

平行高周波照明による透視画像の散乱光除去

田中賢一郎^{†a)} 向川 康博[†] 八木 康史[†]

Descattering of Transmissive Images Using Parallel High-Frequency Illumination

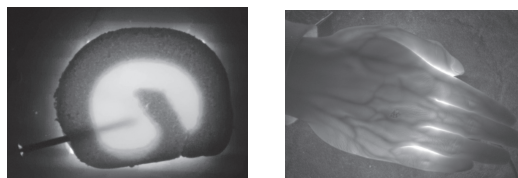
Kenichiro TANAKA^{†a)}, Yasuhiro MUKAIGAWA[†], and Yasushi YAGI[†]

あらまし 濁った液体や乳白色のプラスチックなど、光を透過する性質をもつ物体では、透視画像を撮影することで、その内部状態を推定することができる。しかし、多くの物体では内部で光が散乱してしまうため、透視画像は不鮮明になりやすい。散乱光を除去するために、偏光板やライトフィールドカメラを用いた解析が行われてきたが、鮮明化には不十分であった。そこで、本論文では、透過光と散乱光を分離し、鮮明な透視画像を得るための平行高周波照明を提案する。まず、高周波照明は、撮影法を工夫することで様々な成分を分離できるが、いずれも光路が重なる光と重ならない光を分離する手法として統一的に説明できることを示す。次に、照明と観測を共に平行系にすることで、透過光が重ならなくなり、透過光と散乱光を分離できることを示す。実際に、カメラとプロジェクタにテレセントリックレンズを組み合わせた計測システムを開発し、実験によって平行高周波照明が画像の鮮明化に有効であることを確認した。

キーワード 平行高周波照明, 透過光, 散乱光, 鮮明化

1. ま え が き

半透明な性質をもつ物体を撮影すると画像が不鮮明になる場合がある。この原因の一つとして、光線が微粒子等に衝突して進路が変化する散乱という現象があげられる。光線が散乱すると、光の直進性が乱されるため、画像は不鮮明になってしまう。散乱によって不鮮明になった画像を鮮明化する技術は、様々な分野において重要な基礎技術である。図 1(a) は、食品中に存在する釘の透視画像の例であり、産業界では、このように製品内部に異物が紛れていないか検査したいという要求がある [16]。また、霧の中にいる人の姿を検知するような車載センサの開発も行われている [17], [18]。医療分野では、生体内部の可視化に関する研究が盛んに行われている。近赤外光を用いることで、図 1(b) のような透視画像を得ることができる。このような生体内部の可視化技術は、例えば指にシャープペンスルの芯が刺さった事故などにおける治療時に必要とされる [1]。



(a) 食品の異物検査 (b) 生体の透視画像

図 1 透視画像の例

Fig. 1 Example of transmission images.

コンピュータビジョン分野では、特殊な光学系や計算機を併用した画像撮影法であるコンピューテーショナルフォトグラフィ技術が活発に研究され、散乱光の除去にも利用されている。Gilbert と Pernicka [2] や Treibitz と Schechner [3] は円偏光を用いた後方散乱光の除去によってシーンを鮮明化した。しかし、散乱光は完全な非偏光となるわけではないため、鮮明化の効果は限られている。Narasimhan ら [4] や Gu ら [19] は単一散乱をモデル化することで、濁った液体中の物体の見えを鮮明化した。しかし、単一散乱しか生じないという強い制約があるため、多重散乱を含む一般的なシーンには適用が難しい。Kim ら [5] は、ライトフィールドカメラを用いたときに、散乱光と透過光ではセンサに到達する際の入射角度が異なることを利用

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨木市
ISIR, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki-shi, 567-0047 Japan

a) E-mail: tanaka@am.sanken.osaka-u.ac.jp

し、散乱光を除去した。しかし、解像度が大きく低下する問題があった。

本研究では、透過光と散乱光を分離することで、透視画像を鮮明化できる平行高周波照明を提案する [23]。まず、Nayar ら [6] が提案した高周波照明及びその拡張手法 [7]～[9] は、光路が重なる光と重ならない光を分離する手法として統一的に説明できることを示す。次に、照明と観測を共に平行系にすることによって、透過光が重ならなくなり、透過光と散乱光を分離できることを示す。また、テレセントリックレンズを用いた平行系を構築し、不鮮明な透視画像の鮮明化に取り組む。更に、この鮮明化が、偏光板を用いた散乱光除去法や、可視光と比べて波長が長いために散乱しにくい近赤外光と容易に組み合わせられることを示し、その効果を検証する。

2. 関連研究

2.1 透過性の高い波長の利用

医療診断や工業品検査では鮮明な透視画像を得るために、X 線撮影が広く使われている。X 線は透過性が高く散乱しにくいいため、鮮明な透視画像を得ることができる。しかし、X 線には被曝の問題があり、適用範囲は限られる。

