

## 差分ステレオを用いた人流計測手法の屋外実環境における実証実験\*

柴田 雅聡<sup>\*1</sup>, 生形 徹<sup>\*2</sup>, 有江 誠<sup>\*2</sup>  
モロ アレサンドロ<sup>\*2</sup>, 寺林 賢司<sup>\*3</sup>, 梅田 和昇<sup>\*4</sup>

### Experimental Evaluation of Methods of Pedestrian Traffic Measurement Using Subtraction Stereo

Masatoshi SHIBATA<sup>\*1</sup>, Toru UBUKATA, Makoto ARIE, Alessandro MORO,  
Kenji TERABAYASHI and Kazunori UMEDA

<sup>\*1</sup> Dept. Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University,  
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

In this paper, we report the results of experimental evaluation for methods of pedestrian traffic measurement at the festival held in Tatebayashi, Gunma prefecture. To measure pedestrian traffics, which include the direction and the number of pedestrian, we have already proposed two types of measuring methods based on subtraction stereo. One is the tracking method using Kalman filter, which is used in uncrowded scenes. The other is the method using KLT and Voronoi diagram, used in highly dense scenes. Finally, we show the accuracy of the proposed methods used in city environments.

**Key Words** : Stereo Camera, Pedestrian Traffics, Kalman Filter, KLT

#### 1. は じ め に

近年、様々な場面で人流計測のニーズが高まっている。例えば、駅などの公共施設での災害時における人の誘導に利用することが挙げられる。人をスムーズに誘導するには、常時、人の流れを計測し、施設内のどこに人が集中しているかを把握することで最適な避難ルートを算出することが必要である。また、スーパーマーケットやショッピングモールなどの商用施設での人の流れを調査することで、購買がしやすい商品の配置や利用者の好みに合わせた店舗の入れ替えなどのマーケティングにも応用が可能である。しかし現状では、実際に人が歩行者を観察して何人の人がどの方向に移動したかをカウントしているため、多くの人の労力を必要とする。このことから人の流れを自動で計測するシステムが期待されている<sup>(1)(2)</sup>。

また、近年 CPU や GPU (Graphics Processing Unit) の発達により、リアルタイムでの距離計測が可能となったステレオカメラを用いた人流計測手法が提案されている<sup>(3)(4)(5)</sup>。これらの手法の多くでは、ステレオカメラにより得られる三次元情報を用いて人物を検出し、フレーム間での三次元座標の推移から人の流れを計測する。しかし、これらの手法では人物同士の重なりが生じないよう人物を真上から俯瞰するように天井にステレオカメラを設置したり、複数のカメラを要するなどカメラの設置環境を限定されるという課題がある。

本論文では、実証実験を行った結果の報告として、群馬県館林市で開催された第 40 回館林まつりにおいて、2ヶ所に設置されたステレオカメラで計測した人流計測結果を報告する。我々は先行研究において、計測対象を移動物体に制限する差分ステレオ<sup>(6)</sup>と呼ばれる三次元計測手法を用いた歩行者検出・追跡手法を提案している。人流計測手法として、この差分ステレオを拡張し、追跡された人物の位置と速度から人数と移動方向を算出する手法と、

\* 原稿受付 2012 年 10 月 18 日

<sup>\*1</sup> 学生員, 中央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)

<sup>\*2</sup> 中央大学院理工学研究科精密工学専攻

<sup>\*3</sup> 正員, 静岡大学工学部機械工学科 (〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

<sup>\*4</sup> 正員, フェロー, 中央大学理工学部精密機械工学科

E-mail: shibata@sensor.mech.chuo-u.ac.jp



KLT(Kanade-Lucas-Tomasi Tracker)<sup>(7)</sup>とボロノイ分割<sup>(8)</sup>を用いて人数と移動方向を算出する手法を用いる。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2章において本研究での物体検出の基盤となっている差分ステレオと影検出<sup>(9)</sup>を用いた前景検出について述べる。3章では、混雑度合に応じた2種類の人流計測システムについて説明する。続く4章では、屋外実環境における実証実験を行い、上記の2手法の特徴・有用性を示す。最後に5章で結論と今後の展望について述べる。

## 2. 前 景 検 出

### 2.1 差分ステレオ

本研究では、画像中の前景領域(移動体領域)を検出する手法として、差分ステレオを用いている。差分ステレオの基本アルゴリズムを図1に示す。差分ステレオでは、まず左右カメラそれぞれで背景差分によって前景領域を抽出する。その後、抽出された前景領域をマッチングすることで距離情報を得る。このように、マッチングする領域を背景差分で得られた前景領域に限定することで、マッチングの誤対応と処理時間を削減することができる。背景差分によって検出された前景領域を図2(b)に青色で示す。なお、背景差分は輝度値の差分を用いているため、照明の変化の影響を受ける。そこで、背景を逐次更新していくことで、照明変化に対応している<sup>(10)</sup>。

