

**NSK-FAM**

**研究助成・教育助成 成果報告書**

**No. 3 5**

公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団  
2022（令和4）年度（第13期）助成事業分

2025（令和7）年8月

公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団  
**NSK Foundation for the Advancement of Mechatronics**



## まえがき

このたび公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団2022（令和4）年度（第13期）助成事業分の「研究助成・教育助成 成果報告書 No. 35」を纏めましたのでお届け致します。

これは、2023（令和5）年4月から2025（令和7）年3月の2年間に  
行われた“メカトロニクス技術の高度化”のための助成研究と技術教育助成の  
成果であり、研究者の皆様がご報告下さいました「成果の概要」、担当代表教員  
の皆様がご報告下さいました「教育の概要等」をそのまま掲載したものです。  
今回の成果を、この分野の技術の発展及び教育の充実のためにご活用  
いただければ幸いです。

さて、2024（令和6）年度は、研究助成として15件、教育助成として高  
専のメカトロニクス技術教育へ複数の教員や学科・専攻のチームを支援対象と  
するA助成に3件、教員個人が行う教育を支援対象とするB助成に4件を採  
択いたしました。

これにより、助成事業の累積件数は、公益財団移行前の財団設立時から  
昨年度まで、研究助成、交流助成、集会助成、教育助成を合わせて995  
件（うち研究助成679件、教育助成A助成、B助成含め63件）、助成金額  
にして約1,244百万円（研究助成 約1,052百万円、教育助成 約119  
百万円）となりました。

当財団は2010（平成22）年11月公益認定を受け公益財団法人NSKメ  
カトロニクス技術高度化財団と改称し移行いたしました。今後ともメカ  
トロニクス技術の高度化により社会へ貢献することを目指して、1件でも  
多く助成が出来るように助成費用の捻出に努め、研究者・教育者の皆  
様のご期待に応えられるよう最大限努力してまいりますので、今後とも  
ご支援、ご鞭撻の程お願い申し上げます。

2025年8月

公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団

理事長 内山俊弘

## 目 次

研 究 題 目	助成対象者 (共同研究者)	頁
<b>1. 複数パイプ型垂直振動粉体ポンプシステムにおける月土壤粒子搬送条件の最適化</b> 京都大学 大学院 工学研究科 機械理工学専攻	助 教 安 達 眞 聡	1
<b>2. 磁気飽和を考慮した半波整流可変界磁モータの最大トルク／電流制御法</b> 長崎大学 大学院 工学研究科 電気・情報科学部門 電気電子工学分野	教 授 阿 部 貴 志	2
<b>3. 車輪—グリッパ間変形可能ユニットを用いたマルチモーダル移動ロボットの開発</b> 東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻	助 教 宇 野 健 太 朗	3
<b>4. 3D 赤外分光法によるフッ素樹脂の摩擦メカニズム解明</b> 公立小松大学 生産システム科学部 生産システム科学科	教 授 粕 谷 素 洋	4
<b>5. 駆動型ロータリ工具とヘール加工のハイブリッド加工法を用いた焼入れ鋼の スパイラル溝加工の高精度・高能率化に関する研究</b> 金沢工業大学 工学部 機械工学科	教 授 加 藤 秀 治	5
<b>6. イオン液体—水混合系における電気二重層構造のダイナミクス解析と潤滑特性の評価</b> 関西大学 システム理工学部 機械工学科	准教授 川 田 将 平	6
<b>7. 液面追従機能によるフロート式非接触型磁気駆動攪拌の安定化</b> 豊田工業高等専門学校 機械工学科 (大同大学 工学部 機械システム工学科)	教 授 小 谷 明 教 授 田 中 淑 晴 )	7
<b>8. 針の持ち直しが不要な 2 自由度針回転機構を有する新規持針器の開発</b> 東京大学・大学院工学系研究科 精密工学専攻	教 授 小 林 英 津 子	8
<b>9. 形状記憶材料を用いた構造変更により感度可変な力覚センサの開発</b> 九州工業大学 大学院生命体工学研究科生体機能応用工学専攻 (北九州市立大学 国際環境工学部 機械システム工学科)	准教授 高 嶋 一 登 准教授 長 弘 基 )	9
<b>10. ねじ対偶要素の開発とリンク機構の新展開</b> 東京科学大学 工学院 機械系	助 教 高 田 敦	10

研 究 題 目	助成対象者 (共同研究者)	頁
<b>1 1. Assist As Needed を実現する冗長ハイブリッドアクチュエータの開発と 立ち上がり支援装置への適用</b>		11
東京科学大学 工学院 機械系 (東京科学大学 工学院 機械系)	教 授 武田 行生 助 教 JIANG MING)	
<b>1 2. 重篤事故の原因となる体育館床ささくれ傷の見える化システム</b>		12
東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科	教 授 竹村 裕	
<b>1 3. 小型軽量・高牽引力・高速牽引を実現するワイヤ無限巻取り機構の開発</b>		13
電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻	准教授 東郷 俊太	
<b>1 4. 円筒ころ軸受に負荷されるラジアル荷重と転動体のすべりとの関係性調査</b>		14
関東学院大学 理工学部 理工学科 機械学系	准教授 堀田 智哉	
<b>1 5. 左右心流量バランス制御が可能な全置換型磁気浮上人工心臓の研究開発</b>		15
茨城大学 学術研究院応用理工学野 機械システム工学領域 (茨城大学大学院 理工学研究科工学野 機械システム工学領域)	教 授 増澤 徹 助 教 北山 文矢)	
<b>1 6. 構造最適化手法を用いた 3D プリンテッド・マイクロゲルアクチュエータの開発</b>		16
横浜国立大学 工学研究院 (横浜国立大学 工学研究院)	特任助教 向井 理 教 授 丸尾 昭二)	
<b>1 7. ソフトアクチュエータの駆動システムを大幅に簡素化する極軽量電空人工筋肉の開発</b>		17
岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域	助 教 山口 大介	
<b>1 8. 自由曲面流体ジェット研磨における研磨影響関数のデジタルツイン推定システムの構築</b>		18
東京農工大学 工学研究院 先端機械システム部門	准教授 大和駿太郎	



## 目 次

科 目 名	助成対象者	頁
<b>A助成</b>		
<b>1. 長野工業高等専門学校 工学科機械ロボティクス系</b>	<b>教 授 田 中 秀 登</b>	<b>19</b>
ものづくり基礎工学		
ものづくり基礎実験		
工作実習		

(敬称略・50音順 所属機関成果報告時)



# 複数パイプ型垂直振動粉体ポンプシステムにおける 月土壌粒子搬送条件の最適化

安達真聡 京都大学大学院工学研究科 助教

## 1. 目的

本研究の対象は、萌芽的な粉体ハンドリング技術である垂直振動粉体ポンプシステムである。このシステムは、縦1方向に振動するパイプを粉体層に挿入することで、パイプ内を粉体が液体の毛細管現象のように上昇することを利用した粉体搬送システムである。本研究では、粉体材料として月土壌のような非球形形状や広い粒度分布を持つ粒子の搬送性能に着目し、その基礎特性を明らかにすると共に、その搬送性能を向上させるための最適な条件を明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究内容

本研究では、まず複数のパイプを並列に並べた複数パイプ型垂直振動粉体ポンプシステムの基礎特性について調査を行った。これは、過去に1本のパイプを使用して非球形粒子の搬送を行った場合に粒子の流動性と搬送高さの低下が確認されており、2本のパイプを使用することで振動するパイプ同士が周囲の粒子の流動性を向上させ、その搬送性能を向上させることを目的としたものである。本研究では、振幅、周波数、パイプ間距離、位相、パイプ形状などを変化させた際の粒子搬送性能に及ぼす影響を調査した。その結果、複数のパイプを使用することで各パイプの入口付近に位置する粒子の流動性を大きく流動化させられることが確認できた。この効果を流動性が低い非球形粒子の搬送性能向上に結び付けられる可能性がある。実際に粒子の搬送高さについても評価を行ったところ、特定の条件下において搬送性能が向上させられることを確認した。

次に、月土壌粒子は幅広い粒度分布を持つことから、これまでの研究では調査されてこなかった1 mm以上の大粒径粒子の搬送性能についても調査を行った。なお、各粒径の粉体動特性を詳細に明らかにするために、より単純化された実験モデルとしてここでは1本のパイプを使用して実験を行った。調査の結果、従来使用されてきた中粒径粒子（～数100 μm）を対象とした時と比較して、振動周波数の影響を大きく受けることが確認できた。これは、粉体のバルク的な特性ではなく、個々の粒子の特性が大きく表れるようになったためである。粒径が大きくなることで、慣性の効果が大きくなり粉体が流動するのに必要な時間が増加することや、粒子間での力を伝達する経路が切断されやすくなることで、その搬送性能が影響を受けたと考えられる。さらに、振幅、周波数、パイプ径、粒子層の状態などの条件を変化させた試験を行い、各粒子の搬送性能を向上させるための最適な条件を明らかにすることができた。

さらに、個別要素法を利用したシミュレーションを活用して、地上重力と月面重力環境下における粉体搬送特性の違いについても調査を行い、月面重力下では地上よりも低周波数の振動で粒子搬送が可能であることが確認できた。

## 3. 成果

- (1) 複数パイプを使用することで、パイプ入口付近の粒子の流動性を向上させて、特定の条件下で搬送性能が向上することを確認した。
- (2) 粒径が異なる各粒子の搬送基礎特性や、それらの最適搬送条件を明らかにすることができた。
- (3) 重力加速度が異なる月面環境下での粉体搬送基礎特性を予測することができた。

# 磁気飽和を考慮した半波整流可変界磁モータの最大トルク／電流制御法

阿部貴志 長崎大学 教授

## 1. 目的

本申請では、研究代表者が提案し実用性を検証してきた可変界磁モータである半波整流可変界磁モータに対して、高速・高トルク時に顕著になる磁気飽和により変動する  $dq$  インダクタンスを考慮した最大トルク／電流制御法を提案し、保有する実験装置にて実証可能な速度・トルク領域にて実機検証を実施する。その制御システムにおいて、有限要素法を用いた電磁界解析結果を用いて構築したサロゲート（代理）モデルを導入し、磁気飽和を考慮した制御パラメータの決定を簡素化し、リラクタンストルクを併用した最大トルク／電流制御の実用性を明確にする。

## 2. 研究内容

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略に対し、産業、運輸、業務、家庭などの非電力部門では各システムの電化技術がCO<sub>2</sub>排出量削減の中心となり、電動化システム全体の高効率化が必須である。申請者の研究室では、高頻度な運転領域での平均効率向上を実現するために、界磁磁束を自在に調整可能な半波整流可変界磁モータの設計と制御に取り組んでいる。図1に示すように、本モータは永久磁石を使用せずに、ダイオードで単相短絡された回転子界磁巻線を持つブラシ無し構造であり、回転子の界磁磁束を固定子巻線より自己励磁でき、その界磁磁束をゼロから最大まで調整可能である特殊な半波整流可変界磁法を利用した独創的モータである。

埋込型永久磁石同期モータに適用される最大トルク／電流制御（MTPA制御）では、PMトルクとリラクタンストルクを有効に利用して最小電流で最大トルクを発生するために、制御パラメータである電機子電流の実効値  $I_a$  と位相  $\beta$ 、およびモータパラメータである  $dq$  軸自己インダクタンス  $L_d$  と  $L_q$  が利用されている。しかし、本モータにMTPA制御を適用するには  $L_d$  と  $L_q$  以外に、回転子界磁巻線自己インダクタンス  $L_{fd}$ 、固定子と回転子巻線の相互インダクタンス  $M_{fd}$  がモータパラメータとして必要となり、これらは高速・高トルク領域では  $d$  軸における磁気飽和の影響を大きく受ける。さらに制御パラメータでは、電機子電流の振幅と位相角に加え、界磁磁束を制御する励磁電流の実測値  $I_f$  の決定法が問題となる。以上のモータパラメータの測定および推定法を確立し、電磁界解析によるトルク特性を利用したサロゲート（代理）モデルによる制御パラメータ抽出法を提案し、MTPA制御法の実機試験を実施した。

