

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870398

研究課題名(和文)三次元ディスプレイへのランダム性の導入

研究課題名(英文)Introduction of a randomness to three-dimensional display

## 研究代表者

堀崎 遼一(Horisaki, Ryoichi)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：20598958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：三次元ディスプレイはエンターテインメントのみならず、近年は医療・工業分野においてもニーズが高まっている。しかし、裸眼式の三次元ディスプレイは再生する光線の位置と角度の分解能や空間と時間の分解能の間にサンプリング定理にもとづくトレードオフが存在することが知られている。またサンプリング定理を満たさない場合に発生する信号の劣化はエイリアシングノイズと呼ばれ、ディスプレイシステムにおいて画質劣化を引き起こす主たる要因となる。本研究では三次元ディスプレイシステムにの出入力プロセスに不規則性を導入し、エイリアシングノイズを低減する手法の開発に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional display is useful for not only entertainment but also biomedicine and industry recently. However three-dimensional display without eye glass has tradeoffs between spatial and angular resolutions of reproduced light ray or spatial and temporal resolutions based on the sampling theorem. The artifacts are caused if the sampling theorem is not satisfied, and they are known as aliasing noise. This noise degrades the reproduced image quality significantly in three-dimensional display. In this study, we developed a method for reduction of the aliasing noise by introducing randomness to the input and output process of three-dimensional display systems.

研究分野：光情報処理

キーワード：多次元ディスプレイ 多次元カメラ

1. 研究開始当初の背景

三次元ディスプレイは立体像を提示でき、二次元ディスプレイでは表現できない臨場感を与えられるため、エンターテインメントの分野を中心に長年研究が行われている [Xiao Xiao, Bahram Javidi, Manuel Martinez-Corral, and Adrian Stern, “Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and application,” *Applied Optics* **52**, pp. 546-560 (2013)]. 近年はエンターテインメントのみならず医療・工業分野においても三次元情報提示のニーズが高まっている。

三次元ディスプレイは両眼に異なる画像を提示することで、観測者に視差を与え立体情報を再現する。三次元ディスプレイの実装法として、ヘッドマウント式、シャッターや偏光を利用したメガネ式が行われている。特に実応用を考えた場合、裸眼式の三次元ディスプレイが望ましい。裸眼式三次元ディスプレイはレンズアレイやレンチキュラーレンズを利用して、多数の光線から構成される視差を観測者に与える。この手法ではメガネ等の付加的な素子は必要なく、複数人で同時に立体視が可能である。

三次元情報や光線情報を取得するためにはディスプレイと同様な光学系、レンズアレイやレンチキュラーを用いられることが多い。特に大きな視差情報を得るために多眼カメラやメインレンズを用いた複眼カメラが用いられることもある。

2. 研究の目的

裸眼式の三次元ディスプレイは再生する光線の位置と角度の分解能や空間と時間の分解能の間にサンプリング定理にもとづくトレードオフが存在することが知られている。またサンプリング定理を満たさない場合に発生する信号の劣化はエイリアジングノイズと呼ばれ、ディスプレイシステムの画質劣化を引き起こす主たる要因となる。

また、光線を高密度に再生する出力デバイスを開発できたとしても、光線を取得する入力デバイスが出力デバイスに対応した性能を持っていないとエイリアジングノイズが発生する。すなわち、ディスプレイシステムの開発には入出力デバイスの統合的に取り扱うことが不可欠である。

本研究期間中にはさらに提案する三次元ディスプレイシステムを拡張した多次元ディスプレイシステムの可能性も探った。

3. 研究の方法

本研究ではディスプレイシステムの入出力プロセスに不規則性を導入することで、エイリアジングノイズノイズを軽減する手法の開発に取り組んだ。不規則性の導入は出力デバイスだけでなく、入力デバイスにおいて

