

## ホログラフィックな立体動画像表示と情報圧縮

吉 川 浩

ホログラフィーによる立体動画像表示のアイデアは、1965年のLeithらの論文<sup>1)</sup>にすでに登場している。その論文の試算では3次元表示のために必要な標本点数が毎秒 $1.5 \times 10^{11}$ となること、 $1 \mu\text{m}$ 程度の微細な画素をもつ空間光変調器が必要なこと、などにより理論的には可能でも現実的ではないと考えられてきた。

しかし、液晶などの空間光変調器や計算機などの進歩により、ホログラフィーによる実時間の立体動画像表示を目指した論文が80年代中頃から表れはじめた。86年には市販の液晶テレビを使用して単純な図形の計算機合成ホログラムを再生した論文<sup>2)</sup>が報告され、89年頃から液晶パネルによる立体動画像表示の研究が非常に活発となった<sup>3)</sup>。ただし、現状では画素ピッチ、画素数とも両眼での立体視には不十分であり、ホログラム用の液晶パネルの開発が待たれる。

現在のところ唯一の両眼での立体像が観察可能な表示方式として、89年にMITの研究グループにより音響光学偏向器を用いる方式が提案された<sup>4)</sup>。翌90年には同グループにより生成・伝送・表示を実時間でできるシステムが発表され<sup>5)</sup>、この分野の研究が活発になる一因となった。

将来、ディスプレイとしてどのような方式が用いられるとしても、立体動画像ホログラムに必要な情報は2次元動画像に比較して膨大であり、その圧縮技術は効果的な蓄積・伝送のために重要な課題となる。本解説では、音響光学素子を使用したディスプレイの原理と、ホログラム情報の圧縮に関する筆者の研究について述べる。

### 1. 音響光学偏向器を用いた表示システムの原理

液晶パネルを用いたホログラムの表示<sup>3)</sup>は、原理的には液晶パネルに直接レーザーを照射するだけでよい。それに対して、空間光変調器として音響光学偏向器(AOD: acousto-optical deflector, 以下AODと略す)を用いる方式では、入手可能なデバイスでディスプレイを実現するために、ホログラムの情報量を十分な3次元知覚を行うための必要最小限まで低減し、音速で移動する干涉縞を停止させるための機械走査やAODの偏向角度の不足を補うための縮小光学系など、様々な工夫がなされている<sup>4-7)</sup>。

本ディスプレイシステムはホログラムの生成・伝送・表示の3つのブロックに大別できる。まず、生成部ではホログラムとして表示したい物体の3次元形状データから、ホログラム上に形成される干涉縞をコンピューターにより計算する。生成されたホログラムはフレームバッファを通じて電気信号として表示部に伝送される。

表示部ではフレームバッファからの信号を、光学走査部分の同期信号とAODを駆動するホログラム信号とに分離する。AOD素子には二酸化テリリウム( $\text{TeO}_2$ )結晶の遅い剪断波モードが用いられている。その理由は、現在入手可能な素子のなかでもっとも大きな光の回折角度(約 $3^\circ$ )を有するからである。図1にディスプレイの光学系を示す。AODの帯域に変換されたホログラムの電気信号がAODのトランスデューサーで超音波に変換され結晶中を伝達するとき、弾性的に変調される屈折率変化が生じる。そのAODにレーザー光を入射すると、この屈折率変化による回折で光の進行方向が曲げられて、出射光としてホログラムからの再生像が得られる。AOD内に形成されたホログラムは、音速(617 m/

