

## 動作予測に基づく大腿義足膝継手制御手法の開発

Development of a Control Method for Transfemoral Prosthetic Knees with Prediction of Gait

2181003



研究代表者

香川大学 創造工学部

講師

井上

恒

### [研究の目的]

大腿切断差者が歩行能力を再獲得するために使用する義足を大腿義足という。この大腿義足では膝継手（義足膝関節）の運動機能が使用者の運動能力を大きく左右する。近年、電子制御式の膝継手が開発され、義足使用者の平地における歩行能力の改善がなされてきた。

現在までに開発、市販されている膝継手の多くは平地歩行能力の獲得を対象にしたものであり、それ以外の動作が可能な膝継手は限られている。大腿切断者にとって最も困難な日常生活動作の一つに階段を左右交互の脚で上ることが挙げられる。最新式の電子制御式膝継手以外では、平地歩行に加えて、階段交互昇段などの様々な日常生活動作に対応しているものはない。このような膝継手は、高機能である反面、非常に高価であり、経済的に発展している国や地域以外での普及は難しい。

最新の電子制御式膝継手が高価である主な原因の一つとして、力覚センサや加速度センサ等、多数かつ高額なセンサ類が膝継手に使用されている点が挙げられる。多数のセンサからの情報によって、様々な歩行パラメータを使用して膝継手の運動機能を制御している。多機能を実現できる一方、消費電力と製造コストは増大してしまう。この問題を解決する方法の一つとして、少数かつ安価なセンサのみで多機能な膝継手の制御手法を開発することが挙げられる。機械

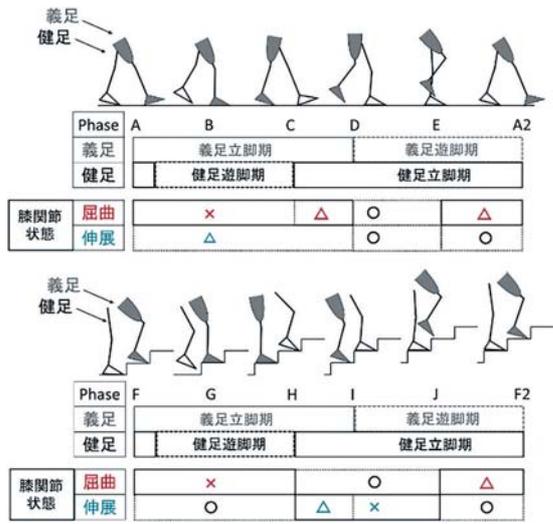
ベースの設計で多数のセンサを用いて歩行の状態をつぶさに検出する最新式の膝継手に対して、少数かつ安価なセンサを用いるということは限られた情報から制御に必要な情報が得られなければならない。

健常者の歩行状態の簡単な検出方法として、慣性計測センサ等を身体に装着する方法が良く使用されている。このセンサが安価で軽量であることや、取り付けが容易に行えるためである。しかし、慣性計測センサを用いた歩行動作検出などに関する先行研究では義足の制御を行うに足る状態にはなっていない。そこで本研究では、大腿部に装着した1つの慣性センサから得た大腿角度と大腿角速度のみを使用して、平地歩行および階段昇段が可能な制御手法の開発を目的とした。

### [研究の内容、成果]

大腿部に装着した1つの慣性計測センサから得た大腿角度と大腿角速度のみを使用して、歩行モード（平地歩行／階段昇段）と、各歩行イベントを検出可能な制御手法を提案した。

図1に平地歩行および階段昇段時の歩行周期と膝継手に求められる機能を示す。平地歩行を安全に行うためには、立脚期および遊脚期において膝継手の屈曲・伸展を制御することが必要である。義足側の片足支持期（図1のAからCの区間）においては、意図しない膝の屈曲を



(○: 回転運動が必要, ×: 回転運動の制限が必要, △: どちらでもよい)

図1 平地歩行(上)と階段昇段(下)における歩行周期と膝継手に必要な機能

防ぐため、膝の屈曲制限が必要である。また、遊脚期の開始から義足側つま先のクリアランスが最小になるまでの期間(図1のDからEの区間)には、下腿を振り子のように前に振り出す必要があるため、屈曲と伸張の両方が可能であることが求められる。階段昇段時には、平地歩行時と同様に義足側の片足支持期(図2のFからHの区間)には、意図しない膝の屈曲を防ぐための屈曲制限が必要である。また、階段昇段時には、体を持ち上げて健足側の次の段につくために膝継手の伸張が行える必要がある。義足遊脚期では、膝伸展開始時(図1のJ)ま

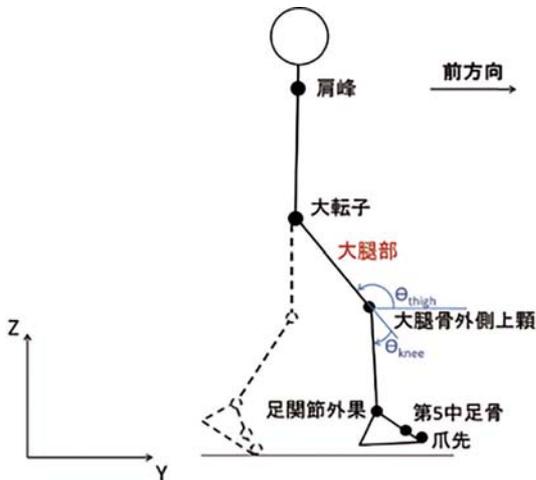
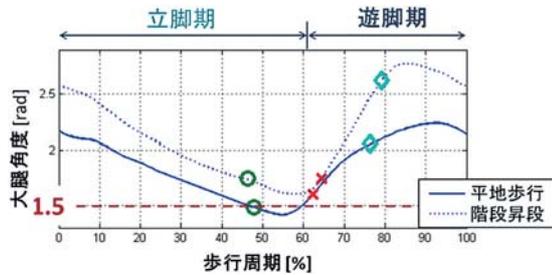


図2 歩行動作分析のための身体モデルと関節角度定義

では、膝継手の屈曲位を維持して段差と義足の衝突を回避するために膝継手は伸張が制限されている必要がある(屈曲可能)。その後、義足側の足部接地の準備のために、膝継手は屈曲が制限されている必要がある。このように、平地歩行と階段昇段とでは、主に遊脚期において膝関節に求められる機能が異なるため、遊脚期に入る前に歩行状態を予測する必要がある。図2に歩行動作分析のための身体モデルと角度定義を示す。図3は、歩行分析によって示された健常者の平地歩行と階段昇段の大腿角度である。平地歩行と階段昇段の両動作において大腿角度が立脚後期に最小値を取るが、その値は平地歩行では1.5 radを下回り、階段昇段では1.5 radを上回ることが示された。これまで、大腿部に装着した1つの慣性計測センサを使用して、歩行状態(平地歩行/階段昇段)の予測と、各歩行イベントを検出可能な制御手法を提案した。また、膝継手の試作機を製作し、模擬大腿義足を用いて、平地歩行、階段昇段、および、それらの移行動作が適切に行われることの検証を行った結果、使用者の歩行動作中の大腿角度の情報のみで膝継手の機能が自動で切り替わり、それぞれ適切な制御による安全な歩行が行えることを確認した。なお、試作機には、市販の膝継手で使用されている関節運動を制動するダンパ等の代わりに、より安価に膝継手の運動を制限可能なラチェットギアを用いた(図4、図5)。

次の義足側の一步がどこ(平地/階段)に接



(平地歩行: 対側肢の踵接地(○), 爪先離地(×), 遊脚中期の爪先鉛直位置の最小値(◇) 階段昇段: 対側肢の足部接地(○), 爪先離地(×), 遊脚期における膝関節伸張開始時点(◇))

