

フィルタの動的制御による 実世界光源の4次元ライトフィールドの獲得

中村 基裕^{1,a)} 岡部 孝弘²

概要: 従来, CV や CG では, 点光源などの大きさの無視できる理想的な光源を仮定した画像の解析・生成が行われることが多かった. しかしながら, 実世界の光源はしばしば一定の大きさを持ち, 理想的な光源とは異なる特性を有する. そこで本稿では, より正確な画像の解析・生成を目指して, 一定の大きさを持つ実世界光源の放射強度分布を獲得するための手法を提案する. 提案手法では, 自発光光源から放たれた光が液晶パネルを透過して拡散反射板に入射するときに, その反射光の明るさを手掛かりにして4次元ライトフィールドを求める. 液晶パネルの透過率を動的に制御することで, 計測時間を一定に保ったままで SN 比を大幅に改善できる技術として知られる多重化センシングに基づいて, 4次元ライトフィールドを密に, かつ, 効率的に獲得することが提案手法の特長である. また, プロトタイプシステムを実装して, 提案手法の有効性を確認する.

1. はじめに

物体の見えは, 物体の形状や反射特性だけでなく, シーンの光源環境にも依存する. したがって, 物体の形状や反射特性の推定などの CV におけるイメージベースドモデリング, および, CG や AR・MR における写実的画像の生成・融合において, 光源環境を計測・推定することは極めて重要である.

従来, CV や CG の分野では, 点光源のような大きさを持たない光源や無限遠方光源のような理想的な光源を仮定して画像の解析・生成を行うことが多かった. しかしながら, LED や豆電球のような微小光源を除けば, 実世界光源の多くは一定の大きさを持ち, 被写体から有限の距離に位置するため, 点光源や無限遠方光源のような理想的な光源を仮定した画像の解析・生成は正確ではない.

そこで本稿では, 実世界光源下におけるより正確な画像の解析・生成を実現するために, 一定の大きさを持つ**実世界光源のモデリング**を目的とし, 実世界光源の放射強度分布を獲得する手法を提案する. 具体的には, 図1に示すように, 液晶パネルと拡散反射板からなる装置を用いて, 光源から放たれた光が液晶パネルを透過して拡散反射板に入射するときに, その反射光の明るさを手掛かりにして4次元ライトフィールドを求める.

提案手法では, 計算機により, 液晶パネルの任意の位置

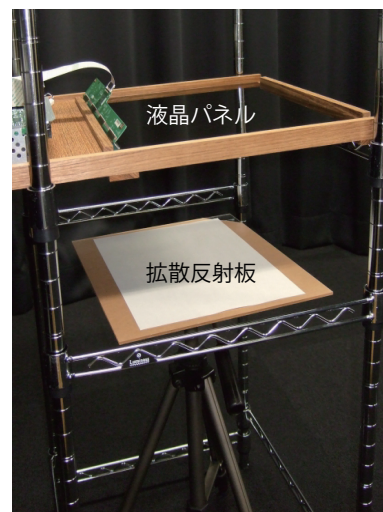


図1 ライトフィールド計測装置

の透過率を動的かつ高速に制御する. 特に, 計測時間を一定に保ったままで画像の SN 比を大幅に改善できる技術として知られている多重化センシングを用いることで, 自発光光源の4次元ライトフィールドを密に, かつ, 効率的に計測する. また, プロトタイプシステムを実装して, 提案手法の有効性を確認する.

本稿の構成は以下のとおりである. 第2節でライトフィールドを紹介したのち, 第3節では関連研究を整理して提案手法の位置付けを明らかにする. 第4節ではフィルタの動的制御により自発光光源のライトフィールドを計測する提案手法を説明する. 第5節で実験結果を報告し, 第6節で

¹ 九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻
² 九州工業大学大学院情報工学研究院知能情報工学研究系
^{a)} m.nakamura@pluto.ai.kyutech.ac.jp

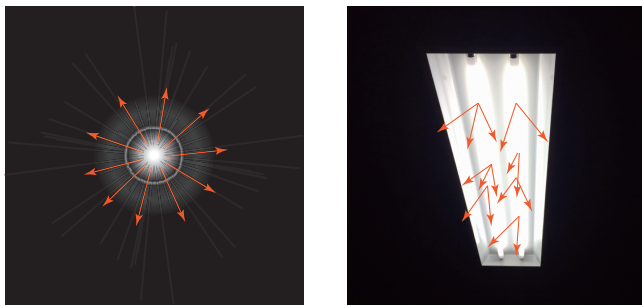


図 2 点光源 (左) と実世界光源 (右)

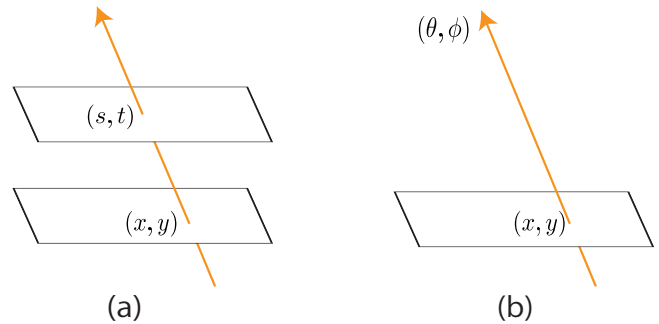


図 3 4次元ライトフィールドの表現

むすぶ。

2. ライトフィールド

図 2 左に示すように、大きさの無視できる点光源は、空間中の一点から光を放射する。したがって、点光源の放射強度分布は、光源位置を中心とする球座標において (θ, ϕ) の方向に放射される光のエネルギーとして記述される。

一方、図 2 右に示すように、一定の大きさを持つ光源は、光源の表面上の様々な場所から様々な方向に光を放射する。したがって、大きさを持つ光源の放射強度分布は、上記のように 2 つの変数 (θ, ϕ) だけを用いて記述することはできない。

一定の大きさを持つ光源の周囲のように、様々な場所から様々な方向に伝播する光線で満たされた空間は、一般に、**ライトフィールド**と呼ばれる。ライトフィールドをモデル化するには、一般に、プレノプティック関数 [1] が用いられる。プレノプティック関数は、時刻 t に、位置 (x, y, z) を通過して (θ, ϕ) 方向に進む、波長 λ の光のエネルギーを記述したもので、 $L(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$ と表記される。簡単のため幾何パラメータ (x, y, z, θ, ϕ) のみを考えると、通常空気中では、光の散乱・吸収は無視できるので、ライトフィールドは 4 つの変数を用いて $L(x, y, \theta, \phi)$ と記述される。このようなライトフィールドを特に **4次元ライトフィールド** という。

4次元ライトフィールドの表現として、図 3(a) のように、3次元空間中の 2 枚の平面と光線との交点 (x, y) および (s, t) による表現と、同図 (b) のように、3次元空間中の 1 枚の平面と光線との交点 (x, y) および進行方向 (θ, ϕ) による表現の二つがある。提案手法では、前者を用いる。

3. 関連研究

従来研究を、(i) 自発光光源の 2次元放射強度分布を獲得する手法、(ii) 自発光光源の 4次元ライトフィールドを獲得する手法、および、(iii) 一般的な 4次元ライトフィールドを獲得する手法に分類して、提案手法との関連を述べる。

自発光光源の 2次元放射強度分布の獲得

前節で述べたように、大きさの無視できる点光源からの放射強度分布は、2次元の関数として表現される。Verbeck

ら [15] は、2次元放射強度分布を計測する基本的な手法として、ゴニオフォトメータを用いた手法を提案している。この手法は光源の周囲でセンサを動かして放射強度を直接計測するものであるが、一度に一方向しか計測できないために、全方向の分布を計測するのに膨大な時間を要する。

これに対して、一度に多数の方向の放射強度を同時に計測することのできる画像ベースの手法が提案されている。Rykowski ら [10] は、半球面ドーム内に点光源を設置して、ドームの内面における反射光をカメラで捉えることにより、一度に 2π ステラジアン放射強度分布を計測する手法を提案している。Tan ら [13] は拡散シートとフラットヘッドスキャナを、Moreno ら [6] はスクリーンとカメラを、河村ら [5] は拡散反射板とカメラを用いて、点光源の放射強度分布を効率良く計測する手法を提案している。

しかしながら、これらの手法は、大きさの無視できる点光源を対象としている。したがって、一定の大きさを持つ光源の 4次元ライトフィールドを計測することができない。

自発光光源の 4次元ライトフィールドの獲得

前節で述べたように、一定の大きさを持つ実世界光源からの放射強度分布は、4次元ライトフィールドで表現される。Ashdown [3] は、自発光光源の 4次元ライトフィールドを計測する基本的な手法として、ゴニオフォトメータを用いた手法を提案している。しかしながら、上述の Verbeck らの手法 [15] と同様に、計測に膨大な時間を要するという問題がある。