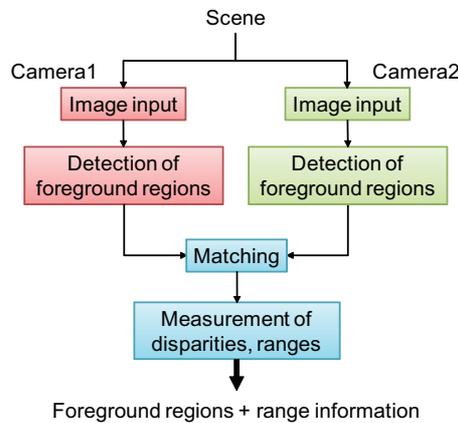


Fig. 1 Basic algorithm of the subtraction stereo

### 2.2 影検出

背景差分によって検出された前景領域には、物体の影となる領域も含まれてしまう。そのため、前景領域を正確に検出するためには、影となる領域を除去する必要がある。画像座標 $(x,y)$ における輝度値を $I(x,y)$ 、背景画像における同位置の輝度値を $I'(x,y)$ とすると、影を判定する評価関数は次式で表わされる。

$$\theta_{(t+1,x,y)} \begin{cases} \alpha\Psi(x,y) + \beta\Lambda(x,y) + (1-\alpha-\beta)\theta(t,x,y), & \left(\frac{I(x,y)}{\eta} < I'(x,y)\right) \\ \infty, & \text{(otherwise)} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ は影と判断するためのスコアを表し、 $\theta$ が閾値以下となる画素を影と判断して前景領域から除去する。 $\Psi$ は前景の近傍画素値と背景の近傍画素値の相違度を表し、 $\Lambda$ は前景の色相と背景の色相の相違度を表す。また、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$ はそれぞれの項に対して重みを与える定数である。今回用いた影検出手法の詳細は文献<sup>(9)</sup>にて述べられている。

図2(a)より前景領域を抽出した画像(図2(b))に対して、本手法を用いて影検出を行った例を図2(c)に示す。図中において、影と認識された領域を緑色で表わし、前景領域から除去する。また、人物の影でない部分も除去されているが、これは照明のちらつきによって一部前景領域が誤抽出され、その箇所の色相の変化が小さいため影として検出されたためである。最終的に検出された前景領域を図2(d)に示す。

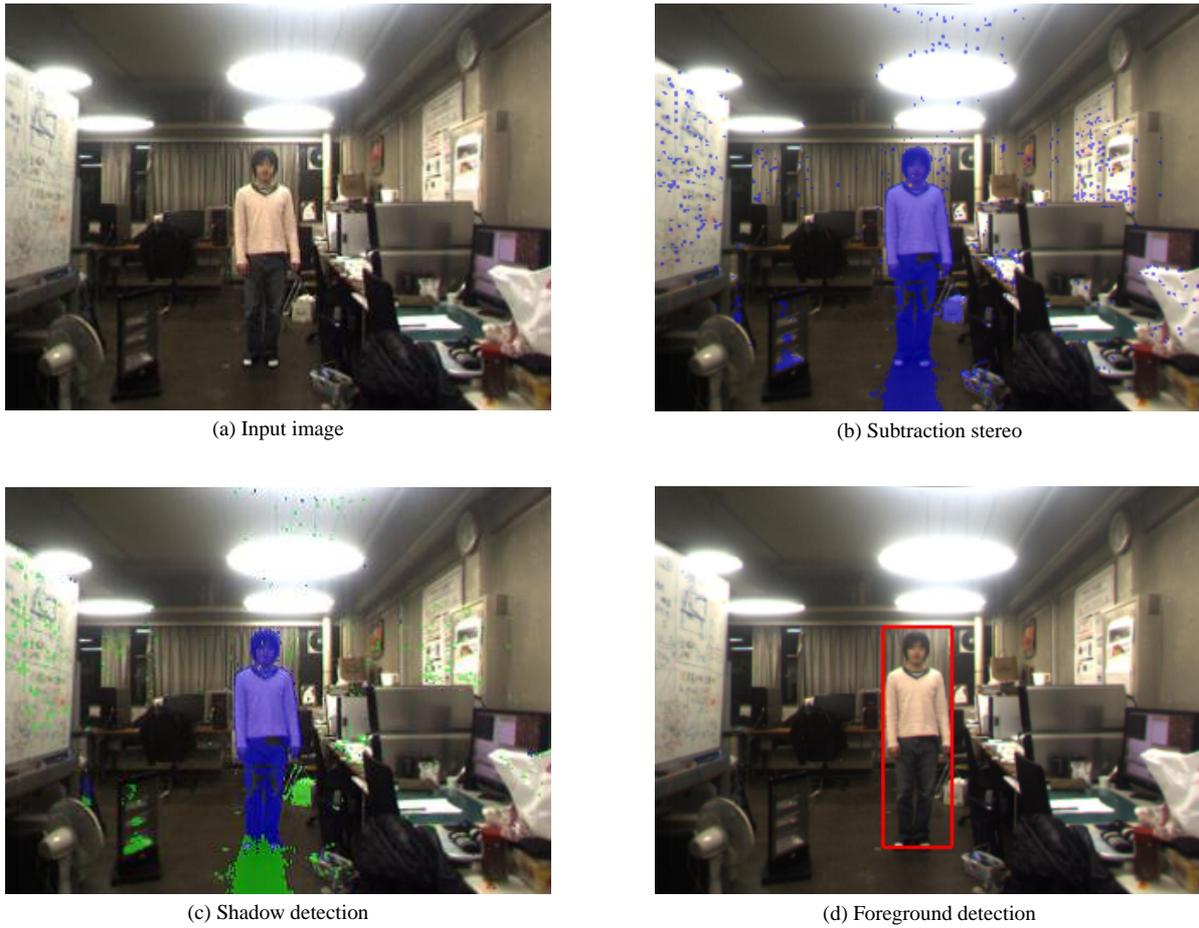


Fig. 2 Flow of the foreground detection

### 3. 人流計測手法

本論文では2つの人流計測手法を用いて実験を行う。一つは、カルマンフィルタを用いて検出した人物をトラッキングし、人の流れを計測する手法である。もう一つは、KLTにより得られた特徴点の移動方向をもとに、ポロノイ分割で領域の移動方向を推定し、人の流れと人数を計測する手法である。

