

ブルー棟を、メガソーラーに ～次世代ホログラム技術 Egarim & Holo-Window～ 奇跡の連続が紡ぐ、夢の実現

株式会社 エガリム
加瀬澤 寿宏

「ホログラムを使って、太陽光発電ができますか？」これが、私がホログラムの世界に入ることとなる最初の、そして生涯の夢となる言葉です。当時、私は玩具ソフト開発会社を経営していて玩具への色素増感型太陽電池の利用を考えていました。忘れもしません、場所は、岐阜駅のミスタードーナツ、目の前にいたのが現在弊社 CTO でもありホログラムの世界では有名な堀米秀嘉先生でした。ここから玩具親父の最終人生が急展開を始めます。資金もありませんでしたから、何度となく静岡県のもつくりプロジェクトに応募しましたが、すべて落選しました。諦めきれずに堀米先生に相談して、私の夢を実現すべくホログラム開発専門の会社、株式会社エガリムを共同で設立できることになりました。今度は NEDO のプロジェクトに申請し、2 度目の挑戦で採択していただきました。門外漢である私は、堀米先生の指導と甚大なる協力のもとホログラム露光現場の暗室に籠り、光学系部品を捏ね繰り回し、緑色レーザーに驚愕する日々を送ります。（1 ページにつづく）

目 次

1. 巻頭言：ブルー棟を、メガソーラーに	加瀬澤寿宏	表紙
2. 2016 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考報告	山本健詞	2
3. 次世代ホログラム技術: Egarim & Holo-Window～フォトポリマー FIGURA FILM が開く高度ホログラム技術の応用Ⅱ	加瀬澤寿宏, 他	9
4. 有機フォトリフラクティブ材料の研究動向	荻野賢司	16
5. ウェアラブルディスプレイ向けホログラフィック光学素子	稲垣義弘, 他	22
6. 投影型ホログラフィック 3D ディスプレイ	涌波光喜	27
7. 水平走査型ホログラフィックディスプレイ	高木康博	33
8. 次回研究会のお知らせ		巻末

こうして、ホログラムを使った採光型太陽光発電ユニットの技術開発が始まったのです。岡本硝子株式会社の協力も得られ、幸運にも東京大学教授 志村努先生による頭が爆発しそうな理論指導をも受けることができました。このプロジェクトによる成果として、ガラスに貼付けられたホログラムで、光を急角度に回折させ、ガラスの内面に取り込み、端面から出射する原理実証に成功しました。続いて太陽光の下で評価し、太陽電池での発電量を100%とした場合に、それと同じ面積のフォトポリマーで採光された発電量は、8.6%が得られました。

この実験成果を基に、沖縄で開催された IWH 2015 に投稿し、経験したこともない英語論文の発表に挑戦しました。発表が最終日ということもあり、出発の飛行機内から沖縄ホテル滞在中の全時間を英語発表の練習に費やしました。結果は、Best Paper Award の奇跡的な受賞でした。壇上で思わず男泣きしてしまいました。この感動を携えて無謀にも、OPTICAL REVIEW に投稿することとなります。堀米先生の辛抱強い指導の下、海外エディターからの拙い英語へのエンドレスとも思える修正とそれでも内容には期待するといった激励批評に背中を押され、連日深夜まで格闘しました。そして掲載。2度目の奇跡が起きました。

Holographic window for solar power generation 喜びも束の間、この夢の実現には、太陽光を想定した可視光全域に対応するホログラムの露光技術開発、太陽の位置に依存しないホログラム作製のための回折シミュレーションの開発、透明かつ大型のホログラム材料フォトポリマーの確保等多くの課題、障壁の克服が必要だということが明確になります。そして現在、我々は海外のフォトポリマー開発メーカーと協業し、ほぼ全ての材料を日本で調達し、Made in Japan のフォトポリマーフィルムの量産試作開発に漕ぎつけています。試作開発したホログラムメディアは、波長450~660nm程度までの光を回折可能なメディアです。独自の光学系によりホログラムを露光したところ、広波長帯域の採光が可能である事が確認され、Holo-Window の国産化に向けた実現可能性の道が開けました。3度目の奇跡です。

ホログラム知識が皆無な玩具屋親父の無謀な挑戦は、このように多くの奇跡を必要とします。無知ゆえに眠れない夜もあります。泣きたい日もあります。それでも私自身の能力成長の奇跡を信じて、精進していきたいと思っています。皆様のご指導、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

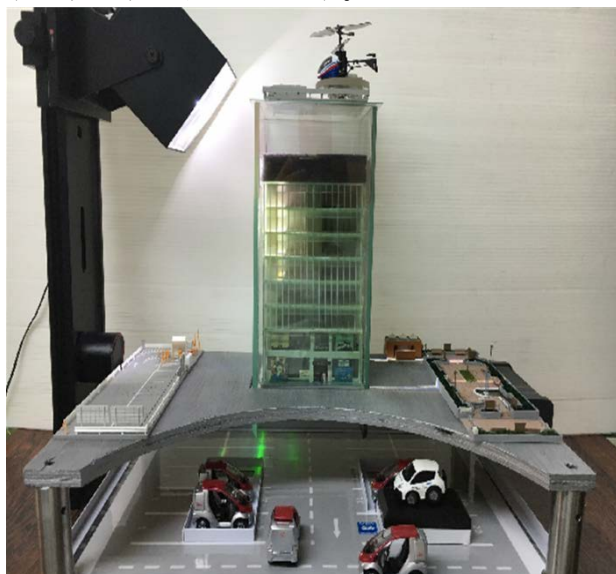


図1 小型発電ユニットの模型

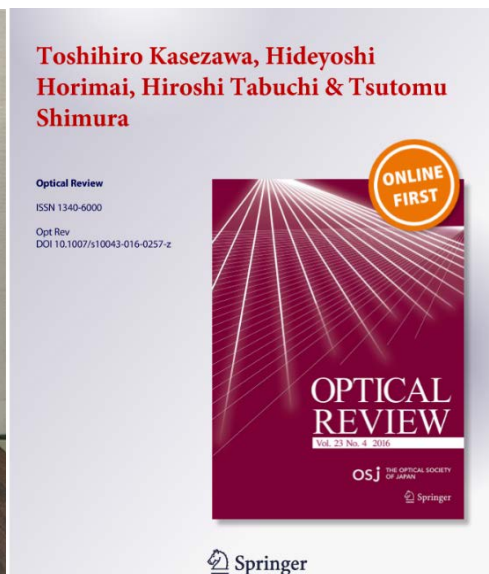


図2 OPTICAL REVIEW

2016 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考報告

2016 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考委員長 山本 健詞（情報通信研究機構）

2016 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考委員会は、2017 年 4 月 24 日に開催した委員会にて慎重に審議を行い、2016 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞として以下の 3 名の方を選考しました。後日幹事会において承認され、受賞が決定しましたのでここにご報告します。

■技術部門（3 件）

（1） 高田 直樹 氏（高知大学）

受賞理由：同氏は、GPU を活用した電子ホログラフィのリアルタイム化で数多くの業績を上げてきた。受賞対象論文のシステムは、PC5 台に GPU13 枚を搭載させ、各 PC 間のデータ転送には InfiniBand を用いることで、1 色あたり約 21,000 点からなる物体を表示する 1920×1024 ピクセルのホログラムを高速に計算して、高画質なカラーの立体像を表示できるものとなっている。このシステムを構築して電子ホログラフィの表示ポテンシャルを示せた点を高く評価できる。また、構築は学生を熱心に指導しながら進めており、その姿は多くのホログラム研究者に刺激を与えている。

対象論文：“GPU クラスタシステムによるリアルタイムカラー電子ホログラフィ”，高田直樹他，平成 28 年第 4 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会

（2） 白倉 明（アーティエンス・ラボ）

受賞理由：同氏は、ホログラフィックステレオグラム方式のホログラムを中心に研究開発や社会実装を行い、数多くの業績を上げてきた。受賞対象の論文は、ホログラムだけでなくその照明技術の重要性にも着目して、独自に開発した LED 内蔵型ホログラム WOWLIGHT について述べている。WOWLIGHT として、コンサート等でのアーティスト応援グッズとして使えるモデルに加えて、テーブルトップで使えるモデルなども考案している。また、スマートフォンを使って認証できるホログラムのツール、WOWcoder についても述べ、ホログラムの新たな活用方法を提案している。これら実用化を念頭に置いた技術開発はホログラムの普及には重要であり、高く評価できる。

対象論文：“WOWGAM 技術とその応用”，白倉明，平成 28 年第 2 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会

（3） 堤 直人（京都工芸繊維大学）

受賞理由：同氏は、フォトリフラクティブ材料やフォトクロミック材料を用いた書き換

え可能なホログラム用材料の研究を行ってきており、数多くの業績を上げてきた。受賞対象の論文では、アゾカルバゾールモノリシック化合物を用いた材料による書き換え型フルカラーホログラフィーについて設計指針を提案し、MACzE/PMMA を用いて実証している。材料開発は動画ホログラフィを実現するための基礎的な技術であり、フルカラーに向けての設計指針の提案と実証は、高く評価できる。

対象論文：“3Dマルチカラーホログラフィックディスプレイシステム”，堤直人他，平成28年第4回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会

受賞者のプロフィール

技術部門 高田 直樹 氏（高知大学）

【抱負・コメント】

名誉ある HODIC 鈴木・岡田記念賞の技術部門賞をいただき、誠にありがとうございます。選考委員会の皆様、これまでご支援いただきました先生方に心より御礼申し上げます。ホログラフィを知りましたのは学生のときではありますが、電磁界シミュレーション、分子動力学シミュレーションに関する研究を経て現在に至ります。12年前より計算機合成ホログラムの計算高速化の研究を始めましたが、本格的には高知大学に着任してからとなります。このような素晴らしい賞をいただきましたのも、私と共に研究をしていただきました卒業生のおかげと深く感謝しております。これからも、勉強を重ね、学生と共に研究を続け、ホログラフィの発展に少しでも貢献できるよう努力していこうと思っております。今後とも一層のご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

【略歴】

1996年3月 群馬大学大学院工学研究科博士前期課程 電気電子工学専攻修了

1996年4月 国立小山工業高等専門学校電子制御工学科 助手

2000年3月 群馬大学大学院工学研究科博士後期課程電子情報工学専攻修了
博士（工学）取得

2001年7月 理化学研究所ゲノム科学総合研究センターゲノム情報科学研究グループゲノム解析用コンピュータ研究開発チーム 研究員

2005年4月 ソニー学園湘北短期大学情報メディア学科 専任講師

2010年4月 ソニー学園湘北短期大学情報メディア学科 准教授

2012 年 4 月 高知大学教育研究部自然科学系理学部門 准教授

2017 年 4 月 高知大学教育研究部自然科学系理学部門 教授 (現在に至る)

【研究分野】

電子ホログラフィ, 計算機合成ホログラム, 高性能計算など

【主要な研究業績】

- 1) M. Fujiwara, N. Takada, H. Araki, C. W. Ooi, S. Ikawa, Y. Maeda, H. Niwase, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Gradation representation method using a binary-weighted computer-generated hologram based on pulse-width modulation", Chinese Optics Letters, Vol. 15, Issue 6, pp. 060901- (2017)
- 2) M. Fujiwara, N. Takada, H. Araki, S. Ikawa, H. Niwase, Y. Maeda, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Gradation representation method using binary-weighted computer-generated hologram", Optical Engineering, Vol. 56, Issue 2, 023105 (2017)
- 3) 高田直樹, 荒木啓充, 庭瀬裕章, 猪川翔平, 前田祐貴, 藤原将人, 中山弘敬, 角江 崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "GPU クラスタシステムによるリアルタイムカラー電子ホログラフィ," Hodic circular, vol. 36, No. 4, pp.2 -7 (2016)
- 4) 高田直樹, 庭瀬裕章, 荒木啓充, 中山弘敬, 杉山充, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "マルチ GPU 計算システムを用いたリアルタイム電子ホログラフィの検討," Hodic circular, vol. 34, No. 4, pp.13-18 (2014)
- 5) H. Niwase, N. Takada, H. Araki, Y. Maeda, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time electroholography using a multiple-graphics processing unit cluster system with a single spatial light modulator and the InfiniBand network," Optical Engineering, Vol. 55, Issue 9, 093108 (2016)
- 6) H. Araki, N. Takada, H. Niwase, S. Ikawa, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time time-division color electroholography using a single GPU and a USB module for synchronizing reference light," Applied Optics, Vol.54, Issue 34, pp.10029-10034 (2015)
- 7) H. Niwase, N. Takada, H. Araki, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography with a single graphics processing unit utilizing movie features," Optics Express, Vol.22, Issue 23, pp.28052-28057 (2014) (selected by Virtual

Journal for Biomedical Optics (VJBO), Vol.9, 2014)

- 8) N. Takada, T. Shimobaba, H. Nakayama, A. Shiraki, N. Okada, M. Oikawa, N. Masuda, T. Ito, "Fast high-resolution computer-generated hologram computation using multiple graphics processing unit cluster system," Applied Optics, Vol.51, Issue 30, pp.7303-7307 (2012)
- 9) H. Nakayama, N. Takada, Y. Ichihashi, S. Awazu, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, "Real-time color electroholography using multi graphics processing units and multi high-definition liquid-crystal display panels," Applied Optics, Vol.49, Issue 31, pp.5993-5996 (2010)
- 10) A. Shiraki, N. Takada, M. Niwa, Y. Ichihashi, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, "Simplified Electroholographic Color Reconstruction System Using Graphics Processing Unit and Liquid Crystal Display Projector," Optics Express, Vol. 17, Issue 18, 16038-16045 (2009)

技術部門 白倉 明 (アーティエンス・ラボ)

【抱負・コメント】

名誉あるHODIC鈴木・岡田記念賞の「技術部門賞」をいただけるとのこと、心よりお礼申し上げます。留学先のMITで、故 Stephen Benton 教授の下、ホログラム研究に関わりをもったのが1988年ですから来年には30年になります。ホログラム技術を世の中の人々にもっと身近に広めたいという思いで「実用化」に向けて何でもトライをしてきています。光が見えてきたこの時期に、HODICの賞を拝受できることは、大きな励みになります。HODICの皆様方の素晴らしい研究成果をさらに発展させるためにも微力ながら実用化の面で貢献させていただく所存です。今後ともご指導ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

【略歴】

1986年東京大学工学部卒業。

1986年ソニー株式会社入社、開発研究所にてプリンター技術開発に従事。

1988年米国マサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute Technology)

Media Lab 客員研究員

1995年ソニー中央研究所において、ホログラム関連研究プロジェクトを発足。

同技術成果をベースに、自ら社内ベンチャー・本社直轄プロジェクトを立ち上げ、H P S 事業開発室室長としてプロジェクトを牽引。社内外のホログラム技術の基礎研究から応用開発まで貢献。

