

アッカーマン理論を拡張した4輪独立 転舵制御*

Four-Wheel Independent Steering Control That Extends Ackerman Theory

鈴木 雄大
Yuta SUZUKI

佐藤 孝文
Takafumi SATO

立入 泉樹
Motoki TACHIIRI

高橋 友哉
Tomoya TAKAHASHI

倉光 修司
Shuji KURAMITSU

土方 昌幸
Masayuki HIJIKATA

As a future trend in mobility, independent steering systems that can steer each wheel individually are expected to become widespread to improve mobility freedom in MaaS. In addition, improvement in fuel consumption and electric power costs are also desired, along with a concern for environmental issues. Therefore, we proposed a control method for four-wheel independent steering that can achieve both vehicle behavior unique to independent steering systems and reduce driving energy.

Key words :

Vehicle Dynamics, Steering System, Motion Control, Electric Power Steering

1. まえがき

自動車産業は大変革時代を迎えており、モビリティはユーザーが所有し自ら運転し移動するPOV (Personally Owned Vehicle) から、サービスを提供するMaaS (Mobility as a Service) へと拡大しつつある。MaaSでは人流・物流において、輸送量の拡大、車室内空間の快適性向上、道路環境に左右されないラストワンマイル対応 (目的地までの道中における横幅の狭い場所での旋回や前後幅の狭い場所への縦列駐車など) などが求められる。また、世界的なカーボンニュートラルへの取り組みに合わせて、電動車両 (BEV) が普及すると予測される。一日中動き続けるMaaSの使い方方を想定すると、輸送効率を上げるためにできるだけ一度の充電で航続距離を伸ばし (低電費) 充電回数

を少なくするニーズがあると考えられる。

上記のMaaSへのニーズから、従来の転舵装置 (左右輪を連結した転舵システム:以下、従来転舵システム) の左右輪連結を排除し車室内空間を拡大、前後4輪を個別に転舵し自由度の高い移動を実現することができる独立転舵システムの普及が予測される。この独立転舵システムは、4輪転舵の組み合わせ次第で、従来転舵システムでは不可能な超信地旋回や真横移動 (90deg 転舵) などの動作が可能となる。そこで、本報では独立転舵システム特有の車両動作を実現でき、かつタイヤの引き摺りを最小限にしたスムーズな旋回 (低電費) を実現できる転舵制御アルゴリズムについて報告する。また、本アルゴリズムを用いた転舵パターンと従来転舵システムの旋回に要したエネルギー量を比較、および本アルゴリズムで実現可能な転舵パターン同士のエ

ネルギー量を比較し、本アルゴリズムがスムーズ (低電費) な旋回に効果的である事を確認したため、併せて報告する。

2. アルゴリズム構築

2.1 独立転舵システムで実現したい車両動作

従来転舵システムでは、道路幅の狭い道でのUターン (Fig. 1-(1)-a) や狭路走行 (Fig. 1-(1)-b) のシーンでは、何度か切り返しを行わなければ走破できない。狭路でのUターン (Fig. 1-(2)) のシーンでは、切り返しができず後進して戻る事しかできない。前後の間隔が狭い空間への縦列駐車 (Fig. 1-(3)) を行うシーンでは、そもそも駐車が不可能である。

