

モデル予測制御による二輪車の衝突回避システムに関する研究

日大生産工（院） ○野見山 龍介 日大生産工 丸茂 喜高 日大生産工 綱島 均

1. 緒論

四輪車に比べ、軽量、小型である二輪車は、交通渋滞の緩和や環境負荷の低減が期待できる。しかし、逆操舵や低速走行時の直立安定の確保など二輪車特有の操作が必要であり、四輪車に比べて操縦が複雑とされている。筆者らは、二輪車にステアパイワイヤ技術¹⁾を適用することで複雑な操縦が除去され、ライダーの意図を実現することを示した²⁾。また、車線維持支援システム³⁾を適用することで、ライダーのエラーや外乱などにより走行車線を逸脱しそうな場合でも自動的に復帰させることができることを確認した。しかし、走行車線上の障害物を回避する場合、ライダーが障害物に気づいていないときには、ライダーのかわりに操舵を行うことで、積極的に回避を行うシステムが必要となる。

本研究では、自動操舵により障害物の回避行動を行う二輪車の衝突回避システムについて検討する。システムにより回避行動を行う場合、システムの入力とライダーの操縦が干渉することが考えられるため、操舵系にはステアパイワイヤ技術を用いることを前提とする。ライダーの意図しない障害物回避によりライダーの挙動に悪影響を及ぼす可能性があるため、車両運動に制約を設けることで、影響を少なくする必要があると考えられる。そこで、制約を陽に取り扱うことのできるモデル予測制御⁴⁾を用いて、衝突回避のシミュレーションを行い、最適制御を適用した場合と比較を行う。

二輪車の場合、車両と乗員の質量が接近しているため乗員の特性が車両運動に及ぼす影響が大きく、二名乗車をした場合、運動特性が大きく変化することが考えられるため、制御系の持つロバスト性についても検証を行う。

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表現することが可能である。ここでは、Sharp⁵⁾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。車両モデルを図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、参考文献2)に記載されており、ここでは簡略化した方程式のみを示す。

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

$$B_{21}\dot{y}_1 + B_{22}\dot{\psi} + B_{23}\dot{\phi} + B_{24}\dot{\delta} + A_{21}\dot{y}_1 + A_{22}\dot{\psi} + A_{23}\dot{\phi} + A_{24}\dot{\delta} + A_{25}\phi + A_{27}Y_f + A_{28}Y_r + A_{29}T_{zf} + A_{2a}T_{zr} = -\tau \cos \varepsilon \quad (2)$$

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

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

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、参考文献2)に記載されている。

本検討では車線上の障害物を操舵により回避する問題を扱うため、固定座標系で検討する必要がある。そこで、以下に示すように、移動座標系 (x_1 - y_1) から固定座標系 (x_0 - y_0) へ座標変換³⁾を行うものとする。

$$\dot{y}_0 = \dot{y}_1 + \dot{x}_1\psi \quad (5)$$

ここで、 $\dot{y}_0$ は固定座標系で表現された横速度、 $\dot{y}_1$ は移動座標系で表現された横速度、 $\dot{x}_1$ は移動座標系で表現された前後速度、 ψ はヨー角である。

3. 制御系設計

自動回避時のライダーの挙動を考慮して、車両運動に制約を設けるため、モデル予測制御を適用する。モデル予測制御とは、制御器に含んだ内部モデルにより予測した

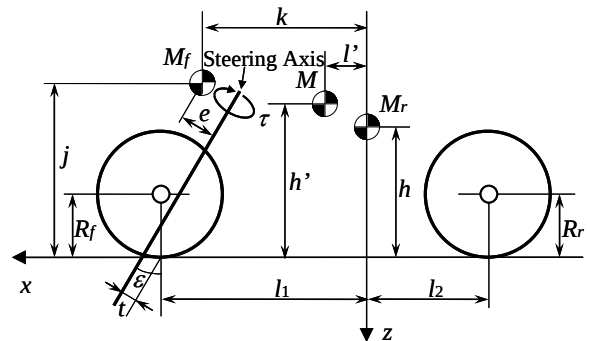


Fig. 1 Vehicle model

プラントの出力を用いて制約を考慮した最適制御を行う制御法⁴⁾であり、四輪車⁶⁾や大型車⁷⁾の衝突回避システムに適用されている。内部モデルを構築するために、(1)～(4)式を座標変換した運動方程式により以下のような状態方程式を導出する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{x} = [\dot{y}_0 \ \dot{\psi} \ \dot{\phi} \ \dot{\delta} \ y_0 \ \psi \ \phi \ \delta]^T$, $u = \tau$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & a_{46} & a_{47} & a_{48} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

