

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第4報)

ーカメラセンサー

平湯 秀和 田畑 克彦 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (4th Report) - Camera Sensors for Obstacle Detection -

Hidekazu HIRAYU Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI

あらまし 高齢者の生活を支えるツールとして電動カートの普及が進んでいる。しかし、加齢に伴う認識力の低下による運転者の判断ミスや操作ミスが原因で発生する、歩行者や車との接触事故および段差等での転倒事故等が問題となっている。本研究では、このような事故の危険を未然に検知するための安全装置として、単眼カメラを用いた歩行者や電柱、側溝などの衝突・転倒要素となる障害物を検出するセンサを開発する。本年度は、移動体に搭載した単眼カメラで取得したオプティカルフローを用いて、前フレームからのカメラの並進・回転量を推定し、床面と障害物領域を安定して抽出する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性を示す。

キーワード 電動車いす, 安全装置, 障害物検出, 画像処理, オプティカルフロー

1. はじめに

高齢者の生活を支えるツールとして電動カートの普及が進んでいるが、電動カートの普及に伴い、歩行者や車との接触事故が毎年多く発生している。平成27年の電動車いすに係る交通事故の発生件数は179件であり、このうち7人の利用者が亡くなっている^[1]。この件数は、道路交通法上、歩行者と電動車いすの接触事故や電動車いすの単独事故は交通事故として計上されないことから、電動車いすに関連した実死傷者数はさらに多いといえる。事故の要因としては、運転者のマナーや法令違反等に起因するもの（車道走行等）もあるが、ボンヤリしていて歩行者と衝突するなど、電動カートを運転する利用者の高齢化による認識力の低下に伴う操作ミスによる事故も多数発生している。

これらの問題を解決するため、本研究では、共同研究先である県内企業が開発する高齢者用電動ビークル^[2]に、歩行者や電柱、側溝などの衝突・転倒要素となる障害物を検出する安全装置を新たに開発・搭載することで、電動ビークルの操作ミスによる事故防止の実現を図る。なお、本稿では開発する安全装置付きの電動カートと従来の電動カートとを区別するため、以下では電動ビークルと記載する。

本稿では安全装置のためのセンサとして、カメラを用いた障害物検出センサの研究開発について報告する。近年、自動車の安全運転の分野では『ぶつからない車』として、複数カメラによるステレオ視を行い前方の車との

車間を自動で制御する技術や、ミリ波などを使用したレーダー装置が開発されている^[3,4]。しかし、これらのセンサ技術は前方の自動車や中央線などの検出を目的としているため、人、段差等を検出対象とする本研究では、これらの技術を使用することはできない。

開発中の電動ビークルの用途は、ショッピングモールや公共施設などの屋内から駅前や田園地帯などの屋外走行まで幅広く想定されている。これらの環境において、歩行者や電柱、側溝や車止めなどの電動車いすの衝突・転倒要素となる障害物を検出する安価で小型なセンサの開発が求められる。そこで、本研究では電動ビークルの周辺環境情報を高速に取得可能で、コンパクトかつ安価な単眼カメラを用いたセンサを開発する。

昨年度は、前フレームと現フレームの画像情報を基にオプティカルフローを検出し、カメラの並進運動のみを考慮し、平面（床面）であれば得られる三次元的な動き情報を基に平面と異なる高さを持つ領域（障害物）を検出する手法に関して検討を行った^[2]。なお、オプティカルフローとは時間的に連続する画像間で物体の動きをベクトルで表現したものである^[5]。カメラが並進運動のみの場合は、この手法で平面と障害物を区別することが可能であったがカメラの回転運動も加わると、平面と障害物の識別精度は低下する問題点があった。実際の電動ビークルは並進だけでなく回転運動も発生するため、本年度はカメラの並進運動と回転運動を考慮し、床面と障害物を識別する手法の検討を行った。

