

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760201

研究課題名(和文)超小型電気自動車のための障害物緊急自動回避システムの開発

研究課題名(英文)Development of Autonomous Obstacle Avoidance System for Micro Electric Vehicles

研究代表者

林 隆三(HAYASHI, RYUZO)

東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：80505868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、自動車の進路前方に突然出現する障害物を操舵により回避する前方障害物緊急自動回避システムを開発することを目的し、従来の障害物自動回避システムにおける車両の軌道追従性の改善手法、および、障害物(歩行者)の加速や減速などの挙動変化に対応可能にする障害物回避軌道の補正手法を構築したほか、障害物自動回避システムの一般乗用車への適用性についての検討を行った。構築した手法の有効性が数値シミュレーションおよび実車実験により示されたほか、自動操舵用モータの最大トルクおよび許容回転速度と回避成功率との関係を定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study aims at developing the autonomous collision avoidance system using steering which can evade a frontal obstacle that appears in front of the vehicle. Methods to improve the trajectory tracking performance and to revise the desired avoidance trajectory which enables to deal with the change of behavior of the obstacle like a pedestrian were proposed in this study. In addition, applicability of the system to ordinary passenger cars were discussed. The effectiveness of the proposed methods were shown and the relationship between the specification of the motor for autonomous steering and performance of avoidance was revealed from the results of the numerical simulations and the experiments using a real micro electric vehicle.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：交通機械制御 自動車 予防安全 障害物回避 自動運転

1. 研究開始当初の背景

近年、日本の自動車交通においては、交通事故の死傷者数は減少傾向にあるものの、事故件数自体は依然として多く、事故件数の低減が喫緊の課題となっている。車両側からの事故対策として、最近では、前方障害物に対する緊急自動ブレーキ技術が実用化されており、大きな注目を浴びている。

障害物との衝突の回避という問題に関しては、古くからさまざまな研究がおこなわれている。前方障害物との衝突回避には、ブレーキにより停止する方法(制動回避)とハンドル操作により障害物を避ける方法(操舵回避)の2つが挙げられ、一般的に、車両速度が低い場合は制動回避が、車両速度が高いほど操舵回避のほうが有効であることが示されている。制動回避に関しては、前述のように警報や緊急ブレーキ技術がすでに実用化されているものの、操舵による回避を含めた衝突回避技術は未だ実用化されておらず、さまざまなアプローチから最適な回避軌道を求める研究がなされている段階である。

このような中、我々は図1に示すような都市内パーソナルモビリティ・ビークルを主な適用対象とし、予防安全装置としての車両への実装という観点から、操舵による障害物回避の実践的研究を行ってきた。2つの円弧の組み合わせにより幾何学的に回避軌道を導出するという方法により、単路に障害物が出現する場面(図2)において、障害物をレーザレーダにより自動認識して操舵による緊急自動回避を行うシステムの開発に成功したが、同時に新たな課題も見出された。

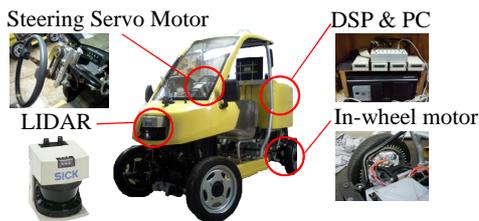


図1 超小型電気自動車

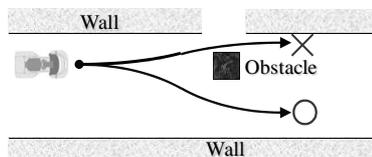


図2 想定した緊急回避場面

2. 研究の目的

本研究は、自動車の進路前方に突然出現する障害物を操舵により回避する前方障害物緊急自動回避システムを開発(改良)することを目的とする。実用的視点に立った実践的研究として、最適な制御で回避することよりも確実な軌道で回避することに重点を置き、回避開始前に回避軌道を算出することにより回避可能かどうかの事前判断を可能とす

る操舵回避方法を検討する。車両の動特性を考慮した操舵回避軌道を用い、歩行者の飛び出しなどを想定した現実的な緊急回避場面における回避軌道導出法を確立することにより、操舵を用いた回避による予防安全技術の実用化への足がかりとする。

