities and the direction of generating line is easy. (2) Discrimination of true orientation from its reflection is possible. (3) Estimation of orientations in consecutive frames is possible in absence of prior knowledge on albedo of the object. Experimental results for images synthesized by computer are shown.

1. はじめに

最近、ロボット・ビジョンへの応用という観点から、時間的に変化する画像を入力し、物体の3次元運動を理解する研究が盛んになされている。ほとんどの研究^[1,2,4,5]では、画面間で特徴点を対応付け、その結果から剛体の3次元構造を算出するものである。しかしながら、曲面物体を対象とした場合、その表面に特徴的なパターンがない限り、画面間の対応付けは困難であり、従来の研究では解析できなかった。

そこで、我々は、良く見かける曲面物体の例として、円筒状物体を対象とし、その形状と運動を理解する2つの方法を研究してきた。^[3,6]

1つは、画像面に映る物体の形状の時間的変化を解析する方法である。^[3]この場合、円筒状物体の底面と切線が垂直であれば、2枚の画面からその物体の形と運動が理解できる事が判っている。

ここでは、もう1つの手法として、濃淡情報を利用した円筒状物体の運動の理解について述べる。もし濃淡画像から、各点の法線ベクトルが求められれば、底面の向きが判り、その方向で底面の輪郭線を対応付けることで、物体の運動は明らかとなる。Pentland^[4]は対象とする曲面が球面近似できる場合について、照明条件(物体の面の反射率、照明の方向等)なしに、濃淡画像から各点の法線ベクトルを求めたが、円筒状物体の場合、球面近似が適用できず、各点の法線ベクトルは求められない。照明条件が既知であれば、局所的な濃淡情報の解析、もしくはHorn^[5]による反射率地図法(Reflectance Map Method)により、各点の法線ベクトルを求める事は可能である。

これらの方法は計算が複雑であり、しかも一般には多数回の解が得られ、どれが真の解が判らない。ここでは、大局的な濃淡情報を利用した拡張反射

率地図法を提案する。この方法では、各点の明るさと、最も明るい母線の方向からの拘束条件を利用している。この条件から、画面の法線ベクトルの2つの候補を容易に算出できる。この2つの解は照明方向に関して対称であり、真値と鏡像に対応し、その区別も可能である。

照明条件の中で照明方向は、既知の場合が多いが、面の反射係数は物体の種類などに左右され、利用できない場合が多い。そこで円筒状物体の剛体性を利用して、その底面積や母線の長さが変化しないことから、最も適切な面の反射係数を求める事ができる。即ち、それだけの画面で、面の反射係数 α 各値に対する底面積と母線の長さを求め、それらが複数画面で一一致する様な反射係数を発見することである。

本文では合成画像に適用した結果を示す。

2. 前提条件

本研究では、以下の4つの仮定を設ける。

- (1) 投影法は直交射影である。
- (2) シーンは単一動物体を含む。
- (3) 物体は底面と円筒状の面(以下、

円筒面と呼ぶ。)を持つ。

ここでは円筒面を、閉曲線を通る平行直線群(母線)により、とおおひいた面と定義する。

(4) 面は一樣乱反射面であり、一定 α 反射係数を持つ。

仮定(4)より、画像面上の各点の見かけの明るさ E は、面の反射係数を P 、入射光の強さを I 、その点の法線ベクトルを N 、照明方向を表すベクトルを L として(N, L はいずれも単位ベクトル)次式で与えられる。

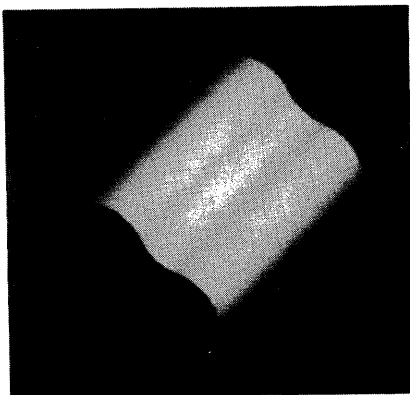
$$E = P \cdot I * (N \cdot L) \dots \dots \dots (1)$$