図3 平地歩行(実線)と階段昇段(点線)の1歩行周期における大腿角度

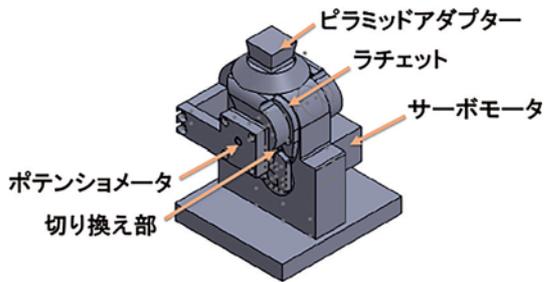


図4 ラチェット式膝継手の構造



図5 膝関節の伸展・屈曲ロックの自動切替えシステム

地するかを、その遊脚の前の立脚期の大腿角度で予測するこの制御手法は、大腿角速度が0に近づいたタイミングの大腿角度を最小値として取得し、歩行状態（平地／階段）の検出を行っている。そのため、平地歩行中に立ち止まった場合には、平地歩行中にもかかわらず、次の歩が階段昇段と予測され、不適切な制御が行われてしまう問題がある。また、他の問題点として、歩幅の大きさが大腿角度に関係しているため、義足使用者が小さい歩幅で歩行した場合、立脚制御の検出条件を満たせない可能性がある。つまり、この場合に義足側の立脚期が実際に始まっても、膝継手は屈曲制限状態にならず膝折れが発生する危険性がある。さらに、この場合は立脚制御の検出条件を満たすまで、歩行状態や他の歩行イベントの検出は行われなくなってしまう。このように、使用者による歩行動作のばらつきに対して十分な対応ができていなかった。

立脚期における歩行状態の予測と、遊脚期において歩行イベントの検出の精度を上げることが必要であった。ルールベースで行われている歩行状態の予測に対しては、ルールの見直し、または、予測手法を統計学や機械学習を用いたものに変更する方法が考えられた。しかし、これらの手法は予測（判断）を確率や機械にゆだねることになり、制御対象への理解が深まらず、

他への応用の可能性も見出しにくくなる可能性がある。そのため、本研究では、まずはルールベースでの改善に取り組んだ。ルールに用いているパラメータや閾値を変更して予測精度を上げること他に、前述の歩行状態誤検出が発生した場合でも、その後、遊脚期開始までに正しい歩行状態を再検出して適切な制御へ修正を行うことで、安全な歩行を実現することが可能である。そこで、歩行状態が階段昇段と検出された後でも、遊脚期を終了する歩行イベントが検出される前に、大腿角度が1.5 radを下回った場合、平地歩行モードに移行するという処理を追加した。また、歩幅が小さい場合にも安全に次の立脚期を迎えられるように歩行分析を基に閾値の調整を行った。図1に示すように平地歩行時の遊脚期における膝継手の伸展開始後には、次の遊脚期の開始までに屈曲機能は必要ない。そのため、義足側膝関節が最大屈曲するタイミングからこの閾値を決定した。修正したアルゴリズムを図6に示す。

誤検出を改善する為に修正したアルゴリズムによる検出精度の向上を評価するために、修正前のアルゴリズムと修正後のアルゴリズムに健康者の平地歩行データ（AIST歩行データベース）を入力し、歩行の検出状態のシミュレーションを行った。入力した歩行データは、健康男性115名、女性99名（年齢：48.63±20.74歳、身長：160.76±12.54 cm、体重：58.03±13.72 kg）であった。また、各被験者で5歩行周期の歩行データを使用した。歩行状態検出精度の評価手法として、式(1)～(3)に示すP値、R値、F値を使用した。P値、R値、F値はそれぞれ、適合率、再現率、P値とR値の調和平均を示し、TPは正しく歩行状態・イベントを予測（検出）した回数、FPは誤った歩行状態・イベントを予測（検出）した回数、FNは予測（検出）するべき歩行状態・イベントを予測（検出）できなかった回数を示している。

