

過去の車載カメラ映像との道路面差分による不特定障害物の検出

久徳 遙矢[†] 出口 大輔[†] 高橋 友和^{††} 目加田慶人^{†††}
井手 一郎[†] 村瀬 洋[†]

[†] 名古屋大学 大学院情報科学研究科 〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} 岐阜聖徳学園大学 経済情報学部 〒 500-8288 岐阜県岐阜市中鶯 1-38

^{†††} 中京大学 情報理工学部 〒 470-0393 愛知県豊田市海津町床立 101

E-mail: †{kyutoku,ddeguchi,ttakahashi,mekada,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 近年、自動車の運転者支援技術の研究や製品化が盛んに行われている。その中でも本研究では、車載カメラ映像を用いた前方障害物の検出に注目する。従来の物体検出に関する研究の多くは、あらかじめ人や車など、対象を想定して検出するものであり、想定していない物体を検出することは難しい。しかし実環境下においては、様々な障害物が車両前方に存在することが考えられるため、不特定の前方障害物を検出する必要がある。そこで本稿では、現在の走行映像と過去に同じ道路で撮られた走行映像の道路面間の差分によって、あらかじめ想定できない前方障害物を検出する手法を提案する。現在の走行映像と過去の走行映像では、走行速度や車線内での走行位置が異なるため、2系列間の時間方向の対応付け及び道路面の空間方向の対応付けを行う。その後、対応付けられた道路面同士の差分を求めることで障害物を検出する。実際の車載カメラ映像を用いた評価実験の結果、提案手法により、車両やボールなどの前方障害物が検出できることを確認した。また、市街地における一般的な走行速度で十分に回避可能な距離にある障害物の検出が可能であることを確認した。

キーワード 障害物検出, 車載カメラ, 差分, ITS

Detection of General Obstacles by Subtraction of Road-Surface with Past In-Vehicle Camera Images

Haruya KYUTOKU[†], Daisuke DEGUCHI[†], Tomokazu TAKAHASHI^{††}, Yoshito MEKADA^{†††},
Ichiro IDE[†], and Hiroshi MURASE[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan

^{††} Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University, Gifu, Gifu, Japan

^{†††} School of Information Science & Technology, Chukyo University, Toyota, Aichi, Japan

E-mail: †{kyutoku,ddeguchi,ttakahashi,mekada,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract Recently, research and commercialization of driving support technology is an active topic. In light of the above background, we focus on a technique to detect forward obstacles from in-vehicle camera images. Most existing techniques detect obstacles that could be expected beforehand, such as a pedestrian or a car. However, there could also exist various unexpected obstacles on the road. Therefore, it is necessary to detect general obstacles. Hence, this paper proposes a method for detecting general forward obstacles by subtraction of road-surface regions between present and past in-vehicle camera images. The proposed method first absorbs the gap of the road-surface regions due to the differences of the running speed and the running position in the lane, and determines the correspondence of the road-surface regions between the present and the past in-vehicle camera images. Then, the proposed method detects obstacles by subtracting the corresponding road-surface regions. Experiments were conducted using actual in-vehicle camera images. The results show that the proposed method could detect obstacles on the road accurately by subtracting the present and past in-vehicle camera images. Moreover, it was confirmed that the distances to the detected obstacles were large enough to avoid the obstacles while a vehicle runs at a standard velocity in an urban area.

Key words Detection of obstacles, In-vehicle camera, Subtraction, ITS

1. はじめに

平成 21 年の交通事故死者数は 4,914 人であり [1]、この数値は 1 日あたり約 13 人の交通事故死者が存在することを意味する。この数値からわかるように、依然多くの尊い命が交通事故によって失われている。交通事故死者数の減少には、飲酒運転対策やシートベルト着用の義務化などが貢献していると考えられる。しかし、運転者の能力には限界があるため、センサなどを用いた外部からの運転者支援も必要であると考えられる。

近年、そのような運転者支援システムに関する研究やその実用化が盛んに行われている。そのような中で、本研究では車載カメラを用いた前方障害物の検出に着目する。前方の障害物の検出が可能になれば、運転者へ運転操作に対する注意を促すことが可能になり、多くの事故を抑止できると考えられる。

