

画像処理による速度計測

雨宮, 美和子 / AMEMIYA, Miwako

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2004年度 修士論文

画像処理による速度計測

指導教授 小林 一行 助教授

大学院工学研究科

システム工学専攻修士課程

03R6101

アメミヤ ミワコ

雨宮 美和子

Non-contact type speed measurement

Miwako AMEMIYA

Abstract

For autonomous navigation, the omni-directional camera is a suitable sensor for capturing a 360° image without any dead angles. In this paper, we propose a new image-based absolute (translational and/or rotational) speed measurement method using sequential frames of an omni-directional image. The proposed method demonstrates the omni-directional camera's ability to function not only as a vision sensor but also as a speedometer. The validity of the proposed method was examined in real field images.

Key words: speed estimation, omni-directional camera, vision, speedometer

目次

目次	3
第1章 はじめに	4
1.1 研究の背景	4
2.2 従来手法と問題点	4
第2章 対象と問題の記述	6
2.1 環境	6
2.2 仮定の記述	7
2.3 問題の記述	7
第3章 測定原理	8
3.1 オムニディレクショナルカメラの構造	8
3.2 テンプレートマッチング処理	11
3.3 オプティカルフロー	14
第4章 画像処理によるプログラム	17
4.1 画像処理の手順	17
4.2 速さ・角度計算	18
第5章 実験	19
5.1 計測システム	19
5.1.1 車両	19
5.1.2 オムニディレクショナルカメラ	19
5.1.3 ジャイロスコープ	20
5.1.4 システムの基本構成	21
5.2 実験	22
5.3 オプティカルフローの実験結果	23
5.4 相関法の実験結果	25
5.4 検証	28
5.4.1 回転角度検出	28
5.4.2 速さ検出	28
第6章 むすび	29
付録1	30
付録2	31
参考文献	32
謝辞	33

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

移動ロボットや車両が未知環境を自律的に移動, 作業するためには, 環境に対する自己位置・姿勢の推定や未知物体の認識や未知物体への衝突回避などさまざまなタスクがある. 視覚センサは, これらの処理を行なうのに必要な外界情報を一つのセンサで獲得できるという利点があり, 移動ロボットのためのセンサとして有望視されている.^[1]

一般に, 自己位置を推定する方法には, 視覚の利用以外にも, GPS, スピードメータ, ジャイロスコープなどのセンサがある. それぞれ位置や速さ, 角度を測る専用センサである. スピードメータは, タイヤに直接接触させるセンサなので, 芝生の上ではタイヤの空回りにより誤差が生じ易く, 速さや角度にずれが生じ正確な計測が難しくなる. ジャイロスコープは角速度を計測し, 累積加算することで姿勢を推定する. しかし, ドリフトが起こり易いという問題がある. 長時間使用すると, ドリフトを累積することになるので誤差が大きくなっていく. そして, D-GPS は基地局からの電波を受信し, 絶対位置を推定する. しかし, 屋内環境や屋外の受信環境の悪い場所では適さないし, 単体では精度が悪い. よって, スピードメータやジャイロスコープ等の内界センサの値を積算する方法(デッドレコニング)を併用する必要がある.

そこで, D-GPS のような専用センサを組み合わせず, 様々な処理を同一のセンサシステムで実現できる利点から, 全方位視覚センサを用いた視覚情報のみでのマルチセンシングを行う.

そこで本研究ではオムニカメラ画像を非接触絶対速度センサとして利用する方法を提案する. 提案する方法は非接触で計測可能であるため, 原理的には, 芝生などの地面がやわらかく滑りやすい状況でも正確に速さを計測が可能である. 提案する方法の有効性を実験により検証する.

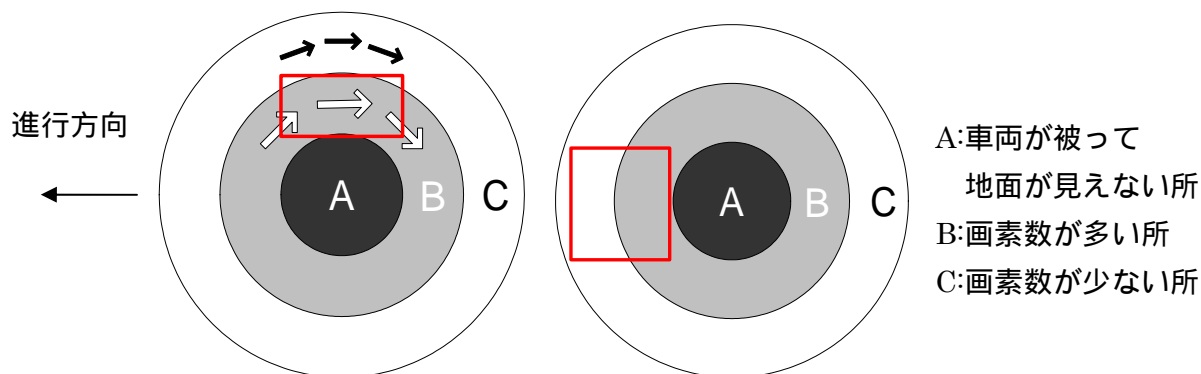
2.2 従来手法と問題点

オムニカメラを使う理由として, 我がピークルームが大会で白線検知に用いているということが挙げられる. オムニカメラの他に CCD カメラをもう一台載せることはプログラムの処理スピードが落ちてしまうのである.

オムニカメラの画像は双曲面ミラーなので画像が歪んでいる. オムニカメラより得られた画像は角度情報を保持するが, 距離情報は非線形である.

オムニカメラの画像は中心から外側に行くにつれて画素数が薄くなる. そこで車両が動作中に画像の歪みが少ない場所, かつ最小限で移動がわかる場所を探す. 歪みの少ない場所と歪みの多い場所を Fig. 1 に示す. (a)は進行方向に向かって画素数もだいたい同数であり, 画像の歪み方も比較的緩やかである. (b)は C から B へと画像が移動する

ので画素数が違い，画像の歪み方も急である．



(a) 歪みが少ない場所 (b) 歪みが多い場所

Fig . 1 オムニカメラの歪み方

Fig . 2 に車両での探索画像の位置を示す．探索画像位置は進行方向に向かって左右にとり，車両の移動距離を左右の画像の移動量の計算によって求める．

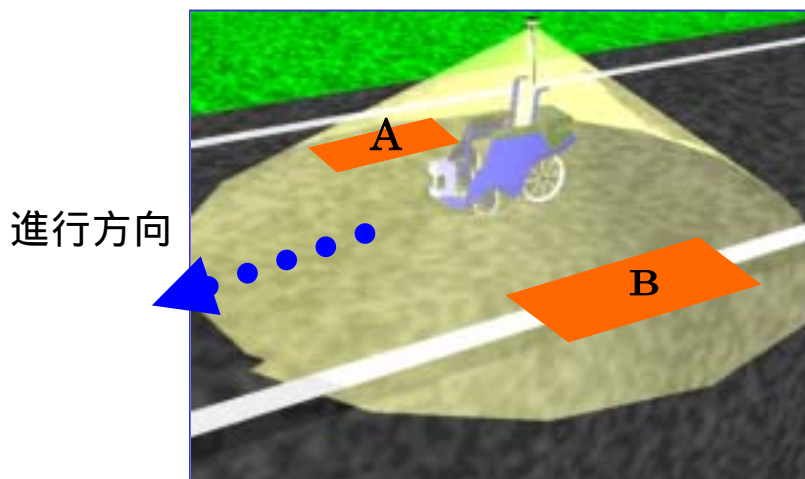


Fig . 2 探索画像の位置

しかし，オムニカメラの画像を変換していないので，テンプレートと検索画像領域との相関値が低く，回転角度によって検出精度に大きな差がでていた．そのため，検索画像の領域やテンプレートのサイズの再検討，また画像を地面平面変換してみるという課題が残った．そこで本論では地面平面への変換処理を行った後 2 つの手法を比較検討する．

