

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420170

研究課題名(和文)地震に不感な空圧式除振装置の実現に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Realization of Pneumatic Anti-vibration Apparatus with Insensitivity for Earthquake Ground Motion

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生時、空圧式除振装置の制御パラメータを切替えて地震をやり過ごす戦略を検討した。従来、地震性状を捉える指標としてSI値を導入した。しかし、計算負荷大で実時間性に欠ける。そこで、除振装置遠方に地震観測所を設け、この地震性状および大きさに基づき事前に制御パラメータを切替え、地震到達時には安全サイドで運転させておくことを検討した。しかし、切替え可ではあるが観測所の設置コスト増が問題となる。そこで、計算機負荷が軽く、実時間性に優れるDI値を導入した。4種の地震波形を使い、低周波数成分の地震動での切替えでは除振台の相対位置が、高周波数成分の場合には除振台の加速度が抑制できることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study shows estimation of earthquake using destructive intensity (DI) value and its application to switching control for air type anti-vibration apparatus (AVA). AVAs are used for suppression of vibration in precision machining field. Previous work switched control of the AVA by using spectrum intensity (SI) value when seismic motion occurs. However, the calculation of SI value requires long computation time. In order to solve this problem, observation points were created in the distance from the AVA. However this method leads to the increase of cost. Moreover, it is difficult for an enterprise to use observation points. Then, this study proposes control system which estimates property of earthquake using only location of the AVA. This approach estimates characteristic of seismic motion by using both DI values. Simulation results demonstrated that DI value estimates property of seismic motion faster and proposal method could properly switch controller of AVA.

研究分野：振動制御

キーワード：除振装置 空気ばね 地震動 SI値 DI値 フィードバック フィードフォワード

1. 研究開始当初の背景

半導体露光装置にあっては、空圧式除振装置の除振・制振性能向上が生産物である LSI の品質と 1 対 1 に対応する。そのため、継続的な研究が行われている。一方、稀にしか発生しない地震発生時の対策も施される。ところが、軽微な地震にも関わらず装置停止になる、あるいは露光装置の稼働停止を要する巨大な地震にも関わらず、停止信号がでない場合もある。理由は、地震動を加速度センサで検出し、この大小だけから緊急停止、あるいは連続稼働のいずれかを判定する仕組みのためである。現実の地震動では、高周波数または低周波数成分が支配的という性質が存在し、加速度レベルだけでは露光装置に対する影響を判定する指標とはならない。

そこで、地震動性状を実時間で判定し、巨大地震の場合には装置停止命令を、軽微な地震の場合には除振装置の制御パラメータを切替えて地震発生時にも連続稼働させる方法が有益と考えた。産業应用到近づけるためには、アルゴリズムの確立が必要である。

2. 研究の目的

地震動の加速度、変位、高周波成分検出用 SI 値、そして低周波成分検出用 SI 値の合計 4 信号を用いて地震性状を捉え、除振装置のフィードバック (以下、FB) あるいはフィードフォワード (以下、FF) のパラメータを切替えたときの効果をシミュレータでは確認した。しかし、切替えアルゴリズムの簡素化、性状を異にする地震動に対する適応性、そして実機検証が不可欠であった。そのため、本研究の具体的な目的を以下のように定めた。

- (1) 多点観測網を使った事前切替えの検討：観測点の地震性状分析に基づく空圧式除振装置の制御パラメータ切替え効果を示す。
- (2) SI 値に代えた DI 値の導入： SI 値を使ったとき、計算機負荷が大きいこと、および実時間性に欠ける課題がある。そこで、床と除振台上の DI 値を計測し、両者の差分で地震動の周波数成分を判定する有効性を示す。
- (3) 空圧式除振装置の速度センサ化：空圧式除振装置とサイズモ型速度センサの制御構造を対比するとほぼ同じであり、一ヶ所の極性を反転したとき除振装置を速度センサ化できる。この場合、地震動の入力に対して除振装置の揺れが抑えられる。この性質を使って、除振装置に地震耐性を付与する。
- (4) 実機検証：制御パラメータ切替えの効果を実機検証する。

