

渡邊 博人 藤井 隆弘

Abstract

A slide control system (hereafter “SCS”) has been developed and featured in the YZF-R1/R1M launched in 2015.

To achieve unity between rider and machine from the perspective of pursuing the unique style of Yamaha, development focused on providing a control system which generally respects the rider's will and intervenes only when necessary. Moreover, when it does intervene, it does so with an unnoticeable and natural feeling. After all, the focus is the rider. This project aimed to develop a system that supports the rider's acceleration control, focusing mainly on the lateral slip behavior of the rear wheel causing the loss of balance when accelerating out of corners.

ESC (Electronic Stability Control) has been already practicalized in four-wheeled vehicles (hereafter “automobiles”); however, in order to apply this to motorcycles there are two major development issues to face. The first is to detect the lateral slip.

Lateral slips such as oversteer and understeer cannot be detected from the steering angle and the yaw rate of motorcycles, because, unlike automobiles, they behave three-dimensionally.

The second is to control the lateral slip. Having only two wheels, motorcycles cannot control the brake force on four wheels and create a yaw moment, which automobiles can.

This report discusses the how these issues were faced.

1 はじめに

2015 年に発売された YZF-R1/R1M に搭載されたスライドコントロールシステム（以下、SCS）を開発した。

ヤマハらしさを極めるという視点でライダーとマシンの人機一体を実現するために、基本はライダーの意思を尊重しながら、本当に必要な場面でのみ介入し、かつ介入感を感じさせない自然なフィーリングの制御システムを提供することを心掛けた。あくまで主役はライダーである。

本プロジェクトでは、主にコーナー立ち上がり加速時における車両のバランスを崩すような後輪の横滑り挙動に着目し、ライダーの加速操作を支援するシステムの開発を目指した。

四輪自動車（以下、自動車）においてはすでに実用化されている ESC（横滑り防止装置）があるが、これを二輪車に適用するための開発課題は大きく 2 つある。一つ目は横滑りを検出することである。

自動車と異なり 3 次元的な動きをする二輪車ではハンドル舵角とヨーレートからオーバーステア、アンダーステア等の横滑りを検出することはできない。

二つ目は横滑りを抑制することである。タイヤが前後 2 本しかない二輪車では自動車のように 4 輪のブレーキ力を制御してヨーモーメントを発生させることができない。

本稿では、これらの課題に対して取り組んだ内容を述べる。

2 SCS 概要

2-1. SCS コンセプト

二輪車の後輪タイヤと路面間にかかるタイヤ力をタイヤ摩擦円の概念で考える。右旋回のシチュエーションで考えるとタイヤと路面との間には駆動力による縦力と遠心力による横力の合力がかかっている（図 1）。

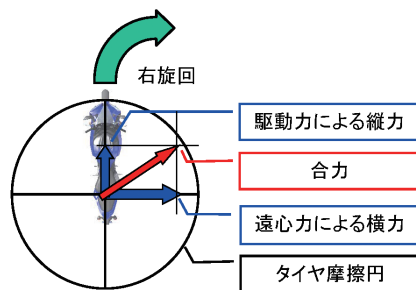


図1 タイヤ摩擦円とタイヤにかかる力の関係

この合力がタイヤ力の限界を示すタイヤ摩擦円を越えるとグリップが急激に低下し、縦滑りや横滑りが発生する。逆に言えば、縦滑りと横滑りの両方を検出できれば合力が摩擦円を超えたことが検出できる。縦滑りに関しては前輪と後輪の車輪速度差で検出可能である。横滑りについてはハンドル舵角から目標ヨーレートが求まらないため、後述するタイヤの横滑りの変化量である横滑り加速度の検出にて対応することとした。

次に、合力が摩擦円を超えたことを検出した時にそれを摩擦円内に抑えられるか検討した。右旋回の状態（図 1）からコーナー立ち上がり加速状態になると、アクセルを開けて駆動力が増加し、合力が摩擦円を超えた状態（図 2）となる。

