

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 14 日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23710210

研究課題名(和文) 小型船舶による救急患者搬送用防振架台の省エネルギー・省スペース化

研究課題名(英文) Energy and Space Saving System of Vibration Isolation Stand for Transporting the Injured using Pleasure Boat

研究代表者

外山 茂浩 (Toyama, Shigehiro)

長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：60342507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：小型船舶用防振架台の省エネルギー化、省スペース化を実現するシステム構成を検討した。まず動吸振器の応用を検討した結果、能動型防振架台へ適用した場合、単純な能動型防振架台に対して発生力を38%程度に抑制できることが分かった。次にメカニカルスナッパの応用を種々検討した。その結果、スカイフックメカニカルスナッパを実現する絶対天井の近似機構が省エネルギー化、省スペース化に有効であることが分かった。また、減衰力可変ダンパによる準能動型防振架台の制御則を検討した結果、記述関数法によってスライディングモード制御系を設計できれば、省エネルギーで患者への負担が少ない防振架台を構成できる可能性があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Saving energy and space, the system configuration of vibration isolating stand for transporting the injured using pleasure boat was investigated. First, it turned out that using the dynamic damper for active vibration isolating stand could suppress the actuator force into 40% compared with the pure active stand. Next, applying the mechanical snubber was investigated. It turned out that approximation mechanism of the absolute ceiling was effective in the saving the energy and the space. Finally, as a control system of the semi-active stand, it turned out that the sliding mode control with the describing function method was effective.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：自然災害 被害対策 離島 小型船舶 救急活動 搬送 防振架台

1. 研究開始当初の背景

7000 余りの島々からなる我が国では、離島に対する災害時の応急対策活動の整備が急務となっている。災害発生時の応急対策活動には、発災直後の情報の収集・連絡、活動体制の確立と並行して、人命の救助・救急、医療、消火等の応急対策活動を迅速かつ的確に講ずることが求められているが、離島に対するそれらの活動では船舶の利用が必要不可欠である。大規模地震の被災地と予想され、高度医療機関が設置されていない離島を数多く抱える三重県鳥羽市では、研究代表者が以前勤務し、研究協力者が勤務している鳥羽商船高等専門学校と 2006 年 9 月に災害時協力協定を締結し、海上保安庁等との協力の下、練習船「鳥羽丸」や小型船舶に分類される教習艇「あさま」を利用した救急患者搬送体制等を検討している。2010 年 2 月には三重県伊勢市とも同様の災害時協力協定が締結され、行政のみならず、地域コミュニティ、企業、学校など様々な主体が支え合う「新しい公共」の力を活かした防災力向上のモデルケースになり得る体制へと発展してきた。

船舶による救急患者搬送には大別して 2 つのケースが考えられる。1 つは、被災地から被災地外の災害拠点病院等への搬送のケースであり、もう 1 つは被災地内での搬送、例えば、離島から被災地内の医療機関に搬送するケースである。前者のケースでは、収容人数が多く設備の整った中・大型船舶の利用が適しており、後者のケースでは、喫水が浅く狭水路の航行が可能で、離着岸が容易である教習艇「あさま」のような小型船舶の利用が適している。

船舶による救急患者搬送で問題となるのは、船体の揺動が患者にストレスを与えることである。ストレスの原因は特に船舶の縦揺れで生じる上下加速度であり、搬送の対象が重篤患者であった場合、その容態を急変させかねない。乗員の上下加速度の低減を目的としたこれまでの研究では、大型船舶を対象として、船底に装備したフィンを適宜制御することで船体縦揺れ運動そのものを抑制するといった研究がなされてきた。これに対して上述のフィンの装備は稀で、エネルギーやスペースに制約がある小型船舶では、高規格救急車の防振架台と同様な装置を利用するのが最も現実的である。客室内に設置した防振架台にストレッチャーを搭載することで、客室床面振動の患者への伝達を低減させる。ただし、救急車と比べ船体振動の振幅はあまりにも大きく設置スペースも限られているので、高規格救急車用の防振架台の流用は不可能である。

