

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21300042

研究課題名（和文）

再帰透過性素材を用いた虚像プロジェクタ

研究課題名（英文）

Virtual Image Projector Using Retrotransmissive Material

研究代表者

木島 竜吾（Ryugo Kijima）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：80283282

研究成果の概要（和文）：いくつかの微細構造により「再帰透過性」を持つ異なる素材を製作し、これが持つ「未実像-虚像」変換機能を用いて「虚像プロジェクタ」を構成した。再帰透過材の性能及び虚像プロジェクタの性能を実験的に計測し、構築した理論式と照応させるとともに、画像分解、虚像結像距離の理論値からの大きな乖離などを見いだした。

研究成果の概要（英文）：Several “Retrotransmissive” materials were produced experimentally, with different optical structures and scales. Using these optical elements, “false image projectors” were constructed. The accuracy of the material and the resolution of displayed false image were evaluated by experiments, in correspond to the theory. Several phenomena such as the image disassemble, image distance estrangement were newly found.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 4,100,000  | 1,230,000 | 5,330,000  |
| 2010年度 | 3,200,000  | 960,000   | 4,160,000  |
| 2011年度 | 3,200,000  | 960,000   | 4,160,000  |
| 2012年度 | 2,800,000  | 840,000   | 3,640,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 13,300,000 | 3,990,000 | 17,290,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学、データベース

キーワード：バーチャルリアリティ

## 1. 研究開始当初の背景

頭部搭載型ディスプレイ（Head Mounted Display: HMD）は、頭部の運動を計測し、その位置姿勢から見えるべき画像を、眼前に装着したディスプレイにより提示するものである。である。1969年の最初の提案から、一種の究極のディスプレイとして期待されて来たが、実用にはいくつかの根本的な問題解決が必要である。

理想的には、現在広く用いられているメガ

ネと同等な外見、重量、視野の広さを実現するとともに、内耳前庭等による自己運動感覚と高度に整合した視覚提示が必要である。前者はHMD単体の設計問題であり、後者は主に、運動計測から視覚提示に至までの時間遅れの問題である。

前者については、国内外で広く改良が行われ、年々小型高精細化が進んではいいる。初期には、凸レンズとCRT等の表示デバイスを用いた虚像結像系が用いられた（HMDの第1形式）後、凸レンズを凹面鏡に変えた反射

式の虚像結像系が開発された(第2形式)。後者は、第1形式では原理的に困難な広視野角を得ることが可能であり、近年では超広視野HMDも試作されている。また、自由曲面プリズムの実現以降、市販品はこの形式ばかりである。しかし、凹面鏡の内側から管面像を入力するため、目-凹面鏡間に光路空間が必要であり、広視野を得るためには大型になる。

これに対し、筆者らが提案した頭部搭載プロジェクト[R1][R2]は、眼点のプロジェクトから外に投影した像を観察するものである。投影系は古くから広画角のものが作られていることから判る様に、光学的にはプロジェクト方式は第1、第2形式よりも容易に広画角が得られる。この形式は後に世界的に広く認められて一研究分野を形成し、[R3]、[R4]などによる再帰反射スクリーンの導入、[R5]による超広画角等の成果を得ると共に、オブジェクティブなディスプレイという概念を誘発し、HMDの第3形式となった。しかし残念ながら、外部にスクリーンが必要である。

[R1] 木島竜吾, 廣瀬通孝, "頭部搭載型プロジェクトを用いた仮想環境とデスクトップ環境の融合", 第10回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.399-404, SICE, 1994.

[R2] Kijima, R., Ojika, T., "Transition between Virtual Environment and Workstation Environment with Projective Head-Mounted-Display", Procs. of IEEE Virtual Reality Annual Intl. Symp. 1997, pp.130-137, IEEE, 1997.

[R3] Inami, M., Kawakami, N., Sekiguchi, D., Yanagida, Y., Maeda T., Tachi, S., "Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector", Procs. of IEEE VR 2000, pp. 233-240, IEEE, 2000.

