

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7573190号
(P7573190)

(45)発行日 令和6年10月25日(2024.10.25)

(24)登録日 令和6年10月17日(2024.10.17)

(51)国際特許分類

F I

F 1 6 F 15/02 (2006.01)

F 1 6 F 15/02 C

E 0 4 H 9/02 (2006.01)

F 1 6 F 15/02 A

E 0 4 H 9/02 3 3 1 A

E 0 4 H 9/02 3 3 1 D

E 0 4 H 9/02 3 4 1 D

請求項の数 10 (全20頁)

(21)出願番号 特願2019-134011(P2019-134011)
 (22)出願日 令和1年7月19日(2019.7.19)
 (65)公開番号 特開2021-17932(P2021-17932A)
 (43)公開日 令和3年2月15日(2021.2.15)
 審査請求日 令和4年6月17日(2022.6.17)
 審判番号 不服2023-19196(P2023-19196/J
 1)
 審判請求日 令和5年11月10日(2023.11.10)

(73)特許権者 000000549
 株式会社大林組
 東京都港区港南二丁目15番2号
 (73)特許権者 518462765
 株式会社Laboro.AI
 東京都中央区銀座八丁目11番1号
 (74)代理人 110000176
 弁理士法人一色国際特許事務所
 (72)発明者 青山 優也
 東京都清瀬市下清戸4丁目640番地
 株式会社大林組技術研究所内
 (72)発明者 山中 昌之
 東京都港区港南2丁目15番2号 株式
 会社大林組内
 (72)発明者 中塚 光一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 構造体の制振システム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

支持端と、

前記支持端と所定方向に並ぶ第1質点と、

前記支持端と前記第1質点を結ぶ第1バネ要素であって、前記所定方向と直交する直交方向に沿って作用する弾性反力を発生する第1バネ要素と、

前記第1質点に対して前記直交方向に相対変位可能な第2質点と、

前記第1質点に接続され、前記第2質点を前記直交方向に加振するアクチュエータと、を有する質点モデルで表現される構造体の制振システムであって、

前記アクチュエータの加振力を制御する制御則を、強化学習を用いて定め、

前記第2質点を前記第1質点の振動を抑制するマスダンパーのマスとし、

前記強化学習における報酬を、前記第1質点の保存量に基づいて定め、

前記強化学習は、ある環境におかれたエージェントが、環境との相互作用を通じて、最適な行動規則を獲得するための枠組みであり、学習波を入力とする質点モデルのシミュレーションを複数回繰り返し行う、

ことを特徴とする構造体の制振システム。

【請求項2】

請求項1に記載の構造体の制振システムであって、

前記強化学習は、行動価値関数を用いて最適方策を獲得する学習であり、前記行動価値関数は、ある状態にてある行動を選択し、その後にある方策に基づいて行動を選択し続け

10

20

た時に将来にわたり得られる累積報酬の期待値を、全ての状態と行動の組み合わせについてテーブル形式で定義したものである、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の構造体の制振システムであって、
状態 s_t 、報酬 r_t 、行動 a_t について、

次式に従って 行動価値関数 ($Q(s_t, a_t)$) の更新を繰り返すことにより、累積報酬が最大化される最適方策を獲得する、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha \left\{ r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) \right\} \quad \dots \quad (17)$$

10

ここで、 α は学習率 ($0 < \alpha < 1$) で、行動価値関数の更新スピードを調整する係数、 γ は割引率 ($0 < \gamma < 1$) で、将来における最良の Q 値 ($\max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1})$) をどれだけ割り引いて考慮するかを定める係数である。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の構造体の制振システムであって、
行動した結果の報酬 (r_{t+1}) と前記最良の Q 値を Q テーブルに反映する、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

20

【請求項 5】

請求項 1 に記載の構造体の制振システムであって、
前記強化学習は、行動価値関数を用いて最適方策を獲得する学習であり、

深層学習を導入し $Q(s, a)$ をパラメータ θ のニューラルネットワークで関数近似 ($Q(s, a) \doteq Q(s, a; \theta)$) することで、次式 (18) で定義する損失関数 $L(\theta_t)$ を最小化する最適な $Q(s_t, a_t; \theta_t)$ を獲得する、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

$$L(\theta_t) = E \left[\left\{ r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta_{t-1}) - Q(s_t, a_t; \theta_t) \right\}^2 \right] \quad \dots \quad (18)$$

30

【請求項 6】

請求項 5 に記載の構造体の制振システムであって、
上記強化学習の次に、学習により得られた制御則を確認する (S103)、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

【請求項 7】

請求項 6 に記載の構造体の制振システムであって、
前記学習により得られた制御則の結果の良否を判定し、結果が不良であれば、再度、パラメータの設定を行う、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

40

【請求項 8】

請求項 6 に記載の構造体の制振システムであって、
前記学習により得られた制御則の結果の良否を判定し、結果が良好であれば、実装を行う、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

【請求項 9】

請求項 1 乃至請求項 8 の何れかに記載の構造体の制振システムであって、
前記アクチュエータと並列に設けられ、バネ方向が前記直交方向である第 2 バネ要素を有する、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

50

【請求項 10】

請求項 1 乃至請求項 9 の何れかに記載の構造体の制振システムであって、
前記所定方向は鉛直方向であり、
前記直交方向は水平方向であり、
前記第 1 質点の上に、前記第 2 質点を前記水平方向に転がり可能に支承する転がり支承を有する、
ことを特徴とする構造体の制振システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、構造体の制振システムに関する。

【背景技術】

【0002】

各種外乱に起因する建築物の水平振動や、床の上下振動など、構造体の振動を低減させる手法として、質量体（マス）を能動的に動かすことによって制振する AMD（Active Mass Damper）が知られている（例えば、特許文献 1 参照）。AMD では、一般的に、制御工学に基づく制御則に従って制御を行っている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開平 1 - 275867 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

制御工学に基づく制御則では、制御理論が必要であり、AMD の能力を最大限に発揮させること（すなわち、マスを最適に動かすこと）が困難であった。

【0005】

本発明は、かかる課題に鑑みてなされたものであって、その目的とするところは、制振性能の向上を図ることにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記目的を達成するための主たる発明は、支持端と、前記支持端と所定方向に並ぶ第 1 質点と、前記支持端と前記第 1 質点を結ぶ第 1 パネ要素であって、前記所定方向と直交する直交方向に沿って作用する弾性反力を発生する第 1 パネ要素と、前記第 1 質点に対して前記直交方向に相対変位可能な第 2 質点と、前記第 1 質点に接続され、前記第 2 質点を前記直交方向に加振するアクチュエータと、を有する質点モデルで表現される構造体の制振システムであって、前記アクチュエータの加振力を制御する制御則を、強化学習を用いて定め、前記第 2 質点を前記第 1 質点の振動を抑制するマスダンパーのマスとし、前記強化学習における報酬を、前記第 1 質点の保存量に基づいて定め、前記強化学習は、ある環境におかれたエージェントが、環境との相互作用を通じて、最適な行動規則を獲得するための枠組みであり、学習波を入力とする質点モデルのシミュレーションを複数回繰り返し行う、
ことを特徴とする。

本発明の他の特徴については、本明細書及び添付図面の記載により明らかにする。

【発明の効果】

【0007】

本発明によれば、制振性能の向上を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図 1】図 1 A は、第 1 実施形態に係る構造体の制振システム構成を示す図である。図 1

10

20

30

40

50

Bは、図1Aをモデル化した図である。図1Cは、図1Bの等価図である。

【図2】アクチュエータ40の制御部分の構成を示すブロック図である。

【図3】比較例におけるAMD制御システム構築のフロー図である。

【図4】本実施形態におけるAMD制御システム構築のフロー図である。

【図5】図5Aは、第2実施形態に係る構造体の制振システム構成を示す図である。図5Bは図5Aをモデル化した図である。

【図6】図6Aは、第3実施形態に係る構造体の制振システム構成を示す図である。図6Bは図6Aをモデル化した図である。

【図7】第3実施形態の変形例を示す図である。

【図8】第3実施形態の別の変形例を示す図である。

10

【図9】図9Aは、第4実施形態に係る構造体の制振システム構成を示す図である。図9Bは図9Aをモデル化した図である。

【図10】第4実施形態の変形例を示す図である。

【図11】第4実施形態の別の変形例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

本明細書及び添付図面の記載により、少なくとも以下の事項が明らかとなる。

【0010】

支持端と、前記支持端と所定方向に並ぶ第1質点と、前記支持端と前記第1質点を結ぶ第1バネ要素であって、前記所定方向と直交する直交方向に沿って作用する弾性反力を発生する第1バネ要素と、前記第1質点に対して前記直交方向に相対変位可能な第2質点と、前記第1質点に接続され、前記第2質点を前記直交方向に加振する加振器と、を有する質点モデルで表現される構造体の制振システムであって、前記加振器の加振力を制御する制御則を、強化学習を用いて定めたことを特徴とする構造体の制振システムが明らかとなる。

20

このような構造体の制振システムによれば、制御理論に基づく制御則（例えば最適制御）よりも優れた制御則を実現できる。これにより、加振器によって第2質点を加振することによる制振（AMD）の能力を高めることができ、制振性能の向上を図ることができる。

【0011】

かかる構造体の制振システムであって、前記強化学習における報酬を、前記第1質点の保存量に基づいて定めることが望ましい。

30

このような構造体の制振システムによれば、優れた制御則を得ることができる。

【0012】

かかる構造体の制振システムであって、前記保存量を対戦型とすることが望ましい。

このような構造体の制振システムによれば、優れた制御則を得ることができる。

【0013】

かかる構造体の制振システムであって、前記保存量がエネルギーであることが望ましい。

このような構造体の制振システムによれば、さらに優れた制御則を得ることができる。

【0014】

かかる構造体の制振システムであって、前記エネルギーは、少なくとも運動エネルギーを含むことが望ましい。

40

このような構造体の制振システムによれば、制振性能を高めることができる。

【0015】

かかる構造体の制振システムであって、前記エネルギーは、バネ系の位置エネルギーをさらに含むことが望ましい。

このような構造体の制振システムによれば、制振性能をより高めることができる。

【0016】

かかる構造体の制振システムであって、前記加振器と並列に設けられ、バネ方向が前記直交方向である第2バネ要素を有していてもよい。

このような構造体の制振システムによれば、第2バネ要素を有していても制振性能を高

50

めることができる。

【 0 0 1 7 】

かかる構造体の制振システムであって、前記所定方向は鉛直方向であり、前記直交方向は水平方向であり、前記第 1 質点の上に、前記第 2 質点を前記水平方向に転がり可能に支承する転がり支承を有していてもよい。

このような構造体の制振システムによれば、第 1 質点の上で第 2 質点を水平方向に加振する（転がす）ことで第 1 質点の水平方向の振動を制振できる。

【 0 0 1 8 】

かかる構造体の制振システムであって、前記所定方向は鉛直方向であり、前記直交方向は水平方向であり、前記第 2 バネ要素は、前記第 1 質点の上で前記第 2 質点を支承する積層ゴムであってもよい。

このような構造体の制振システムによれば、第 1 質点の上に積層ゴムで支承された第 2 質点を水平方向に加振することで第 1 質点の水平方向の振動を制振できる。

【 0 0 1 9 】

かかる構造体の制振システムであって、前記所定方向は水平方向であり、前記直交方向は鉛直方向であってもよい。

このような構造体の制振システムによれば、例えばブリッジなどの鉛直方向の振動を制振できる。

【 0 0 2 0 】

＝ ＝ 第 1 実施形態 ＝ ＝

< < 制振システム構成について > >

図 1 A は、第 1 実施形態に係る構造体の制振システム構成を示す図であり、図 1 B は、図 1 A をモデル化した図であり、図 1 C は、図 1 B の等価図である。また、図 2 は、アクチュエータ 4 0 の制御部分の構成を示すブロック図である。

【 0 0 2 1 】

図 1 A に示すように第 1 実施形態の制振対象となる構造体は、長手方向の両端（支持端 1 2）が固定され、水平方向に掛け渡されたブリッジ 1 0 である。このブリッジ 1 0 の長手方向の中央部に、バネ 3 0 とアクチュエータ 4 0 を介して、マス 2 0 が設けられている。また、図 2 に示すように、ブリッジ 1 0 及びマス 2 0 の状態を検出するセンサ群 6 0（例えば、加速度を検出する加速度センサ、変位（相対変位等）を検出する変位センサ等）と、センサ群 6 0 の各センサの出力に基づいて状態量の計算やアクチュエータ 4 0 の加振の制御を行うコントローラ 7 0 が設けられている。