3. 研究の方法

(1) 車両系(操舵系)として実現可能な回避軌道の導出法の構築

本研究開始以前に提案されていた障害物自動回避システム(以下、既存システムと称す)では、目標とする回避軌道に追従するための操舵角指令値が図3のようにステップ状に変化する。しかし、実際には、自動操舵用のモータには角速度の上限値が存在するため、ステップ状の急激な操舵は不可能であり、一定の変化率を持った台形のような形状である必要がある。

そこで、算出される操舵角指令値を直接用いるのではなく、図4のように台形状に変換することで、車両の自動操舵系が追従可能なようにする計算手法(操舵角指令値の補正手法)を構築する。図4の形状変換を実現する計算式を定式化し、数値シミュレーションを用いた検証及び図1の超小型電気自動車を用いた実証実験によりその妥当性を示す。

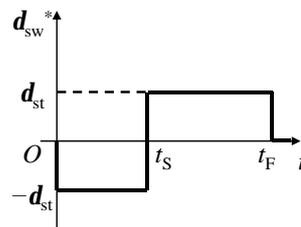


図3 操舵角指令値の形状

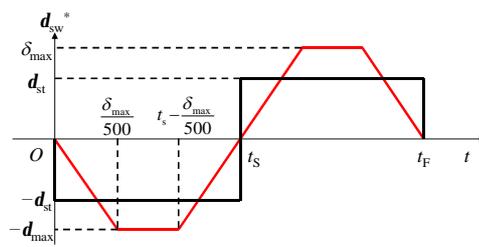


図4 操舵角指令値の変換

(2) 出現後の障害物の位置変化に応じた回避軌道補正法の構築

現実の緊急場面では、障害物は歩行者や他車両であることが多い。したがって、障害物は瞬時にして現れるわけではなく、また、出現後にさらに動くという場面も少なくない。そのため、障害物の挙動変化にも対応できるように自動回避アルゴリズムの高度化を行う。具体的には、まず、回避途中状態からの補正軌道を導出する計算式を定式化する。次

に、緊急自動回避の実行中も障害物の位置センシングを継続し、その動きに応じて図5のように回避軌道を再計算して補正するという制御アルゴリズムを構築する。さらに、数値シミュレーションと実車実験によりその有効性・妥当性を検証する。

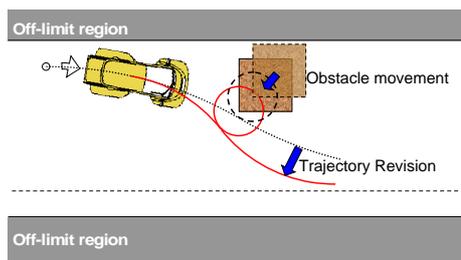


図5 回避軌道の補正

(3) 操舵系の制約が回避性能に及ぼす影響の検討

既存システムは超小型電気自動車への実装を念頭に置いたものであるが、事故低減への寄与を考慮すると、普通自動車にも適用可能であることが望ましい。そこで、既存システムの普通自動車への適用にあたり懸念される、自動操舵系の制約（自動操舵用モータのトルク限界や許容回転速度）の回避性能への影響を検討する。普通自動車による実験はコスト面や時間的制約などから困難なため、車両挙動計算ソフトウェア CarSim を用いたシミュレーションを活用する。既存システムを一般乗用車に実装した場合の緊急自動回避の数値シミュレーションを網羅的に行い、その結果から、自動操舵用モータのトルク限界および許容回転速度に対する回避成功率の関係を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 車両系（操舵系）として実現可能な回避軌道の導出法の構築

等価二輪モデルを用いると、図4におけるステップ状および台形状の操舵により生じる時刻 t_s における車両の横変位はそれぞれ以下の式で表される。

$$y_{st}(t_s) = \frac{V_0^2}{2(1+KV_0^2)lN} \delta_{st} t_s^2 \quad (1)$$

$$y_{tr}(t_s) = \frac{V_0^2}{2(1+KV_0^2)lN} \left(\delta_{max} t_s^2 - \frac{\delta_{max}^2}{500} t_s \right) \quad (2)$$

ここで、 V_0 は車両の初速、 K はスタビリティ・ファクタ、 l はホイールベースである。したがって、車速を一定とした場合、操舵切替時刻 t_s における車両の横変位を一致させることを考えると、台形状操舵の場合の操舵角の最大値は以下ようになる。

$$\delta_{max} = \frac{500t_s - \sqrt{500^2 t_s^2 - 4 \cdot 500 t_s \delta_{st}}}{2} \quad (3)$$