また、近赤外光も生体への透過性が比較的高いため、生体イメージングによく用いられている。例えばセキュリティ分野では近赤外光による静脈認証が利用されている。また、医療分野では、酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンでは近赤外光の吸収特性が違うことを利用し、血中の酸素濃度が測定されている。松田ら [12] は、複数の波長を用いて血管透視像の動静脈判別を行った。また、西田ら [13] は、2 波長間の透視画像を除算することで、血管透視画像を改善した。この手法は、透視画像の背景領域の明るさの不均一さをなくすことで画質改善を施したものであり、散乱光が除去されたわけではない。

一方、本研究では、可視光や近赤外光などの安全な光を用いて、光学系の工夫によって散乱光を除去することで透視画像を鮮明化することを目的とする。

2.2 平行光の利用

光応用計測分野では、平行光を用いた計測法が古くから研究されている。シャドウグラフ法 [10] は、液体や気体を光線が通過する際に、屈折率の違いによって光線の方向が変化することを利用し、空間的な密度分布を可視化する技術である。また、シュリーレン

法 [10] も同様に、平行光が屈折率の違いによって曲げられることを利用するが、平行光を集光する際にずれる光の一部をナイフエッジで遮へいすることで、空間的な密度分布を明暗の差としてより明確に可視化することができる。

本研究でも、平行光の進行方向が散乱によって曲げられることを利用しており、また、利用する光学系も似ている。しかし、シャドウグラフ法やシュリーレン法が光線の方向変化のみを手掛りとしているのに対し、本研究では高周波照明と組み合わせることで、散乱光の方向変化に加えて位置の変化も手掛りとして利用できるため、より効率的に透過光と散乱光を区別することが可能である。

2.3 レーダの利用

雨や霧などの悪天候の中での環境解析のために、様々なレーダを利用した計測が行われている。ミリ波帯の電波を用いるミリ波レーダは、雨や霧などの影響を受けにくいことから、車の衝突を回避する車載レーダとして利用されている [20]。また、可視光や近赤外光など、より短い波長の電磁波を使うレーザーレーダ (ライダー) は、レーザー光がエアロゾルによって反射 (後方散乱) することを利用して、霧や雨の検出に利用されている [21]。これらの技術は広く実用化されているが、本研究で想定している、通常のカメラ・プロジェクタシステムを用いた透視画像の鮮明化には、そのまま応用することは難しい。

3. 透視画像の撮影

3.1 透視画像の成分

光源から発せられた光を散乱体を通して反対側からカメラで撮影することで、図 1 のような透視画像が得られる。カメラで観測される画像には、2 種類の成分が含まれる。一つは、光路が散乱体に影響されことなく直進して観測される透過光であり、もう一つは、光が微粒子と衝突を繰り返すことによって光路が様々なに変化した散乱光である。散乱光には、物体内部の吸収体に対して回り込むように広がる光も存在する。また、入射光は、吸収体に到達する過程でも散乱し、周りの観測光に影響を与える。つまり、透視画像が不鮮明になる主な原因は、散乱光が光の直進性を乱すためである。

透過型のシーンで観測される光は透過光と散乱光のみとすれば、観測光 (L) は、透過光 (L_t) と散乱光 (L_s) の和として次式のように表される。

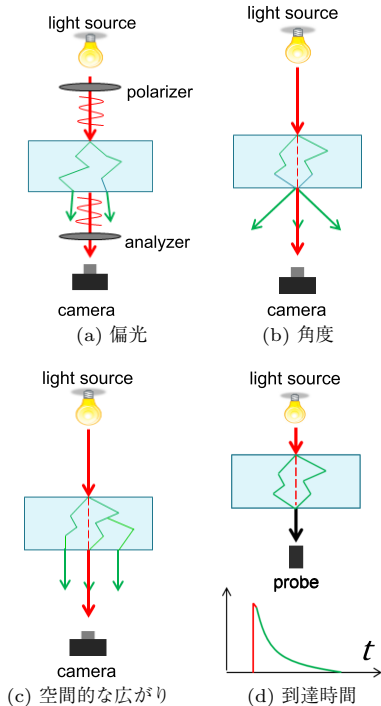


図2 透過光と散乱光の性質の違い

Fig. 2 Difference of transmissive and scattered lights.

$$L = L_t + L_s \quad (1)$$

鮮明な透視画像を得るためには、 L_s を除去し、 L_t のみを抽出する必要がある。

3.2 透過光と散乱光の性質の違い

透過光と散乱光を分離するためには、まず両成分の性質の違いを明らかにする必要がある。本節では、偏光、角度、空間的な広がりに関する性質の違いについて述べる。

3.2.1 偏光に関する性質

図 2(a) に示すように、物体に偏光の性質をもった光を入射させる場合、透過光と散乱光では、その偏光の性質が異なる。透過光は散乱体の影響を受けないので、入射光の偏光性は保たれる。しかし、光は微粒子に衝突して光路が変化するたびに徐々に偏光の性質を失っていく。そのため、衝突回数の少ない散乱光は偏光の性質が乱れた部分偏光となり、衝突を何度も繰り返した多重散乱光は偏光の性質を失った非偏光となる。この違いを利用し、偏光板を 2 枚用いることで散乱光を抑制することができる。直線偏光板は、偏光面に平行な偏光を透過し、垂直な光を遮断するため、入射光

