2次元受光素子列を用いたホログラフィック 3次元情報検出

上田 裕 昭[†], 高橋 秀 也^{††}, 正会員 志 水 英 二^{††}

Holographic Method for Extracting Three Dimensional Information with a CCD Camera

Hiroaki Ueda[†], Hideya Takahashi^{††} and Eiji Shimizu^{††}

Abstract A method for extracting three-dimensional information from holographic interference fringe patterns by using an interferometer is studied and its effectiveness is confirmed experimentally. The holographic fringe patterns of the object surface, which is assumed to be a set of point sources, are compared with standard patterns calculated assuming that a corresponding point object exists in the measured space. We show theoretically that three-dimensional information can be extracted by three methods: for the sum of products of each pixel, computational correlation using Fourier transformation, and optical correlation. We also simulate extractions of a set of point sources by correlation and optical correlation, and we experimentally confirm the effectiveness of this method applying to actual point-source object and line objects and using interference fringe pattern captured by a CCD camera.

1. ま え が き

近年の3次元映像技術の進歩は著しく、CRTを用いたいわゆる3次元CGのみならず、液晶メガネ方式の3次元ディスプレイや、レンチキュラ方式のメガネなし立体テレビ¹⁾など各種の方式が実用化されている。このなかでホログラフィによる動画表示も開発され^{2)~4)}、究極の3次元表示技術として注目を集めている。これらに伴い3次元入力・計測技術のニーズが一

段と高まってきている。光学的な3次元計測技術としての光切断法、モアレ法などが広く用いられているが、専用の投光装置とカメラが必要であり、通常の映像とは異なる入力を用いるという難点がある。ステレオカメラによる手法は、両眼視差を用いるステレオ表示映像を利用できるが、対応点を教示する必要がある、これに時間がかかるという問題がある⁵⁾。

3次元表示のための映像には3次元情報が含まれているはずであるから、その映像から3次元情報を検出

キーワード：ホログラフィ，3次元計測，光学相関

1993年7月1日，3次元画像コンファレンス'93 講演論文集に発表

1994年4月6日受付，1994年7月11日最終受付

[†] 財団法人イメージ情報科学研究所 (〒565 豊中市新千里東町1-4-2, TEL 06-873-2053)

^{††} 大阪市立大学 工学部 電気工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138, TEL 06-605-2679)

[†] Laboratories of Image Information Science and Technology (1-4-2, Shin-Senri Higashi-machi, Toyonaka-shi, Osaka 565, Japan)

^{††} Faculty of Engineering, Osaka City University (3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka 565, Japan)

できれば前述の難点を解消できる．そこで，白井らが提案した超音波による3次元情報検出⁶⁾を光学的に応用することに着目し，その可能性について検討した．本手法は点物体の位相情報がその位置によって異なるという考えに基づき，干渉光学系を用いて観測空間内に点物体が1個のみ存在する場合の位相情報を，点物体の位置ごとに比較用の基準パターンとして用意し，被測定物体表面を点物体の集合と考えて，観測された物体のホログラム情報と各基準パターンとのマッチングをとることで，物体の3次元情報を検出するものである．本手法については，専用の計算機による積和を用いた検出のシミュレーション⁷⁾も報告されている．本論文では検出処理方法として，上記の計算機による積和に加え，フーリエ変換を用いた計算機による相関および光学的相関を示し，実際に2次元受光素子列(以下受光素子という)を用いてホログラムデータを取り込み，基本的な手法を確認した．

本方式によれば，将来ホログラフテレビが実用化される過程において，ホログラフテレビカメラの入力画像を検出に利用できるもので，従来のように検出のためだけの情報入力が必要になると考えられる．また，ホログラム情報をそのまま伝送するのではなく，本方式を用いて位置情報に変換してから伝送することにより，情報圧縮の効果も期待できる．

以下，本論文の2章で本方式の原理，3章で本方式による検出のシミュレーション，4章で実際の干渉縞を用いた3次元情報の検出実験の結果，5章で結論を述べる．

2. ホログラフィック3次元情報検出の原理

2.1 点物体と点物体群の3次元情報検出の原理

図1に示すような光学系において，観測空間内に存在する点物体にレーザ光を照射する．点物体からの反射光を参照光と干渉させると，観測空間内の点物体の3次元的な位置の情報をもつホログラムが得られる．

このホログラムにおいて，点物体の位相情報は図2に示すように点物体の座標によって異なる．観測空間を適当な体積素に分割して各体積素ごとに点物体の有無を調べるという考えに基づき，3次元情報検出を行う⁸⁾⁹⁾．

この光学系において，点物体からの物体光の複素振幅は(1)式で与えられる．

$$O_{(m,n)} = U_{(m,n)} \exp[j\delta_{(m,n)}] \quad (1)$$

ただし， m と n は受光素子上での各素子の座標であり，受光素子上での振幅 $U_{(m,n)}$ と各点物体の位相分布 $\delta_{(m,n)}$ は， A を点物体からの反射光の振幅， $r_{(m,n)}$

図1 3次元情報検出光学系
Optical layout for measuring three dimensional information.

図2 点物体からの位相情報
Phase information from point objects.

を点物体から各受光素子までの距離， λ を光の波長として，おのおの $U_{(m,n)} = A / r_{(m,n)}$ ， $\delta_{(m,n)} = 2\pi r_{(m,n)} / \lambda$ で示されるものとする．

参照光を平行光とすれば，位相分布を $\alpha_{(m,n)}$ として，複素振幅は $R_{(m,n)} = R \exp[j\alpha_{(m,n)}]$ と表される．ここで受光素子で観測される干渉縞の光強度分布から参照光と物体光の光強度分布を除くと，(2)式が得られる．

$$S_{(m,n)} = |O_{(m,n)} + R_{(m,n)}|^2 - |O_{(m,n)}|^2 - |R_{(m,n)}|^2 \\ = 2U_{(m,n)}R \cos(\alpha_{(m,n)} - \delta_{(m,n)}) \quad (2)$$

(2)式は，干渉縞の光強度分布から直流成分を除き，点物体の情報のみを取り出したものである．これは，点物体の3次元情報を検出するための比較用の基準パターン $S_{(m,n)}$ となる．そして，(2)式を用いて観測空間内の各体積素に存在する点物体に対応した基

準パターン $S_{(m,n)}$ をあらかじめ作製しておく。この基準パターン $S_{(m,n)}$ は個々の点物体の位相情報であるので、得られる点物体(群)の位相情報と比較することにより、点物体(群)の座標を検出できる。

観測空間内の物体表面が N 個の点物体の集合体であると考え、(1)式で用いた変数 U, δ を個々の点物体の変数として U_i, δ_i とおくと、キルヒホッフの積分定理より物体光の振幅は $\sum U_i$ で与えられる。(2)式と同様に、干渉縞の光強度分布から物体光と参照光と光強度分布を除くと(3)式が得られる。

$$G_{(m,n)} = |O_{(m,n)} + R_{(m,n)}|^2 - |O_{(m,n)}|^2 - |R_{(m,n)}|^2 \\ = 2R \sum_{i=1}^N U_{(m,n)} \cos(\alpha_{(m,n)} - \delta_{(m,n)}) \quad (3)$$

これが、観測されるデータ(ホログラム情報) $G_{(m,n)}$ に相当する。ここで(2)式より、 $G_{(m,n)}$ は(4)式で表される。

$$G_{(m,n)} = \sum_{i=1}^N S_{(i,m,n)} \quad (4)$$

シミュレーションではこの式を用いて物体のデータを作製する。ただし実際の実験では $r_{(m,n)}^2 \gg m^2 + n^2$ であるから $U_{(m,n)}$ は一定として計算する。

2.2 積和を用いた3次元情報検出

3次元情報(座標位置)の検出処理として、図1の光学系における観測データ $G_{(m,n)}$ と、あらかじめ(2)式により計算しておいた基準パターン $S_{(j,m,n)}$ との比較を行う。この比較の方法として、計算機による積和の方法が考えられる。つまり、観測空間内のすべての単位体積素に対して、その体積素にのみ点物体が存在する場合の位相情報を基準パターンとして用意し、各基準パターン $S_{(j,m,n)}$ と観測出力 $G_{(m,n)}$ とで画素ごとに積和を行うというものである。このとき、積和によるマッチング P_j は次の(5)式で与えられる。

$$P_j = G_{(m,n)} \oplus S_{(j,m,n)} \\ = \sum_{i=1}^N S_{(i,m,n)} \oplus S_{(j,m,n)} \\ = \sum_{i=1}^N (S_{(i,m,n)} \oplus S_{(j,m,n)}) \quad (5)$$

ただし、 $\oplus$ は画素ごとの積和を表す。対象物体が占める空間を O 、観測空間を V として $i \in O, j \in V$ であるから、 $j \in O$ であれば P_j は同じパターンどうしのマッチングを含むので、 $j \in O$ であるときの P_j に比べて値が大きくなる。したがって、 P_j の値を評価することで観測空間内の物体表面の3次元情報が検出できる。しかし、基準パターンを各体積素ごとに用意しておくことは、基準パターンの容量が莫大なものとなるうえ、各々との積和の計算には膨大な時間を要するので、ワークステーション程度の計算能力では現

図3 隣合うマスクの共通部分
Common area of masks.

实的ではない。このため、専用の計算機が提案されているが⁷⁾、まだ充分であるとはいえない。光コンピュータの研究が進みつつある現在、光学的な手法に今後の発展が期待できるので、検出時間の短縮が可能な光学的な方法への適用を考慮し、フーリエ変換を用いた相関による検出を検討する。

2.3 基準パターンの結合

図1の光学系の場合には z 座標が同じであるすべての基準パターンが図3のように位相情報を共有している。例えば $(x_1, y_1, 0)$ の点物体の基準パターンは、 $(0,0,0)$ の点物体の基準パターンを x_1, y_1 だけシフトしたものである。したがって、基準パターンどうしの共通部分を共有できるように、 xy 平面上にあるすべての基準パターン群を1つの基準パターンとしてまとめることで、基準パターンの容量を削減することが可能である。仮りに観測空間の x, y 方向の大きさを受光素子の大きさと同じとするなら、基準パターンの大きさは受光面積の4倍あれば足りることになる。

2.4 フーリエ変換を用いた相関による3次元情報検出¹⁰⁾

前節の基準パターンの結合を利用すれば、各 z 座標ごとに結合された基準パターンで観測データ $G_{(m,n)}$ との比較に次のような2次元相互相関を用いることができる。観測で得られる画像分布を $g_{(x,y)}$ 、結合された基準パターンの画像分布を $s_{(x,y)}$ とすると、相互相関は(6)式で表される。

$$\phi_{gx(x',y')} = \iint_{-\infty}^{\infty} g_{(x,y)} \cdot s_{(x-x',y-y')}^* dx dy \quad (6)$$

(6)式で z 座標ごとに用意した結合基準パターンと相関演算を行うことにより、観測空間内の物体表面の3次元情報を検出することができる。

相関演算は高速フーリエ変換(FFT)を用いて計算機で行う方法と、レンズのフーリエ変換作用を利用して光学的に行う方法の2つが挙げられる。

観測データの画像分布 $g_{(x,y)}$ と各 z 座標ごとに結合された基準パターンの画像分布 $s_{(x,y)}$ のフーリエ変換

をそれぞれ $G(u, v)$, $S(u, v)$ とすれば、相互相関は(7)式で表される。

$$\phi_{fg}(x, y) = F^{-1}\{G(u, v)S^*(u, v)\} \quad (7)$$

計算機による相関ではこの式を用いて演算を行う。

3. 3次元情報検出のシミュレーション

3.1 光学系とサンプリング定理

図1の光学系はHe-Neレーザ(λ : 632.8 nm)を用いたトワイマングリン型の干渉計であり、受光素子上では参照光と物体光の干渉が観測され、(4)式に相当する観測データ G となる。

実際の計算に適用するためには受光素子(CDDカメラ)の画素ピッチおよびコンピュータに取り込むフレームメモリの分解能と干渉縞のピッチの関係がサンプリング定理を満たす範囲でなければならない。表1に実験で使用する受光素子とフレームメモリの仕様を示す。実験の都合上、取り込んだ画像のうち512×480画素を256階調で使用した。

1個の点物体の干渉縞(フレネルの輪帯板)の周波数 N と焦点距離 f (受光素子から点物体までの距離に相当する)は $N = r/r_0^2$, $f = r_0^2/2\lambda$ で表される。ただし、 r は輪帯板の中心からの距離、 r_0 は第1明輪帯の半径である。観測空間の x, y 方向の大きさを受光素子の大きさと同じとすれば、輪帯板の半径の最大値は x, y 方向でそれぞれ8.8, 6.8 mm となる。観測条件はフレームメモリによる x 方向の分解能が律速となるので、ピッチを x_p としてサンプリング定理から(8)式を満たす必要がある。

$$f > \frac{x_p r}{\lambda} = \frac{0.0172 \times 8.8}{0.000633} = 239 \text{ mm} \quad (8)$$

実際には斜め方向にはさらに分解能を要するので、図1に示した光学系の距離は表2のような配置を取った。

一方、観測されたホログラムから再生される点物体の空間分解能は、再生光の広がり角 $\Delta\theta = 2\lambda/D$ で与えられることが知られている⁹⁾。ただし D はホログラムの寸法である。したがって、検出に用いる点物体は $f\Delta\theta$ 以上の間隔を持つ必要がある。表2より D を6.2 mm, f を600 mm と考えると0.12 mm となる。

3.2 フーリエ変換を用いた相関による検出シミュレーション

ここでは、今回は $z=0$ の結合基準パターンだけを用意し、 $z=0$ 平面内での位置を相関を用いた方法で検出するシミュレーションを行った。基準パターンは画素ピッチ間隔で $z=0$ 平面に $512 \times 480 = 245760$ 個用意し、1つに結合したものを用意した。

表1 CCDカメラとフレームメモリの仕様
Specification of CCD camera and flame memory.

画素数	768 (H) × 493 (V)
撮像面積	8.8 × 6.6 mm (2/3 インチ)
画素ピッチ	11 × 13 μm
フレームメモリ	512 × 512 ドット

表2 光学系の配置
Arrangement of optical layout.

ハーフミラー・観測空間間の距離	300 mm
ハーフミラー・受光素子間の距離	300 mm
基準パターンの間隔 ($x \times y$)	17.2 × 12.9 μm
観測空間の範囲 ($x \times y$)	8.8 × 6.2 mm

図4 3個の点物体からなる干渉縞
Interference pattern from three point objects.

まず、原点 O に受光素子の中心が対応するように配置し、(3,0,0), (0,0,0), (-3,0,0)の3点に仮想的に点物体を置いたときに受光素子上で得られる干渉縞を(4)式によって計算で求めた。これを図4に示す。

これと用意しておいた結合基準パターンとの相互相関を行った。相関出力は図5に示すような原点を中心とする512×480画素の分布であり、原点からのピーク的位置座標が点物体の位置を表す。

ここでは強度の分布をとって、最大値、最小値の間を256段階に正規化している。また図6は図5の x 軸上における検出結果を示したもので、3点において鋭いピークとなっていることがわかり、点物体の存在位置を示している。

3.3 光学的相関による方法

光学的に相関を行う場合には、前節で述べた計算機による相関とは違って(2)式で得られる位相情報をそ

図 5 3 個の点物体の検出シミュレーション (相互相関)
Detection simulation of three point objects. (Correlation)

図 6 3 個の点物体の検出シミュレーション (相互相関)
Detection simulation of three objects. (Correlation)

