

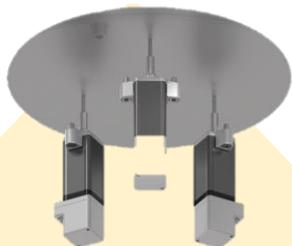
# 汎用型空気圧アクチュエータ による超高精度位置決め制御

徳島大学 大学院社会産業理工学研究部  
教授 高岩 昌弘

2023年9月12日

# 研究の背景と目的

半導体ウエハ搬送



協働ロボット



手術支援ロボット



基本特許（大学単独）に基づく成長産業分野への応用展開

- 超高精度位置決め技術の提案
- これまで電動式の独壇場であった精密作業分野への応用

摩擦力の影響を受けやすく高精度位置決めには不向き

汎用・廉価な空気圧アクチュエータ

低発熱特性

高出力/重量比特性

低電磁ノイズ特性

低コストで  
クリーンな環境

産業用アクチュエータとして潜在的な魅力

# 提案手法の特徴

- 従来法と全く異なる設計コンセプト

従来の位置偏差を時間積分する方法ではなく、位置偏差の状態に着目したポテンシャル型ハイゲイン制御の提案

摩擦力が見かけ上存在しないように作用させる要素

+

位置偏差に反比例してハイゲイン化する要素

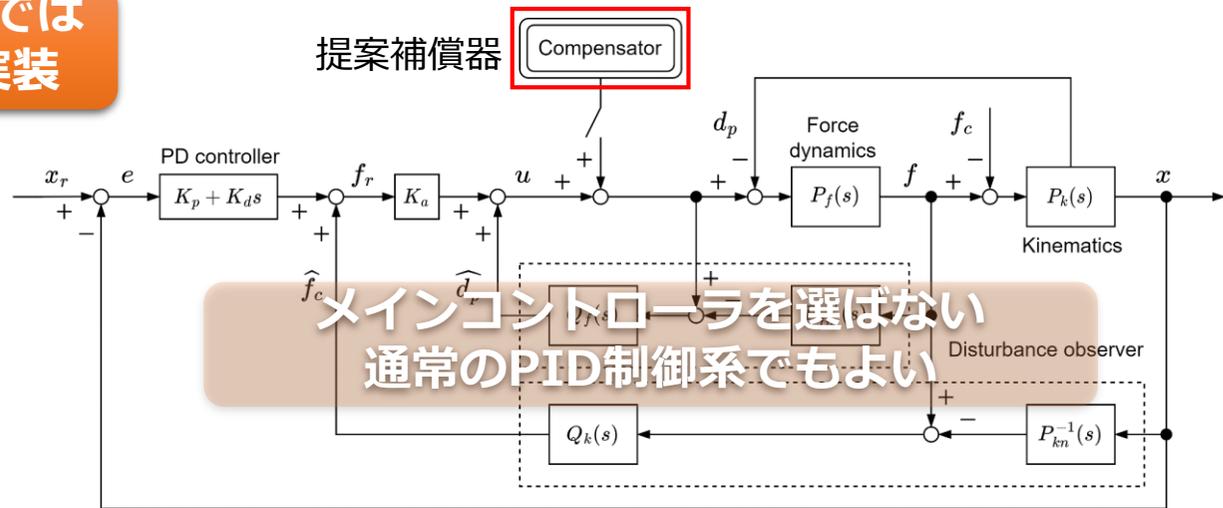
=

安定範囲内でサーボゲインを飛躍的に高めることを可能とした

- 実装法の特徴

メインコントローラではなく補償器として実装

作業場面に応じたオンデマンド的な利用法が可能



- 幅広い拡張性

物理量を選ばない



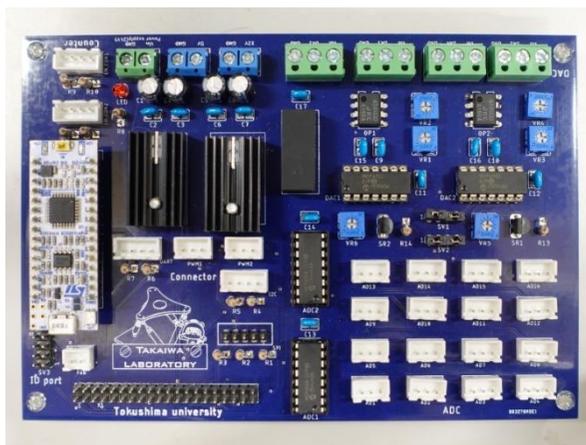
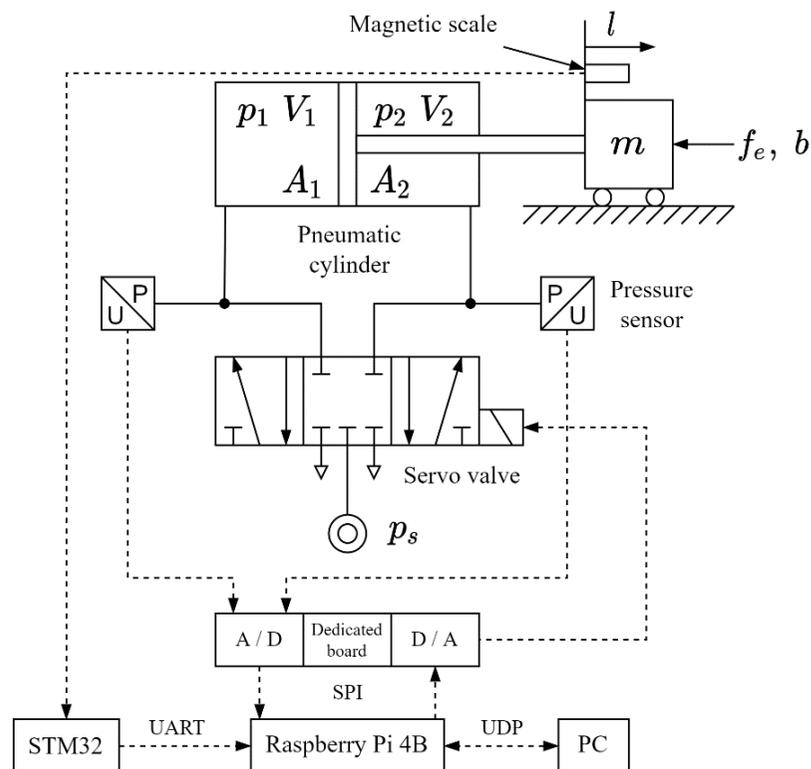
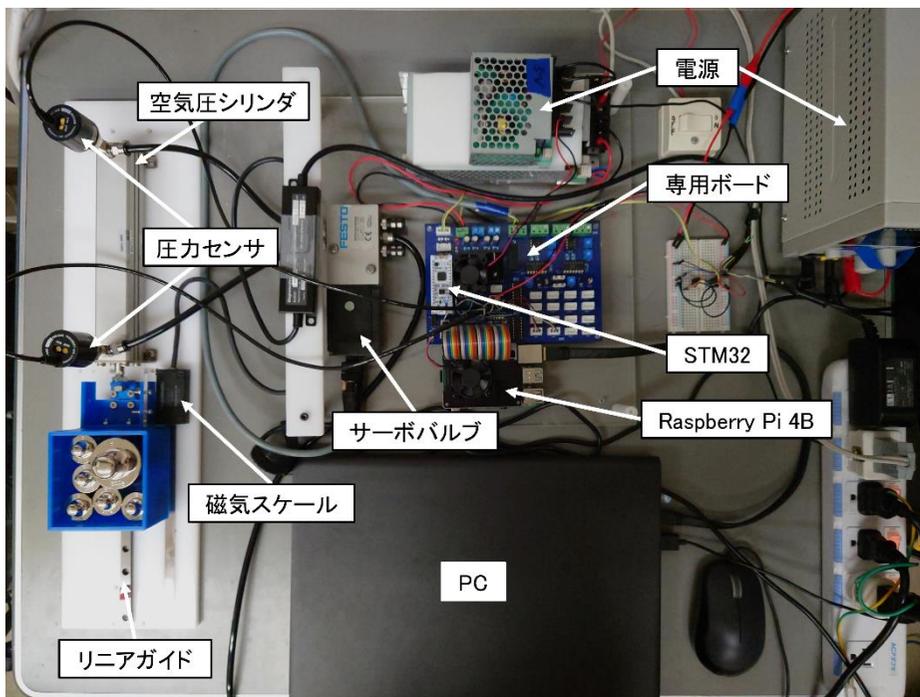
速度制御、力制御への応用展開が可能

