

多波長遠赤外光観測による受動的な距離計測

長瀬 康斗^{1,a)} 櫛田 貴弘^{1,b)} 田中 賢一郎^{2,1,c)} 船富 卓哉^{1,d)} 向川 康博^{1,e)}

概要

本研究では、対象のテクスチャによらず適用可能な受動的距離計測技術として、温度を持つ物体が放射する遠赤外光を利用して距離推定を行う手法を提案する。大気における光の減衰率の波長による差異に着目し、遠赤外光帯域で多波長観測を行うことで、計測対象の距離、温度、放射率を同時に推定する。実験では、実際のシーンの撮影を行い、その距離を推定することで提案手法の有効性を検証した。

1. はじめに

コンピュータビジョンにおける距離計測手法は、パッシブステレオ、アクティブステレオ、Time-of-Flight、照度差ステレオや Depth from Focus/Defocus など様々な手法があり、物体の形状復元や自動運転、ロボットの制御などの多くのアプリケーションで利用されている。しかし、パッシブ方式では対象にテクスチャがない場合や、夜間、暗闇のように対象が見えない場合には計測が難しい。また、アクティブ方式では制御可能な光源が必要となるほか、黒色のように対象が光を反射しない場合には計測が難しいという問題がある。

これに対し本研究では、温度を持つ全ての物体が放射する遠赤外光の減衰を観測することで、距離を推定する手法を提案する。遠赤外光の放射強度は物体の温度と放射率によって変化するため、単一の観測だけでは曖昧性が残ってしまう。提案手法では、遠赤外光の大気減衰が波長によって異なることに着目し、複数の波長で観測することで、温度と放射率の影響による曖昧性を解消し、距離を推定する。対象が放射した遠赤外光が観測されるまでの大気減衰をモデル化し、複数の波長による観測を用いて対象の距離、温度、放射率を推定する。

本手法は、複数の波長で光の減衰を観測するという点において Shape from Water [1] から着想を得たものである

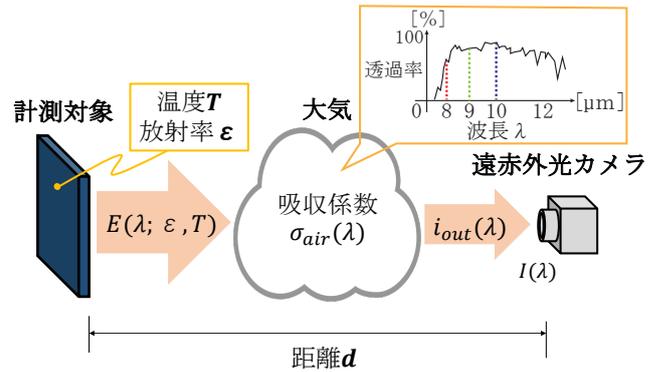


図 1: 遠赤外光の観測モデル

が、計測対象自体が放射する遠赤外光を利用するため、光源を必要としない受動的な計測が可能である。また [1] と同様に計測対象のテクスチャの有無による影響を受けないという利点がある。

2. 遠赤外光の観測モデル

図 1 に示すように、物体から放射された遠赤外光は、大気によって減衰し、遠赤外光カメラで観測される。以下では、この遠赤外光の観測モデルについて述べる。

遠赤外光の放射 絶対零度以上の温度 T を持つ黒体は、プランクの法則に従って光を放射する。このとき、黒体の分光放射輝度 M_e は次式で与えられる [4]。

$$M_e(\lambda; T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

ここで、 λ は光の波長、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数を表す。一般的な物体から放射される分光放射輝度 E は、放射率 ϵ を用いて次式で表せる。

$$E(\lambda; \epsilon, T) = \epsilon M_e(\lambda; T) \quad (2)$$

放射率 ϵ は、黒体放射のエネルギーを 1 としたときの比率である。放射率は物体の材質や表面の状態によって変化するが、遠赤外光の範囲では波長に依らずほぼ一定とみなせることが知られている [2]。

大気減衰 物体から放射された遠赤外光は、カメラによって観測されるまでに通過した大気によって吸収され、減衰する [3]。大気の吸収による光の減衰は、Lambert-Beer の

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 立命館大学

a) nagase.yasuto.nx0@is.naist.jp

b) kushida.takahiro.kh3@is.naist.jp

c) ken-t@fc.ritsumei.ac.jp

d) funatomi@is.naist.jp

e) mukaigawa@is.naist.jp

法則により次式で表せる。

$$i_{\text{out}}(\lambda) = \exp(-\sigma_{\text{air}}(\lambda)d)i_{\text{in}}(\lambda) \quad (3)$$

