

Plane-to-Ray ライトトランスポートの計測に基づく 半透明物体内部のリアルタイムイメージング

久保 尋之^{1,2,a)} Suren Jayasuriya^{2,3} 岩口 堯史^{1,2} 船富 卓哉¹ 向川 康博¹ Srinivasa Narasimhan²

概要

本デモンストレーションでは、エピポーラ幾何に基づく時間同期式のプロジェクターカメラシステムを用いて、適切な同期遅延時間と露光時間で撮影することでライトトランスポートを計測し、シーンの半透明物体の内部構造をリアルタイムに可視化できるシステムの実演を行う。特に人の肌の内部における血管を可視化することで、メディカルイメージングへの応用の可能性を提案する。

1. はじめに

シーン中の光の伝搬は、照明と観測装置とを結ぶ光の伝搬を示すライトトランスポート行列 [1], [2], [7] (以下、ライトトランスポート) によって表すことが出来る。このライトトランスポートを用いるとシーンの様々な性質を推定することが可能であるが、計測には膨大な撮影回数や時間、記憶容量が必要になることが課題である。

そこで、ライトトランスポートをいくつかの成分に大別したうえでそれぞれを個別に計測することが一般的で、例えば偏光の違いを利用して拡散反射光成分と鏡面反射光成分とを分離する手法 [3], [4], [5] や、空間的周波数の違いを利用して直接光成分と大域光成分とに分離する手法 [6] などが挙げられる。近年では、平行化 (rectification) されたプロジェクターカメラシステムを用いて直接光と間接光がエピポーラ幾何学的に満たす性質の違いを利用して、直接反射成分と間接光成分をそれぞれ個別に取得する手法 [8], [9] が知られている。また、照明を多重化する方法も提案されており、Hadamard コードを利用した手法 [11], [12] や符号化露光によるだけの補償 [10] などが挙げられる。より近年では、Episcan3D[8] はラスタキャン方式で映像をシーンに投影することが可能なレーザープロジェクターとローリングシャッター方式のカメラとを時間的に同期して撮影することで、エピポーラ光と非エピポーラ光を分離したイメージ

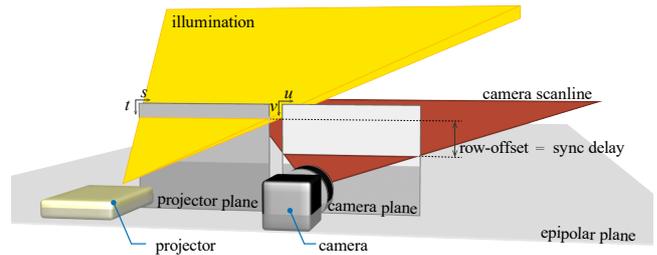


図 1 本研究で用いるプロジェクターカメラシステムの模式図。レーザープロジェクターとローリングシャッターカメラとがエピポーラ平面に沿ってシーンを水平に照明・撮影ながら上下にスイープする。

ング (以下、エピポーラ画像、非エピポーラ画像) を実現した。

本稿では、Episcan3D のセットアップを用いて非エピポーラ光として観測される間接光成分に対して、近距離で生じたものか遠距離からのものかを区別して取得する手法を提案する。図 1 には本研究で使用するプロジェクターカメラシステムを模式的に表している。カメラとプロジェクターは平行化されているものとし、プロジェクターがあるエピポーラ平面に沿って照明を照射するとき、カメラが同一のエピポーラ面を撮影し、そのままエピポーラ面を共有しながら上から下までスイープする。このときカメラで得られた光線にはエピポーラ光だけが含まれており、その結果としてエピポーラ画像を得ることが出来る [8]。本手法では、プロジェクターとカメラの同期に意図的に遅延時間を挿入することで、照明と観測が一定の距離を保ったままシーン全体を撮像することが可能であり、さらにカメラの露光時間を制御することによってプロジェクターがシーンを照明する領域を調節することができる。このように同期遅延時間と露光時間との制御によって、様々な性質の間接光を選択的に取得することが可能である。本デモンストレーションでは、適切な同期遅延時間と露光時間で得られるシーンの間接光成分を用いることで、特に人肌などの半透明物体における内部構造の可視化が可能であることを実演を通じて実証する。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² Carnegie Mellon University

