

# 車体傾きとセルフステアを考慮した 自転車シミュレータの開発

山口 哲治<sup>1</sup> 藤原 武<sup>2</sup> 金田重郎<sup>1,a)</sup>

**概要:** 著者らはプローブ自転車で市街地を走行し、得られたセンサデータからハザードを自動検出する手法を既に報告している。この既存手法では、道路上のハザードを判別するための知識を必要とする。この知識を学習するためには、危険な箇所を繰り返し実走行せねばならず、研究遂行上の課題となっていた。この問題を回避するためには、仮想空間上の3D市街地内を、自転車と変わらない操作感で走行可能な「自転車シミュレータ」が望まれる。しかし、著者らの知る限り、実際の自転車と変わらない操作感覚を持つ自転車シミュレータは存在しない。そこで、3D市街地内を走行する自転車シミュレータの開発を試みた。具体的には、市販の自転車を中心として、この自転車に左右の傾き角（ティルト角）を与える車体傾きサーボと、ハンドルにセルフステアトルクを与えるセルフステアサーボを装着し、車体傾斜とセルフステア効果を与えることとした。サーボ制御の運動方程式としては、倒立振り子モデルと旋回つりあいモデルを試用した。3D仮想市街地は、自転車の周囲に3面のスクリーンを設置して、そこに3D合成した市街地を投射した。実装して動作確認した結果、例えば、左右に蛇行する手放し運転をシミュレートできた。

## Development of Bicycle Simulator with Tilt Angle Control and Self-Steering

### 1. はじめに

著者らは、プローブ自転車で市街地を走行し、センサデータからハザードを自動検出する手法を既に報告している [1][2]。この既存手法では、道路上のハザードを判別する知識を用いる。しかし、知識を学習するためには、危険な箇所を繰り返し実走行する必要がある、研究遂行上の大きな問題であった。

上記問題を回避するためには、仮想空間上の3D市街地内を、自転車と同等の操作感を有し、バランスを取りながら走行できる「自転車シミュレータ」の利用が望まれる。自転車を操縦するのと同じ様な不安定さと挙動を示す自転車シミュレータがあれば、ハザード自動検出のデータ収集のみではなく、任意の走行環境における操縦者の挙動を分析できるため、交通事故の再現等に有効と考えられる。

自転車シミュレータとしては、ホンダ技研工業製の交通法規学習用の自転車シミュレータが知られる [3][4]。しかし、車体は床面に固定され、自転車のバランスを取る必要はない。自然な操作感が得られるとは言い難い。また、著者らの知る限り、セルフステア動作を反映した自転車シミュレータも我が国では知られていない。

そこで、本稿では、自然な走行感の得られる自転車シミュレータの構築を目指し、プロトタイプシステムを試作した。具体的には、左右の傾き角（ティルト角）を与える車体傾きサーボと、ハンドルにセルフステアトルクを与えるセルフステアサーボを市販の自転車に装着し、車体の挙動をシミュレートした。運動方程式としては、1) 倒立振り子モデルと、2) 旋回つりあいモデルを試用した。また、走行環境をシミュレートするために、自転車の周囲に3面のスクリーンを設置して、そこに3D合成した市街地を投射した。実装した結果、手放し運転をシミュレートできた。

以下、第2章ではシミュレータ構築の課題を述べ、第3章では既存研究について述べる。第4章では提案手法の概要を示し、第5章では実装モデルについて説明する。第6章では動作結果を紹介する。第7章はまとめである。

<sup>1</sup> 同志社大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

<sup>2</sup> 京都試作センター  
Kyoto Shisaku Corporation

a) skaneda@mail.doshisha.ac.jp

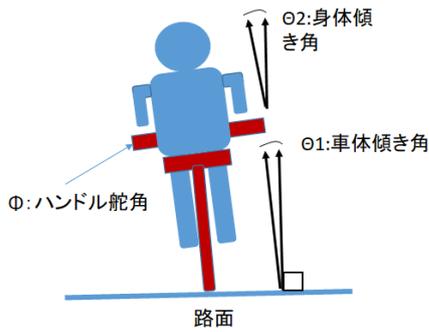


図 1 自転車のモデル

## 2. 自転車シミュレータ実現上の課題

本稿のシミュレータは、中心に市販の電動アシスト制御の自転車を設置する。自転車の動作を実現するために必要な制御入力（センシングパラメータ）、及び制御サーボ出力について考察する。

### 2.1 シミュレータに必要な制御構成

図 1 は後ろから眺めた自転車のイメージである。自転車の状況を確認するためには、少なくとも、1) ハンドル舵角、2) 車速、3) 自転車の左右の傾斜角（ティルト角）、を知る必要がある。走行は平坦な路面を想定しており、ピッチ角は考えない。加えて、人間は体を左右に傾けて、自転車の傾斜角を制御している。この人間の動作を反映しないと自然な操作感は得られない。そこで、本シミュレータの特徴として、4) 操縦者の背中に 9 軸モーションセンサを装着することとした。

