

建設車両シミュレータにおける受動的身体揺動の模擬生成

西岡 右平

近年の建設業界において、建設関連の人材育成の短期間化と安全教育の重要性が増している。この人材育成プロセスにおいて、デジタル技術の導入が不可欠であり、建設機械のシミュレータの利用がますます求められている。本稿では、訓練シミュレータの開発と活用において、身体揺動（ボディモーション）の模擬生成とその検証に焦点を当て、その内容を詳しく報告する。

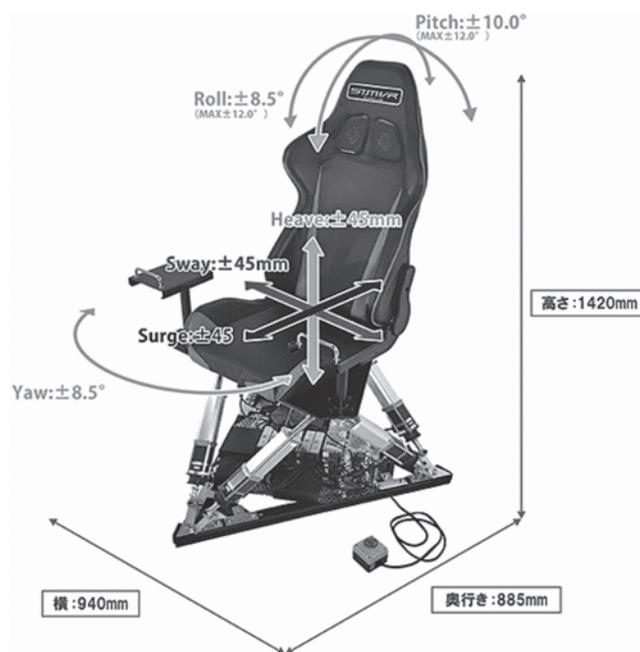
キーワード：建設車両，3D シミュレーション，身体揺動，模擬データ検証

1. はじめに

近年の建設業界では、人材不足が深刻な問題となっているが、人材不足の対策の一部として人材育成の短縮と安全教育が求められるようになった。2018年には経済産業省が策定した企業に向けた「DX推進ガイドライン」によって、建設会社にもデジタル化が必要になり、非熟練者向けの建設機械訓練シミュレータの需要はさらに高まっている。建設機械や車両の運転や操作は高度な技能と専門知識を必要とし、訓練シミュレータは運転手やオペレータ（作業員）がこれらのスキルを練習し向上させるための貴重なツールで、感覚データの正確な生成は、訓練効果を高めて安全な建設作業を確保するのに不可欠となっている。多くの訓練シミュレータは視覚情報と操作コントローラを重点的に開発されているが、身体揺動の重要性についても強調したい。そこで本稿では訓練シミュレータの開発で使うための身体揺動（ボディモーション）の生成方法についての取り組みを報告する。

まず建設機械や車両を適切に操作し作業を行うためには、作業員への体感や感覚が非常に重要である。視覚、聴覚、触覚などの感覚を駆使して、車両の動作を監視し、安全な操作を確保することが必要だ。作業員のプロセスは操縦室内のさまざまな操作コントローラを使用して機械を制御し、そのフィードバックを受けて次の制御方法を決定する。よって建設作業を行うためのフィードバックには、体感装置が重要な役割を果たすことが理解できる。今回の検証では、身体揺動装置の提示にはスチュワートプラットフォーム式の電動6軸モーションシミュレータである「WIZAPPLY

SIMVR 6DOF」(以下、本シミュレータという)(写真—1)を使用した。本シミュレータに与える6軸（ロール・ピッチ・ヨー，ヒープ・スウェイ・サージ）と設定パラメータを生成する方法に焦点を当てて検証する。このパラメータは、リアルタイムで適切な感覚データを算出・生成する必要がある。それは訓練被験者が作業状況を迅速に判断し、適切な操作を行うためである。今回は建設機械に見立てたコンピュータグラフィックスの3次元空間データから慣性データを算出し身体揺動装置に出力される動きを慣性計測センサ（IMUセンサ）で計測し検証する。



写真—1 身体揺動装置 本シミュレータ

2. 使用した機器・プログラム

検証に使用する機器やプログラム・開発ツールは表一に示す。身体揺動装置には、電動6軸モーションシミュレータの本シミュレータを使用し、そこに慣性情報を測定するためのIMUセンサを搭載する。

また、建設機械や車両をコンピュータグラフィックスの3次元空間で挙動をシミュレーションを行うために「Unity3D」(以下、本ツールという)を活用している。本ツールはUnity Technologiesが開発・販売している主にゲームや映像コンテンツの開発で広く使われているツールだ。高度な物理計算も可能とし、多くのシミュレーションソフトウェアの開発にも導入されている。

