

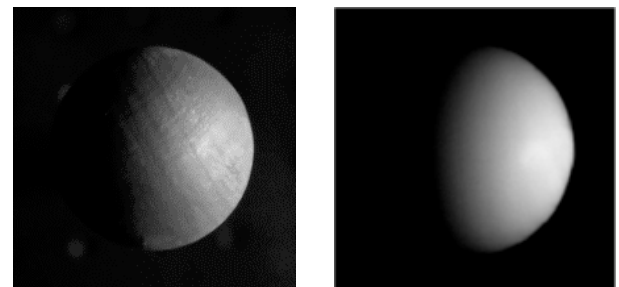
# 熱伝導の経時特性に基づく成分分解を用いた 遠赤外照度差ステレオ法

池谷 信寛<sup>1,a)</sup> 田中 賢一郎<sup>1</sup> 高谷 剛志<sup>1</sup> 久保 尋之<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

**概要:** 照度差ステレオ法は、光の反射特性においてランバート拡散反射を仮定することで物体の法線ベクトルを推定する。しかし、可視光領域において光沢がある材質や半透明な材質の反射特性はランバート拡散反射を仮定できないため適用が難しい。また、可視光領域において黒色や透明な物体はそもそも反射光が観測できないため適用できない。本研究では、遠赤外光を利用することによって、材質の違いに頑健な照度差ステレオ法を提案する。遠赤外光は多くの材質において吸収され、熱に変換された後、再び放射される。単一の遠赤外光源で照明すると、その放射強度は間接的に表面法線に依存する。ただし、物体内部における熱伝導によって放射強度は空間的に広がるため、表面法線への依存性が弱まり、単純には照度差ステレオ法を適用できない。そこで、放射強度の時間変化を計測し、放射成分をその経時特性に基づいて分解することによって、表面法線依存成分を取り出す。実験では複数の材質で実験を行い、本手法の有効性を検証した。

## 1. はじめに

物体の三次元形状計測技術はコンピュータビジョン分野において古くから取り組まれてきた問題の一つである。これまでに複数台のカメラを用いる手法 [29] やプロジェクタによるパターン投影を利用する手法 [14]、光の飛行時間を利用する手法 [2] など多様な計測手法が提案されてきた。特に、照度差ステレオ法 [25], [30] は物体表面の詳細な形状を復元できることで知られており、文化財アーカイブなどに応用されている [3]。一般的な照度差ステレオ法は、可視光領域の光源を用いて、様々な光源方向下における観測画像から物体表面の法線マップを推定する。しかし、物体の反射特性をランバート拡散反射と仮定することが多いため、実環境に多く存在する光沢のある物体や半透明物体などを対象とすることは難しい。これは、光沢性や半透明性が鏡面反射や表面下散乱といったランバート拡散反射と異なる光学現象に起因することが原因である。この問題に対し、ランバート拡散反射成分のみを抽出することにより、様々な材質において照度差ステレオ法を適用可能にする提案が多くある。例えば、偏光を利用して鏡面反射を取り除く手法 [21] や高周波パターンを投影して表面下散乱を除去する手法 [22] などが存在する。しかし、黒色物体や透明物体のようにそもそも反射光が観測できない材質を計測対象



(a) 可視光画像

(b) 熱画像

図 1: 可視光画像と熱画像の比較 (a) 可視光カメラで撮影した反射光画像 (b) サーモグラフィカメラで撮影した熱画像。同様の環境で撮影した場合、可視光画像と熱画像で似た陰影が観測できる。これは熱画像においても、コンピュータビジョンの従来手法が適用可能であることを示している。

とすることは困難であった。

そこで、本研究では、遠赤外光を利用することによって、材質の違いに頑健な照度差ステレオ法を提案する。遠赤外光は多くの材質において吸収され、熱に変換された後、再び遠赤外光として放射される。単一の遠赤外光源で物体を照明したとき、ある表面点に対する照度は表面法線の角度に依存し、ランバートの余弦則に従う。可視光領域とは異なり、間に熱エネルギーを介するが、照度と放射強度の間に正の相関があるため [32]、間接的に放射強度はその表面法線の角度に依存することになる。実例として、図 1 に、点

<sup>1</sup> 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  
<sup>a)</sup> ikeya.nobuhiro.i16@is.naist.jp

光源で照らした物体を可視光カメラとサーモグラフィカメラで撮影した画像を示す。熱画像においても可視光画像と同様の陰影が現れており、遠赤外光領域においても照度差ステレオ法が適用可能であることがわかる。ただし、一度吸収された熱エネルギーは、物体内部における熱伝導によって空間的に広がるため、照度と放射強度の相関が弱くなる。ゆえに、放射強度の角度依存性が失われるため、単純には照度差ステレオ法を適用できない。そこで、放射強度の時間変化を計測し、放射成分をその経時特性に基づいて分解することによって、角度依存成分を取り出す。本稿では、実環境で複数の材質に対して実験を行い、本手法の有効性を検証した。

## 2. 関連研究

一般的な照度差ステレオ法 [30] は、ランバート拡散反射面を仮定して、物体の表面法線を推定する。しかし、実環境では鏡面反射や表面下散乱、相互反射などの光学現象が起こるため、単純に照度差ステレオ法を適用できない。この問題に対し、鏡面反射を含めた反射現象をモデル化する手法 [11] や表面下散乱による光の広がりを畳み込みとしてモデル化する手法 [12] などが提案されてきた。しかし、複雑な光学現象を完全にモデル化することは難しいため、光学現象に基づく成分を分解するアプローチが多く取られている。例えば、偏光を用いることで鏡面反射を除去する手法 [27] や高周波パターンを投影することで表面下散乱と相互反射を除去する手法 [22] などが提案されている。このアプローチでは、成分分解の性能が高まるほど、最終的な法線推定の性能が高くなる。

