

## 動作計画のための環境構築と視覚誘導

大西 直哉<sup>†</sup> 井宮 淳<sup>††</sup>

<sup>†</sup>千葉大学 自然科学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 Tel +81-43-290-3257.

<sup>††</sup>国立情報学研究所 / 千葉大学総合メディア基盤センター 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2  
/ 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 Tel +81-43-290-3257 / +81-3-4212-2000,  
<sup>†,††</sup> {ohnishi,imiya}@media.imit.chiba-u.ac.jp

**あらまし** 本論文では、二足歩行型ロボットの動作計画を作成するための、オプティカルフローを用いた環境構築法を提案する。ロボットが歩行するためには、進入領域が平面であることが必要である。そこで、ロボットの頭部に取り付けられた単眼カメラの画像のオプティカルフローを用いて、平面領域を抽出する。キャリブレーションが困難な、二足歩行型ロボットのカメラ運動においても、平面領域の点対応を用いて、平面領域を推定することができる。そして、抽出された画像の平面領域から、逆透視変換を用いて局所的な地図を作成し、ロボットの移動にしたがって環境地図を構築する。

**キーワード** 環境地図, オプティカルフロー, 視覚誘導, ロボットビジョン, 逆投影.

## Environmental Map Construction and Visual Navigation for Motion Planning

Naoya OHNISHI<sup>†</sup> and Atsushi IMIYA<sup>††</sup>

<sup>†</sup>School of Science and Technology, Chiba University Yayoicho 1-33, Inage-ku, 263-8522, Chiba, Japan Tel +81-43-290-3257.

<sup>††</sup>National Institute of Informatics / IMIT Hitotsubashi 2-1-2, Chiyoda-ku, 101-8430, Tokyo, Japan / Yayoi-cho 1-33, Inage-ku, 263-8522, Chiba, Japan Tel +81-3-4212-2000 / +81-43-290-3257.  
<sup>†,††</sup> {ohnishi,imiya}@media.imit.chiba-u.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose an algorithm for the construction of environmental maps using optical flow observed by the vision system of humanoid robot. A humanoid robot walks on a planar area. Therefore, for the autonomous navigation of a humanoid robot, the detection of a planar area is an essential task. Our algorithm first detects dominant plane area from sequence of images employing optical flow, and second estimates a walkable area and obstacles backprojecting dominant plane to the environment. We also develop a method to transform a sequence of images observed by a camera mounted on a humanoid robot to a sequence of image observed by a vehicle robot, which are suitable for computation of optical flow to the navigation.

**Key Words** Environmental map, Optical flow, Visual navigation, Robot vision, Back projection.

# 1 まえがき

本論文では、二足歩行型ロボットの自律的な動作計画を考え、二足歩行型ロボットに取り付けられたカメラの視覚情報より、歩行可能な領域の地図を作成する方法を提案する。

ロボットの視覚センサを用いて、ロボットの侵入可能な領域を抽出する手法には、全方位カメラや単眼カメラを用いたエッジ抽出による方法 [1][2]、経路と交差点の観測による方法 [3] などがある。エッジ抽出による方法では、床面とその他の領域が明確に分かれていなければならない。床面の色は均一でなければならない。しかし、人工的な環境では床面にテクスチャが貼られていることが多い。また、経路と交差点を観測する方法では、経路を認識するためのランドマークが必要である。さらに、本研究室で提案された、カメラ運動によるオプティカルフロー解析による平面領域の抽出方法 [4] がある。オプティカルフロー解析による手法は、特別なランドマークを必要としないので、さまざまな環境に適応できる。そこで、本論文では、平面領域を抽出するために、オプティカルフロー解析による抽出方法を用いる。

