

平成 26 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「FIR-V ハイブリッドカメラを使った歩行者検知装置の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 27 年 3 月

委託者 東北経済産業局
委託先 地方独立行政法人岩手県工業技術センター

FIR-V ハイブリッドカメラを使った歩行者検知装置の研究開発

目次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	
1-3	成果概要	
1-4	当該研究開発の連絡窓口	
第2章	本論-1 「歩行者検知アルゴリズムの研究開発」	9
2-1	自車両運動パラメータの組込み開発	
2-2	歩行者検知率 95% の内部検証	
2-3	歩行者画像 DB の品質向上	
第3章	本論-2 「歩行者のリアルタイム検知の研究開発」	15
3-1	歩行者検知コードの C 言語再構築	
3-2	専用評価ボードへの実装	
第4章	本論-3 「FIR-V カメラのハイブリッド化の技術開発と試験評価」	21
4-1	カメラ位置合わせの誤差精度決定	
4-2	キャリブレーション方法の改善	
第5章	実証試験	25
5-1	外部評価	
最終章	全体総括	26

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

歩行者保護や交通事故防止の観点から、自動車の衝突被害軽減（プリクラッシュセーフティ）の有効性が世界的に認められ、車両周辺監視が衝突被害軽減に有効な重要技術であり、その中でも歩行者検知の難易度は高く各国の技術開発が進んでいる。

車両周辺監視のセンサはミリ波レーダとカメラが代表的であり、30～150mの遠方検知にはミリ波レーダを用い、30m以内の近距離検知にはカメラを用いる方法が有効とされている。より高度な衝突被害軽減のためには、歩行者の認識とその速度、進行方向を実時間に検知し、衝突を事前に予測する必要がある。しかし、ミリ波レーダでは歩行者自体の認識やその移動方向、複数の物体を分離する等の検出が困難であるため、現在ではカメラ画像を用いて、歩行者の特徴形状と移動方向を、画像処理で求める方法で研究開発が行われている。

国内メーカーでは車庫入れなどの駐車支援や、追突や急発進に対する衝突を防止するものが既に製品化されている。しかし、歩行者検知に関しては、歩行者の形が一様でないことや背景と混同するなど、未検知と誤検知の削減を両立することが難しく、膨大な計算量と相まって未だに実用的な国産製品化までは至っていない。一方、イスラエルのモービルアイ社は、単一カメラのみで複数の歩行者を検知する製品を既に実用化し、BMWやボルボに次々と採用されるなど世界をリードしている。（図1-1）しかし、日本車への導入検討において、モービルアイ社の製品はブラックボックスとなっており、国内メーカーは内部が開示されないため安全性を確認できないことを理由に、数年前に採用を見送っていた経緯がある。



図1-1 モービルアイ社の歩行者検知装置

欧州では AUTOSAR による安全基準の国際標準化を進めており、モービルアイ社の装置のスペックが国際標準として採用される可能性が高い。その場合、同等の装置を開発できなければ世界市場での競争力低下は免れない。具体例を示すと、歩行者検知はプレー

キなどの制動部分と密接に関わるため、車載コンピュータ（ECU）と一体化した製品をリリースされた場合に、対応できない国内メーカーは優位性の大半を失うことになりかねない状況にある。

1-1-2 研究目的及び目標

1-1-2-1 研究目的

本事業では、遠赤外線カメラと可視光カメラのハイブリッドカメラ（FIR-V）を使って、歩行者を実時間で検知可能な実用装置を開発し、衝突被害軽減などの高度な安全装置を開発する国内メーカーに技術（製品）を提供することを目的とする（図1-2）。

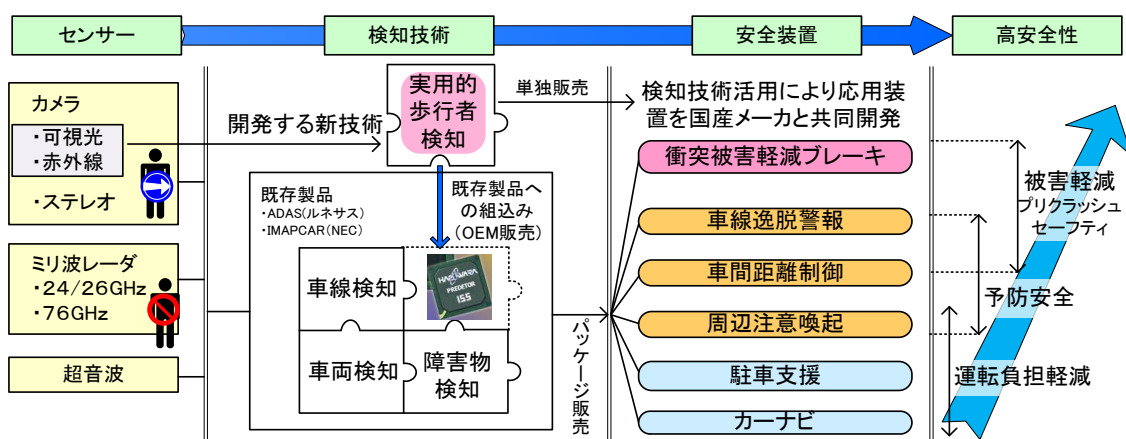


図1-2 車両用安全装置開発の全体図

1-1-2-2 目標

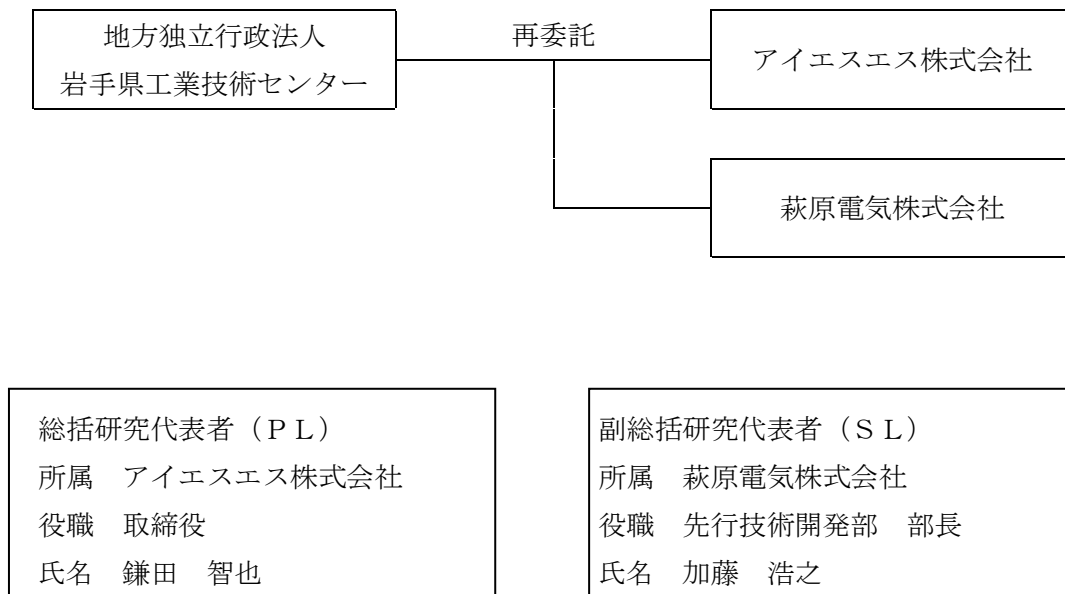
本事業では、日本国産の世界トップレベルの歩行者検知装置（技術）を実現するために、車速50km/h以下で車両から30m以内にいる歩行者を検出率95%以上で検出することを目標とする。

基本仕様は以下のとおりである。

- ・車両から30m以内の歩行者をリアルタイム（約33ms以内）に認識
- ・歩行者の動く方向を認識し衝突を予測し警告する
- ・技術情報を国内メーカーに公開

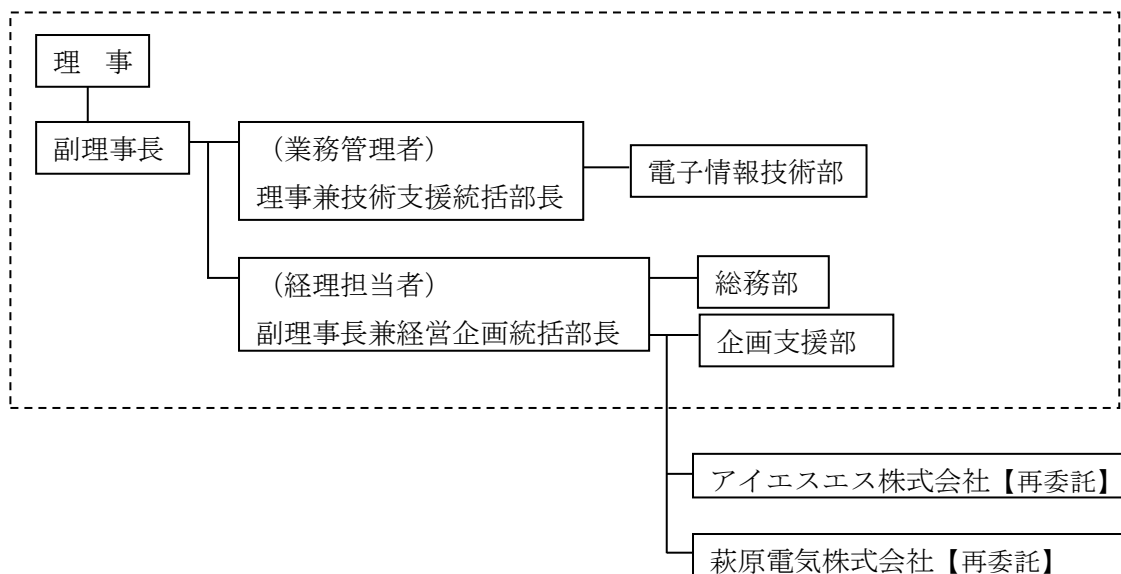
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1-2-1 研究組織（全体）



