

3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善†

渡辺 正規^{††} 大田 友一^{††} 池田 克夫^{††}

本論文では、3眼ステレオ視によりエッジの方向に影響されず精度よく奥行き情報を求める手法について述べる。3台のカメラを直角2等辺3角形の三つの頂点に配置して撮像した3枚の画像を用い、上下、左右の2組の画像対に対して動的計画法を用いた対応探索を行った後、二つの対応結果を、エッジ位置のあいまいさに基づき弛緩法を用いて調整する。本解法は互いに直交する2本のエピポーラ線を利用しているため、任意の方向を持ったエッジに対しても位置決めが容易で、精度の良い奥行き情報を求めることができる。エッジ位置のあいまいさの評価は画像の局所的濃度変化に基づいて決定しているため、曲線を含む一般の画像に対しても適用可能である。実験により、本解法の有効性を定量的、定性的に示した。

1. ま え が き

ステレオ視では、2枚の画像中で互いに対応する点の対が求まりさえすれば、3角測量の原理で3次元空間中の点の座標を決定できる。しかし、実際には、1) 類似した特徴を持つ画素が多く存在することにより誤った対応を求めてしまう、2) 特徴量の変化の小さい(滑らかな)部分では対応点の位置決めがあいまいになる、3) オクルージョンにより対応点が存在しないことがある、などの原因により対応点の探索が困難な場合が多く、対応点探索はステレオ視における最も重要な問題の一つとして熱心に研究されてきた。

近年、1)の問題に対しては粗密探索¹⁾、弛緩法²⁾、動的計画法^{3),4)}により周囲の状況を考慮して対応を求める方式や、高次の特徴量を用いて類似点存在の可能性を減らす方式^{5),6)}が、2)の問題に対してはエッジなどの特徴点のみについて対応探索を行う方式が提案されている。また、3)の問題に対しても周囲との整合性を考えることによりオクルージョン発生部分の検出はある程度可能で⁷⁾、全体としてかなり信頼性が高く対応を行えるようになってきた。

しかし、対応点対から得られる3次元情報の精度という観点に立てば、2)の問題に対して対応を求める単位にエッジを用いても、エッジの位置決めにあいまいさが残るかぎり本質的な解決にはならない。また、滑らかな部分では得られるエッジの数も少ない。オクルージョン部分に対しても3次元情報を得ることはできない。これらの問題の解決のため、我々は3眼ステレオ視の有効性を検討してきた⁸⁾。

ステレオ視による距離決定は、原理的には2眼で十分であるので、3眼あるいは多眼視により得られる情報は後述のように冗長である。この冗長性を利用し、前述1)の問題の解決を主目的として特徴量を高次元化して用いた研究はいくつか行われている⁹⁾⁻¹¹⁾が、本論文では2眼ステレオ視にはハードウェア化が容易な効率よい対応探索アルゴリズムが存在することを考慮し¹²⁾、3枚の画像から選んだ2組の画像対で別々に対応探索を行い、得られた結果を調整するという方式を開発し、主として前述2)の問題の解決を図った。

2. 3眼ステレオ視

2.1 カメラモデル

図1に示すように、3次元空間中に $x-y-z$ 座標系をとり、 $x-y$ 平面上で直角2等辺3角形の3頂点の位置L, R, Uに配置された視点から観測された3枚の画像を考える。いずれの画像も画像面は $x-y$ 平面に平行な同一平面上にあり、走査線方向は x 軸に平行になるように正規化されているものとする。このとき、3組の画像対L-R, L-U, U-Rは次の性質を持つ。

- 画像対 L-R のエピポーラ線は x 軸に平行
- 画像対 L-U のエピポーラ線は y 軸に平行
- 画像対 U-R のエピポーラ線は直線 $y = -x$ に平行
- 画像対 L-R における対応点の(水平)視差と画像対 L-U における対応点の(垂直)視差は等しい

性質 a, b, c は各画像対の基線が画像面と平行ならば、エピポーラ線は基線に平行になることから、また、性質 d は、L-R, L-U の基線長が等しく、かつ、3組の画像対のエピポーラ線が直角2等辺3角形をな

† Improving Accuracy of Depth Determination by Right-angled Trinocular Stereo by MASAKI WATANABE, YUICHI OHTA and KATSUO IKEDA (Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba).

†† 筑波大学電子・情報工学系

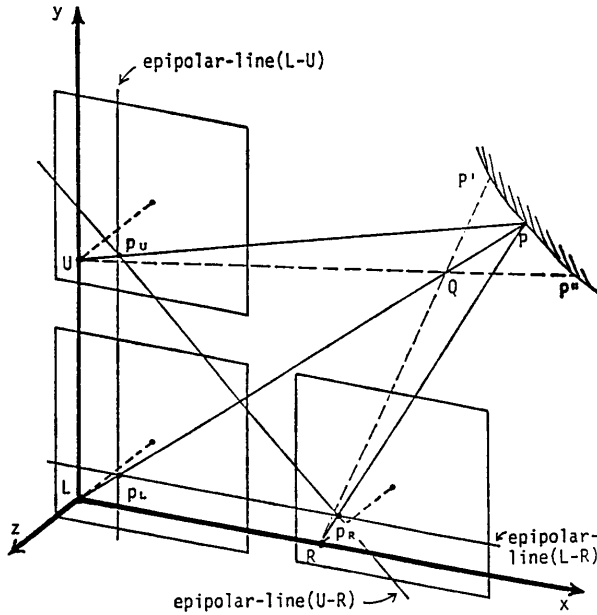


図1 3眼ステレオ視
Fig. 1 Right-angled trinocular stereo.

