

過去の車載カメラ映像との時空間差分による 不特定障害物検出

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

^{††} 名古屋大学 情報連携統括本部

〒 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 岐阜県岐阜市中鷺 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@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本研究の目的は、前方を向いた車載カメラ映像から障害物を検出することである。車載カメラ映像からの障害物検出に関する研究は広く行なわれているが、多くは車両や人物といった特定の検出対象の見えを学習して行なうものであり、事前に学習することができない、段ボール箱や積荷の落下物などの不特定の障害物への対応はできない。そこで提案手法では、同一地点における過去の車載カメラ映像との差分を用いて不特定の前方障害物を検出する。しかし、過去の走行映像は走行位置の違いによる視点のずれを含み、直接的に差分を求めることは困難である。そこで、まず既存手法により現在と過去の映像中のフレーム間対応付けを行なう。そして、対応付いたフレーム同士の道路路面を射影変換によって位置合わせする。最後に、対象までの距離を考慮した道路路面時空間画像差分により障害物を検出する。評価実験から、ボールなどの不特定の障害物を検出できることを確認した。

キーワード ITS, 障害物検出, 車載カメラ, 差分, 運転者支援

1. はじめに

近年、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なわれている。その中でも、路上障害物は事故を引き起こす大きな要因であり、それらの検出および警告といった支援が必要とされている。前方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。そこで、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。

前方障害物を検出する技術は数多く研究されているが、それらの多くは人や車など特定の検出対象のみを検出するものである。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、不特定の障害物を検出する技術は重要である。

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不特定の障害物を検出することである。我々は、前方を向いた単一の車載カメラを用い、現在と過去の走行映像の差分により前方障害物を検出する手法を提案している [1]。この手法は、次の 2 つの課題を解決することで、現在の走行映像と過去の走行映像の差分による障害

物検出を実現している。

(1) 現在と過去の走行映像中のフレーム対応付け

(2) フレーム内の画素間の対応付け

課題 (1) については、エピポーラ幾何を用いたフレーム間距離尺度を定義することで、精度良く対応フレームを求めている [2]。そして、文献 [1] では、道路路面を平面と仮定し、射影変換による位置合わせを行なうことで、道路路面の位置合わせを行ない、課題 (2) を解決している。しかしながら、フレーム単位の差分では、位置合わせ精度の低下などによって、安定した障害物検出を行なえないという問題がある。さらに、差分画像中での障害物の解像度やぼけ具合が、対象までの距離によって異なる。

そこで提案手法では、時間方向の連続性を考慮し、障害物までの距離に応じた検出を行なうことで、さらなる精度向上を試みる。

以下、2. 節で本研究に関連する研究について述べ、提案手法について 3. 節で詳細に説明し、提案手法の有効性を確認する実験について 4. 節で述べる。最後に、5. 節で本稿をまとめる。

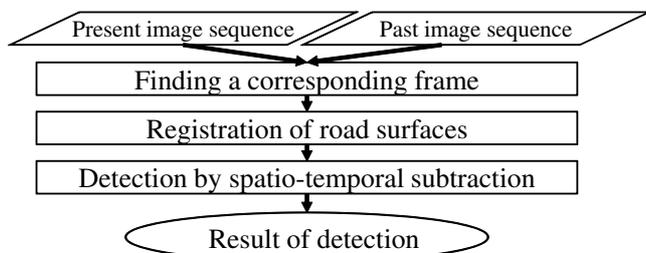


図1 処理手順

2. 関連研究

本研究では、前方障害物を検出するために、自車の現在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。そのためには、位置情報が付与された過去の車載カメラ映像をデータベースとして準備する必要がある。また、差分により障害物を検出するためには、過去の走行映像中に障害物が映っていないことが重要となる。このような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する手法が提案されている[3][4]。さらに障害物が映っていない走行映像については、同一地点の複数の走行映像を用いることで、障害物を除去した映像を生成する手法が提案されている[5][6]。

