

平成22年6月1日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19710151  
 研究課題名（和文） 小型船舶による救急患者搬送用の防振架台に関する研究  
 研究課題名（英文） A Study on Vibration Isolating Bed for Emergency Patient Transportation using Pleasure Boat

研究代表者  
 外山 茂浩（TOYAMA SHIGEHRO）  
 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

研究成果の概要（和文）：小型船舶への搭載を想定した救急患者搬送用防振架台のばね機構、制御則に関して研究を行った。まず、患者にかかる負担は搬送患者の上下加速度によるものとし、防振架台の伝達特性に対する仕様を決定した。次に、防振架台に用いるばねの理想的な弾性特性について検討し、複数の引張ばねを組み合わせた非線形ばね機構を考案した。そのばね機構を有する実物大の防振架台を製作し、防振架台を小型化できる可能性を示した。最後に、電子制御用アクチュエータの制御則の候補をいくつか挙げ、制御入力の最大値、感度特性、入力外乱抑制特性、観測雑音除去特性の4つのフィードバック特性を用いて評価した。その結果、スカイフックダンパ制御が制御入力の最大値を抑制できており、装置の小型化が期待できることがわかった。また、搬送患者の体重差に対するロバスト性の尺度となる感度特性についても、スカイフックダンパ制御は良好な特性を示すことがわかった。

研究成果の概要（英文）：A spring mechanism and some control laws of actuator for vibration isolating bed have been investigated. Firstly, a specification on the transfer characteristics of the vibration isolating bed is determined on the supposition that the acceleration of the bed makes the transported patient's load. Secondly, some ideal elastic characteristics of the spring are considered. To satisfy the ideal elastic characteristics, a nonlinear spring mechanism employing some pull springs is devised. The full size vibration isolating bed with the nonlinear spring mechanism is designed, and the bed can show possibility of downsizing. Finally, some feedback control laws are examined from viewpoints of magnitude of the control input, sensitivity characteristic, and robustness for disturbances and measured sensor noise. Showing superior performance on the magnitude of the control input and on the sensitivity, the skyhook damper control can be expected to downsize and to have robustness against the weight difference of the transported patients.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	3,200,000	630,000	3,830,000

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：被害予想、分析、対策、船舶による離島からの救急患者搬送

## 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、災害時における離島からの救急患者搬送体制を早急に確立しなければならない。救急患者の搬送には、喫水が浅く狭水路の航行が可能で離着岸が容易な小型船舶の利用が考えられるが、船体の揺動が患者にストレスを与えることが問題となる。ストレスの原因は特に船舶の縦揺れ（ピッチング）によって生じる上下方向の加速度であることが知られており、搬送の対象が重篤患者であった場合、その様態を急変させかねない。中・大型船舶のように船体振動そのものを抑制するフィンの装備は稀で、スペースや電源に制限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（図 1）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、救急車と比較して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、高規格救急車の防振架台の流用は不可能である。

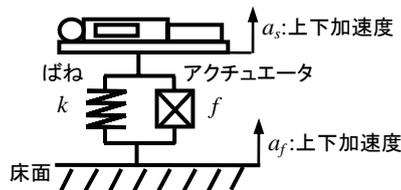


図 1 救急患者搬送用防振架台

## 2. 研究の目的

本研究課題では、ストレッチャーに横たわる患者のストレス（上下加速度）を低減可能で、患者の体重差を問題とせずに防振架台の小型化が可能となるようなばね機構、制御則を明らかにすることを目的として研究を行った。

## 3. 研究の方法

### 3.1 問題の定式化

客室内の床面振動は、船舶が直進状態で一定の速度を超えると上下振動とみなせる。その最大片振幅は、通常運航条件でのピッチング角の平均振幅から  $0.105[\text{m}]$  と想定した。また、床面振動の最大角周波数は Darbyshire が示した吹送距離を含む海洋波の振動に関する一般式の計算例と船速を考慮した船舶振動の角周波数を求める一般式から  $5.2[\text{rad/s}]$  と想定した。

搬送時の患者にかかる負担の原因は、上下方向の加速度が最も大きいとされている。人体応答より見た上下振動限界に関する文献調査から、ストレッチャー搭載面の加速度を  $0.3[\text{m/s}^2]$  以下に抑える必要があることがわかった。床面振動の最悪ケースを単一正弦波とすると、周波数帯域  $\omega \leq 5.2[\text{rad/s}]$  における床

面振動の加速度からストレッチャー搭載面の加速度への伝達ゲイン  $|G(j\omega)|$  は次式を満たす必要がある。

$$|G(j\omega)| \leq \frac{0.3}{0.105\omega^2}$$

床面振動を想定していない  $\omega \leq 5.2 [\text{rad/s}]$  の周波数帯域における伝達ゲインの仕様は、 $\omega = 5.2 [\text{rad/s}]$  の条件を満たせばよいものとした（図 2）。

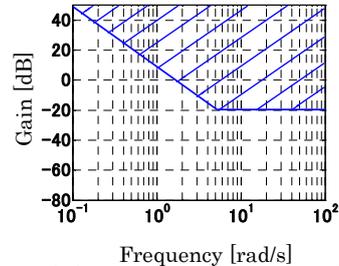


図 2 床面加速度からストレッチャー搭載面加速度への伝達ゲインの仕様

### 3.2 理想的な弾性特性の検討

前節で述べた伝達ゲインの仕様を満たすとともに、患者の体重差を問題とせずに防振架台の小型化を可能とするには、防振架台の弾性特性が以下の要件を満たさなければならない。

- ・支持剛性の確保とアクチュエータの消費エネルギー抑制との両立
- ・搬送患者の体重差の許容
- ・通常ストローク外における急激な加速度増加の防止

これらの要件を満たす理想的な弾性特性を図示すると図 3 となる。その弾性特性を実現するメカニズムを考案するとともに、模擬実験装置を製作し、その実用性を検討した。

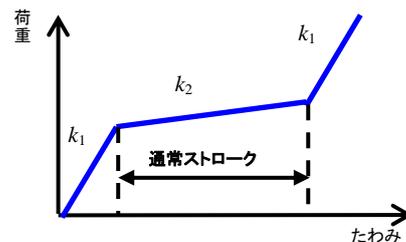


図 3 防振架台の理想弾性特性

### 3.3 電子制御用アクチュエータの製作とそのフィードバック則の検討

まず防振架台の電子制御基礎実験を行うために、図 4 に示す水平型一軸加振機（以下、加振機とする）と、図 5 に示す電子制御用アクチュエータを製作した。アクチュエータは、エネルギー源や、コスト、応答性の観点から、DC ブラシレスモータとボールねじから構成することにした。

次に電子制御用アクチュエータの制御則の候補をいくつか挙げ、数値計算によって比

較検討した。実際の防振架台では、アクチュエータの出力を抑える必要があることや、体重変動などのパラメータ変動、摩擦、観測雑音の存在といった問題がある。各フィードバック則においてそれらの問題がどのように影響するかを、制御入力 of 最大値、感度特性、入力外乱抑制特性、観測雑音除去特性の4つのフィードバック特性を用いて評価した。

