動的な3次元累積合成機構を有する微分両眼視法[†]

安 藤 繁*・田部井 俊 幸**

Differential Stereo Vision Systems with Dynamical
3-D Reconstruction Scheme

Shigeru ANDO* and Toshiyuki Tabei**

The purpose of this paper is to solve a narrow depth range problem of the differential stereo vision systems which has been regarded as an essential drawback of the principle. It is enabled by extracting a reliable depth slice from series of measurements and by accumulating them dynamically while changing a convergence angle of the stereo cameras. For this purpose, three self-evaluators for 1) feasibility, 2) consistency, and 3) error variance of measurements are defined by statistical consideration of the estimators. By combining these quantities, we separate reliable depth regions from ineffective ones of excessive depth. Then, these slices are accumulated to build up a total 3-D shape. The accumulation algorithm is nearly optimum because it is derived from least square criteria based on the evaluated statistics. Estimating inter-slice shifts internally, it can work even if the absolute depth of the slices are unavailable. According to the several experiments, we found the proposed method was added great performance owing to absolute accuracy improvement by implicit averaging effects and to relative accuracy improvement by the range expansion.

Key Words: 3-D measurement, stereo vision, differential vision algorithm

1. はじめに

画像情報を用いた立体再現の問題には計算機視覚の研究に関連して多くの報告がある^{1)~4)}。このなかで両眼視法は前提となる仮定や先験情報が少ない点で計測分野での応用に適し、かつ光沢感などの特徴抽出能力⁵⁾を兼備する利点がある。従来著者らは両眼視法において微分ずれ解析の方法^{5)~7)}を両眼映像場の対称な微視的恒等関係で表現し¹²⁾、主に回路網で実現することを狙った並列型アルゴリズムを開発してきた^{13)~15)}。この方法は限られた対象の表面形状計測手法としてばかりでなく、将来その実時間的高速性を生かして人間の視覚系に類似な汎用の動的3次元計測系への発展が望まれる。このためには微分両眼視法の原理的弱点である凹凸測定範囲の狭さの問題を解決する必要がある。この点に関して微分型算法においては分解能の段階的向上による反復整合法⁷⁾などが試みられているが、低域フィルタが左右対応に矛盾を導入する問題があるほか演算の高速化にも適していない。本論文では微分両眼視法の推定式の解析によって、(1)測定可能性の評価量、(2)仮定の正当性の評価量、(3)測定誤差分散の評価量を定め、測定範囲を逸脱する部分を排除し有効部のみを凹凸スライスとして抽出する方法を導入する。つぎに輻輳角を変更しつつ取得した凹凸スライス系列を累積合成して3次元形状を再構成する統計的に準最適なアルゴリズムを導出する。最後にこれらの理論を実験により確かめる。

本論文で対象とする立体はゆるやかな凹凸を有し表面に模様がある単一の自由曲面に限定している。表面の弱い光沢は許容するが、これによる両眼強度差の分布は模様の変化に比べてゆるやかと仮定する。また与えられた両眼輻輳角に対して両眼ずれがまったく生じないような平面を基準面と呼ぶ。この基準面が自由に

† 第25回、第26回計測自動制御学会学術講演会で発表
(昭61・7, 昭62・7)

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

** 電気通信大学 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

** The University of Electro-Communications, Chofu

(Received August 6, 1987)

(Revised January 25, 1988)

移動可能なように撮像系には両眼幅角のオンライン駆動機構が付属しているとする。

2. 凹凸スライス推定とその信頼度の自己評価

2.1 凹凸と両眼強度差の同時推定法

前論文¹⁴⁾で報告した凹凸と両眼強度差の同時推定法によると、両眼間隔 D 、基準面までの距離 H ($H \gg D$) の両眼撮像系を考え、両眼の中央で仮想的に観察される対象面画像を $f(x, y)$ とすると、左右画像 $f_L(x, y)$, $f_R(x, y)$ は局所的に $f(x, y)$ に対して対称な強度変化 $1 \pm \xi$ と対称な位置ずれ $\pm \Delta$ をともなった画像として

