

ロボットハンドの 機構と制御

岡山県立大学 情報工学部 人間情報工学科
バイオメカトロニクス研究室
井上貴浩

自己紹介(学生時代)

- 1973年 大阪市城東区に生まれる
- 1993年 同志社大学 工学部 機械工学科 入学
- 1998年 大阪工業大学 工学部 機械工学科 入学
- 2002年 立命館大学 理工学研究科 修士課程 入学
- 2004年 立命館大学 理工学研究科 博士課程 入学

2006年9月 立命館大学 理工学研究科 博士(工学)授与

お仕事(経歴)

- 2007年4月 岡山県立大学 情報工学部
スポーツシステム工学科 助教(助手)
- 2009年10月 同 准教授 (現在に至る)
- 津山高専 機械工学科 非常勤講師 兼任
- 立命館大学 総合科学技術研究機構
客員研究員 兼任

研究理念と方向性



生体模倣ロボット



生活支援ロボット

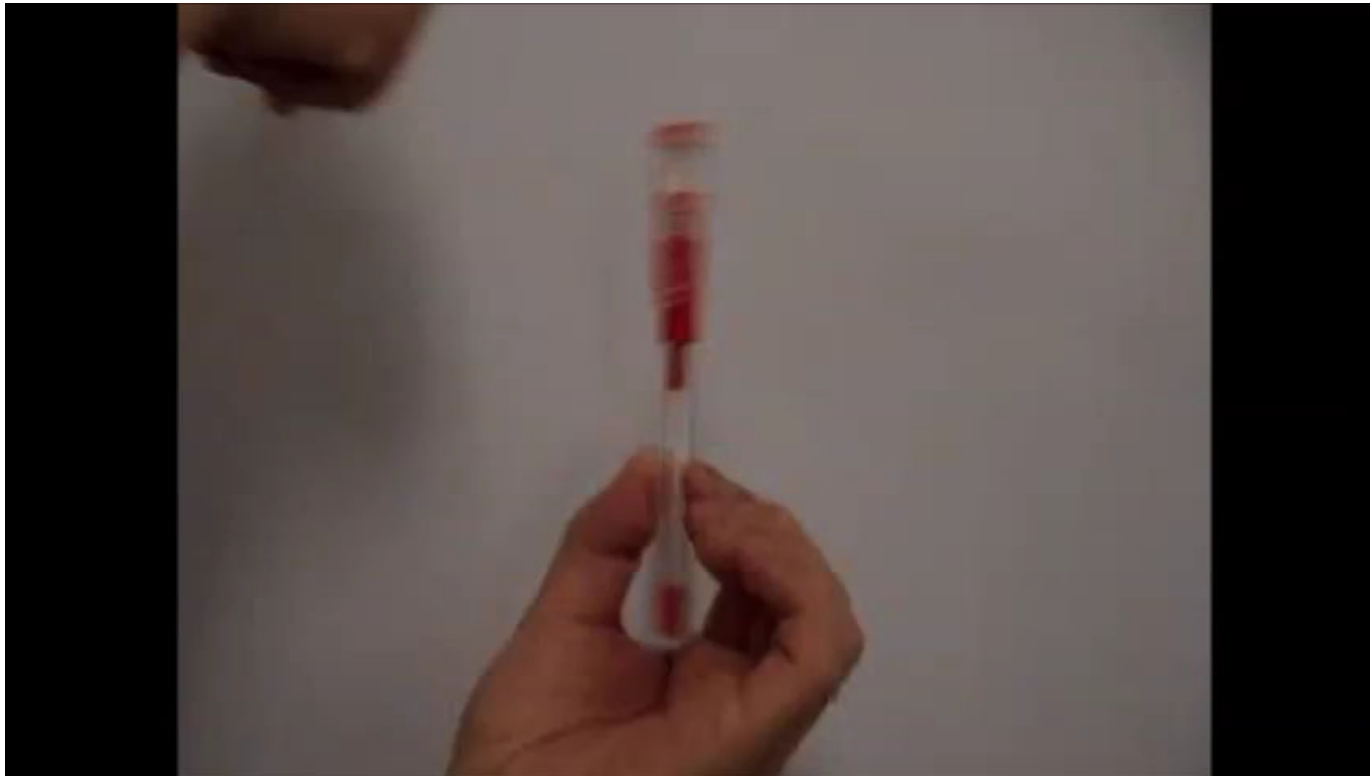
FA・自動化



アウトライン

- 立命館大学の研究(2002年～2006年)
- 岡山県立大学での研究(2007年～)

立命館大学での研究(2002年～2006年)



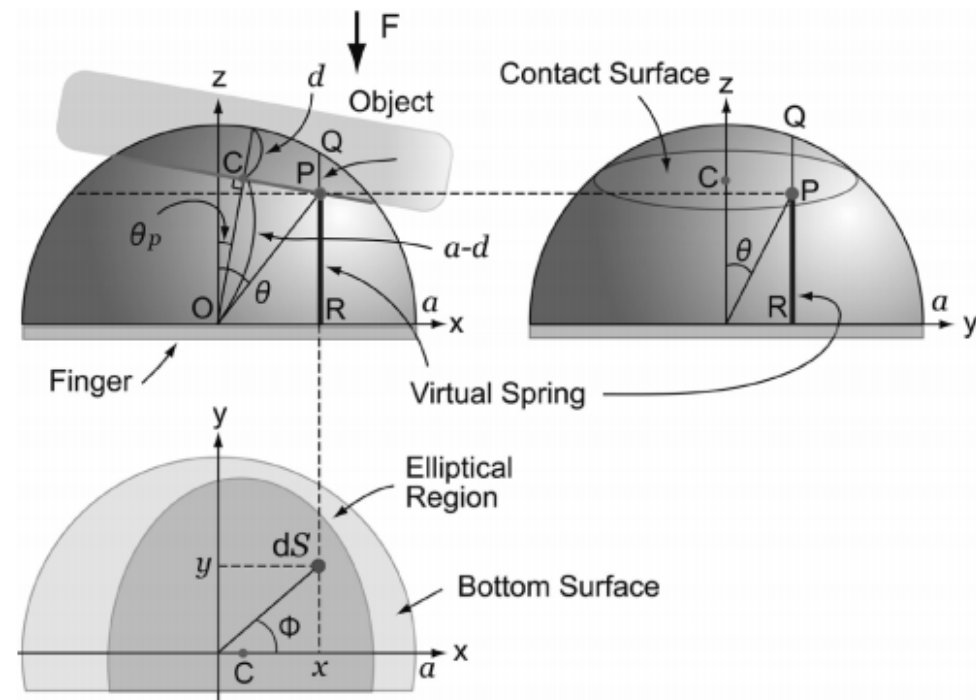
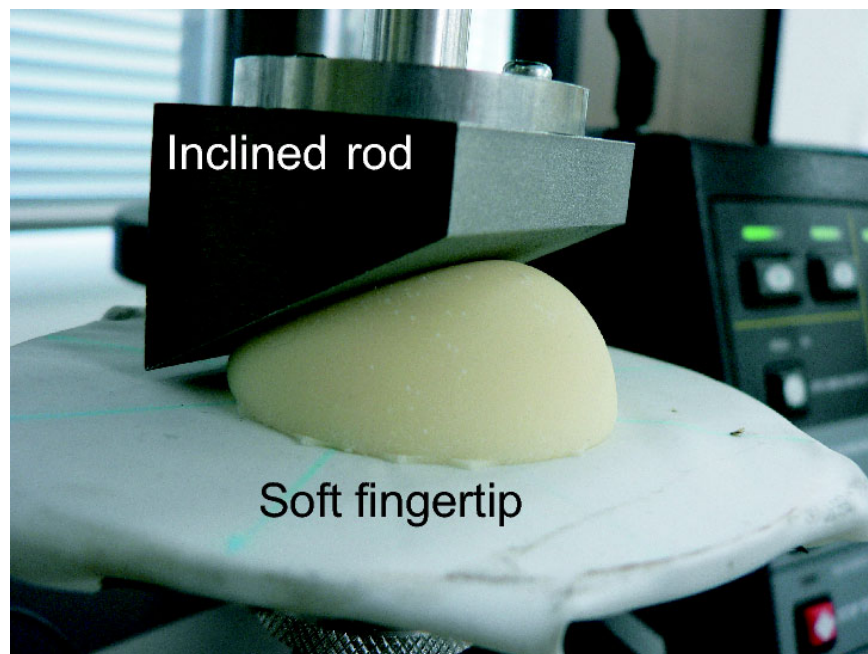
柔軟指の柔らかさ

人の指先を模倣して..

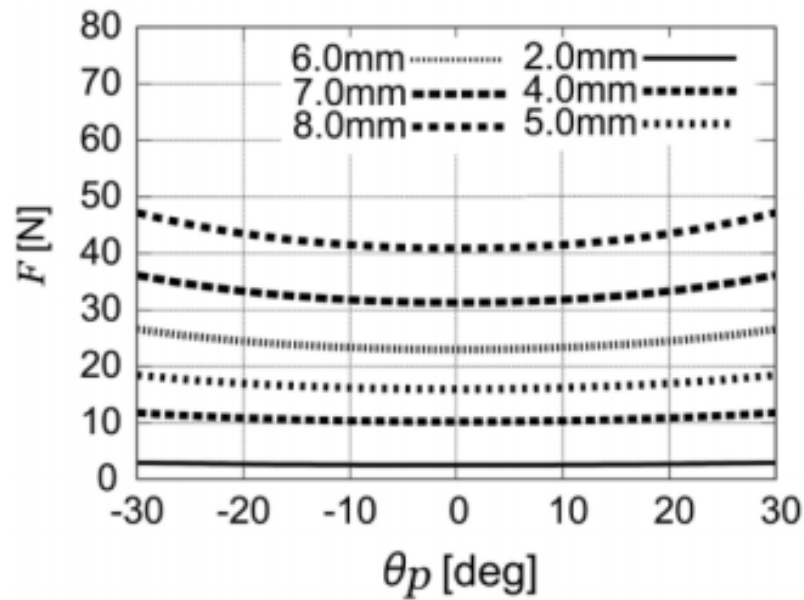


ポリウレタン樹脂

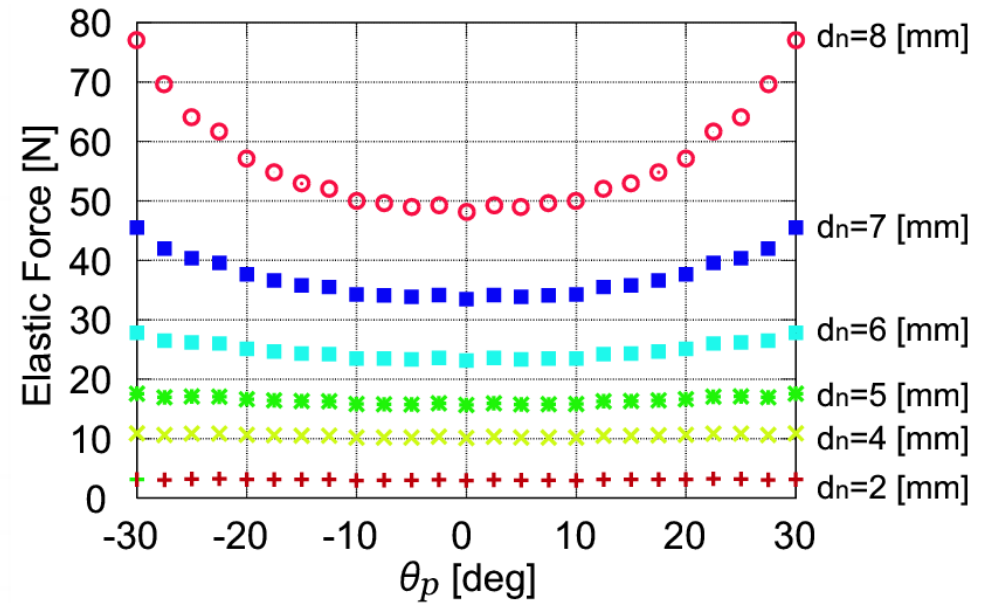
柔軟指への圧縮実験



柔軟指の力学特性の解明

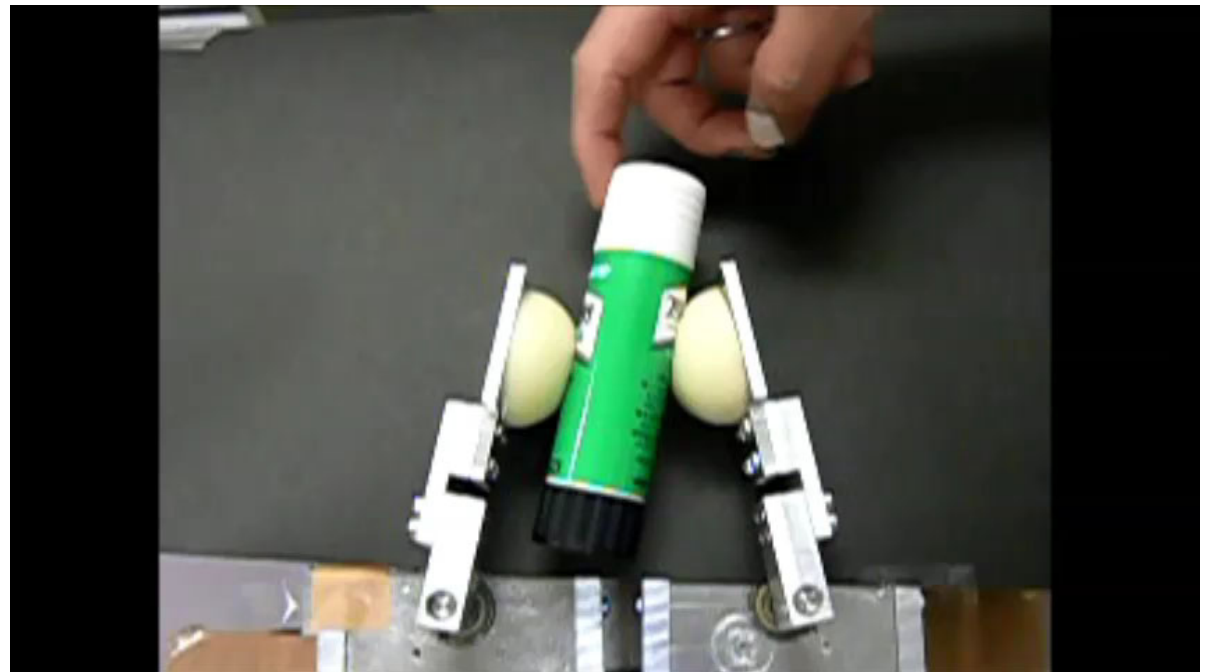
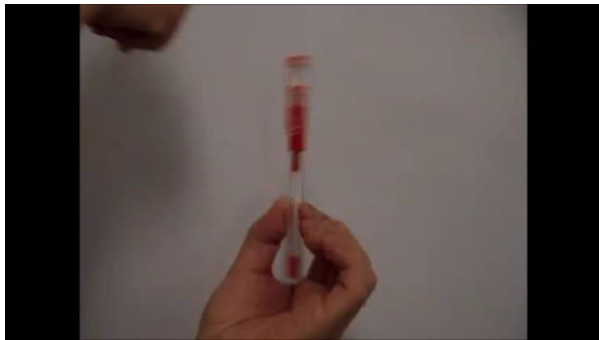


(a)

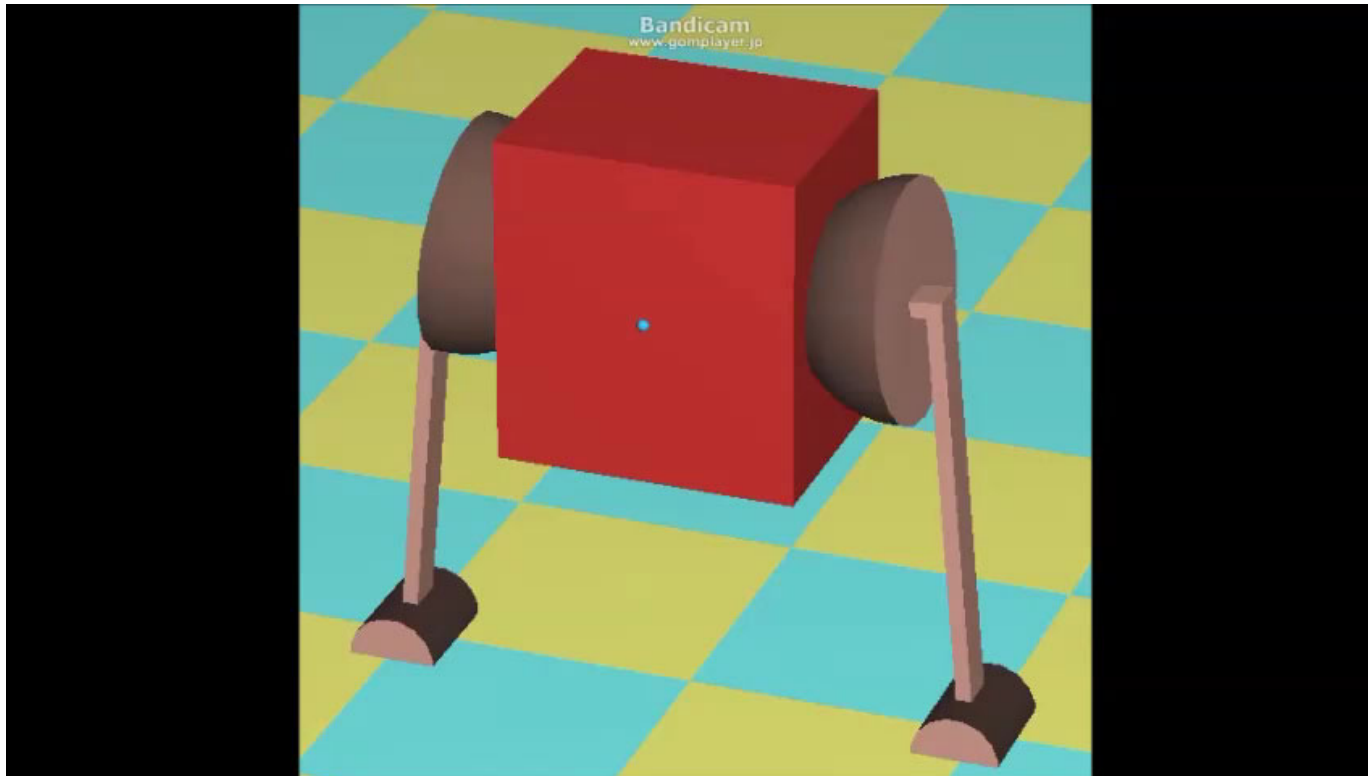


(b)

柔軟指での安定把持



2指による物体操りシミュレーション

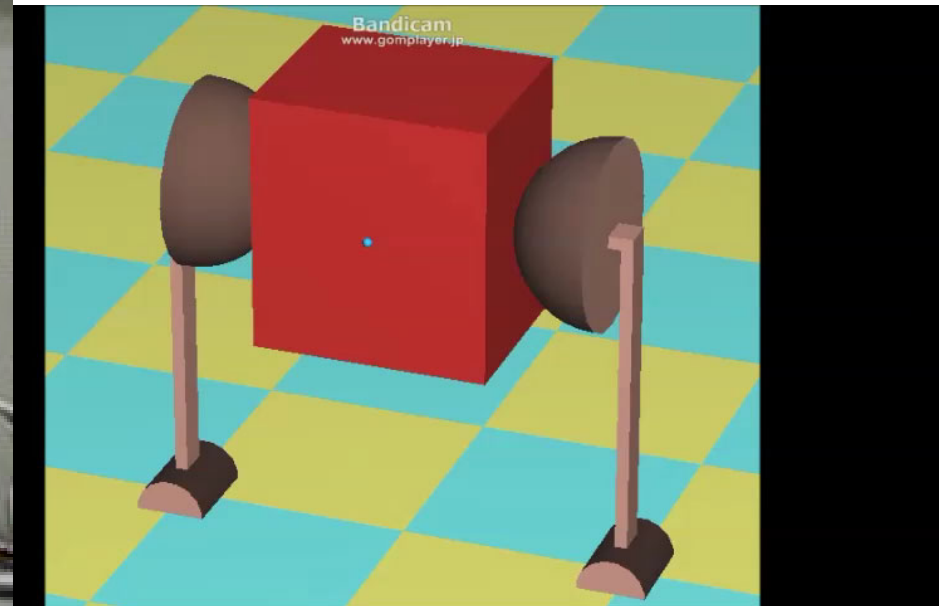
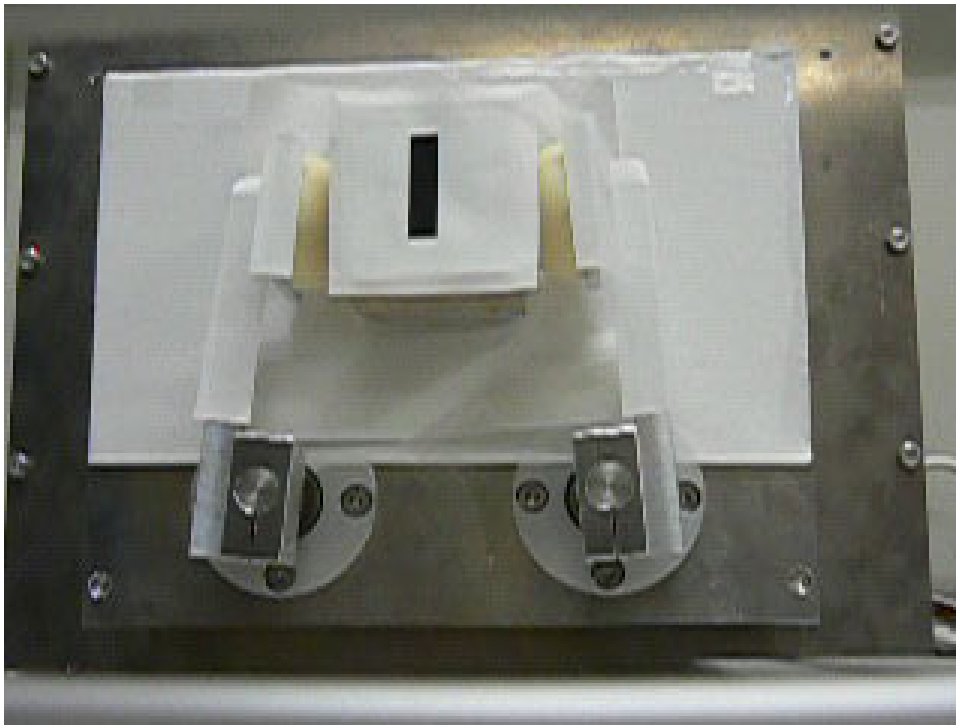


実際のペン振動実験を再現できた！

柔軟半球指の力学モデルの妥当性が示せた

1本指×2本 ロボット制御実験

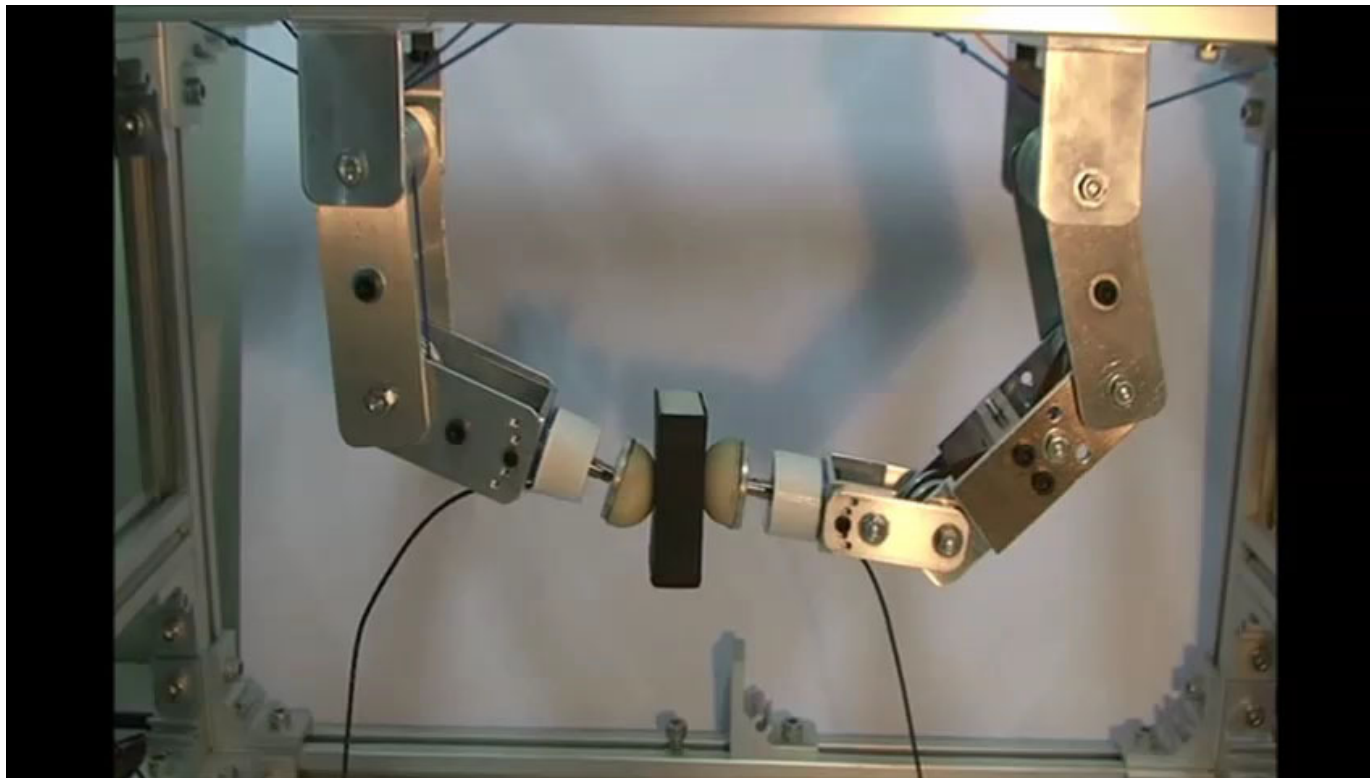
◆ 指先力学モデルを得たので、把持・操り制御が可能に！



拇指 & 示指ロボットによる操り実験

拇指：2関節

示指：3関節



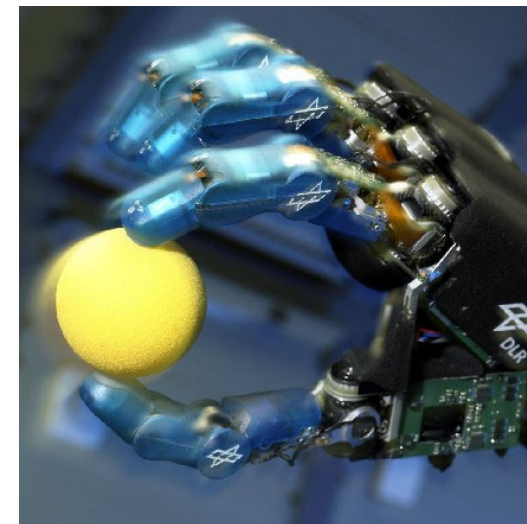
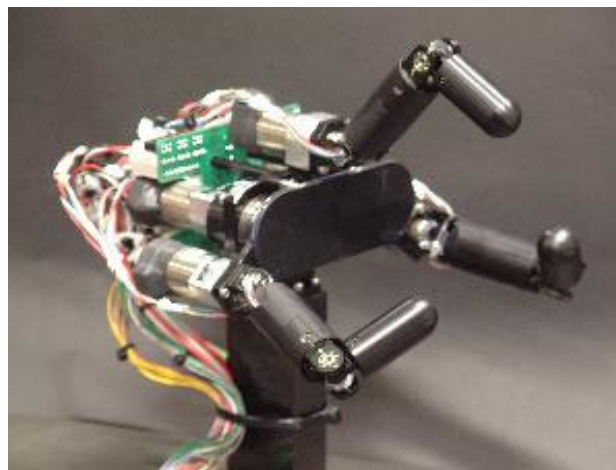
アウトライン

- ◆ 立命館での研究(2002年～2006年)
- ◆ 岡山県立大学での研究(2007年～)

県立大学での研究(2007年～)

- ◆ ロボットハンドの**制御**に関する研究
- ◆ ロボット用アクチュエータ(**駆動**)**機構**の開発
 - (1)腱駆動, ~~(2)空気圧人工筋~~, (3)丸ベルト振り機構
- ◆ アーム搭載型の全方向自律移動ロボットの開発
- ◆ 筋骨格を模した多関節ロボットフィンガと筋電制御
- ◆ 高齢者歩行支援ロボット

5指 & 3指の人型ロボットハンド



いずれも把持物体の**操り動作**は議論さえ
されていない

把持と操り動作における問題提起

◆ 把持物体をうまくコントロール(制御)するとは??

