

足部連動式義足の開発研究

—Development of a New Functional Prosthetic Knee Joint System Using Prosthetic Foot Movement—

北山一郎、大塚 博

KITAYAMA Ichiro, OTUKA Hiroshi

大島康敬、西原一嘉(大阪電気通信大学)

OSHIMA Yasuyuki, NISHIHARA Kazuyoshi (Osaka Electro-Communication Univ.)

キーワード: 大腿義足, 荷重ブレーキ, リンク機構

Keywords: Transfemoral prosthesis, Weight-activated brake, Linkage mechanism

Abstract:

Many amputees have comfortable walking and life by using Intelligent Prosthetic(IP) system which have been developed by this institute. Some research subjects, however, remain in order to provide safe and active walking especially in stance phase of prosthetic walking.

This research aim to develop a new prosthetic knee joint system which prevent amputees from bulking of their prosthetic knee, and make them a natural walking with bouncing, yielding.

This year, first of all, we got EMG data of a transfemoral amputee, and analyze them whether EMG of a stump can use as signals of voluntary knee control or not. We plan to apply these result to under-mentioned system.

Secondly, we developed a new knee joint system which have a 4-bar linkage mechanism, a weight-activated brake mechanism, and IP pneumatic cylinder. And, we did a try walking by a amputee who said that this new system provide us safe walking without knee bulking.

Furthermore, we newly developed a knee joint by which amputees can have a yielding function with IP system.

1. はじめに

当研究所で開発を進めてきたインテリジェント大腿義足により、大腿切断者の快適な歩行はある程度実現されたが、同義足は義足で体重を支える

際の安定性、快適性などには問題が残されていた。

本研究では、現状のインテリジェント大腿義足の高機能化を目指し、体重負荷時に高い安定性が得られる膝継手の開発と大腿義足用足部の開発、およびこれらを連携、連動させた機構の開発を行い、実用化を目指す。

2. 開発の流れと指針

2. 1 前年度までの経過

前年度までの研究では、表1に示すような課題(研究項目)を取り組んできた。最初に、現状の課題とニーズを調べるため、義足使用者に面談調査を行い、どのような義足を使っても大半のものは転倒する危険性があり、これが大きな課題であることが分かった。特に、十分膝が伸展していないときや、ふとした時に膝折れは起こり、非常に危険を感じていることが分かった。これを元に、転倒を防止するシステムを組み込むこと、特に、感度良い思い通りに作動し、また、それは歩行の妨げにならないことを開発の指針とした。

また、長年義足の研究を行い、近年第一線から離れた専門家を中心に、経験等に関する面談調査を実施した。これにより得られたポイントは、○歩行中の大きなパワーの基である使用者自身の体重やエネルギーを有効に活用すること、○油圧機構のなめらかさと空圧機構の空気バネ様の機能をうまく組み合わせて活用すること、○メカトロニクスを視野に入れ開発を進めること、などであった。

また、現状の義足の分析として、遊脚相に関しては、引張圧縮試験機、工業用ロボット、実際の義足歩行の各実験を通して、遊脚相では、空圧シリンダの働きが有効であること、つまり、インテリジェント大腿義足の有効性を確認した。さらに、立脚相に関しては、近年導入された機能を調べ、これらを高価格なものとせずに実現することを開発の方針とした。

2. 2 本年度の研究

本年度は、これらの指針を受けて開発した義足膝継手の改良、臨床テスト等を実施した。

遊脚相では空圧シリンダを主に用いることから、開発のターゲットは、立脚相の制御に絞られる。

立脚相に関して重要な点をまとめると、

- (1) 体重を義足にかけたときに膝折れせざかつ遊脚相に移行しやすい機能 (図1 (1))、
- (2) ゆっくり膝を折って座ることができる機能 (イールディング機能¹⁾、図2)
- (3) 立脚相初期～中期間に少し膝屈曲して歩行する機能 (バウンシング機能^{2) 3)}、図1 (3))
- (4) 隨意に膝の固定とそれとの解除ができる機能⁴⁾、(図1 (4)) をあげることができる。

前年度では、上記(1)の機能を実現するため、4節リンク機構に荷重ブレーキを組み込んだ新しいアイデアの膝継手を試作した。

本年度は、最初に、現状の義足や開発した義足の機能を詳細に分析するため、

- ① パイロンロードセルを用いた義足膝継手の分析、ついで上記(4)随意制御義足の可能性を調べるため、
- ② 義足使用者の断端から得られる筋電を取得し、分析を行った。さらに新しい義足の開発としては、
- ③ 前年度の荷重ブレーキ内蔵4節リンク機構義足膝継手の機能を向上させる改良、
- ④ 同機構の機械的な機能確認実験、
- ⑤ 大腿義足使用者による試用実験を行った。また、
- ⑥ 同様のアイデアを発展させることで、上記(2)のイールディング機能を有することが分かり、この機能を確認するための試作を実施した。

