

プロジェクターカメラシステムの同期遅延と走査速度の制御にもとづく光伝播の計測と応用

上田 朝己¹ 久保 尋之¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要: プロジェクターでシーンを照明したときの様子をカメラで撮影することで、シーンでの光伝播を計測し、シーンの様々な光学的性質を推定できることが知られている。本研究では、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を用いて撮像タイミングを同期し、さらにローリングシャッターカメラの走査速度を制御することによって、従来とは異なるモダリティでライトトランスポート行列の取得が可能である。本稿では、実際に構築したシステムを用いて取得した光伝播を示し、本手法の有効性とその応用について述べる。

1. はじめに

シーンに照射された光は、反射や屈折、表面下散乱などの光学現象を繰り返しながらシーン中を伝播し、様々な経路を通過してカメラに到達する。このような光の伝播をライトトランスポートと呼び、この計測を通じてシーン中で起こる反射や表面下散乱などの光学現象や物体の形状など、様々な情報を推定することが可能である。このようなライトトランスポートを推定する手法を確立するために、コンピュータビジョンの研究分野では古くから多くの研究が取り組まれている。

従来、プロジェクターからの照明を変化させ、その応答をカメラで観測することでシーンのライトトランスポートを推定する試みが行われてきた。これらはプロジェクターとカメラの間での伝達を解析する手法であり、この伝達はライトトランスポート行列として表現されてきた。しかし、ライトトランスポート行列を用いてシーンの解析を行う手法は計測回数や時間を要するという課題があった。

近年、ラスタスキャンできる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のライン走査を同期させ、ライトトランスポート行列の主要な部分をシングルショットで取得し、シーンの特徴を抽出する手法が提案されている [5], [6]。この原理を応用し、本研究では、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の同期に遅延時間と走査速度の制御を加え、ライトトランスポート行列のうち従来とは異なるスライスを実行して取得する手法を提案する。さらに、配置を適切に構成したプロジェ

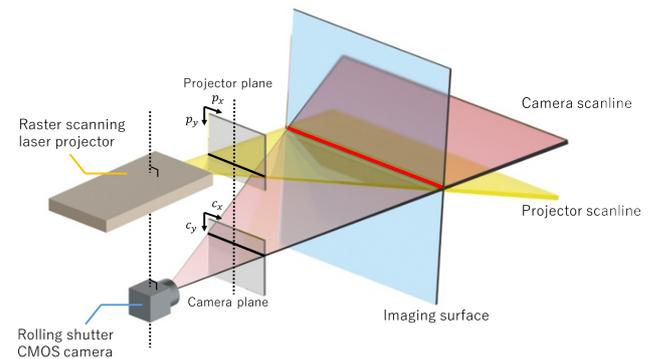


図 1: 本研究で用いるプロジェクターカメラシステムの模式図。

クターカメラシステムに提案手法を適用することで、シーンから特定の奥行きと傾きを持つ面からの反射光のみをシングルショットで撮像することが可能となることを示す。

本論文の構成を以下に述べる。2章でライトトランスポート行列の取得に関する先行研究から本研究の位置付けを明らかにする。3章では、本研究で用いるライトトランスポート行列を定義し、4章で本手法に用いるプロジェクターカメラシステムの同期とそれによって切り取られるライトトランスポート行列の領域について述べる。5章で配置を適切に構成したプロジェクターカメラシステムに提案手法を適用することで可能となるイメージングについて述べ、6章で実際に構築したシステムで撮像した結果を示す。7章でまとめと今後の展望について述べる。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

2. 関連研究

これまでにシーンのライトトランスポートを計測するために、プロジェクタとカメラを用いた方法が提案されている。Nayar ら [3] や Reddy ら [8] は、シーン中のライトトランスポートにおける直接光成分と大域光成分とを空間周波数の違いを用いて分離した。しかし、これらの手法はプロジェクタがパターン光の位相を変えながら照明し、カメラで複数回撮影する必要がある。