$$f_R(x, y) = (1 + \xi) f(x + \Delta, y) \quad (1a)$$

$$f_L(x, y) = (1 - \xi) f(x - \Delta, y) \quad (1b)$$

ただし、

$$\Delta = \frac{Dh(x, y)}{2(H + h(x, y))} \div \frac{D}{2H} h(x, y) \quad (2)$$

と書かれる。 $h(x, y)$ は基準面からの相対標高を示す。2式の和と差を和画像 $f_+(x, y)$ 差画像 $f_-(x, y)$ と定義し、1次近似により $f(x, y)$ を消去すると

$$f_-(x, y) = \xi f_+(x, y) + \Delta f_x(x, y) \quad (3)$$

の関係をj得る。 $f_x(x, y)$ は和画像の x 偏微分 (微分和画像で、本来 f_{+x} と記すべきもの) を示す。この式を着目点の近傍領域 Γ における最小2乗誤差条件

$$J = \iint_{\Gamma} \{\Delta f_x + \xi f_+ - f_-\}^2 dx dy = \text{minimum} \quad (4)$$

によって解くと、ずれ Δ と強度差 ξ は

$$\xi = \frac{S_{xx}S_{+-} - S_{+x}S_{-x}}{S_{xx}S_{++} - S_{+x}^2}, \Delta = \frac{S_{++}S_{-x} - S_{+x}S_{--}}{S_{xx}S_{++} - S_{+x}^2} \quad (5a, b)$$

ただし

$$S_{ij} \triangleq \iint_{\Gamma} f_i f_j dx dy, \quad i, j: +, -, x \text{ 添字} \quad (6)$$

のように求まる。(6)式は和画像、差画像、微分和画像の Γ 内での積和を表わす。

2.2 測定信頼度の自己評価

従来、微分両眼視法は原理上(3)式が成立する凹凸範囲が狭い問題と、近似が成立しないときに生じる意味のない解が正しい凹凸と見わけがつかないため対象物表面をあらかじめ測定可能範囲内に限定する必要があった。そこでわれわれは速度分布の時空間微分計測法¹³⁾において導かれた測定信頼度の自己評価量を参考に、無意味な結果と有効な結果とを測定系自身が判別分離するための評価量を導入する。

(1) 測定可能性の評価量

時空間微分法においては測定可能性の評価量として正規方程式の行列式 J_{DET} が用いられた¹³⁾。(4)式から得られる正規方程式にこれを当てはめると、

$$J_{\text{DET}} \triangleq S_{xx}S_{++} - S_{+x}^2 \quad (8)$$

を得る。Schwartz 不等式の等号条件より J_{DET} が零となるのは Γ 内のいたるところ

$$f_x(x, y) = c f_+(x, y) \quad (c: \text{任意定数}) \quad (9)$$

のときで、この解は x の指数関数だから、(4)式が解けるためには Γ 内で単一の指数関数で表わされないような複雑さを有する明度変化が必要である。 J_{DET} はこの条件の成立度を評価しており、着目点での測定可能性の大小を表現している。

(2) 仮定の正当性の評価量

評価関数 J に(5a), (5b)式を代入し最適条件下での残差2乗和 J_{RES} ¹³⁾を求めると、

$$J_{\text{RES}} \triangleq S_{--} - \xi S_{+-} - \Delta S_{-x} \quad (\xi, \Delta: \text{最適条件}) \quad (10)$$

が得られる。 J_{RES} は一般にモデル外要因の混入の指標となるため、微小ずれ・微小強度差仮定の不成立、画素雑音、 Γ 内での凹凸や強度差の変動などを判断する基礎的情報となる。

(3) 測定誤差分散の評価量

(3)式の誤差の大半は Taylor 展開の高次項に由来するため、これを左辺に移項して等価的に差画像の雑音とみなすと¹³⁾、残差2乗和 J_{RES} はこの雑音の分散の面積分を表わす。これらはほぼ無相関と考えられるから、解 ξ, Δ 上の誤差 p, q の2乗和の期待値は近似的に

$$E[p^2 + q^2] = \frac{(S_{xx} + S_{++})J_{\text{RES}}\Gamma^{-1}}{S_{xx}S_{++} - S_{+x}^2} \triangleq J_{\text{ERR}} \quad (11)$$

(Γ : 近傍領域 Γ の面積)

