

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

磯邊 柚香^{*1}, 増山 岳人^{*2}, 梅田 和昇^{*2}

Target Tracking for a Mobile Robot Based on Combination of Color and Location Information Considering Changes of Lighting Conditions

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

In this paper, a target-tracking system for a mobile robot with a stereo camera is addressed. Tracking a specific person in real-world environments is one of the most essential abilities of mobile robots. In order to carry out target tracking, varying illumination and the presence of multiple people are challenges. By fusing color and location features that are obtained from a stereo camera, the distinction between a target person and the other people is achieved. Additionally, the function of automatic adjustment of white balance of a camera is assumed to reflect illumination changes. For adjusting to lighting conditions, color and location features are weighted based on changes of white balance. The effectiveness of the proposed system is verified through target-tracking experiments in the environments where illumination varies extremely and multiple people are present.

Key Words : Target tracking, Mobile robot, Stereo camera

1. 序 論

人物追跡は、自律移動ロボットに求められる機能の一つである。この機能は、工事や災害の現場においては資材運搬、日常生活では荷物運搬といったタスクへの活用が期待される。これらの動的な環境における人物追跡の実現のためには、ロボットに搭載されたセンサによる周囲の環境の認識が必要となる。

人物追跡を実現するために、様々なセンサが用いられるが、中でもカメラが広く使用されている。カメラから得られる色情報のみに基づいて、追跡対象領域の抽出を行うことで人物追跡を実現する手法^{(1)~(3)}が提案されているが、使用可能な照明環境が制限される。これは、照明変動の影響を受けやすい色情報を用いているため、照明環境が変化する場合に誤追跡が容易に起こり得ることによる。これらの研究に対して、Hu ら⁽⁴⁾は、物体のエッジ情報から得られる人物らしさのパラメータと、追跡対象の色情報に関するパラメータに基づいた追跡手法を提案している。また、Chakravarty

ら⁽⁵⁾は、レーザレンジファインダを用いて人物の検出を行い、全方位カメラを用いて色情報により複数の人物から追跡対象を検出するシステムを構築している。これらの研究では、色情報以外にも用いることで様々な照明環境における追跡を可能にしているが、照明条件が大きく変化する環境への対応は困難である。

Takemura ら⁽⁶⁾は、ステレオカメラとレーザレンジファインダを用い、双方から得られる追跡対象の特徴を組み合わせることで、屋外の環境においても人物追跡を実現している。しかし、照明条件が多様に変動する環境における追跡には至っていない。また、複数のセンサから得られる特徴量の組み合わせに基づく手法は、Fritsch⁽⁷⁾らによっても提案されている。顔の特徴、胴部、声音、および脚部を検出することで追跡を行う手法であるが、各特徴を検出可能な環境がそれぞれ限られていることが課題である。Cielniak ら⁽⁸⁾は、カラーカメラとサーマルカメラを搭載した人物追跡ロボットを開発している。サーマルカメラにより人物検出を行い、カラーカメラにより照明変動に強い色特徴を抽出する。また、オクルージョンを検出する機能も備えており、複数の人物が存在する環境における特定の人物の追跡が実現されている。しかし、サーマルカ

^{*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

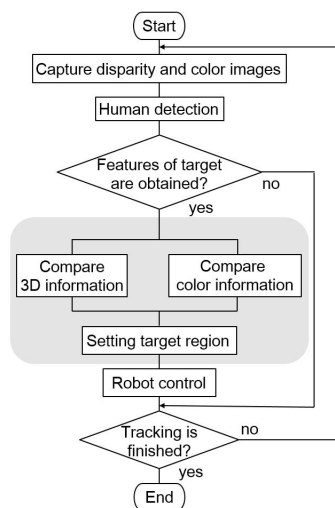


Fig. 1 Flow chart of the proposed system

メラを使用して人物検出を行うため、屋外環境においては検出が困難となる。

色情報を用いた人物検出、人物追跡手法に対して、Satake ら⁽⁹⁾の手法においてはステレオカメラの視差情報を利用した人物検出が行われている。検出された人物から追跡対象を求める処理には、SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特徴量を用い、各人物の着ている服のデザインから追跡対象を判別する。照明変動に頑健な手法であるが、処理時間に課題が残る。Petrovic ら⁽¹⁰⁾は、ステレオカメラにより得られる三次元情報のみを用いた手法を提案している。屋内外の照明変動のある環境で人物追跡実験を行っているが、複数の人物が存在する環境での運用には至っていない。これは、検出された人物に対して位置情報のみを用いて追跡を行っており、追跡対象のその他の特徴は使用していないためである。

