

修士論文

時間同期式プロジェクタカメラシステムを用いた 光源波長と遅延時間制御による 物体内部の強調表示

三上 徹朗

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 向川 康博 教授

光メディアインタフェース研究室 (情報科学領域)

令和2年1月28日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

三上 徹朗

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
加藤 博一 教授	(副指導教員)
舩富 卓哉 准教授	(副指導教員)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)

時間同期式プロジェクタカメラシステムを用いた 光源波長と遅延時間制御による 物体内部の強調表示*

三上 徹朗

内容梗概

一般的なカメラを使った撮影においては、主に物体表面からの反射光を計測しているため、物体内部の構造を知ることは困難である。一方で時間同期式プロジェクタカメラシステムは、照明と撮影のギャップに応じた表面下散乱光成分を計測できる。本研究では、物体内部を鮮明に可視化できる計測と画像処理の実現を目的とする。そこで、照明と撮影の位置関係を逆転させて取得できる表面下散乱光成分の非対称性と様々な光源波長を用いた物体内部構造を強調する手法を提案する。実験より、提案手法は物体内部構造を強調した可視化に有効であることを示した。

キーワード

プロジェクタカメラシステム, 正規化相互相関, 表面下散乱, 可視化

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和2年1月28日.

Visualization enhancing of interior structure by light source wavelength and synchronous delay control of projector camera system *

Tetsuro Mikami

Abstract

It is difficult to visualize the interior structure because the reflected light from the object surface is mainly dominant in observation with a general camera. To capture the light transport by the synchronized projector camera system, it is possible to acquire the subsurface light transport by gap of light illumination and observation position. In this study, I aim to realize a measurement and image processing that can visualize the interior structure apparently. Therefore, I propose a method of visualization enhancing of interior structure by using the various light source wavelength and the asymmetry of the subsurface light transport component that can obtain the positional relation ship between light illumination and observation position by inversion. These results are shown that the proposed method is effective for visualizing interior structure.

Keywords:

Projector camera system, Normalized cross-correlation, Subsurface scattering, Visualization

*Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, January 28, .

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	3
3. 物体内部の光伝播	5
3.1 光伝播の種類	5
3.2 物体内部の光伝播の選択的な取得	6
3.2.1 光の波長を選択した撮影手法	6
3.2.2 照明と撮影を制御した撮影手法	7
3.3 局所的な表面下散乱光成分	7
3.3.1 局所的な表面下散乱光成分の計測	7
3.3.2 局所的な表面下散乱光成分を用いた画像処理	11
4. システムの実装	12
4.1 光源波長を選択できるレーザープロジェクタの構築	12
4.2 実際に構築した撮影システム	15
4.3 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制御	15
5. 実験と結果	17
5.1 肌の内部状態の可視化	17
5.2 血管の強調表示	20
6. まとめ	23
謝辞	25
発表リスト	27
付録	28

A. 撮影結果	28
A.1 光源波長 445nm と異なる遅延時間設定による結果	28
A.2 光源波長 554nm と異なる遅延時間設定による結果	30
A.3 光源波長 639nm と異なる遅延時間設定による結果	32
A.4 光源波長 808nm と異なる遅延時間設定による結果	34
B. 近赤外領域における高解像度分光画像計測装置の試作	36
C. 1次元走査型 MEMS ミラーとパウエルレンズを用いた光源システムの試作	38
参考文献	41

目 次

1	様々な光伝播を辿る反射光	6
2	取得できる表面下散乱光成分	8
3	遅延時間の符号と発生する影の関係	9
4	予備実験に用いた半透明のアクリル板	10
5	実際に確認した影.	10
6	既製品のプロジェクタ内部	13
7	改良後のレーザプロジェクタ	13
8	改良レーザプロジェクタによる投影	14
9	実際に構築したシステム	15
10	撮影対象の腕. 皮膚下の血管は目視できない	17
11	異なる波長光源と遅延時間による撮影結果	19
12	異なる遅延時間で人の腕を撮影した画像	20
13	異なる大きさの矩形領域を設定して計算した相関値画像 (グレースケール)	21
14	異なる大きさの矩形領域を設定して計算した相関値画像 (疑似カラー)	22
15	光源波長:445nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1	28
16	光源波長:445nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2	29
17	光源波長:554nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1	30
18	光源波長:554nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2	31
19	光源波長:639nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1	32
20	光源波長:639nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2	33
21	光源波長:808nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1	34
22	光源波長:808nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2	35
23	分光器と自動ステージを組み合わせた計測装置	37
24	試作した光源システムの模式図.	39
25	MEMS ミラーとパウエルレンズを用いて試作した光源システム.	39
26	ライン光が上下に走査されている様子.	40

1. はじめに

近年、肌内部の血管や下肢静脈瘤といった疾患の可視化は重要な課題である。前述した食品や肌というような世の中に存在する物体は僅かながら光を通す半透明であることが多い。そのような半透明物体の内部を可視化するためには、物体内部を通過してくる光のみを捉える必要がある。物体内部を通過する光として入射光とは異なる物体表面から出射する透過光や入射光と同様の物体表面上において入射光とは異なる位置から出射する表面下散乱光が存在する。前者の透過光は、物体が十分薄く光を通しやすいと観測できるが、物体が分厚く光を通しにくいと物体内部における吸収や散乱の影響を大きく受けた透過光が観測されるため、物体表層付近の可視化は難しい。そこで、後者の表面下散乱光の中で物体表層付近を通過した散乱光だけを観測できれば、物体表層内部を可視化することができる。しかし、環境光が存在するシーンやフラッシュを焚いてカメラで物体を撮影した時に、物体表面で反射する直接光成分が支配的に観測されてしまうため表面下散乱光のみを分離抽出することは難しい。

様々な光伝播を計測するためには、膨大な撮影回数や時間を要することが知られている。しかし、近年では、照明や撮影を工夫し光伝播をいくつかの成分に分けた計測が提案されている。例えば、偏光の違いを利用して直接光成分の中で拡散反射光と鏡面反射光を分離する手法 [1][2][3] 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に分離する手法 [4] が知られている。

また、間接光の一つである表面下散乱光を分離抽出して半透明物体内部を可視化する研究としては、計測対象に対してリング状の光をプロジェクタで投影し、その中央を計測することで任意の深さの表面下散乱光を取得する手法 [5] が挙げられるが、計測時間に膨大な時間を要する。一方で、平行化されたプロジェクタとカメラを用いてエピポーラ幾何に基づき直接光成分であるエピポーラ光と間接光成分である非エピポーラ光をそれぞれ取得する手法が提案されている。特にレーザープロジェクタとローリングシャッター方式のカメラを組み合わせ、照明と撮影のタイミングを時間的に同期させて撮影する手法 [6] では、高効率に直接光成分であるエピポーラ光と間接光成分である非エピポーラ光を分離して抽出できる。そして、非エピポーラ光として観測される照明と撮影のタイミングを遅延させて様々

な間接光成分を撮り分ける手法 [7] が提案されている。そして、間接光成分の 1 つである表面下散乱光成分を取得することで、半透明物質である皮膚下の血管を可視化する一例が示されている。しかし、撮影と照明のタイミングを決める遅延時間と光源波長については十分な検討がされておらず鮮明な可視化画像が取得できているとは言い難く、遅延時間と光源波長の選択には検討の余地が残されている。

そこで、本研究では前述したエピポーラ幾何に基づく時間同期式プロジェクタカメラシステムを用いて遅延時間の制御と光源波長を選択的に用いた撮影を実施し、皮膚のような半透明物体の内部状態の可視化において遅延時間の制御と光源波長の選択による可視化の有効性を示す。また、システムによって撮影された画像に対して、その画像が持つ性質から計算処理を提案し、物体内部の構造を強調した画像を生成する。

2. 関連研究

従来から人の目や一般的な撮影機材を通して視認が難しいものを可視化する研究が多く実施されている。その中でも照明と撮影を制御して、光伝播をいくつかの成分に大別して個別に撮影する手法が数多く提案されており、人が視認しにくいようなシーンの可視化が実施されている。

例えば、分光イメージングと呼ばれる光の波長領域において解像度の高いカメラや特定の波長のみを通すフィルタを用いてシーンを撮影する手法がある。分光イメージングを用いることで特定波長を吸光物質からの反射光とそうでない反射光成分に分離でき、考古学的資料の下地や修復跡 [8] や血管を可視化する手法 [9] が提案されている。

また、光の振動方向による性質の違いから偏光板を利用して、直接光である拡散反射光と鏡面反射光を分離する手法 [1] [2] [3] がある。同様に偏光板を用いることで不鮮明な水中内を鮮明化する手法 [10] が提案されている。

次に、Nayar ら [11] や Reddy ら [12] は、パターン光を用いることでシーン中の光の成分を空間周波数の違いから直接光成分と大域光成分を分離した。同様にパターン光を用いることで散乱媒体中の物体を鮮明化 [13, 14] する手法が提案されている。更に物体内部構造を可視化する手法として異なる半径の円環状のパターン光を物体表面に投影し、その中心を撮影することで物体表層内の異なる深さの表面下散乱光を取得する手法 [5] が提案されている。

最後に、光源とカメラの間での光路の幾何を利用することで1度の撮影でシーン中から直接光成分と間接光成分を撮り分ける方法が提案されている [15, 16]。これらの手法は、プロジェクタカメラシステムにおけるエピポーラ面上を經由する光を直接光成分、エピポーラ面上を經由しない光を間接光成分であることを利用している。また、O'Toole らが提案した時間同期式プロジェクタカメラシステム [16] は、高速に1ライン毎の照明を行うレーザプロジェクタと、同様に1ライン毎の撮影を行うローリングシャッタカメラの照明と撮影のタイミングを同期した撮影システムを用いることで直接光成分画像と間接光成分画像のリアルタイム映像として撮影している。

そして、Kubo ら [17] は、前述した時間同期式プロジェクタシステムを拡張し、

照明と撮影のタイミングを決定する遅延時間を適切に設定し、間接光成分を詳細に撮り分け、シーン中の間接光成分を選択的に取得する方法を提案している。そして、間接光成分の1つである表面下散乱成分を取得することで、皮膚下の血管のような物体内部構造の可視化する例を示した。しかし、物体内部構造の可視化において、照明と撮影のタイミングを決定する遅延時間について詳細な考察を実施していなかった。また、同様に撮影時に用いられた光源波長もプロジェクタに内蔵されている可視波長光源の中で、従来の分光イメージングの知見から血管の可視化に適しているとされている639nmのみを利用していた。しかし、表面下散乱光成分を選択的に取得できる本システムにおいて、光源波長も同様に選択して利用して、物体内部構造がどのように可視化されるのか詳細な検討はされていない。よって、現状では鮮明な物体内部構造の可視化が実現しているとは言い難い。

本論文では、前述した時間同期式プロジェクタカメラシステムを用いて、従来研究において、考察されていなかった光源波長の選択と遅延時間の設定によって撮影される物体内部構造の可視化画像について実験を通じて考察する。また、符号の異なる遅延時間の設定によって得られる表面下散乱光成分の非対称性に注目し、撮影した2枚の可視化画像から物体内部構造を強調する計算処理を提案する。

3. 物体内部の光伝播

本章では，光伝播のうち物体内部における表面下散乱光と光の波長による侵入深さについて述べる．また，時間同期式プロジェクタカメラシステムの照明光の波長を選択的に利用した表面下散乱光成分の取得について述べる．また，そのシステムを用いた撮影において，従来研究のように大域的な表面下散乱光成分を取得するのではなく，局所的な表面下散乱光の計測と画像処理について提案する．