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[7][8][9][10]。しかし、ミリ波レーダは解像度が低く、小さな障害物の検出には向かない。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[8][9]。さらに、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]。

以上の背景から、本研究では1台の前方を向いた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不特定障害物の検出手法を提案する。

3. 過去の車載カメラ映像との時空間差分による不特定障害物検出

提案手法の処理手順を図1に示す。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場合、2映像間の走行速度や走行位置の違いが問題となる。つまり、現在と過去の走行映像間には、時間方向と空間方向のそれぞれに対して位置ずれが存在する。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、時間方向のずれを補正する。図2に時間方向に対応付けられたフレーム、図3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、時間方向の補正後のフレームにおいても、

走行位置の違いによる空間的なずれが存在する。これを補正するため、検出対象領域である道路面に対し、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ない、差分により障害物を検出する。図4に図2の道路面を位置合わせして差分を求めた例を示す。しかしながら、位置合わせ精度が不十分な場合には誤検出が多数発生する。そこで、位置合わせされた道路面間の差分画像を時系列に並べた道路面時空間差分画像を生成し、時間的な連続性を考慮して障害物を検出することで誤検出を抑制する。さらに、対象までの距離によって差分画像中の解像度やぼけ具合が異なるため、障害物までの距離に応じた検出を行なうことで、検出精度の向上を図る。

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

ここでは、文献[2]で提案されている、2カメラ間の位置関係を反映した距離尺度を用いた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。以降の処理では、ここで対応付けられたフレーム対(図2)を用いて処理を行なう。

3.2 道路面の位置合わせ

対応付けられたフレーム中には、撮影視点の違いにより、図3のような平行移動や回転では吸収できないずれが存在する。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画素単位で位置合わせを行なう[1]。

実際に図2のフレームに射影変換による位置合わせを行ない、フレーム間の差分を求めた例を図4に示す。図3に比べ、道路面領域内の位置ずれが小さいことがわかる。

3.3 道路面時空間差分画像を用いた障害物検出

まず、位置合わせされた道路面領域間の差分画像を生成する。その際の特徴量には、輝度変化に頑健な差分指標であるRGBベクトル間の角度を用いる。

次に、道路面差分画像を時系列に並べた道路面時空間差分画像から障害物を検出する。

この処理の流れを図5に示す。図中の破線は区画線を表わす。まず、道路面差分画像を時系列に並べ、フレームの横方向を x 軸、縦方向を y 軸、フレーム群の時間方向を t 軸とした道路面時空間差分画像を生成する(図5(a))。次に、図5(a)の一点鎖線で示すように、各 y に対して (x, t) 画像を切り出す(図5(b))。そして、各 (x, t) からCannyアルゴリズム[13]を用いてエッジを抽出する(図5(d))。ここで、解像度やぼけの問題から、自車と障害物間の距離に応じて、障害物に対して生じる差分画像中の差異の現れ方は異なる。このことから、 y に応じたしきい値 θ_y をエッジ検出に用いることで、障害物までの距離に応じた検出を行なう。こうしてエッジを抽出した (x, t) 画像中の現在のフレーム位置から、あるし



現在の走行映像



過去の走行映像

図 2 時間方向に対応付けられたフレーム



図 3 図 2 のフレーム間の差分画像（輝度差の絶対値）



図 4 射影変換による位置合わせ後の差分画像（輝度差の絶対値）

きい値以上連続するエッジをもつ x を、障害物に対して検出されたエッジ位置とする。これを各 y において算出し、対応する (x, y) を障害物検出結果とする（図 5(c)）。

4. 評価実験

4.1 実験用データ

実験には、Logitech 社の Web カメラ「Logicool Qcam®Pro 9000」を、図 6 のように車両のフロントガラスに固定し、 640×480 画素、15fps で取得したデータを用いた。これは、障害物として道路を横断する歩行者、直径 20 cm 程度のボール、パイロン、路上駐車車両、前方走行車両を含む、合計 879 フレームの系列である。また、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た。ここで、車載カメラ画像には自車両のダッシュボードのフロントガラスへの映り込みが存在するため、その領域を検出対象領域から除いた。