動作媒体を選ばない



油圧アクチュエータ、電動モータへの応用展開が可能

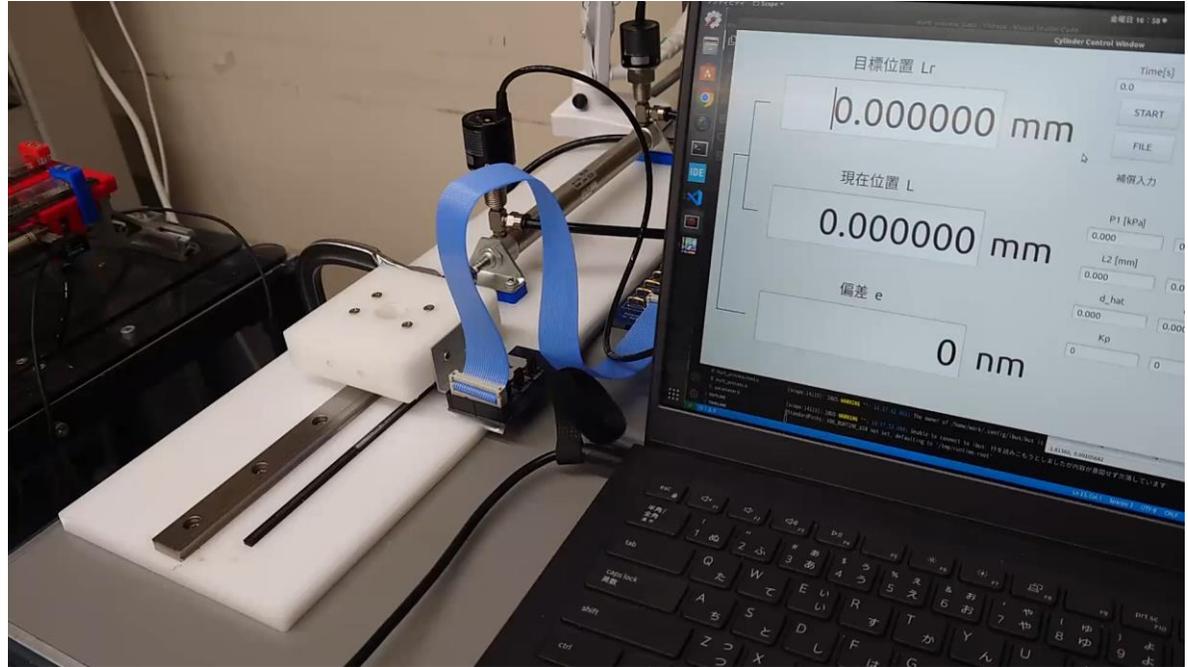
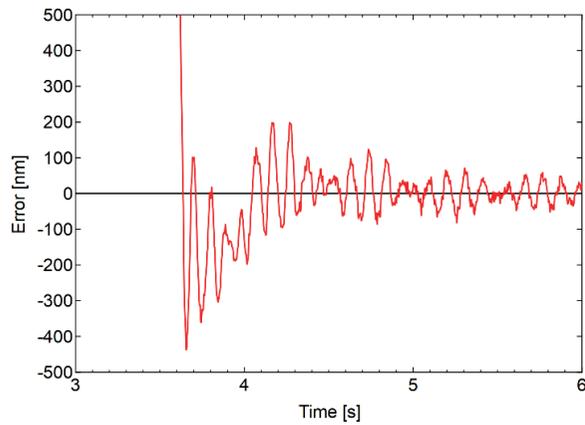
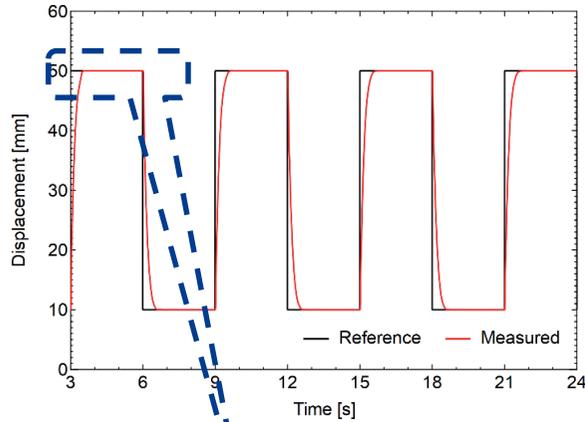
# ノートPCを用いた計測制御環境の構築



