

ステレオカメラの自動調整機能を利用した照明変動の検知に基づく移動ロボットによる人物追跡

磯邊 柚香^{*1}, 増山 岳人^{*2}, 梅田 和昇^{*2}

Target Tracking with a Mobile Robot Based on Detection of Illumination Variation Using Automatic Adjustment of a Stereo Camera

Yuzuka ISOBE^{*1}, Gakuto MASUYAMA^{*2}, and Kazunori UMEDA^{*2}

^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*2} Faculty of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

This paper presents a robust target-tracking system for a mobile robot. The robot is supposed to equip a stereo camera. The stereo camera can obtain both color and 3D information, however, color information can be easily influenced by illumination variation. Two kinds of illumination variation are specified using white balance, shutter speed, and gain. We then introduce three parameters representing the illumination variation. Suitable parameters are designed based on the result of verification experiments. Weights of color and location features are determined by the parameters in order to distinguish a target from others. In real world environments with frequent and extreme illumination variation, the effectiveness of the proposed system is tested.

Key Words : Target Tracking, Illumination Changes, Mobile Robot

1. 序 論

自律移動ロボットに求められる代表的な機能の一つとして、特定の人物の追跡が挙げられる。人物追跡は、荷物運搬や監視、見守り等での場面において必須の機能である。また、その用途の多様性から、運用される環境も工場から日常生活まで幅広い。運用環境が屋内外を問わず、またターゲット以外の物体や人物が存在する環境も想定される。

これまでに実環境での運用を目標とした人物追跡ロボットの研究が盛んに行われてきた。また、その多くでカメラがセンサとして使用され、カラー情報を用いた人物追跡が行われる^{(1)~(3)}。しかし、カラー情報は照明の変化の影響を受けやすい問題がある。さらに、使用環境にターゲット以外の人物が存在する場合、カラー情報の変化はターゲットを誤検出する要因となる。

Satake ら⁽⁴⁾や Petrovic ら⁽⁵⁾は、視差情報や SIFT 特徴量を用いた追跡手法を構築している。これらは照明変動の影響を受けにくい手法ではあるが、計算コストの増加やターゲット固有の特徴が現れにくい点に問題

がある。よって、ターゲットの特徴としては、照明変動の問題は付随するものの、計算負荷が比較的小さく、加えて周囲の人物との区別も明確なカラー情報を用いることが有用である。

カラー情報をターゲットを判別するための特徴の1つとして用いた照明変動に頑健な人物追跡手法も数多く提案されている。Cielniak ら⁽⁶⁾はカラー情報と熱情報を用いた追跡手法を提案している。また、Fritsch らの手法⁽⁷⁾ではカラー情報以外に脚部の形状等も特徴量として用い、カラー情報が使用不可能な環境にも対応している。これらの手法は複数の特徴を用いているものの、屋外や複数の人物が存在する環境ではターゲットの特徴を得ることが困難な場合もある。

Takemura ら⁽⁸⁾は、各センサで得られた距離情報とカラー情報を組み合わせて追跡を行い、屋外環境での追跡に成功している。ターゲット領域の抽出に色相と彩度の特徴を用いているが、これらの特徴は光源の方向や種類の変化には弱い面もある。

そこで、本論文では照明が多様であり、かつ複数の人物が存在する環境での移動ロボットによる人物追跡手法を提案する。提案手法では、ステレオカメラを用い、視差情報とカラー情報により追跡を行う。まず、照明環境に依らず取得可能な3次元情報を用い、ター

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) isobe@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

^{*2} 中央大学理工学部精密機械工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) {masuyama, umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

ゲットの候補領域を抽出する．候補領域の中から，カラー特徴と位置特徴を照明変動に応じて組み合わせてターゲットを判別する．周囲の物体や人物によるオクルージョンに対応するためにオクルージョン検出および対策手法を導入する．カメラ機能の設定に関する検証実験と実環境での追跡実験により，提案手法の有用性を検証する．

