

多重連結車両の安定制御における 車線維持支援システムが制御効率に及ぼす影響

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

トラック輸送を中心とする物流業界では、労働力不足の問題によるドライバの不足が年々深刻化しており、輸送のさらなる効率化が急務である¹⁾。その対策として、一度に大量輸送が可能なダブル連結トラックが導入され、今後、特殊車両通行許可基準の車両長の規制が緩和されれば、複数のトレーラを連結した多重連結車両が用いられることが想定される。

多重連結車両はドライバ不足の対策として期待できるが、連結数が増えると安定性が低下する傾向にある²⁾。そのため、安定制御の一つとして、トレーラ輪を操舵するベクトルフォロ（以下、VF）法という制御方法が提案された³⁾。VF法により、トレーラの安定性が向上するだけでなく、多重連結車両のすべてのトレーラ輪を操舵することで、トレーラの車線維持性能が向上することを確認した⁴⁾。制御効率の観点からは、一部のトレーラ輪を操舵しても、ある程度の制御効果を得られることが想定され、効率よい条件について検討した結果、最前方のトレーラ輪のみを操舵することが最も効率的であることがわかった⁵⁾。一方、トレーラ輪操舵では、その車両より前方の車両の運動に影響を及ぼさないため、トラクタの運動には影響を及ぼさない。トラクタの車線維持性能を向上させるには、トラクタに車線維持支援システム（以下、LKAS）を適用することが考えられる。トラクタのヨーモーメント制御を用いたLKASをVF法と併用することで、多重連結車全体の車線維持性能が向上することが確認された⁴⁾。しかし、LKASの追加によって、トレーラ輪操舵の効率のよい条件が変化する可能性があり、LKASとVF法を併用した場合の制御効率についての検討が必要である。

そこで本研究では、トレーラが4両連結されたクアドラプルストレーラにVF法を適用した上でLKASを追加し、ドライバモデルによる

閉ループシミュレーションを行う。LKASの追加によって、VF法の効率よい条件に与える影響について考察を行う。

2. 車両モデルと制御系設計

本研究で用いるクアドラプルストレーラの車両モデルは、Fig.1に示すように路面固定右手下向き直交座標系に関する簡略化した線形モデルであり、運動方程式は参考文献5)に記載されている。

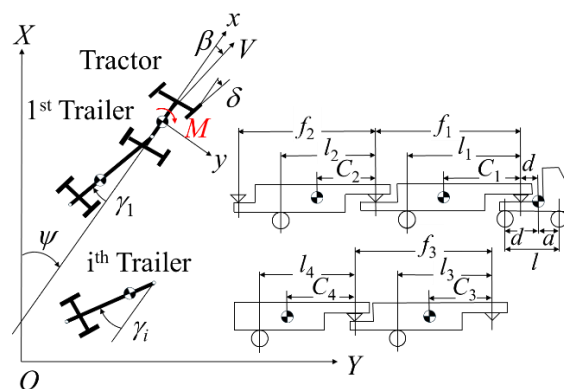


Fig. 1 Tractor and four-trailer combination model

VF法は、トレーラ輪を操舵することで、トレーラの向いている方向と連結点の速度ベクトルの方向を一致させる制御方法である³⁾。両者の方向を一致させることは、連結点における横すべり角と、連結点の前後の車両における相対ヨー角の差である連結点角度差 θ を0にすることである。その計算式とVF法の制御系設計の詳細は、参考文献5)に記載されており、ここでは、LKASの制御系設計について説明する。運動方程式より、以下の状態方程式を導出する。

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

ただし、 $\mathbf{x} = [\dot{Y} \ \dot{\psi} \ \dot{\gamma}_1 \ \dot{\gamma}_2 \ \dot{\gamma}_3 \ \dot{\gamma}_4 \ Y \ \psi \ \gamma_1 \ \gamma_2 \ \gamma_3 \ \gamma_4]^T$ 、 $u = M$ 、 $\mathbf{A}$ は12行12列のシステム行列、 $\mathbf{B}$ は12行1列の入力行列である。制御入力 u は支援を行うトラクタヨーモーメント M である。