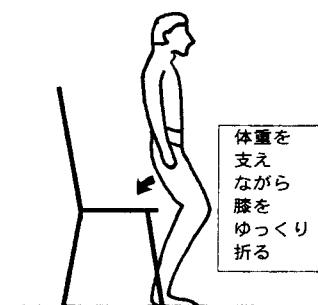


図2 イールディング機能について

Fig 2 Yielding in sitting

表1 研究項目と開発指針

Table 1 Subjects and target

研究項目	ポイント	開発指針
義足使用者面談調査	転倒は非常に怖い 転倒は通常歩行ではほとんど起きない (膝の伸展が不十分、遊脚相中につま先が引っかかる時などに起きる)	転倒を防止 多少の膝屈曲状態でも転倒防止 また、高感度にブレーキ等が効く
専門家面談調査	体重を有効利用するのがよい 空圧、油圧の利点をそれぞれ生かす 部分的なメカトロ化を常に視野に入れる	荷重ブレーキを念頭に置く 空圧、油圧システムの利点欠点等を見極める 最小限で効果的なメカトロ化を目指す
基礎的な調査と分析		
1 遊脚相制御 (機械的な試験) (義足使用者による分析)	空圧シリンダ：膝屈曲角度と反発力が同期 油圧シリンダ：膝屈曲初期に反発力大 →これらから空圧シリンダが有効と考える ※これについては今年度実施	遊脚相制御は空圧シリンダをベースとする
2 立脚相制御 (文献、先進事例調査および先進機構調査)	bouncing機能 (バウンシング機能) yielding機能 (イールディング機能) ワンウェイクラッチ的機能 (ブレーキをかけるのは膝屈曲のみでほぼ良い) 統合化されたコンピュータ制御 各種機能性材料の利用	これらの機能を実現する新たな膝継手開発 統合化されたシステムよりも低価格を目指す 機能性材料による試作も試みる

1 サイクルのパーセント

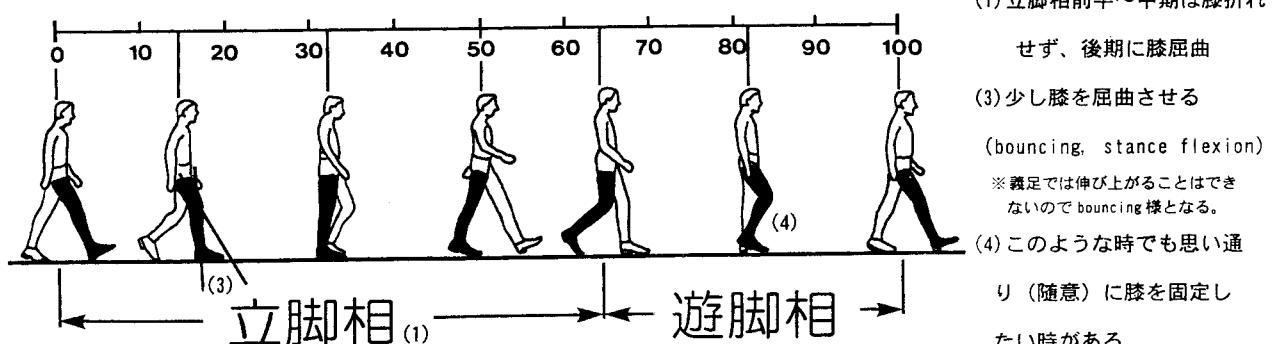


図1 歩行のサイクルと足の機能

Fig. 1 Typical walk cycle

3. パイロンロードセルを用いた義足歩行の分析

3. 1 目的

義足歩行において、どのような荷重やトルクが義足に作用しているかを3分力と3軸まわりのトルク（あわせていわゆる6軸）が同時に測定できるロードセルを用いて調べる。これにより、(1)遊脚相制御機構がどのような役割を果たしているか、(2)立脚相を制御するにはどのようにすればよいか、などを検討する。

3. 2 実験概要

3. 2. 1 被験者

29才、男性、1名、左大腿短断端、通常はインテリジェント大腿義足使用、約3年使用。

3. 2. 2 被験対象膝継手

空圧制御機構を有するものとして単軸インテリジェント大腿義足(IP)、4節リンク機構インテリジェント大腿義足(4IP)（ともにNABCO社）、油圧制御機構を有するものとして160-High-activity(Catech社)の3種類の膝継手を用いた。

3. 2. 3 測定装置

図3に測定装置を示す。義足にかかる力とトルクを2つのロードセルを用いて調べる。大腿部ロードセルは遊脚相中の力学状態も調べることができる。膝屈曲角度はフレキシブルゴニオメーター(Penny & Gilles社)で測定する。

3. 2. 4 歩行条件

義足使用者は、本人の感覚としてゆっくりした歩行(Slow)、通常速度(Middle)、速い速度(Fast)で歩行し、その際のデータを取得する。図4は、ロードセルを装着した状態を示している。また、データ測定中の写真を図5に示す。

3. 3 結果

実験では、各ロードセルとともに6軸データが得られているが、歩行を側面から見たとき(2次元)のデータに対応するものとして、上下方向と前後方向の力(F_z 、 F_y)、前後周りのトルク(M_{yz})に注目して分析を行う。荷重線は、図6のように定義したベクトルの向きを図に示した。これにより、歩行中、義足に対する荷重ベクトルは、どのように時間的に推移をするかがわかる。また、下腿部及び大腿部に設置したロードセルの前後方向のトルクは、義足の足部、膝継手、にかかるモーメントと深く関連するので、特にこれらに注目した。各膝継手による、早足(Fast)のみの荷重線の変化とトルクの変化を図7～9にまとめて示す。特に、図のA:立脚相スタート、B:つま先離床、C:遊脚相

前半部、D:ターミナルインバ外の各事象に注目した。荷重線は時間経過とともに踵部からつま先へ移動する。

3. 4 考察

3. 4. 1 立脚相中のモーメントの変化について

図7～9の大腿部と下腿部のモーメントの変化を見ると、立脚相中、大腿部モーメントは値が小さく変化も複雑である。これに対し、下腿部モーメントは、立脚相前半は正の大きな値を示し、後半は負の大きな値を示し、動きも継手に関係なく一定している。このことは、義足歩行で、今どのような歩行状態にあるのかを知ること、つまり歩行モードの獲得には、下腿部モーメントが有効であることが分かる。

3. 4. 2 立脚相中の荷重線の変化について

図7～9の荷重線の変化では、いずれも、立脚相初期では踵部分から膝に向けての荷重線が得られており、立脚相後期では、足部つま先から膝に向けてのベクトルが得られている。立脚相を初期、中期、後期などに分離するには、足部に近い位置でトルクを測定すれば良いことを示している。一方、膝継手に近い位置では、荷重線の走行が複雑で、立脚相の分離が困難であることが推測できる。図7で示したように荷重ブレーキのトリガ位置を膝前方のできるだけ下方に設置することで、ブレーキONする必要のある立脚相前半とOFFする必要のある後半に分離することが容易となる。このことは、本文後半の義足の設計に生かすことができる。

3. 4. 3 遊脚相制御機構について

立脚相後期から遊脚相にかけては、義足の重量や遊脚相制御装置の反発力などにより大腿部に大きなモーメントが働く。また、大腿部に設置したロードセルは、ソケット直下にあるため、遊脚相中に断端に感じる荷重やトルクと密接な関係にあると考えられる。立脚相後期から遊脚相にかけての大腿部ロードセルのデータ(C)を見ると、空圧シリンダでは上に凸となり、さらに膝の最大屈曲でもまだ伸展トルクがあることが分かる。一方、油圧シリンダでは、波形はほぼ直線的に急激に減少し、最大屈曲での伸展トルクは少ない。このことは、空圧シリンダが膝の屈曲の増加に対しいわゆるダイナミックな反発力が発生し、膝最大屈曲では、膝継手を前方に降り出すように働いていると考えられる。義足使用者は、このトルクを感じながら歩行しており、このことは、遊脚相における空圧シリンダの優位性を示唆しているのではないかと考えている。この結果を受け、以下の義足の開発には、空圧シリンダを第一義に考えて進めたいと考える。

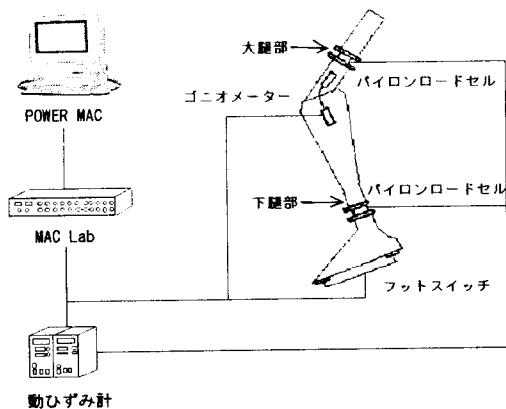


図3 測定装置

Fig. 3 Measuring System

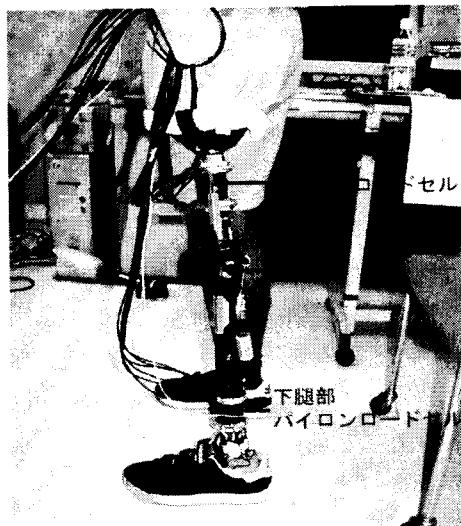


図4 ロードセル装着状態

Fig. 4 Prostheses with sensors



図5 義足歩行での測定

Fig. 5 Prosthetic gait with sensors

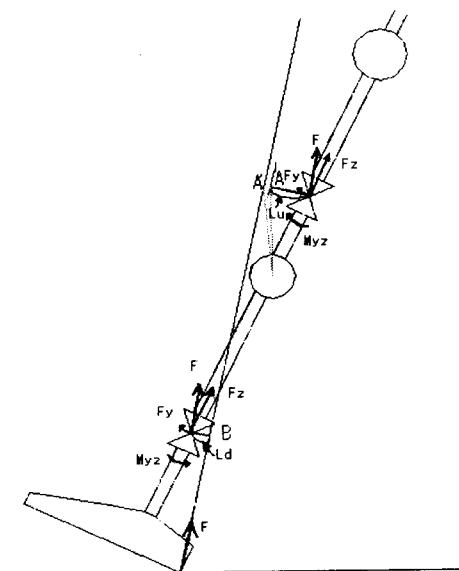
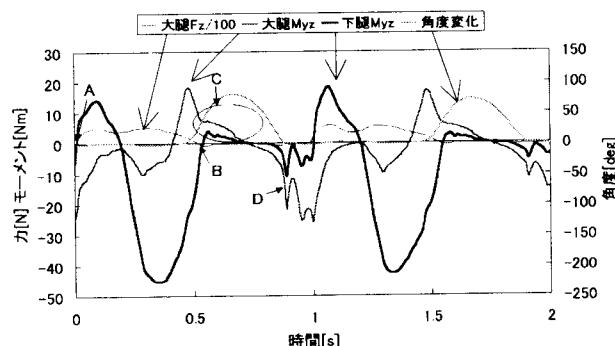
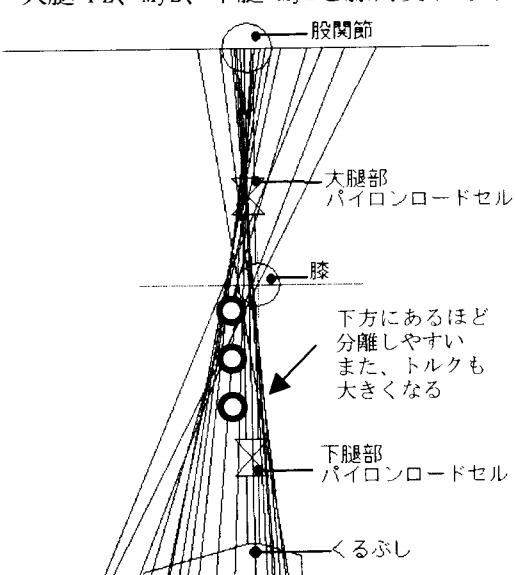


図6 2つのロードセルと荷重線（矢状面）

Fig. 6. Pylon load sensors and a load line



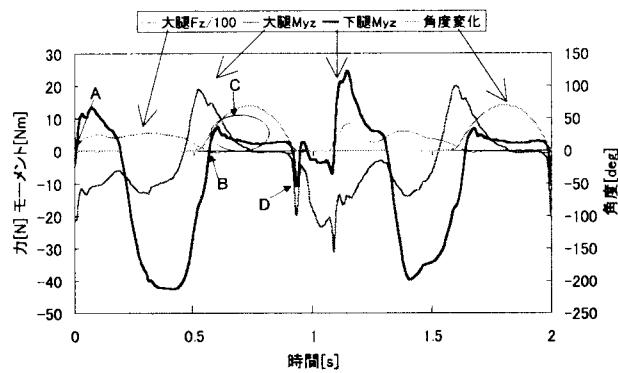
(a) 大腿:Fz、Myz、下脚部:Myzと膝角度(2歩分)



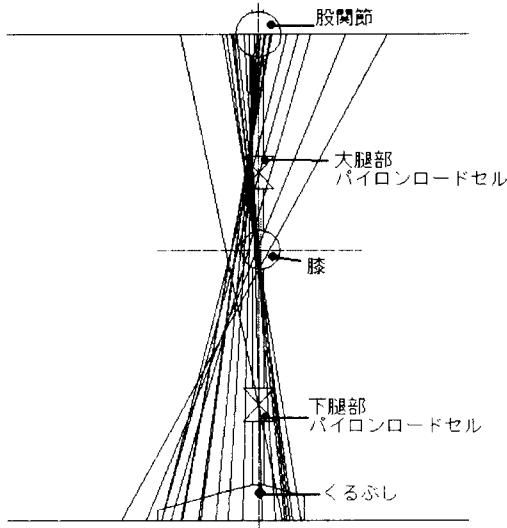
(b) 荷重線の変化

Fig. 7 Data and load lines(IP, Fast)

Fig. 7 Data and load lines(IP, Fast)



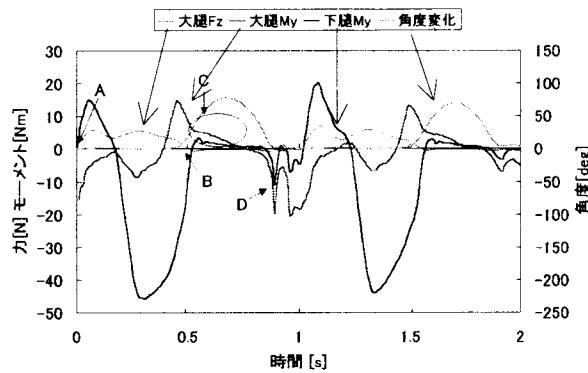
(a) 大腿:Fz、Myz、下腿:Myzと膝角度(2歩分)



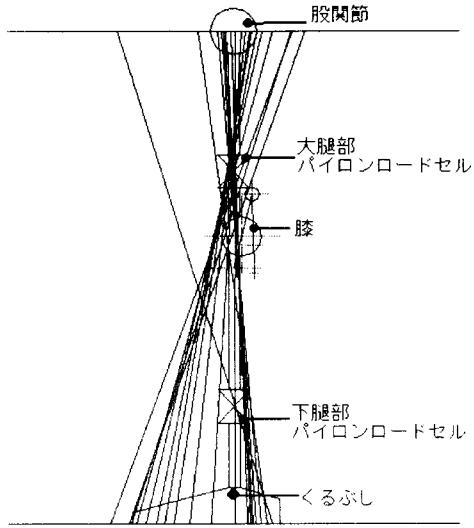
(b) 荷重線の変化

図8 Catech(油圧シリンダ)Fast

Fig. 8 Data and load lines(Catech, Fast)



(a) 大腿:Fz、Myz、下腿:Myzと膝角度(2歩分)



(b) 荷重線の変化

図9 4IP(空圧シリンダ)Fast

Fig. 9 Data and load lines(4link-IP, Fast)

4. 筋電による義足制御の可能性

4. 1 目的

第2節で示した義足に求められる機能の一つに随意制御義足があげられる。特に階段の昇降などで、使用者の思い通りに膝継手の固定、解除を行うことができれば、非常に有効で先進的な義足となる。本研究では、義足使用者が随意に発生させることができる信号として筋電(EMG)に注目し、実際の義足使用者の断端から歩行中の筋電を取得する。このデータを分析し、筋電信号による随意制御義足の可能性を調べる。研究にあたり、W.R. Dyck^④らの研究、二宮らの研究^{⑤⑥}、を参考とする。

4. 2 方法

4. 2. 1 測定装置

測定装置の概略図を図10に示す。生体用電極か

ら得られた筋電は送信機により、マルチテレメータ(MWB-5000)を通して、データ収集解析システムMacLab(ビデオサーカ社)に送られる。これをコンピュータで解析する。

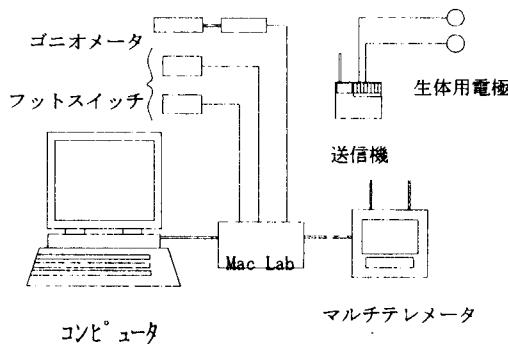


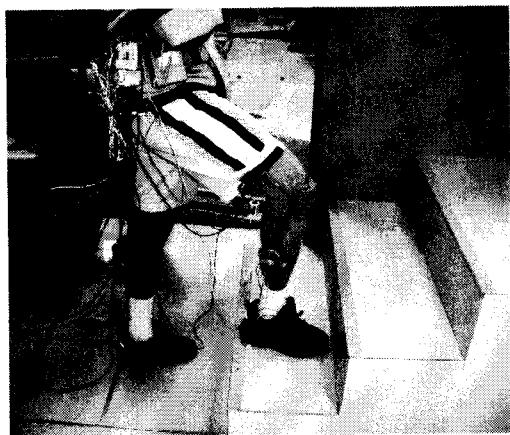
図10 筋電(EMG)測定装置

Fig. 10 Measuring of EMG

4. 2. 2 測定部位

データは、健常者と大腿義足使用者各1名づつに對し、大腿四頭筋とハムストリングスの筋電を取得した。義足使用者は、29才右大腿長切断、義足使用歴は7年で、日常はインテリジェント大腿義足を使用している。測定では、歩行中と足（義足）を空中に浮かした状態での筋膜隆中の筋電を取得した。

測定中のスナップを図11に示す。



※この状態で義足を浮かして筋膜隆する

図11 EMGの取得中の写真

Fig. 11 Recording of EMG

4. 3 結果

EMGは、大腿四頭筋とハムストリングスの2箇所のデータを取得した。大腿四頭筋のEMGは、大きな値が得られたが、歩行中の筋電と筋膜隆の筋電の区別等が困難であると考え、今回はハムストリングスのデータのみを使用した。

被験者は膝を曲げて義足を空中に浮かした状態で、筋肉に力を入れる（筋膜隆）。この時の断端のハムストリングスでの筋電データを図11に示す。また、義足での歩行中の筋電を図12に示す。

4. 4 考察

現状、市販化された義足には、空間に義足を持ち上げた状態で膝継手をロックすることはできるものはない。これを実現するには、使用者の意志に対応して発生できる信号が必要となる。EMGは、使用者の意志で発生できる信号があるので、このための有力な候補である。筋膜隆時のデータを取ると図11のように、使用者の意志通りにEMGを発生することができる。これを用いれば、義足の膝継手などの固定解除を随意に行うことができる。

しかし、図13にあるようにEMGは、歩行中でも発生していることが分かる。歩行中の遊脚相では、

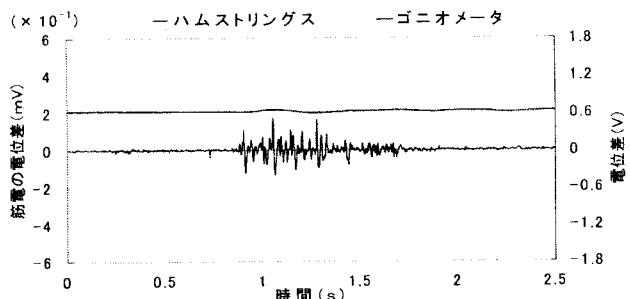


図12 筋膜隆での筋電位（ハムストリングス）

Fig. 12 EMG (Hamstrings) in muscle contraction and relaxation during lifting a prosthesis by a stump

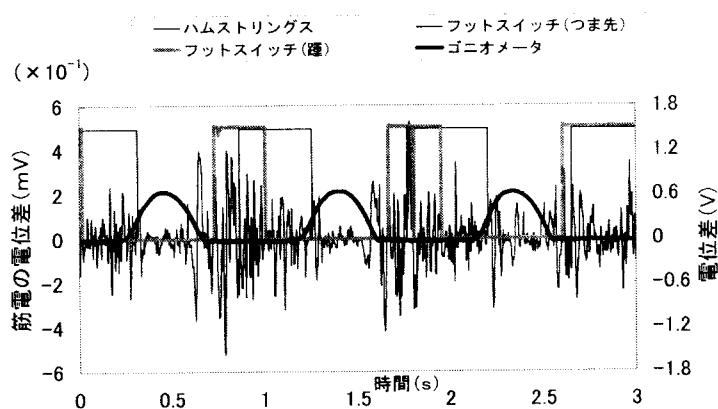


図13 義足歩行中の筋電位（通常速度）

Fig. 13 EMG (Hamstrings) of a stump during walking

EMGの発生は少ないので、遊脚相中に一定以上のEMGの発生があれば、膝の固定あるいは解除の信号に使用することは可能であると考えられる。

ただし、立脚相では発生が大きいので、EMGのみで、義足を制御することは難しいと考えられる。図13にあるように、フットスイッチや膝角度計（ゴニオメータ）などのデータと併用することで、遊脚相中に随意に義足をコントロールすることが可能であると考えられる。

随意制御義足では、二宮らによりソケット断端間の圧力を利用する方法も開発されている⁵⁾。この方法の有効性も報告されている⁶⁾が、随意制御するためにはソケットと断端間の密着性が安定して維持されなければならないことが問題点として指摘できる。EMGは、ソケットがない状態でも使用者自身の意思で発生できるので、より優れたものとなる可能性はあると考える。しかし、データにあるように、信号の安定性の問題、また、歩行などで意識しない状態でも発生することは、この方式の欠点であり、他の情報との組み合わせなどを含めて今後さらに検討を進める必要がある。

5. 荷重ブレーキ内蔵4節リンク膝継手の開発

5. 1 開発の経過

義足の立脚相制御の中で、最も重要な点の一つは、2. 2節の(1)で示した、「体重を義足にかけたときに膝折れせずかつ遊脚相に移行しやすい機能」である。

これを実現するものとして、ブレーキがかかるかどうかを決める軸（トリガ軸）を膝前方の下方に設

置した新しい義足の試作を前年度行った。しかし、機能的には予測通りの作動はするが、予備テストでは、ブレーキの効きが不十分だったので、今回より強くブレーキが利くように改良を実施した。

5. 2 荷重ブレーキ内蔵4節リンク膝継手

今年度改良した義足の概略図を図14に示す。

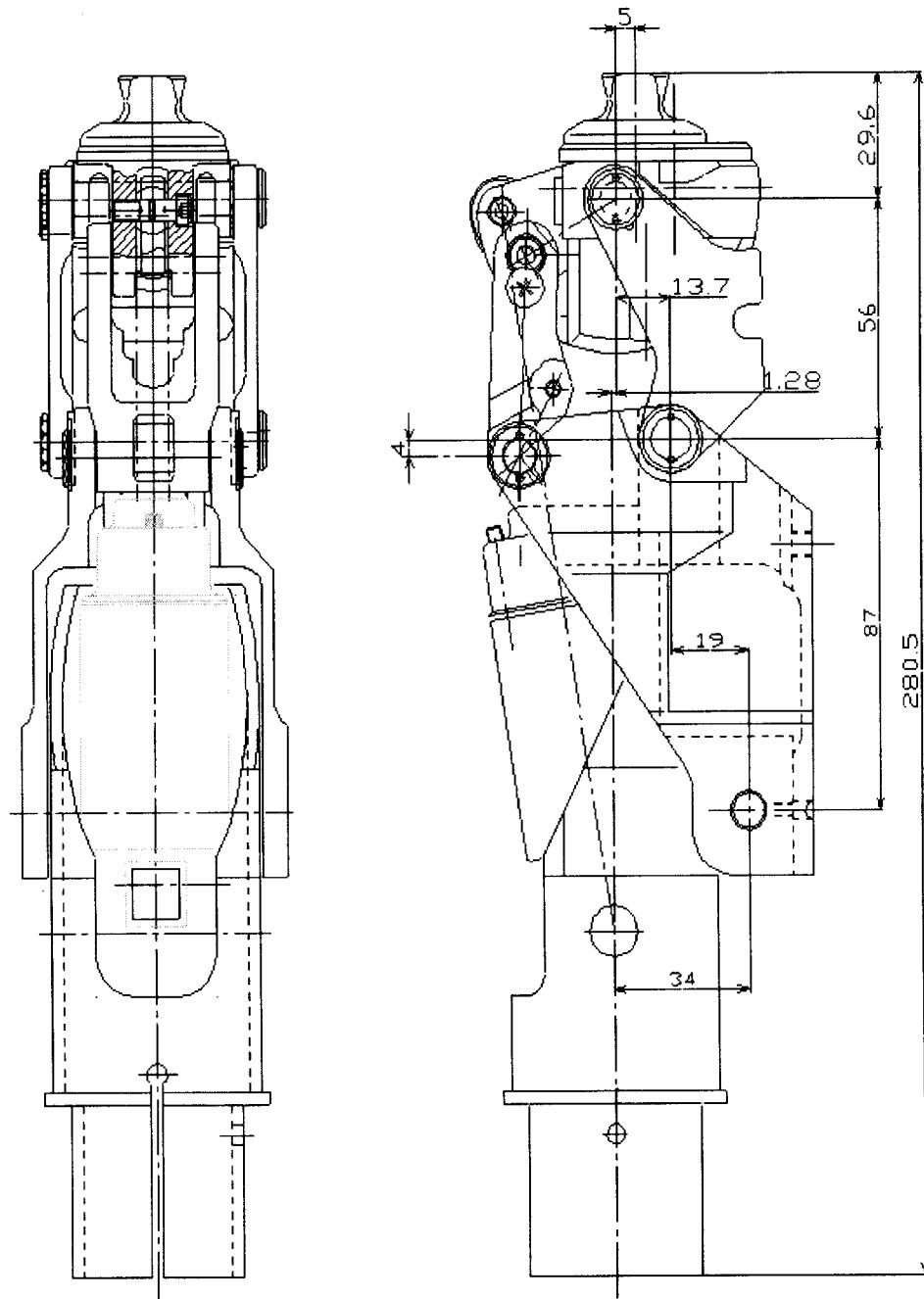


図14 荷重ブレーキ内蔵4節リンク膝継手

Fig. 14 4-bar linkage Intelligent Prosthesis
with a weight-activated mechanism

試作した膝継手は、トリガ軸の位置を調整できるようにしたことなどで重量は約1.7kgと通常の膝継手よりも重くなっている。今回は動作を確認するための試作モデルであり、トリガ軸が決定すれば、0.5kg以上の軽量化は可能であると考える。

本義足は、インテリジェント大腿義足としての機能や4節リンクの機能はそのまま有している。

4節リンクの大きな利点として、①立脚相での安定性、②遊脚相中の床と足部のクリアランスの増加があげられる。同欠点としては、①膝伸展が不十分でないと膝折れしやすい、②瞬間中心 (ICR: instant

