

# “BigRobot”: 歩行感覚を拡張する移動型モーションベース

岩田 洋夫\*<sup>1</sup> 木村 優太\*<sup>2</sup> 圓崎 祐貴\*<sup>1</sup> 矢野 博明\*<sup>1</sup>

## BigRobot: A Movable Motion Base Enhancing Walking Sensation

Hiroo Iwata\*<sup>1</sup> Yu-ta Kimura\*<sup>2</sup> Yuki Enzaki\*<sup>1</sup> and Hiroaki Yano\*<sup>1</sup>

**Abstract** --- The “Big Robot” has two legs with wheels, mounting the pilot at 5m height position. The robot goes forward according with the motion of the feet of the pilot. It is programed to make trajectory of head position of 5m giant. Thus, the pilot feels as if his/her body were extended to 5m giant. The biggest technical issue in large-scale robot is falling down to the ground. Thus, the base frame of BigRobot is made of steel and its linkages are made of CFRP. This structure enables low center of gravity and prevents from falling down. The Big Robot was exhibited at Ars Electronica Festival 2015, Tsukuba Media Art Festival 2015 and Emerging Technologies of SIGGRAPH 2016, that proved its effectiveness.

**Keywords:** locomotion, mobile robot

### 1 はじめに

VRの基礎技術として前庭覚に刺激を与えるモーションベースは従来より研究されてきた。モーションベースの上に、飛行機や自動車の操縦席をまるごと載せて傾けることによって、飛行機や自動車が発生する加速度を模擬するドライビングシミュレータやフライトシミュレータはすでに実用化されている[1]。

モーションベースが発生する加速度は、単に前庭覚に刺激を与えるだけでなく、物理現象として体全体の各部位に見かけの力を発生させる。したがって、その見かけの力を深部感覚が知覚する。すなわち、モーションベースは前庭覚ディスプレイであるだけでなく、ハプティック・インタフェースでもある。この深部感覚の刺激が移動感覚を高める。現存する乗り物の加速度を模擬する技術はすでに完成の域に達しているが、VRでは実世界ではあり得ない乗り物を定義することも可能である。その加速度をモーションベースで提示すれば、人間の身体感覚を変容させるポテンシャルがあると考えられる。例えば、自身の体が拡大されたり縮小されたりする感覚はVRならではの効果であり、芸術性という観点からも重要なテーマである。例えば、2015年のIVRC優勝作品であるCHILDHOODは、腰に付けたカメラヘッドの映像をHMDに提示することによって子供の視線を体験させ、その結果自分の身体が子供のように小さくなった感覚を得るものである[2]。

本論文では、身体感覚を拡大する手法を提案する。

\*1 筑波大学 システム情報系

\*1 University of Tsukuba

\*2 本田技研工業株式会社

\*2 Honda Motor Co., Ltd.

BigRobotは、人が立位で乗り、歩行動作を拡大して移動し、その結果搭乗者に巨人になったような歩行感覚を与えるものである。

### 2 モーションベースを用いたアート表現

著者は、人間の身体感覚の変容をモチーフとして、モーションベースの技術を用いた作品を制作してきた。1996年に制作した”Cross-active System” [3]では、2人の参加者の内、一人がモーションベースの上に乗り、もう一人が磁気センサー付きの小型ビデオカメラをもつ(図1)。このカメラの映像はモーションベース上の人のHMDに映り、カメラの動きに合わせてモーションベースが動く。すなわち、モーションベースの搭乗者は自分が小人になって、カメラを持った人の指先で振り回されているような感覚を得る。



図1 Cross-active System

Fig.1 Cross-active System

この作品の名前にインタラクティブではなくて **Cross-active** と名前を付けたのは、この動作入力と感覚フィードバックのずれが参加者同士のコミュニケーションを生むことを意味している。自分が小人になって人に操られる、という体験は自分というものの自己認識を新たに定義することになる。この点が芸術的観点から高く評価され、メディアアートの分野で世界最大のコンペティションである **Prix Ars Electronica** において **honorary mentions** を受賞した。

モーションベースの技術を用いたもう一つ作品である「メディアビークル」を 2007 年に制作した[4]。メディアビークルは車輪付き脚機構の上に、全周映像提示機能をもカプセルが載り、搭乗者はこのカプセルの中に入る(図2)。車輪付き脚機構は、各脚の角度を制御することによって上下の並進とロールとピッチの回転運動を発生する。各車輪は任意の方向に操舵する機能を持たせてあり、メディアビークルを前後左右に移動するとともに、ヨー回転を行うことができる。車輪は無限に回転することができるので、前後左右とヨー回転は、無限の可動範囲を有する。



