
次世代輸送システム研究部門

2021年度活動サマリー・研究成果・業績リスト

次世代輸送システム研究部門

(部門長)

星野 祐 教授

(副部門長)

大島政英 教授

(部門研究員)

北村正司 教授

國行浩史 教授

雷 忠 教授

藤原大佑 助教

齊藤 茂 客員教授

佐藤大記 客員研究員

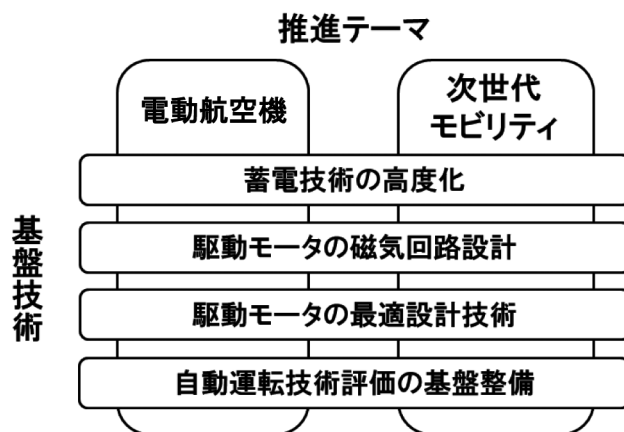
次世代輸送システム研究部門 活動サマリー

1. 背景・目的

世界的に自動車の電動化が進み、航空機電動化に関する研究開発が盛んに行われている。本学次世代輸送システム研究部門は、産業政策研究や製品開発を含めて積極的に産学官連携研究開発の活動に参加している。特に近年、航空機の環境問題対策として、航空機の電動化が注目されており、二酸化炭素 CO₂ の排出削減による環境負荷の低減を始め、燃費の改善、騒音の低下、制御系の電氣化による安全性の向上などの利点が期待できる。その実現には、機体設計、製造、インバーター、モータ、電池、材料の軽量化などの技術開発が求められる。一方、少子高齢化及び都市圏の人口集中を背景に、今後の社会における新たな移動手段として次世代モビリティの利用が検討され、各地で社会実装が試行されている。少子高齢化は国内外で深刻な問題であるため、優れた次世代モビリティを開発・実用化して生産拠点を形成できれば地域の製造業振興の一助になると考えられる。

そこで本部門ではメンバーが連携し、電動航空機と次世代モビリティの実用化を地域と連携して進めることを目的とする。また、蓄電技術の高度化、駆動モータの磁気回路設計・最適設計技術の開発、および自動運転技術評価などの基盤技術の整備も進める。

これらの研究開発の一部を学部学生の卒業研究や大学院修士課程の修士論文テーマとし、学生の積極的な研究活動への参加を進めている。



2. 2021 年度活動サマリー

推進テーマと基盤技術の両面から研究を進めた。

1) 電動航空機用主駆動用モータの電磁界解析と出力特性 (基盤技術)

昨年度に引き続き、回転子鉄心に埋め込む永久磁石やフラックスバリアの形状や配置に着目し、電動航空機用主駆動モータの磁気回路設計を行いパワー密度向上を目指した。

2) 電動航空機向け 100kW 級ハルバックアレイ回転子モータの多目的最適設計 (基盤技術)

2021年7月に採択されたNEDOプロジェクトに参加し、駆動モータにおける磁気回路の最適設計および熱-磁場連成解析を実施した。ハルバックアレイモータと呼ばれる回転子に永久磁石を使ったモータを対象として多目的最適化設計を実施し、得られたパレット解を考察し、設計指針を定めた。

3) 電動航空機技術の研究開発 (推進テーマ)

太陽光エネルギーを動力源とした無人航空機の研究開発を続けており、7号機の改良設計と流体・構造連携解析を行った。また、プロペラによる推進力と後流が機体に与える影響を数値シミュレーションで解析した。

未来空中交通手段としてエアモビリティに関する研究が盛んに行われて、特にeVTOL(電動垂直離着陸)航空機が注目されている。本学では機体システムに関する基礎研究と、推進モータの設計開発を行っている。2019年に採択された国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の先導研究プログラム「航空機向け高出力・高密度モータの技術開発」が7月に終了し、審査を受けた。本研究の成果が高く評価され、9月に採択されたNEDOプロジェクト「航空機用先進システム実用化プロジェクト/次世代電動推進システム研究開発/推進用電動機制御システムの研究開発」に、本部門が再委託先として継続され、委託先の企業と共同で研究開発を進めている。

また、本学では独自研究として物資搬送大型ドローンの研究開発に着手し、基本設計をほぼ完成した。産学官連携研究開発において、長野県の産学地帯、山小屋への物資搬送に利用されるドローンに技術支援に本研究の成果を活用すると考える。

4) 自動運転技術評価の基盤整備 (基盤技術)

自動運転技術評価の基盤整備を目的として、3テーマについて継続して検討した。

- (ア) 実車試験評価路の調査
- (イ) 自動運転模型車と試験コースの作成と走行評価
- (ウ) 自動運転化に向けたDSの改良と評価環境の整備

5) 次世代モビリティの実用化 (推進テーマ)

球乗型の問題点を解決した継手型電動車いすの開発を継続して進めており、姿勢の安定化制御に取り組んだ。その結果、下肢不自由者用電動車いすに人を搭乗させることができ、提案した継手型電動車いすの利用可能性を部分的に確認した。また、サスペンションの柔軟性を考慮した、4輪独立懸架式の継手型モビリティの姿勢安定化制御にも取り組み、シミュレーションでオブザーバを用いた出力フィードバック制御の有効性を確認した。

一方、ドローンによる物資吊り下げ搬送に取り組む県内企業との共同研究を進め、周波数整形法を応用した準最短時間制振位置決めを用いた物資の振れ止め制御に取り組んだ。高架軌道上のローバーをフライトコントローラで操作する初期実験を行い、提案制御手法の有用

性を確認した。

この他に、県内企業との技術指導契約を締結し、主にロボットマニピュレータの順運動学と逆運動学を講義し、企業の抱える課題の解決に取り組んだ。

6) 不整地軟弱地盤を移動するモビリティ (推進テーマ)

車輪型機構は多くのモビリティに採用され、その走破性に関する検討は重要である。車輪型モビリティは月や惑星、災害地などの不整地では滑り・沈下により走行悪化に至る。一方、見方を変えると、スタックした車輪は地盤から支持が得られる。本研究では、この地盤支持を有効に利用した尺取虫型の移動に取り組み、走行性能向上を目指した。特に、不整地における小型の車輪型モビリティの走行性能の検証に取り組んだ。

電動航空機用主駆動用モータの電磁界解析と出力特性

1. 背景・目的

引き続き、回転子鉄心に埋め込む永久磁石やフラックスバリアの形状や配置に着目し、電動航空機用主駆動モータの磁気回路設計を行いパワー密度向上を目指した。

2. 研究メンバー

大島 政英

3. 今年度の研究成果

3-1 回転子形状の提案

図1に今年度提案した電動航空機用主駆動モータの横断面図です。引き続き突極比 (L_q/L_d 、 L_d 、 L_q はそれぞれd軸、q軸インダクタンス)を増加してリラクタンストルクの増加を目指した。

ギャップ側空気層とロータ中心側空気層をV字型にすることによって、q軸磁束の磁路となる回転子鉄心領域を広くして L_q が増加しリラクタンストルクの増加を図った。

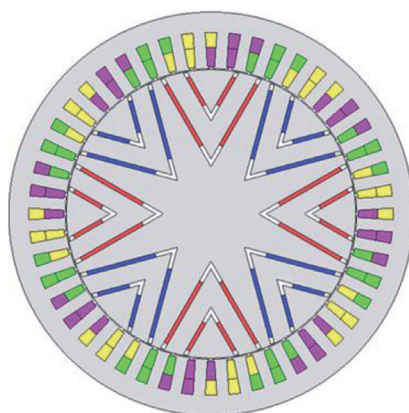


図1 今年度新たに提案したモータの横断面

3-2 有限要素解析による検証

今年度提案するモータの有限要素モデルを作成し、トルクを求めパワー密度を算出した。その際、永久磁石やフラックスバリアの分量やフラックスバリア内の永久磁石の位置を変えて、パワー密度が最大になるそれらの配置を明らかにする。

