

二次元濃淡画像より三次元形状の再構成

池内克史

(電子技術総合研究所)

そのコンピュータ・ビジョンへのうめこみを検討する。

1. はじめに

本研究は、二次元濃淡画像から主に反射率地図 (Reflectance Maps) なる拘束 (Constraints) を用いて三次元形体を再構成しようとするものである。

1. 1 人工知能研究の流れ

1960年代、大学生レベルの知識をプログラムの中にうめこむことを目標としていた人工知能研究も、1970年代後半以降、常識のインプレメントを目標とするようになったと言われる。^[1] 常識の中に複雑にからみ合っており、それを人間が無意識のうちに使用している拘束 (constraints) を抽出し、それをプログラムの中にうめこむのである。Minskyによれば^[2]、この回帰現象は、専門的な知識よりも常識的な知識をつくり上げることの方が難しいことを示しているのである。即ち、常識の中には多くの異なった知識が存在し、それらが複雑にからみ合っている、その中から有用な拘束を切り出すのが非常に難しいからである。

さて、人間が網膜上に投影された二次元情報を解釈して三次元記述を得る際にも、多くの常識を駆使していると言われる。これらの常識として、両眼視差、Line Label, texture, contour, shading, motion 等からの常識があると言われる。^[3] これらの常識の中にも多くの拘束が存在するはずであり、これらの拘束を見つけ出せば、それらを利用してコンピュータ・ビジョンがつけられる。

本論文では、濃淡情報 (Shading Info.) についての常識に注目する。この濃淡情報を利用するための拘束を抽出し、

1. 2 濃淡情報からの形体再構成

濃淡情報のコンピュータ・ビジョンへの応用は、1970年 Horn^[4] によって始められた。照明の方向、被写体の反射係数、そして被写体の濃淡情報が既知の場合には、被写体の面の傾きが非線形-階偏微分方程式としてモデル化できることに着目し、この偏微分方程式を特性曲線 (Characteristic Strips) に沿って解いた。

Hornのアルゴリズムは、濃淡情報が単にエッジ等の領域の周辺部の特徴理解に役立っただけでなく、直接領域内部の理解にも役立つことを示した点に特に大きな意義があった。

しかし、コンピュータ・ビジョンの一部として使用するには、2つの欠点があった。まず一つは、ある解が既知の点から放射状に特性曲線に沿ってくり返し法で解を求めて行く際、新しい点での解は特性曲線上の1つ手前の点での解にのみ依存することである。従って、途中にノイズ等が存在した場合、誤差が蓄積してしまふことである。オ2点は、上記と関連して、領域の周辺では多くの場合輪数線 (Silhouette) が存在し、その輪数線に対応する面番上では法線の方が一意に定まるにもかかわらず、そこでは微係数が無限大となるため、その情報を有効に利用し得ないことである。

上記の欠点を克服すべく諸研究がなされたがそれらは大別して3つのグループに分けられる。まず一つは、Hornの原モデル下で、アルゴリズムの改良を試みるもの。(Woodham^[5], Shust^[6])

Brooks^[6] これらの研究は、面素の法線ベクトルを定める際、そこに影響をおよぼす点が Horn の方法では、単に特性曲線上のとなりの点であるのに対し、より多くの点から影響をうけるようにすることでノイズに強い方法をつくり出そうとした。すなわち、ある面素に影響を与える近傍を広げることにより、ノイズの影響を平均化しようとした。

一方、オ2のグループは、ある地点で得られる濃淡情報を増加させることにより局所的な計算 (local parallel) で済むようにすることで Horn のアルゴリズムの欠点を克服しようとした。被写体とカメラの位置は固定しておいて、光源の方向のみを変化させて、同一の被写体の2枚以上の画像情報を得ることにより解を求める手法を提案した。この手法は、photometric stereo と呼ばれる。ここで注意しなければならないのは、通常のステレオ法と異って被写体とカメラの位置は変化させないことである。変化させるのは光源の方向だけである。故に、2枚の画像の同一の地点が常に同一の面素に対応するので通常のステレオ法で問題となる2画像の対応づけが省略できる。Photometric Stereo は Woodham^[7] により提案され Ikenchi^[8], Silver^[9] により展開された。本論文のオ3章はこれについて検討する。