ここで、 i_{in} , i_{out} はそれぞれ入射光と透過後の光の強度を表し、 d は光路長、 σ_{air} は大気吸収係数を表す。

観測モデル 式 (1)–(3) から、カメラに入射する遠赤外光の強度 I は次式のように表される。

$$I(\lambda) = S \exp(-\sigma_{\text{air}}(\lambda)d)\epsilon M_e(\lambda; T) \quad (4)$$

ここで、 S は分光放射輝度とカメラの観測値を結びつけるための予めキャリブレーションされた定数である。カメラで観測される遠赤外光の強度は、大気を通過した距離 d による減衰だけでなく、対象の放射率 ϵ と温度 T によっても変化することがわかる^{*1}。そのため、単一の観測だけでは距離に曖昧性が残ってしまう。

3. 多波長遠赤外光観測による距離計測

本研究では、観測する遠赤外光の大気減衰率が波長ごとに異なることに着目し、その減衰の違いを利用することで温度と放射率の曖昧性を解消し、距離を推定する。

異なる 2 つの波長 λ_i, λ_j における観測を $I(\lambda_i), I(\lambda_j)$ とすると、式 (4) より、それぞれを除算することで放射率 ϵ を消去し、次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \hat{I}_{ij} &= \frac{I(\lambda_i)}{I(\lambda_j)} \\ &= \frac{\exp(-\sigma_{\text{air}}(\lambda_i)d)M_e(\lambda_i; T)}{\exp(-\sigma_{\text{air}}(\lambda_j)d)M_e(\lambda_j; T)} \end{aligned} \quad (5)$$

この式を距離 d について解くと、次式ようになる。

$$d = \frac{1}{\sigma_{\text{air}}(\lambda_j) - \sigma_{\text{air}}(\lambda_i)} \ln \left(\frac{M_e(\lambda_j; T)}{M_e(\lambda_i; T)} \hat{I}_{ij} \right) \quad (6)$$

しかし、このままでは対象の温度が分からず計測対象の放射輝度 M_e が得られないため、距離と温度に曖昧性が残ってしまう。

そこで本手法では、観測する波長を新たにもう一つ追加し、合計 3 波長による観測を利用する。どの波長を用いても、シーン中の距離 d は変わらないため、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sigma_{\text{air}}(\lambda_2) - \sigma_{\text{air}}(\lambda_1)} \ln \left(\frac{M_e(\lambda_2; T)}{M_e(\lambda_1; T)} \hat{I}_{12} \right) &= \\ \frac{1}{\sigma_{\text{air}}(\lambda_3) - \sigma_{\text{air}}(\lambda_1)} \ln \left(\frac{M_e(\lambda_3; T)}{M_e(\lambda_1; T)} \hat{I}_{13} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

この式を満たす温度 T を探索することで、対象の温度が推定できる。推定された対象の温度 T を、式 (6) に代入することで、対象までの距離 d を推定できる。最後に、推定し

^{*1} 一般的なサーモグラフィでは、 $8\mu\text{m}$ から $14\mu\text{m}$ までの波長を観測して温度を計測する。広範囲の波長を観測しており、また短い距離での利用を想定しているため、減衰の影響をほとんど受けない。

た距離 d と温度 T を式 (4) に代入することで、放射率 ϵ が得られる。以上の方法により、3 波長による観測を用いることで、対象の距離 d 、温度 T 、放射率 ϵ をそれぞれ推定できる。

4. 実環境実験

実験では、まず遠赤外光の波長による減衰の違いを確認し、大気吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ の計測を行う。次に、計測した吸収係数を用いてシーンの距離を推定し、提案手法を用いた距離推定の有効性を確認する。

4.1 計測システム

本研究で使用した計測システムを図 2 に示す。遠赤外光カメラは FLIR 社製 Boson640 を使用した。この遠赤外光カメラは、 $7.5\mu\text{m}$ – $13.5\mu\text{m}$ の範囲に感度を持つ。そのため、カメラの前方にバンドパスフィルタを設置し、特定の波長のみを計測できるシステムを構築した。フィルタスライダを用いてフィルタを自動で切り替えながら計測できるため、効率的な計測が可能である。本実験では大気減衰率の差が比較的大きい $8\mu\text{m}$ (中心波長: $8.248\mu\text{m}$, 半値幅: 452nm), $9\mu\text{m}$ (中心波長: $9.127\mu\text{m}$, 半値幅: 545nm), $10\mu\text{m}$ (中心波長: $10.400\mu\text{m}$, 半値幅: 737nm) の 3 種類のバンドパスフィルタを使用した。各フィルタの透過特性を図 3 に示す。