1-2-2 管理体制

事業管理者 [地方独立行政法人 岩手県工業技術センター]



1-2-3 研究者氏名

【事業管理機関】 地方独立行政法人 岩手県工業技術センター
 研究員

氏名	所属・役職
長谷川 辰雄	電子情報技術部 上席専門研究員
菊池 貴	電子情報技術部 専門研究員
宇都宮 弘純	電子情報技術部 研究スタッフ

【再委託先（研究員）】

アイエスエス株式会社

氏名	所属・役職
鎌田 智也	取締役
中野 誠士	開発部 エンジニア
中野 裕介	開発部 エンジニア
中居 沙耶香	開発部 アシスタント
澤里 薫	開発部 アシスタント
松浦 淳子	開発部 アシスタント
滝本 恵里	開発部 アシスタント

萩原電気株式会社

氏名	役職・所属
加藤 浩之	技術センター 先行技術開発部 部長
野口 剛	技術センター 先行技術開発部 第一G マネージャー
宮川 典久	技術センター 先行技術開発部 第三G マネージャー
足立 博基	技術センター 先行技術開発部 第三G 主任
廣瀬 尚	技術センター 先行技術開発部 第三G
山本 三四郎	技術センター 先行技術開発部 第三G
藤井 憲人	技術センター 先行技術開発部 第一G

1-2-4 協力者

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
鎌田 智也	アイエスエス株式会社 取締役	PL
加藤 浩之	萩原電気株式会社 先行技術開発部 部長	SL
青木 孝文	国立大学法人東北大学 大学院情報科学研究科 教授	アドバイザー
伊藤 憲三	公立大学法人岩手県立大学 名誉教授	アドバイザー
佐々木 英幸	地方独立行政法人岩手県工業技術センター 理事兼技術支援統括部長	
高橋 強	地方独立行政法人岩手県工業技術センター 電子情報技術部 部長	
長谷川 辰雄	地方独立行政法人岩手県工業技術センター 電子情報技術部 上席専門研究員	

アドバイザー 氏 名	主な指導・協力事項
青木 孝文	(国立大学法人東北大学 大学院情報科学研究科 教授) MAP 法とオプティカルフローによる動体検知の方法についての助言 遠赤外光カメラと可視光カメラの位置合わせ技術について助言
伊藤 憲三	(公立大学法人岩手県立大学 名誉教授) システム全体の構成が適正かどうかについての助言 画像処理の適用方法について助言
プリマ オキ ディッキ アル ディアンシャー (Prima Oky Dicky Ardiansyah)	(公立大学法人岩手県立大学 ソフトウェア情報学部 准教授) 試作の歩行者検知装置に関して、技術面や実用面からの外部評価及び、歩行者検知に関する知覚情報処理技術についての助言

1-3 成果概要

1-3-1 歩行者検知アルゴリズムの研究開発

車速 50km/h 以下で 30m 以内にいる歩行者を検出率 95%以上で検出するため、最大事後確率法(MAP)とオプティカルフローを基盤とした動体検出及び、パターン認識手法を基盤とした学習による識別アルゴリズムを構築した。また、遠赤外線(FIR)カメラと可視光(VR)カメラの FIR-V カメラで学習用及び評価用の画像を内部録画し、それぞれから画像特徴量を抽出した歩行者認識用 DB を構築した。歩行者画像を入力に HoughForest 処理を行った後、その Hough 投票のスコアが閾値以上の場合に歩行者と認識する手法を構築し評価を行った。

平成 24 年～25 年度までの成果は、動体検出アルゴリズムの実現及び、歩行者の学習用データにより、歩行者検知率は内部評価で 80～90%であった。しかし、目標の 95%以上の達成にはさらに誤検知及び未検知の低減が課題として残っていた。そこで平成 26 年度は、①学習パラメータの最適化、②学習サンプルの厳選、③フィードバック学習の各技術を発展させ、効果的に活用したことで誤検知・未検知の低減に成功し、論理 OR 方式のハイブリッド手法により目標の検知率 95.2% (評価指標: FPPI=1) を達成することができた。FPPI(False Positive Per Image)=1 とは、1 フレームに 1 個の誤検知を許容した場合の歩行者検知率を意味する。一方、自車両運動パラメータ推定の基板実装については、動作検証は完了したが処理速度不足が課題として残った。今後も継続して課題に取り組む予定である。

(1) 検知率の成果

FIR-V カメラを使用したハイブリッド手法により、歩行者検知率 95.2%を達成した。また、可視光カメラ単体では 94.8%、遠赤外線カメラ単体では 96%の検知結果となった。評価方法は、内部で撮影した評価映像の 17 種類 (3,946 フレーム) に対し、正解画像と検出画像を照合する自作検証ツールを使用して評価した。夜間 (遠赤外線カメラのみ、20 種類: 4,043 フレーム) を含む、昼夜間 (24H) の評価では、全 37 種類 (7,989 フレーム) に対し、95.9% (FPPI=1) の成果が得られた。

(2) 歩行者画像 DB の成果

試験研究用の車両走行シーンを内部で録画し、その映像データを用いて歩行者画像データを厳選した結果、ハイブリッド手法により歩行者検知率 95.2%を実現することができた。

1-3-2 歩行者のリアルタイム検知の研究開発

歩行者検知アルゴリズムを自動車制御コンピュータ (ECU) で動作させる組込コード開発について、ECU 動作周波数 100～200MHz でパイプライン的に 33ms 以内に処理可能な C 言語および HDL のコード開発に取り組んだ。これは ARM プロセッサ (CPU) と FPGA が同一の LSI で構成できる Xilinx 製 Zynq (以下 Zynq) を利用したことが特長となっている。ユーザ企業が本研究成果を評価できるように、専用の評価ボードを試作した。一方、夏季の気温が高い中部地方の特徴を捉えるため、遠赤外線カメラと可視光カメラで学習用及び評価用の路上映像の録画を内部で実施した。

平成 24～25 年度までの成果は、Zynq 上での開発環境構築、専用評価ボードの製作、歩行者検知コードのハードウェア化を実施した。しかし、リアルタイム（33ms）で動作させるには、メモリ構造やタイミングの設計など難易度の高い課題が残った。そこで平成 26 年度は、高速処理化のためにベアメタル（OS レス）化や領域マスクの工夫を行い、専用評価ボード（Zynq）に歩行者検知コードを実装し評価した。しかし、検知率を向上させるためにコード量が増加したことが原因で最終的に 0.177 秒（5.6fps）の処理速度にとどまった。今後、高速化アルゴリズム検討と高速 CPU の利用など、継続して目標の 30fps を目指す計画である。一方、ユーザ評価及び顧客ニーズの情報収集では、ESEC2014、人と車のテクノロジー展 2014、人と車のテクノロジー展 2014 in 名古屋、ET2014 など昨年以上に展示会出展を行い、ユーザニーズ調査の取り組みを強化した。

（１）基板コード実装の成果

歩行者検知を実施する候補領域について、当初目標の通り高位合成ツール（CyberWorkBench）を利用したことで、短期間で拡張ボード（東京エレクトロニクス製 TB-7K-ACDC-FND）への実装ができた。具体的には、オプティカルフローと動体検知を実装し動作確認ができた。動作確認は独自に設計・製作したカメラ I/F ボードを経由して、PC から動画を入力しモニター画面を目視確認することによって検証した。

（２）高速処理化の成果

専用評価ボードへの映像入力と前処理及び、歩行者検知アルゴリズムの実装評価では、ARM 環境での実処理速度の計測において、一枚の画像を処理するのに 30.4 秒を要することが分かった。そこで、高速処理化のために、Linux をベアメタル（OS レス）化し、領域マスク処理を実装することで、一枚の画像を処理するのに約 0.177 秒（5.6fps）まで短縮できた。しかし、目標のリアルタイム化（30fps）には至らなかったため、今後、アルゴリズムの見直しや高性能 CPU 利用の検討を行い、継続して処理時間の短縮化を図る予定である。

1-3-3 FIR-V カメラのハイブリッド化の技術開発と試験評価

可視光カメラと遠赤外線カメラのそれぞれの特性を考慮し、可視光カメラは車内のバックミラー付近、遠赤外線カメラは車外に設置した。ハイブリッドは両カメラ画像の位置合わせが必要であるが、両カメラの間隔は約 1m と距離が離れ、また画角も多少異なるレンズを用いていることから、位置合わせの誤差が大きくなる課題があった。これに対し、両カメラ画像の較正（キャリブレーション）の工夫と、ルックアップテーブル（LUT）を使った位置合わせにより、ハイブリッド化の精度を向上させることができた。

