

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—

平湯 秀和 田畑 克彦 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Wheelchair (1st 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が、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と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のセンサとして、障害物の有無や段差等の危険箇所を検出するカメラセンサを開発する。カメラセンサとして、屋内外で安定して障害物を検出可能であること、実用化のための安価なセンサであること等を考慮し、単眼カメラを使用した。本年度は単眼カメラによるオプティカルフローを用いて、床面と障害物領域を分割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の検討を行った。

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

到来する超高齢化社会において、高齢者のQOL（生活の質）を向上させることは、廃用症候群による寝たきりや閉じこもりを予防する上で、非常に重要な要素である。そして、QOLを向上するためにはADL（日常生活動作）やIADL（手段的日常生活動作）の維持が必須であり、活動的な日常を送ることが求められる。

高齢者が活動的な生活を送る上で、有用なツールの1つとして挙げられるのが電動カートである。もともとはゲートボールが流行していた時、高齢者が自宅からコートまでの移動手段として、電動車いすを製造していたスズキ株式会社が販売するのが始まりであるが、歩行が困難な高齢者に歓迎されて広く普及した。普及が広がったその他の理由として、道路交通法上、電動カートは電動車いすに分類されるため、歩行者と同じ扱いであり運転免許が必要ないことも挙げられる。

しかしながら、電動カートの普及に伴い、歩行者や車との接触事故が後をたたず、最近5年間では年間約200件の交通事故が発生している^[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実際にはさらに多いといえる。事故の要因としては、運転者の不注意等に起因するもの（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、4割強が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である。

そこで、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に、障害物の接近や危険箇所を検知する安全装置を新たに開発することで、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、特に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^[2~4]。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のに対して、本研究では人、段差等を検出対象としているため、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。

具体的には、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、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）を検出する手法について検討を行った。また、実験により本手法の有効性の検討を行ったので報告する。

2. 高齢者用電動ビークルおよび安全装置について

本プロジェクトでは、歩道などの屋外走行から、ショッピングセンターなどの屋内走行までシームレスな走行を実現する電動ビークルを開発する。

一般的な電動カート利用者の声として現状の電動カートは屋外走行では支障ないが、ショッピングセンターなどの屋内の走行においては小回りが利かないため、商品棚間の移動や、人などの障害物を避けることが困難といった課題が挙げられている。

そのため、本プロジェクトで開発する電動ビークルは、電動カート同様に屋外環境で安定した走行を実現しつつ、屋内環境においては人等の障害物の回避や商品棚間の移動がスムーズに行えるように小回りの利く機能を有する。この電動ビークルは健常者に受け入れやすい操縦インタフェースを持ち、さらに、人や段差などの危険を事前に検知して、自動的に停止する機能を持つ。本プロジェクトで開発する電動ビークルのイメージ図を図1に示す。

車いす型電動ビークル本体は共同研究先である県内企業が開発する。この電動ビークルは、図1に示すとおり、ホイールベース長可変機能により、屋外環境下ではホイールベースを長くすることで安定した走行を実現し、屋内環境下では逆にホイールベースを短くすることで小回りの利く走行を実現する。また、フレーム前面にヘッドライト等を取り付けたカバーを装着し、全体寸法は電動車いすのJIS規格 T9203に準拠した大きさとする。最高時速は車いすと同様の6kmである。

本機の安全装置として、前面に障害物を検出するための超音波フェーズドアレイソナーおよびカメラセンサを搭載し、後部には後方からの自動車の接近音を検知するための音センサを有している。

超音波フェーズドアレイソナーは電動ビークル前方にある複数の障害物を広域に探索することが可能なセンサである。更にカメラセンサでは検出困難な夜間等の環境やガラス戸などの透明物体の検知が可能である。一方、カメラセンサはセンサ周辺環境情報を高速に取得可能で、かつ人や段差などの対象物の大きさや高さ等の形状を識別することが可能である。また、超音波フェーズドアレイソナーでは検出が困難な段差等の検出が可能である。それぞれのセンサは長所・短所があるため、将来的には両方のセンサで得られた情報を組み合わせて、障害物検知率を向上させる。