フィルタによる反射とノイズへの対策 遠赤外光カメラの撮影では、通常の可視光カメラと異なり、いくつかの特有の対策が必要となったため、これについて述べる。

1 つめは、カメラ自体が放射する熱の影響である。遠赤外光カメラの前にバンドパスフィルタを設置すると、カメラ本体から放射された遠赤外光がフィルタで反射し、これも観測されてしまう。通常の可視光カメラによるフィルタを用いた撮影では、カメラ自体は発光しないため、このような問題は起きない。本実験ではこの影響を取り除くため、カメラ本体から放射されフィルタにより反射された遠赤外光だけを撮影する機構を取り入れた。具体的には、図 2(b) に示すような内側に黒体スプレーを塗布した外部シャッタを用意し、これをペルチェ素子により外側から冷却することで、温度が低く保たれ、放射率がほぼ 1 である均一な背景とみなした。外部シャッタがある画像とない画像を連続して撮影し、これらの差分を取ることでカメラ本体が発する遠赤外光を除去することができる。

2 つめは、遠赤外光カメラ特有のノイズ特性である。時間的に低周波に発生するノイズがあり、複数フレームの平均をとるだけでは取り除くことができない問題があった。そこで、外部シャッタとシーンの撮影を交互に複数回行い、それぞれ差分をとった画像の平均値をとることでこのノイズを低減した。

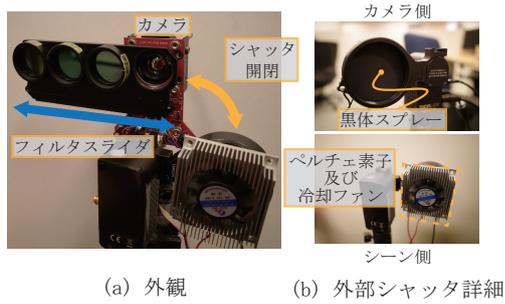


図 2: 多波長遠赤外光の計測システム

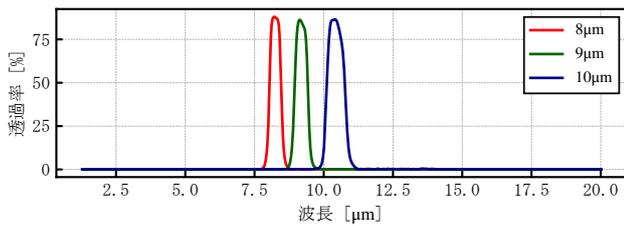


図 3: 各フィルタの透過特性

4.2 吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ の計測

実験では黒体炉を使用し、大気吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ を計測した。黒体炉は放射率 ϵ がほぼ 1 であり、かつ温度を一定に保つことができる。そのため、黒体炉からカメラまでの距離を変化させて観測することにより、距離に応じた大気減衰のみを観測できる。黒体炉の温度を 80°C に設定し、図 4 のようにカメラから黒体炉までの距離を 1 m から 23 m まで 1 m 間隔で移動したときの変化を観測する。カメラから黒体炉までの距離はテープメジャーで測定した。なお、観測値は画像内の黒体炉の中心 3×3 ピクセルの平均を用いた。観測値と距離の真値を最小二乗法を用いて式 (4) にフィッティングすることで、吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ を推定する。

各距離において黒体炉を観測したときの結果を図 5 に、フィッティングによって得られた吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ を表 1 に示す。図 5 の実線は各波長で得られた観測値、破線は各波長の観測結果に対してフィッティングした結果を表している。各波長ともカメラから黒体炉までの距離が長くなるにつれて観測光の強度が下がっており、大気吸収により減衰していることがわかる。また、推定した吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ が波長によって異なることから、減衰率に差があることが確認できる。以上の結果から、各波長の吸収係数が得られた。

4.3 提案手法を用いた距離の推定

黒体炉の計測 まず、4.2 節と同様の環境下において 50°C と 90°C に設定した黒体炉を動かしたときの観測から、黒体炉の距離、温度、放射率を推定した。結果を図 6 に示す。グラフの橙線が真値、青線が推定結果を表している。ノイ