- (1) 縦方向の動き
- (2) 横方向の動き
- (3) 回転(姿勢)の動き
- (4) 力加減

「疑問」

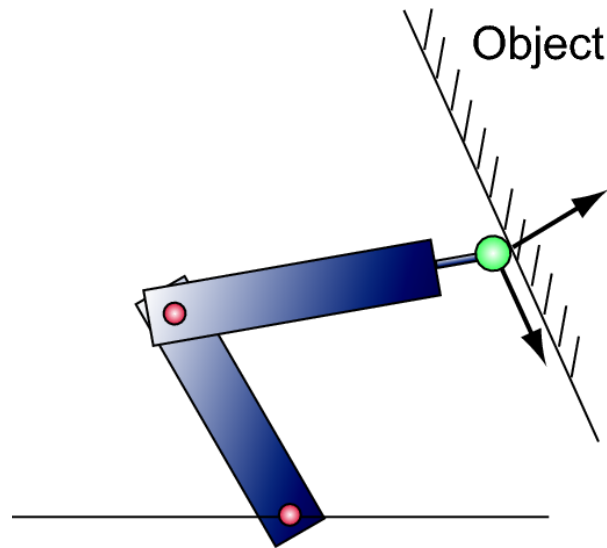
人指は個別に行ってるの？
同時に行ってるの？



単純な把持(握り)しか実現できていない

従来のロボット

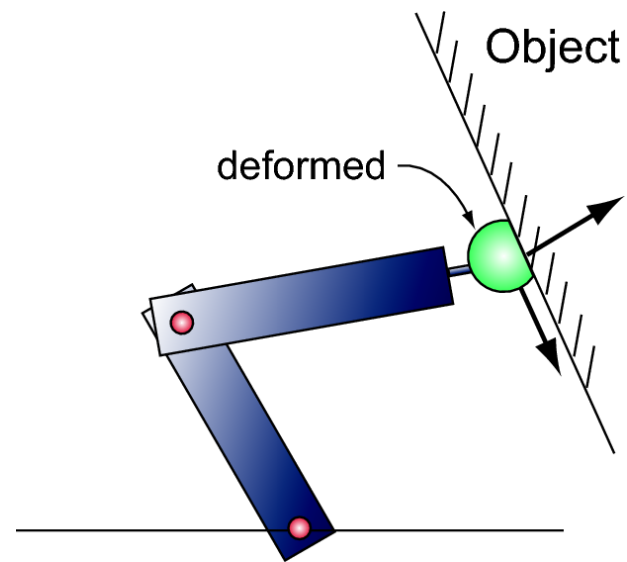
点接触では



把持対象物が指先上で簡単に転がってしまい不安定になる

柔らかい指先を持つロボット

面接触では



安定な把持が可能になる

シミュレーション

- (1) 縦方向の動き
- (2) 横方向の動き
- (3) 回転(姿勢)の動き
- (4) 力加減

シミュレーション1 ⇔ 回転のみ

シミュレーション2 ⇔ 横方向のみ

シミュレーション3 ⇔ 回転と力加減

シミュレーション4 ⇔ 横方向と力加減

シミュレーション5 ⇔ 横方向と回転

シミュレーション1 (回転のみ)

制御方法

回転量

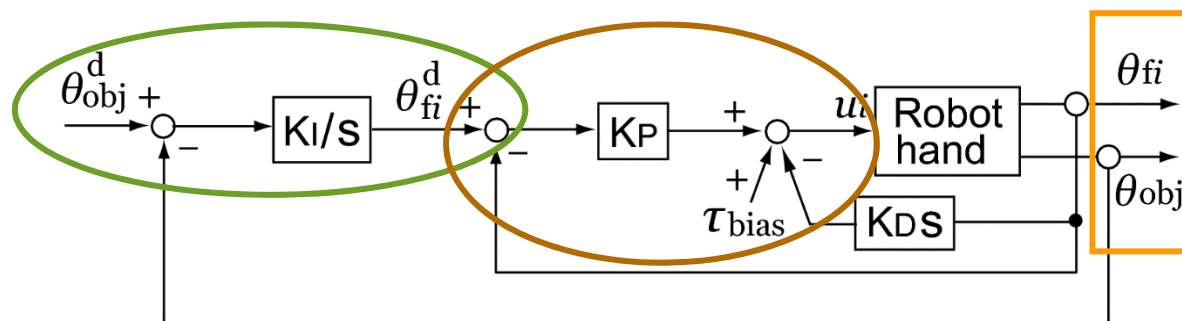
$$\theta_{fi}^d = -(-1)^i K_I \int_0^t (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) d\tau$$

1 段目

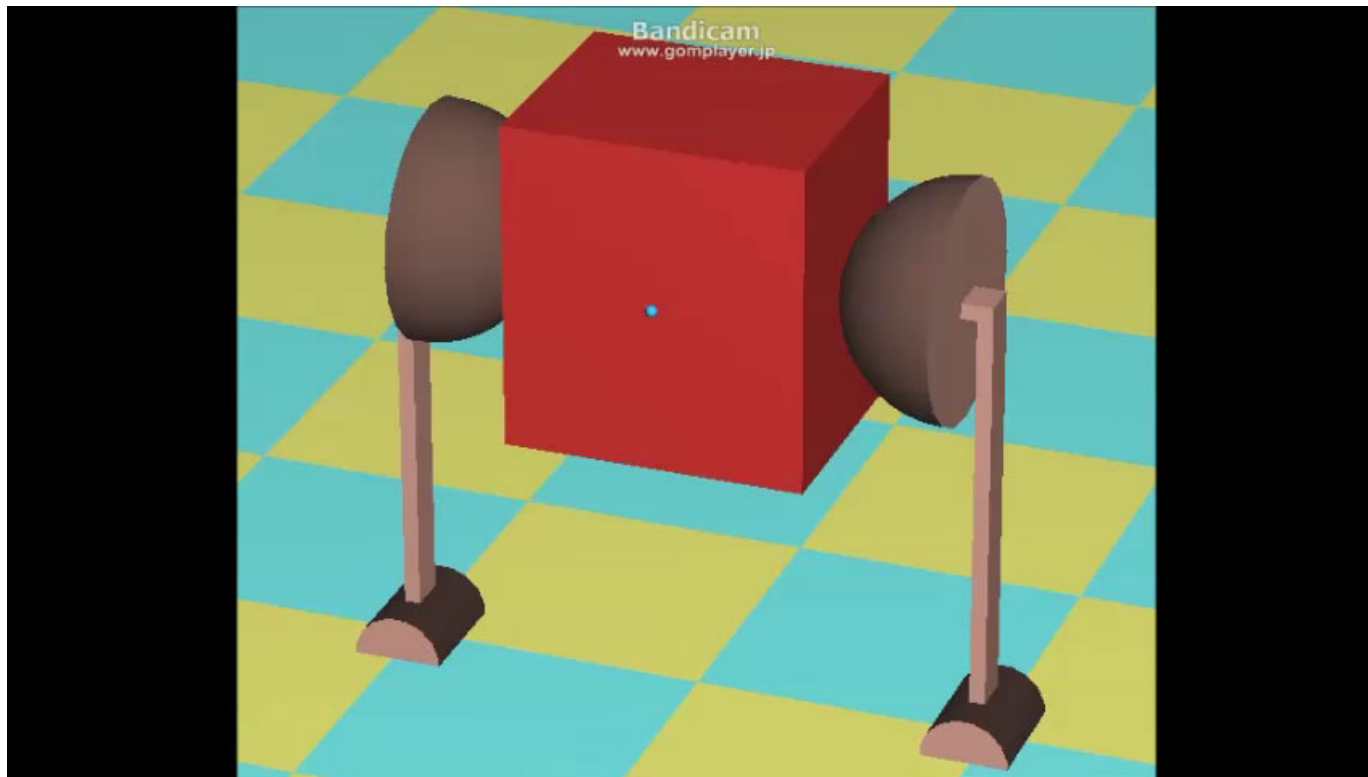
仮想的な関節角目標

$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + K_D \dot{\theta}_{fi} + \tau_{bias}$$

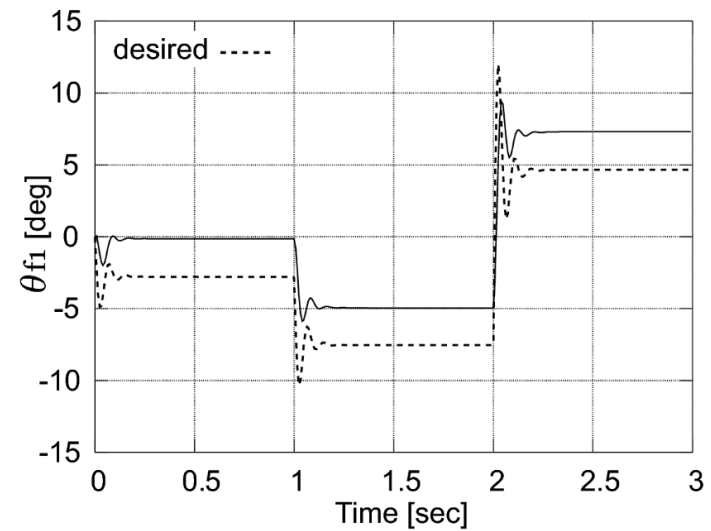
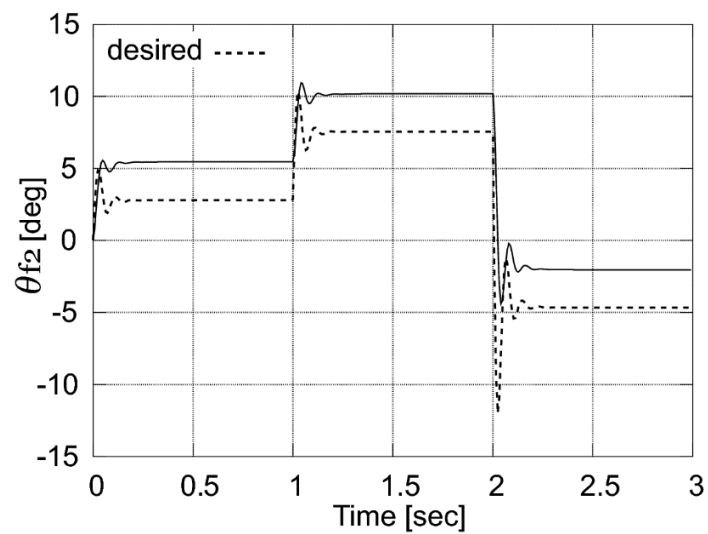
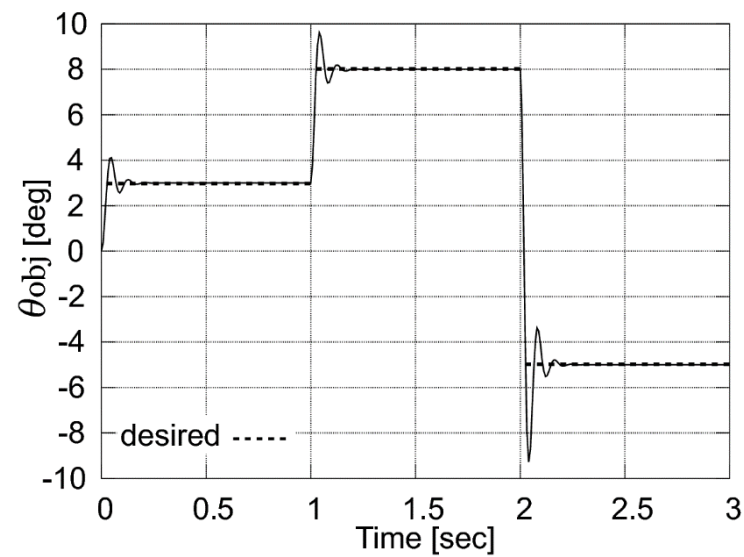
2 段目



結果(回転のみ)



結果グラフ



シミュレーション²(横方向のみ)

仮想的な関節角目標 $\theta^{\text{d fi}} = -(-1)^i K_I \int_0^t (\theta_{\text{obj}} - \theta^{\text{d obj}}) d\tau$ シミュ1の1段目

↓ のみ変更する

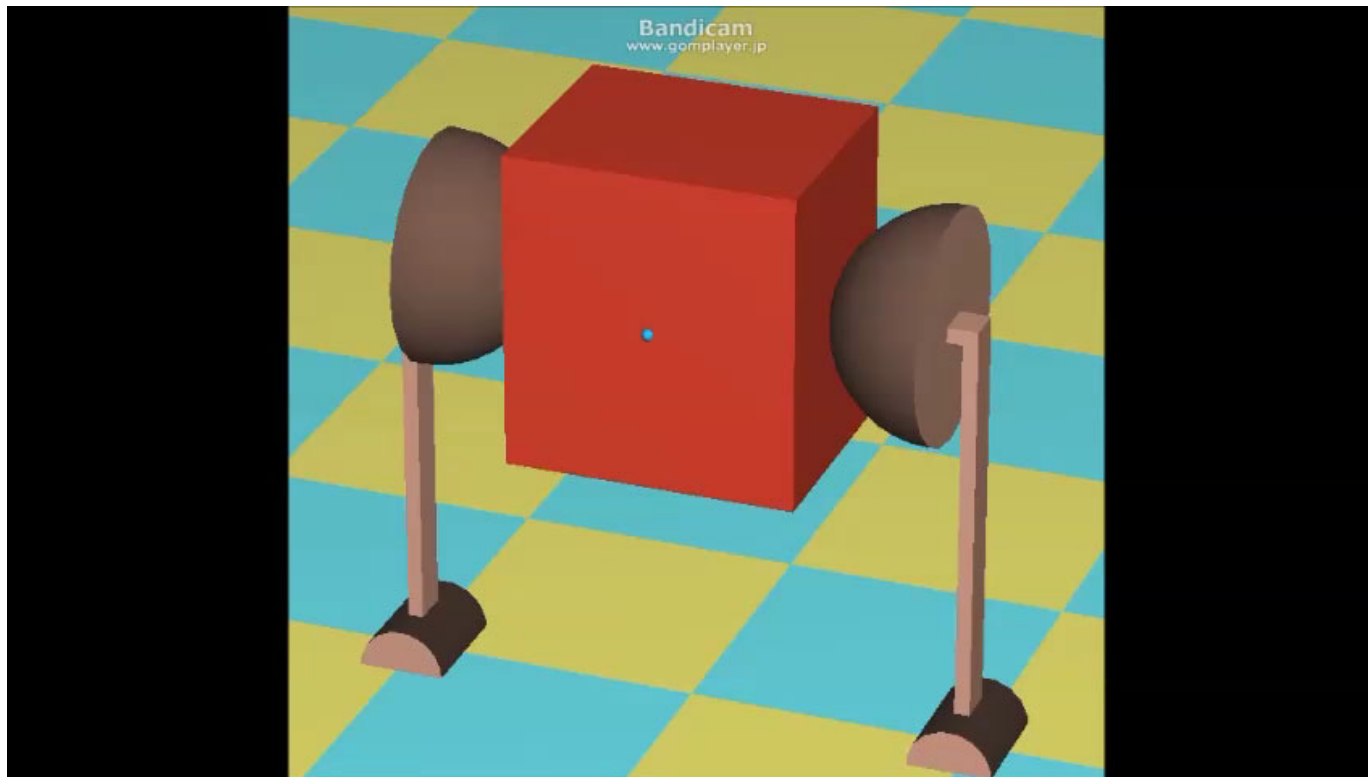
$$\theta^{\text{d fi}} = -(-1)^i K_I \int_0^t (x_{\text{obj}} - x^{\text{d obj}}) d\tau$$

$$u_i = -K_P (\theta_{\text{fi}} - \theta^{\text{d fi}}) + K_D \dot{\theta}_{\text{fi}} + \tau_{\text{bias}}$$

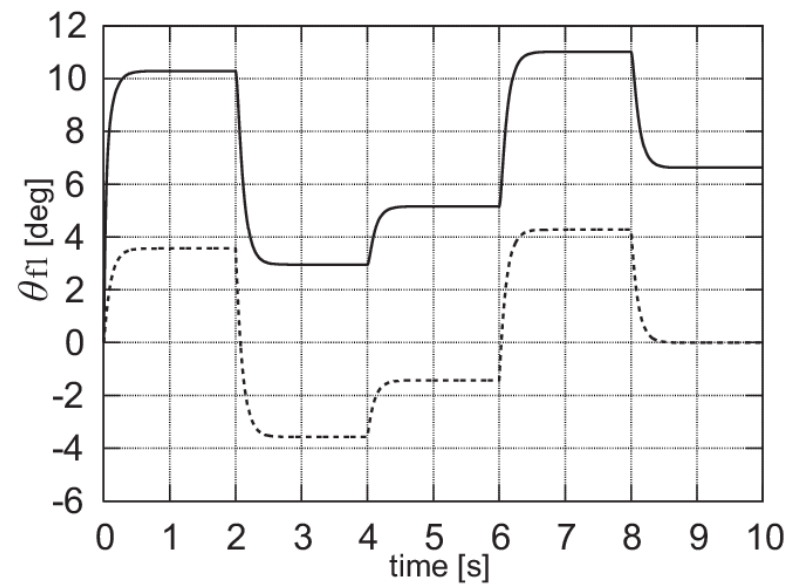
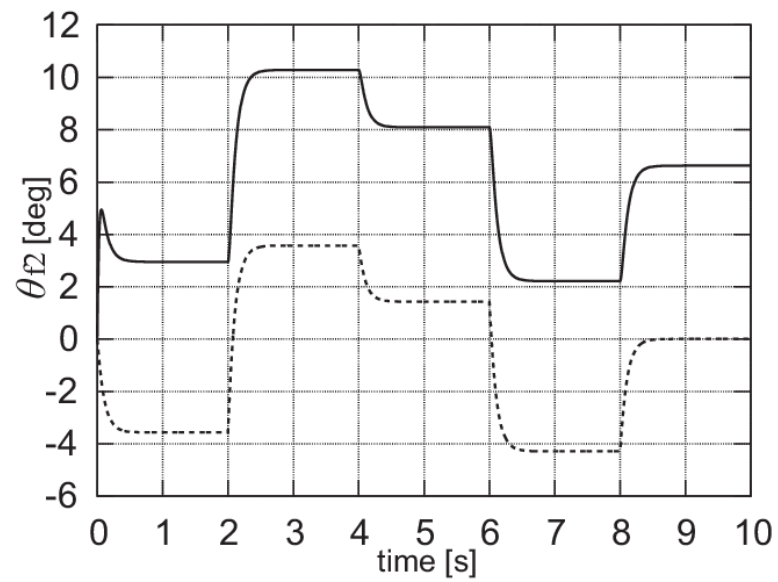
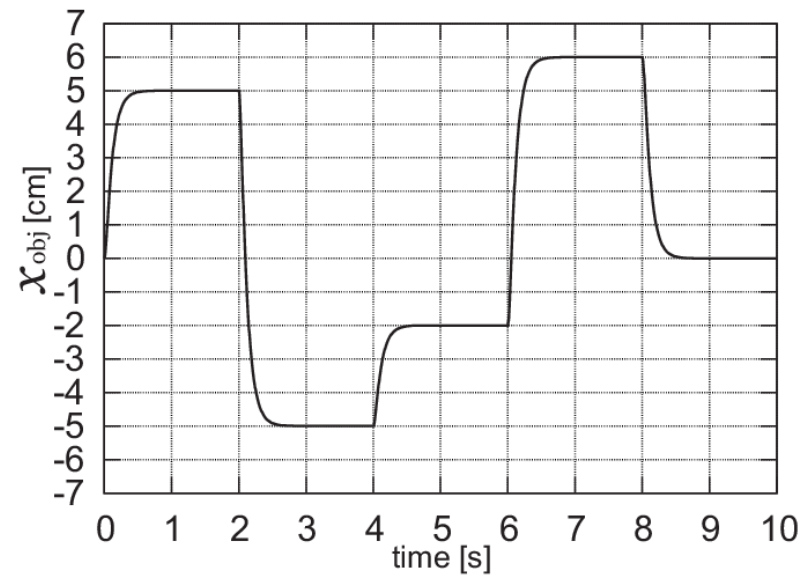
1 段目

2 段目 (変更なし)

結果(横方向のみ)



結果グラフ



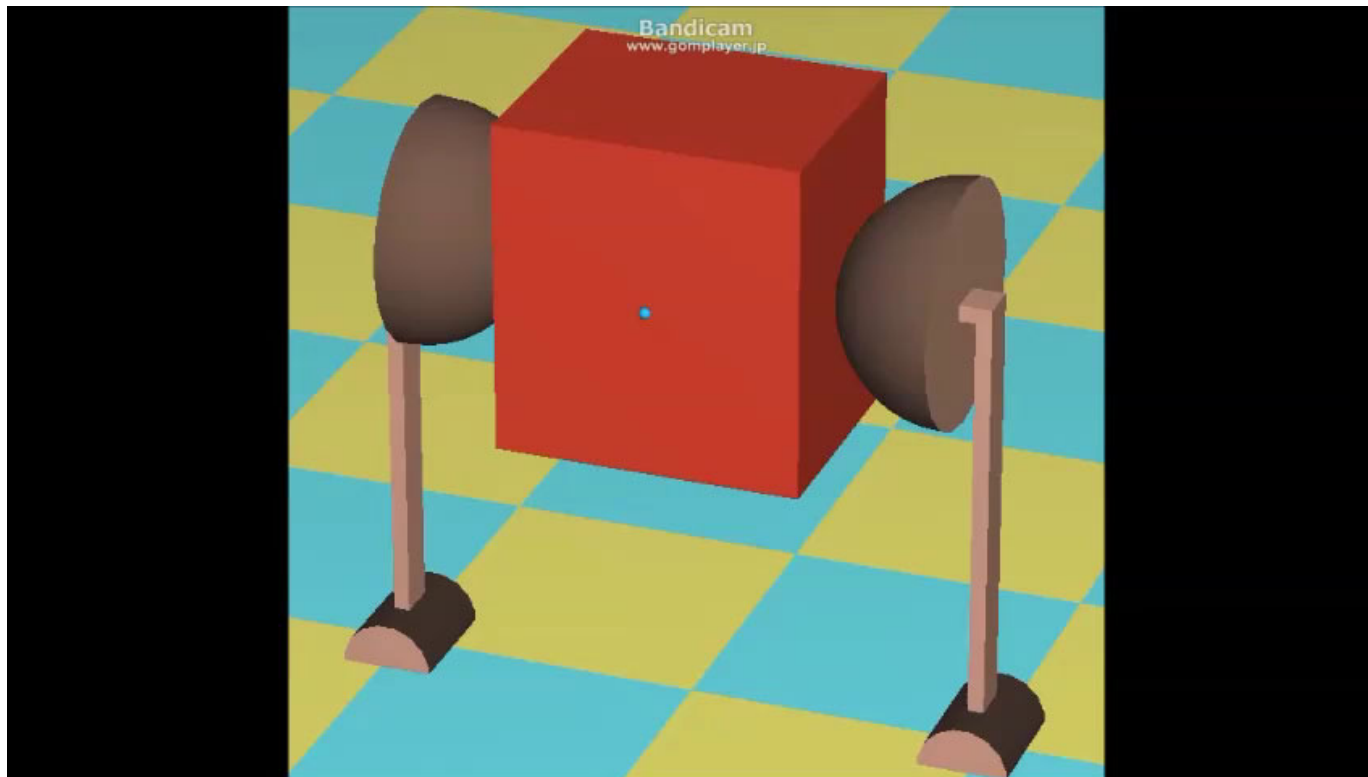
シミュレーション3(回転と力加減)

シミュ1の1段目

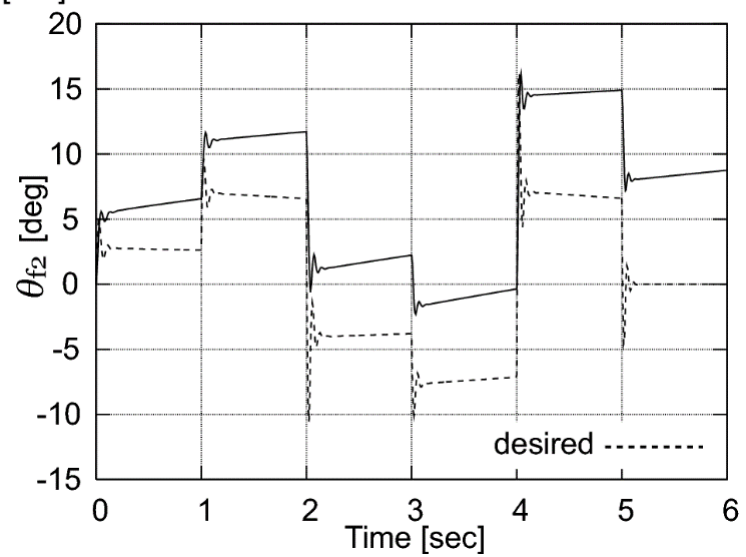
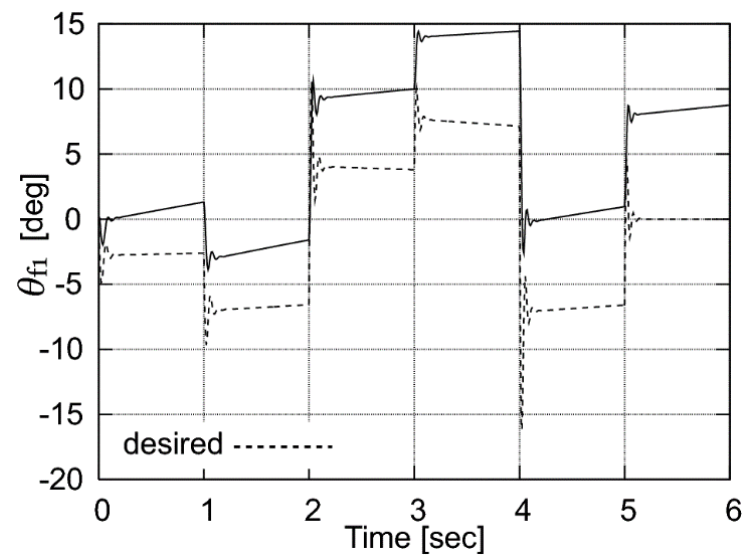
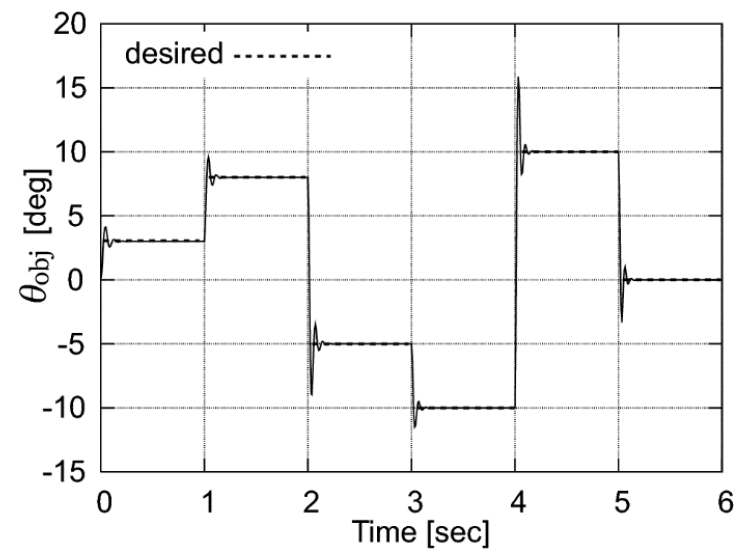
$$\theta^{\text{d fi}} = -(-1)^i K_I \int_0^t (\theta_{\text{obj}} - \theta^{\text{d obj}}) d\tau \quad \text{1段目}$$
$$u_i = -K_P(\theta_{\text{fi}} - \theta^{\text{d fi}}) + K_D \dot{\theta}_{\text{fi}} + \tau_{\text{bias}} \quad \text{2段目}$$

3~15[Nm]増加

結果(回転と力加減)



結果グラフ



シミュレーション4 (横方向と力加減)

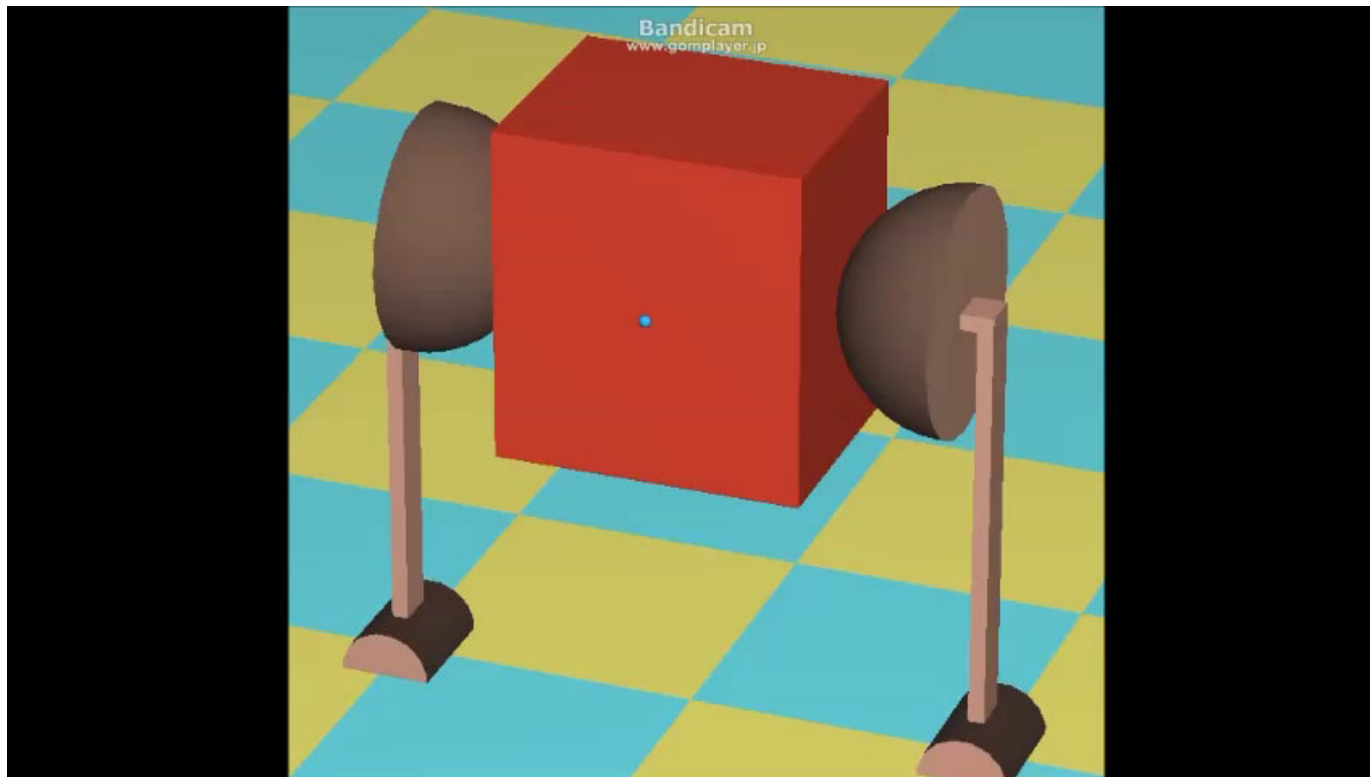
シミュ2の1段目

$$\theta^{\text{d fi}} = -(-1)^i K_I \int_0^t (x_{\text{obj}} - x^{\text{d obj}}) d\tau \quad \text{1段目}$$

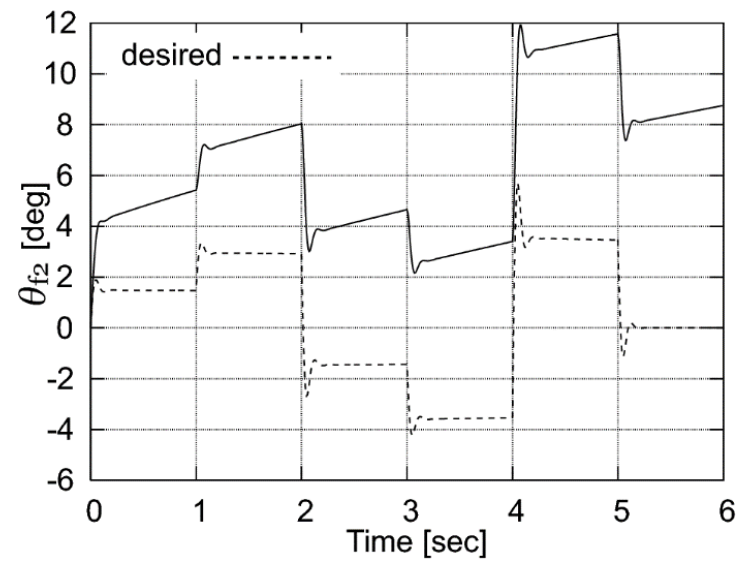
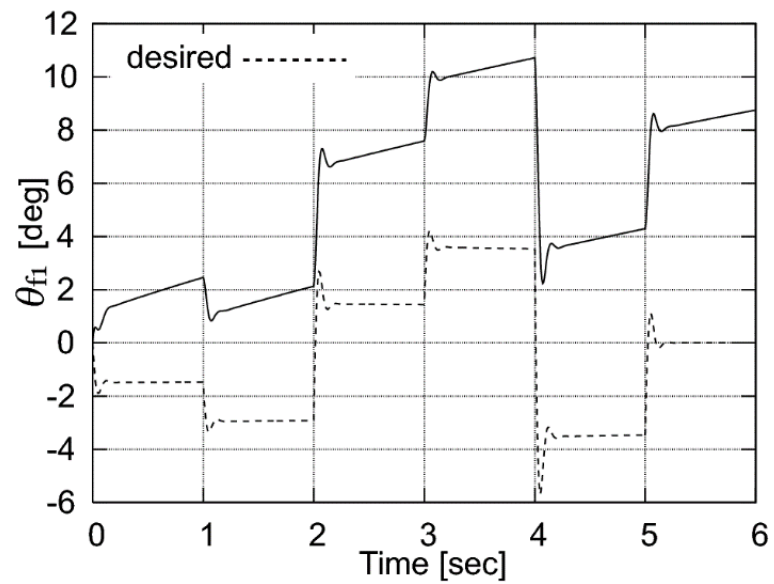
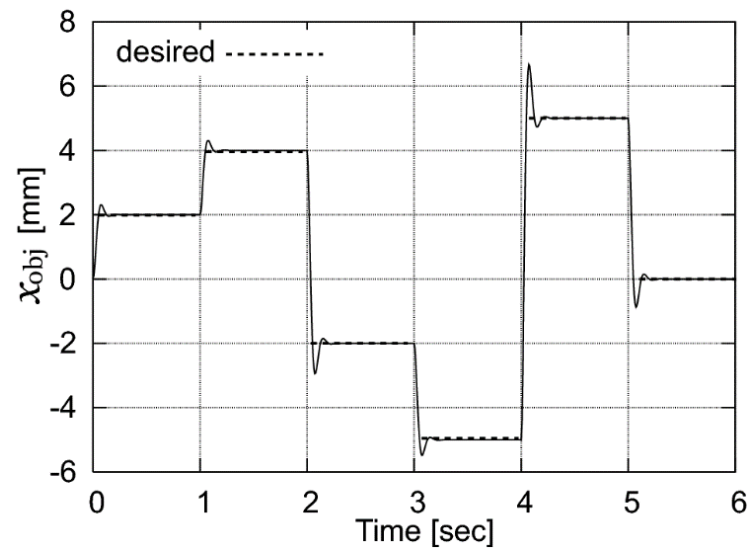
$$u_i = -K_P (\theta_{\text{fi}} - \theta^{\text{d fi}}) + K_D \dot{\theta}_{\text{fi}} + \tau_{\text{bias}} \quad \text{2段目}$$

3~15[Nm]増加

結果(横方向と力加減)



結果グラフ



シミュレーション5 (横方向と回転)

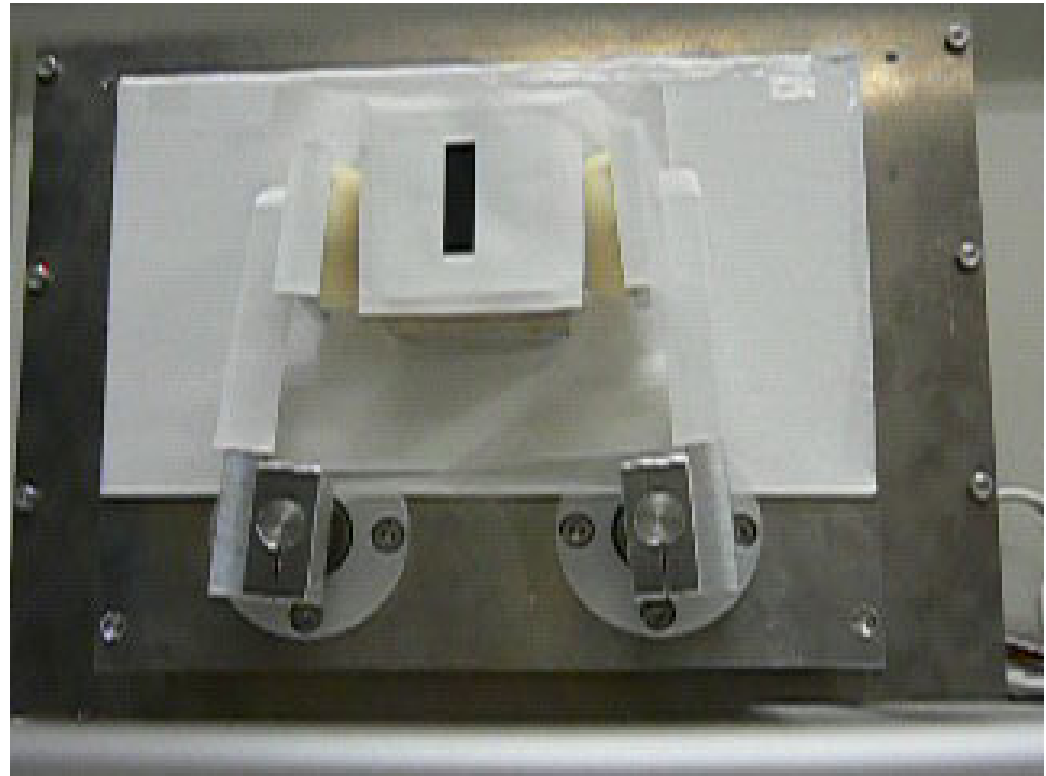
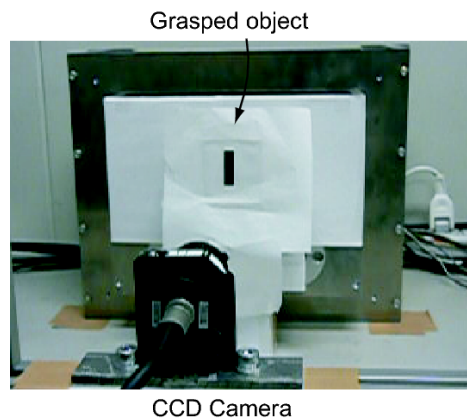
◆ 残念ながら失敗

結論としてはおそらく...

