

# ライダー挙動を含む二輪車の走行シミュレーション 技術の構築

Motorcycle Dynamic Simulation Model Incorporating Actual Rider Behavior Data

手塚 良孝\*  
Yoshitaka TEZUKA  
宮 岸 俊一\*  
Shunichi MIYAGISHI

玉 島 勉\*  
Tsutomu TAMASHIMA  
中 村 豊一\*  
Toyokazu NAKAMURA  
細 田 和 作\*  
Wasaku HOSODA  
吉 木 浩 人\*  
Hiroto YOSHIKI

## 要 旨

二輪車の走行シミュレーションにおいて、ライダーは車体に固定の質量として扱われてきたため、ライダー挙動に関する研究とシミュレーションへの適用が長年の課題であった。本研究では、ライダー挙動を取り入れたワインディングコース走行シミュレーション技術構築を推進した。映像処理型のモーションキャプチャにより、実走行時のライダー挙動を数値化し、車体モデルに結合させた新たな人体モデルに適用することで、実際のライダー挙動を再現した。計算に必要な走行軌跡の取得には、Global Positioning System計測機器を用いた。得られたデータと多自由度ライダーモデルを導入した二輪車走行モデルを、機構解析ソフトに適用することで、ライダーの積極的な体重移動と加減速を伴うワインディングコース走行の計算精度が向上した。

## ABSTRACT

For motorcycle dynamic simulation, the rider had previously been defined as a mass that is fixed on the motorcycle; therefore, examining and applying rider behavior to dynamic simulation models have been long-standing issues. This research established a dynamic model that simulates running on a winding road course while incorporating rider behavior. Rider behavior in actual running tests was digitalized using an image-processing-type motion capture system. By applying the digitalized behavior data to the motorcycle simulation model, the actual rider behavior was accurately modeled. Actual running paths for the simulation were measured using a Global Positioning System. Calculation accuracy of the rider model weight shift during acceleration and deceleration on the winding road course was enhanced by applying the acquired rider behavior data and the motorcycle dynamic simulation model which incorporates the multi-degree-of-freedom rider model, into the multi-body dynamics analysis software.

## 1. まえがき

高速安定性・定常円旋回シミュレーションなど、機構解析ソフトによる二輪車の走行シミュレーションは実走行試験との相関性も高く、広く商品開発や学術研究の場で利用されている<sup>(1)・(3)</sup>。しかし、これらのシミュレーションにおけるライダーモデルは、固定質量や、1-2自由度の簡単なモデルで表現されており、ライダー挙動を伴う操縦特性の研究には適用が難しかった。本研究は、スーパースポーツ系車両の開発における、積極的な体重移動を含むライダー挙動と加減速を伴うワインディングコース走行時の操縦性検討や、クローズドサーキットの走行シミュレーションを実現させることを目的とし、その第一ステップとして、ライダー挙動およ

び走行軌跡を正確に再現するための計測技術・シミュレーション技術を構築した。

実際のライダー挙動を再現させるため、ライダーの腰や肩など人体各部位の挙動計測手法を確立し、より現実に近い挙動を再現できる人体モデルを二輪車走行モデルに組み込む必要があった。また、単純な直線や円形状で定義されていた計算上の目標走行ラインを、ワインディングコース走行の計算を可能とするため、実際の走行軌跡を取得する計測システムを必要とした。本稿では、ライダー挙動および走行軌跡の計測手法について説明し、得られたライダー挙動データ・実走行軌跡のデータをシミュレーションに適用した結果を事例とともに報告する。

\*二輪開発センター

## 2. 計測技術とシミュレーション手法

計測から計算までの流れを Fig. 1 に示す。はじめに、ワインディングコース走行時のライダ挙動、走行軌跡および車体挙動の計測をおこない、得られたデータをシミュレーションモデルに組み込むことで、加減速を含むワインディングコース走行の計算をおこなう。以下にその詳細を述べる。