一方、自転車を制御するサーボモータとしては、5) 自転車の左右の傾斜を制御する車体傾きサーボ、6) ハンドルに回転トルクを与えるセルフステアサーボが必要である。ここで、セルフステア（セルフステアリング）とは、前輪ハンドルの方向が路面と交わる点と前輪接地点との距離（トレイル）により生じる現象であり、車体が傾いた側に自然とハンドルが切れる効果を生む。このセルフステアがないと、自転車は安定して走行できない。逆に、セルフステアがあれば、無人のフラフラ走行や両手手放し運転も可能である。

### 2.2 シミュレーションモデルの課題

自転車シミュレータ開発上の大きな課題に、遠心力の扱いがある。たとえば、実世界で自転車が一定の半径で、円を描いて回転しているときを考える。この場合、自転車が内側に重力で倒れ込もうとする力と、回転運動に起因する遠心力は釣り合っている。しかし、実際には、シミュレータは固定され、静止している。遠心力はシミュレーションモデル上のみ存在し、実際の運転者の体には作用しない。結果的に、身体を傾けてハンドルを切って曲がろうとする

と、体の支えがないため、墜落しそうになる。

この問題は、自転車シミュレータでは回避できない。従って、本稿のシミュレータでは、運動方程式として以下の 2 種類を準備して評価することとした。

**倒立振り子モデル** 名前の通り、左右に倒れ込む操縦者と人間を、下からバランスを取っている様なモデルである。ただし、人間は脚で車体に左右方向の力を加えて制御していると思われるが、今回のモデルは、そこまでの表現は難しい。

**旋回つりあいモデル** ハンドルを曲げると、遠心力と傾斜分力が釣り合っている状態まで傾斜させる方法である\*1。



図 2 HONDA 自転車シミュレータ [4]

## 3. 関連研究

自転車シミュレータとしてよく知られている製品に、ホンダ技研工業製の自転車シミュレータがある [3]。図 2 に全体像を示す。しかし、このシミュレータに装着された自転車は、床面に固定され、ハンドルのみを操作できるに過ぎない。自転車を操縦する様な自然さはない。

一方、アカメディアに目を転じると、東京大学、慶応大学、東京工業大学などで自転車シミュレータが開発された報告がある。ただし、慶応大学のシミュレータ [5] は、前後の車輪が乗っているローラをチェーンでつないだ市販製品を用いており、自立は基本的に、車輪のジャイロ効果に基づいている様に思われる。完成度が高い既存研究のひとつは東京大学の Morics である [6]。しかし、著者らの入手した資料を見る限り、セルフステアサーボは具備していない様に思われる。同様に東京工業大学のシミュレータ [7] も、セルフステアサーボは具備されていない様に思われる。

海外に目を転じると、著者らの知る限り、韓国 KAIST の報告がある [8]。詳細は不明であるが、大規模な設備であり、ハンドルを制御するサーボモータを具備している様に

\*1 後述する様に、このモデルでは、車体を逆方向に傾斜させて、模擬的に加速度を表現できる。旋回つりあいモデルでは、傾斜を逆方向にした方が、自然な操作感を感じるとの利用者の意見が多かった。

見える。ただし、IEEE のエクスポーラで見える限り続報は報告されていない。

一方、自動二輪については既にシミュレータが報告されている [9][10]。ホンダ技研工業は自動二輪用の運転シミュレータを市販している [10]。詳細な制御構成は不明であるが、3 サーボ方式としているので、セルフステアサーボを具備している可能性は高い。尚、自動二輪では自転車以上に体の動きは重要であるが、圧力センサで体の移動を検知している様に思われる。車体を抱えるように乗る自動二輪では妥当な手法と思われる。

## 4. 自転車シミュレータ概要

試作した自転車シミュレータの実装イメージを図 3 に示す [11][12]。図 4 は信号処理フローを示すブロック図である。図 5 は外観である。

試作シミュレータは、大きく 3 つの制御部にわかれる。1) 運転挙動のセンシングと挙動計算、2) 車体傾き実現のためのサーボモータ制御、3) セルフステア実現のためのサーボモータ制御の 3 つである。以下、各制御部について説明を行う。

