

[研究助成 (A)]

歩行アシストに滑らかさと柔らかさを吹き込んだ
ロボティック・ハンドフリーステッキ

2251020

研究代表者
(助成金受領者)

長崎大学 大学院総合生産科学研究科 (工学系)

准教授 田 中 良 幸

[研究の目的]

超少子高齢化が進む日本の総人口(約1億2,300万人)の約30%が65歳以上の高齢者であるが、70歳を過ぎた頃から歩行に難を感じる割合が急増することが報告されている。その中で、歩行補助具として「杖」を使用する割合は、健康な高齢者では10%弱、自立して歩行はできるがサポートを要する高齢者では約60%にも達する。

歩行機能を効果的に補う「杖」は手軽で便利なツールであり、少なくとも古代文明が発祥してから現在の科学文明に至る約6000年の長い間、その形状と素材を変えながら幅広く使用されている。しかしながら、「杖」を使用すると同時に少なくとも一方の手が塞がれるため、ちょっとした荷物を両手で持って運ぶシンプルな動作を含めて、上肢を使う日常的な作業は少なからずの制約を受けることとなる。そして医学的には、「杖」の使用で手首・肘・肩に加わる負荷による上肢関節の疾患や、杖の過剰依存による歩行姿勢や重心の大きな変化による下肢関節の疾患を誘発する可能性も指摘されている。

そこで本研究では、「杖」に現在の科学技術を吹き込んだ新しいロボット装具を考案し、使用者の手を塞ぐことなく使用できる「ロボティック・ハンドフリーステッキ」の実用化を最終的な目的として取り組んでいる。これまでに安価なロボット部品を用いて幾つかの試作機

を作成してきたが、部品性能と制御精度の制約などにより、杖の硬さによる装着部への過度な反力負荷や、杖の動作タイミングのズレによる不自然さが入り交じり、安心して使用するには幾つかの大きな問題があった。このような問題を一掃するため、本研究課題では「ロボティック・ハンドフリーステッキ」の動きに滑らかさと柔らかさを持たせることを目的とした。

[研究の内容、成果]

本研究課題の目的を達成するため、高性能小型DDモータ(マイクロテック・ラボラトリー社製)を用いて、「ロボティック・ハンドフリーステッキ」の試作機(図1)を構築するとともに、滑らかさと柔らかさを兼ね備えた杖の動作を実現するための制御システム(図2)を実装した。

1. 試作機の開発

図1に示すように、試作機は本体部と制御BOX部を主として、バッテリー部と装着部で構成している。身体に装着して使用することから、3Dプリンターを活用して可能な限りコンパクトかつ軽量化を意識し、ロボット部品の選定と機構設計の繰返しを経て開発した。表1に、各構成の重量[g]の数値データを記す。

本体部には、杖を回転させるための小型DDモータ1と、杖の長さを伸縮させるための小型DDモータ2をアクチュエータとして配置している。杖先が床を突いて身体を支える際、杖の

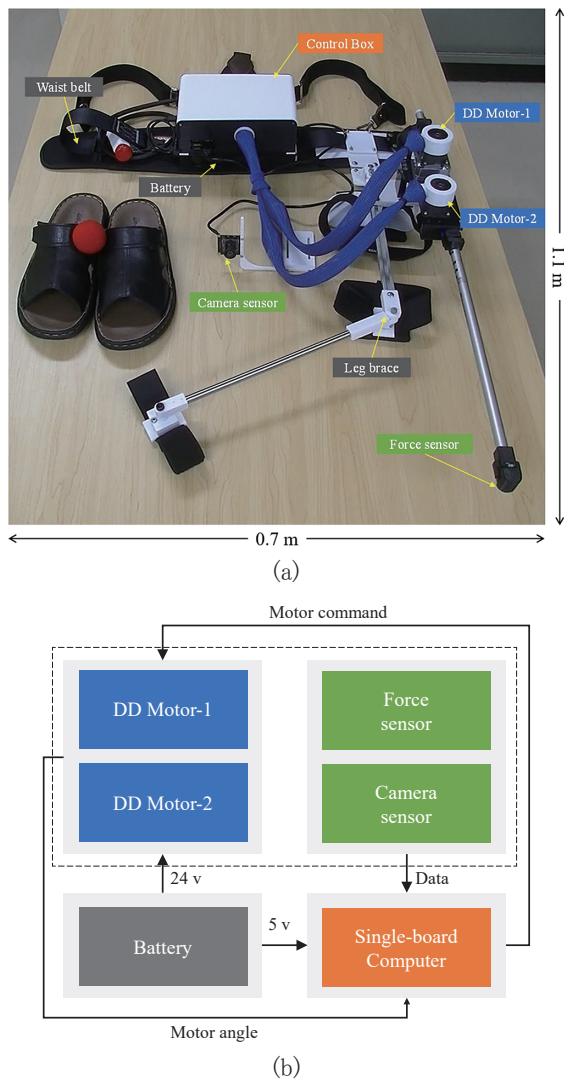


図1 試作機の概略図

表1 試作機各部の重量データ

Parts	Main body	Control box	Battery	Etc
Weight	700	660	1000	800

回転角度を保持するための駆動力が必要となるが、DD モータ 1 だけでは十分ではないため小型軽量のハーモニック減速機（ハーモニック・ドライブ・システムズ社製）を取り付けた。杖の伸縮は、ラックアンドオピニオン機構を用いて実現している。3D プリンターで作成したラック・ケースの中空に杖を挿入して取り付け、オピニオン・ギアを DD モータ 2 で回転させることで、杖の長さを自在に伸縮することができる。

加えて、使用者の大腿部に取り付ける USB カメラセンサと、杖先に組み込んだ感圧センサ（定格：15 kg）を有している。カメラセンサは小型シングルボード・コンピュータに接続し、本体部を装着していない側の足背（足の甲）に取り付ける球状マーカーを撮影・記録する。感圧センサへの印加力に応じて変化する電圧値は、I2C 通信方式で接続した AD コンバータ（分解能：16 bit）を介して小型シングルボード・コンピュータで計測・記録する。

制御 BOX 部は、二つの小型 DD モータを動かすために必要となる超小型モータドライバと、USB カメラセンサと感圧センサで計測したデータに基づいて小型 DD モータを独立制御する小型シングルボード・コンピュータ（Raspberry Pi5）で構成されている。超小型モータドライバと小型シングルボード・コンピュータのデータ送受信を SPI 通信方式にすることで、1 kHz のサンプリング周波数で高精度のモータ制御を可能としている。なお、小型シングルボード・コンピュータに接続するカメラセンサと感圧センサとのデータ送受信は通常のシリアル通信方式であることから、後述のアップサンプリングによる補間処理をして使用する。

バッテリー部には、二つの小型 DD モータに必要な DC24V と、小型シングルボード・コンピュータに必要な DC5V を安定して供給できるリチウムイオン電源（日泉社製）を用いた。

2. 制御システムの開発

図2は、試作機に対して考案した動作アルゴリズムを実現するために設計した制御システムのブロック線図である。制御システムは Matlab と Simulink（Mathworks 社製）を用いてデスクトップ PC 上で開発し、コンパイルしたプログラミングコードを小型シングルボード・コンピュータに転送して使用する。

2.1 杖の回転動作を滑らかにするアルゴリズム

本体部を装着していない側の足背（足の甲）

Control part for stick angle

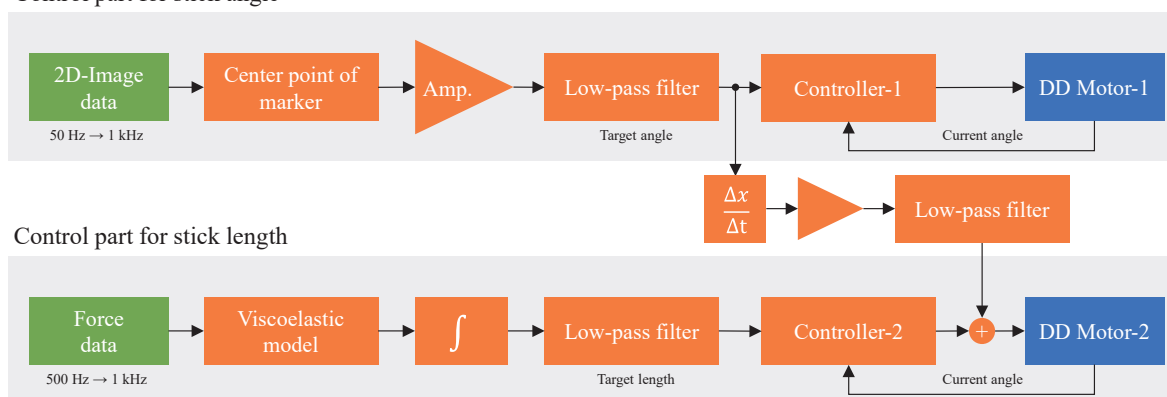


図2 制御システムの概略図

に取り付けた球状マーカを上方から USB カメラセンサで撮影（撮影速度：50 fps）をして、画像データから抽出したマーカを中心位置を足背の動きとして用いる。中心位置データは 20 倍にアップサンプリングされた後に、平滑化フィルタ（遮断周波数：3 Hz）を透して滑らかな目標軌道を生成する。そして、杖先端がマーカ中心を追従するように、小型 DD モータ 1 で杖の角度を滑らかに変化させる。この時、杖先が床面と接触して身体を支えている状態では、杖の回転動作が妨げられる。そこで、杖先を前方に移動させる際は、マーカの移動速度の大きさに比例して杖の長さを小型 DD モータ 2 で短縮させて杖先を離床させることにより、杖の回転動作が妨げられないようにする。

2.2 杖先の動作を柔らかくするアルゴリズム

杖先端に内蔵した感圧センサから計測される電圧値は、印加力として計測・記録（サンプリング周波数：500 Hz）される。印加力のデータは 2 倍にアップサンプリングされた後、杖先と床面の間に仮想的に設定した粘弾性モデルに入力する。そして、設定した粘弾性パラメータに応じた変形量を算出する。弾性パラメータを大きくすると変形量は小さくなり、小さくすると変形量は大きくなる。また、粘性パラメータを大きくすると変形量の過度な振動が抑制され、小さくすると変形量が振動的となる。適切な粘弾性パラメータを設定した上で、杖の長さを小

型 DD モータ 2 で伸縮させることにより、身体を支える際に床を突く杖先の動作に柔らかさを持たせる。

3. 動作検証と歩行実験

3.1 杖の回転動作の検証

図 3 (a) のように感圧センサを内蔵した杖先端パーツを取り外した本体部を固定台に設置し、赤色マーカを取り付けたサンダルを履いて、床面上で X 軸方向へ周期的に動かした。そして、小型 DD モータに内蔵されているエンコーダを用いて杖の動作を計測した。また、赤外線反射マーカ（図中の黄色○印）を取り付けて、光学式モーションキャプチャ装置を用いて杖の動作を同時に計測した。なお、感圧センサからの計測データに基づく杖の伸縮機能は、安全の為、無効にして実施した。

図 3 (b) に、連続 3 試行の計測結果を代表例として示す。赤線と緑線の連続 2 試行は、同じ動作となるように足を動かした結果であり、青線は意識的に少しゆっくりと動かした結果である。なお、青線と重なる黒の点線は光学式モーションキャプチャ装置による測定結果、背景が灰色の時間帯ではモータ制御をオフにしている。平滑化フィルタによる反応速度の遅延が若干みられるが、足の移動に応じて杖の角度が滑らかに変化しつつ、足の移動速度に比例して杖が伸縮していることも確認できる。なお、杖の

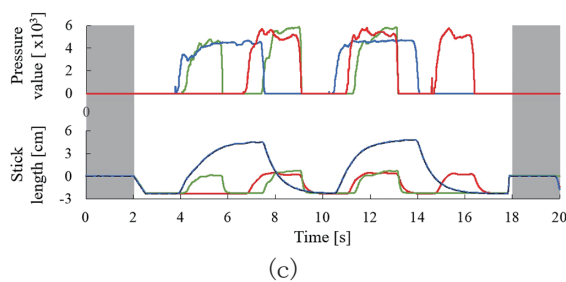
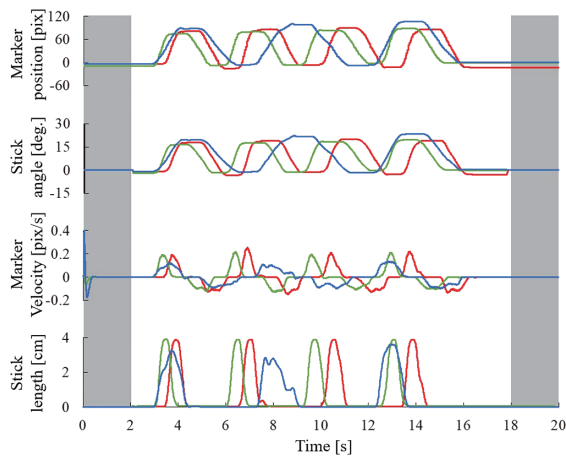
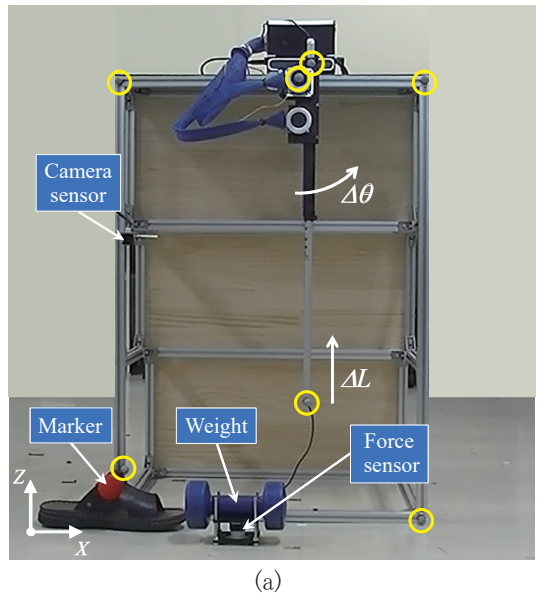


図3 動作検証の結果

伸縮は、足の移動方向が前（移動速度が正）の時であることに注意されたい。

3.2 杖先の伸縮動作の検証

図3(a)の実験環境で杖の回転動作を無効にして、感圧センサを内蔵した杖先端パーツに重さ1.5 kgのダンベルを載せて、杖の伸縮動

作を計測した。

図3(c)に、3種類の粘弾性パラメータを設定して得られた計測結果の代表例を示す。設定した粘弾性モデルの設定値は、赤線に対して設定した粘弾性モデルを基準にして、緑線と青線では粘性パラメータと弾性パラメータの値をそれぞれ1/3に設定した。なお、青線と重なる黒の点線は光学式モーションキャプチャ装置による測定結果である。今回はダンベルの追加と除去を手作業で実施したため、印加力の波形に若干の違いが生じたが、概ね設定した粘弾性パラメータに対応した結果を確認することができた。粘性を小さくすることで杖が伸縮する応答速度が早くなり、弾性を小さくすることで変形量が大きく（杖が柔らかく）なっている。

3.3 試作機による歩行実験

健康な男子被験者3名に試作機を右脚に装着させ、左足の足背に赤色のマーカーを取り付けて歩行実験を行った。被験者には指定された始点から3 m離れた終点までの直線軌道を、各自の歩幅でややゆっくりとした歩行速度で歩かせた。この時、光学式モーションキャプチャ装置を用いて歩行動作も記録した。被験者には試作機の使用方法を説明した上で、数回の事前練習をした後に本実験を実施した。

図4に、歩行実験の計測結果を示す。図(a)は一例であり、上側のスティックピクチャーは歩行中の試作機と右脚をそれぞれ赤線と黒線で描いている。下側のグラフは、小型DDモータのエンコーダ値から算出した杖の傾き角度と伸縮量の時間波形である。装着者の左足の動きに応じて、杖が回転動作と伸縮動作を同時に行っている様子を確認した。

図4(b)は、各被験者の歩行実験で計測された杖の回転角度と伸縮量、杖先への印加力の時間変動を表している。今回は各自の歩幅で実験を行ったことで杖先への印加力に個人差が見られたが、杖の滑らかな回転動作と伸縮動作を確認することができた。

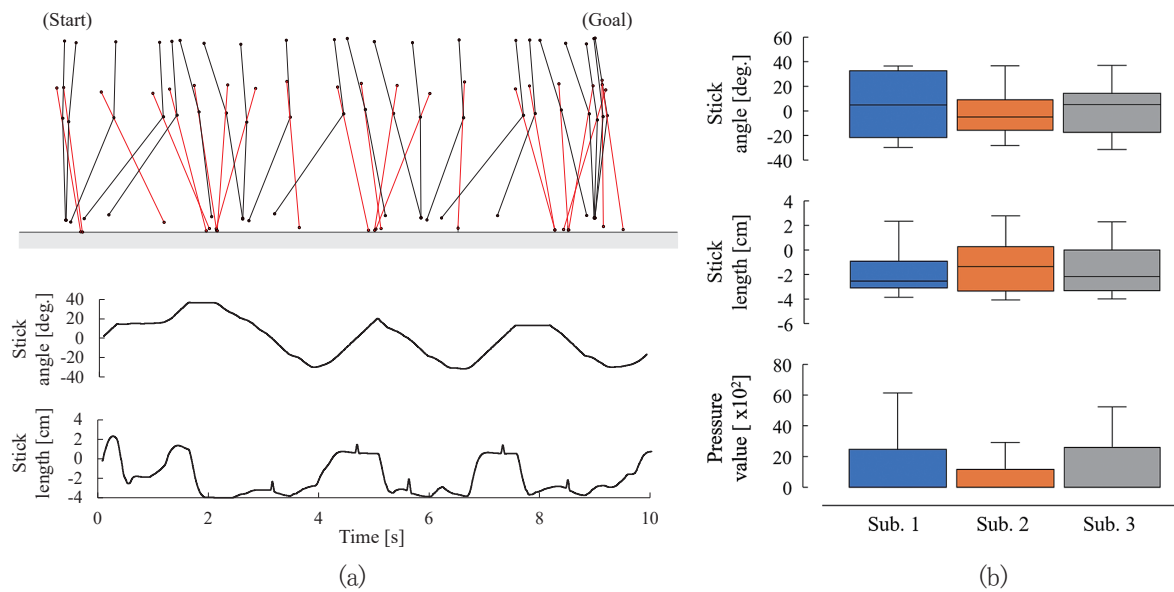


図4 歩行実験の結果

4. まとめと今後の展望

本研究課題では、小型 DD モータを用いた杖型のロボット装具を開発するとともに、カメラセンサで撮影した使用者の足の動きに応じて、杖の動作に滑らかさと柔らかさを持たせるための制御アルゴリズムを考案した。そして、動作検証と歩行実験を通じて、概ね目標を達成することができた。

今後の展望として、まず試作機の総重量を 1.5 kg にまでの軽量化を目指したい。そして、各使用者の体形と歩行姿勢に合わせて、制御シス

テム内で予め設定する必要がある制御パラメータを学習・自動チューニングをする機能を追加することも必要である。十分な安全性を確保した後、一般の杖使用者のご協力を得ながら本研究の最終目標を目指していきたい。

[成果の発表、論文など]

本研究課題で得られた成果は、第 27 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（2026 年 12 月開催）で発表する予定である。