絶対変位センサを用いた2自由度空圧式除振装置の制御*
(ボイスコイルモータを用いた制振)甲斐孝志^{*1}, 涌井伸二^{*2}Control of Air Type Anti-Vibration Apparatus with
Two Degrees-of-Freedom Using Absolute Displacement Sensors
(Vibration Control Using Voice Coil Motor)Takashi KAI^{*3} and Shinji WAKUI^{*3} The Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

In the field of vibration control, acceleration sensors are widely used as vibration sensors for large-space structures and soft ground. It is preferable to use velocity and displacement additionally. Then, the absolute velocity and displacement sensors are proposed and these can be used as feedback sensors. Up to now, the research, which is about each detected signal's feedback to an air type anti-vibration apparatus with one degree-of-freedom using an absolute displacement sensor, has been carried out. However, the apparatus will be connected each other in order to configure a large isolated table, and vibration modes of the table are selected and distributed in industrial applications. Since the above research is just one example of the applications, some practical applications should be presented more. Therefore, an anti-vibration apparatus with two degrees-of-freedom is controlled with absolute displacement sensors, and its application is verified in this paper.

Key Words: Vibration Control, Absolute Displacement Sensor, Absolute Velocity Sensor, Air Type Anti-Vibration Apparatus, One Degree-of-Freedom, Two Degrees-of-Freedom

1. 緒 言

振動制御の分野では、大型構造物や軟弱地盤などの振動検出のために加速度センサが多用される。絶対量の加速度は振動検出に適するからである。さらに、橋梁や制振ビルの振動制御では加速度に加えて速度も検出可能な速度センサが用いられることがある。これは速度フィードバック(以下、フィードバックをFBと略記)、すなわちDVFB(Direct Velocity Feedback)によって、制振対象の機械インピーダンスにダンピングを付与するためである。そして、現代制御理論に基づく状態FBを適用する場合、加速度・速度に加えて変位も利用できることが望ましい。原理的には、速度センサからの速度信号を1階積分器に通す、あるいは加速度センサからの加速度信号ならば積分器に2回通せば変位信号が得られる。しかし、速度・加速度信号に含まれる低周波数ノイズに起因して、不用

意な積分演算を行うとドリフト問題に悩まされることは常のことである。そのため、文献(1)では振動センサ自身の閉ループ内から変位・速度・加速度の3種類の信号を同時検出する絶対変位センサを提案した。さらに、3種類の振動検出だけ、すなわち観測だけではなく、各信号をFBしたいと考え、文献(2)では空圧式除振装置の制振実験を行った。市販の加速度センサでさえ空圧式除振装置に適用した際、同センサ単体の数値仕様が十分であっても、FBに活用したことによる特有の問題が発生することを筆者の一人は経験しているからである。具体的に、仕様書に記載のない同センサ自身の高周波共振がFBによって顕在化することがある。そこで文献(2)では提案の絶対変位センサの各出力をFBしたときの課題を明白にするため、鉛直1軸の1自由度空圧式除振装置(以下、AVA singleと略記)を用いて、FBセンサとしての有効性を検証した。その結果、同センサはAVA singleを制振するためのFBセンサとして機能しており、DAVDFB(Direct acceleration, Velocity, and Displacement Feedback)が可能であるという結論を得た。しかし、AVA singleへの適用が可能と言っても、まだ同センサを実用に供すると

* 原稿受付 2009年7月31日。

^{*1} 学生員、東京農工大学大学院工学府(〒184-8588 小金井市中町2-24-16)。^{*2} 正員、東京農工大学大学院共生科学技術研究院。
E-mail: 50010834201@st.tuat.ac.jp

は言えないと考えている。運動自由度が1軸に限定された除振装置には適用可能であっても、産業応用のように剛体6自由度の姿勢制御を要する空圧式除振装置の場合には、さらに除振台の姿勢変動に伴って生じる振動センサの傾斜に起因した特有の問題が発生するからである。そこで、提案の絶対変位センサについても、多軸制御のFBをかけることで姿勢変動する除振装置への適用性を検証せねばならないと考えた。なお、変位FBのメリットはスカイフックスプリングの付与による固有振動の高周波化であり、この検証を通じて既述した大型構造物分野の多自由度制振への適用も期待できる。