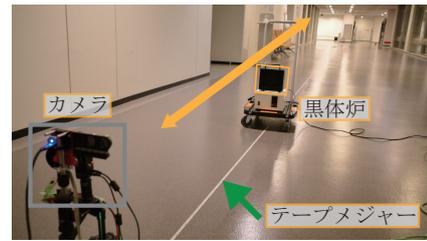


図 4: 黒体炉を用いた大気吸収係数 $\sigma_{\text{air}}(\lambda)$ の計測環境

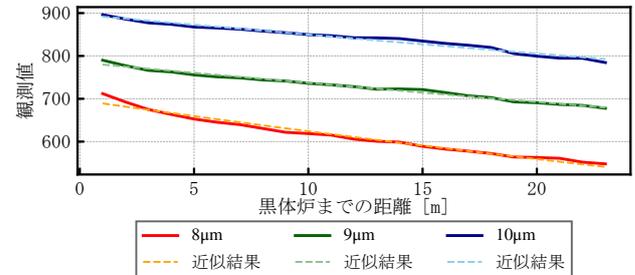


図 5: 黒体炉までの距離に対する各波長の観測値の変化

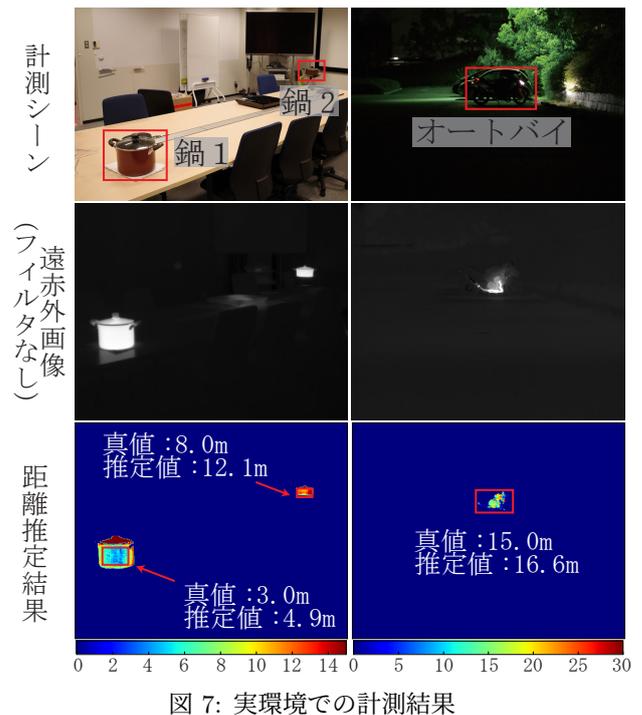
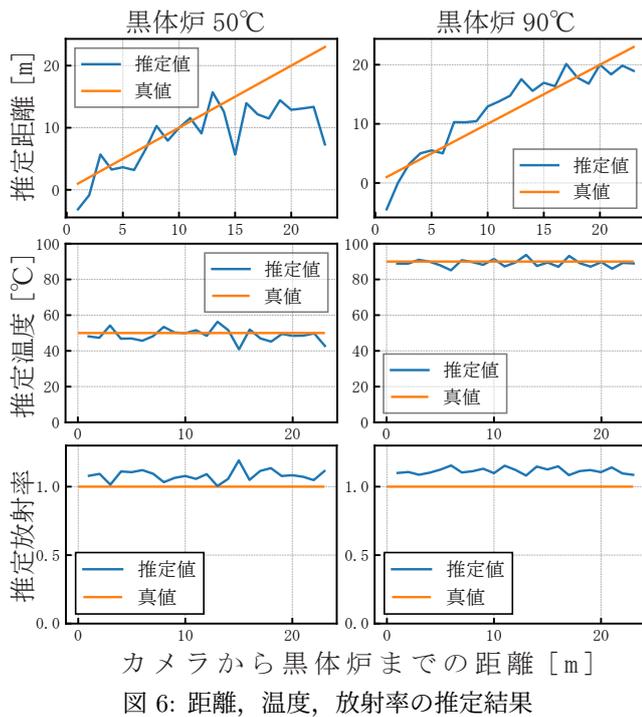
表 1: 吸収係数の推定結果

波長	8μm	9μm	10μm
$\sigma_{\text{air}}(\lambda)$	0.01100m^{-1}	0.00625m^{-1}	0.00535m^{-1}