具体的には、前フレームで得られた床面領域情報とそ

の領域のオプティカルフロー情報を基に、カメラの並進・回転パラメータの推定を行う。次に推定された並進・回転パラメータを基に現フレームの特徴点の位置情報からオプティカルフローを推定する。ここで、もし床面領域であれば「カメラの並進・回転パラメータを基に推定したオプティカルフロー」と、「画像から得られたオプティカルフロー」の結果は一致し、障害物領域であれば結果にずれが生じる。本稿では、実際に屋外環境下で実験を行い、本手法の有効性の検討を行ったので報告する。

2. カメラセンサによる障害物検出手法

2. 1 障害物検出のためのアルゴリズム

単眼カメラは電動ビークルに固定されている。従って、平坦な道であっても坂道であってもカメラから得られる画像は見かけ上、同じ平面として観測される。そこで、本研究ではオプティカルフローを用いて、平面上の領域（電動ビークルが走行する床面領域）とそれ以外の領域（人や壁、側溝、段差などの障害物）に分割する手法を検討した。

具体的には、前フレームで得られた床面領域情報とその領域に含まれるオプティカルフローの情報を基に、カメラの並進・回転パラメータを推定し、次に、現フレームの画像全体において、求めた並進・回転パラメータを用いて個々の特徴点に対して座標変換し、現フレームにおけるオプティカルフローを推定する。ここで、もし、床面領域であれば「カメラの並進・回転パラメータを基に推定したオプティカルフロー」と、「画像から得られたオプティカルフロー」の結果は一致し、障害物領域であれば結果にずれが生じる。

本研究では前フレームおよび現フレームの画像を用いて、下記のとおり、Step0を1回実施後、Step1からStep4の処理を繰り返し実施することで、障害物検出を行った。

Step0: 最初のフレーム（電動ビークルが動き出す直前）において、カメラの手前には障害物がないものと仮定し、画像における手前エリア（図1の黒い四角枠内）にある特徴点（図1の白い丸）は全て平面領域に存在すると仮定する。これを「前フレームで平面領域に存在する特徴点」とし、位置情報を保持する。

Step1: 現フレームにおいて、画像の手前エリア内で、かつ、前フレームで平面領域と推定された特徴点を持つオプティカルフローの情報を基にカメラの並進・回転パラメータを推定する。

Step2: 現フレームの画像全体における全ての特徴点に対して、Step1で求めた並進・回転パラメータを用いて座標変換し、現フレームにおけるオプティカルフローを推定する。