(1)式のシステムに関して、次に示す評価関数が最小となるようなフィードバックゲイン K_{LK} を求める。

$$J = \int_0^\infty (q_Y Y^2(t) + r M^2(t)) dt \quad (2)$$

ただし、 q_Y はトラクタ重心点横変位に対する重みであり、 r はトラクタヨーモーメントに対する重みである。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、LKAS の制御入力である M が求まる。

$$M = -K_{LK} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (3)$$

ただし、 K_{LK} は 1 行 12 列のフィードバックゲインであり、

$$\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ Y^* \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \text{ である。}$$

ここで、 Y^* は目標車線の横変位である。

3. シミュレーション

3.1 時系列応答

ドライバモデルを用いて、VF 法に LKAS を追加した場合の制御効率について検討を行う。Fig. 2 に二つの制御を併用した際のブロック線図を示す。クアドラプルストレーラには、ドライバ操舵角 δ_{DM} 、LKAS のヨーモーメント M 、VF 法の制御入力である δ_{VF} が入力される。

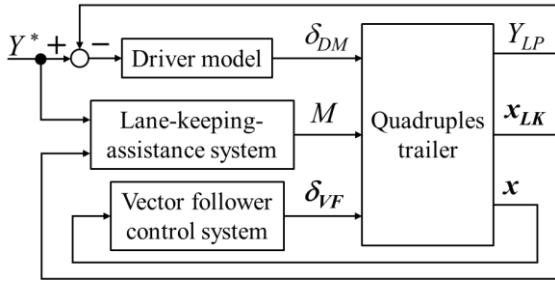


Fig. 2 Block diagram of multi-articulated vehicles with lane-keeping-assistance system

制御効率に対する影響を確認するため、4 両のトレーラ輪の制御の有無を組み合わせた全 16 通りの操舵条件について検討を行う。その一例として、LKAS のみの場合および LKAS に前方からトレーラ輪を操舵する車両を増加させた場合の 5 通りの操舵条件について検討を行う。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 (22.2 m/s) で走行中に、シミュレーション開始 1s 後に 1s 間、トラクタ重心点に、10kN の横力外乱が入力されるもの

とした。制御系の設計は、VF 法における評価関数の連結点角度差に対する重みを $q_{1-4} = 10^2$ として、トレーラ輪操舵角に対する重みを $r_{1-4} = 1$ とした⁵⁾。LKAS の評価関数に対する重みをそれぞれ $q_Y = 10^9$ 、 $r = 1$ として、ドライバモデルのパラメータは、 $K_{DM} = 0.014 \text{ rad/m}$ 、 $l_{LP} = 35.6 \text{ m}$ 、 $T_L = 0.1 \text{ s}$ 、 $T_D = 0.1 \text{ s}$ とした⁴⁾。以上の条件でシミュレーションを行った結果を 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 両目を操舵する条件である。