第 2 章 対象と問題の記述

本研究ではオムニカメラを取り付けた CCD カメラの画像を計測対象とする．車体に接触させて測るエンコーダーは速度を測る上で一番有効であるかと思われたが，タイヤの空回りがあっては誤差が必ずでてしまう．そこで非接触で行なう必要があると思われる．非接触で計測が行なえるのはレーザーレーダとオムニカメラだが，外界センサはオムニカメラだけに絞って本研究を進める．

2.1 環境

本研究で対象とする環境は屋外環境である．芝生の環境は国際自律走行車競技大会 (IGVC) を想定し、アスファルトの環境は、学内のドライエリアを想定する．両環境とも傾斜角は 15 度以下とする．Photo . 1 と Photo . 2 に大会の屋外環境を示す．



Photo . 1 芝生の走行環境



Photo . 2 アスファルトの走行環境

2.2 仮定の記述

IGVC 大会での走行環境を想定し，以下の仮定を設ける．

- (A1) 急激な光量変化はないものとする
- (A2) 地面は近似的に平面とし，芝生やアスファルトの何らかの模様があるものとする

2.3 問題の記述

本研究では上記の対象と仮定の下に次の問題について検証する．

- (P1) オムニカメラの画像の歪み処理をどのように取り除くか
- (P2) 画像情報からどのように移動角度を抽出するか
- (P3) 画像情報からどのように速さを抽出するか

第 3 章 測定原理

3.1 オムニディレクショナルカメラの構造

本センサでは双曲面として 2 葉双曲面を用いる。Fig. 4 に示すように 2 葉双曲面とは双曲線を実軸(Z 軸)周りに回転することで得られる曲面である。そして、以下の双曲線が持つ特徴も双曲面において保持される。^[2]

・(0,0,+c)と(0,0,-c)の 2 つの焦点を持つ。(C = $\sqrt{a^2 + b^2}$)

ここで Fig. 3 に示すように Z 軸を鉛直軸とする 3 次元座標系 O-XYZ を考える。この時 2 葉双曲面は次の式で表せる。

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad \dots (1)$$

なお、a、b は双曲線の形状を定義する定数である。

本視覚系では、2 葉のうち Z>0 の領域にある双曲面をミラーとして利用する。

全方位視覚センサ Hyper Omni Vision は、Fig. 4 に示すように鉛直下向きに設置した Z>0 の領域にある双曲面ミラーとその下に鉛直上向きに設置したカメラから構成される。このとき、ミラーの焦点 およびカメラのレンズの中心からカメラの焦点 F だけ離れた平面とする。ミラー面とその焦点、カメラのレンズの中心は次式で表される。

ミラー面	$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1$
ミラー焦点	(0,0,+C)
カメラレンズの中心	(0,0,-C) \dots (2)

空間内の任意の点 P(X,Y,Z)に対する画像上での写像点を p(x,y)としたとき、点 P の方位角 θ は次の式で表される。

$$\tan\theta = Y/X = y/x \quad \dots (3)$$

すなわち Y/X で定まる点 P の方位角 θ は y/x で定まる写像点 p の方位角 θ を算出することで得られる(Fig. 4)。このように 360 度パノラマ状の領域内にある対象物体の方位角 θ が、その物体の画像面上の写像の方位として直接現れる。

また、点 P と Z 軸を含む鉛直断面を想定すると、点 P と写像点 p の間には次式の関係が成り立つ。

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha + c$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \gamma}$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{F}{x^2 + y^2}\right) \quad \dots (4)$$

すなわちミラーの焦点からの点 P の包圍角および伏角 α は，カメラのレンズの中心を双曲面の焦点位置にすることで，写像点 $p(x,y)$ より，一意に求まる．このとき，ミラーの焦点は固定なため，入力画像をミラーの焦点から見たカメラを鉛直軸周りに回転して得られる画像や一般のカメラの画像に変換できる．

変換画像面が地面と同一になるように，変換画像の光軸を鉛直下向きにし，地面からカメラの焦点までの距離 H_r を変換画像の焦点距離とする．

このとき，変換画像面は式(3)，(4)より次式が成り立つ．

$$\begin{aligned} \tan\theta &= Y/X = y/x \\ R_p &= \frac{-(b^2 - c^2)H_r r_p}{(b^2 + c^2)F - 2bc\sqrt{r_p^2 + F^2}} \\ R_p &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ r_p &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ (R_p, \theta) &: P(X, Y) \text{の極座標表現} \\ (r_p, \theta) &: p(x, y) \text{の極座標表現} \end{aligned} \quad \dots (5)$$

この変換公式により地面平面への変換画像を作る．

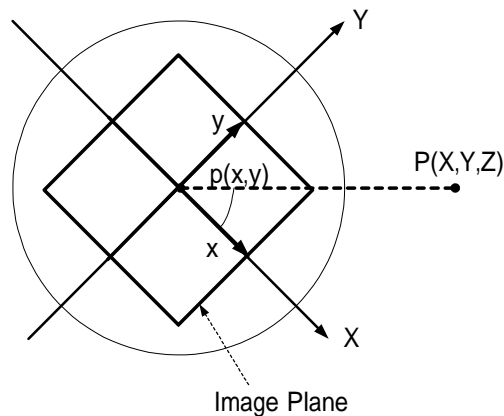


Fig . 3 点の射影

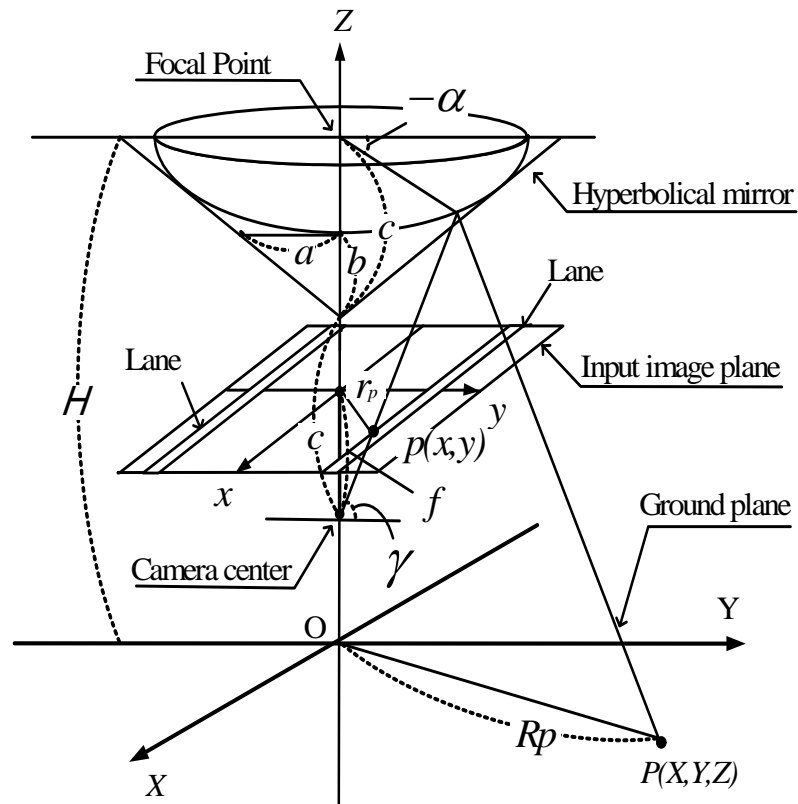
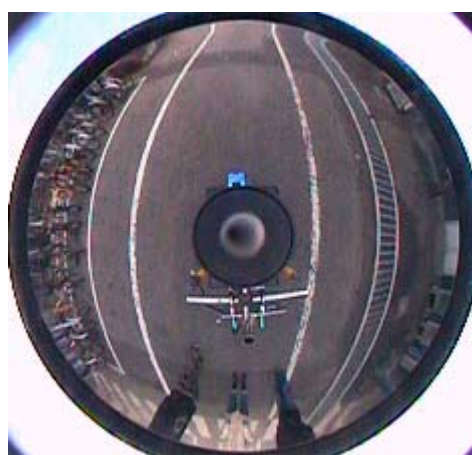


