Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

傾斜角に着目した自転車運転の分析・評価手法

織邊 大輝[1]　梶原 彩音[2]　金田重郎[1,a)]

概要：自転車は日常的に利用されている交通手段である．しかし，意外にも，「どのような運転をする人の運転が安定しているのか」は分析されていない．著者らは，既に，走行軌跡から計算した曲率中心軌跡を用いた自転車運転の可視化手法を提案している．この既存手法は，車体に装着した 9 軸モーションセンサ 1 台で計測できる利点があり，この既存手法を用いると，レントゲン写真の様に，視覚的に運転安定度を観察できる．しかし，車体からの情報だけでは，運転スキルの分析には不十分であった．その理由は，2 輪車の場合，車体を安定させているのは，運転者によるハンドル操作ではなく，運転者が体を左右へ傾斜させて，車体のバランスを保っている要素が強いためと思われる．本稿では，この問題を回避するため，2 台の 9 軸モーションセンサを用いた，自転車挙動の分析方法を提案する．センサ情報から，(1) 車体の左右の傾斜と，(2) 運転者の体の左右の傾斜，を求め，これから運転の安定性を評価する．学生 15 名を被験者とする評価実験を行った結果，体重移動を使って左右の自転車のバランスを維持するグループと，ハンドルを併用してバランスを取るグループに区別されることを見出した．機械学習を併用した運転安定性の評価の結果，自転車の安定性を担保するには，体重移動を通じて，素早く自転車の左右の傾斜を抑え込むスキルを身に着けることが望ましいと判断される．

Proposal of Analysis and Evaluation Method of Bicycle Driving Ability based on Tilt Angle

1. はじめに

自転車は多くの方が利用している日常的交通手段である．しかし，意外にも，「どのような運転をする人が安定しているのか」は論じられていない．子どもの頃に，初めて自転車の練習をした際には，「倒れそうになったらそちらへハンドルを切れ！」みたいな「操縦法」を習う．そして，自分でも何故に乗れるようになったかが分からないままに，自転車に乗れる様になる．そのまま成長しても，自分の自転車操縦の安定性などは考えない．しかし，転倒事故等のことを考えれば，どのような運転をすれば安定なのかは知りたいところである．

この様な問題意識のもと，著者らは，自転車の走行軌跡から得た曲率中心軌跡を用いた自転車運転の可視化手法を既に提案している [1][2][3][4][5][6][7][8][9]．この既存手法は，車体に取り付けた 1 台の 9 軸モーションセンサで計測でき，スマートフォンのセンサーでも測定できる．しかし，車体の走行軌跡のみからでは，運転スキルの定量化は不十分であった．

そこで，本稿では．自転車運転では，運転者の体の左右への傾斜が重要であるとの問題意識から，2 台の 9 軸モーションセンサを用いた，自転車挙動の分析方法を提案する．1 台は運転者の体の左右の傾斜を測定し，もう 1 台は，車体の左右の傾斜を測定する．自転車等の 2 輪車では，体の重心を左右に移動させて車体を傾斜させ，セルフステア効果により運転していると考えられるからである．

学生 15 人による評価実験を行った結果，全体的傾向として，身体を左右に傾斜させてバランスを維持するグループと，ハンドルを併用してバランスを取るグループに区別された．機械学習による分析の結果，安定した自転車運転を実現するためには，自転車の左右の傾斜を，身体の傾斜を使って素早く制御するスキルを身に着けることが望ましいと判断された．

以下，第 2 章では，従来技術である曲率中心軌跡を用いた可視化手法について述べる．第 3 章では，身体と車体の

[1] 同志社大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University
[2] 同志社大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Doshisha University
[a)] skaneda@mail.doshisha.ac.jp

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

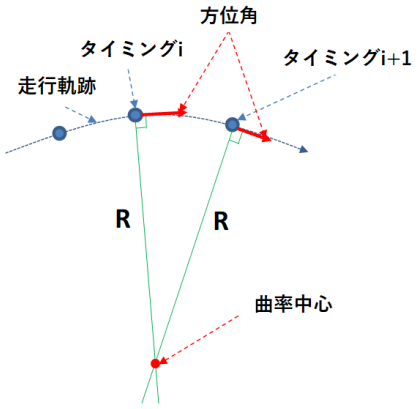


図 1　曲率中心の計算方法

2 つの左右傾斜角を測定する必然性について説明する．第 4 章では，提案手法の概要を示し，第 5 章は実験内容と結果を論じる．第 6 章はまとめである．

2. 曲率中心軌跡法

本章では，著者らの既存研究である走行軌跡に基づく曲率中心軌跡をもちいた自転車挙動の可視化手法について紹介する．

2.1 曲率中心軌跡法の原理

走行軌跡に基づく曲率中心軌跡法は，以下のステップを踏む．

(1) 何等かの方法で，自転車の水平方向の走行軌跡を得る．結果は，水平 2 次元平面上に描く．ただし，走行軌跡と言っても，センサ信号はサンプリング周期を持つので，そのサンプリング周期 (今回は 20ms) 毎の離散値である．

(2) 上記走行軌跡のサンプリングタイミング毎に，走行軌跡に直角の直線を引く．図 1 に示すように，着目しているサンプリングポイントが i 番目とすると，i 番目と $i+1$ 番目から出る走行軌跡[*1]に対する 2 本の垂線が交わる点である「曲率中心」を求める．これを，つぎつぎと繰り返して，曲率中心を同一水平 2 次元画面上にプロットしてゆく．ただし，走行軌跡から見て，予め定めた距離より遠くに曲率中心が出現する場合にはプロットしない[*2]．これを「曲率中心軌跡」と呼ぶ．

2.2 走行軌跡の導出

上記の最初のステップでは，自転車の走行軌跡を得る必要がある．高橋らの既存研究では，プローブ自転車から得た正確な車速，ハンドル操作角，9 軸モーションセンサによる自転車傾斜角に基づいて，自転車の運動方程式の近似解を用いて，走行軌跡を推定していた [1][8]．しかし，この方法では，特殊な自転車が必要となる．そこで，加藤らは，スマートフォンに搭載した 9 軸モーションセンサを用いて，近似的に，走行軌跡を求める方法を示した [4][6]．

スマートフォンの 9 軸センサは，ピッチ，ロール，ヨーの 3 種類の方向角を出力する．この中で，加藤らは，ヨー（アジマス）角に着目した．ヨー（アジマス）は，水平方向の方位角であるが，9 軸モーションセンサが搭載する 3 種類のセンサ（加速度，角速度，地磁気）の中で，地磁気センサのセンシング結果がほぼそのまま反映されており，誤差が小さいと判断したからである．これに対して，例えば，角速度センサは積分しないと方位に反映されない．これは，誤差の原因になると考えた．

具体的には，以下の様にして近似的に，走行軌跡を導出した．サンプリングタイミング i におけるヨー（アジマス）角を $\theta_i(i = 0, 1, 2, 3 \ldots, n-1)$ とする．(X, Y) の 2 次元座標軸上で，初期位置座標を $(0, 0)$ とするとき，自転車の位置 $(x_k, y_k)(k = 0, 1, 2, 3 \ldots, n-1)$ は，以下の式 (1) と (2) で計算できる．ただし δ_i は，タイミング i と $i+1$ の間に自転車が進む距離を示すが，加速度を積分した速度では誤差が多く乗ってしまうので，本手法では一定値である．以上の手法で導出する座標位置を結ぶことで疑似的な走行軌跡を導出出来る．

$$x_k = \sum_{i=0}^{k-1} \delta_i \times sin(\theta_i) \tag{1}$$

$$y_k = \sum_{i=0}^{k-1} \delta_i \times cos(\theta_i) \tag{2}$$

2.3 分析結果例

図 2，図 3 に直進時とスラロームコースにおける算出結果を示した．利用したセンサは，後述の本提案手法で用いたセンサである．図 2 では，自転車は下から出発し，上へ向かってほぼ直線的に走行している．曲率中心は，一定以上近づかないと図には反映されていない．図から分かるように，自転車は殆ど旋回することはなく直線的に進行し，たまに，ハンドルが切られて，自転車が旋回している[*3]．

一方，図 3 のスラロームコースでは様相は一変する．直進状態では基本的には曲率中心プロットは現れない．しかし，旋回を始めると，前方斜め右からプロットは出現し，急速に特定の一点（以下，「旋回目標」と呼ぶことにする）に接近する．正常に旋回している間，曲率中心は，この旋

[*1] 今回は，隣接する 2 つのサンプリングタイミングを直線で結んだ直線近似を用いている．

[*2] これは，遠い曲率中心までもすべて表示すると，2 次元画面が大きくなるからである．ただし，わずかな方向変化でも，その頻度は意味があり，後述の機械学習の為の属性としては，走行軌跡の方向変化の回数を利用する．

[*3] 曲率中心が現れない区間はハンドルを殆ど切っていないので安定に走行していることは分かる．しかし，何も現れていない区間で何が起こったのかが分からない．これが，既存手法の弱点のひとつである．

