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　中村俊哉、大塚　博
NAKAGAWA Akio, NAKAMURA Toshiya, OTSUKA Hiroshi
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, OJIME Isao, MACHIDA Katsuhiro, TAKASE Izumi(Hyogo Rehabilitation Center)

Keywords：
Intelligent Prosthesis, Hip disarticulation prosthesis, Mechatronics

Abstract：
A smaller hip unit was designed and machined to be tested. The cylinder has been designed so that it fits with the requirements of walking and sitting. The piston rod has a telescopic mechanism that it is short when walking and is long for sitting. The mechanism worked well when the air inside the cylinder was compressed then started to walk. It didn't work enough when the gait started from standing. It needs to be designed again. The control algorithm of the pneumatic valve is considered to be similar to that of the Intelligent Knee. It is estimated that the same control circuit for the knee could be used for the Intelligent 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ことを目標としている。

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、静止立位でのソケットへの不快な曲げモーメントや、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部を大きく設計したため、日常の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股義足使用者が日常生活でも試用する事ができるように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、前年度にインテリジェント化することで、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する。

2. 小型化した股継手の試作

平成10年度は同年の報告書にもあるように、小型化した股継手を2種類設計した。股ソケットへの取付け面の角度を水平面から30度としたものと、60度としたものである。義足製作を担当する義肢装具士にとっては60度のものが使いやすいということから、平成11年度にはこれを試作した。設計された股継手を図1に、試作した股継手を図2に、これを義足として組み立てた股義足を図3に示す。このモデルでは、股継手の大腿部の長さを短縮することを目的として、ストロークの短い内径40mmの工業用空気圧シリンダを使用し、歩行時の動きと、椅子等に座位をとるときの動きを別の機構としたものである。歩行時の大腿部の鉛直線から伸展側への傾きを15度、屈曲側への傾きを20度とすると、空気圧シリンダのストロークは14.5mm程度であるため、シリンダのストロークは最大30mmのものを使用した。ピストンロッド内部を加工して2重のロッドとし、座位をとるときにはこの内部ロッド部が伸長するよう設計した。歩行時には内部ロッドは短縮状態になるよう、約1kg程度の力を持つスプリングで押しつ

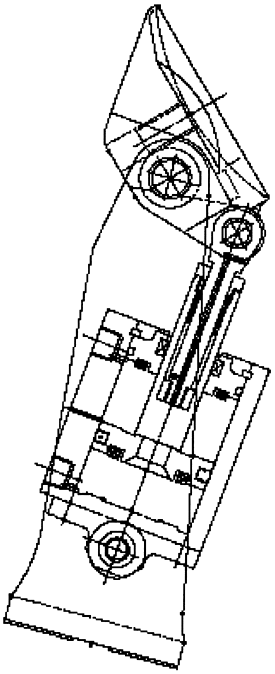

図 1：小型化した股継手の設計

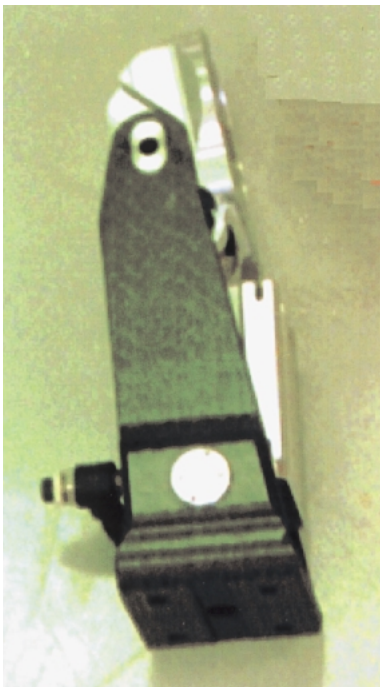

図 2：試作された小型股継手

けられている。

この機構では歩行時の歩幅を規定する屈曲制限機構を組み込んでいなかったために、炭素繊維のフレームに切り込みを入れて、これに当たるような機構を組み込むこととした。これを組み込んだ股継手を図 4 に示す。歩幅の調節は、組み込まれたねじを回して、この機構の長さを変化させることによって可能である。

