

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560212

研究課題名（和文）絶対変位センサの除振装置への適用に関する研究

研究課題名（英文）A Study about Application of an Absolute Displacement Sensor to Anti-Vibration Apparatus

研究代表者

涌井 伸二 (WAKUI SHINJI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70334472

研究成果の概要（和文）：変位・速度・加速度を同時検出できることを特徴とする絶対変位センサの特性改善と、このボイスコイルモータ付きの空圧式除振装置への適用に関する研究である。フィードバック用センサとして活用できることを、1DOF および 2DOF の空圧式除振装置を用いて示すことができた。

研究成果の概要（英文）：This study is concerning an absolute displacement sensor which can detect displacement, velocity, and acceleration signals simultaneously. Objectives are to improve the frequency response of absolute displacement sensor and to apply that to an air type anti-vibration apparatus with voice coil motor. We show effectiveness as a feedback sensor using air type anti-vibration apparatuses with 1DOF and 2DOF.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2008 年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2009 年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究代表者の専門分野：振動制御

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：絶対変位センサ，除振，スカイフック，空気ばね，ボイスコイルモータ，モード制御，加速度センサ

1. 研究開始当初の背景

振動制御の分野で多用する加速度センサに代えて、変位・速度・加速度の3信号を同時に検出できる絶対変位センサを産業応用に提供することを目的とする研究である。

従来研究でも、絶対変位センサの提案があった。同センサに内蔵する位置検出器の2階微分信号をフォーサコイルにフィードバック（以降、FBと略記）する原理である。研究代表者は、2階微分信号に代えて1階微分信号を用い、かつ振動センサのアライメントによって生じるオフセット電圧を除去するために弱い位置FBを施したことを特徴とす

る絶対変位センサを提案している。しかし、産業応用を目指したとき、(a)絶対変位センサの設計法・調整法の確立、(b)同センサのFB応用の提示、が必要である。上記(b)の結果を踏まえて、(a)の進展も期待できる。本研究では、既提案の絶対変位センサ自身の性能を向上させ、かつ従来は観測用であったものをFB応用することを意図したものである。

2. 研究の目的

半導体露光装置への搭載を最終目標としたとき、同装置仕様から導かれる絶対変位センサの仕様を明確にし、現状までの知見を総

合して試作を行い、そして同センサを実機へ搭載し総合評価まで行うことを計画する。より具体的に、下記の項目である。

●【絶対変位センサの周波数特性の改質】現在 1~80Hz 程度の帯域しかない。これを 0.5~100Hz 程度までの帯域にする。高周波化を阻む要因は、振動子の副振動である。低周波化のネックは、低周波共振の増大にある。

●【6 軸姿勢・振動制御用の除振装置に搭載可能な絶対変位センサの実現】絶対変位センサの実現にあたっては地震計の振動子を使っている。除振台に搭載不可能ではないが、振動制御のためのセンサとしては大きい。さらに、振動検出感度のアップが必要である。絶対変位センサの実現にあたっては、通常の動作にあつては放置の検定コイルを積極的に活用している特長がある。逆にいえば、検定コイルの積極的活用を前提にして振動子を再設計すれば、加速度・速度・変位の検出感度が向上する。振動センサメーカーに設計条件を提示して試作を行なうことを考えている。不可の場合、中型振動センサを購入し研究室で絶対変位センサに改造する。

●【6 軸姿勢・振動制御系の構築】アクティブ除振装置の主流は、空気ばねと VCM を併用したハイブリッド形である。マイナーループに圧力 FB、加速度 FB、そして位置 FB を備え、全体の構造は運動モード別制御になっている。最近の低固有振動数の除振台にあつては機械的にマイナス剛性を実現しているものもある。いずれの FB も超精密位置決め実現のために順次に改善を施されてきた機能である。これらの機能を維持したまま、絶対変位センサの使用を行なつてさらに超位置決めに資する FB 構造を創出する。

