

地震の縦揺れも再現する全方向車両型起震装置の開発

○岡本 裕 (HERO 研) 吉田 稔 (白山工業)
木村 直人 (HERO 研) 広瀬 茂男 (HERO 研)

地震への防災意識の涵養のためには、シミュレータを利用して巨大地震を事前に体感することが有用である。そのため、これまでに我々は人間が持ち運び可能な全方向移動車両の「地震ザブトン」を開発してきたが、これは横揺れのための再現であり、縦揺れの再現は未達成であった。そこで、本研究では従来装置に積載可能な、座位姿勢の人を垂直駆動可能な装置を新たに開発する。加えて、過去の地震データを用いた、人が座位姿勢での垂直方向震動実験検証を行い、提案装置の有効性を確認する。

1. はじめに

1994 年阪神淡路大震災、2011 年東日本大震災、2024 年能登半島地震を例に挙げるように、日本は地震大国であり、今後も南海トラフ地震や首都直下地震等の大規模地震の発生が高い確率で予想されている [1]。このような地震への防災意識の涵養のためには、シミュレータを利用して巨大地震を事前に体感することが有用である。そのため、これまでに地震の震動を再現可能な起震装置が開発されてきた。例えば、ボールねじ式 3 軸起震車 (飛鳥特装株式会社) [2]、油圧シリンダ式 3 軸起震装置 (カバヤシステムマシナリー株式会社、現: KYB 株式会社) [3] や、電動シリンダ 6 軸パラレルリンク起震装置 (コスメイト株式会社) [4] 等がある。しかし、これらの起震装置は一般的に大型かつ大重量で、持ち運びや設置が困難なものであり、気軽に体験できるものではない。また、小型起震装置の研究として、Y. Sugahara et al. のワイヤー駆動型 [5] があるが、この地震波再現は横揺れのみであり、人を搭乗した状態での実験は未検証である。一方で、著者らはより多くの人々に気軽に地震体験を提供するために、人間が持ち運び可能で、室内環境で座位姿勢の状態地震を体験可能な装置である「地震ザブトン」を開発してきた [6, 7]。この装置は、R. Damoto et al. が提案した VUTON クローラ [8] を利用した全方向移動車両であり、平面空間を自在に移動でき、強震動だけでなく従来大型システムでのみ可能であった数メートルの振幅を持つ長周期地震動も屋内で手軽に再現可能とした。しかし、この「地震ザブトン」における地震波再現は横揺れのみである。過去に縦揺れ再現のためにエアシリンダを用いた装置 [9] を提案されているが、地震波に対してエアシリンダの制御が困難である問題があった。そこで、本研究では、エアシリンダにより人と座席部の重力を補償し、モータにより加振する垂直駆動装置を提案する。これにより、制御が容易になり、エアシリンダのみよりも少ないエネルギーで駆動可能となる。そして、提案装置を従来の「地震ザブトン」に搭載し、縦揺れも再現する全方向移動車両起震装置を開発する。加えて、過去の地震波形データを用いた垂直方向の震動実験を行い、提案装置の有効性を検証する。

2. 地震体験における縦揺れの波形

地震体験装置の目的は、災害時に被災者が不安や恐怖でパニック状態に陥ることを防止するために事前に地震を模擬体験することである。この実現には、地震特有の揺れを再現することが重要である。地震波のう

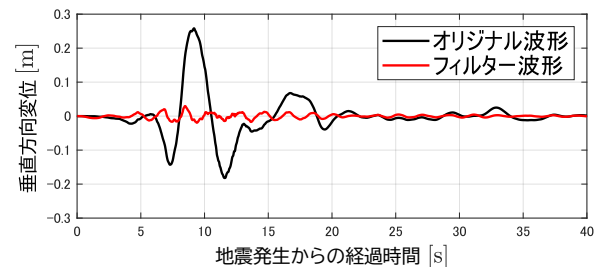


図 1 実際の縦揺れの例 (2016 年熊本地震)

