

特集 1：未来を拓く ProPILOT 2.0

1. 安心して任せられるパートナーへ

江川 健一* 東又 章** 大西 孝一***

1. プロパイロット 2.0 は いかにして生まれたのか

プロパイロット 2.0 (以下 PP2.0) を世に問うた結果、多くのジャーナリストから単に便利で安全快適なだけでなく、「相棒」「パートナー」といったこれまでにない人とクルマの関係性を表現して頂いた。心理学の研究者と「何故そう感じるのか」を改めて考えてみた結果、以下 3 つのキーワードが浮かび上がってきた。

1. Vigilance からの解放 注意リソースの最適配分
2. 操作主体感 他者理解
3. 運転のうまさ

これらのキーワードは、PP2.0 の開発で掲げた以下の開発目標が良く達成できていることを示している。

- 制限速度内で全ての高速道路をシステムのみで「安全」「安心」「利便」「快適」に走行可能な能力を持つ
- ドライバー & 同乗者が「意のままに」「ゆとりある」運転が体験できるような車両の動きを実現する
- 自車内からの感覚だけでなく、前後周辺の車両から見たときに自然な車の動きであること

「自動運転」という機能、これが持つイメージは“ドア・トゥ・ドア”と考える。自宅を目的地と告げると自動で連れて行ってくれるという機能が最終的に目指すところである。これを最新の技術で実現したものが PP2.0 である。

PP2.0 が実現したのは「ポイント・トゥ・ポイント」(以下 P2P)。目的地を入力すればナビゲーションが設定するルートガイドにしたがって、高速道路に乗ってから降りるまでのドライバーの運転操作を幅広く支援する機能である。レーンを維持する、車線変更を行う、周囲の車両の流れに応じて車間や車速を制御する、これら個々の技術レベルを上げると共に、分岐や出口を考慮し、レーンレベルの走行を計画によるナビ連動ルート走行が可能となる技術開発を行ってきた。

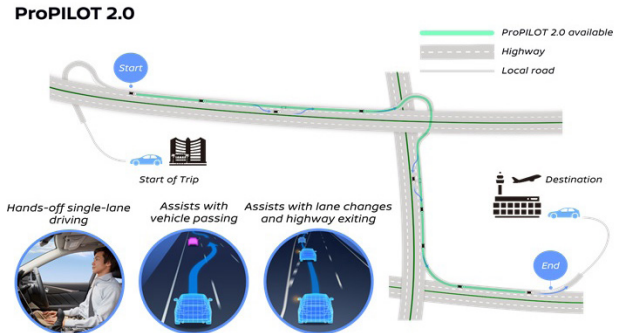


図 1. プロパイロット 2.0 (ポイント・トゥ・ポイント)

まず、P2P を実現させるためのキー技術が 3D 高精度地図 (以下 3D HD マップ) である。従来の地図に比べ、車線数や勾配・カントといった路面情報が多く含まれており、これらの情報を運転システムに適用することで機能を実現した。

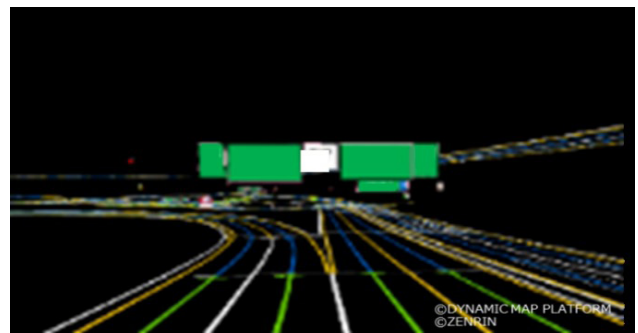


図 2. 3D 高精度地図 (3D HD マップ)

次に、PP2.0 を特徴づける要素として「安心」「快適」のキーワードが上げられる。「安心」は、滑らかな車両の制御に代表されるように日産自動車が長年蓄積してきたダイナミックパフォーマンス技術 (以下 DP)、すなわち、誰でも、いつでも、どんな道路環境でも意のままに運転を発揮できる技術が支えている。

また、システムが今どのような状態であるかをトランスペアレントにドライバーへ伝えることも重要である。周囲をどのように認識しているか、どのように判断したか、HMI を通して

* カスタマーパフォーマンス&実験技術革新部 ** ソフトウェア開発部 *** カスタマーパフォーマンス&第一車両実験部

システムがしっかり見ているということを理解してもらうことが「安心」に大きく寄与する。

そこで新たにインタラクティブな HMI を開発した。



図 3. インテリジェント・インターフェース

そして、もう一つのキーワードである「快適」は、前段で記述した「安心」の上に成り立っている。DP と人間研究、これらの研究の蓄積から「ゆとり」を感じる車両の動きを作り上げた。さらに、ドライバーを運転操作から解放するハンズオフ機能(以下 H/O) と P2P を組み合わせることで「快適性」を向上、そして「疲れない」というシステムを実現した。

2. プロパイロット 2.0 は何を目標に作ったか

PP2.0 の開発では、“技術の押し売り”ではなく、“お客様が使える価値を追及すること”を開発コンセプトに、「高速道路を安全・安心・利便・快適に走行できるという新たな価値を提供すること」としている。

「DP/人間研究」という基盤技術と、「車両制御・HMI・安全設計」の3つのキー技術の下、PP2.0 の特徴的な機能である「P2P」と「H/O」により目標性能の「安心」「快適」を実現、システム目標の「新たな価値(バリュー)」を生み出す。この価値を測る指標に「疲れない(疲労度)」を設定、システム作り上げた。(図4)

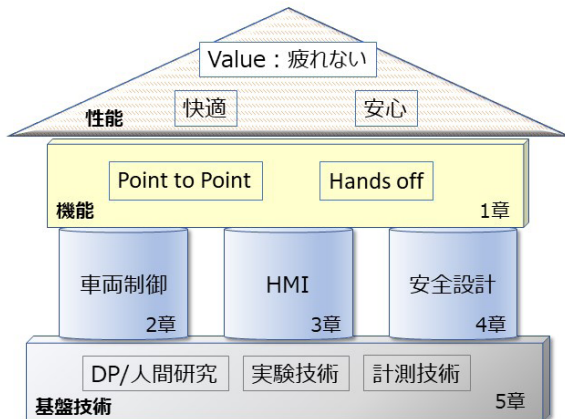


図 4. システム目標と機能のヒエラルキー

では、“疲れない”とはどのような状態か?肉体的疲労と神経的疲労に分け、機能との関係を整理した。

- 肉体的な疲労の軽減：ハンズオフできる、自動で車線変更できるという運転操作からの解放
- 神経的な疲労の軽減：滑らかな動き(車両制御)、周囲状況の適切なタイミングでの情報提供(HMI)

“ハンズオフできる、車線変更できる”、これらが可能となっても車の動きがごちない、あるいは周辺車両の邪魔をする、ひゃつとするようであると却って疲労する。すなわち、神経的疲労の軽減が達成できてこそ肉体的疲労の軽減が達成される。これらが解決できて初めて「疲れない」＝「安心、快適」という価値が提供できる。

3. 「疲れない」の心理学的な理解

このようにして作り上げた PP2.0 は日産のテストドライバーやジャーナリストから高く評価されたが、冒頭で述べた通り、職業として自動車に接していない人々にはどのような印象を与えるのかを知りたいと考え、2019年11月と2020年10月の2回にわたって、京都大学大学院 情報学研究科 知能情報学専攻 教授の熊田孝恒先生に、京都市郊外の高速度道路で PP2.0 を試乗していただき、ご専門の心理情報学の視点からコメントをいただいた。その結果、

- 短時間の試乗ながら、確かにストレスが少なく疲れにくい。
 - ・遅いクルマに追従してもあまり気にならない。
 - ・そもそも遅い感じがしない。
- 人と車の新しい関係への期待を感じる。

とのご意見をいただいた。

以下、いただいたご意見、仮説を整理して記す。

Vigilance 状態

PP2.0 が搭載されていない車において、周囲の車の挙動に応じた減速操作は疲れる。先行研究^{*1)}では、この理由は、衝突などの頻繁には起こらないがいつ起こるかわからない確率が低い事象に対して持続的に予期的構えを維持している「Vigilance 状態」が挙げられている。Vigilance は、「外部環境においてランダムな時間間隔で生起するある特定の小さな変化を発見し、いつでもこれに対応し得るような状態」^{*2)}と1956年の英国でのシンポジウムで定義されており、Mackworth のレーダー監視に関する研究などが有名である。PP2.0 を試乗した印象からは、PP2.0 が作動する前の絶え間ない注意リソース投入から部分的に解放され、作動後は適切な周囲監視状態になることから疲れを感じにくくなるのではないかと推測できる。

操作主体感と他者理解

また、一般に操作主体感が失われるとストレスの原因になりえるといわれるが、PP2.0においては、操作主体感と役割委託が良いバランスで両立されている。操作主体性とは、自分が車を操縦しているという意識のことである。すなわち、目的地へ安全に到達するというドライバーの目的を車が共有したうえで、目的達成の役割の一部をドライバーから車に委託している。委託している間も、車が何を認知してどのように制御しようとしているか HMI を通じてドライバーとコミュニケーションしている。さらに、制御の許可を車がドライバーに求めるなど、あくまでも人間が操作主であるが、車は目的達成に向けて共に努力するパートナーという位置づけになっている。特徴的なのは、車に委託する際のステアリングから手を放すという行動で、これによって役割の切り替えを明確に、且つドライバーが主体的に行っていることを、ドライバー自身が認識することができている。

この新しい人間と車の関係は、人と車が同じものを認識している段階から車が行おうとしている制御を、コミュニケーションを通じて共有する段階（意図や目標の共有）へ発展することで安心感が生まれるとも解釈でき、心理学で扱われる「他者の理解」*3)と同様のメカニズムで説明できるのかもしれない。

運転のうまさ

更に、目的地へ安全に到達するという目的達成の役割を車に委託したあと、車は単に安全だけではなく、快適な動きを提供してくれる。追い越しの横方向の動きや加速のタイミングなど、車の動きがドライバーの予想の範囲で、余計な緊張を強いられることがほとんどない。車線内の追従走行でも車線の中央をどこまでも安定して走っていく感じがして、快適な感覚を作り出している。このような安定性が、ドライバーの車に対する信頼感を生み出しており、これも疲労感低減の1つの要因と考えられる。

これらの要因から、仮説ではあるが適度な車への信頼が生じ、安心して快適な走行感覚から、ストレスが少なく疲れにくくなっているのではないかと考える。しかし、短時間（今回は10分程度）の試乗で、なぜ信頼感ができるのかわからない。PP2.0が市販車に搭載されて、一般公道を実際に運転して初めてわかる人間の心の動きがある。心理学研究テーマとしても興味深い。



図5. 京都大学 熊田教授と試乗いただいたスカイライン（同型）

以上のように、心理学研究者の視点から見ても、開発の狙いが実現できていることが示唆できた。今後も「人間と車の新しい関係」について、研究を続けていきたい。

4. まとめ

PP2.0は、現在の技術レベルで安全に実現可能な“ドアクルーズ・ドア”“ハンズオフ”機能をともに備えた技術である。これは、これまで世界に先駆けて実現してきた多くの車両制御技術、HMI技術、安全設計技術を多面的に組み合わせることでつくりあげられた。さらに、ダイナミックパフォーマンスの研究や人間研究、実験技術、計測技術など豊富な基盤技術があつてこそ成立したものであり、決して一朝一夕でできるものではない。ビジョンを持ち一貫して技術を開発し続けているからこそ成し遂げることができると自負している。

その結果、安心して快適な性能を持ち、疲れにくいという新しい価値を生み出すことができた。心理学の視点で見ても、これまでにない人と車の関係が示唆され、今後の研究が待たれる。

本稿では、このPP2.0の実現に要した技術について詳述する。

5. 参考文献

- 1) 熊田孝恒他，長時間運転での疲労蓄積への影響要因の分析とドライバーの疲労蓄積タイプの分類，自動車技術会論文集 Vol.44 No.6 p.1451, 2013
- 2) 西岡昭，Vigilance Taskに関する心理学的諸研究，心理学研究 第33巻 第3号 p.31, 1962
- 3) N. J. Emery, The Eyes Have It: The Neuroethology, Function and Evolution of Social Gaze, Neuroscience & Bio Behavioral Reviews 24(6) p.581, 2000

著者



江川 健一



東又 章



大西 孝一

特集1：未来を拓く ProPILOT 2.0

2. 新しい機能

谷口 洋平* 厚村 大悟* 徳永 誠士* 出川 勝彦*

1. はじめに

プロパイロット 2.0 (以下、PP2.0) は、第一世代のプロパイロットを大きく進化させ、高速道路の複数車線をナビゲーションシステムと連動して設定したルートを行く (以下、ナビ連動ルート走行) し、かつドライバーが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じて直ちにハンドルを確実に操作できる状態にある限りにおいて同一車線内でハンズオフが可能となる世界初の運転支援システムを実現した。本章では、その PP2.0 の新機能について説明する。

2. プロパイロット 2.0 の新機能

2.1 プロパイロット 2.0 の概要

PP2.0 では、ポイント・トゥ・ポイント機能として、ナビゲーションシステムで目的地を設定し、高速道路の本線に合流するとナビ連動ルート走行を開始することができる。ナビ連動ルート走行を開始すると追い越しや分岐なども含めてシステムがルート上にある高速道路の出口までの走行を支援し、ドライバーが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じ直ちにハンドルを確実に操作できる状態にある限りにおいて同一車線内でハンズオフが可能となり、ドライバーの運転操作を幅広く支援する。また、ナビゲーションと周囲 360 度のセンシング情報に基づいて、ナビ連動ルート走行中の分岐や追い越しのための車線変更の適切な開始タイミングをシステムが判断し、ドライバーに提案する。ドライバーがハンドルに手を添え、スイッチ操作で提案を承認することで、車線変更支援を開始する。図 1 に PP2.0 の作動イメージを示す。

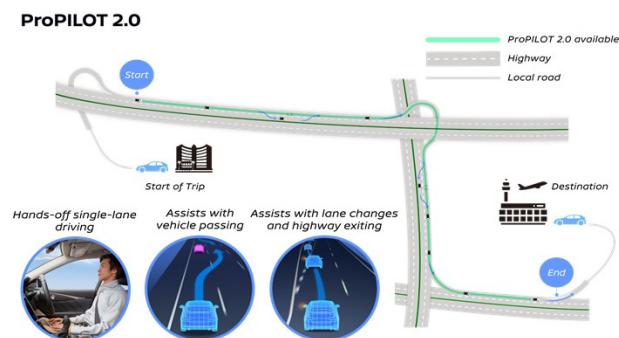


図 1 プロパイロット 2.0

PP2.0 は、車両に搭載した 7 個のカメラ、5 個のレーダー、12 個のソナーと、GNSS、3D 高精度地図 (以下 HD マップ) データを組み合わせることで車両の前方だけでなく、左右や後方など周囲 360 度の情報と、道路上の正確な位置を把握する。3D HD マップデータには、道路構造が把握できる情報と車線の数、合流・分岐・交差の位置の情報が含まれ、これらの情報を使うことでこれから走る道路を予見した制御を行い、熟練したドライバーが運転しているような滑らかな走行を実現した。また、ドライバーモニターカメラを装備しており、ドライバーが前方を注視しているかを常に監視する。

