

研究報告

No.35
— 2024 —



国立大学法人 室蘭工業大学

MONOづくりみらい共創機構

— 目 次 —

【令和6年度 プレ共同研究成果】

- (1) インフラ構造物補修作業用ロボット技術の開発 1
水上 雅人, 川村 宗範, 望月 章志
- (2) 衛星宇宙実験に向けたゾウリムシ培養・可視化条件の検討 3
鹿毛 あずさ, 洞口 竜輝, 竹内 佑介, 上野 宗一郎
- (3) AI を活用した超音波溶着条件の推定 6
渡邊 真也, 宮田 勝
- (4) スラブ付鉄筋コンクリート梁の有効幅に関する解析的研究 9
高瀬 裕也, 坂本 啓太, 安部 隆英
- (5) 低融点個体ロケットの加速度中性能評価 11
中田 大将, 島谷 一生, 安達 直人
- (6) 人体追従型空調ロボットの開発 15
梶原 秀一, 福家 英晃

インフラ構造物補修作業用ロボット技術の開発

水上雅人*¹, 川村宗範*², 望月章志*²

- 1 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域
- 2 NTT 株式会社 先端集積デバイス研究所

1. はじめに

近年、日本国内にあるインフラ設備の急速な老朽化が問題⁽¹⁾となり、少子高齢化に伴い、点検作業を担う技術者不足が社会課題⁽²⁾となっている。特に近年、道路陥没による設備損傷、事故等が多発しており、大きな社会問題となっている。

これらの課題解決に向けて、ロボットによる作業自動化が求められ、まず損傷・劣化点検の自動化にロボットを適用する試みは種々なされている^(3,4)が、点検した後に抽出される損傷・劣化を如何にロボットにより自動補修するかについては、検討が至っていないのが現状である。橋梁、道路、管路などは人手が入れない場所に設置されることが多く、補修作業も現状では人手で行っているため、社会課題の解決に向けては、点検～劣化判別～補修～評価までを一気通貫で実施できるロボットの開発が必要と考えられる。

本プレ共同研究では、上記の課題解決に資する、将来のインフラ構造物補修作業用ロボットの開発を目標として、外部研究動向の調査及び要求仕様の整理、補修作業に必要なロボット動作の洗い出しを目的とした。本報告では、通信インフラ及び精密・情報機器関連学会で外部動向調査を実施し、補修のターゲットや要求仕様を調査し、ニーズを分析した結果及び移動ロボットの外部インタラクションに必要なアクチュエータ適用時の課題洗い出しを行った結果を述べる。

2. 外部動向調査

補修自動化技術に関し、ニーズ、要求仕様等を把握するため、精密機械、ロボット、情報通信を対象とする国内学会及びこれら技術に関わる展示会を主に調査対象とし、研究開発の動向調査を行った。調査した主な学会等を以下に示す。

<学会調査>

機械学会年次大会
精密工学会大会
ロボット学会
電子情報通信学会大会
自動制御連合講演会
日本機械学会知能・情報・精密機器部門講演会
日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会

調査結果からは、工事作業自動化例、また屋内の工場での自動化事例はあったものの、点検～補修までを一気通貫で検討した自動化例は見当たらなかった。

補修自動化研究がまだ多くない理由としては、以下のことが推察される。

- ・ロボットによる点検自動化がまだ十分に普及、浸透していない
- ・「補修は人手で」がまだ主流である。作業が複雑、設備対象によって、必要な項目が違い、一品ものになる可能性があり、そのため自動化システムの高コスト化を嫌う傾向がある。
- ・ロボット自体の研究としては、要素技術主体の研究段階である。自己位置推定、マニピュレーション、AI・機械学習など。複合作業を有するシステムインテグレーションは研究発表例としては少なく（おそらく開発なので、企業では権利が主体となる）

そこで、要素技術である点検技術、計測技術、自己位置推定などに範囲を広げてまとめることとした。

各学会での研究例の整理として、表1に技術分野ごとに整理し、まとめたものを示す。

表1 各学会での研究例

施工自動化	3DMAP作成とVRに基づく施工自動化	バックホウ・クローラダンプと複数3D LiDARによる土砂の掘削・積載・運搬・放土作業の自動化
	3Dプリンタによる構造物制作を移動ロボット利用	造形物上を自走するスクリー型モルタル敷き均し積層ロボット
	除草作業の自動化	道路脇の除草のための自律除草ロボット
	遠隔ロボットによるボルト外し作業の自動化	画像認識を用いたロボットの遠隔操作支援によるボルト外し
	自動浴槽掃除ロボット	テザー牽引とプロペラ推進の協調によって移動する 浴槽掃除ロボットの開発
	草刈りロボット	遠隔からの操作を想定した草刈りロボットの基礎検証
	建設機械の自動化	バケットのポジション移動の半自動化
	ロボットによるレーザー照射	ガラスプレスハンドリングに向けたレーザー照射点追尾法による精度検討
	左官作業の自動化	コンクリート施工時における仕上げタイミングの定量的決定法
	位置補正	スポット溶接作業ロボットにおける検査ブロープの位置補正
自動化要素	破砕作業の制御	外乱状態オブザーバを用いたロボットマニピュレータの反力推定
	屋内塗装作業ロボットにおけるハンド位置の制御	複数ボスの凝集性に応じたロボット塗装制御戦略
	ハンド部分の高精度位置決め	基準マーカを用いたマニピュレータの遠隔操作における高精度位置決め
	マーカを用いた溶接作業ハンドの位置決め(屋内)	溶接作業の自動化に向けたマーカベースの位置推定と協働ロボットへのティーチング手法
	橋梁の塗装膜厚検査自動化シミュレーション	不安定な橋梁作業現場におけるヒューマノイドロボットの膜厚検査動作シミュレーション
	ワイヤロープ表面の損傷検出	ワイヤロープ表面の損傷を検知するアコースティック・エミッションセンシング
	橋梁振動波形分析	橋梁振動波形の分析による交通量把握
	AE法による健全度マッピング	AE法を用いた床版内部健全度マッピングとモーダル時刻解析による波源分布予測
	形状計測	RTK-GNSSを用いた構造物形状のモデル化と利活用
	アーム制御法	キクラゲの収獲自動化に向けた強化学習によるロボットアームの制御方法
点検自動化	赤外線カメラを搭載した壁面移動ロボット	コンクリート欠陥検査が可能な壁面移動ロボット
	移動ロボットによるセンシング	ミリ波レーダ搭載AGVによる非接触所持品検査のための信号強度分布に基づいた金属物の検出
	ドローン自動巡回点検	水力発電所の低照度環境でのドローン自動巡回点検技術
	危険箇所検知システム	マンホールモビリティにおける危険箇所検知システム
	橋梁たわみ検出	計測対象上から得られる画像を活用した橋梁のたわみ計測
	測位	BIMと連携した維持管理用ロボットの測位と制御
自己位置推定	打音検査自動化	鉄筋コンクリート打音検査のオートエンコーダによる自動化
	マッチングに基づく写真測量へDLを適用	深層学習による画像マッチングに基づく写真測量
	圃場の3DMAP化	犬型ロボットによる圃場の3次元化とセンサ融合
	3次元位置推定:ステレオカメラ	二回走査型クラスタリング手法を用いたステレオ画像の領域 ベース対応付けによる3次元位置推定手法
	点群データが欠落した場合の対応手法	MaskNetを用いた3次元点群の形状復元
	データ欠損への対応	Kriging法を用いた3次元環境地図の構成
	特徴量が乏しいLiDAR SLAM	特徴点の乏しい環境における仮想点群を用いたSLAM
	構造物特徴を利用した位置推定	室内環境における建築物構造特徴線を利用した自己位置推定精度向上法の検討
	暗闇かつ霧が発生する環境	LiDAR SLAMを用いた 暗闇・霧・非GNSS環境下における自己位置推定
	船舶の自己位置推定	3次元地図データを用いた自動離着岸に向けた船舶事故位置推定
鉄筋自動配置	鉄筋自動配置システムのための2D-LiDarを用いた測距精度評価	
距離推定	屋外静止環境におけるLEDバライイトとイベントカメラを用いた距離推定	