日本大学理工学部 (〒274 船橋市習志野台 7-24-1)  
E-mail: hiroshi@ecs.cst.nihon-u.ac.jp

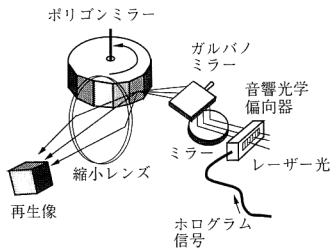


図1 ディスプレイの光学系。

秒)で移動するため、ポリゴンミラーを音速に同期して回転することでホログラムの像を静止させる。このときポリゴンミラーはAOD内に形成されたホログラムを水平走査して、見かけ上大きなホログラムとするためにも用いられる。この水平走査によって小さいAOD結晶でも大きな再生像を得ることができる。このような水平方向走査により形成された横長の線状ホログラムをガルバノメータースキャナーによって垂直方向にも走査し、ポリゴンミラーの後に置いた出射レンズの手前の空間に3次元像を形成する。AODの回折角はわずかに $3^\circ$ であるため、出射レンズによりAODの像を縮小することによって見かけ上の回折角を大きくし、広い視域(3次元画像の観察可能な範囲)を得る。この光学系は、1930年代に研究された機械式テレビジョンである「スコフォニー」方式に類似しているため、「スコフォニー構成」と呼ぶこともある。

このディスプレイにより表示された再生像は、両眼視差・輻輳・焦点調節など生理的な3次元知覚情報をすべて備えている。したがって、両眼で観察した場合には奥行きを知覚することができ、観察者が左右に移動すれば異なる視点からの像が見える。ただし、AODで形成されるホログラムは1次元であり、水平方向にはホログラムによる3次元像が再生されるが、垂直方向には2次元的な像となる。したがって、視点を上下に移動しても像は変化しない。このような垂直視差の放棄は3次元ディスプレイとしてはあまり望ましくはないが、ホログラムに要求される標本点数を2~3桁低減できる<sup>9)</sup>。

AOD1個を使用したディスプレイ構成の一例として日本大学の表示システムを説明する<sup>7)</sup>。このシステムでは、画面の毎秒更新数は60で、走査線数は32本、ポリゴンミラーの面数は12、ホログラム1本あたりの横方向ピクセル数は40,960である。再生像の大きさは30mm×30mm×30mm程度で、水平方向の視域は10度程度である。

表示画像を大きくしたり、視域を広げるためには1画

面あたりの情報量を増加させる必要がある。決められた周波数帯域内で1画面あたりの情報量を増加させるには画面の毎秒更新数を低下させればよい。しかし、その場合はフリッカーが問題となる。また、AOD1個の帯域は限られているので(TeO<sub>2</sub>の遅い剪断波モードの場合約50MHz)、周波数帯域を増加させるにはAODを複数個並列動作させることが必要になる。

現時点で最大の画面サイズかつ広視域のシステムとしては、18個のトランスデューサーを有するAODを使用して再生像の横幅15cm、高さ7cm、奥行き30cm以上で視域30度を実現したとの報告がなされている<sup>9)</sup>。また、ディスプレイ全体を大型化する代わりに、ディスプレイをモジュール化してこれを並列に配置することで大型化する試みもある<sup>9)</sup>。複数のAODを用いる場合は、赤・緑・青の3色のレーザーを使用することでフルカラー表示も実現可能である<sup>10,11)</sup>。

## 2. ホログラムの情報圧縮

本章ではホログラムの情報圧縮法として筆者がこれまで行ってきた研究について解説する。ホログラムの情報圧縮に関する研究は少なく、決して完成されたものではない。それに対して2次元画像情報圧縮ではすでに多くの研究がなされている。以下に解説する方法は、ホログラムに適切な前処理を行うことで、2次元画像のために開発された情報圧縮法が利用できることを示したものが主である。

### 2.1 ホログラム(干渉縞)の特徴

2次元画像情報圧縮の基本は冗長性の利用と人間の視覚に影響の少ない部分の削減である。ホログラムの情報圧縮においても、ホログラムとして記録されている干渉縞の特徴を調べ、画質の劣化を抑えて高い効率の圧縮を行うことが重要である。以下に解説する情報圧縮では、ホログラムの高い解像度を犠牲にする方法とホログラムを分割して局所的なスペクトルをとる2つの方法が基本となっている。解像度を犠牲にする方法については2.2で述べることにして、本節では局所スペクトルを利用する方法について解説する。