本論文では、照明変動があり複数の人物が存在する環境における、移動ロボットによる人物追跡手法を提案する。ステレオカメラを用い、取得したカラー画像と視差画像を利用して人物追跡を行う。照明変動に応じて色情報と位置情報に重みづけをした評価値を算出し、検出した人物から追跡対象を判別する。屋外環境における実験により、提案手法を用いた追跡対象検出の正確性、および網羅性を評価する。

2. 人物追跡手法

2.1 手法の概要 人物追跡の流れを図1に示す。まず、ステレオカメラより得られる視差画像を利用して人物検出を行う。検出された各人物領域に対して、色情報と三次元の位置情報を抽出する。予め取得した追跡対象の各情報と、それぞれの人物の情報を照合し、



(a) The previous frame

(b) The next frame

Fig. 2 Example of extreme white-balance changes

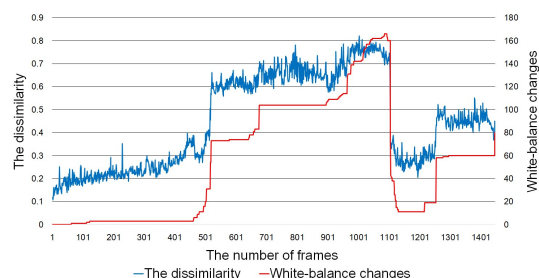


Fig. 3 The influence of white-balance changes on color information

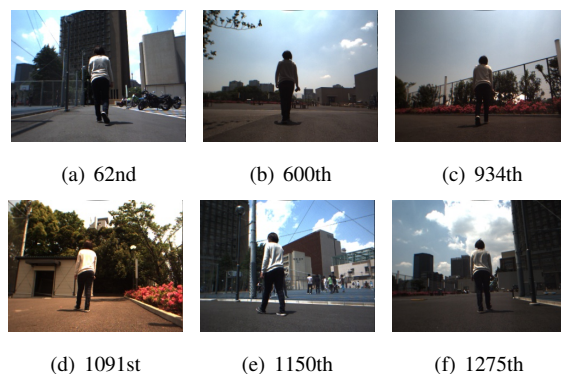


Fig. 4 Varying illumination scenes

追跡対象を判別する。照明環境の変化に対応するために、検出された人物と追跡対象の相違度として、照明変動に応じて各情報を組み合わせたパラメータを用いる。検出された追跡対象人物とロボットの距離と方位に基づいて、ロボット制御を行う。以上の処理を毎フレーム繰り返すことで、移動ロボットによる人物追跡を実現する。

2.2 従来手法における問題点 我々はこれまで、追跡対象の特徴として色情報（色相、彩度）のみを用いた人物追跡手法を構築してきた⁽¹¹⁾。色相と彩度は、照明変動の小さな環境においては有効な特徴量であるが、急激な照明条件の変化には脆弱である。また、図2のように短時間にホワイトバランスが大きく変化する環境においても、追跡対象と他の人物との区別が困難である。同図において、図2(a)の次フレームが図2(b)であり、1フレームの処理時間は約0.05sである。

また、ホワイトバランスの変化による追跡対象人物

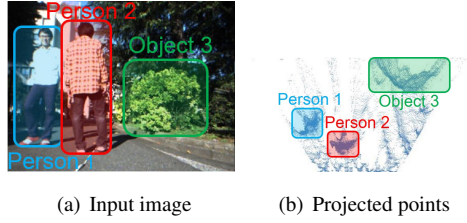


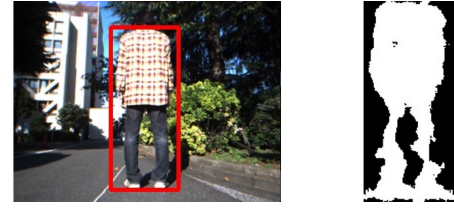
Fig. 5 Extraction of the candidates of human regions

の色情報の変化を図3に示す。図中で青線は、従来手法における各画像中の正しい追跡対象の色情報と予め保存した追跡対象の色情報の相違度を表す。赤線は、各画像での追跡開始時からのホワイトバランスの変化量を示す。使用したステレオカメラ（Bumblebee2, Point Grey Research）において、ホワイトバランスは、それぞれ1024段階の赤ゲインと青ゲインにより調節される。ホワイトバランスの変化量は、追跡開始時と各フレームでのホワイトバランスの、それぞれのゲインの変化量の和により算出される。同図とカラー画像の出力例（図4）より、ホワイトバランスの変化が大きいときに、照明環境の変化が見受けられる。