### 4.1 運転挙動のセンシングと挙動計算

自転車は、ハンドルと体重移動、ペダルを用いて、左右にバランスをとりながら走行する乗り物である。ハンドル舵角、速度、車体傾き角をセンサによって取得する。舵角の取得には OMRON 社製ロータリエンコーダ (E6A2-CWZ3C 500P/R 0.5M)、後輪速度取得には光電センサを用いた。光電センサは、後輪のスポークを挟むように設置することで、スポークの通り過ぎる間隔を取得できる。これらの 2 データは、マイクロコントローラである Arduino のシリアル通信機能を用いて PC に送信した。送信したデータは、ゲームソフトである Unity [13] を用いた自転車挙動計算に用いられる。

搭乗者の姿勢移動の検出には、ATR プロモーションの TSND-151 小型無線多機能センサ (モーションセンサ) を用いた。本センサは、9 軸のデータを最速で 1[ms] 毎に取得可能である。搭乗者の背中にセンサを取り付け、Bluetooth 機能によってセンサデータをパソコンに送信、Telnet 通信で Unity に送信し、リアルタイムでの同期・計算に反映している。

次に、取得した舵角、速度、姿勢角のデータから、自転車の挙動計算を行う。自転車の挙動に欠かせない要素である車体傾きをサーボにより再現する必要がある。運動方程式については次章で述べる。上記のように挙動計算を行った結果から視覚情報 3D を作成し、周囲に設置したスクリーンに後ろから投影する。自転車から前方 50[cm]、左右 100[cm] の距離に 150[cm] × 270[cm] の大型スクリーンを設置し、実際に屋外で自転車を運転している視覚情報を

提供する。投影する風景は、Unity を用いて作成する。街はホンダシミュレータを参考に、家、木、塀などのモデルを使用して作成している。

また、挙動計算の結果自転車がどのような動きをするのかが可視化できるよう、Unity を使用して 3D 自転車画像モデル (図 6) を作成した。簡易な自転車の形をしたモデルと、前輪と後輪の軌跡、方位角における曲率中心の軌跡が表示可能となっている。ここで、曲率中心軌跡について簡単に説明を行う [14][15][16][18][19][21]。自転車が旋回を開始すると、曲率中心の軌跡が発生し、走行軌跡に向かって徐々に接近する。最接近した辺りで少し停滞し、旋回が終わるにつれて走行軌跡から離れていく。このようにして、自転車の旋回時は V 字型の曲率中心軌跡が残るようになっている。もし途中でバランスを崩し、ふらついて急旋回した場合は、きれいな V 字型の軌跡にならないため、運転の安定性を示す指標となっている。作成した画像モデルの様子を図 6 に示す。

### 4.2 車体傾きの制御

走行時の車体傾き角度は、Unity モデリングの際に計算を行っているため、その値を用いた位置制御によって車体傾きを再現する。図 7 は、AC サーボモータを用いた車体傾きサーボの外観である。すこし見にくいだが、写真の下部中央よりすこし左に、オリエンタルモーター製の工業用 AC サーボモータ (NXM920A-PS25) を設置し、その上にギアをとりつけている。ギアが駆動するワイヤは左右から車体を制御する。危険回避のため、ワイヤー部分には木製のカバーを取りつけている。

### 4.3 セルフステアの制御

セルフステアによってハンドルに発生するトルクを再現するため、前輪上部にセルフステアサーボを設置した。その様子を図 8 に示す。写真のゴムベルトで接続された右側プーリーが AC サーボモータの軸であり、左側の大きなプーリーはハンドルを駆動する。ただし、このベルトには滑りを与えて、ハンドル軸にトルクは印加されるが、軸を拘束はしない。