この関係から、シーン中の未知の物体の面を、その明るさの分布によって、球面、円筒面、平面に分類できる。即ち、仮定(3)が満足されているかどうか検証できる。

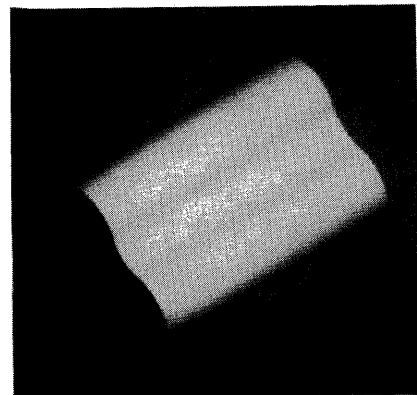
3. 濃淡画像の解析

3.1 局所的な解析

Pentland^[3]は、照明条件(前述の P, I と L)が未知の場合の濃淡画像の局所的な解析を示した。彼の方法では、一樣乱反射面で、局所的に球面近似(等主曲率面)ができれば、その点の法線ベクトルが求められる。また、各点ご



(a)



(b)

図1. 入力画像

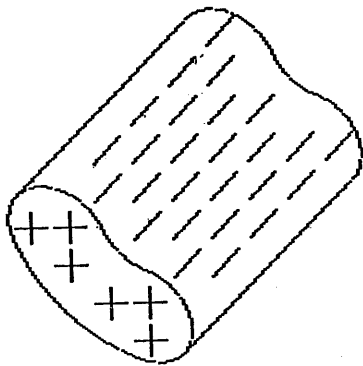


図2. 図1.(a)に対する面の分類結果

の近傍が、①平面であるが、②円筒面などの平面に展開できる曲面が、③球面のように平面に展開できない曲面が、の判別もできる。

次は、面の法線と面の分類に利用している。即ち、与えられた濃淡画像を、平面、円筒面、球面の各領域に分割する。図1に入力画像を示す。256×256点、8ビットの円筒状物体の合成画像である。図2.は図1.(a)に対する面の分類の適用結果である。「+」と「/」はそれぞれ、平面と円筒面の領域である事を示している。この図から、この物体が、円筒面と平面からなっている事が判る。更に、円筒面の重要な特徴として、母線の方向も得られる。「/」の方向)

もし、濃淡画像の解析により、円筒面の各点の法線方向が求められれば、当然、底面の向きにも拘束を与える。底面の向きが判れば、それを正面に向きを変える事によって底面の形が判る。そして、画面内で底面の輪郭線と対応付ければ、シーン中の物体の運動が決定される。しかしながら、局所的な解析では、照明条件なしに、円筒面の各点の法線ベクトルを求める事はできない。以下にそれを示す。

円筒面の解析には、Pentland [4]が提、平面モデルの代りに円筒モデルが使

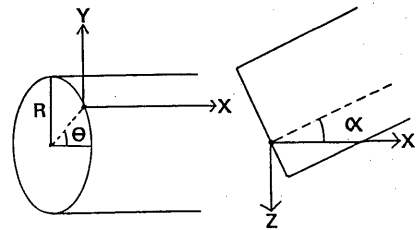


図3. 円筒状物体を解析する時の未知数

われる。今、図3に示す様に、X軸が、画面内の母線の方向と一致しているとする、3つの値 E , E_x , E_{yy} が解析に利用できる。ここで、 $E(x, y)$ は点 (x, y) の明るさ、 $E_x = \partial E / \partial x$, $E_{yy} = \partial^2 E / \partial y^2$ である。この場合、各点の法線ベクトルを求めるには、図3に示す、3つの未知数 R , θ , α が存在する。 R は円筒の半径、 θ は、その点が円筒のどの位置かを表すパラメータ、 α は母線の進行方向の傾き角である。そこで、照明条件(面の反射係数と入射光の強さの積 PI と、照明方向 L を表す2つのパラメータで、計3つの変数)が未知の場合には、局所的な明るさの情報から、円筒面上の各点の法線ベクトルを求めることは不可能である。

3.2 拡張された反射率地図法

上で述べた様に、照明条件の3つのパラメータが判れば、局所的な解析から、円筒面上の各点の法線ベクトルは求められる。同じ条件下では、Horn [5]によって提唱された反射率地図法を利用する方法が考えられる。

今、底面と円筒面の向きの関係について考えよう。3つの面が交わることができるY型接続点を使って、3つの面の拘束条件を導く、勾配空間 (Gradient Space) での解析は、円筒面の場合にも有効である。図4は、勾配空間に