すことから明らかである。したがって、L画像中のある点 p_L に対応すべき、R画像中の点 p_R とU画像中の点 p_U の位置の自由度は合わせて1しかない。

3枚の画像上で選ばれた対応点 p_L, p_R, p_U が正しくない場合、3点により決定される3次元空間中の点 Q に物体面はなく、各点はそれぞれ全く別の点 P, P', P'' の写像となっている。この場合に、誤対応であることが判定できないのは、 P', P'' の2点ともが、たまたま P と類似の性質を持つ場合に限られる。したがって、1点が類似の性質を持てば誤対応となり得る2眼視に比して対応の信頼性は向上する。伊藤ら¹¹⁾は3眼視を特徴点対応法に、Tsai⁹⁾は多眼視を面対応法に適用し、対応の信頼性を向上させている。また、谷内田ら¹⁰⁾も3眼のうちの一つを投光器に置き換えた方式を報告している。しかし、3眼視においては、2眼視の場合のように、動的計画法などを用いて周囲との整合性を考慮する効率よい探索アルゴリズムは現在のところ不明である。

2.2 エッジの位置決定に対する考察

エッジに基づくステレオ視では、エピポーラ線上でのエッジの位置決定の精度が、得られる距離情報の精度に関係する。今、エッジ位置の決定に用いる特徴量を f とし、特徴量 f の頻度が正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うものとする。エピポーラ線上で真のエッジ位置 p_0 における特徴量 $f(p_0)$ と、 p_0 から r だけ離れた点 p_1

における特徴量 $f(p_1)$ の差がノイズに比して十分に大きくないとき、 p_1 が誤ってエッジとして検出される可能性が大きくなる。ノイズの標準偏差を σ_N とし k を S/N 比の逆数 σ_N/σ としたとき、 $f(p_0)$ と $f(p_1)$ の差がノイズレベル以下、すなわち、

$$|f(p_0) - f(p_1)| \leq k\sigma \tag{1}$$

になる確率は

$$q(r) = \text{erf}(k/2\sqrt{1-A(r)}) \tag{2}$$

であることが導ける。ここで、 $\text{erf}(x)$ はガウスの誤差関数、 $A(r)$ はエピポーラ線上で r だけ離れた場合の f の自己相関係数である。 $q(r)$ は $A(r) = 1$ のとき最大値1をとり、 $A(r)$ の減少とともに単調減少する。したがって、 $A(r)$ の r に関する減少率が小さい場合には位置決定のあいまいさが大きくなる。

一般に、線状のエッジ付近において r が増加したとき、エッジに平行な方向では自己相関係数はあまり減少せず、エッジに直交する方向では自己相関係数は急激に小さくなる。したがって、エピポーラ線がエッジに沿うと位置決めは困難になる。

ある点における自己相関係数が

$$A(x, y) = \exp(-\sqrt{\alpha^2 x^2 + \beta^2 y^2}) \tag{3}$$

で表されるとする。このとき、エッジが x 軸に平行だとすると $\alpha \ll \beta$ と考えてよい。エピポーラ線が x

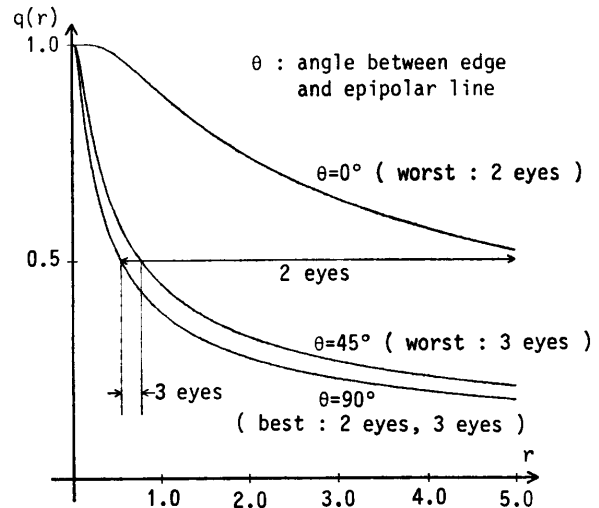


図2 エッジ位置からの距離 r と特徴量の差がノイズレベル以下になる確率 $q(r)$
Fig. 2 Distance r from an edge position and probability $q(r)$ that the difference of two feature values is under noise level.

軸となす角を θ とすれば、エピポーラ線に沿った方向では、自己相関係数は

$$A(r) = \exp(-r\sqrt{\alpha^2 \cos^2 \theta + \beta^2 \sin^2 \theta}) \quad (4)$$

となる。

2眼ステレオ視では、エピポーラ線は1本しかなく、エッジとエピポーラ線の交角は $0 \sim 90^\circ$ の間に分布する。したがって、最悪の場合 ($\theta = 0^\circ$)、図2に示したように $q(r)$ がある値以下に下がる r の値が大きくなり、すなわち、位置決めあいまいさが極端に大きくなる可能性がある。ただし、図2は、 $\alpha = \beta/10$ 、 $\beta = 0.02$ 、 $k = 0.1$ の場合の $q(r)$ を例示している。