ち、横揺れの再現は従来の地震ザブトンで実現したため、ここでは縦揺れの再現に焦点を当てる。実際の地震の縦揺れの例として、熊本地震 (観測点: 熊本県南阿蘇村中松) における垂直方向変位の時系列データ [10] を図 1 に黒線で示す。このデータは、加速度の時系列データに対して積分漸化式処理 [11] を行い算出したものであり、その一部を抜粋している。熊本地震は直下型地震であり、この地震波は図 1 のように低周波かつ大振幅の揺れと、高周波かつ小振幅の揺れから構成される。この大振幅の地震波を再現するためには、振幅分装置が巨大になる。これは当初の持ち運び可能な装置という目標に反することから、このような地震波の完全再現は困難である。そこで、地震波のうち人が不安や恐怖を感じやすい揺れの再現を目指す。本装置の体験において人は座位姿勢であることから、乗り心地の側面から所望の波形を考える。BS6841 や ISO 2631 等の規格によれば、座位姿勢での垂直方向振動において、人が最も不快に感じる加速度の周波数は 4-16Hz とされている。この周波数帯は、着座状態の人の共振周波数帯 (主共振: 約 4-6 Hz, 第 2 共振: 約 8-15 Hz) と一致することが Vogt et al. [12]、岡村ら [13]、玉置と吉村 [14] の研究により報告されている。このことから、被災時の人の不安や恐怖と乗り心地の不快さが類似したものであると仮定すると、地震波のうち 4-16Hz の周波数帯の加速度波形を再現すればよいといえる。この周波数帯は長時間曝露すると人体に悪影響があるが、地震波体験の数分程度であれば短時間であるため問題ない。本研究では、人の体格差等を考慮して、4-16Hz を含む周波数帯の波形を用いた。図 1 における地震波の加速度に対して、1-25Hz のバンドパスフィルタ処理を行い、変位を求めたデータを図 1 に赤線で示す。この処理により、振幅が数十 mm と黒線の振幅と比べて十分に小さくなり、起震装置を小型に設計可能となる。

3. 提案起震装置

3.1 提案装置の概要

地震ザブトンを基に新たに開発した縦揺れを再現する垂直駆動装置について説明する。その装置に必要な性能要件を以下に示す。

- ・人が持ち運び可能な大きさ及び重量（椅子程度）であること
- ・人間 1 人（約 100kg 以下）を垂直駆動可能であること
- ・振動負荷に対して、垂直駆動案内部が十分な強度があること
- ・4-16Hz を含む周波数帯の縦揺れを再現可能であること

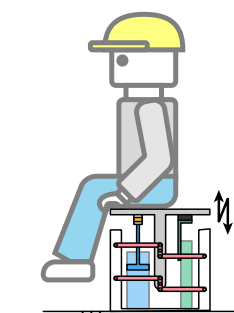
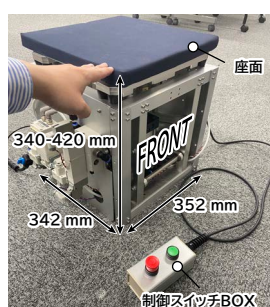


図 2 垂直駆動装置の外観 図 3 装置使用時の様子

以上の要件を基に開発した垂直駆動装置の外観及び代表寸法を図 2 に示す。この装置は、直方体の装置部と人が座る座面部で構成され、図 3 のように座面自体を垂直方向に震動させることで、地震の縦揺れを再現するものであり、最大約 40mm の振幅範囲を持つ。この範囲は、起震車 [2] の最大 50mm と比較して同等の駆動範囲である。

3.2 垂直駆動装置の構造

垂直駆動装置の構造について説明する。装置内部の構造を図 4 に示す。図 4 の左図は 3DCAD の装置の俯瞰図、右図は実際の装置を側面図である。本装置は、ワット

