

修士論文

熱特性に基づく伝播解析を用いた 非視線方向イメージング

加賀 正樹

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 向川 康博 教授

光メディアインタフェース研究室（情報科学領域）

令和2年3月13日提出

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

加賀 正樹

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員, 情報科学領域)
清川 清 教授	(副指導教員, 情報科学領域)
船富 卓哉 准教授	(副指導教員, 情報科学領域)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員, 情報科学領域)
久保 尋之 助教	(副指導教員, 情報科学領域)

熱特性に基づく伝播解析を用いた 非視線方向イメージング*

加賀 正樹

内容梗概

非視線方向イメージング (Non-Line-of-Sight Imaging, NLOS Imaging) は, 非視線方向のシーンが視線方向のシーンに及ぼしている影響を観測・処理し, 直接観測できない非視線方向のシーンを推定する手法である. 従来では可視光や近赤外光を用いる手法が提案されてきたが, 本研究では熱を用いた非視線方向イメージングの手法を提案する. 光が物体内部まで伝播する材質は限られているが, 熱はほとんどの物体でその内部を伝播する. また物体内部の熱は遠赤外光を放射するため, 遠赤外領域ではあらゆる物体を光源と見做すことができる. この特性を応用することで, 熱伝播を利用した物体内部のイメージングを実現できる. また従来手法とは異なり光源を用意せずに隠れ物体の位置を推定する非視線方向イメージングを実現できる. 提案する手法について実験を行い, 本手法の有効性を確認した.

キーワード

非視線方向イメージング, 熱画像処理, 遠赤外光, 熱伝導, 温度推定

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和2年3月13日.

Thermal Non-Line-of-Sight Imaging from heat characteristics using a thermal camera system ^{*}

Masaki Kaga

Abstract

Non-Line-of-Sight (NLOS) imaging is a technique to visualize a non-line-of-sight scene through the observations of an In-Line-of-Sight scene. Previous methods tackle this task mainly using active lighting of visible light or near-infrared light. In this study, I propose some methods of Non-Line-of-Sight imaging utilizing the heat characteristics. The heat generally propagates inside of a object whereas the objects are limited of which the light propagates inside. Furthermore, the heat inside the object emits far-infrared light, thus, any object can be regarded as a light source in the far-infrared domain. According to the heat characteristics, an NLOS imaging is proposed for the scene under an occluder using thermal conduction. In addition, another method of NLOS imaging is proposed to estimate the position of a hidden object without a light source. The effectiveness of the proposed methods was evaluated by conducting real-world experiments.

Keywords:

Non-Line-of-Sight Imaging, Thermal Imaging, Far-infrared, Heat conduction, Temperature Estimation

^{*}Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 13, 2020.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	4
2.1 光の伝播を応用した非視線方向イメージング	4
2.1.1 Active NLOS Imaging	4
2.1.2 Passive NLOS Imaging	4
2.2 熱の伝播を応用した手法	5
2.3 本研究の位置付け	5
3. 熱と遠赤外光の伝播	6
3.1 物体内部での熱伝播	6
3.1.1 熱放射	6
3.1.2 熱伝導	7
3.2 物体外部での遠赤外伝播	8
4. 非視線方向イメージングへの応用	9
4.1 物体内部での熱伝播を応用した非視線方向イメージングの検討	9
4.1.1 遮光紙に覆われた物体の形状計測	9
4.1.2 部分的に隠れた金属棒のクラスタリング	14
4.2 遠赤外光の反射成分分離による非視線方向イメージング	18
4.2.1 モチベーション	18
4.2.2 提案手法	19
4.2.3 実験	23
5. おわりに	29
5.1 遮光紙に覆われた物体の形状計測	29
5.2 部分的に隠れた金属棒のクラスタリング	29
5.3 遠赤外光の反射成分分離による非視線方向イメージング	30
謝辞	31

発表リスト	32
参考文献	33

図 目 次

1	非視線方向イメージング	2
2	熱カメラが出力する熱画像例	7
3	アクティブ計測での光の吸収と放射	10
4	板に覆われた物体の非視線方向イメージング	11
5	遮光紙を透かす実験環境	11
6	遮光紙に隠れている対象物体	12
7	遮光紙を透かす実験の熱画像と復元結果	13
8	部分的に隠れた対象物体	14
9	隠れ物体の露出部分抽出	16
10	連結情報を考慮したクラスタリング結果	17
11	セットアップおよびコンセプトの幾何関係	19
12	拡散反射成分と鏡面反射成分の分離結果	21
13	実験環境	23
14	熱カメラによって視線方向の壁 (LOS wall) を観測した熱画像 . . .	23
15	熱カメラのキャリブレーションボード	24
16	隠れ物体の動きを推定するための実験環境	25
17	位置推定の実験結果	26
18	位置および温度推定の実験結果	27
19	物体の動きを推定した結果	28

表 目 次

1	温度推定の実験結果	27
---	---------------------	----

1. はじめに

コンピュータビジョン分野においては，ロボットの作業支援や人物の行動計測などのために現実世界の情報を得る様々な手法が提案されてきた．カメラなどのセンサを用いて観測を行い，観測した値をもとに解析を行うことで，観測した現実世界の形状や位置といった情報を求めてきた．センサで観測を行う都合上，視線方向に対象物体がなければならず，遮蔽物によって観測者から隠されている物体に対しては従来の手法をそのまま用いることができない．近年では，このような直接観測できない非視線方向にある物体の情報を求めるために，非視線方向イメージング (Non-Line-of-Sight Imaging, NLOS Imaging) と呼ばれる手法が研究されている [1, 2, 3]．非視線方向イメージングでは，隠された対象物体が観測者から見て視線方向に及ぼす影響を観測し，その観測値を解析して対象物体の情報を求める．非視線方向イメージングによって，通常観測できない壁の向こうにいる人物や車の位置などを推定することや，災害現場などの立ち入れない場所の情報を計測することが期待されている．また，対象物体が壁の中に埋め込まれていたり他の物体が重なっていたりするような，物体の一部または全体が遮蔽物によって覆われているシーンにおいて，隠れた物体の形状情報を推定することも期待されている．

従来の非視線方向イメージングの研究では，隠れ物体が視線方向に及ぼす影響を観測するために高時間分解能な光センサや制御された光源を用いるアクティブな手法がよく提案されてきた [4, 5]．図 1(a) に示すように，光源から照射された光は視線方向のシーンに届いた後，非視線方向に伝播する．この光は非視線方向にある隠れ物体で反射し，再び視線方向に届く．この光をセンサで観測することで，隠れ物体が影響を及ぼした情報を得ることができる．例えば観測した光の観測位置や入射角度などの情報から光の空間的な伝播を解析できる．また，高時間分解能な光センサを用いることで光の時間的な伝播を解析できる．光源が発光してからセンサが受光するまでの飛行時間から，光が空間中を伝播した光路長を求めることができ，空間的な情報と組み合わせて非視線方向での反射位置や反射角度を求めることができる．

図 1(b) に示すように，観測者側に光源を用意せずに，非視線方向にある光源の

情報を求めるパッシブな非視線方向イメージングの手法も提案されている [6, 7]. これらの手法は光源を用意するアクティブな手法と比べて, 光路が非視線方向から視線方向への片道とシンプルなため, 特殊なセンサを用いずに問題を解けるなどの特徴がある.

従来のアクティブな非視線方向イメージングの手法は高時間分解能なセンサを用いる必要があったり, また光が伝播しやすい状況でなければ用いることができなかった. 例えば対象物体が遮光紙などで覆われている場合は光が吸収されるため, 解析するための光を観測することができない. またパッシブな非視線方向イメージングの手法は非視線方向に光源がある必要があるため, 利用できる状況が限られている.

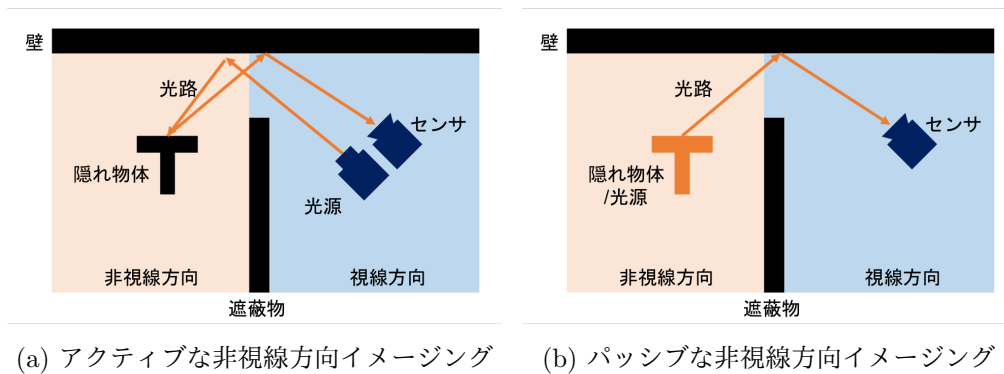


図 1 非視線方向イメージングの例. 遮蔽物によってセンサから直接観測できない位置に隠れ物体が置かれている. (a) アクティブな非視線方向イメージング. 光源を用意し, 光を照射する. 照射された光は視線方向から非視線方向に伝播し, 隠れ物体で反射して視線方向に届いてセンサで観測される. (b) パッシブな非視線方向イメージングの例. 非視線方向にある光源から照射された光が視線方向に届き, センサで観測される. 隠れ物体自身が光源である場合や, 非視線方向に光源がある場合にのみ利用できる.