●【除振装置を用いた実機検証】研究室に保有する 6 軸制御の除振台（市販品）を使用する。あるいは試験用の 1 軸除振装置を 2 台使用して 2 軸制御の除振台に改造する。いずれかの除振台に、絶対変位センサを搭載し、従来はダンピング抑制機能だけであった除振装置に新規の機能を付加する。また、FB 応用を通して絶対変位センサの完成度を向上させる知見を得る。

3. 研究の方法

絶対変位センサの実現にあつては、市販の速度センサ（地震計）である VSE-11,12F の機構を活用した。つまり、同センサの振動子は市販のものを用いる。その上で、研究室で設計したアナログの FB 回路を自作しこれを実装した。

次に、提案する絶対変位センサの産業応用を提示するため、鉛直方向 1 軸にだけ可動する VCM 付き空圧式除振装置に同センサを装着し、FB に使えることを実証する方法を採用した。

さらに、1 軸の VCM 付き空圧式除振装置 2 台を剛に結合して、2 自由度の運動を行う除振装置へと改造を施し、ここに 2 台の絶対変位センサを搭載したうえ FB 制御をおこなう方法を採用した。この実験の目的は、除振台の姿勢変動の影響が絶対変位センサの出力に影響するので、この状況にあつても FB に使えることを示すことにある。

4. 研究成果

4.1 絶対変位センサの構造

図 4.1 は、市販の速度センサ(VSE-11,12)の機構を使い、これに研究室の設計に基づく制御回路を付加して、変位・速度・加速度の 3 信号を同時に検出できるようにした絶対変位センサの概観である。本来は、振動センサの感度校正用のアクチュエータである検定コイルを振動子の相対速度の検出用に使い、かつ振動子の傾斜設置に起因するオフセットを除去する弱い位置の PI 補償をかけていることを特徴とする。

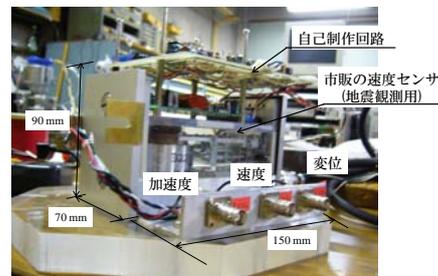


図 4.1 絶対変位センサの概観

4.2 絶対センサの設計法

図 4.1 の絶対変位センサの実現にあつては、所望の感度および周波数特性を実現するためにパラメータ調整を実施せねばならない。絶対変位センサをはじめて試作したときには、試行錯誤の調整をおこなっていた。

まず、図 4.2 は絶対変位センサを実現する FB のブロック図である。同図を参照して、記号の意味は下記の通りである。

M : 振子の質量[kg], D : 粘性比例係数[N·s/m], K : 振子を支持する板ばねのばね定数[N/m], k_s : 内蔵する位置検出器の感度[V/m], k_v : 検定コイルの逆起電力感度[V/m/s], k_p : PI 補償器のゲイン[V/V], T_p : PI 補償器の時定数[s], k_t : 力定数[N/A], R_a : コイル抵抗[Ω], k_{dr} : ドライバのゲイン[V/V], k_f : 速度・変位センサのメインループのゲイン [V/V], k_d : ダンピング付与のゲイン[V/V], T_1 : 擬似微分器の分母の時定数[s], T_2 : 擬似微分器の分子の時定数[s], x : 振子の変位[m], u : ケース（被計測対象）の変位[m], d : 外乱[N], v_{asens} : 加速度出力[V], v_{vsens} : 速度出力[V], v_{dsens} : 変位出力[V], w : ドライバの入力電圧[V], v_{aux} : 補助入力 [V], $v_{ret}:v_{aux}$ に対する一巡信号 [V],

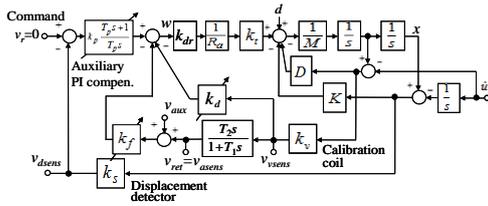


図 4.2 絶対変位センサのブロック線図

である。

この中で周波数応答の形状を調整する主なパラメータは、 k_p , T_p , k_d , k_f である。従来はこれらパラメータの調整ごとに周波数応答を実測し、さらに調整をおこなうという方法をとっていた。しかし、複数台の絶対変位センサの特性をばらつきなく製造せねば、除振装置への応用を行うことができない。なんとすれば、6 自由度の姿勢および振動制御を施す除振装置にあつては、振動センサとしての絶対変位センサを少なくとも 6 台使用することになるからである。

