

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

高橋 遼一² 坂上 友都¹ 加藤 一² 金田 重郎^{2,a)}

概要：自転車は身近な交通手段であり、幅広い年齢層に利用されている。ただし、若者の自転車操縦からは機敏さを感じるものの、高齢者の自転車挙動には、ふらつきや反応の遅さによる「危うさ」を感じることもある。自転車運転者の挙動を、客観化して眺めたい所である。しかし、自転車の挙動を、客観的に「見える化」する手法は知られていない。本稿では、自転車のハンドル方位角のみから、運転の安定状態を「見える化」する手法を提案する。具体的には、ハンドルの東西南北の絶対方位角を前輪の進行方向とみなし、自転車が一定の速度で前進しているとして、前輪の移動軌跡を作成し、その移動軌跡の曲率中心を2次元平面上にプロットする。これにより、曲率中心のプロット軌跡は、操縦者の回転意志をV字型の軌跡として表示できる。V字型の広がり角(挟角)は、自転車が曲がった際の方向転換角度に一致し、V字型の分布から、自転車挙動が統制されたものであるか否かを読み取り可能となる。提案に基づき、スマートフォン(Android)のアジマス角からV字型を出力するプロトタイプシステムを構築した。実際に、若者と高齢者のスラローム走行を比較分析した結果、統計的に有意に、高齢者が「回りすぎる」ことを確認できた。

Visualization Method of Bicycle Riding Situations using Center of Curvature

RYOICHI TAKAHASHI² YUTO SAKAJYO¹ HAJIME KATO² SHIGEO KANEDA^{2,a)}

Abstract: Bicycles are a low-cost and popular form of transportation, and the age distribution of bicycle riders ranges from young children to senior citizens. Naturally, the age of a rider influences his/her bicycle control ability. For example, senior citizens often ride with a slight wobble. However, no current tool visualizes the bicycle control ability of individual riders. To resolve this problem, this paper proposes a new visualization method of bicycle riding situations that traces the steering angle of orientation. The trajectory of the angle of orientation is generated and the center of curvature is calculated from it. This paper clarifies that the center of curvature forms a v-formation pattern when the rider makes a turn. Since the angle trajectory basically equals the vehicular sweep path of the front wheel, the v-formation's angle equals the angle of the bicycle's turn, and the v-formation distribution on the horizontal surface describes the level of the steering control. We developed a prototype system using smartphone sensors and generated the center of curvature from the azimuth angle of an Android smartphone. We experimentally compared both young and senior riders on a slalom test course and conclude that the latter make turns with angles that are too sharp.

1. はじめに

自転車は、身近な乗り物だけに、幅広い年齢層に利用さ

れている。しかし、街角を走る自転車を見ていると、若者の運転には機敏さを感じ得ても、高齢者の運転には、ぎこちなさを感じることもある。では、若者の操縦と、高齢者の操縦はどこがどう違うのであろうか。この様に、若者と高齢者の違いにとどまらず、自転車の操縦の態様を可視化して、安定状態を直感的に読み取ることが出来ないか、と言うのが本稿の問題意識である。

上記課題を達成するため、本稿では、自転車のハンドル

¹ 同志社大学理工学部, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe-city, Kyoto-pref., 610-0321, Japan

² 同志社大学大学院理工学研究科, Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe-city, Kyoto-pref., 610-0321, Japan

a) skaneda@mail.doshisha.ac.jp

方位角を用いた、近似的な前輪の移動軌跡から、自転車挙動を「見える化」する。具体的には、1) 東西南北を示す方位角センサーを用いてハンドル方位角をサンプリングし、得られたデータから、ハンドル方位角の示す方向に、自転車(前輪)が一定速度で進んでいるとして得られる前輪の移動軌跡を作成するステップと、2) この移動軌跡上の各サンプリングポイント(それぞれ方位角を持つ)と隣のサンプリングポイントとの位置関係と方位角の違いから、曲率中心を計算するステップと、3) 得られた曲率中心を2次元平面にプロットして、曲率中心のプロット軌跡(以下、曲率中心軌跡)を求めるステップ、から構成される。

