

自動運転に向けた 経路生成・車両統合制御技術

鵜生知輝*
篠本 凜*
吉桑義雄**

Path Planning and Vehicle Integrated Control Technologies for Autonomous Driving System

Tomoki Uno, Rin Shinomoto, Yoshio Yoshikuwa

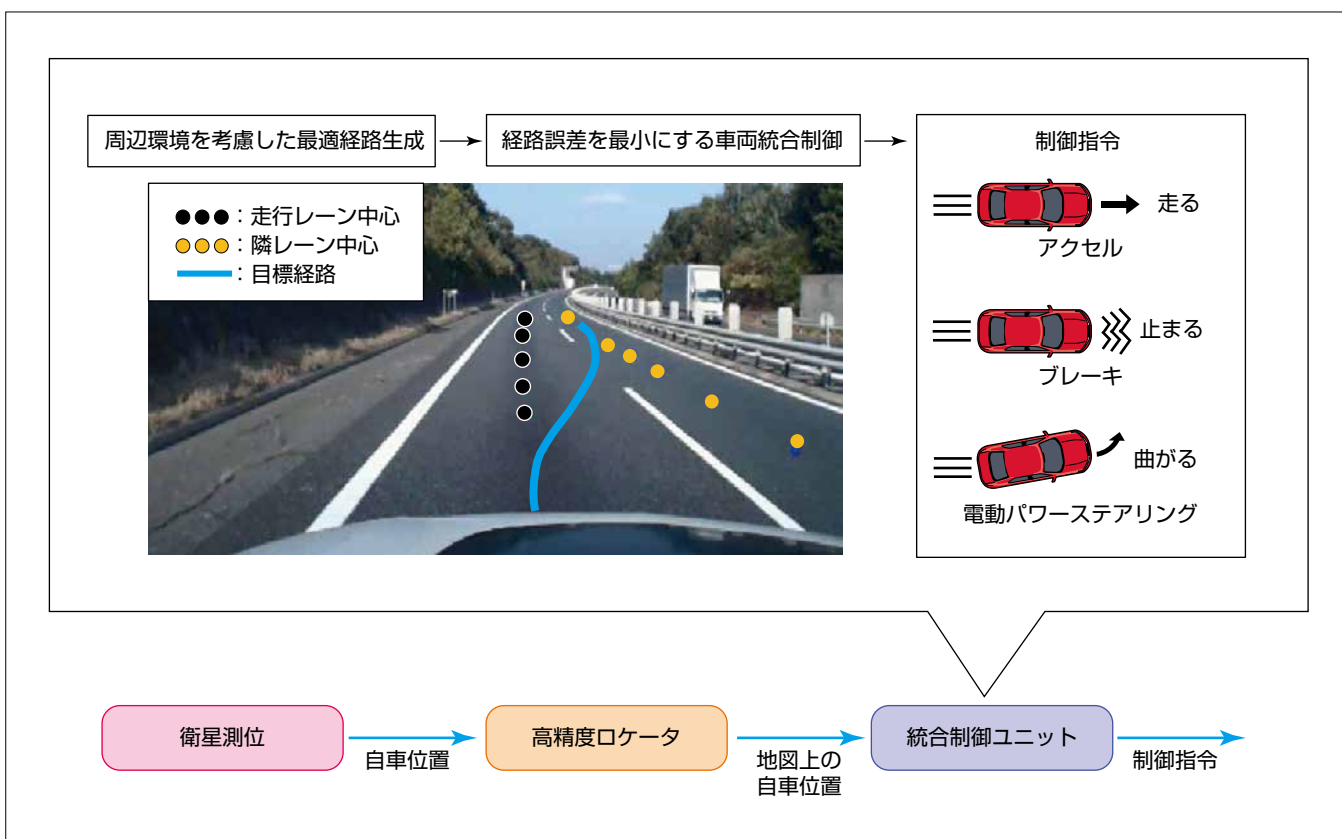
要 旨

自動運転の技術は多くのメーカーや研究機関で開発が進められており、公道での実証試験も実施されている。また、高速道路の本線走行時などでは、前方車両を監視しながら車線内を走行することで、自動走行がほぼできるレベルにある。しかしながら、自動運転を世の中に浸透させていくためには、周辺車両や歩行者の存在を考慮して、適切に行動する自動運転の技術開発が必要である。そのためには、高度な認知技術とともに、周辺環境に応じた行動判断技術、及び安全で快適な車両操作技術が必要と考えられる。

