

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：21201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11326

研究課題名（和文）健足同期制御高機能義足の開発

研究課題名（英文）Development of Artificial Leg synchronizing with A Healthy One

研究代表者

村田 嘉利（Murata, Yoshitoshi）

岩手県立大学・その他部局等・特命教授

研究者番号：80444925

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：高機能義足は利用者のQOL向上に有効であるが、商用製品は高価で一般障がい者が購入・利用するのは難しい。本研究開発では、工業用モータによる義足・足部の上下動制御と踵部にHeel-Raising Unit (HRU) を装着することで低コスト化を目指した。HRUについては、アシスト効果を最大にするスプリング強度と体重との間にリニアな関係があり、その解放タイミングの最適化により、アシスト効果を更に向上出来ることを明らかにした。モータによる義足・足部の制御については、モータの選定とそれに掛かる負荷抑制に多大な時間を要したが、義足使用者による評価テストを行い、商用化に向けアルゴリズムの改良を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下肢切断者の平均年齢の上昇が著しく、特に疾病を原因とする下肢切断者が高齢者に増加している。高機能義足は、義足使用者のQOL向上に有効であるが、商用製品は全て海外製で高価かつ保険適用外であることから、一般障がい者が購入・利用するのは難しい状況にある。本研究開発では、工業用モータによる義足・足部の上下駆動部Instep Push/Pullと踵部に装着したHeel-Raising Unitを開発し、健足側に装着したセンサのデータを基に制御することで、低コストかつスムーズに歩行出来る高機能義足を実現する。それにより、筋力が低下している高齢の障がい者でも購入・利用可能とし、彼らのQOL向上に資する。

研究成果の概要（英文）：Several million people around the world live with limb loss. Prosthetics are useful to improve their quality of life, and some powered prosthetics enable them to walk naturally. However, most are too expensive for most amputees to afford. We develop a low-cost one that adopts the instep push/pull module to move the foot part of prosthesis and the heel raising unit (HRU) to assist raising the heel part. Experimental results of HRU demonstrate that the optimal spring stiffness of such devices linearly correlates with the body weight, and controlling release timing of the spring improves its assistance effect.

However, in experimenting of the instep push/pull module, we had two problems, one was power shortage of an initial version of cylinder motor, the other was that the motor driver of higher power motor was broken because of regenerative energy. After solving such problems, we have evaluated a new module by prosthetic user to improve its control algorithms.

研究分野：センサー応用、医療情報

キーワード：義足 駆動義足 健足同期 歩行 アシスト 歩行障害 SACH

## 1. 研究開始当初の背景

厚生労働省の「平成 18 年身体障害児・者実態調査結果」では上肢切断者が平成 13 年 98,000 人から平成 18 年度 82,000 人 (増加率-16.3%)、下肢切断者が平成 13 年 49,000 人から平成 18 年 60,000 人 (増加率+22.4%) となっている。国立障害者リハビリテーションセンターの調査 (研究紀要 28 号、H19) では、義肢製作の対象となった切断者の平均年齢は上昇の一途をたどり、上肢切断者に比べて下肢切断者の平均年齢の上昇が著しい。特に、疾病を原因とする下肢切断者が高齢者に増加しており、切断者の状況が大きく変化している。新たに義足を必要とする人と修理・更新する人を合わせると年間に 10,000 人程度の需要が想定される。更に海外に目を転じると、Maurice Le Blanc が切断者の推定人数を発表している (2008 年のデータ)。世界の人口 67 億人に対し、切断する確率は 1.5/1000 人、世界の切断者数は約 1000 万人と言われている。上肢切断はそのうち 30% であり、70% にあたる約 700 万人が義足を使う権利・可能性・必要があると考えられる。

多くの下肢切断者が利用している義足は膝や足首が動かないため、歩行形態がぶん回し歩きとなり、残存した大腿部の力で歩行するため、疲労が大きいという問題がある。

膝や足首が自然な動きをする高機能義足は、非常に高価で日本では保険適用になっていないことから、一般障がい者が購入・利用するのは困難な状況にある。疾病により切断に至った方や高齢者のように、体力的に弱い切断者が手頃な価格で購入でき、健全な歩行を可能にする義足を開発することは、社会的意義が大きいといえる。

## 2. 研究の目的

海外を中心に戦争で足を失った障がい者等への要望に応える研究開発が多く行われている。世界展開している高機能義足の一つに Ottobock 社のコンピュータ制御による膝継手 Genium [1]がある。非常に高性能で健常者に近い歩行が可能である。しかしながら、非常に高価であると共に利用者の特徴に合わせて学習させる必要があり、それに時間がかかると言われている。研究段階であるが、残存部の筋電位によって義足を制御するものに、Levi J. Hargrove の研究などがある [2]。このタイプは、筋電位を理由するが故に、筋肉を適格に制御できるようになるまでに時間がかかると共に筋電位の計測から制御スタートに遅延があると言われている。

本研究開発では、(i) 学習の手間や制御遅延がない、(ii) 健常に近い歩行が可能、手頃な価格、を実現する高機能義足の開発をめざす。なお、今回は片足切断の患者を前提とし、足首から下の足部義足に絞って開発する。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 低コスト化

足部の甲の上げ下げ (背屈、底屈) は、義足の脛部に取り付けた 1 軸方向に動くステッピングモータ (Instep Push/Pull) と踵に付けたスプリング (Heel-Raising Unit HRU) を既存義足に装着し、コンピュータ制御する。

既存義足の流用と Heel-Raising Unit (HRU) の駆動部に工業用のシリンダーモータを利用することで低コスト化を図る。また、これらのモジュールを筋力が弱く、歩行に不自由な人へも適用することで、量産効果による低コスト化を図る。

### 3. 2 学習の必要のない自然な歩行の実現

駆動義足内の制御に加えて、健足側に装着したセンサで取得したデータを駆動義足の制御に適用することで、左右の足の歩行バランスがとれた自然な歩行を実現する。

## 4. 研究成果

### 4. 1 Heel-Raising Unit (HRU)

従前の研究で、床に着地後の踵上げをアシストするスプリング強度の最適値と利用者の体重との間に相関関係があると想定されたことから、その相関関係を詳細な実験により明らかにした。使用した HRU のバネは、図 1 に示すように圧縮時の厚みが少なくなるよう円錐形のコイルスプリングを採用し、V 字型のアタッチメントに収納した。スプリング強度は 3 Kg~11 Kg の 5 種類のコイルスプリングを用意した。図 2 に示すように、HRU をスニーカーの踵部に装着した。

評価項目は、

(i) 歩行に要した筋力の低減：図 3 に示すように、脛脛に筋電位センサ [3] を取り付け、歩行時の筋電位 iEMG の値をスプリング無し時と各スプリング強度について測定する。最も筋電位が低い値を示すスプリング強度を最適値 (Spring Power at lowest iEMG) とした。

(ii) 姿勢の乱れ：図 4 に示すように、廊下に MS-KINECT [4] を設置し、5 m の距離を歩行した時の頭部と腰部の上下の変動幅と左右の変動幅を測定する。変動幅は、2 歩行サイクルにおける最大振れ幅の平均値とする。

被検者は、76 歳 2 名、78 歳、79 歳、84 歳、87 歳、89 歳各 1 名の 7 名である。各人に対してスプリング強度の最適値を求め、体重との関係をプロットした結果を図 5 に示す。サンプル数は



図 1. V 字型 HRU



図 2. V 字型 HRU を装着したスニーカー



図 3. 筋電位センサを装着した被検者

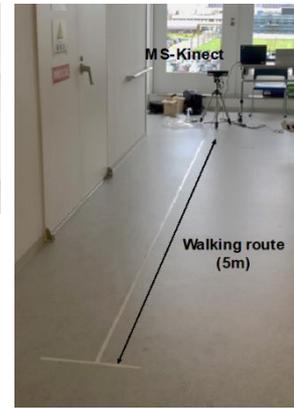


図 4. 歩行姿勢計測環境

十分とは言えないが、体重とスプリング強度を最適値との間にはリニアな関係があると判断される。

また、各被検者に対して頭部と腰部の上下の変動幅と左右の変動幅を測定した結果を表 1 に示す。表 1 において、スプリング強度 = 0 は HRU 無し時の測定値である。被検者間およびスプリング強間で違いはあるが、それはランダムであり、HRU 無し時の測定値と同じレベルであることから、HRU が歩行に影響を与えることは無いと判断できる。

図 1 の V 字型 HRU は、踵が床に着地した瞬間から踵を押し上げようとする反力が発生し、前の進ことを阻害する。理想的には、踵が床に着地した後、膝が踝より前に前に出たタイミングでバネを解放し、踵を押し上げることが望ましい。モータ等の電気的な機構を使わず、機械的な機構により、タイミング制御機能を実現した改良 HRU を開発した。改良 HRU は、図 6 に示すように、上部と下部と HRU と同じ円錐型スプリングコイル、タイミグ制御機構から構成される。上部が靴に踵に装着される。タイミグ制御機能を図 7 に示す。今回は金属 3D プリンタを使って改良 HRU を製作した。

改良 HRU を装着した靴を履いた利用者が踵を床に着地すると、上部 A が下に下がり、部品 C が上にスライド、部品 D が反時計回りに回転、部品 E が時計回りに回転することで、ノッチがラッチ状態になる。続いて、利用者の膝が踝より前に出ると、踵が床から少し上がる。その動きにより、部品 C が下にスライド、部品 D が時計回りに回転、部品 E が反時計回りに回転することで、ノッチが解放される。

健全な学生 4 人に対して、HRU と改良 HRU の筋力アシストの改善度 IR を実験的に求めた結果を図 8 に示す。IR は以下の式で求めた。

$$IR = 100 \times (B - A) / B;$$

A: 最もアシスト効果が大きい時の *iEMG*

B: HRU 及び改良 HRU を使用した時の *iEMG*

表 1. 2 歩行サイクルにおける頭と腰の上下左右への最大振れ幅の平均値 (mm)

Spring power [kg]			0	3	5	7	9	11	
Participant A (76, 56 Kg)	Head	LR	60.62	69.26	91.38	79.01	75.42	76.53	
		UD	19.44	23.61	13.56	22.83	20.01	13.70	
	Mid-hip	LR	51.08	61.32	66.90	59.02	47.74	58.85	
		UD	32.25	31.89	23.30	28.10	26.78	27.75	
	Participant B (76, 48 Kg)	Head	LR	30.45	30.99	52.27	45.35	41.29	40.08
			UD	15.28	20.30	17.85	20.30	11.63	10.23
Mid-hip		LR	31.10	37.87	46.90	34.01	38.90	32.52	
		UD	24.56	23.84	22.21	23.24	14.79	17.67	
Participant C (78, 60 Kg)	Head	LR	41.25	59.01	42.44	56.36	54.62	50.98	
		UD	15.82	25.08	19.39	15.36	14.53	18.56	
	Mid-hip	LR	58.50	58.97	55.10	58.71	62.14	77.81	
		UD	26.25	26.36	25.53	26.58	24.64	26.05	
Participant D (79, 60 Kg)	Head	LR	66.88	60.40	57.97	68.29	75.61	65.40	
		UD	20.68	10.13	22.21	7.59	13.89	11.83	
	Mid-hip	LR	62.42	59.12	51.13	53.55	63.88	57.20	
		UD	19.38	16.87	21.83	15.63	13.02	19.04	
Participant E (84, 60 Kg)	Head	LR	71.67	91.23	78.08	71.68	82.36	73.21	
		UD	13.32	8.30	16.74	26.26	10.41	21.85	
	Mid-hip	LR	53.25	44.67	43.69	47.30	65.53	47.34	
		UD	24.49	18.28	24.93	30.66	27.17	31.38	
Participant F (87, 38 Kg)	Head	LR	41.99	36.83	36.95	37.61	38.90	22.61	
		UD	22.64	20.76	25.87	19.07	15.52	16.06	
	Mid-hip	LR	25.74	33.13	25.26	226.78	30.39	21.17	
		UD	20.15	25.16	18.78	21.16	14.14	16.19	
Participant G (89, 57.5 Kg)	Head	LR	46.55	48.94	41.17	45.00	34.58	39.54	
		UD	28.18	14.10	15.61	18.09	14.29	14.01	
	Mid-hip	LR	43.29	31.80	31.61	40.55	28.28	32.91	
		UD	29.93	29.63	23.97	24.95	13.19	19.95	

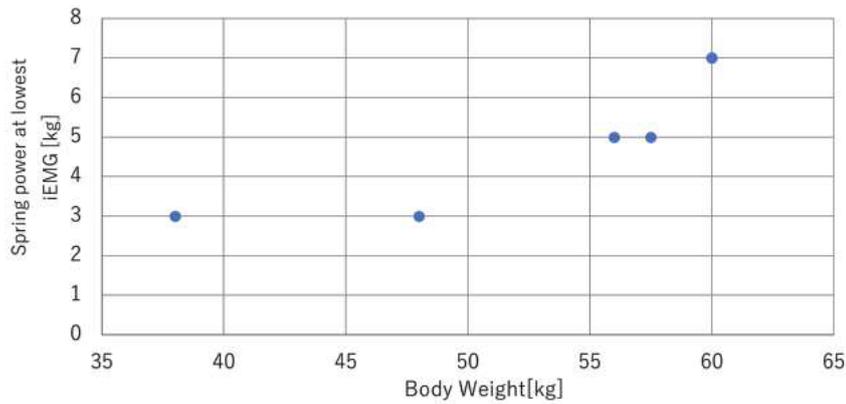


図5. HRU 使用時の体重とアシスト効果が最大となるスプリング強度の関係

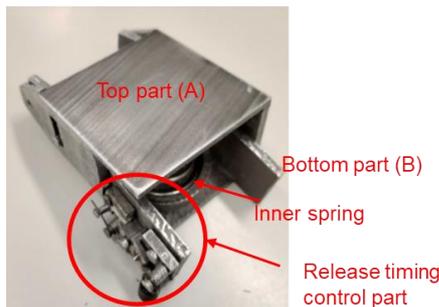


図6. 改良 HRU

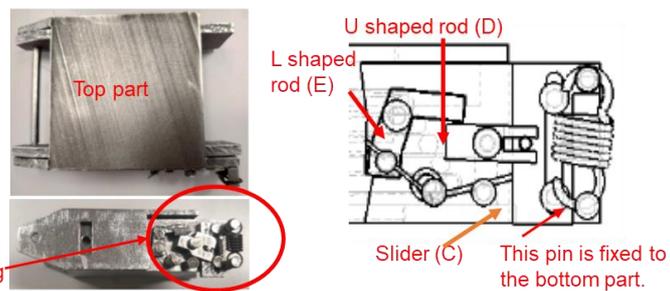


図7. タイミング制御機構

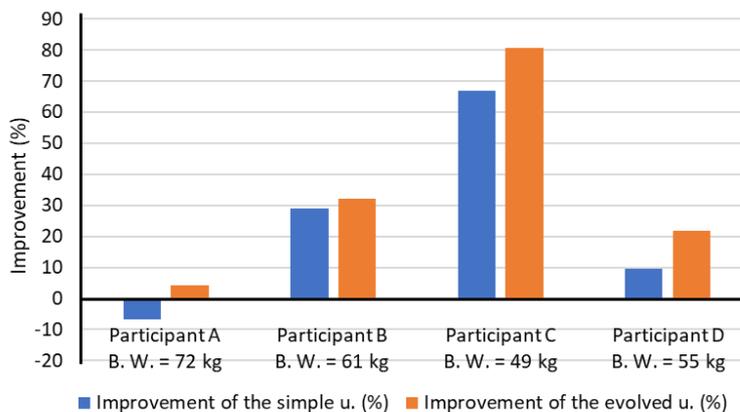


図8. HRU と改良 HRU の筋力アシストの改善度比較

筋力アシスト効果は被検者によって異なるが、いずれも改良 HRU の方が、筋力アシスト度が高いことが分かる。今回は金属 3D プリントを利用して製作してこともあり、重量が 210 g と重く、壊れやすいと言う問題が発生した。機構の複雑さや重量を考えるとシンプルな V 字型 HRU の方が実用性は高いと判断している。

本研究成果を反映した高齢者向けシューズあるいはリハビリシューズの製品化を複数のシューズメーカーに働きかけたが、理解を得られなかった。

#### 4.2 Instep Push/Pull 付き義足（駆動義足）

当初はオリエンタルモータの小型シリンダーモータ[5]を Instep Push/Pull を組み込んで駆動義足を製作したが、トルク不足から義足足部を十分な速度で駆動出来なかった。そのため、ヴィッテンシュタイン・ターナリのシリンダーモータに交換し、実験を行った。被検者は義足使用者である。実験風景を図9に示す。この実験では、歩行ではなく、「足踏み動作」を確認した。

制御アルゴリズムは、義足の踵に 6 軸センサ（加速度：3 軸、ジャイロ：3 軸）を装着し、義足の加速度センサを使って義足の踵の床への着地とその後の膝が踝を越えたことを検出した場合に義足足部を押し下げることで床を蹴るようにした。この床を蹴る動作により、義足は後ろに蹴り上げられることから、それに続く義足の前への振り出しを検出した場合に義足足部を引き上げることで爪先をあげるようにした。この爪先上げは、義足を前に振り出した際に爪先が床に当たることを避けるためである。6 軸センサは株式会社イーアールアイ [6]に製造依頼した。



図 9. 2次モデルの実験風景

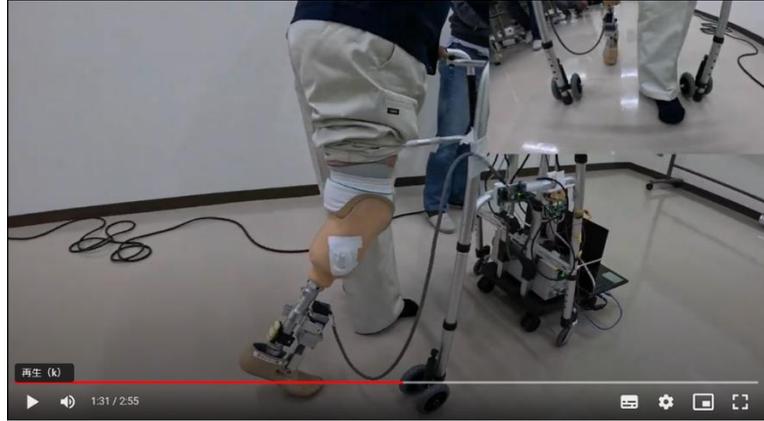


図 10. 3次モデルの実験風景

本実験において、被検者が全体重を義足に全体重をかけた際にモータの制御基板にあるパワーICが破損した。調査した結果、床への踵の着地に続いて床を蹴る際に義足足部からシリンダーモータに力が掛かった時にパワーICに耐電圧 60 V を越える電圧が発生し、パワーICが破損したことが判明した。その対策として、

- (i) モータドライブ基板にモータ逆駆動による「エネルギー回生回路」を追加する。
- (ii) シリンダーモータと義足の足部を結合するボールネジを、逆駆動動作を防止する「すべりネジ」に変更する。

の2つを試した。両者について評価した結果、いずれの解決策においてもパワーICが破損することは無くなった。すべりネジについては、シリンダーモータから義足の足部に掛かるトルクが減少することから、エネルギー回生回路を使って義足足部の制御アルゴリズムの開発を進めた。

3次モデルでの実験風景を図10に示す。3次モデルでは、センサの取り付け位置を義足足部から脛部に変更した。アルゴリズムとしては、義足の床への着地に続く、「膝が踝を越えたことの確認」を「膝が親指の爪先を越えたことに確認」に変更した。これは、健足から義足への体重移動を確実にし、安全に歩行できるようにするためである。

その結果、少なくとも以下の2点を解決すべきことが判明した。

- (i) 床を蹴る際の速度の適正化
- (ii) 踵を床に着いた後の膝を前に持っていく動作へのアシスト追加

今後は、株式会社イーアールアイ[6]および株式会社岩手テクノ[7]の両者を主体とする駆動義足の商用化に研究・開発フェーズを移行する。

<参考文献、等>

- [1] Ottobock, 義足の種類と構造 ; [https://www.ottobock.co.jp/prosthetic\\_le/info/structure/](https://www.ottobock.co.jp/prosthetic_le/info/structure/)
- [2] Levi J. Hargrove et al., “Intuitive Control of a Powered Prosthetic Leg During Ambulation: A Randomized Clinical Trial,” American Medical Association, JAMA, Volume 313, Number 222015, pp. 2244 – 2252.
- [3] Wireless EMG logger, Logical Product Corporation, [Online] <http://www.lp-d.co.jp/EMGSensor.html>, [retrieved: June, 2024].
- [4] Meet Kinect for Windows, [Online] <https://learn.microsoft.com/ja-jp/windows/apps/design/devices/kinect-for-windows>, [retrieved: June, 2024].
- [5] Single motor cylinder, DR series, Oriental Motor Ltd., [Online], <https://www.orientalmotor.co.jp/products/new/180611341135dr/> [retrieved: June, 2024].
- [6] 株式会社イーアールアイ, <https://www.eri.co.jp/products/bluetus/>, [retrieved: June, 2024].
- [7] 株式会社岩手テクノ, <https://iwate-tech.wixsite.com/mysite>, [retrieved: June, 2024].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Haruki Baba, Akimasa Suzuki, Yoshitoshi Murata	4. 巻 vol 12 no 3 & 4
2. 論文標題 Spring Assist Unit for Individuals with Walking Disabilities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IARIA, International Journal on Advances in Life Sciences	6. 最初と最後の頁 102-113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Haruki Baba, Akimasa Suzuki, Yoshitoshi Murata
2. 発表標題 Assistance Effect of an Evolved Heel-Raising Unit for Walking Disabilities
3. 学会等名 IARIA, eTELEMED 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshitoshi Murata, Haruki Baba, Yukihide Nishimura
2. 発表標題 Proposal of Powered Foot Prosthesis Emulating Motion of Healthy Foot (PEHF)
3. 学会等名 IARIA, eTELEMED 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruki Baba, Yoshitoshi Murata, Tomoki Yamato
2. 発表標題 Proposal of Spring Assist Unit for Walking Disabilities
3. 学会等名 IARIA, eTELEMED 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshitoshi Murata, Tomoki Yamato
2. 発表標題 Module Structure for Foot Prosthetic and Interface Standardization
3. 学会等名 ITU, 2019 ITU Kaleidoscope Academic Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 駆動機構付き義足装置	発明者 村田嘉利、牛崎孝	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6883819号	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西村 行秀  (Nishimura Yukihide)  (20464117)	岩手医科大学・医学部・教授   (31201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------