Step3: 推定したオプティカルフローの位置と、画像から得られたオプティカルフローの位置を照合す

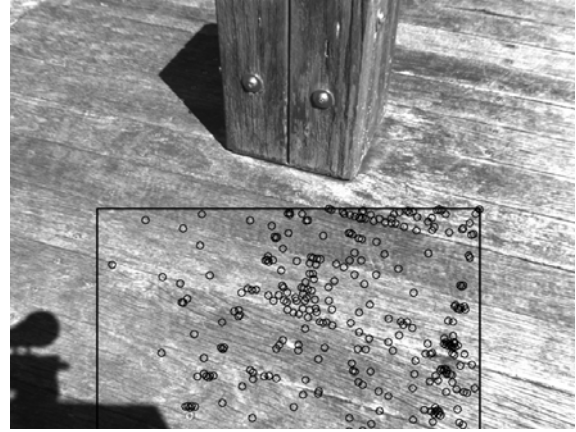


図1 画像における手前エリア（黒四角枠内）
（白い丸はエリア内で検出された特徴点を示す）

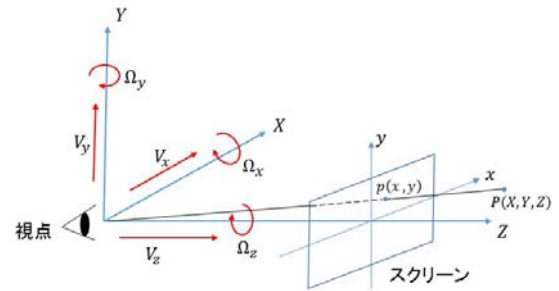


図2 オプティカルフローにおける座標系

る。ここで、一致していればその特徴点は平面領域であり、一致していなければ、凹凸のある障害物領域となる。

Step4: 現フレームにおいて、平面領域と抽出された特徴点を、「前フレームで平面領域に存在する特徴点」とし、位置情報を保持する。

2. 2 カメラ並進・回転パラメータのロバスト推定

図2に示す座標系のとおり、並進量 $V=(V_x, V_y, V_z)$ と回転量 $\Omega=(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ の運動パラメータを持つカメラにおいて、三次元上の特徴点 $P=(X, Y, Z)$ は(1)式に示すオプティカルフロー $v=(v_x, v_y)$ を持つ^[6]。また、複数のオプティカルフローの延長線は拡張焦点（Focus Of Expansion : FOE点）と呼ばれる、ある一点に収束されるが（図3および(2)式の F ）、この拡張焦点を用いると、更に(3)式が得られる^[6]。

$$\begin{cases} v_x = x \frac{V_z}{Z} - f \frac{V_x}{Z} + v_x^r(\Omega) \\ v_y = y \frac{V_z}{Z} - f \frac{V_y}{Z} + v_y^r(\Omega) \end{cases} \quad (1)$$

ここで $v_x^r(\Omega)$, $v_y^r(\Omega)$ は

$$v_x^r(\Omega) = \frac{xy}{f} \Omega_x - \frac{x^2 + f^2}{f} \Omega_y + y \Omega_z,$$

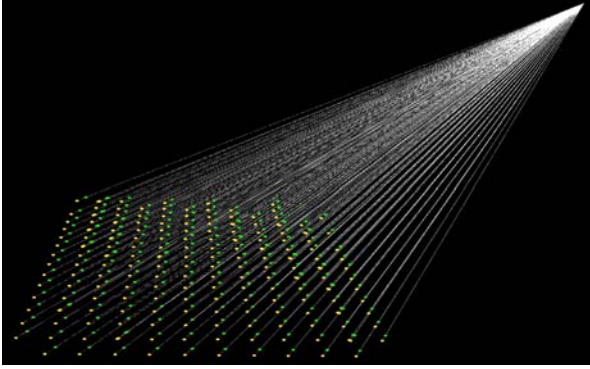


図3 オプティカルフローと拡張焦点 (FOE点)
(画面左下の点集合：前後フレームの特徴点を示す。
オプティカルフローの延長線上が拡張焦点となる)

$$v_y^r(\Omega) = \frac{y^2 + f^2}{f} \Omega_x - \frac{xy}{f} \Omega_y - x \Omega_z \text{ である.}$$

$$F = (FOE_x, FOE_y) = \left(f \frac{V_x}{V_z}, f \frac{V_y}{V_z} \right) \quad (2)$$

$$E(F, \Omega) = u_x(y - FOE_y) - u_y(x - FOE_x) \quad (3)$$

ただし, $u_x = v_x - v_x^r, u_y = v_y - v_y^r$ である.

ここで, f は焦点距離を示し, $x=fX/Z, y=fY/Z$ である. また, $E(F, \Omega)$ は誤差関数で, 誤差が無ければ理論上0となる.

本稿では, 文献[6]の佐藤らが行ったように, (3)式に対して, M推定として反復再重み付け最小二乗法を用いて, FOE点 F およびカメラの回転量 Ω を求め, 更に得られたカメラの回転量を基に, (1)式を用いた最小二乗法により, カメラの並進量 V を求めた.

下記にカメラの並進・回転パラメータのロバスト推定の流れと床面領域および障害物領域の検出の流れを示す(図4).

Step1: 前および現フレームの画像からオプティカルフローを求める.