2. 補修自動化技術の研究の方向性

補修自動化技術に関して、「点検」、「補修」、「評価」作業を同一のロボットで実行するシステムインテグレーションでは現場実証が重要となるが、この部分の研究例は少なく、先駆けとしてはいいターゲットなのではと考えられる。中でも重要な要素技術となる劣化認識技術、ロボットによる作業自動のために必須となる自己位置推定技術、3DMAP 作成技術が研究テーマとしては考えられる。そこで、以下の技術をまずは大学にて掘り下げていく方向があると考えた。

- ・カメラ画像・LiDAR 点群などを取得し、構造物の材質、状態を認識し、状態判別する機械学習技術
- ・床面、壁面など、構造物の状態が不定形なものに対して、エンドエフェクタ部分の3次元位置を高精度に測定・位置決めする制御方式検討

4. おわりに

インフラ構造物補修作業用ロボットの開発を目標として、外部研究動向の調査及び要求仕様の整理、補作業に必要なロボット動作の洗い出しを行った。

屋内工場等での作業自動化例はあったものの、屋外での検討例は見当たらなかった。屋外建設作業では、土木学会等でもロボットの導入が研究され始めているが、筆者の専門外であり、調査には至っていない。また、現場で求められるニーズがまだ具体的には整理、分析が進んでいないことから、どの分野、領域で両社の得意とする技術を持ち寄っての共同研究が成立するかについては、今後の検討課題である。

文献

- (1) 国土交通省, 日本の社会資本整備を取り巻く環境の特徴, 国土交通省 HP, <<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/infra/>> (accessed on 26 May, 2025)
- (2) 国土交通省, 人口問題研究所, 我が国の経済社会と人口減少, 国土交通白書 (2024), pp.5-7
- (3) 松浦亜美, 水上雅人, 花島直彦, 藤平祥孝, 細径管路内走行のための移動ロボット脚駆動機構の小型化検討, 精密工学会誌, 89 巻, 11 号, pp.839-843, 2023
- (4) 水上雅人, 安田晃雄, 蝦名徳一, 小坂井琢也, 望月章志, 舗装下埋設インフラ構造物自動探査用移動ロボットの二次元位置・姿勢推定精度評価実験系の構築, 日本ロボット学会誌, 43 巻, 10 号, pp.47-54, 2025

衛星宇宙実験に向けたゾウリムシ培養・可視化条件の検討

鹿毛あずさ^{*1}, 洞口竜輝^{*2}, 竹内佑介^{*3}, 上野宗一郎^{*3}

- 1 室蘭工業大学大学院工学研究科 しくみ解明系領域
- 2 室蘭工業大学理工学部システム理化学科 化学生物システムコース
- 3 株式会社 IDDK

1. はじめに

地球上の生物は常に重力の影響下にある。重力は地球生命に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

遊泳単細胞生物であるゾウリムシ属 (*Paramecium*) は、2種を共培養できるものとできないものがあることが報告されている(1, 2)。ゾウリムシは行動上、重力に応答することが知られており(3, 4)、共培養できる・できないは重力応答の種による違いによる可能性がある。この仮説を検証するため、人工衛星の狭小スペースを用いて複数種のゾウリムシの長期培養および遊泳の可視化を行う宇宙実験を目指し、条件検討を行った。

2. 熱耐性試験

通常、地上では微生物を一定温度で培養するが、人工衛星は激しい温度変化にさらされる。衛星実験において、機器周辺をどの程度の温度に保つことが望ましいか明らかにするため、ゾウリムシの熱耐性を検証した。

実験にはサーマルサイクラー (Mastercycler Nexus Gradient, Eppendorf) と 0.2 mL の 8 連 PCR チューブ (FG-028FC, 日本ジェネティクス) を用いた。各チューブに 0.1 mL の *Paramecium bursaria* HA1g 株 (山口大学ナショナルバイオリソースプロジェクトゾウリムシ研究室提供; 20°C, レタスジュース培地で *Klebsiella aerogenes* ATCC35028 と共培養) を入れ、サーマルサイクラーの勾配モードで加熱した。「40.3~59.7°C, 1分」「35.1~44.9°C, 10分」「33.1~42.9°C, 30分」の3条件で加熱し、加熱終了直後に実体顕微鏡 (室温) 下で観察し、動いている細胞数をカウントした。ゾウリムシは通常の状態では遊泳するため、動い

ている個体を生きているとみなし、動いている個体が一部でもいた最高の温度を「耐えられた温度」とした。表1に結果を要約し、耐えられた温度を※で示す。

表1 ゾウリムシ加熱時間と耐えられた温度 (※)

加熱時間	温度	死亡個体数/全個体数
1分	44.9°C※	3/31
1分	47.5°C	19/19
10分	40.0°C	3/19
10分	41.2°C※	10/12
30分	33.6°C	0/26
30分	36.8°C※	10/13

加熱時間 10 分と 30 分では耐えられた温度 (それぞれ 41.2°C, 36.8°C) でも死亡個体の割合が高く、生きていた個体の運動にも異常が観察された。生物サンプルへのダメージを防ぐという観点から、それぞれより低い温度であり、死亡個体や運動の異常が少なかった 40.0°C (10 分), 33.6°C (30 分) を曝露温度の上限として採用することが妥当であると考えられた。

3. 培養容器の開発

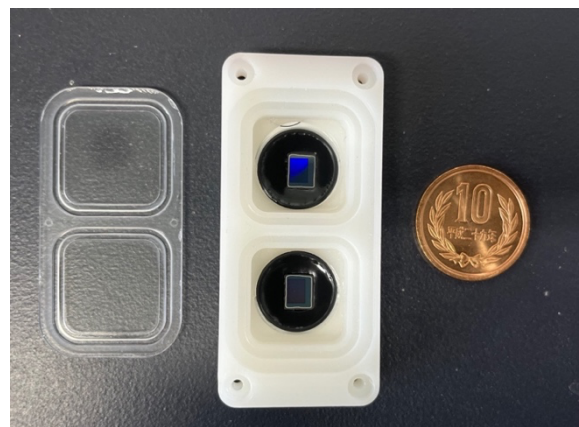


図1 マイクロイメージングデバイスを組み込んだ培養容器

宇宙実験に供するため、ゾウリムシを可視化して遊泳を観察することが可能なマイクロイメージングデバイス (MID) を組み込んだ培養容器の開発を行った (図 1)。現在、この容器を用いたゾウリムシの培養条件・可視化条件の検討を行っている。

4. 画像取得条件の検討

MID を用い、白色 LED、赤外 LED (ピーク波長 850 nm) を照明として用いて画像取得した代表例を図 2 に示す。2 節と同様の条件により、*Paramecium caudatum* My43c3d 株、*Paramecium bursaria* Dd1g 株 (いずれも山口大学ナショナルバイオリソースプロジェクトゾウリムシ研究室提供) を培養し、各 50 μ L、合計 100 μ L の培養液を MID 素子上に滴下して撮像を行った。ただし、*P. caudatum* の培養温度は 25°C とした。*P. bursaria* の概日リズムへの影響を考慮し、宇宙実験では赤外 LED を用いた画像取得を計画しているが、赤外 LED を用いて問題なく画像取得することができた (図 2B)。