写真では見にくいですが、中央部に、ハンドル舵角を測定するロータリエンコーダが見える。ハンドル軸との間は滑りのないベルトで接続されている。

## 5. 車体傾き挙動計算方法

本章では 2 種類の車体傾き制御手法について説明する。

1) 自転車の車体を倒立振子とみなした車体の傾きの制御手法、2) 重力と遠心力のつり合い関係に着目した車体傾きの制御手法、の 2 通りである。

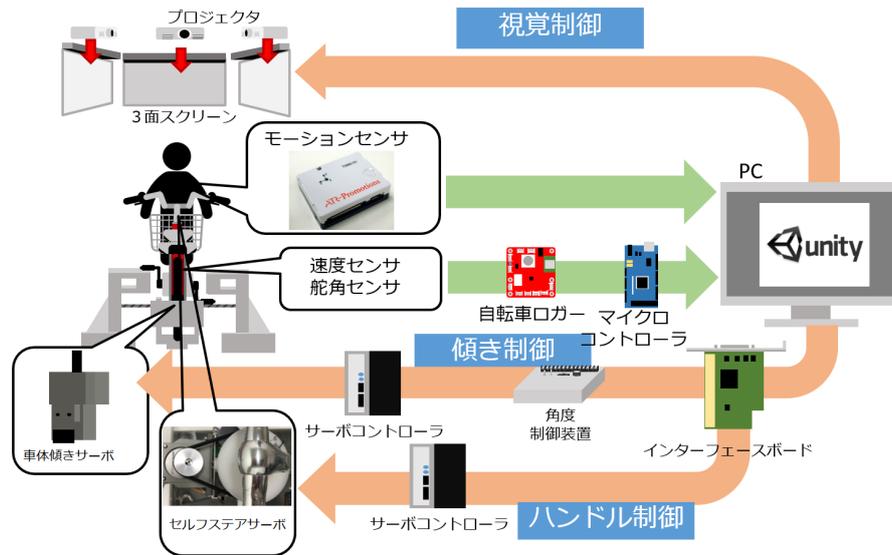


図 3 シミュレータ実装イメージ

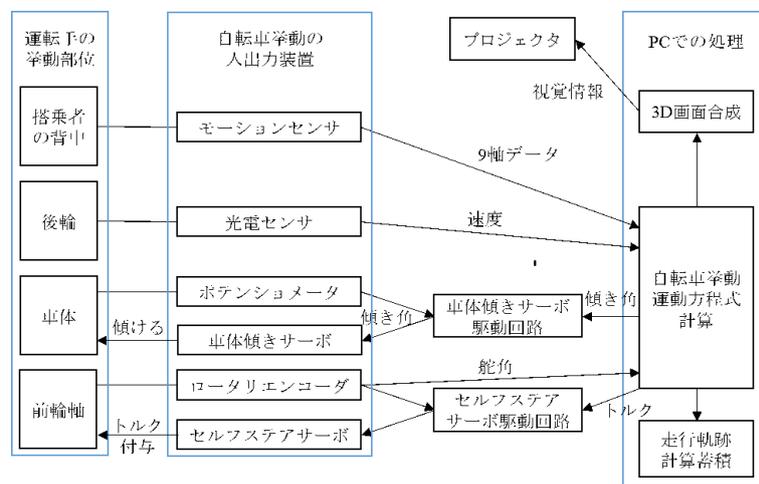


図 4 信号処理フロー概要



図 5 シミュレータ外観

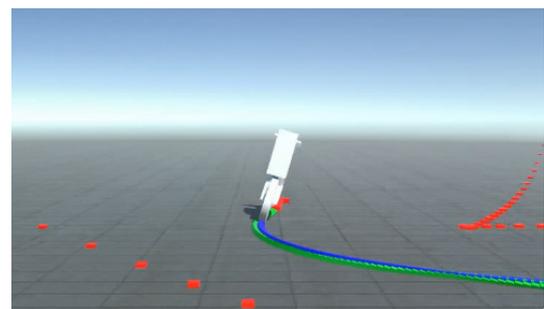


図 6 3D 合成画像モデルと走行軌跡

### 5.1 倒立振り子モデルによる制御

今回提案する自転車シミュレータは、前後輪の位置が固定され、図7のように車体傾きサーボモータにより車体傾きを制御している。そこで、この提案シミュレータを倒立振り子モデルとしてみなすことにする。本節では、倒立振り子モデルに対して運動方程式を導出し、それをを用いた車体傾き制御手法を提案する。使用するパラメータは、自転車を

倒立振り子として扱い電動自転車の走行安定化に関する研究を行っている仁木らの文献 [5][17] を参考にした。

図9に自転車後方からみた場合の自転車と搭乗者に発生するモーメントの関係図を示し、運動方程式の導出に使用するパラメータの詳細を表1にまとめる。

車体傾きに関する運動方程式の導出を行う。自転車を倒立振り子とみなし、剛体の運動方程式をたてる。図9のよう

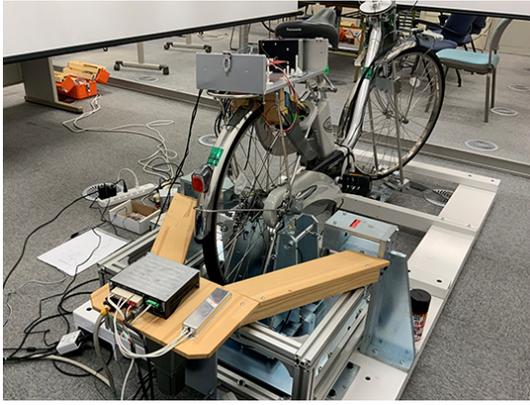


図 7 車体傾きサーボ外観



図 8 セルフステアサーボ外観

に、タイヤの接地面を軸として考える。

$$I\ddot{\theta}_1 = N \quad (1)$$

但し、 $N$  は回転モーメント [ $Nm$ ] である。(1) 式は次の (2) 式となる。等式の左側が左に倒れ込もうとする自転車と操縦者の回転モーメントであり、右式は、自転車および操縦者の水平方向の分力と遠心力である。ただし、自転車と操縦者の相互作用のモデル化は困難であり、操縦者と自転車は全体をひとつの剛体とみなして式を立てている。

