

## 医療用除振台に関する研究

## Development of Vibration-free Surgical Table with Bilateral Servo System

○東脇正明 (東電大院) 大西謙吾 (東電大) 斎藤之男 (芝工大)

Masaaki TOWAKI, Kengo OHNISHI, Tokyo Denki University

Yukio SAITO, Sibaura Institute of Technology

**Abstract:** With the advances of medical technology, the surgical conditions of microsurgery and optical measuring environment for small animal experiments conducted require equivalent vibration-free systems as semiconductor devices. This report describes a Bilateral Servo System based control of vertical motion and posture of the surgical table, and control for active vibration suppression of working state vibration and the external vibration. The use of air dumper commonly enables vibration isolation, but, due to the reduced rigidity, has insufficiency to correspondence to centroid fluctuation as of a human body. By mounting the cylinder in the table's strut, the bilateral servo system operated with active high-speed switching of position and force control apparently achieve to effect as active dynamic vibration absorber.

**Key Words:** active control, bilateral servo system, surgical bed, position and force control, vibration-free

## 1. 緒言

最近のマイクロサージャリーによる手術環境, 小動物実験台での光学式測定環境などでは, 半導体機器と同様の除振化は必要である。

本研究は, バイラテラルサーボを基本に作業台の上下, 傾斜を任意に設定すると共に作業中の外部振動, 作業中における振動を制振するシステムの研究報告である。通常, 空気ばねを使用しているため, 振動絶縁はできても剛性低下のため人体などのように重心変動に対しては対応が難しいのが実情である。これに対し, 本方式は支柱にバイラテラルサーボによる位置制御と力制御を高速で切り替え, 見かけ上両手法が成り立つようなシステムとしたアクティブ制振装置である。

シリコンウエーハの製造における装置は低周波かつ大振幅で変位する。また, 宇宙空間においても軽量構造物が用いられ, 空気抵抗がないことから減衰が小さく, わずかな外乱で振動が発生する。更に, 中越沖震災などの地震の卓越振動数も2~4[Hz]である<sup>1)</sup>。このような環境条件下では, 振動抑制は不可欠である。特に, 医療環境では必要不可欠である。

## 2. 従来のパッシブ除振法とアクティブ制振法の欠点

現在の除振台には, パッシブ型除振法とアクティブ型制振法があり, 部分的な対策が可能である。パッシブ型除振法は, 防振ゴムのようにほかからエネルギーを供給しなくても, その物質自体が持つ固有の除振性能を生かし振動を抑える方法で安くできる。しかし, パッシブ型では最も除振性能に優れている空気ばねを用い, いかに上手に調節しても, 共振点が1[Hz]以下になる事はない。そこで, 現在では複雑な振動に対してパッシブ除振法に比べ高性能タイプであるアクティブ型制振法を使用するケースが多い。

アクティブ型制振法は共振周波数を変えることや, 共振そのものを無くすることが可能である。しかし機器等に対して, ばね支持の方法で振動絶縁を図ると, 低振動数のため支持ばね定数は極端に小さくなり, 振動絶縁が可能でも剛性低下のため搭載した重量や重心点移動に直接作用する力により大きく変形し不安定となる。そこで, そのような低周波でかつ振幅の大きい振動に対する無共振振動絶縁装置として, 本研究ではバイラテラルサーボシステム(Bilateral Servo System 以下, BSS)を用いた振動絶縁装置の研究を行

うものである。

## 3. BSSの原理と特性

バイラテラルサーボシステム(Bilateral Servo System 以下, BSS)の概要をFig.1に示す。

本研究の全てのBSSは油圧式バイラテラルサーボシステム(Hydraulic Bilateral Servo System 以下, HBSS)を用いている。

BSSの特徴として, (1) 拮抗作用による安定動作 (2) 高出力で滑らかな動作, 応答性の良さが挙げられる。HBSSはマスタシリンダとスレーブシリンダの2対1組の複動形直動シリンダをチューブで連結し, 作動流体として非圧縮性オイルを密閉させ拮抗作用を行なう構造となっている。また, 圧力センサを内蔵し内圧を測定することで圧力制御を行っている。各シリンダにポテンショメータを組み込むことで位置決め制御を構成している。

