ステアバイワイヤによる二輪車の操縦安定性向上に関する研究* (第3報, ロール角とヨーレイトを線形結合した制御量の提案)

丸茂 喜高^{*1}, 大木 陽平^{*2}, 毛利 宏^{*3}

Improved Handling and Stability of Two-Wheeled Vehicles Using Steer-By-Wire Technology (3rd Report, Novel Controlled Variable with Linear Combination of Rolling Angle and Yaw Rate)

Yoshitaka MARUMO^{*1}, Yohei OKI and Hiroshi MOURI

^{*1} College of Industrial Technology, Nihon University
1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275-8575, Japan

This study examines a controlled variable for the steering control of two-wheeled vehicle using Steer-By-Wire (SBW) technology. Computer simulation using a simple vehicle model with two cases, the controlled variable is the rolling angle or the yaw rate, are examined. The rolling angle control realizes the good tracking performance to the desired rolling angle, while it deteriorates the yaw rate damping and makes the transitional large steering torque input. The yaw rate control performs the good damped response, while the tracking performance to the desired yaw rate is limited. A novel controlled variable is proposed with a linear combination of the rolling angle and the yaw rate. Controlling this controlled variable realizes not only the good tracking performance, but also the damped vehicle response.

Key Words : Active Safety, Driver Assist, Maneuverability, Handling and Stability, Two-Wheeled Vehicle, Steering Control, Steer-By-Wire

1. 結 論

二輪車は、進路変更時の逆操舵や直立安定性の確保など、複雑な操縦が必要となる。筆者らは、二輪車の操舵系にステアバイワイヤ技術を適用することにより、前述の複雑な操縦が除去できる⁽¹⁾ことを示し、ライダーを含めた人間-二輪車系での車線維持性能が向上する⁽²⁾ことを確認した。それらの検討では、ライダーは目標となる車体ロール角に対応した指令値を入力することを想定し、入力された目標ロール角を実現するように操舵トルクを自動制御している。また、ライダーの操縦を模擬するライダーモデル^{(3),(4)}においても、前方注視点での目標コースからの横偏差に対応した目標ロール角に実ロール角が追従するような構成となっている。

しかし、ライダーが目標コースを走行する際には、目標となるロール角を直接計算 (イメージ) しているのかどうかは明らかではなく、例えば、四輪車のように目標となるヨーレイト⁽⁵⁾を計算して、それを実現するようなロール角制御を行っていることも考えられる。また、制御量として、ロール角とヨーレイトのどちらが二輪車の操舵制御にとって適切かも明らかではない。

そこで本研究では、二輪車の操舵制御の制御量について、ロール角およびヨーレイトとした場合のシミュレーションを行い、時系列応答や根軌跡、閉ループ系の周波数応答からそれぞれを比較して検討を行う。さらに、得られた結果から、各制御量の特徴を両立させる手法⁽⁶⁾を参考に、ロール角とヨーレイトを線形結合した新しい物理量を提案し、それを制御量とすることにより、良好な制御効果が得られることを示す。

* 原稿受付 2013 年 5 月 1 日

^{*1} 正員, 日本大学生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)^{*2} 学生員, 日本大学大学院^{*3} 正員, 山梨大学大学院 (〒400-8531 山梨県甲府市武田 4-3-111)

E-mail: marumo.yoshitaka@nihon-u.ac.jp

2. 車 両 モ デ ル

制御量の違いによる基礎的な特性を調べるために、制御対象および制御系設計モデルとして、二輪車の基礎的な車両モデルを適用する．本研究では、Sharp⁽⁷⁾により定式化された運動方程式を基本としたモデルを用いる．車両モデルを図1に示す．この図では、座標系をメインフレームの路面への投影点を基準として、右手下向き直交座標系としている．運動方程式の詳細は末尾の付録に記載し、ここでは簡略化した方程式のみを示す．

$$B_{11}\ddot{y}_1 + B_{12}\ddot{\psi} + B_{13}\ddot{\phi} + B_{14}\ddot{\delta} + A_{11}\dot{y}_1 + A_{12}\dot{\psi} + A_{17}Y_f + A_{18}Y_r = 0 \quad (1)$$

