

# 時空間MRFを用いた自転車走行環境評価手法に関する研究

田中 淳<sup>1</sup>・山中 英生<sup>2</sup>・上條 俊介<sup>3</sup>・松原 淳<sup>4</sup>・道工 敏央<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)

E-mail: tanaka-at@oriconsul.com

<sup>2</sup>正会員 徳島大学

<sup>3</sup>正会員 東京大学

<sup>4</sup>正会員 交通エコロジー・モビリティ財団

<sup>5</sup>正会員 株式会社エイテック

歩行者と自転車の混在交通についてそのサービスレベル等を評価する手法が重要となり、様々な研究が進められてきたが、評価指標の算出のための調査や解析に多くの労力を要することが課題となっている。そこで、本研究では、歩行者や自転車の交通実態及び問題点・課題、また各種施策の効果検証等のために、的確かつ効率的に把握できる調査・解析手法について研究を行った。

具体的には、画像解析する上で理想的な真上からの画角(地上11m)と、歩道橋との比較的調査のしやすい画角(地上5.5m)の2パターンでビデオ調査を実施し、得られた映像をもとに時空間MRF<sup>1)</sup>を用いて画像処理した。この結果を基に撮影パターン別に自転車と歩行者の交通量、密度、速度、走行軌跡等の自転車走行環境の評価指標を解析し、その精度の違い等を分析・考察した。結果として、歩道橋程度の高さからのビデオ調査画像であれば、比較的精度よく解析できることを確認した。

**Key Words :** image processing analyzes, Spatio-Temporal MRF, bicycle

## 1. はじめに

近年の自転車利用傾向が高まる一方で、自転車に関連した事故は増加している。これらに対する対策としてモデル地区等において歩行者や自転車空間の再構築などの検討が実施されている。これらの検討にあたっては歩行者と自転車の混在交通についてそのサービスレベル等を評価する手法が重要となり、様々な研究が進められてきたが、評価指標の算出のための調査や解析に多くの労力を要することが課題となっている。そこで、本研究では、歩行者や自転車の交通実態及び問題点・課題、また各種施策の効果検証等のために、的確かつ効率的に把握できる調査・解析手法について研究を行った。

## 2. 研究手順と手法

本研究においては、以下の手順及び手法で行った。

1)自転車・歩行者の走行環境の評価指標に関する研究事例から、観測すべき内容について整理した。

2)画像解析する上で理想的な真上からの画角(地上11m)と、歩道橋などの比較的調査のしやすい画角(地上5.5m)

の2パターンでビデオ調査を実施した。

3)得られた映像をもとに時空間MRFモデルを用いて画像処理を行い、撮影パターン別に自転車と歩行者の交通量、密度、速度、走行軌跡等の自転車走行環境の評価指標を算出し、その精度の違い等を分析・考察した。

## 3. 自転車・歩行者の走行環境評価指標の整理

既存研究事例等から、自転車の走行環境に関する主な評価指標を表-2に整理した。同表に示すとおり、評価指標は交通量、密度、速度、錯綜挙動に大別される。

交通量は、1分間交通量、幅員2mあたりの時間交通量、走行位置別交通量がある。このうち、1分間交通量はアンケート結果による不快感との関係等から自転車走行空間の分離のための閾値の検討に用いられている。

密度は、自転車を歩行者に換算した歩行者換算密度があり、錯綜回数、自転車速度、危険感との相関関係から、自転車走行空間の評価に用いられている。

速度は、自転車の平均速度から快適な走行をしている割合を明らかにするために用いられている。

錯綜挙動は、交錯(不快な交差)、錯綜(コンフリクト

表-1 自転車・歩行者の走行環境評価に関する評価指標と必要となるデータ要素

評価指標	評価の目的・内容	必要となるデータ要素	
交通量	1分間交通量 <sup>2)</sup>	1分間交通量と歩行者の不快感の関係から自転車走行空間を評価	・自転車・歩行者別の交通量
	幅員2mあたりの時間交通量 <sup>3)</sup>	混雑緩和(混雑回避検討、混雑解消すべき)の必要性の判断基準とするため、混雑状況を明らかにする	・自転車・歩行者別の交通量
	走行位置別交通量 <sup>4)</sup>	歩道内等の走行位置等、走行位置の遵守状況を把握する	・自転車・歩行者別走行位置別交通量
密度	歩行者換算密度 <sup>5)</sup>	歩行者換算密度と、錯綜回数、自転車速度、危険感との関係から自転車走行空間を評価	・自転車・歩行者別の交通量
速度	自転車速度 <sup>6)</sup>	自転車の平均速度から快適な走行をしている割合を明らかにする	・自転車の平均区間速度
錯綜挙動	交錯 <sup>7)</sup>	追い越し、すれ違い時の最接近距離を算出し、不快に感じる割合を明らかにする	・自転車・歩行者の走行軌跡
	錯綜 <sup>8)</sup>	TTCなどのコンフリクト指標を用いて、危険性を評価する。	・自転車・歩行者の走行軌跡
	ニアミス <sup>9)10)</sup>	自車両の占有空間の中に他の自転車・歩行者が存在するような不快な状況となる回数を明らかにする	・自転車・歩行者の走行軌跡