状態量 $\mathbf{x}$ は、それぞれメインフレーム重心点の横速度、ヨーレート、ロールレート、操舵角速度、横変位、ヨー角、ロール角および操舵角から構成されており、制御入力 u は緊急回避を行うための操舵トルクである。

次に、評価関数 $J(k)$ を以下のように設定した。

$$J(k) = \sum_{i=0}^{H_p} \|\mathbf{y}(k+i|k) - \mathbf{r}(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta u(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{y}(k+i|k)$ は時刻 k における予測出力、 $\mathbf{r}(k+i|k)$ は目標値(参照軌道)、 $\Delta u(k+i|k)$ は単位時間当たりの入力である。 H_p は予測ホライズンと呼ばれ、現在から H_p ステップ後までの車両運動を予測させることを意味する。 H_u は制御ホライズンと呼ばれ、車両運動の予測を行う際、 H_u ステップ間で入力を変化させることを意味し、予測ホライズンが制御ホライズンより長い場合、 H_u ステップ間以外では、入力が一定値であると仮定される。(7)式のノルムは $\|\mathbf{x}\|_{Q(i)}^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{Q}(i) \mathbf{x}$, $\|u\|_{R(i)}^2 = u^T \mathbf{r}(i) u$ と定める。本研究では、障害物回避を行うため、横変位に重み q_y を設け、それ以外の状態変数の重みは0とした。

制約条件式を $|u| \leq u_{\max}$, $|\mathbf{y}| \leq \mathbf{y}_{\max}$ と表わすと、線形不等式は以下ようになる。

$$\mathbf{E}[\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(k+H_u-1|k), 1]^T \leq 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{F}[\mathbf{y}(k|k), \dots, \mathbf{y}(k+H_u-1|k), 1]^T \leq 0 \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$ は適切な次元の行列、 $\mathbf{0}$ は零ベクトルである。

モデル予測制御では、予測ホライズンの長さにわたって、制約条件式である(7)式、(8)式のもとで最適化問題を解き、

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k+1) \quad (10)$$

を得る。

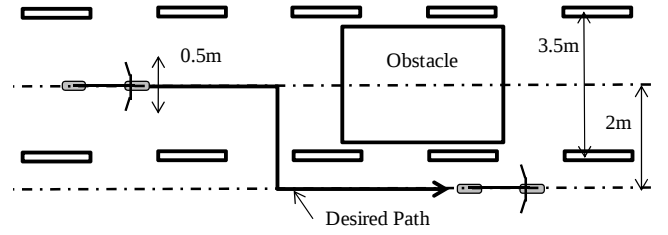


Fig. 2 Desired path for collision avoidance

本研究では、モデル予測制御を用いて、緊急回避のために横変位の重みを大きくした制御系をあらかじめ作成し、急なロール運動がライダの挙動に影響を与え、ロールレートに制約を設けることとする。ロールレートの制約の値は $\pm 1 \text{ rad/s}$ に設定した。

モデル予測制御を用いた回避システムの制御系のパラメータは、サンプリング時間は 0.01 s で、 $H_p=200$ ステップ(2s)、 $H_u=200$ ステップ(2s)、 $q_y=10^4$, $r=1$ とした。

モデル予測制御の比較対象として、これまで車線維持支援システム³⁾の設計で用いた最適制御理論により制御系の設計を行う。最適制御の評価関数は、前述のモデル予測制御の制約を満たすように、横変位と操舵トルクへの重みに加えてロールレートにも重み q_ϕ を設け、以下のように設定した。

$$J = \int_0^\infty (q_y y_0^2(t) + q_\phi \dot{\phi}^2(t) + r \tau^2(t)) dt \quad (11)$$

横変位の重み q_y と操舵トルクの重み r は、モデル予測制御のものと同一とし、ロールレートの重みは、ロールレートが $\pm 1 \text{ rad/s}$ 以下になるように、 $q_\phi = 220$ とした。

4. シミュレーションによる検討

静止している障害物が走行中の二輪車の前方にあり、自動操舵により回避することを想定し、モデル予測制御を用いた回避システムの回避性能を検討する。本研究では、問題を単純化するため、車線中央を車速 16.7 m/s (60 km/h)で走行中の二輪車に対して、前方の障害物を回避するために目標横変位 y^* がシミュレーション開始 1 s 後にステップ状に変化するものとした。図2に示すように、二輪車の横幅を 0.5 m とし、幅員 3.5 m の車線内に障害物があることを仮定すると、操舵により衝突を回避するのに必要な横移動量は、車両と障害物の横幅の和の半分であるため、目標横変位は 2 m とした。

4.1 ロールレートに制約を設けた場合

3章で設計した制御系を用いてシミュレーションを行った。図3にシミュレーション結果を示す。実線は回避システムにモデル予測制御を適用した場合、破線は最適制御を適用した場合である。同図のロールレート(右下)の応答には、制約の値を点線で示している。横変位(左上)の応答から、両制御とも自動操舵により進行方向右側(正)の目標横変位に追従していることが確認できる。ヨー角(左中)に着目すると、右方向(正)を向くのは、

最適制御のほうが早いですが、最大値はモデル予測制御のほうが大きくなっている。ロールレイトを制約の範囲内で可能な限り大きくし、ロール角（左下）を大きく発生させることで、ヨー角が大きくなり、横方向への移動が早く行われているため、目標横変位に到達した時間が短縮されている。ここで、目標横変位への到達時間について検討する。目標値の95%に到達する時間を比較すると、最適制御では2.02sであるのに対して、モデル予測制御を適用すると1.57sになり、約22%短縮されている。目標値に到達する時間では、最適制御が2.20s、モデル予測制御が1.82sであり、約17%の短縮となっている。以上のことから、モデル予測制御を用いることで、障害物の回避性能が向上することが確認できる。

ところが、操舵トルク（右上）に着目すると、目標横変位が変化した際に150Nmを越える値になっており、アクチュエータの制約を考えると、実現するのが難しいことが考えられる。

4.2. 操舵トルクへの制約を追加した場合

前節で示した制御系では、操舵トルクの値が大きくなるため、操舵トルクへの制約を追加した制御系を設計する。ロールレイトの制約はそのまま、操舵トルクの制約を $\pm 50\text{Nm}$ として新たに追加した。モデル予測制御のその他のパラメータは同一である。また、最適制御を用いた場合は、横変位の重みはそのまま、操舵トルクが $\pm 50\text{Nm}$ 以下、ロールレイトが $\pm 1\text{rad/s}$ 以下になるように、 $q_\phi = 30$, $r = 14$ とした。図4にシミュレーション結果を示す。操舵トルクへの制約を追加した場合でも、両制御とも自動操舵回避により目標横変位に追従していることが確認できる。制約がない場合と同様に、操舵トルクを制約の範囲内で大きくして、回避を行っていることがわかる。目標値の95%に到達する時間を比較すると、モデル予測制御を用いた場合は1.60sであり、最適制御では1.98sとなり、モデル予測制御により到達時間が約19%短縮されている。操舵トルクに対する制約がない場合（1.57s）と比較して、到達時間に及ぼす影響は少ないといえる。目標値に到達する時間では、モデル予測制御が1.87s、最適制御では2.16sであることから、モデル予測制御により約13%短縮されている。操舵トルクへの制約がない場合（1.82s）と比べて、あまり影響がないことがわかる。

ここで、これまでの到達時間の結果を図5にまとめる。操舵トルクへの制約の追加の有無によらず、到達時間がほぼ同じであることから、障害物回避性能には大きな影響がないことがわかる。このことから、操舵トルクの大きさを制限した場合でも、モデル予測制御を用いることで、回避性能が向上することが確認できた。

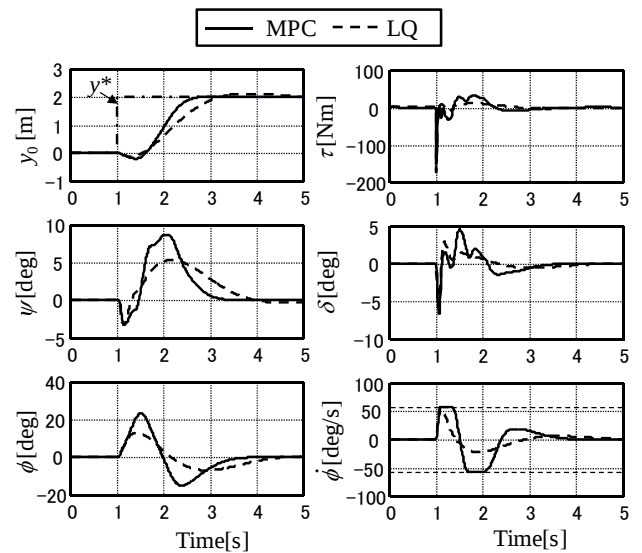


Fig. 3 Time history of collision avoidance system
(with constraint on roll rate)

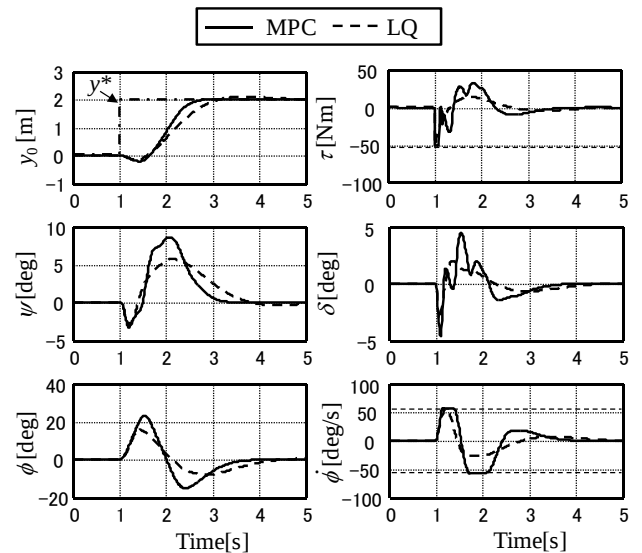


Fig. 4 Time history of collision avoidance system
(with constraints on roll rate and steering torque)

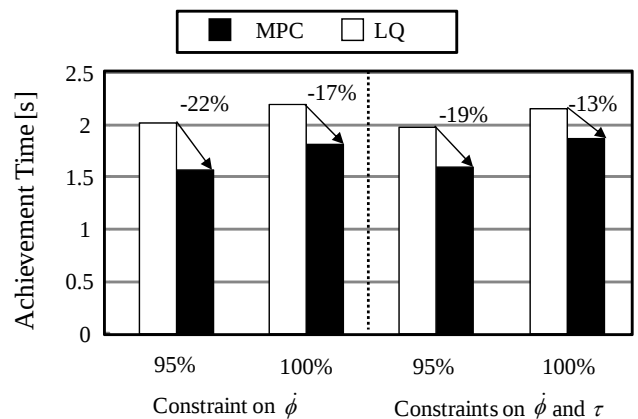


Fig. 5 Achievement time

5. 制御系のロバスト性の検証

二輪車は、四輪車の場合と比較して車両と乗員の質量が接近しているため、乗員の特性が車両運動に及ぼす影響は大きく、二名乗車を行うことがあるため、乗員人数により運動特性が大きく変化することが考えられる。前章では、制御対象のモデルが制御設計時に用いたモデルと同一となっていたが、ここでは、制御対象のモデルの特性が制御系設計時のモデルの特性と異なる場合を想定し、制御系のもつロバスト性について検証する。

車両モデルのパラメータを変化させることで、二名乗車の状態を想定する。ここでは、ライダーの質量が含まれているメインフレームの質量を増加させ、その重心位置を同乗者が乗車する後方へ移動させるものとする。実際には、慣性モーメントやその他の緒元も影響を受けるが、ここではこれらのパラメータを変更させることで、二名乗車を模擬するものとした。具体的には、参考文献 2) に記載されている計算緒元のメインフレームについて 30% 増加させ、メインフレーム重心-後輪軸間の距離を 0.1m 増加させた。これは、質量約 70kg の同乗者が乗車していることを想定している。

検証する制御系は、前章で設計したモデル予測制御を用いたものとし、ロールレイトと操舵トルクに制約を設ける。制御系のパラメータとしては、一名乗車時であり、シミュレーションを行う制御対象のパラメータを前述の二名乗車のものとしてシミュレーションを行う。シミュレーション条件は、前章と同様に目標横変位 y^* がシミュレーション開始 1s 後にステップ状に 2m 変化するものとした。シミュレーション結果を図 6 に示す。実線は二名乗車時の場合、破線は一名乗車時の場合である。ロールレイトが制約の値をわずかに超えているが、二名乗車により不安定になることもなく、一名乗車と同様の回避性能が得られている。

このことから、制御対象の特性が変化しても、ある程度のロバスト性を有しており、乗員人数の変動に対しても有効であると考えられる。

6. 結言

二輪車のモデル予測制御を用いた衝突回避システムの設計を行い、衝突回避のシミュレーションにより検討した。最適制御を適用した場合と比較した結果、以下の結論を得た。

- 1) モデル予測制御を用いてロールレイトに制約を設けた場合、最適制御を用いた場合に比べて回避性能が向上することを確認した。
- 2) ロールレイトに加えて、操舵トルクへの制約を追加した場合でも同様に、モデル予測制御により衝突の回避性能が向上した。
- 3) 乗員人数の変動に対しても、程度のロバスト性を有することを確認した。

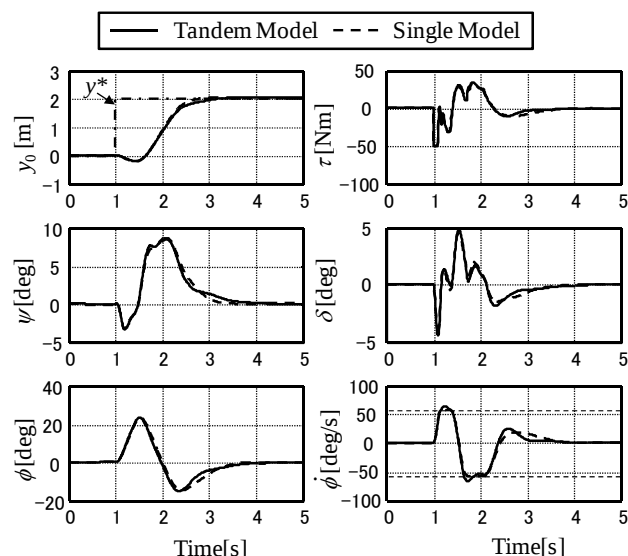


Fig. 6 Time history of collision avoidance system
(with tandem riding)

「参考文献」

- 1) 本山康夫：ステアバイワイヤと車両運動制御，自動車技術，Vol. 57, No. 2, 2003, 39-43
- 2) Y. Marumo and M. Nagai : Steering Control of Motorcycles Using Steer-by-Wire System, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 5, 2007, 445-458
- 3) N. Katagiri, Y. Marumo and H. Tsunashima : Controller Design and Evaluation of Lane-Keeping-Assistance System for Motorcycles, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 2, No.1, 2009, 43-54
- 4) J. M. Maciejowski (著)，足立修一，管野政明 (訳)：モデル予測制御 制約のもとでの最適制御，東京電機大学出版局，2005
- 5) R. S. Sharp, : The Stability and Control of Motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 13, No. 5, 1971, 316-329
- 6) H. Yoshida, S. Shinohara and M. Ngai, : Lane change steering maneuver using model predictive control theory, Vehicle System Dynamics, Vol. 46, Supplement, 2008, 669-681
- 7) 佐藤裕太，小口俊樹：大型連結車両の横転防止を考慮した自律回避行動，機構論，No.08-68, 2008, 155-158