この時、遠心力をコントロールすることは不可能だが、増加した駆動力を低下させることにより合力を摩擦円内に抑えることが可能となる（図 3）。

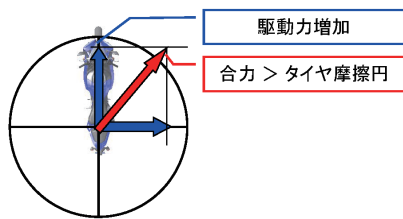


図2 タイヤ合力が摩擦円を超えた状態

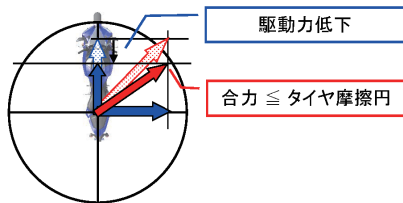


図3 タイヤ合力が摩擦円内に収まった状態

以上のことから SCS は後輪の横滑り加速度を検出し、駆動力の低減によって横滑りを抑制するというコンセプトとした。

2-2. SCS システム構成

横滑り加速度の検出には 3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサおよび前後車輪速度が必要なため、3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサを搭載した Inertial Measurement Unit（以下、IMU）を用いた。前後車輪速度は EG 制御ユニットから CAN 経由で IMU に入力され、IMU 内で横滑り加速度を演算し、EG 制御ユニットに CAN 経由で出力される。

EG 制御ユニットはこの情報を受けて駆動力を抑制する。駆動力の抑制は制御時間が短いと想定されること、およびその応答性が重要であることから、点火時期を遅角させることで実現させた。

また、前述したように縦スリップの検出、および抑制が前提となるため、トラクションコントロールシステム（以下、TCS）と SCS を併用する構成とした。TCS は前輪と後輪の車輪速が EG 制御ユニットに入力され、電子スロットル（以下、YCC-T）と点火時期を操作する。システム構成を図 4 に示す。

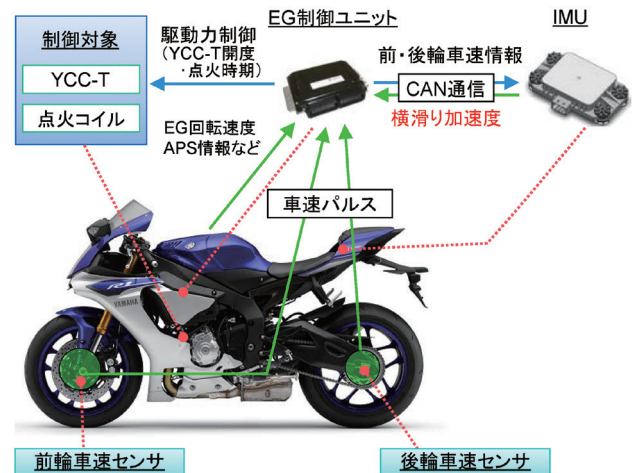


図4 システム構成

3 横滑り挙動の検出

3-1. 横滑り加速度の定義

ここでは後輪駆動に伴うスリップ増加に起因する車両横滑りに着目し、合力が摩擦円を超えたときに急激にスリップアングルが大きくなり、その変化量であるタイヤの横滑り加速度も急激に増加すると考え、横滑り加速度を検出することとした。検出する横滑り加速度は路面平面上で、かつ車体方向速度 V_x に対し垂直方向の速度 V_y の加速度 $\dot{V}_y$ と定義した（図 5）。

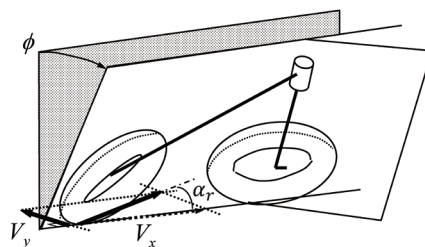


図5 横滑り方向の定義^[1]

3-2. 横滑り加速度の導出

後輪接地点の横滑り加速度 $\dot{V}_y$ は、車体に固定された IMU にて検出された加速度、角速度信号、および車輪の回転速度から検出される車体速度信号を用いて導出する。

図 6 において後輪タイヤは点 q において接地し、旋回中心 o の周りを速度 Ω_z で旋回している。このとき後輪タイヤはスリップ角 α_r 方向に速度 V にて進行している。また、車体方向の速度を V_x 、 V_y に対し路面平面状で垂直かつ旋回外向きの速度を V_y とする。

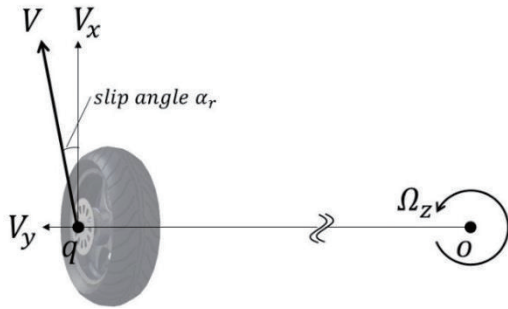


図6 旋回中の後輪タイヤ進行方向

このとき、後輪接地点の横滑り加速度 $\dot{V}_y$ は、式 (1) によって算出できる。

$$\dot{V}_y = A_y - V_x \cdot \Omega_z \quad (1)$$

ただし、式 (1) における右辺第 1 項である後輪タイヤの横加速度 A_y および、第 2 項である求心加速度成分 $V_x \cdot \Omega_z$ は直接観測することができない。そこで、後輪タイヤの横加速度は車体に固定された IMU が検出する車体横方向加速度センサ値、ロールレートセンサ値、ヨーレートセンサ値、および車体バンク角より算出することとする。