2013 年 2 月～現在、株式会社アーティエンス・ラボ設立 代表取締役

2013 年 3 月、ソニー株式会社退社

【研究分野】

主に、ホログラフィックステレオグラム、ホログラフィック光学素子

【主要な研究業績】

- 1) Stephen Benton, Sabrina Birner, Akira Shirakura "Edge-Lit Rainbow Holograms" SPIE Proceedings Vol. 1212: p. 149-157, Practical Holography IV, Jan. 1990.
- 2) Akira Shirakura, Nobuhiro Kihara, Shigeyuki Baba, "Instant Holographic Portrait Printing System", SPIE Proceedings Vol. 3293: p. 246-253, Practical Holography XII, Jan. 1998.
- 3) 白倉 明、木原 信宏、馬場 茂幸、"即時ホログラフィック 3 D プリント技術" HODIC Circular ホログラフィック・ディスプレイ研究会 Vol.18, No.3 (Aug. 1998)
- 4) 木原 信宏、白倉 明、馬場 茂幸 "高速ホログラムポートレイトプリントシステム", 3次元画像コンファレンス 1998
- 5) Nobuhiro Kihara, Akira Shirakura, Shigeyuki Baba, "One-step edge-lit transmission holographic stereogram printer", SPIE Proceedings Vol. 3637: Practical Holography XIII, Jan. 1999.
- 6) 木原 信宏、白倉 明、馬場 茂幸、豊田 高博 "透過型ワンステップエッジリットホログラフィックステレオグラムプリンタ" HODIC Circular ホログラフィック・ディスプレイ研究会 Vol. 19 No.1 (1999)
- 7) Nobuhiro Kihara, Akira Shirakura, "Personalized Hologram", PICS2001 Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference, April 2001.
- 8) Akira Shirakura, "Digital Holographic Stereogram Technology for Anti-counterfeiting", WHO 1st Global IMPACT (International Medical Products Anti-Counterfeiting Taskforce) Forum, February 2008.
- 9) 白倉 明 "WOW G A M 技術とその応用", HODIC Circular ホログラフィック・ディスプレイ研究会 Vol. 36 No.2 (2016)

技術部門 堤 直人 (京都工芸繊維大学)

【抱負・コメント】

栄誉ある HODIC 鈴木・岡田記念賞を頂きありがとうございます。十数年前の有機フォトリフラクティブポリマーを用いた体積ホログラム記録の研究に始まり、電界型の有機フォトリフラクティブポリマーに加えて、光のみで書き換えできるカルバゾールとアゾベンゼンとを複合化したフォトクロミック材料の研究へと展開しています。この材料の特徴は、書き込み速度の速さに対して消去速度が非常に遅いことで、これを利用して、書き込んだホログラフィックステレオグラムを長時間見ることができます。さらに、化学構造の改変によって、短波長での書き込みができ、マルチカラーの書き換え型ホログラムの記録再生が可能となりました。

研究成果を発信することも重要です。持ち運びできるホログラフィックディスプレイ装置（1号機）を2012年に、書き換え型ホログラフィックステレオグラム装置（2号機）を2013年に作製し、各種展示会でデモンストレーションしています。

材料の可能性は無限であり、これからも材料からホログラムに貢献できればと思います。

【略歴】

1977年3月 京都大学 工学部 工業化学科 卒業
1982年3月 京都大学 工学研究科 高分子化学専攻 単位取得退学
1984年7月 京都工芸繊維大学 繊維学部 助手
1997年4月 京都工芸繊維大学 繊維学部 教授
2002年4月 京都工芸繊維大学 機器分析センター長（兼任）
2006年4月 京都工芸繊維大学 工芸科学研究科 教授
2015年4月 京都工芸繊維大学 副学長 兼 材料化学系 教授

【研究分野】

有機高分子光電子機能、有機非線形光学、強誘電高分子材料、レーザーによるマイクロ・ナノ構造構築

【主要な研究業績】

- 1) N. Tsutsumi, Y. Yabuhara, K. Kinashi, and W. Sakai, "Advantage of the circular polarization of light in the updatable holographic response in an azo-carbazole monolithic dye dispersed acrylate matrix", Opt. Mater. Express 7(5), 1647-1655

- (2017).
- 2) K. Kinashi, T. Fukami, Y. Yabuhara, S. Motoishi, W. Sakai, M. Kawamoto, T. Sassa, N. Tsutsumi, “Molecular design of azo-carbazole monolithic dyes for updatable full-colour holograms”, NPG Asia Materials, 8 e311 (2016).
 - 3) N. Tsutsumi, K. Kinashi, K. Ogo, T. Fukami, Y. Yabuhara, Y. Kawabe, K. Tada, K. Fukuzawa, M. Kawamoto, T. Sassa, T. Fujihara, T. Sasaki, Y. Naka, “Updatable Holographic Diffraction of Photoreactive Monolithic Compound in Poly(methyl methacrylate) Matrix”, J. Phys. Chem. C 119(32), 18567-18572 (2015).
 - 4) N. Tsutsumi, K. Kinashi, K. Masumura, K. Kono “Photorefractive Performance of Poly(triarylamine)-based Polymer Composites: An Approach from the Photoconductive Properties”, J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys. 53, 502-508 (2015).
 - 5) N. Tsutsumi, K. Kinashi, K. Tada, K. Fukuzawa, Y. Kawabe, “Fully updatable three-dimensional holographic stereogram display device based on organic monolithic compound”, Optics Express 21 (17), 19880-19884 (2013).
 - 6) N. Tsutsumi, K. Kinashi, A. Nonomura, W. Sakai, “Quickly updatable hologram images using poly(*N*-vinyl carbazole) (PVCz) photorefractive polymer composite”, Materials 5, 1477-1486 (2012).
 - 7) N. Tsutsumi, K. Kinashi, W. Sakai, J. Nishide, Y. Kawabe, H. Sasabe, “Real-time three-dimensional holographic display using a monolithic organic compound dispersed film”, Opt. Mater. Express 2 (8), 1003-1010 (2012).
 - 8) N. Tsutsumi, J. Eguchi, W. Sakai, “Asymmetric energy transfer and diffraction efficiency of novel molecular glass with carbazole moiety” Optical Materials, 29 pp.435-438 (2006).
 - 9) N. Tsutsumi, T. Murao, and W. Sakai, “Photorefractive response of polymeric composites with pendant triphenyl amine moiety”, Macromolecules, 38(17) pp.7521-7523 (2005).
 - 10) N. Tsutsumi, Y. Shimizu, “Asymmetric two beam coupling with high optical gain and high beam diffraction in external field free polymer composites”, Jpn. J. Appl. Phys., 43(6A), pp.3466-3472 (2004).

次世代ホログラム技術：Ega-rim & Holo-Window

フォトポリマーFIGURA FILM が開く 高度ホログラム技術の応用

Brand-new Technologies Applied by Holography ~Ega-rim & Holo-Window with FIGURA Film~

加瀬澤寿宏¹⁾ 堀米 秀嘉²⁾ 田淵泰志³⁾ 志村努⁴⁾

¹⁾ T. Kasezawa, ²⁾ H. Horimai, ³⁾ H. Tabuchi, ⁴⁾ T. Shimura

¹⁻²⁾ 株式会社エガリム ³⁾ 岡本硝子株式会社 ⁴⁾ 国立大学法人東京大学

¹⁻²⁾ Egarim Co. Ltd., ³⁾ Okamoto Glass Co. Ltd., ⁴⁾ The University of Tokyo

E-mail: ¹⁾ t-kasezawa@egarim.co.jp, ²⁾ h-horimai@egarim.co.jp,

³⁾ h-tabuchi@okamoto-glass.co.jp, ⁴⁾ shimura@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract The brand-new technologies applied by holography were proposed. The first one is the see-through thin holographic illumination unit called Ega-rim. This unit works even in only 1mm thick and has a transparency; it can be combined with the photo-frame. The second one is Holographic Window for solar power generation. Wide wavelength capturing capability was achieved by using RGB exposure. To open up the holography applied market worldwide, we have been developing and fabricating our original photopolymer film called FIGURA Film. In the near future, everybody will be enjoying a holographic 3D image easily by using Ega-rim, and Holo-Window will become one of the promising solutions of natural energy electric generation system.

1. はじめに

近年、ホログラフィあるいはホログラムの商品開発への応用に期待が高まっている。しかし、ホログラムの分野を俯瞰すると、その発展と市場成長を妨げている大きな二つの壁の存在に気付かされる。

その一つ目の壁は、ホログラムコンテンツやホログラフィック映像を表現する方法が限定的である点である。図1に典型的なホログラムの表現方法を示す。

Big Wall Problem in Hologram Market

Commonly used hologram lighting method.

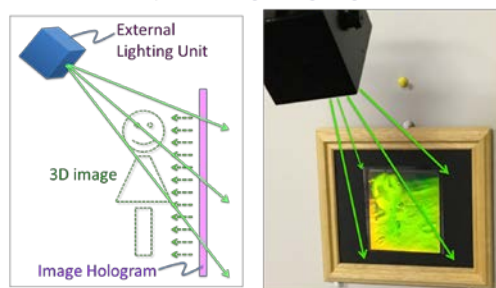


図1 外部照明による従来のホログラム観察方法

上質なホログラフィック 3D 画像を観察するためには、外部に配置した光源が必須となっている。しかしながら、この外部光源の必要性により、表現方法はかなり制約を受けている。たとえば、高精細なホログラムを接近して観察しようとする、外部光源からの光を遮ってしまい、ホログラム映像が消えてしまう。また、作品発表の場は、どうしても薄暗い部屋の中に限定されがちである。

二つ目の壁は、体積的なホログラム記録材料であるフォトポリマーなどの入手の困難性にある。フォトポリマー記録材料は、セキュリティ用として使用されるケースが多く、世間一般に出回っていないのがその理由の一つと考えられている。しかし、より本質的な原因は、記録材料を大量に消費するホログラム応用分野が産業的に確立していないために、製造普及が進んでいないのではないかと推察している。

一方、筆者らは、窓ガラスに特殊なホログラムフィルムを貼付けるだけで太陽光をガラス内面に閉じ込めて集光して発電する「Holo-Window」の研究開発を行なっている [1]。昨年 6 月に開催された本会でも発表したが、将来的には、新しい BIPV [2] として、都会のビル一棟をメガソーラーへと変身させることを目指している。その際には、ビル一棟だけでも数万平米ものフォトポリマーフィルムの大量需要が見込まれることになる。

また、この Holo-Window の機能を逆に用いることで、ガラス端面に光源を配置し、ガラスの表面から所望の角度で照明光を回折出射させるエッジリット型の照明装置「Ega-rim」の研究開発も行なっている。これが実現すれば、額縁の前面のガラス自体が組込み型のシースルーなフロントライトとなり、ホログラフィックな 3D 映像を外部照明の制約無しに、自由に表現することが可能になる。

そこで筆者らは、これらのホログラム応用技術

の開発と商品化を推し進めることはもとより、ホログラムを応用した新たな市場の創造に寄与することを目指して、ホログラム記録用フォトポリマーフィルムの量産試作（Made in Japan 化）にも取り組んでいる。本研究会では、これら我々の取り組みを紹介する。

2. 新フォトポリマー 『FIGURA Film』

2014 年度に NEDO プロジェクトとして Holo-Window の研究開発が採択された際にも、ホログラム記録材料の調達に困難を極めた経緯がある。しかし、その際に市販されていたフォトポリマーは、我々の所望する波長への対応が十分ではなく改良を必要とした。フォトポリマーを安定需給できなければ、我々の掲げる全てのホログラム研究開発は頓挫してしまう。

その打開案として、海外のフォトポリマー研究開発会社との協業により、ほぼ全ての材料を我々が主導で調達し、Made in Japan のフォトポリマーフィルムの量産試作開発を行った。試作したフォトポリマーフィルムは、図 2 に示すように幅 30cm で長さ 100m 以上のロール状である。ポルトガル語で「像」や「イメージ」等を意味する言葉をとって『FIGURA Film』と命名した。日本国内での製造権と日本および海外商圏での販売権を得ているため、積極的に外販も行なう計画である。



図 2 FIGURA Film 試作完成

試作したホログラムメディアは、図3に示すように、波長450～660nm程度までの光感性を有するメディアである。このメディアはレーザーによる露光後、熱処理によって回折強度を高める効果を持つ。本メディアを用いて Ega-rim および Holo-Window 用の露光を行った。詳細は、株式会社エガリムの HP (<https://www.egarim.co.jp/>) にて逐次掲載する予定である。



図3 FIGURA Film へのカラー露光

3. ホログラフィック照明ユニット

～Ega-rim～

前述のとおりホログラム普及の障壁となる外部光源の解決策として、我々はホログラフィック照明ユニット、Ega-rim を提案する。図4に、従来の表現方法と Ega-rim のデザイン概念図を比較して示す。Ega-rim はあくまで照明の機能を持たせたホログラムであり、映像は記録されていない。図5に Ega-rim の基本原理を示す。一枚の薄い平坦なガラスに特殊露光されたホログラムが貼付けられているだけの単純な構造で、ガラス端面から入射された光が内面反射により導かれ、ホログラムの回折作用によりガラスの表面から出射し、3D 映像が記録されたイメージホログラムを照明して立体像を再生させる。フォトフレームに一体化して組込む事も可能であるため、日本語の「絵」や「画」を照明出来る「額縁」という意味で、絵画縁=Ega-rim と名付けた。

What is “Ega-rim”

Design Concept : See-through, Simple & Compact Illuminator

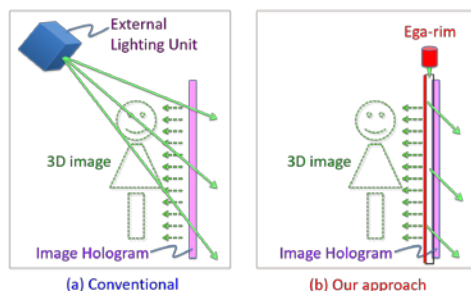


図4 従来表現方法と Ega-rim デザイン概念

Basic Principle of “Ega-rim”

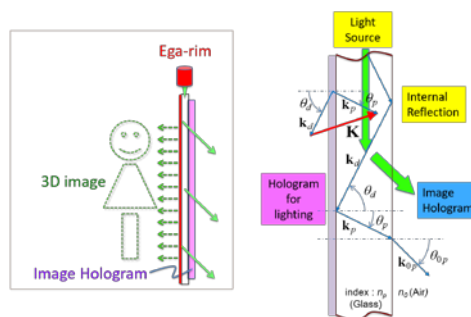


図5 Ega-rim の基本原理

Hologram Design and Fabrication

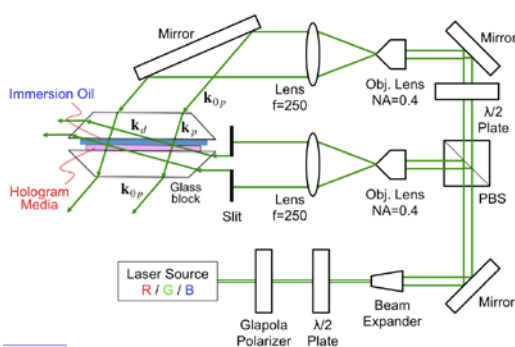


図6 Ega-rim 用ホログラムの露光光学系の構成

図6に Ega-rim 用ホログラムの露光光学系の構成を概略的に示す。Ega-rim に取り付けられたホ

ログラムに要求される効果は、ガラスの内部に3~10度で入射した光を回折して、ガラスの表面から出射することである。ガラスの光学屈折率は $n = 1.52$ であり空気屈折率よりも高いため、通常の光学素子及び設定を用いてこれらの干渉パターンを生成することは不可能である。

そこで筆者らは、図7に主要部を示すように、マッチングオイルを用いたガラスの臨界角以上の参照光入射による露光方法により、本来不可能であった干渉縞の露光形成に成功した。図は、実際の光学部品と内部のレーザー光の伝搬の様子を観察した画像である。左側の写真は、マッチングオイルのない場合を示し、右側の画像はマッチングオイルが充填された場合をそれぞれ示している。マッチングオイルがない場合、エッジからの光はガラスの接面で反射し、干渉縞を作り出すことはできない。一方、マッチングオイルを使って反射を制御すると、2本の光束が交差するのが分かる。

Optical Setting for Holo-Fabrication

Importance of optical index matching.