### 2.1. ライダ挙動の計測方法

片山らの研究では、ライダと車両をリンク機構にてつないだライダ挙動計測装置が考案されている<sup>(4)</sup>。また、近年では、スポーツ医学やコンピュータアニメーション分野で活用されるモーションキャプチャ技術による、人体挙動計測の進歩がめざましい。二輪車走行時のライダ挙動を、精度よく計測できるシステムとして、ライダの操縦動作の自由度を制約しないこと、車体挙動に影響しない小型なものであることを前提に調査・検討した結果、本研究では、一台の CCD カメラで撮影されたライダ挙動の動画から、人体の三次元座標データを求めるモーションキャプチャ手法を採用することにした<sup>(5), (6)</sup>。ゆがみの少ない画像と、ライダの動きをカバーできる撮影範囲を得るために、使用するカメラレンズと位置を検討した(Fig. 2)。

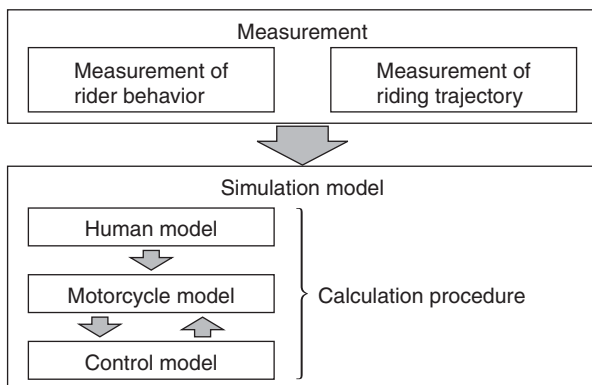


Fig. 1 Process flow from measurement to simulation



Fig. 2 CCD camera position

基本となる画像処理の考え方について説明する。Fig. 3は静止状態の車両上で、格子模様のベストを着用したライダが、前傾姿勢および横移動をおこなった際の計測結果の例である。図中の黄色線は、標準姿勢のライダ背中の格子模様の輪郭を示す(以下、パターンという)。ライダが標準姿勢から前傾姿勢へ変化した際に、動画中のライダ背中のパターンは、Fig. 3 (a) から Fig. 3 (b) へと徐々に変化していく。Fig. 3 (b)のライダの背中のパターン変化をみると、ライダ背中が前方に移動しながら前傾度を増していることがわかる。Fig. 3 (c)は、ライダが標準姿勢から左側へ横移動したあとの姿勢を示す。このときのパターン変化をみると、ライダの横移動と同時にライダの左肩が前進していることがわかる。モーションキャプチャソフトウェア(以下、キャプチャソフトという)では、このような動画の映像パターンの変化を追跡・解析することにより、人体の姿勢変化(挙動)の抽出をおこなっている。その精度は、ライダ前後・左右の動きに対し 10 mm 以内であることを確認した。

映像情報からライダ挙動を得る手法を実施例(Fig. 4)とともに説明する。映像は、任意の長さで区切った映像単位ごとに処理をおこなうものとする。まず、黄色のワイヤモデルにて表現されたキャプチャソフト上の簡易人体モデルに対し、身長、肩幅、腕長さなど(以下、各部位という)基本寸法をライダの実寸法と一致させる。次に、作業する映像単位の先頭フレームにて、映像内のライダ各部位と、簡易人体モデルの各部位が重なるように位置と姿勢を調整する(以下、関連付けという)。キャプチャソフトは、映像パターン変化に合致するように簡易人体モデルの姿勢変化量を計算し、各部位の位置・姿勢を連続的に追跡・抽出する。キャプチャソフト内で発生する累積誤差については、映像単位の最終フレームでも、映像内のライダと簡易人体モデルの関連付けをおこない、最終フレーム側からも逆回しで姿勢変化を計算することで誤差を最小化している。得られたデータは、車体モ

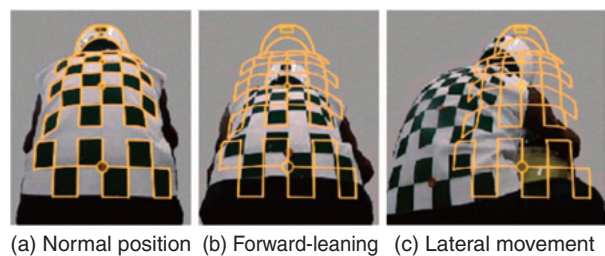


Fig. 3 Example of rider position while riding



Fig. 4 Consecutive movement of rider

デルに新たに組み込んだ人体モデルの挙動データとして使用する。

## 2.2. 走行軌跡の計測方法

ワインディングコース走行軌跡の計測は、ライダーごとの差異を把握できる精度が必要となった。走行軌跡の把握手法として、古くから慣性航法装置や残跡装置などが知られているが、今日では、自転車位置把握手法として Global Positioning System (以下、GPS という) が一般的になり、さらに小型・高性能化により二輪車への応用が広がってきた。本研究では、GPS による走行軌跡計測に注目した。以下に GPS を用いた走行軌跡の計測について説明する。

二輪車特有の大きなバンク角やロールおよびピッチ挙動は、GPS アンテナの角度変化を生み、受信状態の悪化から安定した計測ができないことが多い<sup>(7)</sup>。このため、ライダーおよび積載した計測器による GPS 衛星電波の遮へいを避けるよう GPS アンテナ位置に配慮し、数種類の GPS について走行軌跡の比較実験をおこない、搭載に適する GPS を選定した。計測した走行軌跡の緯度・経度等の情報は、平面位置情報に座標変換する。また、アンテナ搭載位置とタイヤ接地点は大きなバンク角時にずれを生じるため、車体に取り付けたロール角速度センサのデータを利用し、計測後の演算処理でタイヤ接地点への換算をおこなった。

## 2.3. シミュレーションモデル

本研究で使用した人体モデルと車体・制御モデルについて説明する。

### 2.3.1. 人体モデル

本研究においては、コンピュータ上でライダー挙動を忠実に再現できる人体モデルの取り込みをおこなった。人体モデルは、19 個のパーツに分かれており、それぞれに質量と慣性モーメントが定義される。その際のデータは人体データベース GeBOD を参照している<sup>(8)</sup>。さらに、各関節部での荷重反力などが算出できるため、将来的にライダーの疲労度、乗り心地などの予測技術へ応用が可能と考えられる。人体各部位の質量・慣性モーメントは、ライダーの身長・体重な

どの基本情報を入力することで、内包するデータベースから作成される。これに、人体各部位の角度、座標位置情報を入力することで、人体モデルの姿勢を車体モデル上で決定することができる。車体モデルとの接続は、ハンドル左右、ヒップ、ステップ左右の計 5 箇所である。ライダー挙動は、時間経過に伴う各部位の移動量として扱われる。

### 2.3.2. 車体モデル

車体モデルを Fig. 5 に示す。ばね上操だ系、ばね下操だ系、フロントタイヤ、エンジンを含む後部車体、ライダー、リヤサスペンションおよびリンク機構、スイングアーム、リヤタイヤの 9 要素から構成される。なお、フレームボデー、フロントフォーク、スイングアームは剛体として扱う。タイヤモデルは、マジックフォーミュラタイヤモデルを採用している<sup>(9)</sup>。

### 2.3.3. 制御モデル

制御モデルは、横方向と前後方向の制御に分けて取り扱っている。本シミュレーションモデルで用いた制御モデルを Fig. 6 に示す。横方向制御モデルは、ロール方向の動的な釣合いを満たし目標走行ラインに追従する制御 (Fig. 6 の 1)、ウィーブやウォッブルの振動を低減するための制御 (Fig. 6 の 2) の二つから構成され、車体モデルの操だ角を制御している。目標走行ラインに追従する制御におけるア

