

歩行者検出器の信頼度推定に関する初期検討

久徳 遙矢¹⁾ 川西 康友¹⁾ 出口 大輔¹⁾ 井手 一郎¹⁾ 加藤 一樹²⁾ 村瀬 洋¹⁾

A Preliminary Study on Reliability Estimation of Pedestrian Detectors

Haruya Kyutoku¹⁾ Yasutomo Kawanishi¹⁾ Daisuke Deguchi¹⁾ Ichiro Ide¹⁾ Kazuki Kato²⁾ Hiroshi Murase¹⁾

Results of pedestrian detectors using in-vehicle sensors can not be trusted perfectly in real environments. Therefore, we propose an estimation system of pedestrian detector's reliability (e.g., probability of oversight and misdetection) for environments. This paper presents preliminary study for reliability calculation of detectors in an environment, and construction method of estimator for the reliability. The proposed method defines a reliability of true detection as recall and a maximum threshold without oversight. Additionally, it defines a reliability of false detection as precision and a minimum threshold without misdetection. Moreover, the proposed method constructs an estimator for the reliability using brightness-based features.

KEY WORDS: Electronics and control, Image recognition system, Vehicle sensor, Pedestrian detection, Reliability (E1)

1. はじめに

近年、自動車の運転者支援技術や自動運転技術の開発が盛んであり、大いに注目されている。このような情勢の中、車両周辺環境の認識技術は、それらの技術に対する要素技術として非常に重要である。特に、歩行者検出技術は人身事故の発生に直結するため、非常に高い精度を求められるものである。歩行者検出技術は、古くから監視カメラや車載カメラを対象として非常に盛んに研究されてきており、高精度な手法が多く確立されている(1, 2)。しかし実環境において、依然として検出精度に改善の余地がある。

ここで、運転者支援技術や自動運転技術において、単に歩行者の有無に関する情報だけでなく、その情報がどの程度信頼できるのかが重要となる。検出器の信頼度が低下すると考えられるシーンの例を図1に示す。それぞれ、図1(a)は白飛びにより、図1(b)は黒潰れにより歩行者の判別が困難な例である。これらのような入力を与えられた場合、検出器は「歩行者は存在しない」という情報を出力する可能性が高い。これを信頼度を加味せずに「存在しない」と出力した場合、自動運転車は歩行者が「実際に存在しない」と判断し、現状の走行速度を維持してしまう。しかし実際には歩行者が存在しており、「判別が困難なために検出できなかったが、存在する可能性がある」という状況であり、慎重な走行を要するシーンである。そのため、信頼度を加味し、信頼度の低い「存在しない」を出力することで、「実際には存在する可能性がある」と判断して減速する、といった制御が可能となる。また、自動運転などにおける走行経路算出においても、「存在する」という情報の信頼度に応じて歩行者とのマージンを効率よく算出できると考え

(a) Blown out highlights.

(b) Clipped shadows.

Fig.1 Examples of difficult scenes for detection.

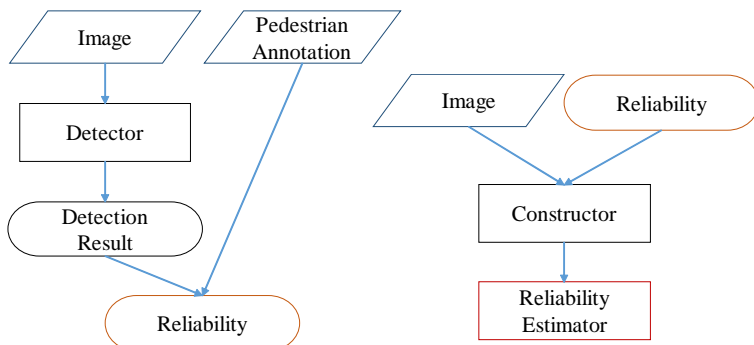
られる(3, 4)。以上のように、歩行者検出器の出力結果に関する信頼度は、非常に重要な情報である。

そこで我々は、車両周辺環境の違いに対する歩行者検出器の信頼度推定手法について検討した。本発表では、その定義方法、およびその推定手法について検討した結果を報告する。

2. 信頼度付き歩行者検出

本節では、我々の想定する信頼度付き歩行者検出の概要について述べる。信頼度付き歩行者検出は、学習段階と推定段階から成る。それぞれの処理の流れを図2、図3に示す。

1) 名古屋大学 (464-8603 名古屋市千種区不老町)
2) 株式会社デンソー (448-8661 刈谷市昭和町1-1)



(a) Reliability calculation. (b) Construction of estimator.

Fig.2 Learning step.

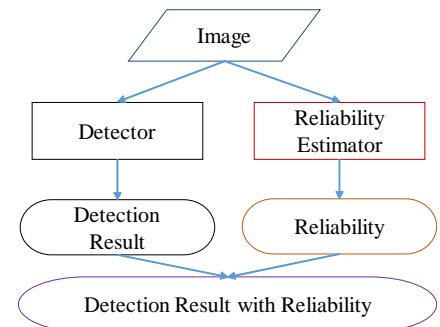


Fig.3 Estimation step.

学習段階は、信頼度算出段階（図 2(a)）、信頼度推定器構築段階（図 2(b)）から成る。まず信頼度算出段階では、入力画像から歩行者検出器を用いて検出結果を得る。この検出結果と、歩行者位置のアノテーション情報を用い、信頼度を算出する。次に信頼度推定器構築段階では、入力画像と算出した信頼度を用い、入力画像から信頼度を出力する推定器を構築する。

続いて推定段階では、未知の入力画像から歩行者検出結果を得る。また、学習段階で構築した信頼度推定器を用いて信頼度を得る。これらを組み合わせ、信頼度付き歩行者検出結果として出力する。

3. 信頼度の定義と推定器の構築

本節では、信頼度算出段階（図 2(a)）について 3.1 節で、信頼度推定器構築段階（図 2(b)）について 3.2 節で述べる。

3.1 信頼度の定義

本節では、検出器の車両周辺環境の違いに対する信頼度の定義について述べる。

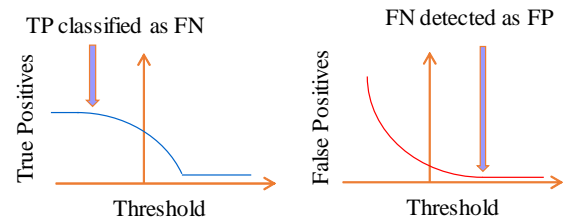
歩行者検出器による検出結果における誤りとしては、歩行者の見落としと非歩行者の検出がある。そのため、信頼度として正検出に関するもの、および誤検出に関するものの 2 つが考えられる。正検出に関する信頼度は、検出していない結果への信頼度、すなわち未検出が存在し得る程度を示すものである。一方、誤検出に関する信頼度は、検出した結果への信頼度、すなわち検出結果が真に検出対象である程度を示すものである。

以降、信頼度として用いることができる指標について、および算出時に考慮する点について述べる。

3.1.1 正検出に関する信頼度

正検出に関する信頼度としては、まず検出率が上げられる。対象シーンの検出率が低いほど、未検出、すなわち見落としが多いシーンであり、検出率が高いほど信頼性が高いシーンであると言える。そのため、検出率は入力した画像に対する正検出に関する信頼度として用いることができる。

次に、未検出が発生するしきい値が上げられる。検出のためのしきい値を変化させた際の正検出数の変化の例を図 4(a) に示す。図のように、一般的に検出器は、しきい値が低い（緩



(a) For true positives. (b) For false positives.

Fig.4 Reliability indexes.

い) ほど正検出が多くなり、高い（厳しい）ほど正検出が少なくなる。しきい値が低いほど誤検出も多くなるため、未検出が発生するしきい値は高いほど良いと言える。そのため、しきい値を低い値から徐々に変えた際に、未検出が発生したしきい値を、入力した画像に対する正検出に関する信頼度として用いることができる。

3.1.2 誤検出に関する信頼度

誤検出に関する信頼度としては、3.1.1 節で述べた正検出に関する信頼度と同様に、適合率が上げられる。適合率が低いシーンは、すなわち誤検出が多いシーンであり、高いほど信頼性が高いと言える。そのため適合率は、入力した画像に対する誤検出に関する信頼度として用いることができる。

