

Pairdriver[®] はいかにして築かれたか

The Making of Pairdriver[®]

ロバート・フックス R. FUCHS 田村 勉 T. TAMURA 仲出知弘 T. NAKADE

JTEKT is advancing the development of Pairdriver, a novel technology to realize collaborative steering control between the driver and the automation system on a software platform for advanced driver assistance systems (ADAS) and automated driving (AD). This paper presents the conceptual evolution of Pairdriver, describing how the idea was conceived and developed based on interdisciplinary insights, including haptics and shared control. Furthermore, it highlights a human-centered design philosophy to enhance both safety and usability by ensuring that the human driver remains an active participant in the driving control loop. In addition, Pairdriver is designed as a software-oriented solution that abstracts hardware dependencies, enabling scalability and compatibility with modern vehicle architectures. Finally, future perspectives, including branding strategies, are discussed to strengthen the technology's identity and promote broader applications.

Key Words: Pairdriver, haptics, driver-automation collaboration, automated driving

1. Pairdriver とは

近年、生成 AI をはじめとする知能化技術の進展により、カメラなどのセンサーを使った走行環境の認識性能は大きく向上している。これにより、自動運転の利用領域は高速道路のような比較的単純な走行環境から多様な交通参加者が存在する市街地環境へと広がりつつある。自動運転および運転支援システムのさらなる普及には、車両側が周囲の状況を正しく認識し、進むべき経路を判断したうえで、その判断どおりに正確に運転できる性能が欠かせない。しかし、現状では安全のため運転者に一定水準の関与が求められる。

自動運転システムで安全な走行を実現するには、車両に目標軌道を正確に追従させる高い制御性能が求められる。一方、追従性を高めるほどシステムによる制御が優先され、運転者の操舵^た入力が相対的に反映されにくくなる。その結果、自動運転と人の操作が滑らかに移行できず、必要な場面で運転者の意図とのかい離が発生し、使いやすさや快適性低下の要因となる。

上記の課題を解決するために開発されたのが Pairdriver である。Pairdriver とは、自動操舵^た中に運転者がステアリング操作を通じて常に介入できる独自の協調操舵^たシステムである。これにより、人と車がチームのように連携した運転が可能となり、より安心して快適な

運転体験を実現する。

本報では、当社のコアコンピタンスを結集して開発した Pairdriver の技術的背景、開発思想および開発過程について概説する。

2. Pairdriver 誕生の道のり

2.1 開発のきっかけ

本開発の検討を開始したのは、2012 年に Google Car が発表され、自動車業界全体が自動運転技術へと本格的に移行し始めた時期に遡る。当時、本報の第一著者である Fuchs は、スイス連邦工科大学ローザンヌ校の Bleuler 教授とともに手術ロボティクス分野で用いられていた力覚フィードバック技術を自動車のステアリング制御へ応用する方法について検討していた。

そのなかで、2016 年にフランス・ベルサイユで開催された Euro Haptics Conference に参加し、ハプティクス^{図 1}に関する知見を得た。ハプティクスとは、人間が生まれつき持っている自然で直感的なコミュニケーション手段の一つである。当時のハプティクス研究の多くは、指先による触覚知覚を主な対象としており、操舵^た操作への応用は限定的であった。運転時のハプティクスは手指の触覚に限定されず、車両運動に起因する力学的刺激を含め、身体全体で受ける感覚として捉える必



図1 触覚によるコミュニケーション
Example of haptic communication

要がある。すなわち、運転者は操舵時のステアリング反力トルクにくわえ、加速度による運動刺激を同時に受けており、これら複数の知覚情報の統合によって操舵感覚（以下、ステアリングフィール）を形成する。この認識に基づき、自動運転および運転支援システムの設計においては、自動化性能の向上のみならず、ステアリングフィールを含めた運転者の関与や、運転者と車両との相互作用を考慮することが重要であるとの結論に至った。

現在では、この考え方は運転支援システムの評価制度や規制動向にも反映されている。たとえば、第三者機関による安全性能の評価プログラムであるNCAPのAssisted Driving Gradingsでは、Driving Collaborationが独立した評価項目として設けられている¹⁾。また、中国におけるL2システム向けの安全要求²⁾では、運転者の継続的責任が明確化されている。これらの動向は、人とシステムの関係において、人を中心とした設計・評価の重要性が高まっていることを示している。

2.2 大胆な決断がもたらした変革

第一著者は、2016年のIFAC Human-Machine Systems Conferenceにおいて報告されたShared Control（運転者と自動化システムが操舵制御を共有するという概念）に着目した。さらに、完全自動化が実現された将来の運転状態を想定し、自動運転システムと運転者との相互作用に関する研究を同年に開始した。

本研究には技術面と戦略面の両面で独自性がある。技術面では、通常は運転者の介入を許容しない高ゲインのステアリング角度制御にShared Controlを適用した点である。戦略面では、当時主流であった自動化レベルの段階的向上とは異なり、完全自動化を前提として研究開

発を開始した点である。

初期段階の検討では、自動運転から手動介入状態へ移行する際の操舵切替を実現するため、ステアリングトルクのしきい値に基づく制御方式を採用した。しかし、本方式では、操舵感覚の不連続性が顕在化した。そこで、運転者の操舵角に応じて、手動操舵のためのアシスト制御トルクと自動操舵のための舵角制御トルクの重みを連続的に変化させる制御方式を開発し、操舵状態の滑らかな遷移を実現した。さらに、手動操舵と自動操舵が混在する制御がモード切替に起因する運転者の操作上の違和感や混乱の低減に有効であることを確認した。以上の検討結果により、操舵制御におけるShared Control(図2)の有効性が示された³⁾。



図2 搬送タスクにおける人間同士の共同動作
(シェアードコントロール)

Human-human joint action in a carrying task (shared control)

2.3 技術資産を生かした挑戦

これらの知見に基づき、本研究では操舵制御にアドミタンス制御を適用した。アドミタンス制御とは、機械系の見かけの慣性特性を調整する手法であり、著者らは本手法を「慣性シミュレーション」として操舵支援システム以外の用途に応用した実績があった。本研究においては、自動化による目標軌道への高い追従性を維持しつつ、運転者が操舵介入できることを目的としているため、アドミタンス制御がPairedriverの設計方針と整合すると考えた。

従来の先進運転支援システム(Advanced Driver Assistance Systems: ADAS)では、自動化を優先するか、あるいは手動操作を優先するかという二者択一的な制御概念が一般的であったが、本制御アプローチはそ

れとは本質的に異なる。すなわち、人と自動化の協調を前提としている。この考え方がPairedriverの原点となった。

3. Pairedriver を支えるコアコンピタンス

3.1 安全性課題の認識

人工知能（Artificial Intelligence：AI）は、人間にのみ可能と考えられてきた領域への技術的実装を実現する基盤技術として注目されており、Physical AI ともよばれる分野を形成しつつある。その代表的な応用例として、自動運転システムやヒューマノイドロボットがあげられる。

AIは大規模な投資に支えられて成長している分野であるが、安全性および信頼性の観点からは依然として発展途上である。これに対し、Pairedriverの技術的基盤は約70年の歴史を有する自動化分野に位置付けられる。しかし、自動化分野には、自動化が進むにつれ問題が複雑化する矛盾を抱えている（図3）。これは自動化のアイロニーとよばれている。すなわち、「人為的ミスの防止を目的として、不完全な人間が完全な機械を開発する」という矛盾と、「自動化の性能が向上するほど人間の介入が困難になり、システムの異常時に安全確保ができない」という矛盾である。このことは、自動運転システムの設計・運用において、高度な自動化による安全性確保の難しさや、運転者を単なる監視者として位置付ける設計の非現実性を示唆している。