2. 照明変動のパラメータ

2.1 従来手法における問題 筆者らは従来研究⁽⁹⁾において，カメラのオートホワイトバランス補正值の変化量を照明変動を示すパラメータとして用いた追跡システムを構築している．ホワイトバランス変化とカラー情報の変化との関係を基に，ホワイトバランスの変化量に応じてターゲット検出に使用するカラー特徴と位置特徴の間に重みづけをし，照明変動への対応を図っている．ホワイトバランスは画像中の色味の変化を補正する機能であるが，照明変動には光源方向や種類に依存する色味変化の他に，光量に依存する明るさの変化も考えられる．従来手法は明るさ変化によるターゲットのカラー特徴の変化を考慮していないといえる．以上を踏まえ，提案手法では色味変化と明るさ変化，それぞれの度合いを表すパラメータ P_c , P_l を導入する．従来手法と同様に光源方向や種類による画像中のカラー情報の変化を示すカメラ機能である，オートホワイトバランスによって色味変化のパラメータ P_c を定義する．ホワイトバランスと同様，一般的なカメラに搭載されている，シャッタースピードとゲインにより明るさ変化のパラメータ P_l を定義する．また，カラー特徴の取得しやすさを示すパラメータ D_l を導入する．提案したパラメータの変化に応じて，カラー特徴と位置特徴の間に重みづけを行う．次節で以上の明るさ変化に関する各パラメータの導出，および色味変化を示すパラメータの検証を行う．

2.2 パラメータ P_c , P_l の定義 (実験 I) 照明変動のパラメータを定義するために，まず照明変動による画像中のカラー情報の変化を検証する実験を行う．各パラメータの要素となる，ホワイトバランス，シャッタースピード，ゲインの3つのカメラ機能の出力値の変化を確認する．

2.2.1 実験条件 実験環境を図1に示す．スタンドにセットした白熱電球により照度を変化させ，白い壁に貼った画用紙（緑）をステレオカメラで撮影する．画像中の画用紙の色情報および撮影時の各カメラ機能の出力値を取得する．実験には Bumblebee2(Point Grey Research) をステレオカメラとして用いた．使用したカメラにおける各カメラ機能の出力値が取得

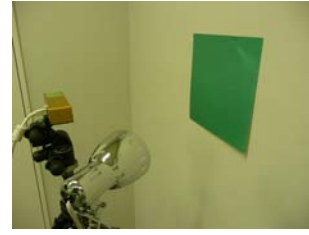


Fig. 1 Experimental environment

Table 1 Camera parameters

Setting	Range
White Balance	Red gain (R): 0 to 1023
	Blue gain (B): 0 to 1023
Shutter speed (S)	0 to 707
Gain (G)	0 to 683

Table 2 Experimental condition

Condition	I	II	III
White balance	Auto	Auto	Fixed
Shutter speed	Auto	Fixed	Auto
Gain	Auto	Fixed	Auto

値の範囲を表1に示す．実験では，ホワイトバランスの各ゲインの変化量 $|\Delta R| + |\Delta B|$ ，シャッタースピードを最大値 S_{max} で正規化した S/S_{max} ，ゲインを最大値 G_{max} で正規化した G/G_{max} を取得する．また，表2に示す3条件で照度を変えて実験を行う．なお，照度が最大のときは全てのカメラ機能はオート設定とする．それ以外の照度のとき，カメラ機能を固定する条件においては，実験中で照度が最大のときに観測された出力値を用いる．図2は実験した各照度における条件Iでの画像の取得例である．図中の画像内の赤い矩形はカラー情報を取得する範囲である．各条件について照度が最大となる際のカラー情報をテンプレートとし，それ以外の照度でのカラー情報との相違度を次式により算出する．

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

$H_{input}(h,s)$, $H_{template}(h,s)$ はそれぞれ各照度での取得画像，テンプレート画像における色相 h ，彩度 s での正規化された頻度を表す．

2.2.2 実験結果 各条件間における相違度 R_{color} ，ホワイトバランス補正值，シャッタースピード，ゲインの変化を図3に示す．図3はそれぞれ条件I, II, IIIでの結果である．なお，照度値はカラー情報取得範囲における平均値である．これより，実験に用いた全てのカメラ機能の出力値は，相違度の変化に追従する傾向を持つことがわかる．また，ゲインに関して，シャッ