図2 メディアビークル  
Fig.2 Media Vehicle

この車輪付き脚機構と全周映像ディスプレイの組み合わせは、VR 端末と自動車の融合を意味する。バーチャル世界を体験する機能と実世界を移動する機能を同時に実現しているわけである。自動運転の実用化が進んだ社会においては、移動手段と VR 端末の合体は現実のものになるであろう。

メディアビークルは、搭乗者に与える映像情報と揺動運動の与え方によって、様々な体験を作り出すことができる。例えば、センサー付きカメラヘッドを、メディアビークルの外にいる人が持てば、前述の **Cross-active System** と同じ効果が得られる。また、カメラヘッドをシャシー下部に付ければ低い目線になり、揺動と組み合わせ

せることによって、うさぎ等の小動物の動きを体験することができる。

このメディアビークルは 2007 年に日本科学未来館で、2011 年にオーストリアの **Ars Electronica Center** で長期展示を行った。

### 3 BigRobot のコンセプト

前述の **Cross-active System** とメディアビークルは、いずれも自身の身体が小さくなった体験をもたらすものであった。一方、**Big Robot** はその逆で自身の身体が巨人になった体験をもたらすことを目指したプロジェクトである。身体感覚を縮小する方は、前述のように先行研究があるが、拡大する方は実装が難しく、前例がほとんどない。巨人の視点の疑似体験だけであれば、ステレオカメラをドローンに載せて、巨人の身長的位置まで上昇させることによって実現が可能である[5]。また、**Cross-active System** とメディアビークルのセンサー付きカメラヘッドをドローンに付けて飛ばせば、鳥になったような視覚体験が得られるが、身体感覚までは鳥になれない。

本論文では身体感覚を拡張して巨人になる要素として、立位で歩行運動をすることと、歩行に伴って発生する加速度や見えの変化を生身の身体で受けることに着目している。これを実現する手法として、通常のコンプラットフォーム上で、HMD で観察するということも考えられる。しかし、通常のコンプラットフォームでは並進の可動範囲に制約があるため、徐々に速度が増減する自動車や飛行機の加速度提示には効果的であっても、巨人の歩行運動のように加速度が大きく変化する現象を模擬するには限界がある。また HMD やプロジェクタの性能が上がっても、肉眼による直視の方がより自然に外界を見ることができる。

本研究ではこのような認識に基づいて、実際に巨大ロボットを作り、その上部に人が立ち、巨人が歩く際に発生する加速度を全身で受けることを目指している。それを行うために、搭乗者の歩行動作を検出し、それを拡大して体に加速度を与える機能を実現する。加速度を与えるという点において **Big Robot** はモーションベースである。**Cross-active System** とメディアビークルでは、搭乗者は座位で体験したが、**Big Robot** では搭乗者は立位で、実際に歩行動作をする。立位で歩行動作をすると、全身の体性感覚が刺激され、多くの感覚フィードバックを得ることになる。

自分の体が大きくなった時の移動感覚は、身体を拡大した分に対応して大きな加速度を提示する必要がある。モーションベースの可動範囲はそれを可能にする大きさがなければならない。一般のシミュレータに用いられるモーションベースでは、次の加速度提示に備えてウォッシュバックをしなければならないが、歩行動作のように連続して起こる現象には、それをやる時間がない。した

がって、提示しようとする巨人と同じ大きさの移動ロボットを用意し、巨人が歩行するときの頭部の移動軌跡を再現することが理想的な加速度提示になる。これが、歩行移動型モーションベースの設計思想の原点になる。このロボットの頭部に人が載れば、加速度だけでなく、視覚情報も巨人と同じ高さになり、前進時に受ける空気の流れも皮膚感覚として感じるができる。したがって、**BigRobot** は単なるモーションベースではなく、統合的な感覚ディスプレイといえる。

巨大ロボットは、搭乗者に感覚刺激を与えるだけでなく、それを外で見ている人にも強い印象を与えるので、芸術的な表現の対象となってきた。例えば、体長4mで車輪付き脚機構を有する **KURATAS** は、2013年の文化庁メディア芸術祭で審査員特別賞を受賞している[6]。ステラークは6脚移動機構の上に人が載るインスタレーション作品を発表している[7]。これらの作品は、搭乗者が歩行動作をするものではないが、搭乗者の歩行を拡大する作品の例としては、スケルトニクスを挙げるができる[8]。スケルトニクスはパンタグラフリンクを用いて手足の可動範囲を1.5倍に拡大するものであるが、アクチュエータを持たない受動機構であるため、1.5倍に拡大するだけでも大きな力が搭乗者に要求される。

フランスのナント市で開発された **La Machine** は、象や蜘蛛などの形をした巨大構造物に動きをつけたもので、町起しの成功例として知られている[9]。我が国でも2019年までに実物大のガンダムに動きを付けようとする **Gundam Global Challenge** が進行中で、成功すれば、**La Machine** よりも大きな経済効果を持つであろう。