上記手順により、自転車操縦者の旋回行為が、曲率中心軌跡上に、V字型軌跡として現れることを著者らは見出した。上記移動軌跡は、正確には、自転車の走行軌跡^{*1}とは一致しない。しかし、近似的に似た形となる。このため、V字型の広がり角(挟角)は、自転車の旋回角に一致し、V字型の発生分布から、運転挙動が統制されたものであるか否かを読み取ることができる。

以下、第2章では、自転車方程式を簡単に紹介し、スマートフォンから自転車の位置を計算することのむづかしさを説明する。第3章は移動軌跡を用いた可視化手法とプロトタイプの概要を述べ、第4章では、プロトタイプシステムによる、若者と高齢者のスラローム走行実験について述べる。第5章では既存研究に触れ、第6章は結論である。

2. 自転車の挙動

2.1 自転車方程式

自転車の挙動に関する運動方程式の研究は、数多く知られている。本節では、ハンドル角と旋回半径の関係を、文献[1]を用いて紹介する。

旋回時における、後輪の移動軌跡を円弧とみなした時の半径を R 、曲率を σ 、前輪の実効的な角度(進行方向右が正、自転車の構造上、これはハンドル回転角とは一致しない)を β 、前輪・後輪間のホイールベース長を L とする時、以下の関係が成立する。

$$\sigma = \frac{1}{R} = \frac{\tan(\beta)}{L} \quad (1)$$

また、ハンドル回転角を ϕ 、車体の傾斜角(後輪の傾斜角であり進行方向右側が正)を θ 、そしてキャスター角(前輪のハンドル回転軸の水平面からの傾き)を η とする時、以下の式が成立する。

$$\tan(\beta)\cos(\theta) = \tan(\phi)\sin(\eta) \quad (2)$$

式(1)、式(2)から、 $\tan(\beta)$ を消去すると、

$$R = \frac{L}{\tan(\beta)} = \frac{L \times \cos(\theta)}{\tan(\phi)\sin(\eta)} \quad (3)$$

^{*1} 本来の走行軌跡は、重心位置で計算され、車体の傾きやタイヤ滑り等も考慮しなくてはならない。

式(3)で、 L と η は自転車固有の定数なので、旋回時の半径 R を決めるのは、ハンドル回転角(ϕ)と自転車自体の傾き(θ)である。 θ と ϕ がゼロの時には、曲率中心が無限の遠方にある状態となり、上式(3)は無限大となる。自転車が正確に直立・直進した状態である。

式(3)は、我々の日ごろの実感と合致する。ハンドルを切りつつ、すこし体を傾けて、旋回遠心力と体の傾きがバランスしている姿勢のまま、旋回を続ける。ただし、バランスが取れる傾き θ は、車速に依存する^{*2}。同じ旋回半径であれば、高速で走るほど、傾きを大きくしないと釣り合わない。即ち、速度が正確に分からない限り、ハンドル角から車体の傾きを求めることはできない。結果的に、実効的な前輪の方向もわからない。

以上の状況から、本稿では、正確な実効ハンドル角(β)を求めたり、ホイールベースの影響まで考慮したアプローチは採用を見送ることとする。そして、本稿では、スマートフォン内臓のセンシング機能の範囲で、自転車の安定状態をモニタリングする手法を検討する。

2.2 アジマス角への着目

スマートフォンを用いる場合、本来であれば、自転車の速度が知りたいところである。速度を求めるには、理論的には、加速度を時間方向に1回積分すれば良い。スマートフォンは、加速度3軸、角速度3軸、地磁気3軸のセンサーを持っている。しかし、この様な、安価なセンサーでは、ノイズ等の影響もあり、正確な自転車の進行方向加速度の測定は困難である。結果的に、加速度を積分しても、正確な速度は出せない。特に、自転車にスマートフォンを取り付けると、地面からの強烈的な振動(=加速度)を受けるだけではなく、スマートフォンが傾くので、強大な地球の重力加速度の分力の影響を受ける。これらを完全に除去するのは難しい。加速度センサーは細かい運動を正確に追跡するためのトランスデューサとは言い難い。

それに対して、地磁気センサーは直接的に地球磁場を観測している。地球磁場の強さは、そのまま東西南北の方位角に、微分・積分なしに変換できる。結果的に、ノイズやオフセットの影響を受けにくい。スマートフォンをハンドルに水平方向に取り付けておけば、ハンドルが水平方向でどちらを向いているかが分かる。現実には自転車は左右に傾くが、スマートフォンの内部で、端末座標でのセンサー出力に対して、回転マトリックスをかけて、世界座標での東西南北方向の絶対方位角(アジマス角)が出力されている。前輪とハンドルは一体となって、ハンドル軸を中心に回転している。このため、ハンドルに水平に取り付けたスマートフォンの地磁気センサーで、前輪の方向がほぼ正確

^{*2} 通称「ビザ屋のバイク」や「高齢者向け3輪自転車」が、車体の前部分が容易に傾くようになっているのも、体を傾けてバランスを取り、スムーズな旋回を実現するためと思われる。

に求められることになる。

本稿では、上記の問題意識から、スマートフォンにおいて、世界座標で出力されているアジマス角（北をゼロとして、時計回りに0度から360度^{*3}）を用いる。市販のツールで、ハンドルの上にはほぼ水平方向にスマートフォンをとりつけ^{*4}、得られたアジマス角を前輪の進む方向と近似的に解釈する。これによって、スマートフォンのセンサーのみで、近似的に、前輪の移動軌跡を導出し、自転車の走行状態を把握する。

3. 自転車走行状態可視化手法の提案

3.1 基本的な構成

提案手法の自転車走行状態可視化手法は、以下の3ステップから構成される。

【STEP1】：前輪の移動軌跡作成

サンプリング周期 $\tau(sec)$ で、ハンドルが水平面上で東西南北のどちらを向いているかの方位角 θ_i ($i = 0, 1, 2, 3 \dots n, n$ は正整数) をサンプリングする。方位角は、真北をゼロとして、時計回りに0度から360度とする。ただし、この角度の定義は、後述のプロトタイプで利用した Android の仕様であり、他の角度表現でも類似の式となる。ただし、角度の向きによっては、後述の (4)(5) 式が変更されることがある。本稿では、この θ_i が自転車前輪の進む方向であるとする。

自転車の前輪は、タイミング i と $i+1$ ($i = 0, 1, 2, 3 \dots n-1$) の間では、上記方位角 θ_i を保ち、タイヤの滑りもなく走行しているとする。

(X,Y) 2次元座標軸上で、前輪の初期位置座標を (0,0) とするとき、自転車の前輪の位置 (x_k, y_k) ($k = 0, 1, 2, \dots, n-1$) は、以下の式で計算できる。ただし、Y座標が北向き、X座標が東向きとしている。更に、 δ_i は、タイミング i と $i+1$ との間に自転車が進む距離を示す。自転車の速度が分からない時には、一定値をわりつける。本稿では一定としている。

$$x_k = \sum_{i=0}^{k-1} \delta_i \times \sin(\theta_i) \quad (4)$$

$$y_k = \sum_{i=0}^{k-1} \delta_i \times \cos(\theta_i) \quad (5)$$

【STEP2】：移動軌跡から曲率中心の計算

前輪の移動軌跡の曲率中心は、隣接した2つの測定点の方位角から計算できる。タイミング i と $i+1$ との方位角をそれぞれ、 θ_i と θ_{i+1} とする時、曲率中心は、

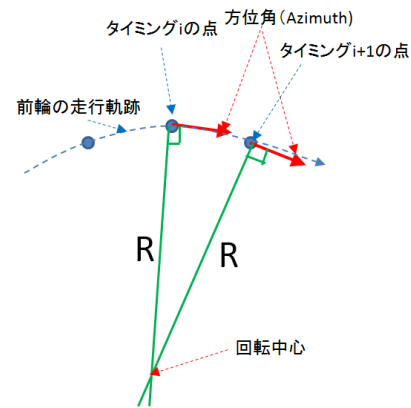


図1 隣接したサンプリング点からの曲率中心の求め方

θ_i に直交した直線と、 θ_{i+1} に直交した直線の交点として求まる。図1には、この曲率中心の求め方を図示している。すべてのサンプリングタイミングの隣接したペアに対して、曲率中心を求める。ただし、一定の値以上に曲率半径が大きい場合には、つぎのSTEP3のプロット生成では無視する。つまり、完全に自転車が直進していると、後述のV字型は、進行方向の左右には現れないことになる。