## 3. 成果

(1) モータパラメータの実機測定と解析による推定を行い、比較検討により概ね一致した結果を得た。さらに、それらのモータパラメータを用いたMTPA制御法を確立し、実機検証を実施した。

(2) モータパラメータを用いたMTPA制御法に対し、有限要素法を用いた電磁界解析によるトルク特性を利用したサロゲート（代理）モデルによる制御パラメータ抽出法を構築した。

(3) 上記代理モデルを実機の制御プログラムに導入し、最小電流でトルクを最大にする制御パラメータを推定したMTPA制御法の実機検証を行い、成果(1)の結果と比較して有用性を示した。

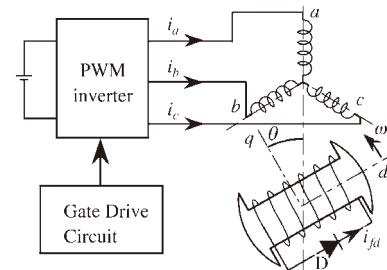


図1 半波整流可変界磁モータ

# 車輪－グリップ間変形可能ユニットを用いた マルチモーダル移動ロボットの開発

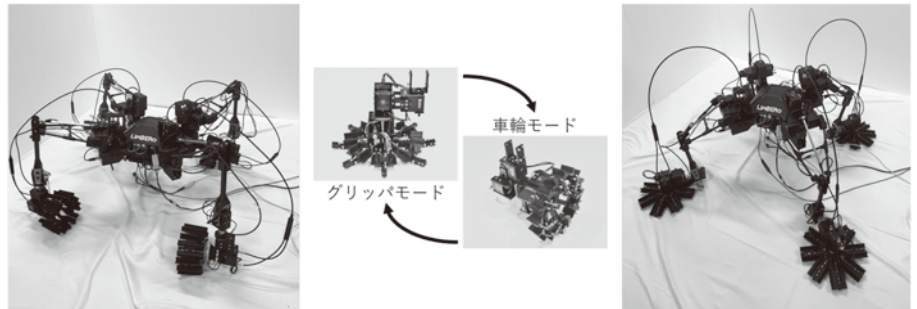
宇野健太朗 東北大学 助教

## 1. 目的

これまでの不整地移動ロボットの研究では、車輪と脚という2つの移動形態の長所を取り合わせるというアイデアから、不整地での対地適応的な歩行移動のための脚と、平地での高速かつ高効率移動のための車輪を融合させたハイブリッド移動機構を有するロボットが複数提案されてきている。しかし、単なる脚ではなく物体や地表面を把持するグリップと車輪のハイブリッド機構はいまだ実現されていない。そこで本研究では、車輪－グリップ間を最小限のアクチュエーションで変形可能な新型機構を開発し、これをロボットに応用することで、車輪走行とクライミングという2つの形態を選択しながらどのような地形でも自在に移動可能なマルチモーダル移動ロボットの開発に取り組み、実現場への幅広い応用へと繋げてゆくことを目的とする。

## 2. 研究内容

車輪モードとグリップモードに相互変形可能な機構を開発し、これを脚型ロボットに装備することで砂場・岩石地帯・崖などの不整地を含む様々な地形を走破または踏破することができる新たな移動ロボットを具現化し実証した



(図1)。

図1 本研究にて開発した車輪－グリップ間変形可能ユニットを装備した4脚ロボット（左：車輪モード，右：グリップモード）。

## 3. 成果

(1) 車輪モードとグリップモードを単一アクチュエータで相互変形可能な新型機構を開発した(図1, 国際特許出願済：WO2023/233468)。

(2) 上記の機構を4脚ロボットの足部に装着可能な形で改良を行い、同ロボットを用いて車輪走行とクライミング歩行の実証実験を成功させることができた(図2)。

(3) 上記のマルチモーダル移動ロボットを知的・自律的に移動探索するための方法論を確立し自律化ソフトウェア完成の目途が立った。

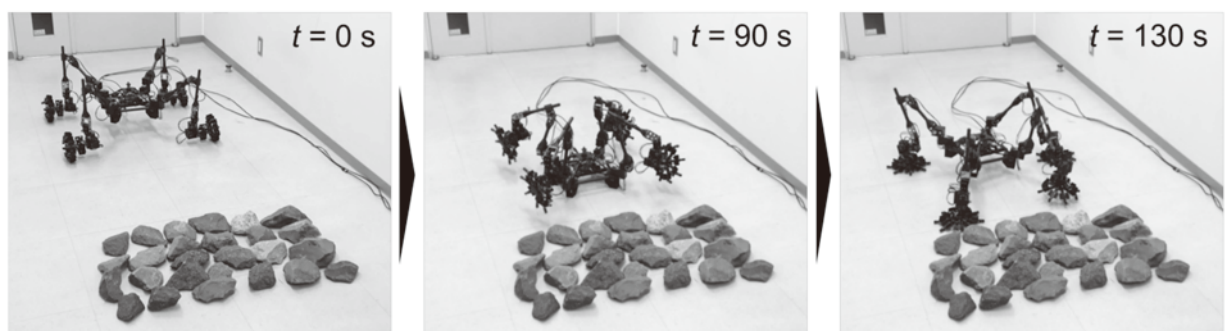


図2 開発機構を装着した脚型ロボットによる車輪走行から歩行動作への遷移。

# 3D 赤外分光法によるフッ素樹脂の摩擦メカニズム解明

粕谷素洋 公立小松大学 教授

## 1. 目的

低摩擦材料として多くの機械部品に用いられるフッ素樹脂について、申請者が開発中の分子の結合・配向を3次元的に評価できる摩擦評価用多角入射分解赤外分光法(MAIRS)を用いて、摩擦に伴う分子構造変化を観測する。フッ素樹脂摺動材料で課題となっている摩擦挙動の分子レベルでの機構を解明し、その低減の分子設計指針を提示する。

## 2. 研究内容

自作の往復型の摩擦試験機を用いて、成膜試料とシリコンウェハを摺動した。摺動前後の成膜試料について、市販のフーリエ変換赤外分光器 (Nicolet iS50, ThermoFischer 製) を用いて、FT-IR による pMAIRS 測定[3]を行い、摩擦前後の分子の振動方向を面外(OP)と面内 (IP), あるいは摩擦方向に垂直( $p \perp F$ )と平行( $p//F$ )のスペクトルに分割して、3次元的な構造変化を評価した。

## 3. 成果

(1) 結晶性について既報であり、基礎的な物性研究に適用しやすいポリパーフルオロオクチルメタクリレート(C8SFA)を用いて評価法の妥当性について調べた。シリコンウェハにスピコート法により成膜した C8SFA 膜をシリコン基板と接触・せん断させた時の、摩擦前後の pMAIRS スペクトル変化を測定し、 $1150 \text{ cm}^{-1}$  周辺の  $\text{CF}_2$  伸縮振動および  $1700 \text{ cm}^{-1}$  周辺の  $\text{C=O}$  伸縮振動に由来するピークが摩擦前では測定の向きで変化がないのに対して、摩擦後の試料では摩擦方向に平行( $p//F$ )の方が垂直方向 ( $p \perp F$ )よりも大きくなり、摩擦方向への分子が配向する様子を観測できた。また摩擦前後の各ピーク強度の減少量から、摩擦割合が評価可能であることが分かった。また  $1270 \text{ cm}^{-1}$  付近のフォノンバンドにおける OP/IP が  $p \perp F > p//F$  となったことから、摩擦に伴って有機フッ素鎖の集合構造が小さくなることが明らかとなった。

さらに  $70^\circ\text{C}$  のアニールにより高結晶性とした試料についても同様の測定を行い、摩擦に伴う前述のスペクトル変化が起こらず、せん断に伴う分子配向変化が起こらないことを見出した。以上の結果から、摩擦に伴う有機フッ素鎖の集合構造の摩擦に伴う3次元的な分子配向変化や集合構造の変化を評価する手法として、pMAIRS 法が有用であることを示すことができた。

(2) (1) と同様の手法を PTFE 薄膜について適用し、 $\text{CF}_2$  伸縮振動とフォノンバンドのピークの変化から、PTFE の場合でも摩擦方向に分子が配向するとともに、摩擦方向に SDA 集合構造が破壊されることが明らかとなった。

以上の結果から、PTFE の摩擦に伴う3次元的な配向評価、および集合構造変化の評価を明らかにすることができた。今後これらの評価手法と結果を基に、摺動材として用いる場合の摩擦低減指針の解明への展開が期待できる。

# 駆動型ロータリ工具とヘール加工のハイブリッド加工法を用いた 焼入れ鋼のスパイラル溝の高精度・高能率加工に関する研究

加藤秀治 金沢工業大学 教授

## 1. 目的

本研究ではシリンダ形状の円筒端面外周部を切れ刃とする駆動型ロータリ工具を作成し、これを用いたロータリ加工とヘール加工を組み合わせたハイブリッド加工法を用いて焼入れ鋼に対する疑似的なボールねじの加工を試みた。直彫り加工による工程削減と加工の高能率化の可能性と耐久性の観点から摩擦や繰り返し荷重が加わる加工後のボールねじ溝表面における残留応力の挙動について検討した。

## 2. 研究内容

### 2.1 ボールねじの直彫り加工

駆動型ロータリ工具は超微粒子超合金製の直径 10 mm、長さ 80 mm の円筒形状をベースとした工具先端部に逃げ角  $10^\circ$ 、すくい角  $0^\circ$  の形状を有する切れ刃に(Ti,Al)N と(Ti,Si)N 膜の多層被膜を施した。ボールねじ加工は図 1 のようにねじ切りサイクルを使用し、マクロプログラムを用いて 45 層・合計 645 パスの NC プログラムを作成し、63HRC の焼き入れ鋼の直彫り加工で実施した。本加工では、連続した薄い切りくずが生成される良好な加工が行われ、図 2 に示すようにボールねじ形状の溝部は光沢面を有し、加工面粗さは  $0.294 \mu\text{m Rz}$  の非常に良好な値を得ている。

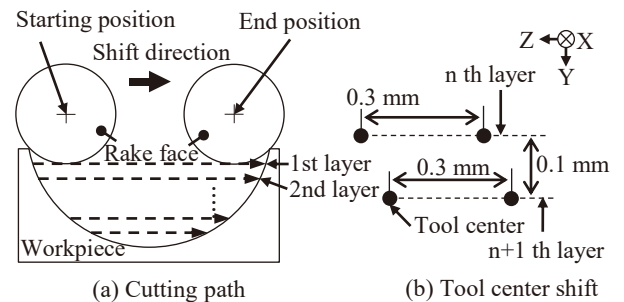


Fig.4 Schematic illustration of tool path in ball screw

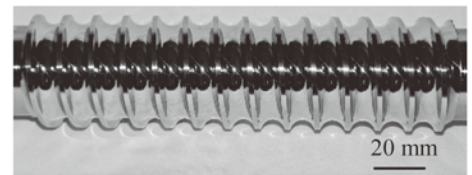


Fig.2 Ball screw after machining

### 2.2 加工面の残留応力の挙動

ボール溝の左側面部 (Point A)、右側面部 (Point B) と底辺部 (Point C) の 3 か所において工具送り方向とそれに直交するクロスフィード方向の残留応力を測定した。図 3 より、工具送り方向では各点とも約 500 MPa の圧縮残留応力を示し、摺動部品として使用するには必要十分な値を得た。これにはロータリ工具の切れ刃に施された  $50 \mu\text{m}$  のホーニングによる押しならし効果が影響している。一方、クロスフィード方向は圧縮残留応力の値は小さく、バラツキも大きく不安定な傾向を示した。