PP2.0 のセンサー搭載図、360 度センシングのイメージ図、および 3D HD マップの一例をそれぞれ、図 2、図 3、および図 4 に示す。

* AD/ADAS 先行技術開発部

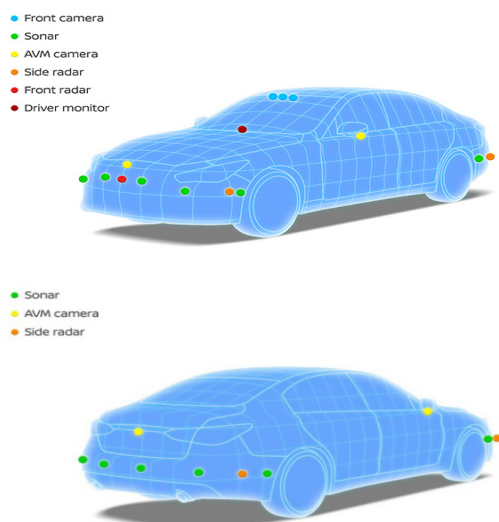


図2 プロパイロット2.0のセンサー搭載図

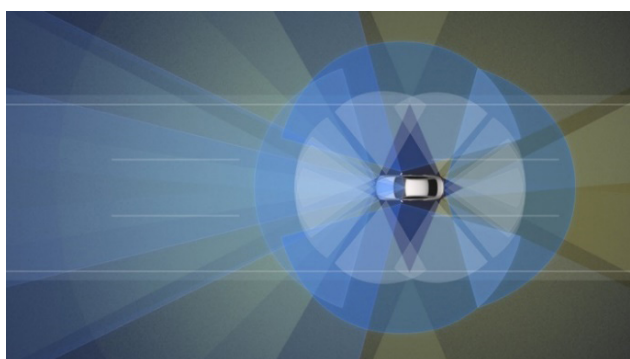


図3 360°周囲センシング

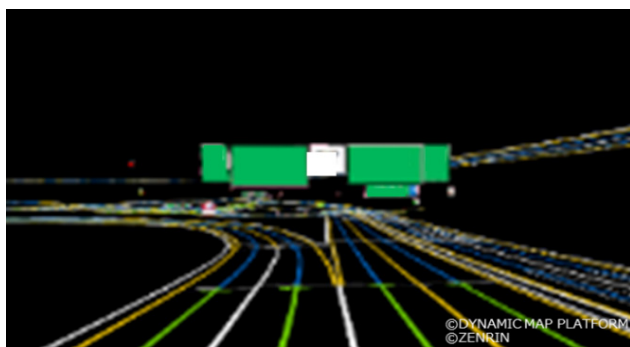


図4 3D高精度地図(3D HD マップ)

2.2 車速・車間制御機能

ドライバーが設定した車速を維持するように速度制御を行う。先行車を検出すると、ドライバーが設定した車速を上限に車速に応じた車間距離を保つように車間制御を行う。先行車が停止した場合は、先行車に続いて自車も停止する。停止後、約30秒間までは先行車に対して停止・追従走行を行うことができる。

前方にカーブがあるときは、カーブの大きさに応じて車速を調整する減速制御を行う。

また、標識検知機能により速度標識を検出した場合、検出した速度を設定車速にすることが可能である。

2.3 車線維持機能

車線中央付近を走行するようにステアリングを制御し、ドライバーのハンドル操作を支援する。ドライバーが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じ直ちにハンドルを確実に操作できる状態にある限りにおいて、ハンドルから手を離すことが可能となる。

2.4 ルート走行支援機能

ドライバーがナビゲーションシステムで目的地を設定している場合、出口・分岐路または車線数が減少する地点などルートに従って走行するために必要な車線変更地点に到達すると、ドライバーに車線変更を提案する。ドライバーがハンドルに手を添え、ステアリングホイール上に設置された車線変更支援スイッチを押すと、目的の車線の方向へ方向指示器が作動、その後ステアリングを制御し車線変更操作を支援する。目的の車線まで複数回車線変更が必要な場合は、連続して車線変更の支援を行うこともできる。

2.4.1 車線変更支援機能

ドライバーがハンドルに手を添え、目的の車線の方向へ方向指示器を作動させると、ステアリングを制御し車線変更に必要なステアリング操作を支援する。

2.4.2 追い越し支援機能

ドライバーが設定した車速よりも遅い車両を前方に検出すると、ドライバーに追い越しを提案する。ドライバーがハンドルに手を添え、ステアリングホイール上に設置された車線変更支援スイッチを押すと、右側の車線の方向へ方向指示器が作動、その後ステアリングを制御し車線変更操作を支援する。遅い車両を追い抜くと、ドライバーに元の車線に戻ることを提案する。ドライバーが車線変更支援スイッチを押すと、左側の車線の方向へ方向指示器が作動、その後ステアリングを制御し車線変更操作を支援する。

次章で車線変更支援機能、追い越し支援機能、ルート走行支援機能に必要な3D HDマップデータの活用について説明する。

3. 3D 高精度地図データの車線変更支援機能への適用

本章では、3D HD マップデータの車線変更支援機能への適用の一例として、車線変更可否判断、車線レベルの走行計画について説明する。

3.1 車線変更可否判断

車線変更支援を実現するための課題の一つに、前方の車線に関する情報を取得することが挙げられる。車線変更を開始する時点では車線変更終了地点の車線情報をカメラでは計測しきれていない場合がある。このため、カメラのみの情報では車線変更中に車線変更禁止を表す区画線が現れるなど車線変更ができなくなる可能性がある。一方で、3D HD マップデータは車線レベルで曲率や区画線などの情報を持っているため、カメラの検知範囲外の道路形状を取得することで、任意の車線の開始地点から終了地点までを考慮した車線変更可否判断が可能となる。

3.2 車線レベルの走行計画

車線変更支援機能は、追い越し支援やナビゲーションシステムの推奨する経路に沿って進む目的でシステムが適切なタイミングを判断し車線変更を提案する。この判断はシステム内で3D HD マップデータのもつ車線レベルのデータを用いて走行計画を作成することで可能となる。ここでいう走行計画とは、どの区間でどの車線を走行すべきかと、どのように走行すべき車線に誘導するかの計画を指す。

図5に車線レベルの走行計画を作成する過程を示す。まず、高速道路上で出口などの分岐が存在した場合に、ナビゲーションシステムの推奨する進路に移動するために必要な車線変更回数と、分岐に対して道なり距離とを計算し車線選択を行う。

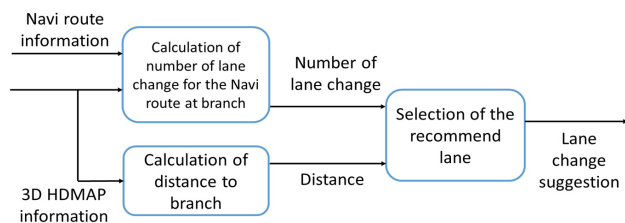


図5 車線レベル経路生成ブロック図

次に、車線レベルの走行計画について例を用いて説明する。図6は高速道路の分岐付近の道路形状を模式的に表した図である。ナビゲーションシステムの推奨する経路が、図中の「P」地点から出口に進むように設定されているとする。

本線の右側車線にいる場合は、出口が近づくと車線「A」に移動するまで左の車線に車線変更するようシステムが提案する。ここで車線「B」に移ってしまうとP地点を出るために必要な車線変更回数が却って増えてしまうため、車線「B」へ移動する提案はしない。なお、はじめから車線「B」を走行していた場合は、右への車線変更をシステムが提案し車線「A」へと誘導する。このように、いずれの車線を走行していても、最終的には車線「A」に誘導するように車線変更の提案が行われる。

また、車線レベルでの走行計画を持つことで、前方車の追い越しにおいても適切なタイミングで提案することができる。例えば、進むべき進路が分岐の左方向にあり、かつその分岐までの距離が近い場合には、追い越しの提案をしないようシステムが判断している。

以上のように、3D HD マップデータを用いた車線レベルの走行計画を持つことで、どの車線に移動するのが望ましいかが分かり、その結果、適切なタイミングでの車線変更の提案が可能になる。

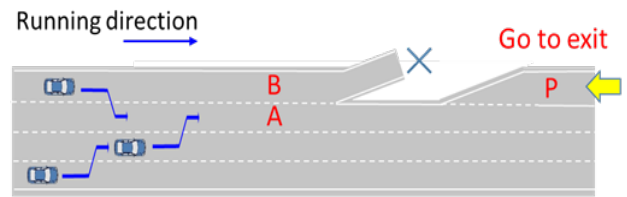


図6 分岐付近での車線レベル経路生成

4. オフボード連携機能

PP2.0 システムにおいては、3D HD マップのデータ更新などの機能を実現するため、テレマティクス通信によるサーバーとの常時通信によるオフボード連携機能を有している。

オフボード連携機能は、車両側の3D HD マップのストレージおよび地図データ出力を行う3D HD マップ ECU、テレマティクス通信を行うテレマティクス CU、最新地図データの保存及び配信を行うサーバーから構成される。

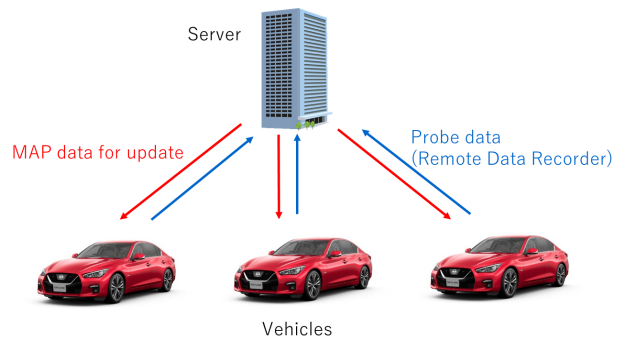


図7 オフボード連携

工事などによる道路形状の変更があった場合にもタイムリーに実際の道路形状にあった最新の地図データを活用できるようにするため、3D 高精度地図データは年に数回の頻度で更新される。

3D 高精度地図 ECU は、サーバー上の最新地図データのバージョンと ECU 内の地図データのバージョンの差分を都度確認し、地図データの更新があった場合には自車位置に近い場所から優先的に最新地図データをサーバーからダウンロードし、ECU 内の地図データを更新する。これにより、常に最新の 3D 高精度地図データを運転支援に利用できるようにしている。

5. まとめ

本システムの開発により、高速道路の複数車線をナビゲーションシステムと連動して設定したルートを走行し、ドライバーが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じ直ちにハンドルを確実に操作できる状態にある限りにおいて、同一車線内でハンズオフが可能となる世界初の先進運転支援技術を商品化し、お客様に、より安心で快適、ストレスフリーな運転を提供することができた。

今後、この技術を日本以外の地域へ拡大し、またより多くの車両に搭載させるとともに、より幅広いシーンで運転操作を支援できるよう技術開発を行い、更なる安全な交通社会の実現を目指し、クルマの新しい価値を提供していきたい。

著者



谷口 洋平



厚村 大悟



徳永 誠士



出川 勝彦

特集1：未来を拓く ProPILOT 2.0

3. 支える車両の制御技術

谷口 洋平* 平 靖久* 菅原 直人**

1. はじめに

日産は 20 年以上にわたり運転支援技術のパイオニアとして技術革新をリードし、数多くの世界初の技術を開発してきた。¹⁾⁻⁸⁾ そして、2016 年には統合的に支援する高速道路単一車線の運転支援技術「プロパイロット」(以下、PP1.0)⁹⁾ を実用化、さらに 2019 年には PP1.0 を大きく進化させ、高速道路の複数車線をナビゲーションシステムと連動して設定したルートにしたがって走行(以下、ナビ連動ルート走行)する「プロパイロット 2.0」(以下、PP2.0)を開発した。

これらプロパイロットを実現する車両を制御する技術は、これまで多くの運転支援システムを開発したことによる制御技術の積み重ねが大きな原動力である。

車両の速度や車間距離を制御する技術は 1999 年に発売した ICC (Intelligent Cruise Control) まで遡り、またステアリングの制御技術、および車線追従の制御技術は 2001 年の LKS (Lane Keep Support System) が開発の基盤となる。

本章では、PP2.0 において「安心」「快適」を実現する上でキーとなる車両の制御技術について、その変遷と主な制御を解説する。

1.1. 運転支援システムにおける制御開発の歴史

日産における運転支援システムは、1999 年シーマに搭載した ICC から始まる。図 1 に日産が市場投入してきた運転支援システムの一覧を示す。

ICC の開発では、車両の前後方向の力を制御する制駆動力制御を基に、車速を指令値とおりに制御する車速制御と、先行車との車間距離をドライバーの運転操作を模擬するように制御する車間制御を実現した。

この駆動力制御・車速制御・車間制御の制御技術は、その後続く DCA (Distance Control Assist) や FEB

(Forward Emergency Braking) の制御にも応用している。

また、LKS (Lane Keep Support) の開発では、カメラで車線を認識し、その中心位置をトレースするよう車両運動特性を基にしたステア制御を実現した。

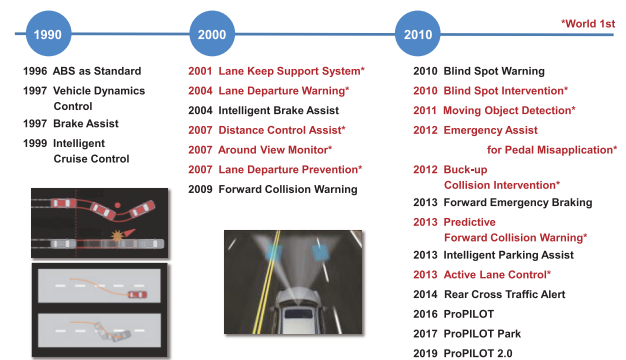


図 1 運転支援システム開発の歴史

これらの制御技術は時代と共に進化し、PP1.0, PP2.0 の基盤制御技術として用いている。

2. 制御システムの特徴

2.1 車速制御

日産における車速制御の歴史は古く 1990 年代前半にまで遡る。オート・クルーズ・コントロールの制御にロバスト制御とモデルマッチング制御を組み合わせた制御則を設計した。(図 2)

車両特性の変動や勾配など走行状態の変化を推定し制御入力を補正することで、時々刻々と変化する制御対象に対して常に一定の制御特性を補償する。(ロバスト制御) この補償された制御対象に希望する応答特性の規範モデルを設定し、制御対象を規範モデルと同じ動きとなるように制御入力を決定する。(モデルマッチング制御)

このように制御系を構成することで、車重の変動や道路勾配など走行環境の変化に強い車速制御を実現した。¹⁰⁾

* AD/ADAS 先行技術開発部 ** シャシー開発部

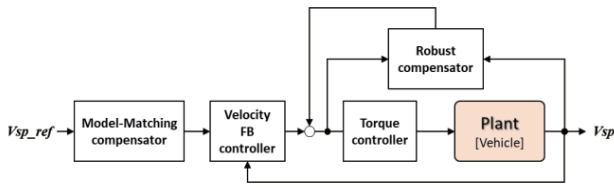


図2 車速制御ブロック

2.2 車間距離制御

ICC や PP1.0/2.0 で使用している車間距離制御は、ドライバーの運転操作の分析から2つの指標を設定し制御系を設計した。

- 1) 追従開始後の軌跡が設定できること
- 2) 追従中の制御性能が安定していること

この要件を満たすため、応答特性と追従安定性を独立に設定できる「モデル規範型2自由度制御」を適用した。(図3)