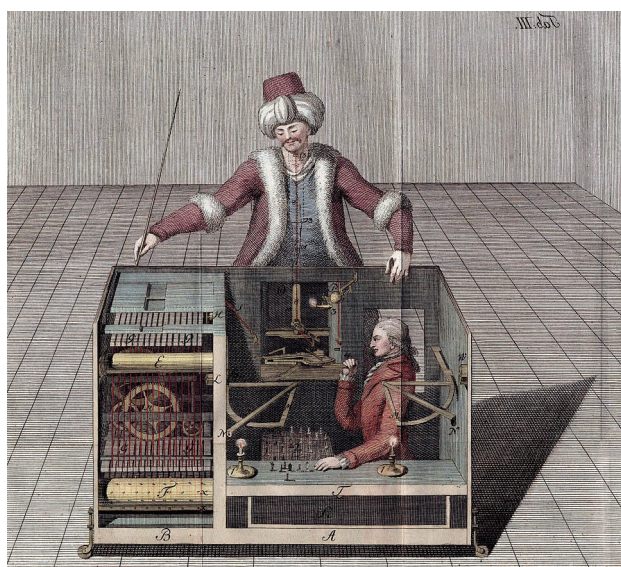


図3 Mechanical Turk：完全自動化の幻想
Mechanical Turk: The illusion of full automation

3.2 人間中心の設計思想

この課題認識に基づき、著者らは試験車両を用いてアドミタンス制御の概念実証を行った。その後、本技術を基盤として、ヒューマンファクターを重視した対話的なADAS機能へと発展させてきた。これらの経緯から人間の能力を中心に据えて、車両性能をそれに適合させるHuman-Centered Design（人間中心設計）を開発方針の中核に位置付けた。

本設計思想においては、自動化システムの高度化のみを目的とするのではなく、人とシステムが相互に状態を理解しながら協調的に機能する関係性を重視した。その結果、運転者を自動化システムの外部に位置付けるのではなく、制御ループに含まれた主体的要素として位置付けた。

3.3 制御機能の拡張

Pairedriverは操舵^た制御だけでなく、運転者の意図を自動運転システム全体に反映させる構成となっている。すなわち、操舵^た入力^たは局所的な操作量としてではなく、車両運動の統合的制御に影響を与える情報として扱われる。この考え方にに基づき、過渡的に目標軌道に適應する機能と定常的に目標軌道を更新する機構を組み合わせることにより、運転者と自動化システムが協調して運転を制御する構造を実現した^{4), 5)}。この構成により、両者は「Horse riding metaphor」として乗馬の例（図4）に代表されるように、主従関係ではなく相互の役割を分担する協調関係として構成され、Pairedriverの中核的な設計思想および制御構造が確立された。



図4 騎手と馬による協働の象徴
Horse riding metaphor of driver-automation team-up

3.4 ソフトウェアソリューションとしての構想

SDV (Software-Defined Vehicle) という概念が広く議論される以前より、著者らは Pairdriver をソフトウェアソリューションとして構想してきた。Pairdriver の特長の一つは、特定のステアリングハードウェアに依存しないソフトウェアアーキテクチャである。指令値への追従性を高める高ゲインの角度制御は、ステアリングシステムごとの機械摩擦や路面反力の違いを吸収し、異なるステアリングハードウェアにも適用できる。また、Pairdriver を構成するほかの機能群は API (Application Programming Interface) として定義され、自動運転システムのソフトウェアとともに ADAS ECU (Electronic Control Unit) 上に配置するのが適していると考えられる。この構成により、EPS 側ソフトウェアのハードウェア依存性を低減しつつ、ADAS におけるユーザーエクスペリエンス (UX) に関する機能を ADAS ECU 側に統合できる。

さらに、ソフトウェア機能の配置と責任範囲を明確化することでシステム全体の管理を一元化でき、保守性の向上や更新・機能拡張のための柔軟な対応が可能となる。このように構成されたソフトウェアスタックは、自動運転および運転支援に必要な機能を整合的に統合でき、E/E アーキテクチャ (Electrical/Electronic Architecture) の高度化や SDV の設計思想とも整合する。

3.5 研究開発環境と多様なチームメンバー

Pairdriver は、当社の研究環境および選任チームによって開発された。当社の研究組織は、学術研究と先行開発の中間に位置する研究環境を有しており、事業への貢献を視野に入れつつ、中長期的な視点で研究活動を推進している。この視点は、技術の発展や新技術の創出を支える重要な要素である。

また、当社では伊賀試験場をはじめとする各種試験設備に比べ、ドライビングシミュレーター (図5) など業界屈指の開発設備を構築してきたことも Pairdriver を効率よく開発できた大きな要因である。これらの開発環境により、理論的に可能な制御手法について、実車両 (図6) における挙動や運転者の主観的評価を初期段階から確認できる。さらに得られた知見を迅速に設計へ反映させる開発プロセスが実現されている。



