

TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2022/ **2** 237

特集

「スポーツを通じた平和で
差別のない社会づくり」
そして「モビリティを通じた
持続可能な社会づくり」へ



Vol.67

SUSTAINABILITY

【表紙のデザイン】

今回、本誌では、東京2020オリンピック・パラリンピックに提供した大会運営モビリティおよびロボット（以下、モビリティ群）を中心に特集しています。

モビリティ群のさまざまな使用環境を想定した画像をモザイク状に配置し、自由な「移動」の多様性をイメージしつつ、「SUSTAINABILITY」というキーワードを添えることにより、「モビリティを通じた持続可能な社会づくり」に向けた当社の思いを図案化した構成となっています。

APM：東京2020パラリンピック選手村。この画像はイメージです。

東京2020マスコットロボット：東京2020組織委員会と開発。

TOYOTA Technical Review

237

Vol. 67 Feb. 2022

目次

巻頭言

- ・ホームプラネットモデルチェンジ 先進技術開発カンパニー Fellow 奥地 弘章 4

▷特集「スポーツを通じた平和で差別のない社会づくり」そして「モビリティを通じた持続可能な社会づくり」へ

- ・燃料電池バスSORAによる自動運転実証 香川 卓也 6
- ・APM (Accessible People Mover) の開発 加藤 浩幸/谷中 壯弘/大豊 公志 11
- ・歩行領域EVの開発 山田 雅司/谷中 壯弘/森 淳/仙波 快之 16
- ・TOYOTA LQ 井戸 大介/武井 達弥/岩田 洋一/関沢 省吾/中川 俊 21
- ・東京2020オリンピック・パラリンピック生活支援ロボットによる車いす観戦サポート
戸田 隆宏/田中 和仁/岩永 優香/竹下 佳佑/大沼 侑司/森 健光 27
- ・テレプレゼンスロボットT-TR2の開発 中山 貴裕/木田 祐介 32
- ・フィールド競技サポートロボットFSRの開発 桑原 健/山根 五月/重本 剛 37
- ・東京2020マスコットロボットの開発
森平 智久/服部 祐人/土井 将弘/井山 寛之/近藤 寛之/山本 一哉 44
- ・AIバスケットボールロボットCUE5の開発
辻本 崇好/八木 正純/滝沢 良/土井 将弘/原田 哲志/安井 雄哉/佐野 光 51

▷論文/解説

- ・PHEV参加型の個人間 (P2P) 電力取引システムの開発
小幡 一輝/工藤 由貴/菊池 智志/木暮 宏光/木村 和峰 58
- ・複雑な都市環境における高度自動運転に対するTRIの取り組み
Ryan Eustice / Wolfram Burgard / John J. Leonard / Ryan W. Wolcott / Robert Zidek / Gill Pratt 65

▷受賞技術概要 73

Contents

Preface

- **Transforming Our Home Planet**
Hiroaki Okuchi, Fellow, Advanced R&D and Engineering Company4

-
- ▷ **Special Feature: Toyota's initiatives for building a society through sports in which everyone can participate in peace and equality, and for realizing a sustainable society through mobility**
 - **Field Operational Tests of Automated Driving Using the Sora Fuel Cell Electric Bus**
Takuya Kagawa6
 - **Development of the Accessible People Mover (APM)**
Hiroyuki Kato/Akihiro Yanaka/Masashi Otoyo11
 - **Development of Walking Area Electric Vehicles**
Masashi Yamada/Akihiro Yanaka/Makoto Mori/Yoshiyuki Senba16
 - **The Toyota LQ**
Daisuke Ido/Tatsuya Takei/Yoichi Iwata/Shogo Sekizawa/Satoshi Nakagawa21
 - **Support for Spectators in Wheelchairs at the Olympic and Paralympic Games Tokyo 2020 Using Human Support Robots (HSRs)**
Takahiro Toda/Kazuhiro Tanaka/Yuka Iwanaga/Keisuke Takeshita/Yuji Onuma/Takemitsu Mori27
 - **Development of the T-TR2 Telepresence Robot**
Takahiro Nakayama/Yusuke Kida32
 - **Development of Field Support Robot (FSR)**
Takeshi Kuwabara/Satsuki Yamane/Takeshi Shigemoto37
 - **Development of Tokyo 2020 Mascot Robots**
Tomohisa Moridaira/Hirohito Hattori/Masahiro Doi/Hiroyuki Iyama/Hiroyuki Kondo/Kazuya Yamamoto44
 - **Development of the CUE5 AI Basketball Robot**
Takayoshi Tsujimoto/Masazumi Yagi/Ryo Takizawa/Masahiro Doi/
Tetsushi Harada/Yuya Yasui/Hikaru Sano51

▷ Technical Papers/Technical Articles

- **Development of Peer-to-Peer Energy Trading System Including Plug-in Hybrid Electric Vehicles**
Kazuki Obata/Yuki Kudo/Satoshi Kikuchi/Hiromitsu Kigure/Kazutaka Kimura58
- **The TRI Approach to Advanced Automated Driving in Complex Urban Environments**
Ryan Eustice/Wolfram Burgard/John J. Leonard/Ryan W. Wolcott/Robert Zidek/Gill Pratt65

▷ Technical Award News73

ホームプラネットモデルチェンジ

先進技術開発カンパニー Fellow

奥地 弘章



コロナ禍による大会史上初の1年延期そして無観客での開催となった東京2020オリンピック・パラリンピックですが、2015年にワールドワイドパートナー就任を決めた当社社長の想いをご存知でしょうか。

それはオリンピック・パラリンピックが目指す「限界への挑戦」や「共生社会の実現」という理念と価値観に共感し、「スポーツを通じた平和で差別のない社会づくり」そして「モビリティを通じた持続可能な社会づくり」への貢献を目指す、というところにあります。

特に「移動」がチャレンジするための障がいではなく、夢を叶えるための可能性になって欲しい、移動が自由にできればどんなことにもチャレンジできる。

このような想いから従来大会におけるような単なる車両供給スポンサーとしてではなく、初のモビリティワールドワイドパートナーとして、モビリティソリューション全体を大会へ提供していくことに積極的にチャレンジしています。

モビリティソリューションは、「サステナビリティ」「Mobility for All」そして「TPS」というSDGsそのものともいえる三本の柱から成り立っており、これに基づいた先進技術が東京2020大会に実装されています。

サステナビリティの柱では、乗用車のみならず、バス、フォークリフトまで含めた大会運営モビリティに大量の水素モビリティを投入、大会史上最高レベルの環境性能を実現し、水素の聖火とともに東京2020大会をカーボンニュートラルに向けた水素社会の扉を開く大会とし、この美しいホームプラネットを次世代へ繋いでいきます。

そして初の同一都市二度目の夏季パラリンピック開催都市として、究極の Mobility for All ソリューションといえる技術を大会運営に実装するとともに、全ての人に寄り添った聖火リレーを目指し、T-TR1/2 による遠隔地からの仮想移動も実現、これは新しい時代の Mobility for All ともいえます。

また、TPS、IoT を駆使した大会車両運行管理により、輸送が最大の課題の一つとされている超過密都市東京においても、安心安全快適な移動を実現し、大会成功に向けた運営そのものにもトヨタの強みを生かしています。

加えて、FSR による投てき競技の省人化、マスコットロボットのおもてなし、バスケットロボット CUE の超人的パフォーマンスにより大会を盛り上げ、アスリート、国民をはじめ多くのステークホルダーの笑顔をも量産、その裏には大会延期で大進化を遂げた熱い開発物語があります。

一方、ウィズコロナにより空間や移動の価値が見直されている時代、究極の POV といえる LQ や HSR をはじめとする非接触型ロボット技術は時代特有の注目をも集めるモビリティ技術といえます。

このようなオリンピック・パラリンピックにおけるトヨタ開発陣による数々の新しい領域へのチャレンジは、トヨタのモビリティカンパニーへの変革に向けた、そして SDGs に真剣に取り組む先進技術開発を加速させる絶好の機会でもあります。

なぜならば大会という場は、世界中からアスリートや大会関係者、そしてボランティア等の大会をサポートする多様性に富む人々が行き交う現実のコミュニティであり、そこに実装していくことはトヨタが目指す将来のモビリティ社会を広く見て知ってもらえる機会となるからです。

そして我々開発陣は、東京・北京・パリと各々の都市にあった、かつ大会ごとに進化したソリューションを提示して、絶えざる改善を続けていくことが大事だと思っています。

2 年ごとのオリンピック・パラリンピックが、トヨタのモビリティカンパニーへの変革の起爆剤となり、そしてこのホームプラネットのモデルチェンジのトリガとなることを目指したいと考えています。

燃料電池バス SORA による自動運転実証

Field Operational Tests of Automated Driving Using the Sora Fuel Cell Electric Bus

香川 卓也^{*1}
Takuya Kagawa

要旨

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期の東京臨海部における自動運転実証実験に、日本初の量産型燃料電池バス SORA をベースに、日野自動車株式会社様と共同で開発した自動運転バスにて参加した。信号・バス専用レーン等のインフラと連携し、磁気マーカーによる自車位置推定・自動加減速・自動操舵・周辺環境認識等による自動運転走行を羽田空港周辺の公道にて実施し、自動運転技術を適用した将来の公道での路線バスサービスの社会実装に向けた知見を得ることができた。

Abstract

Toyota participated in the automated driving field operational tests (FOTs) carried out in the Tokyo waterfront area as part of phase 2 of the Cross-Ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP) using an automated bus, which was jointly developed by Hino Motors, Ltd. and based on the Sora, Japan's first mass-produced fuel cell electric bus. These automated driving tests were carried out on public roads in the area around Haneda Airport and involved coordination with infrastructure such as traffic signals and bus lanes, localization technology using magnetic markers, automated acceleration, deceleration and steering, detection of the surrounding traffic environment, and so on. A wide range of knowledge was obtained with regard to the future social implementation of fixed-route bus services on public roads using automated driving.

キーワード 自動運転, 燃料電池, 公共交通, 路線バス, インフラ, 社会実装, 正着, 社会受容性

1 まえがき

近年、交通事故の低減、交通渋滞の削減等の社会問題の解決への貢献を目指して、自動運転実用化に向けた研究開発が推進されている。

一方、公共交通は人々の暮らしを支える重要な役割を担っているが、こちらもさまざまな課題に直面している。現在、全国的な人口減少で地方の電車やバス等の交通路線が相次いで撤退。また、運転手不足で需要のある路線でも縮小されるケースもでてきており、赤字路線の維持や運転手不足対策として地方の「交通弱者」の新たな足の確保のためにも、バスの自動運転の実用化が大いに期待されている。

本稿では、信号等の ITS と連携した路線バスの自動運転実証により得られた知見、および、今後の課題について紹介する。

2 車両概要

今回は電動車である燃料電池バス SORA をベースに自動運転バスを仕立てた。燃料電池バスは、走行時に CO₂ や環境負荷物質を排出しない優れた環境性能と、騒音や振動の少ない快適な乗り心地を兼ね備えている。また、電動車特有のスムーズな加速と、自動運転に不可欠な高性能な人工知能（AI）を搭載する場合、一定量の電力が求められることから、燃料電池バスは自動運転に大変適している。

車両に搭載した機能を図 1 に示す。今回の実証では走路に埋設された磁気マーカーを、車両底部の後輪軸前後に搭載した磁気センサで検出・照合し自車位置を特定する仕組みを採用した。磁気マーカーシステムは、積雪・濃霧等の悪天候下や GPS 電波が届きにくいトンネル内等でも正確な位置情報を入手することが可能であり、決まったルートを走行する公共交通の路線バスとの相性が良い。

^{*1} CV カンパニー CVZ



図1 自動運転実証車両

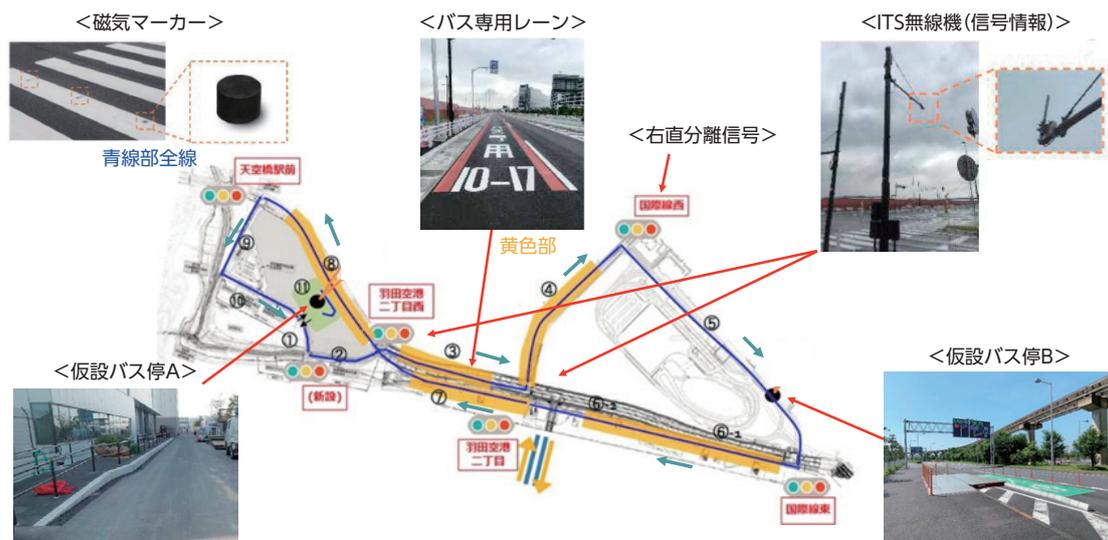


図2 実験コースと整備インフラ

また、車両前後に搭載したカメラや LiDAR (Light Detection and Ranging) は障害物・対向車・歩行者等を検知する周辺環境認識に使用し、自動加減速・自動操舵機能とあわせて自動運転を実施した。

路線バスは車内に立っているお客様の存在が前提のため、今回の実験車両は急制動による車内での転倒事故の回避を目的とした減速度の上限目標を 0.15G とした。

また、あわせてこれによりジレンマゾーン（青信号から黄信号変化時に、黄信号終了時まで停止線を通過することもできず、かつ急減速無しで無理なく停止することもできない領域）を確実に回避するために走行速度の上限を 35km/h とした。

3 実験コースと整備インフラ

今回の実証走行は羽田空港周辺の公道を主に実施した。関係省庁ご協力のもと、公道には数多くのインフラを整備頂いた。実験コースとインフラの整備状況を図2に示す。

磁気マーカーは走行ルート全線に埋設頂いた。また、一般車との交錯による回避制御の頻度を下げるため、専用道や専用レーンは早期の社会実装に有効な環境の一つであり、今回の実証実験もバス専用レーン（規制時間 10～17 時）を交差点内と片側 1 車線等の一部の区間を除いて設置いただいた。

また、ITS 無線機を利用した路車間通信での信号の青・黄・赤の灯色情報を利用して、発進・停止制御も実施した。

4 実証実験結果

4.1 磁気マーカーによる走行

磁気マーカーは天候や周辺環境の影響を受け難く、自車位置を推定できるため、一定ルートを走行する公共交通の路線バスにおいては大変有効であることを改めて認識した。

ただし、目標としていた通常走行において、走行軌跡に対する横偏差 ± 200mm 以内での走行は達成できたが、左折時の路肩境界線や右折時のゼブラ

ゾーンを踏まない走行軌跡の設定に苦労した（写真1）。



写真1 右折レーン手前のゼブラゾーン

また、左折先の対向車と自車右前端とが近接する場面（写真2）や、大型バスでは車線幅に対する余裕が少なく隣接する車線を走行する大型車と近接する場面（写真3）が見られた。



写真2 左折先の対向車



写真3 隣接車線の大型車との並走

これは大型車両サイズならではの問題であり、自動運転専用レーンの車線幅拡大や路肩境界線・ゼブラゾーン・停止線の自動運転車への配慮を希望するとともに、乗用車の自動運転システム以上の認識精度や、隣接車両の予測技術（ドライバーの危険予知運転）も重要な要素となる。

4.2 磁気マーカーによるバス停正着

高齢者や車イス・ベビーカーを利用するお客様の乗降性の向上（バリアフリー）につながる正着評価を実施した。車イスの方が一人で乗降可能な60mm以内の隙間とするため、車両とバス停の隙間目標を $45 \pm 15\text{mm}$ とした。結果はバス停への進入軌跡が異なる2つの仮設バス停A・B（写真4、5）において偏差約4mm（図3）と目標を達成した。



写真4 仮設バス停Aの進入軌跡



写真5 仮設バス停Bの進入軌跡

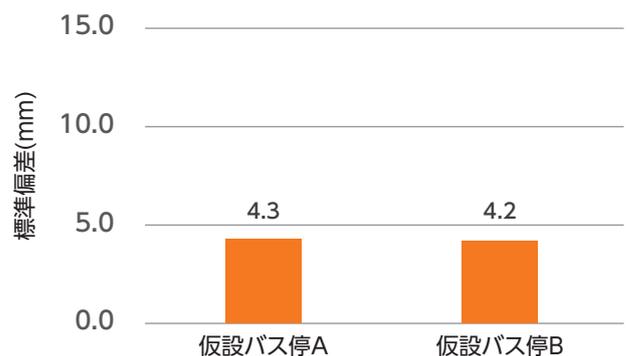


図3 車両と仮設バス停との隙間の偏差

ただし、難易度の高い鋭角な進入軌跡である仮設バス停Bでは進入速度を5km/h程度まで下げることが必要であり、速達性の観点から進入軌跡の角度の緩和、つまりバス停手前に十分なスペースが確保されていると良い。

4.3 信号情報に基づく停止・発進

ITS無線機から受信した信号情報に大きな遅延は無く、停止・発進の制御において問題無く使用することができた(写真6)。また、走行速度の上限を35km/hとすることで、ジレンマゾーンの発生を抑止することができた。



写真6 受信した信号情報(車内モニター)

4.4 バス専用レーンによる自動運転バスの運用

バス専用レーンの確保により外乱の少ない自動運転バスに適した走行環境を確保することができた。

ただ、一部区間において、規制時間内(10~17時)の駐停車車両の発生や突発的な割り込み車両のために、ドライバーによる手動運転への切り替えで回避するケースも見られた(写真7)。これに対しては、一般車等の外乱の無い確実な専用空間の確保、もしくはお客様の着座前提等の外乱対応が必要と考える。



写真7 バス専用レーン上の駐停車車両

5 まとめ

磁気マーカー・バス専用レーン・バス停・ITS無線機等による自動運転を用いた路線系バスサービスの実現性について検証し、早期の実用化に向けて以下課題を抽出した。

- 1) 専用レーンでも駐停車車両や割り込み車両との突発事象を完全に排除することは難しい。例えば自動レーンチェンジ機能や着座を前提とした外乱対応機能を備えた自動運転バスの開発、または、駐停車禁止等を順守する社会受容性の醸成が必要。
- 2) 大型バスは車線幅に対する余裕が少なく、大型車との並走等のケースでは安全距離の確保が難しい。車線幅の拡張が必要。
- 3) 左折先での対向車が停止線で停止していると安全距離の確保が難しい。停止線位置の後退と、停止線での停止を厳守する社会受容性の醸成が必要。
- 4) 車道外側線やゼブラゾーンをタイヤが踏まない前提での軌跡設計が難しい。道路標示位置の見直しが必要。

-
- 5) 正着に必要なバス停スペース確保と速達性の両立が難しい。周辺交通流を考慮した進入角度・目標停止位置のスペース確保が必要。

本実証実験にあたり、インフラ整備において関係省庁に、実証実験車の開発において日野自動車株式会社様に多大なるご協力をいただいた。謹んで感謝する。

■著者



香川 卓也

APM (Accessible People Mover) の開発

Development of the Accessible People Mover (APM)

加藤 浩幸*¹ 谷中 壯弘*¹ 大豊 公志*²
Hiroyuki Kato Akihiro Yanaka Masashi Otoyoy

要旨

「ラストワンマイルの移動をサポートし、すべての人に、快適で安心・安全な移動を」をコンセプトに、東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会向け専用車両として開発した電気自動車を紹介する。

Abstract

This article describes the development of a dedicated battery electric vehicle for the Olympic and Paralympic Games Tokyo 2020 under the concept of facilitating last-mile transportation and providing comfortable, safe, confident, and natural mobility for all.

キーワード Mobility for All, ラストワンマイル, C⁺pod, サイネージ

1 はじめに

トヨタでは、Mobility for All のビジョンのもと、商品開発や様々な取り組みを推進している。東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会においても、オリンピックおよびパラリンピックのワールドワイドパートナーとして、Mobility for All の精神で大会に貢献するべく、大会をサポートする専用モビリティ「APM (Accessible People Mover)」を開発したので、その車両について紹介する。

2 開発のコンセプト

開発当初、大会規定のアクセシビリティガイドラインの原則に則りつつ、さまざまな人・モノの移動ニーズを東京2020組織委員会に伺い、さまざまな移動手段やトヨタが提供可能な車両ラインアップを提示し、各移動に最適な車両の選定を進めるなかで、近距離移動へのソリューション提供というテーマの重要性が改めて認識された。

そこで、「ラストワンマイルの移動をサポートし、すべての人に、快適で安心・安全な移動を」をコンセプトとし、APMの開発をスタートさせた(図1)。

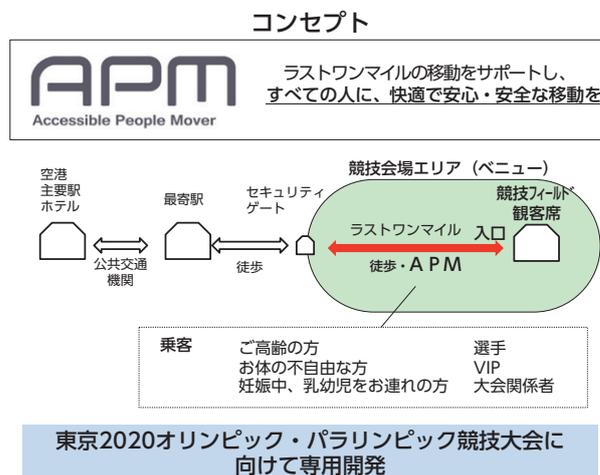


図1 APM 開発コンセプト

具体的には、国立競技場や各競技場などの最終目的地に行く際に、まず空港・主要駅・ホテルなどから公共交通機関などで最寄駅まで移動、さらにセキュリティゲートまで徒歩などでの移動が想定される。そして、ベニュー内を移動して最終的な目的スペースまで移動する際のラストワンマイル移動をサポートするのが本車両の役割と考えた。

選手、VIP、大会関係者の移動はもちろんのこと、高齢者、お体の不自由な方、妊娠中・乳幼児をお連れの方の移動も想定して開発に臨んだ。

3 車両の特長

スポーツ大会におけるラストワンマイルのモビリティについて、組織委員会をはじめとした関係各所

*¹ トヨタ ZEV ファクトリー ZEV B&D Lab
*² 豊田合成株式会社

との協議のなかで、開発ポイントとして、

- ・乗降が容易であること（含む、車椅子）
- ・乗っていただく方、ともに移動する方を大切に
- ・スムーズな運用のためのパッケージング
- ・運転が容易な小型のBEV

を目指すことにした。

車両バリエーションとしては、詳細は後述するが、3タイプを開発した（表1）。

表1 車両バリエーション

タイプ	特長	台数(台)
標準タイプ※	乗客：最大5名、車椅子も可	144
救護タイプ※	要救護の方の移動用	40
リリーフカー	野球競技用	2

※公道走行も可

主な諸元は、下図に示す（図2）。

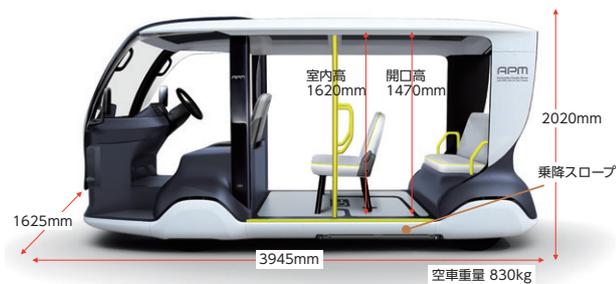


図2 主な諸元

また、車両の特長として、

- ①コンパクトな車両寸法
⇒取り回しやすさ
- ②運転席センター&上方配置
⇒お客様の左右の乗降を素早くサポート、高い視点で視認性確保
- ③乗客用低床フラットフロア（電池床下搭載）
⇒乗降容易、十分な室内スペース確保
- ④乗降スロープ搭載（床下格納）
⇒車椅子乗降対応（標準タイプのみ）
- ⑤最高速度 19km/h（ナンバー取得可能）
⇒自走での会場間移動も可能

デザインは、すべての人々のラストワンマイルが快適になるよう、オープンな視界を確保しながら、タイヤは歩行者や乗員に接触しないデザインとして、トヨタの電動車両のデザインキーをもとにユーザーフレンドリーで先進的なイメージを表現した。さらに、運転席は前方の視界と、振り返って乗員の表情が見えるようにセンターに独立したステップ

ロアで一段高くレイアウトし、絞り込んだ平面形として運転時の左右の見切りの良さを確保したうえで、威圧感のない親しみのあるイメージとした。また、後席シートはスムーズな乗降性のために、やや高いヒップポイントとフラットな形状として、手すりとあわせて視認性の高いイエロー系のカラーでパイピングを施した。表皮においては、クッション部は横に移動しやすく、バック部はホールド性のあるメッシュとして熱がこもりにくく、防汚・撥水作用のある材質を採用した（図3）。



図3 外形デザイン

さらに、アンダーボデー、シャシーユニットおよび走行・電池システムユニットを、2020年末発売開始したC⁺podを最大限活用することで、開発費低減にも配慮した（図4）。

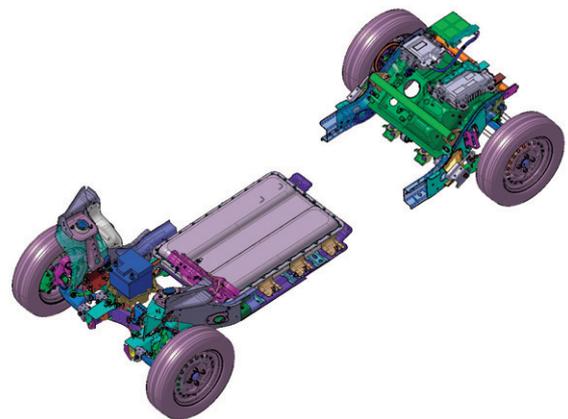


図4 C⁺pod 流用部位

3.1 標準タイプ

●室内アレンジ

乗客最大5名乗車が可能で、2列目シートを折り畳むことで車椅子や荷物の搭載が可能。また、床下格納タイプの乗降スロープも搭載し、スムーズな乗り降りを実現した。車椅子のよりスムーズな乗降のサポートを目的に、スロープおよびフロアに導線を視認性・意匠も考慮しながらグラフィカルに表示した(図5, 6)。

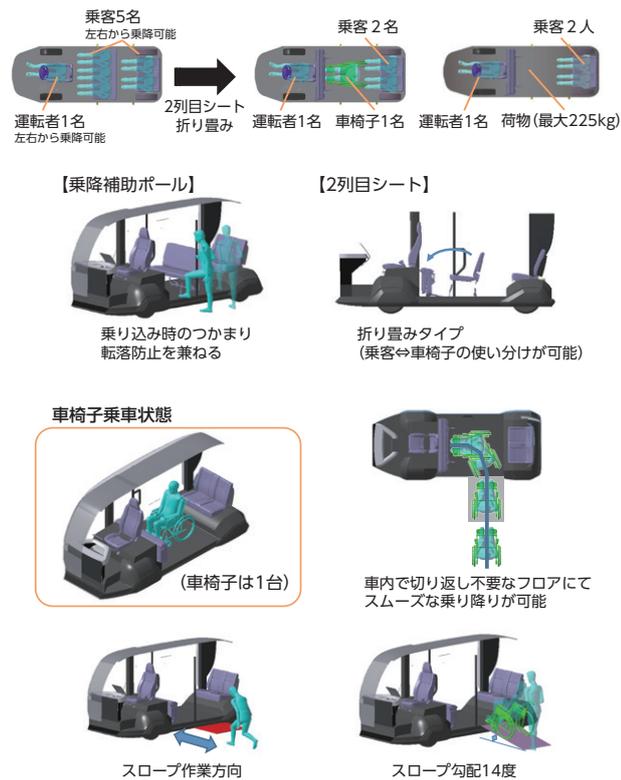


図5 室内アレンジ



図6 利用シーン (車椅子乗車)

●雨天対応

夏場の開放感およびスムーズな乗降を優先し、サイドドアを採用しなかったため、雨天時用にカーテンを設定した。

カーテンは、外形デザインと融合させながら、前後のピラー内にインテグレートされており、必要に応じて前後から引き出して、中央のポールに端部を固定する。前後それぞれの開閉が可能であり、乗降時は必要な部分のみを開けることができるよう配慮した。後方は使用性も考慮したロールカーテンとし、ルーフ後部に格納した。また、カーテンの素材は、雨を遮るとともに、室内外の様子がわかるよう半透過素材とした(図7, 8)。

さらに、運転席横からの雨の吹込みを抑えるため、大型サイドバイザーおよび運転席横に透明樹脂パネルを設定した。

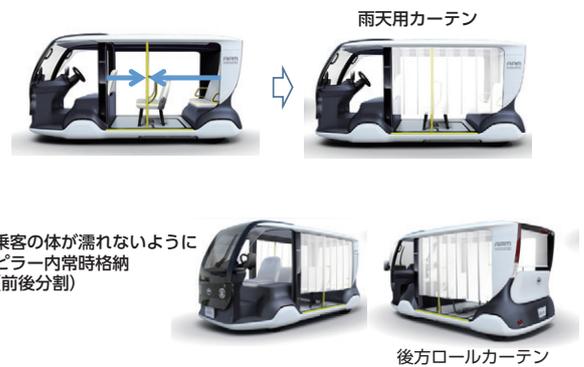


図7 雨天用カーテン



図8 利用シーン (雨天時)

3.2 救護タイプ

救護が必要な方に、救護センターまでの短距離の移動用に開発した(図9)。



図9 救護タイプ

バスケットストレッチャーの搭載を前提に、熱中症対応などを想定したスポットクーラーを設定した。主に顔の周りや上半身に冷風をあてられるよう工夫した。また、救護スタッフ2名が乗車可能とし、夜間でも作業が可能ないように室内照明も完備した。カーテンは、搬送者のプライバシー保護を目的とした使用も可能としている（図10）。

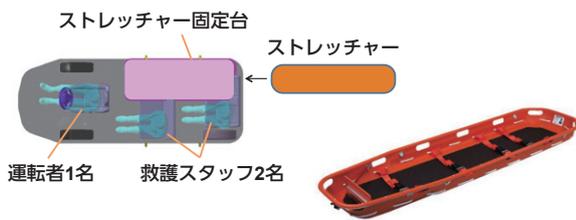


図10 救護タイプ

3.3 リリーフカー

野球競技会場向けの特別車両であり、リリーフ投手のグラウンド移動用に開発した。

リリーフ投手が登場の際、スタンドからも投手がよく見えるようにオープンカーとした。選手が座るシートはグローブ形状とし、フロアにはスパイクで乗降するピッチャーのために人工芝とし、グラウン

ドのダイヤモンドを模擬したラインを施し、大会の盛り上がりにも貢献できるように演出した（図11）。



図11 リリーフカー

また、豊田合成株式会社との共同開発で、サインージを前後パネルに搭載した。LEDやパネル色の特性を踏まえ、遠くからみても分かりやすいコンテンツで競技を盛り上げる工夫をした（図12）。



図12 サインージ

4 おわりに

東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会向け専用モビリティではあるが、Mobility for Allのビジョンの具現化の一例を示せたと自負している。今後も「すべての人に、快適で安心・安全な移動」ができる魅力ある商品を提供していきたい。

コロナ禍の影響で、大会延期にともなう生産日程の延期、仕入先様の事業撤退などさまざまな問題が

あったが、協力会社様、関係者の協力により、何とか大会に提供できたというのが正直なところである。この場を借りて深謝の意を表す。

■著者



加藤 浩幸



谷中 壯弘



大豊 公志

歩行領域EVの開発

Development of Walking Area Electric Vehicles

山田 雅司 *1 谷中 壯弘 *1 森 淳 *1
Masashi Yamada Akihiro Yanaka Makoto Mori

仙波 快之 *1
Yoshiyuki Senba

要旨

「すべての人に移動の自由を」をコンセプトに、ライフステージにあわせた、安心な移動の提供を実現すべく開発した、歩行領域での移動を可能とするパーソナルモビリティを紹介する。

Abstract

This article describes the development of personal mobility vehicles capable of being operated in pedestrian spaces with the aim of providing confident and natural mobility to people at all stages of life under the concept of mobility for all.

