

股義足の継手の開発研究

Development of a new hip joint for a hip disarticulation prosthesis

中川 昭夫、大塚 博、中村 俊哉

NAKAGAWA Akio, OTSUKA Hiroshi, NAKAMURA Toshiya

長倉裕二、小嶋 功、町田勝広、高瀬 泉（兵庫県立総合リハビリテーションセンター）

NAGAKURA Yuji, OJIMA Isao, MACHIDA Katsuhiro, TAKASE Izumi (Hyogo Rehabilitation Center)

キーワード：インテリジェント義足、空気圧遊脚相制御、股義足

keywords: Intelligent prosthesis, pneumatic swing phase control, hip prosthesis

Abstract:

The gait with a trans-femoral prosthesis has been improved since the introduction of the Intelligent prosthetic knee joint which had been developed by our research institute. On the other hand the gait with a hip disarticulation prosthesis has been considered to be slow and different from that of normal persons. This research is to introduce the technology of the Intelligent prosthetic knee joint to the hip joint to improve the gait. The pneumatic swing phase control cylinder has been designed so that to accelerate the flexion speed of the thigh. The cylinder was equipped with a stepping motor and the controller circuit of the knee was used. The sensor to measure the gait cycle period was attached at the maximum flexion position. The gait was successful, the amputee could walk easier, could change the walking speed, the fastest walking speed was 90m/min which was faster than the subject's conventional prosthesis. The hip joint needs further development so that the locking mechanism should be incorporated to allow the joint to walk and to sit. Another problem is to develop a training program suitable for the hip amputees to fully utilize the function of the hip.

1. はじめに

本研究は、股関節から全ての下肢を失い、膝継手と股継手を機械的な継手で置き換える股義足に対して、当研究所が開発したインテリジェント大腿義足膝継手の技術を応用して、歩行が容易で歩行速度も向上し、疲労が少なく、さらに、歩容も優れた義足とするために、新たな股継手を開発するものである。インテリジェント大腿義足膝継手と同様に、股継手についてもインテリジェント化することで、股義足であっても良好な歩容を保ったままで歩行速度を変えながら歩行することができる目標としている。

平成8年から、股義足に対していくつかの方法を試みてきた。初期には金属スプリングを使用して歩行を改善できる可能性を確認した。このときには、スプリングの反発力による、静止立位でのソケットへの不快な圧迫感や、異なった歩行速度に対応できない等の問題点が残った。そこで、平成9年度には、空気圧シリンダを使用してこれらの問題点を改善する可能性を探った。この試作では、空気圧シリンダの反発力の効率を良くするために、股継手ソケット側の軸受ユニットを大きく設計したため、日常生活で使用する義足とすることができなかった。平成10年度では、この原理のメカニズムを小型化するための設計を行った。平成11年度は、前年度に設計した股継手を試作し、歩行実験を行うことで、問題点を明らかにした。また、前年度の実験によってインテリジェント化すれば、歩行速度の変化に応答させることができる見込みが得られたことから、この制御のアルゴリズムについても検討した。また、歩行に必要な角度変位幅は狭いことに対して、座位に必要な角度変位は大きいことか

ら、昨年度まではこれらを共用できるメカニズムをシリンダロッド部に組み込むことで、歩行時には狭い角度範囲で、座るときにはその制限域を越えて股関節を屈曲させることができるように設計したが有効に機能せず、何らの操作も必要とせずにこれらを両立することは困難であることがあきらかとなった。

平成12年度では、これまでの経験から、座位をとるためにメカニズムをシリンダロッド部に組み込むことを避け、空気圧シリンダの外部に設けることとした。その結果、シリンダ部は歩行に必要なストロークのみを考慮すればよいこととなり、小型化できることが期待できる。また、弁制御用のステッピングモーターを組み込むことで、インテリジェント股継手として歩行を試みることが可能となった。

2. シリンダの設計

股継手部のフレームは、前年度に試作したものを利用することとし、シリンダだけを試作することとした。したがって、ソケットと股継手の接続部の基本角度は60度である。シリンダとシリンダを収納するフレームに必要な機構は、大腿部の屈曲を加速するための空気圧シリンダ（空気バネ）、歩幅を規定するための歩幅制限機構、歩行時と座位の屈曲角度を切り替えるためのロック機構、また、インテリジェント化するための近接センサーなどである。また、インテリジェント化する際には、マイクロコンピュータを搭載した制御基板と電池も搭載しなければならない。これらのこと考慮して、図1のようなシリンダを設計した。これは、歩行時と座位のための屈曲角度を切り替えるためのロック機構をシリンダの下部

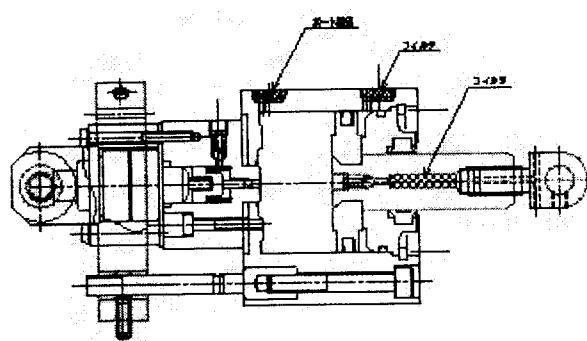


図1 インテリジェントシリンダ
Fig. 1 Intelligent Pneumatic Cylinder

に組み込み、何らの操作なしに、歩行時にはロックし、座位を取るときには、歩行時に発生する以上の力を加えることで、屈曲させることを期待したものである。昨年度のフレームを利用するためには、シリンダの上下の軸間距離は、同等となるよう設計している。また、下部のロック機構の中間部にステッピングモーターと弁を組み込んでいる。インテリジェント膝継手の空気圧シリンダの弁と異なり、股継手のシリンダの弁は大気中との間に設けられており、ピストンより上部の部屋は、特に利用していない。

3. シリンダのフレームへの組み込み

シリンダをフレームへ組み込んでユニットとした股継手を図2に示す。この股継手では、歩幅制限機構をもたないかわりに、利用していないピストン上部の空気室に厚みの異なる数種類のゴムリングを挿入することで、歩幅制限を行うこととした。このリングは、円の一部を切断することで、シリンダを組み込んだ後でも、追加や取り出しが容易であり、外部に機構を組み込むための加



図2 インテリジェント股継手
Fig. 2 Intelligent Hip Unit

工を必要としないことから、歩幅調節には有効な手段と考えられる。

センサーは、ナブコ製の膝継手に採用しているものと同じリードスイッチを使用し、磁石部を股ソケットユニットに、センサー部をカーボンフレーム外側に取り付けたジュラルミン製の金具に取り付けた。昨年度のアルゴリズムの検討結果に従って、このセンサーは股継手が屈曲し、最大屈曲に近づいた付近で働くように調整した。最大

屈曲角度に達するのは、遊脚相後期であり、かかと接地時期より少し前のタイミングである。図3は本インテリジェントシステムにおける制御ソフトウェアである。膝継手と同じ制御基板を使用していることから、同じソフトウェアを使用しているが、空気圧シリンダの内部圧力が最低になるのは遊脚相中期に、股関節の屈曲が最大になった時点であるので、この時点で歩行速度を評価して、歩行速度が変化している場合にはステッピングモーターによって空気圧の弁の位置を変化させるものである。また、正立位で一定時間経過した場合には、歩行が終了していると判断して弁を低速歩行の位置に移動して、内部の圧縮を開放することとなっており、これも、正立位でのソケットに対する不快な屈曲モーメントを避けるために、有効に働いている。

マイクロコンピュータ基板と電池に関しては、インテリジェント膝継手に使用されているものを、そのまま利用して、ユニット直下のパイプ部へ取り付けた。歩行の障害にはならないが、最終的な取付位置に関しては、再考を要するものと考える。

今回のフレームの設計は、図4のようにソケット取付角度を60度としたものである。これは、共同研究協定を結んだ英国プラッチフォード社

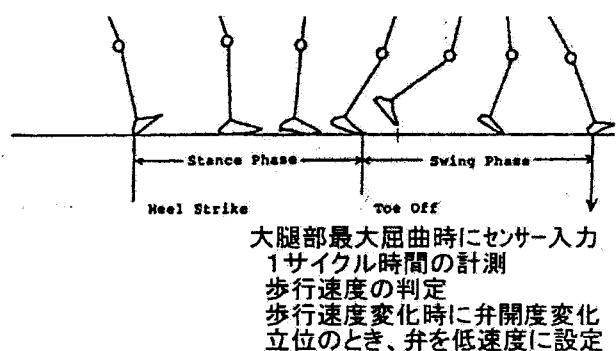


図3 コントロールシーケンス
Fig.3 Control Sequence

の義肢装具士の図5のような要求に合致したものであり、ソケットと骨盤部の適合が得やすとされているものである。しかし、この角度に合わせて継手部を設計すると、シリンダ上部の軸を取り付ける際にオフセットを大きくすることができず、正立位、すなわち、シリンダが最大圧縮された時点での股継手軸とシリンダ下部の接続軸を結ぶ直線に対して、シリンダ上部の接続軸と下部の接



図4 ソケットへの股継手の取り付け角度
Fig.4 Hip Unit attachment angle

続軸を結ぶ直線のなす角度は7.11度であることから、シリンダ内の空気が圧縮されて最大の反発力を発生するときに屈曲補助モーメントを発生するために用いることができるの、その12.4%にすぎず、体重によって圧縮した空気圧を有効に利用できるシステムとは言い難いものとなった。

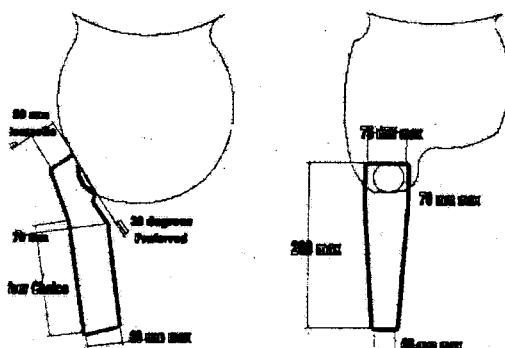


図5 義肢装具士による股継手の最大寸法
Fig.5 Maximum Dimension of Hip Unit by P0

4. インテリジェント股継手による試歩行

義足として組み立てた直後には、静的アライメント調節が行われたが、この段階で試歩行を行った場合には、シリンダの調節も、歩幅の調節も、また、座位をとるためのロック機構に関するもの、その効果や適切な調節方法が不明であった。その

ため、初めての試歩行では、大腿部の振り出しが不足し、歩幅の制限を行っていないための無駄時間が多く、さらには、ロック機構でのロック力が不足していたために、十分な歩行を得ることはできなかった。このため、まず、ロック機構を固定した状態で歩幅調整を行うこととした。シリンドラのストロークは 20mm のものを使用したため、このストローク全長を使用すると屈曲角度が大きくなりすぎる。そこで、実際の歩行を行なながらゴムリングの厚みと枚数を調節することで、最適なストロークを検討した。その結果、8mm の厚みが最適ということがわかり、ストロークとしては 12mm を用いることとした。

次に、シリンドラの弁の調整を行ったところ、早足に対応する弁開度は全閉であり、普通速度ではこれより 1 ステップだけ弁を開いた位置、また、ゆっくりした歩行ではこれよりさらに 1 ステップだけ弁を開いた位置が最適とわかった。ここにおける 1 ステップは 50 ミクロンの平行移動である。

この股義足においては、はじめは空気圧遊脚相制御膝継手（ブラッチフォード社 PSPC）を使用していたが、歩行速度を変化させ、特に早足で歩行できるようになると、かかとのけり上げが過度になって、歩行のリズムを確保することができなくなったため、膝継手もナブコ製のインテリジェント膝継手に交換し、適切なデータを入力することによって全ての歩行速度範囲で適切な歩行を得ることができるようになった。

本年度に試作したインテリジェント股継手用シリンドラを使用しての歩行の連続写真を図 6 に示す。被験者は以前より協力を得ている股離断の女性で、これまでのテストでも的確な装着感の評価を得ている。今回の評価では、骨盤で意識的に大腿部を振る操作を行わなくとも、自動的に大腿部が振り出される（圧縮された空気圧シリンドラが股関節の屈曲の初期を補助する）ことから、歩行が容易になったこと、また、歩行速度の変化に対しても、大腿部の屈曲補助が自動的に変化して追随することから、通常の速度であっても、あるいは、速い速度や遅い速度であっても、それに適した大腿部の振り出しが得られることなどが、主観的評価として得られた。なお、本被験者は、この義足を使用して、運動療法室の 90m の歩行路を 1 分 2 秒で歩行した。以前の評価において、従来の義足では最大の歩行速度は 76m/分程度であったことから、最大歩行速度においても、かなりの改善が得られたことが明らかとなった。

5. 歩行分析によるデータ

この義足による歩行では、デジタルビデオによる歩行記録を行い、そのデータをコンピュータに静止画像として取り込み、マウスを使用して座標を取り込むことで、各種の歩行データを得た。これは、義足による歩行への習熟が十分でなく、また、日常生活における使用ができるところまでの段階に達しておらず、各種の微調整の直後に歩行データを記録する必要があったからである。

本研究の最初の目的は、大腿部の振出を加速することで、大腿部の屈曲の角速度を健常者の歩行に近づけることであった。そこで、この角度計算をするために、義足の股継手軸、膝継手、足関節の座標を得る。また、股義足の股継手は立脚相での安定性と、座位を取る必要性からソケットの前方に取り付けられるが、ソフトカバーを取り付けた後の見かけの角度変位は大転子部（股義足の場合はソケットの外側になり、図 6 の歩行写真ではソケットに取り付けた白い四角のマークの部分）と膝継手を結ぶ直線がなす、見かけの大腿部と下腿部がなす角度であり、このために、先の大転子部の座標も得る。これらの 4 点から、大腿部の空間に対する角度変位や角速度、また、大転子部と股継手部、及び、膝継手部のなす角度から、股関節の相対的角度などを求めた。また、連続写真の間隔は 1/15 秒である。

これらの結果を図 7 から図 11 に示す。図 10 より、股関節が最大伸展（グラフ上の相対角度は約 80 度、グラフ上の計測時刻としてはおよそ 1.2 秒の辺り）になるのは短時間のみであり、また、図 7 からシリンドラ内で圧縮された空気圧によって大腿部が加速されるのは、立脚相において踵が離れて（ヒールオフ）から爪先が離れる（トゥオフ）までの間であると考えられること、また、大腿部の屈曲を加速した結果、速い速度の歩行では、前述の時期に 220 度/秒程度の屈曲角速度が得られており、所期の目的は達成できているように考えられる。遊脚相で股関節の屈曲が最大になるのは遊脚中期より遅れて、踵接地よりある程度前のタイミングであることなども明らかとなった。しかし、実際にはこの時期より前に近接スイッチからのセンサー信号が得られることから、遊脚中期にセンサー信号が入力されるものと考えられる。図 9 には、見かけの膝の屈曲角度変位と、実際の義足としての膝の屈曲角度変位が示されるが、速い速度での見かけの膝の最大屈曲角は 53 度程度となり、ビデオ撮影による記録と合わせて考えると、