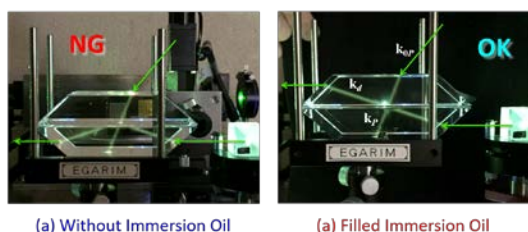


図7 Ega-rim 光学設定

4. Ega-rim プロトタイプによる映像観察

図8にEga-rimのラボプロトタイプによる映像観察結果の一例を示す。この実験では厚さ10mmのガラスを使用した。ガラスの端面から照明光としてレーザー光を入射させると、ガラスの表面からホログラム画像観察に最適な照明角度(45度)

の照射光が出射された。これを用いて、記録されたImage Hologramから鮮明な3D画像が再生された。さらに図9はその発展型を示す。前述とほぼ同様な特殊露光により設計製作されたホログラムが、厚さ1mmの透明ガラス上面に取り付けられている。対物レンズ(NA=0.4)から放射された緑色レーザー光(532nm)を厚さ1mmのガラスの端から入射させたところ、その光はガラス内部の臨界角反射によってホログラムに導かれ、ガラス表面から所望の角度で出射された。この実験によりEga-rimの商品コンセプトが実証された。

Illuminated by Lab. Proto of Ega-rim

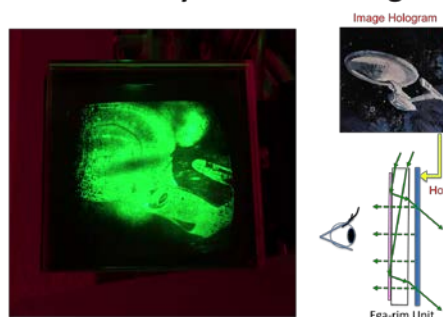


図8 Ega-rimのラボプロトタイプによる3D映像観察結果

Experimental : 1mm-thick Ega-rim

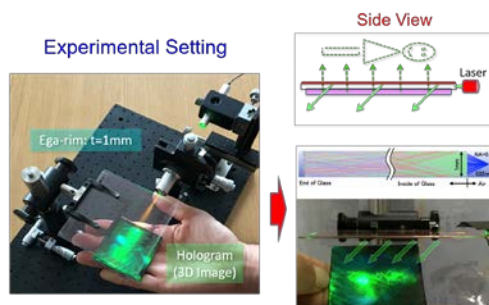


図9 Ega-rimの薄型プロトタイプ

5. 採光型太陽光発電ユニット Holo-Window

筆者らは、これまでの研究で培ったホログラムの技術を応用し、窓から差し込む太陽光を採光して発電する全く新しい太陽光発電システム：

Holo-Window を実用化すべく、2012 年より研究開発を行なっている。

Holo-Window の動作原理を図 10 に示す。窓ガラスの室内側には、ホログラムが貼付けられており、窓ガラスの下の部分には、非常に微小な細長いリボン状の太陽電池セルが配置されている。このホログラムに所望の仰角以上で太陽光が差し込むと、ホログラムの特性である角度選択性と波長選択性により、太陽光を急角度に回折反射される。ガラスの内面に採光された光は、全反射を繰り返してガラス端面まで導光されて発電される。

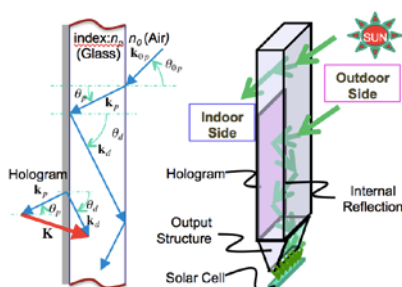


図 10 Holo-Window の動作原理説明図

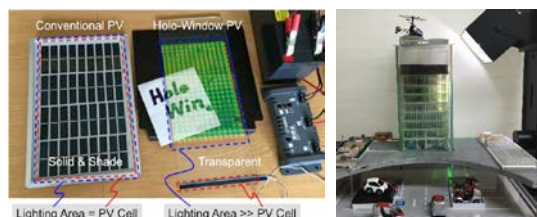


図 11 従来の太陽発電ユニットと Holo-Window との比較（左）および 採光型太陽光発電モデルによるデモ（右）

図 11（左）に示すように、既存の太陽光発電ユニットと Holo-Window ユニットの比較した場合、大きな特徴の一つは、採光するエリアと発電するエリアが分離されている点に有る。採光エリアはホログラムを大きくする事で大面積化が成され、それを効率良く有効にガラスの端部に集める事が出来れば、太陽電池セルの利用量をより小さくすることが可能となるため、ローコスト化の実現に

寄与すると考えている。同図（右）は、動作検証用の小型のビルのモデルである。太陽光に見立てた LED 照明の光が採光され、ガラス端面まで導かれてビルの地下駐車場部分に光が出射されている。

6. Holo-Window の回折波長領域の拡張

Holo-Window のコンセプトは、Ega-rim と逆方向へ光が進行すると考えると理解しやすい。

しかしながら、Holo-Window を実用化するためには、季節ごとおよび日々の時間の流れとともに時々刻々と変化する太陽光の軌跡や、地球上の緯度や経度、太陽光の波長スペクトラム、更には建物の位置や高さや方向などに依存する太陽光照射条件に対して、どのようなホログラムを形成すれば効率の良い採光が出来るかなど、理論的な解析と露光方法へのフィードバック技術など、取り組まなければならない技術課題は山積している。

そのため、まずは、回折する波長領域を拡張する技術課題に取り組むことにした。厚みを持った体積的な記録媒体へ形成されたホログラムでは、波長選択性と角度選択性は同じような傾向で変化することが知られている。そのため、複数の異なった k -vector を持つような物体光を用いることで、Bragg Degeneracy [3] の効果が増大され、回折する波長領域が拡大するのではないかと考えた。

図 12 に、回折波長領域を拡張することを目的とした露光実験用の光学系を模式的に示す。太陽光入射に対応した参照光生成用の光学系は、微細セル構造を持つシリンドリカルレンズアレイを 90° 違いに 2 枚を重ね合わせて使用し、微小な球面波群とした。さらに、光源は波長 452nm、532nm、660nm の混合したレーザー光を用いた。この参照光と、ダブリズム端面から入射した物体光に対応する平行光との干渉により、ホログラムを露光した。なお、この露光においては、マッチングオイルは使用していない。レンズアレイの挿入効果

を比較して確認するため、レンズアレイを挿入しない状態でも同じ光学系で露光を行った。この場合には、マッチングオイルを挿入している。

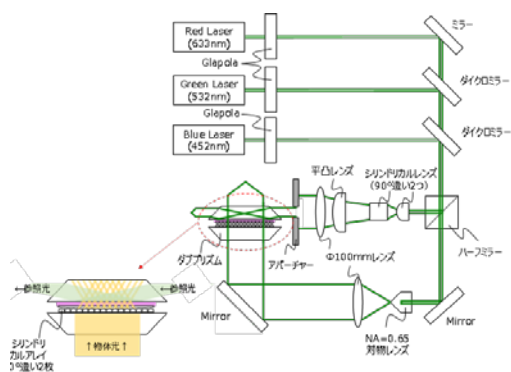


図 12 回折波長領域の拡張実験用 露光光学系

この実現アプローチによる効果を定量的に観察するため、露光したホログラムの分光透過率測定を行った。露光したホログラムは、入射した光を回折して光路を曲げる効果を持つことから、曲げられた光は分光器のディテクタに受光せず、透過率としては低下する。よって、分光透過率の測定は「どの波長の光をどの程度回折しているか」の指標として扱うことが出来る。

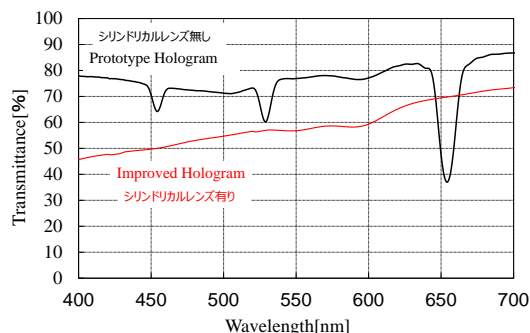


図 13 分光透過率特性の測定結果

図 13 に分光測定結果を示す。レンズアレイを挿入しない、比較確認用の露光サンプルでは、露光に用いたレーザー波長付近の光のみが、局所的に回折されている。一方、レンズアレイを挿入した

場合は、可視全域の光の透過率が全体的に低下している。このことから、広い波長範囲で回折が起こっている事が示唆された。

そこで実際に、レンズアレイを用いて露光試作したホログラムに対して、擬似的な太陽光として白色 LED の光を入射したところ、図 14 に示すように、ダブリズムの端面からは可視域の広い波長成分の光が採光されて出射されるのが確認された。これにより、波長幅が極めて狭いレーザー光の露光であっても、複数の異なる k -vector を持つ参照光を用いてホログラムを露光形成することで、回折波長領域を拡大した設計が可能である事が実験的に実証された。

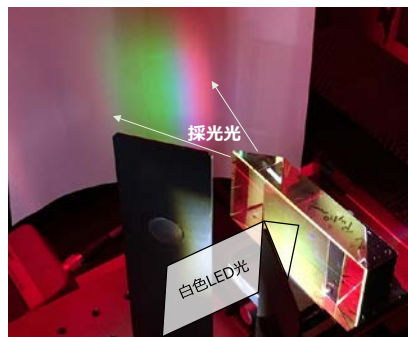


図 14 広波長帯域の採光可能性原理実証実験結果

7. Holo-Window の近未来ビジョン

Holo-Window が拓く近未来ビジョンとしては、図 15 に示すようなハイセンスなビルやコンドミニアムの窓へも、違和感なく導入できるような商品化をイメージしている。



図 15 Holo-Window の導入イメージ

外観や景観を損なわず、シンプルな構造でありながら、集光型発電システムのように発電量の向上による発電コストの低減が期待でき、メンテナンス性にも優れ、それでいて発電素子の今後の性能向上に合わせて発電性能のバージョンアップにも容易に対応可能な、採光型太陽光発電システムの実現を目指していく。

7. まとめ

ホログラムの発展と市場成長を妨げている大きな障壁を打破するため、ホログラフィック・テクノロジーを駆使した新しい技術を提案し、幾つかの研究開発を行なった。

その一つとして、Ega-rim と呼ばれるシースルーの薄いホログラフィック照明ユニットを試作開発した。厚さ 1mm のガラスに特殊露光したホログラムを貼付けただけのシンプルなユニットでありながら、フロントライト照明のような機能を持たせられる事を実験的に示した。ユニット自体が透過性を備えていることから、3次元画像が記録されたホログラムを照明するフォトフレームとしての実用化が期待されている。

もう一つは、採光型太陽光発電ユニット：Holo-Window である。ガラス内面で全反射を生じる、いわゆる臨界角以上となる反射回折特性のホログラムを利用することで、窓等から差し込む太陽光を採光してガラス内面へ閉じ込め、所望の位置に配置された微小な太陽電池セルで発電を行うシステムである。今回、RGB 光源と拡散光による露光を組み合わせることにより、広い波長範囲での採光性能が達成された。

さらに、世界中のホログラフィ応用市場を開拓するために、FIGURA と命名した独自のフォトポリマーフィルムを開発し、量産試作を行なった。

近い将来、誰もが、Ega-rim を使用して容易にホログラフィック 3D 画像を楽しむことを可能にし、自然エネルギー発電システムの有望なソリューションの 1 つとして Holo-Window を世界中のビルや車の窓などさまざまなところに [4]、誰もが気軽に設置出来るようにすることが、筆者らの使命であると考えている。

Reference

- [1] T. Kasezawa, H. Horimai, H. Tabuchi and T. Shimura, "Holographic window for solar power generation" *Optical Review* Vol.23 No.4 2016.
- [2] Strong, Steven: (June 9, 2010). "Building Integrated Photovoltaics (BIPV)". [wbdg.org. Whole Building Design Guide](http://wbdg.org/Whole_Building_Design_Guide). Retrieved 2011-07-26.
- [3] R. Fujimura, T. Shimura, and K. Kuroda: OPT. EXPRESS **18**(2), 1091-1098 (2010)
- [4] Steven E. Letendre : Workshop "Hybrid and Solar Vehicles", November 5-6, (2006)

有機フォトリフラクティブ材料の研究動向

Research Trend for Organic Photorefractive Materials

荻野賢司 (東京農工大学大学院 BASE)

Kenji OGINO (BASE, Tokyo University
of Agriculture and Technology)

Organic photorefractive (PR) materials exhibit the temporary change of refractive index when they are exposed to light. PR effect is observed when the materials shows photoconducting ability and electro-optic effect, simultaneously. Overview about the characteristics, mechanism, various types of organic PR materials is presented including the concept for nanostructure controlled materials based on block or graft copolymers we have investigated.