- Note-PC Linuxのリアルタイム拡張であるRTAI(ハードリアルタイム方式)を実装し、サンプリング周期は2ms
- A/D, D/A, カウンタは研究室で新たに開発した専用基板上に実装し、RaspberryPi-4BとSPI通信でデータ授受 Note-PCとRaspberryPiはUDPソケットによるイーサネット通信によりデータ授受
- 現在, RaspberryPiの機能も含めた小型ボードの製作をすすめている

# 負荷なし応答

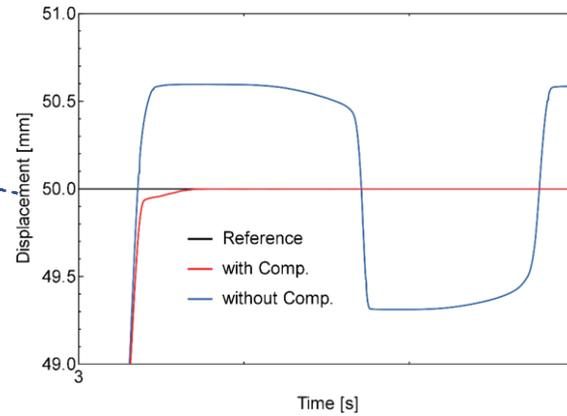
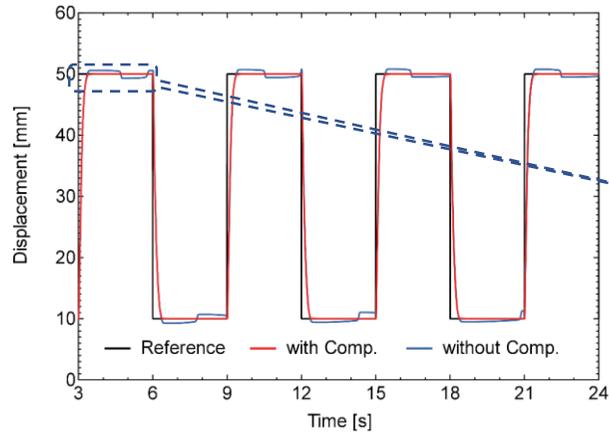
目標値10mmと50mmを交互に与えたステップ応答（負荷なし）



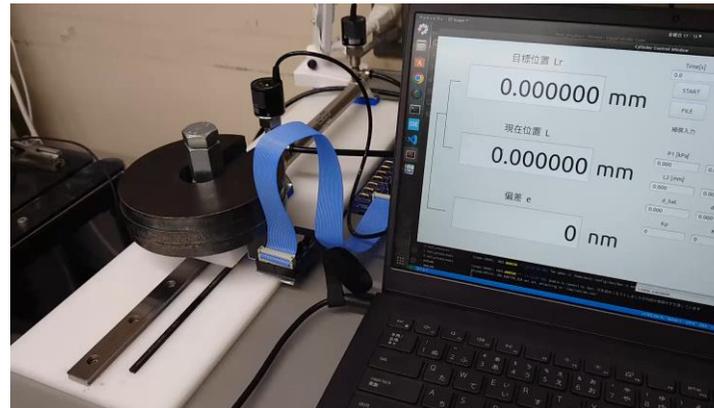
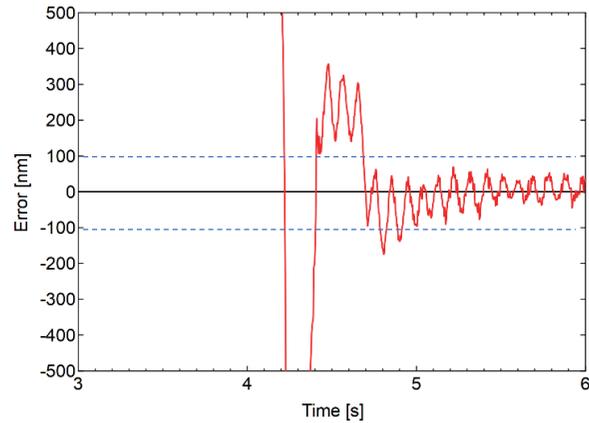
定常状態において、誤差は $\pm 0.1\mu\text{m}$ に収まっていることが確認できる。

