

高度運転支援のための3次元運転行動データベースの構築と解析

赤木康宏^{†1} ポンサトーン ラクシンチャラーンサク^{†1}

概要: 自動車の高度運転支援システムに関する開発および評価実験を行う際には、実環境において人間が行う運転行動を記録し、解析する方法が有効である。本稿では、車両の速度、加速度計測に加えて、道路幅や交差点の見通し状況などを計測する3次元レーダー、および、人や対向車等を認識し、その挙動を計測するための画像認識技術を組み合わせた、3次元運転行動計測システムを開発する。また、本システムにより蓄積したデータの解析事例として、無信号交差点を通過する際の運転行動モデル、および歩行者の側方を通過する場面の運転行動解析を行う。

キーワード: 高度運転支援, 3次元距離計測, 画像認識, 運転行動

Construction and analysis of driving behaviors including 3D shape information of traffic participants for ADAS.

YASUHIRO AKAGI^{†1} PONGSATHORN RAKSINCHAROENSAK^{†1}

Abstract: To develop and to evaluate an advanced driver assistance system (ADAS), the driving data from the real traffic environment is useful. We report the development of the driving recorder system which can record not only the behaviors of the driver but also the behaviors of pedestrians and other vehicles. The recorder system measures the positions of traffic participants based on the object recognition method from camera images and the 3D reconstruction method based on the stereo camera. We also show the example of the analysis case of driving data which is the scenario that a driver passing pedestrians in the urban road.

Keywords: ADAS, Image recognition, Stereo vision, Driving behavior

1. はじめに

高度運転支援システムおよび自動運転に関する研究開発は、欧州の AdaptIVe[1], 米国の ITS Strategic Plan[2]や、国内の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP-adus) [3] に代表されるように、大規模なプロジェクトが多数計画、または実施されている。各プロジェクトに共通した特徴として、2016年から2020年頃を目標とした公道実証実験が予定されており、実用化に向けた取り組みも開始されている。このように、2010年以降急速に自動運転の実用化に向けた研究が加速している背景には、自動運転に必要な人間と同等の物標認識技術が情報学の発展によりもたらされた点が大きく貢献している[4]。特に、高速道路のような外部要因が限定できる環境においては、実証実験等により運転知能が実用的な認知判断能力を有していることが確認されている。一方で、図1に示すような市街地では、認知する対象が多く、状況判断における選択肢も無数に存在するので、すべての運転操作を自動化することは困難であり、交差点の右左折や、歩行者の追い越しなどの限定された状況下での要素技術の研究が行われている途中である[5][6]。著者らも、市街地における運転行動のモデル化を行っている[7]。運転支援システムの研究開発において公道実験をしようとした場合、市街地では特に事故リスクが高く、地域社



図1 市街地の複雑な交通環境

Figure 1 Complex traffic situation in the urban area.

会の理解や国・自治体の協力を得る必要がある。また、自動車の制御を行うための装置や、制御用の計算機の特性を理解した支援者が同乗する必要もあり、実験には多くのコストがかかる。これらの運転支援システムの研究を実施する際の困難さから、多くの研究ではシミュレーション試験によりその効果を検証している。そこで、真実味のあるシミュレーション試験を実施するための基礎データとなる、実路での走行環境の計測に関する技術、特に歩行者等の交通参加者の動きや、死角を作る障害物の3次元形状情報を含むデータを収集する技術は、運転支援システムに関する研究を効率的に進める上で必要とされている。

^{†1} 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

本稿では、市街地走行時の特徴である、多様な行動をとる歩行者および自動車等の交通参加者の動き情報、および、運転者に死角をもたらす塀や駐車車両等の障害物の情報を含む、運転行動データベースを作成するためのシステムを提案する。本システムの特徴としては、レーザー式の距離計 (LIDAR) のような直接的に周囲の3次元形状を計測する装置だけではなく、車載システムとして実用化されつつある、ステレオカメラによる3次元形状計測や、カメラ画像を用いた人や車の認識技術を組み合わせたシステムの開発を行う。本研究は、システム開発に重点を置き、ステレオマッチング技術や物標認識技術については、既存の技術のうち車載システムに適したものを選択して利用する。最後に、提案システムの利用例として、歩行者の側方を通過する場面における運転行動の収集事例について述べる。