4次元ライトフィールドの計測に関しても、2次元放射強度分布の計測と同様に、より効率的な画像ベースの手法が提案されている。Goesele ら [4] は、光源から放たれた光がフィルタを透過して拡散反射板に入射するときに、その反射光の明るさを手掛かりにして 4次元ライトフィールドを計測する手法を提案している。しかしながら、光源の位置を手動で変更したり、フィルタが静的であったりすることから、4次元ライトフィールドを密に、かつ、効率的に計測することは困難である。

Aoto ら [2] は、光源から放たれた光が拡散反射板に入射するときに、その反射光の明るさを手掛かりにして 4次元ライトフィールドを計測する手法を提案している。この手

法は、提案手法や Goesele らの手法 [4] と比較して、透過フィルタを必要としないという点でユニークである。しかしながら、拡散反射は入射光分布に対してローパスフィルタとして振る舞うことから [9]、鏡面球アレイを用いた手法 [14] などと比較して、4次元ライトフィールドを高精度で推定することは容易ではないと考えられる。

一般的な4次元ライトフィールドの獲得

上記のような自発光光源の4次元ライトフィールドの計測に特化した手法以外にも、一般的なシーンの4次元ライトフィールドを計測する手法が多数提案されている。

一つは、カメラアレイ [16] や鏡面球アレイ [14] を用いてシーンの4次元ライトフィールドを計測するアプローチである。このようなアプローチは、自発光光源の4次元ライトフィールドを広範囲にわたり計測できるという利点がある。その一方で、カメラや鏡面球を密に配置することが容易ではないために、自発光光源の4次元ライトフィールドを密に計測するには適さないと考えられる。

もう一つは、マイクロレンズアレイ [7] や符号化絞り [8] などを用いた単体のカメラで4次元ライトフィールドを計測するアプローチである。このようなアプローチは、自発光光源の4次元ライトフィールドを密に計測できるという利点がある。その一方で、計測できる範囲が限られてしまうために、自発光光源の4次元ライトフィールドを広範囲にわたり計測するには適さない。

4. 提案手法

提案手法では、図1に示す液晶パネルと拡散反射板からなる装置を用いて、実世界光源の4次元ライトフィールドを獲得する。提案手法では、計算機により液晶パネルの透過率を動的かつ高速に制御することにより、4次元ライトフィールドを密に、かつ、効率的に獲得する。

4.1 基本的な計測手法

図1の装置を用いた4次元ライトフィールドの基本的な計測手法について述べる。図4のように、液晶パネルの単一領域のみの透過率を1とし、光源から放たれた光がその領域を透過して拡散反射板に入射する様子をカメラで撮影する。そして、拡散反射板上におけるその反射光の明るさを手掛かりにして、ライトフィールドを計算する。なお、液晶パネル、拡散反射板、および、カメラの幾何学的関係は、事前に校正済みである。

しかしながら、上記のように液晶パネルの単一領域のみの透過率を1として計測する手法には問題がある。ライトフィールドを密に計測するためには、透過率を1とする単一領域のサイズを小さくする必要があるが、サイズを小さくすればするほど、拡散反射板に到達する光量もまた小さくなってしまふ。したがって、計測時間を一定に保ったままサイズを小さくすると、撮影される画像に含まれ

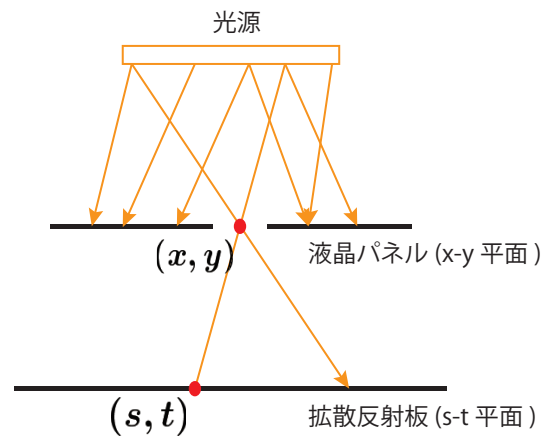


図4 基本的な手法

るノイズの量が相対的に増大してしまい、得られるライトフィールドの精度が低下してしまう。一方、撮影された画像の画質を一定に保ったままサイズを小さくすると、一枚あたりの露光時間を長くする必要があるために、計測時間(露光時間 × 画像の枚数)が増大してしまう。以上のように、ライトフィールドを密に計測しようとすると、精度もしくは効率のいずれかが犠牲になってしまう。