前方障害物を検出する技術は数多く研究されているが、その多くは人や車などのあらかじめ想定した検出対象のみを検出するものである。そのため、あらかじめ想定できない障害物を検出することはできない。しかし、実際の路上障害物には様々なものが考えられるため、あらかじめ想定できない障害物の検出は重要な課題である。

一方で近年、市街地走行映像データベースが普及しつつある^(注1)。更に、無線通信の高速化や記憶媒体の大容量化は著しく、このような技術の発展により、事前に過去の車載カメラ映像を収集・蓄積しておき、走行中の車両でその情報を運転者支援に利用することが現実的になりつつある。

本研究の目的は、車載カメラを用いて自車の前方に存在する任意の障害物を検出することである。本稿では、単一の前向き車載カメラを用い、同一地点の過去の走行映像との差分を求めることで前方障害物を検出する手法を提案する。また、前向き車載カメラを利用することで、安価かつ汎用性が高い技術を実現する。現在と過去の走行映像間の差分により障害物を検出するためには、現在の走行映像の各フレームを過去の走行映像中のフレームに対応付ける必要がある。更に、現在と過去の走行映像では同じ道路の走行映像であっても走行位置は異なり、対応付けられたフレーム間には空間的なずれが存在するため、直接的に差分を求めることは困難である。本研究では、このような問題を解決する。

2. 関連研究

本研究では、前方障害物を検出するために、自車の走行映像と同一地点における過去の走行映像との差分を用いる。そのため、まず過去の車載カメラ映像とその位置情報を蓄積したデータベースの構築が必要である。また、差分を用いて障害物を検出するためには、障害物が映っていない過去の走行映像か、または過去の映像からの障害物除去が必要である。

市街地走行映像データベースの構築手法として、普及型の GPS とカメラを搭載した多数の一般車両により市街地映像マップを構築・更新する手法が提案されている [2] [3]。市街地走行映像データベースの構築は、このような研究を基に実現可能で

あると考えられる。

市街地走行映像データベース中の障害物の除去手法について、既に提供されているサービスである Google ストリートビューは、プライバシー保護の観点から車両のナンバープレートや人物の顔などにぼかしを入れるような補正を行っているが、車両や人物そのものの除去には対応していない。そのため、そのような障害物を除去する研究も行われている [4] [5]。このような技術により、障害物が映っていない市街地走行映像データベースの構築が可能になる。

一方、道路上の障害物を検出する手法として、ミリ波レーダやステレオ及び単眼カメラを用いたものなどが多く研究され、実用化され始めている [6]。しかし、現状ではミリ波レーダを搭載するのは高級乗用車のみである [7] [8] [9]。また、ステレオ視はカメラの較正 [10] や画像間の対応点の検出に十分な精度を得ることが難しく、いまだ多くの課題が残る。赤外線カメラを用いた技術も高級乗用車に搭載されはじめているが、人物の検出に特化したものであり、夜間の視認性を補助する意味合いが強い [7] [8]。更に、通常の単眼カメラを用いた研究も行われているが、多くは検出対象を人や車に限定した、見えの学習に基づくものである [11] [12]。

これらの問題から、本研究では 1 台の前向きカメラのみをセンサとして用い、現在の走行映像と過去の走行映像との差分に基づく検出により、対象の形状などの情報を必要としない不特定障害物の検出手法を提案する。

3. 現在と過去の車載カメラ映像間の差分による障害物検出

本研究では、現在と過去の車載カメラ映像中の道路面間の差分を用いて障害物を検出する。現在と過去の車載カメラ映像間の差分を用いて障害物を検出するとき、2 映像間に走行速度や走行位置の違いが存在することが問題となる。そのため、まず現在の走行映像の各フレームに対応する、過去の走行映像中のフレームを求める必要がある。また対応するフレームにおいても、走行位置の違いにより直接的に差分を求めることは困難である。図 1 に時間方向に対応付けられたフレーム、図 2 に直接それらのフレーム間の輝度値の差分を求めたものを示す。このように、走行位置の違いによって見えのずれが存在する。そこで、検出対象領域を道路面に限定し、道路面の平面性を仮定した射影変換により位置合わせを行う。

