

三次元情報技術と情報フォトニクス

宮 崎 大 介

Three-Dimensional Information Technology and Information Photonics

Daisuke MIYAZAKI

Three-dimensional information technology as a concrete research theme in information photonics is described. Holography and other optical technologies for acquisition, processing and display of three-dimensional information are reviewed. In order to construct a practical three-dimensional information system, it is important to consider cooperation and integration of such technologies, which are individually developed.

Key words: information photonics, image processing, stereoscopic display, three-dimensional measurement, holography

三次元空間に存在する人にとって、三次元的な情報の獲得や利用を欲するのは自然なことといえる。正確な三次元情報の獲得のために多種の計測技術が開発され、獲得した三次元情報を効果的に表現するためにさまざまな立体表示方法が考案された。近年の情報技術の発展により、三次元情報を高速に処理することが可能になり、広範囲な分野で三次元画像が利用されるようになった。今や取得から利用までを含めた三次元情報システムの開発が可能となり、その実現が期待されている。

一方、光を情報のキャリアーとし光技術を駆使した高機能な情報機器の開発を目指す研究領域として、情報フォトニクスが現在立ち上がりつつある。三次元情報技術は光技術との親和性が高く、社会からの需要が大きいといった点から、情報フォトニクスにおける研究対象として適している。光学分野における三次元情報技術の研究は、多くの領域にまたがって行われている。三次元情報フォトニクスシステムを構築するためには、これらの技術を再構成して連携させる必要がある。

本稿では、光技術を用いて三次元情報の取得、加工、表示等を実現する研究について、いくつか具体例を挙げ展望

する。統合的な三次元情報フォトニクスシステムとしての研究はまだ少ないが、三次元情報を扱う各段階の間で連携を図っている研究に特に注目する。

1. 三次元情報技術

三次元情報技術とは、三次元シーンの画像情報に対する取得・生成・符号化・認識・伝送・表示等を行う技術である^{1,2)}。自然に三次元シーンを再生するためには、対象からの光の状態をできるだけ忠実に再現する必要がある。図1(a)に示すように、計測面における各位置での光の振幅と位相、波長を再現できれば、波面を再生することができる。しかし、位相の計測や再現は難しく、情報処理の際には回折の計算が必要なことなどから、波面を光線で近似して計測・再現を行うことが多い。光線で光の状態を表すには、図1(b)に示すように、ある計測面における光線の位置と角度(水平方向、垂直方向)、波長、強度をパラメーターとする多くの光線の情報を取得し再現する必要がある。実際に利用できる情報量は使用デバイスにより制限されるので、どのパラメーターの情報をどのように減らすかが重要な課題となる。画質に与える影響が最も大きいのは空間分

解能であるため、光線方向や波長の情報は省略される場合が多い。各光線における垂直方向の角度(ϕ)に関する情報は、人の目は左右に並んでいることから省略される場合がある。視差をもつ2枚の二次元画像を両目にそれぞれに届くようにするだけでも立体感を得ることができる。しかし、この場合は生理的な立体視要因である両眼視差、焦点調節、輻輳の間に矛盾が生じる。また、観察位置を変えたときの像の見え方を再現することができない。今後は、より自然で、高い機能をもつ三次元情報システムの実現を目指して、より多くの三次元画像情報を取り込み、処理や表示を行うように進展していくものと考えられる。

二眼式で情報を取り込み、立体眼鏡で観察する三次元情報システムでは、光技術の果たす働きはそれほど大きくなない。しかし、多くの光線情報を取り込み、表示するためには、光技術をより高度に取り入れる必要がある。また、光情報処理技術を利用すれば、膨大な情報量をもつ三次元画像情報に対しても効率的に処理を行える可能性がある。仮想現実感の研究においては、実世界の取り込みやバーチャル世界との融合のために、光技術が重要な働きを果たす。光技術による三次元情報の取得や立体表示は、多次元情報と時系列データ間の変換を行う光情報処理とみなすことができる。その意味で、三次元情報技術は情報フォトニクスの研究における重要なテーマのひとつと考えられる。

三次元情報技術の多くは、計測、処理、表示の分野で個別に研究されており、「三次元工学」のような研究領域としての認識は十分とはいえない。すぐれた立体表示装置が開発されたとしても、データ生成や伝送がなければ表示は行えない。逆に、情報の入出力の形式が明確でないと処理の検討はできない。三次元情報技術を有益なものにするためには、三次元情報の取得から表示までを考えた情報システムとしての概念と利用形態を明確にする必要がある。

2. ホログラフィー技術

ホログラフィーは、光の干渉性と回折性を活用して三次元情報を扱うすぐれた技術のひとつである³⁾。ホログラフィーにおける記録と再生を分離し、観測結果を情報として取り出すことで、三次元情報システムを構築することができる。

2.1 三次元静止画の記録と再生

ホログラフィーでは、物体にレーザー光を照射し、反射光とコヒーレントな参照光とを重ね合わせて生じる干渉縞をホログラムとして記録して、光波の振幅と位相の分布を測定する。ホログラムにレーザー光を当てると、回折作用により記録された波面が再生される。1ミリあたり1000本

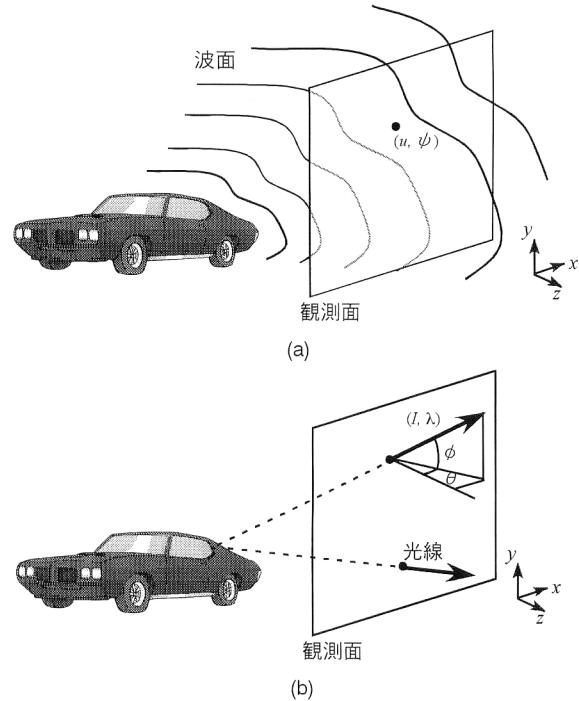


図1 測定対象からの光波の表現方式。(a) 測定面の各点(x, y, z)における光波の振幅 u と位相 ψ 、波長 λ を測定し、波面として表現。(b) 測定面を横切る多くの光線の位置(x, y, z)、強度 I 、波長 λ 、角度 θ 、 ϕ を測定して光線情報として表現。

程度の十分な解像度をもつホログラムを用いれば、物体を直接観察する場合とほとんど変わらない再現性を得ることができる。そのためには、現状では高解像な写真乾板等を用いて静止画としてホログラムを記録・再生するしかない。

現在も、より使いやすく、高い臨場感を得ることのできるホログラフィーの研究が続けられている。例えば、再生に白色光源を利用すると像がぼける問題を解決するため、リップマンホログラムを記録する際に、レインボーホログラムと同様にスリットを用いる手法が提案されている⁴⁾。また、電子データからホログラムを簡便に作成するホログラフィックプリンターが開発されている⁵⁾。

2.2 デジタルホログラフィー

イメージセンサーによりホログラムの記録を行い、電子情報として画像処理を行う技術はデジタルホログラフィーとして知られている⁶⁾。写真乾板に比べるとイメージセンサーデバイスの解像度は100分の1程度で、十分な画質を得るのは困難であったが、位相シフトデジタルホログラフィーによりオンライン化が可能となり、高画質化への展望が開けた(図2)⁷⁾。

2.3 三次元情報処理と伝送

デジタルホログラムとして記録されている三次元情報を利用する技術の例として、三次元物体の相関値を光情報

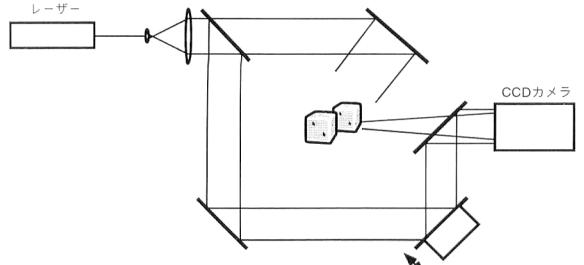


図2 位相シフトディジタルホログラフィー。ピエゾアクチュエーターにより参照光の位相を4段階シフトさせてホログラムをCCDカメラで記録する。

処理により算出する手法が提案されている⁸⁾。これにより三次元物体の認識や特定の物体の三次元的な位置の検出を高速に行うことができる。

光技術を用いた三次元情報処理の他の例として、情報の秘匿性を守る暗号化処理が検討されている。ホログラムの記録の際にランダム位相マスクを用いて暗号化ディジタルホログラムを作成し、再生時には光学的な画像処理技術により高速に複合することができる(図3)⁹⁾。