キーワード Mobility for All, 歩行領域

1 はじめに

トヨタでは Mobility for All のビジョンのもと、「すべての人に移動の自由を」をお届けするため、モビリティの品揃えとサービスでライフステージにあわせた安全・安心な移動を提供することを目標としている。

また、東京 2020 オリンピック・パラリンピック 競技大会においても、運営・警備スタッフの移動をサポートし、新たな領域でのモビリティの在り方を検証していく予定としている。

本稿では上記により開発した歩行領域 EV について紹介する。

2 導入意義

近年、高齢化による身体能力やニーズの変化、都市・郊外など場所や環境による課題、ニーズの多様化など、目的やシーンに応じたモビリティの必要性が高まっている。

加齢にともなう身体能力の変化に加え、事故への恐怖や家族の反対などにより、従来の移動手段の利用を遠ざけ、移動の欲求と実際の行動範囲にギャップを生じさせる。

それは免許返納をターニングポイントとして、より大きくなり、生活に必要な範囲の移動もままならなくなる。こうしたギャップを埋め、お客様の行動範囲を広げ、生活を豊かにすることが導入意義と考えた (図 1)。

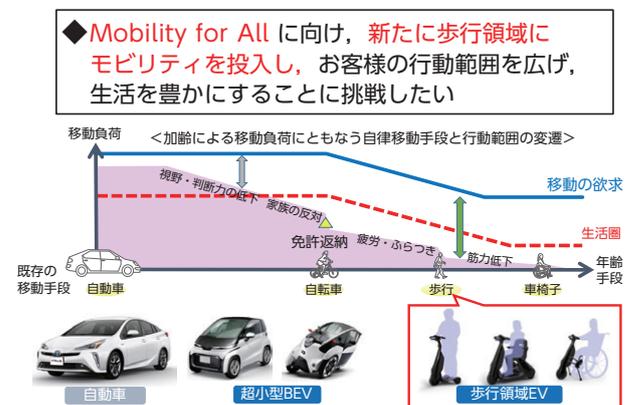


図 1 導入意義の概念図

今まではクルマで移動を支えてきたトヨタが、これまで参入してこなかった歩行領域に新たなモビリティを投入し、免許返納後の移動を含む移動の生涯サポートを実現することに挑戦したいと考えている。

3 投入の狙いとターゲット

歩行領域 EV は目的や利用シーンにあわせて、立

*1 トヨタ ZEV ファクトリー ZEV B&D Lab

ち乗りタイプ、座り乗りタイプ、連結タイプ（車椅子）の3タイプを開発している（図2）。



図2 歩行領域EV 3タイプ

以下にそれぞれの投入の狙いとターゲット、および、パッケージを紹介する。

3.1 立ち乗りタイプ

3.1.1 立ち乗りタイプの投入の狙い

立ち乗りタイプは、いつまでも社会貢献したいシニア労働者の活躍をサポートすることを目的に、巡回・警備業務へのシニア活用や、従業員負荷低減を図りたい企業をユーザーイメージとした。

立ち乗りタイプは現在のところ法律がなく、公道走行が不可能なため、私有地限定での使用を想定している。

3.1.2 立ち乗りタイプのパッケージ

歩行空間に馴染むため、人が歩行するために必要な専有面積を意識し、全長を歩行時の歩幅、全幅を腰幅となるように設計している。また、乗降しやすく、安心なステップ高さを設定した（図3）。さらに、小回り性を重視し、その場旋回が可能な90度ステアを有している。

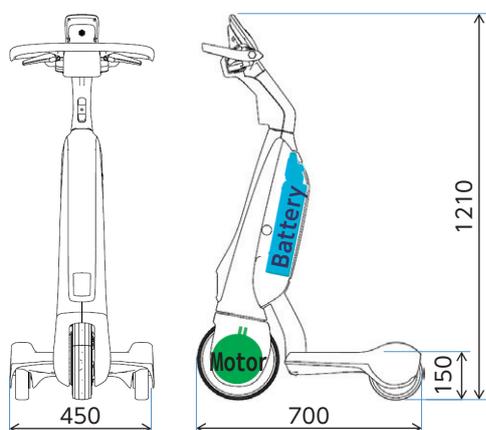


図3 立ち乗りタイプパッケージ

3.2 座り乗りタイプ

3.2.1 座り乗りタイプの投入の狙い

座り乗りタイプは、自宅から近隣施設間の移動をサポートすることを目的にしている。独力歩行は可能であるが、長距離移動が困難な方、具体的には生活用品の買い物やコミュニティへの参加、通院に際して、

- ・一定距離以上はつらい
- ・思うように早くは歩けない
- ・荷物があると歩行はつらい

といった場合でも気軽に移動したい個人をユーザーイメージとして開発した。

現在の法律に適合して公道走行が可能である。

3.2.2 座り乗りタイプのパッケージ

外寸はハンドル型電動車いすのJIS規格に適合するサイズとし、進行方向における不意な路面の変化に対し、前輪まわりが見やすい3輪タイプを選択している。乗降しやすいステップ高さ・ヒップポイントとするため、ステップ地上高を低くすることにこだわり、乗降に際しては、中腰姿勢を維持したままでの乗車を不要とするため、ステップに直立できるスペースを確保している（図4）。

また、体格にあわせてシート位置の前後調整機構を設定した。シート下には買い物かごをそのまま入れることが可能なラゲージを設定している。

さらに、取り扱いのし易さを重視し、小回り性は0.95mの最小回転半径を実現している。

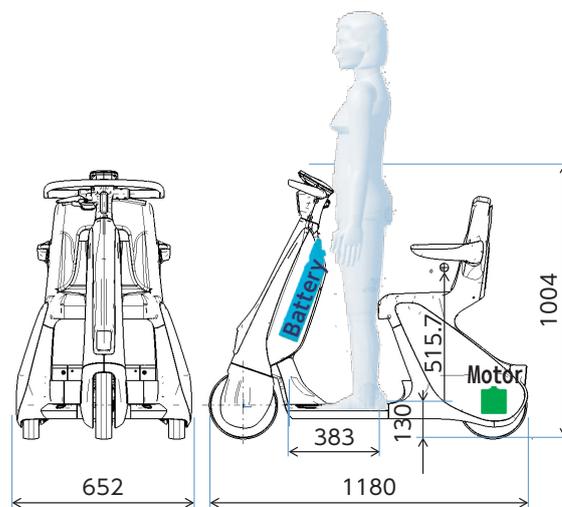


図4 座り乗りタイプパッケージ

3.3 連結タイプ

3.3.1 連結タイプの投入の狙い

連結タイプは、アクティブに行動する手動車いすユーザーの出先での長距離移動をサポートすることを目的とした。普段から車いすで外出しているが、

- ・ 駐車場から施設に入るまでが遠い
- ・ 坂道はさらに困難
- ・ 同伴者に押しってもらうのも気を遣う

といった方が、連結アタッチメントを所有の車いすに装着することで、出先で本機を例えばレンタル利用いただくことを想定している。よって、上記車いすユーザーを含めた来場客を誘致したい公共施設 / 行政などに使っていただくことを想定して開発を進めている。

座り乗りタイプと同様に現在の法律に適合して公道走行が可能である。

3.3.2 連結タイプのパッケージ

座り乗りタイプと同様、外寸はハンドル型電動車いすのJIS規格に適合するサイズとしている。ユニットは立ち乗りタイプをほぼそのまま利用し、着脱・保管時に自立可能なスタンドを装着している(図5)。

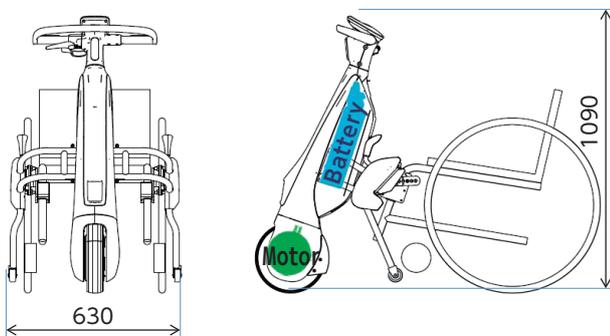


図5 連結タイプパッケージ

4 新たな移動体験価値を生むデザイン

新しいモビリティを普及していくにあたり、デザインは最重要項目の一つである。

デザインテーマを『コンパクトで「ヒト・まち・社会」と「繋がる、よりそう」それが新しい移動体験価値を生む。』とした。

高齢者の移動をサポートするモビリティであっても、新しい、使いたいと言っていたきたいという想いを込め、意匠開発を進めた。

前後輪ともにタイヤを包み込む構成、ツートンで樹脂ボデーの特性を生かす滑らかなフォルムとした。また、周辺に圧迫感を与えない、歩行者が行き来する空間に溶け込むデザインとしている。

5 主要機能

5.1 ハンドル部 (操作系)

免許返納後の高齢者が容易に取り扱えることを念頭に、自転車を思わせる馴染みのあるハンドル・レバーを設定した。

ハンドルに手をかけたとき、不意にアクセルレバーを操作してしまわないように、アクセルレバーはハンドルの下に配置している。後退する場合は、アクセルとは別にバックボタンを設定し、操作を分けることで操作ミスを低減している。

以上のアクセルレバー・ブレーキレバー・バックボタンは、利き手によらず操作できるように左右両側に配置している。この両側配置は、持ち替えが可能となり、長時間使用の疲労を低減することと、大舵角時の操作を容易にしている(図6)。

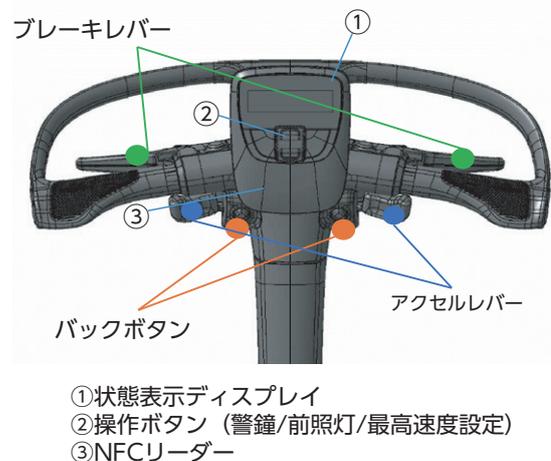


図6 ハンドル部拡大図 - 操作系の左右配置 -

5.2 速度設定

図6に示す②操作ボタンの最高速の設定は、2～6km/hのなかで1km/h間隔で可能。設定の速度以上にはならない制御により、容易に一定速度での走行が可能となり、同行者の歩行速度にあわせて並走することができる。

立ち乗りタイプのみ、業務利用専用として10km/hを設定している。

5.3 NFCリーダーによる電子キー認証

図6に示す③のNFCリーダーに電子キーのIDを認証することで、走行が可能となる。

電子キーのIDに対して最高速度の上限を設定でき、管理者が使用者の熟練度にあわせて使用速度を制限することが可能となる。

5.4 取り外し可能なバッテリー

バッテリーのみを取り外して充電できるようにすることで、例えばマンションに住む人がバッテリーを外して室内で充電することができる。

また、2つ目のバッテリーを準備することで、電欠時の不安を解消し、航続距離を伸ばすことができる。

バッテリーは簡単な操作で着脱が可能としている(図7)。

取り付け時はモビリティ本体にバッテリー下部を位置合わせし、図7のような円弧軌道にて車両にロックする。取り外し時はレバー操作でロックを解除することができる。

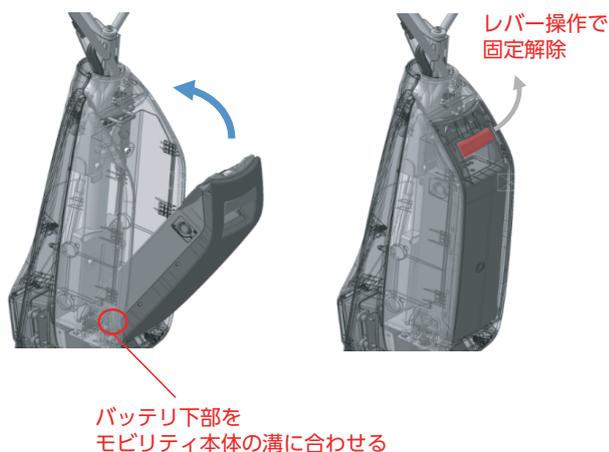


図7 バッテリー着脱手順

5.5 安心機能

安心な移動を提供するため、3つの速度抑制機能を設定した。

1つ目は、舵角に応じて自動減速を行い、旋回時の横加速度を低減する。

2つ目は、急な坂路への進入時に警告を発するとともに降坂時は自動減速する。

3つ目は、正面に障害物がある場合、車両速度/検知距離に応じて自動減速を行い、運転者へ通知する。

6 主要諸元・性能

表1に主要諸元を示す。

表1 主要諸元

TYPE	立ち乗り	座り乗り	連結
イメージ			
全長	700mm	1,180mm	540mm
全幅	450mm	652mm	630mm
全高	1,210mm	1,002mm	1,090mm
最高速度	6 (10) km/h	6km/h	6km/h
連続走行距離	約 14km	約 10km	約 20km
充電時間	2.5 時間	2.5 時間	2.5 時間
登坂性能	6°	10°	6°
体重制限 (荷物含む)	100kg	100kg	100kg
対応規格	無し 公道走行不可 (私有地利用)	ハンドル型 電動車いす 公道走行可	ハンドル型 電動車いす 公道走行可
安心機能 (速度抑制)	標準：旋回 OPT：斜面, 障害物	標準：旋回・斜面 OPT：障害物	標準：旋回・斜面 OPT：障害物

7 オリンピック・パラリンピックでの活用

東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会においては、運営・警備・メディカルスタッフの移動をサポートするため、オリンピックスタジアム、有明テニスの森等大規模な会場を中心に「立ち乗りタイプ」約210台の活用を予定している。

8 おわりに

歩行領域EVは、「Mobility For All」を実現する重要な商品の1つであると考え開発を進めてきた。

早期から実機を用いた実証実験や、想定ユーザーの声をお聞きする機会にて、困りごとやニーズを伺うとともに、多くのご期待や、改善のご要望をいただいていた。これをもとに改善を実施してきたが、よりよい商品となるよう、今後もお客様との対話を大切に、改善し続けることで、多くのお客様にお使いいただき、誰もが活き活きと暮らせる社会づくりに貢献していきたい。

■ 著者



山田 雅司



谷中 壯弘



森 淳



仙波 快之

TOYOTA LQ

The Toyota LQ

井戸 大介^{*1} 武井 達弥^{*2} 岩田 洋一^{*3} 関沢 省吾^{*4} 中川 俊^{*4}
Daisuke Ido Tatsuya Takei Yoichi Iwata Shogo Sekizawa Satoshi Nakagawa

要旨

TOYOTA LQ は未来の愛車体験をコンセプトに、本邦にとって節目となる 2020 年に向けて開発された。従来の所有を前提とする「愛車」の概念を発展させ、MaaS 時代の「愛車」とは何かを突き詰めた。また、一般販売しないが公道を走行するモデルとして、多くの世界初、トヨタ初の先進技術を採用し、試乗いただく方にいち早く未来を感じていただくとともに、お客様の声を開発にフィードバックし、さらに技術を進化・深化させることを狙った。本稿では特に後者に焦点を絞り、LQ で採用した各種技術を俯瞰的に概説する。

Abstract

The Toyota LQ was developed for the milestone year of 2020 under the concept of showcasing ideas for the beloved cars of the future. The LQ embodies the essence of what can make a car truly beloved in the age of Mobility as a Service (MaaS), building upon the conventional concept of cars as a possession. In addition, although not intended for general sale, a model featuring a wide range of advanced world-first and Toyota-first technologies was developed to be driven on public roads. This model was developed to give people the opportunity to test drive and experience the future at first hand, create customer feedback for development, and to help further advance and enrich the component technologies. This article focuses on the latter objective and provides a panoramic outline of the technologies used in the LQ.

キーワード TOYOTA LQ, 大型一体サイドガラス, インビジブルレジスタ, 覚醒 / リラックスシート, 自動運転, 無人自動パーキングシステム, AI エージェント AR-HUD DMD 式ヘッドライト

1 まえがき

2020 年は多くの人にとって計画が外れた年であったと思われる。TOYOTA LQ もしかりである。一般のお客様に試乗いただき、東京訪問の思い出に加えていただくはずが、Covid-19 の感染リスクを鑑み、中止やむなきに至った。

LQ は数多くの新技術を搭載し、お客様に実際に体験いただくことで未来を感じていただくとともに、技術的にはフィードバックを開発に活かすことを狙った。紙面の都合ですべてを網羅できないのが残念だが、主要なものを紹介する。

2 デザイン開発

2.1 デザインの狙い

先端技術が搭載された車であることが視覚的に伝わるデザインでありながら、決して冷たい雰囲気にならず、日本の伝統的な、人の手が作る温かみを感じさせるデザインを目指した。

2.2 デザインの特徴

- ・AI エージェント YUI を起点に、室内と外装がシームレスにつながる INSIDE-OUT という考えの内装デザイン (図 1)
- ・先端技術と人の手が作る物の温かみを融合させた造形および質感表現
- ・エンジンのない BEV の特徴を活かした、A ピラーを寝かせた外形意匠による、ワンモーションの未来的なシルエット (図 2)
- ・乗車時に従来の車とは圧倒的な違いを体感できる、大開口ドアガラスの意匠 (図 2)

^{*1} トヨタ ZEV ファクトリー ZEV B&D Lab
^{*2} MS カンパニー MS デザイン部
^{*3} クルマ開発センター 自動運転・先進安全開発部
^{*4} クルマ開発センター コクピット電子システム開発部

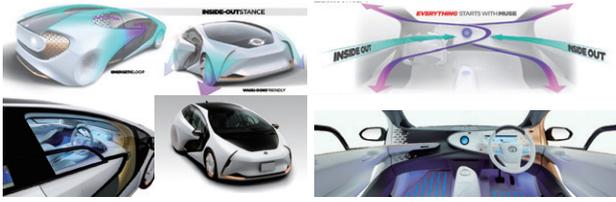


図1 デザインコンセプト INSIDE-OUT を忠実に再現



図2 BEVの特徴を活かした外形意匠

3 ボディ設計

3.1 大型一体サイドガラス

アップパーボディ構造として大型一体サイドガラスの実現は、透明部分が増加することにより室内の解放感を高め、外から見た際の未来的な印象を強めるうえで、こだわった部分の一つである。

大型接着ガラスの採用、安全やチケットの受け渡しなど利便性の確保のための昇降ガラスの設定、ドア剛性確保のためインナーリーンスラス材を配置するなど、実用性の確保に苦心した。

ベルトラインよりも下部は、室内上方から室外下方ヘトリム部を傾けることにより、外から足元が直視できないような細やかな配慮も行った。

3.2 インビジブルレジスタ

空調の吹き出し口をレジスタと呼ぶが、特徴的な内装意匠を実現するため、乗員から見えない位置にレジスタを配置した。

風は壁に沿って流れるというコアングダ効果を応用し、乗員の喉元を狙って適切な位置にフラップを設定することで風を引きはがし、意匠性と快適性を両立させた (図3)。

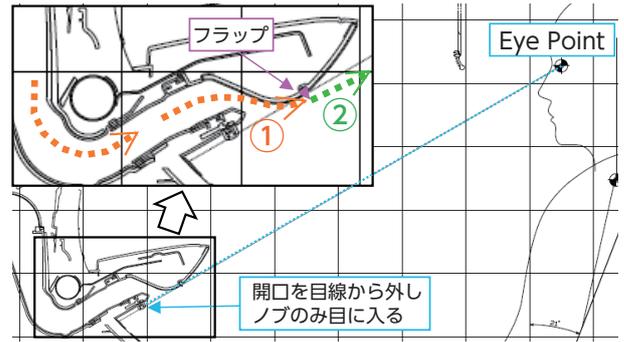


図3 インビジブルレジスタのしくみ

3.3 覚醒/リラックスシート

シートには覚醒/リラックス効果を持たせた。極度の緊張や逆に眠気を感じるような覚醒度の低下は運転に適当でない。シートに内蔵されているブラダ(空気袋)を制御することにより、緊張している場合には腹式呼吸をサポートすることで深いリラックスを誘導。また、眠気を感じているような場合には、背伸びのような姿勢をサポートすることで覚醒誘導する。

なお、覚醒度の検知は前部カメラやTOF センサによって行う。LQは体験者が助手席に座ることも想定し、前2席で覚醒度検知が可能となっている。

4 自動運転

LQに搭載されている自動運転技術は2種類ある。一つはSAEレベル4相当のショーファーと呼んでいるもの。もう一つは無人自動バレーパーキングシステムである。

4.1 ショーファー

ショーファーの実現にあたっては、国内関係法規ならびにガイドラインの定めにより、緊急時に対応できるドライバーが必要である。そのためレベル4相当と説明している。

LQには、TOYOTA Research Institute (TRI)が開発したPlatform 5と呼称している最新の自動運転技術を搭載している (図4)。台場、豊洲周辺の試乗デモルートのうち、最も景色の良い約1.6kmをショーファーで走行する予定であった。これにより、アイズオフと呼んでいる脇見を体験できる。これは美しい景色を、ドライバーを含む乗員全員が一緒に楽しむことができる、といったシーンを想定している。また、ルート上の一部分を自動運転走行す

ることにより、現実問題として、自動と手動の切り替えが発生することを、実際にお客様に見ていただくことも重要と考えたからであった。



図4 LQ 自動運転車

ショーファアの各種カメラやセンサを用いて Sight-to-Sound という機能を実装した。これはショーファアのシステムが検知した歩行者、自転車、自動車などの位置や速度に対応した音を出すことで、乗員の認知を補助するというものである。これも自動運転中の注意力維持を目的としている。

4.2 無人自動バレーパーキングシステム

駐車場の乗降場と駐車スペース間で低速無人自動駐車ができるシステムを新規開発した。これにより駐車スペースを探す必要がなくなり、高齢者などアクセシビリティに配慮が必要な方に加えて、駐車が苦手な方の負担を軽減できる。また、隣接する車両と20cm 間隔で駐車できるため、駐車場の省スペース化に貢献できることから、利用者、事業者の双方にメリットが生まれる (図5)。



図5 20cm 間隔で駐車が可能

車両側では複数のカメラ・ソナー・レーダーと路面マップを用いて車両の現在位置を特定する。同時に、歩行者などの避けるべき障害物と白線が引かれた目標駐車位置を検知し、適切に車両走行経路と加減速を制御する (図6)。

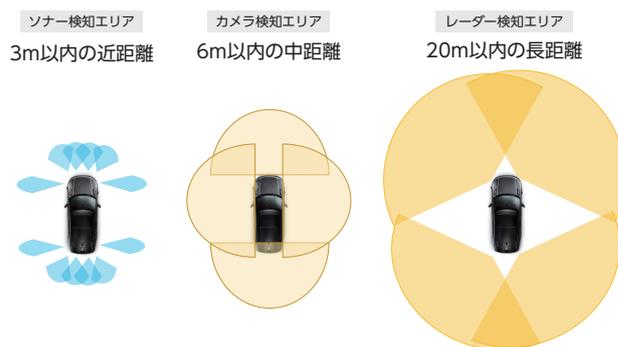


図6 車載カメラ、センサによる検知範囲

また、駐車場に設置したカメラと管制サーバを連携させ、空いている駐車スペースに無人車両を誘導する。また、操作端末で予約した時間に乗降場まで自動で迎車させることもできる (図7)。

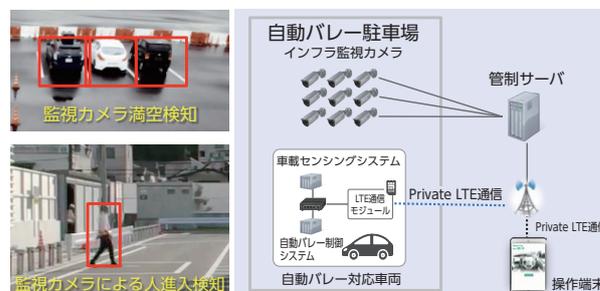
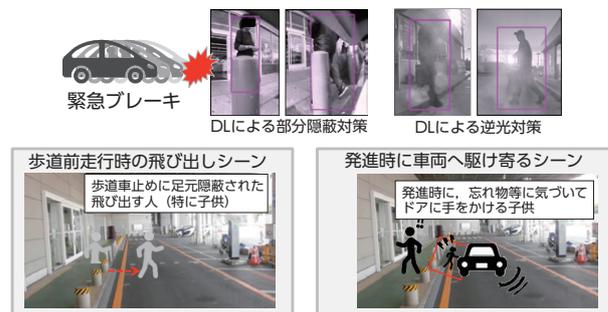


図7 システム側での検知と車両誘導

車両にある複数のセンサと駐車場のカメラの両方で自動運転経路への他の車両や歩行者の進入を監視している。衝突の可能性を総合的に判断して、危険な場合は自動で停車させる (図8)。



MEGAWEBでの危険シーンを想定した検知要件

図8 車両乗降場での歩行者検知の例

管制サーバは複数の無人車両を同時に制御する。一台ごとに順次制御する場合に比べ、入出庫の時間短縮が可能になり、乗降場でお客様をお待たせしないサービスが可能である。

5 AI エージェント

AI エージェント「YUI」は、モビリティエキスパートとしてお客様一人ひとりに寄り添い、特別な移動体験（UX：User Experience）を提供することを目的に開発された。「YUI」は、常にお客様の表情や動作から感情や眠気などの状態を推定し、会話を中心としたコミュニケーションに加えて、覚醒・リラックス誘導機能付きシート・音楽・車内イルミネーション・空調・フレグランスなどの各種HMI (Human Machine Interface) を用いて働きかけ、安全・安心・快適な移動に貢献する。また、シーンや嗜好に応じた音楽の選曲・再生や、興味のある話題や施設情報を提供することで移動自体を楽しむことをサポートすることを目的としている。

システム構成について、エージェントシステムが制御可能な入出力を中心に説明する（図9・図10）。まずは運転席の中心にエージェント「YUI」のAvatarであるUIが存在し、乗員とのコミュニケーションの中心となっている。また、運転者や助手席、後席の乗員に対してのマイク・カメラ・イルミネーション・音声・音楽などを、搭載されているエージェントECUから制御することが可能となっている。例えば、4席対象のデジタルマイクとシートセパレーションの制御により、各席での音声認識による「YUI」との会話が可能であり、また、会話している対象にのみフロアイルミネーションを発光させることによりわかりやすいHMIを実現している。他にも、運転席や助手席のモニタリングシステムを用いて画像認識により乗員の感情（Happyなど）を認識することで、好みにあわせた音楽やリラックス誘導機能付きシートやフレグランス（アロマシュータ）を用いて乗員の快適な移動に誘導することが出来る（図11）。このように、多数の入出力の統合制御と画像認識技術の有効活用により、「YUI」を中心にクルマの各種機器を用いたUXを実現することが可能となる。他にも、本システムはコネクティッドカーとしてクラウドともつながっており、スマホアプリと連携することで、アプリで入力した項目から嗜好性や傾向を「YUI」が知ることで、その人に応じたサービスを行うことが可能となっている（表1）。

一般のお客様が体験いただくデモについては、日本語、英語、中国語の3カ国語での対応を準備した。話す内容についても直訳で理解しにくいものにならないよう、文化的な背景も踏まえて調整を図った。



図9 3台同時 無人自動駐車実施例

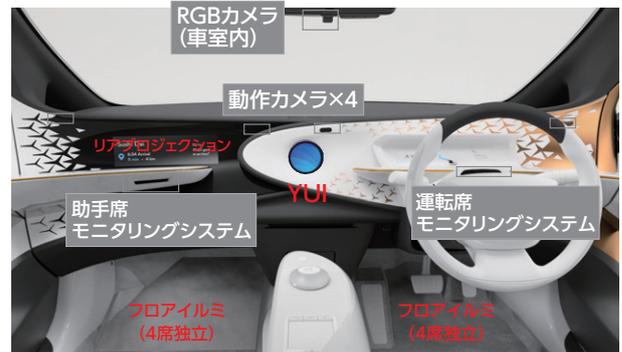


図10 運転席周りのAIエージェント関連機能

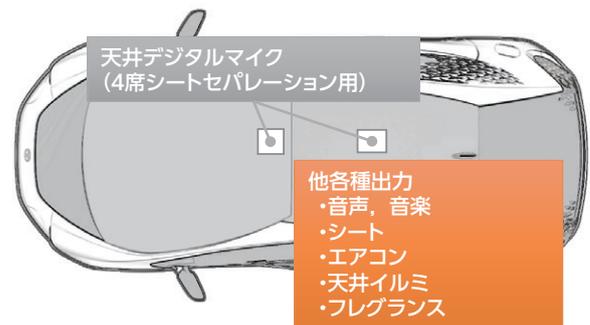


図11 車両全体の他入出力

分類	使用機能
乗員の状態推定 (画像認識)	感情 / 覚醒度推定
	視線 / 顔向き推定
会話制御	4席マイク処理・ASR/NLU・カスタムTTS

表1 主要ソフトウェア（認識系）

6 AR-HUD

AR-HUDは、運転中に必要な安全情報やルート情報などをフロントウィンドシールド越しに実際の風景と重ね合わせて拡張現実表示（AR表示：Augmented Reality）する。表示サイズは横11.4°×縦4.0°のフルカラー大画面で、ドライバーの目より前方7mから41mの範囲に表示され、実際の対象物までの距離に応じた奥行き感のある表示を行

うことができる (図 12)。上方かつ遠方に表示されることにより、ドライバーは最小限の視線移動および焦点調節で、安全に関する情報やルート情報の確認を安全かつ快適に行うことができる。ユーザーインタラクション (UI : User Interaction) では、ドライバーの前方視界の阻害や、運転中の注意散漫とならないことに配慮しながら、心理的な奥行き手掛かりの効果を活用した一貫性のあるグラフィックで、ドライバーの現実世界と仮想世界の整合をサポートし、情報の正確かつ直感的な認知をサポート。また、自動運転システムと連携して高精度地図やローカライズ情報を活用し、現実世界の道路形状や対象物の位置にグラフィックの仮想世界を重ね合わせることを可能にした (図 13)。

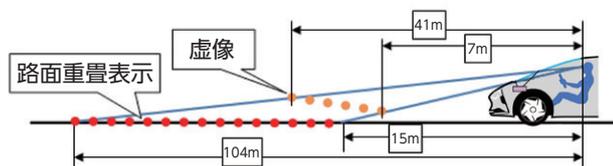


図 12 AR-HUD 表示の考え方



図 13 AR-HUD 表示例 (右図は注意喚起対象あり)

7 路面描画ランプ

7.1 概要

ランプを用いて車内外とのコミュニケーションを可能にする DMD (Digital Micromirror Device) 方式を用いた路面描画ランプを設定した。

DMD は 1 枚当たり $10\mu\text{m}$ 以下の微小ミラー (計 130 万枚) を高速で切り替えることで、任意の画像を路面に照射することが可能なデバイスである。

このデバイスをヘッドランプユニットに活用して、文字や記号などを路面に投影することで、ドライバーおよび車両周辺の人への情報提供が可能になる (図 14)。

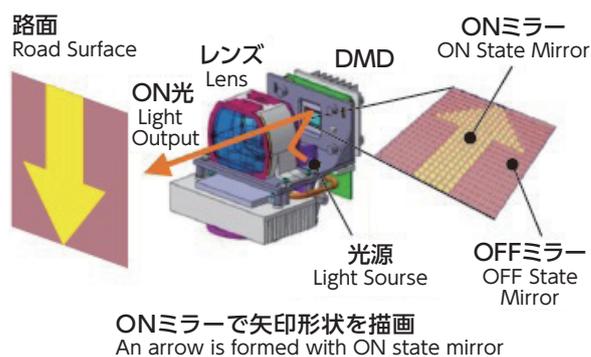


図 14 DMD ユニット詳細

7.2 灯具仕様

路面への情報提示にあたって、ドライバー向けと車外の人向けでは、照射すべき場所や内容が大きく異なる。そこで本車両では、R 側と L 側で異なる照射範囲のユニットを搭載した。

具体的な描画コンテンツ (代表例) を以下に挙げる。

○運転者向け (車両前方 7 ~ 8 m)

⇒ 車幅通知

狭路で車幅を照射することで、安心走行を実現

○車両周辺向け (車両前方 2 ~ 3 m)

⇒ 発進通知 (図 15)

車両が動き出すときに表示、周囲への注意喚起



図 15 発進通知イメージ

7.3 法制化状況

本技術の実用化にはランプ関連法規の改定が必要である。現在、UN 法規改定に向けて描画コンテンツについて審議がされている状況であり、公道での使用可能時期はまだ決定していない (ドイツ国内のみ例外的に許可)。

8 OLED メーター

有機 EL (OLED) パネルを使ったメーターを採用した。OLEDは液晶パネルと比べ、原理的に黒がしっかり表現でき、コントラストが得やすい。また、視野角による色の見え方の変化が小さいことから、曲面での使用性に優れる。こうした特徴を活かし、意匠面の手前にメーターを設置した。これにより、特徴的な内装意匠と運転情報を表示するメーター機能の両立を図った (図 16)。



図 16 OLED メーター

9 全固体電池

車載用の全固体電池を新開発し、登録ナンバーを取得した (図 17)。全固体電池は、従来の電解液・セパレーターを固体電解質に置き換えた Li イオン電池である。Li イオンの移動速度が上がることで、低抵抗化が可能となり急速充電性能が高まる。国連法規 UN-R100part2 を満足させることはもちろん、実際の走行使用に耐えるための支持構造、冷却構造など、車載のための周辺技術開発も同時に進展させることができた。

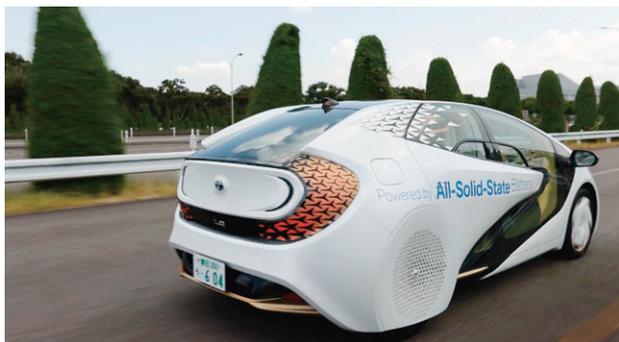


図 17 全固体電池を搭載し登録ナンバー取得

10 むすび

LQ は 2020 年という本邦にとって節目の年に向け開発を進めたモデルである。当初から販売計画がなかったとはいえ、お客様に乗っていただく、公道を走行する、といった目標は、開発関係者にとっては、規模の大小、数の多寡を問わずチャレンジなものであった。本稿で取り上げたのは LQ という車両を特徴づける主な機能だけである。

LQ で採用された新技術は、実際に車載品質に仕上げたことで、多くの知見と新たな課題を得て、次世代の技術開発につながっていく。また、人材も然りである。

執筆にあたっては、株式会社小糸製作所様の加藤靖礼氏から 7 章路面描写ランプについて情報提供をいただいた。

また、登録ナンバー取得に際し、国土交通省自動車局、関東および中部陸運局の皆様には、親身な助言を数多くいただいた。LQ の開発関係者、およびデモの企画計画運用に協力いただいた関係者の皆様には、献身的なサポートをいただいた。この場を借りて謝意を表したい。

■著者



井戸 大介



武井 達弥



岩田 洋一



関沢 省吾



中川 俊

東京2020オリンピック・パラリンピック生活支援ロボット による車いす観戦サポート

Support for Spectators in Wheelchairs at the Olympic and Paralympic Games Tokyo 2020 Using
Human Support Robots (HSRs)

戸田 隆宏 *1 Takahiro Toda	田中 和仁 *1 Kazuhito Tanaka	岩永 優香 *1 Yuka Iwanaga
竹下 佳佑 *1 Keisuke Takeshita	大沼 侑司 *1 Yuji Onuma	森 健光 *1 Takemitsu Mori

特
集

要旨

東京2020ロボットプロジェクトの一環として、生活支援ロボット HSR (Human Support Robot) による国立競技場での車いす観戦サポートが予定されている。大会ビジョンに掲げた「史上最もイノベティブで、世界にポジティブな改革をもたらす大会」を体現すべく、HSRの遠隔操縦機能と自律動作機能を組み合わせ、心のもった観戦サポートを実現する。多台数のHSRが多くの人が行き交うなかを自由に動作可能とする開発を行ったため本稿で紹介する。

Abstract

As part of the Tokyo 2020 Robot Project, plans were made to provide support for spectators in wheelchairs at the Japan National Stadium using human support robots (HSRs). In line with the Tokyo 2020 Games Vision of staging the most innovative Games in history and bringing a positive legacy to future generations, this project aimed to help realize a deeply caring spectator experience by combining the remote control and autonomous operation functions of HSRs. This article describes how this development aimed to enable free movement of multiple HSRs within busy environments filled with people on the move in all directions.