# 負荷あり応答

目標値10mmと50mmを交互に与えたステップ応答（慣性負荷3kg）



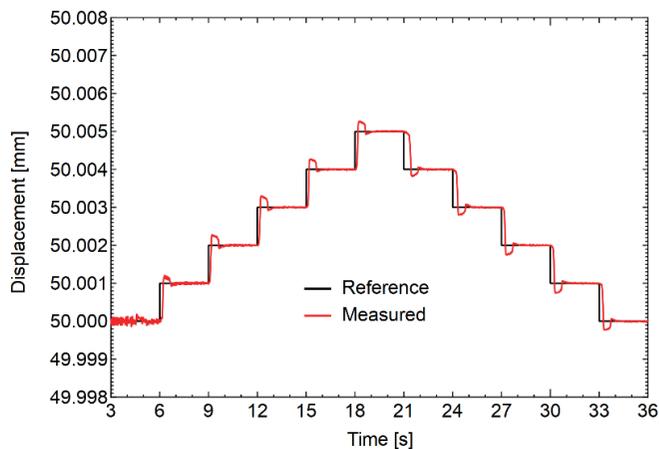
補償器なし（青線）ではStick-slipにより大きな誤差が生じてしまう。



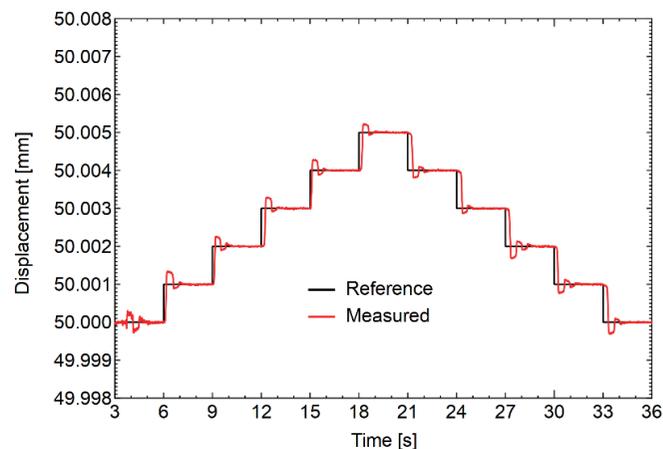
定常状態において、誤差は $\pm 0.1\mu\text{m}$ に収まっていることが確認できる。

# 微細(1 $\mu$ m)送り

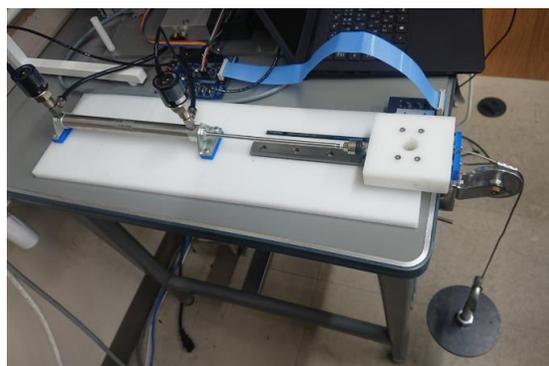
目標値50mmのステップ応答を行った定常状態で種々の環境下で1 $\mu$ mステップ送りを行う



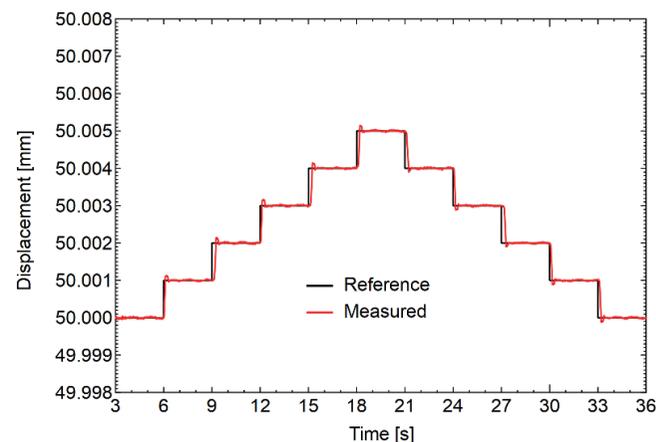
慣性負荷なし



慣性負荷(3kg)



引張荷重(3kgf)環境

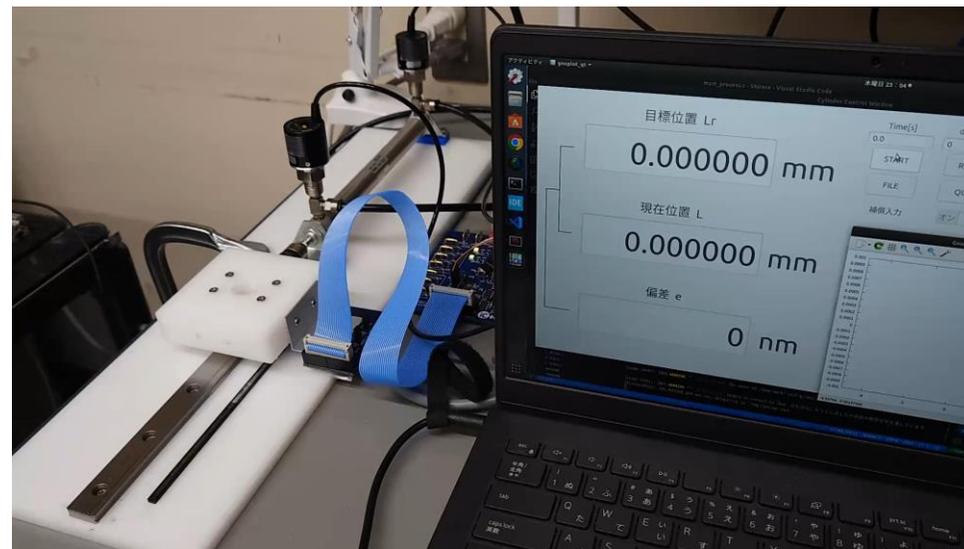
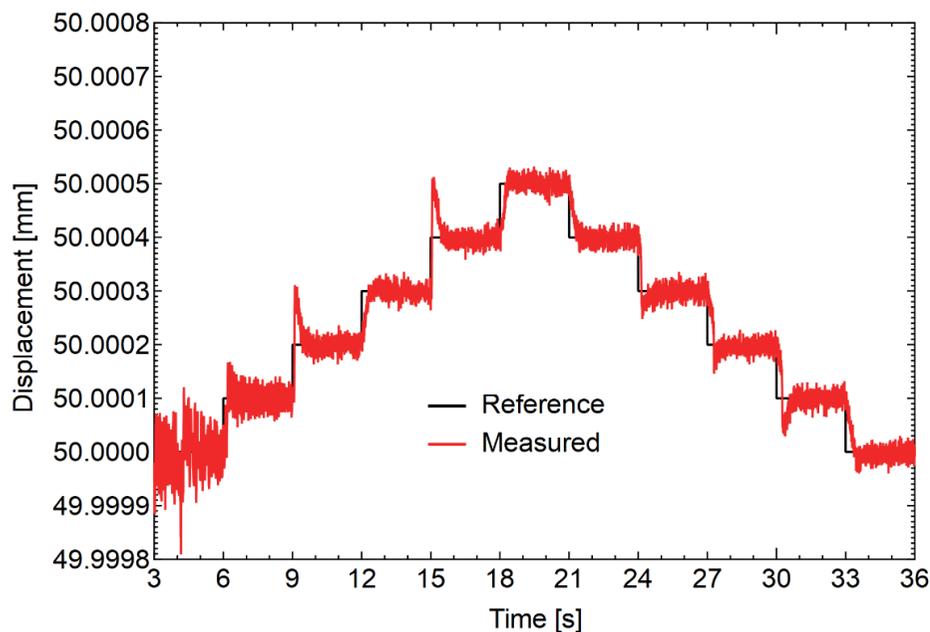