今後、デバイスの発展により高解像なホログラムの取得が可能になったときに、空間的情報であるホログラムを時系列信号へ高速に変換する技術として、超短パルス光を利用する技術が提案されている¹⁰⁾。回折格子に対して超短パルス光を斜めに照射したときに生じるスペクトルの広がりと時間遅れを利用して、二次元情報を光信号の波長軸と時間軸に展開して光パルス列に変換することができる。

2.4 ホログラフィーによる動画立体表示

ホログラムの表示における問題として、十分な解像度をもつ書き換え可能な表示デバイスの欠如が挙げられる。音響光学素子は、比較的高密度な屈折率格子の表示が可能である。音響光学素子にホログラムを表示するうえでの問題点である格子の移動やサイズの問題をスキャナーの利用により解決して、ホログラフィックビデオの実現に成功している¹¹⁾。また、高解像度化が進んでいる液晶ディスプレイを利用してホログラムを表示する立体ディスプレイにも期待がもたれている¹²⁾。

3. ホログラフィー以外の三次元情報フォトニクス技術

3.1 情報取得・処理

三次元情報の取得法として、受動的にシーンの光線情報を取得する手法と、光を投射して能動的に物体の形状を計測する手法がある。

3.1.1 受動的三次元情報取得

撮像装置を複数用意し、さまざまな角度から測定対象を撮影することで複数の光線方向に関する情報を取得すること

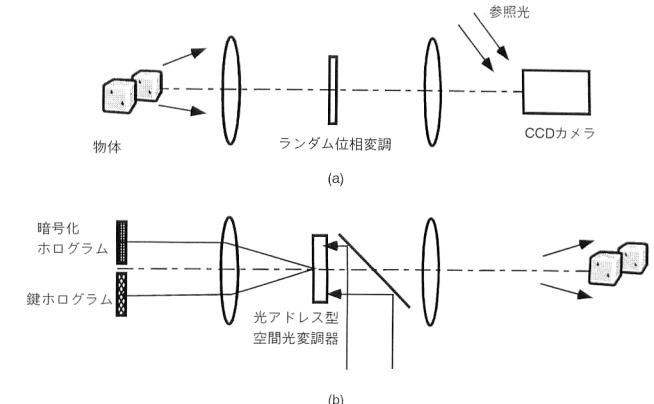


図3 暗号化ディジタルホログラフィー。(a) ランダムな位相変調をかけてホログラムを記録する。(b) 鍵ホログラムとの相関演算を行い、像を再生する。

ができる。また、レンズアレイを用いると1つの撮像装置で複数の光線方向の情報を取り込むことができる。ホログラフィーに匹敵する光線情報をこれらの手法により取り込むことは困難であるが、補間処理等により情報を補うことができる¹³⁾。物体の三次元形状情報を測定するには、得られた多視点画像から三次元構造の解析を行う必要がある¹⁴⁾。三次元情報を光学的に処理する例として、多視点画像を対象として光学的相関演算を行い、三次元物体の認識を高速に行う手法が検討されている¹⁵⁾。

3.1.2 能動的三次元情報取得

物体に対して光を投射し、反射光の位相、光照射位置、光の飛行時間、集光状態等を計測して三次元形状を測定することができる^{16,17)}。光の特性を利用して形状情報を抽出しているため、正確な三次元形状計測を高速に行うことができる。

物体にコヒーレント光が照射されたときの反射光の位相の変化は干渉計測により測定できる。変位の量がサブマイクロメートルレベルの場合に有効である。

光照射位置のずれを見る手法では、測定対象に対してレーザービームやスリット光を照射してその位置を計測し、三角測量に基づいて対象の形状を測定する。高速化を図るために二次元パターンを投影する手法もある。この手法は、対象の大きさについてミリメートルからメートルレベルまでの広い範囲で適用できる。

