

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560253

研究課題名(和文)絶対変位センサの仕様向上に関する研究

研究課題名(英文)A Study on Improved Specification of an Absolute Displacement Sensor

研究代表者

涌井 伸二(Wakui, Shinji)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70334472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：変位・速度・加速度を同時検出できる絶対変位センサを提案し、これをボイスコイルモータ付き空圧式除振装置のフィードバックに適用できることを基盤研究(C)20560212で示した。この継続としての本研究では、変位センサの検出感度を数値で捉えるとともに、感度向上のために検定コイルの巻数を変更する試作を行った。この感度向上がフィードバック応用においても有意に機能することを示した。併せて、高周波数域に出現する機械共振の振動モードを特定し、これをチューニングマスダンパで抑制して周波数応答をクリーンにできることを振動子単体とともに、フィードバック応用においても示した。

研究成果の概要(英文)：An absolute displacement sensor has been proposed for anti-vibration. By using Grant-in-Aid for Scientific Research (C20560212), it has been shown that this sensor is effective as a feedback sensor. Then, we would like to apply the same sensor to semiconductor exposure apparatuses, however detection bandwidth and sensitivity were limited. To overcome these issues, a high sensitive method by increasing the number of coil turns was carried out. Next, sensitivity calibration and practical control tests were conducted. Finally, we conducted to suppress the resonances by Tuned Mass Damper. As a result, the resonances can be most suppressed by TMD. Moreover, we tried loading TMD in consideration of vibration modes, loading point, and constitution of TMD. The resonances were drastically suppressed by TMD on multiple points. In addition, we confirmed effects of high frequency dynamics and its suppression under the feedback of the absolute displacement sensor's velocity signal.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動センサ 絶対変位センサ 制振 除振 振動子 逆起電力 周波数応答 モーダル解析

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したいと考え、申請者はH20~22年にわたり基盤研究C(20560212:絶対変位センサの除振装置への適用に関する研究)の助成を受けた。ここでは、同センサがフィードバックに活用できることをはじめて実証した。しかし、感度および周波数帯域の不足という応用にとっての不十分さが実証研究から明確となった。そこで、本研究では、同センサの振動子構造に踏み込むことによって、仕様向上を図ることを目的とする。

2. 研究の目的

H20~22年基盤研究Cの助成を受け、提案する絶対変位センサがフィードバックに活用できることをVCM付き2自由度空圧式除振装置で実証できた。原理的な検証はできたが、同時に、感度および帯域不足という最先端の産業応用を行うには不十分な欠点も明々白々となった。具体的に言うと、(a)感度不足は感度校正用アクチュエータとしての検定コイルを逆起電力検出のセンサとして活用したため、(b)高域へ帯域拡大できない理由は振動子が副振動を有するため、である。上記(a)、(b)を解消したとき、真に産業応用で利益をもたらす仕様を持つ絶対変位センサの実現が図れる。そこで、次の3項目に対して研究を行うことを目的とする。

(1)【絶対変位センサの振動子構造の分析】 検出帯域を0.2~200Hzに、かつ速度・加速度感度を従来研究に比較して2倍以上とする。そのために、振動子の構造分析をおこない、感度アップと高周波副振動が抑圧された新規の振動子構造を見出す。

(2)【絶対変位センサの総合評価】

①周波数特性の評価：閉ループの周波数特性による振動子単体の1次評価とともに、ケース全体を加振してセンサとしての特性を評価できる実加振治具を製作する。これを用いて周波数応答の評価を行う。加えて、姿勢変化の影響・アライメント誤差の影響・検出感度の算定が可能な評価法を確立する。

②シミュレーション設計の実行：既にシミュレーション設計可能なことは示した。ただし、1台だけの絶対変位センサを使ったときの結果に過ぎない。センサを振動制御用に大量生産する場面を想定したとき、ばらつきの問題に対応せねばならない。そこで、試作機に対する適用を通して、より信頼のおけるシミュレーション設計法を確立する。併せて、シミュレーションと実測が一部合わなかった問題点(特に低周波域)の解決を図る。