近年、光学成分をより詳細に分解するため、光の経時特性を用いる手法が提案されている。Wu ら [31] はフェムト秒パルスレーザーの時間応答に基づいて拡散反射と相互反射、表面下散乱を分解した。また、近年では Time-of-Flight カメラを用いた成分分解の研究として、 $K$ -スパース [1], [5], [24], パラメトリックモデル [9], [15], ステレオ [17] などの研究がなされてきた。また、直接光及び間接光に関しても同様に時間分解することが可能である [6], [7], [16], [23], [31]。光伝播は極めて速い現象であるため、計測するにはストリークカメラなどの特殊な設備や繰返し計測による時間超解像が必要で、実用可能性はまだ低い。これに対し、我々は、熱移動の速度が光速よりも遥かに遅いことを利用し、熱画像の経時特性に基づいた新たな光伝播の分解手法を提案する。

別の問題として、そもそも反射光が観測できない黒色物体や透明物体は照度差ステレオ法で対応できない問題があった。対応策として、物体を白色スプレーで塗りつぶすか透明物体に特化した形状計測手法が用いられる。透明物体を対象とした形状計測手法として、既知の屈折率を利用する手法 [20] や鏡面反射を利用する手法 [19], 偏光を利用

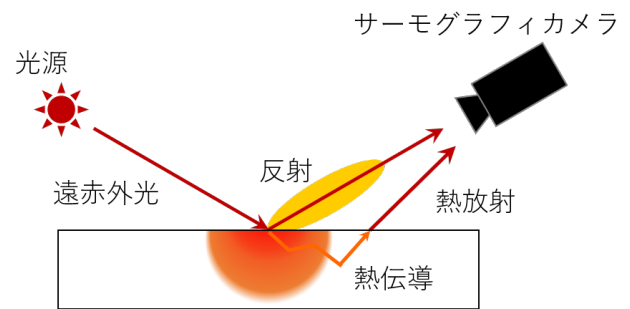


図 2: 遠赤外光の伝播. 遠赤外光の一部は表面で反射するが、残りは熱エネルギーに変換され、物体内部を移動し、温度に応じた遠赤外光を放射する。すべての成分をサーモグラフィカメラで撮影することができる。

する方法 [18] などが提案されている。これらの問題も熱画像を用いることで解決できることが多い。可視光領域において不可視（黒色や透明）となる材質であっても遠赤外光領域で可視となる場合、通常の照度差ステレオ法が適用できる。熱画像を用いる手法として、Eren ら [4] はレーザー光源とサーモグラフィカメラを用いて透明物体の形状を計測する手法を提案している。しかし、対象物体全体において点計測を走査する必要がある。

一方で、本稿で利用する照度差ステレオ法の場合、必要計測回数は最低 3 回で、面形状を詳細に計測できるため、点計測に基づく手法より実用的である。

## 3. 遠赤外光の伝播

あらゆる物体は表面温度に応じた遠赤外光を放射する。サーモグラフィカメラは、その性質を利用し、遠赤外光の強度を計測することによって、物体の表面から放射された熱エネルギーを取得する。物体が黒体である場合、ステファン・ボルツマンの法則 [10] によって、温度と遠赤外光の強度の関係が表される。

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

ここで、 $E$  は黒体から放射される全エネルギー、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数、 $T$  は黒体の絶対温度である。これにより、遠赤外光の強度を温度として扱うことができ、その逆も可能となる。

図 2 のように定常状態の遠赤外平行光源でシーンを照らし、サーモグラフィカメラで物体を撮影する。物体が黒体でない場合、遠赤外光の一部のみが吸収され、残りは反射される。吸収された遠赤外光は熱エネルギーに変換されるため、物体温度が上昇し、温度に応じた遠赤外光が物体から放射される。本研究で行う計測はこれらの現象の合成であり、光源からカメラまでの系が遠赤外光領域内で閉じられているので、本稿ではこのエネルギーの移動を遠赤外光伝播と呼ぶ。

