

周囲の人物の存在を考慮した移動ロボットによる 照明変動下における人物追跡手法の構築

○磯邊柚香 (中央大学) 増山岳人 (中央大学) 梅田和昇 (中央大学)

1. 序論

特定の人物の追跡は、自律移動ロボットに求められる基本的な機能の一つである。この機能は、荷物運搬や見守りなど用途が幅広く、想定される運用環境も屋内外問わず、また日常生活から作業現場まで様々である [1]。

人物追跡の実現を目指した研究は数多く行われており、その多くでセンサとしてカメラが用いられている。これは環境中に存在する物体や人物と追跡対象を区別する際に、カラー画像から得られる色情報が有用であることによる。しかし、色情報は照明変動の影響を受けやすい点が課題点として挙げられる。人物追跡の機能は様々な場面での運用が想定されるため、照明条件が大きく変わる環境での追跡も行えなければならない。また、同時に、運用環境に複数の人物が存在することも考えられる。そのため、他の人物と追跡対象を見誤らないことだけでなく、オクルージョンへの対応も求められる。

照明変動への対応を図った研究 [2, 3] においては、オクルージョンの発生は考慮されていない。オクルージョンへの対応を図った人物追跡手法 [4, 5] も提案されているが、時系列フィルタに大きく依存したものが殆どである。これらの手法においては、時系列フィルタのパラメータ設定により、対応可能なオクルージョンの継続時間が制限される。これらの手法に対し、オクルージョン自体を検出しオクルージョン発生時と見失い時の処理を分けるシステムも提案されている [6, 7]。オクルージョンの発生を推定し適切な処理を施すことで、オクルージョンの長さに依存しない追跡が可能となる。しかし、これらの手法では、色情報を追跡対象の特徴として主に用いているため、照明変動のある環境での運用が課題となっている。以上より、時々刻々の照明変動と長時間のオクルージョンの両方への対応は、ロボットによる人物追跡における課題である。

本稿では、これらの課題の解決を図った、移動ロボットによる人物追跡手法を提案する。従来手法との比較実験、及び屋外の実環境における追跡実験を通して、提案手法の有用性を検証する。

2. 人物追跡手法

2.1 手法の概要

提案手法においては、ステレオカメラを用いる。まず、ステレオカメラから取得される3次元情報を用いて追跡対象の候補となる領域を抽出する。抽出された候補領域の色情報と位置情報に基づいて、追跡対象の検出を行う。また、フレーム毎にオクルージョンの状態を推定する。本手法では、追跡対象と周囲の物体や人物との位置関係により、オクルージョンの状態を3

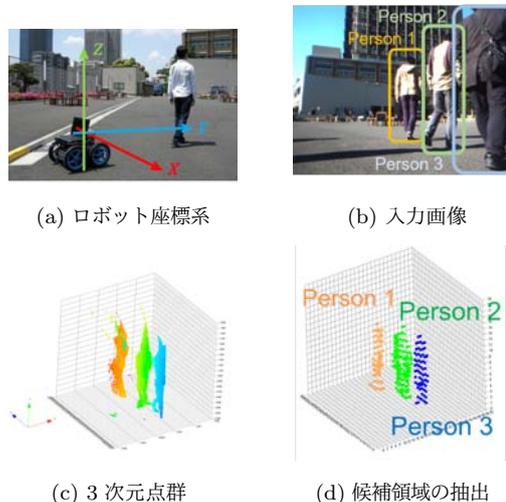


図1 追跡対象の候補領域の抽出

つに分ける。この状態分けにより、追跡対象が未検出となるフレームにおける処理をオクルージョン発生時と見失い時で区別することが可能となる。

2.2 候補領域の抽出

従来研究 [8] において提案した人物候補領域の抽出処理を適用する。ステレオカメラより得られる3次元情報を、図1(a)で示されるロボット座標系の3次元空間内にプロットし点群を作成する(図1(b), 1(c))。この3次元空間をボックスに分割し、近傍ボックスをラベリングする。また、Mean-shift法を用いて、領域分割・統合処理を行う。得られたボックス群の大きさにより、追跡対象の候補となる領域を抽出していく(図1(d))。

2.3 追跡対象の判別

色情報と位置情報を特徴とし、抽出された候補領域から追跡対象を判別する。この際、照明変動にロバストな追跡対象の検出手法 [8] を用いる。各特徴について、追跡対象と各候補領域の相違度を算出する。各相違度に照明変動に応じて重みづけを行った評価値により、追跡対象を決定する。

各候補領域に対応するカラー画像の画素値より色ヒストグラムを作成する。色情報として、照明に頑健な色相と彩度を用いる。予め保存しておいた追跡対象の色

ヒストグラムとの相違度 R_{color} を次式により算出する.

$$R_{color} = \sqrt{1 - \sum_h \sum_s \sqrt{H_{input}(h, s)H_{template}(h, s)}} \quad (1)$$

$H_{input}(h, s)$, $H_{template}(h, s)$ はそれぞれ注目している領域の色ヒストグラム, 保存しておいた追跡対象の色ヒストグラムにおける色相 h , 彩度 s での正規化された頻度を表す.

