

モデル予測制御による多重連結車両の衝突回避システムに関する研究

日大生産工 (院) ○大木 陽平 日大生産工 丸茂 喜高

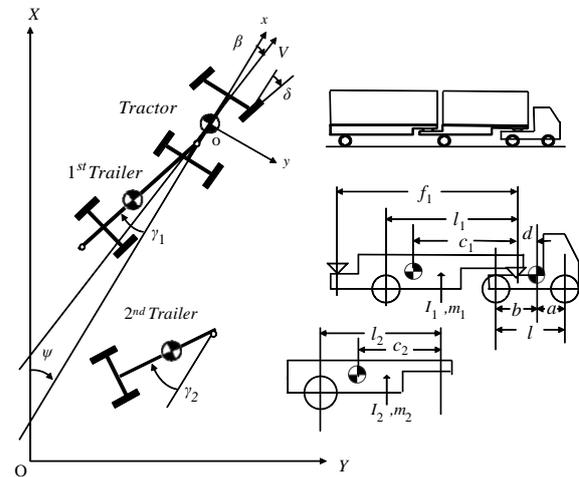
1. 緒言

近年, 大型車を自動運転で隊列走行させることにより, 高効率な幹線物流システムを実現するための研究開発が行われている⁽¹⁾. しかし, フェイルセーフ設計や車車間通信の遅れによる車間距離の限界といった技術的な課題が挙げられている. それに対して, 多重連結車両は, トラクタとトレーラ, トレーラとトレーラがピンによって連結されているため車両間隔が短く, 一度に多くの荷物を積載できるため高い経済性を持っている. しかしながら, 多重連結車両は連結車両数を増やすと安定性が低下するという課題を抱えており⁽²⁾, 万一事故になると単独車両に比べて被害は甚大となるため, 事故を未然に防ぐ技術が必要であると考えられる. そこで, 多重連結車の付加操舵の方法としてベクトルフォロー法が提案され, シミュレーションと模型車両を用いた実験によって安定性の向上が確認されている⁽³⁾. 他にも, 多重連結車両の操縦安定性については議論されている⁽⁴⁾が, ドライバがエラーを起こした際に事故を回避するような運転支援システムに関する検討はされていない. 例えば, 運転支援の一つとして, ドライバが車両前方の走行車線外の障害物に気がついていない場合に, ドライバの代わりに操舵制御を行い, 積極的に障害物を回避するようなシステムが挙げられる.

本研究では, 多重連結車両の一つであるダブルストレーラに着目し, 自動操舵により障害物の回避行動を行う衝突回避システムについて検討する. システムにより緊急回避を行う場合, 急ハンドルによってジャックナイフ現象など連結車両固有の現象が発生する可能性がある. そのため, これらの現象を防止するには, 車両運動に制約を設けることが有効な対策と考えられる. 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⁽⁵⁾を用いて, 衝突回避のシミュレーションを行う. モデル予測制御は, 各時刻において有限区間の最適制御問題を解きながら制御入力を決めていくため, 制約を陽に考慮しない通常の最適制御を適用した場合と比較し, モデル予測制御を用いた衝突回避システムの有効性を検討する.

2. 車両モデル

本研究で採用するダブルストレーラの運動モデルは, 図1に示す路面固定右下向き直交座標系に関する簡略化したモデルである. 自由度は, トラクタの横運動, ト

Fig. 1 Vehicle model⁽⁴⁾

ラクタのヨー運動, トラクタに対する各トレーラの相対的なヨー運動の4自由度である.

まず, 等速走行する各車両の X と Y 方向の力のつり合い式およびヨー方向モーメントのつり合い式から連結点に作用する力を消去すると, 運動方程式が以下のように求まる.

- トラクタの横方向の運動方程式

$$(m + m_1 + m_2)\ddot{Y} - [m_1(d + c_1) + m_2(d + f_1 + c_2)]\ddot{\psi} - (m_1c_1 + m_2f_1)\ddot{\gamma}_1 - m_2c_2\ddot{\gamma}_2 = F_f + F_r + F_1 + F_2 \quad (1)$$

- トラクタのヨー方向の運動方程式

$$m d \ddot{\psi} + I \ddot{\psi} = (a + d) F_f + (d - b) F_r \quad (2)$$

- 第一トレーラのヨー方向の運動方程式

$$-(m_1c_1 + m_2f_1)\ddot{\psi} + [I_1 + m_1c_1(d + c_1) + m_2(d + c_2)f_1]\ddot{\gamma}_1 + (I_1 + m_1c_1^2 + m_2f_1^2)\ddot{\gamma}_1 + m_2c_2f_1\ddot{\gamma}_2 = -I_1F_1 - f_1F_2 \quad (3)$$

- 第二トレーラのヨー方向の運動方程式

$$-m_2c_2\ddot{\psi} + [I_2 + m_2c_2(d + f_1 + c_2)]\ddot{\gamma}_2 + m_2c_2f_1\ddot{\gamma}_1 + (I_2 + m_2c_2^2)\ddot{\gamma}_2 = -I_2F_2 \quad (4)$$

また、各車輪に発生するコーナリングフォースはコーナリングパワと横すべり角の積から以下ようになる。

$$F_f = C_f(\delta - \dot{Y}/V - a\dot{\psi}/V + \psi) \quad (5)$$

$$F_r = C_r(-\dot{Y}/V + b\dot{\psi}/V + \psi) \quad (6)$$

$$F_1 = C_1[-\dot{Y}/V + (d+l_1)\dot{\psi}/V + l_1\dot{\gamma}_1/V + \psi + \gamma_1] \quad (7)$$

$$F_2 = C_2[-\dot{Y}/V + (d+f_1+l_2)\dot{\psi}/V + f_1\dot{\gamma}_1/V + l_2\dot{\gamma}_2/V + \psi + \gamma] \quad (8)$$

なお、運動方程式の記号と計算に用いた車両諸元については、参考文献(4)に記載されている。

3. 制御系設計

自動回避時の連結車両固有の現象を防止するために、車両運動に制約を設けることが可能な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プラントの出力を予測し、それを用いて制約を考慮した最適制御を行う制御法⁽⁵⁾であり、四輪車⁽⁶⁾や二輪車⁽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)~(8)式より以下のような状態方程式を導出する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{x} = [\dot{Y} \ \dot{\psi} \ \dot{\gamma}_1 \ \dot{\gamma}_2 \ Y \ \psi \ \gamma_1 \ \gamma_2]^T$ 、 $u = \delta$ 、 \mathbf{A} は8行8列のシステム行列、 \mathbf{B} は8行1列の入力行列である。状態量 \mathbf{x} は、トラクタ重心点横速度 \dot{Y} 、トラクタヨーレート $\dot{\psi}$ 、トラクタ・第一トレーラ相対ヨーレート $\dot{\gamma}_1$ 、トラクタ・第二トレーラ相対ヨーレート $\dot{\gamma}_2$ 、トラクタ重心点横変位 Y 、トラクタヨー角 ψ 、トラクタ・第一トレーラ相対ヨー角 γ_1 およびトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角 γ_2 から構成されており、 δ は障害物回避のための操舵角である。

また、本研究では問題を簡単にするために、全状態フィードバックが可能なものとする。すなわち出力方程式は、

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (10)$$

となり、 \mathbf{C} は8行8列の単位行列となる。

このシステムを離散化したものを内部モデルとして、評価関数 $J(k)$ を以下のように設定した。

$$J(k) = \sum_{i=0}^{H_p} \|\hat{\mathbf{y}}(k+i|k) - \mathbf{r}(k+i|k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\hat{\mathbf{u}}(k+i|k)\|_{\mathbf{r}}^2 \quad (11)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{y}}(k+i|k)$ は予測される出力、 $\mathbf{r}(k+i|k)$ は目標値(参照軌道)、 $\hat{\mathbf{u}}(k+i|k)$ は予測される入力であり、 H_p は予測ホライズン、 H_u は制御ホライズンである。目標値は、目標横変位 Y^* を用いて、 $\mathbf{r} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ Y^* \ 0 \ 0 \ 0]^T$ とした。また、 \mathbf{Q} および \mathbf{r} は、予測出力と目標値との差、および予想される入力に対する重みであり、 $\mathbf{Q} = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ q_Y \ 0 \ 0 \ 0]$ とした。

