

## [研究助成 (A)]

# 関節可動域訓練のための人と親和性の高い下肢装具型ロボットの 可変インピーダンス制御

## Variable Impedance Control of Human-friendly Lower-limb Orthosis Robot for Knee Joint Range of Motion Training

2201025



研究代表者 東京工業大学 工学院機械系 助教 舩屋 賢

## [研究の目的]

リハビリにおける訓練では、被訓練者は身体運動を学習し、運動機能を高めていく。この訓練では、トレーナーが被訓練者の運動機能を判断して訓練内容を決めるため、トレーナーの時間的・体力的な負担が大きい。このため、負担低減に向けたロボット技術導入が進んでいる。

このような状況のもと、本研究では、リハビリのひとつである下肢の関節可動域訓練に着目する。この訓練ではトレーナーが被訓練者の膝関節を屈曲・伸展させるため、ロボットを用いた訓練ができれば、トレーナーの負担軽減が期待できる。そのような訓練のためには、①人と親和性の高い下肢装具ロボット、および、②人の運動能力を判断して訓練を変更する方法、が必要である。

そこで、本研究では、「人の下肢訓練を促進する、人と親和性の高い装具型ロボットの開発」を目的とする。

## [研究の内容, 成果]

## 1. 人と親和性の高い下肢装具ロボット開発

## 1-1. 柔軟円筒の転がりを利用した関節機構

人と親和性の高い装具では、人とロボットで回転中心の変動にずれが生じた際に、そのずれ

を吸収することが求められる。そこで、これまでに、柔軟部材によりずれを吸収可能な関節機構(図1)を開発し、運動計測をレーザ変位計を用いて行ってきた。しかし、装具への実装を考えると、レーザ変位計の利用は難しい。

本研究では、ワイヤ長さを用いた運動推定技術を開発した。開発した方法では、現在のワイヤ長さから Levenberg-Marquardt 法に基づく収束計算により現在の運動を推定する。さらに、ワイヤのたるみを考慮するために、制御器が発生するワイヤ張力により収束計算の重みを変化

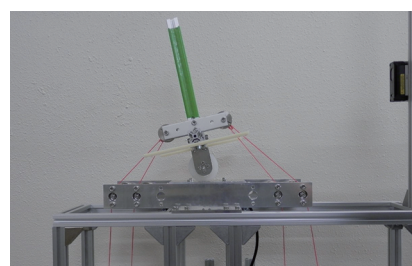


図1 柔軟部材の転がりを利用した関節機構

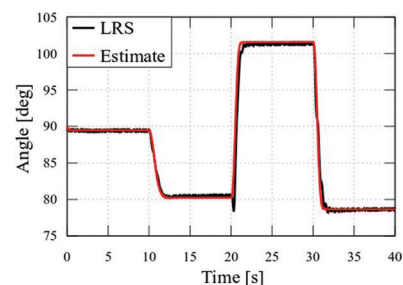


図2 運動推定結果 (LRSはレーザ変位計測値)

させる。

往復運動に対して、運動推定方法を適用した結果が図2である。結果より、レーザ変位計の計測値に近い推定値が得られていることが確認できた。

### 1-2. 装具装着部の力制御

装具ロボットで人を動かすとき、その装着部には力が発生するが、運動に寄与しない力の方向成分は人にとって痛みの原因になると考えられる。とくに、本研究で扱う膝関節では回転に伴う回転中心の変動により、運動に寄与しない力の方向成分は運動に伴って変化する。

本研究では、この問題に対して、ロボットの運動から人の回転中心を推定し、その推定値に基づいて運動に寄与しない成分を小さくするように目標接触力を与える制御器を開発した。ここで、力の運動に寄与する方向・しない方向の2方向の力を制御することから、1自由度の膝関節屈曲運動に対して2つのモータで冗長駆動する装具（図3）を考えた。