可視光カメラによって撮影された画像は、鏡面反射や拡

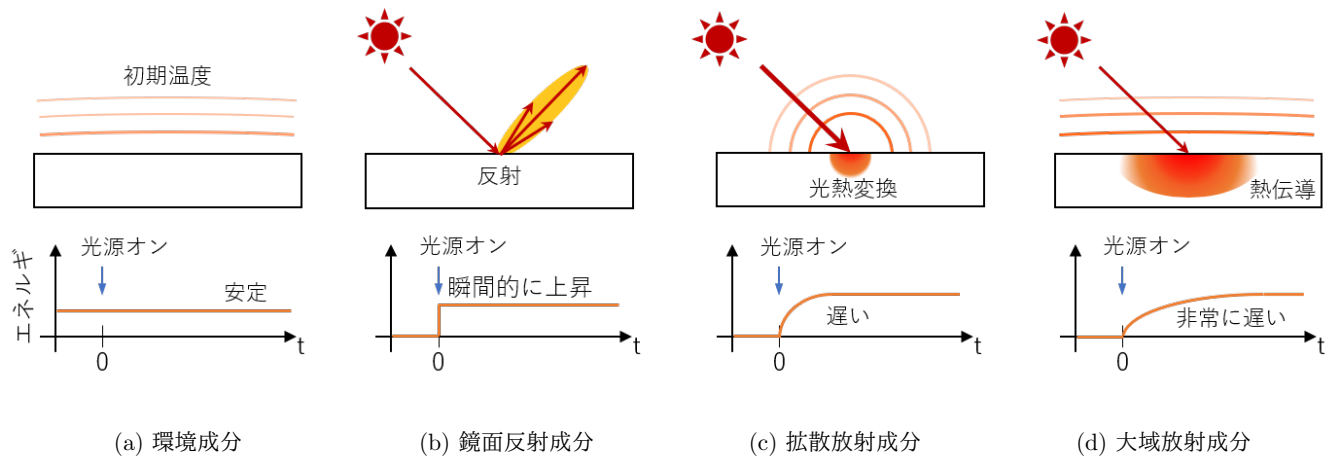


図 3: 遠赤外光と熱の伝播成分. (a) 環境成分は物体の初期熱エネルギー, (b) 鏡面反射成分は電磁波としての反射, (c) 拡散放射成分と (d) 大域放射成分は熱の移動による. 熱の移動速度は光の速度よりも遥かに遅く, すべての成分が特有の経時特性を持つため分解可能となる.

散反射, 表面下散乱などの複数の光伝播現象の合成である. また, 熱画像も同様に複数の遠赤外光伝播現象の合成である. ここで我々は, 遠赤外光の伝播成分を図 3 に示すような 4 成分に分類した. 光源がオフの状態では物体が放射する光を環境成分, 光源をオンにした直後に物体表面で反射する光を鏡面反射成分, 表面で吸収され, すぐに放射された光を拡散放射成分, 熱として物体内部をゆっくりと移動した後再び放射された光を大域放射成分と定義した.

可視光と遠赤外光の伝播には様々な違いがあるが, 本研究では特に遠赤外光の経時特性が伝播成分間で大きく異なるという点に着目する. 可視光伝播の過渡状態はピコ秒単位で変化するため, ビデオフレームでは分解能がまったく足りず計測できない. それに対して, 遠赤外光伝播は熱エネルギーの移動が秒単位であり, 可視光に比べると極端に遅いため容易に計測可能である. 図 4 に遠赤外光伝播成分の熱エネルギー遷移の概念を示す. 光源をオンにする前は環境成分のみ計測される. 光源をオンにした直後に鏡面反射成分が計測され, 熱エネルギーが上昇するにつれ拡散放射成分と大域放射成分が徐々に計測される. また, 物体内部での熱移動を伴う大域放射成分に比べ, 拡散放射成分は早く定常状態へ遷移する.

ある時刻  $t$  に観測された熱画像において, ある画素  $c$  の輝度値  $I(t, c)$  をモデル化する.

$$I(t, c) = A(t, c) + S(t, c) + D(t, c) + G(t, c) \quad (2)$$

$A, S, D, G$  は, それぞれ, 環境成分, 鏡面反射成分, 拡散放射成分, 大域放射成分である. この観測は画素単位であり, 一般性を失うことなくカメラ画素  $c$  を省略できる. 以下で遠赤外光伝播成分の詳細な特性について述べる.

### 3.1 環境成分

環境成分は, 光源がオフになっている状態で, 物体の初

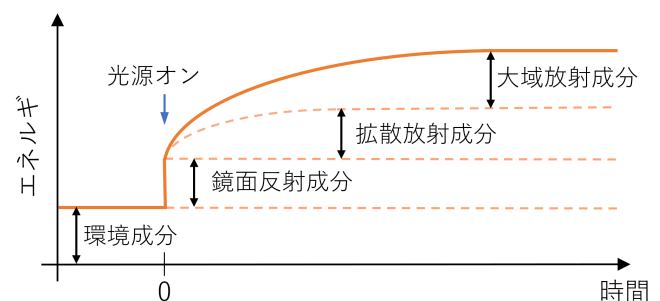


図 4: 遠赤外光の伝播における経時特性. 遠赤外光の伝播成分は経時特性が異なるため, 分解することが出来る.

期熱エネルギーによって放射されている遠赤外光の強度に対応する. この環境成分  $A(t)$  は, 光学計測における環境光や暗電流に対応し, 時間の経過によらず一定のものとしてモデル化する.

$$A(t) = \tau \quad (3)$$

ここで,  $\tau$  は物体の初期熱エネルギーである.

### 3.2 鏡面反射成分

鏡面反射成分は, 遠赤外光の電磁波としての挙動であり, 可視光伝播と同じ特性を持つため, 物体の熱移動や熱エネルギーに関係しない. しかし, 観測の際, 鏡面反射成分も同時に計測されてしまうため, 考慮が必要である. 鏡面反射成分  $S(t)$  は, 光源がオンになっている間のみ観測される.

$$S(t) = \begin{cases} L_0 r_s & (t > 0) \\ 0 & (t \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで,  $r_s$  は鏡面反射率,  $L_0$  は光源の強度である. 本研究では, 光源から放射される遠赤外光が定常状態にあると仮定するため, 鏡面反射成分についても過渡状態はなく, 定常状態にあるとモデル化できる. また, 拡散反射や表面

下散乱のような他の光学現象は、波長が長い場合多くの材質で無視することができる。仮に影響を与えたとしても、それらは鏡面反射と同じく過渡状態を計測できないため、鏡面反射成分の一部とみなすことができる。

### 3.3 拡散放射成分と大域放射成分

照射された遠赤外光は物体表面で吸収され、光熱変換により表面の温度が上昇する。この温度上昇に伴い変化する遠赤外光の放射を拡散放射成分として取り扱う。遠赤外光を吸収した結果として熱エネルギーが上昇する過程で時間がかかるため、可視光における拡散放射の時間的広がり（約数十ピコ秒）[28]と比較するとはるかに遅い。そのため、拡散放射成分の過渡状態についてはビデオフレームでも十分に観測することができる。

一方、拡散放射以外にも、表面熱エネルギーが上昇した結果、熱が物体内部をゆっくりと伝播し、物体の他の部分でも熱エネルギー上昇をもたらす。その結果として発生する熱放射は、大域放射成分として取り扱う。物体内部の熱の伝播にはさらに長い時間がかかるため、大域放射成分については定常状態に移行するまで数分程度かかると考えられる。

拡散放射成分と大域放射成分はそれぞれ、光熱変換や熱伝播を介した拡散反射と表面下散乱と解釈することもできると考えられる。拡散反射と表面下散乱は同じ物理現象とみなすことができるとされており [8], [13], [26], 物体表面への入射点から物体外へ放出される点までの距離が小さいものが拡散反射、距離が十分に大きいものが表面下散乱に対応すると捉えることができる。同様に、遠赤外光伝播の放射においても、拡散放射成分は局所的に起こった光熱変換による熱の放射であり、大域放射成分は十分に離れた場所から移動してきた熱による放射であると考えられる。

拡散放射成分と大域放射成分については、経験則に基づき、指数関数を用いてそれらの過渡状態をモデル化する。

$$\begin{cases} D(t) = (1 - e^{-\sigma_d t}) R_\infty d_\infty \\ G(t) = (1 - e^{-\sigma_g t}) R_\infty g_\infty \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_d$  および  $\sigma_g$  ( $\sigma_g \ll \sigma_d$ ) は、それぞれ拡散および大域放射成分の過渡速度の係数を表し、 $R_\infty = R(\infty)$  は放射成分の定常状態、 $d_\infty$  と  $g_\infty$  は、それぞれ、定常状態における拡散および大域放射成分の放射成分に対する比を表す。

## 4. 遠赤外照度差ステレオ法

遠赤外光伝播成分間の経時特性の差に基づいた遠赤外照度差ステレオ法を開発する。本手法では、遠赤外光伝播成分の分解と照度差ステレオ法によって物体の法線を推定する。

### 4.1 拡散放射成分の分解

ランバート照度差ステレオ法を適用させるため、経時特性の計測に基づいて遠赤外光伝播を成分分解し、拡散放射成分を抽出する。まず、環境成分は光源がオンになる前に放射されている遠赤外光の強度とする。光源を  $t = 0$  でオンにし、その直後に増加した熱エネルギーが鏡面反射成分である。放射成分は熱エネルギーが上昇している間は過渡状態であり、熱エネルギーが安定した時点では定常状態にあると考えることができる。この定常状態までの遷移速度に基づいて拡散放射成分と大域放射成分に分解する。

放射成分は、観測値から環境成分と鏡面反射成分を差し引くことによって取得できる。環境成分と鏡面反射成分を定数として扱い、放射成分  $R(t)$  を求める。

$$\begin{aligned} R(t) &= I(t) - A - S \\ &= I(t) - I(\epsilon) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで  $\epsilon$  は光源をオンにしてからの微小時間である。

放射成分  $R(t)$  を式 (5) で定義したモデルに当てはめる。

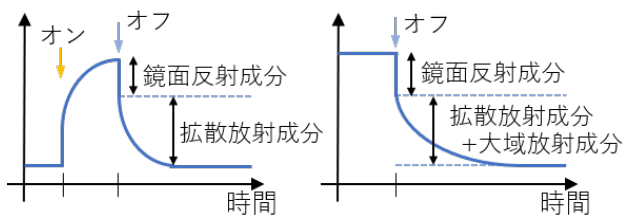
$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_d, \hat{d}_\infty, \hat{\sigma}_g, \hat{g}_\infty &= \operatorname{argmin}_{\sigma_d, d_\infty, \sigma_g, g_\infty} \|R(t) - D(t) - G(t)\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad &\min_t \frac{-\log(R_\infty - R(t))}{t} \leq \sigma_g \ll \sigma_d \\ &0 \leq d_\infty \leq 1 \\ &0 \leq g_\infty \leq 1 \\ &d_\infty + g_\infty = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、拡散放射成分と大域放射成分に分解するためにいくつかの制約を課した。第1の制約は、各成分の定常状態までの遷移時間が、観測が定常状態になるまでの時間よりも小さいことを表す。また、拡散放射成分は大域放射成分よりも過渡速度が速いので、 $\sigma_g$  は  $\sigma_d$  より小さくなる。第2, 第3の制約は、拡散放射成分および大域放射成分の強度が放射成分全体よりも小さいことを表す。最後の制約は、放射成分が拡散放射成分と大域放射成分の和であることを表す。ここでは単純にグリッドサーチにより近似大域最適解を見つける。これらの制約によって、変数は3つとなり、パラメータの境界は放射成分  $R(t)$  によって予測することができるため、大きな計算コストではない。

### 4.2 その他の分解手法

他の実行可能な手法として、光源をオフにした後の熱エネルギー計測が挙げられる。図 5(a) に示すように、短い時間で光源のオン/オフを切り替えることで、物体内部の熱移動の影響を無視できるため、鏡面反射成分と拡散放射成分を直接得ることができる。しかし、拡散放射成分は定常状態に達しないので、S/N 比が非常に低くなる可能性がある。





(a) 短時間の加熱. (b) 冷却における過渡状態.

図 5: その他の分解手法 (a) 極めて短い時間光源をオンにし、鏡面反射成分と拡散放射成分を直接計測できる. (b) 光源を消した後の過渡状態においても提案手法と同様の情報を得ることが出来る.

る. 加熱時間を延長すると、S/N 比が向上するが、大域放射成分の影響が大きくなってしまふ. この手法では、適切な照射時間を決定する必要がでてくる.

冷却プロセスは図 5(b) に示すように、遠赤外光伝播を分析するのにも有用である. 加熱と冷却は逆の現象であるため、提案手法と非常によく似た方法で光伝播を分解することができる. しかし、提案手法の 2 倍の時間がかかるので、我々は加熱プロセスを採用した.

#### 4.3 表面法線推定

物体に遠赤外光を照射すると、その点はエネルギーを吸収し、上昇した温度に応じた遠赤外光を放射する. その照度は余弦則 [10] に従うので、定常状態の拡散放射成分を表すことができる.

$$D(\infty) = \rho \mathbf{i}^\top \mathbf{n} \quad (8)$$

ここで、 $\rho$  はスケール定数、 $\mathbf{i}$  と  $\mathbf{n}$  はそれぞれ光源ベクトルと表面の法線ベクトルを表す.

拡散放射成分および拡散反射は同じ余弦則に従うので、通常の照度差ステレオ法を拡散放射成分に適用することができる. 通常の照度差ステレオ法は、黒色物体や透明物体、半透明物体のように拡散反射が無い、または他の光伝播が支配的である物体に対しては適用困難である. 一方、拡散放射成分は、エネルギーの吸収および放射の現象であるため、より多くの物体の表面法線を得ることができる. 我々は、拡散放射成分を用いた照度差ステレオ法を提案し、遠赤外照度差ステレオ法と名付けた.

式 (8) に示すように、分解された拡散放射成分はランバートの余弦法則に従うので、照度差ステレオ法を適用することができる. 複数の光源を異なる位置に置くと、複数の計測値が得られ、行列形式で表すと、

$$\mathbf{D} = \rho \mathbf{I} \mathbf{n} \quad (9)$$

となる. ここで、 $\mathbf{D}$  と  $\mathbf{I}$  は、それぞれ拡散ベクトルと入射

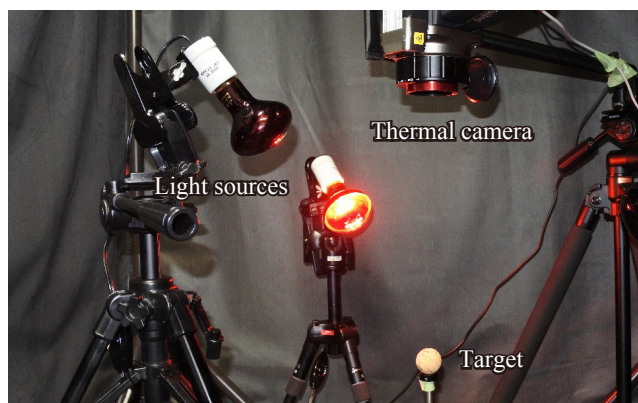


図 6: 実験環境.

光行列である. 入射光行列がフルランクの場合、法線を求めることができる.

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{I}^\dagger \mathbf{D}}{\|\mathbf{I}^\dagger \mathbf{D}\|} \quad (10)$$

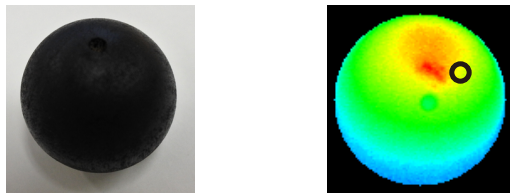
ここで、 $\mathbf{I}^\dagger$  は  $\mathbf{I}$  の擬似逆行列である.

## 5. 実験

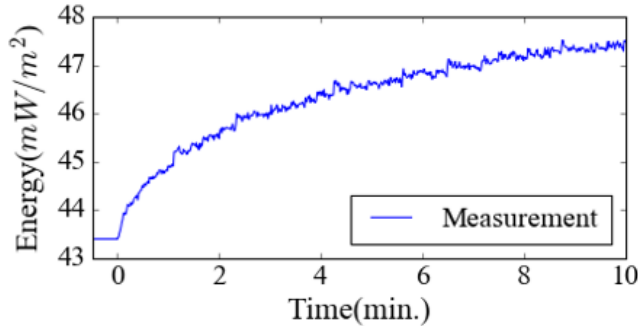
実験で使用したセットアップを図 6 に示す. 遠赤外光領域を多く含む光源 (Exo Terra Heat-Glo 100W) を用いて対象物体を照明し、サーモグラフィカメラ (InfRec R500) で撮影する. 光源をオンにする前の熱エネルギーを環境成分とし、光源をオンにした後の熱エネルギー変化を映像として取得する.

### 5.1 分解結果

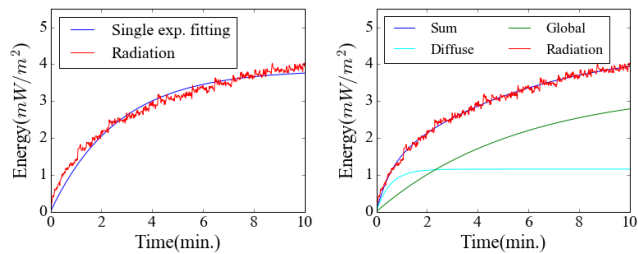
図 7(a) に示す黒色に塗られた木球を対象として実験を行う. 例として、撮影した熱動画の 1 フレームを図 7(b) に示す. また、図 7(c) に図 7(b) の黒丸部分において計測された熱エネルギーの時間的変化を示す. ここで、環境成分は光源をオンにする前の熱エネルギー、鏡面反射成分は光源をオンにした直後に計測される熱エネルギー変化であり、式 (6) によって除去できる. 環境成分・鏡面反射成分の除去によって得られた放射成分を図 7(d) に示す. 放射成分に対し、単一の指数曲線をフィッティングした場合の二乗平均平方根誤差は  $1.6 \times 10^{-4}$  となった. 我々の定義では、放射成分は拡散放射成分と大域放射成分の合成であるため、式 (7) による分解を行う. 図 7(e) は、二つの指数曲線のフィッティングすることによって分解された拡散放射成分および大域放射成分である. それらを合成した場合の二乗平均平方根誤差は  $0.75 \times 10^{-4}$  となり、単一の指数曲線フィッティングと比較し、誤差が小さくなった. ゆえに、拡散放射成分と大域放射成分の合成は放射成分をよく近似できているが分かる. これらの手順をすべての画素に適用し、分解された結果を画像として図 7(f)–(h) に示す. 結果から、鏡面反射成分は表面上の光源の反射、拡散放射成分



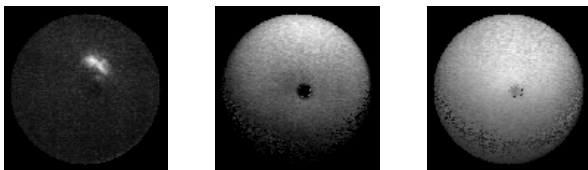
(a) 対象物体. (b) 動画中の1フレーム.



(c) 熱エネルギーの推移.



(d) 放射成分プロフィール. (e) 放射成分の分解結果.



(f) 鏡面反射成分. (g) 拡散放射成分. (h) 大域放射成分.

図 7: 黒色球の分解結果. (a) 計測対象. 木球は中央に穴が開いている. (b) ビデオフレームの一例. (c) 熱エネルギープロフィールの例であり, (b) の黒丸中の熱エネルギー変化を表す. (d) 観測値から環境成分と鏡面反射成分を引いた値. 二乗平均平方根誤差は  $1.6 \times 10^{-4}$ . (e) 拡散放射成分と大域放射成分の分解. 二乗平均平方根誤差は  $0.75 \times 10^{-4}$ . (f-h) 鏡面反射成分と拡散放射成分, 大域放射成分それぞれの分解結果の画像.

は陰影, 大域放射成分は物体全体の熱エネルギー変化を表していることが分かる.

## 5.2 表面法線推定

三つの光源位置において撮影を行い, 成分分解した拡散放射画像を用いてランバート照度差ステレオ法を適用する. 図 8 は, 図 7 と同じ黒色球を対象物体として, 遠赤外照度差ステレオ法を適用した結果を示す. 図 8(a)-(c) は異なる光源位置で撮影された拡散放射画像であり, (d) は推

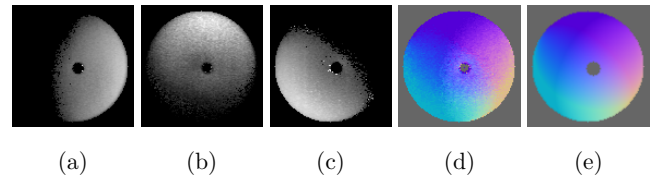


図 8: 遠赤外照度差ステレオ法の結果. 穴の部分はマスク処理されている. (a-c) 異なる光源位置で撮影された拡散放射画像. (d) 推定された法線マップ. (e) 法線マップの真値.

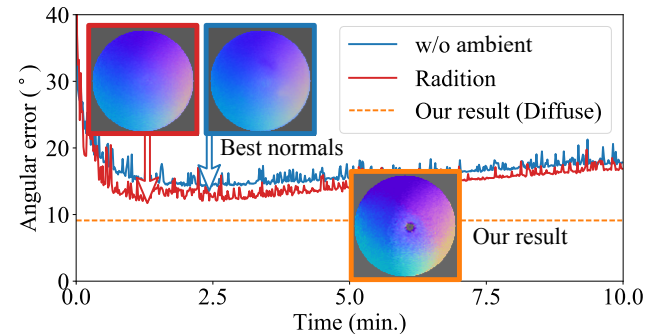


図 9: 分解の有効性. 環境成分のみを除去した場合と放射成分のみの場合, 提案手法における照度差ステレオ法の結果の比較. 環境成分のみを除去した場合と放射成分のみの場合における法線の最良角度誤差はそれぞれ, 14.17 度と 11.83 度であった. また, 提案手法は点線で示され, その角度誤差は 9.16 度であった. これらの結果は提案手法の有効性を示している.

定された法線マップ, (e) は法線マップの真値を表す. 結果から, 真値法線マップに類似した推定が得られており, 遠赤外照度差ステレオ法の有効性が確認できた. 成分分解の有効性を確認するため, 環境成分のみを除去した場合と環境成分・鏡面反射成分の両方を除去した場合においても同様に法線マップを推定し比較する. 前者は鏡面反射成分と拡散放射成分, 大域放射成分の合成であり, 後者は放射成分全体, すなわち, 拡散放射成分と大域放射成分の合成を意味する. 推定された法線マップの平均角度誤差を時間経過について解析した結果を図 9 に示す.  $t = 0$  付近では熱エネルギー上昇が小さく, S/N 比が悪いため, 推定誤差は大きくなる. また, 時間が十分に経過した時点では大域放射成分が支配的になるため, 放射成分の法線依存性が弱くなり, 推定誤差が大きくなる. 環境成分のみを除去した場合, および環境成分・鏡面反射成分の両方を除去した場合における最小誤差はそれぞれ 14.17 度と 11.83 度となった. 一方, 拡散放射成分のみを用いる提案手法の誤差は 9.16 度となり, より良い法線マップが推定でき, 成分分解の有効性を示せた.

