研究速報

Passive/Active サスペンションシステムを用いた 3D 無重力シミュレータの開発

吉田 和哉^{*1} 広瀬 茂男^{*2} 小川 雅^{*3}

A Development of the 3D Micro-Gravity Simulator with a Combined Passive/Active Suspension System

Kazuya Yoshida^{*1}, Shigeo Hirose^{*2} and Tadashi Ogawa^{*3}

This paper develops a new methodology of Combined Passive/Active Suspension System for the 3D micro-gravity simulation, and demonstrates its validity with a prototype test bed. The system is a combination of low-impedance passive suspension, which is transparent to the high frequency dynamics, and tribial servo-tracking control which covers global motion of the system. The prototype shows a good performance for 3D dynamics hardware simulation such as impact, collision, or docking of space systems.

Key Words: Micro-Gravity Testbed, Hybrid Simulation, Spring-Mass Pendulum System, Free Body Dynamics

1. ま え が き

宇宙ロボットおよび軌道上展開構造物などの研究開発・動作実証における問題点の一つは、地上の実験室において無重力の動作環境を得ることができないことである。したがって何らかの疑似的な方法を用いて、無重力状態を機械的に模擬してやらなければならない。

これまでに開発されてきた無重力シミュレータを、力学的にパッシブな方法によって無重力状態を模擬するか、アクティブなモーションコントロールによって模擬するかという観点から概観すると、以下のように分類される。

力学的にパッシブな方法としては、(1) 落下塔あるいは弾道飛行により自由落下状態を実現する、(2) 水中の浮力を利用する、(3) 空気浮上を利用する、(4) カウンターウェイトあるいはスプリングをつけたワイヤーで吊す、などの方法が知られている。(1) は実験時間が短く、実験機会も限られるという欠点をもつ。(2) は大がかりな水槽が必要なこと、水の慣性および粘性抵抗のため、力学的正確さの追求は難しいなどの欠点がある。(3) は力学的に良好な結果が得られているが(例えば文献[1]など)、最大の欠点は動作が二次元平面に限られることである。(4) は人工衛星の開発現場において、太陽電池パドルの展開試験の際によく用いられている方法である。

一方、アクティブなモーションコントロールによる方法は、計算機上の無重力ダイナミクスモデルに基づいて被験体であるハードウェアを動作させる「ハイブリッドシミュレーション」と呼ばれる方法がよく知られている(例えば文献[2][3]など)。またワイヤー懸架にアクティブコントロールを併用する例として、文献[4]では鉛直方向にはカウンターウェイトでパッシブなバランスをとり、水平方向にはサーボコントロールによる位置追従を行っている。一方文献[5]では、水平方向の運動についてはダイナミクスモデルを用いて懸架のリファレンスポジションを定め、鉛直方向にはワイヤーの張力を一定に保つ制御を施している。また支持点まわりの回転運動については、ジンバルを用いてパッシブに対応している。

アクティブモーションコントロールを用いる方式は三次元運動のシミュレーションにおいて極めて強力な方法になりうるが、その制御帯域よりも高速の現象に対しては、力学的に正確なシミュレーションを行うことはできない。例えば、近年、衛星のランデブ・ドッキングあるいはマニピュレータームによる浮遊ターゲットのバーシング・捕獲などの衝突や接触を含む局面に対する動作実証試験の必要性が高まっているが、現行のハイブリッドシミュレータをみるとその総合的な制御帯域はたかだか10[Hz]程度であり[2][3]、高速の衝突ダイナミクスを模擬するためには不十分なものである。また、特に力/トルク情報を用いてシミュレーションを行う方式においては、センサの正確なキャリブレーションが現実的にやっかいな問題となる。

筆者らはこれら問題に対し、原理的により簡単な方法により、高速ダイナミクスの三次元無重力実験が可能であることを指摘し、基本的性能を確認するためのプロトタイプモデルを開発した。周波数の高いしかし動作距離の短い並進運動、および回転

