

## 近赤外波長における間接光成分の選択的撮影と演算処理による血管の可視化

三上 徹朗†久保 尋之†船富 卓哉†向川 康博†

† 奈良先端科学技術大学院大学

E-mail: mikami.tetsuro.mr9@is.naist.jp

## 1 はじめに

直接見ることの出来ない物体の内部を可視化するためには、表面で生じる反射光ではなく、内部で生じる表面下散乱光のみを捕らえる必要がある。人の肌は僅かながら光を通す半透明物体であり、特に医療分野などにおいて、その内部の可視化は重要な課題である。しかし、一般的な照明とカメラを使っただけでは、物体表面で反射する直接光が支配的となり間接光である表面下散乱光のみの抽出は難しい。先般研究ではレーザ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、照明と露光を同期させることでエピソード幾何を満たす直接光と満たさない間接光を効率よく撮り分けている [1]。さらに、照明と露光の間で遅延を持たせて同期させることで、異なる間接光を撮り分ける手法が提案されている [2]。同論文では、表面下散乱光を撮り分けて肌内部を可視化する事例が示されているが、遅延時間の設定や用いる光源波長 (639nm を利用) はあくまで経験的に定められていた。そこで、本研究ではエピソード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、物体内部を通過する表面下散乱光の計測に対する照明の波長と遅延時間の影響を明らかにする。さらに、物体内部の様子の視認性を向上させるため、計測結果を演算処理することで強調画像を生成する手法を提案する。

## 2 物体内部の可視化と視認性の向上

## 2.1 遅延時間制御による物体内部の可視化

本研究で使用するプロジェクタ-カメラシステムの模式図を図 1 示す。レーザ走査式プロジェクタとローリングシャッターカメラが平面に配置され、それぞれは上下に繰り返し走査しながらシーンのある 1 面の照明と露光を繰り返す。照明と露光のタイミングに対して意図的に遅延時間を加えると照明面と露光面の上にギャップが発生し、照明面から露光面への表面下散乱光を取得できる。これは図 1 に示すように表面下の深さに依存すると考えられる [3]。その経路上に血管のような吸光物質が存在すると、観測される光量が減少するため黒い影として撮影され、これは物体内部の構造を反映して

いと捉えることができる。そして、遅延時間を制御することにより、異なる深さを通った散乱光を撮影できるため、内部構造の可視化に有用であると考えられることができる。

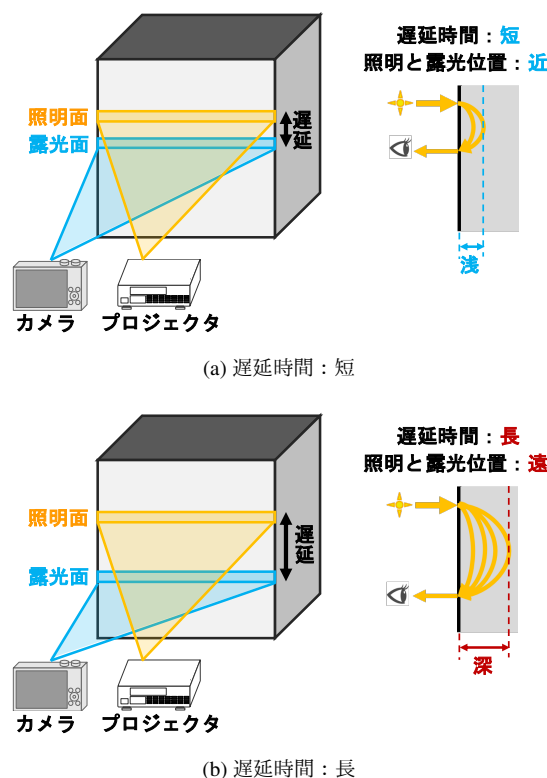


図 1: システムの模式図。ローリングシャッターカメラとレーザプロジェクタを平面に設置し、照明と露光のタイミングを同期させ、上から下へ繰り返し走査する。ここで、照明と露光のタイミングに遅延を加えることで異なる深さの散乱光が取得できる。

## 2.2 異なる波長光源による物体内部の可視化

従来、光源として用いていたレーザプロジェクタは 445nm, 554nm, 639nm の 3 つの可視波長を利用できる。本研究では、さらにそれらに加えて、一般的に生体を透過しやすいとされ、内部の可視化によく用いられる近赤外波長 808nm も含めた 4 バンドの波長をそれぞれ選択して計測を実施する。追加の光源 (レーザダイオード) を設置するためには、プロジェクタに改良を加える必要がある。プロジェクタ内部の構造は図 2