3. 検証内容

(1) 検証概要

今回、用意したシステムは以下の3種類である。

- ①データ生成用3Dソフトウェア
- ②ハードウェアシステム
- ③シミュレーション検証スクリプト

データ生成3Dソフトウェアは、本ツールエディタの3次元空間に建設機械や車両を配置するため次のような手順を実行する。まず、タイヤ付きショベルの建設車両を模した3Dオブジェクトを用意する(写真一2)。実際の挙動に近い3Dオブジェクトを使用した。本ツールからは、リアルタイムの3D座標(X, Y, Z)と向きを示す四元数(w, x, y, z)のデータを利用する。更新インターバルは60fps固定で設定した。3次元空間内の単位はメートル(m)で、角度の単位はラジアン(rad)とする。次に車両のデータ測定位置を決める。ここで重要なのは、建設車両のローカルデータではなく、車両操縦席位置のデータを取得する必要がある点である。そのため、操縦席の位置を写真一3の位置に設定する。本ツールでは階層構造の車両の子としてセットアップすることで、自動で行列計算を行い設定した操縦席の位置でデータが取得できる。別の3Dシミュレーションツールを使う場合は、車両の行列に操縦席の行列で積を求めることで計算できる。これで3D座標と向きの2種のデータを取得し、車両の

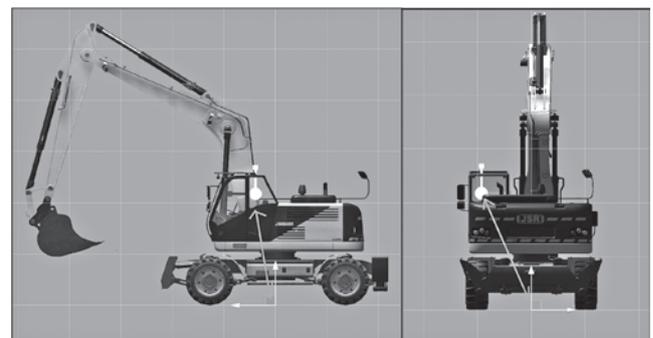
加速度と傾きを算出できるようになる。

ハードウェアシステムでは身体揺動装置に本シミュレータを使用した。複合再現可能な性能でロール・ピッチ・ヨー角で±8.5度、ヒープ・スウェイ・サージの動きに±45mmを動作させることができる。その装置の椅子上にIMUセンサを設置するが、より本シミュレータと慣性データの傾きと加速度に近くなるように椅子の真上かつその中心に置いた(写真一4)。このIMUセンサは1ミリ秒ごとに加速度(m/s²)と傾き(rad)が取得できる。本稿では生成される、この慣性データとこのIMUセンサを比較して内容を評価する。

次に制作するシミュレーション検証スクリプトは、(1)データ生成用3Dソフトウェアと(2)ハードウェアシステムの両方のデータを制御するのに用いられる。データ生成用3Dソフトウェアからは、実行からの時間を約16.666ミリ秒ごとに3D座標(X, Y, Z)と向きを示す四元数のデータをリアルタイムにUDP/IP通信で送信する。シミュレーション検証スクリプト側



写真一2 タイヤ付きショベルの建設車両を模した3Dオブジェクト



写真一3 操縦席の位置

表一 使用した3Dシミュレーションソフトウェア

ソフトウェア名	目的
Unity3D 2022.3.10f	3Dゲーム開発環境及び物理シミュレーション
Unity Asset : Excavator Simulator v1	Unity3D上に搭載できるタイヤ付きショベルの建設車両3Dオブジェクトアセット群



写真一4 椅子の上に IMU センサを固定

がそのデータを受信をし、ハードウェアシステムと結びつけることができる。UDP/IP とはインターネット通信にて標準的に利用されているプロトコルである。コンピュータの OS (オペレーティングシステム) に依存することなく比較的簡単に使うことができ、またループバック機能を使えば同じコンピュータ内にデータを送受信するのに便利である。本ツール標準のプログラミング言語を使うことも可能だが、今回は別のシミュレーションソフトウェアとの連携の可能性も想定して外部システムとして実装したい。実装にはプログラミング言語「Python」のスク립トとして記述した。さらに本シミュレータ並びに IMU センサは Python 言語に対応しているため実装は簡易であることや全てのシステムが同期して動かす必要があるためである。

(2) システム構成と仕様

①データ生成用 3D ソフトウェア

使用した 3D シミュレーションソフトウェアは表一 1 の通り。

②ハードウェアシステム

今回検証に使用したシステムの構成と仕様は図一 1 に示す。

(3) 仮想作業シナリオの決定

シミュレーションを行う検証シナリオにおいて、建設車両の 3 つの動作を決定した。建設車両はタイヤ付き油圧ショベルを使用し、以下の手順で行う。これらの操作は手動で実行されるが、評価では 1 度だけデータを記録し使用する。

