

# 反射型液晶ディスプレイと専用計算機システムによる動画ホログラフィー

伊藤 智 義

## Real-Time Holography with Reflective Liquid Crystal Display by Special-Purpose Computer

Tomoyoshi ITO

A three-dimensional animation system by holography for practical use requires a controllable fine minute display system and a high performance computing system. A special-purpose computer system for holography with a fine minute reflective liquid crystal display will be able to realize it in near future.

**Key words:** holography, computer-generated hologram, animation, liquid crystal display, special-purpose computer

ホログラフィーは三次元波面を忠実に記録・再生できる唯一知られた技術であり、ホログラフィーによる三次元動画システムは究極の立体テレビになりうるものと考えられている。しかしその実用化は難しく、21世紀初頭のある予想では実現は2020年ごろになるだろうとしている。その主な理由は以下の2つである。

- (I) ホログラムの干渉縞を表示できるほど高精細で制御可能な表示デバイスが現時点において見当たらないこと
- (II) 実用的なサイズのホログラムをビデオ・レート(30枚/秒)で更新できるほど高速な計算機環境が実現されていないこと

ホログラフィーでは光の干渉現象と回折現象を利用する。物体光の波面を位相のそろったレーザーなどの参照光と重ね合わせて干渉させ、その干渉縞を写真乾板(ホログラム)に記録し、再生時にはホログラムに参照光だけを照射する。照射された参照光は干渉縞によって回折を起こし、この回折光が物体光の波面を忠実に再生する。

再生に回折光を利用しているため、視域は回折角によっ

て決まってくる。回折角 $\theta$ は表示系の画素間隔 $l$ によって決まり、参照光の波長を $\lambda$ とすると両者の間には次の関係がある。

$$2l\sin(\theta/2) = \lambda \quad (1)$$

銀塩写真などの光学フィルムでは画素間隔に相当する画質の解像度は $0.1\sim 1\mu\text{m}$ である。したがって視域は $40^\circ$ 以上あり、十分な立体視が可能である。実際、静止画においては素晴らしいホログラム作品がいくつも作られている。しかし動画の場合はこのホログラムを逐次更新しなければならない。データを制御でき、かつこれほど高精細な表示デバイスは今のところ存在しない。これが第1の問題である。

次に、表示デバイスの問題が仮に解決した場合を考えてみる。ホログラムの干渉縞は計算によってコンピュータ上で作ることも可能であり、計算機合成ホログラム(computer-generated hologram: CGH)とよばれている。したがって理論的には、たとえば数値シミュレーションの結果を計算によってホログラムに変換して再生を行えば三次元の可視化を行うことができる。ただし、十分な再生像

を得るための表示系,たとえば画素間隔 $1\mu\text{m}$ ,有効利用面積 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ の総画素数は100億である.これをビデオ・レートで駆動するためには,現在のコンピューターより $10^5\sim 10^6$ 倍高い計算能力が必要である.これが第2の問題である.

本稿では,まず第1章でこれまで行われてきたホログラフィー動画についての先駆的な研究を紹介し,そこで明らかにされた問題点を整理する.第2章で表示系として反射型液晶ディスプレイ(LCD)が有効であること,第3章でCGHの計算アルゴリズムが専用ハードウェアに向いており,飛躍的に計算速度が向上することを示し,第4章で将来の展望について議論したい.

## 1. 動画ホログラフィー

### 1.1 AOM方式

制御可能なディスプレイ装置による動画ホログラフィーの研究は1990年ごろにMITで初めて行われた<sup>1)</sup>.MITのグループでは表示デバイスとして音響光学変調器(acoustic optical modulator: AOM)を使用した.AOMは音響光学効果を利用してレーザーなどの入射光を変調させるデバイスであり,うまく制御することによってAOM内にホログラムの干渉縞に相当する回折効果をもたせることができる.最初の試作で得られた再生像の大きさは3cm程度であったが,その後AOMを複数用いた2号機を開発して1995年には10cm程度の像再生に成功した<sup>2)</sup>.

