

クアドラプルストレーラの安定制御における 操舵車両が車線維持性能に及ぼす影響

日大生産工(院) ○楊 宇恒 日大生産工 風間 恵介
日大生産工 丸茂 喜高

1. 緒言

近年、トラック業界ではドライバー不足やドライバーの高齢化という問題が深刻化している¹⁾。多重連結車両は一度に多くの荷物を積載できるため、ドライバー不足の問題への改善が期待できる。ただし、多重連結車両には、車両数が増えると安定性が低下するという特徴があり、事故を防止する技術が必要であると考えられる。

連結車の安定性を向上させるために、ベクトルフォロ（以下 VF）法が提案されている²⁾。さらに、多重連結車であるトラクタに3両のトレーラを連結したトリプルストレーラを対象にVF法を適用し、全てのトレーラ輪を操舵することで良好な車線維持性能が確認された³⁾。しかし、全てのトレーラ輪を操舵しなくても、非制御時と比較すると、良好な車線維持性能が得られることが考えられる。すなわち、制御効率の観点からは、より少ない制御入力により、車線維持性能が向上することが望ましい。

そこで本研究では、トラクタに4両のトレーラを連結したクアドラプルストレーラを対象に、VF法を適用させ、安定制御の操舵車両が車線維持性能に及ぼす影響について検討する。さらに、安定制御に必要な操舵入力量と、最後端のトレーラの横変位の関係から、効率的なトレーラ輪操舵について検討を行い、得られた結果について考察する。

2. 制御系設計

本研究で使用するクアドラプルストレーラの運動モデルは、Fig. 1 に示すような右下向き直交座標系に関する簡略化したモデルであり、トリプルストレーラの運動方程式³⁾を基に、以下のようなクアドラプルストレーラの状態方程式を導出した。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

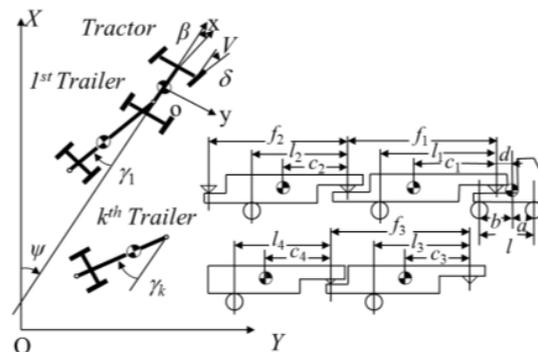


Fig. 1 Tractor and four-trailer combination model

ただし、 $\mathbf{x} = [\beta \ \psi \ \dot{\gamma}_1 \ \dot{\gamma}_2 \ \dot{\gamma}_3 \ \dot{\gamma}_4 \ \gamma_1 \ \gamma_2 \ \gamma_3 \ \gamma_4]^T$ 、 $\mathbf{u} = \delta_{VF} = [\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4]^T$ 、 \mathbf{A} は 10 行 10 列のシステム行列、 \mathbf{B} は 10 行 4 列の入力行列である。制御入力 \mathbf{u} は第 i トレーラ輪操舵角 δ_i ($i = 1 \sim 4$) である。

車線維持性能を検討するにあたり、ドライバーの操縦を模擬するために、前方注視点の横偏差に基づくドライバーモデルを用いる³⁾。ドライバーが操作する際のむだ時間と一次遅れ系を考慮し、ドライバーモデルの操舵角がクアドラプルストレーラに入力されるものとする。

VF法は、Fig. 2 に示すように、連結点における速度ベクトルの方向とトレーラの車体中心線を一致させる制御である。すなわち、各連結点の前後の車両における相対ヨー角の差 θ_i (以下、第 i 連結点角度差という) を抑制することで、VF法が実現できる。ここでは、それを実現するために、最適制御をベースとした状態フィードバック制御を用いる。以下に示す評価関数が最小となるフィードバックゲインを求める。

$$J = \int_0^{\infty} (q_i \theta_i^2(t) + r_i \delta_i^2(t)) dt \quad (2)$$

ただし、 q_i は第 i 連結点角度差に対する重みであり、 r_i は第 i トレーラ輪操舵角に対する重みである。

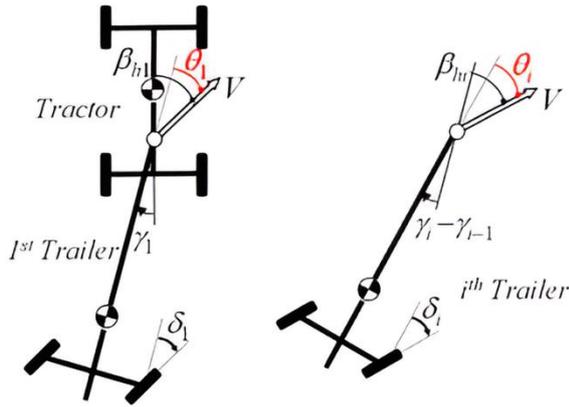


Fig. 2 Direction difference angles at articulation points

状態変数 \mathbf{x} を以下のようにフィードバックすることで，VF法の制御入力である δ_{VF} が求まる．

$$\delta_{VF} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (3)$$

ただし， \mathbf{K} は 4 行 10 列のフィードバックゲインである．

3. シミュレーション

2章で述べたドライバモデルとVF法を適用して，人間-自動車系でのシミュレーションにより，車線維持性能の評価を行う．クアドラプルストレーラには，ドライバ操舵角 δ_{DM} とVF法の制御入力である δ_{VF} が入力される．

