

遠赤外線カメラを用いた温度変化計測に基づく 過去イベント推定の試み

齊藤 晴香¹ 藤村 友貴¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要：本研究では物や人が接触した後の温度変化を遠赤外線カメラで計測した情報から、過去のイベントを推定することを試みる。遠赤外の波長帯域では、熱を持った物や人が対象物体に接触した痕跡が温度変化として残される。実験では観測された温度変化の情報からニュートンの冷却の法則に基づいて過去のイベント時刻を推定できる可能性を見出した。

1. はじめに

カメラを用いることで、人がどこに立っているかなど、シーンに関する現在の状況を知ることができる。さらに、過去から現在の映像を元に、未来を予測する研究もこれまでに多く進められている。例えば、深層学習によって複数の歩行者の相互作用から個人固有の行動パラメータを推定し、歩行者が今後どの方向に進行する可能性があるのかを予測する研究などが報告されている [1]。これらの未来イベントの予測は、人の行動認識や危険予測による安全な誘導に役立てることができる。

一方で、人がどこを歩いてきたか、どこに触れたのか、物体がいつ撤去されたのかなど、過去のイベントを現在の観測から推定することができれば、現在の状況をより詳細に知ることができる。普通のカメラが捉える光の現象は一瞬で完了するため、過去のイベントに関する痕跡が一切残らず、推定は難しい。しかし、遠赤外線カメラが捉える温度はその経時変化が緩やかであるため、過去のイベントであってもその痕跡を捉えることができる。

遠赤外線カメラで得られた熱痕跡から接触履歴の検出と把持形態を推定し、ロボットハンドによる操作に活用する方法が提案されている [2]。また、熱痕跡から人の触れた場所を特定し、ウイルスによる接触感染を避けるための可視化情報として利用するシステムも提案されている [3]。

そこで本研究では、図 1 に示すように、物や人の接触など、温度変化を生じるイベントを対象として、これらが発生した後で遠赤外線カメラで計測した温度変化から、過去のイベントを推定することを試みる。温度の経時変化を解析することで、過去イベントの有無だけでなく、その時

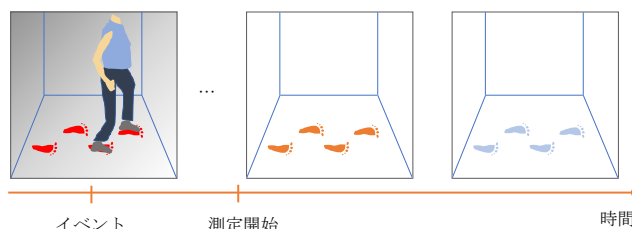


図 1 歩行によって床に残された熱の痕跡の例

刻を推定する可能性について検証を行う。

2. 過去イベントの痕跡

2.1 遠赤外線カメラを用いた熱痕跡の検出

絶対零度を超える全ての物質からは遠赤外線が放射されている。一般に遠赤外線カメラは約 8–14 μm の波長域を撮影可能であり、その計測値は温度だけではなく、黒体放射を 100%とした場合の物質の放射率にも依存する。絶対零度を超える物質を観測できるため、暗闇でも測定でき、熱を持つ全ての物体を熱源と捉えることができる。また、放射率が既知であれば、計測された放射強度から温度に変換できるため、近年では様々なシーンで非接触の温度計測に用いられている。

温度差のある物体が接触すると、その接触イベントは熱の痕跡を残す。例えば、図 2 に示すように、カーペットの上を歩いた時、しばらく時間が経過した後でも、足跡が熱の痕跡としてはっきりと確認できる。可視光を撮影する通常のカメラでは痕跡は残らないが、遠赤外線カメラを用いると、様々な人間の活動の痕跡が計測できることを示している。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