オ3のグループとして、Horn の手法が利用することのできたが、た輪敦線から形体を求めようとした Marr^[10], Barrow & Tenenbaum^[11] の研究がある。しかし、彼らは単に輪敦線の形状のみから形体を推定しようとし、オ1のグループが提案した手法との融合を試みながら、たためにある程度の成功しかあさめていない。オ4章ではこの融合を試みる。

2. 道具だて

2.1 正射投影法

本論文では、カメラと被写体の関係をあらわすモデルとして正射投影法を使用する。被写体がカメラとの距離に比して小さい場合この近似法が有効となる。

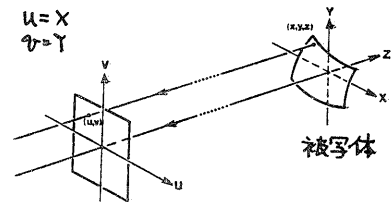


図1 正射投影法

(u, v) は画像上の、 (x, y, z) は被写体の存在する空間の座標系である。点 (x, y, z) は、 Z に無関係に画面上の点 (u, v) に投影される。この投影法の下では視線は常に画面に直交し、かつ Z 軸と平行である。

2.2 ガウス球

単位半径をもつ球上の点によ、て面素の方向を表現する。この球のことをガウス球と呼びこの写像をガウス写像と言う。^[12]

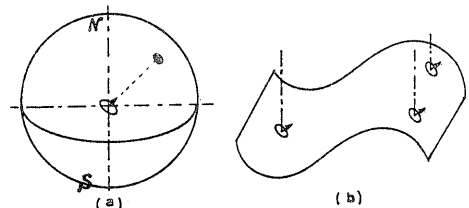


図2 ガウス球

視線方向をこの球の SN 軸とする。面素がこの球の中心にあるとする。この時面素上に立つ単位法線ベクトルの終点はガウス球面上のどこかの点と一致する。この球面上の点でもってその面素の方向をあらわす。観測者中心座標系とも呼ばれる。

2. 3 反射率地図

被写体の見かけの明るさは、被写体表面の材質および視線方向、面素の法線方向、光源方向がありなす3つの角によつて定まる。^[2,13] 正射投影法の近似の下に、さらに光源と被写体の距離も被写体の大きさに比して十分遠いとするれば、(視線の方向だけでなく、)光源の方向も被写体の面素の空間上の位置と無関係に定まることになる。従つて、ガウス球面上の点によつて上記の3つの角の關係が表示でき、表面の材質が既知であればガウス球上に被写体の見かけの明るさ分布をプロットできる。

ガウス球を平面に写像する。面素の方向をガウス球面上の点で表現する際には、球表面上の点にのみ興味があり、内部の点は必要である。従つて球面を一定の方法で2次元に写像して計算機に記憶させる方が有利である。この写像された点は球面上の点と一対一に対応するのでこの平面上の点によつても、上記3つの角の關係を表わせる。又、この平面上に被写体の明るさ分布をプロットし得る。このプロットした結果を広義の反射率地図と呼ぶ。

本論文では、2つの写像法を使用する。1つは、正射投影法である。この投影法はガウス球の北極での接平面へ北半球上の点を球の中心から投影する。結果として得られる2次元平面上の点を (p, q) とすると、

$$\begin{aligned} p &= \frac{\partial z}{\partial x} \\ q &= \frac{\partial z}{\partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

となることが容易にわかる。この平面は、Huffman, Mackworth がシーンの解析に使用していたグラディエント空間と同一のものである。Hornは、この平面上に明るさ分布をプロットしてこれを(狭義の)反射率地図(Reflectance Maps)と名づけた。^[14,15] 3章で使用する。

2つは、極射影法である。この投影

法は、ガウス球の北極でこのガウス球に接する接平面に球上の点を南極から投影する。結果として得られる2次元平面上の点を (f, g) とすれば、

$$\begin{aligned} f &= 2 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} - 1 \right] / \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right] \\ g &= 2 \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} - 1 \right] / \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