ホログラムは物体からの光の強度と進行方向を記録することができる。光の進行方向は波面と垂直であり、波面の分布はホログラム面での光の位相分布より得られる。ただし、通常の記録媒体では光の強度しか記録できないので、参照光を導入して干渉縞を発生させ、干渉縞の強度により光の振幅情報を、干渉縞の空間周波数により光の進行方向情報を記録する。そのときの干渉縞の空

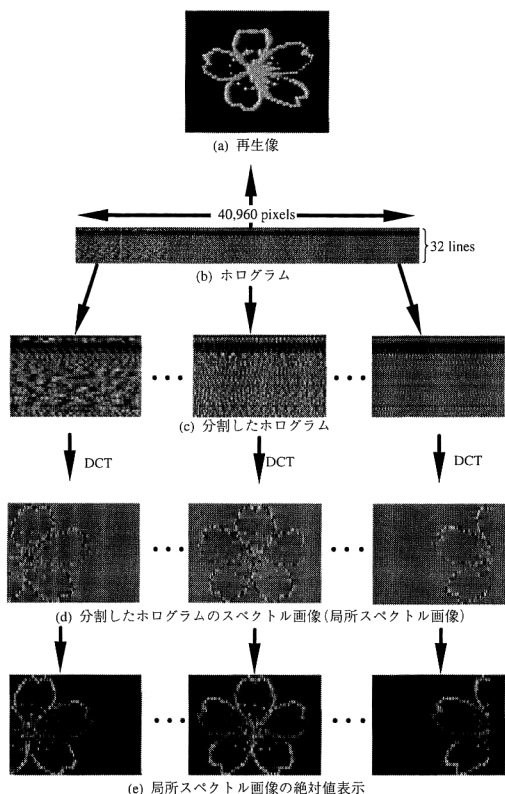


図2 局所スペクトル法によるホログラム情報圧縮の原理.

間周波数  $f$  は物体光と参照光の進行方向がホログラムの法線となす角度  $\theta_0$ ,  $\theta_t$  および光の波長  $\lambda$  により次式のようになる.

$$f = (\sin \theta_0 - \sin \theta_t) / \lambda \quad (1)$$

参照光を平面波とすれば  $\theta_t$  は一定となり、干渉縞の空間周波数  $f$  から光の到来方向を知ることができる。このことを実際のホログラムにより図2で説明する。例として点光源の集まりで表した桜の花を記録したホログラムを図2(b)に示す。このホログラムは横方向のみの視差をもつ40,960画素からなる1次元ホログラムを32本積み重ねている<sup>12)</sup>。ホログラムそのものを見ても何が記録されているかは人間には認識できない。図2(a)はそのホログラムからの再生像をAODを用いたディスプレイ<sup>7)</sup>で表示したものである。ホログラムから有限の距離に位置する物体からの光の進行方向がホログラムの法線となす角度  $\theta_0$  はホログラム上の位置によって変化する。角度が変化するということは、干渉縞の空間周波数  $f$  も変化するということになる。そこで、この変化を小さくするために、ホログラムを小領域に分割し、各領域ご

とに周波数領域に変換した場合を考える。周波数領域では物体からの光の到来方向に対応した位置にスペクトル成分が現れる。したがって、そのスペクトル全体では、その小領域を視点とした被写体の投射図形となることが予想できる。図2(b)のホログラムを図2(c)のように横方向に  $N$  画素 (図では128画素) ずつの小領域に分割し、おのおのの領域で横方向に離散コサイン変換(DCT: discrete cosine transform)を行ってスペクトルを求めた結果を図2(d)に示す。DCTの代わりにフーリエ変換を用いてもよい。3枚の画像はもとのホログラムの中央部分と左右両端のものである。ホログラムの局所スペクトル画像である図2(d)を見ると、図2(a)の再生像と似た桜の花が確認できる。ただし、図2(d)は正負の値をとるスペクトルを画像として示すために、スペクトルの振幅値がゼロのときを階調値50%とし、正の値を明るく、負の値を暗く表している。このスペクトル画像の振幅を絶対値で表示した図2(e)では、再生像により近い画像となる。図2(d)および図2(e)の3枚のスペクトル画像では、被写体(桜の花)の位置がずれているが、これはカメラを平行移動しながら撮影した場合に対応している。また、位置のずれだけでなく、細部も微妙に異なっている。この理由は、ホログラムの小領域の位置の違いが視点の違いに対応しており、3次元物体を異なる視点から観察した場合の見え方の違い(視差)によるものである。