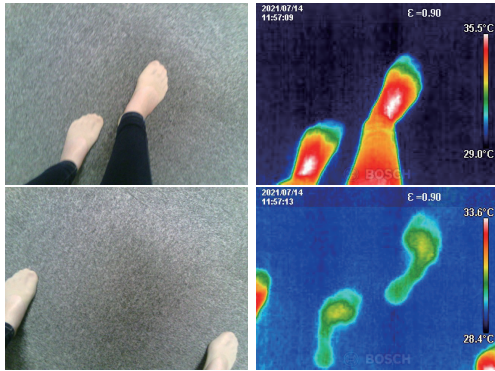


図 2 足跡の痕跡の例

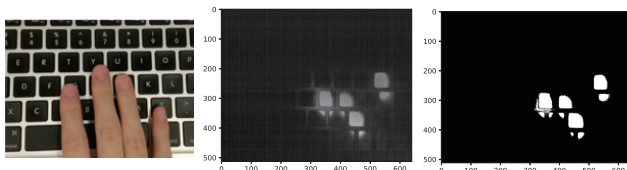


図 3 接触前後の差分画像と 2 値化画像

2.2 熱の痕跡の検出例

熱の痕跡が容易に検出できることを示すために、キーボードのタイピングの例を示す。図 3 に示すようにキーボードに触れるシーンを考える。接触前と接触後の差分画像を見ると、指先の触れていた領域では差分が大きいことがわかる。さらにこの差分画像の 2 値化により、触れていたキートップの特定が可能である。しかし、このような単純な処理では、あくまでも接触の有無と位置のみを推定しているだけであり、イベントが発生した時刻を推定することは難しい。

3. 過去イベント時刻の推定

前述のように遠赤外線カメラを用いて熱の痕跡を計測することで、接触のイベントの有無や接触場所を推定することは可能である。さらに、どの順番に接触したかという相対的な時刻差や、何秒前に接触したかという絶対的な時刻を知ることができれば、いつまで人がいたのかやどちらから歩いてきたのかなど、過去イベントをより詳細に推定することが可能となる。そこで本研究では、遠赤外線カメラによって温度の経時変化を撮影し、その変化を解析することで過去イベントの発生時刻を推定することを試みる。推定のためには温度の経時変化のモデル化と、そのモデルに基づいたイベント時刻推定を行う必要がある。本節では、温度変化モデル、過去イベント時刻推定の曖昧性の問題、曖昧性を解消する手掛かりについて順に述べる。

3.1 ニュートンの冷却の法則

本研究では、イベント発生後の温度の経時変化のモデルとして、ニュートンの冷却の法則を用いる。この法則は高温の物体を冷却する様子を測定実験に基づいた経験則から

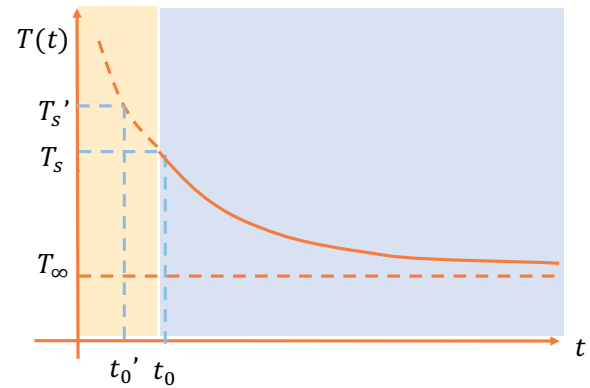


図 4 ニュートンの冷却の法則

定式化されたものであり、冷却されていく物体の温度変化を表す。ニュートンの冷却の法則に従うと、図 4 に示すように、イベント発生時刻を t_0 、イベント発生直後の初期温度を T_s とすると、ある時刻 t における温度 $T(t)$ は式 (1) で表される。

$$T(t) = (T_s - T_\infty) \exp(-\lambda(t - t_0)) + T_\infty \quad (1)$$

ここで T_∞ はイベント後に十分に時間が経過した後の定常状態での温度を表す。 λ は冷却の速さを表し、材質ごとに異なる値を持つ。

3.2 初期温度とイベント時刻の曖昧性

イベント発生直後の初期温度 T_s とイベント時刻 t_0 が共に未知の場合、イベント発生後に計測した温度変化から両パラメータを同時に推定することは難しい。これは、図 4 に示すように、異なるパラメータの組 (T_s, t_0) と (T_s', t_0') でも次式のように同じ計測値となる組み合わせが存在するからである。

$$T(t) = (T_s' - T_\infty) \exp(-\lambda(t - t_0')) + T_\infty \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) により、初期温度 T_s とイベント時刻 t_0 の相対的な関係は式 (3) で表される。

$$\frac{T_s - T_\infty}{T_s' - T_\infty} = \exp(-\lambda(t_0 - t_0')) \quad (3)$$