#### 3.1 カルマンフィルタを用いた人流計測

人物の動きが等速直線運動であると仮定し、カルマンフィルタで用いる運動モデルとする。状態変数  $\mathbf{X}$  は、カメラ座標系での人物の三次元位置  $(x,y,z)$ 、および速度  $(\dot{x},\dot{y},\dot{z})$  を用い、次式で表わされる。

$$\mathbf{X} = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ \dot{z}]^T \tag{2}$$

カルマンフィルタの状態方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{X}_{i+1} = \Phi_i \mathbf{X}_i + \Gamma_i \omega_i \tag{3}$$

$\Phi$  は状態遷移行列であり、

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

で与えられる。  $\omega_i$  は速度に対するプロセスノイズであり、

$$\omega_i = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \tag{5}$$

で与えられる。  $\Gamma_i$  は、

$$\Gamma_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

で与えられる。観測変数には、

$$Z = [u \ v \ d]^T \tag{7}$$

を用いる。  $u$ ,  $v$  は画像上の座標、  $d$  は視差である。観測変数と状態変数の関係は次式で表わされる。

$$\begin{cases} Z_i = G(X_i) + v_i \\ G(X_i) = \left[ \frac{x_i \cdot f}{z_i} \ \frac{y_i \cdot f}{z_i} \ \frac{b \cdot f}{z_i} \right]^T \end{cases} \tag{8}$$

$f$  はカメラの焦点距離、  $b$  は基線長、  $v_i$  は観測ノイズである。これらの式からカルマンフィルタを更新し予測値を得る。カルマンフィルタの予測値と、人物の観測値を対応づけることでトラッキングを行う。カルマンフィルタの予測値の集合を  $K$ 、その要素を  $k_i$  とし、観測値の集合を  $M$ 、その要素を  $m_j$  とする。  $i$  番目の予測値から  $j$  番目の観測値までの三次元空間でのユークリッド距離  $D_E(k_i, m_j)$  を計算し、ユークリッド距離が最小であり、かつ閾値  $D_{th}$  以内のものを対応づける。前景領域内の人数の推定には、画像上での前景領域の面積とカメラから対象までの距離を用いて人数を推定する以下の手法を用いる。

### 3.1.1 領域の面積と距離を用いた人数推定手法

カルマンフィルタによりトラッキングした観測点 (前景領域) が複数人物を含むことがあるため、各観測点に含まれる人の人数を推定する必要がある。物体をカメラで撮影すると、画像内における大きさは光軸方向の距離の二乗に反比例して小さくなる。差分ステレオによって領域までの距離が算出できるため、この関係を用いて領域内の人数を推定する。歩行者の領域を示す前景領域の画素の合計を面積  $S$ 、集団までの光軸方向の距離を  $z$  とおくと、面積  $S$  と距離  $z$  の関係は以下の式で表せる。

$$A = S \cdot z^2 \tag{9}$$

ここで  $A$  は距離によって補正された面積である。集団の中で人物の重複がない場合、集団の人数  $n$  は式 (9) より求める一人のときの補正後の面積  $A_1$  を用いて以下の式で求められる。

$$n = \frac{A}{A_1} \tag{10}$$

### 3.2 KLT とポロノイ分割を用いた人流計測

本手法の処理の流れの概念図を図 3 に示す。まず、図 3(a) に示す入力画像に対して 2 章で述べた前景領域検出を行い、特徴点としてコーナー点を検出する。次に、対応点探索手法の一手法である KLT を用いることで検出された特徴点を追跡する。対応付いた特徴点のみを抽出し、特徴点の移動量から移動方向を決定する。左方向に移動している特徴点を緑色、右方向に移動している特徴点を赤色で図 3(b) に示す。次に、ポロノイ分割を用いて各分割領域内に特徴点の一つ含まれる領域を図 3(c) のように作成する。この領域に含まれる特徴点の移動方向をその領域の移動方向とし、移動方向が推定された前景領域を移動方向ごとに分割する。図 3(d) に図 3(b) と同様の配色で前景領域を移動方向ごとに分割した図を示す。移動方向ごとの領域内の人数推定には、人物同士の重なりを考慮して人数を推定する以下の手法を用いる。