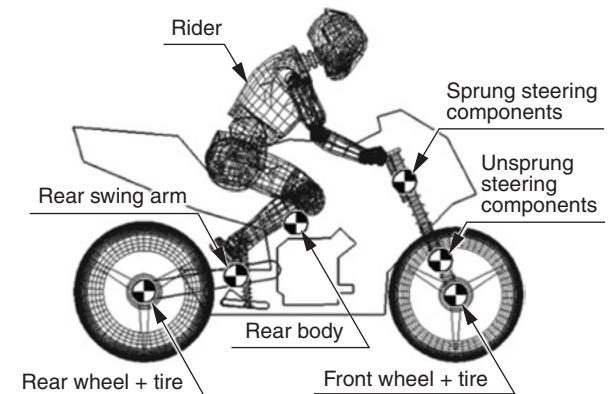


Fig. 5 Motorcycle simulation model

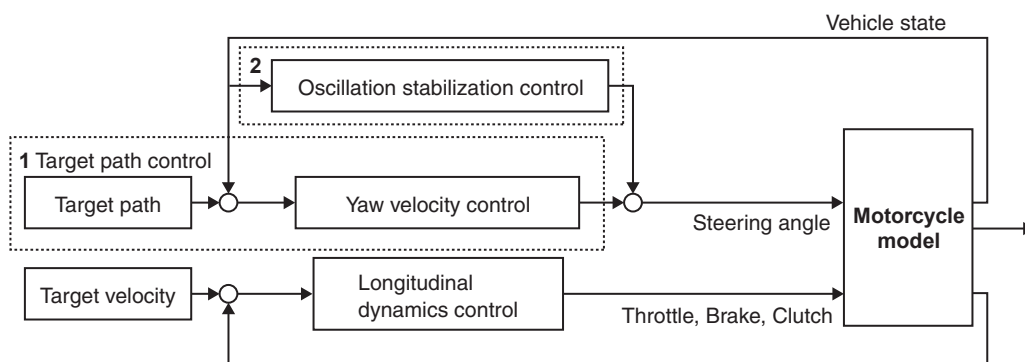


Fig. 6 Control model for motorcycle simulation model

ルゴリズムは、現在の車両状態量と  $\Delta t$  秒走行後の一次予測位置からみた目標走行ラインとの偏差・曲率より、できるだけスムーズな走行になるよう、最適化計算を用いて目標ヨー角速度を算出する。得られた目標ヨー角速度と現在のヨー角速度との差分に応じた、操だ角の制御をおこなうフィードバック制御モデルとした<sup>(10)</sup>。

前後方向制御モデルは、目標車両速度に対して、エンジン回転数に応じたスロットル開度を制御するとともに適切なギヤを選択し、クラッチ操作をおこなうモデルとした。また、前後ブレーキ力の配分を変化させることも可能とした。

### 2.3.4. 計算手順

- (1) ライダ挙動のデータは、車体モデル上の基準点からの移動量に変換をおこない専用フォーマットとして作成する。
- (2) 実走行軌跡のデータは、タイヤ接地点に換算した計算専用フォーマットとして作成し、目標コースとする。
- (3) 車速データと移動距離データを計算専用フォーマットとして作成し、車両の速度目標とする。

これら三つのファイルを機構解析ソフトに読み込んで計算がおこなわれる。

## 3. ライダ挙動を含む走行計測および結果

### 3.1. 計測車両

Fig. 7 に計測車両を示す。車両は、排気量 599 cm<sup>3</sup>、計測車両質量 209.3 kg、ホイールベース 1.39 m である。計測機器は、車体角速度センサおよびデータロガーをフューエルタンク上、GPS をリヤシート上に、GPS アンテナ部はフロントメータ上部にそれぞれ配置した。ライダ挙動撮影用 CCD カメラは、リヤに固定した。車両データとして、前後・横加速度、ヨー・ロール角速度、操だトルク、操だ角、左右ステップ荷重、フロント・リヤサスペンションストロークを計測した。また、ライダ挙動映像と車体挙動データの同

期を図るために、光電スイッチを搭載し走行コース脇に設けた反射板に反応させる。光電スイッチから出力される信号の一方は、LED 発光回路を用いて映像側に記録し、もう一方は車両データ計測用ロガーに記録をおこなった。GPS を用いて反射板の位置を特定することで、ライダ挙動・車体挙動・走行軌跡の同期とシミュレーションへの適用を容易とした。