これらの関係は、初期温度 T_s とイベント時刻 t_0 が相対的な関係を持つことを表している。これは、初期温度 T_s またはイベント時刻 t_0 のどちらか一方が決まらなければ、もう一方が定まらず、曖昧性が生じることを表している。

3.3 過去イベント時刻推定の手掛かり

温度計測の開始時刻を t_s 、終了時刻を t_e とする。 $t_s \leq t \leq t_e$ の間に計測された $T(t)$ から過去イベントの時刻 t_0 を推定することを考える。過去イベントの時刻推定の曖昧性を取り除くためには、何らかの付加的な情報

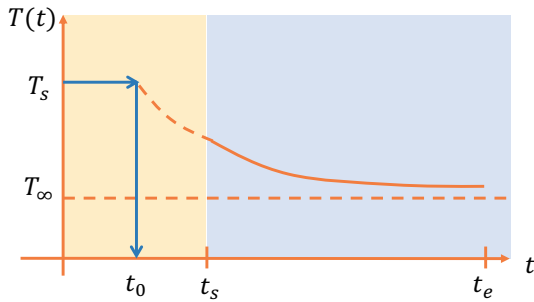


図 5 初期温度 T_s を既知とした場合のイベント時刻 t_0 の推定

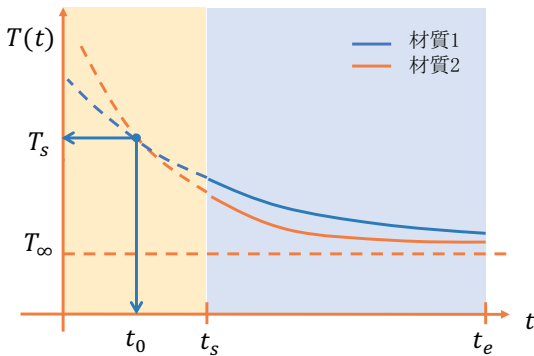


図 6 材質の違いによるイベント時刻 t_0 の推定

が必要となる。本研究では、2通りの制約を加えることで過去イベントの時刻推定を試みる。

1つ目は、図 5 に示すように、初期温度 T_s を経験的に決めることでイベント時刻 t_0 を推定する方法である。例えば、手や足など人体の接触によって温度変化が生じた場合には、初期温度を一般的な体表温度として大まかに定めることができる。他にも、ノート PC の電源を切った時刻、冷蔵庫で冷やされた食料品を取り出した時刻、風呂の保温を止めた時刻など、イベント発生直後の温度をある程度制限できるケースは多い。初期温度 T_s を決めることができれば、式 (1) によってイベント時刻 t_0 を推定することができる。

2つ目は初期温度に制約をかけない代わりに、モデル式であるニュートンの冷却式の定数 λ に注目する。この定数は冷却に伴う温度変化の速さを表す材質固有の値である。イベントを発生させる熱源そのものではなく、熱源に接触していた材質に残された熱の痕跡をカメラで捉える場合には、温度変化の速さは接触していた材質に依存する。ここで、図 6 に示すように、接触していた材質が複数あった場合を考える。これは、歩いた床にカーペットやタイルなど、異なる材質が含まれていた場合に相当する。ここで、イベント発生直後には同じ初期温度であったとしても、定数 λ が異なれば温度変化の様子も変わる。 $t_s \leq t \leq t_e$ の間に計測された 2 種類の $T(t)$ に対してそれぞれニュートンの冷却式を当てはめ、その交点を見つけることで初期温度 T_s とイベント時刻 t_0 を同時に求めることが可能となる。