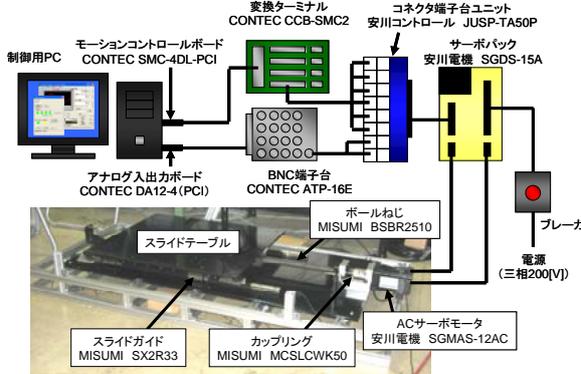


図4 水平型一軸加振機の構成  
ボールねじ DC ブラシレスモータ

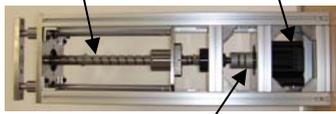


図5 電子制御用アクチュエータ

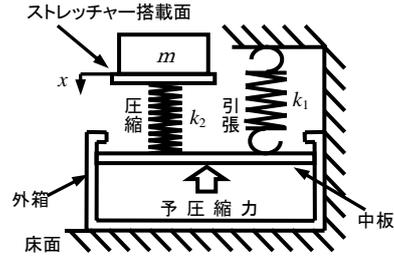
#### 4. 研究成果

##### 4.1 非線形ばね機構

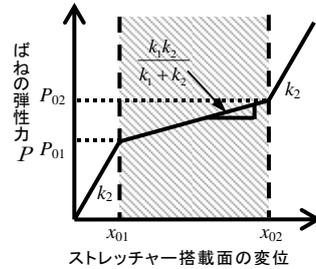
先述の理想的な弾性特性を持つばね機構として、圧縮ばねと引張ばねを組み合わせた非線形ばね機構 (図 6(a)) を考案した。この機構は中板が外箱によって拘束される構造となっており、ばね定数  $k_1$  の引張ばねによって予圧縮力  $P_{01}$  が与えられている。荷重が予圧縮力  $P_{01}$  を超えるまでは、ばね定数  $k_2$  の圧縮ばねのみが作動する。荷重が予圧縮力  $P_{01}$  を超えると圧縮ばねと引張ばねの両方が作動し、それらのばねが直列接続される形となる。このときのばね定数は  $k_1 k_2 / (k_1 + k_2)$  となり、見かけのばね定数は小さくなる。見かけのばね定数を一番小さくできるのは  $k_1 = k_2$  のときであり、このときそのばね定数は  $k_1 / 2 (= k_2 / 2)$  となる。さらに荷重が  $P_{02}$  を超えると中板が外箱の底面まで下降し、底面に到達した後は再びばね定数  $k_2$  の圧縮ばねのみが作動する。

このばね機構の理論的な弾性特性を図 6(b) に示す。斜線部の弾性特性を通常ストロークとして使用することで、ある程度の荷重を支持しながら平衡位置での見かけのばね定数を小さくすることができる。また、引張ばねの上端接続位置を可変とすることで予圧縮力  $P_{01}$  を調整できると考えられる。さらに、斜線部の両端にばね定数の大きな弾性特性

を持たせることができるため、ストレッチャー搭載面が通常ストロークを超えた場合でも急激な加速度の増加を防ぐ役割がある。図 7 に示す実験装置を製作し、考案した非線形ばね機構の弾性特性を検証した。その実験結果の一つを図 8 に示す。この図から、図 6(b) に示す理想的な弾性特性を実現できていること、また引張ばねの上端位置を決定するパラメータ  $h_r$  に応じて予圧縮力  $P_{01}$  を可変できていることがわかる。つまり、搬送患者の体重差が与える悪影響をこのばね機構によって補正可能であることを実証できた。