3-2-1 解析モデルと解析条件

表 1-3 に有限要素モデルの諸元と解析条件、各部の材質をそれぞれ示す。

表 1 提案したモータの有限要素モデルの諸元

	昨年度の構造	今年度の構造
軸長 [mm]	130	
ギャップ長 [mm]	0.5	
固定子のティース幅 [mm]	6	
固定子のヨーク厚 [mm]	10	
固定子の外径 [mm]	200	
固定子の内径 [mm]	144	
回転子外径 [mm]	143	
磁石の幅（ギャップ側） [mm]	2	
磁石の幅（ロータ中心側） [mm]	2	
磁石の厚み（ギャップ側） [mm]	17.5	16
磁石の厚み（ロータ中心側） [mm]	17.5	35

表 2 有限要素解析条件

巻線の線径 [mm]	0.6
巻線のターン数 [turns]	2
巻線の並列数 [本]	47
巻線の抵抗 [m Ω / 相]	16
占積率 [%]	67
電流密度 [A/mm ²]	23
定格電流 [A]	305
誘起電圧 [V]	201
インバータの定格電圧 [V]	354
回転速度 [r/min]	2,000
解析範囲 [deg]	0 から 90 まで 5 ずつ計 20 ステップ

表 3 モータ各部の材質

	材料	製造会社	型番
固定子、回転子鉄心	電磁鋼板	JFE スチール	35JN440
永久磁石	ネオジム焼結磁石	日立金属	NMX-S45SH
巻線	銅		

3-2-2 解析結果

図2に回転子磁極内側V字磁石の埋込位置 x (ギャップからの距離) を変えて有限要素法解析によりトルクを求め、パワー密度を計算した結果を示す。 $x=0-10\text{mm}$ ではパワー密度の変化は小さいが、 $x=15\text{mm}$ 、すなわち永久磁石が回転子中心に移動すると大きく増加した。

この理由を解明するために、 $x=0\text{mm}$ と 15mm のときの磁束分布を解析した。図3にその結果を示す。なお電流位相角は 45deg に設定した。図3より $x=0\text{mm}$ のときに比べ、 $x=15\text{mm}$ のときの方が内側V字磁石の内側鉄心部分やそれに面するギャップ付近の磁束線が多い。したがって、 $x=15\text{mm}$ の方のマグネットトルクが大きく、それにとまってパワー密度も大きい。

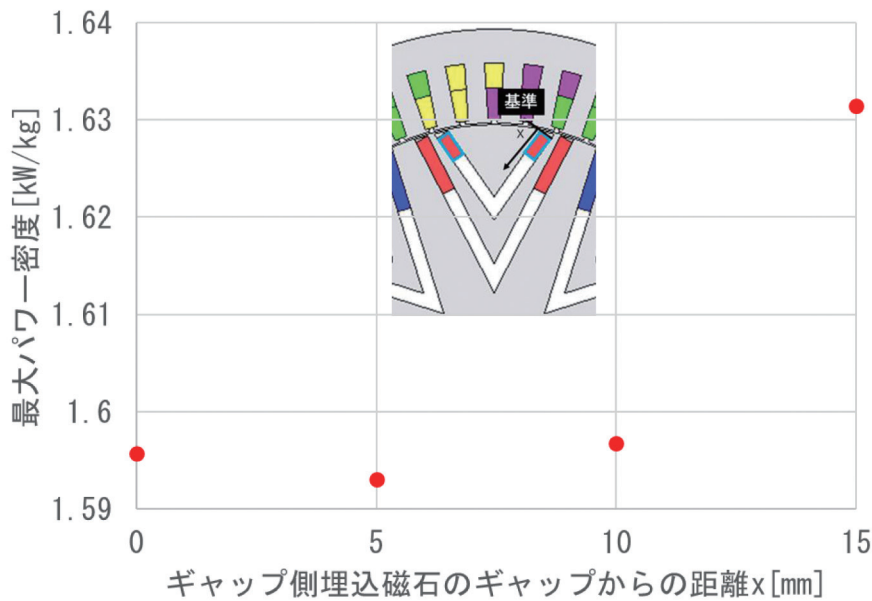
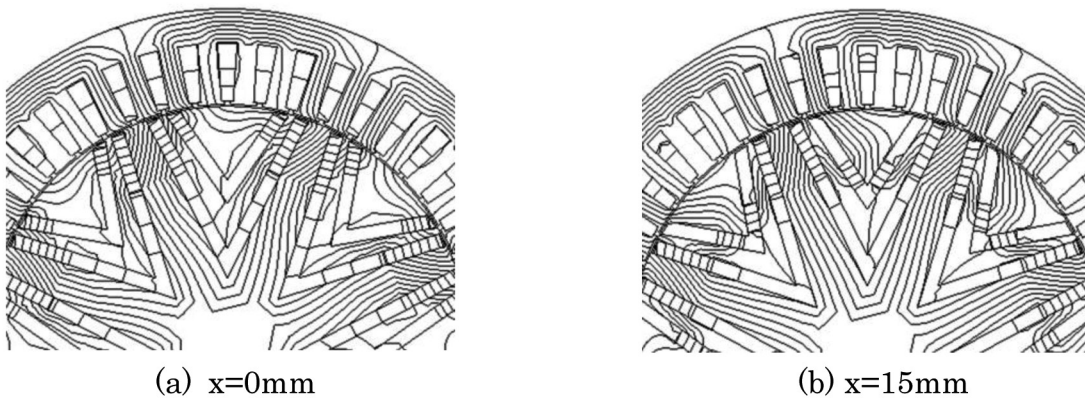


図2 内側V字磁石のギャップからの距離 x を変えたときのパワー密度



(a) $x=0\text{mm}$

(b) $x=15\text{mm}$

図3 内側V字磁石のギャップからの距離 x を変えたときの磁束分布
(電流位相角 45deg)

次に図4に回転子磁極外側V字磁石の埋込位置 y (ギャップからの距離) を変えて有限要素法解析によりトルクを求め、パワー密度を計算した結果を示す。図より y が増加、すな

わち永久磁石が回転子中心に近づくにつれてパワー密度は減少する。この理由を解明するため、 $y=0\text{mm}$ と 25mm のときの磁束分布を求めた。図5にその結果を示す。なお電流位相角は 50deg に設定した。図より $y=0\text{mm}$ 、すなわち永久磁石磁極の内外永久磁石が重なった場合、その相乗効果でギャップ磁束が多い。したがってトルクが大きくパワー密度も大きいと思われる。

