

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12786

研究課題名（和文）健足の運動機能低下を代償するサイボーグ義足の開発～下肢切断者の安心な歩行の実現～

研究課題名（英文）Development of a cyborg prosthetic leg compensating the low locomotive functions of healthy lower limbs

研究代表者

矢野 賢一（YANO, KENICHI）

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：90314088

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）：現在のロボット義足には切断者個人の歩行特性が考慮されておらず、異常歩行や転倒に繋がってしまう危険性がある問題に対し、本研究ではUser-adaptive Robotic Prosthesisの考え方を歩行モデルに導入することで、使用者の歩行特性を学習し、歩容の変化に応じた遷移条件の適応を可能とする膝角度制御システムを開発した。最終的には、義足使用者を被験者とした臨床試験において、平地での歩行速度の変更や坂道下り歩行時における速度変化追従性や安定した歩容の確保を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大腿切断者による臨床実験の結果、リアルタイムで検出した歩幅などの歩行パターンの変化に応じて屈曲角度を自動調整することで、下肢の挙動が安定したことを確認した。最終的には、提案システムを実装したサイボーグ義足を用いて、大腿切断者による歩行中の膝折れを模擬する実験を実施し、本提案システムの有効性を示した。本サイボーグ義足は大腿切断者に対する安全性を確保することで、大腿切断者の義足歩行獲得率の向上が期待される。最終的に、提案システムにより、大腿切断者に対する歩行安定性をより高いレベルで確保することが可能であり、下肢切断者のQOLやADLの向上への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a knee angle control system that automatically adapts the flexion angle of the knee joint to the changes in gait pattern by varying the control parameters of the robotic prosthesis. Specifically, we focused on the gait characteristics before one gait cycle and proposed an adaptive gait model that follows the knee joint flexion angle to the real-time gait characteristics. Finally, we conducted clinical experiments by a trans-femoral prosthesis user and showed the effectiveness of proposed method by stabilizing the gait.

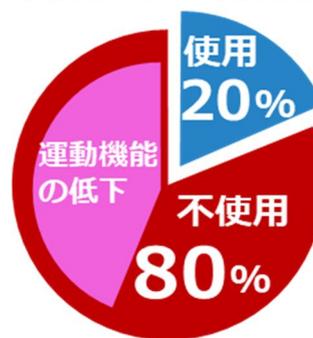
研究分野：ロボット工学

キーワード：義足 有限要素機械 福祉ロボット 適用制御 運動機能低下 転倒防止

1. 研究開始当初の背景

近年では疾患によって下肢を切断する高齢者が増加している。下肢切断者には義足を用いることにより自立した歩行を取り戻す可能性がある。しかしながら一方で、高齢下肢切断者の80%は義足を使用できないという現状がある。その要因の多くは運動機能の低下である。義足歩行は転倒の危険性を常に抱えており、特に高齢者の転倒は大けがや死亡事故に繋がってしまう。近年では歩行をセンシングし、義足の動きを自動的に制御するロボット義足の開発もされているが、このような従来義足を使用する際は、切断していない健足側で自身の体重を支持することや義足側の残存筋を適切に発揮することが求められ、運動機能が低下した高齢の下肢切断者では、その使用が困難となっている。

下肢切断者の義足使用率



さらに屋外では、不整地や坂道などの単純な平地以外での歩行も求められる。こうした通常とは異なる環境においては、健常者は自分自身で歩行中の各関節角度や接地時間を調整しながら、路面状況に合わせて歩行速度や歩幅、足底の接地角度などを変化させながら歩行している。しかしながら、膝関節以下の関節がない大腿義足使用者は、個々に調整された義足膝継手の屈曲抵抗や伸展抵抗力に基づいた歩行しかできない。そのため、大腿義足使用者は路面状況に応じて歩行速度を調節したり、坂道を歩行したりする際の関節角度の随意制御に制限がかかり、転倒の危険性から坂道や不整地での歩行に不安を感じていることが報告されている。そのため、実生活の中で起こる様々な歩行環境の変化に対しても、関節角度変化のばらつきや左右非対称性が小さく安定性の高い歩行が可能となる義足の実現が求められている。

近年では、ロボット制御技術を義足膝継手に適用したサイボーグ義足によって歩容を安定化させる研究開発が進んでいる。K.Ekkachai らはMRダンパ付き膝継手において、膝角度と制御電圧を入力としたニューラルネットワーク予測制御を提案し、健常者の自然な脚軌道を再現することに成功した。他にも、モータを使用して膝継手の拳動を動的に再現する電子制御能動式膝継手の開発として、P.Anna らは人間の反射経路にヒントを得た神経筋骨格系モデルを活用した適応制御系を設計し、基準となる健常者の歩行からのずれを抑制することに成功している。

しかしながら、従来の膝継手を使用した場合においては、歩行環境に依存しない安定した歩行の実現には課題がある。電子制御受動式膝継手を使用した歩行では、義足使用者の身体の生体力学的な補正を必要とし、日常生活中に関節の違和感や腰痛を引き起こす可能性があると報告されている。また、電子制御能動式膝継手を使用した場合では、参照した関節軌道が特定の使用者や事前学習した歩容に大きく影響を受けてしまい、歩容の乱れに繋がることが懸念されている。

H.Herr らは、このような歩行環境の変化に適応できない問題に対し、義足使用者それぞれの歩行速度や歩幅に応じて膝継手の屈曲角度を自動適合する User-adaptive Robotic Prosthesis の考え方を提唱している。しかしながら、歩行環境に依存せず関節角度変化のばらつきや左右非対称性の小さい安定した歩行が可能となる義足は未だ存在せず、サイボーグ義足の膝継手屈曲角度を制御する User-adaptive な制御システムの実現が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は近年増加している高齢下肢切断者が直面している「運動機能の低下によって義足の

処方が困難となることで社会に参加できない」という問題をロボット制御技術と義肢装具製造者の専門性を活かし解決する。具体的には、“切断していない健側の運動機能の低下を切断肢に装着する義足によって担保するためには、どのような機能を持った義足を設計・制御するべきか”という学術的な「問い」を、生体力学や義肢装具学の観点を踏まえた先端ロボット制御技術で答えることを目標とする。

特に本研究では、歩行速度や路面の勾配角度を変化させた際に健常者が膝角度を調整する方法を分析し、様々な歩行環境における膝角度の特性を明らかにする。そして、歩行環境の変化に対応して膝継手屈曲角度を自動適合することを可能とするサイボーグ義足のための膝角度制御システムを開発することを目的とする。具体的には、目標とした膝角度特性に対して膝継手屈曲角度を自動適合させる数理モデルを提案し、膝角度の制御が可能なサイボーグ義足に実装する。最終的には、大腿義足使用者を被験者として歩行速度や路面傾斜角度を変化させた歩行実験を実施し、提案する膝角度制御システムの有効性を示す。

最終的には、下肢切断者の健常な足の機能を持ち、健側の衰えを代償することを可能とする新たなサイボーグ義足を開発する。そのために健常な足の機能を解剖学的に明らかにし、切断者の意図を認識する新たな制御技術や小型軽量構造の開発に取り組む。開発する新たなロボット制御技術を搭載するサイボーグ義足によって、これまでに使用できなかった高齢下肢切断者に夢を与え、国が求める誰もが満身に活躍する社会の実現を目指す。

3. 研究の方法

3.1 サイボーグ義足の数理モデル構築と試作モデルの開発

人は下肢の無数の筋肉や神経の複合的な運動によって動いている。下肢切断者の残存している筋肉や神経系から生じる微小な電気信号を読み取る手法や我々が従来から研究しているように、切断者の動きをセンシングすることで義足に「頭脳」を持たせる



手法によって切断者の動作意図を反映させる必要がある。さらに、本研究で開発するサイボーグ義足は健足の機能を補うという点でこれまでに開発してきたロボット義足と異なり、下肢の運動機能や切断者固有の特性分析が不可欠である。長年研究にご協力いただいている下肢切断者の方々を対象に、筋電位計測機や3次元動作解析装置等を用いて切断者の運動機能を数理モデル化し、新たなサイボーグ義足を設計する。