平成 24～25 年度までの成果は、遠赤外線カメラと可視光カメラのハイブリッド化のためのキャリブレーションと、両カメラの位置合わせを実施し基礎的な手法の検証ができた。しかし、キャリブレーションと位置合わせの精度向上が課題として残ったため、これらの課題について、平成 26 年度は、歩行者の足元座標を利用したルックアップテーブル（LUT）を考案することで位置合わせ精度を向上させることができた。また、キャリブレーション精度は、各カメラの全画面をカバーするような座標点を用意することで精度を向上させる

ことができた。これらの成果について、ESEC2014、人と車のテクノロジー展 2014、人と車のテクノロジー展 2014 in 名古屋、ET2014 の展示会に出展し、試作品のユーザ評価及び技術的な課題の抽出等の調査を実施した。

(1) 位置合わせ精度の成果

位置合わせ精度向上のため、当初はステレオ平行化による位置合わせを実施したが、両カメラの画角の違いと視差の大きさが影響し、誤差の縮小は困難であった。そこで、歩行者の遠赤外線画像と可視光画像の対応する座標をルックアップテーブル (LUT) として構築する新たな手法を開発し、位置合わせ誤差を±10 画素以内に収めることができた。また、従来の加算式ハイブリッド法に対し、論理 OR 方式にすることでハイブリッド検知率 95.2% の達成に貢献することができた。

(2) キャリブレーション精度の成果

キャリブレーション誤差を改善するため、平面パターンボードの多点数キャリブレーション画像 (可視光画像 558 枚、遠赤外線画像 446 枚) を使用して、画像中心の座標誤差を 17 画素以内に収めることができた。また、歪補正は遠赤外線カメラにおいて $0.3 \times 10^{-3}\%$ の向上を図ることができた。前記カメラ位置合わせとキャリブレーションの性能向上によって、可視光画像と遠赤外線画像のハイブリッド検知率 95.2% に貢献することができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(管理法人)

地方独立行政法人 岩手県工業技術センター 企画支援部 荒濱 清一

〒020-0857 岩手県盛岡市北飯岡2丁目4番25号

電話 019-635-1115

FAX 019-635-0311

E-mail: s-arahama@pref.iwate.jp

(統括研究代表者)

アイエスエス株式会社 取締役 鎌田智也

〒020-0611 岩手県滝沢市菓子95-2 スゴテックビル

電話 019-643-2600

FAX 019-643-2601

E-mail: kamatomo@japan-iss.co.jp

第2章 本論－1 「歩行者検知アルゴリズムの研究開発」

近年では、計算機性能の向上に伴い、シーン映像からの人物検知を行う手法としては、機械学習によるものがウェイトを占めてきている。本研究においても最終的な人物領域の検出は学習器を用いたものとなるが、一般に学習器による検出計算は膨大な特徴量計算を要するために、実時間性の面で課題がある。本アルゴリズムの狙いは、初めに撮影シーンを解析することによって、歩行者が存在する可能性のある領域を特定し、次に、限定された領域にのみ人物検出処理を行うことで処理全体の計算量を大きく軽減することにある。故に、シーン理解のための前段処理アルゴリズムは、結果精度よりもむしろ、計算量の少ない単純な処理であることが望ましい。そこで、画像領域全体の密なステレオ計算を行うのではなく、疎な特徴点群のオプティカルフローに基づき 3 次元シーン推定を行う手法の開発を行った。

2－1 自車両運動パラメータの組み込み開発

運動する車両に設置した単眼カメラにて、車両前方の路上シーンを撮影する場合、停車中の歩行者検出は、監視カメラ分野の背景差分法を応用することにより比較的容易に検出可能である。一方、移動車両の場合、背景を含む車両シーン全体が動くため、背景差分法を使うことができない。このため、歩行者を検出する処理では、画面全体にわたって歩行者画像を探索する必要があり、組み込みシステムにおいて計算負荷が大きな課題となる。

本研究は、計算資源が制限される組み込みシステム上で、歩行者検知処理のリアルタイム処理を実現するため、車両の運動とカメラ上で成立する幾何学条件を用いて、歩行者を含む立体物の領域を予め抽出し、その領域にのみ歩行者検出処理を適応する。これによって、HoughForest 法による歩行者検出処理を適応しなければならない領域面積を抑制し、歩行者検出に要する計算コストを削減できるアルゴリズム開発を行った。図 2－1 は、自車両運動推定アルゴリズムと HoughForest アルゴリズムの処理の流れを示すものである。

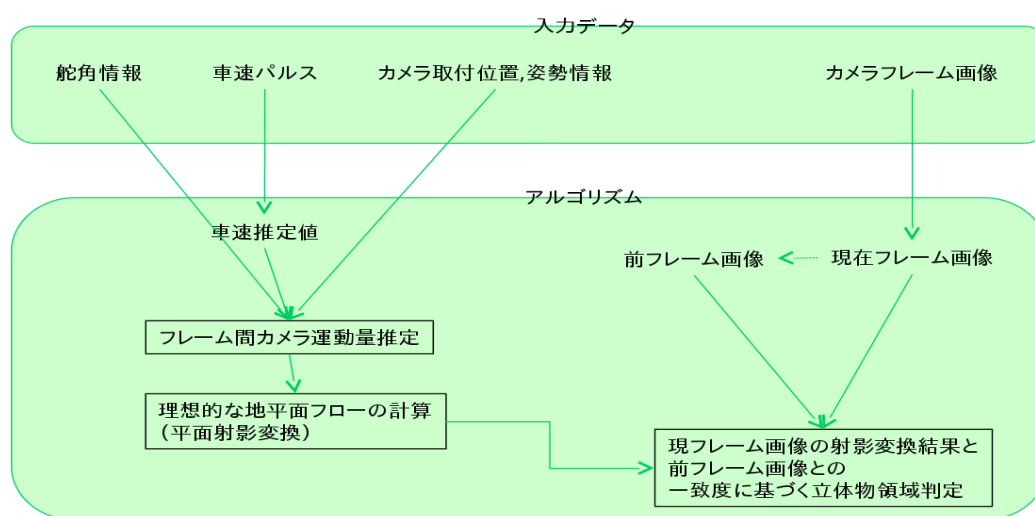


図 2－1 自車両運動推定アルゴリズムと HoughForest 法の関連図

(1) 実装結果

自車両の推定にあたっては、Intel Core i7 プロセッサを搭載する PC 上で動作するソフトウェアを試作した。本ソフトウェアは Visual Studio 2012 の Windows 64bit 環境で開発してきたが、平成 26 年度は、Zynq SoC に内蔵の ARM cortex A9 上に移植する作業を実施した。開発環境は DS-5 ARM 純正コンパイラを使用し、シンプルなソフトウェア移植とソフトウェア構成の最適化によって計画通り動作検証ができた。しかし、組込みシステム向けには処理が重くて採用が難しいということが、実装の過程において明らかとなった。図 2-2 は開発に用いた Zynq 搭載基板である。本ボードに、我々が開発した CameraCapture ボードを接続したシステムを用いて検証を行った。



図 2-2 実験に使用した Zynq 搭載基板

(2) 高速化

自車両運動推定の実装の結果、処理レートが不足であったため、Zynq SoC の Programmable Logic 部を活用した、画像処理アルゴリズムのハード化を検討した。我々は当初、Xilinx 社の提供する Vivado HLS ツールによる高位合成ツールを活用し、独自のアクセラレータ IP の開発を検討した。ハード化を進めた機能は、次の 3 つである。

- ①パターンマッチング計算 (SSDA)
- ②逆行列計算
- ③RANSAC による平面射影行列の計算

開発した RTL は、シミュレーションによって、ソフトウェア処理と同等のアウトプットレベルとなった一方で、必要な Programmable Logic の容量が拡大してしまう課題が生じた。この課題に対して、今後も継続して、組込みシステム上でのリアルタイム処理の実現を目標に、最適実装作業を継続する予定である。

2-2 歩行者検知率 95%の内部検証

2-2-1 ハイブリッド検知の方法

遠赤外線(FIR)カメラと可視光(VR)カメラのハイブリッド方法は、それぞれの Hough Forest 法の投票値を組合せて歩行者を認識する。これまでは各投票値を加算した後、閾値より高い投票値を歩行者と定義していたが、この方法では片方のカメラが未検出の場合にハイブリッド法でも未検出となり検知率が低下する課題があった。そこで、平成 26 年度は図 2-3 ハイブリッド方法概念図に示す通り、片方のカメラが検出していれば正検知となる論理 OR 方式を検討し評価した。