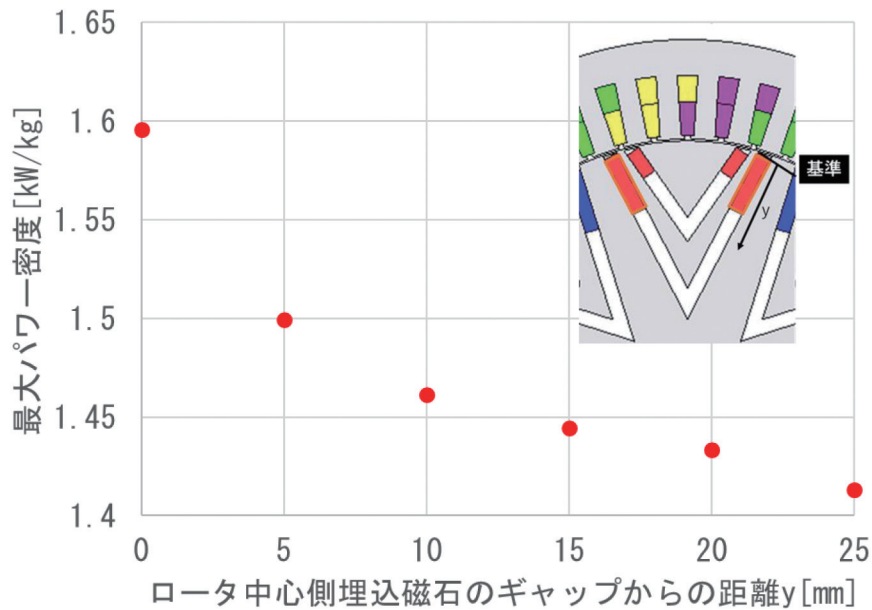


図4 外側V字磁石のギャップからの距離 y を変えたときのパワー密度

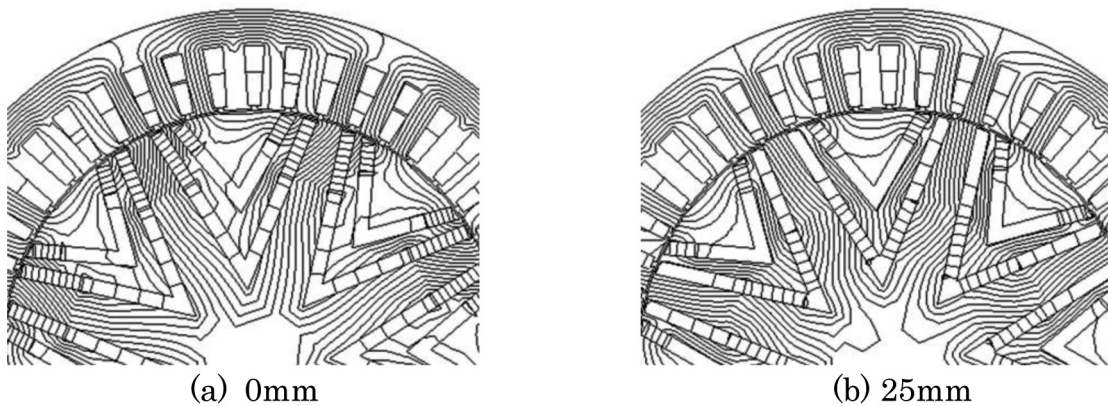


図5 外側V字磁石のギャップからの距離 y を変えたときの磁束分布
(電流位相角 50deg)

4. 今後の計画

2022年度

パワー密度を増加することができたものの、まだまだ、実用レベルには程遠いので、引き続き、ロータトポロジーについて検討を行っていく。磁気回路設計を行った後、概念設計から機械設計を含む詳細設計へ進める。

電動航空機向け級ハルバックアレイ回転子モータの多目的最適設計

1. 背景・目的

駆動モータにおける磁気回路の最適設計および熱-磁場連成解析を実施した。ハルバックアレイモータと呼ばれる回転子に永久磁石を使ったモータを対象として多目的最適化設計を実施し、得られたパレット解を考察し、設計指針を定めた。モータの体格と効率の間にはトレードオフの関係を勘案した上で、合理的かつ最適な設計解の集まりを求めた。

2. 研究メンバー

北村 正司

3. 今年度の研究成果

図1 (a) に示す目的関数の空間（横軸と縦軸がそれぞれ目的関数 $f_1(\bar{x})$ と $f_2(\bar{x})$ の値）を用いてパレット最適解を説明する。●用の集合がパレット最適解である。目的関数の数が2個の場合には、rbkによる単目的最適化を繰り返すことにより、パレット最適解の集まりを簡単に探索することが図1 (a) にパレット最適解の定義を示す。自分自身に優越する設計解が存在しない解をパレット最適解という。図1 (b) に今回考案した単目的最適化によるパレット最適解の探索方法を示す。この方法は、 f_1 - f_2 平面上においてパレット最適解を通り、設計解の集合と接する直線を考え、原点からこの直線までの距離を最小化することによって、当該パレット最適解を見つけ出すものである。多目的最適化ではパレット最適解の集まりを見つけ出すことがゴールになる。

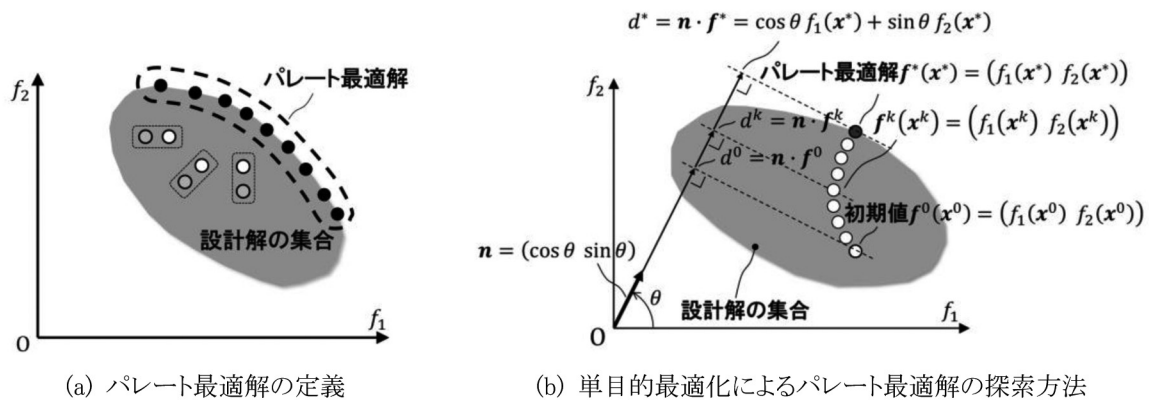
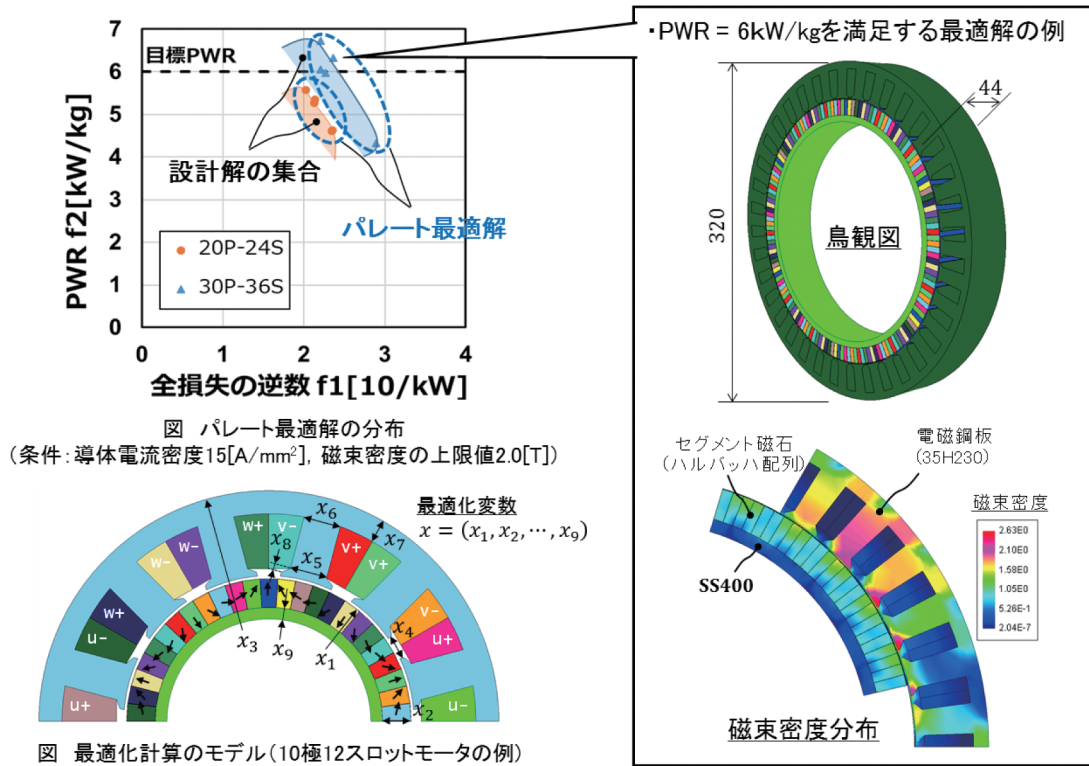


図1 目的関数が2つの単目的最適化によるパレット最適解の探索法

パレット最適解の集合（パレットフロント）の全体像を把握するためには、複数のパレット最適解を見つけ出す必要がある。これには図1に示した単目的最適化問題のパラメタ θ を適宜変更しながら、最適解を探索すればよい。図2はパレット最適解の探索結果である。意図通りにパレット解が求められた。



電動航空機技術の研究開発

1. 背景・目的

次世代エアモビリティは新興産業として巨大な経済効果が期待できるのみならず、空の利活用による交通渋滞回避のための市街地や離島間や山間部などでの移動利便性の向上や災害救助や物資輸送などが期待される。eVTOL 航空機に関して短・中距離移動、多頻度運航に空を利用するビジネスとして色々な事業モデルが考えられる。

次世代輸送システム部門においては産業界と連携して、電動航空機に関する研究を行っており、研究開発計画、機体設計、推進モータシステム、ソーラープレーン無人航空機などの研究開発を進めている。

2. 研究メンバー

雷 忠

3. 今年度の研究成果

(ア) ソーラープレーンの実用化

太陽光エネルギーを動力源とした無人航空機の研究開発を続けており、飛行性能を向上するため、機体設計の改良を行った。改良設計についてコンピュータシミュレーションを行い、飛行性能を確認した。本研究ではコンピュータシミュレーションを用いた数値解析ソフ

トウェアより、ソーラープレーン設計において消費電力の最小化や構造軽量化といった最適化を行う際に必要となる飛行性能計算と機体まわりの詳細な流れ場解析を行い、空力性能や流れ場のデータを取得し評価することを目的とした。

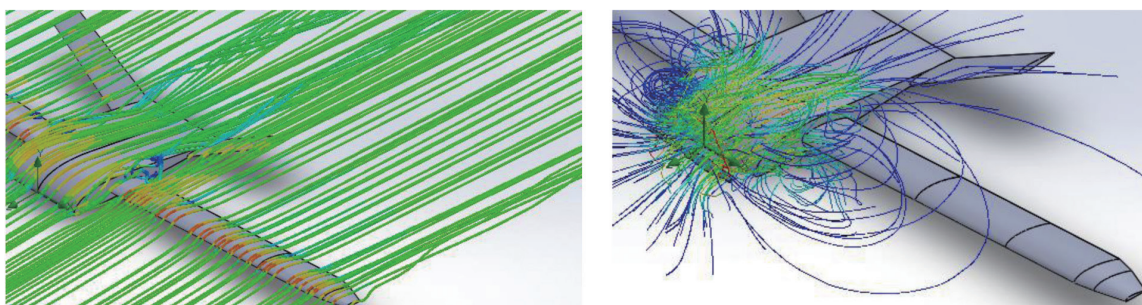


図1 改良したソーラープレーン7号機体のプロペラ推進解析

(イ) eVTOL (電動垂直離着陸) 航空機

本研究では現在注目されている eVTOL 航空機を調査し、回転翼機理論に基づいてホバリング時、上昇・下降時、巡航時における飛行性能の推算、評価を行い、eVTOL 航空機が特有する課題を取り上げることが目的とする。調査した各社が開発している機体について各性能を比較した。設定した目標飛行性能を満足するため、ロータ形状、モータ性能、バッテリー性能、主翼諸元、機体重量の内訳などについて考察し、主要パラメータによる影響を調査した。

本研究で開発した eVTOL 性能評価ツールは機体の研究開発を始め、耐空証明の取得、事業化調査などへの利用が考えられる。

(1) eVTOL 機体の設計

仕様策定、機体諸元設計、各フェーズ飛行性能の推算、システム構成の検討

(2) 耐空証明

航空規制にかかる条件の確認、事前評価

(3) ビジネスモデルの構築

技術実現の可能性予測、対象機体の選定、開発コスト推計、運航コスト試算、など

図2に飛行プロファイルを示す。垂直離陸から着陸まで、各フェーズにおいて飛行条件を設定し、飛行性能を推算した。本研究の計算手法を検証するために、米 Sikorsky 社の軍用ヘリコプター UH-60A (Black Hawk) を計算し結果を飛行試験データと比較した。図3にメインロータとテイルロータのパワー係数が前進率による変化を再現し、両者が良好に一致しており、本手法の妥当性を確認できた。

表1 eVTOL 航空機の分類及び本研究での調査対象 (赤字: 推算値)

分類	機体			
Wingless (Multicopter) 	 EHang 216 乗員: 2人 最大重量: 600kg モーター: 8kWx16組 バッテリー容量: 40kWh 最大航続距離: 15km 最大航続時間: 20min	 Volocopter, Volocity 乗員: 2人 最大重量: 900kg モーター: 8kWx18組 バッテリー容量: 74kWh 最大航続距離: 48km 最大航続時間: 45min	 Airbus, CityAirbus 乗員: 4人 最大重量: 2200kg モーター: 100kWx8組 バッテリー容量: 200kWh 最大航続距離: 53km 最大航続時間: 23min	
Vectored Thrust 	 Joby, S4 乗員: 5人 最大重量: 2177kg モーター: 120kWx6組 バッテリー容量: 166kWh 最大航続距離: 236km 最大航続時間: 69min	 Archer Aviation, Maker (100%) 乗員: 5人 最大重量: 3175kg モーター: 90kWx3+120kWx3組 バッテリー容量: 258kWh 最大航続距離: 287km 最大航続時間: 90min	 Vertical Aerospace, VX4 乗員: 5人 最大重量: 3175kg モーター: 120kWx4+160kWx4組 バッテリー容量: 260kWh 最大航続距離: 340km 最大航続時間: 90min	 Lilium Jet, 7-Seater 乗員: 7人 最大重量: 3175kg モーター: 120kWx36組 バッテリー容量: 306kWh 最大航続距離: 293km 最大航続時間: 69min
Lift & Cruise 	 Wisk, Cora (Gen 5#) 乗員: 2人 最大重量: 1270kg モーター: 40kWx12+200kWx1組 バッテリー容量: 88kWh 最大航続距離: 182km 最大航続時間: 72min	 Beta Technologies, Alia 250 乗員: 6人 最大重量: 3175kg モーター: 250kWx4+350kWx1組 バッテリー容量: 544kWh 最大航続距離: 267km 最大航続時間: 71min	 EVE, DreamMaker 乗員: 4人 最大重量: 998kg モーター: 30kWx8+80kWx2組 バッテリー容量: 36kWh 最大航続距離: 116km 最大航続時間: 53min	 Autoflight, VF1500M 乗員: 4人 最大重量: 1500kg モーター: 50kWx8+180kWx1組 バッテリー容量: 88kWh 最大航続距離: 252km 最大航続時間: 80min

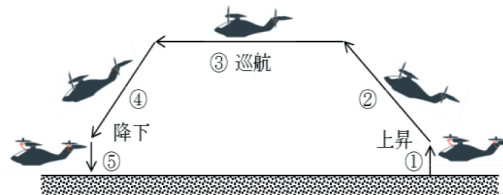


図2 飛行フェーズの模式

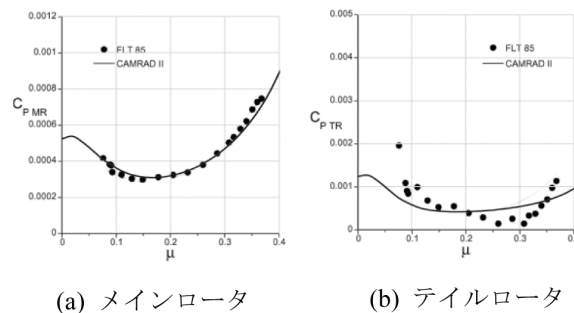


図3 $C_W = 0.0065$ におけるロータ出力の検証計算

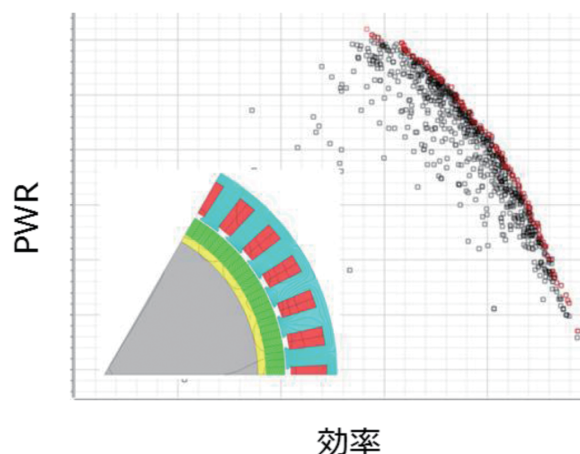
(ウ) 電動航空機推進モータの研究開発 (委託研究)

2021年9月に多摩川精機株式会社が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究プログラム「航空機用先進システム実用化プロジェクト/次世代電動推進システム研究開発/推進用電動機制御システムの研究開発」に採択された。本部門が再

委託先として本研究に参画し、これまで蓄積してきた航空機設計技術と電気推進技術を活かし、推進モータおよびコントローラに関する設計、実験を行っている。



(a) 米 Joby 社 eVTOL 航空機



(b) 駆動モータの多目的最適化設計

図 4 電動推進機体の検討対象

(エ) 産学官連携活動

県内企業との共同研究を実施しており、産学連携を積極的に推進している。本年度に伝熱機器や新型コロナウイルス感染対策などに関する研究開発を行った。

4. 今後の計画

NEDO プロジェクトにおいて、多摩川精機（株）に協力し、開発目標を達成するように研究を進めていく。また、電動航空機の研究に関して、企業、公的機関、地方団体、などと協力し、地域プロジェクトを支援しながら、実用化技術の研究開発を推進する。

自動運転技術評価の基盤整備

1. 背景・目的

自動運転技術評価の基盤整備を目的として、3テーマについて継続して検討した。

- ①実車試験評価路の調査
- ②自動運転模型車と試験コースの作成と走行評価
- ③自動運転化に向けた DS の改良と評価環境の整備

2. 研究メンバー

國行 浩史、橋本 幸二郎（部門外）

3. 今年度の研究成果

- ①羽田イノベーションシティで実施されている自動運転車の実証実験を調査した。会場施

設内を定期循環し、一般の人の施設内移動を行っている（図1）。清水建設が主導して立ち上げた。8人乗りの小型バスを事前に構築している走行経路の地図と前後に組み込まれたLiderセンサーで障害物を検知して走行する（図2）。現時点ではオペレータ1名が乗車し、運転開始を指示していた。同乗調査中に他の駐車車両が急に移動するシーンに対しても検知してバスは一時停止する行動は取れていたが、その後システムがフェール状態となり、復帰に時間が掛かることがあった。自動運転レベルとしてはまだ開発途上レベルと考える。なお、走行速度は30km/h程度であるが、敷地内道路を活用した実証実験の簡易コースとしては十分であると考えられる。校内を周回できる評価コース構築も一つの選択肢と考える。引き続き、環境整備案について検討を進めていく。



図1. 自動運転実証実験 羽田イノベーションシティ

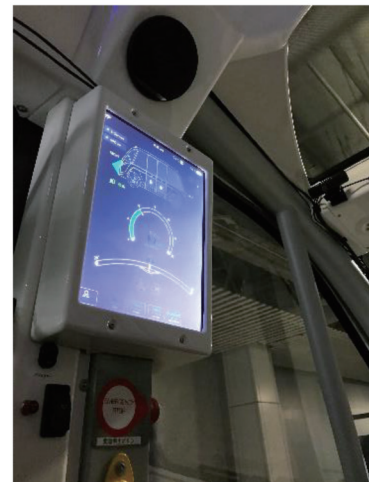
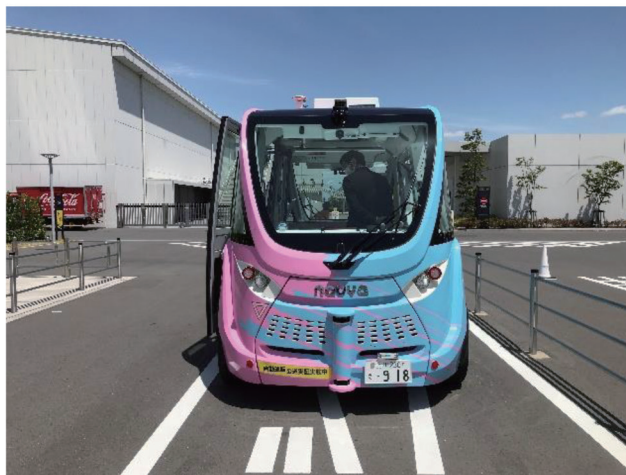


図2. 自動運転用のセンサーおよび室内表示装置

②前年度に引き続き、「小型のPC（NVIDIA製 JetsonNano）を組み込んだ市販自動運転の模型車 JetBot（GClue製：図3）を用いて、前方カメラによる障害物、道路検知（白線内の識別）を機械学習させ評価実験を行った。前年度の周回路評価コースから、今年度は、約3m × 2mの片側一車線の交差点評価コースを設定し（図4）、出会い頭での衝突となる事故リスクシーンを設定し、車両挙動の評価を行った。その結果、回避した車両の死角を走行す

別の車両を検知できずに衝突する事故シナリオを抽出することができた（図5）。本模型による実験手法が想定しにくい自動運転車の事故シナリオ抽出に本手法は有効であり、今後、自動運転時の事故リスク評価の一助として活用できることがわかった。今後さらなる評価シナリオを検討していく。



図 3. JetBot

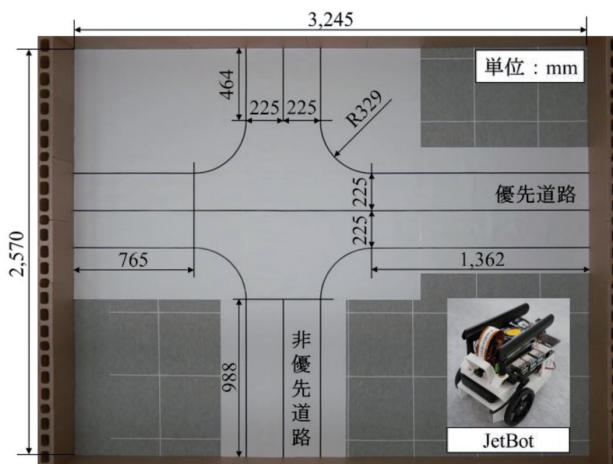
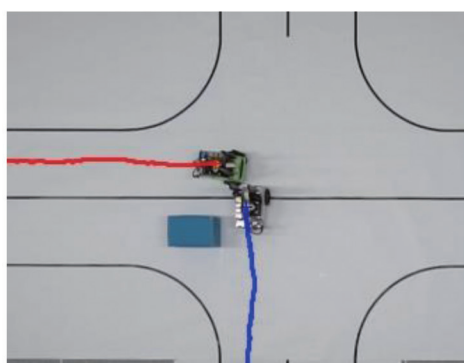
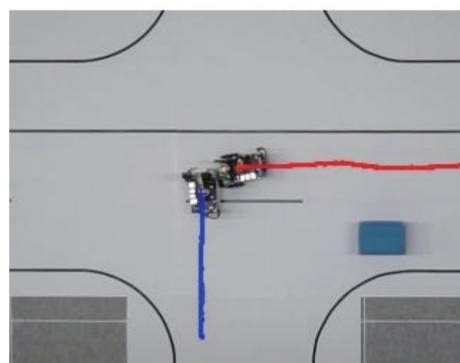


図 4. 模型実験の交差点評価コース



(a) 後方回避時の死角



(b) 前方回避時の死角

図 5. 死角による想定しにくい事故シナリオの再現

③自動運転時の運転行動等を分析、評価するためのベースとなる実車に近いドライビングシミュレータ（以下、DS）の構築ができた。DSの視野角を拡大するために、曲面有機ELモニターを用いて約180度の視野角を持つモニター装置を組み込んだ（図6）。また、実車に近いステアリング操舵特性およびブレーキ反力特性を設定するために、DSのソフトウェアと連動した反力モーターを組み込み、チューニングを行った。

今年度は、自動運転から手動運転に切り替えが必要となる場合の事故リスクの影響を分析するために、車両追い越しのシーンの構築を行い、権限移譲後の運転行動への影響を調査した（図7）。その結果、障害物追越し前の運転集中度が低下していると障害物の認知が遅れ、車線変更が遅れ、障害物追越し後の自車線に戻る際、運転集中度が低く回避余裕度が低い時は、大きな角度で回避操作を行い、過剰な運転操作が発生する懸念があることがわかった（図8）。自動運転車の進化過程では自動運転と手動運転の切り替えが求められることが考えられ

るため、引き続きより複雑なシーンを想定して、切り替え時の運転特性および事故リスクへの影響を調査していく。

併せて、既存事故パターン調査（戦略的イノベーション創造プログラム:SIPにて実施）を用いて、平成28年に発生した事故を分類した。死者数の多いパターンを抽出し、自動運転車においても残存すると考えられる交通事故とその真因を組み合わせ、9パターンの危険なシーンを構築した。それぞれに対して事故シナリオデータベースを作成した（図9）。今後の自動運転車の事故シーンの設定として活用していく。なお、本活動は、第9回学生プログラミングワールドカップ（フォーラムエイト主催）にて海外30校参加の中からノミネート賞として8校に選ばれた。