$$B_{21}\ddot{y}_1 + B_{22}\ddot{\psi} + B_{23}\ddot{\phi} + B_{24}\ddot{\delta} + A_{21}\dot{y}_1 + A_{22}\dot{\psi} + A_{23}\dot{\phi} + A_{24}\dot{\delta} + A_{27}Y_f + A_{28}Y_r + A_{29}T_{zf} + A_{2a}T_{zr} = -\tau \cos \varepsilon \quad (2)$$

$$B_{31}\ddot{y}_1 + B_{32}\ddot{\psi} + B_{33}\ddot{\phi} + B_{34}\ddot{\delta} + A_{31}\dot{y}_1 + A_{32}\dot{\psi} + A_{34}\dot{\delta} + A_{35}\phi + A_{36}\delta + A_{3b}T_{zf} + A_{3c}T_{zr} = -\tau \sin \varepsilon \quad (3)$$

$$B_{41}\ddot{y}_1 + B_{42}\ddot{\psi} + B_{43}\ddot{\phi} + B_{44}\ddot{\delta} + A_{42}\dot{\psi} + A_{43}\dot{\phi} + A_{44}\dot{\delta} + A_{45}\phi + A_{46}\delta + A_{47}Y_f + A_{49}T_{zf} + A_{4b}T_{zr} = \tau \quad (4)$$

ここで、 $A_{11} \sim B_{44}$ は車両諸元に依存した係数であり、本研究の計算に用いた諸元は、排気量 250cc の中型車のもので、末尾の付録に記載されている．

Fig. 1 Vehicle model

3. 制 御 系 設 計

ステアバイワイヤの制御系設計についての詳細は、既報⁽¹⁾に記載されており、ここではその概要のみを述べる．基本的には、目標値に対応したフィードフォワード制御と、目標値の状態に対応したフィードバック制御からなる二自由度制御系により操舵トルクを制御するものとする．

3・1 制御量をロール角とした場合

まず、既報で扱った制御量として、ロール角を用いた場合（以下、ロール角制御という）について述べる．ライダから指令された目標ロール角 ϕ_{des} を維持するのに必要な操舵トルクをフィードフォワード制御により実現する．操舵トルク τ からロール角 ϕ までの伝達関数を

$$\phi(s) = G_\phi(s)\tau(s) \quad (5)$$

と定義すると、この伝達関数の定常成分のみを考慮し、目標ロール角に対するフィードフォワード制御による操舵トルク τ_{ff} を以下のように定める．

$$\tau_{ff} = G_{\phi}^{-1}(0)\phi_{des} \quad (6)$$

フィードバック制御については最適制御理論を適用することとし、式(1)～(4)の運動方程式から以下のような状態方程式を導出する.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{x} = [\dot{y}_1 \quad \dot{\psi} \quad \dot{\phi} \quad \dot{\delta} \quad \phi \quad \delta]^T$, $u = \tau_{fb}$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

ここで、 $a_{11} \sim b_{41}$ は運動方程式から導かれる係数である. 状態変数 $\mathbf{x}$ は、メインフレーム重心点の横速度 $\dot{y}_1$ 、ヨーレート $\dot{\psi}$ 、ロールレート $\dot{\phi}$ 、操舵角速度 $\dot{\delta}$ 、ロール角 ϕ および操舵角 δ から構成されており、 τ_{fb} は操舵トルク入力である.

あるロール角で定常旋回状態を考えた場合、操舵角やヨーレートなど状態変数のいくつかは、有限な定常値をもつ. 一般的なレギュレータは、各状態変数が0になるように制御するため、このような系に対してレギュレータを設計するには、それぞれの定常値に収束させる必要がある. そこで、設定値制御レギュレータ⁽⁸⁾を適用する. 操舵トルクから、横速度、ヨーレートおよび操舵角への伝達関数が以下のように表現できるものとする.

$$\dot{y}_1(s) = G_{\dot{y}_1}(s)\tau(s) \quad (8)$$

$$\dot{\psi}(s) = G_{\dot{\psi}}(s)\tau(s) \quad (9)$$

$$\delta(s) = G_{\delta}(s)\tau(s) \quad (10)$$

これらの伝達関数の定常成分を用いて、ある目標ロール角が与えられたときの各状態変数の定常値は、式(6)より、以下のように表すことができる.