4.2 多重化センシングに基づく計測手法

前述の基本的な手法では、4次元ライトフィールドを密に、かつ、効率的に計測することが困難であった。そこで提案手法では、計測時間を一定に保ったままSN比を大幅に改善することのできる技術として知られる**多重化センシング (Multiplexed Sensing)** [11], [12] を用いる。

具体的には、図5左に示すような単一領域のみの透過率を1としたフィルタの代わりに、図5右に示すような複数領域の透過率を1としたフィルタを用いて、その透過光により照らされた拡散反射板の画像からライトフィールドを求める。多重化センシングで用いるフィルタは、単一領域フィルタに対して S 行列 [11], [12] を掛けることで容易に作成することができる。また、多重化センシングによる計測で撮影した画像に対して S^{-1} を掛けることで、単一領域のみの透過率を1としたときの画像が復元できる。

単一領域の数を $(n - 1)$ とすると、単一領域のみの透過率を1とする基本的な手法のSN比 $\text{SNR}_{\text{single}}$ と多重化センシングに基づく提案手法のSN比 $\text{SNR}_{\text{multi}}$ の関係は、 n が大きいときに、最大で

$$\frac{\text{SNR}_{\text{multi}}}{\text{SNR}_{\text{single}}} \simeq \frac{\sqrt{n}}{2} \quad (1)$$

となる [11], [12]. そのため、提案手法は、SN比を一定としたときに、ライトフィールドをより密に、より高速に計測することが可能である。

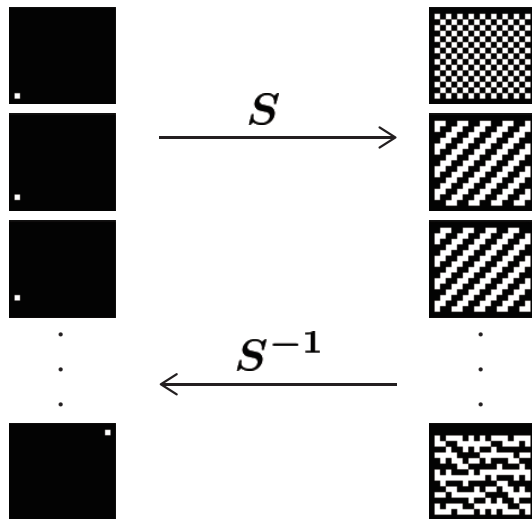


図 5 多重化センシング

5. 実験

5.1 多重化センシングの効果

多重化センシングによるノイズ低減を確認するための実験を行った。実験では、単一領域の数を 255 とし多重化センシングによる計測を行ない、ある領域 D のみの透過率を 1 としたときの拡散反射板の画像を復元した。一方で、実際に領域 D のみの透過率を 1 としたときの拡散反射板の画像を撮影した。そして、多重化センシングで復元した画像と実際に撮影した画像を真値 (領域 D のみの透過率を 1 とし撮影した 1000 枚の画像の平均) と比較した。なお、実験では図 6 のような蛍光灯を用いた。

図 7 に実験結果を示す。多重化センシングによって復元した画像 (b) は、全体的な明るさの分布が真値 (c) とほぼ一致していることがわかる。一方、実際に撮影した画像 (a) は、真値 (c) に比べてノイズによるザラツキが顕著であることがわかる。

RMSE は、実際に撮影した画像が 5.98、多重化センシングによって復元した画像が 2.56 となり、多重化センシングで復元した画像に 2.34 倍のアドバンテージがあった。これらのことから、多重化センシングに基づく提案手法は、単一領域のみの透過率を 1 とする基本的な手法に比べて、ノイズの少ない画像を獲得できることがわかる。なお、多重化センシングによる改善の程度が式 (1) の理想的な値よりも小さいのは、実験に使用した光源の特性や光源と液晶パネルとの距離などが原因であると考えられる。

5.2 画像の再構成

獲得した 4 次元ライトフィールドの精度を検証するために、画像再構成の実験を行った。実験では、獲得した 4 次元ライトフィールドを用いて、拡散反射板の高さを計測時の高さから変化させたときの画像を再構成した。