キーワード 東京2020, 自律移動, 遠隔操縦, 生活支援, 人協調

1 はじめに

2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会(東京2020大会)では、大会ビジョンに掲げる「史上最もイノベティブで、世界にポジティブな改革をもたらす大会」を実現するためにさまざまな取り組みが予定されている。ロボティクス分野においてもロボットが大会期間中にさまざまな場面で人々に寄り添い役に立つために、東京2020組織委員会とトヨタ自動車、パナソニック、有識者などの間で東京2020ロボットプロジェクトを発足し、競技サポートロボット、東京2020マスコットロボットなどの開発が進められている⁽¹⁾。そのなかの一つに、生活支援ロボット HSR (Human Support Robot)⁽²⁾を活用した車いす観戦サポートがある。HSRによる観戦席への誘導や物品の運搬をつうじ、国立競技場における車いすの観客のストレスフリー

な入退場と観戦をサポートする⁽³⁾。

国立競技場における混雑するなかでの車いす移動のストレスを軽減するため、入場口から自席への先導案内、客席へのゴミの回収や記念写真撮影、その他の困りごとの解決を、ロボットが自動で環境を認識し動作する自律動作とロボットの遠隔操縦を組み合わせ実現する(図1)。

HSRは研究プラットフォームとして、主に家庭内の生活支援実現に向けた研究に利用されてきた⁽⁴⁾。一方、東京2020大会では、多くの人が行き交う広い場所で動作する点、自律動作と遠隔操縦を組み合わせたロボットが複数台同時に稼働する点がこれまでと異なる。東京2020大会に向け、遠隔操縦システムと人が行き交うなかでの移動技術の開発を進めた。以下に開発内容を紹介する。

*1 未来創生センター Rフロンティア部



図 1 HSR による先導案内の様子

2 システム構成

2.1 全体像

合計 10 台の遠隔操縦用の PC 端末を東京都と愛知県に設置し、合計 20 台程度のロボットを国立競技場に設置する。システムのシンプル化のため、1 台の管理サーバに全遠隔操縦端末と全ロボットを接続する構成とし、信頼性確保のため、管理サーバはハードウェアを二重化したフォールトトレラントサーバ (FT サーバ) で構築する。図 2 にシステム構成を示す。

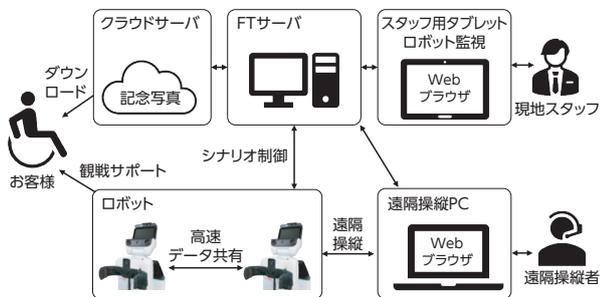


図 2 システム構成概要

遠隔操縦時は、任意の遠隔操縦用端末と、任意のロボットを一対一で接続する。実運用においては、複数人の遠隔操縦者が複数台のロボットを入れ替えながら操縦し、車いす観戦客のサポートを実現する。

2.2 通信システム

ロボットは広範囲を移動するため、ロボットの通信は無線で行う。ロボットの通信には干渉無く高信頼な通信が可能な 4.9GHz 帯無線を採用する。国立競技場に無線親機 (AP) を複数設置し、ロボットに小型軽量の無線子機を搭載する。ロボットは競技場内の接続先 AP を自動的に切り替えながら広範囲

を移動する。AP 切り替わり時にも途切れることなく遠隔操縦を続けられるようにするため、AP 切り替え時間が 200ms 以内になる無線設計としている。また各種データの伝送には軽量高速な Web Real-Time Communication (WebRTC) を採用する。ロボットとの主な通信内容を表 1 に示す。

表 1 遠隔操縦通信内容

内容	周期 [Hz]	通信量 [kbps]
ロボット座標系	10	250
映像 音声	HSR から操縦 PC	(合計) 2000
	操縦 PC から HSR	
操縦指令	10	10

3 ロボットハードウェア

国立競技場はこれまで HSR が対象としてきた家庭内と以下の点が大きく異なる。

- 太陽光の影響を強く受ける
- ロボットが囲まれる程、人が多く行き交う
- 雑音下でロボットと人が音声対話を行う

これらに対応するため、従来の HSR⁽⁴⁾ に対していくつかのハードウェア変更を行った (図 3, 表 2)。

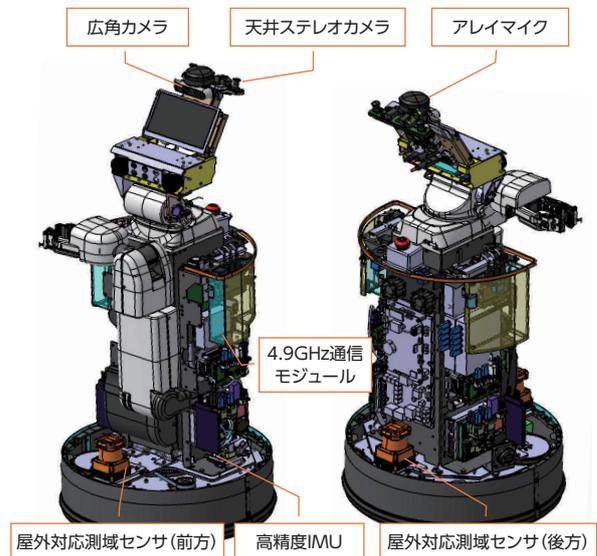


図 3 ロボットハードウェア変更点

表2 ロボットハードウェア変更点詳細

項目	詳細
広角カメラ	遠隔操縦用の画角 165° のカメラ
天井ステレオカメラ	囲まれ時も自己位置推定できるよう、ステレオカメラを天井に向けて搭載 (4章)
アレイマイク	ノイズキャンセル機能を備えた遠隔操縦会話用のマイク
4.9GHzモジュール	2.2 通信システム参照
屋外対応測域センサ	障害物検知・自己位置推定用地図生成 (4章)のため、屋外対応 2D-LiDAR を前後に搭載
高精度 IMU	自己位置推定を補うための慣性計測装置 (4章)

4 移動技術の開発

4.1 多数の人が行き交う環境下での移動

2D-LiDAR を用いた一般的な自律移動アルゴリズムでは、多数の人が行き交う動的環境化ではセンサ情報と地図が誤対応を起こし、自己位置推定の精度が著しく落ちてしまう課題があった。本稿では、動的物体の影響を受けにくい天井にカメラを向け、安定した自己位置推定を行う手法を開発した。

4.2 自己位置推定の機能構成

開発した自己位置推定機能の構成を図4に示す。

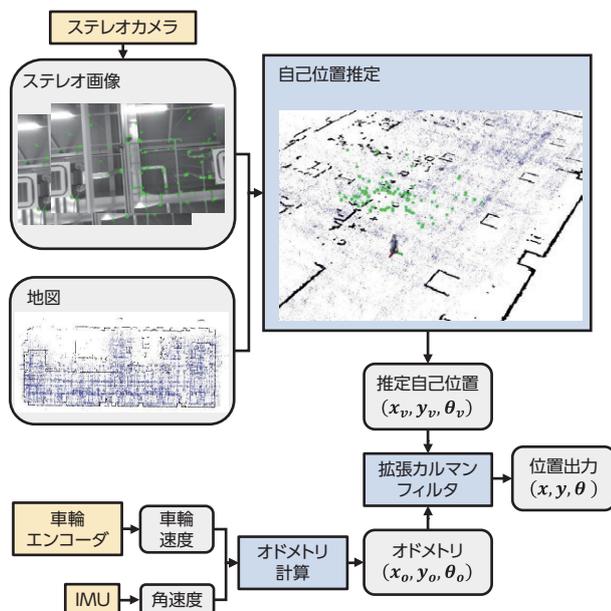


図4 自己位置推定機能構成

天井に向けたステレオカメラの画像より得られる特徴点と、特徴点の集合である地図の対応付けにより自己位置推定を行い、HSRの車輪エンコーダとIMUの出力を組み合わせて計算したオドメトリを拡張カルマンフィルタで融合し、最終的な自己位置として出力する。

4.3 天井ステレオカメラによる自己位置推定

本稿では、特徴点ベースのVisual SLAM⁽⁵⁾を参考に以下の改良を施し、ステレオカメラによる地図作成、自己位置推定を行った。

- ①地図作成時に、人などの動的物体の影響を排除するため、静的環境で精度の高い2D-LiDARによる自己位置推定結果を地図作成時の最適化処理に参照値として入力した。
- ②時刻変化による照明条件変化に対応するため、複数時刻で作成した地図の合成を行った。これは、複数時刻のテストデータに対して、自己位置推定性能が基準を満たす組み合わせを選定し合成した。
- ③ステレオカメラでの自己位置推定が失敗した時の復帰率向上のため、失敗直前の自己位置を中心として、地図から一定範囲を抽出した部分のみをマッチングに使用するようにした。

以上の改良を施し、国立競技場で作成した地図を図5に示す。図中の青い点は天井ステレオカメラから得られた特徴点である。

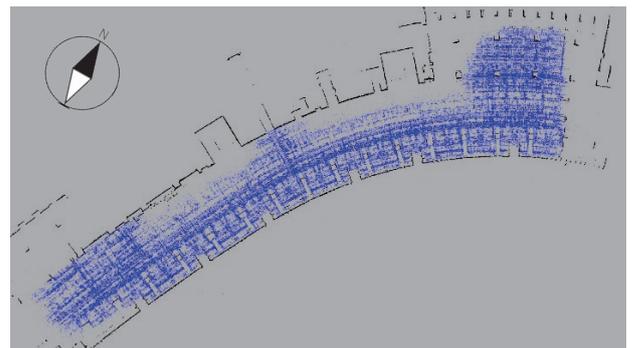


図5 作成した国立競技場の地図

4.4 自己位置推定性能評価

開発した自己位置推定機能の精度を国立競技場で計測した。走行経路と自己位置推定誤差の関係は図6、全て自己位置推定結果出力を誤差の大きさで区切り、区切り中に含まれる出力回数をプロットしたヒストグラムは図7のようになった。

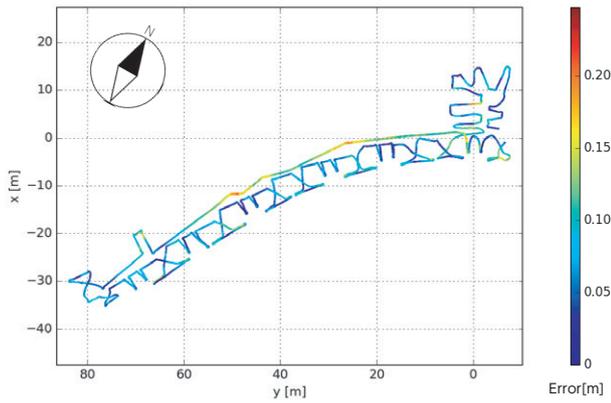


図6 走行軌跡と自己位置推定誤差

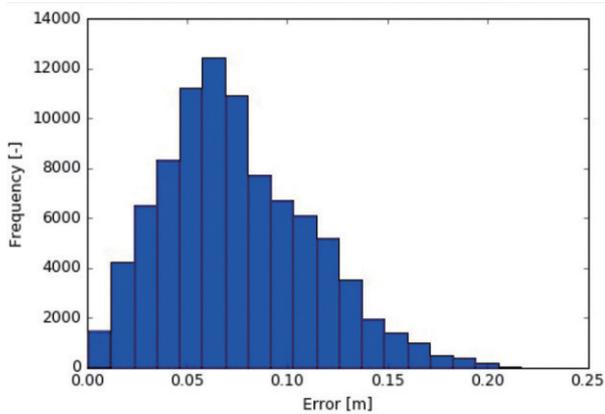


図7 自己位置推定誤差ヒストグラム

自己位置推定の平方根平均二乗誤差 (RMSE) は 0.084m, 誤差の 3σ 範囲は 0.19m となり, 国立競技場内での高精度な自己位置推定を達成した。

5 遠隔操縦システム

5.1 遠隔操縦システムの概要

遠隔操縦者は図8に示すとおり, 遠隔操縦用のPCに接続されたマウス等を使い, ロボットの頭部, アーム, 台車を操縦する。

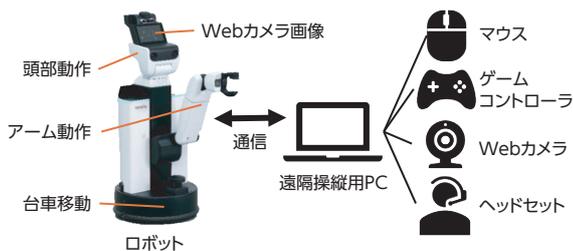


図8 遠隔操縦システム概要

5.2 遠隔操縦機能

遠隔操縦画面の構成を図9に示す。特徴として, 自律移動機能と3Dビューがある。ある程度決まった経路を移動する場合, 目的地を指定しロボットを自律移動させる。これは国立競技場コンコース内の移動に利用する。一方, 車いす観戦席付近でロボットを自由に移動させる場合にはゲームコントローラでの操縦を活用する。

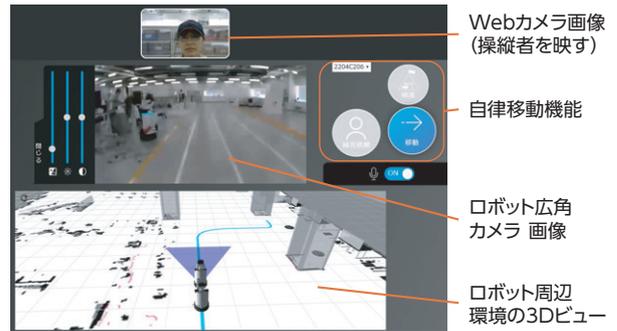


図9 遠隔操縦画面

3Dビューには柱などの静的構造物と, ロボットが認識した周囲の障害物や人などの動的情報を合成して表示する。操縦時はロボット搭載の広角カメラで車いす観戦客を視認しながら, 3Dビューで周囲の障害物を把握する。3Dビューの視点は自由に移動でき, 拡大してロボット近くの障害物を詳細に把握したり, 縮小しておおまかな障害物の位置を確認したりできる (図10)。

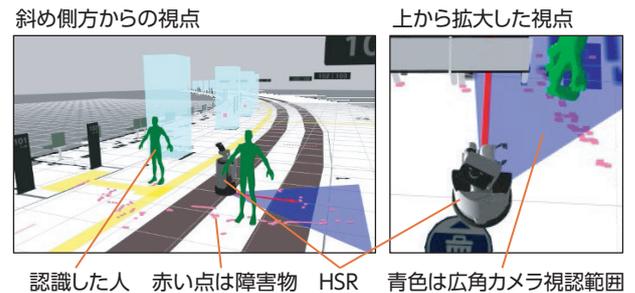


図10 3Dビューの例

遠隔操縦者が操縦を誤っても人に衝突することがないように, ロボットに以下安全機能を設け, 遠隔操縦者が安心して遠隔操縦できるようにしている。

- ①障害物の形状に倣うようにロボットが移動方向を自動で調整する倣い機能。主に静的な障害物に効果がある。
- ②倣い機能で避けられなかった障害物がロボットに接近した場合, 物理接触前にロボットが自動停止

する仮想バンパー機能。主に動的な障害物に効果がある。

6 むすび

国立競技場の車いす観戦客を遠隔操縦した HSR でサポートするために開発した機能を紹介した。特に、自律と操縦を組み合わせたロボット指示方法は今後もさまざまな形で発展すると考えられ、我々もさらなる研究開発を進める予定である。

■謝辞

未来創生センターの皆様、R フロンティア部の皆様、先進サービスロボット Gr の皆様、また、オリンピック・パラリンピック部の皆様には東京 2020 の実現に向け沢山のご尽力を賜りましたこと、心より感謝申し上げます。

■参考文献

- [1] 東京 2020 イノベティブな大会に向けて
<https://olympics.com/tokyo-2020/ja/games/vision-innovation/>
- [2] Yamamoto, T., Terada, K., Ochiai, A., Saito, F., Asahara, Y., & Murase, K. (2019). Development of human support robot as the research platform of a domestic mobile manipulator. ROBOMECH journal, 6(1), 1-15.
- [3] 東京 2020 ロボットプロジェクト第一段
<https://olympics.com/tokyo-2020/ja/news/news-20190315-02-ja>
- [4] トヨタニュースルーム
<https://global.toyota.jp/detail/8709536>
- [5] R.Mur-Artal and J.D.Tardos : "ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras", IEEE Transactions on Robotics 2017 pp.1-8.2017.

■著者



戸田 隆宏



田中 和仁



岩永 優香



竹下 佳佑



大沼 侑司



森 健光

テレプレゼンスロボット T-TR2 の開発

Development of the T-TR2 Telepresence Robot

中山 貴裕^{*1} 木田 祐介^{*1}
Takahiro Nakayama Yusuke Kida

要旨

人と人が関わる機会を増やせるかを設計の指標とし、高齢者や身体の不自由な方々が、今まで行けなかった場所を体験することを可能にすることを目指したテレプレゼンスロボット T-TR1 のコンセプトを引き継ぎ、遠隔地においてもその場にいるような臨場感を感じてもらおうこと、遠隔地の人がその場に実際にいるような存在感の向上を目的としたアップデート開発を、T-TR2 として実施した結果について報告する。

Abstract

The original T-TR1 telepresence robot was developed to help elderly and physically disadvantaged people experience normally inaccessible locations through a design approach evaluated by its success in increasing connections between people. This article describes the results of the development of the next-generation T-TR2, which extended and updated this concept to create an even more realistic sensation of being in far-away places while making people in those places seem even closer.

キーワード テレプレゼンスロボット

1 背景・目的

テレプレゼンスロボット T-TR1⁽¹⁾ は、遠隔地にいる人があたかも目の前にいるように見せてくれるロボットであり、遠隔地コミュニケーションを助けるカメラ、マイク、ディスプレイ、スピーカと、遠隔地から自分の分身となって移動するためのモビリティが組み合わされている。

T-TR1 をつうじて、東京 2020 大会に来られないお客様や大会に想いを寄せるお客様が仮想的に参加し、コミュニケーションが取れる機会を提供する予定で TRI と開発・運用を進めていた。具体的には、その場に来られない聖火ランナーがロボットに憑依して聖火を運ぶこととなった。東京 2020 オリンピック聖火リレーとして 4 月愛知県と 7 月東京都、東京 2020 パラリンピック聖火リレーとして 8 月東京都の合計 3 回参加する予定である。T-TR1 を図 1 に示す。聖火リレーのトーチを持つアームも備えており、機体サイズは全高 2,070mm × 全長 942mm × 全幅 668mm (アーム込 全幅 866mm)。重量は 152kg。LED ディスプレイを使用、屋外の日中や太陽光のもとでも見られるものとなっている。

画面サイズは 60 インチ相当、画素数は 240 × 660 ピクセル。システム構成を図 2 に示す。上部はコミュニケーション用の各種デバイスとそれらをつなぐ Upper-PC で構成され、下部は台車制御用の Lower-PC、センサ、モータドライバ、インホイールモータ、バッテリーで構成されている。電源は 24V バッテリ (動作電圧 20 ~ 28.8V) からヒューズ BOX 経由で、各電圧設定用の DC/DC コンバータに直接給電されている。ロボットの操作は 920MHz 無線コントローラで行い、操作者がセーフティサポーターとして聖火リレー隊列に参加してロボット近傍から操作する予定である。

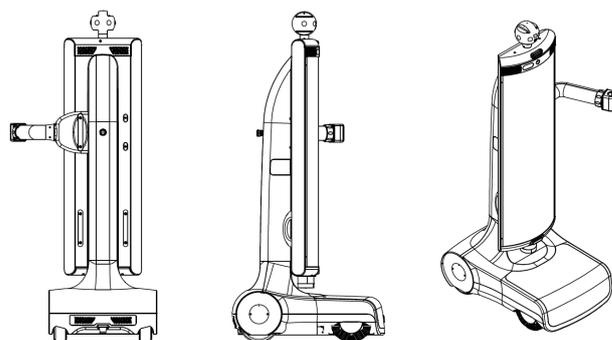


図 1 T-TR1 外観図

^{*1} 事業開発本部 新事業企画部

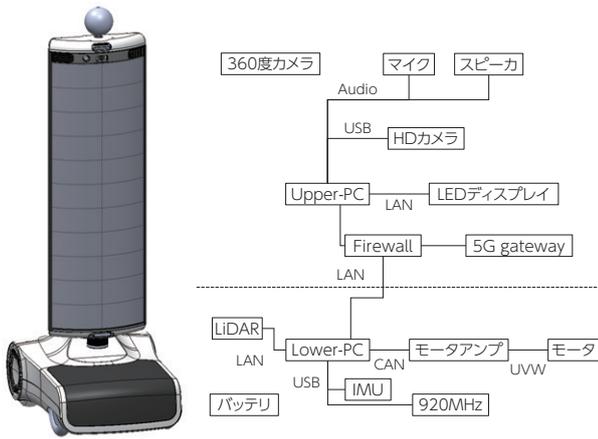


図 2 T-TR1 システム構成

2 アップデート開発

2.1 進め方

東京 2020 大会の 1 年延期に伴い、T-TR1 の基本コンセプトである、人と人が関わる機会を増やし、高齢者や身体の不自由な方々が今まで行けなかった場所を体験することを可能にする 2 つの重要な要素をより向上させるアップデート開発を検討した：

- ・遠隔地においてもその場所にいるような臨場感を感じてもらう
- ・その場所に実際にいるような存在感（ロボット画面の映り）

はじめに、遠隔地においてもその場所にいるような臨場感を感じていただくために、聖火リレーの聖火を運ぶ体験を向上させることに着目した。具体的には、T-TR1 ではタッチの上げ下げ操作だけだったものに、T-TR2 では直進のみではあるが、ロボットに憑依する聖火ランナー自身の車いすでロボットを操作してもらう要素を取り入れることにした。

次に、その場所に実際にいるような存在感（ロボット画面の映り）をロボット周囲の人に感じていただくために、ディスプレイの全周囲化の検討を行った。T-TR1 は LED ディスプレイを前面のみに搭載していたところに、背面にもディスプレイを追加、ディスプレイ自体もフル HD 解像度の有機 EL ディスプレイとし、映っている人の表情がよくわかるようにした。背反として、有機 EL ディスプレイ自体が明るくないため、屋内や日没後の使用が前提となってしまった。

さらに、遠隔側でユーザを撮像した映像とロボッ

ト周囲のカメラ映像とを合成することにより、あたかもその場所を走っているような印象を持っていただくことを目指した。

その他のアップデートとして、T-TR1 はバッテリーが交換式であること、残容量がわからないことにより運用面に大きな課題を持っていた。そこで、Human Support Robot (HSR) で採用されたバッテリーに置換、継ぎ足し充電可能な方式とすることにした。これにより、電源電圧と主要部品は共通のまま、運用面のハードルが下がることになった。さらに、操作性向上のために、前後輪にサスペンションを搭載させた。

2.2 臨場感向上のための開発

ユーザが普段使用している車いすでロボット操作を可能とするシステムを構築した。

ハードウェア構成を図 3 に示す。車いすの回転数を取得するために、シャシ台に設置したエンコーダから平行出力された値を I/F デバイスにて角度へ変換し、USB 経由で遠隔ブース側の Portal-PC へ入力。Portal-PC にて指令値に変換後、インターネット経由でロボットへ送信、ロボット内の Lower-PC から CAN 通信によりモータドライバへ指令を出し操作を行っている。

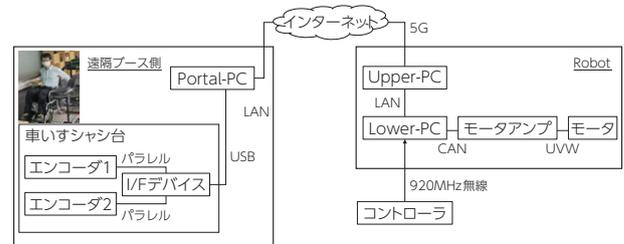


図 3 車いす操作のハードウェア構成

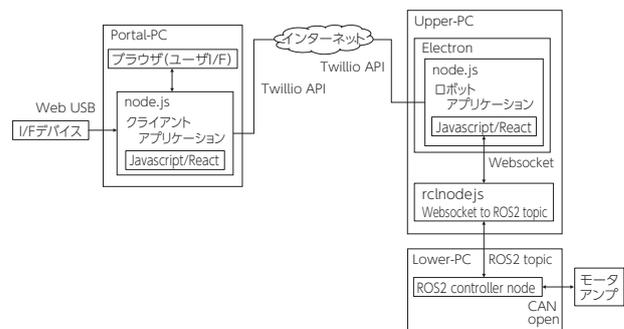


図 4 車いす操作のソフトウェア構成

次に、ソフトウェア構成を図4に示す。I/FデバイスよりWeb USBプロトコルにてエンコード値をクライアントアプリケーションは取得している。クライアントアプリケーションでは、I/Fデバイスより取得した値に基づいて、直進、旋回指令値を生成し、Twillio APIを使用してインターネットを通してロボット側へ送信される。ロボット側では、ロボットアプリで指令値を取得して、Web Socketを介してROS2 Topicへ変換されLower-PCへ送信される。Lower-PC内では、取得した指令値をCAN Openのプロトコルに変換してモータアンプへ送信される。

上記のハードウェア、ソフトウェア構成により、インターネットを介してロボットの前進、旋回を行えることの確認ができた。しかし、ロボット実機での動作確認において、遠隔地(Portal-PC)からのみのロボットコントロールでは、インターネットの通信遅れ、モータアンプの応答性、路面状況等から細かく制御することは難しいため、遠隔地からは直進のみの制御に制限をし、コースからずれた際には、ロボット近傍にいるセーフティオペレータが操作する920MHz無線コントローラの信号をオーバーライドさせることで位置の補正を行うこととした。

2.3 存在感向上のための開発

ロボットに遠隔地から人が乗り移り、その人がその場にいる存在感を向上させる試みとして、ロボットに搭載されているカメラと、遠隔地の人物のみの映像を合成するシステムを構築した。

ハードウェアの構成を図5に示す。ロボットには前面、後面の2面ディスプレイを搭載することとし、それにあわせてカメラも前後に2つ搭載する。前を撮影しているカメラはロボット後面のディスプレイに、後ろを撮影しているカメラはロボット前面のディスプレイに映像を表示する構成となっている。

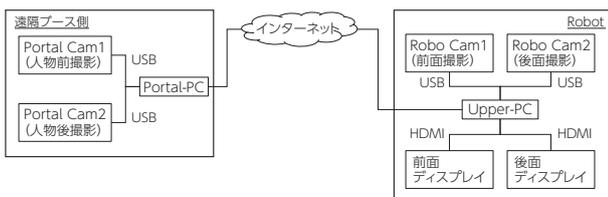


図5 存在感向上のためのハードウェア構成

ソフトウェア構成を図6に示す。ロボットの前面、後面に搭載された2つのカメラはGstreamerを介してUpper-PCに取り込まれ、同時に、遠隔側で、Portal Cam1、Portal Cam2のカメラで撮影した人物の前面、後面の映像をインターネット経由で取得する。

Portal Cam1、Portal Cam2で撮影された人物は、Portal-PC内で人物抽出を行い、人物の領域以外はRed:0,Green:255,Blue:0の値にしてインターネット経由でロボットへ送信される。人物抽出は距離と素肌検出により行っている。

ロボット側では、インターネット経由で取得した人物映像のG:255値のピクセルのアルファ値を0にすることで人物以外は透過する処理を行い、重畳して表示することでロボット背景と遠隔人物の合成を実現している。

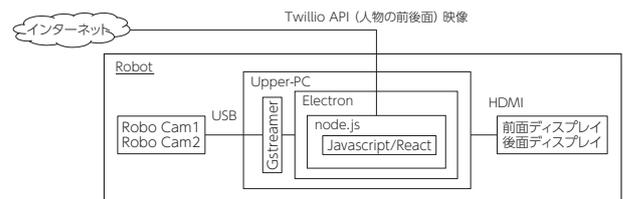


図6 存在感向上のためのソフトウェア構成

図7にT-TR1のシミュレータを使用した人物と背景の重畳映像の結果を示す。また、Gstreamerの代わりにWeb APIを使用した状態ではあるが、図8に実機ディスプレイでの検証結果を示す。ロボット搭載のカメラは一般的なウェブカメラをUpper-PCへ接続、ディスプレイを前面に1つ接続した構成である。



図7 人物と背景の重畳画像



図 8 実機検証

3 アップデート開発の結果

3.1 T-TR2

4月の本社での東京2020オリンピック聖火リレーに向けて開発した T-TR2 を図 9 に、主な諸元を表 1 に示す。有機 EL ディスプレイの曲率が小さくなったため、T-TR1 と比べて全幅が 10cm 程度大きくなっている。重量は 140kg 程度、画面サイズは 55 インチ Full-HD 有機 EL ディスプレイを前後面に 1000R で湾曲させて搭載させている。速度は T-TR1 と変わらず、聖火リレーが早歩き程度の速さで走行するため、最高速度 6km/h での使用を想定している。

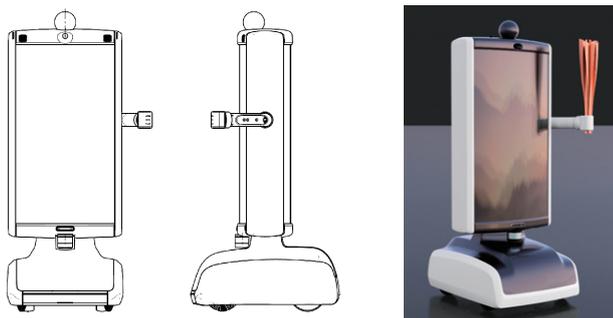


図 9 T-TR2 外観図

表 1 T-TR2 主要諸元

	全高 (mm)	全長 (mm)	全幅 (mm)	重量 (kg)	画面 (in)	画素数
T-TR2	1907	1000	780	140	55	1920×1080
T-TR1	2070	942	668	152	60	240×660

3.2 課題と今後の対策

聖火リレー本番までに実施した走行試験とリハーサルで課題が見つかった。

①低速での直進性

モータ適合の問題と思われるが、低速での直進性が悪くなってしまった。そのため、車いす操作時の左右調整をロボット近傍のリモコンで行う場合、リモコンの速度指令がロボットの走行速度より遅いと速度低下となり、この問題が現れてしまう。

聖火リレー本番では車いすによる直進操作をサスペンドする判断をした。

今後は、モータ適合とその特性にあわせて、遠隔からの指令値とロボット近傍のコントローラからの指令値をどう組み合わせるかを検討する。

②人物抽出の精度

遠隔側の会場となった愛知県三河青い鳥医療療育センター講堂の環境の影響（照明・背景）により、素肌検出の精度が下がってしまった。特に手を振ったときの影響が大きかったこと、ユーザを撮像する距離画像カメラの RGB 画質が思わしくなかったことにより、ディスプレイの解像度向上を引き出すように周囲で応援している子供たちも含めて映し出す処理に変更した。

今後は、人物と背景画像の合成精度を高める試みとして Background Matting 手法⁽²⁾ をベースとした人物抽出の検討を行う。

4 結論

T-TR1 の 2 つの重要な人中心のコンセプトである臨場感と存在感に着目、遠隔側からの操作指令の取り込みとディスプレイの解像感向上とあわせて人物と背景合成を行い、T-TR2 としてアップデート開発を行った。

4月の本社での聖火リレー本番では、ロボットに遠隔地から人が乗り移り、その人がその場に存在している存在感を出すことができた。各開発項目について明確になった課題の対策を次の聖火リレーに向けて実施していく。

本開発を行うにあたり T-TR2 につながるコンセプトとベースシステムの提供、アドバイスも含めサポートをいただいた TRI のギル CEO、マックス VP をはじめとする VM チームの皆さん、本番走行まで多大なサポートをいただいた新事業企画部、R-フ

ボランティア部、オリンピック・パラリンピック部の
皆さんに深謝の意を表します。

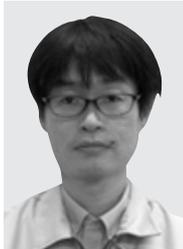
■参考文献

- (1) <https://www.tri.global/news/toyota-introduces-tris-t-tr1-a-virtual-mobility-2019-7-22/>
- (2) Soumyadip Sengupta, et al., "Background Matting: The World Is Your Green Screen," Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2020, Seattle, WA, USA, pp. 2288-2297, 2020.

■著者



中山 貴裕



木田 祐介

フィールド競技サポートロボットFSRの開発

Development of Field Support Robot (FSR)

桑原 健*¹ 山根 五月*² 重本 剛*¹
Takeshi Kuwabara Satsuki Yamane Takeshi Shigemoto

要旨

FSRは東京2020オリンピック・パラリンピックで投てき競技と7人制ラグビーを、人と寄り添いながらサポートするロボットである。投てき競技では、スタッフが回収した投てき物をAI技術およびロボット技術を用いて自律走行で運び、回収時間短縮とスタッフの労力低減に寄与する。7人制ラグビーでは、キックオフ直前にフィールド中央へ自律走行でボールを運び、落下させることにより競技運営に貢献する。LiDAR、カメラ、バッテリー等で構成され、自律走行モードに加え、人を追従走行するモード、障害物との衝突を回避するモード、手動走行モード、緊急停止モードを有している。

Abstract

Field support robot (FSR) was developed to assist the throwing and rugby sevens events at the Olympic and Paralympic Games Tokyo 2020 while working in close proximity to people. In the throwing events, the FSR used artificial intelligence (AI) and robotics technologies to carry and autonomously transport the thrown objects recovered by the event officials, thereby helping to reduce recovery times and reduce the physical burden of the officials. In the rugby sevens event, the FSR autonomously delivered and dropped the ball at the center of the field immediately before kick-off to help make the games run more smoothly. In addition to the autonomous driving mode realized using lidar, cameras, batteries, and other components, the FSR was also provided with a person-following mode, a mode to avoid collisions with objects, a manual driving mode, and an emergency stop mode.

キーワード FSR, 自律走行, 追従走行, 衝突回避, AI, LiDAR, カメラ, GNSS, ロボット, からくり

1 はじめに

東京2020オリンピック・パラリンピックでは、トヨタはMobility for Allの観点から様々なロボットで来場者や運営スタッフをサポートする。その一つとして、投てき競技と7人制ラグビーを、人と寄り添いながらサポートするロボットがFSR (Field Support Robot) である (図1)。



図1 FSR

2 FSR 開発に対する想い

FSRは陸上競技の投てき競技(円盤投げ、やり投げ、ハンマー投げ、こん棒投げ)において、競技スタッフが回収した投てき物をAI技術およびロボッ

*¹ CVカンパニー CV統括部
*² トヨタ自動車東日本(株)

ト技術を用いて自律走行で運び、回収時間短縮と競技スタッフの労力低減に寄与するロボットである。

7人制ラグビーではキックオフ直前にフィールド中央へ自律走行によりボールを運び、落下させることにより競技運営に貢献する。

先回のオリンピック・パラリンピックまでは投てき物をラジコンカーで回収していた。真夏のオリンピック・パラリンピックにて、選手、競技スタッフ、メディアの方々や電光掲示板等を避けながら数十m先を走るラジコンカーを操縦することは非常にストレスが高く難しい。また、落下位置からファールゾーンで待機するラジコンカーまで8kg近い投てき物を繰り返し運ぶ作業は重労働でもある。

東京2020オリンピック・パラリンピックでは、モノづくりで培ったロボティクス&AIの技術を活用した自動化技術を用い、競技運営はもちろん、競技スタッフの負担を軽減したいという想いで開発を進めてきた。

FSRを活用すると回収スタッフを追従して落下地点近傍まで走行可能となるため、投てき物を運搬する距離を短縮できる。また、自律走行可能なため、ラジコンによる操作が不要になる。

3 FSR 動作概要

FSRの自律走行システムは、『自律走行』『衝突回避』『追従走行』『手動走行』『緊急停止』の5つのモードで構成している。

1) 競技者が投てき後、待機位置から回収スタッフが回収に向かう。FSRはスタッフを『追従走行』し、落下地点に向かう。

2) 落下地点でスタッフが投てき物を回収しFSRに搭載する。タッチレススイッチを操作されることにより回収が終了したと判断し、FSRは『自律走行』し、返却位置まで向かう。

3) 返却位置で別のスタッフがFSRから投てき物を回収した後、タッチレススイッチを操作されることにより回収が終了したと判断し、待機位置まで『自律走行』で戻る。この動作を繰り返し実施する(図2)。

4) 選手、スタッフ、メディアの方々や電光掲示板等を『衝突回避しながら自律走行』することが可能である。

5) 車両輸送時や緊急停止のために無線操縦する『手動走行』や、いざというときに『緊急停止』す

るモードも持ち合わせている。

ラグビー競技のボールデリバリーは『自律走行』モードで実現している。

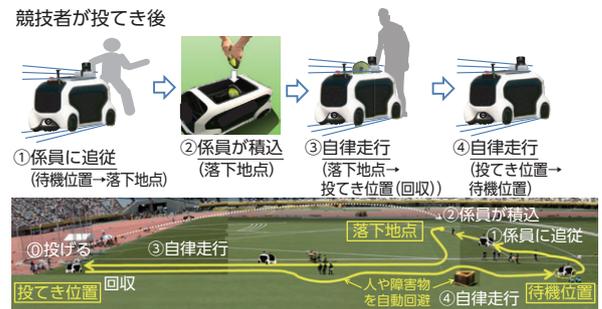


図2 FSR 動作概要

4 FSR の構成

FSRのハードウェア構成はIntel社製NUCを2機、車両制御インターフェイスボード、LiDAR、3台のカメラなどから構成されている(図3, 図4)。

Intel社製NUC2機は自律システムのメインECUとして搭載している。一機はLiDARの点群処理と車両制御、残りの一機はAI推論を実行する(図5)。

バッテリーは交換式の国産リチウムイオン電池(127Wh)を6並列で搭載(図6)。9機のアトラックラボ社製DC/DCコンバータで24V/15V/12V/5Vへ降圧している。



図3 FSR 構成概要

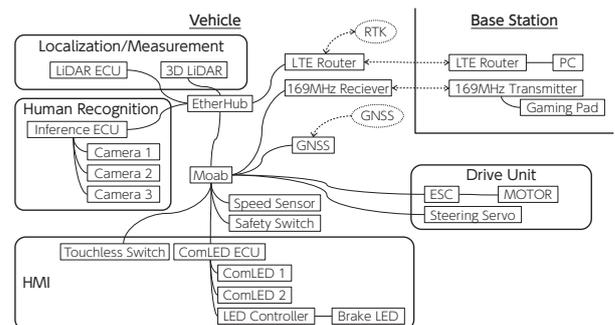


図4 FSR システムダイアグラム



図5 メイン ECU (ECU ボックス内部)



図6 電池 BOX 内観

5 FSR の自律走行システムと付随機能

自律走行システムの各モードとその他の機能についてシステムを構成するハードウェア、ソフトウェアを紹介する。

5.1 自律走行

落下地点～返却位置、返却位置～待機位置を最高20km/hで自律走行するモードである。

返却位置で協働する競技スタッフが、車両上部のタッチレススイッチに手をかざすことで、FSRは自律走行モードに切り替わる。

当初、機械式のタッチスイッチを装備していたが、新型コロナウイルス感染拡大防止のため赤外線式のタッチレススイッチへと変更した。

自律走行モードでは後輪に装着された車速センサーから得られる走行距離情報、事前に準備した競技会場のマップと、走行しながらLiDARで計測した競技会場の形状を比較して得られる自車位置情報、RTK-GNSS情報を組み合わせて自己位置を推定し目的地へと誘導される。

東京2020オリンピック・パラリンピックの投てき競技会場である新国立競技場は、競技フィールドの壁間が最大で約130mあり、確実に計測するためにLiDARは200m級を搭載している(図7)。

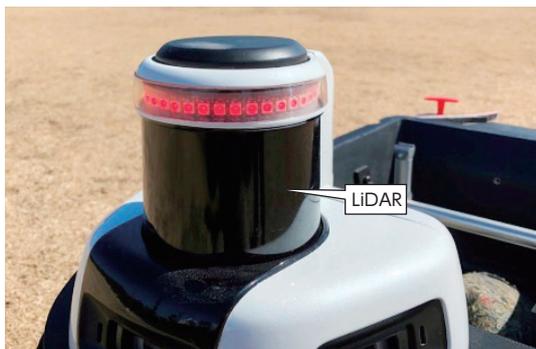


図7 Quanergy M8 Ultra LiDAR

車速センサーはホールIC方式で、左右のリアデフジョイントカップに固定してあり、タイヤの回転と同期し一回転で4パルス出力する。

精度向上とフェールセーフのため、左右2輪分のセンサー情報から車両の車速を算出している(図8)。

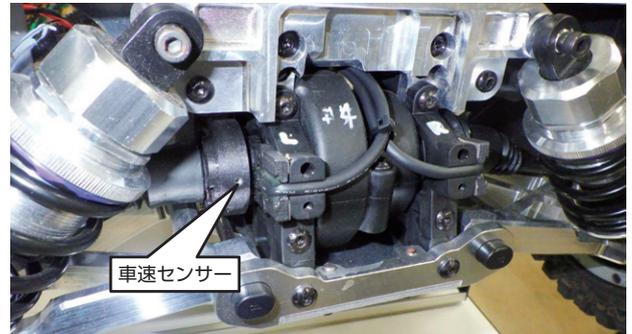


図8 車速センサー

車両の9DoF加速度は、リアECUボックスに格納している車両制御インターフェースボード『Moab(モアブ)』上の加速度センサーを使用している(図9)。

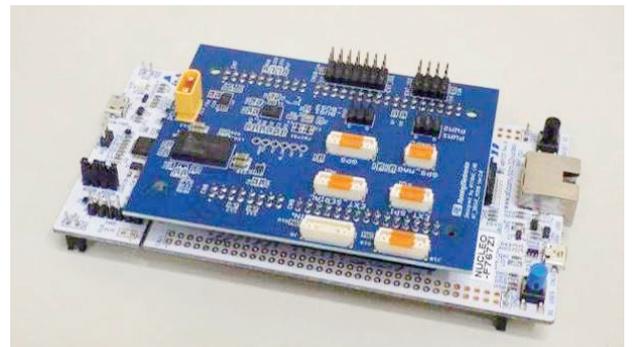


図9 アトラックラボ Moab for FSR

Moabは駆動制御系、操舵系と自律走行システムを繋ぐFSRで最も重要なボードであり、信頼性を重視して非常にシンプルなマイコンとI/O装置で構成されている。やりやハンマーなどの投てき物を搭載し車両重心が上がった際に、ステアリング操作で横転することが無いよう、車速に応じて最大操舵角を規制するアルゴリズムもMoab上に搭載している。

自律走行では、事前に設定した経路に沿って走行する(図10)。



図 10 経路設定画面

走行経路の検討にはトヨタ自動車東日本内製で学習させた AI も活用した。

茨城国体にて定点カメラで各競技を撮影した映像を AI で分析し、競技スタッフやカメラマンが滞在する頻度のヒートマップを作製。可能な限り人と交差しない経路を計画した (図 11)。

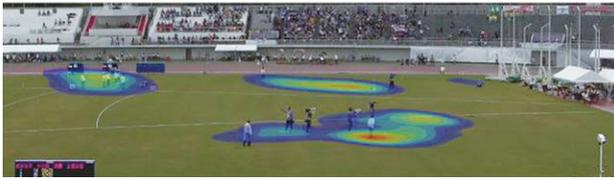


図 11 AI 滞在頻度ヒートマップ

5.2 衝突回避

自律走行時には車両進行方向を監視し、衝突を回避する機能を実装している。

障害物の検出には LiDAR を用いている。ビームは水平ラインと 3 度下向きラインの 2 本を使用している (図 12)。

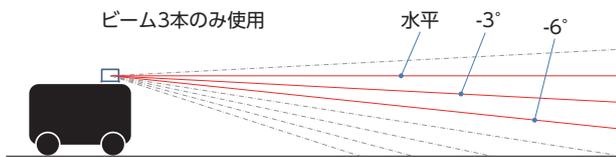


図 12 LiDAR ビームライン側面視

衝突回避アルゴリズムは信頼性向上のため単純なルールに基づいて動作するよう開発した。

アルゴリズムは FSR から障害物までの距離に応じ三段階で切り替わる。

FSR から 0 ~ 1m をブラックゾーン、1 ~ 3m をレッドゾーン、3 ~ 5m をイエローゾーンと呼び、それぞれの動作があらかじめ設定されている (図 13)。

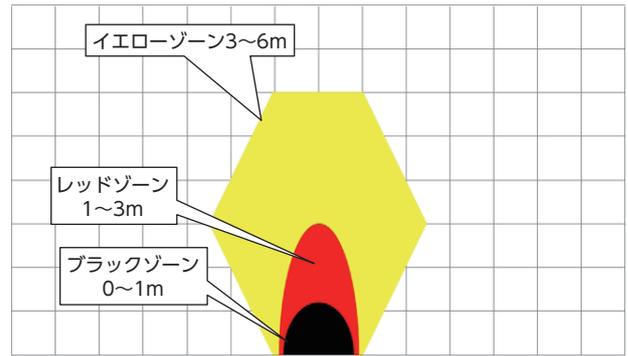


図 13 衝突回避ゾーン

ブラックゾーンでは FSR はフルブレーキで停止し衝突回避対象が移動するまで待機状態を維持する。衝突回避対象が無くなると走行を再開する。

レッドゾーンでは車両は 2km/h で微速前進し、操舵角を最大まで使って衝突を回避する。

イエローゾーンでは 10km/h に減速し、操舵角を 50% まで使って衝突を回避する。

衝突回避機能の開発においては一部 MBD 手法を活用した (図 14)。

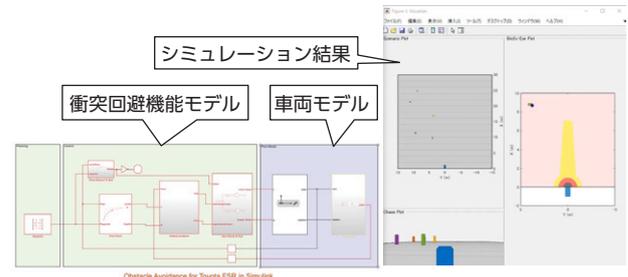


図 14 衝突回避シミュレーション

FSR の車両特性やアルゴリズムをモデル化し、シミュレーションによって衝突回避ゾーンの形状や各ゾーンの動作を再現。

シミュレーションシナリオの生成にはトヨタ自動車東日本で開発した AI による滞在頻度分析 / 動線分析技術を活用した (図 15)。

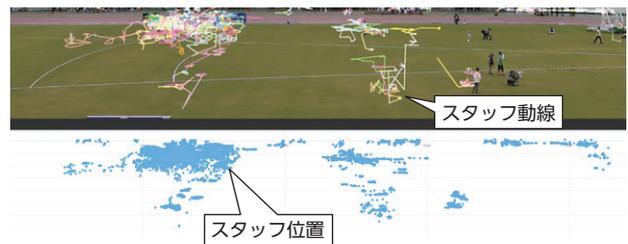


図 15 動線分析

車載センサーでの検知をトリガーとした衝突回避に加えて、予め避けるべきオブジェクトや走行可能エリアを登録できるジオフェンス機能も実装した。自己位置推定機能と連動して、設定されたエリアに機体が接近したらセンサー信号がオブジェクトを検知していなくても回避機能が動作する。この機能によって投てき距離表示板や電光掲示板、カメラマン席を確実に回避することができる。

5.3 追従走行

競技スタッフに追従してフィールド内へと走行する追従走行ではAIを活用している。

FSRは市販WebカメラLogicool社製C930を搭載している。追従走行では、カメラで撮影したRGB画像を用いてAIで競技スタッフを認識し、バウンダリーボックスを形成する。競技スタッフまでの目標角度は、バウンダリーボックス中心点を使用する。次に、バウンダリーボックスで示される水平角度域にはいるLiDARの水平ビーム一本の点群のなかから、最もFSRに近い点を競技スタッフまでの距離として使用する。上記処理を各フレームで実行し、競技スタッフまでの距離が3mとなるよう車両を制御している(図16)。

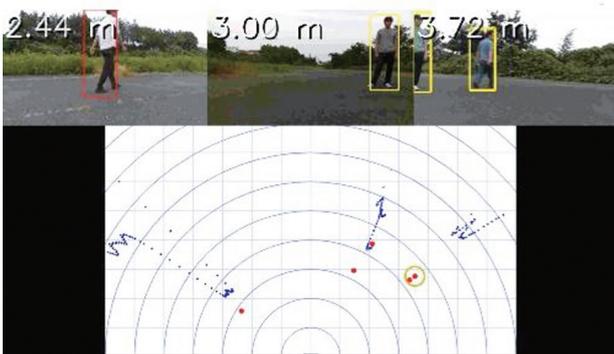


図16 追従時の車載カメラによる人認識

WebカメラとAI、LiDARで構築したことで、軽量の処理で動作する追従機能を実現することができた。

5.4 手動走行

車両の輸送時や緊急停止のために無線操縦装置も搭載している(図17)。



図17 169MHz 操縦装置

一般的な2.4GHzラジオコントロール装置と、ドローン専用の169MHzの2系統を使用している。

東京2020オリンピック・パラリンピック期間中は、規定により新国立競技場内では2.4GHz帯をFSRが使用することができないため169MHzを使用する。

5.5 緊急停止

FSRは自律システムで衝突回避を実現しているが、何らかの原因で衝突しそうな場合や、システム異常による暴走を防ぐため、遠隔操作で停止する。

緊急停止指令は2.4GHzラジオコントロール装置と169MHz操縦装置から送信できる。

緊急停止指令は直接Moabに入力され、自律システムが実行されるECUや車載LANを介さずに、直接駆動装置にフルブレーキ指令が入力される。

また自律状態のFSRは、2.4GHzもしくは169MHzの通信リンクが切れると自動停止する。

5.6 ボールデリバリー機能

7人制ラグビーでは、FSRのバスタブ部にトヨタ自動車東日本製のからくり機構を搭載した。

フィールド中央で停止後ボールを落下させる際、自律システムからの信号を受け、サーボモーターが動作してからくりを固定しているロックが外れて動作する(図18)。



図18 からくり

5.7 コミュニケーション機能 (ライト)

FSRの大きな特徴としてコミュニケーションライトがある。車両上部に搭載しているRGBアニメーション可能なLEDリボンで、自律システムの稼働状態、認識できている障害物や、追従走行のターゲットの方向を表示する。

AIと搭載する知能化ロボットが人と協働する場合、ロボットが何を考えているのか、どのような判断をこれから実行するつもりなのかを人に伝える必要がある。

『目線が合わない人』のようなロボットにしないために、FSRではコミュニケーションライトを開発した。

FSRのコミュニケーションライトは、LiDARの上に搭載している小型のものと、車両上部を一回りする大型のもの2種類搭載している。

小型のものは上部のタッチレススイッチの入力待ちを示すために発光する。

大型のものは自律システムのモードを色で伝える機能を持っている(図19、表1)。



図19 コミュニケーションライト

車両モード	コミュニケーションライトの色
自律走行	紫+水色 (マーカー)
追従走行	水色+赤 (マーカー)
定位置停止	緑 (点滅)
手動操作	オレンジ+白 (アニメーション)
緊急停止	白

表1 コミュニケーションライトの色とモード

自律走行時は、衝突回避機能で検知したオブジェクトの方向に水色のマーカーが表示され、FSRが回避動作を実行することが周囲のスタッフに知らされる。

追従走行時はAIとLiDARでロックオンしている追従対象者の方向に赤いマーカーを表示する。マーカーの有無によってFSRが追従対象者と認識しているかどうかをスタッフが知ることができる。

6 適合・実証実験

6.1 適合

FSRは芝生の上での運用を想定しているため、適合は静岡県裾野市の運動公園内芝生広場を借用して実施した(図20)。



図20 適合の様子

6.2 実証実験

開発中は日本陸上競技連盟や日本ラグビーフットボール協会他、関係者のご協力のもと、茨城国体をはじめとする国内大会にてFSRの運用をさせていただき、改善に取り組んできた。

6.2.1 カメラ防曇性能の向上

実証実験にて雨の中で運用し、カメラのレンズが曇り、AIが人を認識できなくなる問題を抽出した。換気経路の改善など対策に取り組み、カメラ内蔵ヒーターの内製開発に繋がった(図21)。

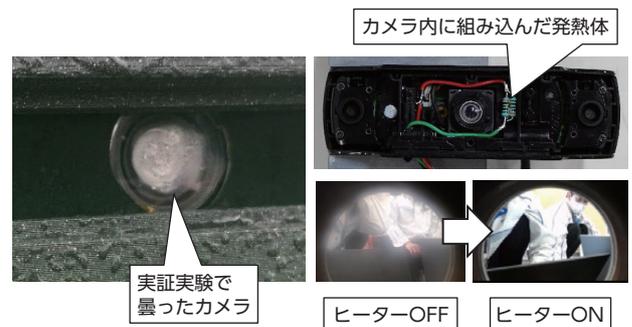


図21 カメラヒーター

6.2.2 走行音の低減

2019年ジャパンパラ陸上選手権にて、選手より走行音が大きいとご指摘をいただいた。

走行音の周波数解析の結果、モーター出力軸一次減速ギアの噛み合い振動が主成分であることが分かり(図22)、下記の対策を折り込んだ。

市販品のギアは平歯ギアであったため、ギア噛み合いによる騒音・振動が大きかった。そこでギア振動の主原因である伝達誤差変動が平歯ギアよりも少ない斜歯ギアを採用することにし、新たに設計・製作した(図23)。

作動音放射低減のため、ギア周囲を囲い遮音効果を得られるようギアBOXを設定した(図24)。

ギアBOXは防振ゴムを介してアンダーボデーに固定することにより、振動の各部への伝達を抑制した(図25)。

静粛性を上げるため、アッパーボデー裏面に吸音材を設定し騒音放射を抑制した(図26)。

上記の対策を実施することにより、FSR走行音は競技場内の環境音より小さくなり、その後の実証実験では選手からの走行音の指摘も無くなった。

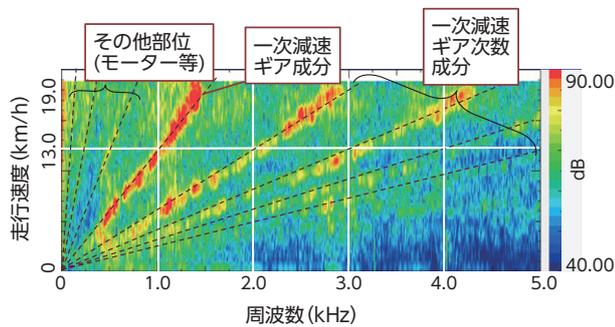


図22 走行音周波数解析



図23 斜歯ギア



図24 ギアBOX



図25 防振ゴム



図26 吸音材

7 むすび

小型で自律走行可能、親しみやすいデザインと挙動というFSRの特徴は将来、各分野で活用が期待されている。今後、FSR開発で培った経験を活かし新たなサービス提供を実現したいと考えている。

最後にFSR開発にあたり各競技関係者をはじめ多数の関係者より多大なる協力をいただいた。謹んで感謝する。

■著者



桑原 健



山根 五月



重本 剛

東京 2020 マスコットロボットの開発

Development of Tokyo 2020 Mascot Robots

森平 智久 *1 服部 祐人 *1 土井 将弘 *1
Tomohisa Moridaira Hirohito Hattori Masahiro Doi

井山 寛之 *1 近藤 寛之 *1 山本 一哉 *1
Hiroyuki Iyama Hiroyuki Kondo Kazuya Yamamoto

要旨

東京 2020 ロボットプロジェクトの一環として、「ミライトワ」「ソメイティ」のロボット化の取り組みを進めてきた。2019年に発表した旧モデルに大幅な改良を加え、本格的な小型ヒューマノイドロボット仕様の新モデルを開発した。多くの小学生の投票で選ばれた愛らしいデザインを踏襲しつつ、滑らかな全身動作や多彩な目の表情に、より高い表現力を持つロボットを実現したので本稿にて報告する。

Abstract

As part of the Tokyo 2020 Robot Project, the Tokyo 2020 Organising Committee and Toyota developed robotic versions of Miraitowa and Someity, the official mascots of the Olympic and Paralympic Games Tokyo 2020. In addition to making extensive refinements to the original models that were announced in 2019, the specifications of the new models were upgraded to create realistic mascot characters. While following the endearing design cues selected and voted for by elementary school students, highly expressive mascot robots were developed with smooth full-body movements and various eye expressions. This article describes the development of these mascot robots.

キーワード 東京 2020, ヒューマノイドロボット, ソフトスキン, GaN, 遠隔操縦, VR

1 はじめに

東京 2020 大会では「史上最もイノベーティブで、世界にポジティブな改革をもたらす大会」を大会ビジョンに掲げ、さまざまなテクノロジー領域で先進技術の利活用が計画されてきた。ロボティクス分野においても、大会組織委員会とトヨタ自動車、パナソニックなどパートナー企業との間で東京 2020 ロボットプロジェクトが発足し競技サポート、観客サポートなど多様なシーンでの活用を検討している。その一つとして、会場に行けない子供たちにも遠隔地から大会を楽しんでもらうため、東京 2020 マスコットロボット（以下マスコットロボット）の開発を進め、2019年の大会 1 年前イベントにあわせて発表した⁽¹⁾。ロボット間での動きと力を相互伝達可能な遠隔操作機能と、画像・音声認識による自律的なインタラクション機能に関して一般公開を行っている⁽²⁾。

その後、大会の 1 年延期判断により施策が再検討

されるなかで、コロナ禍で学校行事など多くの面で行動に制約を受けている子供たちに、大会をつうじ少しでも笑顔になってもらうためにマスコットロボットが貢献できないかと議論が進んだ。そして、デジタル世界から飛び出した大会マスコットの“ミライトワ”と“ソメイティ”が発表時の CG さながらのサイズでリアルに存在し、子供たちとインタラクションしたり一緒にダンスを踊ったりと、ユーザ体験の質を大幅に向上するためにマスコットロボットの大幅な仕様変更を実施した。

2019年に発表時のモデル（以下旧モデル）が、遠隔コントローラとしての機能を重視し移動機能を持たない仕様であったのに対し、2021年モデル（以下新モデル）では、外観の質を高めつつ、歩行や全身を使ったダンスなど、高い運動性能を備えた本格的なヒューマノイドロボット仕様となっている。

あたかも“自然にそこに存在している”ようなリアルマスコットロボットを実現するべく、下記 3 点を指針として開発を進めた。

①ロボットらしさを排除した外観

*1 未来創生センター R-フロンティア部

- ②軽快で滑らかな動作の実現
- ③自然なインタラクション

これらをオリジナルのデザインやサイズ感のまま実現するために、これまでトヨタが培ったヒューマノイドロボット技術⁽³⁾⁽⁴⁾に新規技術をふんだんに取り入れ開発を進めた。その概要を本稿にて紹介する。

2 メカ構成

2.1 新旧モデルでの基本構成比較

2019年と2021年の新旧モデルの外観(図1, 図2)と基本構成の比較(表1)を示す。



図1 旧モデル



図2 新モデル

表1 新旧モデルの構成比較

	旧モデル	新モデル
サイズ	身長 60cm 重量 6kg	身長 65cm 重量 10kg
関節自由度	腕 5軸×2 脚 4軸×2 首 2軸 計 20軸	腕 6軸×2 脚 6軸×2 首 3軸 腰 1軸 計 28軸
外装外皮	硬質樹脂	ソフトシェル ソフトスキン

写真からも、マスコットのデザインが持つ愛らしさはそのままに、大幅に身体表現が強化された点と、ソフトスキンを纏い関節の継ぎ目が隠れたことで、外観の質的向上がうかがえる。

関節自由度の面でも、新モデルでは8軸の自由度追加を行いつつも、身長増5cm程度に収めた。

腕・脚とともに、先端を任意位置姿勢に動かすための6自由度を有する妥協のないヒューマノイド仕様とし、任意の二足歩行やダンスステップが実行可能な構成とした。また、腰・首にも関節を増やして更なる表現力向上を意図した構成とした。

2.2 表情表出

関節自由度増加による身体表現に加えて、マスコットロボットの大きな特徴が、目のアニメーションによる感情表現である(図3)。

目の専有面積も大きく曲率の高いデザインのため、平面ディスプレイで再現すると頭部の3次元曲面に沿わせられず、表示部が目の奥側に入ることによって違和感が生じる。そこで、フレキシブル OLED ディスプレイを頭部形状に沿わせて2次元曲面に曲げて搭載し、ディスプレイ面を2次元曲面、外側は3次元曲面に加工した透明な薄型アクリルレンズで保護する構成としている。

OLED ディスプレイの発色の良さに加え、曲面で提示することで、視野角を広く設けて感情表現を伝えることが可能となった。



図3 曲面ディスプレイによる多彩な感情表現

2.3 柔軟な外装部の採用

新モデルでは、伸縮・回復性に優れる高機能ポリエステル生地をソフトスキンとして体全体を覆い、関節の継ぎ目を隠し本物らしく演出している(頭部のみ CFRP 製の外骨格構造)。

また、関節部は「ミライトワ」「ソメイティ」のアウトラインを維持しつつ広い可動域を両立するために、外装の一部にソフトシェル構造を採用した(図4)。ソフトシェルはゴムライク材料の Agilus30 を使用し、3D プリンタで造形している。部位によって硬度を変え、硬質部と軟質部を一体造形している。さらに、Y字状の切り欠きにより柔軟性を増し、股関節など3自由度が集中した部位でも多様な動きにも追従できるように構成した。

ソフトシェル+ソフトスキンの採用により、外観向上のみならず、人型ロボットとして極端に短い脚長ながらも、最大限の関節可動域を確保し、多彩なポーズをとれる身体表現力を持つロボットを構成することが可能となった。

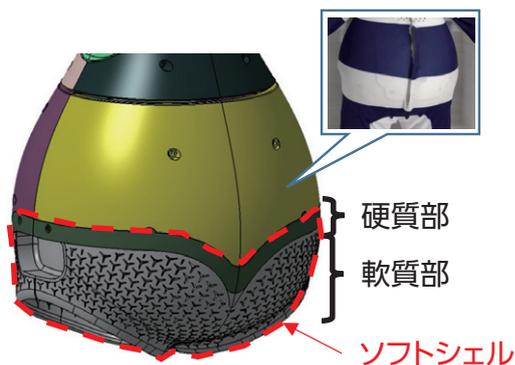


図4 股関節まわりのソフトシェル構造
※硬質部と軟質部は一体構造

3 電気システム

3.1 システム構成

新モデルの電気システム構成を図5に示す。EtherCATバスによるデージーチェーン接続など体内通信は旧モデルと同等であるものの、運動性能向上のための各種センサの新規搭載や、高出力化のため多くのデバイスの刷新を実施した。

サイズの汎用6軸力センサの搭載は難しく、足底の四隅に分散配置した力センサによるフォースプレート構成でZMPの取得を行っている。また、歩行やダンスなど高負荷動作に対応するため、入力電圧を24Vから42Vに上げた。それにともない、新たにセルを選定してのバッテリーパック開発、モータアンプの高出力対応など実施した。新モデルでの代表的な変更点を以降詳述する。

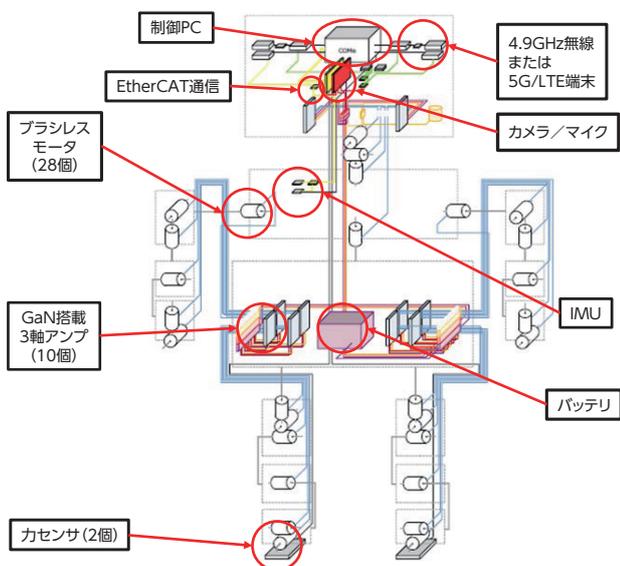


図5 電気システム構成

3.2 アクチュエータ

小型化と高トルク化のために、フレームレス構造の超多極アウターロータモータ(44極48スロット)を採用し(図6)、シミュレーションから得た要求トルクと搭載サイズからφ25×L10、φ29×L9、φ35×L10の3タイプのモータを設計した。

減速機に関して、旧モデルではバイラテラル制御による動きと力の伝達を重視し、バックドライバビリティの高い減速機を採用し、若干のバックラッシを許容していた。それに対し新モデルでは運動性能を重視し波動歯車装置を採用している。

これら超多極モータと波動歯車装置の組み合わせで、各関節を構成する方式に刷新した。



図6 超多極アウターロータモータ

3.3 GaN搭載3軸まとめアンプ

複数軸のモータをまとめて駆動できるアンプ構成は、搭載スペースが限られた小型ロボットにおいて非常に有効である。旧モデルにおいても3軸まとめアンプを開発し搭載していたが、新モデルでは関節軸数が増加した分も体内に収めるためのダウンサイジングや高出力化対応が必要であり、高密度化にもなう発熱も大きな懸念事項であった。

そこで、パワー半導体材料にガリウムナイトライド(以降GaN)を採用し、高効率な3軸アンプを新規に開発した(図7)。スペックを表2に示す。

実効値3Aを流した場合のシリコン(Si)とGaNでスイッチング素子を構成した場合の発熱を、サーモグラフィ画像で比較した(図8)。

GaN搭載基板は明らかに温度が低く保たれており、各素子の定格温度内でモータにより多くの電流を流すことができ、GaN搭載アンプにより大出力化が実現可能となった。これはGaN搭載基板の高効率性によるものであり、実際に開発したアンプにモータを接続し、使用想定条件で回した計測結果(図9)からも広い範囲で効率90%以上(最大98%)

の高いアンプ効率が達成できている。

本アンプの実現により、搭載時の省スペース化、高出力化、体内の発熱低減など多くの課題解決に繋がっている。

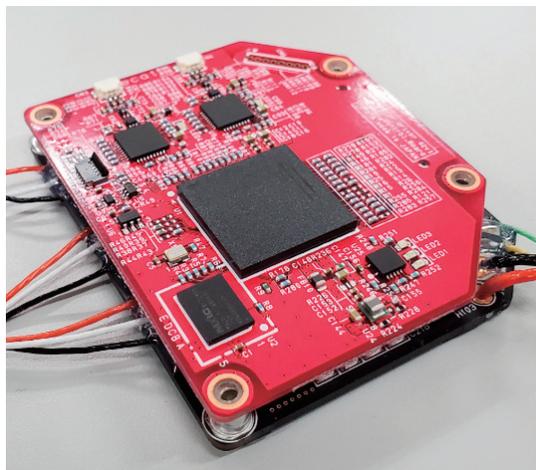
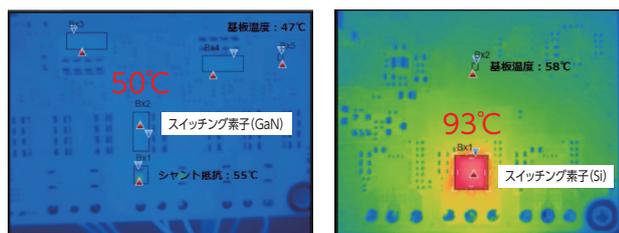


図7 GaN 搭載 3 軸アンプ

表2 モータアンプ主要スペック

サイズ	50 × 60 × 10mm
電源電圧	定格 42V
モータ電流	定格 3A × 3 軸出力
ABS エンコーダ	シングルターン：18bit マルチターン：12bit
通信方式	EtherCAT
制御方式	ベクトル制御
制御周期	48μs
制御モード	電流、速度、位置、パイラテラル



GaN 搭載アンプ基板

Si 搭載アンプ基板

図8 実効値 3A 通電時の温度比較

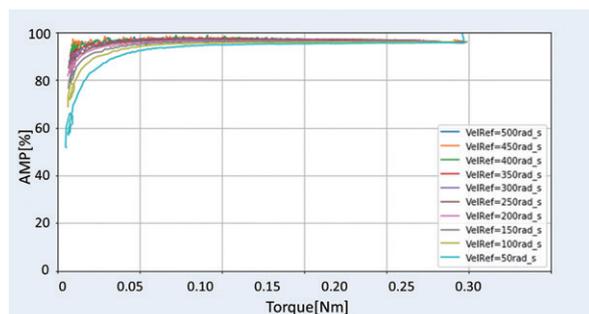


図9 アンプ効率計測結果

3.4 無線通信

無線通信として下記 2 方式に対応した。

①4.9GHz 帯無線

小型の基地局設置で通信干渉が少なく、信頼性の高い無線通信が可能。利用申請必要。

②5G (sub6) /LTE

5G の商用利用開始済。エリア次第で高速通信が可能。電波状況が悪ければ LTE で接続継続。

大会本番での使用条件に応じて無線方式を選択し、内蔵する通信端末を換装し対応する。アンテナに関しては両方式の周波数帯をカバーするフィルムアンテナをロボットの両耳内部に搭載した。

4 制御ソフトウェア

4.1 ソフトウェア構成

ソフトウェア構成 (図 10) について述べる。ロボット搭載 CPU では、リアルタイムパッチを充てた Linux OS 上で制御ソフトウェアが稼働している。モータアンプへの指令は EtherCAT バスを介して 1ms 周期で行っている。搭載デバイスの違いによりロードされるモジュールが若干違うものの、ソフトウェア自体は等身大ヒューマノイドロボットの T-HR3 と互換性を持って開発されており、従来資産の歩行機能⁽⁵⁾ や全身協調制御機能、各種演算ライブラリもマスコットロボットで活用可能である。また、制御ソフトはステートマシン形式をベースとするトヨタ独自の“pfx”というソフトプラットフォーム上で開発されているものの、ROS⁽⁶⁾ や choreonoid⁽⁷⁾ といったロボット開発に定番のプラットフォームやシミュレータともプロセス間通信による接続機能を備えている。以降では新モデル開発にあたり追加した機能について述べる。