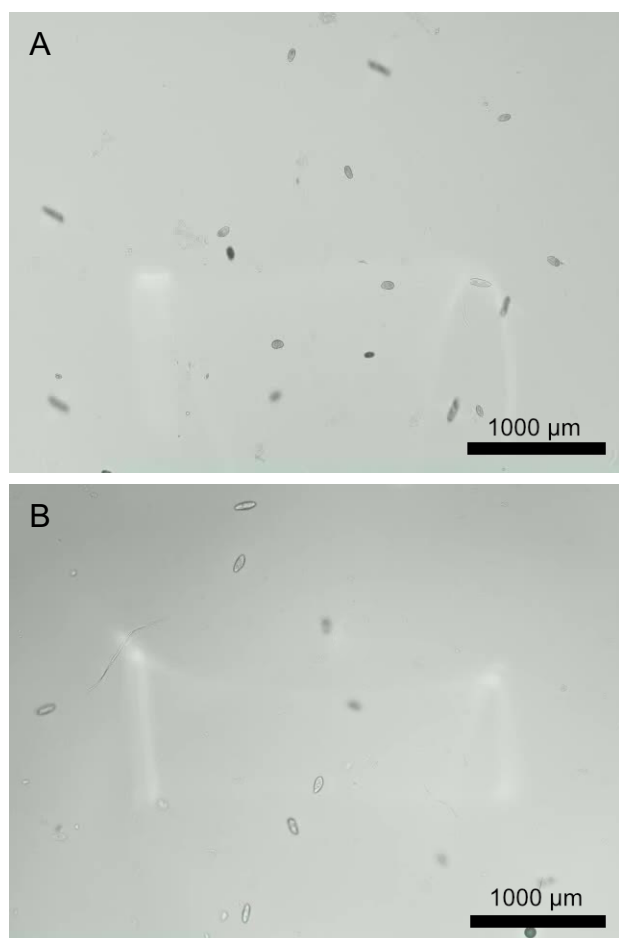


図 2 MID を用いた画像取得の代表例。
(A) 白色 LED, (B) 赤外 LED を光源とした。

MID を用いた動画撮影の主な結果を表 2 に示す。人工衛星からのデータ受信の都合上、動画は 5.8 MB より小さいサイズにする必要がある。実験本番では 1 回につき 300 秒の記録を予定しているため、画質を VGA または HD に設定し、fps を 3~5 に設定することが望ましいと考えられる。ただし、餌バクテリア由来のバイオフィームが背景ノイズとなり、画像サイズが増大している可能性が示唆されたため、今後はバイオフィームの影響を評価する必要がある。

遊泳のトラッキングについては現在検証中であるが、やはりバイオフィームが妨げになる可能性が示唆されている。

表 2 MID を用いた動画撮影の主な結果。
サイズの赤字は 5.8 MB を超過したものを示す。

ID	画質	fps	時間 (s)	サイズ (MB)	照明
91	VGA	3	300	7.0	白色光
92	VGA	3	300	6.2	白色光
94	Full HD	3	300	14.2	白色光
95	Full HD	3	60	2.3	白色光
96	VGA	3	60	0.2	白色光
97	VGA	3	300	1.1	白色光
98	VGA	3	300	1.2	白色光
99	Full HD	3	300	11.5	白色光
100	VGA	5	300	1.5	白色光
101	VGA	10	300	2.5	白色光
102	VGA	5	60	0.6	白色光
103	VGA	5	300	2.8	白色光
104	VGA	3	300	4.4	白色光
105	VGA	3	300	3.8	白色光
106	VGA	3	300	4.2	白色光
107	VGA	3	300	4.2	白色光
108	Full HD	5	300	40.3	白色光
109	VGA	3	300	3.2	白色光
110	VGA	3	300	2.9	白色光
125	HD	3	300	3.7	赤外光
129	HD	3	300	3.9	赤外光
130	HD	3	300	3.4	赤外光
131	HD	3	300	2.8	赤外光
132	HD	3	300	3.1	赤外光
133	HD	3	300	2.0	赤外光

4. おわりに

本プレ共同研究では、人工衛星を用いた宇宙実験に向けたゾウリムシの培養条件・可視化条件の検討を行った。

本研究の遂行にあたり、材料のゾウリムシを提供いただいた山口大学共同獣医学部ナショナルバイオリソースプロジェクトゾウリムシ研究室に感謝申し上げます。

る.

文献

- (1) G.F. Gause, “The struggle for existence”, Baltimore: The Williams & Wilkins Company (1934).
- (2) G.F. Gause, “Vérifications expérimentales de la théorie mathématique de la lutte pour la vie”, Paris : Hermann (1935).
- (3) H.S. Jennings, “Behavior of the lower organisms”, New York: Columbia University Press (1906).
- (4) R. Hemmersbach, R. Voonmanns, D.-P. Häder, “Graviresponses in *Paramecium biaurelia* under different accelerations: Studies on the ground and in space”, *J. Exp. Biol.*, 199, 2199–2205 (1996).

AI を活用した超音波溶着条件の推定

渡邊 真也*1, 宮田 勝*2

- 1 室蘭工業大学 しくみ解明系領域
- 2 精電舎電子工業株式会社 室蘭事務所 所長

1. はじめに

共同研究企業である精電舎電子工業（株）では、超音波の「音波」、高周波の「電波」、レーザの「光波」を利用した各種溶着溶断装置を販売している。その中の超音波溶着では、各案件に対して設定圧や保持時間といった8つのパラメータを適切に設定する必要があり、現在は熟練の経験者が経験と勘に頼って設定している。

そこで、本研究では設定のための負担軽減を目的としたAIを活用したパラメータ推奨値を自動で算出することを最終目標に、その検討のための調査研究を行った。

以下、超音波溶着における設定パラメータについて説明したうえで、調査研究として行った入力と出力パラメータの分析結果について述べる。

2. 超音波溶着における設定パラメータについて

超音波溶着において、熟練者が長年の「経験と勘」で行ってきた条件設定をAIによって自動化・最適化するため、開発目標である予測システムにおける入出力パラメータについて説明する。

本研究におけるパラメータ推定の構造は、大きく分けて「製品情報」と「設定パラメータ」が入力となり、溶着の結果としての「出力値（計測値）」を推定する形となる。

製品情報には材質や溶着面積、断面形状など具体的な案件要求により定まるパラメータがあり、これらは固定となる条件である。一方、超音波溶着機側で設定するパラメータが、現在熟練者がワークの状態に合わせて調整している変数であり、これらのパラメータ値推定が本研究の目標となる。これらパラメータの具体的な項目を以下に示す。

- 設定圧 (MPa) : ワークを押し潰すための圧力
- 保持時間 (sec) : 超音波発振停止後、樹脂が安定して固まるまで圧力を加え続ける時間
- 溶着沈み込み (mm) : 超音波発振中にプレスが押し込まれ、樹脂が溶けて沈み込む量

- 溶着エネルギー (J) : 溶着に費やされた総電力量であり、樹脂を溶かすために投入されたエネルギー
- トリガー荷重 (N) : 超音波の発振を開始する際の負荷しきい値
- 接触荷重 (N) : ホーンがワークに接触した瞬間に発生する荷重（衝撃度）
- 溶着時間 (sec) : 実際に超音波を発振させている時間
- 振幅 (%) : ホーンの振幅であり、摩擦発熱量に直結する極めて重要な値

これらを入力した結果として得られる出力パラメータは、溶着が成功したか否かを示す「溶着結果 (OK/NG)」と、溶着プロセス中に装置が計測した「計測データ」である。