### 3.2. ライダ挙動の計測結果

ワインディングコースを社内テストライダ 7 名に自由に走行してもらい、各ライダの計測をおこなった。その結果、ライダごとの操縦操作と体の動き、車体挙動と走行軌跡などの違いがわかった。代表として、左右切り返し走行時 (Fig. 8) に違いが見られた 2 名のライダについて、操だトルク、ロール角速度、ライダの腰横移動量のデータを Fig. 9 に示す。たとえば、ライダ A の腰横移動量は少なく、操だトルクとロール角速度の時系列波形に相関関係が見られる。つまり、ライダ A は、操だトルク主体で二輪車にロール挙動を与える特徴を持つ。ライダ B の腰の移動タイミングはライダ A よりも早く、その移動量も多い。また、腰の移動とロール角速度の関係をみると、腰の動きが完了した際にロール角速度の増加がみられる (Fig. 9 内の点線枠に示す)。このときの操だトルクに目立った変動がないことから、このロール角速度の増加はライダの体重移動によるロール挙動と考えられる。したがって、ライダ B は操だトルクと体重移動を利用してロール挙動を与える特長を持つ。このように本研究で用いた計測技術により、体重移動を伴うライダ挙動がデータ化され、各ライダの特徴を明確にすることが可能となった。今回の計測例では、ライダ挙動・ハンドル操作・走行軌跡について分類し、7 名の中からライダ B を標準的な操縦をおこなうライダとして特定することができた。計測で得られたライダ挙動データは二輪車走行モデルに適用し、ライダの特徴を反映した計算に利用する。

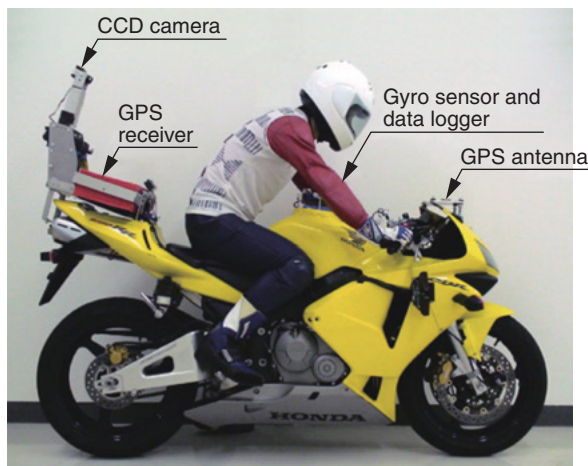


Fig. 7 Test motorcycle and location of measuring instruments

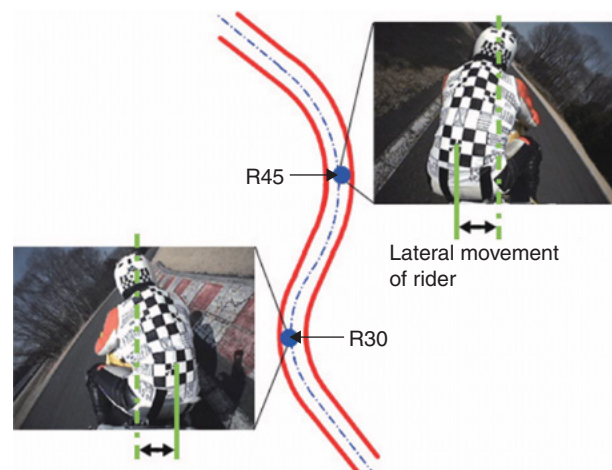


Fig. 8 Rider behavior on right-and-left turn

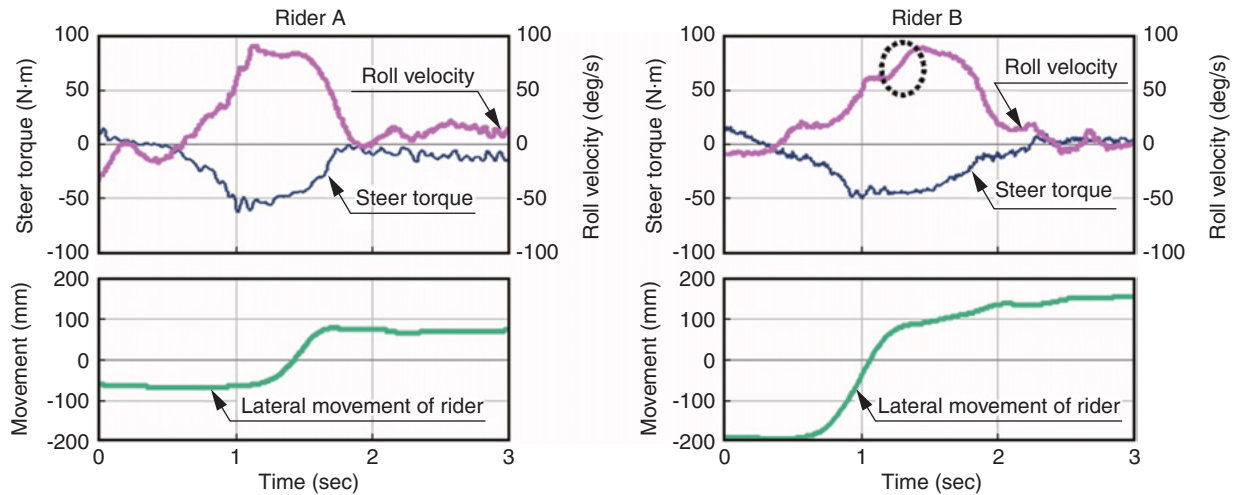


Fig. 9 Results of rider behavior

### 3.3. 走行軌跡の計測結果

本研究で使用した GPS の走行軌跡の計測結果を Fig. 10 に示す。路面には半径 30 m の円と進入および脱出の方向を示す直線が描かれ、ライダーはこれを目標に複数回の走行をおこなった。その結果、走行軌跡のバラツキは、図中の光電スイッチ用反射板位置の幅方向で  $\pm 1\text{m}$  程度発生していることがわかった。一方、ワインディングコースでは、おおむね満足できる結果を得たが、一部のコーナでは、数 m の誤差が生じることがある。これは、GPS アンテナが大きく傾くことにより、GPS が持つ本来の性能を発揮できないことが原因と考えられる。今後、GPS の計測データを補正する技術に注目し、精度向上を図る必要がある。

## 4. 適用事例

適用事例として、(株)モビリティランドツインリンクもてぎ北ショートコース (Fig. 11) での走行シミュレーションを示す。コースは全長 982 m である<sup>(11)</sup>。実走行試験のデータと計算結果を合わせて、Fig. 12 に示す。赤線が実験値、青線が計算値を表す。図の上段から、車体の速度および車体ロール角速度とヨー角速度をそれぞれ示す。一部を除きおおむね実験値と一致しており、本研究で構築したライダー挙動の取り込みとタイヤ接地点での走行軌跡が、実走行試験

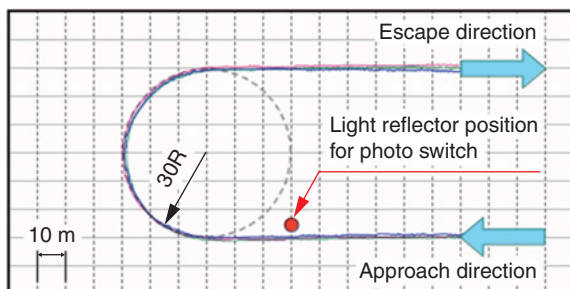


Fig. 10 Measurement of riding trajectory

の再現性の高さに寄与していることが確認できた。Fig. 12 内の点線枠に示す低速コーナにおける実験値と計算値の差異は、GPS の走行軌跡データが実際の走行軌跡より内側を

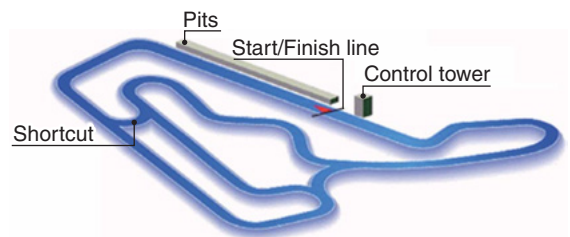


Fig. 11 Twin Ring MOTEGI (North short course)

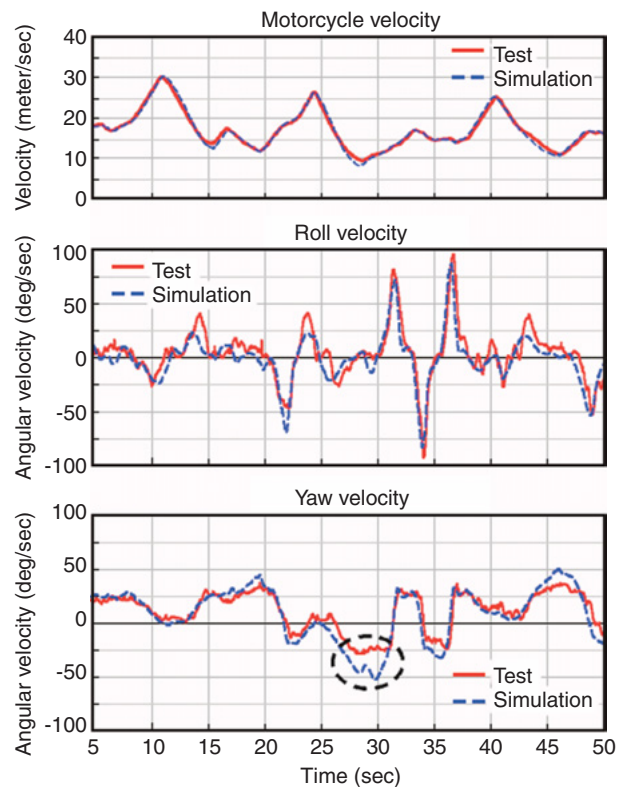


Fig. 12 Comparison between simulation results and test data

観測しているためと考えられる。

次に、ライダー挙動の有無を比較した計算の例をFig. 13に示す。大きなライダー挙動を伴う連続するコーナ部(Fig. 14)での操だトルクとロール角度の大きさに違いがある。ライダー挙動がない場合、コーナでロール角度が大きくなり、オーバシュートの傾向を示している。二輪車走行モデルにライダー挙動を取り込むことにより、車体のロール角度が軽減していることが確認できた。

以上より、従来の走行シミュレーションモデルに多自由度ライダーモデルを導入し、実走行で得られたライダー挙動と走行軌跡をデータとして与えることで加減速を含む複合コースの走行が実現できることがわかった。

## 5. まとめ

- (1) モーションキャプチャを応用することで、実走行時のライダー挙動を三次元データとしてとらえる計測手法を確立した。
- (2) GPS 観測データをロール角速度情報によるタイヤ接地点への換算をおこなうことで、二輪車の実走行軌跡を計測できることがわかった。
- (3) 実走行時のライダー挙動を忠実に再現すること、実際の走行軌跡を目標コースとして与えることで、加減速を含む複合コース(サーキットなど)の走行シミュレーションを実現できることがわかった。

## 謝 辞

本研究開発を進めるにあたり、ご協力いただきましたエムエスシーソフトウェア株式会社の皆様、VI-grade の皆様に紙面をお借りして深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) Hidefumi, ISHII, Yoshitaka, TEZUKA: Considerations of Turning Performance for Motorcycles, Proceedings SETC '97, SETC Paper 9734601/972127, p.383-389 (1997)
- (2) 今泉博英, 藤岡健彦: 機構解析言語による二輪車-ライダー系の運動特性に関する研究-後部積載重量物がウォブル運動に与える影響とその制振法-, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.965, 9638220, p.177-180 (1996)
- (3) 二輪車の運動性能専門委員会編: 二輪車の運動特性とそれを取りまく環境, 自動車技術会, p.73-79(1997)
- (4) 片山硬, 西見智雄, 青木章: ライダの振動特性の測定, 自動車技術会論文集, No.35, p.147-153(1987)
- (5) 山本正信, 川田聡, 近藤拓也, 越川和忠: ロボットモデルに基づく人間動作の三次元動画追跡, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-D-II, No.1, p.71-83(1996)
- (6) 大田佳人, 山際貴志, 山本正信: キーフレーム拘束を利用した単眼動画からの人間動作の追跡, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.9, p.2008-2018 (1998)
- (7) 村澤直喜, 鈴木浩二, 安藤正訓, 西本修, 池上健太郎, 盛田裕之: 二輪車用ナビゲーションシステムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No2, p.75-81
- (8) <http://www.lifemodeler.com/>
- (9) 手塚良孝, 石井秀文, 清田悟: 二輪車運動性能解析へのマジックフォーミュラタイヤモデルの適用, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.59-00, 20005043,

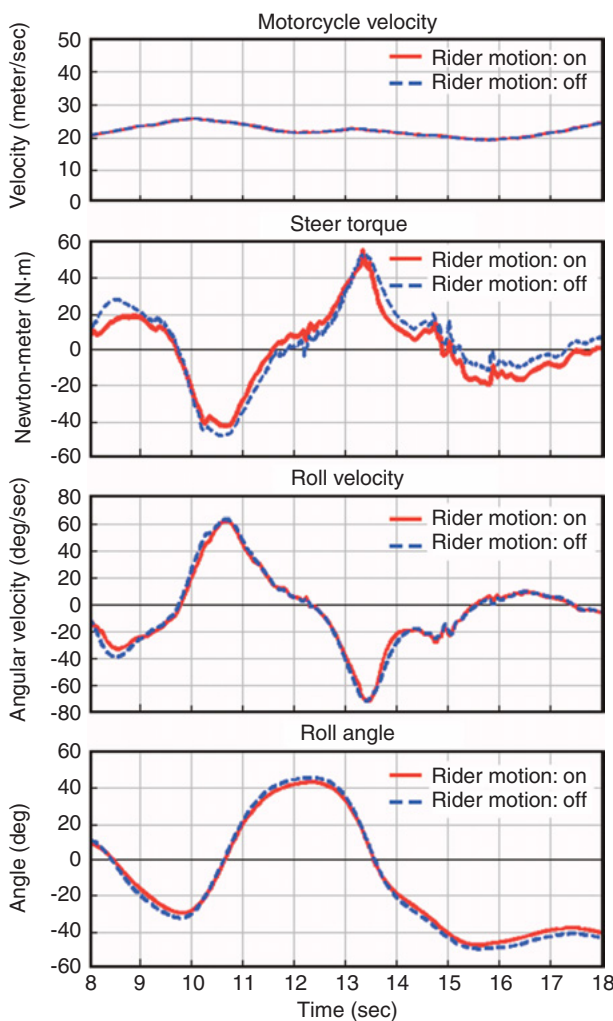


Fig. 13 Simulation results with or without rider movements

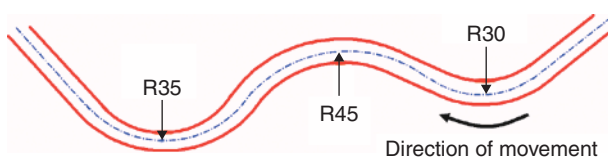


Fig. 14 Test course

p.17-20(2000)

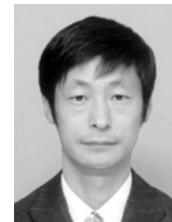
(10) <http://www.vi-grade.com/>

(11) <http://www.twinring.jp/>

■ 著 者 ■



手塚良孝



玉島 勉



細田和作



宮岸俊一



中村 豊一



吉木浩人