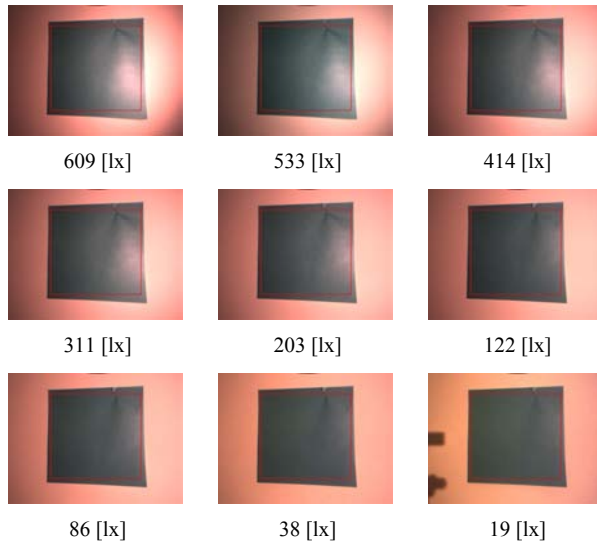


Fig. 2 Captured images under each luminance

タースピードが最大値 (20.85 [ms]) を取るまで低い値をとり、シャッタースピードが最大値の間において値の変動が起こることが見てとれる。

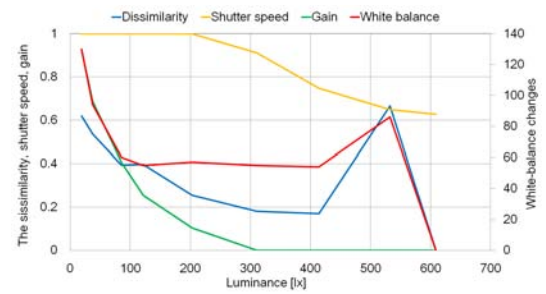
カラー情報の相違度の変化に伴って各カメラ機能の出力値も変化する傾向により、画像の色味変化を示すパラメータ P_c 、明るさ変化を示すパラメータ P_l を決定する。追跡における、ターゲットのカラー特徴取得フレームと現フレームでのホワイトバランス、シャッタースピード、ゲインの差 (ΔR および ΔB , ΔS , ΔG) により、各パラメータは各出力値の関数として以下のように定義する。

$$P_c = f(|\Delta R| + |\Delta B|) \quad (2)$$

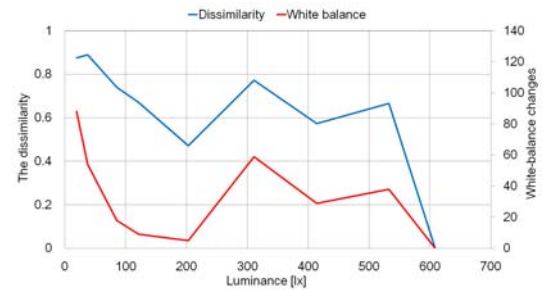
$$P_l = g(|\Delta S|, |\Delta G|) \quad (3)$$

2.3 パラメータ D_l の定義 (実験 II) カラー特徴を取得する際の問題として、逆光や陰の中ではターゲットのカラー情報に特徴が出にくいことが挙げられる。これらの環境では、画像中の彩度の値が一様に低くなるのが原因である。また、逆光や陰の環境では、カメラに入射する光量がそれ以外の環境と著しく異なる。そこで、実験 I と同様にカメラ機能のシャッタースピードとゲインを用い、カラー特徴の取得しやすさを示すパラメータ D_l を作成するための実験を行う。

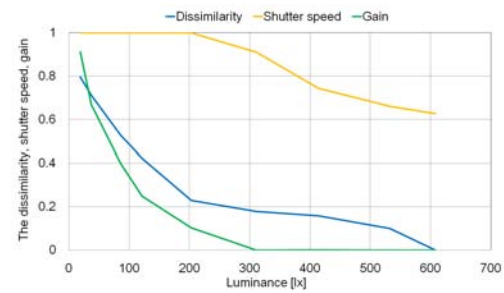
2.3.1 実験条件 実験においては、移動ロボット (Blackship, Segway Japan) に設置したステレオカメラに映るように、ロボット前方に画用紙 (緑) を配置する (図 4)。カメラ画像中の画用紙の HSV の各色情報の変化やカメラ機能の出力値の変化を検証する。また、各出力値を最大値で割り正規化した値の和 (式 (4)) と