O'Toole ら [6] は、レーザープロジェクタとローリングシャッターカメラのラスタ走査のタイミングを同期させることで、ライトトランスポート行列から直接光成分に該当するスライスをシングルショットで取得することを可能とした。Kubo ら [2] はこのシステムを拡張し、遅延時間とカメラの露光時間を適切に設定することで、ライトトランスポートの間接光成分を選択的に取得できることを示した。また [6] には、プロジェクタとカメラを同列上に配置することで、プロジェクタとカメラの視差を利用して特定の奥行きにある平面からの反射光のみを取得できることも示されている。

Wang ら [9] はこのアイデアを発展させ、ガルバノミラーを用いてレーザーを走査し、これに同期してラインセンサで撮影することで、3次元空間中に曲面を任意に設定し、そこから反射光だけを取得する手法を提案した。Kubo ら [2] が行ったようなカメラの露光時間による制御と異なり、装置の構築と制御は容易ではない。

本研究では、プロジェクタとカメラの同期システムに走査速度の自由度を加えることで従来とは異なるスライスでライトトランスポート行列を取得する方法を提案する。さらに露光時間を制御することでライトトランスポート行列のスライスを選択的に取得する。

3. ライトトランスポート行列

シーンでの光の伝播は、シーンへの入射光と観測光との関係を示すライトトランスポート行列 [1], [4] を用いて表すことができる。ライトトランスポート行列は、プロジェクタからの照明 $L(p_x, p_y)$ 上の各ピクセルから出射した光線がシーンを伝播した後、カメラ画像 $I(c_x, c_y)$ 上のピクセルで観測される光の強度を表したものである。このライトトランスポート行列 $T(c_x, c_y, p_x, p_y)$ を用いると、プロジェクタカメラシステムで取得される画像を次式によって定式化することができる。

$$I(c_x, c_y) = \int T(c_x, c_y, p_x, p_y) L(p_x, p_y) dp_x dp_y \quad (1)$$

この4次元のライトトランスポート行列を先行研究 [6], [7] に従って2次元で表記したものが図2(a)である。

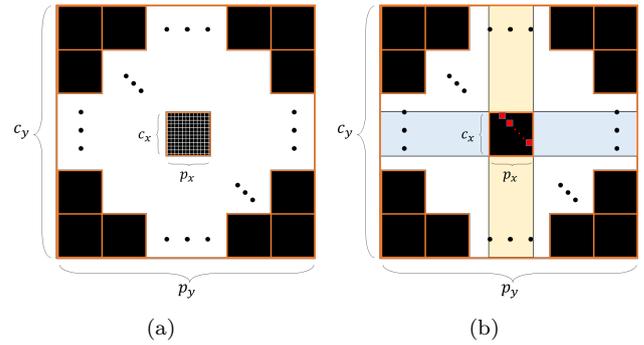


図 2: ライトトランスポート行列を2次元で表記した図。(a) (p_y, c_y) 上の各ブロック毎に (p_x, c_x) サイズの要素を持つ。(b) 赤色の要素は図1のように縦に並べたレーザープロジェクタとローリングシャッターカメラによってある時間に取得される領域 [6]。1行の照明と露光によって (p_y, c_y) 上の1ブロックのみを取得することができる。

4. 同期システムとライトトランスポート行列の取得領域

一般的なプロジェクタカメラシステムによってシーンのライトトランスポート行列を計測することが可能であるが、1回の照明と撮影によって取得可能なライトトランスポート行列は、 (p_x, p_y) を固定したスライスである。そのため、先行研究ではプロジェクタによる照明方法を様々に工夫することで効率的なライトトランスポート行列の推定や復元に取り組んでいる。本研究では、先行研究 [2], [6] の同期システムのスイープ速度に差を与えることで、ライトトランスポート行列のうち、従来とは異なる傾きのスライスを取得する方法を提案する。

