

## 片麻痺患者のための健側歩容を活用した装着型歩行支援システム

### Walking support for hemiplegic patients wearing Robot Suit HAL using unaffected side's motion data

2011901



研究代表者	筑波大学 サイバニクス研究センター	助教	河本 浩明
共同研究者	筑波大学附属病院 リハビリテーション部	教授	江口 清

#### [研究の目的]

脳卒中や脳梗塞など脳血管障害によって片側に麻痺を有する患者の歩行は、顕著な非対称な歩容となる。これは、中枢神経障害により、一般に、筋力が低下すると共に、下肢では伸筋が優位となり、膝関節の屈曲、足関節の背屈が起こりにくくなることが原因である。

このため、歩行中患側の遊脚期では、下肢の屈曲が困難なことや、つま先が地面に当たらないようにするため、脚を外側に回しながら振り出だす（分回し歩行）現象、健側の脚を伸ばす現象（伸び上がり歩行）が起こる。一方、立脚期では、膝の力が突然抜ける現象（膝折れ）を防止するため、着床時に体幹を前屈させて、膝を過伸展させる歩行となる。

このような片麻痺患者の歩行補助として装具が一般に用いられている。装具の機能は、装具関節部の粘弾性や固定を利用することによって、遊脚期での足関節の底屈位の防止、立脚期の各関節の支持性確保である。このため、健常者の遊脚期における膝関節の屈曲-伸展といった動作に対する補助を行うことはできず、装具による歩容の対称性の改善は難しい。

一方、我々は、装着型ロボットによって装着者の運動機能を補助、強化するロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb) の研究開発を

行っている。下肢支援用 HAL は、外骨格構造をとり、股関節と膝関節はアクティブジョイントとなっている。HAL には様々なセンサが取り付けられており、装着者の身体情報を抽出することも可能である。現在まで、神経筋難病の方や重度対麻痺患者に対して疾患や症状に応じた下肢の動作支援方法が提案され、その有効性が検証されている。

片麻痺患者の場合、麻痺側の歩容が非麻痺側の歩容に近づくように、HAL が動作支援することが理想である。その実現方法として、HAL が非麻痺側の運動パターンを抽出し、麻痺側では抽出した運動パターンになるように HAL が制御する方法が考えられる。この方法では、HAL 装着者が非麻痺側で自発的に生成したパターンを基に麻痺側の歩容パターンをつくることで、対称な歩容が得られることが期待される。

本研究では、片麻痺疾患を有する方を対象として、非麻痺側の運動情報を用いた麻痺側の動作支援手法を提案する。また、片麻痺患者による実証試験において、歩容の対称性を検証し、本手法の有効性を示す。

#### [研究内容の成果]

##### 1. ロボットスーツ HAL

本研究では、ロボットスーツ HAL 福祉用を

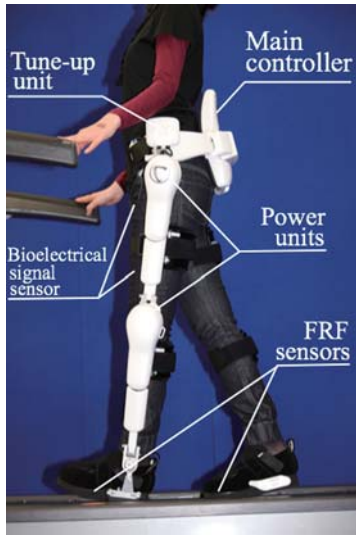


Fig. 1 Robot Suit HAL for Well-being

ベースにした両下肢支援用モデルを用いた。Fig. 1にHALの外観を示す。下肢の運動補助に関わる駆動関節として、膝関節と股関節に、パワーユニットが配置され、矢状面方向にアシストを行う。HALの背面部には、パワーユニットを制御する小型コンピュータ、及びバッテリーが搭載されている。その他、HALのセンシング機能として、角度センサ、姿勢センサ、及び床反力センサ等が装備されている。

## 2. 制御手法

これまでに我々が開発してきた Phase Sequence 手法を利用し、片麻痺患者の歩容を支援する制御手法を提案する。まず、人間の複雑な一連の運動は基本的な運動単位から構成されているものと捉え、運動情報や生理情報を用いた運動解析によって一連の運動を基本運動単位 (Phase) に分解する。それらをHALに組み込み、再合成することによって、人間の動作特性を反映した運動を生成する。歩行動作の場合、Fig. 2に示すように4つのPhaseに分解する。本研究では、麻痺側を右側とし、Phase 1の左脚 (非麻痺側) 遊脚で抽出した運動情報を基に、Phase 3で右脚遊脚の運動支援を実施する。