計測データには、発振中を含めたトータルの沈み込み量である「総沈み込み」や、発振停止後の「保持沈み込み」、さらに溶着中に記録された「ピークパワー」や「最大荷重」などが含まれる。

AIはこれらの複雑な入出力関係を学習することで、最適な設定値の導出を最終目標とする。

3. 過去データを活用したパラメータ分析

前章で述べた案件要求により決定する製品情報と超音波溶着機側で設定するパラメータの関係について、過去の溶着実績データを用いて分析を行った。

以下、分析により得られた知見について項目に分けて示す。

3.1 パラメータ間の相関分析

特定のデータセットを用いた入出力関係に対する相関行列による分析を行ったところ、図1に示すような特定のパラメータ間に極めて強い相関が確認された。最も顕著なのは「溶着沈み込み（入力）」と「溶着沈み込み（出力）」の関係であり、相関係数1.00という完全な一致を見せた。また、「溶着沈み込み」と「ピークパワー」の間には0.86という強い正の相関が認め

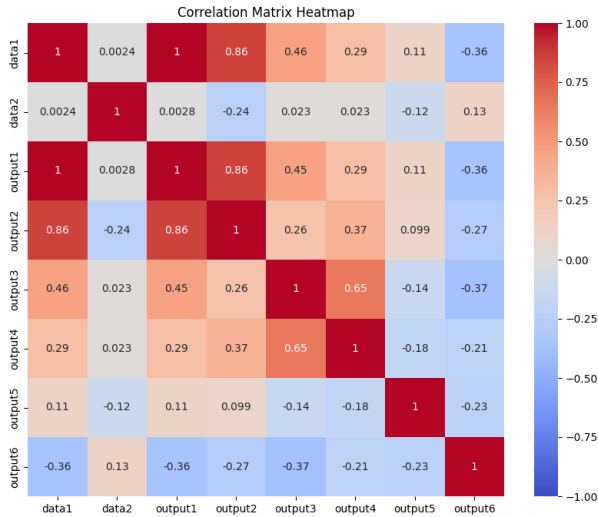


図1：溶着条件と出力データの相関

られ、沈み込み量を増やす設定にすると、それに伴って必要となる最大電力（ピークパワー）も増大することが定量的に示された。

さらに、「溶着エネルギー」と「設定圧」の間にも0.65の相関が確認されており、加圧力の設定が消費エネルギー量に影響を及ぼす構造が明らかになった。

3.2 制御方式による溶着特性の差異

溶着の制御方式には、主に「時間制御」と「沈み込み制御」が存在するが、図2、図3に示すようにこれらによってパラメータの寄与度が大きく異なることが判明した。

時間制御においては、あらかじめ設定された発振時

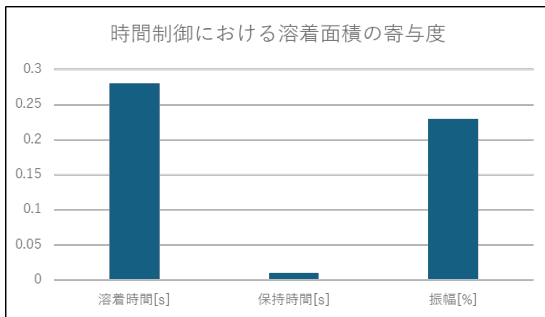


図2：時間制御における溶着面積の寄与度

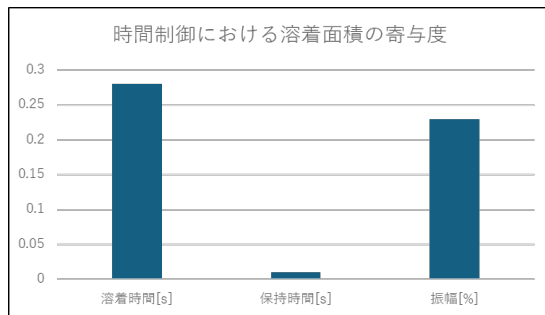


図3：時間制御における溶着面積の寄与度

間が経過するまで超音波を加え続けるため、溶着面積の変化が溶着条件に与える影響は比較的小さい。対して、沈み込み制御においては、指定の沈み込み量に達するまで発振を継続するため、溶着面積の大きさが溶着時間や必要なエネルギー量に大きく直結する。このため、AIモデルを構築する際には、採用されている制御方式ごとに学習データを整理することが不可欠である。

3.3 製品属性（色・素材）が与える影響

物理的な設定値以外に、製品の視覚的・化学的属性も溶着結果を左右する要因として浮上した。例えば、製品の色によって熱の吸収率や溶けやすさが異なり、「黒色は溶けやすく、青色や白色は溶けにくい」という傾向が示唆された。また、素材に関しても、単に「ポリアミド (PA)」と一括りにするのではなく、PA6とPA66といった細かなグレードの違いが溶着特性に差異を生むため、分析の精度を上げるにはこれらの材料情報をより厳密に区分して管理する必要があることが指摘された。

3.4 推奨値導出の試行と精度の検証

線形回帰モデルを用いて、過去データからトリガー荷重や溶着沈み込みの推奨値を導出する試みも行った。一部の分析では、得られた推奨値が入力値の平均値とほぼ同等になるという結果が得られたが、これはデータセットの分布が偏っている場合や、モデルが十分に特徴を捉えきれていない可能性を示唆している。

また、溶着結果が「Alarm (異常)」となっている不適切なデータを分析に含めると、正確な相関が得られないことも実証されており、AI学習の前段階における「データの整形・クレンジング」の重要性が改めて浮き彫りとなった。

4. おわりに

本研究では、超音波溶着機におけるパラメータの自動推定を行うための調査研究として、関連するパラメータの入出力の関係について様々な角度から分析を行った。

分析を通じて、製品情報と設定パラメータが計測値（出力）にどのように影響するかという問題構造が整理された。主な成果として、「溶着沈み込み」と「ピークパワー」の間に強い相関があることや、制御方式（時間・沈み込み）の違いによって溶着面積の影響度が劇的に変わること、さらには製品の色や材料グレードといった微細な属性が溶着結果を左右することが明らかとなった。

一方、今後の課題として、以下の問題点が明らかとなった。

- データの質の向上: 「Alarm」データを除去し、溶着結果が成功（OK）しているデータの中でも特に安定しているものを抽出する必要がある
- 材料情報の詳細化: PA6/PA66 の区別や、単一素材か複合素材かといった詳細な情報をデータセットに組み込むことが必要
- 外部環境要因の特定: 気温や湿度、装置の個体差など、現在のデータセットには含まれていない外部変数が溶着結果に与える影響の検討
- 推定アルゴリズムの最適化: 線形回帰やランダムフォレスト以外の機械学習手法も試行・検討

スラブ付鉄筋コンクリート梁の有効幅に関する解析的研究

高瀬裕也*¹, 坂本啓太*², 阿部隆英*²

- 1 室蘭工業大学 もの創造系領域
- 2 飛鳥建設株式会社 技術研究所

1. はじめに

一般に鉄筋コンクリート（以下、RC）造建築物の梁には、スラブが接続するため T 型断面となる。この梁から張り出したスラブ領域は協力幅（協力幅と梁幅を合計したものが有効幅となる）と呼ばれる。著者らは、この協力幅領域を活用した、新たな耐震工法を検討しており、本プレ共同研究において、協力幅の影響を評価可能な解析モデルを構築して、モデルの実験値への適合性について検証した。また、近年の RC 造建築物では、重量を軽くするために、スラブ内部を空洞化したボイドスラブの採用が主流となっている。しかしながら、協力幅に関する研究は散見¹⁾されるが、ボイドスラブが協力幅に及ぼす影響については検証例がほとんどない。そこで本研究では、通常スラブとボイドスラブが接続する RC 梁の力学挙動を再現可能な解析モデルを構築し、ボイドスラブが協力幅に及ぼす影響を検証しつつ、その応力場を評価することを目的とする。