このようなシステムによりHBSSは精度の高い位置制御, 及び微小圧力制御を行っており, オープンループ, カフィードバック, 位置フィードバックのシステム化を実現している。また, 基礎研究ではHBSSの応答時間が0.1[s]程度で, 目的的低周波領域の応答性に優れていることを確認している。

制振用HBSSの外観と仕様をFig.1及びTable1に示し, 実物をFig.2に示す。油圧式アクチュエータ単体では必要不可欠であったパワーユニットは, 電磁モータで代用するハイブリッド構造としたため必要なくなり, 小型になり油圧式アクチュエータの欠点が補われている。また, (1) 拮抗作用による安定動作とは, ヒトの筋力の特性から考えられたものであり, 関節を駆動する一対の筋肉により関節回りのトルクが拮抗し, 高い保持力と制振もつ構造を応用している。HBSSではFig.1に示すようにマスタとスレーブ間の流体(シリコンオイル使用)を両シリンダ内に完全密閉すると両ピストンにかかる圧力は拮抗状態となる。ヒトの場合は, 動作時は一対の筋力の一方が作用しているが本システムでは, 常に, 拮抗作用が連続している。そのため, 安定な動作となる。さらに, (2) の高出力, 滑らかな動作とは, 油圧特有の滑らかな動作であり, 出力はシリンダ径により決まる。例えば, マスタシリンダが20[mm]でスレーブが30[mm]であれば力で2.25倍となり, 高出力はモータと違い減速機も使用することなく得られる。

また、シリコンオイルは温度と粘度の変化が線形的であり圧力センサの情報をフィードバックし、力帰還型バイラテラル制御系を形成すれば、スレーブで発生する力によって制御量を変える力制御が可能となる。

HBSS の運動方程式を式 (1), (2) に、動作開始および停止条件を式 (3), (4) に示し、一般化した伝達関数を式 (6) に示している。また、Fig.3 は MATLAB によるブロック線図を示している。

赤印で囲んだ部分は、拮抗作用による増幅器の位置を示している。

- $V_r$  : Rod side volume [  $m^3$  ]
- $V_b$  : Bottom side volume [  $m^3$  ]
- $\Delta V_r$  : Volume change of Rod side [  $m^3$  ]
- $\Delta V_b$  : Volume change of Bottom side [  $m^3$  ]
- $A_{Mr}$  : Master Rod cross sectional area [  $m^2$  ]
- $A_{Mb}$  : Master Bottom cross sectional area [  $m^2$  ]
- $A_{Sr}$  : Slave Rod cross sectional area [  $m^2$  ]
- $A_{Sb}$  : Slave bottom cross sectional area [  $m^2$  ]
- $\dot{x}_m$  : Master velocity [  $m/s$  ]
- $\dot{x}_s$  : Slave velocity [  $m/s$  ]
- $P_r$  : Rod side pressure [  $MPa$  ]
- $P_b$  : Bottom side pressure [  $MPa$  ]
- $P$  : Initial pressure [  $MPa$  ]
- $k$  : Specific heat ratio [  $MPa$  ]
- $m_{sp}$  : Mass(Piston+Rod) [  $kgf$  ]
- $L$  : Load of slave piston [  $kgf$  ]
- $f$  : Slave's damping force [  $N/(m/s)$  ]
- $\kappa$  : Slave's constant of spring [  $N/m$  ]
- $F_{sum}$  : Slave's sum force [  $N$  ]
- $F_{sta}$  : Slave's static friction [  $N$  ]

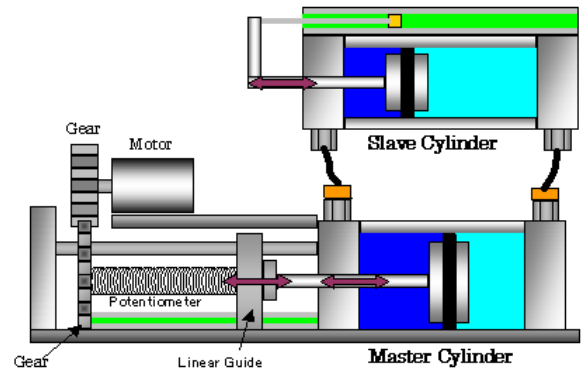


Fig.1 Structure of HBSS



(a) Master Cylinder (b) Slave Cylinder  
Fig.2 HBSS for Vibration Isolation System