となる。もちろんこの (f, g) 平面にも被写体の明るさ分布をプロットできる。この極射影平面上の反射率地図は、4章で使用する。

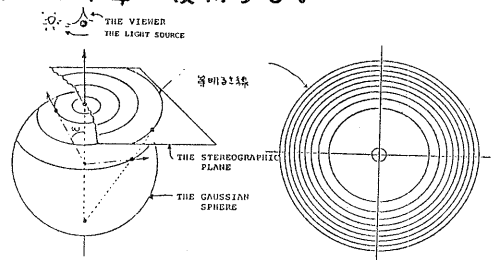


図3 反射率地図

3. 複数濃淡画像からの3次元再構成 (Photometric Stereo 法)

3.1 Photometric Stereo の原理

Photometric Stereo とは、同一被写体を同一方向から光源の状態を変化させて、た複数枚の画像から面素の方向を定めようとするものである。^[7] 使用する拘束は、反射率地図だけであり、局所的な計算だけで面素の方向が定まってしまう。また Photometric Stereo は、通常の二眼のステレオ法のように得られた画像間に視差がある、というようなことなく、各画像上の同一の位置にある画素は、全て被写体の同一部分に対応している。従つてオンラインでの計算量が非常に少なく、工学上応用しやちりという利点もある。

さて、Photometric Stereo についてもう少し詳細に検討する。反射率のわかってる被写体を既知の方向の光源から照明する。従つて、我々はグラディエント空間に反射率地図が描ける。次

に、画像上のある画素 (x_0, y_0) である
明るさ $E_1(x_0, y_0)$ を観測したとしよう。
この情報はその画素の傾きが、反射率
地図上の

$$R_1(P, \theta) = E_1(x_0, y_0) \quad (3)$$

に対応する等あかるさ線上のどこかの
点 (P, θ) に対応することと教える。
 R_1 は、この際の光源方向による反射率
地図。言い換れば、その情報を得る以
前はグラディエント空間上の全ての点
が解になり得たのが、反射率地図と観
測値 E_1 により、上記空間の部分空間で
ある(3)式を満たす点の集合に拘束
されたのである。同様に θ の方向の
光源から被写体を照明し、上記 (x_0, y_0)
の画素から $E_2(x_0, y_0)$ を得たとすると

$$R_2(P, \theta) = E_2(x_0, y_0) \quad (4)$$

この2つの等あかるさ線の交点が解。
すなわちその面素の方向を手える。実
際、図4に示されるように、 R_1, R_2 等
の非線形性のために、 θ の光源による
情報が必要となる。

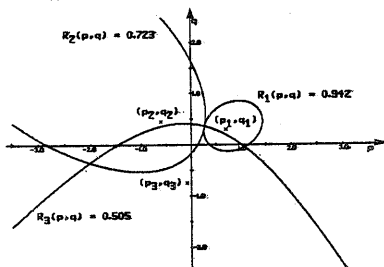


図4
Photometric
Stereo

3.2 ルックアップテーブル

上節で図示した方法を実用化する場合
には、Ikeuchi^[8], Silver^[9]が行ったよ
うにルックアップテーブルを利用する
のが有利である。すなわち、正射投影
遠光源が仮定できるなら、画像上の被
写体のどの画素についても同一の反射
率地図が適用できる。従ってグラディ
エント空間上のおおのの点 (P, θ) で
明るさの3組 (E_1, E_2, E_3) を計算し、
逆に、この3組から (P, θ) を引け

る表の形にまとめて計算機に記憶して
おくのである。こうすれば、オンライ
ン処理としては、表をひく操作だけと
なり、面素の方向が与えられる高速に行
なえる。

3.3 Photometric Stereoの応用例

Photometric Stereoにより金属物体の
傾きを求めた例を述べる。一般に金属
面には光沢が存在し、この光沢による
全反射のため通常のレンジファインダ
等による測定が難しい。Koshikawa^[16],
Ikeuchi^[8]はこの全反射をむしろ積極
的に利用して、金属物の傾きを定める
ことを提案している。

Ikeuchi^[8]は測定室の天井に光度分
布をつくり出し、この天井が金属面に
うつる様子を天井につけた穴からTV
カメラで観測した。すなわち、金属面
の面素の傾きにに応じて、その面素は天
井の異なった部分をうつし出すことにな
る。この際、天井の各部分の光度が異
なれば面素の方向に応じて、観測され
る反射光の照度に変化し、反射率地図
が得られることになる。この反射率地
図をもとにPhotometric Stereoを適用し
面素の方向を決定した。図5に光源、