2. 関連研究

本章では実際の運転行動データを用いた運転支援システムおよび運転知能に関する先行研究、および、画像処理による道路環境の計測に関する先行研究について述べる。

2.1 運転支援システムおよび運転知能に関する研究

自動車の運転を補助したり、運転を自動化したりする目的で、様々な運転知能に関する研究が行われている。すでに実用化の段階にある研究としては、道路の白線を画像から認識することで走行車線を維持するシステムや、先行車との車間距離を一定に保つ追従機能および、急な障害物の出現に対して緊急停止を行う自動ブレーキがある[8]。これらのシステムは、人間が主体となって運転を行うことを基本とし、運転者の負担を軽減したり、居眠りやわき見等による、人間の不注意による事故を防止したりする限定的な機能を実現しており、システムに誤りがあれば運転者が機能の中断をいつでも選択できるという性質から、社会の受容性も高く、実用化が可能となった。一方で、事故の多発する場面である、市街地において見通しの悪い交差点を走行するような場面や、右左折を行うような場面[5]では、より高度な状況判断が必要であり、このような場面に対応した運転支援システムは研究段階にある。特に、見通しの悪い交差点や、駐車車両の側方を走行する場面では、死角にある潜在的な危険を予知し、あらかじめ減速を行うような運転行動が理想的であり、センサでは見えない危険を予測するような機能が必要である[9]。このような場面では、安全な運転に習熟したドライバの運転行動を参考にし、それを模擬する運転行動をシステムで再現する、規範ドライバモデルという考え方がある。例えば、駐車車両の側方を通過する場面では、車両の陰からの歩行者等の飛び出しに備えて、安全な側方間隔および速度を求める研究がある[9]。また、死角の多い無信号交差点を通過する場合の、適切な減速行動を生成する研究がある[7]。これらの研究では、道路幅や法定速度が異なる複数の交差点について運転行動デ

ータを収集する必要がある、運転行動データを効率的に収集するシステムが求められている。

2.2 環境計測および環境理解に関する研究

1章で述べたように、近年急速に運転支援システムが実用化されつつある理由の1つとして、計算機によるカメラ画像を用いた環境計測および環境理解を実現する技術の進歩があげられる。特に、ステレオカメラによる距離計測は古くからおこなわれている研究ではあるが、近年では車載システムを意識した、高速でありながら制度の良い手法が提案されている[10]。また、機械学習に基づくカメラ画像からの歩行者の認識についても活発に研究が行われている[4]。これらの研究では、ベンチマークのためのデータセットとして KITTI データセット[11]および Caltech データセット[12]が共通して用いられており、多くの研究者が解決しようとしている問題設定に合致した、適切なデータセットを用意することが、研究の発展に大きく貢献できることを表している。国内では、SIP-adus[3]において、車や歩行者などの交通参加者の動きを地図と融合してデータベース化する、交通ダイナミックマップを作成する計画がある。特に、日本国内の事故原因の多くを占める、市街地での運転行動に関するデータベースはまだなく、収集と分析が必要とされている。

3. 運転行動計測システム

本章では、運転行動を計測するためのシステムの構成を示し、歩行者や車両等を画像から認識する方法、および、ステレオカメラを用いた距離計測手法について説明する。

3.1 システムの構成と計測データ

まず、本研究で提案する運転行動計測システムの機器構成について説明する。各機器の名称、用途およびデータ取得の頻度を表1に、各種センサの車両への設置例を図2に、センサから取得した情報を記録するための2台のPCとの接続図を図3に示す。カメラ画像からの物標認識とステレオカメラによる距離計測には多くの計算量が必要なので、これらの処理のために Robot OS を搭載した専用 PC を用いる。その他のセンサ情報は、Simlink 等による車両制御システム開発のしやすさから Windows 機で受信をする構成としている。