光の飛行時間による手法では、パルス光や時間的に変調された光を測定対象に照射し、反射光の到達時間を計測することで対象までの距離を得ることができる。

結像作用を利用する手法は、何らかのパターンを投影し、投影パターンの像のぼけ具合で奥行きを知ることができる。集光ビームを照射し、反射光をピンホールを通して

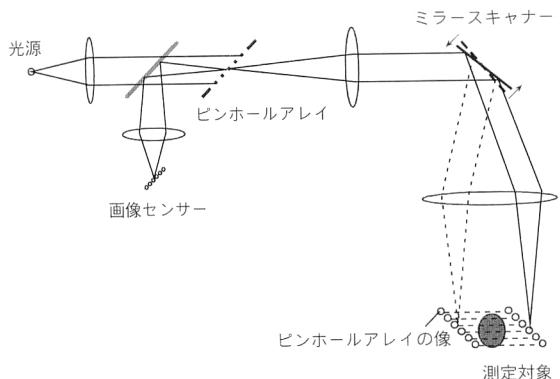


図4 傾斜ピンホールアレイによる共焦点法。傾斜した面で光軸に垂直な方向へ走査することができる。

検出する共焦点顕微鏡はこれに分類できる¹⁸⁾。三次元形状を得るために、多くの断面形状を測定する必要がある。共焦点法の速度向上を目指して、傾斜した二次元ピンホールアレイを用いて深さの異なる複数の収束光を測定対象に投影し、走査することで三次元情報を得る手法が提案されている(図4)¹⁹⁾。

三次元光計測のデータから光情報処理により認識を行う手法も提案されている。これは縞パターンを物体に投影し、三次元情報を含んだ測定結果を用いて光学的相関演算を行い、三次元形状の一一致度を検出している²⁰⁾。

受光素子と処理回路を一体化したインテリジェントセンサーを利用することにより、画像取得におけるボトルネックを解消し、より高速な計測が可能となる。例えば、レーザーの照射位置を高速に検出して三次元形状を得るセンサーが開発されている²¹⁾。また、共焦点顕微鏡において、受光素子を備えた複数の処理エレメントによって並列処理を行う光LSIにより、受光データを高速に処理するシステムが提案されている²²⁾。

3.2 立体表示

ホログラフィー以外の立体表示技術について概説する。光線を再現する方式と物体を再現する方式に分類する。

3.2.1 光線再現型立体表示

像の表示は平面上で行い、光線方向の制御により立体像を形成する。波長や偏光、時間差等によるフィルターを目の直前に用意し、フィルターに合わせて光を変調すれば、表示側で光線角度を制御せずに、両眼へ情報を振り分け、両眼視差による立体感を得ることができる。

目の直前にフィルターを用いない場合は、光学的な機構により表示装置側で光線の角度を変調する必要がある。光源の後にピンホール、遮へい物、レンズ、回折素子等を置いて、その位置関係により光線の角度を制御することができる(図5)^{1,2)}。遮へい物を置く手法は、構造が簡単で大画

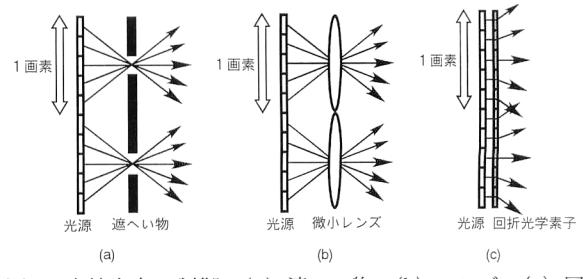


図5 光線方向の制御。(a) 遮へい物、(b) レンズ、(c) 回折光学素子をそれぞれ用いて光源の発光位置により光線の方向を変えることができる。

面化にも対応しやすく、LEDパネルを用いて1メートル以上のサイズの立体ディスプレイも試作されている²³⁾。

これらの手法は画像の表示部が平面なので、光線方向が少ない場合は立体像の観察に不自然さを生じる。多くの光線方向を実現する手法として、複数のレーザービームを一点に収束させ、二次元走査して画像を形成する超多眼方式が提案されている²⁴⁾。また、拡散板を利用して上下方向に並んだ光源からの光を垂直方向へ拡散させることにより、水平方向の光線情報を大幅に拡張する手法もある²⁵⁾。

3.2.2 物体再現型立体表示

体積表示方式は、何らかの三次元的走査機構により空間中に光点を分布させて三次元像を形成する三次元表示方式である。実際に形成されている三次元像を観察するので、光線情報を再現しなくとも立体感に関する生理的な要因をすべて満たすことができる。

