

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H04138

研究課題名（和文）インダイレクト光伝搬の計測と解析による潜在的映像の可視化

研究課題名（英文）Visibility Enhancement of Concealed Appearance by Acquiring and Analysis of Indirect Light Transport

研究代表者

久保 尋之（Kubo, Hiroyuki）

千葉大学・大学院情報学研究院・准教授

研究者番号：90613951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、シーンのインダイレクト光伝搬の性質に応じて選択的に取得した観測をもとに、物理ベースの数理モデルを用いてシーンの潜在的情報の可視化を目的とした。5年間で、時間同期式のプロジェクターカメラシステムの構築、近赤外光を利用した皮下組織の可視化、透過光と散乱光の分離計測、マルチスペクトル情報の計測、構造化照明による低次散乱光と高次散乱光の分離、偏光を利用した液体の流れ方向の可視化など、様々な専用光学デバイスと画像処理アルゴリズムを開発した。これらの研究成果は、国内外の学会で発表され、複数の賞を受賞するなど高く評価された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究プロジェクトの成果は、インダイレクト光伝搬の性質を利用して、従来は可視化が困難であったシーンの潜在的情報を可視化する新たな手法を確立した点で学術的に意義がある。特に、専用の光学デバイスと画像処理アルゴリズムを組み合わせることで、皮下組織や内部構造、液体の流れなどの可視化を実現したことは、コンピュータビジョンや画像処理の分野に大きく貢献すると言える。また、本研究の成果は、医療診断や食品検査、材料分析など、様々な分野での応用が期待され、非破壊検査や可視化技術の発展に寄与することで、社会的にも大きな意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Over the five years of this research project, we aimed to visualize latent information in scenes by selectively acquiring observations based on the properties of indirect light transport and using physics-based mathematical models. We developed various specialized optical devices and image processing algorithms, including a time-synchronized projector-camera system, visualization of subcutaneous tissues using near-infrared light, separate measurement of transmitted and scattered light, measurement of multispectral information, separation of low-order and high-order scattering light using structured illumination, and visualization of liquid flow direction using polarization. These research results were presented at domestic and international conferences, receiving multiple awards and high recognition.

研究分野：画像情報処理

キーワード：コンピュータビジョン コンピューショナルフォトグラフィ コンピューショナルイメージング
コンピュータグラフィックス 光伝搬

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョン分野では、シーンに照射した光が物体の表面で反射し、直接カメラに到達する光（直接光成分）だけを扱う、単純化されたモデルを用いることが多い（図 1(a)）。もちろん、カメラに到達する光は直接光成分が支配的であり、物体の位置や法線方向などシーンの表層的な情報はこの直接光成分から獲得することが可能である（本稿ではこれはダイレクトビジョンと呼ぶ）。しかし、実際にはシーン中の光の伝搬（ライトトランスポート）は直接光成分だけでなく、物体間の相互反射や屈折、表面下散乱など様々な要素から構成されている。例えば、図 1(b)に示される経路を辿る光線は、2つの物体を経由した相互反射光を捉えており、(c)では物体の表面に当たった光の一部は直接反射せずに内部まで進入し、散乱を繰り返して再び表面を経てカメラへ到達していることがわかる。このような経路を辿る光の伝搬を本稿ではインダイレクト光伝搬と呼び、インダイレクト光伝搬によってカメラに到達する間接光成分は直接光成分と比較して小さいものの、シーンの深層を経由しているために非常に多くの情報を潜在的に含んでいると考えるに至った。