**BigRobot** プロジェクトでもこのような観客効果を狙っており、搭乗者にとっての統合的な感覚ディスプレイとしてだけでなく、周りで見ている人にも、巨人が歩いているように感じさせることを設計に取り入れている。

#### 4 BigRobot Mk.1 の実装

このような機能をもつ巨大ロボットを設計する際に、最もストレートな発想は巨人と同じ大きさのヒューマノイドロボットを作ることであるが、動歩行を行う2足歩行ロボットにおいて転倒のリスクを完全に排除することはできない。さらに、巨大な2足歩行ロボットに動歩行を行わせることは技術的に多くの困難が伴い、人が載った状態での安全性を確保するまでに至るのは、予想する研究期間では不可能であり、開発にかかる費用対効果が非常に低いと言わざるを得ない。

このような考察のもとに、著者がとった設計思想は、車輪による移動機構の上に頭部に揺動運動を与えるようなリンク機構を載せることである。これらの並進と揺動の運動を組み合わせることによって、巨人の頭部の歩行軌跡を再現しようとする発想である。車輪機構を鉄骨で作し、揺動リンクを CFRP で作れば、装置全体の重心

を下げることができ、転倒のリスクを回避できる。転倒のリスクを完全に排除するためには、モーターがダウンした時にも姿勢が維持できないといけない。そこで、揺動機構の背骨を1本の通し柱とし、搭乗者が倒立振り子の上に載るような構成にした。この倒立振り子の付け根をユニバーサルジョイントにし、ロールとピッチの回転を同時に可能にしている。倒立振り子の根本に傾斜角を機械的に制限するストッパーを備えれば、モーター出力に関係なく、最大傾斜角が決まる。ロールとピッチの回転を決めるアクチュエータとして、2関節のリンク機構を備えるようにした。このリンク機構において、足首と膝を備える脚に見たてて、観客から巨人が歩いているように見える効果を狙った。ロールとピッチの回転を与えるモーターは足首の位置に備えた。車輪を回転させるモーターも左右それぞれ独立に備え、これらの差動で方向変換ができるようにしている。これらのモーターとその制御装置はすべて車輪機構の鉄骨に固定されており、重量物の自重は車輪が支えるような設計にした。

最初の試作機 **BigRobot Mk.1** は、この設計思想の妥当性を確認することを目的とし、体長5mのものを作った(図3)。したがって、人間の体を3倍に拡大したものになる。巨人の頭部歩行軌跡は、人の歩行時の頭部軌跡をモーションキャプチャしたデータを3倍して求めている。揺動機構の可動範囲はこれをカバーできるように定めた。具体的にはピッチが0~20度で、ロールが±5度である(図4)。揺動と並進に使用したモーターは、主に電気自動車用に使われるワコー技研製 AC サーボモーターである。



図3 Big Robot Mk.1 全景

Fig.3 Overall view of Big Robot Mk.1

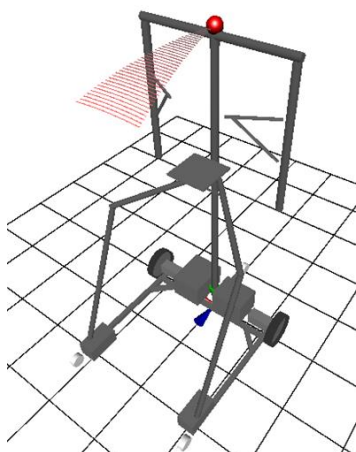


図4 搭乗者の可動範囲

Fig.4 Working volume of the rider

搭乗者は高さ 3.2m の位置にある台の上に立ち、上体を高所作業用のハーネスで支柱に固定する。歩行動作は搭乗台にタッチスイッチを付けて検出している。将来的にはこれがロコモーション・インタフェースになるが、揺動部の重量を軽くするために、この部分は省略している。BigRobot Mk.1 は CFRP 製の腕を備えている。この腕にはアクチュエータは付いておらず、搭乗者が自分の腕の自力で動かす。これは歩行運動時の腕振りの際に、巨人の腕の慣性質量を感じさせることを狙っている。

BigRobot Mk.1 は 2015 年3月に実装を開始したが、同年の Ars Electronica Festival に招待展示を依頼された。開発途上であったため、体験者は一部の招待客に限定した。体験者は搭乗台の上に立った時点で、一様に恐怖心を感じたが、数歩分前進すると強い高揚感を感じていた。会場はリンツ駅に隣接した郵便貨物集配場の跡地を使った、広大なスペースで、BigRobot Mk.1 が歩き始めると、通行人が周囲を取り囲み、観客効果が十分確認できた(図5)。



