

二輪車のライダ操縦モデルの安定性解析

日大生産工 (院)
日大生産工○大木 陽平
綱島 均日大生産工
久工大丸茂 喜高
片山 硬

1. 緒 論

自動車の予防安全技術を考える上では、車両単体ではなくそれを運転する人間も含めたクローズドループで性能を評価する必要がある。ドライバの操縦動作をモデル化した研究は近藤⁽¹⁾によって行われた。すなわち、目標車線と車両の前方注視点の横偏差に比例して操舵角を制御する前方注視モデルである。さらに、ドライバ操縦モデルのパラメータ特性など数多くの研究成果が報告されている⁽²⁾。

四輪車と同様に、二輪車についてもライダの操縦モデルが提案されている。二輪車の操縦を考えた場合、四輪車に対して車体が傾く自由度が増えるため、操縦モデルも、方向制御に加えて、車体を直立させるための姿勢制御が必要となる。前述の前方注視モデルにロール運動のフィードバックを付加した操縦モデルが井口⁽³⁾によって提案された。さらに、片山⁽⁴⁾は、ライダ操縦モデルを用いたシミュレーション結果と実車走行結果を比較し、ライダの操縦動作の本質的な再現が可能であることを確認している。しかし、ライダ操縦モデルのパラメータの特性についての検討が行われておらず、各パラメータがもつ物理的な意味合いが明らかになっていないのが現状である。

そこで本研究では、ライダ操縦モデルのパラメータを車両状態量に対応させて、各パラメータを変化させたシミュレーションを行い、その結果から各パラメータの安定性に及ぼす影響について検討する。

2. 車両モデル

二輪車の運動を表現するために必要な自由度は、横運動、ヨー運動、ロール運動および操舵系の運動の4自由度といわれている。すなわち、この4自由度を考慮することにより、二輪車のもつ基本的な特性を考慮することが可能である。ここでは、Sharp⁽⁵⁾により定式化された運動方程式を基本としたものを用いる。ただし、タイヤの動特性（一次遅れ特性）は、振動解析においては重要であるが、操縦性を考えた場合には、人間が操縦可能な周波数帯域との関係から、その影響は非常に小さいため、考慮しないものとする。

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。既存の車両モデルは車両に固定した移動座標系で表現されているが、今回は目標車線に車両を追従させる問題を扱うため、地上に固定した固定座標系で表現する必要がある。また、運動方程式も固定座標系に表現しなおしたものをを用いることとする。以下に簡略化した運動方程式を示す。

$$B_{11}\ddot{y}_0 + B_{12}\ddot{\psi} + B_{13}\ddot{\phi} + B_{14}\ddot{\delta} + A_{11}\dot{y}_0 + A_{16}\dot{\psi} + A_{19}\dot{Y}_f + A_{1a}Y_r = 0 \quad (1)$$

$$B_{21}\ddot{y}_0 + B_{22}\ddot{\psi} + B_{23}\ddot{\phi} + B_{24}\ddot{\delta} + A_{21}\dot{y}_0 + A_{23}\dot{\phi} + A_{24}\dot{\delta} + A_{26}\dot{\psi} + A_{27}\dot{\phi} + A_{29}Y_f + A_{2a}Y_r + A_{2b}T_{xf} + A_{2c}T_{xr} = -\tau \cos \varepsilon \quad (2)$$

$$B_{31}\ddot{y}_0 + B_{32}\ddot{\psi} + B_{33}\ddot{\phi} + B_{34}\ddot{\delta} + A_{31}\dot{y}_0 + A_{32}\dot{\psi} + A_{34}\dot{\delta} + A_{36}\dot{\psi} + A_{37}\dot{\phi} + A_{38}\dot{\delta} + A_{3d}T_{xf} + A_{3e}T_{xr} = -\tau \sin \varepsilon \quad (3)$$

$$B_{41}\ddot{y}_0 + B_{42}\ddot{\psi} + B_{43}\ddot{\phi} + B_{44}\ddot{\delta} + A_{42}\dot{\psi} + A_{43}\dot{\phi} + A_{44}\dot{\delta} + A_{47}\dot{\phi} + A_{48}\dot{\delta} + A_{49}Y_f + A_{4b}T_{xf} + A_{4d}T_{xr} = \tau \quad (4)$$

ここで、 $A_{11} \sim B_{44}$ は車両諸元に依存した係数である。本研究において計算に用いた諸元は、排気量 250cc の中型車のものであり、詳細は、参考文献 6 に記載されている。