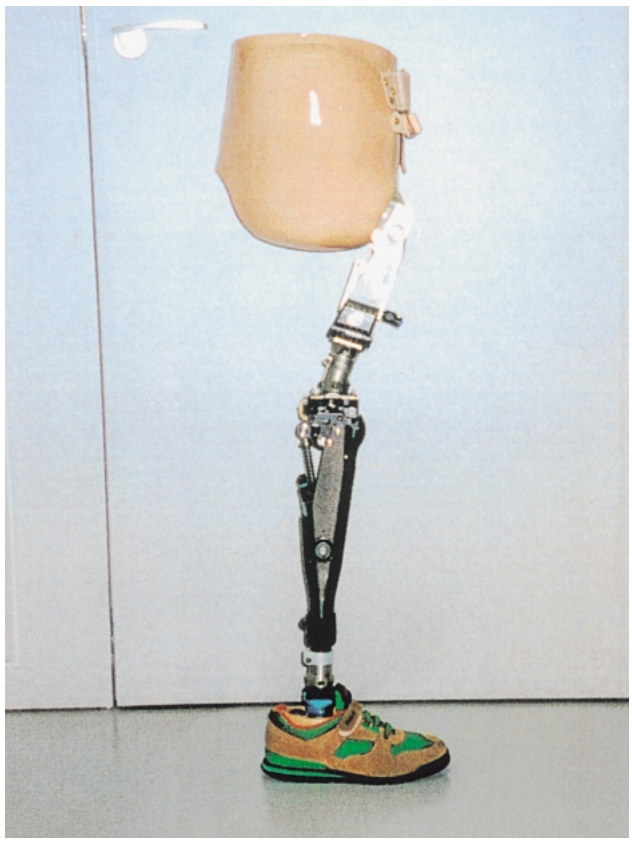

図 3：組み立てられた股義足

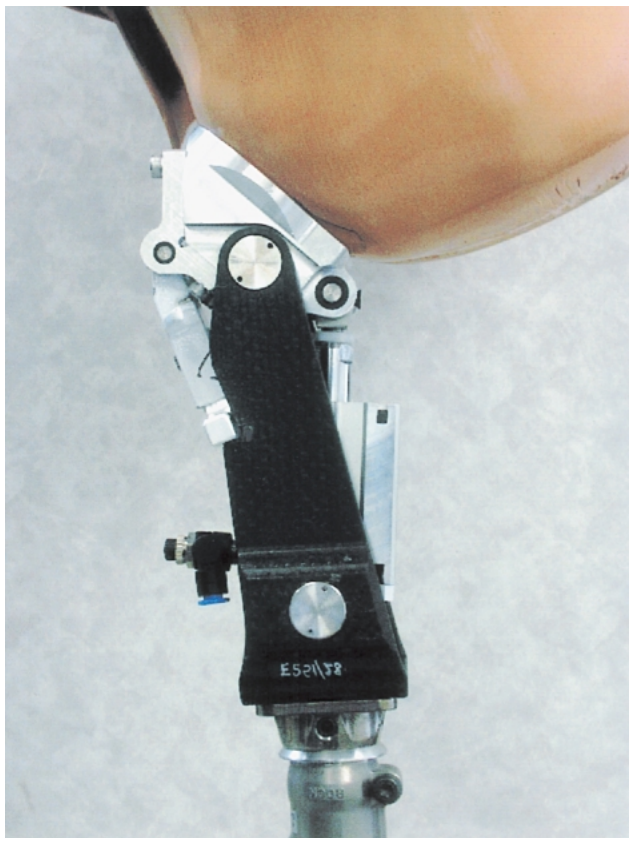

図 4：屈曲制限機構の組み込み

3. 小型化した股継手による試歩行

この股継手を組み込んだ義足の歩行を１名に試みた結果、空気圧の弁を全閉にし、屈曲位置を初期位置とし、そこから伸展して空気圧シリンダ内の空気を圧縮してから歩行を開始すれば、所期の目的どおりの動作を行うことが確認された。しかし、伸展位置を初期位置として歩行を開始すると、ピストンロッドに内蔵した内部ロッドが先に動き始めて、空気圧シリンダが所期の目的の動作を行わないことがわかった。これは、ここに使用したスプリングの圧縮力が 1kg 程度であるのに対して、ピストンやピストンロッドまわりのＯリングの摩擦が大きいことや、ピストン下部とシリンダ底部で形成される空気室に対して外気を取り込む弁を通過する空気の流動抵抗のため、その部分が陰圧になることの相乗効果によるものと考えられる。

次に、図５のように、これらの摩擦力や陰圧により発生する抵抗力より大きな力を発生する圧縮スプリングをシリンダ外部に取り付けた。このスプリングはストローク 10mm、最圧縮時 10kg 程度の力を発生する。この改造は既存のメカニズムへの後付による組み込みであったため寸法的な制約が大きいものであった。スプリングの自然長と圧縮時のコイルの最小厚さの関係から、圧縮時には期待したとおり、摩擦等よりも大きな力を発揮できたが、伸展して自然長に近くなるにつれて力が弱くなり、摩擦等の力の方が大きくなることが明らかとなった。

この改造を行った股継手を使用した股義足で歩行を行ったところ、伸展位置を初期位置とし空気圧弁を閉鎖して歩行する場合には、期待した結果が得られた。このときの歩行の様子を図６に示す。ただし、大腿部の屈曲は十分ではなく、前述のようにスプリングが自然長に近づいた位置では、十分な屈曲補助力が得られなかった。また、異なった歩行速度に対応させるために、空気圧弁をわずかに開いたところ、空気のリークと吸入の抵抗のために圧縮が低下して、歩行開始から数サイクルで空気圧シリンダの効果が低下した。歩行を停止して静止立位をとった場合には、被験者はソケットの曲げモーメントを感じるほどではなかったが、方向転換等を行うことを目的に義足を持ち上げた場合には、このスプリングによって大腿部が屈曲を開始することから、再度接地する場合には、そのまま体重をかけると膝折れが起こる状況が発生することが分かった。これらのことから、この設計のまま細かな改良を続けても、予定の動作を達成できる可能性が少ないことがわかった。

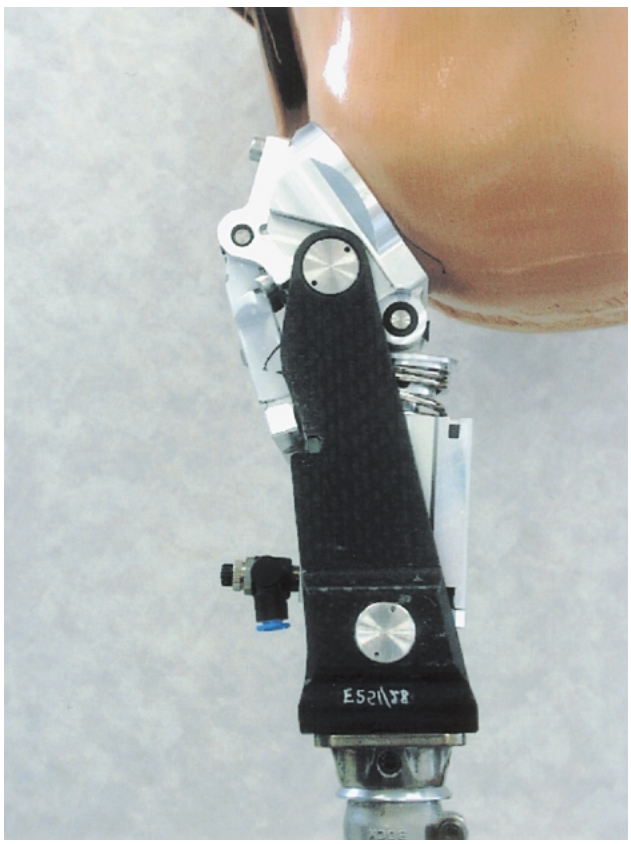

図５：スプリングの取り付け

図６：試歩行

4. 股継手専用シリンダと股継手の概念設計

前節までの試作では、工業用のシリンダを使用することを前提として試作を行ってきた。実用化される段階では専用のシリンダを使用することになる。まだ、試作はされていないが、イメージとしては円筒型のシリンダを使用し、底部にステッピングモーターを取り付ける形状として、図7のような外観が考えられる。インテリジェント化する場合には、シリンダの他に制御基板とティーチング時に必要な無線通信のアンテナ部、および、電池が必要となることから、これらの収納スペースも必要であり、次の段階へ進むためには総合的な設計を行わなければならない。