3. 研究の方法

実績のある 1 軸空圧式除振装置のモデルに、防災科学研究所が運営する K-NET から入手した地震波形を入力する方法を採用した。つまりシミュレータを使って SI 値を指標として用いたときの課題である切替え遅れを解消するアルゴリズムを開発した。

具体的には、空圧式除振装置の遠方に地震観測所を設け、この観測に基づいて制御パラメータ切替えの高速化を図った。さらに、 SI

値に代えた DI 値を用いて、地震観測網を不要とし、しかも地震到来直後に制御パラメータの切替えが起動するアルゴリズムの構築を行った。続いて、切替え効果を実機検証するために、 DI 値メータを 2 台試作して校正を行った。これらを鉛直方向 1 軸の空圧式除振装置に搭載し、加速度 FB の切替え、床振動 FF の切替え、巨大地震到来時の緊急な装置稼働停止、そして除振装置を速度センサ化する切替えを試行した。

4. 研究成果

空圧式除振装置のモデル、次に観測地点の地震性状分析の結果を用いた制御切替えの検討結果を示す。しかし、安全サイドの切替えは可能ではあるがコスト上昇を招くため、再び除振装置が設置されている場所での地震性状分析に基づく除振装置の制御パラメータ切替え方式に戻り、結果として DI 値が活用できることを示した。

4.1 空圧式除振装置のモデル

図 4.1 は、本研究で使用した空圧式除振装置のモデルである。図中の(1)はダンピングを付与する加速度 FB、(2)は床振動の除振台上への伝搬を抑制する床振動 FF、(3)は空気ばねの剛性を削除する相対加速度を積分した正の FB、(4)は除振台を平衡位置に保持する位置の FB、そして(5)は空気ばね内の圧力を一定にする圧力 FB である。加えて、地震発生を捉えて、制御パラメータを切替えるために、「FB gain switch」と「FF switch」を備える。これらのスイッチは、床振動 \ddot{x}_0 、すなわち地震動の性状および大きさを判定する「Logic」の出力信号に基づいて起動する。

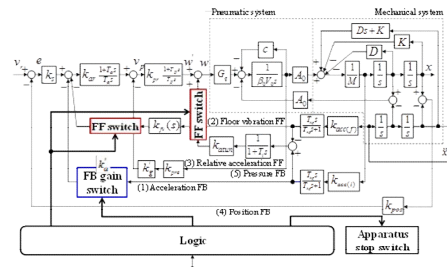


図 4.1 空圧式除振装置のモデル

4.2 観測地点の地震情報を用いた切替え

図 4.2 は、本研究で試行した 4 種の切り替え方法を示す。(a)は震源からの地震波が空圧式除振装置の設置場所に到来し、この場所での SI 値、加速度、そして変位の大きさを閾値と比較することによって制御パラメータを切替える方法である。(b)は震源と空圧式除振装置の設置場所の間に地震観測所を設け、ここでの地震性状の分析結果を踏まえて、除振装置の制御パラメータを切替える。この場合、除振装置に地震が到来する前から、余裕をもって制御パラメータを切替えられる。

図 4.3 に一例を示す。この場合、観測地点で 110.8 s に低周波地震と判定し、信号を送信した。そのため、除振装置は地震動が伝達する時刻 121.99 s よりも 11.19 s 手前で制御を低

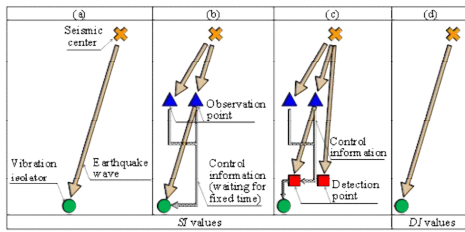


図 4.2 制御パラメータの切替え方法

周波向けに切替え、右側のように相対位置 $(x-x_0)$ を抑制できた。しかし、地震動到着前の切替えであり、わずかな時間ではあるが IC が製造できた。つまり、露光装置内の除振装置は稼働させているものの、露光は停止させるので生産性が低下する。

