

二輪車・車両運動の簡易的な計測・解析技術の開発と活用

Development of a Simplified Method for Measuring and Analyzing Motorcycle Dynamics

品川 晃徳 小林 寛 小島 儀隆

要旨

二輪車の車両運動を解析する場合、必要な情報を直接計測し解析する手法が一般的であるが、センサの搭載に工数を要する場合が多い。そこで、計測に工数をかけなくとも、必要最小限の情報から「走る・止まる・曲がる」の運動解析を間接的に可能とする手法を構築した。車載が容易な小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定した。車両運動の基礎理論を用い、前後・横加速度、タイヤに発生する力、サスペンションの伸縮、ライダーの操作量の関連性を定式化した。一例として、走行教育に本手法を活用した。走行が容易なオーバルコースを工学的に設定し、一定速と直線加減速の2パターンで走行した。その結果、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運転特性を抽出できた。さらに、運転特性の改善点を、車両運動理論を用いて考察した。本手法が走行教育に対して有用である可能性を示すことができた。

Abstract

When analyzing the vehicle motion of a two-wheeled vehicle, there are general methods of directly measuring and analyzing necessary information available. But, it often requires man-hours to mount sensors on the vehicle. Therefore, we have created a method that indirectly enables the motion analysis of “driving, stopping, and turning” from the minimum necessary information without the need for spending man-hours on the measurement itself. Using a small GPS data logger that can be easily mounted on a vehicle, the position and velocity, which are the basics of object motion, can be measured, and the longitudinal and lateral acceleration can be estimated. Using the basic theory of vehicle dynamics, the relationship between the longitudinal and lateral acceleration, the force generated from the tyres, the suspension expansion/compression, and the rider operation level is formulated. As an example, this method was used for riding education. The oval course, which is easy to drive, was engineered. The rider ran in two patterns: constant velocity in whole section and acceleration/deceleration in straight section. As a result, the riding characteristics of the rider subject to “driving/stopping/turning” could be extracted. Furthermore, improvements in driving characteristics were considered using the vehicle dynamics. We were able to show the potential for this method being useful for riding education.

1 はじめに

二輪車の車両運動を解析する場合、スロットル開度、エンジン回転数、車速、シフトポジション、バンク角、前後ブレーキ液圧、サスペンションストロークなどを計測するセンサを車載し、必要な情報を直接取得することが一般的である^[1]。センサの準備や車載に多くの工数やコストがかかるが、運動解析自体は取得情報から素早く実施できる利点がある。しかしながら、車両毎にセンサの搭載が必要ため、異なる車両の走行性能の比較評価がすぐに実施できないなど、汎用性が低いという課題がある。そこで、計測に工数をかけなくとも、必要最小限の情報から「走る・止まる・曲がる」の運動解析を間接的に可能とする手法を構築する。四輪車の場合、加速度センサを車載し、アクセル・ブレーキ・ステアリング操作と前後・横加速度を関連付け

て、車両運動の計測・解析を行うのが一般的である^[2]。同様の手法を二輪車に適用する場合、前後・横加速度の座標変換のための姿勢角センサの追加や、前後独立のブレーキ操作・ライダー乗車姿勢の影響を考慮した運動解析が必要となるなど、そのままの適用は難しい。そこで、先行研究の手法^{[3][4]}と同様に、車載が容易な小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定する。運動解析のために、車両運動の基礎理論から、車両の前後・横加速度、前後タイヤに発生する駆動力・制動力・横力・上下荷重、フロントサスペンションの伸縮、ライダーのスロットル・ブレーキ操作量、車両のバンク角の関連性を定式化する。一例として、走行教育に活用し、ライダーの運転特性の抽出や改善点の考察に、本手法が有用であるかどうかを検証する。