制御対象は、扱いやすい伝達関数で記述できる構成とするため、直接車間距離を制御するのではなく所定の伝達特性を有する車速制御系を介した階層化構造とした。これにより、車間距離の応答特性は車速制御系の伝達特性の逆系を用いたフィードフォワード制御で補償し、車間距離を維持する追従特性は極配置法を用いたフィードバック制御で構成した。¹¹⁾

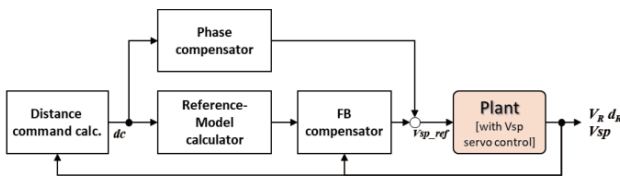


図3 車間制御ブロック

さらに、ICC の普及に伴い、ドライバーの違和感が生じないような自然な挙動に加え、渋滞を抑制するような挙動が求められてきた。これは、交通流の乱れや疎密を抑制し、道路の輸送効率を向上させるため車間距離制御特性が先行車の車速変化を後続車に増幅して伝えない性質、すなわち車群安定となることが重要となる。一般に、車群安定を実現するには、先行車の車速変化に対する自車速の応答性を速くすることになるが、制御ゲインの増加を招き、追従走行時の乗り心地を悪化させる。そこで、車群安定性と乗り心地をより高いレベルで両立させながら、車間距離応答がドライバーにとって自然な応答となるよう、従来の車間距離制御から進化させた。¹²⁾ (図4)

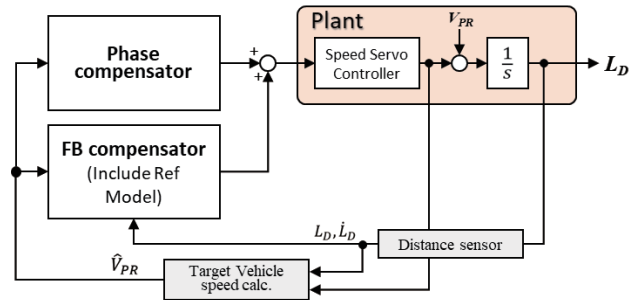


図4 車群安定性を考慮した車間距離制御ブロック

2.3 車線追従制御

PP1.0/PP2.0 の車線追従制御は、2001年に商品化したLKSシステムがベースになる。LKSに求められる制御性能は、ライントレース性能と耐外乱安定性を維持、向上させることであり、車両の横運動を制御することから車両モデルに基づく状態フィードバック制御で設計した。この状態フィードバック制御は、カルマンフィルタによるオブザーバーを配し、LQ (Linea Quadratic) 制御を用いて要求性能を満足するよう設計した。

また、曲線での制御性能を向上させるため、曲線情報をフィードフォワードで補償する構成とした。¹³⁾¹⁴⁾ (図5)

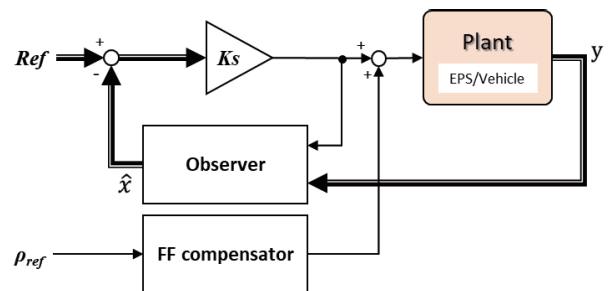


図5 車線追従制御ブロック

3. プロパイロット 2.0 のステアリング制御

PP2.0 のステアリング制御は、前述の車線追従制御を基にカメラと3D高精度地図(HDマップ)からの情報を用いて、車線維持支援/車線変更支援の機能を実現する目標舵角を算出する。

3.1. 制御系の構成

図6に本システムのステアリング制御の構成を示す。カメラで検知されるリアルタイムの車線形状情報と3D HDマップの情報を比較することで情報の信頼性を高め、さらにカメラでは取得が難しいレーンの3D形状を3D HDマップから取得することでレーン中央を走行するための目標舵角を精度よく演算する。

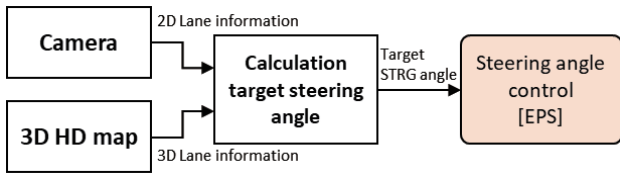


図 6 レーンセンタリング制御のブロック図

本システムのステアリング制御性能を検証するため、弊社テストコースにおいて熟練ドライバーと本システムの比較実験を行った。

3.2 実験概要、および結果

半径 500m ~ 1000m (500R ~ 1000R) のカーブが続くテストコースにて、レーンセンタリングの実験を実施した。PP2.0 で走行 (レーンセンタリング制御) した場合と、熟練ドライバーが PP2.0 を使用しないで運転した場合のデータを計測して比較した。実験にあたり熟練ドライバーは極力レーン中央を走行するように指示した。

PP2.0 での走行、および熟練ドライバーの運転の結果を、図7にレーン中央からの横変位置、図8に操舵角量を示す。図7から、PP2.0の方が熟練ドライバーの運転よりもレーン中央からの横変位が小さく、高いレーンセンタリング性能が確認できる。また図8から、操舵が変化するコーナーの出入り口で、PP2.0は操舵角にオーバーシュートがなく熟練ドライバーと同等の滑らかな操舵ができていることがわかる。また、時刻 50s ~ 150s 付近のほぼ一定操舵のコーナーでは、PP2.0の方が熟練ドライバーよりも操舵角の変化を小さく抑えられていることがわかる。

この結果から、PP2.0のレーンセンタリング性能は熟練ドライバーと同等、またはそれ以上の滑らかなステアリング制御であることが確認できた。

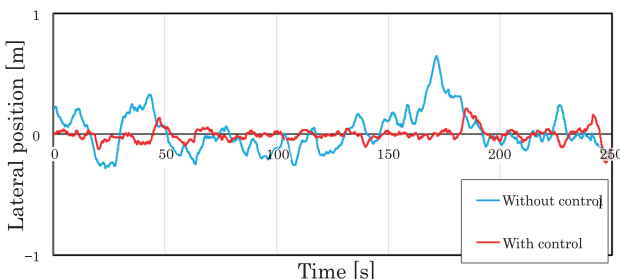


図 7 レーンセンタリングの比較結果

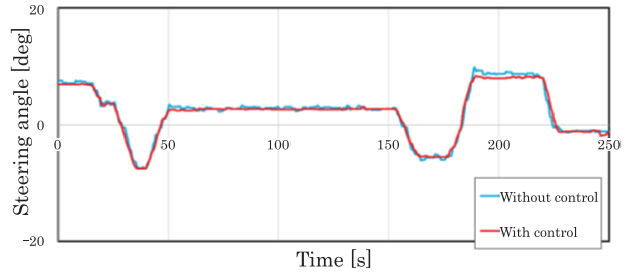


図 8 操舵角の比較結果

4. ステアリング制御を支えるステアバイワイヤ技術

日産スカイラインのステアリングシステムには DAS (Direct Adaptive Steering) が採用されている。DAS は、ハンドルとタイヤの機械的な接続を電気信号に置き換えたバイワイヤシステムである。ステアリングシャフトに設けたクラッチを切り離すことで、ハンドルとタイヤを独立に制御できることが特徴である。ここでは PP2.0 における DAS の貢献について紹介する。

4.1 滑らかなハンドルの動きと正確なライトレースの両立

PP2.0 におけるステアリング制御の役割は、タイヤの角度を精密に制御し、車両の横の動きを正確にコントロールすることである。一方、ハンドルの動きも重要な要素であり、滑らかなハンドルの動きはシステムの安心感向上につながる。DAS では、ハンドルとタイヤが切り離されている特徴をいかし、次に述べるような制御を行うことでこれら 2 つの性能を両立させている。

PP2.0 のステアリング制御の概要を図 9 に示す。まずライトレース実現のためのタイヤ角指令が PP2.0 で生成される。このタイヤ角指令には、車両の大まかな動きや軌道を決める成分と、路面状態や路面からの外力などによって生じた軌道のズレを微調整する成分が含まれている。DAS では、PP2.0 のタイヤ角指令の中から車両の大まかな動きや軌道を決める成分を抽出し、ハンドル角指令を生成する。ハンドルはハンドル角指令に追従するようにコントロールされる。ハンドルの動きは、ドライバーが操舵したのと同様の演算でタイヤ角指令へと変換され車両の動きを制御する。

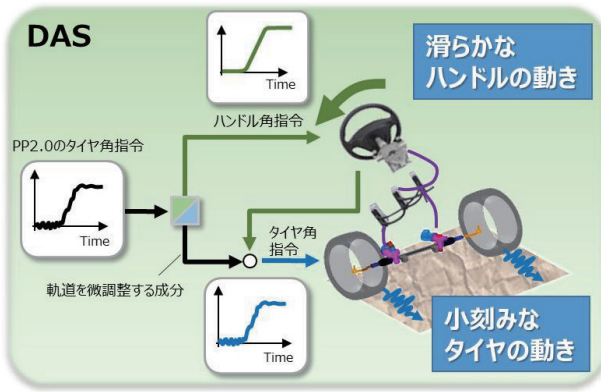


図9 プロパイロット 2.0 作動中のステアリング制御の概要

DAS の構造上、ハンドルを一切動かさずタイヤ角制御のみで車両の動きを制御することは可能であるが、ハンドルを動かすことでドライバーに車両の動きを伝える効果がある。微調整に伴う小刻みな動きを除去し、車両の大まかな動きの成分のみハンドル角指令に反映させることで、ハンドルはゆったりと滑らかに動き車両の動きをより明確にドライバーへ伝えることができる。PP2.0 のタイヤ角指令のうちハンドル角指令に含まれていない残りの成分は、タイヤ角制御へ直接反映される。これにより、タイヤ角は PP2.0 のタイヤ角指令に従って制御され、正確なライントレースを実現する。

PP2.0 作動中のハンドル角とタイヤ角の一例を図 10 に示す。緑がハンドル角、青がタイヤ角を示す。緑のハンドル角は、車両の大まかな動きを表現するためゆったりと滑らかな動きとなっている。一方、青のタイヤ角は、車両の大まかな動きに加え軌道を微調整するために絶えず小刻みな動きをしていることが分かる。

このように、ハンドルとタイヤを独立に制御することで、ハンドル角の滑らかな動きと、正確なライントレースの両立を実現している。



図10 ハンドル角とタイヤ角の応答性比較

4.2. ステアリング・オーバーライドのしやすさへの貢献

PP2.0 作動中、例えば落下物を避けようとしたときや並走する車両から距離を空けるためにレーン中央から移動させたいときなど、ドライバーの操作によって車両の動きを修正するステアリング・オーバーライドが行われる。PP2.0 作動中、ハンドルにはライントレース実現のための制御力が常に作用しており、オーバーライド時ドライバーはこの制御力に打ち勝つ操舵力を加える必要がある。そのため PP2.0 作動中においても、ドライバーの操作に対してオーバーライドのしやすい操舵力特性とすることが重要である。

一般的に従来のステアリングシステムでは、路面からの外力やシステムの持つフリクションなどを電動モータもしくは油圧が発生させる制御力によって打ち消すことで狙った操舵力特性を実現している。一方、DAS はハンドルとタイヤが切り離されており、路面からの外力がハンドルへ伝わらない。そのため、操舵力の設計自由度が高く、狙った特性を作りやすいというメリットがある。

PP2.0 作動中の操舵力特性について、右旋回中を例に図 12 の概略図に従って説明する。青点線がドライバー操舵時 (PP2.0 機能オフ時) の操舵力特性、赤線が PP2.0 作動中の操舵力特性を表している。旋回状態を維持するためには、ハンドルをあるハンドル角指令に追従させる必要がある。DAS では、ハンドル角指令での操舵力が 0 となるように、ドライバーの操舵時の操舵力特性をオフセットさせている。これにより、ドライバーは旋回中においても直進から切り込むような自然な操舵力でオーバーライドが可能となり、ドライバーへの負担を低減している。

尚、PP2.0 作動状態からオフ状態、即ち完全にドライバー操舵に切り換わる時は、操舵力 0 のオフセットを徐々に減らしてスムーズに状態を移行させることで、ドライバーが自然にハンドル操作をできるようにしている。

このように、ハンドルとタイヤを独立に制御できる DAS の特徴を生かすことで PP2.0 の性能向上に貢献している。

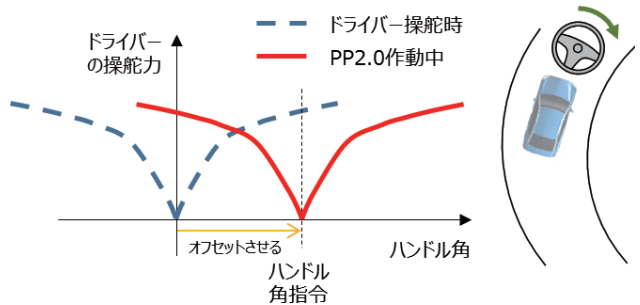


図12 プロパイロット 2.0 作動中の操舵力特性

5. おわりに

日産は20年以上にわたり運転支援技術のパイオニアとして技術革新をリードし、数多くの世界初の技術を開発してきた。

まずICCで車両の速度と車間距離を制御する技術を確立し、LKSで車両の横運動・ステアリング制御を確立した。これらの技術の蓄積によりプロパイロット2.0を開発することができた。さらに、ステアバイワイヤシステムDASの持つ強みを生かし、ライントレース性や滑らかなハンドルの動きを実現し、ドライバーに与える安心感に寄与することができた。