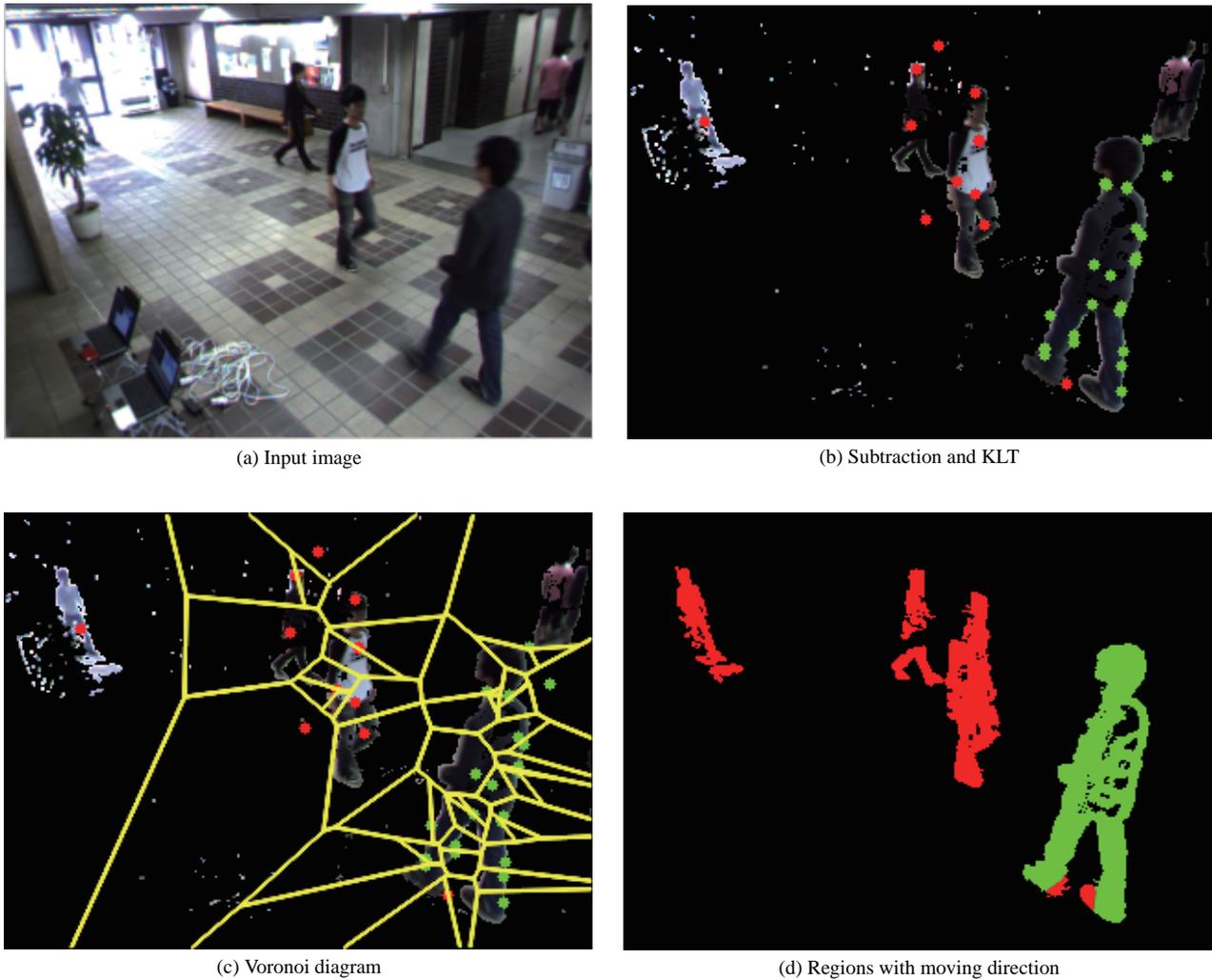


Fig. 3 Flow of the method using KLT and Voronoi diagram

### 3.2.1 人物の重なりを考慮した人数推定手法

3.1.1 項と同様にして、移動領域ごとの面積を累積し、これを一人分の面積で割ることで移動方向ごとの人数を推定する。しかし混雑環境下においては画面上で人物同士のオクルージョンが発生しやすく、見えない部分の面積が生じてしまうため正しい人数が計測できない。そこで、3次元情報を持つ特徴点の奥行き方向の分布から人物同士の重なり度合を数値化し、見えない部分の面積の補正を行う。

以下に本手法の流れを説明する。まず、図4(a)の入力画像に対して、図4(b)のように移動方向ごとの領域と特徴点の画面座標を取得する。このとき、ステレオカメラを用いて計測を行っているので、特徴点のある座標における奥行き方向の距離を取得できる。次に、距離情報を持った特徴点を画面座標系の  $x$ (画像横方向) と世界座標系の  $Y$ (奥行き方向) の  $x$ - $Y$  平面に投影する。この  $x$ - $Y$  平面をセルによって図4(c)のように分割する。セルの大きさは画像上での人物一人の大きさとカメラからの距離より算出する。各セル内に投影された特徴点の数から、図4(c)に示すヒストグラムを作成する。人物が重なっている領域におけるヒストグラムでは手前の人物の位置に対応する位置にピークが発生し、手前から二人目以降に対応するセルでは全体的に頻度が少なくなる。これは集団手前の人物からは多くの特徴点が算出され、重なり隠れた奥の人物からは特徴点が算出されにくいためである。このヒストグラムの特徴から領域内における人の重なり度  $o$  をヒストグラムの列方向ごとに次式より算出する。

$$o = \frac{f_{max} - f_{ave}}{f_{max}} \quad (11)$$

ここで  $f_{max}$  は列ごとの最大頻度、 $f_{ave}$  は列ごとの平均頻度である。この重なり度  $o$  は、0に近いほど領域内での重なりが少なく、1に近いほど重なりが多いことを表す。そして、重なり度  $o$  を用いて重なりが生じている奥の人