2. 解析対象とする実験の概要

図-1 に解析対象とする試験体の形状を示す。試験体は、およそ 1/2.5 スケールとしたスラブ付 RC 梁である。梁の断面サイズは、210 mm×300 mm であり、通常スラブとボイドスラブをそれぞれ伴う 2 体の試験体を解析する。現行の設計基準³⁾では、慣用的に梁端から 1 m までのスラブを協力幅と見做されることから、試験体縮尺を考慮し、スラブ長さを 400 mm とした。スラブ厚さは 120 mm であり、ボイドを形成するため、実際の建設工事を模擬し、112 mm×95 mm×55 mm の発砲スチロール 8 個を、D6 の抑え筋を使用して型枠内部に固定して、コンクリートを打設した。

図-2 に加力方法を示す。梁に作用する自重の影響を排除するため、梁を鉛直に起こした状態で加力するこ

ととし、加力には 500 kN のアクチュエータを使用した。加力軸の高さに、容量 100 mm の高感度変位計を設置し水平変位を計測した。部材変形角 R は、この水平変位の値を加力高さ 900 mm で除すことで算出される。

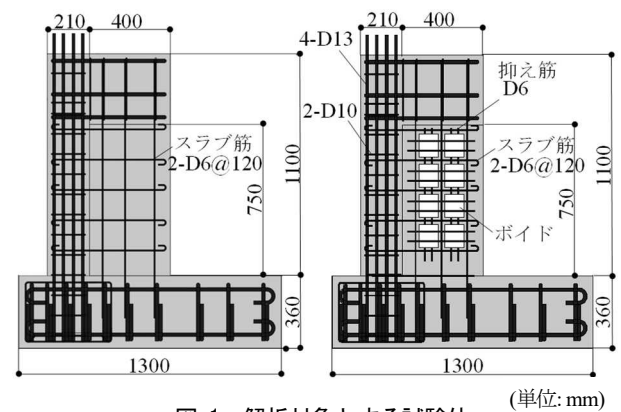


図-1 解析対象とする試験体 (単位: mm)

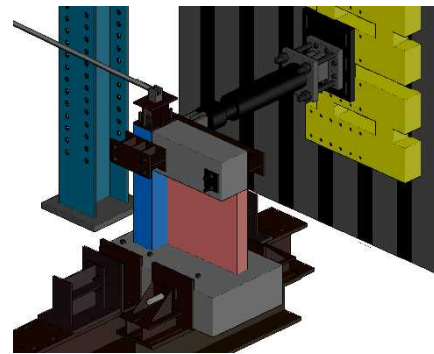


図-2 試験体の加力方法

表-1 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
35.9	2.75	23.8

表-2 鉄筋の機械的性質

サイズ	f_y	f_u	E_s	Δ
D6 (梁)	537	620	194	12.5
D6 (スラブ)	511	613	201	15.7
D13	364	501	191	25.6

f_y : 降伏強度(N/mm²), f_u : 終局強度(N/mm²), E_s : ヤング係数(kN/mm²), Δ : 伸び率(%)

試験体に使用したコンクリートと鉄筋の材料特性は、それぞれ表-1 と表-2 に示す通りである。

3. 解析モデル

図-3 に解析モデルの概要を示す。本研究では、汎用解析プログラム DIANA10.10 を用いて検討した。コンクリートの圧縮側には、破壊エネルギーを考慮した放物線モデルを、引張側は軟化後の挙動を二直線モデルで再現し、鉄筋には Von Mises モデルを採用した。また鉄筋とコンクリートの境界には、付着-すべり挙動を再現する島モデルを適用した。ボイドスラブについては、試験体の空洞と同形状のコンクリート要素を取り除くことで再現した。

図-4 に、解析モデルと実験値の荷重-変形角関係を比較したものを示す。同図から理解されるよう、本解析モデルにより、実験で得られる力学挙動を概ね再現することができ、最大荷重の誤差も4%以下であった。さらに、両試験体に大きな差はなく、ボイドスラブであっても協力幅が有効に作用することが分かった。

ここで解析と実験の両者において、スラブ内部に空洞があるにも関わらず、ボイドスラブの方が高い荷重値を示した。そこで、図-5 にスラブ内部の鉄筋の負担応力度の割合 (f_y に対する応力度の割合) を示す。同図より、抑え筋も引張応力を負担している。これらの鉄筋の負担割合 (同図右側の赤い数値) を加算すると105%になった。つまり抑え筋もスラブ筋に換算して約1本分の応力を負担しており、このためボイドスラブの方が、荷重が大きくなったと判断される。

4. おわりに

著者らは、協力幅領域を活用した新たな耐震工法の提案を目指し、まずは事前検討に必要な解析モデルの構築をプレ共同研究で実施した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 構築した解析モデルにより実験値を精度良く再現でき、スラブ内の鉄筋の応力も評価できた。
- 2) ボイドスラブでも協力幅が有効に作用した。
- 3) 抑え筋の影響によりボイドスラブの方が、実験でも解析でも荷重が僅かに大きくなった。

以上から、本プレ共同研究により、スラブ付 RC 梁の力学挙動を再現可能な解析モデルを構築でき、さらにボイドスラブも協力幅として有効に作用していることを明らかにした。これらの知見を活かし、今後は合

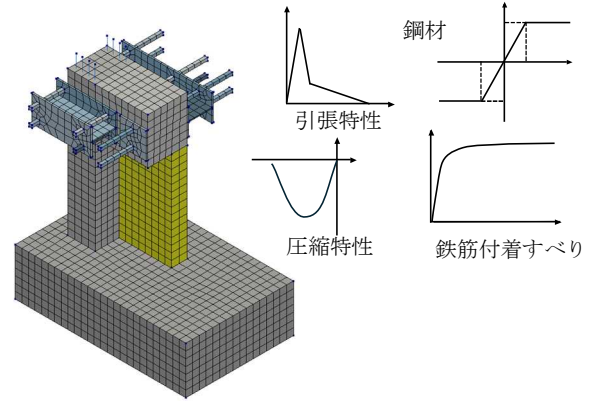


図-3 有限要素解析モデル

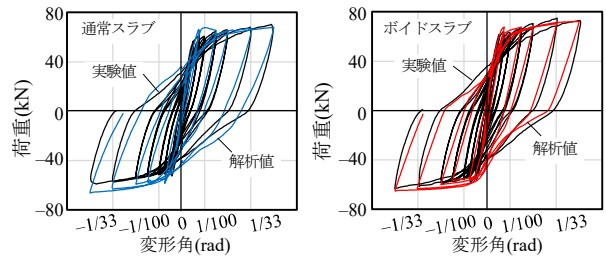


図-4 荷重-変形角関係の比較

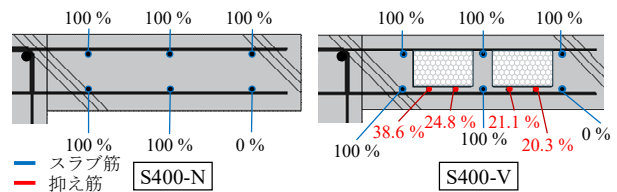


図-5 スラブ内部の鉄筋の負担応力度割合 ($R = 1/25$)

