

人にやさしい遠隔操縦付き自動運転の開発 (AIT Project on Human-friendly Autonomous Vehicle with Remote-control: HAVRec)

[研究代表者] 道木加絵 (工学部電気学科)
 [共同研究者] 中條直也 (情報科学部情報科学科)
 塚田敏彦 (情報科学部情報科学科)
 矢野良和 (工学部電気学科)
 松河剛司 (情報科学部情報科学科)
 日比野良一 (工学部機械学科)
 中井孝幸 (工学部建築学科)

研究成果の概要

HAVRec メンバーが参加したあいち重点プロジェクト三期 (研究課題: ヒトに優しい遠隔運転要素技術の開発とシステム化~完全自動運転実現への架け橋として~、研究リーダー: 塚田敏彦教授、研究期間: 2019年4月~2022年3月) が、2021年度末に終了した。このプロジェクトで多くの成果を挙げた一方で、遠隔型自動運転に関する課題も浮き彫りとなった。そこで、2022年度はあいち重点プロジェクトで取り組んだ課題に関し、引き続き研究を継続することとした。以上の研究内容について、国内の学術講演会にて9件の成果発表を行った。更に、今年度は新規メンバーとして工学部機械学科より日比野教授を迎えることになった。そして、従来メンバーも含め、遠隔型自動運転に関する新規課題の立ち上げ、並びに遠隔型自動運転に関する要素技術を応用した新たな研究課題を立ち上げることにした。また、あいち重点プロジェクトで中井教授が取り組んだデザインを同プロジェクトで購入したコムスにラッピングした。そして、豊田市から借用しているコムスについては、年度末に豊田市から譲渡された。

HAVRec における対外活動の1つとして例年取り組んでいる夏のオープンキャンパスへの出展を今年度も実施した。豊田市から借用・改造したコムス、あいち重点研究プロジェクトで開発した自動運転車両、またプロジェクトで取り組んでいる各研究課題の紹介や関連動画の展示を行った。これと同時に、魚眼カメラの画像合成による全天球映像や遠隔運転のデモンストレーションも行った。感染症対策を施しての実施であったため、あまり多くの人には体験頂けなかったが、遠隔型自動運転の重要性や運転支援システムの必然性について来場者に理解頂けたと考える。また、毎週の研究打ち合わせや対外活動を通して、HAVRec 参加学生は複数分野に跨る研究活動やプレゼンテーション能力、コミュニケーションスキル、企画運営能力等を高めることができた。

研究分野: ロボティクス、知的情報処理、知的制御、システムインテグレーション

キーワード: 遠隔型自動運転車、操縦支援、X Reality(XR)、情報提示、環境認識、アプリケーション開発

1. 研究開始当初の背景

労働人口の減少により物流における運送・配送手段、都心や過疎地における高齢者の移動手段として日本では自動運転車両の実現が急務である。世界的にも自動運転車両実現に対する要望は高く、自動運転に関する様々な要素技術研究が全世界的に行われてきている。最初は一般車両を除いた高速道路のように非常に限定された環境での自動運転を目的とし、その開発は順調であった。しかし、一般

車両を含む高速道路、大都市の市街地、一般市街地と自動運転車両の走行環境の拡大や制限緩和が進むにつれ、Level5の自動運転実現に向けた課題が複雑かつ困難であることが明らかとなりつつある。

2. 研究の目的

本研究では、Level4に当たる遠隔操縦付き自動運転車両に着目し、「ラスト100ヤードの走破」を合言葉に一般的

な交通ルールが順守されない状況が発生しやすい私有地や未整備道路、自動運転車両が自律走行不可能な状況下等で遠隔地の操縦者が車両の運転操作を行う事を想定する。まず、自動運転車両が一般社会で受容されるには「搭乗者」「遠隔操縦者」「周囲の一般車両のドライバや歩行者」にやさしい自動運転車両が必要不可欠と考える。次に、遠隔地の操縦者が安全かつ確に自動運転車両を運転するには、十分かつ適切な車両周辺状況提示やシステム側からの支援が必要である。更に、自動運転車両が自律走行不能な状況を減らすには、自動運転性能の更なる改善、操縦者の状況判断や車両制御の自動運転システムへの反映等が望まれる。そこで本研究では、「(搭乗者・遠隔操縦者・一般ドライバや歩行者すべての) 人にやさしい」遠隔操縦付き自動運転開発に向けた様々な要素技術に取り組む。また、本プロジェクトで開発した遠隔型自動運転システムの要素技術を応用したアプリケーション開発にも取り組む。

3. 研究の方法

遠隔操縦付き自動運転車両の実現には、「自動運転システム」および「遠隔操縦システム」に関連した多岐に亘る要素技術とアプリケーション開発が必要である。そこで、プロジェクト全体の方針・方向性を全教員で議論・決定しつつ、各自の専門を基盤とした「自動運転システム」および「遠隔操縦システム」ならびに「応用アプリケーション開発」に関連する研究テーマを設定する。以下に、各メンバーが取り組んだ研究内容について順に述べる。

(1) センサ情報に基づく拡張現実映像を用いた遠隔操縦支援システムに関する研究 (道木)

遠隔操縦者の作業負担軽減と作業性能向上を目的として、これまで HMD(Head Mounted Display)と全天球映像を用いた遠隔操縦支援システムを提案してきた。このシステムでは膨大なデータサイズを持つ全天球映像を用いるため、映像遅延が非常に大きく遠隔操縦性能に悪影響を及ぼす。そこで、本研究では低遅延のセンサ情報に基づく拡張現実 (Augmented Reality: AR) 映像を操縦者に提示する遠隔操縦支援システムを提案してきた (図 1)。提案システムでは、センサ情報として 3D LiDAR 点群情報を用い、通信遅延の影響を低減するため 2 次元情報に圧縮した後、この情報を元に AR 映像を生成し、操縦者に提示する。これまでの被験者実験結果より、提案システムにより通信遅延

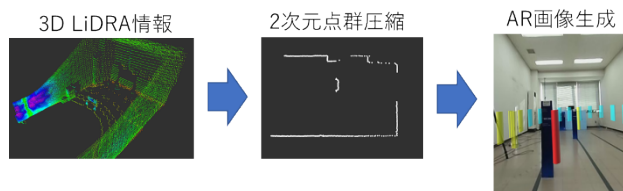


図 1 センサ情報に基づく遠隔操縦支援用 AR 映像生成法

による作業性能低減回避並びに作業負担低減が可能であることを示した。一方で、実画像上に重畳されている 3D オブジェクト (以下、AR オブジェクト) による情報の煩雑さや状況把握の困難さに課題が残っていた。そこで、更なる作業負担低減を目指して AR オブジェクトの提示数や透過率の観点から改良を行った。

(2) 未整備道路における自動運転のための走行可能領域の識別に関する研究 (中條)

現在、レベル 4 の自動運転システムは実搭載可能な状況である。システムに運転の全制御を任せる以上、周囲の認識・判断はこれまで以上に重要なタスクである。道路の構造や劣化等の路面の凹凸により、走行安全性や快適性が損なわれる恐れがあるため、路面の状況状態を認識・考慮した自動運転システムが必要不可欠である。そこで、本研究では未整備道路を対象とし、図 2 に示す路面障害物のうち、ハンプとポットホールを識別対象とする動的な路面障害物識別手法に取り組んだ。図 3 に示すように、路面情報は LiDAR により点群として取得し、得た LiDAR 点群情報を多項式曲面により近似、近似曲面から外れた点群を検出