Fig . 4 視覚系構成

- (x, y) : x - y 座標 (入力画像)
- (X, Y, Z) : X - Y - Z 座標 (地面平面)
- F : カメラの焦点距離
- $a, b, c, α, γ$: 双曲面ミラーの中間変数
- H : カメラと地面の距離
- r_p : 画像平面の距離
- R_p : 地面平面の距離

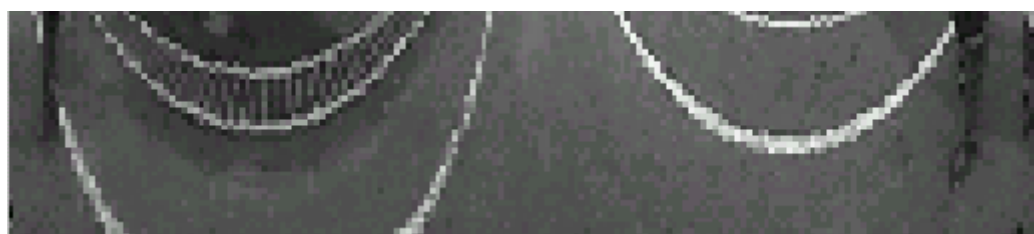
以下に入力画像と, X - Y 座標, r - $θ$ 座標へ変換後の画像を示す.



(a) 入力画像



(b) X-Y 座標



(c) r-θ 座標

Fig . 5 オムニカメラの変換例

まず速さ・角度計測を非接触で行なうにはランドマークや障害物を見つけて距離を測る方法があるが、IGVC 大会では近くにランドマークや障害物が見つからないことがしばしばあるので、ランドマークや障害物がない時でも距離を測定しなくてはならない。そこで、芝生やアスファルトに反射している太陽の光（輝度）に着目した。

次では本研究で使う処理について詳しく説明する。

3.2 テンプレートマッチング処理

動画像処理にはオプティカルフロー、空間フィルタ法^{[3][4][5]}などがある。これらを用いて移動画素により進行方向、その速さなどを計算することができるが、計算時間に問題がある。もっとも簡易に文字パターンや画像パターンなどを認識する方法としてテンプレートマッチングと呼ばれる方法がある。^[6]テンプレートマッチングではテンプレートを用意し、入力された探索パターンを1対1に重ねて比較することによって、もっともマッチング率が高い探索パターンを見つけることによって認識を行なう方法である。そこで本研究では、正規化相関テンプレートマッチングという処理方法を用いる。Fig . 6 はテンプレートと探索パターンの具体例である。

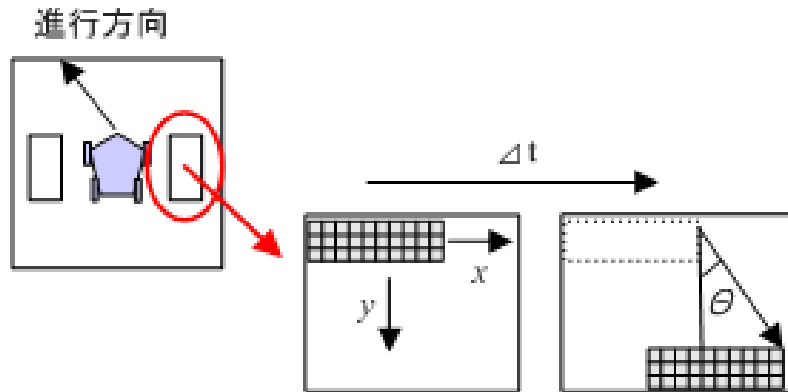


Fig . 6 テンプレートと探索画像

正規化相関テンプレートマッチングは時間 $k-1$ のテンプレート画像 $g_{(k-1)}(i, j)$ を時間 k の探索対象画像 $f_{(k)}(i, j)$ 内で画素単位に逐次移動させ , 探索対象画像内におけるテンプレート画像と類似した部分画像間の相関 $R_{(k)}(x, y)$ を式(6)で定義される .

$$R_{(k)}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_{(k)}(x+i, y+j) - \overline{f_{(k)}})(g_{(k-1)}(i, j) - \overline{g_{(k-1)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_{(k)}(x+i, y+j) - \overline{f_{(k)}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (g_{(k-1)}(i, j) - \overline{g_{(k-1)}})^2}} \quad \dots (6)$$

ただし , $\overline{f_{(i)}}$, $\overline{g_{(i-1)}}$ は共にそれぞれの画像の平均値である .

相関の計算には , FFT を利用した方法を使用している . FFT による方法では相関値の計算を直接時間軸で行なうのではなく , 一旦 , 周波数領域に分解し , それから周波数ごとに計算 , 一方のデータは複素共役をとり , 乗算する . そして周波数ごとのずれを計算 , その後 , 逆 FFT を施し時間軸のデータへ変換している . 計算される相関関数は , むだ時間のずれが計算される . FFT でデータは , 周期関数データとして扱われるため FFT 法で計算される相関係数は , 巡回的相関係数と呼ばれる . ここでは巡回的影響をなくした相関係数を計算する .

正規化相関係数 $R_{(k)}(x, y)$ は 2 つのパターンの相関が高ければ 1 に近づき , 低ければ

□1 に近づく .

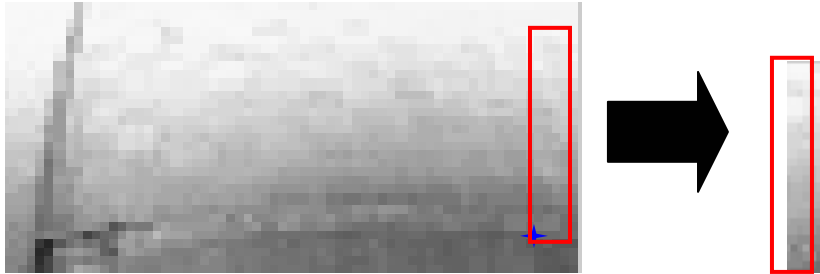


Fig . 7 時間 $k-1$ の画像と切り取ったテンプレート画像

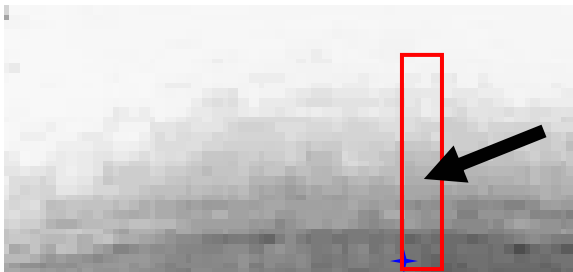


Fig . 8 時間 k の画像

正規化相関法によってテンプレート画像と探索画像の画素ずれ量 x, y [pixel] を抽出することができる。画素ずれ量 x, y [pixel] は、車両進行方向に対し、並進運動の場合には、同じ方向に画素のずれが生じる。また、回転運動の場合それぞれの画素ずれ量 x, y [pixel] は、回転量に応じそれぞれ反対方向に移動する。距離は画像平面の画素ずれ量 x, y [pixel] を地面平面 X, Y [cm] に変換すればよい。

3.3 オプティカルフロー

オプティカルフローとは、映像におけるフレーム間で画像中の明度パターンが変化する場合の見かけの速度分布である。従来提案されている代表的なオプティカルフロー検出法は、マッチング法、グラディエント法およびその他の手法に大別される。^[7]グラディエント法は、パターンの特徴を表す画像関数（濃淡分布）が運動に際して不変に保たれるとの仮定により、ある点におけるオプティカルフローの速度と、動画像の濃淡分布の空間勾配および時間勾配とを関係付ける式（拘束条件）をもとにした解析手法である。本研究では、グラディエント法でオプティカルフローの検出を行う。理由として、カメラ自身が動くような映像では、適切なテンプレートを作成するのが困難であり、動画像にはグラディエント法が適しているからである。グラディエント法は、次のように定義される。物体像の明度は時間的には変化せず、画像中の明度変化が運動によってのみ生じると仮定できる場合には、時刻 t における画像中の点 (x, y) の明度を $I(x, y, t)$ 、微小時間 Δt 経過後の位置を $(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ として、以下の式が得られる。

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (7)$$

式(7)の右辺をテイラー展開し、両辺を Δt で割り $\Delta t \rightarrow 0$ にすると式(8)が得られる。ただし、 $(u, v)^T = (dx/dt, dy/dt)^T$ は速度ベクトルを、 $(I_x, I_y, I_t) = (\partial I / \partial x, \partial I / \partial y, \partial I / \partial t)^T$ は輝度ベクトルを示す。

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (8)$$

しかし、2 個の未知パラメータ (u, v) が含まれるため、一意に決定するためには更に拘束条件を加える必要がある。この拘束条件は、本研究では空間的局所最適化法(Spatial Local Optimization)によって与えられる。同一物体の濃淡パターン上の局所領域では、オプティカルフローはほぼ一定と考えられる。このことから局所領域で得られるグラディエントの式は、同一の解を持つと仮定できる。そこでオプティカルフローの 2 個の未知パラメータ (u, v) に対して局所領域全体から求まる 2 つ以上の式を用いて、最小 2 乗法などで求める。

画像平面上に局所領域 S を考え、この領域 S 中でオプティカルフローが一定であると、次式を仮定する。

$$\rho = (u, v) = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right)$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{d\rho}{dy} = 0 \quad (9)$$

これを利用しオプティカルフローの速度成分 (u, v) を求める。

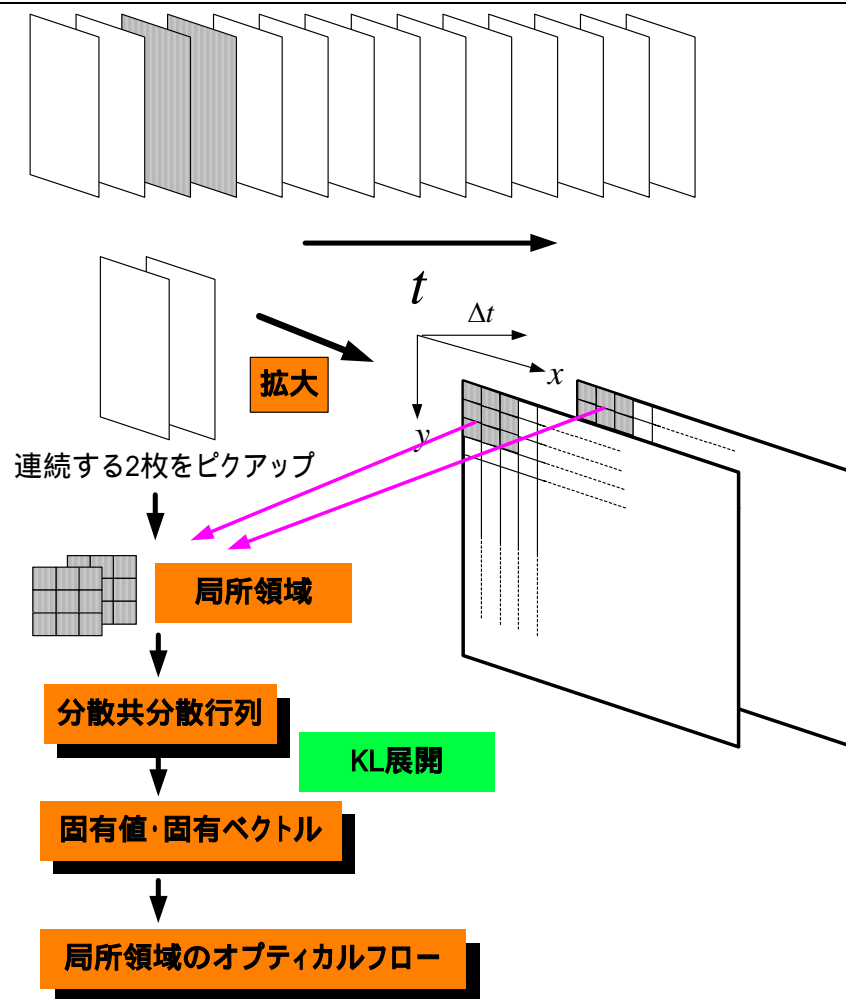
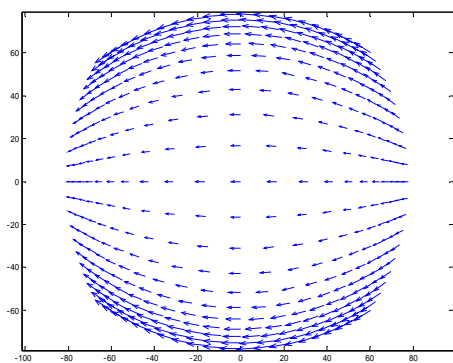
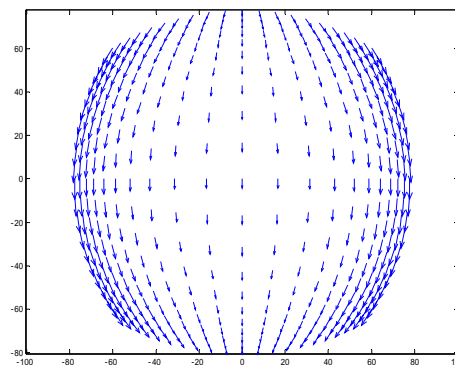


Fig . 9 オプティカルフローによる速度成分の求め方例

オムニカメラからのオプティカルフローは、6自由度(X, Y, Z, Yaw, Roll, Pitch)が同時に現れるが、並進運動と回転運動のみに着目する。これらが並進運動と回転運動に分離できるならば、それぞれの全方位オプティカルフローの現れ方は Fig . 10 , Fig . 11 のようになる。



(a) ΔX が正に変化した場合



(b) ΔY が正に変化した場合

Fig . 10 並進運動

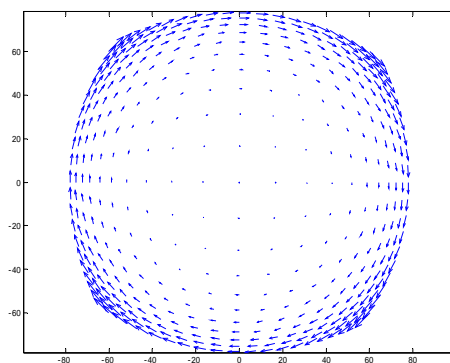


Fig . 11 回転運動

第4章 画像処理によるプログラム

4.1 画像処理の手順

以下に画像処理の手順を Fig. 12 に示す。停止，並進運動，回転運動の時それぞれ相関法とオプティカルフローを用いて速さ・距離・角度を求めることにする。

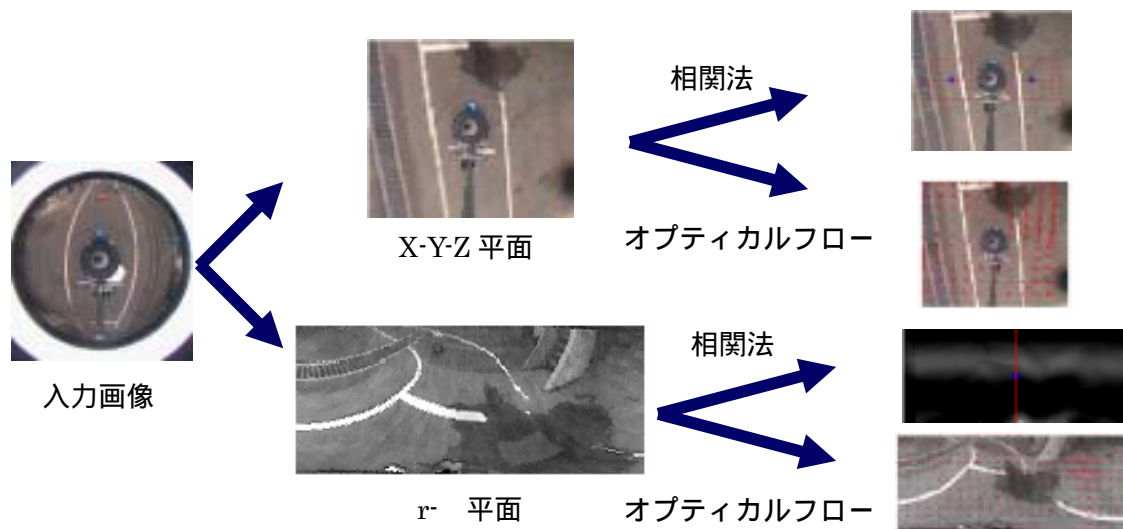


Fig. 12 画像処理の手順

4.2 速さ・角度計算

X-Y-Z平面変換では320×240画素の入力画像を中心から実測値 前後左右3[m]を80×80画素へ変換する．よって, 0.075 [m/pixel]とする．

速さの計算は式(10)で定義する．

$$V = \frac{0.075 \tau}{\Delta t} \quad (10)$$

角度の計算は式(11)で定義する．Fig. 13 に車両動作によつての車両角度を示す．

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(V_a - V_b)\Delta t}{L} \quad (11)$$

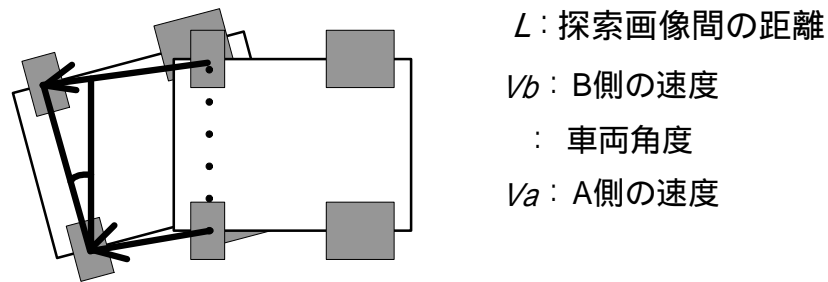


Fig. 13 車両角度

以上の処理により(P1), (P2), (P3)の問題が解決した．

第5章 実験

5.1 計測システム

5.1.1 車両

Photo . 3 に速度計測を行う車両を示す . 本研究で使用した車両はパワーチェアと呼ばれる身体障害者用の電動車椅子をベースとした車両である . 車両は , 2 WS 車両であり , 2つのモータの回転差により進行方向とその速さを調節できる . また2つのタイヤによりその場で半径 0 の回転をすることも可能である . 詳しい車両の仕様は付録に示す .

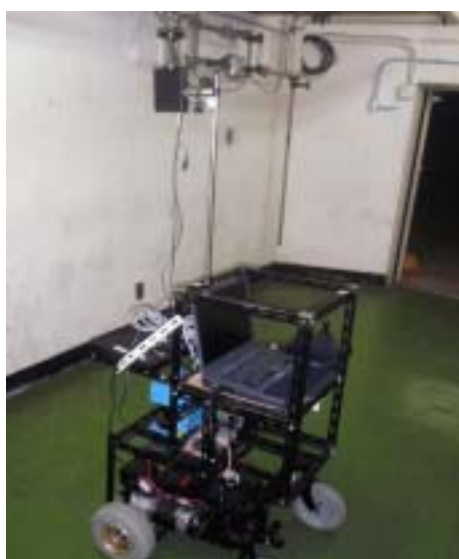


Photo . 3 実験車両

5.1.2 オムニディレクショナルカメラ

オムニカメラは , 鉛直下向き of 双曲面ミラーと鉛直上向き of カメラから構成され , センサの周囲 360 度の画像を一度に撮像できる特徴を持つ . 双曲面ミラーで撮影した画像の中心と実験車両の回転軸上に設置し撮影する . Photo . 4 に撮影した画像を示す . 処理系を Table 2 に示す .

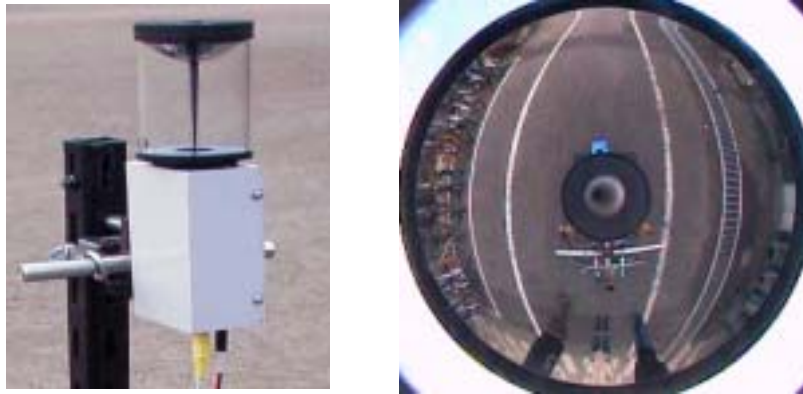


Photo . 4 オムニカメラの概観と得られる原画像

Table 2 Vision system

CCD camera	SONY EVI-370
Horizontal angle of view	48 . 8deg - 4 . 4deg
Focus	1 . 8 - 2 . 7
Wide-angle lens	0 . 45 Times
Hyper Omni Vision	a=3 . 121[cm], b=3 . 522[cm] c=4 . 41, α=5 . 0[deg] H=125[cm], F=0 . 2[cm]
Captured image resolution	240×320

5.1.3 ジャイロスコープ

本研究で使用したジャイロスコープを Photo . 5 に示す . また諸性能を T a b l e に示す . このジャイロスコープは 0 . 0001 度ステップで進行方向に対して ±360 度の範囲で角度を測ることができる . 本研究では , ジャイロスコープの値を真の値とする . レーザ距離計の仕様は付録に示す .



Photo . 5 gyroscope

Table4 Gyroscope system

角速度測定範囲	±100 度
角度測定範囲	±360 度
最小検出感度	0 . 001[deg/h]
零点ドリフト	10[deg/h]以下

5.1.4 システムの基本構成

システムを以下 Fig . 14 に示す . オムニカメラより画像を PC に取り込む . そして車両の制御に用いる . 今回は車両の制御は行わない .

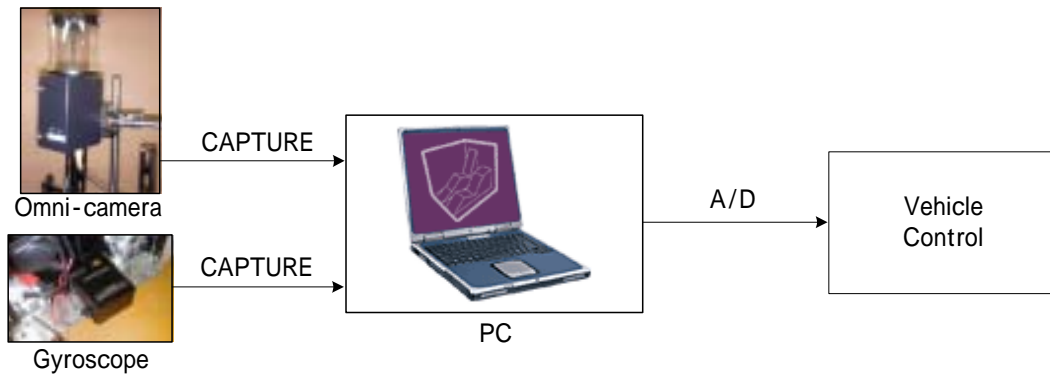


Fig . 14 システムの基本構成

5.2 実験

入力画像の画素サイズは 320×240 [pixel] とする。オムニカメラは、地面から 1.6 [m] の高さに設置されたものである。サンプリングタイムは 0.2 秒、車両速度はほぼ一定 (0.9 [m/s]) としている。距離は 10.0 [m] である。テンプレートマッチングでは 0.95 以上の相関を持つ領域を検出する。X-Y 座標と $r-\theta$ 座標へ変換し、停止、並進運動と回転運動のそれぞれオプティカルフローの実験結果を 5.3 に示す。テンプレートマッチングの実験結果を 5.4 に示す。

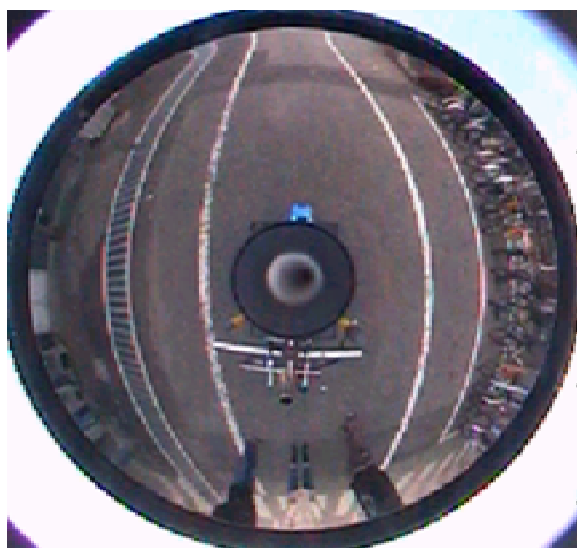
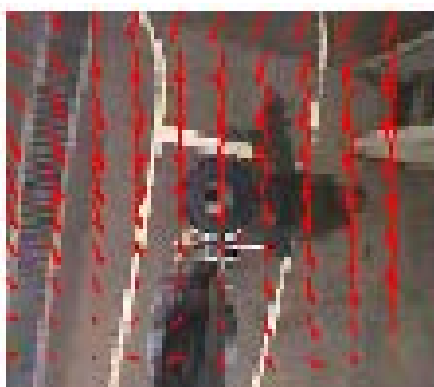
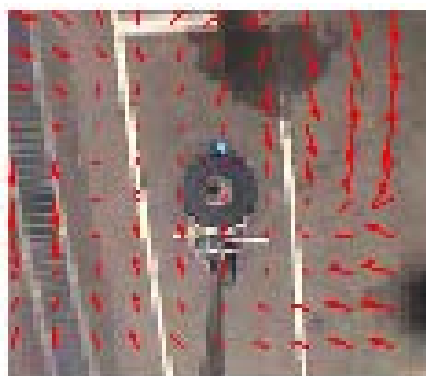