ばらつきの抑制をはかるためには、管理すべきパラメータを、すなわち特性に対する影響が大きいものとそうでないものを区別し、製造にあたっては前者のパラメータを管理する、という行動をとることができる。そこで、感度解析を実施した。表 4.1 は極感度を表す。特に、低域折点に生じるばらつきは、振動子を支持する板ばねの剛性 K と、これに付随して決定される内部減衰としての粘性比例係数 D に起因することがわかった。そこで、解析結果に基づいて、調整パラメータの特定と調整手順を提案した。具体的に、 k_f の調整で主な帯域設計を行い、次に、 k_d で極のばらつきを改善する調整手順を提案した。

次に、試行錯誤の調整に代えて最適制御理論を活用するために、すなわちシミュレーシ

表 4.1 極感度

| | P_1 | P_2 | P_3 | |
|----------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Servo type velocity sensor | S_M^{PI} | 1.03×10^{-7} | $0.830 \pm 0.0959i$ | 3.03×10^2 |
| | S_D^{PI} | -5.32×10^{-6} | $-0.126 \mp 0.145i$ | 1.85×10^{-2} |
| | S_K^{PI} | 1.85×10^{-2} | $0.0837 \pm 2.98i$ | 1.49×10^{-1} |
| | $S_{k_c}^{PI}$ | -1.84×10^{-2} | $0.0104 \pm 0.447i$ | -2.50×10^{-3} |
| | $S_{k_d}^{PI}$ | -1.30×10^{-4} | $-0.618 \mp 3.365i$ | -3.12×10^2 |
| | $S_{R_a}^{PI}$ | 1.84×10^{-2} | $-2.18 \mp 0.0940i$ | 3.18×10^2 |
| | $S_{k_t}^{PI}$ | -1.84×10^{-2} | $2.18 \pm 0.0940i$ | -3.18×10^2 |
| Circuit parameters | $S_{k_{dr}}^{PI}$ | -1.84×10^{-2} | $2.18 \pm 0.0940i$ | -3.18×10^2 |
| | $S_{k_f}^{PI}$ | 1.39×10^{-8} | $2.47 \pm 0.196i$ | -2.92×10^2 |
| | $S_{k_c}^{PI}$ | -1.30×10^{-4} | $-3.08 \mp 3.56i$ | -2.04×10 |
| | $S_{T_p}^{PI}$ | 2.11×10^{-2} | $-0.0106 \pm 0.0109i$ | 8.76×10^{-6} |
| | $S_{T_1}^{PI}$ | 2.32×10^{-5} | $-0.0926 \mp 0.0109i$ | -3.88×10^2 |
| | $S_{T_2}^{PI}$ | 2.96×10^{-7} | $2.47 \pm 0.0204i$ | -2.92×10^2 |
| | $S_{k_p}^{PI}$ | -1.84×10^{-2} | $-0.0104 \pm 0.447i$ | -2.50×10^{-3} |
| | $S_{k_{dr}}^{PI}$ | 1.39×10^{-8} | $2.47 \pm 0.196i$ | -2.92×10^2 |

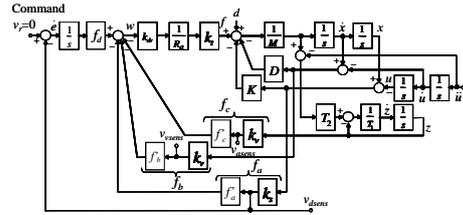


図 4.3 状態FBのためのブロック線図

ョン設計を行うために図 4.2 のブロック線図を図 4.3 のように等価変換して以下の式(1)~(4)の状態方程式を導いた。ただし、状態変数を $x_d = [x-u, \dot{x}-\dot{u}, z, e]^T$ とおいた。

$$\dot{x}_d = A_d x_d + B_d w + B_{dd} \begin{bmatrix} d \\ \ddot{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_r \quad (1)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K}{T_2} & -\frac{D}{T_2} & 0 & 0 \\ \frac{M}{T_1} & \frac{D}{T_1} & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ -k_s & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_t k_{dr}}{MR_a} \\ \frac{T_2 k_t k_{dr}}{T_1 MR_a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_{dd} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_2} & -1 \\ \frac{M}{T_1} & \frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