図 2 路面障害物の例

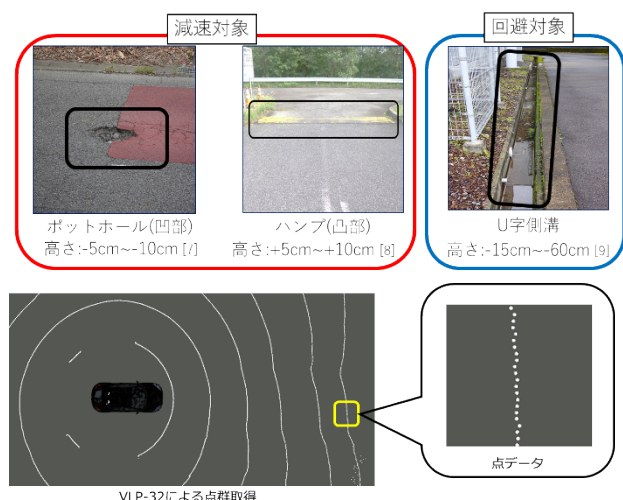
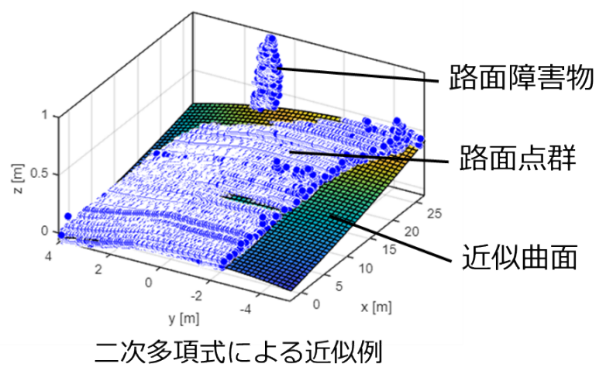


図 3 LiDAR による路面情報の取得例



二次多項式による近似例

図4 多項式曲面を用いた路面近似と路面障害物検出

すべき路面障害物と見なす(図4)。図4に二次多項式曲面を用いた路面障害物の検出例を示す。

(3) 魚眼カメラによる全天球映像生成に関する研究(矢野)

遠隔型自動運転車をはじめとし、様々な機器を遠隔で操縦する場合、機器周辺の映像情報は必要不可欠な情報である。近年、全天球映像を取得するカメラが開発され、これを操縦対象に搭載することでカメラを中心とした360度映像を取得可能である。しかし、カメラの設置位置によっては操縦対象の映り込みや操縦対象の足元周辺等に死角が生じる。そこで、本研究では超広角な撮影範囲を持つ魚眼レンズを用いたカメラ(以下、魚眼カメラ)を操縦対象に複数設置し、得られた画像を適切に合成することで死角のない操縦対象周囲の360度映像を生成するシステムの実現を目指す。

魚眼カメラで撮影された映像を合成する場合、レンズ特性が必要不可欠である。高価な産業用魚眼レンズを用いると、魚眼レンズの特性が安定しているため複数の撮影画像合成は比較的容易に行えるが、本システムの一般普及を考えると現実的ではない。そこで、本研究ではレンズ特性のバラつきが大きい安価な民生用魚眼レンズの活用を目指し、簡単かつ高精度なカメラ校正法の開発に取り組んだ。

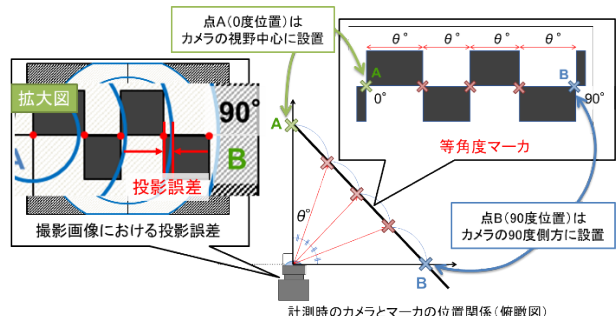


図5 提案する等角度マーカを用いた魚眼カメラ校正法



図6 搬送台車ロボット SUPPOT

図5に提案する魚眼カメラ校正法を示す。本手法では、カメラの視野角を等分する位置に配置した等角度マーカを用いる。そして、このマーカを撮影した画像からレンズ面形状すなわち入射光の投影位置を多項式でモデル化することで魚眼カメラを校正する。従来手法に比べ、提案手法は小型かつ簡便な魚眼レンズの歪み補正法となっている。

(4) 遠隔型自動運転システムの要素技術を応用したアプリケーション開発(塚田)

自動運転システムでは、車両の現在位置を識別するため環境地図が必須である。近年、環境地図作成と車両の現在位置識別を同時に行うSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術の開発が著しく、その応用システムについても様々な開発が行われている。本研究ではAI技術による作業負荷軽減を目的としたスマート農業に着目し、SLAM技術を応用して収穫作業の負荷軽減を目指した人追従型搬送ロボットの開発を目指す。本研究では、梨園を対象とし、SLAMによる対象果樹園の地図生成と地図を使った自律移動実験を通して、実際に梨収穫の際に生じる課題や必要機能について検討を行った。今回、ベースロボットとしてソミックマネジメントホールディングス社製SUPPOTを用いた(図6)。

(5) 遠隔操縦中の搭乗者の状態計測に関する研究(松河)

遠隔型自動運転車の普及を考慮すると、搭乗者が安心かつ快適性を感じる遠隔操縦方法が1つの課題となる。本研究では搭乗者が安心・快適性を感じる遠隔運転の解析を目指し、その第一歩として遠隔運転時の搭乗者の姿勢や状態を計測するシステムの開発に取り組んだ。今年度は、基礎検討として慣性式モーションキャプチャによる搭乗者の姿勢推定の可能性を検討するための基礎実験を行った。具

体的には、実車コムスを用い、急停車および急発進時における搭乗者の頭、背中、腰の進行方向への回転変化量を計測し、上半身の重要部位の姿勢変化を計測可能か検証した。

(6) 実車のドライバビリティや乗り心地の向上を目的とした車両全体モデル作成手法に関する研究（日比野）

安心・安全な自動運転車両には、実車のドライバビリティや乗り心地の向上が必要不可欠である。従来の車輛開発は、設計者の知識と経験に基づいていたため、莫大な開発時間と費用が必要であった。そこで、本研究では近年注目を集めるモデルベース開発に着目し、変則時の車輛前後方向の挙動に関して車両全体を表現したモデルを実験ベースで容易に作成する手法の開発に着手した。今年度は、実車のドライバビリティ・乗り心地に関係する定常～20[Hz]程度の低周波の挙動を対象とし、実車両中の各要素の加速度・各加速度のデータを計測、得られたデータからモデルパラメータを同定することで車両モデル作成を行う手法を検討した。データ取得に用いた実車両として図7に示す車両（ホンダ ライフ(JB1)）を用い、フロア、パワートレーン重心位置、ばね下重心位置にて加速度を、エンジン回転、トランスミッション出口の回転並びに車輪（タイヤ）回転の各地点で回転数を計測する実験システムを構築した。

4. 研究成果

(1) センサ情報に基づく拡張現実映像を用いた遠隔操縦支援システムに関する研究（道木）

実験環境並びに安全性を考慮し、本研究では被験者による移動ロボットの遠隔操縦実験により提案手法の有効性を検証した。実験では路上駐車回避を想定し、路上駐車車両に見立てた障害物を回避しながら移動ロボットをスタ