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

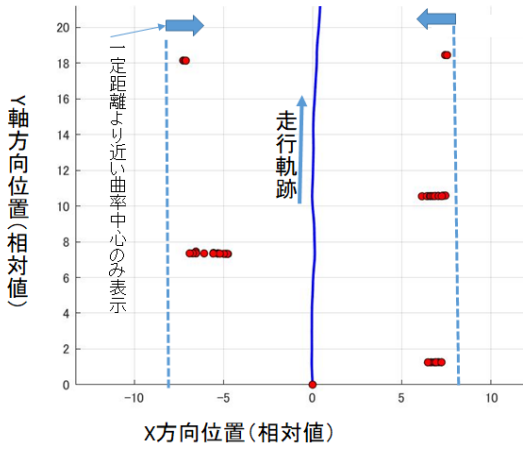


図 2　直進時の曲率中心算出結果の例（安定した直線走行）

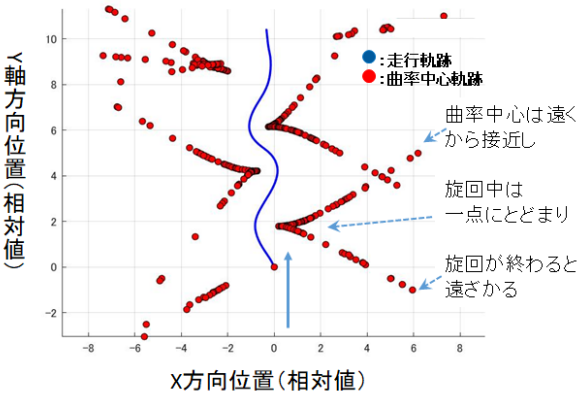


図 3　旋回時の曲率中心算出結果の例（スラローム）

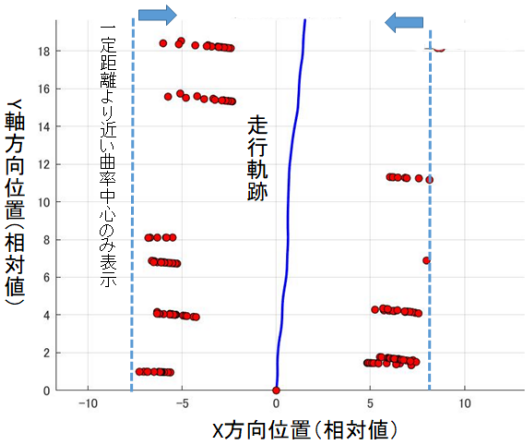


図 4　直進時の曲率中心算出結果の例（不安定な直線走行）

回目標にとどまり，自転車は方向を変え続ける．やがて，旋回が終わると，曲率中心は斜め後方に去ってゆく．

図 2，図 3 はいずれも，安定した走行の事例である．次節で紹介する様に，直進であっても，不安定な運転者では，曲率中心プロットの出現が多くなる（図 4）．スラロームコースの場合には，不安定な走行者では，V 字型のきれいな曲率中心軌跡は現れず，V 字型が一回の旋回で何度もでたり，形そのものが乱れる．従って，曲率中心軌跡を 2 次元平面上に表示することで，人間が見れば，運転者の安定性を理解できる．しかし，このままでは，運転者の運転特性（運転の「くせ」や良しあし）を抽出したとは言えず，更に，手法の改善が望まれる．尚，この曲率中心軌跡法は，本稿の提案手法でも組み込んで利用している．

3.　身体・自転車の傾斜角測定の必要性

本章では，なぜ，2 個の 9 軸モーションセンサを採用したのか理由を示す．

3.1　曲率中心軌跡法の限界

図 4 は，不安定な運転時の曲率中心のプロット結果である．図 2 と図 4 を見比べると，曲率中心軌跡法の効用は明らかである．直感的に，図 4 がふらつきが多いことが分かる．本稿では事例を示さないが，スラロームでも同様であり，不安定な運転者は，V 字型の曲率中心軌跡が乱れる．しかし，この状態では，不安定さは読み取れても，なぜ，そうなっているかが分からない．また，例えば，図 2 で，曲率中心のプロットが無い区間で何が起きているのか分からない．では，従来の車体の動きに追加して，何を測定するべきであろうか．

3.2　セルフステアの重要性

公開された資料は無いが，著者らの研究室では，自転車における片手運転と両手運転の相違分析を行った研究がある [11]．この研究では前述したプローブ自転車を用いて片手運転，両手運転のスラロームコース走行時の運転挙動をハンドル舵角と曲率中心軌跡に着目して分析を行った．片手運転では両手運転と違いハンドルがふらつくのではないかと予想していたが，ハンドル舵角と曲率中心軌跡に差を確認することはできなかった．

つまり，自転車の操舵は，腕で行っているというより，セルフステアによる操舵の占める割合が大きいと思われる．ここで，セルフステアとは，自転車を左右に傾斜させると，傾斜した方向に自然にハンドルが切れる現象である．この現象は，自動 2 輪車の運転時には運転者が意識している運転原理である．

しかし，直線走行時の分析結果（図 2）を見ると，長い区間にわたって，ハンドルが殆ど切られていない．「自転車が倒れそうになったら，倒れる側にハンドルを切る」との原理では動いていないことになる．一方で，旋回時（図 3）には，運転者は自転車の傾斜を制御し，セルフステアで旋回を開始する．旋回により生じる遠心力による引き起こしと，傾斜による自重の水平方向分力をバランスさせて運転していると考えられる*4．

*4　実際に本提案の測定システムの結果を見ると，ハンドルを切るとバランス状態に変化して旋回するのは大きく回る時のイメージである．スラロームコースなどでは，急速に体重をかけて倒れ込ん

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

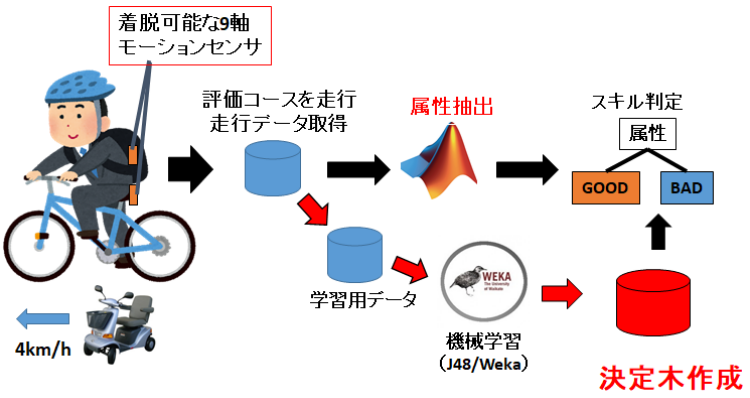


図 5　本提案の分析手法

3.3　身体傾斜角の重要性

以上の議論からも分かるように，自転車では，車体の傾斜とともに，体の傾斜が重要と思われる．このため，本稿では，車体と身体に 9 軸モーションセンサを取りつけて，自転車の安定性との関係を評価することとした．

ここで，安定性とは何かが問題となる．自転車の運転安定性を評価する手法はあまり知られていないが，自動 2 輪車の免許試験では，スラロームコースが以前から使われている．一方，2019 年に廃止されたが，JISD9203:1993 自転車走行安定性試験方法では，「試験は，一定の速度で両手放しで直進して安定度を測定し，また，安定の状況を調べる．助走区間 20m を速度 10km/h で走行した後，両手放しで幅 0.5m，距離 10m の測定区間を速度を維持しつつ直進走行したとき，輪跡の幅及びハンドルのふらつき，片切れの有無について行う。」としている．

上記の JISD9203 は，運転者の安定性ではなく，自転車自身の評価を目的としている様に思われる．安定性評価として，幅 50cm の直進コースからの逸脱を用いている．そこで，本稿でも，被験者に狭い直線コース上を走行してもらい，安定性をその狭いコースからの逸脱回数により評価することとする．利用するコースは，図 9 に写真で示した．幅 20cm，長さ 25m である．図 2，図 4 はその様な状況下での走行軌跡（縦横座標は相対値）である．

4.　提案手法

本稿では，9 軸モーションセンサにより取得できる車体と身体の傾斜角に着目した分析・評価方法を提案する．安定か不安定かは，既存手法である曲率中心軌跡法で直感的には観察できる．しかし，曲率中心軌跡法では，不安定・安定を決めている属性についての情報が得られないため，不安定とわかっても，解決する糸口が得られない．そこで，自転車運転能力を判別するモデルを作ることとする．モデルの表現には，決定木を利用する．

4.1　概要

図 5 には，本提案の測定・分析手法のブロック図を示す．被験者は，9 軸モーションセンサを車体と身体に装着し，幅 20cm，長さ 25m の評価コースを 4km/h で定速走行する．速度を維持するために，タウンカートを 4km/h で並走させ，運転者はタウンカートに合わせて速度設定する．自転車の前輪にはコース面を撮影するカメラを設置しており，これにより評価コースからの逸脱を数え（目視），運転の安定性とする．

本提案の測定・分析手法の利用は，大きく分けて 2 つのフェーズに分かれる．

決定木学習フェーズ　スキルを判定する決定木を作成するフェーズであり，安定度は動画記録からカウントする．センサから得られた幾つかの属性に基づいて，スキルを判別する決定木を作成する．決定木を用いたのは，（どの様な属性がどの様な値なら安定していると言った）可読性，及び部分構造の表現に優れていると判断したためである．

スキル判別フェーズ　得られた決定木に基づいて，運転者のスキルを判別する．このフェーズでは，評価コースからの逸脱を目視でカウントする必要はない．ただし，本稿では，このフェーズが適用できるかどうかを，決定木作成時のクロスバリデーションの性能で評価することとする．汎化性能が悪ければ，提案手法の実用性に疑問が生じる．

4.2　実装

図 9 に評価コースを示す．長さ 25m 幅 20cm の実験コースを低速走行する．評価の際，運転者は幅 20cm から逸脱しないように意識して走行してもらう．低速走行はバランス能力が必要となる．よって本研究では低速走行 (4km/h) で評価を行った．4km/h は事前に実験を行うことで算出し

でゆくことでセルフステアにより旋回に入る．しかし，バランス状態になる訳ではなく，敢えて小回りさせて，その遠心力で車体が引き起こされ，旋回が終了したタイミングでは，車体は直立している．この成立状態から，今度は逆に車体を傾けて，次の旋回に入る．

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

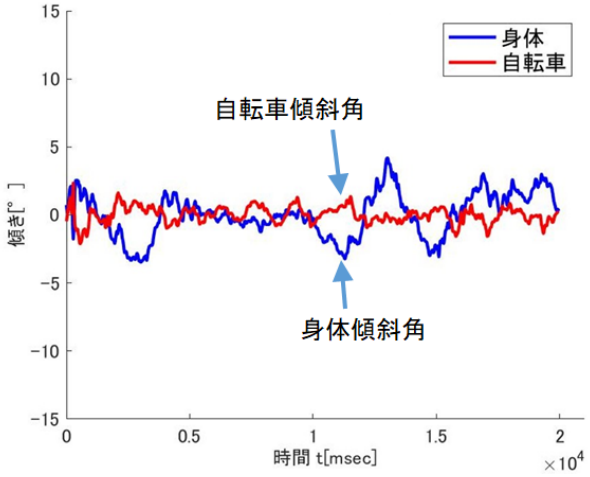


図 6　逸脱回数の少ない運転者の左右傾斜角

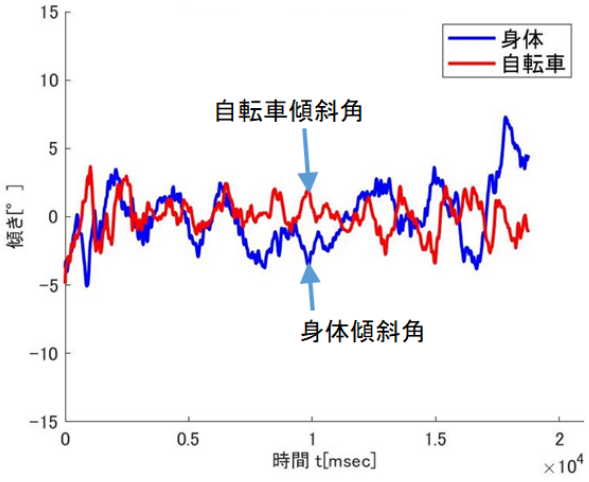


図 7　逸脱回数の多い運転者の左右傾斜角 (1)

た．9 軸モーションセンサは着脱可能なため，普段使用している自転車による走行分析が可能となる．

9 軸モーションセンサは ZMP 社の IMU-Z2 を用いた．そして付属の SDK を用いてロー，ピッチ，ヨー（アジマス）を推定する．SDK は加速度・地磁気から静的姿勢を導出し，角速度から計算した動的姿勢により静的姿勢を補正している．身体に取り付けるセンサはベルトに装着して背中に取りつけた．車体に取り付けるセンサはサドルに装着した．データのログには VECTOR 社の GL1000 を用いた．身体の左右傾斜角，車体の左右傾斜角等は，MATLAB により DC 成分を除去するなどの処理を行い，グラフ化することで，分析が可能となっている．利用するデータは，25m の評価コース走行中のデータのみとしている．ただし，機械学習時の属性値算出では，走行データの不安定な，最初の 3 秒間を除外している．被験者数は 15 名，各人，2 回ずつ走行してもらった．コースの開始点と終了点には，角材を置き，この上を通過する時のショックで，開始と終了を判別した．

実験から決定した抽出属性を表 1 に示す．逸脱度，車体・身体傾斜の標準偏差，左右方向変化回数，曲率中心発生回数である．属性の意味は，それぞれ表中に述べた通りである..

5.　評価実験と結果

属性抽出のため，実験を行った．実験風景を図 9．利用した自転車は 26 インチの通常のものである．

5.1　全般的傾向

身体傾斜角の標準偏差 15 名分，及び車体傾斜角の標準偏差 15 名分の平均を表 2 に示しておく．当然であるが，身体の動きのほうが，自転車の動きを上回る．この車体の傾斜角に関して，分析を開始してすぐに気づいたのは，安定性の高い運転者と低い運転者の車体傾斜の差である．図 6 は，コースからの逸脱の少ない被験者の身体と自転車の傾斜角である．被験者は，図 2 と同じである．これに対して，図 7 は，コースからの逸脱の多い被験者の身体と自転車の傾斜角である．被験者は，図 4 と同じである．図 8 も，逸脱の多かった被験者である．図 6 と図 7 図 8 を見比べると

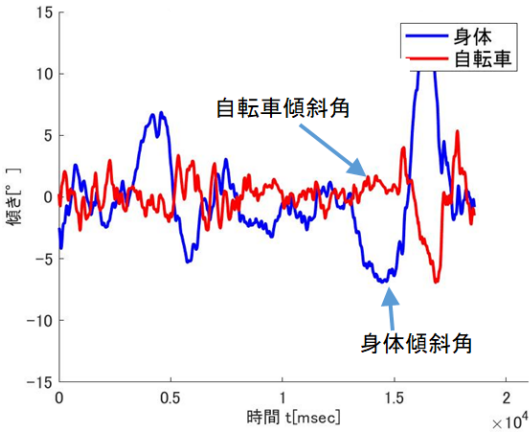


図 8　逸脱回数の多い運転者の左右傾斜角 (2)

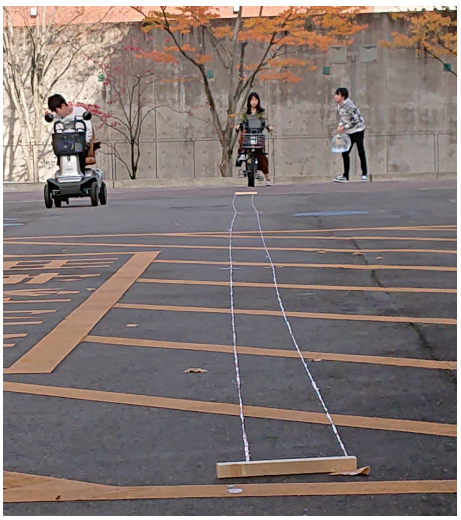


図 9　直進コースとタウンカート

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

表 1　抽出した属性一覧

属性名	内容
逸脱度	ビデオ画像から目視測定された逸脱回数である．逸脱している間の画像のフレーム数（毎秒 30 回）を加算している．被説明変数であるが，決定木とするにはシンボル化が必要（単位回）．
車体傾斜の標準偏差	測定区間内の車体傾斜の標準偏差．車体傾斜は直流成分を除去している（単位：度）．
身体傾斜の標準偏差	測定区間内の身体傾斜の標準偏差．身体傾斜は直流成分を除去している（単位：度）．
方向変化回数	走行軌跡の方位角が，増加から減少，あるいは減少から増加に変位した変位点の個数である（単位：回）．
曲率中心発生回数	曲率中心軌跡としてプロットされたサンプリングポイントの個数である（単位：個）．逸脱度と類似の概念であるが，決定木作成で必ず選ばれた訳では無い．

表 2　傾斜角標準偏差の平均

属性名	平均
身体傾斜角の標準偏差の平均	2.20
車体傾斜角の標準偏差の平均	1.14

以下のことが分かる．

- 曲率中心軌跡法では，何も情報が得られなかった直線走行の空白期間も，身体や自転車の傾斜は大きく変動している．
- 明らかに自転車の傾斜角は，安定した運転者の方が小さい．不安定な運転者の自転車の傾斜角は大きい．
- 身体の傾斜角は，安定した運転者，不安定な運転者で値が大きい範囲ではあまり差が無い．しかし，安定した運転者の場合，ある区間の範囲では，不安定な運転者に比して，身体の傾斜角が小さい．

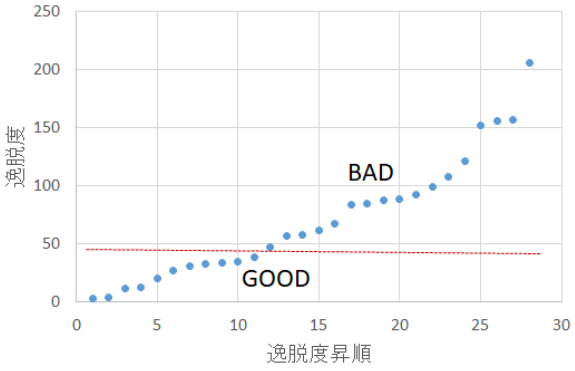


図 10　逸脱度分布と 2 クラス化

以上示した曲率中心軌跡法による結果と，本提案の 2 つの傾斜角のプロット結果を総合すると一つの仮説を得る．それは，安定した運転者の直進進行では，ハンドル操作というより，身体をわずかに傾斜させてバランスを取っている．これに対して，不安定な運転者は，体を大きく動かして安定を取ろうとするが，取りきらず，頻繁にハンドルを切って（意図的な操舵か，セルフステアかは分からないが）安定を保つ傾向がある．この様に曲率中心軌跡法と 2 つの傾斜角の検出手法の併用は，自転車運転者の振る舞い分析に有効と考える．

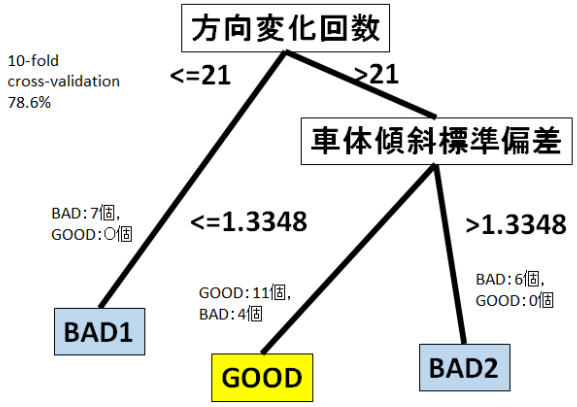


図 11　生成された決定木（普通の自転車）

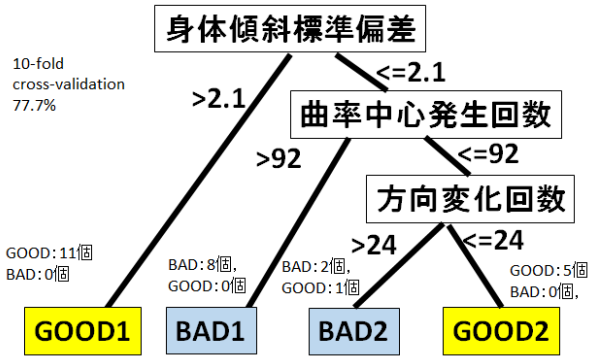


図 12　生成された決定木（幼児同乗型自転車）

5.2　運転スキル判別知識の獲得 (普通の自転車)

取得した走行データを用いて，属性を抽出し，目的変数を逸脱度から分類された運転として決定木を作成する．これにより，直線コースさえ準備すれば，逸脱度を手間をかけて測定することなく，スマートフォンにでもついている簡便なセンサデータのみから，スキル判別可能とできる．学習ツールは J48(Weka) を利用し，表 1 に示した属性を利用した．ただし，走行データのスタートから 3 秒間を切り捨てて属性を抽出した．これは開始点のみ全員が共通してふらつくような傾向が確認できたので運転の特徴を正確に抽出するために切り取った．

被説明変数である逸脱度は数値であるが，J48 はクラスへの判別なので，逸脱回数のシンボル属性化が必要である．逸脱度の分布を図 10 に示す．逸脱度の分布を低い順に見て，逸脱度の差が 10 と大きな差が生まれている 38 以下を良い運転（GOOD），47 以上を悪い運転（BAD）とした．

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

表 3 各グループの平均パラメータ（普通の自転車）

クラス名	GOOD	BAD1	BAD2
サンプル数	15	7	6
正解サンプル数	11	7	6
身体傾斜角の標準偏差	2.15	1.96	2.4
車体傾斜角の標準偏差	0.99	1.09	1.34
方向変化回数	26	20	27
曲率中心発生回数	52	101	98
逸脱度	23	122	87
グループの特性	方向変化回数が多く，車体傾斜は小さい	方向変化回数が少ない	方向変化回数が多く，車体傾斜が大きい

表 4 各グループの平均パラメータ（幼児同乗型自転車）

クラス名	GOOD1	GOOD2	BAD1	BAD2
サンプル数	11	5	8	3
正解サンプル数	11	5	8	2
身体傾斜角の標準偏差	2.44	1.61	1.91	1.04
車体傾斜角の標準偏差	1.01	0.71	1.10	0.66
方向変化回数	21	20	23	27
曲率中心発生回数	140	62	197	62
逸脱度	68	31	168	124
グループの特性	身体を傾けて頑張っているが，逸脱度は大きい．	身体は動かず，自転車の方向変化は少ないが，逸脱度は小さい．	身体は動いているが，ハンドルを左右に切っている．	身体が動いていない．逸脱度は大きい

以上の方法で作成した決定木を図 11 に示す．Weka を利用し，J48 のパラメータはデフォルト値のままである．結果として，3 個のリーフが生成されており，GOOD クラスのリーフが 1 個，BAD クラスのリーフが 2 個生成されている．説明の都合上，悪い運転である BAD のリーフを BAD1,BAD2 と名付けている．尚，この決定木の 10-fold cross-validation による汎化性能は 78%であった．

GOOD, BAD2, BAD2 毎のパラメータ平均値を表 3 に示す．以下，順に説明する．GOOD 運転は逸脱度が低く，直進に近い運転を行っている．図 6 はこのリーフに到達した測定事例の一つである．左右の方向変化回数が多く，車体傾斜角の標準偏差が低い．小刻みにハンドル操作を行っている．動画に残した走行姿からもハンドルを大きく操作せず小刻みに震えるようなハンドル操作を行っていたことを確認した．また車体の傾斜角の標準偏差が低いことから車体があまり傾いていない．一方，車体は傾いていないが，身体は大きく傾いている．GOOD とは大きなハンドル操作をせず，早めに身体を傾けて車体の傾斜を制御する運転と思われる．

BAD1 は逸脱度が 3 つの中で平均的に一番高かった運転である．図 7 は BAD1 のリーフに到達した測定事例のひとつである．運転の特徴としてハンドルを大きく操作している．ハンドル操作をしてしまうと方向が大きく変わってしまうので 20cm 幅から逸脱しやすくなってしまう．ではなぜハンドル操作を行ったのかというとハンドルでバランスをとる必要があったからだと思われる．表 7 からも，身体をあまり傾けていないことが確認できる．また車体の傾斜角と同方向に体が傾いている．以上から身体で車体の傾き操作を行えていない．よって BAD1 は身体傾斜による車体傾斜角操作能力が低いため，ハンドル操作でバランスをとる運転と思われる．

BAD2 は逸脱度が高かったデータである．図 8 は BAD2 のリーフに到達した事例の一つである．逸脱が高いにもかかわらず，BAD1 とは異なり，身体操作を頻繁に行っている．車体傾斜角標準偏差が高いことから車体を頻繁に傾いていたことがわかる．ある程度のバランス能力はあるが，身体操作による車体操作能力が低いのではないかと思われる．それによりハンドル操作を行うことで曲率中心点が増えてしまったのではないかと考えられる．BAD2 運転はハンドル操作と身体操作のハイブリッド運転であり，身体のみで車体を常に成立させるバランス能力はないと考えられる．

5.3 運転スキル判別知識の獲得 (幼児同乗型 3 人乗り自転車)

参考までに，図 12 には，電動アシスト付き幼児同乗型自転車の実験結果から得た決定木を示す．ただし，電動アシストであり，幼児の代わりに水をいれたビニール袋を用いている．水は，前 10 リットル，後ろ 15 リットルの合計 25Kg である．データは，幼児を乗せないときの運転パラメータから幼児を乗せた際の安定性を推定している．一人の被験者が 2 回乗っているので，幼児を乗せない 2 回の

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MBL-96 No.20
Vol.2020-UBI-67 No.20
Vol.2020-CDS-28 No.20
Vol.2020-ASD-19 No.20
2020/9/30

実験に対する逸脱度は，水を乗せた 2 回の実験の逸脱度の小さい方を採用した．逸脱度のクラス分けは，100 以下を GOOD としている．

図 12 のみを見ると，身体傾斜の大きな左下へ向かうパスが安定のように見えるが，表 12 を見ると，逸脱度が大きい．恐らくは，自転車が重い（軽快車で 20Kg 以下，3 人乗りは 35Kg を越えることがある）ので，身体を使って左右のバランスを取るグループであろう．安定しているのは，右下に延びる GOOD2 の数人であり，身体の傾斜は小さく，逸脱度は低い．おそらく，鋭敏に身体を使って（ハンドルをあまり操作せず）バランスを取れる運転者と思われる．この例から見ても分かる様に，機械学習で作成したモデルによって，幼児を乗せた危険なトライアルをしなくても，無荷重状態の走行から，3 人乗りの挙動を予測できる可能性がある．

6. 終わりに

自転車の運転スキルを分析するための手法として，2 個の 9 軸モーションセンサを用いる手法を提案した．モーションセンサは，運転者の背中と自転車の車体に取り付ける．これにより，運転者が左右に体を傾斜させて自転車を制御している様子を客観化できる．今回の評価実験では，手元にあったスマートフォンが旧式だったので用いなかったが，原理的には，2 台のスマートフォンでも実現できる．

測定環境としては，平面舗装面に狭い直線コースを設け，定速で走行してもらう．速度の維持には，タウンカートの並走を用いた．信号処理としては，(1) 車体にとりつけたセンサから得られるヨー角（アジマス角）に基づく走行軌跡の分析，(2) 車体と身体に取りつけたセンサから得られる左右の傾斜角（ロール角）の測定を利用している．15 名の学生・院生に，市販の 26 インチ自転車（電動アシスト無し) に乗って，2 回ずつコースを走行してもらい，直線コース（20cm 幅，25 メートル長）からの逸脱は，カメラの動画像記録の分析を用いた．その結果，以下の点が明らかになった．

- 直進時でも，身体は左右に動き，自転車のバランスを取っている．当然，身体の動きのほうが，自転車の動きより大きい．ただし，安定な運転者は，車体の左右への動きが小さい．
- 運転者は，殆どハンドルは操作せず体の左右への傾斜で自転車を直立するタイプから，比較的大きくハンドルを切り安定を保とうとするタイプの間に分布している．
- 機械学習による決定木の作成結果から見ると，安定な運転をしている運転者は，(1) 細かく自転車の進行方向を左右に振っており，かつ，(2) 車体の左右の傾斜角を抑え込めている．

以上から，提案手法は，運転者の自転車運転スキルの分別に効果的と考えられる．15 名の評価実験なので，断定的なことは言えないが，自転車を安定して乗れる運転者とは，車体の傾斜に素早く反応し，身体の傾斜を使って，ハンドルを殆ど切らずに，自転車の車体の傾斜角を小さく抑え込める人である．また，決定木が構築されたので，直線のテストコースさえあれば，コースからの逸脱数をカウントしなくても，被験者のスキルを判定できると考える．

参考文献

[1] 高橋遼一，金田重郎，“曲率中心を用いた自転車走行状況の数値化とスラロームコースへの適応”，電子情報通信学会・知能ソフトウェア研究会，信学技報，117(465)，pp.37-42，2018 年 3 月
[2] 三木和輝，高橋遼一，金田重郎，“自転車走行軌跡による走行状況の可視化”，電子情報通信学会，知能ソフトウェア研究会，信学技報，117(295)，pp.25-30，2017 年 11 月
[3] 織邊大輝，高橋遼一，坂上友都，加藤一，金田重郎，“スマートフォンを用いた自転車走行状況の可視化”，電子情報通信学会，知能ソフトウェア研究会，信学技報，117(295)，pp.31-36，2017 年 11 月
[4] Hajime Kato, Yuto Sakajyo, Shigeo Kaneda, “Visualization Method for Bicycle Rider Behavior Analysis Using a Smartphone”, 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Vol.2, pp.354-359, DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.262, 2017 年 7 月
[5] Ryoichi Takahashi, Kazuki Miki, Shigeo Kaneda, “sualization Method Using Probe Bicycle to Analyze Bicycle Rider’s Control Behavior”, 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Vol.2, pp.360-365, DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.263, 2017 年 7 月
[6] 加藤一，坂上友都，高橋遼一，金田重郎，“スマートフォンを用いた若者・高齢者に対する自転車運転時の相違分析”，情報処理学会・第 79 回全国大会，3V-05，2017 年 3 月
[7] 坂上友都，高橋遼一，金田重郎，“曲率中心を用いた自転車走行状態の可視化手法”，情報処理学会・第 79 回全国大会，3V-04，2017 年 3 月
[8] 高橋遼一, 坂上友都, 加藤一, 金田重郎，“スマートフォンセンサを用いた自転車挙動表示法の提案”，情報処理学会，研究報告コンシューマ・デバイス & システム（CDS）Vol.2017-CDS-18, No.30, pp.1-7 2017 年 1 月
[9] 加藤一，山本光，河内雄太，金田重郎，“スマートフォン内蔵センサを利用した自転車走行状態推定環境の提案”，電子情報通信学会，信学技報，vol.115，No. 231，KBSE2015-29，pp.7-12，2015 年 9 月 24 日
[10] Shigeo Kaneda, Shohei Asada, Akira Yamamoto, Yuta Kawachi, Yusuke Tabata，“A Hazard Detection Method for Bicycles by using Probe Bicycle”，Proc. of CDS2014 (The 2nd IEEE International Workshop on Consumer Devices and Systems),pp.547-551，2014 年 7 月
[11] 井狩 鮎美，“自転車の片手運転の特徴分析”，同志社大学理工学部，インテリジェント情報工学科，卒業論文，2018 年 2 月
[12] Matlab，MathWorks，https://jp.mathworks.com/products/matlab.html，(参照日 2019 年 12 月 23 日）
[13] Weka， THE UNIVERSITY OF WAIKATO，https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/，(参照日 2019 年 12 月 23 日）

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan