

# 位相限定相関法を用いたステレオビジョン

## Stereo Vision System Using Phase Only Correlation

○瀧田健児\*, 青木孝文\*, 樋口龍雄\*, 小林孝次\*\*

○Kenji Takita\*, Takafumi Aoki\*, Tatsuo Higuchi\*, Koji Kobayashi\*\*,

\*東北大学 大学院情報科学研究科, \*\*株式会社 山武

\*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University \*\*Yamatake Corporation

キーワード : 3次元計測 (3D measurement), ステレオビジョン (stereo vision), 位相限定相関法 (phase only correlation), 窓関数 (window functions), 多重解像度画像 (multi-resolution image),

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉05 東北大学 大学院情報科学研究科 樋口研究室  
瀧田健児, Tel.: (022)217-7169, Fax.: (022)263-9406, E-mail: kenji@higuchi.ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

現在, 産業応用に広く使われている3次元計測技術の大部分は, 電波, 音波, 構造光などを測定対象物に能動的に照射することにより行われている。能動的な手法は, 一般に高精度な計測が可能であるが, 適用できる環境と測定対象物が限定されるという欠点がある。例えば, 移動ロボットの視覚においては, 複数台のロボットが同一環境に存在するときに能動的な手法を用いると, お互いの干渉が問題となる。また, 計算機とユーザーの自然な対話を実現するマンマシンインターフェースのための3次元計測技術の需要が高まりつつあるが, この場合, 測定対象に能動的な手法を適用するのは好ましくない。

一方, 自然光のみを利用するステレオビジョン法は, 受動的な計測手法の一つであり, 適用できる環境が広く装置も簡便であるため, 広い用途に適用できる。ステレオビジョン法の最大の問題は, 2

枚のステレオ画像中の各点をいかに誤りなく対応させるかという点にあり, SAD (Sum of Absolute Difference) や各種の相関関数を用いた画像の対応づけが提案されている<sup>1)</sup>が, 多数の対応誤りの発生が実用上問題になると考えられる。

筆者らは, これまで位相限定相関関数 (Phase Only Correlation) を用いた高精度な画像照合手法とその応用を検討してきた。位相限定相関関数は, 通常の相関関数よりも高精度な画像照合を可能にすることが知られており, 近年, 指紋照合やスマートセンサなどの応用において, 高い認識率と高速処理を達成している<sup>2), 3)</sup>。また, 位相限定相関関数を用いてステレオ画像の視差を求める手法も検討されている<sup>4)</sup>。本稿では, <sup>4)</sup>と同様にステレオビジョンの対応点探索問題に位相限定相関関数を利用する手法について述べるが, 特に窓関数を利用することにより安定して対応点を求められることを示す。また, 多重解像度画像にこの手法を適用した階層化マッチング法を提案するとともに, こ

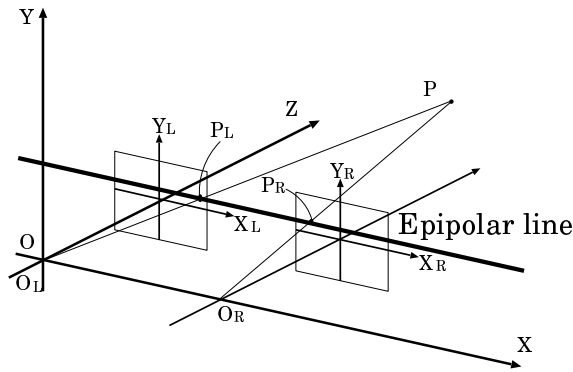


Fig. 1 ステレオビジョンの原理

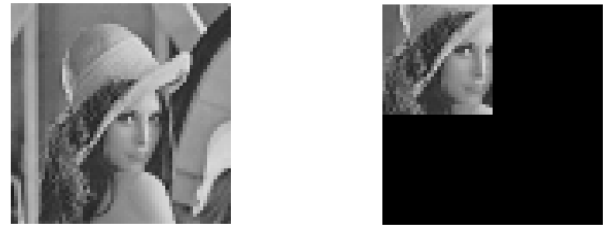
れに基づく3眼ステレオビジョンシステムを示す。

## 2. ステレオビジョン法

能動的にエネルギーを照射することなく、自然光だけで3次元距離計測を行うステレオビジョン法は、対象物に影響を与えることなく画像のみから3次元形状を復元することが可能である。この手法は、人が視差により奥行きを知覚するメカニズムに基づいて、左右に並べた2台のカメラで対象物をとらえ、画像間の視差から3次元形状を復元する。

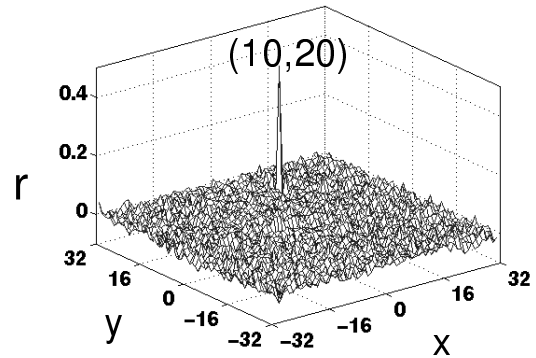
Fig. 1にステレオビジョンの原理を示す。カメラにより得られる画像は対象物の画像面への投影像であり、対象物の各点は左画像面と右画像面に投影される。例えば、点Pは左右の画像面の点 $P_L$ および $P_R$ にそれぞれ投影される。点 $P_L, P_R$ は対応点と呼ばれ、それぞれの画像上での座標 $X_L, X_R$ の差が視差である。ここで、対応点はエピポーララインの上にあるという拘束を満たし、エピポーララインはカメラの配置によって決定される。対応点分かると三角測量の原理で対象物までの距離を計算することができる。したがって、ステレオビジョン法の最大の問題は、画像面に投影された点同士をいかに誤りなく対応させるかという点である。

画像間の対応づけは、左画像の対象点を中心と



(a)

(b)



(c)