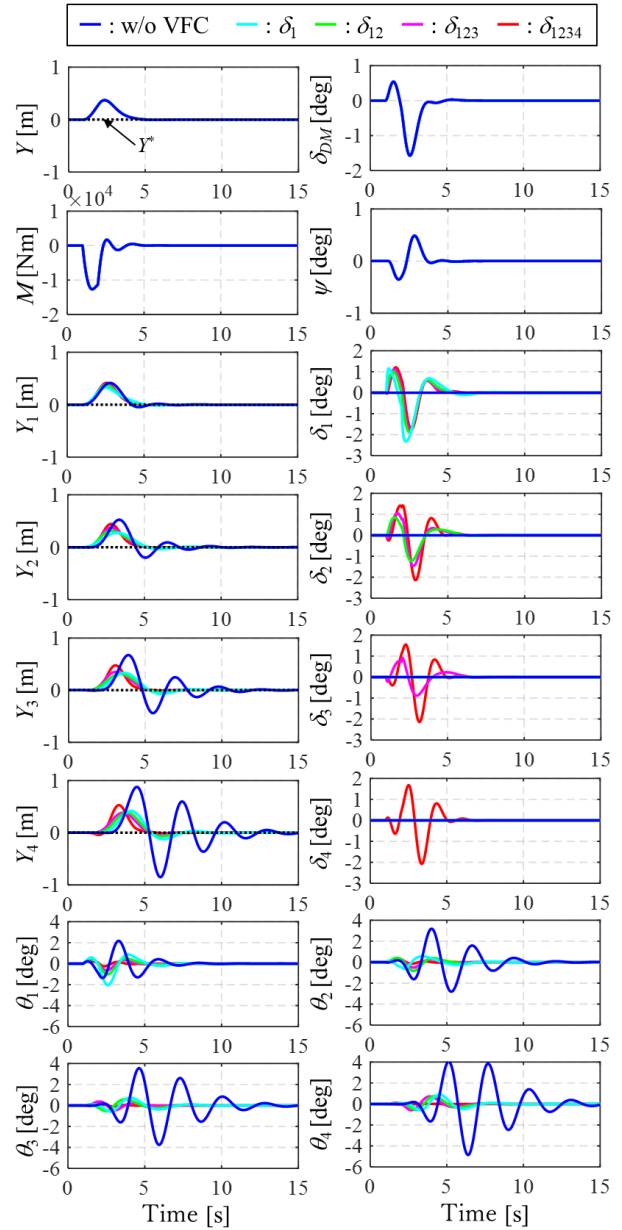


Fig. 3 Time history of stability control when increasing number of steered trailers with lane-keeping-assistance system

同図により，VF法にLKASを追加しても，各トレーラの連結点角度差 θ_{i-4} を良好に抑制しており，その影響で各トレーラの横偏差 Y_{i-4} も抑えられた．また，各トレーラ輪の操舵角 δ_{i-4} に着目すると，操舵車両数の増加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．VF法のみの場合⁵⁾と比較すると，LKASを追加することでトラクタの横偏差が抑制されることで，各トレーラの横偏差も抑制され，さらに各トレーラ輪の操舵角も小さくなった．

3.2 RMS値による評価

ここで，前節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，横偏差が最も大きくなる最後端の第4トレーラの横偏差と，各トレーラ輪の操舵角の総和について検討を行う．Fig.4は，LKASを追加した場合のトレーラ輪操舵角の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，VF法を用いない場合を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，LKASを適用した場合のトラクタ横偏差を0として，横偏差が最大となるVF法を用いない場合の第4トレーラの横偏差を1として正規化している．ここで，トレーラ輪操舵の制御効率がよい条件としては，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ことであり，この距離が短い場合効率的に制御が行われているものとする．同図より，第1トレーラ輪のみ操舵すると(δ_1)，第4トレーラの横偏差はVF法を用いない場合より抑制されるが，それに要する操舵入力が発生し，操舵角の総和は増加する．1両のみ操舵する場合($\delta_1 \sim \delta_4$)には，操舵する車両が後方になるほど，第4トレーラの横偏差は増加し，操舵角の総和も大きくなっている．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(δ_{123})場合，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が，全車両を操舵すると，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．以上から，LKASを追加しても，VF法のみの場合⁵⁾とほぼ同様な傾向であることがわかった．

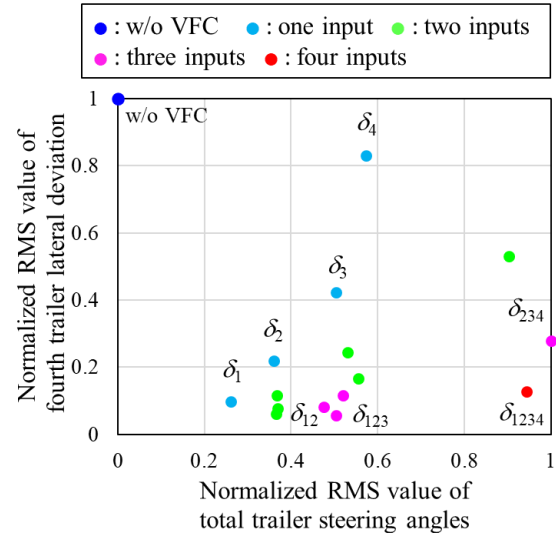


Fig. 4 Relation between RMS values of total trailer steering angles and fourth trailer lateral deviation with lane-keeping-assistance system

次に，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．同図において，操舵されていない車両を白抜きで表している．

