

NAIST-IS-MT1651009

修士論文

光と熱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

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

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

池谷 信寛

審査委員：

向川 康博 教授	（主指導教員）
萩田 紀博 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）

光と熱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

内容梗概

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．

キーワード

形状計測，照度差ステレオ法，遠赤外光，熱伝導，経時特性

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651009, 2018 年 3 月 15 日.

Far-infrared Photometric Stereo Using Decomposition Based on Temporal Characteristics of Light and Heat*

Nobuhiro Ikeya

Abstract

Photometric stereo estimates the normal vector of an object by assuming Lambert diffuse reflection. However, it is difficult to apply reflection properties of glossy materials or translucent materials in the visible light region because Lambert diffuse reflection cannot be assumed. Also, black and transparent objects in the visible light region cannot be applied since reflected light cannot be observed. In this paper, by using far infrared light, we propose photometric stereo which is robust to the material. Far-infrared light is absorbed by many materials, converted to heat, and emitted again. When illuminated with a single far-infrared light source, radiation intensity indirectly depends on the surface normal. However, since the radiation intensity spatially expands due to heat conduction inside the object, the dependence on the surface normal is weakened, and simply photometric stereo cannot be applied. Therefore, by measuring the temporal change of the radiation intensity and decomposing the radiation component based on its temporal characteristics, a surface normal dependent component is extracted. Experiments were conducted with multiple materials and the effectiveness of this method was verified.

Keywords:

Shape measurement, Photometric Stereo, Far-infrared, Heat conduction, Tem-

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651009, March 15, 2018.

poral characteristics

目次

図目次	vi
第 1 章 はじめに	1
第 2 章 関連研究	4
2.1 複雑な光学現象に対する照度差ステレオ法	4
2.2 成分分解手法	4
2.3 熱画像を用いた手法	5
2.4 本研究の位置づけ	5
第 3 章 遠赤外光伝播	6
3.1 遠赤外光伝播成分	6
3.2 環境成分	9
3.3 反射成分	9
3.4 拡散放射成分と大域放射成分	9
第 4 章 遠赤外照度差ステレオ法	11
4.1 拡散放射成分の分解	11
4.1.1 加熱過程の経時特性に基づく分解	11
4.1.2 冷却過程の経時特性に基づく分解	12
短時間加熱後の冷却	13
長時間加熱後の冷却	13
4.2 表面法線推定	13
第 5 章 実験	16
5.1 実験環境	16
5.2 評価実験	16
5.2.1 経時特性に基づく成分分解	17
5.2.2 法線推定	19
5.2.3 成分分解の有効性	19

5.3	様々な材質に対する法線推定	21
第 6 章	結論	26
	謝辞	27
	発表リスト	28
	参考文献	29

図目次

1.1	ガラス球の可視光画像と熱画像の比較	1
1.2	計測値の角度依存性	3
3.1	遠赤外光の伝播	6
3.2	遠赤外光と熱の伝播成分	7
3.3	遠赤外光の伝播における経時特性	8
4.1	冷却過程の経時特性	14
5.1	実験環境	17
5.2	光源の経時特性	17
5.3	黒色球の計測	18
5.4	計測値の分解	19
5.5	フィッティング結果	20
5.6	放射成分の分解結果	20
5.7	遠赤外照度差ステレオ法の結果	21
5.8	分解の有効性	22
5.9	計測対象	23
5.10	様々な材質に対する実験結果	24
5.11	失敗例	25

第 1 章 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 [31] やプロジェクタによるパターン投影を利用する手法 [16]，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 [27, 32] 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，光沢性や半透明性を持つ物体に対して光を照射した場合，ランバート拡散反射だけでなく，鏡面反射や表面下散乱といった光学現象が混在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とすることは困難であった．



(a) 可視光画像



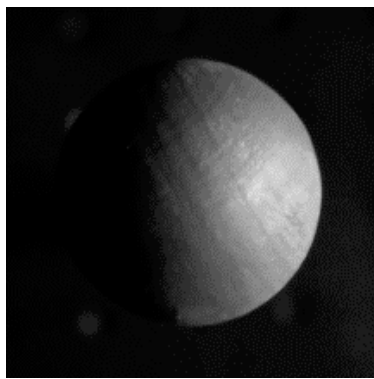
(b) 熱画像

図 1.1: ガラス球の可視光画像と熱画像の比較

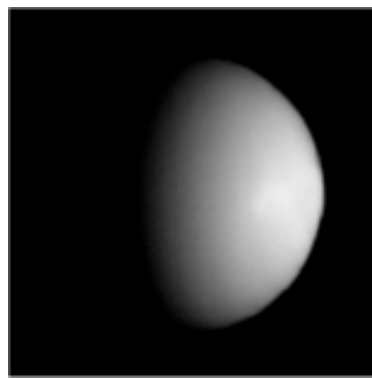
そこで、本研究では、遠赤外光を利用することによって、材質の違いに頑健な照度差ステレオ法を提案する。物体に照射した遠赤外光は吸収され、熱に変換された後、再び遠赤外光として放射される。本研究では、この伝播過程が有する以下の3つの特徴を利用する。

- 多くの物体が遠赤外光を吸収する
- 放射エネルギーが表面方向と光源方向に依存する
- 物体内部における熱伝導が非常に遅い

波長によって吸収特性が異なる物体が多く存在する。図 1.1(a) のように可視光領域では光を透過し、反射光を撮影できないガラスに対しても、遠赤外光領域では光を吸収するため、図 1.1(b) のように不透明物体として撮影することができる。これはガラスのみでなく、多くの透明物体や半透明物体においても同様の現象が起こる。また、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 [11]、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 1.2 に、点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、物体内部の熱伝導が光速と比べると遥かに遅いという特徴を利用する。可視光領域では、様々な光学現象が混在して起こる材質において、ほぼ同時に起こるそれぞれの現象を分解することは困難である。しかし遠赤外光領域では、一度伝導速度の遅い熱を介するため、容易に分解することが可能であると考えられる。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。



(a) 可視光画像



(b) 熱画像

図 1.2: 計測値の角度依存性. (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.