Table 1 Specification of HBSS

	Master	Slave
Cylinder Diameter	$\phi 50$ [mm]	$\phi 30$ [mm]
Cross Section	1,962.5[mm <sup>2</sup> ]	706.5[mm <sup>2</sup> ]
Tube Diameter	$\phi 4.5$ [mm]	
Gear ratio	1/5	
Potentiometer	1	1
Pressure Censor	2	
Motor(AC)	100[W]	

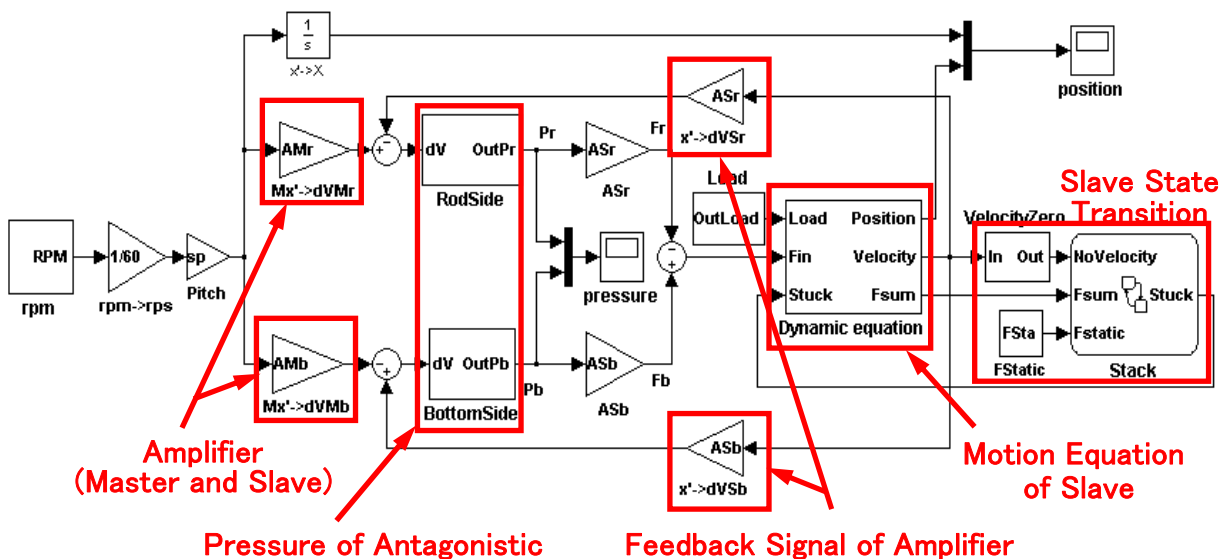


Fig. 3 Block Diagram of HBSS

BSS の運動方程式

$$\begin{cases} (m_{sp} + L)\ddot{x}_s + f\dot{x}_s = A_{sb} \cdot P_b - A_{sr} \cdot P_r & (1) \\ \ddot{x}_s = \frac{A_{sb} \cdot P_b}{m_{sp} + L} - \frac{A_{sr} \cdot P_r}{m_{sp} + L} - \frac{f}{m_{sp} + L} \dot{x}_s & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{動作条件} & |F_{sum}| > F_{sta} & (3) \\ \text{停止条件} & |F_{sum}| \leq F_{sta} \wedge |\dot{x}_s| = 0 & (4) \end{cases}$$

伝達関数(一般的な制振装置)

$$G = \frac{k}{ms^2 + G_c + k} \quad (5)$$

伝達関数(HBSS)

$$G = \frac{1}{(m_{sp} + L)s^2 + fs} \quad (6)$$

一般的なアクティブ制振場合、粘性項 ( $G_c$ ) は除振台を使用することで、任意の値になるようにフィードバックし、これにより制振効果を高めている。それに対し HBSS は伝達関数の分母に  $m_{sp} + L$  の項があり、負荷  $L$  の増加に対し実験的に周波数特性が伸びている。