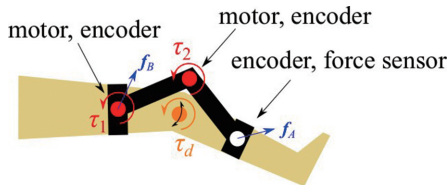


図3 力制御のための冗長駆動装具の概要

回転中心推定器において、回転中心 $\mathbf{p}_c$ はある点での速度を角速度で除算すれば求まるが、零除算が生じた場合、ロボットが意図しない動作を行う危険性がある。そこで、零除算を防ぐために、次の評価関数を最小化するように、回転中心推定を行った。

$$E_c = \frac{w_c}{2} \left\| \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_{A,k} - \omega_{A,k} (\hat{\mathbf{p}}_{C,k} - \mathbf{p}_{A,k}) \right\|^2 + \frac{1}{2} \left\| \dot{\mathbf{p}}_{C,k} - \dot{\mathbf{p}}_{C,k-1} \right\|^2 \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{p}_A$ は脛側の装具装着位置、 $\omega_{A,k}$ はその点での角速度であり、 $\hat{\mathbf{p}}_c$ は回転中心 $\mathbf{p}_c$ の推定

値、 $w_c$ は重み、添字 $k$ は時刻のインデックスである。右辺第1項は回転中心の定義より求まる評価関数であり、第2項は1つ前の推定値へ近づけるローパスフィルタの役割をもつ。一方で、脛側の装具装着位置における目標接触力 $\mathbf{f}_{Ad}$ は次の評価関数を最小化することで与えた。

$$E_f = \frac{1}{2} \left\| \tau_d - \mathbf{J}_C^T \mathbf{f}_{Ad} \right\|^2 + \frac{w_{f1}}{2} \left\| \mathbf{R}_{A\hat{\xi}} \mathbf{f}_{Ad} \right\|^2 + \frac{w_{f2}}{2} \left\| \mathbf{R}_{B\hat{\xi}} \mathbf{f}_{Ad} \right\|^2 \quad (2)$$

ここで、 $\tau_d$ は回転中心に働くトルクの目標値、 $\mathbf{J}_C$ は回転中心の推定値 $\hat{\mathbf{p}}_c$ から計算されるヤコビアン、 $\mathbf{R}_{A\hat{\xi}}$ 、 $\mathbf{R}_{B\hat{\xi}}$ はそれぞれ脛側と大腿側の装具装着位置の運動に寄与しない力の方向成分への変換行列を表し、 $w_{f1}$ と $w_{f2}$ は重みである。また、右辺第1項は目標トルクを発生させるための評価関数であり、第2項と第3項は膝装具装着部における運動に寄与しない力の方向成分を小さくするための評価関数である。

開発した制御方法を図4の検証用ロボットへ適用し、その有効性を検証した。ここで、人の膝関節の回転中心変動を2つの歯車による転がり関節で模擬した。

検証用ロボットを手で動かした際の回転中心推定の結果を図5に示す。結果では、回転中心の方向誤差はどの時刻でも小さいが、角度変化が小さい箇所では回転中心までの距離に誤差が生じている。しかし、本制御器では力のある方向を小さくする点から方向が重要であるため、回転中心推定は有効であると考えられる。

次に、力制御を行った結果を図6に示す。ここで目標トルク $\tau_d$ として一定値を与え、回転中

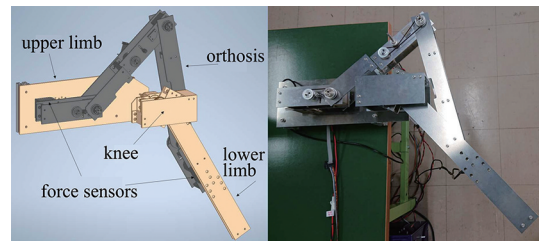
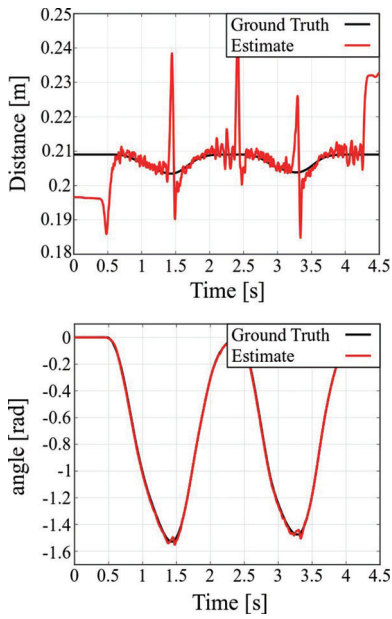
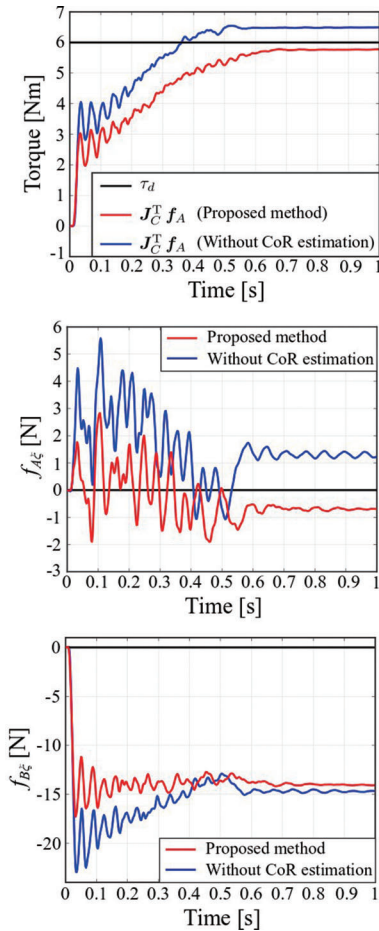