4.2 検出精度の評価方法

自車両から 44 m 以内の障害物を検出対象としたとき

の再現率（Recall）と適合率（Precision）を用いて評価を行なった。ここで、それぞれ

$$\text{再現率} = \frac{\text{正検出数}}{\text{障害物総数}}$$

$$\text{適合率} = \frac{\text{正検出数}}{\text{検出総数}}$$

で求める。また、検出結果をラベリングし、同一ラベルのものを 1 つとして数えた。ただし、1 つの障害物に対して 1 フレーム内で複数の検出結果が現れた場合はまとめて 1 つとして数えた。

4.3 比較手法

提案手法の障害物までの距離に応じた検出の有効性を確認するため、3.3 節で θ_y を距離によらず一定とした手法を比較手法 1 として用いた。また、時空間差分画像を用いることの有効性を確認するため、3.3 節で求めた道路面差分画像においてしきい値以上の差異を持つ画素をそのまま検出結果とする手法 [1] を比較手法 2 として用いた。さらに、RGB ベクトル間の角度を差分指標とす

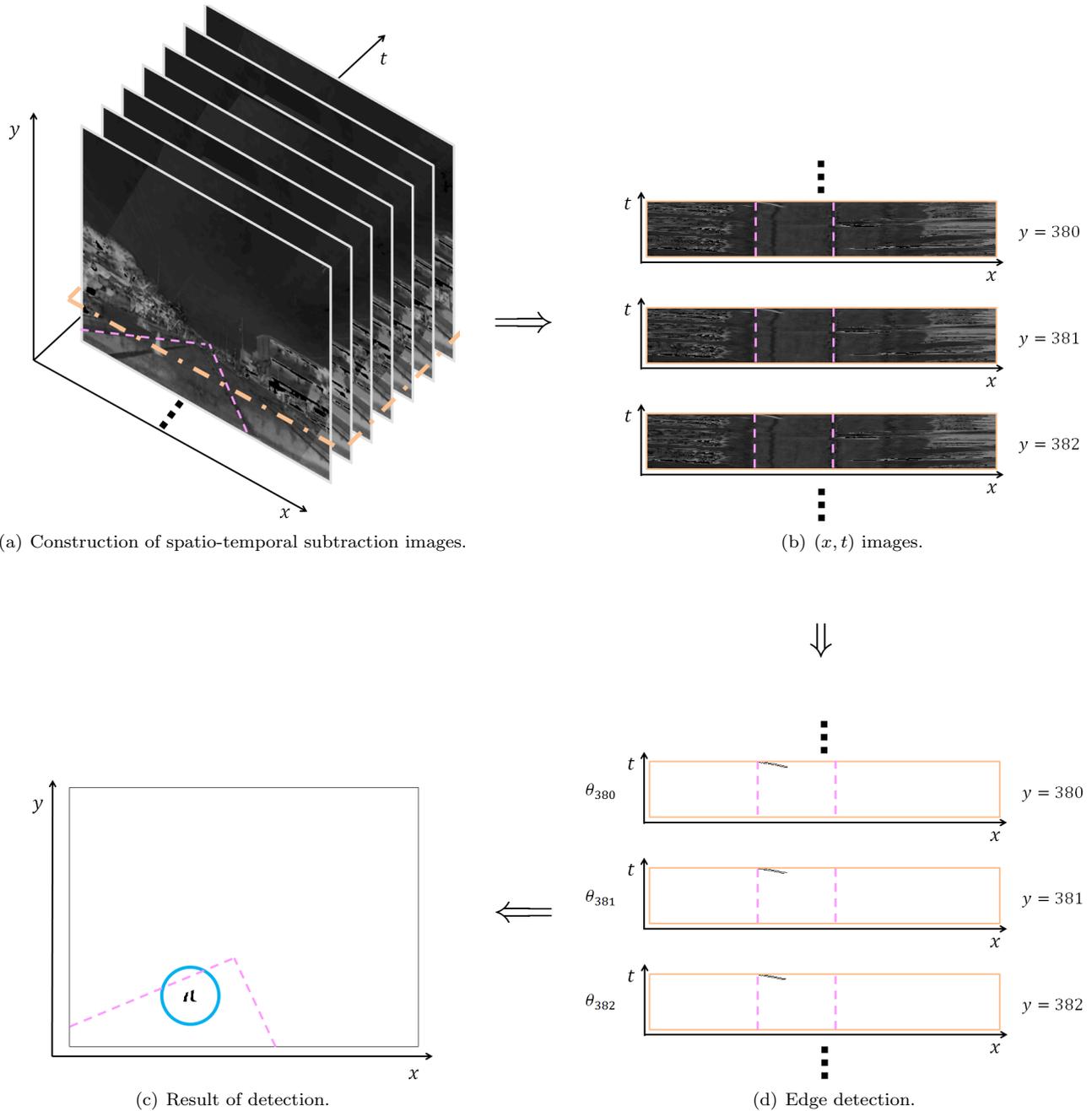


図 5 道路面時空間差分画像を用いた障害物検出

ることの有効性を確認するため、差分指標を輝度差に変更し、しきい値以上の差異を持つ画素をそのまま検出結果とする手法を比較手法 3 として用いた。

4.4 実験結果

各手法で差分を求める際のしきい値を変化させたときの再現率と適合率のグラフを図 7 に示す。横軸が再現率、縦軸が適合率である。提案手法および比較手法 1 は、3.3 節における Canny のエッジ検出アルゴリズムのヒステリシスしきい値処理において、上限と下限の差を一定にして評価した。また、提案手法の y に応じたしきい値 θ_y は、 y に比例して変化させて設定した。

さらに、各手法で F 値が最大となったときの再現率、

適合率、F 値を表 1 に示す。ここで、F 値は再現率と適合率の調和平均であり、次式で求められる。

