

運転支援システム構築のための歩行者の行動推定に関する研究

日大生産工(院) ○趙 越 日大生産工 景山 一郎

1 まえがき

自動車が開発され以来飛躍的な発展を遂げており、現在では人や物資の移動手段や輸送手段として広く利用されている。しかし、自動車の普及に伴い、交通事故が大きな社会問題となっている。事故発生数及び死者数は平成15年がピークとなり、その後減少傾向にある。

一方で平成20年には歩行中の事故が自動車乗車中の死亡者数を超えて最大となり、平成22年には1714人となった。類型別事故発生状況では横断歩道における死亡者比率が38%を占めており、道路形状別の事故発生状況に関しては交差点が48%を占めているため^{1) 2) 3)}、交差点を横断中の歩行者に注目する。歩行者の動作を数値化して、これを用いた解析を行うことで歩行者事故件数を減少することが可能であると考えられる。

警察庁において交通の安全等を目指した新交通管理システム(UTMS)が研究開発されている⁴⁾。従来の横断歩行者早期判断システムには横位置応答遅れの欠点があるので、猪俣亮らは車両と歩行者の両方を想定したフィルタ処理に横断歩行者に特化したフィルタ処理を加えて、ミリ波横位置の応答性を向上させた⁵⁾。しかし、これらの研究には歩行者の速度が横断中に急に变化するシーンが考慮されていない。

そこで、本研究ではドライバ運転支援システム構築のため、横断歩道を歩行する歩行者の挙動等から歩行モデル構築を行う。

なお、本研究は生産工学部「人を対象とする研究倫理審査会」の承認を受けている(承認番号:S2015-004)

2 歩行者横断調査

歩行者横断状況において横断速度急に变化する状況を調査するために、渋谷スクランブル交差点に設置しているライブカメラの映像を利用する。

2.1 横断調査

映像の中で、歩行者が横断中に速度を变化する現象を計588件にとらえた。図1において横断

中の加速件数を469件抽出し、減速件数は119件抽出した。

赤信号になるまでの残り時間を横軸とすると、青信号の点滅中(10秒～0秒)と赤信号になってからの20秒間の速度変化件数は76.3%にも上る。さらに、赤信号になってからの5秒間が加速件数も減速件数も一番多いことがわかる。速度変化の面から見ると、歩幅の変化と頻度(単位時間当たりの歩数)の変化に分けられる。

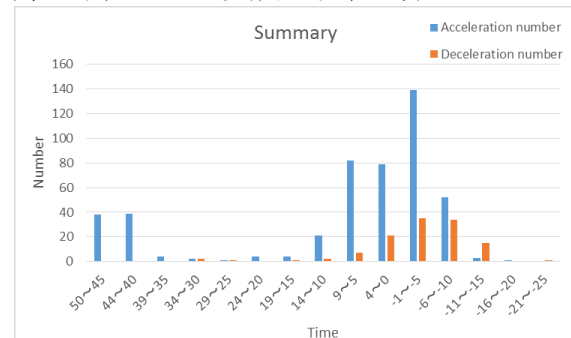


図1 Summary of cross-sectional survey

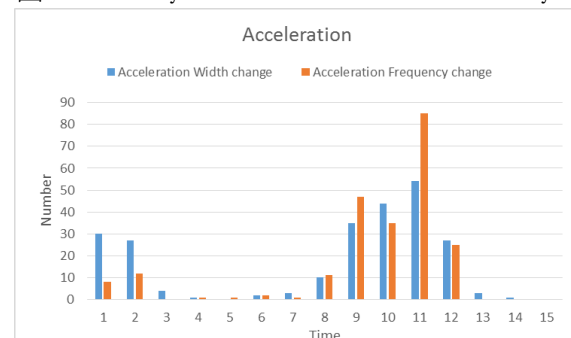


図2 Summary of acceleration phenomenon

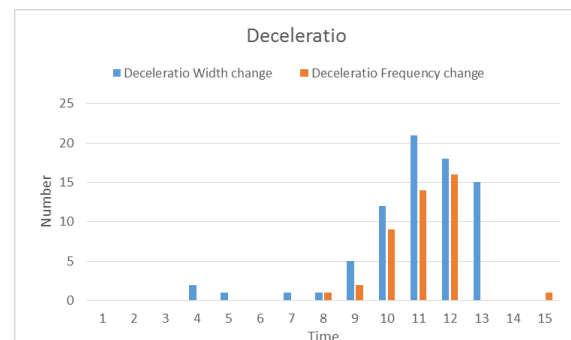


図3 Summary of deceleration phenomenon

A Study On Pedestrian Behavior Estimation for Driving Support System Construction