ただし,AOMは一次元デバイスであるので,水平・垂直両視差を同時にもつことができない.そのため,このシステムでは垂直視差を犠牲にしている.また,入力された干渉縞はAOM内を進行していくので,像を静止させるための走査系が必要となる.このことから,AOM方式には本質的に次のような欠点が存在している.

- (1) 垂直視差を犠牲にするため,ホログラフィーの特徴である完全な三次元像再生ではないこと
- (2) ポリゴンミラーなどの機械的な走査系が必要なこと

AOM方式での視域は,原理的には帯域幅の大きなAOMを使用することで広くすることができる.しかし機械走査が間に合わず,そこで律速する<sup>3)</sup>.そのため再生像を大きくするにはAOMを並列化していかなければならず,それに伴ってシステムも大規模・複雑化する.機械制御は速度,実装容積,信頼性等の面で電子制御に劣り,将来の実用化に向け,大きな難点になるものと考えられる.

### 1.2 LCD方式

一方,もっとも一般的な電子制御表示デバイスとしてLCDがある.LCDを用いたシステムには上記のような欠

点はなく,(1)完全な三次元像再生であり,(2)完全に電子制御が可能である.LCDによる動画ホログラフィーは1991年にシチズン<sup>4)</sup>および佐藤(湘南工科大学),樋口(NTT),勝間(多摩美術大学)のグループ<sup>5)</sup>がそれぞれ行い,1cm程度と小さいながらも像の再生に成功し,立体テレビとして話題をよんだ.その後,1995年には通信放送機構(TAO)で,AOM方式と同程度の5~10cmの像再生に成功した<sup>6)</sup>.

TAOのシステムで表示に使用されたのはシチズンが開発した画素ピッチ $28\mu\text{m}$ (水平) $\times 56\mu\text{m}$ (垂直),画素数 $3200\times 960$ (約300万画素)の透過型LCDパネルであった.ただし $28\mu\text{m}$ の画素ピッチでは $1^\circ$ 程度の回折角しか得られないため,パネルを水平に5枚用いて像を拡大している.総画素数は実に1500万画素であり,破格の大画面である.また, $28\mu\text{m}$ の画素ピッチから10cmの視域を得るためには,照明光学系から再生像までが7.5mという巨大な光学系が必要であった.この試作を通して明らかにされたLCD方式の課題は以下の通りである<sup>7)</sup>.

- (3) 数 $\mu\text{m}$ オーダーの画素ピッチを実現して装置全体を実現可能な規模に納めること

この結果はLCD方式によるホログラフィー再生の実用化が困難であることを示唆した.透過型LCDでは液晶素子とそれを制御する回路が同じ面に作り込まれるため,高精細化には限界があるからである.しかも高精細にすればするほど制御回路部分によって遮られる光の割合が増え,再生像が暗くなるという欠点も内含している.

## 2. 反射型LCD

筆者らの研究室ではAOM,透過型LCDに代わる表示デバイスとして,最近市販され始めている高精細な反射型LCDに注目している.反射型LCDでは制御回路は液晶面の裏面に作り込まれる.したがって原理的に高精細化が可能である.しかも制御回路が入射光を遮ることはないのでパネルの反射率を高くでき,明るい像を得ることが可能である.つまり,透過型LCDに本質的に存在している欠点が反射型LCDにはないのである.この章では反射型LCDを用いた再生例をまじえ<sup>8,9)</sup>,その有効性を示す.

### 2.1 再生システム

図1に反射型LCDを用いた再生システムを示す.使用したLCDはColorado Microdisplay(CMD)社製のCMD 8X 6Dで,画素間隔 $12\mu\text{m}$ (水平) $\times 12\mu\text{m}$ (垂直),画素数 $800\times 600$ (48万画素),有効面積 $9.6\text{mm}\times 7.2\text{mm}$ というパネルである.また参照光源には,AOM方式および透過型LCD方式では不可欠であったレーザーではな

く、発光ダイオード (LED) を使用している。これは反射型 LCD の光利用効率が高いために可能になった。レーザーを使わないでよいということはシステムを飛躍的に小さくできるという利点はもちろんであるが、それ以上の意味合いを含んでいる。レーザーは本来ビーム状で使うものであり、それを干渉縞によって発散波にさせてしまうと大出力のレーザーでも強度不足に陥ることが TAO の研究でも指摘されている<sup>7)</sup>。また、コヒーレント光であるため、スペックルノイズなどの問題も生じる。実際、静止画ホログラムの場合でも、露光にはレーザーを使うが、再生時はハロゲンランプを用いたりしている。反射型 LCD がインコヒーレント光である LED で機能できるということはシステムに大きな柔軟性を与える。

本システムは非常に簡素であり、LCD パネルと LED のほかは、ピンホールフィルター、ビームスプリッター (ハーフミラー)、2 個のレンズとパーソナルコンピュータ (PC) で構成されている。PC で生成したホログラムを LCD に表示し、そこにピンホールフィルターとコリメーターレンズで平行にした LED の参照光を、ビームスプリッターを利用して入射する。もう 1 枚のレンズは視野レンズで、再生像を観察者に近づけるために使用している。

## 2.2 再生例

図 2 は画素数 240 点の立方体である。LCD から 1 m 離れた空間に傾きをつけて再生した。図中で立方体を含んだ形で写っている視野レンズの直径は 5 cm である。立方体の中央付近に明るい点が写っているが、それは LED の直接光である。レーザー光の場合、直接光を見ることは危険であるが、LED の場合は目を傷つけることはない。そのコントラストを示すために直接光と回折光を同時に表示した。図が示すように、参照光源が微弱な LED にもかかわらず再生像は明るく、室内光下でも十分きれいに見ることができている。

図 3 は LED に赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の 3 原色を使用した再生例である。この結果は、RGB の光源でそれぞれ像を作り出して重ね合わせることで、容易にカラー再生が行えることを示している。

再生点が増加すると回折光の分散によって像のコントラストは低下する。そこで次に、システムの表示能力をみるためにサーフェス・モデルの再生を行った。図 4 は転がっているサイコロの動画再生例である。画素総数は 5212 点で、陰面処理を行って半数の点を表示させている。TAO で試作された透過型 LCD 方式のパネルが 1500 万画素であったのに対して、ここで使用している反射型 LCD はその 30 分の 1 の 48 万画素にしからずがない。パネルサイズもわ

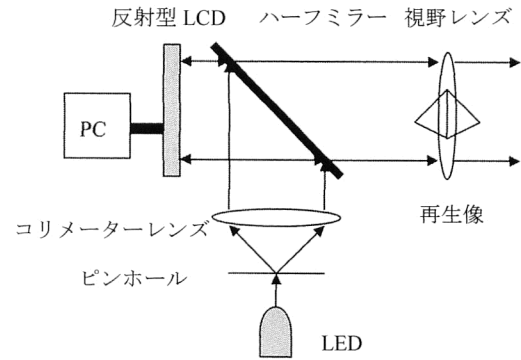


図 1 反射型 LCD を用いた再生システム。

ずかに 1 cm 角以下であることを考慮すると、反射型 LCD のもっている表示能力は十分に高いものと考えられる。

## 3. 情報処理の超高速化

LCD と LED の組み合わせは現在の二次元表示装置でもふつうに使われているので、2 章の結果は現在の技術の延長上で三次元動画システムが実現可能であることを示唆している。現在市販されている反射型 LCD の画素間隔は、高精細のもので  $10 \mu\text{m}$  であり、視野角にすると約  $3^\circ$  に相当する。これが半分の  $5 \mu\text{m}$  になれば  $7^\circ$  になり、10 分の 1 の  $1 \mu\text{m}$  になれば  $40^\circ$  にまで広がる。ここまでくれば十分実用の領域に入る。それは、現在の技術推移からみれば、数年のうちに実現してもおかしくはない。