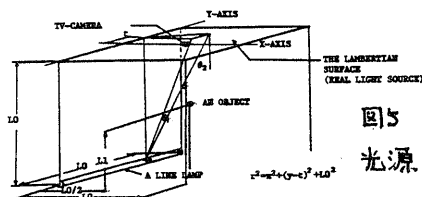


図5
光源

図6に3
つの反射
率地図を
重ねたも
のを示す。
実際、図
6をルッ
クアップ
テーブル
にまとめ
あげた。

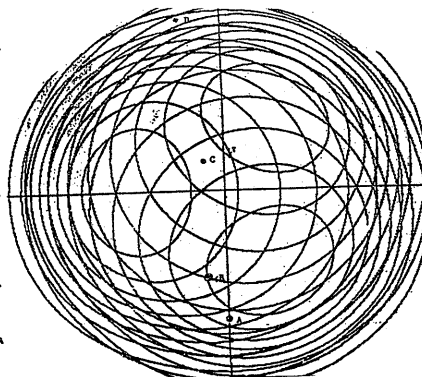


図6 3つの反射率地図

図7は、ボールベアリングの金属球を被写体として天井下において得られた光源下のおおのの光度分布。中央部のノイズはTVカメラの穴に対応する。



図7 光度分布

図8は、図7の光度分布より得られた面素の方向を針表示であらわしたもの。図9は、図8の針(P, θ)を積分して、面の形状を再現し、誤差を評価したものの。

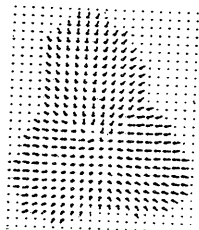


図8 得られた面素の方向

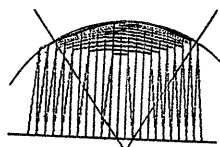


図9 復元された形状

この手法の1つの応用として、ロボットの目への応用がある。それに目を向けた例として、図10は、ボルト、ナットの山である。この山を先の光源下におき面素の方向を定めたのが図11、面を再現したのが図12である。

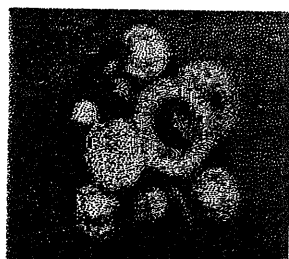


図10

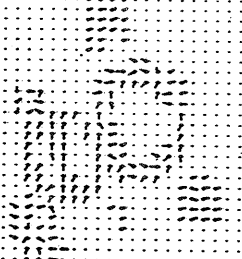


図11

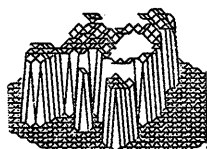


図12

本手法は、金属面の検査にも使用できる。すなわち、金属面にキズとかさびがあつた場合、得られる照度の3つ組が表になり組合せになり解が得られないからである。図13のホックの下部にキズがあり、図14で解がその部分で求まていない。また、刻印の存在のため、面素の方向が乱れている。

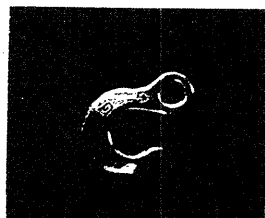


図13

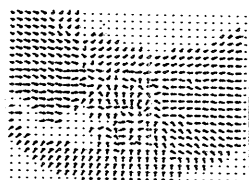


図14

4 単一画像からの再構成

4.1 なめらか仮定

単一画像から三次元形状を再構成する場合、Photometric Stereoと比べて、もう少し強い仮定をおかなければならぬ。ある画素からの1つの明るさ情報は、解が反射率地図上の1本の等あかるさ線上にのっているというだけのことでしか教えないからである。被写体はなめらかな表面をもつという仮定をおく。この仮定を拘束としてとりまとめ問題解決を試みる。

なめらか仮定は、いろいろな形の拘束にとりまとめられている。Horn^[2]はなめらか仮定を、特性曲線が拡張できるという形の拘束にしたあげた。Strat^[5], Brooks^[6]は、任意の閉ループに沿った(P, θ)の線積分が0になるという形の拘束を導びいた。

我々の場合、このなめらか仮定が、2つの性格の異つた拘束を生み出すことに注目する。1つは、外縁線拘束(occluding Boundary Constraints)と呼ぶもの。他方は、なめらか拘束(Smoothness Constraints)である。この外縁線拘束を表現したため、P- θ 空間を放棄しS-g平面を使用する。

4.2 外縁線拘束

外縁線 (Occluding Boundary) とは、画像上で輪紋線 (Silhouette) を形成することになる、3次元被写体上の線のことである。

なめらかな被写体の外縁線上においては、そこでの面素の傾きが、画像上に写し出された輪紋線の形状から定まる。^[10,11] まず①に、外縁線上では、

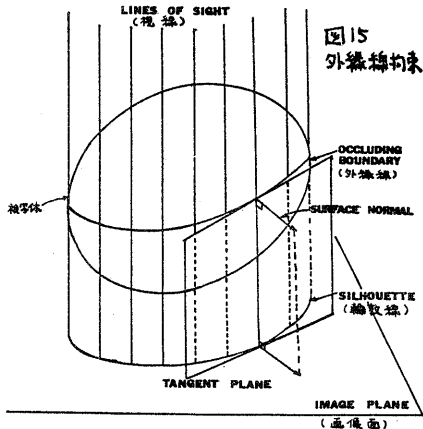


図15
外縁線拘束

視線は被写体と接する。故に、視線は外縁線上の点での接平面上に存在する。もちろん、ここでの面素上の法線は、この接平面、従って視線に直交する。②に、全ての視線は平行である。従って、外縁線、視線、輪紋線から1つの円筒面が形成され、視線はその母線となる。従って、1つの視線上の外縁線における接平面と輪紋線における接平面は一致する。③に、視線は、画像面に直交する。従って先の接平面は輪紋線の接線として観測される。以上の議論より、輪紋線の単位法線ベクトルをそれに対応する外縁線上の面素における単位法線ベクトルとすることが出来る。これを外縁線拘束と呼ぶ。

さて、この外縁線拘束は、グラディエント空間では表現できない。外縁線上では、 z の微分が無限大となるため、 (p, q) 座標を用いて面素の方向を表現できないからである。Horn^[5], Szel^[6], Brook^[6] のアルゴリズムは

全てグラディエント空間でしか有効でなく、従って外縁線拘束をアルゴリズム中にとり入れることができなかった。

外縁線上の面素の法線ベクトルは、ガウス球上の赤道上的点として表現される。従って、グラディエント空間のような心射投影でなく、極投影等を用いれば、これらの点を有限の点として表現できる。この理由から、本稿では一般によく使用されているグラディエント空間 ($p-q$ 空間) を放し、極投影平面 (f, g) を使用する。もちろんこの $f-g$ 平面でも反射率地図が定義できる。

4.3 なめらか拘束

なめらか拘束とは、一般に被写体の近傍面素間の面素の方向の関係を規定するものである。我々の $f-g$ 空間では Horn, Brook, Szel の提案しているものは使用できない。

さて、なめらか仮定とは、「被写体が、面の傾きの連続であるような面を持つであろうと仮定する。」ことである。^[20] 本質的に情報の欠落した一枚の次元画像から3次元形状を再構成する際には、こういうた強い仮定もやむを得ないと思われる。

このなめらか仮定より、我々のなめらか拘束が出てくる。面素の傾きを (f, g) と表わし、位置を十分小さな格子間隔で格子化する。同一の等あがる線上にのる (f_{ij}, g_{ij}) のうち

$$(f_{in,j} - f_{ij})^2, (g_{in,j} - g_{ij})^2$$

といふ項をなるべく小さくする f_{ij}, g_{ij} を選ぶということになる。これをなめらか拘束とする。

このなめらか拘束は、反射率地図からの拘束と共同して、くり返しアルゴリズムを形成する。このなめらか拘束のために、ある面素での解が近傍での解のとり得る範囲を拘束するので、拘

束の伝播 (Propagation of Constraints) の一例とも言える。⁽²⁰⁾

4.4 拘束伝播アルゴリズム

本アルゴリズムは、反射率地図、なめらか拘束、外縁線拘束の3拘束を使用する。このうち、反射率地図となめらか拘束はアルゴリズムの本体となり外縁線拘束は、境界条件を与えることになる。