も重要である。また、提案手法を八次元の光情報再生に拡張した。この多次元ディスプレイシステムにおいても不規則性は重要な鍵となる。

入力デバイスに不規則性を導入することは、近年新たな計測技術として注目を集めているコンプレッシブセンシングにもとづく [David Donoho, “Compressed sensing,” *IEEE Trans. Info. Theory* **52**, pp. 1289-1306 (2006). Richard Braniuk, “Compressive sensing,” *IEEE Signal Processing Magazine* **24**, pp-118-121 (2007).]. 特にコンプレッシブセンシングはサンプリング定理にもとづく計測と比べて、サンプリング数(計測回数)を大幅に減らせることが知られている。サンプリング数の減少は計測の高速化に対応する。

出力デバイスにおいて、エイリアジングノイズの発生は、光線の再生機構の規則性や周期性による。コンピュータグラフィックスの分野では、レンダリングに不規則性を導入してエイリアジングノイズを抑える確率的レンダリングが提案されている [Robert Cook, “Stochastic rendering in computer graphics,” *ACM Trans. Graph.* **5**, pp. 51-72 (1986).]. 同様のアプローチを三次元ディスプレイの出力デバイスに導入すれば、エイリアジングノイズの低減が期待できる。

4. 研究成果

本研究ではまず多次元光情報入力デバイ

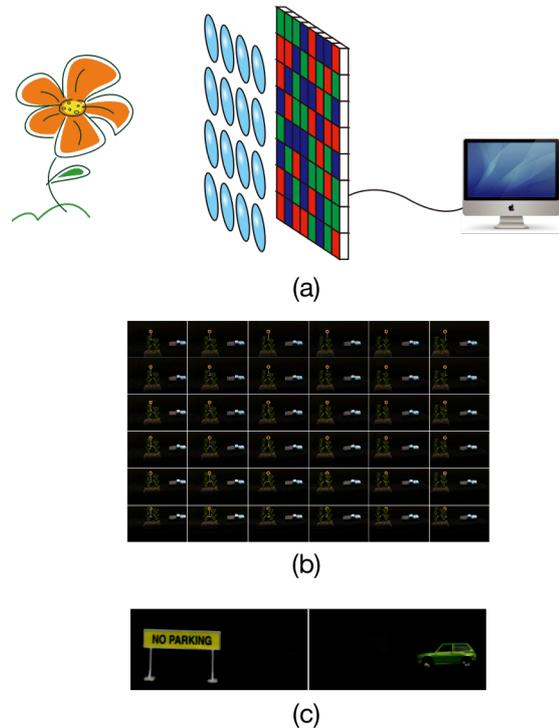


図 1. 不規則性を利用した複眼カメラ。

スの開発をおこなった．光線情報の取得には多眼カメラや複眼カメラが用いられることが多い．これらのカメラの光学系に不規則性を導入し，光線の位置と角度を高解像度に取得する図 1 に示す手法を開発した[雑誌論文②⑤]．図 1(a)に示すようにフィルターやレンズ配置に不規則性を導入している．撮影画像は図 1(b)のようになる．得られた光線情報から対象の三次元情報を抽出した結果が図 1(c)になる．複数の距離に配置された対象がその距離に再構成されていることがわかる．再構成には対象のスパース性を利用したアルゴリズムを用いた[Jose Bioucas-Dias and Mario Figueiredo, “A new TwIST: Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration,” IEEE Trans. Image Proc. 16 pp. 2992-3004 (2007)]．

我々はこの光線情報取得法を双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF: Bidirectional scattering surface reflectance distribution function) の計測に拡張した．BSSRDF は光線の入出力関係を表現する八次元関数であり，もっとも一般的に光線情報を記述する関数である[Henrik Jensen, Stephen Marschner, Marc Levoy, Pat Hanrahan, “A practical model for