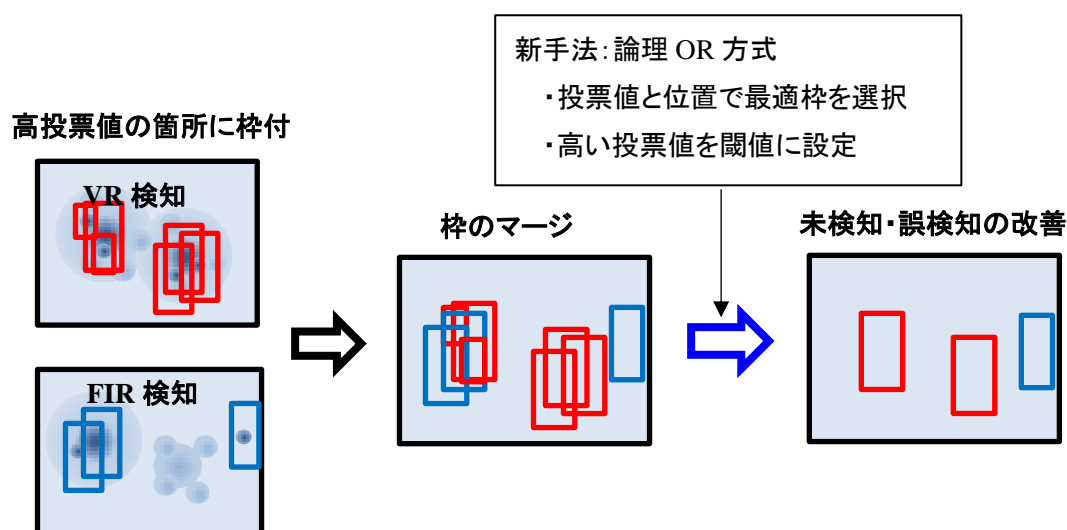


図 2-3 ハイブリッド方法概念図

2-2-2 ハイブリッド検知結果

評価映像は、内部で録画した 17 種類 (3,946 フレーム) を対象に、正解画像と検知結果画像を照合する評価用ソフトウェアを独自開発し評価した。評価用ソフトウェアは、評価シーン動画の各フレームに対してあらかじめ人手で設定された真の歩行者画像位置に関する情報と、そのシーンに対する学習器による検知処理結果とを、両者の中心位置とサイズ比率の二つの指標が共に閾値を下回っているか否かを計算することで照合を行い、検知結果を {正検知、誤検知} のいずれかに、真の歩行者像を {検知、未検知} のいずれかに判定を行うことによって、評価シーン動画に対する歩行者検知率を自動算出する。この評価用ソフトウェアを使用した実験結果を、図 2-4 ①及び②のハイブリッド検知結果に示す。ハイブリッド手法による歩行者検知率は FPPI=1 で 95.2%の実績となり目標検知率 95%以上を達成した。夜間（遠赤外線カメラのみ、20 種類:4,043 フレーム）を含む、昼夜間（24 時間）の評価では、全 37 種類 (7,989 フレーム) に対し、95.9% (FPPI=1) の成果が得られた。

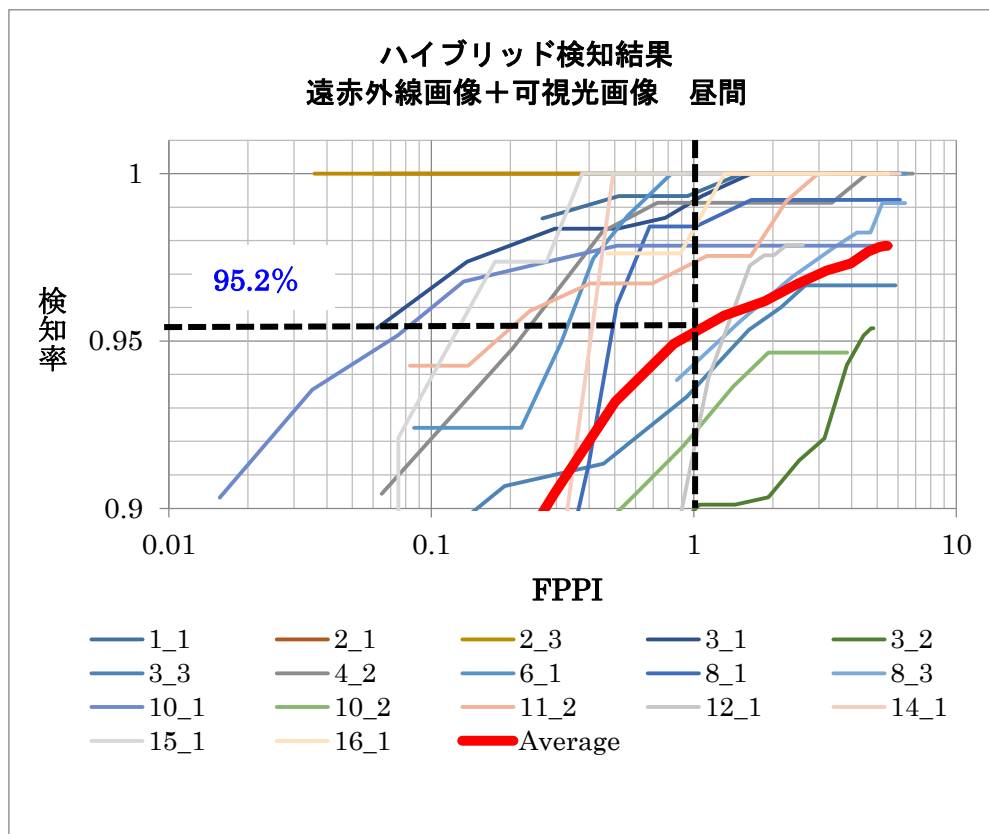


図 2-4 ① ハイブリッド検知結果グラフ



(a) 昼間

(b) 夜間

(左上 : FIR 検知画像、右上 : VR 検知画像、中央 : ハイブリッド検知画像)

図 2-4 ② ハイブリッド検知結果画像

2-3 歩行者画像 DB の品質向上

共同研究の 3 機関が協力し、試験研究用の実験車両により、内部での車両走行シーンの録画撮影を実施した。これまでの研究に引き続き歩行者検知率向上のため、検知器を作成する際に用いる良質の学習サンプルの選定基準を検討し評価した。

2-3-1 遠赤外線画像の歩行者サンプル厳選

過去 2 年間の検知結果では、可視光カメラの検知性能が遠赤外線カメラよりも優れていた。そこで、遠赤外線カメラの検知率向上のため、遠赤外線画像の良質な歩行者サンプルの厳選を実施した。遠赤外線画像の歩行者サンプルの厳選は、学習成果を比較するために、現行の検知器 (F2) を作成する際に使用した学習サンプル群 (FL2) から行った。厳選方針として不適格サンプル対象を以下の 3 項目に定義し、目視により不適格な画像を削除した。

不適格サンプル対象

- (A) 歩行者の背後に直線状オブジェクトがある画像
- (B) 歩行者の中心がずれている画像
- (C) 歩行者が重複している画像

学習サンプルとして不適格と判断した画像例を図 2-5 に示す。なお遠赤外線画像は視認性がおもわしくないので、画像例はコントラストを明瞭化するイコライズ処理を施して厳選を行った。



図 2-5 背後に直線状オブジェクトがある画像例

厳選した作業者は 3 名であり、それぞれの厳選結果の論理和 (3 名全員が不適格だと判断したサンプルを除外) を採用する事で、個人的な主観による偏りが生じる事を防いだ。この厳選作業により学習サンプル群 (FL2') を構築し、検知器 (F2') を作成した。この結果、期待した程の検知率向上は果たせなかった。理由として検知器 (F2) を作成した時点の学習サンプル群 (FL2) が既に洗練されていたと考えられる。

2-3-2 検知器による誤検知サンプルの収集

これまでに歩行者検知率の向上を目的として歩行者画像 (ポジティブサンプル) に着目してきたが、今回は背景画像 (ネガティブサンプル) に着目した。これまでの目視による選別に対して、検知器自体が実際に誤検知したサンプルを収集する事とした。この収集及び

評価には、図 2-6 に示す自作の歩行者検出アプリケーションを使用した。遠赤外線画像では学習サンプル群 (FL3)、可視光画像では学習サンプル群 (VL3) として新たに構築し、フィードバック学習及びハイブリッド化の入力データとして、歩行者検知率 95.2% の達成に貢献できた。

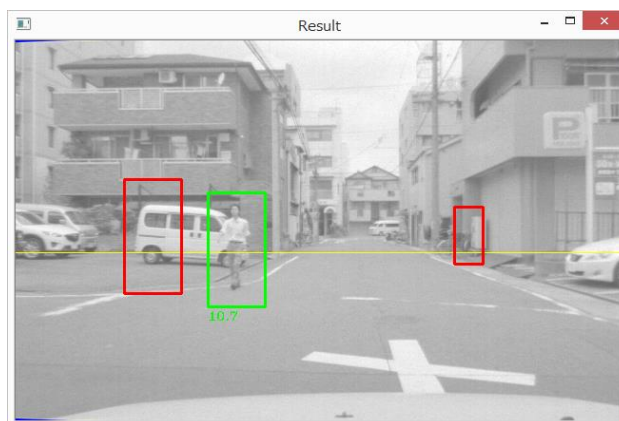


図 2-6 歩行者検出アプリケーション

第 2 章 結論

開発した自車両運動パラメータ推定アルゴリズムを、車載コンピュータ製品 (ECU) を模した専用評価ボードに実装し検証する目標に対し、ARM 開発環境 (DS-5) を用いてシンプルなソフトウェア移植と、ソフトウェア構成の最適化によって動作検証することができた。しかし、処理レートは約 2fps 程度 (目標 30fps) にとどまったため、今後も継続して実装を進め、事業化を目指す予定である。