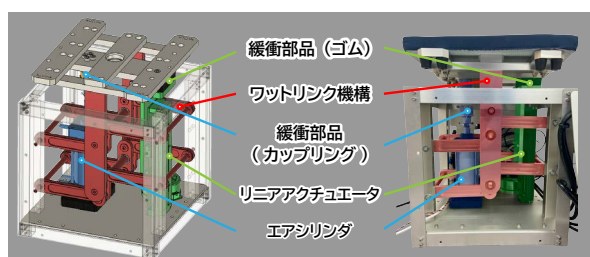


図 4 垂直駆動装置内部の構造

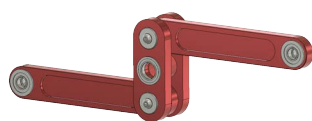


図 5 ワットリンク機構

リンク機構、エアシリンダ、リニアアクチュエータの 3 つで構成される。ワットリンク機構は疑似直線運動を行うリンク機構であり、座面部の直進運動を案内する役割を持つ。これは図 4 の赤色で示すように支柱と座面から伸びたリンク間に図 5 のワットリンクが各側面に 2 セット、計 4 セット接続されており、横揺れ時などに生じる曲げモーメントにも十分な剛性を持つ。従来の起震装置として、直動運動ガイドに平行リンクが使われた例 [3] もあるが、それと比較してリンク数が少なく、軽量で安価に設計が可能である。エアシリンダは、空圧によって座面本体と人の重量を補償する役割を持ち、図 4 の青色で示すように底面部と座面間に接続されている。これにより、人の体重に依存せずに振動制御が可能となる。リニアアクチュエータは、座面の加振を行う役割を持ち、図 4 の緑色で示すように装置本体と座面部間に接続されており、装置裏面でプーリ及びベルトを介して EC モータによって駆動する。以上より、人と座席の荷重を常時補償することで、少ない駆動力で垂直方向駆動を達成する。ただし、ワットリンク機構の運動は疑似直線運動であるため、運動時に座面とシリンダ及びリニアアクチュエータ間で位置ずれが生じる。そのため、その位置ずれ吸収のために、オルダムカップリングとゴム材を緩衝部品としてその部品間に設置した。

最後に、提案する垂直駆動装置に座席部を取り付け、従来の地震ザブトンの全方向移動車両に搭載したものを図 6 に示す。図 6 のように、今回開発した垂直駆動装置は全方向移動車両に対して適切な大きさであり、座位姿勢の人を垂直方向に駆動可能であることから第 3.1 節の要件を満足する縦揺れも再現する全方向移動車両起震装置の開発を達成したといえる。