そこで本研究では, 遠赤外光と熱の特性を利用することによって, 観測者側に特殊な光源やセンサを用意しない状況や, 光が伝播しにくい状況に有効な非視線方向イメージングを提案する. 物体が持つ熱は熱放射によって遠赤外光として物体外部へと放射される. 空間を伝播した遠赤外光は物体表面で反射するか, 物体

内部に熱として吸収される。物体が吸収した熱は物体内部で熱伝導によって伝播する。観測者側に光源を用意しない場合であっても、非視線方向にある隠れ物体が放射する遠赤外光が視線方向に伝播する。その影響を熱カメラによって観測し解析することで、非視線方向の情報を推定することができる。また、対象物体が光を吸収しやすい板などによって覆われている場合であっても、光が吸収されて熱に変換されるため、これを観測することができる。このように、熱と遠赤外光の特性を利用し、熱カメラによって観測された値を解析することで、従来の手法では有効でなかったシーンに有効な非視線方向イメージングを実現できる。本論文では3つの手法を提案する。1つ目の手法は熱吸収による温度上昇の差を利用した隠れ物体形状の復元で、これはパイプや工業製品といった薄い板で構成された物体の内側に貼りついた異物を検知するといった応用が可能である。2つ目の手法は熱伝導を利用した隠れ物体のクラスタリングで、これは非接触非破壊に物品の内部構造を推定するといった応用が考えられる。類似の手法として通電検査を行う手法があるが、本手法は熱カメラを用いているため2次元平面での処理が可能である。3つ目の手法は遠赤外光の反射を利用した物体位置温度推定で、これはロボットビジョンや自動運転、医療画像、リモートセンシングなどの様々な応用が考えられる。

2. 関連研究

2.1 光の伝播を応用した非視線方向イメージング

2.1.1 Active NLOS Imaging

ほとんどの非視線方向イメージングは、制御可能な光源を用いた時間分解イメージングによる手法となっている。初期の研究では、フェムト秒レーザーを用いてシーンに光を照射し、ピコ秒解像度のストリークカメラを用いて時間分解画像を計算した [5, 4]。ホモダイン Time-of-Flight (TOF) センサーは時間分解画像を計算するためにも利用可能であり [8]、非視線方向イメージングに利用された [9, 10]。Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) を用いたコンピュータビジョンの研究が進んでからは、非視線方向イメージングに SPAD を用いた手法も提案されるようになった [11, 2, 1, 3]。光の伝播から非視線方向イメージングを行う手法に応用して、音の伝播を用いる手法も提案された [12]。

2.1.2 Passive NLOS Imaging

近年、制御された光源を用いないパッシブな非視線方向イメージングが提案されている。Torralba と Freeman [6] は、偶発的にできたピンホールカメラが非視線方向を撮像することを示した。Bouman ら [7] は、壁などのエッジを持つ障害物が、その先の非視線方向の情報を間接的に計測するカメラとして利用できることを示した。Saunders ら [13] 部分的に隠されたシーンと非視線方向のシーン内の不透明な物体の位置を復元するために、通常のカメラで撮影された単一の画像のみを必要とするパッシブな非視線方向イメージングの手法を提案した。Beckus ら [14] は、強度と空間コヒーレンス関数のマルチモーダルな手法を提案した。Seidel ら [15] は、壁の角の周りの床の単一の写真から、壁で遮られたシーンの投影を復元する方法を提案した。

2.2 熱の伝播を応用した手法

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 [16] は、時間経過による物体の温度上昇・下降特性が物質ごとに異なることを利用し、熱カメラで撮影した材質を分類する手法を提案した。Tanaka ら [17] は、通常照度差ステレオ法を用いることができない半透明物体に対し、遠赤外光源で対象物体を熱して放射強度を計測することで、間接的に物体の法線を求める手法を提案した。Maeda ら [18] は、非視線方向にある物体が放射する遠赤外光の鏡面反射成分から、物体の位置や形状を求める手法を提案した。

2.3 本研究の位置付け

従来研究されてきた非視線方向イメージングの手法は、制御された光源と高時間分解能のセンサを用いて視線方向と非視線方向で3回反射する光の光路を推定することで問題を解くものが多かった。本研究で提案する手法の1つでは、非視線方向にある隠れ物体から放射されて1回反射する遠赤外光の光路を推定する。これは3回反射する光路を求める手法に比べてシンプルな問題を解くことを意味する。光源を用意せずに非視線方向の情報を推定するパッシブな非視線方向イメージングの手法も提案されているが、対象物体が光源である必要があるなどの制限があった。本研究で提案する手法では、隠れ物体が熱源であればよく、現実世界にある物体は全て熱を持つため制限がない。隠れ物体が遠赤外光を放射することを用いて視線方向にある壁での反射から非視線方向イメージングを行う手法も提案されているが、本研究で提案する手法は隠れ物体の温度推定ができるなどの点で異なっている。また、本論文ではいくつかの熱と遠赤外光の伝播を用いた非視線方向イメージングの手法を提案、検討しており、様々な状況に対応できる。

3. 熱と遠赤外光の伝播

本研究では視線方向を観測し，熱と遠赤外光の伝播から非視線方向の情報を解析する．本章では，本研究で取り扱う熱と遠赤外光の伝播の特性について紹介し，それがどのように観測されるかについて示す．3.1 では本研究で提案する手法で共通して用いる熱エネルギーの伝播について紹介し，3.2 では4.2 で用いる遠赤外光の伝播について紹介する．

3.1 物体内部での熱伝播

3.1.1 熱放射

あらゆる物体は熱放射を行い，物体表面から自身の熱エネルギーに応じた遠赤外光を放射する．熱カメラは遠赤外光を観測し，熱放射の性質を利用して物体表面から放射された熱エネルギーを計算し，図 2 のような観測シーンの温度マップである熱画像を出力する．物体が黒体である場合，シュテファン・ボルツマンの法則により，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， σ はシュテファン・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．ただし，理想的な黒体でない物体が放射するエネルギーは黒体放射より小さい．物体を黒体とみなして温度を計算すると実際の温度よりも低い温度になってしまう．実際の物体が放射する光のエネルギーと，同じ温度の黒体が放射する光のエネルギーの比を放射率 ϵ で表し，温度と遠赤外光の関係が補正される．

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

物体に遠赤外光を照射すると，熱吸収によって照射された遠赤外光の一部は物体表面で吸収され，光熱変換によって物体表面の熱エネルギーが上昇する．キル

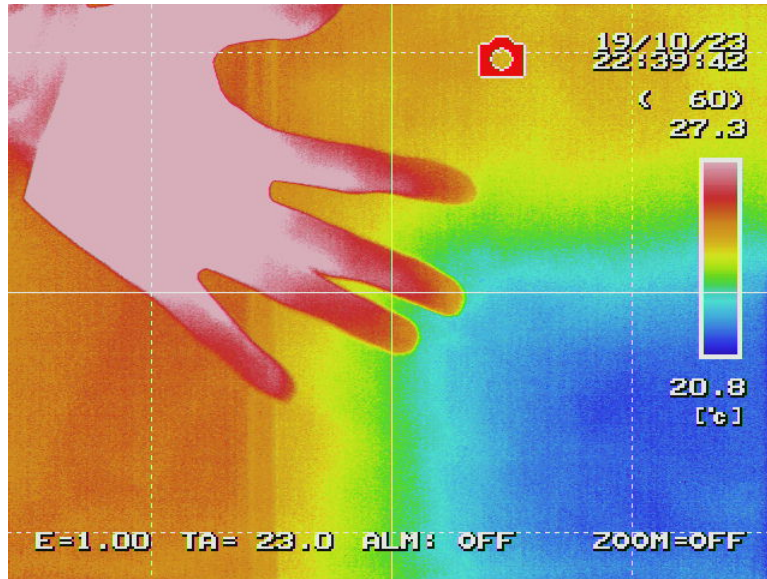


図 2 熱カメラが出力する熱画像例．一般的な RGB カメラが出力する物体の色を示す画像ではなく，物体の温度マップが出力される．物体を黒体として温度を計算するため，物体表面が黒体でない場合は正しい温度が求められないことがある．

ヒホッフの法則より，物体の放射率 ϵ と吸収率 α は等しい．

$$\epsilon = \alpha \quad (3)$$

物体表面の熱エネルギーが上昇することで，物体表面が放射する遠赤外光の強度も上昇する．熱カメラが観測する遠赤外光の放射強度が上昇するため，出力される熱画像中の物体の温度も上昇する．

3.1.2 熱伝導

物体が熱吸収を行い，物体表面の熱エネルギーが上昇することで，物体には温度の勾配ができる．物体の熱エネルギーは温度の勾配に従い温度の高い方から低い方へ伝わる．この物体内部で熱が伝わって各部分の温度が変わる現象を熱伝導という．これは熱拡散率 α と温度 T を用いて時間の次元の熱伝導方程式で表すことができる．

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

3.2 物体外部での遠赤外伝播

物体に遠赤外光を照射すると，吸収されない遠赤外光は物体表面で反射する．光の反射の種類は鏡面反射成分と拡散反射成分の2つに分類できる．鏡面反射成分は光の入射角に対して正反射になる角度で強く反射する成分で，金属面などに見られる．拡散反射成分は，光の入射角に関係無くどの方向にも反射する成分である．熱カメラで観測している物体に遠赤外光を照射すると，物体自身が放射する遠赤外光に加えて，これらの反射成分も観測される．足し合わされた遠赤外光の強度を元に物体の温度を計算するため，通常より高い温度が求まることになる．

4. 非視線方向イメージングへの応用

この章では、熱と遠赤外光の伝播を用いた非視線方向イメージングの手法を3つ紹介する。まず4.1で物体内部での熱と遠赤外光の伝播を応用した手法を2つ紹介する。4.1.1では、遠赤外光の吸収と物体内部での温度上昇の差を用いて、遮蔽物の裏に隠れた物体の形状を復元する手法を紹介する。4.1.2では、遠赤外光の吸収と物体内部での熱伝導を用いて、遮蔽物の裏で連結している物体の連結情報を求める手法を紹介する。次に4.2で、物体外部での熱と遠赤外光の伝播を応用した手法を紹介する。隠れ物体が放射する遠赤外光が視線方向にある壁で反射する様子を観測することで、隠れ物体の位置や温度を推定する。

