

# 遺伝的アルゴリズムを用いた 二輪車操縦モデルの開発

A Model for Motorcycle Rider Operation Based on Genetic Algorithms

藤井 茂 Shigeru Fujii Sergey A. Panfilov Sergey V. Ulyanov

●研究開発センター コア技術研究室 / Yamaha Motor Europe N.V.

技術論文

## Abstract

In order to program computer simulations for a running motorcycle it is necessary to create a model of the motorcycle body plant and also a model for the rider's operational actions. In this research project we developed a motorcycle rider operation model using genetic algorithms to replace the operational actions of the rider and make the motorcycle follow a specified course. We created the motorcycle body model using the SimMechanics, mechanical modeling tool of the MATLAB software. This model is made to represent a scooter and consists of seven rigid bodies and 12 degrees of freedom. The rider operation model adopts a control method in which the machine roll angle is kept coinciding with the target roll angle, which is calculated so as to reach the prescribed course point at the forward reference length. Furthermore, the gain parameters used in the control method were optimized by genetic algorithms used in performing simulations at set velocities and roll angles. The running simulations using this rider operation model were performed over a velocity range of 1-15m/s and were successful in having the machine run the designated course with good stability. Furthermore, a good level of agreement was achieved between the results of actual test runs and the simulation runs.

## 要旨

二輪車の走行をシミュレーションするためには車体モデルと共にライダーの操縦動作をモデル化する必要がある。本研究はライダーの操縦動作の代わりに車体を安定に目標コースに追従させる二輪車操縦モデルを遺伝的アルゴリズムを用いて開発したものである。シミュレーションで用いた車体モデルはSimMechanicsというMATLABの機構解析用オプションツールにて作成した。このモデルはスクーターを対象にモデル化したものであり、7つの剛体からなり、12自由度を持つ。操縦モデルは前方注視点にてコース上に到達するために適当な車体ロール角度を目標ロール角として、車体ロール角を目標ロール角に一致させるように制御する形式を用いた。また、この制御におけるゲインパラメーターは遺伝的アルゴリズムを用いつつ、定速度、定ロール角シミュレーションを行うことによって最適化した。この制御モデルを用いて行った走行シミュレーションは1~15m/sの速度範囲で、任意のコースを安定に走行することができた。また、実車走行の結果とシミュレーションの結果はよく一致した。

## 1 はじめに

近年、二輪車操縦モデルとして様々なものが提案されている<sup>1~4)</sup>。これらの中にはライダーの操縦動作をデータに基づいて再現した例や、ロール角の安定性とコースへの追従性の両立をするための工夫が見られる例などがあり、大変参考になる。しかし、実際に走行シミュレーションを行うにはまず多くの時間を掛けて走行条件ごとに安定に走行できる制御パラメーターを求める必要があり、走行シミュレー



図1 モデル対象車両

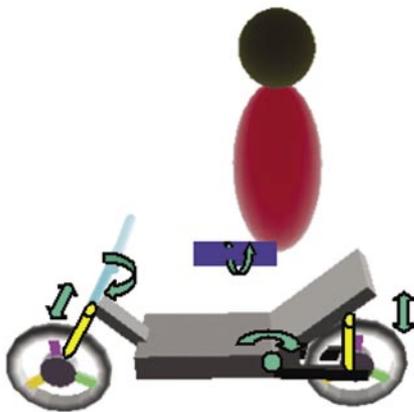
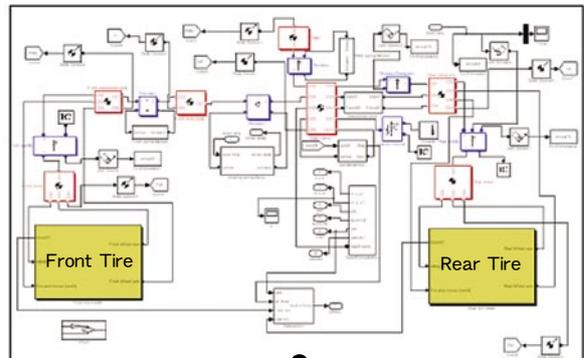