このとき、目標回避軌道は図6のように変

化するが、どちらの操舵パターンでも、操舵切替点（ S 点）を通過することが分かる。操舵角変換により軌道への追従性能が向上することを考慮すると、総合的な回避性能は向上すると考えられる。

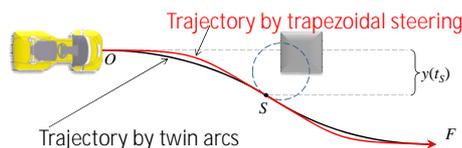


図6 目標回避軌道の変化

ただし、上記の変換で求められる操舵指令目標値は、車速を一定とした場合のものであるため、減速しながらこの回避軌道に追従させるには、時間に関する変換も行う必要がある。走行距離による等価性を考慮すると、車速一定の場合の時刻 \bar{t} と減速する場合の時刻 \hat{t} には以下の関係が成立する。

$$\hat{t} = \frac{-V_0 + \sqrt{V_0^2 + 2a_x V_0 \bar{t}}}{a_x} \quad (4)$$

この関係を用いて操舵角指令値をさらに変換すると、減速する場合の操舵角目標値が図7のように得られる。

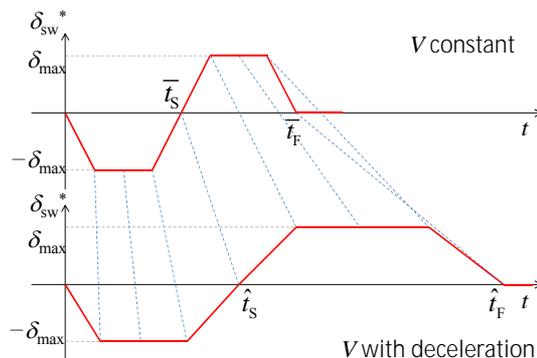
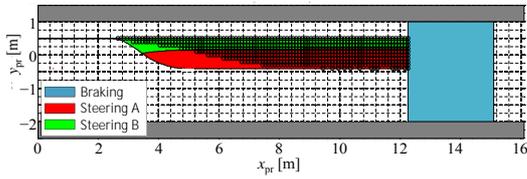
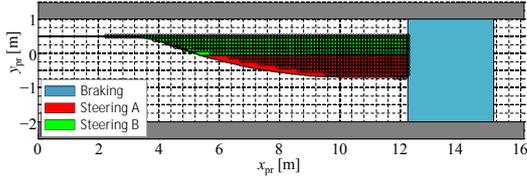


図7 時間変換の概要

図8は上記の操舵角指令値変換を既存システムに実装した場合の回避性能のシミュレーション結果である。 (x_{pr}, y_{pr}) は障害物出現時の障害物の車両に対する相対位置座標であり、色で塗られた領域は、障害物が出た場合に出現した場合、それぞれの回避方法により衝突回避が可能であるとシステムが判断するということを示す。また、印は、シミュレーションの結果、実際に回避に成功した障害物位置であることを示す。図8(a)から、既存システムでは、システムが回避可能と判断したにもかかわらず実際には衝突回避に失敗するような条件も多いということが分かる。一方、図8(b)からは、そのような判断ミスがほとんどなくなっていることが分かり、また、回避に成功した領域も広がっていることが分かる。



(a) 既存システム

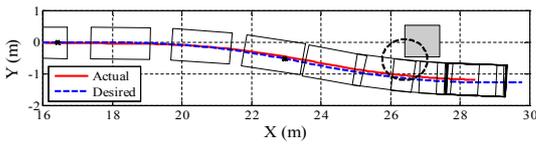


(b) 操舵角指令値変換を用いたシステム

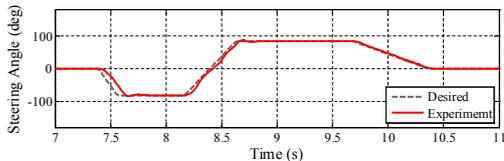
図 8 回避の成否のシミュレーション結果

次に、実車実験の結果を図 9 に示す。この実験の条件は、障害物位置の座標が $(x_{pr}, y_{pr}) = (10, -0.45)$ というものであり、既存システムでは回避不可能と判断するものである。しかし、提案した操舵角指令値変換を組み込むことにより目標軌道への追従性が向上したため、見積もるべき安全マージンが小さくなり、これにより、この障害物の回避は可能であると判断された。そして、自動回避が実行され、図 9 のように実際に回避に成功している。