2. 研究の目的

これまでの研究で防振架台の省エネルギー化を期待できるメカニズムとしてトリリニア形ばね機構を考案すると共に、制御アルゴリズムと合わせて数値シミュレーション、模

擬実験によってその基本的な有効性を確認してきた。本研究では、これまでの研究成果を基に、大規模な船体の改修無しに防振架台を設置するため、省エネルギー化と同時に省スペース化を図る実用的なメカニズムの提案を目的とする。

3. 研究の方法

防振架台の設置位置は、船の重心から約 1.5~2.0[m]後方のキャビン内を想定している(図 1)。防振架台の設置位置におけるピッチングを上下振動と近似し、実船実験の測定データを参考に通常の航海条件でその片振幅の最悪ケースを 0.105[m]と仮定した。また、Darbyshire による海洋波のスペクトルに関する成果を基に船速の変化を考慮し、床面振動の円振動数を最高 5.20[rad/s]と想定する。船舶の乗り心地評価及び船酔率(MSI)を用いた実船実験による成果によれば、搭載患者の上下加速度が 0.3[m/s²]を超えると急激に MSI 等の値が悪化するとされている。そこで、ストレッチャー搭載面の上下加速度を 0.3[m/s²]以下に抑えることを振動伝達特性の仕様とした。前述の防振架台の設置位置における振幅、海洋波の周波数の最悪ケースに対して、船体床面の上下加速度からストレッチャー搭載面の上下加速度までの振動伝達特性を具体化すると、仕様は図 2 のようなゲイン特性として表すことができる。この仕様を満たすべく種々のメカニズムを検討した。

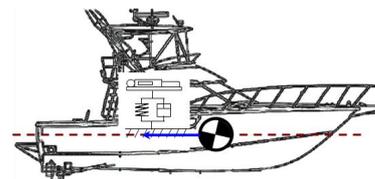


図 1 防振架台の設置位置

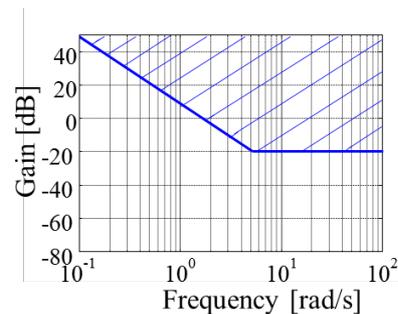


図 2 所望の振動伝達特性

(1) 動吸振器

外部エネルギーを必要としない受動型の制振装置の中でも、高い制振効果の望める動吸振器(図 3)をエネルギーが不要な受動型防振架台へ適用することをまず検討した。次に、能動型防振架台に動吸振器を併用した場合、従来の能動型防振架台と比較して、どの程度のエネルギー消費低下が見込まれるか数値シミュレーションによって求めた。

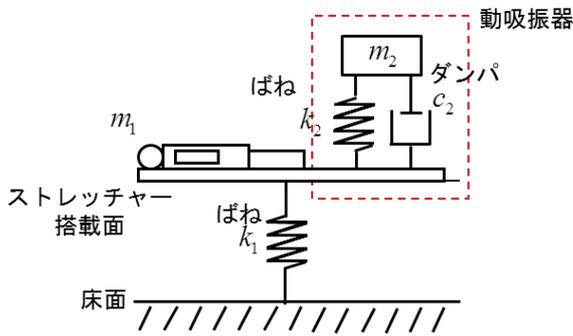


図3 動吸振器を用いた受動型防振架台

(2)メカニカルスナップ

図4に示すメカニカルスナップは、発電所などの高温環境中における配管の防振用支持装置である。メカニカルスナップは、直線運動を伝達するロードコラム、直線運動を回転運動へ変換するねじ軸とボールナットから成るボールねじ、加速度に応じて抵抗力を与えるフライホイールから成っている。ねじ軸に伴ってフライホイールが回転することで、ロードコラムの直線運動を妨げる抵抗力が働く。外部エネルギーを利用することなく、見かけ上のばね上質量を増加させ固有振動数の低下が期待されることから、その効果を数値シミュレーションによって求めた。また、メカニカルスナップを応用した2種類のメカニズム(クラッチ機構の組み込み、絶対天井の近似実現)を提案し、その効果を数値シミュレーションによって求めた。