$$\dot{y}_{10} = G_{\dot{y}_1}(0)G_{\phi}^{-1}(0)\phi_{des} \quad (11)$$

$$\dot{\psi}_0 = G_{\dot{\psi}}(0)G_{\phi}^{-1}(0)\phi_{des} \quad (12)$$

$$\dot{\phi}_0 = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\delta}_0 = 0 \quad (14)$$

$$\phi_0 = \phi_{des} \quad (15)$$

$$\delta_0 = G_{\delta}(0)G_{\phi}^{-1}(0)\phi_{des} \quad (16)$$

これらを、状態変数の平衡点として、以下のようにまとめる.

$$\mathbf{x}_0 = [\dot{y}_0 \quad \dot{\psi}_0 \quad \dot{\phi}_0 \quad \dot{\delta}_0 \quad \phi_0 \quad \delta_0]^T \quad (17)$$

平衡点からの状態変数 $\Delta\mathbf{x}$ を以下のように定義し、これを新たな状態変数として、レギュレータを構成する。

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 \quad (18)$$

$$\text{ただし, } \Delta\mathbf{x} = [\Delta\dot{y}_1 \quad \Delta\dot{\psi} \quad \Delta\dot{\phi} \quad \Delta\dot{\delta} \quad \Delta\phi \quad \Delta\delta]^T.$$

レギュレータの設計にあたっては、式(7)のシステムに対して、以下に示す評価関数が最小になるようなフィードバックゲインを求める。

$$J = \int_0^\infty (q_\phi \phi^2(t) + r \tau_{fb}^2(t)) dt \quad (19)$$

ここで、 q_ϕ r は、それぞれロール角、操舵トルク入力に対する重みである。なお、設定値制御レギュレータにおけるフィードバック制御部は、ある平衡点からのずれに対して制御を行っており、フィードバックゲインの計算は、システムが線形で記述される限り、各状態変数や制御入力が0の場合を基準とした評価関数から求めることになる。求まったフィードバックゲイン $\mathbf{K}$ に対して、平衡点からの状態変数をかけることで、設定値制御レギュレータの制御入力決定される。

$$\tau_{fb} = -\mathbf{K}\Delta\mathbf{x} \quad (20)$$

$$\text{ただし, } \mathbf{K} = [K_{\dot{y}_1} \quad K_{\dot{\psi}} \quad K_{\dot{\phi}} \quad K_{\dot{\delta}} \quad K_{\phi} \quad K_{\delta}].$$

以上より、二つの制御による操舵トルクを足し合わせたものをステアバイワイヤによる操舵トルク入力 τ_{sbw} として、二輪車に入力する。

$$\tau_{sbw} = \tau_{ff} + \tau_{fb} \quad (21)$$

このときのブロック線図を図2に示す。

Fig. 2 Block diagram of rolling angle control

3・2 制御量をヨーレイトとした場合

次に、制御量としてヨーレイトを用いた場合（以下、ヨーレイト制御という）について説明する。基本的な考え方は、ロール角制御時と同様である。目標ヨーレイト $\dot{\psi}_{des}$ に対するフィードフォワード制御による操舵トルク τ_{ff} を以下のように定める。

$$\tau_{ff} = G_{\dot{\psi}}^{-1}(0)\dot{\psi}_{des} \quad (22)$$

また、ある目標ヨーレイトが与えられたときの各状態変数の定常値は、式(22)より、以下のように表すことができる。

$$\dot{y}_{10} = G_{\dot{y}_1}(0)G_{\dot{\psi}}^{-1}(0)\dot{\psi}_{des} \quad (23)$$

$$\dot{\psi}_0 = \dot{\psi}_{des} \quad (24)$$

$$\dot{\phi}_0 = 0 \quad (25)$$

$$\dot{\delta}_0 = 0 \quad (26)$$

$$\phi_0 = G_{\phi}(0)G_{\dot{\psi}}^{-1}(0)\dot{\psi}_{des} \quad (27)$$

$$\delta_0 = G_{\delta}(0)G_{\dot{\psi}}^{-1}(0)\dot{\psi}_{des} \quad (28)$$

これらの定常値に対して、設定値制御レギュレータを構成する。

ヨーレイト制御時の評価関数では、ヨーレイトとロール角の定常値が等しくなるように係数 k_{st} をかける。

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ q_{\dot{\psi}} (k_{st} \dot{\psi}(t))^2 + r \tau_{fb}^2(t) \right\} dt \quad (29)$$