4.1 物体内部での熱伝播を応用した非視線方向イメージングの検討

この節では、遮蔽物によって覆われた物体の形状を求めるために、外部から遠赤外光を照射して温度変化を観測する2つの手法を提案する。

4.1.1 遮光紙に覆われた物体の形状計測

非視線方向イメージングでは、非視線方向にある隠れ物体を間接的に観測する。物体が板などの遮蔽物によって隠されている場合のために、観測者側に光源を用意することで非視線方向の情報を推定する手法が提案されている [1]。光源から照射された光は遮蔽物の表面で反射するが、一部は遮蔽物を透過して非視線方向に届く。非視線方向で反射した光は再び遮蔽物を透過して視線方向で観測される。遮蔽物の表面で反射した光と非視線方向で反射した光の両方を同時に観測することになるが、これらを分離し非視線方向に届いた光を解析することで、非視線方向の情報を推定することができる。ただし、図 3(a) のように遮蔽物が遮光紙のような光を透過しにくい材質の場合、従来の手法を用いることができない。そこで、熱と遠赤外光の伝播を用いた手法を提案する。図 3(b) のように観測者側に遠赤外光源を用意し、非視線方向と視線方向を隔てる遮蔽物に光を照射する。遠赤外光が物体表面に照射されると、光は吸収されて熱エネルギーに変換される。

変換された熱エネルギーは遮蔽物の裏側まで伝播する．この時，遮蔽物の裏に物体がある場合とそうでない場合について，熱の伝播が異なるため，遮蔽物表面での温度変化に差ができる．これを解析することで，非視線方向にある物体を推定できる．

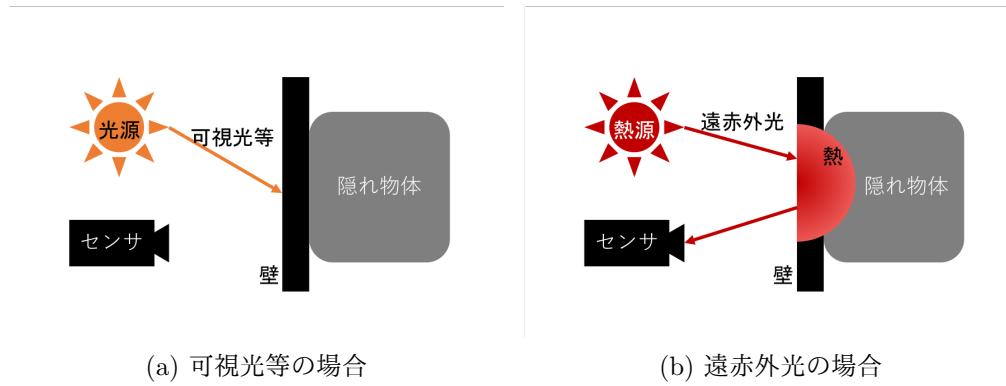


図 3 アクティブ計測での光の吸収と放射．(a) 黒色の材質などの光を吸収しやすい物体に光が届くと，光は吸収されてセンサは光を観測できない．(b) 遠赤外光が物体に吸収されると熱エネルギーに変換され，物体の温度が上昇する，それに応じて物体が放射する遠赤外光が上昇するため，センサは間接的に物体の情報を含んだ光を観測できる．

対象とするシーンは図 4 のような隠れ物体の上に板状の物体を置いて遮蔽物とし，板に向けて遠赤外光源を設置している状況とする．遠赤外光源による影響以外の環境成分や遮蔽物自体の温度の影響を無視するために，光源をオンにする前に熱カメラで撮影を行い環境成分を観測しておく．光源をオンにしてから時間経過後撮影し，熱画像中の各画素について，温度の時間変化による遮蔽物の裏の物体有無のセグメンテーションを行い，隠れ物体の形状を復元する．セグメンテーションは熱画像の各座標 (x, y) について次の式の 2 値化処理を適用することで行う．

$$f(x, y) = \begin{cases} \text{true} & \text{after}(x, y) - \text{before}(x, y) \geq \theta \\ \text{false} & \text{after}(x, y) - \text{before}(x, y) < \theta \end{cases} \quad (5)$$

ここで $\text{before}(x, y)$ は加熱前の温度で， $\text{after}(x, y)$ は加熱後の温度である．温度上昇値がしきい値 θ 以上のとき，遮蔽物の裏に物体があるとする．

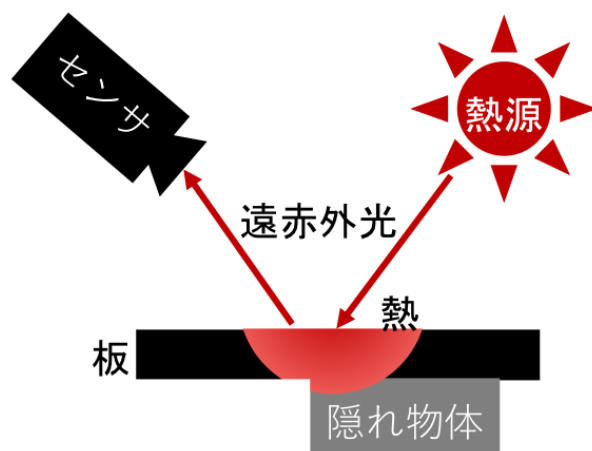


図 4 板に覆われた物体の非視線方向イメージング

遮光紙によって覆われた物体の形状を推定する実験を行った．実験環境を図 5 に示す．図 6 に示す T の形状をした木材を隠れ物体として机の上に設置する．遮光

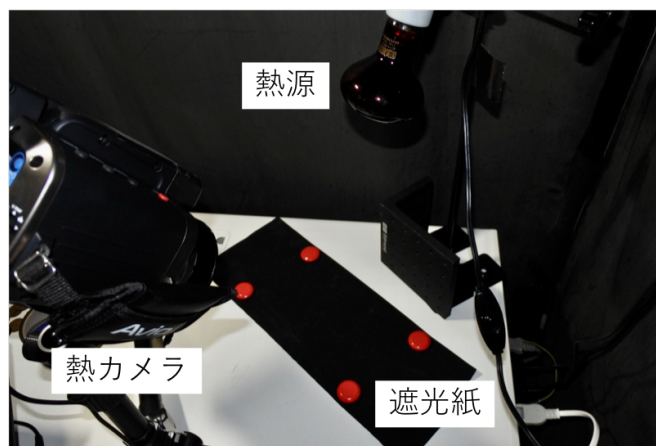


図 5 遮光紙を透かす実験環境

紙を物体の上に設置して，観測者側からの視線を遮る．遠赤外光領域を多く含む光源 (Exo Terra Heat-Glo 100W) を用いてを照明し，熱カメラ (InfRec R500) で撮影する．光源をオンにする前に遮蔽物を撮影した熱画像を図 7(a) に，光源をオンにしてから時間経過後に撮影した熱画像を図 7(b) に示す．セグメンテーショ

ンによって隠れ物体の形状を復元した結果画像を図 7(c) に示す．セグメンテーションでは，光源を照射した画像中央の領域について，温度変化がしきい値 θ 以上である画素とそうでない画素の 2 つに分割した．しきい値 θ は手動で適切な値を設定した．復元結果と加熱前の熱画像を比較すると，隠れ物体の形状が明瞭に確認でき，遮光紙の裏に隠れた物体の形状を復元できていることがわかる．

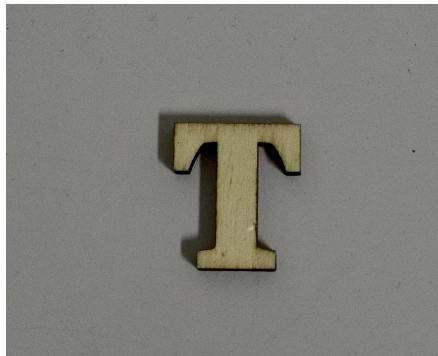


図 6 遮光紙に隠れている対象物体

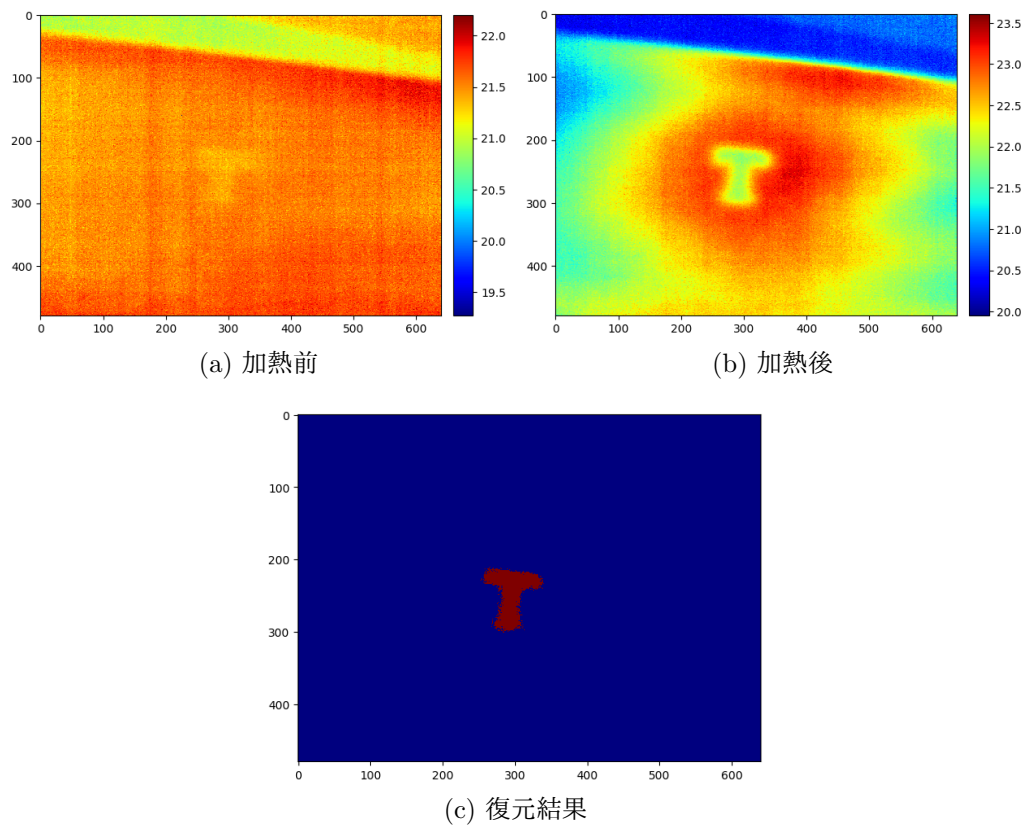


図 7 遮光紙を透かす実験の熱画像と復元結果. (a) 対象物体が遮光紙に覆われて T の形状を確認しにくい. (b) 遮光紙の裏での熱伝播によって温度分布に差が生じ, T の形状を確認できる. (c) 遮光紙を透かす復元結果. 加熱によって閾値以上の温度変化があった画素とそうでない画素について分割した. 温度上昇遮光紙に隠れている T の形状が復元できている.