図7 加速度・回転数計測実験に用いた車両

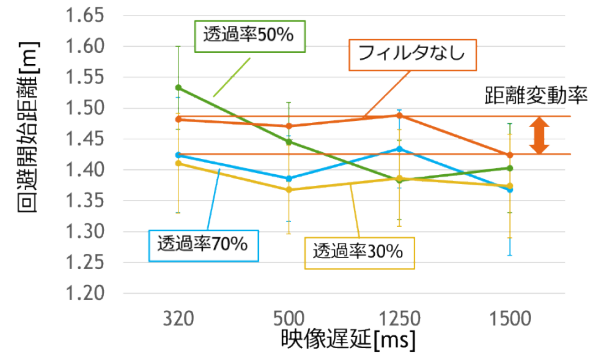


図8 障害物回避開始時のロボットー障害物間距離

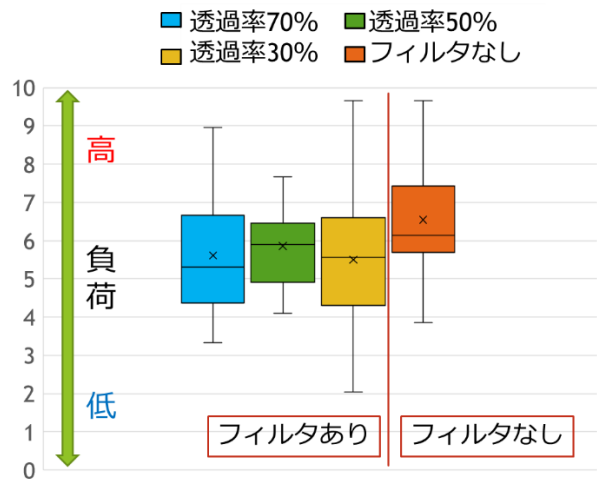


図9 NASA-TLX による作業負荷評価結果

ート位置からゴール位置まで遠隔操縦で移動してもらった。図8並びに図9に実験結果を示す。図8は映像に付与した遅延時間を変化させた時の障害物回避開始時のロボットー障害物間距離を示す。この距離の変化が少ないほど回避動作が安定していることを示す。この結果は、ARオブジェクトの透過率が作業性能に与える影響を調査した。結果より、透過率30%の時の最も変動量が小さく、安定した回避動作であったことが示された。図9は作業終了時にアンケート形式で評価した作業負荷の値を示す。値が大きいほど作業負荷が高いことを意味する。この結果より、ARオブジェクトの透過率の変動は作業負荷にさほど影響を与えないことが示された。

(2) 未整備道路における自動運転のための走行可能僚機の識別に関する研究（中條）

仮想環境の湾曲路面を用い、LiDARの誤差による路面障害物の検出精度への影響についての検証実験を行った。

表1 上り坂始端における検出精度と近似精度

	適合率 [%]	RMSE
ハンプ IV	100.0	0.0089
ハンプ V	100.0	0.0085
ハンプ VI	100.0	0.0091
ポットホール IV	100.0	0.0093
ポットホール V	100.0	0.0092
ポットホール VI	100.0	0.0096

表2 カーブにおける検出精度と近似精度

	適合率 [%]	RMSE
ハンプ I	100.0	0.0093
ハンプ II	99.9	0.0164
ハンプ III	100.0	0.0103
ポットホール I	100.0	0.0090
ポットホール II	86.9	0.0154
ポットホール III	100.0	0.0099

本実験で、仮想 LiDAR の想定精度を $\pm 2.5\text{cm}$ に設定し、ガウス分布に従うノイズ特性とした。表1及び表2に実験結果を示す。表1は湾曲路面の上り坂始端におけるハンプまたはポットホールの検出精度結果、表2はカーブにおける結果である。結果より、直線では路面障害物と路面の分離が可能である一方、カーブでは路面の近似精度が低下、すなわち近似モデル式の限界が示された結果となった。

(3) 魚眼カメラによる全天球映像生成に関する研究 (矢野)