理的な協力幅を考慮した、新たな設計法を提案する予定である。

文献

- 1) 田尻清太郎, 柏尚稔, 加藤博人, 壁谷澤寿一, 福山洋: RC 造スラブ付き十字形部分架構の減衰性能に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.353-354, 2015.9
- 2) 壁谷澤 寿一, 壁谷澤 寿海, 福山 洋, Xuan Deng: 超高層鉄筋コンクリート造建築物のスラブ有効幅に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.17-20, 2013.8
- 3) 建築物の構造関係技術基準解説書 付録 1-3 鉄筋コンクリート造に関する技術資料 2015 年版(2016 年追補収録版), p.652, 2016

低融点固体ロケットの加速度中性能評価

中田 大将^{*1}, 島谷 一生^{*2}, 安達 直人^{*3}

- 1 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター
- 2 室蘭工業大学 生産システム工学専攻
- 3 (株) 植松電機

1. はじめに

ロケットエンジンは主として火薬を利用した固体ロケットエンジンと、液体燃料（液体水素、液体酸素、液化メタン、ケロシンなど）を用いた液体ロケットエンジンに大別されるが、前者は製造の認可を得ることが極めて難しく、国内でも製造可能な企業は2～3社に限られている。このような折、JAXA 宇宙科学研究所でイプシロンロケットなどのプロジェクトマネージャを務めた森田らが設立した Rocket Link Technology 社の新型固体燃料 LTP のライセンスを基に、赤平市にある植松電機では北海道では初のロケット用固体燃料の製造認可を受け、今後多彩な固体ロケットエンジンの販路が期待されている。

この LTP 燃料は従来燃料よりも安価に製造できるが、その特性については未解明の点が多く、まずは室蘭工大の所有するロケットスレッド設備（図1）での機能確認、特に加速度中での挙動を把握することが期待されている。本プレ共同研究ではロケットスレッド用に設計された 5kN 級固体ロケットエンジンの着火機構についての実証を行ったので、これについて述べる。



図1 ロケットスレッド設備
(ハイブリッドロケットでの加速)

2. 5kN 級固体ロケットエンジン

固体ロケットエンジンの全体図を図2に示す。火薬は断熱ペークライト筒に収められ、外側に SCM440 製の金属製ケースがある。300m の高速軌道上で加減速を行う必要があるため、燃焼時間は 3s 程度、推力 5kN 級の尻上がりを目指してグレインサイズとスロート径を設計した。その結果グレインは外径 180mm、内径 145mm、長さ 400mm の中空円筒型、スロート径は 30mm と決定した。

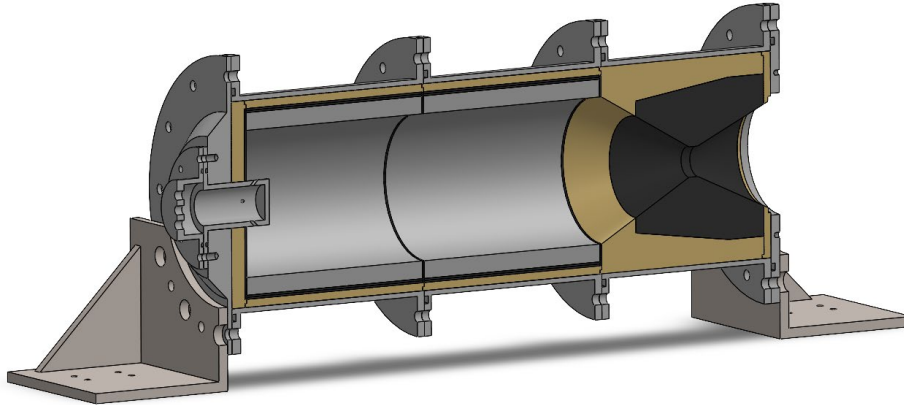


図2 5kN 級固体ロケットエンジン

まず、ロケットの推力は質量流量、比推力より以下の式にて算出することが出来る。なお、質量流量 \dot{m} は燃焼室から排出されノズルを通る燃焼ガスの流量、比推力 I_{sp} は単位推進剤当たりのトータルインパルス（全力積）と定義されている。

$$F = \dot{m} I_{sp} g \quad (1)$$

また、推力は推力係数、スロート径、燃焼圧を用いて以下のように表すこともできる。ここでの推力係数 C_F は圧力比、比熱比、ノズル出口圧力、大気圧、ノズル膨張比の関数であるが、直接計測したり設計したりすることが容易ではないため、今回の研究では仮定値を用いている。

$$F = C_F A_t P_c \quad (2)$$

燃焼によりグレインが減っていき燃焼面が下がっていく速度を燃料後退速度 \dot{r} と呼ぶ。この値は、温度係数 a 、燃焼圧 P_c 、圧力指数 n を用いて以下の式にて表される。この式は Vieille の法則と呼ばれる。ここでの温度係数、圧力指数は実験より算出されるため、今回の研究では他の実験によって算出された値を用いる。特に、圧力指数に関しては燃料の種類に依存する。

$$\dot{r} = a P_c^n \quad (3)$$

\dot{r} が分かると燃焼面積 A_b から単位時間当たりに気化・燃焼するグレイン体積が算出され、そこからグレイン密度 ρ により質量流量を算出することが出来る。

$$\dot{m} = A_b \dot{r} \rho \quad (4)$$

以上の4つの式では瞬間の値を算出することが出来るが、実際のロケットモータでは燃焼が連続して続き、各値も連続して変化していくため、そのシミュレーションには上の4つの式を用いてフィードバック・ループ計算を行った。この結果、冒頭に述べるようなサイジングのロケットエンジンとなった。

3. 点火器設計

確實性の高い点火器の早期の開発が求められたため、固体ロケットモータの点火器は点火薬ペレットを点火器ケーシングに必要分を直接入れ、スパークプラグや電気導火線で発破するタイプを採用した。その点火薬質量は以下の式にて算出することが出来る。なお、 m_{ig} は点火薬質量、燃焼室 Free Volume V_c は燃焼前のグレインに囲まれた空間とノズル収縮部まで含めた部分の体積である。