$$F \text{ 値} = \frac{2 \cdot \text{適合率} \cdot \text{再現率}}{\text{適合率} + \text{再現率}}$$

4.5 考察

4.5.1 検出精度

図 7 および表 1 から、輝度差を用いた場合に比べて、RGB ベクトル間の角度を用いた方が高い F 値が得られることがわかる。このことから、RGB ベクトル間の角度は輝度差に比べて明るさの変化に頑健な指標であると考えられる。さらに、RGB ベクトル間角度を指標とした時空間差分画像を用いた比較手法 1 では、より高い検

表 1 各手法における F 値の最大値

	Recall	Precision	F-measure
Proposed method	0.92	0.84	0.88
Comparative method 1 (Constant)	0.80	0.83	0.82
Comparative method 2 (Intervector angle)	0.71	0.92	0.80
Comparative method 3 (Brightness)	0.87	0.71	0.78



図 6 車載カメラ搭載の様子

出精度が得られている．特に図 7 から，適合率が 1.0 に近いときの再現率が高いことがわかる．このことから，時空間差分画像の利用は，誤検出の抑制に一定の効果があったことがわかる．

また提案手法は，比較手法 1 に比べさらに高い検出精度が得られている．このことから，障害物までの距離を考慮したしきい値決定有効に働いていることがわかる．

以上から，提案手法の有効性を確認した．

4.5.2 遠方の障害物の検出

表 1 のときのしきい値を用いた提案手法による，障害物までの距離に応じた再現率のグラフを図 8 に示す．また，そのときの遠方の障害物検出例を図 9 に示す．各障害物名の後ろの数値は自車両からの距離であり，白い画素が検出結果である．さらに，4.1 節で述べた検出対象領域外の画素の輝度を低く表している．