以上より、ホワイトバランスの変化により照明環境の変化が示されると仮定する。そこで、提案手法においては、ホワイトバランスの変化を照明変動を表すパラメータとして用いることで、様々な照明環境における追跡の実現を図る。

2.3 人物検出 画像中に存在する各物体の領域を抽出するために、取得した視差画像に対して、距離画像セグメンテーション⁽¹²⁾を適用する。まず、視差画像中の各画素の持つ三次元情報を俯瞰平面に投影する（図5）。図5(b)は、入力画像5(a)に対する投影結果を示す。俯瞰平面において投影された点群の密度により、人物領域の候補となる領域を抽出する。次に、抽出された各候補領域に対応する視差画像を2値化することで、各物体のシルエットを取得する。シルエットの取得例を図6に示す。図6(a)中で矩形で表される候補領域に対して、視差情報より物体の存在する領域のみを白画素として表したものが図6(b)である。このシルエットにより、候補領域の物体が人物であることを評価する。

2.4 追跡対象人物の検出 検出されたそれぞれの人物に関して色情報と位置情報を組み合わせた評価値を算出し、追跡対象人物を判別する。色情報は、人物のシルエットを表す2値画像の白画素に対応する領域に関して取得される。色情報としては、従来手法と同様に色相と彩度を用いる。検出された人物と予め取得した追跡対象の色情報との相違度は、以下の式によ



(a) Example of extraction of the candidates (b) Binary image

Fig. 6 Process of human detection

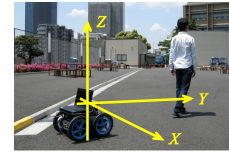


Fig. 7 X-Y-Z coordinate of the proposed system

り与えられる。

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

$H_{input}(h,s)$, $H_{template}(h,s)$ はそれぞれ入力画像、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。なお、動的な環境における色情報の変化に対応するために、検出された追跡対象の色情報と追跡開始前の色情報を一定フレーム毎に比較し、テンプレートの色情報を更新する。

色情報に加えて、追跡対象の判別に位置情報を用いる。位置情報として、図7に示すロボット座標系の X , Y について評価を行う。追跡対象の位置と速度を状態変数としてカルマンフィルタを適用し、前フレームの追跡対象の位置から現在のフレームでの位置を予測する。なお、カルマンフィルタのモデルには等速直線運動モデルを用いる。検出された各人物の位置と、予測した追跡対象の位置を次式により比較する。

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

(X_s, Y_s) は人物の位置、 (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 を無次元化するための定数である。

R_{Bhat} と E をそれぞれ色情報と位置情報に関する評価値とする。これらの評価値を用い、検出された人物と追跡対象人物の相違度 D は以下のように与えられる。

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

D の計算結果にしきい値処理を施し、人物領域の絞り込みを行う。しきい値よりも D の値が小さい人物領域が存在するとき、その中で最も値の小さい領域を追跡

対象人物の領域とする．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． α と α_{th} ，および D の算出式の関係を以下に詳述する．

(1) $\alpha < \alpha_{th}$ の場合

各評価値はホワイトバランスの変化に応じて重みづけされる．これは，照明条件の変化により，色情報への信頼度が変化することによる．照明変動が小さいときは，色情報による追跡対象の判別は有効であるが，照明条件が様々に変わる環境においては，色情報はその影響を受けやすい．位置情報は視差情報により与えられるため，照明の影響は受けにくい，単独で用いると追跡対象の実際の運動と予測モデルが異なったときに追跡が困難となる．よって，色情報と位置情報の両方を組み合わせて用いることで，各情報を単独で用いる場合よりも実環境における追跡能力を向上させることが可能となる．

(2) $\alpha \geq \alpha_{th}$ の場合

ホワイトバランスの変化が極端に大きいとき，色情報への信頼度は著しく低下する．そのため，相違度を位置情報のみにより与える．ただし，位置情報のみに依存した追跡となることを避けるために， D の値が小さいときにテンプレートの色情報を更新する．なお，テンプレートの色情報が更新されるとき，同時にそのフレームでのホワイトバランスも登録する．登録後は，現フレームでのホワイトバランスと登録されたホワイトバランスの各ゲインの差の絶対和により $|W|$ を算出する．