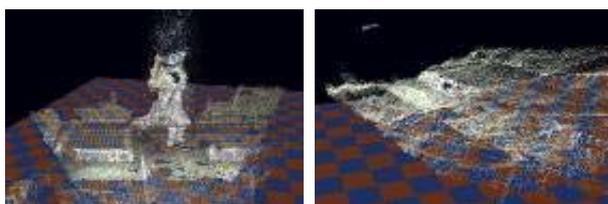
図1 電動ビークルのイメージ図

電動ビークル後部に搭載する音センサは、マイクロホンアレイを用いることで、環境雑音の影響を低減させながら、自動車のクラクション音、エンジン音、ロードノイズなどの音を検出することで、運転者に自動車の接近を知らせる機能を有する。

3. カメラセンサによる障害物検知

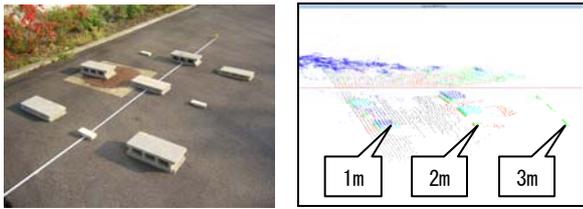
3. 1 カメラセンサの選定

最高速度6kmで走行する電動ビークルが、人や段差等の障害物を検出し安全に停止するには3m程度離れた距離で段差等を識別可能なセンサが求められている。そこで、本研究でははじめに「測域センサ」「ステレオカメラ」「単眼カメラ」の3種類のセンサを電動ビークルに搭載するカメラセンサの候補として検討した。実際に屋外環境下で障害物の計測をいくつかのセンサを用いて実施すると共に、センサの情報収集等を行った結果、屋内環境のみならず屋外環境下において安定して計測できること、安全装置として超音波フェーズドアレイソナーとの併用可能なコストとなること等を考慮し、単眼カメラを選定した。ステレオカメラや測域センサは複数カメラが必要であることやセンサ単体の価格が高価であるが、単眼カメラは1つのカメラモジュールとFPGAでシステムを組み上げることが可能である。なお、屋外環境下でステレオカメラ(ビュープラス製miniBEE)と測域センサ(北陽電機製URG-04LN)を用いて障害物検知を行った結果、70mmのベースラインを持つステレオカメラは2m離れた



ステレオカメラで撮影した 人や車止めの例 ステレオカメラで撮影した 車止めの例

図2 ステレオカメラの実験結果例



測域センサによる計測 測域センサによる凹凸検出結果
(数字は測域センサからの距離)

図3 測域センサの実験結果例

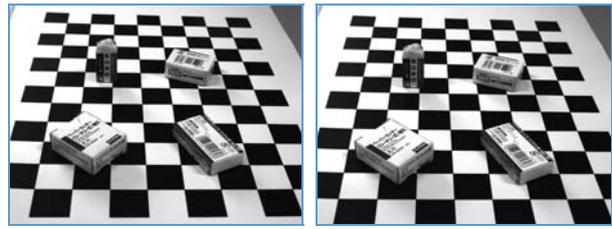
距離にある10cm程度の段差は識別可能であった。また、測域センサは半導体レーザが近赤外波長帯に関わらず、直射日光下でも3m離れた3cmの段差も障害物検出が可能なことを確認した。ステレオカメラおよび測域センサでの実験結果例を図2, 図3に示す。

3. 2 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）に分割する手法の検討を行った。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]。オプティカルフローの例を図4の赤線で示す。

オプティカルフローは物体の動きを画像座標上の長さや方向で表す。従って、カメラから物体までの距離が遠いと長さは短く、近いと長く表現されるため、見かけの長さのみで平面（床面）と障害物を識別することは困難である。そこで、本研究ではオプティカルフローの長さを二次元的な画像上の見かけの長さではなく、三次元的な長さに変換し評価することにした。本稿では、画像上の見かけの長さであるオプティカルフローを、三次元空間における床面上に射影したその長さをオプティカルフローの三次元長と定義する。