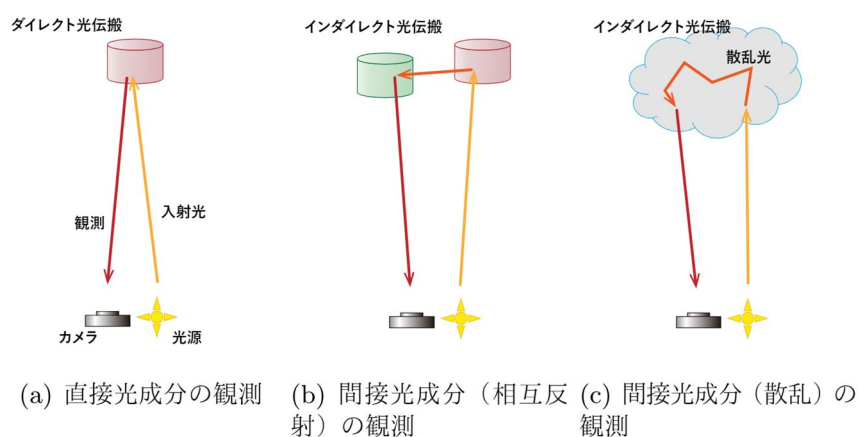


図 1 直接光成分と間接光成分の違い。物体表面との作用しか生じない (a) と異なり、他物体 (b) や物体内部 (c) の情報を含む間接光成分が観測できる。

2. 研究の目的

本研究の核心となる学術的な問いは、表層や遮蔽によって隠されたシーンの深層的な情報は、通常用いられる直接反射光ではなく複雑な経路を経由して深層に到達した間接光だけが有しており、間接光成分のなかでもその目的に応じた特定の光線を選択的に計測することでシーンの内部にある潜在的な情報を抽出し、可視化することが可能ではないか、ということにある。こういった、特定の間接光成分を利用したイメージングをインダイレクトビジョンと名付け、これまで見ることの出来なかった全く新しいイメージング技術として体系立てることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、インダイレクトビジョンと呼ぶ光伝搬のインダイレクト光成分を対象とした新しいコンピュータビジョン技術を体系化するために、以下の3点の研究を実施する。

(1) インダイレクト光伝播の選択的計測のための光学デバイスの開発

光源から出た光は、シーン中で複雑に伝播してセンサに到達する。このようなインダイレクト光伝播を計測するために、専用の光学デバイスを新たに開発する。時間同期式のレーザーピコプロジェクトとローリングシャッターカメラによるエピポーラ幾何を利用したプロジェクターカメラシステムを構築し、多視点・多波長観測によって高次元なインダイレクト光伝播の計測システムを設計する。

(2) インダイレクト光伝播解析のためのアルゴリズム開発

光の反射・屈折・散乱などの物理モデルに基づいて、(1)で計測した空間中の光伝播から、シーンを解析するためのアルゴリズムを開発した。(1)で計測した選択的なインダイレクト光伝播成分に対して、開発した光伝播の数値モデルを適用して光伝播を解析することで、空間全体の光

学特性・幾何特性の推定や可視化を行った。

(3) アプリケーション開発

インダイレクトビジョンとして体系化された計測・解析技術を具現化するために、様々な分野で実際に役に立つアプリケーションを開発した。表面下散乱光を利用して人肌の内部の血管をリアルタイムで可視化する専用のアプリケーションを開発したほか、多重散乱光と透過光とを個別に計測することで、より鮮明な映像をリアルタイムで可視化可能なアプリケーションを開発した。

4. 研究成果

研究の主な成果：

本研究プロジェクトでは、シーンのインダイレクト光伝搬の性質に着目し、物理ベースの数理モデルを用いてシーンの潜在的情報を可視化する手法の開発に取り組んだ。具体的には、時間同期式のプロジェクターカメラシステムを構築し、インダイレクト光伝搬の観測を行うことで、被写体の材質や内部構造の非破壊観測を実現した。また、近赤外光を利用することで、人間の皮下組織における血管の走行をより鮮明に可視化することに成功した(図2)。さらに、透過光と散乱光を分離して計測する手法(図3)や、マルチスペクトル情報を計測するための専用の光学デバイスと画像処理アルゴリズムを開発し、物体内部の異物混入検知や内部構造の可視化を実現した。また、構造化照明を用いて低次散乱光と高次散乱光を分離し、より鮮明な内部情報の可視化を実現した。このほかにも、偏光を利用した液体の流れ方向の可視化技術を開発するなど、多岐にわたる成果を上げた。

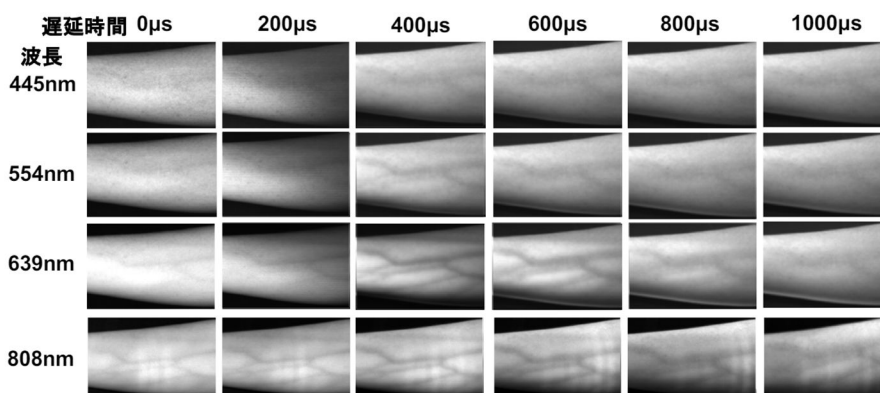
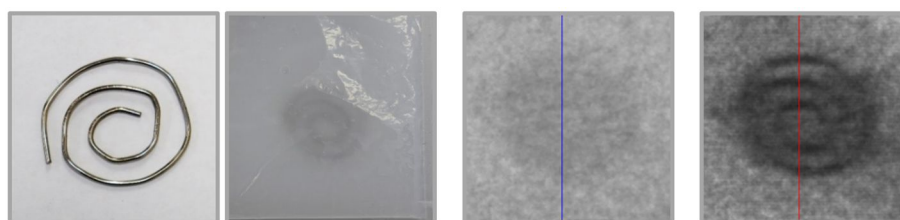