①前進走行およびステアリングの左右操縦 (写真一5)

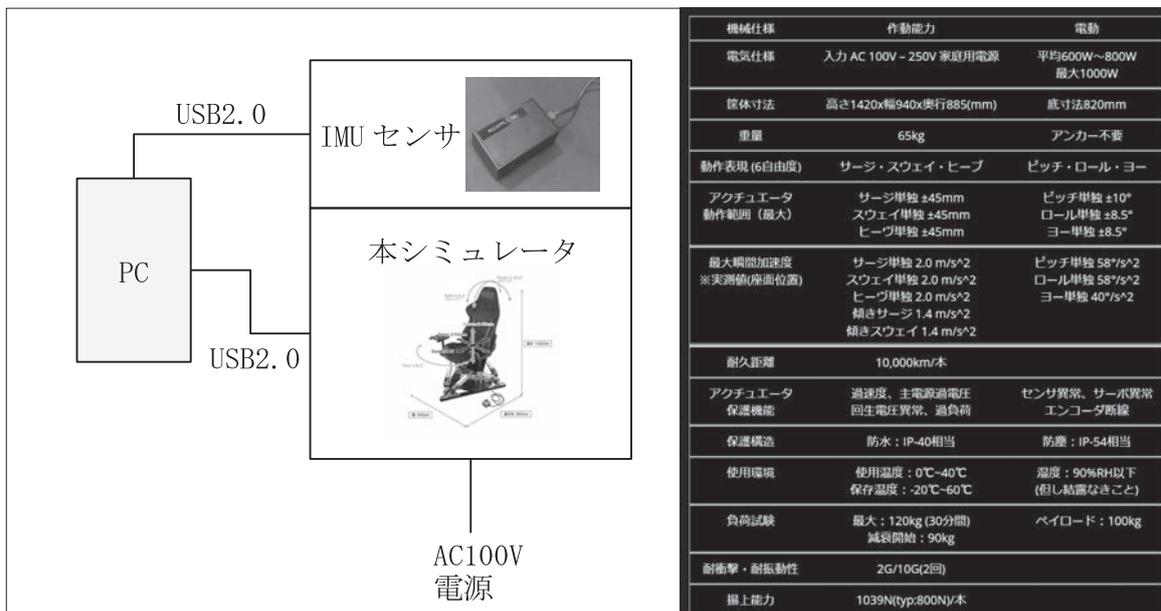
走行停止状態から 20 km/h までの走行を 2 回繰り返す、その後、20 km/h で約 2 秒間左にステアリングを切り、約 2 秒間右にステアリングを切る動作を 2 回交互に行った。

②ショベルのブームとアームの操作、バケットの地面設置 (写真一6)

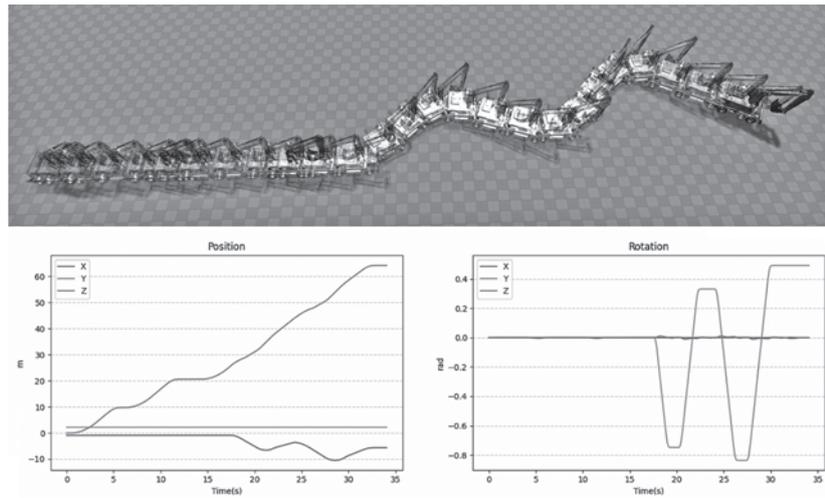
走行停止状態で、ブームとアームを操作してバケットを地面に押し付け、その後約 3 秒後ブームを上げて地面から離す。

③上部旋回体の旋回運動 (写真一7)