はその偏光度によって強度が減衰する。したがって、偏光板を散乱体前後に平行に配置することで、散乱光の強度を抑え、透視画像を改善できる。

3.2.2 角度に関する性質

図 2(b) に示すように、ある観測点からは様々な方向に光が出射しており、透過光と散乱光ではこの角度が異なる。透過光は、散乱物体により光路が変化しないため、入射光と同一直線上に同じ向きで出射する。一方、散乱光は、光路が様々に変化するため、出射時の角度も様々である。

この性質を利用し、Kim ら [5] は、ライトフィールドカメラで光の角度情報を記録し、透過光強度を推定した。また、Brogioli ら [11] は、シュリーレン法を応用し、ナイフエッジによって透過光を遮断し、散乱光を計測した。

3.2.3 空間的な広がりに関する性質

図 2(c) に示すように、透過光と散乱光では出射位置に関して性質が異なる。透過光は、入射光と同一直線上に存在するのに対して、散乱光は散乱体内部で広がるため、様々な位置から出射する。一本の光線を入射したとき、透過光は鋭いピークをもって観測される。そのため、光線の入射位置をわずかに変えると、観測値もそれに合わせて変動する。一方、散乱光は、たとえ入射光が一本の光線であったとしても観測値は空間的に広がりをもって観測される。そのため、入射位置がわずかにずれただけでは、観測値に大きな違いは生じないという違いがある。

3.2.4 その他の性質

以上で述べたほかにも、透過光と散乱光の性質の違いが利用されている。例えば、散乱や吸収の特性は波長依存であることから、前述のとおり近赤外光が利用されたり、多波長解析 [14] が行われたりしている。最近、Miura と Sato は、3 種類の異なる波長を組み合わせ、指の静脈像を鮮明化する手法を提案している [22]。

また、図 2(d) に示すように、散乱光は透過光に比べて光路長が長くなり、到達時間が遅れることを利用して、対象物体の密度分布を推定する研究も行われている [15]。

3.3 透視画像の鮮明化

本研究では、前節で述べた透過光と散乱光の性質の違いに基づいて、透視画像中に含まれる散乱光成分を効率的に除去し、透視画像を鮮明化することを目指す。

3.2.2 で述べた角度に関する性質を利用すれば、シュ

リーレン法と同様に透過光の直進性を利用できるが、透過光と同じ方向になってしまう散乱光を除去できない。また、**3.2.3**で述べた空間的な広がりに関する性質を利用することで、高周波照明 [6] と同様に透過光と散乱光の位置の違いを利用できるが、透過光と同じ位置から出射する散乱光を除去できない。

そこで、本研究では、透過光の方向と位置の両方の手掛りを利用することで、より効果的に散乱光を除去することを目指す。そのために、高周波パターンを平行系で投影・観測できる平行高周波照明と呼ぶ計測システムを提案する。このシステムでは、**3.2.1**で述べた偏光や**3.2.4**で述べた近赤外光と組み合わせることも容易であり、透過光と散乱光の性質の違いを可能な限り利用できる。

以下、**4.**では高周波照明による成分分離法の原理について述べ、**5.**では鮮明な透視画像を得るための平行高周波照明について述べる。

4. 高周波照明による成分分離

4.1 高周波照明の原理

Nayar ら [6] は、照明としてプロジェクタを用いて、白と黒が交互に繰り返される細かいチェッカーパターン（高周波パターン）をシーンに投影することで、観測画像を直接成分と大域成分に分解できる高周波照明を提案した。ここでいう直接成分とは、プロジェクタから出射された光線が物体表面上で一度だけ反射し、そのままカメラで観測される成分を指す。具体的には、拡散反射と鏡面反射であり、パターン光の高周波成分がそのまま残っている。一方、大域成分とは、反射を繰り返して様々な光路を通ることで投影パターンが平均化されて観測される成分を指す。具体的には、相互反射や表面下散乱、体積散乱などであり、パターン光の高周波成分は失われてしまい、低域通過フィルタとして働く現象である。

そのため、高周波パターンの位相をわずかに変化させると、直接成分もそれに合わせて変化するが、大域成分はほとんど変化しない。この違いを利用して、両成分を分離することができる。ここで、 $L_d[c]$ と $L_g[c]$ を、それぞれカメラのピクセル c で観測される直接成分と大域成分とする。高周波パターンの白と黒の画素数が同数であるとし、高周波パターンの位相を様々に変化させた場合の、カメラのあるピクセル c で観測される最大値 $L_{max}[c]$ と最小値 $L_{min}[c]$ は、それぞれ次のように表される。

$$L_{max}[c] = L_d[c] + \frac{1}{2}L_g[c] \quad (2)$$

$$L_{min}[c] = \frac{1}{2}L_g[c] \quad (3)$$

この関係から、直接成分と大域成分は以下のようにして推定できる [6]。

$$L_d[c] = L_{max}[c] - L_{min}[c] \quad (4)$$

$$L_g[c] = 2L_{min}[c] \quad (5)$$

4.2 高周波照明の拡張手法

前節では、高周波パターンを投影した場合に、高周波成分が残るか、あるいは低域通過フィルタとして働くかの違いによって成分が分離できる原理を説明した。一方で、高周波パターンの白画素に対応する光線に着目すると、直接成分とは光線が互いに重ならず観測できる成分であるとみなすこともできる。すなわち、光源から発せられる白画素に対応する光線を画像面に射影した場合に、それぞれ異なる画素として独立に観測できれば、直接光として分離できる。高周波照明法は、照明と撮影を工夫することで、様々な成分を分離できるように拡張されている。本節では、これらの拡張手法を光線の重なりという観点で見直すことで、仕組みを統一的に説明できることを示す。