これらの結果から、提案した操舵角指令値変換手法は有効であることが示された。



(a) 車両の軌跡



(b) 操舵角時刻歴図

図 9 実験結果

(2) 出現後の障害物の位置変化に応じた回避軌道補正法の構築

導出する補正軌道は、図 10 に示すように、車両が道路の向きに対して傾いた状態から開始し、障害物と S 点にて最接近した後車両の向きを道路と並行にして終了するような軌道となる。導出した補正軌道の計算式を以下に示す。

$$R(t) = \frac{x_{pr}(t)^2 + \hat{y}_{pr_b}(t)^2 - r^2}{-2(x_{pr}(t)\sin\theta_t(t) + \hat{y}_{pr_b}(t)\cos\theta_t(t) - r)} \quad (5)$$

$$\theta(t) = \cos^{-1} \left(\frac{R(t)\cos\theta_t(t) + \hat{y}_{pr_b}(t)}{R(t) + r} \right) \quad (6)$$

ここで、 x_{pr} は車両と障害物との x 方向の距離、 \hat{y}_{pr_b} は障害物の予測 y 座標であり、 R 、 θ 、 θ_t は図 10 のように定義される円弧の半径と中心角である。また、 r は車幅の半分である。これらの式により、自動回避の実行途中で回避軌道を変更することが可能となり、したがって、障害物の加速などの挙動の変化に応じて回避軌道を補正することが可能となる。

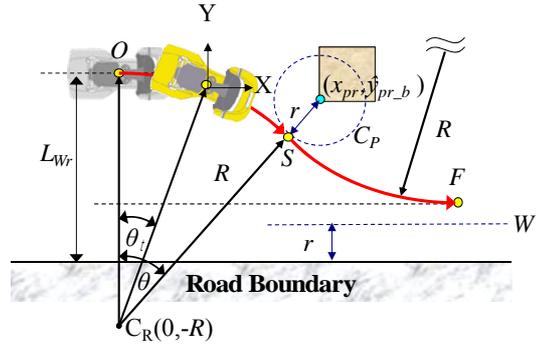
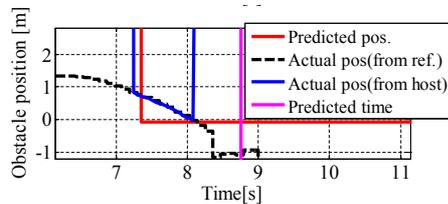


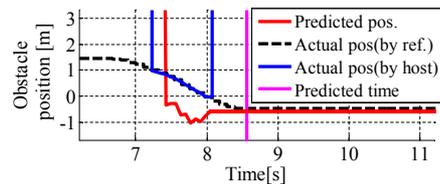
図 10 補正回避軌道

導出した補正軌道の計算式を既存システムに組み込み、図 1 の超小型電気自動車に実装して実験を行った。自車の初速を 5m/s とし、自車の前方約 6.5m に障害物を出現させた場合の実験結果を図 11 および図 12 に示す。

まず、図 11 は既存のシステムとの障害物の位置予測の結果の比較である。図 11(a) から、既存のシステムを用いた場合では、障害物出現時に一度だけ障害物位置の予測を行っているため、障害物との予測位置は実際と大きく異なっていることがわかる。(障害物は実際には 0.7 秒程度早く衝突予想位置に到達している。)一方、提案したシステム(図 11(b))では、障害物の挙動変化に対応して予測位置を更新しているため、障害物位置の予測の正

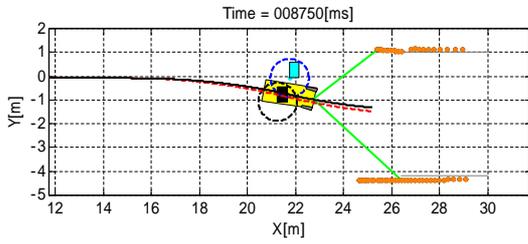


(a) 既存のシステムによる場合

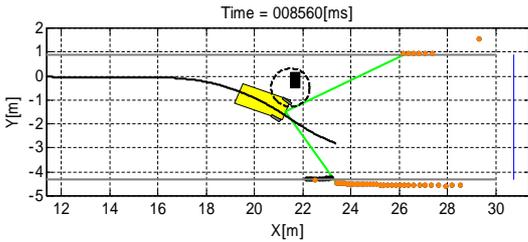


(b) 軌道更新手法を実装した場合

図 11 実験結果 (障害物位置の時刻歴図)



(a) 既存のシステムによる場合



(b) 軌道更新手法を実装した場合
図 12 実験結果 (車両の軌跡)

確さが向上していることがわかる。

図 12 は既存のシステムを用いた場合との車両の軌跡の比較である。黒の四角は車両が障害物位置に到達した時刻における実際の障害物位置を示している。既存のシステムでは目標軌道の計算は障害物出現時に一度のみ行われるため、図 12(a)に示すように、障害物の挙動変化に対応できず、結果として障害物と衝突していることが分かる。一方、提案したシステムでは、障害物の時々刻々の予測位置に応じて目標軌道が更新されることから、図 12(b)のように軌道が大きく変化しており、これにより障害物回避に成功していることが分かる。

(3) 操舵系の制約が回避性能に及ぼす影響の検討

操舵系の制約として、CarSim の車両モデルに対して図 13 に示すような、操舵系の制約を考慮した制御系を作成して実装した。操舵系の逆モデルから得られる目標トルクに実操舵角のフィードバック制御から得られる付加トルクを加算することで得られる入力トルクを後述するリミッタに入力する。

さらに、操舵系の制約として、式(7)に示すようなリミッタを設け、操舵系モデルに入力する操舵トルクの値を決定する。

$$\begin{cases} T_h = T_{h \max} & (\text{if } : T_h \geq T_{h \max}) \\ T_h = 0 & (\text{if } : \omega \geq \omega_{\max}) \\ T_h = T_h^* & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

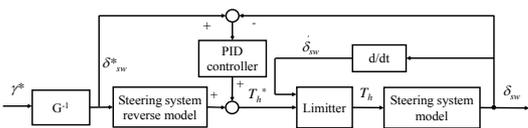


図 13 制約のある操舵制御系

ここで、 $T_{h \max}$ はモータの最大トルクを表現した定数であり、 ω_{\max} はモータの許容回転数を表現した定数である。

操舵系の制約を考慮し、普通乗用車に適用した自動回避システムのシミュレーション結果の例を図 14 に示す。実線は車両先端の中央の軌跡であり破線は障害物の端点を中心、車幅の半分を半径とする円である。回避軌道がこの円外を通っていれば回避成功であることを意味する。この図から、操舵トルク制限あるいは操舵角速度制限があると、制約なしの場合に比べて回避軌道の横方向変位が小さくなり、障害物の回避に失敗することがわかる。さらに、障害物位置を変化させてシミュレーションを行い、操舵系に制約がある場合でも操舵回避が成功する障害物位置の範囲を計算した。その結果を図 15、図 16 に示す。図 15 は操舵トルク制限、図 16 は操舵角速度制限を考慮した場合である。制限値が小さくなるにつれ、どちらの場合もほぼ同様に、回避に成功した範囲が車両から見て右手前側から狭くなっている。これは、回避軌道半径が小さくなる、つまり目標操舵角が大きくなる方向であり、目標操舵角への追従のために必要な操舵トルクや操舵角速度も大きくなるためであると考えられる。

さらに、制約がない場合の回避成功領域の面積を 100%として、各制約の大きさに対する回避成功領域面積の広さを表す等高線図を図 17 に示す。各制約の範囲内でのモータの最大出力を表す曲線を重ねて示している。このようなグラフを作成することにより、モータの出力を制約条件として、最大の回避性能を得るための最適な減速比が求められることになり、自動回避システムを実装する際のハードウェアの仕様設計に回避性能を反映させることが可能になる。

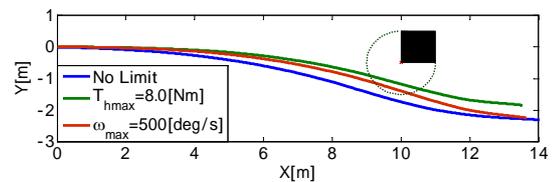


図 14 制約による回避軌道の変化

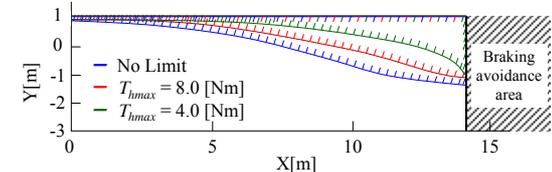


図 15 最大トルクと回避成功領域の関係

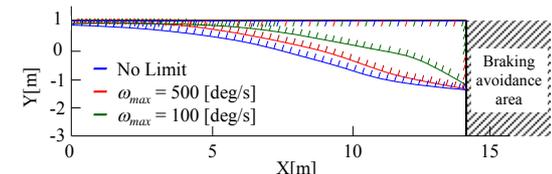


図 16 許容回転数と回避成功領域の関係

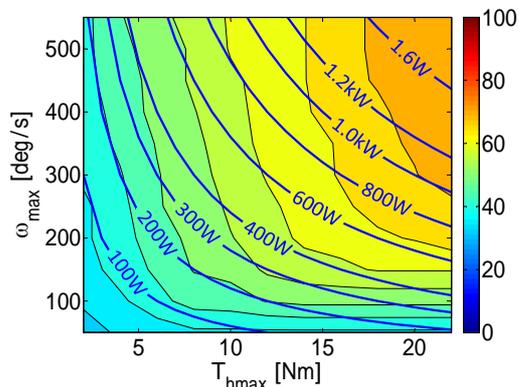


図 17 操舵系の制約と回避成功領域面積の
関係

以上(1),(2)は、既存のシステムと比較して自動回避に失敗する確率を大きく低減するものであり、障害物自動回避システムの性能向上を実現したものである。また(3)は、超小型電気自動車以外の車両に提案するシステムを適用する際の、定量的なシステムの性能設計を可能にするものである。

本研究の成果により、現実的な緊急回避場面（操舵系の制約や歩行者の挙動）のもとでも、可能な場合には操舵により確実に回避を行う予防安全システムが実現できることが、理論面および実践的実証の両面から示されたといえる。これらの成果は、操舵による緊急回避を用いた予防安全技術や自動運転技術の実用化への足がかりとなり、「事故ゼロ」を目指す社会的要求にも大きく応えるものと考えられる。

今後は、(1),(2)の成果を一つのシステムに統合し、普通乗用車での実車実験なども含め、実用化に向けた実証研究を進めていく。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1件)

林隆三, 磯谷十蔵, ホンソト・ラクションヤク, 永井正夫, Autonomous Collision Avoidance System by Combined Control of Steering and Braking using Geometrically-Optimized Vehicular Trajectory, Vehicle System Dynamics, 査読有, Vol.50, Supp. 1, 2012, pp.151-168

〔学会発表〕(計 6件)

藤森晋平, 林隆三, 永井正夫, 操舵系の制約が前方障害物自動回避システムの性能に及ぼす影響の検討, 日本機械学会関東学生会第 53 回卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月 14 日, 小金井市

林隆三, チャット・ソナト・カル・ブ・ワート, 永井正夫, Improvement of Trajectory Tracking Performance in Autonomous Collision

Avoidance by Steering, 7th IFAC international symposium on advances in automotive control (AAC), 2013 年 9 月 4 日, 渋谷区

チャット・ソナト・カル・ブ・ワート, 林隆三, 永井正夫, The autonomous collision avoidance system by combined control of steering and braking with limited steering angular velocity, The 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control(AVEC 2012), 2012 年 9 月 9 日, Seoul, Korea

林隆三, 磯谷十蔵, ホンソト・ラクションヤク, 永井正夫, Autonomous Collision Avoidance System by Integrated Steering and Braking Control using Geometrically-Optimized Vehicular Trajectory, IAVSD 22nd Symposium, 2011 年 8 月 17 日, Manchester, UK

ロトリカホン・コソ, 林隆三, 永井正夫, 前方障害物自動回避システムのための回避軌道の逐次修正法の検討, 第 20 回交通・物流部門大会, 2011 年 12 月 7 日, 川崎市

チャット・ソナト・カル・ブ・ワート, 林隆三, 永井正夫, 操舵角速度の限界を考慮した前方障害物自動回避システムの検討, 第 20 回交通・物流部門大会, 2011 年 12 月 7 日, 川崎市

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

林隆三 (HAYASHI, Ryuzo)
東京理科大学・工学部・講師
研究者番号: 80505868

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし