

# 身体負担の少ないパワーアシストスーツのための バイオミメティック膝関節

## Biomimetic Knee Joint for Shear Stress Free Power Assist Suit

2181011



研究代表者

大分大学 理工学部

教授

菊池 武士

### [研究の目的]

脳卒中片麻痺患者は、片麻痺の状態になることが多く、そのリハビリが重要である。下肢の麻痺に対するリハビリテーションは、歩行や立ち上がり訓練を中心として実施される。日本人の場合、風呂につかる習慣があることから深く座った状態から立ち上がることが出来ればQOLの向上にも有効である。

近年では、ウェアラブルロボットを用い本人の意思に基づく運動を反復することで、バイオフィードバックによる神経回路の再建が可能とされている。しかし多くのウェアラブルロボットはその関節中心が単軸回転であるため、すべての姿勢で生体関節と回転中心を一致させることは困難である。これまで我々は、生体膝の運動を模擬した新しい関節機構としてBiomimetic Knee Joint (BKJ)を開発し、空気圧人工筋と組み合わせることでパワーアシスト装置に応用した(図1, 2)。しかし、開発されたアクティブ型BKJは重量が2kgと重く、コンプレッサーを必要とした。本研究の目的の一つは、小型、軽量化を行うために人工筋の代わりに弾性体を使用することでパッシブ型BKJを開発することである。

しかしながら、上述のようなパワーアシスト装置に限らず、人間-機械間に接触面を持つ支援装置は、人間と機械との間でずれが生じたと



図1 Biomimetic Knee Joint (BKJ)



図2 BKJによる深屈曲の様子

き、補助に必要な接線力が生じていることが予想される。そこで、その負担を調べるために図3に示すように安価な素材を用いた使い捨てシートであるShear-force Sensitive Sheet (SSS)を提案した。

SSSは表面に凹凸を持った凹凸シートと、転

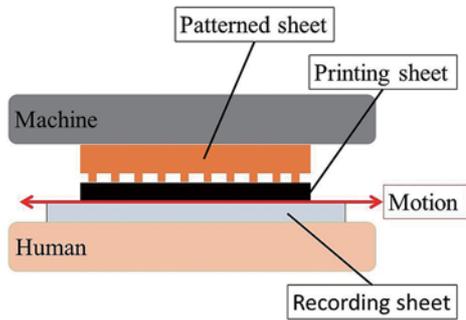


図3 Shear force Sensitive Sheet (SSS)

写用インクが塗布された印刷シート、およびせん断方向への相対的なずれによる引っかき痕を記録するための記録シートの3つのシートを積層した構造となっている。記録シートは、人肌の表面に貼り付けて固定させて、印刷シートと記録シートの間で相対運動を起こすことにより引っかき痕を転写させる。

本研究のもう一つの目的は、SSSの引っかき痕の画像特徴量からせん断方向の力とずれ量を精度よく推定することである。そこで本研究では、一定の条件下でSSSの最適な形状、材質を調べられるように専用の試験装置を開発した。また、本装置を用いたせん断試験の結果からせん断方向の力とずれ量を求めるモデル式を作成した。

## [研究の内容, 成果]

### 1. パッシブ型 BKJ の開発

#### 1.1 膝関節軸の運動モデル

膝関節の屈伸運動は転がり運動とすべり運動の複合運動である。完全伸展位から屈曲初期は転がり運動のみで、徐々に滑り運動が混じり、最終的に滑り運動のみになる。白石ら（機論C, Vol. 77, No. 782, 2011）は、スクワット時の膝関節をX線動画撮影し、その動きを分析している。この文献のデータを直線近似することによって膝関節運動モデルを作成した（図4の実線）。図の横軸、縦軸はそれぞれ脛骨に対する大腿骨の前後方向および上下方向の位置を表す。また、数値は膝関節の屈曲角度を示して

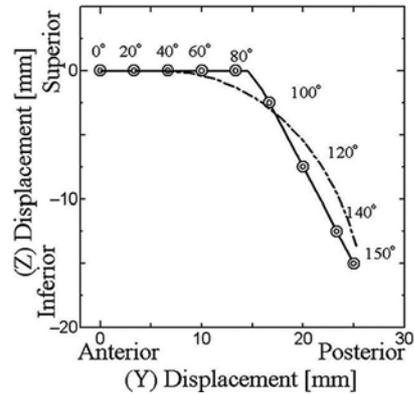


図4 膝の運動のモデル

いる。この運動モデルを設計目標として新規な機構を開発する。

#### 1.2 基本構造

図4の運動モデルを近似するために、図5の機構を考案した。本機構は、大腿部に連結された可動ギアと大腿部に固定されたケース、および固定ギアからなる。ギアが離れることを防止する目的で、回転中心にはピンが貫通し、これが長穴の中を運動する。固定ギアは、直線部と円弧部からなる。直線部は初期の回転運動に対応し、円弧部は回転+すべり運動を近似する（図4の一点鎖線）。