4.2.1 拡散・鏡面反射成分と大域成分の分離

Nayar ら [6] の手法では、直接成分は拡散・鏡面反射であった。プロジェクタから出射し、物体表面上で反射して、カメラで撮影されるまでの直接成分の光路の一例を、図 3(a) の赤線で示す。この赤線は、青色で示す別の直接反射の光路と重ならない。光線が互いに重ならないことで、高周波成分が残ることとなる。

4.2.2 拡散反射と鏡面反射の分離

Lamond ら [7] は、半球状スクリーンに高周波パターンを投影し、その映り込みを観測することで、拡散反射と鏡面反射を分離できることを示した。この場合、直接成分は鏡面反射であり、図 3(b) に示すように、鏡面反射に対応する赤線や青線の光路は互いに重ならない。

4.2.3 平面内での単一散乱と多重散乱の分離

Mukaigawa ら [8] は、厚みのない平面上の半透明物体に対して側方からストライプ状の高周波パターンを投影し、物体の法線方向から撮影することで、単一散乱と多重散乱を分離できることを示した。この場合、直接成分は単一散乱である。図 3(c) に示すように、対

象を平面に限定することで、単一散乱に対応する赤線や青線の光路が互いに重ならないように工夫していることが特徴である。

4.2.4 体積内での単一散乱と多重散乱の分離

Mukaigawa ら [9] は、前節で述べたストライプ状の高周波パターン投影を拡張し、パターンを走査することで、体積のある半透明物体中で生じる単一散乱と多重散乱を分離できることを示した。この場合も同様に、直接成分は単一散乱である。二次元状の高周波パターンを投影すると単一散乱が互いに重なってしまうが、図 3 (d) に示すように、奥行ごとに別々に投影することで、光線の重なりを防いでいる。

4.3 光線の重なりを防ぐ工夫

前節で紹介した高周波照明に基づく様々な拡張手法は、光線が互いに重ならない光を直接成分として分離するという点で共通している。高周波パターン中の白画素は一本の光線に対応し、たとえ空間上でそれらが重なることはなかったとしても、カメラ・プロジェクタの配置や注目している光学現象によっては、それらの光線が重なって計測されることがある。また、投影するパターンについても、光線が重ならないように観測できるパターンを選択する必要がある。直接反射光の分離では、チェッカーパターンの各白画素は重ならず観測できるが、単一散乱光の分離では、チェッカーパターンでは異なる深さの光線が重なってしまうため、それを防ぐためにストライプパターンを用いて

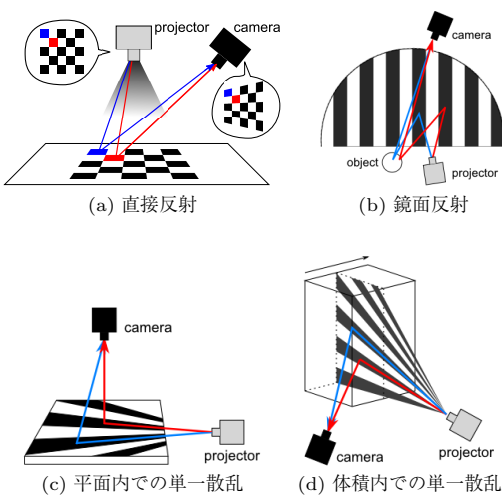


図 3 高周波照明により抽出される光

Fig. 3 Separated lights using high-frequency illumination.

いる。これらのことから、分離したい成分が互いに重なって観測されないように工夫することができれば、高周波照明が適用できることが分かる。

5. 平行高周波照明

5.1 透視画像における光線の重なり

本研究の目的は、透視画像に含まれる透過光と散乱光を分離することである。そこで、光源としてプロジェクタを用いて、高周波照明を利用することを考える。図 4 (a) のように、単純にプロジェクタから高周波パターンを投影し、反対側からカメラで撮影しても、透過光は抽出できない。なぜなら、透過光そのものは空間中で互いに重ならないが、透過光は直接観測できず、透過光に沿った単一散乱を観測することになる。そのため、赤線の光路の奥には青線の光路があり、これらが図 4 (c) のように重なって観測されてしまうからである。

この透過光の重なりを避けるための解決法は、照明と観測を平行系にすることである。図 4 (b) のように、高周波パターンを平行投影し、その透視画像を同じく平行投影で撮影すれば、光線はシーン中を平行に進行するため、図 4 (d) のように透過光が互いに重なって観測されることはない。一方、散乱光は反射を繰り返すため、互いに重なって観測される。

我々は、この照明・観測方法を「平行高周波照明」と呼ぶ。この平行高周波照明では、数式 (2)~(5) をそのまま用いることで、透視画像中の透過光と散乱光を分離できる。