(a) Condition I



(b) Condition II



(c) Condition III

Fig. 3 The changes in the dissimilarity and each camera settings



Fig. 4 Experimental environment

して S と G の関数 $h(S, G)$ を算出する。

$$h(S, G) = k_{dS} \frac{S}{S_{max}} + k_{dG} \frac{G}{G_{max}} \quad (4)$$

ただし、 k_{dS} や k_{dG} は定数である。なお、実験 I よりシャッタースピードやゲインの値は細かい変動が多いことが見受けられたため、 S や G の値を量子化して使用する。実験 I の各照度での標準偏差の平均値に基づいて量子

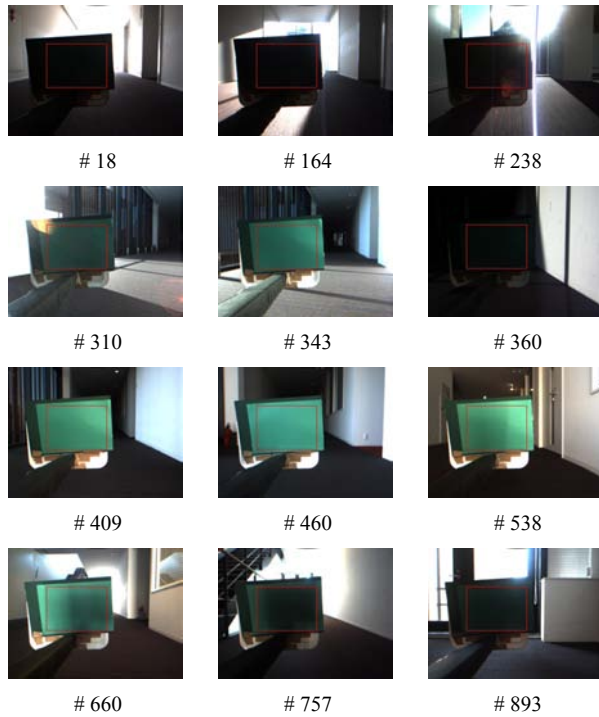


Fig. 5 Captured images in indoor environment

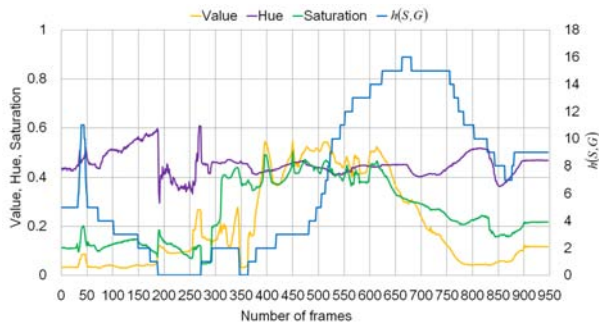


Fig. 6 The result of acquiring color and luminance parameter

化すると、それぞれの最大値は $S_{max} = 177$, $G_{max} = 342$ となる。また、実験においては $k_{dS} = k_{dG} = 10.0$ とする。実験環境は屋内で、逆光等の極端に光量が増えたり陰の中等の光量が減る照明条件を含む。実験では 947 フレームを取得した。得られた画像の例を図 5 に示す。図中で赤い矩形の範囲のカラー情報を取得し、HSV 色空間の各値を算出する。