$$\begin{aligned} (m_1 l_1^2 + m_2 l_3^2) \ddot{\theta}_1 = & \\ m_1 g l_1 \sin(\theta_1) - m_1 l_1 \frac{v^2}{r} \cos(\theta_1) & \quad (2) \\ + m_2 g l_3 \sin(\theta_3) - m_2 l_3 \frac{v^2}{r} \cos(\theta_3) & \end{aligned}$$

本方程式では、車輪のジャイロ効果は、走行速度が遅い領域を対象とするシミュレータから除外した。また、セルフステア効果は、ハンドル舵角が正面から外れるとスイッチが ON となり、車体傾斜角の 2 倍の舵角に達すると OFF となる、簡単な制御構造とした。2 倍の係数は、経験的に決定した。

曲率半径  $r$  は  $\phi$  が小さいとして以下のように近似する [5][17]。これにより、上式の半径  $r$  を算出する。

$$r = \frac{1}{\sigma} = \frac{L}{\sin(\phi)} \quad (3)$$

表 1 倒立振り子モデルのパラメータ

名称	記号	単位
ハンドル舵角	$\phi$	$rad$
後輪速度	$v$	$m/s$
曲率半径	$r$	$m$
キャスト角	$\eta$	$rad$
車体の慣性モーメント	$I$	$kgm^2$
重力加速度	$g$	$m/s^2$
ホイールベース	$L$	$m$
地面の接地面から重心までの直線距離 (操縦者と自転車一体)	$l$	$m$
自転車と地面の接地面から自転車の重心までの直線距離	$l_1$	$m$
自転車のサドルから搭乗者の重心までの直線距離	$l_2$	$m$
自転車と地面の接地点から搭乗者の重心までの直線距離	$l_3$	$m$
自転車と地面の接地点から自転車のサドルまでの直線距離	$l_4$	$m$
車体傾き角 (操縦者と自転車一体)	$\theta$	$rad$
地面に対して垂直な軸と、自転車車体のなす角	$\theta_1$	$rad$
地面に対して垂直な軸と、搭乗者のなす角 (サドルを支点とみる)	$\theta_2$	$rad$
地面に対して垂直な軸と、搭乗者のなす角 (地面を支点とみる)	$\theta_3$	$rad$
自転車の質量	$m_1$	$kg$
搭乗者の質量	$m_2$	$kg$

また  $\theta_3$  は、センシング可能な  $\theta_1, \theta_2$  から以下のように求めることとする。

$$\theta_3 = \arctan\left\{\frac{l_4 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2)}{l_4 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2)}\right\} \quad (4)$$

式 (2) に、式 (3)~式 (4) を代入すれば、以下の  $\theta_1$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & \\ \frac{m_1 l_1}{m_1 l_1^2 + m_2 l_3^2} \left\{ g \sin(\theta_1) - \frac{v^2 \sin(\phi)}{L} \cos(\theta_1) \right\} & \\ + \frac{m_2 l_3}{m_1 l_1^2 + m_2 l_3^2} \left\{ g \sin(\theta_3) - \frac{v^2 \sin(\phi)}{L} \cos(\theta_3) \right\} & \quad (5) \end{aligned}$$

導出された微分方程式 (5) を用いてリアルタイムに車体傾き角度を算出する。Unity の動作との関係で、16.7[ms] 毎に計算を行うため、微小時間をかけることで微分方程式を近似的に解く形を採用している。尚、上式において、車体傾き  $\theta_1$  の導出に  $\theta_1$  を用いている。このため、右辺の  $\theta_1$  はサンプリングタイミングの 1 つ前の値を使用して、近似計算している。

## 5.2 モーメントのつり合いによる制御

本節では、遠心力と旋回のための傾斜角がバランスして

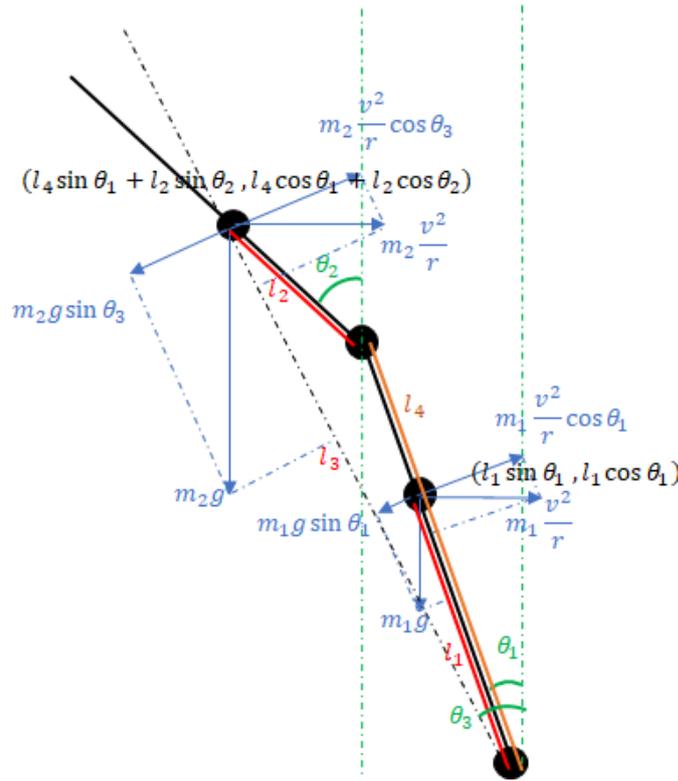


図 9 前方から見たパラメータの相互関係

いる時を考える。必要なパラメータは表 1 に示す。体重移動を考慮した自転車つり合い式は次式であらわす。

$$\begin{aligned} m_1 g l_1 \sin(\theta_1) + m_2 g l_3 \sin(\theta_3) &= \\ m_1 \frac{v^2}{r} l_1 \cos(\theta_1) + m_2 \frac{v^2}{r} l_3 \cos(\theta_3) & \quad (6) \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} l_3 \sin(\theta_3) &= l_4 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) \\ l_3 \cos(\theta_3) &= l_4 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) \end{aligned}$$

であるから、次式を得る。

$$\begin{aligned} (m_1 l_1 + m_2 l_4) g \sin(\theta_1) - (m_1 l_1 + m_2 l_4) \frac{v^2}{r} \cos(\theta_1) & \\ = m_2 l_2 \frac{v^2}{r} \cos(\theta_2) - m_2 l_2 g \sin(\theta_2) & \quad (7) \end{aligned}$$

三角関数の合成の公式

$$\begin{aligned} a \sin \theta + b \cos \theta &= \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \alpha) \\ \sin \alpha &= \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ \cos \alpha &= \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{aligned}$$

より左辺を変形すると、最終的に以下の結果を得る。

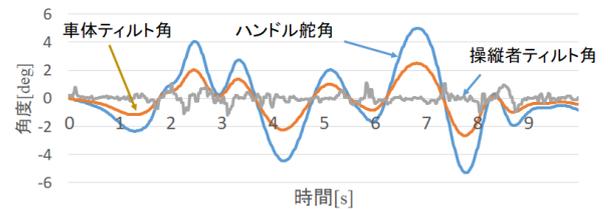


図 10 両手放しフラフラ運転における傾斜角 (シミュレータ)

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \sin^{-1} \left( \frac{m_2 l_2 \left( \frac{v^2}{r} \cos(\theta_2) - g \sin(\theta_2) \right)}{\sqrt{\left( g(l_1 m_1 + l_4 m_2) \right)^2 + \left( \frac{v^2}{r} (l_1 m_1 + l_4 m_2) \right)^2}} \right) \\ &+ \sin^{-1} \left( \frac{\frac{v^2}{r} (l_1 m_1 + l_4 m_2)}{\sqrt{\left( g(l_1 m_1 + l_4 m_2) \right)^2 + \frac{v^2}{r} (l_1 m_1 + l_4 m_2)^2}} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

## 6. 動作確認

本章では、シミュレータの動作例を示す。

### 6.1 倒立振り子モデル

最初に倒立振り子モデルの動作を示す。図 10 には、シミュレータを用いた両手手放し走行 (ほぼ直進走行) における、ハンドル舵角、操縦者の傾斜角、自転車の傾斜角の例を示す。車体傾きサーボ、セルフステアサーボ、操縦者用センサが稼働している。時間は左から右に流れ、操縦者はハンドルに全く手を触れていないのにも関わらず、セルフステアサーボによりハンドルが制御されている。

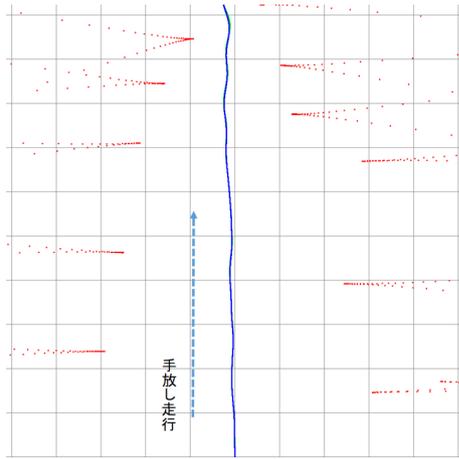


図 11 両手放しフラフラ運転における走行軌跡 (シミュレータ)

図 11 は、走行軌跡の曲率中心プロット法 [21][14] の表示結果である。図 10 と同一の走行であるが、走行軌跡を上から眺めている。左右にプロットされているのが曲率中心プロットであり、シミュレータは下から上へ走行している。曲率中心の V 字型は、V 字の頂点をひとつの目標として自転車が回転していることを示す。最初はあまりハンドル舵角も大きくなかったのが、左右にフラフラと進む内に、旋回回転半径が小さくなっていることが曲率中心プロットから分かる。

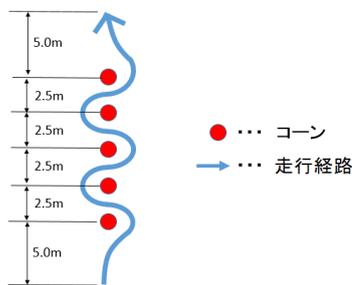


図 12 想定されたスラロームコース

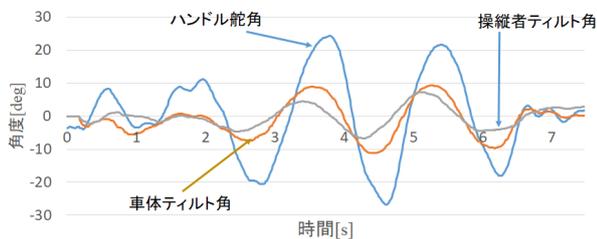


図 13 自転車シミュレータによるスラロームコース車体傾き角

## 6.2 旋回つりあいモデル

旋回つりあいモデルの場合の走行例を示す。舵角操作が必要な走行の検証として、スラローム走行実験を行う。運動方程式の検証と同様、図 12 に示したスラロームコースを

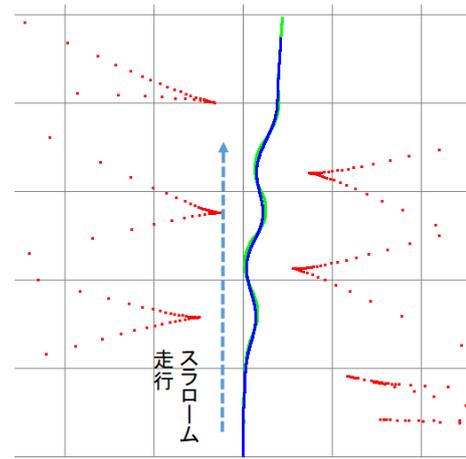


図 14 自転車シミュレータによるスラロームコースの曲率中心軌跡

使用する。今回はつり合い式のため、スラローム走行でも倒れずに走行できることは自明である。舵角、車体傾き、搭乗者の身体の傾きを図 13 に、走行軌跡と曲率中心軌跡を図 14 に示す。図 14 から、スラロームコースの走行が概ね再現できていると考えられる。

ここで、算出した傾きが正しいか検証を行う。被験者に実地のスラロームコースを走行してもらい、結果を自転車シミュレータの場合と比較する。比較する 2 つの値は、1) 実測値である車体に装着したジャイロセンサから求めた傾きの値 (傾斜角) と、2) 式 (9) に基づいて、シミュレータの後輪速度、舵角、及び車体傾き角から算出した傾きの値である。結果を図 15 に示す。

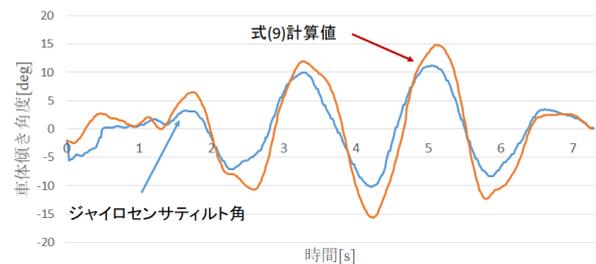


図 15 実走行時の身体傾斜角とシミュレーションとの比較

図 15 から、式 (9) で求めた傾きの値は、ジャイロセンサの値より振れ幅が大きくなっている。原因としては、人間の体重移動に対する考慮が足りていない可能性があると考えられる。今回は 2 重振り子の近似的なものとして考えているが、厳密には人間は剛体ではないので重心位置が自由にかわる。そのため、搭乗者がうまく調整している部分が誤差として生まれてしまったと考えられる。

ただし、旋回つりあいモデルでは、試しに、車体の傾斜角を逆にすることを試みた。即ち、左にハンドルを切っている場合を考える。旋回つりあいモデルでは、左に車体は傾く。しかし、同じ傾きで右に振ったのである。利用者の声

を聴くと、多くの操縦者がこちらの方が自然と回答した。本来期待される遠心力による身体を右に持ち上げると同等の力が再現できているからではないかと思われる。

## 7. 終わりに

セルフステアサーボと車体傾きサーボを具備した自転車シミュレータを構築した。姿勢制御は、1) 簡略化された倒立振り子モデルと 2) ハンドル舵角を前提とした旋回つりあいモデル、である。実装した結果、旋回つりあいモデルは、車体の傾斜を本来の方向とは逆に振る、即ち、左にハンドルを切った時に右に車体を傾けた方が、本来の左方向への傾斜をかけるより、操作感は自然であった。これは、実操作では存在する遠心力の影響を模擬できるためと思われる。

倒立振り子モデルとしては、身体の左右への傾斜を考慮に入れており、手離しをして、身体の左右の動きで運転ができることを確認した。ただし、今回採用した工業用 AC サーボと滑りベルトによるトルク印加では、トルク制御が自由にできず、ハンドルを握った時の動作制御は不適切であった。一つの原因として、AC サーボ系のレスポンスが遅く、運動方程式の求解がうまく行っていない可能性がある。

今後の自転車シミュレータの課題があるとすると、1) AC サーボではなく、トルクサーボを用いたセルフステアサーボの導入、2) 応答速度改善のためのサーボ制御系の最適化設計、が望まれる。

本試作に際しては、多くの学生さんの寄与がある。以下に名前を記して、謝意を捧げる。島田哲哉、山田憲、山本光、植田晃一郎、高橋遼一、石田雄紀、坂上友都（順不同・敬称略）。

## 参考文献

[1] 浅田翔平, 田端佑介, 河内雄太, 山本光, 金田重郎, “自転車の走行状態推定を加味したハザードマップの提案”, 第9回情報システム学会全国大会・研究発表大会 2013年11月

[2] 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

[3] 本田技研工業株式会社, 自転車シミュレータ, <https://www.honda.co.jp/safetyinfo/simulator/bicycle/> (2020年5月19日確認)

[4] “ホンダ、自転車シミュレーター発売”, Response.20th Web サイトから, <https://response.jp/article/2009/10/15/130865.html> (2020年5月19日確認)

[5] 仁木宏, 村上俊之, “ハンドル制御による電動自転車の走行安定化に関する一考察”, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/125/8/125.8.779/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/125/8/125.8.779/_pdf), 電学論 D, 125 巻 8 号, 2005 年

[6] 動作反映没入型自転車シミュレータ MORICS の開発, [http://www.transport.iis.u-tokyo.ac.jp/poster/091-](http://www.transport.iis.u-tokyo.ac.jp/poster/091-120/101.pdf)

120/101.pdf

[7] 自転車シミュレータ C-Tips, <https://tabi-rin.com/archives/article/9816#C-Tips> (2020年5月20日確認)

[8] Dong-Soo Kwon et al., “KAIST interactive bicycle simulator”, Proceedings 2001 IEEE ICRA, May, 2001

[9] 景山一郎, 草刈政宏, “二輪車用ライディングシミュレータの構築と制御系設計に関する研究”, 機械学会, 2005 年次大会講演論文集, pp.309-310, 2005 年

[10] “世界初のライディングシミュレーターの開発と進化”, ホンダ技研工業, <https://www.honda.co.jp/tech/motor/close-up/ridingsimulator/>

[11] Tetsuji Yamaguchi, Akira Yamada, Takeshi Fujiwara, Ryoichi Takahashi, Tetsuya Shimada, Yuki Ishida, Koichiro Ueda, Shigeo Kaneda, “Development of Bicycle Simulator with Tilt Angle Control Tilt Angle”, 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), DOI: 10.1109/COMP-SAC.2018.10238 Vol.2, June, 2018

[12] 石田雄紀, 島田哲哉, 植田晃一郎, 金田重郎, “車体傾きを許容した自転車シミュレータの提案”, 情報処理学会・第79回全国大会, 3T-05 2017年3月

[13] すべての人に Unity を, Unity Web ページ, <https://unity.com/ja>

[14] 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

[15] 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

[16] 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

[17] 村上俊之, “平成23年度電動自転車の環境適応型安心安全支援制御補助事業報告書”, 2020年1月参照 [http://www.fha.sd.keio.ac.jp/JKA2011/2011jka\\_report-final.pdf](http://www.fha.sd.keio.ac.jp/JKA2011/2011jka_report-final.pdf)

[18] 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

[19] 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/COMP-SAC.2017.263, 2017年7月

[20] 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. 2583-589, May, 2006

[21] 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