図6. 実車型広視界DS



図7. 自動運転からの手動運転後の車両追い越しシーンの評価

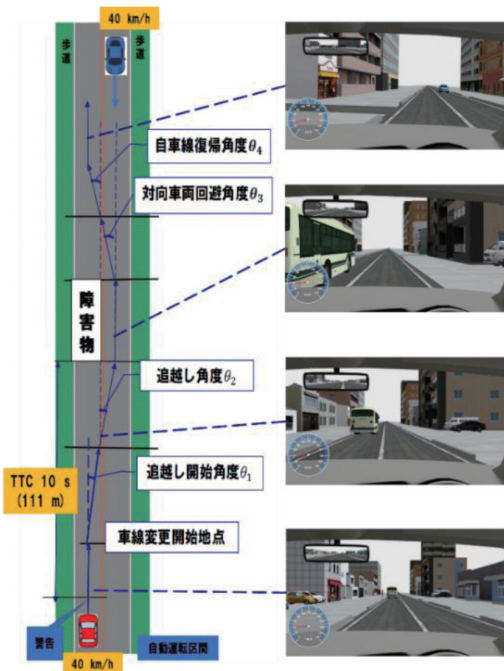


図8. 実験評価コース



図9. 構築した危険なシーン
(第9回学生プログラミングワールドカップ)

4. 次年度以降の計画

次年度は、引き続き模型実験車を用いた自動運転時の事故リスクシーンを拡大し、評価・検討を進める。また、これまで構築したDSのさらなる改良、特に自動運転時を想定シーンの拡充や5Gを活用した遠隔操作に対しての自動運転評価の事故リスクへの影響を調査できるように機器等の改良、評価手法の構築を図っていく。

継手型電動車いすの開発（姿勢安定化制御）

1. 背景・目的

昨年度に引き続き、継手型電動車いすの開発を進め、特に姿勢の安定化制御を実現した。車体と車台が一つの自在継手で接続された構造であり、従来の静力学的に安定な車いすと比べて動力学的安定性に優れる反面、車体の姿勢安定化が必須である。

2. 研究メンバー

星野祐、及び星野研究室卒業研究生

3. 今年度の研究成果

3-1 制御系の実装

図1が提案する継手型電動車椅子であり、全方向車輪（メカナムホイール）で駆動される車台に、車体が自在継手一つで接続されている。停車時は前後のスタンドが下がって設置し、車体を静力学的安定に保つ。走行時はスタンドが上がり、車台が動いて車体を安定化する。

車いすのハードウェアは一部の電装系を除いて完成していたが、本年度は電装を終了し、制御系をコントローラに実装することで、車体の姿勢安定化実験の実施が可能となった。

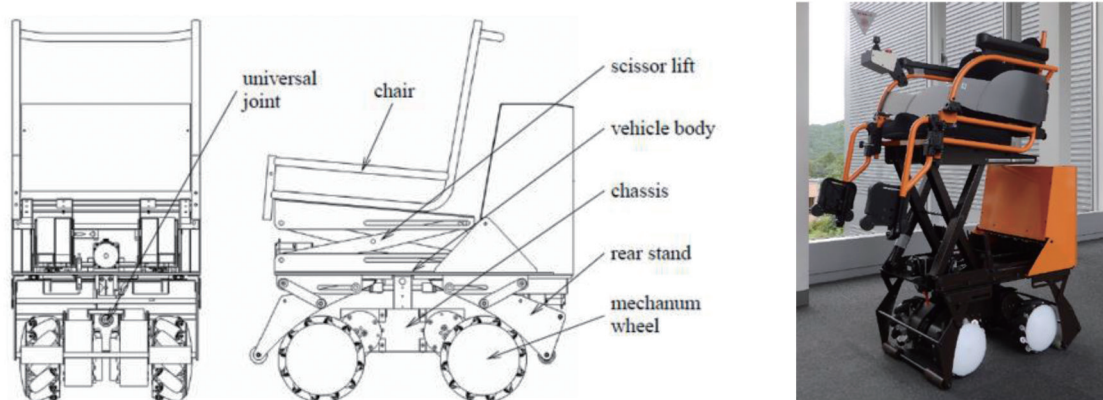


図1. 全方向移動継手型電動車いす

3-2 制御系の構成と安定化制御の結果

図2に制御系の構成を示す。IMUで検出された車体の姿勢と全方向車輪の回転数に基づいて、車輪の駆動トルクを決定する。駆動トルクは継手型電動車いすの動力学モデルに基づ

いて設計された状態フィードバックにより計算される。図3に安定化制御の実験結果を示す。車輪が路面に対して滑ることがあり、完全な安定化には至っていないが、制御系の基本的な機能である車体の安定化は確認できた。

また、人が搭乗した安定化制御も実施し、その場合でも車体が安定化されること、及び、搭乗者の重心移動によって車両をどの方向にも進められることが確認された。

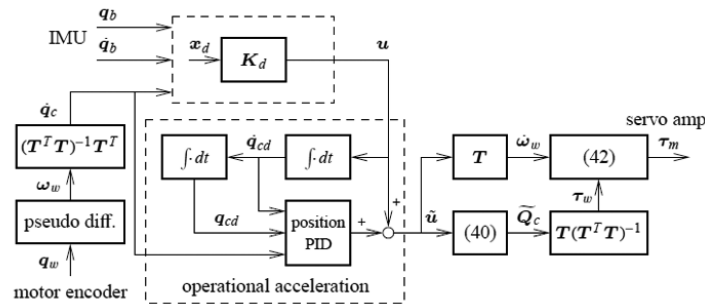


図2. 制御系の構成

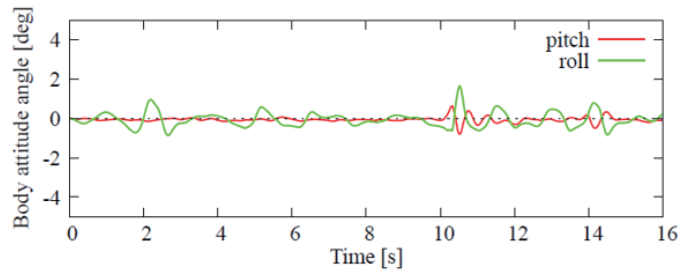


図3. 継手型電動車いすの姿勢安定化制御の実験結果

4. 次年度以降の計画

引き続き継手型電動車いすの安定化制御に取り組み、特に、車輪の懸架装置の動特性を考慮した制御系の開発に取り組みたい。また、人が搭乗した場合の安全性が確認でき次第、AIを活用した走行環境認識などの運転支援システムを搭載する予定である。

4 輪独立懸架式継手型モビリティの開発（姿勢安定化制御）

1. 背景・目的

昨年度に引き続き、4 輪独立懸架式継手型モビリティの開発を進めた。特に姿勢の安定化が実現されておらず、懸架装置の柔軟性を考慮した制御系を構築し、姿勢安定化の可否を検討する。

2. 研究メンバー

星野 祐、及び星野研究室卒業研究生

3. 今年度の研究成果

3-1 車体の柔軟モードの確認

図4が提案する継手型電動車椅子であり、全方向車輪（メカナムホイール）で駆動される車台に、車体が自在継手一つで接続されている。特に、街乗りを目指し、様々な路面状況に対応することを考慮して、4輪独立懸架装置を備えている。

車いすのハードウェアは完成していたが、制御系設計の際に懸架装置の柔軟性を考慮しておらず、姿勢の安定化ができていなかった。今年度は車体の矢状面及び冠状面内モデルを導出し、車体の柔軟モードを求めた（表1）。その結果、矢状面内の運動に比べて冠状面内の運動の固有振動数が著しく小さく、これが剛体モードを仮定した制御系による姿勢の安定化を妨げていることが示唆された。したがって、制御器の設計に冠状面内の柔軟モードを考慮することとした。