と求められる。 J_{ERR} は個々の解 ξ, Δ に含まれる誤差の大きさを分散によって自己評価する量である。

2.3 測定結果の分類と凹凸スライス抽出

測定可能性の判定は画素雑音のみに起因する平均的 J_{DET} との比較による。すなわち和画像の画素雑音の自己相関関数を $\Psi(x, y)$ とすると、この値 J_{MIN} は相関関数の微分定理¹⁶⁾などを用いると近似的に

$$J_{\text{MIN}} \triangleq E[S_{xx}S_{++} - S_{+x}^2] \\ \doteq -\Gamma^2 \{\Psi_{xx}(0, 0) \Psi(0, 0)\} \quad (12)$$

と導かれる。画素雑音が独立で画素間隔を1と規格化した場合、雑音分散 σ^2 に対する右辺中括弧内の値は $\pi^2 \sigma^4/3$ であるから、判定条件は

$$J_{\text{DET}} \geq J_{\text{MIN}} \doteq \sqrt{3} \pi \sigma^2 \Gamma/3 \quad (13)$$

となる。 J_{ERR} は(13)式を満たし、画素雑音と近似誤

差が精度を支配する測定点で誤差の大きさを表わす。したがって許容限界の誤差分散 J_{MAX} をあらかじめ与えると、判定

$$J_{ERR} \leq J_{MAX} \quad (14)$$

によって信頼性のない結果が排除される。

(13), (14)式を用いると対象の凹凸と強度差の分布図は(1)条件が適切で信頼できる結果が得られた領域, (2)模様が存在からは測定可能なはずだが信頼できる結果が得られなかった領域, (3)適切な模様が存在せず測定が不可能な領域, の3種に分類される。(2)の原因としては Δ の過大さが大半を占めるほか, Δ の不連続や過剰強度差など不適切な状況一切が含まれる。この結果(1)とされた領域は Δ が微少な範囲に納まる凹凸スライスの中に含まれていて, 段差や模様の点でも適切な物体表面を表わすことになる。これを有効領域と呼ぶことにする。この領域では $h = 2H\Delta/D$ が基準面からの相対標高を与える。

以上の評価量と分類結果はつぎに述べる累積機構に伝達されるほか近傍領域サイズの適応的決定にも用いる¹³⁾。また凹凸過剰領域が画像の大半を占めたときの幅縁角や視点の飛越的変更などの発見的方法への利用が検討されている¹¹⁾。

3. 絶対標高分布とその最小2乗累積アルゴリズム

従来の微分両眼視法では(5)式で求めた凹凸をそのまま対象の標高としていた。しかし本論文では微分両眼視系に連結して絶対的な標高を形成し保持する機構があると考え。一般化して述べればこの機構は撮像系の幾何学パラメータ(位置, 方位, 凝視点など)をその制御下に置き, 微分両眼視法から得られる相対的かつ断片的な立体情報を再構成して, 広範囲でより絶対的な3次元情報を形成する。これは人間の漸増的な情報獲得の機構⁴⁾や外界座標中心の空間知覚能力^{9), 10)}に類似点を有するため, これを将来的に模擬する意図も含まれている。ここでは単純に両眼幅縁角のみを制御し, 深い奥行き立体情報を段階的に得る方式について議論を限定する。簡単のため凹凸と同時に求まる両眼強度差のこの機構への利用は考えない。各撮像ごとに基準面を凹凸スライスの厚みより十分狭い幅で移動させる。最初の時点での基準面の絶対的奥行きは既知と考える。これは幅縁角の絶対設定精度を不要とする。さらに幅縁角駆動量からの基準面距離決定には誤差が多い状況を想定する。

3.1 最小2乗誤差凹凸累積法

ここでいう累積とは凹凸スライスとその誤差分散分

Fig. 1 Geometry and a block diagram of a binocular vision system with dynamical 3-D reconstruction scheme