Step2: そのオプティカルフローの中で, 前フレームで平面領域と推定された特徴点を持ち, かつ, 手前エリア内に現フレームの特徴点が存在するオプティカルフローのベクトル v および, それらのベクトルを構成する現フレームにおける画像座標上の特徴点 $p = (x, y)$ を取得する.

Step3: (3)式と, v および p から反復再重み付け最小二乗法でFOE点 F とカメラの回転量 Ω を求める.

Step4: カメラの回転量 Ω を(1)式に代入し, 特徴点 p を用いて最小二乗法でカメラの並進量 V を求める.

次に, 得られたカメラの並進・回転パラメータを用いて床面領域と障害物領域検出処理を行う. 現フレームの

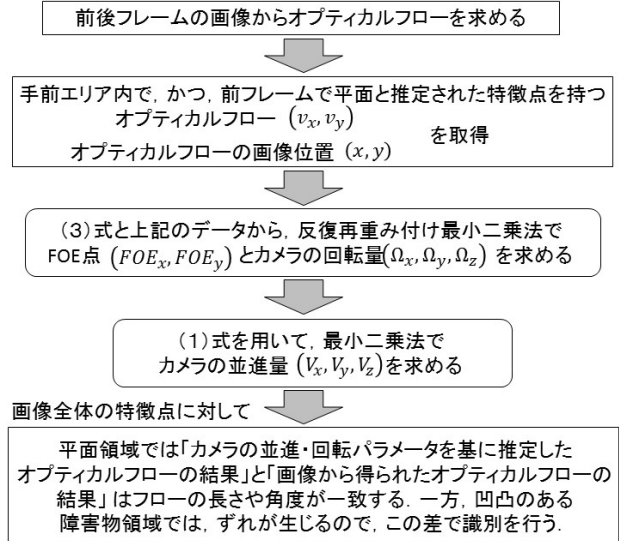


図4 ロバスト推定および床面領域と障害物領域検出の流れ

画像全体で抽出された全ての特徴点に対して, (1)式を当てはめることで, それぞれのオプティカルフローが推定される. 前述で求めた並進・回転パラメータは平面領域のみを用いて得られたものであるため, 現フレームにおいて平面領域に存在するオプティカルフローは, 「カメラの並進・回転パラメータを基に(1)式に代入し求めたオプティカルフローの結果」と「画像から得られたオプティカルフローの結果」は一致する. しかし, 凹凸のある障害物領域に存在するオプティカルフローの場合は, 「カメラの並進・回転パラメータを基に(1)式に代入し求めたオプティカルフローの結果」と「画像から得られたオプティカルフローの結果」に, フローの長さや角度にずれが生じる. 実験では, 計算で求めたオプティカルフローと画像から得られたオプティカルフローに対して, ある閾値以上の長さもしくは角度がずれていた場合は障害物領域と判定した.

3. 実験および考察

3. 1 キャリブレーション

電動ビークルの周りにある障害物領域を, 単眼カメラを用いて精度良く検出するため, できるだけ画角の広いレンズを用いる必要がある. その場合, 画像周辺部で発生するレンズ歪み等を解決する必要がある. また, (1)式に示すように, カメラの並進・回転パラメータを推定する際には, カメラ中心から床面までの距離 Z を事前に求めておく必要がある. そこで, レンズ歪みや画像主点位置調整等のみならず, 各画素において距離 Z を正確に求めるため, 本研究では幾何学的キャリブレーションを実施した.

実験では, できる限り画角を広くとるため, A0用紙にキャリブレーションパターンを印刷し, それをキャリブレーションボードとして使用した. また, 下記のとおり,