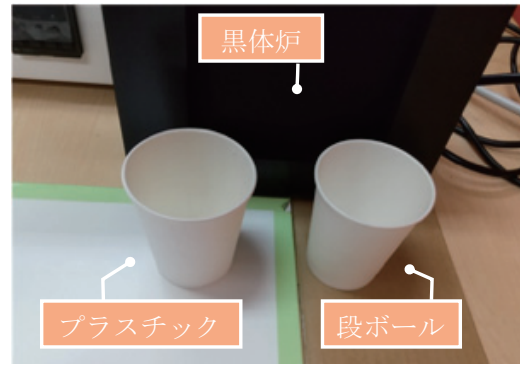


図 7 実験環境

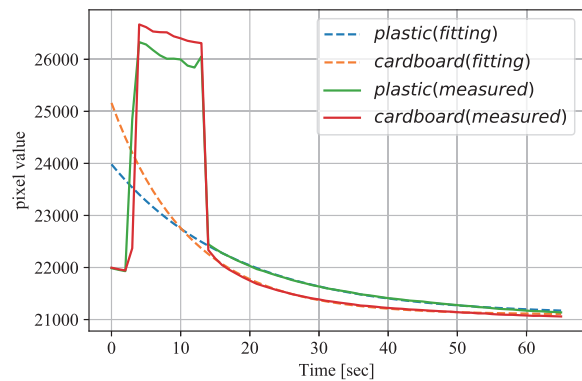


図 8 計測データへのニュートンの冷却式の当てはめ結果

4. 実験結果

4.1 実験環境と補正方法

イベント時刻の推定を行うための実験環境を図 7 に示す。約 100 度の熱湯を紙コップに入れ、プラスチックと段ボールの上に約 10 秒間置き、同時に撤去した。この撤去をイベントとする。2つの紙コップが置かれている場所の温度変化を遠赤外線カメラ (FLIR 社製 Boson640) を用いて約 20cm の距離から計測した。なお、イベント発生の実値を求めるために、温度変化は紙コップを置く前から計測している。

遠赤外線カメラから得られる画素値を温度に変換するために、温度を一定に保つことが可能な黒体炉を同時に撮影して補正用のデータとして利用した。まず、カメラ本体の温度変化の影響で温度が一定の黒体炉の画素値も変化してしまうため、黒体炉の最初の画素値からの差分で温度の経時変化を補正した。その後、測定時に撮影した 30 度の黒体炉の画素値と、あらかじめ撮影した 20 度の黒体炉の画素値から相対的に温度への変換を行なった。ただし、材質の放射率が不明の場合は正しい温度が求められない。本研究では、過去イベント時刻の推定が主目的であるため、初期温度は放射率が 100% と仮定したときの温度を参考値として推定する。

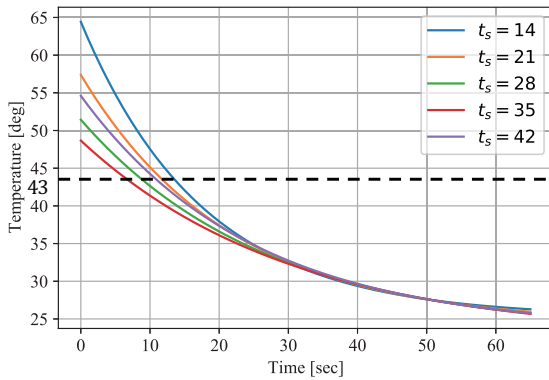


図 9 初期温度 T_s の固定によるイベント時刻 t_0 の推定

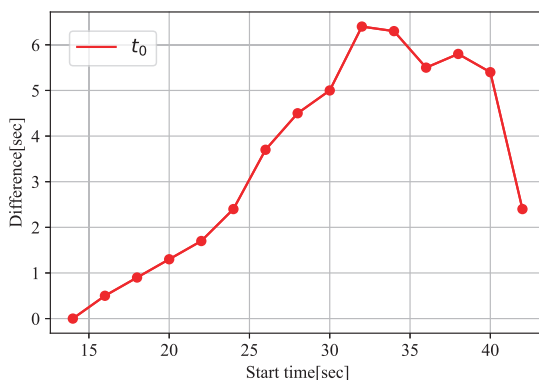


図 10 測定開始時刻 t_s と t_0 の誤差との関係

なお、プラスチックと段ボールでは放射率が異なるため補正が必要となる。本研究では、定常状態の温度は等しいと仮定し両材質の T_∞ が一致するように、2つの材質のうち放射率が高い方に合わせるように画素値を定数倍して補正した。補正後の計測データを図 8 に示す。

紙コップの撤去をイベントとすると、目視より約 14 秒の時刻で急激な温度変化が生じていることから、イベント時刻 $t_0 = 14$ を真値とする。初期温度は両材質で一致していないが、画素値が概ね 22,000 であり、温度に変換すると約 43 度なることから $T_s = 43$ を真値とする。