Fig. 2 位相限定相関法による画像の移動量検出:  
(a) 入力画像, (b) 画像 (a) から切り出した画像,  
(c) (a) と (b) の位相限定相関関数

する小領域と、右画像のエピポーラライン上の各点を中心とする小領域との類似度を計算する。その中で最も類似度が高い点を対応点とする。この類似度の評価法はさまざまあり、SADや相関関数を用いる手法が提案されているが対応づけの困難さが指摘されている<sup>1)</sup>。本稿では、類似度の評価法として通常の相関関数よりも信頼性の高い位相限定相関関数を用いる。

## 3. 位相限定相関法

位相限定相関法は、画像の輝度の変化とノイズの存在に対してロバストであり、画像の移動量検出に対して鋭敏な特性を示す<sup>2)</sup>。位相限定相関関数 $r(x, y)$ は複素行列 $R$ を逆離散フーリエ変換して得られる(これを相関平面と呼ぶ)。複素行列 $R$ は、2つの画像を $f(x, y)$ および $g(x, y)$ とし、こ

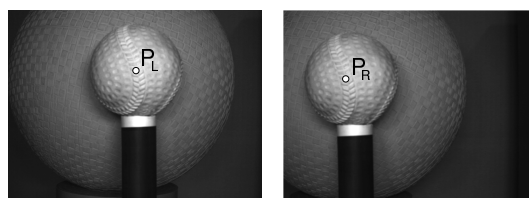
これらの2次元離散フーリエ変換を  $F(u,v), G(u,v)$  とすると、以下の式によって表される。

$$R(u,v) = \frac{F(u,v)G^*(u,v)}{|F(u,v)G^*(u,v)|} \quad (1)$$

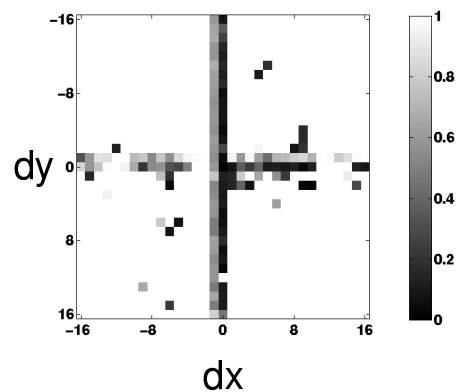
2つの画像が同一である場合、相関平面は原点に大きさ1のピークが現れる。片方の画像がもう一つの画像を移動させた画像である場合、相関平面にはその移動量に応じた位置にピークが現われる。Fig. 2は、入力画像(a)の一部を切り出した画像を(b)として、位相限定相関法により画像の移動量を検出した例である。切り出した画像の移動量は  $x$  方向に10ピクセル、 $y$  方向に20ピクセルであるが、相関平面において、画像の移動量に対応した座標(10,20)にピークが現われている。また、画像の移動量がサブピクセルレベルの場合にも、適当な補間法を用いることにより、移動量検出が可能である。

Fig. 2の結果は、ほぼ同一の画像を用いて、移動量を検出する理想的な場合の議論であるが、この原理を実際にステレオビジョンの視差計測に用いた場合、対応点の検出自体に失敗するケースが多い。これは、左右の画像のわずかな差と画像端の不連続性が雑音となって働き、対応点における相関値が相対的に低下するためである(位相限定相関法では、循環畳み込みを行うので、画像端に不連続性が生じることに注意せよ)。本稿では、この問題を解決するために、特に窓関数を利用することを提案する。窓関数により、画像端での不連続性の影響を排除し、注目している画像の中心部での計測精度を向上させることができる。窓関数には、画像の大きさを  $X \times Y$  ピクセルとしたとき、以下の式で表される2次元に拡張した一般化ハミング窓  $w_H(x,y)$  を用いる。ここで、 $\alpha = 0.50$  である。

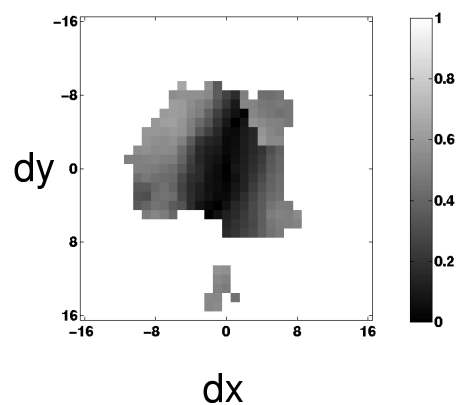
$$w_H(x,y) = \left\{ \alpha + (1-\alpha) \cos \frac{2\pi x}{X-1} \right\} \cdot \left\{ \alpha + (1-\alpha) \cos \frac{2\pi y}{Y-1} \right\} \quad (2)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 画像の中心を変動させたときの視差の誤差: (a) 実験画像, (b) 窓関数なし, (c) 窓関数あり

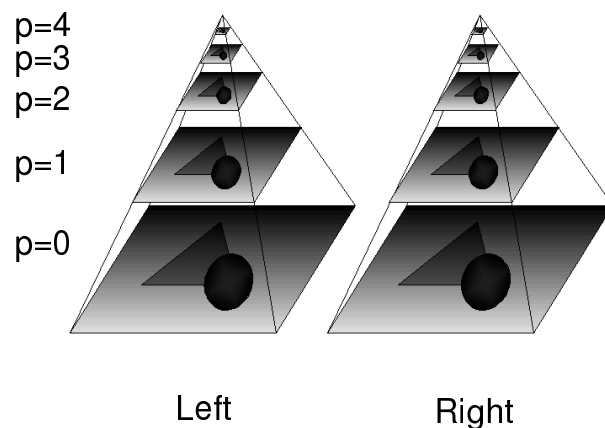


Fig. 4 多重解像度画像

用いる窓については、半値幅が同じで中心から端へかけてなめらかに減少するものであれば、計測精度に対する有意差は見られない。

窓関数の効果を調べるために、Fig. 3(a)に示すステレオ画像に対して、窓関数の有無による視差の誤差を測定した。まず、Fig. 3(a)に示すステレオ画像の対応点  $P_L, P_R$  を中心にそれぞれ小領域画像 A, B を切り出す。次に、小領域 B の中心を点  $P_R$  から  $x, y$  方向にそれぞれ  $dx, dy$  だけ移動させると、画像 A, B 間に視差が生じる。Fig. 3(b), (c) は、各々の誤差（真の視差と検出された視差との差）を、濃淡図で表したものである。窓関数を用いない方法では、不連続性による影響により正しい視差を求められない (Fig. 3(b))。一方、窓関数を用いる方法では、小さな移動に対して、安定して高精度に視差を求めることが可能である。ただし、視差が大きくなると、窓関数を用いることによって生じる画像の歪みにより、正しい視差を求められなくなるという問題点も観測された (Fig. 3(c))。