図 8 から，18 から 31 m に位置する障害物について，全てを検出できていることがわかる．時速 50 km で走行する一般的な車両の停止距離が 32 m であることから，良好な検出精度であると考えられる．ただし，それより近い 12 から 18 m に位置する障害物に対する検出率が低下している．これは，検出対象領域から外れる直前の障害物の検出精度が低下したためである．これらはそれより遠方の位置で既に検出できているため，大きな問題は無いと考えられる．

さらに，図 9 から，歩行者，ボール，パイロン，路上駐車車両について，44 m 以上の遠方で検出できている．これは，時速 60 km で走行する一般的な車両が停止可能な距離であり，一般道を走行する車両にとって危険回避のために十分な距離であると考えられる．

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道路面時空間差分を用いた不特定前方障害物の検出手法を提

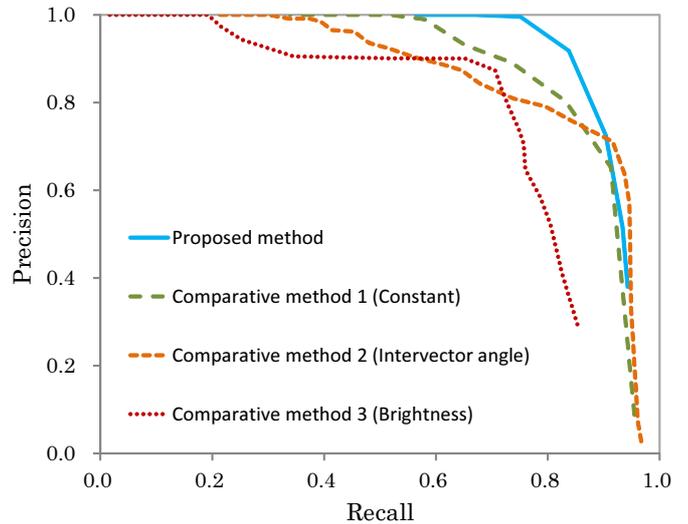


図 7 障害物検出結果の再現率と適合率の関係

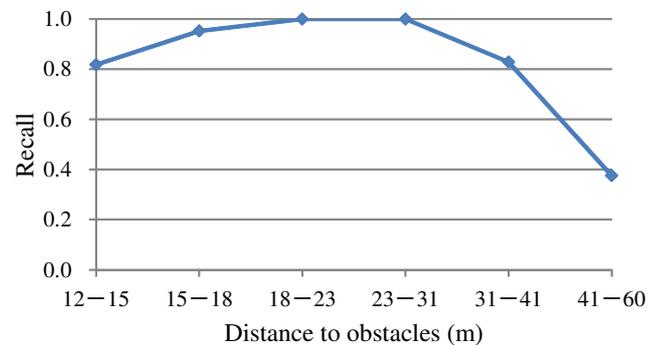
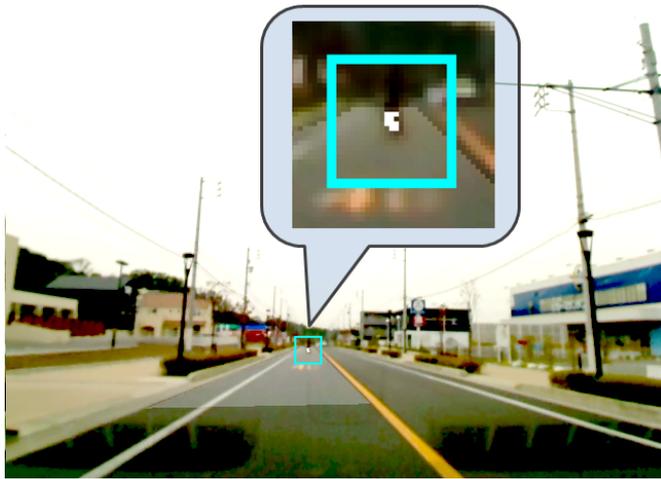