1. はじめに

有機化合物に光誘起で屈折率変化を与えるものとして、フォトポリマーがホログラム光記録媒体として実用的な検討が行われている。フォトポリマーへの記録は、光重合とそれに伴うモノマーの拡散による屈折率変調を利用している。その他にも光異性化を利用したフォトクロミックポリマーも古くから知られている。何れの場合でも、光の吸収・励起、化学反応をする。一方、フォトリフラクティブ (PR) 効果は、光照射により材料中に空間電界が形成され、屈折率が変化する現象で、上記のような光化学反応利用した屈折率変化とは狭い意味で区別される。

図 1 (a) に示すように 2 本のコヒーレントな光波の照射を行うと干渉縞が形成し、光強度の強い部分では励起種の光イオン解離によりフリーなキャリアが生成する (有機材料においてはこのプロセスは強い電場依存性を示し、一般的に Onsager 理論¹⁾に従う)。干渉縞の周期は 2 本のビームのなす角度、波長、媒質の屈折率に依存する。生成したキャリア対の中で、より移動しやすいもの (正孔または電子) が密度勾配に起因する拡散や内部または外部電界によってドリフトする (b)。一般的には、後者の機構 (ホッピング電導) が支配的といわれている。ドリフト移動度は通常の有機電荷輸送材料と同様な電場及び温度依存性を示す²⁾。

ドリフト移動度は極性分子の添加により、減少することが知られており³⁾、非線形光学活性分子等を含む PR 材料中でのドリフト移動度は一般的に低下していると考えられている。次に輸送された電荷はトラップされる。トラップが空間

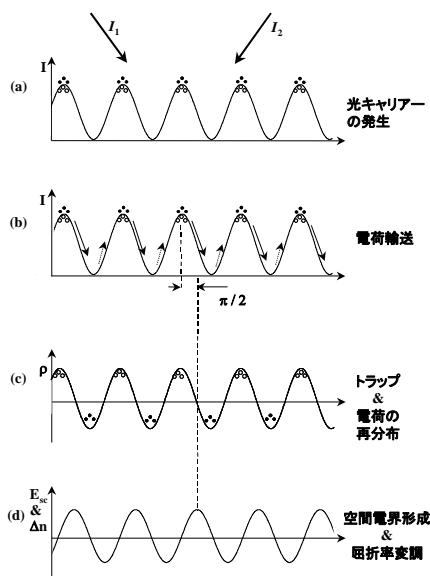


図 1 フォトリフラクティブ効果発現機構

的に均一に分布している場合でも定常状態を考えたとき、暗部にトラップされるキャリアの数が多くなり、新たな空間電界が形成する(c)。アモルファスな有機 PR 材料の場合、ホッピングサイトのエネルギーには分布が存在し、エネルギー的に低いサイトがトラップとして働く。電荷がトラップにとどまる寿命はトラップの深さに依存する。最後に材料が電気光学的に活性ならば、空間電界の強度を反映した屈折率分布が材料中に生じることになる(d)。

ここで注意すべき点は、屈折率変調と光強度変調が同位相にならないことである。空間電場の強度は Poisson 方程式に従い電荷の分布から決まるが、電荷の輸送が純粋に拡散あるいはドリフトによって支配される場合に、90° の位相のずれが生じる。この場合に透過光と回折光の位相が整合し、一方の光波から他方へとエネルギーの移動がおこる。この位相のずれは光異性化等の他の現象では観察されず、PR 効果に特有なものである。PR 効果により形成された屈折率格子を利用し、光増幅素子、現像不要なホログラムメモリー、位相共役鏡等への応用が期待されている。PR 効果に関しては、当初 LiNbO_3 を中心とする無機の電気光学効果を有する結晶について研究が進められた。90 年代に入り、有機化合物の高い非線形性、低誘電率、多様な分子構造、加工の容易さが注目を集め、無機材料を凌駕する材料もすぐに報告された⁴⁾。

2. 有機 PR 材料の分類と現状

有機材料が PR 活性になるために必要な要素は以下の通りである。まず、光照射によりフリーなキャリアが発生し、拡散またはドリフトにより移動する必要がある。つまり材料は光導電性(電荷輸送性)でなければならない。また、形成した空間電場に応答した屈折率変調を生み出すため、材料は1次の電気光学効果を示さなければならない(最近では大きな屈折率変調は、空間電場による双極子の再配向による増大効果によるものとされている)。

そのため、PR 効果は材料科学者にとって比較的なじみ深い有機光導電性と2次の非線形光学活性を同時に持った材料において発現する。有機化合物で最初に PR 効果が観察されたのは電子受容体でドーピングした電気光学結晶⁵⁾においてであるが、加工性や機械的強度に優れたポリマー系のアモルファス材料へと研究対象は移行した。ポリマー系材料は図2に示したように、a) 電気光学活性なポリマーに電荷輸送分子をドーピングした材料、b) 電荷輸送性のポリマーに EO 色素をドーピングした材料、c) 電荷輸送及び EO 部位を高分子の主鎖または側鎖に含んだ一体型材料等のカテゴリーに分類される。d) は後述するようにブロック共重合体であり、e) は低分子ガラス PR 材料である。1991 年に IBM の Moerner らによって報告された初めての PR ポリマーはタイプ a) である⁶⁾。初期の材料はこのタイプが多いが、回折効率、結合利得ともに小さい。c)

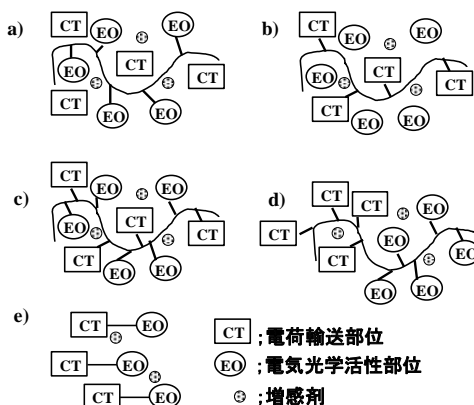


図2. 有機 PR 材料の分類

の材料系は、相分離などの心配はないが、やはり性能は低い。高い特性が得られる材料系について例を挙げて説明する。詳細については文献 7) を参考にさせていただきたい。

2.1. 電荷輸送性ポリマーに EO 色素をドーピング系

このタイプでかつ室温程度のガラス転移温度 (T_g) を持つ材料において高い回折効率や利得、速い応答が観察されている。低い T_g の材料では、色素の運動性が増加して前述のような配向増大効果がおこるため、屈折率の変調が大きくなると考えられている。電荷輸送性ポリマーとして正孔輸送性のポリビニルカルバゾール(PVK)が広く用いられている。PVK は T_g が高いが、電気光学色素や可塑剤をドーピングすることで室温付近まで下げることができる。図 3 の PVK ベースの複合体では回折効率がほぼ 100%、結合利得 200cm^{-1} が観察されている⁴⁾。ここで 2,4,7-トリニトロフル

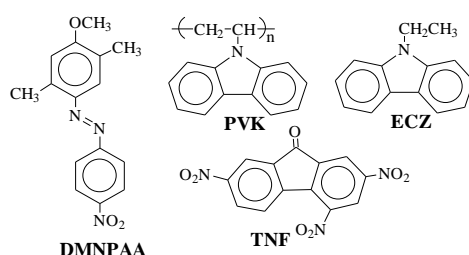


図 3. PVK ベースの材料の代表例

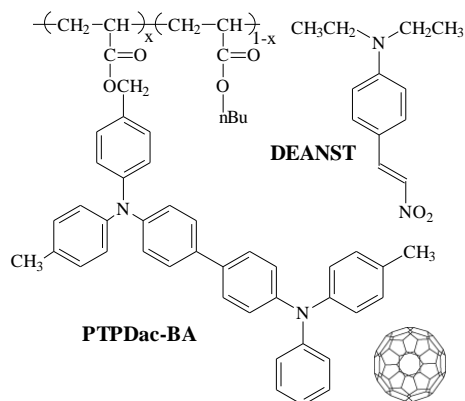


図 4. トリアリールアミン系 PR 材料

オレノン(TNF)はカルバゾール単位と電荷移動錯体を形成し、電荷発生剤となる。エチルカルバゾール(ECZ)は正孔輸送性の可塑剤であり、DMNPAA は EO 活性色素として働く。図 4 に筆者らが合成したトリアリールアミン系高分子をベースとした PR 材料を示す。このホスト高分子は PVK と比較して光導電性が大きく応答速度が大幅に向上した⁸⁾。

2.2 低分子ガラス一体型材料

図 5 に示す低分子化合物は室温で安定な分子状ガラスを形成し、優れた PR 特性を示す材料群である。低分子化合物は構造が明確で分子量も単分散であることから高分子系材料と比較してコントラストの高い屈折率格子が形成できると考えられる。このタイプの材料で最初に報告された a) は Lundquist らによる 2BNCM である⁹⁾。この分子はガラス転移点(25°C)を示し結晶化しない。0.3% の TNF をドーピングすることで $69\text{ cm}^{-1}(\text{at } 40\text{V}/\mu\text{m})$ の結合利得を示す。理由の記述はないがポリメタクリル酸メチルを少量 (10%) ドーピングすると、応答が速くなる ($\tau=83\text{ s at } 40\text{V}/\mu\text{m}$ でドーピング系の材料と比較して大変遅い)。b) は理研のグループによって報告された一連のカルバゾール系オリゴマー¹⁰⁻¹²⁾の代表例である。それぞれのカルバゾール環に導入した長鎖 N-アルキル基により結晶化が抑制される ($T_g: 29^\circ\text{C}$)¹⁰⁾。TNF 量を変化させたところ 0.06wt% ドーピングしたときに回折効率、利得、光導電性は最大となった (正味の利得 ($I-\alpha$): $76\text{ cm}^{-1}\text{ at } 30\text{V}/\mu\text{m}$)。c) に示した TPA-DCVA 及び TPA-NA は電荷輸送部である TPA 部位と電気光学活性

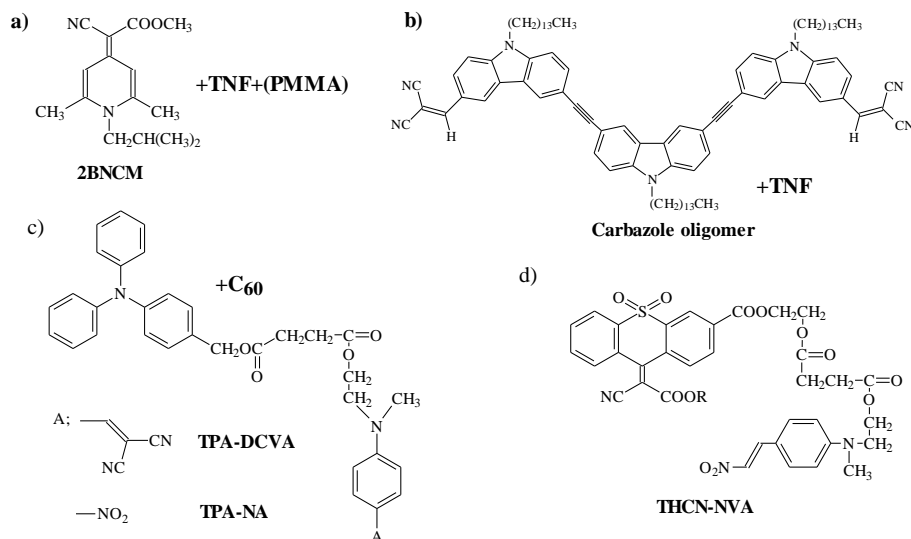


図 5 低分子一体型 PR 材料

な DCVA や NA 単位を一つの分子中に含むコハク酸エステルである¹³⁾。TPA-DCVA 素子においては回折効率 65%、結合利得係数 188 cm^{-1} という値が得られ、高性能ポリマードーブ系素子に匹敵する性能を有していることが明らかとなった。また、室温においては1年以上経過しても結晶化は観察されず、経時安定性に優れた材料であることがわかった。応答速度はポリマードーブ系の材料に比べて遅くなったが ($\tau=3\sim5 \text{ s}$)、電荷輸送部の光導電性や電気光学活性部位の運動性を高めることで改善を行っている¹⁴⁾。

d)は電子輸送部位としてチオキサンテン単位を含むコハク酸エステルである。この化合物もまた室温で安定なアモルファスガラスとなる。この材料は電荷発生剤（光増感剤）を加えることなしに PR 効果を示す。電子受容的なチオキサンテン部位と電子供与的なアニリン部位間で電荷移動相互作用が存在していると考えられる¹⁵⁾。

4. ナノ構造を制御した分子設計

上述のように優れた PR 効果を示す材料は光導電性高分子に EO 分子を分子分散した系や二つの機能を併せ持った多機能性オリゴマーなど低いガラス転移点 (T_g) を示す材料に限られている。このことから EO 活性部位の電場配向のしやすさ、運動性の高さが PR 効果の発現に大きく寄与していることを示唆しているが、過度の運動性の向上や T_g の低下により、材料の暗導電性が増加し、形成する空間電場が低下することがわかっている。これらの問題を解決するために、電荷輸送部位と EO 活性部位からなるブロック共重合体を設計した。ブロック

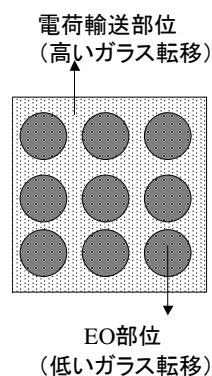


図 6 多相系 PR 材料の概念

共重合体は図6のようなミクロ相分離構造をとることができるため、それぞれの相の T_g を独立に設定でき、暗電流を増加させることなく EO 活性部位の T_g を下げることが可能である。筆者らはこのような「機能分離型」PR 材料を創製すべく多機能性ブロック共重合体の合成に取り組んでいる。

4.1 アクリレート系材料¹⁶⁾

シアノビフェニル単位を含むアクリル酸エステルから原子移動ラジカル重合（開始剤：methyl 2-bromopropionate, 80°C）によりマクロ開始剤を合成した。その後、カルバゾール環を有するアクリル酸エステルを重合させることでブロック共重合体を得た（図7）。比較のために、統計的な共重合体を通常のラジカル重合により合成した。

ブロック共重合体では、DSC 測定においてそれぞれのブロックに対応する2つのガラス転移及び液晶から等方

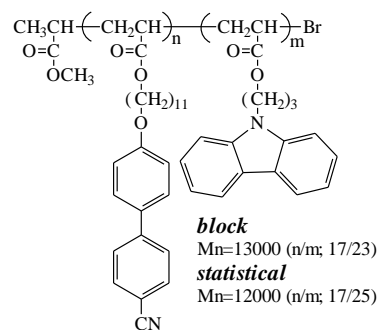


図7 多機能性ポリマーの構造

相への転移が観察され、ミクロ相分離構造を示唆した。偏光顕微鏡観察より、ブロック共重合体のキャストフィルムはシアノビフェニル単位の自己配向による複屈折が観察された。電子受容体である TNF をドーブした共重合体の4光波混合実験から回折効率を算出した。ブロック共重合体では 80 V/μm の印加電圧で 25% の回折効率を得られた。この値は、似た化学組成の統計的共重合体より優れていることがわかった。