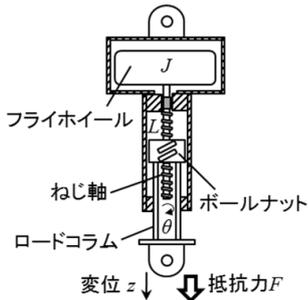


図4 メカニカルスナップ

(3)記述関数法に基づくスライディングモード制御系

減衰力可変ダンパを用いた準能動型防振架台(図5)の制御則について検討した。本研究においては、ストレッチャーに搭載する患者質量変化に対して高いロバスト性を得るためスライディングモード制御系の適用を試みた。一般にスライディングモード制御系を構築する場合、アクチュエータの応答遅れ等によってチャタリングが発生するので、ストレッチャーに搭載する患者への悪影響が懸念される。そこで、記述関数法によりチャタリングの低減を目的とした新たな制御則を提案し、数値シミュレーションによってその基本的な有効性を確認した。

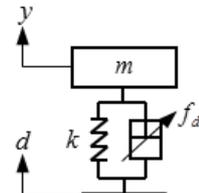


図5 減衰力可変ダンパを用いた準能動型防振架台モデル

4. 研究成果

(1) 動吸振器

動吸振器を用いた受動型防振架台

動吸振器(図6)のパラメータを変え、希望の伝達特性を満たすかどうか計算した。計算結果を図7(a)~(c)に示す。まず標準的な質量比 $\gamma=0.1$ では、仕様を満足できなかった。そこで、質量比を大きくしていった結果、質量比 $\gamma=23$ となったところで仕様を満足することが分かった(図7(c))。しかしこの場合の動吸振器の質量は1610[kg]となるため、小型船舶への搭載は現実的に極めて困難であることが分かった。

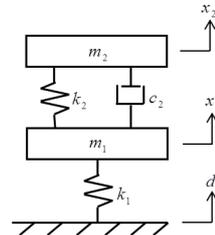
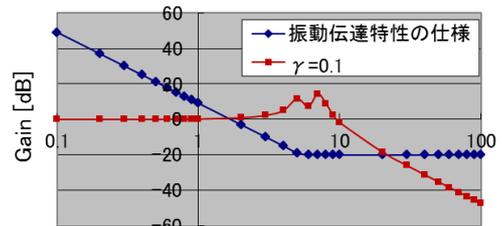
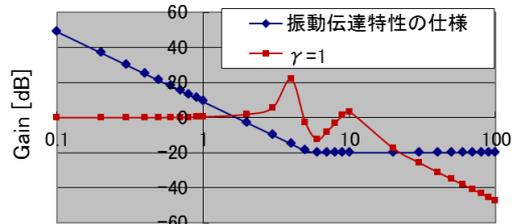