³ Arizona State University

^{a)} hkubo@is.naist.jp

2. Plane-to-Ray ライトトランスポート

2.1 エピポーラ幾何とライトトランスポート行列

本節ではまず、本研究で用いるプロジェクターカメラシステムにおけるエピポーラ幾何について述べる。なお、表記は先行研究 [8], [9] に従った。図 1 に示すようにプロジェクタとカメラは平行化されており、またそれぞれはピンホールモデルであるものとする。なお、簡単のために垂直方向の解像度は等しいものとした。プロジェクタのスクリーン座標系を (u, v) 、カメラのスクリーン座標系を (s, t) とおき、プロジェクタのある行 u を通るエピポーラ平面に当てた照明がシーンから反射し、カメラのピクセル (s, t) を通る光線として観測されるとき、本稿ではその光の伝搬を Plane-to-Ray ライトトランスポートと呼ぶ。

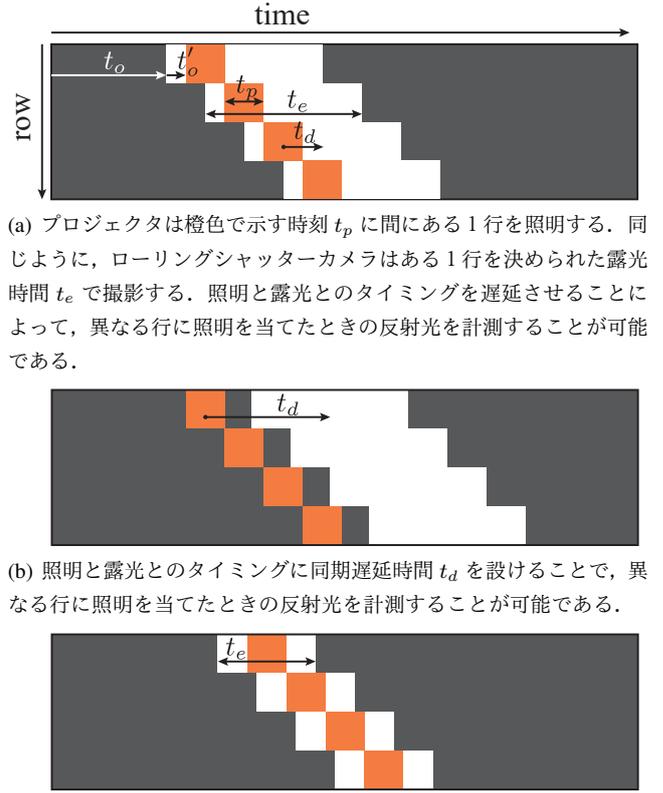
直接光はシーンで 1 度しか反射しないため、そのような反射光の直接光成分は必ずプロジェクタで照明した u に対応するエピポーラ面を通して観測される。一方で、間接光はシーンで複数回の反射・散乱を生じるため、間接光成分は必ずしもカメラと同じエピポーラ面に到達するわけではなく、むしろ大部分はプロジェクタの照明と異なる離れた行に対応するエピポーラ面を通してカメラで観測される [8]。このように、シーンにおける直接光や間接光は照明を当てるエピポーラ面とカメラで観測するエピポーラ面との相対的な距離によって特徴付けることができ、後述する同期遅延時間と露光時間とを個別に設定して撮像することで、様々な性質の間接光を選択的に取得することが可能である。

2.2 本手法における観測と同期遅延時間・露光時間との関係の定式化

まず、本手法によって観測される Plane-to-Ray ライトトランスポートの性質を明らかにするために、本研究で用いるプロジェクターカメラシステムにおけるシーンへの照明と撮像とのタイミングの関係を、同期遅延時間と露光時間とを用いて定式化する。まず、スキャンライン方式のレーザープロジェクタがある 1 行に照明を当てるために要する時間を t_p とし、さらに撮影時の露光時間を t_e とおく。また、プロジェクタの垂直同期信号の開始時刻からカメラの最初の列が露光を始めるまでの時間を t_o とし、さらにプロジェクタがシーンに照明を開始するまでの時間を t'_o とした。図 2 には各行へのプロジェクタによる照明とカメラの露光とのタイミングチャートを示す。本研究では、同期遅延時間 t_d を、ある行に照明が当たっている中央の時刻と、ある行の計測のために露光している中央の時刻との差を

$$t_d = \frac{1}{2}t_e - \frac{1}{2}t_p - t'_o \quad (1)$$

と定義するとき、 $t_d > t_e/2$ が正の値の場合には、カメラに



(a) プロジェクタは橙色で示す時刻 t_p に間にある 1 行を照明する。同じように、ローリングシャッターカメラはある 1 行を決められた露光時間 t_e で撮影する。照明と露光とのタイミングを遅延させることによって、異なる行に照明を当てたときの反射光を計測することが可能である。