さらに、求心加速度成分は、車体速度信号、ヨーレート、および車体バンク角より式 (2) のとおり算出される。

$$V_x \cdot \Omega_z = v \cdot \omega_y \cdot \sec\phi \quad (2)$$

よって、後輪タイヤ接地点 q における横滑り加速度 $\dot{V}_y$ は式 (1)、(2) により、次式のとおり決定される。

$$\dot{V}_y = A_y(a_y, \omega_r, \omega_y, \phi) - v \cdot \omega_y \cdot \sec\phi \quad (3)$$

ω_r : ロールレートセンサ値	v : 車体速度信号
ω_y : ヨーレートセンサ値	a_y : 車体横方向加速度センサ値
$\dot{V}_y$: 横滑り加速度	A_y : 後輪接地点横方向加速度
ϕ : バンク角	Ω_z : ヨーイング速度
V_x : 車体方向速度	α_r : 後輪タイヤスリップ角

4 横滑り制御

4-1. 制御ロジック

横滑り加速度が作動閾値を超えたときに点火時期を遅角する (図 7-②:SCS-on)。すると次に横滑りが回復し始め、終了閾値を下回りかつ、点火時期遅角量がゼロとなった時点で制御を終了させる (図 7-③:SCS-off)。

なお、TCS との並列動作となるため点火時期の遅角量については TCS と SCS の制御量を比較して大きい値を採用する。TCS と SCS の全体の制御ブロックを図 8 に示す。

4-2. 制御ロジックの評価

オンロードにおいて TCS と SCS を組み合わせて搭載した際の効果およびフィーリングについて確認した。

評価路面は下記のとおりである。

■評価コース

路面: アスファルトドライ路面

曲率: $R = 8.5 \sim 21$

最大バンク角: $35 \sim 45\text{deg}$

車速: $40 \sim 100\text{km/h}$

■評価内容

コーナー立ち上がりの加速での車両挙動にて制御性、ライダーのコントロール性を評価する。

図 9 に走行中の横滑り加速度波形を示す。

バンク角が深い状況において、ライダーがアクセルを開け増した際に横滑り加速度が上昇している (A)。このタイミングで SCS が作動し点火時期を遅角する (B)。するとスリップ率が低下し、横滑りが遅れなく低減されている (C) ことが確認できた。

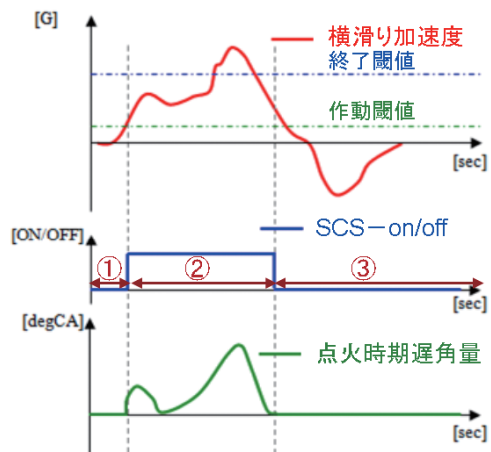


図7 SCS 制御ロジック

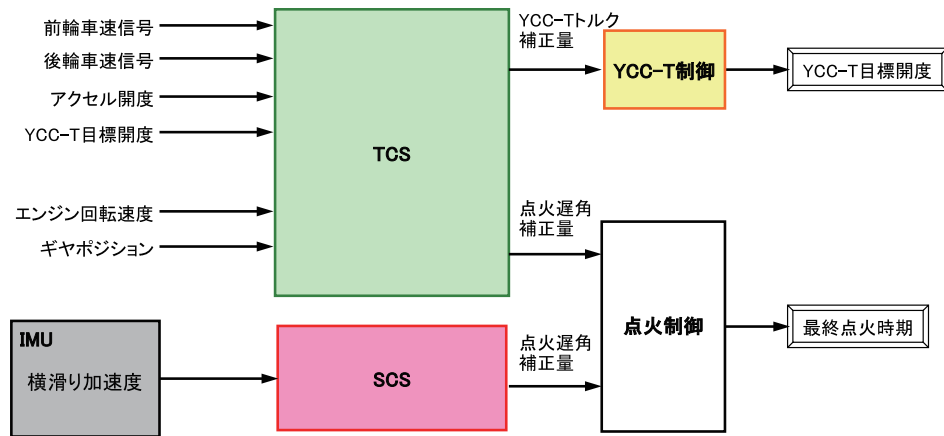


図8 全体制御ブロック (TCS+SCS)

