

複数の遠赤外線画像を用いた全周の接触領域検出と 把持形態推定への応用

○稲田大亮 (九州大学) 辻徳生 (金沢大学) 諸岡健一 (九州大学) 田原健二 (九州大学)
河村晃宏 (九州大学) 倉爪亮 (九州大学) 原田研介 (大阪大学)

1. 緒言

人は日常生活において、多様な把持形態を使い分けて物品を把持・操作し、様々な種類の作業を行っている。この把持を伴う作業をロボットで実現する方法の一つに、作業中の人の動作を計測し、それを基にロボットハンドの動作を生成する方法がある。これを実現するためには、計測したデータから人がどのような作業をしているかを正確に理解し、各ロボットのハンドの動作に変換する必要がある。

人の作業を分析・理解する方法として、把持形態 [1] の識別がある。例えば、把持形態が、指先で精密に物を掴む “precision grasp” と分かれば、その人が細かい物体の操作や、精密作業をしていると推定できる。また、手のひらまで用いて力強く物を把持する “power grasp” であれば、力が必要な作業の可能性が高いと分かる。このように、把持形態を識別することで、手だけでなく、それ以外の部位の状態や、把持対象物の性質も推定することができる。また、動作計測で、手の形状だけでなく、人と物体の接触領域を計測・解析できれば、より安定したロボットハンドの把持動作を生成することが可能となる。

しかし、把持形態の識別と接触領域の計測を同時に行っている研究はない。把持形態の識別においては、可視光画像を用いた手法 [2] があり、物体把持時の手の画像から、機械学習により把持形態を推定している。接触領域の計測で可視光画像を用いると、人の腕や把持対象物により接触位置が隠蔽されるため、正確な位置を得られない。一方、人と物体の接触領域を測定する研究として、素子分散型触覚センサを備えたデータグローブを手装着し、物体を把持したときの手の各部位にかかる圧力から、手と作業対象物体との接触状態を計測する方法 [3][4] がある。しかし、センサを装着するためグローブは厚く、このような分厚いグローブを手装着すると把持にも影響が出るため、自然な状態での把持を計測するのは困難である。また、接触範囲はセンサの分解能に依存するため、触覚センサを密に配置することが望ましいが、個々のセンサのサイズにより配置可能なセンサ数には限界がある。

そこで、本研究では、人の動作の観測からロボットハンドの動作の自動生成を実現するため、遠赤外線カメラにより人と物体の接触領域を抽出し、それに基づいて把持形態を推定する手法を提案する。物体を把持し (図 1 左)、手を離れた後に遠赤外線カメラで物体を撮影すると、図 1 の右の画像のように、物体が手から離れた後に、手が物体に接触した領域を熱痕跡として計測できる。本手法では、手に何も装着する必要がな

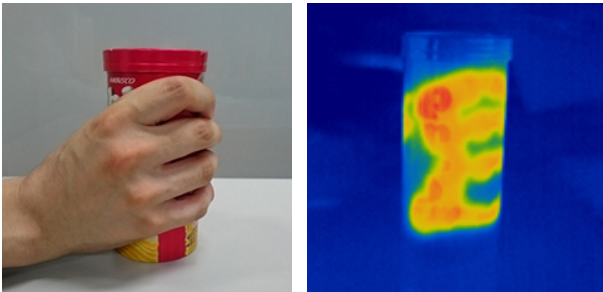


図 1 遠赤外線カメラによる熱痕跡画像の例



図 2 PI450

解像度	382 × 288 pixel
フレームレート	80 Hz
熱検知範囲	-20 ~ 1500 °C
視野	38 × 29 deg

表 1 PI450 の性能

く、自然な状態で作業を行うことができる。また、データグローブを用いる手法 [3][4] は、上述のように分解能に上限があるが、本手法ではカメラに写すことができる全範囲を高い分解能で計測できる。さらに、可視光画像を用いる手法 [2] と異なり、作業後に多方向から観察することが可能であるため、手や物体による死角を気にする必要がない。

我々は、一方向から撮影した画像を用いて接触領域の抽出と把持形態の識別を行った [5]。しかし、視点が変わると識別率が下がるという問題があった。そこで本稿では、回転テーブルに物体を載せ、多方向から撮影した画像を使って把持形態の識別を行う。ただし、対象物体は直方体形状に限定する。

2. 接触領域の計測

遠赤外線カメラ (Optris 社製・PI450) (図 2) を用いて、非接触で手と物体の接触領域を計測する手法に

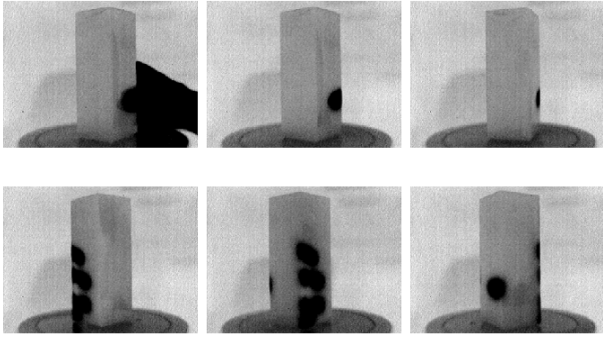


図3 回転テーブルを用いた物体の遠赤外線動画の例

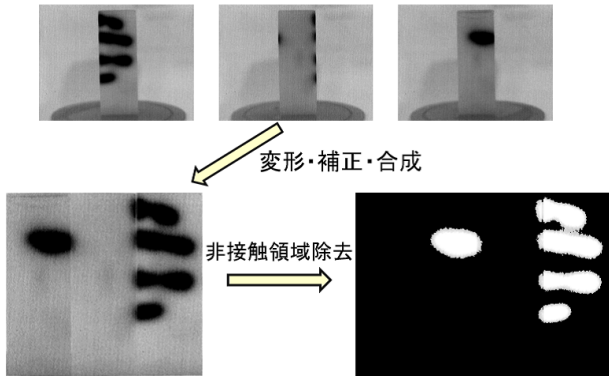


図4 全周熱痕跡画像生成の流れ

ついて述べる．遠赤外線カメラの性能 [6] を，表 1 に示す．まず，直方体の箱を被験者が把持し，遠赤外線カメラの前に設置された回転テーブルの中央に置き，物体から手を離す．次に，回転テーブルを回しながら，箱の全側面に残った熱痕跡を遠赤外線カメラで動画で撮影する．取得した動画例を，図 3 に示す．

熱痕跡を撮影した動画から，全周熱痕跡画像を作成する (図 4)．箱の 4 つの側面に対応する画像を動画から切り取り，側面の大きさが同じになるよう変形・補正を行う．補正後の 4 枚の画像を繋ぎあわせることで，箱を展開した 1 枚の全周熱痕跡画像を得る．この際に，手のひら部分が全周熱痕跡画像の中央にくるようにする．最後に，非接触領域を除去するため，適切な閾値以下の画素の輝度を 0 にし，接触領域の情報のみを残した画像に変換する．

3. 把持形態の推定

識別には，以下 3 種類の把持形態を扱う．

○ tip (図 6.1)

指先を立て，つまむように把持する．

○ body (図 6.2)

物体の側面を指の腹ではさみ把持する．このとき，指の腹は全体的に物体に接触する．

○ power (図 6.3)

手のひらまで物体に接触するように把持する．

図 5 から，把持形態により異なる熱痕跡が残っていることが確認できる．したがって，熱痕跡から把持形

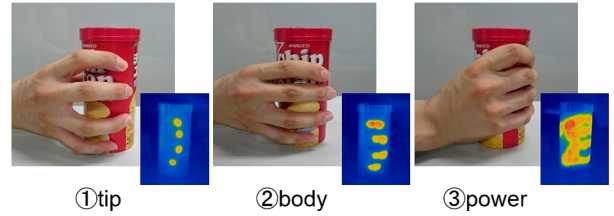


図5 識別に用いる把持形態とそれぞれの熱痕跡の例

態を識別するためには，それに有効な特徴量の選択が必要である．本研究では，把持形態を識別するための特徴量として，Hu モーメント不変量 [7] を用いる．Hu モーメント不変量とは 7 つの値からなる特徴量で，反転によって符号が逆転する 7 番目の値を除き，画像のスケール変化，回転，および反転に対して不変である．この特徴量を把持形態識別に適用した場合，特徴量は接触領域の形状のみに依存し，把持位置が変化しても同じ値であるため，把持形態の分類に有効である．濃淡画像に対して，位置 (x, y) にある画素の輝度値を $f(x, y)$ と表すと，その画像の $(i + j)$ 次のモーメント m_{ij} は

$$m_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j f(x, y) \quad (1)$$

である．また，画像の重心の位置 $(\bar{x}, \bar{y})$ は

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (2)$$

と表せる．さらに，正規化した中心モーメント η_{ij} を

$$\eta_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\mu_{00}^{(1+(i+j)/2)}} \quad (3)$$

$$\mu_{ij} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^i (y - \bar{y})^j f(x, y) \quad (4)$$

と定義すると，Hu モーメント不変量 $I_1 \sim I_7$ は次式で得られる．

$$I_1 = \eta_{20} + \eta_{02};$$

$$I_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + \eta_{11}^2;$$

$$I_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2;$$

$$I_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2;$$

$$I_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2];$$

$$I_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03});$$

$$I_7 = (3\eta_{21} - 3\eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[(3\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2].$$

認識手法は，k-nearest neighbor 法を用いる．画像の特徴量を 7 次元空間の点とし，それぞれのテストデータに対してユークリッド距離が近い k 個の学習データを探索する．選ばれた k 個の学習データの中で，一番多いクラスを識別結果とする．本実験では $k = 5$ として識別を行った．

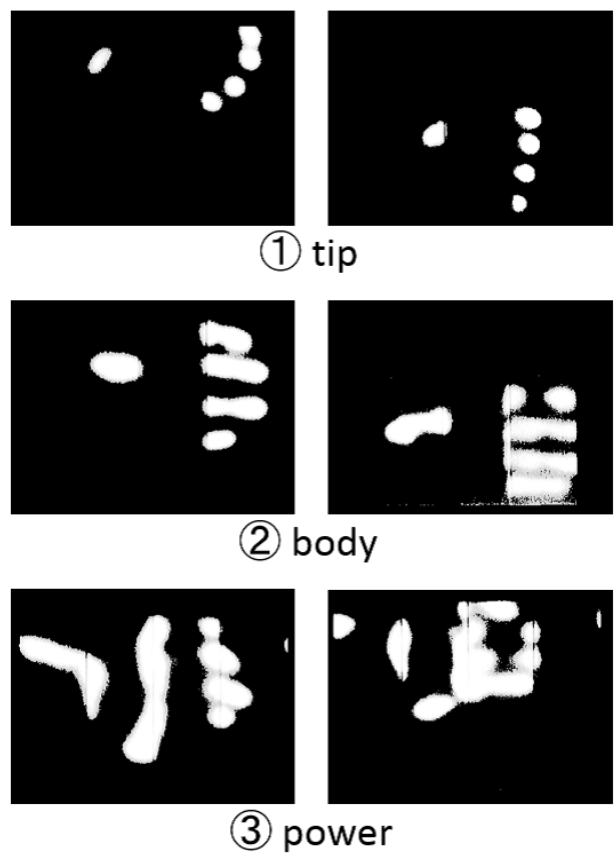


図 6 識別実験に用いた全周熱痕跡画像の例

4. 実験

提案手法の有効性を検証するために、熱痕跡画像を用いた把持形態の識別実験を行った。“body”,”power”,”tip”の三通りの把持形態について、5 人の被験者（男性 4 名、女性 1 名）ごとに直方体の箱を把持し、1 つの把持形態につき 4 回ずつ撮影を行った。1 回の把持動作の動画から、1 枚の全周熱痕跡画像を作成し、把持形態ごとに 20 枚、合計で 60 枚の画像を用意した。実際に使用した画像の例を、図 6 に示す。

本実験では、Leave-one-out により識別性能を検証した。具体的には、60 枚の中から 1 枚ずつテストデータとして選び、残りの 59 枚を学習データとした。識別結果を表 2 に示す。行が正解クラス、列が識別クラスを表す。

正解\識別	tip	body	power	識別率 [%]
tip	20	0	0	100
body	0	16	4	80
power	0	2	18	90

表 2 識別結果

全体の識別率は 90%であり、本手法が把持形態の推定に有効であることが分かる。不正解データは body と power がお互いに誤識別されているもののみであった。

直方体の把持においては被験者が力を込めても手のひらが接触し難く、power と body の熱痕跡の違いが小さくなる場合がある。この場合、異なる形態の特徴が、特徴空間内でお互いに近くにあり、そのため、k-nearest neighbor 法では識別が困難となる。また、対象物体の形状によっては特徴が出難い把持形態がある。したがって、今後は対象物体の形状、重さを変化させ、多様な状況においての熱痕跡を収集・解析し、対象物の特性と把持形態の関係、把持形態推定に有効な識別法などについて検討する。

5. 結言

本稿では、遠赤外線カメラによって取得した把持物体の熱痕跡画像を用いて、接触領域の検出と把持形態の推定法を提案した。直方体を把持したときの全周熱痕跡画像の作成とそれによる識別実験を行い、実験の結果により手法の有効性を確認した。今後は、さらに複雑な作業内容に関連付けて接触領域の抽出と機械学習による作業内容の識別を行う。また、接触領域と対象物体の 3D データを合わせることで、接触領域の立体データを作成し、これらの作業の学習結果から、ロボットの動作生成を実現する

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務と株式会社安川電機の支援により得られたものである。

参 考 文 献

[1] 鎌倉矩子: “手のかたち 手のうごき”, 医歯薬出版株式会社,1989

[2] YANG, Yezhou, et al. “Grasp Type Revisited: A Modern Perspective on A Classical Feature for Vision.” In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. p. 400-408, 2015

[3] 関喜一, 下条誠, 佐藤滋, 高橋昭彦 “高柔軟性をもつ把持圧分布センサの開発”, 計測自動制御学会論文誌, Vol.31, No. 9, pp. 1528-1530, 1995

[4] 松尾一矢, 村上剛司, 長谷川勉 “手作業認識のための触覚センサ素子配置の決定手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 93-96, 2008

[5] 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 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2015

[6] “Infrared camera optris PI 400 / PI 450”, <http://www.optris.com/thermal-imager-pi400-PI400.html>

[7] M. K. Hu, “Visual Pattern Recognition by Moment Invariants”, IRE Trans. Info. Theory, vol. IT-8, pp.179-187, 1962