まず、計測データをニュートンの冷却式でモデル化できるかどうかを確認した。計測時間 $t_s \leq t \leq t_e$ はイベント発生直後の $t_s = 14$ から $t_e = 60$ とし、モデルを当てはめた結果を図 8 の点線で示す。この結果より、どちらの材質でもモデル式が当てはまることが確認できた。

4.2 初期温度 T_s の固定によるイベント時刻 t_0 の推定

イベント時刻 t_0 を推定する 1 つ目の方法として、初期温度 T_s を既知とする手法を試みた。実際の環境ではイベントの直後から測定できるとは限らない。計測開始時刻 t_s を遅らせた場合、推定したイベント時刻と真値との差が大きくなると予想される。そのため、 t_s を遅らせた場合のイ

ベント時刻 t_0 の推定への影響を確認した。

図 9 は下地がプラスチックの場合を示し、 t_s をそれぞれ 14, 21, 28, 35, 42 秒に設定した場合の推定結果である。5 通りの測定開始時刻によって推定したグラフの傾きが異なっていることが分かる。

初期温度 T_s は任意に設定できるが、今回は $T_s = 43$ に設定した場合の t_0 を推定した。計測開始時刻 t_s を 14~42 秒の間で変えた場合の真値 $t_0 = 14$ との誤差を図 10 に示す。この結果より、計測開始時刻 t_s を遅らせるにつれ、推定される t_0 の誤差が大きくなった。しかしながら、最も誤差が大きいときでも、計測開始時刻 t_s が 32 秒のときの 6 秒程度で抑えられている。

4.3 材質の違いによるイベント時刻 t_0 の推定

イベント時刻 t_0 を推定する 2 つ目の方法として、異なる下地の材質を用いることによるイベント時刻 t_0 の推定を試みた。下地の材質が異なることで定数入が異なり、温度変化の速さに違いが現れると考えられる。この違いにより 2 つの材質による推定データに交点が生じ、初期温度 T_s を定めずにイベント時刻 t_0 を求められるかどうかを確認した。

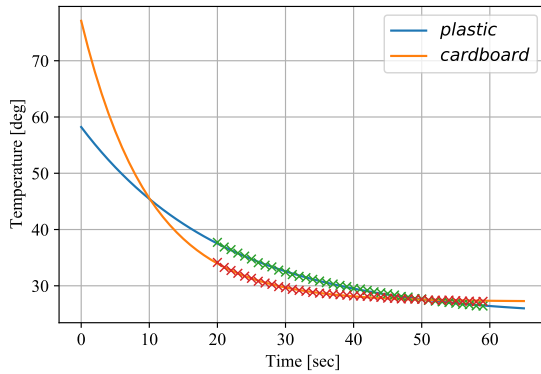
プラスチックと段ボールの 2 つの素材を用いて測定を行った。計測開始時刻を $t_s = 20$, $t_s = 28$ とした場合の推定結果の例を図 11 に示す。この結果より、 t_s を遅らせるとイベント時刻 t_0 が真値の 14 秒よりも過去に推定されていることがわかる。さらに t_s を遅らせた場合、28 秒以降での推定結果では交点が定まらなかった。この例ではイベントが発生した後 16 秒後までであれば時刻の推定が可能であると確認できた。

また、 t_s を 14~28 秒の 1 秒間隔に設定し、推定したイベント時刻 t_0 が真値とどれくらいの誤差を生じるかを確認した。図 11 の例にあるように、 t_s を遅らせると真値との誤差も増えてゆくと予想される。イベント時刻と初期温度の誤差を表したグラフを図 12 に示す。ここでも初期温度の真値は 43 度とした。

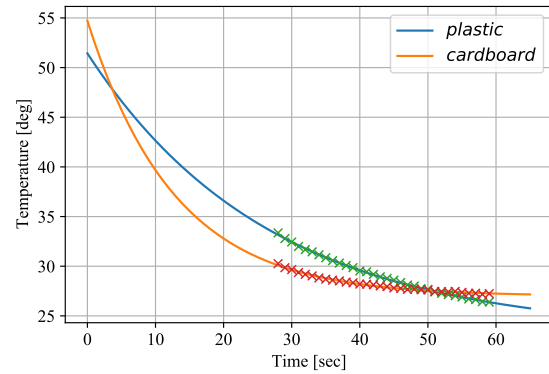
図 12 より、 t_s を遅らせるほど真値との誤差が大きくなっていることがわかる。推定イベント時刻は真値よりも小さい値、すなわちより過去にイベントが発生していたと推定された。また初期温度に関しては、イベント発生直後である 14 秒の地点の温度よりも高く推定されることがわかった。