二つの変位量を同時に制御不可??

ロボットによる実験

◆ シミュレーション1（回転のみ）と同じ動作



今後の課題

シミュレーション2～4の検証

共同研究しましょうよ！！

県立大学での研究(2017年～2018年)

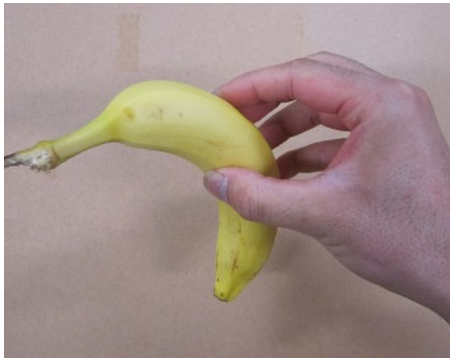
- ◆ ロボットハンドの**制御**に関する研究 **Part II**
- ◆ ロボット用アクチュエータ(駆動)機構の開発
 - (1) **腱駆動**, ~~(2) 空気圧人工筋~~, (3) 丸ベルト振り機構
- ◆ アーム搭載型の全方向自律移動ロボットの開発
- ◆ 筋骨格を模した多関節ロボットフィンガと筋電制御
- ◆ 高齢者歩行支援ロボット

(1) 3本指 腱駆動ロボットハンド

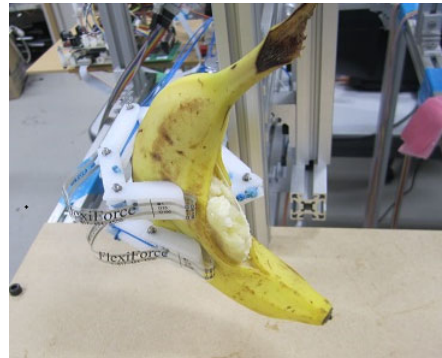
多本指・多関節化と柔軟物把持

◆触覚で柔らかさを知る

ヒト



ロボット

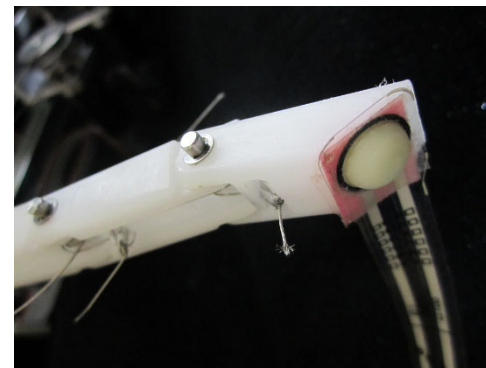


ヒトは柔らかさを加味して把持力を調節する
しかし、ヒト型ハンドに柔らかさの感覚を与える研究は少ない...

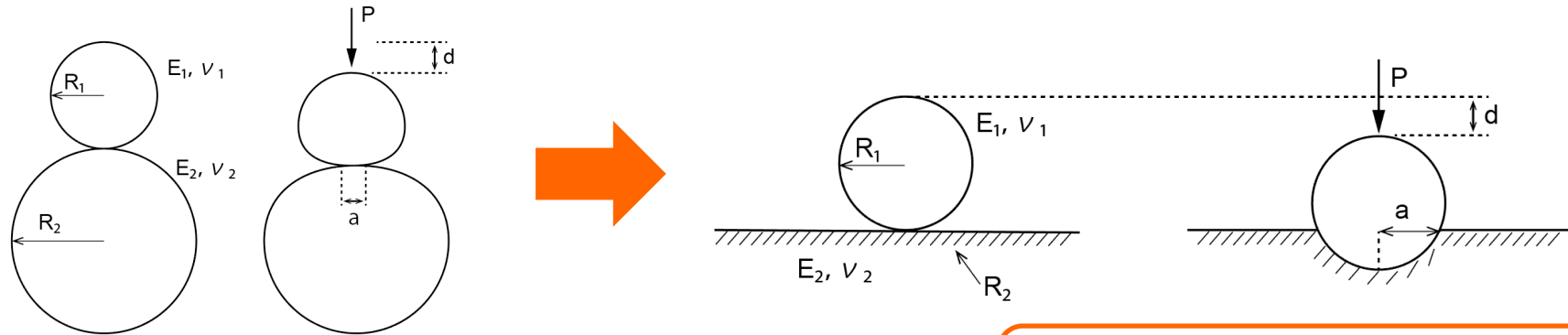
柔らかさ推定システム

柔らかさ $\equiv$ ヤング率

1. ハンドに実装可能な
指先サイズの**柔らかさ推定システム**の構築
2. 提案推定システムの**性能評価**
3. ロボットハンドを用いた柔軟物の**柔らかい把持の実現**



柔らかさ推定法 (Hertzの接触理論から)



<仮定>

- 一方の球を平面にする ($R_2 \rightarrow \infty$)
- 対象物が半球に対して十分大きい ($\nu_2 \approx 0$)

$$\alpha = \frac{R_1 + R_2}{2R_1R_2} \rightarrow \alpha = \frac{1}{2R_1}$$

$$c_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \rightarrow c_2 = \frac{1}{\pi E_2}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi P(c_1 + c_2)}{8\alpha}}, d = \sqrt[3]{\left\{\frac{3}{4}\pi P(c_1 + c_2)\right\}^2 2\alpha}$$

柔軟物のヤング率推定式

$$E_2 \approx \frac{3P}{4ad - 3\pi c_1 P} \quad (c_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1})$$

推定システムの設計①

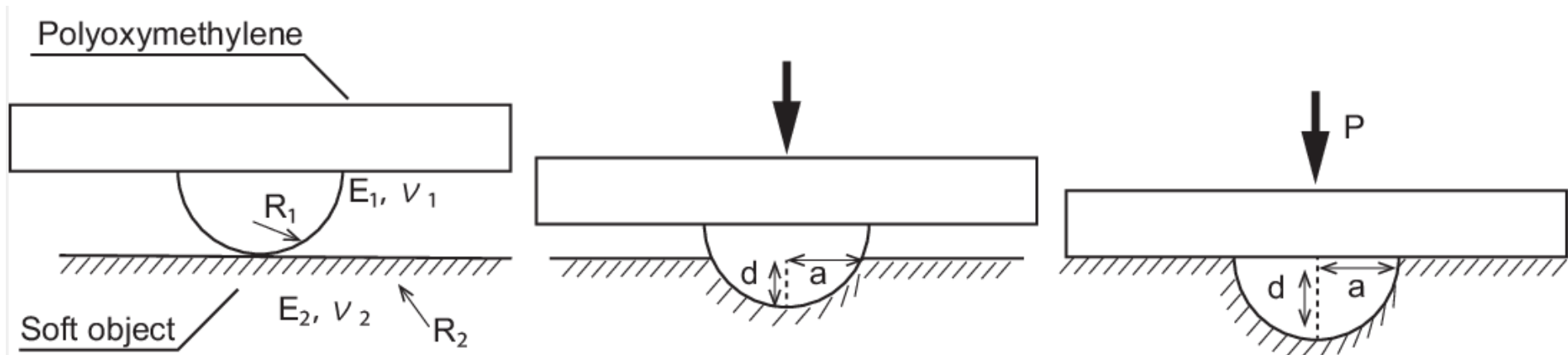
柔軟物のヤング率推定式 $E_2 \approx \frac{3P}{4ad - 3\pi c_1 P}$ ($c_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}$)

■ POM樹脂を使用する

→ $E_1 = 2.75 \times 10^6 [\text{kPa}]$, $\nu_1 = 0.35$

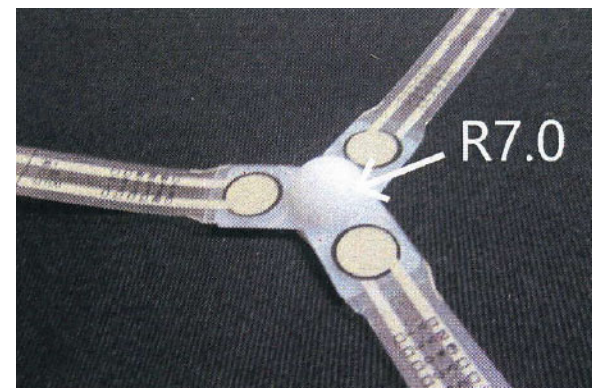
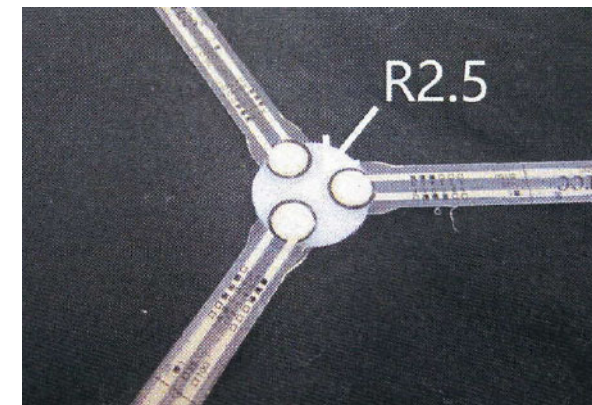
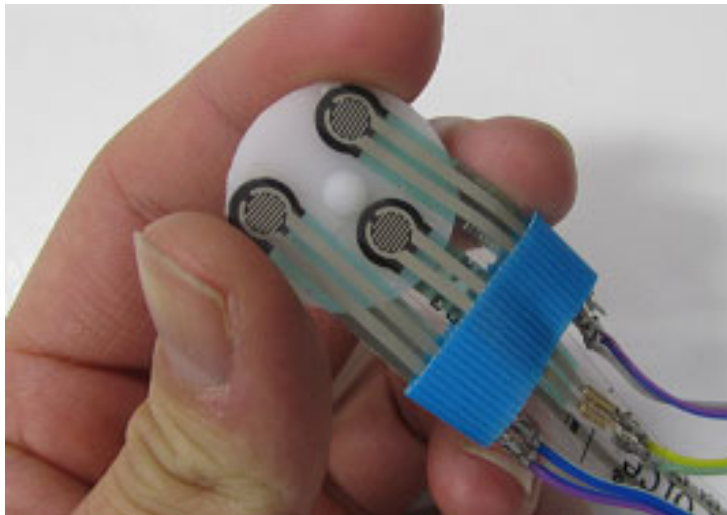
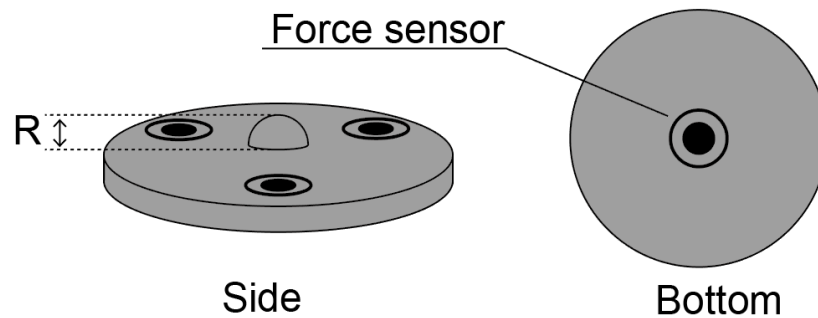
■ 平面+半球

→ 物体との接触範囲を限定, $a, d = R_1 (= \text{const.})$



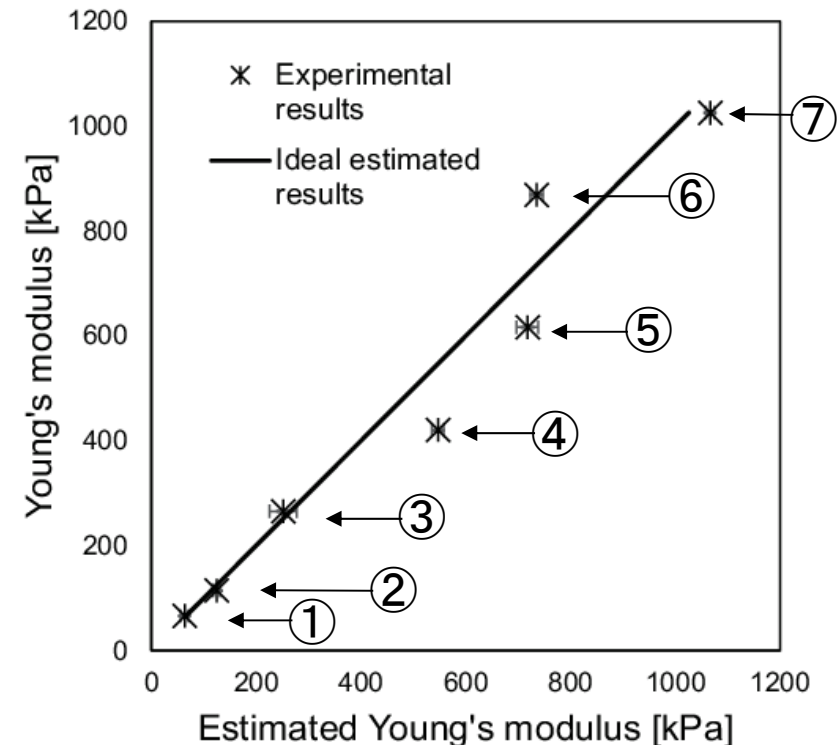
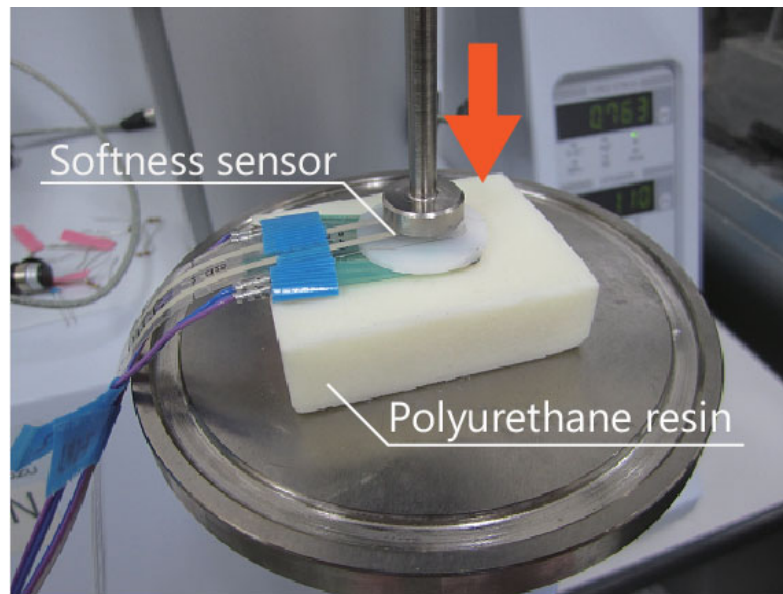
推定システムの設計②

- センサと物体の接触判定 → 表面に3つの圧力センサ
- 押しつけ力Pの計測 → 裏面に1つの力センサ



柔らかさ推定の実行

- ヤング率の異なる7個のポリウレタン樹脂をそれぞれ5回計測し平均をとり推定結果とする
- 垂直に接触させるために圧縮試験機を用いて実験



ヤング率推定システムの検証実験結果

柔らかい把持〈実験条件〉

■ 制御則

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

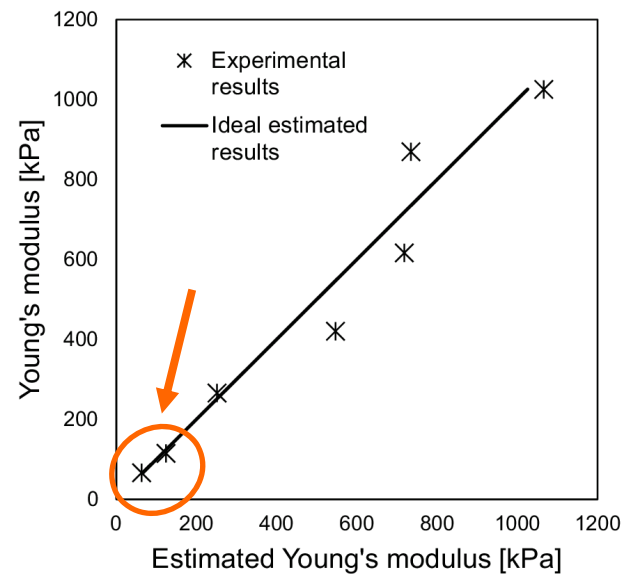
$$F_d = AE\varepsilon$$

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right\}$$

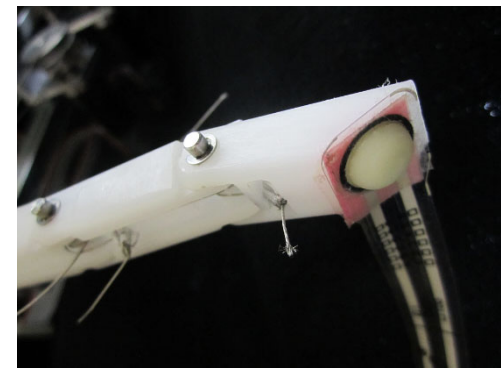
A : ハンド指先面積
L : 物体長さ
 ΔL : 物体変形量
 ε : ひずみ

■ 良好な推定結果を得た 2つの柔軟物に対して実験

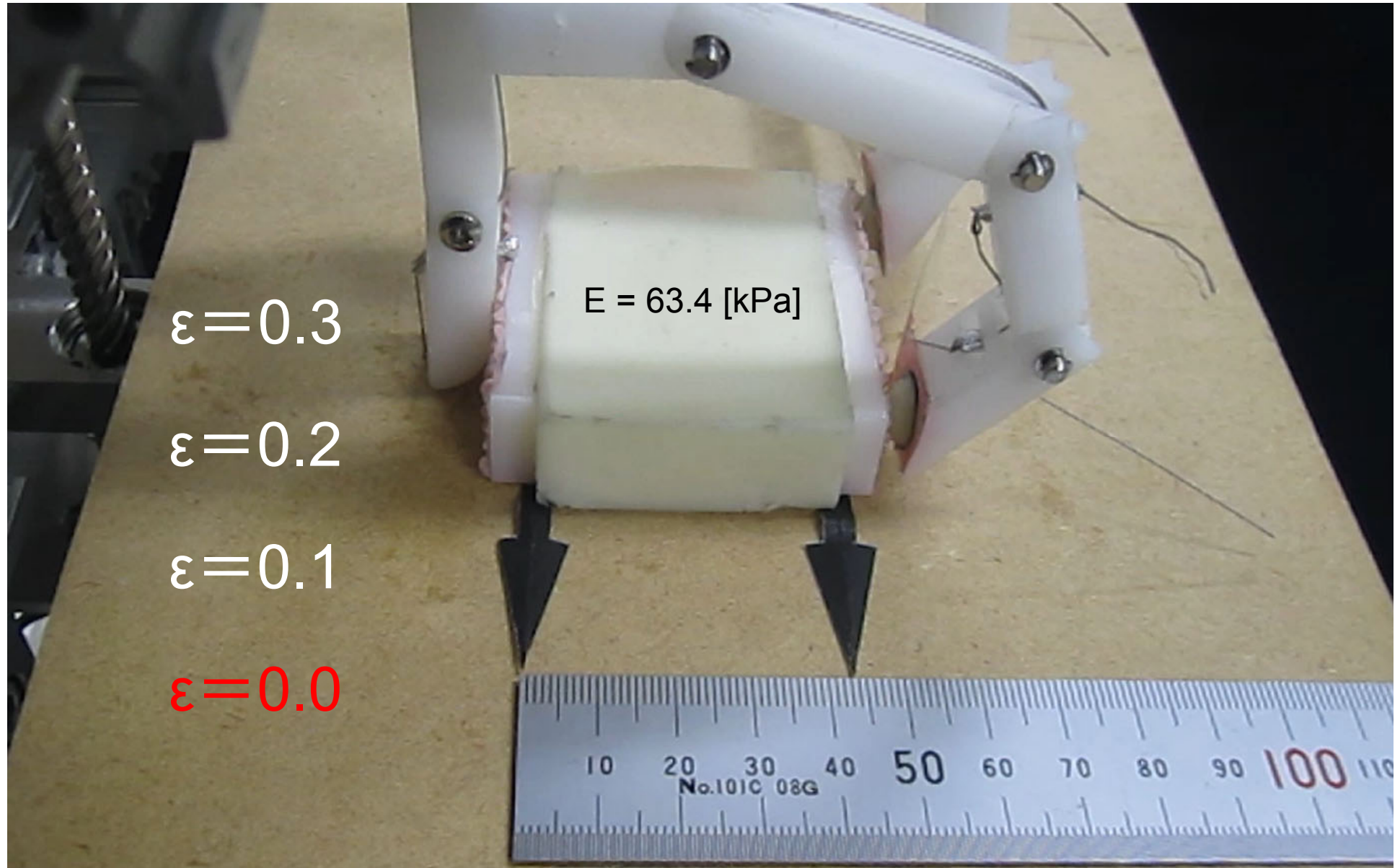
■ 5s毎に目標ひずみを更新 $0.0 \rightleftharpoons 0.1 \rightleftharpoons 0.2 \rightleftharpoons 0.3$



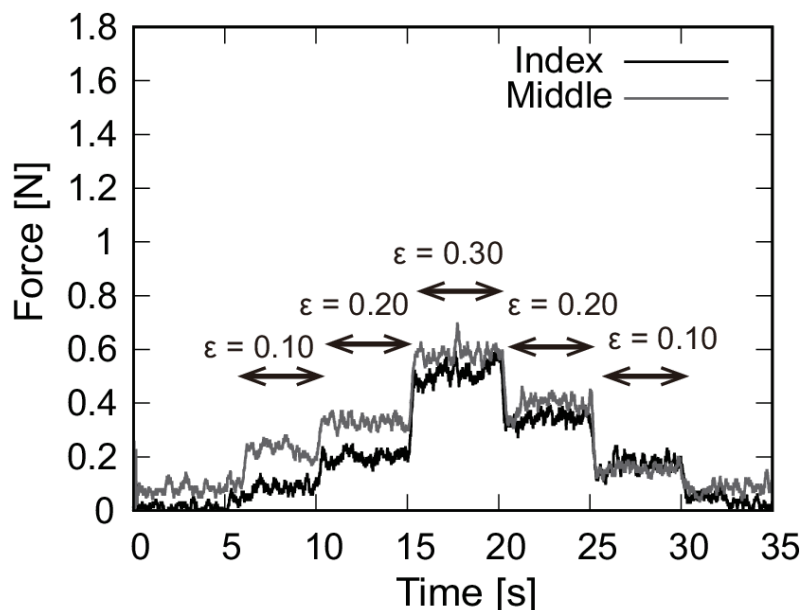
ヤング率推定システムの検証実験結果



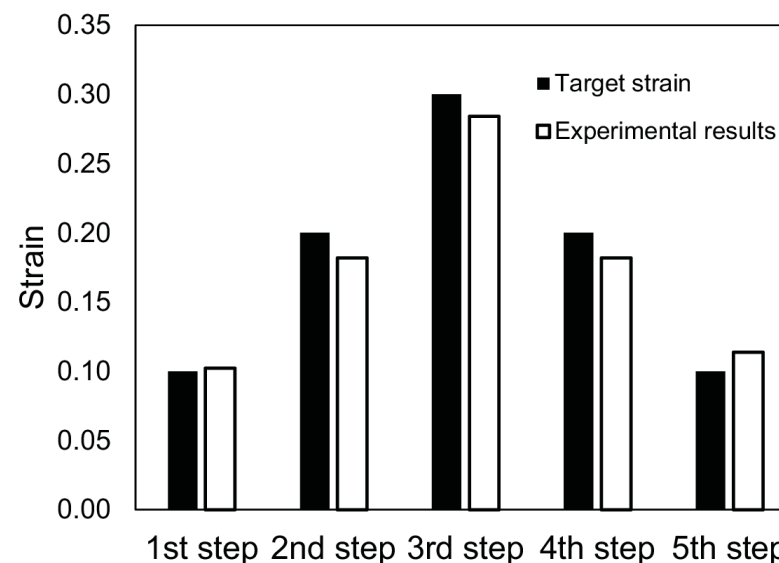
実験の様子 (ヤング率63.4 [kPa])



実験結果 (ヤング率63.4 [kPa])



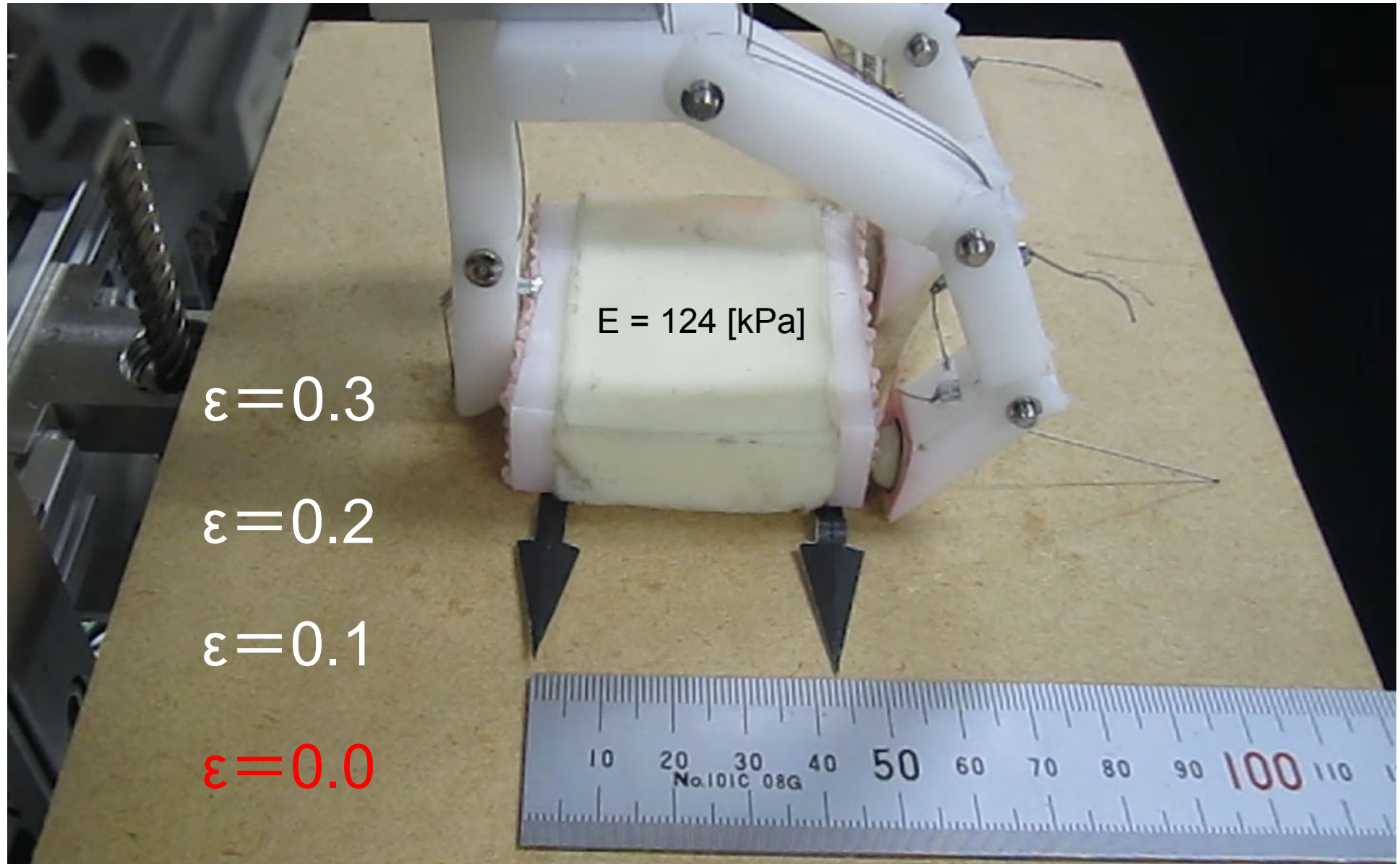
ひずみ制御中の指先力時間応答



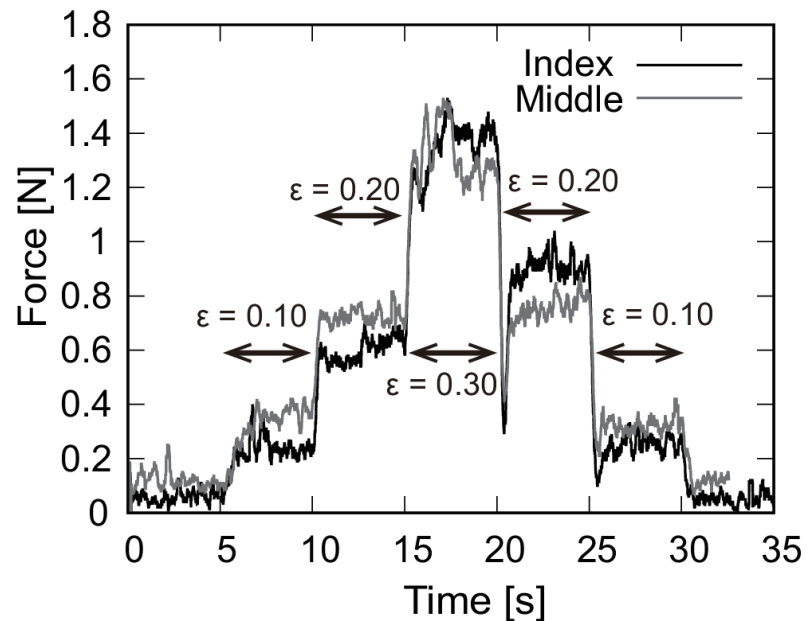
目標ひずみに対する出力ひずみの偏差

- 制御偏差(目標ひずみの)10%程度で、ひずみ制御を実現

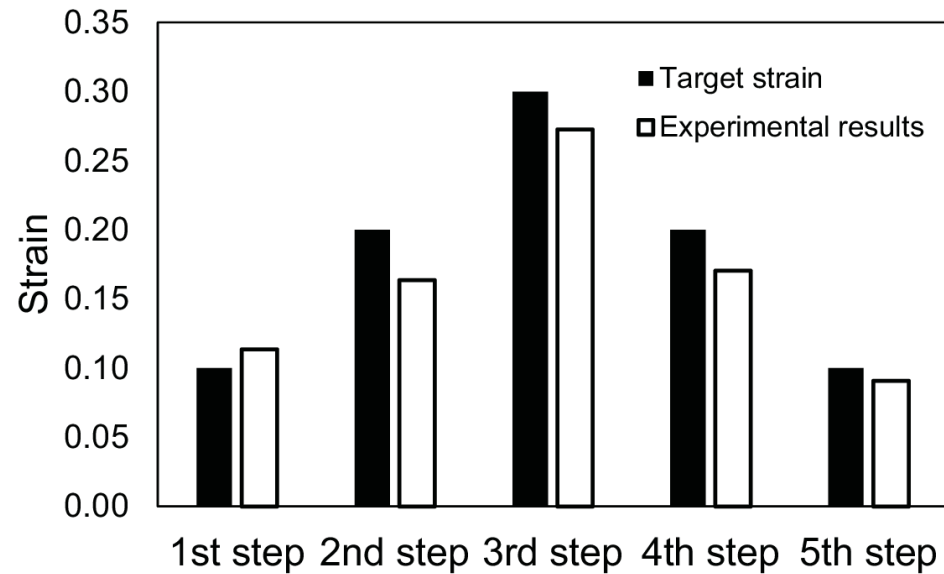
実験の様子 (ヤング率124 [kPa])