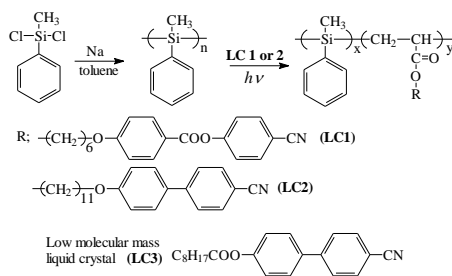


図8 ポリシラン系ブロック共重合体の合成

2光波結合実験では、非対称なエネルギー移動が確認され、ブロック共重合体では 45 V/μm において 100 cm⁻¹ の結合利得係数を示した。

4.2 ポリシランを含む材料¹⁷⁾

ポリシランは主鎖が Si-Si からなる高分子であり、その性質の特異さから広く研究が進められてきた。その性質は、主鎖中の σ 電子の非局在化に由来し、高い光導電性、正孔移動度を示す¹⁸⁾。そのため、ポリシランは PR 材料のホストとして期待されていた。しかしながら、ポリシランに対する EO 色素や可塑剤の溶解性が低く通常のドーブ系材料と比較して特性は劣る。また、この問題を解決するために多機能型ポリマーの合成もなされているが、高性能な材料は得られていない¹⁹⁾。筆者らは、ポリシランを光重合開始剤として用いることでビニルポリマーとのブロック共重合体が合成できることを利用して、EO 活性なモノマーの重合を行った（図

8)。その結果、LC1を含んだブロック共重合体に少量の低分子液晶をドーブした系において 120 cm^{-1} (at $60\text{ V}/\mu\text{m}$) 程度の結合利得を観察することができた。

4.3 ポリトリアルアミン系グラフト共重合体

ポリアリールアミン (PAA) は光導電性が大いことから²⁰⁾、電荷輸送部位として適用した場合、大きな空間電場の形成や応答速度が期待できる。しかしながら、これらのポリマーには、 T_g が高すぎる、電気光学 (EO) 色素や可塑剤の溶解性が低いなどといった問題があるため、PR材料としてこれまで利用されていなかった。

筆者らは PAA を主鎖とし、ポリアクリル酸エチルを側鎖とするグラフト共重合体が、PR材料のホストとして機能することを見出し、さまざまなグラフト密度とグラフト長を有する共重合体を合成し、ホストとしての特性を評価した。高い光導電性を反映し、数 10 ms オーダーの応答速度を示し、かつ PR 特性は材料中のナノ構造に依存することが明らかになった²¹⁾。

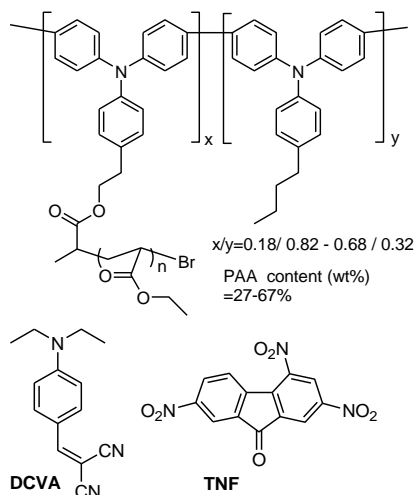


図9 PTAA グラフト共重合体系材料

5. おわりに

比較的短い応答速度で書き換えが可能な有機フォトリフラクティブ材料に関して紹介した。光の明暗の格子と屈折率変調格子との位相が $\pi/2$ ずれており、このために実時間ホログラフイー。動的ホログラム記録・再生などの体積ホログラム光記録のみならず、非対称エネルギー移動・光増幅位相共役波の発生などのフォトポリマーやフォトクロミックポリマーにない特徴を有している。書き込んだ情報の暗所での安定性、素子的高速駆動には比較的高い電圧が必要ということなど、解決すべき問題も多いが、今後のさらなる応用展開が期待される。

文献 1) L. Onsager, *Phys. Rev.*, **54**, 554 (1938), 2) H. Bassler, *Phys. Stat. Sol. B*, **175**, 15(1993), 3) M. Stolka et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **277**, 15 (1992), 4) K. Meerholz et al., *Nature*, **371**, 497(1994), 5) K. Sutter et al., *Solid State Commun.*, **74**, 867 (1990), 6) S. Ducharme et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 1846 (1991), 7) S. J. Zilker, *Chem. Phys. Chem.*, **1**, 72 (2000), 8) K. Ogino et al., *Chem. Mater.*, **9**, 2768 (1997), 9) P. M. Lundquist et al., *Science*, **274**, 1182 (1996), 10) L. Wang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 728(1996), 11) Y. Zhang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 2949 (1997), 12) Y. Zhang et al., *Chem. Mater.*, **9**, 2798 (1997), 13) K. Ogino et al., *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3936 (1999), 14) Z. Cao et al., *Chem. Lett.*, **41**, 1541 (2012), 15) J. M. Jeong, *Synth. Met.*, **139**, 11 (2003), 16) K. Ogino et al., *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **19**, 419 (2006), 17) K. Ogino et al., *Proc. the 6th ICIM* (Tokyo), 211(2005), 18) H. Qiu et al., *J. Polym. Sci., Part C: Polym. Lett.*, **27**, 469 (1989), 19) E. Hendrickx et al., *Macromolecules*, **32**, 2232 (1999), 20) C. Takahashi et al., *Synth. Met.*, **129**, 123 (2002), 21) Z. Cao et al., *Polymer*, **54**, 269 (2013)

ウェアラブルディスプレイ向けホログラフィック光学素子

稲垣義弘 田村希志臣

コニカミノルタ(株)

概要: 弊社ではホログラフィック光学素子(HOE)を採用したウェアラブルディスプレイの開発に取り組んでいる。“ウェアラブルコミュニケーター(WCc)”と名付けた弊社のウェアラブルディスプレイは使用者の頭部に装着するタイプであり、HOEの持つ高い光学波長選択性を利用することで、装着者の実際の視界に仮想画像を重ねて表示することができる。本報では、このウェアラブルディスプレイの持つ特徴とユニークな光学系の構成を紹介する。

キーワード: ホログラフィック光学素子、ウェアラブルディスプレイ、波長選択性、光回折

Holographic Optical Element for a Wearable Display

Yoshihiro INAGAKI Kishio TAMURA

Konica Minolta, Inc.

Abstract: We have developed wearable displays using a holographic optical element (HOE). The wearable display “Wearable Communicator (WCc)” is a type of head mounted display that can display virtual image superimposed on scenery utilizing the HOE’s high wavelength selectivity. This paper describes a summary of specifications and unique optics for the wearable display using HOE.

Keywords: holographic optical element, wearable display, wavelength selectivity, optical diffraction

1. ウェアラブルコミュニケーター(WCc)の特徴

近年、国内外の様々な研究機関や企業からウェアラブルディスプレイの技術提案、商品化がなされており、世の注目も高まってきている。頭部に装着するウェアラブルディスプレイは大きく3つのタイプに分類できる。ひとつ目は Oculus Rift(オキュラス)、PlayStation VR(ソニー)など、視界の全てをディスプレイが占有するタイプである。もし外部視界が必要な場合は別途、デジタルカメラで取得し、ディスプレイ映像として視認する必要がある。二つ目は Air Scouter(ブラザー工業)、InfoLinker(ウエストユニティス)など、頭部に取り付けたアームなどを利用して、非透過型の小型ディスプレイを視界内に設置するタイプである。シンプルな構成だが、ディスプレイやアームが視界の一部を妨げることに繋がるため、表示サイズをあまり大きくできない。そして、三つ目は MOVERIO(セイコーエプソン)など、シースルーディスプレイを搭載して外部視界と映像の両方を重ねて視認できるタイプである。光学構成はやや複雑になるが、外部視界を確保しながら大きな映像表示を可能とする。映像表示サイズはそれほど大きくないものの、Google Glass(グーグル)もこのタイプに含めて良いだろう。

今回、弊社が開発した「ウェアラブルコミュニケーター(WCc)」(Fig.1a,1b)は、シースルー型ディスプレイを搭載したウェアラブルディスプレイであり、三つ目のタイプに分類される。WCcはディスプレイとして

高い映像表示性能を目指し、映像表示部にハーフミラーではなく HOE (Holographic Optical Element) を採用した。ウェアラブルディスプレイは、映像表示サイズ、外部視界確保、デバイス重量の 3 要素がトレードオフの関係にあり、これらをいかにバランスさせるかが重要課題である。弊社は映像表示に HOE を採用することで、これら 3 要素を高いレベルでバランスさせることに成功した。特に、明るい外界視界と明るい映像表示の両立には、HOE が大きく貢献している。WCc 表示部の基本仕様を Table 1 に示す。



Fig.1a WCc Display Unit and Controller

Fig.1b WCc Display Unit
(Enlarged View)

表示解像度	1280×720 画素
表示色数	24bit フルカラー
表示画角 (対角)	25 度
表示部の光透過率	80%以上
重量	35g (参考値)

Table 1 Specifications of WCc Display Unit

また、WCc は表示部の小型化、軽量化にも徹底してこだわった。多くのウェアラブルディスプレイは、表示のための光学系(光源や光路など)を視界の左右のいずれか、もしくは両方に配置している。眼鏡で言うところのヨロイ、テンプレの位置である。眼鏡型デバイスとしての一体感がその主たる理由と考えられるが、その反面、光学系の存在が装着者の左右の視界を制限することになってしまう。左右視界の制限は、装着者がウェアラブルディスプレイを装着した状態で移動する際の安全確保に支障を来すことに加え、装着するだけで装着者に心理的圧迫感を与える場合もある。光学系を装着者の視界からできるだけ外すとなると、どうしても光学系が大きくなってしまふ。WCc では表示光学系を視界の上部に配置したことで、装着者の左右視界を十分に確保した。ただし、視界上部にはあまり空間的余裕はないので、表示光学系の小型化に腐心した。次項より技術詳細を紹介する。

2. 光学系の概要

ウェアラブルディスプレイの光学系は、液晶のような表示素子の画像を、数 m 先の虚像として装着者に見せるものである。Fig.2 は、今回開発したウェアラブルディスプレイの光学系の模式図である。

表示素子には反射型液晶を使用しており、これを照明するために、赤、緑、青の 3 つの光源を一つのパッケージに収めた LED を用いている。LED からの光は自由曲面ミラーを用いて拡散板に照射され、拡散されて二次光源となる。拡散された光は偏光ビームスプリッター (PBS) によって反射されて、反射型液晶に入射する。反射型液晶は、画像信号に応じて偏光の方向を変えて光を反射し、ON のピクセルからの光のみが PBS を透過して、樹脂のプリズム内に入射する。

プリズムは、上部の画像光が入射する部分が突出している以外は平板であり、画像光は二つの平面で 1 回ずつ全反射した後、平板内に埋め込まれた HOE に入射する。HOE は、赤、緑、青に相当する 3 つの波長を選択的に回折し、装着者の瞳に向けて射出する。また、外界から HOE を透過して瞳に入る光は、上記の 3 波長は回折するが残り透過し、装着者には、液晶の表示画像と外の景色が重なって見えることになる。

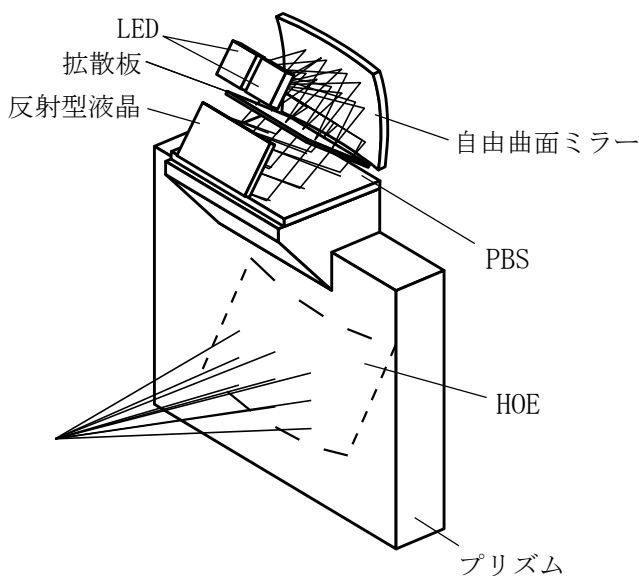


Fig.2 Optics of wearable display using HOE

3. 露光光学系

HOE を作製するための光学系を本報では露光光学系と呼ぶ。露光光学系の設計の手法について、Fig.3 に示す HOE のみの架空の光学系を用いて説明する。Fig.3 は、左上の紋りに角度の異なる平行

光を入射すると、y 軸に沿って配置された平坦な HOE によって反射回折され、左下に集光するような光学系となっている。その集光位置に液晶等の表示素子を置き、絞りの位置に眼を置いて観察すれば、観察者からは HOE の延長上に画像が表示されているように見えることになる。HOE は、入射した光に、その入射位置によって異なる量の位相差を付加して射出することができるが、その位相差を適切に設計することによって、集光作用を持たせることも可能である²⁾。HOE の特性は、光に付加する位相差を面上の位置の関数として示した「位相差関数」や、それを光路長に換算した「光路差関数」として表現される。以下の説明では、光路差関数を使用する。

HOE の特性を示す光路差関数は、使用時には、入射光に対して、HOE 上のそれぞれの場所でどれだけの光路長を付加するかを示す関数であるが、同時に、作成時に、干渉させる二光束間でどれだけの光路差があるかを HOE 上の位置の関数として示したものである。従って、HOE 上のある点に入射する光線を、干渉させる二光束の一方について決めると、同じ位置に入射する、もう一方の光束中の光線について、その方向を決定することができるのと同時に、光路長についても知ることができる。露光光学系の設計では、この方向と光路長の両方を利用する。

ここで使用する露光光学系では、レーザー光源からの光を2分岐し、それぞれをレンズで1点に集光して、位相の揃った二つの点光源を作る。Fig.4 は、その二つの点光源以降、HOE までの光学系を示した図である。その二つの点光源の一方を、平行光の主光線が交わる位置に置き、そこから発散した光を感材に照射する。これは、使用時に眼に向かう光を反対向きにしたものに相当する。これと干渉させるもう一方の光束は、使用時の画像光を延長した光である必要がある。その延長した光は、そのままでは一点に集まることはないので、何らかの光学素子を用いて集光する必要がある。ここでは、自由曲面ミラーを用いる。

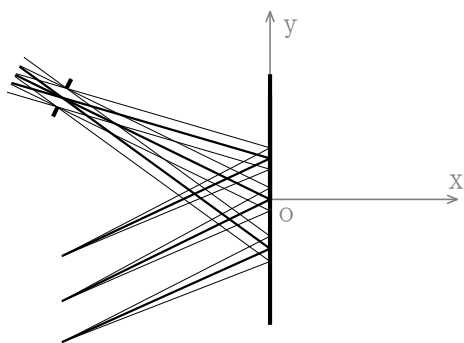


Fig.3 Schematic drawing of HOE for observation
(oblique incidence)

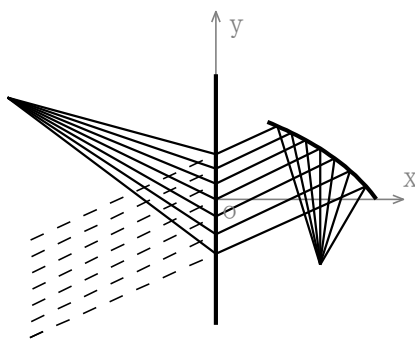


Fig.4 Schematic drawing of exposing optics

例として用いる HOE は、原点において光路差関数が 0 である。露光光学系の設計の際も、この点を通る2光線を基準とする。この点を通る光線の延長線上に位置と角度を決めて自由曲面ミラーを置き、