$$m_{ig} = 0.016944(V_c)^{0.7} \quad (5)$$

製作した点火器の図面と、燃焼時写真を図3に示す。4つの穴から火炎が噴き出し、メインエンジンへの良好な着火性が期待される。

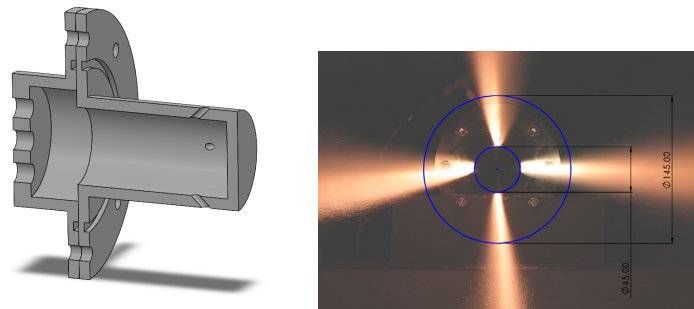


図3 点火器図面および単体燃焼時写真

4. メインエンジン燃焼試験

5kN級固体ロケットエンジンのメイン燃焼時の画像を図4に示す。

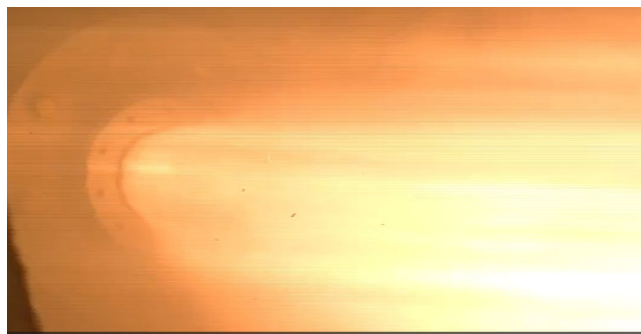


図4 メイン燃焼時画像

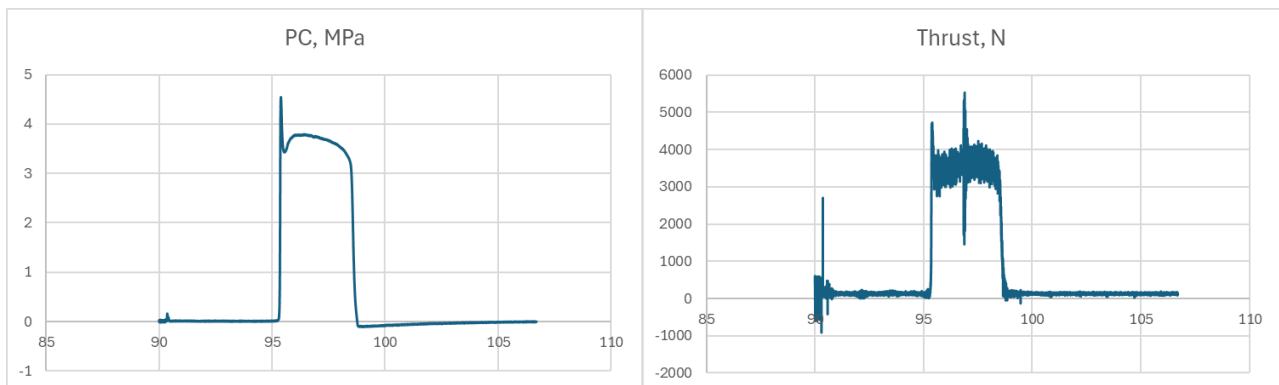


図5 燃焼室圧力と推力

まず、着火については点火器への着火後、メインの燃焼室圧が立ちあがるまでに5秒を要した。点火器火炎が正常に噴射したものの、表面での燃え広がりに時間を要したためと考えられる。点火器火炎の当たる面を広く取ることや、表面に粗さを付けるなどの対策が必要である。とりわけ、このLTP燃料では低融点の樹脂成分が表面付近に析出している可能性がある。

また、圧力・推力カーブについては当初予測していた右肩上がりのカーブとならず、山なりになっている。これは燃料の燃え方が上流と下流で均一ではなく、初期に燃焼面積が増大し、後半で次第に小さくなっていったものと考えられる。製造時の段差や継ぎ目から凹みが生じ、燃焼面積が増大した可能性も考えられるため、今後製造時のばらつきや再現性に留意しながら、ロケットスレッド走行にふさわしい5kN級モーターの成立に向けてさらなる精査と追試験が必要である。2026年2月、4月にも植松電機にて追試験を行い、また本学CRDセンターでのX線検査を行うなど、精力的に研究を続けている。

5. おわりに

本プレ共同研究の資金は年度の変わり目に先行で必要な部材を発注することができ、大変な支援となりました。その後Go Techへの採択にもつながり、さらなる成果創出へと邁進しているところです。

人体追従型空調ロボットの開発

梶原秀一*1, 福家英晃*2

- 1 室蘭工業大学 もの創造系領域
- 2 日鉄ファーストテック株式会社 技術部 技術課

1. はじめに

工場内における作業環境は、夏季には酷暑環境、冬季には酷寒環境となる場合が多く、作業者の身体的負担は大きい。近年では熱中症対策や作業環境改善が重要視されているが、大空間である工場全体を均一に空調することはエネルギー効率の観点から必ずしも合理的とはいえない。また、過酷な環境は作業効率の低下や労働災害リスクの増加につながるだけでなく、作業者の離職要因の一つにもなり得る。そこで本研究では、工場内で勤務する作業者に対し、効率よく冷風・温風を送ることができる装置の開発を目的とする。特に、作業者を検知し、その位置に応じて風向を自動的に調整する「人体追従型空調ロボット」の実現を目指す。本システムでは、作業者の位置をカメラ画像により認識し、空調装置の送風口が常に人体方向を向くように制御することで、局所的かつ効率的な空調を可能にする。本プレ共同研究では、まず小型モデルの製作を目標とする。具体的には、小型スポットエアコンを搭載したロボット台車を製作し、カメラ画像から人体を検出する機能を実装する。さらに、検出した人体の方向に送風口が常に向くようにロボットを旋回制御するシステムを開発する。

2. システム構成

図1に、本研究で製作した人体追従型空調ロボットの小型モデルの外観を示す。本ロボットは、小型スポットエアコンをアルミフレーム製の台車上に搭載した構成となっている。台車下部には差動二輪駆動型のロボット台車を配置しており、左右輪の回転速度差を制御することで旋回動作が可能である。スポットエアコン上部前方にはWebカメラを設置しており、前方の作業者を検出するための画像情報を取得する。取得した画像は制御用コンピュータで処理される。台車は検出された人体の位置に基づいて、その場旋回を行い、

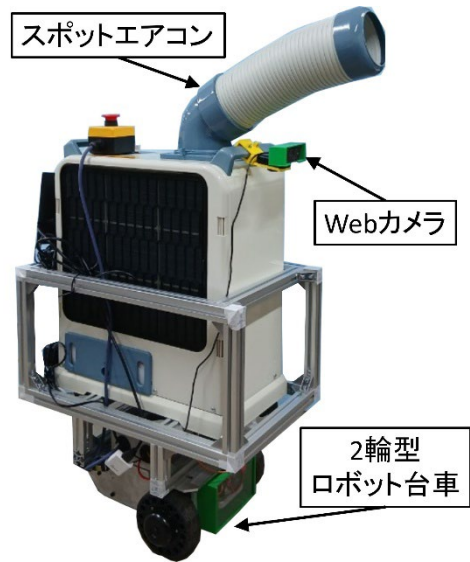


図1 人体追従型空調ロボットの小型モデル

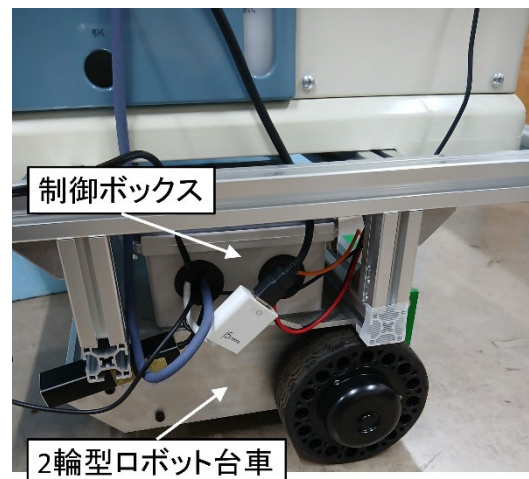


図2 制御ボックスとロボット台車

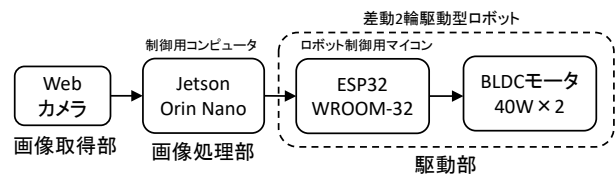


図3 人体追従型空調ロボットのシステム図

送風口を常に人体方向に向ける。

図2にロボット下部に配置された制御ボックスと2輪型ロボット台車を示す。制御ボックス内には制御用コンピュータ、電源などが配置されており、2輪型ロボット台車はVstone社製メガローバーVer.3.0(2)を使用している。