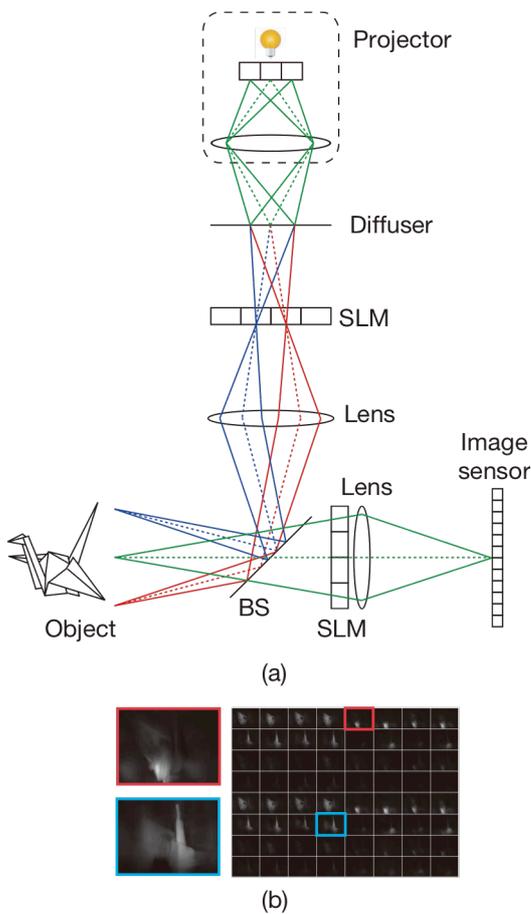


図 2. BSSRDF 取得システム．(a) 光学系，  
(b) 取得情報．

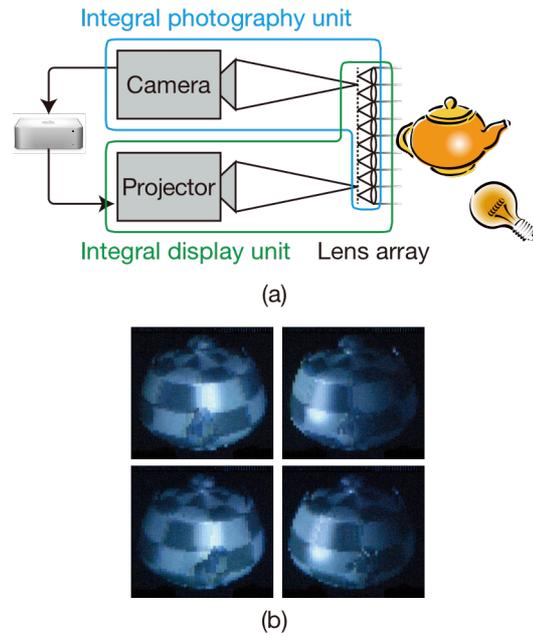


図 3. リフレクタンсフィールド  
ディスプレイ．(a) 光学系，(b) 再生結果．

subsurface light transport,” Proc. SIGGRAPH ’01, pp. 511-518.]. BSSRDF が取得できれば，半透明の対象を含めたありとあらゆる物体をレンダリングできる．しかし，その取得には時間がかかりすぎる問題があった．本研究では図 2 に示すように，コンプレキシセンシングにもとづいて，計測過程に不規則性を導入し計測時間の短縮化を図った[雑誌論文③]．図 2(a)に示すように，プロジェクターと空間光変調器 (SLM) を用いて光線情報を変調する．得られた撮影画像から再構成された BSSRDF が図 2(b)である．提案手法により，計測時間が半分以下になることが実験により確認された．

また，我々は計測した BSSRDF を表現できるリフレクタンсフィールドディスプレイとよばれる図 3 に示すディスプレイシステムを開発した[雑誌論文④]．リフレクタンсフィールドディスプレイは図 3(a)に示すように複眼カメラと複眼プロジェクターを組み合わせて八次元関数である BSSRDF を表現する．リフレクタンсフィールドディスプレイでは任意の照明に応答する立体像再生や半透明物体の表現が可能である．図 3(b)は提案手法により異なる方向からの照明で再生する視差画像が変化する様子が示されている．

我々は提案手法を広角なカメラシステムにも展開した．図 4 に示す手法では光学系の不規則性を散乱体によって実装した[雑誌論文①]．図 4(a)に示すように導入する空孔の密度を変化させることで，広角な方向からの光線をセンサ面に導く散乱体を実現した[Bahaa Saleh and Malvin Teich, Fundamentals of Photonics, (Wiley, New