図 6 ノイズ低減確認に使用した光源

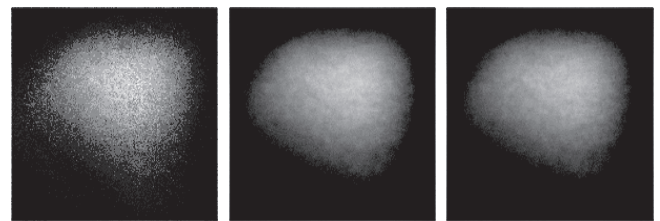


図 7 多重化センシングの効果

図 8 のように、ある単一領域を透過する光線を考える。ここで、計測時の位置 (高さ) の拡散反射板の法線を \mathbf{n} 、単一領域から光線と拡散反射板の交点までの距離を R 、再構成時の高さの拡散反射板の法線を \mathbf{n}' 、単一領域から光線と拡散反射板の交点までの距離を R' 、光線と逆向きのベクトルを \mathbf{l} とする。この光線の計測時/再構成時の拡散反射板による反射光の明るさをそれぞれ I および I' とすると、それらの間には

$$I' = \frac{\mathbf{n}'^T \mathbf{l} R^2}{\mathbf{n}^T \mathbf{l} R'^2} I \quad (2)$$

という関係が成り立つ。すべての単一領域について、このようにして計算した輝度を足すことにより、すべての単一領域の透過率を 1 としたときの画像を再構成することができる。

図 9 のように、2 台のプロジェクタをそれらの光線が交差するように配置して、4 次元ライトフィールドを計測した。そして、獲得した 4 次元ライトフィールドを用いて、計測時よりも拡散反射板の高さが高いときと低いときの画像を再構成した。同図からわかるように、拡散反射板の高さが高いときは、拡散反射板上の像が小さくなり、2 つの像の交わりが大きくなる。一方、拡散反射板の高さが低いときは、拡散反射板上の像が大きくなり、2 つの像の交わりが小さくなる。

図 10 に結果をまとめる。それぞれ、計測時の高さにおける拡散反射板の画像 (a)、計測時よりも高くしたときの再構成画像 (b) と実際の画像 (c)、および、計測時よりも低くしたときの再構成画像 (d) と実際の画像 (e) である。

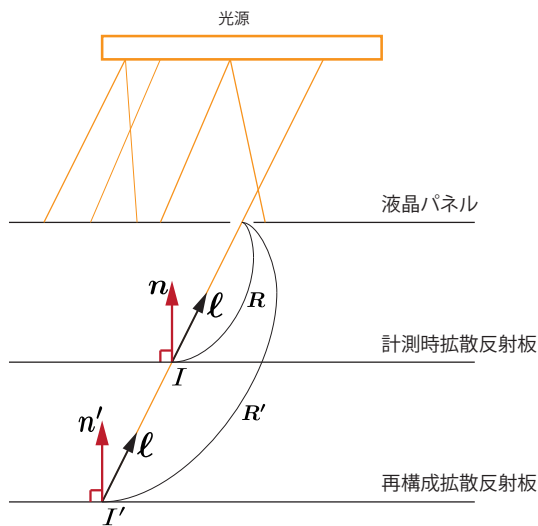


図 8 4次元ライトフィールドによる画像再構成

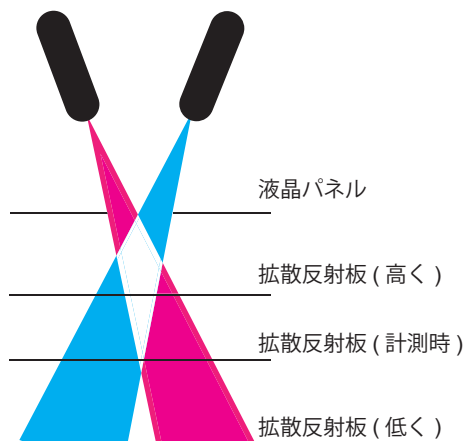
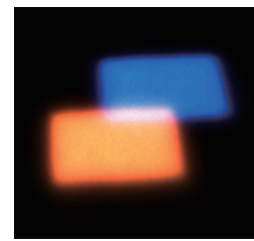


図 9 画像再構成セッティング

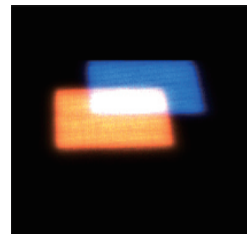
像や重なり的大小関係が上述のとおりとなっており、また、再構成画像と実際の画像がほぼ一致していることから、提案手法がうまく働いていることが確認できる。一方で、像の位置や明るさ・色が完全には一致していないこともわかる。この原因として、拡散反射板（とみなしている物体表面）の反射率や法線に若干のムラがあることや、液晶パネル・拡散反射板・カメラの幾何学的校正の精度が十分ではなかったことが考えられる。