実験結果(ヤング率124 [kPa])



ひずみ制御中の指先力時間応答



目標ひずみに対する出力ひずみの偏差

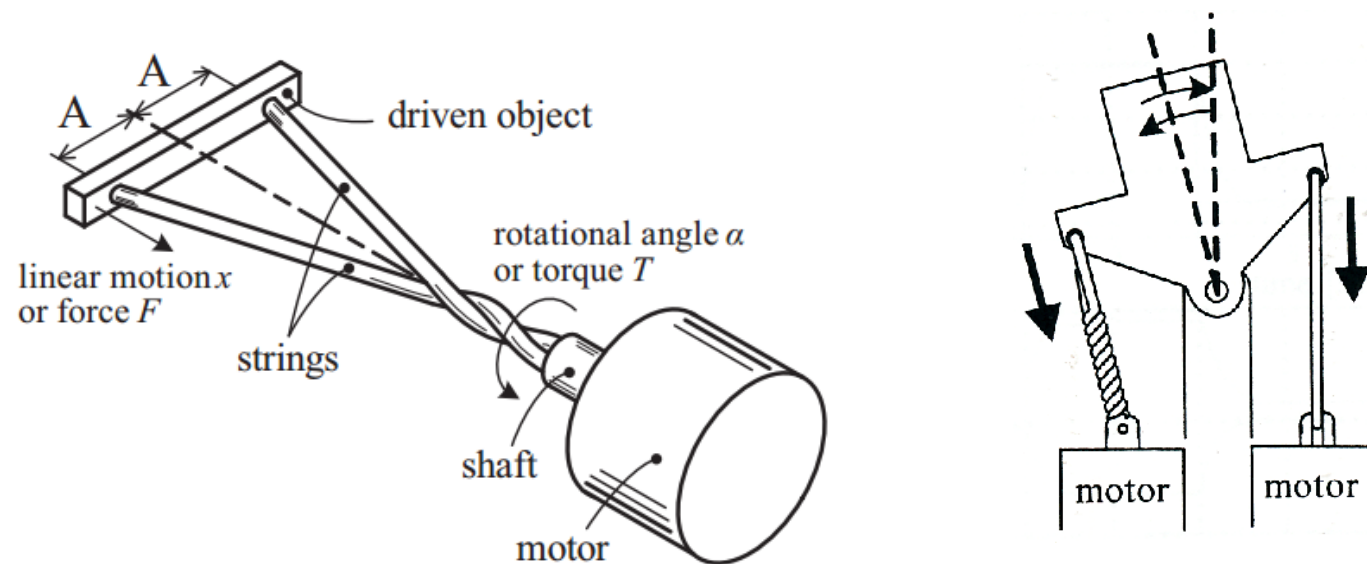
- ヤング率63.4 [kPa]のポリウレタンの時と比べ
目標値収束が遅く、オーバーシュートが見られる
- 反力の変化がより急峻であることが原因

県立大学での研究(2014年～)

- ◆ ロボットハンドの制御に関する研究
- ◆ ロボット用アクチュエータ(駆動)機構の開発
 - (1)腱駆動, ~~(2)空気圧人工筋~~, (3)丸ベルト捩り機構
- ◆ アーム搭載型の全方向自律移動ロボットの開発
- ◆ 筋骨格を模した多関節ロボットフィンガと筋電制御
- ◆ 高齢者歩行支援ロボット

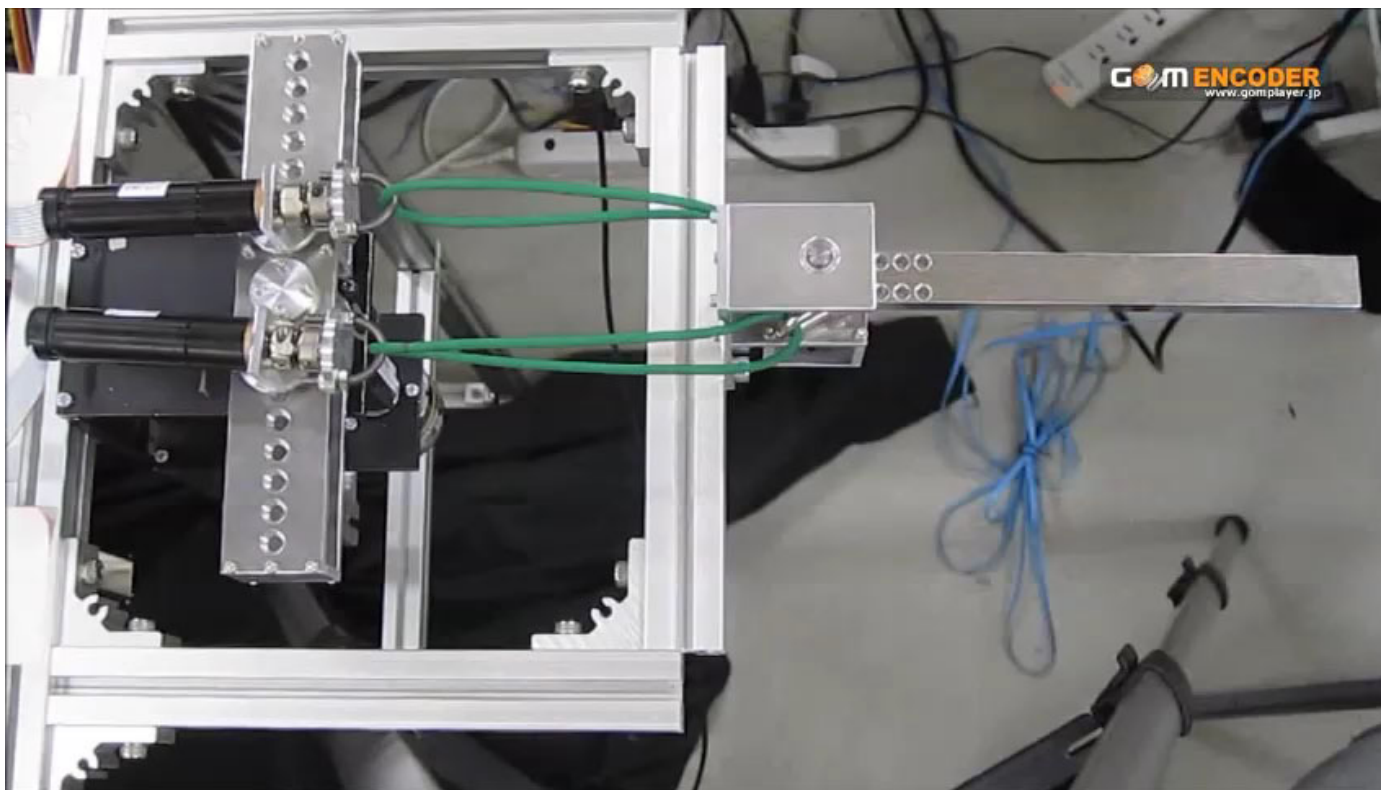
(3) 丸ベルト振り機構を新開発

◆ 振り駆動の原理

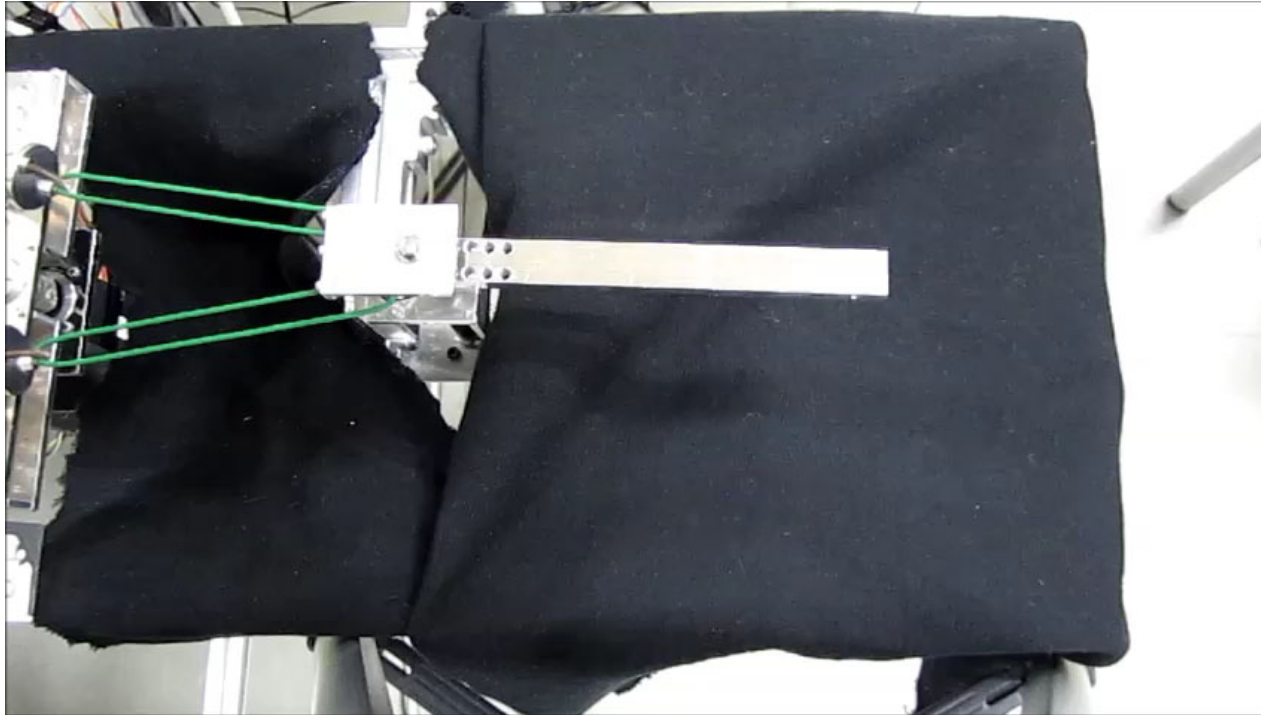


- ◆ 減速機として働くので, 細かい収縮変位が得られる
- ◆ 大きな収縮力を小さな回転力で得られる

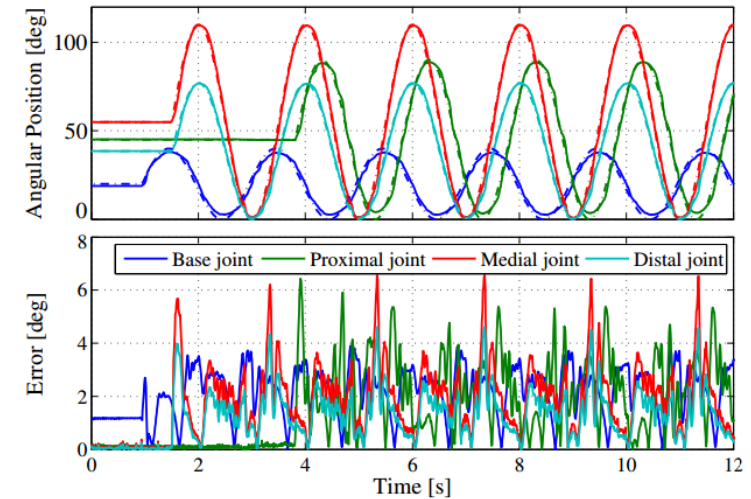
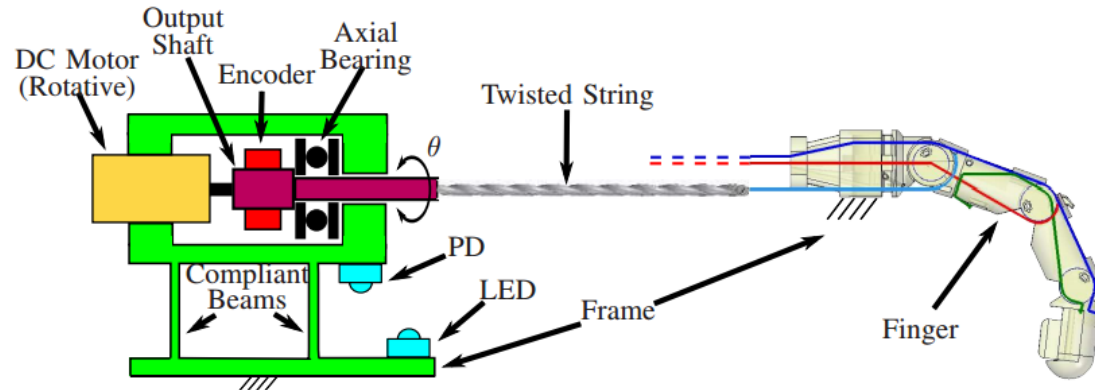
ベルト振り駆動型単関節ロボット(試作1号機)



ベルト振り駆動型単関節ロボット(角度制御)



関連研究1



◆ 関節角制御 & 剛性制御

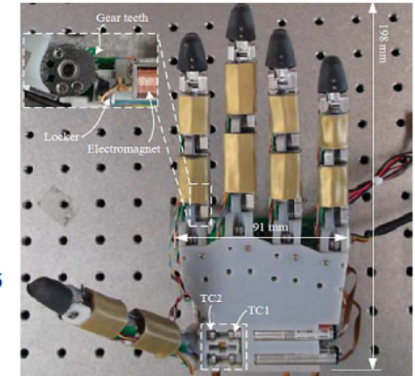
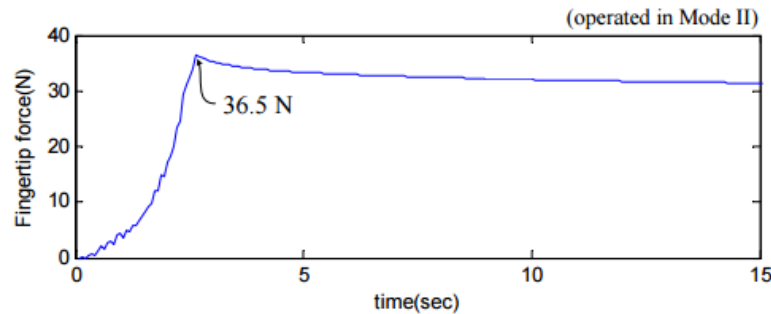
◆ 最高で1.5 Hz

➡ 細い糸のため屈曲に時間がかかる

- [1] G.Palli, S.Pirozzi, C.Natale, G.De Maria, and C.Melchiorri,
“Mechatronic Design of Innovative Robot Hands: Integration and Control Issues”, AIM,
2013
[2] G.Palli, L.Pan, M.Hosseini, L.Moriello, and C.Melchiorri,
“Feedback Linearization of Variable Stiffness Joints Based on Twisted String Actuators”, ICRA,
2015.

関連研究2

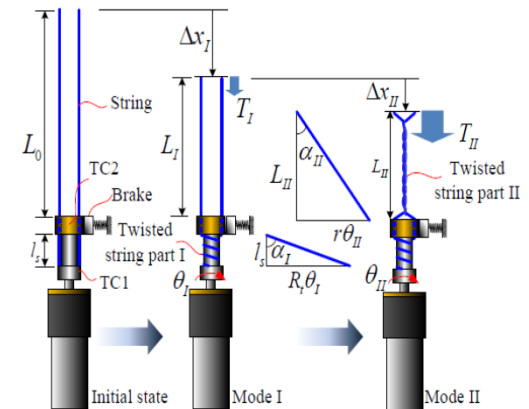
- ◆ 5本指ハンド
- ◆ 振り停止機構
- ◆ 最大指先力: 36.5N



➡ 静的な力のみ
力制御されていない

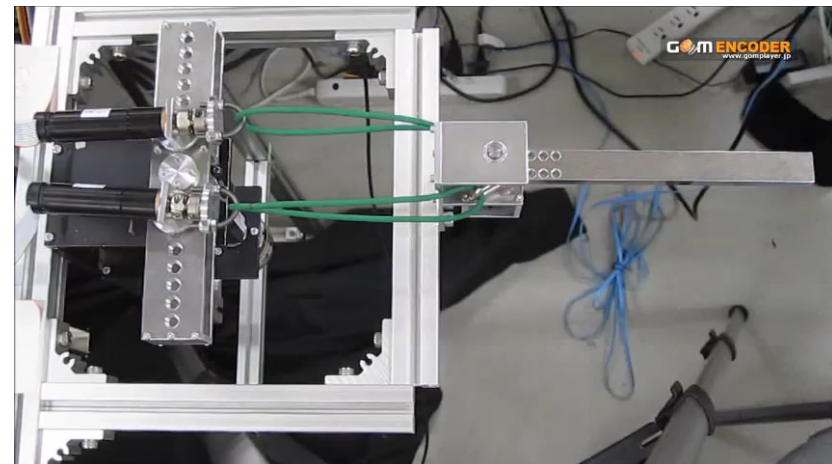
[1] Young June Shin, Keun-Ho Rew, Kyung-Soo Kim, and Soohyun Kim, “Development of Anthropomorphic Robot Hand with Dual-mode Twisting Actuation and Electromagnetic Joint Locking Mechanism”, ICRA, 2013.

[2] Seok Hwan Jeong, Young June Shin, Kyung-Soo Kim, and Soohyun Kim, “Dual-Mode Twisting Actuation Mechanism with an Active Clutch for Active Mode-Change and Simple Relaxation Process”, IROS, 2015.

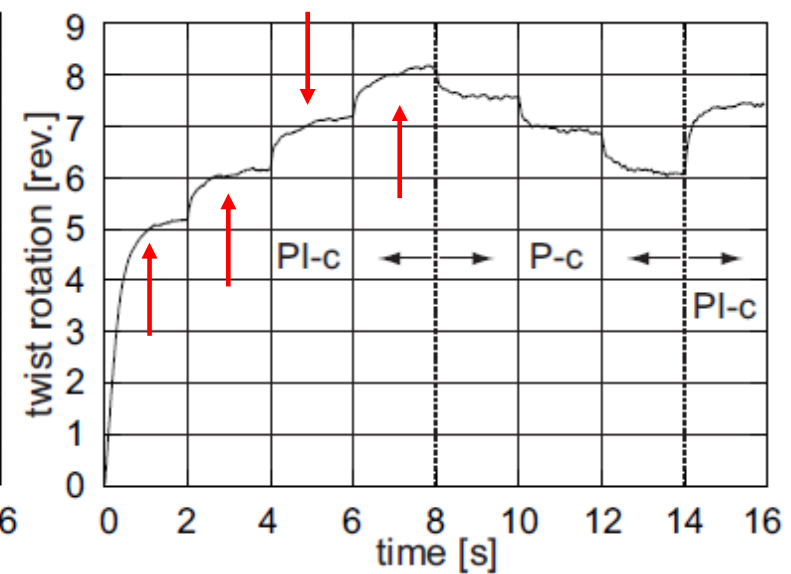
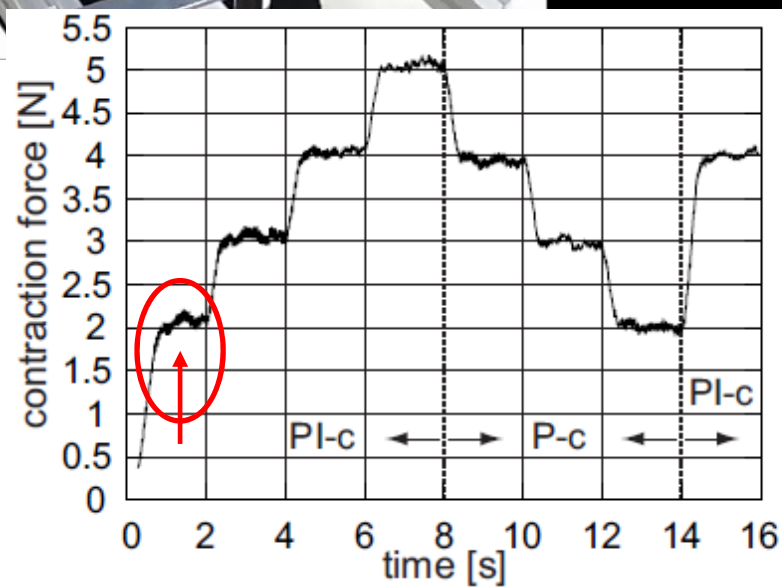
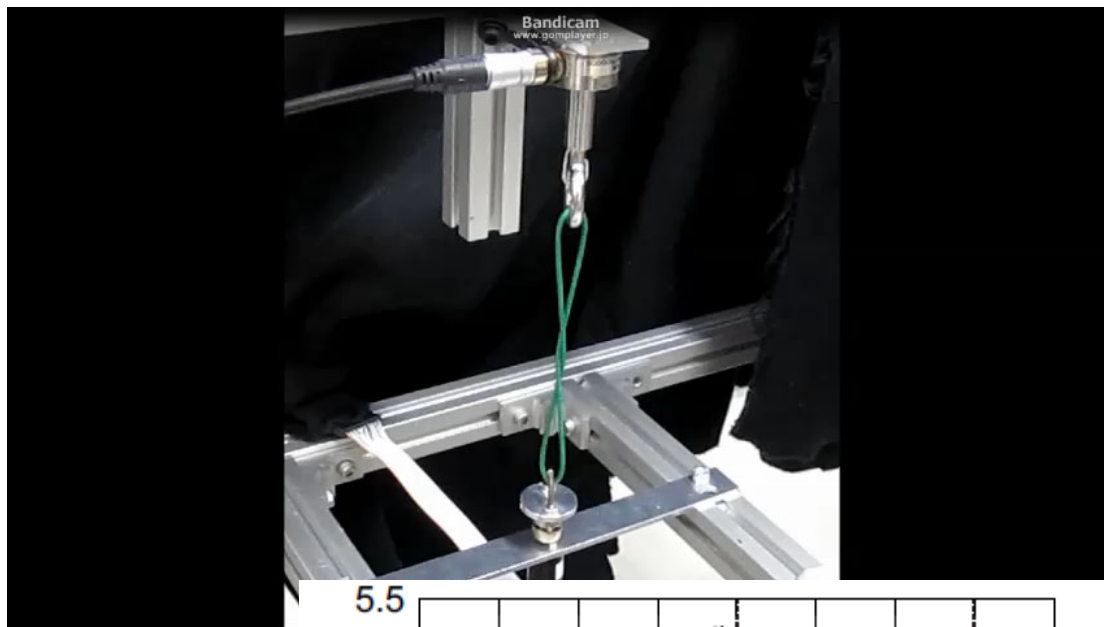


試作1号機の特徴

- ◆ 直径2mmの弾性ベルトを利用
- ◆ 柔らかい関節剛性と，関節剛性を可変にできる
- ◆ 糸に比べて，少しの捩り量で大きな収縮量
- ◆ 安価で交換可能
- ◆ 関節剛性や収縮力を上げるために，本数を自由に変更可能

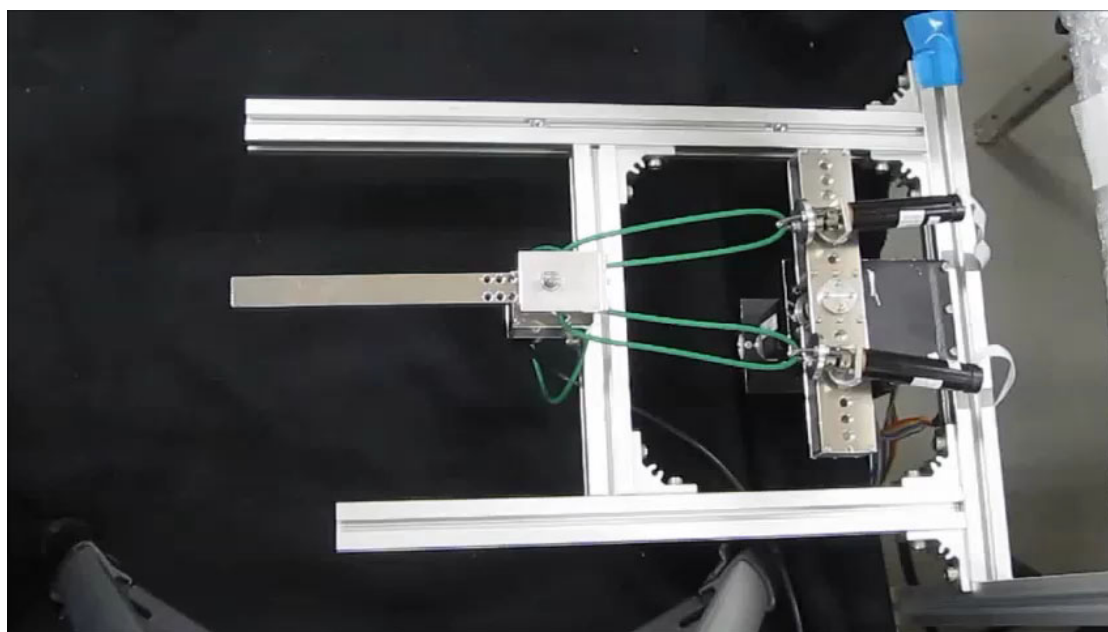


収縮力の制御

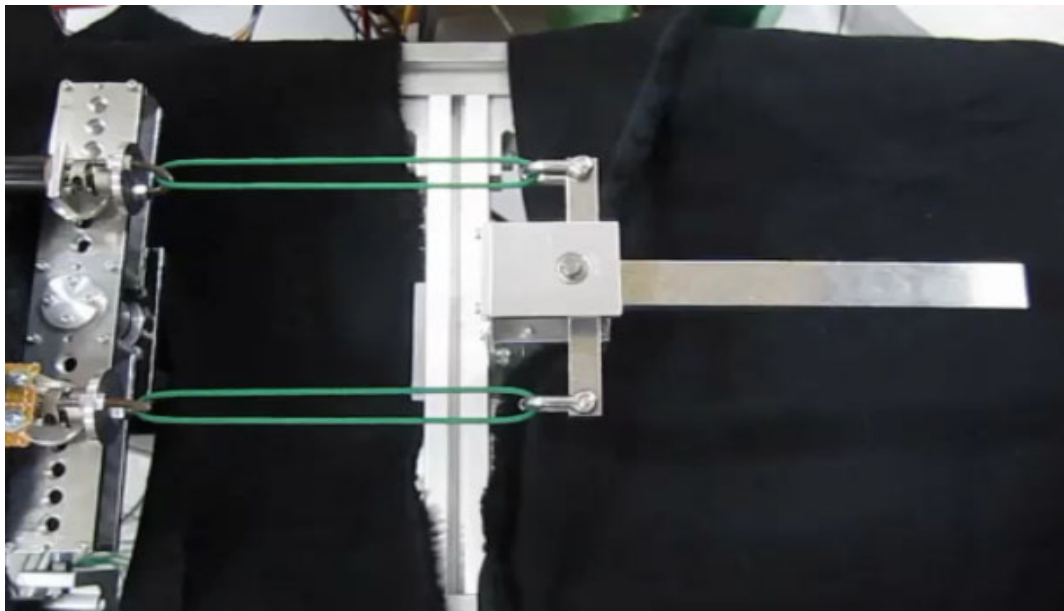
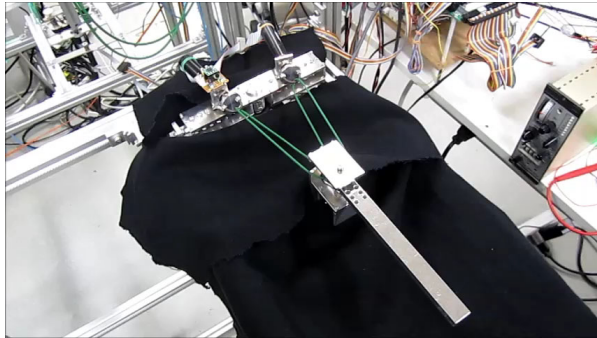