本論文では、自由度を鉛直方向と鉛直面内の回転運動の2自由度に限定した2自由度空圧式除振装置(以下、AVA dualと略記)の制振を行う。まず、市販の速度センサの振動子に提案のFB系を実装して、絶対変位センサに改良したときの調整結果を周波数応答で示す。次に、AVA singleに対する従来の制御結果を示したうえで課題を明確にする。最後に、AVA dualの制御構成および提案の絶対変位センサ2台の計6出力を使った直接FBの結果を示す。

2. 絶対変位センサ

提案の絶対変位センサは、サーボ形速度センサである地震計(VSE12F)^①の振動子を使って、これに施すフィードバック構造を変更したものである。具体的には、内蔵の検定コイルの出力をFBに活用したことを特長とする。本来、同コイルは振動子を強制励振させて感度校正に用いるが、ここでは同コイルの逆起電力を利用して速度を検出する。さらに、傾斜に起因したオフセットの発

生を抑制できる点が、文献(4)で提案の絶対変位センサとは異なる特徴である。

図1が絶対変位センサの構造および制御構成である。まず、サーボ形速度センサに内蔵される容量式の位置検出器より変位信号を検出する。そして、これに弱いPI補償を施すことで、振動子の傾斜によるオフセットの発生を抑制する。次に、内蔵の検定コイルより速度信号をバッファを介して検出し、ローパスフィルタ(LPF)を用いて高周波ノイズを除去した後、さらに擬似微分演算することで加速度信号を検出する。これらを含むFBループが提案する絶対変位センサのメインループである。以上、2つのループ構成により、文献(4)では2回の微分演算を要するのに対して、1回の微分演算のみでFBループ内より加速度・速度・変位が同時検出可能となる。

さて、以降の4章の実験では、特性が同じ絶対変位センサが2台(以下、絶対変位センサL・Rと記載)必要である。絶対変位センサL・Rの周波数応答を図2に示す。両センサの周波数帯域はゲイン・位相特性でフラット(位相は180 degree)となる領域であり、約1~90[Hz]である。この整形は、主に帯域整形用ゲイン(図1破線内の k_f)の調整を行うことで可能である。しかし、帯域拡大のためにこれを強めすぎると、検出感度の低下や低域の折点に共振が発生する。そこで、後者の共振を抑えるためにダンピング(図1破線内の k_d)を付加した。よって、絶対変位センサの帯域は、帯域整形用ゲイン k_f とダンピングゲイン k_d の調整により決定できる。同センサL・Rの帯域整形は試行錯誤である。低域の折点で特性が異なるのは、サーボ形速度センサは一品ごとの手作り製品であるため、この機械特性のばらつきに起因すると考えられる。

3. 絶対変位センサを用いたAVA singleの制御

絶対変位センサL・Rを用いてAVA dualの制御を行う前に、すでに文献(2)、(5)でAVA singleが備えるボイスコイルモータ(以下、VCMと略記)に各検出信号をFBし、同装置への適用性を確認している。以下、簡単に結果を述べる。装置構成を図3に、制御系のブロック図を図4に示す。ここで、

- M : 振動子の質量 [kg]
- D : 振動子の粘性比例係数 [N・s/m]
- K : 振動子のばね定数 [N/m]
- R_a : コイル抵抗と電流検出抵抗の和 [Ω]
- k_t : 駆動感度 [N/A]
- k_f : 帯域整形用ゲイン [V/V]
- k_d : ダンピングゲイン [V/V]
- k_v : 検定コイルの逆起電力感度 [V・s/m]

Fig. 1 Structure and control scheme of absolute displacement sensor

Fig. 2 Frequency responses of absolute displacement sensors

Fig. 3 Control scheme of AVA single using absolute displacement sensor⁽⁵⁾

Fig. 4 Block diagram for AVA single using absolute displacement sensor

- k_s : 位置検出器の検出感度 [V/m]
- k_p : PI 補償器のゲイン [V/V]
- T_p : PI 補償器の時定数 [s]
- k_{acc} : 加速度FB ゲイン [V/V]
- k_{vel} : 速度FB ゲイン [V/V]
- k_{dis} : 変位FB ゲイン [V/V]
- M_i : 除振台の質量 [kg]
- D_i : 除振台の粘性比例係数 [N・s/m]
- K_i : 除振台の機械ばね剛性 [N/m]
- x : 振動子の変位 [m]
- z : 除振台の変位 [m]
- u : FB 非投入時の VCM の操作量 [N]
- u' : FB 投入時の VCM の操作量 [N]