さらに、ドライバの入力電圧 w は、次式である。

$$w = -[f_a, f_b, f_c, -f_d] x_d \quad (5)$$

ここで、FB 係数 $f_{a \sim d}$ は、重みを R_d , $Q_d = \text{diag}(q_a, q_b, q_c, q_d)$ と、評価関数 PI_d を

$$PI_d = \int_0^{\infty} (w^T R_d w + x_d^T Q_d x_d) dt \quad (6)$$

とおいて求められる。重み q_a, q_b, q_c, q_d を用いて、絶対変位センサの周波数応答の形状を整形できることを図 4.4~4.7 に示す。

重みを調整することによって、周波数応答をシミュレータで整形し、これを回路パラメータとしてセットすればよいことを示した。

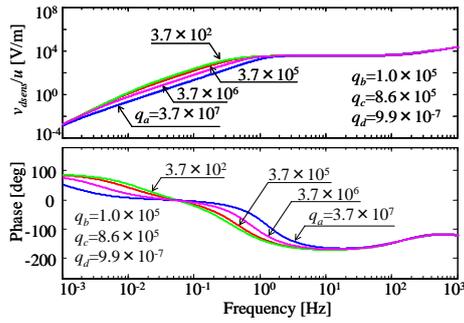


図 4.4 重み q_a の調整

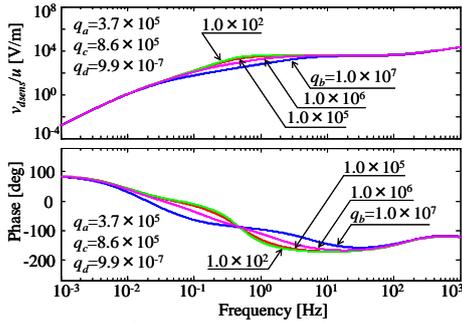


図 4.5 重み q_b の調整

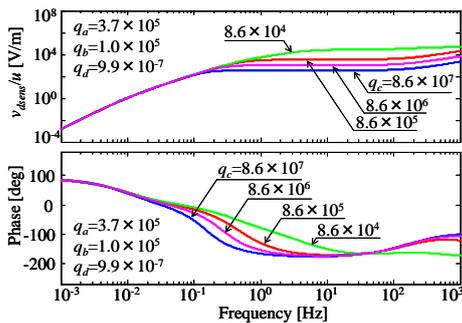


図 4.6 重み q_c の調整

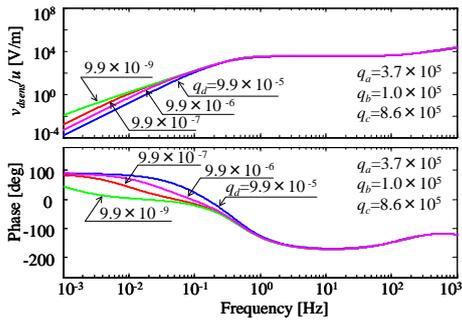


図 4.7 重み q_d の調整

4.3 1DOF 絶対センサのフィードバック応用

試作した絶対変位センサを汎用的に使われる加速度センサと同様に、除振台上に設置して、同センサの出力に基づくフィードバックをかけた。

図 4.8 は 1DOF の VCM 付き空圧式除振装置に、試作した絶対変位センサを搭載した写

真である。図 4.9 は、絶対変位センサの 3 種類の信号を除振装置の VCM にフィードバックするブロック図である。具体的に、変位 k_{dis} 、速度 k_{vel} 、加速度 k_{acc} のゲインを介して、VCM にフィードバックして機械インピーダンスの可操作性を検証する制御ブロック図である。 k_{dis} の FB によって固有振動数の増加が、 k_{vel} の FB によって共振ピークに対するダンピング付与が、そして k_{acc} の FB によって電気的な質量付加が行われて固有振動数の低下がはかれれば、3 種の振動検出出力に基づく FB が正しく機能していることになる。