図 8 提案手法による障害物までの距離ごとの再現率

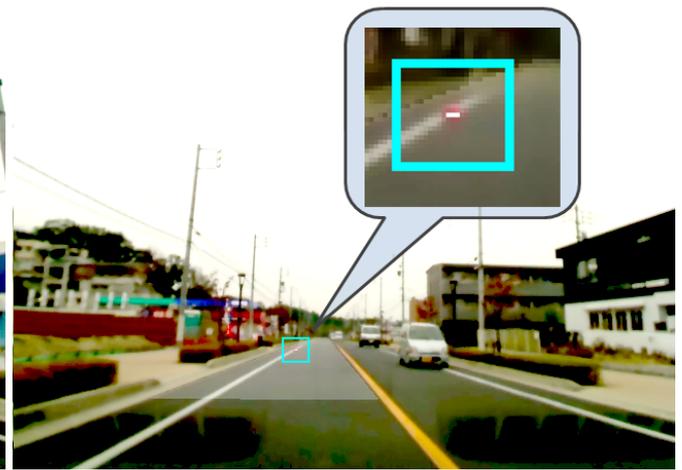
案した．現在と過去の走行映像間の差分を求めるためには，現在の走行映像の各フレームに対応する過去の走行映像のフレームを見つける必要がある．ここでは，走行位置ずれに頑健なフレーム間対応付け手法を適用した．また，現在と過去の走行映像では走行位置が異なるため，直接差分を求めることは困難である．そこで，検出対象領域を道路面に限定し，道路面が平面であるという仮定の下で，射影変換により画素単位での対応付けを行なった．これらの対応付けを行なった後，RGB ベクトル間の角度を差分指標とした道路面時空間差分画像を生成した．これを時間方向に切り出し，エッジに基づく物体検出を行なうことで，誤検出の抑制を図った．その際，対象までの距離に応じた処理を行なうことで，さらなる検出精度の向上を図った．

実際の車載カメラ映像を対象とした実験により，提案手法を用いて，ボールなどの不特定の障害物が良好に検出できることを確認した．更に，時速 60 km の車両が停止可能な距離での検出が可能であることを確認した．

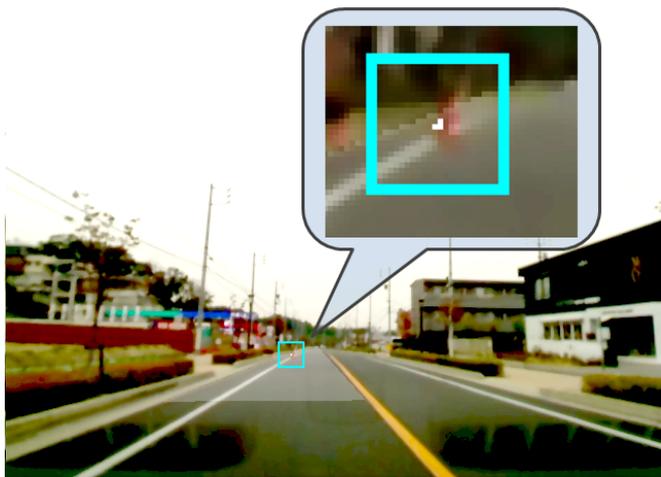
今後の課題として，天候の異なる走行映像間での検出精度評価や，道路面位置合わせの精度向上などが挙げられる．