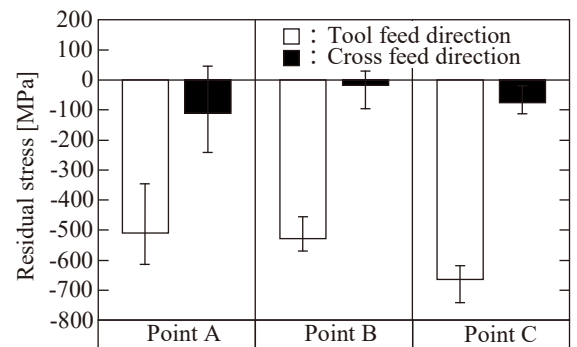


Fig.3 Comparison of residual stress at three measurement points

## 3. 成果

- (1) ねじ切りサイクルを利用して作成したプログラムを用いて焼入れ鋼の直彫り加工によるボールねじ形状の成形が可能となり、ねじ溝部の表面粗さは極めて良好な  $0.172 \mu\text{m Rz}$  の値を得ている。
- (2) 工具送り方向は、ねじ溝部の代表的な測定点全てにおいて 500 MPa 程度の圧縮残留応力を示し、軸受け内輪表面と同等な値を得た。これは、切れ刃に施した大きなホーニングによる押しならし効果が関与している。一方、クロスフィード方向はその平均値は小さく、溝の外側は引張残留応力の範囲までばらつく結果を示した。

# イオン液体—水混合系における電気二重層構造の ダイナミクス解析と潤滑特性の評価の研究

川田将平 関西大学 准教授

## 1. 目的

2050年までのカーボンニュートラルを達成すべく、トライボロジー分野においては、摺動部における摩擦損失を極限まで低減する要素技術の開発が急務である。そこで、申請者は、様々な優れた物理的・化学的特性を持つイオン液体に着目し、ブレークスルーをもたらす新規潤滑システムの構築を目指してきた。実際に、摩擦表面に電位を与えることで、摩擦界面におけるイオン液体の吸着物質を制御し、摩擦係数を変化させることに成功している。一方で、イオン液体中の水分が、イオン液体の吸着を阻害するなどの問題が残っている。そこで、本研究においては、摩擦雰囲気中の湿度を制御、親水性イオン液体や疎水性イオン液体の適用をすることで水分の影響を評価した。

## 2. 研究内容

摩擦試験機の外観を図1に示す。摩擦試験機をグローブボックスに入れることで、摩擦雰囲気中の湿度を制御できるようにした。湿度は10%~80%まで制御が可能である。摩擦試験は、相対湿度を50%に制御し、親水性イオン液体[BMIM][BF<sub>4</sub>]と疎水性イオン液体[BMIM][PF<sub>6</sub>]を用いた。試験条件は、境界潤滑領域で行った。

## 3. 成果

(1) 親水性イオン液体である[BMIM][BF<sub>4</sub>]は、摩擦表面の電位が負の時低摩擦を示した(図2)。一方で、正電位を与えたときは摩擦係数が0.2を超える非常に高い値であった。

(2) 疎水性イオン液体である[BMIM][PF<sub>6</sub>]は、負電位の時も安定した摩擦挙動を示した。

(3) 正電位の場合は、電気的な相互作用により、アニオンが摩擦表面に引き寄せられると考えられる。水分子は、イオン液体のアニオンと相互作用をされると考えられており、水分子がアニオンの吸着に悪影響を与えていると考えられる。

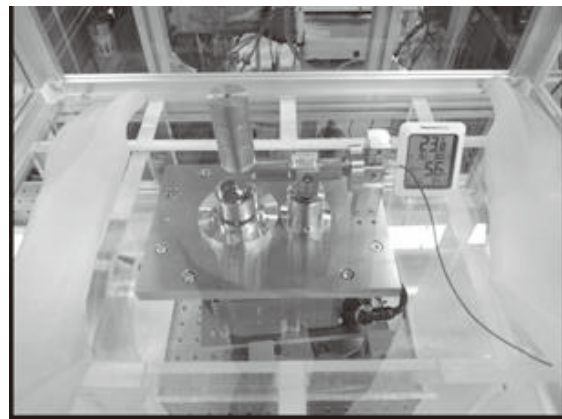


図1 摩擦試験機の外観

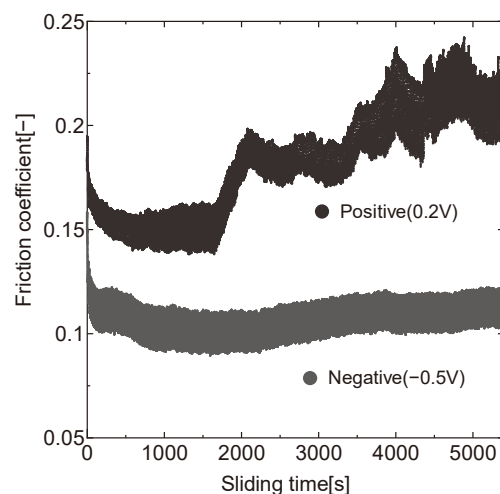


図2 [BMIM][BF<sub>4</sub>]の摩擦係数

# 液面追従機能によるフロート式非接触型磁気駆動攪拌の安定化

小谷 明 豊田工業高等専門学校 教授

## 1. 目的

飲料などの液体食品の貯蔵タンクにおける異物混入のリスクを回避するため、永久磁石を用いた構造が非常に単純で安価で、より実用的な非接触攪拌装置の開発を目指し、液面変動に対応したフロート式の非接触攪拌装置を提案するとともに、その非攪拌における最適な攪拌条件の検討を行う

## 2. 研究内容

図 1 に示すように、液体中に浮かせる回転体はフロート、回転軸、攪拌翼および錘から構成され、フロートの上部はネオジム磁石が埋め込められており、磁力を介してモータによる駆動円板の回転を非接触で回転体に伝達する。実験には吸着力が異なる 2 種類のネオジム磁石を使用した。また、回転体を静止状態から駆動円板の回転に追従させるため、モータの初速度を徐々に大きくするように制御している。さらに、超音波センサで液面高さを検知して高さ調節モータを **Bang-Bang** 制御することにより、液面高さが変動しても安定して攪拌を行うことができるようになっている。

粒子画像流速測定法 PIV による流れの解析のための攪拌動画の撮影は、暗幕室内で透明円筒容器にトレーサー粒子を入れた水を満たし、レーザーシート光を照射して高速度カメラを用いて行った。

また、回転体の攪拌翼にもネオジム磁石を取り付けた駆動円板を透明円筒容器の下側にも設置し、回転体の攪拌翼にもネオジム磁石を取り付けることにより、動粘度 50, 100, 300, 500cSt の 4 種類のシリコンオイルについても攪拌実験を行った。

## 3. 成果

(1) 駆動モータの初期回転速度の制御により回転の初期段階において安定して攪拌を開始できるようになった。また、液面追従機能により液面と回転体とのギャップの維持することが可能となり、液面が変動しても安定した非接触攪拌が可能となった。

(2) フロート形状によって適切な錘の質量が存在し、プロペラ翼に比べて傾斜パドル翼の方が攪拌に適していること、吸着力の大きな磁石の方が最高回転数は大きくなることが確認できた。

(3) PIV 解析 (図 2) により、攪拌翼は傾斜パドル翼、フロート形状は半球型もしくは台形型が最適であることが分かった。

(4) 上下から動力を伝達することによって高粘度液体に対しても攪拌可能であることが確認できた。

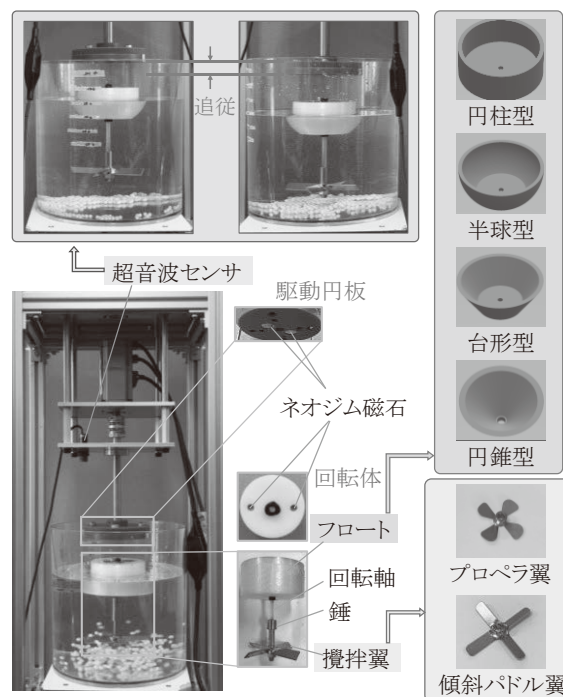


図 1 実験装置の概要

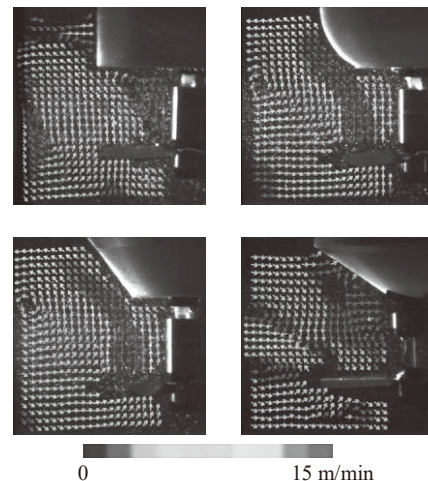


図 2 PIV 解析結果

# 針の持ち直しが不要な 2 自由度針回転機構を有する新規持針器の開発

小林英津子 東京大学 教授

## 1. 目的

腹腔鏡下手術は、侵襲が少なく美容的にも優れる点で普及が進んでいる一方で、限られた視野と操作自由度の制約から手技の難易度が高く、特に縫合操作には高度な技能が求められる。その中でも「運針」に至る前段階の「持針」の最適化は、これまで十分に検討されてこなかった。そこで本研究は、腹腔鏡下縫合手術における「持針操作」の困難さに着目し、手術の精度向上と術者の負担軽減を目的として、(1) 縫合手技における持針姿勢と縫合軌道最適化、(2) 針を持ち直すことなく対象組織への適切な穿刺が可能な持針器の開発、を行った。

## 2. 研究内容

縫合針が組織面に対して垂直に刺入されることが、組織損傷の軽減や術後の癒痕形成抑制に有効であることから、この条件を満たす針の把持姿勢と持針器の動作軌道を、数学的に最適化する手法を構築した。縫合対象点の位置とその法線ベクトル、ポート位置を入力とし、針の持ち方(2自由度)と鉗子の姿勢パラメータを探索することによって、コスト関数最小となる解を導出した。この最適化アルゴリズムの妥当性を検証するため、経験の異なる3名の被験者(初心者、中級者、熟練者)による縫合実験を実施し、実際の針把持姿勢および鉗子軌道を画像処理とモーションキャプチャにより計測した。結果として、縫合成功時の93%、失敗時の10%、全体で71%の一致率を示し、最適化モデルが臨床的にも妥当な推定を行っていることが示された。また、術者の経験年数と最適軌道のコストとの間に中程度の負の相関( $R=-0.43$ )も確認された。