3.1 光伝播の種類

図 1 に示すように光源から出射した光は，反射や散乱，屈折などの光学現象を繰り返しながらシーン中で伝播し，様々な経路を通過して我々の目や撮影素子で観測される．これらの光の伝播における光路の違いから，観測される光を直接光と間接光に分類することができる．直接光は，シーン中の物体表面で一度だけ反射したのちに観測される光である．一方で，直接光以外の複雑に経路を変えるような光を間接光と呼ぶ．間接光として物体内部で発生し複数回の反射を繰り返す表面下散乱光や，物体外部で複数回の反射を繰り返す相互反射光，霧からの後方散乱光が挙げられる．特に間接光の 1 つである表面下散乱光は物体内部で複数回の反射を繰り返すことで，その内部の吸光物質によって光量は減衰していく．また，光量の減衰は波長に依存する性質があり，吸光物質による光の吸収率によって光量の減衰量に差が生じる．また，可視波長から近赤外波長領域において，物体内部に侵入した光は波長が長いほど散乱の影響を受けにくく直進性を維持したまま物体内部深くに侵入することが知られている [18]．そのため，入射光の波長に依存して表面下散乱光の侵入深さが異なり，観測できる物体内部構造の情報が異なる．

従って本研究では，従来研究では計測されなかった様々な光源波長を用いて表面下散乱光成分を計測することで，その差異を明らかにする．

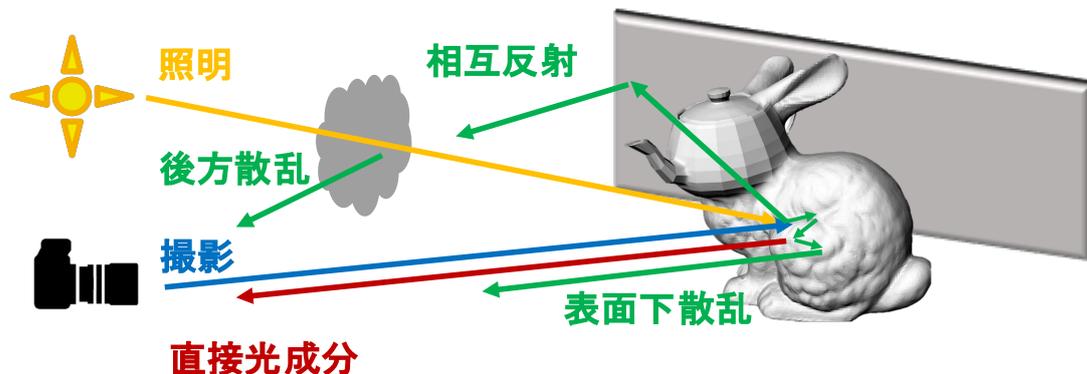


図 1 様々な光伝播を辿る反射光

3.2 物体内部の光伝播の選択的な取得

本研究において述べる物体内部の光伝播の選択的な取得について、光の波長を選択した撮影手法と照明と撮影を制御した撮影手法に分けて説明する。

3.2.1 光の波長を選択した撮影手法

一般的な撮影機材では、太陽光やハロゲン光源のように多数の光の波長を含む光源によって照らされた対象を撮影すると全ての波長が混在して観測されるか、少数の波長に畳み込まれて観測される。特に前者において光の波長を個別に選択して撮影する場合、付録Bに示すようなプリズムや回折格子を用いた分光器や撮影機材に特定の波長のみを通すバンドパスフィルタを取り付ける必要がある。

本研究においては、前述した手法を使わずに異なる波長の光を選択して取得する。本研究で用いる時間同期式プロジェクタカメラシステムは、照明光として指向性とエネルギー密度の高いレーザ光を用いている。そのため、撮影対象において照明光が環境光と比較し支配的となり、カメラで観測される反射光も照明光が支配的となる。よって、照明光の波長と同じ波長の反射光をカメラは観測することができると考えた。

3.2.2 照明と撮影を制御した撮影手法

直接光は物体表面で生じるため物体内部構造の情報は含まれていない。そこで、Nishino [5] らや Kubo ら [7] のように、照明と撮影にギャップを設け、短距離からの表面下散乱光を撮影することで内部の構造を可視化する手法が知られている。前者と後者に共通する課題として、3.2.2 節で述べたような波長軸に注目した実験が実施されておらず、物体内部構造の可視化について鮮明化の余地が残されていることが挙げられる。また、両者の手法では、最終的に取得できる大域的な表面下散乱光成分に着目した可視化を実施している。しかし、我々は実験を通じて同じ短距離の表面下散乱光成分においても、局所的に観察すると散乱方向の異なる表面下散乱光成分が取得できることに気づいた。そこで、我々は、局所的な間接光成分を強調する計測・画像処理アルゴリズムを提案する。

3.3 局所的な表面下散乱光成分

3.3.1 局所的な表面下散乱光成分の計測

3.2.2 節で述べた局所的な表面下散乱光成分について説明する。まず、図 2 に示すように照明と撮影のギャップによって取得できる一般的な表面下散乱光成分の性質を説明する。Nishino [5] らはギャップが大きいほど物体内部を深く経由してきた表面下散乱光が取得できることを示した。同様に Kubo [7] らは時間同期式プロジェクタカメラシステムの照明と撮影のタイミングを遅延させて物体内部を通過してきた表面下散乱光成分のみを撮影した。一般的に物体内部に吸光物質が存在した場合、その箇所を經由した表面下散乱光は光量が減少する。よって、結果画像には物体内部に吸光物質が存在することを示す影が現れる。

次に、本研究で用いる時間同期式プロジェクタシステムを用いて取得できる局所的な表面下散乱光成分について述べる。前述した通り、照明と撮影の遅延時間を長く設定すると短く設定した場合と比較して、照明面と撮影面が遠くなり物体内部深くまでを經由した表面下散乱光を取得できる。よって、図 3(c) と図 3(d) に示すように異なる遅延時間で物体内部の吸光物質を示す影を比較すると、遅延時間が長い方が照明面と撮影面が走査される過程で空間的に広い範囲の表面下散

乱光成分を取得できるため長い影が発生する。また、遅延時間の符号に着目すると、図 2(a) 図 2(b) に示すように正と負では、照明と撮影の位置関係を逆転することができる。よって、最終的に取得できる大域的な表面下散乱光成分は同じだが、局所的には異なる経路を経由した表面下散乱光が取得できるため図 3(c) 図 3(d) に示すように遅延時間が正の時は影は下に伸び、負の時は影は上に伸びる性質を持つ。

予備実験として図 4 のようにアクリル板の下に吸光物質を模した黒紙を設置し、遅延時間を正と負に設定して撮影し、発生する影を観察した。図 5 に発生した影を示し、遅延時間の符号毎に縦軸の輝度値の変化を示す。遅延時間を設定せずに照明と撮影を同期させると画像中心にのみ影が発生している。そこで、遅延時間の符号を正の方向に設定すると、影が上に伸びるため画像の上方向の輝度値が低下していることがわかる。逆に負の方向に設定すると影が下に伸びるため画像の下方向の輝度値が低下していることがわかる。このように、遅延時間の符号を逆転させることで照明と撮影の位置関係が変化し、その結果、局所的な表面下散乱光成分に非対称性が発生する。

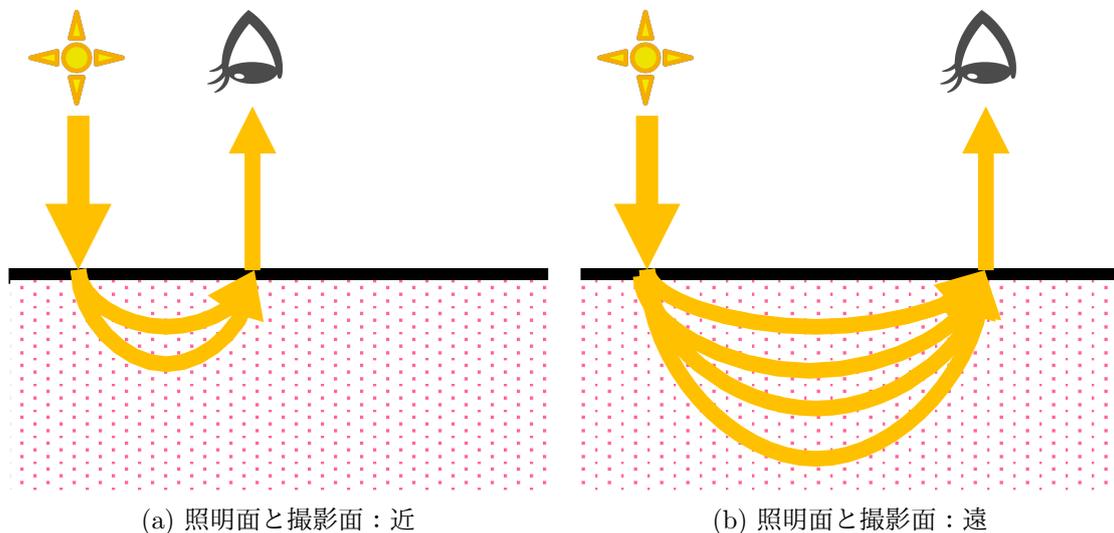
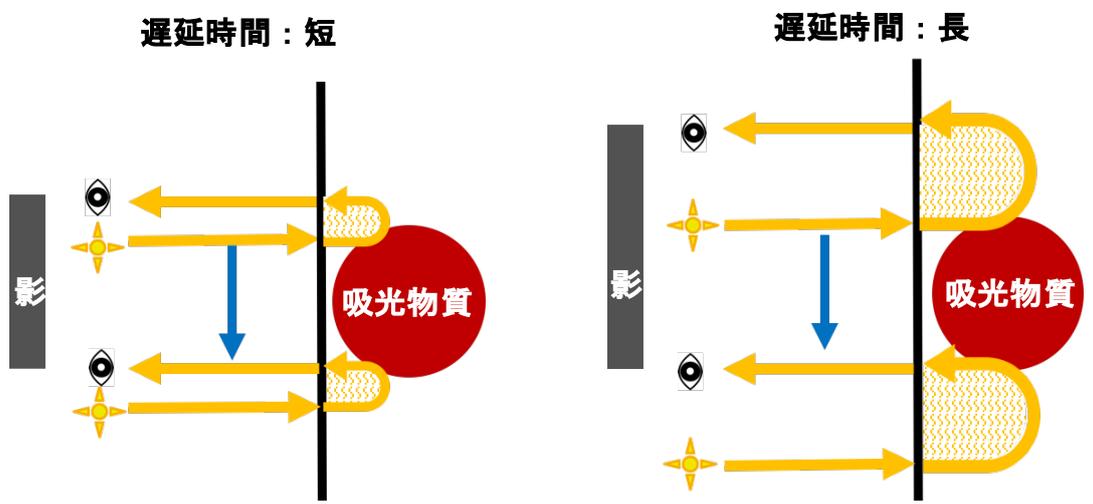
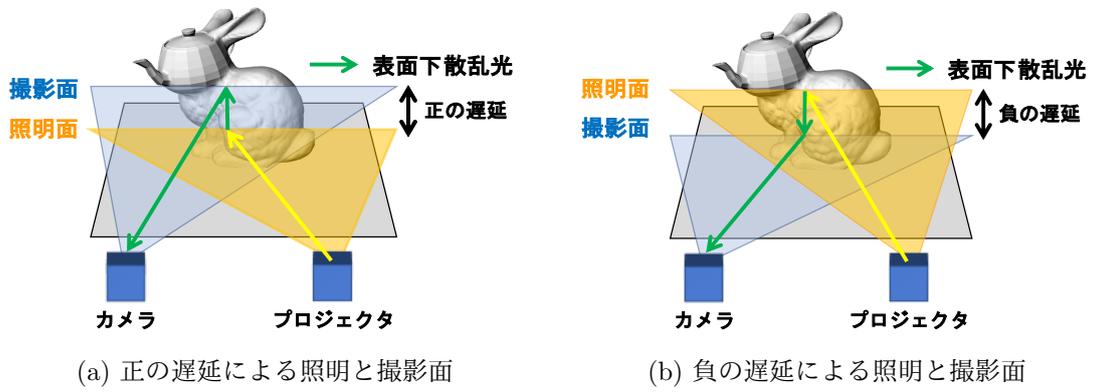
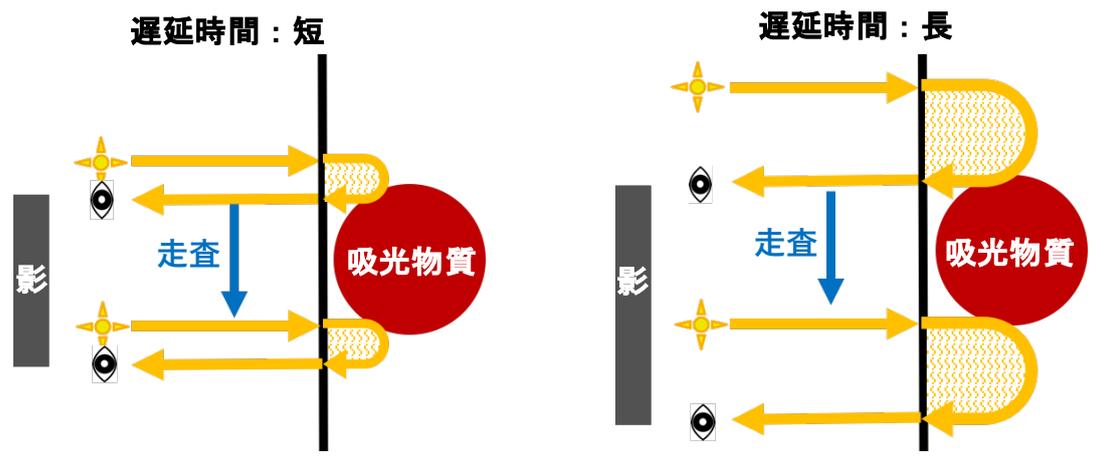