しかし表示デバイスが十分な解像度をもつようになると、今度はこれを駆動する計算処理系の問題が増大する。はじめに動画ホログラフィーにおける 2 つの課題 (表示と情報処理) をあげたが、この 2 つは互いに独立ではなく、高精細な表示デバイスは必然的に情報量を増大する。したがって動画ホログラフィーの問題は、最終的には情報処理速度の問題に帰結する。

### 3.1 計算量

この問題を明確にするために、まず CGH の計算量を示しておこう。ホログラムの干渉縞は以下の式で計算することができる。

$$I_\alpha = \sum_j^M \phi_{\alpha j} \quad (2)$$

$$\phi_{\alpha j} = (A_j / R_{\alpha j}) \cos(R_{\alpha j}) \quad (3)$$

計算は離散点で行われ、 $\alpha$  はホログラム上の点を、 $j$  は物体を構成する点を表す。 $A_j$  は物体点の光の強度、 $R_{\alpha j}$  はホログラム点と物体点の間の距離、 $k$  は参照光の波数である。 $M$  は物体点の総数であり、ホログラム上の 1 点  $I_\alpha$  を計算するのに式 (3) を  $M$  回計算する必要がある。式 (3) は 30 演算くらいに相当するので、ホログラムの画素数を  $N$

とすると、1枚当たりの計算量は  $30MN$  と見積もることができる。これを1秒間に30枚生成するためには約  $10^8 MN$  flops (floating point operations per second: 1秒当たりの浮動小数点演算数) の計算能力が要求される。

たとえば、 $1\mu\text{m}$  ピッチで  $10\text{cm}\times 10\text{cm}$  のLCD (総画素数100億:  $N=10^{10}$ ) を用いて、10万点 ( $M=10^5$ ) の物体を動画再生させるためにはE (エクサ:  $10^{18}$ ) flops の計算能力が必要となる。現在のスーパーコンピュータはようやくT (テラ:  $10^{12}$ ) flops に到達しようとしているが、その100万倍である。もう少し現実的に、 $5\mu\text{m}$  の画素ピッチで  $5\text{cm}\times 5\text{cm}$  のディスプレイが構成できた場合を考えてみよう。これは数年のうちに十分達成できる仮定である。しかしそれでも総画素数は1億 ( $N=10^8$ ) であり、物体を少々粗く1万点 ( $M=10^4$ ) で構成したとしても、P (ペタ:  $10^{15}$ ) flops の計算能力を実現しなければならない。

### 3.2 ホログラフィー専用計算機 HORN

CGHの高速化に関しては差分法や漸化式による方法など<sup>10,11)</sup>、アルゴリズムの改良が続けられており、式(3)を直接計算する方法に比べて数十倍の高速化が達成されている。しかし上述の通り、ホログラムのもつ情報量が膨大であるため、実用化に向けてはさらに飛躍的な高速化が必要である。

そこで筆者らの研究室では、ここ10年にわたってハードウェアによる高速化の研究を続けてきている。ある種の数値計算では、アルゴリズムをハードウェア化することで、汎用計算機の1000倍以上にも及ぶ高速化が達成されることがある。代表的な例が、銀河などのように多数の粒

子(星)が互いの重力で運動を行っている重力多体系であり、1988年に東京大学で始まった重力多体問題専用計算機GRAPE (gravity pipe) の開発は大きな成功を取っている<sup>12)</sup>。スーパーコンピューティングのコンテストでもっとも価格性能比の高い数値シミュレーションに与えられる賞にゴードン・ベル賞 (価格性能比部門) があるが、この10年間で5度、GRAPEを用いた数値計算が受賞している。筆者は開発当初から3年間GRAPE計画に従事しており、試作1号機GRAPE-1、2号機GRAPE-2および分子動力学にも使えるように改良を加えたGRAPE-2Aを開発した。現在のGRAPEは東京大学で天文学用の、理化学研究所で分子動力学の最新バージョンがそれぞれ開発されてお