Fig . 15 今回使用したオムニカメラの画像

5.3 オプティカルフローの実験結果



(a) 停止時

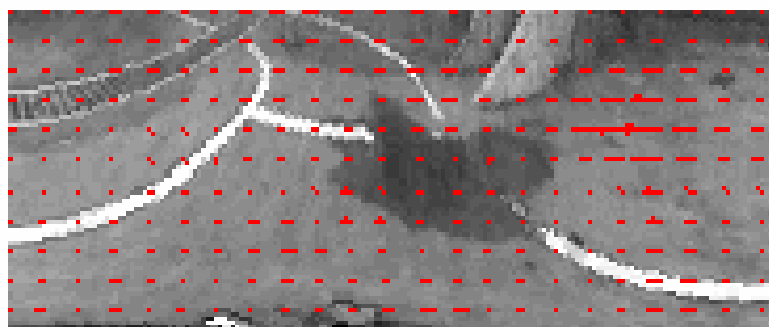


(b) 並進運動時

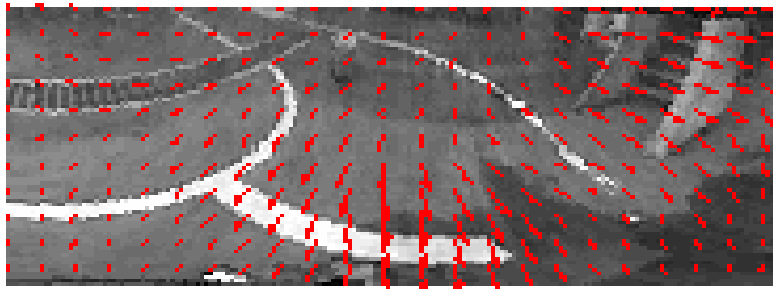


(c) 回転運動時

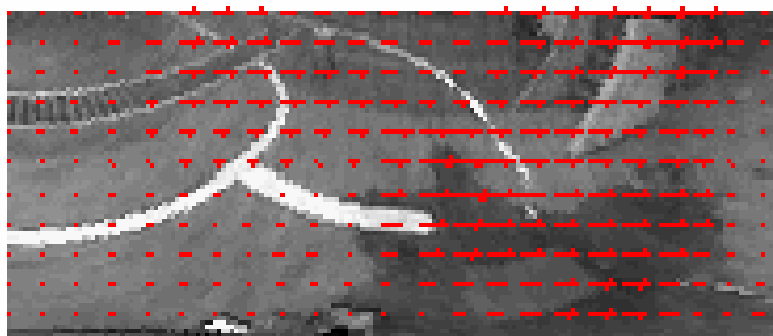
Fig. 16 X-Y 座標におけるオプティカルフローの現れ方



(a) 停止時



(b) 並進運動時



(c) 回転運動時

Fig. 17 $r-\theta$ 座標におけるオプティカルフローの現れ方

5.4 相関法の実験結果

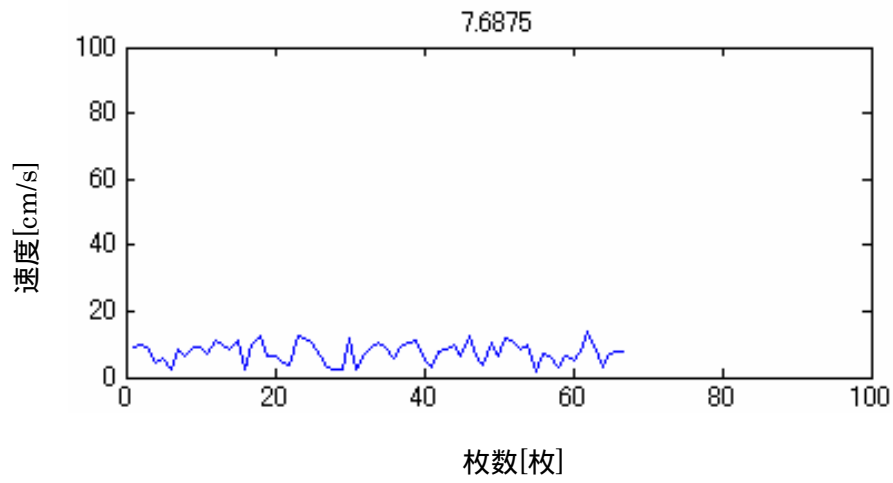


Fig . 18 X-Y 座標での正規化相関法による速度計測

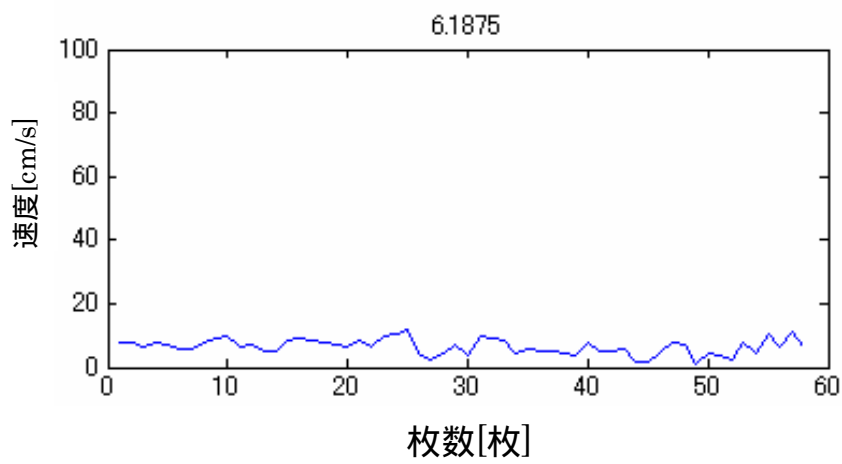


Fig . 19 r-θ 座標での正規化相関法による速度計測

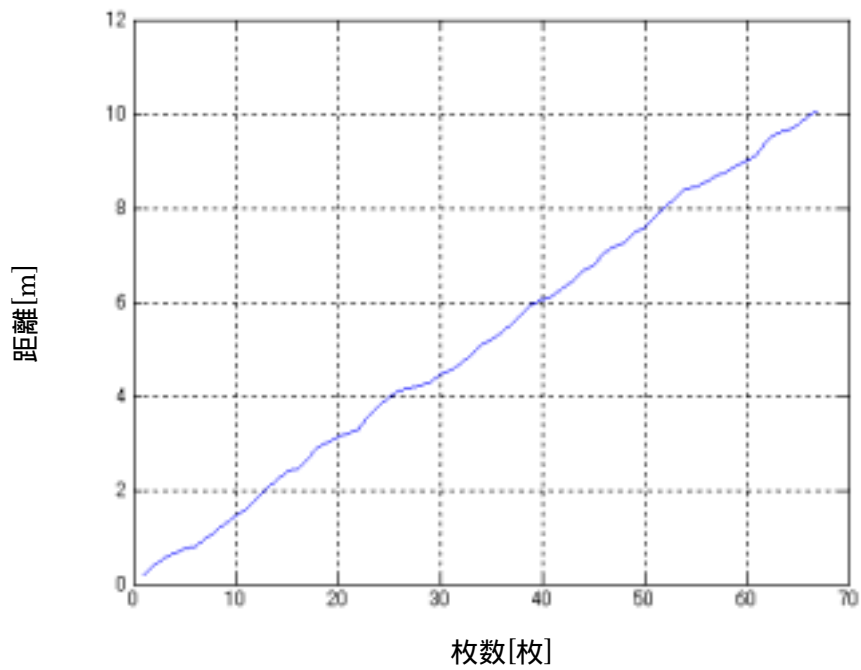


Fig . 20 X-Y 座標での正規化相関法による距離計測

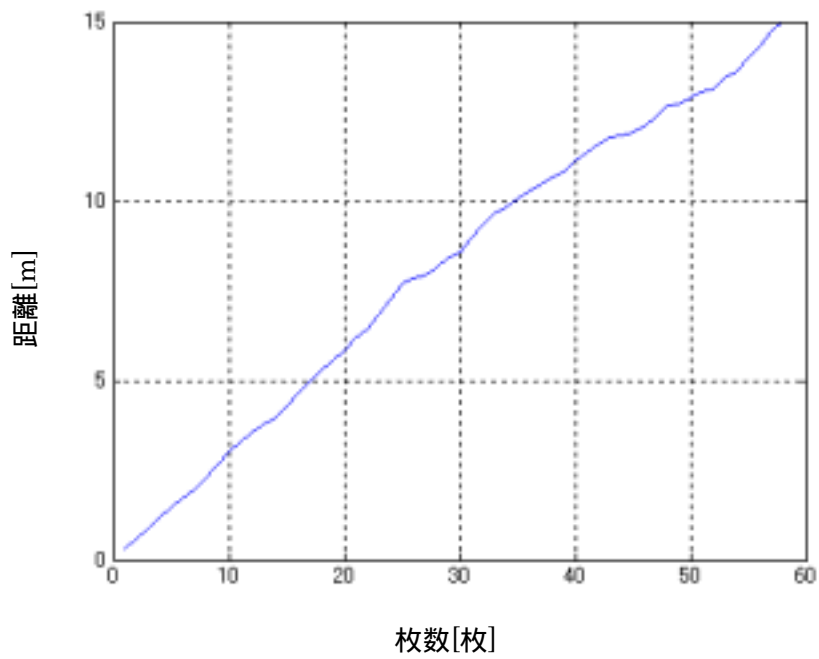


Fig . 21 r-θ 座標での正規化相関法による距離計測

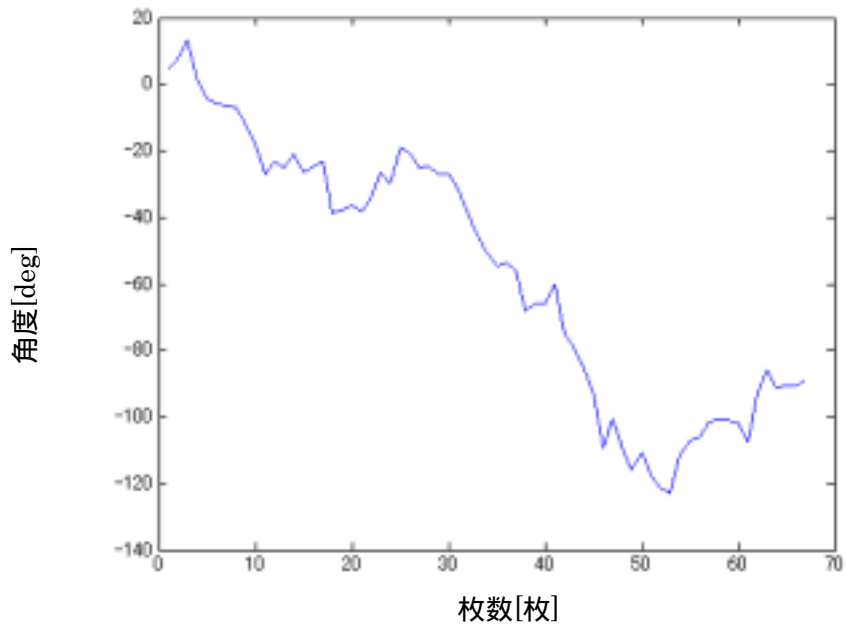


Fig . 22 X-Y 座標での正規化相関法による角度計測

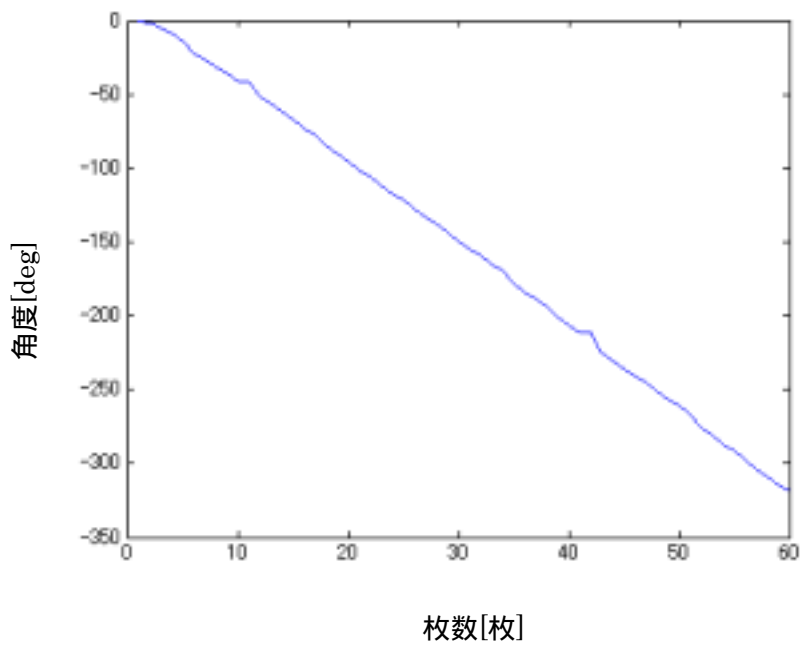


Fig . 23 r-θ 座標での正規化相関法による角度計測

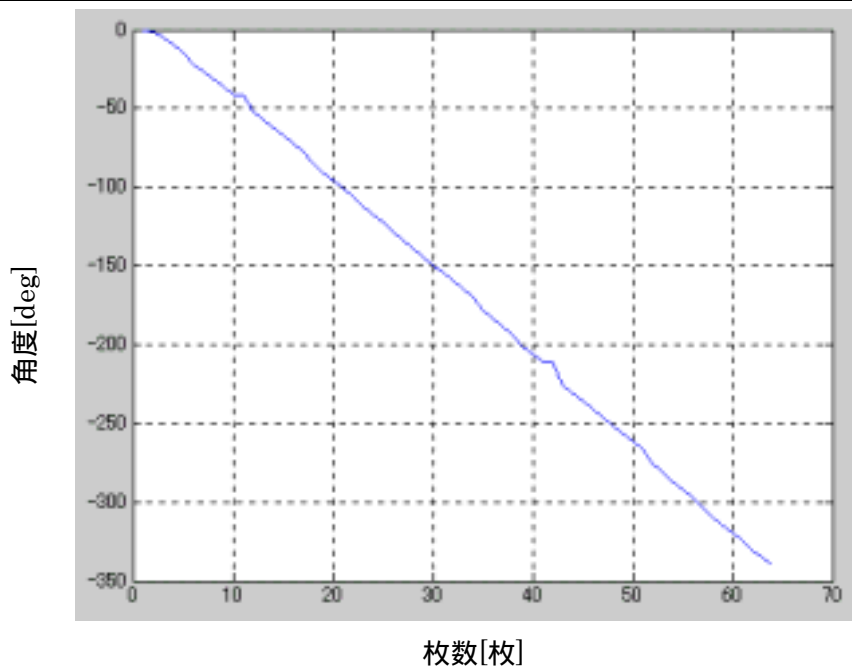


Fig . 24 ジャイロ스코ープの角度データ

5.4 検証

5.4.1 回転角度検出

検出率は従来手法より今回提案する手法の方が優れていた。特に r -座標へ変換した手法がジャイロの角度データに非常に近い値が出た。Fig . 22 , Fig . 23 では X-Y 平面変換にした方が誤検出率が高かった。どうしても地面平面だけだとランドマークが少ないので、 r -平面のように側面まで画像があると検出率が上がるのではないかとと思われる。

5.4.2 速さ検出

提案する手法では、従来手法より正確な値が出ていた。
特に X-Y 平面へ変換した手法が正確に距離が測れていた。

従来方法では、平面変換してないのに拘らず 1[pixel]の距離を一定にしていたための誤差があり、実際の距離よりも必ず長くなっていた。今回は距離も定まっていたのでその分の誤差が消えたのではないかとと思われる。

第6章 むすび

本研究ではオムニカメラ画像を非接触絶対速度センサとして利用する方法を提案した。実験よりオムニカメラのような歪んだ画像からランドマークの無い状況でも移動を抽出することができ、移動量を計算することが可能である。提案する方法は非接触で計測可能であるため、芝生などの地面がやわらかく滑りやすい状況でも速さ・距離・角度の計測が可能である。2種類の手法は従来法よりも優れていた。しかし、回転と速さの合わさった画像ではまだかなりの誤差が出てしまう。これより、オプティカルフローと正規化相関テンプレート法の有利な面を合わせて少しでも精度の高い手法を確立していく。