4.1 照明と露光の同期

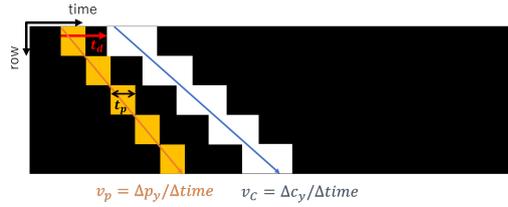
本手法では、レーザープロジェクタを用いて1行ずつの照明を垂直方向に繰り返し行い、ローリングシャッターカメラを用いて1行ずつの露光読み出しを垂直方向に繰り返し行う。このプロジェクタとカメラのライン走査を同期制御することで照明と露光の範囲を制御する。同期信号が入力されてからライン走査するレーザープロジェクタが $t=0$ で最初の行を照明するとき、 t 秒後にプロジェクタが照明する行は、1行あたりの照明時間 t_p を用いて、

$$p_y(t) = \frac{1}{t_p} t \quad (2)$$

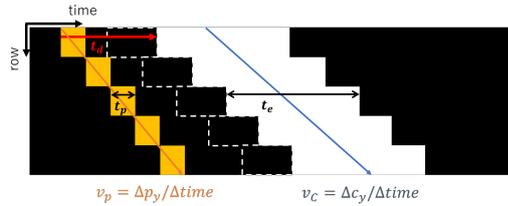
であり、プロジェクタの走査速度を $v_p = 1/t_p$ [lines/sec] とおくと式 (2) は、

$$p_y(t) = v_p t \quad (3)$$

となる。また、ライン走査するローリングシャッターカメラの走査速度を v_c [lines/sec] とおき、 t_d 秒遅れてセンサが露光を開始するとき、式 (3) と同様に時間 t にカメラが露



(a) 任意の遅延時間とセンサ走査速度を与えることで照明に対して相対的に露光する行を制御することが可能である。



(b) カメラの走査速度と同期遅延時間、露光時間を適切に設定することで、各行でカメラが1行露光する間にプロジェクタが照明する行数を制御する。

図 3: 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。橙色はプロジェクタの照明、白色はカメラの露光を表している。

光する行は、

$$c_y(t) = v_c(t - t_d) \quad (4)$$

と表すことができる。以降、 t_d を同期遅延時間と呼ぶ。図 3(a) は、プロジェクタとカメラのタイミングチャートを図示したものである。

さらに、カメラの露光時間を設定することでカメラが1行を露光する間にプロジェクタが照明する行数を制御することができる(図 3(b))。カメラがある1行の露光を完了したときにプロジェクタが照明している行の取りえる範囲は、カメラの露光時間 t_e と式 (3) を用いて、

$$p_y^*(t) \leq v_p(t + t_e) \quad (5)$$

となる。このようにレーザープロジェクタとローリングシャッターカメラの同期を走査速度、遅延時間、露光時間によって制御することで露光と照明の範囲を制御することが可能である。

4.2 ライトトランスポート行列の取得領域

次に、4.1節で示した同期を用いることで取得することができるライトトランスポート行列の領域について述べる。図 2(b) は、ある時間にレーザープロジェクタとローリングシャッターカメラがそれぞれ1行の照明と露光を行ったときにライトトランスポート行列から取得される領域である。プロジェクタがある行を照明したとき、その応答はシーンの性質に基づいてカメラの特定の画素で観測される。このときカメラもある行のみを露光することで特定の応答

のみを観測できる。これは、図 2(b) のようにライトトランスポート行列の (p_y, c_y) の領域を取得していることと等しい。

さらに、プロジェクタとカメラの配置を適切に構成して、直接光を仮定するとプロジェクタとカメラの同じ画素列で照明と応答が完結するため、このブロック上でさらに (p_x, c_x) の解像度で領域をスライスできることが明らかとなっている [6]。本手法もある時間での取得されるライトトランスポート行列のスライスは図 2(b) と同等である。さらにプロジェクタとカメラを同期して走査することで1フレームの撮影でライトトランスポート行列から図 4(a) で示すような領域を取得することが可能である [6]。

