



ホログラフィック・ステレオグラムにおける 視差画像の補間

高橋 進*・本田 捷夫***・山口 雅浩**・大山 永昭**・岩田 藤郎*

* 凸版印刷(株)総合研究所 〒345 北葛飾郡杉戸町高野台南 4-2-3

** 東京工業大学像情報工学研究施設 〒227 横浜市緑区長津田 4259

*** 千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1993年6月10日受付, 1993年8月23日受理)

Generation of Intermediate Parallax-Images for Holographic Stereograms

Susumu TAKAHASHI,* Toshio HONDA,*** Masahiro YAMAGUCHI,**
Nagaaki OHYAMA** and Fujio IWATA*

* Toppan Printing Co., Ltd., 4-2-3, Takanodai-minami,
Sugito-machi, Kitakatsushika-gun 345

** Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of
Technology, 4259, Nagatuta, Midori-ku, Yokohama 227

*** Department of Image Science and Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

(Received June 10, 1993; Accepted August 23, 1993)

We propose a new image processing approach to construct intermediate parallax-images from parallax-images at coarsely sampled viewpoints for holographic stereograms. Compared with conventional methods that require a large number of parallax-images, this approach reduces recording labor. In our approach, the intermediate parallax-images are made by projections of 3-D surface data, which are computed from several given parallax-images. To obtain the 3-D surface data, we use a new technique, in which it divides epipolar-plane images (EPI) in direction factors with Fourier transform. The 3-D surface data is reconstructed from original parallax-images and camera positions. Conventional techniques of stereo-matching need preprocess, such as feature extraction, and match only one stereo-pair at a time. This technique treats all given parallax images simultaneously to find the depth map. In addition, feature extraction is not required in the matching process. Therefore it is possible to apply this method to almost all kind of scenes for holographic stereograms.

1. ま え が き

ホログラムは、眼鏡などの装置を必要とせずに自然な立体感の3次元像を表示する手段として実用化されている。そのなかのホログラフィック・ステレオグラムは、**Fig. 1**に示すように観察方向が連続的に変化する多数枚の平面画像(2次元視差画像)を撮影し、それを基にして1枚のホログラムに合成する技術である。このよう

にホログラフィック・ステレオグラムは実際に被写体を直接ホログラムに撮影する必要がないため、コンピュータ・グラフィックスなど実際に物体が存在しない場合や、人物や建物など被写体としてホログラムの撮影に不適切な物のホログラム化に適している。しかしながら、平面型のホログラフィック・ステレオグラムで自然な立体感を得るためには、一般に50枚から100枚程度の多数枚の2次元視差画像を必要とし、視差画像の撮影に要

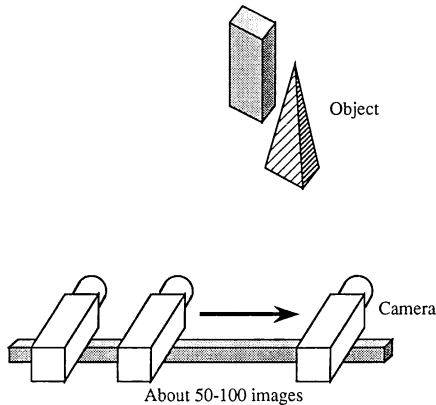


Fig. 1 Taking parallax-images for holographic stereograms.