付録 1

以下に車両の仕様を示す。

項目	Nippy仕様	
型式	TE - 888W	
全長	930mm	
全幅	580mm	
座席	幅	445mm
	奥行き	445mm
	高さ	490 - 540mm(可変)
全高	1,035mm	
重量	本体	50.2kg
	バッテリー	11.6kg × 2
タイヤ	後輪	2.80/2.50 - 4
	前輪	200 - 50
	補助輪	75mm
ブレーキ	電磁式再充電型ブレーキ	
バッテリー	12V-38AH Deep-cycle × 2 個(MF)	
モーター(30分定格出力)	350W × 2	
操舵方式	コントローラーによる後輪操舵	
制御方式	速度調節機能付コントローラー	
	による無段階制御方式	
充電器	直流12V4A-100V	
最高速度	6km/h	
実用安全登坂角度	9° 以下推奨	
最小回転半径	675mm	
段差乗越え高さ	50mm	
溝乗越え幅	100mm	
連続走行距離	40km	

付録 2

以下にジャイロ스코ープの仕様を示す。

項目	単位	規格
外観寸法	mm	88 × 88 × 65
インタフェース		RS232C
角速度測定範囲	deg/s	± 100
角度測定範囲	deg	± 360
電源電圧	V	+ 10 ~ + 18
最小検出感度	deg/s	0.05 以下
角速度直線性	%	± 1.0 以内
零点ドリフト	deg/h	10 以下
起動時間	min	1 以内
電源消費電流	mA	500 以下
使用温度		-10 ~ 70
使用湿度	%	20 ~ 80RH, 結露しないこと
保存温度		-20 ~ 70
保存湿度	%	10 ~ 80RH, 結露しないこと

参考文献

- [1]西井渉, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位オプティカルフローからの移動ロボットゆれ推定, 電子情報通信学会論文誌, D-11, No. 6, pp1512-1521, 1997
- [2]石川謙: オムニカメラを利用した屋外自律走行車両の開発, 法政大学大学院システム工学専攻修士論文
- [3]三橋渉, 岡和彦, 山崎弘郎: 電子的に構成した空間フィルタによる運動計測, 計測自動制御学会論文集, (1988)
- [4]小林彬: 空間フィルタとその応用[] [], 計測と制御, (1980)
- [5] 山本英明, 百田正広, 古賀和利, 三池秀敏: デジタル動画画像処理による空間フィルタ速度計測法, 電子情報通信学会論文誌 (1992)
- [6]Ramesh Jain, Rangecher Kasturi, Brian G. Schunck: MACHINE VISION, (1995)
- [7]佐藤耕: 没入型仮想空間における揺れ再現手法, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻修士論文

謝辞

本研究を進めるにあたり，適切なお教示，ご指導をして頂いた渡辺嘉二郎教授，小林一行助教授に深く感謝いたします。渡辺先生には勉強以外にも就職活動などの面でも大変お世話になり，小林先生には技術的な面からサポートして頂きました。

また，自律ロボット実験室で共に研究に励んだビークル班の方々や，その他渡辺研究室の方々にも心から感謝します。