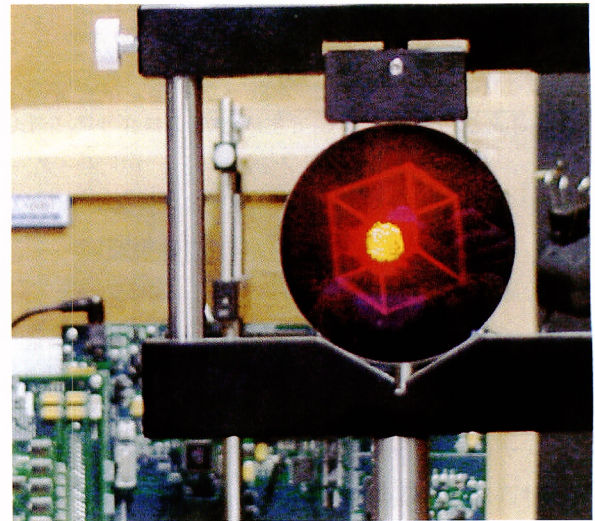


図2 ワイヤフレームモデルの再生例。

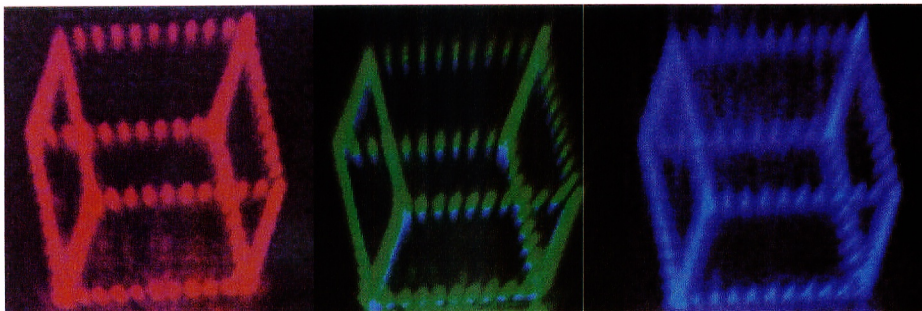


図3 カラー表示。

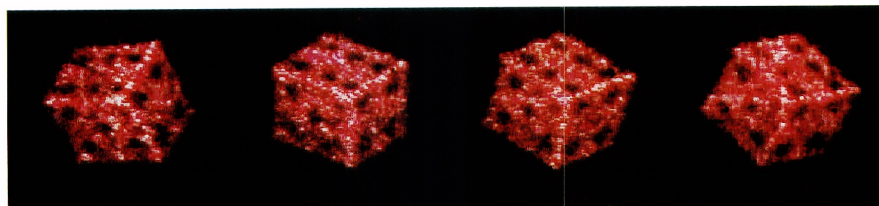


図4 サーフェスモデルの再生例。

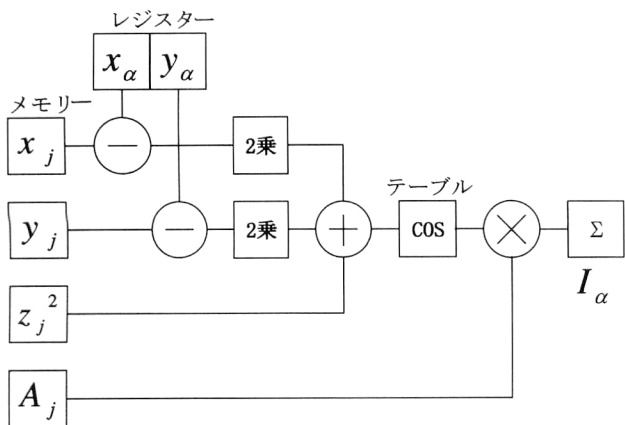


図5 CGH パイプライン.