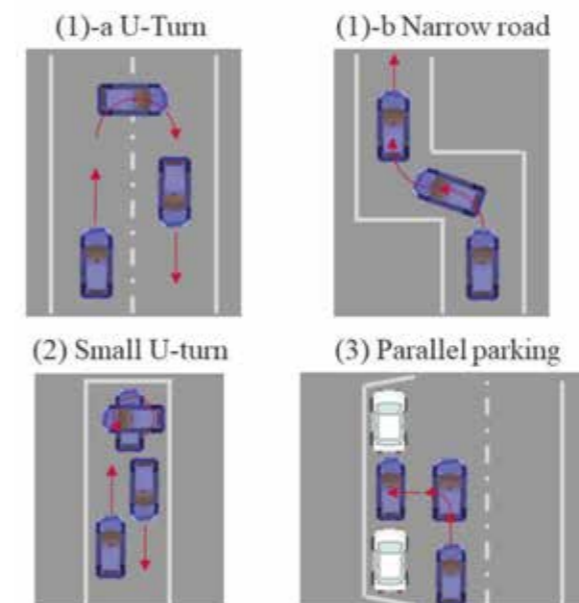


Fig. 1 Desired vehicle movement

これらの道路環境に対して、4輪を独立に転舵できかつ90degまで転舵できるような独立転舵システムでは、Fig. 1-(1)、Fig. 1-(3)のようなシーンでは切り返す事なく旋回や縦列駐車が可能になり、Fig. 1-(2)のシーンでは超信地旋回のように車両の向きを180deg変えられるため、後進せずに抜け出す事ができる。以降、これらの車両動作をタイヤの引き摺りが少なくスムーズに旋回できる転舵制御アルゴリズムを検討する。

2.2 アッカーマン理論の原理

Fig. 2に、アッカーマン理論の原理を示す。車両の

旋回中心 (後輪軸上に存在) と前2輪それぞれを結んだ線に直交した法線と一致するように前左右輪の舵角 (転舵角比) を決め転舵する。これにより、極低速での旋回時において、各々のタイヤは横滑りを最小限に進行方向に進む事ができるため、スムーズな旋回が可能となる。

ここで、アッカーマン理論と従来転舵システムの関係性を説明する。Fig. 3の上段は、アッカーマン理論に則り、後輪軸上に存在する旋回中心に向けて前輪左右輪を理想的な転舵角比で転舵している状態を表している。しかし、従来転舵システムは、左右輪の連結などによる機械的制約によりFig. 3下段のように左右輪の旋回中心が後輪軸上で交わらない領域の方が多く存在する。この領域では、各輪の法線と進行方向が一致しないためタイヤの滑りや走行抵抗の増大によりエネルギーロスが大きいと考える。

本報の独立転舵システムでは、アッカーマン理論のうれしさを常に維持しながらも2.1項で示した全ての車両動作に使える転舵手法を構築する。

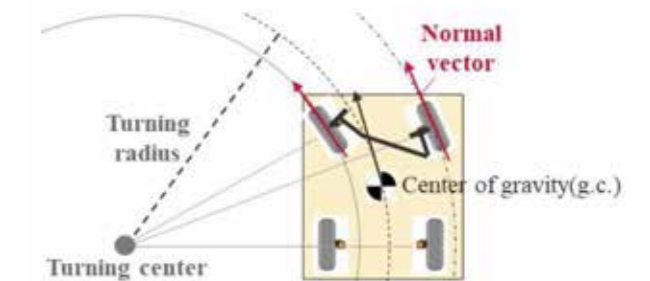


Fig.2 Ackerman Steering theory

Example

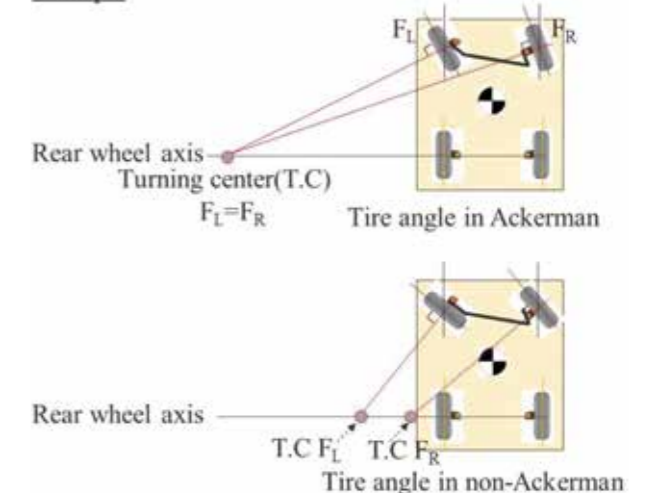


Fig.3 Tire angle ratio of conventional steer vehicle

* (社)自動車技術会への了承を得て、「2022年秋季大会学術講演会」No.97-065より一部加筆して転載

2.3 アッカーマン理論の拡張

アッカーマン理論のうれしさを言い換えると、所望の旋回動作に対して各々のタイヤを引き摺らないように転舵する事である。この事から、2.1項で述べた全ての車両動作をある旋回中心を持つ「旋回動作」として捉える事で、各タイヤを引き摺らずにスムーズな車両動作を実現できる。それぞれの車両動作に対する拡張方法について説明する。