これを応用して本手法では、4.1節で示したようにプロジェクタとカメラの走査速度に差を与えることで、従来とは異なる傾きでライトトランスポート行列のスライスを取得する。このときライトトランスポート行列から取得される領域は、式 (3) と式 (4) を用いて、

$$\begin{aligned} & \left\{ T(c_x, c_y, p_x, p_y) \left| \begin{array}{l} c_y = c_y(t), \\ p_y = p_y(t) \end{array} \right. \right\} \\ & = \left\{ T(c_x, c_y, p_x, p_y) \left| \begin{array}{l} c_y = v_c(t - t_d), \\ p_y = v_p t \end{array} \right. \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

と表すことができる。図 4(b) は提案手法で取得される領域の一例を図示したものである。

さらに、4.1節で示したようにカメラの露光時間に対する制御も加えることで図 4(c) のようにライトトランスポート行列を選択的に取得することが可能である。このときライトトランスポート行列から取得される領域は、式 (3) と式 (4)、式 (5) を用いて、

$$\begin{aligned} & \left\{ T(c_x, c_y, p_x, p_y) \left| \begin{array}{l} c_y = c_y(t), \\ p_y(t) \leq p_y \leq p_y^*(t) \end{array} \right. \right\} \\ & = \left\{ T(c_x, c_y, p_x, p_y) \left| \begin{array}{l} c_y = v_c(t - t_d), \\ v_p t \leq p_y \leq v_p(t + t_e) \end{array} \right. \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

と表すことができる。このように、提案手法においてシングルショットで取得されるライトトランスポート行列の領域は、同期遅延時間 t_d とカメラの走査速度 v_c 、露光時間 t_e の3つのパラメータによって制御することが可能である。

5. 平面に基づいたイメージング

提案手法を用いたアプリケーションとして、図 1 のように光軸を平行に保ったまま同列上に配置したプロジェクタカメラシステムについて述べる。このシステムでは、O'Tooleら [6] や Wangら [9] と同様に空間中の平面上での反射光を撮像することができる。4章で示したように我々の手法は、遅延時間、走査速度、露光時間の制御をもってライトトランスポート行列のスライスを変更稿することが

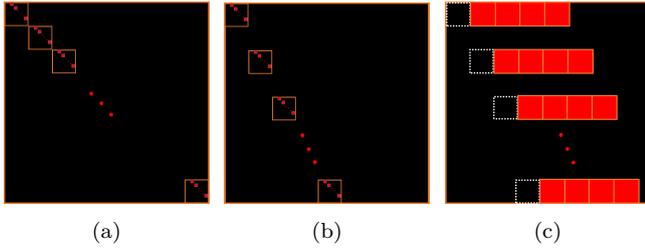


図 4: ライトトランスポート行列の取得範囲。(a) 従来手法 [6]. (b) 走査速度を制御することで従来と異なる傾きのスライスを得ることが可能である。(c) 走査速度と遅延時間、露光時間を制御することでライトトランスポート行列を選択的に取得することが可能である。

可能である。これによって、撮像可能な平面を従来より自由に選択できることを示す。

5.1 照明平面と露光平面の交線

プロジェクタとカメラがそれぞれある 1 行の照明と露光を行ったときの幾何について述べる。プロジェクタはある 1 行の照明によってシーンに図 1 のような平面を通る照明を行い、カメラも同様にある平面上を撮像する。図 1 のようにプロジェクタとカメラの光軸が同列上で平行になるように並べ、これらの平面が空間中で交わるときの交線を YZ 平面で考える。図 5(a) は図 1 を X 軸方向から見たときの図である。プロジェクタが照明する行を p_y 、カメラが露光する行を c_y とおくと、その視差は、

$$d = p_y - c_y \quad (8)$$

で表される。プロジェクタとカメラの解像度と焦点距離を同一と仮定し、それぞれ H , f とおき、プロジェクタカメラシステムの基線長を b とおくと、三角測量の原理より、交線はカメラの光学中心を原点とした YZ 座標系において、

$$\begin{cases} Y = \frac{Z}{f} \left(c_y - \frac{H}{2} \right) \\ Z = f \frac{b}{d} \end{cases} \quad (9)$$