であり、図4の破線部分がAVA singleの機械系を、一点鎖線部分が絶対変位センサのモデルを示す。ここで、図3に示すVCM driverの直前にアナライザから正弦波を入力し、 M_i が約120 [kg]の除振台を加振する。このときの除振台の振動を、評価用に設けた帯域400 [Hz]の加速度センサを用いてアナライザに入力することで、AVA singleのイナータンス応答を測定した。測定結果は図5である。

Fig. 5 Inertance responses of AVA single using absolute displacement sensor⁽⁵⁾

同図よりAVA singleの固有振動による共振は、加速度FBによって低周波に推移、速度FBによってダンピングを付与、そして変位FBによって高周波に推移可能である。これはスカイフックの法則に基づく。つまり、FB非投入時 ($k_{acc} = k_{vel} = k_{dis} = 0$) と投入時のAVA singleのイナータンス応答の簡易な伝達関数は、対比するとそれぞれ式(1)、(2)であり、式(2)の効果を確認したことになる。

$$\frac{\ddot{z}}{u} = \frac{s^2}{M_i s^2 + D_i s + K_i} \quad (1)$$

$$\frac{\ddot{z}}{u'} = \frac{s^2}{(M_i + M_e) s^2 + (D_i + D_e) s + (K_i + K_e)} \quad (2)$$

- M_e : 電氣的質量 (加速度FB) [kg]
- D_e : 電氣的粘性 (速度FB) [N・s/m]
- K_e : 電氣的剛性 (変位FB) [N/m]

以上より、絶対変位センサを用いてFBを施すことでAVA singleの固有特性が変更可能であることは検証できた。通常、市販の加速度センサではフォーサコイルの電流検出出力をもって加速度信号とする。これを踏襲して、供試の絶対変位センサの場合も当初、電流検出出力を加速度信号としてVCMにFBしていた。しかし、AVA singleを用いた検証の過程で、図1に示すように擬似微分器後に加速度を検出する修正が必要となった。この理由は、フォーサコイルには絶対変位センサの傾斜補正のために導入した位置検出器からの変位出力に基づく弱いFBが重畳するためである。さらにAVA singleを使用した実験から、同センサをFBに適用する際の問題は以下であることが明確になった。

- [1] 絶対変位センサの低周波帯域の不足
- [2] 除振装置の姿勢変動に伴うオフセット発生

による影響

まず、問題 [I] は図5を参照して、AVA singleの固有振動数は約3 [Hz]であり、絶対変位センサL・Rの帯域内にあることが図2よりわかる。しかし、これより低い固有振動数をもつ除振装置へは適用できない。よって、除振装置に応じた帯域が必要となり、この解決には同センサがより広帯域化される必要がある。

次に、問題 [2] は、振動検出の方が1自由度に限定されたAVA singleの実験では検証できない事項である。提案の絶対変位センサ自身は傾斜によるオフセットの発生を抑制する機能はもたせたが、瞬時にこれを除去できるわけではない。よって、FBループ内に同センサの姿勢変動によるオフセットが取り込まれた場合の検証が必要である。本論文では、これを検証するため、次の4章で同センサL・Rを用いてAVA dualの制振を行う。

4. 絶対変位センサを用いたAVA dualの制御

3章ではAVA singleの制振を行い、提案の絶対変位センサがFBセンサとして機能することを示した。しかし、産業応用の場面では多軸の除振装置が稼動している。そこで、本章では除振装置の運動自由度を2自由度に限定し同センサの適用性をさらに検証する。

4・1 AVA dualと制御装置の構成 除振装置の運動自由度を2自由度にするため、AVA singleを剛に2台（以下、AVA single L・Rと記載）連結し、 M_t が約250 [kg]のAVA dualを構成する。連結図と制御装置の構成は図6である。AVA singleでは鉛直方向の並進運動のみ制御可能であったが、AVA dualでは並進に加えて回転運動の振動も制御することになる。ここで、両運動の制御方法は次の2通りが考えられる。

- (a) AVA singleの空気ばねL・Rの他に、外部アクチュエータとなるVCM L・Rを用いて制御する。
- (b) 空気ばねL・Rだけに絶対変位センサの各信号をFBして制御する。