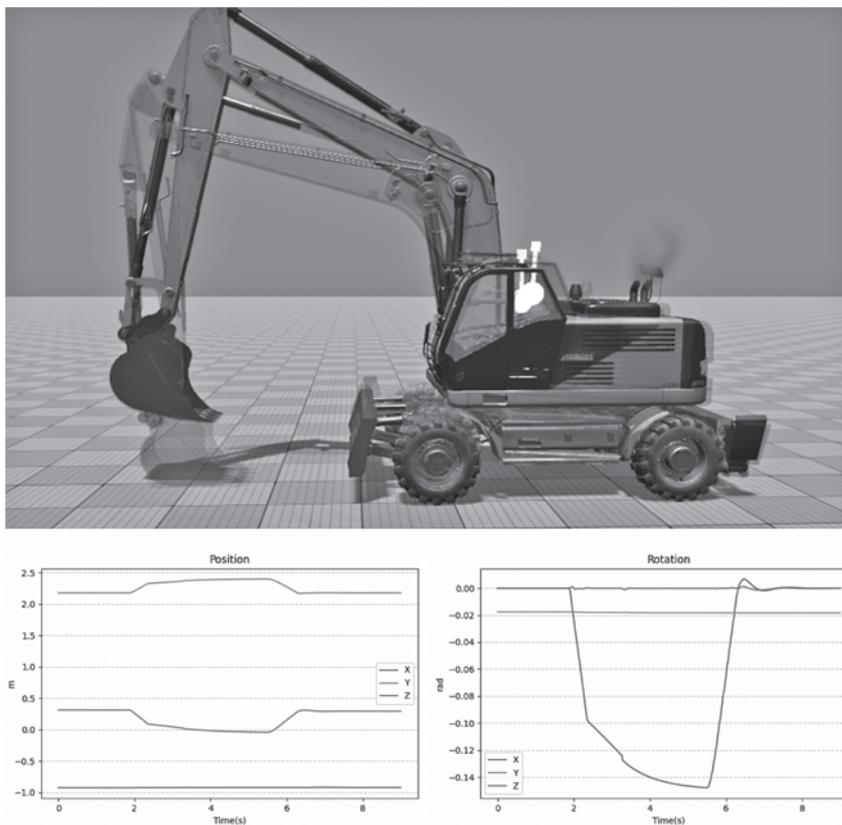
走行停止状態で、上部旋回体を約 $1/2\pi$ rad (90 deg) の左に旋回させ、約 1 秒間停止し、その後、約 1π rad (180 deg) 右に旋回した。



図一1 ハードウェアシステムの構成と主な仕様



写真—5 前進走行およびステアリングの左右操縦



写真—6 ショベルのブームとアームの操作, バケットの地面設置

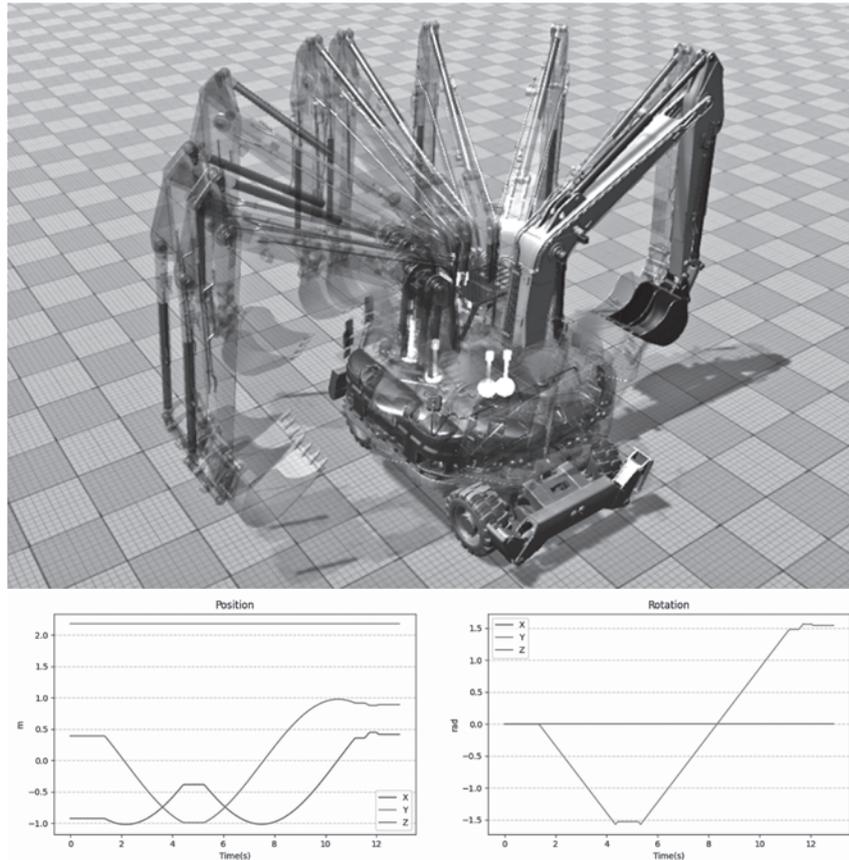
(4) 検証内容と設定できるパラメータ・フィルタリング

前項(3)項で作成した仮想作業シナリオでは、3つの動作が同時に発生するため、各動作の設定を個別に行うことはできない。各動作の最適な設定とパラメータを比較評価し、最適な組み合わせを特定する。設定可能なパラメータとデータフィルタリングに関して、次の指針がある。