# 2 オプティカルフローによる環境構築

二次元地図は平面領域とそれ以外の部分からなる。平面領域とは床面のように一つの平面で近似できる領域のことをいう。画像からの平面領域の抽出は、オプティカルフローを用いる。そして、画像から抽出された平面領域を、逆透視変換を用いてワールド座標に変換する。これにより、局所的な二次元の環境地図を作成することができる。ここで、時刻  $t$  での、画像上の点  $(x, y)$  の輝度値を  $I(x, y, t)$  とし、 $I_x u + I_y v + I_t = 0$ 、をみたす  $\mathbf{u} = (u, v)^T$  をオプティカルフローという。

カメラ中心の運動が平面に対して平行な等速並進運動であるとき、平面が引き起こすオプティカルフローは一定となることが知られている [4]。従って、そのフローとの整合を判定することにより、平面領域を抽出することができる。

ここで、二足歩行型ロボットの視点を考える。ロボットが二足歩行するとき、頭部に取り付けられたカメラは進行方向以外にも運動する。そのカメラ運動は、ロボットの進行方向に対して垂直な面での、平行移動と回転運動であると仮定する。このとき、カメラの移動による画像上の平面領域の変化は、アフィン変換で表すことがで

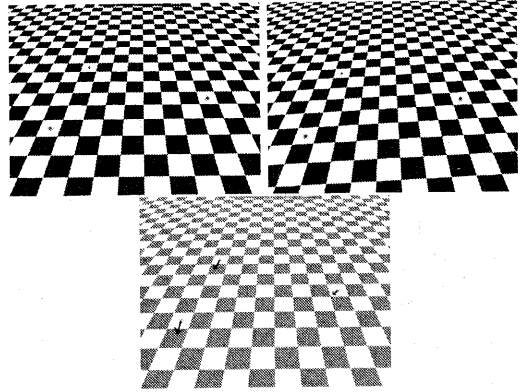


図 1: ロボットの歩行による画像のズレ

きる (図 1)。

すなわち、時刻  $t$  での画像上の点  $(x, y)^T$  と、時刻  $t + \Delta t$  での画像の対応する点  $(x', y')^T$  の間に、

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \mathbf{t}, \quad (1)$$

という関係が成り立つことを仮定する。ここで、 $\mathbf{A}$  は  $2 \times 2$  の行列、 $\mathbf{t}$  は 2 次元ベクトルである。時刻  $t$  と  $t + \Delta t$  の画像において、3 つの対応点が分かっているならば、 $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{t}$  を計算できる。時刻  $t$ 、 $t + \Delta t$  での対応点をそれぞれ  $\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i$  ( $1 \leq i \leq 3$ ) として、

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}'_2 & \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}'_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2 & \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

とおくと、アフィン係数  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{t}$  は

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}' \mathbf{P}^{-1}, \quad \mathbf{t} = \mathbf{p}'_1 - \mathbf{R} \mathbf{p}_1, \quad (4)$$

として求めることができる。 $\mathbf{A}$  を求めるための条件として、 $\mathbf{P}$  に逆行列が存在しなければならない。そのため、式 (3) より、画像上で一直線上にない 3 点を対応点として選ぶ必要がある。

アフィン係数  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{t}$  を求められれば、式 (1) より、ロボットの進行方向に直行する面での画像の変動が分かる。このとき、フローの関係は、

$$\mathbf{u}(x, y) = (x - x', y - y')^T, \quad (5)$$

である (図 2)。この、前方に物体のない平面上を歩行するロボットから見た画像列に対して計算したオプティカルフローを平面の定常なオプティカルフローとする。

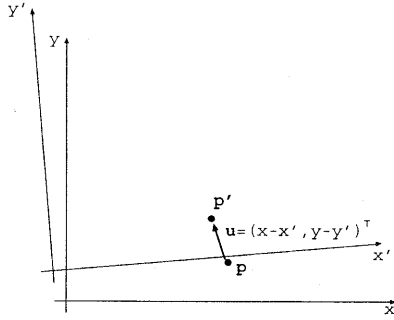


図 2: 画像のズレから求めるオプティカルフロー

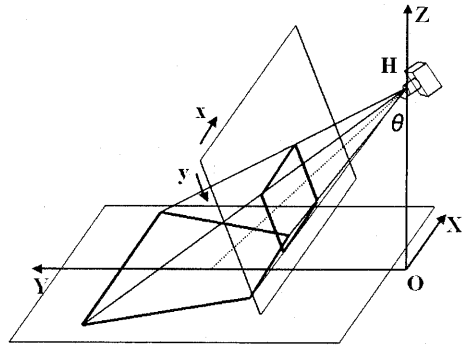


図 3:  $(x, y)$  画像座標系と  $(X, Y, Z)$  ワールド座標系の関係

下に、式 (1)(5) にもとづく平面領域のオプティカルフロー計算のアルゴリズムを示す。

```

procedure Planar Flow Detection
for  $x = 0$  to  $w$ 
  for  $y = 0$  to  $h$ 
     $(x', y')^T = \mathbf{A}(x, y)^T + t$ 
     $\mathbf{u}(x, y) = (x - x', y - y')^T$ 
  end
end

```

ただし、 $w, h$  はそれぞれ撮影画像の幅、高さとし、画像上の点  $(x, y)$  での平面領域のフローを  $\mathbf{u}(x, y)$  とする。この平面の定常なオプティカルフローと、前方に物体のある画像のオプティカルフローを整合判定することにより、画像の平面領域を求めることができる。

画像座標  $(x, y)$  での、平面の定常なオプティカルフローを  $\mathbf{u}(x, y)$ 、カメラ運動による時刻  $t$  のオプティカルフローを  $\mathbf{u}_t(x, y)$  とする。オプティカルフローは画像面上の 2 次元のベクトルなので、その大きさと傾きが等しければ、2 つのフローが等しいといえる。したがって、以下の式を満たすなら、 $\mathbf{u}_t(x, y)$  は平面のオプティカルフローであると判定する。

$$\frac{\mathbf{u}_t(x, y)^T \mathbf{u}(x, y)}{\|\mathbf{u}_t(x, y)\| \|\mathbf{u}(x, y)\|} = 1, \quad \frac{\|\mathbf{u}_t(x, y)\|}{\|\mathbf{u}(x, y)\|} = 1. \quad (6)$$

次に、式 (6) にもとづく平面領域抽出のアルゴリズムを示す。ただし、時刻  $t$  での画像を  $I_t(x, y)$  とし、 $w, h$  はそれぞれ撮影画像の幅、高さとする。ここで、 $I_t(x, y) = 1$  となる領域が平面領域となる。

```

procedure Ground Plane Detection
for  $x = 0$  to  $w$ 
  for  $y = 0$  to  $h$ 
    if  $\frac{\mathbf{u}_t(x, y)^T \mathbf{u}(x, y)}{\|\mathbf{u}_t(x, y)\| \|\mathbf{u}(x, y)\|} = 1$  and  $\frac{\|\mathbf{u}_t(x, y)\|}{\|\mathbf{u}(x, y)\|} = 1$ 
      then  $I_t(x, y) = 1$ 
    else  $I_t(x, y) = 0$ 
    end
  end
end

```

抽出した平面領域の画像から逆透視変換を用いて局所的な二次元の環境地図を作成する [5]。静止したカメラで撮影される領域を局所という。 $(x, y)_I$  を画像座標系、 $(X, Y, Z)_W$  をワールド座標系とする (図 3)。カメラの位置、角度から求められる外部変数として、 $H$  をカメラの高さ、 $\theta$  を鉛直方向からのカメラの傾きとする。また、カメラモデルをピンホールカメラとして、その内部変数  $f$  を焦点距離とし、 $(f_x, f_y)$  をカメラ中心の画像座標とする。

ピンホールカメラモデルを用いた投影の幾何を図 4, 5 に示す。カメラ中心はワールド座標  $(0, 0, H)_W$  に位置し、カメラの光軸は鉛直軸  $Z$  から  $Y-Z$  平面内に  $\theta$  だけ傾いている。

図 4, 5 より画像座標  $(x, y)_I$  は次のようにワールド座標  $(X, Y, Z)_W$  に変換できる。

$$(x, y)_I \mapsto (x - f_x, f \sin \theta + (f_y - y) \cos \theta, H - f \cos \theta + (f_y - y) \sin \theta)_W.$$

これより、ワールド座標の平面領域上のそれぞれの点は以下のように表すことができる。

$$X(x, y) = \frac{H(x - f_x)}{f \cos \theta - (f_y - y) \sin \theta} \quad (7)$$

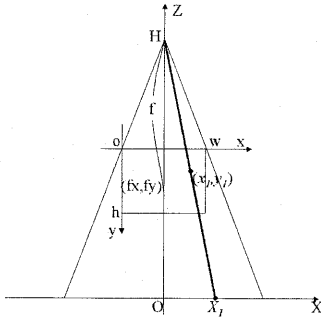


図 4: X-Z 平面

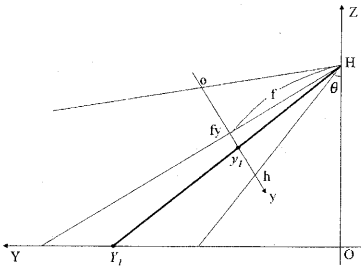


図 5: Y-Z 平面

$$Y(y) = \frac{H(f \sin \theta + (f_y - y) \cos \theta)}{f \cos \theta - (f_y - y) \sin \theta}. \quad (8)$$

カメラはワールド座標 Y 軸方向に速さ  $v$  mm/s で並進している。環境地図作成で用いる射影変換の式 (7), (8) にカメラの運動を考慮に入れると,  $t$  を時間として,

$$X_t(x, y) = X(x, y), \quad (9)$$

$$Y_t(y) = Y(y) + vt, \quad (10)$$

と書ける。これより, 局所的な二次元環境地図を, 各時刻において一つづつ作成することができる。異なる時刻でワールド座標  $(X, Y)$  が等しくなる場合は, 新しい方の時刻を優先して重ね合わせる。このようにして, 画像列から環境地図を作成することができる。

ここで, 画像座標系からワールド座標系への射影変換によって生じる距離の誤差を考える。この環境地図は二足歩行型ロボットを誘導するためのものなので, 二足歩行型ロボットの歩幅より, 小さな誤差で環境地図を作成しなければならない。射影変換によって生じる X, Y 方向の距離の誤差は, カメラからの距離で決まるため,  $y$  (画像縦座標) のみに依存した関数となり, それぞ

れ  $\Delta X(y)$ ,  $\Delta Y(y)$  とすると,

$$\Delta X(y) = X(x+1, y) - X(x, y), \quad (11)$$

$$\Delta Y(y) = Y(y+1) - Y(y), \quad (12)$$

となる。画像座標での  $x, y$  軸方向のオプティカルフローを求める間隔を  $s$  pixel, 二足歩行型ロボットの歩幅を  $S$  mm とすると,

$$\frac{\Delta X(y)s}{S} < 1, \quad \frac{\Delta Y(y)s}{S} < 1 \quad (13)$$

を満たす撮影画像の領域を使用し, 局所地図の重ね合わせをする。式 (7)~(13) にもとづく環境地図作成のアルゴリズムを下に示す。

```

procedure Mapping
for t = 0 to T
  for x = 0 to w
    for y = 0 to h
      if  $\frac{\Delta X(y)s}{S} < 1$  and  $\frac{\Delta Y(y)s}{S} < 1$ 
        then  $M(X_t(x, y), Y_t(y)) = I_t(x, y)$ 
      end
    end
  end
end

```

ただし, 時刻  $t = 0$  から  $t = T$  のあいだまでを撮影するとし, ワールド座標の地図を  $M(X, Y)$  とする。 $M(X, Y) = 1$  となる領域が平面領域である。