歩行者検知率 95% 以上の内部検証に関しては、様々な手法の検討・評価を繰り返し、有効な方法を組み合わせる事で当初の目標である検知率 95% 以上 (実績: 95.2%) を達成する事ができた。また、昼夜間 (24 時間) の評価では、全 37 種類 (7,989 フレーム) に対し、95.9% (FPPI=1) の成果が得られた。しかし、近年における歩行者検知システムに対する市場のニーズは期待と共に更に高まる傾向にあり、悪天候や障害物による遮蔽時でも正確に歩行者を検知する事が必要とされている。歩行者検知器のロバスト性を向上させる為、更なる工夫と研究開発が今後とも必要である。また、自動車、二輪車、道路交通標識等の認識も重要であるため歩行者検知器に限らず、自動車や二輪車用の検知器を作成する上で、本研究成果の有効活用が期待できると考えられる。

第3章 本論－2「歩行者のリアルタイム検知の研究開発」

歩行者のリアルタイム検知に関するアルゴリズム全体構成を図3-1に示す。

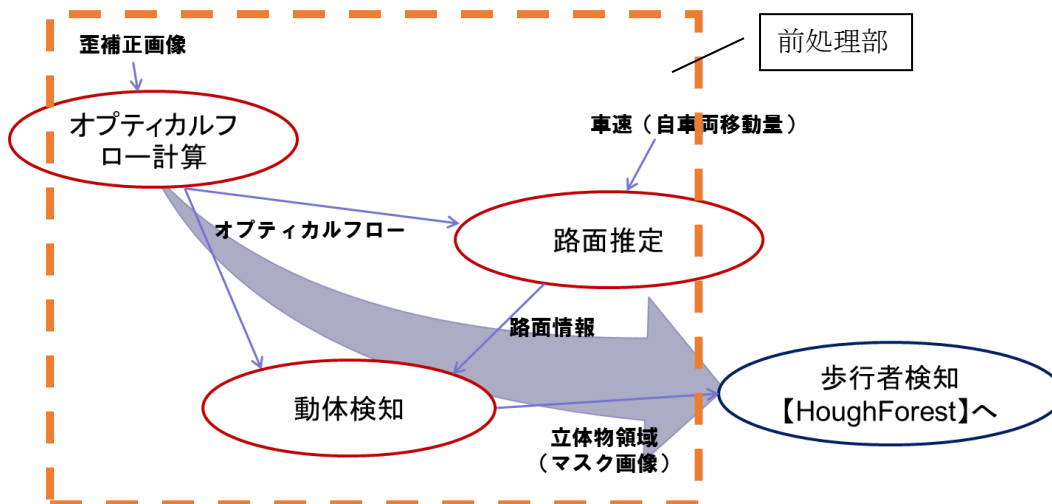


図3-1 歩行者のリアルタイム検知アルゴリズム全体構成

一般的に歩行者検知は、次元の大きな特徴量を使用することが多く、処理として非常に負荷が大きい。本研究で用いる Hough Forest 法も同様の構造で処理負荷が大きい。歩行者検知アルゴリズムの前段に、歩行者検知領域を抽出する処理を新たに設計したことで、負荷の大きい歩行者検知処理量を減らし、全体として的高速化を実現する構成となっている。この前段処理は、ソフトウェア的に実施すると、処理自体の負荷が大きくなることから、専用ハードウェアを FPGA で実現することで負荷を低減し、歩行者検知の処理速度に影響を与えないように構成した。

この専用ハードウェアの設計は従来の HDL ベース設計ではなく C 言語ベースの高位合成ツール(NEC 製 CyberWorkBench)を利用した。高位合成ツールの利点としては、アルゴリズム開発自体が C++言語で実施されていることから、そのまま流用が可能な点と、本来画像処理の HDL 設計は難易度が高いことから一から HDL 設計するよりも大幅な工数削減が可能というところにある。

3-1 歩行者検知コードの C 言語再構築

歩行者検知アルゴリズムの C++言語コードについて、CyberWorkBench ツールに入力可能な C 言語コード (BDL) にするための、ソースコードの再構築を行った。ソースコードの再構築の目的は、高位合成ツール(CyberWorkBench：以降 CWB と記載)の適用に必要なためである。具体的に実施した内容は以下となっている。

・ C++特有の記述を C 言語に置き換え、OpenCV を展開

CWB は ANSI C ベースの独自言語 BDL, System C で記述することが必須であるため、C++

を使用して PC ベースでアルゴリズム開発を実施した後に、C 言語 (BDL^{*1}) に置き換えをする必要がある。また、アルゴリズム開発の場面では OpenCV をフル活用しているが、そのままでは CWB に使用できないため、OpenCV のソースコードを展開したうえで C 言語 (BDL) に置き換えを行った。

*1) BDL : NEC が CyberWorkBench ツール向けに独自拡張した C 言語

■オプティカルフローの BDL 置き換え

・全体のハードウェア構成を検討

オプティカルフローアルゴリズムを元に全体のハードウェア構成を検討した。オプティカルフローは大きく分けると 3 つに分割される。すなわち、入出力 I/F+メモリ I/F、特徴点算出部、特徴点追跡部の 3 ブロックとなる。3 ブロックのうち OpenCV や C++ ベースの記述を BDL に置き換えが必要なのは、特徴点算出部・特徴点追跡部の 2 ブロックとなる。

・ブロック毎の検討(以下は特徴点算出ブロックのフロー)

全体構成からブロック毎のハードウェア構成を検討し、OpenCV 記述と C++ 記述を BDL に置き換えた。特徴点算出部はこのブロック自体が OpenCV の cvGoodFeaturesToTrack を使用しており、中身のアルゴリズムを全て展開したうえで BDL に置き換えた。C++ 記述の BDL 置き換えとしては、クラスを構造体に置き換えるなどを実施した。特徴点追跡部も OpenCV 関数 (cvCalcOpticalFlowPyrLK) を使用しており、同様の手法で BDL へ置き換えを行った。

■動体検知の BDL 置き換え

動体検知は本研究のオリジナルアルゴリズムとなっているため、OpenCV を使用している部分は少ない。そのため、多少の動作確認に OpenCV を使用しているが、大部分は一から C 言語で開発した。その際、ハードウェアに実装しやすい記述に工夫したことで、BDL への置き換えに要する時間を短縮した。

■CWB での合成結果確認

CWB による HDL 生成結果に関して、正常に出力されていることを確認した。CWB を使用して HDL を生成する際に、使用する FPGA のリソースをレポートするが、実際の FPGA 開発ツールで実施した場合、CWB のレポートとリソース量が大きく異なることがある。そのため、リソース量について確認した結果、正しく生成されたことを検証した。