4.1.2 部分的に隠れた金属棒のクラスタリング

物体の形状推定はコンピュータビジョンにおいてよく取り組まれてきている問題だが、観測できない部分を復元することは難しい．例えば図 8(b) のように複数の物体が混在している環境では、隠れている部分の連結状態は分からない．そこで、物体内部での熱伝導を用いて非視線方向での連結情報を可視化する．物体の一部を熱すると物体内で温度勾配ができるため、熱エネルギーが物体内で伝播する．非視線方向で連結している場合、物体の一部を加熱すると視線方向で確認できる他の部分の熱エネルギーが上昇する．この共起性の情報を用いて非視線方向イメージングを行う．

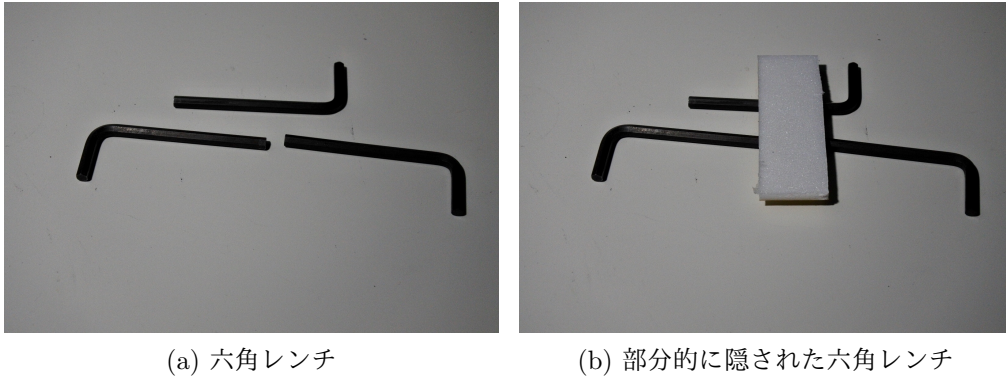


図 8 部分的に隠れた対象物体．(a)3本の六角レンチ．(b)3本の六角レンチの上にスチレンボードが置かれ、端点が隠れている．露出している4本の金属棒のうち、右上と左上の2本は遮蔽物の裏で連結している．

対象とするシーンは隠れ物体の一部を分厚い遮蔽物で覆い、露出している物体の一部に向けて光源を設置している状況とする．光源をオンにする前にシーンを熱カメラで撮影し、熱画像を作成する．熱画像をもとに露出している物体の領域を抽出する．光源をオンにしてシーンを部分的に温め、抽出した物体の領域ごとに温度変化を確認する．温度変化は各領域毎に次の式に応じて求める．

$$f(i) = \begin{cases} \text{true} & \text{after}(i) - \text{before}(i) \geq \theta \\ \text{false} & \text{after}(i) - \text{before}(i) < \theta \end{cases} \quad (6)$$

ここで i は領域番号で, $before(i)$ は加熱前の領域内の平均温度で, $after(i)$ は加熱後の領域内の平均温度である. 温度上昇値がしきい値 θ 以上のとき, その領域 i が温度変化したとする. 任意の 2 つの部分について一方が温度上昇しているのに対してもう一方が温度上昇していない場合, 共起性がないため 2 つの領域は連結していないことがわかる.

$$connection(i, j) = \begin{cases} false & f(i) \neq f(j) \\ undetermined & f(i) = f(j) \end{cases} \quad (7)$$

2 領域 i, j について $connection(i, j)$ が $false$ のとき, 2 領域は連結でない. 温める位置と領域の連結関係によって, 1 回の計測で連結情報を確定させられない場合がある. 温める位置を変えながら撮影を行い, それぞれの計測で得られた連結情報を補完する. 連結な複数の領域を遮蔽物の裏で連結している 1 つのクラスとしてクラスタリングを行う. 隠れ物体の形状が既知な場合, 同一クラスに属する複数の領域の形状とのマッチングによって隠れ物体の姿勢を求められる. 隠れ物体の姿勢と形状から, 遮蔽物の裏に隠れている部分を補完する.

遮蔽物によって一部が覆われた物体の形状を復元する実験を行った. 実験の撮影対象として図 8(b) に示す六角レンチを用いた. 3 本の六角レンチの上にスチレンボードを置いて, 端点を隠している. 露出している 4 本の金属棒のうち, 上側の 2 本は遮蔽物の裏で連結しており, 下側の 2 本は非連結になっている. まず露出している金属棒領域の抽出を行う. 光源をオンにする前に遮蔽物を撮影した時の熱画像を図 9(a) に示す. 露出している部分の抽出のためにシーン全体を温めた時の熱画像を図 9(b) に示す. シーン全体を温めた熱画像と可視光画像から手動で露出している領域を抽出した結果を図 9(c) に示す. 露出領域の抽出を行ったが, この時点では遮蔽物の裏での連結状態は分からない. 次に, 遮蔽物の裏での連結状態を求めるために, シーンを部分的に温める. シーンの右側を温めた後の熱画像を図 10(a) に示す. 左側に露出している金属棒のうち, 左上の金属棒は温度上昇しているが, 左下の金属棒は温度上昇していない. これより, 左上の金属棒は右側の金属棒のどちらかと連結しているが, 左下の金属棒は右側の金属棒のどちらとも連結していないことがわかる. この情報からクラスタリングを行うと図 10(b) のように, 左下の金属棒だけ異なるクラスに分類した結果が得られる.

温める場所を変えながら連結情報を求め、クラスタリングを行うと図 10(c) のように、遮蔽物の裏での連結を考慮したクラスタリングが行える．このクラスタリング結果と、物体形状の既知情報を元に遮蔽物の裏を補完すると、図 10(d) が得られた．クラスタリング結果が同じクラスでありながら画像中で連結でない領域は、遮蔽物の裏で直線状に連結しているため、連結でない領域を最短で繋ぐ線分で結ぶことで補完を行った．線分の太さは既知として補完した．

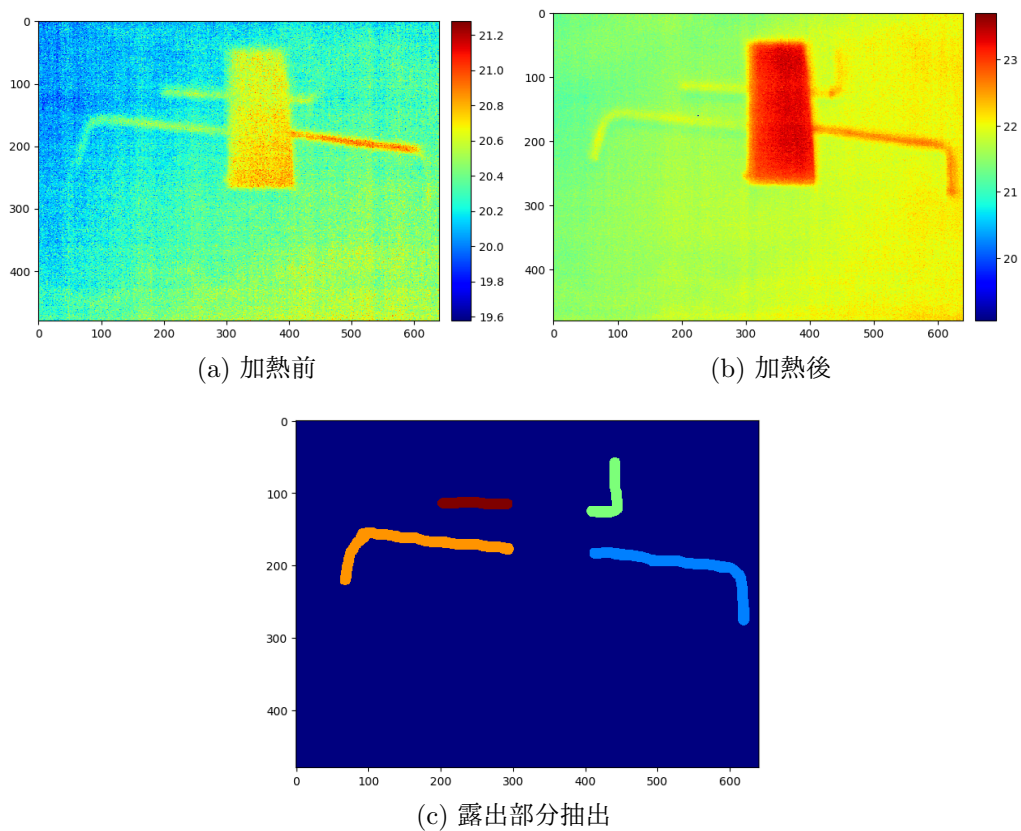


図 9 隠れ物体の露出部分抽出．(a) 光源をオンにする前の状態．(b) 光源をオンにして、隠れ物体の露出した部分を温めている状態．(c) 加熱した熱画像と可視光画像から手動で露出部分を抽出した結果．露出している 4 本の金属棒の連結状態は分からない．

