

## 曲率中心を用いた自転車走行状態の可視化手法

坂上 友都† 高橋 遼一‡ 金田 重郎‡  
Yuto Sakajo Ryoiti Takahashi Shigeo Kaneda  
同志社大学† 同志社大学大学院‡

## 1. はじめに

自転車は、身近な乗り物だけに、多くの人に利用されている。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、自転車のハンドル方位角を用いて自転車挙動を「見える化」する。具体的には、1) 前輪方位の方向に向かって一定速度で走行しているとした走行軌跡（以下、「前輪方位軌跡」）を導出。2) 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、曲率中心を計算し、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。

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。上記前輪方位軌跡は、正確には、自転車の走行軌跡とは一致しない。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。

## 2. 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  $\sigma$ 、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  $\beta$ 、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。

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

また、ハンドル回転角を  $\phi$ 、車体の傾斜角（後輪の傾斜角であり進行方向右側が正）を  $\theta$ 、そしてキャスト角（前輪のハンドル回転軸の水平面からの傾き）を  $\eta$  とする時、以下の式が成立する。[1]

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

上記2式から、 $\tan(\beta)$ を消去すると、

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

$L$  と  $\eta$  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 ( $\phi$ ) と自転車自体の傾

A visualization method of bicycle driving situation by using center of curvature

†Faculty of Science and Engineering, Doshisha University.

‡Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University.

き ( $\theta$ ) である。 $\theta$  と  $\phi$  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。

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ため、本稿では、正確な実効ハンドル角 ( $\beta$ ) 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。

## 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】：前輪方位軌跡の作成

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  $\theta_i$  ( $i=0,1,2,3,\dots,n$ ,  $n$  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、後述の式が変更されることがある。本稿では、この  $\theta_i$  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  $\theta_i$  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、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、 $\delta_i$  は、タイミング  $i$  と  $i+1$  の間に自転車が進む距離を示す。

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

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

【STEP2】：前輪方位軌跡から曲率中心の計算

前輪方位軌跡の曲率中心は、隣接した2つの測定点の座標と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、 $\theta_i$  と  $\theta_{i+1}$  とする時、曲率中心は、 $\theta_i$  に直交した直線と、 $\theta_{i+1}$  に直交した直線の交点として求まる。

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。

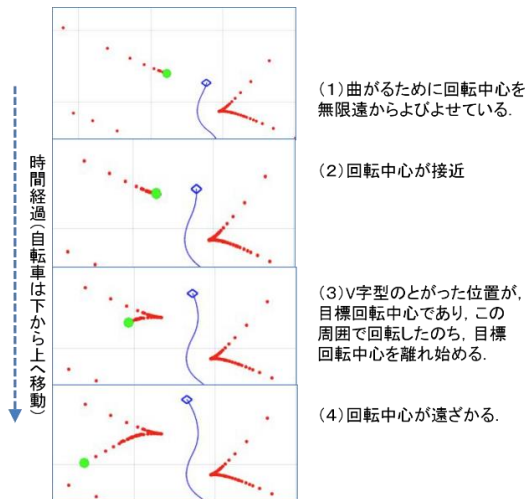


図1 V字プロット結果の生成過程

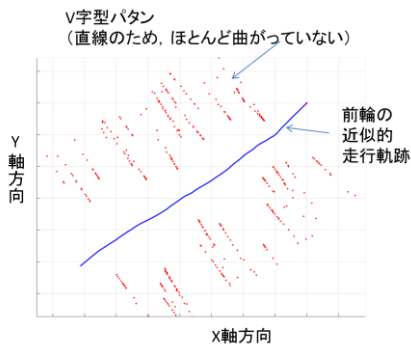


図2 直線時の曲率中心プロット結果

【STEP3】曲率中心軌跡の作成

次に、上記 STEP2 で、前輪方位軌跡から得られた曲率中心を 2 次元平面上にプロットする。そうすると、前輪方位軌跡の両側に V 字型の曲率中心軌跡が出現する。図 1 は、実際に V 字型の曲率中心軌跡が発生する順序を示している。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、上から 2 番目の図では、旋回中心となる目標点 (以下「目標回転中心」) 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、目標回転中心の周囲を、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、曲率中心は前輪方位軌跡を離れ、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、このような目標回転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。次に、図 2 は、自転車直進時の、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。

3.2 スマートフォンによる実装

図 1, 図 2 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、スマートフォンを用いた。具体的には、SONY 製 XperiaZ3 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

ン固定器具で、できるだけ水平にして、ハンドルに取り付けている。前輪方位軌跡の計算は、3.1 節の式を利用したが、速度が不明なので、本稿では、 $\delta$  は一定値を利用している。このため、物理的な実距離を計算することはできない。ただし、前輪方位軌跡は、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。

この前輪方位軌跡から曲率中心を導出し、前輪方位軌跡と一緒に 2 次元平面状に曲率中心をプロットする。結果の例は、図 1, 図 2 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、曲率中心軌跡には、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。

4. 終わりに

本稿では、自転車のハンドルの水平方向の向きのみから、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た前輪の移動軌跡 (前輪方位軌跡) を得るステップと、2)前輪方位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から構成される。但し、前輪方位軌跡の作成には、自転車の速度情報が不明であれば、一定の速度で進行しているとしてよい。

上記前輪方位軌跡の左右には、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、(旋回の際、操縦者に設定されていると思われる) 目標回転中心に引き寄せるフェーズと、2)目標回転中心を中心として旋回するフェーズと、3)旋回を終了し、その目標回転中心を離れて、直線走行に戻すために、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、直進時には、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 字型が同一箇所にも重複して出現する。この可視化結果から自転車の走行状態を判定できる。

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] 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 CDS 研究会, 2017 年 1 月