まず初めに、提案手法による魚眼レンズのひずみ補正実験の結果を図10に示す。図中の赤線は提案手法による補正前のひずみ量、青線は入射光の投影位置を多項式でモデ

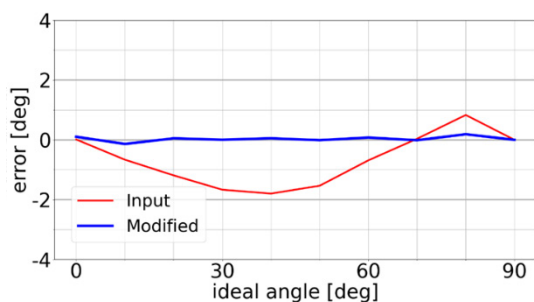


図10 補正前後のひずみ量の比較



図11 実験装置及び撮影条件

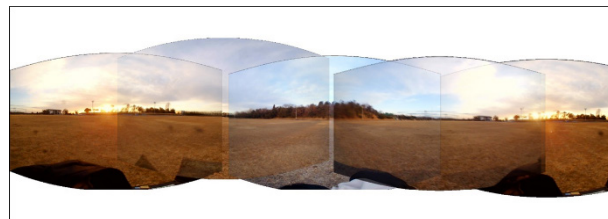


図12 複数カメラ画像の合成に寄る全周囲映像生成

ル化・補正後のひずみ量を示す。結果より、提案手法による補正で十分な精度が得られることが確認できた。

続いて、提案手法による歪み補正とキャリブレーション手法を用いた複数魚眼カメラ画像の合成による全周囲映像生成実験結果を行った。図11に使用した実験装置並びに撮影条件を、図12に得られた全周囲映像を示す。結果より、VR機器での映像視聴に耐える高精度な全周囲映像を得られたことが確認できた。

(4) 遠隔型自動運転システムの要素技術を応用したアプリケーション開発 (塚田)

図13に示す梨園にて、SLAMによる地図作成並びに作成した地図を用いた自律移動実験を行った。実験で得られた地図を図14に示す。対象の梨園はそれなりの凹凸や下草、周囲を囲う網があるにも関わらず自律移動に耐える地図が生成できたことが示された。また、作成した地図を用いた自律移動も成功した。



図13 実験で使用した梨園風景

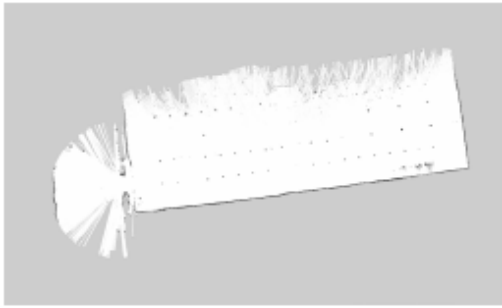


図 14 SLAM で得られた梨園地図

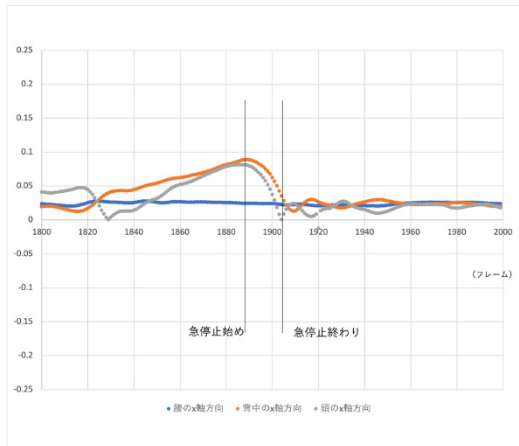


図 15 搭乗者の位置計測実験結果（急停止時）

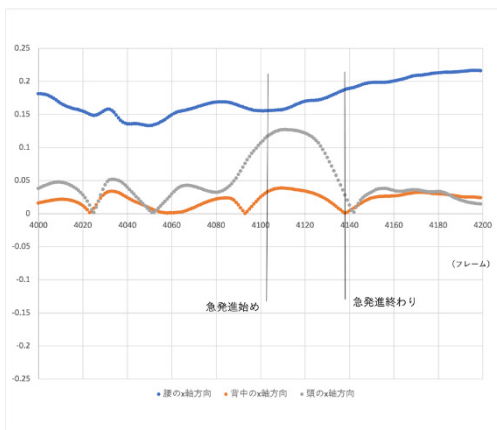
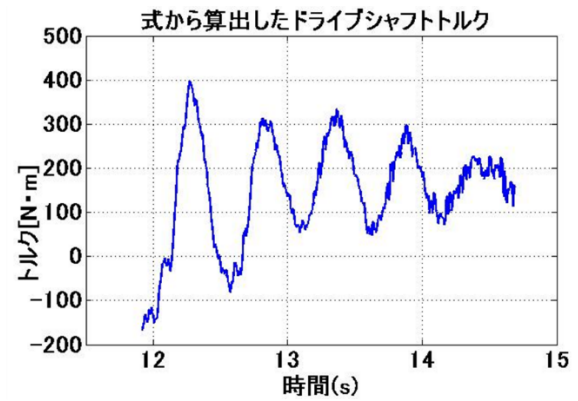