加えて、針を持ち直すことなく多様な刺入姿勢に対応できる新たな持針器の開発にも取り組んだ。従来構想していた3ブレード方式では先端部が大型化するという課題があったため、代替としてワイヤ駆動型の2自由度屈曲機構を新たに設計した。本機構では、1本のワイヤを閉ループ状に配置し、プーリの移動および回転操作によって、ブレードの開閉および同方向への回転(屈曲)を実現する。また、垂直方向の屈曲も追加機構により可能とした。試作された鉗子は直径10mmで、 $\pm 90$ 度の屈曲、 $+80$ 度の垂直屈曲、1.4kgfの把持力を実現。操作性については医師から好評を得た一方、把持力に関してはワイヤの摩擦損失による力伝達の低下が課題として残った。

本研究の成果は、腹腔鏡下縫合の自動化やロボット支援手術における精度向上のための基盤技術となるものであり、今後は持針器の改良を通じて、より実用的かつ臨床応用可能なデバイスの開発を目指す。

## 3. 成果

1) 内池 智哉, 旭 博佑, 渡邊 達己, Jiahe Chen, 富井 直輝, 北 順二, 佐久間 一郎, 小林 英津子、  
腹腔鏡下縫合手技における 針把持姿勢と縫合軌道最適化に関する研究、精密工学会春季大会、2024

# 形状記憶材料を用いた構造変更により感度可変な力覚センサの開発

高嶋一登 九州工業大学 准教授

## 1. 目的

近年、機械やロボットは工場だけでなく、介護や福祉の現場などでも使用され、使用状況に応じて様々な力の大きさ・分布を測定する必要がある。しかし、従来の力覚センサでは、例えば、片持ち梁状の構造物の根元にひずみゲージを貼り付ける構成が用いられ（図1）、センサ材料やサイズによって測定可能な力の感度・レンジが決まっていたため変更が不可能である。そのため、使用状況に応じたセンサの交換が必要で、手間や複数種のセンサを準備するための費用の問題があった。

そのような背景から、本研究の目的は、環境に応じて構造を変え、感度や測定レンジを変更可能な力覚センサを開発することである。すなわち、構造を変更することによって、検出されるひずみと力の関係を変更させる。また、構造変更後、初期構造に復元させる必要があるため、形状記憶材料を利用する。

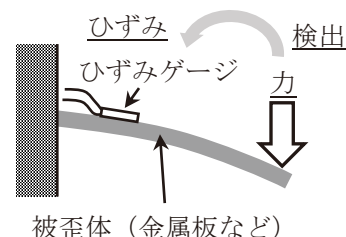


図1 従来の力覚センサの構造

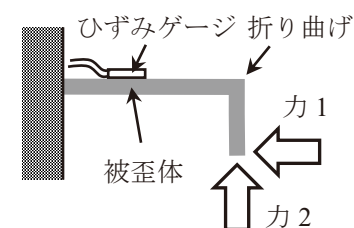


図2 L字型に形状固定後

## 2. 研究内容

我々は先行研究で、ひずみゲージを貼り付けた形状記憶材料を片持ち梁状に固定した試作センサを長手方向にL字型に折り曲げ、先端に加えた力と検出されるひずみの関係が変更可能であることを確認した（図2）。しかし、測定する力の方向や位置が変わってしまう問題があった。そこで、形状記憶ポリマー（SMP）平板（厚さ：1 mm）にひずみゲージを貼り付け、片持ち梁状に固定したセンサを試作し、断面形状を変更することで、先端に加えた力と検出されるひずみの関係が変更可能であるか、評価した。図3は円筒型、コの字型に折り曲げた例で、どちらもSMP平板を加熱して軟化させた後、変形させ冷却し、形状を固定した。様々な大きさの試作品を用いた実験により、提案するコンセプトに沿って、測定する力の位置や方向を変更することなく、力とひずみの関係を変更できることを確認した。また、構造変更後のキャリブレーションを不要にするため、自動ステージを用いて、形状を正確に変更する治具も試作し、検証した。

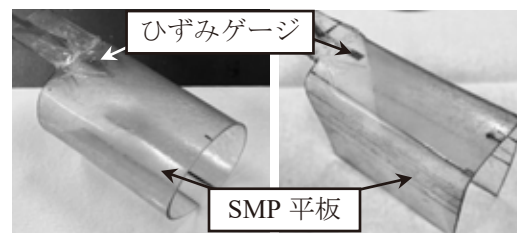


図3 試作品の写真（円筒型（左）、コの字型（右）に形状固定後）

一方、測定値と理論値には差が見られ、光弾性法などにより、断面が一様に変形していないことが原因だと考えられた。今後は、センサ根元の固定方法を改良し、引き続き、理論値との差の減少を目指す。また、開発した試作品を硬さなど材料の特性測定や、ロボットアームの物体持ち上げなどへ応用する予定である。

## 3. 成果

(1) 提案するコンセプトに沿って、感度を変更することができた（円筒型、コの字型でそれぞれ6.2、2.7倍）。

(2) 先行研究で開発した感度可変センサと異なり、測定する力の位置や方向を変更する必要がなくなった。

# ねじ対偶要素の開発とリンク機構の新展開

高田 敦 東京科学大学 助教

## 1. 目的

メカトロニクス機器の機構部は複数の剛体に対偶(関節)で連結されたリンク機構として設計される。そのうち、リンクがループを構成するものはパラレルリンクと呼ばれる。そして、従来、リンク機構の対偶には専ら回転または直動対偶が用いられてきた。本研究は、回転と直動の中間に位置する有限リードのねじ対偶要素の開発によって、今までにないリンク機構の実現を目的とし、ねじ対偶要素の開発、ねじ対偶からなるリンク機構機構の設計プロセス、試作機の製作とモーションキャプチャによる運動評価を行った。

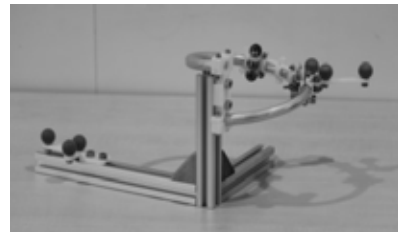


図1 らせんレール型  
ねじ対偶要

## 2. 研究内容

### (1) らせんレール型ねじ対偶要素の開発と運動評価

らせん状レールとスライダからなるねじ対偶要素(図1)を試作した。丸パイプをらせん状に曲げたレールをスライダに備えた4つの円筒ころで挟み込む方式とした。しかし、クリアランスが大きくモーションキャプチャによる評価では径方向0.9 mm、鉛直方向は2.8 mmと大きなガタとなり、パラレルリンクの対偶として十分な幾何拘束を得られなかった。

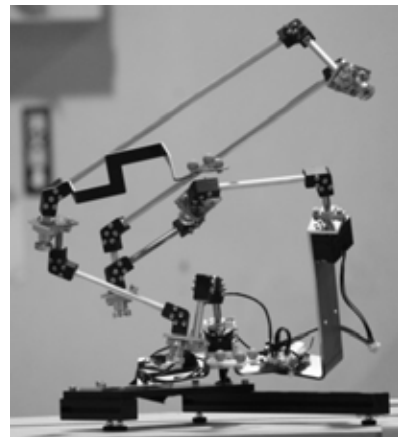


図2 7回転対偶パラレル  
リンク機構

### 2) リンク機構の機構学パラメータを具現化する対偶設計法

任意の方向を向いた対偶をつなぐリンク部材の形状設計は難しい。そこで1個のリンクを2本の線分と2つの角度に置き換え、線分端点の座標を機械CADに読み込ませることで容易に設計できるプロセスを構築した。その可用性を確かめるために、回転対偶のみからなる7対偶パラレルリンク機構(図2)を製作した。

### (3)ねじ対偶からなるリンク機構の試作と運動評価

らせん状レールによる対偶要素はパラレルリンクの拘束に必要な剛性を満たせない課題が明らかとなったため、ボールねじを対偶とした7回転パラレルリンク(図3)を設計・製作した。モーションキャプチャにより、エンドエフェクタの誤差は8.70 mm(RMSE)となった。

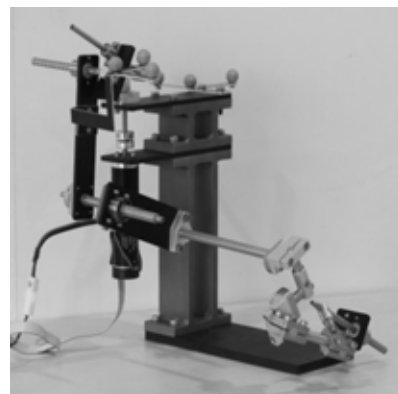


図3 ねじ対偶を含む  
7対偶リンク機構

## 3. 成果

(1) らせん状レールからなるねじ対偶要素を試作した結果、ガタが大きくパラレルリンクのループ拘束に必要な剛性を満たせない課題が明らかとなった。

(2) 対偶軸が3次的にあらゆる向きにある機構のリンク形状を2本の線分と2つの角度でパラメトライズするプロセスを確立した。

(3) ボールねじを対偶として用いた7対偶リンク機構を製作し、おむね設計通りの運動が確認できた。

# Assist As Needed を実現する冗長ハイブリッドアクチュエータの開発と立ち上がり支援装置への適用

武田行生 東京科学大学 教授  
JIANG Ming 東京科学大学 助教

## 1. 目的

高齢者の健康な社会参加を実現するために、安全、安心で、使用者身体の残存能力を最大限に活用し必要最小限の支援 (Assist As Needed) が行える、小形、軽量、安価な装置が必要とされている。本研究では、椅子型立ち上がり支援装置を対象として、使用者と支援装置がそれぞれ主体的に機能するモードを機械的に切り換えることができる冗長ハイブリッドアクチュエータにより駆動される支援装置を試作し、立ち上がり動作における支援効果を、モデル実験により検討することを目的とした。

## 2. 研究内容

図1に対象とした椅子型立ち上がり支援装置の機構およびその駆動用アクチュエータの構成を示す。支援装置は1自由度機構であり、E-RHAが本研究で開発した冗長ハイブリッドアクチュエータであり、これにより装置を駆動することで、座面とする出力リンクが上昇するとともに、その姿勢が変化し、使用者の立ち上がり運動を支援することができる。E-RHAは減速機付きモータ駆動の回転円板と出力部の間に設けられたストッパにより可動範囲が制限され、この間に設置されたばねにより小負荷を受ける構造となっており、使用者主体のモードはばねによる小支援力、支援装置が主体のモードは減速機付きモータによる支援力がストッパの機能によって切り換わる。使用者の筋発揮力を模擬するために、図2に示す装置を試作し、ダミー人形の吊り上げ力(電流)制限を種々に変えて支援装置と同期させて駆動し、この人形の立ち上がり支援実験を行い、検討を行った。

## 3. 成果

(1) 負荷に応じて動作モードを機械的に切り換えることができる冗長ハイブリッドアクチュエータ E-RHA を開発した。

(2) (1) のアクチュエータにより駆動される椅子型立ち上がり支援装置を設計、試作し、ダミー人形の立ち上がり支援実験を行った結果、開発したアクチュエータの動作モードの切り換えにより、使用者(ダミー人形)の消費エネルギーが多いことが実験的に確認され、提案したアクチュエータを立ち上がり支援装置に用いることにより、使用者の身体能力をより活用できることが示せた。