三次元空間の走査手法としては、投影スクリーンやLEDアレイのような表示装置を高速に回転あるいは平行移動させる手法や、焦点距離を高速に変化できる結像素子を用いて光学像を移動させる手法が提案されている^{1,2)}。また、二次元像を斜めに傾け、ミラーの回転による横方向の移動により空間を走査する手法が筆者により提案されている(図6)²⁶⁾。

残像に頼らずに三次元像を形成する手法として、アップコンバージョンを利用されるエルビウム等の蛍光材料をガラスブロック中に添加し、赤外レーザービームを照射して可視光を選択的に発光させることができる(図7)²⁷⁾。局所的に発光させるために、波長の異なる2つのレーザービームが交わる点で2段励起を生じさせている。

4. システム化へ向けて

4.1 三次元情報の取得と表示の統合

二眼式の三次元情報システムは、情報の取得から立体表示まで統合されたシステムとして実用化されているが、その他の方式に関しては実現例が少ない。

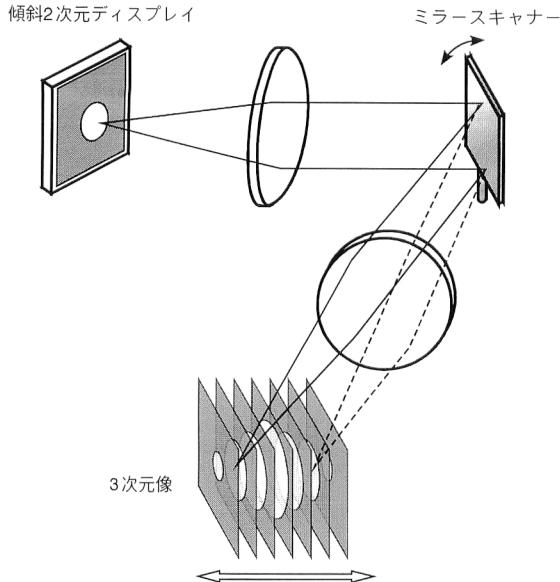


図6 傾斜面を用いた体積表示。傾斜した二次元像を横方向に移動させることによって、三次元空間を走査する。

表1に、三次元情報の表現方式（物体指向・光波指向・光線指向）および三次元情報を扱う各段階によりおもな三次元情報技術を分類したものを示す。

情報の取得と表示における表現方式が似通っている場合は、比較的容易に連携させることができる。実例として、屈折率分布型の微小レンズアレイで三次元像の取得を行い、同様のレンズアレイを用いたインテグラルフォトグラフィーにより表示するシステムが開発されている²⁸⁾。

能動型の三次元計測では高速に物体の形状情報を取得できるので、体積表示型のディスプレイに適用しやすい。例

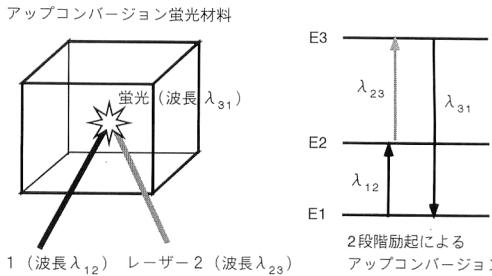


図7 アップコンバージョンによる体積表示。赤外レーザー1と赤外レーザー2の交わる部分で、2段階励起が起こり蛍光を発する。

えば、光飛行時間方式の立体カメラで取り込んだ距離画像をもとに、体積表示式立体ディスプレイへの表示を行っている²⁹⁾。また、筆者が行った研究として、レーザービームを照射して三次元計測を行い、傾斜面走査による立体ディスプレイへの表示を行った例がある³⁰⁾。

4.2 三次元情報記述方式の統一

三次元情報システムの多くは特定の取得方式と表示方式を組み合わせた専用システムになっており、独自の三次元情報のフォーマットが利用されている。すべての三次元映像情報を統一して扱えるフォーマットを中間表現として利用すれば、取得装置と表示装置を限定せずに組み合わせることができる。現在よく利用されている三次元情報の記述として、コンピューターグラフィックス等で利用される構造モデルによる方法があり、物体指向型の情報取得や表示に適している¹⁴⁾。しかし、光線指向の情報取得・表示方式には適さない。より包括的な記述が可能な光線情報による三次元画像符号化の研究が行われている³¹⁾。