図5 ドライビングシミュレーター
Driving simulator

Pairdriver が目指すのは、人と車両との円滑な相互作用の実現であり、そのためには制御性能の向上だけでなく、運転者が知覚する感覚的品質や車両運動品質を含めた総合的な評価が不可欠である。解析モデルからシミュレーションへ、さらに実車評価へと連続的につながるツールチェーンは、このような総合的な検証を支える重要な基盤である。

Pairdriver の開発チームは、日本文化の中心地である奈良を拠点として、6 か国以上の国籍および多様なバックグラウンドを持つメンバーで構成されている。日本語、英語、フランス語が日常的に使用される多言語環境は、異なる視点や価値観の共有を促進し、メンバーの好奇心や創造性を刺激している。このような環境は、技術を多面的に捉える視点や感性の醸成にも役立っている。



図6 テストコースと評価車両
Test track and evaluation vehicle

4. ブランドの構築

開発の初期段階では、本技術は「Haptic Shared Control」と位置付けられ、主に自動車メーカーを対象として訴求してきた。その後、本技術をソフトウェア事業に展開するにあたり、技術の識別性および顧客への認知度を高めるため、マーケティング戦略の一環としてブランドの構築を決定した。

ブランド名を検討する際は、本技術に精通したメンバーにくわえ、当該技術の知識を有していないメンバーを含む部門横断的なチームを編成し、技術的な先入観に依存しないようにした。また、ロゴデザイン、カラーパレットおよびタイポグラフィの設計は外部のデザイン専門会社と協業し、人とシステムの協調を表現する視覚的要素を追求した。ロゴデザインは pair の“p”と driver の“d”を統合した円形構造とし、ステアリングホイールを想起させる形態により、人と車両制御系が協調する設計思想を象徴的に表現している。また、フォントおよ

び配色については、信頼性、安全性および調和といった特性が想起されるよう配慮した（図7）。さらに、マーケティング活動の基盤となる情報発信手段として、公式ウェブサイト*およびビジネス向けソーシャルネットワークワーキングサービス（SNS）である LinkedIn ページを開設し、各種の情報を発信している。

※ Pairdriver 公式ウェブサイト：<https://www.pairdriver.jtekt.co.jp/>

5. Pairdriver のこれから

Pairdriver のようなソリューションを適切なタイミングで提供するには、市場動向に対する理解、明確な開発戦略、技術的知見、専門性の蓄積にくわえ、開発環境・設備の構築が不可欠である。また、ブランド戦略とマーケティング、強固なネットワーク、そして働く環境やチームづくりの組み合わせも重要である。これらの根底にあるのは、グローバルな視点で技術的卓越性と競争力