図4 検証用ロボット（薄茶色が人の膝に相当）



上図は回転中心までの距離，下図はその方向をそれぞれ表す。

図5 回転中心推定の実験結果



上図は回転中心に働くトルク，中央図・下図はそれぞれ脛側・大腿側の装着位置における運動に寄与しない力の方向成分である。

図6 力制御の実験結果

心変動を考慮しない場合の制御器と提案方法を比較した。結果より，提案方法では運動に寄与しない力の方向成分を小さくできている。また，目標トルクもおおよそ達成できていることから提案方法の有効性が確認できた。

## 2. 人の運動能力判断に基づく訓練変更方法

### 2-1. 外乱オブザーバに基づく人の可動域推定

関節可動域訓練において，ロボットは被訓練者の現在の可動域を見極めて，わずかに可動域を超えるように動かす必要があるが，可動域は訓練により変化する。既存研究で，関節可動域付近で関節の抵抗トルク  $T_{Res}$  の増大が確認されており，次のモデルが提案されている。

$$T_{Res} = -\exp(k_U(\theta_H - \theta_{H,U})) + \exp(-k_L(\theta_H - \theta_{H,L})) \quad (3)$$

ここで， $\theta_H$  は人の膝の屈曲角であり， $k_U$  と  $k_L$  は抵抗トルク増大を表す定数である。 $\theta_{H,U}$  と  $\theta_{H,L}$  は抵抗トルクが増大する位置であり，おおよそ可動域に近い値となると考えられる。

そこで，本研究では，外乱オブザーバで推定した関節抵抗トルクから，式(3)に基づいてパラメータ  $k_U$ ,  $k_L$ ,  $\theta_{H,U}$ ,  $\theta_{H,L}$  を推定する方法を開発した。ここで，膝の可動域訓練では，膝を伸展させた状態から膝を屈曲させていくため，訓練開始時の  $\theta_H$  は小さく，式(3)右辺第1項の影響が強く表れると考えられる。一方で，訓練が進み，大きく屈曲させるようになると，式(3)右辺第2項の影響が支配的になると考えられる。そこで，各パラメータ推定を次の2つのステップで行う。

#### 推定ステップ1) $k_U$ , $\theta_{H,U}$ の推定

まず，小さな角度で膝の屈曲運動を繰り返すようにロボットを動かし，逐次最小二乗法で  $k_U$ ,  $\theta_{H,U}$  を推定する。

#### 推定ステップ2) $k_L$ , $\theta_{H,L}$ の推定

次に，膝の屈曲角度を徐々に大きくしながら

ら繰り返し、逐次最小二乗法で $k_L$ ,  $\theta_{H,L}$ を推定する。このとき、Step 1 で得られた $k_U$ ,  $\theta_{H,U}$ を用いてロボットのトルクを補償する。