ける円筒状物体の面の拘束条件を表している。既に、母線方向は判り、2通りの、画面内の円筒面は、同じ明るさを持つ母線を含む細い面群に分割できる。底面と円筒面上の位置の2面を表わす勾配空間上での位置をそれぞれ G_1, G_2, G_3 とする。これらの3

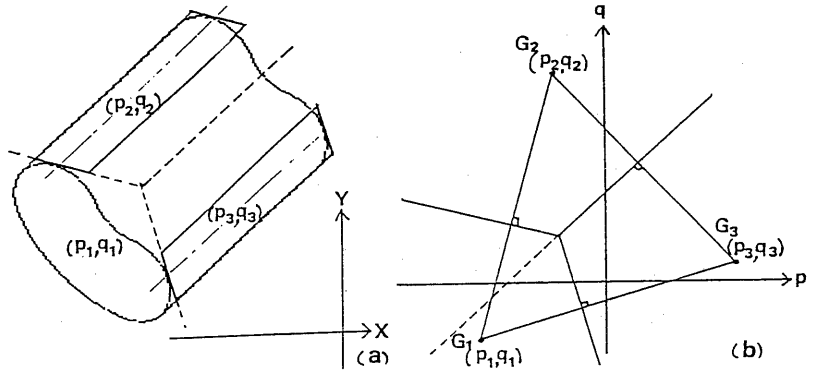


図4. 勾配空間への射影

点はこの3本の直線によって構成される三角形の頂点となる。3本の直線は、母線に対する勾配直線 (gradient Line) と、円筒面上の2面と底面に对する勾配直線である。後の2本の勾配直線の方向は、図4(a)に示す様に、円筒面上の接平面に对应する底面の輪郭線上の点での接線に垂直な方向である。

この拘束から、6つの未知数 (各面の向きを表わす勾配空間の点の座標 (P_i, q_i) ($i=1,2,3$)) の内、3つを消去できる。言い換えれば、残り3つの未知数を知る必要がある。即ち、三角形 $G_1G_2G_3$ の位置と大きさである。今、底面と他の2面の明るさが判れば、反射率

地図法⁽⁵⁾を使ってそれぞれ面の向きを計算できる。しかしながら、この計算は複雑である。なぜなら、照明条件と各面の明るさによって決まる円錐曲線上に頂点がある様に、三角形の位置と大きさを、反射率地図の上で変えなければならぬ。しかも、複数個の解が得られ、一意に定まらない。

そこで我々は、もっと簡単な決定法として拡張反射率地図法を提案する。円筒面上の各点の勾配 (gradient) は同一の母線上では等しい。また、母線に垂直な方向に連続である。もし連続でないとしたら、円筒面が滑らかでなくなり、底面の形に特徴的なものが存在してしまう。そこで先ず始めに、最も明るい母線を見出し、その明るさを計算する。この母線に対する勾配は、勾配空間でその明るさに対応する円錐曲線の2つの接線の接点 A_1, A_2 として図5に示す様に求められる。接線の方向は母線に垂直な方向である。これから2点から、底面の向きの候補として E_1, E_2 が求められる。これらの点は底面の明るさに対応する円錐曲線と、 A_1, A_2 からの底面に対する勾配直線との交点である。

最も明るい母線による拘束は、図4に示した三角形による拘束とは独立であり、これから2つの拘束条件から、 E_1

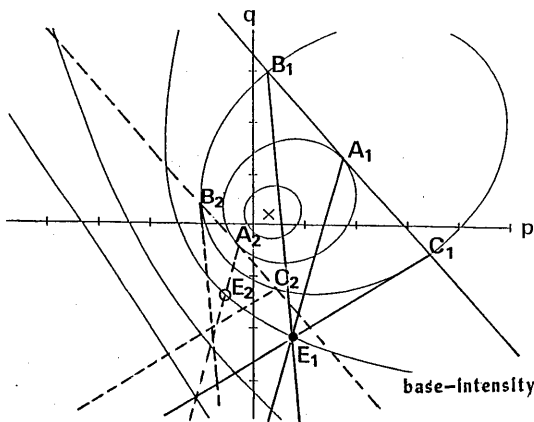


図5. 底面の向きの決定

と E_2 の 2 つの候補から真の解を得る事ができる。即ち、最も明るい母線以外の残りの 2 つの母線を選び、これらの明るいに対応する円錐曲線と、最も明るい母線により決定された勾配直線の交点として、これから 2 つの母線の勾配の 2 組の候補 (B_1, C_1) と (B_2, C_2) を得る。これらの点から底面に対する勾配直線を下した時、 E_1 と E_2 のどちらが、より収束するかにより、真の解を得ることが出来る。(図 5 では E_1 が真)