2.3.1 小回り旋回 (Uターン, 狭路走行)

Uターン (Fig. 1-(1)-a) や狭路走行 (Fig. 1-(1)-b) は、小回り旋回 (及びその組み合わせ) と捉えることができる。左旋回 (CCW) を例にした時、前輪を CCW 方向に大転舵 (Fig. 4-(1))、後輪を CW 方向に大転舵 (Fig. 4-(2))、またはこれらを組み合わせる (Fig. 4-(3)) 事で実現できる。前輪転舵で小回り旋回する場合、アッカーマン理論に則り後輪軸上に旋回中心 T.C を設定し、4 輪のタイヤ進行方向と法線が全て一致するように前輪の転舵角を決定する。同様に、後輪転舵を用いる場合は、前輪軸上に旋回中心 T.C を設定し、前後輪逆方向転舵を用いる場合は、前後輪間の軸上に旋回中心 T.C を設定して前後輪の転舵角を決める。つまり車両で実現したい旋回動作から旋回中心を前後輪間の軸上の任意の場所に設定すれば、各転舵パターンとその転舵角が決定でき、全ての設定範囲でタイヤを引き摺る事なくスムーズな旋回が可能となる (Fig. 4 下段)。

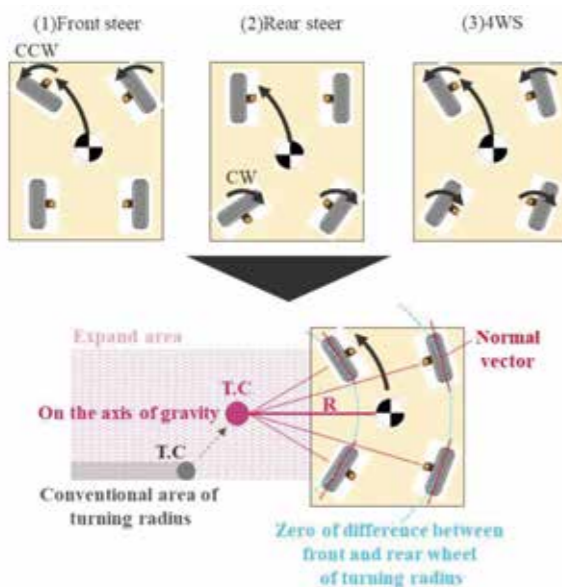


Fig. 4 Small turn

2.3.2 超小回り旋回 (狭路 U ターン)

狭路 U ターン (Fig. 1-(2)) は、超小回り旋回と捉えることができる。左超小回り旋回 (CCW) を例にした時、左前輪は 0deg から CW 方向に大転舵、右前輪は 0deg から CCW 方向に大転舵、左後輪は 0deg から CCW 方向に大転舵、右後輪は 0deg から CW 方向に大転舵し、かつ左側の前後輪は負 (-) の駆動力、右側の前後輪は正 (+) の駆動力を発生させる事で実現できる (Fig. 5 上段)。この時 4 輪それぞれのタイヤ進行方向に直交した延長線が交わるのは、(1) 小回り旋回とは異なり車両の内側になる。つまり車両で実現したい旋回動作から旋回中心を 4 つの車輪間 (トレッド × ホイルベースの空間内) に設定すれば、4 輪の転舵角を決定することができ、全ての設定範囲でタイヤを引き摺る事なくスムーズな旋回が可能となる (Fig. 5 下段)。

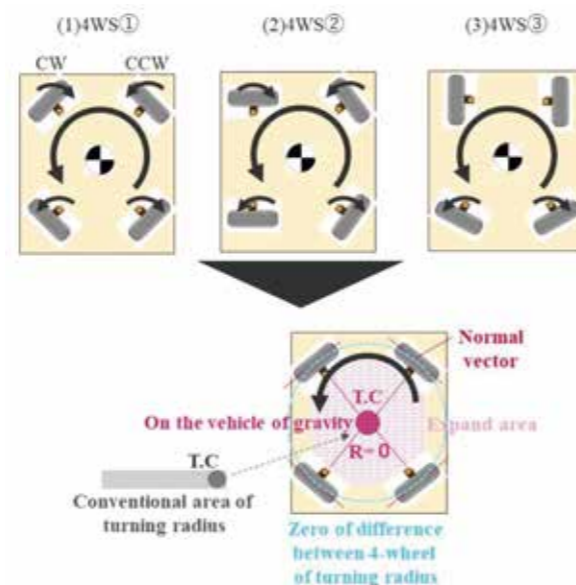


Fig. 5 Ultra-small turn

2.3.3 ヨーレス旋回と真横移動 (狭い空間の縦列駐車)