のまま基準パターンとして用いることができない。これは(2)式では正負の値を持つが、光学的方法での入力像は正の値を持つ振幅分布の画像でなければならないからである。そこで、光学的相関の基準パターンとしては(2)式で得られる位相情報に直流成分を加えて、すべての値が正になるようにして、前述の計算機を用いた相関シミュレーションと同じ条件で、光学的相関の計算機によるシミュレーションを行った。

得られた、 $z=0$ 平面内における点物体の存在位置検出結果を図 7, 図 8 に示す。

この結果から(3,0,0), (0,0,0), (-3,0,0)の位置においてピークが確認できるが、前節の相互相関のシミュレーションの結果と比べてみると、直流成分を加えた影響によるノイズ成分が全体に大きく含まれることになり、 S/N が悪くなっている。点物体の数を増やしていけば、さらに S/N が悪くなっていくと考えられるため、光学的に相関を行う際には、ノイズの除去を考えることが必要である。そこで、このノイズが基準パターンに加えられた直流成分によるものであることから、光学的に行う際にはフーリエ変換面で高域通過フィルタを通すことで、不必要な直流成分による

図 7 3 個の点物体の検出シミュレーション (光学相関)
Detection simulation of three point objects. (Optical correlation)

図 8 3 個の点物体の検出シミュレーション (光学相関)
Detection simulation of three point objects. (Optical correlation)

ノイズは除去され、前節のシミュレーション結果に近い結果が得られると考えられる。

FFT を用いた相互相関による方法は、積和による方法に比べて検出処理の高速化を行えるが、計算にかかる時間は膨大であり、今日のコンピュータをもってしても、まだ実用的な時間で処理することはできないと考えられる。次章では高速化の期待できる光学的な方法のより具体的な検討を試みる。

4. 光学的な相関を用いた 3 次元情報検出

光学的なマッチトフィルタリングによる 2 次元画像処理は古くから知られている¹¹⁾。本章では、フィルタに点光源の干渉縞のフーリエ変換を用いることで前述の相関演算を行い、3 次元情報を検出する方法を試みる。

4.1 光学系

実験には図 9 に示すレイリー干渉計の変形による相関光学系を用いた。レンズのフーリエ変換作用を利用して光学的に相関演算を行うので、各 z 座標における結合基準パターンのフーリエ変換ホログラムを作製しておけば、ホログラムを取り替えていくことで、入

図9 光学相関システム
Optical correlation system.

図10 3個の点物体の光学相関による検出
Detection of three point objects. (Optical correlation)

力像に対するそれぞれの相関像から物体の3次元情報を検出することができる。

図9において、レーザからの光をビームスプリッタで2光束に分け、一方の光はピンホールAによって点光源をつくり、これをレンズ L_0 の後焦点に置いて得られる平行光で P_1 面を照射し、 P_1 面の中央に光軸と交わる点を原点として結合基準パターンを置く。参照光はもう一方の光でピンホールBによって点光源をつくり、ハーフミラーによって合成する。ここで、参照光の P_1 面上での原点からのずれは、ハーフミラーを図のように平行移動することによりつくられる。これにより、 P_1 面のフーリエ変換面 P_2 には基準パターンのフーリエ変換ホログラムがBを参照点光源として形成される。

次に、このホログラムを P_2 面の元の位置に正確に置き、参照光を遮断する。 P_1 面に観測画像データを置いて、そのフラウンホーファー回折光でホログラムを照明すると、 P_3 面では観測データと基準パターンとの相関結果が得られる。 P_3 面において受光素子などでその像を取り込むことで、その光強度と位置のずれ量を評価できる。本試作システムでは、前述の受光素子(表1)を用い、受光するデータは 512×480 画素で256階調の画像データとした。

また、観測空間の z 座標ごとに基準パターンのフーリエ変換ホログラムを作製しておけば、ホログラムを取り替えて光学的相関の操作を繰り返すことで、観測物体の3次元情報が検出できる。ただし、ここで作製されたフーリエ変換ホログラムは、基準パターン画像として前述のような直流成分を加えたものを用いているので、その中心部(低周波数領域)での信号光が露出過度となって、低周波成分を再生できないホログラムとなっている。