各フレームで得られるオプティカルフローの中で床面上にあるオプティカルフローは、全て同一平面（床面）上に存在する（一つのオプティカルフローは三次元特徴点となる二つの端点を結ぶ線分で構成され、二つの端点はどちらも床面上に存在する）。従って、カメラが移動することで表れる床面上の複数のオプティカルフローの三次元長は、三次元空間上におけるカメラの移動量と等しく、かつ全て同じ長さになる。一方、障害物領域で検出されるオプティカルフローは三次元空間上において、床面と同一平面上に特徴点は存在しないため、これらのオプティカルフローの三次元長は床面から得られるオプティカルフローの三次元長とは長さが異なる。例えば、床面よりも上にある段差や人等の凸状の障害物は長さが長く、床面よりも下にある側溝等の凹み状の障害物は長さが短くなる。したがって、もし、床面上のオプティカルフローの三次元長（=カメラの移動量）がわかれば、異



フレーム(t-1) フレームt



図4 オプティカルフローの例

なる三次元長のオプティカルフローを持った特徴点は障害物領域の特徴点となるはずである。また、カメラは電動ビークルに固定されているため、カメラの高さが既知である。従って、床面上のオプティカルフローとの三次元長の差から後述の式を用いて障害物の高さ情報を得ることが可能となる。

本研究では現フレームおよび前フレームの画像を用いて下記の手順で障害物検出を実施した。

Step1: 現フレームのオプティカルフローを求める。

Step2: 現フレームのオプティカルフローの中から、前フレームで床面と検出された特徴点と同一座標位置のオプティカルフローを全て求める。これが現フレームにおける床面上のオプティカルフローと仮定される。なお、カメラが移動する最初のフレームにおいては、カメラの近傍に障害物はないという仮定をもとに画面下部領域は床面とした。

Step3: Step2で求めた現フレームにおける床面上のオプティカルフローを全て三次元長に変換する。なお、ノイズ等の影響があるため、得られた全ての三次元長に対してメディアンをとった値を現フレームにおけるカメラの移動量とする。

Step4: 現フレームで検出された全てのオプティカルフローに対して、床面との高さ h を求める。高さ h は(1)式より求める。

$$h = \frac{l-L}{l}H \quad (1)$$

ここで、 H はカメラの床面からの高さ、 l は対象とするオプティカルフローの三次元長、 L はStep3で求めた床面上のオプティカルフローの三次元長である。

Step5: 高さ h が(2)式を満たす場合、そのオプティカルフローは現フレームにおける床面上のオプティカルフローとする。

$$-d \leq h \leq d \quad (2)$$

ここで、 d は床面の許容範囲を示す閾値である。

また、 h が(2)式の範囲外、かつ正の値を持つ場合は凸状の障害物、負の値を持つ場合は凹状の障害物となる。

3. 3 キャリブレーション

前節のとおり、オプティカルフローの画面上の見かけの長さを三次元空間上の長さに変換するためには、画像平面に投影された点をワールド座標系の三次元座標に射影する必要がある。そのため、キャリブレーションを行う。

1. 内部パラメータ A 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パターンを複数枚撮影し、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う。

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで f_x, f_y はそれぞれ画像面上の u 軸および v 軸における画素サイズと焦点距離 f との積からなるスケール係数であり、 (C_x, C_y) は画像平面とカメラ光軸の交点となる主点座標である。

2. 外部パラメータ $[R/T]$ の推定

実際に撮影する高さ・角度にカメラを配置し、キャリブレーションパターンを撮影し、外部パラメータ（カメラの回転 R および並進 T ）を推定する。

$$[R|T] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 画像平面の二次元点から三次元座標の射影

ワールド座標系の三次元座標点 (X, Y, Z) および座標平面に投影された二次元点 (u, v) は、式(5)の関係となる。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

s は任意のスケールを示す。本研究では、画像平面に投影された点をワールド座標系の三次元座標に変換するため、式(5)の逆行列を求め、 (u, v) から (X, Y, Z) を推定する。

また、ワールド座標系におけるカメラの位置 T_c ・姿勢 R_c は式(6)、式(7)より求める。

$$R_c = R^T \quad (6)$$

$$T_c = -R^T T \quad (7)$$

ここで、右肩の T は転置行列を意味する。

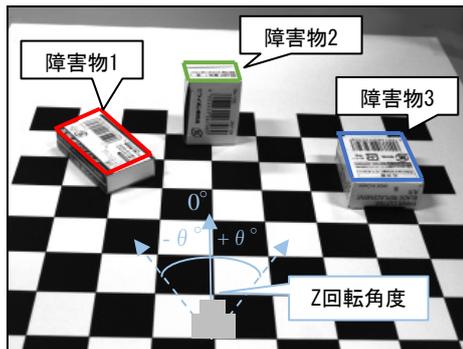


図5 実験で使った床面および3つの障害物



図6 実験の様子

3. 4 実験および考察

本手法の有効性を検証する実験を行った。

実験では障害物と床面の識別、また、障害物がある場合、その高さを求めることができるかを検証するため、屋内環境において、水平な机の上にマーカを置き、その上に寸法がわかっている3つの障害物を配置した(図5)。

カメラの位置・姿勢およびレンズ補正のためのキャリブレーションを実施後、カメラを雲台に固定し、三脚を床面と水平に進行方向で、かつ障害物に正対する方向に対して前後に手動で動かしながら動画像を撮影することで、床面と障害物の分割および障害物の高さが識別できるかについて実験を行った。実験の様子を図6に示す。

実験で使ったカメラはセンサーテクノロジー社製 STC-TB202USB-AHでフレームレートは15fps、解像度は1628×1236である。レンズは12mmレンズを使用した。撮影対象となる3つの障害物の高さはそれぞれ11.5mm, 39.5mm, 16.5mmである。

今回、実験で撮影したフレームの中から、カメラを障害物に対して近づけたり遠ざけたりする動作を行った73フレームから148フレームの計76フレーム分のデータに対して床面と障害物の分割および障害物の高さについて検証を行った。

床面と障害物の分割実験の結果、画像中から障害物のみを検出することは可能であった。そこで、精度良く障害物や床面の高さを求めることができるかについて定量的な評価実験を行った。

図5に示すとおり、フレーム毎に画像中の障害物領域をあらかじめ求めておき、その領域内のそれぞれの画像点

におけるオプティカルフロー情報から個々の画像点での障害物の高さ h を求め、領域内の複数の高さ情報の中からメディアン値を取ることでその領域の障害物の高さとした。

1フレーム毎に計測した3つの障害物の高さ等の結果を図7に示す。横軸はフレーム番号、左縦軸は床面からの高さ(mm)、右縦軸はZ回転角度(度)を示す。Z回転角度は図5に示すとおり、床面に対して鉛直方向をZ軸とした時のカメラの回転角度を示す。カメラを床面に対して水平方向に回転することでZ方向の回転角度が検出される。Z方向の回転角度は R_c より求める。

図7(a)に床面領域(真値は0mm)の実測値を、図7(b)~(d)に障害物1, 2, 3のそれぞれの高さの真値および実測値を示す。また、図7(e)にカメラのフレーム毎の並進移動量を示す。

図7(a)~(d)のグラフにおいて、フレーム115~124付近で誤差は非常に大きい。それ以外のフレームにおいて、障害物の高さも床面も比較的真値に近い値となっている。また、カメラを回転させた(Z方向の回転角度が大きい)場合、回転角度が大きいと障害物の高さの誤差は大きい傾向となった。

図7(e)のグラフに示すとおり、フレーム115~124フレーム付近ではカメラを障害物に対して近づけてから遠ざける動作をしている瞬間のため、カメラの並進移動量はほとんど0であった。したがって、このフレーム間ではオプティカルフローの三次元長は短くなるため、障害物の高さの誤差も大きくなったと推測される。その結果が図7(a)~(d)のグラフに示される大きなピークで現れている。

1フレーム当たりのカメラの移動量が0~約2.5mmと非常に微小であったため、オプティカルフローの三次元長の長さも短く、そのため、障害物の高さも真値との誤差が2mm前後となった。

そこで、オプティカルフローの三次元長を長くするために、連続する前後フレームでの障害物検出を行うのではなく、6フレーム間隔のフレームを用いて障害物検出を行った。図8にその結果を示す。横軸はフレーム番号、左縦軸は高さ(mm)、右縦軸はZ回転角度(度)を示す。

図8(a)に示すとおり、平面の真値との誤差は1mm前後であった。また、図8(b)~(d)に示すとおり、障害物1, 2, 3のそれぞれの高さの真値および実測値は、カメラの並進移動量が少ない115~127フレーム前後、およびカメラの回転角度が大きい133フレーム付近を除くと、障害物の高さはほぼ真値に近いことが確認できた。

実験の結果、カメラが停止寸前のように並進移動量が非常に少ない場合を除けば、床面と障害物の領域分割が可能であり、かつ、障害物の高さの識別も可能であることがわかる。

したがって、オプティカルフローを用いて床面と障害物の領域分割および障害物の高さ検出を行う本手法は有効であることが示唆された。

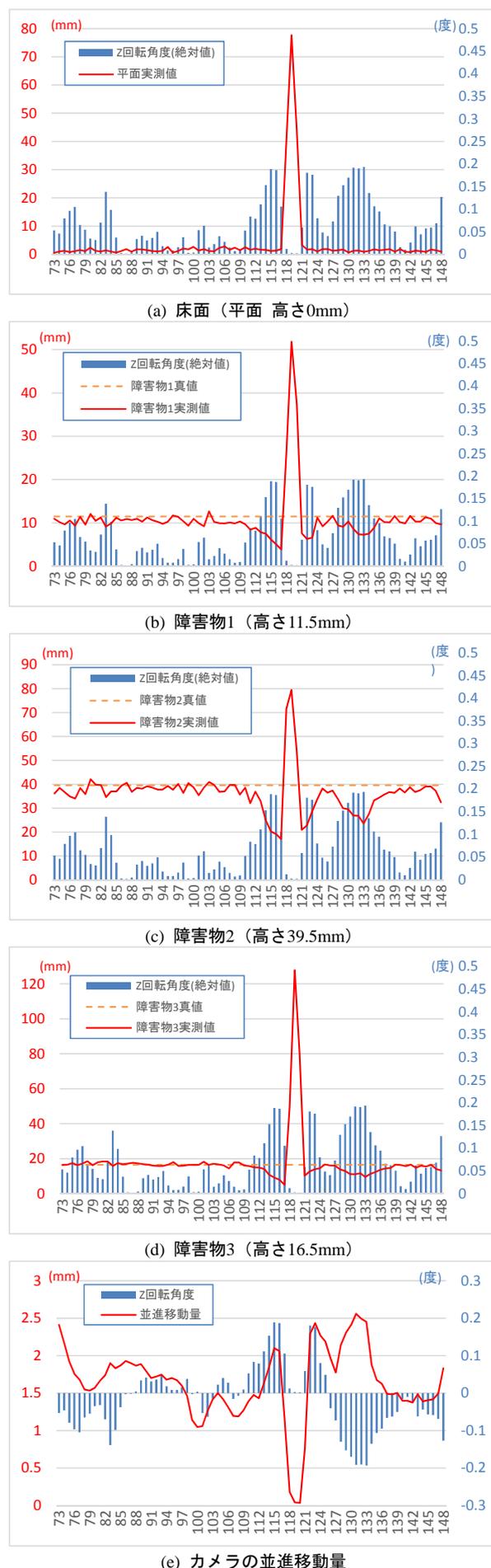
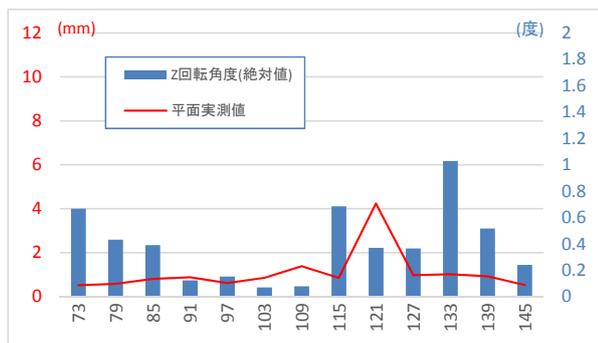