ただし、 $q_{\dot{\psi}}$ は、ヨーレイトに対する重みであり、 $k_{st} = G_{\phi}(0)/G_{\dot{\psi}}(0)$ である。

ヨーレイト制御時のブロック線図を図3に示す。

Fig. 3 Block diagram of yaw rate control

4. 制御量による比較検討

前章で設計した制御系の効果を確認するために、時系列シミュレーションを行う。シミュレーション条件としては、式(1)～(4)の運動方程式で示した二輪車が車速 16.7m/s (60km/h) で走行中に、シミュレーション開始 1s 後に、ライダーからの指令値がステップ状に入力されるものとした。ロール角制御の場合には目標値 ϕ_{des} は、10deg とし、ヨーレイト制御の場合には、ロール角が 10deg になるように、目標値 $\dot{\psi}_{des}$ は $\phi_{des}/k_{st} = 5.1\text{deg/s}$ とした。図4、図5にそれぞれロール角制御時およびヨーレイト制御時のシミュレーション結果を示す。各図において、評価関数の重み q_{ϕ} および $q_{\dot{\psi}}$ は共通とし、 $10^3 \sim 10^7$ の場合を重ね書きしている。図4より、ロール角制御の場合には、ロール角への重みを増加させると目標ロール角への追従性が改善されることがわかる。しかし、その際のヨーレイトは大きな逆応答を示し、重みの増加とともに振動的な応答になっている。さらに、目標値が変化した際の過渡的な操舵トルクが、追従性の改善とともに大きくなっていることが確認できる。一方、図5に示したヨーレイト制御の場合には、評価関数の重みを増加させても、ある程度のところで目標ヨーレイトへの追従性が改善しなく

なる。しかし、基本的には、ヨーレイトやロール角のダンピングもよく、ロール角制御時ほど過大な操舵トルクとならないことが確認できる。

Fig. 4 Time history of rolling angle control

Fig. 5 Time history of yaw rate control

各制御時の漸近特性を確認するために、評価関数の重みを増加させた場合の根軌跡を調べる。ロール角制御時、ヨーレイト制御時における、重みを増加させた場合の極配置と零点を図6、図7に示す。図7のヨーレイト制御時の際は、原点付近を拡大した図となっている。なお、これらの図を含め、以降、極配置と零点の図においては、 $\times$ 印が極を、 $\circ$ 印が零点を表すものとする。図6のロール角制御時には、2組の複素零点が存在するが、重みの増加にともなって極が零点に向かい、最終的に極零相殺が生じて、ロール運動は、遠方の1組の複素根が残る。そのため、目標ロール角への追従性は良好になるが、ヨー運動など他の運動では、原点に比較的近い複素根が残るため、ダンピングの悪い振動的な応答になる。一方、図7のヨーレイト制御時は、不安定零点が存在し（同図にはないが、実数の不安定零点がもう1つあり、不安定零点は計2点存在する）、安定な零点は、重みの増加にともない極零相殺を起こすが、実軸上の不安定零点に対しては、虚軸対称となる点に極が収束していることがわかる。そのため、各運動の応答が振動的にはならないものの、比較的原点に近い場合、追従性に限界のある応答となっている。

Fig. 6 Pole placement of rolling angle control

Fig. 7 Pole placement of yaw rate control

ここで、閉ループ系の周波数応答について確認する。まず、ロール角制御時の閉ループ系の周波数応答を図 8 に示す。同図の(a)は目標ロール角から実ロール角まで、(b)は目標ロール角からヨーレイトへの周波数応答となっており、ヨーレイトはゲインを k_{st} 倍（すなわち、定常ゲインが 1 になるように）している。図 8(a)に着目すると、重みの増加にともない、高周波数側でもゲインが 1 に近づき、目標値への追従性が向上することがわかる。一方、図 8(b)のヨーレイトへの周波数応答では、重みが増加することで、高周波数側においてハイゲイン化し、前述のような応答となることが確認できる。

Fig. 8 Frequency response of rolling angle control

次に、ヨーレイト制御時の閉ループ系の周波数応答を図 9 に示す。同図の(a)は目標ヨーレイトからロール角まで、(b)は目標ヨーレイトから実ヨーレイトへの周波数応答となっており、目標ヨーレイトおよび実ヨーレイトはゲインを k_{st} 倍（すなわち、定常ゲインが 1 になるように）している。図 9(b)に示したヨーレイトへの特性に着目すると、重みの増加にともない、高周波数側のゲインが 1 に近づいている。一方、図 9(a)のロール角への特性では、高周波数側でハイゲイン化することはないが、ゲインの増加に限界があることがわかる。これらのことから、前述のような結果となることが確認できる。

Fig. 9 Frequency response of yaw rate control

5. 新たな制御量の提案

前章では、ロール角制御およびヨーレイト制御における特徴について調べた。ロール角制御は、追従性が向上するものの他の運動のダンピングが劣化する状況が確認された。また、ヨーレイト制御時には、追従性には限界があるものの、良好なダンピング性能が得られることを確認した。これらの傾向から、ロール角制御とヨーレイト制御の特徴を合成することができれば、良好な制御効果が得られることが予想される。四輪車の分野では、追従性が良好な横加速度と、安定性が良好なヨーレイトを線形結合した物理量として $D^{*(6)}$ と呼ばれる指標を制御することが提案されているが、ここでは、ロール角とヨーレイトを線形結合した物理量を制御することを検討する。

ロール角とヨーレイトを線形結合した物理量として、以下のように E^* を定義する。

$$E^* = k_e \phi + (1 - k_e) k_{st} \dot{\psi}, \quad 0 \leq k_e \leq 1 \quad (30)$$

ここで、 k_e はロール角に対する係数であり、 E^* は、 $k_e = 0$ のときにロール角、 $k_e = 1$ のときに k_{st} 倍したヨーレイトに一致する。

この E^* を制御量として、以下のような評価関数を定義する。

$$J = \int_0^\infty (q_{E^*} E^{*2}(t) + r \tau_{fb}^2(t)) dt \quad (31)$$

ただし、 q_{E^*} は、 E^* に対する重みである。

フィードフォワード制御やフィードバック制御に関する構成は、ロール角制御およびヨーレイト制御の場合と同様である。

図 10 に、 E^* の目標値 E^*_{des} がステップ状に変化した場合の時系列応答を示す。同図では、 $q_{E^*} = 10^5$ として、 k_e を 0~1 の間、0.2 刻みで増加させている。 $k_e = 0$ のときにヨーレイト制御時に相当し、 $k_e = 1$ のときにロール角制御時に相当する。この図より、 k_e を増加させると、ある程度ダンピングを保ったまま、追従性が改善されていくことがわかる。

k_e を変化させた場合の零点の推移を図 11 に示す。この図では、 k_e を 0 から 0.1 刻みで 0.9 まで、その後、0.01 刻みで 1 までプロットしている。 $k_e = 0$ のときは、ヨーレイトの零点と一致して、実数の安定零点が 3 つ、不安定零点が 2 つ存在している。その後、 k_e の増加とともに、各零点の組が接近し、その後 2 組複素零点になり、 $k_e = 1$ でロール角の零点に一致する。また、原点から一番離れた負の実数の零点は、 k_e の増加とともに原点から離れ、 $k_e = 1$ で無限遠に消滅する。

Fig. 10 Time history of E^* control

Fig. 11 Transition of zero point

ここで、 k_e の設定例として、 E^* のダンピングがよく振動せずに追従性が良い例について検討する。図 11 に示した零点の推移から、代表特性根が負の実数で原点から遠くなる場合について考える。すなわち、原点に近い不安定零点が実数のまま原点から遠くなり、かつ、原点に近く、 k_e 増加とともに複素零点になる安定な零点の実部の大きさが、不安定零点の実部の大きさを下回らないのは、 $k_e = 0.89$ のときとなる。このときの時系列応答を図 12 に示す。この図より、ヨーレイトのダンピングを保ちつつも、ロール角の良好な追従性が得られていることが確認できる。

