

令和元年5月22日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06422

研究課題名(和文) 適応スライディングモード制御を用いた車両自動運転に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Autonomous Driving using Adaptive Sliding Mode Control

研究代表者

森 泰親 (Mori, Yasuchika)

首都大学東京・システムデザイン研究科・客員教授

研究者番号：00210138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、安全性と快適性を求めて、世界中で多くの研究者が自動運転車の開発に注力している。本研究では主として自動駐車システムの開発を行った。実際の駐車場は平坦ではなく、路面勾配、うねり、段差などが存在しており、これらはすべて制御系にとっては外乱である。そこで、構造可変型制御であるスライディングモード制御の適用を検討し、時変楕円切換面を持つ適応型手法を新たに開発した。提案手法の高いロバスト性により、快適性を損なわずに位置決め精度を大幅に改善できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本政府や米国運輸省道路交通安全局(NHTSA)では、段階的に車両自動運転を実現する戦略が提言されており、本研究はこの戦略に沿ったものである。路面勾配、うねり、段差が存在する駐車場においても正確な駐車を実現するために新しい制御手法を開発した。そして、フルビークルモデルを用いたシミュレーション(CarSim)により提案手法の有効性を検証した。本研究の中核を成す『切り返しを伴う自動駐車システム』は、学術的な新規性と社会的な実用性の両面で高く評価されている。

研究成果の概要(英文)：Recently, many researchers all over the world make efforts to develop autonomous cars in order to get safety and comfort. In this research, I developed mainly automatic parking systems. Many conventional studies use the assumption of a flat road surface. In real-life situations, issues such as road surface gradient, swollen road surfaces and a difference in levels are frequently encountered. And all of them are recognized as disturbances against the automatic control system.

Therefore, I studied to apply the sliding mode control which is a variable-structure control, and developed a new adaptive type method with a time-varying ellipsoidal sliding surface. Thanks to the high robustness of the proposed method, the positioning accuracy was improved much without losing comfort.

研究分野：制御工学

キーワード：車両自動運転 自動駐車 スライディングモード制御 システム制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車運転中の事故原因の約9割は人為的ミスであると言われている。また、高齢化社会の到来に伴い、高度な運転支援・自動運転システムの実現が望まれている。しかしながら、自動車は、多様な交通条件、気象条件、地理的条件など様々な環境で使用されるため、天候、路面状態、路面勾配、横風外乱、積載重量など、様々な不確かさに対してロバストなシステムを構成しなくてはならないという課題がある。

(2) 自動運転はアメリカ国防高等研究計画局 (DARPA) が主催した自動運転技術の競技大会である未舗装路を想定したグランドチャレンジ (2004, 2005)、市街地コースを想定したアーバンチャレンジ (2007) をきっかけに近年、急速に実現可能性が高まった。現在は、Google や、主要な自動車メーカーが自動運転システムの普及・製品化を目指して研究開発を進めている。日本政府や米国運輸省道路交通安全局 (NHTSA) では自動運転の自動化レベルを4段階に分け、段階的に自動化技術を実現する戦略を提言しており、各自動車メーカーも、この戦略に沿って研究開発を進めている。この戦略は比較的危険度が低い低速域や、自動車専用道路など限定された環境における自動運転からより危険度が高い高速域や一般道などの複雑な状況へ段階的に自動運転の適用範囲を拡大する戦略である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷を低減することを目的とする。そのために、電気自動車への適用を想定した「不確かさに対するロバスト性を保ちつつ滑らかに素早く省エネルギーで車両を制御する手法」を構築し、自動運転技術の適用範囲拡大を図る。

(2) 駐車時の運転操作の煩わしさを解消し、安全性や快適性を向上するために操舵を自動化した駐車支援システムが実用化されている。現在実用化されている駐車支援システムでは、車載カメラや超音波センサを用いて目標駐車位置を検出して目標駐車位置に至る軌跡を算出したうえで、この軌跡に沿って走行するように自動操舵する手法が主流である。

(3) 現在実用化されている駐車支援システムでは車両横方向制御が自動化されているものの、車両前後方向制御はドライバーがアクセルやブレーキを操作する必要がある。高齢化社会の到来に伴い、さらなる運転の自動化が望まれており、車両前後方向制御と横方向制御を統合したシステムの開発が急務である。