図 2 取得できる表面下散乱光の関係



(c) 正の遅延で発生する影



(d) 負の遅延で発生する影

図 3 遅延時間の符号と発生する影の関係



図 4 予備実験に用いた半透明の亚克力板. 亚克力板の下に黒紙を設置した.

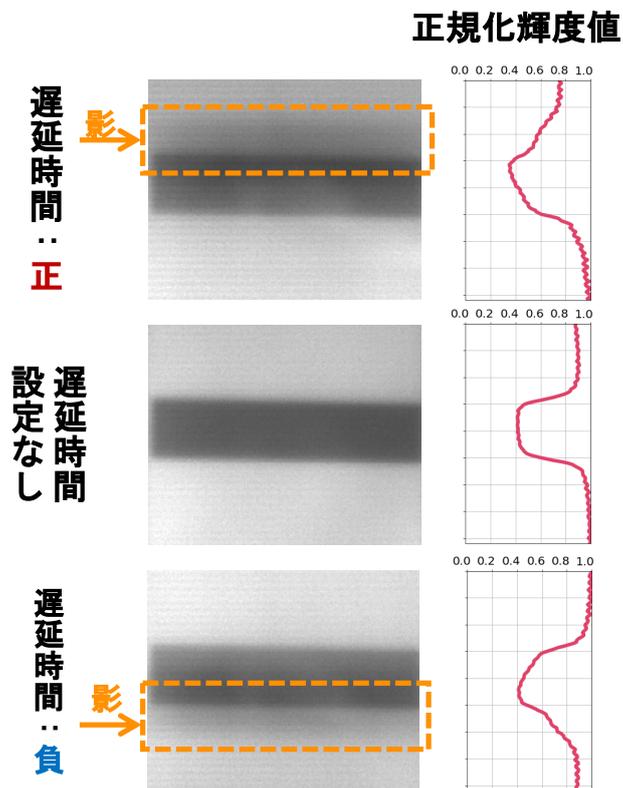


図 5 実際に確認した影と縦方向の輝度値の変化. 符号の変化によって影の伸びる方向が変化し, それに伴い輝度値も変化していることがわかる.

3.3.2 局所的な表面下散乱光成分を用いた画像処理

3.3.1 節で述べた影の性質を利用した計算処理について説明する．異なる遅延時間の符号で撮影された2枚の画像 I_p と I_m を用いて，2枚の画像の各画素 (d_x, d_y) を基準とした共通の矩形領域（縦： h × 横： w ）同士に対して (1) に示す正規化相互相関を計算する．すると，吸光物質が内部に存在しない箇所では影が発生しないため正の相関が得られるが，吸光物質が存在する箇所では影が発生しており，遅延時間の符号によって発生する影の方向が異なるため負の相関を持った相関値画像が生成できる．

$$ZNCC(d_x, d_y) = \frac{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [(I_p(d_x + x, d_y + y) - \mu_{I_p})(I_m(d_x + x, d_y + y) - \mu_{I_m})]}{\sqrt{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [(I_p(d_x + x, d_y + y) - \mu_{I_p})]^2} \sqrt{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [(I_m(d_x + x, d_y + y) - \mu_{I_m})]^2}} \quad (1)$$

4. システムの実装

本章では、実際に撮影システムの構築するにあたって光源波長を取り替え可能になるよう改良したレーザプロジェクタとそれを組み合わせて最終的に構築した撮影システムを説明する。実際に構築した撮影システムの基本的なハードウェアとソフトウェア構成は、O'Tooleら [16]Kuboら [7]が提案した時間同期式プロジェクタカメラシステムに従った。

4.1 光源波長を選択できるレーザプロジェクタの構築

光源波長として可視波長だけではなく、近赤外波長も利用するため、既製品のレーザプロジェクタである Sony 社製 MP-CL1A に改良を加えた。図 6 のようにレーザプロジェクタ内部には 2 次元走査型の MEMS ミラーが内蔵されている。この MEMS ミラーに対して任意の波長のレーザ光を照射することで、光源波長を自由に選択可能なレーザプロジェクタを構築できる。しかし、図 6 に示すように既にプロジェクタ内部に設置されたレーザダイオードを置き換えることは困難であるので外部からコリメート済みのレーザダイオードによるレーザ光を取り込んだ。外部からレーザ光を取り組むことで光源波長を選択可能にしたレーザプロジェクタを以下の図 7 に示す。プロジェクタ内部の集光レンズと MEMS ミラーとレーザダイオードの光軸が一致するように、3D プリンタを用いてレーザダイオードの位置を上下左右に調整できる機構を造形し取り付けた。

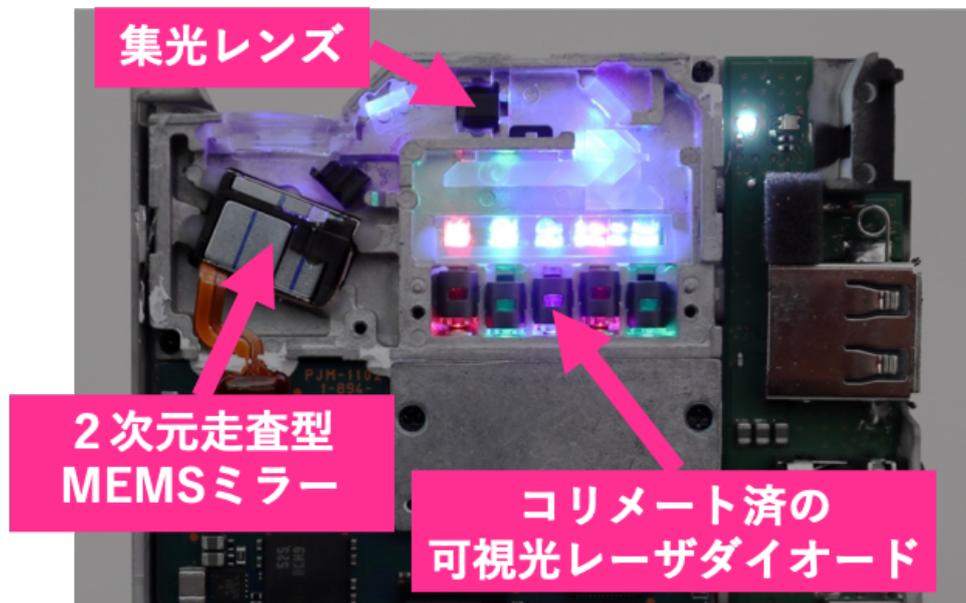
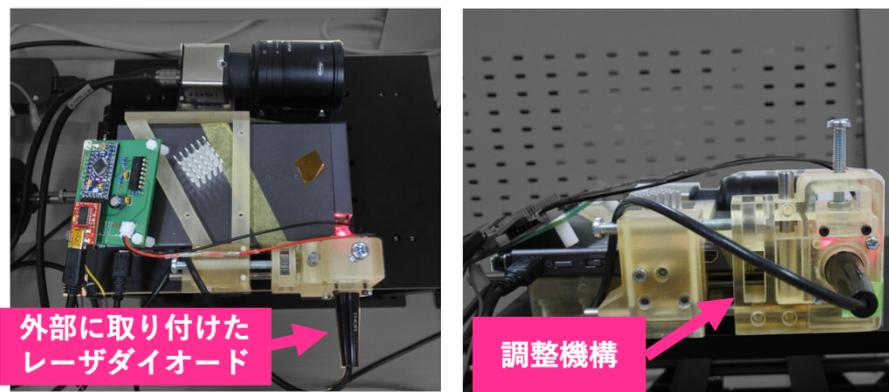


図6 既製品のプロジェクタ内部. 波長445nm, 554nm, 639nmの可視波長のレーザーダイオードが合計5つ組み込まれている. 出力されたレーザー光は集光レンズによって集光されたのち, MEMSミラーによって空間的にレーザー光が投影される.



(a) 外部に取り付けたレーザーダイオード (b) レーザーダイオードの位置を調整する機構

図7 改良後のレーザープロジェクタ

図 8(a) と図 8(b) に改良したレーザープロジェクタからライン光が投影されている様子とライン光が上下に走査されスクリーン上に投影されている様子を示す。図 8(a) と図 8(b) から平行なライン光が空間的に走査されていることから，外部からレーザーダイオードを取り込むだけで，簡易に波長光源を選択可能な光源が構築できていることが確認できる。



(a) 投影されたライン光



(b) 空間的に走査されたライン光

図 8 改良レーザープロジェクタによる投影

4.2 実際に構築した撮影システム

4.1 章で示した光源波長の選択を可能に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を組み合わせて構築したシステムの概要について述べる。

実際に構築したシステムを図9に示す。レーザープロジェクタとカメラを横に整列させ固定した。ローリングシャッターカメラには可視波長及び近赤外波長領域において高い感度を持つモノクロカメラ IDS UI-3250CP-M-GL(解像度 1600×1200)を使用した。撮影においては、12 bit 画像を取得した。用いたカメラには、ローリングシャッターモードとグローバルシャッターモードを切り替えて撮影する機能がある。前者は、レーザープロジェクタの照明と同期させて撮影する際に用い、後者は同期させずに通常画像を撮影する際に用いる。

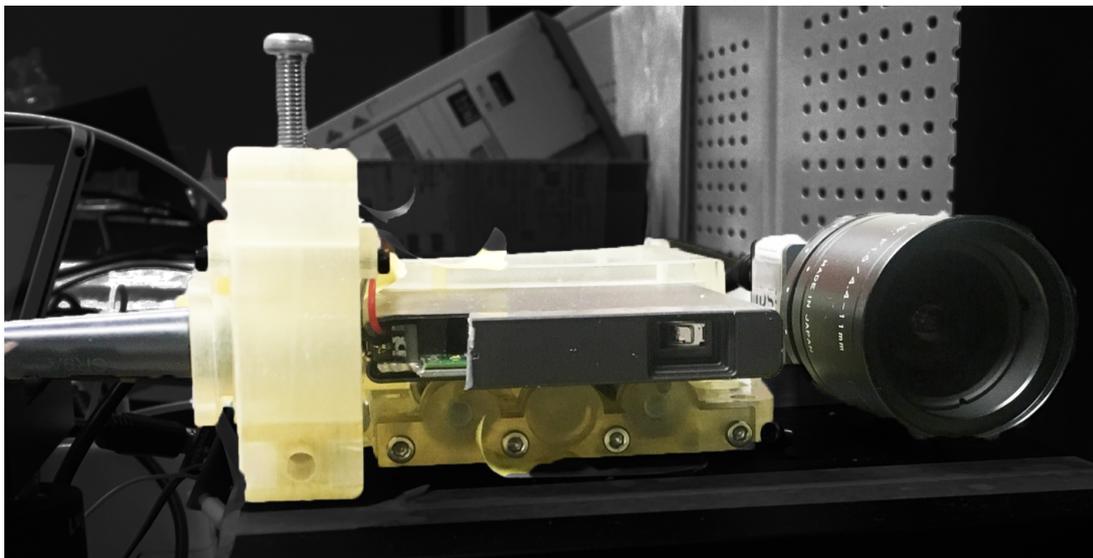


図9 実際に構築したシステム。カメラとプロジェクタを横に整列させて固定した。

4.3 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制御

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照明と撮影の同期方法について述べる。なお、同期方法は論文 [16] [7] にて提案されているものと同様である。まず、レーザープロジェクタは2次元走査型の MEMS ミラーを用いてレーザーダイオードから出力されるレーザー光をシーン中に対して面上に照射している。こ