3.2 臨床用サイボーグ義足と運動機能代償システムの開発

臨床試験を目的としたサイボーグ義足の設計・開発を行う。切断者にとって義足は可能な限りの軽量さが負担を少なくする点で優れているとされており、メカトロニクス分野の工学研究者としての経験を活かした最小設計のサイボーグ義足を目指す。さらに、低下した運動機能を代償することを可能とする運動機能代償システムを開発する。最終的には、義肢装具メーカーの協力を基に、臨床用サイボーグ義足の製作および性能評価を行う。

3.3 サイボーグ義足の有効性検証

これまで構築してきた下肢切断者や医師ネットワークを通じて、できるだけ多くの下肢切断者に臨床試験を依頼する。そして、開発したサイボーグ義足の有効性について生の声による評価を受けて、試作品の改良を行い、実用化を目指す。

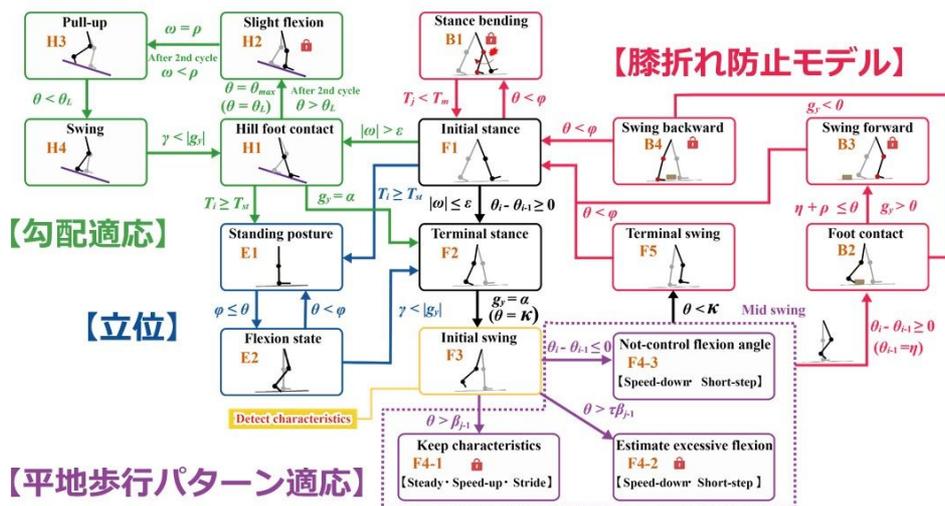
4. 研究成果

人は下肢の無数の筋肉や神経の複合的な運動によって動いている。下肢切断者の残存している筋肉や神経系から生じる微小な電気信号を読み取る手法や我々が従来から研究しているように、切断者の動きをセンシングすることで義足に「頭脳」を持たせる手法によって切断者の動作意図を反映させる必要がある。さらに、本研究で開発するサイボーグ義足は健足の機能を補うという点でこれまでに開発してきたロボット義足と異なり、下肢の運動機能や切断者固有の特性分析が不可欠である。長年研究にご協力いただいている下肢切断者の方々を対象に、筋電位計測機や3次元動作解析装置等を用いて切断者の運動機能を数理モデル化し、新たなサイボーグ義足を設計した。



そして、転倒の回避に必要な膝継手の挙動を明らかにし、転倒の危険性の有無等の切断者の状態に応じた膝継手の制御を可能とするために、Finite state machine に基づくサイボーグ義足のための新しい転倒回避支援システムを提案した。最終的には、提案システムを実装したサイボーグ義足を用いて、大腿切断者による歩行中の膝折れを模擬する実験を実施し、本提案システムの有効性を示した。本サイボーグ義足は大腿切断者に対する安全性を確保することで、大腿切断者の義足歩行獲得率の向上が期待される。

適応型Finite State Machineの構築

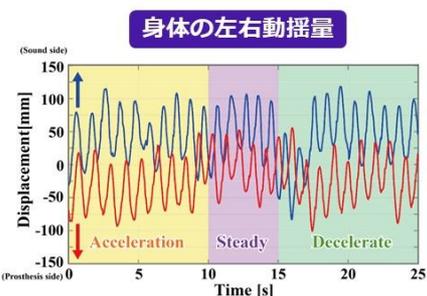
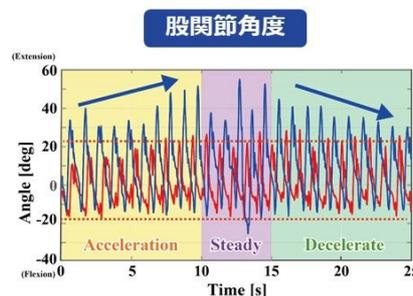