次に, 透明なクリスタルガラスや半透明なプラスチック, 半透明な大理石などの材質にも遠赤外照度差ステレオ法を



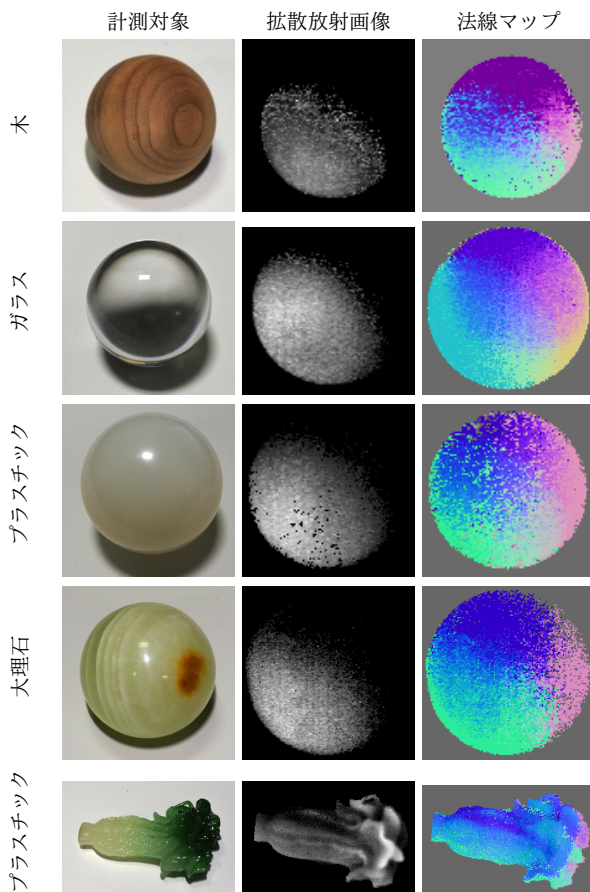


図 10: 様々な材質に対する実験結果. 計測対象には, 木球に加え, 従来の手法では適用困難なガラスやプラスチック, 大理石も含んでいる. 提案手法はどの材質に対しても有効であることを示している.

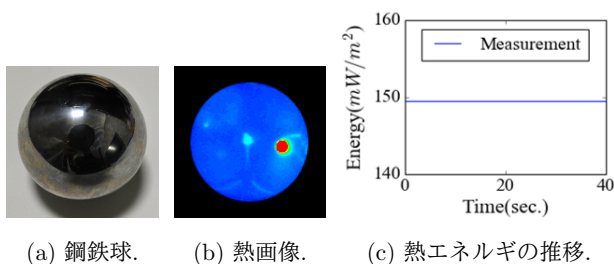


図 11: 失敗例. 金属のように放射率が小さい物体は, 入射光を全て反射してしまう. (c) 熱エネルギープロファイルは鏡面反射部分の時間応答を示しているが, 過渡状態状態が無いことが分かる. この場合, 環境成分と鏡面反射成分しか得られず, 提案手法を適用させることは出来ない.

適用した. 分解された拡散放射成分と推定された表面法線を図 10 に示す. 提案手法は拡散放射成分に基づいているため, 通常の可視光では計測が困難な材質に対しても同一手法で計測することができた. また, プラスチック製のオブジェを計測した結果から, 複雑な形状を持つ対象物体への適用が可能であることも示された.

一方, 本手法は遠赤外光を吸収しない物体ではうまく機

能しない. 金属は, 図 11 に示すように, 入射光をほぼすべて反射し, 遠赤外光領域においても鏡として働く. また, 図 11(c) に示す熱エネルギーの時間変化を見ると, 過渡状態が存在せず, 放射成分がほぼないことがわかる. これは可視光での計測と全く同じ問題である.

## 6. 結論

本論文では, 従来の手法で適用困難であった材質に対する新たな照度差ステレオ法を提案した. 本手法は, 遠赤外光が多く物質に吸収・放射されることを利用し, その伝播成分の経時特性から拡散放射成分のみを抽出することで, 一般的な照度差ステレオ法を適用した.

実環境における実験により本手法の有効性が示されたが, いくつかの制限が挙げられる. まずは, 熱エネルギー分解能が低いため, ノイズが多い点である. しかし, 現状, 本手法ではノイズが多い画像に対して画素毎に計算しているため, 空間的な制約を用いるなど, 改善の余地があると言える. 次に, 金属のような拡散放射が少ない材質に対しては適用が困難な点である. この場合, 環境成分と鏡面反射成分しか計測できず, 照度差ステレオ法が有効でない. これは可視光領域における問題と同じである. しかし, ガラスを含む多くの材質において遠赤外光の吸収率は高く, 本手法の適用可能範囲は可視光を用いた計測に比べて高いと言える.

今後の展望として, 平滑化フィルタの使用や連続性を考慮した最適化を適用することでノイズを軽減し, 精度改善を目指すことが挙げられる.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP17H06865, JP26700013, JP17K19979, JP17J05602 の助成を受けた.

## 参考文献

- [1] Bhandari, A., Feigin, M., Izadi, S., Rhemann, C., Schmidt, M. and Raskar, R.: Resolving Multipath Interference in Kinect: an Inverse Problem Approach, *IEEE SENSORS*, IEEE, pp. 614–617 (2014).
- [2] Cui, Y., Schuon, S., Chan, D., Thrun, S. and Theobalt, C.: 3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2010).
- [3] Einarsson, P., Hawkins, T. and Debevec, P.: Photometric Stereo for Archeological Inscriptions, *Proc. SIGGRAPH Sketches* (2004).
- [4] Eren, G., Aubret, O., Meriaudeau, F., Sanchez Secades, L. A., Fofi, D., Naskali, A. T., Truchetet, F. and Ercil, A.: Scanning from Heating: 3D Shape Estimation of Transparent Objects from Local Surface Heating., *Optics express*, Vol. 17, No. 14, pp. 11457–68 (2009).