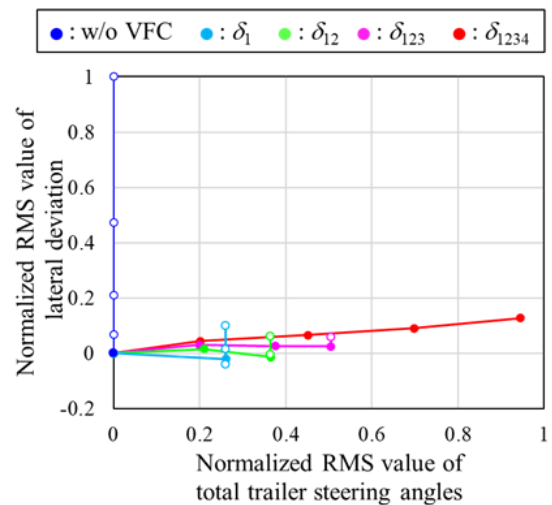
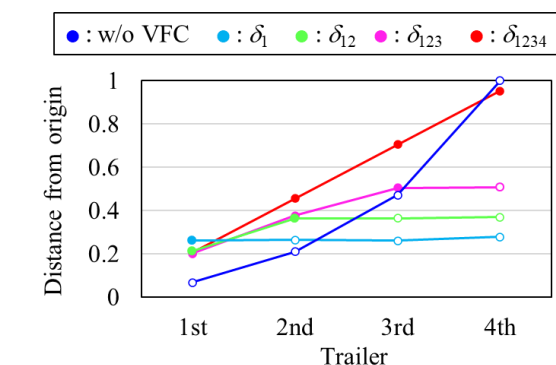


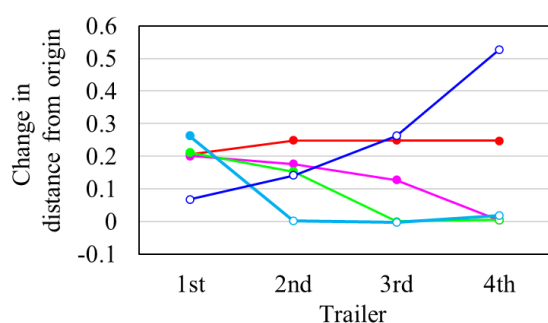
Fig. 5 Relation between RMS values of total steering angles and lateral deviation for each trailer with lane-keeping-assistance system

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。この傾向は、VF法の場合⁵⁾とほぼ同様である。

そこで、Fig. 5において、原点から各トレーラの点までの距離、および1両前方のトレーラからの原点との距離の変化量を示したものがFig. 6である。



(a) Distance from origin of each trailer



(b) Change in distance from origin of each trailer
Fig. 6 Distance from origin in Fig. 5

Fig. 6(a)の原点からの距離に着目すると、第4トレーラの距離は、VF法を用いない場合が最も長いものの、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、VF法を用いない場合の距離が最も短く、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。

Fig. 6(b)の距離の変化量に着目すると、トレーラ輪操舵を行うことで、原点からの距離は増

加するが、その後は、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、距離の変化量が若干増加するものの、操舵を行うことによる距離の変化量より小さいため、LKASを追加しても、VF法の場合⁵⁾と同様に、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。

4. 結言

本研究では、多重連結車両の安定制御における車線維持支援システムが制御効率に及ぼす影響について検討を行った。車線維持支援システムを適用した場合でも、安定制御のみの場合と同様に、トレーラ輪を操舵することで、連結点角度差が抑制され、その結果、トレーラの横偏差が抑制されることを確認した。安定制御のみの場合における、最前方のトレーラ輪のみを操舵することの制御効率の優位性は、車線維持支援システムを併用した場合でも、同様の結果となった。

参考文献

- 1) 丸茂喜高, 風間恵介, 青木章, “多重連結車両の安定制御と車線維持性能へ及ぼすその影響”, 自動車技術, Vol. 77, No. 9 (2023), pp. 66-71.
- 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) 鈴木桂輔, 近森順, 清水裕, 川沢祥三, “模型車両によるセミトレーラ牽引時の安定性解析—トレーラ輪を操舵した場合の安定性解析—”, 自動車技術会論文集, Vol. 27, No. 2 (1996), pp. 113-118.
- 4) 丸茂喜高, 佐藤元哉, 大明洋輝, 青木章, “トリプルス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.
- 5) 丸茂喜高, 風間恵介, 楊宇恒, 青木章, “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”, 日本機械学会論文集, Vol. 89, No. 927 (2023), p. 23-00209.