3.3 反射係数が未知の場合の円筒状物体の運動解析

前節では、照明条件が与えられるれば、局所的な濃淡情報の解析、もしくは、通常の反射率地図法^[5]により、各点の法線ベクトルが求められる事を示した。最も明るい母線の明るさと、その方向という重要な情報は、一つの拘束条件となり、円筒状物体の運動を解析する上で、照明条件を表わすパラメータが 3 つの内、2 つで充分である事を示す。

多くの場合、照明方向は知っていても、物体の面の反射係数までは知らない。そこで、面の反射係数が不明の時に、円筒状物体の運動を明かにす

る事を考える。

簡単な方法は、最も明るい母線によって決定される底面の向き(図 5, A, E_1)と、三角形を構成して得られる底面の向き(図 5, B, C, E_1)が一致するように、反射係数と入射光の強さの積 PI (式(1)参照)を推定する事である。

この方法は常にうまくいくとは限らない。なぜなら、画像の各点の明るさや、勾配直線を求める際の、底面の輪郭線の接線の方向などに含まれる雑差の影響で、正確な底面の向きが得られないからである。そこで、別の手法を変更して、与えられた画像列全体を通して、底面種や母線の長さが一定であるような PI を推定することを考える。

簡単のため 2 画面の場合について考えよう。まず、それぞれの画面で、いくつかの PI を仮定し、これらの値に対して、拡張反射率地図法を適用し底面の向きを求める。この値から底面種や母線の長さを算出する。剛体条件から、底面種や母線の長さは不変であるので、2 画面間で変化しないような PI を推定する。当然、画面数が増えれば、 PI の値や底面の向きは信頼性の高いものとなる。

実験結果から、 PI が真値から多少ズレても、底面の向きの評価には、それほど影響がないことが判った。

4. 実験結果

図 1 (a) (b) に示した円筒状物体に対する照明の反射率地図を図 6 に示す。照明方向は $(PS, QS) = (3, 2)$ であり、 $\times$ 印で示している。数字は PI に対する比を示している。先ず最初に、様々な値の PI に対して底面の向きが求められる。 PI の初期値は、画面内の最も明るいレベルであり、以後、徐々に引き上げられる。図 7 に図 1 (a) に対する処理結果の一部を示す。 PI