引張荷重(3kgf)

従来とおり、1 $\mu$ mステップ送りが実現できていることが確認できる。  
定常状態において、位置決め誤差は50nm幅（図縦軸の最小目盛り10個分）となっている。

## 超微細(0.1 $\mu\text{m}$ )送り (負荷なし)

目標値50mmのステップ応答を行った定常状態で0.1  $\mu\text{m}$ ステップ送りを行う (負荷なし)

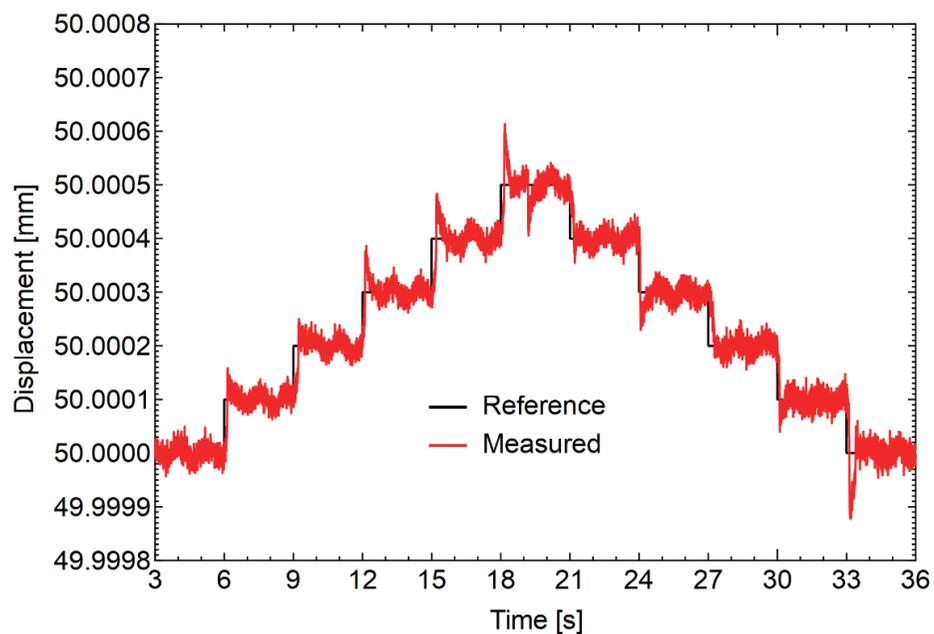


動画

0.1 $\mu\text{m}$ ステップ送りが実現できていることが確認できる。  
定常状態において、位置決め誤差は50nm幅 (図縦軸の最小目盛り10個分) となっている。

## 0.1 $\mu\text{m}$ 送り (引張荷重3kgf)

目標値50mmのステップ応答を行った定常状態で0.1  $\mu\text{m}$ ステップ送りを行う (引張荷重3kgf)

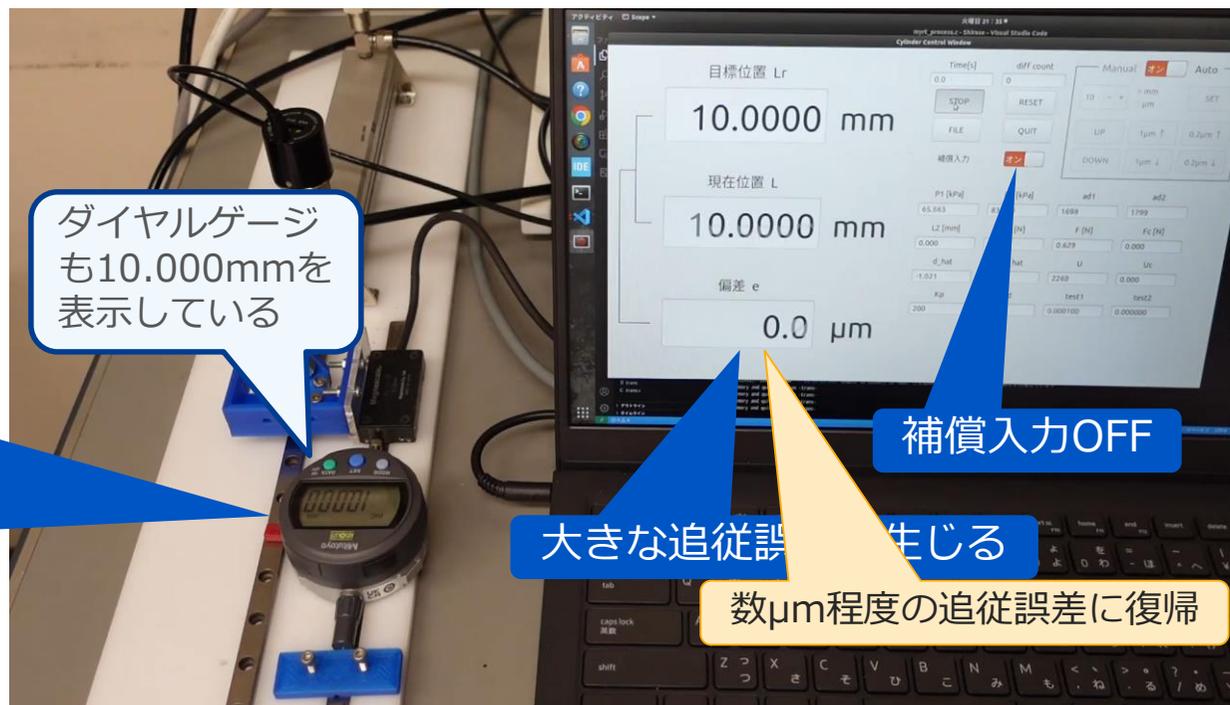


動画

0.1 $\mu\text{m}$ ステップ送りが実現できていることが確認できる。  
定常状態において、位置決め誤差は50nm幅 (図縦軸の最小目盛り10個分) となっている。