(b) 照明と露光とのタイミングに同期遅延時間 t_d を設けることで、異なる行に照明を当てたときの反射光を計測することが可能である。

(c) 露光時間 t_e を減らすことで隣接した行に当たる照明を減少させることができ、この例では (a) よりも間接光の影響を減少させることができる。

図 2 各行へのプロジェクタによる照明とカメラの露光のタイミングチャート。

よる各エピポーラ面の観測はそれぞれ下方のエピポーラ面から照明されていることになり、同様に負の場合は上のエピポーラ面から照明されていることに相当する。さらに、 $0 \leq |t_d| \leq t_e/2$ を満たす場合、あるエピポーラ面の露光時間中に同じエピポーラ面をプロジェクタが照明することから、主として直接光が観測されることになる。図 2(c) に示すように、一般的にエピポーラ画像とは $t_d = 0$ かつ t_e をできるだけ小さくとした際の画像のことを指し、ほとんどの場合において直接光成分が支配的である [8]。

3. 実験と結果

3.1 ハードウェア

本手法は、先行研究 [8] に示されるものと同じプロトタイプを利用しており、Celluon 社製のプロジェクタ *PicoPro* (解像度 1280×720)、及び IDS 社製のカラーカメラ *UI-3250CP-C-HQ* およびモノクロカメラ *UI-3250CP-M-GL* を用いた。なお、本カメラはグローバルシャッターとローリングシャッターの両方を切り替えて使用可能であり、さらにシャッターのトリガとしてプロジェクタの垂直同期信号を用いた。

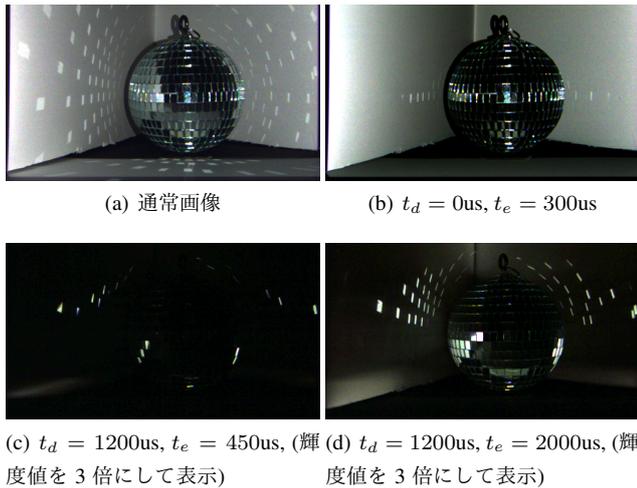


図 3 同期遅延と露光時間による撮像結果. 間接光が帯状に観測される. (a) は通常の画像, (b) はエピソード画像, (c) は間接光, (d) は露光時間を増加させた結果である. (c) と比較して (d) は水平の帯状に現れる間接光がより太くなっている.

3.2 距離に応じた間接光のイメージング

まず, 本計測装置を用いて, 同期遅延と露光時間とを制御することにより取得される画像の例を示す. 図 3 は拡散面でできた壁の隅の前に多数の鏡面からなるディスコボールが置かれているシーンであり, (a) には人の眼に見えるような通常の画像 (以下, 通常画像) を表示している. 壁面にはプロジェクタの照射光の直接反射光に加え, プロジェクタからディスコボールにあたった光が鏡面反射によって壁面を照らす間接反射光が広がっている. (b) は同期遅延 $t_d = 0\mu s$ の場合の撮影結果で, 前述の間接反射光がほとんど見られなくなっている. (c), (d) は同期遅延が $t_d = 1200\mu s$, 露光時間がそれぞれ $t_e = 450, 2000\mu s$ とした場合の撮影画像である. どちらもエピソード幾何を満たすタイミングで露光していないため直接反射光は含まれておらず, そのため非常に暗い画像になっていることがわかる. 一方, (c) の上部にはディスコボールからの間接反射光が見られるが, (a) と比較してみると一部の近距離の間接光のみが現れていることがわかる. (d) ではそれがより広い範囲に現れていて, 露光時間を増加させるに従って短距離だけでなく長距離の間接光が観測されていることがわかる.