図2 異なる波長光源と遅延時間による皮下血管の可視化結果。445nm, 554nm の短波長と比較し, 639nm, 808nm の長波長において遅延時間を大きくしていき, 皮膚下の血管が徐々に可視化されている。



(a) 金属片 (b) 白濁液中の様子 (c) 通常の撮影 (d) 本手法

図3 金属片(a) を白濁液中に沈めた様子(b)。通常の撮影だとほとんど視認することはできない(c)が、本手法では金属片が鮮明に可視化されている(d)。これにより、例えば食品製造工場での異物検査などへの応用が可能になる

国内外における位置づけとインパクト：

本研究プロジェクトの成果は、コンピュータビジョンや画像処理の分野において、インダイレクト光伝搬を利用した新たな可視化手法を確立した点で高く評価できる。特に、専用の光学デバイスと画像処理アルゴリズムを組み合わせることで、従来は困難であった物体内部の情報を非破壊で可視化する手法を実現したことは、国内外の関連研究と比較しても独自性が高く、大きなインパクトがあると言える。また、本研究の成果は、医療診断や食品検査、材料分析など、様々な分野での応用が期待され、非破壊検査や可視化技術の発展に大きく寄与すると考えられる。本

研究成果は、国内外の学会で発表され、複数の賞を受賞するなど、その学術的価値が認められている。

今後の展望：

本研究プロジェクトで開発された手法は、様々な応用分野での利用が期待されるため、今後は産業界との連携を深め、実用化に向けた研究開発を進めていく必要がある。また、本研究で得られた知見を基に、さらなる技術的発展を目指し、新たな光学デバイスや画像処理アルゴリズムの開発に取り組む。特に、深層学習などの最新の機械学習技術を取り入れることで、より高度な可視化技術の実現を目指す。さらに、国内外の研究者との共同研究を推進し、当該分野の発展に貢献していく。