パラメータは本シミュレータへの入力として、ロール (Roll), ピッチ (Pitch), ヨー (Yaw) に対して

設定できる値は±1.0である。これらの値は、カタログ値としてロールおよびヨーはそれぞれ±8.5度、ピッチは±10.0度に相当する。また、ヒープ (Heave), スウェイ, サージ (Surge) に対する設定値はそれぞれ±1.4 m/s²である。

本シミュレータの設定において、スピード調整モードには Normal Mode (スピードおよび加速度が固定設定) および Variable Speed Mode (パラメータ同期追従モード) の2つが存在し、この状況では後者のパラメータ同期追従モードが使用される。また、動作の



写真一七 上部旋回体の旋回運動

比率を調整するためのパラメータとして Rotation Motion Ratio および Gravity Motion Ratio の設定があるが、これらを両方とも最大値の 1.0 で設定した。

データフィルタリングは、生成された慣性データから高周波成分を迅速に排除するために IIR ローパスフィルタを採用した。サンプリング周波数は約 16.666 ミリ秒ごとにサンプリングされるので、サンプリング周波数は固定で 60 Hz にした。カットオフ周波数は評価され、その後決定される。

(5) 車両の加速度と傾きの算出方法と本シミュレータパラメータ

①車両操縦席の加速度データ

3次元空間の位置座標となるので、まずは向きを示す四元数から前、右、上の方向ベクトルを計算する必要がある。向きを示す四元数を行列へ変換を行い、行列と単位ベクトルで積を求める。具体的には次の計算式を用いる。

$$R = \begin{pmatrix} 2q_w^2 + 2q_z^2 - 1 & 2q_x q_y - 2q_z q_w & 2q_x q_z + 2q_y q_w \\ 2q_x q_y + 2q_z q_w & 2q_w^2 + 2q_y^2 - 1 & 2q_y q_z - 2q_x q_w \\ 2q_x q_z - 2q_y q_w & 2q_y q_z + 2q_x q_w & 2q_w^2 + 2q_z^2 - 1 \end{pmatrix}$$

$$D_x = R \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_y = R \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_z = R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

次に方向ベクトルを前フレームの方向ベクトルを微分して速度で、さらに速度を微分することで加速度(a)が算出できる。

$$v_{xyz} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{D(t1 + \Delta t) - D(t1)}{\Delta t}$$

$$a_{xyz} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t1 + \Delta t) - v(t1)}{\Delta t}$$

②車両操縦席の傾きデータ

車両操縦席の傾きは、向きを示す四元数からオイラー角変換を用いてロール角 (θ_z)・ピッチ角 (θ_x)の角度を得ることができる。

$$\theta_x = \arcsin(-(2q_y q_z - 2q_x q_w)) \quad [\text{rad}]$$

$$\theta_z = \arctan\left(\frac{2q_x q_y + 2q_z q_w}{2q_w^2 + 2q_y^2 - 1}\right) \quad [\text{rad}]$$

ヨー角だけは上部旋回体との身体揺動装置の物理的な上限に乖離があるので、ヨー角速度 (θ_y) を使用する。前フレームの四元数で微分した角速度を計算する。あとはオイラー角に変換する。

$$\omega = \frac{q \otimes q^{1^{-1}}}{\Delta t} \quad [\text{rad/s}]$$

$$\theta y = \begin{cases} \arctan\left(\frac{2\omega_x\omega_z + 2\omega_y\omega_w}{2\omega_w^2 + 2\omega_z^2 - 1}\right) & (\cos \omega_x \neq 0) \\ \arctan\left(-\frac{2\omega_x\omega_z + 2\omega_y\omega_w}{2\omega_w^2 + 2\omega_z^2 - 1}\right) & \end{cases} \quad [\text{rad}]$$

③本シミュレータへのパラメータ

傾きデータと加速度データを本シミュレータのカタログ値とパラメータ値に適合させるため、これらのデータを±1.0の範囲に変換する。この変換において、以下の計算式を使用する。もし、変換後の値が指定の範囲を超える場合、自動的に±1.0の範囲に制約する。また、各パラメータに対してゲイン調整が可能であり、これによって各パラメータに係数 [k] を適用できる。この係数は、ヨー角は0.5とし、他は1.0を基準として調整する。

$$\begin{aligned} \text{roll} &= \frac{\theta x}{8.5} \times k_x & \text{heave} &= \frac{\alpha_y}{1.4} \times k_{ay} \\ \text{pitch} &= \frac{\theta z}{10.0} \times k_z & \text{sway} &= \frac{\alpha_x}{1.4} \times k_{ax} \\ \text{yaw} &= \frac{\theta y}{8.5} \times k_y & \text{surge} &= \frac{\alpha_z}{1.4} \times k_{az} \end{aligned}$$