次に、各種センサの受信する具体的なデータについて説明する。本研究では、車両の自己位置推定を主な目的として、周辺の物体までの距離(点群データ)を計測する LIDAR である Velodyne (表1番号1)を用いる。Velodyne により計測した点群データは、点群の位置合わせ手法を時系列データに適用することで自車の走行軌跡を求める際に有用である[13]。走行軌跡は全地球航法衛星システム (GNSS) (表1番号2)を用いても取得できるが、市街地では建物の影響による測位誤差が生じるので、本研究では3次元点群の位置合わせと GNSS による測位情報を複合的に用いて走行

軌跡を推定する．その他には，緊急停止ブレーキなどに有効な，前方の障害物を検出するための LIDAR (表 1 番号 4)，3 軸の加速度および角加速度を計測するための装置 (表 1 番号 5) を搭載する．また，運転者の操作を記録するために，車両 Controller Area Network (CAN) 上を流れる信号から主要なものを抽出し記録する (表 1 番号 6)．最後に，車両前方に 2 台のカメラを設置しステレオカメラを構成する．2 台のカメラは約 0.3m 離れた位置 (基線長にほぼ等しい) に設置し，同期撮影を行う機能を有する．本カメラのキャリブレーション方法については，3.4 節で説明する．本カメラのうち，運転者の左手側にあるカメラ画像を人や車両の認識に用いる．

3.2 計測した情報の時刻合わせ

運転行動を計測する際には，各種センサから取得した情報を後から対応付けられるように統一的な基準による時刻情報を付加する．本研究では，GNSS 情報計測器 (表 1 番号 2) が衛星から受信した時刻 T を基準とし，最後に時刻 T が更新されてからの経過時間 Δt を受信用 PC の内部時計から求めることで，各センサ情報の計測時刻 ($T + \Delta t$) を決定する．また，画像データや周辺環境の 3 次元点群のような大きなデータを記憶装置に書き込む際には遅延が生じるので，各計測処理はマルチスレッドにより並列動作させることで，あるセンサに要する処理が他のセンサの処理に与える影響を少なくする．

3.3 カメラ画像を用いた交通参加者の認識

歩行者や対向車等の交通参加者をカメラ画像から認識し，保存することは，人間がどのような場面において，どのような判断および操作を行ったか等の運転行動の解析に有用である．本研究では，交通参加者の認識手法として Deformable Part Model (DPM) [14] を用いて，歩行者と車両の認識を行う．DPM を用いる理由としては，認識精度そのものは最新の歩行者認識技術に関する研究には劣るものの [4]，車載システムとして 1 つの基準となる 100msec 以内に処理が完了できるという理由から DPM を用いることとした．認識精度に関しては，実験後の後処理としてより高精度な認識手法を適用するという方法もあるが，本研究では実用的な車載システムの開発を目的としているので，様々な機器の遅延や誤りの発生を含んだ交通参加者の認識情報を保存する点にも意味があると考え，DPM による認識結果の保存を行う．なお，DPM の実装として名古屋大の Autoware[15]を用いる．ここで得られる交通参加者の位置情報は，カメラ画像上の矩形領域として表現されるので，この領域に対してステレオカメラによる距離計測を行う．

3.4 ステレオカメラを用いた交通参加者の距離計測

3.3 節で述べた交通参加者の認識情報に対してステレオカメラによる距離計測情報を併せることで，交通参加者までの相対距離を計測する．次にその詳細を説明する．

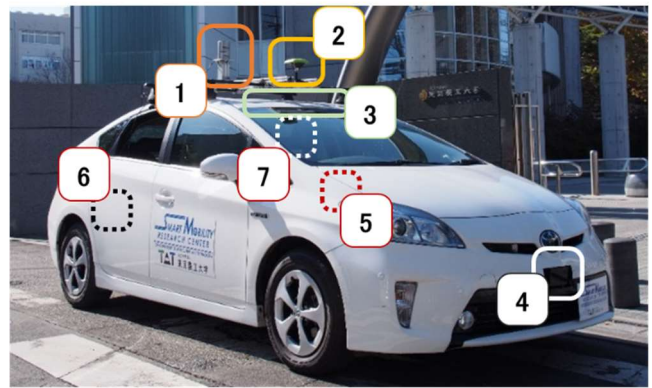


図 2 各種センサ類の配置

Figure 2 Configuration of the sensors.