(4) 従来研究のほとんどは、路面が平坦路と見做せる理想的な環境を前提とした自動駐車システムの検討である。しかし、実環境では路面勾配やうねり、コインパーキングの車止めなど様々な路面外乱が存在する。本研究では、このような実環境に存在する路面外乱に対してロバストな自動駐車システムの提案を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、様々な環境変化の影響を受けにくい自動運転システムを構築するために不確かさに対しロバスト性が高い制御則である適応スライディングモード制御を適用する。ここで、追従誤差動特性に応じて境界層幅を調整するチャタリング抑止のための境界層幅適応則を適用する。また、走行中にオンラインで滑らかさを損なうことなく目標駐車位置を修正するために、滑らかな参照軌道の修正手法を適用する。

(2) 図1に提案する自動駐車システムの構成図を示す。本システムは車両前部、後部および左右のドアミラーに設置された4台の車載カメラにより得られた画像情報を基に駐車枠位置を検出し、検出した駐車枠位置から目標駐車位置および姿勢を算出する。

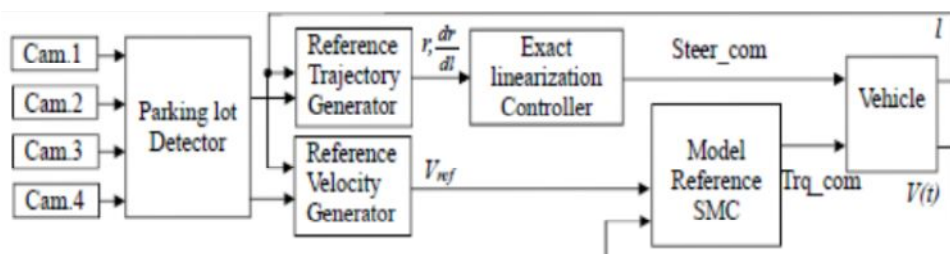


図1 システム構成図

(3) さらに車両初期位置から目標駐車位置に至る切り返しを含む軌跡と、速度プロファイルを算出する。算出した軌跡に沿って車両が走行するように前方注視点距離を導入した厳密線形化制御器により操舵角指令値 $Steer_com$ が与えられ、車両横方向制御を行う。また、モデル追従

SMC は、与えられた位置・速度指令値に沿って動作するようにトルク指令値 Trq_{com} を生成し、車両前後方向制御を行う。

(4) それに加えて、車両初期位置で検出した目標駐車位置に近づく目標駐車位置を再検出し、目標駐車位置の観測誤差を検出した場合には、走行中に停車することなく滑らかに軌道修正を行う。この軌道修正は2回実施される。1回目は、後輪車軸中心座標が最初に検出した駐車枠の入口に到達した時点で目標走行軌跡を修正する、2回目は修正軌跡の midpoint で最終的な目標駐車位置を再度検出し、車両前後方向軌道のみを修正する。

4. 研究成果

(1) 本研究で検討する自動駐車システムは、目標駐車枠を車載カメラで観測可能な停車位置において動作を開始する。この停車位置から目標駐車枠内の駐車位置に至る1回の切り返し軌道を算出して、この軌道に沿って並列駐車を行う。この際、走行中に目標駐車位置を再検出し、途中で停車することなく滑らかに目標駐車位置を誤差修正する。ここで、周囲には駐車枠外に停車している他車両や壁などの障害物は存在しないこととする。図2にシミュレーション条件を示す。

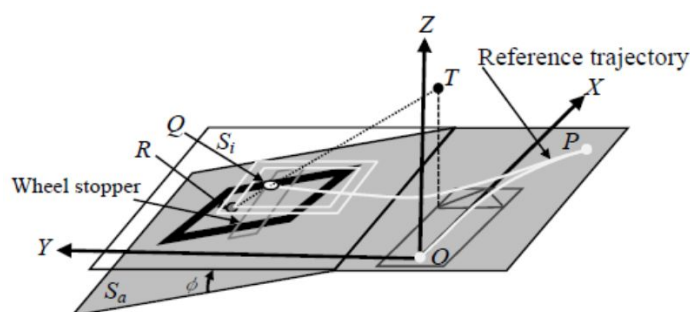


図2 シミュレーション条件

(2) ここで、図中のハッチング部分 S_a は部分的に勾配がついた実際の路面、 S_i は仮想的な平坦路面を表している。いま、初期位置の後輪車軸中心座標 $O(x, y, z, h)$ 、左ドアミラーに設置されたカメラ座標 $T(x, y, z)$ の場合を考えると、真の目標位置の後輪車軸中心座標 $R(x, y, z, h)$ に対して、左ドアカメラ画像を仮想的な平坦路面に射影変換することにより、カメラから得られる画像を用いて検出される目標位置の後輪車軸中心座標 $Q(x, y, z, h)$ が算出できる。ここで、撮像系のレンズ歪は、あらかじめキャリブレーションされており補正されることを前提として無視する。また、コインパーキングを想定して駐車目標位置の手前に車止めが存在し、 $y > 1$ において $[\text{deg}]$ の勾配が存在するものとする。