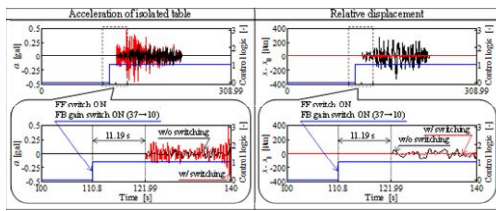


図 4.3 観測地点の地震情報に基づく切替え

加えて、観測所で有意な地震と判定し、この情報に基づいて制御パラメータを切替えても、除振装置には問題視する地震が到来しないケースも存在した。理由は、印で示す図 4.4 の観測地点の配置から、震源によっては、印で示す除振装置に地震波が到来しないからである。

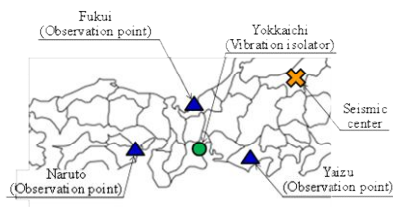


図 4.4 観測地点の配置

そこで、図 4.2(c)に示すように、地震観測地点で地震性状を捕捉するとともに、除振装置が設置されている地点の近傍に、地震到来の有無だけを検出する地震検出点 (印) を設け、確実に地震が到来したときに除振装置の制御パラメータを切替える方式をとった。この場合、地震到来の直前まで除振装置の稼働が可能である。つまり、図 4.2(c)が地震に性状を判定したうえで、確実に除振装置に到来するとわかったうえで制御パラメータの切替えが実施できる方法となる。しかし、図 4.2(b), (c)は設備コストの上昇を招く。除振装置を一ユニットとする半導体露光装置の運転コストに直接反映するので、同装置が生産する製品のコスト上昇をもたらす。一企業の生産装置に対してコストをかけ過ぎとな

る。したがって、堅実な地震耐性の付与方法は言えない。そこで、図 4.2(d)のように、それは同図(a)と同様であるが、除振装置が設置されている場所での地震性状の判定に基づいて制御パラメータを切替える方法が望ましい。ただし、図 4.2(a)の場合、SI 値を用いたため実時間性に問題があった。この解消のため、同図(d)では DI 値を用いる。

4.3 実時間性に優れた DI 値の導入

DI 値とは、地震動による加害指標であり、新幹線の P 波警報として使用されている。単位質量当たり仕事率であり $DI = \log_{10}|a \cdot v|$ と定義される。ここで、 a [gal]と v [m/kine]は東西・南北・上下の加速度ベクトルと速度ベクトルである。まず、DI 値が実時間で地震を捉えられる機能を持つことを確認するため、地震動に対するシミュレーションを行った。地震動は K-NET より入手した下記 4 種である。
 (1)小坂地震: 岐阜県下呂市小坂町で 2011 年 3 月 16 日 (3:33:29) に観測。
 (2)熊本地震: 熊本県熊本市東町で 2010 年 8 月 29 日 (21:31:45) に観測。
 (3)宮城地震: 三重県四日市市で 2011 年 4 月 7 日 (23:35:38) に観測。
 (4)四川省地震: 中国四川省を震源とする四川省地震を大分県大分市碩田町で 2008 年 5 月 12 日 (15:33:27) に観測。

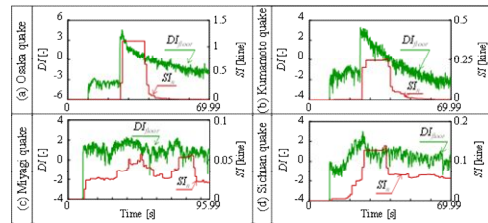


図 4.5 SI 値と DI 値の地震検出能力の差異

結果を図 4.5 に示す。いずれの DI 値も時刻 10 s で立ち上がる。それに対して、SI 値の場合には、検出が遅い。したがって、DI 値は実時間性に優れ、かつ地震動の早期検出が可能である。

4.4 DI 値を用いた地震性状の判定

DI 値を使って地震の性状を、すなわち地震波形に含まれる周波数成分の高低を判別する必要がある。

図 4.6 は地震動の特性判定の概念図である。同図(a)に低周波成分、(b)に高周波成分が支配

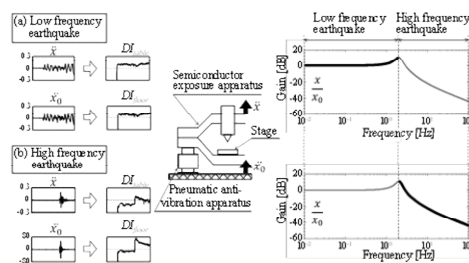


図 4.6 DI 値を使った地震動の特性判定

的な地震動が発生したときの床と除振台上の加速度と DI 値を、右側には除振装置の除振率の周波数特性を示す。この除振率は(a)と(b)において、それぞれ太線箇所の特性で床上の振動が除振台上へ伝達される。つまり、固有周波数より低い領域では低周波成分が卓越する地震動が、また高い領域では高周波成分が卓越する地震動が支配的となる。はじめに、(a)と(b)ともに床上の加速度 \ddot{x}_0 と速度 \dot{x}_0 、そして除振台上の加速度 \ddot{x} と速度 \dot{x} からそれぞれの DI 値を計算する。このとき、床上および除振台上の DI 値を DI_{floor} 、 DI_{table} と定義する。(a)の低周波地震動が発生したとき、除振装置の除振率はほぼ 0 dB のため、床上に生じる地震動の加速度は減衰しない。そのため、 DI_{floor} と DI_{table} はほぼ同一の値をとる。一方、(b)の高周波地震動が発生したとき、床上の振動は減衰して除振台上に伝達されるので、 $DI_{table} < DI_{floor}$ の関係になる。つまり DI_{table} と DI_{floor} の差が大のとき高周波地震動、小のとき低周波地震動が発生したと判定できる。

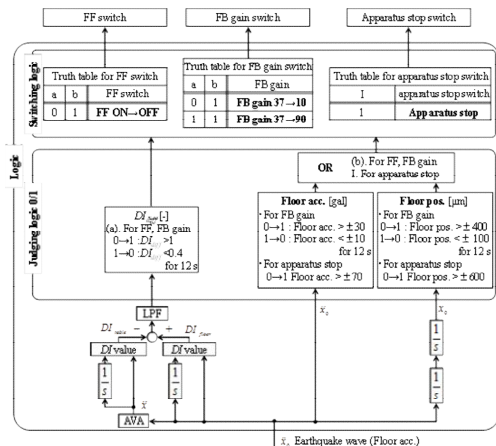


図 4.7 DI 値を用いた制御論理の詳細

続いて、 DI 値を用いた空圧式除振装置の制御パラメータ切替え論理を図 4.7 に示す。同図では、「FB gain switch」、「FF switch」、そして「Apparatus stop switch」を切替える。この切替え論理では入力として地震動の加速度 \ddot{x}_0 を用いる。入力された信号は四つの信号に変換する。一つ目は地震動の加速度 \ddot{x}_0 、二つ目は加速度を二階積分した地震動の変位 x_0 、三つと四つ目は床上と除振台上の DI 値の DI_{floor} 、 DI_{table} である。この二種類の DI 値を用いて「 $DI_{floor} - DI_{table} = DI_{diff}$ 」を計算する。続いて \ddot{x}_0 、 x_0 、そして DI_{diff} の値は同図の「Judging logic 0/1」に伝達され、閾値判定により「0」あるいは「1」の信号に変換される。 \ddot{x}_0 と x_0 を閾値と照らし合わせて使用する。一つ目は FF switch と FB gain switch に用いる閾値、そして二つ目は Apparatus stop に用いる閾値である。 \ddot{x}_0 は 30 gal を x_0 は 400 μm 超えたとき、地震動が到達したとしてそれぞれ 1 を出力する。 \ddot{x}_0 と x_0 の論理和をとり、Switching logic へ送信する。また、70 gal、600 μm を超えたとき、

可動限界に達して機械衝突の危険性があるため、それぞれ 1 を出力して論理和をとり、Switching logic へ送信する。 DI_{diff} は 1 を超えたとき、高周波成分を多く含む地震動と推定して 1 を送信する。そして、1 が出力されているときに 0.4 未満が 12 s 間続くかを判定し、この判定結果を満たすとき 1 から 0 に切替え、低周波成分を多く含む地震動と判定する。最後に Switching logic に送信され、真理値表の条件を満たすとき、FF、FB gain、Apparatus stop の制御を切替える。具体的に、FB gain switch の詳細は Judging logic 0/1 で FF switch と FB gain switch の閾値を満たした \ddot{x}_0 と x_0 の論理和から出力された信号が 1、かつ DI_{diff} から出力された信号が 0 のとき低周波地震動と推測し FB gain を「37 から 10」に、1 のとき高周波地震動と推測し同 gain を「37 から 90」へ切替える。FF switch は低周波地震動と推測したとき、FF 制御を OFF にする。Apparatus stop switch は Apparatus stop の閾値を満たした \ddot{x}_0 と x_0 の論理和から出力された信号が 1 のとき、装置停止命令を除振装置へ送信する。

