

自動運転向け高精度車両制御技術

栗重正彦* 沖本行弘†
家澤雅宏** 北野弘明††
田中英之***

High-Fidelity Autonomous Vehicle Control Technologies

Masahiko Kurishige, Masahiro Iezawa, Hideyuki Tanaka, Yukihiro Okimoto, Hiroaki Kitano

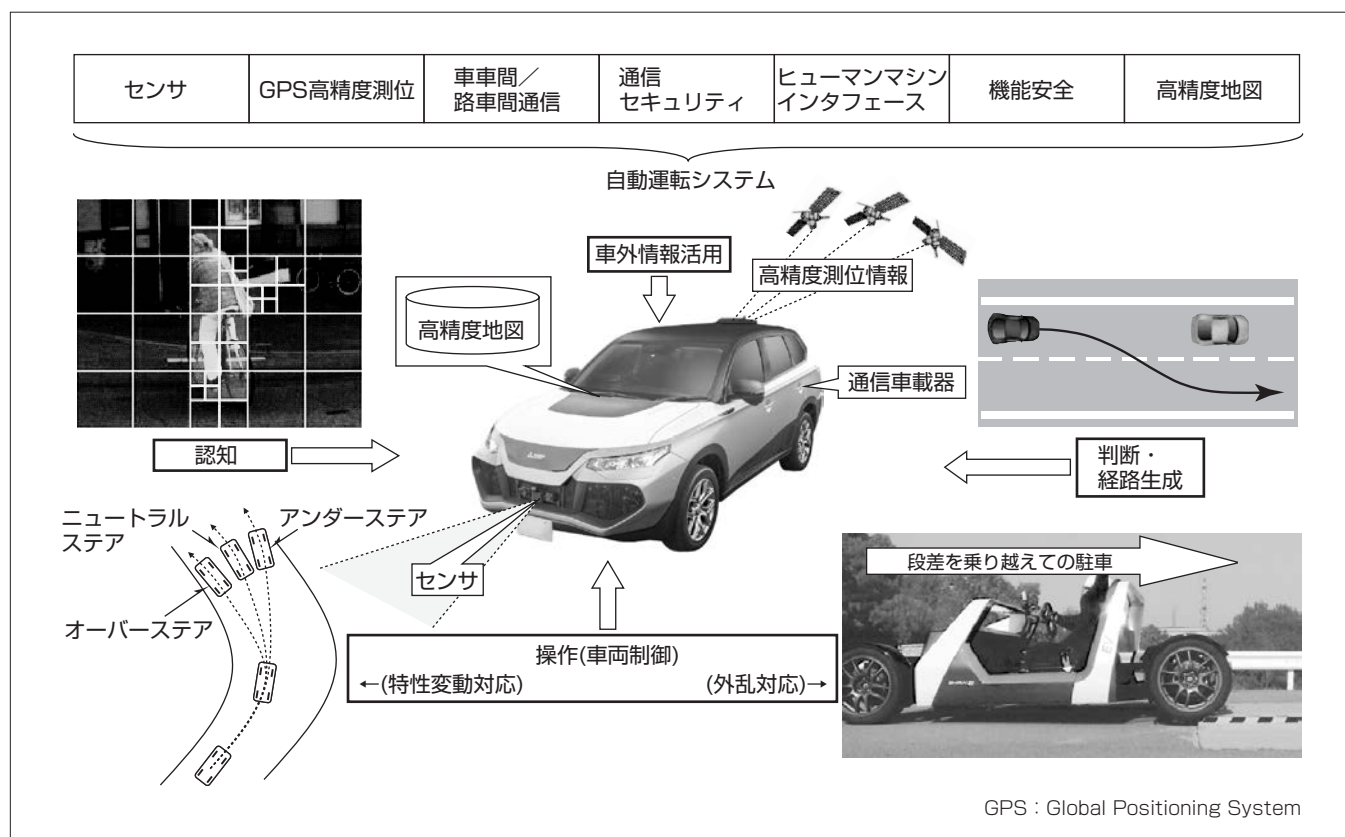
要 旨

自動運転は、加速・制動・操舵(そうだ)のどれかの操作をドライバーに代わって車両システムが行うものであり、自動化の度合いに応じてレベル1から4までの段階に分類されている⁽¹⁾。レベル3以上では、これら3操作全てを車両システムで対応するものと定義付けられている。