原稿受付 1995年2月12日

^{*1}東北大学工学部

^{*2}東京工業大学工学部

^{*3}東京大学大学院

^{*1}Tohoku University

^{*2}Tokyo Institute of Technology

^{*3}Graduate School, Univ. of Tokyo

運動に対しては力学的にパッシブな懸架が適しており、周波数の低い広範囲の並進運動に対しては力/トルクセンサを用いないアクティブな追従制御が有効である。本論文で提案する方法は、この両者の長を結合したものである。まず 2 章において提案する原理について説明し、3 章においてプロトタイプ・シミュレータの開発について述べる。4 章ではシミュレーションおよび実験結果を示し、5 章にまとめおよび今後の課題を示す。

2. Passive/Active サスペンションシステムの原理

無重力模擬実験のポイントは被験体をいかにして、その物理運動に対して外乱を与えずに、三次元的に支持・懸架するかということである。力学的な釣合い状態を利用したパッシブな場合を考えてみると、被験体の物理運動を乱さないためには、支持・懸架メカニズムの機械的インピーダンスが可能な限り小さくしなければならない。例えば、ワイヤー・プーリーを介してカウンターウェイトで釣合いをとる場合、カウンターウェイトは系の慣性を増加させ、プーリーは粘性外乱を与える。カウンターウェイトを使う場合、実験システムの応答に付加慣性の影響が加わることは避けられない。

ところで、いま Fig. 1 のように質量 m の被験体 Q (ここでは簡単のために質点として描いてある) の重心を、支点 P が移動可能なバネ振子で懸架する場合を考えてみよう。簡単のために、この系は x - z 平面で運動を生じると仮定し、バネの長手方向 (ζ 方向) の微小変位 ζ 、および振子の振れ角方向 (θ 方向) の微小変位 θ について運動方程式を導くと以下のようになる。

$$(\ell + \zeta)\ddot{\theta} + 2\dot{\zeta}\dot{\theta} + g\sin\theta = F_{\theta}/m - \ddot{p}_x\cos\theta - \ddot{p}_z\sin\theta \quad (1)$$

$$\ddot{\zeta} - (\ell + \zeta)\theta^2 - g\cos\theta + k\zeta = F_{\zeta}/m - \ddot{p}_x\sin\theta - \ddot{p}_z\cos\theta \quad (2)$$

ここで、 g : 重力加速度、 $\ddot{p}_x, \ddot{p}_z$: 支点 P の加速度、 ℓ : バネ振子の平衡長、 k : バネの剛性である。また、高次の微小項は省略した。

いま、P 点を固定し、変位 θ, ζ が小さいと仮定する。すなわち θ 方向が x (水平) 方向、 ζ 方向が z (垂直) 方向一致し、 $(\ell + \zeta)\ddot{\theta} = \ddot{x}$ 、 $\zeta = \delta z$ 、 $\sin\theta = \delta x/\ell$ 、 $\cos\theta = 1$ と書くことが

Fig. 1 A principle of a suspension system

でき二次の微小項が無視しうると考えると、上式はそれぞれ

$$m\ddot{x} = F_x - mg\frac{\delta x}{\ell} \quad : \text{水平方向} \quad (3)$$

$$m\ddot{z} = F_z + mg - k\delta z \quad : \text{鉛直方向} \quad (4)$$

と書くことができ、バネ長 ℓ が大きく剛性 k が小さい場合には、被験体に対して重力方向の釣合いを保ち、それ以外の外乱力はほとんど作用しない状態をつくり出すことができる。

また、非常に長く剛性の低いバネで支持することは、懸架メカニズムの機械的インピーダンスを下げることになり、被験体の高周波数の物理現象に対して、懸架メカニズムはほとんど力学的に干渉しない状態が実現できる。特に、衝突のような現象においては、被験体に大きな力、加速度を生じるものの衝突の瞬間の変位は微小であり、ここに示したパッシブな力学系を用いることは非常に好都合である。

被験体の広範囲の運動をカバーするためには、支点 P をアクティブに追従制御する必要がある。式 (3) (4) に P 点をアクティブに動かす制御入力を加えて伝達関数の形式で書くこと次のようになる。

$$X(s^2 + \Omega_x^2) = F_x + U \quad (5)$$

$$Z(s^2 + \Omega_z^2) = F_z - mg + V \quad (6)$$

ここで、 Ω_x, Ω_z は

$$\omega_x = \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad \omega_z = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