(3) シミュレーションには Math Works 社 MATLAB/SIMULINK およびバーチャルメカニクス社 CarSim を用いた。図3~10に車両初期位置 $(x, y, h) = (-0.5\text{m}, -0.5\text{m}, 0\text{deg})$ 、 $y > 1$ における路面勾配 $\phi = -2\text{deg}$ に対するシミュレーション結果を示す。

(4) 路面勾配や段差を含む並列駐車をケーススタディとして本研究の有効性を示した。これにより従来手法では適用が困難であったコインパーキングにおけるフラップ式ロック装置や、歩道に隣接する駐車場などで歩道の段差、路面勾配などの路面外乱が存在する駐車シーンへの自動駐車システムの適用範囲拡大が期待できる。

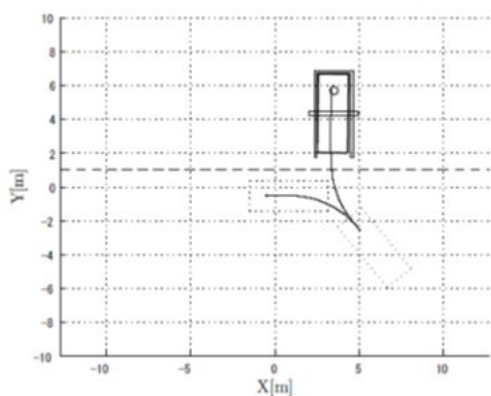


図3 走行軌跡

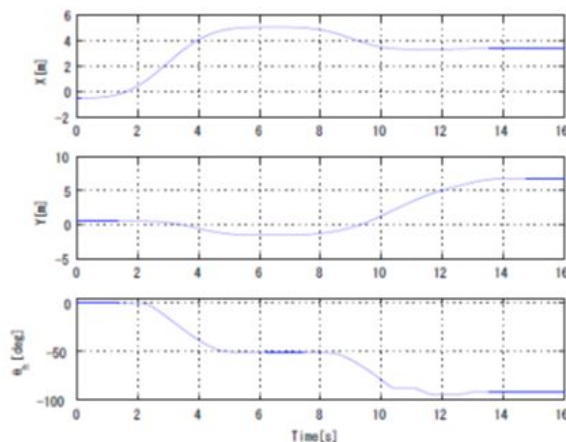


図4 車両後輪車軸中心座標と姿勢角

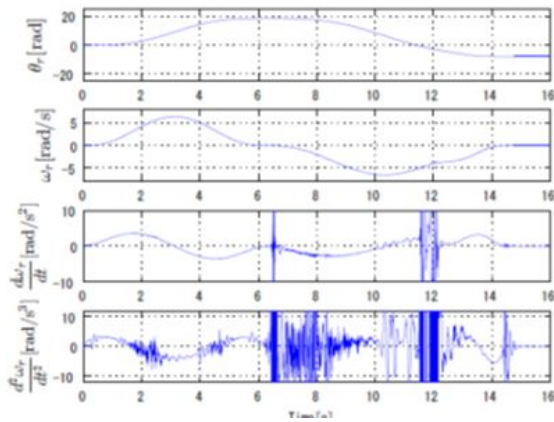


図5 前後方向制御追従軌跡

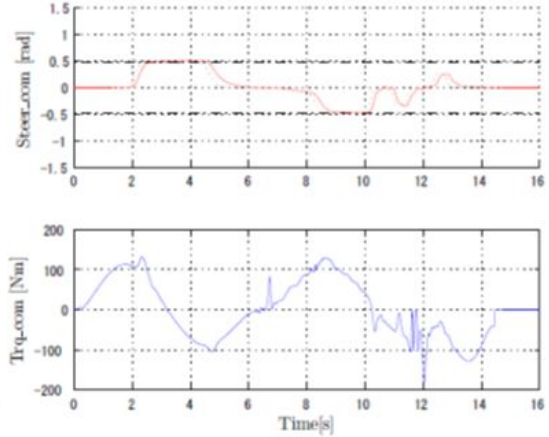


図6 操舵制御入力と駆動モータ制御入力

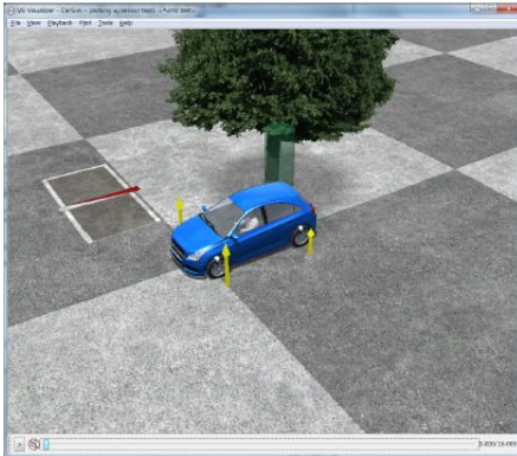


図7 シミュレーション結果(t=0)

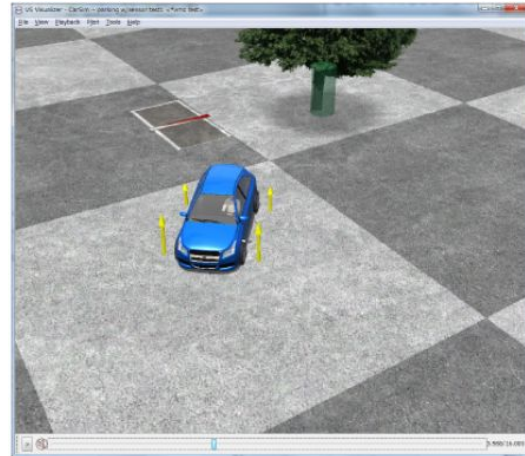


図8 シミュレーション結果(t= t=5.988)

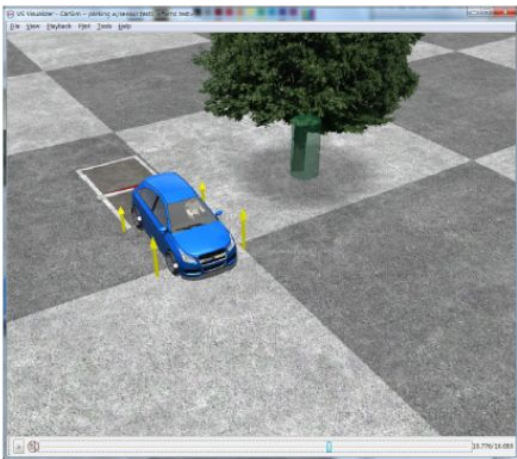


図9 シミュレーション結果(t= t=11.576)



図10 シミュレーション結果(t=16)

(5) 今後の展望

今後は、本研究で提案した手法に基づき、狭い駐車場における壁や、駐車枠外に存在する他の駐車車両などの障害物を考慮した複数繰り返し軌道生成問題、周囲に歩行者などの移動物体を検出した場合について検討する予定である。

<引用文献>

里中 久志, 岩田 洋一, 岩切 英之, 岩崎 克彦, 遠藤 知彦, 田中 優. 自動操舵後退駐車支援システム, 計測と制御 Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 45, No. 3, 227-230 (2006.3)
 クアングオミン, 劉 康志, 大形 明弘. 4 輪車自動駐車システムの開発: 理論と実験. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 12, 1211-1219 (2004.12)
 クアングオミン, 井上 拓哉, 劉 康志. 自動車の自動駐車技術の実用化に関する研究. 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 7, 765-774 (2006.7)

宮原 陽洋, 小林 康秀, 塩谷 弦, 疋田 真一, 齋藤 充行, 小野 貴彦. 車載レンジファインダによる車両に認識と自動駐車システムの開発. 自動車技術会論文集, 第 40 巻, 973-978 (2009)

江上 正, 望月 光一郎, 中崎 哲, 任意曲線経路に対する移動車両の経路制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 11, 986-993 (2013.11)

J. Luo and P. Tsiotras, Exponentially convergent control laws for nonholonomic systems in power form. Systems & Control Letters, No. 35, 87-95 (1998)

K.Z. Liu and A. Kanehara. Steering control of vehicles by discontinuous control approach, In Proc. of ACC'2001, 1521-1526 (2001)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

Fitri Yakub, Pauziah Muhammad, Hoong Thiam Toh, M. Sofian Abu Talip and Yasuchika Mori, Explicit Controller of a Single Truck Stability and Rollover Mitigation, Journal of Mechanical Science and Technology, 査読有り, Vol. 32, No. 9, 4373 - 4381 (2018. 9)

DOI: 10.1007/s12206-018-0836-y

溝尻 太一, 森 泰親, 路面外乱に対するロバスト性を考慮した自動駐車システムの検討, 査読有り, 電気学会論文誌 C, Vol. 137, No. 8, 1070-1082 (2017. 8)

DOI: 10.1541/ieejieiss.137.1070

Fitri Yakub, Aminudin Abu and Yasuchika Mori, Enhancing the Yaw Stability and the Maneuverability of a Heavy Vehicle in Difficult Scenario by an Emergency Threat Avoidance Maneuver, Journal of Automobile Engineering, 査読有り, Part D, Vol. 231, 615-637 (2017. 2)

DOI: 10.1177/0954407016658808

Taichi Mizoshiri and Yasuchika Mori, Application of Adaptive Sliding Mode Control with an Ellipsoidal Sliding Surface for Vehicle Distance Control, SICE Journal of Control, Measurement and System Integration, 査読有り, Vol. 10, No. 1, 25-31 (2017. 1)

DOI: 10.9746/jcmsi.10.25

Fitri Yakub and Yasuchika Mori, Enhancing the Stability of Unmanned Ground Sport Utility Vehicles through Coordinated Control under Mu-split and Gust of Wind, Journal of Engineering Science & Technology, 査読有り, Vol. 11, No. 10, 1450-1469 (2016. 10)

https://www.researchgate.net/publication/309579095_Enhancing_the_stability_of_unmanned_ground_sport_utility_vehicles_through_coordinated_control_under_MU-split_and_gust_of_wind

Fitri Yakub, Shihao Lee and Yasuchika Mori, Comparative Study of LQR and MPC Control Method with Disturbance Observer for Rollover Prevention in Inclement Environments, Journal of Mechanical Science and Technology, 査読有り, Vol. 30, No. 8, 3835 - 3845 (2016. 8)

DOI: 10.1007/s12206-016-0747-8

[学会発表](計8件)

Taichi, Mizoshiri and Yasuchika Mori, Sliding Mode Control with a Time-Varying Lemniscate-Based Sliding Surface, The 12th Asian Control Conference (ASCC 2019), Kitakyushu, Japan, No. WeA4.3 (2019. 6. 9-12)

Taichi, Mizoshiri and Yasuchika Mori, Sliding Mode Control with a Time-Varying Ellipsoidal Sliding Surface, 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2019), Paris, France, No. Mo2A.5 (2019. 1. 14-16)

Nur Alyani Nadhiya, Fitri Yakub, Hatta Ariff, Azizul Azizan, Zainuddin A. Rasit, Sheikh Ahmad Zaki, Abdul Yasser Abd Fattah, Yasuchika Mori, Vehicle High Speed Stability Analysis through Integrated Control, 2018 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC 2018), Malacca, Malaysia, pp. 1-6 (2018. 12. 14-15)

笠原 美左和, 森 泰親, 斜面走行時における車両の横滑りに関する研究, 第 61 回自動制御連合講演会, 南山大学名古屋キャンパス(愛知県名古屋市), No. 11C4, 2018 年 11 月 17-18 日

Sharifah Munawwarah, Fitri Yakub, Zainudin A. Rasid, Aminudin Abu, Normaisharah Mamat, Yasuchika Mori, Control Analysis for Enhancing Ride Comfort through Linear Quadratic Regulator, 14th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'18), Beijing, China, No. ThC2-1 (2018. 7. 16-20)

Fitri Yakub, Yasuchika Mori, Pauziah Muhamad, Zul Hilmi Che Daud and Abdul

Yasser Abd Fattah, Ride Comfort Quality Improvement for a Quarter Car Semi-Active Suspension System Via State-Feedback Controller, The 2017 Asian Control Conference in Gold Coast, Australia, No. Mo1Po-02.9 (2017. 12. 17-20)

Misawa Kasahara and Yasuchika Mori, Relation between Overturn and the Center of Gravity of a Forklift Truck, SICE Annual Conference 2017 in Kanazawa, No. WeA06-4 (2017. 9. 19-22)

Naoki Watanabe, Taichi Mizoshiri and Yasuchika Mori, Integral Sliding Control with Adaptive Switching Gain : An Application to the Vehicle Positioning Control, The International Society of Artificial Life and Robotics (ISAROB), B-Con Plaza, Beppu, No. GS15-1 (2017. 1. 18-20)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。