布の対から絶対標高分布とその誤差分散分布の対を合成することである。いま i 回目を得られた凹凸スライスを考え, その有効領域を ω_i , 相対標高分布を $h_i(x, y)$, その誤差分散分布を $v_i^2(x, y) \triangleq 4\bar{H}_i^2 J_{ERR}/D^2$ とする。 $\bar{H}_i$ は i 回目の基準面までの距離を示す。幅縁角駆動によって設定した基準面距離の目標値は $\bar{G}_i$ であるが, 現実の設定値 $\bar{H}_i$ (未知) に至るまでに分散 σ_ε^2 の誤差の混入が予想される。現時点 i 回目までには有効領域 Ω_i において絶対標高分布 $H_i(x, y)$ が累積されており, その誤差分散分布は $V_i^2(x, y)$ であるとする。このとき真の絶対標高分布を $H(x, y)$ とし Fig. 1 を参照すると,

$$h_i(x, y) = H(x, y) - \bar{H}_i + \theta_i(x, y) \quad \text{in } \omega_i \quad (15a)$$

$$H_i(x, y) = H(x, y) + \theta_i(x, y) \quad \text{in } \Omega_i \quad (15b)$$

$$\bar{H}_i = \bar{G}_i + \varepsilon_i \quad (15c)$$

ただし

$$E[\theta_i(x, y)^2] = v_i^2(x, y) = 4\bar{H}_i^2 J_{ERR}/D^2$$

$$E[\theta_i(x, y)^2] = V_i^2(x, y)$$

$$E[\varepsilon_i^2] = \sigma_\varepsilon^2$$

のように雑音 $\theta_i(x, y)$, $\theta_i(x, y)$, ε_i を含む統計モデルが成立すると考えられる。これからつぎのように未知量 $H(x, y)$, $\bar{H}_i$ の推定を行う。仮定により ω_i と Ω_i には十分な重なりがあるから, (15a), (15b) 式の差と (15c) 式を組み合わせた連立方程式

$$\begin{cases} H_i(x, y) - h_i(x, y) = \bar{H}_i + \theta_i(x, y) - \theta_i(x, y) \\ \quad \text{in } \omega_i \cap \Omega_i \\ \quad (\cap: \text{共通領域}) \\ \bar{G}_i = \bar{H}_i - \varepsilon_i \end{cases}$$

が立つ。すべての雑音は独立とみなせる(注1)から、右辺の $\Theta_i(x, y) - \theta_i(x, y)$ は ε_i と独立で $V_i^2(x, y) + v_i^2(x, y)$ の分散をもつ。つぎに示されるように $v_i^2(x, y)$ は推定式の荷重に寄与するだけだから、この式に含まれる $\bar{H}_i$ を目標値 $\bar{G}_i$ で置き換えて

$$v_i^2(x, y) = 4\bar{G}_i^2 J_{ERR}/D^2$$

と近似しても影響は少い。このとき $\bar{H}_i$ の最小2乗推定 $\bar{K}_i$ は容易に

$$\bar{K}_i = \frac{\iint_{\omega_i \cap \Omega_i} (V_i^2 + v_i^2)^{-1} (H_i - h_i) dx dy + \sigma_G^2 \bar{G}_i}{\iint_{\omega_i \cap \Omega_i} (V_i^2 + v_i^2)^{-1} dx dy + \sigma_G^2} \quad (16) \nearrow$$

$$H_{i+1}(x, y) = \frac{V_i^2(x, y) H_i(x, y) + \{v_i^2(x, y) + \sigma_K^2\}^{-1} \{h_i(x, y) + \bar{K}_i\}}{V_i^2(x, y) + \{v_i^2(x, y) + \sigma_K^2\}^{-1}} \quad \text{in } \omega_i \cap \Omega_i \quad (18a)$$

$$H_{i+1}(x, y) = h_i(x, y) + \bar{K}_i \quad \text{in } \omega_i \cap \bar{\Omega}_i \quad (18b)$$

$$H_{i+1}(x, y) = H_i(x, y) \quad \text{in } \bar{\omega}_i \cap \Omega_i \quad (18c)$$

($\bar{\Omega}_i, \bar{\omega}_i$ は Ω_i, ω_i 以外の領域を示す)

それらの誤差分散は

$$V_{i+1}^2(x, y) = \{V_i^2(x, y) + \{v_i^2(x, y) + \sigma_K^2\}^{-1}\}^{-1} \quad \text{in } \omega_i \cap \Omega_i \quad (19a)$$

$$V_{i+1}^2(x, y) = v_i^2(x, y) + \sigma_K^2 \quad \text{in } \omega_i \cap \bar{\Omega}_i \quad (19b)$$

$$V_{i+1}^2(x, y) = V_i^2(x, y) \quad \text{in } \bar{\omega}_i \cap \Omega_i \quad (19c)$$