第 2 章 関連研究

2.1 複雑な光学現象に対する照度差ステレオ法

一般的な照度差ステレオ法 [32] 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 [12] や表面反射率に対して仮定を置くことで鏡面反射を含む物体に対して適用する手法 [10] などが提案されてきた．また，相互反射が起こる凹面に対する形状推定手法 [15] や表面下散乱による光の広がりやを畳み込みとしてモデル化する手法 [13] 研究がなされている．

2.2 成分分解手法

ランバート拡散反射面を仮定する一般的な照度差ステレオ法においては，混在する光学現象を分解する手法も有効である．成分分解の研究は色情報に基づく研究から始まり，Shafer ら [26] は鏡面反射が光源色，拡散反射が物体色に依存する二色性反射モデルを提案した．また，色情報ではなく，偏光板を用いることで鏡面反射を除去する手法 [29] 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．

近年では，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 [33] はフェムト秒パルスレーザ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, 17]，ステレオ [19] 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 [33, 23, 18, 7, 6]．

2.3 熱画像を用いた手法

コンピュータビジョンにおける問題を解決するために熱画像を用いた研究はこれまでも行われている。Saponaro ら [25] は、物質によって透水性や温度上昇・下降特性が異なることを利用して材質分類する手法を提案した。また、形状計測手法として、宮崎ら [20] は、可視光の表面反射と遠赤外光の放射における偏向度を分析することで透明物体の表面方向を推定した。Eren ら [4] はレーザ光源とサーモグラフィカメラを用いて三角測量から透明物体の形状を計測する手法を提案している。

2.4 本研究の位置づけ

ランバート拡散反射面に対して良好な結果を得ることができる照度差ステレオ法では、様々な光学現象が混在する環境下において、成分分解が非常に重要な技術となる。Wu ら [33] は、光伝播の成分毎に経時特性が異なることを利用して成分分解をした。しかし、光伝播の変化を捉えるためにはピコ秒オーダーの分解能が必要であるため、ストリークカメラやフェムト秒パルスレーザ等の特殊な計測機器が必要となる。それに対して、我々は光速より遥かに遅い熱伝導を利用することで、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。

また、熱画像を利用した形状計測の研究 [4] はこれまでもされてきたが、物体をレーザで照射するため、走査して計測する必要があった。一方で、本研究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、面形状を画素毎に計測できるため、点計測に基づく手法より実用的である。

第 3 章 遠赤外光伝播

3.1 遠赤外光伝播成分

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 [11] によって，温度と遠赤外光の強度の関係が表される．

$$E = \sigma T^4 \quad (3.1.1)$$

ここで， E は黒体から放射される全エネルギー， σ 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．熱画像で得られる値は温度であるが，この法則により，温度を遠赤外光の強度として扱うことができ，その逆も可能となる．また，ある実在面を有する物体に対してエネルギー $E(\lambda)$ の遠赤外光が照射された場合，キルヒホッフの法則 [11] に基づき，物体が受け取るエネルギーと物体が放射するエネルギーは等しくなる．

$$\alpha E(\lambda) = \epsilon E(\lambda) \quad (3.1.2)$$

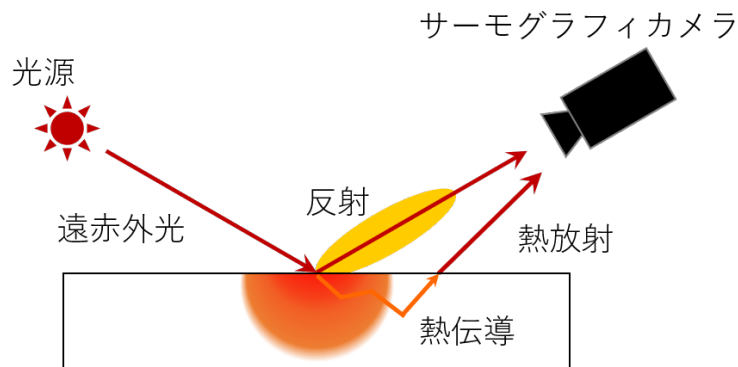


図 3.1: 遠赤外光の伝播．遠赤外光の一部は表面で反射するが，残りは熱エネルギーに変換され，物体内部を移動し，温度に応じた遠赤外光を放射する．サーモグラフィカメラはすべての成分の合成を撮影する．

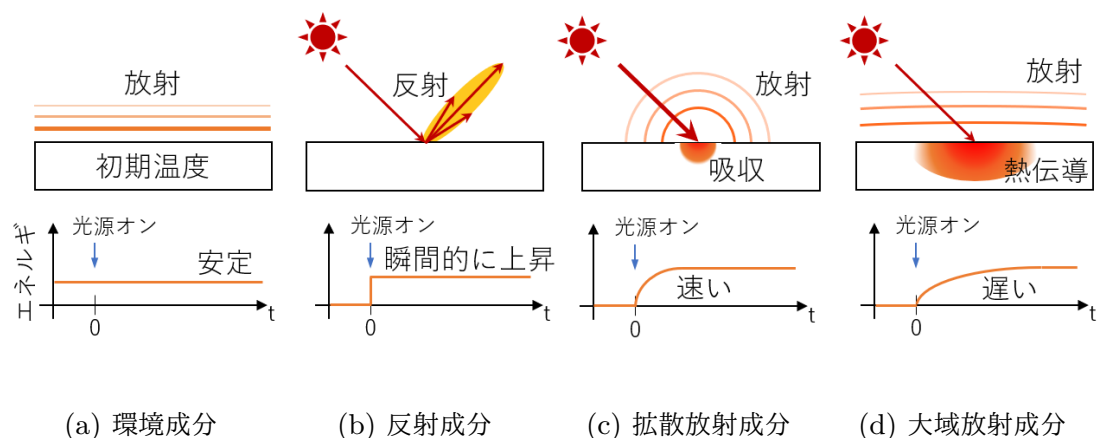


図 3.2: 遠赤外光と熱の伝播成分. (a) 環境成分は物体の初期温度による放射エネルギー, (b) 鏡面反射成分は電磁波としての反射, (c) 拡散放射成分 と (d) 大域放射成分は熱の移動による. 熱の移動速度は光の速度よりも遥かに遅く, すべての成分が特有の経時特性を持つため分解可能となる

ここで, λ は波長, α は吸収率, ϵ は放射率を表す. 物体内部で熱エネルギーが伝播しない場合, 物体が放射するエネルギーは物体が受ける照度に依存する.