図11 3個の点物体の光学相関による検出
Detection of three point objects. (Optical correlation)

4.2 試作システムによる検出処理一その1

まず仮想的な観測データおよび基準パターンとして3.3節で述べたシミュレーションと同様 $(0,0,0)$ 、 $(3,0,0)$ 、 $(-3,0,0)$ の3点に点物体を置いたときに受光素子上で得られる観測データを計算で求めてフィルムに出力しておき、これを用いて試作検出処理システムで点物体の位置を検出する。

上記の仮想観測データを入力像として P_1 面に置いた。また、基準パターンとしては平面 $z=0$ 内にある基準パターン $512 \times 480 = 245760$ 個を1つに結合したものを用意した。このとき、受光素子面中心が $(0,0,0)$ の相関出力と一致するように配置した。検出結果を図10に示す。ただし、光強度分布は最大値と最小値の間を256段階に正規化して表示してある。これらではいずれもピーク値をもつ点の周りに像の広がりがみられる。これは光学系による誤差と考えられ、これによってこのシステムの検出精度が決まるが、この場合は50画素分(0.65 mm)程度であり、肉眼では1点として認められるほどの小さい広がりである。

図10において、その最大値を含む行(y 方向)における検出結果(強度分布)を示したものが図11である。

図 12 検出物体(点)
Object. (Point array)

図 15 検出物体(線)
Object. (line)

図 13 点物体列の相互相関による検出
Detection of nine point objects. (Correlation)

図 16 線物体の相互相関による検出
Detection of line object. (Correlation)

図 14 点物体列の光学相関による検出
Detection of nine point objects. (Optical correlation)

図 17 線物体の光学相関による検出
Detection of line object. (Optical correlation)

図 11 の検出結果から、光学的相関の計算機シミュレーション結果(図 7)により予測されていた、基準パターンと観測データに加える直流成分の影響によるノイズ成分が大幅に低減されていることがわかる。この原因としては、フーリエ変換ホログラム作製時に中心部が露出過度となって、低周波成分が再生不能となっていることが影響していると考えられる。低周波成分が再生不能となることにより、ホログラム上の周辺部の高周波信号成分のみが入力画像のブラウンホーファ

ー回折光との相関に関わるため、加えた直流成分による相関結果への影響がほとんどなくなる。つまり、このホログラムは高域通過フィルタとしても働いており、 S/N の向上が実現でき、相関の計算機シミュレーションの結果(図 5)に近づく。

4.3 試作システムによる検出処理—その 2

次に実際の点物体群の検出を試みた、図 12 に示すように、点物体を約 0.75 mm 間隔で計 9 点、約 4 mm 四方で、v 状に並べたものを物体とした。基準パ

ターンは前節と同じものを用いた。

まず、計算機による実験処理結果を図13に示す。点物体を配置したのと同じ位置にピークが存在することがわかる。

これを相関光学系を用いて処理した結果を図14に示す。点物体を配置した位置にピークがみられる。点物体は実際には一定の大きさを持つため、検出結果も広がりを持っている。

次に、線状物体の検出として図15に示すように大きさ約4mm四方、太さ約0.5mmの物体を対象として実験を行った。

点物体と同様に計算機処理の結果および相関光学系による検出結果を図16、図17に示す。一部が欠けているが、線状にVの形で盛り上がっているのが認められ、物体は点物体の集合であるという仮定のもとで線が検出できるということが確認できた。

