

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	全方向移動型可搬式地震動シミュレータ "地震ザブトン" の開発
Title	Development of "Jishin-The-Vuton", The Portable Earthquake Simulator Using Omni-Directional Platform
著者(和文)	松平 昌之, 山口 龍介, 平山 義, 王 猛, 吉田 稔, 翠川 三郎, 広瀬 茂男
Authors	Ryusuke Yamaguchi, SABUROH MIDORIKAWA, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2009, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2009 The Robotics Society of Japan.

# 全方向移動型可搬式地震動シミュレータ ”地震ザブトン”の開発

○ 松平 昌之 (白山工業(株)) 山口 龍介(東工大) 平山 義治(白山工業(株)) 王猛(東工大)  
吉田 稔(白山工業(株)) 翠川三郎(東工大) 広瀬茂男(東工大)

## Development of "Jishin-The-Vuton", The Portable

### Earthquake Simulator Using Omni-Directional Platform

\*Masayuki MATSUDAIRA<sup>[1]</sup>, Ryusuke YAMAGUCHI<sup>[2]</sup>, Yoshiharu HIRAYAMA<sup>[1]</sup>,  
Meng WANG<sup>[2]</sup>, Minoru YOSHIDA<sup>[1]</sup>, Saburoh MIDORIKAWA<sup>[2]</sup>, Sigeo HIROSE<sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Hakusan Corporation., <sup>[2]</sup> Tokyo Institute of Technology

**Abstract** — We developed a portable earthquake simulator which can reproduce a waveform of a two-dimensional earthquake vibration using a holonomic omni-directional platform. By adopting a compact platform with large payload capacity, the simulator can be applied to applications for which vibration is felt by actually getting on top of the simulator in various places or for applications in vibration tests for larger structures.

**Key Words:** Earthquake, Simulator, Crawler

## 1. はじめに

地震発生時の地面や建造物の床面の揺れを模擬・再現する装置（以下地震動シミュレータ）が従来開発されている。これらの装置はいずれも装置の上面や台に物や人を乗せてアクチュエータで駆動させる方式を採っている。震災の模擬体験を通じた防災意識の啓発、大小の設備や構造物の耐震試験や有用性評価など様々な用途に利用されており、その大きさや仕様も様々である。

しかし一般に搭載する対象と比べて大型の機構や大出力のアクチュエータが必要であり、例えば人が乗って揺れを体験できるような装置は大規模な設備とならざるを得なかった[1]。

不特定の場所で揺れを再現できる小型・可搬式の装置には一定の需要があり、これに対応する装置も開発されているが[2]、複数方向についての地震動を実際のデータに基づいて精度よく再現する装置についても同様な可搬性と十分な耐荷重を両立させる事はより多様な有用性につながると考えられる。

そこでコンパクトで耐荷重の大きい全方向移動機構を利用して、自走式・可搬式の地振動シミュレータを開発した[6]。本報ではその仕様検討および設計の概要に加えて、試作機を用いた性能評価について報告する。

## 2. 地震動の性質と本装置の目標設定

本研究で扱う地震動シミュレータは地震、特に被害をもたらす大規模地震が発生する時に特定の地点で観測される地面もしくは建築物の床面の揺れを、実測ないし予測されたデータに従って同縮尺かつ十分な精度で自らが移動する事によって再現させる事を目標として開発する。

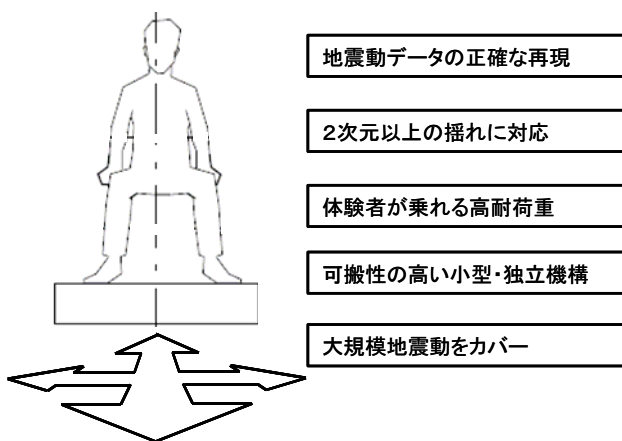


図1. 地震ザブトンのコンセプト

典型的な使用形態として、1名の体験者が乗って自ら(または近くからオペレータが)操作して動かすことを想定する(図1参照)。

本装置では大震度の強震動を体験するとともに、ストロークが事実上無限大である利点をいかし、変位がm単位にも及ぶとされる超高層ビルにける長周期地震動を再現する。特に後者は従来の地震動シミュレータでは再現が困難な領域である。