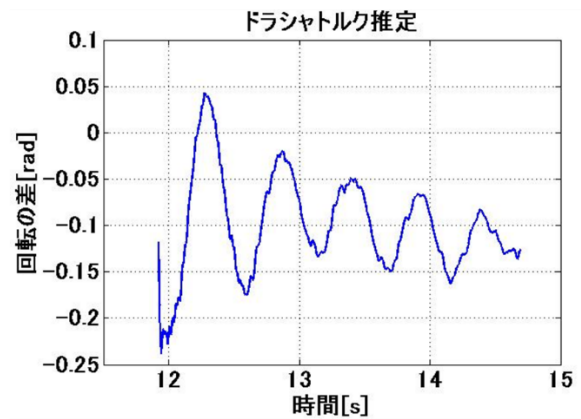
図 16 搭乗者の姿勢計測実験結果（急発進時）

(5) 遠隔操縦中の搭乗者の状態計測に関する研究（松河）

図 15 および図 16 に慣性センサ式モーションキャプチャを用い、実車両を急停車並びに急発進させた時の搭乗者の腰（青色）、背中（橙色）、頭（灰色）の位置の進行方向への回転量を計測した結果を示す。この結果を腰固定の補正を施した人体姿勢シミュレータに入力することで、上半身の腰・背中・頭の各部位の関節角変化データが測定可能であることを確認した。



(a)： 運動方程式から算出したドライブシャフトトルク



(b)： トランスミッション出口とタイヤの回転角の差から算出したドライブシャフトトルクc

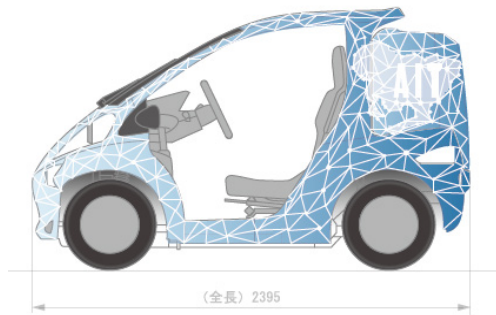
図 17 ドライブシャフトトルク推定結果の比較

(6) 実車のドライバビリティや乗り心地の向上を目的とした車両全体モデル作成手法に関する研究（日比野）

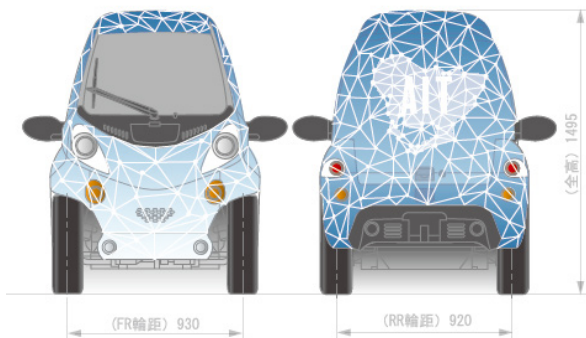
実験で得た回転数と加速度の計測データを用い、2種類の推定手法でドライブシャフトトルクを推定した結果の比較を図 17 に示す。図より、運動方程式に基づき推定した結果とトランスミッション出口とタイヤ回転角の差から算出した推定結果は振動周期が一致する一方、形状は完全に一致してはいないことが確認できた。今後の予定として、どちらの推定手法がより適切か、実際に計測したドライブシャフトトルクの値と比較する予定である。

(7) ヒトに優しい自動運転車両のデザイン（中井）

あいち重点プロジェクト（III期）にてデザインし、最終的に採用・コムスにラッピングを施した車両外装デザインを図 18 に示す。このデザインでは、テクノロジーとコムスのコラボレーションを基本概念として、不規則なグリッドで科学的・解析的な印象を持たせたものとなっている。