3章に記載したAVA singleの制振は上記(a)の方法を用いており、AVA dualの制振も同方法で検証する。

まず、AVA dual浮上の制御について説明する。これは図6を参照して、同装置に取り付けた位置センサL・Rからのループである。すなわち、同センサの出力をモード選択し、PI補償器に通した後に、さらにモード分離を行い、各空気ばねにFBする。このとき、AVA single L・Rは同特性であることが望ましく、詳細は後の4.2節の図7に示すが、AVA dual浮上のループのモード分配にゲインを設けて調整した。次に、絶対変位センサL・Rを用いたAVA dualの制振について説明する。これは、除振台上に

Fig. 6 Control scheme of AVA dual using absolute displacement sensors

設置した両センサからのループで、AVA single L・Rの除振台の加速度・速度・変位を検出し、モード選択を行い、適切なFBゲインをかけ、最後にモード分離しVCMに直接FBする。ブロック図の詳細は4.3節の図11に示す。ここで両ループにおいて、モード選択の方法はL・Rの信号の和を並進運動、差を回転運動とする。以上より、AVA dualは並進・回転方向の2自由度で制振可能となる。

4・2 AVA dualの安定化と固有振動数の変更 4.1

節 (a) の制御方法でAVA dualを浮上させ、提案の絶対変位センサを用いて制振する際、生じた問題以下の2点である。

- [I] 回転運動が定常発振し、安定性が不足する。
- [II] 並進・回転運動の固有振動数は2.2・1.2 [Hz]であり、図2右図で示した絶対変位センサL・Rの位相特性を参照すると、12 [Hz]において180 [deg]より進むところに位置している。

まず、問題 [I] はAVA dualの設置床が傾いていることや、接合箇所の剛性不足に起因する。そこで、加速度センサJA-5Vを除振台上に2台（以下、加速度センサL・Rと記載）設置し、空気ばねにFBすることでAVA dualを安定化する。これは、空気ばねの特性が、低周波積分特性であることを利用した補償方法で、効果としてDVFBと同様に各固有振動にダンピングを付与できる。制御ブロック図は図7である。ここで、同図の一点鎖線部の $k_{A(L)}$ 、 $k_{A(R)}$ が、4.1節で述べたAVA single L・Rの特性を一致させる調整するゲインである。そして、位置センサL・RからのループがAVA dual浮上制御のためであり、安定化は加速度センサL・Rからの太線を除くループである。すなわち、除振台の加速度をモード選択し、適切なゲイン調整（ $k_{A(L)}$ 、 $k_{A(R)}$ ）後に、AVA dualの並進・回転運動に関するPI補償器の後段にそれぞれ加算する。この加速度FBを施した際の効果を図8のステップ応答で確認する。ステップ入力、図7右下に示すようにVCM

Fig. 7 Block diagram of AVA dual using acceleration sensors (JA-5V and JA-40GA)

Fig. 8 Step responses of AVA dual with acc.FB using acceleration sensors (JA-5V)

にモード分離して入力した。このとき、ステップサイズは並進・回転運動に対して、それぞれ $109 [\mu\text{m}] \cdot 0.011 [\text{deg}]$ である。前者のオーダは、産業応用の場面における並進運動の先頭ピークを $100 [\mu\text{m}]$ 以下に抑えると言う調整指針を踏まえている。そして、鉛直方向の空気ばねがスパン $852 [\text{mm}]$ で取り付けられた産業装置にあって、 $\pm 100 [\mu\text{m}]$ の先頭ピークで回転運動を生じたとき、この傾きは $\pm 0.0134 [\text{deg}]$ と計算できる。したがって、後者の回転運動 $0.011 [\text{deg}]$ の傾きは、実移動の装置と同レベルのものとなっている。さて、図8より、図7の $k_{A(T_r)}$, $k_{A(R_or)}$ を投入して加速度FBを施すことで両固有振動にダンピングを付与でき、AVA dualの安定化が施されている。ステップ応答が $0 [\text{V}]$ に収束するのは、もちろん同装置浮上のループにPI補償器が入っているためである。さらに、同図左側より並進ステップ入力時は回転運動への影響がなく、これは固有振動のモード選択・分離が機能していることを示す。右図の回転ステップ時についても同様である。

次に、問題 [II] の解決には、絶対変位センサの低域の位相特性を改善する方法と、同装置の固有振動数を絶対変位センサの帯域内に推移させる方法があげられる。今後、絶対変位センサを産業応用の場面で用いられる6自

Table 1 Specification of acceleration sensors

	JA-5V	JA-40GA
Sensitivity [V/G]	5	5
Resolution [$\pm\text{m/s}^2$]	9.81×10^{-6}	6.9×10^{-6}
Frequency response [Hz]	DC ~ 300	DC ~ 200
Max amplitude [mA]	0.04	0.012
Measuring range [m/s^2]	$\pm 0.981 \sim 147.15$	± 39.2

Fig. 9 Steady state of AVA dual with acc.FB and integral acc.FB using acceleration sensors

由度の空圧式除振装置に適用したいので、前者の対策が望ましい。しかし、本論文では機械特性にばらつきがある2台の振動子を絶対変位センサへと改良し、同センサの3種類の信号を用いて除振台の運動モードごとの直接FBが適用可能なことを最優先で示したいので後者で対策する。具体的には、先の加速度センサJA-5Vを用いて、この積分信号を空気ばねにFBする。これより、積分した加速度信号は空圧系の積分特性によって、DDFB (Direct Displacement FB) と同様の効果をもち、AVA dualの各固有振動を高域に推移できる。この積分加速度FBの制御ブロック図は、図7で加速度センサL・Rからの太線で示すループであり、FBゲインは $k_{A(T_r)} \cdot k_{A(R_or)}$ である。このとき、[I]の解決法として述べた加速度FBは併用し、擬似積分器の折点周波数は $0.1 [\text{Hz}]$ に設定した。

ここで、1章の緒言において加速度センサの出力に積分演算を施すことのデメリットについて記載したが、その影響が顕著に現れた。すなわち、擬似積分演算で加速度センサ自身の低周波ノイズが増幅された。そこで、このピンクノイズを抑制した加速度センサJA-40GAを用いた⁶⁾。使用した2種類の加速度センサの仕様を表1に示す。ここで、図9上段が加速度センサJA-5Vを、下段がJA-40GAを用いて積分加速度FBを施した場合のAVA dualの両運動モードの位置信号である。前者の場合、ステップ信号入力時の定常状態における位置の揺動が大き

Fig. 10 Step responses of AVA dual with acc.FB and integral acc.FB using acc. sensor JA-40GA

Fig. 11 Block diagram of AVA dual using absolute displacement sensors

い。しかし、後者を用いると定常位置は安定し、FBを施すことでAVA dualの固有振動数を高周波に推移できる。後者を用いて両運動モードの固有振動数を絶対変位センサの帯域内まで推移したときのステップ応答が図10である。図7の積分加速度FBゲイン $k_{v(tr)} = k_{v(ro)} = 2$ のとき、固有振動数は並進運動で2.2から2.8 [Hz]に、回転運動で1.2から1.6 [Hz]に推移できた。回転運動にステップ信号を入力する際は、並進運動に対する積分加速度FBは投入した状態でゲイン調整を行っており、図10右側上下の波形はモード間の干渉がないことを示す。

4・3 AVA dualの制御 4・2節で各固有振動数を高周波化したAVA dualに対し、絶対変位センサL・Rを用いて制振を行う。方法は4・1節(a)で述べたものである。両センサの各出力をVCMにFBする制御ブロック図を図11に示す。同図を参照して、各FB信号はモード選択後に、適切なFBゲイン(k_{dr} , k_{drot} , k_{vr} , k_{vro} , k_{ar} , k_{aro})をかけ、モード分離して各VCMドライバへFBする。この効果を検証するため、4.2節と同様にVCMにステップ状の外乱を入力し、この応答を測定した。結果は図12である。同図より、3信号の直接FBを行ったとき、左側の並進ステップ応答については3章で示した効果と同様に、固有振動数を変位FBによって高周波に推移、

Fig. 12 Step responses of AVA dual using absolute displacement sensors

速度FBによってダンピングを付与、そして加速度FBによって低周波に推移可能である。しかし、右側の回転ステップ応答については上段の変位FB時のみ、その効果を確認でき、中段と下段の速度・加速度FB時については不明瞭である。これは、AVA dualの固有振動の振幅を、空気ばねに対する加速度FBと積分加速度FBによって、過剰に安定化したためだと考えられる。すなわち、図12右側で変位FBのみ効果が明瞭であるのは、変位信号の出力電圧レベルが、同一振動での速度・加速度信号に比べて高いためである。さらに、2章に既述した検出方法の違いにより、SN比は高いものから順に変位・速度・加速度信号である。よって、図12右側で速度・加速度FBの効果を明確にするには、安定化の制御を弱く設定し直すか、絶対変位センサの速度・加速度信号の検出感度を高くする必要がある。後者では、絶対変位センサの検出感度と帯域のトレードオフをとるか、もしくは同センサ