#### 4. 位相限定相関法を用いたステレオビジョンアルゴリズム

前節で述べたように、位相限定相関法を窓関数と組み合わせて用いることにより、安定して画像の視差を求めることができるが、その際に、視差がいつも安定して求められる領域 (Fig. 3(c) 黒い部分) に絞り込む必要がある。本節では、多重解像度画像を用いて、上の階層での探索結果を利用することで安定した視差量検出を実現している。多重解像度画像として、以下の式で表されるような4分木階層画像を生成する。

$$I_{p+1}(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 I_p(2x+i, 2y+j) \quad (3)$$

本アルゴリズムでは、Fig. 4に示すように  $p=4$  までの階層画像を生成する。 $p=0$  が原画像である。

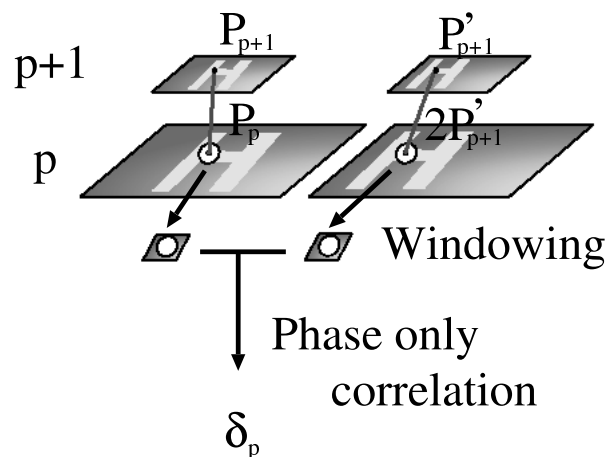


Fig. 5 各階層における対応点探索法

ステレオ画像の点の対応づけは、最上位階層から最下位階層に向けて行う。まず、最上位階層の画像は原画像に比べると非常に小さいので視差も小さい。したがって、多重度を十分大きくすることにより、最上位階層の画像上では視差がほぼ一定となる。この視差は、最上位階層の左画像と右画像全体を位相限定相関法で計算することによって得られる。次の階層からは、以下の方法によって視差を求め、各階層の対応点を決定する。

各階層における対応点の探索法を Fig. 5に示す。第  $p$  階層において、左画像上の点  $P_p(x, y)$  に対応する右画像上の点  $P'_p(x', y')$  を探索するとき、第  $p$  階層の視差を表すベクトル  $D_p$  は、点  $P_p, P'_p$  を表すベクトル  $\mathbf{P}_p, \mathbf{P}'_p$  により、以下の式で表される。

$$D_p = \mathbf{P}_p - \mathbf{P}'_p \quad (4)$$

このとき、右辺の  $\mathbf{P}_p$  は、以下の式に示すように1つ上の階層画像との関係から直接導かれる。

$$\mathbf{P}_p = 2\mathbf{P}_{p+1} \quad (5)$$

一方、 $\mathbf{P}'_p$  は、直接求めることができないため、探索が必要となる。探索は、それぞれの画像においてベクトル  $\mathbf{P}_p, 2\mathbf{P}'_{p+1}$  が指す点を中心とした小領域を窓関数で切り出し、位相限定相関法により小領域内の局所視差ベクトル  $\delta_p$  を求めることによ

て行われる。このとき、ベクトル $P'_p$ は、以下の式で表される。

$$P'_p = 2P'_{p+1} + \delta_p \quad (6)$$

画像を切り出す際に、それぞれ対象点と探索空間の中心を上階層と合わせるにより、視差を安定して求められる微小移動領域に絞り込んでいる。また、相関平面には様々なノイズピークが現われるため、エピポーラ拘束を適用する。本アルゴリズムでは、エピポーララインのずれを考えて、エピポーララインに7ピクセルの幅を持たせている。

この操作を最下位階層 $p=0$ まで繰り返し、原画像での対応点の視差 $D_0$ を求めることにより、3次元形状を復元する。

以上が2眼におけるステレオビジョンアルゴリズムであるが、本ステレオビジョンシステムでは3台のカメラを用いる。一般に、カメラを複数台に増やすことにより、以下の効果を期待できる。

- 1) オクルージョン（1台のカメラからしか見えない点）の減少
- 2) 1点に対し複数の結果が得られるので、信頼度の高い結果を選択することでより信頼の高い対応づけが可能。

2眼ステレオビジョンシステムの左カメラの上にカメラを1台追加することで、水平方向に発生するオクルージョンを削減することが可能である。本システムでは、左-右間で前節で述べた多重解像度画像を用いたステレオビジョンを行い、左-上間にも同様の処理を行う。左画像上の1点につき、左-右間と左-上間の2つの結果が得られるが最下位階層において高い相関を示した方を結果として採用する。