の MEMS ミラーが垂直方向に振動する際に発生する同期信号を回路で整流し同期信号として用いる。ローリングシャッターカメラは、1 ライン毎の撮影が可能であり、外部から前述した同期信号をトリガ信号として入力することで撮影を開始するタイミングを制御する。これによって、レーザプロジェクタの照明とローリングシャッターカメラの撮影の垂直方向での同期が可能となる。

本システムで用いる同期パラメータについて述べる。同期パラメータとして照明と撮影のタイミングを制御する遅延時間 t_d が存在する。遅延時間 t_d は、ローリングシャッターカメラが同期信号を受け取ってからカメラが撮影を開始するまでの時間である。つまり、レーザプロジェクタが照明を開始してからカメラは t_d 秒後に撮影を開始する。なお、この遅延時間は符号を逆転でき、3.3.1 節で述べたように照明面と撮影面の位置関係が入れ替えることができる。

5. 実験と結果

本章では，4章で示したシステムを用いた実験結果を示す．実験では身近な半透明物体である肌を撮影する．

5.1 肌の内部状態の可視化

本節では，異なる波長と遅延時間を用いて肌を撮影することで，その差異を観察する．撮影対象は図 10 に示す腕を用いた．なお，図 10 に示す画像は一般的なカメラで撮影しているため，肌表面での直接光が支配的となっており，肌内部の血管は見えていない．

4章で示した撮影システムを用いて，撮影した結果を図 11 に示す．なお，より詳細に遅延時間を設定して撮影した結果は付録 A に示す．撮影において用いた光源波長は可視光波長である 445nm ， 554nm ， 639nm ，そして，近赤外波長である 808nm を用いた．そして，遅延時間 $t_d(\mu\text{s})$ をそれぞれ変化させて撮影した．また，遅延時間毎に 10 フレームずつ撮影した画像を平均を取得した．

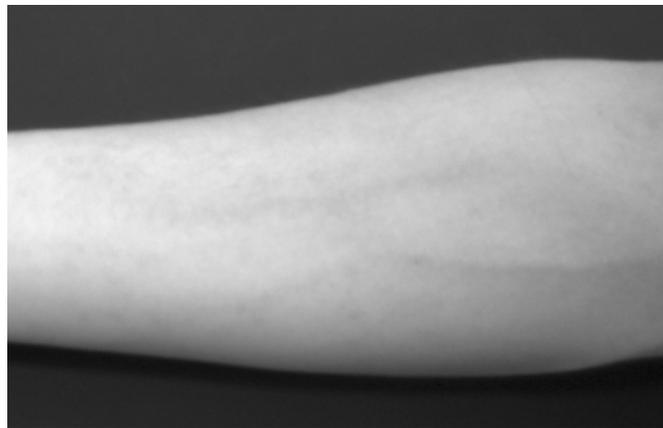


図 10 撮影対象の腕．皮膚下の血管は目視できない

図 11 に異なる光源波長と遅延時間による撮影結果を示す．可視波長 445nm ， 554nm ， 639nm における遅延時間 $0\mu\text{s}$ の撮影結果については，照明と露光のタイミングが一致しており直接光のみが計測される．これは，通常撮影において直接

光が支配的に観測されることと同一視できる。そのため、可視波長では肌内部の血管はほとんど可視化されていないことがわかる。一方、近赤外波長 808 nm では、可視波長と比較して肌内部の血管を不鮮明ながら視認できる。

遅延時間を大きくしていくにつれ、肌内部深くに侵入した表面下散乱光を計測できる。639 nm, 808 nm の光源を用いた場合、遅延時間 400 μ s, 600 μ s 付近であれば、0 μ s と比較して鮮明な血管を視認できる。しかし、比較的短波長である 445 nm, 554 nm においては、遅延時間の大きさに関わらず血管を視認できない。これは、前述の波長が肌内部での散乱の影響を受けやすいためと考えられる。また、遅延時間 400 μ s, 600 μ s 付近における近赤外波長 808 nm と可視波長 639 nm を比較すると、前者の方が血管を示す黒い影がぼやけにくく鮮明に可視化されている。

最後に、近赤外波長 808 nm の撮影結果について遅延時間 0 μ s と 400 μ s を比較すると、後者の方が血管をより鮮明に可視化できている。一方で、前者の遅延時間 0 μ s での撮影結果は、一般的な近赤外波長を使った撮影機材による撮影結果と同一視できる。つまり、表面下散乱光のみを選択的に撮影し物体内部を可視化できる本システムは、一般的な近赤外波長を使った撮影機材と比較して、物体内部をより鮮明に可視化できると言える。しかし、可視波長 639 nm と比較して鮮明になったとはいえ、血管を示す黒い影と肌の部分ではコントラストが低いため視認性も低い。

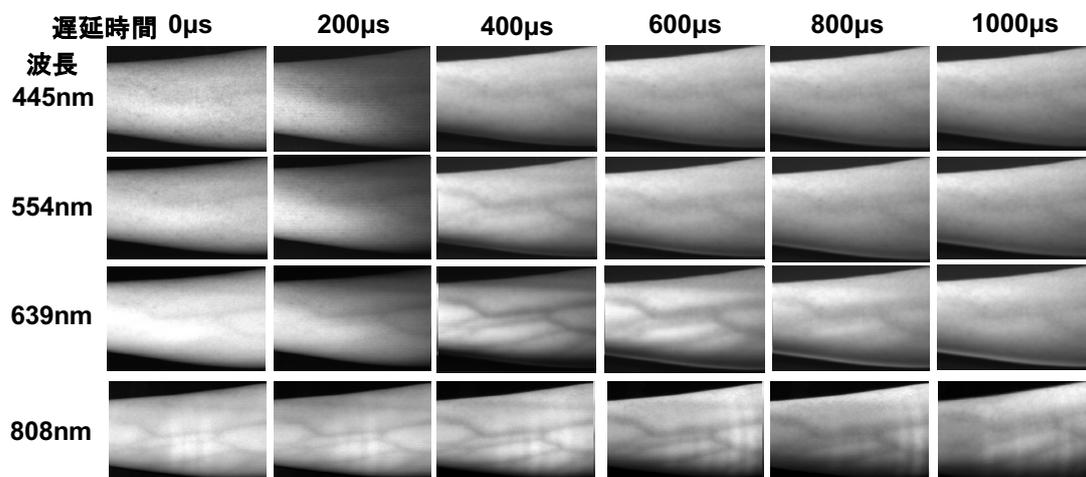
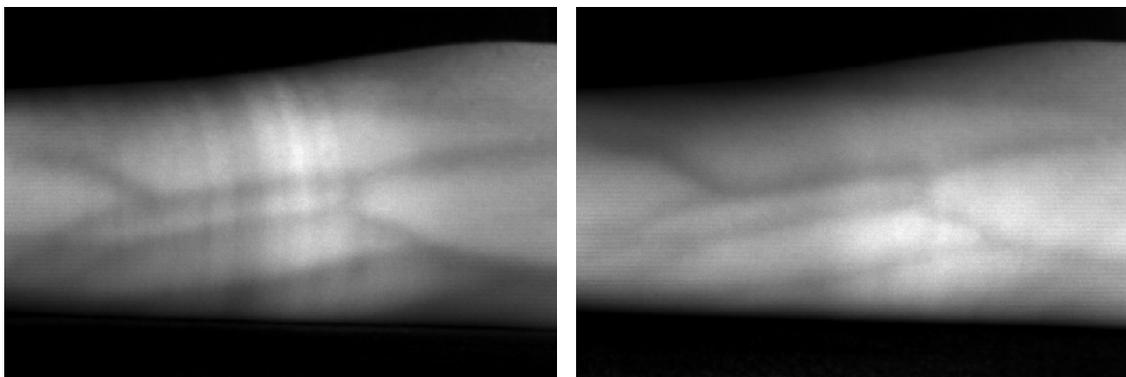


図 11 異なる波長光源と遅延時間による撮影結果. 445nm, 554nm の短波長と比較し, 639nm, 808nm の長波長において遅延時間を大きくしていき, 皮膚下の血管が徐々に可視化される様子を示す.

5.2 血管の強調表示

図 12 に光源波長 808nm を用いて遅延時間 $-600\mu\text{s}$ と $+600\mu\text{s}$ で撮影された画像を示す。3.3.2 節で示した正規化相互相関処理によって、異なる遅延画像から血管が強調された相関値画像を生成する。図 13 において、2 枚の画像の各画素 (d_x , d_y) を基準とし、様々なサイズの短形領域同士で正規化相互相関を計算した相関値画像を示す。その結果、図 13 のように血管が強調された画像が得られた。また、図 13 を疑似カラー表示した結果を図 14 に示す。図 13(a), 図 13(b) のように短形領域のサイズが小さすぎると血管領域があまり強調されておらず視認し難いことがわかる。また、図 13(g), 図 13(h), 図 13(i), 図 13(j) のように逆に短形領域のサイズが大きいと実際の血管の太さ以上に血管領域が太く強調されている。このため、短形領域のサイズ設定として、物体内部の状態の概略を知りたい時には決め打ち的に大きなサイズの短形領域を設定し、更に詳細に位置関係を知りたい時には小さなサイズの短形領域を設定するといった目的に応じてサイズ設定が必要があると考えられる。