の可視波長レーザダイオードとレーザ光を空間的に走査する2次元走査型 MEMS ミラーが内蔵されている。プロジェクタ内部に新たな近赤外波長レーザダイオードを配置する余裕はないため、図2に示すようにプロジェクタ筐体の外部からレーザ光を取り込み、内部の MEMS ミラーに照射することで、追加のレーザ光を照射できるよう改良を施した。

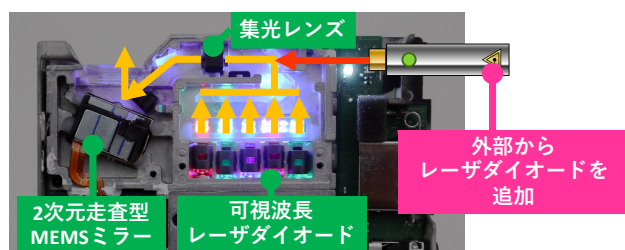


図2: レーザプロジェクタ内部

実装したプロジェクターカメラシステムを図3に示す。プロジェクタとカメラは横に高さを合わせて整列させて固定した。プロジェクタには Sony 製 MP-CL1A を利用し、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 製 UI-3250CP-NIR-GL (解像度 1600×1200) を使用した。本カメラはローリングシャッターとグローバルシャッターのどちらも設定が可能であり、前者は提案するシステムで用い、後者は実験において比較のために用いる。なお、露光後は 12 bit の画像として取得する。また、外部からレーザダイオードをコリメートしてプロジェクタ内部の MEMS ミラーと光軸が一致するように位置関係を調整して取り込んだ。プロジェクタによる照明とカメラによる露光のタイミングは同期回路を通して制御する。

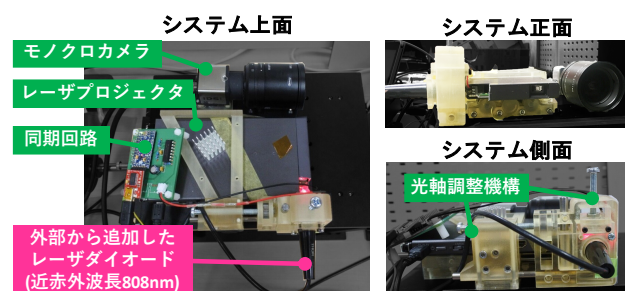


図3: 実装したプロジェクターカメラシステム

### 2.3 視認性を向上させる手法

本システムにおいて、照明と撮影のタイミングを決定する遅延時間として正の値も負の値も設定することが可能である。図4に示すように、設定値の符号によって照明面と撮影面の位置関係が入れ替わる。

物体内部に吸光物質が存在した時、入射光が吸光物質に吸収されて光量が減るため、物体内部に吸光物質

が存在することを示す黒い影が発生するが、この影の見え方は、図5に示すように、照明面と露光面の位置関係によって変化する。例えば、遅延時間を正に設定すると、露光面が上、照明面が下となり、光の入射位置と比較して上部から出射した光が観測されるため、影は上方向に伸びる。逆に、遅延時間を負に設定すると、露光面が下、照明面が上となり、影は下方向に伸びる。このように、設定する遅延時間の正負によって、発生する影には非対称性が生じる。

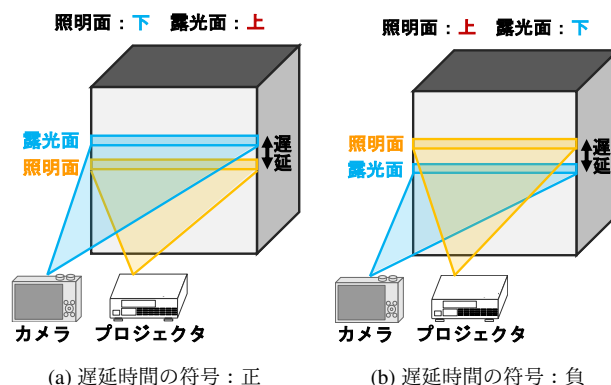


図4: 遅延時間の符号と照明面と露光面の位置関係

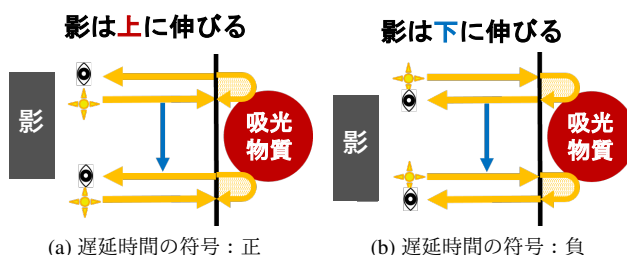


図5: 遅延時間の符号と影の非対称性

この性質を利用し、異なる符号の遅延時間を設定して撮影された2枚の画像を演算処理することで、内部構造が強調された画像を得る。具体的には2枚の画像における各画素に対し、その画素を中心とした矩形領域を設定する。そして、共通する位置の矩形領域間で正規化相互相関を計算し、相関値画像を生成する。この相関値によって、物体内部で吸光によって発生する影か、散乱光強度が元々弱いことによるものかを区別でき、内部構造を反映した可視化を実現できる。