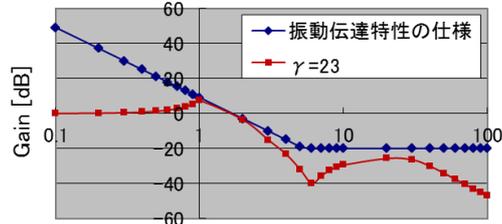
図6 動吸振器を用いた受動型防振架台モデル



(a) 質量比 = 0.1



(b) 質量比 = 1



(c) 質量比 = 23

図7 仕様に対する各質量比の振動特性

動吸振器を併用した能動型防振架台

防振架台を動吸振器のような受動型だけで構成することは困難であることが分かった。そこで、図8のように動吸振器を併用した能動型防振架台について考えた。通常の能動型防振架台と比べ、どの程度までのエネルギー消費低下が望めるか検証した。なお、アクチュエータの制御にはスカイフック理論(図9)の適用を想定した。図10に示すように、スカイフックダンパ粘性抵抗係数 C を調整することにより仕様を満足することができることが分かった。動吸振器を併用しないスカイフック理論単体の能動型防振架台では、 $C=5800$ で仕様を満足するが、図8に示す動吸振器を併用したスカイフックダンパ系では、 $C=2200$ で仕様を満足できている。これらの結果より、防振架台を能動型のみで構成した場合に比べて、動吸振器を組み入れた能動型防振架台はアクチュエータの発生力を約38%程度に抑えられることが分かった。小型船舶は電源に制約があるため、図8のように動吸振器を組み合わせて構成する能動型防振架台の搭載が実用的であることが分かった。さらに、仮に外部エネルギーが遮断された場合、通常の能動型防振架台はばねだけで患者を支えなければならないのに対して、図8に示す能動型防振架台では外部エネルギー無しでも減衰のある動吸振器が作用する。制振効果を考えると動吸振器の方が振動を抑制してくれるため、フェイルセーフの観点からも動吸振器を組み入れた方が良いことが分かった。

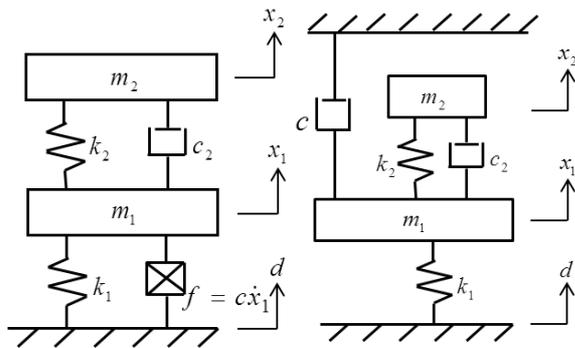


図8 動吸振器を併用した能動型防振架台モデル

図9 スカイフック理論による動吸振器を併用した能動型防振架台の制御モデル

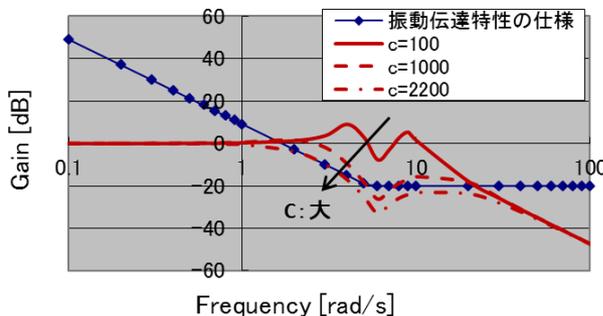


図10 スカイフックダンパ粘性抵抗係数を変化させた時の振動伝達特性

(2) メカニカルスナップ

メカニカルスナップを用いた受動型防振架台

図11に示すメカニカルスナップのフライホイールの慣性モーメント J のみを変化させシミュレーションを行ったところ、図12のような結果が得られた。この図からわかるように、慣性モーメント J を増加させると共振周波数が低周波数側へ移動することがわかる。しかし、それと共に高周波数域におけるゲインが増加し、仕様を満たすことができないことが分かった。そのため、実際には高周波数域におけるゲインを抑制するための工夫が必要であることが明らかとなった。