2.3.2 実験結果 実験の結果、カラー情報取得範囲における HSV 色空間の各値の変化と $h(S, G)$ の変化は図 6 のように得られた。

カラー情報の相違度算出に用いているのは色相と彩度であるが、色相は色味を表す要素であり $h(S, G)$ の変化の影響を受けない挙動を示していることがわかる。

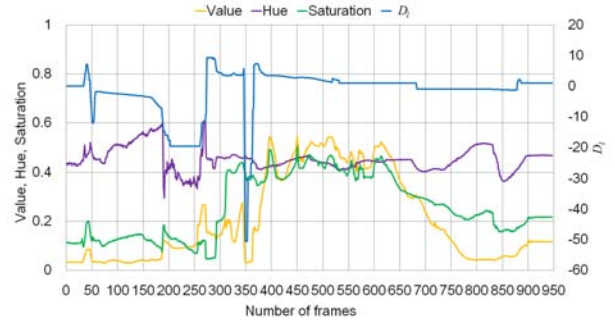


Fig. 7 The result of modifying the luminance parameter

彩度に関しては、変化の様子が明度と類似するものとなっている。また、彩度や明度は $h(S, G)$ の傾きが正の範囲では値が高く、負の範囲では値が低くなる傾向が見て取れる。そこで、 $h(S, G)$ の現フレームより 10 フレーム前までの値に対して最小二乗フィッティングを行い、追跡時の局所的な傾き情報 g_h を取得する。さらに太陽光の影響が大きいとき、屋外などでシャッタースピードが変動する環境であれば、シャッタースピード S/S_{max} は 0 に近くなる。また、屋内などでシャッタースピードが最大値を取っている環境では、ゲイン G/G_{max} も低い値をとる傾向にある。そこで、傾きに $S < S_{max}$ のときには S/S_{max} の逆数を、 $S = S_{max}$ であれば G/G_{max} の逆数をかける。以上より得られる関数を、 D_l としカラー特徴の取得しやすさを示すパラメータとする (式 (5))。

$$D_l = \begin{cases} g_h \frac{S_{max}}{S} & (S < S_{max}) \\ g_h \frac{G_{max}}{G} & (S = S_{max}) \end{cases} \quad (5)$$

D_l の値の変化と彩度や明度の変化との対応を示したものが図 7 である。 D_l の値が正である範囲はカラー特徴を取得しやすい環境である。 D_l の値が負である場合には、その大きさによって取得しやすさが変化する。

この結果より、カラー特徴取得時の傾き情報 D_l の値も、カラー情報と位置情報への重みとしてターゲット判別に用いる。

3. 提案手法

3.1 ターゲット候補領域の抽出 提案手法において、まずステレオカメラから得られる視差画像を用いてターゲットの候補領域を抽出する。

視差画像の持つ 3 次元情報をロボット座標系の 3 次元空間に投影することでポイントクラウドを作成する。取得されたポイントクラウド中で、投影された点群が密な領域にターゲットの候補となる人物が存在すると仮定する。点群の密度が高い領域の幅や奥行き、高さ

情報により候補領域を抽出する。

3.2 ターゲットの判別

3.2.1 カラーと位置に関する評価値の作成 抽出された候補領域の中からカラー情報と位置情報を用いてターゲットを判別する。カラー情報として、HSV色空間の色相 (h) と彩度 (s) を用いる。各候補領域のカラー情報と、カラーテンプレートとして予め保存されたターゲットのカラー特徴を式 (1) により比較する。

また、位置情報として、ロボット座標系の位置 (X, Y) を用いる。ターゲットの位置特徴は、前フレームでのターゲット位置からカルマンフィルタを用いて予測した位置により示される。カルマンフィルタのモデルには等速直線運動を用いる。各候補領域の位置 (X_s, Y_s) と、予測されたターゲット位置 (X_e, Y_e) とを次式により比較する。

$$R_{position} = k\sqrt{(X_s - X_e)^2 + (Y_s - Y_e)^2} \quad (6)$$

ここで、 k は $R_{position}$ を無次元化するための定数である。

3.2.2 候補領域とターゲットの比較 算出した R_{color} , $R_{position}$ をそれぞれカラー情報と位置情報に関する評価値とする。各評価値に照明変動により重みづけを行う。ここで、色と位置の評価値に対する重みを決定する W を次式のように設定する。

$$W = \begin{cases} P_c + P_l & (D_l \geq 0) \\ P_c + P_l - D_l & (D_l < 0) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $0 \leq P_c \leq 1$, $0 \leq P_l \leq 1$ である。各候補領域とターゲットとの相違度を次式で表す。

$$D = \begin{cases} (1 - W)R_{color} + WR_{position} & (W \leq 1) \\ R_{position} & (W > 1) \end{cases} \quad (8)$$

照明変動以後に位置情報のみに依存した追跡が継続されるのを防ぐために、各照明環境でのカラー特徴を取得し相違度 D がしきい値以下のときカラーテンプレートの更新を行う。カラーテンプレートが更新されたタイミングで、 D_l の値も更新し、 P_c や P_l の値を 0 にリセットする。