## 3 実験と結果

### 3.1 異なる光源波長と遅延時間による撮影

本システムを用いることで、間接光成分である表面下散乱光のみを選択的に計測でき、人の肌のような半透明物体内部を可視化できることを示す。

図6に計測環境を示す。本システムの前に計測対象の腕を設置し、室内の蛍光灯下で撮影を実施した。

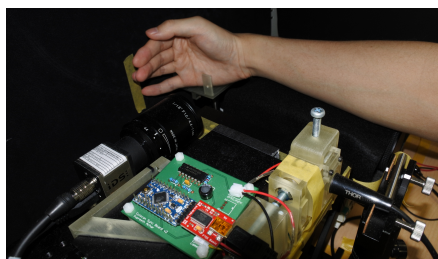


図 6: 計測環境

図 7 に、本システムで使用するモノクロカメラのグローバルシャッタを用いて撮影した画像を示す。直接光が支配的に観測され、肌の内部を視認できない。



図 7: 計測対象の腕

次に、可視波長 445 nm, 554 nm, 639 nm, 近赤外波長 808 nm を用いて撮影を実施した。図 8 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 445 nm, 554 nm, 639 nm 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  $400\mu\text{s}$ ,  $600\mu\text{s}$  付近であれば、 $0\mu\text{s}$  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  $400\mu\text{s}$ ,  $600\mu\text{s}$  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  $0\mu\text{s}$  と  $400\mu\text{s}$  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  $0\mu\text{s}$  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いため視認性も低い。

## 3.2 相関値画像の生成による視認性の向上

### 3.2.1 影の非対称性の確認

2.3 節で述べた計算処理による視認性の向上を検証した。まず、影の非対称性を確認するため、図 9 に示すアクリル板を利用した予備実験を実施した。アクリル板には血管を模した黒い紙を挟んでいる。本システムを用いて遅延時間に正と負の値を設定し、アクリル板を撮影した結果画像と輝度値の変化を図 10 に示す。正の遅延時間を設定した時は影は上方向に伸び、逆に負の遅延時間を設定した時は影は下方向に伸びることが確認できる。

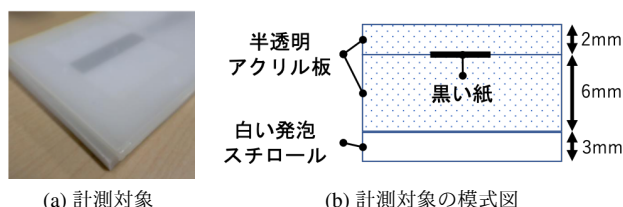


図 9: 計測対象のアクリル板

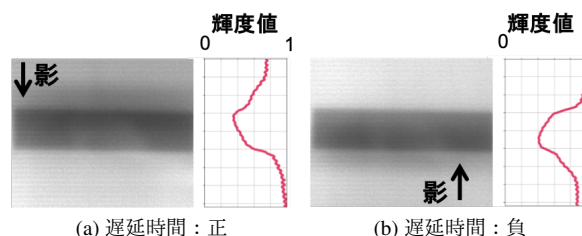


図 10: 発生した影

### 3.2.2 正規化相互相関による視認性向上実験

2.3 節で述べたように、異なる符号の遅延時間を設定して撮影した画像で発生する影の非対称性を利用し、正規化相互相関を計算し相関値画像を生成した。相関値画像の生成に用いる近赤外波長 808 nm で撮影した 2 枚の画像を図 11 に示す。また、2 枚の画像 (点線部分) から生成された相関値画像をグレースケールと疑似カラーで図 12 に示す。血管が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。一方、血管が存在する箇所では影が発生し、同期遅延時間によって発生する影の方向が異なるため負の相関が得られる。その結果、図 12 のように血管が強調された画像が得られる。図 11 の計算処理前の画像と相関値画像を比較す

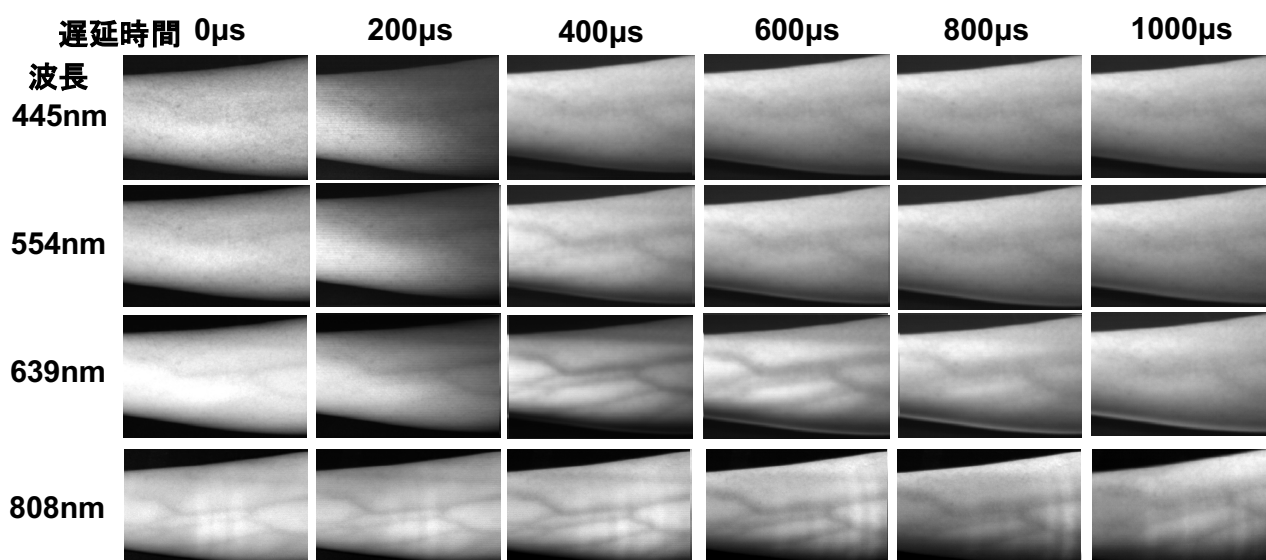


図 8: 異なる波長光源と遅延時間による撮影結果. 445nm, 554nm の短波長と比較し, 639nm, 808nm の長波長において遅延時間を大きくしていき, 皮膚下の血管が徐々に可視化される様子を示す.

ると血管の存在を示す黒い影についてコントラストが上昇し, 視認性が向上していることがわかる.

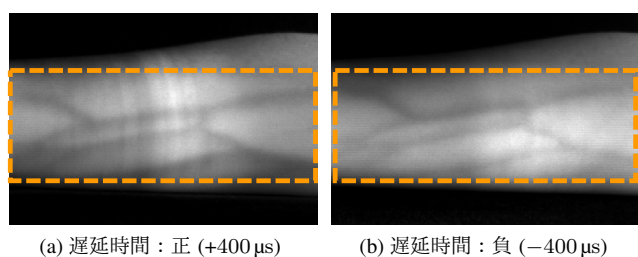


図 11: 異なる符号の同期遅延で人の腕を撮影した画像

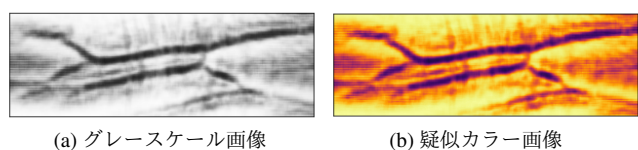


図 12: 血管が強調された相関値画像

## 4 まとめ

本稿では, 物体内部の可視化を目的とし, 時間同期式のプロジェクターカメラシステムを用いて様々な光源波長と遅延時間を設定し, 被写体である肌を計測した. そして, 遅延時間の適切な設定が物体内部の可視化に寄与し, 更に光源波長についても従来用いられていた可視波長と比較して物体を透過しやすい近赤外波長を用いると鮮明な可視化が可能になることを示した. また, 本システムを用いて, 異なる符号の遅延時間で画像を 2 枚撮影し, これらの正規化相互相関を計算す

ることで物体内部の強調画像を生成する手法を提案した. 実験により, 単純にシステムを通して撮影した画像と比較して, コントラストが上昇し視認性を向上できることを確認した. 今後の課題として, リアルタイムシステムとして画像処理を装置に実装することが挙げられる.

## 謝辞

本研究は, 日本学術振興会 科研費 19H04138, および科学技術振興機構 CREST JPMJCR1764 の助成を受けたものです.

## 参考文献

- [1] Matthew O'Toole, Supreeth Achar, Srinivasa G. Narasimhan, and Kiriakos N. Kutulakos. Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, pp. 35:1–35:13, July 2015.
- [2] H. Kubo, S. Jayasuriya, T. Iwaguchi, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, and S. G. Narasimhan. Programmable non-epipolar indirect light transport: Capture and analysis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp. 1–1, 2019.
- [3] Ko Nishino, Art Subpa-asa, Yuta Asano, Mihoko Shimanoto, and Imari Sato. Variable ring light imaging: Capturing transient subsurface scattering with an ordinary camera. In *The European Conference on Computer Vision (ECCV)*, September 2018.