指数)、ニアミス等があり、いずれも軌跡データから歩行者と自転車等との接近時の危険感や不快度を推計する指標となっている。

また、同表にこれらの評価指標算出にあたり、必要となるデータ要素を整理した。これによると、交通量、走行位置、速度、走行軌跡が正確に観測できれば、どの指標も算出できることとなる。本研究では、時空間MRFモデルを用い、観測位置によるこれらの観測精度について分析する。

#### 4. 調査・解析方法

本調査は、表-2の要領で映像を取得し、画像処理を用いた分析を行った。ビデオは2台使用し、異なる高さから同一の計測範囲を撮影した。1台は歩道を俯瞰できる高さを確保するため、建物の屋上から11mの高さに設置した。もう1台は観測が容易な歩道橋の高さ程度を想定し、建物の2階から5.5mの高さに設置した。

それぞれの画角で観測した撮影したビデオカメラの画角は図-1、図-2のとおりである。

観測した範囲は、歩道部10m×3mの30m<sup>2</sup>とした。

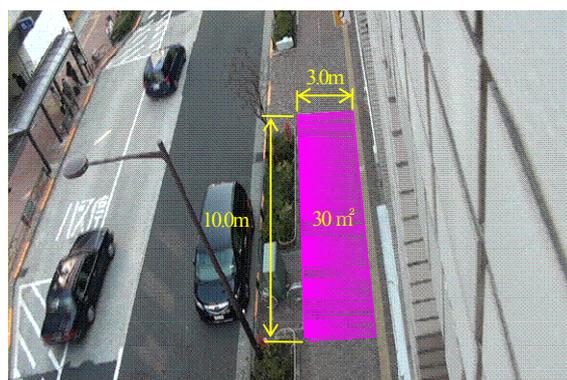


図-1 撮影した画角 (11m高さ)

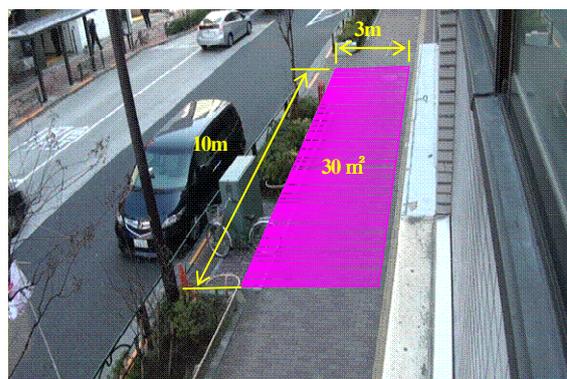


図-2 撮影した画角 (5.5m高さ)

表-2 調査概要

調査箇所	新宿区方南通り
調査日時	2011年3月31日 (木) 8:30~9:30
ビデオ設置場所	ビル屋上 (高さ11m) ※理想的な観測条件 ビル2F (高さ5.5m)
撮影機器	ビデオカメラ
分析対象範囲	歩道部 30m <sup>2</sup> (区間長10m, 幅員3m)

以上の手法で取得した画像を画像処理により、自転車・歩行者の動きを軌跡データとして出力した。画像処理による挙動の取得状況を図-3、図-4に示した。これらの図の四角枠の部分画像検知した部分である。

これらの図によれば、各画角について歩行者等を精度良く検知していることがわかる。

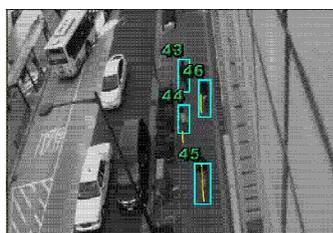


図-3 時空間MRFによる挙動取得状況 (11m高さ)

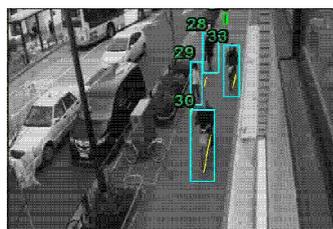


図-4 時空間MRFによる挙動取得状況 (5.5m高さ)

取得した軌跡データから、各指標を算出できるようにするために、次のa)~c) に示す処理を加えた。

**a)画像処理結果の平面変換**

斜めに撮影した映像に対して射影変換を施すことで、実平面座標へ変換した。

**b)軌跡データのノイズ除去**

画像処理によって得られた自転車・歩行者の軌跡 (図-5) に対してカルマンフィルタによる補正を行い、映像ノイズによるブレを除去した軌跡データ (図-6) とした。

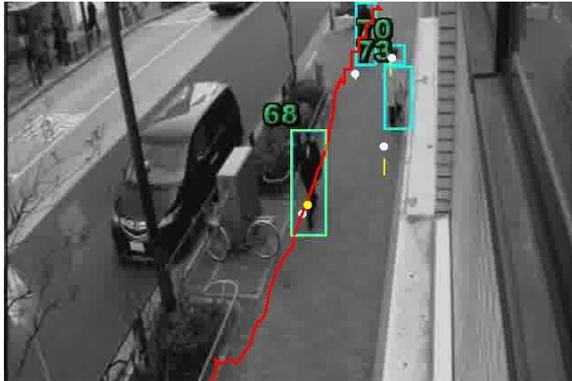


図-5 画像処理により得られた軌跡データ

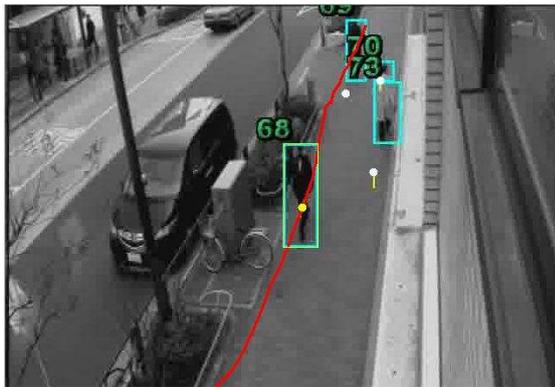


図-6 カルマンフィルタにより補正した軌跡データ

**c)画像処理における自転車・歩行者の分類**

歩行者と自転車の分類の方法としてパターンマッチングの手法もあるが、今回は簡便のため、速度による分類を試みた。

既存の調査結果<sup>8)</sup>によると、歩道を走行する自転車の15%タイル値は10.1km/h (2.8m/s) とあるため、この値を自転車の速度の下限値として、歩行者と自転車に分類した (図-7参照)。なお、当地域では通勤客が多いことを考慮し一般男性の計測値を引用した。

閾値の妥当性の確認のため、画像処理した10分間の映像について、目視で自転車と歩行者の判別状況を確認した。結果として、歩行者と判別された68人はすべて歩行者、自転車と判別された35台のうち1台だけが歩行者の読み間違いであった。よって、速度による自転車・歩行者の分類は概ね妥当と言える。

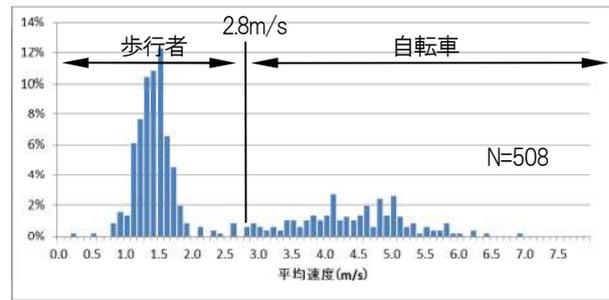


図-7 歩行者と自転車の分類 (11m高さの場合の例)

**5. 解析結果**

高さの異なる2つの映像の画像処理結果について比較し、高さの違いが分析結果に及ぼす影響について確認した。具体的には、交通量・密度については、目視による結果と画像処理結果を比較した。また、速度・挙動については、歩道が俯瞰できる画角であり、精度が高いと考えられる11m高さの画像処理結果を正として、5.5m高さの結果との違いを確認した。

**(1)交通量**

画像処理による交通量計測結果と、目視交通量を比較した結果を表-3に示す。1時間の自転車の交通量は、目視交通量171台に対して11m高さでは167台、5.5m高さでは168台とほぼ同様となった。歩行者の交通量は、目視交通量380人に対し11m高さでは341人、5.5m高さでは330人となり、画像処理による歩行者の交通量は少なめになった。歩行者の精度が低下した理由は、歩行者が並んで移動した場合、図-8のように、1個のオブジェクトとして認識されることが一部発生したためである。

表-3 画像処理による1時間交通量

区分	目視交通量	画像処理結果 (11m高さ)	画像処理結果 (5.5m高さ)
自転車	171	167	168
歩行者	380	341	330
計	551	508	498

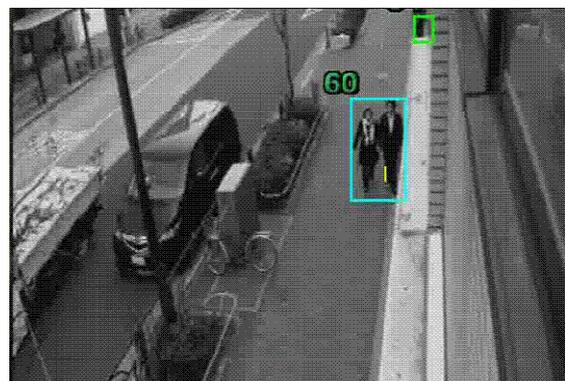


図-8 並んで歩く歩行者を1つとして認識した例  
5分間交通量の精度を検証するため、目視交通量と画

像処理の散布図を図9～図12に示した。

これらの図によると、時間交通量と同様に、自転車は概ね精度は良く、歩行者はアンダーカウントしていることがわかる。

自転車のRMS誤差は、11m高さでは9.0%、5.5m高さでは8.2%となっており、誤差は比較的少ない。一方、歩行者のRMS誤差は、11m高さでは11.7%に対し、5.5m高さでは14.4%となっている。5.5mと比べ11mは人の重なりなどが少なくなるためと考えられる。

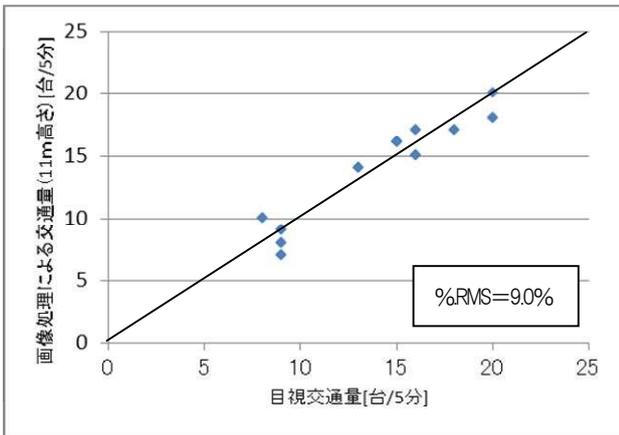


図-9 画像処理結果 (11m高さ) と目視の比較 (自転車)

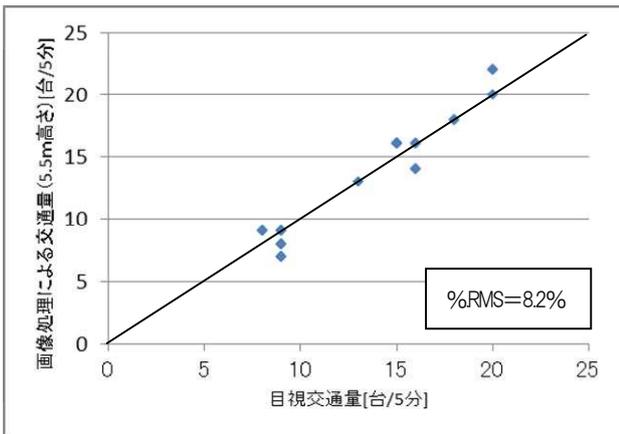


図-10 画像処理結果 (5.5m高さ) と目視の比較 (自転車)

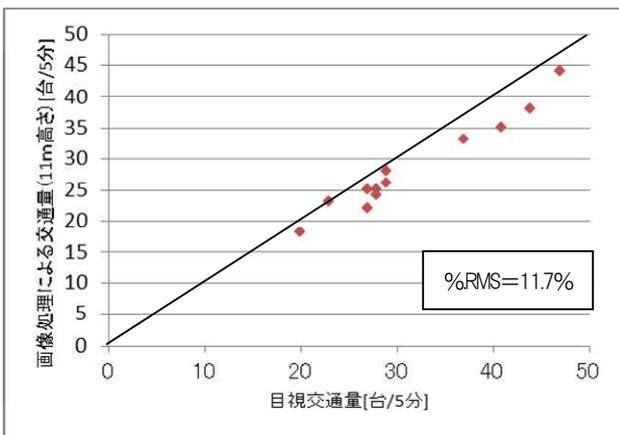


図-11 画像処理結果 (11m高さ) と目視の比較 (歩行者)

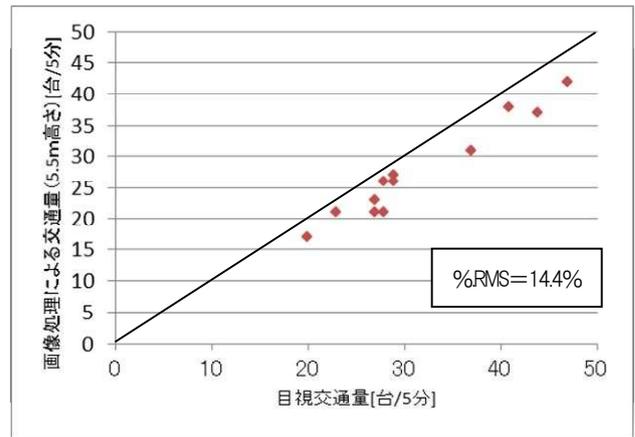


図-12 画像処理結果 (5.5m高さ) と目視の比較 (歩行者)

次に歩行者、自転車の通行位置別の交通量を分析した。図-13、図-14に示すように、分析対象範囲の流入断面を6分割 (50cm×6区間) し、歩行者・自転車の通行位置を解析し、高さ11mと高さ5.5mで比較した。

各方向について、通行位置の分布(図-15～図18)を見ると、断面Aおよび断面Bともに、11m高さの結果と5.5m高さの通行位置別交通量結果が概ね一致している。ただし、北方向の断面Aの左側 (区間1～3) の通行については若干違いがある。5.5mの映像では端に歪みがあるため、平面に変換した際、誤差が生じやすいことが考えられる。

これらの解析結果から、歩行者・自転車ともに左側を通行していることがわかる。

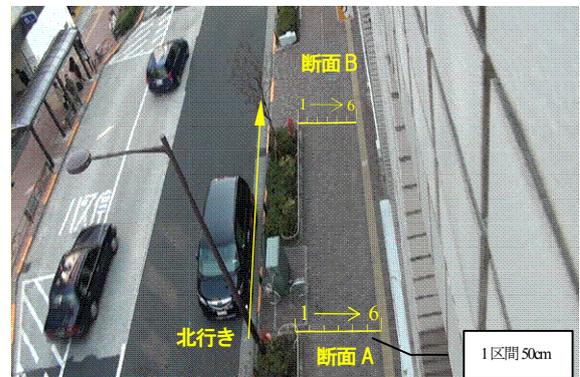


図-13 通行位置の区間設定 (11m高さ)

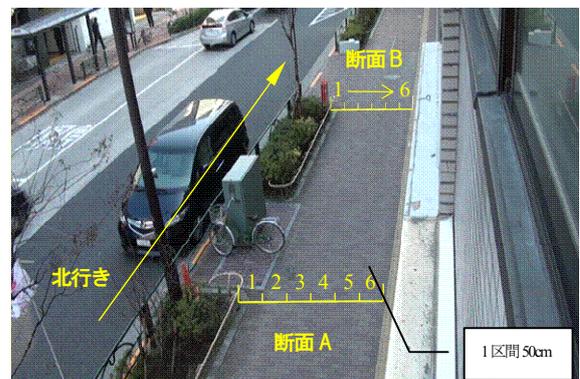


図-14 通行位置の区間設定 (5.5m高さ)

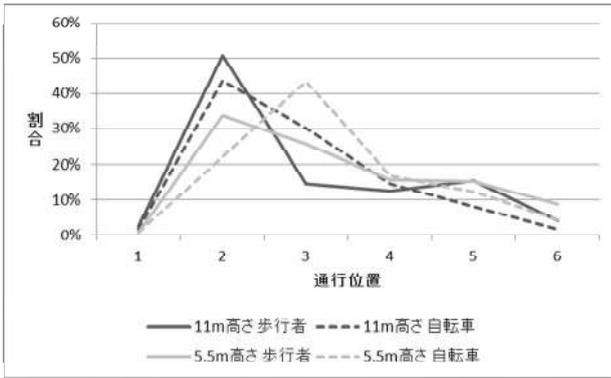


図-15 画像処理による北行き（断面A）の通行位置

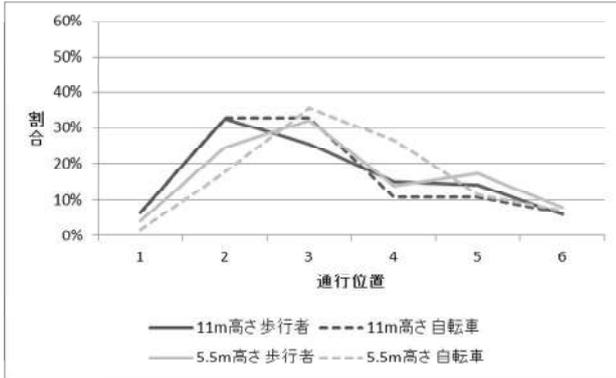


図-17 画像処理による北行き（断面B）の通行位置

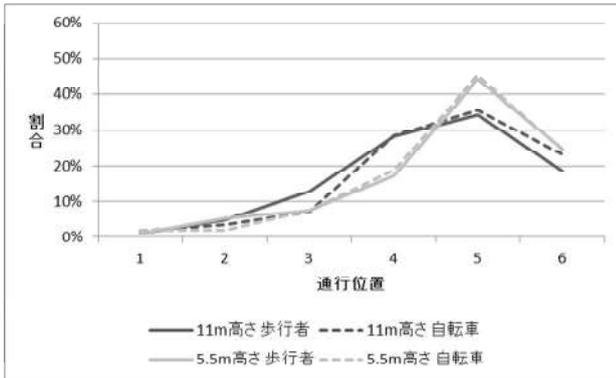


図-18 画像処理による南行き（断面A）の通行位置

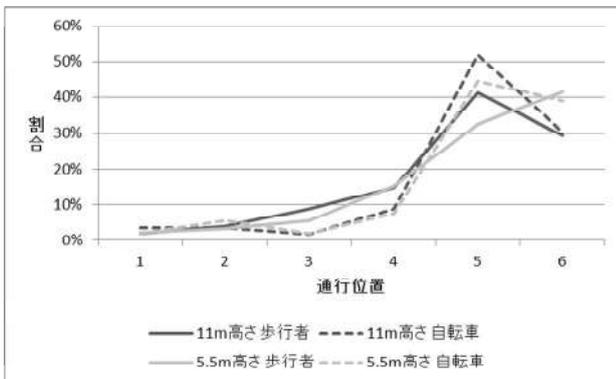


図-19 画像処理による南行き（断面B）の通行位置

(2)密度

自転車1台を歩行者2.56人と換算し、1分間の歩行者換算存在密度を求めた<sup>3)</sup>。画像処理による結果と、目視に

よる計測結果を比較したものは表4である。目視による歩行者換算存在密度4.09人/100㎡に対し、11m高さの結果が3.84人/100㎡、5.5m高さの結果が3.80人/100㎡となり、ともに精度は高い結果となった。

表-4 画像処理による歩行者換算存在密度（人/100㎡）

目視交通量より換算	画像処理結果（11m高さ）	画像処理結果（5.5m高さ）
4.09	3.84	3.80

歩行者換算密度の精度を検証するため、目視と画像処理の散布図を図-20、図-21に示した。これらの図によると、ともに精度が良いと言える。また、RMS誤差は、11m高さでは13.1%に対し、5.5m高さでは13.5%と同程度となった。

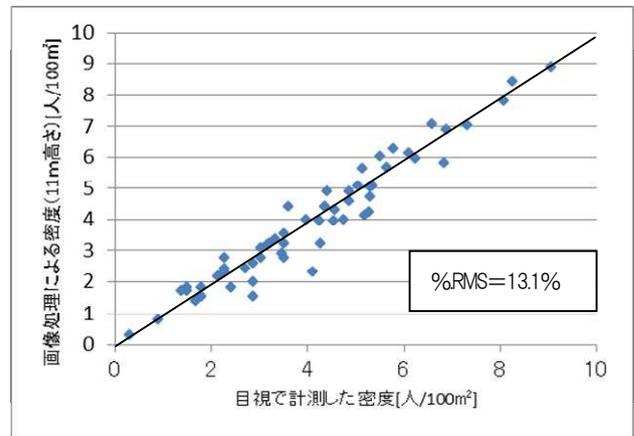


図-20 歩行者換算存在密度の比較（目視・11m高さ）

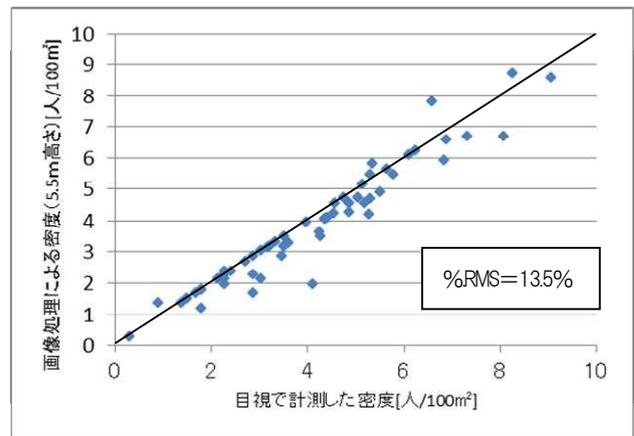


図-21 歩行者換算存在密度の比較（目視・5.5m高さ）

(3)速度

2断面の通過時刻を抽出し、10mの区間を通過する際の自転車・歩行者の区間速度を算出した。

画像処理による自転車・歩行者の区間平均速度を表-5に示す。自転車の速度および歩行速度が5.5m高さで11m高さで近い値となった。

表-5 画像処理による区間平均速度

区分	画像処理結果 (11m高さ)	画像処理結果 (5.5m高さ)
自転車	4.29	4.31
歩行者	1.39	1.40

1分間の自転車・歩行者の速度分布について、11m高さ  
と5.5m高さのものを比較したものを図-22、図-23のとおり  
である。これらの図によると、11m高さ  
と5.5m高さの分布形状は概ね一致している。

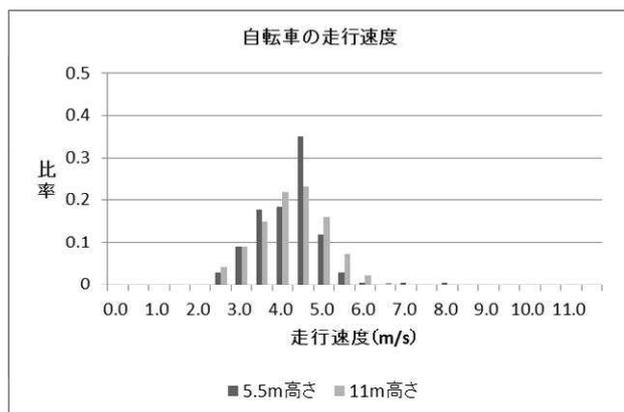


図-22 自転車速度の比較 (11m高さ・5.5m高さ)

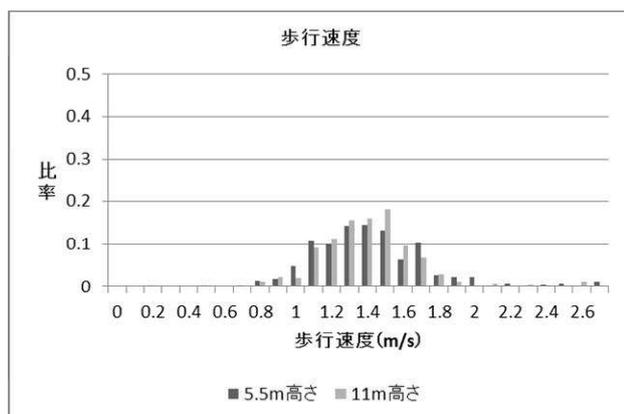


図-23 歩行速度の比較 (11m高さ・5.5m高さ)

(4)錯綜挙動

軌跡データの座標から、自転車・歩行者の最接近距離  
を解析した。この距離は、歩行者・自転車の中心間距離  
である。図-24のような対向方向の接近した状況を「す  
れ違い」、図-25のような同一方向の接近した状況を  
「追越し」と定義し、最接近距離を分類した。1時間に  
発生した自転車・歩行者のすれ違いおよび追越しの抽出  
回数は表-6のとおりである。同表のとおり、11m高さ  
に対し、5.5m高さの抽出回数は同程度となった。

歩行者・自転車のすれ違いおよび追越しのときの最接  
近距離について累積頻度で示したものを図-26、図-27に  
示した。これらの図によると、すれ違いおよび追越し時  
の最接近距離の分布の形状は概ね一致している。

山中ら<sup>4)</sup>は、すれ違いおよび追越し時の危険認知距離  
とし、すれ違い時は1.25m、追越し時は自転車視点と歩  
行者視点で違いがあり、自転車視点では1.25m、歩行者  
視点では1.50mとなり、これを下回るとき不快感が生じ  
るとしている。この解析結果をこれに当てはめると、す  
れ違いの際に約8割が不快な距離となる。また、追越し  
の際には、自転車視点では7割、歩行者視点では9割が  
不快な距離となっていることがわかる。

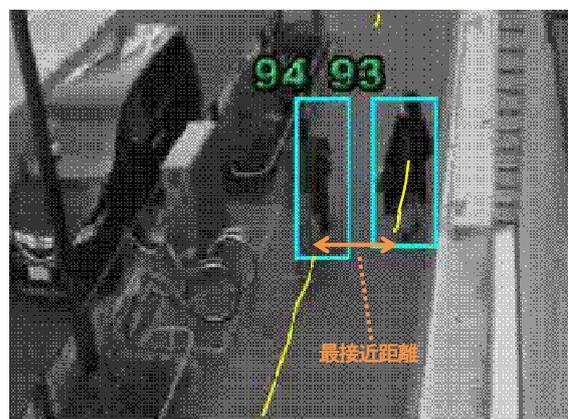


図-24 すれ違いの例

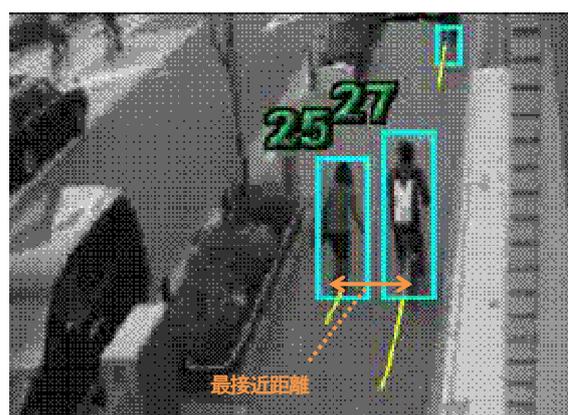


図-25 追越しの例

表-6 画像処理によるすれ違い・追越し抽出回数

区分	画像処理結果 (11m高さ)	画像処理結果 (5.5m高さ)
すれ違い	116	104
追越し	94	94

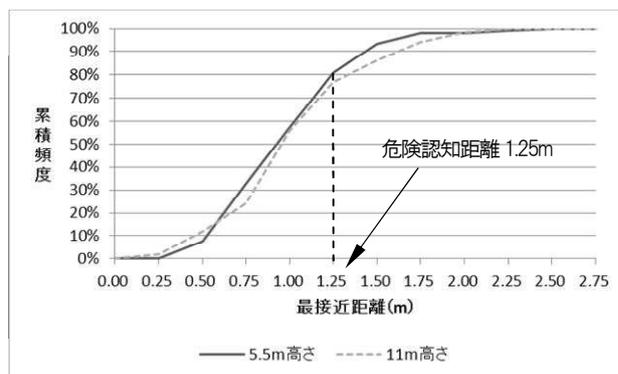


図-26 すれ違い時の最接近距離の累積頻度

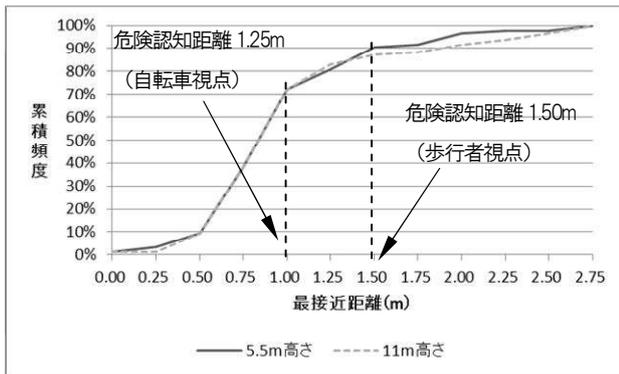


図-27 追越し時の最接近距離の累積頻度

## 5. おわりに

本稿では、画像解析する上で理想的な真上からの画角（地上11m）と、歩道橋との比較的調査のしやすい画角（地上5.5m）の2パターンでビデオ調査を実施し、得られた映像をもとに時空間MRFを用いて画像処理した。この結果を基に撮影パターン別に自転車と歩行者の交通量、密度、速度、走行軌跡等の自転車走行環境の評価指標を解析し、その精度の違い等を分析した。その結果以下のことが得られた。

(a)画像処理による交通量、密度の計測結果は、真値に対し9割以上の精度であった。また、5.5m高さからと11m高さで、同程度の結果が得られた。

(b)画像処理による走行速度、錯綜挙動、通行位置の計測結果は、5m高さからと11m高さで、同程度の結果が得られた。

上記より、11m高さと5.5m高さの結果を比較すると、歩道を俯瞰できる11m高さのほうが精度は若干良いが、5.5m高さでもその精度はほとんど変わらず、実用可能な精度を確保できていると言える。

これにより、自転車と歩行者の危険度やサービスレベル等の詳細な状態を評価するような場合において、高い建物やビデオカメラを設置できる高い構造物がなくても、歩道橋の上からの映像や大型の三脚(ポール等)を用いた映像等を取得さえできれば、比較的容易に様々な評価指標を解析できることになる。

また、自転車や歩行者の走行軌跡が必要な評価指標は、目視で計測するためには数日かかるものが、画像処理を活用することで、ほぼ自動的に結果を出力することが可能となるため、効率的に精度よく解析することができる。

今後は更に以下のような点について研究を進めていきたい。

(a)今回の調査・解析手法を様々な場所で利用し、その適用性や課題を確認し、データを蓄積していく。

(b)画像ならではの長時間観測・分析による歩行者・自転車の利用特性の日別や天候別変化の分析

(c)更に調査環境の厳しい状態（例えば3m高さ等）での精度と適用性の確認

## 参考文献

- 1) 上條俊介, 松下康之, 池内克史, 坂内正夫: 時空間 Markov Random Filed モデルによる隠れにロバストな車両トラッキング, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II No.12, pp2597-2609, 2000年12月
- 2) 諸田恵士他: 自転車と歩行者の混在状況下における通行快適性に関する調査, 土木計画学研究・講演集, 2008
- 3) 山中英生: 第82回交通工学講習会資料, 2008.
- 4) 阿部宏史他: 岡山市内国道53号の自転車道利用促進に向けた交通社会実験, 土木計画学研究・講演集, 2008.
- 5) 山中英生他: 交通工学ハンドブック 2005, 3.5 自転車交通の特性, CD-ROM, 2008.
- 6) 山中英生: 自転車走行速度に着目した歩行者・自転車混合交通の評価基準, 土木計画学研究・論文集 Vol.18, No.3
- 7) 大脇鉄也他: シミュレーションを活用した歩行者自転車混合交通の分離必要度の評価, 土木計画学研究・講演集 2009年春
- 8) 竹之内篤, 河村成人, 大脇鉄也, 濱本敬治, 上坂克巳: 歩行者・自転車マイクロシミュレーションの現況再現性の検証に関する一考察, 土木計画学研究・講演集 Vol.41 CD-ROM
- 9) 小川圭一: 自転車・歩行者交通の錯綜評価, 土木学会土木計画学研究委員会 ワンディセミナー No.53, 2009.
- 10) 山中英生, 半田佳孝, 宮城祐貴: ニアミス指標による自転車歩行者混合交通の評価法とサービスレベルの提案, 土木学会論文集, Vol.IV-730, No. IV-59, pp.27-38, 2003.4