さらに, 様々な同期遅延時間と露光時間とで計測した画像を図 4 に示す. 同期遅延時間が $t_d = 0\mu s$ の画像 (中央の縦 1 列) をみると, 露光時間が長くなるにつれて, 直接光だけでなくより遠い距離からの間接光が含まれるようになっていくことがわかる. さらに, 同期遅延時間の絶対値が大きくなるにつれてディスコボールから離れた位置の間接光成分が現れるようになっていく. 従って, 同期遅延時間や露光時間を操作することで, 距離に応じた間接光のイメージングが可能となった.

3.3 肌の内部状態の可視化

本節では, 適切な同期遅延時間を用いることで肌の内部状態の可視化ができることを示す. 通常, 肌に照明を当てて観察すると, 肌の表面で直接に反射する光が強すぎて内部の血管は僅かにしか見えない (図 5(a),(d)). また, エピソード画像 (b),(e) には肌の表面での反射が支配的になるため, 内部の血管はほとんど観察できなくなる. そこでこの直接光を避けるように $t_d = 600\mu s, t_e = 500\mu s$ として近距離の間接光のみを観測したところ, (c), (f) に示すように肌の内部の血管がよく見えるようになった. 本手法は観測の際にポストプロセスを必要としないためリアルタイムに実行できる点が特徴である. 本技術の応用として, 高齢者への点滴における静脈路確保の補助などが挙げられる. なお, 本実験で用いた t_d, t_e は経験的に定めた値を用いた.

4. まとめ

本稿では, 様々な性質の間接光を選択的に取得して得られる Plane-to-Ray ライトトランスポートの計測について述べ, 実験を通して半透明物体の内部の構造を可視化がリアルタイムに実行可能であることを示した. ただし, 実験で用いた同期遅延時間と露光時間は経験的に定めており, 装置と被写体との距離関係や血管のある深さなどによっても最適な設定は異なると予想される. これらの最適なパラメータを自動で推定する手法の実現は今後の課題である. また, リアルタイム性を担保しながら少数の計測を追加し, 情報量を増やして可視性を向上させることも課題であると言える.

4.1 謝辞

本研究は, 日本学術振興会 頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム, 科研費 15K16027, および奈良先端科学技術大学院大学 人材循環のハブとなる国際協働事業展開プロジェクトの助成を受けたものです.

参考文献

- [1] Debevec, P., Hawkins, T., Tchou, C., Duiker, H.-P., Sarokin, W. and Sagar, M.: Acquiring the reflectance field of a human face, *ACM SIGGRAPH*, pp. 145–156 (2000).
- [2] Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P. and Battaile, B.: Modeling the interaction of light between diffuse surfaces, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, ACM, pp. 213–222 (1984).
- [3] Lin, S., Li, Y., Kang, S. B., Tong, X. and Shum, H.-Y.: Diffuse-specular separation and depth recovery from image sequences, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Springer, pp. 210–224 (2002).
- [4] Ma, W.-C., Hawkins, T., Peers, P., Chabert, C.-F., Weiss, M. and Debevec, P.: Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination, *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, Eurographics Association, pp. 183–194 (2007).