Fig. 3に当該手法のHALの制御系を示す。Phase 1になった際、装着者自ら行われた左脚

	phase 1	phase 2	phase 3	phase 4
Walking motion				
Left leg	swing	support	support	support
Right leg	support	support	swing	support

Fig. 2 Phase division in walking motion (The left leg is colored with gray)

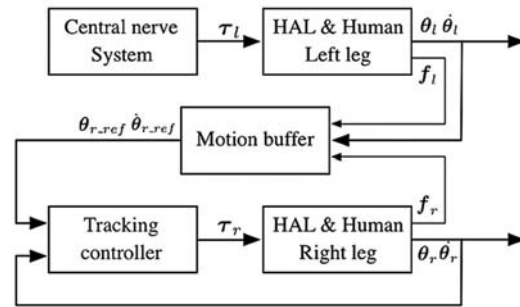


Fig. 3 Block diagram for HAL control system

遊脚に対して、左股関節、膝関節の角度  $\theta_l$ 、角速度  $\dot{\theta}_l$  を抽出し Motion buffer に蓄える。この運動パターンは、右股関節、膝関節の目標角度  $\theta_{r,ref}$ 、目標角速度  $\dot{\theta}_{r,ref}$  となる。Phase 3に遷移した直後、目標角度、目標角速度、及び右股関節、膝関節  $\theta_r, \dot{\theta}_r$  を基に Tracking controller でPD制御により右股関節、膝関節のアシストトルク  $\tau_r$  を算出する。なお、各Phaseの遷移判定 (Motion bufferによる左脚関節角度、角速度の抽出、及び目標角度、角速度の出力タイミング判定) は左右の床反力  $f_l, f_r$  を基に行われる。

## 3. 臨床試験

### 3.1 性能評価試験

開発した本手法の基本性能を確認するために、健常者を装着者として基礎実験を行った。装着者は、左脚を非麻痺側と想定し、左脚の歩幅が65 cmと40 cmとなるように左脚を装着者自身で動かし、右脚は麻痺側として、常に脱力した状態にし、10 m間の歩行を行った。

Fig. 4に歩幅が65 cmと40 cmの1サイクル

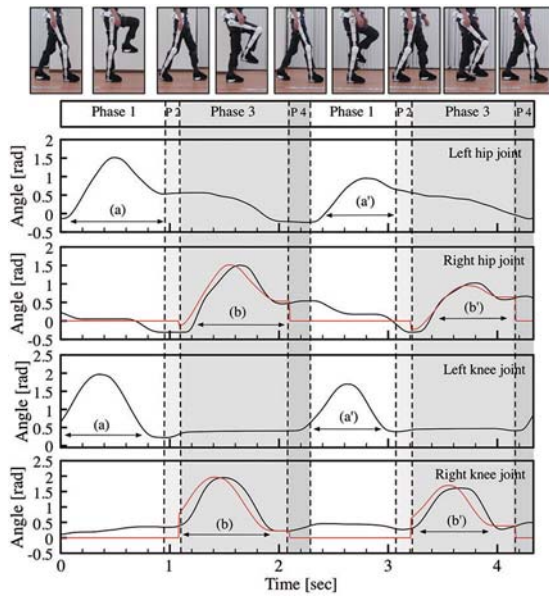


Fig. 4 Walking support of right side by HAL for able-body person

分の股関節、膝関節の角度を示す。Phase 1の異なる歩幅に応じた股関節、及び膝関節の角度軌道 ((a), (a')) が、直後の Phase 3 で目標軌道として生成され、それに応じて右脚の関節軌道が出力されている ((b), (b')) ことが確認された。これにより、麻痺側に対して、非麻痺側の異なる歩行動作に応じた運動パターンを実現させることができた。

### 3.2 パイロット試験

当該試験では、複数人の被験者による本手法の有用性を評価する前に、試験プロトコルの妥当性、障害を有する方に対する本手法の実行可能性を確かめる予備試験として、右膝関節の屈曲動作が困難であり、分回し歩行を呈する慢性期脳卒中片麻痺患者 (64 歳男性) を対象に臨床試験を実施した。当該験のプロトコルは筑波大学システム情報系倫理審査委員より承認を得て、また、当該試験は被験者に研究内容を十分説明し、承諾書を得てから行われた。

当該試験では、まず、HAL を装着してない状態で対象者の自然な早さによる歩行を行ってもらい、モーションキャプチャシステムを用いて、歩容の左右対称性を計測した。Fig. 5 に 2 サイクル分の左右股関節、膝関節の角度を示す。

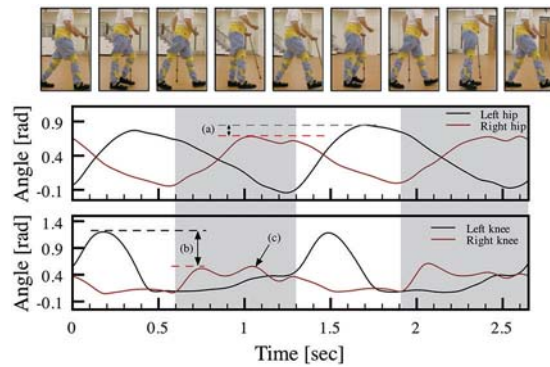


Fig. 5 Hip and knee joint angles of both legs for two gait cycles without HAL. The swing phase of right (affected) side is colored with gray.



Fig. 6 A hemiplegic patient walking with HAL during the experiment.

左右の遊脚期の歩容を比べると股関節、及び膝関節の最大屈曲角度に差が有り ((a) 及び (b)), また、Fig. 5(c) より膝関節の遊脚軌道はスムーズに生成されていないことが確認できる。このことから、被験者の通常歩容は、非対称な動作であることが分かる。

次いで、HAL による片麻痺動作支援として、週 1 回約 60 分を 4 週実施した。Fig. 6 に HAL による歩行支援の様子を示す。実証試験前半 2 週は主に HAL による歩行支援に適した各 Phase の切り替えタイミングやアシスト量に関するパラメータ調整を行いながら HAL の動作を体感してもらい、後半 2 週はパラメータを固定した支援動作で歩行を続け、HAL の動作と自身の動作が一体的に動く感覚を身に付けても



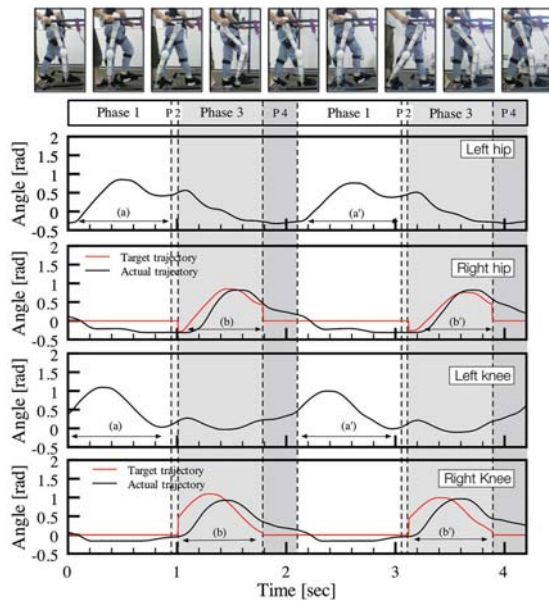


Fig. 7 Walking support of right side by HAL for a hemiplegic patient

らった。

Fig. 7にHALによる動作支援中の歩行2サイクル分の左右の股関節、膝関節の角度を示す。Phase 1の左側の股関節、及び膝関節の角度軌道((a), (a'))が、直後のPhase 3で目標軌道として生成され、それに応じて右脚に左右対称な関節軌道((b), (b'))が生成されていることがわかる。これにより、片麻痺患者に対して、本手法、及び本試験プロトコルに対して、実行可能性を確かめることができた。

### 3.3 有用性評価試験

本手法の有用性を確認するため、4人の片麻痺患者に本手法を適用し、歩容対称性の改善を調べた。Table 1に当該試験に参加した被験者の基本情報を示す。被験者は脳卒中後6ヶ月以上経過した慢性期の右片麻痺患者であり、下肢

Table 1 Patient characteristics

Case	Sex	Age	Time since stroke months	Br. stage	Assistive device	Orthosis
1	M	64	223	III	T-cane	AFO
2	M	62	82	V	NA	NA
3	F	51	16	IV	T-cane	NA
4	F	68	115	V	T-cane	AFO

M male; F female; Br. Brunnstrom; AFO ankle foot orthosis; NA not applicable;

に中程度の麻痺 (Brunnstrom Stage III) を有する被験者は1名、軽度の麻痺 (Brunnstrom Stage IV, V) 被験者は3名であった。

当該試験では、歩容対称性の評価項目として、(A)遊脚期における膝関節の可動域、(B)支持脚期時間、(C)遊脚期における地面から踵までの最大距離に着目した。各項目は、モーションキャプチャシステムを用いて算出され、対称性は、非麻痺側(左側)の10歩分の平均値に対する麻痺側(右側)10歩分の平均値を割合

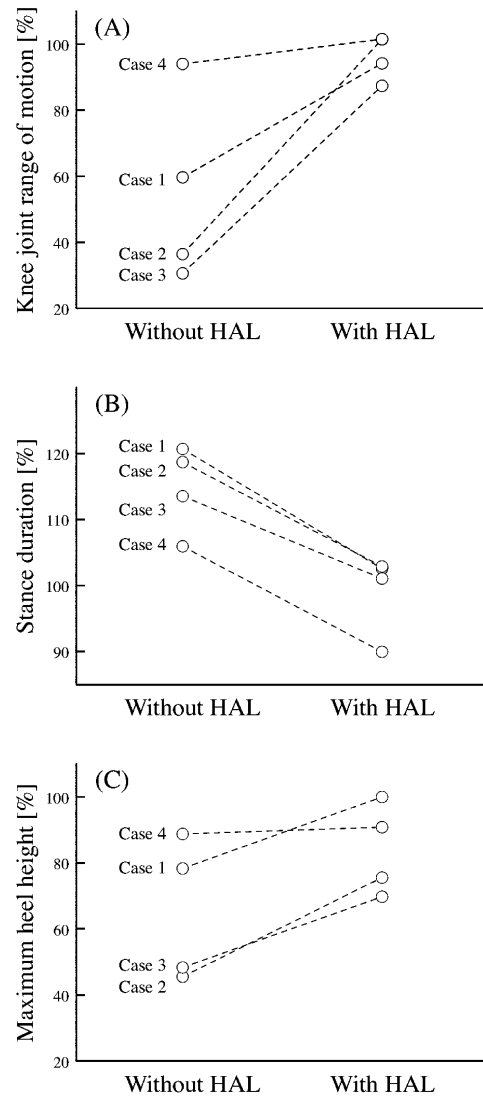


Fig. 8 Symmetrical ratio in the angle range for each knee joint in swing phase (a), support phase duration (b), maximum heel height in swing phase (c) with and without wearing HAL

(%) で評価している。左右完全な対称歩行であれば各項目は 100% の値を示す。Fig. 8 に HAL 未装着時と装着時の対称性の結果を示す。

遊脚期における膝関節の可動域 (A) は、全ての被験者において HAL の動作支援により対称性が改善していることがわかる。一方、支持脚期時間 (B) は、Case 1-3 の被験者は、対称性が改善し、HAL を装着していない時に比べ、左右均等な支持時間で歩行が行われている。逆に、Case 4 では、HAL 装着前は、麻痺側の支持時間が非麻痺側に比べ長かったのが、HAL による支援によって非麻痺側の支持時間が長くなっており、対称性が低下した歩行になっている。また、遊脚期における地面から踵までの最大距離 (C) は、Case 1-3 の被験者は対称性が改善している。Case 4 は HAL 装着前と HAL 装着中には、ほぼ変化がなく、比較的対称性を保っていることが分かる。以上の結果より、左右対称な歩容がより困難な被験者 (Case 1-3) に対しては、歩容対称性が大きく改善され、本手法の有用性が確認された。

#### [今後の研究の方向、課題]

本研究では、片麻痺患者の非麻痺側の歩容を活用して麻痺側の動作を生成する歩行支援方法を提案した。臨床実験では、実際の対象者となる慢性期片麻痺患者に適用し、当該提案手法の

動作性能を確認するとともに、HAL の動作支援によって対称な歩容が実現されることを確認した。

今後の技術的課題として、より適応的に非麻痺側の歩容を麻痺側で生成するため、軌道追従特性を自動で調整する手法を組み込むとともに、装着者の随意特性を反映させた制御系を開発していく。また、臨床研究課題として、発症時期や重症度の異なる患者に適用し、臨床試験の知見を蓄積するとともに、麻痺肢の機能回復を視野に入れた手法、運用方法を検討していく。

#### [成果の発表、論文等]

- [1] 河本浩明, 門根秀樹, 桜井 尊, 有安諒平, 上野有希子, 江口 清, 山海嘉之, 片麻痺を有する人のための非麻痺側の歩容を活用したロボットスーツ HAL の歩行支援と臨床応用, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014
- [2] 河本浩明, 山脇香奈子, 桜井 尊, 山海嘉之, 片麻痺疾患のための健側歩容を活用したロボットスーツ HAL の歩行支援, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012
- [3] Hiroaki Kawamoto, Hideki Kandone, Takeru Sakurai, Ryohei Ariyasu, Yukiko Ueno, Kiyoshi Eguchi, and Yoshiyuki Sankai, Development of an Assist Controller with Robot Suit HAL for Hemiplegic Patients Using Motion Data on the Unaffected Side, Proceedings of 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 26-30, 2014, Chicago, USA