4両のトレーラ輪の制御の有無の組み合わせは，非制御時を含めると16通りある．ここでは，その一例として，操舵車両の増加による影響を確認するために，非制御時および前方のトレーラから操舵車両を増加させた場合の5通りのシミュレーション結果について検討する．

シミュレーション条件は，クアドラプルストレーラが 80 km/h (約 22 m/s) で走行中に，シミュレーション開始 1s 後に目標横変位 Y^* がステップ状に 1m 変化するものとした．制御系の設計にあたっては，評価関数の重みをそれぞれ $q_i = 10^2$ ， $r_i = 1$ として，ドライバモデルのパラメータは， $K_{DM} = 0.014$ rad/m， $l_{LP} = 35.6$ m， $T_L = 0.1$ s， $T_D = 0.1$ s とした³⁾．

なお，一部のトレーラ輪を操舵しない場合には，操舵するトレーラ輪の操舵角に応じて，

入力行列 \mathbf{B} をそれぞれ定める．評価関数においても同様に，操舵するトレーラの操舵角へ重みづけを行い，それ以外の操舵角への重みは 0 とする．連結点角度差に対する重みは，トレーラ輪の操舵の有無によらず，すべてのトレーラの連結点角度差に対して重みづけを行うことで，各トレーラ輪操舵の条件において同様の制御目標とする．各操舵条件に応じて，評価関数を最小化するフィードバックゲイン \mathbf{K} をそれぞれ求めてシミュレーションを行う．なお，求まる \mathbf{K} の行数は，操舵される車両数 (制御入力数) となり，すべての条件において可制御である．

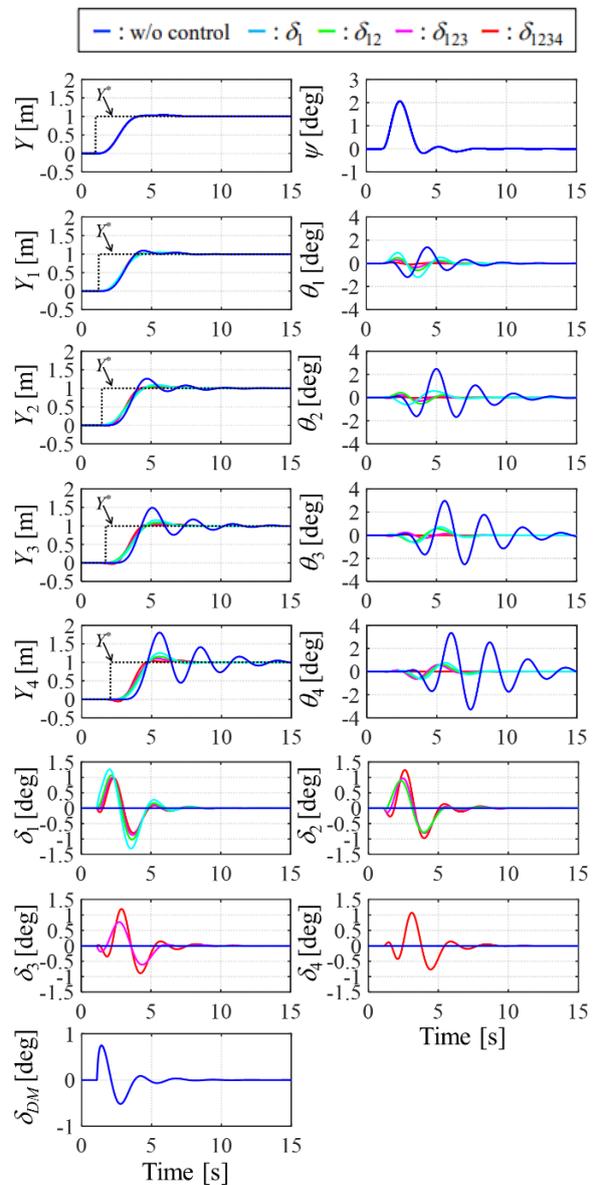


Fig. 3 Step response of desired lateral displacement when increasing number of steered trailers

非制御時および前方のトレーラから操舵車両を増加させた場合のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す. 凡例は, δ の添え字が操舵されているトレーラを表している. 例えば, δ_{123} であれば, 1~3 両目が操舵されている条件である. 非制御時と比較して, 前方から操舵車両を増加させることで, 各トレーラの横変位は良好に抑えられている. 最後尾の第 4 トレーラに着目すると, 操舵車両数が増えるほど横変位も抑制されていることがわかる.