表 1 運転行動計測システムを構成する計測装置

Table 1 Specification of the sensors in the driving recorder system.

番号	機器名称	計測内容	計測頻度 (Hz)
1	Velodyne 32	3次元距離	10
2	Javad GNSS	衛星測位・時刻	10
3	ステレオカメラ	前方映像×2	15
4	IBEO LUX	3次元距離	100
5	AHRS	3軸加速度	100
6	CAN	車速、ステアリング角度、ブレーキペダル操作量、アクセルペダル操作量	100
7	運転者カメラ	運転者映像	15

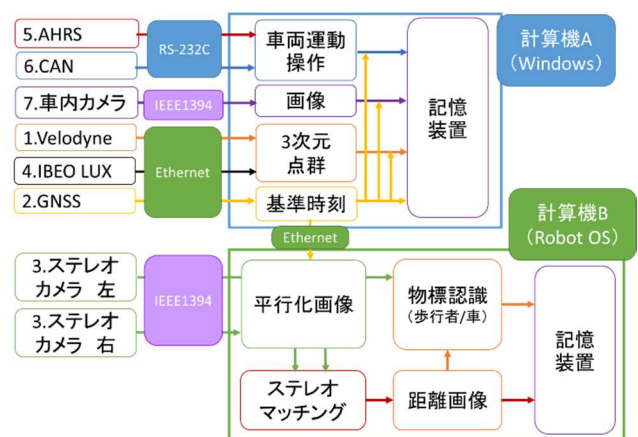


図 3 センサと計測システムの接続図

Figure 3 Block diagram of the sensors and the recorder system.

3.4.1 フロントガラスに由来する歪みの除去

ステレオカメラによる距離計測において精度を向上させるためには、カメラ間の相対位置を正確に求めることに加え、画像の歪みを除去する点も重要である。特に車載カメラでは、雨や汚れの付着を防止するために、フロントガラスの内側に設置する場合があります、レンズとは異なる複雑な歪みが生じる。そこで、Gray Code を用いて歪み補正マップを作成する研究[16]を利用する。この手法では、ディスプレイに Gray Code パターンを投影しカメラで撮影することで、カメラから見えるパターンと、ディスプレイに映し出されたパターンの理論的な位置との相違を用いて歪みの検出を行う。先行研究では、カメラとディスプレイの相対位置を推定するために、カメラの中心部は歪みが少なく信頼できるとして、中心部に映るパターンを利用した初期校正を行っている。本研究では車のフロントガラス越しにキャリブレーションを行うので、レンズの中央部分の歪みが小さいとは限らない。そこで、図 4 に示す AR マーカーを多数配置したパターンを用いてカメラとディスプレイ間の位置推定を行う手法を用いる[17]。この方法では、個々の AR マーカーから個別にディスプレイ平面の物理的な位置と姿勢を求めることができるので、これを複数用いることで、局所的な歪みの影響を軽減できる考え、この方法を用いる。

3.4.2 ステレオマッチングによる交通参加者の距離計測

本研究では、ステレオマッチングの手法として ELAS[18]を用いる。ELAS は画像認識で用いた DPM と同様に、近年の関連研究の中ではトップクラスの精度をもつ手法ではないものの、100m sec.以内で処理が完了するという特徴があり[4]、車載システムとしては有効な手法である。交通参加者までの距離計測を行う際には、画像認識から得られた矩形領域内の距離を計算する。このとき、次節で説明するヒストグラムを用いたノイズ除去を行い、計測精度を向上させる。

3.4.3 ヒストグラムによるノイズ除去

交通参加者の認識情報は、画像上の矩形領域として与えられる。この矩形領域に対応するステレオカメラから得られた奥行情報を参照することで距離を得ることができるが、認識結果の矩形領域内には対象物体の距離に加え、背景領域やノイズに由来する値が含まれており、単純平均により計算することは誤差の原因となる。そこで、矩形領域内の各距離値から背景やノイズ由来の値を除去し、対象物体の距離のみを抽出する工夫を行う。その方法は、矩形領域内に含まれる全ての距離値を 50cm 刻みでヒストグラム化し、その最頻値に相当する範囲に入ったデータのみを単純平均し、交通参加者までの距離とする。これは、対象となる矩形領域のほとんどは、認識対象に由来する画像データが占めており、ノイズや背景部分は相対的なピクセル数が少ないと考えたからである。また、ヒストグラムの刻み幅は予備実験により経験的に定めた値である。