提案手法では、以上の問題を解決し、障害物を検出する。提案手法の処理手順を図 3 に示す。以降、各処理手順の詳細について述べる。

3.1 系列間の時間方向の対応付け

現在と過去の走行映像間の差分を求めるためには、まず現在の走行映像の各フレームに対応する、過去の走行映像のフレームを求める必要がある。そこで、現在と過去の走行映像の 2 つのカメラ間の距離を表す尺度を用いた DP マッチングにより、現在の走行映像の各フレームに対応する過去の走行映像のフレームを求める。

ここで、現在と過去の 2 つのカメラの位置の違いに応じた工

(注1): Google ストリートビュー, <http://maps.google.co.jp/>



現在の走行映像 過去の走行映像
図 1 時間方向に対応付けられたフレーム



図 2 図 1 のフレーム間の輝度値の差分を求めた図

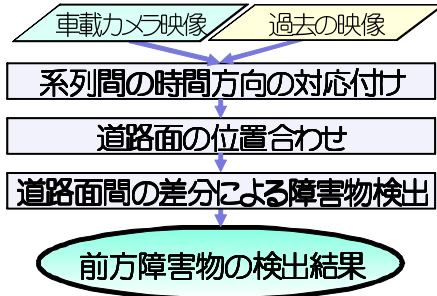


図 3 処理手順

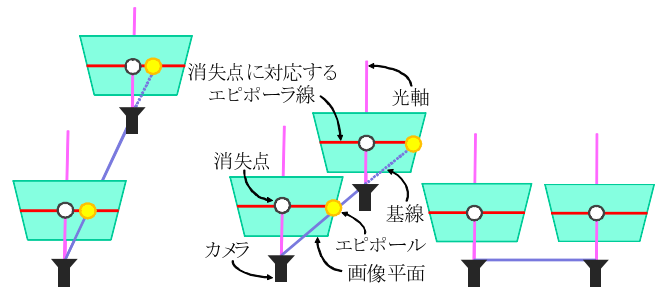
ピポールの位置を図 4 に示す。図から、光軸が平行に近いときは、2つのカメラの配置が真横に近いほどエビポールの位置は消失点から遠ざかることがわかる。実際の車載カメラ映像のあるフレームと、別の映像の一番類似度が高いフレームとその前後のフレームのエビポールの位置を描画したものを図 5 に示す。図から、2カメラ間の距離に応じてエビポールの位置が変動することが確認できる。

以上から、現在と過去のフレーム間のエビポールの位置と、画像中の消失点の位置の x 座標の差を類似度として DP マッチングを行う。エビポールの位置は、現在と過去のフレーム間の対応点を SIFT 特徴 [13] を用いて求め、基礎行列を RANSAC アルゴリズム [14] を用いて推定することで求める。画像中の消失点の座標には、カメラが自車両の進行方向を向いていると仮定し、フレームの中心の位置を用いる。この類似度は特徴点に基づくため、隠蔽に頑健な対応付けが可能である。

3.2 道路面の位置合わせ

時間方向に対応付けられたフレーム中には、走行位置の違いにより、図 2 のような、平行移動や回転では吸収できない見えのずれが存在する。そこで、検出対象領域を道路面に限定し、道路面の平面性を仮定して射影変換によって位置合わせを行い、道路面を画素単位で位置合わせする。