[R4] Hua, H., Gao, C., Biocca, F., Rolland, J., P., "An Ultra-compact and Compact Design and Implementation of Head Mounted Projective Displays", Procs of IEEE VR 2001, pp.175-182, IEEE, 2001.

[R5] Kiyokawa, K., "A Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display using Hyperbolic Half-silvered Mirrors", Procs of ISMAR 2007, pp.207-210, IEEE/ACM, 2007.

## 2. 研究の目的

最近申請者らが発表した「再帰透過性」という概念は、ある面に入射する光線を、面の法線方向には折り返さないが面内では逆方向に折り返す、言い換えれば、面の法線周りに180度回転して射出するものである。図2に、鏡面や再帰反射との比較説明を示す。これを

用いると、プロジェクトが作るべき実像(ここでは未実像と呼ぶ)を、再帰透過面に対象な位置の虚像に変換する機能である「未実像-虚像変換」が導出できる。これにより、プロジェクトを使いながらもスクリーンが無い状態で虚像を観察できる、「虚像プロジェクト」が実現できる(図3)。これまでのところ、例えば実像を実像にリレーする用途や、IP方式の立体ディスプレイなどの個別の用途のための専用光学素子として、実は再帰透過性素材といってもよい光学素子は、個別独立に、散発的に開発されてきた。例えばアフォーカルレンズアレイ、グリーンロッドレンズアレイ、コーナーミラーアレイなどである。しかしこれらは主として実像を形成する目的に用いられており、プロジェクトが結ぶ実像を観察者からみた虚像に変換する実像-虚像変換という機能は新規である。さらに、再帰透過性という抽象概念から出発すると、再帰透過を得るために様々な光学構造に可能性があることがわかり(図3)、その性能は微細構造の大きさと再帰透過精度に支配される[3]ことがわかる。

申請者らは、本来狙っている微細構造ではなく、大型のコーナーキューブプリズムと鏡を運動させる方法で、上記虚像プロジェクトを構成して、原理を実験的に証明[1]し、さらにその性能(解像度)の理論式[2]を微細構造の場合も含め、導出している。本研究では、微細構造を用いた再帰透過材として適した構造を試作により探す事、試作材料と小型のプロジェクトと組み合わせて虚像プロジェクトを構成し、再帰透過材自体の性能と虚像プロジェクトの性能を評価し、理論式を実験的に証明することが目標である。視力1を実現する再帰透過性能は、乱れ角度1分程度までであるのに対し、現在の微細切削加工では数分の精度の実績がある。上記試験には十分利用可能であるが、実用化には加工方法等の今ひとつの工夫が必要となり、性能追求も本研究の範囲の挑戦である。

## 3. 研究の方法

本研究では、良い再帰透過材を製作することが鍵となる。繰り返しになるが、再帰透過という概念も、未実像-虚像変換による虚像プロジェクトも全く新規なものであり、参考となる知見がほとんどない。しいて言えば、屈折光学系のアレイを用いた[R7][R8]や、本申請が参考にしている最近のコーナーミラーアレー構造[R6]などが、実像を結像するために用いられたケースがあるのみである。このため、製作方法は本申請の範囲にとどまらないとは思われるものの、最も可能性が高いと考えられる、ナノ機械切削による方法を中心とする。なお、この概念に基づく動作そのも

のは、既に[1-3]で証明されている。

[R5] Maekawa, S., Nitta, K., Matoba, O., "Transmissive optical imaging device with micromirror array", Procs of SPIE, 6392, 63920E:1-8, SPIE, 2006.

[R6] Okano, F., Arai, J., "Resolution characteristics of afocal array optics", procs of SPIE, 6016, 601601:1-9, SPIE, 2005.

[R7] Okano, F., Arai, J., "Optical Shifter for three-dimensional image by use of a gradient-index lens array", Applied Optics, 41(20), pp. 4140-4147, 2002.