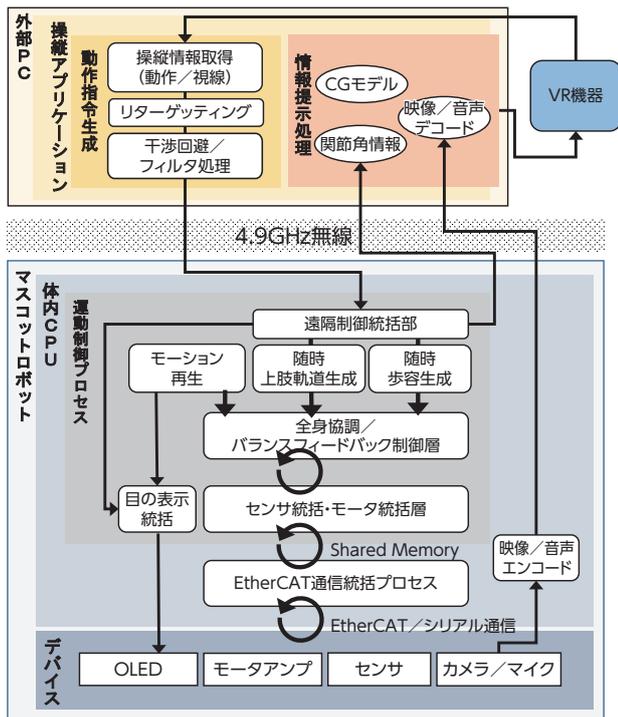


図 10 ソフトウェア構成

4.2 直感操縦システム

ロボットらしさを極限まで排除した滑らかな動作の実現を目指し、操縦者を演者として動きをキャプチャーし、マスコットロボットの動きにリアルタイムに反映させる方式を採用した (図 11)。

図 10 上部の操縦アプリケーションでは、操縦者が装着した VR 機器 (ヘッドセットを含む 11 のトラックデバイス) (図 12) の位置姿勢情報をもとに、人とロボット間の身体性の差異 (サイズや関節可動域) を吸収して上半身の位置姿勢に変換する。さらに、自己干渉防止の補正処理を加え、目標指令としてロボット側に送信する。

ロボット側では指示された関節情報や位置・姿勢情報にリアルタイムに追従しつつバランスを保つよう、自律的にフィードバック制御を行う。操縦者はロボット搭載のカメラやマイクで収録された視聴覚情報がヘッドマウントディスプレイ越しに再現され、ロボットに乗り移ったように直感操作ができる (図 13)。さらに、重畳表示される CG モデルから、第三者視点でもロボットの状態確認ができる。

さらに、ヘッドマウントディスプレイ内のアイトラッカーで操縦者の瞳孔の動きや目の開閉情報を取得し、ロボットの目のアニメーションにリアルタイムに反映する機能を搭載したことで、人を見つけた時にまず目で追ってから顔を向けるなど、自然なイ

ンタラクションが実現できる。

なお、等身大ヒューマノイドロボット T-HR3⁽⁴⁾ で実現したマスターフットを使用しての歩行の直感指示にも対応している。

これらの遠隔操縦機能を用いて、まさしく演者となりマスコットロボットを操縦することができる。



図 11 操縦の様子

図 12 計測位置



図 13 操縦者の視ている視界

4.3 モーション生成手法

4.2 の操縦方法はその場の雰囲気にあわせたインタラクション用途に適しているが、ダンスパフォーマンスなど音楽にあわせた定型動作は、作り込んだモーションを再生する手法が適している。そこで、マスター装置から人の動作を取り込んで自然なモーション生成に活用する手法を開発した。

部位ごとのモーション生成手順を以下に記す。

① 頭部・腕部モーションの生成

遠隔アプリケーションで、人動作からマスコットロボット用に変換した時系列の関節角度列を元データとする。それを約 15ms の間隔に間引いてキーフレームに設定する。フレーム間は滑らかに補間処理を施すことで、人動作の特徴を残しつつ

つ、関節に負担の少ない滑らかな頭部や腕のモーションが生成できる。

②脚モーションの生成

マスター装置の足部データから、人が足を上げる始点と接地する終点の時刻、位置、姿勢を取得し、それをロボットの脚長など身体性を考慮した軌道へとリターゲットイングし足運びを自動生成する。そのうえで、キックなど特徴的な足の上げ方を作るには、キーフレームを手動で挿入し自動補間で足軌道を繋ぐ。特徴的な足軌道も人動作から反映できるような改善も進めている。

③腰モーションの生成

ここでもマスター装置から得た腰位置・姿勢を収録し使用するが、遊脚期と両脚支持期では生成方法が異なる。両脚支持期には、上肢関節同様に人から取得した腰の位置や姿勢を、ロボットで再現可能な範囲に補正して利用する。遊脚時は足運びに連動して、バランス計算により転倒しない腰位置姿勢が生成される。これにより歩行、ステップ時には腰でバランスを取り、それ以外の時は腰の上下動や回転など人のきめ細かな動きの再現が可能となる。

④目の動きと表情

ヘッドセット搭載のアイトラッカーから、瞳孔位置情報や目の開閉情報を取得し、ロボットの黒目位置やまばたき動作に変換する。これにより、動きに応じたリアルな視線移動やウインクなどを再現することができる。泣き、怒り、ハートなど特徴的な感情表現を適宜入れたい場合には、後段で手動編集を行う。

当初は動作編集ソフトを用いて全工程を手動生成していたのに対し、収録した人動作データをもとに自動生成し、シミュレータや実機で動作確認したうえで、必要なら若干手動修正を加えるといった流れになり、効率良く生命感のあるモーション生成ができるようになった。2021年4月からNHKで放映されているFoorinとマスコットロボットが「パブリカ」で共演しているダンス⁽⁶⁾は、この方式で生成・実演したものであり大変好評をいただいている。

4.4 MRライド

開発したマスコットロボットの歩行速度は時速1km程度であり、人と並んで歩くといった活用は難しい。そこで、高速移動に対応するため、スケー

トボード状のマスコットロボット用モビリティとして“MRライド”（以下ライド）を開発した（図14）。後輪の対向2輪を駆動し、車体前方と中央に補助輪としてボールキャスターを備えている。また、マスコットロボットの身体性でも、自立して乗り降り可能な低床構造を採用している。ライドは後輪2輪を独立に速度制御することで、前後と旋回方向に機敏な加減速が可能である。搭乗時は、マスコットロボット側でも転倒防止のため、ライドの加減速にあわせて緻密に重心をコントロールし、常にバランスを取る必要がある。操縦デバイスからライドを任意の速度入力で動かそうとした場合のバランス処理に関し図15に示す。



図14 MRライドに搭乗した様子

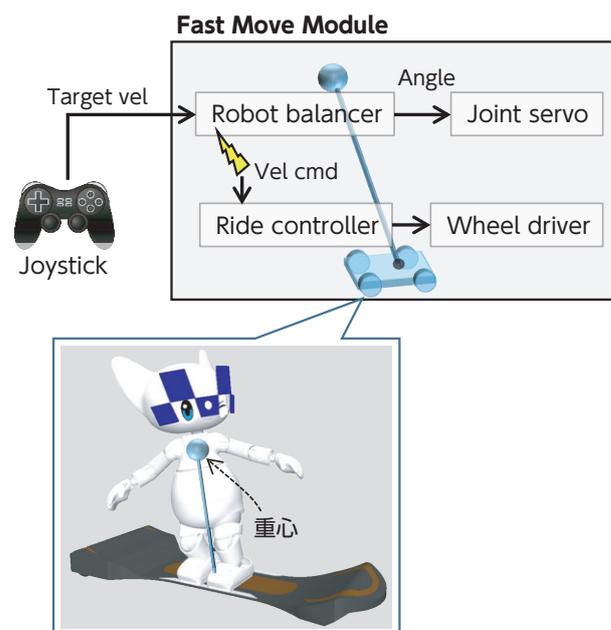


図15 MRライドとの連携処理

指令速度は、まずロボット内のバランス制御器に指令される。バランス制御器では、ロボットとライドを重心-台車でモデル化した最適化計算をオンラインで行い、台車のスペックや摩擦限界などの制約を満たしつつ、バランスが維持できる重心位置・台車速度が算出される。

ロボット側では、両足と重心位置の関係から各関節目標角を求めた制御がなされ、ライド側では無線通信で受信した台車速度を目標に、ライド内に実装されたコントローラが対向2輪を制御する。

このようなロボットとライドの協調動作により安定な高速移動が実現される。

5 おわりに

本稿では、本格的な小型ヒューマノイドロボットへと進化した東京2020マスコットロボットの主要技術について紹介した。

執筆時点(2021年5月)では世界中でいまだ多くの方がコロナ禍で苦しい状況に置かれており、東京2020大会の開催もどのような形態になるのか見通せない状況が続いている。ただ、マスコットロボットは、大会を通して未来を担う子供たちの笑顔というメダルを少しでも多く獲得することがミッションであるのは変わらない。そのため全力でロボットの完成度を上げて活用機会に臨む所存である。

最後に、コロナ禍での短期間で大幅なバージョンアップを行うにあたって、組織委員会の方々、社内のモノづくりプロフェッショナルの方々から多くのサポートをいただいた。ここに感謝の意を表す。

■参考文献

- [1] 東京2020ロボットプロジェクト第2弾
<https://olympics.com/tokyo-2020/ja/news/news-20190723-02-ja>
- [2] 東京2020マスコットロボット(旧モデル)
<https://gting.tokyo2020.org/image/upload/production/bqdkj5d1cwn5haqd2zmz.pdf>
- [3] 高木:「トヨタパートナーロボット」, 日本ロボット学会誌 2006, Vol.24, No.2, p.208.
- [4] T-HR3 プレスリリース
<https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/30609610.html>
- [5] 土井: 特許5803751 重心軌道生成装置, その生成方法及びプログラム

- [6] <http://wiki.ros.org/>
- [7] <https://choreonoid.org/ja/>
- [8] https://www.nhk.or.jp/minna/songs/MIN202104_03/

■著者



森平 智久



服部 祐人



土井 将弘



井山 寛之



近藤 寛之



山本 一哉

AIバスケットボールロボットCUE5の開発

Development of the CUE5 AI Basketball Robot

辻本 崇好 *¹ 八木 正純 *¹ 滝沢 良 *¹ 土井 将弘 *¹
Takayoshi Tsujimoto Masazumi Yagi Ryo Takizawa Masahiro Doi

原田 哲志 *¹ 安井 雄哉 *¹ 佐野 光 *¹
Tetsushi Harada Yuya Yasui Hikaru Sano

要旨

オリンピックの舞台でパフォーマンスをすることを目標に、シリーズ5世代目となるバスケットボールロボットCUE5を今回開発した。CUE5では、CUE4までで達成した連続投球、ボール把持、自律移動の機能に加え、移動しながらのドリブル機能、センターラインを超える距離からの超ロングシュート機能を追加した。

本稿では、これらの機能を達成するための開発内容について、報告する。

Abstract

Toyota developed the fifth generation of its CUE basketball robot with the objective of showcasing its performance at the Olympic Games. The previous generation robot, CUE4, was capable of taking continuous shots at the basket, holding the ball, and autonomous movement. CUE5 also features the ability to dribble the ball while moving and take extremely long shots from behind the midcourt line. This article describes the details of the development to realize these functions.

キーワード モデル予測制御、CFRP フレーム、リチウムイオン高出力バッテリー、高出力モータ、ボール軌道予測

1 開発の経緯、背景

本プロジェクトは、2017年トヨタ自動車(株)のインフォーマル団体であるトヨタ技術会で、ヒューマノイドの開発に挑戦する企画を立案したところから始まった。遊び心とタスクのわかりやすさから、バスケットボールのフリースローを決めるロボットCUE1を開発した。CUE1がBリーグアルバルク東京の選手として登録され、東京2020オリンピック・パラリンピックへのバスケットボールロボットの出展を目標に業務として取り組むことになり、現在に至る。

2018年11月に発表したCUE2は、スリーポイントシュートが打てるヒューマノイドである。

2019年4月に発表したCUE3は、センターサークル内からのシュートが可能なヒューマノイドである。また、2019年5月には「人型ロボットによる連続フリースロー回数記録2020回」でギネス記録を樹立した。

2019年11月に発表したCUE4は、自律移動、

ボール把持、連続シュートが可能なヒューマノイドで、2020年1月Bリーグオールスターゲームのスリーポイントコンテストに出場した。

そして、今回発表したCUE5は、東京2020オリンピックへの出展を目指し、人間にはできない動作と、人間のように器用な動作ができるヒューマノイドを目指した。人間にはできない動作としてセンターラインを超える超長距離シュート機能と、人のように器用な動作としてドリブル機能を達成することを目標として開発した(図1)



図1 これまでに開発したCUEシリーズ

*¹ 未来創生センター R-フロンティア部

2 CUE5 のシステム構成



図 2 CUE5 外観

CUE5 のシステム構成を表 1 に示す。

CUE5 は、シュートやドリブルなどの動作を実行できるヒューマノイドである (図 2)。

移動しながらのドリブルを達成するため、ボールの運動にあわせて、柔軟に自分の位置や手先位置を追従させる必要がある。そのため、片腕 7 軸、片脚 5 軸、胴体 1 軸の可動軸を設定し、また、車輪にメカナムホイールを採用することで、全方向のスムーズな移動を可能にした。

センターラインを越える位置からのシュートを可能にするため、高出力が求められる関節ピッチ軸を中心に、新開発の高出力モータ (3-1 参照) を採用した。また、特に高出力が求められる膝、足首のピッチ軸には、ダブルモータ構造を採用した。

通信については、オリンピック本番会場のさいたまスーパーアリーナでの混信を考慮して、電源や非常停止などの制御スイッチ用として 169MHz、オペレータによる各種の操作用として 4.9GHz の無線通信を採用した。

表 1 CUE5 諸元

身長	213cm
体重	110kg
電源	高出力リチウムイオンバッテリー
可動軸数	右腕：7 軸 左腕：7 軸 首：2 軸 胴体：1 軸 右脚：5 軸 左脚：5 軸 車輪：4 軸 合計：31 軸
アクチュエータ	新開発高出力モータ：20 軸 ブラスレス DC モータ：13 軸 減速機一体小型モータ：2 軸
モータドライバ	70A5.6kW：7 台 50A4.0kW：26 台
通信	下記 2 系統の無線通信 ・169MHz：制御スイッチ用 ・4.9GHz：オペレーション用
CPU	Intel core i7
センサ	・ゴール検出用 ToF カメラ 1 台 ・投球軌跡検出用 ToF カメラ 1 台 ・ボールスタンド検出用 RGB-D カメラ 2 台 ・周辺物検出用 測域センサ 4 台 ・ボール検出用 ToF カメラ 2 台

3 要素技術開発

以下に CUE5 のための要素技術について述べる。

3-1 高出力モータ開発

長距離投球する際、瞬間的に高速・大トルクが必要だが、出力の不足による飛距離未達と過大な発熱で投球ができないという課題があった。この課題を解決するため、以下のような高出力モータを開発した。

- ①ローターの永久磁石をハルバッハ配列 (棒状と扇形の磁石の組み合わせ) として磁力を強める (図 3)
- ②コア材にパーメンジュール (透磁率が電磁鋼板の 1.5 倍)、磁石に自動車用最新ネオジム磁石 (粒子界拡散により保磁力が約 2 倍) を採用
- ③φ1.3 の銅線を採用し高密度巻き線 (占有率 50%) で損失低減 (図 4)

上記により、従来モータに対して、最大出力 2.5 倍 (図 5) で相固定 50A の連続通電 5 秒で巻き線

温度上昇 40℃程度に抑えることが可能になった。投球動作は 1 回 300ms 程度であり、この性能は長距離投球に対して十分な性能である。長距離投球に対して高出力が要求される膝、肩、ひじ、手首などのピッチ軸、および、走行時に連続的にトルクが必要となる車輪軸に本モータを採用した。コア積み厚 25mm、50mm の 2 種類を開発し、搭載スペースに余裕のない手首などには 25mm 品、それ以外の軸には 50mm 品を採用した。

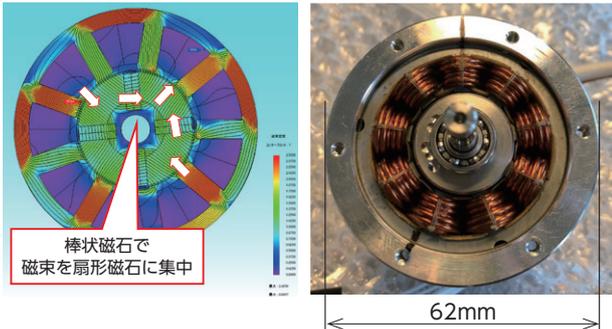


図 3 モータ磁気解析結果

図 4 モータ巻き線

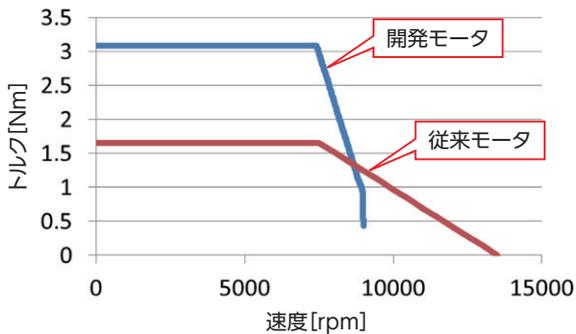


図 5 開発モータの速度、トルク特性

3-2 高出力バッテリー開発

CUE5 の投球や走行、ドリブル動作を実現する動力源として、高出力小型バッテリーを開発した。CUE5 筐体内に納まるサイズで、かつ、イベント対応できる大容量を両立させるため、下記仕様とした。

①電圧 60V 以上

(最大出力時の電圧降下含)

②容量 3 ポイントコンテスト 1 回以上

③体格 幅 213mm × 奥行 160mm × 高さ 230mm
上記を達成するため、リチウムイオンセルを多直化した構成とし高出力が可能とした。

最も電力消費の激しい 3 ポイントコンテストタスク (25 球の投球と 4 回の移動) においても、最終 25 投球目まで 60V 以上を確保 (図 6)、容量も連

続 2 回以上の 3 ポイントコンテストが対応可能である (図 7)。

バッテリーの重量は 7.1kg で胴体上部に搭載し、背中側から簡単に脱着可能としている (図 8)。

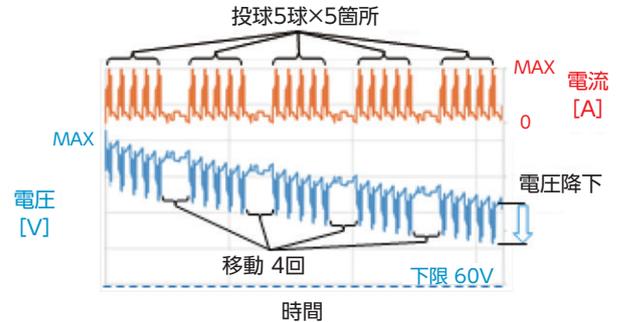


図 6 3 ポイントコンテストでの電圧電流特性

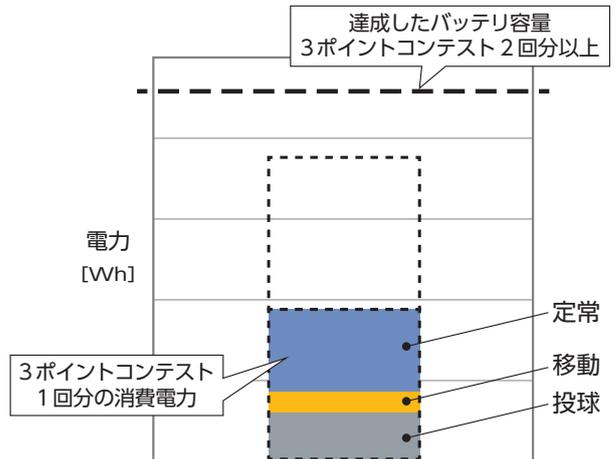


図 7 3 ポイントコンテストの消費電力とバッテリー容量

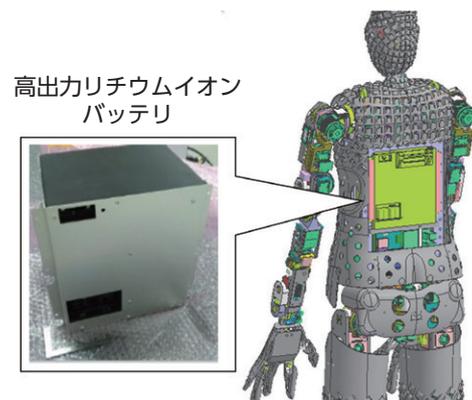


図 8 バッテリー搭載位置

3-3 軽量化技術

シュートやドリブルのような瞬発的な動作を可能にするため、アクチュエータの高出力化だけではなく、機体の軽量化にも取り組んだ。

CUE3 まではアルミニウム（比重 2.7）をフレーム材として採用していたが、投球飛距離の向上を狙って上腕、太もも、ふくらはぎ部に CFRP（比重 1.5）を採用し、軽量化を図った。また、CFRP 板同士の締結では強度が確保できないため、L 字形状での成型構造として剛性を確保した（図 9）。

あわせて、ロボット全体の約 20% を占める減速機の軽量化にも取り組んだ。

- ①減速機ハウジングとロボットフレームを一体化
- ②軽量薄型クロスローラベアリング採用
- ③使用環境に応じ、不要なパッキンなど廃止により、従来減速機の▲ 40%の軽量化を達成した。

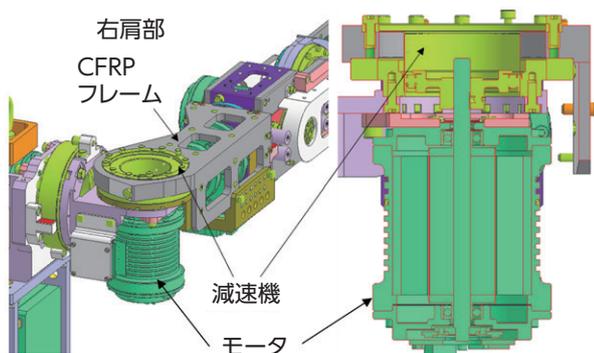


図 9 CFRP フレーム（上腕部）と軽量減速機の構造

3-4 全身バランス制御

CUE4/CUE5 は足裏にメカナムホイールを備え、全方移動が可能である。CUE4 から導入した全身バランス制御により、3 ポイントコンテストのボールスタンド間を高速に移動することが可能となった。さらに、CUE5 では腰・足首のロール軸を追加して両脚に各々 5 自由度を持たせることにより、ボールの動きにあわせてドリブル移動することが可能になっている。

CUE5 のような構成のロボットは、車輪の付いた足部が小面積であるのに対し重心が高い位置にあるため、高速移動の実現には加減速や旋回時に台車の動きにあわせた精密なバランス制御が必要である。加えて、車輪モータ出力や地面 - 車輪間の摩擦限界などの物理的制約を満たす必要があり、これらを両立しなければならない。

そこで、ロボットを重心 - 台車でモデル化（図

10）し、モデル予測制御を用いたオンライン最適化ロジックを実装した。この制御により、制約範囲内で台車目標軌道（図 11）を可能な限り満たす台車 - 重心の軌道を、リアルタイム生成することが可能となった。決定した重心・台車の関係から全身の関節角度、各車輪速度を計算することで、旋回走行時の遠心力や加減速に対するバランス制御を実現した。

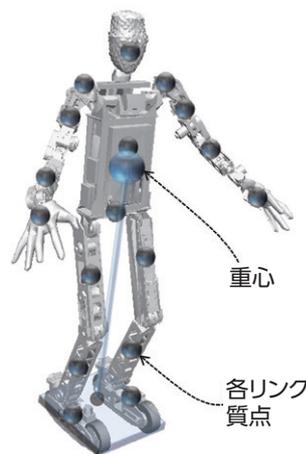


図 10 重心 - 台車モデル

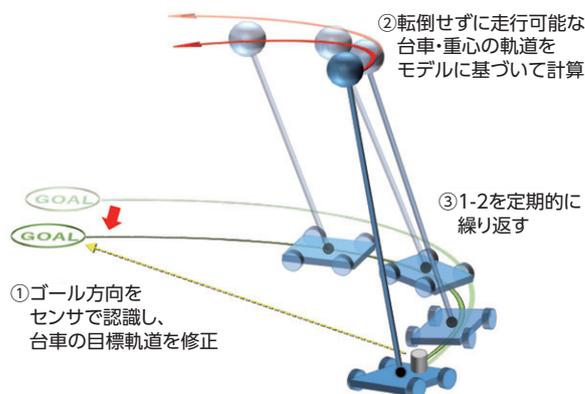


図 11 目標軌跡算出の考え方

3-5 投球軌跡解析システム

ボールの飛距離やボール位置精度など、投球の性能検証のため、投球されたボールの軌跡を正確、かつ迅速、簡潔に取得できるシステムが必要になる。既存のモーションキャプチャなどのシステムでは、1 球あたりの解析時間が長い（15 分 / 球程度）という課題があった。投球の繰り返し精度を検証するためには、数百球の投球評価が必要になり、現実的に採用できる計測手段がなかった。

そこで、今回 ToF カメラを用いて、投球したボール軌跡をその場で検出、解析できるシステムを構築

した。ゴール真下に ToF カメラを上向きに設置し、投球されたボールを検出する構成で、ゴールリングの位置とボールの Depth 情報 (図 12) から、ゴールリング中心を基準としたボールの軌跡を解析により算出 (図 13) する。リアルタイムでボールの軌跡を知ることができるため、効率的に評価を進めることができるようになり、シュートのバラつき改善やシュートの狙い位置の補正に活用した。

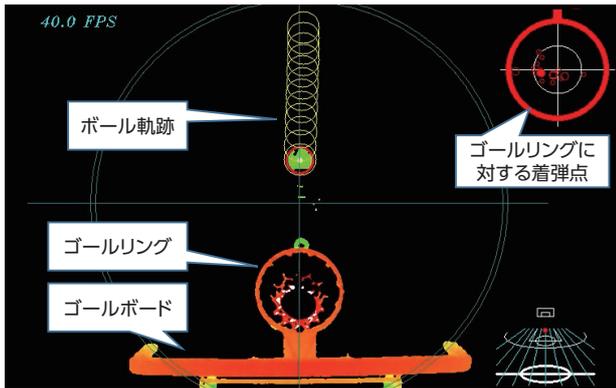


図 12 投球解析システムの ToF カメラ映像

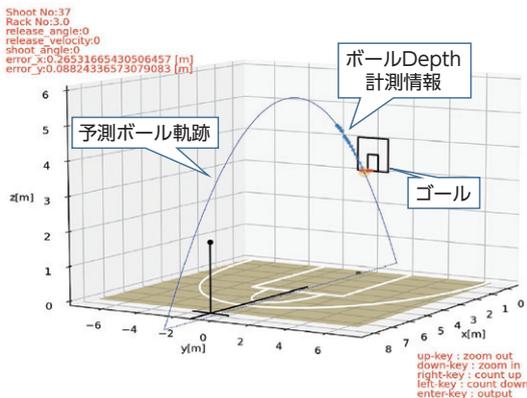


図 13 投球解析システムによる軌跡解析結果

トの各軸指令値を実際の投球評価から探索した。探索パラメータを削減するため、脚動作は経験的に最もバランスよく出力の出せる動作パターンに固定し、肩、ひじ、手首のピッチ軸について、最大回転速度を固定した条件で

- ① 3 軸に生じる最大電流の平均値を最小化
 - ② 3 軸に生じる最大電流の分散を最小化
 - ③ ボールの飛距離を最大化
- するような投球動作を探索する。

3 軸の開始角度、終了角度、動作開始タイミングを投球指令値のパラメータとし、上記の多目的最適化をベイズ最適化により達成した。実際の投球により、投球指令パラメータとそれに対する結果を取得 (図 14) し、投球ごとに予測モデルを更新しながら、次の投球パラメータを獲得関数からサンプリングして探索する仕組みとした。

その結果、約 50 球の実際の投球に対して、各軸出力範囲内で投球飛距離 17m の投球の探索に成功した。実際の投球の様子を図 15 に示す。

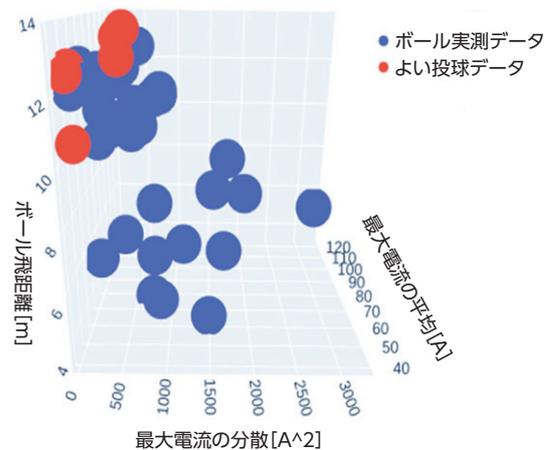


図 14 実際の投球の飛距離、最大電流平均、分散

4 機能開発

4-1 超長距離シュート機能

センターラインを超えるような超長距離シュートの場合、各軸の出力を性能範囲内でバランスよく使うことで、効率よくボールの飛距離を出すことが重要になる。一方で、手とボールの接触状態を精度よくモデル化することが難しいため、ボールの飛び方や必要トルクをシミュレーションだけで正確に見積もることができず、実際に投球して投球動作を決める必要がある。

そのため、以下のような手段で、超長距離シュー

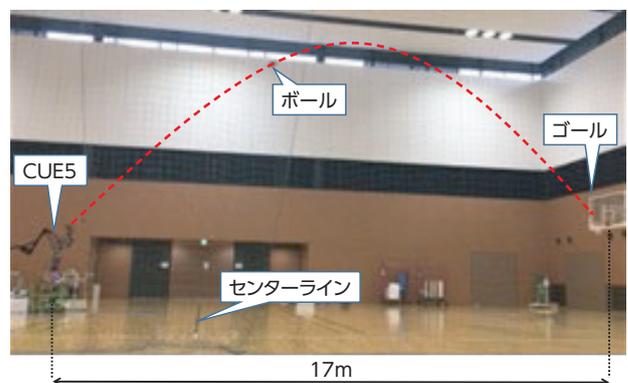


図 15 超長距離シュート

4-2 ドリブル機能

足先に取り付けた ToF カメラで、ドリブル時のボール位置、速度を検出し、ボール軌道を予測しながら、その予測結果に従って、手先位置、姿勢、速度をリアルタイムで制御することでドリブル動作を実現した。安定してドリブルを継続するためには、次回手先が届く範囲に床面からボールが跳ね返ってくるように打ち出す必要がある。このうち、次回のボールの水平位置については、目標の位置にボールを着弾させるための手先位置、姿勢と振り下ろし方向をボールの予測軌跡から決定することで制御した。また、次回のボールの高さについては、ボールの最高到達点とボールの打ち出し高さとの手の振り下ろし速度の関係をあらかじめ計測してマップを作り（図 16）、ボールの予測軌跡から手の振り下ろし速度を決定することで制御した。図 17 にドリブルした時の手先位置と、ボール高さの計測結果を示す。目標高さ 1.2m 付近で安定してドリブルできていることがわかる（図 18）。

移動時は進行方向に対して、ボールに並進速度を与える必要があるため、移動方向にボールが打ち出せるように手先姿勢を適用的に修正することで、1.5m/s で移動しながらドリブルを継続できるようにした。

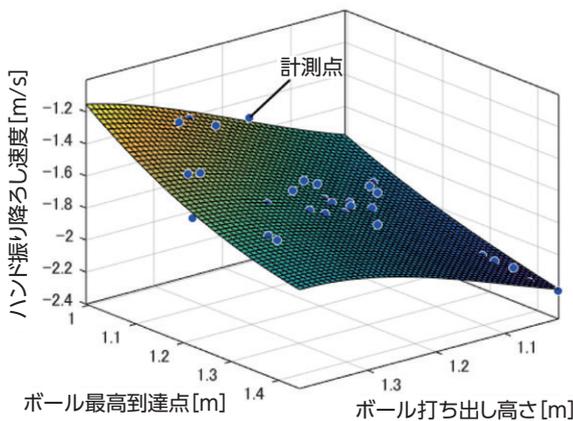


図 16 ハンド振り下ろし速度算出マップ

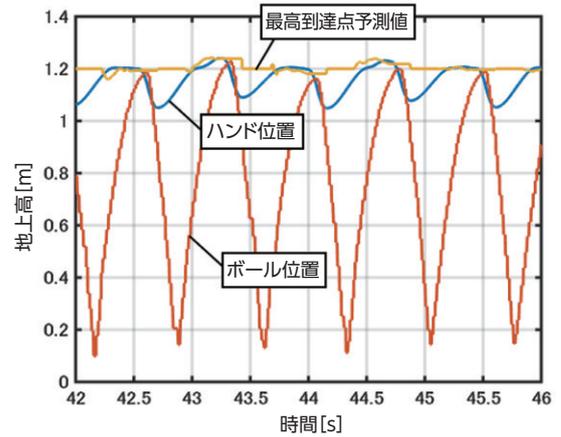


図 17 ドリブル時のボール運動と手先位置

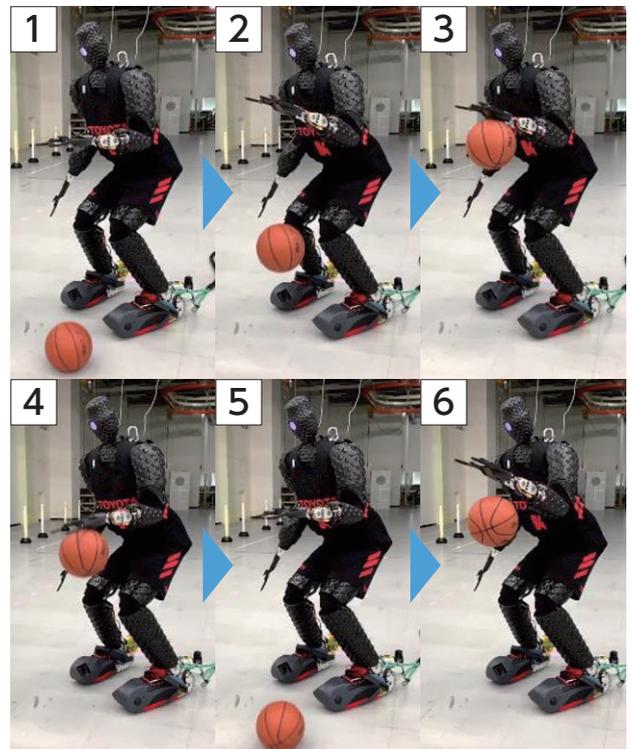


図 18 ドリブル動作

5 終わりに

本稿では、人間にはできない動作と、人間のように器用な動作ができるヒューノイドを東京オリンピックへ出展することを目標に開発した CUE5 について報告した。

投球やドリブルなど、高出力を要する動作を達成するためのモータ、バッテリー開発、軽量化対応や、安定した移動を可能にする全身バランス制御、投球検討のためのボール軌跡計測システムなど、ハード、

ソフト両面から要素技術を開発した。

それらの要素技術を活用し、人間にはできない動作として、センターラインを大きく超える飛距離17mの超長距離シュート機能を達成した。また、人のように器用な動作として1.5m/sでの移動しながらのドリブル機能を達成した。

動作のなめらかさや自由度、ロバスト性についてはまだまだ人間に及ばない。今後さらに人間にはできない動作を増やししながら、人間のように滑らかに動作できるヒューマノイドを目指して開発を進めていく。

■著者



辻本 崇好



八木 正純



滝沢 良



土井 将弘



原田 哲志



安井 雄哉



佐野 光

PHEV 参加型の個人間 (P2P) 電力取引システムの開発

Development of Peer-to-Peer Energy Trading System Including Plug-in Hybrid Electric Vehicles

小幡 一輝^{*1} 工藤 由貴^{*2} 菊池 智志^{*1}
Kazuki Obata Yuki Kudo Satoshi Kikuchi

木暮 宏光^{*1} 木村 和峰^{*1}
Hiromitsu Kigure Kazutaka Kimura

要旨

本研究では、電動車も参加する個人間 (P2P) 電力取引システムを開発し、再生可能エネルギー (再エネ) の効率的活用を目指す。環境に配慮したエネルギー利用が求められるなか、増加する余剰再エネ電力を電動車や家庭の蓄電池を活用し、自律的に需給調整できるシステムが有用であると考え、電動車と家庭、事業所が参加した実証実験にて、本システムの経済性、再エネ活用率を検証した。

Abstract

The aims of this research are to develop a peer-to-peer (P2P) energy trading system that allows the participation of electrified vehicles and to make more efficient use of renewable energy. A system that can store surplus power generated from renewable energy in electrified vehicle and home batteries, and autonomously adjust supply and demand is seen as an effective way of helping to meet the growing need for environmentally conscious energy usage. The economic potential and renewable energy utilization rate of the developed system were verified through demonstration tests that included the participation of electrified vehicles, homes, and businesses.

キーワード スマートグリッド, 個人間電力取引, VPP, 電動車, V2G, 再生可能エネルギー

1 まえがき

本研究では、電動車も参加する個人間 (P2P) 電力取引システムを開発し、再生可能エネルギー (再エネ) の効率的活用を目指す。

環境に配慮したエネルギー利用が求められるなか、世界中で風力や太陽光などの再エネ電源が増加している。これにともない、天候で出力が変動する不安定な電源を安定的に使うために、調整力として活用できる蓄電池への期待が高まっている。例えば、点在する蓄電池を集約して電力供給側から充放電指令を与え制御するアグリゲーション型のバーチャルパワープラント (VPP) に関して盛んに研究・実証がされている (1) (2) (3)。

環境への配慮は自動車に対しても求められており、電動車へのシフトが起きている。バッテリーを点在する蓄電池として使用可能なこと、走行時間よりも駐車時間が長いことなどから、電動車を VPP

へ適用することが検討されている (4) (5)。

本研究では、電動車のバッテリーを調整力として活用する方法として、P2P 電力取引に着目した (図 1)。これは、アグリゲーション型 VPP とは逆に、需要末端側から電力需給調整をする手法である。参加者はシステムが安定化するように自律的に動作する。電動車にとっては、どちらも遠隔より充放電指令を受けて充放電することになるため、ハードウェア構成は類似すると考えられる。一方で、ソフトウェアには市場への参加方法等 P2P 固有の開発が必要となる。本研究では、電動車が P2P 電力取引市場に参加するアルゴリズムを構築・実証し、その効果を評価した。本論文では、主に経済性、再エネ活用に着目して報告する。なお、本実証実験は研究倫理委員会承認のもと進めた (許可番号 2019MK0001)。また、本実証実験は東京大学田中謙司研究室と TRENDE 株式会社様と共に進めた。

^{*1} 未来創生センター R-フロンティア部

^{*2} サステナビリティ推進室

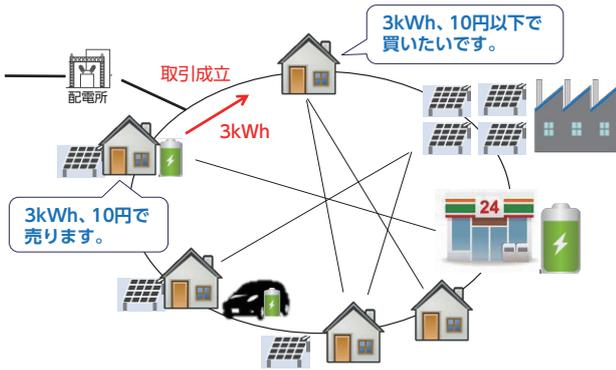


図1 P2P 電力取引の概念図

2 東富士実証

2.1 概要

P2P 電力取引システムは、2019年6月より静岡県東部周辺で実証された。P2P 電力取引への参加者は、事業所、自宅を有する20名のトヨタ自動車東富士研究所所属員である。参加者の所持設備について表1にまとめる。表中において、太陽光発電設備を持たない参加者(コンシューマ)をC、太陽光発電設備を持つ参加者(プロシューマ)をPと表記する。なお、コンシューマ、プロシューマのなかでも所持設備の差によって細分化される。事業所はトヨタ自動車東富士研究所の需要と太陽光発電設備のそれぞれの実データをもとに参加した。個人の需要のデータはスマートメータやHEMS機器を通じて収集した。個人の参加者のうち9名に貸与したプラグインハイブリッド車(PHEV)と車両用充電器には、通信機を設置した。これにより、PHEVのバッテリー残量や、充電器への接続状態を遠隔で取得可能とした。充電器に接続したPHEVは、電力取引結果に基づいて自動的に充電される。

本実証実験の構成を図2、図3に示す。本実証では各参加者に紐づいた自動入札エージェントが入札し、参加者個人は関与しない。自動入札エージェントは過去の情報をもとに、各参加者に適した入札戦略を立てる。本実証では、自動入札エージェントをHomeエージェント、Vehicleエージェント、Officeエージェント、Gridエージェントの4タイプ設定した。それぞれ家、PHEV、事業所、システムを担当する。PHEVは家に従属せず、独立して入札する。ただし、自宅とPHEVは関連付けされており、連携する手段を有する。システムを担当するGridエージェントは、参加者の電力が足りないときには系統電力を販売し、余っているときにはその余剰電力を

表1 参加者と設備

	C1	C2	P1	P2	P3	P4	事業所
参加者数	6	6	2	3	1	1	1
太陽光パネル			○	○	○	○	○
蓄電池				○		○	
PHEV		○			○	○	
充電器		○			○	○	○



図2 実証実験

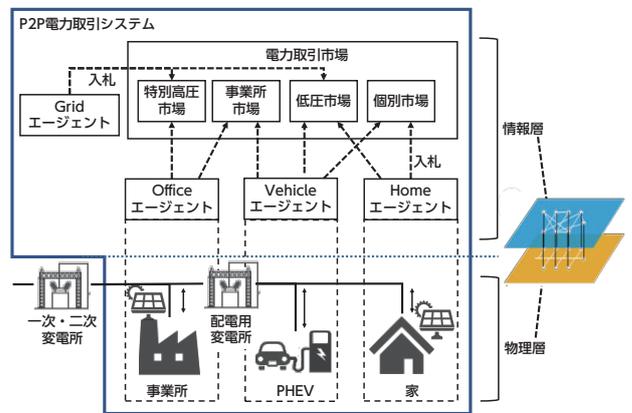


図3 実証実験の全体構成図

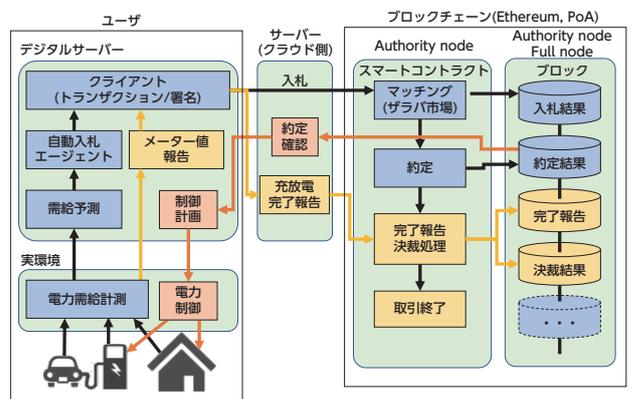


図4 情報の流れの全体図

購入する存在である。そのため、Grid エージェントは事実上無限といえる電力量の売りと買いの入札を固定価格で出す。また、入札とは別で各参加者の電力需給情報が市場へと送信され、市場の取引結果との整合性確認に使用される。さらに、本システムではブロックチェーン技術を採用し、以下3つの機能を構築している。

- 電力融通の記録
- 市場の売買処理（約定処理）
- 電力の発電場所証明とトラッキング

ユーザからブロックチェーンまでの情報の流れは図4のようになっている。計測値をもとにエージェントで作成された入札はブロックチェーンのスマートコントラクトに書き込まれる。ブロックチェーン上には、入札結果、約定結果、電力融通の完了報告、決済結果が記録される。

2.2 市場

本実証における P2P 電力取引システムではザラバ市場を採用した。ザラバ市場では、価格優先と時間優先の2ルールをもとに運営し、30分間を1市場として、24時間先の48市場に対して入札可能とした。1市場はさらに5分間隔で区切られ、6回の入札機会がある。入札情報には、時刻、売/買、単価、取引電力量、タグが含まれる。タグを用いて、その電気が特別高圧か低圧であるか、再エネ由来かそのほかか、同じ敷地内での融通かを指定する。同じ敷地内の融通とは、システムを介さない電力融通を指す。例として、自宅と自宅に接続されたPHEV間、事業所と通勤車両間の取引がある。

電力を購入する際、市場価格に託送料が上乗せされる。託送料は、特別高圧市場では4¥/kWh、低圧市場では8¥/kWh、同じ敷地内の取引ではシステムを使わないため0¥/kWhとした。託送料は約定後に買い手が負担し、市場価格には反映されない。また、電力小売りは低圧市場に18¥/kWhの売りと5¥/kWhの買いを、特高市場では11¥/kWhの売りと、4¥/kWhでの買いを入札する。

3 Vehicle エージェント

3.1 最適化計算

Vehicle エージェントの処理フローを図5に示す。積極的に安い余剰再エネを購入するため、電力コスト最小化アルゴリズムを基本とする。コスト最

小化アルゴリズムは以下の通りである。

$$\text{argmin}_{i=MN} \sum_{i=MN}^{MN+47} \{E_{buy}(i)(Y_{pre}(i) + Y_{rand} + Y_{fee} - Y_{back}) - E_{sell}(i)(Y_{pre}(i) - Y_{rand})\} \dots (1)$$

表2 Vehicle エージェントの制約条件

制約条件	詳細
走行電力の確保	走行開始時において走行に必要な電池残量を確保する。走行の直前に足りなければ小売り価格で入札して、必ず確保する。
走行時の充放電はできない	走行時には充放電器による充放電ができないので入札しない。
充放電器の充放電能力	充放電器の出力は5.9kWなので、1市場(30分)で充放電できるのは最大2.95kWh。
各時間の間の電池残量の関係性	走行、放電した分、車両の電池残量が減り、充電した分、増えるという制約。
最適化区間の最初と最後の電池残量	最初は現在の実際の電池残量。最後は4.4kWhとする。

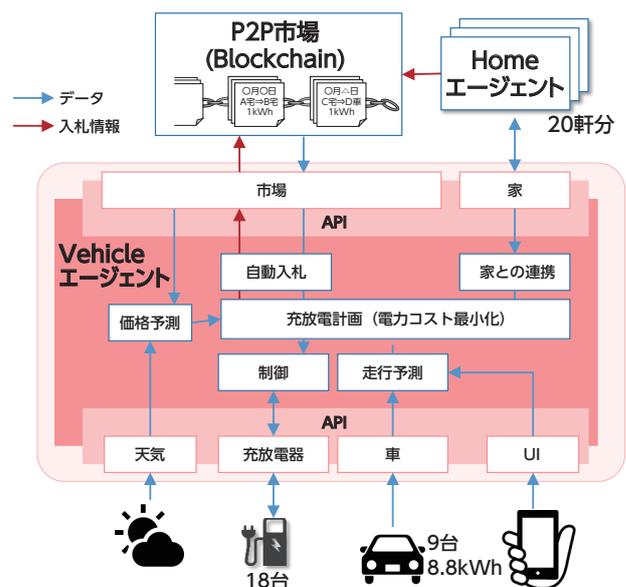


図5 Vehicle エージェント

ここで、 E_{buy} は買い入札量、 E_{sell} は売り入札量、 Y_{pre} は市場価格、 Y_{fee} は託送料、 Y_{back} はペイバック、 Y_{rand} は乱数である。乱数は各 Vehicle エージェントの価格にバラツキを与えることで、入札が同一市場に集中することを防止する。託送料は、一律8¥/kWhとして与え、託送料がかからない市場に対してペイバックを設定する。例えば、同一敷地内での取引ではペイバックは8¥/kWhになる。

3.2 車両移動予測

電力コストを最小化するには、車両の行動予測が重要となる。車両移動予測では蓄積された過去の車両移動データをもとに、未来の移動を予測する。電動車は充放電器に接続されているタイミングでしか充放電ができない。そのため、充放電器に接続されている時間を狙って電力取引市場に入札する必要がある (表 2)。車両のデータは GPS と SOC が走行中 / 充放電中に 30 秒ごとにサーバーへ送られる。このデータを使用して車両の状態 (在宅 / 在社 / 移動) を予測するモデルを構築する。

解くべき問題は、30 分の時間ごとの在宅 / 在社 / 移動の 3 クラス分類問題である。しかし、通勤車はその特性上、自宅と会社への駐車時間が長くなり、走行時間は他の 2 つに比べて非常に短くなる。このような不均衡データでは適切な評価指標を設定して学習することが重要になる。先にも述べたとおり、車両の移動の予測ではいつ充放電器に接続されているかの予測が重要である。そこで、まずは移動 / 非移動 (在社 + 在宅) の 2 クラス分類とみなした時の再現率が重要となる。これらを踏まえて、車両移動予測では図 6 に示すフローで予測する。

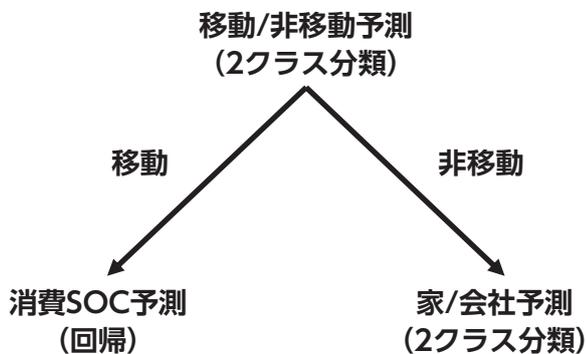


図 6 車両行動予測

最初に移動 / 非移動の 2 クラス分類を解く。このとき、移動のデータ数が非常に少ないため、非移動のデータにはアンダーサンプリングの処理をかける。移動と判定された場合にはその時間に使用する SOC 量を過去データから予測し、非移動と判定された場合には自宅 / 会社の 2 クラス分類を解くようにした。このように、3 クラスの分類問題を 2 つの 2 クラス分類と捉えることで、不均衡なデータから予測できるようにした。

分類問題を解くための機械学習手法は数多く存在する。そのなかから、個々人のパターンやデータ数

等にあわせた手法をあらかじめ決定することは非常に困難である。したがって、本実証では車両移動予測のなかで複数の手法によりモデルを構築して評価し、最適な手法を選択するようにした (自動機械学習)。学習手法はロジスティック回帰、k 近傍法、ランダムフォレスト、勾配ブースティング、多層パーセプトロンの 5 つを採用した。

4 経済性の評価方法

P2P 電力取引での収支は 30 分の市場ごとに集計する。車の収支は次の 2 つの項目の和からなる。

- P2P 電力取引市場での約定結果
- 約定外での収支

約定外の収支とは、参加者が充放電ボタンを押す、充放電器への充放電停止通信が遅れる、充放電の約定を履行できなかったときに発生する。

P2P 電力取引に参加した場合の収支を評価するために、比較対象として P2P 電力取引に参加しなかった場合の電気料金を算出する。このときの電力の購入単価は東電従量電灯 B を参考に 26 円/kWh とし、買い取り単価は旧一般電気事業者の 2020 年時点での最低買取価格 7 円/kWh とした。従って購入電力量を E_p 、販売電力量を E_s とすると、収支 P の式は以下の通りとなる。

$$P = -26E_p + 7E_s \dots \dots \dots (2)$$

P2P 電力取引結果による収支と、式 (2) から算出される収支の差を、電気料金抑制分とした。

5 結果と考察

5.1 実証実験全体

2020 年 8 月 1 日から 2020 年 8 月 31 日の実証結果について報告する。2020 年 8 月のトヨタ自動車の非営業日は、夏季休業である 8 月 10 日から 8 月 14 日と、土日であった。また気象庁によれば、8 月の静岡県東部の日照時間は、三島市 257.3 時間、御殿場市 223.2 時間であり、余剰再エネが発生しやすい条件であった。

市場の価格推移は図 7 のようになった。ここでの価格推移は、電力取引市場の全取引内容を 0:00 から 23:30 までの 30 分毎で積算し、箱ひげ図にまとめたものである。余剰発電は系統価格よりも低価格で取引された。

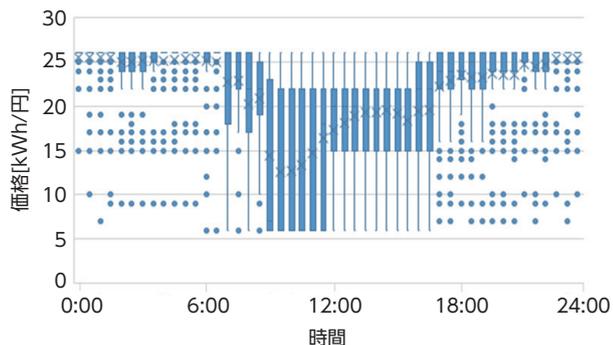


図7 P2Pの取引価格

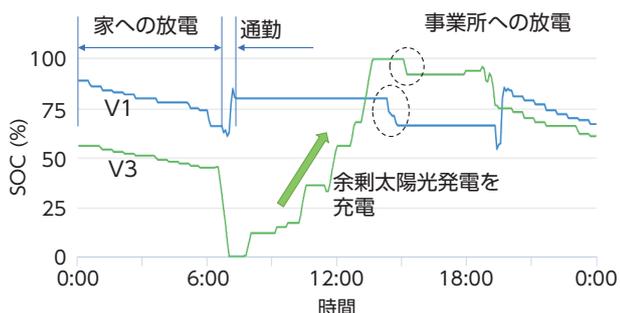


図8 PHEVのSOC推移

代表的なPHEV 2台のSOC推移を図8に示す。これは、2020年8月18日のデータである。図中のV1とV3はPHEVのIDである。SOCは、Vehicleエージェントの指示による充放電、電力取引外の充放電、走行による消費/回生によって推移する。V1、V3ともに夜中～明け方は徐々にSOCが減少している。これは、家へ放電していることを示している。V1の午前7時前後の通勤走行中のSOC増加は、坂を下る等して発生したPHEVの回生エネルギー由来である。また、V3の午前7時から7時46分はSOCが0%であるが、PHEVであるためSOCが0%となっても、ガソリンを使用しての走行が可能となっている。V3のSOCは通勤後午前8時の0%から13時には100%へと増加している。これは、PHEVが剰太陽光発電を購入・充電した様子をあらわしている。このように、家で夜間放電することで、翌日に事業所で剰太陽光発電を可能な限り吸収することができた。また、図7より、価格が低い時間帯で購入しており、電力コスト最小化アルゴリズムの狙い通りの結果となった。15時にはV1、V3ともにSOCが減少した。このとき事業所は28¥/kWhで電力をPHEVから購入しており、PHEVは事業所のピークカットに反応したことが示された。

表3 収支結果

Vehicle ID	A. 従来支払額	B.P2P支払額	差額(B-A)
V1 ^{※1}	-468	251 ^{※2}	737
V2	-3,456	-2,844	612
V3	-3,823	-2,388	1,435
V4	-3,774	-2,380	1,394
V5	-2,420	-2,121	299
V6	-4,843	-4,750	93
V7	-3,373	-1,232	2,140
V8	-6,039	-5,316	724
V9	-2,529	-2,148	381
平均	-3,416	-2,548	868

※1 走行モード設定誤りにより、参考値として記載
 ※2 参加者に利益が出たため、プラス値となっている

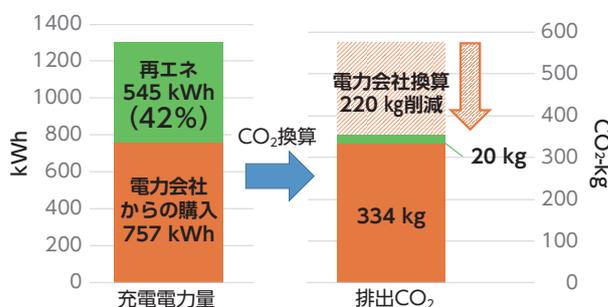


図9 購入電力種別とCO₂換算量(9台合算)

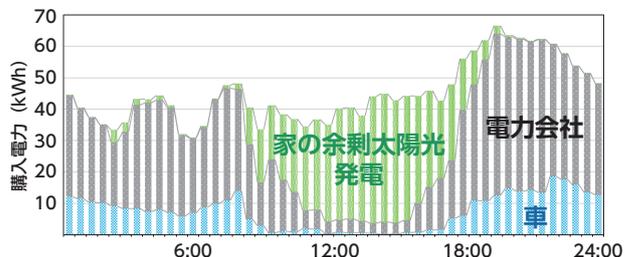


図10 コンシューマの購入電力元(9台合算)

5.2 経済性

収支計算結果について述べる。P2P電力取引に参加しなかった場合、2020年8月のPHEVの電気料金は車台あたり平均で3,416円であった。一方で、P2P電力取引システムに参加した場合、電気料金は平均2,548円となった。各PHEVの詳細収支については表3にまとめる。P2P電力取引システムに参加することにより、平均868円電気料金を抑制できた。

5.3 再エネ活用

再エネの活用率について考察する。図9に2020年8月1日から2020年8月31日間でPHEVが

購入した電力の種別と充電電力による排出 CO₂ 量を示す。図 9 (左) のとおり、PHEV が充電した電力のうち約 40% を P2P 電力取引市場の再エネで賄うことができた。また、購入電力した電力を排出 CO₂ に換算したものが図 9 (右) である。なお換算には東京電力の公表値と電力中央研究所が公表している太陽光パネルの Life Cycle Assessment 値を使用した (6) (7)。再エネ電力を活用することで、走行に使用する電力のうち 9 台合計で約 220kg の CO₂ を削減することができた。

次に、Home エージェントの購入電力の内訳を確認する。図 10 にコンシューマの時間ごとの購入電力元内訳を示す。コンシューマは発電設備を持っていないため、本来であれば電力会社から購入する以外に電力の調達方法はない。しかし、図 10 のとおり昼間 (9 時～17 時) の電力のうち 80% を他家の余剰太陽光発電を購入することができている。また、昼間以外の時間帯のうち 22% の電力を PHEV から購入することができている。夜間は太陽光による発電が無いため電力会社から購入せざるを得ないが、PHEV が昼間に蓄えた電力を販売することで夜間の電力需要の一部を賄うことができていく。これらのことから、本システムで昼間に発生する余剰再エネを他家で吸収、夜間の需要に充てることが可能であると示唆された。

6 むすび

自律的に余剰再生可能エネルギーを吸収する機能を備えた PHEV を P2P 電力取引実証で運用し、その電気料金の収支を評価した。その結果、従来の電気料金計算相当と比較して、2020 年 8 月の一か月で平均 868 円抑制することができた。また、電動車の走行に使用する電力の 42% を再エネとすることができた。さらに、発電設備を持たない需要家でも昼間の 80% と夜間の 22% を再エネで賄うことができた。以上のことから、本 P2P 電力取引実証が経済性と再エネ活用の両立を両立することが可能なシステムであることが示唆された。

今後、規模拡大に向けた各要素の性能検証、改良を進める。

最後に、本実証実験を共同して進めた、東京大学の田中謙司准教授、TRENDE 株式会社様、ならびに社内関係者の皆様に謹んで深謝する。

■出典元

「2021 年 トヨタ技術会 技術者の一日 研究発表会」発表論文：「PHV 参加型の個人間 (P2P) 電力取引システムの開発」小幡一輝ほか (トヨタ自動車)

■参考文献

- (1) H. Saboori, et al. : "Virtual Power Plant (VPP) , Definition, Concept, Components and Types," 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/APPEEC.2011.5749026.
- (2) Luc F.M. van Summeren, et al. : "Community energy meets smart grids: Reviewing goals, structure, and roles in Virtual Power Plants in Ireland, Belgium and the Netherlands," Energy Research & Social Science, Volume 63, 2020, 101415,
- (3) Ahmed Hany Elgamal, et al. : "Optimization of a multiple-scale renewable energy-based virtual power plant in the UK," Applied Energy, Volume 256, 2019, 113973
- (4) B. Jansen, C. Binding, et al. : "Architecture and Communication of an Electric Vehicle Virtual Power Plant," 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, MD, 2010, pp. 149-154.
- (5) M. Vasirani, et al. : "An Agent-Based Approach to Virtual Power Plants of Wind Power Generators and Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1314-1322, Sept. 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2259270.
- (6) TEPCO: https://www.tepco.co.jp/ep/notice/news/2020/1549626_8908.html
- (7) 電力中央研究所 : <https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/leaflet/Y06.pdf>

■ 著者



小幡 一輝



工藤 由貴



菊池 智志



木暮 宏光



木村 和峰

複雑な都市環境における高度自動運転に対する TRI の取り組み

The TRI Approach to Advanced Automated Driving in Complex Urban Environments

Ryan Eustice *¹ Wolfram Burgard *¹ John J. Leonard *¹

Ryan W. Wolcott *¹ Robert Zidek *¹ Gill Pratt *¹

要旨

輸送業務を自動かつ無人で行える車を作ることは非常に困難な課題であり、主要な自動車メーカーや実力のある新興企業が現在取り組んでいる課題である。この論文では、複雑な都市環境で自動運転が可能な車両を作るために求められる最新技術の研究開発に関し、TRI（トヨタ・リサーチ・インスティテュート）が協力企業（トヨタ自動車やその提携企業）と協働し行ったいくつかの取り組みについて述べる。特に、東京オリンピック（パラリンピック）自動運転実証試験（Olympics Capability Showcase, OCS）のために開発された技術について述べる。OCSは、自動運転および高度運転支援技術の分野におけるトヨタの技術的なリーダーシップを示すために計画された。この論文に記載される技術は、ハードウェアやソフトウェアプラットフォーム設計、高精度地図、自車位置推定、認識、機械学習、行動計画、車両の挙動、制御に関しての革新的な手法を取り入れており、ロバストな自動運転（ショーファー）性能が実証されている。このシステムのテストは、TRIの自動運転プラットフォームを搭載したレクサスLS（TRI P4）とトヨタLQを使って、東京のお台場地区で大規模に行われた。この論文では、システムの目的と設計について簡単に概要を紹介し、実環境での運用の例から、いくつかの注目すべき機能及び性能を説明する。

Abstract

Building cars that can perform transportation tasks in an automated fashion and without drivers is an extremely challenging task that is currently being addressed by major car manufacturers and highly effective start-ups. But what does it require to build a self-driving car that can operate autonomously in a complex urban environment? This article describes several of the efforts that the Toyota Research Institute (TRI), in collaboration with collaborating companies from within Toyota Motor Corporation and its partner companies, have undertaken to advance the state-of-the-art in automated driving. In particular, it describes the technology that was built for the so-called Tokyo Olympics Capability Showcase (OCS) designed to demonstrate Toyota's technological leadership in the area of automated driving and driver assistance technology. The described system embodies innovative approaches in hardware and software platform design, mapping, localization, perception, machine learning, motion planning, vehicle maneuvering, and control, to demonstrate a robust Chauffeur capability. The system has been extensively tested on the TRI P4 Lexus LS automated driving platform, as well as on the Toyota LQ vehicle, in the Odaiba district of Tokyo. This article provides a brief overview of the system objectives and design, and provides several performance highlights from extensive real-world operations.

キーワード 自動運転, 認識, 機械学習, 予測, 行動計画, 制御, ユーザーエクスペリエンス

1 はじめに

TRI（トヨタ・リサーチ・インスティテュート）の主な目的の一つは、高度自動運転機能を実現し、安全性の向上や移動の自由を促進することである。このために、TRIではショーファーシステムとガーディアンシステムという2つのシステムを開発中である。ショーファーシステムは複雑な環境にも対応

可能な自動運転システムであり、ガーディアンシステムは予防安全のための高度運転支援システムである。両システムともに、環境を認識し理解する能力、今後何が起きるかを予測する能力、車両を最も安全に制御する方法を計画する能力等、共通した技術が使われている。

この論文では、ショーファーシステムとガーディアンシステムの両方の基礎となるロバストな自動運転システムの実現に向けて、TRIが行っている技

*¹ トヨタ・リサーチ・インスティテュート

術開発のうち、特に OCS に向けて開発したシステムについて説明する。OCS では、環境が複雑な東京の公道で、レクサス LS やトヨタ LQ による自動運転によるデモ走行を行う予定だった。新型コロナウイルスの流行のため、オリンピック期間中に行われるはずだったこれらの展示は中止となったが、システムは完成しており、開発技術を公開することになった。



図 1 東京・お台場で使用された自動運転実験車 TRI P4 レクサス LS

TRI は自動運転用に、最新のセンサーや演算機能によるハードウェアと最新鋭のソフトウェア・スタックを備えた高度な統合プラットフォームを開発した。ハードウェア(図 1)に関しては、各種センサー群、高性能車載コンピューター、データロギング機能を搭載し、機能強化を行っている。ソフトウェア・スタックは拡張性を考慮して一から構築されており、「1 システム / 2 モード」の考え方を採用した。これによりショーファー機能における多くの主要要素技術は、一般向け車両におけるガーディアン先進安全機能との共用を可能としている。さらに、特定のガーディアン機能を選択可能な構成としている。開発された自動運転ソフトウェア・スタックは柔軟性が高いため、レベル 4 システムを実現するうえで一般的に必須とされている高密度全周囲 LiDAR や、高精度地図への依存度を減らすことが可能になる。



図 2 システム要件

システムの検証は東京・お台場の主要な地域で大規模に行われた。お台場は東京ならではの複雑な走行環境により、図 2 および以下に示すような技術的課題が多い。

- トラックや大型車両の多い環境における走行
- 車線を塞ぐ駐車車両を適切に避ける運転操作
- 歩行者との混流下における安全通行
- 適切な横断歩道の通行
- 交通信号の遵守
- 複雑な交差点のレーン選択および直進・右左折
- 車線合流と車線分岐への対応
- 幅狭車線の横断
- 乗員の快適性の維持
- 全ての交通法規の遵守

以下の章では、これらの課題に対するさまざまな解決策を示し、それらがどのように TRI の技術のロバスト性に寄与しているかを説明する。

2 システム概要

2.1 車両ハードウェアとセンサースイート

図 1 は、5 代目レクサス LS をベースにした、TRI P4 自動運転実験車である。図 3 に示すように、カメラ 8 個、ルミナー社の LiDAR を 4 個、ベロダイン社の VLP-16 LiDAR を 4 個、レーダー 10 個を含む、センサーを多数使用したプラットフォームとし

ている。また、車載コンピューターとして、高性能 CPU と GPU による処理システムを採用している。

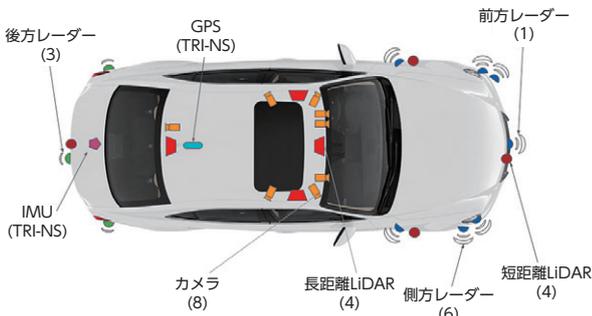


図3 P4のセンサー構成(高性能カメラ, LiDAR, ナビゲーションセンサー)

2.2 自車位置推定と高精度地図

車両の自車位置推定システムには、革新的な OneMap ワールドスケール高精度地図フレームワーク(図4)を採用している。これにより、事前に用意された地図とライブ認識データを取り合わせて、車線レベルでの自車位置が推定可能となった。

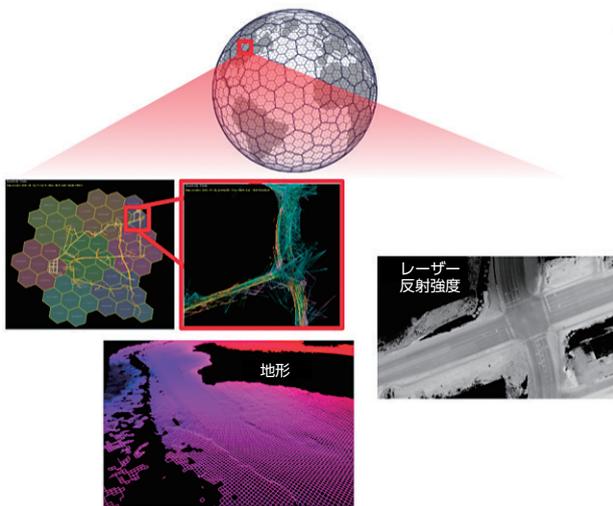


図4 TRI OneMap ワールドスケール高精度地図フレームワーク

図5は車線検知のためのセマンティックセグメンテーションの例であり、カメラ画像と鳥瞰図の両方を示す。セマンティックセグメンテーションでは、画像の各ピクセルが識別された物体や車線によりセマンティッククラスに分けられ、リアルタイムでの自車位置推定やさらなる認識処理を支援する。



図5 セマンティックセグメンテーションと鳥瞰図

2.3 認識と機械学習

TRIは、認識や判断に関する課題に対し、高度な機械学習に基づいた解決策も開発している。解決策を織り込んだモデルは最先端技術として、学術研究の場で発表されている⁽¹⁾⁽²⁾。TRIでは、可能な限り自己教師あり学習を用い、実環境で多くの試験を行うことにより得られる大量のデータセットを活用している。

TRIの機械学習研究の重要な目標は、認識の課題に対し、高額なLiDARセンサーへの依存度を減らすことにより、費用対効果の良い画像認識用のソフトウェアモジュールを開発することである。例えば、TRIが開発したSuperDepthというディープネットワークに基づいた最先端技術は、単眼画像から奥行きを推測する技術である⁽³⁾。図6にこのシステムの代表的な性能を示す。このネットワークは、入力された画像の各ピクセルに対し効率よく奥行きを計算し、LiDARでの対処が難しい場合やLiDARが使用できない状況において、車両の動作を支援する。さまざまな検証により、この技術がこれまでに開発された最良のモデルよりも、優れた性能を持つことがわかった。さらなる利点として、人によるラベル付けを必要としないため、トヨタの車両に装備された安全システムを使って得られた映像データから効率的に学習することも可能であることが挙げられる。

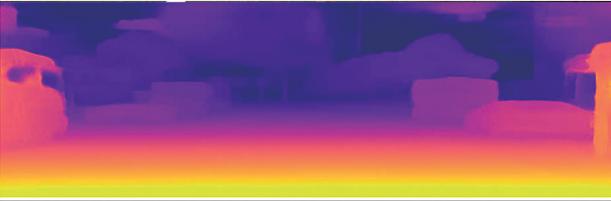
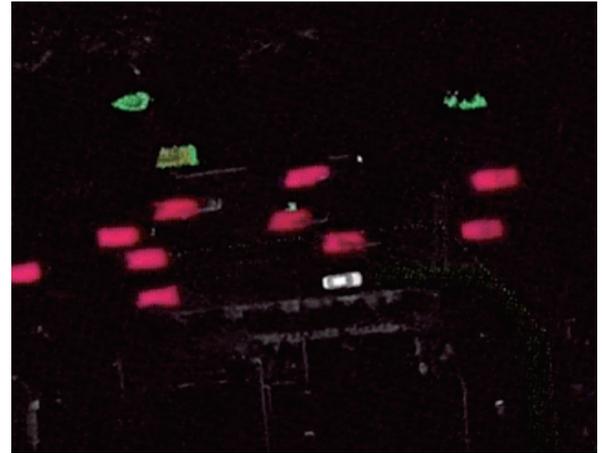


図6 単眼画像から奥行きを推測, 上: 実際の画像, 下: ネットワークが推測した奥行き (黄色は手前, 紫色は遠方を示す)⁽³⁾



(c) 鳥瞰図のシーンフロー



(a) 2D 物体検出



(d) 交通信号推定



(b) 鳥瞰図 3D 検出



(e) セマンティックセグメンテーション



(f) 駐車車両識別器

図7 認識, 追跡, 予測に使用される機械学習モデルの概要

機械学習により、映像や LiDAR データを処理する検出・追跡・予測アルゴリズムが活用可能となり、運転シーンで「何がどこにあるか」を判別し、次に何が起こるかを予測することができる。図 7 は、検出・追跡パイプライン処理の主な要素の概観である。パイプライン処理には、クラスタリング、LiDAR や画像からの物体検出、速度推定処理が含まれる。これらの処理により、車両周囲のあらゆる物体についてセマンティックラベル、速度推定、意図予測の情報が付加された周辺状況の、統合的な局所モデルが得られる。

また、機械学習は行動計画や予測の部分においても使用される。例えば、図 8 のような駐車車両の識別や、図 9 に示すような通路の判別や走行経路の予測である。

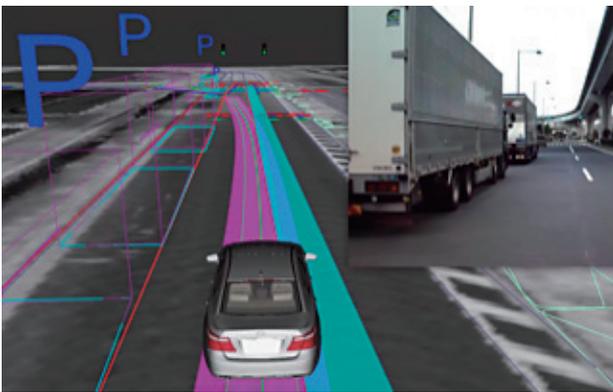


図 8 駐車車両識別の例 駐車中のトラックの横を通過するには、自動運転車両は隣接する車線（水色）の一部にまたがって走行が必要。

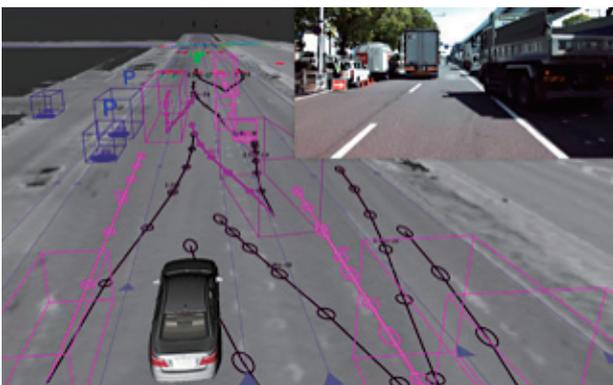


図 9 通路の目的地点と起こりうる経路の予測

2.4 行動計画と制御

前述の認識と機械学習アルゴリズムから、図 10 の行動計画・制御モジュールへの入力情報が得られる。このモジュールは主に、自動運転車両が安全か

つ快適に希望の目的地へ到着できるように、制御入力情報（操舵、ブレーキ、加速）を計算する。行動計画・制御モジュールは、4 つのサブモジュール（経路計画、振る舞い提案、走行軌道計画、制御）より構成される。

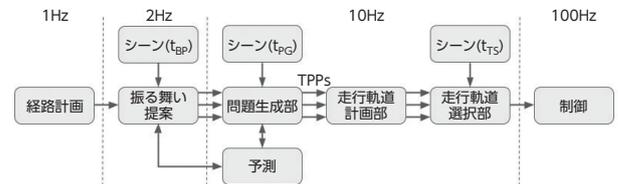


図 10 行動計画・制御アーキテクチャ

1 つ目のサブモジュールは経路計画であり、道路情報網上で最適経路を計算し、車両の現在地から希望の目的地まで到達できるようにするものである。このモジュールは、静的な入力情報（道路の制限速度等）に加えて、動的な交通情報（現在の道路混雑状況等）にも対応している。

2 つ目のサブモジュールは振る舞い提案であり、経路を辿るうえで必要な運転行動の導出を行う。振る舞い提案サブモジュールは、認識スタックから得られた利用可能なシーンに基づいて、利用可能な車線や走行可能な路面に沿って運転する場合の利点を比較する。これによって、方策的判断と関連付いた長期的な利益を得られるようにしている。ここでは探索ベースの手法が採用されており、自車両や他の交通参加者（車両、歩行者等）の動作（車線にとどまる、車線変更する等）を使って、地図上にグラフを構成する。そのうえで、類似解が集められ振る舞い記述と呼ばれるものに分類される。これはさまざまな車両の振る舞い（例えば左側車線への変更等）を表したものである。

3 つ目のサブモジュールは行動計画モジュールの主要部であり、問題生成部、走行軌道計画部、走行軌道選択部から構成されている。問題生成部は、最も有力な振る舞い記述を振る舞い提案サブモジュールから受け取り、それぞれの振る舞い記述について複数の走行軌道計画に関する問題を生成する。それぞれの走行軌道計画問題には、軌道を生成するための具体的な制約条件が含まれる。走行軌道計画問題については、自車の行動や運転シナリオの全範囲を網羅できるよう、汎用的な形での定式化を慎重に行った。このため、走行軌道計画部は計画問題のセマンティックスに依存しないことから、走行軌道

計画部を変更することなく、自動運転の新しい機能を容易に開発可能な拡張性の高いシステムとなっている。

予測部もまた、主要計画サブモジュールの一部である。予測とは、周辺の交通参加者の意図と将来の動作を推測することによって、認識と行動をつなげる重要な機能である。交通参加者ごとに多数の仮説が用意される。発見的手法による予測モデルと機械学習に基づく予測モデルとを合わせたものが採用されているが、将来的には機械学習モデルをさらに増やしていく予定である。歩行者の追跡と予測に対して、学習推測リスクマップ（図 11）を使用している。これにより、運転者が行うようなリスク認識運転と同様に、横断歩道での走行判断が容易になる。問題生成部は予測情報を利用して、それぞれの走行軌道計画問題について関係する物体を選択し、それらの物体をどのように捉えるか決定する（後続、先導等）。問題生成部の最後の段階で、指定した数を上限として最も適した走行軌道計画問題が複数選択され、走行軌道計画部によって解決される。



(a) 歩行者の追跡と横断歩道でのリスクの推定



(b) 歩行者リスクマップ推定

図 11 歩行者追跡とリスク推定

走行軌道計画部は、微分動的計画法に基づいた反復最適化アルゴリズムを用い、それぞれの走行軌道計画問題に対して走行軌道を生成する。生成後は2段階の認証処理が行われ、それぞれの走行軌道が実現可能かつ安全であるかを検証する。走行軌道選択部は、判定処理の最後の部分を担い、最新のシーン情報を用いて走行軌道を選択する。さまざまな基準に基づいて走行軌道を比較しランク付けを行うため、疑似辞書式順序付けフレームワークが用いられる。上記基準には、実現可能性と安全性、リスク、経路設定、進捗、動作一貫性、快適性が含まれる。

選択された走行軌道は下位レベルの車両制御サブモジュールに渡される。このサブモジュールによって、前後方向および左右方向の追従誤差が少ない、ロバストな走行軌道追従性能が得られる。

2.5 ソフトウェアプラットフォームとクラウドインフラ

前述のアルゴリズムは、クラウドベースのソフトウェアプラットフォームに実装されており、新しい機能が追加されてもシステム性能が保証されるよう、広範かつ継続的なインテグレーションとシミュレーションテストを行っている。ソフトウェアを改変するたびに、ソフトウェアはシミュレーションやデータログの再生による数多くのテストにかけられる。その後、ソフトウェアは訓練を受けた評価担当者によって、テストコースで実車評価され、その上で公道試験が行われる。開発工程の全体が、安全システム技術であることを強く意識して進められている。

3 システム性能

上記のシステム構成要素は、全て統合され、東京のお台場地区にて継続的に自動運転の実証走行を行った。同システムは、米国ミシガン州のアナーバーと、カリフォルニア州のロスアルトスでも広く実証走行された。また、TRI P4 実験車は、自動運転システムに加えて図 12 に示すような車内体験機能も装備している。図 13 はお台場にて自動運転走行中における前方 UX 表示と前方カメラ画像表示の例である。どの走行においても複雑な相互作用が働き、機械学習と認識アルゴリズムが行動計画・判断処理と組み合わせることで、実環境での高度な自動運転を実現していることを可視化している。



図 12 自動運転中のユーザーエクスペリエンス (UX)

例えば、お台場を走行する自動運転の重要な性能の 1 つに、駐車車両への対処がある。お台場において、駐車車両が自車の通路を塞いでいるという難しいシナリオは頻繁にみられる（停車中のバスが車線全体を塞いでいる、幅広の車線に何台も駐車トラックが並ぶ、タクシーが路肩に止まる等）。あらゆる可能性のシナリオにロバストに対処するため、学習ベースの駐車車両識別器を開発した。識別器は多くの走行データから得られた何千もの事例を使って学習されている。図 14 は、停車中のバスを追い越すために、右側へ車線変更する例を示す。図 15 は交差点出口での駐車中のトラックの列に対し、自車が隣接する車線をまたいで走行する様子を示す。

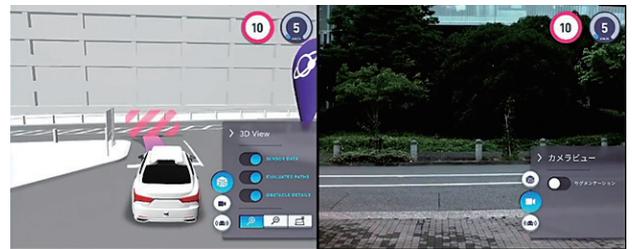


図 13 お台場テスト環境における特定場所での UX 表示と前方カメラ画像表示

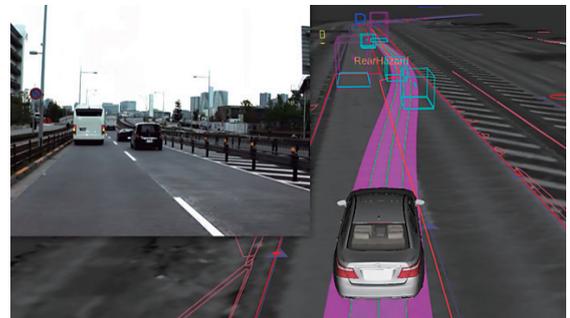


図 14 駐車車両の追い越し時の車線変更

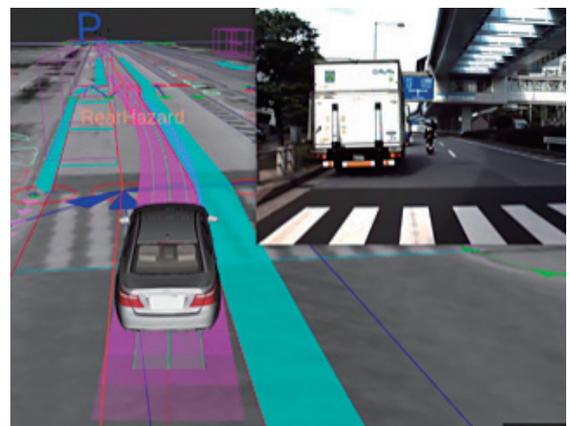


図 15 駐車車両の追い越し時の隣接車線またぎ

論文解説

4 おわりに

TRIはハードウェア、ソフトウェア、機械学習、認識、行動計画、制御における先進技術を組み合わせ統合した自動運転システムを開発し、東京のお台場地区での実証走行を実施した。これらの技術は、全ての人々にとってより安全な未来のモビリティを創るという、トヨタのビジョン推進に寄与するものである。

システムが厳しい気象・環境条件を含むより広範な作動条件範囲での運用に向け、引き続き開発を継続していく。また、TRIはトヨタ自動車やオープンプラネット社と提携して、将来のトヨタ製品に当システムの技術を移行する取り組みを行っている。

謝辞

自動運転システムの開発とテストにおいて、大変なご協力をいただいた全ての方々に、紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- (1) R. Hou, et al.: Real-Time Panoptic Segmentation from Dense Detections. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, pp. 8523 and 8532.
- (2) V. Guizilini, et al.: 3D Packing for Self-Supervised Monocular Depth Estimation. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 2482-2491.
- (3) S. Pillai, et al.: Superdepth: Self-Supervised, Super-Resolved Monocular Depth Estimation. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 9250-9256.

著者



R. EUSTICE



W. BURGARD



J. LEONARD



R. WOLCOTT



R. ZIDEK



G. PRATT

第 70 回自動車技術会賞 技術開発賞
 2019 年度 日本機械学会賞 (技術)
 第 55 回機械振興賞 経済産業大臣賞
超高塗着エアレス塗装技術

Airless Coating Technology with Super-high transfer efficiency application

田中 一基*¹ 大竹 伸弥*¹ 谷 真二*¹
 Kazuki Tanaka Shinya Otake Shinji Tani

村井 裕樹*¹ 鍋島 淳男*¹ 村田 亘*¹
 Yuki Murai Atsuo Nabeshima Wataru Murata

1 はじめに

自動車の塗装は防錆，対候性，外観品質など多岐の機能を必要としており，複数の層から構成されている。そのなかでも中上塗りと呼ばれる中塗り，ベース，クリアの塗装は，艶などの高い面品質や色などの高意匠が求められる。高意匠と生産性の両立のために，自動車では塗料を霧化（微粒化）して塗装するスプレー塗装が用いられている。この微粒化には主にエアを用いているが，このエアは吹付時の飛行にも用いるために，エアにのった塗料が被塗物上で跳ね返って飛散し，歩留まり（塗着効率）が低下する。それだけでなく，飛散した塗料は設備を汚し，塗装品質にも影響を与えるため，塗着効率の向上は普遍的な課題であった。

この課題に対し，エアをほとんど用いずに微粒化を行い，自動車のような大型の被塗物に対しても塗装できる技術を開発し，塗料の飛散がほとんどなく（図 1），塗着効率を従来から 30% 以上向上させた。



図 1 量産ラインでの実車塗装

2 技術の内容

本技術は，エアをほとんど使用せず，静電気力のみで塗料を微粒化し，被塗物へ飛行させる静電微粒

化技術を自動車塗装に適用させた技術である。

静電微粒化原理は次のとおりである。ノズルからでた塗料に電荷を供給すると，アースされた被塗物側に静電引力により塗料が柱状に引き伸ばされる。電荷をさらに供給すると，静電気力が表面張力や粘性を上回り，柱状の塗料が分裂・微粒化する。この塗料は帯電しているため，電界に沿って被塗物に向かって飛行し，付着する。

この静電微粒化は引き伸ばされた柱径が大きくなると良好な微粒化が得られないため，ノズルから吐出することのできる塗料は 0.3cc/min 以下となり自動車の塗装に必要な 200cc/min 以上には大幅に不足しているため，自動車の塗装には用いられてこなかった。

本技術では，この静電微粒化に塗装機の回転体部分であるヘッドの円周上にノズルに見立てたセレーション（溝）を多数配置し，回転を加えることで，それぞれの溝から静電微粒化された塗料を同時に被塗物へ飛行させることができ，自動車塗装に必要な吐出量を確保することができた（図 2）。

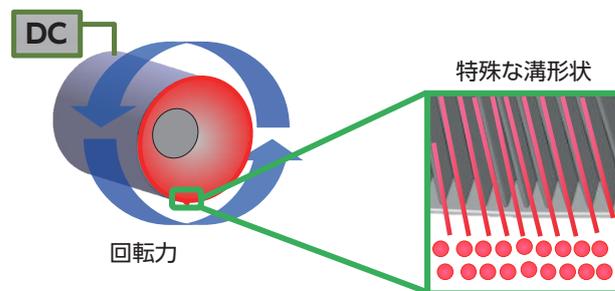


図 2 高吐出量確保の手法

*¹ 生産本部（車両生技領域） 車両生技開発部

また、供給する電荷についても制御を開発しており、これにより、自動車のような複雑な塗装面でも安定した塗装品質を確保することができた。

3 まとめ

本技術により、塗料がほとんど塗面に付着するため、塗料使用量が低減でき、未塗着塗料の回収装置も簡素化できる。

さらに、本技術により、従来汚れ回避のために必要だった大型の塗装ブースが不要になり、設備を小型化することができ（図3）、CO₂の大幅な削減が期待できる。

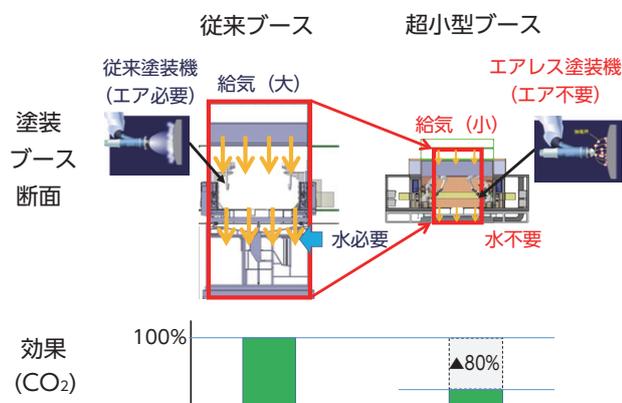


図3 本技術による波及効果

■参考文献

田中一基他：超高塗着エアレス塗装技術，一般社団法人日本機械学会 2019年度事業報告書，p.162

第70回自動車技術会賞 技術開発賞 ショックアブソーバ極微低速減衰力コントロール技術

Control Technology for shock Absorber Damping Force at Very Low Speeds

水野 和之*1 安井 剛*2 高木 元気*2
Kazuyuki Mizuno Takeshi Yasui Motoki Takagi

1 はじめに

近年、自動車の乗心地向上の研究が進み、車体の大きな動きを電子制御技術で抑えることで乗心地は大幅に向上している。本技術は、制御技術では対応が難しい一般国道を走行しているときのような小さな上下の動き、いわゆる良路での乗心地を改善することができる技術である。

2 極微低速減衰力コントロールバルブ構成

極微低速域で減衰力を発生させるため、従来バルブとは異なる構造を検討した。極微低速バルブの設計要件は以下の3点。①極微低速域で減衰力を発生し、バルブチューニング可能とする。②極微低速以降の速度域では、減衰力を飽和特性とする。③伸び行程・縮み行程に作用する。極微低速バルブと従来バルブの減衰力特性を合成することで、新開発バルブの目標特性を達成する(図1)。新開発バルブは従来バルブに極微低速バルブを追加し直列に配置した構造とした(図2)。極微低速バルブはディスクとリーフバルブで構成され、ディスク内径部に配置されたリーフバルブは通常のリーフバルブとは異なり、着座しない構造となっていることが特徴である(非着座バルブ)。非着座構造とすることによって、最大の課題であった油撃による異音や着座時の打音を解消することが可能となった。極微低速域で減衰力を発生するため、ディスクと非着座バルブは、組付け時の隙間が限りなく小さくなるよう設計している。非着座バルブにより作動油流路が蓋をされているため、極微低速域の僅かな作動油流量であっても減衰力を発生するとともに、瞬時に非着座バルブが押し広げられることで極微低速域以降の減衰力増加が抑制される構造となっている。非着座バルブは着

座面を持たない構造であるため、上下両方向へ開口し、伸び行程・縮み行程に作用する。

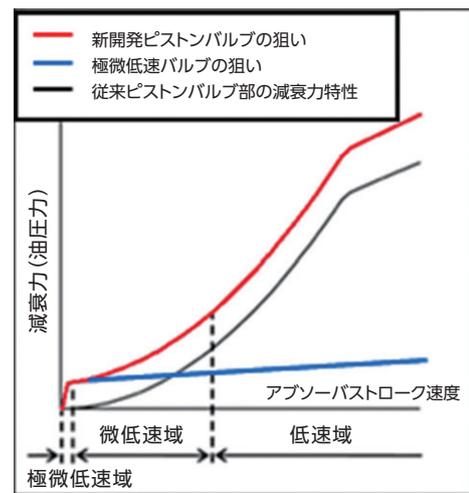


図1 極微低速バルブの目標特性イメージ

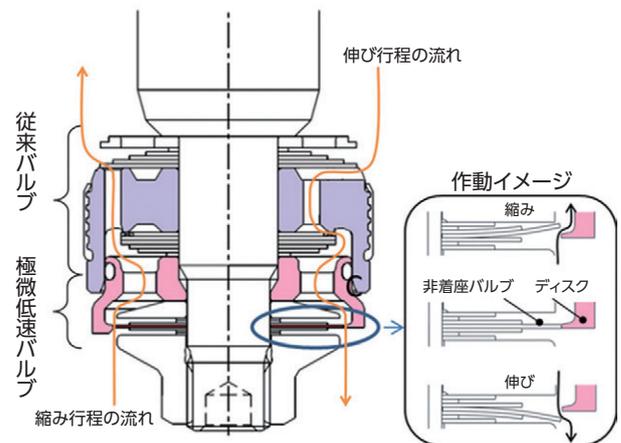


図2 新開発バルブ構造と作動原理

3 極微低速減衰の重要性と効果

ショックアブソーバ使用域を明確にするため、ストローク速度に対する時間割合を整理した。図3より、良路ではストローク速度が遅い領域ほど時間が長い。また、同様にストローク速度の遅い領域において、時間比率の高いことがわかる。これらの理由

*1 クルマ開発センター シャシー開発部
*2 KYB 株式会社

から、極微低速減衰の効果は良路走行時に限定されるわけではないことがいえる。

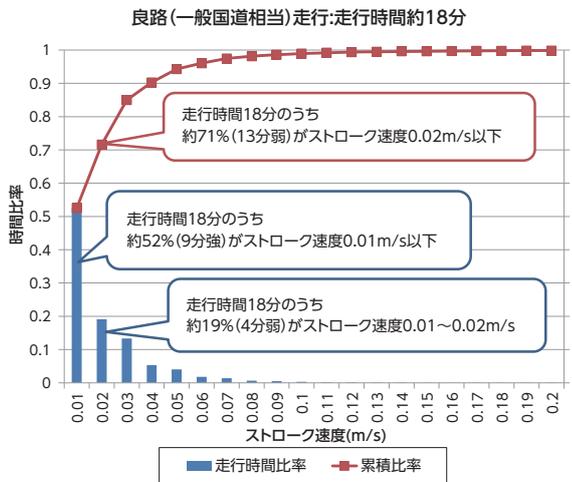


図3 一般国道相当路走行時のストローク速度別走行時間比率

極微低速減衰の影響は官能評価上明確であっても、ばね上 G の PSD (パワースペクトル密度) など、これまでの車両の乗心地評価法ではその差が小さく定量的に的確に表現することが難しかった。そこで、車両の動きを単純化してその差を明確に表現するため、4輪シェーカを用いて4輪同相の矩形波加振を実施した。4輪シェーカによる試験イメージを図4に示す。図5に小入力(2mm)矩形波加振時の基準仕様と官能評価上影響が認められた極微低速減衰付加仕様との乗り上げ加振比較を示す。図中の円形記号内に示すばね上振動の最後の収まり方には明確な差(振動するかしないか:減衰係数比 $\gamma > 1$)のあることがわかった。

さらに、この変位 1mm 以下の僅かな差を人間が感じているかどうかを確認するために、被験者 14 人で4輪シェーカ加振した車両に搭乗し、人間が感じることでできるばね上の動きをバウンス、ロール、ピッチの3モードで実施検証した(図6)。横軸はばね上の振幅、縦軸は加振周波数を表す。被験者が各モードで振動を感じたポイントをプロットした。被験者は、ばね上速度 $vp=0.001\text{ m/s}$ 付近から動きを感じはじめ、被験者 14 人全員が振幅 0.2mm、ばね上速度 $vp=0.002\text{ m/s}$ の微小かつ極微低速の車両の動きを感じることが確認できた。

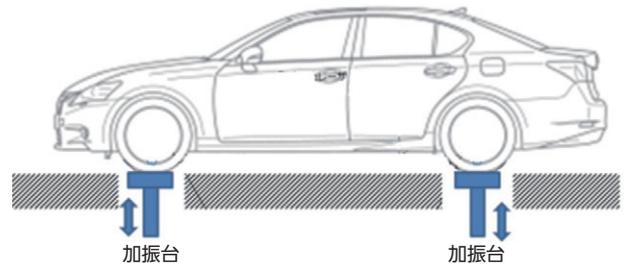


図4 4輪シェーカ加振機

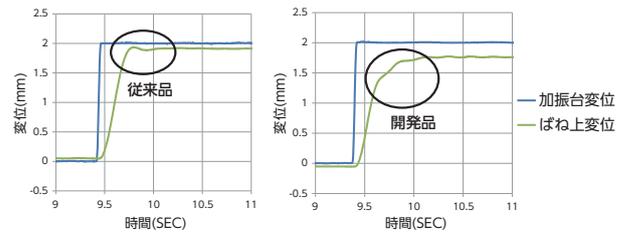


図5 小入力乗り上げ加振比較

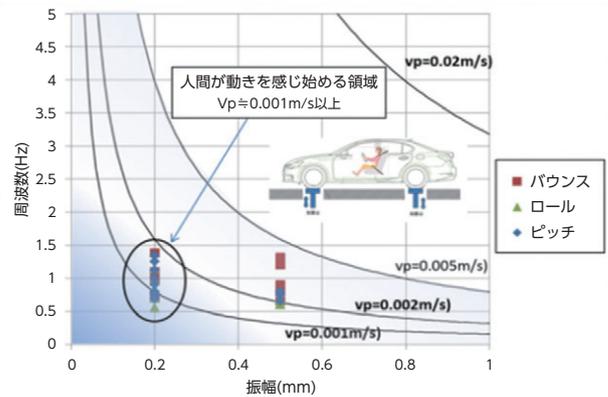


図6 ばね上の動きと人間の感度

4 まとめ

本技術を用いて微小振幅のばね上振動の収まりをコントロールすることによって良路の乗り心地を向上させることが確認できた。今後、本技術はサスペンションの電子制御技術と組み合わせることで、良路から悪路まで自動車の乗心地をさらに向上させることが可能となる。

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

水野和之ほか: ショックアブソーバ極微低速減衰力コントロール技術. 自動車技術. Vol.74, No.10, 2020, P6-7

第70回 自動車技術会賞 論文賞 キャンバ角に起因する旋回抵抗と それを考慮した車両運動の考察

A Study of Cornering Drag Caused by Camber Angle and its Effects on Vehicle Dynamics

山本 真規*¹ 大山 鋼造*¹
Masaki Yamamoto Kozo Oyama

1 まえがき

自動車の運動を省エネルギーで成立させることは、環境時代の車開発において一層追求すべき重要な課題である。旋回運動においては、コーナリングに必要なタイヤ力をいかに効率よく発生させるかという命題になる。本論文では、キャンバ角に起因して発生する抵抗の発生メカニズムとその大きさを明らかにする。さらに、その特性を考慮し、旋回抵抗を低減するための横力分配法、および横力確保と抵抗低減がバランスするホイールアライメント設定法について考察する。

2 簡易モデルに基づくタイヤ力考察

線形ブラシモデルを用いて、キャンバ角 γ がついたタイヤが直進するときのタイヤ力を考察する。このとき、接地面の変形は図1のようになる(a :接地長, b :接地幅, R :転がり半径)。接地面の横変形 δ_y は、自由転動時の旋回半径 $\rho_f \approx R/|\gamma|$ の円弧となり、この変形によって、横力(キャンバスラスト) F_y が生ずる。

$$F_y = -Q_y \gamma \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_y = \frac{e_\alpha}{R} K_y \dots \dots \dots (2)$$

$$e_\alpha = \frac{a}{6} \dots \dots \dots (3)$$

Q_y : キャンバスティッフネス, K_y : コーナリングパワー, e_α : ニューマチックトレール。また、キャンバ角がついたタイヤは幅方向で径が異なるので、接地面の前後変形 δ_x が生じ、これによりモーメント M_z が発生する。

$$M_z = -Q_m \gamma \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_m = \frac{K_x b^2}{12R} \dots \dots \dots (5)$$

Q_m : キャンバモーメント係数, K_x : ドライビングスティッフネス。横力とモーメントが同時に発生するので、形式的なキャンバトレール e_γ として換算すると、以下になる。

$$e_\gamma = \frac{Q_m}{Q_y} = \frac{b^2 K_x}{2a K_y} \dots \dots \dots (6)$$

$$M_z = -e_\gamma Q_y \gamma \dots \dots \dots (7)$$

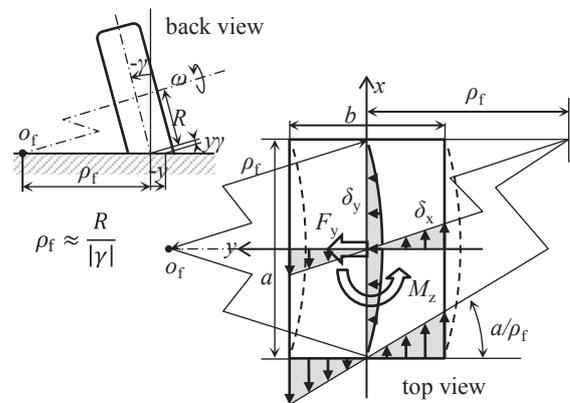


図1 キャンバ角による接地面変形

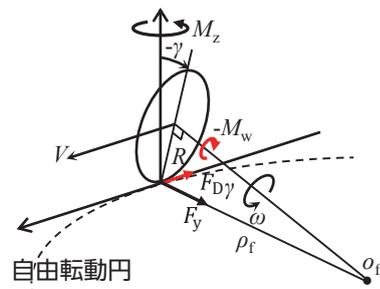


図2 キャンバ角によるタイヤ力

*1 クルマ開発センター シャシー開発部

受賞技術概要

3 キャンバ角に起因する抵抗

図2のように、キャンバモーメント M_z のホイール面成分 $M_w = M_z \sin\gamma$ は車輪の回転を抑制するホイールトルクとなるので、これを転がり半径で除した力がキャンバ角に起因する抵抗になると考えられる。

$$F_{D\gamma} = -\frac{M_w}{R} = -\frac{M_z \sin\gamma}{R} \dots (8)$$

$$\gamma \ll 1 \text{ のとき, } F_{D\gamma} \approx \frac{e_\gamma Q_y}{R} \gamma^2 = \frac{e_\gamma}{R} \frac{1}{Q_y} F_y^2 \dots (9)$$

荷重 F_z で除して無次元表現すると、

$$\frac{F_{D\gamma}}{F_z} = \frac{e_\gamma}{R} \frac{1}{B_y} \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^2 \dots (10)$$

$$B_y = \frac{Q_y}{F_z} \dots (11)$$

一方、スリップ角 α に起因する抵抗は以下となる。

$$F_{D\alpha} = -F_y \sin\alpha \dots (12)$$

$$\alpha \ll 1 \text{ のとき, } F_{D\alpha} \approx K_y \alpha^2 = \frac{1}{K_y} F_y^2 \dots (13)$$

$$\frac{F_{D\alpha}}{F_z} = \frac{1}{C_y} \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^2 \dots (14)$$

$$C_y = \frac{K_y}{F_z} \dots (15)$$

4 タイヤカの実測検証

キャンバ角やスリップ角に対して発生するタイヤ力を、フラットベルト式タイヤ試験機を用いて計測した。図3は、抵抗の大きさを発生横力に対して整理した結果である。このとき、式(8)、式(12)を用いて算出した力も重ねて示している。キャンバ角やスリップ角によって生ずる抵抗は、モーメントや横力から幾何学的に求まる力と一致すること、キャンバ角による抵抗のほうが大きいこと、その傾向は荷重が小さいほど顕著になることなどが確認できる。

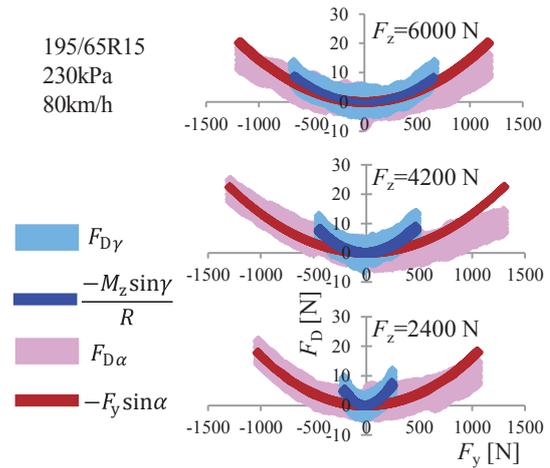


図3 タイヤカ実測結果

5 旋回抵抗を低減する横力分担法

旋回抵抗を低減するためのキャンバスラスト活用法を考察する。スリップ角とキャンバ角が同時に付いて旋回するときの抵抗は、

$$F_D = -(F_{y\alpha} + F_{y\gamma})\alpha - \frac{(-e_\alpha F_{y\alpha} + e_\gamma F_{y\gamma})}{R} \gamma$$

$$= \left[1 - k + pk^2 - k(1 - k) \frac{p}{q} \right] F_{D\alpha} \dots (16)$$

$$k = \frac{F_{y\gamma}}{F_y} : \text{キャンバスラストの横力分担比}$$

$$p = \frac{F_{D\gamma}}{F_{D\alpha}} = \frac{e_\gamma K_y}{R Q_y} : \text{旋回抵抗比}$$

$$q = \frac{e_\gamma}{e_\alpha} = 3 \frac{b^2 K_x}{a^2 K_y} : \text{トレール比}$$

キャンバスラストの横力分担比率 k と旋回抵抗の関係は、図4の放物線となる。スリップ角による横力のみで旋回する場合 ($k=0$) に対し、キャンバスラストが横力の一部を分担すると抵抗は低減し、 $k=k_{\text{Dmin}}$ で極小となる。それ以上にキャンバスラストの分担率が大きいと抵抗は増大し、キャンバスラストのみでの旋回 ($k=1$) では、スリップ角のみで旋回する場合の p 倍 (通常 $p>1$) の抵抗となる。

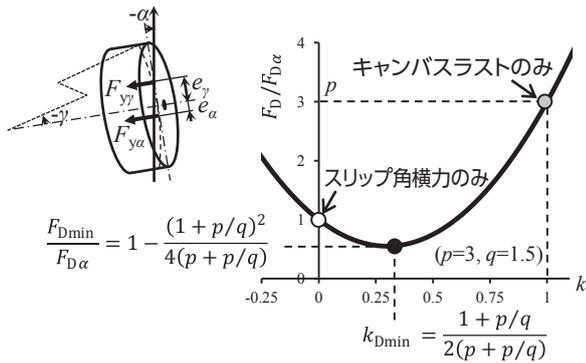


図4 旋回時の横力分担比率と抵抗

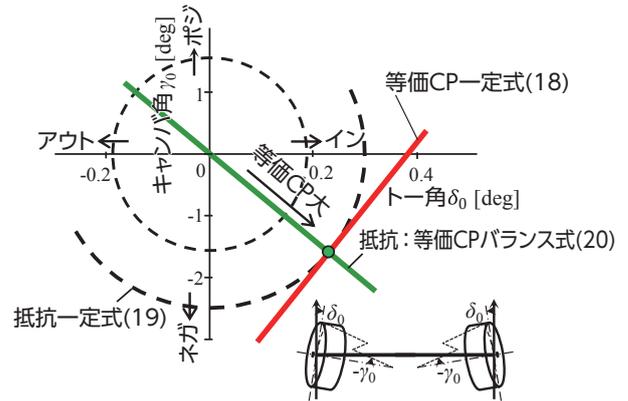


図5 ホイルアライメントによる走行抵抗と等価 CP

6 効率的なホイルアライメント設定法

ホイルアライメントによる等価的横力の確保と走行抵抗低減がバランスする設定法を考察する。タイヤのコーナリングパワー（CP）は荷重非線形性を有す。非線形性の程度を荷重で除した正規化 CP の荷重感度 λ_c で表現する。

$$\lambda_c = -\frac{\Delta C_y / C_y}{\Delta F_z / F_z} \dots \dots \dots (17)$$

初期トー角 δ_0 と初期キャンバ角 γ_0 による等価 CP ⁽¹⁾ が一定となる条件は、

$$B_y \gamma_0 - C_y (1 - \lambda_c) \delta_0 = \text{constant} \dots \dots \dots (18)$$

一方、 δ_0 と γ_0 の設定により生ずる走行抵抗は、

$$\frac{F_D}{F_z} = C_y \delta_0^2 + \frac{e_y}{R} B_y \gamma_0^2 \dots \dots \dots (19)$$

等価 CP に対して走行抵抗が極小となる条件は、

$$\gamma_0 = -\frac{R}{e_y} \frac{1}{(1 - \lambda_c)} \delta_0 \dots \dots \dots (20)$$

図5は、式(18)、(19)、(20)の関係を、 δ_0 - γ_0 を2軸に取って描いた図である。緑色直線が式(20)であり、この直線上が、等価CP確保と走行抵抗低減のバランスが取れたホイルアライメント設定となる。

7 結論

キャンバ角により生ずる抵抗がモーメントに起因することを明らかにした。また、旋回抵抗を低減するためのキャンバスラストの活用法、および効率的なホイルアライメント設定法を示した。

参考文献

- (1) 山本真規：ホイルアライメントと操安性，自動車技術，Vol.54, No.11, 2004461, (2000)，pp.10-15.

自動車技術会 2019年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 FFベースの新4WDシステムの制御開発

Development of New Four-Wheel Drive Control System for Front-Wheel Drive Based Vehicles

湯浅 亮平^{*1} 堀江 亮太^{*2} 深田 俊郎^{*3}
Ryohei Yuasa Ryota Horie Shunro Fukada

1 はじめに

近年、自動車の燃費性能に対する要求値は益々高くなってきており、特に前輪駆動（以下、FF）車は高い燃費性能を持つ車両が多い。そのなかで、それをベースとする4輪駆動（以下、4WD）車に対する要求値も高まっている。同時に、走行性能への要求も高まっているが、**図1**のように一般的に走行性能と燃費性能はトレードオフの関係にある。そこで、それらを高い次元で両立すべく、新型4輪駆動システム（以下、4WDシステム）を開発した。

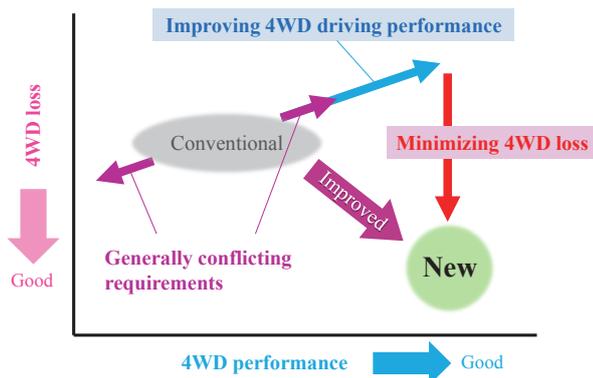


図1 新4WDシステムの開発コンセプト

2 システム概要

新4WDシステムは、**図2**のように燃費性能に貢献するディスコネク機構と、走行性能に貢献するツインカップリング機構で構成される。

2.1 ディスコネク機構

ディスコネク機構には、トランスファーとリアユニットにラチェットシフト式ドグクラッチを採用した。ドグクラッチを切断するとディスコネク状態（2輪駆動以下、2WD）となり、プロペラシャ

フトの回転を完全に停止させるため、FF車と同程度の燃費性能となるポテンシャルを有する。これを、さまざまな路面とドライバーの意思に呼応し、ディスコネク状態（2WD）とコネク状態（4WD）を自動で切り替えることで、4WD車としての走行性能と燃費性能を両立させる。**図3**はその動作イメージであり、制御開発の観点を以下に示す。

- ・燃費：高 μ 路における定常や低負荷走行時は極力ディスコネク状態（2WD）とし、燃費に貢献する。
- ・走行性能：高 μ 路においてドライバーが高い走行性能を要求している領域はコネク状態（4WD）とし、左右駆動力配分制御による高い走行性能をドライバーへ提供する。
- ・安定性：雪路などの低 μ 路では常時コネク状態（4WD）とし、4WD車の高い走行性能を確保する。

また、このように切り替え判断を自動で行うため、切り替え時の音やショックに最大限配慮したうえで制御を構築した。

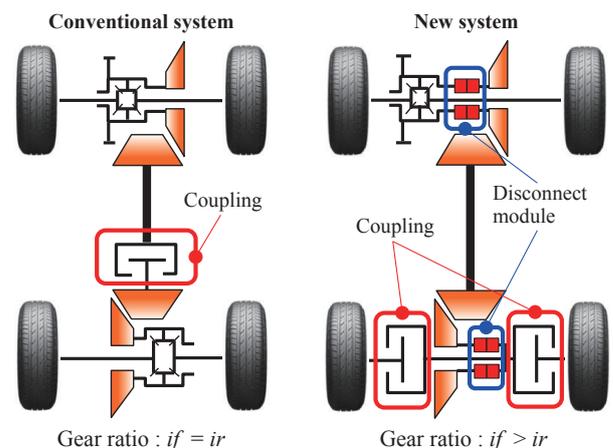


図2 新4WDシステム構成

^{*1} レクサスインターナショナル レクサスパワトレ性能開発部
^{*2} CN 先行開発センター 環境エンジニアリング部
^{*3} パワートレーンカンパニー 電動パワトレ制御機能開発部

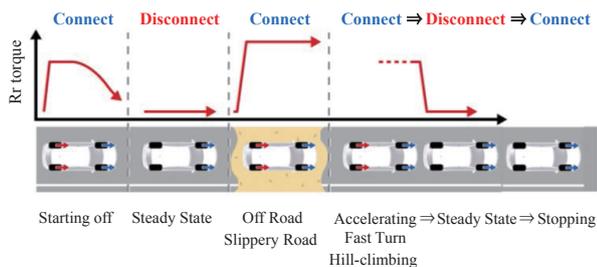


図3 ディスconnect制御コンセプト

2.2 ツインカップリング機構

ドライバーの思いどおりの旋回性能と、高い悪路走破性を実現するために、リアユニットのデフケースを廃し、カップリングを左右に配置することで左右後輪の駆動力を 0:100 ~ 100:0 まで連続的に配分することを可能としたツインカップリング機構を採用した。

従来型 4WD システムで培った雪上性能などの 4WD 性能に加えて、オンロードでの車両運動性能の向上、さらに、路面へ確実にトルクを伝達できる機構を活かしたダート路面やぬかるみ、タイヤ浮きといったオフロード走行時の走破性も向上させるため、左右駆動力配分制御を開発した。

制御構造を図4に示す。前後配分演算と左右配分演算は独立演算とし、前後配分は従来 4WD システムから思想を引き継ぐことで、これまでと同等の 4WD 性能を確保した。さらに、左右駆動力配分によるヨーモーメント制御 (Direct Yaw Moment Control 以下、DYC) を付与し、最終的に左右輪の摩擦円を考慮した駆動力調停を行う構成とした。要求する前後配分による後輪トルクよりもヨーモーメントを発生させるための後輪駆動力が大きい場合は、ヨーモーメントを優先する構成とした。図5にオンロードでの車両性能向上の一例を示す。

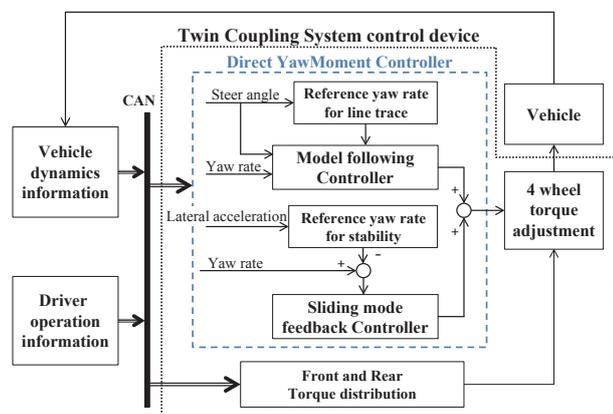


図4 左右駆動力配分制御構造

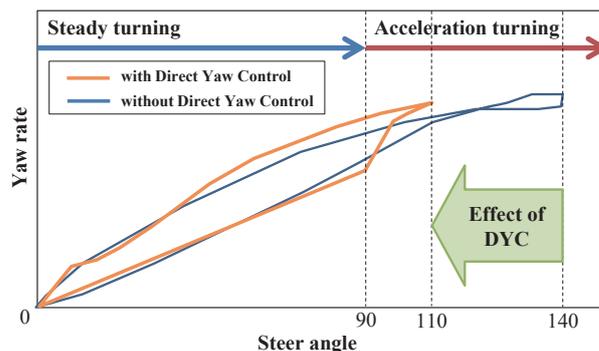


図5 左右駆動力配分制御の結果

3 むすび

燃費性能と走行性能を高い次元で両立するため、ディスconnect機構とツインカップリング機構を有する新たな4輪駆動システムを開発した。さまざまな情報からドグクラッチの断接を制御するディスconnect制御と、オンロード、オフロード問わず走行性能を向上させる左右駆動力配分制御を構築し、燃費と走行性能の両立に貢献した。

■出典元

湯浅亮平 他：FF ベースの新 4WD システムの制御開発、自動車技術会 2019 春季大会学術講演会前副集、(2019)

2019年 自動車技術会秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 低燃費エンジンオイル 0W-8 の開発

Development of Low Fuel Consumption 0W-8 Engine Oil

植松 裕太*1 山守 一雄*1 宮田 斎*2
Yuta Uematsu Kazuo Yamamori Itsuki Miyata
楠原 慎太郎*3 三崎 勇*3
Shintaro Kusuhara Yu Misaki

1 まえがき

地球温暖化防止のため、エンジンの熱効率向上は重要である。エンジンオイルの改良は、エンジンの摩擦損失や攪拌損失を大幅に低減する手段の一つであり、HEVなどの電動化車両の燃費向上にも有効である。エンジンオイルの低粘度化は、攪拌損失の低減に寄与する一方、油膜が薄くなり摩耗などの信頼性低下の懸念がある。今回開発したエンジンオイル 0W-8 は、従来の 0W-16 に対し 0.7% の燃費向上と信頼性を両立し、0W-8 の品質規格である JASO GLV-1 を世界初取得した。

2 技術内容

単純に粘度を 0W-8 まで下げた場合、部品摺動面間の接触が 0W-16 よりも増加することにより、エンジン実機の燃費試験では燃費が向上しなかった。この課題に対し、下記①②の添加剤技術を開発することで、燃費と信頼性を両立する 0W-8 のエンジンオイルを開発することができた。

- ①低粘度化に伴う摺動面の接触を低減できる油膜向上剤
- ②摺動面に低摩擦反応被膜の形成を促進させる清浄剤

2.1 油膜向上剤の開発

摺動面の接触を低減させるためには、荷重に対し厚い油膜を形成させることが必要である。そのため、部品間に入り込み油膜厚さを向上させつつ、オイルの粘度特性には影響しない油膜向上剤を開発した(図1)。この油膜向上剤は、部品表面に吸着することで油膜厚さが増加していることを確認した(図2)。

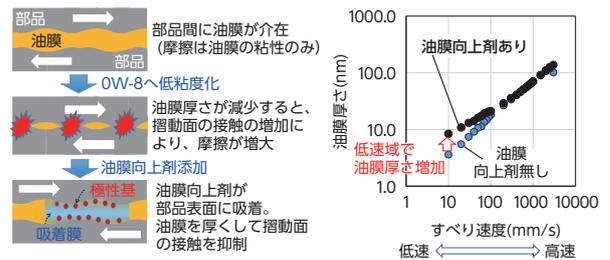


図1 油膜形成メカニズム 図2 油膜厚さ測定結果

2.2 清浄剤の開発

摺動面の摩擦低減は、MoDTC (モリブデンジチオカーバマイト) の反応生成物である MoS_2 (二硫化モリブデン) の形成が重要である。これに対し、ホウ素系添加剤と MoDTC の相互作用の知見を活かし、新規にホウ素系清浄剤を開発。これを使用することで、 MoS_2 が摺動表面に多く形成し、従来の炭酸塩系清浄剤より低摩擦を達成した(図3, 4)。

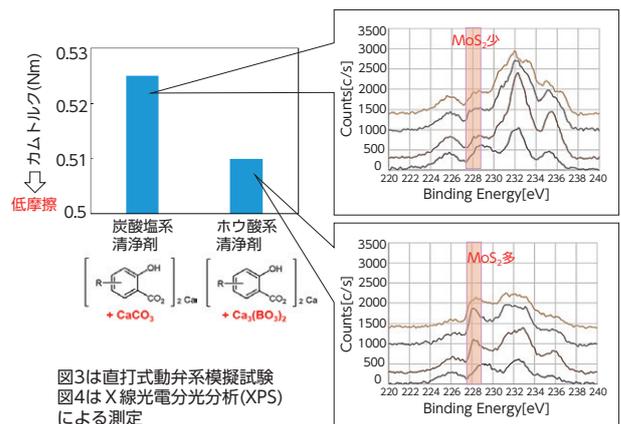


図3 部品摺動試験結果 図4 摺動表面分析結果

3 むすび

上記技術を採用した 0W-8 エンジンオイルは、燃費向上と信頼性を両立し、 CO_2 削減に大きく貢

*1 先進技術開発カンパニー 電動化・環境材料技術部
*2 パワートレーンカンパニー パワートレーン機能開発部
*3 ENEOS 株式会社

献する。今回の開発に関わっていただいた関係者の皆さまに謹んで感謝する。

■参考文献

- ・低燃費エンジンオイル 0W-8 の開発：植松裕太
ほか：2019 年自動車技術会秋季学術講演会予稿集 文献番号 20196233
- ・Development of Ultra Low Viscosity 0W-8 Engine Oil : Kazuo Yamamori, et al: SAE WCX 2020-01-1425

自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 慣性諸元と振動特性を考慮した軽量高剛性な BIW 設計手法

Lightweight and High Stiffness BIW Design Method considering Inertia Specification and Natural Frequency

大學 孝一*1 福原 哲朗*2
Koichi Daigaku Tetsuro Fukuhara

1 まえがき

軽量高剛性な車両構造（以後 BIW：Body in white の略）の必要性は、いうまでもないだろう。

また BIW を 1 つの部品だと見なしたとき、それは車両全体の約 1/4 の重量をしめる最も重い部品であり、車両全域に存在する唯一の部品であるといえる。それゆえ BIW の質量分布は、車両全体の慣性諸元を考えるうえで、極めて重要である。

上記を考える際、最も優れた料理や音楽を定義できないように、いい構造も一意的に定義することはできないが、世の中には優れた運動性能を持つ車両は多数存在し、そのなかには素性のよい BIW 構造を持った車両がいくつもある。

そこで、最も優れた構造を定義し定量化できないのなら、それに相似させる設計手法を考案できないかと考えた。本稿では、固有振動数（以後固有値）を代用特性とした、いくつかの剛性（固有モード）と慣性諸元に着目し、動的性能に優れる車両 A を調査。そして全く別の車両 B に対し、設計 CAE（構造解析）を用いて新設計手法を実践。質量を変えずに前述内容を車両 A に相似させた車両 C を設計し、具現化した。以降、順に説明する。

2 固有値比較とパッケージ比較

まず車両 A と B の固有値解析を行った（図 1）。

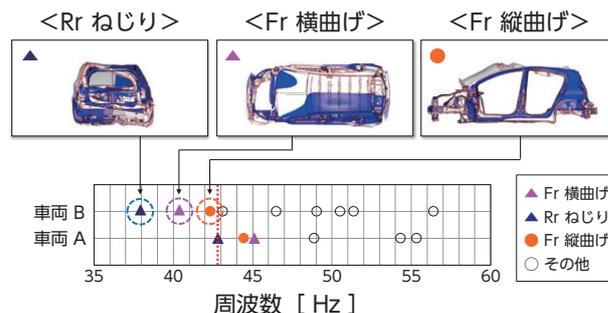


図 1 固有モードと固有値配列の比較

これらの固有モードを、それぞれの BIW 剛性の強さで見なしたとき、車両 B は A の最も弱い剛性、つまり車両 A の Rr ねじり 42.8Hz に対し、弱い剛性が 3 つあるということが出来る。その固有モードは低い方から順に、Rr ねじり 37.9Hz、Fr 横曲げ 40.4Hz、及び Fr 縦曲げ 42.4Hz である。

一方、運動性能において必要な BIW 剛性とは何かを考えてみる。あるコーナーを走行する際の、平面運動における重要な BIW 剛性とは、その入口付近では Fr 横曲げ剛性が、出口付近では Rr ねじり剛性などが、それに該当すると報告されている。

前述した車両 B の 3 つの固有値のうち、2 つの固有モードがその剛性に該当することから、少なくともその 2 つの固有値を上げれば、動的性能に何らかのよい影響がありそうだと推測できる。

本研究では、その車両 B の 3 つの固有値を、車両 A の最も低い固有値以上にした車両 C を、質量を変えずに具現化することを目標とした。

次にパッケージ比較を実施した。車両の大きさ違いなどを補正した上で、車両 B の側面視と重心に対し車両 A の重心を重ねてみる。すると、車両の前後方向で 26.4mm、上下方向で 14.2mm の差があることがわかった（図 2）。

*1 クルマ開発センター 車両構造デザインスタジオ
*2 先進技術開発カンパニー 先進プロジェクト推進部

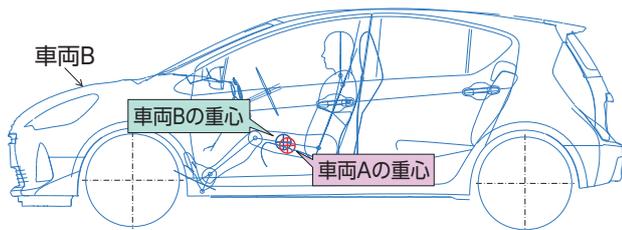


図2 重心位置比較

また上図に車両Aの前席乗員（ドライバ）を重ねてみると、車両Bのそれに対し後方に66.1mm、下方に8.9mmの位置にあることもわかった（図3）。

車両の慣性主軸とドライバの位置関係が、ドライバが感じる動的性能に与える影響は大きいので、車両Bの乗員位置を車両Aにあわせることにした。

すると、重心は後方に9.7mm、下方に1.3mmほど変化する。その分を補正すると、最終的に車両AとBの重心位置の差は、車両Bの重心からみて後方に16.7mm、下方に12.9mmとなる。

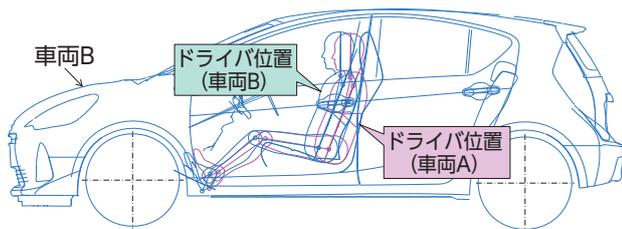


図3 ドライバ位置比較

この前後・上下の重心位置の差を、BIWの質量分布をコントロールすることで車両Aに相似させ、車両Cとして具現化していく（4章参照）。

3 固有値設計

以下、①～⑤の対策方法で取り組んだ。

①板厚を変える、②材料を変える、③部品を追加する、④部品を削除する、⑤接合剛性を上げる。

前述3つの固有値を、上記の対策方法を用いて上げていく。以降その内容を説明する。

3.1 Fr 横曲げ

この固有値は、車両先端の軽量化に感度が高いので、まず始めに下図着色部の軽量化に着手した（図4）。車両Bの鉄の開断面構造に対し、車両Cではアルミの開断面構造を採用。2.3kg軽くしつつも剛性を向上させた。以下に示すように、Fr横曲げだけが大きく向上していることがわかる。

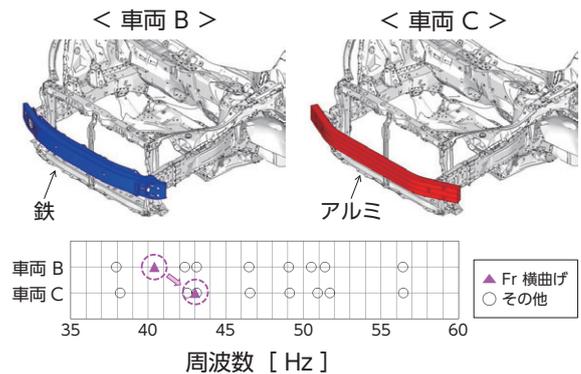


図4 先端部の構造比較

次に図5の部位について、構造検討を実施した。本部位でも前述同様、軽量化による感度が高いため、前側部分の下半分を削除し、残りを樹脂化した。結果として4.6kgの軽量化となっている。

またその際、以下の構造aとb（構造詳細は割愛）の2案を検討した。それぞれの固有値配列を比較すると、構造bのFr横曲げ固有値の上昇代が最も大きいことがわかる。

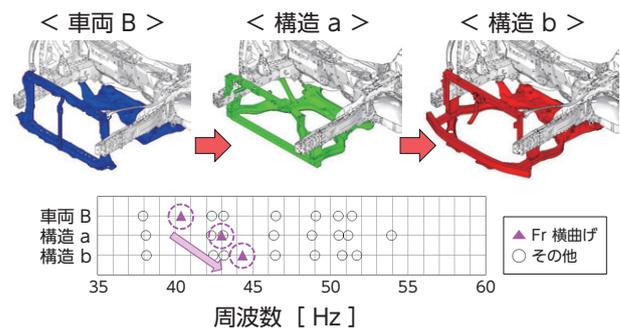


図5 前部の構造比較

3.2 Rrねじり

この部位では、板厚を上げることが最も効果的であると判断し、あえて質量を6.8kg追加した。

その際、慣性諸元変化を考慮し、極力重心が車両上方へ移動しないよう下側から板厚を上げていき、該当する固有値変化を確認した（図6）。結果、構造cのとき車両A並みになることがわかった。

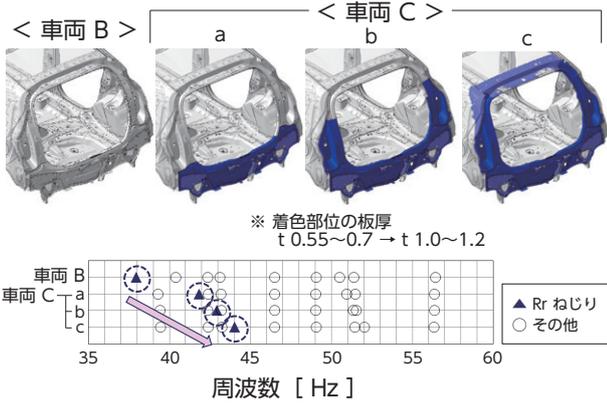


図6 後部の構造比較

3.3 Fr 縦曲げ

この固有モードでは、BIW 本体と車両前側のガラス間に設定している接着剤の硬さに、感度が高いことがわかった (図7)。他性能への影響を確認しながら、できるだけ硬度を上げた。

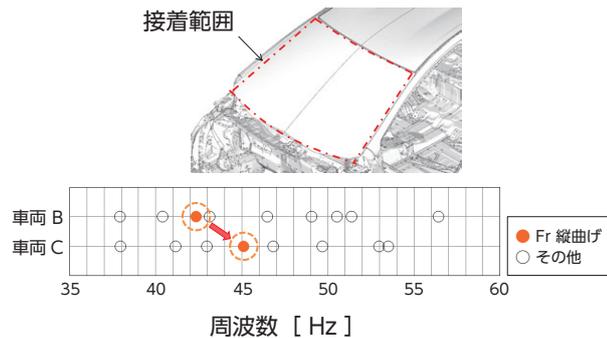


図7 前側ガラス部の構造

3.4 固有値設計結果

以上の取り組みの結果、車両Bの3つの固有値全てを、質量を増加させることなく、車両Aの最も低い固有値以上にすることができた (図8)。

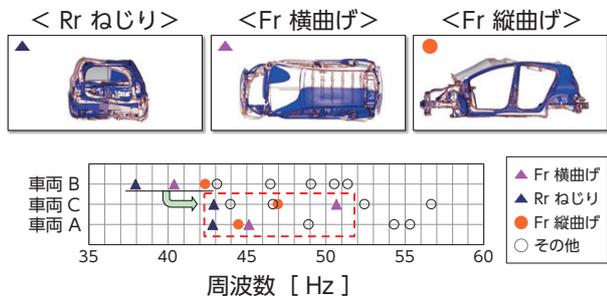


図8 固有モードと固有値配列の比較

4 慣性諸元設計

始めに、重心に対し上側に位置するルーフパネルを樹脂化して6kg軽量化した。あわせて、重心に対し、その大半が下方に存在するBIW中央部の板厚を上げ (図9)、4.1kg重くして重心を下方へ移動させた。

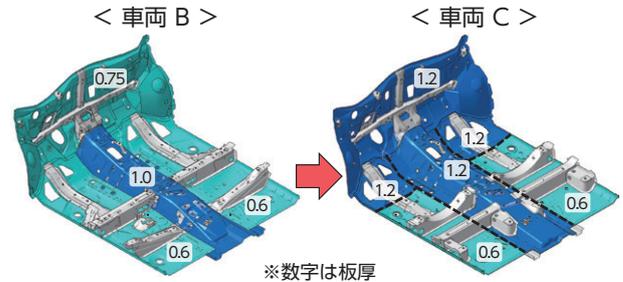


図9 中央部の構造比較

次に、車両前方に存在するフードパネルを樹脂化し、5kg軽量化した。また、Rrねじりの固有値を向上させるために、車両後部を6.8kg重くした効果とあわせ、重心を後方へ移動させた。

結果、重心変化量は車両後方に11.1mm、下方に4.7mmとなり (図10)、質量をほとんど変化させずに、相似させたい方向へ狙って移動させることができた。

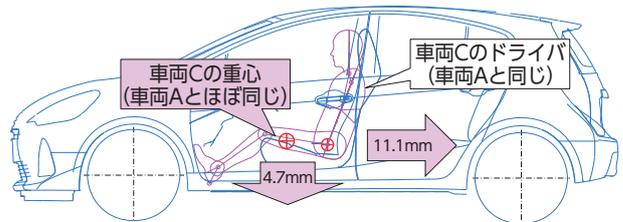


図10 重心とドライバーの移動量

5 計測と走行評価

5.1 振動特性

以下に加振点応答の測定結果を示す (図 11)。

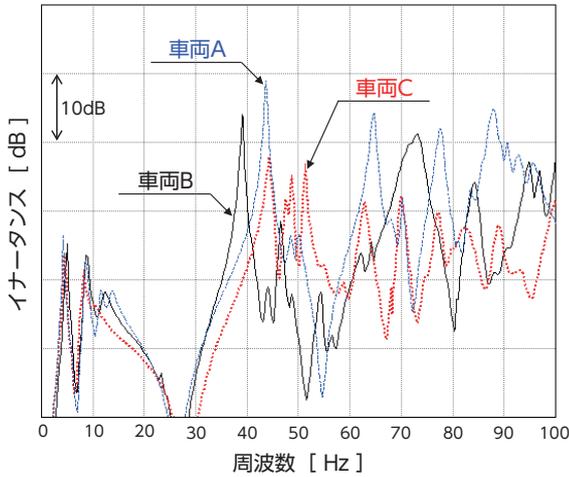


図 11 加振点応答グラフ

車両 C の最も低い固有値が、車両 B の 39.0Hz から 44.3Hz へ上昇し、またそれが車両 A の最も低い固有値 43.8Hz 以上であることが確認できる。

5.2 質量と慣性諸元

実測でもほぼ質量変化がなく、重心移動量も車両後方に 10mm, 下方に 12mm となって、これも狙い通りの変化傾向であることが確認できた。

5.3 走行評価

以下に官能評価結果を示す (図 12)。車両 B と C の間で、明確な動的性能の向上が認められる。

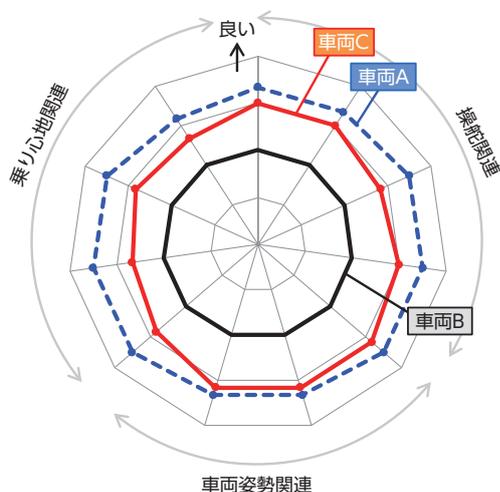


図 12 官能評価グラフ

6 まとめ

BIW を 1 つの部品と見なし、その慣性諸元と振動特性に着目。その上で設計 CAE を用いて BIW の全体設計を実施し、慣性諸元と振動特性を考慮した、軽量高剛性な BIW 設計手法を確立した。

■出典元

- ・大塚孝一 他：慣性諸元と振動特性を考慮した軽量高剛性な BIW 設計手法，自動車技術会 2019 秋季大会学術講演会前刷集，(2019)

Back Number Index



Vol.57 No.2 (2011年)
特集：次世代電池とその活用



Vol.58 No.1 (2012年)
特集：日本独創



Vol.59 (2013年)
特集：生産技術



Vol.60 (2014年)
特集：パワートレイン



Vol.61 (2015年)
特集：MIRAI
第2特集：ITS・高度運転支援



Vol.62 (2016年)
特集：プリウス



Vol.63 (2017年)
挑戦・新技術開発



Vol.64 (2018年)
特集：TNGAパワートレイン



Vol.65 (2019年)
特集：将来の電池技術
～燃料電池と蓄電池



Vol.66 (2021年)
特集：多様化する価値とクルマ創り
～新型MIRAIとGRヤリス～

冊子定価：1,980円 (本体：1,800円)
※英文版も販売しております。冊子定価：3,080円 (本体：2,800円)

発売元：(株) オーム社 Tel: (03) 3233-0641
https://www.ohmsha.co.jp/magazine/partners_magazine.htm

日頃より、TOYOTA Technical Review（以下、TTR）をご愛読いただき、誠にありがとうございます。
でございます。

読者の皆様におかれましては、唐突に始まった新型コロナウイルスの終息の目途も立たず大変なご苦勞を強いられていることとお察しいたします。

2020年度発行のTTR第66巻では、東京2020オリンピック・パラリンピックで活躍するモビリティソリューションの特集をお届けする予定でしたが、今回のパンデミックによる東京2020大会の延期にともない内容を変更して発行させていただきました。

1年延期ののち東京2020大会が行われ、今回のTTR第67巻にてようやくモビリティソリューションの特集記事をお届けできる運びとなりました。

モビリティソリューションは、選手村での人員輸送などの用途として約10種類のモビリティやロボットから構成されています。

特に、「移動」がチャレンジするための障がいではなく、夢を叶えるための可能性になって欲しい、移動が自由にできればどんなことにもチャレンジできる。このような思いから従来大会におけるような単なる車両供給スポンサーとしてではなく、初のモビリティワールドワイドパートナーとして、モビリティソリューション全体を大会へ提供していくことに積極的にチャレンジしています。

本紙では、各モビリティソリューションの企画開発における技術的要素を説明していますが、サステナビリティ、Mobility for All、そしてTPS（Toyota Production System/トヨタ生産方式）という思想を中心に据えて開発に取り組んでまいりました。

これらの思想がどのような技術開発の成果として具現化されているかといった観点でもお読みいただければ幸いです。

最後に、コロナ禍の大変お忙しい時期に編集、発行にご協力いただいた全ての方々に対し、この場をお借りして深くお礼申し上げます。

今後も読者の皆様のお役に立てるよう、内容の充実に努めてまいります。

（発行人：小東）

TOYOTA Technical Review Vol. 67

© 2022 TOYOTA MOTOR CORPORATION

（禁無断転載）

発行所 トヨタ自動車株式会社
先進技術統括部
〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1
(0565) 28-2121 (代表)

発行人 小東 哲也
企画 遠山 淳
編集 株式会社トヨタエンタプライズ
トヨタ事業所 技術業務室 加藤 慎吾
構成 株式会社シンテックホズミ
〒470-0217 愛知県みよし市根浦町五丁目3番地1

発行 2022年2月8日

TOYOTA
Technical
Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

Vol.67

2022/ **2** 237