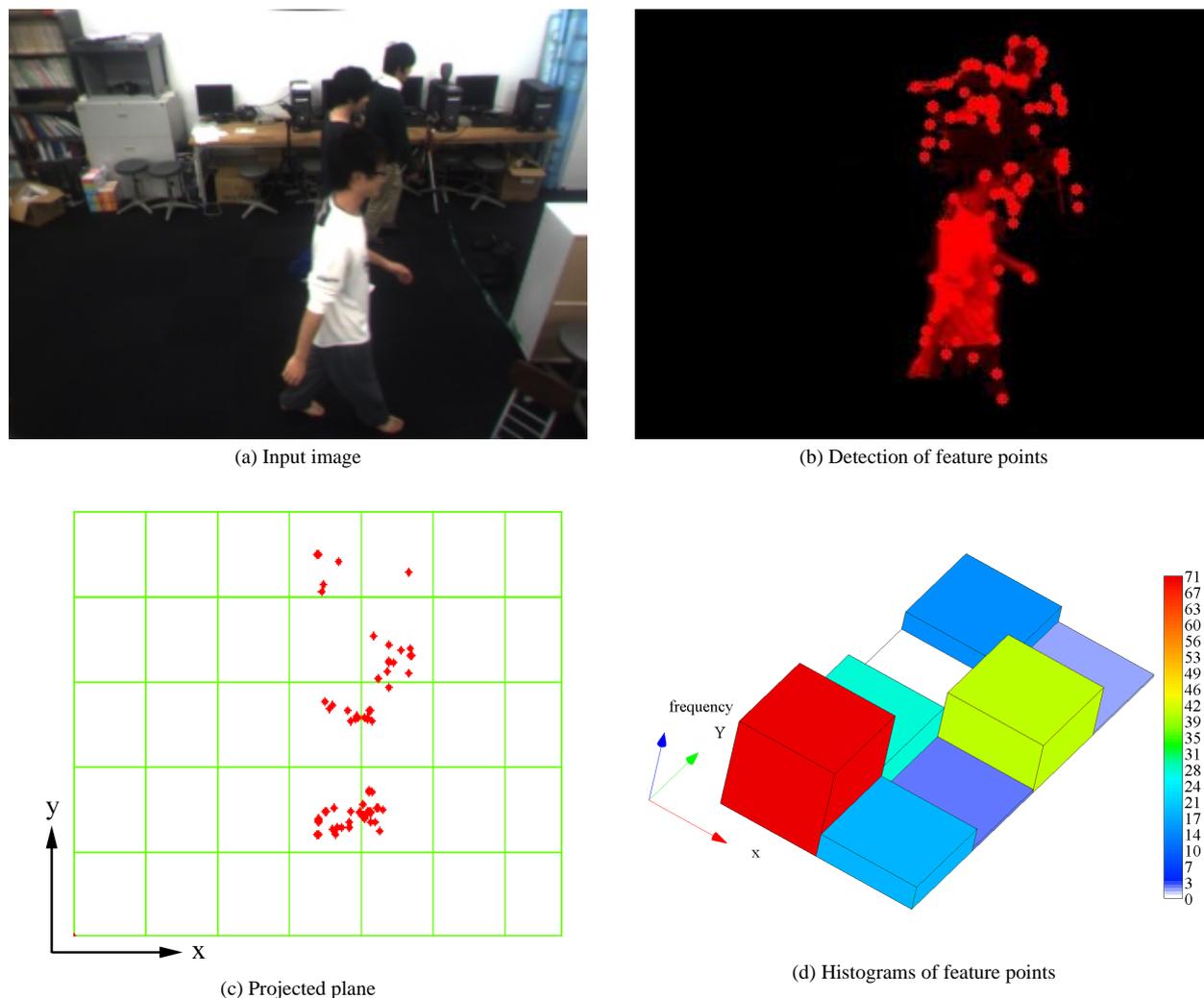


Fig. 4 Flow of the method considering the overlap

物の面積  $S_{back}$  を次式で補正する.

$$S'_{back} = (1 + o) \cdot S_{back} \tag{12}$$

$S'_{back}$  は、補正後の奥の人物の面積である. 面積  $S'_{back}$  を用いて、補正後の面積  $S_c$  は手前の人物の面積  $S_{front}$  と合わせて、

$$S_c = S_{front} + S'_{back} \tag{13}$$

となる. なお、手前の人物の面積  $S_{front}$  は列ごとの最大頻度  $f_{max}$  が得られるセルに含まれる距離情報を持った画素から算出し、残りの面積を重ねている奥の人物の面積  $S_{back}$  とする. この補正後の面積  $S_c$  をすべての列で計算し、次式より累積する.

$$S = \sum_{i=1}^{row} S_{ci} \tag{14}$$

$row$  はヒストグラムの最大列数である. 得られた  $S$  を式 (9) に代入し、重なりが生じている際の集団の人数の推定を行う.

#### 4. 屋外実環境における実証実験

3.1 節と 3.2 節で説明した 2 つの人流計測手法の実証実験を行った. 非混雑環境下と混雑環境下でそれぞれの人流計測手法を用いて計測実験を行い、結果を比較することで 2 手法の特徴・有用性を示す.