このときの極配置を図 13 に示す。評価関数の重みの増加にともない、実軸上の不安定零点の虚軸対象な点に極が収束していることがわかる。

Fig. 12 Time history of E^* control ($k_e=0.89$) Fig. 13 Pole placement of E^* control ($k_e=0.89$)

$k_e=0.89$ のときの閉ループ系の周波数応答を図 14 に示す. 図 14(a)に示した目標 E^* から実 E^* までの応答は, 評価関数の重みの増加にともない, 高周波数側でもゲインが 1 に近づくことがわかる. このとき, 図 14(b)の目標 E^* からロール角までの特性は, 高周波数側でゲインが 1 にはならないものの, 図 9(a)で示したヨーレイト制御時のロール角への特性よりもゲインが大きくなっていることがわかる. E^* からヨーレイトまでの特性 (図 14(c)) に着目すると, 評価関数の重みの増加にともない, 高周波数側でハイゲイン化はしているが, 図 8(b)に示したロール角制御時のヨーレイトへの特性よりもゲインは抑えられていることが確認できる. 以上より, E^* という指標を制御することで, 安定性と追従性を両立することが可能となる.

(a) From desired E^* to E^* Fig. 14 Frequency response of E^* control ($k_e=0.89$)

Fig. 14 Frequency response of E^* control ($k_e = 0.89$)

なお、ロール角制御の評価関数において、ロール角に加えてヨーレイトにも重みをつけることで、 E^* 制御と似たような傾向を持つ制御系を設計することは可能であるが、 E^* の零点のように見通しの良い設計指針はなく、試行錯誤は避けられない。

6. 結 論

本研究では、二輪車の操舵制御における制御量について、ロール角およびヨーレイトとした場合の検討を行い、さらに、それらを線形結合した新しい物理量を提案して検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) ロール角を制御量とした場合には、目標ロール角への追従性は向上するが、ヨーレイトなど他の運動が振動的な応答となり、過渡的な操舵トルク入力も増加することを確認した。
- (2) ヨーレイトを制御量とすると、目標ヨーレイトへの追従性に限界はあるものの、他の運動とあわせて良好なダンピング性能が得られることがわかった。
- (3) ロール角とヨーレイトを線形結合した物理量を提案し、それを制御量とすることで、追従性と安定性をバランス良く実現可能なことを示した。

付 録

A 記号

$e, h, h', j, k, l_1, l_2, l', R_f, R_r, t$: 寸法 (図1)

C_{rxz} : メインフレームの慣性乗積

$C_{YS1}, C_{YS2}, C_{YC1}, C_{YC2}$: 横すべり角, キャンバ角による横力係数 (1 : 前輪, 2 : 後輪)

$C_{ZS1}, C_{ZS2}, C_{ZC1}, C_{ZC2}$: 横すべり角, キャンバ角によるアライニングモーメント係数

$C_{XS1}, C_{XS2}, C_{XC1}, C_{XC2}$: 横すべり角, キャンバ角によるオーバターンモーメント係数

C_δ : ステアリングのダンパ係数

g : 重力加速度

I_{fx}, I_{fc} : フロントフォークの慣性モーメント

I_{rx}, I_{rz} : メインフレームの慣性モーメント

i : エンジンのフライホイールの極慣性モーメント

i_{fx}, i_{fy} : 前後輪の慣性モーメント

$M_f, M_r (M = M_f + M_r)$	: 前後フレームの質量
T_a	: 重心に働く空気力学的ヨーイングモーメント
T_{zf}, T_{zr}	: 前後輪のアライニングモーメント
T_{yf}, T_{yr}	: 前後輪のオーバーステアリングモーメント
Y_a	: 重心に働く空気力学的横力
Y_f, Y_r, Z_f, Z_r	: 前後輪の横力と荷重
$\alpha_f, \alpha_r, \phi_f, \phi_r$	: 前後輪の横すべり角とキャンバ角
ε	: キヤスタ角
λ	: 後輪とエンジンフライホイール間のギヤ比
δ, ϕ, ψ	: 操舵系, 車体 (ロール方向, ヨー方向) の角変位
τ	: 操舵トルク
$\dot{x}_1, \dot{y}_1$	: 車体の前後, 横速度
$ Z_f , Z_r $	: タイヤ特性計測時の荷重