3-2 専用評価ボードへの実装

本研究において、新規に開発した専用評価ボードの構成図を図3-2に示す。

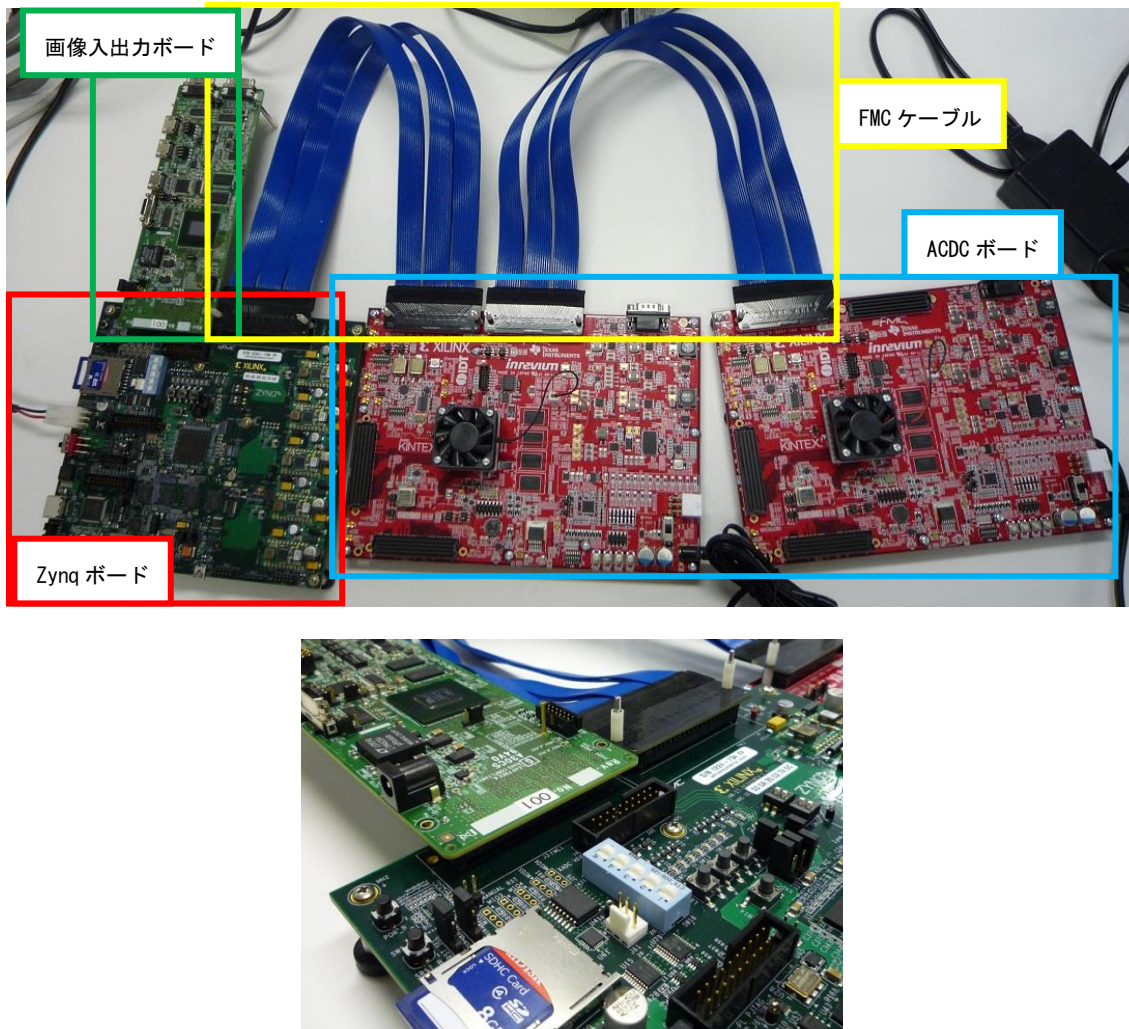


図3-2 専用評価ボード機器接続構成と画像入出力ボード拡大図

図3-2の通り、組込みボードは複数に分かれている。これはアルゴリズムが複雑でコード量が多い事と、実装対象が、ソフトウェアが最適なのかハードウェアが最適なのかで分ける必要があったためである。各ボードの概要と実装内容を以下に示す。

・ 画像入出力ボード

概要：本研究で製作したカメラ入力 I/F ボード、Artix7 FPGA 搭載。

実装内容：レンズの歪補正、カメラ入出力 I/F など

・ Zynq ボード

概要：Xilinx 製 Zynq 搭載ボード。

実装内容：ボード間 I/F(ロジック部)、Hough Forest (ARM 部) など

・ ACDC ボード

概要：東京エレクトロンデバイス製 FPGA ボード、Kintex7 搭載

実装内容：オプティカルフロー、動体検知などの歩行者検知前処理など

全体ブロックイメージの図 3-3 の通り、各ボードは機能単位に分けられており、アルゴリズムの前処理部はハードウェアに実装し、歩行者検知自体はソフトウェアに実装した。

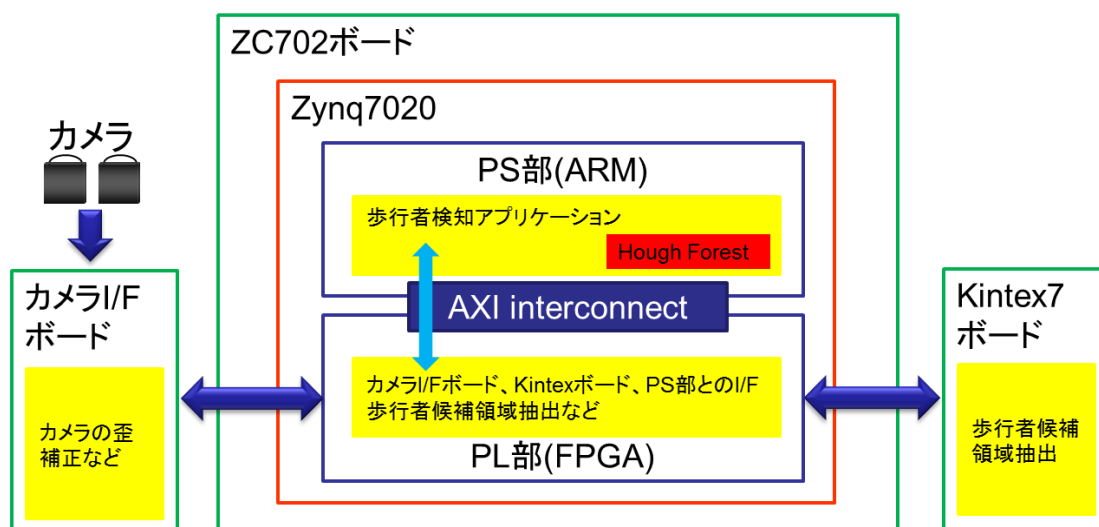


図 3-3 歩行者検知 全体ブロックイメージ

3-2-1 ソフトウェア実装

歩行者検知アルゴリズム (Hough Forest) を Zynq 内の ARM へ実装した。図 3-3 に示すように Zynq ボードの動作環境を構築した上で実装した。Zynq の動作環境を表 3-1 にまとめる。

表 3-1 Zynq ボード動作環境

基板／開発用ソフトウェア	バージョン
ZC702 Evaluation Kit	—
Xilinx SDK	2014.2
OpenCV	2.3.1

実装手順は以下の通りである。

①Linux 上で動作させる

- ・ユーザーインターフェースの変更
→ダイアログベースで作成されていたプログラムを main() から始まる形式に変更
- ・VC++固有の表現を g++で動作できるように修正

②ベアメタル(OS レス)で動作させる

- ・OpenCV を使用しており、さらに内部的には Mat 構造を使用しているため OpenCV の基本モジュール (Core)を含む必要なソースを取り込んだ。
- ・LMO ファイル、Forest ファイル、画像ファイル等を読み込む必要があるため Xilinx が提供しているファイルシステム (LibXil FFS)を組み込んだ。
OS レスにする目的は高速化であり、Linux を使用することで発生するオーバーヘッドを無くし高速化を図った。

■高速化検討

上記 OS レスによる高速化を実施したが、大きな成果が得られなかった。そのため、高速化の対策を行うために、歩行者検知器のパラメータを変化させながら、実際の処理時間を計測した。この結果を図 3-4 に示す。

検出処理スケール倍率	学習木データファイル数	処理時間(秒) (※2)	プラットフォーム
1.0~3.0 7段階	18	30.4	Zynq(Linux)
2.0~2.0 1段階	18	3.8	Zynq(Linux)
2.0~2.0 1段階	6	1.4	Zynq(Linux)
1.0~3.0 7段階	18	26.7	Zynq(ベアメタル)
2.0~2.0 1段階	18	3.3	Zynq(ベアメタル)
2.0~2.0 1段階	6	1.3	Zynq(ベアメタル)
1.0~3.0 7段階	18	0.7	Windows (※1)

図 3-4 歩行者検知の処理速度計測結果 1

ベアメタル(OS レス)化により約 10~15%程の高速化ができたが、目標のリアルタイム化 (33ms) には不十分であった。また、同時に検出スケールと学習木の本数で調整を試みたが、学習木の数を減らした場合、検知率が低下することが分かったため検出スケールを固定化する等のいくつかの対策を実施し、さらなる高速処理化に取り組んだ。

・高速化施策

検知率の結果に影響を与えないように工夫し、且つ、劇的に高速化できるかという観点で検討した結果、以下の方針とした。

- 1pixel 毎に実施している処理を間引く
- 不要な左右の領域を省く

図3-5に示す通り、投票処理の操作間隔を広げる(間引く)ことにより高速化ができていくことが分かる。4pixelの間引きであれば検知が問題ないことも分かった。また、左右の領域は50pixel省くことで高速化ができた。

原画左右端の除外領域幅	投票処理の捜査間隔	処理時間(秒)
0	1	3.307
50	1	2.771
0	2	0.950
50	2	0.812
0	3	0.487
50	3	0.423
0	4	0.333
50	4	0.295

図3-5 歩行者検知の処理速度計測結果2

第3章 結論

当初の計画通り、歩行者のリアルタイム検知のために前処理部のハードウェア化とその実装および歩行者検知部のソフトウェア実装と高速化を実施し完了することができた。

ただし、リアルタイム検知という面では、目標値(0.033秒、30fps)を達成することができなかった。図3-6に最終的な専用評価ボードを使用した歩行者検知の処理速度を示す。

条件	プラットフォーム	処理時間(秒)
PC版	Windows	0.7
Zynqのみ実施	Zynq(Linux)	30.4
ソフト高速化1	Zynq(ベアメタル)	3.3
ソフト高速化2	Zynq(ベアメタル)	0.295
ソフト・ハード統合高速化	Zynq(ベアメタル)+FPGA	0.177

図3-6 歩行者検知の処理速度計測結果3

ソフトウェア及びハードウェアの統合化により40%程の処理時間削減ができた。しかしこれは1スケールの処理時間であり、このスケールでもリアルタイム化(30fps:処理時間0.033秒)にはさらに1/5にする必要がある。本研究で実施したHough Forest法は、処理負荷が非常に大きいことが分かったため、今後、アルゴリズムの見直しや高速処理CPU使用の検討を行いながら、リアルタイム化を進め事業化を目指す予定である。

第4章 本論－3 「FIR-V カメラのハイブリッド化の技術開発と試験評価」

4-1 カメラ位置合わせの誤差精度決定

ハイブリッドの歩行者検知は、遠赤外線カメラと可視光カメラの各 HoughForest 投票値を組合せて歩行者を認識する。これまでは平面射影幾何モデルを利用し、両カメラの歩行者足元の 3 次元座標を単眼カメラでそれぞれに計測後、相互に射影変換することで両カメラ画像の位置合わせを行った。しかし、①外部パラメータ誤差、②歩行者足元 3 次元座標の誤差、③画像中心座標と歪補正の誤差の要因が大きく、位置合わせ精度のバラツキが大きい課題があった。これらの課題の解決について、4-1-1 節に述べる。