次に、誤検出が発生するしきい値が上げられる。検出のためのしきい値を変化させた際の誤検出数の変化の例を図 4(b) に示す。3.1.1 節で述べたように、検出器はしきい値が高い（厳しい）ほど誤検出が少なくなり、低い（緩い）ほど誤検出が多くなる。しきい値が高いほど未検出も多くなるため、誤検出が発生するしきい値は低いほど良いと言える。そのため、しきい値を高い値から徐々に変えた際に、誤検出が発生したしきい値の大小関係を反転させた値を、入力した画像に対する誤検出に関する信頼度として用いることができる。

3.2 信頼度推定器の構築

歩行者の未検出や誤検出は、車両周辺の構造や光源、不適切なカメラパラメータなど、様々な要因により発生する。例えば図 1 のように白飛びや黒潰れが発生した場合、検出率が



Fig.5 Experimental vehicle.

きく低下すると予想される．本稿では初期検討として，この白飛びや黒潰れに注目し，画像の輝度の平均，中央値，分散，最小値，最大値，Michelson コントラスト，飽和画素の割合の7種を，画像の撮像環境を表現する特徴として用いる．これらの特徴とし，RBF(Radial Basis Function) カーネルを用いた²-SVR(Epsilon Support Vector Regression) によって推定器を構築する．

4. 評価実験

本節では，まず3.1節の信頼度の定義の妥当性を評価した実験について4.1節で述べる．次に，3.2節で述べた信頼度推定器構築手法を評価した実験について4.2節で述べる．

4.1 信頼度算出実験

検出率，適合率を信頼度として用いる場合，1枚の入力画像に含まれる歩行者の数は限られているため，算出のためには似たシーンの画像を複数枚まとめる必要がある．その際，図2(b)の信頼度推定器の性質に合わせて複数枚をまとめる必要があるため，信頼度算出段階(図2(a))および信頼度推定器構築段階(図2(b))を総合して考慮する必要がある．

一方，未検出や誤検出が発生するしきい値は，信頼度推定器とは独立に算出可能である．また，入力に対し1つでも検出対象が含まれていれば未検出が発生するしきい値を算出可能である．さらに，誤検出が発生するしきい値は検出対象が含まれている必要がない．

そこで本実験では，未検出や誤検出が発生するしきい値を信頼度として用いた際の妥当性を評価した．

4.1.1 実験条件

評価用データセットとして，車載カメラを図5の位置に設置した車両を用い，日中の市街地を走行し，逆光や濃い影を含む4本の系列を取得した．使用したカメラはPoint Grey Research社のGrasshopper3 GS3-U3-28S4C-Cであり，使用したレンズはスペース社のVP-JHF8M-3MPである．取得したフレームの解像度は1,920×1,440画素であり，ゲイン等の撮影パラメータは標準ドライバによる自動調整とした．取得した系列中の41～100画素以上の歩行者を検出対象とし，人手でアノテーションを与えた．各系列のフレーム数および

Table 1 Dataset.

	# of frames	# of pedestrians
Seq. 1	325	257
Seq. 2	42	32
Seq. 3	385	168
Seq. 4	640	356
All	1,392	813

含まれる検出対象の歩行者数を表1に示す．

信頼度算出に用いる評価用の人物検出器には，予めINRIA Person Dataset (5)を用いて学習したLocally Decorrelated Channel Features (LDCF) 検出器(6)を用いた．

異なる撮影条件を模擬するため，取得した各系列のコントラストに変化を加えた系列を，変化量80～+100までそれぞれ用意した．さらに，輝度の上限あるいは下限のある割合まで線形に引き伸ばして飽和させた系列を，変化量180%～+180%までそれぞれ用意した．これにより，同一シーンにおける白飛びや黒潰れを擬似的に表現した．それぞれの例を図6に示す．これらの系列に対し，歩行者検出器を用いて検出精度や，未検出・誤検出の発生するしきい値の変化を評価した．

4.1.2 実験結果と考察

検出精度の変化 全系列に対する，コントラスト変化量および輝度変化量毎のPrecision-Recall曲線を図7に示す．なお，精度が著しく低い変化量の曲線は描画対象から除いた．図から，コントラストの違いや輝度の違い，すなわち撮影条件の違いによって検出精度が異なることがわかる．このことから，撮影条件の違いが未検出や誤検出の発生に影響を与えていると言える．また図から，概ね適合率の変化幅は変わらず，主に検出率に影響を与えていることがわかる．これは，本実験で模擬した撮影条件の違いが白飛びや黒潰れであるため，歩行者の見落としに大きく影響を与えたためであると考えられる．