(a) 遅延時間： $-600\mu\text{s}$

(b) 遅延時間： $+600\mu\text{s}$

図 12 異なる遅延時間で人の腕を撮影した画像。画像中央付近の血管を示す黒い影が存在するが、ぼやけて視認しにくいことがわかる。

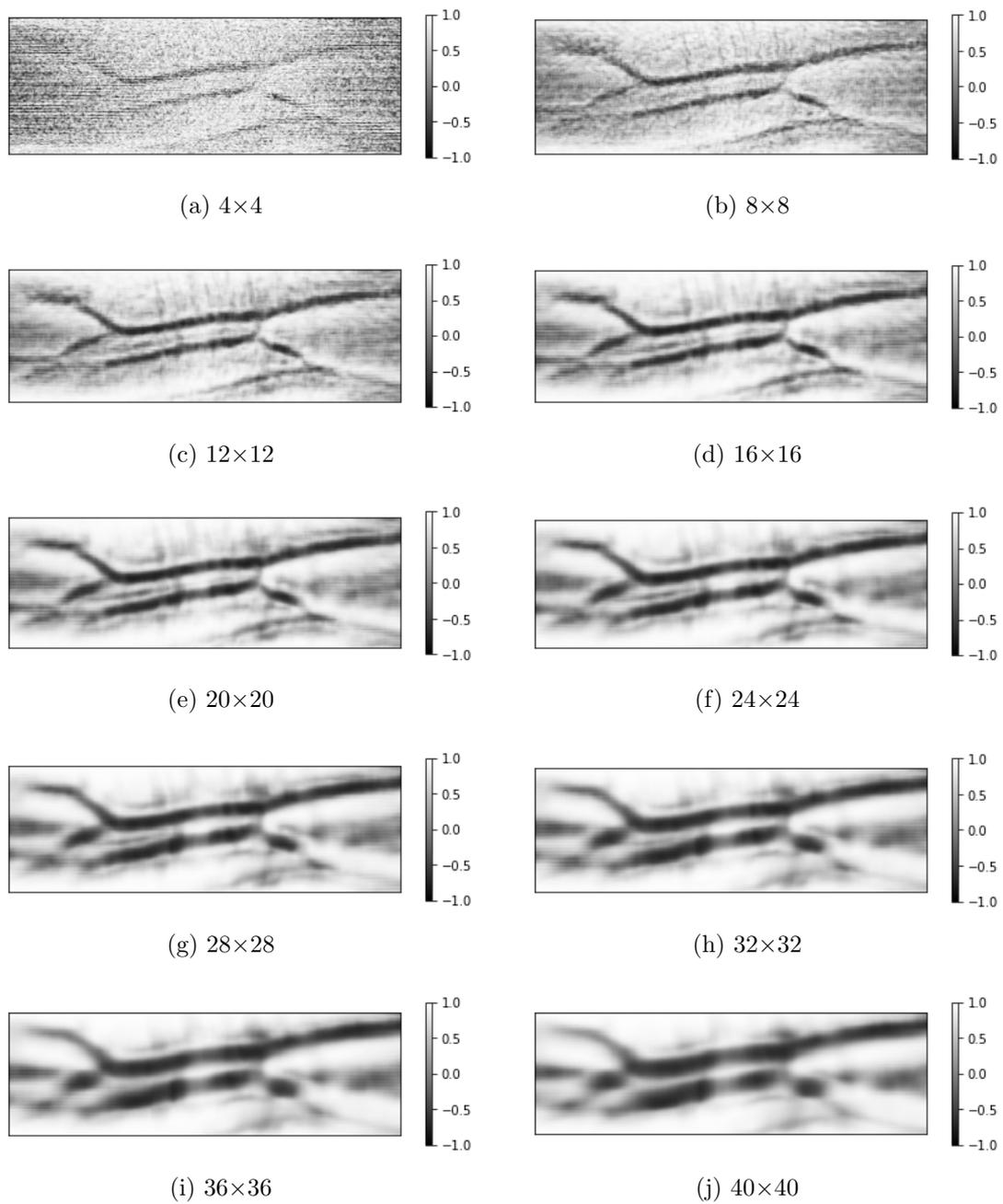


図 13 異なる大きさの矩形領域を設定して計算した相関値画像 (グレースケール)

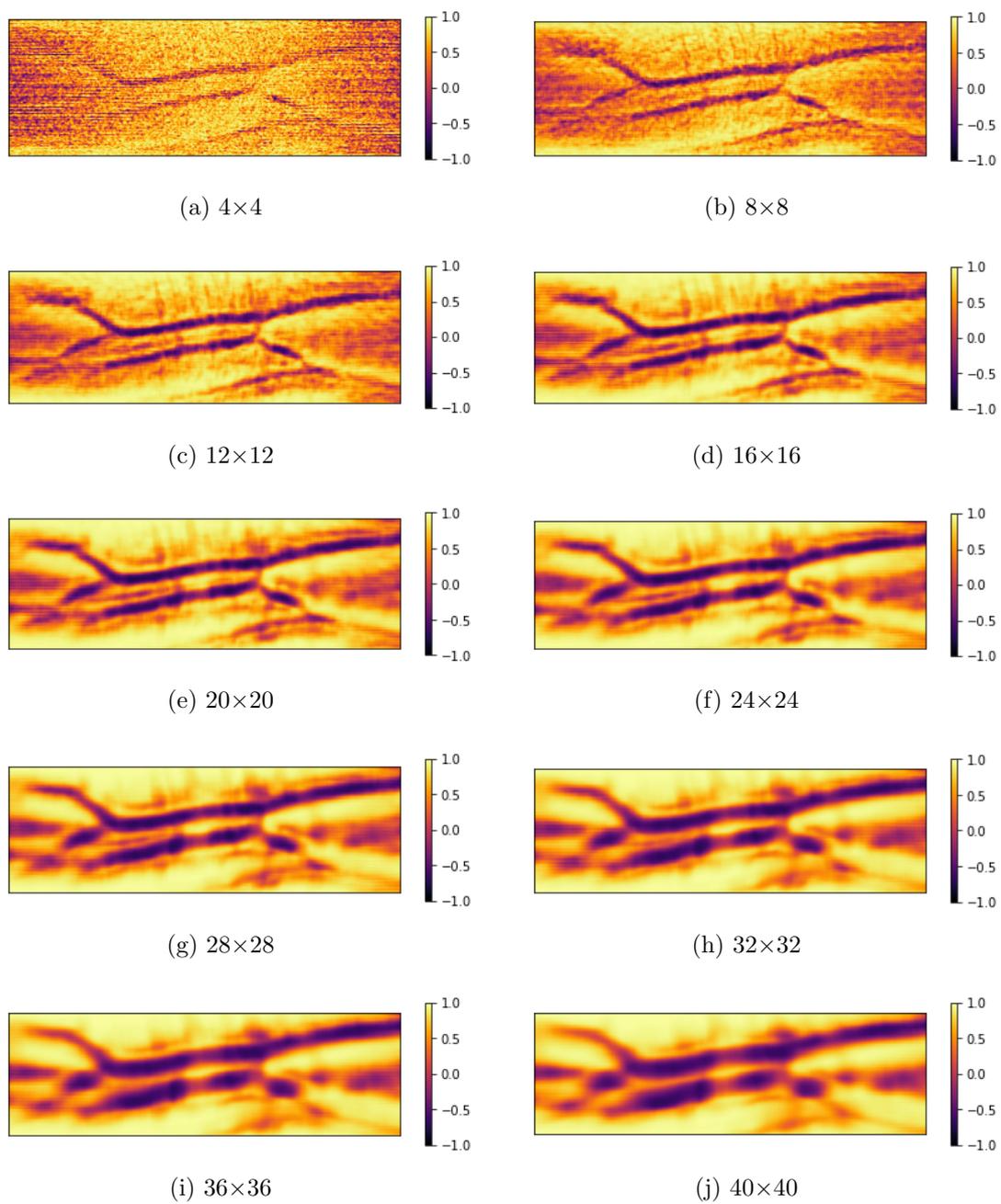


図 14 異なる大きさの矩形領域を設定して計算した相関値画像 (疑似カラー)

6. まとめ

本論文では、時間同期式プロジェクタカメラシステムの照明と撮影のタイミングに遅延を制御して撮影するだけでなく、様々な光源波長を用いた撮影を試みた。その結果、皮膚下の内部状態の可視化について、近赤外波長のような長波長側の光源を用いて撮影すると、遅延時間を設定せずに近赤外線のみで撮影するよりも鮮明に皮膚下の血管が可視化されることがわかった。よって、従来の時間同期式プロジェクタカメラシステムで物体内部をより鮮明に可視化するためには、遅延時間の制御と光源波長の選択が有効であることが示された。

また、異なる符号の遅延時間によって撮影すると、照明と撮影面の位置関係から異なる経路を辿った表面下散乱光を獲得でき、物体内部の吸光物質を示す影の現れ方に違いが生じる。この性質を利用し、異なる符号の遅延時間で撮影した2枚の画像に対して、その非対称性を利用して物体内部を強調する画像の生成を可能にし、実験より物体内部構造が強調され視認性が向上しているため、提案手法の有効性を確認した。

構築したシステムについて2つの制限を述べる。1つ目は大域的な間接光成分が取得できない点である。その原因として、構築したシステムはレーザプロジェクタ外部から光源を取り込んで照明している点が挙げられる。そのため、レーザプロジェクタ内部のMEMSミラーの制御と同期した点灯制御ができず、MEMSミラーが下から上に折り返す際は光源は常時点灯した状態となっている。本論文で示したような1ライン毎の照明と撮影で取得できる局所的な間接光成分の取得においては問題にならない。しかし、1ラインの照明とそれ以外のすべてのラインを撮影することによって取得できる大域的な間接光成分において、ミラーの折り返し中も点灯している光源による直接光が混入してしまう。2つ目は、パターン光の投影ができない点である。これも、MEMSミラーの制御と同期した外部光源の制御ができないことによる制限である。よって、本システムでは1ライン毎の照明と撮影のタイミングを制御による反射光成分を選択的な取得しかできない。

今後の課題と展望について述べる。1つ目の課題としては、MEMSミラーの制御と共に外部光源の点灯制御が可能になるようレーザプロジェクタに本来から取り付けられている光源の制御に関わる同期信号を見つけて外部光源と点灯制御の

同期が挙げられる。また、2つ目の課題として照明と撮影のタイミングを決定する遅延時間の符号を逆転によって発生する表面下散乱光成分の非対称性を利用した物体内部の強調処理をリアルタイムシステムとして実装することが挙げられる。最後に展望として、本論文で構築したシステムは光源と撮影機材を平行に設置し反射光成分を選択的に取得していたが、光源と撮影機材を向かい合わせで設置し、物体をその中央に設置することで、透過光成分の選択的な取得が可能であると考えている。

謝辞

著者が大学院に入学する前のスプリングセミナーやオープンキャンパスの時から大変親切にさせていただきだけでなく、毎週の研究ミーティング等において懇切なるご指導とご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 向川 康博 教授に心より感謝致します。

著者が修士2年生のコロキアム B においては貴重な助言を頂き、そして、本研究の副査を引き受けて頂いたインタラクティブメディア設計学研究室 加藤 博一 教授に厚く御礼申し上げます。

修士1年の終わりに研究テーマが曖昧となった著者に対して声をかけてくださり、それ以降の研究活動で熱心な指導をしてくださったことは忘れません、そして、研究生生活において著者のメンタルが故障する度に親身になって相談に乗ってくださった光メディアインタフェース研究室の久保 尋之 助教に心より感謝致します。

本研究における多大なるご助言と共に電子情報通信学会総合大会の予稿執筆の際には懇切なるご指導を頂いた船富 卓哉 准教授に心より感謝致します。

著者が修士1年の際は、分光器の扱いに苦しんでいた著者が研究ミーティングでその分光器のノイズ特性に対して意見した際、周りの先生方が半信半疑の中で意見を援護してくださった件は忘れません。そのような要所毎に貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 田中 賢一郎 助教に心より感謝致します。

著者の就職活動の際は大変お世話になり、就職活動に対して懇切丁寧な指導をしてくださったこと、そして、修士2年の秋頃に NAIST 近辺まで来てくださって悩みの相談に乗っていただいた株式会社ジースタイラス 高橋 洋平 副社長に心より感謝いたします。

著者が修士1年の時の PBL において分光画像から物体表面の湿り具合を推定する論文 [19] の追実験をしている時に、論文の理解に苦しんでいる著者と様々な議論やアドバイスをしてくださったり、研究活動や大学院生活の様々な場面で助けていたり高谷 剛志さんには最大限の感謝を送ります。

著者の研究活動において、様々なトラブルに対して的確なアドバイスをしてくださった榎田 貴弘さんと北野 和哉さんとはいくら感謝をしてもしきれません。

最後に日々の研究活動や私生活において喜びや悩みを共有した同期一同に心より感謝いたします。

発表リスト

- [1] 三上 徹朗, 久保 尋之, 船富 卓哉, 向川 康博. 時間同期式プロジェクタカメラシステムの遅延時間制御による血管の強調表示, 電子情報通信学会総合大会, 2020