従来アッカーマン理論は、ある旋回中心を軸に車両が向きを変えながら (ヨー運動を伴いながら) 旋回する事である。しかし、本車両動作 (Fig. 1-(3)) は車両の向きを変えないように旋回しかつ最終的に真横に移動する必要がある。前述のように、定められたある 1 点の旋回中心に対して各輪を転舵すると、車両はヨー運動を伴うとともに真横移動 (4 輪が 90deg 転舵されている状態) が実現できない (Fig. 6 上段)。

そこで、旋回中心と法線の関係を維持しつつも真横

移動時に 4 輪を 90deg 転舵させるため、旋回中心を左右の前後輪それぞれに対して 1 点 (計 2 点) ずつかつ極遠方に設ける。さらに、この 2 点の旋回中心を直進時は車両側方、旋回時は車両側方から後方側の間、真横移動時は車両後方側に設定する事で、全てのタイヤの引き摺りが最小限になり、スムーズな旋回動作と真横移動を両立する事ができる。(Fig. 6 下段)。

以上より、アッカーマン理論のうれしさを維持しながらも独立転舵システムで実現したい車両動作ができるアルゴリズムを構築した。

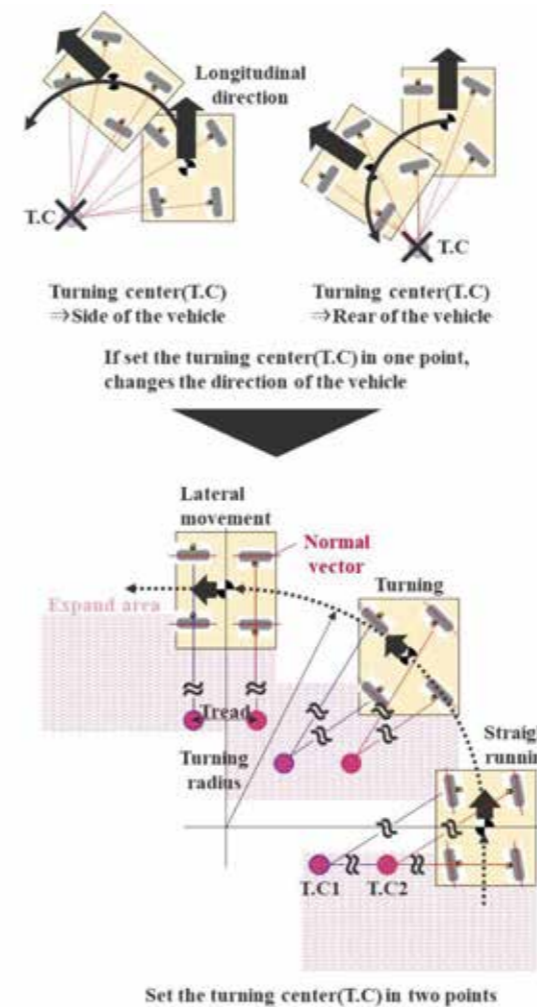


Fig. 6 Yaw less turning and lateral movement

3. アルゴリズムの効果検証

3.1 評価車両の諸元

2 章で構築した転舵アルゴリズムの妥当性を確認するため、CAE 解析と実車評価を行う。評価車両に使用する独立転舵システムは、転舵アクチュエータがタイ

ヤの真上に搭載され、転舵アクチュエータが出力したトルクは減速機を介して直接タイヤを回すトルクとして伝達する (以下、コーナーモジュール)。コーナーモジュールは 4 輪に搭載しており、全て ± 90deg の転舵が可能である。転舵アクチュエータには、EPS (Electric Power Steering) 用 MCU (Motor Control Unit) を使用する。このコーナーモジュールをモデル化し CAE 解析に適用した。また、評価車両の諸元を Table 1 に示す (CAE 解析時も同様の諸元を使用する)。

