

歩行空間移動支援システムのための実走行データ分析に基づく走行環境評価手法の開発

Driving Environment Evaluation Method for Personal Mobility Device in
Pedestrian Space Based on User's Driving Data

○ 石川貴久（東京大院） 吉武宏（東京大院） 小竹元基（東京大院）

Takahisa ISHIKAWA, The University of Tokyo
Hiroshi YOSHITAKE, The University of Tokyo
Motoki SHINO, The University of Tokyo

Abstract: To prevent fall accident that occur when elders use mobility devices in pedestrian space, a driving assistance system is required. The objective of this research is to clarify the requirements for such system and to propose a driving assist system with the requirements. First, we extracted environmental elements which causes fall accident from mobility scooter's drive recorders and recorded the driving environment and user's operation. Among the environmental elements, we especially focused uneven roads which cause failure in prospecting vehicle motion for users. We propose a driving fall risk evaluation method based on prospecting vehicle motion at prospective waypoint by calculating positions of the wheels using an elevation map. This method was verified by a mobility scooter equipped with a tilted laser range finder and internal measurement unit. We verified the effectiveness of the proposed method in uneven road by experiment.

Key Words: Mobility scooter, Fall accident, Uneven road, Elders, Safety

1. はじめに

少子高齢化に伴い、身体機能の低下した高齢者の移動支援機器の重要性が高まっている。現在最も広く使用されている移動支援機器にハンドル形電動車いすがある。ハンドル形電動車いす搭乗中の事故として、自動車との衝突などの交通事故や、転倒、転落などの単独事故が発生している。そのため、事故防止を目的とした運転支援システムが必要と考えられるが、過剰な支援はユーザである高齢者の環境への注意力を低下させ⁽¹⁾、認知機能低下や外出意欲の低下に繋がる可能性がある。

歩行空間における移動支援機器使用中の安全を確保しながらも、ユーザが最大限自立的に操作判断を行うための運転支援システムの構築が本研究の目的である。本稿ではハンドル形電動車いすの使用環境についてドライブレコーダ映像を分析した結果に基づき、転倒、転落などの単独事故を防ぐために必要な機能を検討し、転倒転落リスクを評価するアルゴリズムを提案し、実験機を用いた評価を行った。

2. 実走行データの分析

2.1 実走行データの取得

ハンドル形電動車いすが使用される環境において、車両の転倒転落の要因となりうる環境要素を抽出するため、実走行データの取得を行った。実走行データは、ハンドル形電動車いす走行時の前方環境、手元、顔周りを車両に取り付けた四台のカメラにより映像として取得した。被験者は7県に在住する、78~90歳の日常的にハンドル形電動車いすを使用しているユーザ9名であり、データ取得期間は1~3週間とした。

2.2 実走行データに基づく環境要素の抽出

ドライブレコーダに記録された走行環境の映像から、車両の姿勢と慣性力により転倒する可能性がある領域と、車輪を踏み外すことで転落する可能性がある領域に接近して走行するシーンを97件抽出した。その一例として、左側に急斜面、右側に側溝が存在するカーブを直進するシーンを図1に示す。

先行研究⁽²⁾では、走行環境から事故につながる可能性の

ある要素(ハザード)を見つけ出すハザード知覚、ハザードの持つリスクを見積もるリスク知覚、そのリスクと自己技能の評価を基に行う操作、操作の結果車両に生じる運動が変化するハンドル形電動車いすの運転行動過程モデルが提案されている。本研究で、事故発生の過程に影響を与える可能性のある環境要素を抽出するため、運転行動過程モデルに基づき、各シーンにおける事故発生までの過程を検討した。一例として図1のシーンにおける分析を図2に示す。