再帰透過性を得るために、可能性の高い微細構造は複数あり、まずは性能の理論的な見積もりを行ってターゲットをしぼる。後には、曲面状に再帰透過構造を作る事が必要であるため、単純再帰透過面の性能だけでなく、曲面にしやすいかどうかとも勘案しつつ決める。再帰透過素材は、微細(ナノ)切削加工により製作する。

現在のところ構造の候補は、(1)コーナーミラーアレイ、(2)離散コーナーキューブアレイとビームスプリッター、(3)離散対向コーナーミラーアレイ、(4)離散対向凹面鏡アレイである。(1)は有る程度実績があるため、精度向上が鍵となる。(2)は申請者らが原理確認に用いたシステムに近いが、各要素の大きさが現状1cm程度からターゲット100um程度と100倍ほど異なること、運動部分がないことが異なる。(3)は完全に新規な方法であり、現在性能計算を行っている。入射光と観察瞳の位置が十分にフィットすれば、製造が最も容易な可能性がある。(4)はアフォーカルレンズアレイから色収差を取り除くために反射型としたものである。各構造には各々得失があるため、構造に由来する理論式を立て、性能と使い勝手(入射角の広さ等)を勘案してターゲットを選定する。現在のところ(3)が有利であろうと考えている。

(1)コーナーミラーアレイ (2)離散コーナーキューブアレイとビームスプリッター (3)離散対向コーナーミラーアレイ

図6. 再帰透過を得るための構造

#### 4. 研究成果

いくつかの構造と制作方法を用い、異なるスケールで再帰透過性を持つ光学素子を試作した。これらについて簡単に述べる。

(1)まず、直径7.16ミリのコーナーキューブ

プリズムをアルキメデス螺旋上に配置した回転板と、それに平行なビームスプリッター板によるものを試作した。これはおおむね乱れ角と大きさで決まる理論解像度に近い性能を示した。

(2)約1ミリの大きさを保つ長いリバーサルミラーを並べた板を作成し、これを2枚対向させたりリバーサルミラーメッシュを試作した。前進型レイトレーシングを用いて性能設計を行ったところ、有効開口部を増大させ明るさを稼ぐために、リバーサルミラーの設置角度を場所に応じてひねってゆく方法が有効であることが判った。またこれを10倍スケールモデルと考え、人間の瞳径の10倍のカメラを用いて観察した。結像は確認でき、再帰透過性も証明された。

(3)100ミクロンの厚さの透明版の中に、高さ100ミクロンを持つ長い短冊状の平行鏡を多数作り込んだ板を、ナノ切削加工により作成し、これら2枚を正確に直交するように合わせた、直交短冊鏡型コーナーミラーアレイを試作した。再帰透過性を確認し、虚像結像も観察出来た。直交精度は直接再帰乱れ角を支配するため、直交精度を変化させると結像の解像度が低下してゆく様子も観察され、提案している光学的動作がさらに多面的に確認された。

(4)100ミクロンオーダーの微細コーナーキューブを、1枚の亚克力板の上に微細機械切削により多数構成し、コーナーキューブ部分だけに蒸着反射メッキを行い、これとビームスプリッターを接着することで再帰透過板を試作した。結果としては部分蒸着がうまくゆかないことから、再帰透過材としては機能しなかった。また、このオーダーの大きさになると分オーダー精度での形状の直接計測は困難であること、さらに個々の光学構造の精度を反射光を用いて評価することも困難であることが判明した。

(5)100ミクロンオーダーの直角溝を1枚の亚克力板の上に多数平行に並ぶよう、微細機械切削を行い、溝部分に蒸着反射メッキを行い、これをさらに、溝に直交する方向に100ミクロンオーダーでスライスすることで、コーナーミラー列を面内に有する薄い短冊を作成し、さらにこれを別の亚克力板に張り込むことで、コーナーミラーアレイを安価に作成する方法を試した。結果としては部分蒸着、スライスによる形状の乱れ等が原因となり、再帰透過材として十分機能するにはいたらなかった。