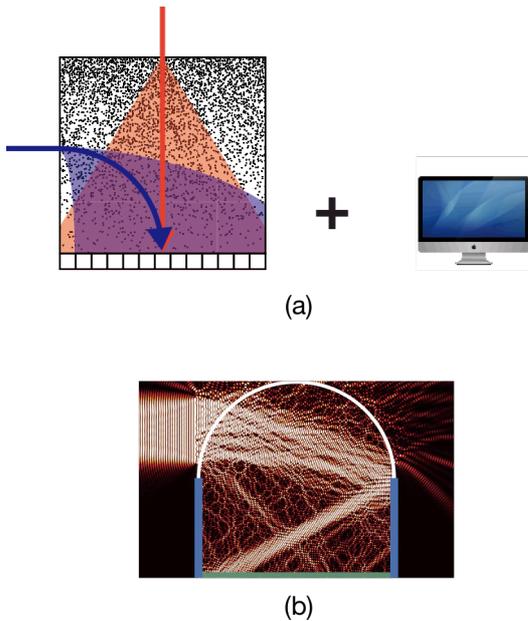


図 4. 散乱体を用いた広角イメージング。  
(a) システム構成, (b) 光伝搬解析結果.

York, 1991).]. 得られた撮影画像から逆問題を解くことで対象情報を再構成できる. 再構成には Richardson-Lucy 法を用いた [William Richardson, “Bayesian-based iterative method of image restoration,” *Journal of Optics Society of America* 62, pp. 55-59 (1972), L. Lucy, “An iterative technique for the rectification of observed distributions,” *Astronomical Journal* 79, pp. 745-754 (1974).]. 本研究では図 4 (b) に示すような 180 度の画角を持つ超小型カメラをデモンストレーションしている. シミュレーションには Finite-difference time-domain 法を用いた [Kane Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* 14, pp. 302-307 (1966).].

本研究期間では, 三次元あるいは多次元ディスプレイシステムにおける入力デバイスと出力デバイスの開発をおこなった. 今後は入力デバイスと出力デバイスの統合を目指す. また, 本手法は入力デバイス, 出力デバイスともに計算コストが高くリアルタイムでも利用は現状では困難である. GPU や FPGA 等で計算処理を実装しリアルタイムでのデモンストレーションを行う予定である.

## 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)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and

Jun Tanida, Compact wide-field-of-view imager with a designed disordered medium, *Optical Review*, 査読有, 22, 2015, pp. 19-24. 10.1007/s10043-015-0060-2

- ② Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, Compound-eye-based multidimensional imager, *SPIE News room*, 査読有, 2014. 10.1117/2.1201412.005656
- ③ Yusuke Tampa, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, Experimental verification of compressive reflectance field acquisition, *Applied Optics*, 査読有, 53, 2014, pp. 3157-3163. 10.1364/AO.53.003157
- ④ Ryoichi Horisaki and Jun Tanida, Reflectance field display, *Optics Express*, 査読有, 21, 2013, pp. 11181-11186. 10.1364/OE.21.011181
- ⑤ Ryoichi Horisaki, Xiao Xiao, Jun Tanida, and Bahram Javidi, Feasibility study for compressive multi-dimensional integral imaging, *Optics Express*, 査読有, 21, 2013, pp. 4263-4279. 10.1364/OE.21.004263

[学会発表] (計 4 件)

- ① Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, Computational imagers with compound-eye and coded aperture, 2nd International Symposium on Microoptical Imaging and Projection, 2015 年 3 月 24 日, イェーナ, ドイツ.
- ② 堀崎 遼一, コンプレッシブセンシングを用いたシングルショット多次元イメージング, *Optics & Photonics Japan 2014*, 2014 年 11 月 06 日, 東京, 日本.
- ③ Yusuke Tampa, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, Complete reflectance function measurement of translucent object using compressive sensing, *Signal Recovery and Synthesis*, 2014 年 7 月 13 日, シアトル, アメリカ.
- ④ 丹羽 佑介, 堀崎 遼一, 谷田 純, 強度変調マスクを用いた光線多重化によるリフレクタンスフィールドの高速取得, *Optics & Photonics Japan 2013*, 2013 年 11 月 12 日, 奈良, 日本.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀崎 遼一 (HORISAKI, Ryoichi)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号: 20598958