ここで、射影変換を行うためには現在と過去のフレーム内の道路面上の 4 対応点が必要となる。しかし、道路面のテクス



2カメラ間の距離大 2カメラ間の距離中 2カメラ間の距離小

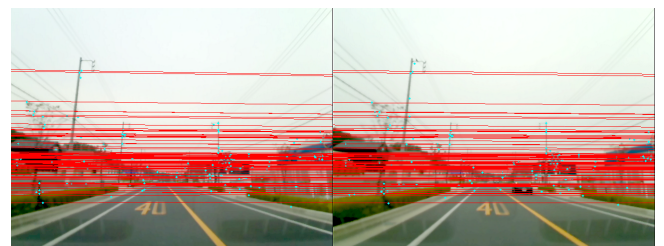
図 4 2カメラの位置とエビポールの位置の関係



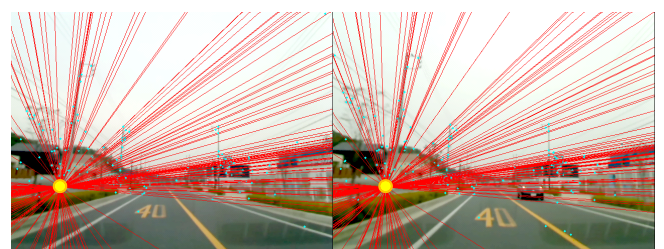
基準フレーム $t = t_0 - 6$ のフレーム



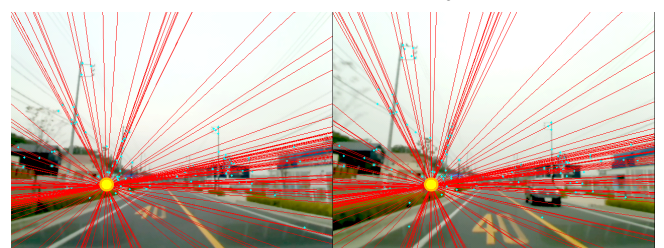
基準フレーム $t = t_0 - 3$ のフレーム



基準フレーム 一番類似度が高いフレーム $t = t_0$



基準フレーム $t = t_0 + 3$ のフレーム

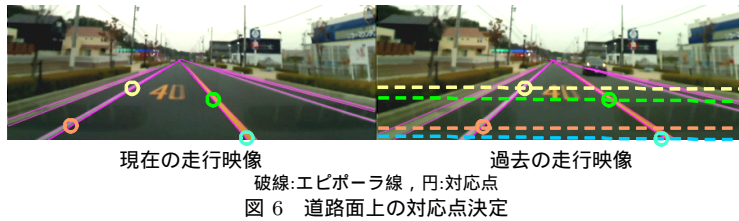


基準フレーム $t = t_0 + 6$ のフレーム

直線:エビポール線, 丸:エビポール

図 5 一番類似度が高いフレームとその前後のフレーム

チャは単調であり、単純な画像特徴では十分な精度で対応点を求めることができない可能性がある。そこで、片方のフレーム内のある点に対応するエビポラ線は一意に求まり、その点の



現在の走行映像 過去の走行映像
破線:エピポーラ線, 円:対応点
図 6 道路面上の対応点決定



図 9 車載カメラ搭載の様子

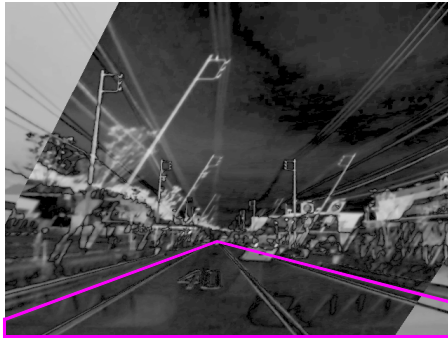
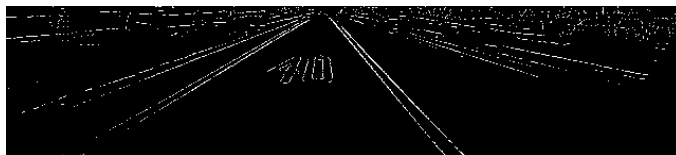


図 7 射影変換による位置合わせ後に輝度値の差分を求めた図



白:現在の走行映像中のエッジと過去の走行映像中のエッジの重複画素
図 8 エッジ画像の射影変換による位置合わせ

対応点は必ずもう片方のフレーム内のエピポーラ線上に存在するという性質を利用し、エピポーラ線と区画線位置を用いて対応点を求める。対応点決定の様子を図 6 に示す。まず、区画線位置を投票範囲を制限した Hough 変換を用いて求める。次に、片方のフレーム中の区画線上の適当な位置に 4 点を決定する。そして、3.1 で求めた基礎行列を用い、各点に対応するもう片方のフレーム上のエピポーラ線を求める。最後に、対応する区画線とエピポーラ線の交点をそれぞれ対応点とする。