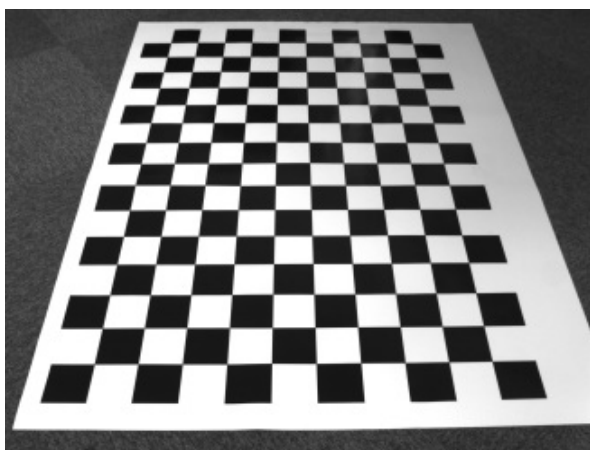


図5 A0用紙サイズのキャリブレーションボード



図6 キャリブレーションで求めたカメラからの距離 Z
(輝度値が明るくなるに従い、距離 Z の値は大きくなる)

内部・外部パラメータを求めた。

- ・内部パラメータの推定

実験で使用するカメラやレンズを用いて、キャリブレーションボード全体が写るように複数枚撮影し、カメラの焦点距離、レンズ歪み係数、画像主点位置等の推定を行った。実験では30枚の画像を基に内部パラメータを推定した。

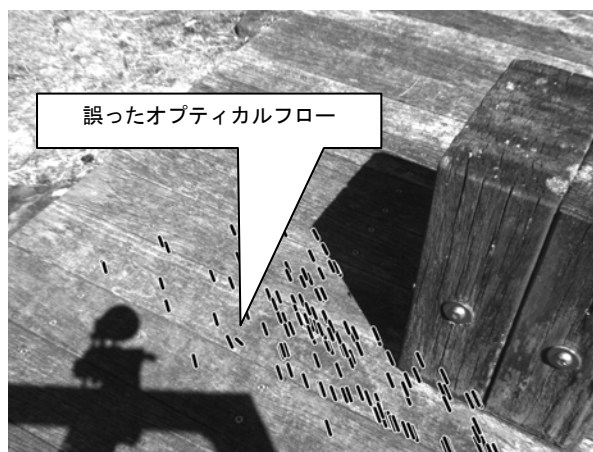
- ・外部パラメータの推定

屋外環境下で実際に撮影する高さ・角度にカメラを固定させ、キャリブレーションボードの撮影を行った。実際に撮影した画像を図5に示す。

キャリブレーションにより、実際の三次元空間と二次元画像平面との幾何学的な対応関係が求まるため、これによりカメラからの距離 Z を求めた。図6に距離 Z の値を輝度値に変えて表現した結果を示す。図5と合わせて見ればわかるとおり、カメラからの距離が遠くなれば輝度値が明るくなる。

3. 2 誤ったオプティカルフローの検出

本研究では、画像処理ライブラリであるOpenCVを用いてオプティカルフローの検出を行った。このライブラリは比較的精度良くオプティカルフローを求めることはできるが、画像によっては誤ったオプティカルフローが求まる場合がある。誤ったオプティカルフローをカメラ



(a) 誤ったオプティカルフロー削除前
(黒線がオプティカルフローの検出結果)



(b) 誤ったオプティカルフローを削除

図7 誤ったオプティカルフローの検出・削除

の並進・回転パラメータの推定に用いた場合、誤った並進・回転パラメータが推定され、障害物検出も誤判定されてしまう問題がある。それを回避するため、図4の「前後フレームの画像からオプティカルフローを求める」処理を行った直後に、誤ったオプティカルフローを検出、削除を行った。

カメラの回転運動の大きさにもよるが、カメラの並進・回転運動により得られるオプティカルフローの位置に関して、一般的に、画像座標の y 軸（水平方向）の値がほぼ同じ位置にあれば、そこに存在する複数のオプティカルフローの長さはほぼ等しくなる。一方、画像座標の x 軸（鉛直方向）の値がほぼ同じにあれば、そこに存在する複数のオプティカルフローの角度はやはりほぼ等しくなる。そこで、実験では画像を横方向、縦方向にそれぞれ10分割し、縦横方向のそれぞれ分割された10個の領域に対して、統計的手法を用いて、ほぼ同じ長さ（横方向）、同じ角度（縦方向）に存在するオプティカルフローのみをその後の処理に使用する手法を実施した。図7に誤ったオプティカルフローの検出、削除の例を示す。図7(a)の黒線がオプティカルフローを検出した結果であるが、その中の一本（吹き出し部分）の角度が他と比較するとずれており、誤ったフローとなっている。本手法