本シミュレータへのパラメータは装置に送信するデータとしてのみ使用し、比較には①と②までを使用する。

(6) 慣性データのフィルタリングのカットオフ周波数の選択

(5) 項で生成された慣性データにフィルタを適用する目的は、物理的に再現できない微細な高周波成分をデータから取り除き、動作をより滑らかにすることである。フィルタには、一次 IIR ローパスフィルタを使用した。このフィルタは、高周波成分を効果的に取り除きつつ、応答性が優れているが場合によっては発信してしまうため係数の設計が必要になる。評価した係数に関しては、サンプルレート 60 Hz で固定設定し、カットオフ周波数は 12, 24, 48 Hz とした。慣性データのサージ値におけるフィルタによる各波形の変化は、図-2 に示される。

以上のことから全体的な波形を鑑みてカットオフ周波数は 0.8 Hz が良いと考え採用した。0.4 Hz の場合は滑らかではあるものの位相遅れが発生し、逆に 1.6 Hz の場合は高周波が除去しきれない部分があった。

(7) 作成したシミュレーション検証スクリプト
シミュレーション検証用スクリプトのブロック図を
図-3 に示す。

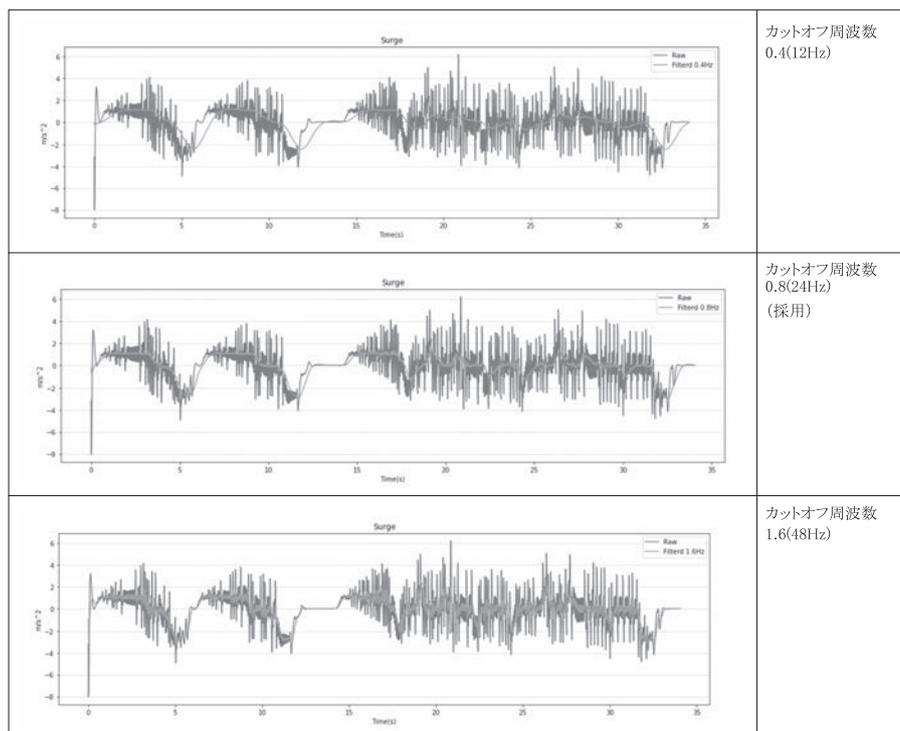


図-2 サージ値の IIR ローパスフィルタと 0.4, 0.8, 1.6 Hz 別のフィルタ

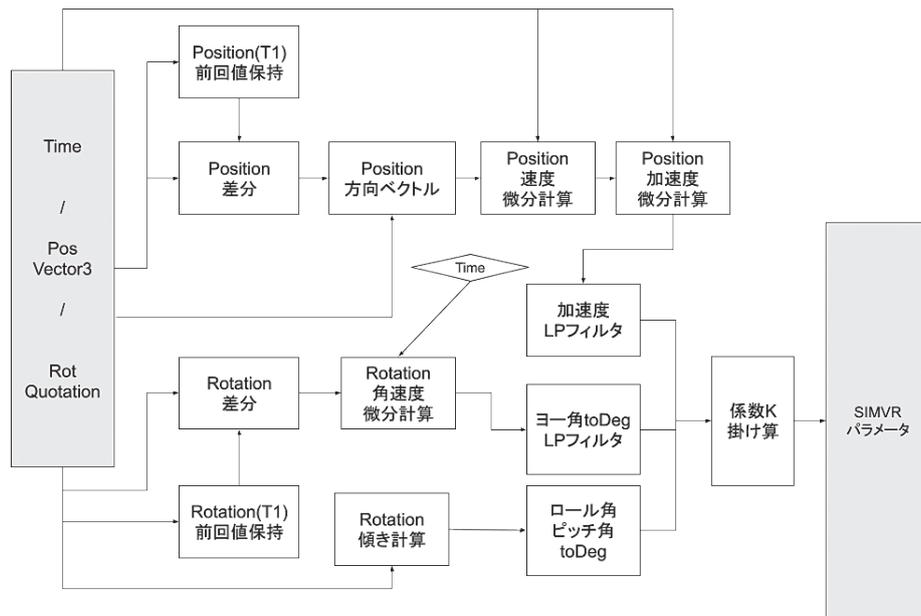


図-3 シミュレーション検証用スクリプトのブロック図

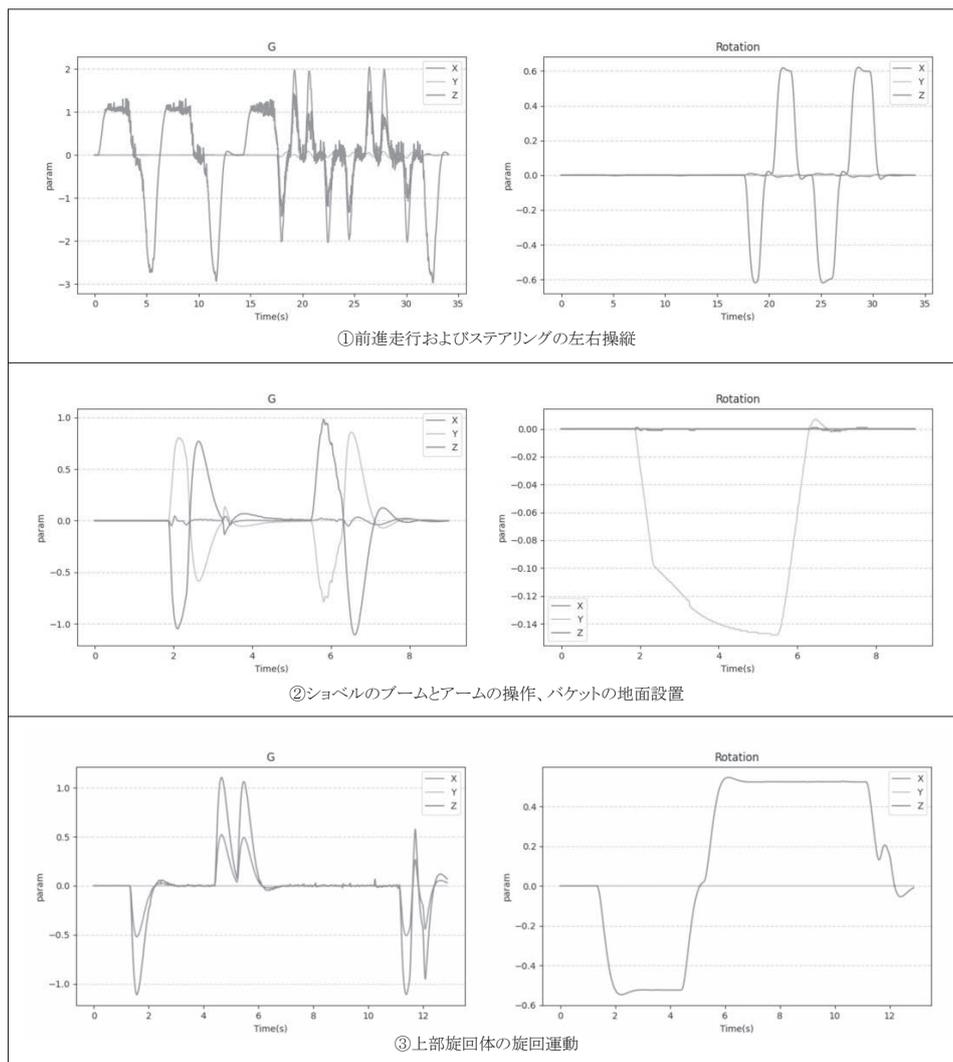


図-4 シミュレーション検証スクリプトで生成されたシナリオ3種の慣性データ

4. 検証・評価結果

(1) シミュレーションした慣性データの確認

仮想作業シナリオの3種類とシミュレーション検証スクリプトで生成された慣性データは、図-4のようになった。

(2) 身体揺動装置に設置したIMUセンサのデータを確認

生成されたシミュレーション慣性データを実行し、同時にIMUセンサのデータを記録した。IMUセンサは基本的にノイズが多いため平滑化フィルタを使用する。フィルタにはSavitzky-Golay法を採用した。高周波成分を維持しつつノイズを除去するのに優れているためである。係数はデータ点数(2N + 1)は13点で、多項式の次数は2に設定している。