図2 車体モデル



motorcycle body model

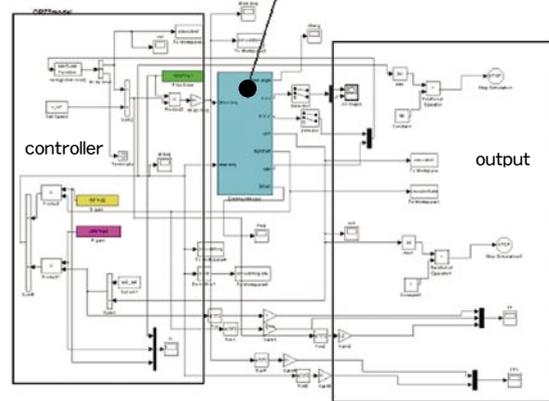


図3 車体モデル回路図

シミュレーションを開発に生かせない原因になっていると考えられる。ここではスクーター車体モデル(図1~3)をMATLAB/SimulinkのオプションであるSimMechanicsにより作成したものを対象に、自由に速度やコースなどの条件を設定してシミュレーションを行うことができるように、遺伝的アルゴリズム(以下、GA)を用いて二輪車操縦モデルを開発した例について報告する。

## 2 車体モデル

車体モデルはSimMechanicsを用いて作成した。概要は剛体数7(メインフレーム、ライダー、ステアリング、フロントサスペンション下、リアアーム、前後輪)、回転ジョイント5(ステアリング、リアアームピボット、ライダーリーン、前後輪)、伸縮ジョイント1(フロントサスペンション)、バネダンパー4(フロントサスペンション、リアサスペンション、ライダーリーン、ステアリング)である。自由度はメインフレーム基準点の6自由度(前後左右上下、ロール角、ピッチ角、ヨー角)の他に前後輪の回転、フロントサスペンションの伸縮、ステアリングの回転角、ライダーのロール角、リアアームの回転角と合計で12自由度のモデルである。外力としては重力、空気抵抗、揚力とタイヤ荷重を用いた。入力データは各剛体の重心点、接続点の座標や重量、慣性モーメント、バネ、ダンパー等の物性値やタイヤについての定数等を入力した。タイヤモデルについては一次遅れを考慮した線形タイヤモデルをSimulinkのブロックにて作成した。このタイヤモデルはタイヤの地面に対する状態(高さ、キャンバー角、横滑り角、前後すべり率)を入力として、タイヤごとに求められたパラメーター値を用いて、タイヤの接地点における前後力、横力、セルフアライニング

トルク、オーバーターニングモーメント、緩和長を出力するモデルである。このモデルは大きな横滑り角やロール角が生じた場合には、線形性を仮定しているため出力が過大になってしまい使えないが、スクーターの一般的な走行の範囲であれば対応可能である。タイヤモデルのパラメーターについては主にJARI(Japan Automobile Research Institute)にて計測した値を用いた。なお、モデルの作成にあたっては参考文献<sup>5)</sup>を基にThe Mathworks社にて作成されたSimMechanicsのデモモデルを参考にした。

### 3 操縦モデル

図3に示すように、走行シミュレーションは、前項にて述べた車体モデルの状態をSimlinkにより組み立てた操縦モデルが制御することにより、実行される。操縦モデルはドライブトルクとステアリングトルクを式(1)、(2)に従って算出するものとした。すなわち、目標速度と目標ロール角に速度とロール角が近づくようにP(D)制御を行うものに、ステアリングダンパーの効果を加えたものである。ステアリングダンパーの項については、通常は車体モデルにその機能を持たせることが多いが、ステアリング部に発生する摩擦力は通常小さく、実際にはライダーが加える力であることと、走行条件によってステアリングダンパーの値は変化すると考え、式(2)に加えた。