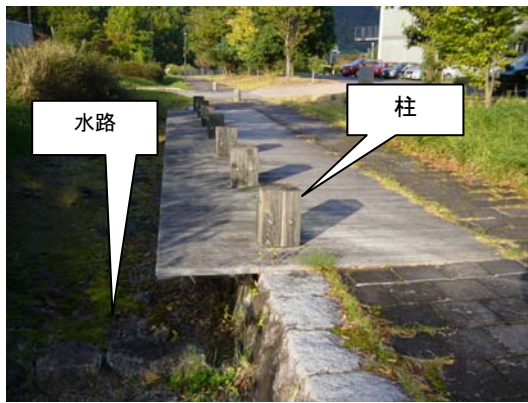


図8 実験環境（歩道）



図9 実験環境（駐車場）



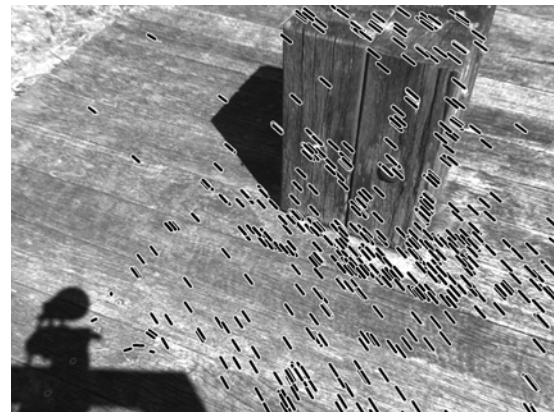
図10 撮影環境

により、図7(b)に示すとおり、削除された。

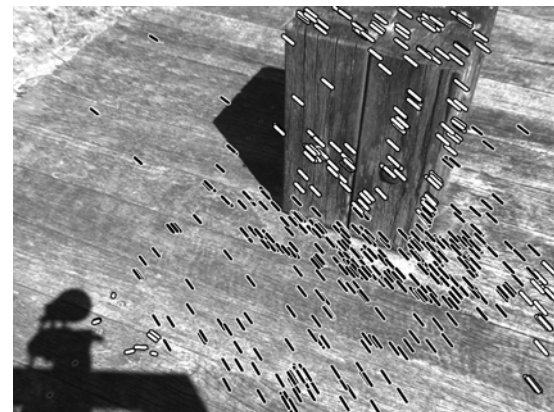
3. 3 実験環境

本研究の有効性を検証するため、屋外環境下で動画像を取得し、オフライン処理で平面領域と障害物領域の識別実験を行った。実験環境は、柱(280×280×400mm)や水路(深さ600mm)のある歩道シーン(図8)と、車止め(120×180×600mm)やU型側溝(寸法180mm)のある駐車場シーン(図9)である。また、撮影環境は図10に示すとおり、台車にカメラおよびパソコンを搭載し、キャリブレーションを行った後、台車を動かしながら動画像の撮影を行った。

実験で使用したカメラはBASLER製acA1600-20umでフレームレートは20fps、解像度は1624×1236である。レンズはミュートロン製8mmレンズHS0818Vを使用した。



(a) 全てのオプティカルフロー（黒線）



(b) 識別結果（黒線：平面，白線：障害物）

図11 歩道シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その1）



(a) 全てのオプティカルフロー（黒線）



(b) 識別結果（黒線：平面，白線：障害物）

図12 歩道シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その2）

3. 4 実験結果および考察

前述の二つの屋外環境下のシーンに関して実験を行った。図8の歩道シーンでは409個の画像、図9の駐車場シーンでは327個の画像に対して、それぞれ平面領域と障害物領域の識別を行った。歩道シーンに関する実験結果例を図11と図12に示す。図11には歩道内の柱が、図12はカメラが更に前方に進んで柱と水路が写っている画像である。図11(a)および図12(a)には画像から得られた全てのオブティカルフローの抽出結果を黒線で示す。また、カメラの並進・回転パラメータを推定後、平面領域と障害物領域の識別をした結果が図11(b)と図12(b)である。図11(b)と図12(b)の黒線は平面領域であり、白線は障害物領域と識別されたオブティカルフローである。柱の部分や水路の部分に関して障害物と識別され、良好な結果が得られていることがわかる。

本研究では、3.2節で記載した誤ったオブティカルフローの検出・削除はカメラの並進・回転パラメータを推定する際のみ使用し、平面領域と障害物領域の識別は全てのオブティカルフローに対して実施した。理由としては、本シーンにはないがカメラの前を人等の移動体が横切った場合、移動体のオブティカルフローはカメラの運動に伴うオブティカルフローとは異なる動きをするため、移動体検出のためには全てのオブティカルフローに関して平面領域と障害物領域の識別を行う必要があるためである。従って、図11(b)や図12(b)において、画像の左下側は明らかに誤ったオブティカルフローではあるが、障害物として識別されている。

駐車場のシーンに関する実験結果例を図13と図14に示す。図13には平坦なアスファルト上に車止めがあり、さらに遠方には側溝、そしてそのさらに先には背の高い雑草の茂みが写っている。図14は図13からカメラが更に前方に進み、側溝と雑草の茂みが写るシーンとなっている。図13(a)および図14(a)は画像から得られた全てのオブティカルフローの抽出結果を黒線で示す。また、平面領域と障害物領域の識別結果が図13(b)と図14(b)である。このシーンでも車止め、側溝、雑草等のアスファルト（平面領域）と異なる凹凸のある障害物が識別されていることがわかる。

以上のことから、オブティカルフローを用いて平面領域と障害物領域の識別を行う本手法は有効であることが示唆された。

一方、三つの課題も判明した。第1の課題はキャリブレーションにおける誤差である。図11(b)や図13(b)のように画像の右下部にあるいくつかのオブティカルフローは本来は平面領域であるが誤判定されており、障害物領域として識別されている。これはキャリブレーションにおいて距離 Z を推定する際に誤差が生じているためと推測される。キャリブレーションの仕方を再度検証し、精度を向上させる必要がある。