2 物体運動の位置・速度の計測と加速度の推定

小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定する。二輪車やライダーの複雑な運動をひとまとめでして、図1のように俯瞰的に見た一つの点の2次元的な動きとして考える。図2に示す小型 GPS データロガーは、位置・速度が計測可能で、車載も容易であるが、加速度センサは内蔵されていない。そこで、サンプリング時間 Δt [s]、位置 x, y [m]、速度 v [m/s]、位置の変化により算出される方位角 θ [rad] から、以下の式を用いて、前後加速度 a_{LON} [m/s²] と横加速度 a_{LAT} [m/s²] を算出した。

$$\Delta\theta = \tan^{-1}(\Delta y \div \Delta x) \quad (1)$$

$$a_{\text{LON_GPS}} = \Delta v \div \Delta t \quad (2)$$

$$a_{\text{LAT_GPS}} = \Delta\theta \div \Delta t \times v \quad (3)$$

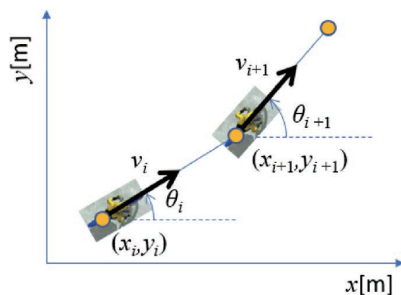


図1 GPS ロガーによる位置と速度の計測



図2 小型 GPS データロガー

推定する前後・横加速度の妥当性を検証する。GPS ロガーに加えて、振動ジャイロ姿勢センサ (IMU) を車載し、同時に計測を行った。オーバルコースを2周走行したときの両者の結果を比較した。図3は GPS ロガーにより計測した位置 (走行軌跡) と速度の時系列データである。図4に前後加速度 a_{LON} [G]、図5に横加速度 a_{LAT} [G] の時系列データを示す。赤線が GPS ロガーの推定値、青線が IMU の計測値を表す。IMU の加速度は、車体座標系で出力されるため、3軸加速度の値を3軸の角度によ

り対地座標系に変換し算出した。その結果、両者はおおむね一致した。GPS ロガーの位置・速度の計測値から算出した前後・横加速度の推定値が、妥当であることを検証できた。

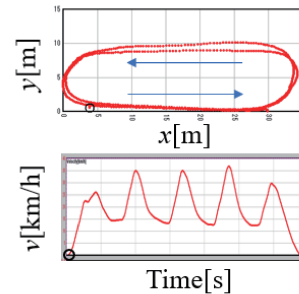


図3 加速度検証時の走行条件

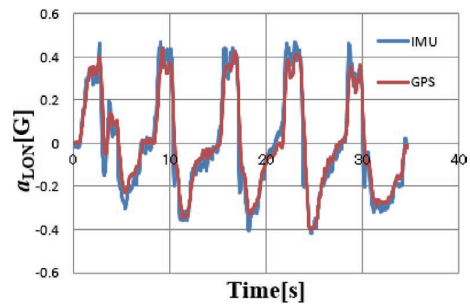


図4 前後加速度・推定値の検証

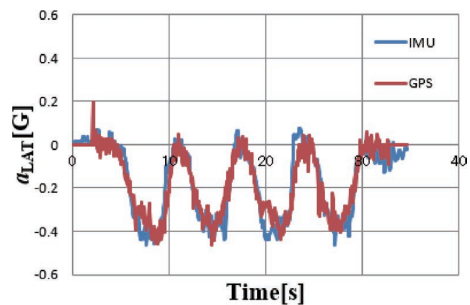


図5 横加速度・推定値の検証

3 二輪車の車両運動の解析

前節にて推定した前後・横加速度は、前後・横方向にタイヤが力を発生することで生じている。さらに、前後加速度の発生に伴い、タイヤ間で上下荷重が移動し、タイヤの摩擦状態やサスペンション伸縮に変化が生じる。これらの運動解析を行うため、車両運動の基礎理論を用い、車両の前後・横加速度、タイヤに発生する駆動力・制動力・横力・上下荷重、フロントサスペンションの伸縮、ライダーのスロットル・ブレーキ操作量、車両のバンク角の関連性を定式化する。本節にて述べる理論は既知のものではあるが、「走る・止まる・曲がる」を全て網羅し、車

