

メカトロニクスを導入した短下肢装具の開発研究

- MR流体を用いた特性可変継手を有する短下肢装具の試作 -

Introducing Mechatronic Technology into Ankle-Foot Orthosis Joint

- Prototyping an AFO with Variable Viscosity Joint using Magneto-Rheological Fluid -

赤澤 康史 中川 昭夫 小西 克浩 中村 俊哉

AKAZAWA Yasushi, NAKAGAWA Akio, KONISHI Katsuhiro, NAKAMURA Toshiya

上松 弘幸 野村 毅 田中 正夫(大阪大学・大阪大学大学院)

UEMATSU Hiroyuki, NOMURA Tsuyoshi, TANAKA Masao

キーワード :

バイオメカニクス、リハビリテーション、片麻痺、
装具設計、足継手、磁気粘性

Keywords:

biomechanics, rehabilitation, hemiplegia,
orthosis design, ankle joint, rheological behavior

Abstract:

Ankle-foot orthoses (AFOs) are essential tools for considerable part of patients with gait disorder. It is obviously understood that mechanical characteristics of AFO joint directly effect their walking function. We have discussed about relationship between hemiplegic ankle joints function and AFO joint characteristics during gait. In this article we developed and examined an ankle joint device using magneto-rheological fluid which rheological behavior could be controlled by changing intensity of magnetic field applied. A closed system consisted of a rotary cylinder and a tube was filled with MR fluid. We measured angular velocity of the axis and the moment required, and obtained the relationship of the resistant moment and the distance between the tube and a magnet surface. It had less holding moment against plantar flexion than that of shoehorn-type AFOs. We prototyped an metal-upright AFO equipped this joint device with magnet position control mechanism. Normal

subjects with this AFO acknowledged it was easy to walk when it made viscosity switching: viscosity low at initial stance phase and high at swing phase. Hemiplegic patients will attend trial walk with this AFO after risk assessments.

1 はじめに

片麻痺者など痙性のために足関節のコントロールが随意にできない下肢障害者にとって、装具継手の機能は歩行能力に直結する重要な問題である。歩行速度に合わせて自らの機械特性を変化させる義足膝継手は以前より提案され、一部はすでに市販・使用されている。一方、同じ歩行のためのツールである下肢装具の継手の高機能化については、いくつかの研究は行われるものの実用に至ったものはなく、油圧シリンダを用いて特性調節をマニュアルで行う足継手がようやく実用化される段階である。下肢切断者に比して下肢麻痺者の絶対数はかなり多い、すなわち潜在的市場が比較的大きい、にもかかわらず、装具研究への取り組みは総じて低調と言わざるを得ない。必要に応じて足関節モーメントを発生できれば、装具歩行が画期的に進展するはずであるし、動力が利用できない場合であっても、装具足継手の受動的特性が歩行に同調して変化することで従来にない歩容が実現される可能性がある。

前年度の研究では、片麻痺者の足関節特性（他動的背屈に対する底屈モーメントの大きさや速度依存性の変化）について定量的評価を試み、短下肢装具

(以下、AFO)の継手機能について考察を加え、継手の力学的特性(抗底屈モーメント)を可変とする必要性を指摘した。本報では、このような足継手の実効性を確認するため、特殊な流体を用いた継手を設計し、試作を行ったので報告する。

