

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04114

研究課題名（和文）身体の重心バランスと個々人の筋特性を考慮したFES立ち上がり補助システムの構築

研究課題名（英文）Development of FES-assisted Standing-up Motion Control System Considering Center of Mass Motion and Individual Muscle Characteristics

研究代表者

河合 宏之（Kawai, Hiroyuki）

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：70410298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではしゃがみ込み状態からの立ち上がり運動を補助する機能的電気刺激を用いた新しいリハビリテーション手法を提案した。特に、下肢への筋刺激に加え上肢にも筋刺激を与えることで、前後の重心移動を促しながらの立ち上がりを実現した。実用面からの貢献として立ち上がり動作時の前後の重心移動に加えて重心位置の左右差を計測可能なリハビリテーションシステムを構築し、健常者を被験者とする検証実験により提案手法の有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した FES 立ち上がり補助システムは、従来まで議論されてこなかったしゃがみ込み状態からの立ち上がり運動を実現できる点が大きな特徴である。上肢と下肢をそれぞれラグランジュの運動方程式で表現したうえで、理論的に安定性を保証する安定化制御則に基づき下肢への筋刺激により立ち上がり運動を補助し、Zero 型制御バリア関数を用いた制御則に基づき上肢へ筋刺激することで重心移動を促す手法を提案している点に学術的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This project has proposed the FES-supported standing-up motion control incorporating the center of mass (COM) motion for rehabilitation for patients with neurological disabilities. The COM motion is controlled by electrical current input, which is delivered through the upper limbs and adjusted according to the velocity of the COM. As a practical contribution, we developed a system that can measure the left-right difference in the center of gravity position in addition to the front-back COM shift during the standing-up motion. Experimental results in healthy participants are shown to confirm the effectiveness of the proposed method.

研究分野：ロボット制御工学

キーワード：立ち上がり運動 機能的電気刺激 リハビリシステム

1. 研究開始当初の背景

生活の質 (クオリティ・オブ・ライフ, QOL : Quality of Life) の向上はすべての人にとって重要であり, 特に老化に起因する怪我や病気による身体の機能の低下は QOL の低下につながってしまう. 現在, 日本は超高齢化社会を迎えており, 2030年には国民の約3分の1が65歳以上(高齢化率31.8%)と見込まれている. 今後, 同様の高齢化問題を抱えるであろう世界の国々は, 日本がこの問題にどのように対応していくのか注目しており, 世界に先駆けて高齢化問題に適切に対応していくことで, 日本にとっては世界に自国の国力を示していく好機となる. 特に, 人生100年時代の到来を背景に次世代ヘルスケアとしてICT, ロボット, AI等の医療・介護現場での技術活用の促進が注目されており, QOLの向上を助ける技術革新が急務であると考えられる. 普段の生活において多くの健常者が意識せず, 何気なくおこなっている日常生活での動作は, 脊髄運動ニューロンの発火が骨格筋を活性化させることで可能となっている. そのため, 脊髄運動ニューロンを傷つけるような神経障害は不全麻痺や運動障害を引き起こす可能性があり, 特に, 脊髄損傷や脳卒中のような上位運動ニューロンの損傷を抱える人は, 機能的な運動を実現することが困難となる.

このような状況において, 最近, 再生医療の分野で脊髄損傷を根本的に回復する手法にも注目が寄せられており, 例えば脊髄損傷を対象とした再生医療製品が厚生労働省から「条件及び期限付承認」を取得し, 上位運動ニューロンの損傷に対する治療方法として大きな注目を集めた一方で, これらの治療においては筋力までの再生は望めないため, QOLの回復や向上のためにはやはりリハビリテーションが必要不可欠となる. 現在は医師や理学療法士をはじめとする医療従事者が患者のリハビリテーションに携わっているが, リハビリにおける作業負担軽減やリハビリ自体の質を向上させるために, ロボット・センサ等の技術を活用した新たなリハビリシステムが望まれている.

そのひとつが, 失われた脊髄運動ニューロンの機能を人工的に補い, 患者の筋に直接働きかけることで運動の補助, 筋力の維持や向上に寄与する機能的電気刺激 (FES: Functional Electrical Stimulation) を用いたアプローチが挙げられる. この機能的電気刺激を用いた研究のひとつとしてリカンベントトライクを用いたペダリング運動があるが, 患者はトライクに身体をあずけるため身体のバランスをとる必要がなくなる. これは, 安全性が確保されるというメリットの反面, 下肢を運動させる際の身体の重心バランスを鍛える機会を失うというデメリットにもなる. そこで, これまでの筋力の向上が可能なりハビリ手法と併せて, 安全性を確保したうえで身体のバランスを鍛えることが可能なりハビリ手法が必要となる.

以上の背景のもと, リハビリテーションとしてより効果的な運動を実現させるために, 工学的な知見を活かした新しい FES 運動システムの提案が期待されている.

2. 研究の目的

本研究の目的は, 下肢の筋力維持と運動特性の向上と併せて身体のバランス性能の向上を目指し, 機能的電気刺激 (FES) を用いて立ち上がり動作を補助する実用的かつ制御工学的なアプローチに基づく新しいリハビリシステムを提案することにある. この FES を用いた立ち上がり運動の従来研究では, ほとんどすべてが椅子からの立ち上がりについての提案であり, しゃがみ込んだ状態からの立ち上がりは議論されてこなかった. その理由のひとつとして, 日本を含むアジア圏では床に腰を降ろすことが日常動作に含まれているのに対し, 欧米諸国では椅子やベッドを使った生活スタイルが一般的であるという文化の違いが挙げられる. 特に日本の年長者においては, 畳に座る, コタツを使う, 布団で寝るといった床に座った状態からの立ち上がりを伴う生活習慣を好む傾向にあるため, しゃがみ込んだ状態から立ち上がるリハビリ手法は高齢者の日常生活の質をあげるためにも極めて重要となる.

そこで本研究では, しゃがみ込んだ状態から下肢に筋刺激することで立ち上がり運動を促すシステムを構築する. 特に, 図1に示す3対6筋モデルに含まれる二関節筋の働きによって得られる足先での出力方向と筋の関係を用いて立ち上がり運動を実現する. 同様に, 腕に対する3対6筋モデルに基づいた筋刺激を加えることで, 重心移動を実現させる手法を確立する.

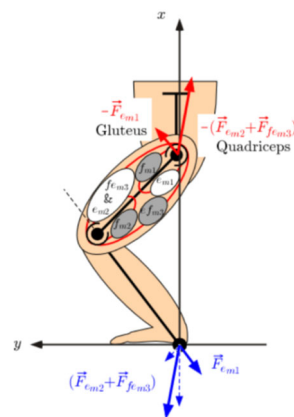


図1 3対6筋に基づく下肢の筋特性

3. 研究の方法

まず FES 立ち上がり運動をオイラーラグランジュシステムと捉えてモデル化する. その際, 従来研究で仮定していた x 軸方向には運動しないという拘束条件を外し, 上体の重心位置が x-y 平面で変化するモデルを考える. そして, 上体の重心位置を変化させながらの立ち上がり運動を実現させるために, 上肢と下肢の両方に筋刺激する手法を提案する.

ハードウェア的な観点からは、健常者と比べて十分な筋力を有していない非健常者が使用出来るように、自重による負荷を軽減するための免荷機能を備えた立ち上がり補助システムを構築する。具体的には、パンタグラフ機構の立ち上がり補助機構に、滑車を介したカウンターウェイトを付加することで実現する。特にy軸方向の自由度に加え、スライド式の座面によりx軸方向の自由度を有する機構とする。構築したシステムにおいて、実験データに基づき工学的な性能評価および検証をおこなう。

4. 研究成果

しゃがみ込みからの立ち上がり運動において、重心移動に関する上肢のモデルと立ち上がりに関する下肢のモデルを図2に示す。xを腰の位置、 y_g を前後方向の重心位置と定義することで、運動モデルをそれぞれ

$$M_l(x)\ddot{x} + C_l(x, \dot{x})\dot{x} + G_l(x) = F_x + F_{cw}$$

$$M_a(y_g)\ddot{y}_g + C_a(y_g, \dot{y}_g)\dot{y}_g + G_a(y_g) = F_y$$

と表す。ここで、 F_x は下肢の大殿筋と大腿四頭筋への筋刺激によって発生される床反力、 F_{cw} は免荷のためのカウンターウェイトから得られる力、 F_y は上肢の上腕二頭筋と上腕三頭筋への筋刺激によって発生される力である。このとき、腰の位置の目標値 x_d との偏差を $e_1 = x_d - x$ と定義し、偏差系における平衡点 $e_1 = 0$ に関して、リアプノフの安定定理に基づいて漸近追従を保証するような F_x の生成方法ならびに制御則を提案した。また、重心速度の目標値 \dot{y}_d との偏差を $e = \dot{y} - \dot{y}_d$ と定義し、上肢に過度な筋刺激を与えないために、重心速度偏差 e に関するZero型制御バリア関数を用いた F_y の生成方法ならびに制御則を提案した。