3.3 オクルージョン対策手法 従来手法⁽¹⁰⁾で提案したオクルージョン対策手法を採用する。この手法では、ターゲット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状態を推定する。推定したオクルージョンの状態により、カラーテンプレート更新タイミングや位置予測の継続時間を設定する。また、オクルージョンの最中にターゲット以外の物体や人物の位置情報にカルマンフィルタを適用し、フレーム間で対応付けを行う。

Table 3 Experimental results

	Previous method	Proposed method
<i>Precision</i> [%]	89.0	94.5
<i>Recall</i> [%]	87.5	97.0
<i>F-measure</i> [%]	88.2	95.7

4. 追 跡 実 験

提案手法を用いて、実環境において追跡実験を行う。実験には予め取得した動画を用いる。動画撮影時は、ステレオカメラを取り付けた移動ロボットでターゲットを追跡するように操作した。屋内外の環境で取得した 8530 枚の画像を用いる。提案手法とホワイトバランス変化量のみを考慮した従来手法⁽¹⁰⁾の比較を行う。各手法の評価には適合率 P , 再現率 R , F 値 f を用いる。

$$P = \frac{A}{A+B}, R = \frac{A}{A+C}, f = \frac{2PR}{P+R}$$

A : ターゲットが正しく検出されたフレーム数

B : ターゲット以外が検出されたフレーム数

C : ターゲット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、各手法において式 (2) で定義した色味変化のパラメータ P_c は以下のように設定する。

$$P_c = 0.4(|\Delta R| + |\Delta B|) \quad (9)$$

式 (3) で定義した提案手法における明るさパラメータ P_l は以下の式で算出する。

$$P_l = 6.0 \frac{|\Delta S|}{S_{max}} + 0.9 \frac{|\Delta G|}{G_{max}} \quad (10)$$

シャッタースピードやゲインの値はノイズの影響が大きいため、量子化した値を使用する。 $S_{max} = 177$, $G_{max} = 342$ である。カラー特徴の取得しやすさを示すパラメータ D_l に関して $k_{dS} = k_{dG} = 10.0$ と設定する。また、式 (6) で $k = 1.0\text{m}^{-1}$ とする。

実験結果を表 3 に示す。また、提案手法によるターゲット検出の様子を図 8 に示す。

結果より提案手法においては、全ての評価値が従来手法よりも高いことがわかる。従来手法では、特に逆光の中でのカラー特徴の更新の直後に誤検出が見受けられた。同フレームでの提案手法による追跡においては、更新時のパラメータ D_l の値により各特徴に重みがつけられる。そのため、誤検出の低減や誤検出後に発生する未検出フレームを減らすことができた。しかし、カメラの近くに人物が存在する場合、カメラに照射する光量が大きく変化することがあった。視差情報等を用い、カメラ付近の人物の存在と明るさ変化の関係を調査することを検討している。