これに対して、3眼ステレオ視では、互いに直交する2本のエピポーラ線を利用でき、いかなるエッジとも $45 \sim 90^\circ$ の交角を保つことができる。これにより、最悪の場合 ($\theta = 45^\circ$) でもエッジの位置決定におけるあいまいさはあまり増大しない。

3. 処理の概要

図3に処理の概要を示す。図1に示した互いに直交するエピポーラ線を持つ2組の画像対 L-R, L-U において別々に動的計画法を用いた2眼ステレオ対応探索を行い、得られた2組の結果を画像L上においてエッジ位置のあいまいさを考慮して調整する。なお、2眼ステレオ視における対応探索は、2枚の画像上で互いに対をなすエピポーラ線間の対応探索として解くことができ、画像対 L-R における対応探索は水平エピポーラ線間で、また、画像対 L-U における対応探索は垂直エピポーラ線間で行う。

3.1 エッジ抽出

図1のカメラ配置では画像対 L-R のエピポーラ線は水平走査線 (画像の行) に、画像対 L-U のエピポーラ線は垂直走査線 (画像の列) に一致する。したがって、L-R 対応探索のためには画像Lと画像Rで水平走査線上の画素間に現れる垂直エッジを、L-U 対応探索のためには画像Lと画像Uで垂直走査線上の画素間に現れる水平エッジを抽出する。エッジは、走

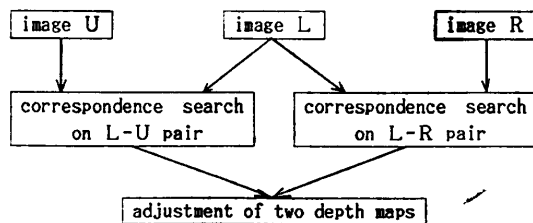


図3 処理の概要

Fig. 3 Outline of algorithm.

査線に沿った 1×2^n 画素 ($n=1, 2, 3, 4$) の大きさの一次微分オペレータによる微分値が極大・極小値をとる位置として求める。ただし、一つのエッジが幅の異なるオペレータにより若干異なった位置に重複して検出されるのを防ぐため、幅の小さいオペレータの出力を優先するようにしている。

さらに、画素間におけるエッジの正確な位置を、2次微分値の零交差位置としてサブピクセル単位で内挿により推定し、距離計算時に利用する。

3.2 動的計画法による画像対 L-R と画像対 L-U の対応探索

3枚の画像から選んだ2組の2眼ステレオ画像対における対応探索は、エピポーラ線上のエッジには含まれた区間を対応の単位とし動的計画法により最適な対応の探索を行う区間対応法⁷⁾による。この手法はノイズなどにより対応しない区間の併合をも含めて、走査線全体に対する最適対応を求めるので、誤対応の発生をかなり防ぐことができる。また、オクルージョンの検出もある程度可能である。さらに、ハードウェア化による処理の高速化も実現されている¹²⁾。したがって、誤対応の問題を主として2眼ステレオ対応探索の段階で処理し、求められる奥行き決定精度の向上を主目的として2組の対応結果の調整を行うという方針は、後節の実験例が示すとおり十分な有効性が期待できる。

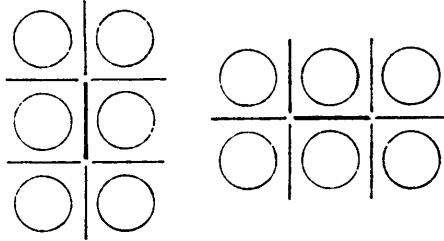
4. 弛緩法を用いた2組の対応結果の調整

4.1 調整の概要

画像対 L-R と画像対 L-U でそれぞれ区間対応法により対応探索を行い、エッジの対応を求めた。そして各エッジにおいて、L-R 対応結果による奥行きと L-U 対応結果による奥行きを算出し、画像L上において2組の対応結果を調整する。このとき、基本的にはL画像の同じ位置で両結果から得られた奥行きは等しくなければならないが、実際には、誤対応、エッジの位置決め誤差、オクルージョンの影響により等しくならない。したがって、何らかの基準で両結果を調整することが必要となる。このとき、3眼ステレオ視の長所を活かすべく、

- a. 誤対応の検出及び除去
- b. エッジ位置精度の評価
- c. オクルージョンの処理

を考慮する。また、対象物の形状やノイズの存在にあまり影響されないよう、これらの評価基準として大域



○：画素
 |：水平走査線上の画素間に存在する垂直エッジ
 -：垂直走査線上の画素間に存在する水平エッジ

図4 エッジの隣接関係
 Fig. 4 Neighbouring edges.

的特徴の使用は避けることが望ましい。大域的特徴の誤った抽出は後の処理に重大な影響を及ぼすからである。

4.2 誤対応の検出

画像L上において、2組の画像対の対応結果がエッジの位置決めにより起こり得る誤差の範囲を超えて異なっているとき、誤対応が生じている、と考えてよい。よって2組の対応結果を比較することで誤対応の検出がある程度可能となる。しかし、実際には、画像L上において、L-R 対応結果は水平走査線上の画素間に存在する垂直エッジにおいて、L-U 対応結果は垂直走査線上の画素間に存在する水平エッジにおいて求められているので、2組の対応結果を同一のエッジにおいて単純に比較することはできない。よって、対応結果の比較は図4に示した隣接エッジ間で行う。

