



2 軸モーションプラットフォームによる 2 足歩行ロボットの 搭乗感呈示手法の改良

Improvement of Boarding Sensation Presentation of the Biped Walking Robot with a Two-axis Motion Platform

森 恭介¹⁾, 脇田 航¹⁾

Kyosuke MORI and Wataru WAKITA

1) 広島市立大学大学院情報科学研究科 (〒731-3194 広島市安佐南区大塚東三丁目 4 番 1 号, mori@ics.info.hiroshima-cu.ac.jp)

概要: 我々は、2 足歩行ロボットに搭乗して歩行移動する際の衝撃、振動、急斜面などの 6 自由度の運動を 2 軸モーションプラットフォームの転がり運動に近似させることで、低コストかつ高臨場な 2 足歩行ロボットの搭乗感呈示を目指している。現状、2 足歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力による高周波数振動に対して 2 軸モーションプラットフォームの追従性が弱く、体験者に撃力の呈示ができていない。そこで本研究では、ロボットの足が地面に着地する際の撃力を呈示するため、揺動パターンを改良し、定量評価実験を行った。

キーワード: 人工現実感, モーションプラットフォーム, 2 足歩行ロボット, 搭乗感呈示

1. はじめに

自動車や飛行機、ロボットなどの搭乗感を呈示するため、人や座席などの積載物を揺動可能なモーションプラットフォームが古くから利用されている。

モーションプラットフォームを用いた歩行ロボットの搭乗感呈示の先行研究として、Zordan らは、歩行ロボットの歩行時の振動をピッチ方向に約±7deg 揺動させることで、歩行ロボットの歩行感が得られたことを報告している[1]。しかしながら、従来の自由度の低いモーションプラットフォームでは、大きな揺動を実現することが構造的に困難であるため、歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力による高周波数振動の表現や、傾斜の大きいフィールドでの歩行ロボットの歩行を実現するには至っていない。そこで我々は、2 足歩行ロボットに搭乗している際の衝撃、振動、急斜面などの 6 自由度の運動を 2 軸モーションプラットフォームの転がり運動[2]に近似させることで、低コストかつ高臨場な 2 足歩行ロボットの搭乗感呈示手法を提案している。

前報[3]では、2 軸モーションプラットフォームをフィールドの傾斜に合わせて大きく揺動させることで、傾斜の大きいフィールドでの 2 足歩行ロボットの搭乗感呈示が可能であることを明らかにした。一方で、2 足歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力による高周波数振動に対して 2 軸モーションプラットフォーム

の追従性が弱く、体験者に撃力を呈示できていないという問題が明らかになった。

そこで本研究では、2 足歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力を呈示する際、2 軸モーションプラットフォームの揺動パターンを改良し、定量評価実験を行った。

2. 関連研究

モーションプラットフォームで高周波数振動が発生する場面として、前述のように歩行ロボットの歩行中の足と地面の衝撃やドライビングシミュレータ等において壁などの障害物に衝突したときなどが考えられる。このような衝突、衝撃を呈示する手法として、小型の振動アクチュエータを用いる手法がある。具体的には、小型の振動アクチュエータを筐体の座席部分に設置する手法[4]や、筐体とユーザの接触点 4 箇所（背部、臀部、手掌部、足底部）に設置する手法[5]などがある。しかしながら、これらの手法では筐体と小型の振動アクチュエータそれぞれ別に制御する必要があり、衝突、衝撃時の振動の呈示が複雑なものとなるだけでなくコストもよりかかることとなる。

一方、Pitch, Roll 方向の 2 軸運動によって移動体の前庭感覚を呈示する手法として、堀ら[6]は、Pitch-Roll 方向の回転運動のみで加速度が発生する運動時に体感する慣

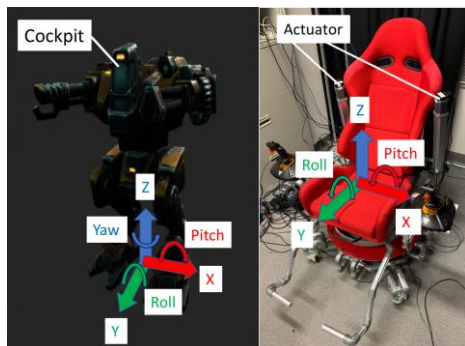
性を擬似的に体感できることを報告している。また、Zordanらは歩行ロボットが足踏みすることで発生する力をPitch方向の回転で表現し、本当に歩いている感覚があるという結果が得られたことを報告している[1]。