4-1-1 位置合わせ精度の改善方法

本研究の各カメラは、画角の違いや、取り付け 3 次元座標 (x, y, z) の差が大きく、画面の位置で変換誤差が大きくなる課題があった。この解決には、従来の線形変換ではなく画面の位置によって変化量を変えるような非線形の変換が必要となる。そこで平成 26 年度は両カメラの位置合わせ手法として、歩行者の座標情報 (図 4-1) を用いたルックアップテーブル (LUT) 方式を考案し評価した。

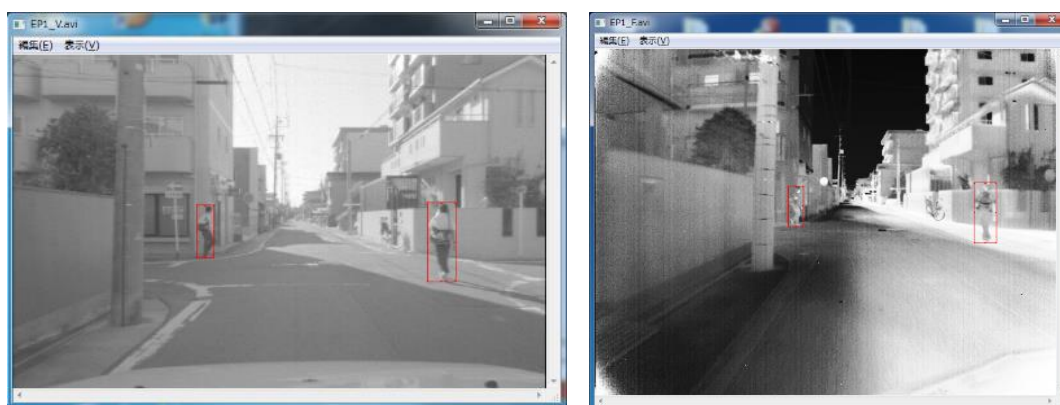


図 4-1 歩行者の座標情報 (左：可視光画像、右：遠赤外線画像)

LUT は 1 画素単位で作成するため、人物の中心位置を求め LUT の該当位置に書き込む。中心位置だけでは LUT のごく一部しか埋められないため、中心周辺や四隅の座標についても埋めていくが、中心位置を優先するように重みをつけていく。しかし、歩行者座標の引用だけでは LUT 全体の一部しか埋められないため残りは補間を行った。この補間は非線形の 2 次元ラプラス方程式を用いて行い、LUT 上に既に埋められた点を境界条件として、x 座標と y 座標それぞれを求める。この方程式を式 1 に示す。

$$\frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} = 0 \quad \dots \dots \text{式 1}$$

ラプラス方程式の解は一様分布となるため、解である x, y が滑らかに変化する値として得られ、結果として非線形の補間が行われる。可視光カメラと遠赤外線カメラの画素数はそれぞれ 25 万画素、30 万画素であるため、歩行者画像から LUT に直接得られるデータは全画素の 1% 程度しかないが、ラプラス方程式を用いた補間により全画素に対応する LUT を取得することができた。これにより、これまでの最大誤差 30 画素以上に対して、誤差を ±10 画素以内に収めることができ、位置精度の向上が達成できた。また、投票値の加算によるハイブリッド検知は、誤検知を減らす但未検知が増えてしまうという課題があった。そこで、可視光画像と遠赤外線画像の双方の投票値が一定の閾値以下のものは事前に排除し、それ以外の検知結果のみを採用する手法（論理 OR 方式）を開発した。その際に人物の可能性が高い場所にとることで、誤検知の増加を抑えつつ、未検知の削減を達成した。

4-1-2 位置合わせ／ハイブリッドの改善結果

ハイブリッド効果は FIR カメラと VR カメラの位置合わせ精度が重要であるが、これまでの平面射影行列による歩行者足元の 3 次元座標変換では、誤差が大きくなる課題があった。これに対し、ステレオ平行化による位置合わせを実施したが、両カメラの画角の違いと視差の大きさが影響し誤差縮小はできなかった。そこで、遠赤外線画像と可視光画像の対応する歩行者の座標を活用した LUT を新たに構築することで、この問題の解決を図った。両カメラ間で座標を変換した際の誤差について図 4-2 に示す。

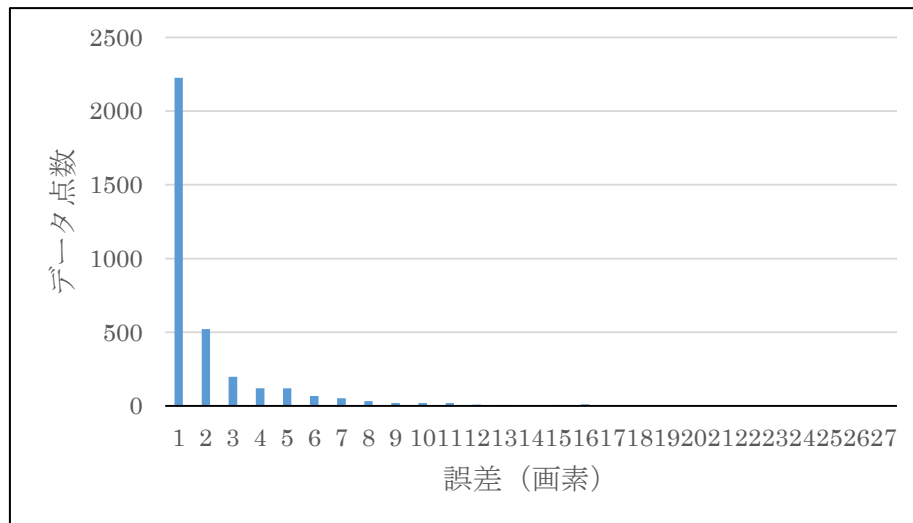


図 4-2 位置合わせ座標変換の誤差

これにより、従来では 50 画素あった位置合わせの最大誤差を 27 画素に縮小することができた。また評価データ全体の 97.8% を ±10 画素以内、92.6% を ±5 画素以内に収めることができた。この位置合わせ誤差の縮小がハイブリッド検知率の向上に寄与したと考える。また、従来の加算式ハイブリッド法に対し、論理 OR 方式にすることでハイブリッド検知率 95.2% の達成に貢献することができた。

4-2 キャリブレーション方法の改善

キャリブレーションは平面射影モデルの Zhang の手法を用いて、平成 25 年度までは遠赤外線画像 45 枚、可視光画像 81 枚のキャリブレーション画像を用いてカメラ内部パラメータ（焦点距離、中心座標、歪補正係数）を求めた。しかし、図 4-3①及び図 4-3②に示す通り、前記の枚数ではカバーしきれない領域が残り、画像中心と歪補正の誤差が大きく、結果的にハイブリッド化の検知率が向上とはならなかった。そこで、画面全体をカバーするようにキャリブレーション座標を取得することで、中心座標とレンズ歪補正の誤差を縮小した。

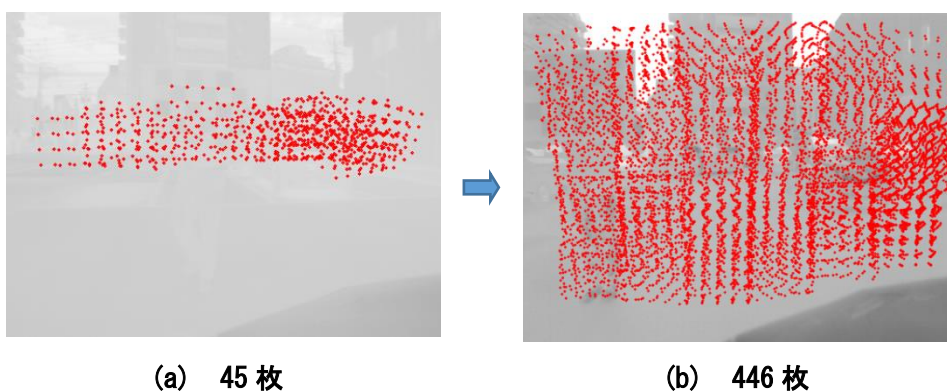


図 4-3① 遠赤外線画像のキャリブレーション座標点数

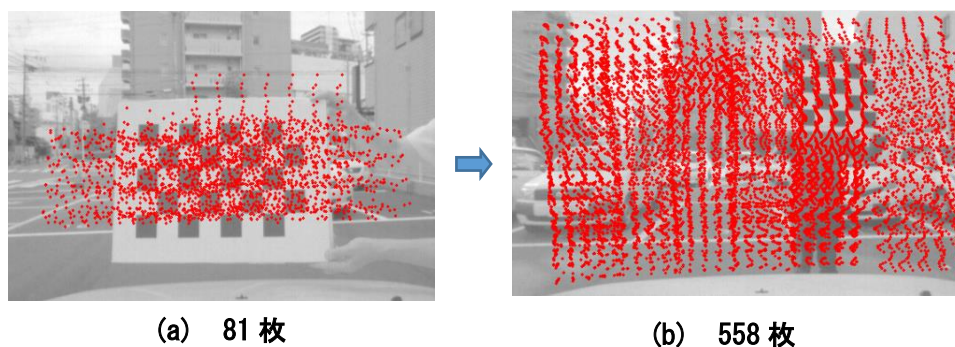


図 4-3② 可視光画像のキャリブレーション座標点数

4-2-1 画像中心（光軸）座標の精度改善

図 4-4 は FIR 画像のキャリブレーションの原画像と歪補正画像で、VGA(640×480)の中心座標を基準点 (320,240) としたとき、キャリブレーションで求めた中心座標 (329,225) との距離を示している。446 枚の計算によって、距離誤差 44pixel から 17pixel へ精度向上することができた。遠赤外線カメラは画角が広くレンズ歪も大きかったことから、歪補正の効果が大きかったと考察する。可視光カメラは 558 枚のデータ枚数のキャリブレーションで、46pixel から 28pixel へ誤差の改善ができた。