なお、コースを追従するシミュレーションにおいては、目標ロール角を式(3)～(6)によって算出した。前方注視距離先にて与えられたコース上に円弧コースを通して到達するというを想定して、その円弧コースで走行する場合に必要なロール角を目標ロール角としたものである(図4)。

$$\tau_d = -K_{p1}(v - v_{ref}) \quad (1)$$

$$\tau_s = -K_{p2}(\phi - \phi_{ref}) - K_{d2}\dot{\phi} - K_{d3}\alpha' \quad (2)$$

$$\omega = v/R \quad (3)$$

$$a = v^* \omega \quad (4)$$

幾何学的(図4)関係から、

$$R = (y^2 + LR^2)/2y \quad (5)$$

$$\phi_{ref} = \tan^{-1}(a/g) = \tan^{-1}\left(\frac{2y^*v^2}{g^*(y^2 + LR^2)}\right) \quad (6)$$

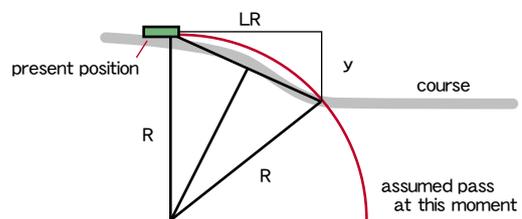


図4 コース追従時の想定コース

以下では操縦モデルのゲイン、すなわち式(1)、(2)の $K_{p1}$ 、 $K_{p2}$ 、 $K_{d2}$ 、 $K_{d3}$ を状況に応じた値に設定するファジーコントローラーを設計する手法について記す。ここで示す手法は、図5に示すように、第一段階にていくつかの目標速度、目標ロール角に対しての最適ゲインを探索し、第二段階では離散的な状態での最適値の間をスムーズにつなぐためのファジーコントローラー作成を行う。なお、本手法はGAを用いた最適ファジーコントローラー設計ソフトSCOptimizerを二輪車のモデルに応用したものである<sup>6)</sup>。

#### 3.1 定速定ロール角シミュレーション

二輪車を操縦するということはロール角を安定させつつ、望んだコースを追従することである。そして、ロール角を安定して走行できる制御方法を探ることが操縦モデルを作成する基礎になると考え、第一段階として目標速度と目標ロール角を指定値に一定化させるシミュレーションを行い、目標値ごとの最適ゲインを探索した。SCOptimizerにて下に示すように目標速度、目標ロール角、GAパラメーター、適合関

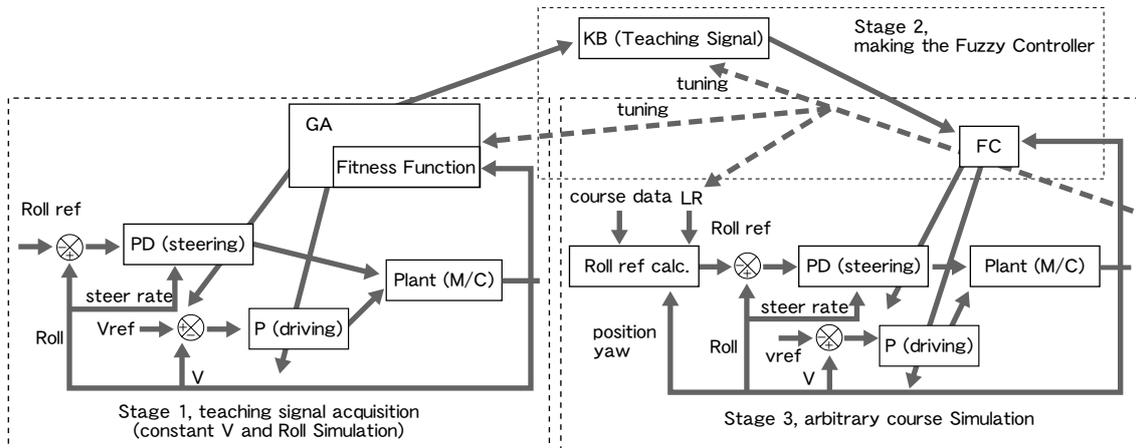


図5 ファジーコントローラーとその開発手順

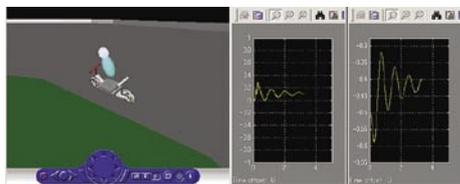


図6 最適化開始直後の最適化の様子

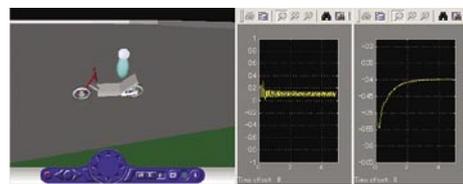


図7 最適化が進んだ後の最適化の様子

数等を設定して、図3の走行モデルを用いてシミュレーション(図6、図7)を行い、各目標値における最適ゲインを求めた。なお、GAの最適化の成否は適合関数の設定の仕方によるので、重み係数はシミュレーションの様子を見て、トライアンドエラーにて調整する必要があるが、図8には単一の適合関数をすべての場合に用いて得られたゲインセットの例を示す。

目標速度 = 1,2,3,5,7,10,15 m/s

目標ロール角 = 0°, 2°, 10°, 20°, 30°

最適化対象ゲイン  $K_{p1}, K_{p2}, K_{d2}, K_{d3}$

GA パラメーター

個体数 = 200, 世代数 = 5

突然変異率 = 0.01, 交配率 = 0.64, 削除率 = 0.8

適合関数

$$FF = (v - v_{ref})^2 W_v + (\phi - \phi_{ref})^2 W_\phi + \phi^2 W_{d\phi} + \tau_d^2 W_{\tau_d} + \tau_s^2 W_{\tau_s} \quad (7)$$

$$W_v = 0.2, W_\phi = 1, W_{d\phi} = 1, W_{\tau_d} = 0.0001, W_{\tau_s} = 0.0005$$

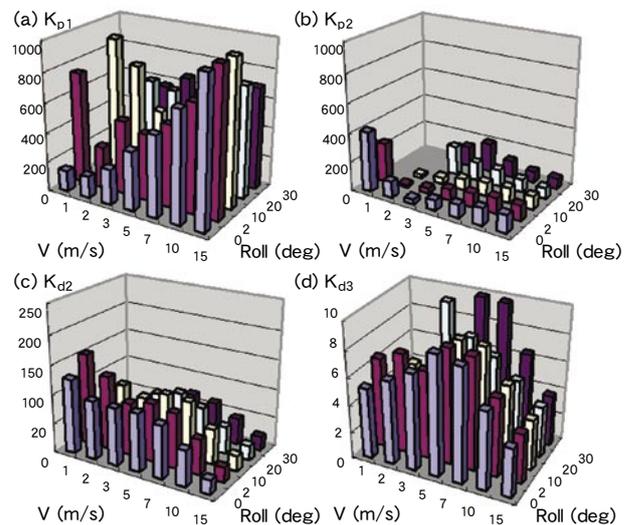


図8 単一の適合関数を用いた場合のゲインセット例

### 3.2 ファジーコントローラー作成

前項の手法にて得られたゲインセットを教師信号として、そのときの状態に応じて適したゲインを選び出すファジーコントローラーをSCOptimizerを用いて作成した。入力データは図8のようなゲインセットであり、図9のようなメンバーシップ関数を設定することにより状態(速度、ロール角)をファジー入力値に変換し、GAにより教師信号に合わせてスムーズにパラメーターが変化するようにファジールールを作成した。

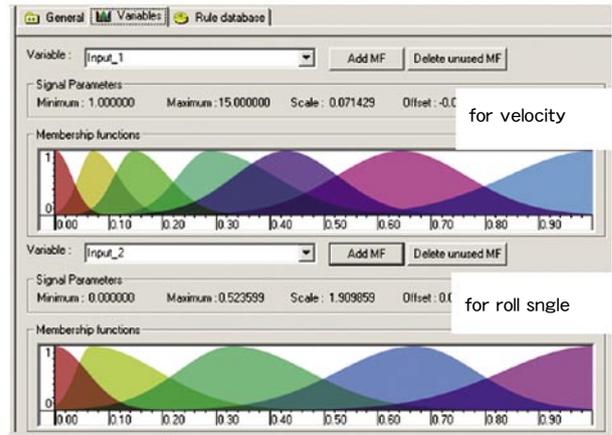


図9 メンバーシップ関数

### 3.3 コース追従シミュレーションと実験データとの比較

図8のゲインセットをベースに作成されたファジーコントローラーを用いて、図10の表のように速度ごとに角Rを設定して作成した左折コースや、図11のような車線変更コースや、図12の周回コースを追従させるシミュレーションを行った。1~7m/sではコース追従性が不十分な場合があり、一方15m/sの場合には操舵トルクの変動が激しい傾向が見られた。また、4~6m/sの速度域で走行させた周回コースを追従させるシミュレーションの走行軌跡は、図13のTrack Aのように大きくコースを外れてしまう結果になった。

これらの不具合点の解決のため、まずは定速定ロール角シミュレーションでの適合関数の重み係数を調整した。これにより1~3m/sの場合は改善されたが、4~7m/sについては改善されなかった。しかし、定速定ロール角シミュレーションにてステアリングレートを対するゲイン $K_{d3}$ を最適化対象に含めず固定値として他のゲインを最適化したところ、操縦性

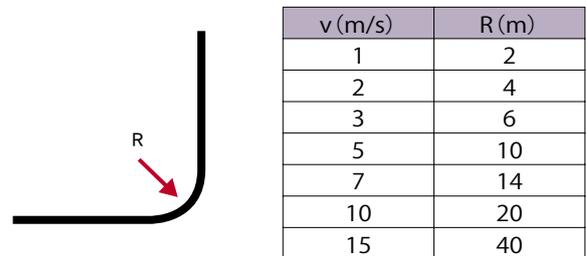


図10 左折コース

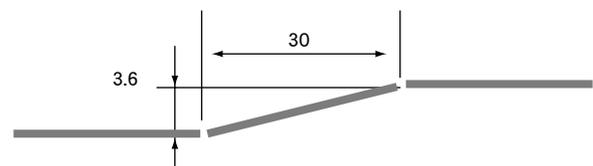
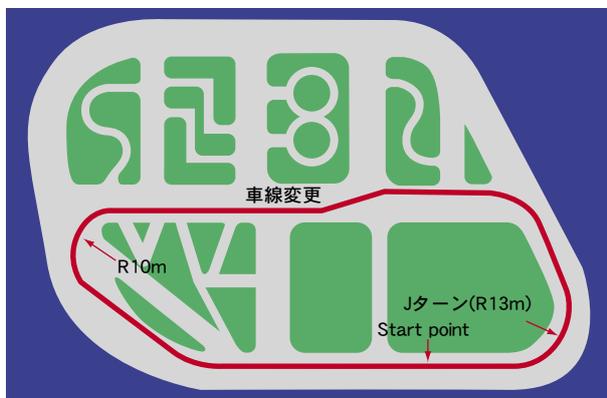


図11 車線変更コース

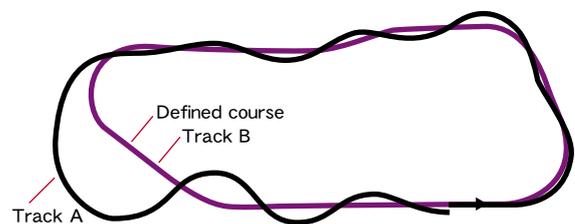


図13 周回コースでの走行軌跡

と安定性のバランスが良いゲインが得られた。また、 $K_{d3}$ はLRと共に別途、左折コースやレーンチェンジなどのコース追従シミュレーションにて値を決めた。これらの改良により図14のようなゲインを得た。このゲインにて作成したファジーコントローラーを用いると、軌跡は図13のTrack Bになった。この図ではDefined Courseと重なっている。

同様のコースをライダーが実走した実験値とシミュレーションの結果を比較したものを図15(a)~(e)に示す。速度については実走結果をスムーズにしたものをシミュレーションの目標速度にしたので当然良く一致しているが、他のデータについても実験とシミュレーションは良く一致している。図16はシミュレーション中のゲインの変化を示している。

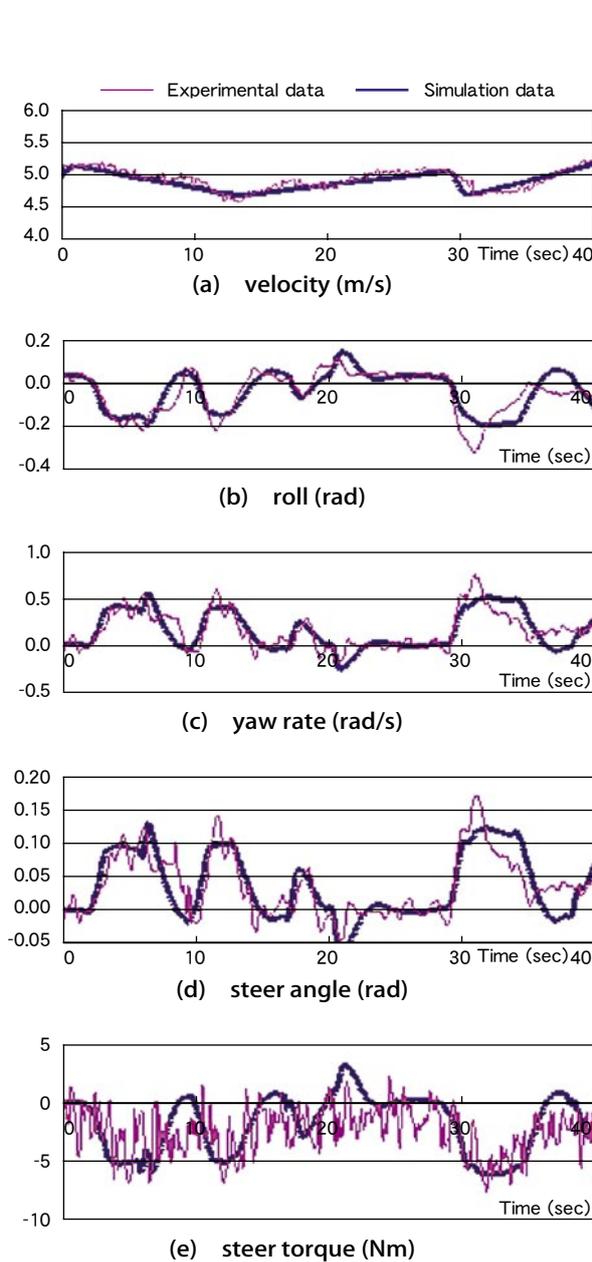


図15 実験と解析のデータ比較

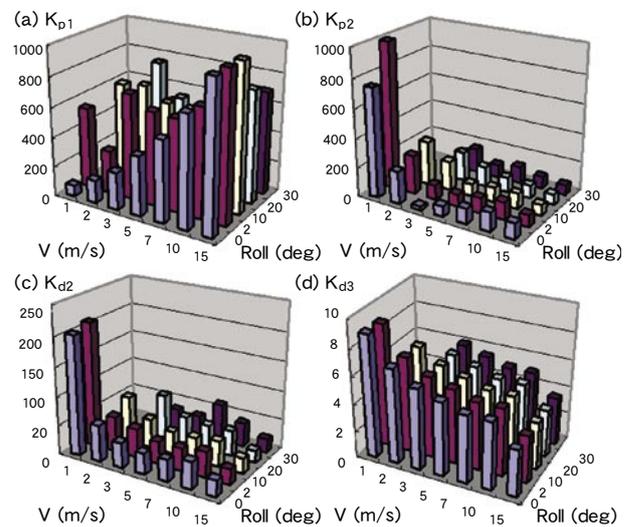


図14 最適化されたゲインセット

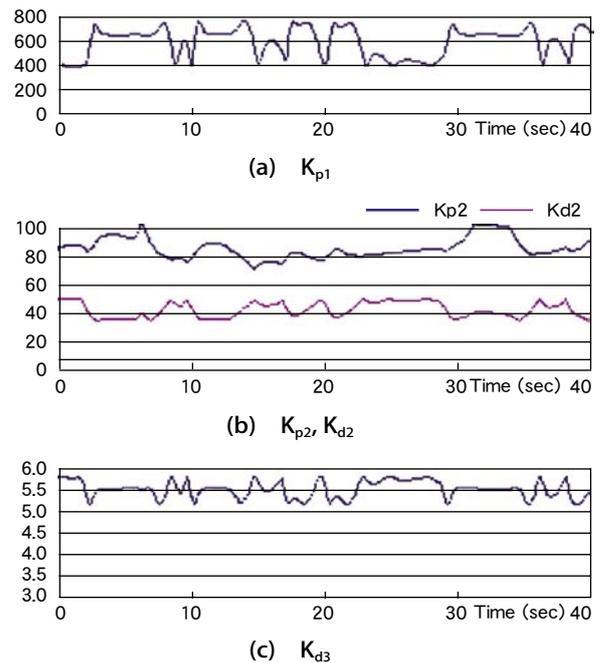


図16 ゲインの変動

また、図17にコースで大きく速度に変化をつけた場合のシミュレーションの様子を示す。ビデオにて示されるように、作成されたコントローラーは広い速度域にて操縦が可能である。

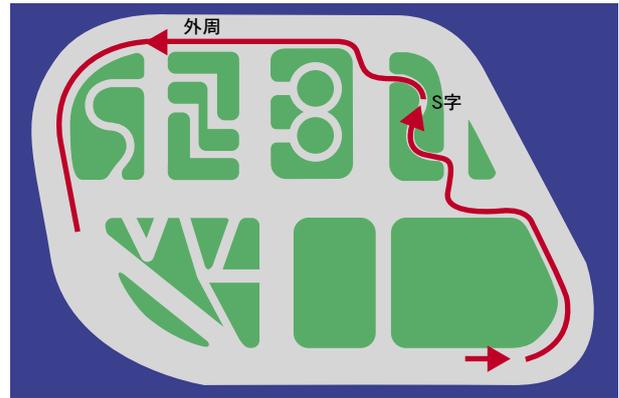


図17 S字コース

## 4 おわりに

GAを使った最適化手法を用いて二輪車の走行シミュレーションモデル操縦用のファジーコントローラーを作成した。作成されたファジーコントローラーは広い速度域にて多様なコースを安定に走行できた。また、シミュレーションの結果は実験データとも良く一致した。

### ■記号定義

$\tau_d$ : 駆動トルク(Nm)	$\tau_s$ : 操舵トルク(Nm)
$K_{p1}, K_{p2}, K_{d2}, K_{d3}$ : ゲイン	$v$ : 前進速度(m/s)
$v_{ref}$ : 目標速度(m/s)	$\phi$ : ロール角(rad)
$\phi_{ref}$ : 目標ロール角(rad)	$\phi'$ : ロールレート(rad/s)
$\alpha$ : 操舵角(rad)	$\omega$ : ヨーレート(rad/s)
$R$ : 旋回半径(m)	$a$ : 横加速度(m/s <sup>2</sup> )
$LR$ : 前方注視距離(m)	$y$ : 前方での予測偏差(m)
$g$ : 重力加速度(m/s <sup>2</sup> )	$FF$ : 適合関数
$W_v, W_\phi, W_{d\phi}, W_{\tau d}, W_{\tau s}$ : 適合関数の重み	

### ■参考文献

- 1) 今泉博英, 藤岡健彦: 機構解析言語による二輪車の運動解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.942, 21-24頁(1994)
- 2) 大和田克幸, 景山一郎: 二輪車を操縦する人間の制御動作に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.942, 41-44頁(1994)
- 3) T.Breuer, D.A.Pruckner: Advanced Dynamic Motorbike Analysis and Driver Simulation, Studienarbeit am Institut für Kraftfahrwesen Aachen (1999)
- 4) 渡辺仁: DADS/Plantを使ったモーターサイクルの走行シミュレーション, Matlab Automotive user's meeting (2000)

- 5) D.J.N. Limebeer, et al.: The stability of motorcycles under acceleration and braking. Proceedings Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, (2001), vol. 215, no. 9, pp. 1095-1110
- 6) S.A.Panfilov, et al.: Soft Computing Optimizer: Structure and SW for Simulation of Universal Fuzzy Approximators, Second International Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW'03), pp. 112-122(2003)

■著者



左から、セルゲイパンフィロフ、セルゲイウイリアノフ、  
藤井茂