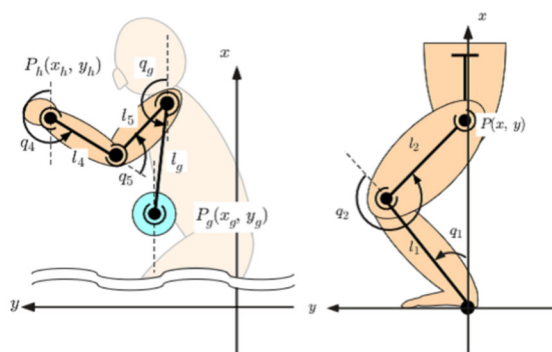


図2 上肢モデル(左)と下肢モデル(右)

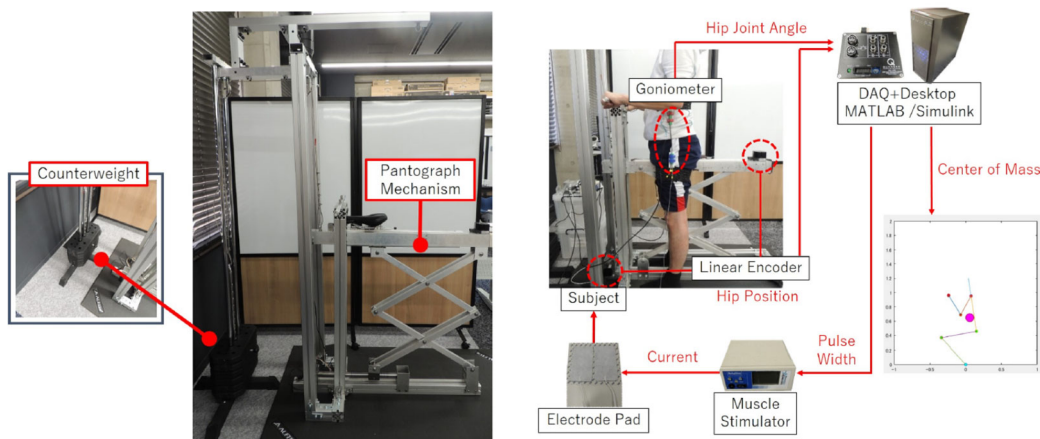


図3 構築したFES立ち上がり補助装置(左)とシステム構成(右)

構築したFES立ち上がり補助装置とシステム構成を図3に示す。立ち上がり補助装置のパンタグラフ機構とカウンターウェイトにより立ち上がり動作を補助することで、被験者の負担を軽減できる。また、装置に取り付けられた2つのリニアエンコーダから横軸と縦軸の腰の位置を測定でき、被験者の腰に取り付けられているゴニオメータから腰の角度を測定することができる。測定したデータをData Acquisition Device (DAQ)であるQ8-USB (Quancer社)を通してMATLAB/Simulinkで設計した制御プログラムで読み取り、逆運動学を用いて各関節の角度を求め、膝、腰、肩、肘関節の座標を計算する。これらを用いて重心位置を求める。また、設計した制御則に従って筋刺激量を決定し、筋刺激装置であるRehaStim (HASOMED社)と経皮電極パッドを通して上肢と下肢を筋刺激することで、重心移動を考慮した立ち上がり運動をおこなう。制御プログラムのサンプリング周期は500Hzである。

構築したシステムと提案した制御手法の有用性を示すための検証実験をおこなった。被験者は成人の健常者4名であり、金沢工業大学の倫理委員会を経た同意書に同意を得たうえで実験をおこなった。本実験検証では、下肢のみに筋刺激をおこなう立ち上がり運動と、上肢と下肢の両方に筋刺激をおこなう重心位置を考慮した立ち上がり運動の2種類を実施した。被験者には目標値は提示せず、また、リラックスした状態で能動的に動作せずに実験を受けるように口頭で指示をした。

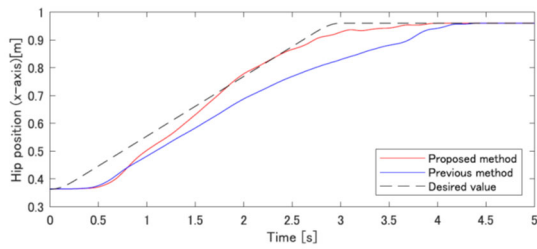


図4 腰の位置(赤線：提案手法，青線：従来手法，破線：目標値)

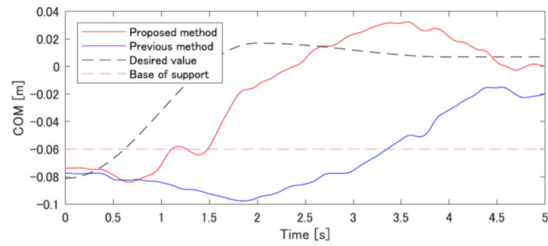


図5 重心位置(赤線：提案手法，青線：従来手法，破線：目標値)