さらに、動的に屈曲角度の制御を必要とする場面として平地歩行や勾配歩行における歩容に変化への追従に着目した。一般的に、平地歩行では遊脚における最大屈曲角度、勾配歩行では両脚の高低差を乗り越えるための接地時の膝継手の軽度屈曲角度は歩行速度や歩幅、勾配角度などのリアルタイムの状況によって変化する。サイボーグ義足のシステムがこのような歩容の変化に適応できないと転倒の発生や関節角度や左右対称性の乱れ、異常歩行に繋がってしまう。そこで本

研究では、1 歩行周期前の歩行特性の変化に着目して義足の制御パラメータを可変とすることで、リアルタイムの歩行特性に膝継手屈曲角度を追従させるための膝角度制御システムを開発した。最終的に、大腿切断者による臨床実験の結果、リアルタイムで検出した歩幅などの歩行パターンの変化に応じて屈曲角度を自動調整することで、下肢の挙動が安定したことを確認した。最終的には、提案システムを実装したサイボーグ義足を用いて、大腿切断者による歩行中の膝折れを模擬する実験を実施し、本提案システムの有効性を示した。本サイボーグ義足は大腿切断者に対する安全性を確保することで、大腿切断者の義足歩行獲得率の向上が期待される。

研究の最後には、現在のロボット義足には切断者個人の歩行特性が考慮されておらず、異常歩行や転倒に繋がってしまう危険性がある問題に対し、本研究では User-adaptive Robotic Prosthesis の考え方を歩行モデルに導入することで、使用者の歩行特性を学習し、歩容の変化に応じた遷移条件の適応を可能とする膝角度制御システムを開発した。最終的には、義足使用者を被験者とした臨床試験において、平地での歩行速度の変更や坂道下り歩行時における速度変化追従性や安定した歩容の確保を実現した。提案システムにより、大腿切断者に対する歩行安定性をより高いレベルで確保することが可能であり、下肢切断者の QOL や ADL の向上への貢献が期待される。

実験結果【歩行速度追従性】



遊動義足: 速度に応じて最大角度が増加

提案手法: 速度に依存せずに最大角度が安定

遊動義足: 健側 (+側) に偏る

提案手法: 義足側 (-側) に偏る

▶ **膝継手の操作に対する股関節の挙動が安定** (速度追従性の指標として挙げられる)

大塚ら、歩速追従性のある機械式遊脚相制御装置を備えた膝継手の開発とその評価、2019

▶ **義足支点での歩行**

歩行速度の追従性に対する遊脚相制御の有効性を確認

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 勝村一優, 大林宗矢, 矢野賢一, 浜田篤至, 鳥井勝彦	4. 巻 35
2. 論文標題 有限状態機械を用いたロボット義足のための膝折れ防止システムの開発	5. 発行年 2022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 228-235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.35.228	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 勝村一優, 大林宗矢, 矢野賢一, 浜田篤至, 鳥井勝彦	4. 巻 87
2. 論文標題 状況の変化に応じた屈曲位保持を可能とするリトラクタ式ロボット義足の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00093	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 M.Katsumura, M.Senzaki, K.Yano, A.Hamada and K.Torii	4. 巻 -
2. 論文標題 Robotic knee prosthesis to follow changes in real-time gait patterns	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 672-675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEEECONF49454.2021	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 勝村一優, 仙崎真正輝, 矢野賢一, 浜田篤至, 鳥井勝彦
2. 発表標題 大腿義足使用者の日常生活動作を考慮したロボット義足の開発
3. 学会等名 第38回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 勝村一優, 大林宗矢, 矢野賢一, 浜田篤至, 鳥井勝彦
2. 発表標題 膝折れによる転倒回避を可能とするロボット義足の開発
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝村一優, 大林宗矢, 矢野賢一, 浜田篤至, 鳥井勝彦
2. 発表標題 状況の変化に応じた屈曲位保持を可能とするロボット義足の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021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

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