また, 追跡対象の前フレームでの位置から現フレームでの位置をカルマンフィルタにより予測する. 予測した位置と各候補の位置の相違度 E_{target} を算出する.

$$E_{target} = k\sqrt{(X_s - X_e)^2 + (Y_s - Y_e)^2} \quad (2)$$

(X_s, Y_s) はロボット座標系での候補の位置, (X_e, Y_e) は追跡対象人物の予測位置を示す. ここで, k は E_{target} を正規化するための定数である.

各相違度に照明変動に応じて重みづけを行い, 以下の式で定義される評価値 D を算出する.

$$D = \begin{cases} (1 - \alpha)R_{color} + \alpha E_{target} & (\alpha < \alpha_{th}) \\ E_{target} & (otherwise) \end{cases} \quad (3)$$

ただし, α は照明変動を表すパラメータでホワイトバランスの変化量 $|W|$ を用いて $\alpha = p|W|$ と定める. また, p は定数で, $0 \leq \alpha \leq 1$ となるように定められる. 式 (3) 中で, α_{th} は照明変動のしきい値である. ホワイトバランスの変化が大きく色情報も大きく変わるとき, α は α_{th} 以上の値となる.

2.4 オクルージョン対策処理

2.4.1 オクルージョン状態に基づく追跡対象情報更新

従来手法と同様に, 追跡対象と周囲の人物の位置関係により, オクルージョン発生状態を3つに大別する.

STATE 1: オクルージョンが発生していない状態

STATE 2: オクルージョンが発生しているが追跡対象が検出されている状態

STATE 3: オクルージョンにより追跡対象が検出されていない状態

図2に追跡対象と周囲の人物, 及びステレオカメラの位置関係の俯瞰図を示す. ただし, 青い矩形はステレオカメラを, 点線はステレオカメラの各レンズで撮影可能な範囲を表している. 同図を用いて, それぞれの状態を定義し, 状態に応じて処理を施す.

(1) STATE 1

追跡対象の領域の右左端にマージンを設けた位置とステレオカメラの各レンズとを結んだ直線に囲まれる領域を Region A とする. Region A に他の人物や物体が存在しない状態 (図2(a)) を STATE 1 と定義する. このとき, 遮蔽物の存在がないことから, 追跡対象の正確な色情報が得られると考えられる. そこで, 時々刻々の照明環境に対応するために追跡対象の色情報の更新は必須となるため, STATE 1 のフレームにおいては色

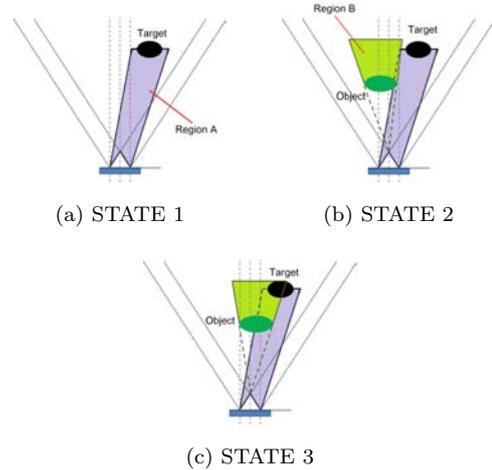


図2 オクルージョン状態

情報の更新処理を行う.

(2) STATE 2

図2(b)のように, Region A に他の物体や人物が存在しているが, 追跡対象が検出されている状態を STATE 2 とする. Region A に存在する物体や人物によって遮蔽される領域を Region B と設定する.

(3) STATE 3

追跡対象が検出されていないフレームにおいて, 図2(c)のように Region B に追跡対象の予測位置が入っている場合を STATE 3 とする. このとき, 追跡対象が検出されていない原因はオクルージョンにあるため, 追跡対象に対するカルマンフィルタの継続時間を延長する処理を行う.