Sharp の研究により、二輪車の直進安定性を考える上で重要となる 3 つのモードの存在が明らかになった。すなわち、ウォブルモード、ウィーブモードおよびキャブサイズモードが二輪車の直進安定性に影響を及ぼすことが示された。ウォブルモードは操舵系の振動であり、振動数は 6~10Hz で車速の上昇とともに不安定化する。ウィーブモードはヨーとロール運動の連成した振動モードであり、その固有振動数が車速の上昇に対して大きくなる 1~4Hz のモードである。キャブサイズモードは非振動的な車体の傾斜運動である。

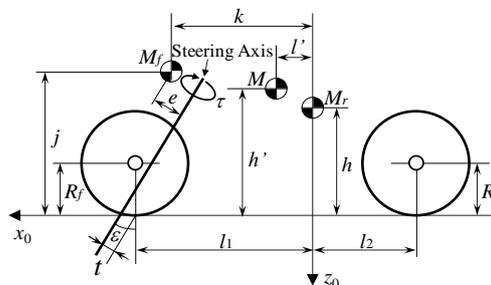


Fig. 1 Mathematical model

3. ライダ操縦モデル

四輪車の操縦を表現するモデルは、車両重心から一定距離前方の注視点（前方注視距離 l_{LP} ）における目標車線とのずれ d を検知し、操舵角をフィードバック制御する。二輪車の操縦を模擬するモデルでも同様に、図2に示すような前方注視点での横偏差をフィードバックすることで方向制御を行う。さらに、直立制御のためにロール角についてもフィードバックを行う必要がある、それらに基づいて操舵トルクを入力するライダ操縦モデルは次式のようになる。

$$\tau = -K_d d - K_\phi \phi \quad (5)$$

ただし、 $d = y_{LP} - y^*$ 、 $y_{LP} = y_0 + l_{LP}\psi$ 、 K_d は前方注視点の横偏差 d に対するゲインであり、 K_ϕ はロール角 ϕ に対するゲインである。

上記モデルは、前方注視点での横偏差をフィードバックしているが、車両状態には直接関係していないため、操縦モデルの物理的な役割の見通しを良くするために、重心点の車両状態量に置き換えることとする。まず、前方注視点の横偏差 d を(5)式に代入すると次式のようになる。

$$\tau = -K_d(y_0 - y^*) - K_d l_{LP}\psi - K_\phi \phi \quad (6)$$

ここで、目標車線を直線 ($y^* = 0\text{m}$) とすると、 $K_y = K_d$ 、 $K_\psi = K_d l_{LP}$ と置くことにより、各項を車両状態に直接関係した次式が得られる。

$$\tau = -K_y y_0 - K_\psi \psi - K_\phi \phi \quad (7)$$

ただし、 K_y は車両重心点の横変位 y_0 に対するゲインであり、 K_ψ はヨー角 ψ に対するゲイン、 K_ϕ はロール角 ϕ に対するゲインである。

4. シミュレーションによる検討

4.1. 標準となる時系列応答

(1)~(4)の運動方程式で示した二輪車と(7)式で定義したライダ操縦モデルにより、ライダー二輪車系を構築する。このときのブロック線図を図3に示す。シミュレーション条件は、二輪車が速度 16.7m/s (60km/h) で走行し、目標横変位は直線とする ($y^* = 0\text{m}$)。シミュレーション開始1s後に1s間、 10Nm の操舵トルク外乱が入力されるものとする。

まず初めに、外乱入力後に目標車線への収束性が良く整定時間が最も短い応答について示す。ライダ操縦モデルのゲインは車両重心点の横変位に対するゲイン $K_y = -12\text{N}$ 、ヨー角に対するゲイン $K_\psi = -260\text{Nm/rad}$ 、ロール角に対するゲイン $K_\phi = -100\text{Nm/rad}$ として、今回設定した各ゲインの値をこれ以降、標準値と呼ぶ。このときのシミュレーション結果を図4に示す。この図より外乱が入力され、二輪車の横変位 y_0 (左上) が目標横変位から逸脱すると、ライダーが操舵トルク τ (右上) を発生させ、最終的に横変位が目標値に追従していることが確認できる。

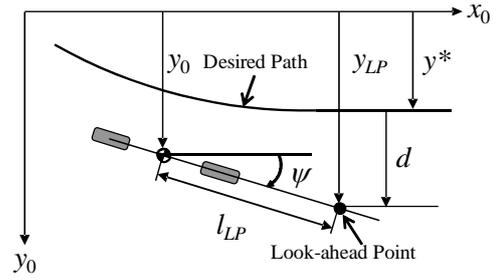


Fig. 2 Look-ahead rider control model

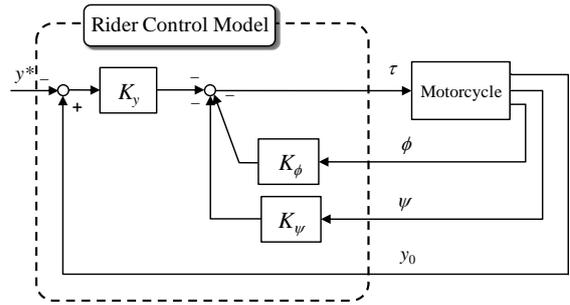


Fig. 3 Block diagram of rider-motorcycle system

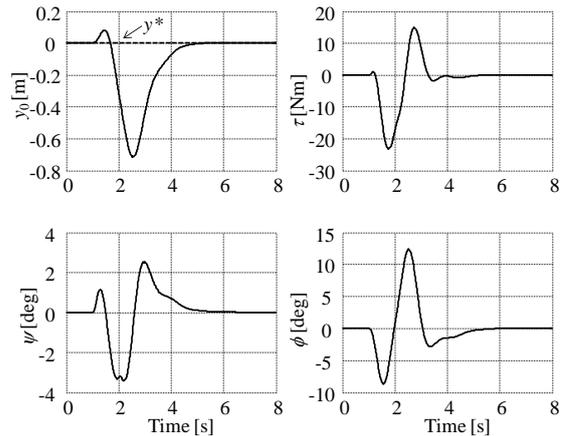


Fig. 4 Time history of rider control model

4.2. ゲインを変化させた場合の時系列応答

次に、各ゲインの値を変化させたときの影響を調べるために、あるゲインの値を変化させて、残りの2つのゲインを標準値のままにした場合の時系列応答について確認する。変化させるゲインの値は、ゲインをゼロ（その運動がフィードバックされない）にした場合と標準値の2倍にした場合について示す。

図5は横変位に対するゲイン K_y を変化させた場合のシミュレーション結果である。横変位に対するゲイン K_y の値が 0N の場合、横運動に対してフィードバックされないため目標車線には復帰しないものの、不安定になることはないことがわかる。また、ゲインが標準値の2倍の値である -24N では、横運動のフィードバックが強く作用し、標準値のときよりも追従性は良くなるが、収束性

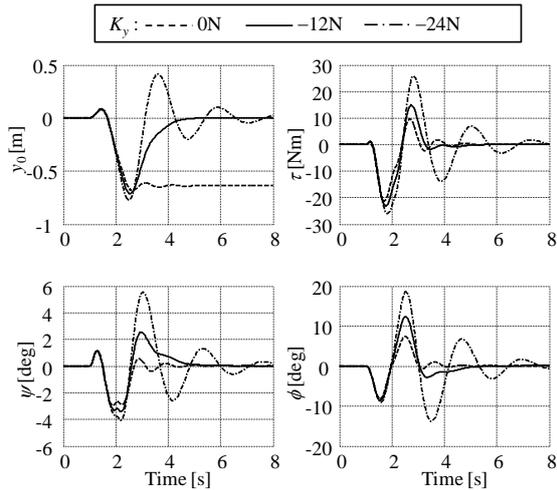


Fig.5 Time history of rider control model (increasing lateral displacement gain)

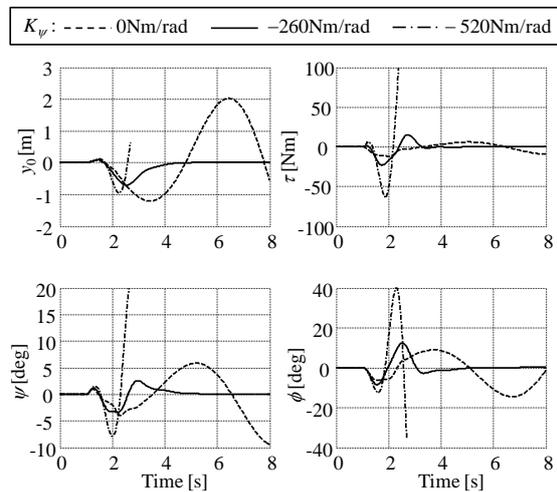


Fig.6 Time history of rider control model (increasing yawing angle gain)

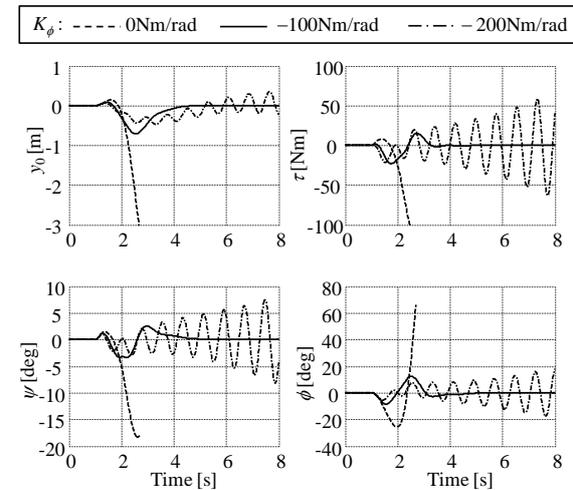


Fig.7 Time history of rider control model (increasing rolling angle gain)

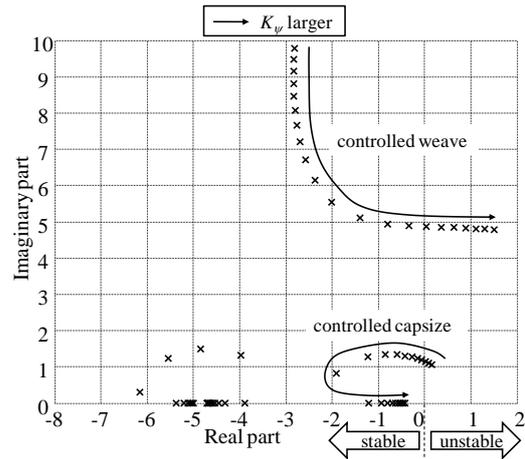


Fig.8 Root locus plot (increasing yawing angle gain)

が劣化，すなわちダンピングが弱くなっていることがわかる．今回検討した範囲内では，横変位に対するゲインは，安定性に直接影響を及ぼさないといえる．

図6にヨー角に対するゲイン K_ψ を変化させた場合のシミュレーション結果を示す．この図より，ゲインが 0Nm/rad では，ヨー角に対するフィードバックが行われないため，直進走行することができず，不安定になっている．また，標準値の2倍に当たるゲインでも同様に，ヨー角に対して制御が強く作用してしまい不安定な挙動となる．ヨー角に対するゲインは，小さすぎても大きすぎても不安定になることがわかる．

ロール角に対するゲイン K_ϕ を変化させた場合のシミュレーション結果を図7に示す．これより，ゲインが 0Nm/rad の場合は，直立安定を補償する制御が行われないため，車体が転倒する．一方，ゲインが -200Nm/rad のときは，ロール角に対する制御が強すぎて，振動的な挙動を示し，最終的に不安定になっている．よって，ロール角に対するゲインも，ヨー角に対するゲインと同様に，ゲインが小さくても大きくても不安定になることが確認できる．

4.3. 閉ループ系の根軌跡

前述の時系列応答で確認した際に，各ゲインを変化させた範囲内で閉ループ系の極の変化（根軌跡）について検討する．なお，ライダー二輪車系の閉ループ系では，非制御時の運動モードの名称を使うことはできないが，非制御時からの極の変化を観察して，非制御時の運動モードと関係している極を，制御されたウィーブモードや制御されたキャブサイズモードと便宜上呼ぶこととする．

図8にヨー角に対するゲイン K_ψ を $0 \sim 520\text{Nm/rad}$ の間 -26Nm/rad 刻みで変化させた根軌跡を示す．ヨー角に対するゲインが小さい場合には，制御されたキャブサイズモードが不安定となり，ゲインの増加に伴い，安定領域へと推移する．しかし，ゲインをさらに増加させると，制御されたキャブサイズモードは安定のままであるが，制御されたウィーブモードが不安定になることがわかる．

ロール角に対するゲイン K_ϕ を $0 \sim -200 \text{ Nm/rad}$ の間 -10 Nm/rad 刻みで変化させた根軌跡を図9に示す。ロール角に対するゲインが小さい場合には、ロール運動に対するフィードバックが弱いため、制御されたキャプサイズモードは不安定となる。ゲインを増加させることで、制御されたキャプサイズモードは安定になるが、さらに増加させると制御されたウィーブモードが不安定になり、時系列応答と対応していることが確認できる。

4.4. ゲインと安定性の関係

前述のように、横変位に対するゲイン K_y は、安定性及び影響が小さいことから、ヨー角に対するゲイン K_ψ およびロール角に対するゲイン K_ϕ と安定性の関係について考察する。図10は、横変位に対するゲイン K_y を -12 N (標準値) に固定して、 K_ψ と K_ϕ を変化させた場合の安定性の結果を示している。同図において、●は安定、×は制御されたキャプサイズモードが不安定、+は制御されたウィーブモードが不安定、○は標準値であることを意味する。この図より、ロール角に対するゲインが小さい領域では、直立制御が弱くなり、制御されたキャプサイズモードが不安定になることがわかる。また、ヨー角に対するゲインが小さい場合には、ロール角に対するゲインを大きくしても、不安定になっていることが確認できる。これらの結果から、ロール角とヨー角に対するゲインは、ある程度の大きさが必要であることがわかるが、それらのゲインを強めすぎると、逆に制御されたウィーブモードが不安定となる。このとき、安定領域と不安定領域の境界は、ロール角とヨー角に対するゲインのどちらかが大きすぎる場合のみでなく、それぞれのゲインがある程度バランスが保たれているかどうか、安定性に影響を及ぼしていることがわかる。

5. 結 言

本研究では、二輪車の操縦を模擬するライダモデルについて、車両状態に対応させて、各ゲインが安定性及び影響を検討した。その結果以下のような結果が得られた。

- 1) 車両重心点の横変位に対するゲインは、今回検討した範囲内では安定性には直接影響を及ぼさない。
- 2) ヨー角に対するゲインとロール角に対するゲインは、ゲインが小さすぎても大きすぎても不安定になることがわかった。
- 3) ヨー角およびロール角に対するゲインと安定性の関係から、これらのゲインのバランスが、安定性に影響を及ぼすことを確認した。

今後は、安定領域内の詳細な考察を行うとともに、車両モデルを詳細にして、ライダの入力も操舵トルクのみでなく、身体による入力も含めた操縦モデルの解析を行う。

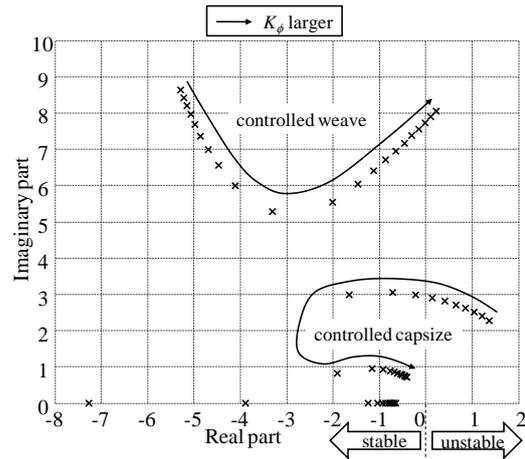


Fig.9 Root locus plot (increasing rolling angle gain)

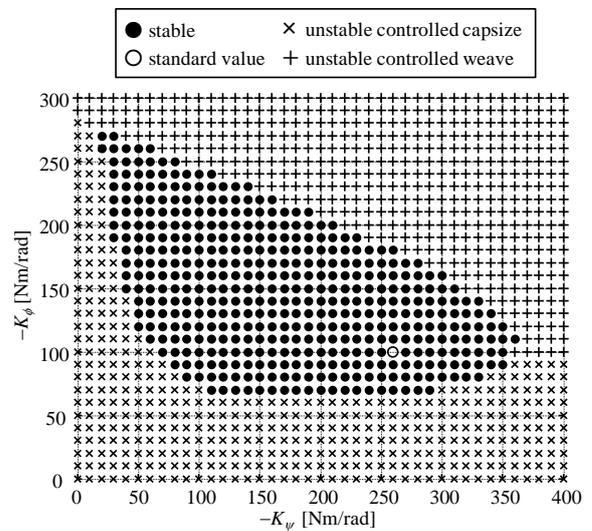


Fig.10 Stable area by yawing angle and rolling angle gains

参考文献

- (1) 近藤政市: 自動車の操舵と運動間に存在する基礎的關係について, 自動車技術会論文集, No.5, (1958), pp.40-43.
- (2) 安部正人: 自動車の運動と制御, 東京電機大学出版局, (2008), pp.223-243.
- (3) 井口雅一: 2輪車の運動力学(1), 線形理論による基本特性の解析, 機械の研究, Vol.14, No.7, (1962), pp.890-894.
- (4) 片山硬, 西見智雄, 岡山巧, 青木章: 二輪車ライダの操縦動作シミュレーション, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.3, (1997), pp.137-142.
- (5) R. S. Sharp: The Stability and Control of Motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 13, No. 5, (1971), pp.316-329.
- (6) Y. Marumo and M. Nagai: Steering Control of Motorcycles Using Steer-by-Wire System, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 5, (2007), pp.445-458.