表1 おもな三次元情報技術の分類。「処理」における矢印は各指向の間での情報変換を示し、そのために必要な技術を記している。

	取 得	処 理	表 示
物体指向	能動的三次元光計測 ・パターン投影 ・光飛行時間 ・共焦点 利点 ・高精度な物体形状取得 ・コヒーレント光が不要	構造モデル 物体情報からのホログラム合成 多視点画像の生成 回折の計算 三次元相関演算 光線情報の抽出 構造解析	体積表示 ・可変焦点レンズ ・回転スクリーン ・二波長蛍光 利点 ・生理的立体視要因を満たす
	干渉計測 ホログラフィー ・ディジタルホログラフィー		波面再生 ・ホログラフィックプリンター ・音響光学素子 ・液晶素子
	利点 ・高精度 ・波面の忠実な測定		利点 ・光波を忠実に再現
光波指向	受動的三次元光計測 ・マルチカメラ ・レンズアレイカメラ 利点 ・装置が簡便 ・取得対象の自由度が高い	多視点画像からのホログラム合成	光線再生 ・パララクスパリア ・インテグラルフォトグラフィー ・レンティキュラーシート 利点 ・実現性が高い
		光線の補間 光線空間	

4.3 観察者を含んだシステム

立体ディスプレイ装置は、フォトニクス技術により光情報を網膜に伝送し、脳内の処理により立体感を生じさせることから、目や脳を含めた情報システムとしての見方もできる。より高品質の三次元像を得るために、観測者からの情報を表示装置にフィードバックして最適化することは有用である³²⁾。

一例としては、二眼式の立体表示において、観察者の頭の動きを計測して光線の方向や表示画像を変化させることができられる³³⁾。また、焦点調節における矛盾を避けるために、人の視線を追跡してその位置に対応するように焦点距離を動的に変化させるヘッドマウントディスプレイが提案されている³⁴⁾。

観察者を含めた環境の情報をシステムに入力することで、臨場感や付加価値を与えることができる。複合現実感システムでは、実世界と電子の情報を融合させ観察者にバーチャルな現実感を感じさせる³⁵⁾。これを実現するためには、シースルー立体ディスプレイや、外界の三次元情報を取り込むセンサーの開発が重要である。

光の研究分野には三次元情報技術に関連するすぐれた研究成果が蓄積されている。三次元情報システムを構築するためには、利用できる技術を取捨選択し、欠如している技術は新規に開発する必要がある。そのような技術やノウハウを「三次元情報光工学」といった研究領域として集結させることができれば、新しい三次元映像を扱う技術の開発が促進されるであろう。光技術の重要性を強調したが、もちろん電子技術を中心として情報処理・通信・機械・制御・視覚等の技術分野と協調することが重要である。