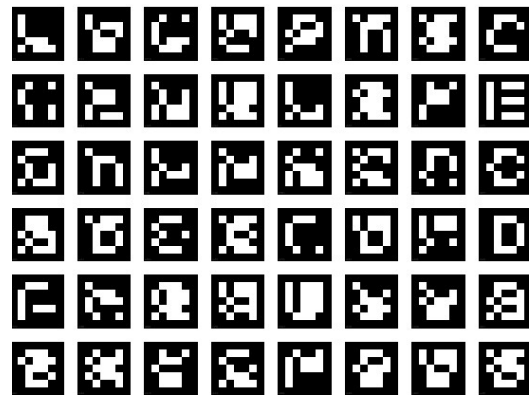


図 4 AR マーカーを配置した較正パターン

Figure 4 Calibration pattern based on AR markers.

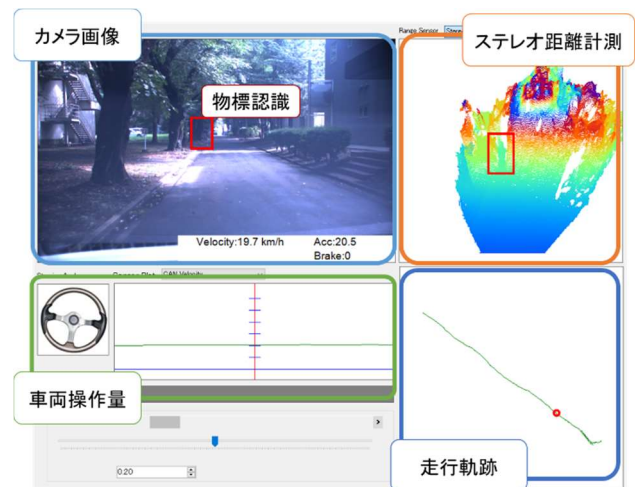


図 5 運転行動データ可視化ツール

Figure 5 Visualization tool for recorded driving data.

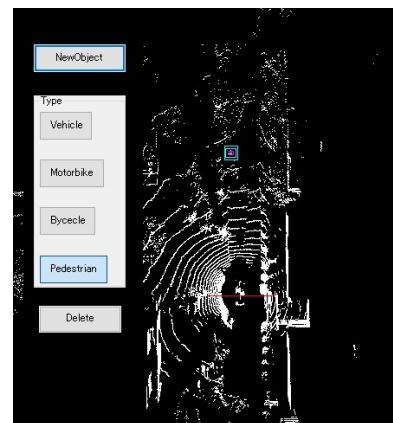


図 6 交通参加者のタグ付けツール

Figure 6 Assistance system for editing object tags.

3.5 運転行動データ可視化ツールの開発

運転行動データに含まれる 3 次元点群や交通参加者の認識情報を可視化し、運転者への運転状況のヒアリング等に用いたり、運転行動を解析するために、運転行動データの可視化ツールを開発する(図 5)。また、本ツールでは、カメラ画像から発見に失敗したり、無関係の物体を交通参加者として誤認識した計測データを手作業で修正するための機能も提供する(図 6)。

4. 実験

本章では提案システムを車載 PC に実装し、公道において計測実験を行い、市街地における無信号交差点の通過場面、および歩行者の側方通過場面に関する運転行動の解析を行う。

4.1 公道計測の実験状況

公道での運転行動計測実験では、自動車教習所の運転指導員 6 名に依頼をし、模範的な運転行動のデモンストレーションを行ってもらい、データの収集を行う。その際、特に歩行者の多い時間帯として、午前 9 時と午後 4 時の計 2 回の実験を行う。実験コースとして、東京都小金井市の市街地を約 4km 周回する経路を設定し、本コースを各被験者には 2 周運転してもらい。本実験により計 24 回 (6 名×2 時間帯×2 周) の走行データを取得した。なお、本実験は東京農工大学倫理審査委員会の許可のもとに実施している。