以上の手順によって道路面上の 4 対応点を決定し、それらを用いて射影変換を行い、道路面を位置合わせする。実際に図 1 のフレームに射影変換による位置合わせを行い、輝度値の差分を求めた例を図 7 に示す。図 2 に比べ、道路面領域内のずれが小さいことがわかる。また、同様に図 1 のフレームのエッジ画像を位置合わせしたものを図 8 に示す。現在の走行映像中のエッジと過去の走行映像中のエッジの重複画素を白で示している。重複画素で路面表示の 40 の文字が判別できることから、道路面の位置合わせが良好に行えていることがわかる。

3.3 道路面間の差分による障害物検出

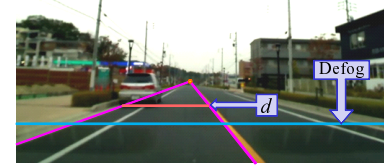
位置合わせされた道路面領域間の差分を求め、差異のある部分を障害物として検出する。その際の特徴量として、輝度・彩度・エッジを用いる。以降、それぞれの求め方を述べる。

3.3.1 輝度・彩度の差分値による検出

車載カメラ映像は、カラー画像の系列として得られる。これを HSV 色空間の輝度 (V) と彩度 (S) のみの画像へ変換し、それぞれの差分値の絶対値を求める。HSV 色空間のうち色相 (H) を用いない理由は、一般に道路面は灰色であることが多く、色相が安定しないためである。その後、道路面領域中の差分値の大きい領域を障害物として検出する。



(a) 障害物が距離 d より遠い (b) 障害物が距離 d より近い



(c) 検出対象領域及び距離 d

図 10 距離 d と障害物の位置の関係及び検出対象領域

また、道路面の位置合わせの精度が不十分であることが起こり得る。そのため、検出された領域を過去の走行映像中の道路面領域から探索し、類似度の高い領域が存在した場合には誤検出であるとして検出結果から除外し、検出精度の向上を図る。類似度には正規化相互相関 [15] を用いる。

3.3.2 エッジ情報の差分による検出

車載カメラ映像の各フレームから、Canny アルゴリズム [16] を用いてエッジを抽出し、差分を求める。ここで、エッジ画像はエッジの有無を表す 2 値画像であるため、本研究では現在の走行映像中に存在するエッジ画素のうち、過去の走行映像中に存在するエッジ画素の部分を除いたものをエッジ情報の差分と呼ぶ。差分画像に残っているエッジを障害物として検出する。

また、エッジ情報の差分では 1 画素でもずれが生じると背景が検出されてしまう。そこで、検出されたエッジを過去の走行映像中の道路面領域から探索し、類似度の高い領域が存在した場合には誤検出であるとして検出結果から除外し、検出精度の向上を図る。類似度は Chamfer 距離 [17] が小さいほど高くなるように設定した。

4. 評価実験

4.1 実験に用いるデータ

実験用データは、Logitech 社の Web カメラ「Logicool Qcam® Pro 9000」を、図 9 のように車両のフロントガラスに固定し、 640×480 画素、15fps でデータを取得した。

実験に用いるデータは、障害物として路上駐車車両、前方走行車両、道路を横断する歩行者、パイロン、段ボール箱、ボールを含む合計 1,746 フレームの系列である。同じ道路で取得した障害物の映っていない系列を過去の走行映像として用いて実験を行った。ここで、自車両のデフォッグ吹出口のフロントガラスへの映り込みが彩度に大きく影響したため、その映り込みの領域を彩度による検出の場合検出対象領域から除いた。

4.2 検出精度の評価方法

本実験では、提案する各差分指標に対し、障害物検出に関してカメラから障害物までの距離に応じた再現率、誤検出に関して誤検出率・誤検出フレーム率で評価を行う。

再現率は正検出数 / 正解総数とする。図 10(a) に障害物がしきい値 d より遠い場合の例を示す。この場合、障害物の下端が距離 d よりも画像上で上方に存在するため、正解及び正検出としないが、図 10(b) のように障害物がしきい値 d より近い場合、正解及び正検出として数える。また、前述の理由から彩度による検出の場合、図 10(c) に示すデフォッガの映り込みの領域を検出対象領域から除く。