Yue ZHAO, Ichiro KAGEYAMA

2.2 歩行者の特徴

図2において40秒から50秒の間に大幅で歩く歩行者は高い頻度の人より多い。これは信号が青に変わったばかりなので、大幅で通ると早く歩道に着くことができるためと考えられる。

一方で、5秒～9秒にほとんどの歩行者が高い頻度で通過するが、それらは、両方向の歩行者が混在していることから、他人をぶつからないように歩道へ歩くためと見ることが出来る。そのかわりに、大幅で歩く歩行者がほぼ横断歩道の外側を通過することが明らかとなった。

赤信号になってから5秒までに高い頻度で歩くことが多くなる。これは、歩行者が歩道に近くなるためと考えられ、一方で、歩道まで遠くにいる歩行者は大幅に変えることが多くなる。

図3において、減速はほぼ青信号の点滅時間中とその後の15秒以内で発生することがわかる。また、当初渡りきることを意識して減速せず、点滅した時点で歩道に近付いているため渡りきれると判断して減速する可能性が高い。

2.2 横断実験概要

前節で歩行者の横断状況を調査したが、精度の高い推定を行うため、歩行者横断中の速度変化に関する関節の変化を検討する。

図4において被験者は10mの直線で実験を行い、開始点から4mのところに速度変化点を設定する。実験は四つの条件に分けて実施した。各条件の説明は以下のとおりである。

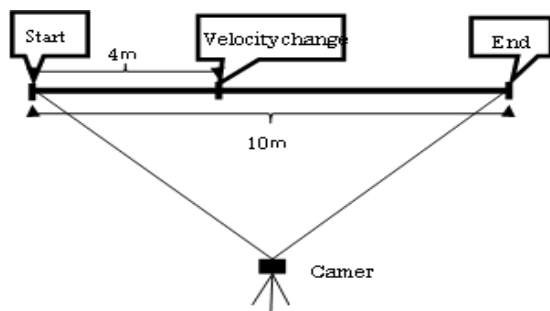


図4 Experimental image

(1) 4mまでは普通で速度で歩き、速度変化点に着いたら、足幅を大きくして加速し、終了点を過ぎるまで歩く。

(2) 4mまでは普通で速度で歩き、速度変化点に着いたら、頻度を上げて加速し、終了点を過ぎるまで歩く。

(3) 4mまでは早い速度で歩き、速度変化点に着いたら、歩幅を小さくして減速し、終了点を過ぎるまで歩く。

(4) 4mまでは早い速度で歩き、速度変化点に着いたら、頻度を下げて減速し、終了点を過ぎるまで歩く。

3 カルマンフィルタの推定

カルマンフィルタを用い、目標の運動軌跡を運動方程式で表現することにより、目標の位置推定および予測を行う。サンプリングの間では目標は加速度一定の直線運動と考えられる。加速度一定運動モデルに基づき、位置・速度・加速度を考慮したカルマンフィルタを構成した。X方向についての説明は以下のとおりである。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{x} \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \dot{\mathbf{x}}_k \cdot T_k + \frac{T_k^2}{2} \cdot \ddot{\mathbf{x}}_k \quad (2)$$

だから、

$$\mathbf{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & T_k \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k \\ \dot{\mathbf{x}}_k \end{bmatrix} + \frac{T_k^2}{2} \cdot \ddot{\mathbf{x}} \quad (3)$$

3.1 運動モデル

2次元空間において静止直交座標系を使用した場合、運動モデルに基づきカルマンフィルタが対象とする運動方程式は以下のように表される。

状態方程式：

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}_k \quad (4)$$

出力方程式：

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\omega}_k \quad (5)$$

ここで $\mathbf{A}$ は状態遷移行列、 $\mathbf{x}_k$ はサンプリング時間 k における目標の状態ベクトル、 $\mathbf{U}_k$ はサンプリング時間 k における加速度の状態ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_k$ は目標のシステム雑音を表す。本研究では $\boldsymbol{\omega}_k$ を0とする。以下のとおりに x_x x_y $\dot{x}_x$ $\dot{x}_y$ はサンプリング時間 k における位置と速度である。

$$\mathbf{x}_k = [x_x \quad x_y \quad \dot{x}_x \quad \dot{x}_y]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{U}_k = [\ddot{x}_x \quad \ddot{x}_y]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \frac{T_k^2}{2} \cdot \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{O}_{2 \times 2} \\ \mathbf{O}_{2 \times 2} & T_k \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.2 運動モデルの推定