図2よりホログラム情報の圧縮についていくつかのことが考えられる。小領域に分割されたホログラムのスペクトル画像は2次元画像に類似しているので、2次元画像のための情報圧縮が適用可能である。また、隣接小領域での視差は小さいので、隣接領域間の相関は高い。これより、情報の間引き・補間や2次元動画像圧縮法の適用が可能である。このように、ホログラムの局所スペクトルを利用することで異なる視点からの2次元画像を集積した多眼ステレオ画像の場合と同様な情報圧縮が適用可能となる。しかし、ホログラムは単なる2次元画像の集積ではなく、物体からの光の波面の情報を位相分布としてもっている。ホログラムの干渉縞は前述のようにホログラム面での物体光の位相分布を参照光との干渉により光強度分布に変換して感光材料に記録したものである。ただし、局所スペクトル法における「位相」とは各小領域での干渉縞の位相である。もしも小領域での「位相」が正しく保存されていないと、隣接領域の境界で干渉縞が不連続となり、その不連続部分による回折が雑音となり再生像を劣化させる。この「位相」の重要性は計

算機合成ホログラムにおいても指摘されている。ホログラムフィクステレオグラムのように小領域で干渉縞の周波数を一定と近似する場合でも、「位相」を考慮することで、厳密計算に匹敵する高画質のホログラムをより高速に計算できることが示されている<sup>13,14)</sup>。ホログラムの干渉縞をフーリエ変換した場合は、振幅と位相とに分離することは容易である。図2ではDCTを用いているので位相成分を完全に分離することはできないが、図2(d)のスペクトル画像の正負の「符号」がこの位相情報に対応している。したがって、図2(e)のようにスペクトルの絶対値をとることは、情報圧縮に対しては有効であるが、ホログラムのもつ重要な3次元情報を棄却することになるので、注意が必要である。このような局所スペクトルによるホログラムの取り扱い、光線群による3次元空間情報の表現手法のひとつとしても検討されている<sup>15)</sup>。ただし、光線群による扱いでは位相情報は考慮されていない。

以下にホログラム情報圧縮のいくつかの手法について解説する。紙面の制約もあり、方法を中心に述べるので、詳細な結果についてはそれぞれの文献を参照していただきたい。

## 2.2 干渉縞の間引き・補間による情報圧縮

ホログラムからの再生像の解像度は、ホログラムの大きさを開口とする窓の回折で決まるため、一般に光の波長程度(1 $\mu\text{m}$ 前後)となる。それに対して、人間の眼は角度分解能を1分(視力1.0相当)とすると視距離500mmに対して最小分解能は140 $\mu\text{m}$ 程度である。そこで、ホログラムの解像度を低下させて情報圧縮をしても、視覚に対してはあまり影響が現れない。

ホログラムの解像度を低下させる方法のひとつに、ホログラム情報の間引きがある。情報の間引きは、光学的ホログラムの撮影時にホログラム面上に周期的開口をもつマスクを置いて、開口部分のみで干渉縞を記録することに対応する<sup>16)</sup>。開口部分の比率が大きいときは、再生時に回折光が減少して像が暗くなる。この場合は開口部分のホログラムをマスクされた部分へ転写すればよい。再生像には、開口部分での回折による「ぼけ」と、マスク部分へのホログラムの転写で生じる多重像による「ぼけ」が起こる。この「ぼけ」を抑えるためには開口部分とマスク部分の比を最適値にする必要がある<sup>12,17)</sup>。間引き前の再生像との比較による主観評価の結果、圧縮率が4分の1程度までは画質の劣化が気にならないという結果が得られた。