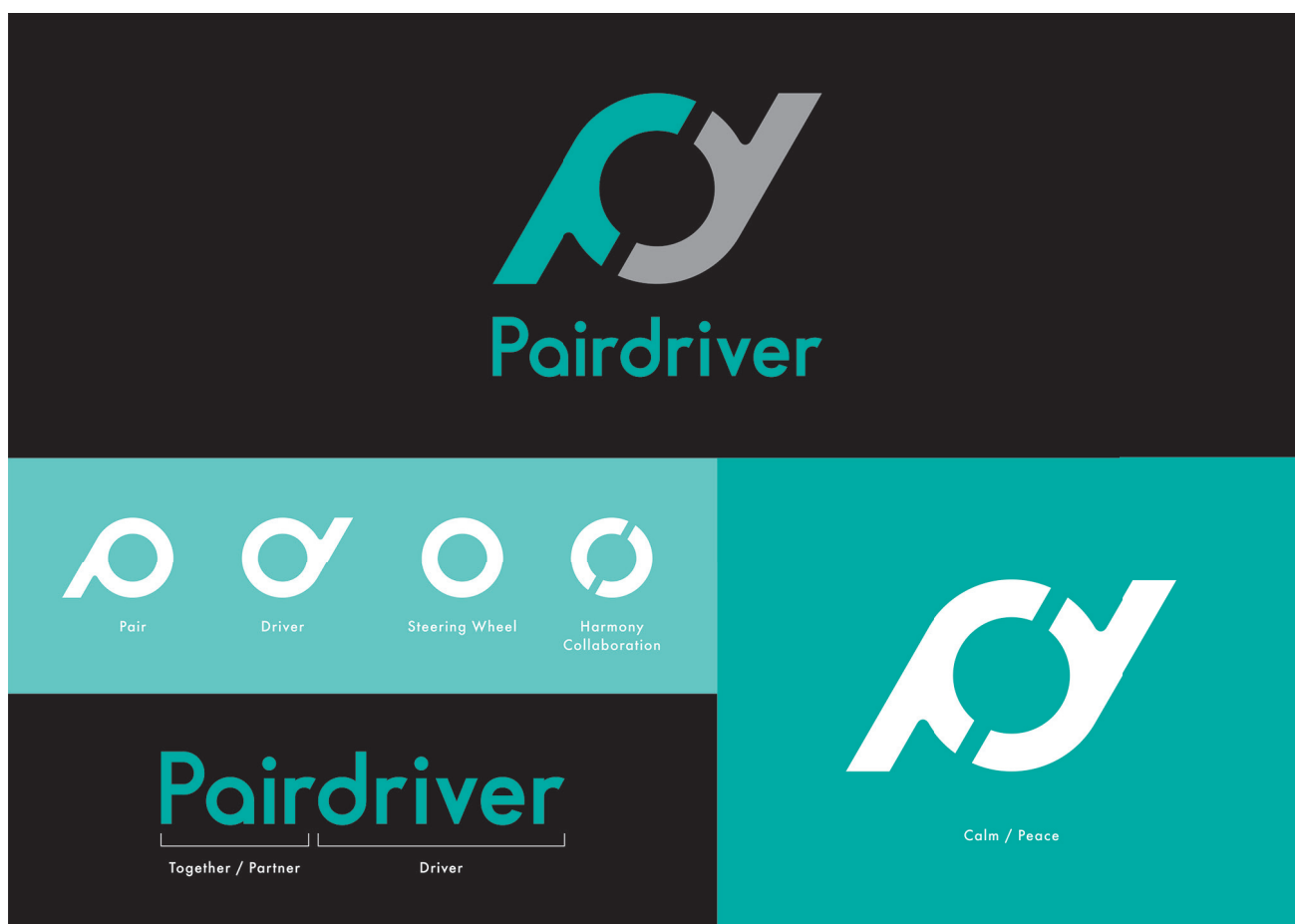


図7 ロゴマーク
Pairdriver logo

を追求する姿勢である。

Pairdriver は、当社が保有するコアコンピタンスを掛け合わせたソリューションの好例である。本技術は、自動車メーカーが独自の対話型 ADAS を効率的に設計・実装するための開発プラットフォームとしての役割も担っている。

Pairdriver は、人と自動化システムが協調するという思想の基に築かれた技術である。本技術を通して、自動運転および運転支援システムにおける本質的な安全課題を解決し、社会に貢献していく。さらに、信頼感と新たな「運転する楽しさ」を提供し、自動運転に対する運転者の受容性を高めていきたい。

* Pairdriver は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) EURO NCAP: Safe Driving Driver Engagement Protocol Version 1.1, Car safety protocols 2026-2028, 2025-10, https://cdn.euroncap.com/cars/assets/Euro_NCAP_Protocol_Assisted_Driving_v1_2_7150e4e41e.pdf (参照 2026.06.01) .
- 2) J. LI: China proposes national safety standards for level-2 driver assistance systems, CHINA DAILY, 2025-09-17, <https://www.chinadaily.com.cn/a/202509/17/WS68ca620da3108622abca149e.html> (参照 2026.06.01) .
- 3) 小路直紀, 仲出知弘, 田村 勉, ロバート・フックス: Pairdriver® 自動運転のためのステアリング協調制御, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1019(2022) 22-29.
- 4) T. NAKADE, R. FUCHS, H. BLEULER, J. SCHIFFMANN: Haptics based multi-level collaborative steering control for automated driving, Communications Engineering, Article number: 2 (2023) .
- 5) T. NAKADE, R. FUCHS, J. SCHIFFMANN: The Haptic Link Enabling Driver-Automation Teaming, 2024 IEEE 4th International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS), IEEE Xplore, (2024) 1-6.

筆者



ロバート・フックス*
R. FUCHS



田村 勉*
T. TAMURA



仲出知弘*
T. NAKADE

* イノベーション本部 システム創生研究部