図 3.1 のように定常状態の遠赤外平行光源でシーンを照らし, サーマ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, 熱画像も同様に鏡面反射や熱放射などの複数の遠赤外光伝播現象の合成である. 遠赤外光の伝播成分は, 実際には複雑なモデルであるが, 単純化した熱伝導モデルを使い, 図 3.2 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

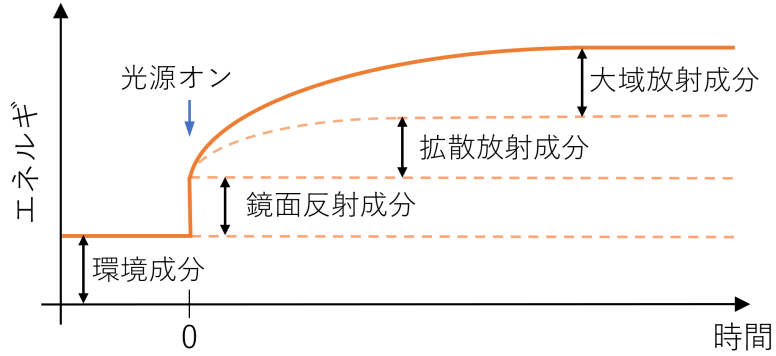


図 3.3: 遠赤外光の伝播における経時特性. 遠赤外光の伝播成分は経時特性が異なるため, その特性に基づき分解することが出来る.

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 3.3 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.

$$I(t, c) = A(t, c) + S(t, c) + D(t, c) + G(t, c) \quad (3.1.3)$$

A, S, D, G は, それぞれ, 環境成分, 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.

3.2 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．

$$A(t) = \tau \quad (3.2.1)$$

ここで， τ は物体の初期熱エネルギーである．

3.3 反射成分

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，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．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．

$$S(t) = \begin{cases} L_0 r_S & (t > 0) \\ 0 & (t \leq 0) \end{cases} \quad (3.3.1)$$

ここで， r_S は反射率， 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，反射成分についても過渡状態は計測できず，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，波長が長いため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，それらは反射と同じく過渡状態を計測できないため，反射成分の一部とみなすことができる．

3.4 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．拡散放射成分は，ほぼ安定しているが，エネルギーを吸収し，温度が上がり，遠赤外光を放射する過程で小さな過渡状態がある．拡散放射成分の過渡特性は，拡散反射

の時間的広がり（約数十ピコ秒）[30]と比較すると、はるかに遅く、ビデオフレームで計測することができる．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反射の時間的広がり（約数十ピコ秒）[30]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、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言われており [14, 8, 28]、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．物体内部での熱伝播がほとんど起こらない拡散放射成分は照度に依存する値をとり、熱が物体内部を伝播する大域放射成分は照度との相関が弱くなる．つまり、拡散放射成分は光源方向と法線方向に依存し、大域放射成分はほぼ依存しないエネルギーとなる．

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、指数関数を用いてこれらの過渡状態をモデル化する．

$$\begin{cases} D(t) &= (1 - e^{-\sigma_d t}) R_\infty d_\infty \\ G(t) &= (1 - e^{-\sigma_g t}) R_\infty g_\infty \end{cases} \quad (3.4.1)$$

ここで、 σ_d および σ_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_∞ と g_∞ 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．

第 4 章 遠赤外照度差ステレオ法

遠赤外光伝播の経時特性を利用した形状推定を行うため，3.4 章で定義した拡散放射成分の角度依存性を利用する．提案手法は以下のステップからなる．

1. 拡散放射成分の分解
2. 拡散放射成分の余弦則に基づく法線推定

ステップ 1 では，熱画像中で混在している遠赤外光伝播成分から，成分ごとの経時特性をもとに分解する．ここでは，光源方向との角度に依存した値をとる拡散放射成分を抽出する．ステップ 2 ではステップ 1 で求めた拡散放射成分へ照度差ステレオ法を適用し，表面法線を推定する．以下で各ステップの詳細について述べる．

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．分解手法として，光源をオンにした後の加熱過程の経時特性を利用する手法と，オフにした後の冷却過程の経時特性を利用する手法を提案する．

4.1.1 加熱過程の経時特性に基づく分解

まず，光源をオンにした後の各成分の経時特性を利用する手法を挙げる．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．

$$\begin{aligned} R(t) &= I(t) - A - S \\ &= I(t) - I(\delta) \end{aligned} \tag{4.1.1}$$

ここで δ は $t = 0$ からの微小時間である．放射成分 $R(t)$ を式 (3.4.1) で定義したモデルに当てはめる．

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_d, \hat{d}_\infty, \hat{\sigma}_g, \hat{g}_\infty &= \operatorname{argmin}_{\sigma_d, d_\infty, \sigma_g, g_\infty} \|R(t) - D(t) - G(t)\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad &\min_t \frac{-\log(R_\infty - R(t))}{t} \leq \sigma_g \ll \sigma_d \\ &0 \leq d_\infty \leq 1 \\ &0 \leq g_\infty \leq 1 \\ &d_\infty + g_\infty = 1 \end{aligned} \tag{4.1.2}$$

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， σ_g は σ_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．ここではレーベンバーグ・マーカート法により最適解を見つける．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．