## 2.3 周波数領域補間法

マスク部分を埋めるために開口部分のホログラムを単純に転写すると多重像による「ぼけ」が起こる。しかし、簡単な補間処理により「ぼけ」を小さくすることができる<sup>18)</sup>。図2に示したように分割したホログラムのスペクトル画像では、そのホログラムの位置によって被写体の表れる位置が横方向にシフトしていく。したがって、マスク部分に開口部のホログラムを転写するとき、このシフト量だけスペクトル画像を横方向にずらせばよい。すなわち、周波数領域において画像の1次補間をすればよい。この「周波数領域補間法」を用いて復元されたホログラムからの再生像の画質劣化に対する主観評価を行ったところ、単純転写による補間と比較して明確な改善がみられた<sup>18)</sup>。ただし、被写体の奥行が異なるとシフト量が違うので、奥行の深い画像では再生像に「ぼけ」が生じる。また、スペクトル画像の絶対値のみを補間しているので、位相情報の欠落による画質の劣化が起こる点は2.2の単純補間の場合と同じである。

## 2.4 2次元静止画像符号化を用いた圧縮法

図2で説明したように、小領域に分割されたホログラムのスペクトルは、被写体の透視図と類似している。そこで、この局所スペクトル画像に対して2次元画像のために開発された符号化アルゴリズムを適用し、その効果を検討した<sup>18,19)</sup>。符号化方式としては2次元静止画像の国際標準となっているJPEG(joint photographic coding experts group)を使用した。圧縮の手順としては、図2(c)のように1次元ホログラム(40,960 $\times$ 32)を1ブロックあたり $N$ 標本点に分割し、1ブロックごとに横方向に1次元離散コサイン変換を用いて周波数領域に変換したホログラム(図2(d))に対してJPEGを適用した。この方法を以下ではDCT-JPEG法と呼ぶ。

また、比較のためにホログラム(図2(b))に直接JPEGを適用した(直接JPEG法)。干渉縞の空間周波数は前述のように光の到来方向で決定されるため、通常は低域から高域までほぼ一様に分布する。したがって、干渉縞にそのままJPEGを適用しても高い圧縮率は期待しがたい。

両方法により圧縮・伸張を行ったホログラムからの再生像を比較した結果、SN比、画質劣化の主観評価の結果ともDCT-JPEG法(局所スペクトル画像に圧縮をかける方法)が優れていた<sup>19)</sup>。また、2.3で述べた周波数領域補間法との主観評価の比較では、圧縮率が6分の1程度まではDCT-JPEG法が有利で、それ以上の圧縮に対しては周波数領域補間法が有利となった<sup>18)</sup>。

## 2.5 2次元動画画像符号化を用いた圧縮法

2.1で述べたように、ホログラムの局所スペクトル画像列は、被写体に対してカメラを横方向に平行移動させながら撮影した一連の画像列とみなすことができる。したがって、この画像列に2次元動画画像符号化を適用することで効果的な圧縮が期待できる<sup>20)</sup>。符号化方式としては国際標準のMPEG (motion picture coding experts group)を用いた。圧縮の手順は2次元静止画像符号化を用いる場合と同じであるが、局所スペクトル画像列を一連の動画像として扱う点が異なる。これまでの結果では、他の方式と比較しても圧縮率に大きな違いは得られなかった。MPEGには設定すべきパラメーターが多いので、これらを最適化することにより圧縮率を改善できる可能性が残されている。

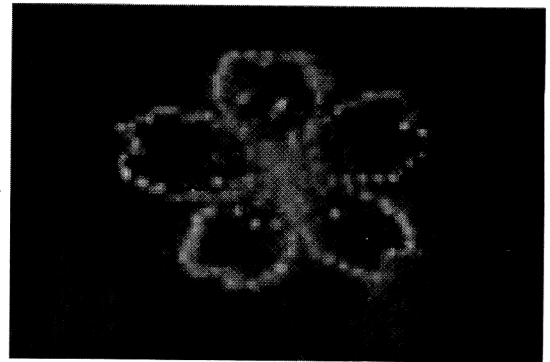
## 2.6 周波数スペクトル間引き

2.2で述べた間引きは、局所スペクトル画像自身の間引きであった。ここでいう周波数スペクトル間引きとは、個々の局所スペクトル画像内において、スペクトル強度の大きい部分は細かく、小さい部分は粗く再標本化(サブサンプリング)し、その他の部分を間引いてしまう手法である<sup>21)</sup>。この方法は、被写体が単純な場合には有利である。しかし、被写体が複雑な場合には重要なスペクトル成分まで間引かれてしまうので再生像の一部が欠けてしまう。

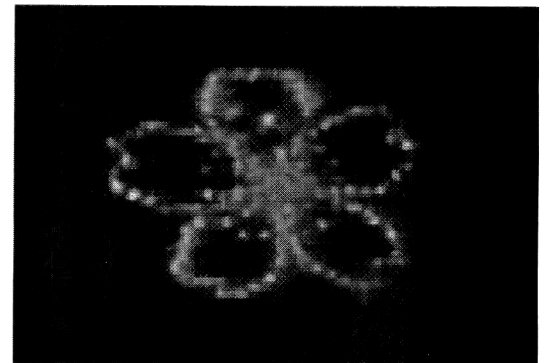
## 2.7 位相保存周波数領域補間法

この方法は、2.3の周波数領域補間法と類似しているが、さらに局所スペクトル画像の位相情報を保存するように考慮し、他の方法と組み合わせて圧縮を行っている<sup>22)</sup>。周波数領域補間法の問題点は、局所スペクトル画像のスペクトル強度は補間できるが位相情報が失われることであった。そこで、図2(d)の局所スペクトル画像において絶対値は間引きと周波数領域補間を行うが、位相成分として正負の符号を2値画像として保存する。この2値画像は、スペクトル強度がゼロ付近の画素を任意の値に置換して相関を高めたうえで、2値画像圧縮法であるJBIG (joint bi-level image coding experts group)により符号化する。圧縮率を高めるために、この処理に加えて通常の周波数領域補間法も画質に影響しない程度に行う。その結果、192分の1まで圧縮しても、再生像の劣化は気にならない程度であった。圧縮前の再生像と、圧縮・伸張後の再生像を図3に示す。

本論文では、ホログラフィックな立体動画画像表示の一方法である音響光学偏向器を用いた方式の原理と、ホロ



(a)



(b)

図3 位相保存周波数領域補間法の再生像。(a)原画像、(b)圧縮率1/192から伸張した再生像。

グラフィック情報圧縮法について解説した。

情報圧縮法の今後の課題として、圧縮する画像の内容(評価用標準画像)や画質の評価方法についての詳細な検討が必要である。たとえば、3次元ディスプレイでは視点によって像の見え方が変化するが、視点によって画質が変化する場合にはその評価が困難になるであろう。また、画質の客観的評価方法についても検討しなければならない。

また、本文では触れなかったがホログラムの計算速度もホログラムの情報圧縮と密接に関係している。ホログラムの計算がディスプレイにおいて十分高速に行えるようになれば、ホログラムを圧縮して伝送するよりも物体の3次元モデルデータを送ったほうが効率的である。