実験ではステレオカメラを群馬県館林市の 2ヶ所に設置し、2011 年 7 月 17 日に同市で開催された第 40 回館林まつりでの参加者の流れを計測した. 図 5 にこれらの実験シーンを示す. それぞれの設置場所において、3.1 節に

Table 1 Absolute error of estimated number of pedestrians

	non-crowded scenes		crowded scenes	
	Left	Right	Left	Right
Kalman filter	2.05	2.81	11.9	12.9
Voronoi & KLT	1.81	2.38	1.00	1.18

示したカルマンフィルタを用いた人流計測手法と 3.2 節に示した KLT とボロノイ分割による人流計測手法の 2 種類の手法を用いて計測を行った。各計測地点において、カメラに対して左右それぞれの方向に移動した人数を 1 分ごとにカウントし、15 時 20 分から 15 時 40 分までの 20 分間の人の流れを計測した。カルマンフィルタを用いた人流計測手法では、図 6(a) や図 6(b) に示す矩形内の人物を追跡することで人数と移動方向を算出した。KLT とボロノイ分割による人流計測手法では、図 6(c) や図 6(d) に示す様に集団内で左方向 (緑色) と右方向 (赤色) に移動している領域に分けて人数を推定した。また、非混雑環境下では車両が走行する車道を除いた手前と奥の歩道のみ、混雑環境下では車両が通行止めにされているため道路全体を計測を行った。正しい人数は動画を目視で確認することで算出し、画像内に人物が半身以上映っていたら 1 人とカウントした。ステレオカメラは Bumblebee2 (Point Grey Research, カラー,  $f=3.8\text{mm}$ ,  $b=120\text{mm}$ , VGA, 48fps) を使用した。処理には CPU が Intel Core2 Duo (3.06 GHz), メモリは 6GB RAM を搭載したノート PC を使用した。非混雑環境下での計測結果を図 7 に、混雑環境下での計測結果を図 8 に示す。図 7 より、各方向に移動する人数の推移が大まかに計測出来ていることが分かる。カルマンフィルタを用いた人流計測, KLT とボロノイ分割を用いた人流計測ともに、図 9(a) に示す赤い楕円部において、日陰が発生し、前景領域が正しく抽出されにくいため精度が低下していた。また、図 9(b) に示すように、上側を走る車が歩道側に映って誤計測されることがあった。Table 1 に示す計測人数の絶対値誤差において、右方向の誤差が大きい原因はこの為であると考えられる。図 8 より、カルマンフィルタを用いた人流計測の結果が非常に悪いことがわかる。これは図 9 に示すように、手前にある紅白幕が風でなびいた際に前景領域として抽出され、人数計測が行われてしまうためである。KLT とボロノイ分割による人流計測の結果では、各方向に移動する人数の推移が大まかに計測出来ていることが分かる。しかし図 9(c) に示すように人物が日陰に入った際に背景差分による前景領域が正しく得られない場合があることがあげられる。また、図 9(d) では手前にある紅白幕が風でなびいた際に前景領域として検出され、その領域の重なり度  $\sigma$  が大きく計測されてしまうため、実際よりも人数を多く計測してしまう。

これらの結果より、2つの人流計測手法の特徴・有用性を示す。カルマンフィルタを用いた人流計測手法は非混雑環境下においては精度よく計測が行えた。また、処理速度も約 20fps とほぼリアルタイムでの計測が可能であり、高密度な人物の軌跡が取得可能である。しかし、照明の変化や風による物体の移動により前景領域が正しく抽出できない場合に、精度が低下した。KLT とボロノイ分割による人流計測手法は混雑環境下で精度よく計測が行えた。しかし、カルマンフィルタを用いた人流計測手法と同様に、前景領域が正しく抽出出来ない場合に精度が低下した。処理速度も約 7fps とやや遅く、人物の軌跡に関しても左右の識別しか行っていないため取得不可能である。よって、カルマンフィルタを用いた人流計測手法は前景領域を個々、あるいは 2~3 人の集団に切り分けられる非混雑環境下で精度よく計測が行える。KLT とボロノイ分割による人流計測手法は前景領域を個々に切り分けることが困難な混雑環境下で有用性あると言える。

## 5. 結 言

本稿では、実証実験を行った結果報告として、屋外実環境下における人流計測の実験結果を示した。実験はカルマンフィルタを用いた人流計測手法と KLT とボロノイ分割による人流計測手法の 2 種類の人流計測手法を用いて行った。非混雑環境下と混雑環境下において実験を行い、2つの人流計測手法による計測結果を比較することで本手法の特徴・有用性を示した。今後は、背景差分の手法を改良することによる前景領域抽出の高精度化、パーティクルフィルタの導入、より正確なオクルージョンの推定を行うことで、さらに高精度に人の流れの方向と人数を算出する手法を検討する。