運動推定を行うカルマンフィルタは、以下の式に従い目標の状態推定及び予測を行う⁶⁾。

【予測ステップ】

事前状態推定値：

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}_k \quad (11)$$

事前誤差共分散行列：

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{A}^T \quad (12)$$

【フィルタリングステップ】

カルマンゲイン：

$$\mathbf{g}_k = \frac{\mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{C}}{\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{C} + \sigma_\omega^2} \quad (13)$$

状態推定値：

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{g}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}^T \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}) \quad (14)$$

事後誤差共分散行列：

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{g}_k \cdot \mathbf{C}^T) \cdot \mathbf{P}_{k+1|k} \quad (15)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ は事前状態推定行列、 $\mathbf{P}_{k+1|k}$ は事前誤差共分散行列、 $\mathbf{g}_k$ はサンプリング時間 k におけるカルマンゲイン、 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$ は事後状態推定行列、 $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$ は事後誤差共分散行列を表す。

4 実験解析

4.1 横断実験解析

2.2節に実験を行う前に、速度変化無しの条件に関節運動を検討するため、実験を行う。図5のようにヒップは20度から-14度までで運動して、ヒップと下腿の角度は20度から-40度までである。

図6は(1)の歩幅増加条件である。当初は図5の運動と同じだが、加速してからヒップは30度～-20度まで運動し、ヒップと下腿の角度は0度～-80度までである。

図7は(2)の頻度増加条件である。ヒップは加速前に20度～-10度までで運動しており、加速後もほぼ変わらないことがわかる。この時、ヒップと下腿の角度は0度～-80度まで下がる。

図8は(3)の歩幅減少条件である。ヒップの角度は減速後にやや下がって、減速前に30度～-10度で、減速後には20度～-15度の間であり、ヒップと下腿の角度は減速前に10度～-70度、減速後には20度～-60度との間であった。

図9は(4)頻度減少条件である。ヒップの角度は減速前に10度～-50度で、減速後には20度～-25度の間であり、ヒップと下腿の角度は減速前に10度～-100度、減速後には10度～-50度との間であった。

4.2 運動モデル及び推定解析

運動モデルとカルマンフィルタに基づき、(1)と(3)の足幅の増減条件を図10と図11に示す。実線は観測値であり、破線は予測値である。Y軸はビデオ画像の横軸の座標を表す。

図10において、ヒップではTimeが100のところから、傾きが大きくなった。膝ではヒップのように傾きが増加した。歩行周期（片側の踵が接地してから、別の踵が接地するまでの時間）⁷⁾から見ると、接地初期及び荷重応答期と立脚中期は歩行周期の40%から20%に減小して、足首は膝のように傾きが大きくなり、周期変化が明確に見られる。歩行周期から見ると接地初期及び荷重応答期と立脚中期は歩行周期の50%から25%に減小する。

図11において、ヒップではTimeが60のところから、傾きが小さくなった。膝ではTimeが60のところも傾きが小さくなった。歩行周期から見ると接地初期及び荷重応答期と立脚中期は歩行周期の20%から40%に減小する。足首は膝のように傾きが小さくなり、周期的な変化が明確に見られる。歩行周期から見ると接地初期及び荷重応答期と立脚中期は歩行周期の25%から50%に減小する。

観測値(実線)と事後予測値(破線)の誤差平均値は表1に示すように、(1)の歩幅増加条件では誤差平均値が8.0ピクセルで、(3)の歩幅減少条件では誤差平均値が9.2ピクセルである。画像のサイズ(1440ピクセル)から算出すると、誤差は0.56%と0.64%になる。

表1 Error average value

ピクセル	Hip	Knee	Ankle
Width - acceleration	8.0	8.1	7.9
Width - deceleration	9.2	9.3	9.1

5 まとめ

本研究では横断実験によって、加・減速の条件で被験者のヒップと膝の角度変化を明らかにした。加えて運動推定モデルを構築して、図

10と図11において、観測値とほぼ同じで、観測値との誤差は0.56%と0.64%であった。そこで、この手法で歩行者の状態変化を推定できると考える。

今回の解析では雑音を考慮しておらず、また、画像の座標のみ推定している。そのため実際の距離に変換した際に、誤差が大きくなる可能性がある。今後は誤差処理に注目して、誤差の減少についての検討を行う必要がある。

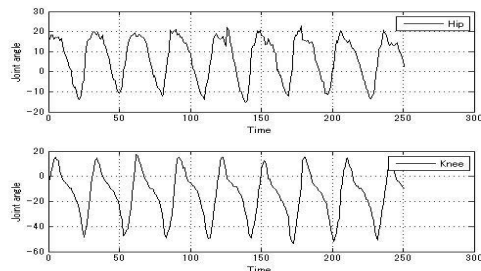


図5 Walking experiment

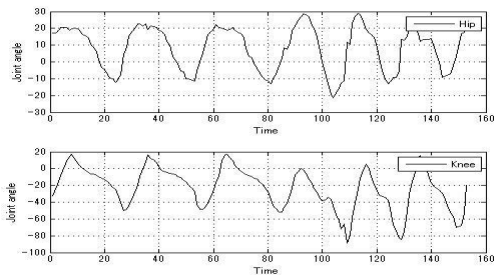


図6 Foot width-Accelerated

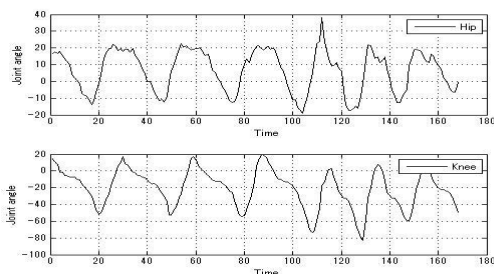


図7 Frequency-Acceleration

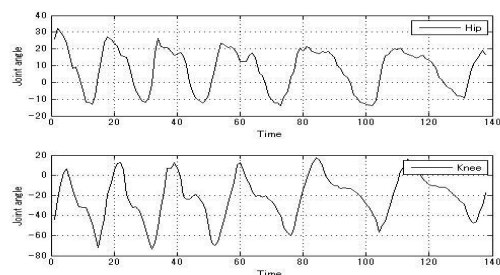


図8 Foot width-deceleration

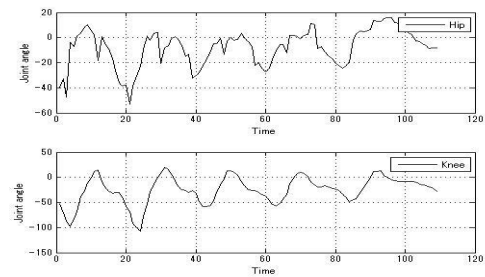


図9 Frequency-deceleration

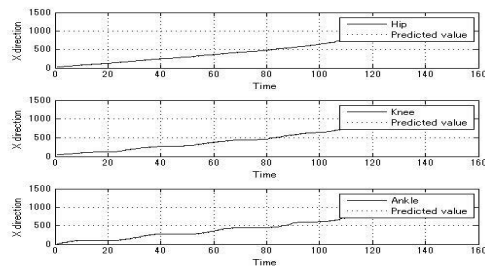


図10 Foot width-Acceleration

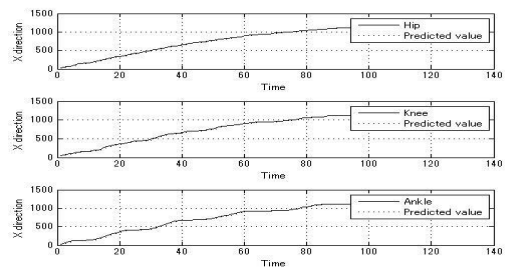


図11 Foot width-deceleration

「参考文献」

- 1) 厚生労働省，“交通事故件数・死者数・負傷者の推移”，厚生労働省統計資料，2012.
- 2) 警察庁，“平成22年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について”，2012.
- 3) 内閣府，“平成22年度 交通事故の状況及び交通安全施策の現況”，2011.
- 4) 警察庁，“UTMS 新交通管理システム”，2012.
- 5) 猪俣亮，“歩行者回避支援機能付きプリクラッシュセーフティの開発”，会誌自動車技術，Vol. 68, No. 12 (2014.12)，pp. 25 - 30.
- 6) 足立修一，丸田一郎，“カルマンフィルタの基礎”，2012.10.10，pp. 112 - 113.
- 7) Irving P. Herman，“人体物理学 翻訳 動きと循環のメカニズムを探る”，pp. 103-104，2009.