環境地図の原点から Y 軸方向 (走行型ロボットの並進方向) の平面領域の長さを求め, それを  $L$  mm とする。また, 二足歩行型ロボットにおいて, 進む距離は歩数と歩幅の積となるので, 歩幅を  $S$  mm とすると, 移動出来る歩数は,  $N = L/S$  となる。二足歩行型ロボットの歩数  $N$  は整数値なので, 求めた値の小数点を切り捨てる。

### 3 実験

式 (7), (8) を用いて, 撮影画像からワールド座標の環境地図に復元できるかを確認する。撮影に使用したカメラの内部変数, 外部変数は表 1 に示す。以降の実験でも, 同じカメラ変数を使用する。またここでは, 平面領域の抽出にオプティカルフローを使わず, 撮影画像から手で平面領域を切りだした。

撮影画像 (図 6 左) から, 手で平面領域とそれ以外の領域に分けたものが図 6 右である。図 6 右において, 白色の領域が平面領域, 黒色の領域がそれ以外の領域である。また, 図 7 において, ワールド座標原点は画像下

表 1: カメラ変数

高さ $H$	465 mm
焦点距離 $f$	343 pixel
カメラの傾き $\theta$	55 °
カメラ中心の座標 $(f_x, f_y)$	(163, 120)pixel

端の中心であり、灰色の部分は撮影外の領域である。これを環境地図の理論値とする。

ワールド座標原点から障害物までの距離と、障害物の手前側の横幅を表 2 に示す。また、障害物がある点 ( $y = 102$  pixel) での誤差の大きさを求めると、X 軸方向の誤差は 3mm、Y 軸方向の誤差は 5mm となり、障害物までの距離と障害物の横幅が、式 11, 12 から求められる誤差の範囲で求められることがわかる。

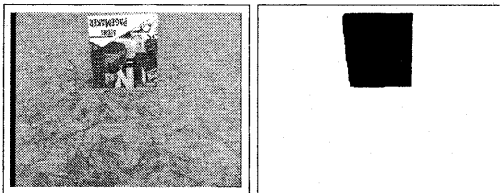


図 6: 左: 撮影画像, 右: 手で抽出した平面領域

表 2: 実測値と環境地図の距離

	障害物までの距離	障害物の横幅
実測値	1600 mm	215 mm
環境地図	1598 mm	216 mm

二足歩行型ロボットの歩行によるカメラ運動から、撮影画像の平面領域を求めた。撮影画像 (図 8 上) より 3 つの点対応を求め、式 (1) を用いてアフィン係数を求める。それより、平面領域のフローを求め、撮影画像のオプティカルフローと整合判定をし、平面領域 (図 8 下) を求めた。

二足歩行型ロボットの視点から平面領域が求められるので、環境地図を作成する実験では、制御が容易な走行型ロボットを用いる。

まず、平面領域を抽出するために、平面領域の定常なオプティカルフローを求めた (図 9)。走行型ロボットの並進速度を  $v = 3$  m/s として、平面だけの領域を 1 秒間に 1 フレーム撮影し、合計 100 フレーム撮影する (図

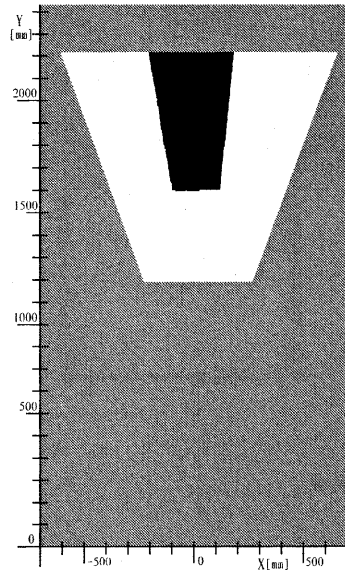


図 7: 環境地図理論値

横軸: ワールド座標 X, 縦軸: ワールド座標 Y  
白色: 平面領域, 黒色: 障害物, 灰色: 撮影外領域

10). 時刻  $t$  のオプティカルフローを求めるために、時刻  $t, t+1, t+2$  の 3 枚の撮影画像を用た。撮影画像の  $x, y$  方向に 5 pixel 間隔でオプティカルフローを求め、それぞれの時刻でのオプティカルフローの平均をとり、それを平面の定常なオプティカルフローとする。

走行型ロボットの並進速度を  $v = 3$  mm/s として、障害物が現れる画像を毎秒 1 フレーム、合計 400 フレーム撮影し、そのオプティカルフローを求める。上記で求めた平面領域のフローと式 (6) を用い整合判定することで、平面領域の画像を作成した (図 11 右上)。図 11 において、白色が平面領域、黒色が障害物と判定された領域である。

オプティカルフローは撮影画像の輝度値から求めるため、実際の実験環境では蛍光灯のちらつきなどにより、正確に求めることはできない。それにより、平面領域が正しく抽出できないので、撮影環境を考慮して誤認識を減らす。ごく小さな障害物は配置しないので、各平面領域画像において  $5 \times 5$  の範囲で空間的中央値を取り誤差を減らす (図 11 左下)。また、この実験では外の環境が急に变化するような場合は考えないので、微小時間の変化では平面領域はほぼ同じであると考えられる。そこで、各画像の時間軸方向に 5 フレーム用い、時間的中央値を取る (図 11 右下)。

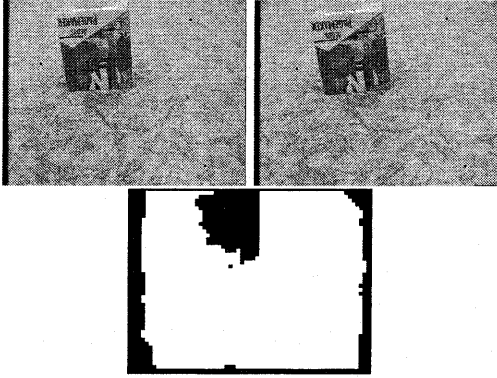


図 8: 二足歩行型ロボットの歩行による画像の傾きと求めた平面領域

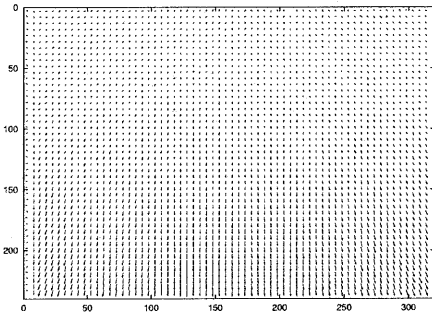


図 9: 平面領域のオプティカルフロー

走行型ロボットの並進速度を  $v = 3 \text{ mm/s}$  として、各時刻での撮影画像 (図 12 左) より、平面領域 (図 12 右) を抽出した。図 12 右において、白色が平面領域、黒色が障害物と判定された領域である。

オプティカルフローを求める間隔は  $s = 5 \text{ pixel}$ 、二足歩行型ロボットの歩幅は  $S = 50 \text{ mm}$  なので、式 (13) より、撮影画像の  $40 < y \leq 240$  となる領域を使用して、環境地図を重ね合わせる。式 (9)、(10) を用い変換したものが図 13 である。図 13 において、ワールド座標原点は画像下端の中心、白色の領域が平面領域、灰色の領域は撮影外の領域である。

オプティカルフローより求めた環境地図では、撮影環境や走行型ロボットの運動誤差などにより、誤認識が生じる。そこで、求めた環境地図の誤認識を減らすために、統計的処理を行う。小さな障害物はおいていないという仮定より、各画素の  $10 \times 10$  の範囲で中央値をと



図 10: 平面領域の画像

た。図 13 にこのような空間的中央値処理を行ったものが図 14 である。さらに、図 14 の凸包をとったものが図 15 である。ここで凸包とは、障害物の領域を囲む最小の凸多角形を求めることである。凸包処理により、抽出することができなかった障害物の領域を復元することができる。

図 15 に示した凸包をとった環境地図と、図 7 に示した環境地図の理論値との差分をとると図 16 のようになる。また、実測値と図 7 の環境地図の理論値、図 15 の環境地図での、障害物までの距離を表 3 に示した。これより、二足歩行型ロボットの歩幅  $S = 50 \text{ mm}$  よりも少ない誤差で求められることがわかる。

表 3: 実測値と環境地図の距離

	障害物までの距離
実測値	1600 mm
環境地図理論値	1598 mm
環境地図	1580 mm

作成した環境地図を用いて二足歩行型ロボットを動かすスクリプトを作成し、歩行させた。

図 15 より、ワールド座標原点から Y 軸方向の障害物までの距離は  $L = 1598 \text{ mm}$  と求まる。二足歩行型ロボットの歩幅  $S = 50 \text{ mm}$  より、 $N = 31$  歩となった。

## 4 おわりに

オプティカルフローを用いた画像の平面領域から、ワールド座標の環境地図を作成できることを示した。また、この手法では、カメラの並進運動だけでなく、回転運動についても同様に考えることができるので、障害物を

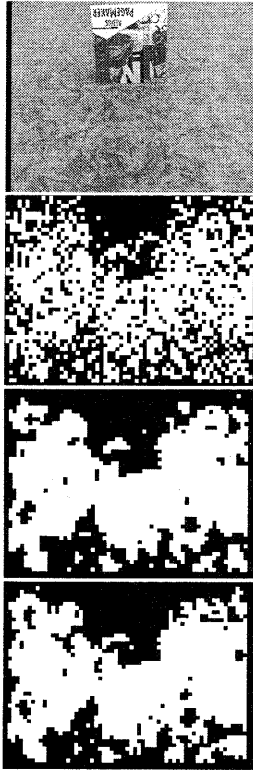


図 11: 撮影画像と平面領域

左上: 撮影画像

右上: オプティカルフローより求めた平面領域

左下: 平面領域の空間的中央値

右下: 平面領域の時間的中央値

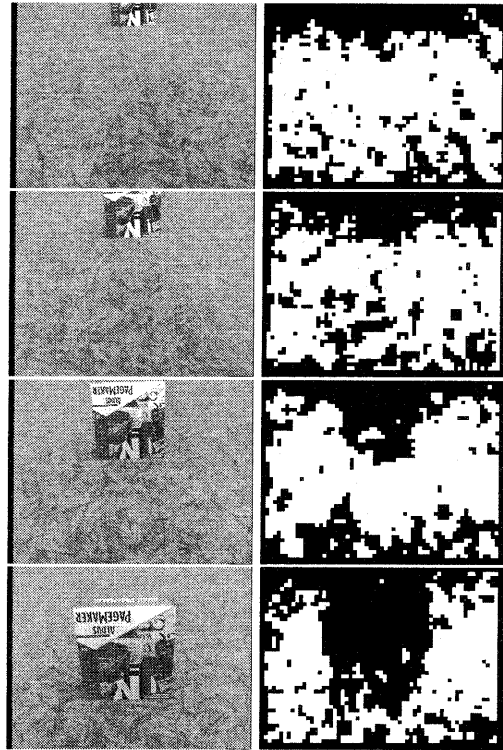


図 12: 左: 撮影画像, 右: 平面領域

$v = 3 \text{ mm/s}$  で並進したとき, 上からそれぞれ

100,200,300,400 秒後の撮影画像

右: 平面領域において, 白色: 平面領域, 黒色: 障害物

回り込んで撮影し, 部屋全体の環境地図を作ることができる.

今後は, 作成した環境地図と, 二足歩行型ロボットに取り付けたカメラによって, ロボットを実時間で視覚誘導する.

## 参考文献

[1] 浜田博昭, 八木康史, Benson Neles, 谷内田正彦, 全方位視覚センサを用いた環境地図とロボット自己位置・姿勢の同時推定法, 情報処理学会論文誌 CVIM No.121 - 014 (2000)

[2] 目崎祐史, 増田功, 階層的プランニングによる室内地図の自動生成, 情報処理学会論文誌 CV No.070 -

014 (1991)

[3] 越智亮, 李仕剛, 八木康史, 谷内田正彦, 経路と交差点の観測による環境地図の作成, 情報処理学会論文誌 CVIM No.104 - 007 (1997)

[4] 川本一彦, 山田大輔, 井宮淳, ラインハルトクリッタ, 廣田薫, オプティカルフロー解析によるシーンに依存しない平面領域抽出, 情報処理学会論文誌 投稿中

[5] A. Laurentini, The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding, IEEE Trans. PAMI, Vol.16, No.2, pp.150-162, 1994.

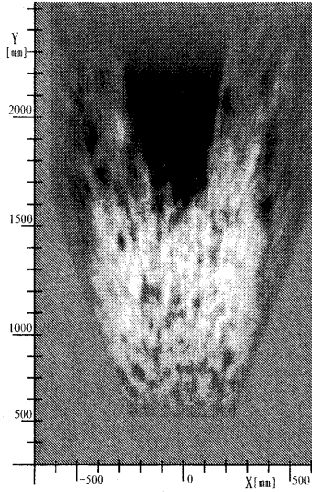


図 13: ワールド座標二次元環境地図

横軸: ワールド座標  $X$ , 縦軸: ワールド座標  $Y$   
 白色: 平面領域, 黒色: 障害物, 灰色: 撮影外領域

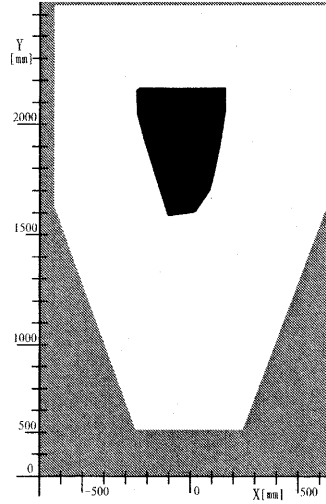


図 15: 凸包処理

横軸: ワールド座標  $X$ , 縦軸: ワールド座標  $Y$   
 白色: 平面領域, 黒色: 障害物, 灰色: 撮影外領域

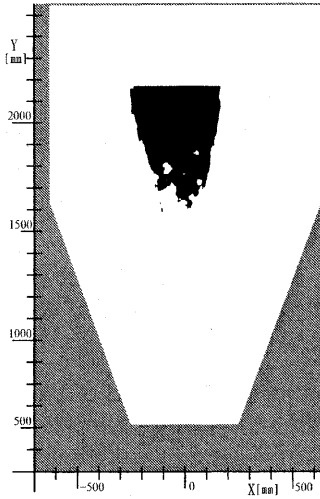


図 14: 空間的中央値処理

横軸: ワールド座標  $X$ , 縦軸: ワールド座標  $Y$   
 白色: 平面領域, 黒色: 障害物, 灰色: 撮影外領域

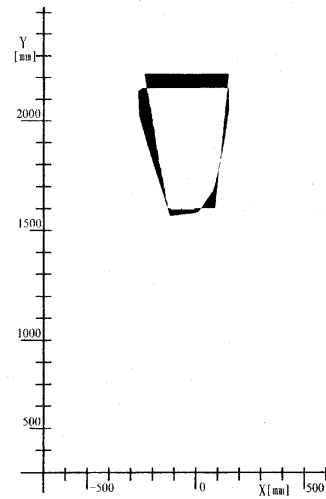


図 16: 理論値との差分

横軸: ワールド座標  $X$ , 縦軸: ワールド座標  $Y$   
 黒色: 理論値と異なる領域