する時間がかかるうえ、撮影装置も大型化する原因になっていた。そこで、少数の視差画像から被写体の3次元形状を求め、新たな視差画像を再構成する手法、言い替えば、少数枚の視差画像から視差画像の間を補間し新たな視点の視差画像を作ることを提案する。

ホログラフィック・ステレオグラムに用いる被写体は、あらゆる分野に応用されることが要求され、被写体を限定することは望ましくない。そのため、できる限り汎用性をもつ手法を用いる必要がある。入力物体の3次元形状を非接触で測定する方法として、大きく分けて受動的な方法と能動的な方法がある。能動的な方法とは、入力物体に対して、そのパターンや濃淡やスペクトル等なんらかの意味をもった、光波や音波や電波などのエネルギーを入力物体に対して照射する方法である。逆に受動的な方法とは、入力物体に対して通常の照明などは行うにしても、計測に関して意味のあるエネルギーを利用しない計測のことをいう。一般的に能動的な方法の方が信頼性が高いが、受動的な方法の方が入力物体に対する大きさや形状、そして測定環境に対する制約が少なく汎用的である。そこで、被写体の3次元形状の入力に、受動的な方法で汎用性が高く、視差画像を得る目的に対して最も自然であるステレオ視による方法を用いる。

ステレオ法は、三角測量の原理を応用し、入力物体を異なる位置から撮影して得られた複数枚の視差画像から、入力物体の形状を測定する方法である。このステレオ法の最も重要な処理は、ある視差画像の中の点が、他の視差画像のどこに対応しているかを探し出す処理、いわゆる対応点決定の処理である。

ステレオ法による対応づけは、例えば Levine⁹⁾などが提案した相関法などの area-based matching や、視差画像間で抽出された特徴の対応づけを行う feature-

based matching 等^{4,5,7)}がある。相関ステレオ法は、視差画像間の小領域の明るさの相関値を計算することによって対応領域を求めているため、小領域のテクスチャーの存在が前提であり、視差の誤差も大きいため応用が限定されている。また、特徴抽出処理は原理の明るさや複雑さ等によって、特徴抽出処理を変える必要があり汎用性が損なわれる。さらに、曲面を持つ物体の場合、特徴点として抽出される物体のエッジの部分の観察される位置によって異なる場合があるため、対応点決定の処理に誤りが生じる場合が多い。また、特徴抽出処理は視差画像の持つ情報量を減らすことになり、視差画像の情報を十分に生かした処理とは言えない。

また一般にステレオ法において、測定に使用する視差画像の枚数が多いほど誤対応が少なくなり精度が向上することが知られている。多数枚の視差画像を用いた方法として、Nevatia⁹⁾らはモーション・ステレオ法を提案し、大きい視差範囲を幾つかの小さな視差範囲に分割し対応点決定の処理を簡単に行っている。さらに、Bolles¹¹⁾らはさらに密に視差画像を取り解析する方法を提案している。しかしながら、従来のステレオ法において原画として3枚以上の視差画像を用いる場合、対応点決定の処理は2枚ずつ複数回繰り返して行い、対応点を追跡することによって入力物体の奥行きを求めている。このため、視差画像の枚数が増えるに従って処理に時間がかかり、対応の誤りが累積されて大きくなる可能性もある。また、誤対応をなくすために密に視差画像を取ることは、視差原画の枚数が多くなるため本論文の目的に反する。

このように、視差画像の補間のための被写体の3次元形状の入力には従来のステレオ法では十分でない。そこで、本論文ではステレオグラムの視差画像の補間を行うのに適した新しい被写体の3次元形状の入力法について提案し、この方法を用いた視差画像の補間について述べる。この方法は、視差画像に特徴抽出の処理をすることなく複数の視差画像間の対応点決定の処理を同時に行うことのできる新しいステレオ法である。

2. 被写体の3次元形状の入力

2.1 EPI の作成

Epipolar-plane image (EPI) は Bolles¹¹⁾らによって定義された。ある視差画像上での、物点Pの結像点をaとする。物体Pは、結像レンズの主点と結像点aを結んだ直線上に存在する。物点Pの他の視差画像上での対応点bは、この直線P-aを他の視差画像上に投影した線上に存在する。この投影した線を epipolar-line という。