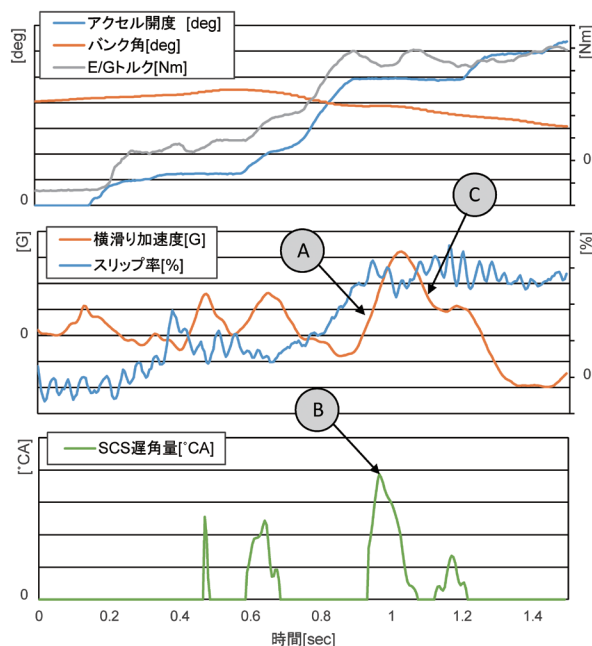


図9 横滑り加速度波形

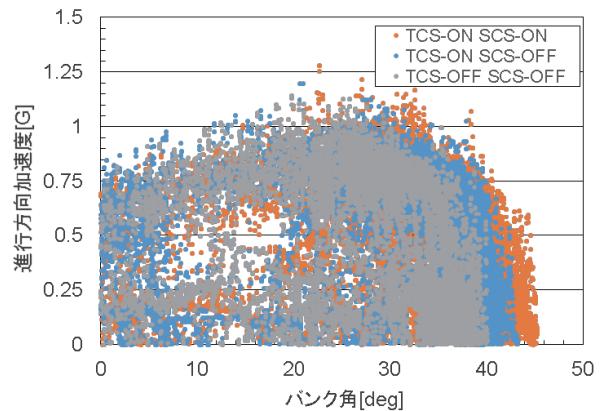


図10 進行方向加速度の比較

表1 アクセル開け始め～全開時間比較

TCS	SCS	平均時間[秒]	最小時間[秒]
OFF	OFF	3.205	3.205
ON	OFF	2.887	2.575
ON	ON	2.381	1.725

図10は評価走行において、各制御パターンの組み合わせにおけるバンク角と進行方向加速度との関係を示す。

ここではTCSとSCSを併用することで、深いバンク角から大きな進行方向加速度が得られていることが分かる。

これはバンク角と必要横力が比例関係であることから、摩擦円の限界付近までタイヤ力を利用できていることとなる。さらに評価ライダーからもパワー感の減少を抑えると同時に、加速操作性が向上しているとのコメントが得られた。

ライダーの加速操作性の指標としてコーナー脱出時のアクセル全開までの時間を比較すると、TCSとSCSを併用した場合が最も短くなっていることが確認できた(表1)。

5 おわりに

横滑りにおいて自動車と異なる動きをする二輪車が抱える2つの課題を解決し、横滑り抑制システムを開発することができた。具体的には後輪の横滑りを横滑り加速度により検出し、駆動力を制御することで、急激な後輪の横滑りを抑えて旋回中のコントロール性を向上できることが確認できた。

今後はIMUのコスト低減によるスポーツモデル、ツアラーモデル、スクーター等への展開を目指す。また、さらなる機能向上として、スリップアングルの検出による旋回性能の向上や制動力制御への応用を図りTCS、ABS、SCSによる

全方位のスリップを抑えることで、ライダーの意思を尊重しつつ運転操作を支援し、より思い通りのライディングを楽しめるようさらなる制御の進化を計っていく。

■参考文献

[1]Vittoe Cossalter : Motorcycle Dynamics Second English Edition, p.13, 2006

■著者



渡邊 博人
Hiroto Watanabe
PF 車両ユニット
コンポーネント統括部
電子システム開発部



藤井 隆弘
Takahiro Fujii
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
先行開発部