誤検出率とは 1 フレームあたりの誤検出数であり、誤検出数 / フレーム数とする。また、誤検出フレーム率とは誤検出が発生するフレームの割合であり、誤検出があったフレーム数 / 総フレーム数とする。

4.3 実験結果

各提案指標ごとの距離 d の値に応じた再現率を図 11 に、誤検出率及び誤検出フレーム率を表 1 に示す。また、遠方で検出された障害物の例を、図 12(a) ~ (g) に、誤検出及びエッジ情報と輝度値の差分の例を図 12(h) に示す。四角枠で囲まれた領域が検出された領域であり、道路面のうち検出対象領域は輝度を高くして示してある。吹き出しの左に検出結果の拡大図、右に元のフレームの拡大図を示す。

4.4 考察

再現率について、図 11 から、エッジによる検出は総じて良好な再現率が得られることがわかる。また彩度による検出は、検出対象領域が狭いために近距離の障害物を検出できないが、遠方の障害物に対し良好な再現率が得られることがわかる。

誤検出について、表 1 から、1 フレームあたり 0.12 個以下の誤検出が存在することがわかる。これは、十分に小さい値であると考えられる。しかし、エッジによる誤検出が他の差分指標に比べ高いことがわかる。これは、同じ対象に対する誤検出でも、図 12(h) のように、輝度や彩度による検出に比べエッジによる検出は寸断が起りやすいため、検出数が多くなる傾向があるためと考えられる。また表 1 から、最も誤検出が多いエッジによる検出でも、誤検出が発生するフレームの割合は約 5%である。1 フレームあたりの誤検出が 0.12 個であることから、一部のフレームに集中して誤検出が発生したことになる。それらのフレームはエビボールの位置が画像上の消失点近く、図 12(h) のように道路面の位置合わせの精度が低下したフレームであったと考えられる。これは、過去の走行映像を複数用意するなどして、エビボールの位置が画像上の消失点とより離れた過去のフレームを用いて位置合わせを行うことで、回避可能な誤検出であると考えられる。

検出結果の例について、図 12(a), (b) の車両、及び図 12(c), (d) の歩行者は、彩度に乏しい検出対象であったため、遠方でも彩度より輝度やエッジによる検出が良好だった例である。また、図 12(g) は、画像上で 4×4 画素程度の大きさであり、直径 20cm 程度のボールをカメラから 44m 遠方の位置で検出した例である。これは、時速 60km で走行中の車両が停止可能な

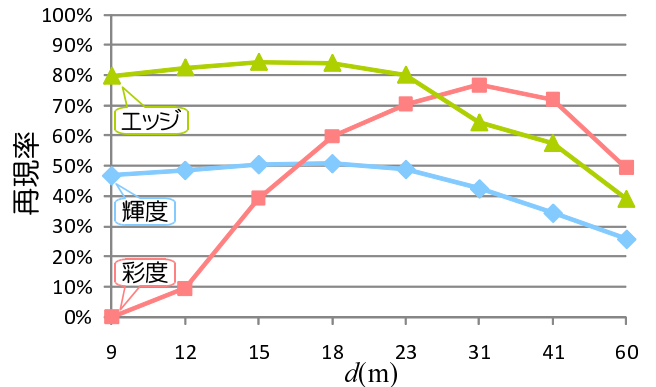


図 11 自転車からの距離 d 以内の障害物検出の再現率

表 1 誤検出率及び誤検出フレーム率

	誤検出率 (個 / フレーム)	誤検出フレーム率
輝度	0.016	0.010
彩度	0.010	0.009
エッジ	0.120	0.052

距離で検出できたことになる。

以上から、検出対象の事前情報を用いず、段ボールやボールなどの不特定の障害物を提案手法によって検出できることを確認した。また、Web カメラという安価なセンサを用いて、障害物回避に十分な距離での検出が可能であることを確認した。