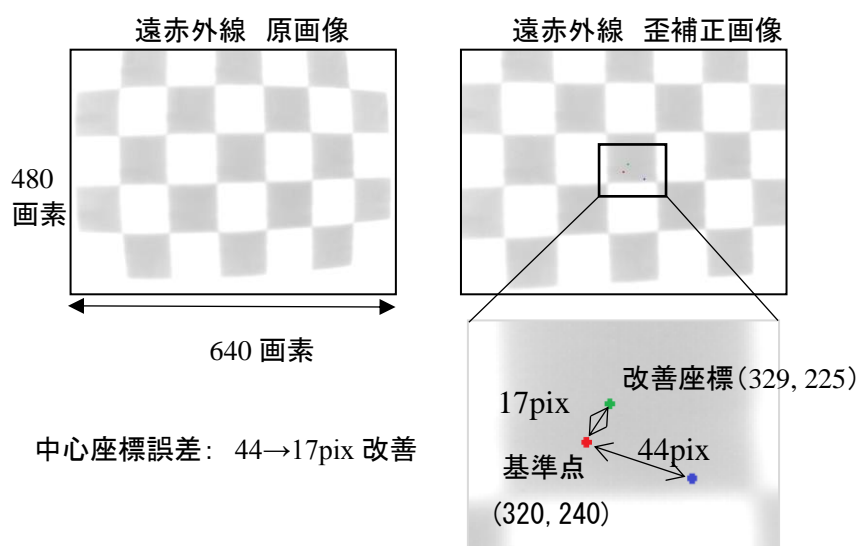


図 4-4 画像中心座標の誤差

第 4 章 結論

FIR 画像と VR 画像の位置合わせは、FIR と VR の対応する歩行者座標を入力データとしたルックアップテーブルを構築することで精度の向上が図れた。また、FIR のキャリブレーションでは、画面全体をカバーするように座標点を取ることで、従来よりも内部パラメータの精度を向上することができた。ハイブリッド方式はこれまでの加算方式では未検知が多かった課題に対し、論理 OR 方式にすることで未検知が減少し検知率が向上した。これらの結果により、HoughForest 法の投票値を組合せて評価する新しいハイブリッド方式（論理 OR）で、歩行者検知率 95.2%を達成することができた。しかし、実用化のためには、さらにハイブリッド方式の位置合わせ精度の向上が課題となっており、今後も継続して取り組んでいく予定である。

【参考文献】

Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000.

徐剛, 辻三郎, "3次元ビジョン", 共立出版, 1999.

David Vazquez, David Geronimo, Antonio Lopez, "Detecting small pedestrians", Computer Vision Center, UAB, Workshop, 2009.

第5章 実証試験

平成26年度の実証試験計画は、試作した歩行者検知装置を実車に設置し、昼夜間の市街地を走行して歩行者検知の実証試験を実施する予定であったが、組込み電子基板「専用評価ボード」への実装が、目標の30fps（実績5.6fps）に達しなかったため、試験評価用の録画映像（可視光画像と遠赤外線画像）を今回の実証用映像として、外部アドバイザーからの評価を受けた。

5-1 外部評価

本研究について、外部アドバイザーの岩手県立大学 プリマ オキ ディッキ アルデアンシャー准教授に、試作した歩行者検知装置の評価試験を依頼し、技術レポート等で技術面や実用面、改良点等の評価を頂いた。評価方法は、成果を取りまとめた資料を事前にプリマ准教授にお渡しし、評価実施日に検知動画をお見せしながら詳細な説明を行い、プリマ准教授の評価コメントを取りまとめて、5-1-1 評価内容として記載した。

5-1-1 評価内容

歩行者検知の評価方法について、歩行者の重なりやの取り扱いや、障害物による遮蔽の許容度など、詳細に定義し体系立てて検証を行っており、成果の内容は妥当であると評価できる。また、歩行者画像 DB は独自ツールを開発して、効果的、効率的に作成されている。しかし、学術分野に目を向けると、車載の歩行者検知の学術的最先端は、学術誌¹⁾に述べられているように、検知率90～95%での競争となりつつあり、技術革新が激しい分野である。図5-2 歩行者検知率の学術的動向に示されるように、パソコンの処理において1時間内の誤検知が10個以下、検知率90%台が最先端であることが分かる。これはあくまで学術的な評価であり、すぐには実用化とはならないが、技術革新のスピードが速く、新技術にも目を向けながら取り組むことが大切と考える。歩行者検知技術は、衣類や身長などの人の外観バラツキを認識することであり複雑な処理である。難易度の高い研究開発であるが、世界的にもユーザニーズが高まっており、実用化に向けたさらなる努力に期待する。

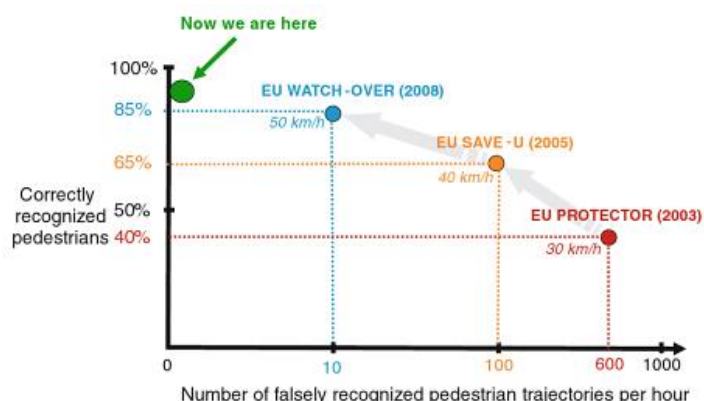


図5-2 歩行者検知率の学術的動向

出典：Vision-based Pedestrian Protection Systems for Intelligent Vehicles

第5章 結論

HoughForest 法による可視光カメラと遠赤外線カメラのハイブリッド式歩行者検知は、限定的な評価シーンであるが、検知率 95.2%の達成は評価できる。各カメラ単体でも検知率 95%レベルであり、どちらのカメラを使用しても学習データが高性能であることが分かる。しかし、処理時間については、学術面と実用面の両方ともに、かなり不足していると思われる。また、実用的なシーンにおいては、どうしても誤検知・未検知が気にかかってしまう。これらの課題解決には、難易度の高さが予想されるが、世界のトレンド技術を参考するなど、改善の方法や手段はまだ十分あると思われるので、継続して研究開発を進めるべきである。車載ハイブリッド方式だけでなく、監視（防犯）カメラのように、カメラ単体でのニーズも十分に考えられるため、それぞれの認識率を向上させることで、事業化の応用展開が広がると思われる。車載カメラでの歩行者検知は、歩行者保護の自動ブレーキや、ドライバーの注意喚起に必須の技術でありニーズも高いため、早期の事業化に期待する。

【参考文献】

1) David Geronimo, Antonio M. Lopez, “Vision-based Pedestrian Protection Systems for Intelligent Vehicles”, SpringerBriefs in Computer Science, The Author(s)2014

最終章 全体総括

FIR カメラと VR カメラによるハイブリッド検知は、波長の異なる画像を組み合わせることで相乗効果を発揮し検知率を向上させる目的で実施した。本研究の結果、アルゴリズム検証において、17種類（3,946 フレーム）の評価用映像で歩行者検知率 95.2%（目標 95%以上、条件 FPPI=1）を達成した。しかし、電子基板（専用評価ボード）での目標 30fps 稼働は、実績値 5.6fps の結果にとどまった。これは、歩行者検知率 95%以上達成のため、プログラム量とデータ量が増加したことが原因であった。今後は、高速化の手法を検討し、継続して 30fps の実現へ取り組み実用化を目指す予定である。これには、第一にアルゴリズム自体の高速化が必須と考える。外部評価での指摘の通り、最新の高速化アルゴリズムを検討しながら高速化に取り組んでいく予定である。

事業化へ向けては、FIR カメラによる夜間の歩行者検知が有力と考えており、検知率も高い水準であることから実用化のアピール点となっている。車載カメラ用以外に夜間監視カメラへの応用化も期待されており、画面全体が変化する車載カメラに比べ、固定設置の監視（防犯）カメラは、背景除去の処理が可能であるため、検知率もさらに向上できると考える。歩行者検知が車載カメラに実用化されている事例が増えつつあるが、対自動車は高い評価だが、対歩行者の評価は対自動車ほどよくない。このことから、車載センサによる歩行者認識の難易度が高く、解決すべきキーテクノロジーであることは明らかであり、本研究をさらに推進させることで、国内外でも競争力の高い製品（技術）へ展開が十分期待できると考える。