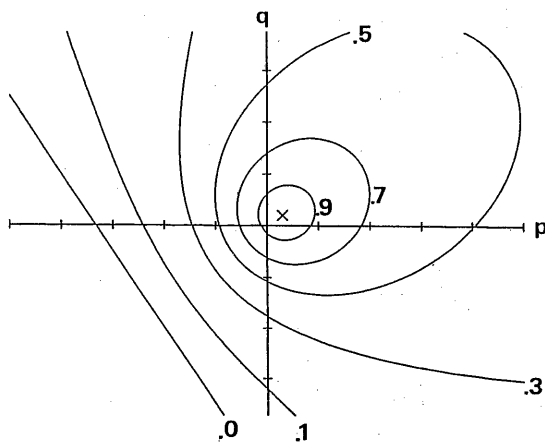


図 6. 図 1 に対する反射率地図 $(PS, QS) = (3, 2)$

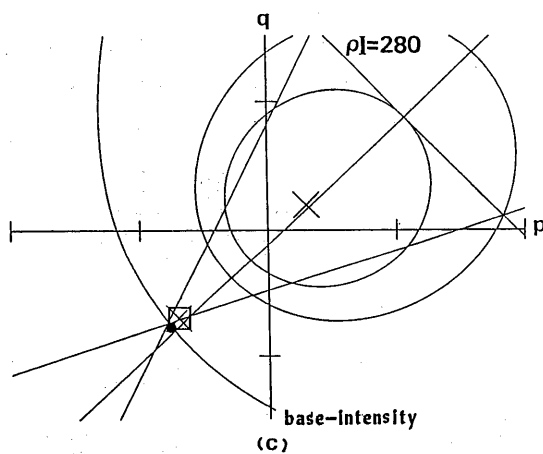
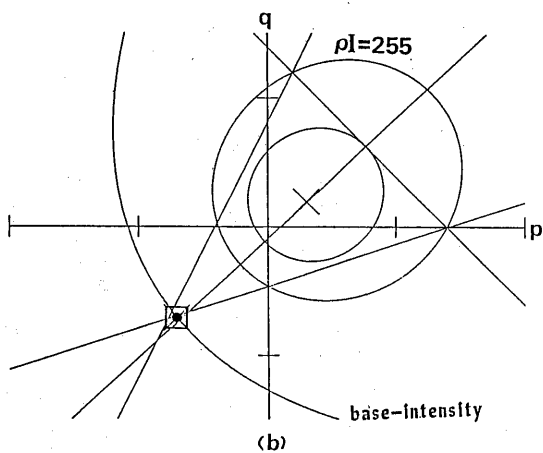
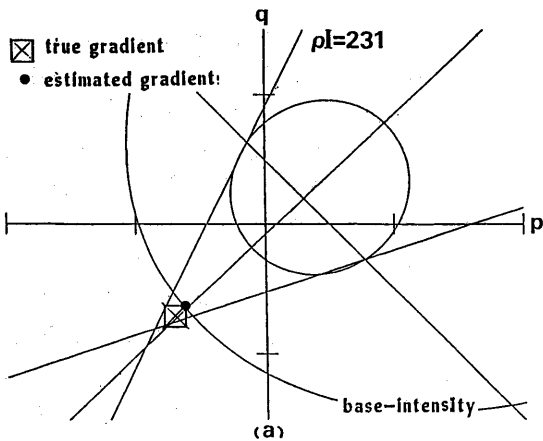


図7. 図1(a)に対する底面の向きを算出過程

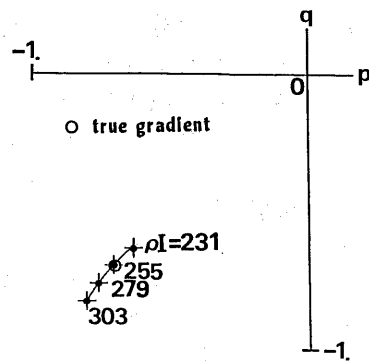


図8. pI の値に対する底面の向きの変化

の値として初期値の231(図7.(a)), 真値の255(bit)(図7.(b)), として最大値の280(図7.(c))の3つの場合を示す。これらの図から判る様に、2つの拘束条件から得られる底面の向きの値の収束度合は、 pI の値にあまり左右されず、それ故、一枚の画面だけから、 pI の値を評価するのは困難である。しかしながら、異なった pI の値から評価される底面の向きは、図8に示す様に、非常に接近した値をとる。例えば、 $pI=303$ (真値の120%)としても、その値からの底面の向きと真の向きとの誤差は5度以内である。図1.(b)に対する解