着目しているエッジの奥行きを z_0 、隣接エッジの奥行きを z_i としたとき、誤対応か否かの判断は次式を用いた。

$$|z_0 - z_i| > \alpha. \quad (5)$$

式(5)中で奥行き z の誤差の許容範囲を表す閾値 α は、エッジの位置決めのあいまいさに基づき、次式により評価される値を用いる。あいまいなエッジほど α は大きく設定される。

$$\alpha = n \times (A(r) \text{ の半値幅}). \quad (6)$$

ただし、 $A(r)$ はエッジにおける濃度値の走査線上の自己相関係数、 n は定数である。 n は一般に奥行きの変化が滑らかなシーンほど小さく設定してよい。

式(5)は着目しているエッジに隣接するすべてのエッジとの間で評価し、すべてについて閾値を超える場合に誤対応と判断し、その着目しているエッジは対応結果から除去する。

4.3 調整方法

前述のように2組の対応結果はそれぞれL画像上の同一エッジに対して奥行きを与えるわけではない。したがって、各エッジにおいてどちらか良い方の結果を単純に選択するということはできない。ここでは2組の対応結果の調整という問題を、隣接エッジ間における奥行き変化の滑らかさという拘束条件を導入することにより処理する。さらに、各エッジ位置のあいまいさの相異やオクルージョンの有無を考慮するため、これらの状況を表現した各エッジ固有のペナルティ関数を設け、調整時に用いる。

奥行き z の滑らかさはラプラシアンで評価し、求めるべき解はすべてのエッジに対して次式を最小にする奥行き z の集合として定義する。

$$\sum_{\text{for all edge}} \{\lambda h_{xy}(z) + (V^2 z)^2\}. \quad (7)$$

ただし、 z は各エッジの奥行き、 λ は定数である。また、 $h_{xy}(z)$ は画像L上の (x, y) に存在するエッジが奥行き z を持つ場合のペナルティを与える関数であり、後述のように対応探索により求められた初期値から離れれば離れるほど大きな値になるような形をとっている。この式の解は解析的に求められないので、弛緩法を用いて解く。

式(7)を満たす z は変分法に関するオイラーの方程式によれば

$$\frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial F}{\partial p_x} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{\partial F}{\partial q_y} \right) = 0 \quad (8)$$

$$F = \lambda h_{xy}(z) + (V^2 z)^2,$$

$$p_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right), \quad q_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)$$

の解となる。ただし、 λ は定数である。さらに式(8)を整理し、

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial z} + 2V^2 (V^2 z) = 0 \quad (9)$$

になる。ここで、奥行き z のラプラシアンは隣接エッジの数 n_0 と隣接エッジの奥行き z_i の平均 \bar{z}_i に従い

$$V^2 z = n_0 (\bar{z}_i - z) \quad (10)$$

と解釈し、隣接エッジにおける奥行き z のラプラシアンを $V^2 z$ で表すことにより、式(8)を満たす z は

$$z = \bar{z}_i - \frac{1}{n_0} V^2 z_i - \frac{\lambda}{2n_0^2} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (11)$$

と解かれる。これを弛緩法の更新計算に式(12)で示されるように組み込む。

$$z' = w_{xy} z_0 + (1 - w_{xy}) \left(\bar{z}_i - \frac{1}{n_0} V^2 z_i - \frac{\lambda}{2n_0^2} \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z_0} \right). \quad (12)$$

ただし、 z_0 は更新前の奥行きを示す。

式(12)中、 w_{xy} は更新前の奥行き z の重みを変えることによって収束の速度を調節するパラメータである。ただし、 w_{xy} は一定値ではなく、位置のあいまいなエッジほど対応により求められた奥行き精度が低いので w_{xy} を小さく設定し、更新が大きく行われるようにするなどエッジごとに異なった値を用いる。実際には、 w_{xy} はエッジ位置のあいまいさを評価するパラメータに基づいて、

$$w_{xy} = \beta_{xy} / (\beta_{xy} + 1), \tag{13}$$

$$\beta_{xy} = n' / (A(r) \text{の半値幅})$$

により定義した。ただし、 n' は定数であり、 n' を大きくすると全体的に w_{xy} も大きくなり、収束速度は遅くなる。

また、式(12)中、 λ は、奥行き z の滑らかさとペナルティ関数 h_{xy} の評価の重みを調節する。 λ に小さな値を与えることは、更新後の奥行きが対応により求められた値から大きく離れることを許し、滑らかさを重視した解を与える。特に λ を 0 にしたとき、更新式(12)はエッジ位置のあいまいさによる重みつき平均を行うことにほかならない。

ペナルティ関数 h_{xy} は以下のように定義する。すなわち、動的計画法を用いた2眼ステレオ対応探索で対応が求められたエッジの奥行きは、画像中のエッジの位置を用いて計算される。この場合、奥行き z の誤差はエピポーラ線上でのエッジの位置決定の誤差に起因する。したがって、調整の段階においては、位置のあいまいさが大きいエッジほど対応により求められた奥行き z の値(弛緩法における初期値)からの変動を許容してもよい。エッジがエピポーラ線上で真の位置から r だけ離れた位置に検出される可能性は2章で導出した $q(r)$ に依存する。したがって、エッジの位置を r だけ移動させて奥行き z を調整した場合のペナルティ関数 $h_{xy}(z)$ は