2.4.2 オクルージョンの原因となる人物の対応付け

オクルージョンへのロバスト性を向上させるために, 追跡対象以外の周囲の物体や人物もフレーム間で対応付ける. 対応付けには, カルマンフィルタにより予測した周囲の物体や人物の位置情報を用いる. また, 処理速度の低下を抑えるために, STATE 2, STATE 3 において, 追跡対象の検出位置 (STATE 2) または予測位置 (STATE 3) より 30cm 奥からカメラまでの間に存在する物体や人物のみ対応付けのために登録する. 処理手順を以下に示す.

- 1: 直前のフレームが STATE 2 か STATE 3 でかつ照明変動のパラメータ α が 0.5 以上のとき, 追跡対象との相違度 E_{target} がしきい値以下の人物に対して, その位置と登録されている物体や人物の位置の相違度 E_{around} を式 (2) と同様に求める. 追跡対象との相違度 E_{target} の値が E_{around} より小さくなる人物の中で, E_{target} が最小の人物を追跡対象とする. それ以外の領域は周囲の人物であるとみなす.
- 2: オクルージョン状態の推定を行う.
- 3: 周囲の物体や人物の対応付けを行う. 対応付かない場合や登録した物体や人物に対して対応付けが

表1 オフライン実験環境

シーン	照明条件 (フレーム数)	平均人数 (追跡対象以外)	オクルージョン 回数/ 平均フレーム数/ 最大フレーム数	陰の発生
1	側光 (245)	2.3	11	建物の陰
			5	
			20	
2	側光 (76)	1.2	2	建物の陰
			6.5	
			12	
3	順光 (317)	1.1	11	×
			5	
			25	



(a) シーン 1



(b) シーン 2



(c) シーン 3

図3 オフライン実験画像

重複する場合は、新たに位置を登録する。

- 登録された全ての位置情報についてカルマンフィルタを更新する。

3. 実験

3.1 オフライン実験

提案手法の有用性を検証するため、従来手法 [8] との比較実験を行った。実験環境は照明変動があり周囲に複数の人物が存在する屋外環境とした。実験環境の詳細を表 1 に示す。なお、実験条件を一致させるために、この実験では予め取得した画像に対し、オフラインで各手法を適用した。実験に用いる画像は、歩行中の特定の人物を追跡するように移動ロボット Blackship (セグウェイジャパン) を操作した際にロボットに搭載のステレオカメラ Bumblebee2 (Point Grey Research) より取得された。取得したカラー画像の例を図 3 に示す。なお、各手法で用いる相違度算出式 (式 (3)) における各パラメータは $k = 1.0\text{m}^{-1}$, $p = 0.25$, $\alpha_{th} = 0.8$ とした。また、本研究では、照明変動や周囲の人物の存在によらず、正確に見逃しなく追跡対象を検出することを目指している。そこで、検出の正確性と網羅性を示す 2 つの評価値により、各手法の評価を行う。

$$\text{適合率} = \frac{A}{A+B}, \quad \text{再現率} = \frac{A}{A+C}$$

A: 追跡対象人物が正しく検出されたフレーム数

B: 追跡対象人物以外が検出されたフレーム数

表2 オフライン実験結果

シーン	提案手法		従来手法	
	適合率	再現率	適合率	再現率
	[%]	[%]	[%]	[%]
1	98.7	81.9	84.2	87.4
2	100	100	100	100
3	100	100	100	100

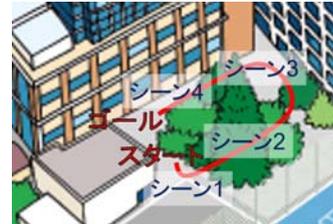


図4 実験経路

C: 追跡対象人物が存在していたが何も検出されなかったフレーム数

なお、この二つの評価値にはトレードオフの関係があり、手法中のパラメータ設定により値が変動しやすい。提案手法と従来手法のパラメータは、誤検出よりも未検出が優先されるように設定される。これは、実環境における追跡を考慮し誤追跡を避けるためである。

実験結果を表 2 に示す。表より、シーン 1 において、提案手法では従来手法より高い適合率を得られたが、再現率は低下していることがわかる。これは、シーン 1 での照明環境の大きな変化とそれに伴う最大 25 フレーム (約 3.7 秒) のオクルージョンの際に、従来手法では誤検出が起こり、提案手法では誤検出は少なくなったが未検出となったことによる。提案手法での周囲の人物の対応付けにより誤検出を減らすことが出来たが、長いオクルージョンの最中に位置推定誤差が蓄積して再度追跡対象が画像中に現れた際に、追跡対象以外として対応付けされてしまったため、追跡対象を再検出するまで未検出が続いていた。実環境で運用する際には、未検出よりも誤検出による誤追跡を避けなければならないため、提案手法は従来手法より改善したといえる。しかし、本実験のように色情報と位置情報のどちらも脆弱となる環境に対応していく必要がある。そのために、新たな特徴量を導入することや見失い時に再検出するための適切な処理を導入することを検討している。