ベース部の駆動

関節剛性を維持しながら，リンクを動かしたい



1号機の問題点と2号機の開発



- ◆ T型リンク
- ◆ ベルト平行配置

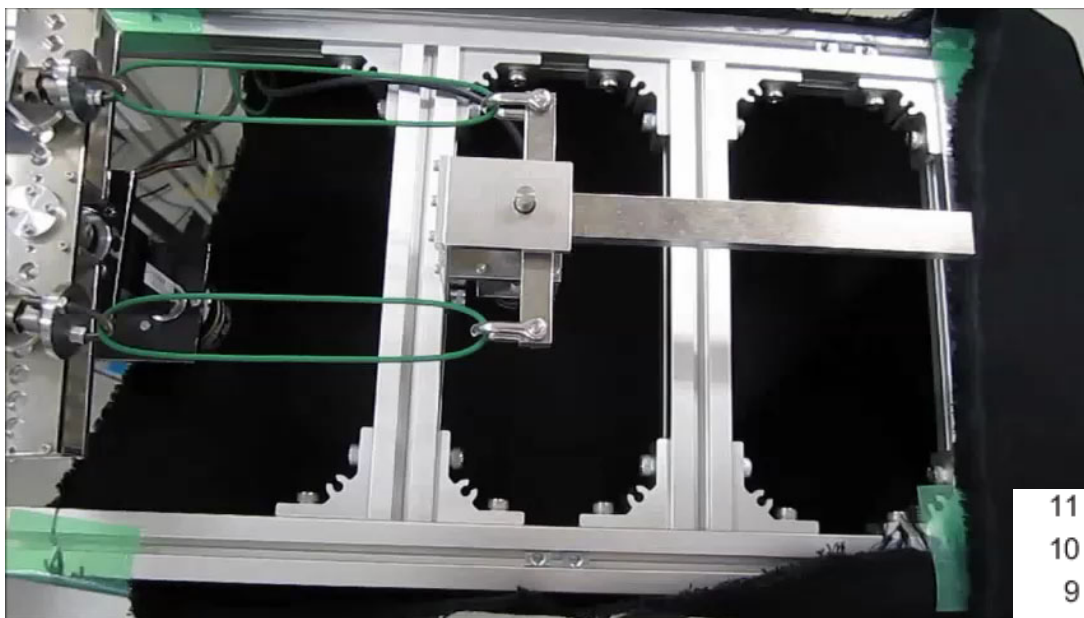


関節トルクの増大



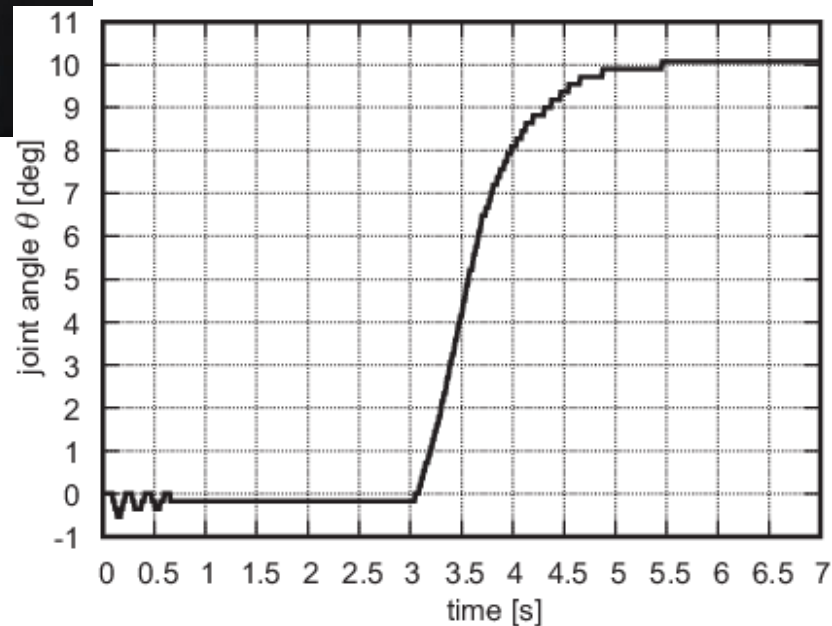
指先力の増大が期待

角度制御(2号機)①

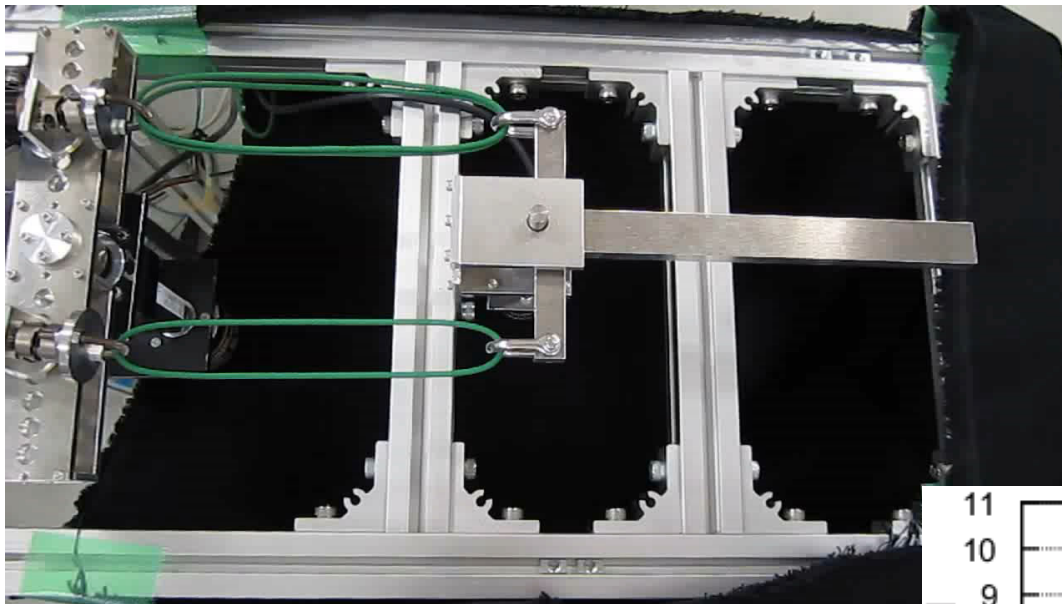


- 屈曲側ベルト1本
- PI 制御, 10° 目標

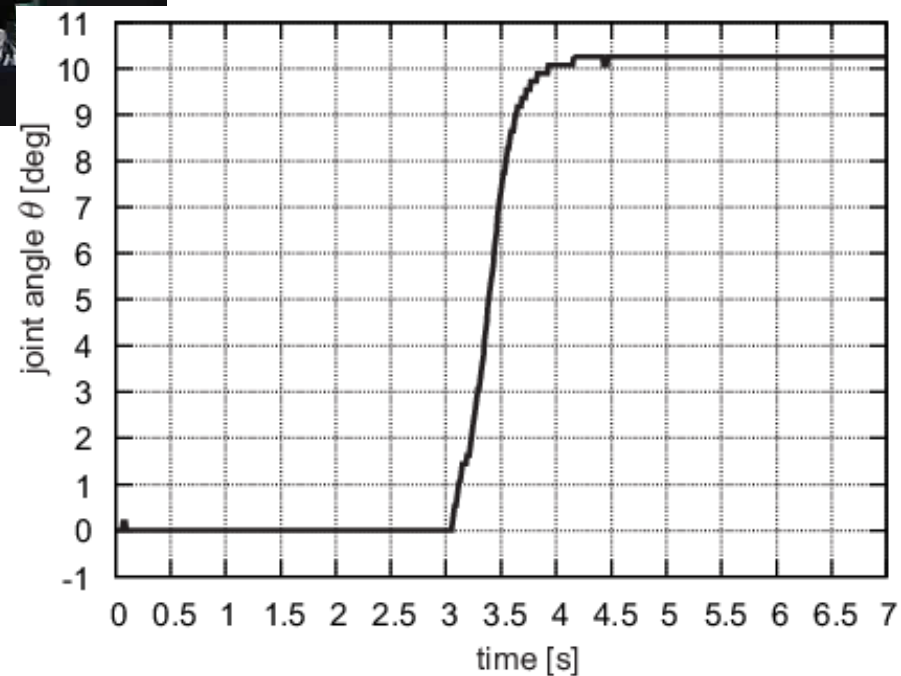
振動が解消



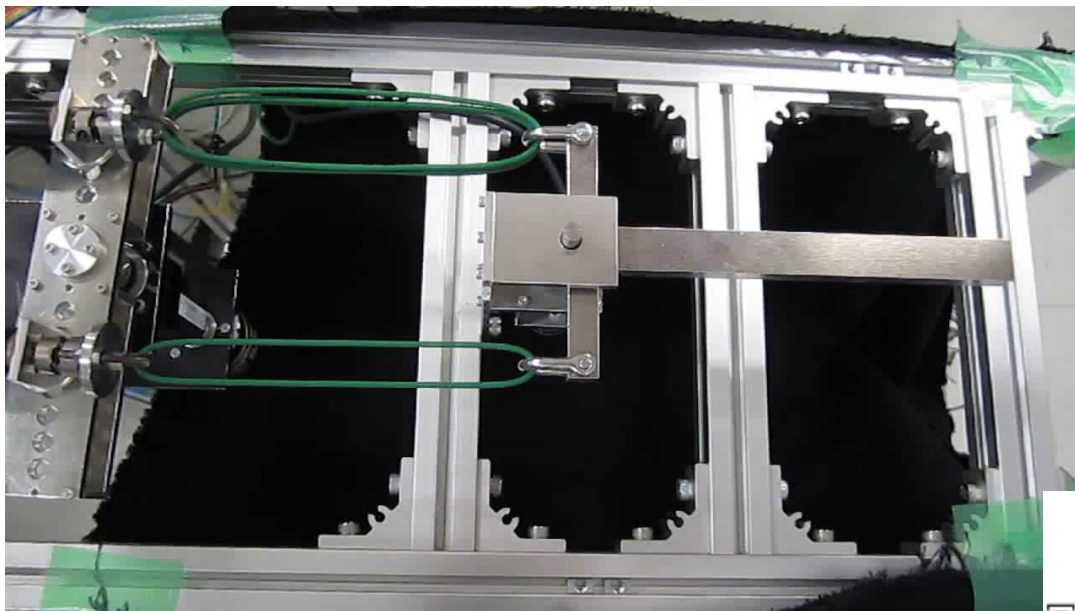
角度制御(2号機)②



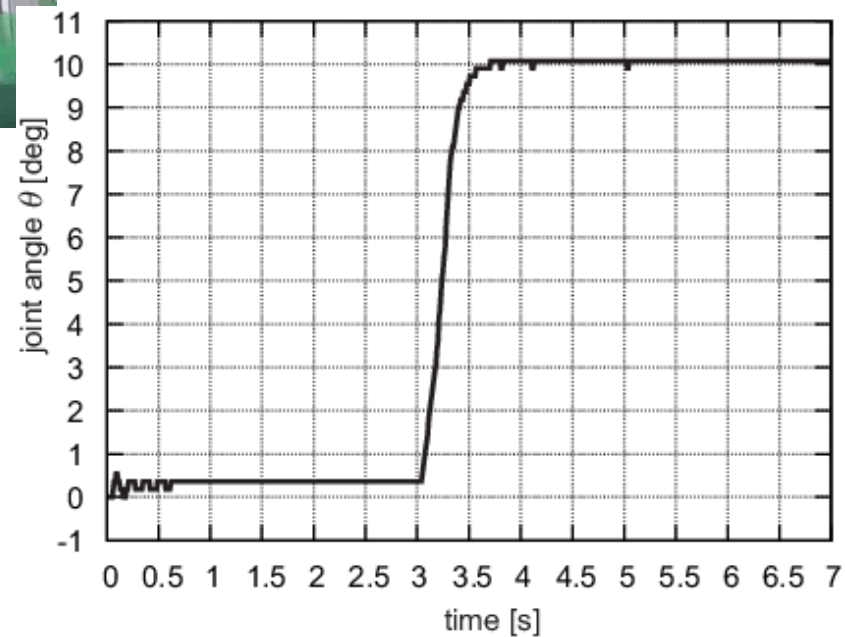
- 屈曲側ベルト2本
- PI 制御, 10° 目標



角度制御(2号機)③

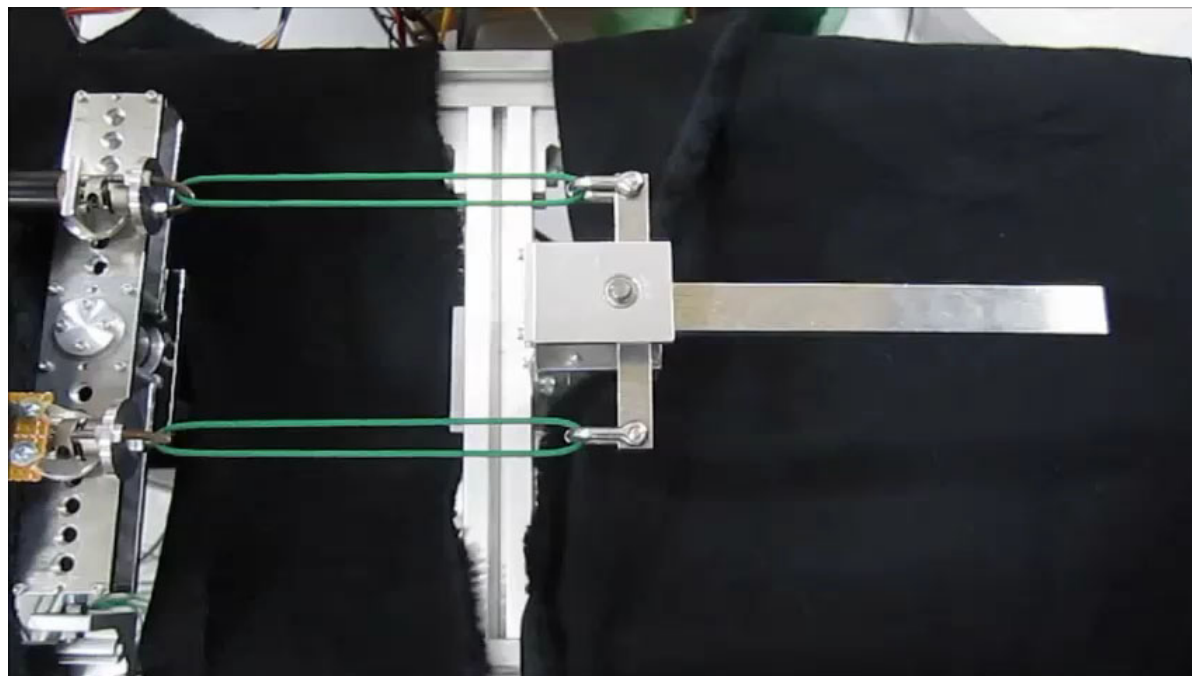


- 屈曲側ベルト3本
- PI 制御, 10° 目標



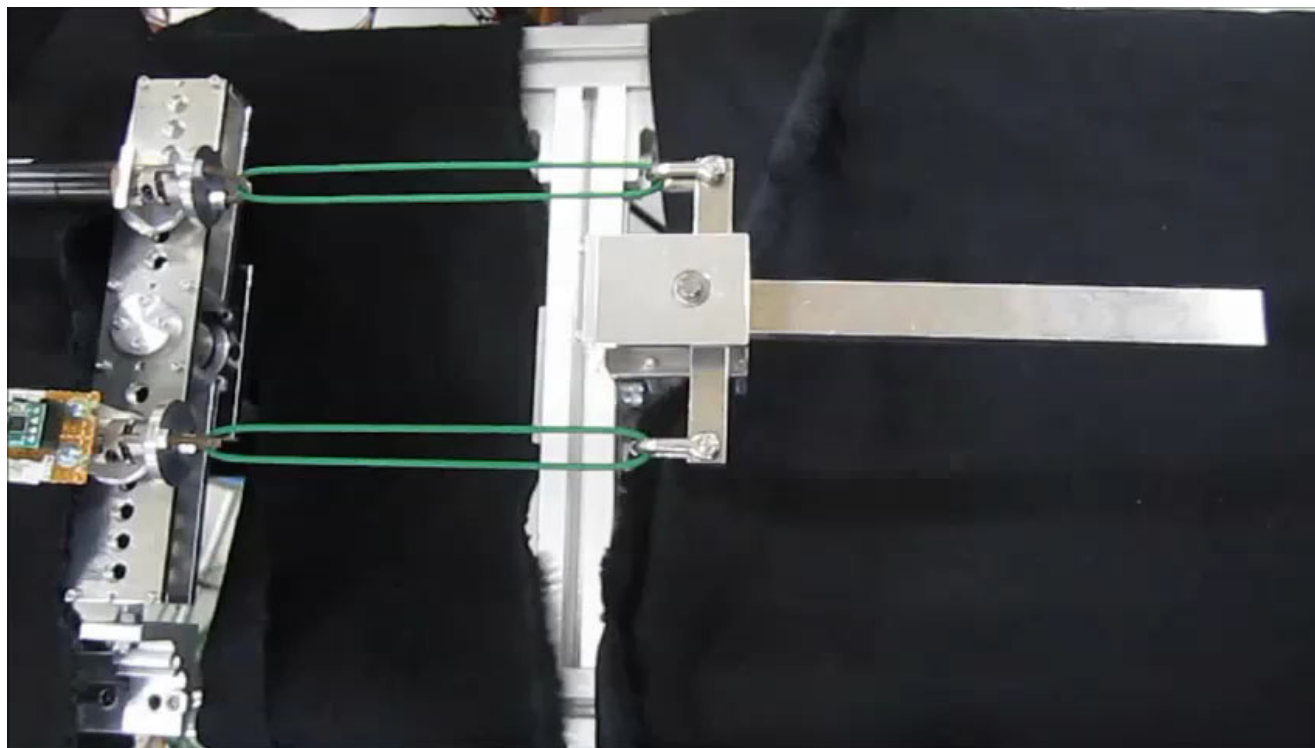
角度制御(屈曲側への往復運動)①

- ◆ 正弦波目標軌道, ゆっくりとした動き, 示指MP関節の可動域



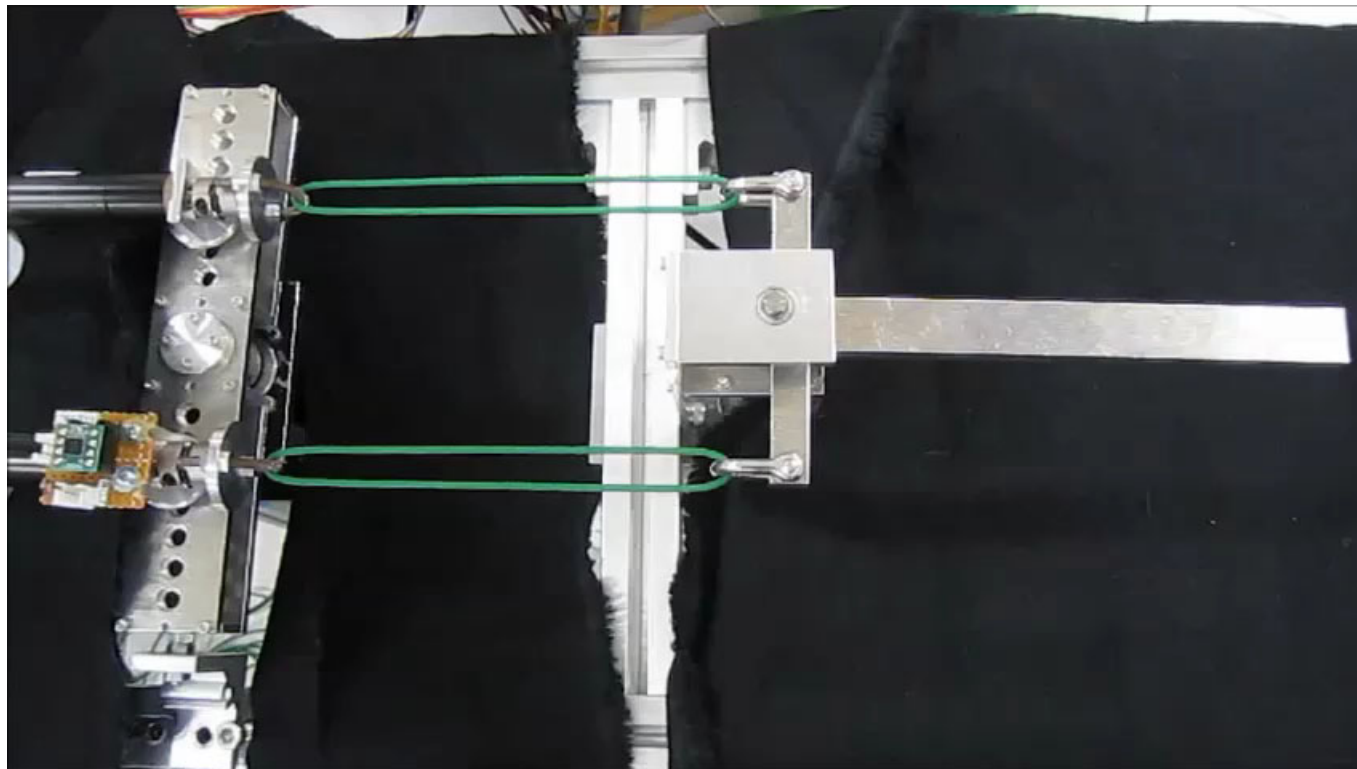
角度制御(屈曲側への往復運動)②

- ◆ 正弦波目標軌道, 少し速い動き



角度制御(屈曲・伸展両側への往復運動)

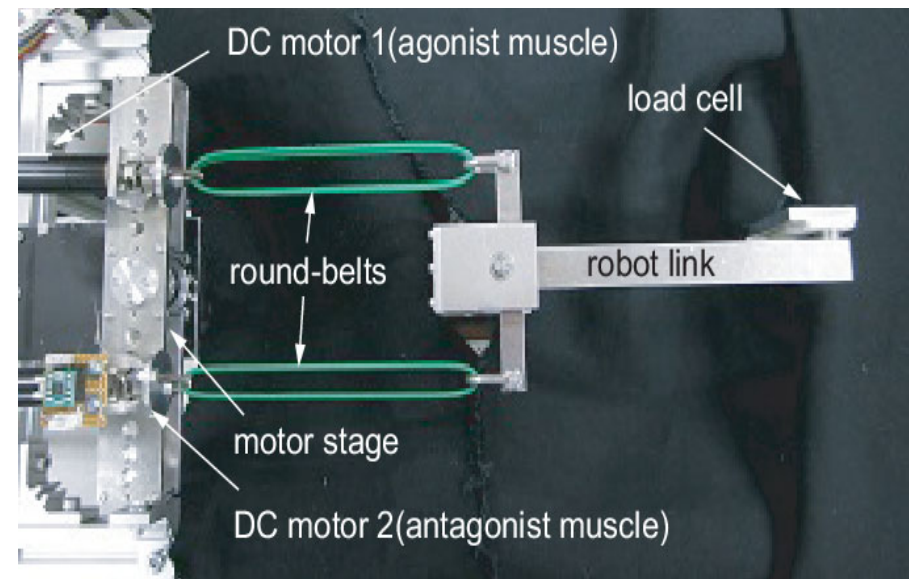
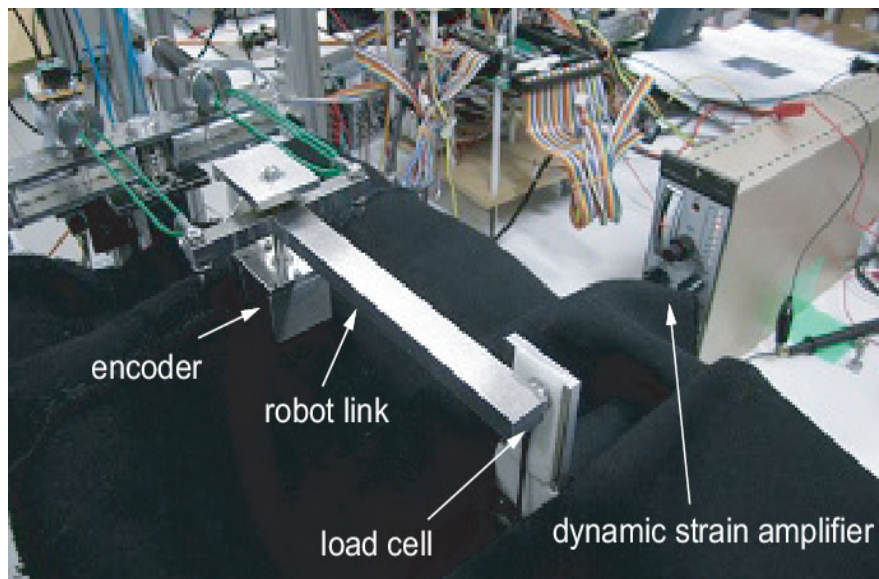
◆ 正弦波目標軌道



力(指先力)制御実験

指先力の増大が期待

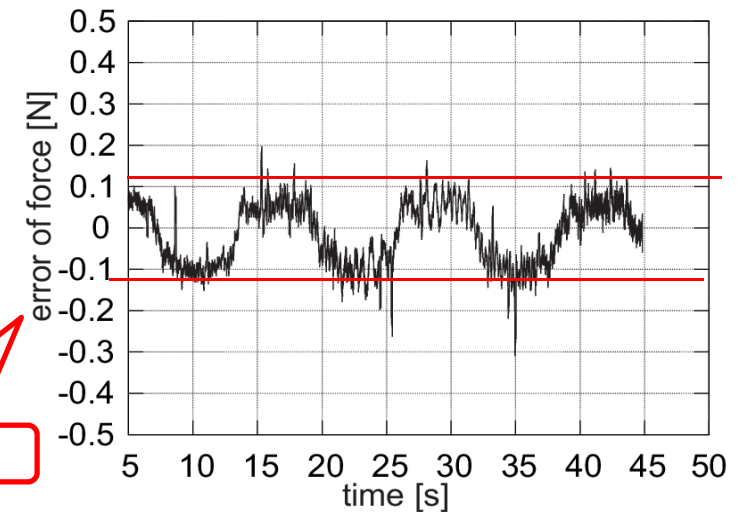
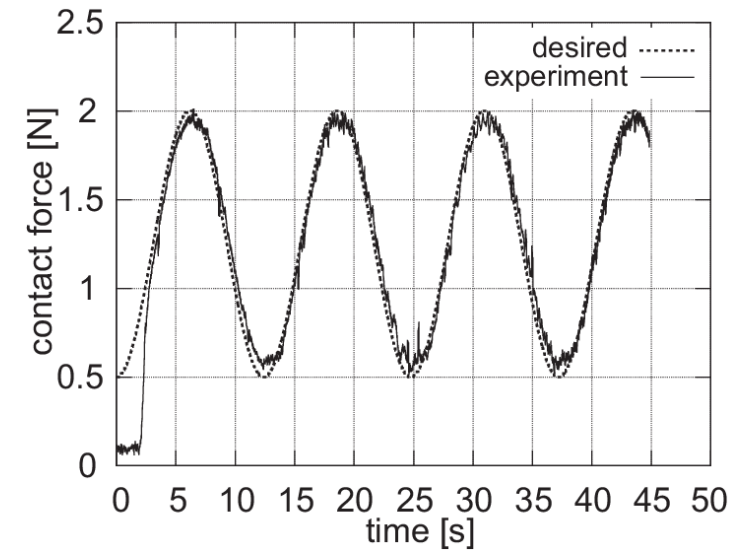
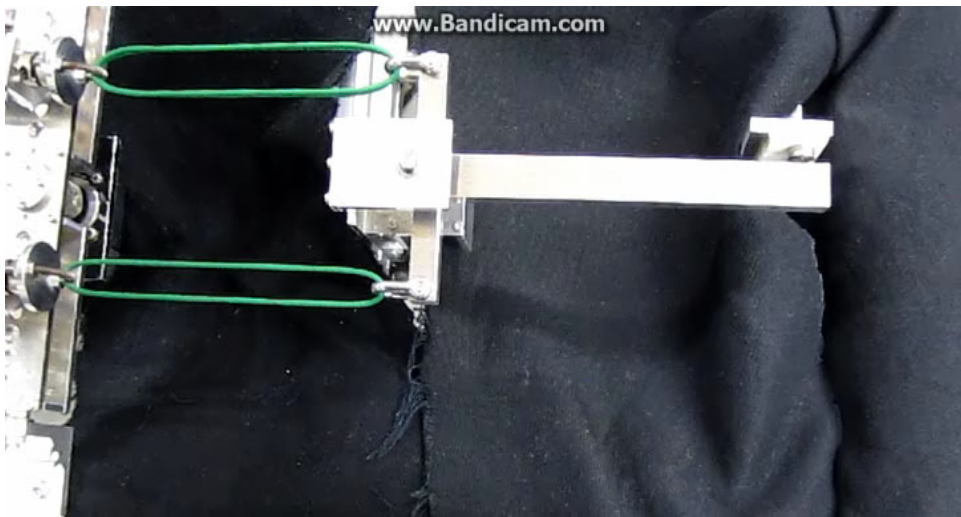
実験装置と準備



実験①(ゆっくりした動き)ベルト2本

- ◆ 力目標軌道: $T=4\pi$ [s]($\omega=1/2$ [rad/s]), 振幅=0.75[N]

$$F^d(t) = 0.75 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 1.25$$



Control law

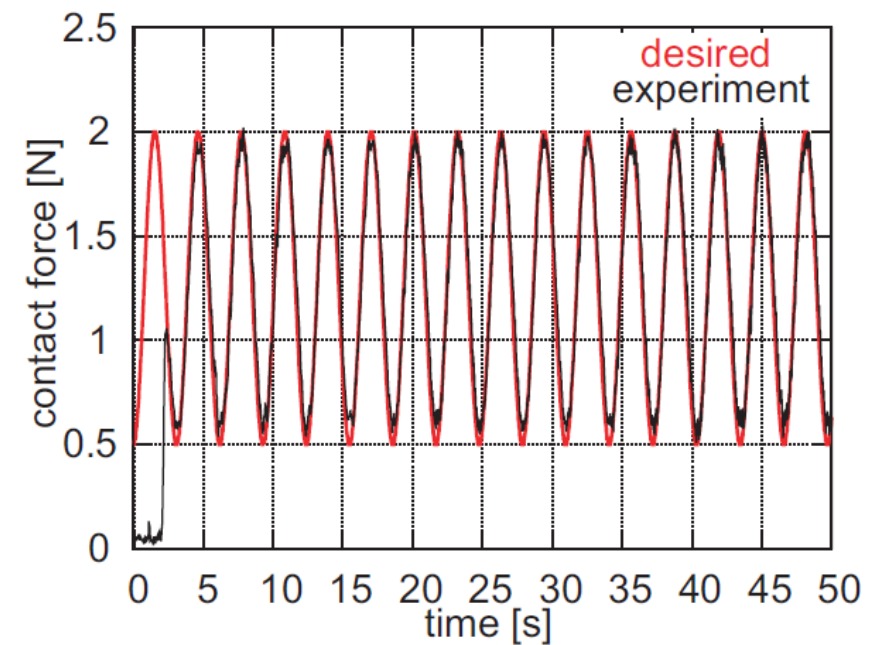
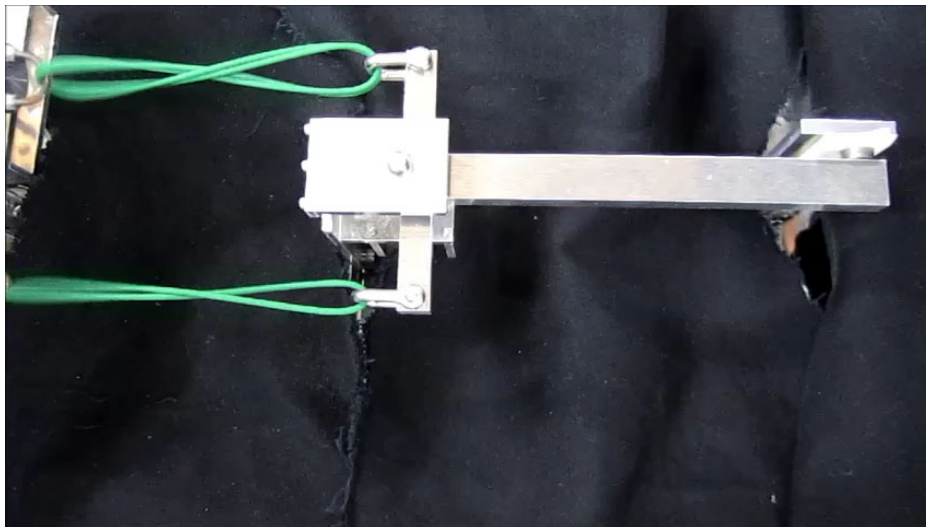
$$u_i = -K_{pi}(F - F^d)$$

誤差5%未満

実験②(少し速い動き)ベルト2本

- ◆ 力目標軌道: $T=\pi$ [s]($\omega=2$ [rad/s]), 振幅=0.75[N]

$$F^d(t) = 0.75 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 1.25$$

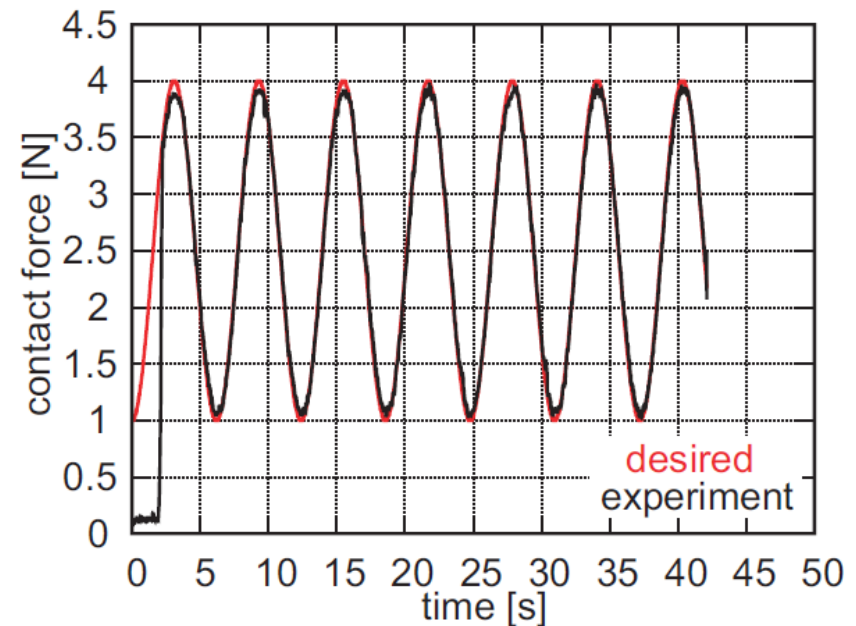
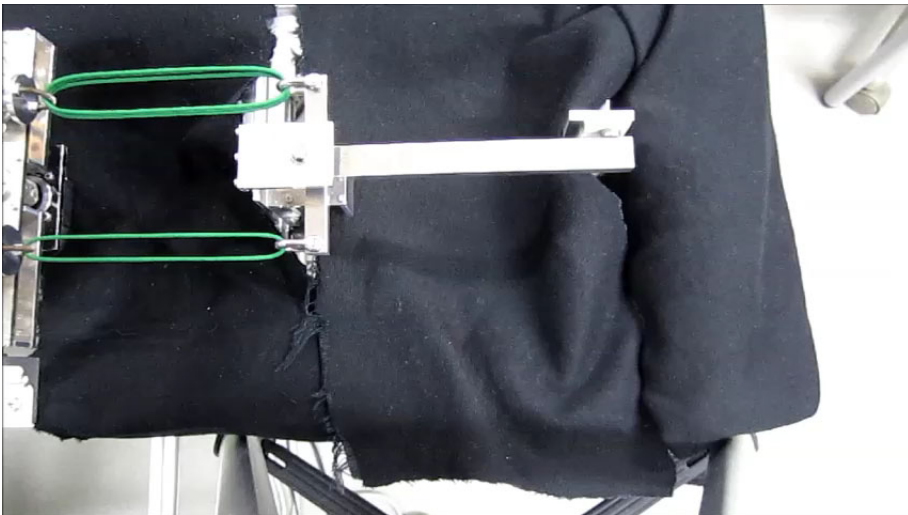