5. まとめ

本稿では、現在の走行映像と過去の走行映像との差分を用いた不特定前方障害物の検出手法を提案した。不特定物体を検出する場合、対象の見えに関する事前学習ができないため、同地点の過去の映像との差分に基づく検出手法であるという特徴がある。現在と過去の走行映像間の差分を求めるためには、現在の走行映像の各フレームに対応する過去の走行映像のフレームを見つける必要がある。また、現在と過去の走行映像では走行位置が異なるため、直接差分を求めることは困難である。そこで、提案手法では、まず現在と過去の走行映像のフレームを隠蔽に頑健な特徴点ベースの手法で対応付けた。そして、検出対象領域を道路面に限定し、道路面が平面であるという仮定の下で、射影変換により画素単位での対応付けを行った。この対応付けのために必要な道路平面上の 4 つの対応点は、エビボール線と区画線位置を用いて間接的に求めた。これらの対応付けを行った後、現在と過去の走行映像の道路面間の差分を用いて障害物を検出した。

実際の車載カメラ映像を対象とした実験により、現在と過去の走行映像中の道路面間の差分を用いて、段ボールやボールなどの不特定の障害物が検出できることを確認した。更に、障害物回避に十分な距離での検出が可能であることを確認した。

今後の課題は、天候の異なる走行映像間での検出精度評価や、差分指標の統合及び新たな差分指標の検討などが挙げられる。

謝辞

日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に深く感謝する。本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST 及び科学研究費補助金による。また、本研究では画像処理に MIST ライブラリ (<http://mist.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/>) を使用した。