をラプラス領域で表示したもの、また U, V は P 点の制御入力

$$u = \ddot{p}_x, \quad v = \ddot{p}_z$$

をそれぞれラプラス領域で表示したものである。いま、

$$U = \Omega_x^2 X, \quad V = \Omega_z^2 Z \quad (7)$$

のような制御系を構成すると、全システムの応答は

$$Xs^2 = F_x \quad (8)$$

$$Zs^2 = F_z - mg \quad (9)$$

となり、外力 F_x, F_z に対して重力をキャンセルして加速度運動のみを生じるといえる、理想的な無重力状態を実現することができる。実際、懸架メカニズムには低剛性で長いバネを用いるので、系の固有角速度 ω_x, ω_z は小さな値となり、式 (7) に示される制御を行う際の制御帯域は低いものでも十分である。

機械的に低インピーダンス、低固有角速度の懸架システムを導入することは、パッシブな支持拘束力を小さくできるばかりでなく、追従制御系に対する応答周波数要求を緩和することができるという、メリットをも生じる。

3. プロトタイプ・シミュレータ

Fig. 2 に開発したプロトタイプ・シミュレータの概観を示す。

P 点を三次元空間でアクティブに移動させるための方式は任意でよいが (応答性能を考えると直交 3 軸ロボットが最適と思われる)、ここではプロトタイプ製作の容易さから、ABC の 3 点からワイヤーを繰り出し、ワイヤーの長さを制御することに

Fig. 2 A general view of the developed prototype 3D micro-gravity motion simulator

より P 点を移動する方式とした。P-ABC は、初期位置として 1 辺 3.0 [m] の正四面体を構成し、この点を中心に P 点は xyz の各方向に ± 0.5 [m] の範囲に最大平均 0.5 [m/s] で移動することができる。P 点に関する逆運動学はパーソナルコンピュータで計算し、天井裏に設置したモーターとリールによってワイヤーを巻き上げ/繰り出しを行う。

被験体は剛球もしくは剛体平板とし、剛体平板の場合には図のようにジンバルを用いて、回転運動に対してパッシブな支持を行う。被験体の三次元空間内での運動は、2 台のカメラを用いた多点三次元位置計測装置 (QuickMag: 応用計測研究所) によってリアルタイム計測され、P 点の追従制御系を構成している。剛体平板の場合には複数の位置計測点が必要であるが、その場合はキューマーカーの色によって計測点を識別する。

プロトタイプ的主要パラメータは、剛体球の場合 $m = 0.3$ [kg], $\ell = 2.0$ [m], $k = 0.3$ [kg/m] であり、したがって $\omega_z \cong 1.0$ [rad/s], $\omega_x \cong 0.45$ [rad/s] である。

4. 性能評価

4.1 基本応答シミュレーション

プロトタイプ・シミュレータの動作実験結果を示す前に、式 (7)~(9) に示される追従制御系の基本応答特性をシミュレーションによって確認しておこう。

x 方向の運動に注目した系のブロックダイアグラムは Fig. 3 のように書くことができる。系に対する入力、懸架される被験体 (物理系) に作用する力 F_x である。この F_x により引き起こされる系の変位は式 (8) より $X/F_x = 1/(s^2 + \Omega_x^2)$ である。変位 X がセンサによってとらえられ、追従系は式 (7) に

Fig. 3 A block diagram of the control system (for one axis)

Fig. 4 Velocity profile of the simulated object after impact (Matlab simulation at $\Omega_x^2 = K = 0.2$, $T = 0.5$)

示されるように、入力変位に一定ゲインをかけたものを加速度として物理系に加えるという簡単な制御を行う。ゲイン K は具体的には、アンプの増幅率を追従走行系の慣性で割ったものである。また、実際にはセンサによる認識および信号処理に遅れが生ずるので、これを表すために一時遅れ要素を仮定した。

この系の応答の様子を Matlab によりシミュレーションし、以下の点を確認した。

- (1) $K \leq \Omega_x^2$ のときこの制御系は安定で、 $K > \Omega_x^2$ のとき発散する。
- (2) 物理系に実機のパラメータとして $\Omega_x^2 = 0.20$ を使い、追従系の遅れ時定数を $T = 0.5$ [s], ゲインを $K = 0.20$ としたときのインパルス入力後の速度応答を Fig. 4 に示す。これは、被験体に衝撃力が働いた場合に相当し、理想的には衝突後は一定の速度をもつ。追従系の遅れ時定数がゼロの場合は完全な等速運動を示すが、遅れが存在する場合は速度の減衰がみられる。遅れが大きくなるにつれこの減衰率は大きくなる。
- (3) 追従系の遅れが同一の場合には、物理系の固有角速度が大きいときに減衰の影響は顕著であり、小さい場合には減衰の影響は小さい。したがって物理系の固有角速度を小さくすることにより、良好な微小重力 (インパクト後の等速運動) 環境をより容易に得ることができる。