center of rotation) 後方の荷重に対しては膝折れが生じる、ことである。今回開発した義足は、上記の利点を生かしながら、欠点を補うものである。

現在、4節リンク機構に荷重ブレーキが組み込まれたものの発表はないと考えられるので、本義足の先進性は高いものと考えられる。

図15は、試作した膝継手を示す。

また、図16から18は、本膝継手により作製した義足の歩行実験を示している。

被験者は、パイロンロードセルでの実験と同じ29才の男性である。

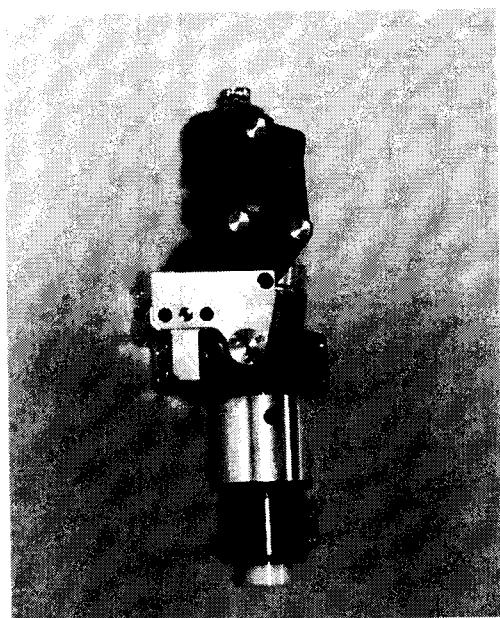


図15 荷重ブレーキ内蔵4節リンク膝継手

Fig. 15 4-bar linkage knee joint with weight-activated brake mechanism



図17 歩行実験 場面Ⅲ—踵接地—

Fig. 17 Test walking -heel contact-



図16 歩行実験 場面Ⅰ—遊脚相—

Fig. 16 Test walking -swing phase-

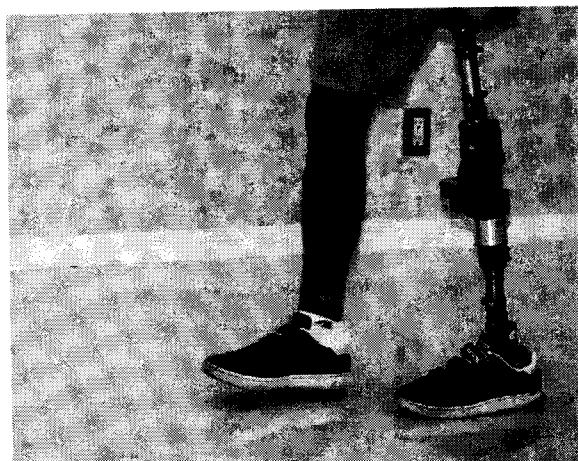


図18 歩行実験 場面Ⅲ—立脚相—

Fig. 18 Test walking -end of stance phase-

使用者の意見としては、以下の通りである。

①膝継手は重くなっているようである（事前に説明した）が重量の増加は感じない。

②荷重ブレーキがきいているかどうかは、当然ではあるが歩行中は確認できない。しかし、後方に体重をかけても膝折れしないので、後方荷重に対してはブレーキがきいていると思われる。

③ブレーキが良くきき、かつ、遊脚相への移行がスムーズである。従来の義足では、ブレーキを良くきかずと、遊脚相への移行時につかかる感じがあったが、これはそれがないので不思議な感じがする。

④ただ、座るときに、つま先荷重をするか、あるいは義足を浮かすかする必要があるのは、少し不便かと思う。

5. 3 今後の方向

今回の試用テストで、“体重を義足にかけたときに膝折れせず、かつ遊脚相へ移行しやすい”という機能と、“4節リンク機構”、“インテリジェント大腿義足”的利点を生かすものが開発できたと考える。上記④については、荷重ブレーキの感度を調整することである程度は解決できる。使用者の生活様式などによる個々の調整は必要であろう。

本機構においては、ブレーキ部分の工夫で、バウンシング機能を有することも比較的容易に可能であると考えられる。次年度は、本機構の有効性をさらに詳細に分析するとともに、バウンシング機能を付加するように改良を進めるか検討したい。

また、国際義肢装具協会（ISPO）世界大会などの発表などを通して、企業からの実用化を目指したい。

6. ブレーキ機構とダンパーを試用した新しい義足膝継手の開発

荷重ブレーキ内蔵4節リンク機構膝継手のブレーキ機構の特徴は、トリガ軸を膝下前方下方に置くことである。これにより、立脚相前半でブレーキが効き、同後半では効かず遊脚相への移行が容易となる。

この特徴をさらに進めて、荷重ブレーキを膝下前方下方に設置し、これとダンパーを組み合わせることで、立脚相制御の課題の一つであるイールディング機能（ゆっくり膝を折ってすわることができる機能、図2）が実現できると考えた。

このもとに試作した義足膝継手を図19、20に示す。

試作の結果、基本的な特性は確認したが、実際に義足に装着したときの使い勝手やイールディングの程度などについては検討を必要とし、今後の課題

として残されている。

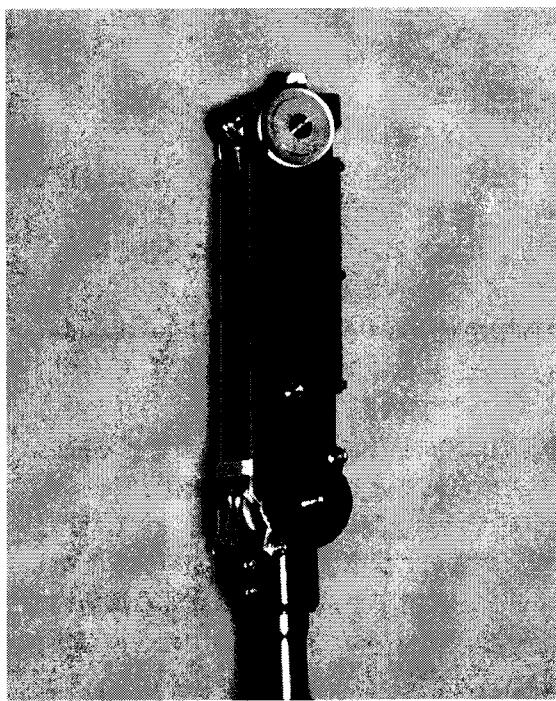


図19 イールディング機能を有する膝継手

Fig. 19 New prosthetic system which allow yielding function to amputees

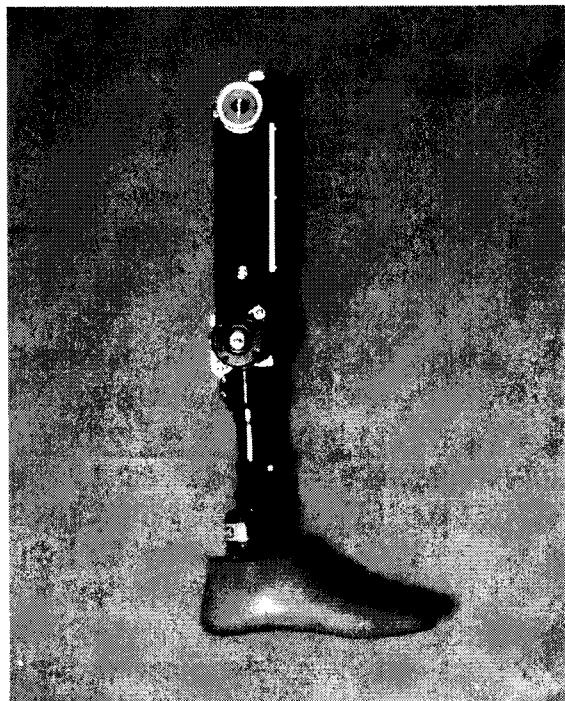


図20 足部を装着した新しい膝継手

Fig. 20 New system with a prosthetic foot

7. おわりに

本研究は、安全で快適な義足歩行を可能とするための義足システムの開発を目指している。

前年度までの使用者面談調査や文献調査などから、

(1) 体重を義足に掛けたときに膝折れせずかつ遊脚相に移行しやすい機能の必要性が確認された。

さらに、義足の高機能化のためには、

(2) ゆっくり膝を折って座ることができる機能

(イールディング機能)、

(3) 立脚相初期から中期において、膝を少し屈曲して歩行することができる機能

(バウンシング機能)、

(4) 随意的に膝の固定とそれの解除ができる機能、などが求められていることが分かった。

前年度では、上記(1)の機能を実現するため、4節リンク機構に荷重ブレーキを組み込んだ新しいアイデアの膝継手を試作し、基本的な機能性は確認したが、ブレーキの効きの点での改良が残されていた。

本年度は、これの改良を含めて、

- ①パイロンロードセルを用いた代表的な義足膝継手の分析、
- ②義足使用者の断端から得られる筋電の分析と随意制御義足の可能性の検討、
- ③荷重ブレーキ内蔵4節リンク膝継手の機能向上させるための改良
- ④大腿義足使用者による試用評価、
- ⑤イールディング機能を有する膝継手の試作、を実施した。

パイロンロードセルでの義足評価実験では、ブレーキ機構のトリガ軸を義足前方下方に持ってくることで、ブレーキのONとOFFが歩行中の適する状況で可能となることが確認できた。

また、義足使用者の筋電の分析から、義足を空間に浮かした状態でも使用者は随意にEMGを発生させることができ、これを用いれば、使用者の意思通りに膝の固定と解除ができる義足が開発できる可能性が見いだされた。しかし、EMGは歩行中にも発生するため、フットスイッチや膝角度計測装置との併用を必要とし、またそれにより、使用者の意思通りに義足の固定と解除ができる膝継手の開発の可能性が高くなると予想される。今後この機構を開発する義足に組み込むかはもう少し詳細な検討を要する。

前年度試作した荷重ブレーキ内蔵4節リンク膝継手の改良では、上記のパイロンロードセルでの実験を参考にトリガ位置を変えることで、ブレーキの

効きの感度が向上した。さらに、改良した膝継手で製作した義足により、試用実験を行い、機能的に有効であることを確認した。

さらに、この義足のアイデアを進めることで、イールディング機能を有する義足開発が可能であると考え、義足を試作し、基本的な機能はアイデアの通り働くことを確認した。

(謝辞)

本研究を遂行するにあたり、株式会社ナブコの奥田正彦氏、富樫勤氏、に適切な助言を賜りました。ここに謹んで謝意を表します。

(参考文献)

- 1) S. Blumentritt, et al., Transfemoral Amputees Walking on a Rotary Hydraulic Prosthetic Knee Mechanism: A Preliminary Report, JPO, Vol. 10, No. 3 (1998)
- 2) L. D. Fisher, G. W. Judge, Bouncy Knee: A Stance Phase Flex-Extend Knee Unit, Pro. & Orth. Intl. Vol. 9, No. 2, 129-136 (1985)
- 3) S. Blumentritt, et al., Design Principles, Biomechanical Data and Clinical Experience with a Polycentric Knee Offering Controlled Stance Phase Knee Flexion: A Preliminary Report, JPO, Vol. 9, No. 1, 18-24 (1997)
- 4) W. R. Dyck, et al. A Voluntarily Controlled Electrohydraulic Above-Knee Prosthesis, BPR 10-23, Spring, 169-186 (1975)
- 5) 二宮誠他、大腿義足のソケット内圧力センサーによる随意的な膝継手制御の可能性、第14回日本義肢装具学会学術大会講演集、14巻特別号、118-119 (1998)
- 6) 二宮誠他、坂道をあるける大腿義足の研究 第三報 膝継手の随意制御、第16回日本義肢装具学会学術大会講演会、16巻特別号、172-173 (2000)
- 7) 北山一郎他、大腿義足における下腿及び大腿部にかかる力とモーメントの測定と分析、第16回日本義肢装具学会学術大会講演集、16巻特別号、171-172 (2000)
- 8) 北山一郎他、足部運動式義足の開発研究、平成10年度福祉のまちづくり工学研究所報告集、143-153 (1998)
- 9) 北山一郎他、足部運動式義足の開発研究、平成11年度福祉のまちづくり工学研究所報告集、151-162 (1999)