5.2 平行系計測システム

光応用計測分野では、計測のために平行光が利用されることが多い。その実現方法は 2 通りあり、一つは、図 5 (a) のように、テレセントリックレンズを用いる方法である。テレセントリックレンズは、高価で

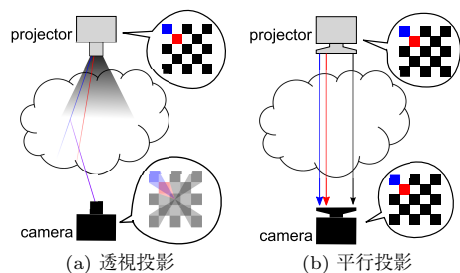


図 4 透過型に高周波照明を適用

Fig. 4 Separating transmissive lights.

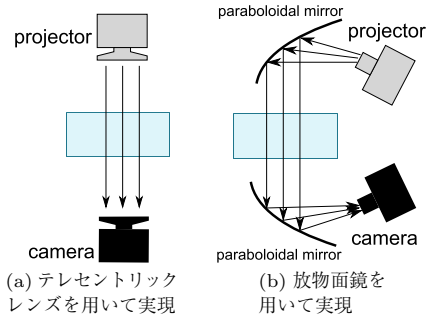


図 5 平行系
Fig. 5 Parallel system.

実視野は狭いが、既製品が多く扱いやすい。二つ目は、図 5 (b) のように、放物面鏡を用いる方法である。放物面鏡は、比較的安価で視野も大きくしやすいが、放物面鏡の焦点をカメラとプロジェクタの投影中心に一致させる必要があり、位置合わせが難しい。

実際には、対象シーンのサイズ、コスト、セットアップの容易さなどを考慮して設計すればよい。もちろん、カメラとプロジェクタで、テレセントリックレンズと放物面鏡を別々に組み合わせることもできる。

6. 実験

6.1 実験環境

本実験では、近赤外波長帯域での平行高周波照明を実現するために、専用のプロジェクタカメラシステムを使用した。プロジェクタは、Texas Instruments 製 DMD プロジェクタ開発キット (LightCommander) であり、Edmund Optics 製テレセントリックレンズを装着することで平行系を実現した。このプロジェクタでは、光源として RGB の可視光に加えて 850 nm 付近にピークをもつ近赤外光を設定できるため、近赤外平行光を実現できる。

更に、近赤外にも感度をもつモノクロ CCD カメラ (Point Grey 社 Grasshopper2) にもテレセントリックレンズを装着し、図 6 のようにプロジェクタと組み合わせることで、近赤外波長帯での平行高周波照明を実現した。このシステムでは、並行に配置した 2 枚の偏光板も利用することで、散乱光除去の性能を向上させている。

プロジェクタで使用する近赤外 LED 光源の分光分布は図 7 (a) のとおりである。また、CCD の感度特性は図 7 (b) であり、近赤外に対しても、十分な感度がある。プロジェクタから投影するパターンはチェッ

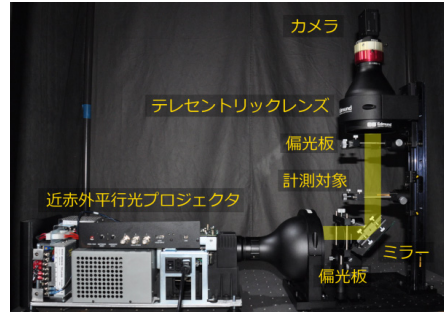


図 6 計測環境
Fig. 6 Environment of experiments.

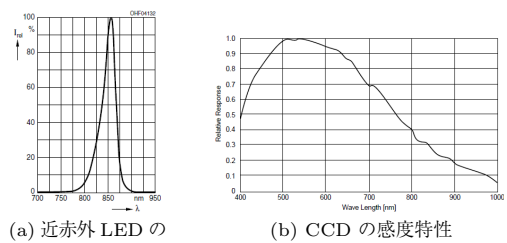


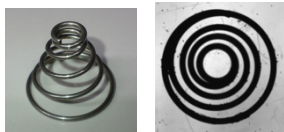
図 7 プロジェクタとカメラの波長特性
Fig. 7 Wavelength characteristics of camera and projector.

カーパターンであり、白と黒の格子の幅は経験的に 9 px×9 px とし、3 px ずつ縦・横にシフトして計 18 枚撮影した。この幅は、入射位置からどれだけ離れて出射する光を散乱光とみなすかを定める値であり、格子の実サイズ、カメラの解像度、散乱の強さなどを総合的に考慮して決める必要がある。最適な幅を自動的に決める方法は今後の課題である。

6.2 予備実験

まず、牛乳を水で薄めた白濁液に、図 8 (a) のような金属部品を沈めたシーンを対象として投影パターンのサイズに関する予備実験を行った。図 8 (b) に示すような、真水における通常の透視画像も別に撮影し、これを真値とした。パターンのサイズは、3 px×3 px から 15 px×15 px まで、3 px ごとに計 5 段階を用いて評価した。各サイズでの投影によって得られた直接成分を図 9 に、それらと真値との相互相関値を表 1 に示す。パターンが小さいほどノイズが大きくなり、パターンが大きすぎると余計な散乱光が含まれるため、相互相関値が下がっている。この実験により、このシーンでは 9 px×9 px が適切であることが分かる。

次に、一方の偏光板を 90° 回転させ、それぞれで得



(a) 対象物体 (b) 真値画像

図 8 白濁液を用いた対象物体
Fig. 8 Target object.