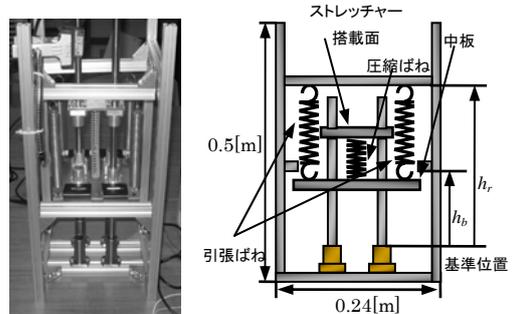


(a) 考案した非線形ばね機構



(b) 理論的な弾性特性

図6 考案した非線形ばね機構



(a) 外観

(b) 構成図

図7 非線形ばね機構の実験装置

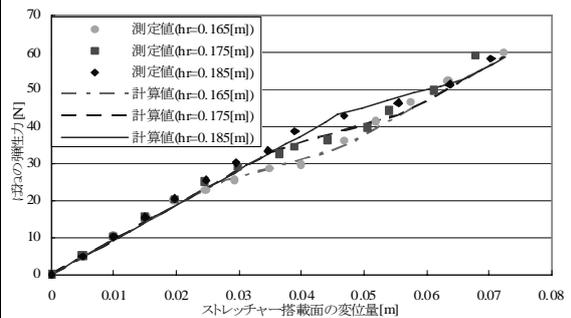


図8 実験結果 (非線形ばね機構の弾性特性)

先述のばね機構を実際の防振架台に組み込むにあたってその設置スペースの確保が問題となった。また、圧縮ばねが長大であると座屈現象を起こし、所望の弾性特性が得られなくなることが判明した。これらの問題に対する解決策として、ワイヤとプーリを用いて引張ばねのみを横に配置した機構(図9(a))を新たに考案した。引張ばねは、実際の搭載患者質量を考慮し、かつ $k_1 = k_2$ となるよう自然長0.269[m]、ばね定数1500[N/m]のばねを4本並列接続させて、中板及びストレッチャー搭載部下側に設置した。通常ストロークは、搭載患者質量を考慮して0.377[m]とした。詳細については割愛するが、実験によってこの防振架台が図6(b)の理想的な弾性特性を有することを確認した。

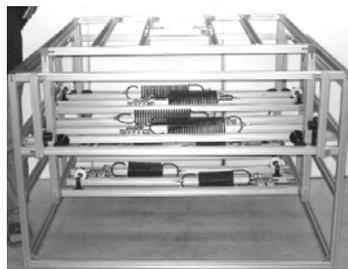
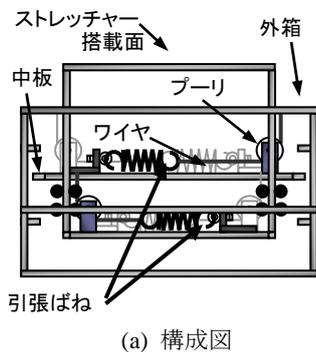


図9 考案したばね機構を有する防振架台

#### 4.2 電子制御用アクチュエータの制御則

電子制御用アクチュエータに適用する制御則を、(1)固有角周波数付近の伝達ゲインを抑える制御則、(2)固有角周波数を低周波数側へと見かけ上設定できる制御則、という2つの指標に基づいて、スカイフックダンパ制御、加速度フィードバック制御、変位フィードバック制御を選定した。

実際の防振架台では、アクチュエータの出力を抑える必要があることや、体重変動などのパラメータ変動、摩擦、観測雑音の存在といった問題がある。そこで、各制御系においてこれらの問題がどのように影響するかを、制御入力値の最大値、感度特性、入力外乱抑制特性、観測雑音除去特性の4つのフィードバック特性を用いて評価した。各制御則におけるフィードバック信号は、加速度フィードバック制御では加速度センサから加速度信号