さらに、その反射光の延長線上に点光源を配置する。ここまで決めてしまえば、自由曲面ミラーの形状は一意に決定する。なぜなら、前述のように HOE 上の位置から、その光線の光路長が決定できるからである。具体的には、眼側の点光源から HOE での回折まで計算し、露光光学系で自由曲面ミラーから HOE に向かう光線を求めておき、その光線の延長線上で反射すべき点を光路長から算出する。光線の角度を変えて計算を繰り返せば、ミラー形状を示す点群データを得ることができる。

前述のように、我々のウェアラブルディスプレイにおいては、HOE は樹脂に埋め込まれており、露光時には樹脂を透過した光を感材に照射することになる。樹脂を透過する部分については、屈折率分の補正を行うことが必要になるが、基本的には同様の方法で自由曲面ミラーの設計を行うことが可能である。

4. まとめ

弊社は「安心、安全、快適」なウェアラブルディスプレイの実現を目指した。具体的には、表示性能(広画角、高精細、高画質)、装着性能(小型・軽量、個人眼鏡対応)、安全性能(左右視界確保、シースルー性)が高度に両立した状態を目標に、その実現に妥協することなくウェアラブルディスプレイの開発に取り組んだ。HOE コンバイナ、ウェアラブルディスプレイについては 1998 年および 2004 年の HODIC 研究会でも技術紹介^{3),4)}している。それから 10 余年を経て大幅な小型軽量化と機能向上を果たし、WCc として完成に至った。

本報では紹介しきれなかったが、WCc はディスプレイとしての機能だけでなく、カメラ、加速度センサ、ジャイロセンサ、ジェスチャセンサ、照度センサなど各種センサ類も光学系ユニット内に一体化している。コントローラ部には、WLAN、Bluetooth といったワイヤレス通信機能を備えている。さらには、ホットスワップ可能な 2 台のバッテリーパックも内蔵しており、通常条件下で 8 時間の連続使用も可能となっている。

現在、多くのビジネスユーザーに WCc を試行運用していただき好評を得ている。中でも、疲労感が少なく長時間の使用に耐えるという声は我が意を得て、WCc の開発でウェアラブルディスプレイのあるべき姿を徹底追求した成果だと捉えている。今回の報告を機に、さらに多くの方に WCc とその技術について関心を持っていただけることを期待するものである。

[文 献]

- 1) 笠井一郎, 野田哲也, 遠藤 毅, 上田裕昭: 第 28 回光学シンポジウム予稿 (2003) pp.29-32
- 2) 稲垣義弘: 第 40 回光学シンポジウム予稿 (2015) pp.5-8
- 3) 笠井一郎: ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報 18 巻 4 号 (1998)
- 4) 野田哲也, 森本隆史, 谷尻 靖, 笠井一郎: ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報 24 巻 4 号 (2004)

投影型ホログラフィック 3D ディスプレイ

涌波 光喜[†]

[†] 国立研究開発法人 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: [†] k.wakunami@nict.go.jp

あらまし ここでは投影型ホログラフィック 3D ディスプレイを紹介する。本技術は、ホログラフィックプロジェクション技術と波面プリンタで作製した DDHOE スクリーンの組み合わせによって実現される。ホログラフィックプロジェクションによって画面サイズを制御し、DDHOE スクリーンによって視野角を制御することで、従来技術と比べて自由度の大きいディスプレイ設計が可能となった。実験では、本技術がシースルーな DDHOE スクリーンを介して観察位置に対して 3D 映像を提示できることを確認した。

キーワード ホログラフィックディスプレイ, ホログラフィック光学素子

Projection-type Holographic 3D Display

Koki WAKUNAMI[†]

[†] National Institute of Information and Communications Technology (NICT) 4-2-1

Nukui-kitamachi, Koganei-shi, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: [†] k.wakunami@nict.go.jp

Abstract Projection-type see-through holographic 3D display is introduced. This method is achieved by the combination of two components: a digital holographic projection technique and a digitally designed holographic optical element (DDHOE) screen that is fabricated by wavefront printing technique. In the experiment, holographic 3D image reconstruction was successfully demonstrated via a see-through screen to a target observation area.

Keyword Holographic display, Holographic optical element (HOE)

1. はじめに

電子ホログラフィは、本来ホログラムに記録される干渉縞を計算機で計算し、空間光変調器(以下、SLM)に表示することで、ホログラム映像を動的に再生する技術である。究極の 3 次元映像表示技術として、様々な研究機関が研究開発を行っているが、干渉縞を表示する SLM には高い空間・時間解像度が要求されるのに対して、現状の SLM ではこれを満たさないため、実用レベルの画面サイズや回折角を同時に満たす技術の提案はなされていない。

2. 画面サイズと回折角の関係

以下、水平方向のみの場合を考える．電子ホログラフィで使用される SLM の画素ピッチを p 、画素数を M とすると、画面サイズ W と最大回折角 θ_{DIF} はそれぞれ

$$W = p \times M \quad (1)$$

$$\theta_{\text{DIF}} = 2\sin^{-1}(\lambda/2p) \quad (2)$$

で求められる． λ は再生光の波長を表す．また、平行光を SLM に正面入射させて SLM に表示した干渉縞を再生する場合、SLM の画面全面からの回折光を観察するために必要な最小観察距離 Z_{MIN} は

$$Z_{\text{MIN}} = W / (2\tan(\theta_{\text{DIF}}/2)) \quad (3)$$

となる．この時、観察位置から画面全面に対して成す角度”視野角”は最大回折角 θ_{DIF} と等しい．式(1)と(2)より、SLM の画素ピッチを変数とした場合、画面サイズと最大回折角がトレードオフの関係であることがわかる．例えば 8K(7,680×4,320 画素)の解像度を持つ SLM が使われた場合、画素ピッチを $4.8\mu\text{m}$ とすると水平画面サイズは 3.6cm 、水平視野角は 6.8 度となり、最小観察距離は 32.4cm となる．ここで再生光の波長は 532nm とした．もし画素ピッチを 2 倍の $9.6\mu\text{m}$ とした場合、画面サイズは 7.2cm に拡大されるが、水平視野角は 3.17 度と減少し、最小観察距離は 129.8cm と大きくなる．このように現状の SLM の解像度では、実用的な画面サイズと回折角および視野角を同時に達成することは難しい．

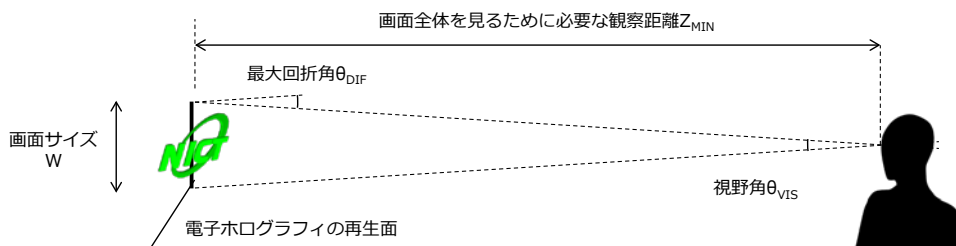


図 1. 従来の電子ホログラフィの課題

3. 投影型ホログラフィック 3D ディスプレイの原理

著者らは、画面サイズと特定の観察位置での視野角を自由に設計できる”投影型ホログラフィック 3D ディスプレイ”を開発した[1, 2]．図 2 に提案技術の概要を示す．本技術は、ホログラフィックプロジェクタと波面プリンタで作製した DDHOE(digitally designed holographic optical element)スクリーンで構成される．ホログラフィックプロジェクタは、上述の電子ホログラフィ装置によって再生されるホログラム映像を投影レンズで拡大投影する構成になっている．これによってホログラム映像の画面サイズを自由に設計することができる．一方、DDHOE スクリーンは、ホログラフィックプロジェクタで投影されたホログラム映像の光を所定の観察位置に集光する機能を持つ．この観察位置は、波面プリ

ンタで記録する物体光を計算機合成ホログラム(CGH : computer generated hologram)で制御することにより、波面プリンタで記録できる物体光の最大回折角の範囲内で自由に設計できる。このように提案技術は、画面サイズと視野角の制御をデジタルホログラフィックプロジェクタと DDHOE スクリーンの機能に分離することで、使用する SLM の解像度と独立して両パラメータを自由に設計することが可能となる。

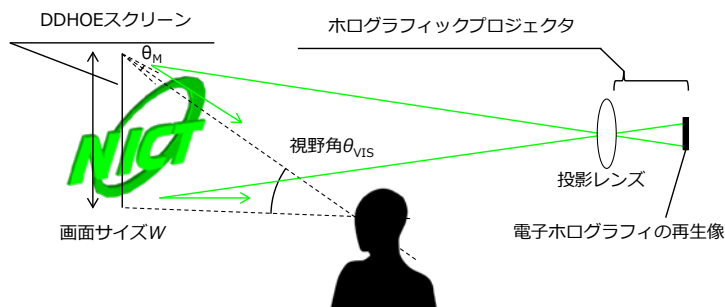


図 2. 提案技術の概要

3. 1 DDHOE スクリーンの作製

DDHOE スクリーンは、波面プリンタ[3-6]で作製した。DDHOE に付加する回折特性を記録時の物体光の複素振幅分布に変換し、その複素振幅分布を再生する CGH を予め計算する。多くの場合、CGH の画素数が波面プリンタに使われる SLM の画素数を上回るため、その場合は適宜 CGH を分割して順次 SLM に表示し記録することで DDHOE 全面を記録する。図 3 に NICT における波面プリンタの光学系を示す。SLM に表示した CGH はレーザー光源をコリメートした平行光で照明され、物体光を再生する。この時に同時に発生する高次回折光、0 次回折光および共役光はシングルサイドバンドフィルタでカットする。シングルサイドバンドフィルタを通過する物体光のみが縮小光学系でホログラム記録材料上に縮小結像され、ホログラム記録材料の反対側から入射する参照光と干渉し、反射型ホログラムが記録される。表 1 に波面プリンタの主な仕様を示す。

今回の提案技術では、後述するホログラフィックプロジェクタからの投影光を予め設定した観察位置に集光する機能を DDHOE に付加した。ホログラフィックプロジェクタの投影中心および観察位置は、DDHOE の中心を原点とした座標空間でそれぞれ(0, 0, 1000mm)、(0, 59, 200mm)とした。この 2 つのパラメータから、DDHOE 上の各点において、再生時の入射光の正反射方向と観察位置への方向との成す角を変調角と定義し、この変調角の傾斜を持つ波面を物体光として記録した。作製した DDHOE の大きさは、 $73.6 \times 41.4\text{mm}^2$ とした。これは後述するホログラフィックプロジェクタに使用する SLM の面積比 4 倍に等しい。また、観察位置における水平視野角は約 20 度となるが、この値は上述した電子ホログラフィで同画素数、同画面サイズを実現した場合の約 6 倍である。なお、DDHOE をスクリーンとして利用する際の光の入射角と波面プリンタで記録する際の参

照光の入射角は必ずしも一致しない．これにより，1)再生時の反射光の回折角が変調角と異なる，2)回折効率が低下する，の2点が課題として挙げられる．この問題に対しては，今後 DDHOE の精度向上を図る際に研究項目として取り組む予定である．

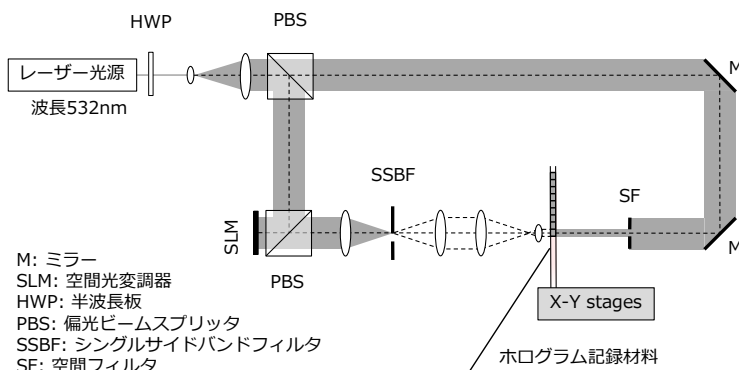


図3. 波面プリンタの光学系

表1. 波面プリンタの主な仕様

仕様項目	値
液晶パネルの有効解像度	3,600 × 1,800画素
液晶パネルの画素間隔	3.5μm
縮小倍率	0.10
光源の波長	532nm

図4に作成した DDHOE スクリーンにファイバから出射される点光源の光を入射させた様子を示す．反射光が観察位置に設定した点周辺に集光していることがわかる．なお，DDHOE 中心付近の回折効率は約 53%であった．また，DDHOE の透過率特性を図5に示す．記録した波長 532nm 付近を除く可視光域で概ね 80%以上の透過率を示していることから，シースルーなスクリーンとしての特性を有することがわかる．



図4. 作成した DDHOE スクリーンの反射特性

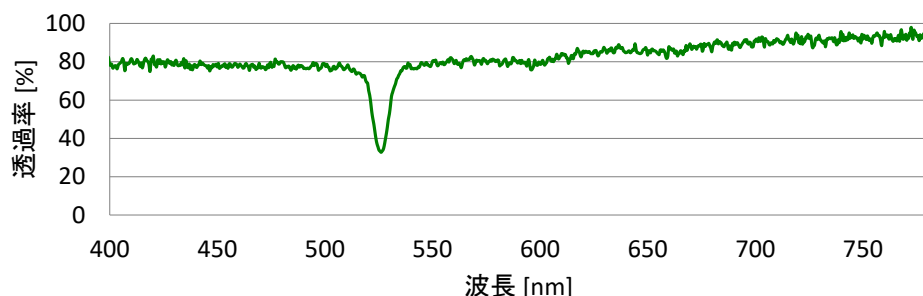


図 5. 作成した DDHOE の透過率特性

3. 2 ホログラフィックプロジェクタ

DDHOE スクリーンにホログラム映像を投影するホログラフィックプロジェクタは、NICT で以前開発した 8K の SLM を用いた電子ホログラフィ装置[7]を改良することで作成した。図 6 に NICT におけるホログラフィックプロジェクタの簡単な光学系を示す。SLM にホログラム映像用の CGH を表示し、上述した波面プリンタと同様にシングルサイドバンドフィルタを経て、物体光のみを成分とする波面を取り出し、投影レンズで DDHOE スクリーン上に拡大投影する。拡大投影された光は DDHOE スクリーンの光学特性によって観察位置に集光される。表 2 に開発したホログラフィックプロジェクタの主な仕様を示す。

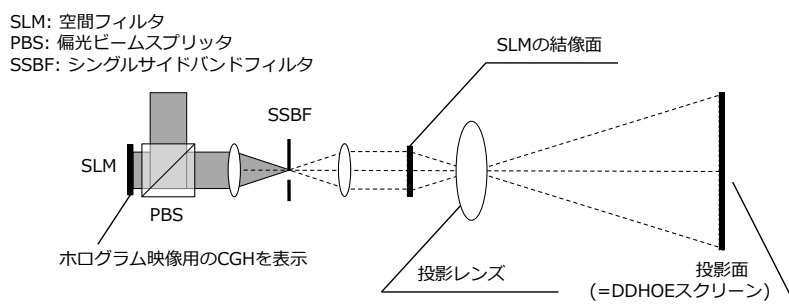


図 6. ホログラフィックプロジェクタの光学系

表 2. ホログラフィックプロジェクタの主な仕様

仕様項目	値
液晶パネルの解像度	7,680 × 4,320画素
液晶パネルの画素間隔	4.8μm
投影倍率	2.0
投影レンズの焦点距離	500mm

4. ホログラム映像用 CGH の計算と実験結果

図 7 に今回の実験で再生を試みた 3D シーンのコンピュータグラフィックス(CG)による画像を示す。DDHOE スクリーンの後方 1cm と 5cm の位置に 2 つの球体を配置した。この 3D シーンを再生する CGH はホログラフィックステレオグラム(HS)に基づいて計算し

た[8]. 多視点画像の枚数(光線の空間方向のサンプリング数)は 240×135 点とし, それぞれの視点画像の解像度(サンプリング点を通過する光線数)は 32×32 とした. 多視点画像は CG のレンダリングソフトを用いて生成した. この時, カメラの画角は, DDHOE スクリーン上に拡大投影されるホログラム映像の最大回折角に設定し, また, カメラの向きは各サンプリング点と観察位置を結ぶ方向に設定した.

図 7(c)-(e)に提案手法による光学再生の結果を示す. (c)より, シースルーな DDHOE スクリーンを介してホログラム映像が観察位置に提示できていることがわかる. また, (d)と(e)より, 異なる奥行きに 2 つの球体が再生されていることがわかる.

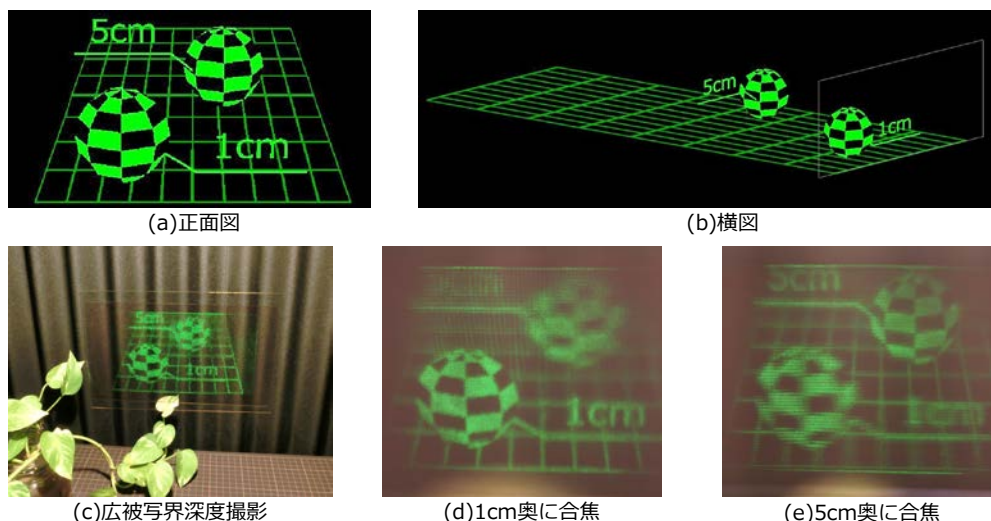


図 7. 3D シーンの CG 画像と提案手法による光学再生の結果[1]

5. 今後の課題

今後は, 波面プリンタのフルカラー印刷によるホログラム映像のフルカラー化, スクリーンの大型化およびスクリーンの精度向上を図る予定である.

謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 (26790064) の助成と総務省 SCOPE (162103005)、文部科学省 COI STREAM の委託を受けたものである.

参考文献

- [1] K. Wakunami, et al., Nature Communications, 12954 (2016).
- [2] 情報通信研究機構, 報道発表, 2016 年 10 月 13 日.
- [3] T. Yamaguchi, O. Miyamoto & H. Yoshikawa, Opt. Eng 51, 075802 (2012).
- [4] W. Nishi & K. Matsushima, Proc. SPIE 9006, 90061F (2014).
- [5] Y. Kim, et al., Opt. Express 23, 172–182 (2015).
- [6] K. Wakunami, et al., Proc. SPIE 9867, 98670J (2016).
- [7] T. Senoh, et al., Proc. SPIE 7957, 795709 (2011).
- [8] T. Yatagai, Appl. Opt. 15, 2722–2729 (1976).

水平走査型ホログラフィックディスプレイ

Horizontally scanning holographic display

高木康博

Yasuhiro Takaki

東京農工大学大学院工学研究院

Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

Holography is an ideal three-dimensional display technique. However, its electronic implementation requires light modulation by tremendous number of pixels whose pitch should be comparable to the wavelength of light. In this paper, horizontally scanning holographic displays are explained, which have been developed to overcome the above difficulties; they are realized using the screen scanning system and the viewing-zone scanning system. The 360-degree display system and the multi-channel display system are also realized based on the latter system.

1. はじめに

ホログラフィは、人間の立体知覚の生理的要因をすべて満たす理想的な立体表示技術である。現在の立体ディスプレイの問題である輻輳と調節の矛盾に起因する視覚疲労¹⁾が生じない。しかし、ホログラフィの電子的な実現は、現状では技術的なハードルが高く実現の難易度が高い。本稿では、ホログラフィックディスプレイの課題について説明した後、その実現方法として著者の研究室で行っている水平走査型ホログラフィックディスプレイの研究について紹介する。

2. ホログラフィックディスプレイの課題

光学的なホログラフィは、物体波と参照波の干渉で作製されるため、微細な干渉縞を記録する必要がある。高解像度なホログラムフィルムが利用される。電子的に実現する場合には、ホログラムパターンを表示するために高解像度な空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) が必要になる。SLM の解像度を $N \times M$ 、ピクセルピッチを p とすると、表示できる立体像の視域角 (立体像を観察できる視域を画面から見た角度) は $2 \sin^{-1}(\lambda/2p)$

で、画面サイズは $Np \times Mp$ で与えられる。ただし、 λ は光の波長である。この関係を Fig. 1 に示す。例えば、画面サイズ 40 インチ、視域角 30° を実現するためには、光の波長を $0.5 \mu\text{m}$ として、ピクセルピッチが $0.97 \mu\text{m}$ で解像度が $886,000 \times 498,000$ の SLM が必要になる。これは、2次元表示の最終形と言われているスーパーハイビジョンの解像度 ($7,680 \times 4,320$) の約 100×100 倍に匹敵する。上記は、フレネルホログラフィの場合であるが、フーリエ変換型の場合も視域角と画面の関係が入れ替わるだけで SLM に必要とされる性能は同一である。

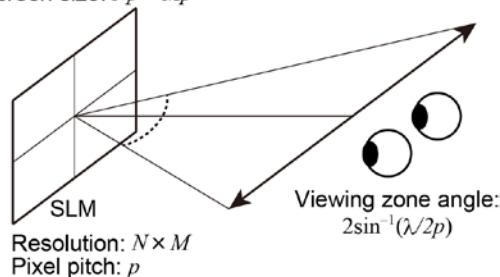
Screen size: $Np \times Mp$ 

Fig. 1 Viewing zone angle and screen size of Fresnel holography.

上記のように、ホログラフィックディスプレイを実現するためには、膨大なピクセル数と波長オーダーのピクセルピッチでの光変調が必要になる。このような超高精細な SLM の研究開発も進められているが、あまりに実現の難易度が高いことを考えると、新しい表示方式の開発も必要である。本稿では、ホログラフィックディスプレイの新しい表示方式として、著者の研究室で研究している水平走査型ホログラフィについて紹介する。

3. 水平走査型ホログラフィ

3.1 スクリーン走査型

水平走査型ホログラフィでは、MEMS 型 SLM の高フレームレート表示と水平走査の組み合わせにより、時分割でホログラム表示の解像度を増加させることを原理とする。これには、スクリーン走査型と視域走査型の2種類がある。最初に、スクリーン走査型について説明する。

スクリーン走査型^{2,3)}は、Fig. 2 に示すように、MEMS 型 SLM、アナモルフィック光学系、水平スキャナ、およびスクリーンで構成される。アナモルフィック光学系は、直交させたシリンドリカルレンズで構成される結像系で、水平方向と垂直方向で異なる倍率をもつ。アナモルフィック光学系は、MEMS 型 SLM の表示面を、水平方向には縮小し、垂直方向には拡大して、スクリーンに結像する。水平方向にピクセルピッチが縮小するため、ホログラム表示の水平視域角が拡大する。MEMS 型 SLM の表示面を垂直方向に拡大するため、スクリーン上に縦長の要素ホログラムとして結像される。要素ホログラムを水平スキャナで水平走査することで、ホログラム表示の画面サイズが拡大される。垂直方向にはピクセルピッチが拡大するため、水平視差型のホログラム表示になる。スクリーンを垂直方向拡散板とすることで、垂直方向に視域を拡大できる。また、アナモルフィッ

ク光学系の焦点面であるフーリエ面にシングルサイドバンドフィルタを配置して、ホログラム表示の際の不要光である共役像とゼロ次回折光を除去する。

本方法は、MEMS 型 SLM による光の2次元変調と1次元走査を組み合わせた時分割表示により実質的に解像度を増やしていると考えられることができる。

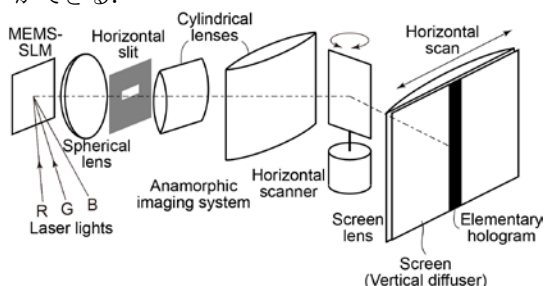


Fig. 2 Horizontally scanning holography using screen scanning system.

カラー化したスクリーン走査型⁴⁾の実験装置を Fig. 3 に示す。MEMS 型 SLM としては、Digital Micromirror Device (DMD)を用いた。解像度は $1,024 \times 768$ 、フレームレートは $22,727 \text{ Hz}$ 、ピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ である。アナモルフィック光学系の水平倍率は 0.183 で垂直倍率は 4.74 である。縮小された水平ピクセルピッチは $2.5 \mu\text{m}$ である。RGB 光源としては、波長 640 nm (R), 515 nm (G), および 445 nm (B)の半導体レーザーを用いた。水平視域角は 14.7° (R), 11.8° (G), および 10.2° (B) である。

水平スキャナには、ガルバノミラーを用いた。走査周波数は 60 Hz で、走査角は $\pm 13.6^\circ$ である。拡大された画面サイズは $6.2 \text{ インチ}(150 \times 49.8 \text{ mm}^2)$ である。

再生像を Fig. 4 に示す。カラー再生像が得られていることがわかる。異なる水平位置から撮影した結果を示すが、運動視差が得られていることがわかる。

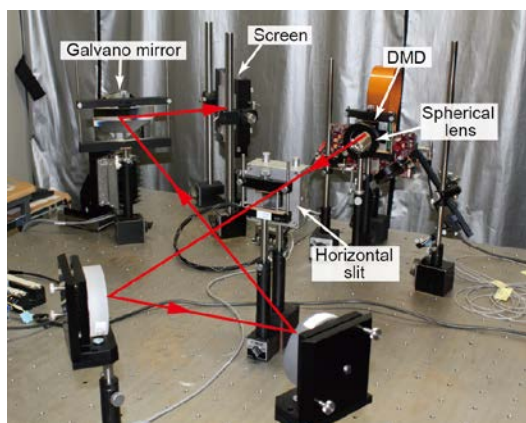


Fig. 3 Experimental system of screen scanning type horizontally scanning holography.

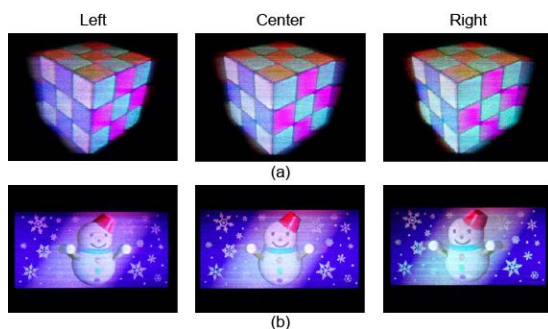


Fig. 4 Reconstructed images of screen scanning type horizontally scanning holography: (a) cube, and (b) snowman.

DMD は高フレームレート表示できるが、表示階調は2値となる。ホログラフィの場合は、表示デバイスの階調数と立体像の階調数は必ずしも一致しないが、ホログラムパターンの2値化は再生像の画質を低下させる。そこで、再生像の画質を向上させるホログラムパターンの2値化方法^{5, 9)}について研究が行われている。Fig. 4 に示した再生像は、誤差拡散法を用いた2値化⁹⁾を行った結果である。

水平走査型ホログラフィでは、DMD の表示面に並ぶマイクロミラー群が Blazed 回折格子に類似した形状をもつため、高次回折光をホログラム表

示に用いることになる。そのため、RGB の波長で用いる回折次数が異なるため、これに合わせて DMD の照明光の方向を変える必要がある⁴⁾。また、回折次数に合わせて、上記の2値化の場合の誤差拡散の方向を決めることで、再生像の階調表現性が向上する。

ホログラム表示が他の立体表示方式に比べて優れている点は、人間の立体知覚の生理的要因をすべて満たし、特に立体像に対する目のピント合わせ機能（調節）が働くことに点にある。そこで、スクリーン走査型の再生像に対して、目がピント合わせできることを、人間の調節応答を測定により確かめられている⁷⁾。

3.1 視域走査型

スクリーン走査型は水平走査をホログラムの表示面である画面上で行うが、視域走査型は水平走査を視域上で行う。

視域走査型⁸⁾の構成を Fig. 5 に示す。MEMS 型 SLM、拡大結像系、および水平スキャナで構成される。拡大結像系は、MEMS 型 SLM の表示面を水平スキャナのスキヤニングミラー上に拡大結像する。スキヤニングミラーがホログラム表示の表示面になり、画面サイズが拡大する。この場合、ピクセルピッチが拡大するため、視域は縮小する。拡大結像系は、2枚のレンズで構成されていて、拡大結像後に光を集光する。この集光点に縮小された視域が形成される。縮小された視域を水平スキャナで水平走査することで、視域を拡大する。水平走査に合わせて、MEMS 型 SLM はホログラムパターンを高フレームレート表示する。なお、水平スキャナの近傍に垂直方向拡散板を配置することで、垂直方向に視域を拡大できる。

従来の電子的なホログラム表示の実現ではピクセルピッチを縮小する方法が考えられてきたが、視域走査型ではピクセルピッチを拡大する。

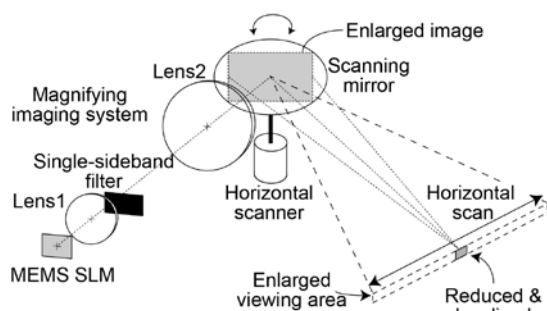


Fig. 5 Horizontally scanning holography using viewing-zone scanning system.