開発した可動域推定方法をシミュレーションで検証した。ここで、 $k_U$ ,  $k_L$ ,  $\theta_{H,U}$ は既存研究のものを真値とし、 $\theta_{H,L}=60$  degとした。 $i$ 番目試行での目標角度 $\theta_{Hd,i}$ は次式で与えた。

$$\theta_{Hd,i} = \begin{cases} \frac{\theta_{r,i}}{2}(1 - \cos(0.4\pi t)) & (\text{if } 0 \leq t < 10) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 $\theta_{r,i}$ は振幅であり、徐々に角度を大きくするように $i$ 番目試行後の $\theta_{H,L}$ の推定値 $\hat{\theta}_{H,L,i}$ を用いて次のように更新した。

$$\theta_{r,i} = \gamma\theta_{r,i} + (1-\gamma)\hat{\theta}_{H,L,i} \quad (5)$$

ここで、 $\gamma$ は更新パラメータである。

結果を図6に示す。ここで、Phase I が推定ステップ1に、Phase II が推定ステップ2に相当する。結果において、 $\theta_{H,U}$ は、小さな角度変化でも $\theta_{H,U}$ の近傍で動かしているために短時間で推定できている。一方で、徐々に $\theta_{H,L}$ に近づいていくため、 $\theta_{H,L}$ の推定に時間がかかっているものの、真値へ近づいていくことが確認できる。

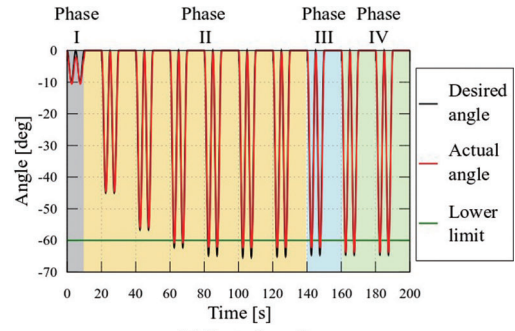
## 2-2. 人の可動域判断に基づく可変インピーダンス制御

前述の方法により獲得した、人の可動域推定に基づいて、可変インピーダンス制御を行う。

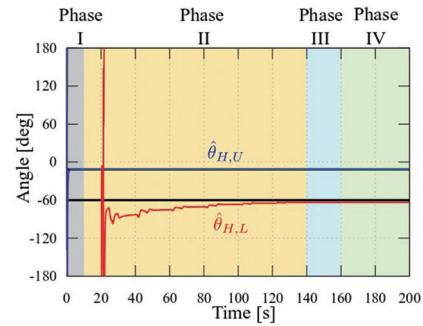
すなわち、次のような制御則により、ロボットが人へ与えるトルクを決定する。

$$\tau_R = K_P(\theta_H)(\theta_{Hd,i} - \theta_H) + K_D(\theta_H)(\dot{\theta}_{Hd,i} - \dot{\theta}_H) + \hat{\tau}_{Res} \quad (6)$$

ただし、 $\hat{\tau}_{Res}$ は抵抗トルクの推定値である。 $K_P(\theta_H)$ ,  $K_D(\theta_H)$ は角度により変化するゲインである。可動域訓練では、可動域制限から離れているとき、ゲインは小さくてもよい。一方で、角度が可動域制限に近いとき、人の可動域をわ



(a) Control result



(b) Estimation result

Phase I では $k_U$ ,  $\theta_{H,U}$ のみを、Phase II では $k_L$ ,  $\theta_{H,L}$ を推定した。Phase III では推定器を停止して抵抗トルク補償のみを行い、Phase IV では可変インピーダンス制御を導入した。

図7 シミュレーション結果

ずかに超えるように動かす必要性からゲインは大きくなることが望ましい。そこで、制限角度と現在の角度の差に基づいてゲインを変化させるように設定した。

シミュレーション結果を図7に示す。シミュレーションでは比較のために、Phase III で式(6)の代わりに抵抗トルク補償付きのPD制御を行い、その後、開発した可変インピーダンス制御をPhase IVで行っている。結果において、Phase III に比べて、Phase IV のほうが目標値へ近づいており、開発した可変インピーダンス制御の有効性が確認できた。

## [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、「人の下肢訓練を促進する、人と親和性の高い装具型ロボットの開発」のための技術開発を行った。人の膝を対象に、装具の人の親和性を高めるための関節機構と装着部の力制御を開発した。また、その関節可動域訓



練を対象に，抵抗トルクに基づく可動域推定方法と可変インピーダンス制御を設計した。

今後，これらの技術を統合し，人に装着した実験により有効性を確認する必要がある。また，本研究では装着部を固定しているが，実際には運動中のずれが生じることが予想される。このため，その運動ずれを考慮した制御技術開発も

また今後の課題のひとつである。

[成果の発表，論文等]

- [1] 井手，舩屋，岡田：回転中心推定を用いた膝装具接触部の力制御，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 2021，2P3-C16，2021.