6. 参考文献

- 1) 定野温ほか：レーンキープサポートシステム、ブレーキアシスト（プレビュー機能付）の開発、日産技報、No. 48、pp. 13-17 (2006)
- 2) 瀬戸陽治ほか：低速追従機能付ACC（アダプティブクルーズコントロール）の開発、日産技報、No. 58、pp. 81 (2006)
- 3) 早川泰久ほか：レーンデパーチャープリベンション（LDP）システムの開発、日産技報、No. 63、pp. 11-14 (2008)
- 4) 上村吉孝ほか：インテリジェントクルーズコントロール（ナビ協調機能）の開発、日産技報、No. 63、pp. 15-18 (2008)
- 5) 金岡晃廣ほか：アラウンドビューモニターの開発、日産技報、No. 63、pp. 37-41 (2008)
- 6) 小林雅裕ほか：ディスタンスコントロールアシストの開発、日産技報、No. 63、pp. 7-10 (2009)
- 7) 早川泰久ほか：ブラインドスポットインターベンション（BSI）システムの開発、日産技報、No. 72、pp. 6-9 (2013)
- 8) 菅野健ほか：バックアップコリジョンインターベンション（BCI）システムの開発、日産技報、No. 72、pp. 10-14 (2013)
- 9) http://www.npo-rjc.jp/commendation/coty_2017.php
- 10) Hideo Nakamura, et al.: Effectiveness of a Robust Control Method for Automotive Power train Control, IPC-10 paper 99066 (1999)
- 11) 東又章ほか：ブレーキ付きACCの車間距離制御系の設計、自動車技術会学術講演会前刷集、No.114-99, 233 (1999)
- 12) Yoshinori Yamamura, et al.: Development of an Adaptive Cruise Control System with Stop-and-Go Capability, SAE Technical Paper, 2001-01-0798 (2001)
- 13) 毛利ほか：LQ制御を用いた車線の自動追従走行の検討～第1報：直線走行時の制御について～、自動車技術会 学術講演会前刷集、No.972, 102 (1997)
- 14) 古性ほか：LQ制御を用いた車線の自動追従走行の検討～第2報：曲線走行時の制御について～、自動車技術会 学術講演会前刷集、No.972, 103 (1997)

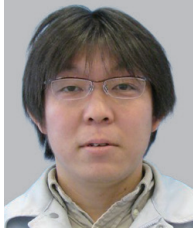
著者



谷口 洋平



平 靖久



菅原 直人

特集1：未来を拓く ProPILOT 2.0

4. インテリジェント・インターフェース

餌取 成明* 中村 昌平* 中園 泰徳** 石郷岡 喜代春** 前田 健司**

1. はじめに

本章では、プロパイロット2.0 (以下、PP2.0) において「安心」「快適」を実現する上でキーとなる HMI 技術として、新たに採用したインテリジェントインターフェースについて概説する。主な機能であるインタラクティブ HMI、360°リアルタイム周囲表示、およびドライバーモニタについて詳説し、最後に HMI 検証方法について述べる。

2. プロパイロット2.0 独自 HMI インテリジェントインターフェース

PP2.0 の高度な運転支援機能を、ドライバーが簡単かつ適切に使えるようにするために独自に開発した HMI が、インテリジェントインターフェースである。いわばインテリジェントな運転支援システムのための、インテリジェントなインターフェースであり、HUD (Head up Display) やメーターディスプレイによる表示、ステアリング・スイッチによる操作、ドライバーモニタによる警報等から構成される。(図1)

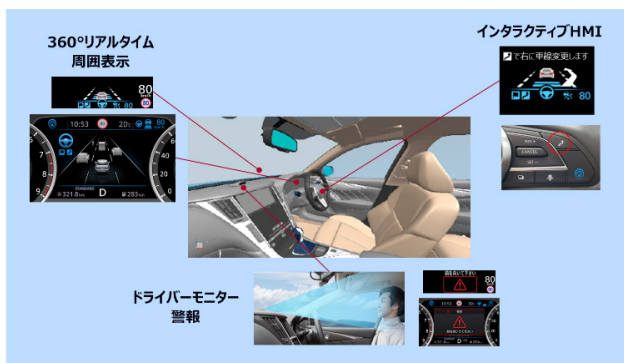


図1 インテリジェントインターフェース

PP2.0 は、第一世代プロパイロット (以下、PP1.0) の車速・車間・ステアリング制御機能を進化させ、同一車線内でのハンズオフ機能と、分岐や追い越しにおける車線変更支援を

行うナビ連動ルート走行機能を新たに備えた運転支援システムである。

同一車線内でのハンズオフ機能が追加されたことにより、システムの作動状態は PP1.0 の2つから3つとなった。車速・車間制御のみを作動している ICC モード、車速・車間制御とステアリング制御の双方が作動しているが、ドライバーは常時ハンドルを把持する必要があるハンズオンモード、車速・車間制御とステアリング制御の双方が作動し、ドライバーが安全を確認しつつでもハンドル操作を行える状態にあることを前提にハンドルから手を離すことができるハンズオフモードの3つである。この3状態を、ドライバーに一瞥で確実に識別させる表示系を構築することが HMI としての課題である。一般に2つの状態を識別させるには、表示要素の ON/OFF を用いるが、3つ以上の状態を識別させることは困難である。我々は、色の違いで識別を促すカラーコーディングを、HUD とメーターディスプレイに表示されるアイコン、インジケーター等の機能表示要素とパーティングラインや背景等の造形表示要素の双方に広く適用し、ICC モードは白、ハンズオンモードは緑、ハンズオフモードは青とすることで、3状態が容易に識別可能となるようにした (図2)。色覚には個人差があることから、今回採用したカラーコーディングには、色覚シミュレーションにより個人差に配慮した色味を採用している。



図2 作動状態を示すカラーコーディング

PP2.0 のもう一つの追加機能であるナビ連動ルート走行機能は、ルートに沿った分岐や、前方の低速車両の追い越しの際に車線変更の支援を行うものである。システムが状況を判断し適切なタイミングで車線変更の支援を提案、ドラ

* AD/ADAS 先行技術開発部 ** カスタマーパフォーマンス & 第二車両実験部

イバーが安全を確認し提案を承認することで車線変更の支援が開始される。このシステムからの提案を短時間で確実にドライバーに理解させる表示系、ドライバーの承認を簡単に誤操作なく入力できる操作系を構築することが、ここでのHMIとしての課題である。課題解決に際し最も配慮したことは、PP2.0は運転支援システムであり、常にドライバーは周囲の交通状況を監視、適切に運転する義務があるため、システムからの提案とドライバーの承認が、ドライバーの周囲の交通状況の監視を阻害しないようにすることである。そのため、システムからの提案はHUDにシンプルなテキストとグラフィックスで表示し、ドライバー承認の入力はステアリング・スイッチの中でもっとも視認性と操作性が良いキーに割り当てた。(図3)



システムから車線変更支援の提案 (HUD)



ドライバーがステアリング・スイッチを押下して承認

図3 車線変更支援時のシステム提案とドライバー承認

これにより、ドライバーは周囲の交通状況の監視から著しく視線を動かすことなく、システムからの提案を把握し、引き続き安全確認を行った上で、ハンドルを把持しながら提案を承認することができる。システム提案とドライバー承認が短時間でストレスなく完了すると、ドライバーにとってHMIは、システムからの出力(表示)に対するドライバーの入力(操作)という従来の表示操作の感覚から、システムと対話している感覚へ自然と変化する。このことから、車線変更支援時の一連のHMIを「インタラクティブHMI」と称し、ユーザーとのコミュニケーションに活用している。

インタラクティブHMIにより、システムとの対話を通して運転が実行される様は、これまでにない新しい運転感覚であり、ユーザビリティの向上にとどまらずUX(User Experience)の観点からも画期的なHMIであると考えられる。

PP2.0は新機能の追加のみならず、加減速のスムーズさや

レーンキープの安定性等の制御性能も格段に向上しており、極めて高度な運転支援システムとなっている。このようなシステムにおけるHMIは、ドライバーの過信・不信、特に過信の防止に最大限考慮する必要がある。具体的には、ドライバーがシステムの能力を正確に理解し、システムの能力の範囲でシステムを適切に使用してもらうことである。そのため、メーターディスプレイにシステムが検知している周囲の交通状況を360°リアルタイムで表示し、ドライバーがシステムの検知範囲と識別能力を一瞥で理解できるようにしている。(図4)



図4 360°リアルタイム周囲表示の例

さらに、ハンズオフモードで走行中にドライバーが周囲の交通状況の監視を失念することがないように、ドライバーが前方注視を怠っていないかその状態を判断し、ドライバーに前方注視を促す警報を発するドライバーモニタも備えている。(図5)



図5 ドライバーモニタによる前方注視を促す警報

3. HMIの詳細

インタラクティブ HMI、360°リアルタイム周囲表示、およびドライバーモニタについて詳述する。

3.1 インタラクティブ HMI

ナビ連動ルート走行機能における分岐時または追い越し時の車線変更支援では、システムがナビルート、先行車の車速、周囲の交通状況を考慮し、適切なタイミングで HUD およびメーターディスプレイの表示を通して車線変更支援を提案する。(図6)



図6 システムからの車線変更支援の提案

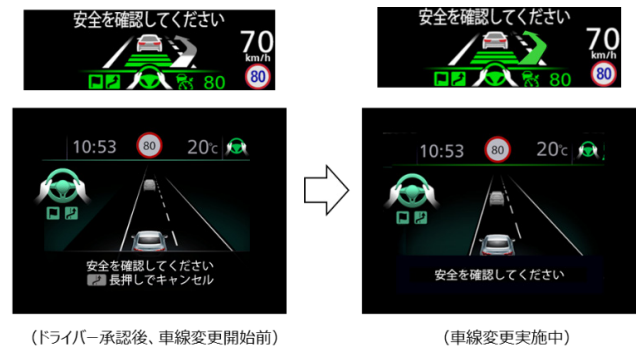
HUDでは、矢印形状のグラフィックで車線変更支援の提案を示し、上部のテキストでドライバーの承認を促す。ドライバーの前方視認を阻害することなく、ドライバーがシステム提案を認識できるよう、最小限の表示要素で構成している。同時にメーターディスプレイには車線変更の理由を合わせて表示し、ドライバーが必要に応じて確認できるようになっている。

ドライバーが周囲の安全確認を行った上で、ステアリング・スイッチ(図3)を押すと、車線変更支援が開始される。このスイッチは、ドライバーがシステム提案を受けて比較的短時間で操作する機会が多いため、視認性と操作性の双方に配慮して、ステアリングの外周に近い上部に配置した。習熟するとスイッチを視認せずに押すことが可能である。

車線変更支援中は、オーバーライドに備えてハンドルを把持しなければならない。そのため、車線変更支援が開始さ

れると、HUDとメーターディスプレイはハンズオフモード(青のコーディング)からハンズオンモード(緑のコーディング)に切り替わり、ドライバーにハンドルの把持を促す。カラーコーディングが最も効果を発揮する場面である。

ドライバーの承認を受け付けてから車線変更が開始されるまでの間、HUDの矢印形状のグラフィックが手前から奥に流れるようなアニメーション表現となり、安全確認を促すテキストメッセージが表示される。システムが方向指示灯を点滅させ車線変更を開始すると、HUDの矢印形状のグラフィックが緑色になり方向指示灯と同周期で点滅し、車線変更が進行中であることをドライバーに伝える。(図7)



(ドライバー承認後、車線変更開始前)

(車線変更実施中)

図7 車線変更支援時の表示

3.2 360°リアルタイム周囲表示

ドライバーにシステムの能力を正確に把握させるため、システムが検知している道路環境と交通状況を360°リアルタイムで表示する。

道路環境として、自車レーンと左右の隣接レーンの有無、道路境界線の種別(白実線/白破線/黄色実線、二重線も表示可)を表示している。(図8) これにより、3D高精度地図データとフロントカメラによる、周囲の道路環境の検知能力が、ディスプレイ内の空間に反映されることになる。

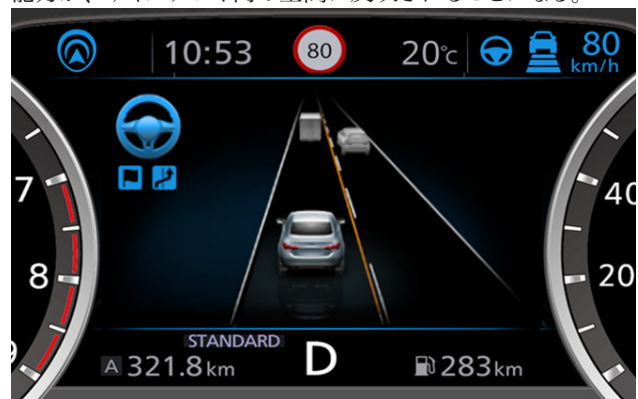


図8 360°リアルタイム表示の例(境界線種別)

交通状況として、自車レーンと左右の隣接レーンで検知している他車両を車型毎(乗用車/大型車/二輪車/不明)に表示する。(図4) また、ディスプレイ内の他車両の距離

感が、実際の風景と概ね一致するよう表示位置のチューニングを繰り返し、最終的に非線形なスケージングとなっている。これにより、フロントカメラ、フロントレーダー、サイドレーダー等のセンサー出力をフュージョン処理した他車両の検知状況が、ディスプレイ内の空間に反映される。ドライバーは実空間とディスプレイ空間を見比べることで、システムの検知範囲と識別能力を概観することができる。

ドライバーが様々なシーンを経験するに従い、360°リアルタイム表示を通して徐々にシステムの能力を学習し、ひいてはシステムの能力の範囲で適切にシステムを使用できるようになる。同時に、システムへの信頼感が醸成される。

3.3 ドライバーモニタ

ハンズオフモードで走行中にドライバーが周囲の交通状況の監視を失念することがないように、ドライバーの顔の向きや目の開閉状態からドライバーが前方注視を怠っている状態を判断し、ドライバーに前方注視を促す警報を発する。(図5)

ドライバーモニタは、カメラレンズ、赤外光照明(LED)、光学フィルター、赤外光撮像素子、画像処理回路、汎用演算回路等が一体構成された部品であり、ダッシュボードの中央に撮像面をドライバー側に向けて設置されている。(図9)



図9 ドライバーモニタの取り付け位置

赤外光照明(LED)は不可視領域の波長940nmの赤外光を周期的に発光し、赤外光撮像素子が同期撮像することで、昼夜問わず様々な光環境においても明瞭なドライバーの顔画像を得ることができる。

撮像されたドライバーの顔画像から顔の器官(目、鼻、口)をパターンマッチングにより抽出し、顔の器官の大きさや位置関係からドライバーの顔の向きを算出する。さらに、目の周辺部を詳細に解析することで、目の開閉状態を判定する。算出された顔向きが、車両の進行方向に対し、所定の角度以上かつ所定の時間以上逸脱した場合は、前方注視を怠っていると判断し警報を発する。但し、方向指示灯が点灯して

いる場合は、同方向の警報を抑制する。また、目が所定の時間以上閉じている場合や、顔の向きまたは目の開閉が所定の時間以上変化しない場合も、前方注視を怠っていると判断し警報を発する。

4. HMIの検証

運転支援機能のHMI検証プロセスを紹介する。

4.1 検証項目の検討

ドライバー操作と関係なく、システムから自動で提供される「システム判定が起点となる情報提示」と、ドライバーの操作にตอบสนองして提供される「ドライバー操作が起点となる情報提示」のそれぞれについて定めた検証項目(表1)に基づいて、評価対象のタスク毎に詳細な検証内容を決める。

表1 検証項目(大項目)

情報提示の起点	特徴	検証項目(大項目)
システム判定	ドライバー操作と関係なく、システムから自動で情報提示されるため、気づきにくい	<ul style="list-style-type: none"> 情報提示のタイミングに気づけること 提示情報の内容を理解できること 正しい行動をとれること
ドライバー操作	操作に対して、システムが応答していることを伝える必要がある	<ul style="list-style-type: none"> 操作方法がわかること 正しく操作できること 操作完了、制御状態の変化がわかること

4.2 検証方法

検証項目に対して、認知・判断・操作のプロセスのいずれかで負荷がかかるシーンを抽出する。3つの作動状態「ICCモード、ハンズオンモード、ハンズオフモード」の識別タスクの評価シーン抽出の例を図10に示す。

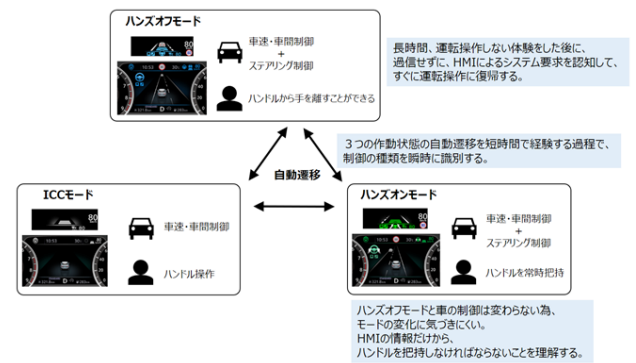


図10 評価シーン抽出の例：3つの作動状態の識別タスク

抽出した評価シーンについて、認知・判断・操作を体験できるシミュレーターを構築し、専門家の評価、および一般のお客様相当の実験参加者による評価を実施する。

シミュレーターは、書面で制御とHMIのロジックを表現した机上シナリオと、コックピットと車両の動きを再現したドライビングシミュレーター(以下DS)の2種類を準備する。

はじめに、机上シナリオを使って、制御と HMI を組み合わせたロジックと、想定されるユーザーの認知モデルとの適合性について、専門家が検証する。(図 11)

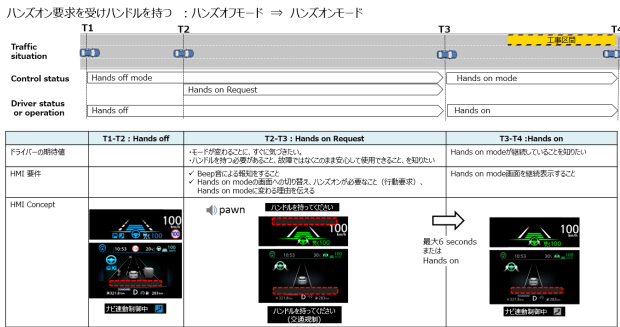


図 11 机上シナリオの一例

次に、机上シナリオ評価を完了した HMI 仕様を、DS を用いて実際の運転体験として再現、専門家および一般のお客様相当の実験参加者による評価を行う。

DS は、前方を注視しようとする動機が自然に生じるように、自車周辺の交通の流れと道路構造等の周辺環境を再現し、PP2.0 の使用による運転負荷の低減、安心感、過信、不信を体感できるように実際の道路を模擬したコースで行う。具体的には、PP2.0 の制御状態に応じた車の挙動とメーター・HUD の情報提供を再現した数十分のドライブを再現している。(図 12)

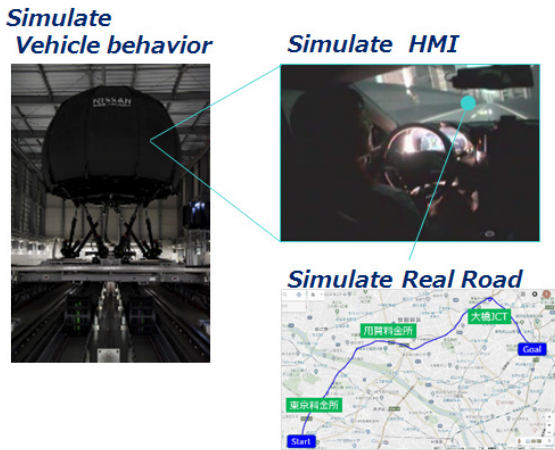


図 12 ドライビングシミュレーターの構成

使用する DS は、車両加速度を呈示するモーション・システムと、映像情報を呈示する映像投影システム、および音や操作系の反力を呈示し、ドライバーの運転席を有するコックピット・システムで構成される。前後方向と左右方向に動く XY 並進装置の上にヘキサポッド (6 軸動揺装置) を備えており、その上にドームおよびプロジェクターシステムが設置されている。ドームの中には、それらと独立で回転するターンテー

ブルと車両を再現したコックピットを有した構成である。ドームの内側はスクリーン面として構成されており、7 台のプロジェクターにより 360 度の全方位の画像を映し出す。図 13 に DS の構造を、図 14 に制御システムの構成を示す。

ステアリング、ブレーキ、アクセルなどの各種操作系の信号と道路路面状態を車両運動解析モデルに取り込み、計算された操作系のステアリング反力やブレーキ反力をドライバーに呈示する。本 DS は、実車との運転感覚の差異による違和感を低減することにより、運転負荷、安心感、過信、不信など運転中の認知に影響する運転体験を高い精度で再現し、酔いにくく長時間の評価を可能としている。¹⁾

- ① XY に大きいストローク範囲を有しながら高応答で可動する並進装置により、実車の高い加速度を遅れなく感じることができる。
- ② 大型ドームに 360° 周辺画像を高応答で表示することで、臨場感が高く、映像の遅れによる違和感が少ない。

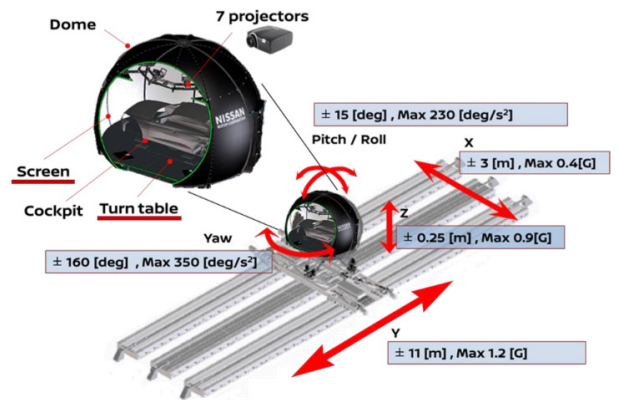


図 13 ドライビングシミュレーターの構造

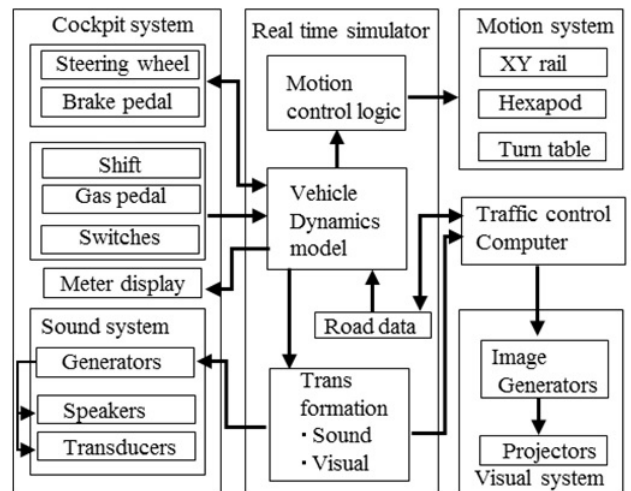


図 14 ドライビングシミュレーター制御システムの構成

DSを用いた評価の例を説明する。

高速道路の出口への連続車線変更を支援するシーンにおいて、システムからの提案に対してドライバーの承認操作を一度で済ませる「一括承認」方式と、車線変更する度に承認操作する「都度承認」方式を評価した。2つの方式とその懸念点(図15)について、評価するための走行体験をDS上に再現(図16)し、運転成績の観察と主観評価を行った。両方式ともに、正しく操作できること、操作性・利便性に不満を感じないことが確認できた。(図17)

このような評価を繰り返し、HMI仕様を決定するまでに数百人の実験参加者による評価を実施した。

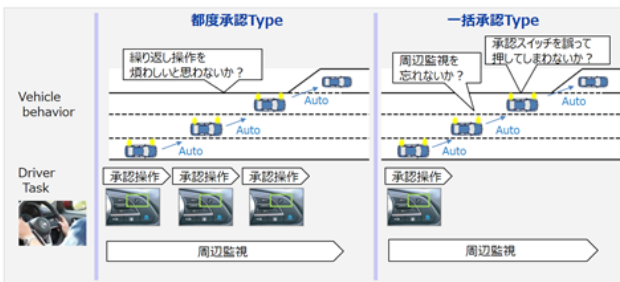


図15 ドライビングシミュレーター評価の例: 出口への車線変更支援の承認タスク

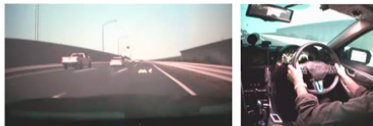


図16 ドライビングシミュレーター評価の例: 再現したシーン

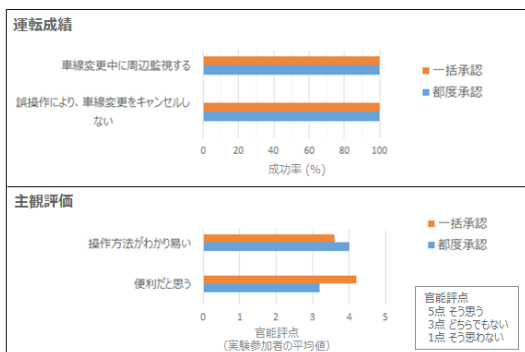


図17 ドライビングシミュレーター評価の例: 評価結果

著者



餌取 成明



中村 昌平



中園 泰徳



石郷岡 喜代春



前田 健司

4.3 検証時期

机上シナリオ評価、DS評価を活用することにより、設計フェーズでHMI仕様の検証を実施し、設計仕様の精度を高めている。評価フェーズでは、試作車を使って、表示タイミングの時間等の細部仕様の最適化を実施する。(図18)

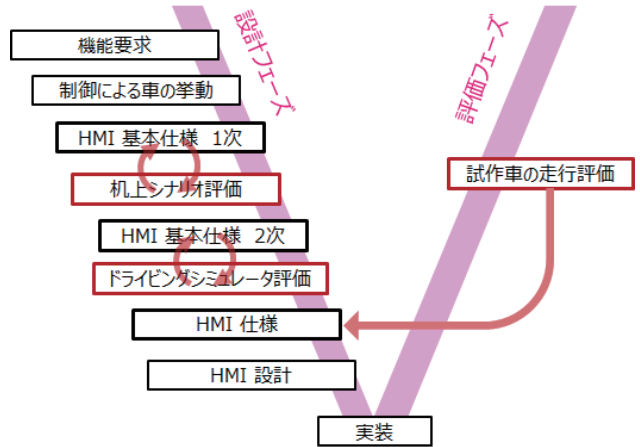


図18 HMI検証プロセス

5. おわりに

本章で述べたインテリジェントインターフェースによって、ドライバーはシステムとの対話を通して容易にシステムの状態、能力を把握でき、簡単かつ適切に使うことのできる高度な運転支援機能であるPP2.0を実現した。

6. 参考文献

- 1) 今村ほか: 実車運転感覚との差異を低減したドライビングシミュレーターの開発、自動車技術会大会学術講演会 2018 年度春季大会 予稿集 ISSN 2189-4558

特集1：未来を拓く ProPILOT 2.0

5. 信頼できるシステムを支える技術

笹山 貴志* 塩野目 恒二* 寺西 憲*

1. はじめに

自動運転の進化に伴い、システムの運転操作支援領域は広がると共にその安全設計がカバーすべき領域も拡大し、その重要性も増している。

プロパイロット 2.0 (以下、PP2.0) は、ドライバーによる運転状況の監視のもと、特定の道路環境下においてドライバーのハンズオフでの運転が許容されるシステムである。そのため、従来の運転支援システムに対して求められる安全設計に違いがある。例えば、万が一システムに故障が発生したとき、第一世代のプロパイロット (以下、PP1.0) では、ドライバーがハンドルを持って運転しているため、すぐに運転操作を介入することが可能であった。一方 PP2.0 では、特定環境下でドライバーがハンドルから手を放して運転しているため、システム故障後にドライバーが運転操作を介入するまで、システム側で安全に対処する必要がある。

本章では、PP2.0 において「安心」「快適」を実現する上でキーとなる安全・信頼性設計について解説する。

2. 機能安全設計の考え方

ドライバーが常にハンドルを持って運転する従来の運転支援システムの故障に対する機能安全設計は、重大な危険事象に至る前に素早く故障を検出し、ドライバーに注意喚起すると共に、意図通りに作動しない機能を停止することで安全を担保してきた。(Fail Silent)

一方、PP2.0 の機能安全設計では、故障を検出しドライバーに注意喚起すると共にドライバーが運転操作に復帰するまで、機能を継続するよう設計する。(図 1 Fail Operation)

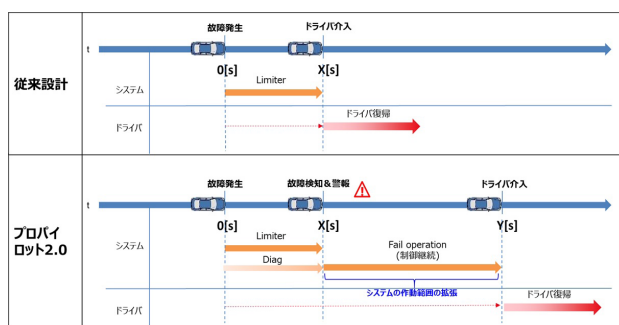


図 1 従来設計とプロパイロット 2.0 の安全設計の違い

故障後も安全に走行するため、システムが継続制御する“曲がる機能”、“止まる機能”、さらにドライバーへ故障状態を知らせる“告知機能”を維持する必要があり、それぞれの機能を冗長にすることで安全を担保する。これらの機能が故障した場合は、故障の影響が及ばないバックアップ系に切り替える安全設計とした。

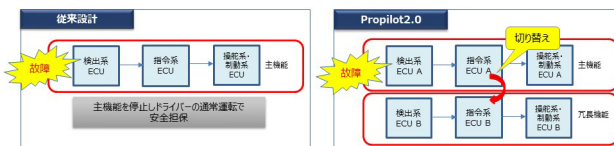


図 2 従来設計とプロパイロット 2.0 の故障時安全設計

機能冗長を実現するためには、機能を構成する ECU やアクチュエータといったコンポーネントを冗長にする必要があるが、それ以外にも電源や通信ネットワークといった E/E インフラストラクチャを冗長にすることも不可欠である。

尚、冗長構成による機能の継続で重要な設計要件は、主機能系とバックアップ機能系の“独立性の確保”である。そのため、以下の機能安全要求を満足する設計を行った。

- 1) 1つの故障で両系統が同時に機能不全にならないこと
- 2) 1系統の機能不全を起こす故障が、他系統の機能不全へ連鎖しないこと

* 電子アーキテクチャ開発部

3. 通信ネットワークアーキテクチャ

ECUの視点では、前述のように“曲がる・止まる”の両機能に対して、複数のECUからなる冗長系により故障時の機能を担保させるが、安全な車両挙動を確保するためECU間の通信ネットワークも同様に冗長性を持たせる必要がある。すなわち、ECU本体やハーネス等に異常が発生した場合でも、運転支援に必要な一連の信号の流れを途絶させないように通信ネットワークを構築する。これを実現するために満たすべき要件は、大きく分けて以下の2つである。