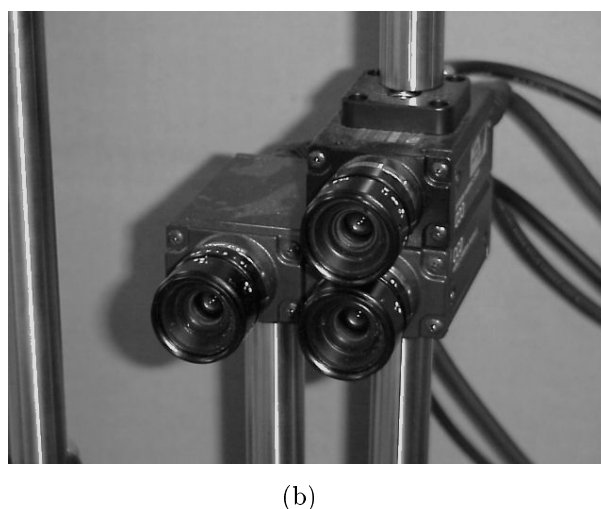
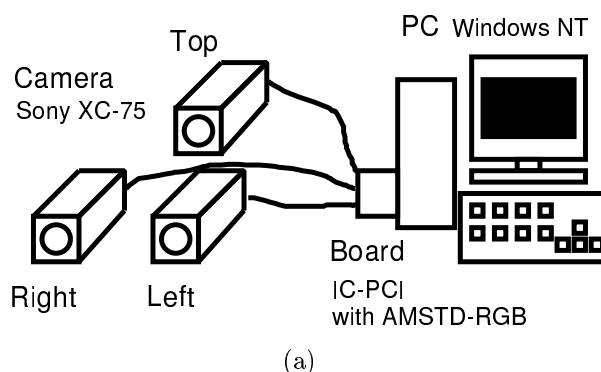


Fig. 6 3眼ステレオビジョンシステム：(a) システム構成，(b) ステレオカメラヘッド

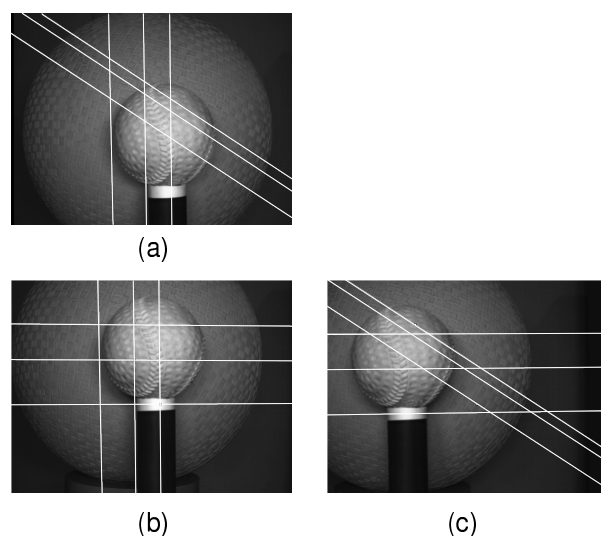


Fig. 7 エピポーララインの例

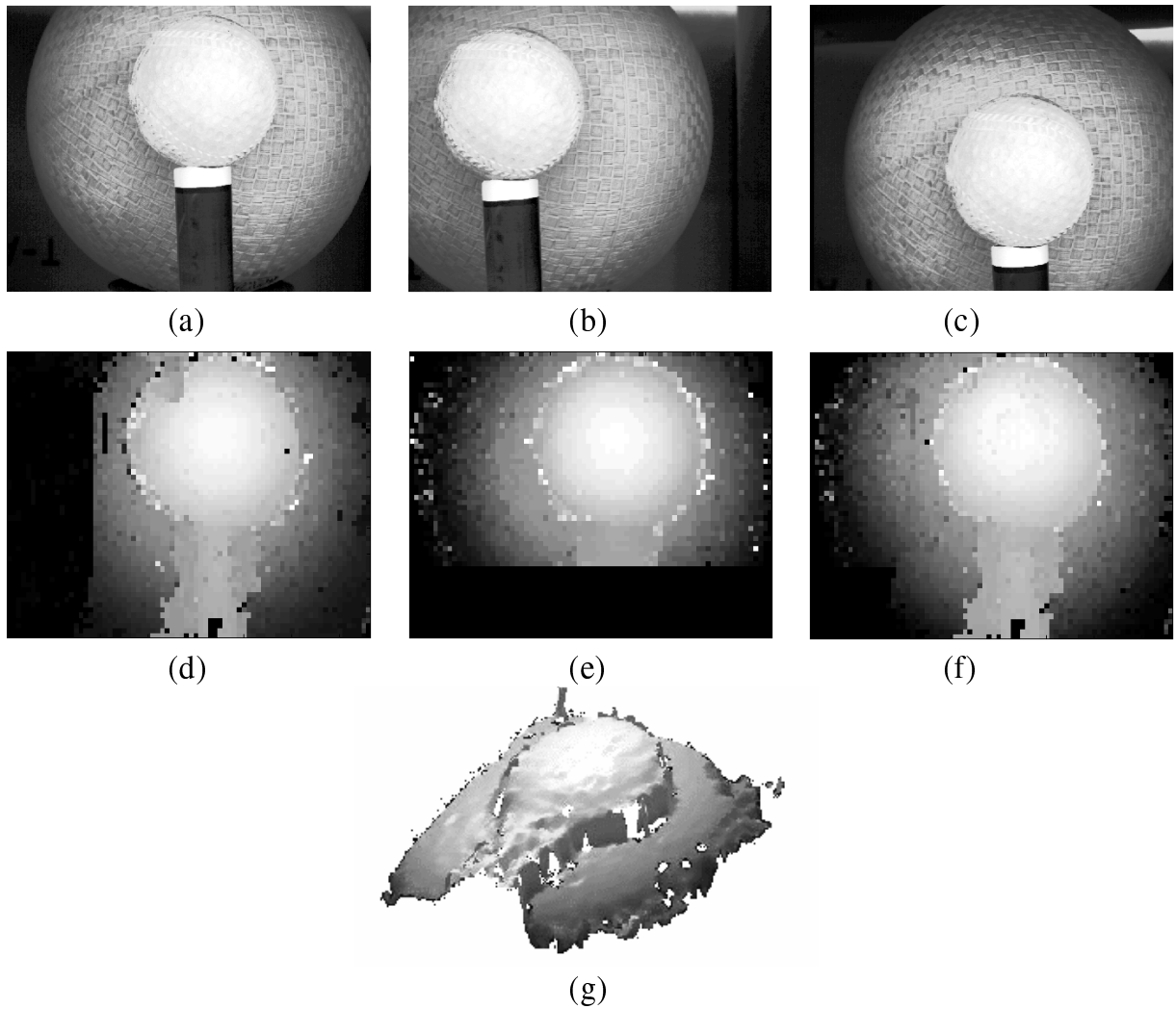


Fig. 8 2つのボール：(a) 左画像，(b) 右画像，(c) 上画像，(d) 左-右間の計測結果，(e) 左-上間の計測結果，(f) (d) と (e) を統合した結果，(g) 3次元形状

## 5. 計測実験

### 5.1 システム構成

本稿の実験で用いたシステムについて示す。3台のCCDカメラ（SONY製XC-75）を左カメラを中心としてカメラ視線が平行になるように固定した。画像取り込みボード（IMAGING Technology製IC-PCI with AMSTD-RGB）を用いて、フレームメモリR, G, Bを通して、それぞれ右, 左, 上カメラの画像を $640 \times 480$ ピクセル、グレイスケール256階調で3枚同時にPCに取り込む。本ステレオビジョンシステムの構成をFig. 6(a)に示す。また、ステレオヘッド部をFig. 6(b)に示す。各点

の対応点探索の拘束条件となるエピポーララインをWeb<sup>5)</sup>上で提供されているアルゴリズムにより求めた。Fig. 7に導出したエピポーララインの例を示す。

### 5.2 計測結果

先に述べたシステムを用いて計測を行った。Fig. 8は、棒の上に小さいボール、その奥に大きいボールを配置し、計測を行った結果である。Fig. 8(a),(b),(c)はそれぞれ左, 右, 上カメラから取り込んだ画像である。Fig. 8(d),(e)は、それぞれ左-右間, 左-上間に2眼ステレオビジョンアルゴリズムを用いて視差の計測を行った結果である。左-右間の計測結