図5 Ars Electronica Festival 2015 における展示

Fig.5 Exhibition at Ars Electronica Festival 2015

同年11月には開発が完了し、一般の体験者を載せられるようになり、つくばメディアアートフェスティバル(11

月 28 日～12 月 6 日、茨城県つくば市、つくば美術) において、展示を行った。期間中に4回試乗会を設け、合計59名が体験することができた。

## 5 BigRobot Mk.1A の実装

最初の試作機 BigRobot Mk.1 を展示した結果、いくつかの問題点が明らかになった。機能上の問題は、車輪機構を支持する鉄骨の剛性不足であった。揺動用のモーターが先端に付いているため、モーターの発生する揺動力を梁の先端で受けることになる。それを支える鉄骨のねじり剛性が不十分であり、揺動運動の性能を低下させていた。

次に、展示を行う時の搬入出に際し、構造部材をすべて分解しなければならないことが問題であった。分解組み立てを行う度に細かな調整が必要であり、手間がかかるだけでなくマシントラブルの原因にもなっていた。分解しなければならないのは、転倒防止のために、車輪機構のホイールベースとトレッドをそれぞれ3mと大きくとっていたため、これをそのままトラックに載せることができなかった。

これらの問題を解決するために、BigRobot Mk.1 の改修を行った。最も大きな変更箇所は、分解しなくてもトラック輸送ができるように、基本構造体の全幅を 2.5m にしたことである。転倒防止のために、動輪の後ろに展開式のアウトリガーを付け、その先端に全方向車輪オムニホイールを付けた。これを展開するとホイールベースとトレッドは実質的に改修前と同じく、それぞれ 3m になる。

揺動モーター支持部の剛性確保のために、モーター取り付け部を、鉄骨の先端ではなく、直方体の鉄骨構造体の内部にし、片持ち梁にならないようにした。図6はこの改修を加えた後の BigRobot Mk.1A の全景である。



図6 BigRobot Mk.1A 全景

Fig.6 Overall view of Big Robot Mk.1A

また、分解しなくても、そのまま海上コンテナに積めるように、中央部支柱を、折り畳み式にし、最上部の高さが海上コンテナの高さ制限以下となる2.3mに収まるようにした(図7)。海上コンテナにそのまま積載できるようにしたのは、BigRobotをSIGGRAPH 2016で展示するためである。これは、2016年7月24日から28日にかけて米国アナハイム市にあるAnaheim Convention Centerにて行われた。5日間の会期中、連続運転を行い、合計205人に体験させることができた。

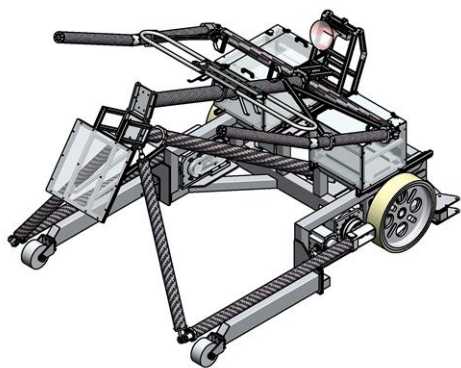


図7 折り畳んだ状態の BigRobot Mk.1A  
Fig.7 Folded Big Robot Mk.1A

## 6 歩行軌跡の拡張

### 6.1 歩行のモデル化

BigRobotは、搭乗者の頭部を巨人の頭部と同じ位置に据えることによって、巨人が歩行するのに伴って発生する加速度や見えの変化を、搭乗者が生身の身体で受けることを目指している。頭部には人間が歩行する際に刺激を受ける前庭覚や視覚、聴覚といった特殊感覚の受容器が集中的に存在しているため、搭乗者の頭部を巨人の頭部と同じ位置に据えることは、大きな効果がある。その場合、BigRobotの頭部は、巨人が歩行する際に描く軌跡にそって動かす必要がある。

巨人の歩行軌跡を生成するにあたって、本研究ではまず通常の人間の歩行をモデル化し、それに基づき身長が3倍の巨人の頭部の歩行軌跡を作成した。頭部の移動モデルとして倒立振子に着目した。倒立振子は、2足歩行ロボットの制御手法や、歩行アシストの手法として従来より研究されてきた [10][11] [12]。人間の歩行は、遊脚相(Swing phase)-遊脚中期(mid swing)から立脚相(Stance phase)-立脚中期(mid stance)までの区間を対象とする脚を左右交互に交換しながら繰り返す。これらの区間に関して、歩行中の人間の頭部から腰部までを直線をつなぎ、これが踏み出しの際に体全体を前へ傾けつつ前進し、遊脚が立脚になった後に体の傾きを元に戻す、という運動モデルを立てた。これは並進移動する倒立振子である。このような単純化を行うことよ

て、歩容の個人差を排除し、BigRobotがより少ない自由度で人間の歩行を近似できるようにした。

このモデルの妥当性を検証するために、実際に成人男性1人の頭部にトラッキングマーカを取り付け、右足一歩分の歩行に関してKinect for Windows v2を用いて頭部の移動軌跡を取得した。その結果が図8である。なお、本研究では進行方向をZ軸、横揺れ方向をX軸、高さ方向をY軸と定義した。ここから人間の歩行は踏み出しの際に体全体を前へ傾けつつ前進し、遊脚が立脚になった後に体の傾きを元に戻す動作で行われ、なおかつ踏み出した足の方へと体が誘導されることが確認できた。

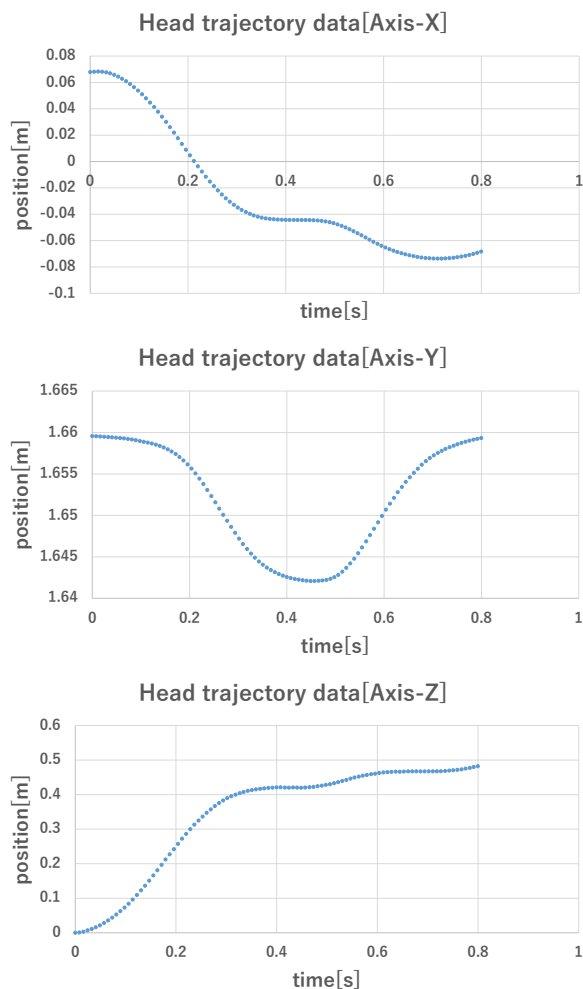


図8 モーションキャプチャした人の歩行軌跡  
Fig. 8 Head trajectory of walking

### 6.2 身長拡大による歩行運動の変化

次に身長の違いが与える歩行への影響について考察した。人間が歩行する際、各歩行周期において頭部の移動速度はおおよそ一定である。また歩行における踏み出しの際には体は傾きつつ前進し、その時の速度を維持して人間は歩行を行っている。すなわち体を傾ける

際に発生する速度に応じて人間の歩行速度は変化していると考えられる。そして体が傾く速度は倒立した棒が重力によって倒れる速度に応じるため、巨人の歩行速度を通常の人間の身長と体重との関係から求めることができると考えられる。

倒立した棒が倒れはじめ、鉛直面から角度 $\theta_1$ 倒れた状態から角度 $\theta_2$ 倒れた状態へ遷移するのにかかる時間を、時間 $\Delta t$ の間の棒の状態の遷移から算出した。時刻 $t$ における棒の重心の移動速度を $v$ 、鉛直面からの傾きを $\theta$ としたとき力学的エネルギー保存則より棒の質量を $m$ 、棒の質量はすべて重心にあるものとして棒の端から重心までの距離を $h$ とおき

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh\cos\theta = mgh$$

(1)式を $v$ について解くことで

$$v = \sqrt{2gh(1 - \cos\theta)}$$

(2)式が得られる。棒の傾きが $\theta$ から $\theta + \Delta\theta$ へ遷移するために棒の重心が移動する距離は $h\Delta\theta$ であるため遷移に必要な時間 $\Delta t$ は(3)式となる。

$$\Delta t = \frac{h\Delta\theta}{\sqrt{2gh(1 - \cos\theta)}}$$

よって角度 $\theta_1$ 倒れた状態から角度 $\theta_2$ 倒れた状態へ遷移するのにかかる時間 $t$ は

$$t = \sqrt{\frac{h}{2g}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{\sqrt{1 - \cos\theta}} d\theta \quad (4)$$

(4)式となる。つまり棒が倒れるのにかかる時間は棒の重心の高さの平方根に比例する。ここから身長が3倍になった時の歩行にかかる時間は

$$\sqrt{3} \cong 1.7\text{倍}$$

となる。

BigRobotの歩行軌跡を生成する場合の時間軸は、想定する歩行ペースに応じて、所要時間を1.7倍することになる。

### 6.3 歩行軌跡の提示結果

試作した Big Robot Mk.1 および Mk.1A の動作性能を評価するため、3倍の身長を持つ人間の頭部位置移動軌跡目標に対する応答を評価した。なお、この実験では本装置が安定して動作する限界を考慮して想定する歩行速度を下げ、通常の3分の1とした。その結果が、図9(位置)および図10(加速度)である。測定に関しては歩行データを取得した際と同様に、トラッキングマーカを装置に取り付け、Kinect for Windows v2を用いて計測を行った。

その結果、改修前の Mk.1 は、目標値に対して大きな遅延が観測された。また、横揺れ方向である X 軸方向に関しては振幅が増大した一方、進行方向の Z 軸方向に関しては振幅が小さく、高さ方向の Y 軸方向に関し

ては振幅が小さい他応答が振動した。これらの原因としては以下のように考えられる。

まず応答における X 軸方向の振幅の増大は本装置を構成する部材の強度不足の問題から、装置の揺動原点から揺動モーターまでのリンクが動作時に捻じれ起こす結果、振動が発生したと考えられる。

次に、装置の進行方向である Z 軸方向への応答の悪さに関しては、巨人の歩行を再現するために、歩行動作再現中に本装置の走行モーターに関して急激な加減速を出す必要があることから、車輪の摩擦力の限界からタイヤが滑り、その結果として移動量が小さくなっていると考えられる。高さ方向の Y 軸方向に関しては、これらの問題が相乗的に作用して振動が発生していると考えられる。

改修後の Big Robot Mk.1A では揺動機構の剛性が向上したため、上記の問題が改善された。特に高さ方向、Y 軸方向についての振動がほぼなくなった。また改修により装置重量が増加したが、動作目標値等の調整により進行方向、Z 軸方向についての遅れは抑えることができた。

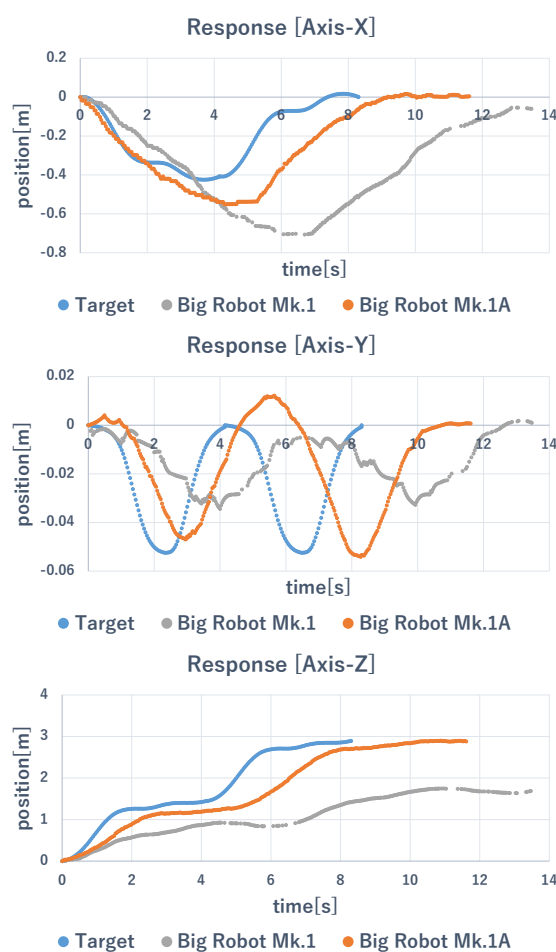


図9 Big Robot Mk.1 / Mk.1A の応答性(位置)  
Fig. 9 Position of Big Robot Mk.1 / Mk.1A

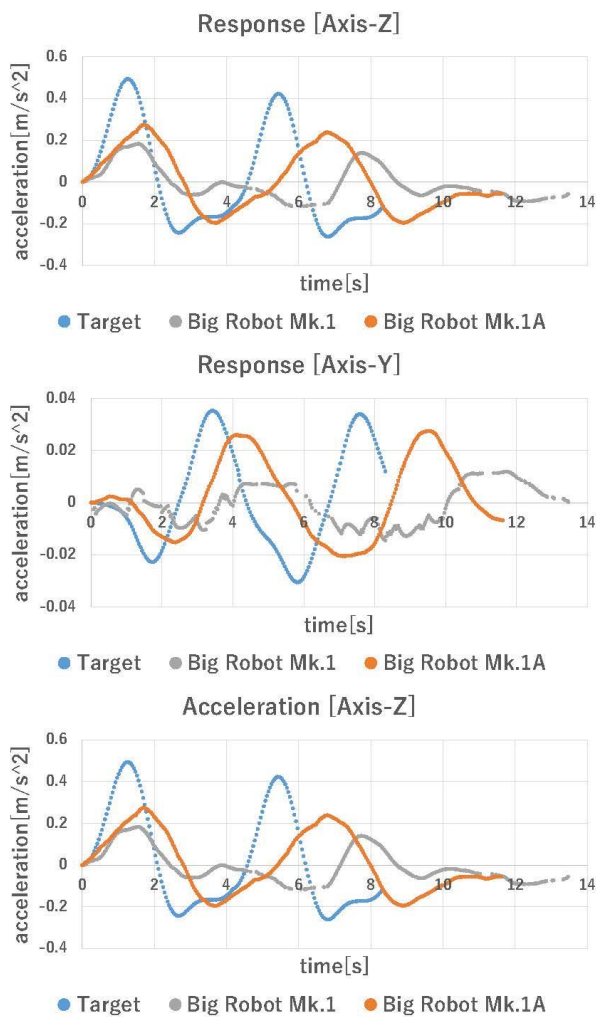


図 10 Big Robot Mk.1 / Mk.1A の応答性(加速度)  
Fig. 10 Acceleration of Big Robot Mk.1 / Mk.1A

だ初歩的な段階にあるため、評価の出発点として体験者が BigRobot をどのように受け入れたかを調べるために一般的な質問項目によるアンケート調査を行った。設計の中心的課題が倒れない人型移動ロボットの実現にあったため、特に安全面の主観評価を行うことを目指した。BigRobot を広く一般向けに展示する機会として、つくばメディアアートフェスティバルと SIGGRAPH2017 を得たので、これらの展示中にアンケートを実施した。

各質問に 0 点から 10 点の 11 段階にて回答させた。質問項目は以下のとおりである。

1. 巨人になった感じがしたか  
(しなかった / 巨人になった感じがした)
2. 歩行に違和感があったか  
(なかった / 違和感があった)
3. 動作中の装置の安定感  
(不安定だった / 安定していた)
4. 自分の歩き出しの動作に対しての装置の反応  
(追従していなかった / 追従していた)
5. 1 歩の大きさ  
(予想より小さかった / 予想より大きかった)
6. 一歩の速さ  
(予想より遅かった / 予想より速かった)
7. 安全への配慮を感じたか  
(感じなかった / 感じた)
8. 搭乗した際怖さを感じたか  
(感じなかった / 感じた)
9. もう一度乗ってみたいと思うか  
(思わない / 思う)
10. 友人に搭乗体験を勧めるか  
(勧めない / 勧める)

### 7 BigRobot の展示評価

BigRobot を一般の人々に対して体験させることがま

この質問紙に、つくばメディアアートフェスティバルでは 59 名が、SIGGRAPH 2017 では 205 名が回答した。図

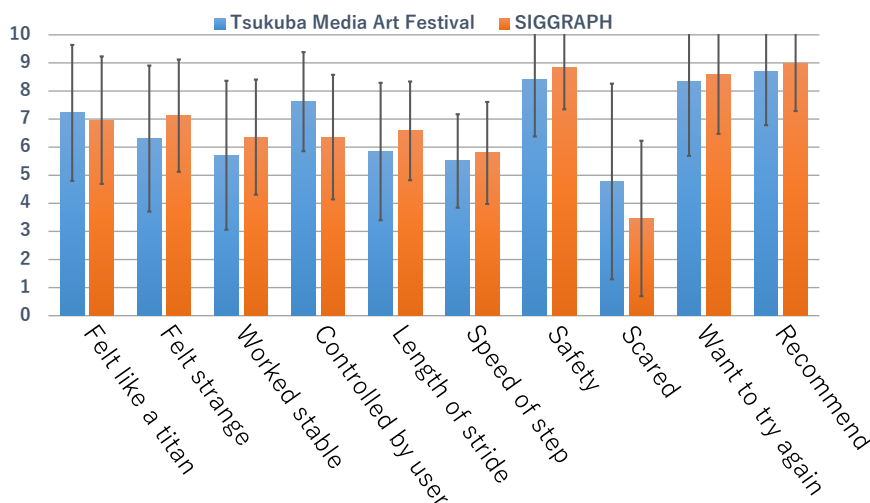


図10 質問紙の結果  
Fig 10 Result of questionnaire

10に、各質問の平均得点を示す。

つくばメディアアートフェスティバルの参加者はつくば市周辺の一般市民であり、SIGGRAPH 2017 の参加者は米国を中心に世界各地から集まった人々である。両者の間の地理的・文化的ダイバーシティは非常に大きい、各質問項目に対する評価はほぼ同じ値になった。これは、BigRobot が多様なバックグラウンドを持つ人々に対して、共通の効果を持っていることを示している。

質問項目の中で比較的评价値が高かったのは、「もう一度載りたい」「人に勧める」「安全面への配慮」であった。多くの搭乗者が体験を楽しんでいたことがわかる。次に、「巨人になった感じ」「歩行動作に対する応答」の評価値が高く、歩行感覚の拡張が概ねねらいどおりだったことがわかる。そして、評価値が最も低かったのは「恐怖を感じた」であり、BigRobot の設計の出発点である安全性の確保が、体験者の主観評価においても成功したことが確認できた。