B 4自由度モデルの運動方程式

(a) 横方向の運動方程式

$$(M_f + M_r) \ddot{y}_1 + M_f k \ddot{\psi} + (M_f + M_r) \dot{x}_1 \dot{\psi} + (M_f j + M_r h) \ddot{\phi} + M_f e \ddot{\delta} - Y_f - Y_r - Y_a = 0 \quad (\text{B1})$$

(b) ヨー方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & M_f k \ddot{y}_1 + (M_f k^2 + I_{fx} \sin^2 \varepsilon + I_{fz} \cos^2 \varepsilon + I_{rz}) \ddot{\psi} + M_f k \dot{x}_1 \dot{\psi} + \{M_f j k + (I_{fz} - I_{fx}) \sin \varepsilon \cos \varepsilon - C_{rxz}\} \ddot{\phi} \\ & - \{i_{fy}/R_f + (i_{ry} + i\lambda)/R_r\} \dot{x}_1 \dot{\phi} + (M_f e k + I_{fz} \cos \varepsilon) \ddot{\delta} - (i_{fy}/R_f) \sin \varepsilon \dot{x}_1 \dot{\delta} - l_1 Y_f + l_2 Y_r - T_{zf} - T_{zr} \\ & - l' Y_a - T_a = -\tau \cos \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{B2})$$

(c) ロール方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & (M_f j + M_r h) \ddot{y}_1 + \{M_f j k + (I_{fz} - I_{fx}) \sin \varepsilon \cos \varepsilon - C_{rxz}\} \ddot{\psi} + \{M_f j + M_r h + i_{fy}/R_f + (i_{ry} + i\lambda)/R_r\} \dot{x}_1 \dot{\psi} \\ & + (M_f j^2 + M_r h^2 + I_{fx} \cos^2 \varepsilon + I_{fz} \sin^2 \varepsilon + I_{rx}) \ddot{\phi} - (M_f j + M_r h) g \phi + (M_f e j + I_{fz} \sin \varepsilon) \ddot{\delta} \\ & + (i_{fy}/R_f) \cos \varepsilon \dot{x}_1 \dot{\delta} + (t Z_f - M_f e g) \delta - T_{zf} - T_{zr} - h' Y_a = -\tau \sin \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{B3})$$

(d) 操舵系の運動方程式

$$\begin{aligned} & M_f e \ddot{y}_1 + (M_f e k + I_{fz} \cos \varepsilon) \ddot{\psi} + \{M_f e + (i_{fy}/R_f) \sin \varepsilon\} \dot{x}_1 \dot{\psi} + (M_f e j + I_{fz} \sin \varepsilon) \ddot{\phi} - (i_{fy}/R_f) \cos \varepsilon \dot{x}_1 \dot{\phi} \\ & + (t Z_f - M_f e g) \phi + (M_f e^2 + I_{fz}) \ddot{\delta} + C_{\delta} \dot{\delta} + (t Z_f - M_f e g) \sin \varepsilon \delta + t Y_f - T_{zf} \cos \varepsilon - T_{zr} \sin \varepsilon = \tau \end{aligned} \quad (\text{B4})$$

(e) タイヤに発生する力とモーメント

$$Y_f = -C_{ys1} \alpha_f + C_{yc1} \phi_f \quad (\text{B5})$$

$$Y_r = -C_{ys2} \alpha_r + C_{yc2} \phi_r \quad (\text{B6})$$

$$T_{zf} = C_{xs1} \alpha_f - C_{xc1} \phi_f \quad (\text{B7})$$

$$T_{xr} = C_{XS2}\alpha_r - C_{XC2}\phi_r \quad (B8)$$

$$T_{xf} = C_{ZS1}\alpha_f + C_{ZC1}\phi_f \quad (B9)$$

$$T_{xr} = C_{ZS2}\alpha_r + C_{ZC2}\phi_r \quad (B10)$$

$$\alpha_f = (\dot{y}_1 + l_1\dot{\psi} - l_t\dot{\delta}) / \dot{x}_1 - \delta \cos \varepsilon \quad (B11)$$

