

# ステレオ対応探索アルゴリズムの有機的統合

渡辺正規 大田友一 池田克夫

筑波大学 電子・情報工学系

本稿では、広範な環境に対処できる柔軟なステレオ距離センサの実現のために、異なった性質を持つ3種のステレオ対応探索アルゴリズムを有機的に統合する手法について述べる。すなわち、動的計画法を用いたエッジに基づく区間対応法、相関を用いた特徴点の粗密対応探索法、連結エッジセグメントの対応探索法の各対応探索アルゴリズムを専門に実行するモジュールを一つずつ設け、各モジュールが別々にかつ並行して対応探索を行なう。そして、モジュール間の通信により、互いに必要とする処理環境を整備し、不足情報を補充する。走査線内の整合性を考慮する区間対応探索モジュールと、走査線に直交する方向の整合性を考慮する連結エッジセグメント対応探索モジュールが、対話をしながら処理を進めることによって、画像全体にわたって整合性を考慮した信頼性の高い対応結果を得る。また、処理の前提条件の緩い点対応探索モジュールは、強いエッジを利用した最低限の対応結果の獲得を保証する。本手法を計算機上に構築し、室内を撮像したステレオ画像を用いて行なった実験結果を示す。

## Integration of Stereo Matching Algorithms

Masaki WATANABE, Yuichi OHTA and Katsuo IKEDA

Institute of Information Sciences and Electronics

University of Tsukuba

Ibaraki, 305, Japan

In order to construct a flexible stereo sensor which can cope with various scene conditions, this paper presents a scheme for integration of three different stereo matching algorithms. They are interval matching method using dynamic programming, point-based matching method based on correlation, and segment-based matching method. Each method is implemented on a separate module. Usually, more than one module are executed in parallel, communicating with other modules to compensate various data : i.e., the interval matching supplies consistency within each scanline, the segment-based matching supplies consistency beyond many scanline, the point-based matching guarantees the acquisition of depth information at strong edges, etc. Experiments show the effectiveness of the integration scheme developed here.

## 1. はじめに

ステレオ視は、2台のカメラという受動的センサのみを用いて3次元情報を抽出する方法であり、適用範囲が広く、距離情報を直接求め得るなどの理由により有用性が注目されている。ステレオ視では、2台のカメラより撮像した2枚の画像中で互いに対応する点の対さえ求めれば、三角測量の原理で3次元空間中の点の座標を決定できる。しかし、実際には、類似した特徴を持つ点が多く存在することにより誤った対応を求めてしまうなど、対応点の探索が困難な場合が多く、対応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、熱心に研究されている。

近年、粗密探索<sup>1)</sup>、弛緩法<sup>2)</sup>、動的計画法<sup>3)4)</sup>により周囲の状況を考慮して対応を求める方式や、高次の特徴を用いて類似点存在の可能性を減らす方式<sup>5)6)</sup>が提案され、信頼性の高い対応結果を得られるようになってきた。これらに共通して言えることは、一つ一つのアルゴリズムの適用条件を明確に規定し、特定の適用環境に対しては信頼性の高い結果を保証する方向を目指している<sup>7)</sup>ということである。一方、実用的観点からは、できるだけ広範な環境への適用に耐え得るアルゴリズムの開発が望ましい。しかし、単一のアルゴリズムにより様々な条件に対処しようとすると、複雑な処理が必要になり、処理量に対する効果比は悪化するのが普通である。従って、異なる特性を持った複数のアルゴリズムを有機的に統合し、適用範囲の広い、より柔軟な処理の表現を図ることが重要だと考えられる。

複数の画像理解のアルゴリズムを利用する問題では、異種のアルゴリズムの処理結果を合成して用いたり<sup>8)9)</sup>、また、あるアルゴリズムの処理結果を他のアルゴリズムが利用して処理を進めたりする<sup>10)</sup>、処理結果の融合といった手法が提案されている。しかし、各アルゴリズムが互いの短所を補い、長所を助長するような処理を進めるためには、互いの処理過程に影響を及ぼし合う、アルゴリズムの統合と呼べる処理形態の実現が望ましい。そして、アルゴリズムを有効に活用するための、処理環境の整備、不足情報の補充などの支援は、実際の処理状況に即して柔軟に行われるべきである。

我々は、先に、個々のアルゴリズムを専門に実行するモジュールを用意し、各モジュールが別々にかつ並行して処理を進め、随時他のモジュールと通信をして処理を進める手法の枠組を提案した<sup>11)</sup>。この手法は、人間社会における対話によるコミュニケーションに着目したもので、アルゴリズム間で補われる情報が、処理状況に即して、随時伝達できる機構になっている。また、各アルゴリズムを別々に実行することから、並列処理に向けた方式になっている。

本研究では、上記の機構を利用し、ステレオ対応探索の適用環境を広げ処理能力を高めるため、相補う特長を持ち合わせている三つのステレオ対応探索アルゴリズム、すなわち、動的計画法を用いたエッジに基づく区間対応法<sup>12)</sup>、相関を用いた特徴点の粗密対応探索法<sup>9)</sup>、連結エッジセグメントの対応探索法の有機的統合について述べる。

## 2. ステレオ対応探索アルゴリズムの有機的統合

複数のアルゴリズムを統合して、広範な環境に対処できる処理を行うためには、相異なる環境および条件に対して有効な性能を持つアルゴリズムを用意する必要がある。ステレオ視においては対応を求める画像特徴の違いにより、対応探索アルゴリズム、ひいては、対応結果の特性が異なる。そこで、本研究では、異なる画像特徴を対応の単位にする、動的計画法を用いたエッジに基づく区間対応法、相関を用いた特徴点の粗密対応探索法、連結エッジセグメントの対応探索法の有機的統合を図る。

表1に三つのステレオ対応探索アルゴリズムの特長を示した。以下に各アルゴリズムを説明する。

ステレオ視における2枚のステレオ画像間の対応探索は、2台のカメラの光軸が平行でかつ基線と垂直になるように画像の正規化を行うと、両画像間で互いに対をなす走査線間の対応探索として解くことができる。動的計画法を用いたエッジに基づく区間対応法は、この性質を利用し、走査線上のエッジにはさまれた区間を対応の単位として一対の走査線間の対応探索を行う。

この対応法は、両走査線上で対応する区間の順序に入れ替えがないと仮定して、走査線内部の整合性を考慮した対応を動的計画法により求める。よって、ノイズなどにより対応しない区間の併合をも含め、走査線全体に対して最適な対応を求めるので、誤対応の発生をかなり防ぐことができ、信頼性の高い解を得ることができる。ただし、一対の走査線ごとの対応なので走査線を超える周囲との整合性は考慮されず、走査線に垂直な方向では大局性に乏しい。

相関を用いた特徴点に基づく粗密対応探索法は、点の周囲に設けた小窓間の相関値を類似度の評価に用いて、点対点の対応を求める。対応探索は始めに、粗く間引いた解像度の低い縮小画像を用いて相関係数が極大をとる位置を求め、順次解像度を上げ、探索範囲を狭めて探索を繰り返す。そして、最後に原画像による探索を行い、対応点を決定する。

この対応法のように、対応点の類似度の評価に点の周囲の相関係数を用いる処理は、全画面で行おうとすると計算量が膨大になる。また、相関値が極大となる点があきらかにずれて対応点の位置決定にあいまいさが残ることがある。しかし、一方の画像において、対応単位になる特徴点さえ与えれば、もう一方の画像にお

表1 ステレオ対応探索アルゴリズムの特長

	対応の単位	適用環境の広さ	3次元情報の量
エッジに基づく区間対応法	走査線上のエッジにはさまれた区間	△	○
連結エッジセグメントの対応探索法	連結エッジセグメント	×	△
相関を用いた点対応探索法	特徴点	○	×

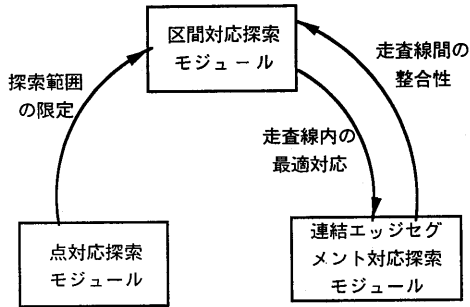


図1 ステレオ対応探索アルゴリズムの有機的統合

いて対応する点の位置を濃度値だけから判断できることから、この点対応探索法は頑健であるといえる。また、粗密対応探索法により、相関係数を計算する際に画像の広域を覆う窓を使用することにもなるので、ある程度信頼できる対応を求めることができる。

連結エッジセグメントとは、走査線を超えて隣接するエッジを連結した高次の画像特徴であり、連結エッジセグメントの対応探索では左右画像中に抽出される連結エッジセグメント間の対応を求める。両画像中の連結エッジセグメントを、長さ、向きなど形状に関して比較し、類似している連結エッジセグメントを対応候補とする。そして、もし対応候補が複数存在するならば、連結エッジセグメントの隣接画素の濃度値の比較により対応セグメントを決定する。

連結エッジセグメントは走査線に直交する方向に関して広く画像を捉える特徴であり、これを対応の単位にすることによって、走査線に直交する方向で大局的に整合性を持った対応を求めることができる。また、高次の特徴のゆえ、類似した特徴の存在をかなり減らすことができ、誤対応を防ぐことができる。しかし、連結エッジセグメントの形状だけではあいまいさを絞りきれなかった場合、複数の連結エッジセグメント同士の最適対応を求めることは、必ずしも容易でない。

以上の各アルゴリズムの特長に基づき、各アルゴリズムを実行するモジュールは以下の通信をして処理環境の整備、不足情報の補充をする。図1に統合時におけるモジュール間の情報の流れを示した。

区間対応探索モジュールは、対応のあいまいさが大きく局所的な特徴のみでは正確な対応を求めることが困難な部分を、集中的に処理できるように処理環境を整える。すなわち、他の二つのモジュールの探索結果を参考にして、対応の明らかなエッジの視差に拘束を与える。また、連結エッジセグメントモジュールからの探索結果を積極的に参考にすることで、走査線に垂直な方向の大局性を補う。

点対応探索モジュールは、濃度値の変化の激しい部分で抽出される強いエッジのみにおいて対応探索を行う。そして、区間対

応探索モジュールに、対応の概略の情報を供給する。

連結エッジセグメント対応探索モジュールでは、連結エッジセグメントの形状だけでは対応連結エッジセグメントを判断できなかった場合、あいまいさを解消するため、区間対応探索モジュールの探索結果を参考にする。これにより、走査線内における整合性も考慮することになる。

全体として、走査線内の整合性を考慮する区間対応探索のモジュールと、走査線外の整合性を考慮する連結エッジセグメントの対応探索モジュールが、互いに情報を取り入れ合うことで、画像全体に整合性を持つ信頼性の高い対応結果を得ることが期待できる。また、適用条件の緩い点対応探索モジュールを設けることで、最低限の対応結果の獲得を保証している。

本統合法では、プログラムを簡明に記述するため、各モジュールを、質問を受信するプロセスとアルゴリズムを実行し返答するプロセスの2種類のプロセスから構成している。そして、同時に複数のモジュールから質問を受けても、待ち時間なしに返答処理を行って応答できるようにするため、アルゴリズムを実行し返答するプロセスを、各質問に対し別々に生成する。また、モジュール間の通信はメッセージキューを用いた通信機能を利用している。

モジュールの制御機構に関する詳細は文献11)を参照されたい。

### 3. 対応探索モジュール

#### 3.1 区間対応探索モジュール

区間対応探索モジュールでは、走査線上のエッジには含まれた区間を対応の単位とし、区間の類似度の評価には対応する両区間内の濃度値の分散を用いる区間対応法を用いて対応探索を行う。ただし、エッジの抽出は、3.4節で述べるエッジ抽出モジュールに依頼する。

この対応法は、走査線間の対応探索を、図2に示した探索平面上で区間の対応を示すパスを求める問題として解く。図2において、探索平面の横軸は左画像の走査線に、縦軸は右画像の走査線に対応しており、探索平面を区切る縦線は左画像の走査線上でのエッジ位置を、横線は右画像の走査線上でのエッジ位置を示している。両走査線上で対応する区間の順序に入れ替えがないと仮定すれば、パスは探索平面の左上から右下に単調に下降する。この対応法では、走査線内部の整合性を考慮した最適対応を、探索平面の縦線と横線の交点を決定段階として、動的計画法により求める。

区間対応法では、2枚の画像間の対応探索を走査線ごとに分割して行うことができる。本モジュールでは、各走査線の対応探索を始める前に、点対応探索モジュールから強エッジでの探索結果を、そして、連結エッジセグメント対応探索モジュールからは連結されたエッジにおける探索結果を得る。そして、対応結果がすでに得られているエッジの視差を限定した、くびれた探索平面(図2の点線内)を形成し、対応が未だ求められていない区間

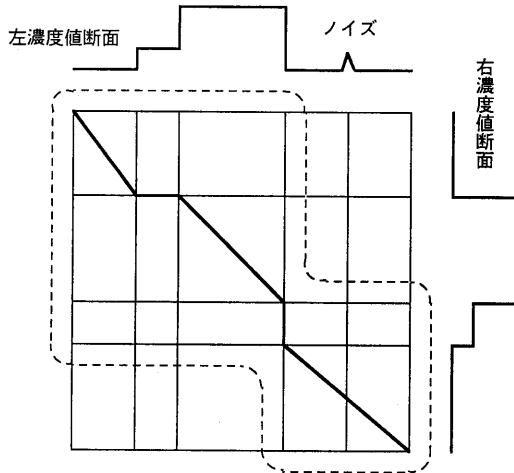


図2 区間対応法における探索平面

の対応探索を、走査線内部の整合性を考慮して集中的に行う。

ただし、参考にするエッジの対応結果が誤っている可能性もあるので、他のモジュールから得た探索結果にある程度の幅を持たせて探索範囲の限定をしている。点对応探索モジュールから得た探索結果と連結エッジセグメント対応探索モジュールから得た探索結果が異なっている場合には、異なった対応結果が示されたエッジに限り双方の探索結果を棄却する。

また、エッジの抽出方法の違いにより、各モジュールでのエッジ位置は完全には一致しないこともある。区間対応探索モジュールでは、当該モジュールのエッジの位置に対し、前後1画素ずれた位置にあるエッジの対応結果も参考にして利用する。ただし、この場合、対応点の位置決めがあいまいであると考えられるため、参考にする探索結果の影響を弱め、探索範囲の限定の幅をさらに広める。

指定された走査線において探索結果が得られていなくても、近接した走査線において既に探索結果が得られている場合には、そちらの結果を返答する機能も用意した。画像中、如何なる部分の探索結果の公開要求に対しても応答時間を均等にするため、始めは走査線を間引いた粗い画像で対応探索を行い、徐々に探索する走査線の密度を高めていく方法を採用した。

区間対応探索モジュールにおいて求めた区間同士の対応は、各区間の両端にあたるエッジ同士の対応に置き換え、部分パスの方向と併せて走査線ごとに格納する。

### 3.2 点对応探索モジュール

点对応探索モジュールは、相関を用いる粗密対応探索法により点対点の対応を求める。本モジュールにおいて対応を求める特徴点は、左画像の走査線上で観察される強エッジであるが、この抽出は、区間対応探索モジュールの場合と同様、エッジ抽出モジュールに依頼する。

対応探索は、まず、両画像の画素を間引いて16分の1に縮小した画像を用いる。強エッジのまわりに設定した6×6画素の窓を右画像にあてがって相関係数を計算し、相関値を極大にする位置を記録する。次に、解像度を2倍にした8分の1に縮小した画像を用い、先の16分の1に縮小した画像の探索結果を基に探索範囲を狭め、再度対応探索を行う。これを、縮小なしの原画像まで順次解像度を上げ、対応探索を繰り返す。

点对応探索モジュールにおける探索結果は、走査線ごとにまとめて格納する。

### 3.3 連結エッジセグメント対応探索モジュール

連結エッジセグメント対応探索モジュールは、両画像で抽出される連結エッジセグメント間の対応探索を行う。本研究における探索法では、始めに、左画像中の各連結エッジセグメントに対して、右画像中の対応候補を、形状の比較により選出する。そして、もし対応候補が複数存在した場合には、連結エッジセグメントの隣接画素の濃度値の比較とともに、区間対応探索モジュールの探索結果を参考にして、対応連結エッジセグメントを決定する。ただし、連結エッジセグメントの抽出は、他のモジュール同様、エッジ抽出モジュールに依頼する。

左画像中のある連結エッジセグメントに対する右画像中の対応候補は、以下の長さとの向き条件を満足する連結エッジセグメントとして選出する。すなわち、

- 両連結エッジセグメントが存在する走査線の範囲が重複しており、かつ、重複する範囲の長さが、左右両連結エッジセグメントの少なくとも一方の連結エッジセグメントの長さの10%以上である。
- 両連結エッジセグメントがともに存在する範囲において、画像上での向きの差が小さい。

ただし、向きの差の閾値は文献(13)に従った。また、対応候補の位置の条件として、シーン中の3次元座標を計算したとき、カメラの前方に像を結び、かつ、対象が存在可能な範囲を視差範囲として指定した。さらに、走査線上の一次微分が極大をとる部分で抽出される連結エッジセグメントと、極小を取る部分で抽出される連結エッジセグメントをも区別して、対応候補を選出した。

以上の条件に適合する対応候補が複数存在したときは、連結エッジセグメントに隣接する左右2画素ずつ、合わせて4画素の幅を持つ領域の濃度値の相関を計算する。そして、その値が閾値を越え、かつ、最も高い相関値を持つ連結エッジセグメントを、対応連結エッジセグメントとして決定する。また、相関値が閾値より低い場合は対応連結エッジセグメントが存在しないと判断する。このとき、雑音により連結エッジセグメントが切断された場合も考慮するため、左画像中の一連結エッジセグメントに対し、右画像中の複数の連結エッジセグメントを対応させる場合も調べるが、その全ての組合せの探索は動的計画法を用いている。

しかし、連結エッジセグメントの形状だけでは対応候補を一つに絞りきれなかった場合、この対応法のように、他の連結エッジセグメントの対応を考慮せず、濃度値情報のみを利用して対

応を求めようとする、その決定があいまいになることが多い。

連結エッジセグメント対応探索モジュールでは、二つの閾値を用意し、濃度値の相関値が二つの閾値間にあるか、または、次候補との相関値の差が小さいとき、対応連結エッジセグメントの決定があいまいであると判断する。このときは、対応を求める連結エッジセグメントが存在する範囲において、等間隔に選んだ3本の走査線における探索結果を区間対応探索モジュールから得る。そして、その探索結果による得票数を加えて、対応連結エッジセグメントの決定を試みる。しかし、それでもなお決定があいまいであると判断された場合は、あいまいさが解消されるまで、参考にする対応結果の走査線数を2本ずつ増やし、対応連結エッジセグメントを決定する。

### 3.4 エッジ抽出モジュール

エッジ抽出モジュールは、原画像よりエッジ、連結エッジセグメントを抽出し、エッジ画像、または、連結エッジセグメント抽出画像を専門に生成するモジュールである。

本研究において取扱うエッジはステレオ対応探索の対応単位として利用される。よって、エッジの抽出は走査線上、一次元に濃度値が変化する部分に現れるエッジのみを抽出する。エッジは、走査線に沿った $1 \times 2$ 画素 ( $n=1,2,3,4$ ) の大きさの一次微分演算子による微分値が極大・極小をとり、かつ、指定した閾値を越える位置として求める。ただし、一つのエッジが幅の異なる演算子により、若干異なった位置に重複して抽出されるのを防ぐため、幅の小さい演算子の出力を優先するようにしている。大きい閾値を指定することで、濃度値の変化の大きい部分に現れる強エッジのみを抽出し、また、小さい閾値を指定することで、濃度値の変化の小さい部分に現れる弱エッジも併せて抽出することになる。

連結エッジセグメントの抽出は、大小二つの閾値を指定して得られた2枚のエッジ画像を用意し、それぞれのエッジ画像において、類似した微分値を持つ互いに隣接するエッジを連結する。エッジの隣接関係を図3に示した。次に、得られた2枚の局所連結エッジセグメント抽出画像を重ね合わせ、大局的な連結を図る。そして、直線により近似できるよう連結エッジセグメントを分割し、最終結果として記録する。以上の処理において、2枚のエッジ画像の生成、および、2枚の局所連結エッジセグメント抽出画像の生成は、エッジ抽出モジュールが自分自身に依頼し、並列処理を可能とする形式を採用している。

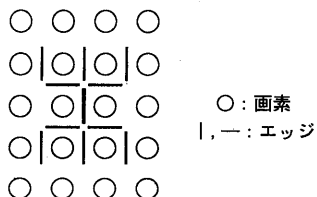


図3 エッジの隣接関係

低い閾値を指定して得られたエッジ画像では、比較的变化の滑らかな部分に現れるエッジの抽出位置が、雑音の影響によりずれることがある。また、高い閾値を指定して得られたエッジ画像では、濃度値の変化が比較的小さい部分に現れる弱いエッジが抽出されない。よって、画像の各部分に適当な閾値を指定して抽出したエッジ画像を用いない限り、大局的にエッジを連結するのは困難である。

以上の理由により、エッジ抽出モジュールにおいては、2枚の異なる強さのエッジ画像を用意し、単純な処理を積み重ねて、大局的に画像を捉える長い連結エッジセグメントを抽出しようとしている。また、この手法は処理結果の融合の形式を採用しているとも言える。

### 3.5 モジュールの統合プロトコル

三つの対応探索モジュール間の通信において、探索結果の受渡しは、走査線を単位に行う。よって、探索結果の公開要求には、画像中の走査線番号を指定する方法、および、走査線の範囲を指定する方法を用意した。このうち、複数の走査線番号を指定された場合、また、走査線の範囲を指定された場合は、指定された走査線における探索結果を走査線ごとに分けて、複数回答する。

各モジュールが返答する内容は、各走査線において対応を求められた左画像のエッジの位置とそれに対応する右画像のエッジの位置である。ただし、区間対応探索モジュールはこれに加えて、探索平面内の部分バスの方向も返答する。また、連結エッジセグメント対応探索モジュールが返答する際は、連結エッジセグメントの対応結果を、互いに対をなす走査線上におけるエッジごとの対応結果に分割する。

各モジュール内のプロセスが共有している探索結果を、同一モジュール内の複数のプロセスが同時にアクセスしないように、処理の背反を図る必要がある。これに対処するため、区間対応探索モジュールと点対応探索モジュールにおいては各走査線ごとに、また、連結エッジセグメントモジュールにおいては左画像中の連結エッジセグメントごとにスピンドロックを用意した。このようなスピンドロックを用意した場合、通信のプロトコルを適当に設定しないと、あるモジュールにした質問が再帰的に戻ってデッドロックを引き起こす恐れがある。

本統合法においては、質問の発散を避けるため、連結エッジセグメント対応探索モジュールに、返答処理の方法を指定する複数のモードを設けた。すなわち、指定された走査線において、

- (1) 現在分かっている対応結果のみを返答するモード、
- (2) 連結エッジセグメント対応探索モジュール内の情報のみで対応を求め返答するモード、
- (3) 区間対応探索モジュールの情報も参考にして対応を求め返答するモード、

である。三つのモードの内、(1) または (2) を指定して質問をすると、その返答処理に限り連結エッジセグメント対応探索モジュールでは別の質問が発生しなくなる。

また、区間対応探索モジュールには、探索範囲に関する条件を与える目的で、

(a) 視差の存在範囲を指定するモード、

(b) 質問するモジュールが求めた探索結果を添付するモード、そして、応答を速くする目的で、3.1節でも述べた、

(c) 指定した走査線において探索結果が得られていなくても、探索結果が既に得られている近接した走査線の結果を返答するモード、

を設けた。この内、(b) のモードが指定されたときは、その質問を発生したモジュールに質問をしないことにしている。

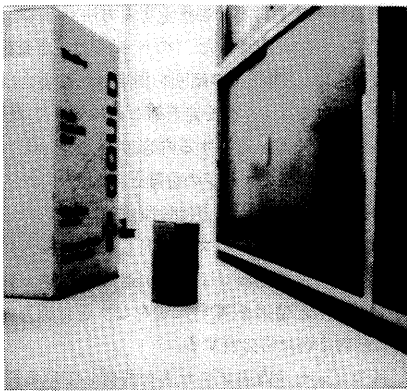
互いに質問し合う区間対応探索モジュールと連結エッジセグメント対応探索モジュール間では、区間対応探索モジュールが(2)のモードを指定して連結エッジセグメント対応探索モジュールに質問することで、質問が戻ってくることを避けている。

また、連結エッジセグメント対応探索モジュールが区間対応探索モジュールに質問する場合、基本的には(c)のモードを指定して質問している。しかし、多数の走査線における探索結果を参考にしても、なお対応連結エッジセグメントの決定的あいまいさが解消されない場合は、(b)のモードを用いる。それにより、区間対応探索モジュールに走査線に直交する方向の整合性を能動的に考慮させる。

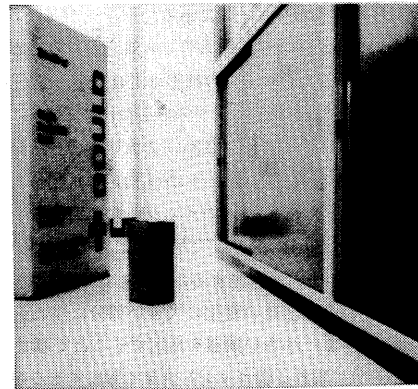
## 4. 実験結果

三つのステレオ対応探索アルゴリズムの有機的統合を、計算機上に構築し、実際のシーンを撮像したステレオ画像を用いて、実験を行った。

使用した計算機は、Sequent社S81で、CPUには32ビットのi80386が採用されており、最大30個のプロセッサが実装可能で

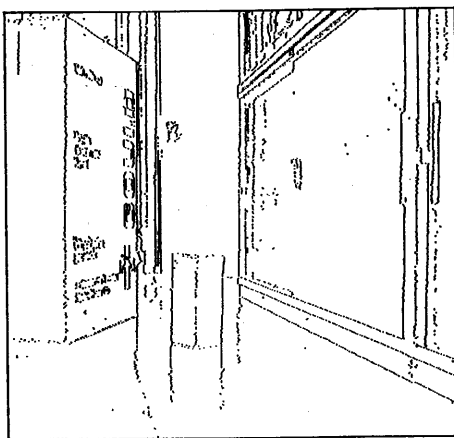


(a) 左画像

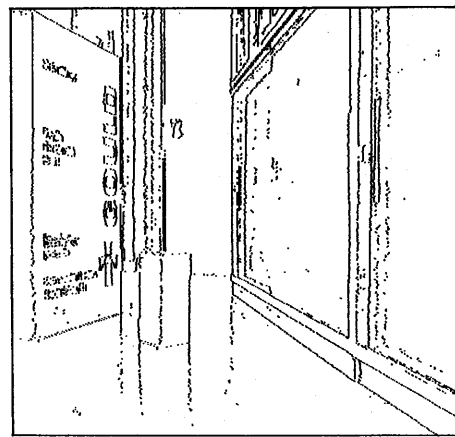


(b) 右画像

図4 原画像



(a) 左画像



(b) 右画像

図5 エッジ画像

ある（現在、8プロセッサのみ実装。）また、OSには、UNIX4.2BSDと同等のDYNIXが用いられている。

三つのアルゴリズムの統合の効果を明確にするため、①区間対応探索モジュールと連結エッジセグメント対応探索モジュールが、それぞれ単独に対応探索をする場合、②区間対応探索モジュールは単独に、連結エッジセグメント対応探索モジュールは区間対応探索モジュールの探索結果を参考にして処理する場合、その逆に、③連結エッジセグメント対応探索モジュールは単独に、区間対応探索モジュールは連結エッジセグメント対応探索モジュールの探索結果を参考にして処理する場合、④区間対応探索モジュールと連結エッジセグメント対応探索モジュールの双方が互いの探索結果を参考にする場合、および、⑤④に加えて区間対応探索モジュールが点对応探索モジュールの探索結果

をも参考にする場合、の5種類の実験を行った。ただし、④と⑤の場合は、相手のモジュールから探索結果を取り入れても、処理結果が変化しなくなったときに実行を終了させた。②と③の場合は、一方のアルゴリズムの処理結果を他方のアルゴリズムが利用して処理を進めるといふ処理結果の融合の手法を形成していることになる。

実験に用いた2台のCCDカメラを用いて室内を撮像した原画像、区間対応探索モジュールで用いたエッジ画像、点对応探索モジュールで用いた強エッジ左画像、および、連結エッジセグメント対応探索モジュールで用いた連結エッジセグメント抽出画像を、それぞれ、図4、図5、図6、および、図7に示す。連結エッジセグメントを抽出した図7からもわかるように、このステレオ画像においては、走査線に対して垂直な方向に伸びた直線が密集した部分があり、連結エッジセグメント対応法のみでは十分な解を得ることが困難である。

実験結果を表2に示す。結果の評価は、左画像中の連結エッジセグメントについて人間が求めた対応結果を正解として、誤り率と見落とし率を求めた。ただし、区間対応探索モジュール、点对応探索モジュールの結果に関しては、連結エッジセグメント上に存在し、正解が分かっているエッジについてのみ評価した。正解データは、101本の連結エッジセグメントの対応結果、すなわち、エッジ単位に直すと4612個、から構成されている。

表2から、一方のモジュールが他方のモジュールの探索結果を参考することによって、誤り率、見落とし率とも良くなっているのがわかる。また、二つのアルゴリズムの探索結果が処理状況に合わせて参考にされる本統合法では、処理結果の融合では得られなかった解の中で、新しく得られた部分もあったことがわかった。

本統合法による⑤の実験で対応を誤った連結エッジセグメントには、図7(a)中、×印を付けた。統合後も対応を誤った主な

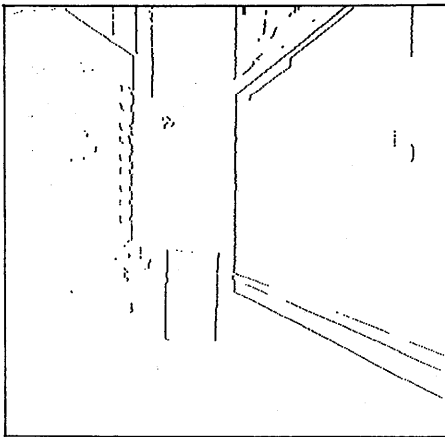
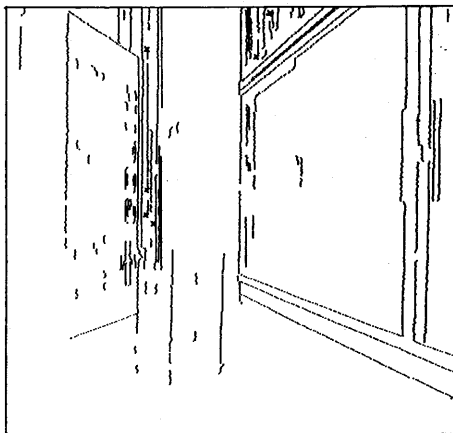
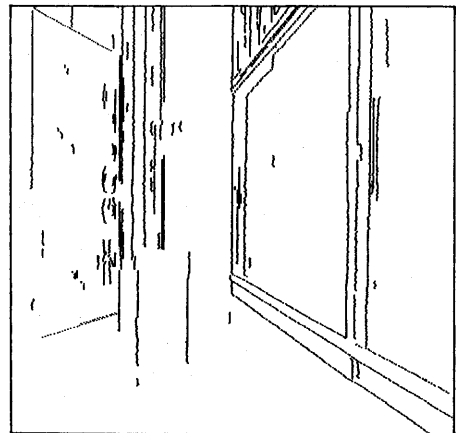


図6 強エッジ左画像



(a) 左画像



(b) 右画像

図7 連結エッジセグメント抽出画像

表2 実験結果

	INT_MOD		SEG_MOD		PT_MOD	
	誤り率 (%)	見落とし率 (%)	誤り率 (%)	見落とし率 (%)	誤り率 (%)	見落とし率 (%)
①	10.7	16.4	33.9	38.6		
②	10.7	16.4	4.7	8.9		
③	10.0	17.9	33.9	38.6		
④	7.9	14.1	4.0	10.9		
⑤	8.5	16.2	5.7	10.9	28.5	78.5

INT\_MOD : 区間対応探索モジュール  
 SEG\_MOD : 連結エッジセグメント対応探索モジュール  
 PT\_MOD : 点対応探索モジュール

- ① INT\_MOD と SEG\_MOD がそれぞれ単独に処理する
- ② INT\_MOD は単独に, SEG\_MOD は INT\_MOD の探索結果を参考にして処理する
- ③ SEG\_MOD は単独に, INT\_MOD は SEG\_MOD の探索結果を参考にして処理する
- ④ INT\_MOD と SEG\_MOD が互いの探索結果を参考にして処理する
- ⑤④に加えて, INT\_MOD が PT\_MOD の探索結果をも参考にして処理する

理由は, 区間対応探索モジュールで用いられるエッジ画像中, その連結エッジセグメントに相当するエッジがほとんどないことによる。また, ⑤の実験結果が④の実験結果と比べて若干劣るのは, 点対応探索法の精度が他の二つの対応探索法に比べて悪いことによるものと考えられ, 点対応探索モジュールの対応の求め方, また, 探索結果の取り扱い方に関して, より検討が必要である。

## 5. むすび

広範な適用環境に対処できる柔軟なステレオ対応探索アルゴリズムの実現のため, 本稿では, 異なった性質を持つ三つのステレオ対応探索アルゴリズムを有機的に統合する手法を述べた。屋内を撮像したステレオ画像を用いて行った実験の結果は, 本手法の有効性を示し, 異なった性質を持つアルゴリズムを統合する重要性を示した。

本統合法では, 各ステレオ対応探索アルゴリズムを実行するモジュールが, 各アルゴリズムに関する限り, 最適な処理環境を整備し, より良い結果を生成した。今後は, 距離センサ全体を考えた, 三つの対応探索モジュールから状況に応じて対応結果を獲得する上位のモジュールの実現もまた検討したい。

なお, 本研究の一部は科研一般 A62420034 による。

## 参考文献

- 1) Marr, D. and Poggio, T.: A Computational Theory of Human Stereo Vision, Proc. of R. Soc. Lond., Vol. B204, 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, IE78-97, 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, 情処学会 CV 研資, 33-2 (1984).
- 7) 大田友一: 画像を用いた三次元計測技術の動向, 電気学会論文誌, Vol. 107-C, No. 7, pp. 608-612 (1987).
- 8) Moerdler, M.L. and Kender, J.R.: An integrated system that unifies multiple shape from texture algorithms, Proc. of IUW, pp. 574-580 (1987).
- 9) Goto, Y. et al.: CMU Sidewalk Navigation System - A Blackboard-Based Outdoor Navigation System Using Sensor Fusion with Colored-Ranged Images, Proc. of FJCC, pp. 105-113 (1986).
- 10) 松山, 村山, 伊藤: 画像処理演算の複合的合成, 情処学会 CV 研資, CV-43-4 (1986).
- 11) 渡辺, 大田, 池田: 画像理解のための並列処理環境, 信学技報, PRU87-76, pp. 77-84 (1987).
- 12) 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. J68-D, No. 4, pp. 554-561 (1985).
- 13) Medioni, G. and Nevatia, R.: Segment-Based Stereo Matching, Computer Vision, Graphics and Image processing 31, pp. 2-18 (1984).