最後に、本稿の執筆に際して情報の提供および議論をいただきました情報フォトニクス研究グループ三次元情報ワーキンググループの発起人の皆様（京都工芸纖維大学大学院工芸科学研究科・粟辻安浩氏、東京農工大学工学部・高木康博氏、徳島大学工学部・山本裕紹氏）および神戸大学工学部・的場修氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 増田千尋：3次元ディスプレイ（産業図書、1990）。
- 2) 岡野文男：“立体映像技術の現状と将来”，光学，31（2002）140-147。
- 3) 遠内順平：ホログラフィー（裳華房、1998）。
- 4) T. Kubota, Y. Awatsuji and Y. Taketomi: “Resolution of a reflection hologram recorded with a slit,” Appl. Opt., 39 (2000) 3466-3472.
- 5) M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Koyama and N. Ohyama: “High-speed recording of full-parallax holographic stereograms by a parallel exposure system,” Opt. Eng., 35 (1996) 1556-1559.
- 6) U. Schnars and W. Juptner: “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction,” Appl. Opt., 33 (1994) 179-181.
- 7) I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holography,” Opt. Lett., 22 (1997) 1268-1270.
- 8) E. Tajahuerce, O. Matoba and B. Javidi: “Shift-invariant three-dimensional object recognition by means of digital holography,” Appl. Opt., 40 (2001) 3877-3886.
- 9) O. Matoba and B. Javidi: “Optical retrieval of encrypted digital holograms for secure real-time display,” Opt. Lett., 27 (2002) 321-323.
- 10) T. Konishi and Y. Ichioka: “Ultrafast image transmission by optical time-to-two-dimensional-space-to-time-to-two-dimensional-space conversion,” J. Opt. Soc. Am. A, 16 (1999) 1076-1088.
- 11) 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. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1212 (1990) 174-182.
- 12) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: “Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM,” Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1461 (1991) 291-302.
- 13) T. Hamaguchi, T. Fujii, Y. Kajiki and T. Honda: “Real-time view interpolation system for super multiview 3D display,” Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 4297 (2001) 212-221.
- 14) B. K. P. Horn: *Robot Vision* (McGraw-Hill, Cambridge, MA, 1986).
- 15) O. Matoba, E. Tajahuerce and B. Javidi: “Real-time three-dimensional object recognition with multiple perspectives imaging,” Appl. Opt., 40 (2001) 3318-3325.
- 16) 谷田貝豊彦：応用光学 光計測入門（丸善、1988）。
- 17) 吉澤 徹：光三次元計測（新技術コミュニケーションズ、1998）。
- 18) 藤田哲也監修、河田 聰編：新しい光学顕微鏡 レーザ顕微鏡の理論と実際（学際企画、1995）。
- 19) 宮崎大介、小原優一、松下賢二：“傾斜面走査による共焦点三次元形状計測”，Optics Japan '99 講演予稿集（1999）pp. 259-260。
- 20) N. Yoshikawa and T. Yatagai: “Fringe pattern correlator for three-dimensional object recognition,” Opt. Lett., 25 (2000) 1424-1426.
- 21) Y. Oike, M. Ikeda and K. Asada: “High-sensitivity and wide-dynamic-range position sensor using logarithmic-response and correlation circuit,” IEICE Trans. Electron., E85-C (2002) 1651-1658.
- 22) M. Naruse and M. Ishikawa: “Parallel confocal laser microscope system using smart pixel arrays,” Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 4092 (2000) 94-101.
- 23) H. Yamamoto, M. Kouno, S. Muguruma, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Enlargement of viewing area of stereoscopic full-color LED display by use of a parallax barrier,” Appl. Opt., 41 (2002) 6907-6919.
- 24) 梶木善裕、吉川 浩、本田捷夫：“収束化光源列（FLA）による超多眼式立体ディスプレイ”，3次元画像コンファレンス'96（1996）pp. 108-113。
- 25) 高木康博、福富武史、海老沢廣喜：“二次元配置した視差画像の一次元再配列化による多眼式立体表示”，Optics Japan

- 2001 (2001) pp. 385–386.
- 26) D. Miyazaki and K. Matsushita: “Volume-scanning three-dimensional display that uses an inclined image plane,” *Appl. Opt.*, **40** (2001) 3354–3358.
 - 27) E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston and R. Macfarlane: “A three-color, solid-state, three-dimensional display,” *Science*, **273** (1996) 1185–1189.
 - 28) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama: “Three-dimensional video system based on integral photography,” *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1072–1077.
 - 29) 河北真宏, 飯塚啓吾, 土屋 譲, 飯野芳己, 菊池 宏, 藤掛英夫, 佐藤弘人：“距離検出カメラと奥行き標本化ディスプレイによる3次元撮像”, 3次元画像コンファレンス2001 (2001) pp. 141–144.
 - 30) D. Miyazaki, T. Eto, Y. Nishimura and K. Matsushita: “Three-dimensional volumetric display by inclined-plane scanning,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **5006** (2003) 5006–5020.
 - 31) 原島 博, 苗村 健：“光線情報に基づく3次元空間記述と空間共有通信”, *光学*, **26** (1997) 314–319.
 - 32) H. Yamamoto, T. Sato, S. Muguruma, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Stereoscopic full-color light emitting diode display using parallax barrier for different interpupillary distances,” *Opt. Rev.*, **9** (2002) 244–250.
 - 33) T. Hattori, T. Ishigaki, K. Shimamoto, A. Sawaki, T. Ishiguchi and H. Kobayashi: “An advanced auto-stereoscopic display for G-7 pilot project,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **3639** (1999) 66–75.
 - 34) 志和新一, 大村克之, 岸野文郎：“視線検出により焦点調節を補償する立体表示装置”, *テレビジョン学会誌*, **50** (1996) 1292–1299.
 - 35) 廣瀬通孝, 広田光一：“複合現実”, *計測と制御*, **41** (2002) 620–623.

(2003年2月25日受理)