実験③(ゆっくりした動き)ベルト3本

- ◆ 力目標軌道: $T=4\pi$ [s]($\omega=1/2$ [rad/s]), 振幅=1.5[N]

$$F^d(t) = 1.5 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 2.5$$

片側(屈曲)のみ3本ベルト

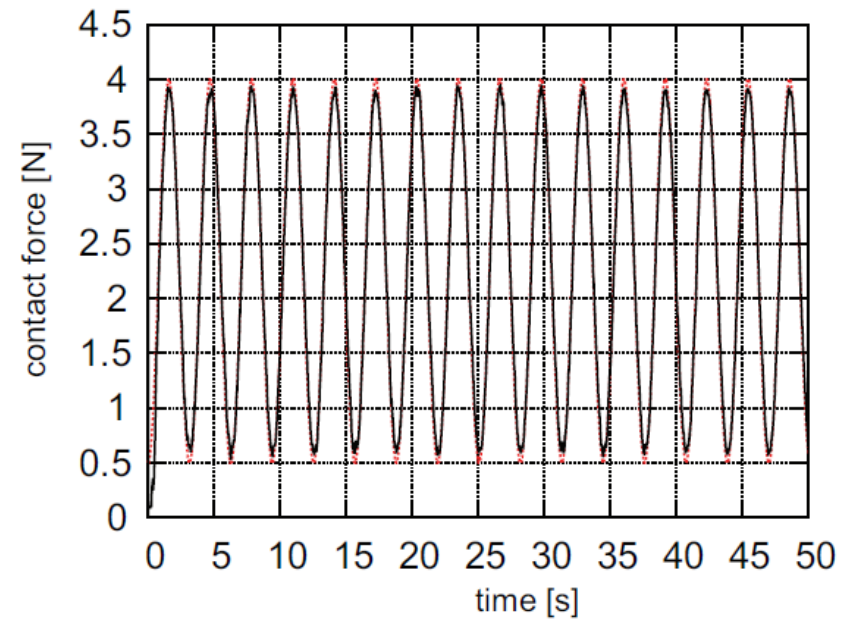
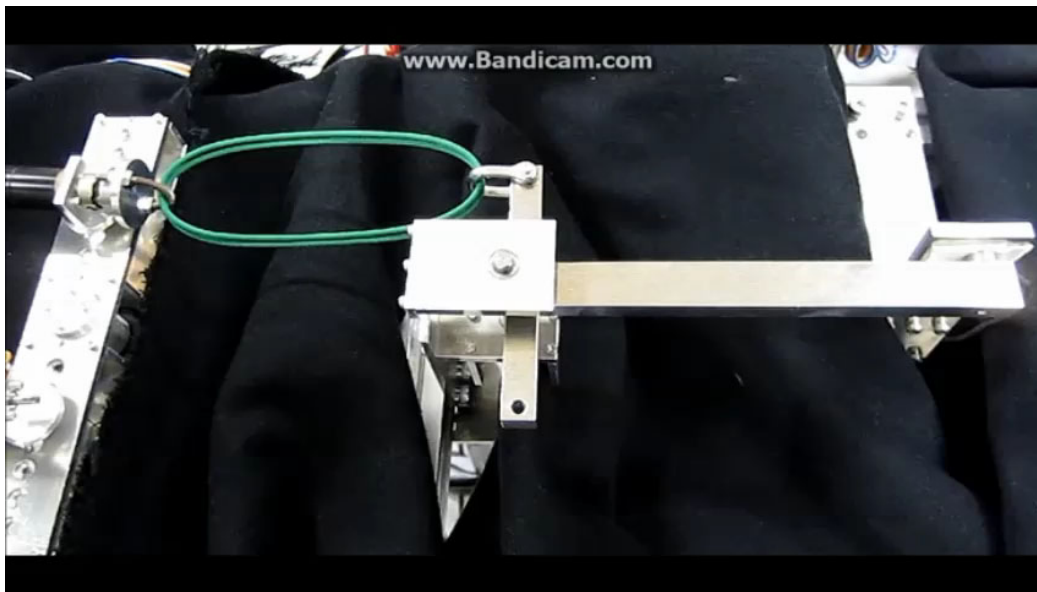


実験④(少し速い動き)ベルト2本

- 力目標軌道: $T=\pi[s](\omega=2[\text{rad/s}])$, 振幅=1.75[N]

$$F^d(t) = 1.75 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 2.25$$

1. 屈曲側: 2 ベルト
2. 伸展側: 0 ベルト



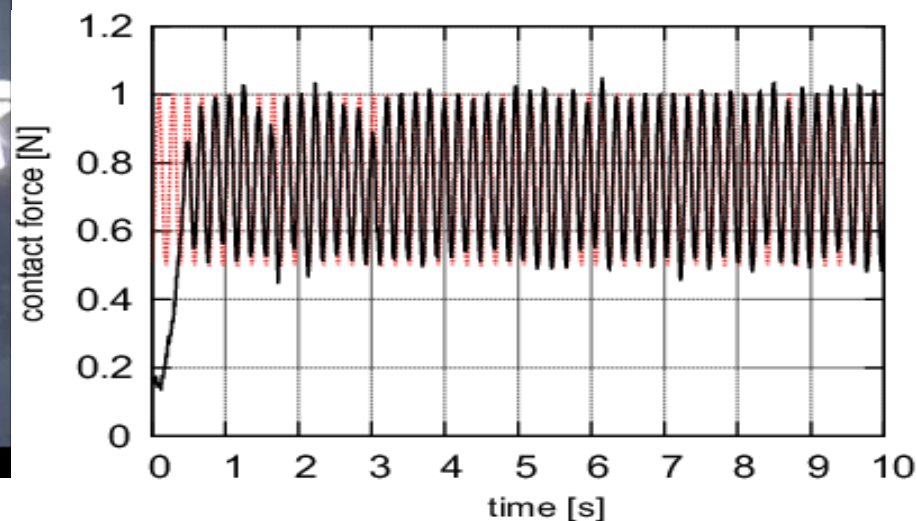
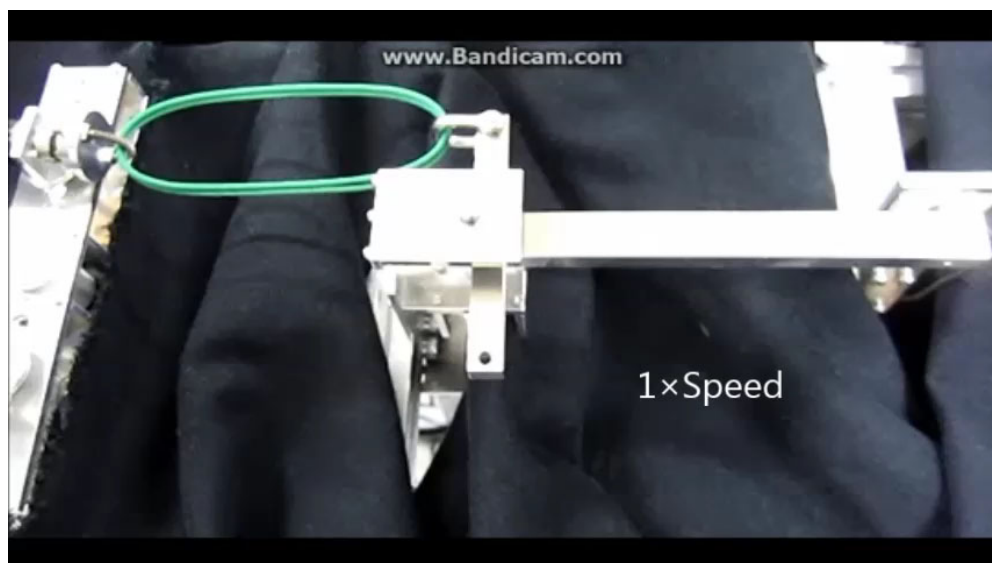
実験⑤(超速い動き)ベルト2本

- 力目標軌道: $T=\pi/16$ [s]($\omega=32$ [rad/s], 約5Hz), 振幅=0.25[N]

$$F^d(t) = 0.25 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 0.75$$

最速の例

1. 屈曲側: 2 ベルト
2. 伸展側: 0 ベルト



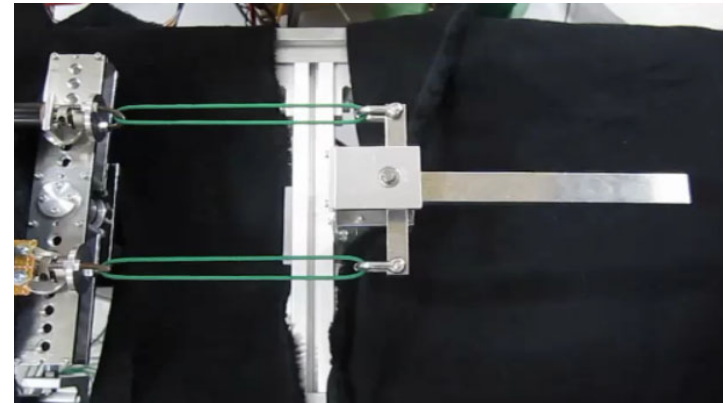
試作2号機の問題点

◆ ベルトの拮抗配置の限界

1. 伸展側のベルトによる不要な引張力の発生
2. 伸展側ベルトを取り除くと、伸展運動ができない



伸展側に新機構が必要！？



県立大学での研究(2016年～)

さらに改良！

- ◆ ロボットハンドの制御に関する研究
- ◆ ロボット用アクチュエータ(駆動)機構の開発
 - (1) 腱駆動, ~~(2) 空気圧人工筋~~, (3) 丸ベルト振り機構
- ◆ アーム搭載型の全方向自律移動ロボットの開発
- ◆ 筋骨格を模した多関節ロボットフィンガと筋電制御
- ◆ 高齢者歩行支援ロボット

安全確保の機構設計

課題: **安全性を有する**駆動機構の開発

解決策

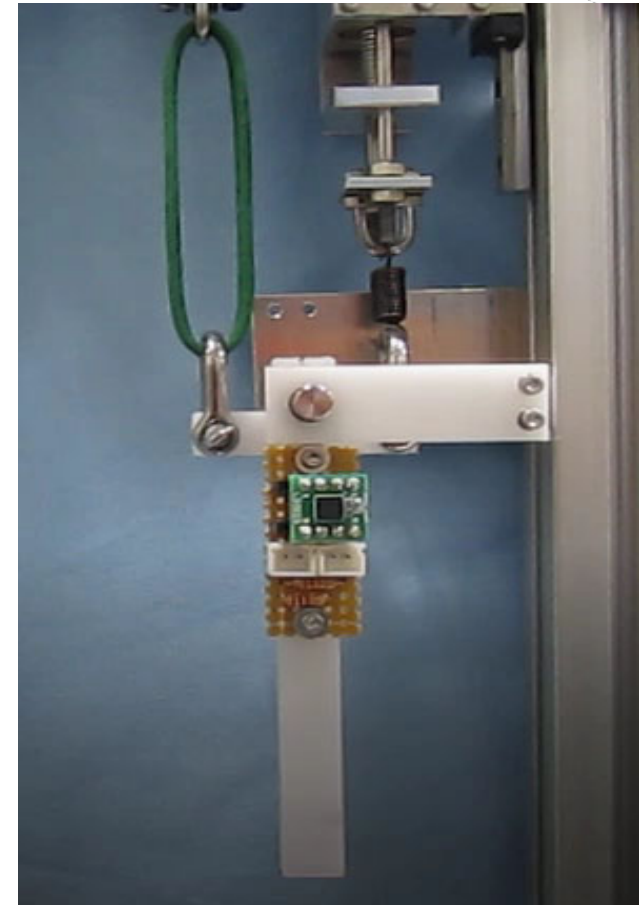
- ①人上肢の筋構造を模倣した拮抗駆動
 - 拮抗筋による瞬時の筋弛緩を再現
- ②ポリウレタン丸ベルトと線形バネを対抗配置
 - 筋肉の粘弾性を有し, 衝撃などの緩和

□能動的に関節を駆動するときは関節可動範囲を制限しない

□外力が働くとき両側で弾性力が働くため関節剛性が上がり動作が安定

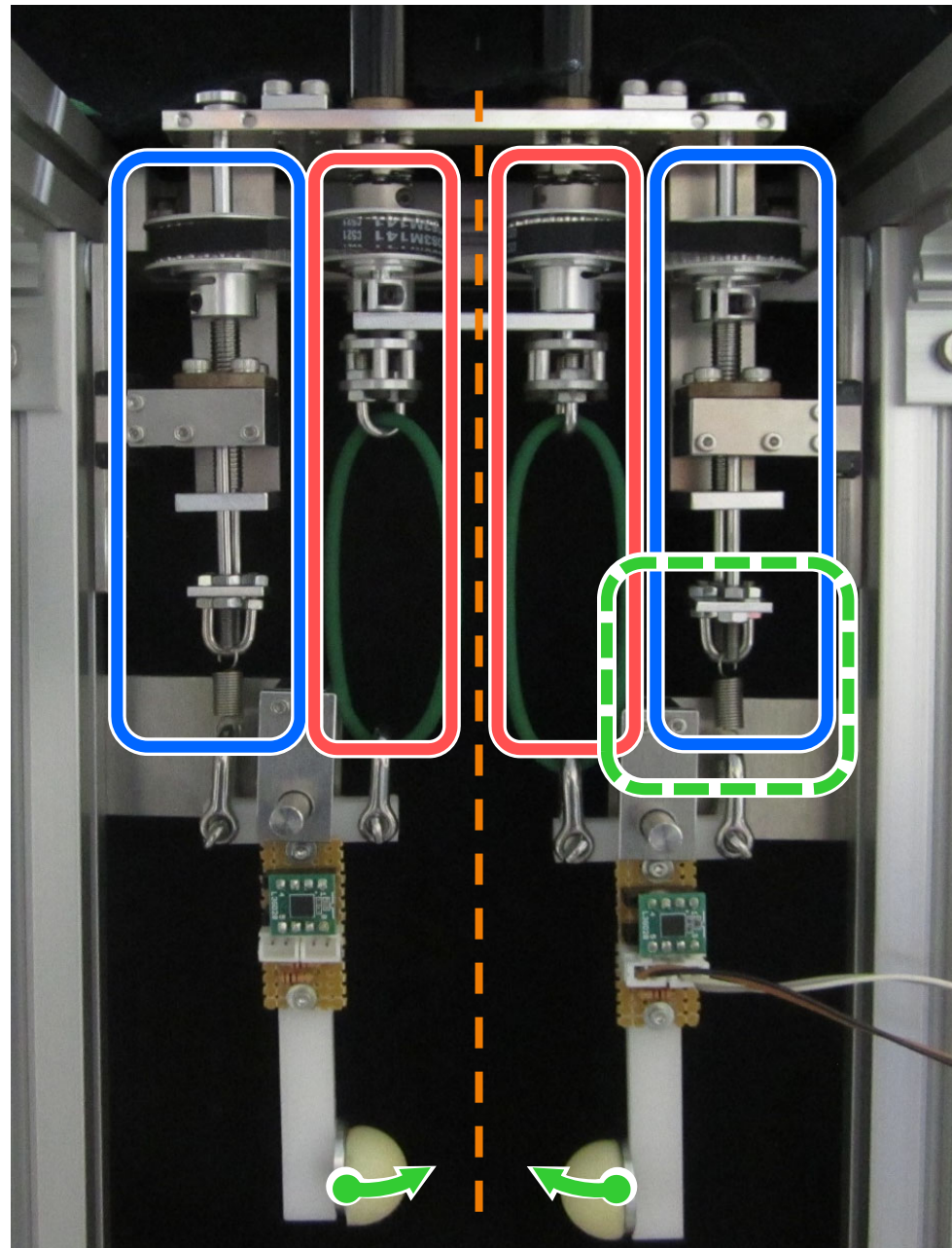


拮抗駆動



機構全体図

主動側



拮抗側

拮抗側の改善

解決策

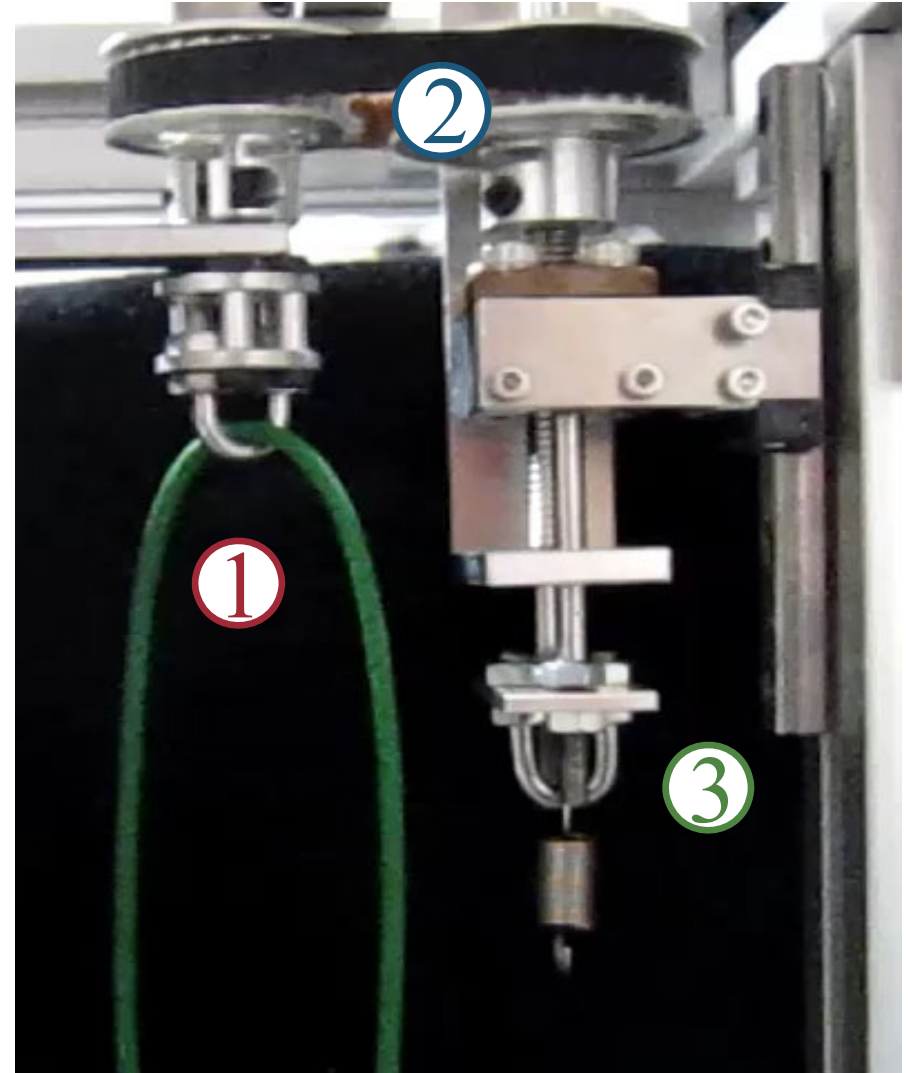
すべりねじとプーリを用いてバネの**自然長の維持**を実現

駆動原理

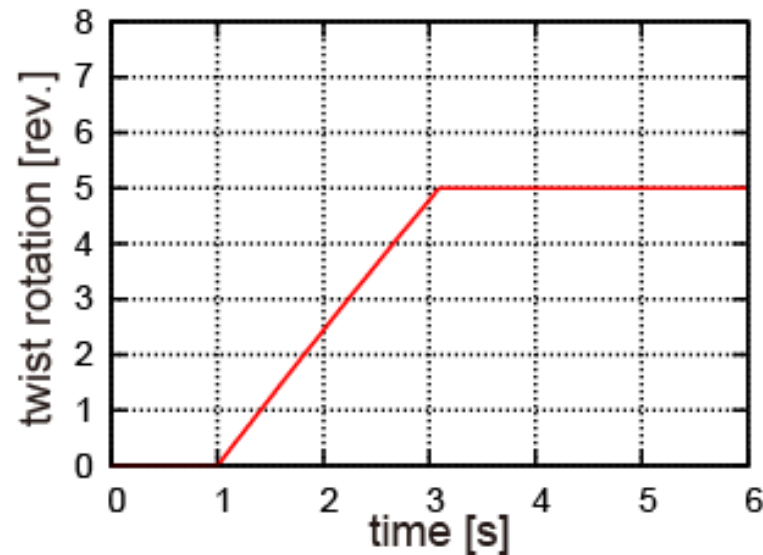
- ① モータによる振り回転
- ② 拮抗配置したプーリにベルトを介して動きを**同期**
- ③ すべりねじが回転しバネの上下が可能



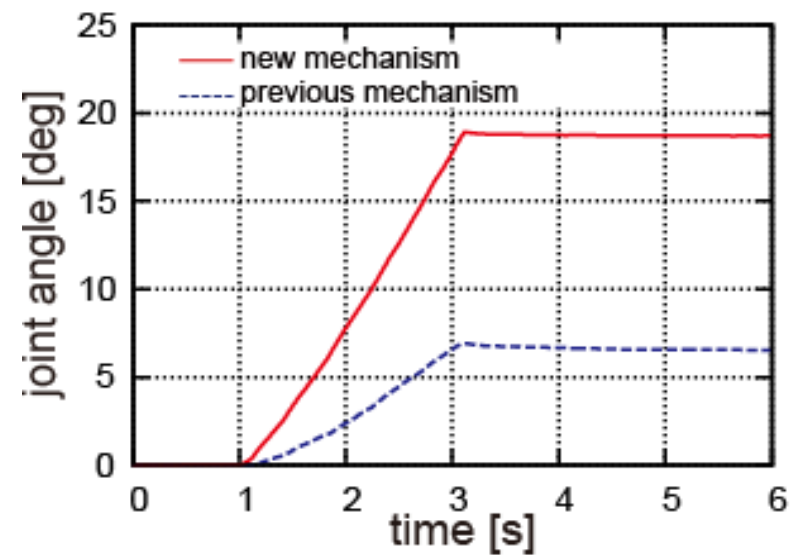
受動駆動機構



受動駆動機構の結果



振り数



関節可動域

実験 : 関節可動域の計測

結果 6.51 deg



18.5 deg

□ 同期運動により関節可動域の拡大

□ 少ない振り数で関節可動域の拡大

約 3 倍



本機構の有用性を示した

把持物体の操り制御

従来の研究では

把持対象物の姿勢情報



視覚センサ

問題点

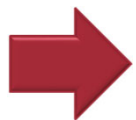
- 視覚センサの制御周期が遅い(100 msec)
- カメラの設置場所が限られる

本研究では

把持対象物の姿勢情報

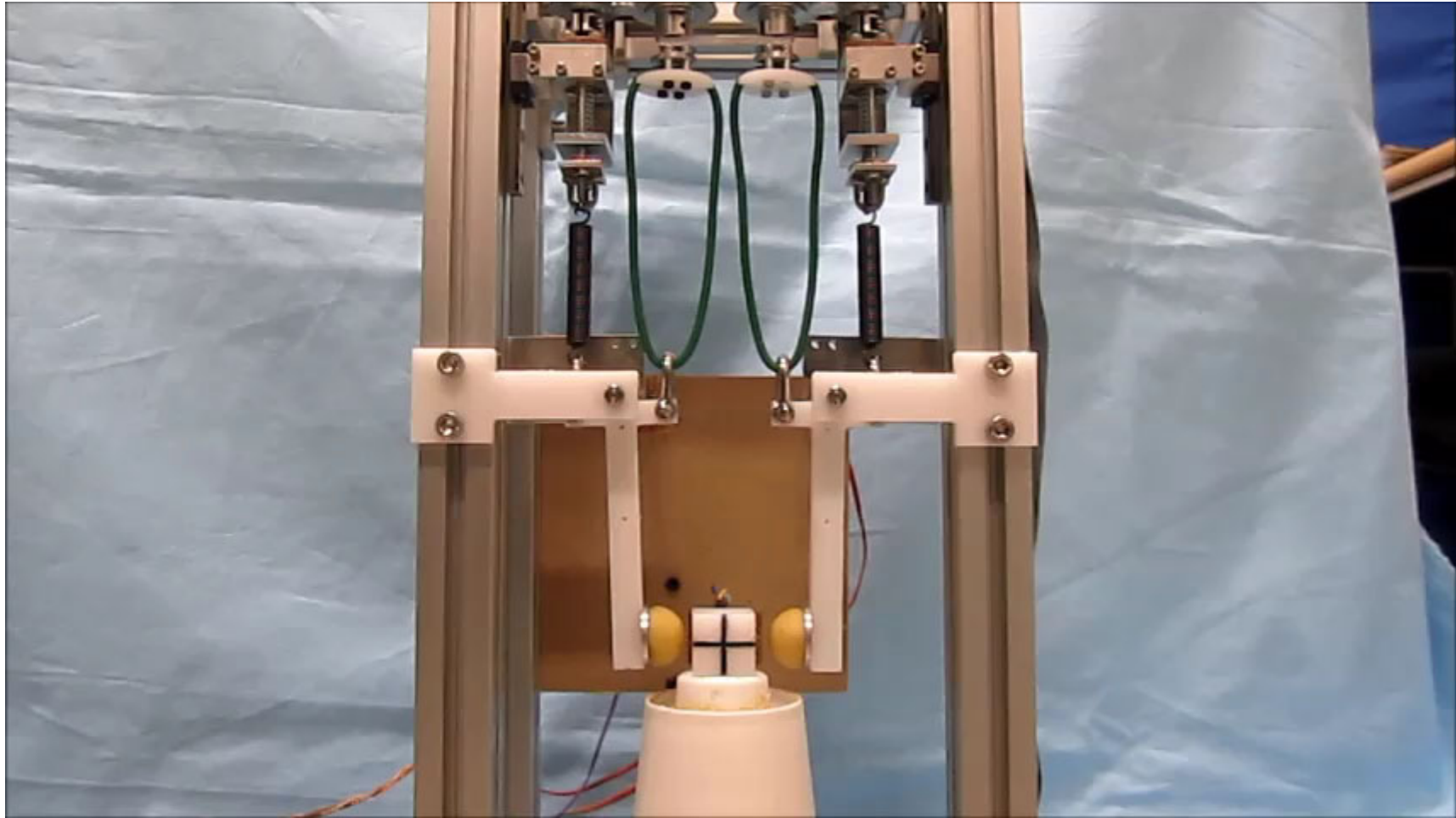


加速度センサ



制御周期の速い物体姿勢操り制御を行う

操り制御実験



二段階制御則

新たな制御手法の提案



1段目制御器(仮想関節角度の生成)

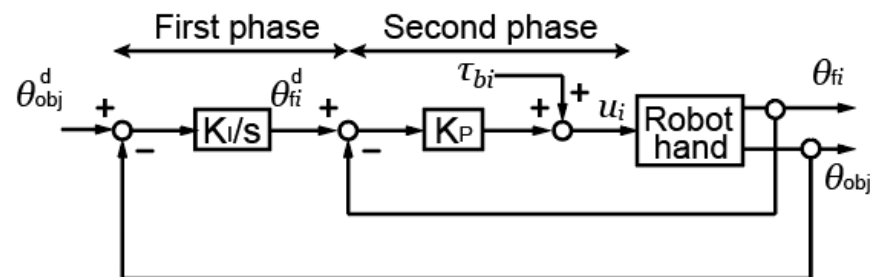
$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

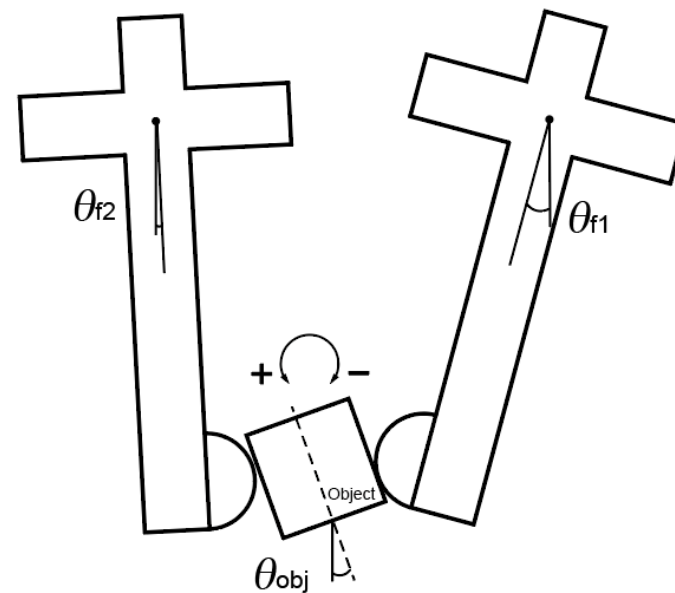
$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_b.$$

特徴

- 目標関節角を介した連動動作
- 重力下にもかかわらず
運動学的手法が不要な構造



操り制御のプロセス



ハンドの構造

姿勢物体の操り制御(2msec)

上りステップ

$$K_P = 175 \quad K_I = 0.00045$$

0 ~ 5 sec: 静止(LPFの立ち上がり遅れを考慮)

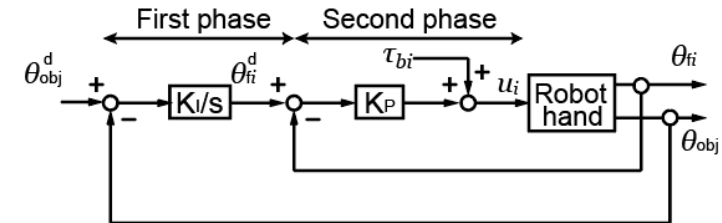
5 ~ 10 sec: 物体把持(バイアストルクのみ)

10 ~ 25 sec: 目標値 5 deg

25 ~ 40 sec: 目標値 10 deg

40 ~ 55 sec: 目標値 15 deg

55 ~ 70 sec: 目標値 20 deg

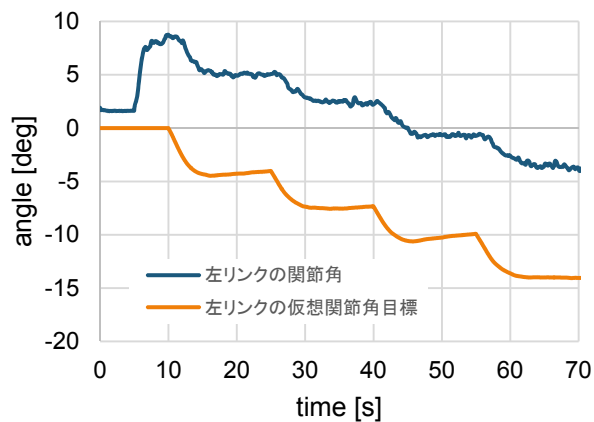


1段目制御器(仮想関節角度の生成)

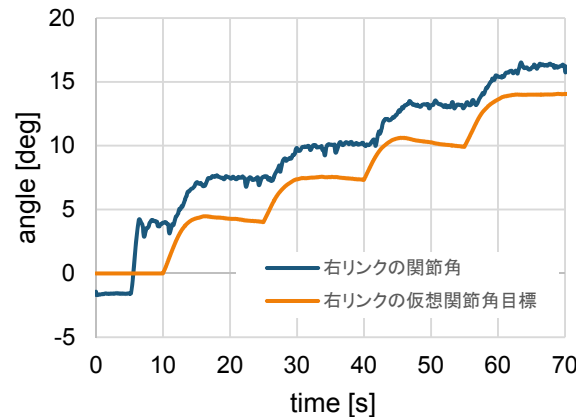
$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

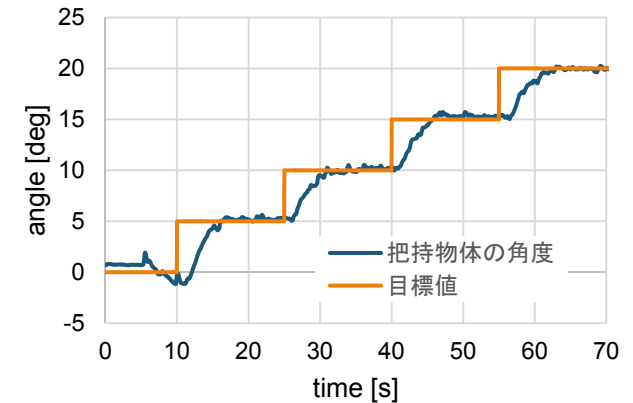
$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_b.$$



左リンク — 仮想関節
角度 — 角度



右リンク — 仮想関節
角度 — 角度



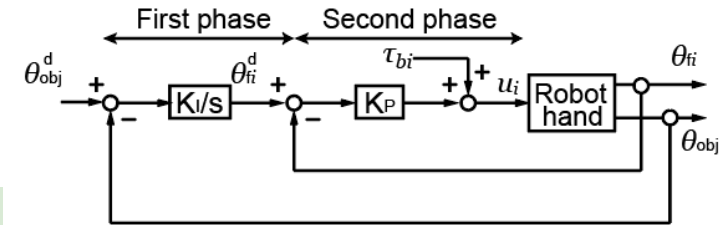
把持物体 – 目標値

姿勢物体の操り制御(2msec)