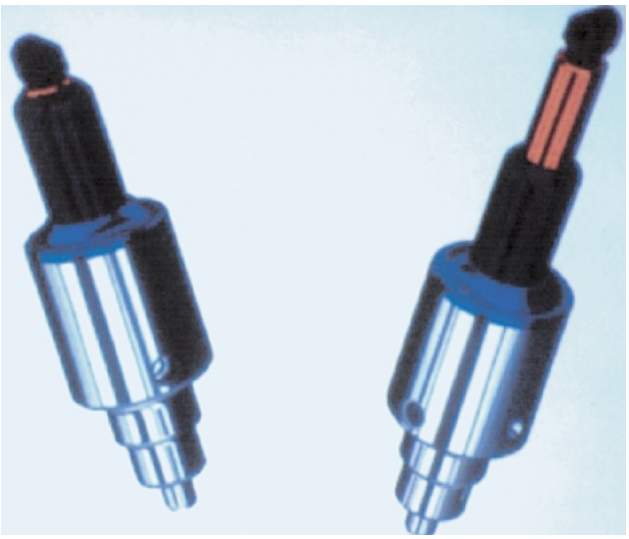

図7：インテリジェント股継手用空気圧シリンダのイメージ

平成10年度に設計し本年度に試作した継手では、歩行に必要なシリンダの運動範囲と座位に必要なストロークとを両立することを目標として、シリンダ単体について小型化することを試みたが、外部に前述の制御回路や電池が取り付けられて、結局は大型化することを考えると、無駄な空間にこれらの部品を配置することを考慮に入れてシリンダの設計を行うことが望ましいことがわかる。

5. 股継手をインテリジェント化するためのアルゴリズム

昨年度までの試作と歩行実験で、股継手においても空気圧シリンダの弁の開度を変化させることによって、歩行速度の変化に追随した大腿部の屈曲を得ることができるという見通しがえられた。これまでの実験は機械的なシリンダと弁機構を応用したものであったが、次の段階へ入るために、股継手を制御するためのアルゴリズムを検討する。

インテリジェント膝継手では、歩行時に膝伸展のタイミングから次の伸展のタイミングまでの1サイクルの時間が歩行速度を代表するものとしてとらえている。すなわち、歩行速度が上昇するに従って、1サイクルの時間は短縮することを利用している。義足使用者それぞれについて、1サイクルの時間と速度の関係は異なることから、ティーチング時に使用者それぞれの高中低3段階の歩行速度と1サイクル時間を計測し、歩行速度を5段階にわけるために、4つの閾値を計算し、5段階の弁開度を設定する。実際の歩行時には各サイクルの時間を計測して、それがどの速度域に属するかを判定し、異なる速度域であれば、膝が伸展している時期、すなわち立脚相において、ステッピングモータによって空気圧弁の位置を移動して弁開度を変更するよう指令を出す。これは、シリンダの内部圧力が最も低い時期で、弁の動作に対する抵抗が最も少ない時期でもある。1サイクル時間が一定以上の長さであれば、歩行を行っていないものと判定する。このときには、空気圧弁の位置を低速の位置に移動し、座位への屈曲を容易にするとともに、次の歩行開始に備える。その他のモードとしては、電池の残り容量が少なくなってきたときに、電圧低下によるコンピュータの誤動作や電流不足による弁の動作不良を防ぐために、空気圧弁を中（普通）速度に移動して、コンピュータの動作を停止するアルゴリズムを持っている。