③調整法の実行：感度解析をおこなって、振動子に製造上のばらつきがあるときの調整方法を検討済みである。具体的には、内蔵する検定コイルの逆起電力の1階微分に対するゲイン k_f で主な帯域設計を行い、次にダンピ

ングゲインの k_d でばらつきを吸収するという手順である。この手順を複数台のセンサに適用することを通して、調整法の信頼性を確認する。

(3)【2自由度空圧式除振装置を用いた実機検証】

仕様を向上させた絶対変位センサを2自由度空圧式除振装置に搭載してフィードバック制御を施す。具体的に、絶対変位センサから出力する3種類の検出信号の直接フィードバックによる機械インピーダンスの可操作性を、つまり除振装置の性能を引き出す調整が容易にできるか否かを確認する。

3. 研究の方法

絶対変位センサの実現にあたっては、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フィードバック回路を自作しこれを実装する。

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、フィードバックに使えることを実証する方法を採用した。さらに、VCM付き1軸空圧式除振装置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フィードバック制御をおこなう方法を採用する。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、この状況にあってもフィードバックに使えることを示すことにある。

4. 研究成果

(1)電流フィードバック式ドライバを用いた絶対変位センサのモデル化

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ブロック図である。

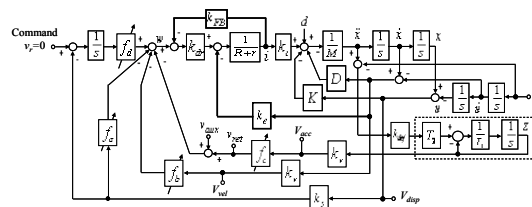


図 4.1 絶対変位センサのブロック図

図4.1に基づいて設計したとき、概ねシミュレーションと実応答との一致が確認できる。しかしながら、より広範囲のパラメータ調整を行ったとき、図4.1のシミュレータでは実測との一致が図れない場合もでてきた。この一例が図4.2である。同図右側のCase AとBのパラメータを使ったシミュレーションでは低周波域のゲイン特性で交差する点が

ある。一方、図 4.2 左側の実測では、ゲイン曲線に交差する箇所はない。

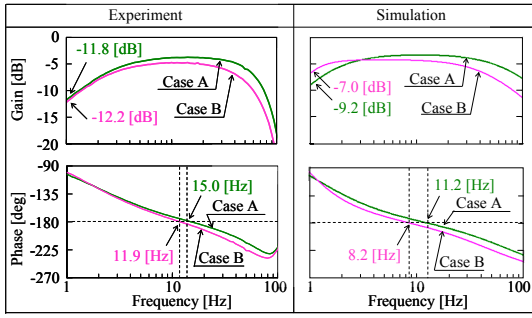


図 4.2 シミュレーションと実測の不一致

このような不一致の原因が、フォーサコイルを駆動したときの逆起電力であることを突き止めた。速度センサを実現する場合には、逆起電力という自然フィードバックが、周波数応答を整形する主体の信号成分であるので問題視する必要はなかった。しかし、絶対変位センサの実現においては、フォーサコイルの逆起電力は邪魔になる。そこで、フォーサコイルの駆動に、従来の電圧駆動に代えて電流駆動を採用した。

図 4.3 は電流駆動を採用したときあって、シミュレータで求めた周波数応答と実測のそれである。両者の一致が図れている。広範囲にパラメータを変更した場合においても、シミュレータと実測との一致が図れており、シミュレータによる設計が精度よくできるようになった。

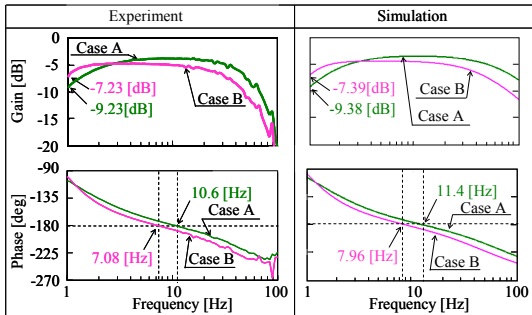


図 4.3 シミュレーションと実測の一致

(2) 傾斜設置に起因するアライメント誤差の抑制

図 4.4 は、絶対変位センサの過渡状態から定常状態までの実測の変位出力 V_{disp} である。同図右側の時間 t は、設置面の傾斜の程度に依存するが、水平のときは約 $t=300$ s で平衡位置に達する。このとき、定常状態を確認すると 0 V に収束せず、約 0.4V のオフセット出力が残留している。このまま FB 信号として用いれば、多自由度制振に当たり高精度な機械インピーダンスの操作に支障をきたす。そこで、振動子を平衡位置に定位させる位置の PI 補償器の設計方針を検討した。

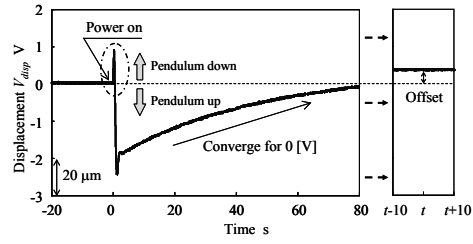


図 4.4 アライメント誤差の発生

① オペアンプの選定: 任意の角度に調整可能な傾斜ステージを用いて、絶対変位センサにアライメント誤差を発生させる。そして、これを抑制可能なオペアンプの選定を行った。図 4.5 がその結果であり、周知のように電流オフセットが小さいオペアンプを選定すべきことがわかった。

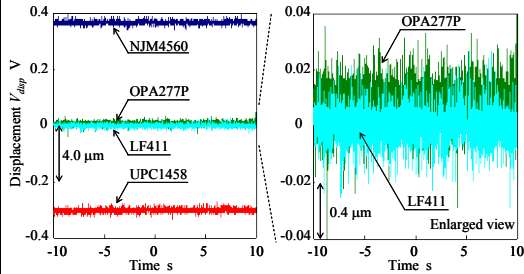


図 4.5 位置の PI 補償器のオペアンプ選定

② 抵抗 R_2 とコンデンサ C の変更: 図 4.6 は PI 補償器に発生するオフセットのモデルである。 R_2 を小さく、 C を大きく選ぶことで、入力電流オフセットに起因する出力オフセットを低減可能である。

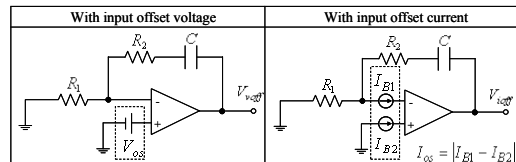


図 4.6 オペアンプのオフセット

③ コンデンサのリーク電流・誘電体吸収: PI 補償器の時定数を決定するために容量大のコンデンサを使用する。この③のようなコンデンサでは、図 4.7 に示すようにリーク電流と誘電体吸収が特性を劣化させる要因と考えられた。まず、前者の存在は実験では存在していないことが確認できた。一方、後者の影響は実測でも確認できているが、過渡応答での特性に影響するだけであり、定常状態で残留するアライメント誤差の原因とはならないことを示した。したがって、安価な電解コンデンサを無極性にする接続によって、時定数をつくりだせばよいことが示された。