## 超微速制御

目標値をランプ状に変化 (0.1mm/s)させた時の追従特性を確認する



途中で補償入力をOFFにすると、大きな追従誤差が生じ始めている。一般に大きな摩擦環境下での微速追従は容易でないが、0.1mm/sの目標速度に対して数ミクロンでの誤差での追従が可能である。

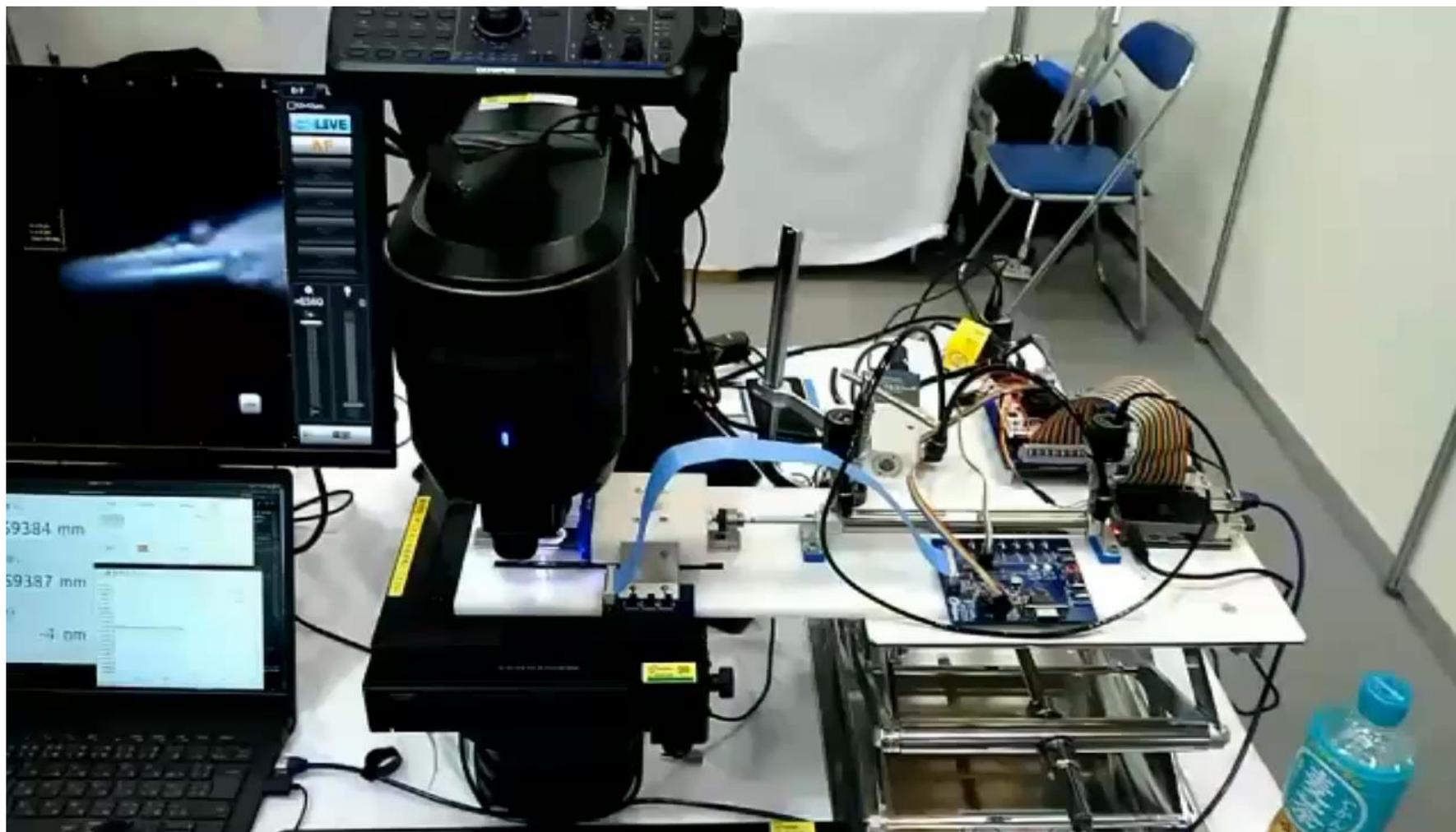
# オンデマンド的な使用

補償入力を途中から入れた場合の応答

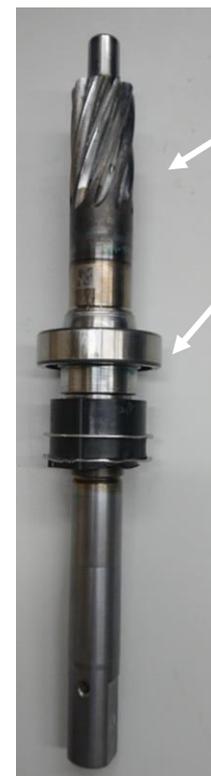
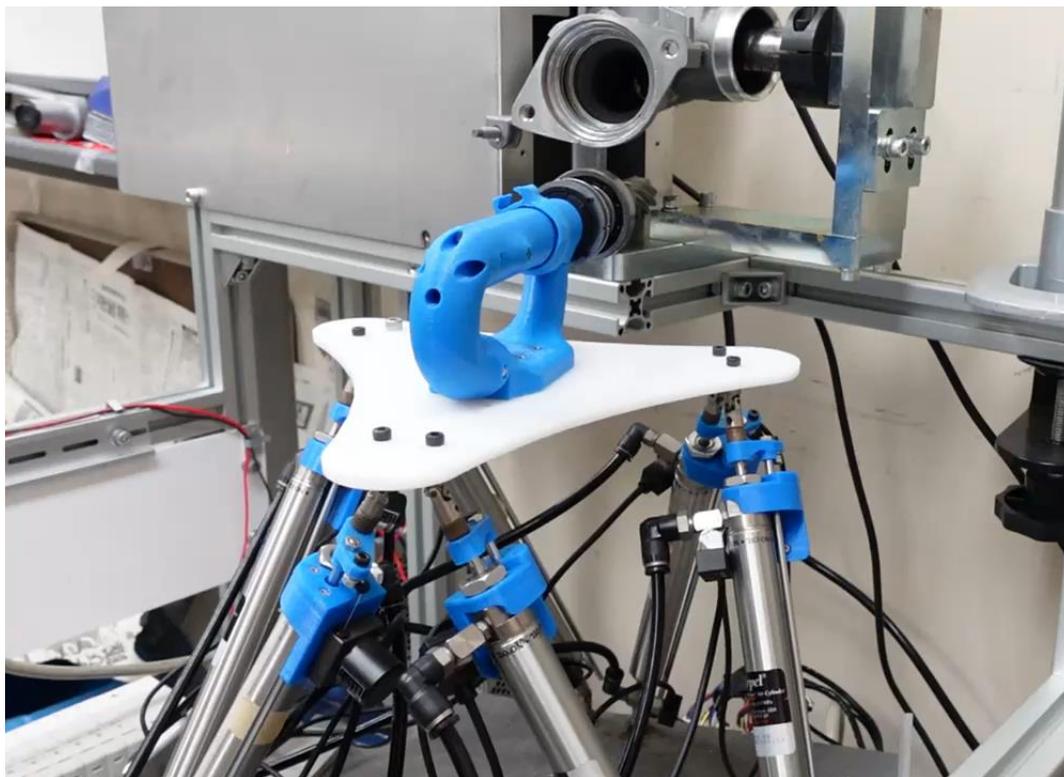