信頼度の変化 各系列に対し，未検出が発生するしきい値，および誤検出が発生するしきい値をフレーム毎に算出した．系列3における変化種別毎の未検出が発生するしきい値を図8に，同様に誤検出が発生するしきい値を図9に示す．3.1節で述べた通り，未検出が発生するしきい値は高いほど良く，誤検出が発生するしきい値は低いほど良い．なお，これらは5フレーム毎の移動平均を求めた値である．また，図8の空白の区間は検出対象を含まない，すなわち未検出が発生し得ないフレームである．

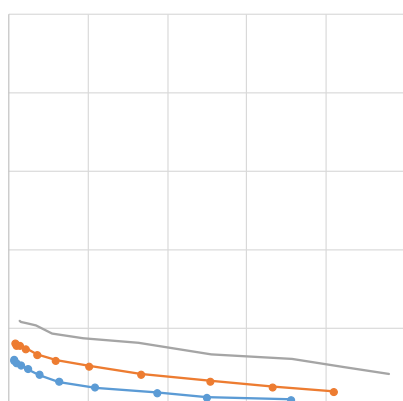
これらの図から，フレーム番号の変化，すなわち車両の移動等に伴う周囲環境の変化に応じて，未検出や誤検出が発生するしきい値が変化していくことがわかる．例えば図9から，系列3ではコントラスト変化および輝度変化において共に，100から150フレーム目までの区間の誤検出の発生するしきい値が低い．このことから，その区間に相当する撮影環境は他の区間に比べて誤検出に関する信頼度が高いと言える．

−60 −20 ±0 +20 +60
(a) Example of contrast.

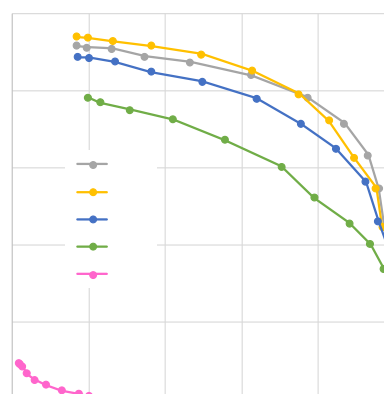


−180 −60 ±0 +60 +180
(b) Example of brightness.

Fig.6 Examples of experimental data.



(a) Accuracy of contrast.



(b) Accuracy of brightness.

Fig.7 Accuracy of each change on all sequences.

またこれらの図から、同一のフレームであっても、コントラストや輝度の違いにより未検出や誤検出が発生するしきい値が異なることがわかる。さらに、元フレーム（0）のしきい値の方が良い区間と、コントラストや輝度に変化を加えたフレームのしきい値の方が良い区間が時々刻々と変化していることがわかる。例えば図 8(a) の 250 フレーム目付近の未検出が発生するしきい値は、元フレームの方が高い状況からコントラスト +20 の方が高い状況へ変化している。この付近の元フレームの例を図 10 に示す。図のように、逆光により撮影条件が急激に変化した区間であり、検出器が歩行者を検出しやすい撮影条件が変化したためであると考えられる。また図 8(b) から、輝度を明るく変化させた系列の方が元フレームより厳しいしきい値で歩行者を検出できたことがわかる。これは、図 10 のように黒潰れに近い状況が発生している区間であるため、その付近の輝度を明るく変化させた方が検出しやすくなったためであると考えられる。

以上のように、未検出や誤検出が発生するしきい値は、車両の移動等に伴う周囲環境の変化や照明変化による撮影条件の変化によって異なる値を示した。このことから、これらは各入力画像に対する検出器の信頼度として妥当であると考えられる。信頼度の応用 図 7(a) から、本実験で使用した 4 系列は、概ねコントラストに変化を加えない元フレームが高精度であったことがわかる。すなわち、カメラドライバの自動制御によって良好な結果が得られたと言える。しかし系列 3 については、図 8(a) からわかるように、コントラスト +20 の時に見落としが少なく。さらに図 7(b) や図 8(b) から、輝度変化に関しては全体として明るく補正をかけた方が精度が高いことがわかる。ここで、本実験でコントラスト変化および輝度変化により模擬した撮影条件の違いは、カメラの撮影パラメータによりある程度の制御が可能である。このことから、これらの信頼度を推定し、カメラ制御へフィードバックすることで、信頼度の高い入力画像を意図的に得ることが可能であると考えられる。

Fig.10 Example frames from Seq3.