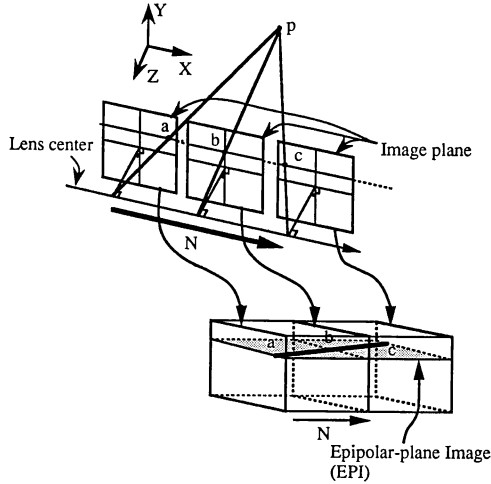


Fig. 2 Generation of an EPI.

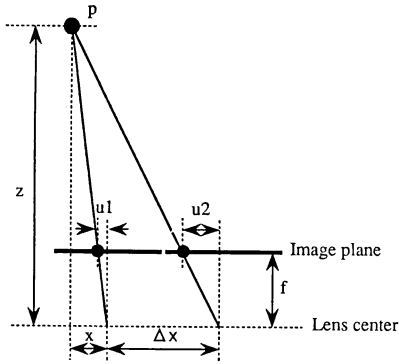


Fig. 3 Geometry of parallax-images.

撮影時には、カメラを前進、回転運動させることなく左右に移動し、画像平面を常に移動方向に対して平行に保つ。この時、epipolar-line は水平になり、EPI は Fig. 2 に示すように各視差画像間の epipolar-line (視差原画の水平方向の切断線) を撮影順に並べ 2次元画像化したものになる。カメラが左から右に移動した時、物点 P の投影点は右から左に動く。この動く速さはレンズの中心を結ぶ直線から P までの距離の関数になる。Fig. 3 に示すように Z の距離で焦点距離 f の 2 台のカメラで物点 P を撮影したとする。左のカメラの位置を X, 2 台のカメラの距離を ΔX, 左のカメラにおける物点 P の結像位置を u_1 , 右のカメラにおける結像位置を u_2 とする。また、左右のカメラにおける結像位置の差を Δu とすると次のような関係がわかる。

$$u_1 = f \cdot x / z$$

$$u_2 = f \cdot (x + \Delta x) / z$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = f \cdot \Delta x / z$$

以上のことより、撮影位置の間隔が一定であるとすると、EPI 上での P の軌跡は直線になる。

以上のことから、この EPI について次のことが言える。

1. 直線的な構造だけを含む。
2. 直線の傾きは物点までの距離を決める。
3. 近景は遠景の上に現れる。

このように EPI は被写体のもつ奥行き情報を対応点の軌跡の傾きとして簡単に形で表しており、被写体の 3次元の位置の解析を容易にする。

2.2 EPI の方向成分の分解

Bolles ら¹⁾は、多数枚の視差画像からの EPI から、特徴抽出の処理を施し直線成分を抽出することによって 3次元計測を実現している。この特徴抽出処理は、被写体によって適、不適があり、また、多数枚の視差画像の使用は、視差画像の枚数を減らすという本論文の目的に反する。

本手法では、EPI が直線的な構造だけを含むことに注目し、EPI を方向成分に分解し奥行き方向に並べることによって被写体の 3次元形状を求める方法を使用する。つまり、従来のように対応点を逐次追跡するのではなく、Fig. 4 に示すように対応点の軌跡からなる直線を EPI 上のテクスチャーと考え、EPI のテクスチャーを方向成分ごとに分解し、分解された EPI を奥行き順に並べることにより被写体の 3次元分布 (ボクセルデータ) を得る。

テクスチャーを方向成分に分解する手法としてさまざまな方法が考えられる。本論文では、ハード化による高速処理が可能なフーリエ変換を利用した方法を使用した。フーリエ変換による EPI の方向成分の分解は、次の三つのプロセスに分けられる。