先述した負荷無しの場合と同様の特性が確認できる。

# デジタルマイクロスコープ下での動作



# 地元企業との共同研究 (ラックバーとピニオンシャフトの精密嵌め合い)



ピニオンギア

+

ベアリング

||

同時嵌め合い

熟練技術



自動化

嵌め合い動作開始時に、ベアリングとベアリングホルダを正確に位置決めをすることで、嵌め合い成功率が飛躍的に高まる。



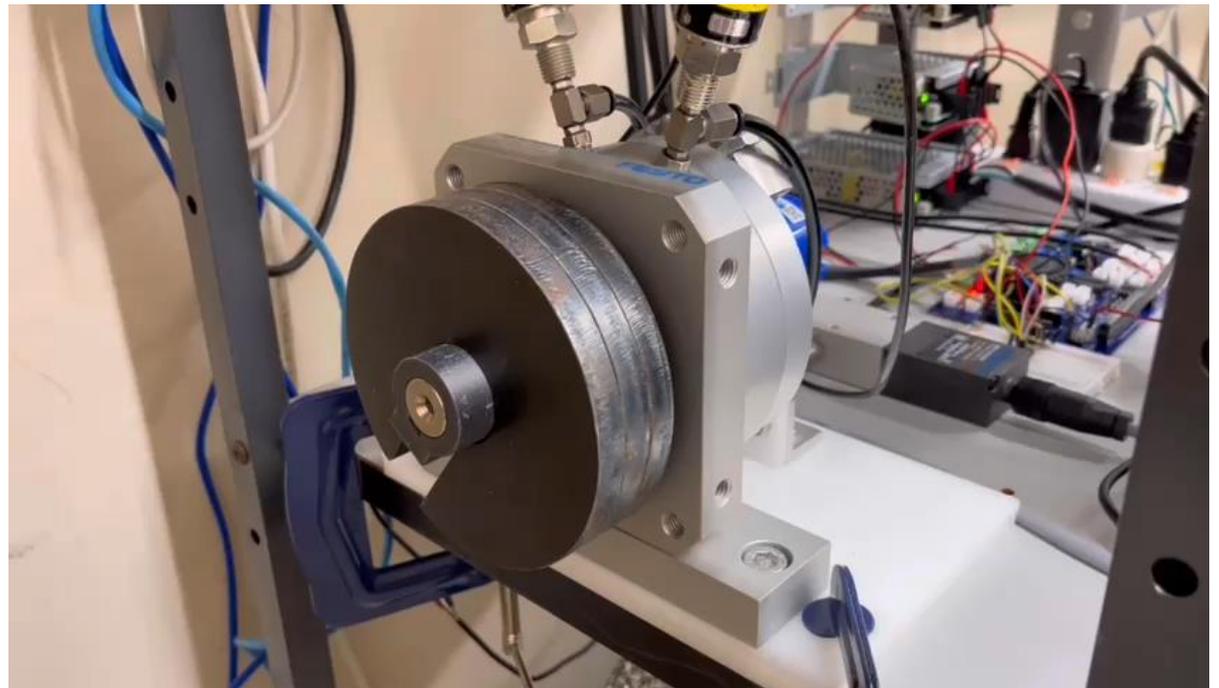
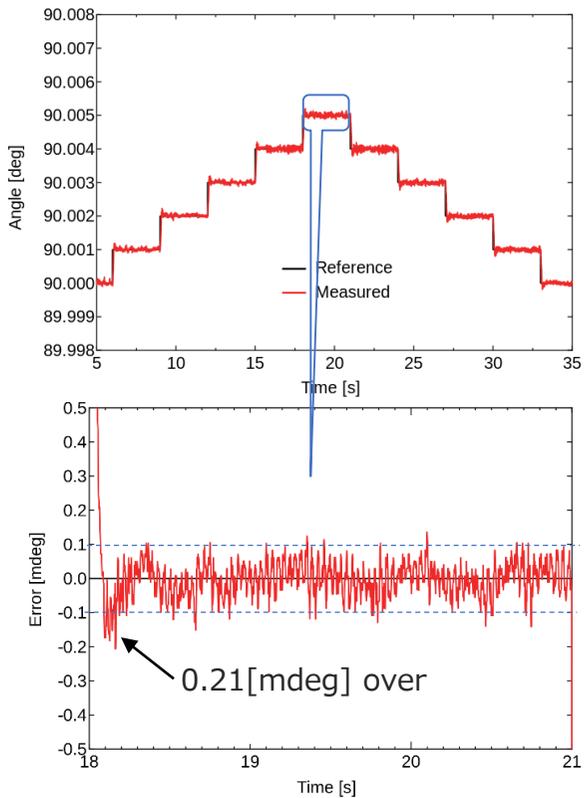
嵌め合い開始時には高剛性化(精密位置決め)を行い、嵌め合い時には低剛性特性に戻し、嵌め合い誤差の自動吸収機能を利用