4.2 信頼度推定実験

本節では、4.1 節で妥当性を確認した信頼度を用い、信頼度推定器を構築して評価した実験について述べる。

4.2.1 実験条件

実験に用いる車載カメラ映像データセットや歩行者検出器は、4.1.1 節で述べたものと同様である。この車載カメラ映像データセットのうち、コントラスト変化について 60%; 40%; 20%; 0%; +20%; +40%; +60%, 輝度変化について 180%; 120%; 60%; 0%; +60%; +120%; +180% を加えた系列群を用い、系列 1 を評価用、系列 2~4 を学習用として用いた。

ここで 4.1.2 節で述べたように、画像全体の輝度変化は概ね未検出に影響を与えていると考えられる。そこで本実験では、未検出の発生しきい値を信頼度として用い、推定した際の評価を行なった。なお、未検出の発生しきい値は、0 から 100 までの値をとる。

4.2.2 実験結果と考察

実験の結果、平均誤差 13.7, 標準偏差 10.5 で信頼度を推定できた。すなわち、取り得る信頼度の範囲の 1 割強の誤差で推定できたことを確認した。

しかし、これは依然十分な精度ではないと考えられる。その原因の 1 つとして、本実験で用いた検出器は LDCF 特徴を用いているため、輝度に関する特徴のみでは推定のための情報として不十分であったと考えられる。

5. むすび

本発表では、歩行者検出器の車両周辺環境に対する信頼度の定義方法、およびその推定器の構築手法について提案した。正検出に関する信頼度、すなわち未検出の有無に関する信頼度について、検出率および未検出が発生するしきい値を用いることができると考えられる。また、誤検出に関する信頼度、すなわち誤検出の有無に関する信頼度について、適合率および誤検出が発生するしきい値を用いることができると考えられる。この内、未検出や誤検出が発生するしきい値に関して、実験により評価した。その結果、それらの信頼度としての妥当性を確認した。さらに、画像の輝度特徴を用いた信頼度推定器構築手

法を提案した。未検出が発生するしきい値を信頼度として信頼度推定器を構築し、評価実験を行なった。実験の結果、平均誤差 13.7 で信頼度を推定できた。今後の課題として、誤検出に関する信頼度を用いた際の推定器構築に関する評価、および信頼度推定器の改良が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーションプログラム (名古屋 COI: 人がつながる “移動” イノベーション拠点)」の支援および、科学研究費補助金の援助によって行われた。

参考文献

- (1) 川西康友ほか: 車載センシング技術の開発と ADAS、自動運転システムへの応用, chapter 6, 技術情報協会 (2017).
- (2) 福井 宏, 山下隆義, 山内悠嗣, 藤吉弘亘: [サーベイ論文] Deep Learning を用いた歩行者検出の研究動向, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2016-121 (2015).
- (3) 赤木康宏, Raksincharoensak, P.: 先読み運転支援を可能にするための逆衝突確率モデルを用いた経路計画手法に関する研究, 自動車技術会 2016 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, p. 114{119 (2016).
- (4) 吉原佑器, Morales, L. Y., 赤井直紀, 竹内栄二郎, 二宮芳樹: 先読み運転支援を可能にするための危険評価, 自動車技術会 2016 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, p. 632{633 (2016).
- (5) Dalal, N. and Triggs, B.: Histograms of Oriented Gradients for Human Detection, Proc. 2005 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, p. 886{893 (2005).
- (6) Nam, W., Dollar, P. and Han, J. H.: Local Decorrelation for Improved Pedestrian Detection, Proc. Neural Information Processing Systems 2014, p. 424{432 (2014).

(a) Result of contrast.

(b) Result of brightness.

Fig.8 False negative classification threshold on Seq3.

(a) Result of contrast.

(b) Result of brightness.

Fig.9 False positive detection threshold on Seq3.