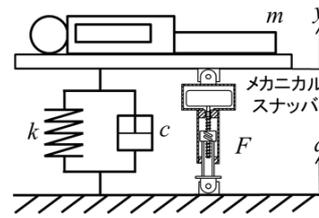


図11 メカニカルスナップを用いた防振架台

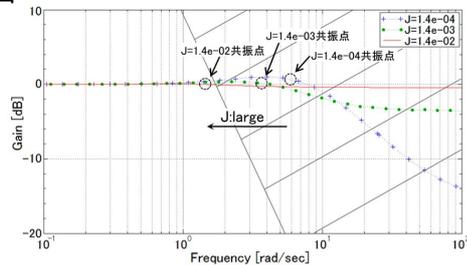


図12 慣性モーメントを変化させた場合の振動伝達特性

クラッチ機構を組み込むメカニカルスナップを用いた準能動型防振架台

メカニカルスナップを防振架台へ導入した場合、ボールねじの抵抗力 F が特に振動抑制に悪影響を与える条件は、ストレッチャー加速度と、床面に対するストレッチャーの相対加速度の符号が異なり、メカニカルスナップの抵抗力 F が加振力として作用してしまう場合である。そこで、加振力のもととなるフライホイールを適宜切り離すため、図13に示すような、メカニカルスナップにクラッチを取り入れた新機構を考案した。図13(a)はクラッチが切れている状態であり、ねじ軸とフライホイールが切り離され抵抗力が発生しない。図13(b)はクラッチが繋がっている状態のため、相対加速度に応じた抵抗力が発生するようになっている。ストレッチャー加速度 \ddot{y} と、床面に対するストレッチャーの相対加速度 $\ddot{y}-\ddot{d}$ の位相差を考慮した以下の御則を用いてクラッチを切り替える。

$$F = \begin{cases} i^2 J (\ddot{y} - \ddot{d}) & \text{if } \ddot{y}(\ddot{y} - \ddot{d}) > 0 \\ 0 & \text{if } \ddot{y}(\ddot{y} - \ddot{d}) \leq 0 \end{cases}$$

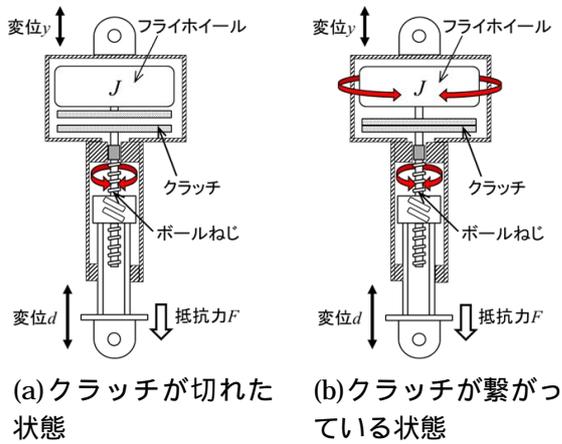
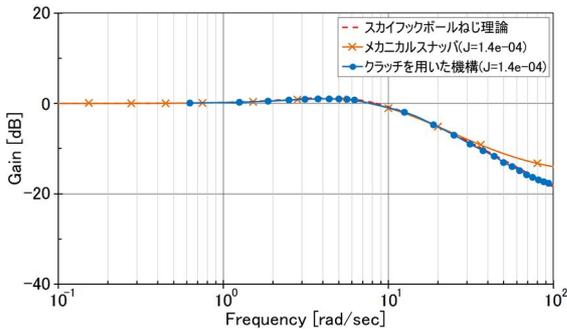
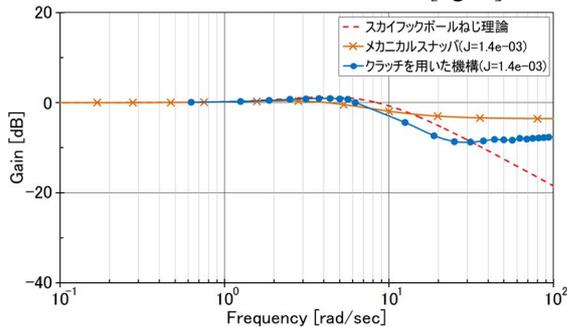


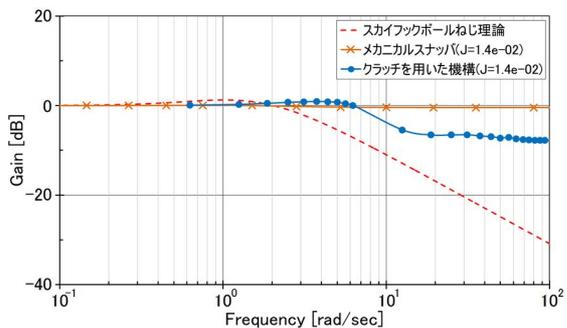
図 1 3 クラッチ機構を組み入れたメカニカルスナッパ



(a)慣性モーメント $J=1.4 \times 10^{-4} [\text{kgm}^2]$



(b)慣性モーメント $J=1.4 \times 10^{-3} [\text{kgm}^2]$



(c)慣性モーメント $J=1.4 \times 10^{-2} [\text{kgm}^2]$

図 1 4 クラッチ機構を組み入れたメカニカルスナッパによる振動伝達特性

ここで、 J は慣性モーメントを、 i は $2 / (\text{ボールねじのピッチ})$ を表している。慣性モーメント J を変化させ数値シミュレーションを行ったところ図 1 4 に示す振動伝達特性が得られた。この図からフライホイールの慣性モーメント J が同じメカニカルスナッパにク

ラッチを組み込んだ場合、問題であった高周波数域の振動伝達特性を改善出来ることが分かった。しかし、慣性モーメント J が増加した場合に共振周波数が低下しておらず、スカイフックボールねじ理論に対しても増加しており、また、ゲインも大きいことが分かる。したがって、クラッチを取り入れた新機構は高周波数域での振動伝達特性を改善できるものの、全周波数領域で見れば劇的な改善には繋がらないことが明らかとなった。

絶対天井近似機構を用いた準能動型防振架台

防振架台の共振周波数を低下させる方法として、スカイフックメカニカルスナッパを実現する絶対天井近似機構を用いた準能動型防振架台(図 1 5)を考える。比較対象として単純質量増加システム(図 1 6)を想定した場合、同程度の制振性能であれば、防振架台の構成質量が軽い方が省スペース化にもつながり実用性が高い。そのため、それぞれのシステムを構成した際に、同程度の制振性能を実現させるのに必要な構成質量に着目して比較した。振動伝達特性の仕様を満足するように、各パラメータを設定したところ、単純質量増加システム、絶対天井近似機構ともに、共振周波数が低下し、振動伝達特性に関する仕様を満たすことが出来ることが分かった。ただし、同程度の制振性能を実現するシステムを構成した際の総質量(搭載患者質量を除く)は、絶対天井近似機構が 230.64[kg] であるのに対し、単純質量増加システムは 49110[kg] であり、単純質量増加システムは慣性質量付加システムの約 213 倍重いシステムになることが分かる。また、単純質量増加システムは追加質量が患者質量の 700 倍の 49000[kg] であり、実際に小型船舶に搭載することを考えると現実的で無く、図 1 5 に示す絶対天井近似機構の実用性が高いことが明らかとなった。

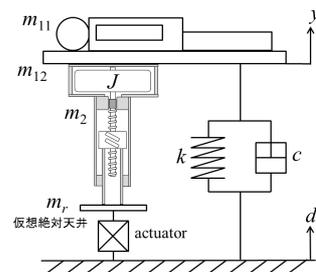


図 1 5 絶対天井近似機構を用いた準能動型防振架台

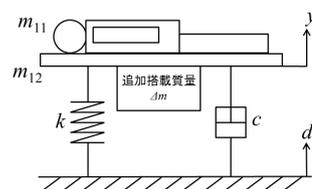


図 1 6 単純質量増加による受動型防振架台

(3) 記述関数法に基づくスライディングモード制御系

スライディングモード制御の特徴は、切換関数に基づき高速でリレー入力を切り替えて高いロバスト性が得られることである。しかし、従来手法では切換入力の遅れによってチャタリングが発生することが問題となっている。そこで、図17に示すような新たにスライディングモード制御系を設計した。この制御系の特徴は、図18(a)に示すように能動制御であれば切換関数のリミットサイクルが発生し、切換入力が平滑化されることである。省エネルギーを実現する準能動制御とした場合でも、図18(b)に示すように所望のリミットサイクルは発生しないが、切換関数は切換面近傍に緩やかに拘束されており、図19に示すような平滑化された切換入力を得られることが明らかになった。従来手法の切換入力に比べてチャタリングを顕著に抑制可能であり、ストレッチャーに搭載する患者への負担が低減できることが分かった。