また、非圧縮性作動流体であるオイルを用いているため、ばね定数項  $k$  が存在しないのが特徴である。

#### 4. シミュレーション

以上の運動方程式より行列演算ソフト MATLAB の Simulink を用いてシミュレーションを行った<sup>2)</sup>。Master と Slave の応答実験のシミュレーション及び結果、1[Hz]で振幅が1[mm]のSine波振動に対する制振シミュレーションをそれぞれ Fig4,5 に示す。

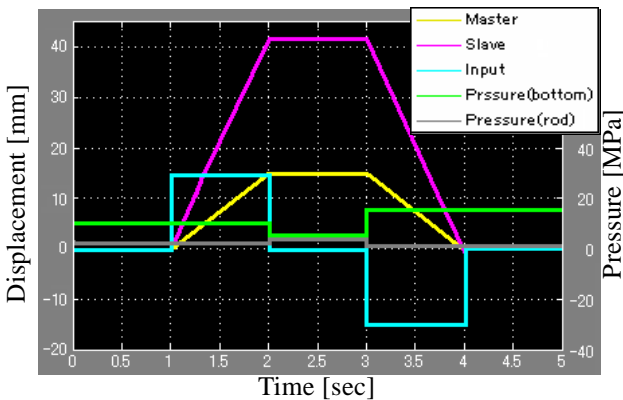


Fig.4 Response Simulation by MATLAB

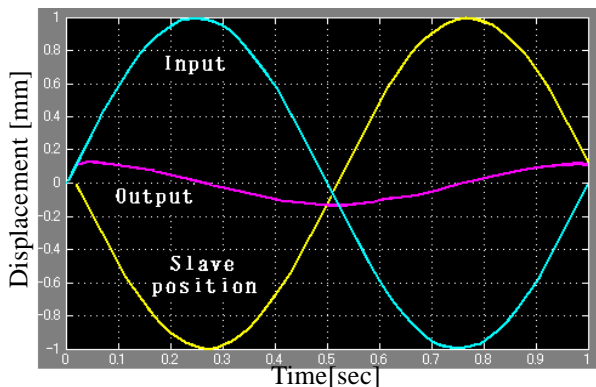


Fig.5 Response Simulation to Sine wave (Input : 1[Hz],1[mm])

#### 5. DDA を用いた HBSS の特性実験

##### 5-1 ソフトウェア及び数値制御法

本研究ではモータを動作させるパルス生成として、H8 マイクロコンピュータを用い、タイマによる ON,OFF 制御を利用する。また、タイマの設定を変え、ON,OFF の時間幅を変えることでモータに送るパルスの周波数を変える。そして、パルスを送るための数値制御法として、デジタル微分解析機(Digital differential Analyzer, 以下 DDA)を利用する。DDA を利用することで、縦軸を時間、横軸をマスタの変位として出力でき、また、その出力は正・余弦波として出力され、周波数や繰り返し動作回数、パルス数の各パラメータを簡単に替えられる。

##### 5-2 静特性実験

静特性実験として、設計した HBSS の許容浮上加重、また、その時の位置・圧力を求めるための実験を行った。

実験法はスレーブシリンダに荷重を加え、H8 マイコンからパルスを送りモータを制御する事で、スレーブシリンダのロッドを上下させる。また、荷重は無負荷状態から 10[kgf]づつ加え、最大 50[kgf]まで加えた。なお、変位はスレーブシリンダのストロークの約半分 20[mm]とした。

##### 5-3 動特性実験

動特性実験として、入力したパルス幅を変える事で周波数を変え実験を行った。なお実験した周波数は 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8[Hz], 変位は 10[mm]である。実験法は基本的に静特性実験と同じだが、加速度センサをスレーブに加え、時々インパルス入力を与え圧力センサの反応や減衰具合を測定した。Fig.6 に負荷 40[kgf]の実験結果を、Fig.7 に負荷 30[kgf]でかつ 1.8[Hz]の時の実験結果を、Fig.8 に周波数特性をそれぞれ示す。

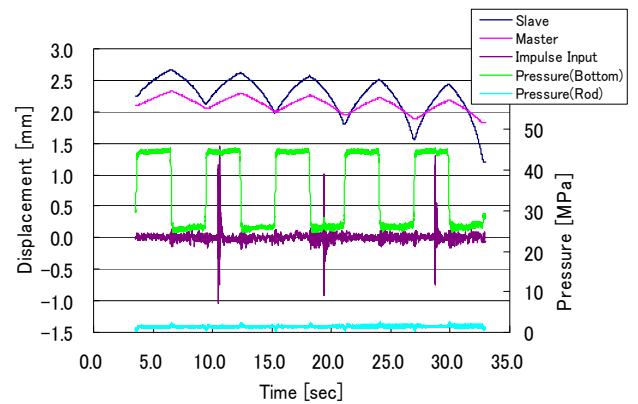


Fig.6 Experiment of Static Characteristic (To add 50[kgf])

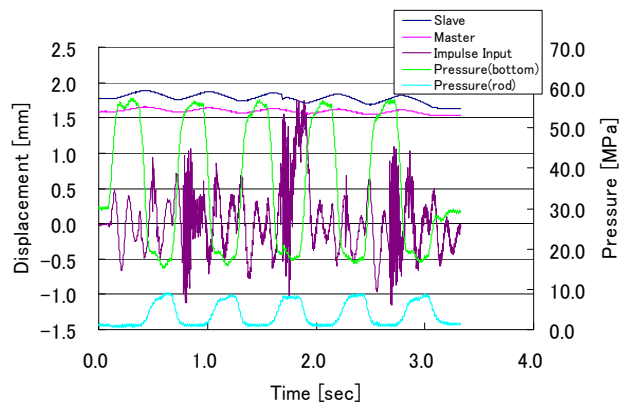


Fig.7 Experiment of Dynamic Characteristic

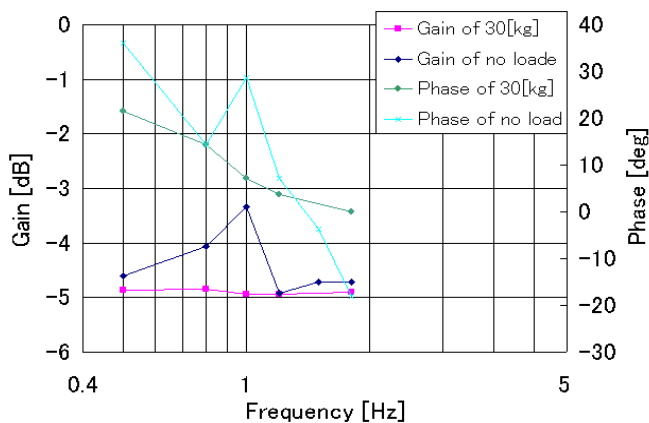


Fig.8 Frequency Characteristic

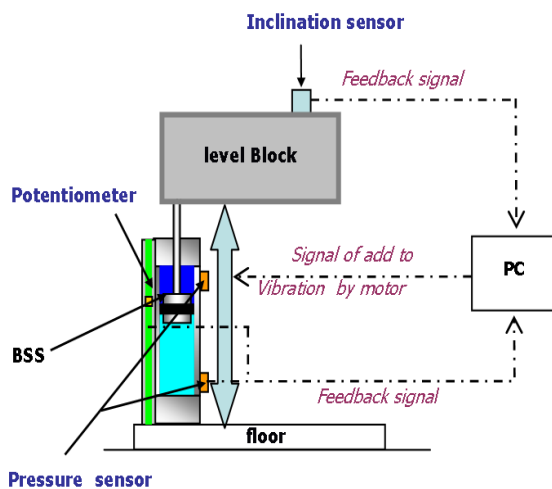


Fig.9 Control Method (To add 50[kgf], 1.8[Hz])

## 6. 制振法

スレーブシリンダを除振脚として4脚配置する。

制振法として、HBSSを浮上させ加速度計を応用した傾斜センサにて定盤を手術台に見立て水平を維持し、ポテンシオメータで上下の位置を測定しそれを基準とする。このセンサを用いることで、各スレーブシリンダが微妙に異なっている、地面に対して完全に水平が出せる利点がある。

もし手術台が何らかの要因を受け振動した場合、まずスレーブシリンダ内のピストンヘッドに反力がかかる。そのときのポテンシオメータが変化分の微小位置を検出し、ピストンヘッドの基準点からの差分を検出する。更に、傾斜センサにより台の傾き (x, y 軸変化) を検出し、傾斜センサの傾きが0になるように位置制御を行う。加えて、力制御に関しては、シリンダのロッド側と反対側の圧力を圧力センサで検出する。これは、アクティブ制振法ではいまだ例を見ないが、位置のみではなく、圧力変動から手術台の重心点の変動を読み取り、4隅の圧力バランスを取ることが可能となる。これらセンサから得た情報はPCによりその水平度を求め、不足分はマスタのモータに信号を送りモータを正転及び逆転させることで各除振脚を個別に動作させアクティブ制御にて再び水平を出す。

本システムは、水平状態を基準としているが、必要な手術台の高さ、傾斜角度を術者から音声信号などで指令されれば、必要な高さ、傾斜角度がコントローラに送られ、位置制御により実行される。

Fig.8は周波数特性である。ここで、30[kgf]の荷重の時、

ゲインは-5[dB]であるが、周波数の変化にもかかわらず、ほぼ水平な特性であり、ゲインが変化することなく1.8[Hz]まで伸びていることが分かる。低周波数領域としては、0.5[Hz]からであるが、制御は0.1[Hz]以下まで可能である。また、Fig.9は、システムを分かり易く図示したものである。通常のアクティブ制御と違い、手術時の重心変動に対応するためには手術台の重さを考慮したシリンダ径を設計すればよい。

## 7. まとめ

通常、モータ単体では出力がモータの大きさに比例するため発熱や制御に問題が出てくる。さらに、ブレーキを設けなくては姿勢を維持できない。

また、空気ばねと超磁歪アクチュエータのハイブリッドアクチュエータでは空気ばねを使用しているため、ばね要素があるため系が不安定になる。

本研究は、パッシブ制振でも線形ダンパとして用いられている油圧シリンダを使いそれをアクティブ制御することにした。ところが、油圧シリンダには必ずパワーユニットが必要になりシリンダ自体はある程度小型化できてもシステム全体が大きくなり、また、振動制御に加え油の流量制御を行わねばならぬ、発熱の問題、停電時での誤動作、手術台の自動保持など問題である。

そこで、油圧型バイラテラルサーボシステム (Hydraulic Bilateral Servo System) を利用することでこれらを解決したものである。

従来、半導体製造において、その装置を備え付ける場合、建物自体が堅牢でなくてはならず、一般的に基礎を地下に備え付けるなど、施工時間やコストが大幅にかかっていた。そこで、本研究では建物がある程度軟体であっても手術台が安定した動作を行うような制振システムの提案を行った。

## 謝辞

本研究は、平成19年度修士課程を修了した野原英明君の研究をもとに進められたものでこの場を借りて感謝の意をささげる。

## 参考文献

- (1) 井開重男, 榎本弘, 阿久津享, 長屋幸助: 大振幅低周波用無共振剛体振動絶縁装置, 日本機械学会論文集 C 編, 1998, pp.459-464
- (2) 小泉真吾, 斎藤之男, 音琴浩: バイラテラルサーボを用いた内視鏡操作ロボットの研究, 第4回生活支援工学系学会連合大会前刷集, 2006, p.73
- (3) 野原英明, 斎藤之男: バイラテラルサーボによる除振台の制振に関する研究, 日本機械学会 埼玉ブロック大会, 2006
- (4) Y. Saito, K. Ohnishi, Y. Sunagawa S. Taguchi; Development of a Hydraulic Bilateral Servo Actuator for a Patient Supporting Robot, JHPS Fluid Power, Vol. 4, 1999, pp.619-624
- (5) 斎藤之男, 田島孝光, 砂川善宏: パワーアシスト機能を有するバイラテラル油圧力伝達機構とロボットへの応用に関する研究, 第37回日本リハビリテーション医学会学術集会, II-O-62, 2000
- (6) 野原英明: バイラテラルサーボシステムによる除振台の制振に関する研究, 平成19年度修士論文, 2007