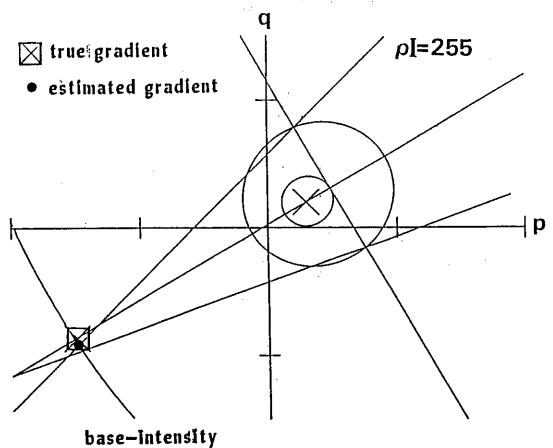


図9. 図1.(b)に対する底面の向きを算出

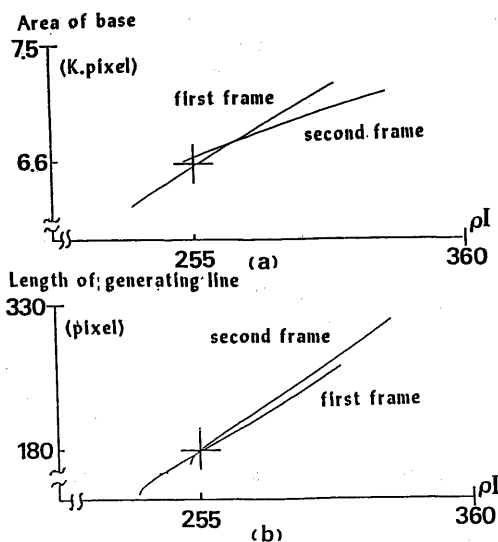


図10. ρI に対する底面積と母線の長さ

析を図9に示す。図7や図9から評価士は底面の向きから、図11の2画面面の動きが決定される。運動のパラメータの決定に関しては文献[3]に詳しく述べている。

次に、物体の形のパラメータが不変である事を利用して、夏の ρI を見出す手法を適用してみよう。図10は各 ρI の値に対する底面積及び母線の長さの関係を示し、2枚の画面について図示したものである。底面積や母線の長さは、不変であるから「+」印で示す

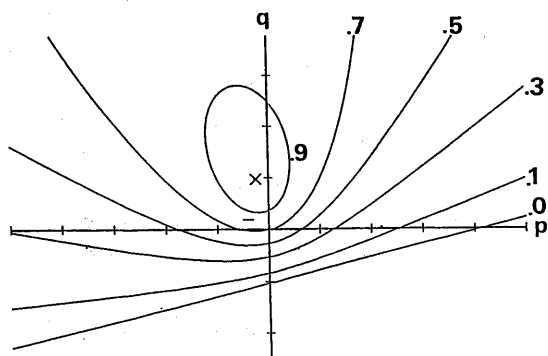
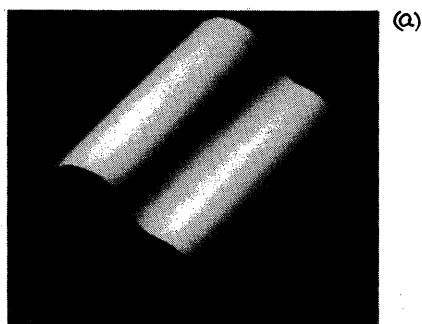
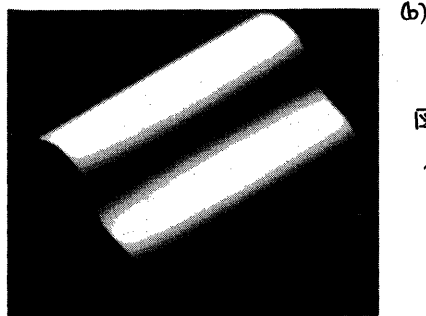


図11. 観測者と45°角をなす照明方向 $(p_s, q_s) = (-24, 97)$



(a)



(b)

図12.
入力画像
(z_{a2})

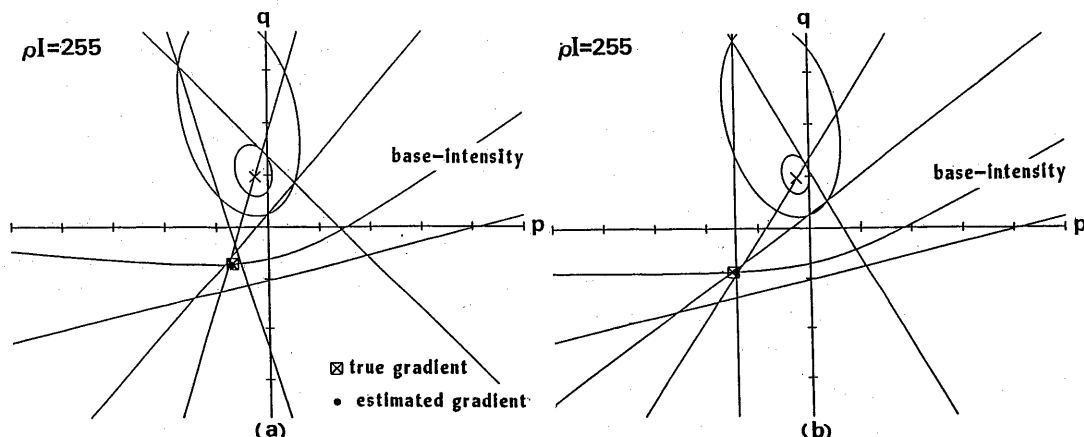


図13. 図12a入力画像に対する底面 q 向き q 決定過程 (図12(a) $\Rightarrow$ (a), 図12(b) $\Rightarrow$ (b))