ドライバーの運転行動は認知・判断・操作の3ステップで構成されることが知られており⁽²⁾、自動運転ではその全てをシステムで実現することが求められる。具体的には、車載センサや車外との通信などから得られた信号を基に車両の周辺状況を認識し、認識結果を判断して適切な目標走行経路を生成し、これに追従するよう加速、制動及び操舵の制御を行うものである。

自動運転は高い信頼性が不可欠であるため、広い領域の技術の結集が必要となる。また、これらの技術を性能面で向上させるだけでなく、高速走行から駐車にいたる全車速域で様々な走行環境に対応させる必要がある。三菱電機では、電動パワーステアリングなどの量産を通じて蓄積してきた様々な走行環境に対応させる技術も有効に活用して、自動運転の早期実用化を目指して開発を進めている。

認知・判断・操作のステップのうち、走行環境の影響が車両走行軌跡や快適性に直接現れる操作のステップ、すなわち車両制御に関しては、走行環境の例として、積載などで発生する走行時の車両の旋回特性の変化と駐車時の段差など外乱に対応した高精度車両制御技術を開発した。



自動運転を実現する技術

自動運転の実現には、ドライバーの運転行動である認知・判断・操作の基本3ステップに直接関わる技術と、センサや機能安全等の幅広い関連技術が不可欠である。さらに、自動車は広い走行環境で使用されるため、これらの技術を性能面で向上させるだけでなく様々な走行環境に対応させる必要がある。例えば、操作で車両特性変動や外乱などへ対応していくことでユーザーメリットが向上して早期の普及を助ける。

1. ま え が き

車両システム側で加速・制動・操舵の全ての操作の対応が求められるレベル3以上の自動運転は、従来の車載制御システムと同様に、極めて広い走行環境で使われる。そのため、実用化するには各々の技術を、視界良好で無風かつ道路が平坦(へいたん)といった理想的な走行条件での性能向上にとどまらず様々な走行環境に対応させる必要がある。すなわち、人間の運転行動である認知・判断・操作の各ステップに対応した個々の技術の高度化に加えて、対応できる走行環境を拡大させる技術開発の両面が重要となる。

本稿では、走行環境の影響を直接受ける場面が特に多い操作のステップ、すなわち車両制御に焦点を当てて2つの例を述べる。1つ目は、車両の旋回特性に対するロバスト性向上に関するもので、具体例として、積載量に伴う車両挙動の変化を走行時に推定する手法を述べる。2つ目は、段差などの走行外乱に対するロバスト性向上に関するもので、具体例として、駐車時に障害物を乗り越える車速制御を述べる。

2. 操舵に対する車両旋回特性の推定

2.1 自動運転での旋回特性変動の影響

自動運転の操舵では、まずレーンチェンジ等での目標走行経路が定められ、その経路に追従するようにフィードフォワード及びフィードバック制御が行われる⁽³⁾。車両の旋回特性モデルに基づいて制御が行われるため、車両旋回特性が変動すると理想の走行経路からずれが生じて乗り心地の低下につながる場合も想定される。車両旋回特性モデルの変動を定量化できれば、制御ゲインを調整するなどの手法で変動の影響を抑制できる。したがって、車両の旋回特性変動に対応した高精度車両制御を実現する上でのキー技術は、車両旋回特性モデルの変動を走行中に定量化する技術であると言える。

2.2 車両旋回特性の変動及びその指標

車両制御に適用される旋回特性モデルとして、ハンドル角 θ_s (タイヤ角換算)に対するヨーレート(旋回速度) γ の応答を定める二輪モデル

$$\gamma = \left(\frac{1}{1 + A v_x^2} \right) \frac{v_x}{l} G_d \cdot \theta_s \dots\dots\dots (1)$$

が広く知られており、本稿でもこれをベースに議論を進める。式(1)の l はホイールベース、 v_x は車速である。右辺の括弧内は定常値、 G_d は定常値に達するまでの過渡応答特性を示す。 A はスタビリティファクタと呼ばれるパラメータであり、負の場合はオーバーステア特性となつて、同一ハンドル角の場合に車速が高速になるほど旋回半径が小さくなる。正の場合はアンダーステア特性となり、高速になるほど旋回半径が大きくなる。運転のしやすさから、一般

に正の値となるよう車両は設計されている⁽⁴⁾。

制御モデルのスタビリティファクタの値と実際の車両挙動の値が異なった場合、式(1)のとおり車速が高速なほど目標走行経路への追従精度が低下しやすくなる。

2.3 車両旋回特性の変動要因とその影響

車両旋回特性を決定する主要パラメータであるスタビリティファクタの変動要因は様々あるが、影響の大きなものとして、重心位置(図1のC.G.)の前後方向への移動が発生して、ホイールベース l の重心から前輪までの長さ l_f と後輪までの長さ l_r が変化することがある。

トランク部分等の車両の端に重量物を積載すると重心位置の前後方向への移動と、これに伴うスタビリティファクタの変動が大きくなる傾向があり、例えば質量1,000kgの車両の後輪軸上に200kgの積載を行うとスタビリティファクタが20%以上オーバーステア側に変化する。このようなスタビリティファクタの変化は、旋回半径を変化させるだけでなく操舵に対する車両の位相遅れにも影響を与えるので、図2に示すように障害物回避等の急なハンドル操作に対する安定性に影響を及ぼすが、この位相遅れを補償することで容易に安定性を回復できる⁽⁵⁾。

2.4 車両旋回特性の推定手法及び評価

スタビリティファクタの推定手法について述べる。式(1)

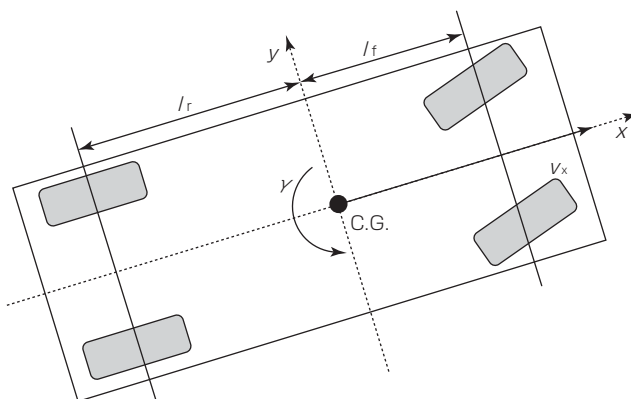


図1. 車両重心と前後輪からの距離

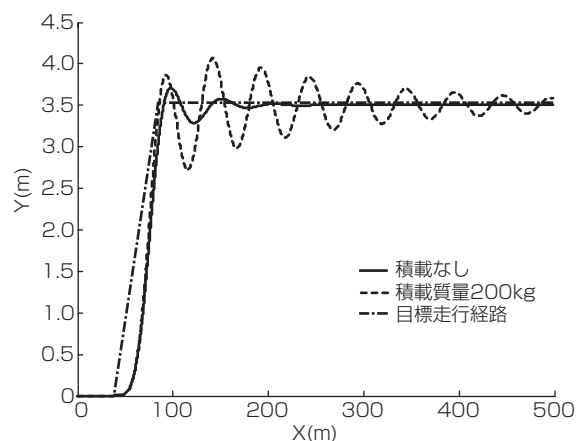


図2. 積載質量による障害物回避操舵時の応答の変化

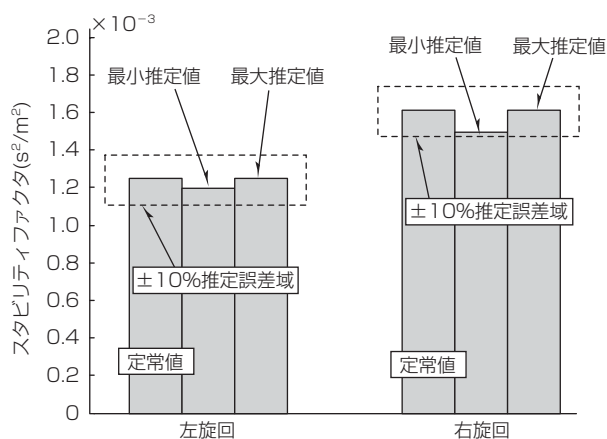


図3. スタビリティファクタの推定誤差

の G_d が1, すなわち一定の半径の道路を旋回している定常状態では, ハンドル角などのセンサ信号やホイールベースなどの既知の定数から,

$$A = \frac{\frac{v_x \cdot \theta_s}{l \cdot \gamma} - 1}{v_x^2} \dots\dots\dots (2)$$

に基づいてスタビリティファクタを容易に推定することができる。しかし, 実際の走行ではこのような走行条件は少ないので, レーンチェンジなど頻度の高いハンドル操作で定常状態に近いとみなして, 式(2)でスタビリティファクタ推定を行っても十分な推定精度が得られる条件を明らかにして⁽⁵⁾実車で有効性を検証した。

なお, 実験車両では左右の旋回でスタビリティファクタが異なったため, 各々についてこの推定手法を評価した。図3は0.2Hzでレーンチェンジを行った際の推定結果であり, 左右両方ともスタビリティファクタの推定誤差が10%以内に抑制されることを確認した。

3. 自動駐車における外乱ロバスト制御

3.1 自動駐車におけるロバスト性の課題

自動運転での駐車動作は, 駐車可能スペースを認識・判断して適切な駐車経路を設定し, それに沿うようにハンドル及び加速・制動を制御するものである。ところが, 駐車場には坂道での縦列駐車や駐車スペースと車道の間に段差がある場合もあり, より広い条件に対応できるようにロバスト性を向上させることが自動運転システムの商品性向上に重要である。

ロバスト性向上制御として, 当社が開発した自動駐車における前後方向制御について述べる⁽⁶⁾。

図4は, 外乱の影響を示すために, 実験用の電気自動車を用いてドライバーが段差を乗り越えて適正な位置に駐車させようとした実験結果である。図4(b)にドライバーの加速・制動操作のみで停止しようとした場合, 図4(c)にロバスト性を向上させる制御を行った場合の結果を示す。ドライバーによる操作では, 段差を乗り越える際に強い加速操作を行うため, 目標停止位置を超えやすくなる。



(a) 自動駐車制御の実験



(b) 制御なしでの停止位置



(c) 制御ありでの停止位置

図4. 駐車時の段差による停止位置の変動

3.2 自動駐車におけるロバスト性向上制御

先に述べたとおり, 外乱は目標走行経路への追従性に影響が大きく, 自動運転でも外乱ロバスト化を考慮した制御を開発しなければ, 目標位置への到達時間の遅れを招くなど快適性が低下する場合がある。

このような課題に対応するため, 図5に示す目標車速を設定して, それに追従させるPI(Proportional-Integral)制御を開発した。

このPI制御の開発に当たって鍵となるのが, パワートレイン系のモデルである。PIゲインの増大で目標車速への追従性は向上できるが, 制御系の発振を招いてしまう場合があるため追従性向上と発振抑制の両立が必要となるからである。

そこで, 図6のようにコンプライアンスを持つパワートレインの両端に車両と電気自動車のモータの2つの慣性体が接続されるモデルを構築して, これに基づいて周波数特性が適切になるようにPIゲインの設定を行った。

3.3 自動駐車におけるロバスト性向上制御の評価

目標車速に追従させるPI制御の有効性を示すために, 実

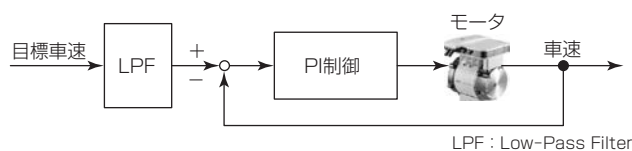


図 5. 駐車時車速制御方式

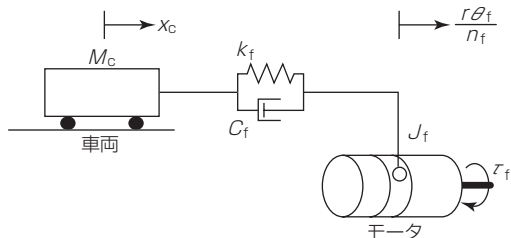


図 6. パワートレイン系の剛性を考慮したモデル

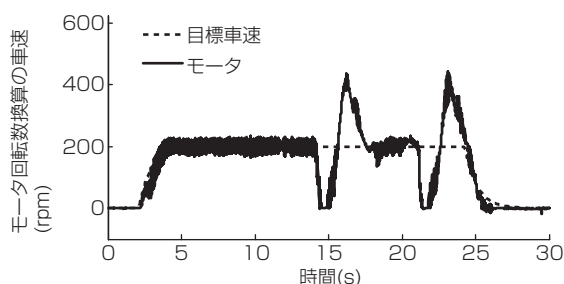


図 7. 物体乗り越え時の車速応答

車試験を実施した。外乱として、直径10cmの筒状の物体を前後輪が各々乗り越えて、その直後に停止させる設定にした。

前後輪が各々物体を乗り越える際に車速変動が生じるが、乗り越え後、速やかに目標車速に追従して停止できている(図7)。追従性は更に向上させることもできるが、実際には乗り心地等、乗員への快適性も考慮した調整が望ましい。

4. む す び

自動運転では、システムが対応できずにドライバーに運転権限を移譲する頻度を減らしていく必要があり、天候や車両特性の変化等、より広い走行環境に対応させていく必要がある。入力側である車載センサや、それに基づく周辺状況の認識改善は、レベル1の段階で既に試行錯誤がなされている⁽⁷⁾。

本稿では、走行環境の影響が車両走行経路や快適性に直接現れる出力側である操作のステップに焦点を当てて、当社の研究開発の一端について述べた。

また、車両制御の対象としては滑りやすい路面⁽⁸⁾や横風・路面勾配⁽⁹⁾などもあり、システムの適用可能範囲の更なる拡大、さらには、一部の部品の故障が発生しても安全を損なわないなど信頼性の強化も重要である。

さらに、当社は車両制御以外でも、経路判断の最適化技術⁽¹⁰⁾、準天頂衛星⁽¹¹⁾、路車間通信・車車間通信のセキュリティ⁽¹²⁾、道路インフラ維持管理関連の技術⁽¹³⁾等様々な分野の技術開発も遂行しており、将来の本格的な自動運転システムの実現に向けて、継続的に技術を進化させていく。

参 考 文 献

- (1) 内閣府政策統括官：SIP「自動走行システム」研究開発計画 (2015)
- (2) 大須賀美恵子：人間の特性を考慮した運転支援システムに向けて、IATSS Review, **28**, 増刊号, 49～54 (2003)
- (3) Yakub, F., et al.: Automomous ground vehicle of path following control through model predictive Control with feed forward controller Proc. of AVEC14, 603～610 (2014)
- (4) 安部正人：自動車の運動と制御, 東京電機大学出版局, 3.3節 (2008)
- (5) Kitano, H., et al.: An Online Estimation Method of Stability Factor of a Vehicle for Steering, SAE paper 2009-01-0045 (2009)
- (6) Yokoyama, K., et al.: Speed Control of Parking Assist System for Electrified Vehicle, SAE paper 2015-01-0316 (2015)
- (7) 小川計介：トヨタの安全戦略, 2015年にレーザーを復活させミリ波と共存へ, 日経テクノロジーonline, (2014)
- (8) Nakajima, K., et al.: A Vehicle State Detection Method Based on Estimated Aligning Torque Using EPS, SAE Paper 2005-01-1265 (2005)
- (9) 栗重正彦, ほか：車両の横外乱推定及びEPS直進性向上制御への適用, 自動運転, 先進運転支援システムの最新動向とセンシング技術 5 章第 1 節, 技術情報協会, 277～282 (2015)
- (10) ジェセフ カッツ, ほか：スマート社会を支える先進最適化技術, 三菱電機技報, **89**, No.7, 415～418 (2015)
- (11) 瀧口純一, ほか：準天頂衛星システムによる都市部での衛星測位の可用性の拡大, 三菱電機技報, **89**, No.3, 162～165 (2015)
- (12) 小林信博, ほか：テレマティクス対応セキュリティ技術, 三菱電機技報, **87**, No.8, 471～475 (2013)
- (13) 木村友則, ほか：車社会の安全を支える超音波センシング技術, 三菱電機技報, **87**, No.6, 329～332 (2013)