り、まもなく実効速度でスーパーコンピュータの100～1000倍速い100 Tflopsに到達しようとしている。

CGHのアルゴリズムは重力多体問題と近い構造をしているうえに、精度が低くてもよいことや通信負荷が小さいことなどから、より専用計算機システムに適した問題である。ホログラフィー専用計算機の開発はHORN (holographic reconstruction)と名付けて1992年に開始した。CGHでは、ただひたすら式(3)の計算を行う。したがってこの式をハードウェア化し、多数並列化することで高速化を行う。

図5に式(3)のパイプライン構成を示す。パイプライン方式とは1つの処理を複数の演算器を使って流れ作業的に行う高速化法で、並列処理の一手法である。式(3)には30程度の演算数が必要であるが、パイプライン方式にするとこれを1クロックで計算できるので、ここで30倍程度の高速化が可能になる。式(3)を基板上に実現した試作1号機HORN-1<sup>13)</sup>、2号機HORN-2<sup>14)</sup>を経て、3号機HORN-3<sup>15)</sup>で1チップ化に成功し、最新のHORN-4<sup>16)</sup>では30万ゲートのPLD (programmable logic device)に30本のパイプラインを実装した。

### 3.3 並列化

CGHの大きな特徴はホログラム各点の計算が互いに独立して行えるということである。つまり並列化が容易であり、パイプライン数に比例して計算速度を上げることができる。式(3)のパイプラインは、ハードウェア化に向けたアルゴリズムの改良を続け<sup>17)</sup>、今では1万ゲートにまで圧縮できている。現在、最大規模のLSIは1000万ゲートに達しているため、これを用いれば1チップに1000パイプラインを実装することが可能である。この専用LSIが1GHzで動作したとすると、1秒間に式(3)を1兆(10<sup>12</sup>)回行うことになる。この専用LSIを30個並列動作させれば、画素ピッチ5μm、有効面積5cm×5cmのディスプレ

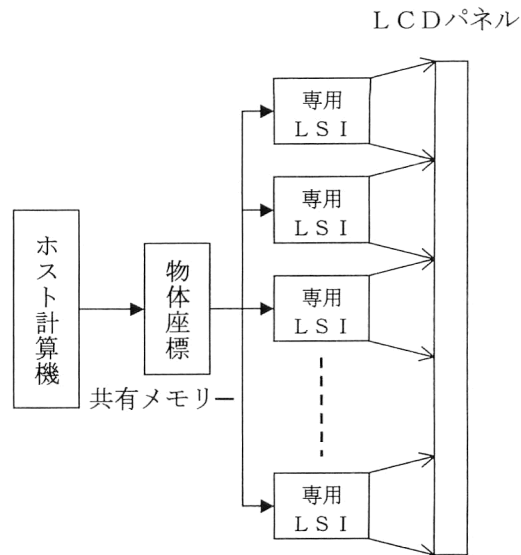


図6 並列システム.

イ(1億画素:  $N=10^8$ )で、1万点( $M=10^4$ )の物体を動画再生させることが可能になる。これは十分現実的な見積りであり、専用計算機システムが動画ホログラフィーにきわめて有効であることを示している。

また、並列計算において一般的に問題となるのが通信コストであるが、本システムにおいてはこれも回避される。図6に専用LSIを組み込んだシステムの構成を示す。データの流れは一方方向であり、しかもホストコンピュータから専用計算機には物体点のデータだけを送ればよい。専用計算機内では各LSIは同時に物体データを参照し、割り当てられたホログラム点の干渉縞を計算し、それを直接ディスプレイに送る。通信が交差するところはどこにもなく、しかも分散処理されているため、通信がネックになることはない。もし専用計算機とディスプレイの間の通信が間に合わない場合は、領域をさらに分割すればよい。