また、実験により新たに発見、確認された事項について述べる。

(2)の試作辺においては、観察眼の焦点が虚像点にある場合には像は観察出来るが、焦点をずらしてゆくと、画像はぼけるのではなく、

各反射経路毎にバラバラに分解してゆく「画像分解」現象が起こった。人間の焦点調節の仕組みはボケ量を手がかりにしている可能性が高いため、本方式の欠点である。原理的には、ある表示点の結像に関わる反射経路の数を増やせば、分解された画像数が増えまた、これらの分解画像がオーバーラップすれば、擬似的にぼけ画像に類似の画像を見せることが可能であると考えられる。必要な分解画像数やオーバーラップ量を理論的、実験的に求めるという課題が生まれた。

(1)、(2)の試作片を用い、虚像の理論的な結像位置を実験により確認した。プロジェクトの実像投影結像位置を、再帰透過面で折り返した位置に虚像は立つはずである。実験結果は、実像投影距離を延ばしてゆけば、虚像も遠くに行くことを示したが、その絶対量は理論値よりも遥かに小さい(近い)ものであり、しかも構造(1)、(2)で異なっていた。これは今後の検討、解明対象である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[国際会議(査読有)](計2件)

Ryugo Kijima, Junya Watanabe, "Alternative Optical Structure of Head Mounted Display Optical See-Through Projection HMD", Proceedings of the Joint Virtual Reality Conference of EGVE-EuroVR-ICAT (JVRC 2009), pp. 61-62, INRIA/ACM, Lyon, France, 7-9 December, 2009. (poster and technical demonstration) (Best Demo Award)

EGVE - the 15th Eurographics Symposium on Virtual Environments ICAT - the 19th International Conference on Artificial Reality and Telexistence EuroVR - the 6th EuroVR (INTUITION) Conference), Lyon, France, 7-9 December, 2009.

Ryugo Kijima, Junya Watanabe, "False Image Projector For Head Mounted Display Using Retrotransmissive Optical System", Proc. of 2009 IEEE Virtual Reality Conference, 2009, pp.297-298, ISBN: 978-1-4244-3943-0, IEEE, 2009. (research demonstration paper), Lafayette USA, 14-18 March 2009

[学会発表](計3件)

本田翔大, 木島竜吾, "コーナーキューブプリズムとハーフミラーから構成される再

帰透過性素材を用いた広角虚像プロジェクトの試験実装", 日本バーチャルリアリティ学会第16回大会論文集(CD-ROM), 21d-6.pdf, VRSJ, 公立はこだて未来大学, 2011.

研究奨励賞: 木島竜吾, 本田翔太, "離散光学系を用いた虚像プロジェクトにおける画質の理論と対向リバーサルミラーメッシュを用いた実験的評価", 日本バーチャルリアリティ学会第15回大会論文集(CD-ROM), 1c2-2.pdf, VRSJ, 金沢工業大学, 2010.

研究奨励賞: 渡邊純哉, 木島竜吾, "対向リバーサルミラーメッシュによる再帰透過材の検討", 日本バーチャルリアリティ学会第14回大会論文集(CD-ROM), 165.pdf, VRSJ, 早稲田大学, 2009.

[産業財産権]  
出願状況(計 0件)

[その他]  
(受賞)

Best Demo Award: Ryugo Kijima, Junya Watanabe, "Alternative Optical Structure of Head Mounted Display Optical See-Through Projection HMD", Proceedings of the Joint Virtual Reality Conference of EGVE-EuroVR-ICAT (JVRC 2009), pp. 61-62, INRIA/ACM, 2009. (poster and technical demonstration)

渡邊純哉, 木島竜吾, "対向リバーサルミラーメッシュによる再帰透過材の検討", 日本バーチャルリアリティ学会第14回大会論文集(CD-ROM), 165.pdf, VRSJ, 2009. (研究奨励賞)

木島竜吾, 本田翔太, "離散光学系を用いた虚像プロジェクトにおける画質の理論と対向リバーサルミラーメッシュを用いた実験的評価", 日本バーチャルリアリティ学会第15回大会論文集(CD-ROM), 1c2-2.pdf, VRSJ, 2010. (研究奨励賞)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木島 竜吾 (Ryugo KIJIMA)  
岐阜大学・工学部・准教授  
研究者番号: 80283282