表1 重心速度と重心位置の二乗平均偏差

Sub.	提案手法 (Vel.)	従来手法 (Vel.)	提案手法 (Pos.)	従来手法 (Pos.)
A	0.0499	0.0524	0.0258	0.0697
B	0.0339	0.0419	0.0191	0.0292
C	0.0604	0.0590	0.0420	0.0598
D	0.0580	0.0686	0.0362	0.0564

そのうちのひとりの実験結果を図4と図5に示す。図4は腰の位置を，図5は重心位置の時間変化を示している。両図において赤の実線は提案手法を，青の実線は従来手法を，黒の破線は目標値を意味している。また，表1には被験者4名の重心速度と重心位置の二乗平均偏差を示す。図4より，目標値に対する遅れがみられるものの，従来手法および提案手法においてしゃがみ込みからの立ち上がり運動が実現出来ていることがわかる。図5から提案手法が従来手法よりも目標値に近づいていることが確認でき，提案手法の方が先に支持基底面内(図中のマゼンダ点線)に入っていることが分かる。表1より，重心速度において提案手法と従来手法に大きな差はみられないものの，重心位置に関してはすべての被験者において提案手法による二乗平均偏差が小さくなっていることが確認できる。以上より，提案手法の有用性が示された。

本研究では，しゃがみ込み状態からの立ち上がり運動において重心移動を考慮して補助するシステムを構築するという目的に対し，機能的電気刺激を用いた下肢への筋刺激による立ち上がり運動の制御手法と重心移動を促す上肢への筋刺激による制御手法を提案し，パンタグラフ機構とカウンターウェイトを有するシステムを構築した。健常者を被験者とした実験結果より提案手法の有用性を検証した。非健常者への実験や継続的な実験を必要とするリハビリテーションとしての評価は今後の課題となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 河合宏之, 南雲政裕, 久島康嘉, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都	4. 巻 36
2. 論文標題 繰り返し学習制御と機能的電気刺激によるペダリング運動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 48 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.36.48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 河合 宏之、村尾 俊幸	4. 巻 65
2. 論文標題 ヒューマンモーションコントロール	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 377 ~ 380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.65.9_377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Y. Takata, H. Kawai, Y. Kushima, T. Murao, Y. Kawai, K. Hirata, and M. Kishitani
2. 発表標題 FES-assisted Standing-up Motion Control Incorporating Center of Mass Motion
3. 学会等名 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Ishikawa, H. Kawai, Y. Kushima, T. Murao, K. Hirata, and M. Kishitani
2. 発表標題 Tracking Control for FES Alternate Knee Bending and Stretching Trike With Electric Motor Assistance
3. 学会等名 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高田康伸, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 平田研二
2. 発表標題 重心移動を考慮したFES立ち上がり補助システム
3. 学会等名 2023年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本萌甫, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 岸谷 都
2. 発表標題 屋外走行を疑似体験可能なFESトライクシステムの構築
3. 学会等名 SICE 第24回 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山智哉, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 岸谷 都
2. 発表標題 食事動作訓練のためのFES上肢屈伸システムの構築
3. 学会等名 SICE 第24回 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川真也, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 平田研二, 岸谷都
2. 発表標題 モータアシストを有するFES下肢交互屈伸トライクの追従制御に関する研究
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kawai, K. Fujie, H. Kawai, and T. Miyoshi
2. 発表標題 Fatigue Estimation using Gaussian Process Regression for Bilateral Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation
3. 学会等名 6th IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田康伸, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 平田研二, 岸谷都
2. 発表標題 重心位置計測可能なFES立ち上がり補助システムの構築
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川真也, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 平田研二, 岸谷都
2. 発表標題 モータアシストを有するFES下肢交互屈伸システムの構築
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西尾すみれ, 河合宏之, 久島康嘉, 村尾俊幸, 平田研二
2. 発表標題 入力飽和を考慮したFES下肢交互屈伸運動の追従制御
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森北涼太, Nguyen Tam, 平田研二, 河合宏之
2. 発表標題 FES ペダリングシステムのモデリングとシミュレータ構築に関する考察
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kawai, F. Sugimoto ¹ , K. Fujie, H. Kawai, and T. Miyoshi
2. 発表標題 Fatigue Estimation using Nonlinear Disturbance Observer for Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西尾すみれ, 久島康嘉, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都
2. 発表標題 FES下肢交互屈伸トライクのペダル踏力ベクトル計測システムの構築
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合康典, 藤江謙伸, 河合宏之
2. 発表標題 電気刺激を用いたバイラテラル遠隔リハビリテーションのガウス過程回帰による疲労推定
3. 学会等名 SICE 第9回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022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	平田 研二 (Hirata Kenji) (40314364)	富山大学・学術研究部工学系・教授 (13201)	

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
---------	---------