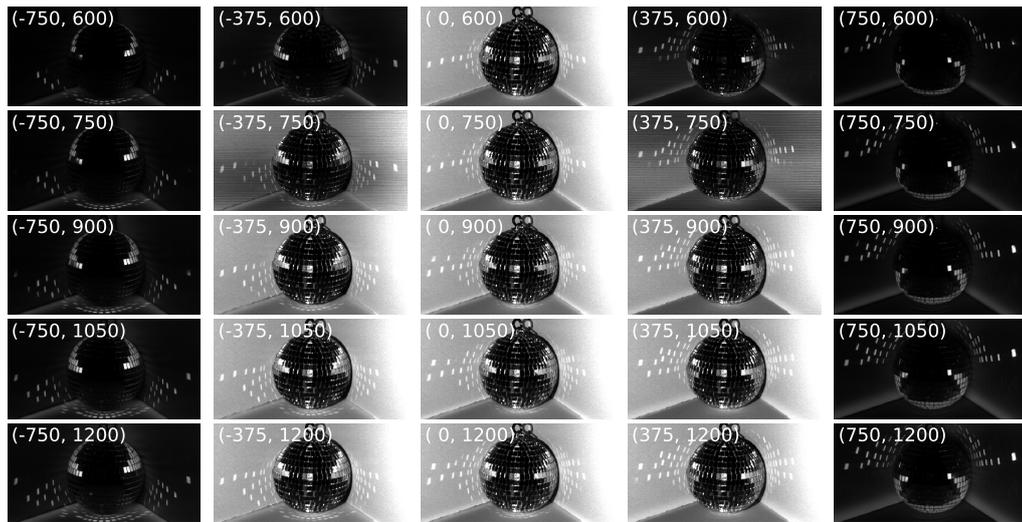


図 4 異なる同期遅延時間（横軸）と露光時間（縦軸）で撮像した結果。図中の値 (t_d, t_e) はマイクロ秒。なお全ての画像は見やすいように強調処理した。

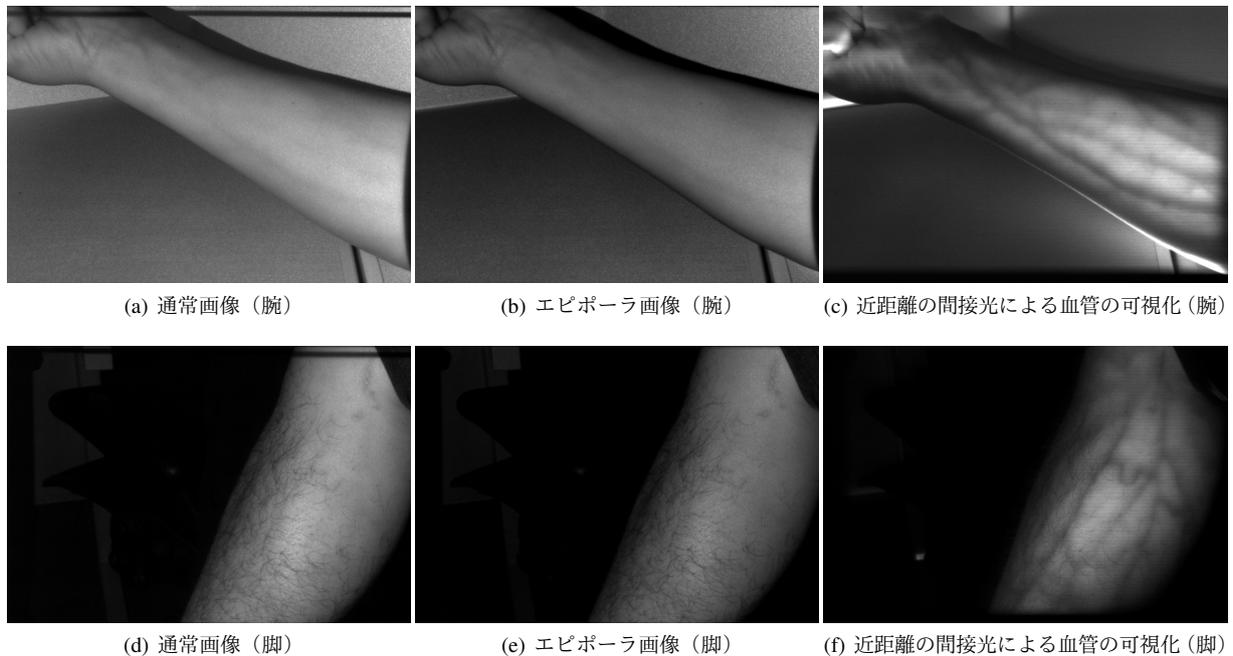


図 5 近距離の間接光による肌の内部状態の可視化

- [5] Nayar, S. K., Fang, X.-S. and Boulton, T.: Separation of reflection components using color and polarization, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 21, No. 3, pp. 163–186 (1997).
- [6] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D. and Raskar, R.: Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 25, No. 3, ACM, pp. 935–944 (2006).
- [7] Ng, R., Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 22, No. 3, ACM, pp. 376–381 (2003).
- [8] O’Toole, M., Achar, S., Narasimhan, S. G. and Kutulakos, K. N.: Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 4, p. 35 (2015).
- [9] O’Toole, M., Mather, J. and Kutulakos, K. N.: 3d shape and indirect appearance by structured light transport, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3246–3253 (2014).
- [10] Raskar, R., Agrawal, A., Tumblin, J., Raskar, R., Agrawal, A. and Tumblin, J.: Coded exposure photography, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 3, p. 795 (2006).
- [11] Ratner, N. and Schechner, Y. Y.: Illumination Multiplexing within Fundamental Limits, *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, pp. 1–8 (2007).
- [12] Schechner, Y. Y., Nayar, S. K. and Belhumeur, P. N.: Multiplexing for optimal lighting, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 29, No. 8, pp. 1339–1354 (2007).