した真値をとるべきである。母線の長さに対する ρ I 曲線の交点は、ほぼ真値に近い値をとっているが、底面積に対する ρ I 曲線の交点は、やや真値からズレている。しかしながら、この差、たゞ ρ I の底面の向きの変差は、わずか 1.3° に過ぎず、本手法の信頼性の高さを示している。

底面積や母線の長さの変化率は、照明方向が、観測者と同じ方向の場合の明るさの変化率と等価であるので、照明方向と観測者のなす角はなるべく大きい方がよい。図1の例では約 20° であり、そのため、底面積や、母線の長さに対する ρ I 曲線の傾きは、2枚の画面で似た値をとっている。

次に別の例として、照明方向を $(P, Q) = (-24, 97)$ にし、観測者の方向となす角を 45° にした場合をとりあげよう。図11に反射率地図を、図12に入力画像を、図13, 14にその結果を示す。

5. おわりに

ここでは、濃淡情報を利用して、画像列から、円筒状物体の運動を理解する方法について述べた。円筒面に対しては、局所的な明るさの解析だけでは、照明条件の3つのパラメータがわからない。そこで、反射率地図法を拡張するために、大局的な明るさの情報として、最も明るい母線による拘束条件をここでは利用した。この条件を利用すると、底面の向きの決定が容易になると同時に複数の候補の中から真の解をえる事ができる。

更に、物体の面の反射係数が未知の場合でも、底面積や母線の長さ等の幾何学的パラメータが不変である事を利用して ρ I の値を決定した。 ρ I の信頼性は、照明方向と観測者の方向となす角度に依存する。また、各点の法線ベクトルの値は ρ I の値を決定する際の変差に対して、それ程影響

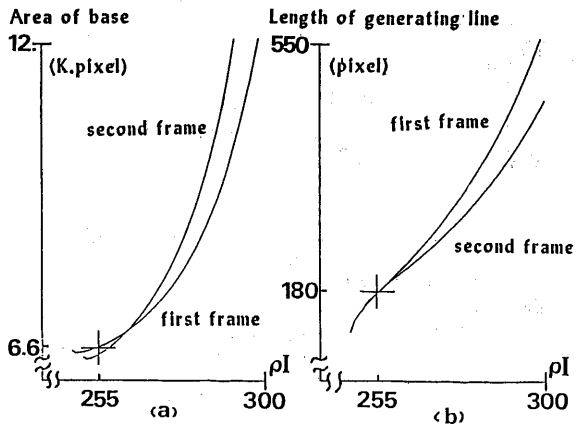


図14. 図12の入力画像に対する結果

を受けない。

本文では主に濃淡情報を利用した解析が中心であったが、形の情報の解析による運動の理解も重要である。[3]現在の所、物体の幾何学的パラメータの不変性だけを利用してはいるが、将来、この形と濃淡情報共に利用した解析が望まれる。我々は、円筒状の物体に対する運動解析について研究してきたが、このほとんどの部分の考えは、同様のクラスの物体、例えば円錐状の物体に対しても有効である。

参考文献

- [1] Ullman, S.: The Interpretation of Visual Motion, MIT Press, Cambridge MA, 1979.
- [2] Nagel, H. H.: Image Sequence Analysis: What Can We Learn from Applications?, in Huang, T. S. (Ed.): Image Sequence Analysis, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1981.
- [3] Asada, M. And Tsuji, S.: Inferring Motion of Cylindrical Object from Shape Information, Proc. IJCAI83, 1983.
- [4] Pentland, A. P.: Local Shading Analysis, SRI Technical Note 272, 1982.
- [5] Horn, B. K. P.: Understanding Image Intensities, Artificial Intelligence, Vol.8, pp.201-231, 1977.
- [6] Asada, M and Tsuji, S., "Inferring of Motion of Cylindrical Object from Shading." In Proc. IEEE Conf. CVPR, June, 1983.