【STEP3】曲率中心軌跡の作成

次に、上記STEP2で、前輪の移動軌跡から得られた曲率中心を2次元平面上にプロットしてゆく。そうすると、移動軌跡の両側にV字型の曲率中心軌跡が出現する。

図2は、実際にV字型の曲率中心軌跡がどのような順序で発生するかを示している。最上部の図では、旋回を始めるために、無限遠にあった曲率中心を操縦者は引き寄せている。上から2番目の図では、旋回中心となる目標点（以下「目標旋回中心」）を目指して、プロットされる曲率中心が更に接近している。この直後、目標旋回中心の周囲を、自転車は一定時間走行し、旋回することになる。意図した角度の旋回が終わると、ふたたび、曲率中心は移動軌跡を離れてゆき、自転車は直進走行に戻る。この曲率中心軌跡が興味深いのは、人間が自転車の操縦をする際に、このような目標旋回中心を無意識に設定し、その周りを正確に回っている点である。逆に言えば、目標旋回中心がずっとつぎつぎと変更される様な走行には問題がある。

次に、図3は、自転車がまっすぐに走っている時の、曲率中心のプロット図である。ほとんどハンドル角は変化しないので、V字型の挟角は極めて小さい。また、走行のメリハリがある場合には、左右にV字型は交代して、規則的に出現する。しかし、フラフラした運転だと、V字型が一方にしか出なかったり、一方の側に連続する等、規則性がなくなる。

^{*3} 今回実験に用いた Android 端末の場合。

^{*4} 著者らの実験では、センサーはハンドルではなく、自転車の車体（サドル下）に取り付けても、後述のV字型が得られることを確認している。しかし、ハンドルに装着した時の方が詳細に描写できる。おそらく、運転者の意志が、直接的に、ハンドルに反映されるためと思われる。