当初予期していなかった事象や知見：

本研究プロジェクトでは、当初の計画では想定していなかった新たな知見も得られた。具体的には、共同研究によって、液体の流れ方向によって偏光の性質が変化することが明らかになり、偏光カメラを利用して流れ方向を可視化する技術を確立した。この現象は、流体の可視化に新たな手法を提供するだけでなく、船舶の製造や創薬など分野にも応用可能な知見であると考えられる。今後は、この現象のメカニズムをさらに解明するとともに、様々な分野での応用の可能性を探っていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsuji Mayuka, Kubo Hiroyuki, Jayasuriya Suren, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Touch Sensing for a Projected Screen Using Slope Disparity Gating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 106005 ~ 106013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3099901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Delmotte Arnaud, Tanaka Kenichiro, Kubo Hiroyuki, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Blind Watermarking for 3-D Printed Objects by Locally Modifying Layer Thickness	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Multimedia	6. 最初と最後の頁 2780 ~ 2791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMM.2019.2962306	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Delmotte Arnaud, Tanaka Kenichiro, Kubo Hiroyuki, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Blind 3D-printing watermarking using moment alignment and surface norm distribution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Multimedia	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMM.2020.3025660	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanaka Kenichiro, Ikeya Nobuhiro, Takatani Tsuyoshi, Kubo Hiroyuki, Funatomi Takuya, Ravi Vijay, Kadambi Achuta, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Time-resolved Far Infrared Light Transport Decomposition for Thermal Photometric Stereo	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2019.2959304	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kubo Hiroyuki, Jayasuriya Suren, Iwaguchi Takafumi, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro, Narasimhan Srinivasa G.	4. 巻 27
2. 論文標題 Programmable Non-Epipolar Indirect Light Transport: Capture and Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 2421 ~ 2436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2019.2946812	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ono Taishi, Kubo Hiroyuki, Tanaka Kenichiro, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Practical BRDF reconstruction using reliable geometric regions from multi-view stereo	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Visual Media	6. 最初と最後の頁 325 ~ 336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41095-019-0150-3	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kajihara Takehiro, Funatomi Takuya, Makishima Haruyuki, Aoto Takahito, Kubo Hiroyuki, Yamada Shigehito, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Non-rigid registration of serial section images by blending transforms for 3D reconstruction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Pattern Recognition	6. 最初と最後の頁 106956 ~ 106956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.patcog.2019.07.001	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuniyoshi Fusataka, Funatomi Takuya, Kubo Hiroyuki, Sawada Yoshihide, Kato Yumiko O., Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 127
2. 論文標題 Visibility Enhancement by Integrating Refocusing and Direct-Global Separation with Contact Imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Vision	6. 最初と最後の頁 1162 ~ 1174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11263-019-01173-5	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 戸田 泰我、杉本 志織、曾我部 陽光、久保 尋之
2. 発表標題 イベント極性を利用したパターン光分離によるイベントカメラ・プロジェクター校正
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会（第233回）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩口 堯史、久保 尋之、川崎 洋
2. 発表標題 微分可能レンダリングを用いたすりガラス越しの鏡面反射物体形状復元
3. 学会等名 第25回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kubo
2. 発表標題 Light Transport Acquisition and Analysis: from Vision to Graphics
3. 学会等名 Computational Color Imaging Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Chandran, H. Kubo, T. Ueda, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, S. Jayasuriya
2. 発表標題 Slope Disparity Gating: System and Applications
3. 学会等名 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kubo
2. 発表標題 Real-time Imaging System by Light Transport Acquisition and Analysis
3. 学会等名 Sensing and Imaging through Scattering and Fluctuating Field in Biology, Telecommunication, and Astronomy (SI-Thru) 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Yamagiwa, H. Kubo
2. 発表標題 A parallel guaranteed projector-camera system for dual videography
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2021 Poster (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ogiwara, H. Kubo
2. 発表標題 Visibility Enhancement for Transmissive Image using Synchronized Side-by-side Projector-Camera System
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2021 Poster (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩口堯史, 久保尋之
2. 発表標題 岩口堯史, 久保尋之, 川崎洋, "微分可能レンダリングによるコースティクス画像からの鏡面反射物体の形状復元
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田美由紀, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博, 久保尋之
2. 発表標題 熱合成開口イメージングを用いた画像中の遮蔽物除去と温度補正
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木淵 寛太, 杉本 志織, 曾我部 陽光, 久保 尋之
2. 発表標題 イベントカメラと動的ライン照明を用いた複数の半透明レイヤの深度推定
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保尋之
2. 発表標題 見えないものが見えてくる, 時間同期式プロジェクタ - カメラシステムによるコンピュータショナルイメージング
3. 学会等名 日本色彩学会 視覚情報基礎研究会 第42回研究発表会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保尋之
2. 発表標題 皮下の血管の非接触イメージングを実現する時間同期式プロジェクタ・カメラシステム
3. 学会等名 日本光学会 第47回冬期講習会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保尋之
2. 発表標題 時間同期式プロジェクタ - カメラシステムによる間接光成分の選択的計測と演算処理による血管の可視化
3. 学会等名 2020年度フォトリソ技術フォーラム第1回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kitano, T. Funatomi, R. Yasukuni, K. Tanaka, H. Kubo, Y. Hosokawa, Y. Mukaigawa
2. 発表標題 Spectral Super-resolution by Image Sensor Tilting
3. 学会等名 OSA Optical Sensors and Sensing / Imaging and Applied Optics Congresses 2020 (OSA COSI2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上徹朗, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第26回画像センシングシンポジウム (SSII 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻菜佑香, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 Slope Disparity Gatingを用いたプロジェクション映像とのタッチセンシングの実現
3. 学会等名 第26回画像センシングシンポジウム (SSII 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Ueda, H. Kubo, S. Jayasuriya T. Funatomi, Y. Mukaigawa
2. 発表標題 Slope Disparity Gating using a Synchronized Projector-Camera System
3. 学会等名 International Conference on Computational Photography (ICCP) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田朝己, 久保尋之, S. Jayasuriya, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 Slope Disparity Gating: 時間同期式プロジェクタ カメラシステムを用いた反射光の選択的取得と応用
3. 学会等名 Visual Computing 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北島大夢, 北野和哉, 榎田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 単一光子検出器を用いた光の高時間分解能計測による材質の分類
3. 学会等名 情報処理学会 CVIM 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高谷剛志, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 コンピュータシミュレーションによる半透明度の再現
3. 学会等名 日本画像学会年次大会 (第123回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川岳大, 船富卓哉, 田中賢一郎, 久保尋之, 向川康博
2. 発表標題 機械走査式ハイパースペクトルイメージングにおける環境光変動補償
3. 学会等名 第47回画像電子学会年次大会 (2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://qlab2022.github.io/ 久保尋之研究室 研究紹介 https://qlab2022.github.io/research-jp.html
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------