## 謝 辞

実験に協力頂いた群馬県館林市に感謝の意を表す。

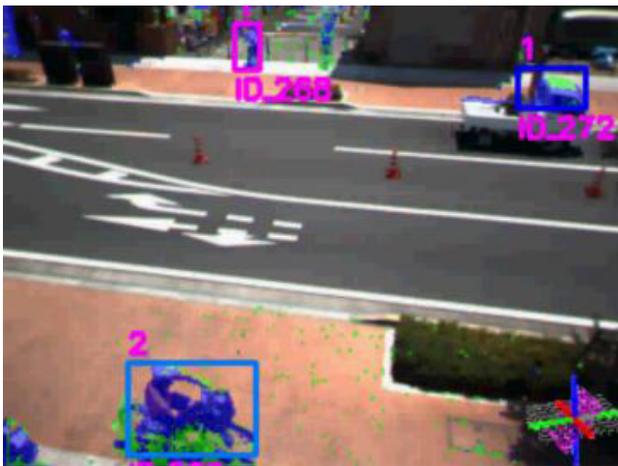


(a) non-crowded scenes

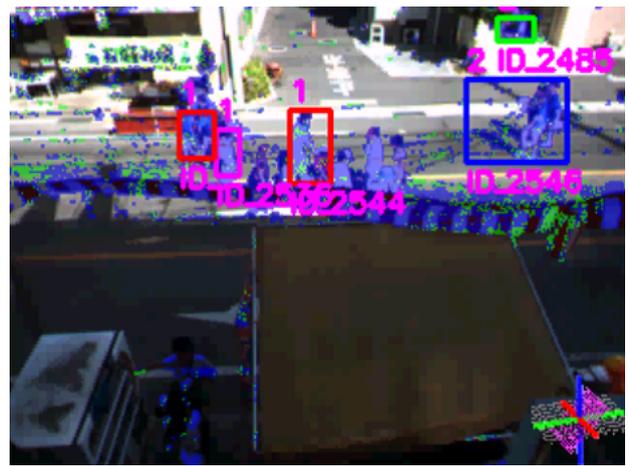


(b) crowded scenes

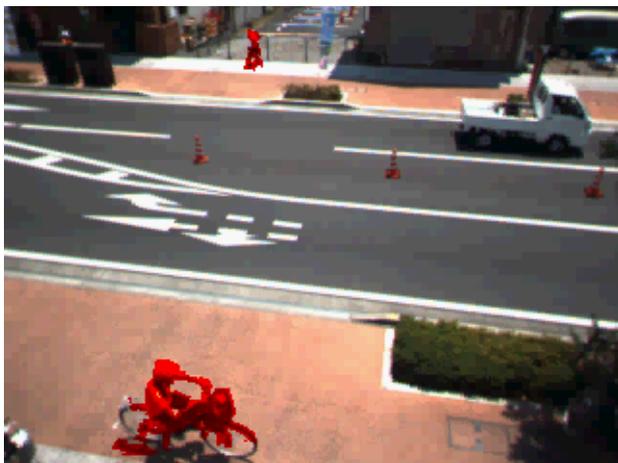
Fig. 5 Experimental scenes



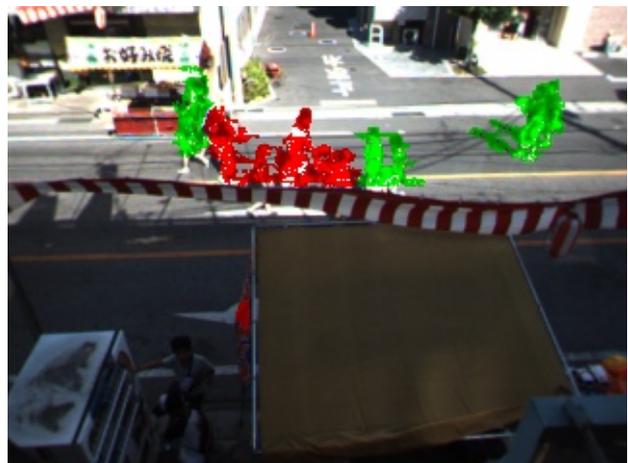
(a) Kalman filter (non-crowded scenes)



(b) Kalman filter (crowded scenes)



(c) Voronoi & KLT (non-crowded scenes)



(d) Voronoi & KLT (crowded scenes)