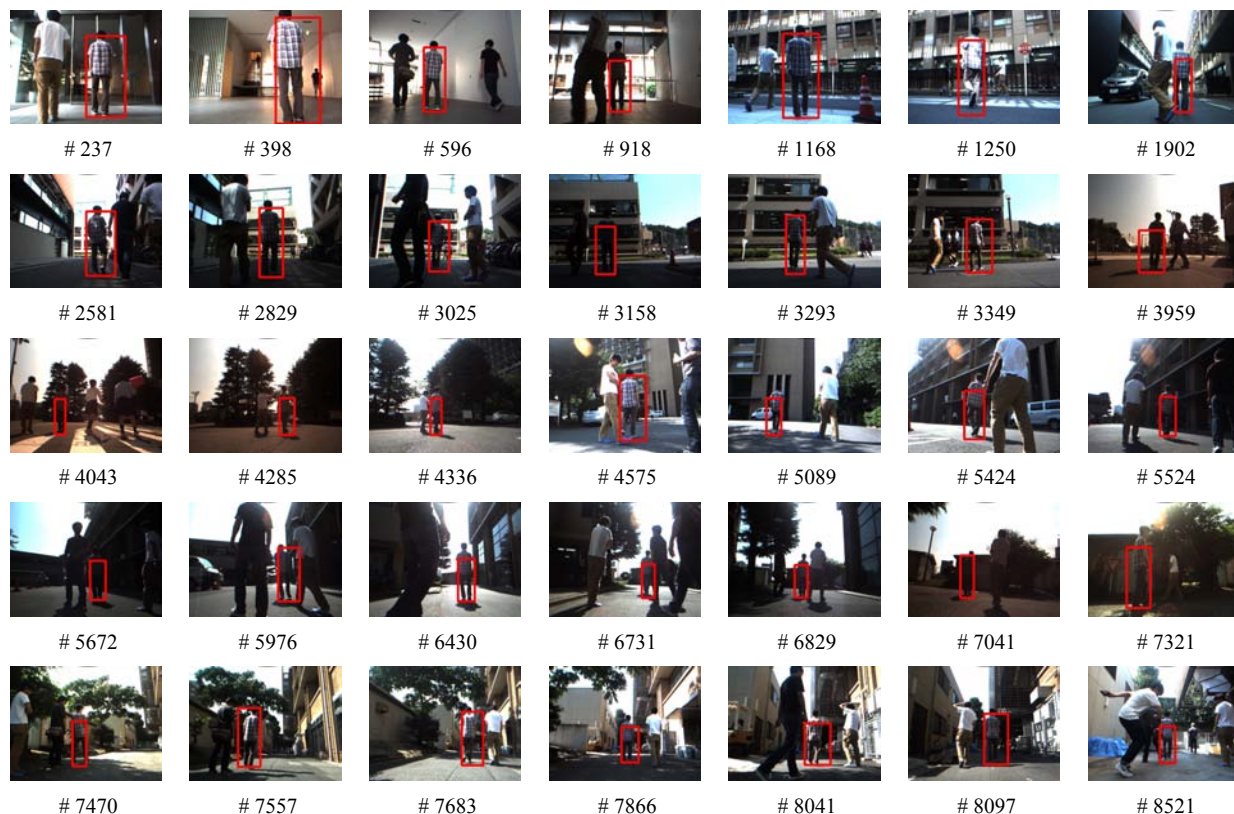


Fig. 8 Experimental results of target identification

5. 結論・今後の展望

本論文では、照明変動に頑健な人物追跡システムを提案した。手法においては、照明変動を色味変動と明るさ変動の2種類に分け、それぞれに対応したパラメータを作成した。各パラメータにより、人物のカラー情報と位置情報に重みづけを行い、ターゲットを判別する。また、明るさ情報から、カラー特徴の取得しやすさを定義し、ターゲット判別の重みに加える。提案した手法と従来手法との比較実験において、各評価値が改善されたことを確認した。

今後は、周囲の人物とカメラの位置関係も明るさパラメータの要素とすることを検討している。

参考文献

- (1) H. Kwon *et al.*, “Person Tracking with a Mobile Robot using Two Uncalibrated Independently Moving Cameras,” *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2005), pp. 2877-2883.
- (2) A. Tsalatsanis *et al.*, “Vision Based Target Tracking and Collision Avoidance for Mobile Robots,” *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, Vol. 48, Issue 2 (2007), pp. 285-304.
- (3) 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 Robotics and Systems*, (2006), pp. 2949-2954.
- (4) J. Satake *et al.*, “Visual Person Identification Using a Distance-dependent Appearance Model for a Person Following Robot,” *Int. Journal of Automation and Computing*, Vol. 10, Issue 5 (2013), pp. 438-446.
- (5) E. Petrovic *et al.*, “Stereo Vision-Based Human Tracking for Robotic Follower,” *Int. Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10 (2013), pp. 1-10.
- (6) G. Cielniak *et al.*, “Improved Data Association and Occlusion Handling for Vision-Based People Tracking by Mobile Robots,” *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, (2007), pp. 3436-3441.
- (7) J. Fritsch *et al.*, “Audiovisual Person Tracking with a Mobile Robot,” *Proc. of the 2004 Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, (2004), pp. 898-906.
- (8) 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*, (2009), pp. 1675-1680.
- (9) 磯邊ら, “照明変動を考慮した色情報と位置情報の組み合わせに基づく移動ロボットの人物追跡”, 第20回ロボティクスシンポジウム予稿集, (2015), pp. 526-531.
- (10) 磯邊ら, “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”, 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2015), 1H3-01.