

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03966

研究課題名（和文）デジタルツインを用いたリハビリテーション用ロボットの最適支援手法の研究

研究課題名（英文）Research on optimal support method for rehabilitation robots using digital twin

研究代表者

川合 忠雄 (kawai, tadao)

大阪公立大学・都市科学・防災研究センター・特任教授

研究者番号：20177637

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、リハビリを支援するロボットによる機能回復効果向上を目指し、身体および支援ロボットをコンピュータ上に再現し、実世界の状態を推測できるデジタルツインを構築した。身体モデルを構築するため、関節運動の主動筋を特定する計測実験を行った。ロボットモデル構築では、空気圧人工筋肉を使用したロボットを製作し、実験によりモデルパラメータを特定した。また、ロボットモデルを用いたシミュレーション結果を用いて実ロボットを制御した。最後に、実ロボットで身体支援を行い身体と支援ロボットとの相互作用力を計測し、デジタルツインモデル間を連結するバネダンパモデルのパラメータを同定して、相互作用力を推定可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

支援ロボットの研究においては、支援の効果を臨床指標による定性的な機能変化で評価しているものが多い。また、支援中の使用者の運動状態が適切であるか計測・評価するには筋骨格モデルを用いた負荷解析が一般に行われているが、反力データ等を測定することが不可欠となっており、このような測定機器がないと解析することができない。本研究では、使用者と支援ロボットの物理モデルを用い、支援されている使用者の運動状態が適切であるかシミュレーション評価できるデジタルツインの開発を目指した。使用者の状態をモデルで推定・評価し、より適切な状態をモデルから推測した支援法を逐次更新可能となれば、使用者の機能回復の効果を高められる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed digital twins of the human body and a support robot using Modelica and conducted the robot's design, development, and control. To create an arm model, we performed measurements and identified the agonist muscles, the biceps and triceps. For creating the robot model, which used pneumatic artificial muscles, experiments with the actual robot helped determine the model parameters. We utilized the robot model simulation results to control the target joint torque and angle. Experiments with the robot revealed an approximate joint angle error of 10 degrees. Finally, we measured the interaction forces between the human body and the robot. We successfully reproduced the bidirectional forces between the arm and robot model by incorporating a spring-damper model at the contact surfaces in the digital twin models. This allowed us to construct a digital twin capable of replicating real-world systems on a computer and predicting the state of actual systems.

研究分野：知能機械システム、バイオメカニクス

キーワード：デジタルツイン シミュレーション 身体モデル リハビリテーション支援

## 1. 研究開始当初の背景

リハビリテーションでは、運動機能が低下した患肢(例えば、片麻痺患者の場合は、麻痺側の腕)を積極的に使い、時には作業・理学療法士などによる支援も受けながら、運動課題を繰り返し行うことが重要である。近年では作業・理学療法士の担い手不足への対応や負担軽減を目的に、訓練の支援はロボットで行うことが期待されている。この時、支援力は患者の身体的特性(機能低下した患肢の箇所や程度など)に応じて適切に設定する必要がある。また、運動課題が効果的に行えているかモニタリングし、運動強度などを逐次更新する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究ではデジタルツインの考え方をリハビリテーションに適用することにより機能回復の効果を高めることを目指している。デジタルツインとは、実世界のシステムをコンピュータ上にモデルとして再現し、実世界の情報をモデルに反映することにより、実システムの状態をモデルから推測する考え方である。推測結果をもとに適切に実システムを制御することにより、実システムをより効率的に運用するなどの優れた効果を期待できる。すなわち、患者と支援ロボットのデジタルツインを構築することができれば、実世界の訓練中の患者の情報をモデルに反映し、モデルから患者と支援ロボットの状態を推測できるようになる。

## 3. 研究の方法

本研究では、上記を実現するための基礎的な取り組みとして、(i)身体とリハビリテーションを支援するロボットのデジタルツイン(コンピュータモデル)を構築、(ii)支援ロボットを設計・製作、(iii)身体と支援ロボットの動きや相互に及ぼす力(インタラクション)を計測し、身体のコピュータモデルを用いて身体の状態や運動負荷を推測して、ロボットが適切な支援を行っているか評価、(iv)上記の評価に基づいてより有効な支援方法を求め、ロボットを制御する研究を行う。

## 4. 研究成果

### ( ) デジタルツインの構築および(ii) 支援ロボットの設計・製作と制御実験

身体および支援ロボットのデジタルツインはModelica言語を用いて構築した。Modelica言語はオブジェクト指向であるため、身体の骨や筋肉あるいは支援ロボットの歯車やリンク機構を個別に作成し、それらを統合したモデルを容易に構築できる。構築したモデルに足りない部分があれば要素を追加することで、身体および支援ロボットのモデルを改良し続けることができる。また、患者の状態に合わせてモデルを組み立てることができる。

身体モデルは、支援する関節およびその関節の屈曲と伸展の主導筋で構成することとした。そのため、これらの拮抗させる筋肉を決定するために若年健康者の腕の筋電計測を行った。今回対象としたのは上腕二頭筋の長頭・短頭と、上腕三頭筋の長頭・外側頭・内側頭である。上腕二頭筋の計測は肘を机の上に置いた状態で掌を手前の方向に引く静的運動を、上腕三頭筋の計測は腕を自然に垂らした状態から背後に押し上げる静的運動を計測した(Fig.1)。Fig.1で4秒の時点で力を抜いており、上腕二頭筋の短頭と上腕三頭筋の長頭の活動量の変化が大きいがわかる。これらは被験者間で概ね共通していた。共通する主導筋を特定できたため、この二つの筋肉を拮抗させた身体モデルを構築した。それらの筋の最大緊張力や起始・停止点などは既に先行研究により得られていたため、それらのパラメータをModelica言語を用いて作成しているモデルパラメータにすることで、本研究にて用いる腕のデジタルツインモデルを構築することができた。

支援ロボットのアクチュエータにMcKibben型の空気圧人工筋肉を用いることにした。空気圧人工筋はModelica言語の標準ライブラリに無かったため、Pujana-Arreseらの研究を参考に空圧と出力の関係式を用いてモデル化を進めた。空気圧人工筋の特性計測実験を実施し(Fig.2)本研究で実際に使用する空気圧人工筋のモデルパラメータの同定に取り組んだ。

支援ロボットのモデル(Fig.3)を用いたシミュレーションより目標関節トルクおよび目標角度の実現に必要な制御入力を計算した。上部の人工筋肉が発揮する力を $F_a$ 、空圧を $P_a$ 、収縮距離を $q_a$ 、収縮率を $\varepsilon_a$ とし、下部の人工筋肉は $F_b$ 、 $P_b$ 、 $q_b$ 、 $\varepsilon_b$ とする。そして、上部の人工筋肉を取り付けているプーリの半径を $r_a$ とし、もう一方のプーリの半径を $r_b$ とする。支援ロボットのアームの角度を $\theta$ とし、アームが地面と平行となる状態を $\theta = 0$ 、時計回りを $\theta > 0$ とする。人工筋肉が自然長 $L_0$ の状態から収縮し、人工筋肉とプーリ間をつなぐ紐が張った状態の距離をそれぞれ $S_a$ 、 $S_b$ とする。シミュレーション結果を用いて支援ロボットを駆動し、フィードフォワード制御下での定量的評価をおこなった(Fig.4)。変位させた角度は $\theta = 0$ を中心に $\pm 20\text{deg}$ (40deg)、 $\pm 25\text{deg}$ (50deg)、 $\pm 30\text{deg}$ (60deg)であり、

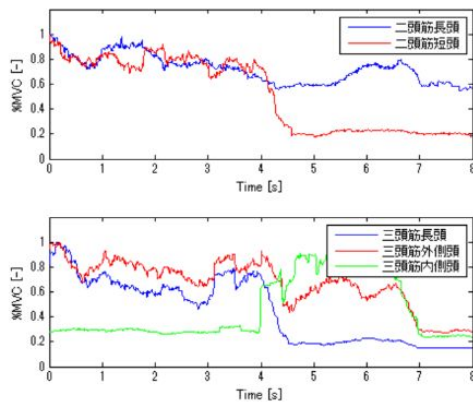


Fig.1 Myoelectric measurement results of the upper arm

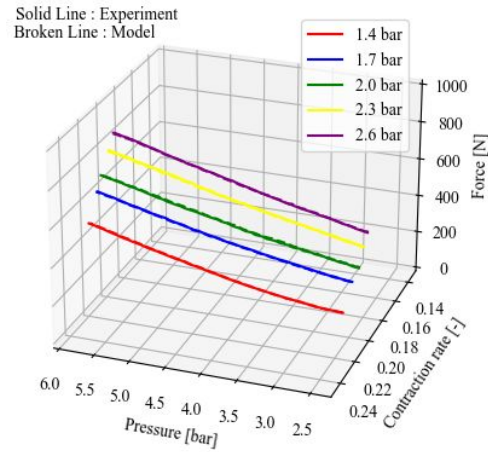


Fig. 2 Comparison of experiments and models of pneumatic artificial muscle.