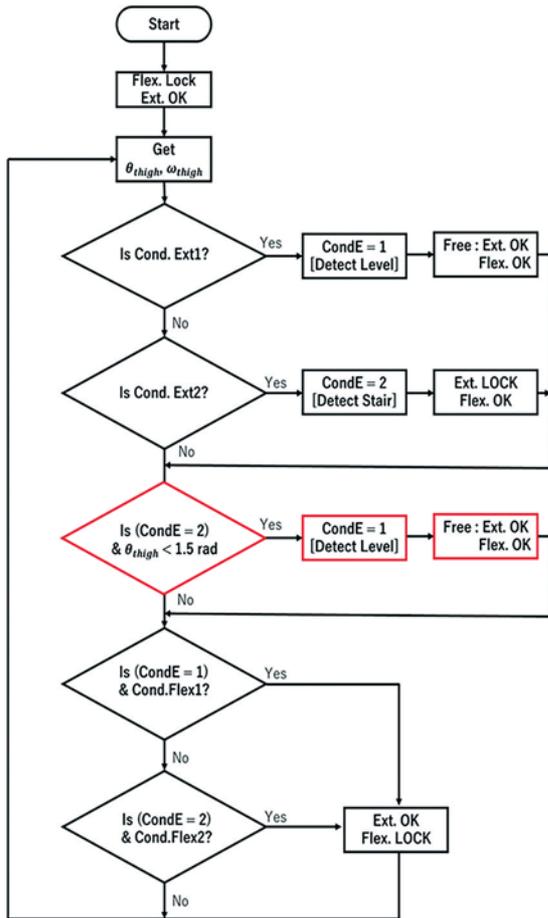


図6 平地歩行および階段昇段における膝継手機能切替え用アルゴリズム

$$P = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (1)$$

$$R = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (2)$$

$$F = \frac{2PR}{(P + R)} \quad (3)$$

表1に評価結果を示す。修正後のアルゴリズムは平地歩行時での歩行状態と歩行イベントの予測（検出）の両者において、修正前と比較してP値とF値の向上を示しており、予測（検出）の精度を向上させたといえる。また、特に修正後のP値、R値、F値は共に高い値となっており、修正後のアルゴリズムの有効性を示している。なお、この評価では評価対象は平地のみである。階段昇段動作についてのデータベースが不足しているため、階段昇段時の検出

表1 修正前後のアルゴリズムによる歩行動作の予測（検出）結果

	歩行状態 (平地/階段)の予測		立脚期を迎えるための 歩行イベント検出	
	修正前	修正後	修正前	修正後
TP	645	1050	324	1050
FP	415	10	0	0
FN	0	0	736	10
P	0.608	0.991	1.000	1.000
R	1.000	1.000	0.306	0.991
F	0.757	0.995	0.468	0.995

精度については評価を行っていない。しかし、アルゴリズムの特性で歩行状態の予測については、平地以外は階段昇段と予測することから平地歩行が正しく予測できることが重要である。従って、階段昇段の予測の評価を行っていないが、この評価の価値を下げるものではない。一方、立脚期を迎えるための歩行イベント検出については、階段昇段時の評価も行う必要があり、今後の課題である。なお、修正後のアルゴリズムにおいても2名、合計10歩行周期については、平地歩行の歩行状態予測に失敗しており、それに伴って立脚期を迎えるための歩行イベント検出にも失敗している。これらの歩行動作については、一歩行周期中に大腿角度が1.5 radを下回らなかったことが原因である。

#### [今後の研究の方向, 課題]

今回のアルゴリズムを膝継手に実装して各種歩行動作を行い、実際の義足での動作における評価と制御手法の更なる改善を図る。また、階段降段についても対応を図る。

本研究の結果は義足以外にも応用が可能である。今後の研究の方向として、高齢者などが使用する装具などへの応用を検討する。

#### [成果の発表, 論文等]

福田哲也, 井上恒, 和田隆広: 慣性センサを利用した大腿角度計測に基づく膝継手制御手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2019

Inoue, K., Fukuda, T., Wada, T.: A Control Method for

Transfemoral Prosthetic Knees Based on Thigh  
Angular Motion, Proceedings of the 41th Annual  
International Conference of the IEEE EMBS

(Engineering in Medicine and Biology Society),  
2019