付録

A. 撮影結果

A.1 光源波長 445nm と異なる遅延時間設定による結果

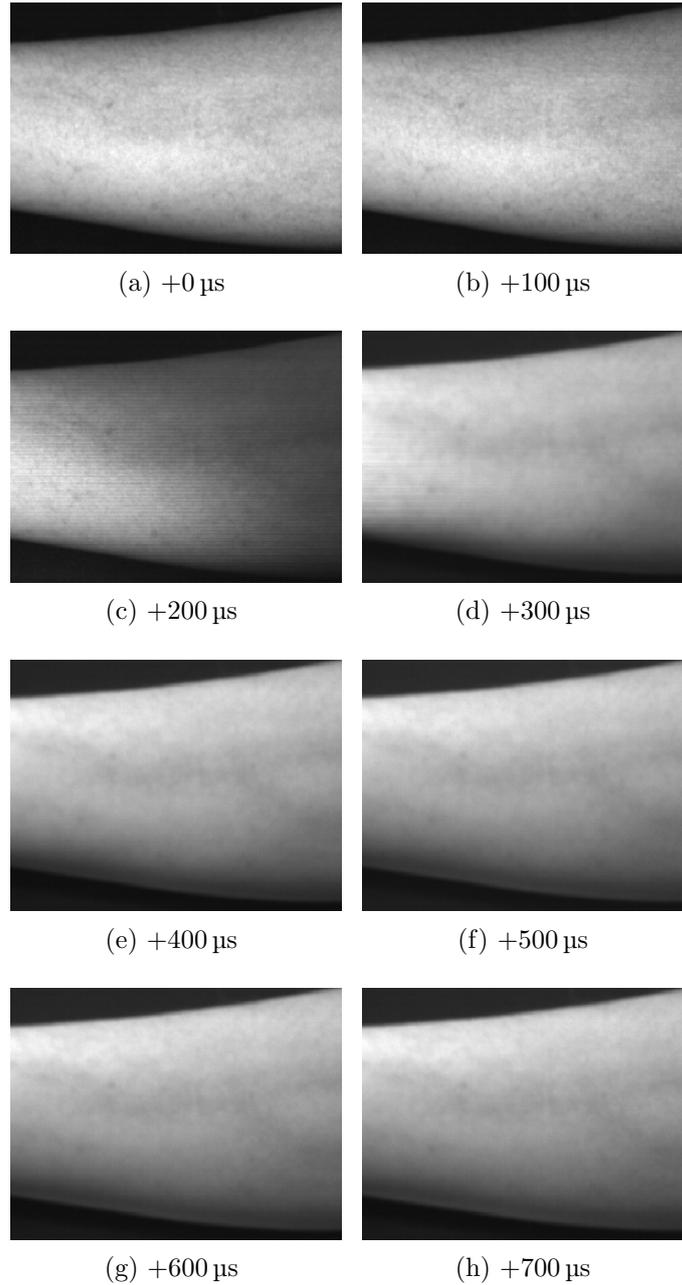


図 15 光源波長:445nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1

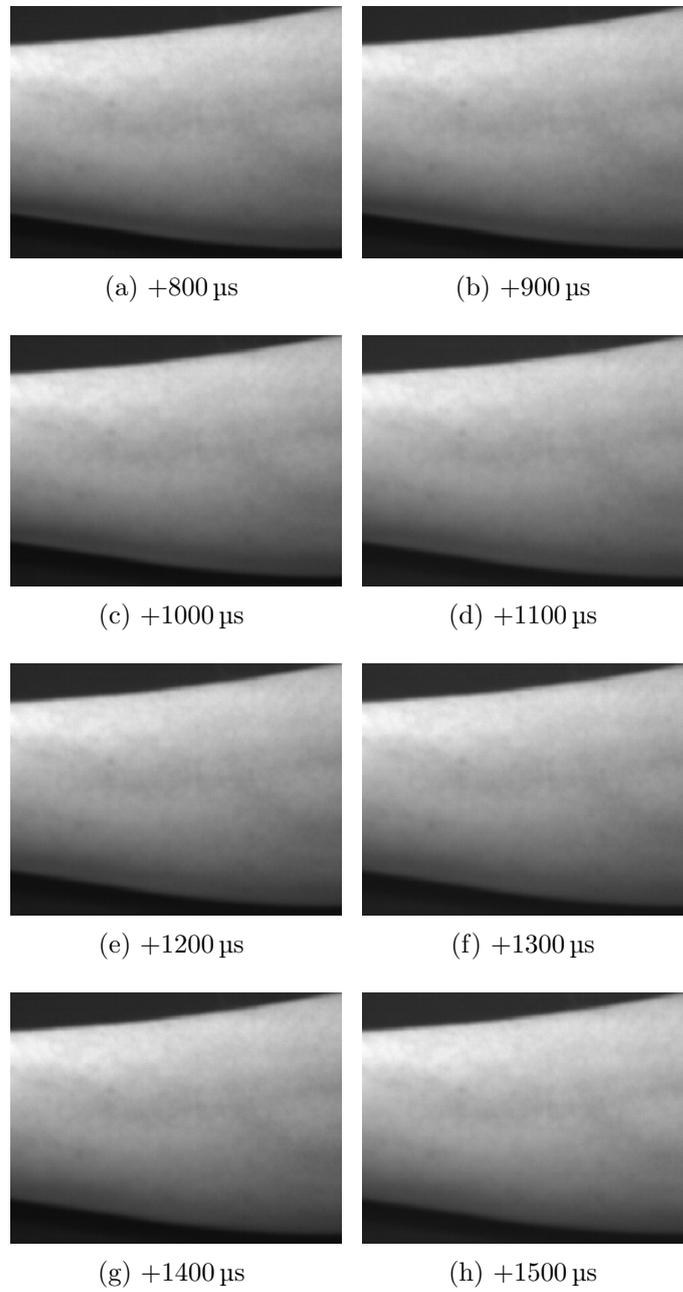


図 16 光源波長:445nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2

A.2 光源波長 554nm と異なる遅延時間設定による結果

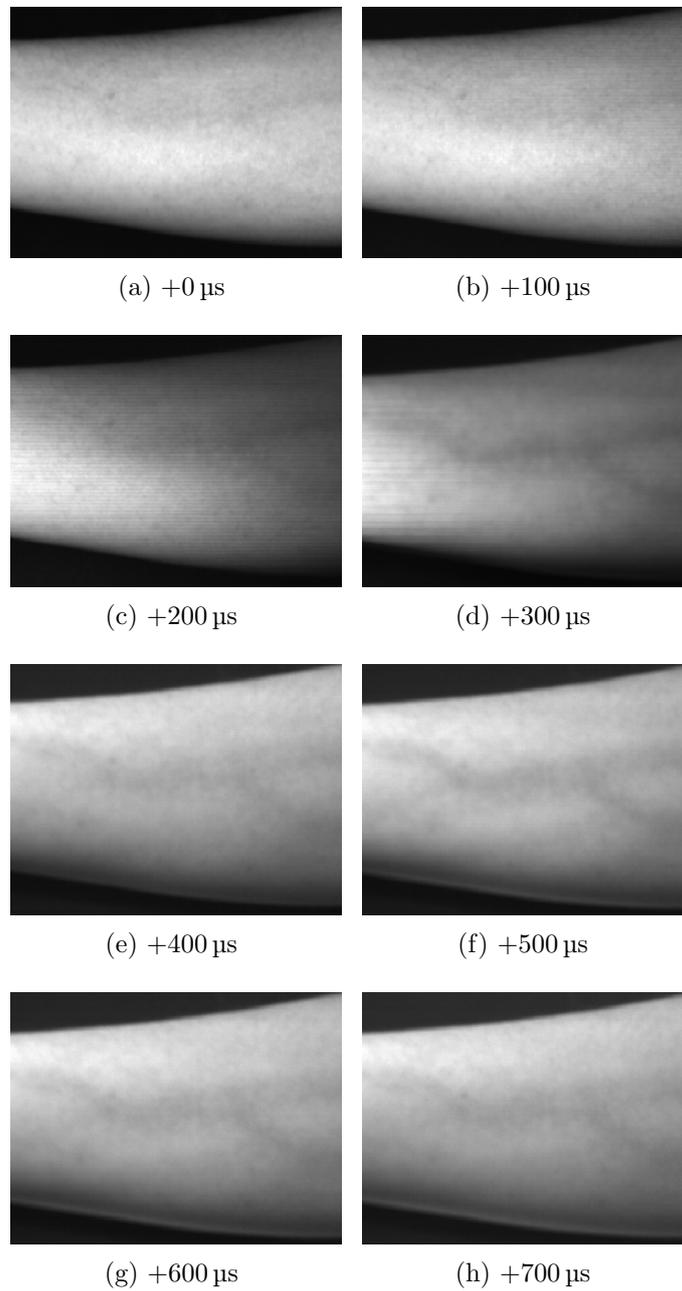


図 17 光源波長:554nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1

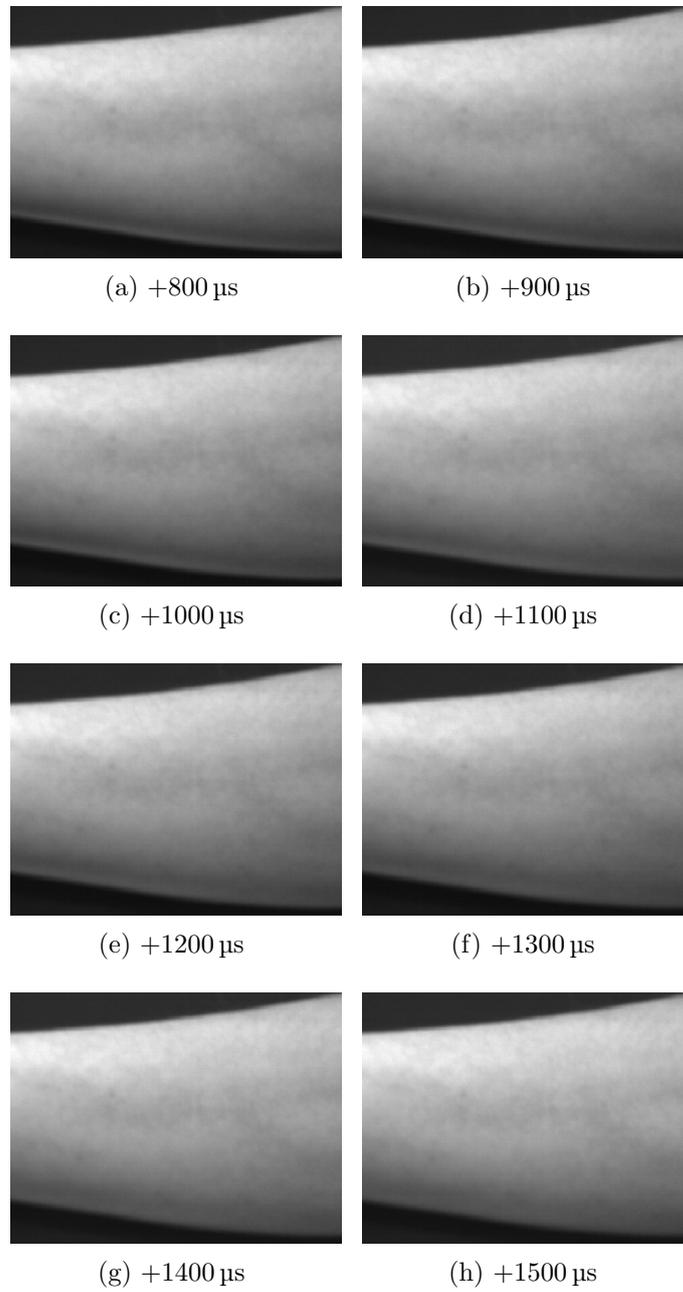


図 18 光源波長:554nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2

A.3 光源波長 639nm と異なる遅延時間設定による結果

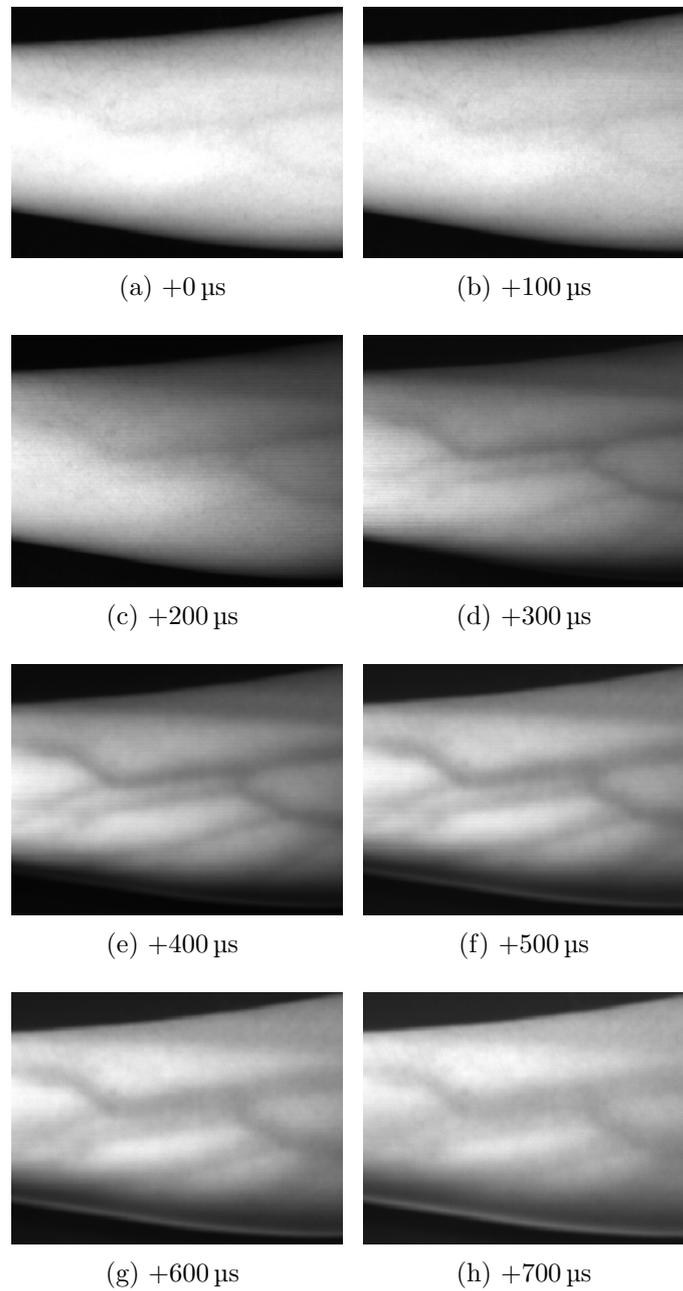


図 19 光源波長:639nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1

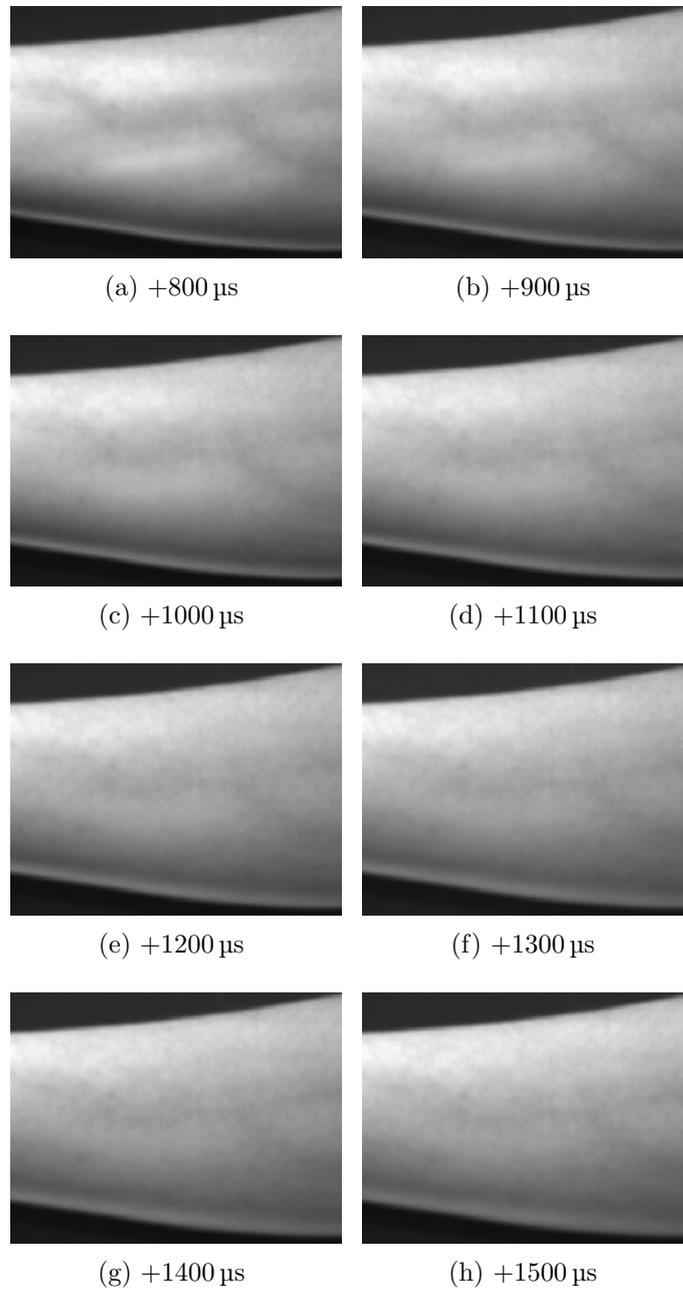


図 20 光源波長:639nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2

A.4 光源波長 808nm と異なる遅延時間設定による結果

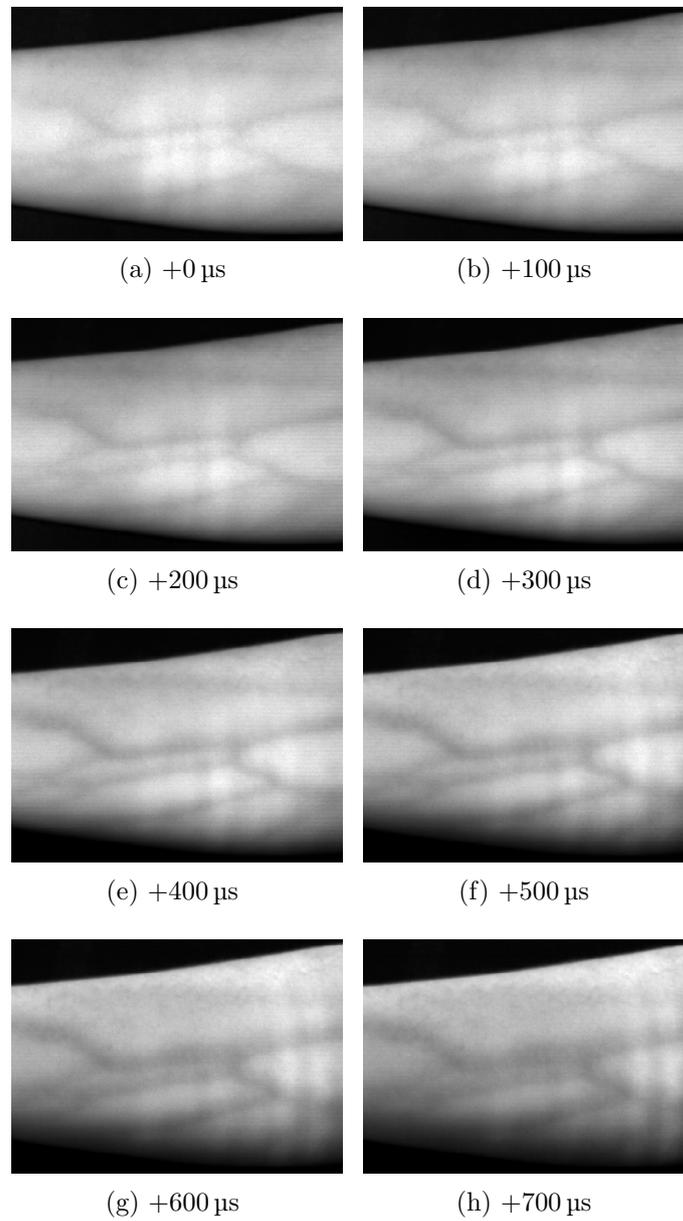


図 21 光源波長:808nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 1