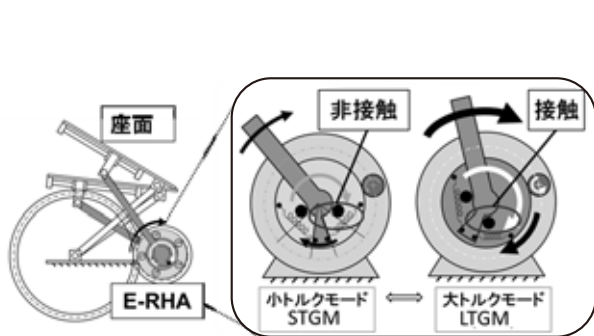


図 1 支援装置とアクチュエータの構成

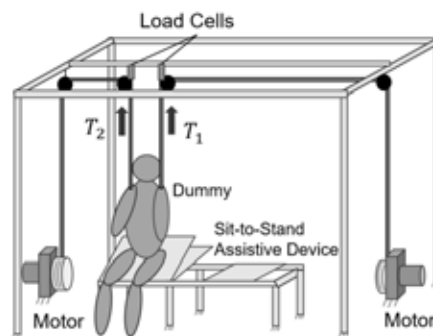


図 2 人形を用いた模擬支援実験の装置構成

# 重篤事故の原因となる体育館床ささくれ傷の見える化システム

竹村 裕 東京理科大学 教授

## 1. 目的

体育館のフローリングが剥がれ、球技に興じる利用者に突き刺さるといふ、想像するだに痛々しい事故が、各地で発生している。体育館の床の傷・割れを定期的に確認している施設は少なく、危険な状態での施設の貸し出しや運用が日常的に続いている。業者等による床フローリング点検方法は、人海戦術且つ目視での点検のみであり、精度だけでなく、時間的コストも問題になっている。上記の課題を解決するために、本研究では、重大事故に繋がる床のささくれ傷に綿を付着させることによりささくれ傷を見える化し、メカトロニクス技術を応用して自動的にささくれ傷を検出するシステムの研究開発を目的とする。

## 2. 研究内容

開発したシステムの概要を図1(a), (b)に示す。本システムでは、LiDARを用いた自律走行システムと、蛍光性の塗料で染色されたポリエステル製の綿（以下、蛍光綿）を用いた独自の傷検出システムを組み合わせており、手作業を介さずに傷の検出が可能である。開発したシステムでは、指定された範囲を自律的に走行し、床面に付着した綿を高速カメラで撮像することで、傷の位置と状態を正確に記録する。検出された傷の情報は、後に補修計画に活用される報告書として出力される。システムは、前方の綿付着部、中央の駆動部、後方の綿検出部で構成されている。綿付着部には、蛍光綿を取り付けており、モーターで回転させることで、綿を均等に床面と接触させる。また、回転により埃やゴミの絡まりを防ぎ、綿を適切に傷に付着させる。綿検出部には、蛍光綿を撮像するためのBasler社製の高速カメラが中央に配置され、その周囲を4つの紫外線LEDが設置されている。紫外線照射下で撮影された蛍光綿は、鮮明な画像として取得される。また、外光の影響を最小限に抑えるため、検出部は遮光シートで覆われている。

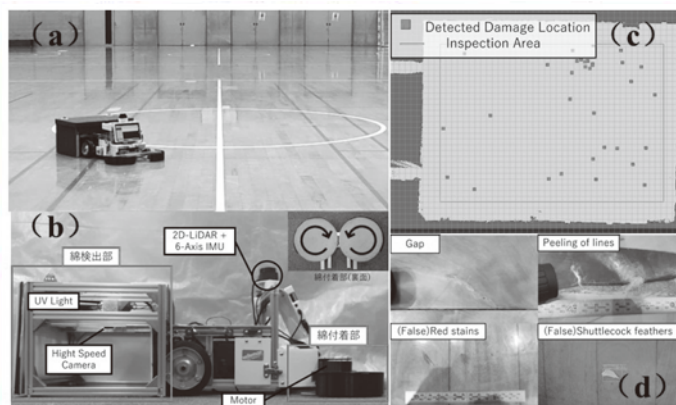


図1：開発したシステムの概要と計測結果の例

## 3. 成果

(1) 自律走行精度を評価した結果、34 m×25.75 mの検査エリア（総検査面積 875.50 m<sup>2</sup>）、検査幅 0.56 m、折り返し幅 0.25 m、52往復の条件で走行した結果、検査漏れ面積は 0.059 m<sup>2</sup>（全エリアの 0.007%）に留まり、ほぼ全域を走行して検査できることを実証した。

(2) 綿の付着率に関して、クリップを用いた模擬的なささくれ傷を 1 m 間隔で 10 個配置し、その上をシステムが走行した際に綿が適切に付着するかを確認した。その結果、94%の確率で綿が模擬傷に付着した。また、実際の付着した綿に対する検出精度に関しても、綿の大きさが 50 mm<sup>2</sup>以上であれば 91.7%の確率で検出できることを実証した。

(3) 大学構内にある体育館において、システムによる床面検査を実施し、その実用性を検証した。結果を図1(c), (d)に示す。検査時間 60 分で 33 か所の傷を検出し、そのうち 26 か所は正確に検出、7 か所は傷ではない汚れやテープなどの誤検出であった。

# 小型軽量・高牽引力・高速牽引を実現するワイヤ無限巻取り機構の開発

東郷俊太 電気通信大学 准教授

## 1. 目的

近年、商業施設や日常生活環境などヒトと接するロボットの需要が高まっている。ヒトと接するロボットは、安全のため軽量・柔軟であることが求められる。一方で、物体の把持移動や様々なタスクを行うためには高い出力も求められる。そのため本研究では、小型・軽量で高牽引力かつ高速にワイヤを牽引できる、ワイヤ無限巻取り機構を開発することを目的とした。

## 2. 研究内容

従来のワイヤ無限巻取り機構は、軸方向に長い巻取りドラムにワイヤを巻き付け、同長さのドラムで押し付けることで摩擦を生じさせワイヤを牽引していた。そこで、巻取り軸とドラム長を短くし、巻取り軸を押し付けドラムの周辺に遊星状に配置し、ギヤで巻取り軸が同期回転する、ドラム同期型ワイヤ無限遊星巻取り機構を提案し、図1に示す試作機を作成した。

図2に示すようにフォースゲージを提案機構のワイヤで牽引することで、提案機構の牽引力を計測した。計測の結果、提案機構は従来機構と同等の牽引力を発揮できることがわかった。また、比較のためにワイヤを同径の巻取り軸に直接固定した場合の牽引力を計測した結果、最大牽引力は45%以上低下することがわかった。これは、押し付けドラムと巻取り軸間で生じるラジアル荷重が原因であり、提案機構及び従来機構に共通する課題であることが明らかとなった。

そこで、軸上のワイヤ運動を完全に防止する溝つきの巻取り軸を備え、ドラムでワイヤを押しつぶすのではなく、引っ張ることで摩擦力を生成するドラム引張型ワイヤ無限巻取り機構を新たに考案し、図3に示す試作機を作成した。巻取り軸と引張ドラムの間には押しバネが配置されており、バネの硬さを調整することで、ラジアル荷重を任意に設計できるようにした。

図2と同様の実験系で牽引力を計測したところ、提案機構の最大牽引力は軸固定の場合の90%に達した。

## 3. 成果

(1) ドラム同期型ワイヤ無限遊星巻取り機構を開発した。最大で高さを53%、体積を38%削減したうえで、従来機構と同等の牽引力を達成した。軸固定の場合と比較して、ラジアル荷重等により最大牽引力が約40%以上低下する課題が明らかとなった。

(2) ラジアル荷重による牽引力の低下を避けるため、ドラム引張型ワイヤ無限巻取り機構を開発した。最大牽引力を比較した結果、最大牽引力の低下は平均10%まで抑えることができた。

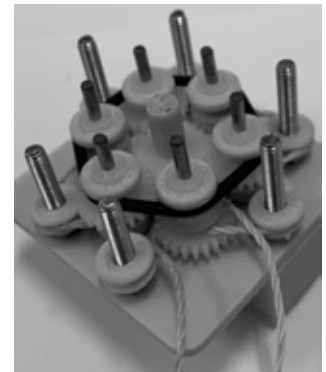


図1：ドラム同期型ワイヤ無限遊星巻取り機構の試作

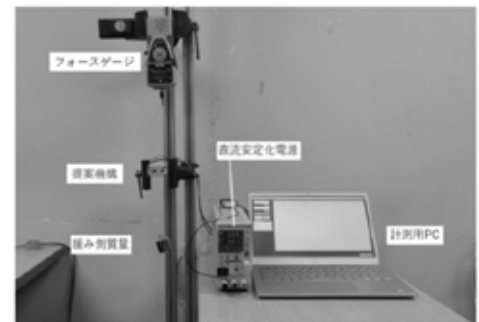


図2：牽引力の評価実験

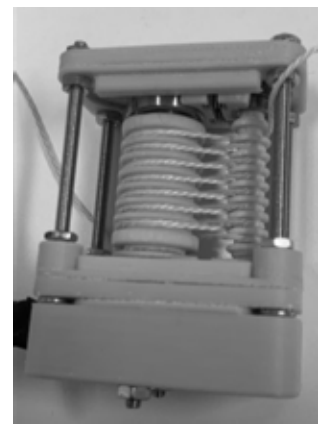


図3：ドラム引張型ワイヤ無限巻取り機構の試作

# 円筒ころ軸受に負荷されるラジアル荷重と転動体のすべりとの関係性調査

堀田智哉 関東学院大学 准教授

## 1. 目的

機械に要求される信頼性を向上させるには、軸受に加わる荷重を考慮することは必要不可欠である。一般的に、転がり軸受に加わる荷重が小さすぎる場合には、すべりが発生する場合がある。とくに高速回転の場合では、スミアリングなどの早期損傷の原因となり得るため、軸受運転時には、すべりを生じない必要最小限の荷重をかける必要がある。しかし、必要最小荷重の算出方法はメーカーによって異なっており、統一された値が記載されていないのが現状である。また、これらの必要最小荷重については算出方法の根拠が記されていない。

そこで本研究では、円筒ころ軸受を対象として、転動体公転速度を測定し、理論公転速度と比較することで、内輪回転速度と荷重とすべりとの関係を明らかにした。

## 2. 研究内容

試験軸受には円筒ころ軸受 N305 を使用し、内輪回転速度は  $1000 \text{ min}^{-1} \sim 10000 \text{ min}^{-1}$  の範囲とし、荷重は  $50 \text{ N} \sim 1000 \text{ N}$  の範囲で、転動体の公転速度を計測した。

図 1 に実験装置を示す。試験軸受は、モータによって内輪を回転させ、正面より、ころの動きをハイスピードカメラを用いて撮影速度（フレームレート） $8000 \text{ fps}$  で撮影した。その際、撮影時に明るさを調節するものとして、試験軸受とハイスピードカメラとの間にリングライトを設置した。

試験軸受のころの中心には、ターゲットマークが付与されており、ころの移動速度を撮影した画像から DIC 法によって計測した。その結果、図 2 を得た。

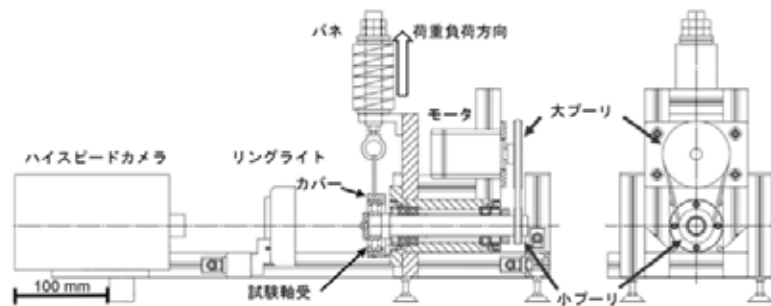


図 1 実験装置

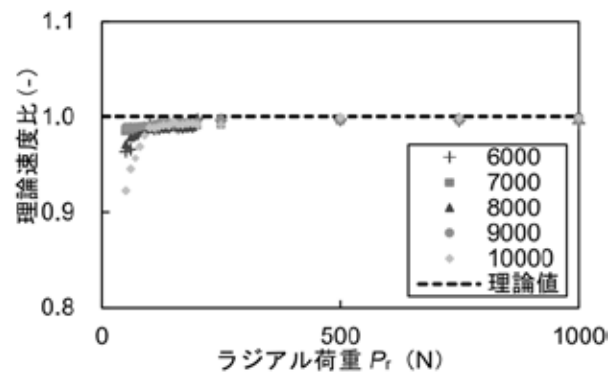


図 2 ラジアル荷重と理論速度比との関係

## 3. 成果

本研究では、円筒ころ軸受 N305 をもちいて、内輪回転速度  $1000 \text{ min}^{-1} \sim 10000 \text{ min}^{-1}$  におけるラジアル荷重と転動体公転速度との関係を明らかにした。その結果、明らかになったことを以下に記す。

- (1) 内輪回転速度が速くなるほど、転動体のすべり率は大きくなった。
- (2) ラジアル荷重が低いほど、転動体のすべり率は大きくなった。
- (3) 内輪回転速度  $10000 \text{ min}^{-1}$  で運転させる場合には、 $100 \text{ N}$  以上のラジアル荷重が必要であると推定される。この値は基本静定格荷重  $C_{0r}$  の約  $0.4 \%$  に相当する。

# 左右心流量バランス制御が可能な全置換型磁気浮上人工心臓の研究開発

増澤徹，茨城大学応用理工学野，教授

## 1. 目的

本研究では体内植え込み可能で左右心流量の個別制御が可能な全置換型磁気浮上連続流人工心臓を開発することを目的とする。患者救命と共に、生体の左右血液流量バランス調節、心流量制御機能研究について動物実験等で使用できるデバイスの実現を目指し、新規なMR流体変速機を開発する。

## 2. 研究内容

本研究では次世代の高機能人工心臓として左右心流量の個別制御が可能な全置換型磁気浮上連続流人工心臓を提案する。そのため、磁気浮上・回転する左右心用一体型インペラに組み込み、左心インペラ（駆動側）から右心インペラ（受動側）へのトルク伝達をMR流体を介して行うことで、インペラ間の回転数に差を生じさせる新規なMR流体変速機を提案した。本変速機により右心インペラの回転数を左心インペラの10%程度変速することにより、左右ポンプ間の流量バランスを調節する。

### ① MR流体変速機の研究開発：

- ・能動型MR流体変速機として、永久磁石と電磁石を併用するハイブリッド磁気構造を採用し、直径50mm、厚さ15mmのMR流体変速機を設計、製作、評価した。その結果、左心側2000rpm回転時に0.5Aの励磁電流で235rpm(11.8%)分、右心側回転数を変速できることを確認した。
- ・受動型MR流体変速機として一体インペラを軸方向に移動させMR流体被磁場面積を調節することでMR流体粘度を調節、回転数変速を行う直径50mm、厚さ15mmの受動型MR流体変速機を設計、製作、評価した。左心側2000rpm回転時に0.4mm程度の変位で200rpm(10%)分、右心回転数を変速できることを確認した。

### ② 全置換型人工心臓の研究開発

- ・能動型MR流体変速機を実装する対象としてアキシヤル型全置換型人工心臓の設計、開発を行った。浮上インペラ軸長を31.9mmから51.8mmに変更し、磁気軸受とモータステータの間に能動型MR流体変速機を組み込み、磁気浮上駆動に成功した。今後、専用の血液ポンプを製作し、左右流量バランスの調節能を検証する。
- ・受動型MR流体変速機を実装する対象としてラジアル型全置換型人工心臓の磁気浮上モータを設計、開発した。径方向支持のホモポーラ型磁気軸受を用いて、外径は55mm、高さは50mmロータ径16.8mm、8極12スロットの磁気浮上モータを製作し、励磁電流2Aで回転数2000rpmで磁気浮上回転し、人工心臓を駆動するのに十分な35mNmのトルク発生を確認した。

### ③ 人工心臓の流量バランス制御方式の基礎検討：

アキシヤル型人工心臓とゼロパワー制御を用いてインペラ磁気浮上位置から心房圧差を検知可能であるのかをモック回路を用いて検討した。0.02mm/10mmHgの心房圧変化に対するインペラ軸方向位置を確認し、能動型MR流体変速機の制御に使用可能であることを確認した。

## 3. 成果

- (1) 能動型および受動型、2種類のMR流体変速機を開発し、能動型は0.5Aの励磁電流で11%の回転数差を、受動型は0.4mmの移動量で10%の回転数差を生じさせることを確認した。
- (2) 各変速機を実装可能なアキシヤル型、ラジアル型全置換型磁気浮上人工心臓試作機の開発が行え、アキシヤル型ではMR流体変速機を実装して磁気浮上回転が可能であることを確認した。
- (3) アキシヤル型全置換型磁気浮上人工心臓でインペラ浮上位置を流量バランス制御に使用できることを見出した。

# 構造最適化手法を用いた 3D プリンテッド・マイクロゲル アクチュエーターの開発

向井理 横浜国立大学 特任助教

**1. 目的** 従来、アクチュエーターには金属や piezo 素子など硬い材料が主に利用されてきたが、軽量性、形状適応性、受動力学制御性、接触角応力分散性が高いことから、柔らかい材料から構成されるソフトアクチュエーターが注目されている。ソフトアクチュエーターの中でも、ゲルアクチュエーターは刺激応答性のゲルである *N*-イソプロピルアクリルアミド (NIPAM) ゲル等を用いることで、材料自体が流体アクチュエーターにおけるポンプや制御装置の働きをするため、構造がシンプルであり、マイクロ系への応用が期待される。しかしながら、従来のゲルアクチュエーターは材料を高精度に加工する技術がなかったため、力学的に最適化された構造ではなく、多くの報告では 2 次元的なシンプルなゲルアクチュエーターであった。

**2. 研究内容** 我々の研究室では、3 次元 (3D) プリント技術のうち最も高精細な造形が可能な光造形技術ならびに光造形樹脂用の研究履歴を有する。このことから、3D ゲルアクチュエーターの作製を試みた。まず初めに、NIPAM の架橋剤を検討することで、従来の NIPAM ゲルに比べ造形精度の優れた光造形用樹脂が得られることが明らかになった。さらに、銀ナノ粒子を組み込んだ 3D ゲルアクチュエーターを作製したところ、中心部に光を照射することで銀ナノ粒子が発熱し、アームが開閉することが明らかになった。その一方で、新たな課題として、NIPAM ゲルが銀ナノ粒子の発熱に伴い均一な膨潤・収縮運動をしているとするならば、アームを開閉するといった屈曲運動が生じないはずであり、駆動メカニズムを明らかにする必要性が生じた。3D ゲルアクチュエーターでは入り組んだ構造のため、光照射に伴いどのように材料が変化しているか詳細を評価するのは難しい。そこで、比較的シンプルな構造としてコの字型のゲルアクチュエーターを光ファイバー端面に造形した。コの字型のゲルアクチュエーターにおいても、光ファイバーを介して光を照射することでアームを開閉可能であった。マルチフィジックスシミュレーションソフト COMSOL ならびにコの字型のゲルアクチュエーターの光照射に伴う膨潤収縮挙動を部位ごとに測定し、駆動メカニズムについて調査した。その結果、レーザー端面の光がガウシアン分布に従う強度分布を持つ光がゲルアクチュエーターの中心に当たると仮定すると、中心部は強度が大きく収縮するのに対して、アームに近い周辺部は強度が弱く収縮率が低くなっていることがシミュレーションおよび実測において確認され、中心部の収縮に引っ張られてアームが閉じることが明らかになった。さらには、作製したゲルアクチュエーターを用いて細胞塊の把持および移動に成功した (図 1)。今後は、駆動メカニズムをもとに構造最適化手法を適用させることで、力学的に最適な 3D ゲルアクチュエーターの開発につながると考えられる。

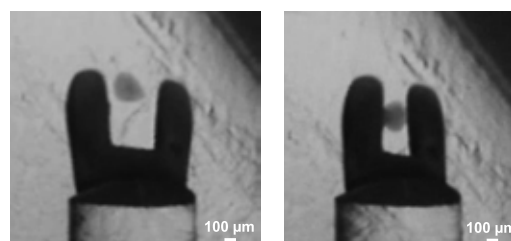


図 1 作製した 3D プリンテッド・マイクロゲルアクチュエーターによる細胞塊の把持

## 3. 成果

(1) 光駆動型の 3D プリンテッド・マイクロゲルアクチュエーターの作製に成功した。

(2) 従来のゲルアクチュエーターはバイモルフ構造によって屈曲駆動を実現している。バイモルフ構造を作製するには複雑な工程が必要であるが、本研究では材料の不均一さではなく光の分布により屈曲駆動を実現した。

# ソフトアクチュエータの駆動システムを大幅に簡素化する 極軽量電空人工筋肉の開発

山口大介 岡山大学 助教

## 1. 目的

本研究では、申請者らがこれまでに開発した髪の毛の直径と同程度の厚さ  $50\mu\text{m}$ 、質量  $0.55\text{g}$  の極薄・極軽量ポリイミド (PI) フィルム製人工筋肉と、従来、吐出圧が低くアクチュエータ駆動源への応用が試みられていないワンチップサイズの圧電ブローを一体化することで、電力供給のみで駆動可能な極軽量電空人工筋肉を実現し、その特性評価によるフィージビリティ検証を目的として実施した。一般的に、アクチュエータの数だけ大量の空圧配管と制御信号・駆動用電源の配線が必要であった空圧駆動システムにおいて、電力供給によりアクチュエータ近傍で空圧の発生・制御が可能となることから、空圧システムの大幅な簡易化と小型化が期待できる。

## 2. 研究内容

### 2.1 圧電ブローのアクチュエータ用空圧源という観点から見た駆動特性の評価

従来、送風による微細なゴミの除去等に使用されていた圧電ブローについて、電圧印加時の発生圧力と流量について評価を行った。この結果より、フィルム人工筋肉駆動に十分な特性を有していることを明らかにした (図 1)。

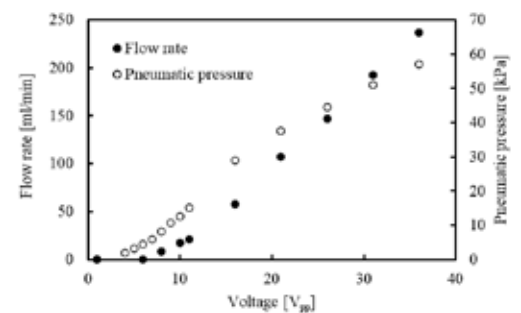


図 1 圧電ブローの出力特性

### 2.2 圧電ブローを用いた電空人工筋肉の試作

評価を行った圧電ブローとポリイミドフィルム製空圧人工筋肉を組み合わせる事で、電力印加により駆動する電空人工筋肉を製作した。製作した人工筋肉の駆動特性を評価し、印加電圧  $7.5\text{V}_{pp}$  において最大発生力  $28.3\text{N}$  を確認した。

### 2.3 圧電ブローの駆動方式変更による立ち上がり特性の改善

空圧人工筋肉内の圧力をフィードバックすることで印加電圧を動的に制御し、立ち上がり時には高電圧、安定時には低電圧で駆動を行う事で立ち上がり特性の改善を行った。また大流量低圧力の圧電ブローと、低流量高圧力の圧電ブローを組み合わせたシステムを構築した。

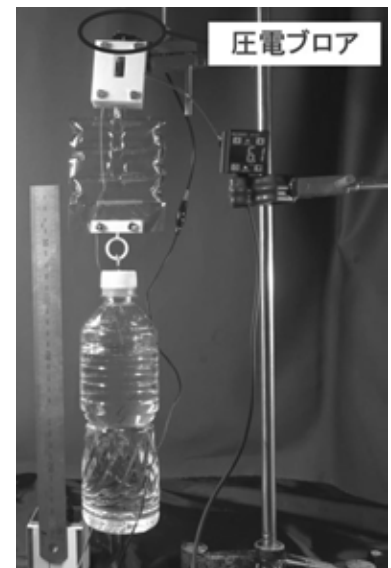


図 2 圧電ブローを搭載した電空人工筋肉

## 3. 成果

- (1) 複数の圧電ブローについて、アクチュエータ用空圧源という観点から駆動特性の評価を行い、低圧用駆動源としての可能性を見出した。
- (2) 圧電ブローとポリイミドフィルム製空圧人工筋肉を一体化させた電空人工筋肉を試作・評価し、従来の空圧駆動系と比較して質量が  $1/10,000$  以上となる軽量化に成功した。
- (3) 単純な電力印加による圧電ブローの駆動では立ち上がり特性に課題があったため、特性の異なる 2 種類の圧電ブローとチェックバルブを併用した駆動方式と、人工筋肉内の圧力をフィードバックする制御系をそれぞれ構築することで、立ち上がり特性の改善を実施した。

# 自由曲面流体ジェット研磨における研磨影響関数の デジタルツイン推定システムの構築

大和駿太郎 東京農工大学 准教授

## 1. 目的

本研究の目的は、任意曲面における流体ジェット研磨 (FJP) のプロセス影響関数 (PIF) を、CFD と限られた実スポット研磨データから推定するデジタルツインシステムを構築するとともに、それに基づく動的送り速度計画による任意自由表面形状の創成を実現することである。

## 2. 研究内容

FJP は各パス点におけるノズルの運動速度と PIF の畳み込みによって形状が創成されるため、形状創成には速度計画が重要となる。また速度計画には、第一に各パス点における PIF の 3 次元形状の事前推定が必要である。本研究では、平面を含む任意曲面に対して PIF を推定するシミュレーションモデルの構築と、PIF に基づき精緻な自由表面形状を創成するための新たな送り速度計画法の開発に取り組んだ。

## 3. 成果

- (1) 並進 3 軸と回転 3 軸を有し、オープン CNC によって各軸の運動を自由に制御可能かつ、プロセス中の実送り速度や圧力、スラリー濃度をモニタリング可能な FJP 加工装置を製作した (図 1a)。
- (2) FEM による CFD と粒子追跡の連成解析に基づき PIF を推定するシステムを構築した (図 1b)。
- (3) プロセス基底関数法という新たな送り速度計画法を考案し、従来の送り速度計画法では実現困難であった 3D 微細表面形状の精緻な自在創成を実現した (図 1c)

上記成果により、平面ワークへの任意の 3D 自由形状創成に成功した。一方で、自由曲面での PIF 推定精度がまだ低く、自由曲面上への自由表面形状の自在創成には至っていないため、今後の課題である。

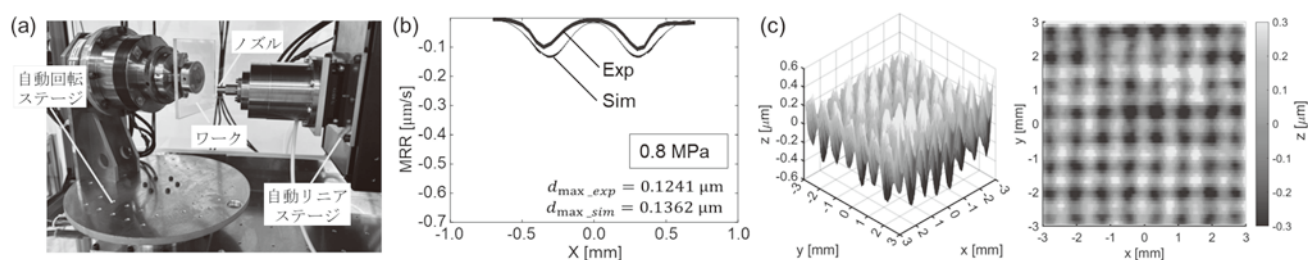


図 1: (a) 開発した FJP 加工装置, (b) PIF 推定の一例, (c) 3D 微細表面創成結果の一例

## 成果発表・受賞等

- [1] 国内学会: 柳谷隆, 大和駿太郎 (2024) 流体ジェット研磨装置の開発とその材料除去特性の評価. 2024 年度精密工学春季大会学術講演会, 東京大学 本郷キャンパス
- [2] 国際学術論文: Shuntaro Yamato, Burak Sencer, Anthony Beaucamp (2024) Concurrent process and feedrate scheduling with convoluted basis functions and its application to fluid jet polishing. International Journal of Machine Tools and Manufacture 197: 104135.
- [3] 国内学会: 柳谷隆, 大和駿太郎 (2024) Abrasive water jet micro machining における送り速度制御による三次元微細形状創成. 日本機械学会第 15 回生産加工・工作機械部門講演会, 郡山
- [4] 国際会議: Shuntaro Yamato, Takashi Yanagitani, Burak Sencer, Anthony Beaucamp (2024) Concurrent process and feedrate scheduling with analytical Gaussian-based process basis function. The 20th International Conference on Precision Engineering, Sendai, Japan.
- [5] 国際会議: Shuntaro Yamato, Takashi Yanagitani (2025) 3D micro-patterning on glass substrate using numerically controlled abrasive water jet micromachining. The 10th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, Himeji, Japan.
- [6] 柳谷隆, 大和駿太郎 (2024) 日本機械学会 生産加工・工作機械部門 優秀講演論文表彰

申請者・担当代表教員	ふりがな	たなか ひでと	印	E-mail	
	氏名	田中 秀登		役職	教授
	所属機関、学科	長野工業高等専門学校工学科機械ロボティクス系（旧・電子制御工学科）			
	ホームページ URL	<a href="https://www.nagano-nct.ac.jp/course/control/">https://www.nagano-nct.ac.jp/course/control/</a>			
	同上所在地	〒381-8550 長野県長野市徳間 7 1 6	電話番号	026-295-7087	
		連絡先FAX	026-295-4356		
この報告書を 長野工業 高等専門学校として承認いたします。 長野工業高等専門学校 校長 早瀬 伸樹					
					校長印
科目名	ものづくり基礎工学・ものづくり基礎実験（1学年・通期）、工作実習（2学年・通期）				
<p>1. 教育概要（フォント明朝 10.5pt で記入して下さい）</p> <p>本校工学科機械ロボティクス系において、メカトロニクス技術教育の目的を達成するために実験・実習および創造性教育を含む5年間のカリキュラムを体系的に編成しており、特に2022年度4月の学科再編により編成された新カリキュラムを実施するために、1～3年次の実験・実習の授業について、貴財団の助成を受けて、新規の教材開発ならびに対象授業を実施することができた。</p> <p>低学年での専門教育において、実験・実習の科目では、ものづくりに不可欠なメカトロニクス技術の技術要素に触れながら、工学的センスを養うため、複数のテーマを並列させながら、体験的に習得できるように進めている。1年次は、学科を問わず、リレーによるシーケンス制御の基本的な動作と使用方法の学習を実施した。2・3年次は、専門学科別の授業となり、更なる深い専門性と周辺領域の知識を身に付ける内容にするための新たな取り組みを実施した。学科再編による当学科の対象学生数の増加に対応するため、学習効率を考慮した教材の拡充や、新規の実験・実習の実施に伴い、新規のロボット教材開発に取り組むことができた。</p> <p>3年次のロボット製作実習では、新たに開発したロボット教材により、機械分野では寸法公差を意識した機械設計・加工・組立を実践的に学習でき、制御分野ではモータによる機械制御の仕組みと制御ソフトウェアの開発に関する学習を実施することができ、メカトロニクス技術に必要な総合的なものづくりの視点を学習できるようになった。新カリキュラムを踏まえて、3年次に適合した教育効果を得ることができた。</p> <p>今回の教材開発においては、内容の見直しをおこなうことで、他学年での実験及び実習にも活用できるものであると考えている。</p>					

2. 教育の目的、実施した対象とする学年、クラス（混合 or 単独学科かなど）、学生人数、必修か選択か、コマ数と教職員の体制（フォント明朝 10.5pt）

〈実施科目〉

(1)ものづくり基礎工学・ものづくり基礎実験：2科目合わせて総合的なものづくり教育を実施。

- ・対象学年・クラス・人数：1学年、工学科5クラス(混合学級)、約200人。
- ・必修/選択・コマ数：必修科目、週2コマ(4時限)×30週のうち、対象テーマは24コマ(48時限)。1テーマ(6週構成)を2テーマ担当。
- ・教職員の体制：教員7名および技術職員1名の計8名が、2テーマに分かれて指導。

(2)工作実習：

- ・対象学年・クラス・人数：2学年、工学科機械ロボティクス系2クラス(単独学科)、約80人。
- ・必修/選択・コマ数：必修科目、週2コマ(4時限)×30週の計60コマ(120時限)。
- ・教職員の体制：教員11名および技術職員4名の計15名が、5テーマにそれぞれ分かれて指導。

(3)ロボット製作実習：

- ・対象学年・クラス・人数：3学年、工学科機械ロボティクス系2クラス(単独学科)、約80人。
- ・必修/選択・コマ数：必修科目、週2コマ(4時限)×15週の計30コマ(60時限)。
- ・教職員の体制：教員7名および技術職員4名の計11名が、機械加工・組立6週と、制御プログラム開発6週の2テーマにそれぞれ分かれて指導し、全体でガイダンスおよび発表会の計3週を実施。

### 3. 実施した授業の達成度、教育の効果と今後の課題（フォント明朝 10.5pt）

#### (1)ものづくり基礎工学・ものづくり基礎実験(1年次)：

対象としたテーマにおいて、当初の到達目標に即して次の教育効果が得られたと考えられる。

①メカトロニクス技術に関連する各種技術要素に触れ、ものづくりに必要な各種技術の結びつきやその重要性を理解し、説明できる。

②課題に対して、アイデア出しを行い、まとめ上げることができる。

③実験で得られた結果と自分の考えを織り込みながら整理し、構成、表現に工夫を入れた報告書をまとめることができる。

以上について、学生から提出されたレポート課題により比較的高い達成度を確認できた。一方で、グループ学習であるため、他の班員に任せてしまう学生も一部見られることが、今後の課題である。

#### (2)工作実習(2年次)：

対象とした PLC 搬送制御のテーマおよびモータ実験のテーマを中心に、当初の到達目標に即して次の教育効果が得られたと考えられる。

①レポートは、必要事項が書かれており、さらに技術者が納得する品質で書くことができる。

②実験実習の目的や内容、理論を理解した上で実験の目的にあった結果を取得し、さらに整理してまとめることができる。

③実験結果や理論などを踏まえて、多方面から工学的に考察することができる。

以上について、提出されたレポート課題により、その達成度を確認できた。

#### (3)ロボット製作実習(3年次)：

新たに開発したロボット教材は、産業ロボットの基礎となる 2 軸スカラ型ロボットであり、機械分野では寸法公差を意識した機械設計・加工・組立を実践的に学習でき、制御分野ではモータによる機械制御の仕組みと制御ソフトウェアの開発に関する学習を実施することができ、メカトロニクス技術に必要な総合的なものづくりの視点を学習できるように構成されている。新カリキュラムを踏まえ、3年次に適合した教育効果を得ることができた。