両運動の理解のために必要最小限な式として簡潔に整理した例はない。直線部での加速時・減速時、曲線部での旋回時に分けて、前後・横加速度と二輪車の車両運動の関係について、以下に述べる。

3-1. 直線部での加速時の車両運動

直線部での加速時の車両運動について述べる。図6に示すように、リアタイヤ駆動力 F_d [N]、空気抵抗 F_{air} [N] により、前後加速度 a_{LON} [m/s²] が発生している。総重量 m [kg]、エンジントルク T_{EG} [Nm]、総減速比 i [—]、伝達効率 η [—]、リアタイヤ有効半径 R_f [m]、空力係数 C_d [—]、投影面積 A [m²]、空気密度 ρ [kg/m³]、車速 v [m/s] により、以下の式で表される^[5]。ライダーがスロットル操作を行うことで、エンジントルクが上昇し、リアタイヤ駆動力を発生する。

$$a_{LON} = (F_d - F_{air}) / m \quad (4)$$

$$F_d = T_{EG} \times \eta \times i \div R_f \quad (5)$$

$$F_{air} = C_d \times A \times 0.5 \times \rho \times v^2 \quad (6)$$

また、前後加速度が生じることで、フロントタイヤとリアタイヤの間で荷重移動が生じる。フロントタイヤ上下荷重 F_{zf} [N] とリアタイヤ上下荷重 F_{zr} [N] は、重心高さ H [m]、ホイールベース L [m]、静止状態でのフロントタイヤ上下荷重 F_{zf0} [N]、リアタイヤ上下荷重 F_{zr0} [N] により、以下の式で表される^[5]。加速時、加速度は正の値なので、フロントタイヤ上下荷重は減少、リアタイヤ上下荷重は増加する。次節で述べるが、フロントサスペンションが伸びる方向に力が作用する。

$$F_{zf} = F_{zf0} - m \times a_{LON} \times H \div L \quad (7)$$

$$F_{zr} = F_{zr0} + m \times a_{LON} \times H \div L \quad (8)$$

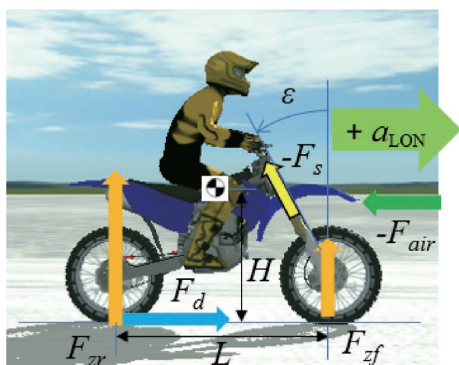


図6 直線部での加速時の車両運動

3-2. 直線部での減速時の車両運動

直線部での減速時の車両運動について述べる。図7(b)に示すように、フロントタイヤ制動力 F_{bf} [N]、リアタイヤ制動力

F_{br} [N]、空気抵抗 F_{air} [N] により、前後加速度 a_{LON} [m/s²] が発生している。フロントキャリパー面積 S_f [mm²]、フロントディスク有効半径 R_{df} [m]、フロントディスク摩擦係数 μ_{bf} 、フロントタイヤ有効半径 R_{tf} [m]、フロントブレーキ油圧 P_f [MPa] より、以下の式で表される^[5]。リアタイヤについては同様であるので省略する。ライダーがブレーキ操作を行うことで、油圧が上がり、タイヤ制動力が生じる。

$$a_{LON} = (-F_{air} - F_{bf} - F_{br}) / m \quad (9)$$

$$F_{bf} = P_f \times S_f \times R_{df} \div R_{tf} \times \mu_{bf} \quad (10)$$

$$F_{br} = P_r \times S_r \times R_{dr} \div R_{tr} \times \mu_{br} \quad (11)$$

前節でも述べたが、前後加速度が生じることで、式(7)(8)のように、フロント・リアタイヤの間で荷重移動が生じる。減速時、加速度は負の値なので、フロントタイヤ上下荷重は増加、リアタイヤ上下荷重は減少する。各タイヤの制動限界は、タイヤと路面の最大摩擦係数を μ [—] とすると、以下の式で表される。