図3に本研究で構築した人体追従型空調ロボットのシステム構成を示す。本システムは、画像取得部、画像処理部、駆動部から構成される。前方に設置したWebカメラはUSB接続によりJetson Orin Nanoへ接続され、撮影したRGB画像をリアルタイムで取得する。Jetson上では人体検出プログラムを実行し、検出された人体の座標に基づいてロボットの旋回速度指令値を算出する。算出した旋回速度指令値は、シリアル通信(UART)によりESP32-WROOM-32へ送信される。ESP32は受信した指令値に基づき、左右のBLDCモータ(40W×2)を制御する。

3. 人体検出およびロボットの旋回制御

USBカメラから取得した画像からの人物検出には、Ultralytics YOLO11n(2)を使用した。

図3に、取得した画像にYOLOが検出した人物にバウンディングボックスが描画されたイメージ図を示す。画像中心座標を (x_0, y_0) 、バウンディングボックスの中心座標を (x_c, y_c) とすると、本研究では、次式のように画像中心と人物中心との水平方向の偏差を算出し、この値をロボットの旋回制御に用いる。

$$e = x_c - x_0 \quad (1)$$

人物が画像右側に位置する場合には正の偏差となりロボットは右方向へ旋回し、左側に位置する場合には左方向へ旋回する。これにより、人物が常に画像中央に位置するようフィードバック制御を行う。

ロボットを制御する目標角速度は以下のように構成した。

$$\omega_d(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

ただし、 ω_d は目標角速度、 K_p, K_i はそれぞれPI制御の比例ゲイン、積分ゲインである。

上式に基づきロボットの車輪速度を制御することで、人体が画像中心に来るように制御される。

4. 実験

本研究で製作した人体追従型空調ロボットの動作確認実験を室内環境にて実施した。図4に実験の様子を

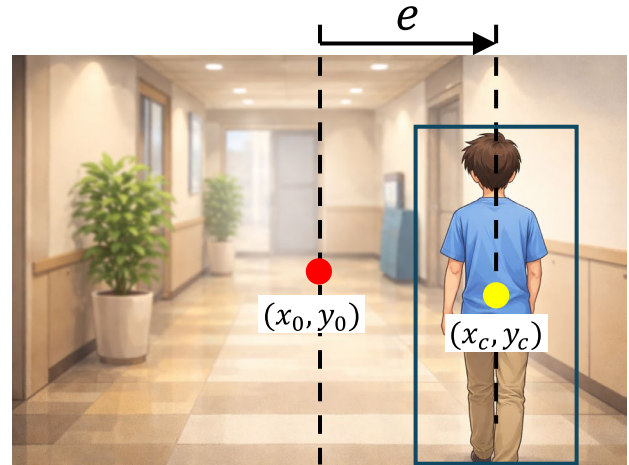
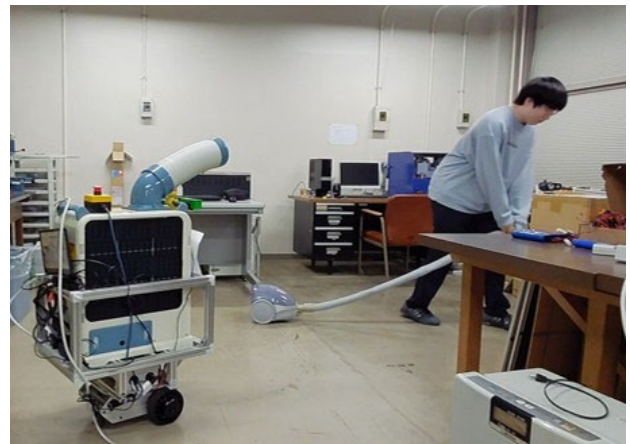


図3 人体検出結果のイメージ



(a) 送風口が作業方向を向いた状態



(b) YOLOによる人体検出結果

図4 人体追従型空調ロボットによる追従実験の様子

示す。図4(a)は、ロボットが作業方向へ旋回し、スポットエアコンの送風口が人体方向を向いている状態を示している。図4(b)は、USBカメラで取得した画像に対してYOLO11nにより人物検出を行った結果であり、検出された人物はバウンディングボックスで囲まれている。図中には人体の検出信頼度0.94および人体

中心の座標情報 $x = 94.4$ が表示されている。実験では、被験者がロボット前方で左右方向へ移動する状況を想定し、ロボットが人体方向へ適切に旋回追従できるかを確認した。

図6に、人体が画面中央から左側へ移動した際のYOLO11nによる人体検出結果とロボットの旋回動作を1秒間隔で示す。

図6(a)より人体の移動に伴ってバウンディングボックスは画面左側へ移動し①～⑤、その後、ロボットが旋回することによりバウンディングボックスが右側に移動していくことがわかる⑦～⑧。図6(b)からも、ロボットは人体の移動に伴って左旋回していることが確認できる⑤～⑧。

実験の結果、本システムは30FPSでのリアルタイム人体認識が可能であり、式(2)の制御ゲインを適切に設定することにより、人体の移動に対して安定した旋回追従動作が可能であることを確認した。

5. おわりに

本研究では、工場内作業者に対して効率的に冷風・温風を供給することを目的として、人体追従型空調ロボットの小型モデルを製作した。WebカメラとJetson Orin Nanoを用いた画像処理系に、YOLO11nを用いた人体検出を実装し、検出された人体中心と画像中心との偏差に基づいてロボットの旋回制御を行うシステムを構築した。室内環境での動作確認実験の結果、本システムは30FPSでのリアルタイム処理が可能であり、被験者の左右移動に対して安定したその場旋回追従動作を実現できることを確認した。

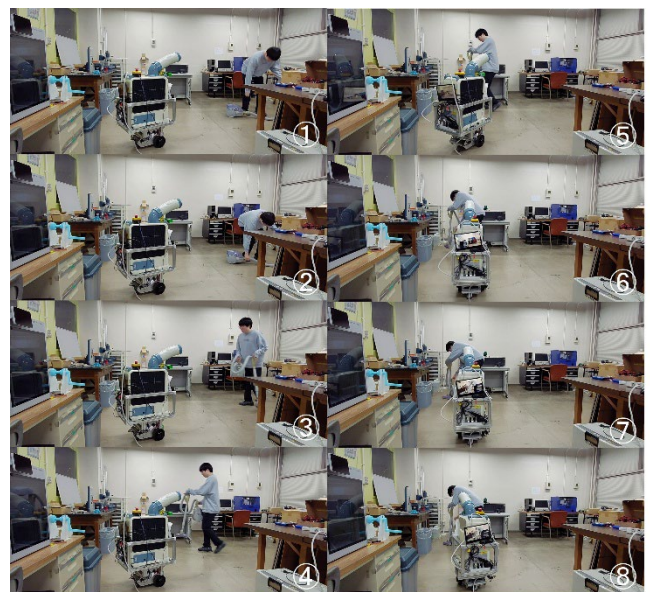
今後は、RGB-Dカメラによる深度情報を活用し、前後移動を含めた人体追従制御への拡張を行いたい。さらに、複数人物が存在する環境における対象選択アルゴリズムの導入を検討したいと考えている。

文献

- (1) Ultralytics YOLO11
<https://docs.ultralytics.com/ja/models/>
- (2) Vstone メガローバーVer.3.0
https://www.vstone.co.jp/products/wheelrobot/ver.3.0_norma1.html



(a) YOLOによる検出結果



(b) ロボットの旋回動作

図5 人体移動に対する検出結果(1秒間隔)

国立大学法人 室蘭工業大学
MONOづくりみらい共創機構

〒050-8585 室蘭市水元町 27-1

<https://u.muroran-it.ac.jp/crd/>

crd@muroran-it.ac.jp

TEL (0143) 46 - 5860

FAX (0143) 46 - 5879