$$\alpha_r = (\dot{y}_1 - l_2\dot{\psi}) / \dot{x}_1 \quad (B12)$$

$$\phi_f = \phi + \delta \sin \varepsilon \quad (B13)$$

$$\phi_r = \phi \quad (B14)$$

C 計算諸元

$M_f=30.9\text{kg}$, $M_r=229\text{kg}$, $I_{fx}=3.70\text{kgm}^2$, $I_{fe}=0.84\text{kgm}^2$, $I_{rx}=28.1\text{kgm}^2$, $I_{rz}=29.7\text{kgm}^2$, $C_{rxz}=0\text{kgm}^2$, $i_{fy}=0.441\text{kgm}^2$,
 $i_{ry}=0.598\text{kgm}^2$, $i=0.902\text{kgm}^2$, $\lambda=1.0$, $e=0.048\text{m}$, $j=0.562\text{m}$, $k=0.698\text{m}$, $l_t=0.086\text{m}$, $h=0.642\text{m}$, $l_1=0.834\text{m}$,
 $l_2=0.519\text{m}$, $h'=0.633\text{m}$, $l'=0.083\text{m}$, $R_f=0.299\text{m}$, $R_r=0.312\text{m}$, $\varepsilon=0.471\text{rad}$, $C_\delta=0\text{Nms/rad}$, $|Z_f|=1.08\text{kN}$, $|Z_r|=1.37\text{kN}$
 $\ast C_{YS1}=(13.3, 3.48)\text{ kN/rad}$, $C_{YS2}=(11.1, 4.44)\text{ kN/rad}$, $C_{YC1}=(1.27, -0.275)\text{ kN/rad}$, $C_{YC2}=(1.66, 0.072)\text{ kN/rad}$,
 $C_{ZS1}=(157, -106)\text{ Nm/rad}$, $C_{ZS2}=(146, -139)\text{ Nm/rad}$, $C_{ZC1}=(8.98, -6.12)\text{ Nm/rad}$, $C_{ZC2}=(18.5, -1.68)\text{ Nm/rad}$,
 $C_{XS1}=(56.1, -138)\text{ Nm/rad}$, $C_{XS2}=(44.9, -173)\text{ Nm/rad}$, $C_{XC1}=(59.5, -14.6)\text{ Nm/rad}$, $C_{XC2}=(89.8, -33.7)\text{ Nm/rad}$,
 $\ast C$ =(計測荷重時, 無負荷時), 実際の荷重に対して2計測点を結んだ線形特性を持つものとして各特性値を求めるものとする。

文 献

- (1) 丸茂喜高, 永井正夫, “ステアバイワイヤによる二輪車の操縦安定性向上に関する研究 (第1報, 制御手法とシミュレーションによる検討)”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 72, No. 717 (2006), pp. 1605-1612.
- (2) 片桐希, 丸茂喜高, 綱島均, “ステアバイワイヤによる二輪車の操縦安定性向上に関する研究 (第2報, ライダ操縦モデルによる車線維持性能の評価)”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 759 (2009), pp. 3029-3037.
- (3) Fujii, S., “Development of Robust Rider Controlling Model for Scooter”, *Proceedings of 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC '04)*, (2004), pp. 803-808.
- (4) Sharp, R.S., Evangelou, S., and Limebeer, D.J.N., “Advances in the modelling of motorcycle dynamics”, *Multibody System Dynamics*, Vol. 12, No. 3 (2004), pp. 251-283.
- (5) Mouri, H., Shirato, R. and Nagai, M. “A Study of a Vehicle Control for Tracking a Target Point”, *Proceedings of 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC '04)*, (2004), pp.59-64.
- (6) 伊藤健, 藤代武史, 川邊武俊, 金井喜美雄, 越智徳昌, “四輪操舵車の新しい制御法—モデル追従制御による方法—”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 23, No. 8 (1987), pp. 828-834.
- (7) Sharp, R.S., “The Stability and Control of Motorcycles”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 13, No. 5 (1971), pp. 316-329.
- (8) Furusho, H. and Mouri, H., “Research on automated lane tracking using linear quadratic control: control procedure for a curved path”, *JSAE Review*, Vol. 20, No. 3 (1999), pp. 325-329.