モータ構造とモータ制御方法を学び、モータ特性の確認をおこなうことができた。

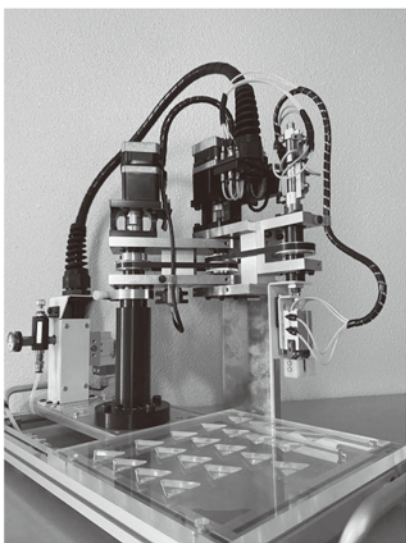


写真1 開発したロボット教材  
(3年・ロボット製作実習)

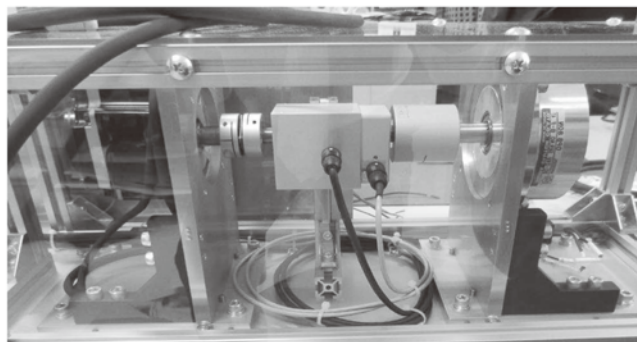
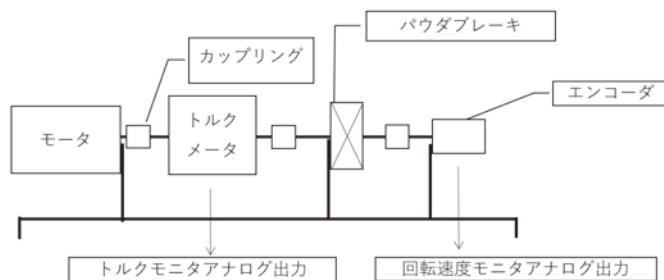


写真2 開発したモータ評価教材（上図は構成図）  
(2年・工作実習)

#### 4. 使用した教育機材の問題点と予定と相違した場合（有れば）その理由（フォント明朝 10.5pt）

予定と相違した内容として、当初は、1年次のものづくり基礎工学・ものづくり基礎実験、2年次の工作実習を対象授業として計画したが、年次進行の新カリキュラムの授業準備に伴って、3年次のロボット製作実習の教育教材の開発にも、貴財団の助成を使用させていただいた。

変更理由は、1～2年次におけるメカトロニクス技術の基礎的な教育内容を踏まえた上で、3年次にその高度化を図るための新たなロボット教材の開発を企画して実施したためである。当初計画の一部支出を調整し、新教材の開発に対応した。

ロボット製作実習で開発した新たな教育機材の問題点としては、3年次の比較的低学年で実施するカリキュラムであるため、専門的な座学の学習が不足した状況で実施する部分である。ただし、座学を学んで上で実習した方が良いか、実習をした上で座学を学んだ方が良いか、どちらも一長一短があるため、当該授業においては後者のメリットを活かし、実際のロボット教材の製作および制御実習を体験的に学習することで、高学年での専門学習への学習意識の向上を側面的な目標として実施した。

ロボット製作実習で開発した教材は、予算都合もあり、12台(学生用10台、教員1台、予備1台)準備した。このため、1班4人程度で1クラス約40人に対応しているが、より少人数で実施するためには、台数を増やすことが課題として考えられる。現状では、クラスの半数が6週で機械加工・組立を実施し、残りの半数が同6週で制御ソフトウェア開発を行っているため、6週のうち機械加工を行う4週は、2人1組で10台の教材を使用できているが、組立を行う2週は、4人1組での実施となっている。

モータ構造とモータ特性評価装置は、写真2に示すようなモータ・トルク変換器・ブレーキ・速度計測用エンコーダの構造としている。モータは400Wクラスまでの特性が可能となっている。アナログ出力のため、オシロスコープを用いて、トルク・モータ速度特性が確認できるようにしている。この点は、想定範囲であったが、サーボモータを扱う場合に、どうしても付きまとうサーボパラメータのチューニングの最適解をどのように得るのか、サーボパラメータを変えることにより、どのような動差が得られるのかを、モータ負荷を変えることにより実機確認できるように拡張すべきであったと考えています。開発したモータ特性評価装置を制御を絡めたシミュレーションと実機確認できるような検討及び、変更をおこなうことで、他の授業でも使える教材となると思われます。

## 財団設立趣意とその後の経緯

グローバル化する国際経済環境の中で、我が国産業がひきつづき発展をとげるには、産業技術の一層の進歩に大きな役割が期待されます。この期待に応え得る技術の中で、機械の運動に関する技術と運動の電子制御に関する技術をシステム統合して一体化するメカトロニクス技術は、今日までとりわけめざましい発展をとげ、さらに未来の技術革新に果たす役割への期待は広がりつつあります。

これまで、機械工学と電子工学の技術融合により開花したメカトロニクスの産業技術は、これからの発展に向けて機械、軸受などの機械要素、センサ、アクチュエータ、運動制御、ロボット化など、多くの未解決の課題があります。その解決には、より高度な知的機能、マイクロ～ナノ・メートルへの微細化と極超精密化、超苛酷な使用条件、カーボンニュートラルをはじめとする地球環境対応やエネルギー革命など、今迄とは異なる次元への技術革新が求められます。それには、機械および電子制御のみならず、トライボロジー、素材、光学、情報、AI、ロボットなど、多分野にわたる知見を採り入れた産業技術の開発が必要不可欠です。さらに技術開発の段階においても、基盤になる科学と技術の研究・開発とともに、多分野の学際領域についての高専、大学、研究機関等における研究と産業における技術開発とを融合させつつ、基礎にまで立ち戻った研究が強く求められます。

私共は以上のような認識に立ち、メカトロニクス技術の一層の飛躍、発展を実現するため、メカトロニクス技術の高度化に関する研究・開発、技術交流、国際研究集会への助成などにより機械を基盤とする産業技術の高度化を図り、我が国産業の発展と国民生活の向上に寄与する目的で、1988年「財団法人メカトロニクス技術高度化財団」を設立しました。

2010年には公益財団法人に移行するのを機に、その名称を「公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団」と変更しました。これにより私共は出捐企業である日本精工株式会社およびそのグループ会社と一体となってメカトロニクス技術の高度化を図るための助成事業の取り組みを強化し充実させるとともに、2012年にはメカトロニクス技術教育の助成事業を開始し、2017年には教員個人が行う教育も支援対象としました。2018年には財団設立30周年を迎えることができました。今後とも我が国のメカトロニクス技術分野の人材の増加とレベルの向上を目指してまいります。

財団設立日	1988年4月30日
公益財団法人移行日	2010年11月1日
行政庁	内閣府

## 事業内容

- (1) メカトロニクス技術の高度化に関する研究開発への助成
- (2) メカトロニクス技術の高度化に関する技術教育への助成
- (3) メカトロニクス技術の高度化に関する技術交流への助成
- (4) メカトロニクス技術の高度化に関する講演会、研究会等の開催及び助成
- (5) メカトロニクス技術の高度化に関する情報の収集及び提供
- (6) 上記に掲げるもののほか、本財団の目的を達成するために必要な事業

## 理事

理事長	内山俊弘	日本精工株式会社 相談役
専務理事	東山聖一	当財団事務局長
理事	荒牧宏敏	元日本精工株式会社 専務
理事	進士忠彦	東京科学大学未来産業技術研究所教授
理事	杉村丈一	九州大学名誉教授 水素材料先端科学研究センター特任教授
理事	樋口俊郎	東京大学名誉教授
理事	北條春夫	東京工業大学名誉教授
理事	若林利明	香川大学名誉教授

## 監事

監事	満江直樹	元日本精工株式会社 専務
監事	望月明美	(株)ツムラ社外取締役 旭化成株式会社 社外監査役 SBI ホールディングス(株)非常勤監査役 公認会計士

## 評議員

評議員	加藤総一郎	元当財団専務理事
評議員	黒河周平	九州大学教授
評議員	澤江義則	九州大学教授
評議員	下条誠	電気通信大学名誉教授
評議員	田中裕久	横浜国立大学名誉教授
評議員	長竹和夫	元株式会社 AD Tech 社長
評議員	野波健蔵	千葉大学名誉教授
評議員	羽根一博	東北大学未来科学技術共同研究センター特任教授
評議員	松原正英	元日本精工株式会社 専務
評議員	山川宏	早稲田大学名誉教授

## 沿革

1988年	4月	財団設立、基本財産3億円、理事長 長谷川正男(日本精工(株)取締役会長) 審査委員長 石原智男(東京大学名誉教授、(財)日本自動車研究所副理事長)
1990年	2月	荒田俊雄(日本精工(株)取締役社長) 理事長就任
	9月	事務所を東京都千代田区丸の内から東京都品川区大崎に移転
1991年	3月	佐田登志夫理事(東京大学名誉教授、理科学研究所副理事長) 審査委員長就任
	3月	日本精工株式会社2億円寄附 基本財産5億円に
	6月	エヌエスケー・ワーナー株式会社1億円寄附 基本財産6億円に
	12月	エヌエスケー・トリントン株式会社5千万円寄附 基本財産6.5億円に
1992年	6月	エヌエスケー・トリントン株式会社5千万円寄附 基本財産7億円に
1999年	3月	土屋喜一理事(早稲田大学教授) 審査委員長就任
2002年	7月	関谷哲夫(日本精工(株)取締役会長) 理事長就任
2007年	3月	染谷常雄理事(東京大学名誉教授) 審査委員長就任
2009年	7月	朝香聖一(日本精工(株)取締役会長) 理事長就任
2010年	11月	公益認定により公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団と改称し移行
2012年	4月	高等専門学校におけるメカトロニクス技術教育への助成事業を開始
2017年	3月	下河邊明理事(東京工業大学名誉教授) 審査委員長就任
	4月	高等専門学校におけるメカトロニクス関連教育を担当する教員個人への支援を開始
2018年	11月	財団設立30周年記念式典開催
2021年	7月	北條春夫理事(東京工業大学名誉教授) 審査委員長就任
2023年	2月	内山俊弘(日本精工(株)取締役会長) 理事長就任
2025年	3月	樋口俊郎理事(東京大学名誉教授) 審査委員長就任

## 助成実績

	1988年度～ 2019年度年計	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	合計
研究開発助成(件)	598	15	16	18	17	15	679
教育助成(件)*1	41	7	5	1	2	7	63
技術交流助成(件)	133	—	—	—	—	—	133
集会助成(件)	100	4	6	3	4	3	120
助成金額合計(千円)	1,037,940	43,180	41,157	39,705	40,973	40,923	1,243,878

\*1 教育助成は2012年度から開始

## 研究助成・教育助成 成果報告書 No. 35

公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団 2022 (令和4)年度(第13期)助成事業分

2025年8月1日発行

公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団

NSK-FAM (NSK Foundation for the Advancement of Mechatronics)

〒141-0032 東京都品川区大崎1丁目6番3号(日精ビルディング)

電話：03-5496-5746、FAX：03-5496-5748、ホームページ：<http://www.nskfam.or.jp/>

編集発行人：事務局長 東山 聖一

印刷：株式会社 TPS