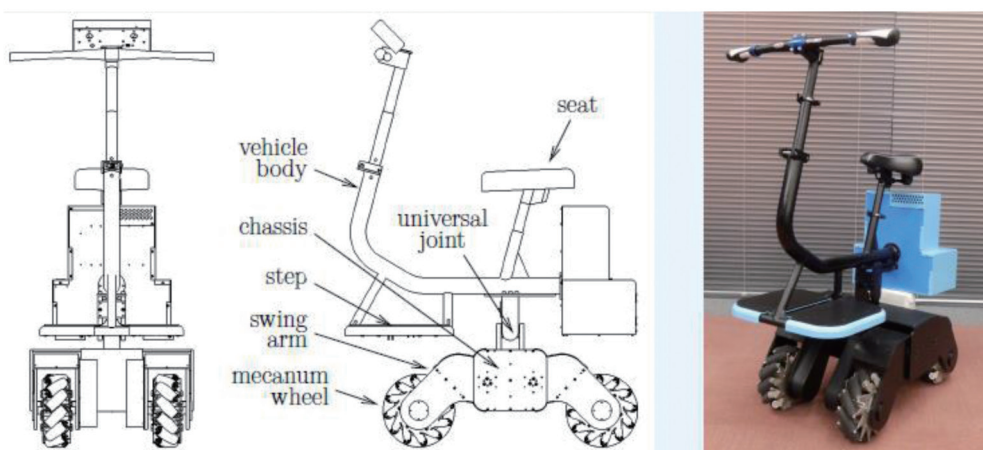


図4. 4輪独立懸架式継手型モビリティ

表1. 矢状面及び冠状面内の運動モード

Table Characteristic modes in sagittal plane			
#	Eigenvalue		Eigenvector $v^T = [x_p, z_p, \beta_b, \beta_c]$
	λ	f [Hz]	
1	0	-	[1, 0, 0, 0]
2	8.74×10^3	1.49×10^1	[0.094, 0, -0.128, 0.987]
3	-1.41×10^1	-	[-0.037, 0, 0.999, -0.001]
4	9.28×10^2	4.84×10^0	[0, 1, 0, 0]

Table Characteristic modes in coronal plane			
#	Eigenvalue		Eigenvector $v^T = [y_p, z_p, \gamma_b, \gamma_c]$
	λ	f [Hz]	
1	0	-	[1, 0, 0, 0]
2	7.31×10^2	4.30×10^0	[-0.177, 0, -0.375, 0.910]
3	-2.33×10^1	-	[0.038, 0, 0.999, -0.007]
4	9.28×10^2	4.84×10^0	[0, 1, 0, 0]

3-2 姿勢の安定化制御

車両の非線形モデルを導出して車両のシミュレータを構築した。また、そのモデルを線形近似し、そこから車台のロール角を考慮した部分システムを取り出して制御系設計用モデルとした。図5に制御シミュレーションの結果を示す。姿勢の安定化が確認された。

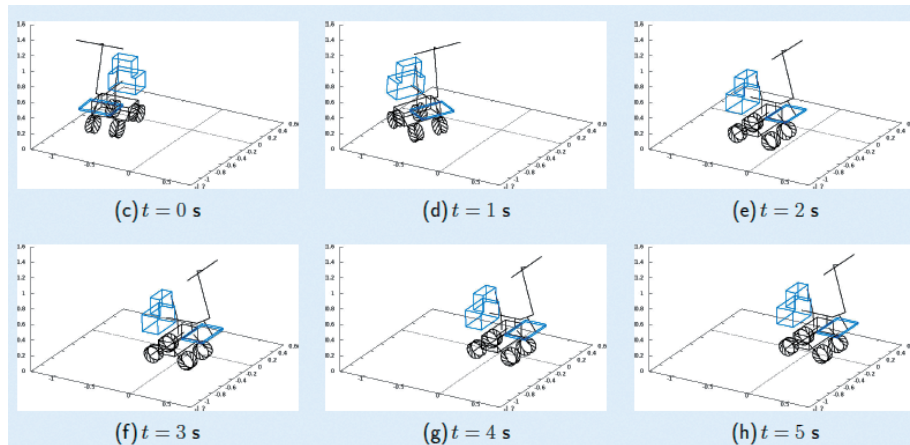


図5. 懸架装置の柔軟性を考慮した制御系による車両の安定化シミュレーション

4. 次年度以降の計画

引き続き4輪独立懸架式継手型モビリティの安定化制御に取り組む。特に車台の姿勢角を実測せず、状態観測器を用いた場合の安定化の可否を確認し、実車での安定化制御に取り組む予定である。

不整地軟弱地盤を移動するモビリティ

1. 背景・目的

車輪型機構は多くのモビリティに採用される。一方、月や惑星、災害地などの不整地では滑り・沈下により走行悪化に至る。見方を変えると、スタックした車輪は地盤から支持が得られない。本研究では、この地盤支持を有効に利用した尺取虫型の移動に着目している。一方の車輪を地盤に対して支持させ、他方を移動していくことにより、車輪型モビリティの走行性能の向上を目指している。

2. 研究メンバ

藤原 大佑

3. 今年度の研究成果

- 小型テストベッドの走行性能を検証し、尺取虫型移動により走行性能が向上することが把握できた。

一般的に小型の車輪型モビリティは地盤から得られる駆動力が減少するため、軟弱地盤上で走行性能が劣る。尺取虫移動をすることで、不整地上でその走行性能がどのように変化するか、各種車輪形状にて検証を行った。使用する小型のテストベッドは(図1)に示す筐体である。また、車輪径、幅は80 mm、25 mmとして、円形車輪、突起を登載した各車輪(ラグ付き車輪)を製作した(図2)。各車輪を付けた状態で軟弱地盤斜面上(図3)で走行性能テストを行った。

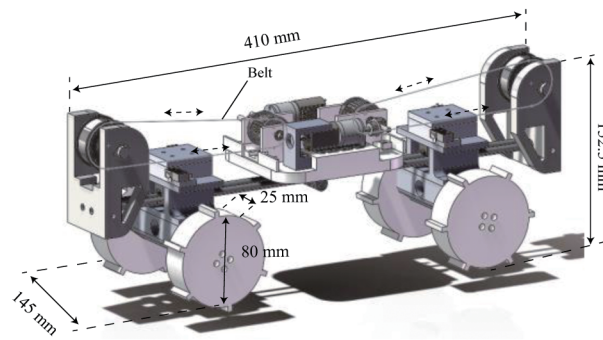


Fig.1 Small Push-Pull Locomotion testbed

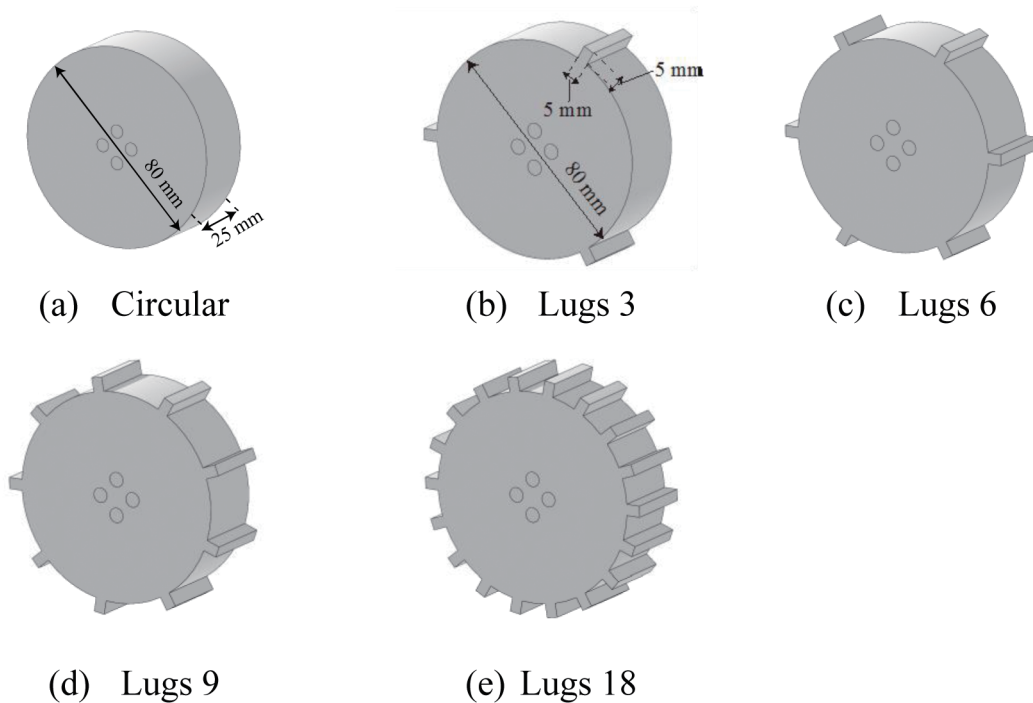


Fig.2 Wheel

移動量はモーションキャプチャで測定した。測定した移動量から平面の移動距離に対する各斜度での移動距離の割合:スリップ率(Slip ratio)を算出した。結果を図3, 4に示す。スリップ率は値が高いほど軟弱地盤上で滑っていることを示す。結果より、通常走行では斜度が上がるにつれて、スリップ率が上昇し走行性能が悪化している。一方、尺取虫型移動 (Inching locomotion) ではスリップ率の低下がみられ、走行性能が向上していることがわかる。また、車輪形状としては突起を登載したラグ付き車輪が円形車輪と比較してスリップ率を抑えた。一方、突起の数の差は走行性能に対して顕著な影響は与えなかった。