- 1) "障害物・白線検出" → "指令値演算" → "アクチュエータ制御"までの通信経路(グループ)を複数確保すること
- 2) これらの通信経路が互いに独立していること

通信ネットワーク設計のために、上記2つの要件を更に細かくブレイクダウンしたものが以下4項目の設計要件となる。

- a) 各グループには、検出系 ECU、指令系 ECU、操舵および制動系 ECU が含まれていること
- b) 各グループは互いに異なる ECU で構成されること (図3)
- c) 各グループ内の通信は互いに異なるバス上で行われること (図4)
- d) 各グループに属する ECU は互いに異なる上流電源に接続されること (図5)

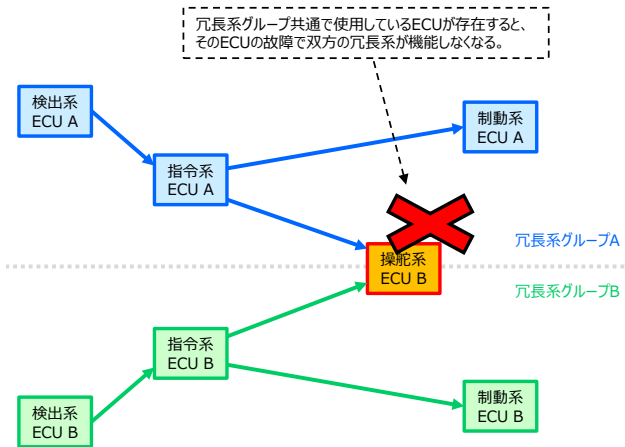


図3 各グループを構成する ECU に関する要件

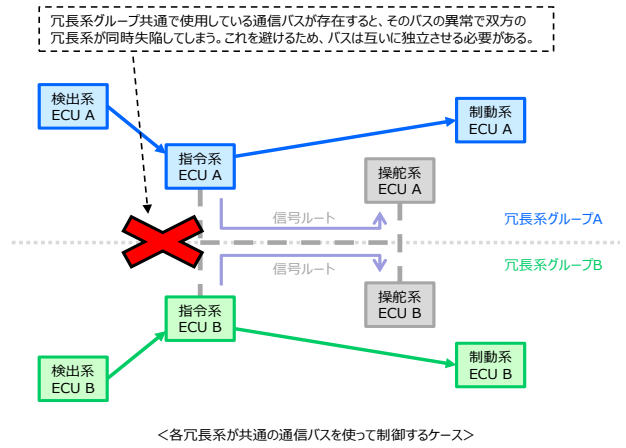


図4 各グループを構成するバスに関する要件

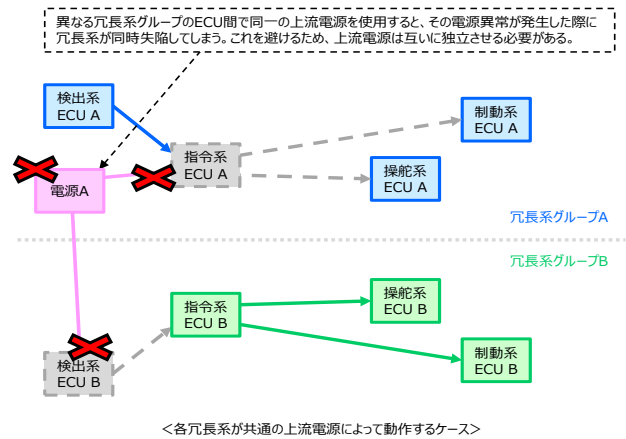


図5 各グループの上流電源に関する要件

これらの要件を満たすように構築した、ネットワークポロジの概要を図6に示す。正常時は、本図に示す全 ECU によって運転支援が行われる。そして、グループ A に異常が発生した際はグループ B にて、またグループ B に異常が発生した際はグループ A によって制御が継続できる通信ネットワーク構成となっている。また、他方のグループの状態監視のため、グループ間を跨ぐ通信バスを設けて双方に発生した異常を即時に検出可能としている。

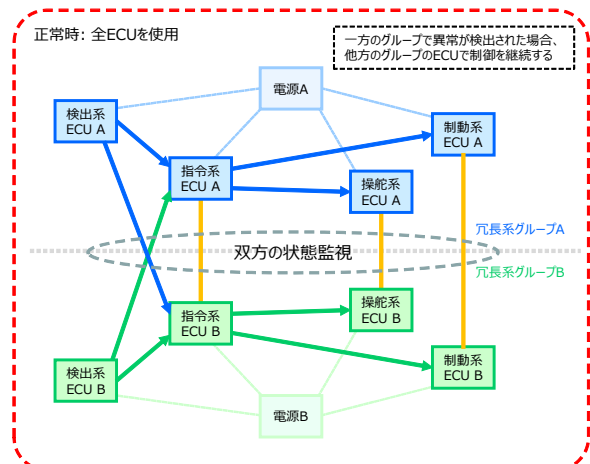


図6 プロパイロット 2.0 の通信ネットワーク構成

4. プロパイロット 2.0 の電源システム

4.1 電源システムへの新たな要求

PP2.0 は車両の 12V 電源から電力供給を受け動作しており、機能失陥防止のため、電源の維持は非常に重要である。

ドライバーの操作をシステムが代行する場合、「ECU は運転支援に必要な演算処理を常時継続しており、短時間であっても高電圧 / 低電圧の発生が許容されない」、「ドライバーの操作力が無いことから、アクチュエータは従来のアシスト機能以上の電力を消費し、モータの起電力に抗する高い電源電圧を必要とする」といった電源システムへの新たな要求が課せられている。

4.2 電源システムの概要

電源システムは、メインバッテリー、DCDC コンバータ、DCDC コンバータリレー、DCDC 電流センサ、バックアップバッテリー、バックアップバッテリーリレー、バックアップバッテリーセンサ、およびそれらを接続するハーネスで構成される。(図7)

車両走行中、バックアップバッテリーは車両の 12V 電力網に接続され、車両の電装部品は DCDC コンバータ、メインバッテリー、バックアップバッテリーの 3 つの電源の下で動作する。仮にメインバッテリーが劣化した状態で DCDC コンバータが故障したとしても、バックアップバッテリーが電圧を維持するため、運転支援システムは動作を継続することができる。

バックアップバッテリーには、セレナ S-HYBRID など市場実績も十分ある鉛酸バッテリーを選択した。

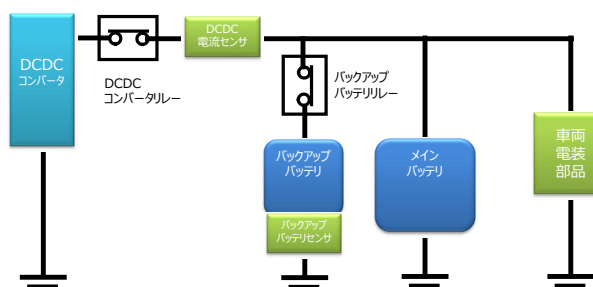


図7 電源冗長回路構成

4.3 電源システムの課題

電源冗長で重要な構成要素であるバックアップバッテリーは、電源故障時に確実な作動が求められるが、頻繁な部品交換や点検などお客様の負担増は避けなければならない。そのため、システム自身はその性能を長期間維持することが要求される。前述の通り、アクチュエータが必要とする電源電圧は高く、バックアップバッテリーが劣化した状態では電圧

の維持が不可能となるため、バックアップバッテリーの劣化抑制方策、正確なバッテリー状態診断方策が必須となる。

一方 DCDC コンバータは、高電圧故障や内部短絡などの故障モード有している。これらの故障モードでは、バックアップバッテリーだけでは電源電圧の維持が困難であるため、DCDC コンバータの故障に対する対策も検討した。

以上から、電源システムにおける冗長化の技術課題は以下となる。

1. バックアップバッテリーの劣化抑制
2. バックアップバッテリーの正確な状態診断
3. DCDC コンバータの短絡・高電圧故障対応

4.4 バックアップバッテリーの劣化抑制の方策

バックアップバッテリーに、メインバッテリーと同じ鉛酸バッテリーを単純に用いただけでは同様の劣化の過程を辿る。その結果、メインバッテリーの寿命時期と同時期にサブバッテリーも寿命となり、バックアップの機能を成さなくなる。したがって、バックアップバッテリーは、メインバッテリーに比べて長寿命化する必要がある。

通常、鉛酸バッテリーに加わるストレスは、バッテリーの機能上排除困難な場合が多い。しかし、バックアップバッテリーはメインバッテリーと異なり、例えば、駐車中の暗電流供給等を行う必要は無く、これによって生じるストレスは回避することができる。このようにバックアップバッテリーは、鉛酸バッテリーの劣化 / 故障要因を再精査し、その原因となるストレスを緩和する方策をとり長寿命化を図った。ここでは主たる要因である「鉛酸バッテリーが低容量状態となるストレス」の排除について紹介する。

まず、バックアップバッテリーの回路上流にバックアップバッテリーリレーを配置し、駐車中には回路を遮断することで車両の待機電流による放電を防止する。(図8)

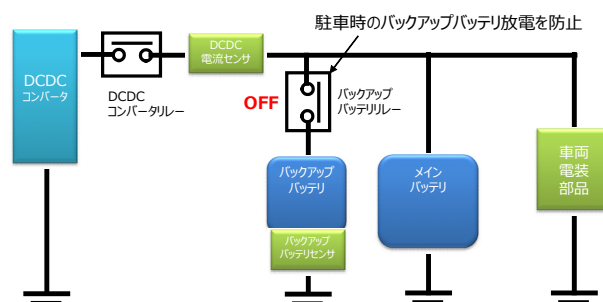


図8 バックアップバッテリー リレー動作

また、鉛酸バッテリーは充電電圧が高すぎても低すぎても寿命低下の原因となるため、DCDC コンバータからの印加電圧がハーネスの電圧降下を含め、双方のバッテリーで同等となるようバックアップバッテリーをメインバッテリーと対称となる位置

に配置した。

これらの方策により、バックアップバッテリーが高い充電容量を保持することが可能となり、低容量状態に起因する劣化を抑制することができる。尚、バックアップバッテリーリレーは車両の静粛性に配慮し、作動音が発生しない半導体リレーを採用した。

4.5 バックアップバッテリーの状態診断

鉛酸バッテリーはその化学的、構造的な特性として複数の劣化 / 故障モードを有することが知られている。前述のように、バックアップバッテリーはその劣化モードの多くが抑制されるよう管理されており、状態診断が比較的容易な状態にあると言える。一方、外部から観測可能なパラメータは、電圧、充放電電流、および温度と限られ、バックアップバッテリーの状態診断を高精度で行うために、より正確に測定する回路構成を採用した。

特にバッテリー電圧について、従来は、バッテリーが12V電力網と接続された状態で実施せざるを得ないため、発電機や他方のバッテリーの電圧の影響、測定対象であるバッテリーからの放電による電圧降下などにより、測定誤差が大きいという問題があった。

この対策としてバックアップリレーをOFFにし、車両回路と分離した状態で電圧測定を行うことでこれらの誤差要因を排除した。

4.6 DCDC コンバータ短絡・高電圧故障への対応

DCDC コンバータの短絡故障、高電圧故障時に車両の12V電力網から分離するため、DCDC コンバータ - バッテリー間に DCDC コンバータリレーを配置した。(図9)

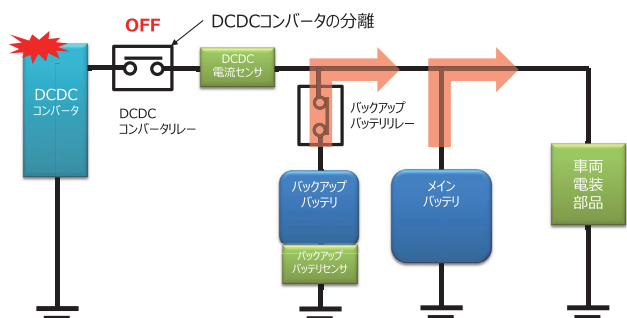


図9 故障時のDCDCコンバータ分離

この回路構成は、ベースとなる本来の電源機能を阻害することが無いよう配慮した。リレーによる電圧降下を最小限とするため、低ON抵抗 / 大通電容量が実現可能、かつ耐久性に優れ、動作音の発生しない半導体リレーを採用した。

尚、バックアップバッテリーリレーとDCDCコンバータリレー

は、PP2.0 作動中にマイコン暴走等により同時にOFFすることが無いよう、それぞれ異なるECUで制御することで信頼性を高めている。

5. ヒューマンエラーを考慮した安全設計

システムによる走行制御機能がより高度化するに従い、ドライバーのシステムに対する過信や誤認識といったヒューマンエラーに起因する事故リスクが増加する。特に、PP2.0のようにドライバーによる運転状況とシステムによる運転支援の比重が高い状況の切り替えが発生するシステムにおいては、システム作動状況の認識誤り（モードコンフュージョン）や、ドライバーとシステムの意図の対立を発生させない措置が求められる。

昨今のメディア報道などにも見られる類似システムの事故事例からも、予見可能なヒューマンエラーは未然防止に十分考慮することがOEMの責任として、今まで以上に求められている。

では、どの様に予見可能なヒューマンエラーを分析するかについて説明する。従来、ヒューマンエラーに起因する危険事象シナリオを分析する際は、知見者によるブレインストーミング手法が用いられていた。しかし、結果の論理性や網羅性の面で論証が難しいという課題があった。

今回PP2.0では、ヒューマンエラーに起因する危険事象シナリオを客観的に漏れなく導出するための分析手法を新たに開発した。リスク分析の手順として以下4つのステップで行う。

1. 対象者を特定する (Who)
2. 現象を特定する (How)
3. 対象を特定する (What)
4. 環境を特定する (Where)

この考え方をゴール構造表記法 (GSN: Goal Structuring Notation) に基づいた記述手法を用いて可視化し、論証の客観性を高めた。(図10)

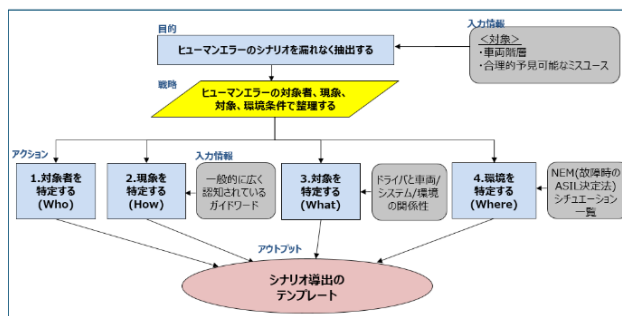


図10 ヒューマンエラー分析の考え方 (GSN)

5.1 対象者を特定する (Who)

まず、ヒューマンエラーを引き起こす対象を特定する。ドライバー、助手席乗員、後席乗員などがある。

5.2 現象を特定する (How)

次に、対象者がどんなヒューマンエラーを起こすのか、現象を特定する。人間の行動を、“認知”、“判断”、“行動”に分解し、それぞれの行動において、発生しうるヒューマンエラーを網羅的に定義し、その中から発生しうる事象を特定した。(図 11)

2. 現象を特定する (How)

➤ 人間の行動をブレークダウンし、ミスユースの現象を特定した

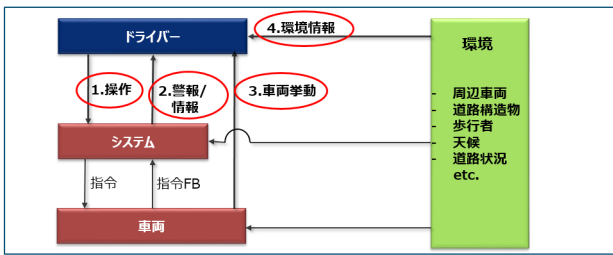


人間の行動	ミスユースの現象	例
認知	1. 無知・理解していない	正確に伝わっていない
	2. 誤認識	情報を見落す、見間違う
判断	3. 判断ミス	先入観や思い込みで判断を間違う
行動	4. ミステイク	意図しない操作をしてしまう
	5. 故意	マナーやルール違反をする
	6. 出来ない	思っているほど出来ない

図 11 ヒューマンエラーの分析

5.3 対象を特定する (What)

次に、ヒューマンエラーの対象を特定する。ドライバーと環境・システム・車両との関係を、STPA の Control structure で表現する。これにより、ドライバーに相互作用を及ぼす対象を網羅的に抽出、その中から対象の絞り込みを行った。(図 12)



ヒューマンエラーの対象	例: 理解していない
1. 操作	“操作の仕方”が、わからない
2. 警報/情報	“警報/情報表示”の意味がわからない
3. 車両挙動	なぜそんな“車両挙動”したのかわからない
4. 環境	“道路標識”の意味がわからない

図 12 ドライバー/システム/車両/環境の関係性

5.4 環境を特定する (Where)

最後に、ヒューマンエラーを起こす環境を特定し、最終的なハザードシナリオを導出する。(図 13)

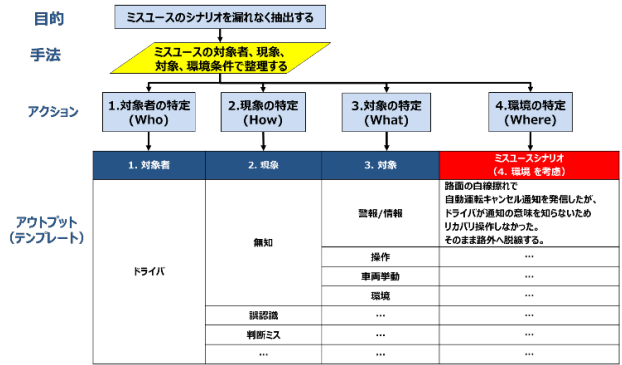


図 13 ヒューマンエラーシナリオの導出

PP2.0 システムに、本分析手法を用いてヒューマンエラーの懸念シナリオを抽出し、安全方策を機能要求に落とし込んだ。

なお、本手法は ISO TC22 SC32 WG8 に提案、2019/1月に発行された ISO PAS 21448 Road vehicles – Safety of the Intended Functionality に採用されている。

6. まとめ

PP2.0 は、本章に述べた設計手法によって従来の運転支援システムよりさらに高い安全要求を満足する設計ができた。これまでに培った安全設計手法をベースに、PP2.0 固有の要件を導出し、新たな設計をアドオン (追加) する形で安全設計を実現した。これにより複雑な設計を回避すると共に高い信頼性を実現した。

7. 参考文献

- 1) ISO26262-1 ~ 10 Road vehicles -Functional safety-

著者



笹山 貴志



塩野目 恒二



寺西 憲

特集1：未来を拓く ProPILOT 2.0

6. 検証のための新しい実験技術

久保田 悠美* 佐々木 光次* 長江 新平** 荻野 健治***

1. お客さまに提供する価値とその検証

プロパイロット 2.0 (以下、PP2.0) は第一世代プロパイロット (以下、PP1.0) に対して、ポイント・トゥ・ポイントである「車線変更支援を含むナビルート走行機能」と「同一車線内ハンズオフ機能」という、2つの新しい知能化を実現している。

「車線変更支援を含むナビルート走行機能」の実現においては、単一車線上から複数車線へと、より複雑な制御が要求される。車線変更や追い越しなど、交通シナリオがより複雑となるため、シミュレーション技術を用いて多くの交通流条件下で車線変更機能などが正しく作動することを検証してきた。

一方、「同一車線内ハンズオフ機能」を実現する上でのキーとなるのが車両挙動の安心感である。日産自動車ではダイナミックパフォーマンスを、誰でも、いつでも、どんな道路環境でも発揮できる技術を長年積み上げ、お客様から好評を得ている。お客様が「意のまま」と感じるクルマの動きや、クルマの動きの意図を生成する人間メカニズムに関する研究の成果の多くを今回の PP2.0 につぎ込まれている。

ダイナミックパフォーマンス研究から得られた「車をどのように動かすか」という知見を最大限に活用し、加えて、シミュレーション技術を積極的に適用して多くの運転支援システム・安全システムの開発で得てきた技術の蓄積、知能化技術の進化、人間研究の成果を融合させ、単に便利だけではなく、クルマと人が目的地向けて対話をしながら協調してドライブができる、そんな関係を築いてもらうために開発を行ってきた。その実現に向けて検討してきた PP2.0 の性能目標設定とその検証結果として、以下の項目について述べる。

- ・複雑な交通環境における車線変更動作の検証
- ・乗員の感覚ずれを抑える車両挙動目標設定と検証

2. 複雑な交通環境における車線変更動作の検証

車線変更支援機能の評価には隣車線を走行する他車両との相互関係を含めた網羅的な検証が必要となる。そのため、複数のツールを組み合わせた連成シミュレーション環境を構築することで、交通流、PP2.0 システム (センサ、制御ロジック) および車両挙動の相互作用を再現した (図 1)。特に、車線変更動作にとっての重要特性である操舵に対するヨー応答の再現性を確保するため、操安性能評価にも用いられる高精度な車両モデルを採用し、センサ、制御ロジック、車両挙動の相互関係を忠実に再現可能とした (図 2)。

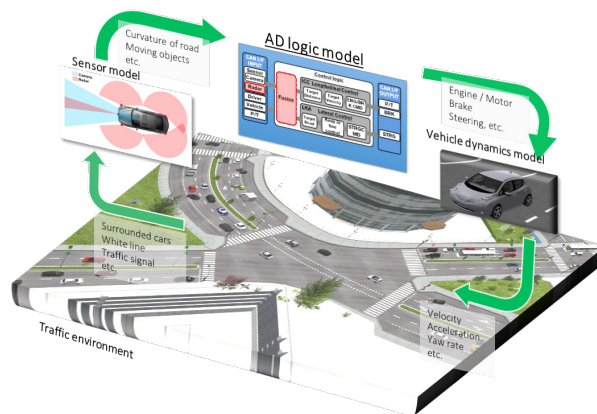


図 1 自動運転用シミュレーションプラットフォーム

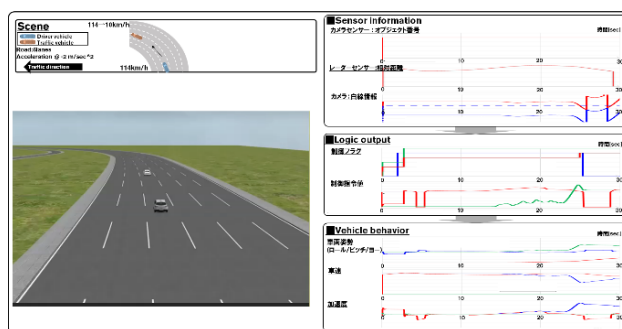


図 2 センサ/AD ロジック/車両挙動シミュレーション結果

次に、車線変更動作時の複雑な交通環境下での検討事例として、分岐シーンにおけるシミュレーション事例を述べる。

* カスタマーパフォーマンス & 実験技術革新部 ** カスタマーパフォーマンス & 第二車両実験部 *** カスタマーパフォーマンス & 第一車両実験部

この事例では、市場評価での再現が困難な複数車両が関わる交通流を再現するため、先ず PP2.0 車両の周囲の空間を9分割し、最近接する任意位置にバスやトラックなどの大型車両を1台ずつ配置(図3; 2,3,6,7,8)、さらに普通乗用車をその前後の任意位置に1台ずつ配置した(図3; 1,4,5,9)。ここで、普通乗用車については車速や加減速度、車線変更タイミングなどの動的交通流パラメータを複数水準設定している。

実際のシミュレーション評価では、上記前提条件に基づき計1376パターンテストケースを自動生成したが、この中には車線変更を行った際に大型車両の死角から普通乗用車が突然カットインしてくる、というような、PP2.0 車両にとって対応が難しいと考えられるシーンも多数含まれている。

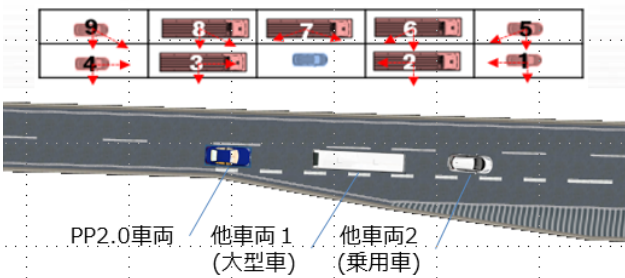


図3 分岐シーンにおけるプロパイロット 2.0 車両と他車両の配置図

また、シミュレーション結果の処理に関しては、PP2.0 車両と他車両の時系列での相対位置や、相対速度も考慮したTTC (Time To Collision)、さらに設計通りに制御ロジックが動作しているかなどを総合的に判断した結果の一覧を、数分で出力できるようにした(図4)。

図4 分岐シーンにおけるシミュレーション結果一覧

このように、従来行われている実車を用いた検証の他にシミュレーション環境を用いた検証も行うことで、任意の道路形状や交通流の条件における車線変更機能作動時の車両挙動を再現し、PP2.0 システムに問題があるかどうか、もしくは問題が起こった際の要因について、より正確な分析と対策の検討が可能となった。

3. 乗員の感覚ずれを抑える車両挙動の目標設定と検証

PP2.0 には同一車線内ハンズオフ機能が搭載されているが、ハンズオフ時のドライバーは運転操作を行わないため不随意運動(受動運動)の状態になっていると仮定できる。不随意運動の状況下では、図5下のように脳内モデル(内部モデル)での運動推定結果をもとにした動作の補正が行われなため、人が感覚系から得る知覚量(実感覚)と、意識下で行われ知覚されない推定感覚との“ずれ”が発生しやすく、それが感覚混乱を引き起こし得る。ドライバーが安心してハンズオフ状態を続けるためには感覚のずれを生じにくい車両挙動を実現する必要があると考えられる。

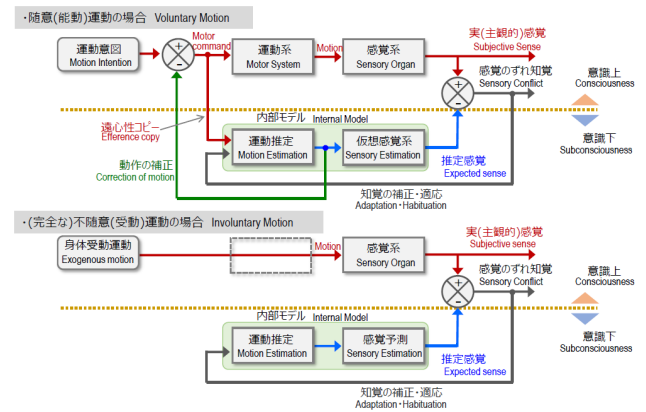


図5 随意運動/不随意運動時の乗員知覚モデル

日産自動車ではこれまで、乗員の快適性を向上させる車両運動制御について研究を重ねてきた。その中で、車両の操作量だけでなく、乗員の視覚による知覚量や身体挙動に関連する運動知覚量もパラメータとして考慮した上での、最適な車両挙動の探索手法構築に取り組んできた。快適性に寄与するパラメータとしては、視覚情報として知覚されるレーン内での横方向移動速度やステアリング操舵速度、身体に加わる加速度やその時間変化(躍度)などが挙げられる。そこで、これら知覚量を最小限に抑えて人の推定感覚とのずれを生じにくくすることが安心感につながるという仮説を立て、車両挙動の性能目標を設定した。

例として図6は、車両運動に関係するパラメータを変化させた際の、車両の横方向加速度および乗員身体の角加速度の時間変化を表している^[1]。V0は運転操作を行うドライバー(随意運動)の快適性向上を仮定し操舵操作量を最小化した仕様、R1は乗員(不随意運動)の快適性向上を仮定し運動知覚量の1つである身体ロール角加速度を最小化した仕様である。これらの車両挙動は、図7のような操舵ロボットやドライビングシミュレーターにより再現することができる。各車

両挙動に対する社内パネラーによる官能評価の結果、仕様V0については動きが滑らかであるものの身体姿勢変化が大きく感じる、仕様R1については身体姿勢変化が小さい、並行移動感が高まった、などの主観評価結果が得られている。

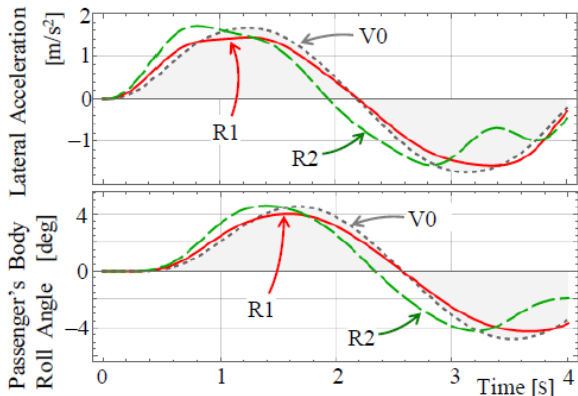


図6 随意運動／不随意運動下での快適性向上を仮定した車両挙動における横Gおよび乗員身体角加速度の時間変化

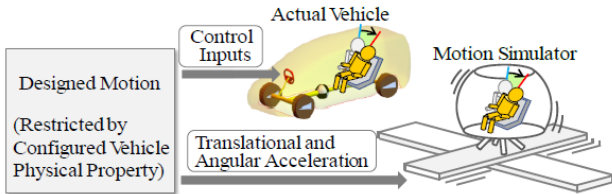


図7 操舵ロボット・ドライビングシミュレーターを用いた車両挙動評価

次に、乗員が感覚系から得る知覚量の評価について説明する。目標とする車両挙動を実際に開発車両で実現できたかどうかの評価は、テストコースでの走行実験によって行われた。この評価では、実際にこの車両を運転した評価者による官能評価と、乗員知覚モデル(図5)で乗員への入力とされている実感覚としての知覚量の計測データによる定量評価の両方を用い、新しい性能目標が達成されたかどうかを確認した。日産自動車は高速道路環境での評価が可能なテストコースとして陸別試験場(図8)を保有しており、ここには複数車線、大R旋回、複合旋回、路面アンジュレーションなどの多様な道路環境に加えて、PP2.0の機能実現に必要な不可欠な高精度地図も整備されている。今回の評価は、このテストコースを熟知したベテランドライバによる運転とPP2.0による運転とを比較する形で行った。