連結点角度差では, 非制御時に対して, いずれのトレーラの連結点角度差も抑制されている. 各トレーラ輪の操舵角に着目すると, 操舵車両数による顕著な違いは確認されず, 同程度の大きさの応答になっていることがわかる.

4. RMS値による評価

3 章のシミュレーション条件を含めた全 16 通りの結果について, 横変位が最も大きくなる最後端の第 4 トレーラと, 各トレーラ輪の操舵角の総和の定量的な検討を行う. これらの物理量は, 次元や値のオーダが異なることから, 正規化した値 (RMS 値) を使うことにより, 制御の効率における費用 (操舵角の総和) と効果 (第 4 トレーラの横偏差) の関係を同等に扱うものとして議論する.

Fig. 4 は安定制御のためのトレーラ輪の操舵角の RMS 値の総和と第 4 トレーラの横偏差の RMS 値の関係について示したものである. 横軸の操舵角の総和は, 非制御時を 0 として, 全 16 通り中で操舵角の総和が最も大きくなる, 2~4 両目を操舵した場合 (δ_{234}) を 1 として正規化している. 縦軸の第 4 トレーラの横偏差は, トレーラの安定制御が影響を及ぼさない, トラクタの横偏差を 0 として, 横偏差が最大となる非制御時を 1 として正規化している. トレーラ輪操舵の制御効率について, いかに小さい制御入力量により, 第 4 トレーラの横偏差を抑えられるかを考えると, 同図において, 操舵角の総和と第 4 トレーラの横偏差のいずれも小さくなる条件, すなわち原点からの距離が近い条件を, 効率的に制御が行われているものとする.

同図より, 第 4 トレーラの横偏差が最も大きくなるのは非制御時であり, 制御は行っていないため, 操舵角の総和は 0 である. 同一の操舵車両数の条件間で比較すると, 前方の

トレーラを操舵している場合の方が, 操舵車両数が後方になる場合よりも, 原点に近い状態, すなわち, 第 4 トレーラの横偏差と操舵角の総和を抑制して, 効率的に制御されていることが確認できる.

また, 操舵車両数を増加させると, 前方から 3 両目までを操舵する場合 (δ_{123}) には, 第 4 トレーラの横偏差の抑制と操舵角の総和の増加という, トレードオフの関係が確認できる. さらに, 全車両を操舵すると (δ_{1234}), 前方 3 両目を操舵する場合よりも, 操舵角の総和の増加に対して, 第 4 トレーラの横偏差が悪化していることがわかる.

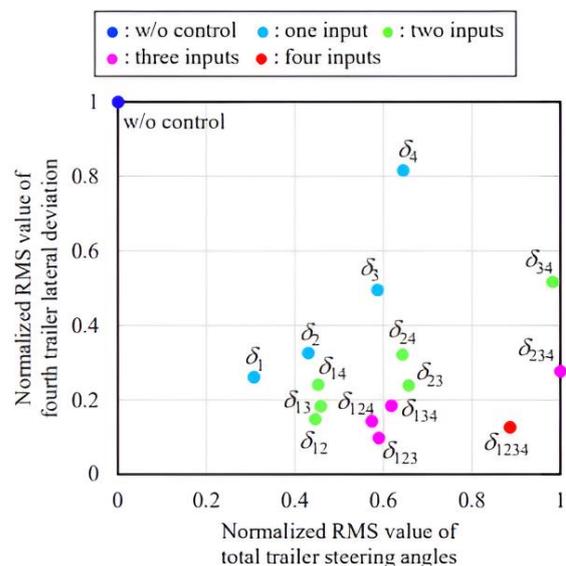


Fig. 4 Relation between RMS values of total trailer steering angles and fourth trailer lateral deviation

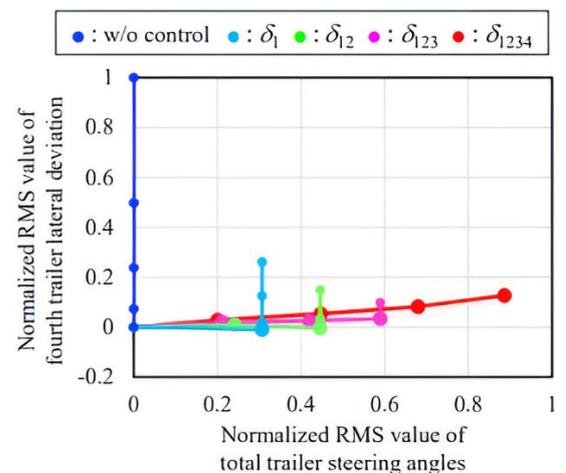
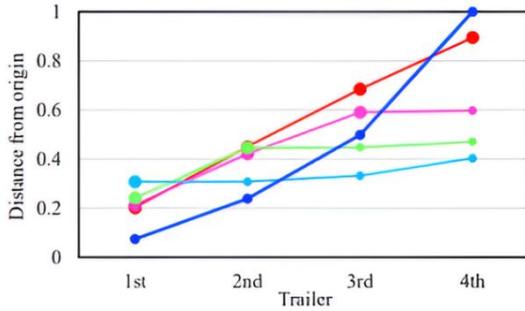
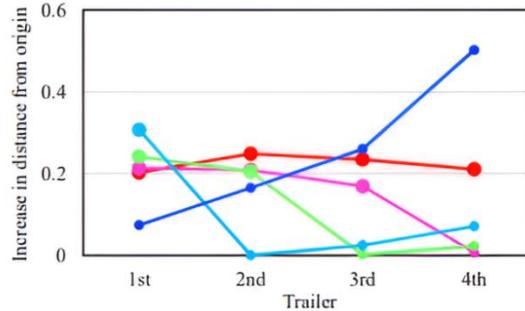


Fig. 5 Relation between RMS values of total steering angles and lateral deviation for each trailer



(a) Distance from origin of each trailer



(b) Increase in distance from origin of each trailer

Fig. 6 Distance from origin in Fig. 5

次に、各トレーラの横偏差と操舵角の関係から、制御の効率を把握するために、Fig. 4と同様の図で、各トレーラの横偏差と、第1トレーラから各トレーラまでの操舵角の総和の関係について、前方のトレーラから順に分解して示したものがFig. 5である。この図から、操舵されたトレーラは、操舵角のRMS値が増加しているが、その分、横偏差の増加は抑制されていることがわかる。

そこで、Fig. 5において、原点と各トレーラの点との距離、および1両前方のトレーラからの原点との距離の増加量を示したものがFig. 6である。原点からの距離に着目すると、第4トレーラの距離は、非制御時が最も長いものの、それより前方のトレーラでは、必ずしも距離が最も長くなってはいないことがわかる。第1トレーラにおいては、非制御時の距離が最も短く、その後、距離が徐々に増加していき、最後に距離が最も長くなっている。

これまでに、トレーラ輪を操舵することで、トレーラの横偏差の抑制効果を確認してきたが、一方で、それに必要となる操舵角が生じ、制御効率の観点からは、操舵角が発生する割には、横偏差を抑制できていないことが、この図から読み取ることができる。

各トレーラの距離の増加量に着目すると、操舵を行うことで、原点からの距離は増加するが、その後は、トレーラの横偏差でも確認されたように、操舵をしていない車両でも、距離の増加を抑えられていることがわかる。後方に操舵を行わないトレーラが続くと、距離の増加量が若干大きくなるものの、操舵を行うことによる距離の増加量よりは小さいため、本研究で検討した条件では、最前方のトレーラ輪のみを操舵することで最も効率のよい結果となった。

ただし、さらに連結車両数が増加すると、操舵を行わないトレーラが後方に続くことによる、距離の増加効果の方が、操舵による増加効果よりも大きくなることも考えられるため、効率のより操舵車両の条件は、連結する車両数に依存することが予想される。

5. 結言

本研究では、多重連結車両の安定制御における操舵車両が車線維持性能に及ぼす影響について研究を行い、効率的なトレーラ輪操舵について検討を行った。結果を要約すると以下のようになる。

トレーラ輪を操舵することで、連結点角度差を抑制し、トレーラの横偏差を抑えることが可能となる。前方の一部のトレーラ輪しか操舵しない場合には、全車両を操舵した場合と比べて、連結点角度差の抑制効果は低減するが、非制御時の場合と比較すると、良好に抑制されており、その結果、トレーラの横偏差も抑制され、最前方のトレーラ輪のみを操舵することが、最も効率のよい結果となった。

参考文献

- 1) 全日本トラック協会, “日本のトラック輸送産業—現状と課題—2023”, http://www.jta.or.jp/coho/yuso_genjyo/yuso.html (参照日: 2023年10月12日)
- 2) 鈴木桂輔, 近森順, 清水裕, 新庄弘之, “トラクタ・セミトレーラ系のトレーラ系のトレーラ輪を操舵した場合の安定性解析”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 62, No. 597 (1996), pp. 1739-1746.
- 3) 丸茂喜高, 佐藤元哉, 大明洋輝, 青木章, “トリプルトレーラの安定化が車線維持性能に及ぼす影響の検討”, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 4 (2019), pp. 1126-1131.