これらの動作をインテリジェント股継手において考えると、股継手が伸展している時期、すなわち、立脚相においては、空気圧シリンダの内圧が最も高い時期でもある。その点を除いては、歩行速度の変化に対応する制御方式その他については同様と考えられる。したがって、負荷の少ない時期に弁の移動を行うためには、股関節が屈曲している遊脚相、あるいは、屈曲角度を制限する歩幅制限機構に近接スイッチを取り付けるとよいことが分かる。1サイクル時間が一定以上になると、立位であると判断し、空気圧弁を低速の位置に移動することも同様に必要である。この機能は膝継手における座位への屈曲を容易にし、次の歩行開始に対応するほかに、空気の圧縮力によるソケットへの不快な屈曲モーメントを軽減する目的がある。

これらの動作を考えると、膝継手の制御と異なるのは、膝においては立脚相で弁位置を変更することに対して、股継手では遊脚相において最も屈曲角度

がおおきくなる、歩幅制限機構にあたる角度で弁位置を変更することであり、他は同様である。したがって、膝継手用の制御システムがそのままで使用できるものと考える。

新しい股継手での歩行テストの観察からは、歩幅を変化させると、歩行速度の変化がより容易であるような印象を受けた。このことは、股関節の屈曲角度制限機構の長さを、歩行速度に合わせて伸縮させることで実現できるように考えられるが、大きな負荷がかかる屈曲角度制限機構に電動化した長さ調節機構を組み込むことで、強度的な信頼性が低下することと、そのためにモーターが2個になり制御回路が複雑になることや電池の寿命が短くなることを考えると、現在開発中の股継手に組み込むよりは、股義足でも歩行速度を自由に変化させることが十分に受け入れられるようになった後の段階で、高機能化するという方法をとるほうが、早期に実用化できるものと考えられるので、今回は見送ることとする。

6. 義足部品メーカーとの共同研究協定書の交換

新しい義足継手の開発においては、最終的に義足部品メーカーから製品化されて販売されることによって、はじめて、義足使用者の役に立つことになる。そのためには、義足部品メーカーとの共同研究と開発段階終了後の製品化をみこした提携が必要となる。インテリジェント大腿義足の場合には、基本特許を兵庫県社会福祉事業団と神戸製鋼所が共同所有し、特許実施権を国内のナブコと英国のブラッチフォード社に与えている。今回の股継手の動作原理がインテリジェント膝継手と同様であることから、同特許の延長にあると判断される可能性が高い。そのため、この股継手の研究開発が終了した段階で、特許実施権の範囲内でこの股継手を製造できるのは、これらの2社であると考えられる。このうち、ナブコには股継手の開発製造経験がなく、また、国内対象を中心とした製造数であれば、きわめて少数の生産量しか期待できない。ブラッチフォード社は、股継手の製造経験も長く、また、英国を中心にしてはいるが全世界相手に部品の販売を行っている関係から、機械的な股継手も年間200台程度製造している。これらのことから、ブラッチフォード社を共同研究協定相手として選択することとした。平成10年12月に同社を訪問して接触を開始して、本年度に英文の共同研究協定書を作成し、まず、社会福祉事業団の理事長のサインを得て、ブラッチフォード社へ送付し、同社の責任者のサインを得て、返送され協定が成立した。この協定は、研究開発を共同で進め、研究開発完了後は、ブラッチフォード社が独占的に製造することを認めるものである。

7. まとめ

身長の低い股義足使用者のために空気圧シリンダ部を小型化することを目標に行った設計では、あまり良好な結果を得ることは出来なかった。しかも、この試作ではインテリジェント化する際に必要となる制御基板やティーチング時に必要となるアンテナ、及び電池の配置に関しては考慮に入れていなかった。そのため、空気圧シリンダ部を小型化しても、最終的な大きさがどのようになるかに関しての検討を行わなかった。場合によっては、これらを配置することが困難で、全体としてはより大型になる可能性も考えられる。したがって、今後はこれらの部品を配置することを念頭において、空気圧シリンダ部を再設計する必要がある。ブラッチフォード社のインテリジェント膝継手の制御基板は34mm × 38mmであり、場合によって、シリンダの内部に配置することも不可能ではないと考えられる。平成12年度はこれらのことも視野に入れて再度股継手部を設計する予定である。