4.2 実験結果

実験は、プロトタイプ・シミュレータに支持される被験体を剛球とし、(1) 静止状態において被験体に衝撃力を加える、あるいは運動中に剛体壁に衝突させる、(2) 被験体に初速度を与え、長いバネとジンバルによってパッシブに支持される剛体平板に衝突させる、の 2 通りについて行った。

Fig. 5 Velocity profile of the simulated object after impact (experiment)

Fig. 6 Motion trace of a collision experiment

(1) の実験結果の代表例を Fig. 5 に示す。グラフのたて軸は、三次元空間内における被験体の速度の絶対値である。衝撃力が作用した後、被験体は本来、等速直線運動をすべきであるが、実際には速度減衰を伴った直線運動を行っている。この基本傾向は Fig. 4 に示した Matlab シミュレーションと同じであるが、実験の場合、特に減衰率が 2 段階になっている様子が観察された。実験結果を整理すると、被験体速度が 0.5 [m/s] 以下ではおよそ 0.01 G ($G = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$) の減衰 (外乱) 加速度であり、 0.5 [m/s] 以上ではおよそ 0.1 G であった。アクティブ追従系の最大応答速度が 0.5 [m/s] であることより、高速域での高減衰率は、追従系の応答速度の限界に起因するものと考えられる。

(2) の実験結果の代表例を Fig. 6 に示す。このような衝突実験 10 回分のデータを採取し解析した結果、衝突の前後で本来は完全に保存されるべき運動量の、実験における損失は、わずか平均 3.3% であった。

5. まとめおよび今後の課題

本論文では、原理的に非常に簡単な方法により、高速のダイナミクスにも追従する三次元無重力実験の方法を示し、プロトタイプ・シミュレータによる実験によりその基本性能を確認し、以下の点を明らかにした。

- 力学的にパッシブな懸架とアクティブな追従制御を組み合わせた方法を提案し、その力学関係式、制御系の構成方法を明らかにした。
- プロトタイプを用いた基礎実験により、広範囲の運動模擬については、追従系の応答速度以内では 0.01 [G] という比較的良好な減衰 (外乱) 加速度環境が実現できること、衝突のような高速の現象に対しては運動量の損失をほとんどなしに実験が行えること、を明らかにした。

なお今後の発展課題として、具体的な宇宙ロボットシステムや多節の構造物の模擬実験を想定した場合、いかに懸架・追従システムを複雑にせずに、的確に複数点を支持するかという問題があげられる。しかし、文献 [4][5] の例ではワイヤーによる複数点支持で成功しており、被験体の動作範囲をある程度限定し、問題を単純化するなどして対処可能と考える。

衝突やドッキングに対して力学的に正確な無重力模擬実験は、これまで空気浮上による平面運動の実験に限られていたが、三次元運動に対しても力学的に比較的良好な模擬実験の可能性を示したことは、今後の発展のために有益であると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 梅谷, 吉田, 藤森, 岡村: “自由浮遊する宇宙用テレロボット・モデルによる対象物の捕捉制御実験”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.6, pp.81-87, 1989.
- [2] 下地ほか: “6 軸サーボ機構を用いた宇宙ロボット用シミュレータシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.2, pp.12-19, 1990.
- [3] S. Dubowsky et al: “A Laboratory Test Bed for Space Robotics: The VES II,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Symp. on Intelligent Robot System (IROS '94), Munich, Germany, pp.1562-1569, 1994.
- [4] Y. Xu et al: “Control System of Self-Mobile Space Manipulator,” Proc. of 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.866-871, 1992.
- [5] Y. Sato et al: “Micro-G Emulation System Using Constant-Tension Suspension for a Space Manipulator,” Proc. of 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1893-1900, 1991.