と表すことができる。ただし、 $d = 0$ のとき、平面は平行となり交差しない。

5.2 平面に基づいた空間の撮像

ライン走査するプロジェクタとカメラの同期によって空間中のある平面上を撮像することが可能となることを示す。この平面は、5.1 節で示した交線の軌跡で表現される。式 (8) と同様に、時刻 t での視差は式 (3) と式 (4) を用いて、

$$\begin{aligned} d(t) &= p_y(t) - c_y(t) \\ &= (v_p - v_c)t + v_d t_d \end{aligned} \quad (10)$$

と表され、時刻 t における交線は、式 (10) と式 (9) より、

$$\begin{aligned} &\begin{cases} Y(t) = \frac{Z(t)}{f} \left(c_y(t) - \frac{H}{2} \right) \\ Z(t) = f \frac{b}{d(t)} \end{cases} \\ &= \begin{cases} Y(t) = \frac{Z(t)}{f} \left(v_c(t - t_d) - \frac{H}{2} \right) \\ Z(t) = f \frac{b}{(v_p - v_c)t + v_d t_d} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

である。これは、媒介変数 t で表される YZ 座標での曲線を表している。図 6 は、一般的なカメラパラメータを用いて式 (11) を YZ 座標にプロットしたものである。この図から読み取れるように、一般的なカメラパラメータを用いると式 (11) の軌跡は直線と近似できる。この直線上を走査することで特定の傾きと奥行きにある平面上だけの撮像が可能となる(図 5(a)). さらに、カメラの走査速度と露光時間、同期遅延時間を適切に選択することで図 5(b)(c) のように特定の領域だけを露光しないような撮像が可能となる。

6. 実験と結果

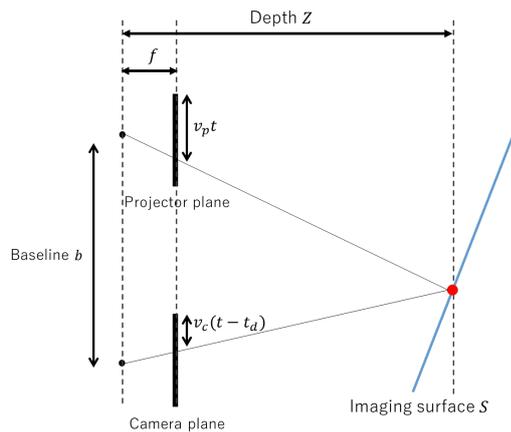
4 章, 5 章で示した理論を基に実際に構築したシステムとそれによって撮像した結果を示す。

6.1 ハードウェア

図 7 は実際に構築したシステムである。レーザープロジェクタとローリングシャッターカメラを 3D プリンタで造形したモデルを用いて縦状に固定した。このとき、プロジェクタの光軸とカメラの光軸が同列上に平行に並ぶように配置した。レーザープロジェクタは SONY 社製 MP-CL1A(解像度 1280×720), ローリングシャッターカメラは IDS 社製のモノクロカメラ UI-3250CP-M-GL を用いた。プロジェクタの垂直走査の信号をカメラシャッターのトリガとして用いた。実験では、プロジェクタの走査速度を固定し、カメラの走査速度を相対的に変化させた。カメラの走査速度を制御するために、センサの画素読み出し周波数であるピクセルクロックを変更した。

6.2 走査速度差と同期遅延時間に基づいた撮像結果

ライトトランスポート行列を走査速度差と同期遅延時間の 2 つのパラメータでスライスして画像群を得た結果を示す。図 8 は撮影したシーンと通常画像である。シーンには木片を異なる距離に異なる傾きで 3 つ設置した。実際に撮像した結果を図 9 に示す。遅延時間 t_d は $\pm 430 \mu\text{s}$, ピクセルクロックは $92 \pm 4 \text{MHz}$, 露光時間は 0.15ms で撮像した。図 9 は垂直に置いた中央の木片が撮像されたときの遅延時間とピクセルクロックをそれぞれ 0 としたときの相対的な値を用いた。カメラの同期遅延時間と走査速度で決まる撮像平面と各木片の平面が空間的に重なるときに撮像できて



(a) 1 行の照明と露光.

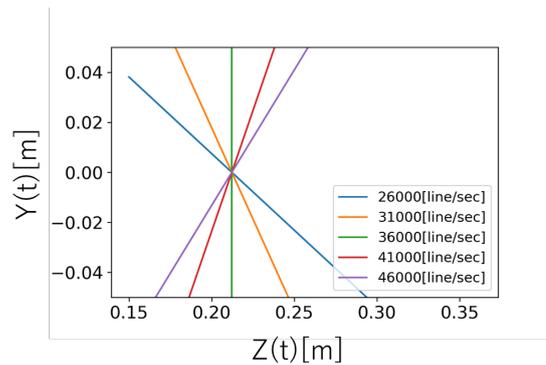
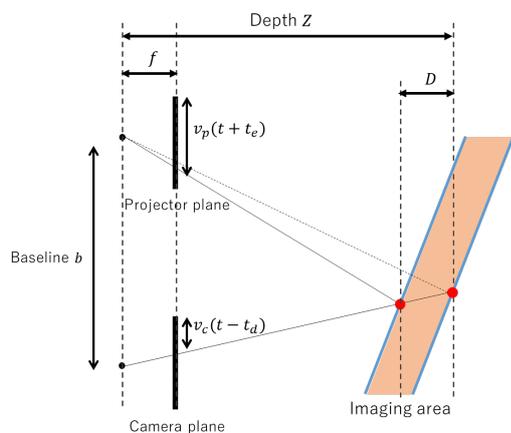


図 6: 焦点距離 0.011m, y 軸解像度 1,200pixel, 基線長 0.05m, 遅延時間 16,000 μ s, センササイズ 4.5 μ m として, $v_p=36,000$ lines/sec, $v_c=26,000\sim 46,000$ lines/sec のもと, 式 (11) を $t=0\sim 40,000\mu$ s でプロットした.



(b) カメラが各行を露光する間にプロジェクタは複数行を照明する.

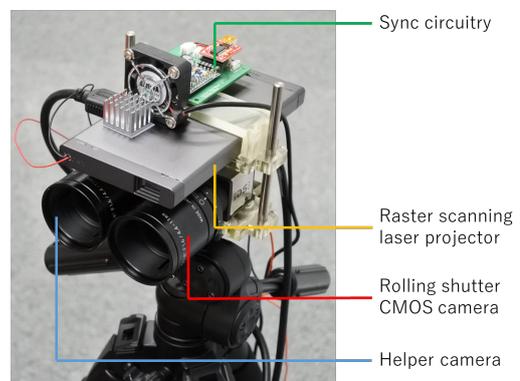
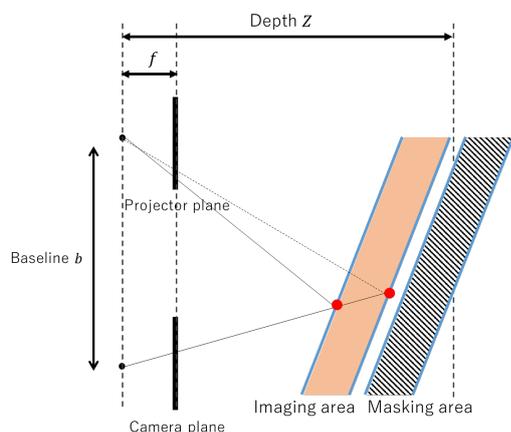


図 7: 構築したシステム.



(c) 走査速度と遅延時間, 露光時間を調整することで特定の領域をマスクしたイメージングが可能である (6 章).

図 5: 図 1 を横から見た図.

いることが読み取れる。一方で、木片の面の一部だけが撮像されているものがあるが、これはカメラの露光時間が大きいためである。十分に露光時間が小さいとき、撮像平面と木片の平面との交線だけが撮像されるはずである。しかし、ライトトランスポート行列のスライス領域が時間的に安定しないという問題が起こった。これは、露光時間を小

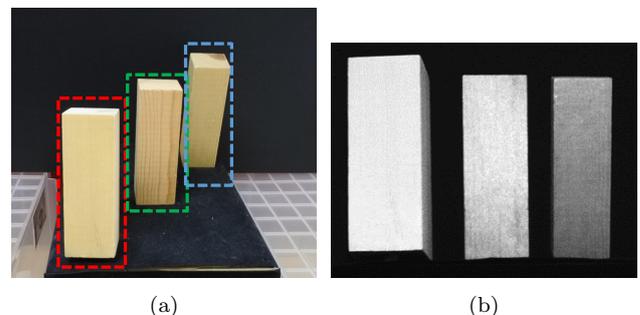


図 8: (a) 撮影したシーン. (b) 通常画像.

さくすると同期のノイズによる影響が大きくなったことが原因と考えられる。

6.3 露光時間によるライトトランスポート行列の選択的取得とイメージング

走査時間, 遅延時間に加え露光時間を適切に設定することにより, シングルショットで特定の平面をマスクしたイメージングが可能となることを示す. 図 10(a) は実際に撮影したシーンの通常画像である. デスクの傾きに合わせてピクセルクロックを設定した後, 走査速度と同期遅延時間, 露光時間を適切に設定することで, 図 10(b) に示すよ

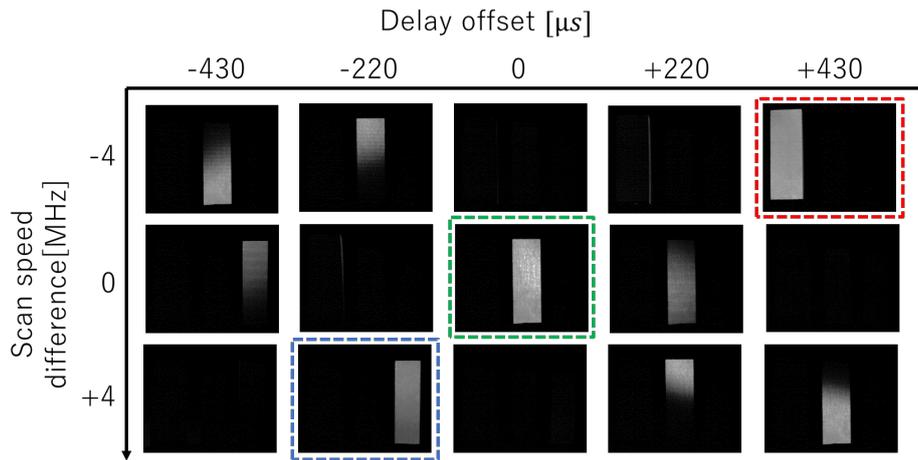


図 9: 異なる同期遅延と走査速度差で撮像した結果. 点線で囲った画像のように特定の傾きと奥行きにある平面だけが撮像された.

うに, デスク上だけをイメージングすることが可能となった. また, 同期遅延時間と露光時間を変更することにより, 図 10(c) に示すように, デスク上をマスクしたイメージングが可能となった. これらの画像は, マスクのための画像処理を必要とせず, シングルショットで取得可能である. センサはマスク領域からの反射光をほとんど露光しておらず, 画像データとして取り込んでいない. これは特定領域をマスクするイメージングとして, セキュリティなどへの応用が見込まれる有効な結果であるといえる.

7. まとめ

本研究では, 従来とは異なるスライスでライトトランスポート行列をシングルショットで取得する方法を提案した. レーザープロジェクタとローリングシャッターカメラの同期システムに同期遅延時間と走査速度, 露光時間の制御を加えることでライトトランスポートの選択的な取得を達成した. これによって, 特定の傾きと奥行きからの反射光だけを撮像することが可能となることを示した. また逆に, それらの反射光だけを除去し撮影することで特定平面をマスクしたイメージングも可能であることを示した.

本手法の制限として, 次の2点が挙げられる. 1つめは, 撮像できる平面角度はカメラで設定可能なピクセルクロックに依存することである. カメラの変更可能な走査速度によって設定できる平面角度の分解能は変化する. 2つめは, 図 10(c) のように特定平面をマスクするために露光時間を設定するが, この露光時間を大きくしすぎると室内照明などの外乱光の影響を受けてしまうことである.

今後の展望として, 本システムでは同期遅延時間, 走査速度, 露光時間のパラメータをシーンにあわせて手動で設定していたが, これを自動で設定できるようなアプリケーションの開発があげられる. 例えば, AR マーカを用いてシーン中の平面にあわせて自動でパラメータを設定するよ



(a)



(b)



(c)

図 10: ライトトランスポート行列の選択によるイメージング結果. (a) 通常画像. (b) デスク上の1平面のみの撮像結果. (c) デスク上だけをマスクした結果.

うな手法が考えられる. さらに, 表面下散乱が発生するような半透明物体などの計測にも本手法を応用していきたいと考えている.

謝辞 本研究は、科研費 15K16027, JST CREST JP-MJCR1764, および奈良先端科学技術大学院大学支援財団支援事業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, *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '00, New York, NY, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 145–156 (online), DOI: 10.1145/344779.344855 (2000).
- [2] Kubo, H., Jayasuriya, S., Iwaguchi, T., Funatomi, T., Mukaigawa, Y. and Narasimhan, S. G.: Acquiring and characterizing plane-to-ray indirect light transport, *2018 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1–10 (online), DOI: 10.1109/ICCPHOT.2018.8368461 (2018).
- [3] 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 Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (online), DOI: 10.1145/1141911.1141977 (2006).
- [4] Ng, R., Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: All-frequency Shadows Using Non-linear Wavelet Lighting Approximation, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 376–381 (online), DOI: 10.1145/882262.882280 (2003).
- [5] O’Toole, M., Mather, J. and Kutulakos, K. N.: 3D Shape and Indirect Appearance by Structured Light Transport, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 38, No. 7, pp. 1298–1312 (online), DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2545662 (2016).
- [6] O’Toole, M., Achar, S., Narasimhan, S. G. and Kutulakos, K. N.: Homogeneous Codes for Energy-efficient Illumination and Imaging, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, pp. 35:1–35:13 (online), DOI: 10.1145/2766897 (2015).
- [7] O’Toole, M., Raskar, R. and Kutulakos, K. N.: Primal-dual coding to probe light transport, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, pp. 1–11 (online), DOI: 10.1145/2185520.2185535 (2012).
- [8] Reddy, D., Ramamoorthi, R. and Curless, B.: Frequency-space Decomposition and Acquisition of Light Transport Under Spatially Varying Illumination, *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision - Volume Part VI, ECCV’12*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 596–610 (online), DOI: 10.1007/978-3-642-33783-3_43 (2012).
- [9] Wang, J., Bartels, J., Whittaker, W., Sankaranarayanan, A. C. and Narasimhan, S. G.: Programmable Triangulation Light Curtains, *The European Conference on Computer Vision (ECCV)* (2018).