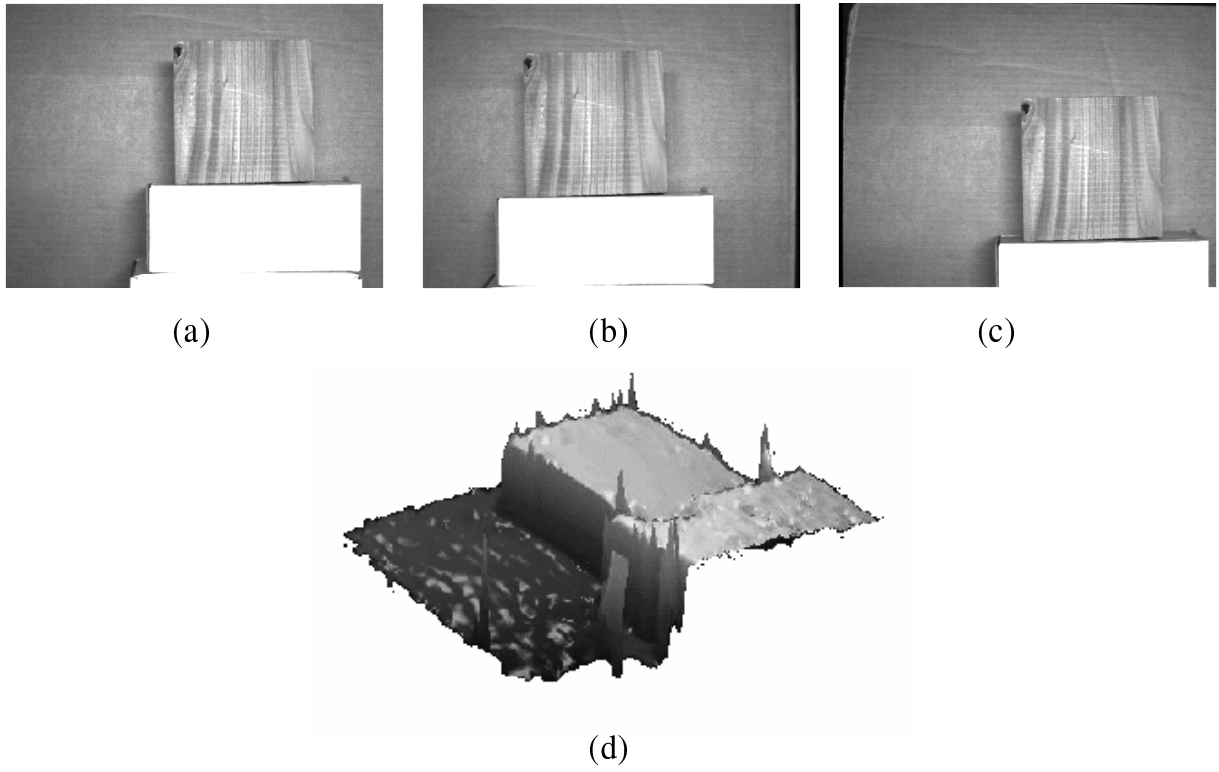


Fig. 9 カメラと平行に置かれた木の箱 : (a) 左画像, (b) 右画像, (c) 上画像, (d) 3次元形状

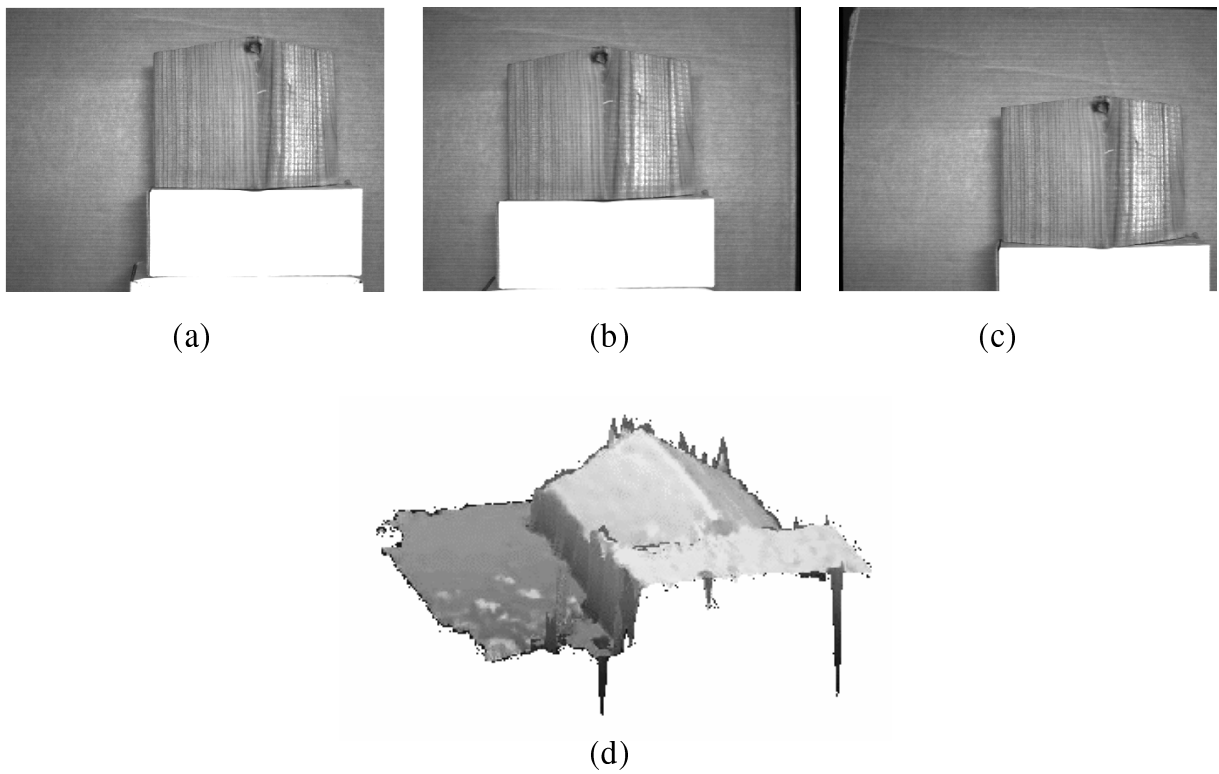


Fig. 10 カメラに対して斜めに置かれた木の箱 : (a) 左画像, (b) 右画像, (c) 上画像, (d) 3次元形状

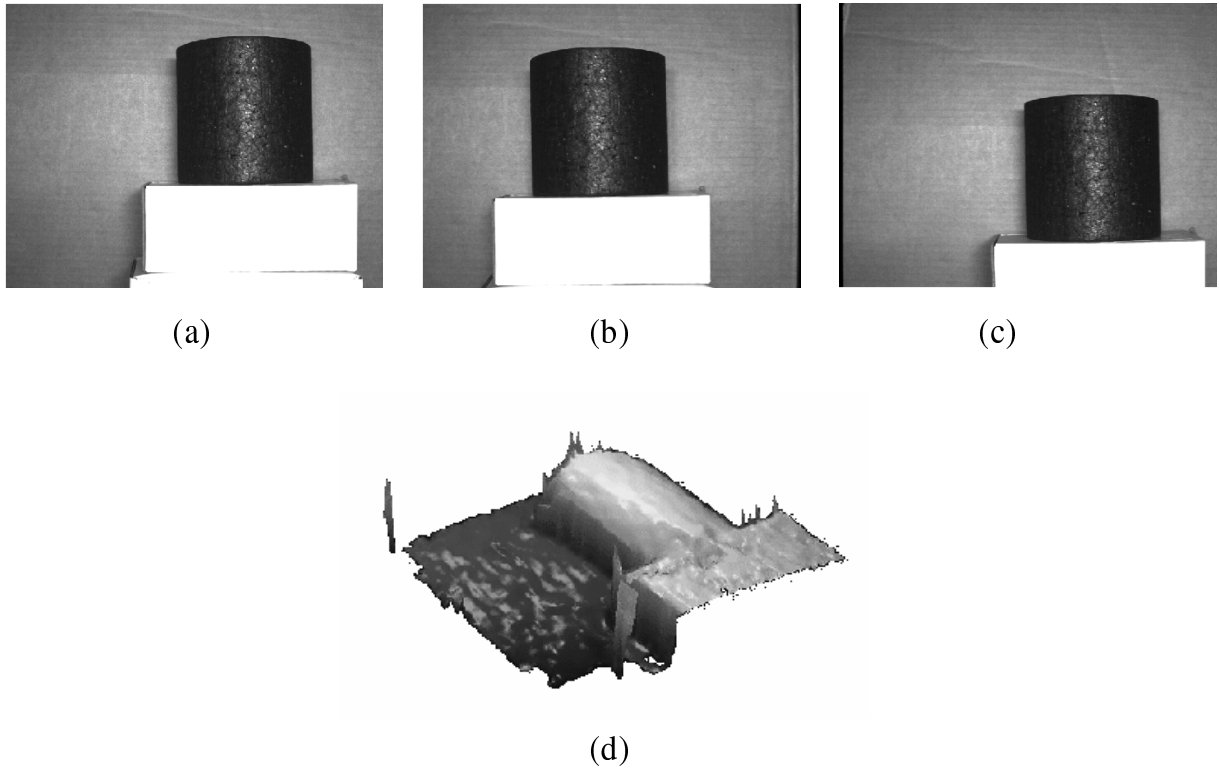