このほか、八木らは電動車イスを移動、地面を傾斜させることで、Pitch方向の回転運動に加え、並進運動も組み合わせた前庭感覚呈示手法を提案し、回転運動のみからなるモーションプラットフォームと比較した際に移動感覚が向上されることを報告している[7]。しかしながら、電動車椅子では、Pitch方向にしか揺動させることができず、任意の高周波振動を呈示することは困難である。

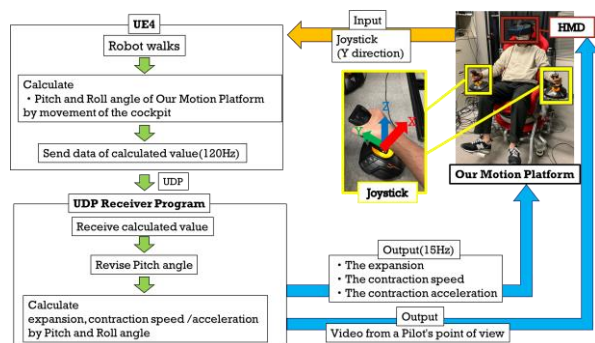
これらに対し、我々が提案している球面体を用いた2軸モーションプラットフォームによる転がり運動を用いることで、並進に近い動きで筐体が回転するため、簡単な制御で低コストかつより臨場感の高い搭乗感呈示が期待できる。

3. システム概要

図1にシステム概要を示す。VRコンテンツ開発環境として、Unreal Engine4(以後UE4)を用い、ジョイスティックの入力に応じて図1(a)左に示す2足歩行ロボットの三次元モデルを操作する。また、2足歩行ロボットの揺れや歩行時に発生する振動を図1(a)右に示す二軸モーションプラットフォームを介して体験者にフィードバックさせる。



(a) ロボットの3次元モデルと2軸モーションプラットフォーム



(b) 処理の流れ

図1: システム概要

本研究では、ジョイスティックを両手用に2つ用いてUE4内の2足歩行ロボットを操作する(図1(b)右上参照)。ジョイスティックを2つ同時に前(Y軸)方向に倒すことでUE4内の2足歩行ロボットが前に歩行し始める。このとき、あらかじめ設定しておいた2足歩行ロボットの歩行時のキープフレームアニメーションからコックピットの上下左右運動が生じるため、この動きをもとに2軸モーションプラットフォームのPitch, Roll方向の傾斜角を算出し、UDP通信を用いてPC側に送信する(約120Hz)。また、別途作成したUDP受信およびアクチュエータ制御プログラム(UDP Receiver Program)側で受信したデータをもとにアクチュエータを制御する(約15Hz)。UE4内で算出されたPitch, Roll方向の傾斜角だけでは2足歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力を表現することができないため、まず、UDP Receiver Programでは、Pitch方向の傾斜角を2足歩行ロボットが歩行中に足と地面の撃力を呈示する際に用いる数式をもとに補正を行う。Pitch方向の傾斜角の補正方法については次章にて述べる。次に、Pitch, Roll方向の傾斜角からアクチュエータの伸縮量、伸縮加速度を算出し、伸縮速度、伸縮加速度をもとにアクチュエータの伸縮長を制御する[2]。また、HMDには2足歩行ロボットのコックピットからの映像が出力される。

4. 2足歩行ロボットの搭乗感呈示法

2足歩行ロボットのコックピットの上下運動(Z座標値)は縦の動きであるため、2軸モーションプラットフォームにおいてはPitch方向の傾斜角、コックピットの左右運動(X座標値)は横の動きであるためRoll方向の傾斜角に置き換える。また、2足歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力による振動をPitch方向の傾斜角で呈示することで、2足歩行ロボットの搭乗感を呈示する。

4.1 コックピットの上下運動による揺れ

図2に2足歩行ロボットの歩行中におけるコックピットのZ座標値の時系列変化を示す。

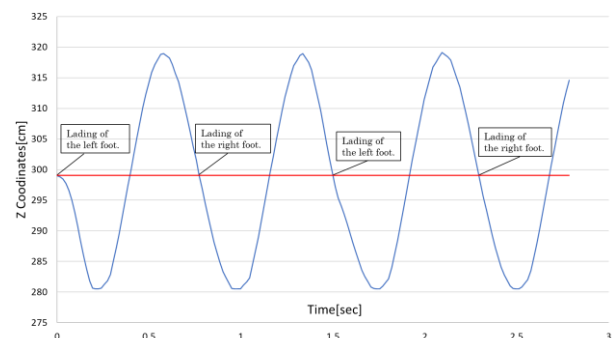


図2: コックピットの上下運動の時系列データ

図2の赤線は、地面に足がついているかついていないかの境目を表しており、赤線より値が小さいときは足が

地面についている状態となる。2足歩行ロボットの上下運動をモーションプラットフォームの Pitch 方向の傾斜角に置き換える際、後ろ側に座席部分が倒れると違和感につながる可能性があるため、水平状態から前方へと座席部分が揺動するように補正した。また、モーションプラットフォームを制御する際、図 2 の振幅では揺れが大きすぎるため、振幅を 1.5 に補正した。座席部分の動かし方によってどの程度 2 足歩行ロボットの上下運動を呈示できるのかどうかは今後明らかにしていく。

4.2 歩行中の撃力による揺れの呈示手法

本研究では、2足歩行ロボットが歩行中に足が着地するタイミングでモーションプラットフォームを急激に前方へ揺動させ、その後ゆるやかに水平方向まで揺動させることで撃力を呈示するものとする。あらかじめ設定しておいた 2 足歩行ロボットの歩行時のキーフレームアニメーションから 0.7621sec ごとに足が着地することがわかっているため、0.7621sec ごとに下記の数式を用いて補正を行う。

$$Z(t) = Z_0 e^{-\omega_0 t} (1 + \omega_0 t) \quad (1)$$

ここで、 $Z[\text{cm}]$ は変位、 $Z_0[\text{cm}]$ は初期値、 $t[\text{sec}]$ は時間、 ω_0 は定数を表している。前節の図 2 を補正したものと 2 軸モーションプラットフォームの座席部分が揺動する時間、振幅をそろえるために、 $\omega_0 = 28$ 、 $Z_0 = 1.5$ とした。ここで、図 3 に 2 足歩行ロボットの歩行中におけるコックピットの Z 座標値を Pitch 方向への揺動に補正した時系列データを示す。

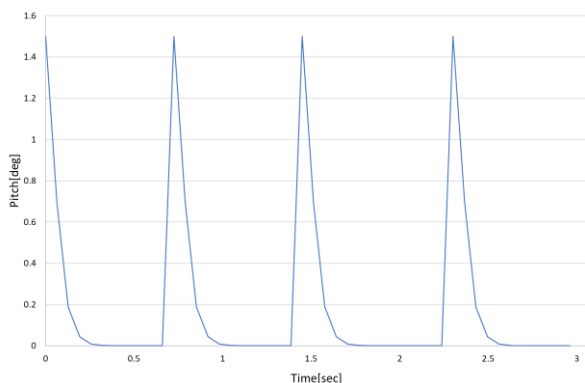


図 3: 撃力を考慮したコックピットの上下運動を Pitch 揺動に補正した時系列データ

また、アクチュエータの伸縮速度 v を 200[mm/sec] とし、伸縮加速度 a は下記の式(2)、(3)で算出する。

$$\Delta Z = |Z(t) - Z(t - T)| \quad (2)$$

$$a = \begin{cases} 0.99G & (\Delta Z = Z_0) \\ 0.22G & (\Delta Z \neq Z_0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $T[\text{sec}]$ はサンプリング周期、 $\Delta Z[\text{cm}]$ は T 時刻前の変位との差分を表している。

本研究では、図 3 の時系列データから算出した伸縮量 [2]、伸縮速度 v 、伸縮加速度 a を用いてモーションプラットフォームの制御を行う。また、左右のアクチュエータの伸縮による揺動だけでなく、アクチュエータの伸縮により生じる慣性力による座席部分の揺動も踏まえて搭乗感呈示を行う。

5. 撃力呈示の評価実験

本章では、UE4 内で 2 足歩行ロボットが歩行している際に 2 軸モーションプラットフォームの座席部分がどのように揺動しているか定量評価を行った。

5.1 実験環境

2 軸モーションプラットフォームの座席部分がどのように揺動しているかを計測するために、本研究では NaturalPoint 社製の Optitrack モーションキャプチャを利用した。マーカは合計 5 個使用し、座席部分に取り付けておく。マーカの取り付け位置を図 4 に示す。

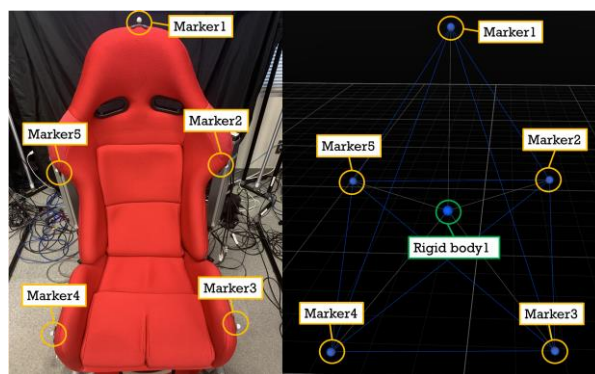


図 4: マーカの取り付け位置

ここで、Rigid Body 1 は Marker 1, Marker 2, Marker 3, Marker 4, Marker 5 の重心位置である。

5.2 定量評価実験

図 5 に目標値と 2 軸モーションプラットフォームの座席部分の実測値の揺動結果を示す。

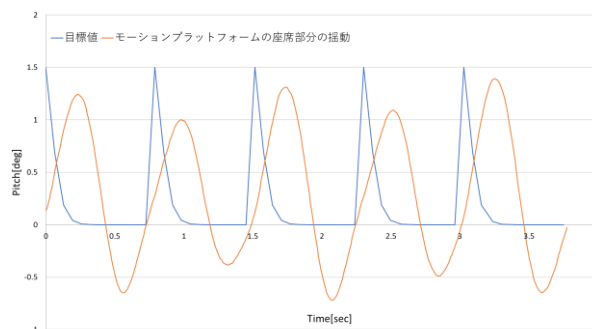


図 5: 定量評価実験結果

図 5 では、まず、座席部分が 1.5deg に向かって傾斜し

ているが、加速度が足りないため目標値と座席部分の揺動の立ち上がり時間に大きな差ができ、目標値が 1.5deg から約 0.425sec 後に最大値となっている。その後、目標値が 0deg となっている箇所では、座席部分はアンダーシュートし、-0.39~-0.72deg まで傾斜している。これは、アクチュエータの伸縮により生じる慣性力によって起こると考えられる。また、アクチュエータの伸縮加速度は ΔZ によって異なるが、最大値、0deg に到達するまでの時間がほとんど変わらない。そのため、今後の課題として、ゆるやかに 0deg に戻すのではなく、急激に 0deg に戻したときに座席部分が実際にどのように揺動するのかについて追加検証する必要がある。また、振幅の大きさやキープフレームアニメーションの再生速度を変える等し、どの揺動パターンがより体験者に撃力を呈示できるのか主観評価実験を行っていく必要がある。

6. むすび

本研究では、2足歩行ロボットが歩行中に足が着地することによって生じる撃力を呈示する際の2軸モーションプラットフォームの揺動パターンを改良し、定量評価実験を行った。その結果、2軸モーションプラットフォームがアクチュエータの伸縮により、座席部分はアンダーシュートし、-0.39~-0.72deg まで傾斜していることが明らかになった。

今後の課題として、ゆるやかに 0deg に戻すのではなく、急激に 0deg に戻したときに座席部分がどのように揺動するのか追加検証するとともに、振幅の大きさやキープフレームアニメーションの再生速度を変えることで2軸モーションプラットフォームの座席部分がどのように揺動するのか明らかにしていく。また、どの揺動パターンがより体験者に撃力を呈示できるのか主観評価実験を行っていく。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP19H04158 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] V. Zordan, J. Welter, S. Hindlekar, J. E. Smith, W. G. McKay, K. Lowe, C. Marti, and R. A. Taylor: MechVR: A physics-based proxy for locomotion and interaction in a virtual environment, In Proceedings of the Tenth International Conference on Motion in Games (MIG '17), pp. 1-5(2017)
- [2] W. Wakita, T. Takano, and T. Hadama: A low-cost motion platform with balance board, In Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '18), No. 44, pp. 1-2(2018)
- [3] K. Mori and W. Wakita: Boarding Sensation Presentation of the Biped Walking Robot with a Low-cost Two-axis Motion Platform, In Proceedings of 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops, pp. 745-746(2021)
- [4] C. Branje, M. Karam, D. Fels and F. Russo. Enhancing entertainment through a multimodal chair interface, In Proceedings of 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH), pp. 636-641(2009)
- [5] 小玉 亮, 塩野入 央空, 藤枝 延維, 梶本 裕之: 自動車を用いた VR エンタテインメントシステムにおける衝激を模した運動フィードバックの体感向上効果検証, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文誌, Vol.24, No.3, pp. 241-252(2019)
- [6] 堀磨伊也, 神原誠之, 横矢直和: 低自由度モーションベースと没入型ディスプレイを用いた慣性力の再現によるテレプレゼンスシステムの構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vo.16, No.2, pp. 283-292(2011)
- [7] 八木龍之介, 海野みのり, ヤエムヴィボル, 雨宮智浩, 北崎充晃, 池井寧: 前庭感覚デバイスによる身体運動感覚の合成に関する研究, 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3D2-3 (202