Fig. 13 Step responses of AVA dual with vel.FB and acc.FB using absolute displacement sensors

に内蔵する検定コイルの逆起電力の検出感度を高めるといふ振動子そのものの改良が必要となり困難である。そこで、本論文では前者の安定化の制御を再設定する方法を用いた。

まず、AVA dual の安定化に用いた加速度FBの投入を行わず、積分加速度FBによる安定化のみでAVA dualを浮上する。次に、入力ステップの大きさを0.05から0.1[V]へ、回転角度換算で0.011から0.026[deg]へ変更した。このときの回転ステップ応答は図13である。同図左側より、各固有振動に対して速度FBではダンピングを付与、右側の加速度FBでは低周波へ推移可能である。ただし、ステップ入力を増したことで、並進運動の位置の揺動が大きくなった。これはモード干渉の増大を意味し、速度FB時のわずかな固有振動数の推移の原因であると考えられる。加えて、絶対変位センサの位相帯域が不十分であることや、AVA dualの設置面に歪がある要因もある。これ以上の精度や改善については今後の課題としたい。

5. 結 論

新規の振動検出センサとして絶対変位センサを提案した。これは積分演算を行わず変位・速度・加速度の各信号を同時検出できる特徴がある。本論文では、AVA dualを用いることによって、姿勢変動を受ける絶対変位センサの出力をFBしたときの機能を検証した。結論は以下の通りである。

- (1) 市販の速度センサの振動子に施すFB系を改良した絶対変位センサを提案し、同センサ2台の周波数特性をばらつきのないよう整形できた。
- (2) 提案のセンサがFBセンサとして有効であることを検証するために、試作機となるAVA dualを構築した。

- (3) 産業用に移動する除振装置において標準的になりつつある運動モード別の制御構造をAVA dualに適用し、絶対変位センサ2台の計6出力をAVA dualに取り付けたVCMに直接FBしてDAVDFBの制御を施した。
- (4) (3)の結果、安定化が実現され、さらに固有振動数を変更したAVA dualに対しては、スカイフックの法則にならない同装置の機械インピーダンスが操作可能であるという結論を得た。これより、AVA dualにおいてスカイフックスプリングの付与による除振率の向上と、ボイスコイルモータの活用によるダイレクトFBが実現できた。ただし、回転運動に対する速度FBと加速度FBの効果は他のFBに比べて小さい。

今後の課題は、6自由度空圧式除振装置への適用を目標にして、絶対変位センサの検出感度と帯域のトレードオフを解消し、検出感度とSN比の向上と1-90[Hz]に制限された帯域を少なくとも0.1~200[Hz]に拡大することである。さらに、水平用絶対変位センサの実現、絶対変位センサの小型化、そして複数台のセンサの特性を一致させる手順を確立することである。

謝 辞

本研究は平成20年度科学研究補助金(基盤研究C): 20560212)と、一部は精密測定技術振興財団の研究助成を受けた。記して謝意を表します。

文 献

- (1) Wakui, S., Kojima, D., Negishi, Y., Realization of Displacement Sensor Using Calibration Coil, *Journal of the Japan Society of Precision Engineers*, Vol. 73, No.3 (2007), pp. 393-397.
- (2) Wakui, S., Kojima, D., Takahashi, M., Yamamoto, K., Application of Absolute Displacement Sensor to Anti-Vibration Apparatus, *Journal of the Japan Society of Precision Engineers*, Vol. 73, No. 10 (2007), pp. 1169-1170.
- (3) Tokyosokushin, Servo Receiving Apparatus, Japanese patent, 6-28698.
- (4) Saito, K., Ida, K., Sato, Y., Doi, F., Seto, K., Development of Velocity and Displacement Sensor for Vibration Control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C)*, Vol. 63, No.615 (1997), pp. 26-31.
- (5) Wakui, S., Kai, T., Kojima, D., Wide Bandwidth of Absolute Velocity/Displacement Sensors and Its Application to Vibration Isolated Table, *Journal of the Japan Society of Precision Engineers*, Vol. 75, No. 4 (2009), pp. 561-566.
- (6) Irie, R., Takahashi, M., Wakui, S., The Influence to the Control Precision of Anti-Vibration Apparatus due to Accelerometer Sensor Noise, *Journal of the Japan Society of Precision Engineers*, Vol. 75, No. 6 (2009), pp. 778-779.