Fig. 11 円柱 : (a) 左画像, (b) 右画像, (c) 上画像, (d) 3次元形状

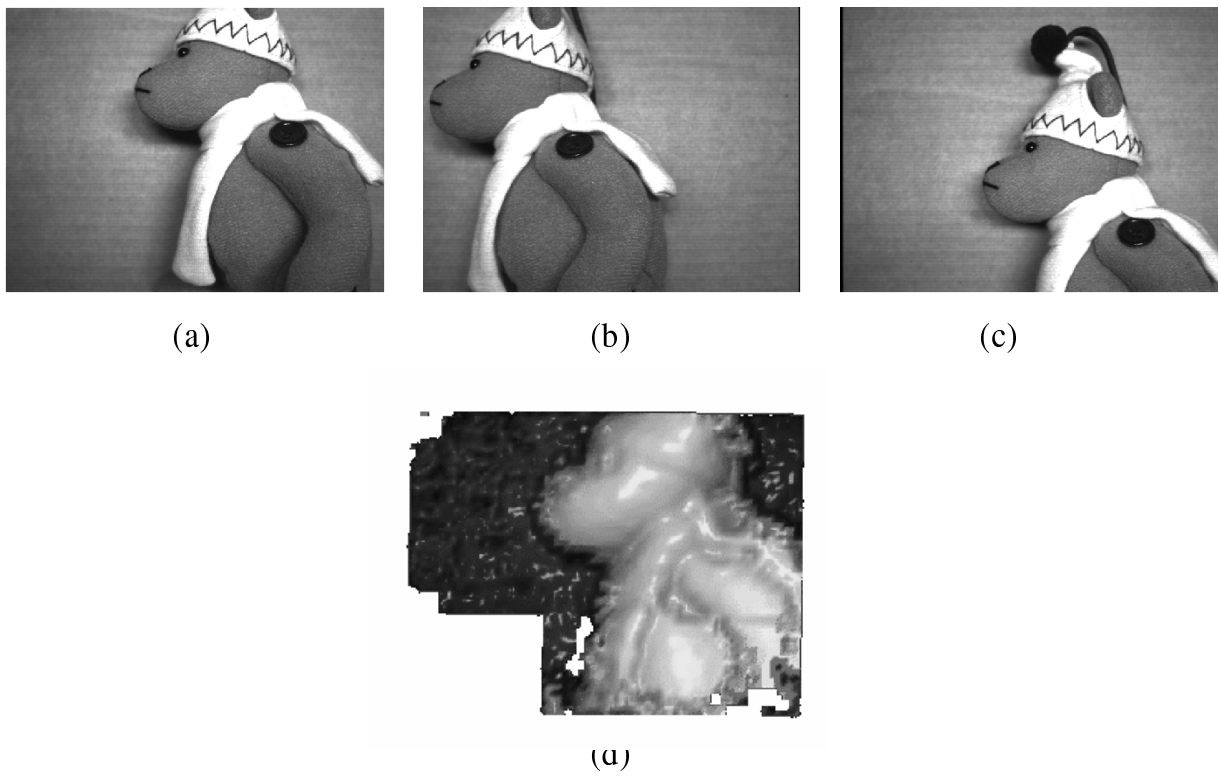


Fig. 12 めいぐるみ : (a) 左画像, (b) 右画像, (c) 上画像, (d) 3次元形状



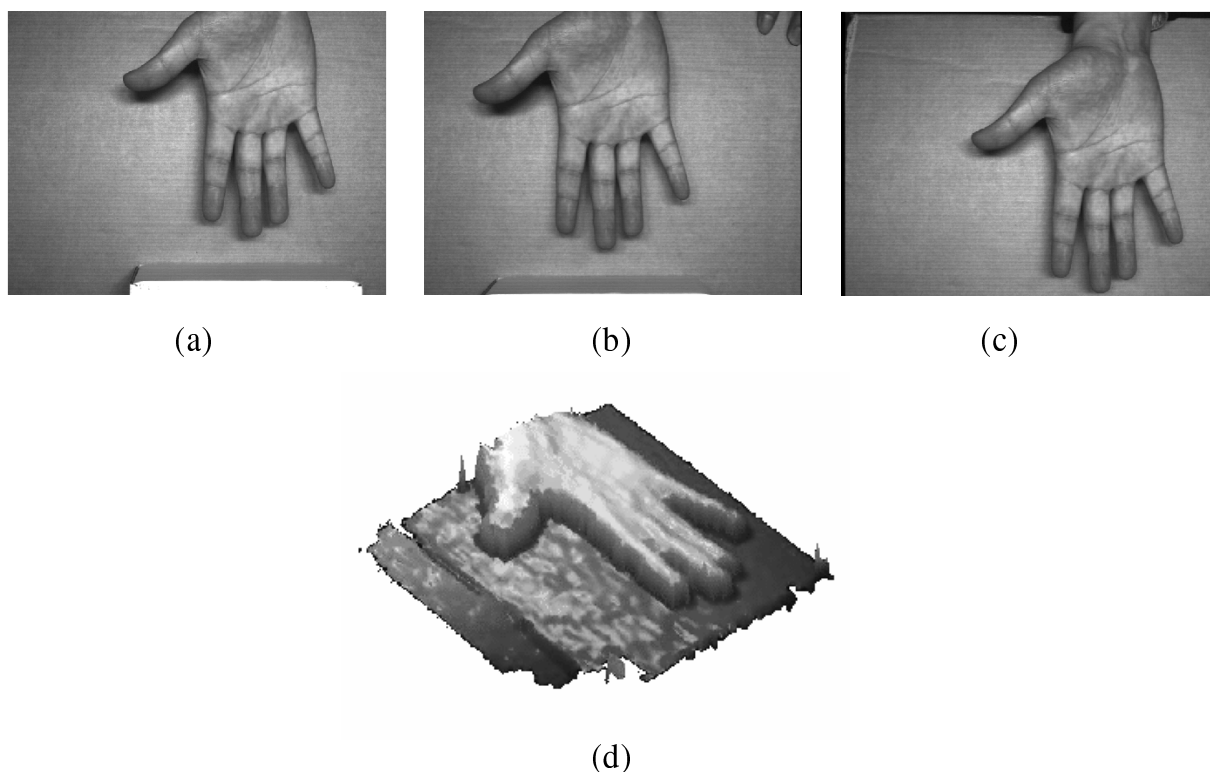


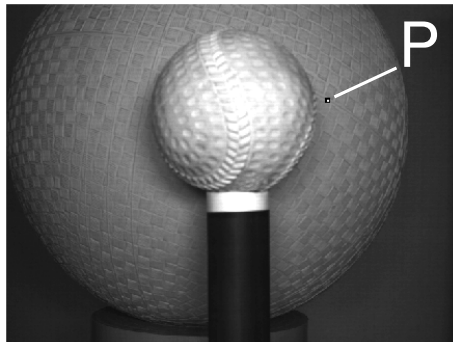
Fig. 13 人の手 : (a) 左画像, (b) 右画像, (c) 上画像, (d) 3次元形状