$$h_{xy}(z) = 1 - q_{xy}(r) \tag{14}$$

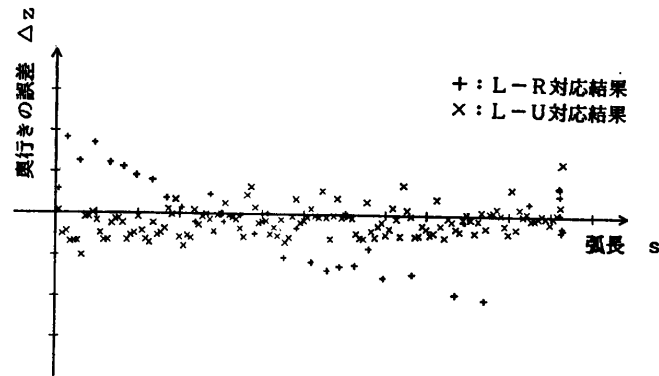
を用いる。

ただし、2眼ステレオ対応探索においてオクルージョンと判断されたエッ

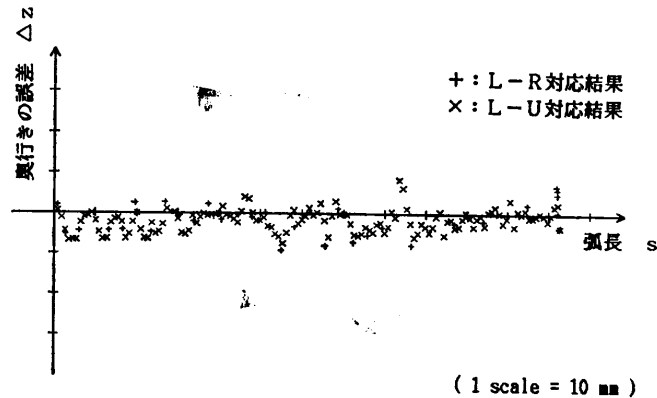
ジはこの限りではない。それらのエッジでは奥行きを算出することはできないが、周囲の対応状況から奥行き z の確率密度を推定することはでき、この確率密度に従いペナルティ関数を与えることができる⁸⁾。しかし、実際には、対応が求められたエッジにおけるペナルティ関数に比し、十分小さなペナルティを課すようにして、対応が求められたエッジが隣接している場合には、事実上、そちらの奥行きが選択されるようにする。これによって、オクルージョンとの判断が誤っていて、隣接走査線では正しい対応が求められている場合や、2組の画像対のうち、一方でしかオクルージョンが発生していない場合の調整が可能となる。

5. 実験結果

本論文で提案した解法の性能を調べるため、様々な画像を用いて実験を行った。その結果、弛緩式に関しては次の結果を得た。1) 収束の速度を調節する n'



(a) 調整前



(b) 調整後

図5 直線状エッジに対する処理例 (水平エピポーラ線に対し15°の方向をもつエッジ)
Fig. 5 A result for a linear edge.

は0にすると $w_{xy} \equiv 0$ となり振動を起し収束しないが、そうでない限りその大小は収束解に至る弛緩回数にほとんど影響を及ぼさない。ただし、 w_{xy} を0でない定数とした場合には、安定に収束させることは困難であった。2) ペナルティ関数の重みを調節する λ を0にすると、極めて滑らかな解が得られ、逆に λ をかなり大きくすると誤対応とみられるエッジの奥行きしか調整されない。また、弛緩処理は概ね4, 5回の反復で収束解に至る。

実験には、3台の2/3インチ CCD カメラを用い、カメラ L-R 間、カメラ L-U 間の基線長は各々 200 mm になるように配置した。カメラのパラメータは、内部パラメータとして、行

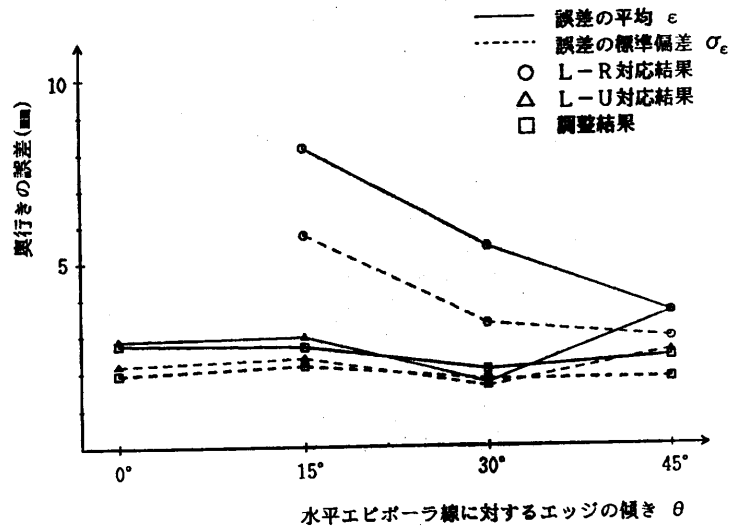
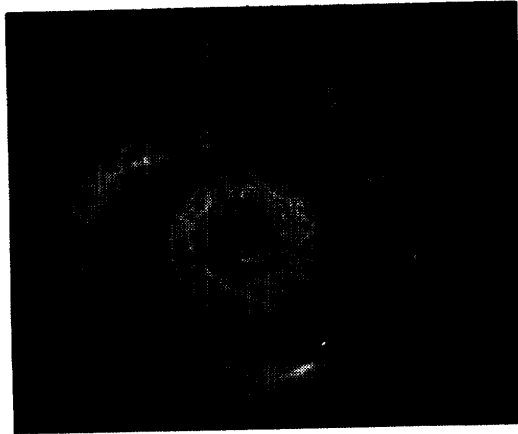


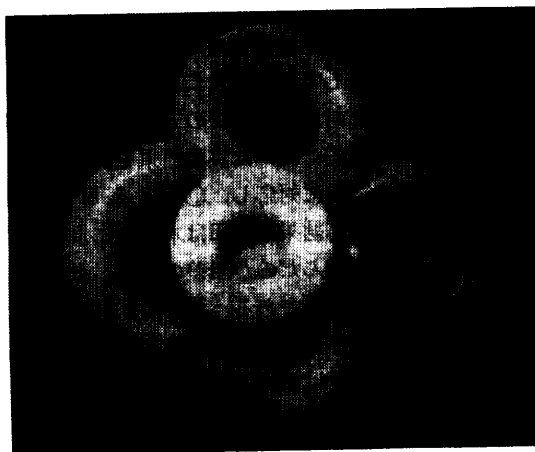
図 6 エッジの方向と奥行き決定精度
Fig. 6 Edge orientation and accuracy of depth determination.

方向の標準化間隔を単位長さ (1 mm) と仮定した場合の焦点距離、行方向、列方向の標準化間隔の比、光軸と画像の交点の計 4 パラメータを、また、外部パラメータとして、カメラの位置、カメラの傾きに関する計 6 パラメータを求めた。座標が既知の点を多数観測することにより、まず内部パラメータ、次に外部パラメータの順に最小二乗法を用いた逐次近似解法¹³⁾により計算した。

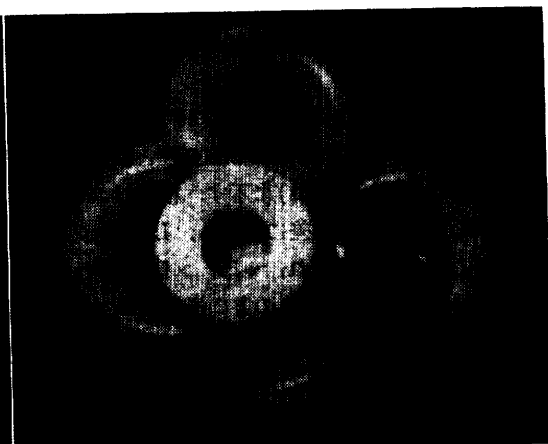
3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善を調べた実験結果を図 5 および図 6 に示す。実験は、水平エビポーラ線に対し 0°, 15°, 30°, 45° の角度をなすエッジが観察されるよう、立方体をカメラの前方 1,460



画像 U



画像 L



画像 R

図 7 原画像
Fig. 7 Input images.

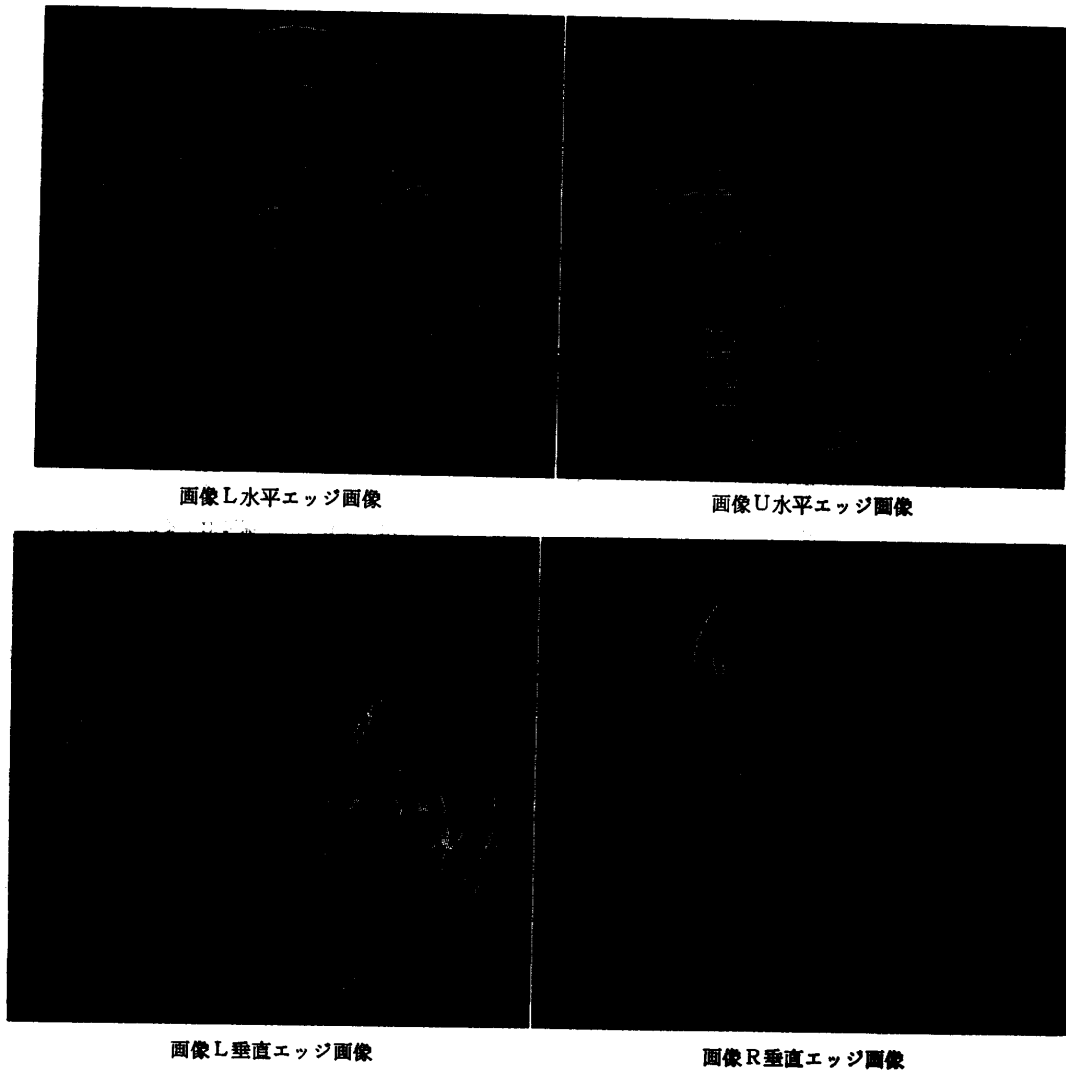


図 8 エッジ画像
Fig. 8 Edge images.

mm の位置に配置して撮像した 4 組の画像を用いて行った。

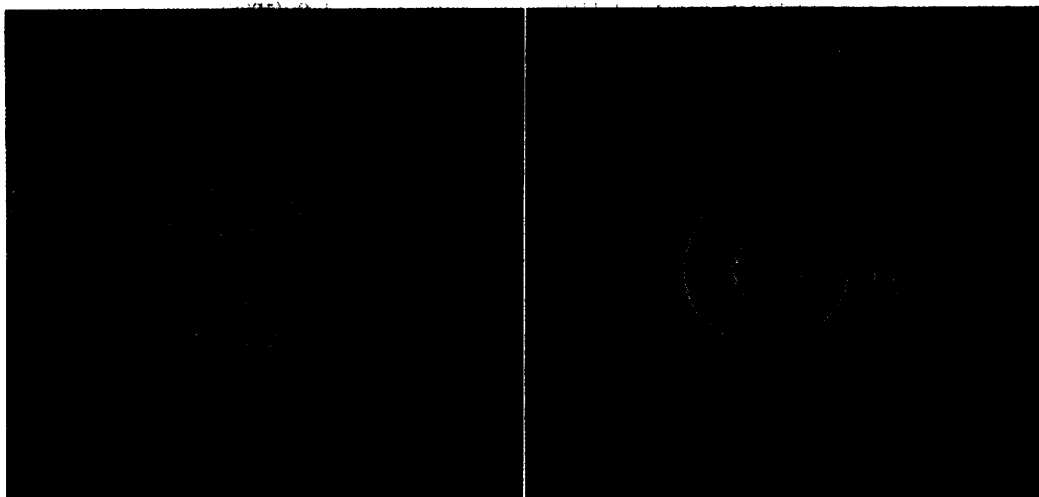
そのうち、水平エポコーラ線に対し 15° の方向をなすエッジの、3 眼ステレオ視による調整前と調整後の処理結果を図 5 (a) および (b) に示す。横軸はエッジの弧長、縦軸は奥行き誤差に対応し、L-R 対応結果、L-U 対応結果をそれぞれ、+印、×印で示す。

水平エポコーラ線に対し 15° の方向をなすエッジでは、L-R 対応探索に与かる垂直エッジの位置決めはあいまいである。したがって、画像対 L-R のみを利用する 2 眼ステレオ視では、このエッジの奥行きを精度良く決定するのは困難である。一方、L-U 対応探索に与かる水平エッジでは、位置決めあいまいさも比較的小さく、奥行き決定精度も高い。図 5 (b)

は、2 組の対応結果の調整が、精度の高い水平エッジの奥行きを優先して行われたことを示している。

4 組の画像に対し、エッジの方向と奥行き決定精度の関係を定量的に調べた実験結果を図 6 に示す。横軸はエッジの方向に対応し、○印は L-R 対応結果、△印は L-U 対応結果、□印は本手法による調整結果を示す。実線で結んだのが誤差の平均、点線で結んだのが誤差の標準偏差である。ただし、水平エポコーラ線に対し 0° の方向をなすエッジで、水平対応探索に与かる垂直エッジは検出されていない。

2 章で考察したように、エッジの傾きが大きくなるにつれて、2 眼ステレオ視 L-R 対応結果では精度が高くなり、L-U 対応結果では精度が低くなる傾向がある。しかし、両対応結果を調整することで、エッジ



画像対L-U対応探索結果

画像対L-R対応探索結果

図9 2眼ステレオ対応結果

Fig. 9 Results of binocular stereo.

の方向に影響を受けず、良好な精度の奥行きを得ることができている。

図7は、カメラの前方1,700mmの位置に配置したドーナツ状の6個の積木を撮像した画像である。エッジ画像を図8に示す。画像は円形の物体を含んでおり、輪郭線が水平エポコーラ線にほぼ平行な部分では、垂直エッジは疎にしか抽出されず、エッジ位置もあいまいである。一方、同部分に対して垂直走査線で検出される水平エッジは分布も密であり、位置決めのあいまいさも小さい。したがって、このような部分ではL-U対応結果を優先した調整を行うことにより、

精度よい奥行きを決定できる。

図9に2眼ステレオ対応結果の調整前の奥行き画像を、図10に調整後の奥行き画像を示す。奥行きはエッジ位置のみにおいて、画像の濃度により表示した。明るい画素ほどカメラ側にあることを意味する。図10からわかるように、調整後は輪郭の奥行きが、向きに関係なく一様に求められているのがわかる。

以上のように、二つの対応結果の調整のためのパラメータとして、エッジ付近の濃度値のエポコーラ線に沿った自己相関係数、という局所的な特徴量を用いることにより、曲線を含む画像に対しても本解法は有効に適用できる。

6. むすび

2眼ステレオ視では特徴量の変化の小さい部分での位置決めのあいまいさによる奥行き決定精度低下の問題を解決することが原理的に困難であった。これに対し本論文では、3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善について、動的計画法と弛緩法を組み合わせた解法を述べ、実験によってその有効性を定量的、定性的に示した。

本論文ではカメラモデルを、3枚の画像のレンズ中心を直角2等辺三角形の頂点に配置し、3枚の画像の光軸が互いに平行になるように仮定したが、2組の画像対のエポコーラ線が直交しない場合や、基線長が異なる場合などこのカメラモデルを形成しない場合にも本解法は容易に拡張可能である。2組の画像対の基線



図10 2組の対応探索の調整結果

Fig. 10 Result after adjustment process.

長が異なる場合は、各々の画像対より求められた対応結果が異なった精度を持つが、この精度の相違は調整時の重みに反映させることになる。

今後は、一般のカメラ配置に対する本解法の拡張と、高速処理の可能性について検討を加えていく予定である。

参 考 文 献

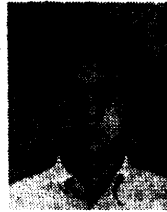
- 1) Marr, D. and Poggio, T.: A Computational Theory of Human Stereo Vision, *Proc. of R. Soc. Lond.*, Vol. B 204, pp. 301-328 (1979).
- 2) Barnard, S. T. and Thompson, W. B.: Disparity Analysis of Images, *IEEE Trans.*, Vol. PAMI-2, No. 4, pp. 333-340 (1980).
- 3) 佐々木, 古川: エッジに注目した動的計画法によるステレオ画像の対応点の検出, 信学技報, IE 78-97, pp. 47-56 (1979).
- 4) Baker, H. H. and Binford, T. O.: Depth from Edge and Intensity Based Stereo, *Proc. of 7th IJCAI*, Vol. 1, pp. 631-636 (1981).
- 5) Moravec, H. P.: Visual Mapping by a Robot Rover, *Proc. of 6th IJCAI*, Vol. 1, pp. 598-600 (1979).
- 6) 池内克史: 2組の照度差ステレオによる距離情報の決定, 情報処理学会 CV 研資, 33-2 (1984).
- 7) 大田, 正井, 池田: 動的計画法によるステレオ画像の区間対応法, 信学論, Vol. J 68-D, No. 4, pp. 554-561 (1985).
- 8) 渡辺, 大田, 池田: 3眼ステレオ視による位置決め改善とオクルージョン処理, 情報処理学会 CV 研資, 38-2 (1985).
- 9) Tsai, R. Y.: Multiframe Image Point Matching and 3-D Surface Reconstruction, *IEEE Trans.*, Vol. PAMI-5, No. 2, pp. 384-391 (1983).
- 10) 青木, 谷内田, 辻: パターン投影法と2台のカメラを用いた3次元物体の計測, 信学論, Vol. J 68-D, No. 3, pp. 384-391 (1985).
- 11) 伊藤, 石井: 3眼立体視による多面体形状計測, 信学技報, PRL 85-21, pp. 19-26 (1985).
- 12) 大田, 高野, 池田: ステレオ画像における区間対応探索処理の高速化について, 信学技報, PRU

86-1, pp. 1-8 (1986).

- 13) 日本写真測量学会編: 写真による3次元測定, p. 180, 共立出版社, 東京 (1983).

(昭和61年6月18日受付)

(昭和61年8月27日採録)



渡辺 正規 (学生会員)

昭和37年生。昭和60年筑波大学第三学群情報学類卒業。現在、同大学院博士課程工学研究科に在学中。主に、コンピュータビジョン、人工知能の分野に興味を持つ。



大田 友一 (正会員)

昭和24年生。昭和47年京都大学工学部電子工学科卒業。昭和52年同大学院博士課程修了。同年学振奨励研究員。昭和53年京都大学情報工学科助手。昭和56年筑波大学電子・情報工学系講師。工学博士。文書画像処理、コンピュータビジョンの研究に従事。昭和57年～58年カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員。電子通信学会パターン認識・理解研究会幹事。電子通信学会、IEEE 各会員。



池田 克夫 (正会員)

昭和12年生。昭和35年京都大学工学部電子工学科卒業。昭和37年同大学大学院修士課程修了。昭和40年同博士課程学修退学。同年京都大学助手。昭和46年同助教授。昭和46年9月より1年間文部省在外研究員として、米国ユタ大学およびMITに留学。昭和53年筑波大学教授。電子・情報工学系。コンピュータ組織法、LAN、画像処理に興味を持つ。著書に「オペレーティングシステム論」(電子通信学会)などがある。工学博士。電子通信学会、IEEE、ACM 各会員。