ズによる変動はあるものの、距離と温度の結果に関しては 50°C、90°C ともに概ね真値に沿って推定できていることがわかる。放射率の結果では真値である 1 よりも高い値になってしまう結果が得られた。これはカメラの本体温度による出力値の誤差の影響であると考えられる。また、いずれの結果も 90°C の結果と比較し、50°C の結果は誤差が大きくなっていることがわかる。これは 50°C の物体は 90°C の物体と比べ放射する遠赤外光の強度が弱く、本実験で使用した計測システムではノイズが大きくなってしまったためだと考えられる。

実環境の計測 次に、図 7 に示す 2 つのシーンに対して、対象までの距離を推定した。なお、本実験では使用したカメラ感度が低く、温度が低い物体では S/N 比が下がってしまうため、比較的高温の物体を計測対象としている。対象として、80°C から 100°C 程度の物体を撮影した。

図 7 に実験結果を示す。推定結果は計測対象部分のみをマスクにより抽出し、赤枠内の平均値を推定値としている。実験結果より、遠くにある物体の距離は大きく、近くにある物体の距離は小さく推定できていることがわかる。また、右側のオートバイの計測結果からわかるように、従来のパッシブ方式による距離測定では困難な暗闇のシーンにおいても距離が推定できていることがわかる。誤差が生じる原因として、吸収係数を計測した環境とシーンを撮影した環境が異なるからであると考えられるが、概ね真値に近い結果が得られていることがわかる。以上の結果から、実環境においても提案手法を用いて対象までの距離を計測



できることが確認できた。

5. まとめ

本研究では, 対象のテクスチャによらず適用可能な受動的距離計測技術として, 温度を持つ物体が放射する遠赤外光を利用して距離推定を行う手法を提案した. 放射率や温度は物体によって異なるが, 3つの異なる波長で遠赤外光を観測することで, その影響を抑えることができることを示した.

制限 本手法で距離計測を行うにあたり, いくつかの制限が存在する. まず, 提案手法の観測モデルでは測定対象に外部から遠赤外光が照射された場合の反射光を考慮していないため, 測定対象の周囲に強い熱源がある場合や遠赤外光における反射率が高い物体の距離導出は困難といえる. また, 本手法では放射率の波長依存性は無いと仮定して観測モデルを立てたが, 世の中には遠赤外光領域でも波長放射率が一定とみなせない物体も存在する. そのような物体を計測するためには, 観測する3波長の組み合わせを慎重に選択する必要がある.

今後の展望 実環境実験では, 温度の高い物体に対して距離の違いが確認できるような結果を得ることができた. しかし温度の低い物体については, 今回用いた装置ではノイズが支配的となり, 推定が難しかった. 多波長での遠赤外光計測を行うにあたり用いたバンドパスフィルタの透過による S/N 比の低下や, センサの感度が原因と考えられる. そのため, 今後はより高性能なノイズの削減に向けて取り組む予定である. なお今回はフィルタを取り換えることによって3波長の観測を実現しているが, ビームスプリッタ

や Bayer パターンなどの活用によってワンショット計測での距離推定が見込まれるため, 今後の遠赤外光センサの性能向上にも期待したい. また, 今回の実験により求めた吸収係数 σ_{air} は常に一定値とはならず, 大気や湿度などの環境によって変化する. 実際の撮影環境とは異なる吸収係数により距離測定を行うと結果に誤差が生じてしまうため, より正確な距離測定を行う場合にはシーンを撮影する前にその環境内での吸収係数を求める実験から始める必要があり, 距離を測定するまでに手間がかかってしまう. シーンの湿度や温度と吸収係数の対応関係が明らかになれば, この処理も不要になると期待される. あらゆる観測環境にロバストなモデルへの改善も今後の課題としたい.

謝辞 本研究の一部は, JST CREST JPMJCR1764, SICORP JPMJSC2003, JSPS Kaken JP18H03265 からの支援を受けた.

参考文献

- [1] Asano, Y., Zheng, Y., Nishino, K. and Sato, I.: Depth Sensing by Near-Infrared Light Absorption in Water, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2020).
- [2] Barducci, A. and Pippi, I.: Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the “grey body emissivity” method, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 3, pp. 681–695 (1996).
- [3] Waldemar, M. and Klecha, D.: Modeling of atmospheric transmission coefficient in infrared for thermovision measurements, *Proceedings of the Sensor*, pp. 903–907 (2015).
- [4] 木股雅章: 赤外線センサ 原理と技術, 科学情報出版株式会社 (2018).