Fig. 6 Example images of experimental results

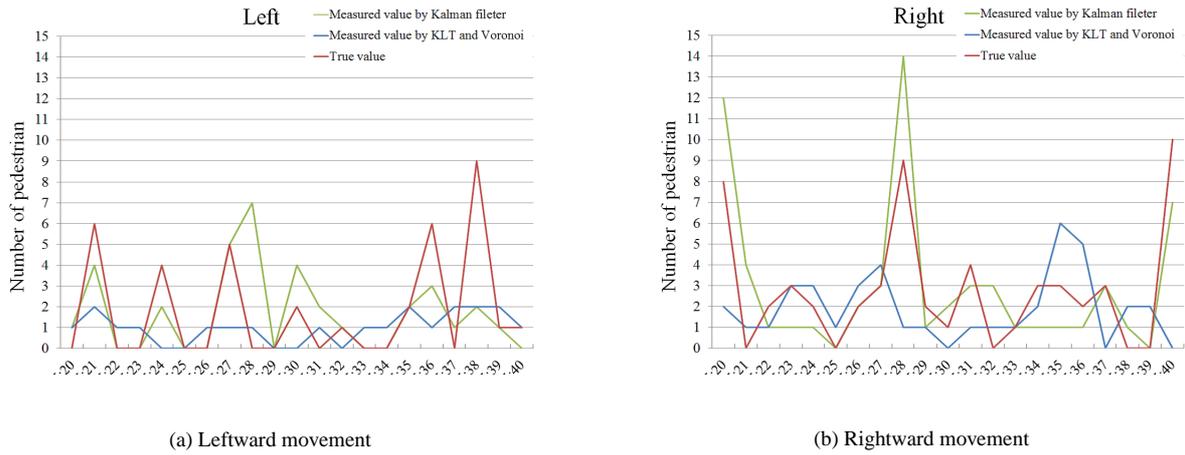


Fig. 7 Experimental results at non-crowded scenes

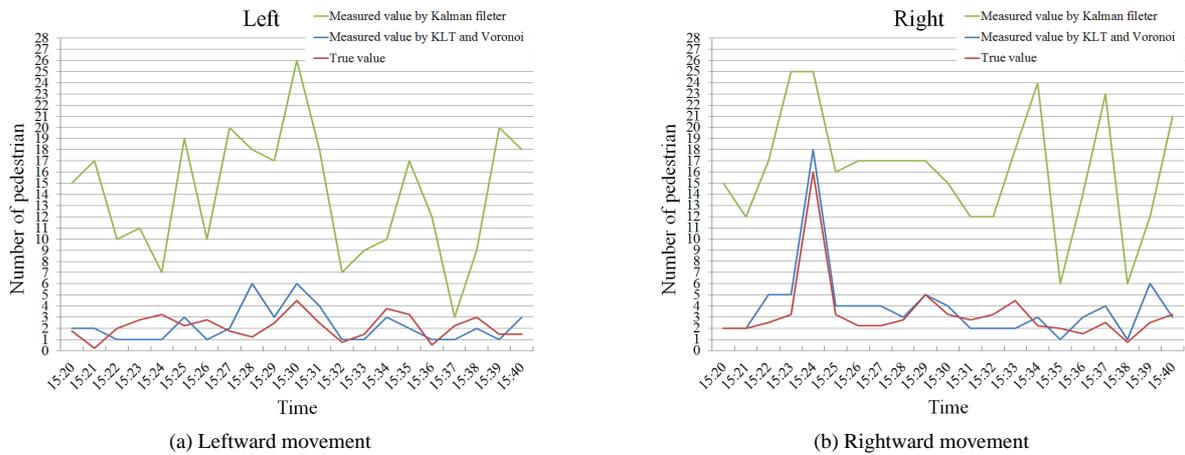
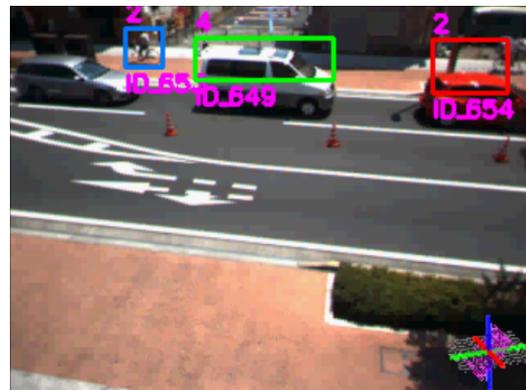


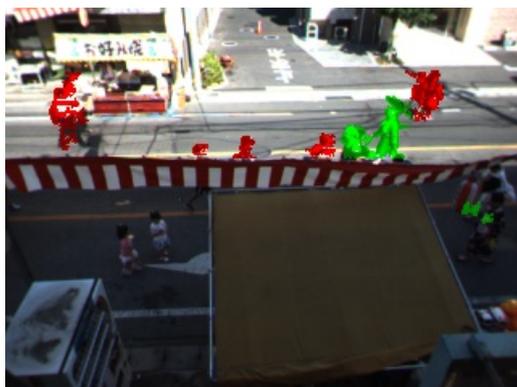
Fig. 8 Experimental results at crowded scenes



(a) Tracking of human group



(b) Detection of car



(c) Detection of the foreground region



(d) Calculation of the overlap

Fig. 9 Cases of failure

## 文 献

- (1) 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介, 坂本圭司, 鋸朋生, 鈴川尚毅, “複数のレーザレンジスキャナを用いた歩行者トラッキングとその信頼性評価”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88-D-II, No.7 (2005), pp.1143-1152.
  - (2) Iwata, T., Nishikado, H., Takayama, S., “Evaluation of Pedestrians Flow by Time Transition of Traffic Line Density Distribution”, *SICE Annual Conference* (2008), pp.2174-2179.
  - (3) Beymer, D., “Person counting using stereo”, *Workshop Human Motion* (2000), pp.127-133.
  - (4) Terada, K., Yoshida, D., Oe, S., Yamaguchi, J., “A method of counting the passing people by using the stereo images”, *Proc. of the ICIP1999*, Vol.2 (1999), pp.338-342.
  - (5) Choi, W., Pantofaru, C., Savarese, S., “Detecting and tracking people using an RGB-D camera via multiple detector fusion”, *ICCV Workshops* (2011), pp.1076-1083.
  - (6) Umeda, K., Hashimoto, Y., Nakanishi, T., Irie, K., Terabayashi, K., “Subtraction stereo - a stereo camera system that focuses on moving regions -”, *Proc. of SPIE*, Vol.7239 (2009), 723908.
  - (7) Tomasi, C., Kanade, T., “Detection and tracking of point features”, *Technical Report* (1991), CMU-CS-91-132.
  - (8) Aurenhammer, F., “Voronoi Diagrams -A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure”, *ACM Computing Surveys* (1991), pp.345-405.
  - (9) Moro, A., Terabayashi, K., Umeda, K., Mumolo, E., “Auto-adaptive threshold and shadow detection approaches for pedestrians detection”, *In Proc AWSVCI* (2009), pp.9-12.
  - (10) 寺林賢司, モロアレッサンドロ, 梅田和昇, “GPUを用いたノンパラメトリック背景更新”, 平成22年電気学会電子・情報・システム部門大会予稿集, No.TC10-7 (2010), pp.398-399.
-