4.2 歩行者認識とステレオカメラによる距離計測精度の検証

3.3 節および 3.4 節で述べたカメラ画像からの歩行者認識とステレオカメラによる距離計測を複合した、歩行者までの距離計測手法の精度評価実験を行う。実験は、カメラを静止させた状態で設置し、カメラから 5m 離れる毎に路上にマーキングを行い、各マーキングの上にカメラを向いた方向に歩行者を立たせることを行った。計測距離としては、歩行者が距離を示すマーク上に静止している約 5 秒間に歩行者を認識できたフレームの平均距離を用いる。表 2 にカメラからの距離 10~50m の範囲で計測を行った際の結果を示す。この結果から、10~50m の範囲では歩行者を誤差 4% 以内で計測できており、車載システムとしては十分な精度を有していることが分かった。一般的に、ステレオカメラによる計測では距離が増加するほど誤差も増加する傾向にあるが、表 2 の実験結果では誤差の増加がみられなかった。これは、3.4.3 で述べたヒストグラムを用いたノイズ除去手法が有効に働き、統計的な効果によりノイズの影響を抑えることができていると考えられる。なお、本実験により一連の距離計測処理が 100msec 以内に完了することも確認した。

4.3 歪み補正マップの効果検証

3.4.1 で述べた歪み補正マップの効果検証を行う。検証のために、歪みの生じている状況下にあるカメラ (図 7) を用意し、そのカメラの撮影範囲と一致するような位置に PC 用の一般的なディスプレイを設置し、実験を行った。提案手法により生成した歪み補正マップを適用した後の画像を図 8 に示す。この結果から、周辺部に生じていたタル型の歪みが解消されており、各縞模様が平行に並ぶように補正されていることがわかる。一方で、図 8 の一部の縞模様に段差のような部分が発生している。これは、本手法がピクセルレベルの Gray Code の対応点情報を用いた手法であ

表 2 歩行者計測の精度評価

Table 2 Evaluation of accuracy in the pedestrian range estimation.

真値 (m)	計測値 (m)	誤差 (%)
10	9.86	1.4
15	14.79	1.4
20	19.71	1.5
25	24.31	2.8
30	29.69	1.0
35	33.75	3.6
40	40.48	-1.2
45	44.49	1.1
50	49.43	1.1

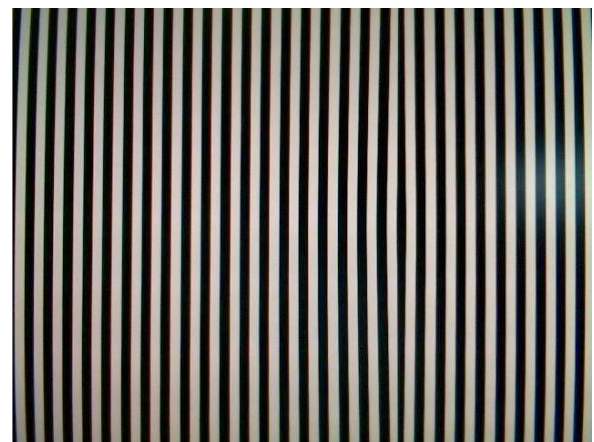


図 7 歪み補正前のカメラ画像

Figure 7 Camera image before the undistortion.

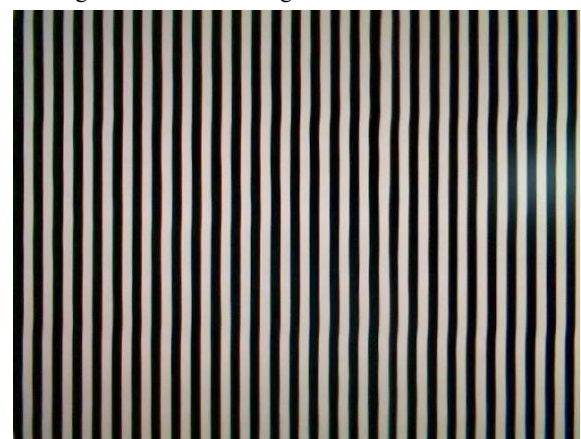


図 8 歪み補正後のカメラ画像

Figure 8 Camera image after the undistortion

るので、量子化誤差による対応位置の急激な変化がこの段差の原因と考えられる。この誤差は 1~2 ピクセル程度であるので、レンズの歪みによる 5 ピクセル以上の位置の誤りに比べて影響は比較的小さく、本歪み補正手法を適用した方が計測精度は向上するものと考えられる。

4.4 歩行者の側方通過場面における運転行動解析

4.1 節で述べた実験により計測したデータから、歩行者の脇を通過する場面 257 件を抽出し、歩行者との側方間隔および通過速度の解析を行う。歩行者との距離計測には、3 次元距離情報を用いて、誤検出データの混入を防ぐために、手作業により歩行者に対する事例かどうかを確認した。図 9 に歩行者の脇を通過する前後 5 秒間の速度変化を表すグラフ、図 10 に歩行者の真横に来た際の側方間隔（車両の側面から歩行者の中心までの距離）とその時の速度の関係を示す。図 9 からは、歩行者の側方を通過する場所以外での速度のばらつきが大きく、側方通過中に選択する速度は 20~30km/h に多く分布している等の傾向がみられる。また、図 10 に示した側方間隔と速度の分布からは、歩行者とは 1m 以上の間隔をあげている場合がほとんどであり、その中で選択する速度は多様であることがわかる。これらの結果から、本研究により開発した運転行動を収集するシステムを用いることで、実路での運転行動を様々な側面から解析するためのデータベースを作成できることが確認できた。

5. おわりに

本稿では、高度運転支援システムの開発に有用な、実路での運転行動記録システムを開発し、行動計測実験によりその有効性を検証した。カメラ画像からの物標認識技術とステレオカメラによる計測技術を用いた、交通参加者の位置計測は安価に実現できるので、高度運転支援システムの実用化には有効な手法である。本研究では、車載する際に特有の問題であるカメラ画像の歪みを補正するための方法として、AR マーカーと Gray Code パターンを組み合わせた歪み補正マップの作成手法を提案した。実装した交通参加者の距離計測システムは、歩行者との距離を計測する実験において誤差 4%未満を達成しており、実用化に十分な性能を有している。今後は、カメラによる交通参加者等の計測を前方のみではなく、全周に拡張することで、高価な 3 次元レーザー距離計に代わる機能を開発する。

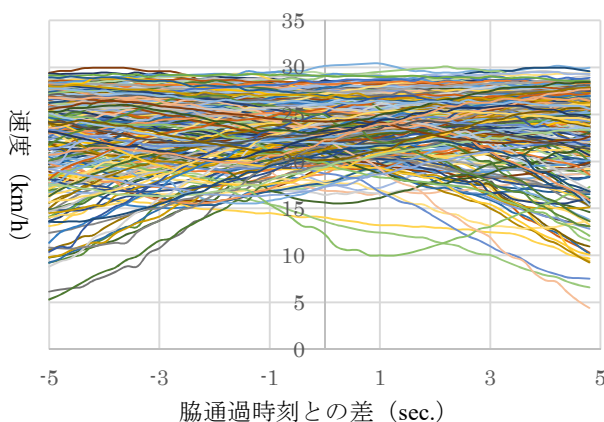


図 9 歩行者の脇通過速度変化

Figure 9 Vehicle velocity profiles passing pedestrians.

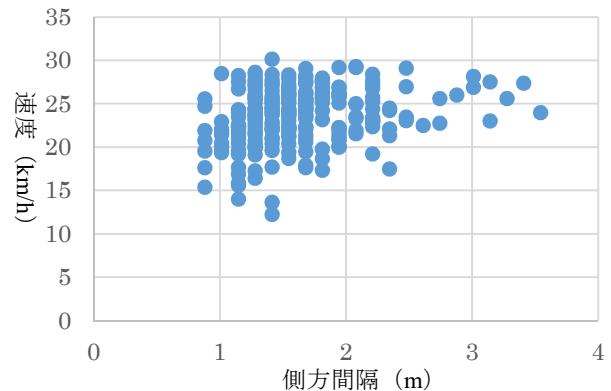


図 10 歩行者との側方間隔と通過速度の分布

Figure 10 Distribution between the distances to the pedestrian and passing velocity.

謝辞 本研究の一部は独立行政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 (COI) プログラム (多様化・個別化社会イノベーションデザイン拠点~高齢者が元気になるモビリティ社会~)」の支援によって行われた。

参考文献

- 1) Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles (online), available from <http://adaptive-ip.eu/> (accessed 2015-10-11).
- 2) ITS Strategic Plan 2015-2019 (online), available from <http://www.its.dot.gov/landing/strategicplan2015.htm> (accessed 2015-10-11).
- 3) SIP-Automated Driving for Universal Services (SIP-adus)(online), available from <http://www.sip-adus.jp/index.html> (accessed 2015-10-11).
- 4) Benenson, R., Omran, M., Hosang, J. and Schiele B.: Ten years of pedestrian detection, what have we learned?, ECCV CVRSUAD workshop (2014).
- 5) Alhajyaseen, W. K.M. Asano, M. and Nakamura, H.: Estimation of leftturning vehicle maneuvers for the assessment of pedestrian safety at intersections, IATSS Research, vol. 36, no. 1, pp. 66-74 (2012).
- 6) Killi, D. V. and Vedagiri, P.: Proactive Evaluation of Traffic Safety at An Unsignalized Intersection Using Micro-Simulation, Journal of Traffic and Logistics Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 140-145 (2014).
- 7) Akagi, Y. and Raksincharoensak, P.: Stochastic driver speed control behavior modeling in urban intersections using risk potential-based motion planning framework, Intelligent Vehicles Symposium (IV2015), pp.368-373 (2015).
- 8) Bauer, E. et al.: PRORETA3 : An Integrated Approach to Collision Avoidance and Vehicle Automation. Automatisierungstechnik, Vol. 60, No.12 : 755-765 (2012).
- 9) Hasegawa, T., Raksincharoensak, P. and Nagai, M.: Risk-Potential Based Motion Planning and Control of Proactive Driving Intelligence System for Enhancing Active Safety, Proceedings of 12th International symposium on advanced vehicle control (AVEC'14), No. 20149224, pp.132-137 (2014).
- 10) Bernini, N.; Bertozzi, M.; Castangia, L.; Patander, M.; Sabbatelli, M.: Real-time obstacle detection using stereo vision for autonomous ground vehicles: A survey," in Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on , vol., no., pp.873-

878 (2014).

- 11) Geiger, A.; Lenz, P.; Urtasun, R.: Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.3354-3361 (2012).
- 12) Dollár, P., Wojek, C., Schiele, B. and Perona, P.: Pedestrian Detection: An Evaluation of the State of the Art, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vo.34, No.4 (2012).
- 13) 赤木康宏, ボンサトーンラクシンチャラーンサク: 運転行動解析のための点群位置合わせに基づく走行軌跡の復元に関する研究, 精密工学会論文誌, Vol.80, No.12 (2015).
- 14) Felzenszwalb, P., McAllester, D. and Ramanan, D.: A Discriminatively Trained, Multiscale, Deformable Part Model, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2008).
- 15) 自動運転ソフトウェア: Autoware (オンライン), 入手先 (<http://www.pdsl.jp/fot/autoware/>) 参照 (2015-10-11).
- 16) 高辻誠也, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史: グレイコードパターンを利用したレンズ歪みの補正手法, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2005), pp.174-180 (2005).
- 17) 清田祥太, 川崎洋, 佐川立昌, 古川亮: AR マーカーと平面版を用いた簡易なプロジェクタキャリブレーション手法の提案, 電子情報通信学会 CVIM2013, Vol.2013-CVIM-186 No.24, pp1-8 (2013).
- 18) Geiger, A., Roser, M. and Urtasun, R.: Efficient Large-Scale Stereo Matching, 10th Asian Conference on Computer Vision (ACCV), pp 25-38 (2010).