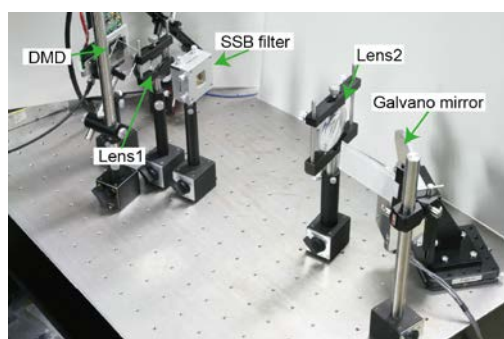


Fig. 6 Experimental system of viewing-zone scanning type horizontally scanning holography.

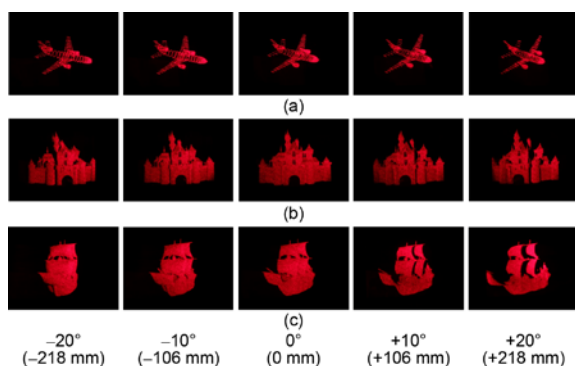


Fig. 7 Reconstructed images of viewing-zone scanning type horizontally scanning holography: (a) plane, (b) castle, and (c) ship.

一般に、拡大結像系は縮小結像系に比べて実現が容易である。また、縮小した視域の幅を人間の眼

の瞳孔径より大きくすることで、実質的に波面再生が実現できる。

視域走査型の実験装置を Fig. 6 に示す。MEMS 型 SLM には、3.1 のスクリーン走査型の実験で用いたのと同じ DMD を用いた。拡大結像系の倍率は 2.86 倍で、画面サイズは 2.0 インチ (40.0 mm × 30.0 mm) に拡大した。光源には、波長 635 nm の半導体レーザーを用いた。縮小した視域は、画面から 600 mm の位置に形成され、その幅は 9.74 mm で人間の眼の平均瞳孔径である 5 mm より大きい。

水平スキャナには、ガルバノミラーを用いた。走査周波数は 60 Hz で、走査角は $\pm 20.0^\circ$ である。拡大された視域の幅は 437 mm で、視域角は 40° である。

再生像を Fig. 7 に示す。異なる水平位置から撮影した結果を示すが、視域が広いので大きな運動視差が得られている。

上記の視域走査型では視域を水平走査したが、視域を円周上で走査すれば全周ホログラム表示が実現できる。

Figure 8 に、全周ホログラム表示⁹⁾の構成を示す。水平スキャナの代わりに、回転スクリーンを用いる。回転スクリーンとしてレンズ中心軸を回転軸からずらした偏心レンズを用いることで、縮小した視域を回転スクリーンの回転軸外に形成する。回転スクリーンが回転すると、縮小した視域が回転軸の周りを回転するため、回転走査が実現できる。

水平走査の場合は、スキャニングミラーが画面になるため、高速走査するスキャニングミラーを大きくできないことが画面サイズを制限していた。これに対して、回転スクリーンを用いる全周表示では、回転スクリーンの径を大きくするのは比較的容易であるため、画面サイズを大きくできる。

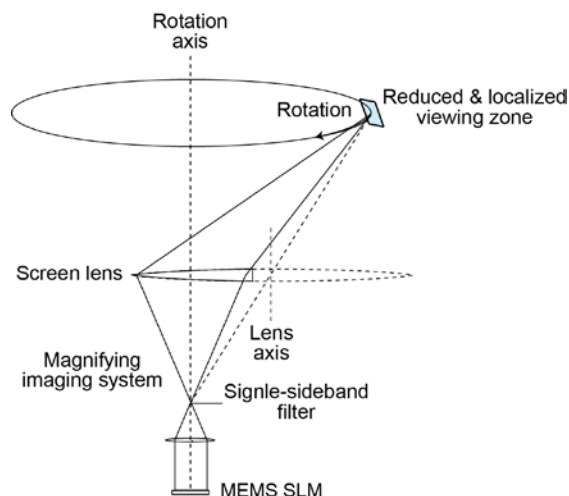


Fig. 8 360-degree scanning holographic display.

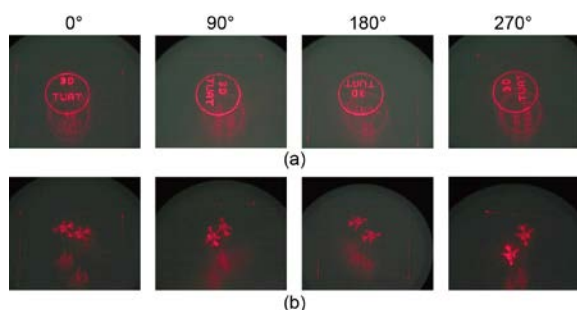


Fig. 9 Reconstructed images of 360-degree scanning holographic display: (a) symbols, and (b) two planes.

全周ホログラム表示の実験について説明する。拡大結像系の倍率を5.71倍として、画面サイズを3.9インチ(80.0 mm×60.0 mm)に拡大した。回転スクリーンには、偏分フレネルレンズを用いた。スクリーンの回転にはサーボモータを用い、回転数を約1,700 rpmとしてフレームレート28.4 Hzでのホログラム表示を実現した。

全周ホログラム表示の再生像をFig. 9に示す。再生像を4方向から撮影したが、見る方向によって見え方が異なることが確認できる。

最近になり、視域走査型で大画面化を実現する方法として、マルチチャンネル型の構成方法¹⁰⁾

が提案されている。MEMS型SLMと拡大結像系で構成されるホログラムプロジェクタを複数用いて、それぞれが表示する拡大像をタILINGすることで大画面化を実現する。さらに、大画面に対応した水平スキャナとして回転スキャナを用いる。

2チャンネルの表示システムをFig. 10に示す。画面サイズ7.4インチで、視域角42°が実現できている。表示した立体像をFig. 11に示す。

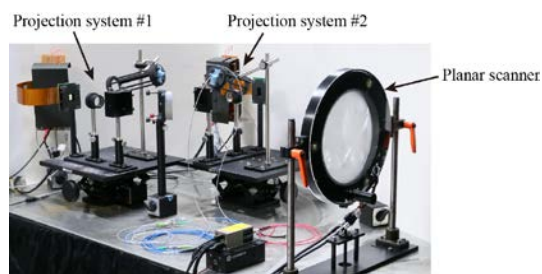


Fig. 10 Two-channel viewing-zone scanning holographic display.

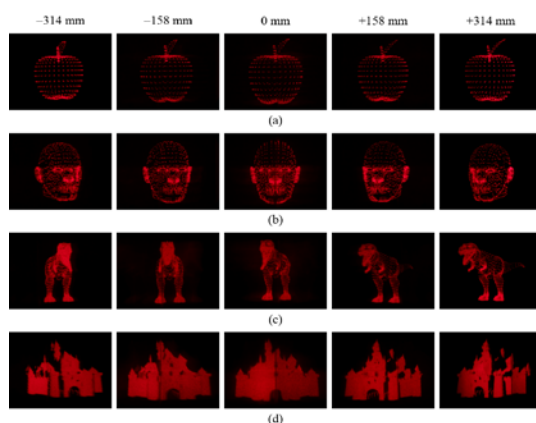


Fig. 11 Reconstructed images of two-channel viewing-zone scanning holographic display.

4. まとめ

ホログラフィックディスプレイの課題と現状について述べた。ホログラム表示は、人間の立体知覚の生理的要因をすべて満たし、理想的な立体

表示方式である。しかし、電子的に実現するためには、膨大なピクセル数と波長オーダーのピクセルピッチを実現する必要がある。本稿は、これを表示方式の工夫で実現する研究を中心に述べた。当然、表示デバイスの開発も重要であり、表示方式の研究と表示デバイスの研究が両輪となり研究が進むことで、将来のホログラフィックディスプレイが実現できると考える。

参考文献

- 1) D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks: J. Vis. **8** (2008) 1.
- 2) Y. Takaki and N. Okada: Appl. Opt. **48** (2009) 3255.
- 3) Y. Takaki and N. Okada: Opt. Express **18** (2010) 11327.
- 4) Y. Takaki, Y. Matsumoto, and T. Nakajima: Opt. Express **23** (2015) 26986.
- 5) Y. Takaki, M. Yokouchi, and N. Okada: Opt. Express **18** (2010) 24926.
- 6) Y. Matsumoto and Y. Takaki: Opt. Lett. **39** (2014) 3433.
- 7) Y. Takaki and M. Yokouchi: Opt. Express **20** (2012) 3918.
- 8) Y. Takaki and K. Fujii: Opt. Express **22** (2014) 24713.
- 9) T. Inoue and Y. Takaki: Opt. Express **23** (2015) 6533.
- 10) Y. Takaki and M. Nakaoka: Opt. Express **24** (2016) 18772.

平成 29 年第 2 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■日時：2017 年 5 月 19 日（金）13:00～17:30

■場 所：東京農工大学 科学博物館 3 F 講堂

〒184-0012 東京都小金井市中町 2 丁目 2 4-1 6

JR 中央線「東小金井駅南口」NONOWA 口より徒歩 10 分

<http://web.tuat.ac.jp/~museum/information/guide.html>

■テーマ：最近のホログラムの材料技術からディスプレイ技術まで

■プログラム

1. HODIC 鈴木岡田記念賞授賞式及び記念講演 13:00～14:00

・HODIC 鈴木岡田記念賞について

ホログラフィック・ディスプレイ研究会会長 伊藤智義

・選考経緯と選考結果の報告

2016 年度 HODIC 鈴木岡田記念賞選考委員長 山本健詞

・表彰状の授与

・記念講演 1 高田直樹（高知大学）

・記念講演 2 白倉 明（アーティエンスラボ）

・記念講演 3 堤 直人（京都工芸繊維大）

－ 休憩 － 14:00～14:30

2. 講演会 14:30～17:30

（1）次世代ホログラム技術：Egarim & Holo-Window～フォトポリマーFIGURA

FILM が開く高度ホログラム技術の応用Ⅱ 加瀬澤 寿宏（株式会社エガリム）

（2）有機フォトリフラクティブ材料の研究動向 荻野 賢司（東京農工大学）

（3）ウェアラブルディスプレイ向けホログラフィック光学素子

稲垣義弘・田村 希志臣（コニカミノルタ(株)）

（4）投影型ホログラフィック 3D ディスプレイ

涌波光喜（情報通信研究機構（NICT））

（5）水平走査型ホログラフィックディスプレイ 高木康博（東京農工大学）

（6）情報コーナー

*講演会終了後に、東京農工大学 高木研究室の見学を予定しています。

■研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）

■参加費 会員 無料、非会員 2,000 円、学生は会報不要の場合は無料

■研究会終了後、懇親会を予定しています。（当日申し込み受付）

■問合せ先 HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付

E-mail: office@hodic.org

平成 29 年第 3 回 ホログラフィック・ディスプレイ 研究会のお知らせ／講演募集

ホログラフィック・ディスプレイ研究会では、2017 年 9 月 15 日（金）に公募形式の研究
会を開催します。今回は「立体映像およびホログラフィー」というテーマで、技術・アー
ト・デザイン等の観点での発表を公募します。下記の申込み方法をご参照の上、ぜひご応
募下さい。

- 開催日： 2017 年 9 月 15 日（金）
- 場 所： 東京工業大学 大岡山キャンパス 南 2 号館 2 F S222 講義室
東急目黒線・大井町線 大岡山駅下車、徒歩 6 分
- テーマ： 立体映像およびホログラフィー
- 共 催： 映像情報メディア学会
映像表現&コンピュータグラフィックス研究会
立体映像技術研究会

■ 発表申込方法：

申し込みについては、共催の映像情報メディア学会の研究会発表申込システムを使用しま
す。

申し込み方法等が不明な場合は、下記担当幹事までご連絡ください。

- ・映像情報メディア学会の WEB ページより（研究会発表申し込みシステム）

<http://www.ite.or.jp/> → 「投稿する/参加する」 → 「研究会」 → 「研究発表のお申
し込み方法」 映像表現&コンピュータグラフィックス研究会 または 立体映像
技術研究会 を選択

または以下の URL へアクセス。

<http://www.ite.or.jp/ken/program/index.php?tgid=OSJ-HODIC>

- ・講演申込み締め切り：2017 年 7 月 4 日（火）

■ 問合せ先

- ・担当幹事

東京工業大学 山口雅浩 （E-mail: yamaguchi.m.aa@m.titech.ac.jp）

- ・HODIC 事務局 日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付
E-mail: office@hodic.org

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名誉会長	辻内 順平	会長	伊藤 智義（千葉大学）
副会長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前会長	橋本 信幸（シズンホールディングス）
国際担当	岩田 藤郎	企画委員長	山口 健（日本大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編集長	吉川 浩（日本大学）		

幹 事（５０音順）

石井勢津子（美術家）	石川 洵（石川光学造形研究所）	植田 健治（大日本印刷）
太田 和哉（トリマティス）	勝間ひでとし（多摩美術大学）	鎌田 康昌（凸版印刷）
久保田敏弘（久保田和光工房）	酒井 朋子（千葉大学）	坂本 雄児（北海道大学）
佐藤 甲癸（早稲田大学）	佐藤 俊一（シャープ）	下馬場朋禄（千葉大学）
白倉 明（アーティエンス・ラボ）	高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）
田中 賢一（長崎総合科学大）	谷口 幸夫（大日本印刷）	福田 隆史（産総研）
本田 捷夫（本田ひかり技研）	松島 恭治（関西大学）	三科 智之（日本放送協会）
森田 正紀（アルファバグ）	山口 雅浩（東京工業大学）	渡邊恵理子（電気通信大学）

相 談 役（５０音順）

上田 裕昭（エコミナルグループ）	小野 雄三（立命館大学）	桑山 哲郎（キャノン）
永田 忠昭（ライトイマジジョン）	三田村峻右	堀内 道夫（光と風の研究所）

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の１ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 37, No. 2 (May 2017)

2017 年 5 月 19 日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたは FAX にてお願いいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

HODIC