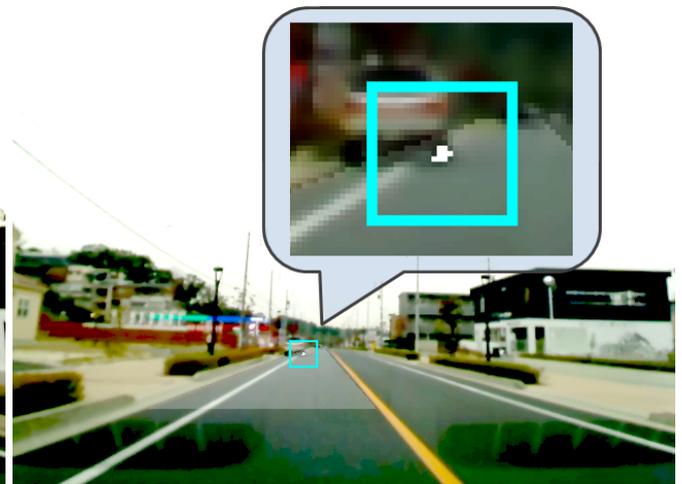
(a) 歩行者 (約 60 m)



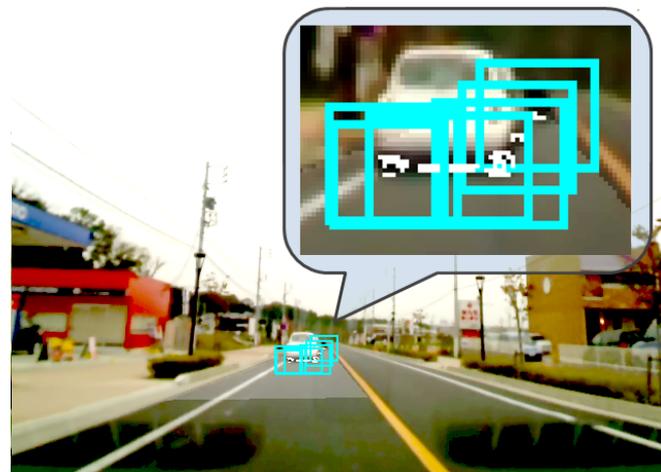
(b) ボール (約 44 m)



(c) パイロン (約 48 m)



(d) 路上駐車車両 (約 55 m)



(e) 前方走行車両 (約 39 m)

図 9 遠方の障害物検出結果の例

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、栢森情報科学振興財団助成金 (K23-XVI-373) 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。

文 献

- [1] Haruya Kyutoku, Daisuke Deguchi, Tomokazu Takahashi, Yoshito Mekada, Ichiro Ide, Hiroshi Murase,

- “On-road Obstacle Detection by Comparing Present and Past In-vehicle Camera Images,” Proc. IAPR Conference on Machine Vision Applications 2011, pp.357–360, Jun. 2011
- [2] 久徳 遙矢, 出口 大輔, 高橋 友和, 目加田 慶人, 井手 一郎, 村瀬 洋, “現在と過去の車載カメラ映像のフレーム間対応付け,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), pp.831–838, Jul. 2011
- [3] 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
- [4] 佐藤 准嗣, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “GPS 座標付き全方位映像群からの市街地映像マップの構築と街並変化の検出,” 信学論, vol.J90-D, No.4, pp.1085–1095, Apr. 2007
- [5] 高橋 英之, 堀 磨伊也, 神原 誠之, 横矢 直和, “全天球画像データベース作成のための動物体除去と色調統一,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), pp.1933–1940, Jul. 2010
- [6] 内山 寛之, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “複数画像系列の部分画像選択に基づく移動物体を含まない車載カメラ映像の生成,” 信学論, vol.J94-D, No.12, pp.2093–2104, Dec. 2011
- [7] 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, pp.31–39, Jun. 2001
- [8] 本田技研工業 (株), 技術一覧,
<http://www.honda.co.jp/tech/auto/>
- [9] トヨタ自動車 (株), テクノロジー,
<http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/index.html>
- [10] 日産自動車 (株), 技術開発の取り組み,
<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/>
- [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), II-13, Mar. 2008
- [13] John Canny, “A Computational Approach to Edge Detection,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, No.6, pp.679–698, Nov. 1986