- 1) EPI を 2次元フーリエ変換する。

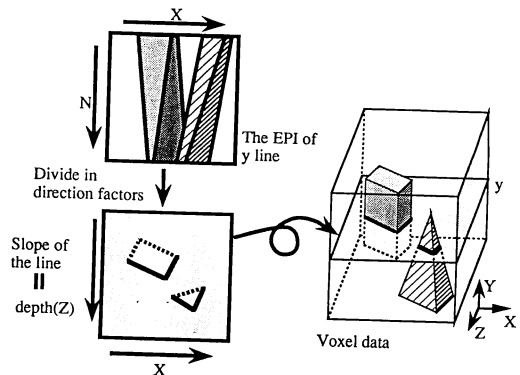


Fig. 4 3-D voxel data from the EPI.

- 2) フーリエ変換した EPI に, 抽出したい EPI の方向に直交する方向の扇形状のフィルターをかける.
 - 3) フィルターのかかった部分のみを逆フーリエ変換する.
- 2), 3) の処理をフィルターの方向を変えながら繰り返す, またはさまざまな傾きのフィルターを用いて並列に処理することにより EPI を方向成分に分解することができる. EPI を 2 次元フーリエ変換すると, EPI 上の方向成分は, 各方向に直交する位置に分布する. そこで, Fig. 5 に示すように, フーリエ面上で扇型のフィルターをかけ, フィルターのかかった部分のみを逆フーリエ変換することによりフィルターと直交する方向の成分を分離することができる. 例えば, EPI 上で左上がりの方向の直線は, フーリエ面上では原点を通る右上がりの位置に分布する. そこで, フーリエ面上で右上がりの扇状のフィルターをかけ, フィルターのかかった部分だけを逆フーリエ変換することにより, 元の EPI の左上がりの成分のみを分離することができる. 同時に, さまざまな方向のフィルターをかけ逆フーリエ変換することにより, EPI を方向成分に分解することが可能になる.

2.3 被写体表面の奥行き決定

フーリエ変換を用いて EPI を方向成分に分解することによって得られた被写体の 3 次元分布 (ボクセルデータ) には, EPI の低周波成分などによって, 実際に物体が存在しない部分にもデータが存在する. そのため, このボクセルデータを直接 2 次元平面上に投影することだけでは正確に視差画像を補間することができない. そこで, 被写体表面の奥行きを決定する作業をする必要がある.

ボクセルデータには, 物体表面の位置には物体表面の濃度と等しい濃度のデータが存在し, それ以外の部分に

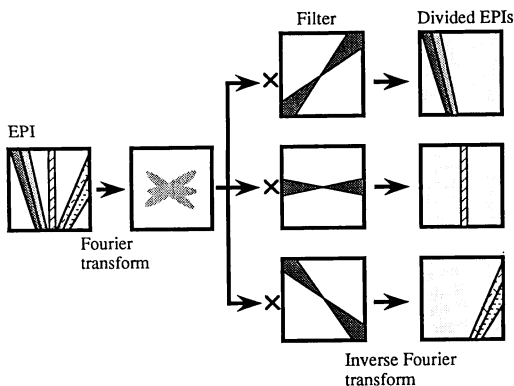


Fig. 5 Flow chart of dividing directional factors of the EPI.

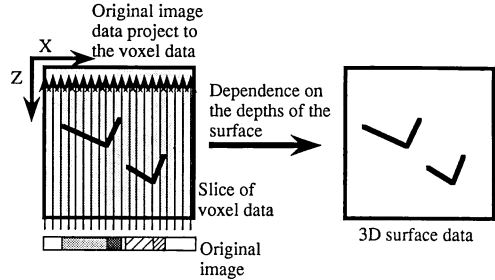


Fig. 6 Flow chart of constructing dependence for the depths.

は低周波によるノイズの成分が存在する. また, 視差原面に撮影されている像は, 被写体表面の正確な濃度を記録している. そこで, EPI の作成に使用した既知である視差原画を被写体のボクセルデータに逆投影し, 視差原画と被写体のボクセルデータとの比較を行い物体表面の位置を決定する.

