マンーマシンシステムとしての義足のメカトロニクス化の現状と展望

兵庫県立総合リハビリテーションセンター
福祉のまちづくり工学研究所
中　川　昭　夫

1．はじめに

義足と切断者は，義足が使用者の身体の一部として機能するマンーマシンシステムを構成する点で，他のシステムと異なる。同等と考えられる身体状況の使用者が同じ義足を使用しても，その使いこなし，意欲，個々人のゴール設定などによって，発揮できる機能が異なることは，しばしば経験することである。筆者らが開発したインテリジェント大腿義足(IP)においても，それを使いこなすための義足訓練がプログラム化されることによって，当初予想していたものに比較して，飛躍的に高い機能を引き出すことができるようになった。また，IP と他の膝継手ではどのような差があるのかをエネルギー消費の観点から検討した。IP の原理を他の義足継手に応用することで歩行が容易になるものと考えられることから，股継手と足継手への初期の応用を試みている。この過程から義足のメカトロニクス化を展望する。

2．インテリジェント大腿義足と歩行の改善

ＩＰは大腿義足の遊脚相の，下腿部の大腿部に対する振動をコントロールするために使用される複動式の空気圧シリンダの弁開度を，１歩行周期の時間を計測することで歩行速度を推定し，それぞれの歩行速度に対して，予め入力して記憶させておいた複数の弁開度から選択して設定することによって，広い範囲の歩行速度の変化に対しても，歩行リズムと良好な歩容を保つことができることを目的に開発された膝継手である。

図１　インテリジェント大腿義足

ＩＰを開発した当初に，それまで使用していた膝継手をＩＰの膝継手に交換して，歩行速度の変化範囲を計測した。５名の被験者に対して，この実験を行ったところ，各被験者の最高の歩行速度は，78m/min から 96m/min の範囲で，いずれの被験者もそれ以上に速度をあげての歩行は不可能であった。その後，多数の大腿切断者がＩＰを使用するようになったが，そのうちの多くの使用者が 120m/min の歩行速度を獲得し，一部の使用者はジョギングや走行まで行うようになった。このような経過をたどった１例の，呼吸代謝によるエネルギー消費の変化を図３に示す。他院からトータルニーを使用して転院した当初は 70m/min 程度までの速度であったものが，IP に交換することで 90m/min まで低いエネルギー消費で歩行可能となった。その後，約２カ月の歩行訓練を経た後には，より速くより低いエネルギー消費で歩行可能となった。これは，当初のエネルギー消費量と比較して，はるかに少ないエネルギー消費で，コントロール群としてデータを収集した健常者群のばらつきの中に入る程度のエネルギー消費である。この段階まで訓練を行った被験者は，通常の歩行速度が健常者と同じ約 80m/min 程度となり，ジョギングを行うこともできるようになる。この変化が見られるようになった原因としては，従来の膝継手を使用していた場合には，膝継手の機能が低いため，歩行速度を変えて歩行することによる適度な運動負荷を与えることができず，体力が適応的に低下していたものと考えられる。IP を使用する場合には，体力を向上させることで，さらに有効な機能を引き出すことができたものと考えられ，この

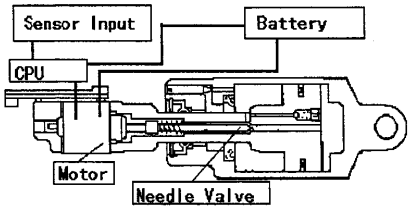

図２　遊脚相制御空気圧シリンダ

体力向上と使いこなしための訓練プログラム [1]が理学療法士によって開発された。呼吸代謝によるエネルギー消費では全身的な状況しかつかむことができない。そこで歩行分析によるデータからエネルギー消費を詳細に分析するために，関節モーメントと角速度の積によって関節パワーを求め，これを立脚相中に渡って積分することによってエネルギー消費を求めた。ここでは，健常者が模擬義足を使用して，膝継手を IP とトータルニーで交換して歩行した場合と，本人が模擬義足を使用せずに通常の歩行した場合の３種類について，健常側の各関節でのエネルギー消費を計算して比較した。この通常の歩行速度では，足首関節と膝関節では IP の値が小さいが，股関節ではトータルニーの値が小さい。同様の計測を３種類の歩行速度について計測した結果，低速では２つの膝にエネルギー消費に関しては差が少ないが，高速になるとトータルニーのデータが急速に大きくなることが確認された。

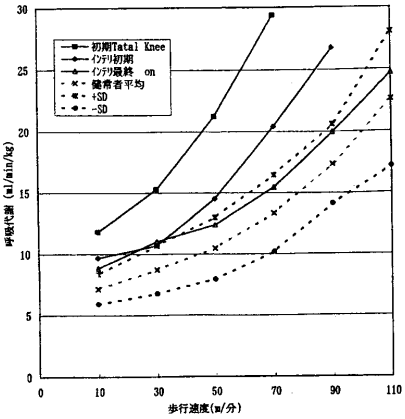

図３　訓練によるエネルギー消費の変化

３．インテリジェント大腿義足の原理の応用

IP の原理の一つは，小さなエネルギー源と小さなアクチュエータを用いて受動的素子の特性を変化させることで，高機能化を行うというものである。股義足は義足使用者自身が制御できない継手として，膝の他に股継手を必要とするため２重振り子となり，一般に歩行速度も遅く歩容も劣る。歩行分析を行ったところ，図４のように大腿部の屈曲の角速度が健常者のそれに比較して遅いことが明かとなった。一般の股継手では，歩幅を調整するために，屈曲を制限するスプリングが使用され，屈曲角速度を一層低下させる原因となっている。これを改善するためには，股継手の屈曲を加速する機構を導入し，その加速機構をコントロールすることが有効と考えられる。現在，この目的の股継手の初期の試作として，メカトロニクス化が可能な機構の開発を行っており，試歩行の結果，改善された歩行を行うことができる可能性を見ることができるようになった。まだ，マイコン制御を行うには至っていないが，その見通しを立てることができるところまで到達することができた。一方，足部についても，踵接地時の特性を変化できる初期の試作を行っている。

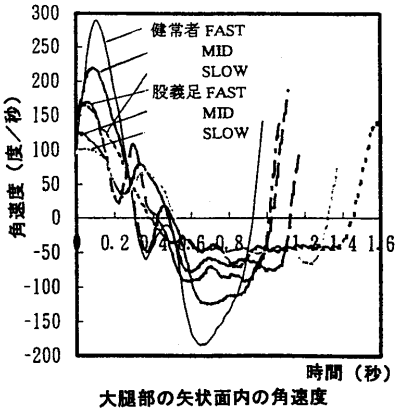

図４　従来型股義足の大腿部角速度

４．おわりに

現在開発に着手している股継手と足継手が実用化された場合には，歩行速度の変化や坂道など様々な歩行モードでの歩行が容易になるものと考えられる。開発初期にはこれらの継手はそれぞれ単独で動作させることになるが，システム的に連動させることで最適化できると考えられる。義足のように使用者の身体の一部としてマン－マシンシステムを構成する機器では，ハードウェアの開発と並行して，使いこなしのための訓練方法が開発されなければ充分な機能を発揮することが不可能と考えられ，そのためには臨床を担当する理学療法士等との共同研究が重要となる。

文　献

1) 長倉裕二他；定量化の手法を用いた義足歩行訓練の試み，日本義肢装具学会誌，Vol.14,No.1,pp59-68, 日本義肢装具学会，1998.