本機構では、トーションバネを用い、膝の屈曲時にポテンシャルエネルギーを保存し、立ち上がり時に使用する。図6に試作を示す。ケースおよびギアは三次元プリンタを用いて成形し、

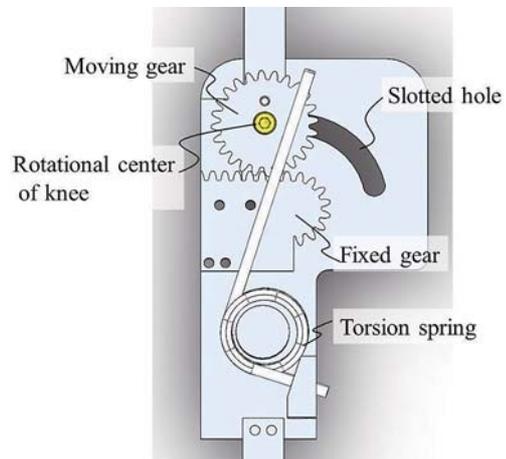


図5 パッシブ型 BKJ の基本構造

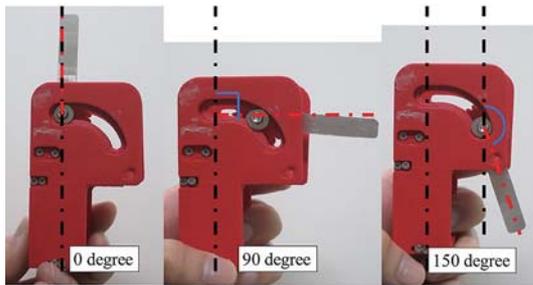


図6 パッシュ型BKJの動作

ピンとリンク部品はアルミ合金を用いた。ギア  
のモジュールは1とした。今後、本機構を応用  
したアシストスーツを製作し、その効果を検証  
する。

## 2. せん断力評価シート SSS の評価モデル

### 2.1 標準試験装置の開発

SSS の基礎実験の再現性を高めるための試験  
装置を開発した。まず、負荷に関する計測範囲  
を決定する必要があった。例えば、図1のパ  
ワーアシスト装置によって立ち上がり支援を行  
う場合、膝の屈曲角度が100度の時で最大32.5  
Nmの補助モーメントが発揮される。これが大  
腿部のカフ部に作用すると仮定すると、平均圧  
力は約0.05 MPa程度である。押具の形状を円  
形で直径20 mmとすれば、押具に16 Nの荷重  
が作用する。そこで16 Nの20%~200%程度  
を測定範囲と設定した。試験装置の基本構造を  
図7に示す。ステッピングモータとして、シナ  
ノケンシ製 PWSA-U42D1-SD (ステップ角  
0.18°) を用い、ボールねじおよびリニアガイ  
ドによって直動運動に変換した。ボールねじの  
リードは5 mmで、最小移動距離は2.5 μmで  
ある。ステッピングモータの駆動によって水平  
テーブルが左右に移動するが、これに垂直な方  
向に一定の負荷を作用させる必要がある。そこ  
で鉛直方向にもリニアガイドを設け、ここに重  
りによる一定負荷を作用させる。重り無し  
の状態では縦方向の重量は約2 N程度あり、  
これが試験可能な最小重量となる。力の計測  
には、テック技販製小型三軸力覚センサ USL06-

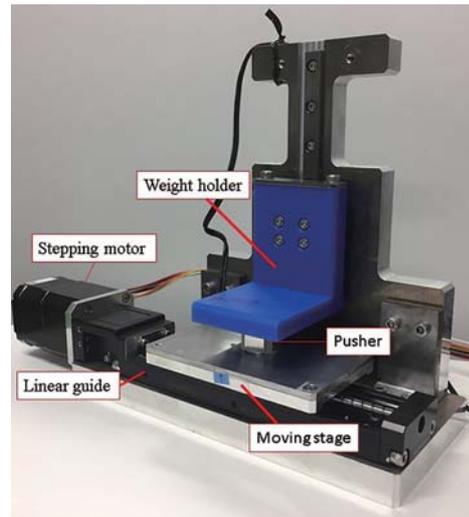


図7 試験装置の構造

H5-50N-A ( $F_x \cdot F_y \pm 25$  [N],  $F_z 50$  [N]) を  
用いる。

### 2.2 測定対象

60番のサンドペーパーを凹凸シートに使用  
し、プラスチックカーボン紙を印刷シートに使  
用した。押し具が与える圧力の条件は5 kPa,  
10 kPa, 30 kPa, 50 kPa, 70 kPaの5つに設定  
した。ずれ量は1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm,  
10 mmに設定した。本実験では人肌に近いヤ  
ング率(200 kPa)を有するウレタン樹脂( $E=$   
100 kPa)とフォーム材( $E=300$  kPa)を使用  
した。

### 2.3 画像処理と抽出したパラメータ

引っ掻き痕が転写された記録シートは、ス  
キャナによってグレースケール画像に変換し、  
適応型2値化処理で2値化する。その後エッジ  
抽出、及びハフ変換によって直線検出を行う。  
検出されたラインを測定座標系におけるベクト  
ルとして定義し、平均ベクトルの長さ、引っか  
き痕の正規化面積率、全ライン数、ラインの平  
均階調値、平均半径等の画像特徴量を算出した。

代表的な引っかき痕の画像を図8に示す。左  
がスキャナで取り込んだグレースケール画像、  
右がハフ変換後の画像である。赤線が検出され



図8 SSSの引っかき痕(左)と画像処理(右)

たラインで緑のラインが平均ベクトル、青い線を条件付き最大ライン長さ、黄色実線の円はライン画素の重心の値を中心とする平均半径円、黄色破線状の楕円は近似楕円である。

## 2.4 モデル化

画像処理によって算出される種々の画像特徴量から、SSSに作用するせん断力およびずれ量を推定するモデル式を検討した。

まず、画像特徴量同士の相関係数を調査し、相関係数が0.7以上の説明変数の組はいずれか片方のみを採用することで共線形性を排除した。その結果、正規化面積率(シート面積に対するライン抽出領域の面積率)  $A[-]$ 、平均ライン長さ  $L[\text{mm}]$ 、99%ライン長さ(抽出されたラインの内、長さでソートした時に上から99%の値)  $l[\text{mm}]$ 、ラインの平均階調(ライン抽出領域のグレースケール階調値)  $c[-]$ 、平均半径(ライン抽出領域を円近似した時の半径)  $r[\text{mm}]$  の5つであった。これらを独立性の高い説明変数として、せん断応力  $\tau[\text{kPa}]$  とずれ量  $\delta[\text{mm}]$  を推定するために重回帰分析を行った。結果として、次式を得た。

$$\tau = 45.03 + 134.27A - 1.69L + 0.02l - 0.26c + 0.58r \quad (1)$$

$$\delta = -56.69 + 26.94A - 0.79L + 0.47l + 0.39c - 1.20r \quad (2)$$

決定変数としていずれも0.7程度であり、高い線形性を示した(図9, 10)が、改善の余地はある。今後、SSSの材質や成型法の再検討を行うことで、更なる高精度化を実現したい。

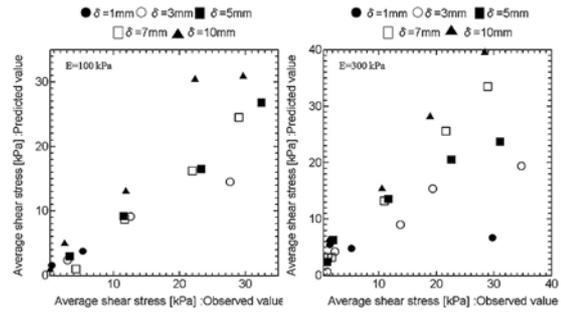


図9 推定結果(せん断応力)

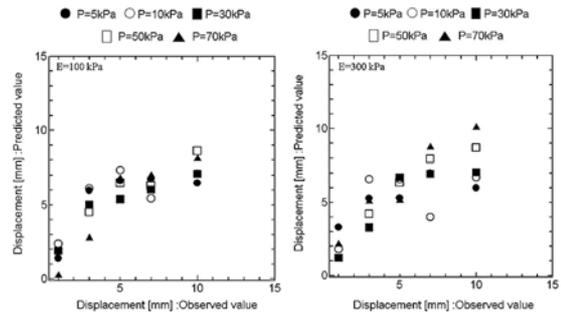


図10 推定結果(ずれ量)

## [今後の研究の方向, 課題]

本研究ではBiomimetic Knee Joint (BKJ)を用いたパッシブ型アシスト装置の関節部品を新たに開発した。今後、本機構を応用したアシストスーツを製作し、その効果を検証する。

また、Shear-force Sensitive Sheet (SSS)の評価モデルを確立すべく、その標準試験装置を開発し、人肌に近い弾性率の対象面上のせん断力とせん断方向のズレを、SSSの引っかき痕の画像特徴量から求める方法を提案した。提案したモデルは高い線形性を示したが、改善の余地はある。今後、SSSの材質や成型法の再検討を行うことで、更なる高精度化を実現したい。

## [成果の発表, 論文等]

- [1] 福岡賢治, 井上智晶, 阿部功, 菊池武士, 生体関節の力学特性を規範としたパッシブアシスト装置の開発に関する基礎研究, 日本機械学会2019年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, in press (2019.6, 広島).

- [2] 井上智晶, 阿部功, 菊池武士, 生体模倣型膝関節を用いた立ち上がり支援装置の開発, 日本機械学会九州支部 北九州講演会, pp.86-90 (2018.9, 北九州市立大学)
- [3] 井上智晶, 押本泰貴, 阿部功, 菊池武士, せん断応方向の負担を定量化する安価な検出シートの開発, 日本機械学会 2018 年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-G02 (2018.6, 北九州).
- [4] 大分大学, 菊池武士  
膝用支援具, 出願準備中