### 4. 将来の展望

近年のコンピュータ環境の進展にはめざましいものがある。ここ10年で演算速度、記憶容量ともに1000倍以上になっている。しかしディスプレイ環境はほとんど変化していない。それは今日のディスプレイがすでに視覚の認識能力を十分満たしているからだと思われる。今後、ディスプレイに関してブレイクスルーがあるとすれば、やはり三次元表示であろう。その究極の目標のひとつに動画ホログラフィーがある。

1μmピッチのLCDは技術的には可能であるように思われるが、現実に開発するメーカーが現れるかは難しい状況にある。商品となるべき用途が見当たらないからであ

る。1  $\mu\text{m}$  ピッチで1000 $\times$ 1000の表示面は1 mm角でしかない。人間の視覚に対する表示装置としてはほとんど意味のないほどのオーバー・スペックである。その開発を促すためには動画ホログラフイーが実現可能であることを示す必要がある。そのためには、本質的な問題であるホログラフイーのもつ膨大な情報量を処理してみせることが必要であろう。本稿で述べた通り、それは十分可能であると考えており、現在、そのプロトタイプとなるべき試作を行っている。その結果は近いうちに報告できるものと考えている。

## 文 献

- 1) P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin and H. Yoshikawa: "Electronic display system for computational holography," Proc. SPIE, **1212** (1990) 174-182.
- 2) P. S. Hilaire: "Scalable optical architecture for electronic holography," Opt. Eng., **34** (1995) 2900-2911.
- 3) 通信・放送機構：高度立体動画画像通信プロジェクト最終成果報告書 (1997).
- 4) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM," Proc. SPIE, **1461** (1992) 291-300.
- 5) K. Sato, K. Higuchi and H. Katsuma: "Holographic television by liquid crystal devices," Proc. SPIE, **1667** (1992) 19-31.
- 6) K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa, K. Sato and T. Honda: "Electro-holographic display using 15 Mega pixels LCD," Proc. SPIE, **2652** (1996) 15-23.
- 7) 前野敬一："液晶パネルを用いた動画ホログラフィック・ディスプレイ", O plus E, **12** (1997), 91-94.
- 8) 下馬場朋禄, 伊藤智義："反射型液晶ディスプレイを用いた計算機合成ホログラムによる3次元動画画像システム", 映像情報メディア学会誌, **55** (2001) 733-735.
- 9) 伊藤智義, 下馬場朋禄, 菱沼信介, 合渡大和, 堀内雅彦："高精細反射型液晶ディスプレイによるホログラフィ再生", ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報, **21** (2001) 5-10.
- 10) 岩瀬 進, 吉川 浩："差分法に基づくフレネルホログラムの高速計算法", 映像情報メディア学会誌, **52** (1998) 899-901.
- 11) K. Matsushima and M. Takai: "Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms," Appl. Opt., **39** (2000) 6587-6593.
- 12) J. Makino and M. Taiji: *Scientific Simulations with Special-Purpose Computers—The GRAPE Systems* (John Wiley & Sons, 1998).
- 13) T. Ito, T. Yabe, M. Okazaki and M. Yanagi: "Special-purpose computer HORN-1 for reconstruction of virtual image in three dimensions," Comput. Phys. Commun., **82** (1994) 104-110.
- 14) T. Ito, H. Eldeib, K. Yoshida, S. Takahashi, T. Yabe and T. Kunugi: "Special-purpose computer for holography HORN-2," Comput. Phys. Commun., **93** (1996) 13-20.
- 15) T. Shimobaba, N. Masuda, T. Sugie, S. Hosono, S. Tsukui and T. Ito: "Special-purpose computer for holography HORN-3 with PLD technology," Comput. Phys. Commun., **130** (2000) 75-82.
- 16) T. Shimobaba, T. Ito, S. Hishinuma and T. Ebisuzaki: "Special-purpose computer for holography HORN-4 with recurrence algorithm," Comput. Phys. Comm (in press).
- 17) T. Shimobaba and T. Ito: "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition," Comput. Phys. Commun., **138** (2001) 44-52.

(2002年1月16日受理)