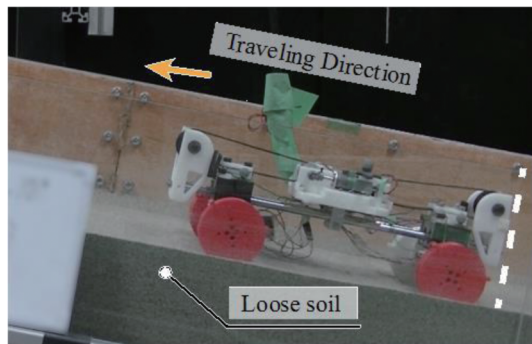
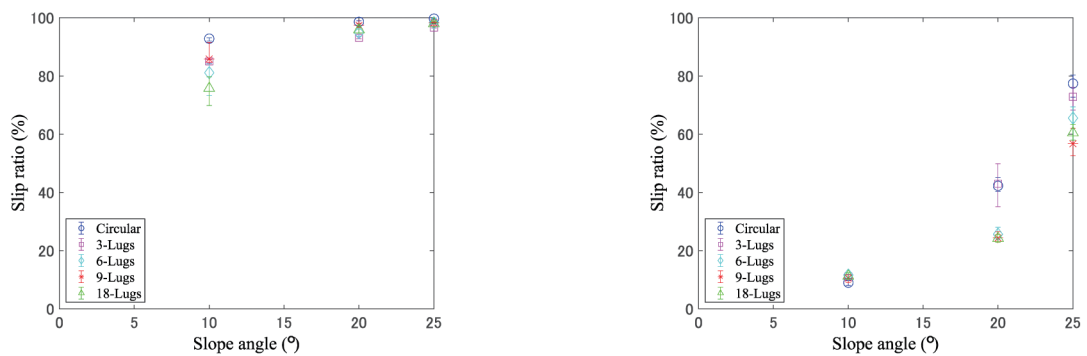


Fig.3 Experimental condition



(a) Normal traveling

(b) Inching locomotion traveling

Fig.4 Experimental results

4. 今後の計画

近年、リスク分散の観点から小型群ロボットによる不整地走行が着目されている。今回、尺取虫型の移動は小型モビリティにおいても走行性能の向上ができることが把握できた。今後は、伸縮ユニットをモジュールロボット化し、複数台の協調により尺取虫型移動することを検討している。群ロボットによる不整地上での移動の有効性を検討していく。

次世代輸送システム研究部門 研究業績リスト

査読付き論文

- [1] Shota Imai, Koki Kamiya, Kakeru Manabe, Hiroshi Kuniyuki, Construction of Hazard Map for Traffic Accidents in Hilly and Mountainous Area Using 3D Measurement for Road Alignment, International Journal of Automotive Engineering, Vol.12, No.3, pp.101-107, 2021. (2021年10月発表)
- [2] Fujiwara Daisuke., Tsujikawa Naoki., Oshima Tetsuya. and Iizuka, Kojiro., Analysis of a resistance force for the locked-wheel of push-pull locomotion rovers using large subsidence, Journal of Terramechanics, Vol. 94, pp. 1-12, 2021.

□頭発表

- [1] 田中晟椰、立木一成、内田悠介、山下明矩、牧田匡史、國行浩史、実車型広視界ドライビングシミュレータを用いた道路線形による交通事故リスク評価、自動車技術会春季学術講演会予稿集、2022. (2022年5月発表予定)
- [2] 星野 祐、丹羽真吾、中野 涼、鎌倉 大、四輪独立懸架式継手型モビリティの提案と姿勢安定化制御、ロボティクス・メカトロニクス講演会、1P3-H14、2020. (2021年6月発表)
- [3] 星野 祐、松木幾日、上田敦史、非減衰振動系の準最短時間制振位置決め制御、Dynamics and Design Conference 2021、137、2021. (2021年9月発表)
- [4] 藤原大佑、太田夏波、飯塚浩二郎、車輪沈下を利用した小型・軽量 Push-Pull Locomotion ローバの走行性能の実験的検証、ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集、2A1-B16、2021. (2021年6月発表)
- [5] 菅龍彦、大許翔代、稲葉康平、藤原大佑、飯塚浩二郎、Push Pull Locomotion を有する月・惑星探査ローバの車輪沈下による斜面横断性能の検討、ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集、2A1-B05、2021. (2021年6月発表)

講演

- [1] 福嶺裕斗、雷忠、回転翼機理論を用いた eVTOL 飛行性能に関する簡易推算、日本航空宇宙学会第59回飛行機シンポジウム、2021年11月30日-12月2日
- [2] 川辺泰智、雷忠、超音速ビジネスジェット概念設計に関する検討、日本航空宇宙学会第59回飛行機シンポジウム、2021年11月30日-12月2日
- [3] 星野 祐、動力学的安定性を有するパーソナルモビリティの開発、産学官交流会 in 松本 2021、長野県テクノ財団、2021年9月21日
- [4] 星野 祐、次世代交通に向けたパーソナルモビリティの開発、第242回リレー講演会、AREC Fii プラザ、2022年2月17日

特許

- [1] 星野 祐、全方向移動装置及びその姿勢制御方法、特許第 6951611 号、2021 年 9 月 29 日
- [2] Tasuku Hoshino, Omnidirectional Moving Device and Attitude control Method for the Same, US 11,157,020 B2, Oct. 26, 2021
- [3] 星野 祐、全方向移動装置以及其姿勢制御方法、CN 109414956 B、2022 年 1 月 11 日
- [4] 星野 祐、全向移動装置及其姿勢制御方法、CN 110709316 B、2021 年 9 月 7 日

受賞

- [1] 受賞者：田中晟椰、立木一成、内田悠介（國行研究室）
受賞名：第 9 回学生プログラミングワールドカップ ノミネート賞
受賞題目：Development of Traffic Accident Scenarios Database for Autonomous Driving Accidents
受賞内容：株式会社フォーラムエイトが主催した第 9 回学生プログラミングワールドカップにおいて、機械電気工学科國行研究室から参加した学生チーム（チーム名：Let's go go DS !!!）がノミネート賞を受賞した。自動運転から手動運転への切り替え時に考えられる事故シナリオをデータベース化し、自動運転車の事故リスク評価を効率よく容易にできる手法を開発したことが評価された。
受賞日：2021 年 11 月 18 日

企業連携

- [1] 星野 祐、藤原大佑、企業との共同研究契約「ドローンによる物資吊り下げ搬送時の振動制御」、2021 年 10 月 1 日から 2022 年 3 月 31 日まで
- [2] 星野 祐、企業との技術指導契約「多関節アームの逆運動解析の公知文献による技術指導」、2021 年 10 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日まで
- [3] 星野 祐、企業との技術指導契約「7 軸直動パラレルリンクロボットの運動学解析に関する技術指導」、2021 年 4 月 26 日から 2021 年 10 月 31 日まで

外部資金獲得

- [1] 雷忠、北村正司、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究プログラム「航空機用先進システム実用化プロジェクト／次世代電動推進システム研究開発／推進用電動機制御システムの研究開発」、再委託研究（2021 年 9 月～2024 年 2 月）
- [2] 雷忠、消毒液に関する新しい製造法の開発及び消毒除菌効果の確認実験、2021 年 2 月～2021 年 7 月
- [3] 藤原大佑、車輪の沈下を有効に利用したロボット群の協調による不整地軟弱走行の実現、日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究 2021 年 4 月 - 2024 年 3 月