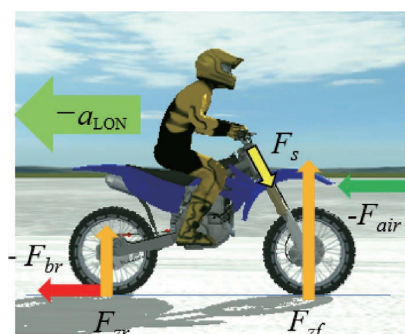
$$F_{bf} / F_{zf} \leq \mu \quad (12)$$

$$F_{br} / F_{zr} \leq \mu \quad (13)$$

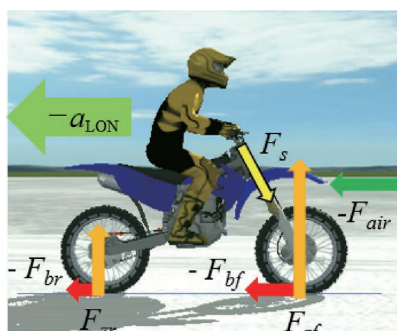
F_{bf} / F_{zf} と F_{br} / F_{zr} は、前後タイヤの摩擦状態を表しており、 μ に達すると、タイヤがロックすることを意味する。さらに、荷重移動とフロントタイヤ制動力により、フロントサスペンションを縮める力 F_s [N] が作用する。キャスター角 ε [rad] のとき、以下の式で表される^[6]。

$$F_s = -m \times a_{LON} \times H \div L \times \cos \varepsilon + F_{bf} \times \sin \varepsilon \quad (14)$$

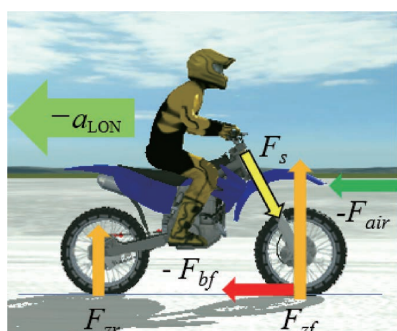
一例として、空気抵抗を無視し、 $H=600$ [mm]、 $L=1290$ [mm]、 $F_{zf0}=663$ [N]、 $F_{zr0}=1075$ [N] の場合を仮定、減速度0.4Gでの車両運動について考察する。図7(a)はリアブレーキのみの場合で、 $F_{bf} / F_{zf}=0$ 、 $F_{br} / F_{zr}=1$ となる。リアタイヤの制動力が限界に達しており、リアブレーキのみで生じる最大の減速度は0.4Gであることがわかる。図7(b)はフロントブレーキとリアブレーキの場合である。ブレーキの配分を適切にした時、 $F_{bf} / F_{zf} = F_{br} / F_{zr} = 0.4$ となり、最もタイヤの摩擦が小さくなる。図7(c)は、フロントブレーキのみの場合で、 $F_{bf} / F_{zf}=0.7$ 、 $F_{br} / F_{zr}=0$ となっている。フロントタイヤの摩擦が大きくなるとともに、式(14)よりフロントサスペンションが縮み、車両が図7(b)よりも前傾姿勢となることがわかる。二輪車はフロントとリアのブレーキが独立した2入力となっている。変動する上下荷重に対して適切な前後ブレーキ操作を行うことで、前後タイヤの摩擦と車両の前傾姿勢変化を最小限することができる。



(a) リアブレーキのみで制動



(b) フロント・リアブレーキで制動



(c) フロントブレーキのみで制動

図7 直線部での減速時の車両運動

3-3. 曲線部での旋回時の車両運動

曲線部での旋回時の車両運動について述べる。ライダー姿勢をリーンウイズ、旋回によるタイヤの接地点の移動はないものと仮定する。フロントタイヤ横力 F_{yf} [N] とリアタイヤ横力 F_{yr} [N] により、横加速度 a_{LAT} [m/s²] が発生している。バンク角を γ [deg] とすると、以下の式で表される^[6]。

$$a_{LAT} = (F_{yf} + F_{yr}) / m \quad (15)$$

$$F_{yf} = F_{zf} \times \tan \gamma \quad (16)$$

$$F_{yr} = F_{zr} \times \tan \gamma \quad (17)$$

$$a_{LAT} = g \times \tan \gamma \quad (18)$$

式(18)を図示すると、図8のようになる。バンク角が大きいほ

ど、横加速度が大きくなる。同一の横加速度で、リーンインの乗車姿勢の場合、車体バンク角は γ よりも小さくなる。タイヤを立てて使うことで、前後方向の力の伝達能力は大きくなる。リーンアウトの乗車姿勢の場合、車体バンク角は γ よりも大きくなる。タイヤを寝かせて使うことで、前後方向の力の伝達能力は小さくなる^[7]。

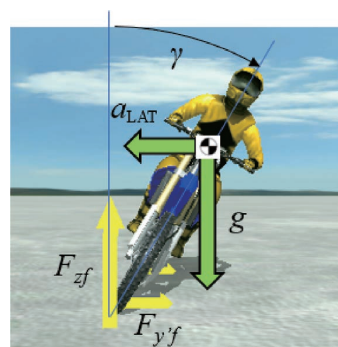


図8 曲線部での旋回時の車両運動

4 走行教育での活用事例

GPS ロガーにて位置・速度を計測、前後・横加速度を推定し、基礎理論を用いて二輪車の車両運動を解析する手法を構築した。一例として、走行教育に本手法を活用し、有効性について検証する。活用目的は、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運転特性を抽出し、改善点を車両運動解析により考察することとした。まずは、走行するコースの形状について検討する。運転特性の抽出を容易にするため、ライン取りの影響が大きい複合的なコース形状や、難易度の高い極端な小旋回は避け、走行が容易と考える旋回半径6m、直線距離30mの左回りオーバルコースを走路として工学的に設定した。車両は排気量600cm³の大型車を使用し、使用するギアは2速とした。次に、コース走行時の教示方法について検討する。1セット目は一定速度での走行とし、「曲がる」の運転特性を抽出する。2セット目は、直線路で加減速操作を行う。「走る・止まる」の運転特性を抽出し、減速操作追加による「曲がる」の運転特性への影響を考察する。旋回時に乗車姿勢を撮影し、横加速度の発生要因の詳細を考察する。

4-1. 指導員の運転特性

目指すべき姿を明確にするため、走行教育における指導員の運転特性を解析する。「走る・止まる・曲がる」の運転特性を直感的にわかりやすくするため、走行軌跡に前後加速度・横加速度をそれぞれグラデーションで書き表示することで表した。前後加速度においては、青色が濃いほど加速度が大きく、赤色

が濃いほど減速度が大きいことを表している。横加速度においては、青色が直線部を表し、赤色が大きいほど横加速度が大きいことを表している。一定速走行時のグラフと乗車姿勢を図9に示す。大きな横加速度が発生し、リーンインの乗車姿勢となっていた。加減速走行時のグラフと乗車姿勢を図10に示す。大きな前後加速度が発生し、さらに、一定速走行時と同等の大きな横加速度が発生、乗車姿勢も不変であった。直線部では、適切な前後ブレーキ操作により前後タイヤの摩擦と車両の前傾姿勢変化を最小限とし(図7(b)参考)、曲線部では、リーンインの乗車姿勢によりタイヤを立てて使用することで余裕をもたせていると想定される。大きな前後・横加速度を生じながらも、タイヤへの負担は最小限となっているのが、指導員の運転特性であると考察した。

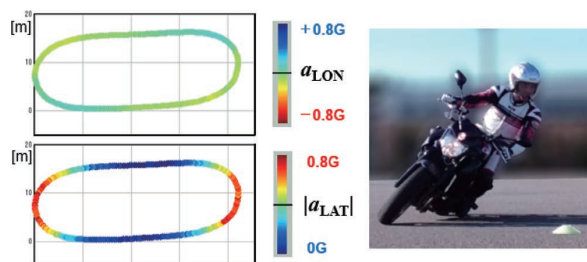


図9 指導員の走行データと乗車姿勢(一定速走行)

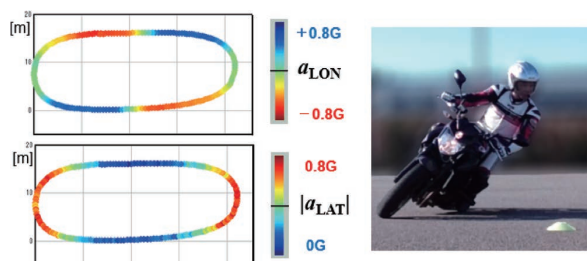


図10 指導員の走行データと乗車姿勢(加減速走行)

4-2. 被験者の運転特性

次に、被験者(筆者)の運転特性を解析する。一定速走行時のグラフと乗車姿勢を図11に示す。指導員よりも横加速度が小さな値であり、乗車姿勢はリーンウィズとなっていた。加減速走行時のグラフと乗車姿勢を図12に示す。大きな加減速度が生じていたが、横加速度は一定速走行時よりも小さくなり、乗車姿勢もリーンアウトとなっていた。フロントブレーキが強めの制動操作(図7(c)参考)のため、車両が前傾姿勢になってしまい、横加速度の低下や乗車姿勢の乱れにつながったと想定される。横加速度の大きさが小さいことと、大きな前後加速度は生じているものの、前後ブレーキ配分が最適化されていないことが、被験者の運転特性であり、今後の改善点であると考察した。

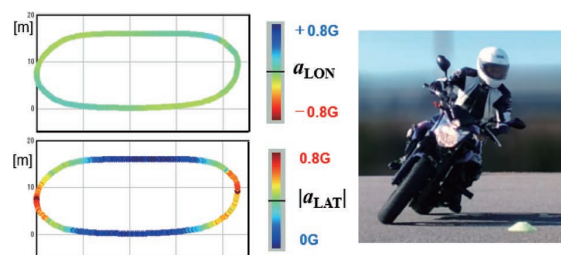


図11 被験者の走行データ(教育前・一定速走行)

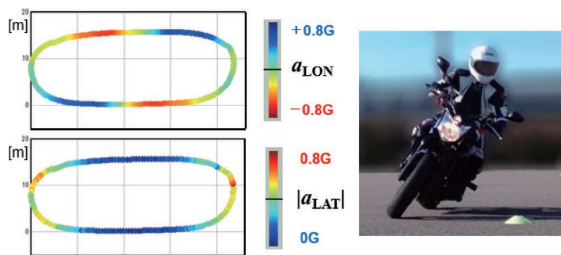


図12 被験者の走行データ(教育前・加減速走行)

上記の結果について、指導員と現状課題を共有した。第一段階として、車両倒し込みの習得とリーンウィズ乗車姿勢の取得、第二段階として、車両姿勢変化の少ないリアブレーキのみ(図7(a)参考)での乗車姿勢の維持、を目標として設定した。年間を通して、計5回の訓練を実施した。その結果を図13、図14に示す。走行教育前に比べ、乗車姿勢が改善し、リーンウィズの乗車姿勢と適切な車両倒し込みを習得できた。横加速度は増加し、リアブレーキ減速による影響もほとんど生じなかった。

以上より、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運転特性を抽出し、改善点を車両運動解析により考察することができた。さらに、段階的な目標設定と訓練により、運転特性を改善できた。本手法が走行教育へ有用である可能性を示すことができた。

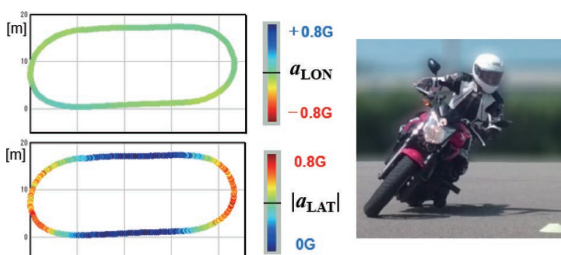


図13 被験者の走行データ(教育後・一定速走行)

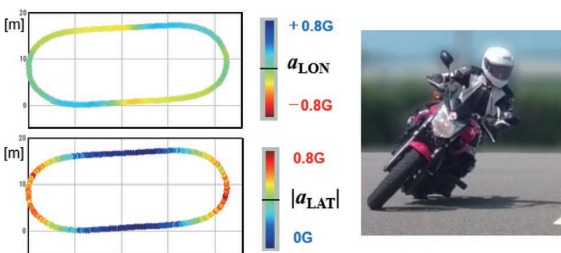


図14 被験者の走行データ(教育後・加減速走行)

5 まとめ

計測に工数をかけなくとも、必要最小限の情報から「走る・止まる・曲がる」の運動解析を間接的に可能とする手法を構築した。車載が容易な小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定した。振動ジャイロ姿勢センサとの比較により、推定値が妥当であることを検証した。車両運動の基礎理論を用い、前後・横加速度、タイヤに発生する力、サスペンションの伸縮、ライダーの操作量の関連性を定式化した。特に、減速時は、減速度自体が同じでも、前後ブレーキの配分によりタイヤの摩擦状態や車両姿勢が大きく異なることを示した。一例として、走行教育に本手法を活用した。走行が容易なオーバルコースを工学的に設定し、一定速と直線加減速の2パターンで走行した。運転特性の差が出にくいコース設定と想定していたが、指導員と被験者の差が顕著に表れた。その結果、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運転特性を抽出できた。さらに、運転特性の改善点を、車両運動理論を用いて考察した。本手法が走行教育に対して有用である可能性を示すことができた。本論文で得られた知見の一部は、YRA (Yamaha Riding Academy) 大人のバイクレッスンにおける YRFS (Yamaha Riding Feedback System) にて導入されている^[8]。

■参考文献

- [1] 藤井茂, 塩澤総一, 品川晃徳, 岸知昭: 二輪車の操縦特性調査, ヤマハ発動機技報, No. 45 (2009), pp. 2-13
- [2] 梅津大輔, 岡本隆秀, 八木淳, 虫谷泰典, 齋藤茂樹: 新型ブレマシー ダイナミックフィールの統一感, マツダ技報, No. 28 (2010), pp. 13-18
- [3] 品川晃徳, 野澤久幸, 内山裕太郎: 全日本クロスカントリー選手権におけるオフロード二輪車の走行データ解析, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 854 (2017)
- [4] 品川晃徳, 野澤久幸, 増田智義: 全日本選手権におけるモタード二輪車の走行データ解析, 日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集, No. 26 (2017)
- [5] 景山克己, 景山一郎: 自動車工学, 理工図書 (1984)
- [6] Vittore Cossalter: Motorcycle Dynamics, Lulu (2006)
- [7] カヤバ工業株式会社: オートバイのサスペンション, 山海堂 (1993)
- [8] <https://www.yamaha-motor.co.jp/mc/yra/otona/>

■著者



品川 晃徳
Akinori Shinagawa
技術・研究本部
研究開発統括部
先進システム開発部



小林 寛
Hiroshi Kobayashi
技術・研究本部
研究開発統括部
先進システム開発部



小島 儀隆
Yoshitaka Kojima
技術・研究本部
研究開発統括部
基盤技術研究部