図 4.10 はイナータンス（加速度/力）の周波数応答の実測結果である。提案する絶対変位センサの 3 種類の信号に基づく FB によって機械インピーダンスが操作できていることがわかる。

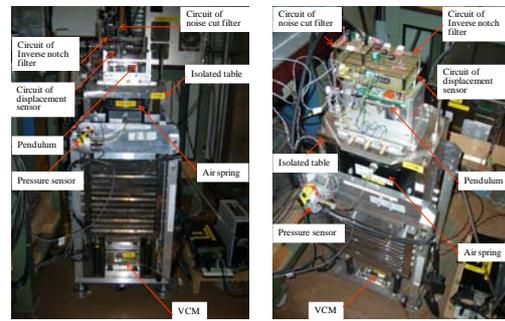


図 4.8 1DOF 除振装置と絶対変位センサ

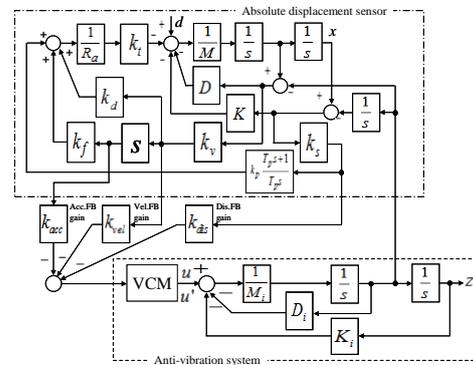


図 4.9 絶対変位センサの FB

4.4 2DOF 除振装置への応用

4.3 節で使用した鉛直方向 1 軸の VCM 付き空圧式除振装置を 2 台並べ、これを剛に結合して 2DOF 除振装置に改造した。同除振装置上に特性をそろえた 2 台の絶対変位センサを搭載した。実装の様子を図 4.11 に示す。同図右側で太い矢印で示す方向に、すなわち並進と回転運動の 2 つの動きをさせることができる。1DOF 除振装置の場合、除振台の可動方向が鉛直 1 軸に制限されているため、搭載する絶対変位センサに除振台の動きにともなう傾斜成分の影響は入り込まない。しかし、

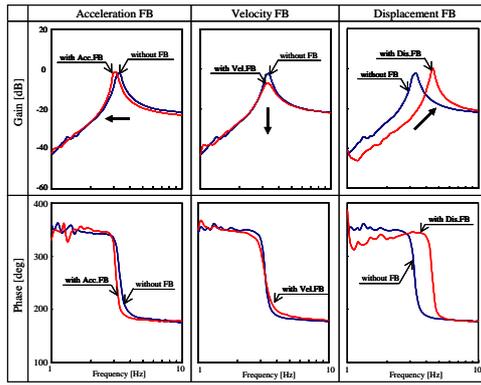


図 4.10 実測のイナータンス応答

2DOF 除振装置の場合には、搭載する絶対変位センサに、除振台の姿勢制御に起因する傾斜の影響が入り込む。この傾斜が FB をかけた除振装置の性能に悪影響を及ぼさないということを、すなわち産業応用のポテンシャルがあることを示すことが目的である。

まず、採用した制御ブロック図を図 4.12 に示す。図 4.13 はステップ応答による制振性能であり、有意な操作ができています。

4.5 フィードフォワード応用

4.3 と 4.4 節では、試作した絶対変位センサの空圧式除振装置に対する FB 応用を示した。本節では、同センサのフィードフォワード (以降、FF と略記) 応用を示す。

図 4.14 の制御ブロック図を用いて絶対変位センサと VCM を用いた床振動 FF の効果を図 4.15 に示す。同図上下段は加速度センサ F

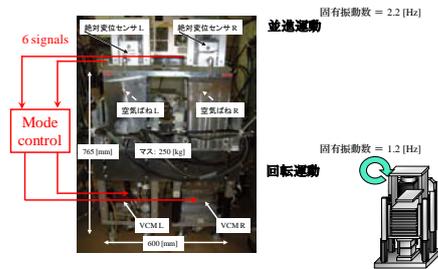


図 4.11 2DOF 除振装置と絶対変位センサ

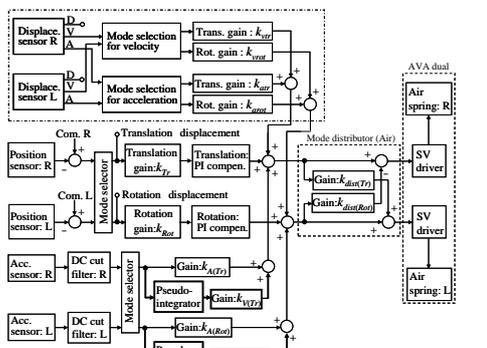


図 4.12 2DOF 除振装置の制御ブロック図

と T で計測した床と除振テーブルの振動である。同図左側 1 番目が FF なし、2 番目が速度信号のみを FF したとき、3 番目が変位信号のみを FF したとき、そして 4 番目が速度と変位信号の同時 FF したときの評価用加速度センサの加速度信号である。図 4.15 上段を参照すると、床は各 FF 投入時で同様の加振状態である。次に、これを下段と比較すると、各 FF 時で除振テーブルの加速度の方が床の加速度よりも小さい。

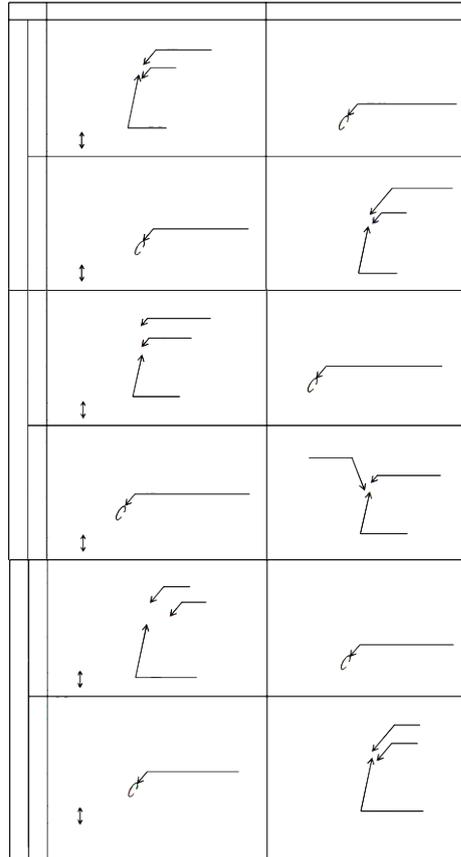


図 4.13 ステップ応答による制振性能

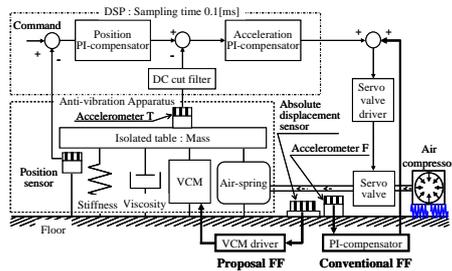


図 4.14 床振動 FF の制御ブロック図

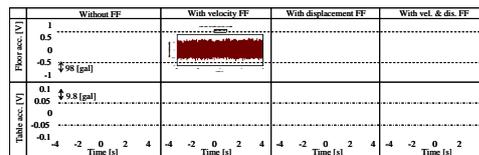


図 4.15 床振動 FF の効果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

- (1)甲斐孝志, 涌井伸二: 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(帯域の改善と空気ばねを用いた制振), 査読有, 日本機械学会論文集 C, Vol.76, No.772, pp.3357-3363 (2010-12)
- (2)甲斐孝志, 涌井伸二: 絶対変位センサを用いたダイレクト床振動フィードフォワードの実装, 査読有, 日本機械学会論文集 C, Vol.76, No.771, pp.3175-3177(2010-11)
- (3)甲斐孝志, 秋山昌也, 涌井伸二: 絶対変位センサのパラメータ感度解析とばらつきの一調整法, 査読有, 日本機械学会論文集 C, Vol.76, No.771, pp.2923-2930(2010-11)
- (4)甲斐孝志, 涌井伸二: 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), 査読有, 日本機械学会論文集 C, Vol.76, No.766, pp.1489-1495(2010-6)
- (5)甲斐孝志, 涌井伸二: 速度・変位センサの状態フィードバックに基づく一設計法, 査読有, 日本機械学会論文集 C, Vol.75, No.760, pp.3201-3208(2009-12)
- (6)涌井伸二, 甲斐孝志, 小島大典: 絶対速度・変位センサの広帯域化とその除振装置への適用, 査読有, 精密工学会誌, Vol.75, No.4, pp.561-566(2009-4)

〔学会発表〕(計14件)

国際会議

(1)Takashi Kai, Shinji Wakui: A Design Method of Absolute Velocity and Displacement Sensors, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2010), 2D12, 18 August, 2010(Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

(2)Takashi Kai, Shinji Wakui: Application of Inverse-Notch-Filter to Absolute Velocity/Displacement Sensors and Vibration Control of Air Type Anti-Vibration System, SESSION D7, 2010 International Symposium on Flexible Automation, July 14, 2010(Tokyo University)

国内会議

- (1)甲斐孝志, 秋山昌也, 中村幸紀, 涌井伸二: サイズモ型絶対変位センサの開発経緯と高周波ダイナミクスの要因解析, 172-1-5, 第11回 SICE 制御部門大会(琉球大学千原キャンパス, 2011-3/17)
- (2)甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 絶対変位センサを用いた除振装置の床振動フィードフォワードに関する一研究, OS5, 523, 第53回自動制御連合講演会(高知城ホール, 2010-11/4)

(3)秋山昌也, 甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 3種類のドライバを用いた絶対変位センサの比較, OS5, 522, 第53回自動制御連合講演会(高知城ホール, 2010-11/4)

(4)甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 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(絶対変位センサの広帯域化と空気ばねを用いた制振), 平成22年電気学会産業応用部門大会, 2-71, (芝浦工業大学, 2010-8/26)

(5)秋山昌也, 甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 電流フィードバックドライバを用いた絶対変位センサの改良, 平成22年電気学会産業応用部門大会, 2-69, (芝浦工業大学, 2010-8/26)

(6)秋山昌也, 甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 絶対変位センサのパラメータ感度解析, 4-169, 平成22年電気学会全国大会(2010-3/19 明治大学)

(7)甲斐孝志, 秋山昌也, 中村幸紀, 涌井伸二: 絶対変位センサのPI補償器に起因したオフセット除去に関する一研究, 3-156, 平成22年電気学会全国大会(2010-3/17 明治大学)

(8)甲斐孝志, 涌井伸二: 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(積分加速度信号を用いた特性の変更), D6-1, 第52回自動制御連合講演会(2009-11/22 大阪大学基礎工学研究科)

(9)秋山昌也, 甲斐孝志, 涌井伸二: 水平用絶対変位センサの一設計法, E4-4, 第52回自動制御連合講演会(2009-11/22 大阪大学基礎工学研究科)

(10)甲斐孝志, 涌井伸二: 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, R2-2-7, 平成21年度電気学会産業応用部門大会(2009年8月31日, 三重大学)

(11)甲斐孝志, 涌井伸二: 状態フィードバック制御を用いた絶対速度・変位センサの設計, 第51回自動制御連合講演会, GS11, 1004, (2008年11月22日, 山形大学工学部)

(12)甲斐孝志, 赤津観, 涌井伸二: 絶対速度・変位センサの改良と応用, 平成20年産業応用部門大会, R2-4, 2-25, 高知市文化プラザ(2008-8/27)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~wakuiken/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

涌井 伸二 (WAKUI SHINJI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 70334472