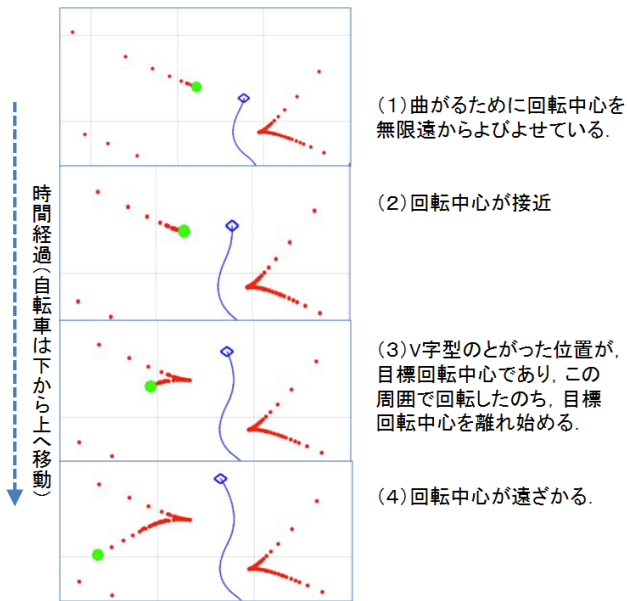


図2 V字型プロット結果の生成過程

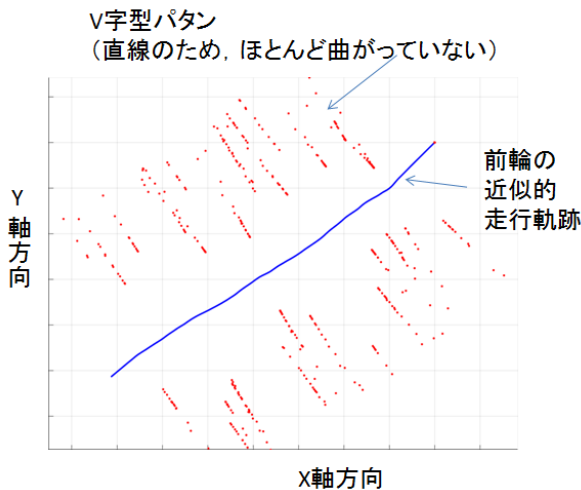


図3 直進時の曲率中心プロット結果

3.2 スマートフォンによる実装

図2, 図3は, 実際の自転車にスマートフォンを装着して得られたデータである。プロトタイプシステムの具体的な構成を以下に説明する。

STEP1の方位角の取得には, スマートフォン (Android) を用いた。具体的には, SONY 製 Xperia Z3 である。絶対方位角としては, アジマス角を用いる。サンプリング周期は $20ms$ である。アンドロイド端末は, 安価な, 市販のスマートフォン用装着ツールで, できるだけ水平にして, ハンドルに取り付けている。実際の走行時は, ハンドルの進行方向左右への傾きの影響をうけて, スマートフォン自体も傾くことになる。スマートフォンでは, 端末の傾きの影響は補正され, 世界座標でのアジマス角が出力される。このアジマス角を前輪の方向として利用する。前輪の移動軌跡の計算は, (4) 式, (5) 式を利用したが, 速度が不明なので, 本稿では, δ は一定値を利用している。このため, 最

終的な曲率中心軌跡から, V字型までの物理的な実距離を計算することはできない。ただし, 移動軌跡は, 一定速度で進行している時の実移動軌跡とかなり似たものとなる。

STEP2は図1の手法で計算した^{*5}。ただし, あらかじめ定めた値以上に, 曲率中心が移動軌跡から離れた場合には, プロットをしない。

STEP3では, 上記の曲率中心を, 移動軌跡と一緒に2次元平面状にプロットする。結果の例は, すでに, 図2, 図3に例示した通りである。データ処理にはMATLABを用いた。現在までに行った実験を見る限り, 曲率中心のプロット結果には, 以下の傾向が観測される。

- V字型の挟角は, 実際に自転車が旋回した角度に対応している。ただし, 安定した旋回走行の場合には, V字型は, ひとつの旋回に一個のみ出現するが, 不安定な旋回を行った場合には, V字型の形が乱れたり, 同じ場所に, 何個もV字型が出現する。
- 直進運動では, 左右に交代にV字型が出現するのが普通である。この場合, V字型の挟角は限りなく小さく, V字型というより, I字型の曲率中心軌跡が出現する。一方, 直線的走行でも, ふらふらした走り方になると, V字型は, 不規則に出現する。

以上から, 本提案の手法によれば, 自転車走行の安定状態を, レントゲン写真の様に観測可能と考える。

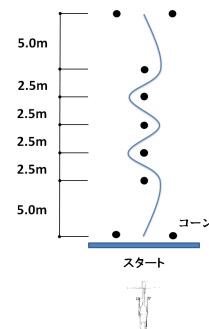


図4 設定されたスラロームコース1 (実験コース1)

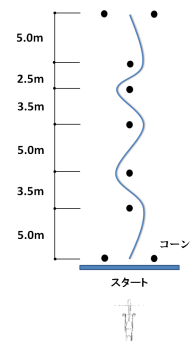


図5 設定されたスラロームコース2 (実験コース2)

^{*5} 隣り合う2つのサンプリングポイントではなく, 間に一つ置いた2つのサンプリングポイントから, 曲率中心を求めてもよい。ただし, 著者らの実験では, 結果は大きな差ではなかった。

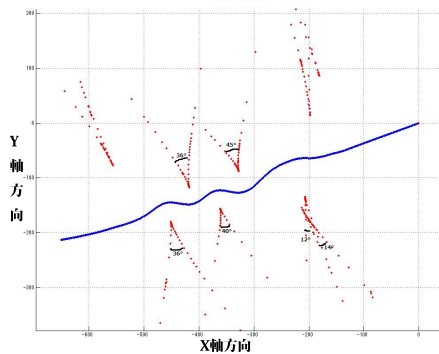


図 6 若者（25 歳）による実験コース 1 の走行例

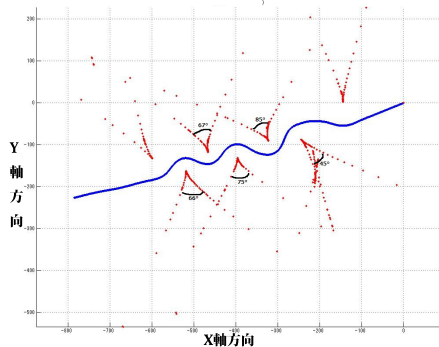


図 7 高齢者（65 歳）による実験コース 1 の走行例

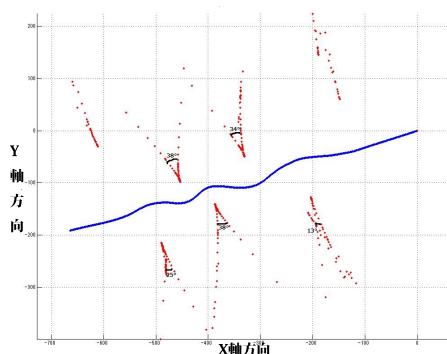


図 8 若者（25 歳）による実験コース 2 の走行例

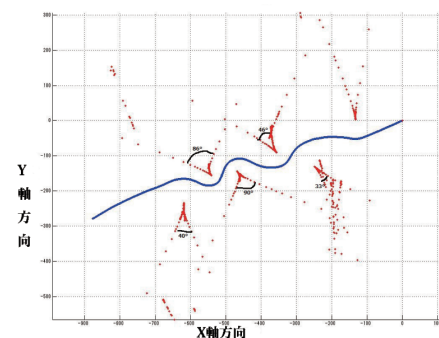


図 9 高齢者（65 歳）による実験コース 2 の走行例

4. 提案手法の有効性の評価

提案手法が、実際に運転者の特性判定に利用できることを確認するため、評価実験を行った。実験には、前述した Android(SONY Xperia Z3) を用いたプロトタイプを利用

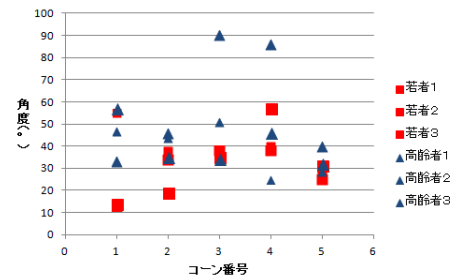


図 10 実験コース 2 の若者 3 名，高齢者 3 名の回転角度

した。具体的には、高齢者と若者で自転車運転時の軌跡・挙動の違いを調査した。

実験コースは、セーフティコーン*6を並べて、2通りのスラロームコースを設置した。実験コース 1(図 4)は、等間隔 (2.5m) にセーフティコーンを並べている。実験コース 2(図 5)は、コーンは直線的に並んでいるが、不規則間隔 (2.5m~5m) である。図 6 は実験コース 1 を若い学生が走行した場合、図 7 は、高齢者が同じコースを走行した例である。スラローム上の障害物の間隔が一定で、走りやすいのか、この例を見る限り、V 字型の出現分布に、年齢による差異は観察されない。ただし、旋回については、高齢者の方が、大きく回っている様にも見えるが、あまり顕著ではない。

一方、図 8 は、若者 (学生) が実験コース 2 を回った結果であり、図 9 は、高齢者が同じ実験コース 2 を回ったケースである。この図では、明らかに、高齢者の方が回転角が大きく、全体に、V 字の分布も乱れた印象を受ける。図 10 は実験参加者 6 名 (若者 3 名，高齢者 3 名) の実際の回転角度である。例外はあるが、高齢者のほうが、回転角度が大きく、若者は小さい。

提案手法は、この様に、レントゲン写真の様に、運転者の挙動を可視化して、確認することを可能とする。なお、今回の実験では、若者も高齢者も 3 名で、実験コース走行も各人 1 回のみの限定された実験である。しかし、その範囲でも、表 1 に示す様に、有意水準 5% の t 検定で、実験コース 1 では、若者と高齢者の回転角に差は出ないものの、実験コース 2 では、高齢者と若者の差がでている。高齢者は、回り込みすぎている。この原因分析は、本稿が扱うべき主旨の範囲を超えるが、提案手法は、高齢者と若者の自転車操縦能力のスクリーニングに、一定の効用を期待できると考えられる。

5. 関連研究

エネルギー資源保全の意識や健康志向の高まりなどにより、移動手段として、またはスポーツ目的での自転車の利用が増加傾向にある。これに伴い、自転車の種類や用途も多様化してきている。自転車のフレーム形状や車輪の大き

*6 円推型のコーン。実際の道路工事で使われるサイズより、はるかに小型である。

t

表 1 実験コース 2 の統計的検定結果

項目	若者の回転角	高齢者の回転角
平均	31.4 度	46.3 度
サンプル個数	15	15
$P(T \leq t)$ 片側	0.00777	—
t 境界値片側	1.71	—
$P(T \leq t)$ 両側	0.0155	—
t 境界値両側	2.07	—

さが異なることで、各種類の自転車についての走行時の安定状態も異なってくる。

このため、自転車メーカーの中には、自転車の安定状態の測定方法を検討しているところがある。例えば、ブリヂストンサイクル（株）による公開特許公報 [2] では、自転車の重心位置をあらかじめ測定し、その場所にマーカーをとりつけて、画像処理によるマーカートラッキングで、重心位置の移動を測定している。同一出願人の公開特許公報 [3] においても、2 台の撮像装置を導入し、設置点の位置情報を取得して、重心位置の移動を把握するという複雑なシステム構成を採用している。

更に、同一出願人の公開特許公報 [4] は、本稿の手法と類似した点を持つ。すなわち、測定に、9 軸センサーを想定している。しかし、センサーは、ハンドル舵角センサ、設置点センサー、重心センサーなど、多数のセンサーを必要とし、また、あくまでも、重心移動を見て、安定性を判断している。

また、日産自動車（株）が開示した公開特許公報 [5] では、自転車がリスクを持つ走行をしたことを検知する方法を提示しているが、一旦停止を無視した、急ハンドルを切った等の、自転車の異常な走行を自動判定する方法を開示しているのみである。

これらに対して、本稿で開示した手法は、ハンドル上に水平方向に取り付けたセンサー（実際にはスマートフォンのアジマス角）のみを利用しており、このアジマス角を前輪の近似的な方位として、前輪の移動軌跡を可視化している。重心の移動については、考慮していない。しかし、重心が左右に移動すれば、当然、車体の立て直し動作が入るため、重心の移動箇所には、V 字型が出現することが想定される。議論としては直感的すぎるかもしれないが、本稿の手法は、重心の左右への移動状況を直感的に把握できる手法であるとも言える。

一方、文献 [6] は、スマートフォンと隠れマルコフモデルを用いて、自転車の走行状態（直進、左折、右折、停止、蛇行運転等）を判別しているが、本稿で開示した技術の様に、運転者の特性を可視化するものではない。また、文献 [7] は、3 軸の角度、角速度、加速度を測定することができる慣性センサを自転車に取り付けて、操縦者の熟練度等を測定しようとしているが、基本的にセンサー出力波形による分

析にとどまっている。更に、著者らの文献 [8], [9], [10], [11] も、自転車やあるいは自転車の走行環境をセンシングしているが、本稿の提案とは主旨が異なっている。

6. 終わりに

本稿では、自転車のハンドルの水平方向の向き（東西南北の絶対方位角）のみを測定するだけで、自転車の走行状態を可視化できる手法を開示した。具体的には、1) ハンドルの水平方向の向きを方位角センサーからサンプリングし、その向きに前輪が進行すると見なして、近似的に前輪の移動軌跡を得るステップと^{*7}、2) 移動軌跡からサンプル毎に曲率中心を求めるステップと、3) 得られた測定サンプル毎の曲率中心を 2 次元上にプロットして可視化するステップ^{*8}、から構成される。但し、移動軌跡の作成には、自転車の速度情報は必ずしも必要なく^{*9}、速度が不明であれば、一定の速度で進行しているとしてよい。

上記移動軌跡の左右には、V 字型の曲率中心軌跡が出現する。この V 字型は、1) 遠方にあった曲率中心を、（これから行う旋回の際の目標として操縦者に設定されているものと思われる）目標旋回中心に引き寄せるフェーズと、2) 目標旋回中心を中心としてそのまま旋回するフェーズと、3) 旋回を終了して、その目標旋回中心をはなれて、直線走行に戻すために、移動軌跡の曲率中心を遠方に追いやるフェーズ、から構成される。結果的に、V 字型の 2 本の直線のなす角は、自転車が曲がった角度である。すなわち、直線走行の際には、V 字型の挟角はほとんど 0 となる。これは、左右にわずかにハンドルを向けながら、直線を走行する安定した走行状態である。しかし、フラフラする運転をすると、V 字型の挟角は大きくなり、また、V 字の発生個所も非規則的な分布になったり、複数の V 字型が同一箇所に重複して出現する。この可視化結果から自転車の走行状態を判定できる。

実際にスマートフォン (Android) のアジマス角のみを用いてプロトタイプシステムを構築し、簡単なスラロームコースを設定し、若者（学生）と 60 歳以上の高齢者数名を対象として、V 字型の挟角の差異を分析した。その結果、障害物の間隔が変化しないスラロームでは有意な差が出なかったが、障害物の間隔が変化するスラロームにおいては、統計的に有意に、高齢者は V 字型の挟角（旋回角度）が大きかった。つまり、高齢者のほうが、「条件が変化する走行環境ではハンドルさばきが適切ではなく回りすぎる」ことを示唆する。このように、V 字型の挟角や分布は、乗り手の

^{*7} ハンドルではなく、車体にセンサーを取り付けても同様の可視化は可能であるが、著者らの実験では、V 字型の出現頻度が低下した。旋回意図が第一義的に反映されているのはハンドルと考えた。

^{*8} 曲率中心が、移動軌跡から見て、あらかじめ定めた一定距離を超える場合には、プロットしない。

^{*9} 自転車の速度が求めれば適用することに問題はない。

運転能力をある程度推定してゆく手法に発展できる可能性もある。今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Jingang Yi, Dezhen Song, Anthony Levandowski, and Suhada Jaysuriya: “Trajectory Tracking and Balance Stabilization Control of Autonomous Motorcycles”, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2583-2589 (2006, May)
- [2] (株)ブリヂストン, ブリヂストンサイクル(株), 公開特許公報, 特開 2013-252779, 「自転車, 重心計測システム, および重心計測方法」, 2013 年 12 月 19 日公開
- [3] (株)ブリヂストン, ブリヂストンサイクル(株), 公開特許公報, 特開 2014-84033, 「自転車」, 2014 年 5 月 12 日公開
- [4] (株)ブリヂストン, ブリヂストンサイクル(株), 公開特許公報, 特開 2014-162260, 「安定性評価システム, 及び安定性評価方法」, 2014 年 9 月 8 日公開
- [5] 日産自動車(株), 公開特許公報, 特開 2015-125560, 「運転診断装置および運転診断方法」, 2015 年 7 月 6 日公開
- [6] 斉藤裕樹, 菅生啓示, 間博人, テーブウィロージャナボンニワット, 戸辺 義人, 「sBike: 参加型センシングを志向したモバイルセンシングによる自転車走行状態収集・共有機構」, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.2, pp.770-782, (2012, 2 月)
- [7] 松澤俊介, 大野寛和, 岩瀬将美, 畠山省四朗, 貞弘晃宜, 「自転車乗車熟達過程の解析と支援システムの開発」, 第 51 回自動制御連合講演会, 1028, (2008, 11 月)
- [8] 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」, 信学技報 115(231), pp.7-12, (2015 年 9 月)
- [9] 河内雄太, 加藤一, 金田重郎, 「スマートフォンセンサを用いた自転車走行状態推定環境の提案」, 電子情報通信学会総合大会, D-13-1, (2015 年 2 月)
- [10] 田端祐介, 河内雄太, 金田重郎, 「速度と舵角に基づく自転車走行状態の高精度推定法」, 情報科学技術フォーラム (FIT), M-001, (2013 年 8 月)
- [11] 河内雄太, 田端祐介, 金田重郎, 「自転車センサを用いた市街地走行環境と障害度の測定」, 情報処理学会, 第 75 回全国大会論文集, 2013(1), pp.165-166, (2013 年 3 月)