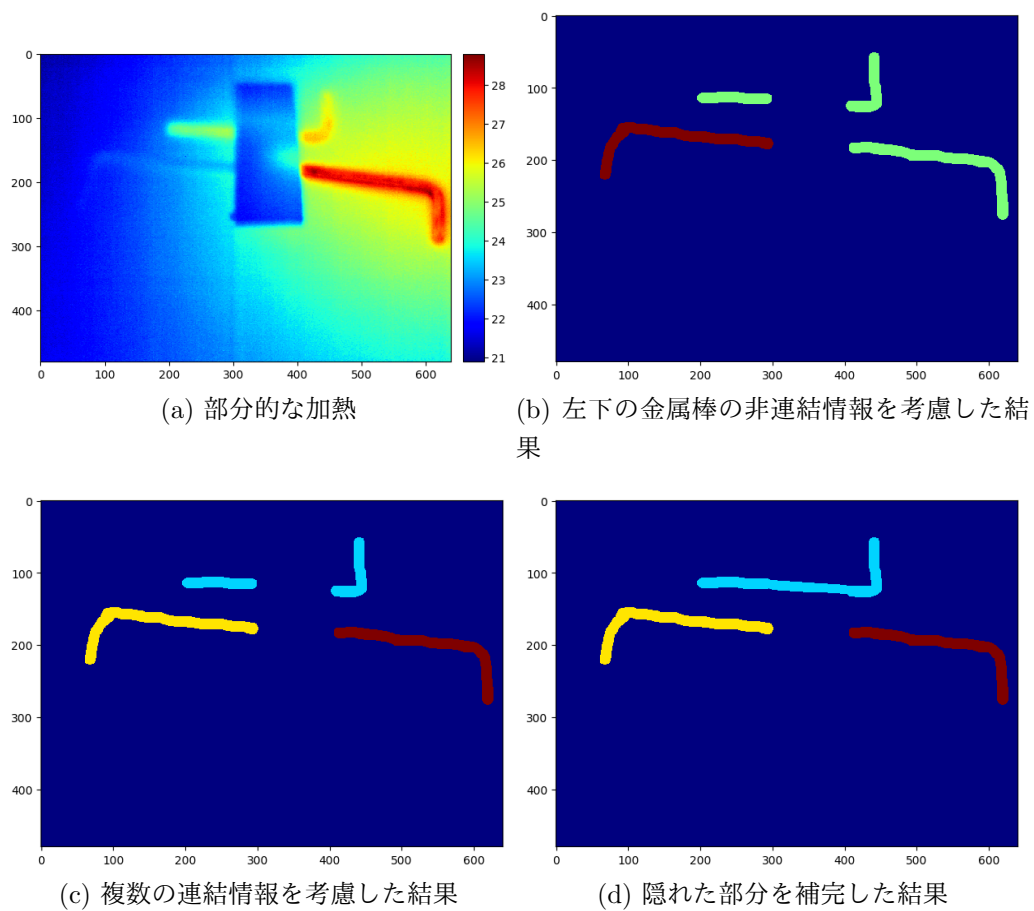


図 10 連結情報を考慮したクラスタリング結果. (a) 光源をオンにして，右側に露出している金属棒を温めている熱画像. 右側の金属棒だけでなく，遮蔽物の裏で連結している左上の金属棒の温度も上昇している. (b) 左下に露出している金属棒は，それ以外の金属棒と連結でないという情報を元にクラスタリングした結果. (c) 複数の連結情報を考慮したクラスタリングした結果. 遮蔽物の裏で連結している右上と左上に露出している金属棒が同一な結果になっている. (d) 隠れた部分を領域の連結によって補完した結果.

4.2 遠赤外光の反射成分分離による非視線方向イメージング

視線方向にある壁での遠赤外光の反射を通して，非視線方向にある物体の位置と温度を推定する手法を紹介する．

4.2.1 モチベーション

壁などによって視線を遮られて直接観測できない物体を間接的に観測することは，ロボットビジョンや自動運転，医療画像，リモートセンシングなどの多くの研究分野で重要な問題となっている．非視線方向イメージングは視線方向で観測された間接的な光路情報から，非視線方向にある物体の情報を推定する手法である．

従来の非視線方向イメージングの手法の多くは，制御可能な光源を必要とする手法となっている．光源から照射された光は視線方向のシーンで反射して非視線方向に届き，非視線方向にある物体で反射して視線方向に戻る．これを観測して光路を復元することで，非視線方向シーンの情報を推定することができる．しかし，このような光源を用意して光路を復元する逆問題は複雑なため，解くことが難しい．

従来手法の多くは制御可能な光源を用いてアクティブな非視線方向イメージングを行っているが，本手法では遠赤外光を用いたパッシブな非視線方向イメージングを提案する．熱を持つ物体は自身の温度に応じた遠赤外光を放射するため，現実世界のあらゆる物体は遠赤外光源とみなすことができる．非視線方向にある物体から放射される遠赤外光は視線方向で1回だけ反射するが，これはアクティブな手法の3回の反射に比べて少なく単純な光路となる．これにより，従来のアクティブな手法に比べて光路を復元する逆問題が簡単になる．

提案手法では，非視線方向にある隠れ物体から放射された遠赤外光が視線方向の壁で反射する様子を熱カメラで観測する．壁での遠赤外光の反射成分は，拡散反射成分と鏡面反射成分に分離できると考えられる．それぞれの反射成分の光路は隠れ物体の位置に依存し，反射強度は物体の位置と温度に影響される．そのため，2つの成分を分離することで隠れ物体の位置と温度を復元できる．

4.2.2 提案手法

対象とする隠れ物体は，熱カメラの視線の外側にある遮蔽物を超えて配置されているとする．熱カメラは隠れ物体から放射された遠赤外光が反射する視線方向の平らな壁を観測する．遠赤外光の反射は可視光と同様に拡散反射成分と鏡面反射成分に分離可能とする．また，壁と熱カメラの幾何的な位置関係が既知とする．図 11 にシーンの幾何関係を示す．問題を単純にするために，隠れ物体は大きさを持たないとする．

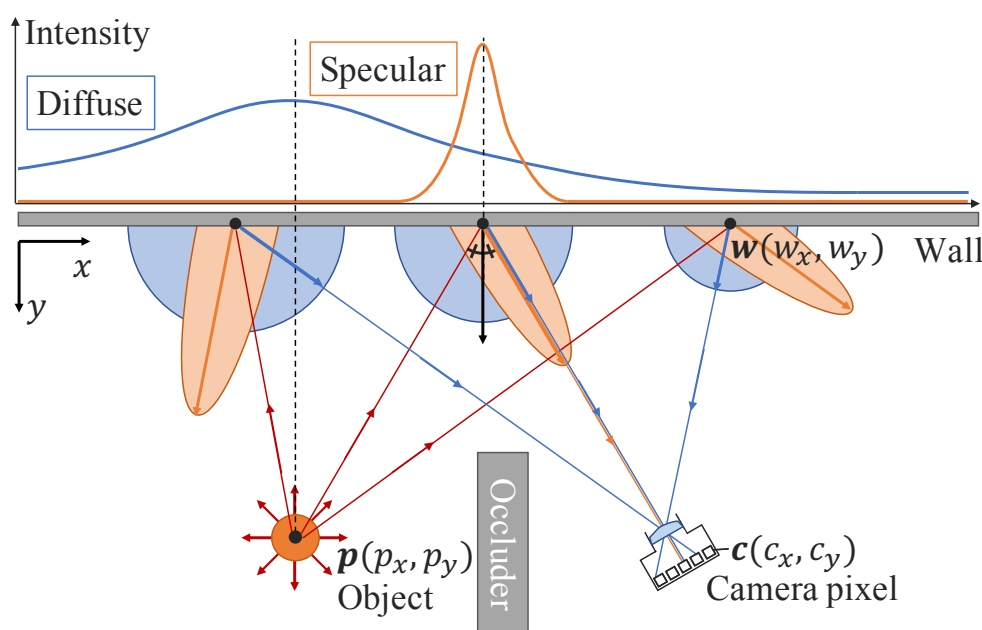


図 11 セットアップおよびコンセプトの幾何関係

この手法は，単一の熱画像から非視線方向にある隠れ物体の位置と温度を推定することを目的とする．壁での反射成分の強度分布のピーク位置が物体位置に依存する．既知のカメラと壁の幾何関係より，画像平面での観測強度は壁に投影することで壁上の反射強度として扱える．鏡面反射成分と拡散反射成分についてそれぞれ考えると，図 11 に示すように，鏡面反射成分に基づく強度分布のピークは，入射角と反射角が等しい位置の周辺にある．一方，拡散反射成分に基づく強度分布のピークは，隠れ物体と壁の距離が最小になる位置の周辺にある．従って，

2つの強度分布を分離すると、予想される光路の逆投影を介して隠れ物体の位置を推定できる。

熱画像で観測される強度には、隠れ物体に由来する反射成分だけでなく、環境光成分や壁自身が放射する遠赤外光の成分も含まれている。これは、事前に隠れ物体なしで観測した熱画像の強度を計測しておき、隠れ物体を推定するための観測値から減算すること除去することができる。拡散反射成分と鏡面反射成分の分離は、壁での強度の1次元の分布に対して行われる。カメラピクセル c と壁 w 上の点は1対1に対応しているため、幾何学的補正と放射補正により、観測された強度を壁上の強度に変換できる。壁での観測強度は次のように表すことができる。

$$I_w(w_x) = D_w(w_x) + S_w(w_x), \quad (8)$$

ここで、 D_w および S_w はそれぞれ拡散反射成分および鏡面反射成分である。

次に、拡散反射成分と鏡面反射成分の経験的なモデルを構築する。様々な測定に基づき、2つの成分の両方がガウス分布に従う。両方の成分を次のように定義する。

$$D_w(w_x) = a_d \exp\left(-\frac{(w_x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right), \quad (9)$$

$$S_w(w_x) = a_s \exp\left(-\frac{(w_x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (10)$$

ここで a_d , μ_d および σ_d^2 は拡散反射成分のスケール、平均および分散であり、 a_s , μ_s および σ_s^2 は鏡面反射成分のスケール、平均および分散である。なお、制約として $\sigma_d > \sigma_s$ であり、拡散反射の空間的な広がりには鏡面反射の広がりよりも常に大きい。両方の反射成分を分離するために、以下を最適化する。

$$\begin{aligned} & [\mu_d, \mu_s, \sigma_d, \sigma_s, a_d, a_s] = \\ & \underset{\mu_d, \mu_s, \sigma_d, \sigma_s, a_d, a_s}{\operatorname{argmin}} \sum_{w_x} \left| I_w(w_x) - \hat{I}_w(w_x | \mu_d, \mu_s, \sigma_d, \sigma_s, a_d, a_s) \right|^2, \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\hat{I}_w(w_x)$ は再構成された強度を表す。図 12 に分離の例を示す。

隠れ物体の位置は、分離された拡散反射成分と鏡面反射成分を用いて推定される。鏡面反射の出射角は入射角と等しいため、壁 w 上の点から物体の点までの光

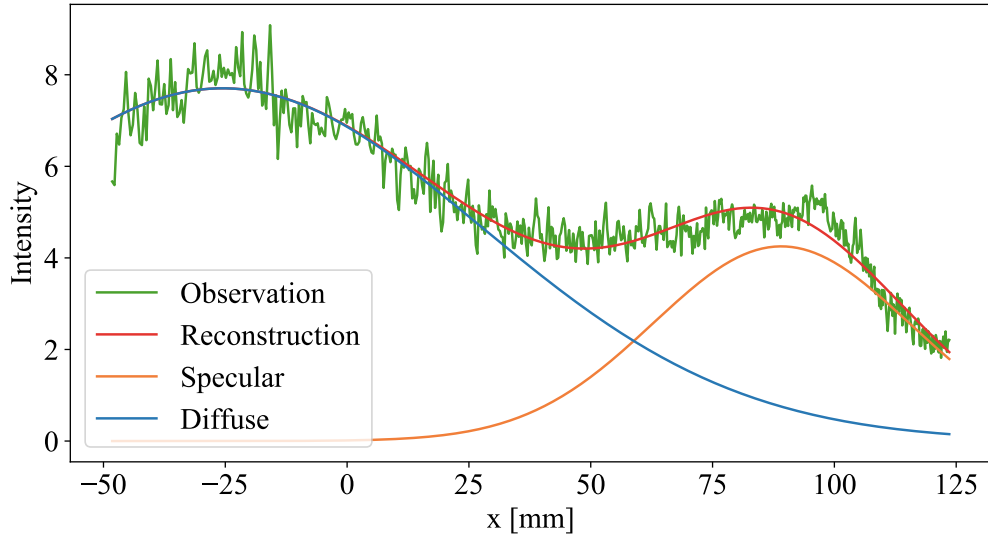


図 12 拡散反射成分と鏡面反射成分の分離結果．観測された強度 (緑) は，拡散反射成分 (青) と鏡面反射成分 (オレンジ) に分けられる．

路は次のように考えられる．

$$\boldsymbol{l} = \frac{\boldsymbol{w} - \boldsymbol{c}}{\|\boldsymbol{w} - \boldsymbol{c}\|^2} - 2 \left(\frac{\boldsymbol{w} - \boldsymbol{c}}{\|\boldsymbol{w} - \boldsymbol{c}\|^2} \cdot \boldsymbol{n} \right) \boldsymbol{n}, \quad (12)$$

ここで $\boldsymbol{n}$ は壁の法線方向である．一般に，実世界の鏡面反射はぼやけたローブを持つ．そのため，投票方式を適用し位置の確率分布を計算する．壁上の各点における鏡面反射の光路は，方向 $\boldsymbol{l}$ に沿って y 軸が壁の法線方向 $\boldsymbol{n}$ であり原点を壁とする投票空間 $\mathcal{V}$ の上を進む．拡散反射の光路は全ての方向に分布している可能性があるが，強度は物体と壁上の点間の距離に依存すると考えられる．そのため，壁の各点での拡散反射の光路は壁の法線方向に沿って進む．点 $(x, y) \in \mathcal{V}$ での投票値 v は次の式で定義する．

$$v(x, y) = v_d(x) + v_s(x, y), \quad (13)$$

ここで v_d および v_s は，それぞれ拡散反射成分および鏡面反射成分から導出された投票強度である．位置 (x, y) の鏡面反射成分からの投票強度は壁上の対応する点

に基づいており, $w_x = \frac{c_x y + c_y x}{c_y + y}$. 従って両方の投票強度は次のように定義される.

$$v_d(x, y) = D_w(x), \quad (14)$$

$$v_s(x, y) = S_w \left(\frac{c_x y + c_y x}{c_y + y} \right). \quad (15)$$

投票空間を正規化すると, 確率分布は次のようになる.

$$p(x, y) = \frac{v(x, y)}{\sum_x \sum_y v(x, y)}. \quad (16)$$

確率 $p(\hat{x}, \hat{y})$ が最大の点 $(\hat{x}, \hat{y})$ を求め, 隠れ物体の推定位置とする.

隠れ物体の温度は, 分離された拡散反射成分と推定された物体位置を基に推定される. 熱物体から放射される遠赤外光エネルギー E は, 物体の熱力学的温度 T の 4 乗に比例し, シュテファン・ボルツマンの法則に従う.

$$E = \sigma T^4, \quad (17)$$

ここで σ はシュテファン・ボルツマン定数である. 放射された光は最終的に視線方向の壁に到達するが, 光路を進むにつれて減衰する. 減衰率は移動距離に依存し, これは逆 2 乗の法則によって説明される. 壁まで到達した光は壁から拡散反射され, 熱カメラで観測される. 従って, 拡散反射成分のスケール a_d は次のように表現できる.

$$a_d = \frac{E k_d}{\hat{y}^2}, \quad (18)$$

ここで k_d は壁の拡散反射率であり, $\hat{y}$ は推定された物体と壁間の距離である. 事前に既知の距離と温度の下で推定された拡散反射成分のスケールから計算するなどして計算される壁の反射率を既知とすると, 隠れ物体の温度は次のように推定できる.

$$T = \left(\frac{a_d \hat{y}^2}{k_d \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (19)$$

4.2.3 実験

隠れ物体の温度と位置を推定する実験を行った．実験のセットアップは図 13 に示すように，熱カメラ (Nippon Avionics, InfRed R500) が視線方向の平らな壁を観測する．視線方向の壁として印刷用紙を用いた．黒い板によって視線を遮られた非視線方向にある隠れ物体として，半田ごてと USB カイロの 2 つの物体を使用した．半田ごては 270°C ， 320°C ， 370°C の異なる温度を維持し，USB 回路は約 50°C を維持する．実際に熱カメラで観測した熱画像を図 14 に示す．

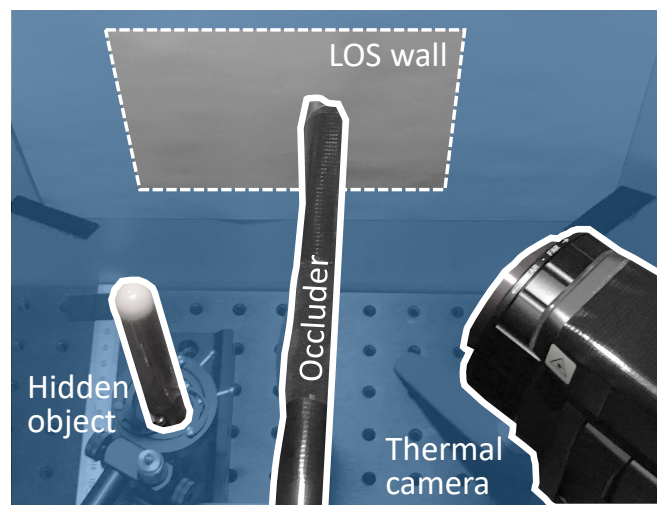


図 13 実験環境．隠れ物体として USB カイロを用意したシーン

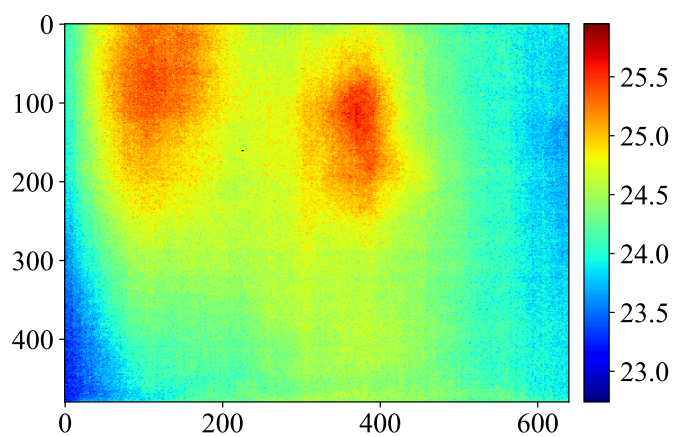


図 14 熱カメラによって視線方向の壁 (LOS wall) を観測した熱画像

図 15 に示すグリッド状に穴のあいた金属板を用いて，カメラ固有のパラメータと，壁とカメラ間の幾何を調整するためのキャリブレーションを行う．熱カメラと隠れ物体は実験を開始する前に適切に温めておき，実験中は周囲の温度を一定に保った．

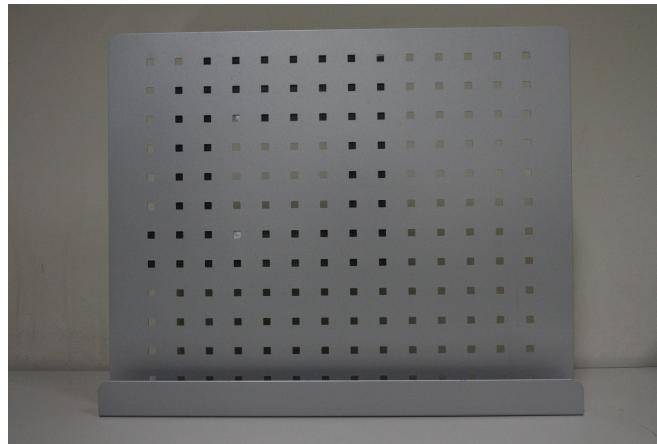


図 15 熱カメラのキャリブレーションボード

また，非視線方向にある隠れ物体の動きを推定する実験を行った．図 16 に示すように非視線方向に回転ステージを設置し，その上に十分に温めた半田ごてを固定した．回転ステージは，固定された物体がちょうど1周するように動く．半田ごてを 370°C に設定した場合と 420°C に設定した場合について実験を行った．

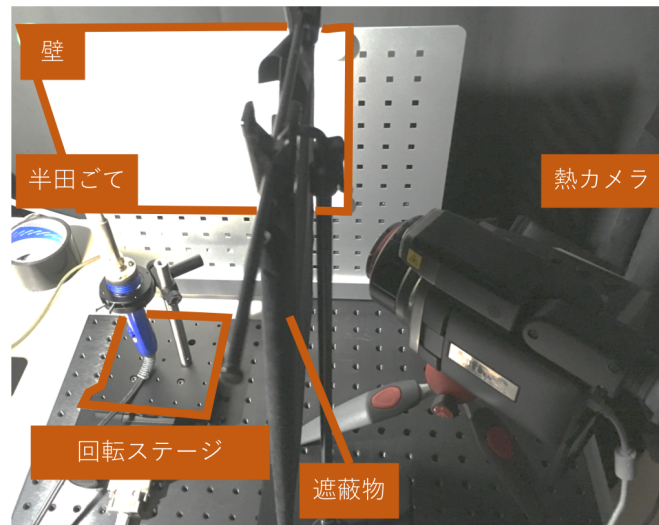


図 16 隠れ物体の動きを推定するための実験環境．十分に加熱された半田ごてが回転ステージの上に固定されている．

隠れ物体の位置推定を評価する．半田ごてを 370°C に設定し，図 18 の非視線方向シーンにおける異なる 3 つの位置 A, B, C に設置した．観測された各熱画像から水平方向の 1 ラインを取り出し，反射強度を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離し，それぞれについて投票を行い確率分布を作成した．それぞれの確率分布を図 17(a-c) に示す．ここで，青い円と赤い十字は，実際に物体がある位置と最大確率位置を示す．A, B および C の推定位置の誤差は，それぞれ 27.41, 26.07, および 31.94 mm である．人間の体温に比較的近い温度を持つ USB カイロを A の位置に設置して実験した結果を，図 17(d) に示す．推定位置の誤差は 38.08 mm となっている．結果より，提案手法では隠れ物体が低温でも物体位置の再構成ができると言える．

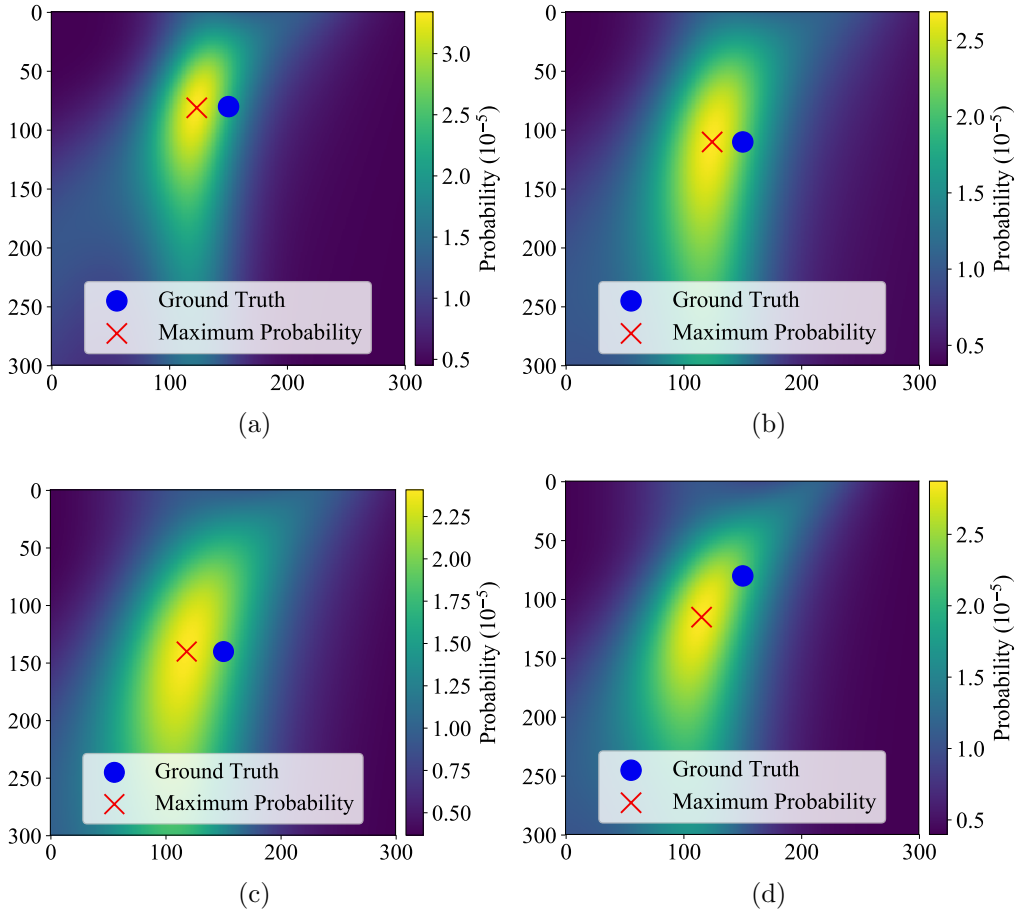


図 17 位置推定の実験結果．縦横の軸は mm．(a–c) それぞれ，位置 A，B および C での半田ごての位置の確率分布．(d) 位置 A での USB カイロの確率分布．青い円と赤い十字は，それぞれ真値と最大確率位置を示す．

隠れ物体の温度推定の結果を評価する．半田ごての温度は，位置 A，B および C のそれぞれについて 270，320 および 370 °C に設定している．位置が推定された後，図 19 を使用して物体の温度が推定される．

拡散反射の k_d は，半田ごてを 320 °C に設定して点 B の位置に置いた時の観測から事前に求めておく．推定温度は表 1 に示す．温度推定の精度は位置推定の結果に依存するため，位置推定の誤差を推定温度の下に表示している．結果から精度が高いと言い切ることは難しいが，少なくとも各位置での温度の大小関係は一致している．点 A で 320 °C に設定した場合と，点 B で 370 °C に設定した場合お

表 1 温度推定の実験結果

	270 °C	320 °C	370 °C
Position A	280 °C(27.77 mm)	335 °C(27.41 mm)	351 °C(24.94 mm)
Position B	283 °C(23.79 mm)	N/A (22.98 mm)	365 °C(26.07 mm)
Position C	365 °C(31.94 mm)	441 °C(40.19 mm)	473 °C(36.35 mm)

よび点 C で 270 °C に設定した場合の結果を 図 18 に示している。

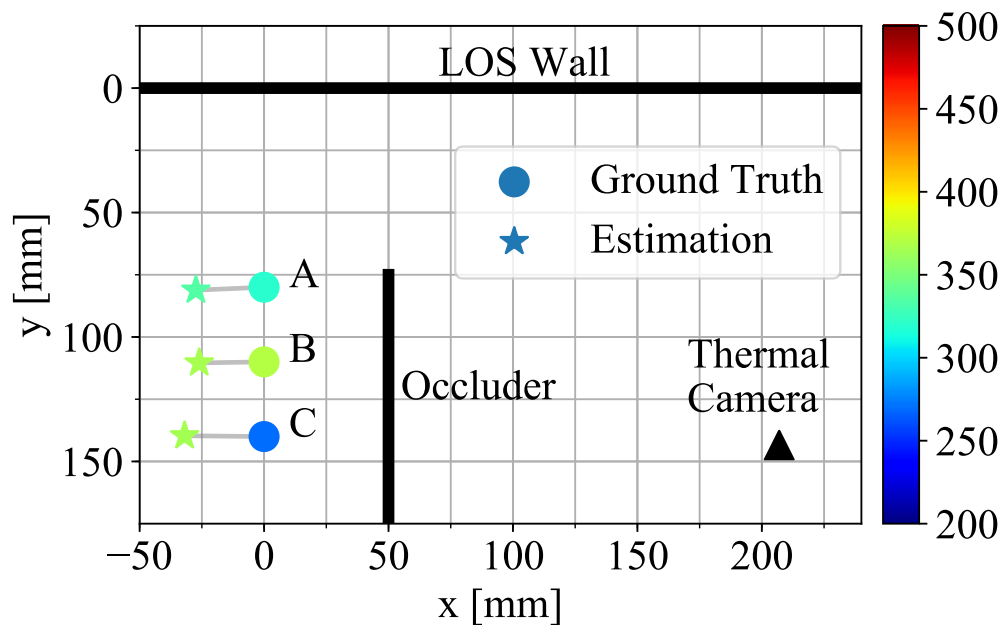


図 18 位置および温度推定の実験結果．対象物体は熱カメラから見て遮蔽物の裏側にあるが，実際の物体位置に近い位置で位置推定できている．また，物体の色は物体温度を示しており，実際の温度に近い温度が推定されている．

非視線方向の隠れ物体の軌跡を復元する実験の結果を図 19 に示す．隠れ物体としている半田ごての温度を 370 °C に設定した場合と，420 °C に設定した場合について，どちらの軌跡も正円とは言い難いが，円運動をしていることが確認できる．

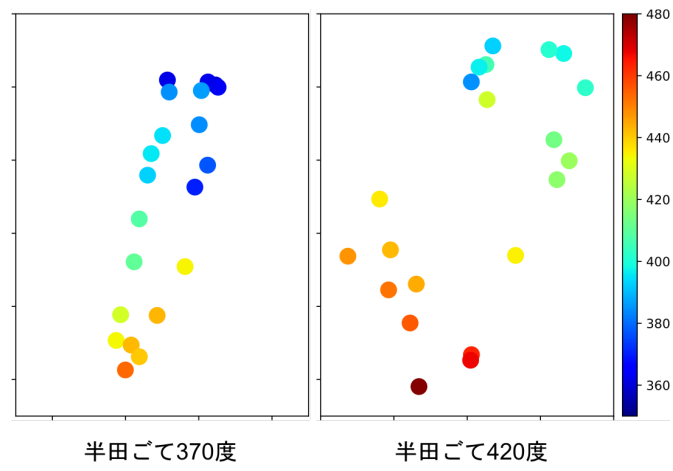


図 19 物体の動きを推定した結果

5. おわりに

遮蔽物によって隠され直接見ることでできない物体の情報を求めるために、熱の伝播を用いて非視線方向イメージングを行う手法を3つ提案し、検証を行った。

5.1 遮光紙に覆われた物体の形状計測

板の裏にある物体の形状を推定するために、熱伝播による温度上昇の差を用いた非視線方向イメージングを提案した。薄い板などに覆われて物体が隠されている場合でも、遮蔽物越しに物体を温めることで遮蔽物表面での温度変化から隠れ物体の形状を推定できる。実験によって、遮光紙によって覆われた T の形状をした物体の形状を復元した。ただし熱が遮蔽物で広がるため、遮蔽物が分厚い場合や熱が広がりやすい金属の場合はぼやけた形状が復元される。また、熱画像の各画素ごとに温度上昇値を確認する手法なため、遮蔽物を十分に温めないで隠れた物体の影響を確認できない。そのため、本手法を用いる場合は遮蔽物全体を均一に温める必要がある。本手法では温度差が明確になる時間を固定して、遮蔽物を温める前後の温度差から形状を復元したが、遮蔽物に隠されている物体が未知の場合では最適なタイミングを設定できない。そのような場合は遮蔽物全体を均一に温め、隠れ物体と遮蔽物の温度差がなくなるまで温め続ける。この過程を熱カメラで観測し続け、熱動画の各画素について温度上昇の過渡応答からセグメンテーションを行う。

5.2 部分的に隠れた金属棒のクラスタリング

遮蔽物によって複数の物体の一部が隠されて連結状態が不明なシーンについて、遮蔽物の裏での連結情報を推定するために熱伝播による温度上昇の共起性を用いた非視線方向イメージングを提案した。分厚い板などに覆われて物体の一部が隠され、非視線方向での連結情報が分からない場合でも、露出している部分を温めることで熱伝導から遮蔽物裏での連結情報を推定できる。また、推定した連結情報と既知の物体形状から、遮蔽物によって隠された物体形状を補完できる。

実験によって、スチレンボードによって一部を覆われた複数の六角レンチを、連結情報に従ってクラスタリングした。現在の手法では露出している領域の抽出を手動で行う必要がある。熱伝導を用いて物体の連結情報を推定するため、熱伝導率の低い材質に用いることは難しい。近接して置かれている物体を区別するためには、それぞれの一方のみを温める必要があり、空間的に細かく制御できる光源が必要となる。今回の実験では隠れ物体が単純な棒状であったため補完を行えたが、隠れ物体が複雑な形状の場合は補完が難しい。単純な熱伝播の連結情報だけでなく、熱伝播にかかる時間や熱エネルギーの平衡情報から隠れ物体の経路長や大きさを推定できると考えられる。本手法は遮蔽物の厚みに依存しないため、5.1で紹介した遮蔽物が分厚いと復元結果がぼやけるといった問題は生じない。ただし、遮蔽物が隠れ物体よりはるかに熱伝導率が高い場合は遮蔽物を通して熱が伝播するため、本手法が有効に機能しない可能性がある。

5.3 遠赤外光の反射成分分離による非視線方向イメージング

遮蔽物によって視線を遮られた位置にある物体の位置と温度を推定するために、熱の伝播を用いた非視線方向イメージングを提案した。隠れ物体が放射する遠赤外光は視線方向の壁で反射し、熱カメラによって反射成分を観測される。観測された熱画像中の反射成分は拡散反射成分と鏡面反射成分に分けられる。両方の成分の光路に沿った投票により、物体位置の確率分布が得られる。物体と壁の間の距離が推定されると、隠れた物体の温度は拡散反射強度から推定できる。実験では提案した手法が異なる温度で異なる位置にある半田ごての位置と温度、および温度が人間に近いUSBカイロの位置を推定できることを示した。また、非視線方向にある隠れ物体の動きを推定できることを示した。ただし、本手法では隠れ物体が単一の円筒形状をしていることを想定している。また、物体から放射される遠赤外光は空中で減衰するため、本手法が実行可能な距離は200 mm未満に制限されている。隠れ物体の温度が低い場合、観測される信号のSN比が低くなるため、本手法を用いることは難しい。遠赤外光の反射モデルは経験的に構築しており、これをより厳密な物理モデルに従わせることで精度が上がる可能性がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり，懇切なるご指導とご助言を頂い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．本研究の副査を引き受けて頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 清川 清 教授に厚く御礼申し上げます．本研究の遂行及び学会の発表にあたり，熱心なご指導を頂いた光メディアインタフェース研究室の舩富 卓哉 准教授に心より感謝致します．本研究を行うにあたり，貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 久保 尋之 助教に心より感謝致します．本研究における多大なるご助言だけでなく，論文執筆や学会発表において懇切なるご指導を頂いた 田中 賢一郎助教に心より感謝致します．本研究における貴重なご助言だけでなく，学会発表や論文執筆においてもご指導頂いた光メディアインタフェース研究室 高 谷 剛志さんに厚く御礼申し上げます．本研究における貴重なご助言だけでなく，学会発表や論文執筆においてもご指導頂いた光メディアインタフェース研究室 櫛田 貴弘さんに厚く御礼申し上げます．本研究における貴重なご助言だけでなく，グループミーティングにおいてもご指導頂いた光メディアインタフェース研究室 北野 和哉さんに厚く御礼申し上げます．また，研究室生活において様々な活動を支えて頂いた，光メディアインタフェース研究室秘書 登 淑恵さんに厚くお礼申し上げます．研究に関する熱い議論だけでなく，夕飯や息抜きにおいて日頃から付き合ってくださった光メディアインタフェース研究室同期の皆様に感謝申し上げます．

最後に研究に関する議論だけでなく研究室生活において日頃からお世話になった光メディアインタフェース研究室学生の皆様に感謝申し上げます．

発表リスト

[1] Masaki Kaga, Takahiro Kushida, Tsuyoshi Takatani, Kenichiro Tanaka, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa: Thermal Non-Line-of-Sight Imaging from Specular and Diffuse Reflections, 第22回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2019), OS3A-4, 2019.7

[2] Masaki Kaga, Takahiro Kushida, Tsuyoshi Takatani, Kenichiro Tanaka, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa: Thermal Non-Line-of-Sight Imaging from Specular and Diffuse Reflections, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, DOI:10.1186/s41074-019-0060-4, 2019.

参考文献

- [1] Shumian Xin, Sotiris Nousias, Kiriakos N Kutulakos, Aswin C Sankaranarayanan, Srinivasa G Narasimhan, and Ioannis Gkioulekas. A theory of fermat paths for non-line-of-sight shape reconstruction. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 6800–6809, 2019.
- [2] Matthew O’Toole, David B. Lindell, and Gordon Wetzstein. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform. *Nature*, 555(338), Mar 2018.
- [3] Adithya Pediredla, Akshat Dave, and Ashok Veeraraghavan. Snlos: Non-line-of-sight scanning through temporal focusing. In *2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–13. IEEE, 2019.
- [4] Andreas Velten, Thomas Willwacher, Otkrist Gupta, Ashok Veeraraghavan, Mounsi G. Bawendi, and Ramesh Raskar. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nature Communications*, 3(745):1–8, Mar 2012.
- [5] Ahmed Kirmani, Tyler Hutchison, James Davis, and Ramesh Raskar. Looking around the corner using transient imaging. In *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 159–166, Sep 2009.
- [6] Antonio Torralba and William T. Freeman. Accidental pinhole and pinspeck cameras. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, 110(2):92–112, Nov 2014.
- [7] K. L. Bouman, V. Ye, A. B. Yedidia, F. Durand, G. W. Wornell, A. Torralba, and W. T. Freeman. Turning corners into cameras: Principles and methods.

- In *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 2289–2297, Oct 2017.
- [8] Kazuya Kitano, Takanori Okamoto, Kenichiro Tanaka, Takahito Aoto, Hiroyuki Kubo, Takuya Funatomi, and Yasuhiro Mukaigawa. Recovering temporal psf using tof camera with delayed light emission. *IPSJ Trans. on Computer Vision and Applications*, 9(1):1–6, Jun 2017.
 - [9] Achuta Kadambi, Hang Zhao, Boxin Shi, and Ramesh Raskar. Occluded imaging with time-of-flight sensors. *ACM Trans. Graph.*, 35(2):15:1–15:12, Mar 2016.
 - [10] F. Heide, L. Xiao, W. Heidrich, and M. B. Hullin. Diffuse mirrors: 3d reconstruction from diffuse indirect illumination using inexpensive time-of-flight sensors. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 3222–3229, June 2014.
 - [11] C. Tsai, K. N. Kutulakos, S. G. Narasimhan, and A. C. Sankaranarayanan. The geometry of first-returning photons for non-line-of-sight imaging. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 2336–2344, July 2017.
 - [12] David B Lindell, Gordon Wetzstein, and Vladlen Koltun. Acoustic non-line-of-sight imaging. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 6780–6789, 2019.
 - [13] Charles Saunders, John Murray-Bruce, and Vivek K. Goyal. Computational periscopy with an ordinary digital camera. *Nature*, 565(7740):472–475, Jan 2019.
 - [14] A. Beckus, A. Tamasan, and G. K. Atia. Multi-modal non-line-of-sight passive imaging. *IEEE Trans. on Image Processing*, Jan 2019.

- [15] Sheila W Seidel, Yanting Ma, John Murray-Bruce, Charles Saunders, William T Freeman, C Yu Christopher, and Vivek K Goyal. Corner occluder computational periscopy: Estimating a hidden scene from a single photograph. In *2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–9. IEEE, 2019.
- [16] Philip Saponaro, Scott Sorensen, Abhishek Kolagunda, and Chandra Kambhamettu. Material Classification with Thermal Imagery. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 4649–4656, 2015.
- [17] Kenichiro Tanaka, Nobuhiro Ikeya, Tsuyoshi Takatani, Hiroyuki Kubo, Takuya Funatomi, and Yasuhiro Mukaigawa. Time-resolved light transport decomposition for thermal photometric stereo. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 4804–4813, 2018.
- [18] Tomohiro Maeda, Yiqin Wang, Ramesh Raskar, and Achuta Kadambi. Thermal non-line-of-sight imaging. In *2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–11. IEEE, 2019.