4.1.2 冷却過程の経時特性に基づく分解

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．ここでは，光源をオンにした直後に光源をオフにする場合と，十分時間が経った後に光源をオフにする場合の手法について述べる．

短時間加熱後の冷却

短時間で光源のオン/オフを切り替える場合を図 4.1(a) に示す．この手法では，光源オンの時間が非常に短いため，物体内部の熱移動の影響を無視できる．環境成分 A は冷却後の定常状態時の値，反射成分は $t = 0$ で光源をオフにした直後瞬間的に消える値であるため，拡散放射成分 $D(t)$ は光源をオフにした後の計測値から環境成分を差し引くことで得ることができる．

$$D(t) = I(t) - A \quad (4.1.3)$$

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．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う．この手法では，適切な照射時間を決定する必要がある。

長時間加熱後の冷却

対象物体の温度が定常状態となった後の冷却過程の経時特性を図 4.1(b) に示す．加熱と冷却は逆の現象であるため，加熱過程の経時特性を利用した手法と同様の方法で光伝播を分解することができる．環境成分 A は冷却過程が終わり定常状態となった時の値であり，反射成分は反射成分 $S(t)$ は $t = 0$ で光源をオフにした直後瞬間的に消える値，拡散放射成分 $D(t)$ と大域放射成分 $G(t)$ は以下の式で表される．

$$\begin{cases} D(t) &= e^{-\sigma_d t} R_\infty d_\infty \\ G(t) &= e^{-\sigma_g t} R_\infty g_\infty \end{cases} \quad (4.1.4)$$

しかし，加熱時間に加え，冷却時間が必要となるため，本研究では加熱過程の経時特性を利用して成分分解を行う．

4.2 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 [11] に従うので，定常状態の拡散放射成分を次式で表すことができる．

$$D(\infty) = \rho \mathbf{i}^\top \mathbf{n} \quad (4.2.1)$$

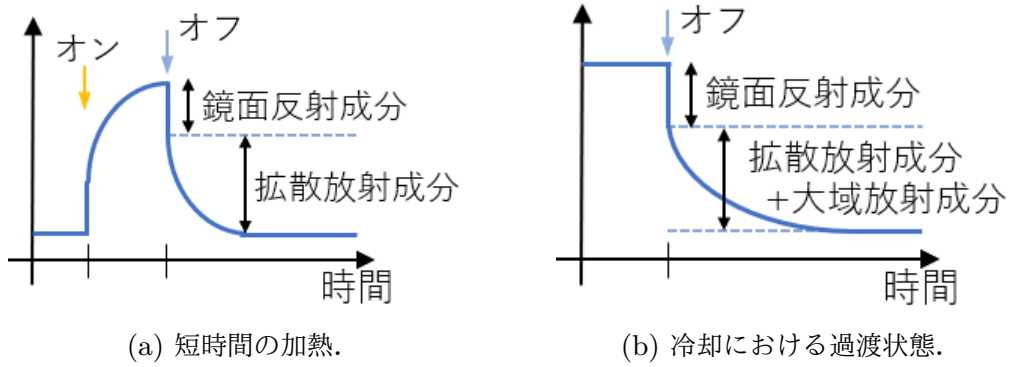


図 4.1: 冷却過程の経時特性. (a) 極めて短い時間に光源のオン/オフを切り替えると、鏡面反射成分と拡散放射成分を直接計測できる. (b) 光源をオフにした後の過渡状態においても提案手法と同様の情報を得ることが出来る.

ここで、 ρ 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. 本稿では、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 (4.2.1) 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、

$$\mathbf{D} = \rho \mathbf{I} \mathbf{n} \quad (4.2.2)$$

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.

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{I}^\dagger \mathbf{D}}{\|\mathbf{I}^\dagger \mathbf{D}\|} \quad (4.2.3)$$

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

第 5 章 実験

本章では，黒色物体に対して提案手法を適用し，実際に法線を求めることで成分分解の有効性を検証する．また，複数の材質に対しても法線推定を行うことで，提案手法の材質による頑健性を検証する．

5.1 実験環境

実験で使用したセットアップを図 5.1 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．計測値は温度であるが，実験では式 (3.1.1) に基づき，エネルギーとして扱う．また，使用する光源は図 5.2 に示すような経時特性を持つため，あらかじめ光源を実験室の外で 10 分間温めた後，カメラと計測物体から物理的に遮断した状態で実験室に設置する．実験では，物理的な遮断を取り除いた瞬間を $t = 0$ として撮影する．撮影後は十分に時間をおいて計測物体を冷却し，同様の手順で光源位置を変えなが三回撮影する．また，撮影は広い実験室の中で行い，カメラや光源は計測物体から十分に離しているため，光源から照射された遠赤外光以外の影響による計測物体の温度変化はないものとする．

5.2 評価実験

提案手法を適用して物体の法線マップを求める．また，成分分解による法線マップの推定精度の影響を比較することで，提案手法の有効性を検証する．実験では，図 5.3(a) に示す黒色に塗られ，中央に穴の開いた木球を対象として撮影を行う．撮影した熱動画の 1 フレームを図 5.3(b) に示す．また，図 5.3(c) に図 5.3(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变化を示す．



図 5.1: 実験環境.