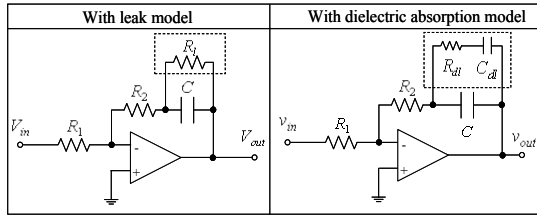


図 4.7 コンデンサのリーク電流と誘電体吸収

(3) 検定コイルの巻数変更による一階微分型サイズモ変位センサの改善

本来の検定コイルの役割は、感度校正にあるが、絶対変位センサの実現においては、振動子の速度を検出するセンサとして使っている。つまり、逆起電力を検出している。この検出感度アップが、絶対変位センサの周波数応答を整形し、かつ振動を SN 比よく検出できると考えられた。そこで、検定コイルを従来に比べて 2 倍巻きとする改造を行った。

図 4.8 は周波数応答の比較である。同図左側は、同一のフィードバック定数で、絶対変位センサの周波数応答を比較したものである。明らかに低周波域に検出帯域が拡大している。さらに、図 4.8 右側は、2 倍巻きの検定コイルを有する絶対変位センサの周波数応答を整形するパラメータ調整を施したとき比較であり、検出帯域の拡大は明確である。

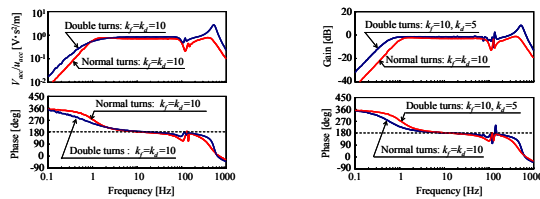


図 4.8 検定コイル 2 倍巻きの周波数応答

次に、検定コイル 2 倍巻きの絶対変位センサを VCM 付き空圧式除振装置に搭載した。絶対変位センサから出力する加速度、速度、そして変位の直接フィードバックを VCM に対して施した。このときの周波数応答が図 4.9 である。同図上段 (Normal turns) が通常の巻数の検定コイルの場合、下段 (Double turns) が 2 倍巻きの場合の周波数応答である。除振台の主振動 2Hz に対する周波数応答の変化が、図 4.9 下段の方が良好である。例えば、同図中央はダンピングを付与している。上段の場合、 k_V の増加で共振ピークの低下はあるが同時に共振周波数も移動しており、純粋なダン

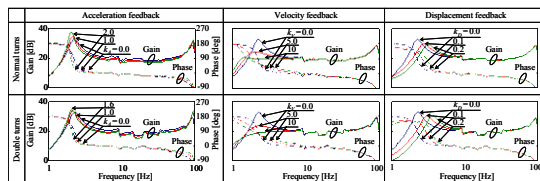


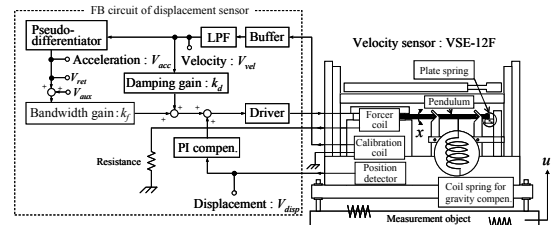
図 4.9 検定コイル 2 倍巻き絶対変位センサをフィードバックに用いたときの応答

ピング機能ではない。一方、感度を向上させた図 4.9 中央下段の場合、共振ピークだけが k_V の増加で下げることができている。つまり、純粋なダンピングを付与することができている。

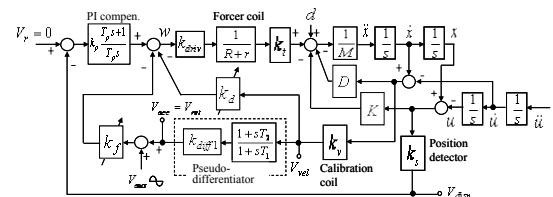
(4) 微分型サイズモ変位センサの高周波ダイナミクスに関する一考察と低周波帯域の拡大

これまで 2Hz 程度にとどまっていた一階微分型変位センサの低周波帯域を、速度信号の検出感度の改善によって拡大する。この過程で、根軌跡によって 1 階微分型と 2 階微分型絶対変位センサの広帯域化の原理を比較したところ、高周波共振の出現に関する差異を見出した。このため、2 階微分型を 1 階微分型と同一機構で試作し両センサの実機特性の差異を明らかにした。

図 4.10 は 1 階微分型絶対変位センサの、図 4.11 は 2 階微分型の絶対変位センサのブロック図をそれぞれ示す。

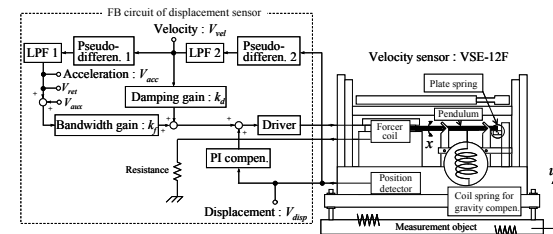


(a) ブロック図

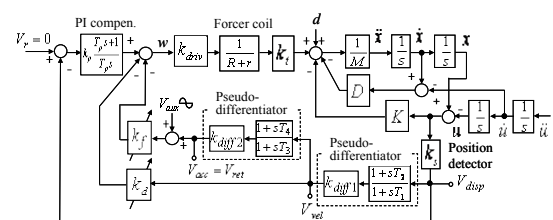


(b) 解析用ブロック図

図 4.10 1 階微分型の絶対変位センサ



(a) ブロック図



(b) 解析用ブロック図

図 4.11 2 階微分型の絶対変位センサ

図 4.10 と 4.11 に基づき、周波数応答で帯域を拡大するゲイン k_f に対する根軌跡を検討した。結果を図 4.12 に示す。同図右上で P_1 と P_2 の軌跡を参照すると、負実軸上で分岐して虚数成分が無限大に推移する様子から、 k_f の増大にともない高周波共振が励起される。ここで、実装の擬似微分器では、折点周波数 $1/(2\pi T_1) = 1/(2\pi T_3) = 159 \text{ Hz}$ を設定している。実測の周波数応答において約 200 Hz に発生する高周波共振の原因は、擬似微分器 1 と 2 の分母の時定数 T_1 と T_3 による電氣的共振であることがわかった。続いて、図 4.12 中央と下段の根軌跡は、1 階微分と 2 階微分型ともに同様である。

したがって、1 階微分型では、擬似微分器の分母の時定数に起因する電氣的な高周波ダイナミクスが非発生、2 階微分型では発生するということが明らかになった。すなわち、提案の 1 階微分型絶対変位センサの方が、原理的には高周波振動を発生させないという観点で優位であることが明らかとなった。

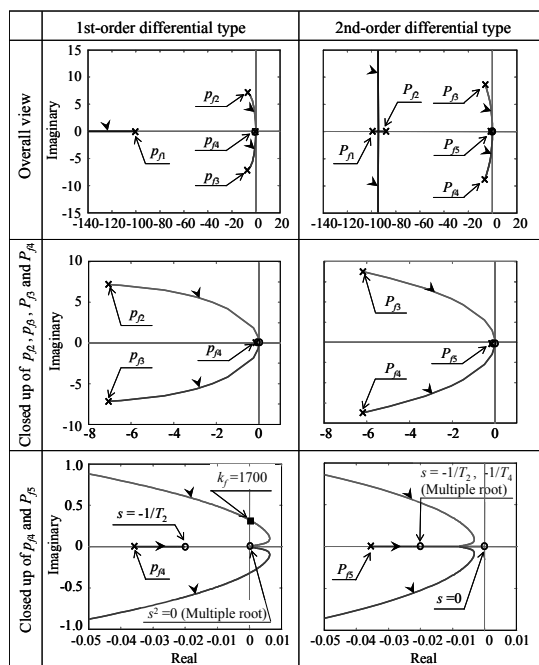


図 4.12 1 階・2 階微分型の根軌跡

(5) 実験モーダル解析

絶対変位センサの検出帯域のうち、高い方は振動子そのものの機械共振で制約を受けている。そこで、弱い板ばねで支持される振動子の各部にレーザ変位計のビームを照射することによって、振動モードを捉え、次にモード形状を踏まえて、機械共振の抑制をはかった。

図 4.13 は振動子を強制加振のうえ、各所にレーザビームを照射して振動モードをとられるためのセットアップである。図 4.14 が特定した振動子の副振動モードである。円形部分にコイルが巻線されており、紙面に垂直の方向にこれが動く。この動きに対して、図 4.14 では、破線で示す箇所を振動の節として互いに逆相で動く振動モードを持つ。

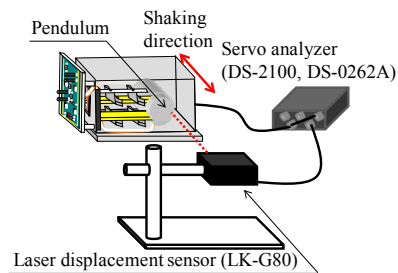


図 4.13 実験モーダル解析のセットアップ

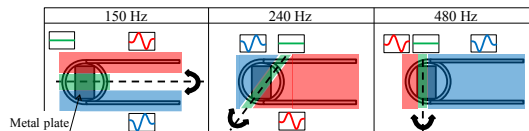


図 4.14 振動モードの特定

これら高周波域の機械振動は、絶対変位センサの検出帯域を高い方に広げるときの障害である。そこで、図 4.14 の実験モーダル解析の結果を踏まえて、微少なチューニングマスダンパ (TMD) を使って、機械共振の抑制をはかった。図 4.15 がこの結果である。粘弾性体に金属マスを接着した TMD を振動子に貼りつけて、図 4.15 のように、150 および 240 Hz の機械共振を抑制することに成功している。機械共振を抑制した絶対変位センサの信号を VCM にフィードバックして制振を行う実験も行っている。高周波振動の抑制が、フィードバック応用においても有効であることが示されている。

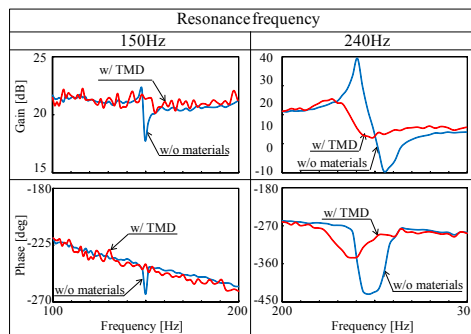


図 4.15 TMD 付加による機械共振の抑圧

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 5 件、全論文査読あり)

- (1) 植本隆明, 涌井伸二: 絶対変位センサの高周波ダイナミクスの一抑制法, 日本機械学会論文集, vol. 80, no. 810, pp. 1-14 (2014-2)
- (2) 甲斐孝志, 涌井伸二: 微分型サイズモ変位センサの高周波ダイナミクスに関する一考察と低周波帯域の拡大, 精密工学会誌, vol. 79, no. 5, pp. 430-436 (2013-5)
- (3) 甲斐孝志, 涌井伸二: 検定コイルの巻数変更による一階微分型サイズモ変位センサの

改善,日本機械学会論文集 C, Vol.79, No.798, pp.361-365(2013-2)

(4)甲斐孝志, 秋山昌也, 涌井伸二: 変位センサの傾斜設置に起因するアライメント誤差の抑制, 精密工学会誌, Vol.78, No.5, pp.432-438 (2012-5)

(5)甲斐孝志, 秋山昌也, 涌井伸二: 電流フィードバック式ドライバを用いた絶対変位センサのモデル化, 日本機械学会論文集 C 編, vol. 77, no. 782, pp. 3818-3822 (2011-10)

〔学会発表〕(計 14 件)