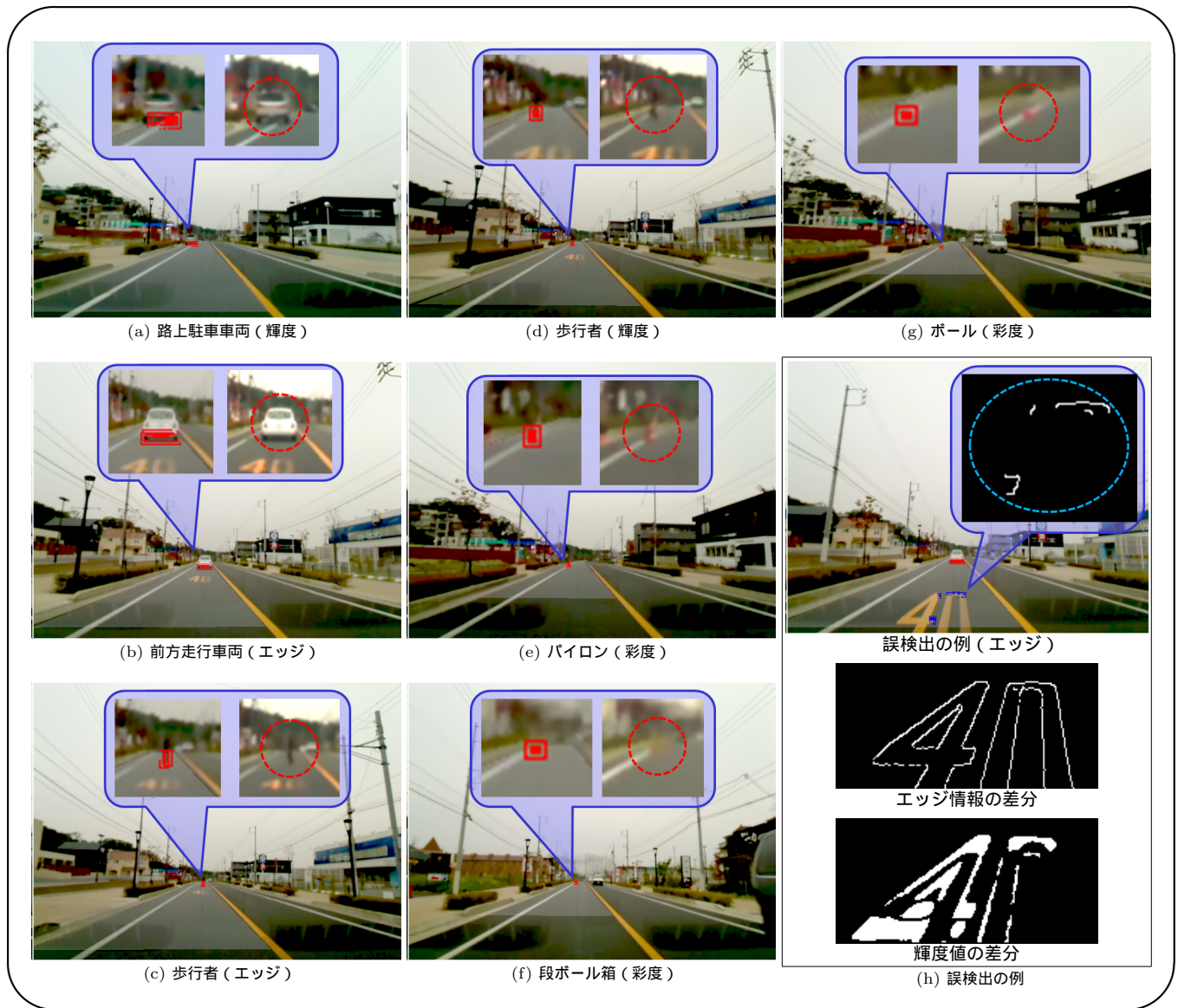


図 12 検出結果の例

文 献

- [1] 警察庁交通局, 平成 21 年中の交通事故死者数について, <http://www.npa.go.jp/toukei/kouki/0102.H21dead.pdf>
- [2] 石川 尊之, 山崎 俊彦, 相澤 清晴, “GPS と画像特徴を用いた車載映像中の街並変化の検出,” 画像符号化・映像メディア処理シンポジウム (PCSJ・IMPS2005), I-4.08, Nov. 2005
- [3] 佐藤 准嗣, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “車載全方位カメラ映像を用いた街並変化検出の高精度化,” 信学技報, PRMU2006-250, Mar. 2007
- [4] 高橋 英之, 堀 磨伊也, 神原 誠之, 横矢 直和, “全地球画像データベース作成のための色調統一と動物体の除去,” 信学技報, MVE2009-40, Oct. 2009
- [5] 内山 寛之, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “複数映像統合による車載カメラ映像からの移動物体除去,” 信学技報, PRMU2009-102, Nov. 2009
- [6] 富士通テン (株), “運転支援システム用フュージョンセンサの開発,” 富士通テン技報, Vol.37, pp31-39, Jun. 2001
- [7] 本田技研工業 (株), 技術紹介, <http://www.honda.co.jp/tech/aut/>
- [8] トヨタ自動車 (株), 研究・技術, <http://www2.toyota.co.jp/jp/tech/safety/>
- [9] 日産自動車 (株), 技術紹介, <http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/>
- [10] Juan M. Collado, Cristina Hilario, Arturo de la Escalera, Jose M. Armingol, “Self-calibration of an On-Board Stereovision System for Driver Assistance Systems,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2006, pp.156-162, Jun. 2006
- [11] 西田 健次, 栗田 多喜夫, “特徴選択と Soft-Margin SVM の Boosting を用いた歩行者検出,” 信学技報, PRMU2004-187, Feb. 2005
- [12] 尾崎 貴洋, 山内 悠嗣, 藤吉 弘巨, “Joint HOG 特徴を用いた 2 段階 AdaBoost による車両検出,” 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2008), I1-13, Mar. 2008
- [13] David G. Lowe, “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints,” International Journal on Computer Vision, Vol.60, No.2, pp.91-110, Nov. 2004
- [14] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles, “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,” Comm. Of the ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395, Jun. 1981
- [15] 田村 秀行, “コンピュータ画像処理,” オーム社, 2002.
- [16] John Canny, “A Computational Approach to Edge Detection,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, No.6, pp.679-698, Nov. 1986
- [17] Gunilla Borgefors, “Hierarchical Chamfer Matching : A Parametric Edge Matching Algorithm,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, No.6, pp.849-865, Nov. 1988