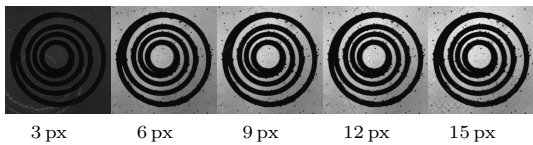


図 9 各サイズにおける直接成分
Fig. 9 Direct components of various sizes.

表 1 各サイズにおける直接成分と真値との正規化相互相関

Table 1 Cross correlations of various sizes.

相互相関値	3 px	6 px	9 px	12 px	15 px
	0.912	0.983	0.988	0.982	0.981

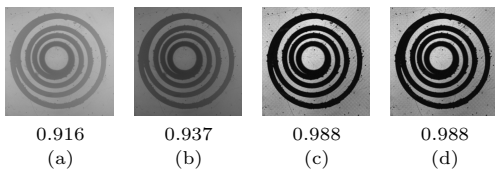


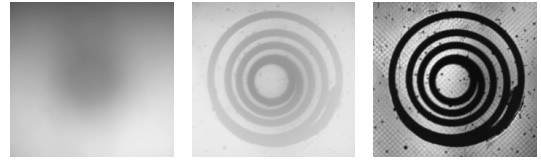
図 10 提案手法との比較
Fig. 10 Comparison.

(a) 通常照明 (b) 偏光板を回転させて減算する手法 (c) 偏光板を並行配置した提案手法 (d) 提案手法に偏光板の回転を組み合わせた手法. 各画像の下部の値は真値との相互相関値.

た画像間の差分をとる従来手法との比較を行った。また、偏光板を回転させる方法を提案手法に組み合わせた手法に対しても検証を行った。実験結果を図 10 に示す。偏光板を回転させる方式に比べ、偏光板を並行配置した提案手法の方が相互相関値が高く、優位性があることが分かる。しかし、偏光板を回転させることで得られる効果は、提案手法による効果に対してわずかであり、提案手法に、偏光板の回転を組み合わせても相互相関値の違いはなかった。逆に、撮影時間が 2 倍になってしまうため、偏光板を並行配置するだけで十分であることが分かる。

6.3 白濁液を用いた評価実験

前節の予備実験と同じシーンを対象として評価実験を行った。光源は可視光 (525 nm) と近赤外光 (850 nm) のそれぞれを用いて比較した。牛乳の濃度は 2.2% と



(a) (b) (c)

図 11 白濁液を用いた実験結果
Fig. 11 Experimental result.

(a) 可視光での通常照明 (b) 近赤外光での通常照明 (c) 近赤外光での提案手法

表 2 各手法の真値との正規化相互相関
Table 2 Zero-mean normalized cross correlation.

相互相関値	可視光通常照明	近赤外光通常照明	提案手法
	-0.10	0.68	0.95

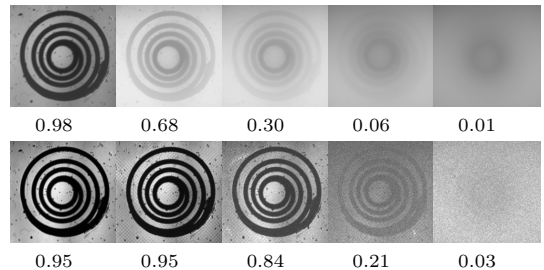


図 12 異なる濃度での実験結果
Fig. 12 Results in some consistency.

上段は、通常の透視画像、下段は提案手法。濃度は左から順に 1.9%, 2.2%, 2.5%, 2.8%, 3.1%。各画像の下部の値は真値との相互相関値。

した。実験結果を図 11 に示す。(a) は、可視光の通常照明での透視画像である。散乱が強く、物体を全く認識できないほど不鮮明である。(b) は、近赤外光を用いた通常照明での透視画像である。近赤外光の効果により鮮明化されているが、不十分である。(c) は、近赤外光での提案手法を用いた透視画像である。物体の深さによらず鮮明化の効果が確認できる。また、各条件において得られた画像と、真値画像との相互相関値を表 2 に示す。提案手法によって相互相関値が高い値を示しており、鮮明化の効果が確認できる。

次に、牛乳の濃度を変えたときの提案手法による鮮明化の効果を確認した。牛乳の濃度は 1.9%, 2.2%, 2.5%, 2.8%, 3.1% の 5 段階とした。各濃度における、近赤外光での通常透視画像と提案手法による鮮明化画像及び真値との相互相関値を図 12 に示す。濃度が高くなるにつれて、透視画像はより不鮮明となっているが、2.2% から 2.8% の濃度については全て提案手法の