(3) 生成した慣性データと計測したIMUセンサとの比較

生成した慣性データの加速度とIMUセンサからの計測データを比較した結果を図-5に示した。加速

度に関して、装置の仕様により1.4 m/s²以上の値は再現できないため、これに基づいてデータがクランプされていることが確認された。傾きについては、データの記載と詳細を省略するが、概ね良好に再現されていることを指摘しておく。

5. おわりに

本稿の検証結果により、表現のハードウェア上限を除いてコンピュータグラフィックスの3次元空間と身体揺動装置が正確に連携していることが確認できた。この検証結果を活用し、本格的な訓練シミュレータを開発し被験者を募集して詳細にテストを行う予定である。

また既に、シミュレーショングラフィックスの視覚情報出力方法の違いによって生成される慣性データを調整しなければならないことが分かっている。それは人間の知覚の約8割が視覚情報と言われており、感覚の相乗作用があるためである。データに味付けをするといった具合だ。視覚出力装置の種類は、大まかに「モニター」と「ヘッドマウントディスプレイ (HMD)」

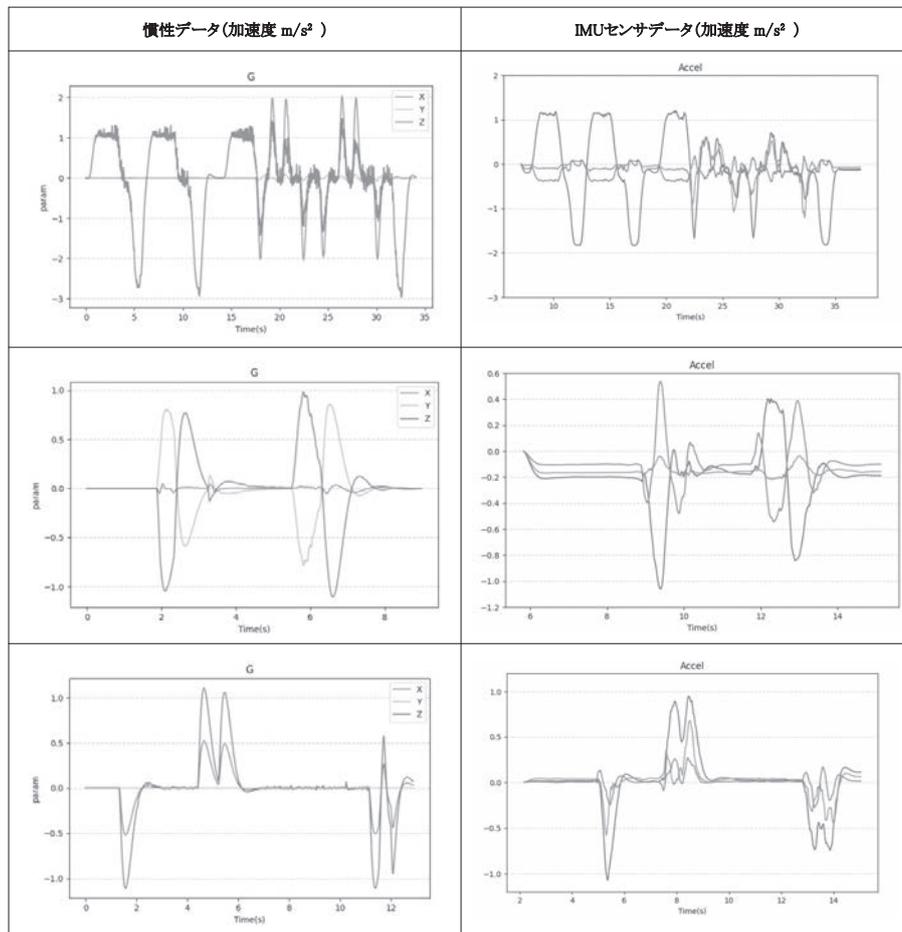


図-5 生成した慣性データとIMUセンサの計測データを比較

の2つのカテゴリに分類でき、これらのカテゴリによっても生成される慣性が異なる可能性がある。

今後、身体揺動のある建設機械シミュレータが広く普及し、訓練の効果向上によって業界の人材不足の軽減や安全性の向上が期待できればと考えている。

J C M A



【筆者紹介】
西岡 右平 (にしおか ゆうへい)
WIZAPPLY 株