そこで三菱電機では、複雑な環境に適応でき滑らかな車両挙動を実現する経路生成技術、車両の運動能力を最大限に発揮できる安全で安心感のある車両統合制御技術の開発

を進めている。具体的には、ロボットのための経路生成技術として開発が進められてきたサンプリングベース計画法に、車両のシステムモデルを組み合わせた独自の経路生成手法を開発している。また、非線形な車両運動特性を考慮して、車両の縦方向と横方向の運動を統合的に制御し、様々な制約条件の下で快適な車両運動を実現するモデル予測制御の開発に取り組んでいる。

衛星測位を活用した自動運転システムに、これらの経路生成技術、車両統合制御技術を適用した実車走行試験を行い、自車両周辺に障害物がある場合でも適切な経路が生成でき、安全な車両制御が実現できる結果を得た。



自動運転を実現する技術

自動運転システムでは、衛星測位を用いて高精度に自車位置を把握し、高精度ロケータによって地図上での自車及び周辺物体の位置を把握して、統合制御ユニットで経路生成及び車両制御を行う。周辺環境と車両運動特性を考慮した最適経路生成が求められ、車両の運動性能を最大限に発揮する統合制御によって、安全で安心感のある車両制御を行う。

1. ま え が き

自動車の自動運転技術は、交通事故の削減、環境改善への貢献、及び高齢者の社会参画につながるという期待等から注目を集め、開発が進められている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。自動運転システムによる運転可能領域を拡大するには、様々な周辺環境を正しく認識するとともに、その環境下で安全性と快適性を実現する判断・操作技術が重要と考えられる。例えば、複数車線の道路を走行中に他車両や障害物などの周辺環境を認知し、自車の行動計画をたて、搭乗者にとって安心感のある車両制御を実現することが望まれる。

本稿では、現在自動運転システムに向けて開発を行っているなかから、複雑な環境にも対応できる経路生成技術と、車両統合制御技術について述べ、これらを用いた実車試験結果を示す。

2. 経路生成技術

2.1 自動運転のための経路生成技術

従来の経路生成技術として、Dijkstra⁽⁵⁾やHart等⁽⁶⁾のグラフサーチ計画法や、RRT(Rapidly-Exploring Random Tree)⁽⁷⁾を代表とするサンプリングベース計画法等がある。これらは複雑な環境での高速な経路探索が可能であるが、移動ロボットのための経路生成技術として開発されたものであり、車両の動作特性が考慮されていない。したがってこれらの手法によって生成された経路に追従する際、車両挙動が滑らかでなくなり、快適性という観点で課題が生じる。このため、曲線の利用や運動モデルとの組合せによる経路生成技術が多く提案されてきた。

当社では、複雑な環境への適応と、滑らかな車両挙動の実現を両立させる経路生成技術の開発を目的として、パーティクルフィルタ(Particle Filter: PF)を用いたサンプリングベースの経路生成手法であるPF-RRTを開発している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。サンプリングベースの計画法であるため、複雑な環境での経路生成が可能であり、またパーティクルフィルタで車両のシステムモデルを用いることによって、車両運動の特性を考慮した経路生成を可能にしている。

2.2 パーティクルフィルタによる経路生成手法

パーティクルフィルタとは、条件付確率分布をパーティクル(粒子)と呼ばれるデータ群によって近似的に表現する状態推定器である。通常、状態推定器は推定対象に取り付けたセンサから得られる観測値に基づき、観測できない状態量を推定するために用いられる。この開発では推定対象として理想的な状態にある車両を仮定し、そこから得られる観測値である理想観測値を用いる。理想的な状態とは経路生成での目標に当たり、例えば目標車線の中央に位置することや、目標車速を保持すること、周辺の障害物から安全な距離を確保すること等が挙げられる。理想観測値を用

いて状態推定を行うことで、現在の状態から理想状態へ近づくための状態変化を算出することが可能になる。

パーティクルフィルタによる経路生成の流れを図1に模式的に示す。まず全パーティクルに対し、システムモデルを用いて状態予測を行う。このときシステムモデルへの入力に乱数を用いることで、パーティクルの状態にばらつきが生じる。各パーティクルの状態から得られる観測値と理想観測値との差から、それぞれのパーティクルの重みを計算し、重みに応じてリサンプリング(パーティクルの増減)を行う。状態予測、重み計算、リサンプリングを繰り返すことによって、各時刻での状態の確率分布がパーティクルによって近似的に得られ、パーティクルの状態量の平均値を取ることで、現在の状態から理想状態へ近づくための経路が得られる。

2.3 パーティクルフィルタ-サンプリングベース経路生成

パーティクルフィルタによる経路生成に加えて、複雑な環境での経路生成にも対応できるように、サンプリングベース計画法のInput-based RRTと組み合わせた経路生成方法を考案した。RRTは、ツリー構造を取るデータ群を乱数を用いて拡大し、その中から経路を探索する手法である。またInput-based RRTは、ツリーを拡大する際、ランダムにノード(節点)を選び、そこからシステムモデルに基づいて枝を伸ばすものである。ツリーのノードは、システムモデルによって表される動作特性に基づいてつながっているため、Input-based RRTでは車両の動作特性を考慮しながら経路を探索することが可能になる。

開発した経路生成の流れを図2に沿って述べる。①位置や車速を含むデータ群をツリー構造で保持する。②ランダムに選択したノードを初期位置とし、先に述べたようにパーティクルフィルタを用いて経路を生成して、生成した経路を新たな枝としてツリーへ追加する。③手順②を繰り返すことでツリーを拡大する。④ツリーの中から到達コストが最小となる経路を選択し、制御器へ出力する。

このようにランダム性を持ってツリーを拡大することで、複雑な環境でも経路の探索が可能になる。

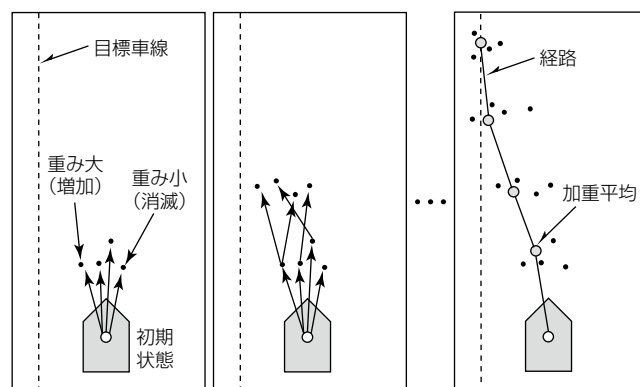


図1. パーティクルフィルタによる経路生成の流れ

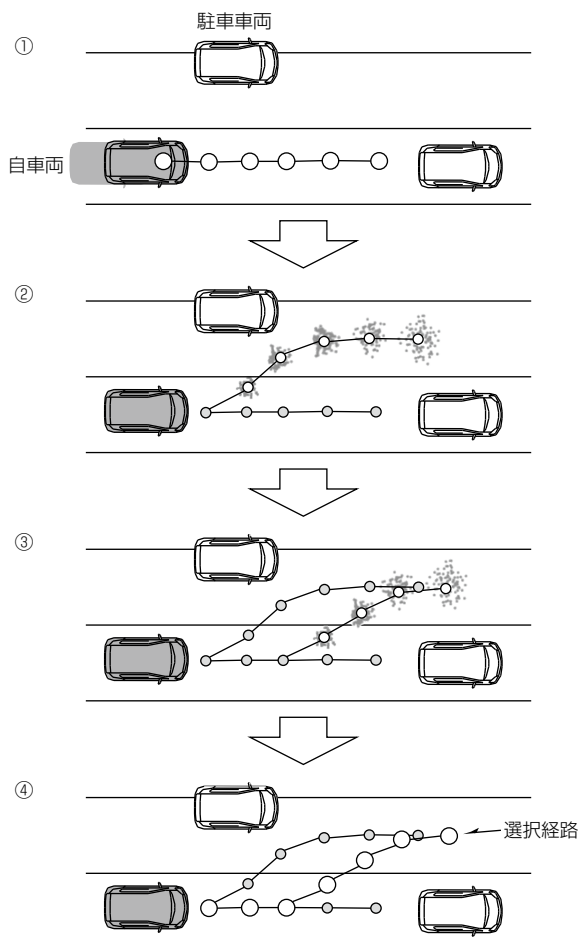


図2. パーティクルフィルタ-サンプリングベース経路生成の流れ

3. 車両統合制御技術

3.1 自動運転のための車両制御技術

近年、計算機の能力向上もあり、非線形モデル予測制御 (Nonlinear Model Predictive Control : NMPC) を用いた制御手法が注目されている。図3に非線形モデル予測制御を示す。NMPCはサンプリング周期ごとに将来の一定期間の最適化問題を解き、得られた解の初期値を制御入力として適用する制御手法であり、計算負荷が高いという課題があるものの、多変数制御問題を扱えることや制約を陽に考慮できること、非線形モデルを扱えるという利点がある。そこで当社では、生成した経路に高精度に追従し、かつ乗り心地よい車両挙動を実現することを目的とし、NMPCを用いて車両の縦方向と横方向の運動を統合して制御するコントローラの開発を行っている⁽¹⁰⁾。NMPCを用いることで、経路追従性だけでなく、加速度やジャークといった乗り心地やその上限値を考慮して制御できる。

3.2 非線形モデル予測制御の定式化

NMPCでは、車両の現在の状態 x_0 から将来の一定期間までの車両の状態を予測する運動モデル、生成された経路に乗り心地よく追従するように設計された評価関数、状態量や制御入力の上下限を設定する制約を設定する必要がある。

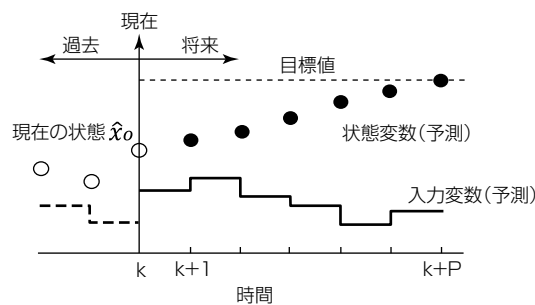


図3. 非線形モデル予測制御

本稿では、車両運動モデルは一般的に用いられる二輪モデル⁽¹¹⁾と非線形タイヤモデルであるPacejka formula⁽¹²⁾を組み合わせて用いた。モデルの状態変数は自車の縦・横位置、方位角、縦・横速度、ヨーレート、舵(だ)角、前・後輪横滑り角、前・後車輪速であり、入力変数は、舵角速度と前・後輪制駆動トルクにした。評価関数は、目標経路と自車位置の偏差及び目標速度と自車速度の偏差で追従性を考慮し、縦加速度、縦ジャーク、ヨーレート、舵角速度で乗り心地を考慮する設計にした。制約は、レーン幅に相当する位置偏差と舵角、舵角速度、前・後制駆動トルクに設定した。

これらによって設計したNMPCコントローラを逐次二次計画法によって求解し、その最適解を車両のハンドル角度と速度に適用して車両制御を行う。

4. 実車検証

4.1 システム構成

今回開発した技術を適用する自動運転システムの構成を図4に示す。この自動運転システムは衛星測位システムを搭載し、高精度地図を持っている。高精度地図はレーン中央の緯度、経度の点群情報を持っている。また、障害物の位置と速度を計測するセンサを搭載している。これらセンサと地図情報を用いて、2章で述べた方法によって目標経路及び速度を生成し、それに追従するために3章で述べたNMPCコントローラによって、車両の目標ハンドル角、目標制駆動トルクを演算する。演算された目標値に追従するように車両制御コントローラでPID(Proportional Integral Differential)等の制御を行い、最終的に地図に沿って走行するように車両のハンドル角と速度を制御する。

4.2 実車試験結果

直線路で障害物を回避して走行する実車試験を行い、この自動運転システムの有効性を検証した。道路は2車線で、目標車速80km/hで走行中に静止した障害物の回避走行を行う。実車試験によって得られた車両の移動軌跡を図5に、その際の車両の横位置偏差、ハンドル角と車速を図6に示す。図6から、滑らかにハンドルを操舵し、経路に追従していることが分かる。また、車速も目標車速80km/hに追従するように動作している。この自動運転システムによ

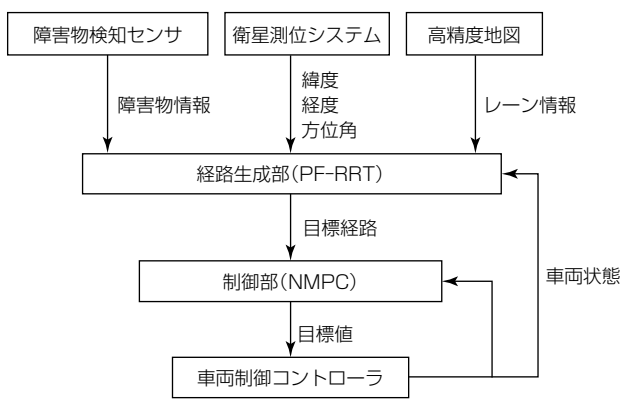


図4. 自動運転システムの構成

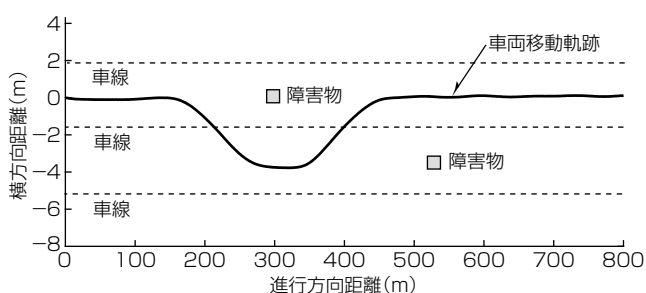


図5. 障害物回避時の車両移動軌跡

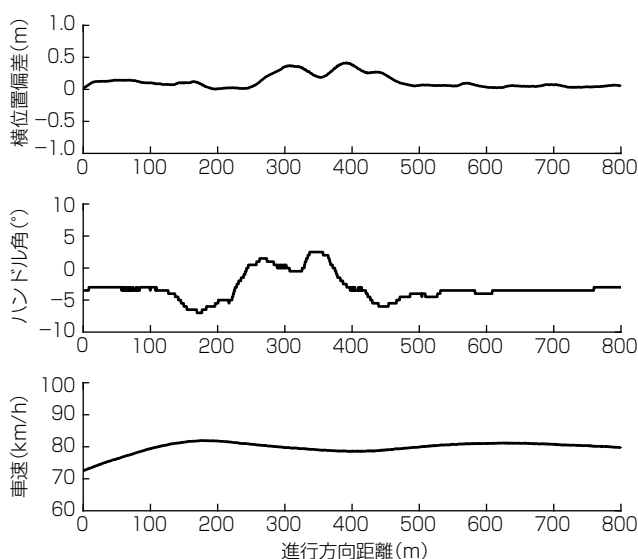


図6. 障害物回避時の車両状態

て、ハンドルと車速を制御し、障害物に応じて車線変更を実施しながら走行できることを確認した。

5. む す び

自動運転に必要な技術として、経路生成技術及び車両統合制御技術について述べた。経路生成に関しては、自車両周辺の複雑な環境を考慮し、かつ滑らかな車両挙動を実現するための経路生成技術を開発した。車両制御に関しては、車両の運動能力を最大限に発揮させるために車両の縦方向と横方向の運動を統合的に制御し、また様々な制約条件の

下で快適な車両運動を実現するモデル予測制御を開発した。これらの技術を実車試験で検証したところ、周辺環境に応じた適切な経路が生成でき、安全な車両制御が実現できる結果を得た。

これらの技術を普及させるためには、より複雑なシーンへの対応に加えて、ロバスト性の向上、演算コスト低減などが重要になると考えている。当社はこれらの課題解決にも取り組んでおり、実用的な自動運転技術の確立を目指している。

参 考 文 献

- (1) Maurer, M., et al.: Autonomous driving, Springer Berlin Heidelberg (2016)
- (2) 須田義大, ほか: 自動運転技術の開発動向と技術課題, 情報管理, **57**, No.11, 809~817 (2015)
- (3) 菅沼直樹: 市街地における自動運転のための外界環境認識, 計測と制御, **54**, No.11, 816~819 (2015)
- (4) Takeuchi, Y., et al.: Development of Autonomous Driving System Using GNSS and High Definition Map, SAE World Congress Experience, 2018-01-0036 (2018)
- (5) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, Numerische mathematik, **1**, No.1, 269~271 (1959)
- (6) Hart, P. E., et al.: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics, **4**, No.2, 100~107 (1968)
- (7) LaValle, S. M.: Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning (1998)
- (8) Berntorp, K., et al.: Particle filtering for online motion planning with task specifications, American Control Conference, 2123~2128 (2016)
- (9) 篠本 凜, ほか: 自動運転のためのパーティクルフィルタを用いた経路生成, 自動車技術会 2018年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, No.163-18 (2018)
- (10) 鷗生知輝, ほか: RTK-GPSを用いた自動運転システムにおける非線形モデル予測制御による車両統合制御, 自動車技術会 2018年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, No.163-275 (2018)
- (11) Berntorp, K., et al.: Models and methodology for optimal trajectory generation in safety-critical road-vehicle manoeuvres, Vehicle System Dynamics, **52**, 1304~1332 (2014)
- (12) Pacejka, H.: Tire and Vehicle Dynamics, Third Edition, Butterworth-Heinemann (2012)