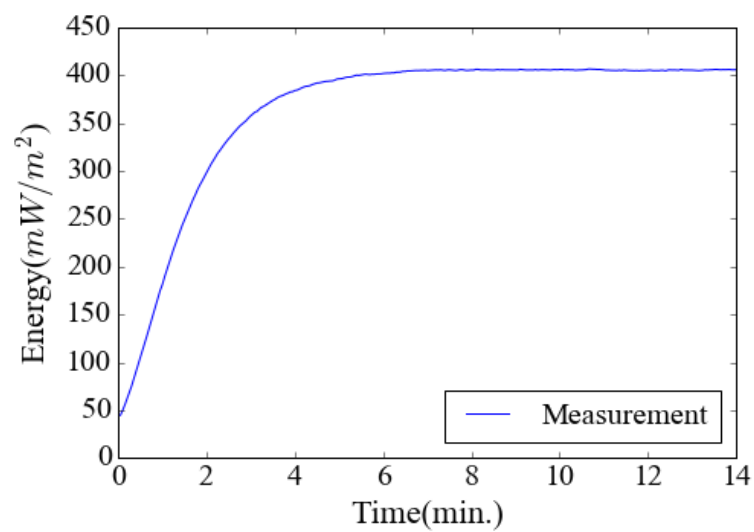


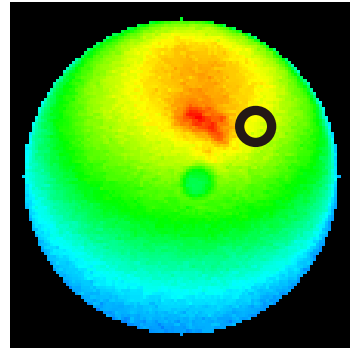
図 5.2: 光源の経時特性. 安定するまでに 10 分ほどの時間を要する.

5.2.1 経時特性に基づく成分分解

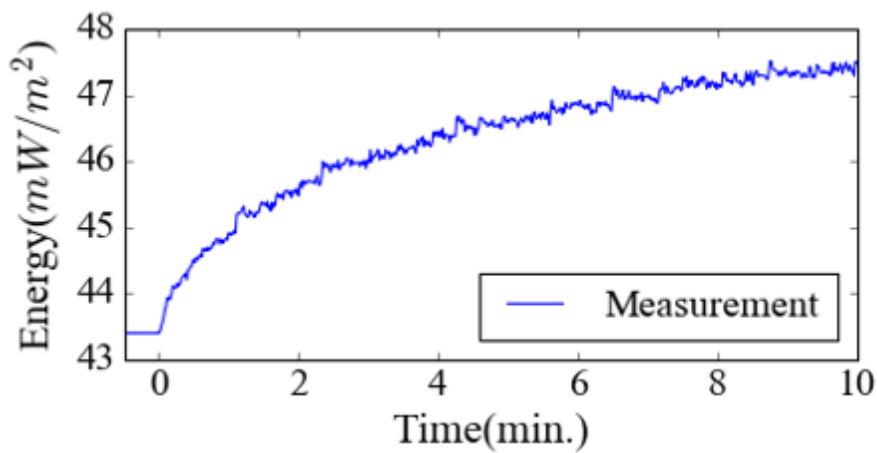
環境成分は光源をオンにする前の熱エネルギー, 反射成分は光源をオンにした直後に計測される熱エネルギー変化であり, 式 (4.1.1) によって除去できる. また, 放



(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.

図 5.3: 黒色球の計測. (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ァイルの例であり, (b) の黒丸中の熱エネルギー変化を表す.

射成分は環境成分・反射成分の除去によって得られる. 分解した各成分の画像を図 5.4(a)–(c) に示し, 放射成分の経時変化を図 5.5(a) 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 1.6×10^{-4} となった. 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 (4.1.2) による分解を行う. 図 5.5(b) 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 0.75×10^{-4} となり, 単一の指数曲線フィッティングと比較し,

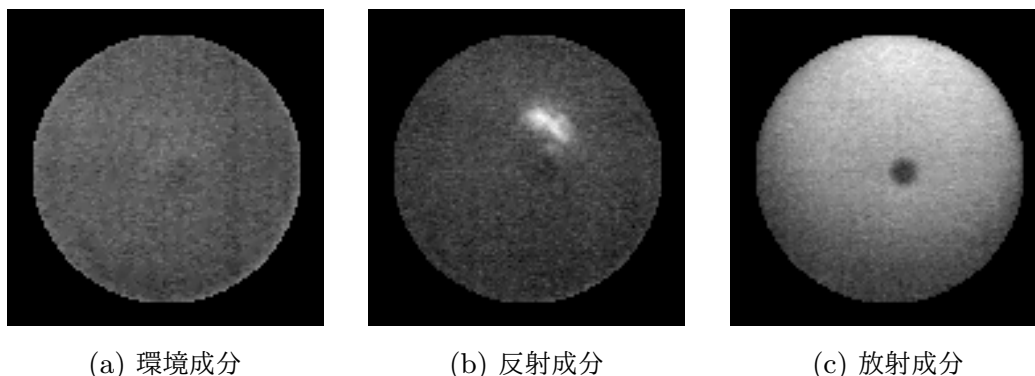


図 5.4: 計測値の分解. それぞれの経時特性から (a) 環境成分, (b) 反射成分, (c) 放射成分に分解した結果を表す.

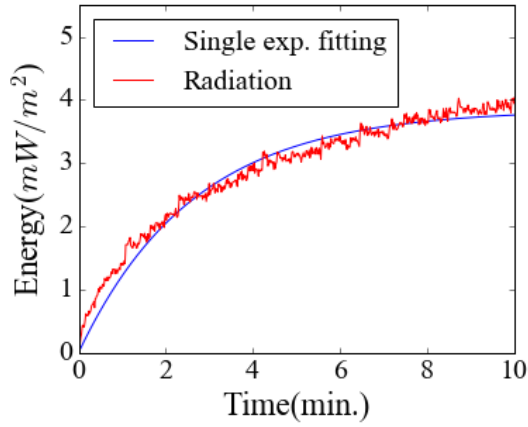
誤差が小さくなった. ゆえに, 拡散放射成分と大域放射成分の合成は放射成分をよく近似できているが分かる. これらの手順をすべての画素に適用し, 分解された結果を画像として図 5.6(a)–(b) に示す. 分解結果から, 反射成分は表面上での光の反射, 拡散放射成分は陰影, 大域放射成分は物体全体の熱エネルギー変化を表していることが分かる.