上り - 下りステップ

$$K_P = 175 \quad K_I = 0.00045$$

0 ~ 5 sec: 静止(LPFの立ち上がり遅れを考慮)
5 ~ 10 sec: 物体把持(バイアストルクのみ)
10 ~ 25 sec: 目標値 5 deg
25 ~ 40 sec: 目標値 15 deg
40 ~ 55 sec: 目標値 0 deg

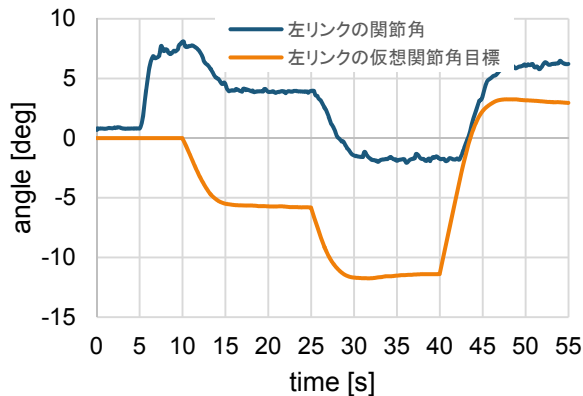


1段目制御器(仮想関節角度の生成)

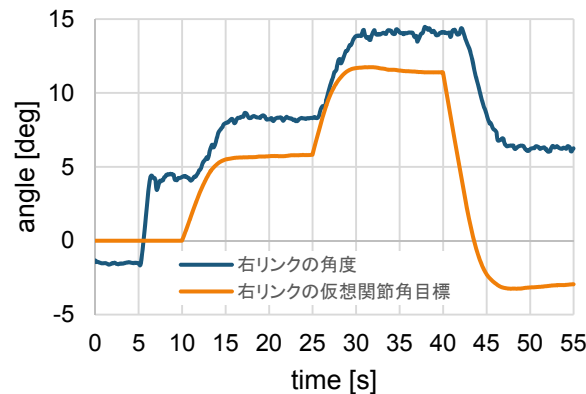
$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

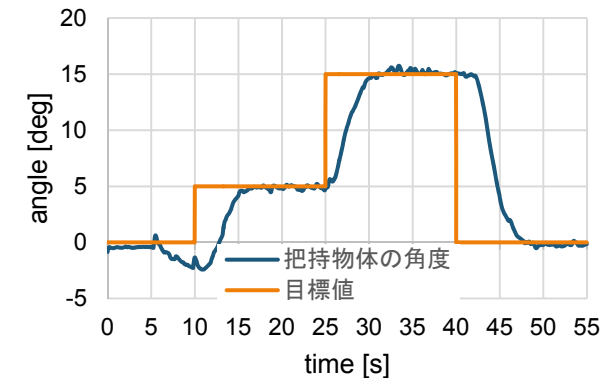
$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_b.$$



左リンク 仮想関節
角度 角度



右リンク 仮想関節
角度 角度

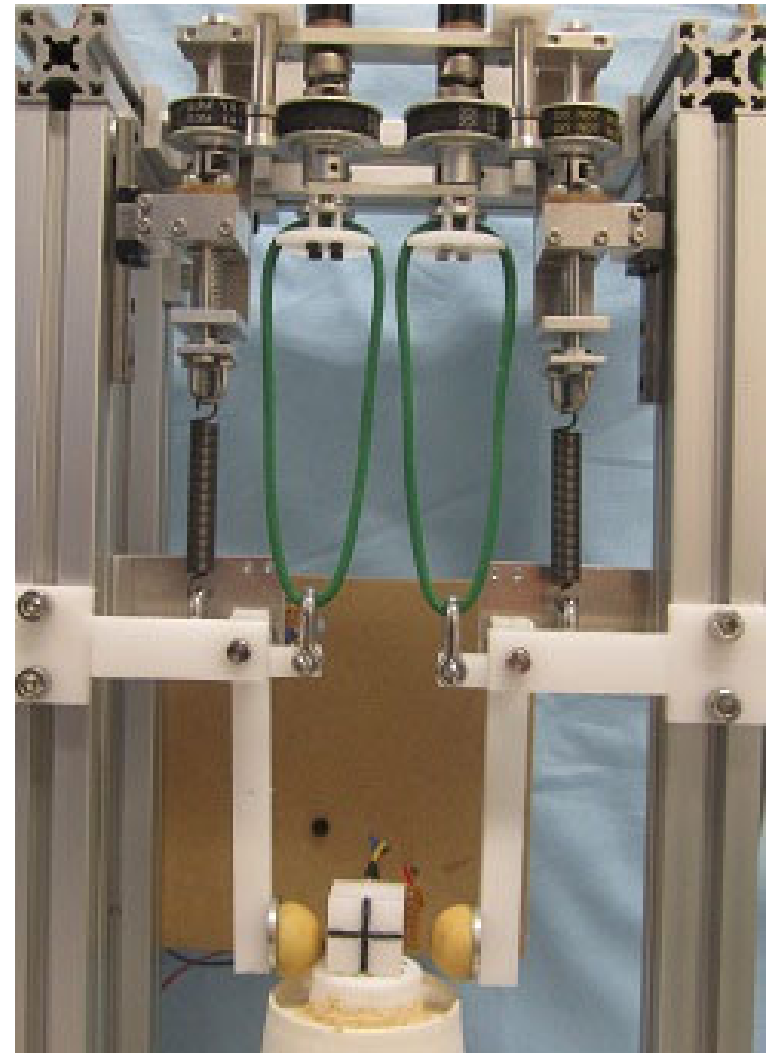
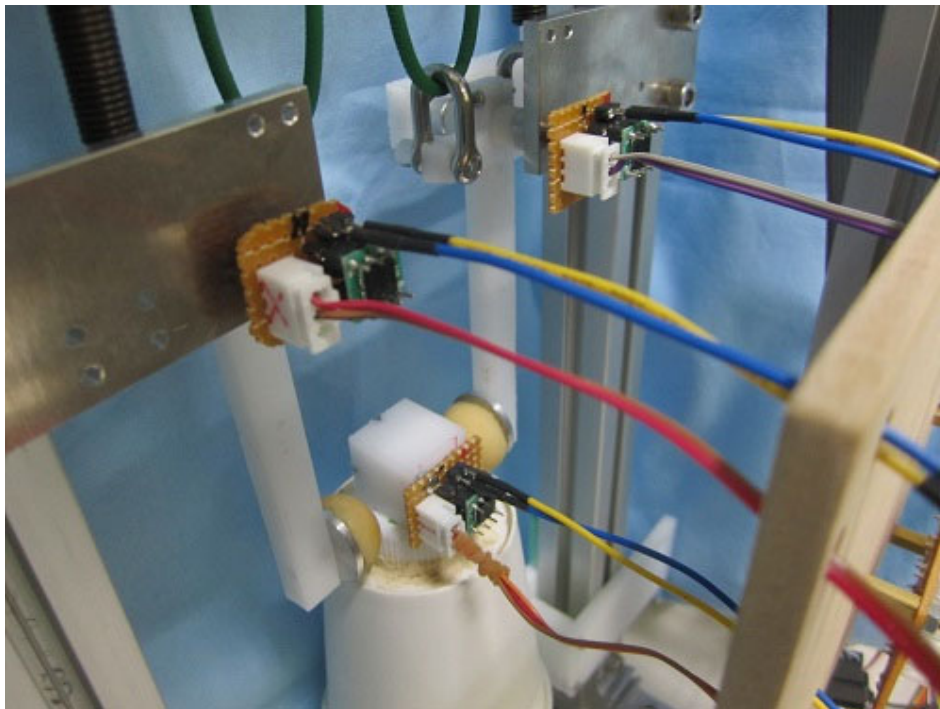


把持物体 - 目標値

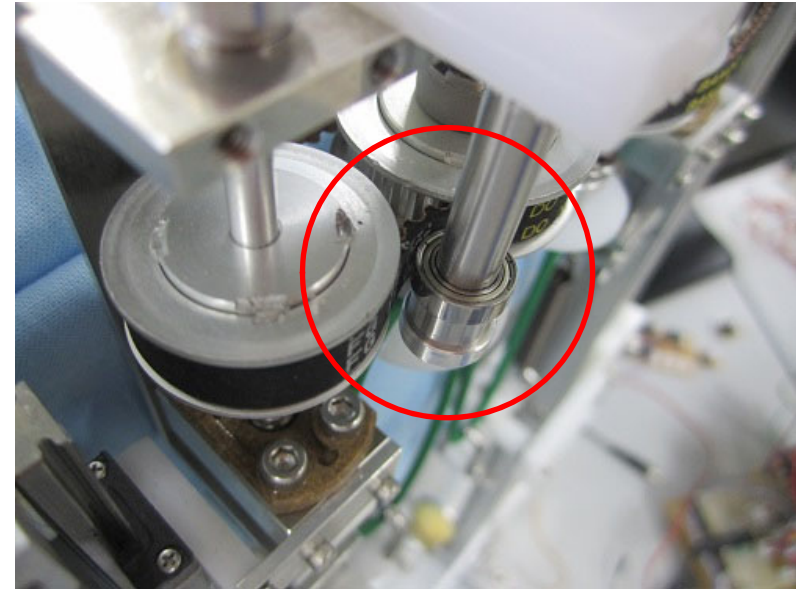
原因①: センサ精度

対象物: ポリアセタール

姿勢検出: 3軸加速度センサ
(KXR94-2050)



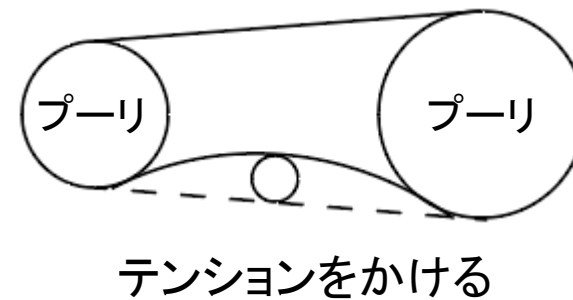
原因②: タイミングベルトの緩み



タイミングベルトにベアリングでテンションを与える



緩みの防止



結果

- 左右のリンク角度と1段目制御器で生成される仮想関節角度との間に大きな定常偏差が残っているが対象物は目標値に収束している



1段目制御器で目標値に収束できれば、左右のリンク角度偏差は許容されえるものと考えられる

- 上りステップと上り下りステップの比例・積分ゲインが同じにもかかわらず、良好な結果が得られている



ゲインチューニングを必要としない簡易的なプログラムの構築



加速度センサを用いることで

2 msec の速い制御周期で物体姿勢操り制御を実現

姿勢物体の操り制御(100msec)

上りステップ

$$K_P = 350 \quad K_I = 0.05$$

0 ~ 5 sec: 静止(LPFの立ち上がり遅れを考慮)

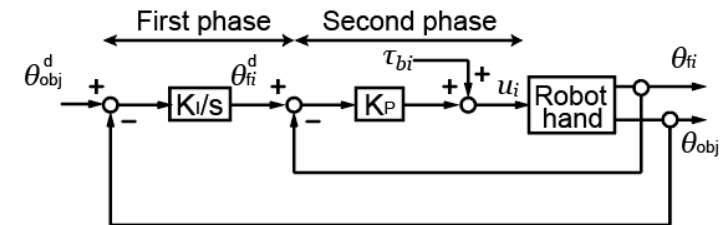
5 ~ 10 sec: 物体把持(バイアストルクのみ)

10 ~ 25 sec: 目標値 5 deg

25 ~ 40 sec: 目標値 10 deg

40 ~ 55 sec: 目標値 15 deg

55 ~ 70 sec: 目標値 20 deg

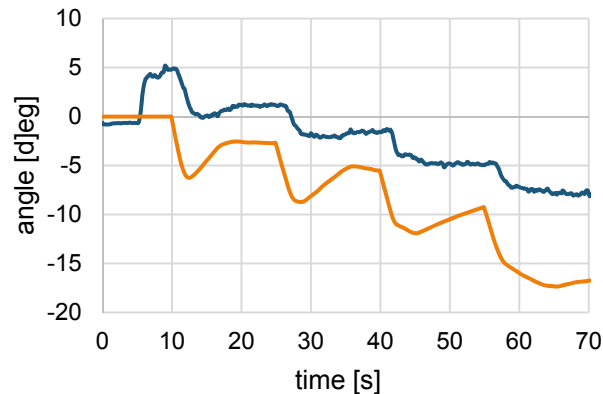


1段目制御器(仮想関節角度の生成)

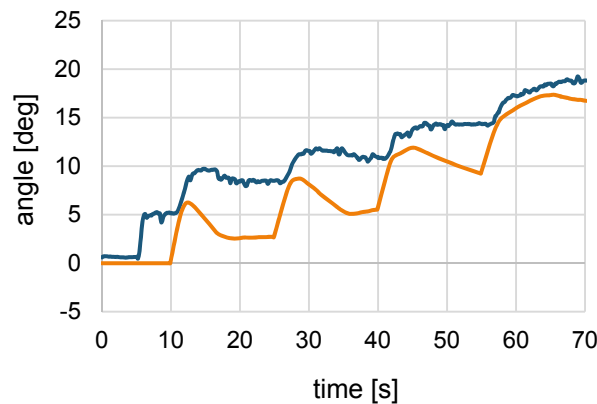
$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

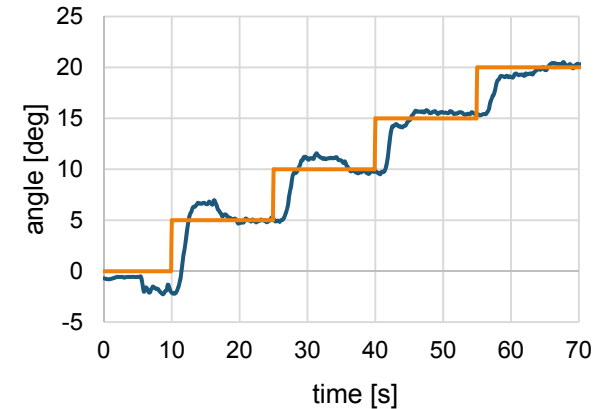
$$\theta_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_b.$$



左リンク 角度 — 仮想関節 角度



右リンク 角度 — 仮想関節 角度



把持物体 — 目標値

姿勢物体の操り制御(100msec)

上り - 下りステップ

$$K_P = 350 \quad K_I = 0.05$$

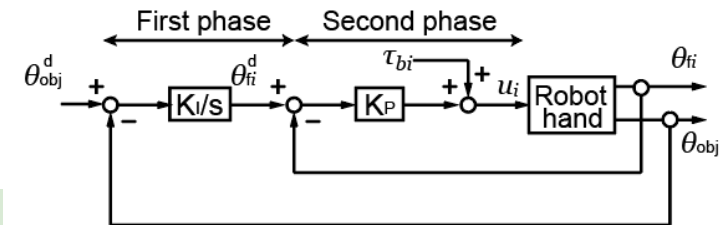
0 ~ 5 sec: 静止(LPFの立ち上がり遅れを考慮)

5 ~ 10 sec: 物体把持(バイアストルクのみ)

10 ~ 25 sec: 目標値 5 deg

25 ~ 40 sec: 目標値 15 deg

40 ~ 55 sec: 目標値 0 deg

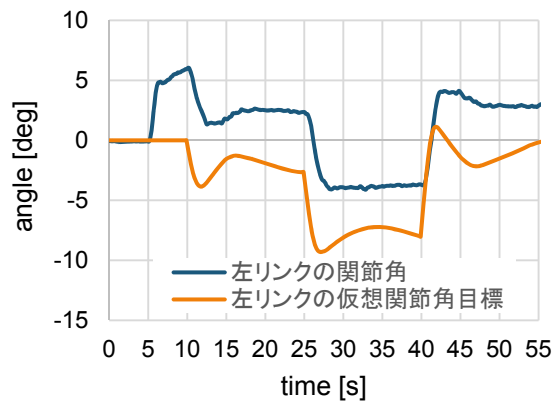


1段目制御器(仮想関節角度の生成)

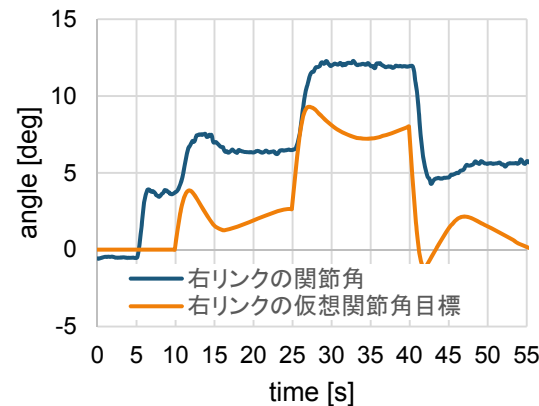
$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

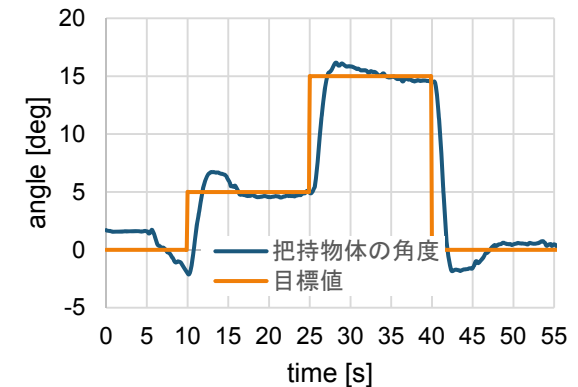
$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_{bi}.$$



左リンク 仮想関節
角度 角度



右リンク 仮想関節
角度 角度



把持物体 - 目標値

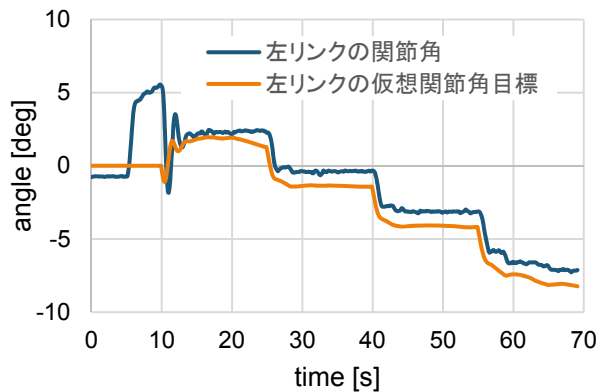
姿勢物体の操り制御(100msec)

上りステップ

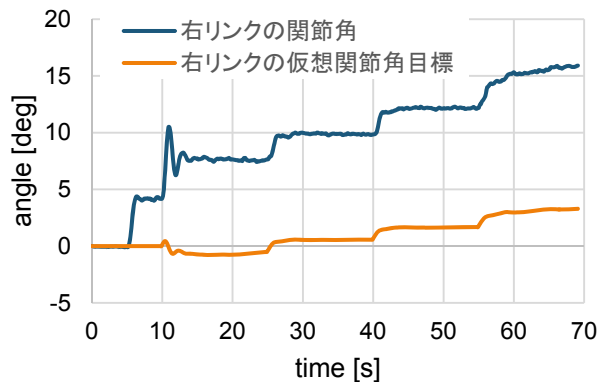
各ゲインを変えて、目標値まで速い収束

$$K_{P1_up} = 1500 \quad K_{P2_up} = 50 \quad K_{I1_up} = 0.05 \quad K_{I2_up} = 0.02$$

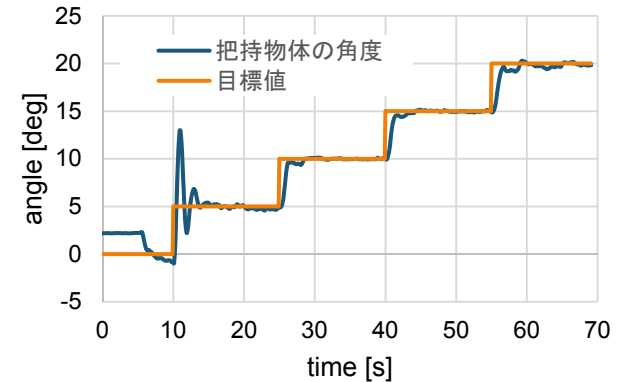
0 ~ 5 sec: 静止(LPFの立ち上がり遅れを考慮)
5 ~ 10 sec: 物体把持(バイアストルクのみ)
10 ~ 25 sec: 目標値 5 deg
25 ~ 40 sec: 目標値 10 deg
40 ~ 55 sec: 目標値 15 deg
55 ~ 70 sec: 目標値 20 deg



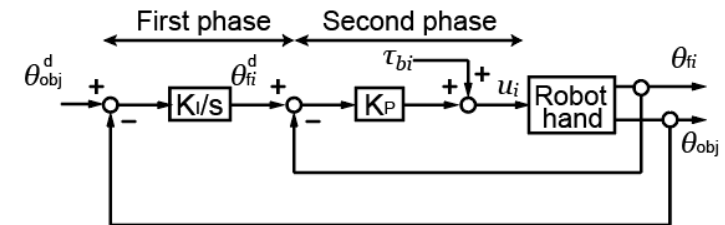
左リンク 角度 — 仮想関節
角度 角度



右リンク 角度 — 仮想関節
角度 角度



把持物体 — 目標値



1段目制御器(仮想関節角度の生成)

$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

$$\theta_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_b.$$

姿勢物体の操り制御(100msec)

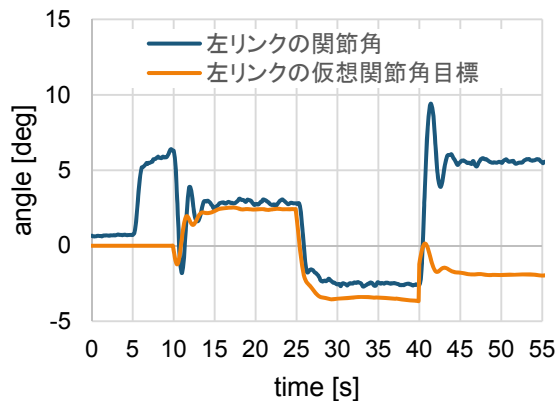
上り - 下りステップ

上りと下りステップでゲインを入れ替える

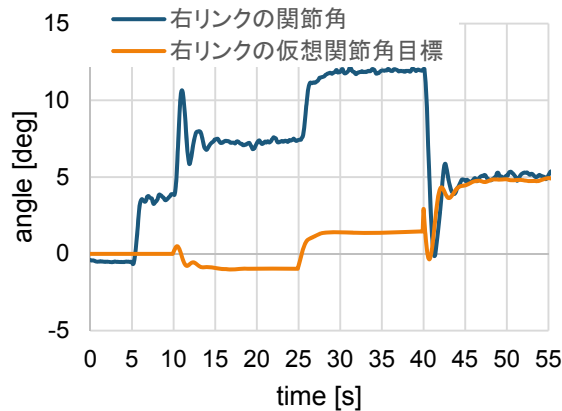
$$K_{P1_up} = 1500 \quad K_{P2_up} = 50 \quad K_{P1_down} = 50 \quad K_{P2_down} = 1500$$

$$K_{I1_up} = 0.05 \quad K_{I2_up} = 0.02 \quad K_{I1_down} = 0.02 \quad K_{I2_down} = 0.05$$

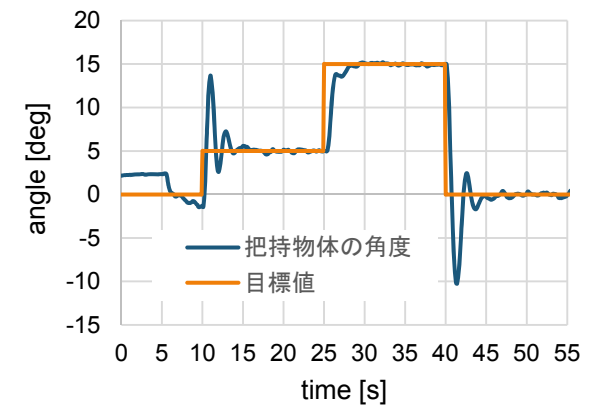
0 ~ 5 sec: 静止(LPFの立ち上がり遅れを考慮)
5 ~ 10 sec: 物体把持(バイアストルクのみ)
10 ~ 25 sec: 目標値 5 deg
25 ~ 40 sec: 目標値 15 deg
40 ~ 55 sec: 目標値 0 deg



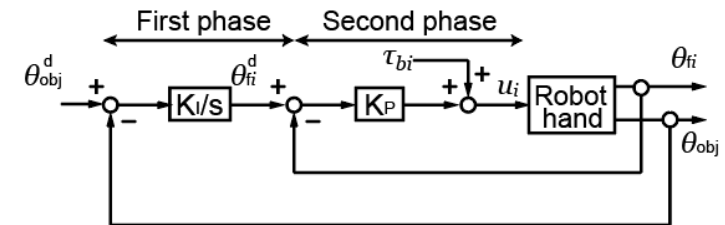
左リンク — 仮想関節
角度 — 角度



右リンク — 仮想関節
角度 — 角度



把持物体 — 目標値



1段目制御器(仮想関節角度の生成)

$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt.$$

2段目制御器

$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_{bi}.$$

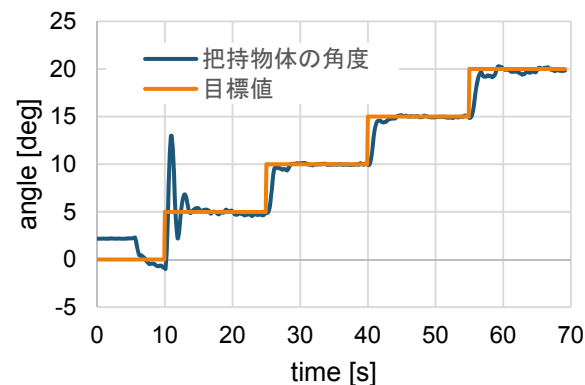
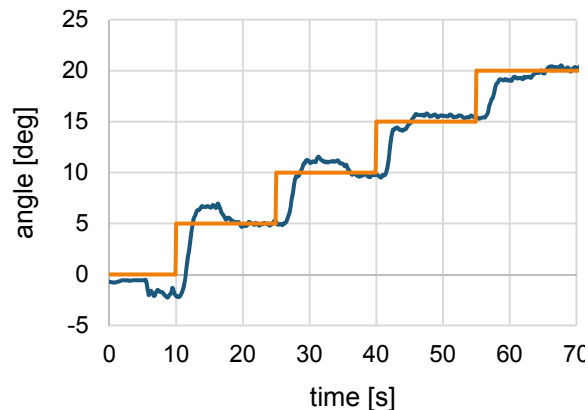
ゲイン値での収束速度比較

左右のリンクに**同じ**比例・積分ゲインにした場合
異なるゲインにした場合

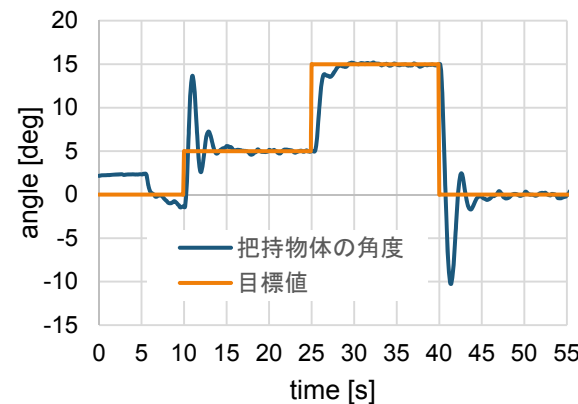
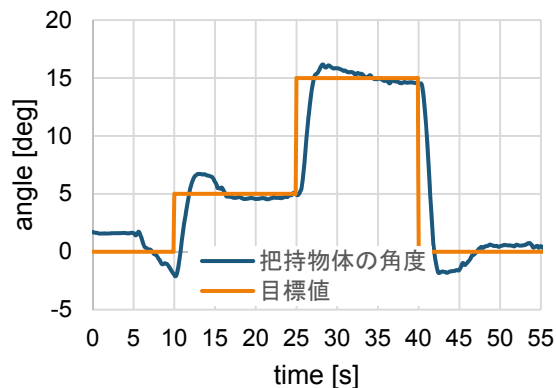
} 収束速さの比較

左: 同じゲイン,

右: 異なるゲイン



同じゲインでは
全てのステップで,
収束までに時間がかかっている



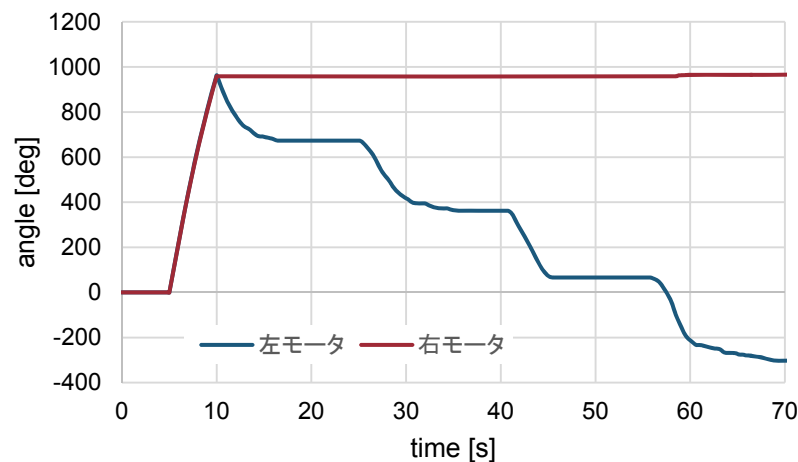
異なるゲインでは
最初のステップでオーバーシュート
が生じるが二段目からは速く目標値
に収束する

把持の強弱

上りステップ

異なる比例ゲインを与えることで把持力を変化させることが可能

$K_P = 350$ $K_I = 0.05$

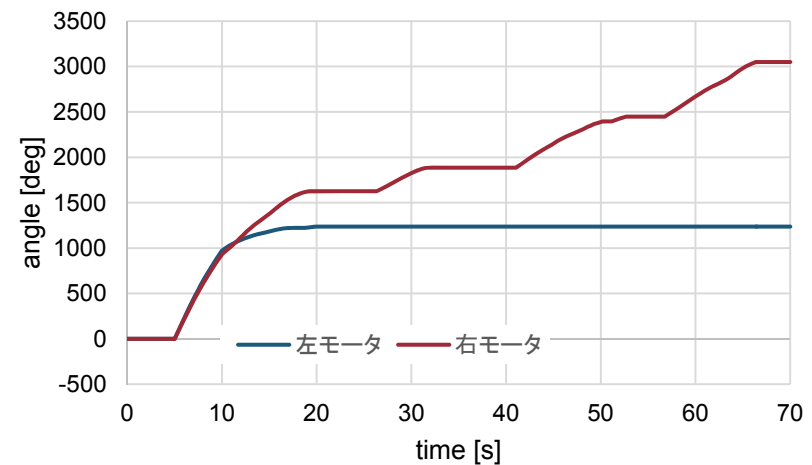


左リンクが逆回転することで把持物の傾きを調整している



弱い力把持

$K_P = 50$ $K_I = 0.05$



右リンクが正回転することで把持物への力を増加させ、傾きを調整している



強い力把持

結果

加速度センサを用いることで

2 msecと同様に, 100 msecでも把持物体操り制御が可能

- 上りステップと上り下りステップで異なる比例・積分ゲインを設定した場合



オーバーシュートが生じるが速く目標値に収束する

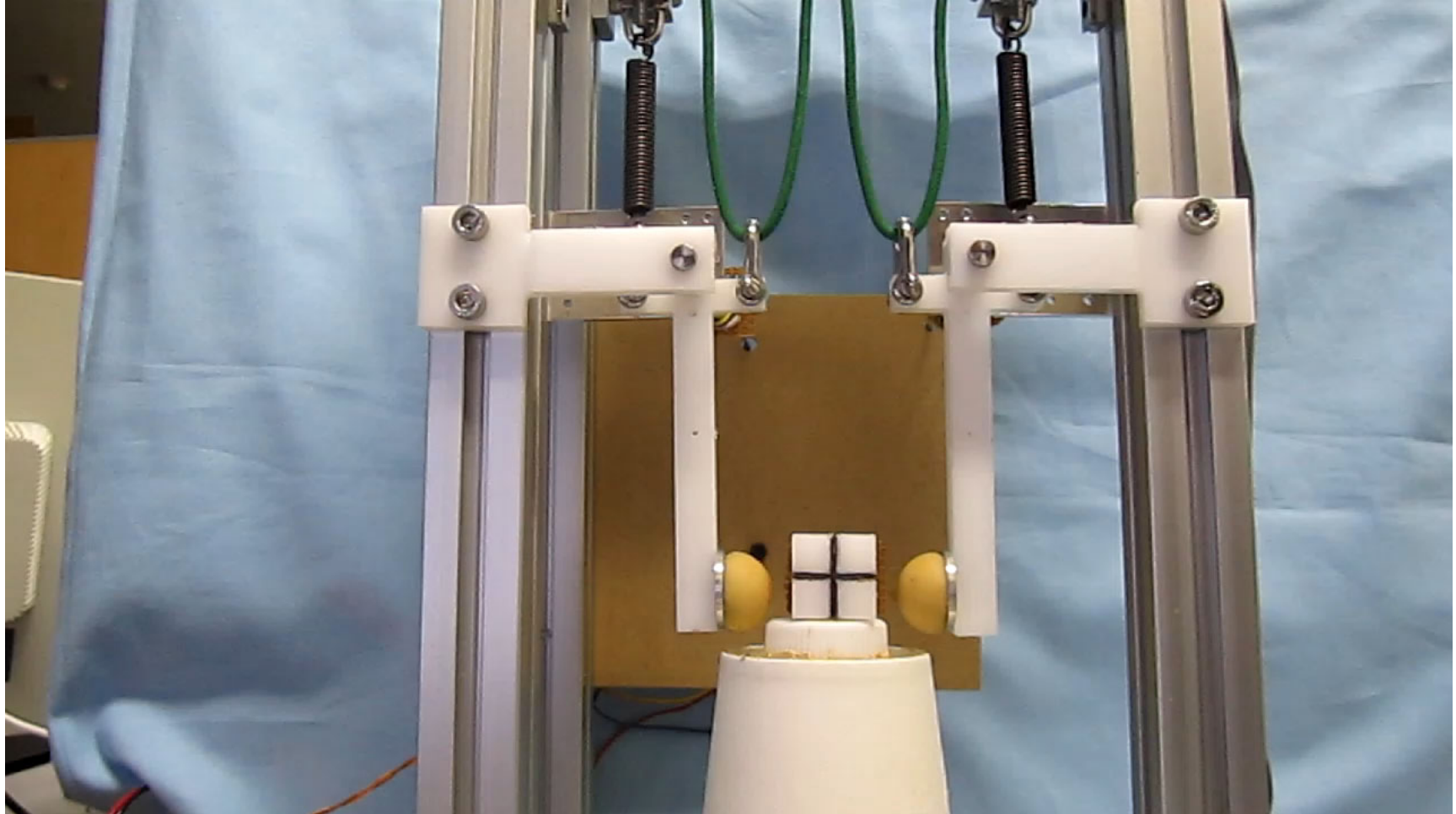
5~10 secで傾くリンクの関節角と1段階制御器で生成される仮想関節角目標との差が操り制御に入る時点で大きいため