5. む す び

本研究では、ホログラフィの手法を用いて、物体からの位相情報を干渉縞として2次元受光素子列で観測し、あらかじめ用意しておいた基準パターンとのマッチングを行うことにより、物体表面の3次元情報検出を行う手法について述べた。マッチングの方法として、計算機による積和、フーリエ変換を用いた計算機による相関および、光学的相関の3つの方法について述べ、基準パターンと観測データとの積和の方法において、基準パターンが結合できることにより大幅に計算機の記憶容量が削減できることを示した。また市販のCCDカメラを想定し、フーリエ変換を用いた計算機による相関と光を用いた相関の、それぞれのシミュレーションを行って、検出できることを示した。さらに、光学的相関による検出処理法における特性について検討し、実際にCCDカメラを用いて点物体および線状物体の3次元情報検出を行い、検出できることを示した。

光を用いた検出処理法の特徴としては、同一 z 平面内にあるすべての基準パターンを1つに結合したものを基準パターンとしたので、基準パターンの数だけ相関を行えばよく、また1回の相関が瞬時に行えるため、積和による方法はもちろんフーリエ変換を用いた計算機処理に比べても、短時間で検出が可能となる。光による相関は離散的でなく連続的なものなので、 x 、 y 方向の基準パターン間隔を小さくして精度を上げて

も検出時間には影響がない。

今後、立体画像としての動画ホログラフィの発展が期待できるが、伝送経路におけるホログラム情報を取り出して物体の3次元情報検出が可能であることを示した。

〔参 考 文 献〕

- 1) 磯野ほか：“多眼式メガネなし3次元テレビジョン”，信学論，J76-C-II，1，pp.10-26 (1993)
- 2) J. S. Kollin, S. A. Benton, M. L. Jepsen: “Real-time Display of 3-D Computed Holograms by Scanning the Image of an Acousto-Optic Modulator”，SPIE Proc., 1136, Holographic Optics II, pp.1136-60 (1989)
- 3) S. A. Benton: “The Second Generation of the MIT Holographic Video System”，Proc. of TAO First International Symposium on Three Dimensional Image Communication Technologies, in J. Tsujiuchi, editor, pp.S-3-1-1, Telecommunications Advancement Organization of Japan, Tokyo (1993)
- 4) 泰間ほか：“電子ホログラムと光学ホログラムの合成”，3次元画像コンファレンス'93 講演論文集
- 5) 井口，佐藤：“三次元画像計測”，昭晃堂 (1990)
- 6) 白井ほか：“新しい超音波映像法の基礎的研究”，信学研資，US89-74，p.61 (1989)
- 7) T. Yabe, T. Ito, M. Okazaki: “Holography Machine HORN-1 for Computer-Aided Retrieval of Virtual Three-Dimensional Image”，Jpn. J. Phys., 32, pp. L1359-L1361, Part 2, No. 9, 15 (Sep. 1993)
- 8) 上田ほか：“2次元受光素子列を用いたホログラフィック3次元情報検出の一方式”，3次元画像コンファレンス'93 講演論文集
- 9) 西川ほか：“2次元受光素子列を用いた3次元情報検出の一方式”，信学'90 秋大，C-311
- 10) 大越：“ホログラフィ”，電子通信学会 (1981)
- 11) 辻内，一岡，峯本：“光情報処理”，pp. 5-60，オーム社 (1989)

うえだ ひろあき
上田 裕昭 昭和53年，京都大学理学部宇宙物理学科卒業。同年，ミノルタカメラ(株)に入社。光学ガラス，非球面レンズ製造法等の研究開発に従事。平成4年より，(財)イメージ情報科学研究所へ研究員として出向中。現在，動画ホログラフィ，ホログラフィ計測の研究に従事。

たかはし ひでよし
高橋 秀也 昭和57年，大阪市立大学工学部電気工学科卒業。昭和59年，同大学院前期博士過程修了。昭和59年，同学工学部助手となり現在に至る。光情報処理，動画ホログラフィに関する研究に従事。工学博士。

しみず えいじ
志水 英二 昭和38年，大阪大学工学部電子工学科卒業。同年，大阪市立大学工学部助手，昭和58年，同学工学部電気工学科教授となり，現在に至る。電子回路，オプトエレクトロニクス，光情報処理および動画ホログラフィの研究に従事。工学博士。正会員。