3. 屋 外 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に屋外の照明変動がある環境において実験を行った．まず，提案手法と従来手法とを比較してシステムを評価する．実験環境は，追跡対象のみが存在する環境（実験環境 A）と，追跡対象の他に 3 人の人物が存在する環境（実験環境 B）とする．各環境において，移動ロボット（Blackship，セグウェイジャパン）の移動経路は所与とする．ロボットの移動中に，ステレオカメラ（Bumblebee2，Point Grey Research）を用いてカラー画像と視差画像を取得し，毎フレーム保存する．保存された各画像を用いて，従来手法と提案手法により，オフラインで実験を行う．それぞれの手法において，各フレームにおける追跡対象の情報と予め登録した追跡対象の情報の相違度を算出する．なお，提

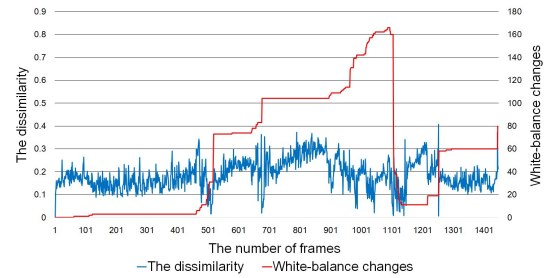


Fig. 8 Influence of white-balance changes on the proposed system

Table 1 Mean and standard deviation of the dissimilarity values

	The previous system	The proposed system
Mean	0.45	0.19
Standard deviation	0.20	0.06

案手法の相違度算出式における各変数は， $k = 1.0\text{m}^{-1}$ ， $p = 0.25$ ， $\alpha_{th} = 0.8$ とする．

3.1.1 実験環境 A 従来手法を用いた実験（図 3，4）と同様のデータを使用し，オフラインで提案手法を用いた追跡実験を行った．なお，実験で使用したフレーム数は 1446 である．

図 8 に提案手法により算出された相違度を，表 1 に各手法を用いて算出された相違度の平均値と標準偏差を示す．図中で，青線は提案手法により算出された各フレーム毎の追跡対象とテンプレート情報との相違度を，赤線はホワイトバランスの変化量を表す．実験結果より，従来手法と比較すると，提案手法は照明変動にロバストであるといえる．

3.1.2 実験環境 B 照明変動があり，複数の人物が存在する環境において，オフライン実験を行った．なお，実験で使用したフレーム数は 609 である．実験においては，オクルージョンは 224 番目のフレーム後と 441 番目のフレーム後で発生しており，継続時間はそれぞれ約 0.6s（5 フレーム分）と約 0.7s（6 フレーム分）であった．従来手法と提案手法による，追跡対象とテンプレートの相違度の算出結果を図 9 に，カラー画像の取得例を図 10 に示す．表 2 には，それぞれの人物とテンプレートとの相違度の平均値と標準偏差を各手法について求めた結果を示す．

実験結果より，従来手法と比較して，提案手法は照明変動の影響を受けにくいことがわかる．提案手法においては，追跡対象とテンプレートの相違度の平均値と標準偏差は共に，他の人物の各値よりも低く，ホワイトバランスの変化によらず値の変動が小さい．し

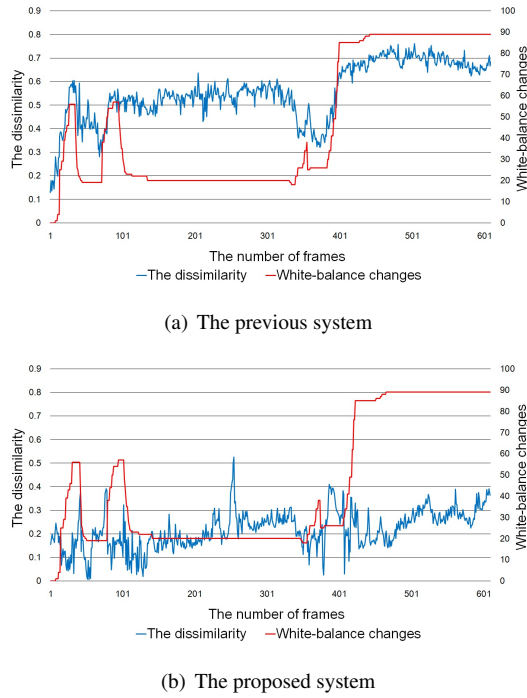


Fig. 9 Results of the experiment in *Environment B*

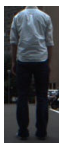
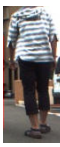
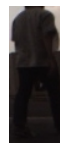


Fig. 10 Varying illumination scenes in *Environment B*

かし、図 10(d) における照明環境のように、ホワイトバランスの変化量が小さくても、照明により追跡対象の服の色が変化することで追跡が不安定になり、相違度が大きくなってしまいう場面も見受けられた。また、図 10(f) のような逆光の環境において、各人物の服の色情報が似通ってしまい誤検出が起こった。