提案する精密位置決め技術の適用によりアドオンの利用による可変剛性機能の実現

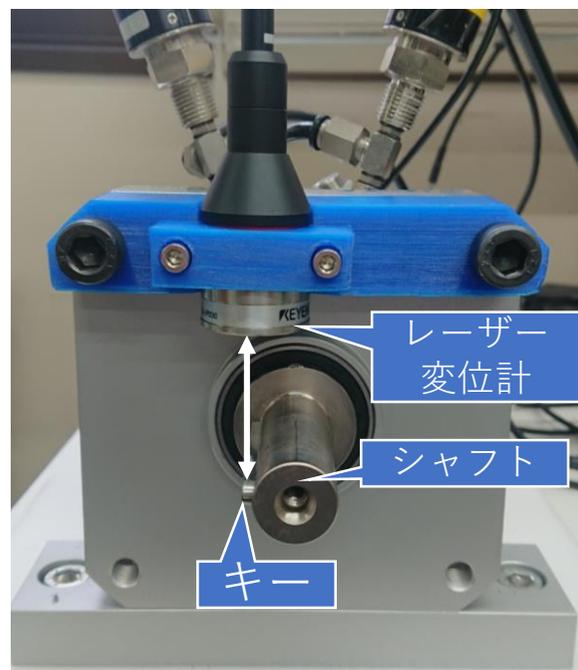
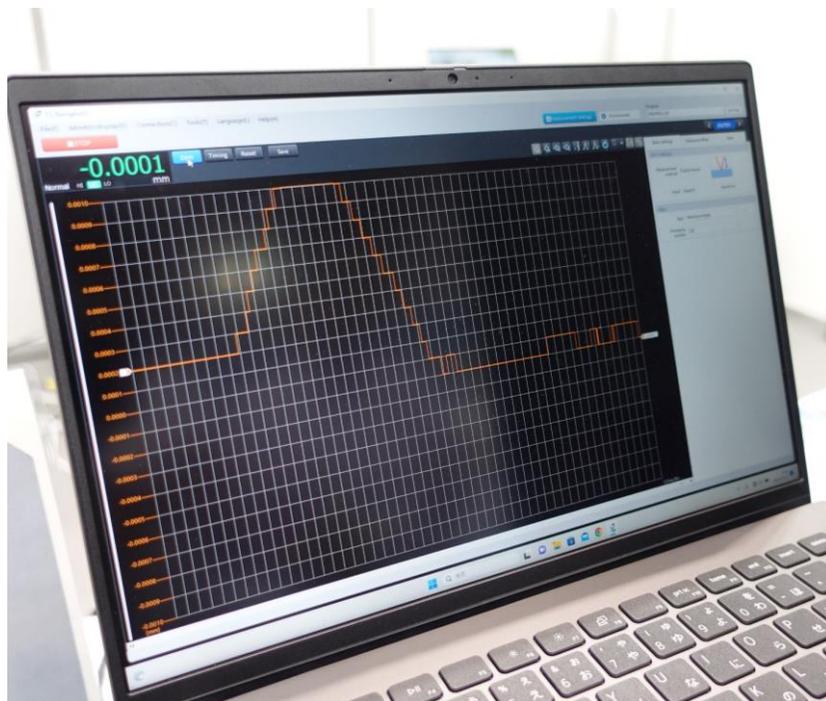
# 1/1,000度 ステップ送り (ロータリタイプ3kg 負荷)

90度のステップ応答を行った定常状態において1/1000度のステップ送りをを行った。



1/1000度の微小ステップ幅に対しても追従可能であることがわかる。  
また、誤差は1/10,000度に収まっている。

## レーザー変位計での計測



ロータリシャフトのキー溝のキーの高さ方向変位をレーザー変位計で計測する。

1/1,000度ずつ回転させると計算では0.2 $\mu$ mずつ高さ方向に変位するが、計測値と一致することを確認している。

## 想定される用途

- **可変剛性機能の活用**により、柔軟特性と高剛性特性を作業内容に応じてオンデマンド的に切り替え可能なため、**協働ロボットへの応用展開**が期待できる。
- 繰り返し動作時でも**発熱せず**、**電磁ノイズの影響を受けにくい**ため、半導体産業等の**精密作業分野への応用展開**が期待できる。
- **センサレスでの外力推定**や**圧力微細制御**による**触覚提示**が可能であるため**手術支援ロボットへの応用展開**が期待できる。

## 実用化に向けた検討内容

- 現在、**リニア駆動タイプ**での定常偏差は**±50nm程度**であるが、近く**pmオーダのリニアスケール**が導入予定であり、**数nmオーダの位置決め精度**が実現できる可能性がある。
- 過渡応答特性については、**目標加速度に基づく軌道生成とフィードフォワードループの導入**による改善を予定している。
- **負圧駆動**も可能であるため、**クリーンルーム内での利用**の可能性についても検討したい。

## 企業への期待

- 発熱の心配がなく、電磁ノイズの影響を受けにくい空気圧サーボは産業用アクチュエータとして大きな魅力を有する。本技術は、これまでボトルネックであった精密位置決めの問題を解決するものと考えている。
- 精密作業分野への空気圧サーボの応用展開を考えている企業との共同研究を希望。
- 本技術は動作媒体を選ばないため、油圧や電動アクチュエータの性能改善を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：制御入力生成装置、制御装置、  
制御入力生成方法、アクチュエータ  
および演算回路
- 出願番号：特願2023-98254
- 出願人：徳島大学
- 発明者：高岩昌弘、白瀬左京

## 産学連携の経歴

- 2006年 JSTシーズ発掘試験事業採択
- 2008年-2009年 JSTシーズ発掘試験事業採択
- 2012年-2013年 JST A-STEP FS探索タイプ  
事業採択

## お問い合わせ先

徳島大学 研究支援・産官学連携センター  
(株)テクノネットワーク四国(四国TLO)

宮澤 日子太

T E L 088-656-9400

F A X 088-656-7274

e-mail [miyazawa@s-tlo.ac.jp](mailto:miyazawa@s-tlo.ac.jp)