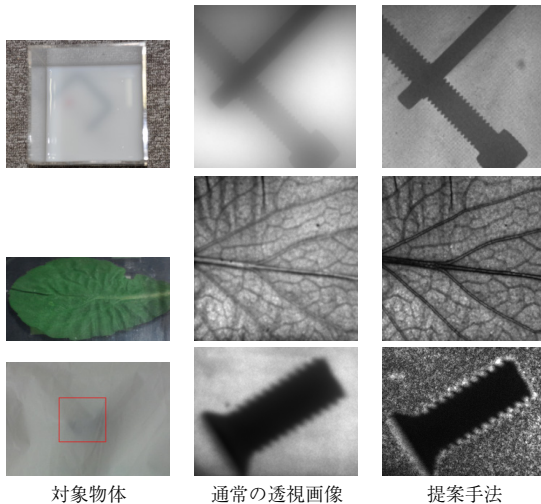


図 13 対象物体と実験結果
Fig. 13 Objects and its result.

鮮明化の効果を確認できる．相互相関値も大幅な向上が見られる．しかし，濃度 1.9%では通常の照明でも十分鮮明な透視画像が得られており，提案手法ではパターン投影に起因するノイズが観測されてしまうために逆に画質が悪化している．濃度 3.1%では，透過光の量が少なく，観測ノイズに近い値をとるために鮮明化の効果は確認しがたい．

6.4 様々な物体に対する実験

また，金属部品を沈めた白濁液，葉の葉脈，ビニール袋に入ったねじに対して，本手法を適用した．対象物体，通常の透視画像，提案手法による透視画像を図 13 に示す．金属部品を沈めた白濁液では，提案手法によってねじの山まで鮮明に見ることができる．葉の葉脈では，提案手法により小さな葉脈に至るまで鮮明に見ることができる．また，ビニール袋に入ったねじは，可視光では見ることすら難しいが，近赤外と本提案手法の効果により，ねじの山まで鮮明に確認できる．しかし，対象物体の透明度が低すぎるため，ノイズが目立っている．

6.5 制限と考察

実験により，提案手法によって散乱光が除去され，エッジが明確になる効果を確認した．一方で，いくつかの問題点も明らかとなった．

まず，対象媒体の透明度が低い場合と高い場合ではセンサに到達するエネルギーが大きく異なる．透明度が低い場合は，散乱によってエネルギーが減衰するた

め，提案手法によって得られる画像には，多くのノイズが含まれてしまう場合がある．対象物体によっては，観測光における透過光の割合が著しく低くなることがあり，結果として透過光の強度とカメラの観測ノイズが同程度になってしまう．冷却 CCD カメラ等を用いたり，ノイズ除去の画像処理によって，ある程度の改善は期待できるが，本質的な解決は難しい．逆に，透明度が高い場合は，光量がセンサのダイナミックレンジを超えてしまう可能性がある．しかし，絞りを露光時間を調節することで容易に対応できると考えられる．そのため，あらかじめ光量のダイナミックレンジを調べることで，透明度が高い領域と低い領域ごとに処理方法を変えることができる．

また，表面形状が平面でない物体に対しては，物体への入射及び出射時に光が屈折するため，厳密な平行系ではなくなる．そのため，鮮明化の効果は限定的となる．そのような物体に対して本手法を適用する際は，屈折率が等しい液体中に物体を配置するなどの工夫が必要である．

本手法は，複数枚の画像を撮影する方式のため，撮影枚数に比例して撮影時間が増大する．例えば，図 11 の実験では，ノイズ及びアーチファクト低減のために，18 個のパターンに対してそれぞれ 4 枚撮影して平均値を用いたため，撮影には約 10 秒かかった．さほど非現実的な時間ではないが，製品検査などの場合には更なる高速化を実現する必要がある．

なお，透過光がほとんど存在せず，散乱光のみが観測される場合は，本手法は適用できない．そのため，例えば近赤外光を用いて人体の内臓を可視化するという用途には適用できない．

また，パターンの投影中は計測物体は静止している必要があり，生体などの動く物体に対して計測を行うことはできない．

7. む す び

本研究では，物体の透視画像を鮮明化するために，観測光に含まれる透過光を分離する手法を提案した．まず，高周波照明法の原理について説明し，抽出した光に対して，光路が重ならないように観測することで高周波照明法が適用できることを示した．また，高周波照明によって透過光を抽出するために，カメラとプロジェクタの投影を共に平行系とした平行高周波照明を新たに提案した．

薄めた牛乳を用いた実験では，平行高周波照明によ

り、実際に透視画像が鮮明化されることを確認した。正規化相関を比較することによって、提案手法が画像の鮮明化に貢献していること定量的に示した。また、その他の物体に対する実験でも、本手法が鮮明化に貢献していることを確認した。

濃いメディアに対する実験では、透過光の量が少ないことに起因するノイズが目立った。今後、機材や画像処理アルゴリズムの工夫によって更なる鮮明化に取り組んでいきたい。

謝辞 本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端・次世代研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものである。