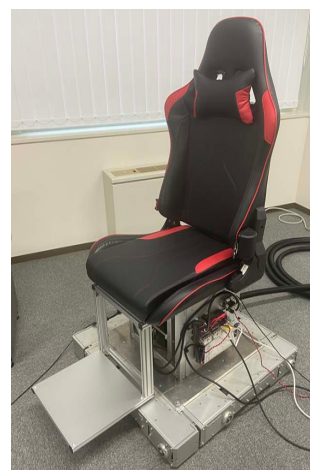


図 6 提案装置の外観図

4. 制御方法

提案装置の震動制御について説明する。人を座面に載せた装置を側面から見たときの動作の様子を図 7 に示し、手順は以下の通りである。

1. 装置の初期状態は図 7(0) のように座面下部がフレーム上端に接触するまで下がった状態である。このとき、エアシリンダの空圧は大気圧と同じである。

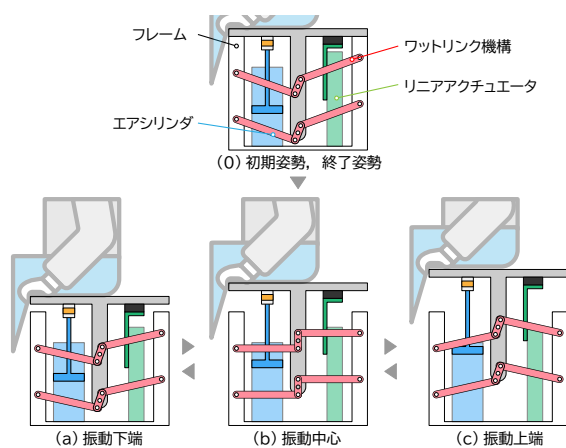


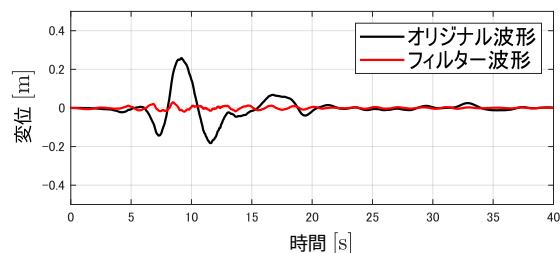
図7 動作の様子

- エアシリンダの空圧を高めて、図7(b)のように振動中心まで座面を持ち上げる。このとき、モータ出力は零であり、空圧はモータに取り付けられたホールセンサ値を用いて、振動中心に対する位置フィードバックを行うことで決定する。これにより、座面と人の合計重量に関わらず、座面が所望の位置まで自動で上昇する。ただし、大気圧を初期値として昇圧させた場合空圧の収束が遅いため、収束を早めるために人の属性(子供、大人等)に応じて設定した大まかな重量によるフィードフォワードを加えて行う。
- 実際の地震の震動波形データを目標時系列データとし、手順2で設定した空圧を維持したままモータを駆動させ、図7(a)-(c)のように座面を振動させる。このとき、座面と人の自重は空圧で補償されているため、モータは少ないエネルギーで座面と人を震動可能である。
- 手順3の制御が終了次第、エアシリンダ内の空圧を徐々に下げ、座面を図7(0)の状態に戻す。

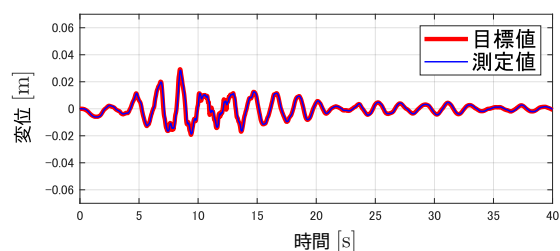
5. 実験検証

図6の提案装置に人が座位姿勢で垂直方向の震動実験を行い、提案装置の有効性を検証した。震動データは、縦揺れが大きな地震の例として、直下型である2016年熊本地震(観測点: 熊本県南阿蘇村中松)[10]と2024年能登半島地震(観測点: 石川県輪島市鳳至町)[15]の2種類を用いた。地震開始時から0-40s間の加速度データに対して、前者は0.5-25 Hz、後者は1-25 Hzのバンドパスフィルタ処理を行い、第2節のと同様に積分漸化式処理[11]によって変位を求め、制御目標値とした。人の体重は約70kgであり、制御のサンプリングタイムは20msとし、モータに取り付けられたホールセンサを用いて座席の変位を計測した。以下、座席の変位は振動中心を原点とする。実験結果として、熊本地震のものを図8に、能登半島のものを図9に示す。

各図の(a)は、目標値で利用したデータ処理後波形とオリジナル波形とを比較したものであり、オリジナル波形を黒線で、データ処理後の波形を赤線で表す。いずれの実験においても、提案処理により、大振幅低周

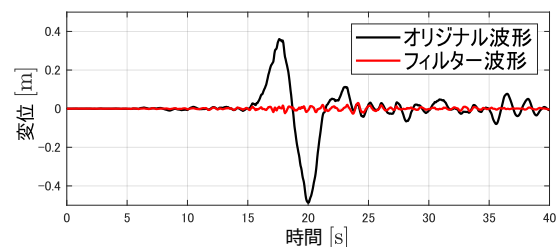


(a) データ処理後の波形

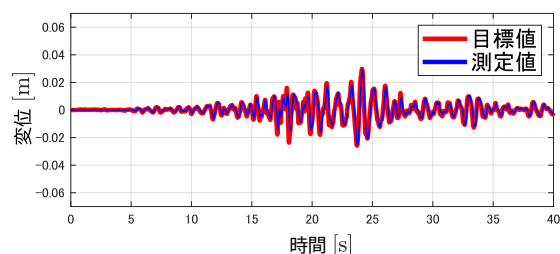


(b) 実験時の変位の時間変化

図8 2016年熊本地震における実験結果



(a) データ処理後の波形



(b) 実験時の変位の時間変化

図9 2024年能登地震における実験結果

波成分が除去され、小型装置で再現可能な小振幅高周波成分の波形が得られていることが分かる。

各図の (b) は、変位の目標値と測定値を比較したものであり、目標値を赤線で、測定値を青線で表す。いずれの実験においても、目標値と計測値が全体的に一致していることから、地震波形の再現を十分に達成できたといえる。一部の急峻な変化に追従できていない箇所においては、リニアアクチュエータと座面間に取り付けた緩衝材がダンパとして機能し、変化が鈍化したためだと考えられる。加えて、(b) の測定値に対して 2 階時間微分により加速度を計算すると、提案装置が最大 1G 程度の加速度を出力可能であることがわかった。1G よりも大きな加速度を出力した場合、人が座席から浮き上がり危険なため、提案装置の出力は地震体験の起震装置として十分であるといえる。以上の結果より、提案装置は地震の縦揺れの再現装置として有効であることを確認した。

6. おわりに

本研究では従来の「地震ザブトン」の機能拡張を目的とした、垂直方向の震動機能を有した起震装置の開発を行った。以下に成果を示す。

- 垂直方向の地震波を小型装置で再現するために、着座状態で人の乗り心地の観点から、高周波低振幅である 4-16Hz 程度の周波数成分の加速度を用いることを提案した。
- 空圧で人と座席の荷重を補償し、電動リニアアクチュエータにより加振することで、体験者の体重に依存しない人が持ち運び可能な垂直駆動装置を開発した。また、直動運動の案内として、リニアガイドよりも安価で軽量のワットリンクを用いた。
- 提案装置に人が座位姿勢で地震波形データを用いた垂直方向の震動実験検証を行い、提案装置が垂直方向の震動を再現可能であることを確認した。加えて、振動の加速度として 1G 程度が出力可能であることを確認した。

今後、図 6 の装置を用いた横揺れを含めた震動再現の実験を行い、震動の組み合わせの有効性を検証する。

参 考 文 献

- [1] 内閣府 : "地震災害", <https://www.bousai.go.jp/kyoiku/hokenkyousai/jishin.html>, 2024 年 06 月 18 日参照。
- [2] 株式会社飛鳥特装 : "地震体験車", <https://www.aska-acg.com/aska-motor/products/kishinsya>, 2024 年 06 月 18 日参照。
- [3] 有坂尚 : "3 軸起震装置の紹介", KYB 技報, No. 50, APR., pp.72-75 2015.
- [4] 株式会社コスメイト : "地震体験機", https://www.cosmate.co.jp/products/dp_products/dp_products.html, 2024 年 06 月 18 日参照。
- [5] Y. Sugahara, T. Ueki, D. Matsuura, Y. Takeda and M. Yoshida : "Offline Reference Trajectory Shaping for a Cable-Driven Earthquake Simulator Based on a Viscoelastic Cable Model," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 2, pp. 2415-2422, 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3144778.
- [6] 吉田 稔, 広瀬 茂男 : "全方向移動車両機構を利用した従来にない地震体験装置 (iメカライフ特集i発想の転換)", 日本機械学会誌, 114 巻, 1111 号, p. 448-449, 2011.

- [7] 白山工業株式会社 : "可搬型地震動シミュレーター", <https://www.hakusan.co.jp/products/eq-simulator/>, 2024 年 06 月 18 日参照。
- [8] R. Damoto, W. Cheng and S. Hirose : "Holographic omnidirectional vehicle with new omni-wheel mechanism", Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), vol.1, pp. 773-778, 2001.
- [9] S. -g. Roh et al. : "Development of the portable ground motion simulator of an earthquake," 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5339-5344, 2013 doi: 10.1109/IROS.2013.6697129.
- [10] 気象庁 : "強震波形 (熊本県熊本地方の地震)", https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index.html, 2024 年 06 月 24 日参照。
- [11] 齊藤正徳 : "漸化式デジタル・フィルターの自動設計", 物理探鉱, 31, 240-263, 1978.
- [12] Vogt,H.L., Coermann,R.R. and Fust,H.D.: "Mechanical impedance of the sitting human under sustained acceleration.", Aerospace Medicine 39: pp.675-679, 1968.
- [13] 岡村 昌浩, 小泉 孝之, 辻内 伸好, 小濱 明久: "水平・垂直連成振動における人体動特性を考慮した乗り心地評価 (機械力学, 計測, 自動制御)", 日本機械学会論文集 C 編, 68 巻, 674 号, pp. 2865-2871, 2002
- [14] 玉置 元, 吉村 卓也 : "全身振動を受ける着座人体の振動特性", バイオメカニズム学会誌, 41 巻, 1 号, p. 9-14, 2017
- [15] 気象庁 : 2024/1/1 石川県能登地方の地震, https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto/index.html, 2024 年 06 月 20 日参照。