3.2 オンライン実験

提案手法を用いて、実環境において移動ロボットによる追跡実験を行った。移動ロボットには Blackship (セグウェイジャパン) を、ステレオカメラには Bumblebee2 (Point Grey Research) を使用した。実験では 122 秒の追跡を行い、1479 枚の画像を取得した。図 4 に示す経路を 4 つのシーンに大別する (表 3)。

表3 オンライン実験環境

シーン	照明条件 (フレーム数)	平均人数 (追跡対象以外)	オクルージョン 回数/ 平均フレーム数/ 最大フレーム数	陰の発生
1	逆光	0.6	4	×
			1.5	
			3	
2	側光	1.6	18	木の陰
			3.7	
			10	
3	順光	1.7	20	×
			4.4	
			11	
4	順光	1.0	5	建物の陰
			4.2	
			5	



(a) シーン 1



(b) シーン 2



(c) シーン 3



(d) シーン 4

図5 追跡の様子



(a) シーン 1



(b) シーン 2



(c) シーン 3



(d) シーン 4

図6 追跡対象の検出結果

実験の様子を図5に、追跡対象の検出結果を図6に示す。図6で赤い矩形は追跡対象領域を、赤い点はその重心位置を表す。評価には、3.1項で定義した適合率と再現率を用いる。表4に評価値算出結果を示す。

実験の結果、提案手法により、98%以上の適合率、90%以上の再現率が得られた。しかし、誤検出や未検出が起こる場面もあった。誤検出の原因として、追跡対象とオクルージョンの原因となる人物の距離が近いときに、領域分割が正しく行われず、誤った領域が検出されてしまったことが挙がる。また、オクルージョン発生後でホワイトバランスの変化が大きいときに未検出

表4 実験結果

シーン	フレーム数	適合率 [%]	再現率 [%]
1	80	100	100
2	387	98.7	93.4
3	603	100	90.1
4	409	100	100

となっていた。未検出フレームを減らすために、照明変動のパラメータを改良することを検討している。また、オクルージョン中の追跡対象の位置推定をより正しく行えるように、様々な時系列フィルタを試し最適なものを選定することを考えている。

4. 結論

本稿では、ステレオカメラを用いた、移動ロボットによる人物追跡手法の提案を行った。照明変動と周囲の人物によるオクルージョンを課題として挙げ、その解決を図った。照明変動に頑健な追跡対象の検出手法に加え、オクルージョンの状態を毎フレーム取得し、その状態に応じて処理を施す手法を提案した。提案手法の有用性を示す実験では、従来手法よりも高い適合率を得られたが再現率は低下した。また、実環境での実験においては、98%以上の適合率、90%以上の再現率で追跡を行うことに成功した。

今後は、より混雑し、照明変動の厳しい環境での追跡に取り組んでいく。そのために、照明変動を示すパラメータの改良や、時系列フィルタの検討を行う。

参考文献

- [1] “Doog Inc. (株式会社 Doog)”, <http://www.doog-inc.com/>
- [2] E. Petrovic *et al.*: “Stereo Vision-Based Human Tracking for Robotic Follower,” *Int. Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, pp. 1-10, 2013.
- [3] H. Takemura *et al.*: “Development of Vision Based Person Following Module for Mobile Robots In/Out Door Environment,” *Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 1675-1680, 2009.
- [4] N. Bellotto and H. Hu: “Computationally efficient solutions for tracking people with a mobile robot: an experimental evaluation of Bayesian filters,” *Int. Journal of Autonomous Robots*, Vol. 28, Issue 4, pp. 425-438, 2010.
- [5] P. Chakravarty and R. Jarvis: “Panoramic Vision and Laser Range Finder Fusion for Multiple Person Tracking,” *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2949-2954, 2006.
- [6] P. Bai *et al.*: “Person-Tracking with Occlusion Using Appearance Filters,” *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 1805-1810, 2006.
- [7] G. Cielniak *et al.*: “Data association and occlusion handling for vision-based people tracking by mobile robots,” *Int. Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, Issue 5, pp. 435-443, 2010.
- [8] 磯邊柚香 他: “オクルージョンを考慮した移動ロボットによる人物追跡”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演集, 2A1-U04, 2015.