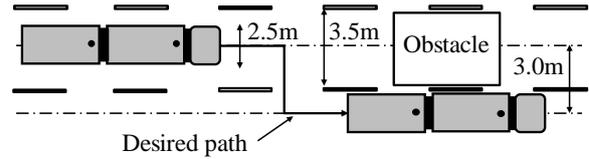


Fig. 2 Desired path for collision avoidance

連結車両は、ジャックナイフ現象が生じる可能性があり、ダブルストレーラの場合、車両間の相対的なヨー角が最も大きくなる先頭車両と後尾車両の相対ヨー角を抑制させることで、各車両間の相対ヨー角を抑えることが可能になると考えられる。そこで本研究では、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、ジャックナイフを防止するための制約としてトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角 γ_2 に設けることとする。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、サンプリング時間が0.01sで、 $H_p = 200$ ステップ(2s)、 $H_u = 200$ ステップ(2s)、 $q_Y = 10^2$ 、 $r = 10^0$ とする。

この制御系の比較対象として、最適制御による制御系を設計する。トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角に制約を設けた制御系に対しては、以下の評価関数を適用する。

$$J = \int_0^{\infty} (q_Y Y^2(t) + q_{\gamma_2} \gamma_2^2(t) + r \delta^2(t)) dt \quad (12)$$

ただし、 q_{γ_2} はトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の重みであり、モデル予測制御で設定した制約値を満たすように設定する。

4. シミュレーションによる検討

4.1 シミュレーション条件

走行中のダブルストレーラの前方に静止している障害物を自動操舵により回避を行うことを想定し、モデル予測制御を用いた衝突回避システムの回避性能を検討する。車線中央を車速22.2m/s(80km/h)で走行中のダブルストレーラに対して、図2に示すように、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1s後にステップ状に変化するものとした。ダブルストレーラの幅を2.5mとし、幅員3.5m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、車両と障害物の幅の和の半分であるため、目標横変位は3.0mとした。

4.2 モデル予測制御による衝突回避性能の検証

ここでは、一例としてトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの制約を5degとして、前章に基づき、MATLABのModel Predictive Control Toolbox⁽⁸⁾を用いて制御系設計を行った。また、(12)式に示した、比較対象である最適制御の評価関数におけるトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の重みは、 $q_{\gamma_2} = 10^{0.46}$ として、それ以外の重みはモデル予測制御のもと同一とした。図3にトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角に制約を設けたときの障害

物回避のシミュレーション結果を示す。同図のトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角 γ_2 には点線で制約を示している。両制御とも、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角 γ_2 が制約をほぼ満たしていることが確認できる。トラクタ横変位 Y に着目すると、シミュレーション開始1s後に目標横変位が変化すると、目標車線に追従しようと舵角 δ が入力され、その後、目標車線に追従している。目標車線へ最初に到達する時間（回避時間）は、モデル予測制御を適用した場合の方が、最適制御を適用した場合に比べて早いことが確認できる。

トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの制約を2.5~15degの間、2.5deg刻みで変化させ、各条件におけるトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値と回避時間の関係を図4に示す。図4より、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値が同程度であれば、モデル予測制御を用いることにより、最適制御よりも回避時間が短くなる。さらに、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値が小さいほど、その差が大きくなることが確認できる。また、適用した制御系によらず、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値が大きくなるに従い回避時間が短くなることがわかる。

本研究では、平面モデルのためロール運動は考慮していないが、横加速度の大きさによってはロールオーバーが発生する可能性がある。そこで、横加速度の最大値が最も大きくなる第二トレーラ横加速度について着目する。前述の制約範囲でシミュレーションを行い、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値と第二トレーラ横加速度の最大値の関係を示したものが図5である。この図より、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値が同程度の場合、モデル予測制御は最適制御よりも第二トレーラ横加速度の最大値が大きい。しかし、第二トレーラ横加速度の最大値が同じくらいであれば、モデル予測制御は最適制御よりトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさの最大値を抑制する。

4.3 操舵角への制約を追加した場合

前節では、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角に制約を設けた場合について検討した。図3の時系列応答の結果をみると、目標横変位の変化時に過大な操舵角 δ が発生しており、さらに、舵角に起因した過大なトラクタ横加速度 \dot{Y} も生じている。そこで、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角のみでなく、入力である操舵角に対する制約も考慮して、複数の状態に制約を設けた場合の検討を行う。ここでは、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の大きさに対する制約を5degとし、さらに操舵角の大きさに対する制約を5degとした場合の制御系を設計する。(12)式に示した最適制御の評価関数の重みは、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角に対する重みを $q_{\gamma_2}=10^{-0.08}$ として、操舵角に対する重みを $r=10^{1.07}$ に変更した。

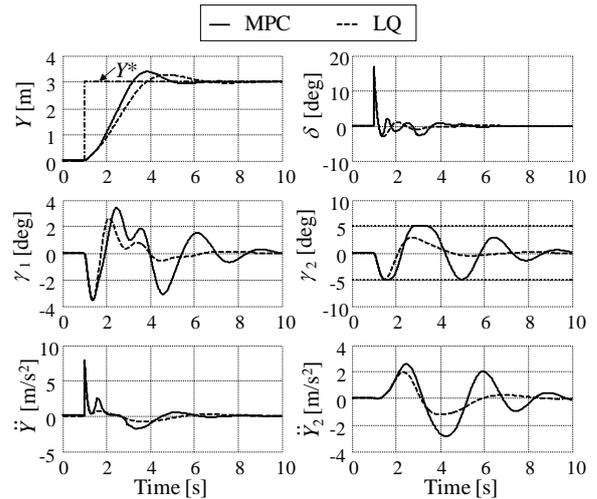


Fig. 3 Time history with constraint on second trailer relative yawing angle

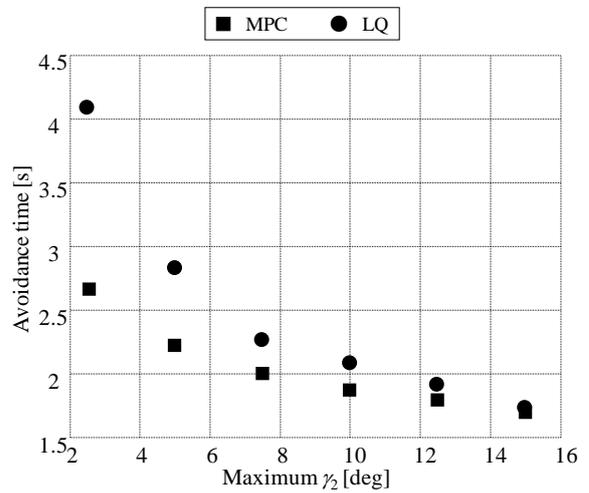


Fig. 4 Relation between maximum second trailer relative yawing angle and avoidance time

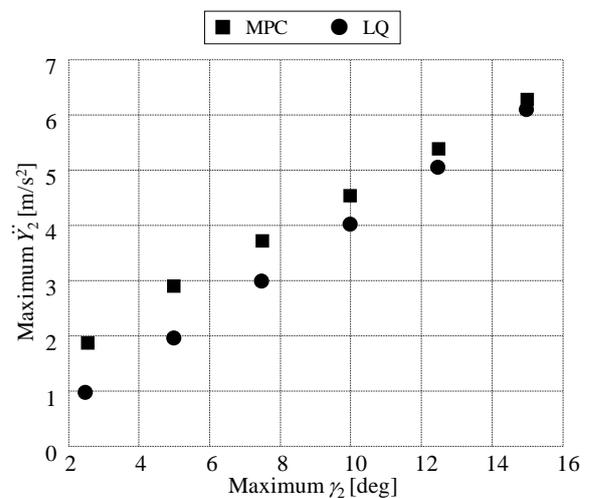


Fig. 5 Relation between maximum second trailer relative yawing angle and lateral acceleration

図 6 にシミュレーション結果を示す。同図の操舵角 δ および同図のトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角 γ_2 には点線で制約を示している。この図より、操舵角に対する制約を追加すると、トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角のみでなく操舵角の制約も満たしており、トラクタ横加速度の最大値は減少したことがわかる。さらに、これまでと同様にモデル予測制御により回避時間が短縮されていることが確認できる。図 3 に示した操舵角への制約なしの場合では回避時間は 2.22s であるのに対して、操舵角に対する制約を加えた場合は 2.31s であり、回避時間にさほど影響を及ぼさずに操舵角の過渡的な入力を低減している。

5. 結 言

本研究では、ダブルストレーラの衝突回避システムにモデル予測制御を適用して、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した結果、以下の結果を得た。

- 1) トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角に制約を設けたモデル予測制御により、最適制御と比較して衝突回避時間が短縮される。さらに、横転リスクが同程度の場合、モデル予測制御はトラクタ・第二トレーラ相対ヨー角を抑えることができることを確認した。
- 2) トラクタ・第二トレーラ相対ヨー角の他に、過渡的な入力を抑えるため操舵角に制約を設けた場合でも同様に、最適制御を適用した場合に比べてモデル予測制御を適用したことによる衝突回避の向上が確認された。さらに、操舵角に起因していた過渡的なトラクタ横加速度も抑えることができた。操舵角に制約がない場合と比較しても、回避性能に大きな影響はないことを確認した。

なお、本研究では簡易な平面モデルを用いたが、ダブルストレーラで問題となるロールオーバーなどの現象には直接的な検討ができない。そこで今後の課題として、ロール運動を含む詳細なモデルを用いてシミュレーションでの検討を行っていく。また、状態変数全てが測定可能としていたが、一般的には全ての状態変数を計測するのは難しいため、状態推定を考慮した障害物回避システムの検討を行う。

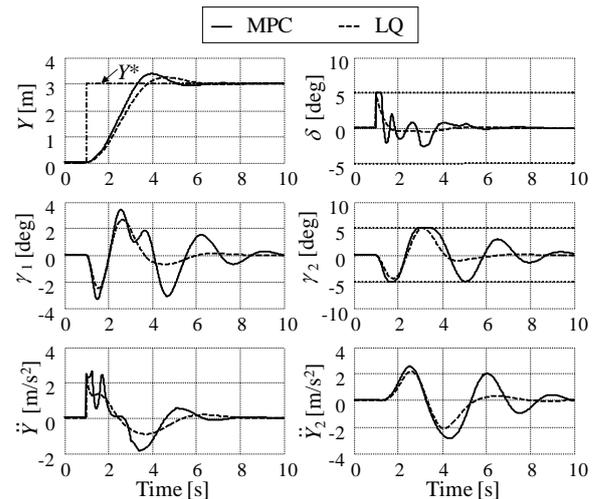


Fig. 6 Time history with constraint on second trailer relative yawing angle and steering angle

「参考文献」

- (1) 青木啓二, 森田康裕: 自動運転・隊列走行システムの開発概要(第1報), 自動車研究, Vol.31, No.10, (2009), pp.500-504.
- (2) 青木章: 多重連結車の安定性について, 自動車技術, Vol.29, No.10, (1975), pp.945-956.
- (3) 近森順, 清水裕, 川沢祥三: 多重連結車の全輪操舵制御による安定性向上, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.2, (1994), pp.115-120.
- (4) 青木章, 丸茂喜高, 景山一郎: 多重連結車両の方向安定性と操縦性に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.760, (2009), pp.24-31.
- (5) 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)
- (6) H. Yoshida, S. Shinohara and M. Nagai : Lane change steering maneuver using model predictive control theory, Vehicle System Dynamics, Vol. 46, Supplement, (2008), pp.669-681.
- (7) 丸茂喜高, 野見山龍介: 二輪車の障害物回避に関する研究 (モデル予測制御を用いた自動操舵制御), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.781, (2011), pp.97-108.
- (8) A. Bemporad, M. Morari and N. L. Ricker : Model Predictive Control Toolbox 3 User's Guide, MathWorks, (2010)