- [5] Freedman, D., Krupka, E., Smolin, Y., Leichter, I. and Schmidt, M.: SRA: Fast Removal of General Multipath for ToF Sensors, *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 234–249 (2014).
- [6] Gkioulekas, I., Levin, A., Durand, F. and Zickler, T.: Micron-Scale Light Transport Decomposition using Interferometry, *ACM Tran. on Graphics (ToG)*, Vol. 34, No. 4, pp. 37:1–37:14 (2015).
- [7] Gupta, M., Nayar, S. K., Hullin, M. B. and Martin, J.: Phasor Imaging: a Generalization of Correlation-Based Time-of-Flight Imaging, *ACM Tran. on Graphics (ToG)*, Vol. 34, No. 5, pp. 156:1–156:18 (2015).
- [8] Hanrahan, P. and Krueger, W.: Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering, *Proc. SIGGRAPH*, ACM Press, pp. 165–174 (1993).
- [9] Heide, F., Xiao, L., Kolb, A., Hullin, M. B. and Heidrich, W.: Imaging in Scattering Media using Correlation Image Sensors and Sparse Convolutional Coding., *Optics express*, Vol. 22, No. 21, pp. 26338–26350 (2014).
- [10] Howell, J. R., Mengüç, M. P. and Siegel, R.: *Thermal Radiation Heat Transfer, Sixth Edition*, CRC Press (2015).
- [11] Ikeuchi, K.: Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No. 6, pp. 661–669 (1981).
- [12] Inoshita, C., Mukaigawa, Y., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Surface Normal Decomposition: Photometric Stereo for Optically Thick Translucent Objects, *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 346–359 (2014).
- [13] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M. and Hanrahan, P.: A Practical Model for Subsurface Light Transport, *Proc. SIGGRAPH*, ACM Press, pp. 511–518 (2001).
- [14] Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y.: Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2008).
- [15] Kirmani, A., Benedetti, A. and Chou, P. A.: SPUMIC: Simultaneous Phase Unwrapping and Multipath Interference Cancellation in Time-of-Flight Cameras using Spectral Methods, *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, IEEE, pp. 1–6 (2013).
- [16] Kitano, K., Okamoto, T., Tanaka, K., Aoto, T., Kubo, H., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: .
- [17] Lee, S. and Shim, H.: Skewed Stereo Time-of-Flight Camera for Translucent Object Imaging, *Image and Vision Computing*, Vol. 43, No. C, pp. 27–38 (2015).
- [18] Miyazaki, D. and Ikeuchi, K.: Inverse Polarization Raytracing: Estimating Surface Shapes of Transparent Objects, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, pp. 910–917 (2005).
- [19] Morris, N. J. W. and Kutulakos, K. N.: Reconstructing the Surface of Inhomogeneous Transparent Scenes by Scatter-Trace Photography, *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1–8 (2007).
- [20] Morris, N. J. W. and Kutulakos, K. N.: Dynamic Refraction Stereo., *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 33, No. 8, pp. 1518–1531 (2011).
- [21] Nayar, S. K., Fang, X.-S. and Boulton, T.: Separation of Reflection Components Using Color and Polarization, *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol. 21, No. 3, pp. 163–186 (1997).
- [22] 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 Tran. on Graphics (ToG)*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (2006).
- [23] O’Toole, M., Heide, F., Xiao, L., Hullin, M. B., Heidrich, W. and Kutulakos, K. N.: Temporal Frequency Probing for 5D Transient Analysis of Global Light Transport, *ACM Tran. on Graphics (ToG)*, Vol. 33, No. 4, pp. 87:1–87:11 (2014).
- [24] Qiao, H., Lin, J., Liu, Y., Hullin, M. B. and Dai, Q.: Resolving Transient Time Profile in ToF Imaging via Log-Sum Sparse Regularization., *Optics letters*, Vol. 40, No. 6, pp. 918–21 (2015).
- [25] Silver, W. M.: Determining shape and reflectance using multiple images (1980).
- [26] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Recovering Inner Slices of Layered Translucent Objects by Multi-frequency Illumination, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 39, No. 4, pp. 746–757 (2017).
- [27] Treibitz, T. and Schechner, Y. Y.: Active Polarization Descattering, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 31, No. 3, pp. 385–399 (2009).
- [28] Velten, A., Raskar, R., Wu, D., Jarabo, A., Masia, B., Barsi, C., Joshi, C., Lawson, E., Bawendi, M. and Gutierrez, D.: Femto-Photography: Capturing and Visualizing the Propagation of Light, *ACM Tran. on Graphics (ToG)*, Vol. 32, No. 4, pp. 44:1–44:8 (2013).
- [29] Vlasic, D., Peers, P., Baran, I., Debevec, P., Popovic, J., Rusinkiewicz, S. and Matusik, W.: Dynamic Shape Capture using Multi-View Photometric Stereo, *Proc. SIGGRAPH Asia* (2009).
- [30] Woodham, R. J.: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 139–144 (1980).
- [31] Wu, D., Velten, A., O’Toole, M., Masia, B., Agrawal, A., Dai, Q. and Raskar, R.: Decomposing Global Light Transport using Time of Flight Imaging, *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol. 107, No. 2, pp. 123–138 (2014).
- [32] 日本機械学会 : 伝熱工学, 日本機械学会 (2016).