Table 1 Vehicle parameters

Definition	Value
Vehicle mass	2000 kg
Wheel base	2.26 m
Tread width of front	1.78 m
Tread width of rear	1.78 m
Longitudinal distance from g.c. to front axle	1.13 m
Longitudinal distance from g.c. to rear axle	1.13 m

3.2 アルゴリズムの検証①

構築したアルゴリズムを使って、狙いの旋回半径で車両が旋回している事を CAE と実車にて車両重心の軌跡により比較する。実車の車両軌跡は、GPS を使用し計測する。

(1) 小回り旋回

評価条件

走行条件：定常円旋回 (旋回方向：CCW)

速度：5, 10, 15km/h (一定)

路面 μ：ドライアスファルト路相当

目標旋回半径：5m

転舵パターン：前輪転舵 (Fig. 4-(1))

後輪転舵 (Fig. 4-(2))

4 輪転舵 (Fig. 4-(3))

【結果】

Fig. 7 より、CAE は狙いの旋回半径で車両が旋回。実車は全ての条件において、旋回半径が CAE に対して 0.1 ~ 0.2m 増加している。これは、GPS の位置精度によるものであり、計測に使用した GPS は衛星の受信状況に応じて精度が 0.1m ~ 0.2m 程度変化する事が分かっている。よって、CAE と実車の結果は一致しており、本アルゴリズムによって狙い通りの車両動

作になる事が言える。

(2) 超小回り旋回

評価条件

走行条件：定常円旋回（旋回方向：CCW）

速度：5km/h（一定）

路面 μ ：ドライアスファルト路相当

目標旋回半径：4輪転舵①…0m

4輪転舵②…0.89m

4輪転舵③…1.13m

転舵パターン：4輪転舵①（Fig. 5-(1)）

4輪転舵②（Fig. 5-(2)）

4輪転舵③（Fig. 5-(3)）

【結果】

Fig. 8 より、CAE は狙いの旋回半径で車両が旋回。実車は、CAE に対して 4WS ① は 0.1m 増加、4WS ② は 0.05m 増加、4WS ③ は 0.05m 減少している。これは、小回り旋回の結果と同様、GPS の位置精度によるものである。よって、CAE と実車の結果は一致しており、本アルゴリズムによって狙い通りの車両動作になる事が言える。

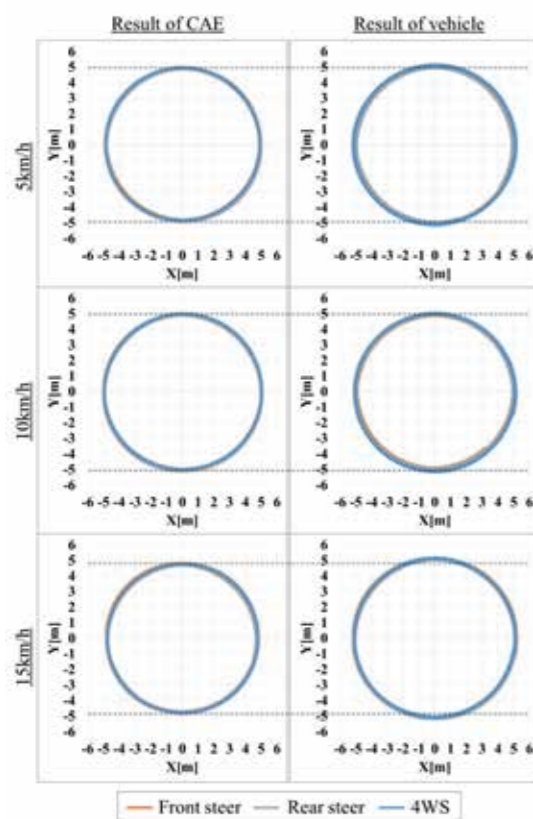


Fig. 7 Trace of center of gravity

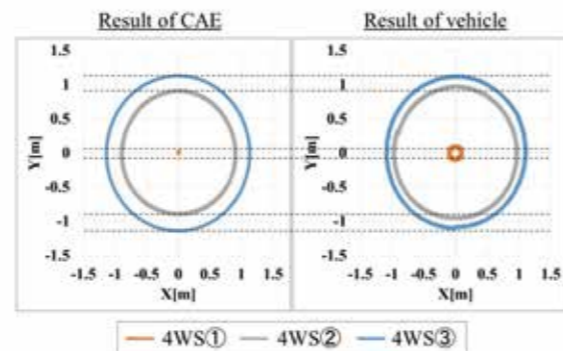


Fig. 8 Trace of center of gravity

(3) ヨーレス旋回と真横移動

評価条件

走行条件：直進⇒旋回⇒真横移動（旋回方向：CCW）

速度：5km/h（一定）

路面 μ ：ドライアスファルト路相当

目標旋回半径：1.8m

転舵パターン：4輪転舵（Fig. 6 下段を参照）

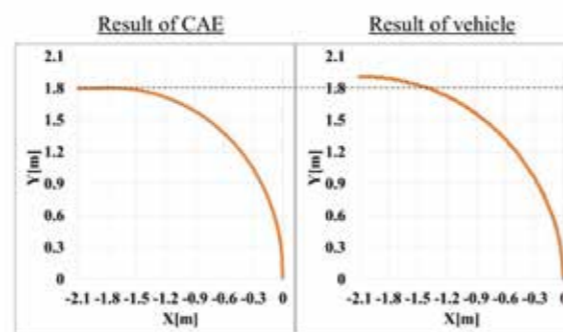


Fig. 9 Trace of center of gravity

【結果】

Fig. 9 より、CAE は狙いの旋回半径で車両が旋回。実車は、旋回半径が 0.1m 増加しているが、小回り旋回／超小回り旋回と同様に GPS の位置精度によるものである。よって、CAE と実車の結果は一致しており、本アルゴリズムによって狙い通りの車両動作になる事が言える。

3.3 アルゴリズムの検証②

3.3.1 従来転舵システムとのエネルギー量比較

CAE 解析を用いて、本アルゴリズムを用いた前輪転舵（アッカーマン拡張理論）と、従来転舵システムの前輪転舵（非アッカーマン拡張理論）の旋回時にお

ける 4 輪の駆動トルクの合計値の積算量（以下、エネルギー量）を比較する。

評価条件は 3.2 項の (1) 小回り旋回のをベースに、下記のように設定する。非アッカーマン拡張理論は、アッカーマン拡張理論の前輪の転舵角比をもとに、転舵角比を変更しかつ目標の旋回半径を実現するよう転舵角を調整した。

評価条件

走行条件：定常円旋回（旋回方向：CCW）

速度：5km/h（一定）

路面 μ ：ドライアスファルト路相当

目標旋回半径：5m

転舵パターン：前輪転舵（アッカーマン拡張理論）

従来前輪転舵（非アッカーマン拡張理論）

【結果】

Fig. 10 に、アッカーマン拡張理論と非アッカーマン拡張理論のそれぞれ 1 周するために要したエネルギー量を比較した棒グラフを示す。非アッカーマン拡張理論に対して、アッカーマン拡張理論は約 37% エネルギー量が低減している。このことから、本アルゴリズムを用いる事でスムーズ（低電費）な旋回ができる事を証明した。

Driving torque of all wheels

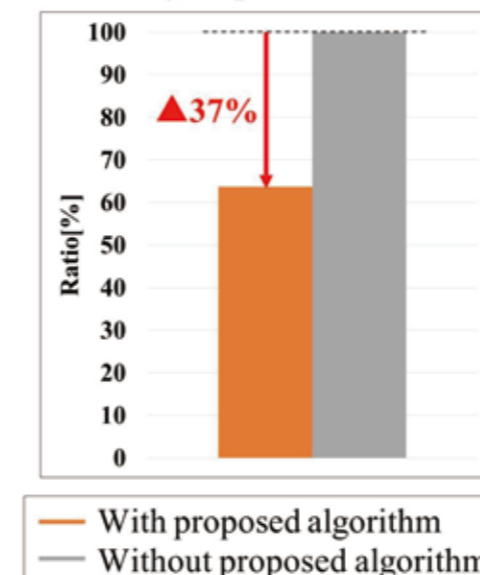


Fig. 10 Bar graph of energy

3.3.2 アルゴリズム同士のエネルギー量比較

次に、アルゴリズムを用いた前輪転舵（アッカーマン拡張理論）と、同アルゴリズムを用いた前後輪逆位相転舵（アッカーマン拡張理論）の旋回時における 4 輪の駆動トルクの合計値の積算量（以下、エネルギー量）を比較する。

評価条件は 3.3.1 節のものをベースに、下記のように設定する。

評価条件

走行条件：定常円旋回（旋回方向：CCW）

速度：5km/h, 15km/h（一定）

路面 μ ：ドライアスファルト路相当

目標旋回半径：5m

転舵パターン：前輪転舵（アッカーマン拡張理論）、

前後輪逆位相転舵（アッカーマン拡張理論）

【結果】

Fig. 11 に、前輪転舵と前後輪逆位相転舵のそれぞれ 1 周するために要したエネルギー量を比較した棒グラフを速度別に示す。前輪転舵に対して、前後輪逆位相転舵は 5km/h の時で約 3%、15km/h の時で約 6% エネルギー量が低減している。このことから、本アルゴリズムを用いた前輪転舵よりも、前後輪逆位相転舵の方がスムーズ（低電費）な旋回ができる事を確認した。

Driving torque of all wheels

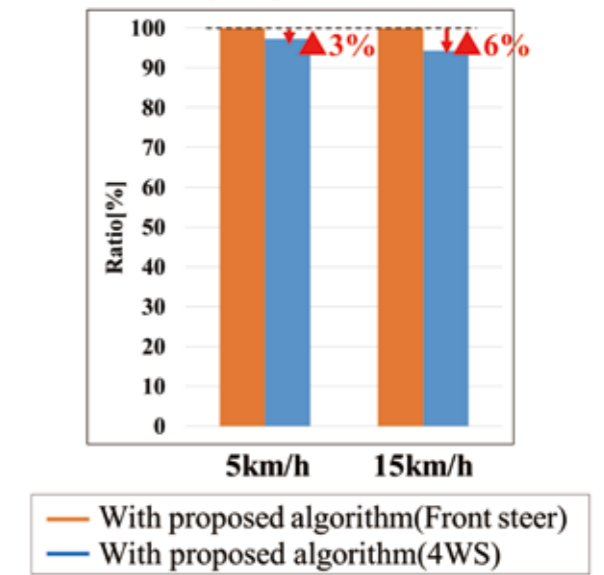


Fig. 11 Bar graph of energy

特
集

4. まとめ

- ・4輪独立転舵システムで実現したい複数の旋回動作に対して、アッカーマン理論のうれしさを維持でき、かつ共通で使用できる転舵アルゴリズムを構築。CAE解析と実車評価ともに狙い通りの動きになる事を確認した。
- ・構築したアルゴリズム（アッカーマン拡張理論）を用いた旋回動作は、非アッカーマン拡張理論に対して

少ないエネルギー量で走行できる事を証明した。

- ・本アルゴリズムを用いた転舵手法の中でも、よりスムーズ（低電費）な旋回ができる転舵手法がある事を確認した。

参考文献

- 1) 安部正人：自動車の運動と制御，車両運動力学の理論形成と応用（第二版），東京電機大学出版局（2012）
- 2) 小島崇他：左右輪を個別に転舵できるステアリングの制御による活用例，自動車技術会学術講演会前刷集，No20206321

著者



鈴木 雄大
すずき ゆうた

シャシコン機器技術部 事業創造室
独立転舵システムのシステム制御開発に従事



佐藤 孝文
さとう たかふみ

シャシコン機器技術部 事業創造室
独立転舵システムのシステム制御開発に従事



立入 泉樹
たちいり もとき

(株)SOKEN 研究2部 24研究室
独立転舵システムのシステム制御開発に従事



高橋 友哉
たかはし ともや

シャシコン機器技術部 事業創造室
独立転舵システムのシステム制御開発に従事



倉光 修司
くらみつ しゅうじ

シャシコン機器技術部 事業創造室
独立転舵システムのシステム制御開発に従事



土方 昌幸
ひじかた まさゆき

シャシコン機器技術部 事業創造室
独立転舵システムのシステム制御開発に従事