第2の課題は、除去しきれなかったオブティカルフロー



(a) 全てのオブティカルフロー（黒線）



(b) 識別結果（黒線：平面、白線：障害物）

図13 駐車場シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その1）



(a) 全てのオブティカルフロー（黒線）

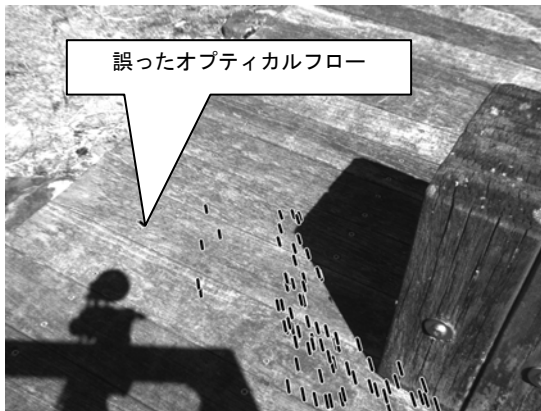


(b) 識別結果（黒線：平面、白線：障害物）

図14 駐車場シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その2）



(a) 平面・障害物領域の識別結果



(b) 運動パラメータ推定に用いたオプティカルフロー

図15 誤判定した平面・障害物領域の識別結果例（その1）

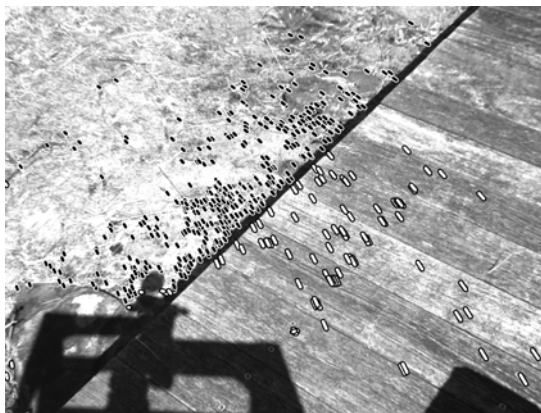


図16 誤判定した平面・障害物領域の識別結果例（その2）

の誤検出である。図15(a)に歩道シーンにおけるある画像の平面領域と障害物領域の検出結果を示す。この結果では平面領域と障害物領域が適切に識別されておらず誤った識別結果となった。この理由として、図15(b)に示すとおり、カメラの並進・回転パラメータを推定するために用いた複数のオプティカルフローの中に誤ったオプティカルフローが含まれていたため、正しくパラメータ推定ができなかったと考えられる。この解決手法として、前後フレームだけでなく、複数フレームを用いてオプティカルフローの信頼度を計算することなどがあげられる。

第3の課題は、手前エリアに存在する特徴点は全て平面領域と仮定したことに伴う誤判定である。本研究では、2.1節で記述したとおり、カメラが移動し始めて最初のフ

レームでは画像の手前エリアに存在する特徴点は全て平面領域と仮定している。一方、歩道シーンの実験で、水路に近づきすぎたため、カメラを後ろに戻す行動を実施した際、障害物領域を平面領域と誤判定してしまった。図16に示すとおり、本来は凹領域の障害物である水路が平面領域と識別され、これにより歩道の平面領域が凸領域の障害物と誤って識別されている。これはカメラを停止→後退させた際、画像の手前エリアは水路しか写っていなかったため、この領域を平面領域と誤判定したためである。電動ビークルがどこまで障害物に近づくのか電動ビークルを開発する共同研究企業と検討する必要があるが、手前が平面であるという仮定がなくなるまで近づくことを想定した場合は、カメラを停止から移動した際も前フレームの平面・障害物領域の情報を保持するなどの対策が必要である。

4. まとめ

電動ビークル走行時に、障害物や段差等の危険個所を検出するカメラセンサの開発を行うため、本研究では移動体に搭載した単眼カメラで取得したオプティカルフローを用いて、前フレームからの移動体の並進・回転量を推定し、床面と障害物領域を安定して抽出する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性を示すことができた。

今後の課題としては、実験により明らかになった三つの課題に対して検討を行う。また、現在は市販のUSBカメラで取得した画像をオフラインによるパソコンの画像処理で障害物検出を実施しているが、今後はFPGA等を用いてリアルタイム処理を行う予定である。

文 献

- [1] “警察庁ホームページ 電動車いすの安全利用に関するマニュアルについて”，
<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku12/tebiki.htm>.
- [2] 平湯秀和，田畑克彦，久富茂樹，“安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第1報）—カメラセンサー”，岐阜県情報技術研究所研究報告，No.16，pp.9-14，2015.
- [3] “富士重工業株式会社ホームページ アイサイト (ver.3)”，
<http://www.subaru.jp/levorg/levorg/safety/eyesight.html>.
- [4] “ぶつからないクルマ いざ普及へ”，「日経エレクトロニクス」2012年11月26日号，pp51-58，日経BP社.
- [5] Buauchemin,S.S. and Barron,J.L. ”The computation of optical flow”，ACM Computing Surveys, Vol.27, No.3, pp.433-467, 1995.
- [6] 佐藤育郎，山野千晴，柳川博彦，“車載単眼カメラからの進路横断物体の検知”，画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2010）論文集，pp.75-82，2010.