関節剛性は $K = 50\text{Nm/rad}$  で一定とした。角度制御や剛性制御はしておらず、シミュレーションから得られた空圧を入力している。最初の5秒間と最後の5秒間は、安定した回転を行うために一定の角度で維持させており、回転するときは10秒間かけて行っている。Fig.4より、回転した角度は、それぞれの実験で $29.67\text{deg}$ 、 $38.87\text{deg}$ 、 $48.09\text{deg}$ であったため、目標の角度変位より $10\text{deg}$ 程度小さいことがわかった。そして、最初と最後の5秒間も誤差が生じていた。以上のようにモデル化誤差が残るが、支援ロボットのデジタルツインモデルを構築することができた。

また、構築したデジタルツインを用いて実際の支援ロボットの構造の最適化を試みた。本研究では目標関節トルクの実現に必要な駆動系設計パラメータの導出をおこなった。例として関節プリー直径を導出し、得られた直径のプリーを実際に製作して可動域と剛性がどのように変化するかを実機で実験評価をおこなった。

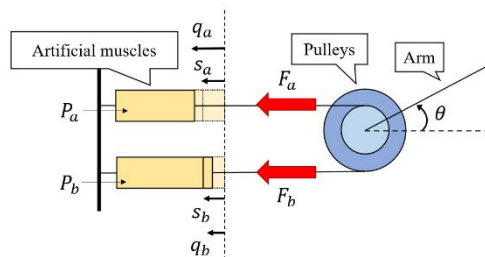


Fig. 3 Antagonistic drive system model of support robot.

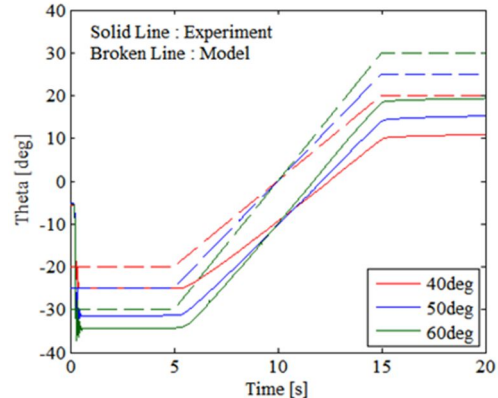


Fig. 4 Experiment and simulation result of robot arm angle.

### (iii) 身体と支援ロボットの動きや相互に及ぼす力（インタラクション）の計測実験

(i) で構築したデジタルツインモデルは、身体モデルと支援ロボットモデルが個別である。そのため、支援ロボットで身体をアシストする状態をシミュレーションするために、身体とロボットのモデル間の連結にバネダンパモデルを組み込み、双方向に力を及ぼしあう構成とした。このバネダンパのパラメータを決定するために、身体と支援ロボット間に働く相互作用力を計測した。先行研究のパラメータチューニング手法を参考にバネダンパパラメータのチューニングを行った。デジタルツインモデルシミュレーションにおいて時々刻々の相互作用力を概ね再現することができた。

続いて身体モデルを用いて身体の動きや運動負荷を推測した。運動負荷は関節モーメントで評価することとし、実験により測定された関節角度と反力を代入する事で逆ダイナミクス解析にて関節モーメントを得た。

実世界のシステムをコンピュータ上にモデルとして再現し、実世界の情報をモデルに反映することにより、実システムの状態をモデルから推測するデジタルツインを構築することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高井飛鳥, 裴凱強, 新谷篤彦, 川合忠雄
2. 発表標題 Modelicaモデルを用いた起立支援装置の移動機構部の設計
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪口都雲, 高井飛鳥, 野田智之, 寺前達也, 川合忠雄
2. 発表標題 脊髄損傷者のプッシュアップ動作をアシストする機器の駆動系の検討
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 第98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoto Otomori, Asuka Takai
2. 発表標題 Long Short-Term Memory (LSTM) Estimation of Chair Reaction Force during Sit-to-Stand Movements
3. 学会等名 2023 The 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松宮光照, 高井飛鳥
2. 発表標題 バーチャルリアリティを用いた遅延視覚が的当てゲームの成績に与える影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤海斗, 音森直人, 鈴木雄太, 高井飛鳥
2. 発表標題 起立支援装置の支援軌道と支援速度の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高井 飛鳥  (takai asuka)  (70769843)	大阪公立大学・大学院工学研究科・助教   (24405)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------