なめらか拘束と反射率地図とよりくり返しアルゴリズムを導出する。なめらか拘束によるなめらかな面と近似解のへだたりは、

$$S_{ij} = [(f_{ijn} - f_{ij})^2 + (f_{ijn} - f_{ij})^2 + (g_{ijn} - g_{ij})^2 + (g_{ijn} - g_{ij})^2] / 4 \quad (4)$$

とあらわせる。一方反射率地図にもとづく近似解の誤差は、

$$r_{ij} = [E_{ij} - R(f_{ij}, g_{ij})]^2 \quad (5)$$

E_{ij} は画素 (i, j) における観測された濃淡情報、 R は反射率地図である。

$$e = \sum_i \sum_j S_{ij} + \lambda \sum_{ij} r_{ij} \quad (6)$$

を最小とするような (f_{ij}, g_{ij}) を解とする。これは最終的に次のようなくり返し計算をしていけば求まる。

$$\begin{aligned} f_{ij}^{n+1} &= f_{ij}^{*n} + \lambda [E_{ij} - R(f_{ij}^*, g_{ij}^*)] \frac{\partial R}{\partial f} \\ g_{ij}^{n+1} &= g_{ij}^{*n} + \lambda [E_{ij} - R(f_{ij}^*, g_{ij}^*)] \frac{\partial R}{\partial g}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$f_{ij}^* = [f_{ijn} + f_{ijn} + f_{ijn} + f_{ijn}] / 4$$

$$g_{ij}^* = [g_{ijn} + g_{ijn} + g_{ijn} + g_{ijn}] / 4$$

ある位置 (i, j) に周囲の情報が次々伝播して来てそこの濃淡情報とつり合いながら最終的な解へと収束していくので伝播アルゴリズムと呼ぶ。

4.5 実験

例1 乱反射球

例1では、アルゴリズムの収束性をチェックする。Lambert の反射特性をもつ表面でおおわれた球を、無限遠方の観測者が、観測者と同じ位置にある光源下で観測したとしよう。この状況下では観測者は全ての外縁線を見ることができる。図16に合成イメージを示す。

図16から2つの情報が得られる。1つは、各画素における濃淡情報。他方は輪数線形状から得られる外縁線上での面素の法線ベクトルである。前者は、(7)式の E_{ij} として、後者は領域条件として働く。図17に30回くり返し計算の結果、図18に収束のようす。図19に得られた法線ベクトルより再構成された球面を示す。

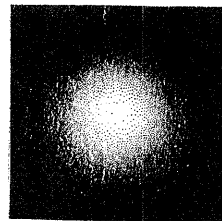


図16 合成イメージ
アルゴリズムへの入力

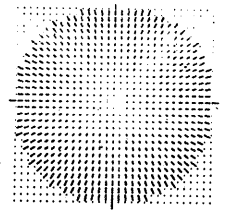


図17 アルゴリズムよりの出力

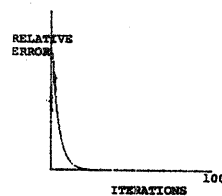


図18

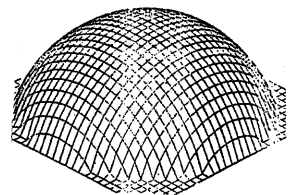


図19 再構成面

例2 走査型電子顕微鏡写真

走査型電子顕微鏡下の写真は、遠方観測者、観測者に近い光源なる仮定のなり立つことがあつてゐる。たとえば、図20は木の葉の若い芽の電子顕微鏡写真である。図21は、図20の入力より、先のアルゴリズムで再構成された形状である。

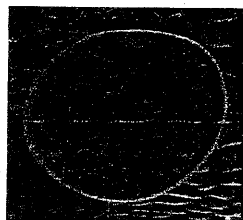


図 20 電線写真

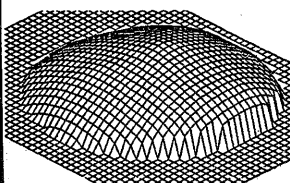


図 21 再構成形状

以上光源が観測者に近い場合のみととりあつた。それ以外の場合には画像に影が写る。この影線上では境界値が求まらない。こういった不完全な境界をもつ場合にもアルゴリズムは正しく収束することがわが、てゐる。^[20]

5. おまへ

2次元濃淡画像から3次元形状を再構成する2つのアルゴリズムを論じた。面素の傾きは2自由度あり、ある面素の濃淡情報はその自由度を1つ減らすだけである。オ1のアルゴリズムは、同一位置から同一被写体を、光源方向を変化させて得た複数の画像により、この不足をおぎな、た。オ2のアルゴリズムでは、被写体がなめらかな面を持つという仮定から、新たになめらかな拘束と外縁線拘束なる2つの拘束を導出し、これにより自由度を下げた。

特に、オ2のアルゴリズムは拘束の伝播原理という原理で他の多くのビジョン分野のアルゴリズムと結びついている。^[17] Marr & Poggio のオ1ステレオアルゴリズム、^[18] Horn の明るさ再現アルゴリズム、^[19] Horn & Schunk の動画画像解析アルゴリズム、^[20] Ikeuchi のテクニクより3D解析アルゴリズム、等全てこの原理で説明できる。

御検討いただいた MIT の Horn 教授、電機研視覚情報研究室長白井博士、同研究室の諸氏に感謝します。

REFERENCES

- [1] Minsky, M.L., "Computer Science and the Representation of Knowledge," in The Computer Age: A Twenty-Year View, M.L. Dertouzos & J. Mose (Ed.), MIT Press, Cambridge Mass 1980.
- [2] Horn, B.K.P., "Obtaining Shape from Shading Information," in The Psychology of Computer Vision, P.H. Winston (Ed.), McGraw-Hill, New York, 1975.
- [3] Marr, D., "Early Processing of Visual Information," Phil. Trans. Roy. Soc., B. 275, 1976.
- [4] Woodham, R.J., "A Cooperative Algorithm for Determining Surface Orientation from a Single View," Proc. of Fifth IJCAI, Aug. 1977.
- [5] Strat, T.M., "A Numerical Method for Shape from Shading from a Single Image," S.M. Th., EECS-MIT, Jan. 1979.
- [6] Brooks, M.J., "Surface Normals from Closed Paths," Proc. of Sixth IJCAI, Aug. 1979.
- [7] Woodham, R.J., "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Image," Optical Engineering, Vol. 19, No. 1, Jan/Feb 1980.
- [8] Ikeuchi, K. & Horn B.K.P., "An Application of the Photometric Stereo Method," MIT-AI Memo 539, Aug. 1979.
- [9] Silver, W., "Determining Shape from Reflectance Using Multiple Images," S.M. Th., EECS-MIT, Jan. 1980.
- [10] Marr, D., "Analysis of Occluding Contour," MIT-AI Memo 372, 1976.
- [11] Barrow, H.G. & Tenenbaum, J.M., "Reconstructing Smooth Surface from Partial, Noisy Information," Special Issue on Vision, Artificial Intelligence, 1981.
- [12] Hilbert, D. & Cohn-Vossen, S., Geometry and the Imagination, Chelsea Publishing Co., New York, 1952.
- [13] Nicodemus, F.E., et. al., Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance, NBS Monograph 160, NBS-U.S.Gov. 1977.
- [14] Horn, B.K.P. & Sjoberg, R.W., "Calculating the Reflectance Map," Applied Optics, Vol. 18, No. 11, June 1979.
- [15] Horn, B.K.P., "Understanding Image Intensities," Artificial Intelligence, Vol. 8, No. 2, 1977.
- [16] Koshikawa, K., "A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Object," Proc. of Sixth IJCAI, Aug. 1979.
- [17] Marr, D. & Poggio, T., "Cooperative Computation of Stereo Disparity," Science, Vol. 194, Oct. 1976.
- [18] Horn, B.K.P., "Determining Lightness from an Image," Computer Graphics and Image Processing, Vol. 3, No. 1, Dec. 1974.
- [19] Horn, B.K.P. & Schunk, B.G., "Determining Optical Flow," Artificial Intelligence, Special Issue on Vision, 1981.
- [20] Ikeuchi, K., "Shape from Regular Patterns-An Example of Constraints Propagation in Vision," Proc. of Fifth IJCAI, Dec. 1980.
- [21] Ikeuchi, K., "Numerical Shape from Shading and Occluding Contours in a Single View," MIT-AI Memo 566, Feb. 1980.