この質問紙には、自由記述欄も設けていた。つくばメディアアートフェスティバルでは、「もっとたくさん歩きたい」(5件)、「音や振動があるともっとよい」(3件)などがあつた。本装置に使っているモーターが電気自動車用であり、動作音がほとんどしないことが、かえって不満だったようである。SIGGRAPH 2017 では、腕に関する感想が多く、「腕が重い」という意見が9件に上り、一方で「腕の重さが適切」という意見も3件あつた。腕が重いと感じた理由としては、足の動きに対する抵抗力を提示していないので、相対的に腕が重いと感じたことが考えられる。「足に対するフィードバックがほしい」という意見も3件あつた。これは、巨人にふさわしい抵抗力を発生するロコモーション・インタフェースが必要であることを示している。

## 8 まとめ

本論文では、歩行感覚を拡張する巨大ロボット型の装置の設計思想と実装例を紹介した。つくばと米国における展示を通じて、この設計思想が正しかったことを確認した。BigRobot の試作機は、公開展示だけでなく、この格納庫である筑波大学エンパワースタジオを訪れる多数の見学者に対しても搭乗させている。それらの体験者から、「下にいる人を踏みつぶしたい」「つまみ上げて食べたい」といった過激な感想を聞くことができた。本装置は身体感覚を拡張することによって、人間の精神性にまで影響を与えるポテンシャルがあるのではないかと予想される。その点において、芸術的な表現としての意義があると考えられる。

BigRobot は人間自体の研究ツールとしても可能性がある。J.J.Gibson が生態学的視覚論で指摘したように、生物は自身の体と環境の相互作用によって外界を認識

している[13]。したがって、その拠り所となる身体感覚が巨大化すれば、外界の認識の仕方も変わるはずである。心理学の世界では、逆さ眼鏡のように、視覚入力を変容させることによって、人間の外界認識のメカニズムが研究されてきた。同様に身体感覚を変容させるツールがあれば、別の視点から人間の外界認識のメカニズムに関する研究ができるはずである。それも BigRobot の将来性の一つである。

## 参考文献

- [1] 舘 暲、廣瀬 通孝監修、バーチャル・テック・ラボ、工業調査会 (1992)
- [2] 佐藤 綱祐、西田 惇、高鳥 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、日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.22, No.1 pp.71-80, 2017
- [3] Iwata,H., . Cross-active System, CYBERARTS 1996 (1996).
- [4] Iwata,H., . Media Vehicle, Ars Electronica 2007 Festival Catalog (2007)
- [5] 古川 正紘、他、テレイグジスタンスの研究(第 76 報) —巨人化体験のための視覚伝送系の設計と実時間映像伝送系の実装—、Proceedings of the 2014 Conference on Robotics and Mechatronics. 2A2-M04 (2014)
- [6] 倉田 光吾郎, “KURATAS”  
<http://suidobashijuko.jp/>
- [7] Stelarc “Exoskeleton”  
<http://stelarc.org/>
- [8] 白久 レイエス樹 “スケルトニクス”  
<http://skeletonics.com/skeletonics-series/>
- [9] フランソワ・ドラロジエール、ラ・マシ カルネ・ド・クッキー、玄光社 (2017)
- [10] 梶田 秀司、倒立振子から2足歩行へ -制御理論と ZMP、日本ロボット学会誌 Vol.27, No.4 pp.392-395 (2009)
- [11] 尾形 邦裕、國吉 康夫、人の歩行運動と二足歩行機械の運動の比較における新体制を生かした歩行に関する検討、第5回 ECSRA 研究会、A-5, 2009
- [12] 佐野 明人、重力場を巧みに利用した動的 2 足歩行(人間に近い歩行への挑戦)、日本ロボット学会誌、Vol.11, No.3 pp.52-57, 1993
- [13] James J. Gibson, 生態学的視覚論、サイエンス社 (1985)

(2017年6月5日受付)

## [著者紹介]

岩田 洋夫 (正会員)



1986年 東京大学大学院工学系研究科修了(工学博士)、同年筑波大学構造工学系助手。現在筑波大学システム情報系教授。ハプティクス、デバイスアート、エンパワーメント情報学などの研



究に従事。

**木村 優太**（正会員）



2017年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。移動型モーションベースに関する研究に従事。卒業後は本田技研工業株式会社にて製品の品質保証に関する業務に従事。

**圓崎 祐貴**（正会員）



2013年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程修了。同大学システム情報系研究員を経て、現在同系助教。没入ディスプレイ及び力覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

**矢野 博明**（正会員）



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)。1999年筑波大学講師、2017年より同大システム情報系教授。力覚提示、歩行感覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。