3.2 オンライン実験 提案手法の有用性を検証するために、照明変動があり複数の人物が存在する環境において、移動ロボットによる人物追跡実験を行った。なお、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。PID 制御を用い、追跡対象人物と移動ロボットとの距離と方位に応じて、移動ロボットの運動を制御した。また、提案手法における各種パラメータは、 $k = 1.0\text{m}^{-1}$, $p = 0.25$, $\alpha_{th} = 0.8$

Table 2 Mean and standard deviation of the dissimilarity values of the each system

	Target	Person A	Person B	Person C
				
The previous method				
Mean	0.57	0.60	0.54	0.74
Standard deviation	0.12	0.08	0.04	0.04
The proposed method				
Mean	0.23	0.51	0.77	0.37
Standard deviation	0.09	0.26	0.34	0.05

とした。本研究では、照明環境によらず追跡対象を正しく、網羅的に検出することを目的としている。そこで、追跡対象検出の正確性と網羅性に対応する評価値として、適合率と再現率を用い実験の評価を行う。各評価値は以下で定義される。

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

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
 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

実験では、151s の追跡を行った。なお、実験を通して計 6 回のオクルージョンが発生し、オクルージョンの継続時間は平均して約 0.6s で、最大約 1s のオクルージョンが起っていた。また、実験環境を照明条件により、次の 4 つのシーンに分ける。

- シーン 1 : 順光
- シーン 2 : 逆光
- シーン 3 : ビルの陰 (順光)
- シーン 4 : ビルの陰 (逆光)

実験の様子を図 11 に示す。また、図 12 は実験における追跡対象の検出例である。図中で、赤い矩形は追跡対象領域を示し、赤い点は領域と対応する 2 値画像中の白画素の重心を表す (図 6(b) 参照)。実験結果に対する評価値を表 3 に示す。全ての実験環境において、91% 以上の適合率、88% 以上の再現率が得られた。

シーン 3 において、両評価値は他のシーンに比べて低くなっている。これは、このシーンにおいて、ホワイトバランスの変化が頻繁に起こっていたことによる。ホワイトバランスの変化の頻度が高いことにより、位



(a) Scene 1

(b) Scene 2



(c) Scene 3



(d) Scene 4

Fig. 11 Experimental scenes



(a) Scene 1



(b) Scene 2



(c) Scene 3



(d) Scene 4

Fig. 12 The results of the experiment

Table 3 Evaluation of results in outdoor scenes

Scene	Number of frames	Precision [%]	Recall [%]
1	716	100	98.4
2	559	99.4	97.0
3	462	91.6	89.0
4	472	99.8	95.4

置情報のみに依存した相違度の算出が行われ、追跡対象が追跡範囲に存在しているにも関わらず何も検出されないフレームが増えていた。この未検出のフレームの増加により、追跡対象の位置予測が不安定になり、その結果、誤検出が発生したと考えられる。

4. 結 論

本論文では、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を提案した。色情報と位置情報の評価値への照明変動に応じた重みづけにより、照明変動があり複数の人物が存在する環境における追跡の実現を図った。実環境における追跡実験により、91%以

上の適合率、88%以上の再現率を得た。

今後は、照明変動を示すパラメータの改良や、追跡対象の特徴量の追加等による追跡性能の向上を検討している。より混雑した環境や照明条件の変化が頻繁に発生する環境における追跡の実現を目指す。

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) D. Calisi *et al.*, "Person Following through Appearance Models and Stereo Vision using a Mobile Robot," *Proc. of VISAPP (Workshop on Robot Vision)*, (2007), pp. 46-56.
- (3) 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.
- (4) C. Hu *et al.*, "A Robust Person Tracking and Following Approach for Mobile Robot," *Proc. of the 2007 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, (2007), pp. 3571-3576.
- (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 Robotics and Systems*, (2006), pp. 2949-2954.
- (6) 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.
- (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) 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.
- (9) 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.
- (10) E. Petrovic *et al.*, "Stereo Vision-Based Human Tracking for Robotic Follower," *Int. Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10 (2013), pp. 1-10.
- (11) Y. Isobe *et al.*, "Human Following with a Mobile Robot Based on Combination of Disparity and Color Images," *10th France-Japan and 8th Europe-Asia Congress on Mechatronics*, (2014), pp. 84-88.
- (12) T. Ubukata *et al.*, "Multi-Object Segmentation in a Projection Plane Using Subtraction Stereo," *Proc. of the 20th IEEE Int. Conf. on Pattern and Recognition*, (2010), pp. 3296-3299.