で与えられる。

(16), (18), (19)式の累積法はつぎのように説明される。まず有効領域 ω_i と累積有効領域 Ω_i の重なった部分の標高差から基準面距離 $\bar{H}_i$ を推定する。重なりが存在しない場合、設定値 $\bar{G}_i$ がそのまま用いられる。 $\bar{H}_i$ の推定値 $\bar{K}_i$ は累積絶対標高分布の標高座標に関して凹凸スライスの基準面がどの位置にあるかを表わしている。したがって $\bar{K}_i$ を相対標高 $h_i(x, y)$ に加えると ω_i 内で絶対標高分布が推定されたことになる。 ω_i と Ω_i が重なった領域ではこれをすでに累積済みの絶対標高と荷重平均することにより累積絶対標高の精度が向上する。これが(18a), (19a)式の演算である。一方 Ω_i と重ならない ω_i の部分では新たに推定された絶対標高を用いて累積絶対標高の有効領域を拡大することができる。これが(18b), (19b)式の演算である。 ω_i 以外の部分では新たな標高情報の獲得はないから累積は生じない。明らかに累積有効領域 Ω_i は広義単調に拡大し、累積誤差分散 $V_i^2(x, y)$ は広義単調に減少する。領域更新とその初期条件は

$$\Omega_{i+1} = \Omega_i \cup \omega_i, \quad \Omega_1 = \phi \quad (\text{空領域}) \quad (20) \nearrow$$

(注1) 近傍領域 Γ が小さく、かつ重複の防止と高速化のため間引き計算¹³⁾を行うことを前提としている。

と得られる。この式は、相対標高と累積絶対標高の差で求まる基準面距離と、基準面距離の目標値との、誤差分散の逆数を重みとする平均にあたる。この $\bar{K}_i$ に含まれる誤差は有効領域の重なり面積が広いいため各点での標高誤差とは相関が弱い。重なり面積を狭められるのは基準面距離の設定精度が高い場合であるが、このときには $\bar{K}_i$ の誤差には設定誤差が支配的である。すなわち本方法が機能しうる条件において $\bar{K}_i$ の誤差は標高誤差に無相関とみなせる。このとき

$$\sigma_K^2 \triangleq \left\{ \iint_{\omega_i \cap \Omega_i} (V_i^2 + v_i^2)^{-1} dx dy + \sigma_G^2 \right\}^{-1} \quad (17)$$

とおくと、 $H(x, y)$ の最小2乗推定すなわち $i+1$ 回目の累積絶対標高は

ととする。初期 $H_1(x, y)$ は任意である。ただし最終累積結果の有効領域以外にはこの初期標高値が変らずに残る。終了条件には(1)一定範囲の基準面移動の後、(2)新たな有効領域が生じないとき、などの方法を用いる。

4. 実験

実験には2台の128×128素子CCDカメラを撮像距離 $H \approx 110$ cm, 両眼間隔 $D \approx 12$ cm の設定で用いる。カメラはステップモータ駆動の微動回転台に取り付け、両モータを逆相に回して輻輳角を可変する。ビデオ信号は8ビット量子化の後、左右の和と差と x 微分をとって計算機の積和ハードウェアに入力する。

4.1 J_{DET}, J_{ERR} の評価能力確認実験

ここでは黒色斑点模様を付した傾斜平面板を対象に用いて、相対標高と J_{DET}, J_{ERR} の関係を調べる。この実験は誤差分散として意味のある J_{ERR} の限界値を見積る意味ももつ。有効判断のしきい値 J_{MAX} は必ずこれより小さく選ばねばならない。Fig. 2(c)は横軸に対象の横座標、縦軸に Δ の平均値と標準偏差(対象の縦方向の繰返しによる)をプロットしたもの、(a)は同様に縦軸に J_{DET} を、(b)は縦軸に J_{ERR} をプロットしたものである(グラフの非対称性は基準面の湾曲による)。 J_{DET} がほぼ一様な値となっているのは斑点模様の付与によっていづれの場所でも測定可能であることを示す。やや増減があるのは、中央部では両眼ずれが少なく左右の模様が整合して加算され強まるのに対し、周辺部では両眼ずれが大きく無相関に加算され弱まるためとみられる。一方 J_{ERR} は中央部で大きく減少する。これは両眼ずれが微分型算法の許容する範

Fig. 2 Examples of response of the proposed self-evaluators. The object is a tapered flat surface with random dot patterns. Cross-sections of distribution of (a) J_{DET} (columns indicate double length of the standard deviation), (b) J_{ERR} , and (c) Δ are plotted. $H=110$ cm, $D=12$ cm

囲に入って Δ が有効な値となったことを示している。Fig. 2(c)と比較するとこの点が確かめられる。有効な Δ の範囲において J_{ERR} が $|\Delta|$ の増加とともに大きくなるのは誤差の多くが Taylor 展開の高次項に由来することを示している。これ以上の $|\Delta|$ では J_{ERR} は飽和して誤差分散としての意味を失う。しかしこの部分での J_{ERR} は大きな値に分布するため、 J_{MAX} との比較により Δ が無効であることを判定できる。

4.2 凹凸スライスの抽出と累積実験

対象物体は約 10 cm 角の石膏製立方体で、表面に 1~3 mm 大の黒色斑点模様がランダムに付けてある。一つの頂点が撮像系を向くように置かれているため、凹凸スライスは三角形の帯状になると予想される。最初に手で基準面を頂点より 5 cm ほど奥に合せる。その後約 8 mm 間隔で前方に 10 回基準面を移動させながら撮像し、凹凸スライスを抽出する。基準面の設定誤差分散はおおよそ駆動系のバックラッシュに相当

Fig. 3 An example of depth-slice accumulation. The object is a plaster cube one of whose vertices faces the cameras. Perspective views of (a) 3rd slice, (b) 5th slice, and (c) 7th slice are plotted. Ineffective regions are indicated by the lowest plane. (d) The final result after 20 times accumulations

する 2 mm^2 の値を用いた。有効領域抽出のしきい値は前節の実験結果より $J_{MAX}=0.82$, $J_{MIN}=64.0$ とした。Fig. 3(a), (b), (c)に 3 回, 5 回, 7 回目に抽出された凹凸スライスの 3 次元プロットを示す。有効領域以外は基準面より一段低い平面で表示されており、三角形の帯状に浮上った部分が有効領域を示す。それ以外にも誤った有効領域が存在するが、その部分での J_{ERR} は通常大きいので累積の過程で無害化される。Fig. 3(d)が最終累積後の標高分布を示す。計算機内にはさらにこの標高分布に対応する誤差分散分布が求まっている。この結果のように、凹凸スライス重複部での平均化による絶対誤差の減少と凹凸範囲の拡大による相対誤差の減少との 2 面の効果から精度が向上することがわかる。

4.3 3 次元形状計測への応用例

前節の実験とはほぼ同じ条件下で、物体としてプラスチック製の顔マスク (Photo. 1) を置く。頬などの部分に模様が少ないため、プロジェクタで表面にランダムドット照明を与えて補った。顔マスクは鼻の先から両耳の面まで約 12 cm の標高差がある。これを約 4 mm 間隔で前に 20 回、最初の位置に戻って後に 20 回基準面を移動させながら撮像し累積する。前後に基準面移動を行うのは絶対精度向上のためである。一方前に移動した場合、はじめに有効領域が存在しない場

Photo. 1 An object and cameras for the experiment of Fig. 4

Fig. 4 An example of 3-D profile reconstruction for a "natural" surface. The object is a soft plastic mask shown in Photo. 1. Random dot patterns are projected on it to make up for little texture of the face portion. It required 40 slices to build up 12 cm range of depth. H, D: Same as Fig. 2

合があるため基準面移動量の推定ができず、設定値の誤差がそのまま累積誤差となってしまう。Fig. 4が累積結果の標高分布の3次元プロットである。無効領域は最下部の平面で表現されている。顔の各部の明暗差などにほとんど影響されずにほぼ忠実な立体再現が得られている（なめらかな部分での誤差は5%以下）。鼻の横での落込みは凹凸変化が急峻すぎるため無効領域として残ったことを示している。段差などで両眼対

応が存在しない部分では両眼視法は成立しない。このような領域を自己評価によって除去し、真の凹凸と紛らわしい誤差を生じない本方法の特長がよく表われている。

5. 結論ならびに展望

本論文では、まず微分両眼視法の出力を自己評価するための3種の評価量を導入し、これらを組み合わせた凹凸スライス抽出法と誤差分散分布の計算法を示した。つぎに撮像系の両眼幅輻角駆動により凹凸スライスの位置を前後させ、これらを順次接続・累積して奥行き幅広い立体形状を再構成する動的な立体合成算法を提示した。この算法は自己評価された誤差分散に基づいて統計的に準最適な標高分布推定を与える。また幅輻角の設定精度が低い場合でも、基準面の移動量を推定しつつ機能することができる。最後に確認実験の結果、本方式が高い立体再現力を有すること、平均化と測定範囲拡大とによる両面の効果から精度が向上することが確かめられた。

以上の点から凹凸スライスの動的累積による立体再構成の原理が確かめられ、微分両眼視法の測定範囲が狭い弱点を解消することが可能になったと考えられる。今後の課題としては幾何学的精度の向上と高速化がある。幅輻角を大にすると基準面が湾曲するとともに像の左右での撮像倍率が変わるため両眼ずれに縦方向の成分が生ずる。前者は累積後に補正できるが後者は1のばらついた誤差に変化するため撮像の光学系と算法の両面から対策を考える必要がある。高速化についてはわれわれは最終的に幅輻角の動きが振動とみなせる程度まで向上させることを目標としている。これが可能なら人間の視覚系の凝視微動⁹⁾の一つのモデルとなる可能性があるからである。このためには累積演算を並列演算に適した構造に洗練してゆく必要がある。

装置製作ならびに実験に協力された電気通信大学の相田泰志君（現在(株)東芝）、浜田徳郎君（現在日本電気(株)）に感謝します。

参 考 文 献

- 1) H.C. Longuet-Higgins: A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections, *Nature*, **293**, 133/135 (1981)
- 2) S.T. Barnard and W.B. Thompson: Disparity Analysis of Images, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-2-4**, 333/340(1980)
- 3) W.E.L. Grimson: Computational Experiments with a Feature Based Stereo Algorithm, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-7-1**, 17/34 (1985)

- 4) M. Herman, T. Kanade and S. Kuroe: Incremental Acquisition of a Three-Dimensional Scene Model from Images, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **PAMI-6-3**, 331/340 (1984)
- 5) B.K.P. Horn and B.G. Schunck: Determining Optical Flow, Artificial Intelligence, **17**, 185/203 (1981)
- 6) C. Cafforio and F. Rocca: Methods for Measuring Small Displacement of Television Images, IEEE Trans. Information Theory, **IT-22-5**, 573/579 (1976)
- 7) B.D. Lucas and T. Kanade: An Iterative Image Registration Techniques with an Application to Stereo Vision, Proc. IJCAI-81, 674/679 (1981)
- 8) たとえば, 田崎, 大山, 桶渡 (編): 視覚情報処理, 273/278, 朝倉書店 (1979)
- 9) H.A. Sedgwick: Environment-Centered Representation of Spatial Layout: Available Visual Information from Texture and Perspective, Human and Machine Vision, Academic Press, 425/458 (1983)
- 10) D. Marr and T. Poggio: A Theory of Human Stereo Vision, Proc. Roy. Soc. London, B204, 187/217 (1980)
- 11) 安藤, 相田: 動的微分両眼視アルゴリズム, 第25回 SICE 学術講演会予稿集, 331/332 (1986)
- 12) 安藤 繁: ステレオ画像の微分恒等式を用いた形状再現システム—並列型アルゴリズムとその実験的評価—, 計測自動制御学会論文集, **23-4**, 319/325 (1987)
- 13) 安藤 繁: 画像の時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム, 計測自動制御学会論文集, **22-12**, 1330/1336 (1986)
- 14) 安藤 繁: 両眼強度差を検出する微分両眼立体視法とその光沢知覚への応用, 計測自動制御学会論文集, **23-6**, 619/624 (1987)
- 15) 田部井, 安藤: 微分両眼視法の統合累積法, 第26回 SICE 学術講演会予稿集, 625/626 (1987)
- 16) Y.W. Lee: Statistical Theory of Communication, chap. 2, John Wiley & Sons (1960), 邦訳「不規則信号論」, 84/85, 東大出版会 (1973)