Fig. 1 Driving environment in driving data

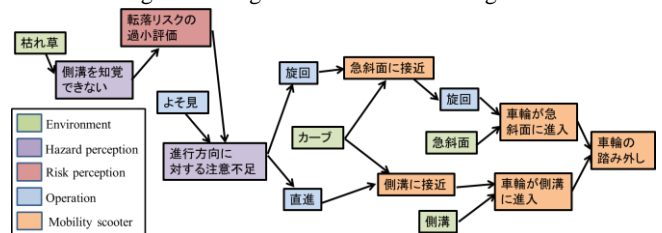


Fig. 2 Investigation result of accident process

事故発生過程に影響する環境要素の抽出と分類を行った結果を表1に示す。

2.2 抽出した環境要素に基づく運転支援システムの要求機能の検討

抽出した環境要素は車両の転倒、転落事故に繋がる可能性があるため、表1に示した要素をセンシングし、センシングした結果を基に情報支援や制動支援を行えることが運転支援システムの要求機能となる。抽出した環境要素の中には、センシングと支援の手法がすでに先行研究で検討されている要素がある。「衝突リスクへの注意の偏り」は衝突回避に関する研究として、レーザレンジファインダ(LRF)

Table 1 Environmental elements extracted from driving recorder

影響を受ける過程	作用	環境要素
ハザード知覚	転倒，転落領域の遮蔽	草，枯れ草
		木
リスク知覚	リスク知覚難度の上昇	照明
	衝突リスクへの注意の偏り	連続的に変化する傾斜
		自動車
操作	操作判断難度の上昇	歩行者
		壁，盛り土
	操舵難度の上昇	カーブ
		交差路
		荒れた路面
		落ち葉
車両	車輪の踏み外し	上り坂
		下り坂
		傾斜
		側溝
	車両のロール方向への傾き	用水路
		階段
		崖
		急斜面
		穴
		傾斜
		急な下り坂

で得られたデータから歩行者などの位置と速度を算出し，衝突を回避する支援が数多く提案されている⁽³⁾。また「操舵難度の上昇」に関係する傾斜のある路面や，摩擦の小さい路面の影響で車両のコントロールが難しくなる状況への対策としては，制御で直進安定性を高める取り組みや，路面の状態をカメラやレーザなどの情報から推定する取り組みがなされている。

「車輪の踏み外し」に関しては，段差の高さを推定し，閾値以上の高さの段差をハザードとして検出する取り組みが数多く行われている。一例としては段差の検出に全方向ステレオカメラを用いる研究⁽⁴⁾が挙げられ，下り段差の推定に関する検討が行われている。しかし，それらの研究では都市部の舗装された道路に存在するハザードへの適用に主眼が置かれ，ハンドル形電動車いすの走行する環境に存在する，農道脇の急斜面やうねりのある未舗装道路など連続的に変化する傾斜へは適用できず，「車両のロール方向への傾き」を生じさせる要素にも適用できない。また，そういった形状の路面は走行する際の車両挙動の予測が難しく，「リスク知覚難度を上昇」させる要素であるとも言える。

「転倒，転落領域の遮蔽」をする要素として，側溝を覆う草などが頻繁に見られた。ハザード知覚が不適である場合，操作行動も不適となるため，草のある環境でもハザードを検出することが必要だと考えられる。

本研究では，既存研究で十分に検討されていない「車輪の踏み外し」，「転倒，転落領域の遮蔽」のうち，事故の直接の原因となりうる前者の要素が存在することで生じるリスクに着目し，連続的に傾斜が変化する路面において適用可能な転倒転落リスク評価を行う手法を提案する。

3. 転倒転落リスク評価アルゴリズム

転落は車輪を踏み外すことで車両の姿勢角度が閾値を越えた状態，転倒は車両の慣性により車両の Zero Moment Point(以後 ZMP)が車輪支持多角形の外に出た状態と定義する。将来の車両の転倒，転落の判別には，傾斜角度が変化する環境で将来の車両の姿勢角度を予測する必要がある。

そのため本研究で提案する転倒転落リスク評価手法としては，現在の挙動から将来車両が通過する点を予測し，その通過点上での車両の姿勢角度と ZMP 位置を，センサにより取得した路面形状情報を基に計算できる四輪の相対位置関係から算出することで，通過点における転倒，転落を判定する。転倒，転落が生じる通過点に到達する時間を Time to Fall Incident(以後 TTFI)とし，TTFIの逆数をリスク評価値とする。

3.1 予測通過点の生成

時刻 t におけるの車両位置，速度，操舵角度から，将来車両が通過する軌跡を離散的に表した予測通過点を生成する。ユーザが操作している状態が前提であるため，軌跡を予測する際にユーザの操舵による操舵角度変化を考慮する。

車両の原点は左右後輪の中心とし，車両原点座標の移動は図 3 に示す車両の等価二輪モデルから導出される式(1)の遷移方程式により表すことができると仮定した。また各変数の定義を表 2 に示す。

$$\begin{bmatrix} x_{t+\Delta t} \\ y_{t+\Delta t} \\ z_{t+\Delta t} \\ \psi_{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ \psi_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_t) \cos(\psi_t) \\ \cos(\varphi_t) \sin(\psi_t) + \sin(\theta_t) \sin(\varphi_t) \cos(\psi_t) \\ \sin(\varphi_t) \sin(\psi_t) - \cos(\theta_t) \sin(\varphi_t) \cos(\psi_t) \\ \frac{\tan(\alpha)}{L} \end{bmatrix} v \Delta t \quad (1)$$

車両速度は現在の速度が維持されると仮定し，操舵角度が変化することを考慮し，操舵角度 $\alpha_t \pm \Delta\alpha$ を i 個に分割し，時間 $t + \Delta t \cdot j$ の時の離散化された予測通過点における車両状態 $\vec{P}_{ij} = [x_{ij}, y_{ij}, \psi_{ij}]$ を生成する。

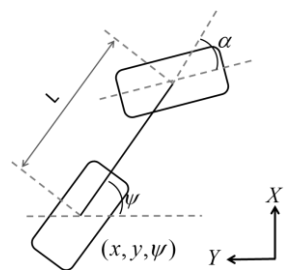


Fig. 3 Equivalent two wheels model for scooter

Table 2 Definition of variables

x	x position
y	y position
z	z position
θ	roll angle
φ	pitch angle
ψ	yaw angle
α	front steer angle
L	wheelbase

3.2 転倒転落判定

各予測通過点における転倒，転落の判定を行う。まず，ある予測通過点における四つの車輪の xy 座標をそれぞれ計算する。計算された各タイヤの xy 座標におけるタイヤ接地時高さを，格子状に区切られた二次元平面の各領域に対し高さが記録された Elevation Map を基に図 4 に示すように算出する。

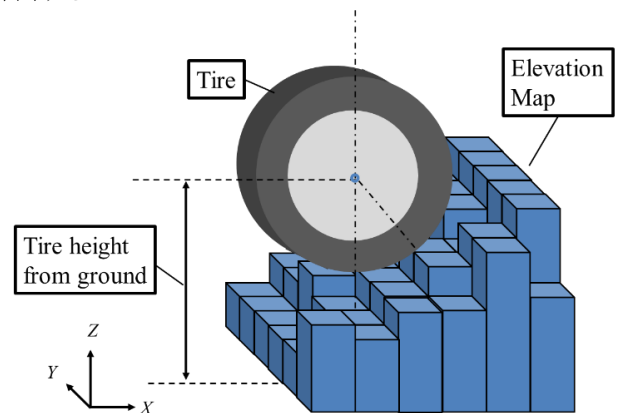


Fig. 4 Tire height from ground

次に，各タイヤの xy 座標と接地時高さから，車両のピッチ角度とロール角度をそれぞれ，図 5 に示す三次元ベクトル \vec{a}, \vec{b} を用いて式(2),式(3)のように近似的に求める。

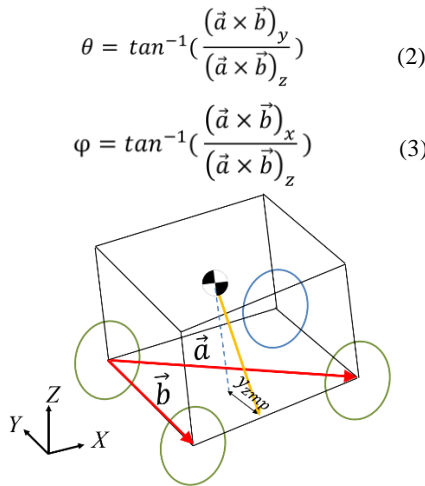


Fig. 5 Illustration of vectors for vehicle angle calculation and ZMP

ZMP 位置の導出はロール方向に対して行う．ZMP は式(4)により計算する．

$$y_{zmp} = h \tan\left(\theta + \frac{v^2 \sin \alpha}{gL}\right) \quad (4)$$

計算した車両のロール角度，ピッチ角度のいずれかが閾値を超えた場合に転落，ZMP 位置が車両のトレッドを超えた場合に転倒すると判定する．

3.3 TTFI の導出

転倒転落すると判定された予測通過点の中で，到達所要時間が最も短い時間を TTFI とする．図 6 に提案アルゴリズムのフローチャートを示す．

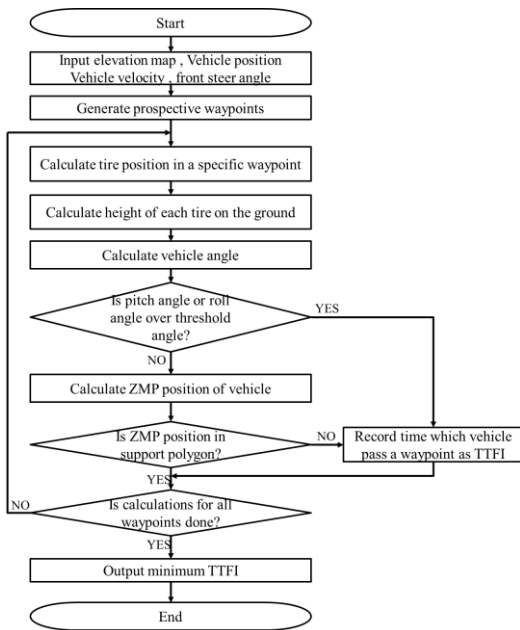


Fig. 6 Flow chart of TTFI calculation

4. 転倒転落リスク評価アルゴリズムの実装

4.1 実験装置

提案した転倒転落リスク評価手法の妥当性を評価するため，図 7 に示す，進行方向斜め下向きの LRF と，9 軸 IMU センサを搭載し，車両の CAN 情報から速度，操舵角度を取得できるハンドル形電動車いすの実験機を製作した．また表 3 に各センサの仕様を示す．LRF は平坦路で 1.5 m 前方の路面形状が取得できるように路面からの高さ 680 mm，24° の設置角度で設置した．

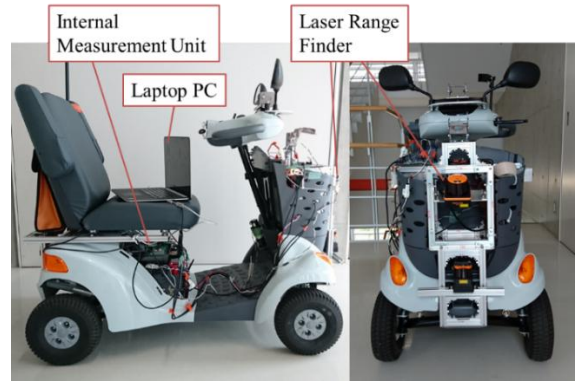


Fig. 7 Experimental equipment
Table 3 Specification of sensors

Sensor	Model	Sensing Data	Range	Resolution
LRF	HOKUYO UHG-08LX	angle	±135 [deg]	0.36 [deg]
		distance	0.02~8 [m]	30 [mm]
IMU	RT-USB -9axisIMU	acceleration	±16 [g]	16 [bit]
		angular velocity	±2000 [deg/sec]	16 [bit]
CAN	SUZUKI ET4D7	vehicle velocity		0.01 [km/h]
		steer angle	±90 [deg]	0.1 [deg]

4.2 Elevation Map の作成

接地車輪高さを求めるために使用する Elevation Map を得る方法としてステレオカメラによる手法⁶⁾があるが，ステレオカメラによる三次元計測はマッチング処理に時間がかかることや，光の反射に対して安定して計測が行えないことがある．そのため，本研究では高速で正確な距離データが得られる LRF を用いる．ただし LRF は 2 次元の面での計測しか行えないため，車両の移動量からセンサの位置を推定し，時系列データを蓄積することにより，3 次元の路面形状を取得することとした．車両の移動量は CAN 情報から得られる車両速度と操舵角度から車両モデルを基にデッドレコニングの手法で求める．また，車両の姿勢角度を IMU から得られた加速度，角速度の値から推定し，車両モデルのロール角度，ピッチ角度を補正する．実験で用いた Elevation Map の格子はタイヤ厚さの 80 mm に対して十分小さい 30 mm とした．

5. 提案アルゴリズムの評価

5.1 車両姿勢角度予測の精度検証

本研究で提案したリスク評価では将来の車両姿勢角度を算出することが特に重要である．そこで，屋外環境における車両姿勢角度予測値と実測値を比較することで精度を評価する実験を行った．図 8 に示す下り傾斜を 2 km/h で走行した．

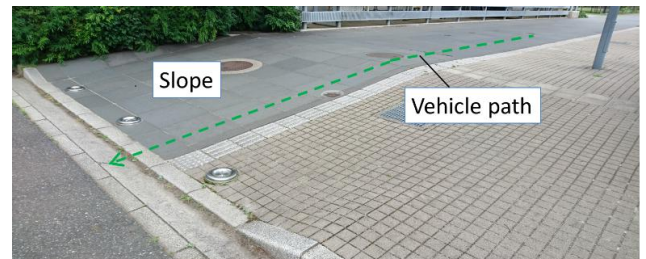


Fig. 8 Experimental scene 1: Slope

図 9 に示したグラフは，傾斜に進入する直前の車両ピッチ角度予測値の推移と，IMU から得たピッチ角度実測値の推移を比較したグラフである．LRF で取得できる 1.5 m までの車両ピッチ角度の予測値と，ピッチ角度の実測値と

の誤差は 1° 程度であり， 1° の誤差であれば ZMP を算出する際の誤差が 0.01 m 程度に収まり，十分な精度であると言える。

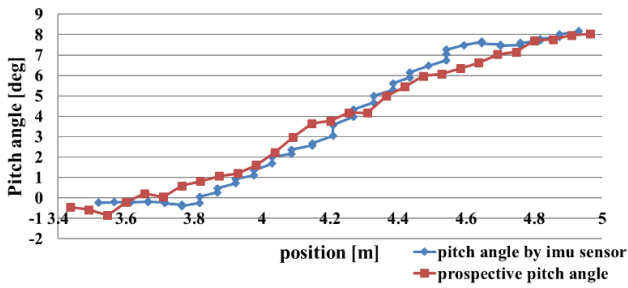


Fig. 9 Comparison of predicted and measured vehicle angle

5.2 転倒転落リスク評価の妥当性評価

本研究で提案した転倒転落リスク評価により，定性的に妥当なリスク評価値が得られることを実験により評価する。実験環境は屋外の，図 10 に示す左側に高さが増える下り段差がある場所であり，LRF のデータから得られた，座標による段差高さの変化を図 11 に示す。最大で 0.2 m 程度の高さであり，これはタイヤ半径の 0.13 m よりも大きく，操舵角度によっては転落するリスクがある環境である。この環境において下り段差の高さの変化に応じてリスク評価値が変化することを示す。実験では車両速度 1 m/s の直進走行を行い，取りうる操舵角度は $\pm 20^\circ$ とした。上記の条件で走行した際に得られた $1/TTFI$ で表されるリスク評価値と車両の x 座標の関係を図 12 に示す。

得られた結果から， $x = 10$ m 付近でリスク評価値が大きくなるのがわかる。これは左側の下り段差が徐々に高くなる路面形状であるため， $x = 10$ m 付近で転落に至る程度の高さになり，そのすぐ脇を走行することはリスクが高いと判定されたためである。また $x = 15$ m 以降は再び段差の高さは低くなるため，リスク評価値が下がっている。

$x = 21$ m 以降でリスク評価値が高くなった要因は路面が下りから水平に移行する位置であり，LRF が 1.0 m 程度先の路面形状しか取得できなかったことが原因であると考えられる。また，LRF の取り付け位置の関係で 1.5 m 先の路面形状までしか取得できないため，1 m/s で走行した場合 1.5 秒以上先の転倒転落判定ができない。Elevation Map の取得範囲に関しては，実用上どの範囲が適切かを検討する必要がある。



Fig. 10 Experimental scene 2: Sidewalk

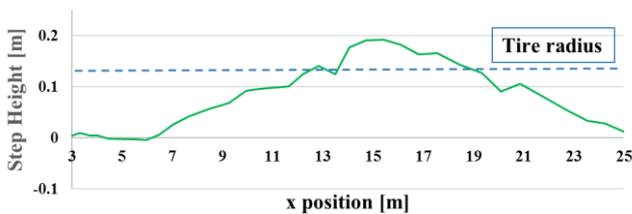


Fig. 11 Side step height

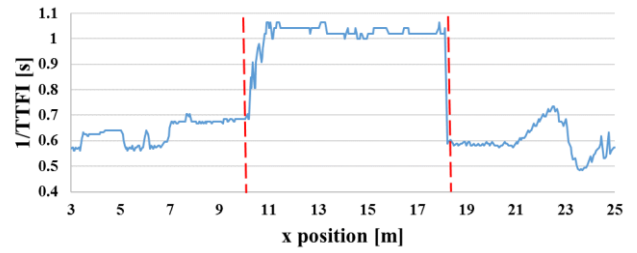


Fig. 12 Transition of fall risk

6. まとめ

高齢者が日常的にハンドル形電動車いすを使用する環境の中で，転倒転落事故の防止を目指し，運転行動過程に基づき転倒転落に至る環境要素を抽出した。抽出した環境要素の内，事故の要因となり得る「車輪の踏み外し」に着目し，転倒転落に至るまでの時間の判断を危険に対する状況判断として考え，それを環境状況から算出するアルゴリズムの検討を行った結果，以下に示す知見を得た。

- ・路面形状情報と将来の車両挙動予測を用いた転倒転落に至るまでの時間を走行環境におけるリスクとして算出するアルゴリズムを提案した。
- ・上記のアルゴリズムを評価可能な LRF を搭載した実験車両を開発した。
- ・段差の高さが連続的に変化する屋外環境において，上記のアルゴリズムを適用した結果，定性的な傾向を確認することができた。

したがって，本手法を用いることにより，将来走行する環境に対するリスク評価値を算出することができ，リスク評価値に基づいた支援を行うことで，事故を防止できる可能性がある。

今後は，農道や草地における適用を目指し，それらの路面での転倒転落に至るリスク評価が可能なアルゴリズムの検討を行う。

謝辞

本研究はスズキ財団の助成により行われ，スズキ(株)次世代車両開発部の皆様には実験車両の整備をはじめとして様々なご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- (1) Kaber, David B, and Mica R. Endsley. "The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task." *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 5.2 ,113-153,2004.
- (2) 小竹,井上ら.高齢者の安全な移動を目指したハンドル形電動車いすの運転特性の把握.生活生命支援医療機器福祉工学会連合大会2010講演論文集.p220-224,2010
- (3) Prassler, Erwin,and Jens Scholz. "A robotics wheelchair for crowded public environment." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 8.1 ,p38-45,2001.
- (4) Satoh, Yutaka, and Katsuhiko Sakaue. Development of omni-directional stereo vision-based intelligent electric wheelchair. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). Vol. 4. p799-804, 2006.
- (5) ONIGA, Florin, et al. Road surface and obstacle detection based on elevation maps from dense stereo. In: 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. p.859-865,2007