文 献

- [1] 早川吉彦, 山下拓慶, 大粒来孝, 妙瀬田泰隆, 佐川盛久, 近藤 篤, 辻由美子, 本田 明, “近赤外線イメージングによる皮下異物の検出実験,” 医用画像情報学会雑誌, vol.27, no.3, pp.50–54, 2010.
- [2] G.D. Gilbert and J.C. Pernicka, “Improvement of underwater visibility by reduction of backscatter with a circular polarization technique,” Appl. Opt., vol.6, no.4, pp.741–746, 1967.
- [3] T. Treibitz and Y.Y. Schechner, “Active polarization descattering,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.31, no.3, pp.385–399, 2008.
- [4] S.G. Narasimhan, S.K. Nayar, B. Sun, and S.J. Koppal, “Structured light in scattering media,” Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on, vol.1, pp.420–427, 2005.
- [5] J. Kim, D. Lanman, Y. Mukaigawa, and R. Raskar, “Descattering transmission via angular filtering,” ECCV’10 Proc. 11th European conference on Computer vision: Part I, pp.86–99, 2010.
- [6] S.K. Nayar, G. Krishnan, M.D. Grossberg, and R. Raskar, “Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination,” ACM SIGGRAPH 2006 Papers, pp.935–944, 2006.
- [7] B. Lamond, P. Peers, and P. Debevec, “Fast image-based separation of diffuse and specular reflections,” ICT-TR-02.2007, 2007.
- [8] Y. Mukaigawa, Y. Yagi, and R. Raskar, “Analysis of light transport in scattering media,” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on, pp.153–160, 2010.
- [9] Y. Mukaigawa, R. Raskar, and Y. Yagi, “Analysis of scattering light transport in translucent media,” IPSJ Trans. Computer Vision and Applications, vol.3, pp.122–133, Dec. 2011.
- [10] 流れの可視化学会 (編), 新版 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 1986.
- [11] D. Brogioli, A. Vailati, and M. Giglio, “A schlieren method for ultra-low-angle light scattering measurements,” Europhys. Lett., vol.63, no.2, pp.220–225, 2003.
- [12] 松田康志, 飛澤直哉, 浪田 健, 加藤祐次, 清水孝一, “血管透視像の分光解析による動脈脈判別の試み (II)—判別原理の実験的検証,” Proc. OPJ 2011, 2011.
- [13] 西田浩平, 浪田 健, 加藤祐次, 清水孝一, “多波長光源を用いた静脈透視画像の改善 (II)—複数被験者における有効性の検証,” Proc. OPJ 2011, 2011.
- [14] 宗宮 功, 岸本直之, 小野芳朗, 西方 聡, “散乱スペクトル分析による水質測定,” 水環境学会誌, vol.18, pp.191–198, 1995.
- [15] 小川誠二, 上野照剛 (監修), “非侵襲・可視化技術ハンドブック—ナノ・バイオ・医療から情報システムまで,” NTS, 2007.
- [16] W. Yang, D. Li, X. Wei, Y. Kang, and F. Li, “An automated visual inspection system for foreign fiber detection in lint,” Intelligent Systems, WRI Global Congress on, vol.4, pp.364–368, 2009.
- [17] K. He, J. Sun, and X. Tang, “Single image haze removal using dark channel prior,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.33, no.12, pp.2341–2353, 2011.
- [18] 宮阪健夫, 内藤貴志, 二宮芳樹, “レーザーレーダとカメラを用いた移動物の検出と追跡,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), 2009.
- [19] J. Gu, S.K. Nayar, E. Grinspun, P.N. Belhumeur, and R. Ramamoorthi, “Compressive structured light for recovering inhomogeneous participating media,” European Conference on Computer Vision (ECCV), 2008.
- [20] 稲葉敬之, 桐本哲郎, “車載用ミリ波レーダ,” 自動車技術, 64-2, Feb. 2010.
- [21] 藍 光郎 (監修), 次世代センサハンドブック, 培風館, 2008.
- [22] N. Miura and Y. Sato, “Removing skin wrinkles and deblurring veins by using tri-band illumination,” Proc. Asian Conference on Computer Vision (ACCV), 2012.
- [23] 田中賢一郎, 向川康博, 八木康史, “平行高周波照明による透視画像の鮮明化,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2012), OS10-02, Aug. 2012.
(平成 24 年 10 月 10 日受付, 25 年 2 月 8 日再受付)



田中賢一郎

現在大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程在籍。



向川 康博 (正員)

1997 筑波大学大学院博士課程工学研究科了。同年～2002 岡山大学助手。2003～2004 年 10 月筑波大学講師。大阪大学助教授を経て 2007 年 4 月より同大学准教授。コンピュータビジョンの研究に従事。博士(工学)。情報処理学会、日本バーチャルリアリティ学会、IEEE 各会員。



八木 康史 (正員)

1983 阪大・基礎工・制御工学卒。1985 同大学院修士課程了。同年三菱電機(株)入社。同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事。1990 大阪大学基礎工学部情報工学科助手。同学部システム工学科講師。同大学院助教授を経て、2003 より同大学産業科学研究所教授。1995～1996 英オックスフォード大学客員研究員。2002 仏ピカルディー大学招聘助教授。コンピュータビジョンに関する研究に従事。情報処理学会フェロー、IEEE、情報処理学会、日本ロボット学会各会員。博士(工学)。