この比較は Fig. 6 に示すように視差原画を画素ごとにボクセルデータに逆投影し, この時視差原画の画素と最も近い濃度を持つ投影方向上のボクセルデータの画素の位置を物体表面とする. このようにして, ボクセルデータ上の物体のない部分に存在する低周波成分等による影響をなくすことができ, 被写体表面の奥行きを求めることができる.

2.4 エラー部の抽出および補正

3次元計測によって被写体表面の形状を求め, それをコンピュータ・グラフィックスの手法を用いて 2次元平面上に投影することにより補間すべき視差画像を求めることができる. しかしながら, 撮影された視差原画上のノイズ等の要因によって奥行き情報にエラーを生じた部分が存在する場合がある. ステレオグラムの視差画像を補間するにあたって, そのような部分はディスプレイとして表示した場合見苦しく望ましい結果をもたらさない. そこで, 奥行きのエラーの生じた部分を抽出し, その部分の奥行き情報の補正を行う.

まず, 奥行きを得られた被写体表面を, 被写体表面位置を求めたときに用いた視差原画とは別の既知の視差原画の方向に投影する. そして, 投影することによって得られた視差画像と既知の原画との比較を行う. もし被写体表面の奥行きにエラーがないならば, 投影することによって得られた視差画像と視差原画は等しくなる. そこで, 投影することによって得られた視差画像と視差原画の差を取ることで, 奥行き情報のエラーの生じている部分を求めることができる.

次に, エラーを生じている画素の奥行きを, その画素

の周辺の部分の情報により類推する。類推はエラーの生じている画素を中心とした正方形のエリア内のエラー画素以外の奥行きを平均を求め、その平均値をその画素の奥行きとする。平均を求めるとき、同一の物体上では奥行きが急激な変化はなく、濃度が近い画素は同じ物体上に存在するという二つの前提条件を用い、エラー部の画素との濃度差および距離によって重み付けした上で平均化の処理を行った。

3. 視差原画の撮影

視差原画は、EPI 上で対応点の軌跡を直線にするため、またステレオグラムとして自然な立体感を得るため、カメラの画像平面を移動方向に対して平行に保ちながら撮影する必要がある。つまり、カメラの光軸を移動方向に対して垂直に保ったまま、回転や前進なしに撮影を行う必要がある。しかしながら、このような撮影方法でステレオグラムとして十分な視差を持つ視差画像を撮影するためには、撮影系の画角内に被写体を納めるために非常に広角のレンズで被写体の撮影を行うか、レンズに対して撮像面を移動させながら撮影する必要がある。広角のレンズを使用することは、視差画像内の被写体のサイズが小さくなるために、解像度の低下を伴う。また、撮像面の移動は、特殊な装置⁶⁾を必要とする。そこで、実験ではカメラを被写体に向けて撮影を行い、画像処理によってカメラを正面に向けて撮影した像を作成する手法を用いた。

Fig. 7 に示すように、ある被写体を角度 θ の位置から撮影したとする。この時、被写体に向けて撮影した視差画像上の座標を x, y 、カメラを正面に向けて撮影した場合の視差画像上の座標を X, Y 、また結像レンズの焦点距離を a とする。このとき、 x, y と X, Y の

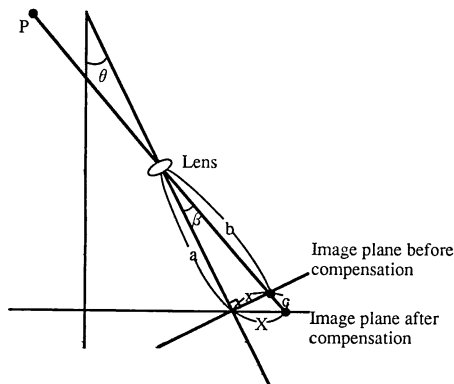


Fig. 7 Geometry of compensation of parallax-image.

関係は、次のように示される。なお、距離 b, c および角度 β は Fig. 7 に示すようにおく。

正弦定理および余弦定理より

$$(b+c)^2 = a^2 + X^2 + 2aX \sin(\theta) \quad (1)$$

$$X/\sin(\beta) = (b+c)/\cos(\theta) \quad (2)$$

よって、

$$\sin(\beta) = X \cdot \cos(\theta) / \sqrt{a^2 + X^2 + 2aX \cdot \sin(\theta)} \quad (3)$$

ゆえに、水平方向の座標は

$$x = a \cdot \tan(\beta) \quad (4)$$

となる。

垂直方向の座標は、レンズからの距離に比例するため

$$y = Y \cdot b / (b+c) = Y \cdot a / (\cos(\beta) \cdot \sqrt{a^2 + X^2 + 2aX \cdot \sin(\theta)}) \quad (5)$$

となる。

4. 実験および考察

上述の方法で実際の被写体を用いて実験を行った。

Fig. 8 は、お面と鉛筆立てを撮影した入力視差原画を (4), (5) 式を用いて処理した画像の一部である。実験では視差原画を全部で 16 枚使用した。シーンの手前に鉛筆立てがあり、その中に数本の色鉛筆が立っている。その奥に彩色されたお面があり、背景として実験室の棚が写っている。カメラは、日立製の CV-7700 を用い、カラー画像として入力した。画像は分解能が、 512×480 画素で、サンプル精度は各色 8 ビットである。撮影した撮像系の焦点距離は、カメラの撮像素子の画素ピッチを長さの基準とすると約 2390 画素である。Fig. 9 に示すようにカメラと鉛筆立ての距離は約 2m であり、62.5 mm の間隔で 16 枚の視差原画を撮影した。よって両端のカメラ間距離は、937.5 mm となる。カメラは被写体の位置を中心に回転させ、常に被写体が視野の中に

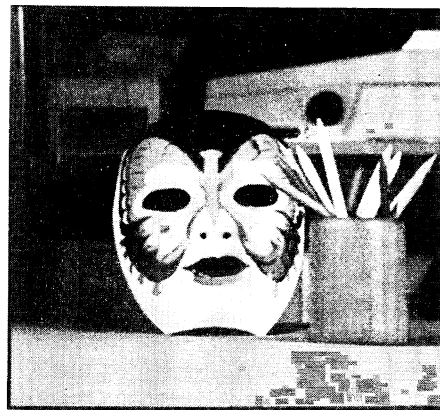


Fig. 8 Original image.

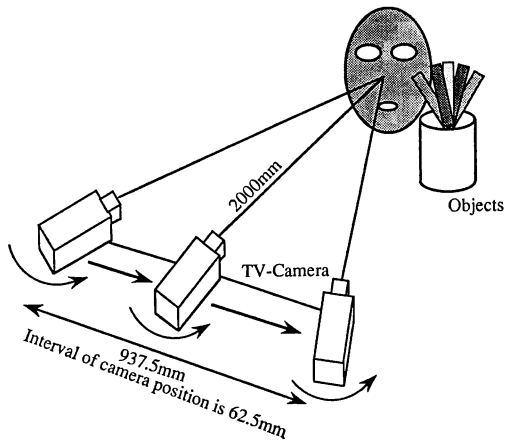


Fig. 9 Experimental arrangement.

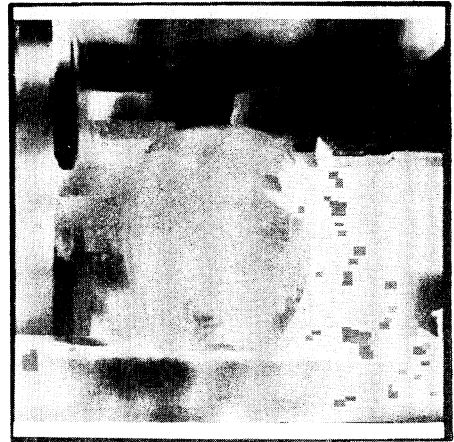


Fig. 12 Depth map.



Fig. 10 EPI from 16 parallax-images.

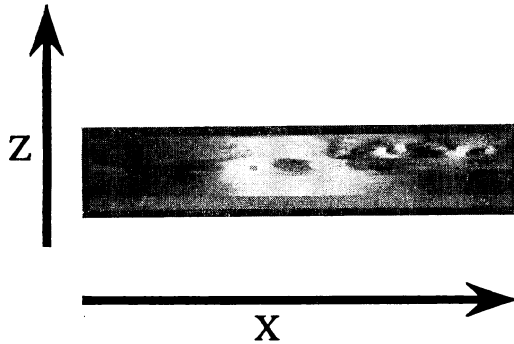


Fig. 11 Slice of voxel data (X-Z plane).

入るように撮影を行った。

Fig. 10 は、16枚の視差原画から作成したお面の目の上の辺りのEPIである。原画の枚数が16枚と少ないため、対応点の軌跡が階段状になっているが、ほぼ直線になっていることがわかる。Fig. 11 は、Fig. 10 に示す EPI をフーリエ変換を用いることによって方向成分に分解することによって作成したボクセルデータの断面図である。

Fig. 12 は、本方法で得られた被写体表面の3次元形状の距離画像（被写体の奥行きを明るさで表したもの：明るい点ほど手前）である。

Fig. 13 はエラー部の抽出補正後、ボクセルデータを2次元平面に投影することによって得られた視差画像を示す。なお、エラー部の補正には 20×20 画素のエリア

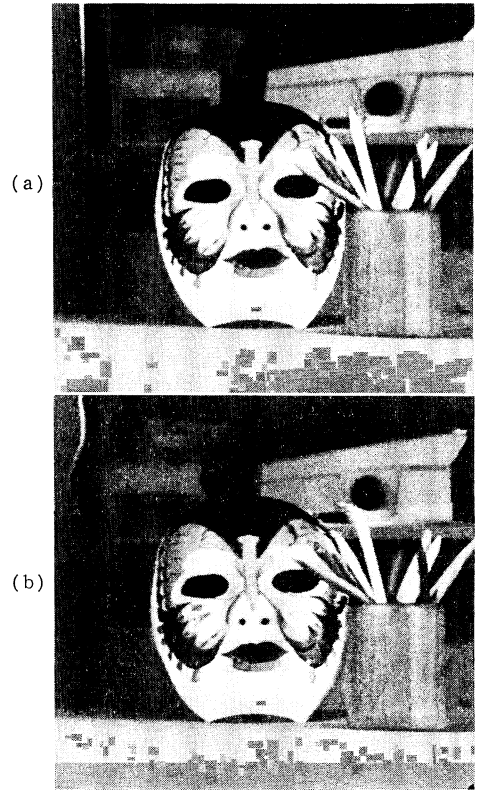


Fig. 13 A computed image and a real scene.

を用いた。(a)が左 0.9° 方向に投影した補間像で投影方向は、入力した視差原画の撮影位置のほぼ中央にあたる。(b)が精度確認のために実際に左 0.9° 方向から撮影したものである。(a)と(b)を比較すると背景部や色鉛筆の先等にエラーが存在するが比較的良好な補間像が得られていることが確認できる。

この方法は、特徴抽出を行うことなく EPI 上での画

素ごとの方向成分を求めているため、特徴抽出処理を用いた方法では難しい影などによって微妙な明るさの変化などをもつ物体の3次元形状の再構築が可能である。特徴抽出を行わない場合の欠点として、お面や鉛筆立てを乗せている台の部分など被写体表面上の濃度変化の少ない点での3次元形状の測定精度は低下することが上げられるが、濃度変化がない部分に3次元形状のエラーが生じた場合でも、2次元平面に投影した補間像の上では同じ濃度の画素が入れ替わるだけで補間像上ではエラーは生じない。ステレオグラムの被写体には人物のように影の明るさが微妙に変化する被写体も考えられるため、EPIを特徴抽出することなく方向成分に分解することによって被写体の3次元形状を求める方法は、ステレオグラムにおける視差原画の補間に適した方法と思われる。

5. 結 び

本論文は、ホログラフィック・ステレオグラムの原画の撮影において、少数枚の視差原画から被写体の3次元形状を求め、それを2次元平面に投影することにより多数枚の視差画像を再構成する手法を提案した。また、ステレオグラムの原画の補間に適した被写体の3次元形状の測定方法の一つとして、フーリエ変換等を用いてEPIを方向成分に分解する方法を考案した。EPIを直接方向成分に分解することにより、特徴抽出などの処理を行うことなく、また複数枚の視差原画間の処理を同時に行うことが可能になった。また、フーリエ変換による方向成分の抽出は、ハードウェア化や光による情報処理が可能であり、また各EPIごとに、そして各方向ごとに独立して演算が行われるために並列処理が可能である。このため、ハードウェア化等によって高速処理が可能になる。将来的にホログラムなどによる3次元動画表示が可能になった場合、本手法はリアルタイムな3次元動画入力方法の一つとして利用できる可能性がある。

近年、3次元の情報をコンピュータから直接ホログラ

フィックな手法を用いてハードコピーを取る技術^{8,9)}や、3次元動画像を表示する技術¹⁰⁾の開発がなされている。少数の視差原画から視差画像の補間を行うことは、これらの3次元表示のための入力装置、言うなれば3次元カメラ等に応用できる。

本手法では、手前の物体に遮られて一部の視差原画から観察できない部分、いわゆるオクルージョンの部分が存在する場合、EPI上において対応点の軌跡が手前の物体によって遮られるため、方向成分の抽出が難しくなる。このため、今後はオクルージョンのある被写体における3次元形状の測定方法の確立が課題となる。

文 献

- 1) R. C. Bolls and H. H. Baker: "Epipolar-plane image analysis: A technique for analyzing motion sequence," *Preprints of the 3rd International Symposium of Robotics Research* (1985) pp. 192-199.
- 2) M. P. Levine, D. A. O'Handley and G. M. Yagi: "Computer determination of depth maps," *Comp. Graph. Image Proc.*, **2, 2** (1973) pp. 131-150.
- 3) R. Nevatia: "Depth measurement by motion stereo," *Comp. Graph. Image Proc.*, **6** (1976) pp. 619-630.
- 4) H. H. Baker and T. O. Binford: "Depth from edge and intensity based stereo," *Proc. 7th. Int. Joint Conf. Artif. Intell.* (1981) pp. 631-636.
- 5) B. D. Lucas and T. Kanade: "An iterative image registration an application to stereo vision," *Proc. Image Understanding Workshop* (1981) pp. 674-679.
- 6) W. J. Molteni: "Shear lens photography for holographic stereograms," *Proc. SPIE*, **1461** (1991) 132-141.
- 7) J. Lie and R. Skerjanc: "Construction of intermediate pictures for a multiview 3D system," *Proc. SPIE*, **1669** (1992) 10-19.
- 8) S. Takahashi, T. Toda and F. Iwata: "Three dimensional grating images," *Proc. SPIE*, **1461** (1991) 199-205.
- 9) M. Yamaguchi, N. Ohyama and T. Honda: "Holographic three-dimensional printer: new method," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 217-222.
- 10) P. St. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. Underkoffler: "Electronic display system for computational holography," *Proc. SPIE*, **1212** (1990) 174-182.