6. むすび

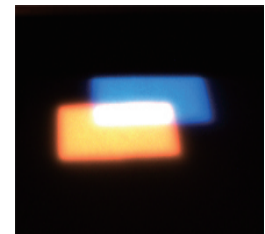
本稿では、液晶パネルと拡散反射板を用いて、一定の大きさを持つ実世界光源の4次元ライトフィールドを獲得する手法を提案した。具体的には、光源から放たれた光が液晶パネルを透過して拡散反射板に入射するとき、その反射光の明るさを手掛かりにして4次元ライトフィールドを求めた。計算機により液晶パネルの透過率を動的に、かつ、高速に制御することで、多重化センシングに基づいて、4次元ライトフィールドを密に、かつ、効率的に獲得した。



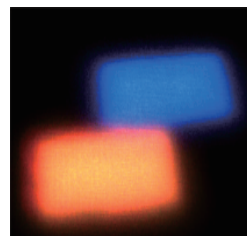
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

図 10 獲得した4次元ライトフィールドによる再構成画像

また、プロトタイプシステムを実装して、提案手法の有効性を確認した。

今後は、圧縮センシングなどを含めた透過率パタンの最適化、獲得したライトフィールドのCVやCGへの応用、また、自発光光源以外の4次元ライトフィールドの獲得についても検討したい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号：24650077）の助成を受けた。

参考文献

- [1] E. Adelson and J. Bergen, "The plenoptic function and the elements of early vision," *Computational Models of Visual Processing*, MIT Press, pp.3-20, 1991.
- [2] T. Aoto, T. Sato, Y. Mukaigawa, and N. Yokoya, "Linear estimation of 4-D illumination light field from diffuse reflections," In *Proc. ACPR2013*, pp.495-500, 2013.
- [3] I. Ashdown, "Near-field photometry: a new approach," *Journal of Illuminating Engineering Society*, Vol. 22, No. 1, pp.163-180, 1993.
- [4] M. Goesele, X. Granier, W. Heidrich, and H. Seidel, "Accurate light source acquisition and rendering," In *Proc.*

ACM SIGGRAPH2003, pp.621–630, 2003.

- [5] 河村拓哉, 岡部孝弘, 佐藤洋一, “拡散反射板を用いた光源の放射輝度分布の計測,” 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2013-CVIM-186(7), pp.1–5, 2013.
- [6] I. Moreno and C.-C. Sun, “Three-dimensional measurement of light-emitting diode radiation pattern: a rapid estimation,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 7, pp.1–6, 2009.
- [7] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” Stanford Tech Report CTSR 2005-02, 2005.
- [8] C.-K. Liang, T.-H. Lin, B.-Y. Wong, C. Liu, H. Chen, “Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition,” In *Proc. ACM SIGGRAPH2008*, 2008.
- [9] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, “A signal-processing framework for inverse rendering,” In *Proc. ACM SIGGRAPH2001*, pp.117–128, 2001.
- [10] R. Rykowski and H. Kostal, “Novel approach for LED luminous intensity measurement,” In *Proc. SPIE*, Vol. 6910, 2008.
- [11] Y. Schechner, S. Nayar, and P. Belhumeur, “A theory of multiplexed illumination,” In *Proc. ICCV2003*, pp.808–815, 2003.
- [12] N. Sloane, T. Fine, P. Phillips, and M. Harwit, “Codes for multiplex spectrometry,” *Applied Optics*, Vol. 8, Issue 10, pp.2103–2106, 1969.
- [13] H. Tan and T. Ng, “Light-emitting-diode inspection using a flatbed scanner,” *Optical Engineering*, Vol. 47, No. 10, 2008.
- [14] J. Unger, A. Wenger, T. Hawkins, A. Gardner, and P. Debevec, “Capturing and Rendering with Incident Light Fields,” In *Proc. EGSR2003*, pp.1–10, 2003.
- [15] C. Verbeck and D. Greenberg, “A comprehensive light-source description for computer graphics,” *IEEE CG&A*, Vol. 4, No. 7, pp.66–75, 1984.
- [16] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy, “High performance imaging using large camera arrays,” In *Proc. ACM SIGGRAPH2005*, pp.765–776, 2005.