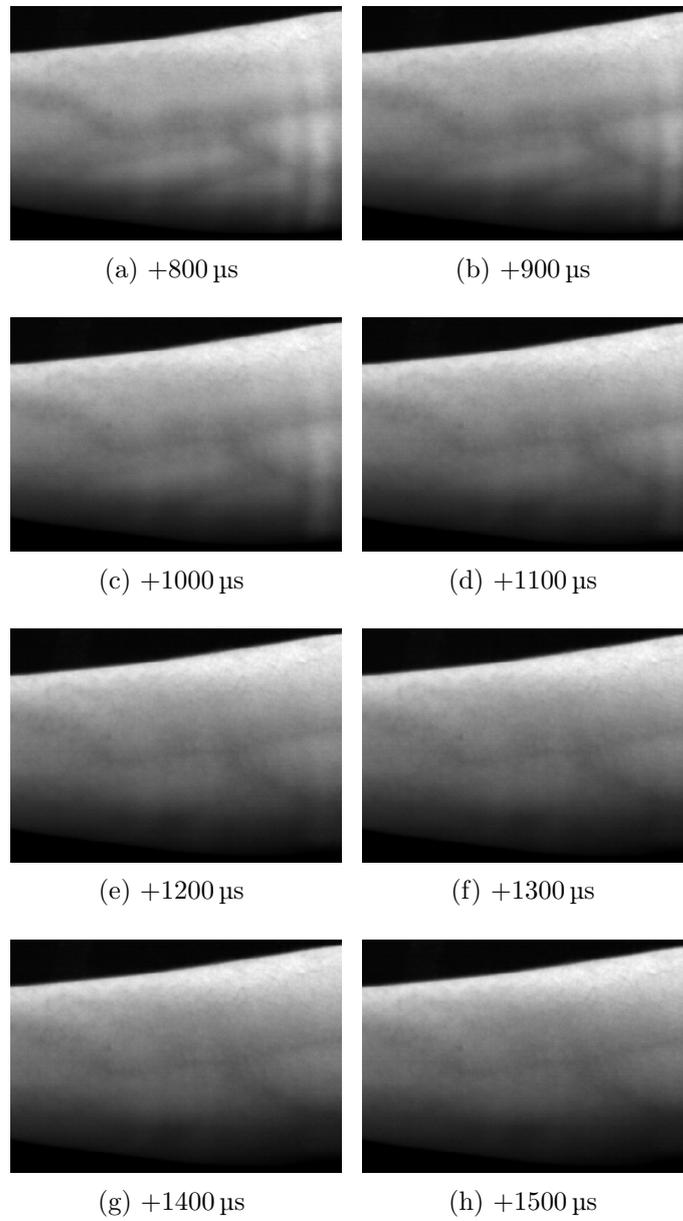


図 22 光源波長:808nm と異なる遅延時間設定による撮像結果 2

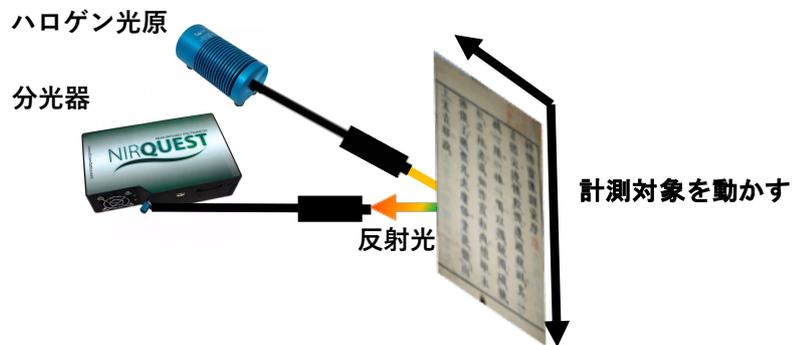
B. 近赤外領域における高解像度分光画像計測装置の試作

従来から考古学の分野において貴重な歴史的資料の1つである古典籍について調査や収集が実施されている。特に、古典籍に捺印されている複数の蔵書印は古典籍の伝来や由来を知る上で重要な情報の1つとなっている。一般的に蔵書印は古典籍の所有者が移り変わることで、紙面上を削ったり、蔵書印の上から別の蔵書印を捺印して消されてしまうことが多い。そのため、判読不能になってしまった蔵書印の復元が課題となっている。従来から歴史的資料に対する非破壊解析の手段の1つとして近赤外面像を使った解析が実施されてきた。特に近赤外線800~1100nmに感度のあるカメラを使って撮影された近赤外面像から掠れた墨文字の復元が実施されることが多い。そこで、更に長波長で高波長分解能な800~2500nmの近赤外面像を使って解析できれば、朱印や墨印の化学的な組成の違いによる詳細な解析が可能になる。しかし、近赤外全域の分光情報を高波長分解能で撮影できるようなカメラは存在しない。そこで、図23に示すように計測範囲は1点のみだが近赤外全域の分光情報を高波長分解能で計測できる分光器(Ocean Optics社製NIRQuest512-2.5, 対応波長900~2500nm, 波長分解能6.3nm)と自動ステージ, 更にハロゲン光源(Ocean Optics社製HL-2000-HP, 出力20W)を組み合わせて, 空間的にも高解像度な計測装置を構築した。なお, 古典籍の破損を避けるため反射系での計測を前提とした計測装置を構築し, 古典籍の各ページに存在する蔵書印を計測した。しかし, 利用した分光器には以下に示す欠点があり, 構築した計測装置を用いて古典籍から分光情報の取得には至らなかった。