国際会議 (全論文査読あり)

(1)Takaaki Uemoto, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Performance Evaluation and Analysis of a Vertical Type Absolute Displacement Sensor, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 3956-3961 (Austria Center Vienna, Vienna, Austria, November 11, 2013)

(2)Takashi Kai, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Evaluation of Seismic Absolute Displacement Sensors Based on Sensitivity Calibration and Control Tests of an Anti-Vibration Apparatus, 2013 IEEE International Conference on Mechatronics(ICM)pp.144-149(Vicenza, Italy, 2013.2.28)

(3)Takaaki Uemoto, Takashi Kai, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Experimental Modal Analysis and Shaking Test of an Absolute Displacement Sensor for Suppression of High Frequency Dynamics, 2013 IEEE International Conference on Mechatronics(ICM), pp.150-155, (Vicenza, Italy, 2013.2.27)

(4)Takashi Kai, Takaaki Uemoto, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Experimental Modal Analysis of a Seismo-Type Velocity Sensor toward Bandwidth Expansion of an Absolute Displacement Sensor, 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS 2012), ME01, pp.152-157 (GRAND HOTEL SAIGON, Ho Chi Minh, Vietnam, 2012.11.26)

(5)Takashi Kai, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Root Locus Analysis of Absolute Displacement Sensors and Bandwidth Expansion with Hybrid Detector System, 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2012), WedP01-04, pp.603-608 (Tokyo University of Agriculture and Technology, September 20, 2012)

(6)Takashi Kai, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Implementation of Floor Vibration Feedforward Using an Absolute Displacement Sensor Combined with Acceleration PI Feedback, 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 1121-1126 (Divani Apollon Palace & Spa Hotel, Greece, March 21, 2012)

(7)Takashi Kai, Masaya Akiyama, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Effects of Back Electromotive Force in an Absolute Displacement Sensor and Improvement Using Current-Feedback-Type Driver, Proceedings of the 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2011), pp. 373-378 (Zhengzhou, China, August 12, 2011)

(8)Takashi Kai, Masaya Akiyama, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Development of an Absolute Displacement Sensor and Its Improvement in High Frequency Region, 2011 International Conference on Intelligent Computing and Control, 618 (May 28, 2011, Bangkok, Thailand)

(9)Takashi Kai and Shinji Wakui: Vibration Control of an Air Type Anti-Vibration Apparatus with Two Degrees-of-Freedom Using Absolute Displacement Sensors (Feedback to Voice Coil Motors), The 8th Asian Control Conference (ASCC2011), MoA7.5 (May 16, 2011, The Splendor Kaohsiung, Kaohsiung, Taiwan)

国内会議 (査読なし)

(1)植本隆明, 涌井伸二, 中村幸紀: 絶対変位センサの信号を用いたフィードバックにおける高周波ダイナミクスの影響とその抑制, 第56回自動制御連合講演会, pp. 73-76, 新潟大学工学部 (2013/11/16)

(2)甲斐孝志, 涌井伸二: 微分型サイズモ変位センサの高周波ダイナミクスに関する一考察と低周波帯域の拡大, 精密工学会誌, vol. 79, no. 5, pp. 430-436 (2013/5)

(3)植本隆明, 甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: モーダル解析に基づくサイズモ変位センサの広帯域化, 第55回自動制御連合講演会, 1D401, pp.280-283, 京都大学吉田キャンパス (2012.11.17)

(4)植本隆明, 甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 絶対変位センサの加振試験と高周波ダイナミクスの抑制, 平成24年電気学会産業応用部門大会, R2-3, 2-19, 千葉工業大学津田沼キャンパス, (2012.8.21)

(5)甲斐孝志, 中村幸紀, 涌井伸二: 極配置と根軌跡による一回微分式変位センサの優位性, 第54回自動制御連合講演会, pp.1324-1327, 豊橋技術科学大学 (2011/11/20)

〔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