4.4 足の熱痕跡の利用

これまでは熱湯を入れた紙コップを熱源として利用してきたが、より現実的なシーンとして、人が立っていたことで床に残る足跡の熱痕跡を利用した実験を行った。人の足を熱源とみなし、人の立ち去りをイベントとして、2 種類の異なる材質の床に残る熱痕跡の温度変化の違いを用いてイベント時刻の推定が可能かどうかを検証した。図 13 に



(a) $t_s = 20$ から $t_e = 60$ の計測データを利用



(b) $t_s = 28$ から $t_e = 60$ の計測データを利用

図 11 材質の違いによるイベント時刻推定の結果

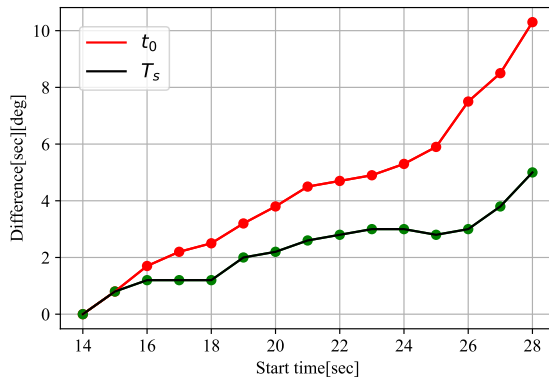


図 12 イベント時刻 t_0 と初期温度 T_s の真値と推定値との誤差

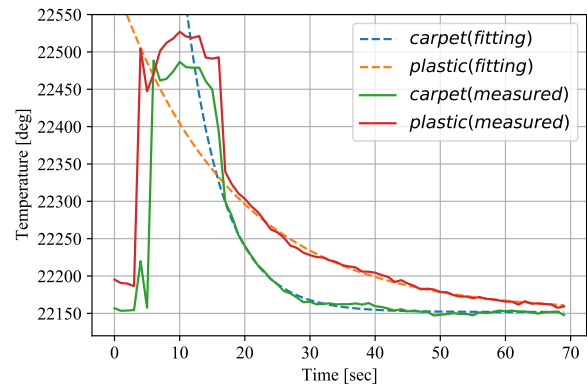


図 14 計測データへのニュートンの冷却式の当てはめ結果

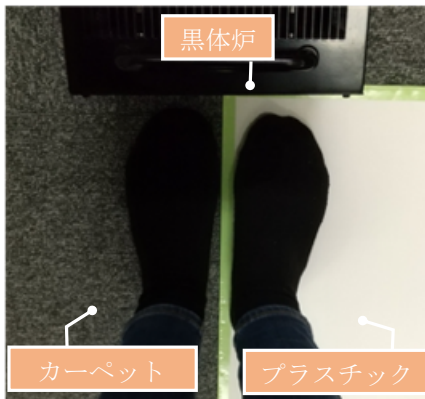


図 13 足跡を対象とした実験の環境

示すように、足跡の熱痕跡が残る下地としてカーペットとプラスチックの素材を用いた。測定データから材質の放射率の違いを補正した結果を図 14 に示す。温度変化の様子から、イベント時刻の真値が約 17 秒であることが目視で確認できる。

次に黒体の測定値を用いて温度に変換し、2つの異なる材質であるプラスチックとカーペットを用いて求めた交点を図 15 に示す。計測時間 $t_s \leq t \leq t_e$ はイベント発生直後の $t_s = 20$ から $t_e = 70$ と、 $t_s = 24$ から $t_e = 70$ に設定し

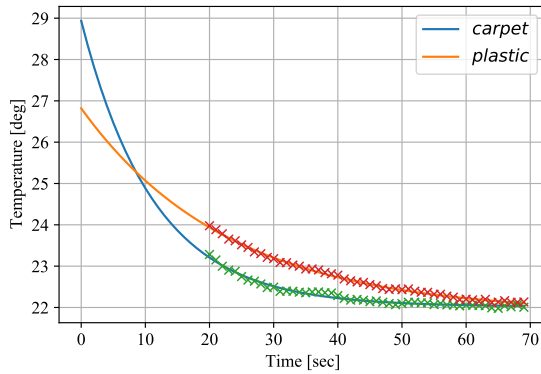
た場合の推定結果を示している。前節と同様に、 t_s を遅らせるとイベント時刻 t_0 が真値の 17 秒よりも過去に推定されていることがわかる。また、 t_s が 24 秒以降での推定結果では交点が定まらなかった。

次に、 t_s を 17~24 秒の 1 秒間隔に設定し、推定したイベント時刻 t_0 および初期温度 T_s と真値の誤差を算出した結果を図 16 に示す。この結果より、前節同様に t_s を遅らせるほどイベント時刻 t_0 と初期温度 T_s の推定値の真値との誤差は増加した。

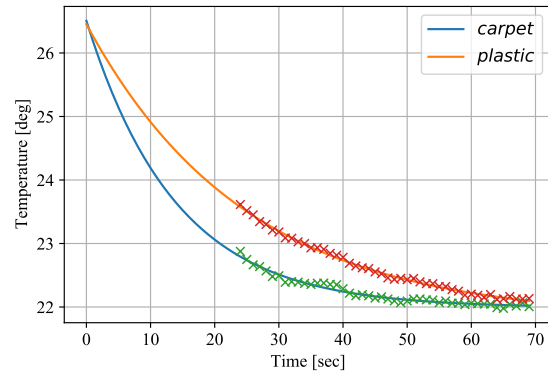
5. まとめ

本研究では、物や人が接触した後の温度変化を遠赤外線カメラで計測した情報から、過去のイベント時刻を推定することを試みた。遠赤外線波長帯域では、熱を持った物や人が対象物体に接触することにより温度変化が痕跡として残される。実験では観測された過去の情報からニュートンの冷却の法則を用いることでイベント時刻を推定できる可能性を示した。

イベント時刻と初期温度には相対的な関係があるため、初期温度を既知とした場合と対象が異なる材質の物体に接触していた場合の 2 つの条件で推定した。温度とイベント



(a) $t_s = 20$ から $t_e = 70$ の計測データを利用



(b) $t_s = 24$ から $t_e = 70$ の計測データを利用

図 15 材質の違いを利用したイベント時刻の推定結果

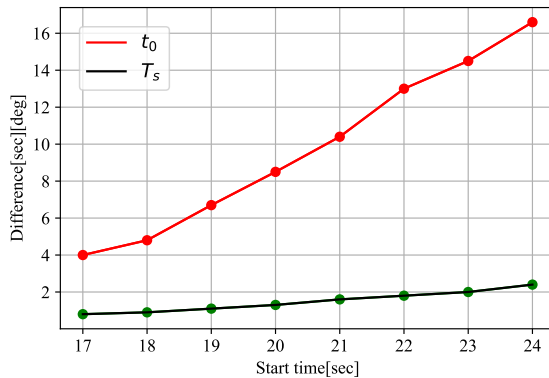


図 16 イベント時刻 t_0 と初期温度 T_s の推定誤差の変化

時刻の関係は対象物や場面により影響されるため、あらかじめ下地等の温度変化を計測すること、また対象物による初期温度が推定できれば精度は改善されと考えられる。また、計測開始時刻を遅らせた場合の推定値の補正や、イベント発生順序の推定が今後の課題である。

参考文献

- [1] Ma, W.-C., Huang, D.-A., Lee, N. and Kitani, K. M.: Forecasting Interactive Dynamics of Pedestrians with Fictitious Play, *CVPR*, pp. 774–782 (2017).
- [2] 稲田大亮, 辻 徳生, 原田研介, 田原健二, 河村晃宏, 諸岡健一, 倉爪 亮: 遠赤外線画像の熱痕跡を用いた接触履歴の検出と把持形態推定への応用, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2015), pp. 332–334 (2015).
- [3] 日本電信電話株式会社: 人が触れた場所を可視化する機能を実環境で簡単に実現～コロナ禍で知りたい: みんなが触ったのはどこ? ～, <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/05/31/210531a.html> (2021).