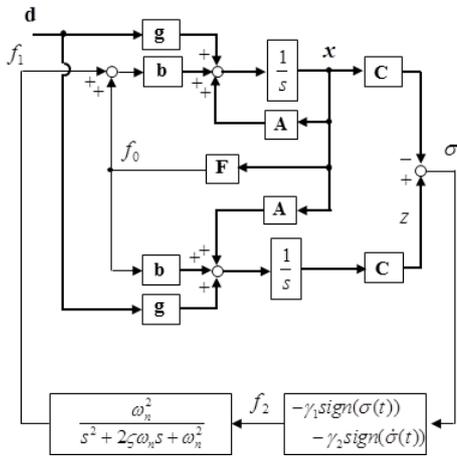
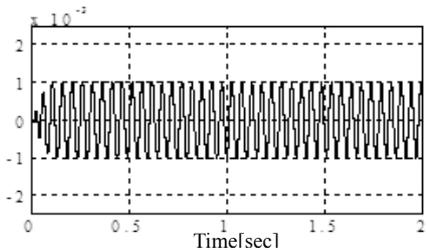
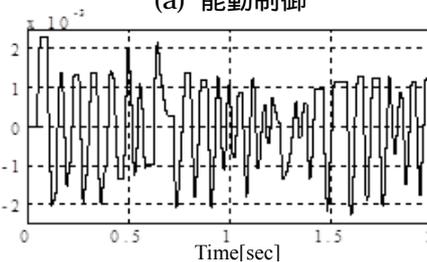


図17 制御系のブロック線図



(a) 能動制御



(b) 準能動制御

図18 切換関数のリミットサイクルの精度

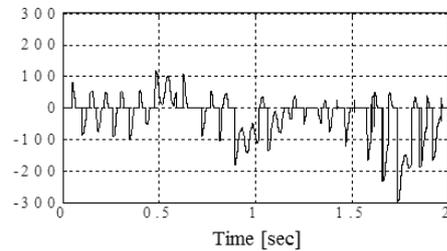


図19 提案手法による切換入力の時系列波形

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3件)

(1) Yoshiaki Mitsuma, Shigehiro Toyama, Fujio Ikeda, Hiroaki Seta, Vibration Isolation Stand for Transporting the Injured using Pleasure Boat, Transaction on GIGAKU, (2014), Accepted

(2) 外山茂浩, 池田富士雄, 記述関数法によるセミアクティブサスペンションのスライディングモード制御, 日本機械学会論文集 C 編, 79-808, (2013), 4984-4993. DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.4984>

(3) Shigehiro Toyama, Fujio Ikeda, A Sliding Mode Control of Semi-active Suspension Systems with Describing Function Method, Journal of System Design and Dynamics, Vol.6-No.3, (2012), 263-272. DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jsdd.6.263>

〔学会発表〕(計2件)

(1) Yoshiaki Mitsuma, Shigehiro Toyama, Fujio Ikeda, Hiroaki Seta, Vibration Isolation Stand for Transporting the Injured using Pleasure Boat, The 2nd International GIGAKU Conference in Nagaoka, Nagaoka, Japan, (2013), SP-22.

(2) Shigehiro Toyama, Fujio Ikeda, Energy-Saving Mechanism of Active Vibration Isolation Stand for Transporting the Injured Using Pleasure Boats, 2012 ASME Dynamic Systems and Control Conference, and 2012 Motion & Vibration Conference, Ft. Lauderdale, USA, (2012), 8618.

6. 研究組織

(1)研究代表者

外山茂浩 (TOYAMA SHIGEHIRO)

長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号: 60342507

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし