ステレオビジョン画像処理技術の実用化研究

金田　憲明*　成田　十一*　大滝　雄一郎*　本間　智之*
渡邉　健次郎**　伊関　陽一郎**　大野　宏**

A Study of Implementing a Stereo Vision System

KANEDA Noriaki*,　NARITA Soichi*,　OHTAKI Yuichiro*,　HONMA Tomoyuki*,
WATANABE Kenjiro **,　ISEKI Yoichiro **　and OHNO Hiroshi **

抄　録

2 台のカメラ画像の視差から距離画像を求めるステレオビジョン画像処理技術の実用化に関する研究を行なった。これまでよく使われてきた距離計算アルゴリズムには、対象物の境界がぼけてしまい、また対象にテクスチャの特徴がないと誤った距離画像が計算されるという欠点がある。本研究では、これらの問題を解決しかつ高速で計算できる距離画像計算手法を開発した。また、小型で計算速度の速い実用的なシステムを実現するための DSP ボードを製作した。実際の移動ロボットに搭載して障害物を避けて移動する実験を行ない、その有効性を確認した。

1. 緒　　言

CCD カメラやコンピュータの高機能低価格化が進み、大量の画像データを処理する時代が到来しつつある。一部高級車には画像処理を使った安全運転補助装置が導入され、最近研究開発が盛んな移動ロボットには、複数台のカメラ画像から距離画像を求めるステレオビジョンが利用されつつある。ただ、パーソナルコンピュータを利用したステレオビジョンは、寸法と消費電力が大きく、また、専用のハードウエアを開発する場合は、価格が高くなるためあまり普及していない。

本共同研究では、ステレオ画像から既存のシステムより精度よく高速に距離画像を求めるステレオビジョンのアルゴリズムを開発する。

また、DSP（Digital Signal Processor）を使った小型で高速なステレオビジョンを構築し、実用的なシステムの開発を目指す。

本論文では、2 章でステレオビジョンの概要について述べる。次に、3 章でステレオビジョンの一般的な計算方法である窓相関法について述べる。4 章では新しい手法としての節による対応付けによる方法とその評価実験ついて説明する。5 章では DSP による小型化、6 章では移動ロボットへの応用について述べ、7 章ではまとめと今後の課題について記す。

*株式会社マイクロビジョン
**研究開発センター

2. ステレオビジョンの概要

2.1　原理

ステレオビジョンは、カメラを使ったレンジ（距離）センサの一種で、通常のカメラ画像が視線と交差する対象表面上の一点の明度や色データからなっているのに対し、カメラと対象表面までの距離データ（距離画像）を出力する。

図 1 に計測原理を示す[1)]。左カメラ画像を基準画像とし、この画面上の点 P_l に対応する右カメラ画像（参照画像）の点 P_r を求める。直線 l と直線 r は点 P で交わるため、P の 3 次元座標（X, Y, Z）は、$P_l(x_l,y_l)$と $P_r(x_r,y_r)$から求まる。P が手前にあるほど P_l と点 P_r の位置の差（視差）は大きく、奥にあるほど視差は小さい。

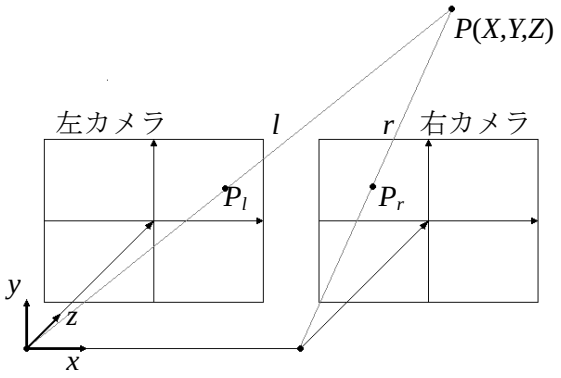


図１　ステレオビジョンの原理

点P_lに対応する点P_rは必ず直線上に存在するため、この直線上に沿って対応点を探索すればよい。この直線のことをエピポーラ線とよぶ。カメラの平行化を行なえば、エピポーラ線は x 軸に平行となるため、x 軸に沿って対応点を探索すればよく処理速度が速くなる。

2.2　ステレオビジョンの位置づけ

画像を使ったレンジセンサは、ある形状パターンや濃淡、スペクトルなど何らかの意味をもった光を対象に照射する能動的手法と、外部から何もせず撮像した画像のみから算出する受動的手法に大別される。

ステレオビジョンは受動的手法の一つで、能動的手法に比べてシステム構成が簡単で、広い範囲の距離データを短時間で計算できるという長所がある。その反面、距離精度が悪い、照明の変動に弱いという欠点がある。そのため、実際に使用する場合は他の能動的センサを併用することが多い。

2.3　歴史と現状

ステレオビジョンの理論は30年以上も前に提案されていた。しかし、計算量が非常に多いため、当時のコンピュータの計算能力では、1フレーム（320×240画素）の距離画像を計算するために数十分もかかり、画像データを計算機に取り込むことも大変で、実用化にほど遠いものであった。ただ、新しい計算アルゴリズムの提案などの研究は盛んに行なわれていた。

その後、半導体技術とカメラの進歩により10年ほど前から再び活発化した。これは、計算量を劇的に減らすアルゴリズムの開発、低価格の演算プロセッサの開発およびこれらプロセッサに複数の計算を同時に行なえる並列処理機能が搭載され、計算速度が飛躍的に速くなったためである。

最近の特徴としては、専用ハードウエア（FPGA や ASIC）により小型高速化を実現しており、実際の民生用ロボットや高級車向けの車間距離計測センサとして利用されている。車間距離計測では、ステレオビジョン単独ではなく、ミリ波レーダを併用している。

計算アルゴリズムは、次章に述べる窓相関法が一般的である。この方法は、計算量が多いものの計算自体が単純なため、ハードウエア化に向いている。しかし、誤った対応付けが起こりやすいため、カメラの台数をステレオビジョンに最低限必要な2台から、5台や9台に増やして、誤対応を減らしている。ただ、カメラ台数が増えるとその分計算量も増加し、システム全体が大型化するという欠点がある。そのため、本研究では、2台のカメラ画像からなるべく精度良く高速に距離画像を計算する手法の開発を目指した。

3. 窓相関法

2台のカメラ画像の対応点探索では、片方の画像の $n \times n$ の窓領域に対して、もう一方の画像の対応する窓領域を求める。窓領域の相関値を求める方法が古くから提案されている[2)]。

3.1　アルゴリズム

各画像の画素(x,y)での輝度値 $I_1(x,y)$、$I_2(x,y)$、その値域を $0 \le x, y < N$、相関演算の窓 i, j の値域を $0 \le i, j < W$、相関演算の探索範囲 d の領域を $0 \le d < D$ とすると、相関値は単純に輝度値の差の絶対値とし次式で表わされる[3)]。

$$S(x,y,d) = \sum_{i,j} \left| I_1(x+i, y+j) - I_2(x+i+d, y+j) \right|$$

窓領域の相関値から距離画像を計算する方法では、対応点探索において再帰相関演算を用いて計算量を減らすことができる。相関値の計算

では、参照画像において最初に計算した領域から全体的に右へ 1 画素ずらして相関値を計算する。この時、新たに右端の縦 1 列分の差の絶対値を加え、左端の縦 1 列分を引けばよく、他の領域は前の計算結果を使うことができる。この方法で求めた距離画像の例を図 2 に示す。

3.2 MMX による高速化

MMX とは、Multi Media eXtention の略で、画像処理など大量の計算処理を高速に実行する必要がある場合、複数のデータに対して同じ処理を同時に実行するための拡張命令セットのことである。インテル社が開発し、1997 年の初頭に発表され、Pentium プロセッサに搭載された。1 つの命令で複数のデータを同時に処理するという機能は、一般的には SIMD（Single Instruction Multiple Data）と呼ばれ、画像処理では、複数のデータに対して同じ計算処理を行なう場面が少なくなく、非常に有効である[4]。

MMX では、8bit×8 個（64bit）のデータを同時処理することができ、演算の種類も多い。例えば、PADDB mm1,mm2 という命令を使うと図 3 に示すとおり、1 回の命令で 8bit のデータを 8 個同時に加算できる。最新の Pentium4 プロセッサでは、さらに改良され 16bit×8 個（128bit）のデータを同時処理することができる。

より高速で動作させるためには、最初から MMX でプログラムした方が良いが、C コンパイラにも自動で MMX 命令に変換し高速化する機能がある。この機能を利用すると、最初から MMX を使う場合にくらべて 8 割程度の処理速度を実現できる。

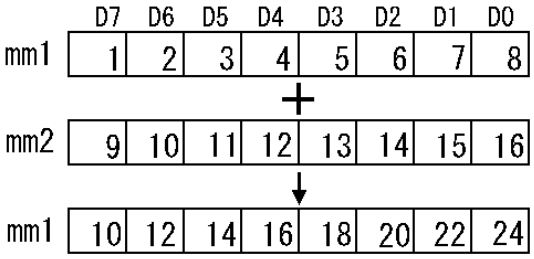


図 3　MMX 命令 PADDB mm1,mm2 の動作
（表の各値は 8bit のデータ値を示す）

3.3 特徴

窓相関法による距離画像計算は、計算量が多いものの加算や積算といった計算が主で、ハードウエアによる高速化に向いている。

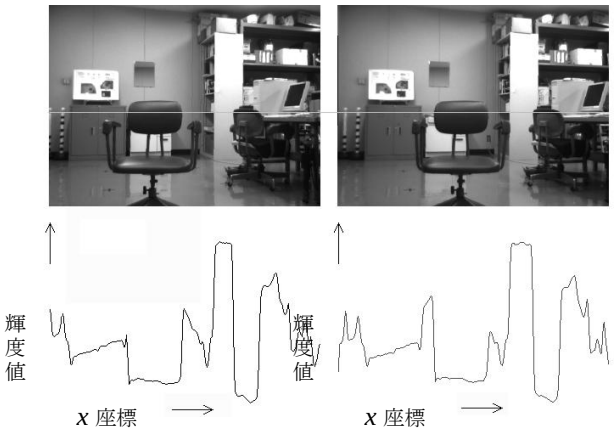
図 2(c)の計算結果をみると、ある大きさの窓領域の相関を計算するため、その中に強い特徴があるとこれに影響を受けて誤対応が起き、境界がぼけてしまう。また、窓領域に明るさの変動がなく単一の場合、似たような候補が沢山あるため誤対応が起きやすくなる。その結果、図 2(c)に示すとおり、椅子の背もたれの白い部分の中に黒い誤った部分が生じる。

4. 節による対応付け

これまで述べた窓相関法は、すでに知られた方法であるが、境界がぼけたり、窓領域に特徴がないと誤対応が起きたりするという欠点がある。そこで、これらの問題を解消する方法として、節の対応付けによる距離画像計算手法を提案する。

(a)左カメラ画像（基準）　(b)右カメラ画像（参照）　(c)距離画像(手前ほど白い)

図 2　窓相関法で求めた距離画像



(a) 基準画像　　(b) 参照画像

図 4　1 ラインの画素の輝度値

4.1　アルゴリズム

図 4 に示すとおり、基準画像の 1 ラインの画素の輝度値とこれに対応する参照画像の輝度値を取り出す。次に図 5 に示すとおり、ある基準で節を作成する。この節を対応付けの基準とし、図 6 に示すとおり、参照画像の 1 ラインの対応する節を計算する。窓相関法では、窓領域の計算を行なうため計算量が多くなってしまうが、本手法は 1 ラインのみの値を比較して計算するため計算量が少なくてすむ。

本手法ではどのような基準で節を設定するかが重要なポイントとなる。画像の対象の境界が正しく検出できればこれが節の区切りとなり、距離画像における対象の境界がはっきり求まる。

本手法でも誤対応が発生するが、その周辺で誤対応が発生しなければ、中間値フィルタ処理による平滑化で誤対応を抑え、図 7 のような距離画像を求めることができる。

図 2(c)の窓相関法で求めた距離画像と図 7(b)の節対応付けで求めた距離画像を比較すると、

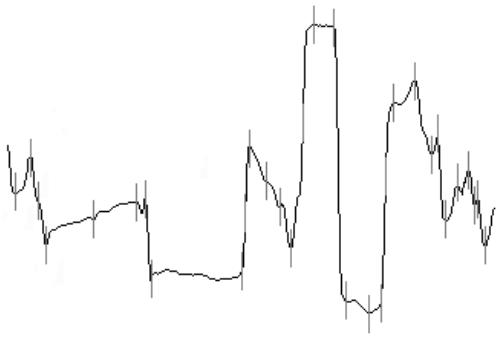
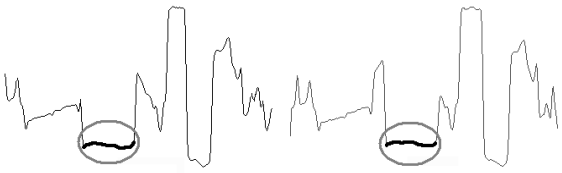
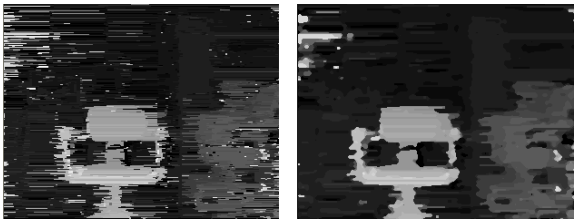


図 5　節の作成



(a) 基準画像　　(b) 参照画像

図 6　節を基準とした対応付け



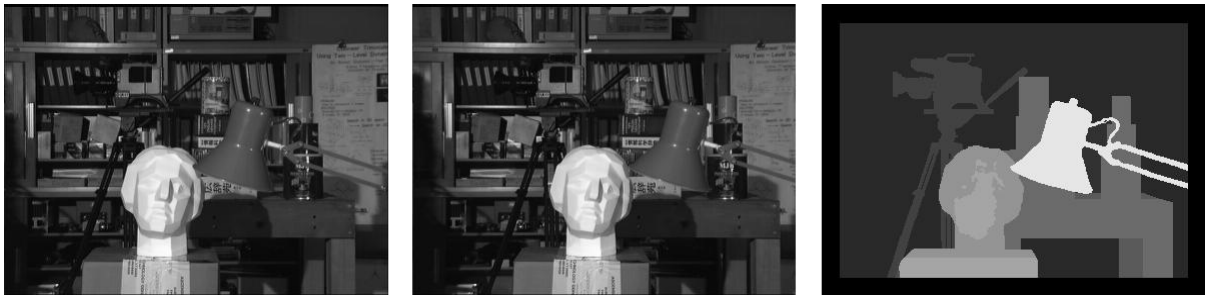
(a) 中間値フィルタ処理前　　(b) 同処理後

図 7　節対応付けで求めた距離画像

節による対応付けの方はカメラに映っている椅子の境界がはっきりしている。また、椅子の背もたれの部分は特徴がないため窓相関法は誤対応により部分的に黒くなったり白くなったりしているが、節対応付けではほぼ均一の色になっている。

4.2　評価実験

ここで提案した節による対応付けによるステレオビジョンシステムを評価するために、距離



(a) 左カメラ画像　　(b) 右カメラ画像　　(c) 真の距離画像

図 8　評価用の基準画像

画像の精度と処理速度について、窓相関法との比較を行なった。

（１）距離画像の精度

図 8 に示す画像はステレオビジョンシステムを評価するための基準画像としてよく利用されており、左右のカメラ画像と正確な距離画像がネット上で公開されている[5]。この左右カメラ画像から窓相関法と節対応付けによって求めた距離画像を図 9 に、真の距離画像との差を図 10 に示す。

図 10 より、節対応付けの方が窓相関法にくらべて誤りの少ないことがわかるが、数値を使って二つの方法を比較する。具体的には、計算で求めた距離画像のうち正しくない割合がどのくらいかを、誤対応率として次式で求める[6]。

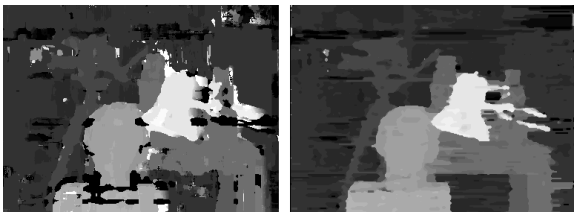
$$B = \frac{1}{N}\sum_{(x,y)}\left(\left|d_C(x,y) - d_T(x,y)\right| > \delta_d\right)$$

ここで、N は距離画像を求める全画素数、$d_C(x,y)$ は計算で求めた距離画像、$d_T(x,y)$ は真の距離画像、δ_d は誤対応と判定する閾値である。この式を使って求めた誤対応率を表 1 に示す。節対応付けは窓相関法にくらべ誤対応と判定された画素の数は半分に減少している。

（２）処理速度

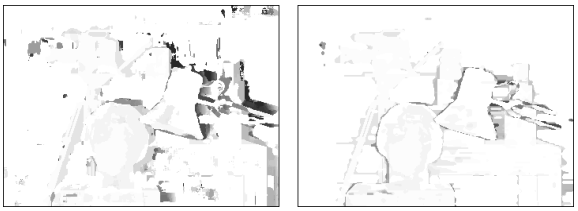
1 フレームの距離画像の計算時間を、窓相関法と節対応付けで比較した。結果を同じく表 1 に示す。ここで、窓相関法の窓の大きさは 13×13 で、両者とも 1 フレームの画像の大きさは 320×240、対応する箇所の探索範囲は横方向に 32 である。また、使用したパソコンの CPU は 1.6GHz の Pentium M プロセッサである。

結果は、節対応付けの処理速度が若干速かった。これは、節対応付けが 1 ライン値を、窓相関法では 13×13 の領域の値を計算するため、節対応付けの方が計算量は少ないからである。ただ、窓相関法は前の計算結果をうまく使うことで全体の計算時間を短くしているため、それほど差はなかった。



(a)窓相関法　　(b)節対応付け

図 9　距離画像



(a)窓相関法　　(b)節対応付け

図 10　計算で求めた距離画像と真の距離画像の差（黒いほど差が大きい）

表 1　窓相関法と節対応付けの比較
（距離画像は 255 階調で δ_d=20 とした）

	窓相関法	節対応付け
誤対応率(%)	14.0	6.9
処理速度(ms)	61.0	57.1

5. DSP による小型化

DSP（Digital Signal Processor）は、音声信号を実時間で処理するために開発されたプロセッサである。当時の一般的な低価格プロセッサは、パーソナルコンピュータ用に開発されたもので、高機能であるものの処理速度が遅く音声信号の実時間処理が不可能であった。そのため、各社から音声信号の実時間処理に適したアーキテクチャのDSPが開発・製品化された。

現在 DSP も高機能化し、画像などの大量データが高速に処理できるようになった。ただ、カメラからの映像信号をデジタル化して DSP に転送する回路を自前で製作する必要があり、利用が難しかった。（株）マイクロビジョンは、以前から各種 DSP ボードを開発しており、今回の共同研究では、カメラ画像を DSP 用に入出力するボードと、距離画像計算を行なう DSP ボードを開発した。主な仕様は次のとおりである。

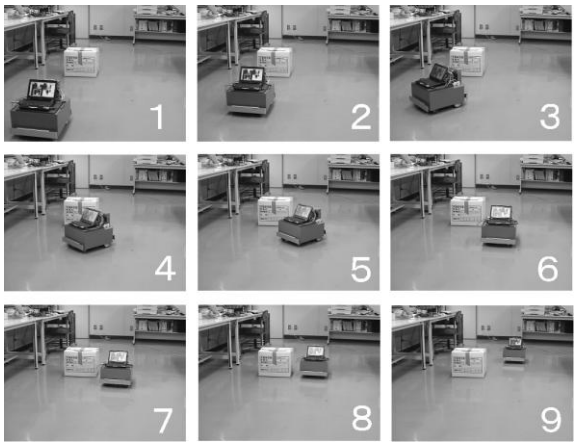


図 11　移動ロボットの障害物回避実験

図 12　飛行機

［MV-39］画像入出力ボード

・カメラからのデジタル信号(LVDS)を入力し、アナログ信号(NTSC)で出力する。

・画像データをDSPボード(MV-40)に送る。

［MV-40］DSPボード

・DSPにて画像処理を行なう。

・USBにてPCと接続。

・LANにて画像出力が可能。

なお、設計変更等によりDSPボードの開発が遅れたため、DSPを使ったステレオビジョン画像処理にどのくらいの時間を要するか、また、DSPの並列処理機能を利用したり、複数個のDSPを使用したりする場合、どのくらいの処理速度が得られるか等に関し、(株) マイクロビジョン[7]では引き続き開発を行なう。

6. 移動ロボットへの応用

実環境での応用を想定して、昨年度の先導的戦略研究調査事業で開発した小型移動ロボットにステレオビジョンシステムを搭載し、障害物を避けて通る実験を行なった。図 11 に示すとおり、障害物である段ボール箱を正しく認識し避けて通ることを確認した。

さらに、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託研究で開発中である除雪ロボットに障害物検出センサとして搭載する。今年度愛知県で開催される「愛・地球博」にて、6 月 9 日から 19 日まで展示・実演を行なう。

また、障害物検出および高度測定用に小型化したステレオビジョンを搭載する目的で、図 12 に示す小型飛行機を委託で製作し実験を行なった。

7. 結　　言

（1）ステレオ画像から精度よく高速に距離画像を求めるステレオビジョンのアルゴリズムを開発した。

（2）小型で高速なステレオビジョンを実現するための DSP ボードを開発した。

（3）実際の移動ロボットに搭載して障害物を回避する実験を行ない、その有効性を確認した。

（4）(株) マイクロビジョンでは引き続き研究を行ない、小型で高速なステレオビジョンシステムの製品化に取り組む。

参考文献

1）佐藤淳，“コンピュータビジョン－視覚の幾何学”，コロナ社，1999

2）松山隆司ほか，“コンピュータビジョン：技術評論と将来展望”，新技術コミュニケーションズ，1998

3）金出武雄ほか，“ビデオレートステレオマシンの開発”，日本ロボット学会誌，Vol15, No2，p.261-267，1997

4）岡田慧ほか，“PC による高速対応点探索に基づくロボット搭載可能な実時間視差画像・フロー生成法と実現”，日本ロボット学会誌, Vol18，No6，p.896-901，2000

５）Middlebury College Stereo Vision Research Page
http://cat.middlebury.edu/stereo/data.html
６）D. Scharstein, “A Taxonomy and Evaluation Of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms”, *IJCV*, 2002
７）（株）マイクロビジョン
http://www.mvision.co.jp