



# Big Robot Mk. 2 を用いた歩行感覚の拡大

森田大輔<sup>1)</sup>, 圓崎裕貴<sup>2)</sup>, 矢野博明<sup>2)</sup>, 岩田洋夫<sup>2)</sup>

1) 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

2) 筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

**概要:** 本研究ではこれまで、身体感覚が拡大されたときに生じる外界認識変化の検証を目的に、歩行移動型モーションベースである Big Robot Mk.2 を開発してきた。本システムは搭乗者の歩行動作に応じて装置の揺動機構と移動機構を制御することで歩行時の巨人頭部の運動軌跡を生成し搭乗者の身体感覚を拡大する。本稿ではその制御手法を提案し、歩行軌跡追従性と搭乗者の歩行動作への応答性の評価実験を行うことで本システムの有効性について評価を行った。

**キーワード:** 身体拡張, モーションベース, ロコモーションインタフェース, メディアアート

## 1. はじめに

J.J. Gibson の生態学的視覚論[1]によれば、動物は身体と環境の相互作用を通じて外界を認識しており、同じ対象を見た場合でも観測者が変われば対象がどのような行動を誘発するか、すなわち対象から読み取る意味合いが変化する。このことから人間の身体感覚を変化させることで、人間が外界を見たときのものの捉えかたを変化させることができると考えた。ここでは視覚優位に生起される身体像と、体性感覚を基に潜在的に姿勢モデルを生起する身体図式の2つの要素によって構成される感覚を「身体感覚」とする。身体像はラバーハンド錯覚[2]のように外界の対象に対しても身体所有感を生起し、実在の身体を超えて柔軟に変容することが知られている。また、身体図式は身体の大きさや運動能力に併せて変化する体性感覚により無意識的に更新される[3]。

身体感覚を変化させる研究として、目線の高さを下げることで自身の身体感覚が小さくなった体験を提示する CHILDHOOD[4]が挙げられる。また、身体感覚を拡大する研究にはドローンを用いて、巨人の目線相当の高さにあるステレオカメラ映像を提示するといった試みがなされている [5]。これらの研究では巨人や小人に対応する視覚の提示に着目しており、被験者による能動的な移動やそれに伴う加速度の変化が身体感覚の変化に与える影響については議論されていなし。一方で、視点の高さや加速度の変化を提示するための装置として、本研究室で開発された Big Robot Mk.1A[6](以下 Mk.1A)がある。Mk.1A は地上 5m の視点高さ、歩行時の身体揺動による前庭覚刺激を提示する揺動装置、実空間を移動する移動機構を統合し、実空間の歩行感覚の拡大を実現した。しかし、Mk.1A は任意の位置、姿勢のままユーザに上下方向の揺動を提示

Daisuke MORITA, Yuki ENZAKI, Hiroaki YANO,  
and Hiroo IWATA

することが構造上不可能である。人間の歩行における頭部軌跡を提示し、ユーザや周囲の人間に対して Mk.1A の動作が巨人の歩行であると認識させるために上記の動作が必要であると考えられる。この問題を解決するために Mk.1A は、脚部や腰の自由度を増やすことで人間の体の構造に近づける必要がある。

本研究では、人間にとって最も基本的な運動である歩行時の身体感覚を拡大することで、身体感覚の拡大が人間の外界認識に対してどのような影響を与えるか調べることを目的とする。また、目的を達成するための提案手法として巨人の歩行感覚を提示する装置 Big Robot Mk.2 を開発し、装置の歩行軌跡追従性とユーザの歩行動作に対する応答性についてそれぞれ評価実験を行った。

## 2. システム構成

1章で述べた Mk.1A の問題点を解決するため、自由度を増やした Big Robot Mk.2 について以降詳述する。開発した Big Robot Mk.2 を図 1 に示す。



図 1. Big Robot Mk.2

表 1. Big Robot Mk.2 性能諸元

Height	8.1m	
Weight	1915kg	
Width	3.2m	
Foot length	3.8m	
Platform height	6.0m	
Maximum movable range	Pitch	$\pm 175^\circ$
	Roll	$\pm 48^\circ$
	Yaw	$\pm \infty^\circ$
Maximum stride	2.35m	

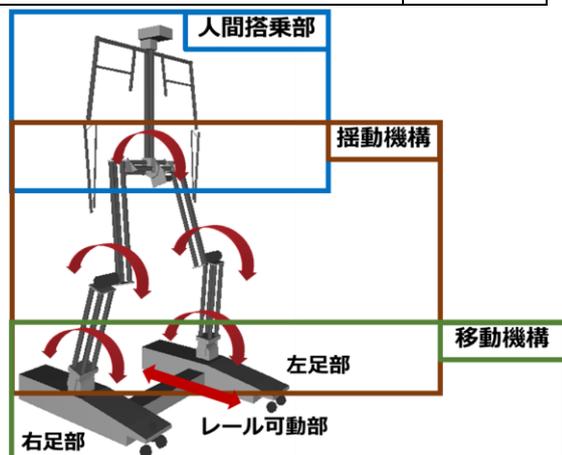


図 2. 全体システム構成

### 2.1. 全体のシステム構成

本システムは身長 8m の巨人の身体感覚の提示を目的とする。そのため、本システムは歩行による移動と頭部の揺れを提示する移動機構と揺動機構に加え、人間の歩行意図を読み取る人間搭乗部から構成される。表 1 に性能諸元を、図 2 に全体システム構成をそれぞれ示す。

本システムでは、先行研究である Mk.1A で 2 自由度のみだった揺動機構を、左右それぞれの足首、膝関節に 1 自由度ずつ、腰関節に 1 自由度の計 5 自由度の機構を実装した。また、歩行動作の際に Mk.1A では装置全体が移動していたが、Big Robot Mk.2 では両足部がレールによって接続されているため、左右の足部でそれぞれ独立にすり足歩行による移動が可能である。このレール長は 2.35 m であり、本システムの歩行動作における最大足振出力である。また、片足部が限界以上に足を振り出す等のエラーが発生した場合に、振り出した足の勢いで装置が意図せず傾くといった危険がある。そこで本研究では安全のために経験的に問題が発生しない稼働範囲である 1.99 m を本装置のとする最大足振出力とした。また、両足部がレールを介して連結していることから、本装置が足を振り出せる距離の最大値は前回の歩行動作によって制限される。つまり、両足部が揃った立位の姿勢から左足部が 0.5 m のみ前進した場合、右足部は残りのレール長である 1.49 m しか前進することができない。このため本装置では直前の踏み出し動作に応じて動的に最大足振出力が変化する。

装置の各軸の駆動には主に産業用に使用される AC サーボモータ (SV シリーズ, KEYENCE 社) を使用し、それぞれのモータの回転数や回転角度の計測には AC サーボモータ

に搭載されたインクリメンタルエンコーダを使用した。モータのデータ取得および制御にはモータ制御用ボード (HUSB-CPD434, ハイパーテック社) を使用した。

### 2.2. 人間搭乗部のシステム構成

人間搭乗部ではユーザの歩行運動を計測し、ユーザの歩行動作と Big Robot Mk.2 の歩行動作を同期するシステムを構築した。図 3 に実際に構築したシステムと人間が搭乗している様子を示す。

人間搭乗部のシステム要件として安全性への配慮が必要である。地上 8m に位置する人間搭乗部へ重量物を配置したことによる装置の転倒や揺動機構モータへの過負荷を避けるために、人間搭乗部は軽量であることが望ましい。また、ユーザが定点にいながら無限歩行を行うためには歩行動作によって振り出した足を引き戻す機構が必要となるが、歩行動作を行う人間の足を引き戻すほど大型のアクチュエータを取り付けることは、重量の増加だけでなく頻繁に動作する揺動機構に這わせて電源系のケーブル等を配線する必要があるため現実的ではない。

以上の理由より、本システムではアクチュエータを用いずにユーザの自重によって振出し足が引き戻され、かつユーザの搭乗する足場のみで構成することが可能な振り子機構を片足それぞれに対して用いた。振り子機構によって、ユーザの歩行動作によって振り出された足は立脚期に移ると重力に従って振り出し開始点へ戻る。そのためユーザはその場で無限に歩行動作を行うことができる。また、制御アルゴリズムでは振り出した足が戻り始めるまでを一步として遊脚を切り替えることで、左右の足を連続で交互に振り出せるようにした。また、身長が  $n$  倍の人間は通常の人間に比べて最低でも  $\sqrt{n}$  倍の歩行時間がかかることが知られている [6]。そのため、ユーザの歩行時間が  $\sqrt{n}$  倍を下回らないよう図 3 のように油圧ダンパを用いて歩行動作を制限した。図 4 に片足が歩行を開始してから終了するまでの動作の様子を示す。

人間の歩行動作の計測には、図 3 のように油圧ダンパと並列に取り付けた直動変位エンコーダ (LP-FJ シリーズ, 緑測器社) を用いた。直動変位エンコーダを用いた歩行動作計測の仕組みを図 5 に示す。



図 3. 人間搭乗部と搭乗している様子

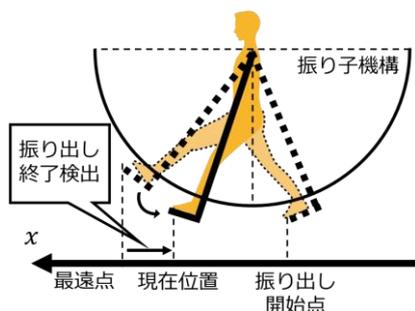


図 4. 振り子機構による歩行動作の様子

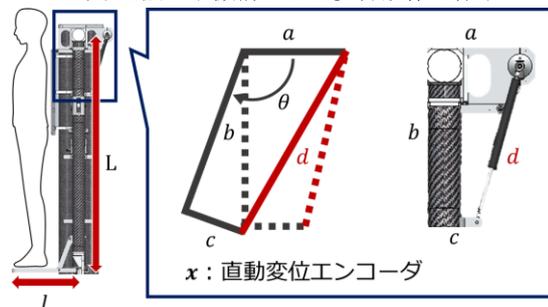


図 5. 人間の歩行計測手法

図 5 に示す通り振り子機構の振り出し角度 $\theta$  は、装置の寸法である $a$ ,  $b$ ,  $c$  と直動変位エンコーダの長さ $d$ によって求めることができる。以下に直動変位エンコーダを用いて振り出し角度 $\theta$  を導出する式を示す。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{c}{b} + \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 + c^2 - d^2}{2ab^2 + c^2} \quad (1)$$

(1)式の通り、振り子機構の振り出し角度 $\theta$  は直動変位エンコーダの長さ $d$  によって一意に定まる。また、ユーザの足位置 $x$  は振り子機構の長さ $L$  と足置き台の幅 $l$  を用いて下式で表せる。

$$x = L \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + l \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

以上より、直動変位エンコーダを用いてユーザの足位置が取得できるためユーザの歩行動作を計測可能である。

またユーザの歩行データの取得には無線 LAN ルータを用いたローカルネットワーク環境を構築し、センサデータ取得用のマイコン(ESP32-WROOM-32, Espressif 社)と地上の制御用 PC 間で TCP/IP 通信を行った。

### 3. 歩行軌跡の生成

本システムではユーザの歩行動作を検出し、身長 8m の巨人が歩行時に生成する頭部運動軌跡を提示する。提示には移動機構と揺動機構をそれぞれ用いて、ユーザの足の振出量に応じて導出した移動量や姿勢を装置全体が連続的に追従することで、巨人の頭部運動軌跡を生成する。

本装置は左右の腰部位置を算出することでピッチ角揺動を除く人間搭乗部の姿勢や位置を決定できる。腰部位置は、左右の足についてそれぞれ移動可能な 2 リンク機構のモデルに置き換えて運動学計算を行い、手先位置を求めることで表せる。腰部位置の計算モデルを図 6 に示す。

表 2. 平地歩行時の一般的な人間の頭部上下動振幅

頭部上下動振幅[m]	
平均	0.0453
標準偏差	0.0052

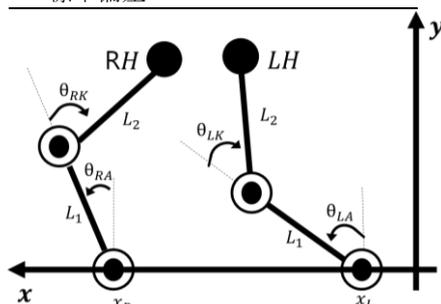


図 6. 腰部位置計算モデル

以下に腰部位置を導出する計算式を記す。

$$LH = \begin{pmatrix} x_L + L_1 \cos(\theta_{LA}) + L_2 \cos(\theta_{LA} + \theta_{LK}) \\ L_1 \sin(\theta_{LA}) + L_2 \sin(\theta_{LA} + \theta_{LK}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$RH = \begin{pmatrix} x_R + L_1 \cos(\theta_{RA}) + L_2 \cos(\theta_{RA} + \theta_{RK}) \\ L_1 \sin(\theta_{RA}) + L_2 \sin(\theta_{RA} + \theta_{RK}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

また、産総研の歩行データベースから無作為に選んだ 10 人の頭頂部(VRTX)の位置データをもとに頭部の上下動振幅の平均を求めた。表 2 に頭部の上下動振幅の平均と標準偏差を示す。データを基に、頭部上下動振幅が身長に比例すると仮定して、平均頭部上下動振幅の 5 倍である約 0.2 m を本システムの頭部上下動振幅とした。

本研究では歩行時に発生する頭部の上下動揺動に着目した。前述より、頭部位置は腰部位置から決定できるため足位置に応じて必要な腰部位置を動的に計算し、振幅 0.2m で頭部上下動揺動を発生させる歩行軌跡を生成した。

### 4. 評価実験

本実験は、開発したシステムがユーザの運動主体感を生起するのに十分な応答性能を満たしているか、その有効性について検討することを目的として、前章で生成した歩行軌跡に沿って、Big Robot Mk.2 がユーザの歩行動作に追従して動作するまでの遅延時間を計測した。

実験は成人男性 2 名を被験者として行った。被験者はそれぞれ立位で Big Robot Mk.2 へ搭乗し、5 歩程度連続的に歩行を行うという手順を 2 試行行った。

ここで計測した遅延時間は、被験者の足が前進し始めた時点から Big Robot Mk.2 の対応する足部が前進を開始するまでの時間である。この際被験者の足が最も後ろに振り戻された地点を振り出し開始点とし、振り出し開始点と比較して少しでも前進していれば被験者の足振り出し開始時点とした。また、同様に Big Robot Mk.2 の足が停止地点から前進した時点の本システムの足振り出し開始時点とした。

一步当たりの平均歩行時間と、その際に発生した足の振り出しにかかる遅延時間を表 3 に示す。また、Big Robot Mk.2 の動作の様子を図 8 に、Big Robot Mk.2 の足の振出量と頭部上下動揺動の関係を図 9 にそれぞれ示す。

図 8 に示した通りユーザ足の振り出しに対して常に一

定の遅延はあるものの、追従できていることが確認できた。また、立脚期にあたる足の振り戻し時には Big Robot Mk.2 の足が下がることなく遊脚から立脚期への切り替えできていることが確認できた。また、図 9 よりユーザの足の振り出しに追従して約 0.2m 程度の頭部の上下動揺動を実現できていることが確認できた。

## 5. 考察

ユーザの足の振り出しに対して平均して約 500 ms 程度の遅延が発生した。これは計測したユーザ足位置データが振動的だったことから 1 次ローパスフィルタをかけてシステムの入力に使用したため、振幅の位相が遅れたことが原因であると考えられる。また、このことに起因して足の振り出し終了検出が遅れたため左右の遊脚の切り替えが遅れ、被験者の遊脚が入れ替わっているにもかかわらず遊脚とは反対の足が前進を続けるといった問題が発生した。

これらの問題に対して遊脚の切り替え判定手法を変えるといった対策が考えられる。歩行動作の中で足の振り出し開始時に足先の加速度は最大値をとる。そのため生データの足先加速度が閾値を越えた際に遊脚を切り替えることで、1 次ローパスフィルタによる位相遅れの影響を受けずに足の振り出し検出が可能であると考えられる。この場合、振り出し誤検出を防ぐために加速度の値がノイズより十分大きいことが必要であるため、定常的に入るノイズの影響と比較して実現可能か検討する必要がある。ただし、被験者からは「あまり遅延は感じられなかった」、「振り出し終了後に足が出ている方が気になった」といったコメントがあり、足の振出遅延に関しては現状の遅延時間で十分応答できている可能性が示唆された。拡大した身体においてどれほどの遅延がユーザの運動主体感に影響を与えるかについては今後実験的に検証を行なう必要がある。

また、本システムでは図 9 の目標値のように、最大振出量をとった際には頭部位置が最低点から山なりに動作する。しかし、本システムでは 2 章で述べたとおり直前の踏み出し動作の影響で最大振出量が制限される。そのため、図 9 のように頭部の上下動揺動が山なりの途中から始まるような軌跡を描いたと考えられる。これはユーザの歩行動作に対して、常に Big Robot Mk.2 の足の振出量が最大付近となるようにゲインを調整するなどで解決できる。

## 6. まとめと今後の展望

本研究ではユーザの歩行動作に追従して Big Robot Mk.2 が動作するシステムを構築し、その動作性能について評価実験を行った。また評価実験から本システムがユーザの歩

今後は拡大された身体における動作の遅延時間と運動主体感の関係について、巨人の身体感覚を提示するうえで歩行動作に対して遅延があるもののインタラクティブに応

表 3. 被験者の歩行時間と足の振出遅延時間

	歩行時間[s]	振出遅延時間[s]
平均	4.104	0.503
標準偏差	1.007	0.159

答可能であることを確認した。また、被験者のコメントから開発したシステムが身体感覚を拡大するために満足すべき動作性能について検証を行う。

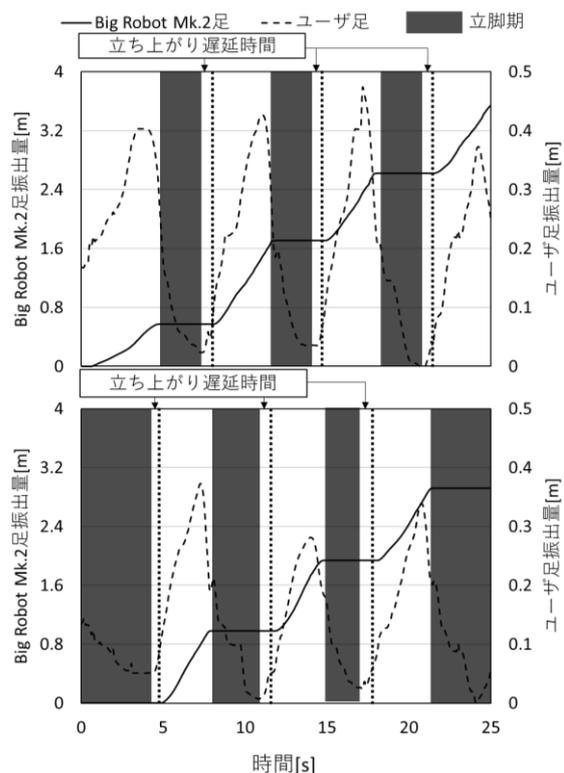


図 7. ユーザの歩行動作と Big Robot Mk.2 の動作の様子 (上: 右足, 下: 左足)

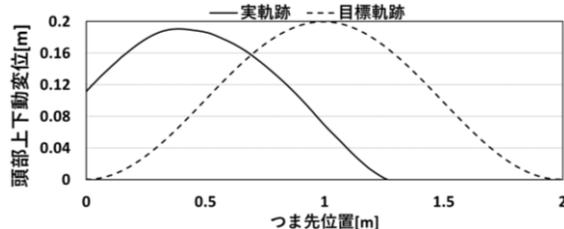


図 8. 典型的な Big Robot Mk.2 の足振出量と頭部揺動

## 参考文献

- [1] James J. Gibson: 生態学的視覚論, サイエンス社, 1985.
- [2] Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, Nature, Vol.391, No.6669, p.756 1998.
- [3] S. Gallagher, J. Cole: Body Image and Body Schema in a Deafferented Subject, The Journal of Mind and Behavior, Vol. 16, pp. 369-389, 1995
- [4] 佐藤綱祐, 西田惇, 高取光, 鈴木健嗣: CHILDHOOD: 小児の体験を再現する装着型身体性変換スーツ, TVRSJ Vol.22 No.1 pp.71-80, 2017
- [5] Masahiro Furukawa, et al: The Giant Experience: Visual Transfer Design to Virtually Extend the User's Body, ICAT-EGVE 2014, Demo
- [6] 岩田洋夫ほか: "BigRobot": 歩行感覚を拡張する移動型モーションベース, TVRSJ Vol.22 No.4 pp.457-465, 2017
- [7] 小林吉之ほか: AIST 歩行データベース 2015