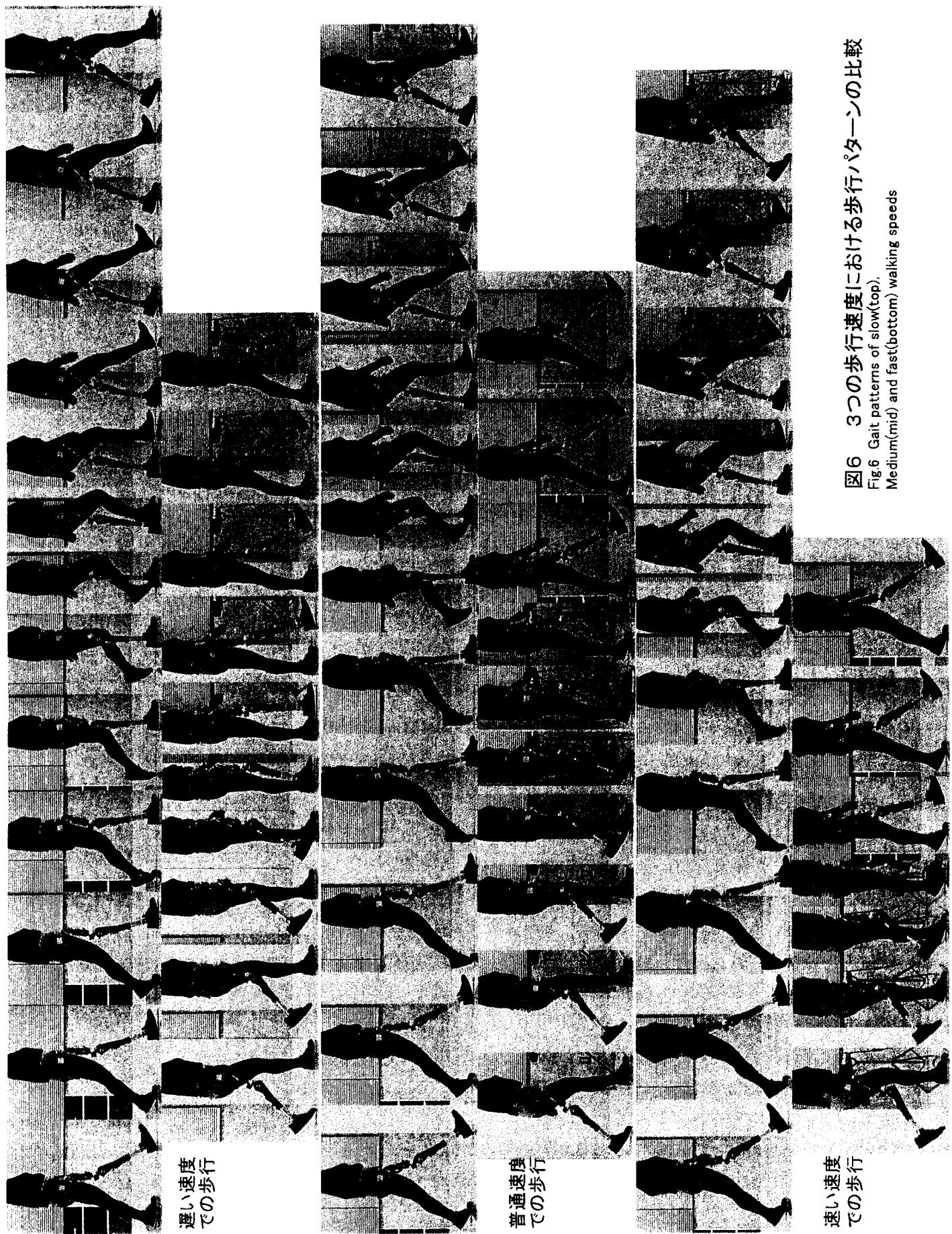


図6 3つの歩行速度における歩行パターンの比較
Fig.6 Gait patterns of slow (top),
Medium (mid) and fast (bottom) walking speeds

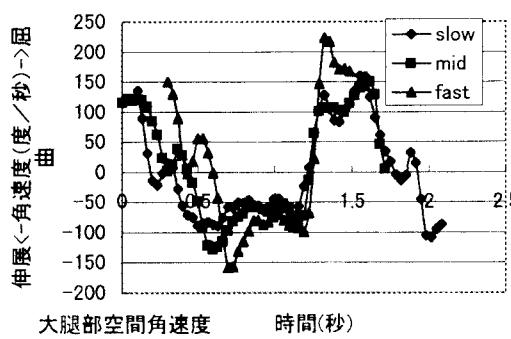


図7 大腿部の空間に対する屈曲伸展の角速度
Fig.7 Thigh Angular Velocities

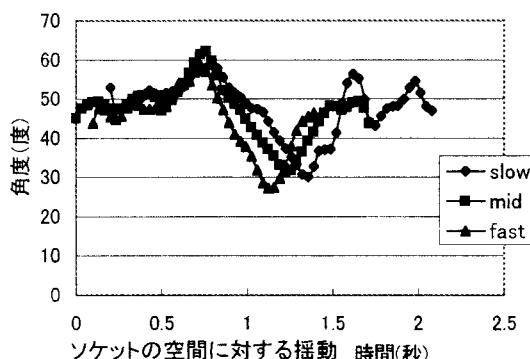


図8 股ソケットの空間に対する揺動角度変位
Fig.8 Socket Angular Displacements

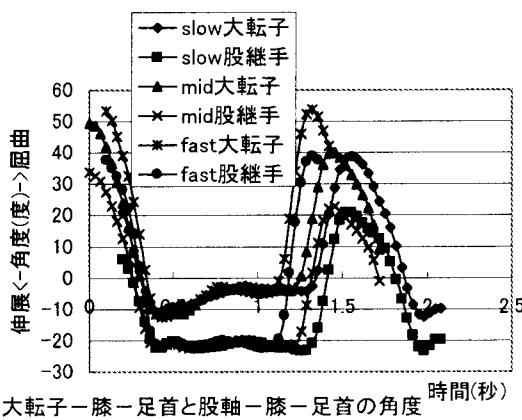


図9 大転子－膝－足首と
股継手軸－膝－足首の角度変位
Fig.9 Greater Trochanter-Knee-Ankle
Hip joint-Knee-Ankle Angles

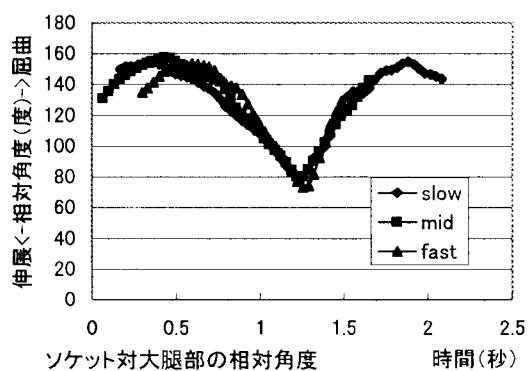


図10 ソケット対大腿部の相対角度
(股関節の相対角度変位)
Fig.10 Greater Trochanter-Hip joint-Knee Angles

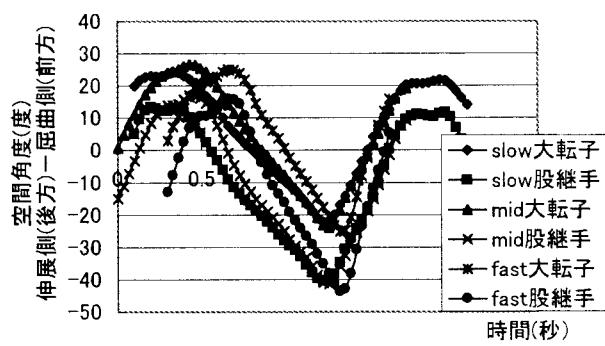


図11 大転子と膝軸、
股継手と膝軸を結ぶ2直線の空間角度変位
Fig.11 Greater Trochanter-Knee and Hip Knee Angular Displacement

歩容としてはかなり改善されている。図8は、ソケット（骨盤）をどの程度揺動させながら歩行しているかを示す。従来の股義足で速い速度を出そうとする場合には、積極的にソケットを揺動させることで大腿の振出を加速する必要がある。それに対して、この股継手では、体重によって圧縮された空気圧シリンダがその代わりの役目を果たすこと、ソケットを大きく振る必要がなく、歩行が容易であるとの主観的評価を得ているが、これがデータでも確認できたものと考える。

前述のように、股継手の軸位置に制約があるため、シリンダの効率が悪く、せっかく体重で圧縮された空気圧を十分には有効利用できていないことは、図7からもわかる。グラフのおよそ1.4秒のタイミングで最大速度が得られているが、この速度がもう少し長く持続していれば、更に歩行は容易になり、あるいは、より速い速度での歩行が可能になるものと考えられる。

6. おわりに（今後の課題）

座位をとるためのメカニズムについては、歩行時の遊脚相に働く股関節の屈曲モーメントでは動かず、座位を取ろうとして意識的に屈曲モーメントを働かせたときには、何らの特別な操作を必要とせずに動くような機構を狙ったが、特に速い速度での歩行における屈曲モーメントは予想以上に大きく、これを的確に働かせることはできなかつた。そこで、本年度の試作には組み込むことはできなかつたが、全く別のラチエット機構、ないしは、ロックーアンロック機構を導入し、使用者が何らかのロック解除の操作を行うことで、座位を取るための屈曲を許す構造とした方が、問題解決が早いとの結論に達した。なお、この操作は、メカニズムに直結した機械的ロック解除機構を手動で操作を行うことや、また、電動化してどこかでスイッチを押すことで介助するという方法、あるいは、ソフトウェア的に歩行状態でないことを検出することによって、自動的にロック解除をすることも可能であると考えられるが、当面は手動で、また、自動化することは将来の問題として検討を続けたい。

前述のように、シリンダで圧縮された空気圧を利用するための効率が不十分であること、歩行分析のデータからも推定され、また、図6の実際の歩行イメージと図11からも、遊脚相の中期での大腿部の屈曲角度が不十分で、義足の全長が短くならないことから、健側の伸び上がり歩行が減少していないことがわかる。これらを改善するた

めには、現状の寸法範囲内でオフセット量を大きくして、シリングの効率を改善することが必要と考えられる。さらには、股義足そのもののあり方まで含めて、再検討を行う必要があるものと考えられる。

本研究によって、股義足についてもインテリジェント化することによって歩行が楽になり、また、通常の歩行速度や最高速度が改善することが確認されたことから、今後は実用化を促進することしたい。