2 MR流体を用いた回転抵抗体の可能性実験

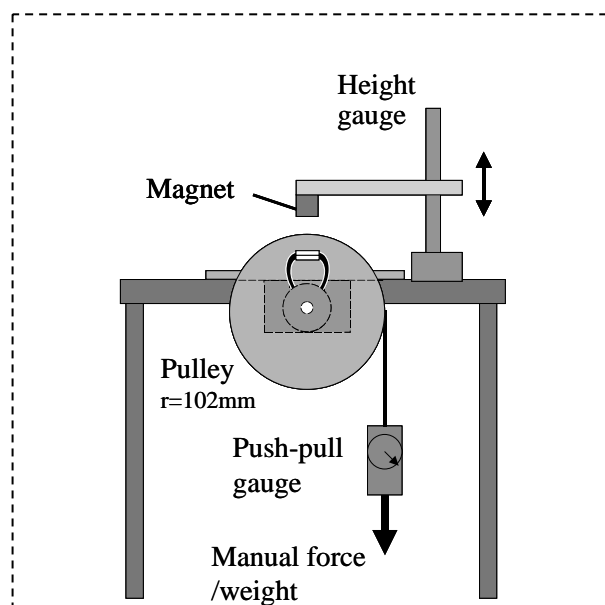
2.1 磁気粘性(MR)流体

MR流体は、直径がマイクロメートルオーダの強磁性体粒子を界面活性剤でコーティングしケロシンや水などの溶媒中に均一に分散させたもので磁気によって粘度が変化するという特徴を持つ。これより小さいナノメートルオーダ径の常磁性体粒子を用いる磁性流体とは区別されるが、どちらも磁気応答性(Magnetically Responsive)の意味でMRと表現されることもあるようである。MR流体には発生力が大きく応答時間が短い(10msec未滿)という特長もある。作動流体にこのMR流体を用い、与える磁場を調節することで回転に対する抵抗を少ないエネルギーで可変とすることが期待できる。

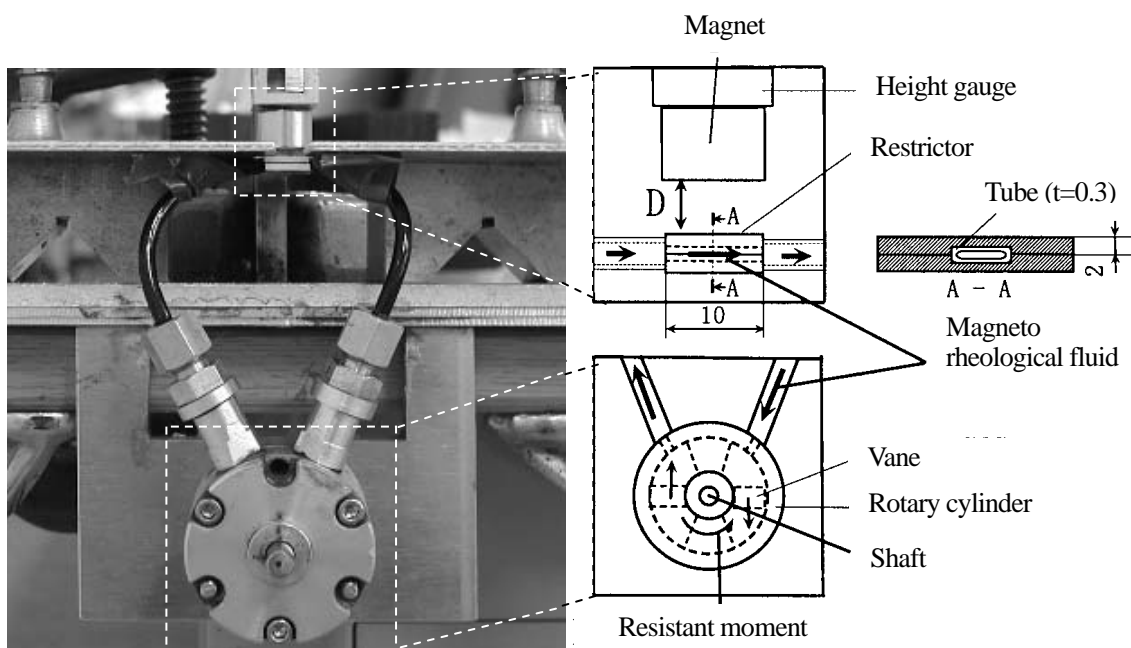
2.2 回転抵抗体の構成

空圧ロータリアクチュエータとして市販されているダブルベーン式のロータリシリンダ(SMC社CRB2BW20-90D)にMR流体(Lord社MRF-132AD)を

満たし、2ヶ所のポートを外径4mm、内径2.6mmのウレタンチューブで連結した。このチューブの中間部をジュラルミン板ではさみ、幅3.6mm、長さ10.0mm、深さ0.6mmの平行管路(絞り)を形成した。ここに磁場を与えることで流れの抵抗が変化し軸が回転する際の抵抗モーメントを変化させることが可能となる。



(a) Schema of total apparatus for the measurement



(b) Detail of the damper

図1 MR流体を用いた回転抵抗の基本性能確認実験 (a)全体構成 (b)詳細
Fig.1 Apparatus for measurement of the MR rotary damper characteristics

2.3 基本性能の確認実験

前節のシリンダを固定しネオジウム・鉄・ボロン磁石(表面磁束密度 470mT)を平行管路に近接させることとし図1のような実験装置を準備した。すなわち、ロータリシリンダの軸に半径 102mm の軽い滑車を取り付け、全体を固定用治具に固定した。はじめに、滑車に取り付けた糸をプッシュプルゲージを介して静かに引き、初動負荷を測定した。次に、初動負荷以上の負荷を錘を利用して与え、30~60 度区間における定常回転時の角速度をビデオカメラの記録画像から計算した。なお、磁石近接後、時間経過とともに流体内粒子が凝集し、粘性が増大することがわかっていたため、計測は迅速に行い、計測一回ごとに磁石を十分(約 12mm 以上)遠ざけた。これらの測定値から、回転軸まわりの初動(保持)モーメントおよび角速度に対する抵抗モーメントを得た。

2.4 結果と考察

2.3 節の実験結果を図2に示す。磁石がない場合の初動モーメントは 0.17 Nm であった。一定の磁場においては、角速度に対する回転抵抗モーメントはほぼ線形変化を示し、磁場が強くなるにしたがって傾き一定($1.2 \pm 0.08 \text{ Nm} \cdot \text{s} / \text{rad}$)のまま大きくなることがわかった。これは流体そのものの特性であるビンガム塑性が支配的であることを示している。初動モーメント(保持モーメント)すなわち、図2における各線の切片は最大約 3 Nm であった。以前計測した既存のプラスチック製短下肢装具の抗底屈剛性²⁾より、初期角度より5度底屈するのに必要なモーメントは、最もよく使用さ

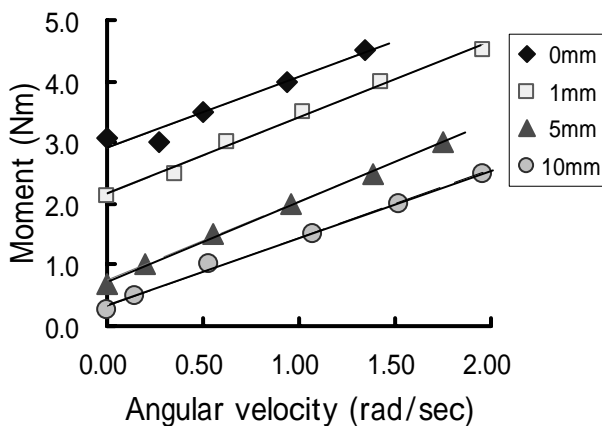


図2 磁石 - 絞り間距離による回転抵抗モーメント特性変化

Fig.2 Resistant moments vs. angular velocity/distance between magnet & restrictor

れている(かつ高剛性グループである)シューホン(靴べら)タイプで4~9Nmであったので、同等の保持モーメントを得るためには、磁場を強くするか、シリンダ径(ペーン面積)を拡大するなどの改良が必要であることがわかった。ただし、痙性足関節であっても、底屈許容時には背屈運動時より小さな底屈モーメントを発生³⁾するので、底屈許容時に今回の継手の保持モーメントを下回る一部のシューホンAFO装着者は対象となり得る。

3 継手粘性切り替え機構の検討

3.1 継手とするための加工

今回利用したロータリシリンダは元々空圧用であるため、わずかながら、動作に伴う液漏れが確認された。そこで、シリンダ本体の接合部にはシールを施し、軸部分は外側から別部材で覆うことで外部への漏れを防止することとした。なお、内側の部材は継手軸を装具軸部へ取り付つけるアダプタを兼ねた。

3.2 継手粘性切り換え方法

絞り部に対して磁石の位置を変化させるため、直流サーボモータを用いる。位置の調整は、プログラマブル IC (Parallax BasicStamp IISx) およびソフトウェア (PBASIC) を用いた。なお、前章の基礎実験では絞り部に対して垂直に磁石位置を変化させたが、装具取付時には側方への張り出しを防ぐため、絞り部およびチューブを含む面と平行に磁石を移動させる機構とした(図3)。モータ軸から 30mm の距離に磁石を取り付け、軸を 0.52rad (30deg) 回転させることで絞り部からの距離が 15mm となり磁場の影

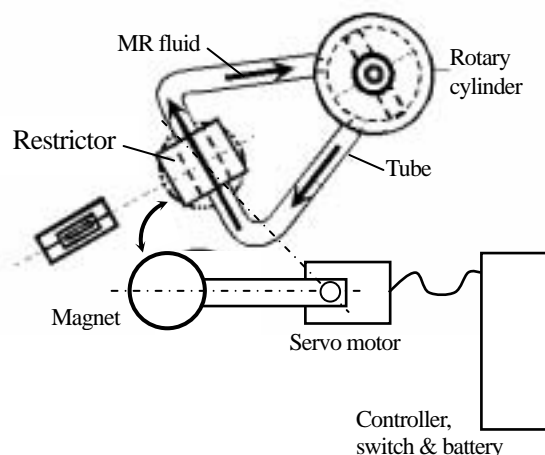


図3 粘性切り替え機構(模式図)

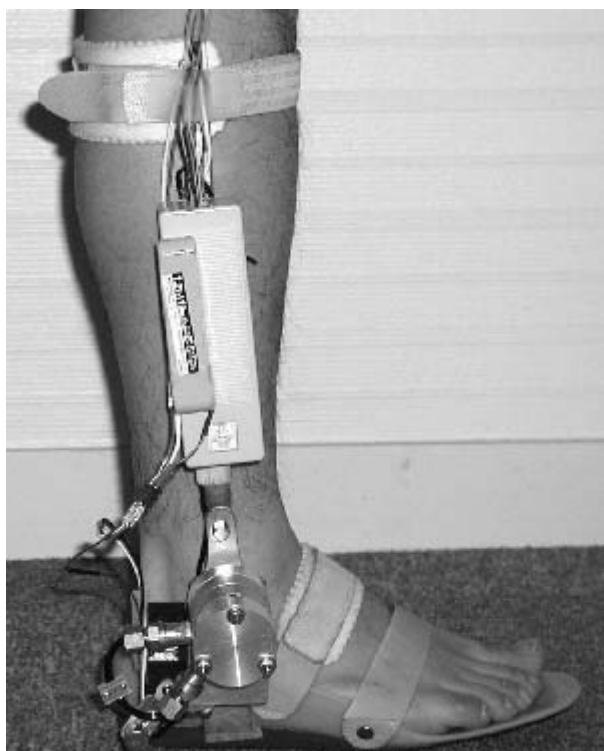
Fig.3 Schema of viscosity switching mechanism

響が与えられないことを確認した。この磁石位置を位置A、磁石が最も絞り部に近接する場合を位置Bとする。なお、両位置の切り替えに要する時間は約0.04秒である。

4 実験用短下肢装具

組み上げた実験用短下肢装具を図4に示す。両側金属支柱式AFOをベースに、継手軸を支柱に、継手管体をあぶみ部に固定した。全体の重量は約1.4kgとなった。通常のAFOに比して重く、手にとると重量感があるが、装着した健常者の主観によれば、重量および慣性モーメントとも歩行の支障にならないとのことであった。そこで、次の3条件を設定し健常者に5名による歩行実験を行った。条件I：磁石を位置Aよりさらに離しておく、条件II：磁石を位置Bのまま、条件III：立脚後期で磁石を位置Bに、踵接地直前に位置Aにマニュアルスイッチで切り換え(スイッチ操作を十分練習後)。その結果条件IIが最も歩きやすく、条件IとIIIは同程度の歩きやすさであるとの主観的評価を得た。一部の被験者においてビデオを用いて確認したところ、条件IIでは、条件Iと同様に踵接地後にスムーズな足底接地に移行しているが、条件IIIでは、足底接地までの時間が長くなっていることがわかった。

今後は、足関節底屈モーメント測定を含むリスク評価を慎重に行いながら片麻痺者で試歩行を行う予定である。



5 おわりに

MR流体を応用して短下肢装具の継手とするための基礎的検討を行った。まずは底屈に対する抵抗を2段階に変化させたが、本研究の機構を用いれば、歩行のさまざまなタイミングで無段階粘性調節が可能である。たとえば、底屈方向と背屈方向を区別して考慮できることから、立脚中期から後期にかけて背屈を制動するようなことも考えられる。このような継手粘性調節のためには下肢の運動状態を詳細にセンシングする必要がある。また、装具継手には大きさ・重量・音・耐久性について厳しい要求があるため、実用モデルに向けてこうした点も同時に取り組む必要がある。

謝辞

装具特性に関して助言を頂いた障害をお持ちの方、兵庫県立総合リハビリテーションセンター理学療法士諸氏に感謝いたします。また、MR流体の入手と実験装置への利用に関して貴重なご教授を頂いた岡山理科大学の森本正治先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷腰:「磁石とその使い方 第2版」, 日刊工業新聞社, 2000
- 2) 赤澤・中川・東藤・田中:「短下肢装具における可変関節粘性の検討」, 機械学会講演集, No00-35, 292-293, 2000
- 3) 赤澤・上松・東藤・田中:「装具継手要件検討のための片麻痺者足関節特性評価」, 第17回生体・生理工学シンポジウム論文集, 127-130, 2001



図4 実験用短下肢装具 装着時の様子(左) 継手部(上) (磁石を位置Aよりさらに離している)

Fig.4 Experimental AFO with variable viscosity joint