を、スカイフックダンパ制御ではその加速度信号の1階積分による速度信号を、変位フィードバック制御では直動式のポテンシオメータからの変位信号を利用するものとした。

図10は各制御則に対する制御入力値の最大値を比較したものである。この図からわかるように、スカイフックダンパ制御は他の制御則に比べて制御入力値の最大値が抑えられている。図11は感度特性について評価したものである。防振架台における感度特性は、搬送患者の体重変動といったパラメータ変動の影響を表す指標である。この図からわかるように、 $0.4 \leq \omega \leq 2$  [rad/s]の周波数帯域においてスカイフックダンパ制御は、他の制御則に比べてパラメータ変動の影響が少ない。図12は入力外乱抑制特性について評価したものである。実際の防振架台の入力外乱としては、機構に存在する摩擦が挙げられる。この図からわかるように、スカイフックダンパ制御、変位フィードバック制御と比べて、加速度フィードバック制御は入力外乱による影響が少なくなる。これは、それぞれの制御則がフィードバックしている信号の差異によるものと考えられる。図13は観測雑音除去特性について評価したものである。図からわかるように、加速度フィードバック制御、変位フィードバック制御と比べて、スカイフックダンパ制御は観測雑音による影響が少なくなる。特に、 $\omega \geq 20$  [rad/s]の高周波数帯域において良好な特性を示す。これは、センサからの測定信号を加速度フィードバック制御、変位フィードバック制御がそのままフィードバックしているのに対し、スカイフックダンパ制御は1階積分した後にフィードバックしているため観測雑音による影響を少なくできる。

以上をまとめると、スカイフックダンパ制御が制御入力値の最大値、感度特性、観測雑音除去特性において他の制御則と比較して良好な特性を示した。ただし、入力外乱抑制特性において加速度フィードバック制御が良好な特性を示したので、スカイフックダンパ制御の入力外乱抑制特性を改善するためには、加速度フィードバック制御との併用が有効となることが明らかとなった。

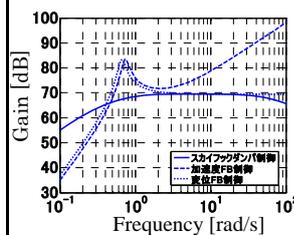


図10 制御入力値の最大値

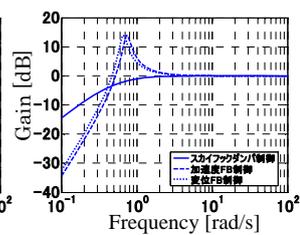


図11 感度特性

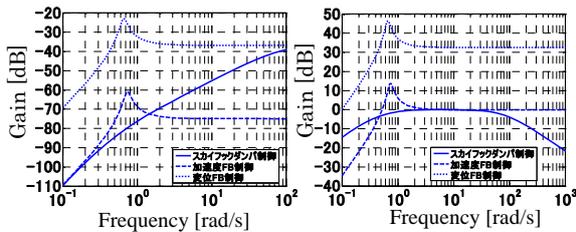


図 12 入力外乱抑制特性 図 13 観測雑音除去特性

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

## 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 0 件)

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 青木 怜史・外山 茂浩・池田 富士雄・瀬田 広明、小型船舶による救急患者搬送用の防振架台に関する研究、第 14 回高専シンポジウム in 高知、345、2009.
- ② 福嶋 祐一・外山 茂浩・池田 富士雄・瀬田、小型船舶における電子制御防振架台に関する研究、第 14 回高専シンポジウム in 高知、347、2009.
- ③ 青木 怜史、外山 茂浩、池田 富士雄、小型船舶用防振架台のばね機構に関する研究、高専・長岡技科大 (機械系) 教員交流研究集会、研究情報交換会予稿集、K-13、2009.
- ④ 福嶋 祐一、外山 茂浩、池田 富士雄、小型船舶用防振架台の能動制御に関する研究、高専・長岡技科大 (機械系) 教員交流研究集会、研究情報交換会予稿集、K-14、2009.
- ⑤ 福嶋 祐一、外山 茂浩、池田 富士雄、瀬田 広明、小型船舶における能動型防振架台のフィードバック特性の検討、第 15 回高専シンポジウム in いわき、126、2010.
- ⑥ 青木 怜史、外山 茂浩、池田 富士雄、瀬田 広明、能動型防振架台における非線形ばね機構の基礎研究、第 15 回高専シンポジウム in いわき、127、2010.

〔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〕

## 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