

# 液晶可変焦点レンズを利用した体積型三次元表示

陶 山 史 朗

## Volumetric 3D Display Utilizing a Liquid-Crystal Varifocal Lens

Shiro SUYAMA

A volumetric 3D display utilizing a liquid-crystal varifocal lens is reported, whose focal length can be changed at high speed over 60 Hz. Our 3D display can provide volumetric floating 3D images as real images in the optical sense. As key devices for our 3D display, we present three active devices and their characteristics: a dual-frequency liquid-crystal varifocal lens, a high-speed optical deflector using liquid-crystal self-motion and a multi-focus lens using several sets of birefringent lens and polarization switching device. Examples of floating 3D images are also presented in the case of dual-frequency liquid-crystal varifocal lens and multi-focus lens.

**Key words:** volumetric, 3D, liquid crystal, varifocal, multi-focus

高臨場感コミュニケーション環境を実現するため、映像の解像度、階調、色再現、画角などに加え、奥行き感が大きな要素として考えられ、人にやさしい自然な奥行き表現を求めて、多くの3D表示技術<sup>1-13)</sup>が検討されてきている。また、将来的には、さらなる高臨場感を得るために、視覚以外の触覚、臭覚ディスプレイなどが導入されていくと考える。したがって、視覚表示としてもこれに対応できるように、何もない空中に3D表示できることが重要と考えられる。

そこで本稿では、何もない空中に、人にやさしい3D表示を行うことを目指し、焦点距離を高速に変化できる液晶可変焦点レンズをキーデバイスとした体積型3D表示技術<sup>14-19)</sup>と、これによる空中3D像について概説する。液晶を利用したキーデバイスとしては、二周波液晶型<sup>14,15)</sup>、二倍波振動型<sup>16,17)</sup>、多焦点レンズ型<sup>18,19)</sup>の3種類を紹介する。

### 1. 3D表示原理

可変焦点レンズ型3D表示方式<sup>14,18,19)</sup>の原理図を図1に示す。本方式は体積型3D表示（奥行き標本化型3D表示ともよぶ）の一種であり、3D物体を奥行き方向に標本化し

て多数の2D画像の集合（奥行き標本化像）とし、これらを再び奥行き方向に配置することにより3D像を再現する。

本方式の特徴は、この再配置を液晶可変焦点レンズの焦点距離の変化を利用して行うことにある。すなわち、2D表示装置の表示像を液晶可変焦点レンズにより空中に実像の形で結像させ、焦点距離の変化とともに、その結像位置を変化できることを利用する。したがって、この焦点距離の変化に同期させて2D表示装置に奥行き標本化像を表示し、奥行き標本化像を残像時間内に再配列することにより、空中に3D像を再現できる。

この再配列において、本方式のキーデバイスである液晶可変焦点レンズには、残像時間内に奥行き標本化像を積層できるだけの高速性が要求される。従来から、数100 $\mu\text{m}$ 程度の小口径から数cm以上の大口径までいくつかの可変焦点レンズが提案されており<sup>20-23)</sup>、結像特性の良好なものも多い。しかしながら、画像を表示できる数cm以上の口径においては、その液晶ギャップの厚さ（200 $\mu\text{m}$ 程度）から高速化することは困難であった。次章より、この数cm以上の口径と高速化を同時に達成可能と考えられる3種類のキーデバイスと、これを利用した空中3D表示技術について、順に概説する。

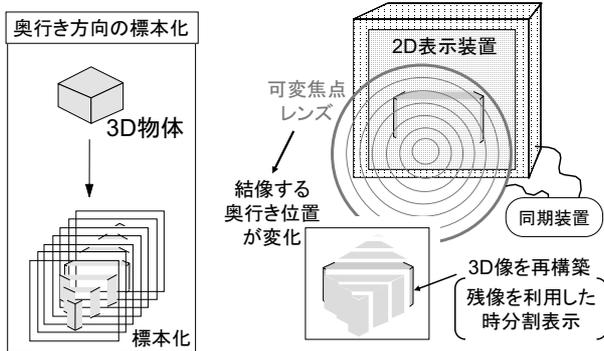


図1 可変焦点型3D表示方式の原理.

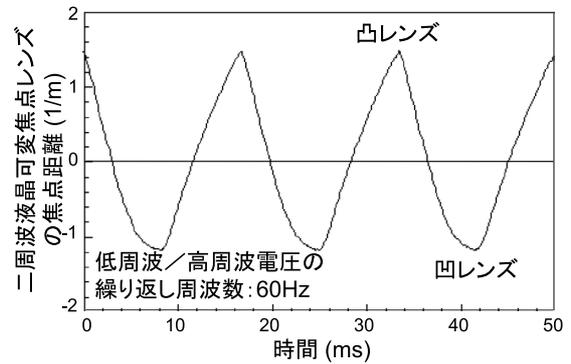


図3 焦点距離の高速な変化.

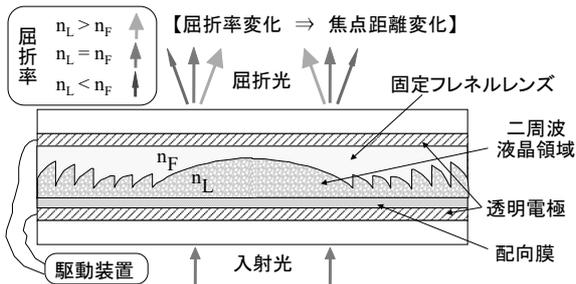


図2 二周波液晶可変焦点レンズの構造と動作原理.

## 2. 二周波液晶型3D表示技術

### 2.1 二周波液晶型可変焦点レンズ

二周波液晶型可変焦点レンズ<sup>14,15)</sup>の構造と動作原理を図2に示す。本素子は、固定フレネルレンズと液晶領域を2枚の透明電極で挟んだ構造を有する。動作原理は、固定フレネルレンズの屈折率 $n_F$ に対して、光の入射方向からみた液晶の実効屈折率 $n_L$ を、液晶の傾きを変えることで変化させ、屈折角を変化させることにある。すなわち、液晶の実効屈折率 $n_L$ を、 $n_L > n_F \rightarrow n_L = n_F \rightarrow n_L < n_F$ と変化させることにより、本素子を凸レンズ $\rightarrow$ 平板 $\rightarrow$ 凹レンズと変化できる。

液晶可変焦点レンズには、残像時間内に2D奥行き標本化像をすべて積層表示する必要から、焦点距離の高速な変化が必要とされる。このため、液晶の傾きを高速で変化させる必要があり、本素子では、二周波液晶(DF-01XXとDF-02XXの混合、チッソ社製)を用いてこれを実現してい

る。二周波液晶は、駆動電界の周波数により誘電率異方性 $\Delta\epsilon$ の符号が逆転するため、液晶の動きを電界の周波数のみにより制御できる。したがって、電界を常に印加した状態で液晶の傾きを変化できるため、高速な実効屈折率の変化を実現できる。

図3に、二周波液晶型可変焦点レンズの高速な焦点距離変化の一例を示す。例として、60 Hzで低周波と高周波を交互に印加して本素子を動作させることで、良好に焦点距離が連続的に高速変化していることがわかる。その焦点距離の変化幅は、約2.7 D ( $D=1/m$ , ディオプター)と大きくとれている。従来の液晶レンズでは電圧のオン/オフで液晶の傾きを制御していたため、この液晶レンズのような厚い液晶層を有する場合には、オフ側の応答が数秒以上<sup>20,21)</sup>と著しく遅かったのに対して、本素子では十分な応答速度で大きく焦点距離を変化できていることがわかる。

### 2.2 二周波液晶型による空中3D像

図4、図5に、本方式により実像として再現した空中3D像(ワイヤーフレームの直方体)の視差、ピント調節への対応例を示す。視差像は、空中3D像の前でカメラを左右に移動して撮影した。ピント調節の像は、空中3D像の左前からカメラのフォーカスを変えて撮影した。

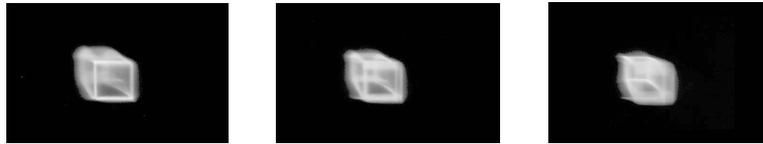
図4に示すようにカメラを左右方向に移動すると、これに対応して直方体の形状が実物体と同様に連続的に変化することから、運動視差を再現できることがわかる。さらに、この3D像の視域角は $\pm 10$ 度以上であり両眼で同時に



右側から見た場合

左側から見た場合

図4 視差への対応(運動視差, 両眼視差).



直方体の前面にフォーカス                      直方体の後面にフォーカス

図5 ピント調節への対応.

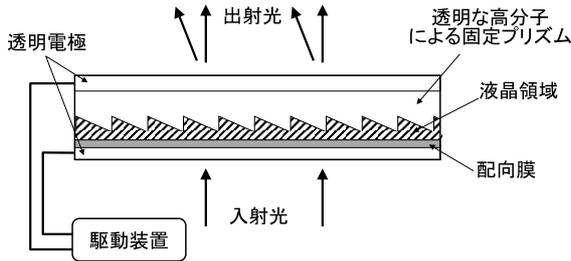


図6 光偏向素子の構造.

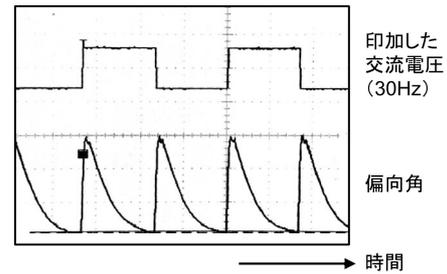


図7 本素子の偏向角の時間変化.

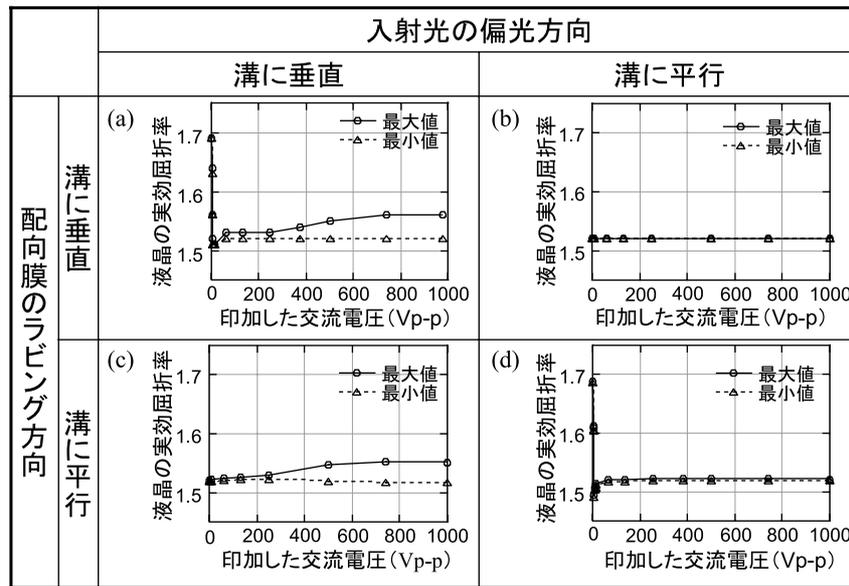


図8 液晶の実効屈折率変化の電界依存性と配向依存性 (常屈折率:  $n_o \approx 1.52$ , 異常屈折率:  $n_e \approx 1.74$ ).

観察可能であるため、両眼視差も満足できることがわかる。次に、図5に示すようにカメラのフォーカス位置を変化させると、これに対応してフォーカス位置以外の部分にぼけが生じていることから、ピント変化を再現できることがわかる。

このように、本方式では3D像を空中に実像として結像できるため、立体視の生理的要因をほぼ満足できると考えられる。

### 3. 二倍波振動型3D表示デバイス

第2章で紹介した二周波液晶型は高速で大きな変化を得

られる利点を有するが、駆動に高周波を必要とするため、駆動が複雑で消費電力が大きくなる欠点を有する。そこで、実効屈折率の変化量は二周波液晶型に比べて小さいが、単一周波数で駆動でき、消費電力の小さい二倍波振動型<sup>16,17)</sup>を検討している。この方式は、駆動電圧を上げていくと、駆動電界の倍の周波数で液晶(誘電率異方性:  $\Delta\epsilon > 0$ )の傾きが振動する現象の発見に基づいている。

本方式の動作を確認するため、図6に示すプリズム構造による光偏向素子を用いて偏向角変化の評価を行った。この素子は透明高分子でできた固定プリズムと液晶領域を平行平板の透明電極で挟む構造を有し、液晶と接する透明電

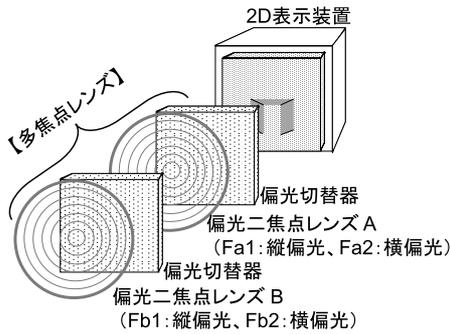
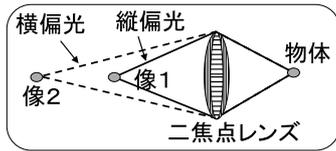


図9 多焦点レンズの概要 ( $F$ : 焦点距離 [1/m]).

(a) 偏光二焦点レンズの機能



(b) 多焦点レンズの機能

合成焦点距離の数:  $2^N$ 個 ( $N$ : レンズ個数)

レンズ直前の偏光状態		→	合成焦点距離 (1/m)
A	B		
縦	縦	→	$Fa1+Fb1$
縦	横	→	$Fa1+Fb2$
横	縦	→	$Fa2+Fb1$
横	横	→	$Fa2+Fb2$

図10 多焦点レンズの基本動作.

極側に配向膜が配置してある。透明電極に電圧を印加することにより、液晶の傾きの変化により実効屈折率が変化し、光の偏向角が変化する。通常、液晶に閾値電圧程度で交流電圧を印加しても、交流電圧の周期的変化とはかかわりなく、液晶は電界に平行に静的に並び、偏向角は変化しない。本方式の場合には、液晶 (E7, メルク社製) に、さらに大きな交流電圧を印加する。すると、図7に示すように、印加交流電圧の2倍の周波数で偏向角が変化する。なお、交流電圧が矩形波の場合だけでなく、正弦波や三角波においても2倍の周波数で偏向角は変化し、偏向角変化の大きさとしては1度程度を実現できている。

次に、偏向角変化より算出した液晶の実効屈折率変化の電界依存性と配向依存性を図8 (a)~(d) に示す。印加交流電圧は、周波数30 Hzの矩形波である。交流電圧が10 V程度以下と小さい場合には、実効屈折率の高速変化はない。通常の誘電率異方性と配向規制力による静的な実効屈折率変化が、入射光の偏光方向と液晶の配向方向が同じ場合 (図8 (a), (d)) に観察された。これに対して、一定以上の振幅の交流電圧の場合には、図8 (a), (c) にみられるように、配向膜のラビング方向によらず、プリズムの溝に垂直な偏光を有する入射光に対してのみ、印加交流電圧

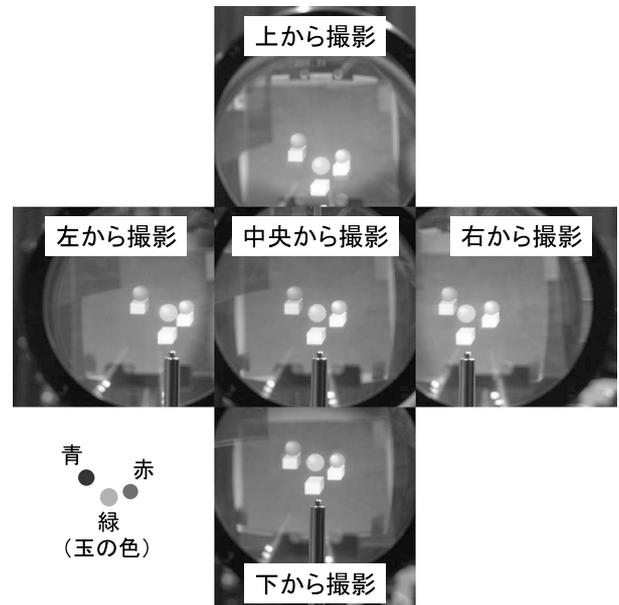


図11 空中像の上下左右視差の表現能力.

の2倍の周波数を有する高速な実効屈折率の変化がみられる。この変化量は、交流電圧の増加に伴って増加した後、飽和する傾向がある。ここで、実効屈折率の最小値が液晶の常屈折率 (約1.52) にほぼ等しいことから、液晶は電界に沿って立った状態と少し傾いた状態の間で高速運動していると推測される。実効屈折率の最大変化量は、常屈折率 (約1.52) と異常屈折率 (約1.74) から期待される屈折率差の4分の1程度であった。

## 4. 多焦点レンズ型 3D 表示技術

### 4.1 多焦点レンズ

本方式のキーデバイスは、複数の焦点距離を高速に切り替え可能な多焦点レンズ<sup>16,17)</sup>である。多焦点レンズの構成を図9に、基本動作を図10に示す。図9に示すように、多焦点レンズは、入射光の偏光方向により2つの焦点距離に切り替え可能な偏光二焦点レンズ (図10 (a)) と、入射光の偏光を高速に切り替え可能な偏光切替器との組を複数 ( $N$ 個) 積層した構成をとる。これにより、多焦点レンズは、偏光方向を各素子で切り替えることにより、順列組み合わせで $2^N$ 個の焦点距離を切り替え可能となる (図10 (b))。この $2^N$ 個の焦点距離の切り替えと2D表示装置における奥行き標準化像の書き換えを同期して、高速 (例えば  $60 \times 2^N$  フレーム/秒) に行うことにより、奥行き標準化像を奥行き方向に残像時間内に再配列でき、空中に実像として3D像を描画できる。

本方式は、結像位置が離散的となる欠点はあるが、偏光二焦点レンズそのものには特に変動部分がなく、入射光の

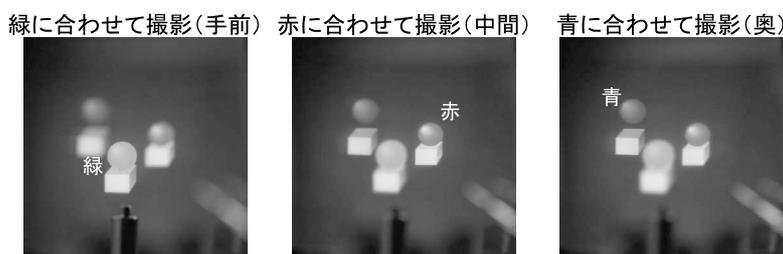


図 12 空中像のピント表現能力.

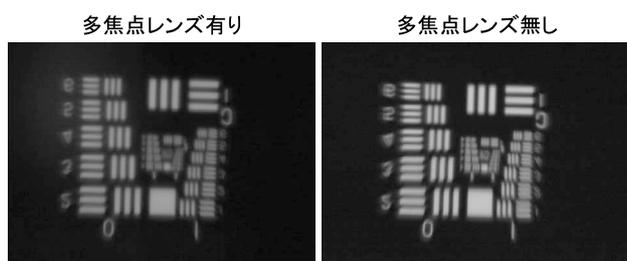


図 13 多焦点レンズによる空中像の解像度.

偏光の切り替えのみで焦点距離を変化できるため、特殊な駆動系は必要でなく高速化が容易であり、かつ描画する 3D 像の解像度を劣化させる要因が少ない利点があると考えられる。また、離れた結像位置の間をランダムアクセスでき、駆動に柔軟性が出る利点も有する。

#### 4.2 多焦点レンズ型による空中像

本方式の偏光二焦点レンズに方解石を用いて製作したレンズを用い、偏光切替器に高速な強誘電液晶デバイスを使用して高速な 2D 表示装置と同期運転させることにより、基本動作の確認を行った。その結果、奥行き方向の異なった空中像を実際に描画でき、かつ解像度の劣化も少ないことも明らかとなった。

図 11 に、カメラを空中像の前で上下左右に移動して撮影し、本方法の上下左右視差の表現能力を評価した結果を示す。カメラを上下左右に移動すると、それに対応して実物体と同様に赤緑青の玉の位置関係が変化することから、上下左右視差（両眼視差、運動視差を含む）を再現できていることが明らかになった。

次に、ピント調節の表現能力を図 12 に示す。カメラのアイリスを開放にし、赤緑青おのおのにフォーカスを合わせて撮影した。カメラのフォーカス位置を手前、中間、奥と変化させると、これに対応してフォーカス位置以外の部分にぼけが生じていることから、ピント変化を表現できていることが明らかとなった。

図 13 に、本方式により解像度テストチャートを空中結像させた結果を示す。多焦点レンズがある場合とない場合において、解像度テストチャート（1951 USAF）を空中像として浮遊させたものを拡大して撮影したものである。両

者を比較することにより、多焦点レンズがある場合でも、ない場合とほぼ同程度の解像度が得られていることがわかる。

何もない空中に、人にやさしい 3D 像を構築する 3D 表示技術として、液晶可変焦点レンズと、これを利用した 3D 表示技術を概説した。また、これに適した高速に焦点距離を変化できるキーデバイスとして、二周波液晶型、二倍波振動型、多焦点レンズ型の 3 種類の液晶可変焦点レンズを紹介した。これらの高速デバイスを利用した空中 3D 表示方式により、上下左右視差およびピント調節を満足できる空中 3D 像を実像として描画できることを検証した。

これから、液晶可変焦点レンズ型 3D 表示技術を用いることにより、人にやさしい空中 3D 像を実現できる可能性を確認できたと考える。

#### 文 献

- 1) D. Gabor: "A new microscopic principle," *Nature*, **161** (1948) 777-778.
- 2) T. Ohkoshi: "Three-dimensional displays," *Proc. IEEE*, **68** (1980) 548-564.
- 3) 安東孝久, 増谷 健, 竹本賢史, 東野政弘, 濱岸五郎, 岸本俊一: "多人数が同時にメガネなしで観察できる多視点方式 3D ディスプレイ", 3次元画像コンファレンス講演論文集, 7-3 (2002) pp. 201-204.
- 4) G. Hamagishi, M. Sakata, A. Yamashita, K. Mashitani, M. Inoue and E. Shimizu: "15' high-resolution non-glasses 3-D display with head tracking system", *Trans. IEEJ*, **121** (2001) 921-927.
- 5) 梶木善裕, 吉川 浩, 本田捷夫: "集束化光源列 (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講演論文集, 4-4 (1996) pp. 108-113.
- 6) Y. Kajiki, H. Yoshikawa and T. Honda: "Three-dimensional display with focused light array," *Proc. SPIE*, **2652** (1996) 106-116.
- 7) 佐藤甲斐: "ホログラフィを用いた立体動画像表示に関する研究動向", 高度立体動画像通信プロジェクト最終成果報告書 (1997) pp. 8-18.
- 8) 岩田成健, 吉川 浩, 本田捷夫: "電子ホログラフィアレイの試作", 3次元画像コンファレンス講演論文集, 2-2 (1997) pp. 36-41.
- 9) K. Langhans, C. Guill, E. Rieper, K. Oltmann and D. Bahr: "Solid Felix: A static volume 3D-laser display," *Proc. SPIE*, **5006** (2003) 161-174.
- 10) A. R. L. Travis: "The display of three-dimensional video

- images,” Proc. IEEE, **85** (1997) 1817–1832.
- 11) Y. Takaki and N. Nago: “Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display,” Opt. Express, **18** (2010) 8824–8835.
  - 12) Y. Takaki, Y. Urano, S. Kashiwada, H. Ando and K. Nakamura: “Super multi-view windshield display for long-distance image information presentation,” Opt. Express, **19** (2011) 704–716.
  - 13) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira and S. Sakai: “Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths,” Vision Res., **44** (2004) 785–793.
  - 14) S. Suyama, M. Date and H. Takada: “Three-dimensional display system with dual-frequency liquid-crystal varifocal lens,” Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 480–484.
  - 15) S. Suyama, M. Date and H. Takada: “High-speed active optical devices utilizing a dual-frequency liquid crystal,” *Active-Matrix Liquid-Crystal Displays (AMLCD) '00 Digest of Technical Papers*, LC-5 (2000) pp. 239–242.
  - 16) 陶山史朗, 伊達宗和, 久木智子, 高田英明, 中沢憲二: “ネマティック液晶を利用した高速な光偏向素子”, 2006年日本液晶学会討論会講演予稿集, PD18 (2006) pp. 431–432.
  - 17) S. Wakita, Y. Sumitomo, Y. Kobayashi, H. Yamamoto and S. Suyama: “High-speed liquid-crystal optical deflector for 3-D display,” Proc. SPIE, **7237** (2009) 723724.
  - 18) 陶山史朗, 伊達宗和, 高田英明: “多焦点レンズを用いた奥行き標準化型 3D 表示方式の提案”, 3次元画像コンファレンス講演予稿集, 1-4 (2006) pp. 13–16.
  - 19) T. Sonoda, H. Yamamoto and S. Suyama: “A new volumetric 3-D display using multi-varifocal lens and high-speed 2-D display,” Proc. SPIE, **7863** (2011) 786322.
  - 20) 佐藤 進: “焦点距離可変液晶レンズの実用化”, 昭和 59 年度科学研究費補助金研究成果報告書, No. 59850048.
  - 21) S. Sato, A. Sugiyama and R. Sato: “Variable focus liquid crystal Fresnel lens,” Jpn. J. Appl. Phys., **24** (1985) L626–L628.
  - 22) M. Honma, T. Nose and S. Sato: “Optimization of device parameters for minimizing spherical aberration and astigmatism in liquid crystal microlenses,” Opt. Rev., **6** (1999) 139–143.
  - 23) 横山義孝, 葉 茂, 佐藤 進: “電界制御アナモルフィック液晶レンズ”, 日本液晶学会討論会講演予稿集 (2004) pp. 478–479.

(2011年7月11日受理)