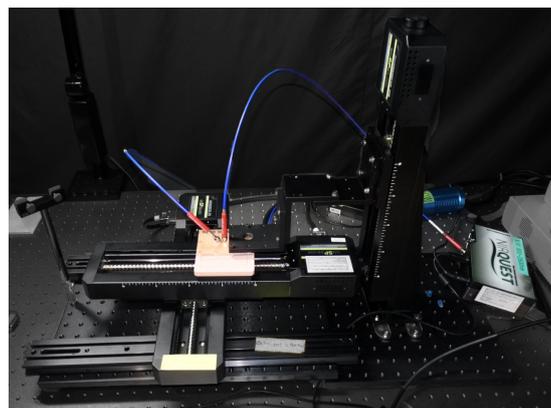
1. センサ感度が極端に低く, 計測においては常にノイズが支配的であった。
2. 分光器からの発熱によってノイズが流動的に印加され, 長時間計測に不向きである。

よって, 本分光器は反射系で長時間計測に不向きであり用途に合っていないことがわかった。本分光器を用いた計測の展望として, より強力な出力を持つ光源

を用意し、透過系や反射型プローブを計測物体に密着させての計測が挙げられる [20].



(a) 構築した計測装置の模式図



(b) 実際に構築した計測装置



(c) 計測の様子

図 23 分光器と自動ステージを組み合わせた計測装置

C. 1次元走査型 MEMS ミラーとパウエルレンズを用いた光源システムの試作

様々な光源波長を選択的に利用できるライン走査式光源システムを試作した。光源システムの基本的な仕様は以下の2点である。

1. コリメート済みのレーザダイオードを簡単に取り替えて光源波長を選択可能であること、
2. レーザ光をライン光として上下に走査できること。

そこで、光源システムの試作にあたってパウエルレンズと1次元走査式の MEMS ミラーを用意した。前者はレーザ光を均一な強度のライン光に伸張することができる。後者は、任意の電流値を入力することによってミラーが上下に高速で走査される装置である。試作においては浜松ホトニクス社製の1次元走査型の MEMS ミラー S12237-03P とそのドライバモジュールを利用した。本 MEMS ミラーの光学的振れ角は $\pm 15^\circ$ となっている。

図 24 に試作する光源システムの模式図を示す。レーザダイオードからコリメート済みのレーザ光が MEMS ミラーに照射される。そして、MEMS ミラーからパウエルレンズにレーザ光が入射し、ライン光に変換される。また、MEMS ミラーはミラーを上下に走査しているのでライン光も上下に走査される。

実際に試作した光源システムを図 25 に示す。レーザダイオードと MEMS ミラー、パウエルレンズのアラインメントを揃えて取り付けるために 3D プリントでモデルを造形した。造形したモデルの中には MEMS ミラーが取り付けられてあり、その斜め上にコリメート済みのレーザダイオードを設置した。ただし、レーザ光がミラーの中心に照射され、そのレーザ光のビーム径がミラーの直径に収まるように距離を調整した。また、MEMS ミラーに対して垂直にパウエルレンズが取り付けられた。

図 25 に示すようにレーザダイオードを点灯させるとレーザ光がライン光に変換されていることがわかる。図 26 に MEMS ミラーに対して電流を印加し、ライン光が上下に走査されている様子を示す。

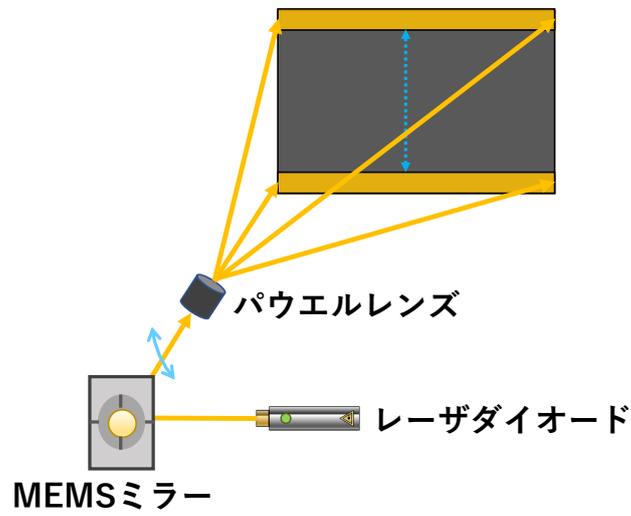


図 24 試作した光源システムの模式図.



図 25 MEMS ミラーとパウエルレンズを用いて試作した光源システム. ライン光が出力されていることがわかる.

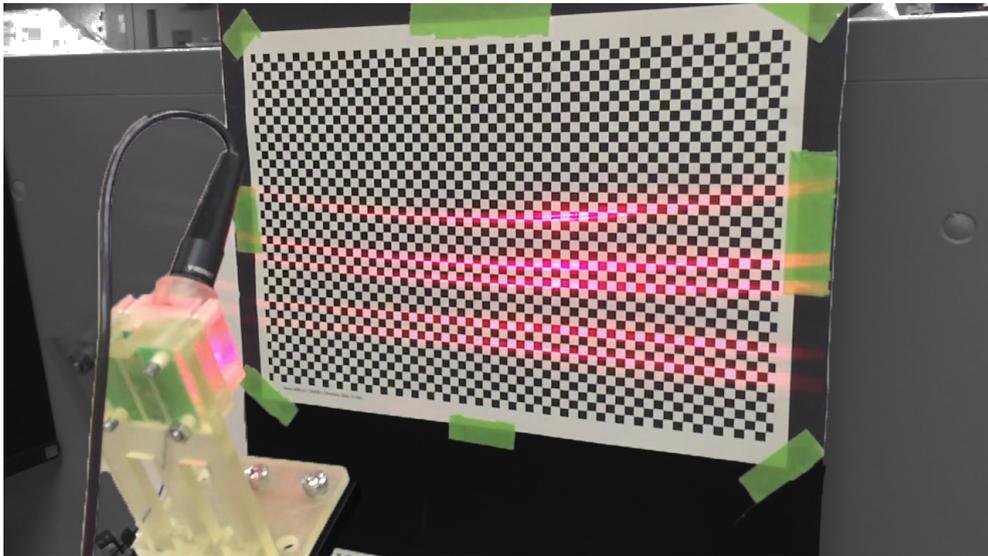


図 26 ライン光が上下に走査されている様子. ライン光が上下に走査されている様子を動画で撮影したのち, フレームを切り出して走査されている様子がわかりやすいよう合成した.

参考文献

- [1] Stephen Lin, Yuanzhen Li, Sing Bing Kang, Xin Tong, and Heung-Yeung Shum. Diffuse-specular separation and depth recovery from image sequences. In *European conference on computer vision*, pages 210–224. Springer, 2002.
- [2] Wan-Chun Ma, Tim Hawkins, Pieter Peers, Charles-Felix Chabert, Malte Weiss, and Paul Debevec. Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination. In *Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques*, pages 183–194. Eurographics Association, 2007.
- [3] Shree K Nayar, Xi-Sheng Fang, and Terrance Boult. Separation of reflection components using color and polarization. *International Journal of Computer Vision*, 21(3):163–186, 1997.
- [4] Shree K Nayar, Gurunandan Krishnan, Michael D Grossberg, and Ramesh Raskar. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 25, pages 935–944. ACM, 2006.
- [5] Ko Nishino, Art Subpa-Asa, Yuta Asano, Mihoko Shimano, and Imari Sato. Variable ring light imaging: Capturing transient subsurface scattering with an ordinary camera. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 598–613, 2018.
- [6] Matthew O’Toole, Supreeth Achar, Srinivasa G Narasimhan, and Kiriakos N Kutulakos. Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 34(4):35, 2015.
- [7] Hiroyuki Kubo, Suren Jayasuriya, Takafumi Iwaguchi, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, and Srinivasa G Narasimhan. Acquiring and char-

- acterizing plane-to-ray indirect light transport. In *2018 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–10. IEEE, 2018.
- [8] Seon Joo Kim, Fanbo Deng, and Michael S. Brown. Visual enhancement of old documents with hyperspectral imaging. *Pattern Recognition*, 44(7):1461 – 1469, 2011.
- [9] Aamir Shahzad, Nicolas Walter, Aamir Saeed Malik, NM Saad, and Fabrice Meriaudeau. Multispectral venous images analysis for optimum illumination selection. In *2013 IEEE International Conference on Image Processing*, pages 2383–2387. IEEE, 2013.
- [10] Tali Treibitz and Yoav Y Schechner. Active polarization descattering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, (3):385–399, 2008.
- [11] Shree K. Nayar, Gurunandan Krishnan, Michael D. Grossberg, and Ramesh Raskar. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):935–944, July 2006.
- [12] Dikpal Reddy, Ravi Ramamoorthi, and Brian Curless. Frequency-space decomposition and acquisition of light transport under spatially varying illumination. In *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision - Volume Part VI, ECCV’12*, pages 596–610, Berlin, Heidelberg, 2012. Springer-Verlag.
- [13] Mohit Gupta, Srinivasa G Narasimhan, and Yoav Y Schechner. On controlling light transport in poor visibility environments. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2008.
- [14] Srinivasa G Narasimhan, Shree K Nayar, Bo Sun, and Sanjeev J Koppal. Structured light in scattering media. In *Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on*, volume 1, pages 420–427. IEEE, 2005.

- [15] Matthew O’Toole, Ramesh Raskar, and Kiriakos N. Kutulakos. Primal-dual coding to probe light transport. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4):1–11, 2012.
- [16] Matthew O’Toole, Supreeth Achar, Srinivasa G. Narasimhan, and Kiriakos N. Kutulakos. Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging. *ACM Trans. Graph.*, 34(4):35:1–35:13, July 2015.
- [17] Hiroyuki Kubo, Suren Jayasuriya, Takafumi Iwaguchi, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, and Srinivasa G. Narasimhan. Acquiring and characterizing plane-to-ray indirect light transport. In *IEEE International Conference on Computational Photography, ICCP 2018*, pages 1–10. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 5 2018.
- [18] Michael S. Patterson, Brian C. Wilson, and Douglas R. Wyman. The propagation of optical radiation in tissue. ii: Optical properties of tissues and resulting fluence distributions. *Lasers in Medical Science*, 6(4):379–390, Dec 1991.
- [19] H. Okawa, M. Shimano, Y. Asano, R. Bise, K. Nishino, and I. Sato. Estimation of wetness and color from a single multispectral image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 1–1, 2019.
- [20] Therese Alburg and David Kraus. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool to evaluate liver tissue. *Lund University of Student publication for Master’s degree*, 2014.