(a) 側面デザイン



(b) 前後デザイン

図 18 あいち重点プロジェクトで作成・選定した外装

このデザインを施した車両は、2023 年度夏季オープンキャンパスの HAVRec ブースにて展示の予定である。

5. 本研究に関する発表

- (1) 道木加絵 (愛工大) 手嶋龍也 (愛工大) 舟洞佑記 (名大) 道木慎二 (名大) 鳥井昭宏 (愛工大) 元谷卓 (愛工大) 「センサ情報に基づく拡張現実を用いた遠隔操縦システム支援に関する研究—警告色を用いた操作性改善の検討—」、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 in Sapporo (Robomech2022 in Sapporo) 2022 年 6 月 1 日～6 月 4 日 (SORA 札幌コンベンションセンター) 1P1-C04,
- (2) 手嶋龍也 (愛工大) 道木加絵 (愛工大) 舟洞佑記 (名大) 道木慎二 (名大) 鳥井昭宏 (愛工大) 元谷卓 (愛工大) 「センサ情報に基づく拡張現実を用いた遠隔操縦システムに関する研究—警告色のグラデーション導入による操作性改善の検討—」、令和四年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 2022 年 8 月 29 日～8 月 30 日 (オ

ンライン開催) F1-5

- (3) 手嶋龍也 (愛工大) 道木加絵 (愛工大) 舟洞佑記 (名大) 道木慎二 (名大) 鳥井昭宏 (愛工大) 元谷卓 (愛工大) 「センサ情報に基づく拡張現実を用いた遠隔操縦システムに関する研究—警告色の導入とオブジェクトの揺らぎ抑制による操作性改善—」、2022 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 2022 年 8 月 31 日～9 月 3 日 (広島大学 東広島キャンパス) PS5-1

- (4) 手嶋龍也 (愛工大) 道木加絵 (愛工大) 舟洞佑記 (名大) 道木慎二 (名大) 鳥井昭宏 (愛工大) 元谷卓 (愛工大) 「センサ情報に基づく拡張現実を用いた遠隔操縦システムに関する研究—提示オブジェクトの透過率の変化による操縦への影響—」、令和 5 年電気学会全国大会 2023 年 3 月 15 日～3 月 17 日 (名古屋大学 東山キャンパス) 3-050

- (5) 東本航汰 (愛工大)、中條直也 (愛工大) 「未整備道路における自動運転のための路面障害物の識別」、第 20 回情報学ワークショップ、2022 年 12 月 17 日 (愛知工業大学 自由ヶ丘キャンパス) L-3-6

- (6) 福井皐河 (愛工大)、矢野良和 (愛工大) 「遠隔運転支援のための複数魚眼カメラによる全天球映像システムの構築」、第 28 回画像センシングシンポジウム講演資料集、2022 年 6 月 7 日～6 月 10 日 (パシフィコ横浜)、SO2-15
- (7) 福井皐河 (愛工大)、三浦唯広 (愛工大)、矢野良和 (愛工大)、「移動ロボットの遠隔操作のための全周囲映像合成と臨場感の提示」、令和 4 年度電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会、2022 年 8 月 29 日～8 月 30 日 (オンライン)、K2-1

- (8) 福井皐河 (愛工大)、矢野良和 (愛工大)、「e-Paper 上の可変格子状マーカの撮影による魚眼レンズ校正システムの構築」、第 53 回東海フェジィ研究会、2023 年 2 月 16 日～2 月 17 日 (日間賀島公民館)、P2-10

- (9) 小野田祐大 (愛工大)、福井皐河 (愛工大)、矢野良和 (愛工大)、「大型移動体の全周囲映像生成に用いるカメラ間パラメータ設計の基礎検討」、第 85 回情報処理学会全国大会、2023 年 3 月 2 日～3 月 4 日 (電気通信大学)、6R-03