果は左の部分がおクルージョンのために対応点が得られていない。また、上-右間の計測結果は画面下の部分がおクルージョンのために対応点が得られていない。この2つを統合した結果が Fig. 8(f) である。お互いのオクルージョン部分を補いあっていることが分かる。Fig. 8(g) に3次元形状復元図を示す。また、Fig. 9~13に、種々の入力画像に対して、本手法を適用して得られた3次元形状を示す。

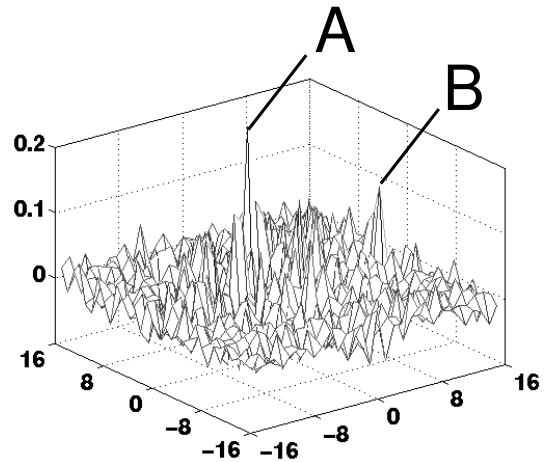
### 5.3 今後の課題

計測結果を詳細に調べるとオクルージョンではない部分にも対応ミスが見られる。このような箇所は、物体と物体の境界に多く発生している。これらの対応ミスの原因は、画像から切り出した小領域画像の中に複数の被写体が含まれるとき、それぞれの被写体の移動量を表す複数のピークが現われ、誤ったピークが選択されてしまうためである。

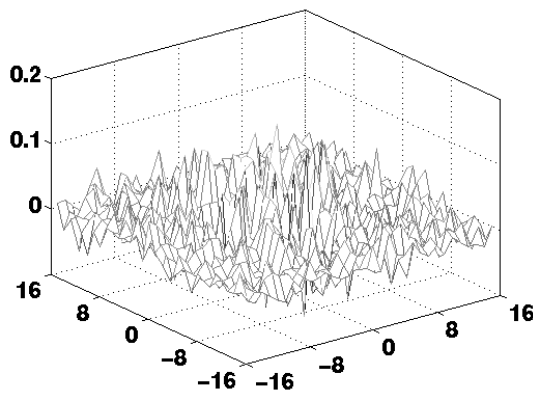
Fig. 14にそのときの相関平面の様子を示す。Fig. 14(a)に示すような手前のボールと奥のボールの境界付近の点Pの対応点を探索する際に、 $p = 1$ の階層において相関平面に複数のピークが現われている (Fig. 14(b))。誤ったピーク (Fig. 14(b)のAのピーク) を選択した場合は、下の階層で対応点が探索空間の中に入らず、相関値が低い (Fig. 14(c))。しかし、正しいピーク (Fig. 14(b)のBのピーク) を選択した場合は、下の階層においても高い相関値が得られる (Fig. 14(d)のCのピーク)。したがって、相関平面に複数のピークが現われた場合、それぞれのピークについて下の階層まで調べることによって、正しい対応点を見つけることが可能であると考えられる。しかし、全てのピークを探索するのは計算時間が膨大なものとなるので、探索すべきピークの判別法を考えることが必要である。



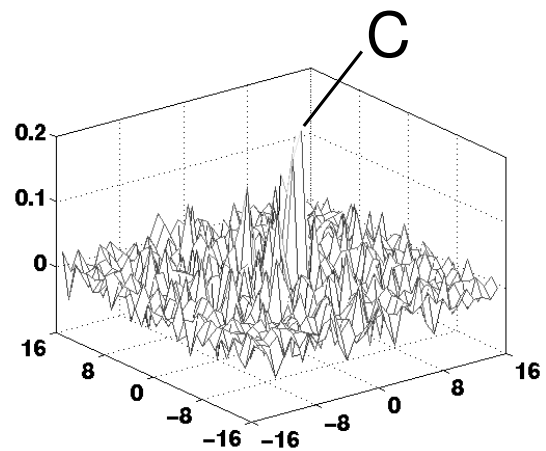
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 14 対応ミスが起きているときの相関平面: (a) 対応ミスが発生している点, (b)  $p=1$  における相関平面, (c) (b) において, A のピークを選んだときの  $p=0$  における相関平面, (d) (b) において, B のピークを選んだときの  $p=0$  における相関平面

## 6. おわりに

窓関数を用いた位相限定相関法と多重解像度画像を利用した3眼ステレオビジョンシステムを構築し、実験を通して本システムが有効であることを示した。また、多重解像度画像を利用した対応点探索において、相関平面に複数のピークが現われた場合、それぞれのピークについて下の階層まで探索を進めることで正しい対応点を見つげられる可能性を示した。

## 参考文献

- 1) 鄭文涛, 鹿喰善明, 田中豊, 湯山一郎: 立体画像符合化における視差推定手法に関する検討, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J80-D-II, No.2, 505/512 (1997)
- 2) 小林孝次, 中島寛, 青木孝文, 川又政征, 樋口龍雄: 位相限定相関法の原理とその応用, テレビジョン学会報告, Vol.20, No.41 1/6 (1996)
- 3) 中島寛, 小林孝次, 青木孝文, 川又政征, 樋口龍雄: 位相限定相関法の原理と指紋照合への応用, 第2回画像センシングシンポジウム, A-4, 15/20 (1996)
- 4) 鄭文涛: 立体画像高能率符合化における視差推定技術, 画像ラボ, 1997.9, 23/26 (1997)
- 5) Zhengyou Zhang, Stephane Laveau: <http://www-sop.inria.fr/robotvis/demo/f-http/html/>