5.2.2 法線推定

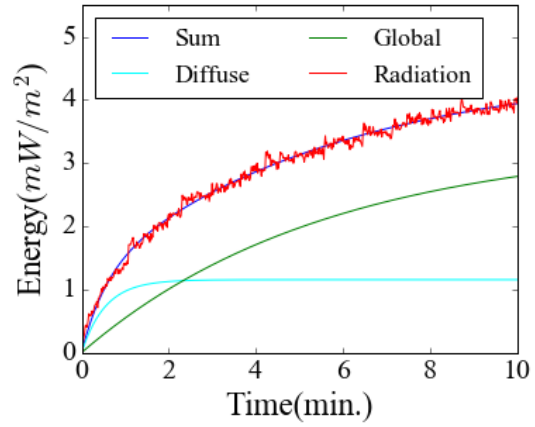
三つの光源位置において撮影を行い, 成分分解した拡散放射画像を用いてランバート照度差ステレオ法を適用する. 図 5.7 は, 図 5.6 と同じ黒色球を対象物体として, 遠赤外照度差ステレオ法を適用した結果を示す. 図 5.7(a)–(c) は異なる光源位置で撮影された拡散放射画像であり, (d) は推定された法線マップ, (e) は法線マップの真値を表す. 結果から, 真値法線マップに類似した推定が得られており, 遠赤外照度差ステレオ法の有効性が確認できた.

5.2.3 成分分解の有効性

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・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

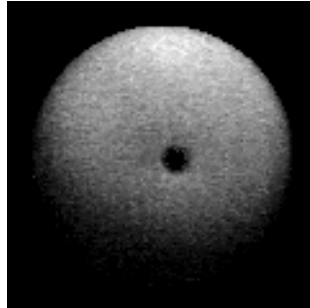


(a) 放射成分プロフィール.

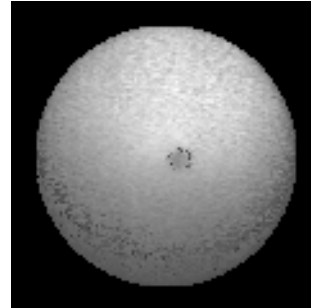


(b) 放射成分の分解結果.

図 5.5: フィッティング結果. (d) 観測値から環境成分と反射成分を引いた値. 二乗平均平方根誤差は 1.6×10^{-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 0.75×10^{-4} .



(a) 拡散放射成分.



(b) 大域放射成分.

図 5.6: 放射成分の分解結果.

は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 5.8 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

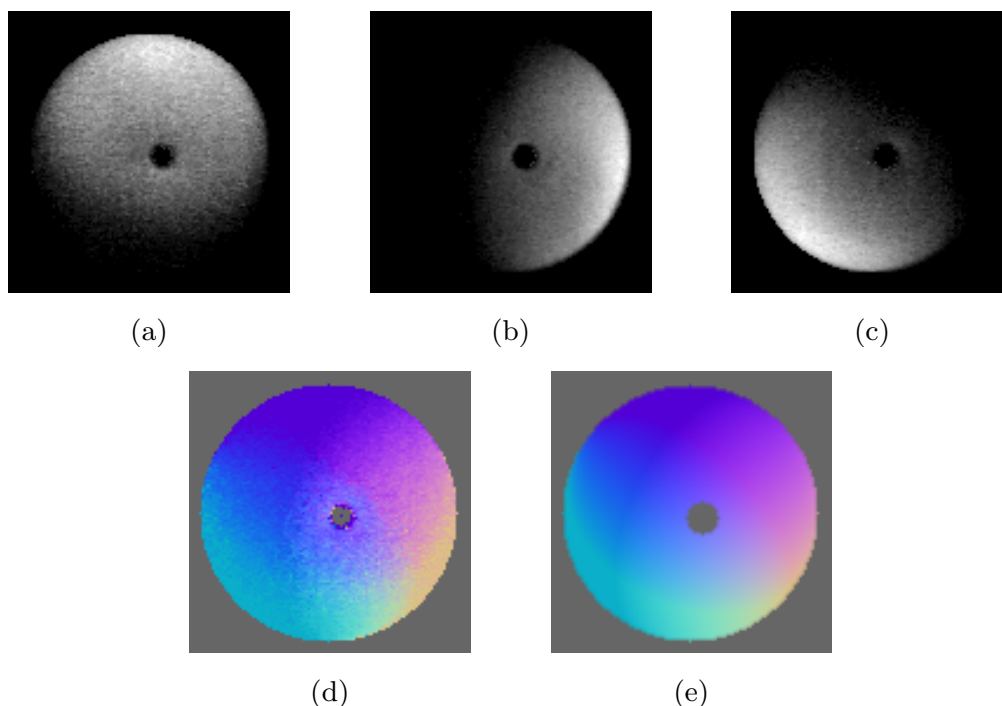


図 5.7: 遠赤外照度差ステレオ法の結果. 穴の部分はマスク処理されている. (a–c) 異なる光源位置で撮影された拡散放射画像. (d) 推定された法線マップ. (e) 法線マップの真値.

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・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．

5.3 様々な材質に対する法線推定

黒色物体だけでなく，その他の材質に対しても提案手法が有効性であることを確認する．図 5.9 のよう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対しても遠赤外照度差ステレオ法を適用する．分解された拡散放射成分と推定された表面法線を図 5.10 に示す．それぞれの角度誤差は，木

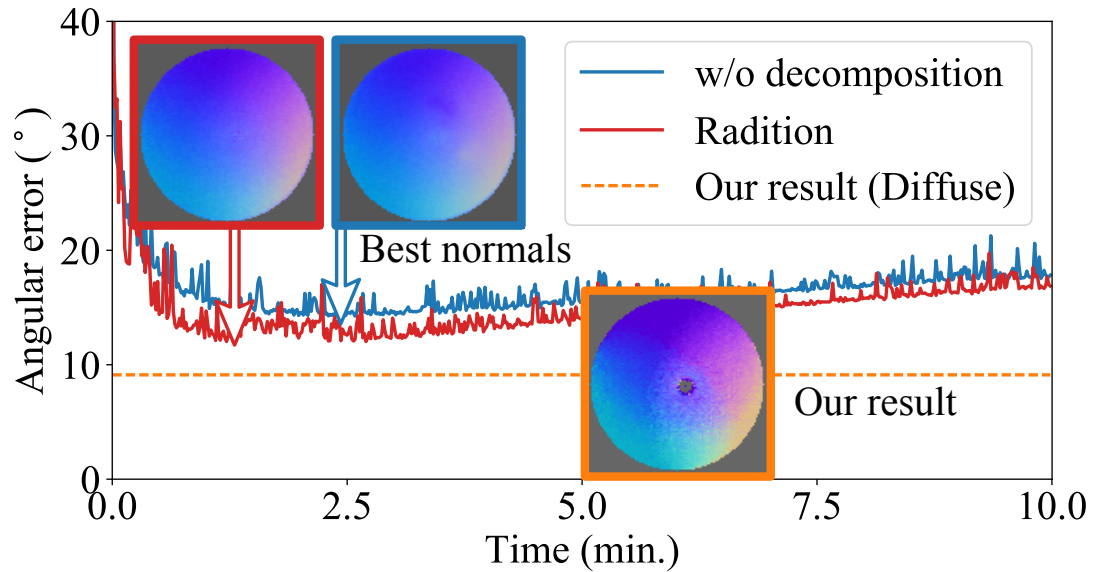


図 5.8: 分解の有効性. 環境成分のみを除去した場合と放射成分のみの場合, 提案手法における照度差ステレオ法の結果の比較. 環境成分のみを除去した場合と放射成分のみの場合における法線の最良角度誤差はそれぞれ, 14.17 度と 11.83 度であった. また, 提案手法は点線で示され, その角度誤差は 9.16 度であった. これらの結果は提案手法の有効性を示している.

21.90 度, ガラス 12.05 度, プラスチック 10.67 度, 大理石 42.84 度であった. 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. しかし, 大理石における光源位置 2,3 の実験では, 光源が安定していない状態で撮影したため, 十分に拡散放射成分を分解することが出来なかった. これにより他の物体と比較して角度誤差が大きくなったが, 十分に安定させて撮影した光源位置 1 では分解できているため, 安定した環境下においては提案手法を適用できる物体であると言える. 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 5.11 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 5.11(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．



(a) 木



(b) ガラス



(c) プラスチック



(d) 大理石



(e) プラスチック

図 5.9: 計測対象．可視光領域では適用困難な透明物体と半透明物体を含む．

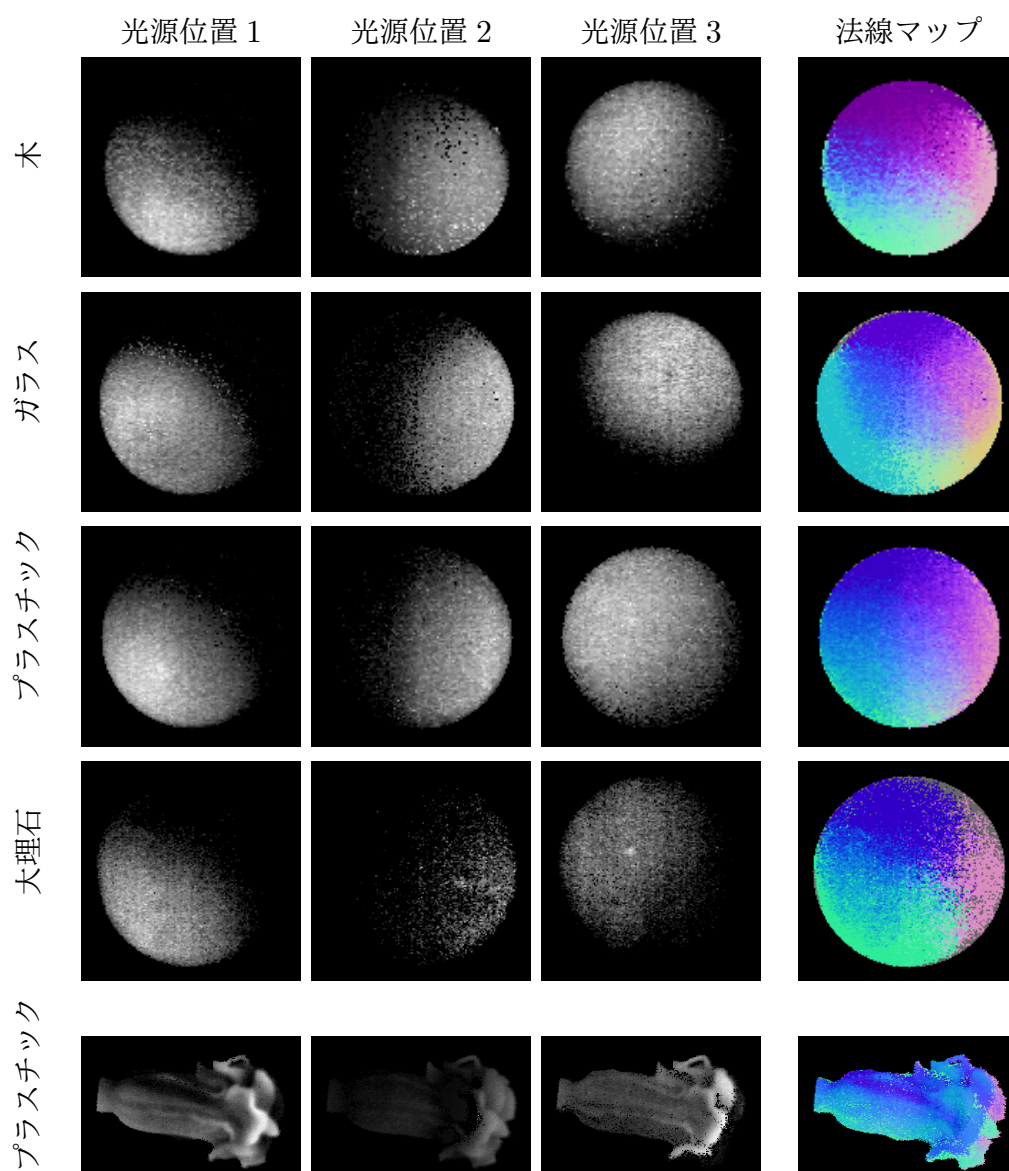


図 5.10: 様々な材質に対する実験結果. 提案手法がどの材質に対しても有効であることを示している.

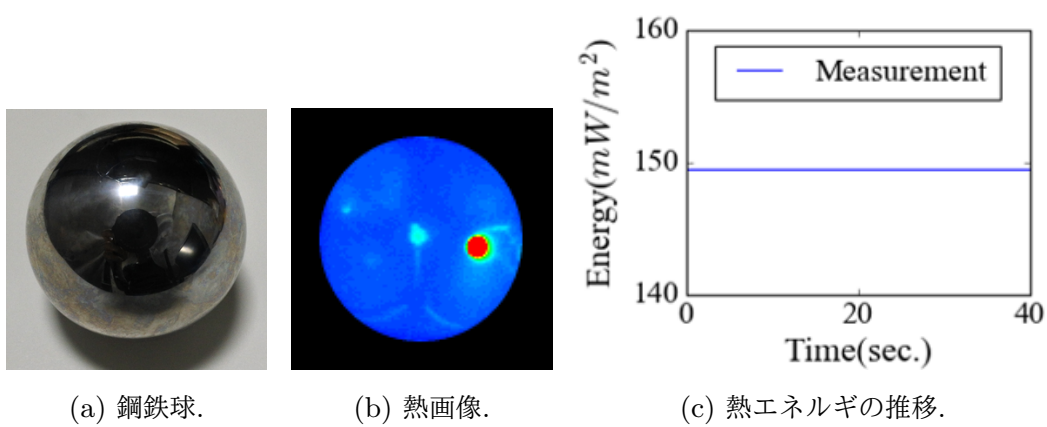


図 5.11: 失敗例. 金属のように放射率が小さい物体は, 入射光を全て反射してしまう. (c) 熱エネルギープロファイルは鏡面反射部分の時間応答を示しているが, 過渡状態状態が無いことが分かる. この場合, 環境成分と反射成分しか得られず, 提案手法を適用させることは出来ない.

第 6 章 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．本手法は遠赤外光の照度が表面法線の角度に依存し，ランバートの余弦則に従うことと，熱伝導が光伝播と比較して遙かに遅いことを利用している．遠赤外光伝播成分を新たに定義し，各成分の経時特性から表面法線の角度に依存する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．実際に黒色，半透明，透明物体に対して適用し，提案手法の有効性を確認した．結果として，可視光領域では法線を推定することが困難な材質に対しても適用可能であることを示した．

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，拡散放射成分と大域放射成分を分解する際，連続性を考慮したフィッティング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

本研究を進めるにあたり，多忙にも関わらず，温かいご指導およびご助言を賜りまし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．本研究の遂行にあたり，中間発表や修士論文発表会の中では貴重なご意見を賜りました環境知能学研究室 萩田紀博教授に厚く御礼申し上げます．本研究の遂行及び論文の執筆や学会発表に際しまして，熱心なご指導をいただきました光メディアインタフェース研究室 船富卓哉准教授に心から感謝致します．本研究における貴重なご助言や，論文執筆に際しまして，細やかなご意見を頂きまし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．本研究の遂行及び本論文の執筆にあたり，新鮮な視点からのご指摘をいただきました光メディアインタフェース研究室 久保尋之助教 に心から感謝いたします．本研究の遂行及び論文の執筆，学会発表に際しまして，大変多くのご助言をいただきました光メディアインタフェース研究室 高谷剛志氏 に心より感謝致します．最後に，研究に関する議論だけでなく日常生活でもお世話になりました光メディアインタフェース研究室のスタッフ，学生の皆様方に感謝申し上げます．

発表リスト

[1] 池谷信寛，田中賢一郎，高谷剛志，久保尋之，船富卓哉，向川康博，『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』，情報研報 CVIM 210-1, 2018.

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 Archaeological Inscriptions, *Proc. SIGGRAPH Sketches* (2004).
- [4] Eren, G., Aubreton, 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] Higo, T., Matsushita, Y. and Ikeuchi, K.: Consensus photometric stereo, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1157–1164

- (2010).
- [11] Howell, J. R., Mengüç, M. P. and Siegel, R.: *Thermal Radiation Heat Transfer, Sixth Edition*, CRC Press (2015).
 - [12] Ikeuchi, K.: Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method, *TPAMI*, No. 6, pp. 661–669 (1981).
 - [13] 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).
 - [14] 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).
 - [15] K., S., Ikeuchi, N. and Kanade, T.: Shape from interreflections, *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol. 6, pp. 173–195 (1991).
 - [16] 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).
 - [17] 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).
 - [18] Kitano, K., Okamoto, T., Tanaka, K., Aoto, T., Kubo, H., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: Recovering temporal PSF using ToF camera with delayed light emission, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 9:15 (2017).
 - [19] 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).
 - [20] Miyazaki, D., Saito, M., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible

- and infrared wavelengths, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 19, No. 4, pp. 687–694 (2002).
- [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] Saponaro, P., Sorensen, S., Kolagunda, A. and Kambhamettu, C.: Material Classification with Thermal Imagery, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4649–4656 (2015).
 - [26] Shafer, S. A.: Using Color to Separate Reflection Components, *Color Research & Application*, Vol. 10, No. 4, pp. 210–218 (1985).
 - [27] Silver, W. M.: Determining shape and reflectance using multiple images (1980).
 - [28] 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).
 - [29] 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).

- [30] 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).
- [31] 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).
- [32] Woodham, R. J.: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 139–144 (1980).
- [33] 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).