- 比例ゲインを変えることで, **把持力の強弱**の制御が容易

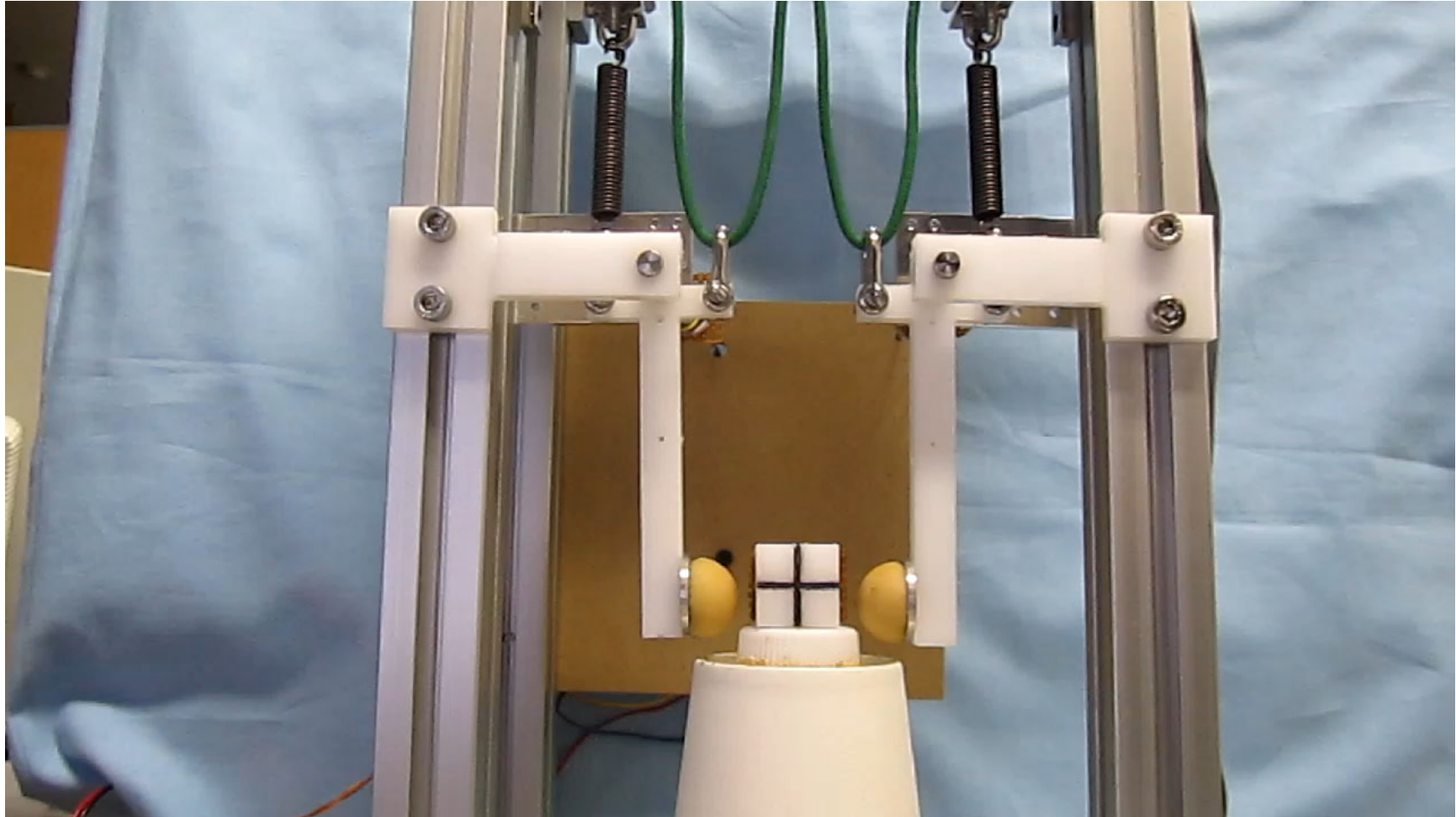


二段階制御で容易に物体把持性能の拡張

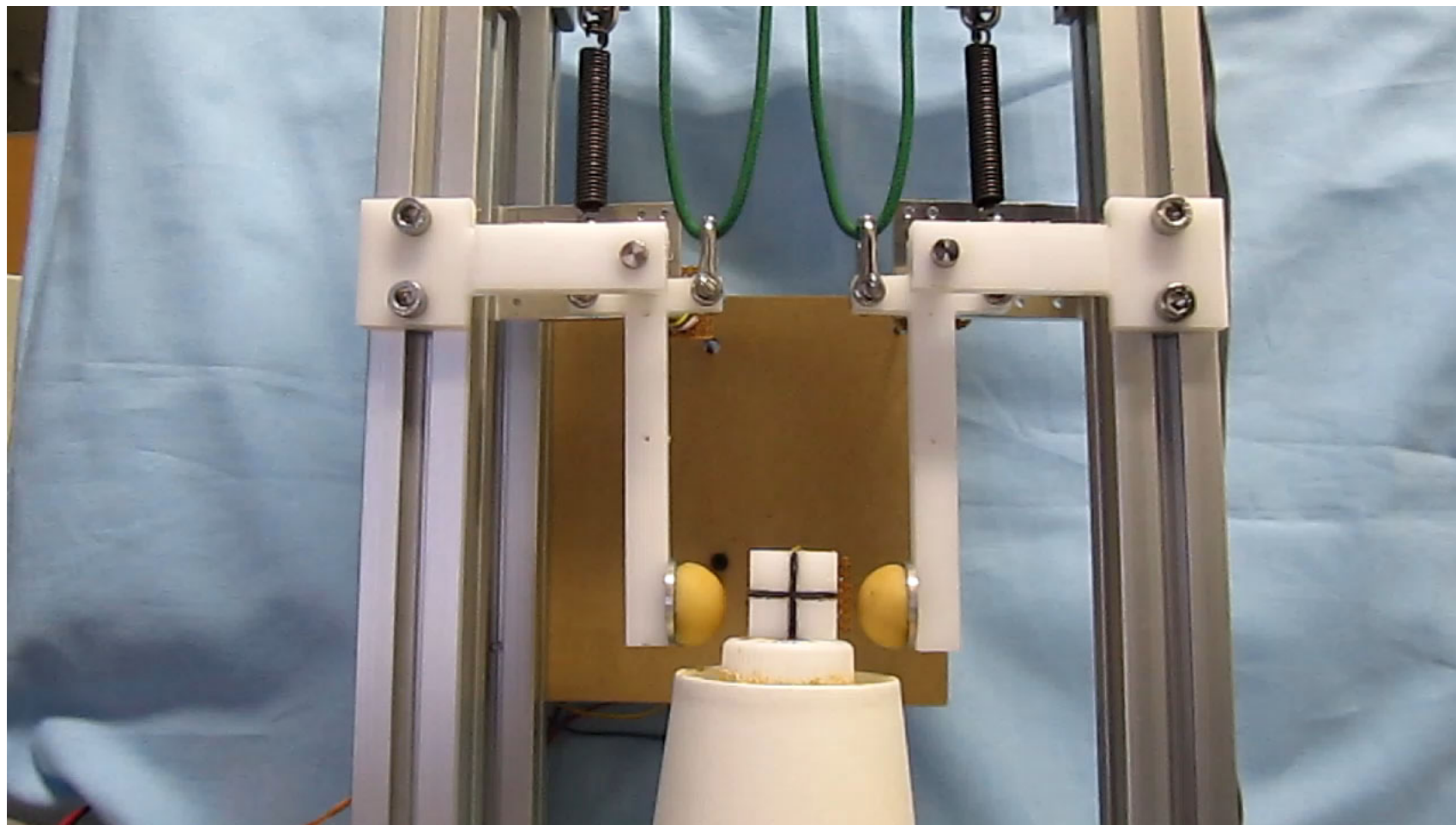
動画集①(低速)



動画集②(高速)



動画集③(小刻み)

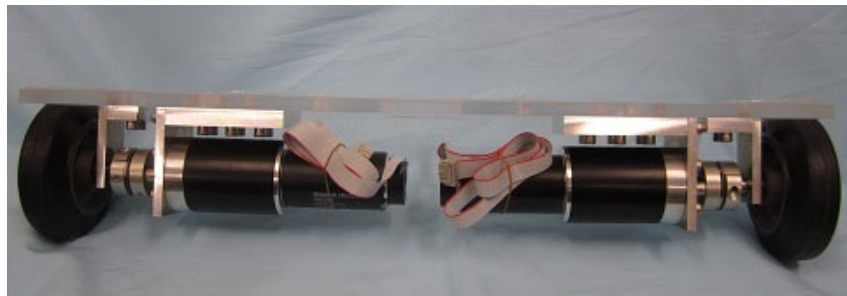


県立大学での研究(2007年～)

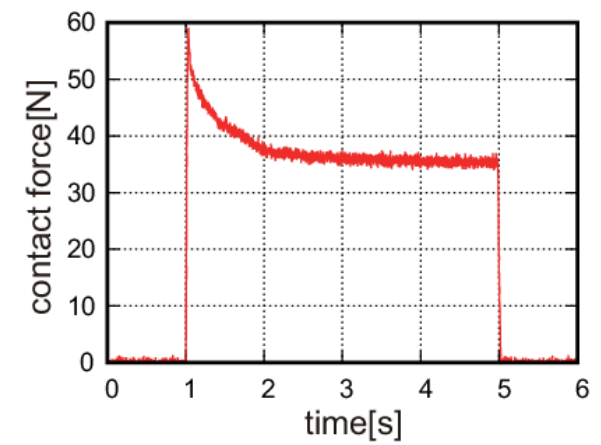
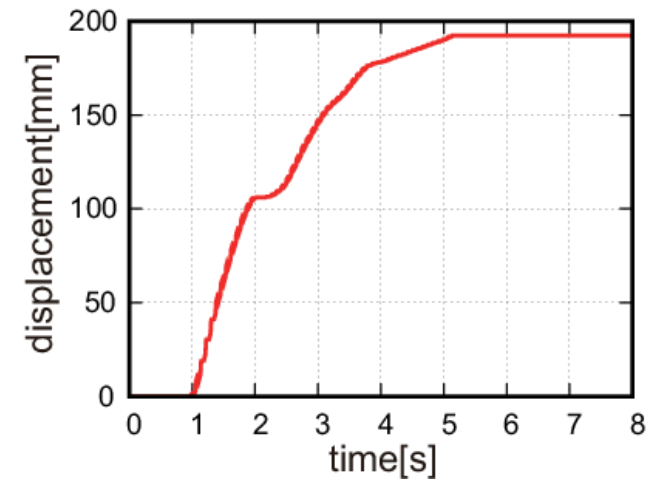
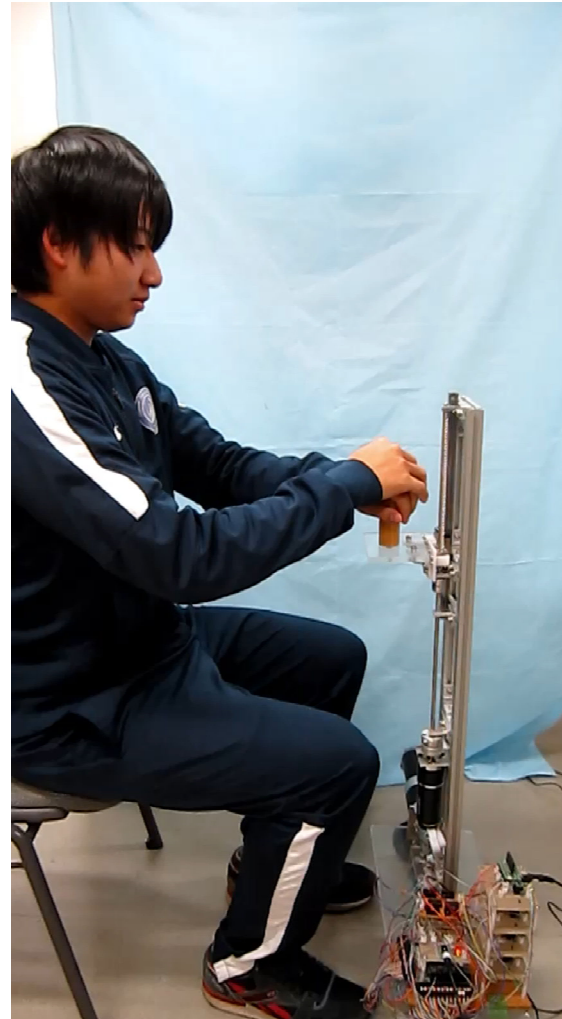
- ◆ ロボットハンドの**制御に関**する研究
- ◆ ロボット用アクチュエータ(駆動)機構の開発
(1)腱駆動, ~~(2)空気圧人工筋~~, (3)丸ベルト振り機構
- ◆ アーム搭載型の全方向自律移動ロボットの開発
- ◆ 筋骨格を模した多関節ロボットフィンガと筋電制御
- ◆ 高齢者歩行支援ロボット(**生活支援**)

生活支援ロボットに関して

- ◆ガイド機能付き 2輪型自律移動可能な杖ロボット
- ◆高齢者歩行速度 1.3 m/s
- ◆ 加速度 3m/s^2 を考慮し, 駆動部推進力を294N
- ◆ 車輪駆動トルク 88.2Nm (各車輪駆動トルク44.1Nm)

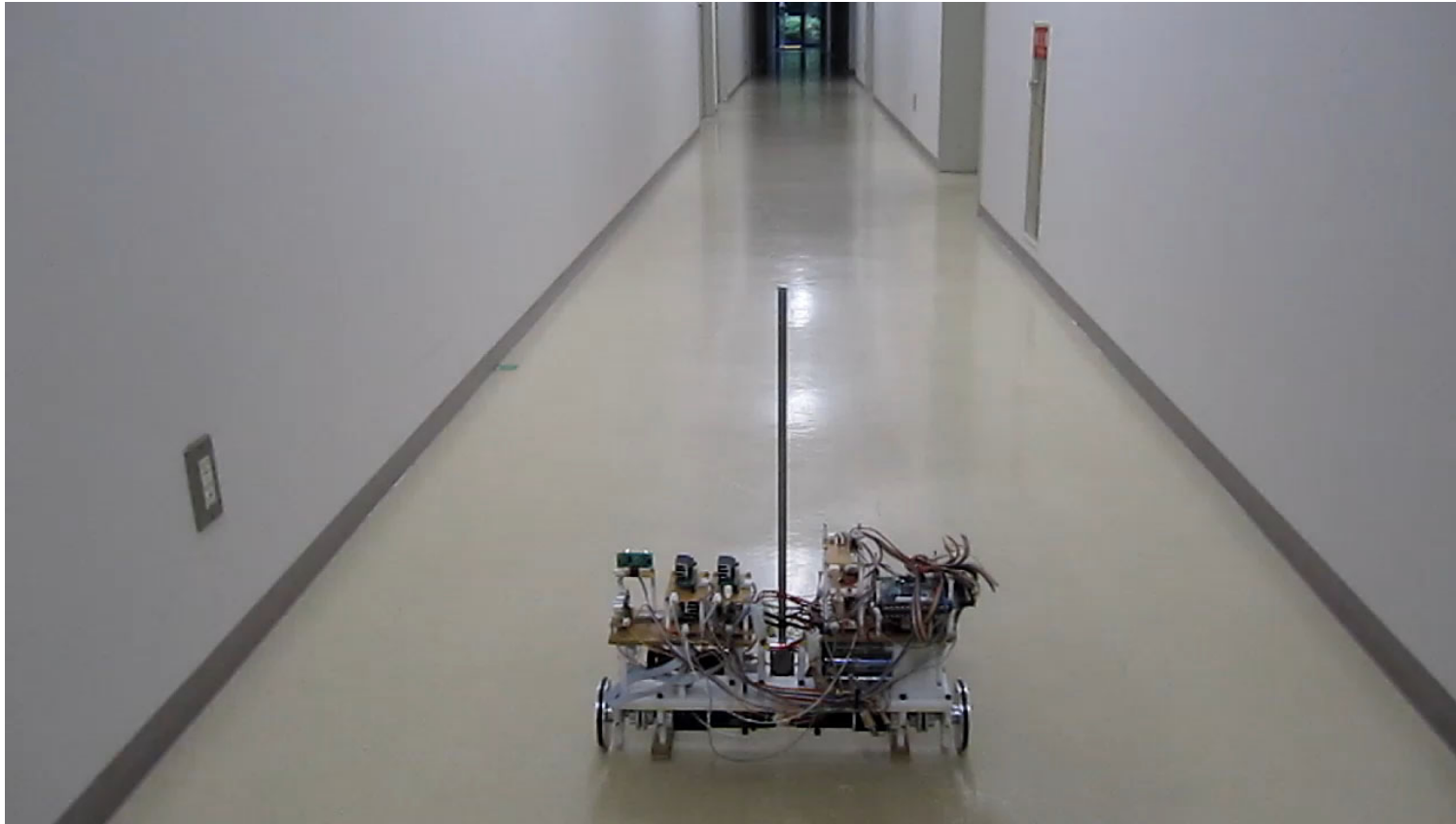


歩行実験と立上り実験



1号機

2輪型自律移動と走行実験



2号機

周期的時変ゲインの導入

問題点・課題



倒立近傍線形化の問題

◆ 走行性能の考察

● 低速走行時

走行速度は遅いが車体の揺れがなく安定した走行

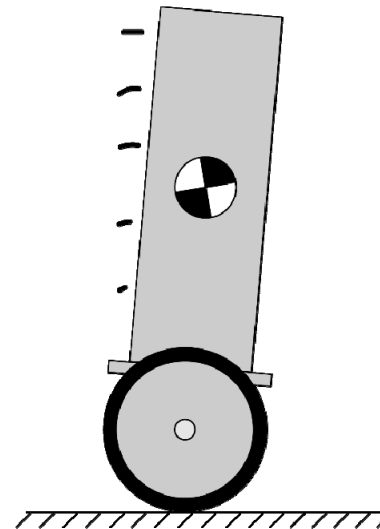
● 高速走行時

走行速度は速いが車体の揺れが大きい

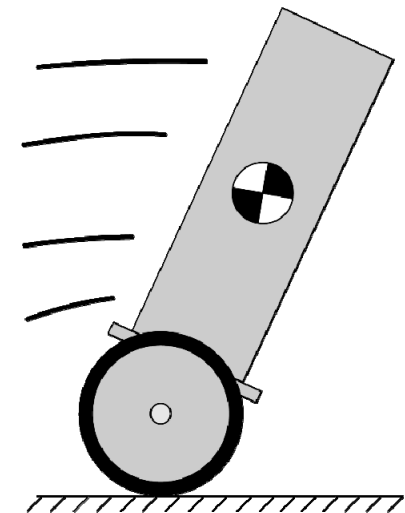
低速走行と高速走行の
応答の違いは

車体の傾きの大きさ

が要因ではないか



低速走行時



高速走行時

LQRゲインと制御手法

最適サーボシステムの制御入力には

$$u(t) = Kx(t) + G \int_0^t e(t)dt + F_a y^{\text{ref}}(t) + F_b x_0$$

より, 状態変数のみに着目すると

$$Kx(t) = (K_\theta \quad K_{\dot{\theta}} \quad K_\varphi \quad K_{\dot{\varphi}}) \begin{pmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \varphi(t) \\ \dot{\varphi}_c(t) \end{pmatrix}$$

ただし, $\dot{\varphi}_c(t)$ は算出された角速度値であることに注意

よって, 車輪の角速度の真値を $\dot{\varphi}(t)$, 時刻 k により定まる整数を n_k としたとき, $K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}_c(k)$ は次式で表される

周期的時変ゲインアルゴリズム

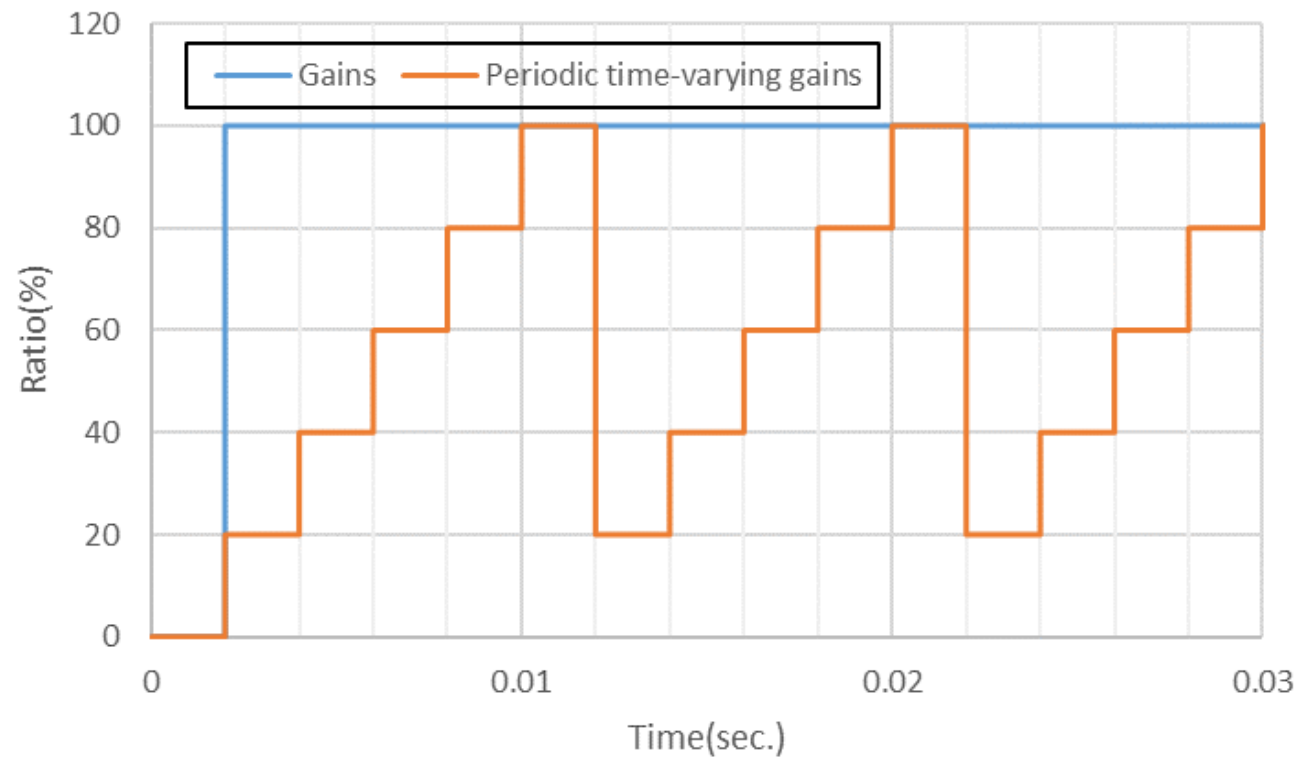
$$K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}_c(k) = K_{\dot{\varphi}} \left(\frac{1}{5} n_k \dot{\varphi}(k) \right) = \frac{1}{5} n_k K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(k)$$

ここで, $\frac{1}{5} n_k K_{\dot{\varphi}}$ を周期的時変ゲイン $K_{\dot{\varphi}}(k)$ で表すと

$$K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}_c(k) = K_{\dot{\varphi}}(k) \dot{\varphi}(k)$$

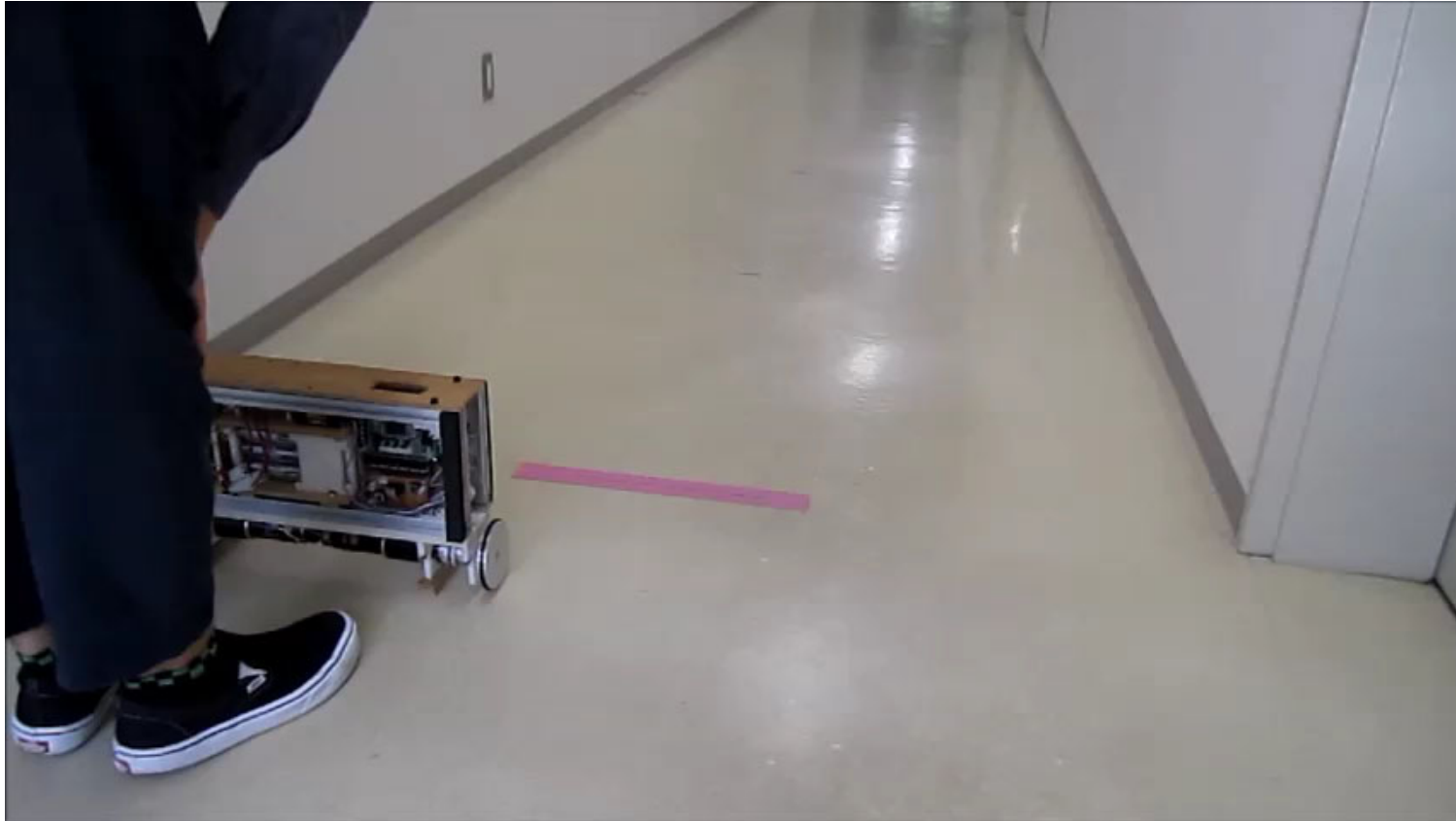
周期的に車輪角速度を補正することは,
みかけ上周期的に変化する
ゲイン $K_{\dot{\varphi}}(k)$ を用いることと同じ

周期的時変ゲインについて



角速度ゲインが変化することで
システムの応答はどう変化するのか

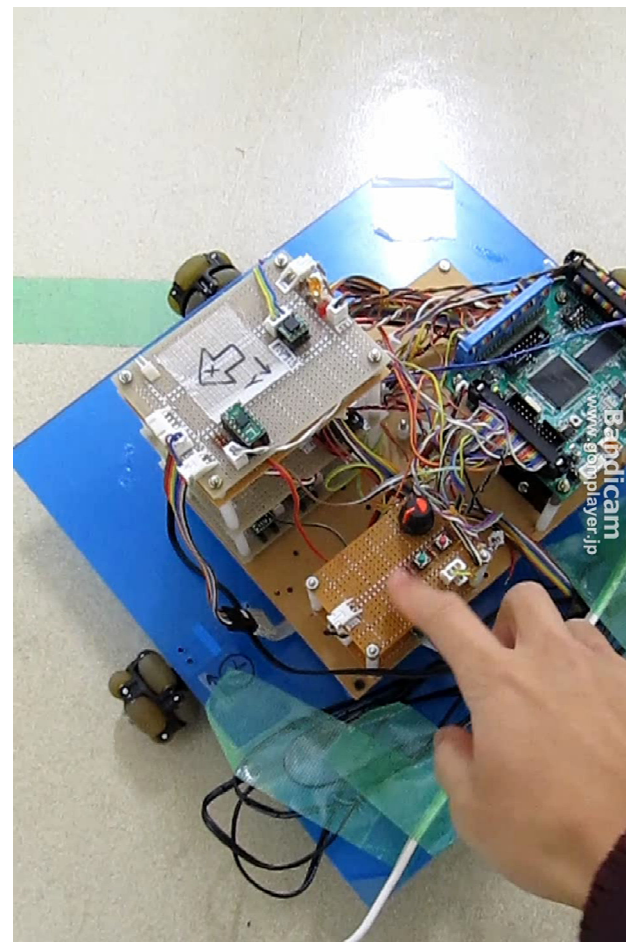
高速走行実験



③FA・自動化に関して



不整地 & 登坂



平地 & 最大距離

ご清聴ありがとうございました.

宿題

ジャイロセンサはカーナビゲーションシステムやスマホ、デジカメに多く利用されている。そのため、ロボット制御において把持物体やロボットリンクの回転角度を計測するために、ジャイロセンサを利用することも多い。

しかし、ある学会で加速度センサを利用する方が良いのでは？と指摘を受けた。

下記の項目を参考にレポートを作成しなさい。

- ジャイロセンサで回転角度を求める方法・手順
- ジャイロセンサのメリット・デメリット
- 加速度センサで回転角度を求める方法・手順

1. 図等を含めて2ページ以内
2. レポート用紙にホッチキス止め