図8 日産自動車 陸別試験場

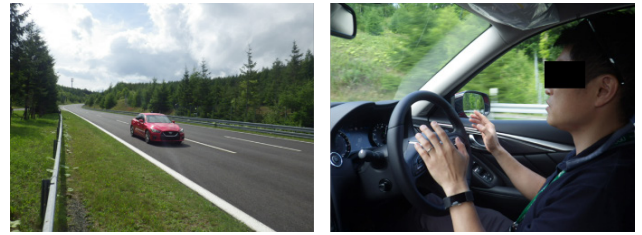


図9 テストコースでのプロパイロット 2.0 評価の様子

まず初めに、PP2.0の同一車線内ハンズオフ走行に対して官能評価を行った。その結果、カーブ走行時のステアリング操作開始点が早く修正操舵量が少ない、軌道上を走行しているかのようなドッシリとした安定感がある、滑らかな走行がいつまでも持続できる、という評価結果を得た。

官能評価結果を定量的に裏付ける計測データとして、視覚的な知覚量に関するレーン内移動速度、ステアリング操舵速度およびレーン中央からのずれ量を比較した結果を図10～12に示す。これらの値の変動幅がベテランドライバによる運転と比較しても小さく抑えられていることから、PP2.0はレーン中央付近をしっかりとキープ、修正操舵が押さえられており安定感のある挙動を実現できていることが分かる。

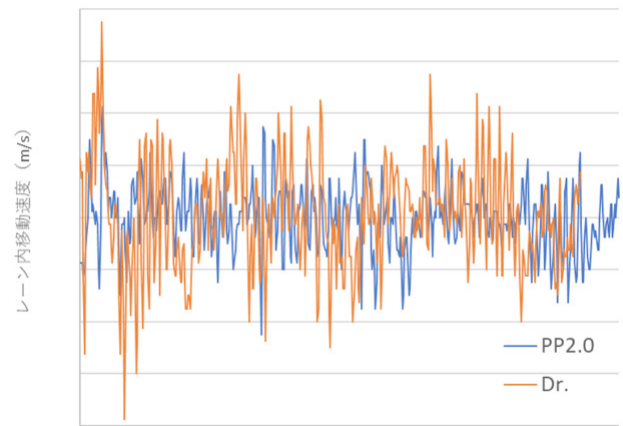


図10 レーン内横方向移動速度

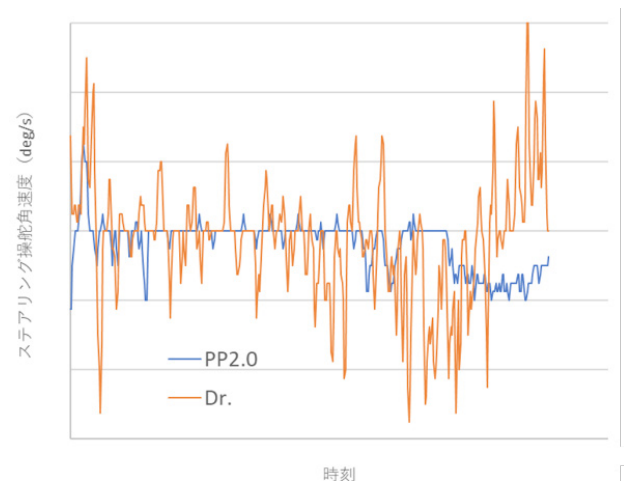


図11 ステアリング舵角速度



図 12 レーン内横方向移動量

一方、運動知覚に関係する物理量として、S字型区間走行時の前後方向・横方向の加速度を計測した結果を図13に示す。この図では縦軸が前後方向の加速度(加速G・減速G)、横軸が横方向の加速度(横G)を表しており、PP1.0(ハンズオン)を用いた場合、PP2.0ハンズオフ機能を用いた場合の2種類のG-Gダイアグラムを色違いで表している。これらを比較すると、PP2.0ハンズオフ機能を用いた場合のほうが前後Gの変動にかかわらず横Gを維持しながらの走行時間を長く継続できていること、左右の横Gレベルが同等であり穏やかにS字区間を走行できていることがわかる。これは、PP2.0では高精度地図により進行する先のコーナー形状があらかじめ分かっているため、コーナーに進入する手前から緩やかな減速を行うとともに、滑らかに横方向の車両制御へとつなげつつコーナーを通過できていることを表している。

以上のように、PP2.0では乗員の感覚混乱の原因となり得る視覚的知覚量および運動知覚量が小さく抑えられる車両挙動を実現できていることを確認した。

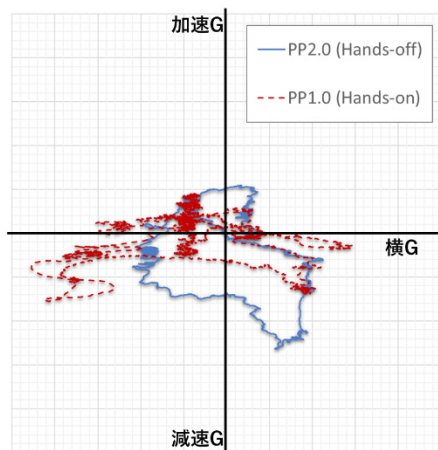


図 13 S字型区間走行時の加減速G・横G (G-Gダイアグラム)

4. プロパイロット 2.0 走行による疲労低減効果の検証

最後に、乗員知覚モデル(図5)において乗員から狙い通りの出力が得られているかどうか、すなわち感覚ずれを生じずに乗員に安心感を与えられているかどうかを検証するため、実際にお客様がこのクルマを走らせる市場の環境下(公道)で、長距離走行時のPP2.0による疲労低減効果を評価し、データから“楽である”ことを確認した。

過度の肉体的、精神的活動によって生じた大量の活性酸素は細胞を傷つけ、傷ついた細胞から疲労因子(Fatigue Factor: FF)が誘発される^[2]。疲労因子によって脳は疲労状態となり、自律神経機能の変調といった症状が出る^[2]。自律神経の状態は交感神経と副交感神経のバランスを示すLF/HFや、自律神経全体の活動の大きさを示すCCVTPによって評価が可能であることから^[3]、今回の実験ではこれらのパラメータを導出できる心拍変動を測定することでPP2.0の疲労低減効果を評価することにした。

心拍変動の測定

本実験ではポータブルの心拍計(MF100、村田製作所/疲労科学研究所製、図14)を使い心拍変動を測定した。測定した心拍変動データをサンプリングレート100HzのR波間隔(R-R interval: RRI)に変換し、パワースペクトル密度関数を求め、その後交感神経系の亢進を反映するLF成分(low frequency components, 0.04 - 0.15Hz)と交感神経系および副交感神経系の亢進を反映するHF成分(high frequency components, 0.15 - 0.4Hz)を算出し、LF成分をHF成分で除すことでLF/HFを求めた。また、LF成分とHF成分の和の平方根をR波間隔の平均値で除すことでCCVTPを求めた。さらに年齢や性別の影響^[4]を除外するため、年代、性別ごとに測定した1万人以上のCCVTPデータ、および各群の人口比率をもとにCCVTPを偏差値化した^[5]。



図 14 MF100



図 15 走行ルート

走行条件

本実験は、図 15 に示す 167km の区間で実施した。実験参加者は事前に下りドライブと上りドライブに振り分けた。下り、上りとも中間地点として日本坂 PA に立ち寄った。実験参加者は PP2.0 の ON 状態と OFF 状態で 2 日に分けて走行し、初日にどちらで走行するかは実験参加者間でカウンターバランスを取った。PP2.0 ON 走行中は、緊急時を除いて極力 PP2.0 モードを維持し、渋滞や工事区間等により一時的に OFF になった場合は通過後即座に ON に戻すよう指示した。設定車速は 100km/h 上限とし、安全な範囲内で設定車速の変更や追い越しは許可した。PP2.0 OFF では車速 100km/h を目安に、普段通りの運転をするよう指示した。

実験参加者

本実験は、日産自動車（株）実験倫理委員会の審査を受け、承認を得た方法で実施している。実験参加者は 30 ～ 60 代の男女 13 名（男性 11 名、女性 2 名）で、内 2 名については SAE の定義する自動運転レベル 1 以上の機能を日常的に使用していた。

また、実験参加者には、走行前日の深酒や夜更かし、走行当日の朝食の欠食、走行開始 1 時間前以降の喫煙や水以外の飲食は控えるよう指示した。

手続き

実験準備完了後、下り実験の出発点である足柄 SA までの運転は下りドライブが行い、このとき走行条件 (PP2.0 ON または OFF) は適用せず自由に運転した。足柄 SA 到着後 15 分の休憩を取り、実験を開始した。最初に安静閉眼状態の心拍変動を 2 分間記録した。心拍変動測定中オーディオ類は消音し、発話、大きな体動、深呼吸等しないよう指示した。その後、その日の走行条件に従い日本坂 PA まで走行し、到着後すぐに心拍変動を測定し、完了次第浜名湖 SA に向かった。浜名湖 SA 到着後、同様にすぐに心拍

変動を測定し、下りドライブの実験を終了した。浜名湖 SA にて 30 分の昼食後、1 時間のレストタイムを設けた。レストタイム中、上りドライブは喫煙および水以外の飲食は控えるよう指示した。レストタイム終了後、浜名湖 SA をスタート地点として下りドライブと同様の手続きを行った。なお、中間地点の日本坂 PA 区を境に、走行の前半区間と後半区間に分けてデータを分析することとした。

結果

LF/HF および CCVTP の結果を図 16, 17 に示す。LF/HF は常用対数でデシベル変換した。走行条件 (PP2.0 ON, PP2.0 OFF) × 走行区間 (前半区間, 後半区間, 全区間) についてそれぞれ 2 要因の反復測定分散分析を行った結果、LF/HF に関しては交互作用 ($F = 8.96, p < .01$) が、CCVTP に関しては走行条件の主効果 ($F = 9.21, p < .05$) が有意であった。

LF/HF の交互作用について下位検定を実施した結果、走行条件の単純主効果が前半区間において認められ ($F = 7.84, p < .01$)、また走行区間の単純主効果が PP2.0 ON ($F = 4.02, p < .05$)、PP2.0 OFF ($F = 3.55, p < .05$) ともに認められた。一方 CCVTP について走行条件の単純主効果を見た結果、全区間においてのみ有意であった ($F = 7.05, p < .05$)。以上の結果より、PP2.0 ON は PP2.0 OFF と比べ、前半区間の自律神経バランスが有意に鎮静傾向であり、一方 CCVTP は全区間で見たときにおいてのみ自律神経活動の大きさに有意差が現れることが示された。

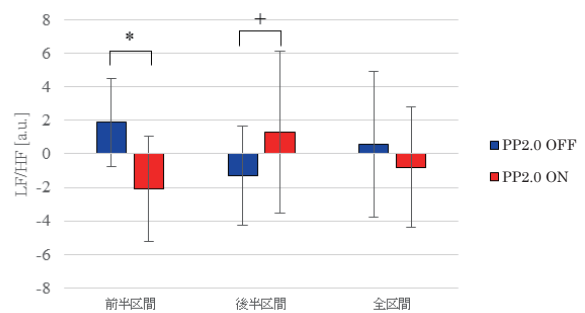


図 16 LF/HF の比較

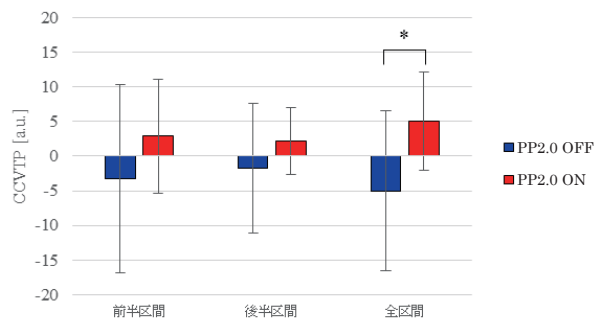


図 17 CCVTP の比較

CCVTPの結果から(図17)、PP2.0機能の使用によって疲労が低減したと解釈できる。また前半区間、後半区間とも全区間同様PP2.0 ONのCCVTPが高い傾向が見られることから、疲労は前半区間から蓄積し続けており、全区間走行したところで有意な差として現れたと推察できる。一方LF/HFを見ると、PP2.0 OFFは前半区間が、PP2.0 ONは後半区間が興奮傾向にある(図16)。LF/HFの上昇は交感神経系の亢進あるいは副交感神経系の抑制によって起こり、交感神経系が長時間亢進し続けると疲労に繋がるとされている^[3]。このことから、PP2.0 OFFでは前半区間で交感神経系が亢進し疲労蓄積に繋がり、後半区間は副交感神経系が亢進し疲労蓄積の程度が抑えられたと考えられる。一方PP2.0 ONでは前半区間で疲労の蓄積が少なかったため、相対的に後半区間のLF/HFが上昇したと考えられる。

以上の結果から、PP2.0機能を使用した長距離走行では、通常の運転による走行時よりも疲労の蓄積が抑えられている傾向を確認できた。これは、PP2.0がどのような交通環境下であっても安心感のある車線変更動作を行い、乗員にとって違和感のない快適な車両挙動を実現できたことの結果であると考えられる。

5. まとめ

これまで述べてきたように、日産自動車の実験技術は、PP2.0の車の挙動がどうあるべきかについて、ダイナミックパフォーマンスの視点、制御技術の視点、更には人間科学の視点から目標を設定し、評価を行った。その結果として、多くのお客様や自動車評論家から、単に便利な機能というだけでなく、「相棒」とまで表現していただく高いレベルに到達することができた^{[6][7][8]}。

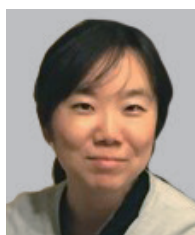
これらの結果は、日産自動車の長年の実験技術の蓄積によるところが大きく、一朝一夕に実現できるものではない。先に紹介した世界最大級のドライビングシミュレーターだけでなく、MILS、HILSの台上実験システムチェーンや走行

車両統合計測技術、大量データ分析技術などの総合力をもって得られた成果であることを最後に付記したい。

参考文献

- [1] 牧田光弘, 松下晃洋, 草柳佳紀, 三浦雅博:
乗員の快適性を向上させる車両運動の探求,
自動車技術会論文集 Vol.50, No.5, p. 1349-1354
(2019)
- [2] 渡辺恭良: 疲労の科学・脳科学と抗疲労製品の開発,
Japanese Journal of Biological Psychiatry,
24(4), (2013)
- [3] 倉恒弘彦: 日本における疲労の現状と客観的疲労評価法,
ストレス科学, 32(4), pp. 271-282 (2018)
- [4] 倉恒弘彦: 疲労度の判定処理システム,
JP5491749B2 (2009)
- [5] 小泉淳一: 自律神経機能年齢の判定システム及び
判定方法, JP5455071B2 (2011)
- [6] 中谷明彦: WEB CARTOP (公開日:2019/08/30)
<https://www.webcartop.jp/2019/08/419804/>
- [7] 青山尚暉: DIME (公開日:2019/10/31) <https://dime.jp/genre/797355/>
- [8] 会田肇: レスポンス (公開日:2019/11/22)
<https://response.jp/article/2019/11/22/329031.html>

著者



久保田 悠美



佐々木 光次



長江 新平



萩野 健治