図2に気象庁のサイト[3]に掲載されている周期及び加速度と震度の関係を表したグラフに、本装置の目標性能領域を示す。その範囲は最大速度が1.23m/s、最小速度が0.01m/sであり、周期が0.5秒より長い領域である。この速度一周期の範囲において、周期1秒以下程度で最大で震度7の巨大地震の再現を目指す。また周期数秒の長周期領域については、震度5弱で長周期構造物に被害が生じた事例があることから、これを再現対象とする。

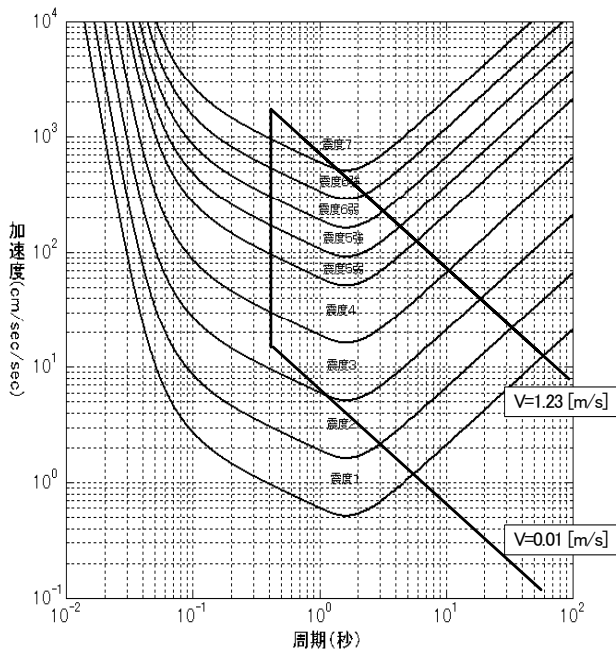


図2. 周期及び加速度と震度(理論値)との関係と、本装置の目標性能との関係。(気象庁のサイト[3]のグラフに加筆)

### 3. Vutonクローラ[4]の概要と特徴

本稿で地震シミュレータへの適用を提案する全方向移動機構(Vutonクローラ)の概要を図3に示す。

Vutonクローラはギアつきモータ(1)とベルト(4)によって2列のチェーン(3)(5)が連動して駆動される機構である。チェーンの間にはゴム製ホイールを格納したフレーム(6)が多数連結されている。チェーンが回転すると接地しているゴムホイールは各々地面をグリップして、チェーンの移動する方向に対して地面と機構の間に推進力を発生させる。一方チェーンの運動と垂直な方向に対しては個々のゴムホイールは自由に回転でき、上方向からの荷重のみを

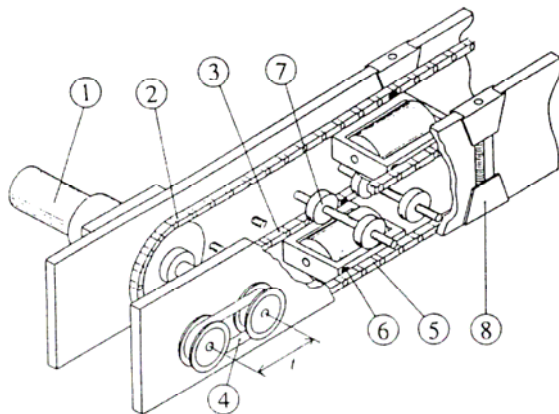


図3. VUTONクローラの概要

受ける。

これによってVutonクローラは一方に対しては推進機構として、直交する方向については従動する支持機構として機能する。両者が複合した斜め方向の運動生成も可能である。Vutonクローラを異なる角度で装置下面に3台以上配置すると、適切な制御を行う事で任意の方向に対して推進力を発生させる事ができる。

このようなホロノミックな特性を有する全方向移動を実現する駆動機構としては、オムニホイール[5]など何種類かの機構が開発されているが、本機構は下記に述べるような幾つかの利点を持っている。

1. 車輪やそれに類する形状の機構に比較して、常に多数のローラーユニットが同時に接地しており、耐荷重が大きい。
2. 同様の理由で横方向に加速度を発生させる際に必要な床面との間のグリップ力を大きくできる。これは地震動再現に必要な高加速度の再現に有利である。
3. コンパクトな機構であり搬送性が高い。

### 4. 体感シミュレータ”地震ザブトン”の設計

本機構を用いて、人が乗って地震の揺れを体感できるシミュレータ”地震ザブトン”の性能設計を行なった。期待できる性能の一例を図2の3軸グラフ上に示す。

地震ザブトンでは内部に4組のローラーモジュールを搭載して、これらを同時に制御・駆動する事によって2次元平面状での地震の揺れを再現する(図4)。再現可能な運動の次元は平面状のX方向、これに直交するY方向、および鉛直軸周りの回転運動である。ただし当面は実際の地震で支配的と考えられるX軸およびY軸方向の並行運動のみを対象として検討を行なう。この場合、対向する2つのモジュールは常に同じ速度で駆動することになる。

本研究では地震ザブトンに乗る人間の体重を80[kg]、各クローラモジュールに搭載するモータを400[W]として、設計検討を行なった。

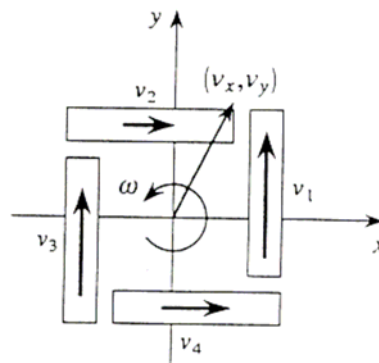


図4. VUTONクローラの配置

### [加速度・速度性能の設定]

地震ザブトンではDCモータをアクチュエータとして、減速機を介してクローラを駆動する。実現できる最大速度と最大加速度はトレードオフの関係になり、その関係はモータの速度・トルクの最大定格値および減速比によって決まる。

本試作では最大速度=1.23[m/sec]、最大加速度(連続)=525[gal=cm/sec<sup>2</sup>]とする設定で減速機構を設計した。本試作では機構内部や床面との摩擦によるロストルクの大きさが事前予測困難であるため最大速度を押えて減速比を大きめに取ったが、今後の評価結果を反映させてより適切な減速比に改善する事は可能である。

### [周波数性能の設定]

地震ザブトンは予め与えられた地震波形の速度データをサーボ制御で実現する方式とするので、実現できる地震波形の周波数範囲は、長周期側については事実上制限がない。ストロークに制限もないので、長周期地震動やこれによる高層建築物の揺れについても十分に再現が可能である。

一方地震動に含まれる高周波成分については、当面の目標設定として5 [Hz]前後の再現を目標として設計を行なった。周波数特性を低下させる要因としてはクローラのチェーン電動機構の伸縮などを想定するがこれらは試作後の評価項目とした。一方でサーボアンプやモータなどの電気機器はこの仕様値に十分に対応できると思われる。

## 5. 地震ザブトンの試作



図5. 地震ザブトン試作機

前章で述べた設計検討の結果を踏まえて実際の装置の試作を行なった。

図5に試作機の外観を示す。地震動の体験者1名を載せて、X軸(前後)・Y軸(左右)両方向に走行する事ができる。

駆動電源は外置きのDC電源装置を用いる。また地震動の再現動作は高頻度で加速・減速を繰り返す特長があるので、この際発生するモータからの回生電流を吸収・蓄積するためのキャパシタ回路を接続している。これによって効率よく高加速・高速度の連続運転を行なう事ができる。一般的に入手可能な出力1kW・AC100Vの商用電源を用いて大規模地震動の再現が可能である。

制御装置にはWindows-PCを用いる。モータの制御には専用サーボアンプを用いて、CANバスによるシリアル通信でPCから速度指令データをリアルタイムで送信することで地震波を再現する事ができる。地震波データはCSV形式のテキストファイルを読み込める仕様となっている。

また市販の地震計(白山工業 SU-102)を試作機上に設置しており、再現された加速度データを自動的に記録でき、かつリアルタイムで震度階をPC画面上に表示する事もできる。

## 6. 実機による性能評価

図6、7に地震ザブトンに搭載した加速度計によって記録された水平方向の加速度データ(再現加速度)と、元となる地震動のデータ(観測値)を重ねて表示した。この例では1995年兵庫県南部地震の神戸市での観測値を元に速度指令データを作成して、これを標準的な体重(実験では約65kg)の搭乗者1名を乗せて再現している。装置の向きと地震動の方位の関係は、前方が北に相当する。

両者の波形を比べると、実在の地震動である観測値の加速度波形に対して、地震ザブトンが短周期の成分を含めてかなり正確な再現を行っている事が分かる。

また実現可能な最大加速度についての評価として、搭乗者を乗せた条件で記録した再現加速度を確認した所、瞬時最大で1000 [gal]以上の加速度を発生している。この加速度を震度階に換算した値は基本波の周期に依存するが、震度6強から7に相当する。この震度は試作機に搭載した加速度計による計測震度でも確認された。

ただしこの最大加速度には、純粋にモータ最大トルクからだけ割り出せる加速性能分以外に、減速時に摩擦トルクが寄与している分や若干の機械的振動が上乘せされていると思われる。

また図8は、実際に一般の人に地震動を体験してもらったデモの様子である。このデモでは典型的な大規模地震動として兵庫県南部地震の神戸市の地震動データ(震度6強)を再現したが、概して大規模地震を経験していない人の事前の想像よりもは



るかに激しい動きになるため、搭乗者は驚きや強い印象を受けた。防災教育や啓発活動のツールとして十分な駆動性能を有している事を示している。

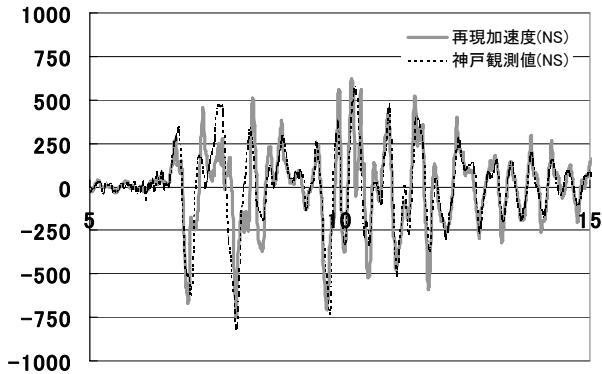


図6. 南北方向の地震動の加速度の再現  
兵庫県南部地震(1995)・搭乗者ありの例  
(縦軸：[gal = cm/s<sup>2</sup>]、横軸：時間[sec])

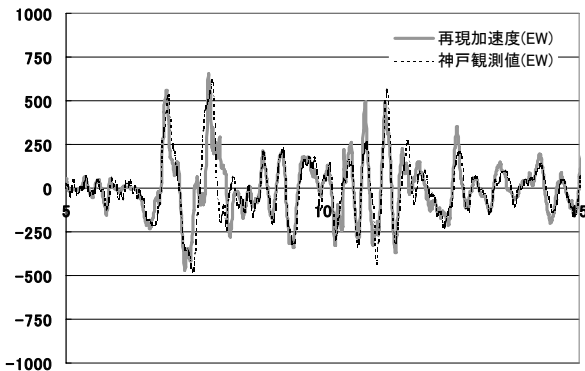


図7. 東西方向の地震動の加速度の再現  
(図6と同条件)  
(縦軸：[gal = cm/s<sup>2</sup>]、横軸：時間[sec])



図8. 地震ザブトンを用いた体感デモ

## 7. 今後の展開

今後試作装置に対してより詳細な性能評価を行

なう予定である。また以下のような項目の改善を行ない、次期試作および製品に反映させていく。

1. 床面とクローラのグリップ性能の改善。特に最大加速度付近では、クローラのローラー部品にかかる摩擦力が過大なため劣化が早まるケースがある。設計・素材の改善による強度向上や、グリップ力をより均等に分散させる設計改善を検討したい。また多様な性状の床面に対して性能の変動を評価したい。
2. 地震動再現の過程で、主に床面とクローラの摩擦力の変動やばらつきによる誤差の累積で位置や方向に意図しない小さい誤差が発生するケースがあるので、制御ソフトまたは機械設計による改善策を検討したい。
3. 体感ツールとしての機能の拡張。映像と組合わせた再現(図8参照)を行なうなどの手法を開発して、よりリアルな震災の模擬体験を可能にする。

また、本試作ではあくまで人が1名搭乗して地震波を体験することを目的とした仕様設計、性能設計を行なったが、地震ザブトンの機構はより大荷重の構造物や、逆に小型の機器に対して手軽に加振評価試験を行なえる試験装置などへの適用も可能である。これらを含めた製品化の可能性を模索したい。

さらに大荷重対応の装置の発展形として、複数の地震ザブトンを連動して駆動して、大型の構造物に対して変位無制限の地震再現試験を行なう形態も今後の検討課題である。

## 参考文献

- [1] 防災科学研究所”E-ディフェンス”Webサイト  
<http://www.bosai.go.jp/hyogo/profile.html>
- [2] 応用地震計測ウェブサイト: “自走ぶるる”  
<http://www.oyosi.co.jp/jisobururu.pdf>
- [3] 気象庁ウェブサイト: 震度と加速度  
“(最大)加速度・(最大)速度・計測震度について”  
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/com.p.htm>
- [4] S.Hirose and S.Amano, “The VUTON: High Payload, High Efficiency Holonomic Omni-Directional Vehicle,” Proc. of the 6th Symp. On Robotics Research, pp.253-260, 1993.
- [5] Website of Kornylak Corporation: “Omniwheel”  
<http://www.omniwheel.com/omniwheel/omniwheel.htm>
- [6] R.Yamaguchi, T.Wang, M.Matsudaira, Y.Hirayama, S.Midorikawa, and S.Hirose, “Development of Brand-new Portable Earthquake Simulator Using Holonomic Omni-Directional Platform”, 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.171-175, 2009