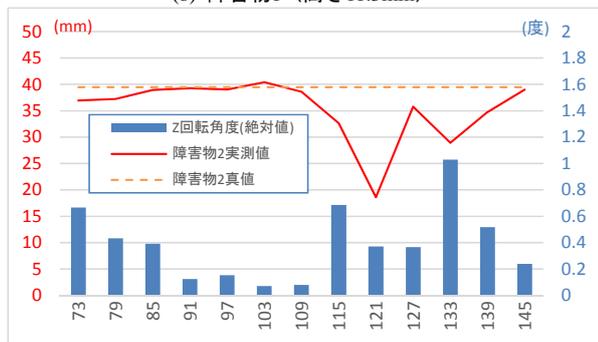
図7 フレーム毎の障害物の真値および実測値の結果 (1フレーム差分)



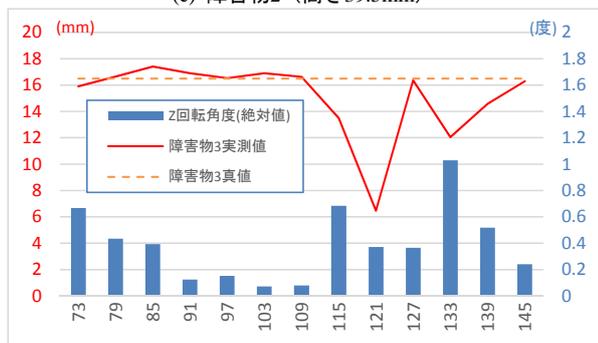
(a) 床面 (平面 高さ0mm)



(b) 障害物1 (高さ11.5mm)



(c) 障害物2 (高さ39.5mm)



(d) 障害物3 (高さ16.5mm)



(e) カメラの並進移動量

図8 フレーム毎の障害物の真値および実測値の結果 (6フレーム差分)

3.1節で記述したとおり、電動ビークルの安全装置としては3m程度離れた距離で段差等を識別できるカメラセンサが求められる。本実験は机上実験であり、カメラの床面に対する高さは239mm、撮影距離は543mmであるが、これを実際の電動ビークルに置き換えた場合、カメラの床面に対する高さが1.3mで撮影距離は3mとなる。このとき、3m離れた距離の10cm程度の段差は今回の実験では18mm程度の段差と同等の高さとなる。本実験で11.5mmの障害物の識別および高さを求めることができたことから、画像の空間解像度等が同等程度のカメラ環境および周辺環境であれば電動ビークルの安全装置として障害物の検出・高さ情報を得ることは可能であることがわかった。また、実験ではデスクトップパソコン上で画像を読み込み、障害物検知および高さ情報の取得を実施したが、処理速度は30フレーム/秒であり、ほぼリアルタイムで処理することが可能であった。

4. まとめ

電動ビークル走行時に、障害物や段差等の危険箇所を検出するカメラセンサの開発を行うため、本研究では単眼カメラによるオプティカルフローを用いて、床面と障害物領域を分割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、実際に屋外環境下で撮影実験を行い、ノイズ等のある環境下で安定して人や段差等を検出できるかについて検討を行う。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・高さ情報の取得を実施しているが、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] 上野潤也, 実吉敬二, “ステレオ法によるロバストな道路面の検出”, ロボティクスシンポジウム予稿集, Vol.14, pp.65-70, 2009.
- [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] Buachemin, S.S. and Barron, J.L. "The computation of optical flow", ACM Computing Surveys, Vol.27, No.3, pp.433-467, 1995.