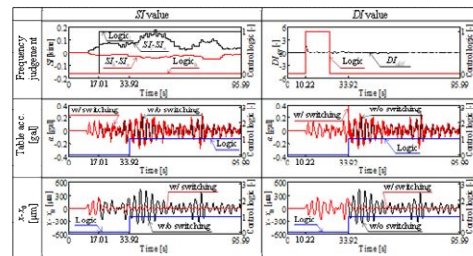


図 4.8 宮城地震の制御切り替え結果

図 4.8 左側上段に示す SI 値を用いた場合、 SI_l が増加し ($SI_l - SI_n$) が時刻 17.01 s に閾値 0.05 を超えたため、低周波地震動を示す論理出力 $Logic_1$ が 1 となる。そして、床上の加速度 \ddot{x}_0 または変位 x_0 が閾値を超え、低周波地震動向けの制御切替を時刻 33.92 s に行った。そのため、中段に示す除振台上の加速度 a が悪化した。しかし、下段に示す相対位置 ($x - x_0$) は抑制できた。一方、右側上段の DI 値を用いた場合、 DI_{diff} が地震動の到達とともに増加し、閾値 1 を超え、高周波地震動を示す論理出力 $Logic_1$ が 1 となる。しかし、すぐ減少して 12 s 間 0.4 を下回り、低周波地震動を示す論理出力 $Logic_1$ が 0 となった。床上の加速度 \ddot{x}_0 または変位 x_0 が閾値を超えたため、低周波地震動向けの制御切替を時刻 33.92 s に行った。そのため、 SI 値使用時と同様に、中段に示す除振台上の加速度 a が悪化し、下段に示す相対位置 ($x - x_0$) は抑制できた。

しかし、計算時間が 119.8 から 0.390 s と高速化し、かつ計算負荷の軽減を確認できた。加えて、相対位置の抑制により、機械衝突が緩和されたので、安全な稼働が可能となった。図 4.8 の比較から、 SI 値と同様に DI 値を用いても地震性状を判定する指標になりえることがわかった。しかし、切替え起動時刻に

はほとんど差異がない．そこで，高速化をはかる．すなわち地震到来直後に制御パラメータの切替えが起動するように論理を変更した．具体的に，床の DI 値の大小，床上の加速度 a_0 と変位 x_0 に加えて新たに地震動の検出論理を加えた制御論理を図 4.9 に示す．ここで，図 4.7 から 4.9 への変更点は， DI_{floor} の追加である．具体的に， DI_{floor} が 1.6 を超えたとき地震動到達と判定して 1 を出力する．一方， DI_{floor} が 12 s の間下回ったとき地震動収束と判定し 0 を出力する．それぞれ出力された \ddot{x}_0 ， x_0 ，そして DI_{floor} の論理和をとり“Switching logic”へ信号を送信する．

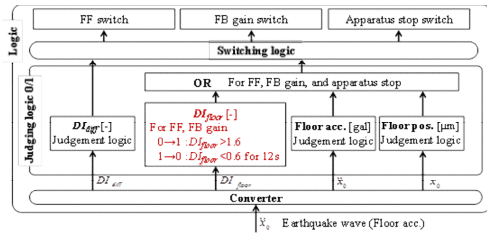


図 4.9 DI_{floor} を加えた地震動の検出論理

“Switching logic”へ信号を送信する． DI_{diff} と論理和をとり，出力された 2 つの信号を入力とする真理値表に基づいて「FB gain switch」，「FF switch」，そして「Apparatus stop switch」の制御信号を送信する．図 4.9 の論理で地震動に対する制御パラメータの切替えをシミュレーションした．結果は図 4.10 である．

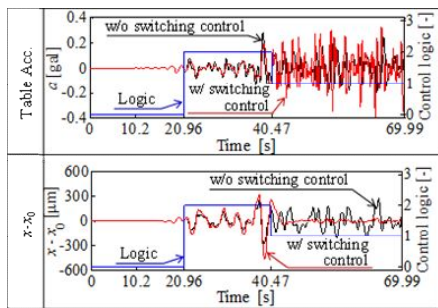


図 4.10 四川省地震の制御切り替え結果

同図をみると，床上の DI_{floor} ，加速度，または変位が時刻 20.96 s に閾値を超えている．そのため，まず高周波地震動向けの制御切り替えを行った．結果，下段に示す相対位置 $(x-x_0)$ は悪化した．しかし，上段の除振台上の加速度 a は良化した．その後，時刻 40.47 s に低周波地震動と判定して，低周波地震動向けの切替えを行った．結果，除振台上の加速度 a が悪化した．一方，相対位置 $(x-x_0)$ は良化した．したがって，検出論理を変更した結果，図 4.9 では地震動を 17 s(38.01-20.96)速く検出し，制御の切替えができる．

4.5 DI 値メータの試作

回路構成を図 4.11 に，動作検証を図 4.12 に示す．同図下段より，定義の計算値と試作 DI 値メータの出力が一致している．

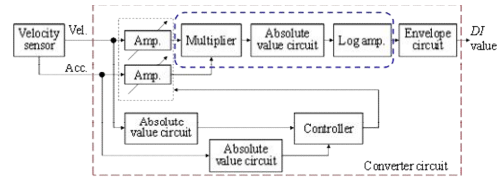


図 4.11 試作した DI 値メータ

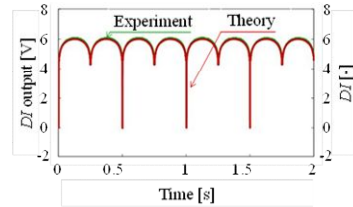


図 4.12 DI 値メータの動作検証

4.6 提案アルゴリズムの一部を実機検証

図 4.13 は， DI 値メータを使って床に衝撃を印加したとき，床と除振台上の DI 値が異なることを示す．制御パラメータ切替えの際，両 DI 値の差異を使っており，この確からしさを実測したデータである．次に，図 4.13 に示す DI 値の差異，および床振動の加速度と変位の大きさを踏まえて，除振装置内の加速度ゲインを切替えたときの応答を図 4.14 に示す．左側は制御切替えなし，右側は切替え時の状態を示す．さらに，上段は除振台上の加速度，下段は相対位置を示す．

図 4.14 を参照すると，除振装置は加振に対し固有周波数 2 Hz で振動している．制御切替えなしでは，振動を与えると除振台の位置振幅が大きくなり，加振後も固有振動が続いている．一方，制御切替えありでは加振中の位置振幅は小さく，加振後に固有振動は残らない．つまり，制御切替えが有効に機能したことがわかる．

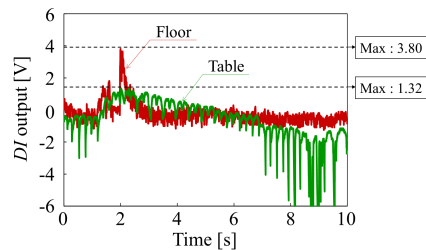


図 4.13 床に衝撃を与えたときの DI 値

4.7 除振装置の速度センサ化

サイズモ型速度センサと空圧式除振装置は，いずれも外側に位置の弱い FB，内側にメインの速度 FB を備える．違いは，前者のメインループが相対位置の微分に基づく速度 FB であることに対して，除振台では絶対速度の FB になることである．ここで，除振台を図 4.15 に示すように相対速度の FB にしたとき，床の速度 \dot{x}_0 から除振台の相対位置 $(x-x_0)$ までの応答を抑制できる．

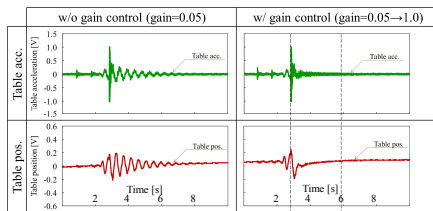


図 4.14 加速度ゲインの切替え結果

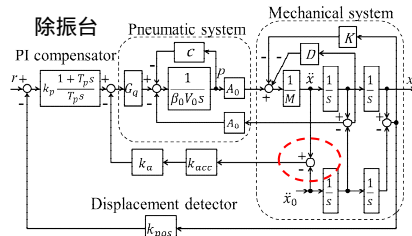


図 4.15 除振台の速度センサ化

図 4.16 は地震波入力時の除振台の応答，すなわち相対位置 $(x-x_0)$ を示す．左側は，通常稼働の状態にしたときであり， $(x-x_0)$ が大きいため除振台は機械衝突を招く．中央は，床振動 FF をオフしたとき，そして右側は速度センサ化したときである．この順番で $(x-x_0)$ は抑えられている．ただし，図示していないが，トレードオフの関係から，除振台上の加速度 a は速度センサ化した場合が最も劣化する．

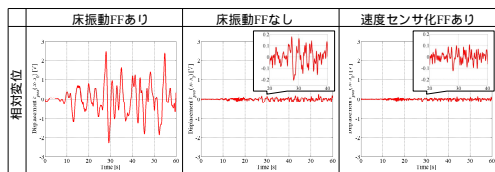


図 4.16 地震波を入力したときの応答

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2件)

久保田将行, 涌井伸二, DI 値による地震性状推定と空圧式除振装置における制御切り替えの高速化, 機論, 査読有, Vol.83, No.845, pp.1-18(2017-1) DOI:10.1299/transjsme.16-00330

涌井伸二, 久保田孝信, 速度センサ化した空圧式除振装置の一産業応用, 機論, 査読有, Vol.81, No.829, pp.1-12(2015-9) DOI:10.1299/transjsme.15-00254

[学会発表](計8件)

上田廣太郎, 涌井伸二: 空圧式除振装置の制御切り替えによるハンチングの対策, 電気学会制御研究会, CT-17-009, pp.23-26(2017.3.19), 宮古島公民館(沖縄県宮古島市)

Kotaro Ueda, Shinji Wakui, Validation Testing of Anti-Vibration Apparatus Using Switching Control by DI Value Meter,

Proceedings of the 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ThuP04-04, pp.265-270(Melbourne, Australia, December 1, 2016)

上田廣太郎, 涌井伸二, DI 値メータを用いた空圧式除振装置の切り替え制御と実機検証, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 2-2, II-77 ~ II-80(2016.8.31), 群馬大学(群馬県前橋市)

上田廣太郎, 久保田将行, 涌井伸二, 中村幸紀, DI 値メータの改良と空圧式除振装置への応用, 電気学会制御研究会, CT-15-157, pp.13-17(2015.12.19), 群馬大学(群馬県桐生市)

Masayuki Kubota, Hirokazu Mineo, Shinji Wakui, Yukinori Nakamura, Study on Detection of Earthquake Using DI Value and Its Application to Switching Control for Air Type Anti-Vibration Apparatus, 2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS2015), SatP03-05, pp.158-163(Beijing Fujian Hotel, China, August 22, 2015)

久保田将行, 涌井伸二, 中村幸紀, 地震動を検出可能な DI 値メータの試作, 電気学会制御研究会, CT-15-080(2015.6.27), 広島大学学生会館(広島県東広島市)

峰尾浩一, 涌井伸二, 中村幸紀, 地震発生時における複数の観測地点を用いた空圧式除振装置の制御切替え方法に関する研究, CT-15-040, pp.51-56, 電気学会 C 部門制御研究会 (2015.3.27), 香川高等専門学校(香川県高松市)

峰尾浩一, 論手孝至, 涌井伸二, 中村幸紀, 地震発生時における空圧式除振装置の制御切替え方法に関する研究, 第 57 回自動制御連合講演会, 1A08-3, pp.628-633(2014.11.10), 伊香保ホテル天坊(群馬県渋川市)

[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]

• <http://web.tuat.ac.jp/~wakuiken/index.html>

• 模擬授業: 地震に強い装置をめざした振動の制御(千葉商業高校, 2015.12.16)

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

(2)研究分担者

中村 幸紀 (NAKAMURA, Yukinori)

岡山大学・自然科学研究科・講師
研究者番号: 90574012

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

該当なし