ホログラフィック3次元画像をデジタルデータとしてあつかう研究はまだ始まったばかりであり、情報圧縮についても発表はまだ少なく、研究の余地は大いにあると考えられる。

## 文 献

- 1) E. N. Leith, J. Upatnieks, B. P. Hildebrand and K. Haines: "Requirements for a wavefront reconstruction television facsimile system," J. Soc. Motion Pict. and Telev. Eng., **74**, 10 (1965) 893-896.
- 2) F. Mok, J. Diep, H. Liu and D. Psaltis: "Real-time computer generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator," Opt. Lett., **11**, 11 (1986) 748-750.
- 3) 佐藤甲突: "液晶デバイスを用いた動画ホログラフィ研究の展望", ディスプレイアンドイメージング, **2** (1994) 309-315.
- 4) J. S. Kollin, S. A. Benton and M. L. Jepsen: "Real-time display of 3-D computed holograms by scanning the image of an acousto-optic modulator," Proc. SPIE, **1136** (1989) 178-185.
- 5) 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.
- 6) P. St.-Hilaire: "Scalable optical architecture for electronic holography," Opt. Eng., **34**, 10 (1995) 2900-2911.
- 7) 吉川 浩: "音響光学素子を用いたホログラムの実時間表示", ディスプレイアンドイメージング, **3** (1995) 293-299.
- 8) 吉川 浩: "ホログラフィック三次元画像の圧縮技術", テレビジョン学会誌, **47** (1993) 177-182.
- 9) S. Iwata, H. Yoshikawa and T. Honda: "Arrayed electro-holographic 3D display," *5th Intl Conf. on High Technol.: Imaging Sci. and Technol. (World Techno Fair in Chiba '96)*, C-3 (1996) pp. 346-354.
- 10) P. St.-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente and P. M. Hubel: "Color images with the MIT holographic video display," Proc. SPIE, **1667** (1992) 73-83.
- 11) 辻川 晋, 岩田成健, 岡田孝常, 吉川 浩, 本田捷夫: "AOM方式立体ディスプレイ(1)-設計-", 第41回応用物理学会関係連合講演会, 29 aB 7/III (1994).
- 12) 吉川 浩, 佐々木建光: "動画ホログラフィの情報低減", 画像電子学会誌, **22** (1993) 329-336.
- 13) 山口雅浩, 大山永昭, 本田捷夫: "ホログラフィックステレオグラムによる像再生特性に関する考察", 光学, **22** (1993) 714-720.
- 14) 亀山祐和, 吉川 浩: "インテグラル・ホログラム", 電子情報通信学会論文誌, **J78-A** (1995) 1061-1064.
- 15) 藤井俊彰, 金子正秀, 原島 博: "光線群による3次元空間の表現とその応用", テレビジョン学会誌, **50** (1996) 1312-1318.
- 16) C. B. Burckhardt: "Information reduction holograms for visual display," J. Opt. Soc. Am., **58**, 2 (1968) 241-246.
- 17) 佐々木建光, 吉川 浩: "電子ホログラフィックディスプレイにおける情報低減の検討", 電子情報通信学会論文誌, **J76-D-II** (1993) 2151-2152.
- 18) 佐々木建光, 丹治英一郎, 吉川 浩: "ホログラフィック3次元画像の情報圧縮", テレビジョン学会誌, **48** (1994) 1238-1244.
- 19) 吉川 浩, 丹治英一郎: "高効率符号化を用いたホログラフィック3次元画像の圧縮法", テレビジョン学会誌, **47** (1993) 1678-1680.
- 20) H. Yoshikawa and J. Tamai: "Holographic image compression by motion picture coding," Proc. SPIE, **2652** (1996) 2-9.
- 21) 水落正裕, 吉川 浩: "周波数スペクトル間引きによるホログラフィック3次元画像の情報低減", 1996年電子情報通信学会総合大会, D-430 (1996).
- 22) 小野智正, 吉川 浩: "ホログラフィック3次元画像情報圧縮の一方方法", テレビジョン学会技術報告, **20**, AIT 96-35 (1996) 13-16.

(1997年2月5日受理)