【 0 0 2 2 】

図 1 A を質点モデルにモデル化すると図 1 B に示す 2 質点のモデルとなり、さらに簡易化すると図 1 C のようになる。図 1 B、図 1 C では、ブリッジ 1 0 とマス 2 0 がそれぞれ質点で示されている。このうち、ブリッジ 1 0 を示す質点は第 1 質点に相当し、マス 2 0 を示す質点は第 2 質点に相当する。

【 0 0 2 3 】

図 1 B 及び図 1 C の質点モデルにおいて、ブリッジ 1 0 は、支持端 1 2 と水平方向に並んでいる。また、図 1 B 及び図 1 C の質点モデルに示すバネ要素 1 4（第 1 バネ要素に相当）は、ブリッジ 1 0 の剛性に相当する。バネ要素 1 4 は、支持端 1 2 とブリッジ 1 0（第 1 質点）を結んでおり、ブリッジ 1 0 と支持端 1 2 の並ぶ方向（ここでは水平方向）と直交する方向（ここでは鉛直方向）に沿って作用する弾性反力を発生する。

【 0 0 2 4 】

マス 2 0 は、AMD 制御を行うための錘（質量体）であり、バネ 3 0 を介してブリッジ 1 0 の上に設けられている（ブリッジ 1 0 と鉛直方向に並んでいる）。これにより、マス 2 0 はブリッジ 1 0 に対して、鉛直方向に相対変位可能である。

【 0 0 2 5 】

バネ 3 0（第 2 バネ要素に相当）は、バネ方向が鉛直方向となるように、ブリッジ 1 0 とマス 2 0 の間に配置（アクチュエータ 4 0 と並列に配置）されてマス 2 0 を支えている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 6 】

アクチュエータ 4 0 (加振器) は、ブリッジ 1 0 に接続されており、コントローラ 7 0 による制御に基づいてマス 2 0 を鉛直方向に加振する。

【 0 0 2 7 】

このアクチュエータ 4 0 の加振力 (制御力) を調整 (制御) することにより、ブリッジ 1 0 の上を人が歩行することに起因するブリッジ 1 0 の縦揺れ (上下振動) を抑制することができる。

【 0 0 2 8 】

図 1 C に示すように、本実施形態の構造体の制振システムは 2 質点系のモデルであり、次式 (1) の状態方程式を数値解析により解くことで挙動をシミュレーションできる。

10

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad \dots \dots (1)$$

【 0 0 2 9 】

なお、式 (1) の各項について以下の式 (2) ~ 式 (5) に示す。

$$\dot{x}(t) = \begin{Bmatrix} \ddot{q}_A(t) \\ \ddot{q}_B(t) \\ \dot{q}_A(t) \\ \dot{q}_B(t) \end{Bmatrix} \quad \dots \dots (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} -2(1+\mu)h_A\omega_A & 2h_B\omega_B & -(1+\mu)\omega_A^2 & \omega_B^2 \\ 2\mu h_A\omega_A & -2h_B\omega_B & \mu\omega_A^2 & -\omega_B^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots \dots (3) \quad 20$$

$$x(t) = \begin{Bmatrix} \dot{q}_A(t) \\ \dot{q}_B(t) \\ q_A(t) \\ q_B(t) \end{Bmatrix} \quad \dots \dots (4)$$

$$B = \begin{Bmatrix} -\frac{1}{m_B} \left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) \\ \frac{1}{m_B} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots \dots (5) \quad 30$$

ここで、

40

50

$q_A(t)$: マス鉛直変位 (m)	
$q_B(t)$: ブリッジ鉛直変位 (m)	
$\dot{q}_A(t)$: マス速度 (m/s)	
$\dot{q}_B(t)$: ブリッジ速度 (m/s)	
$\ddot{q}_A(t)$: マス加速度 (m/s ²)	10
$\ddot{q}_B(t)$: ブリッジ加速度 (m/s ²)	
m_A : マス質量 (kg)	
m_B : ブリッジ 1 次有効質量 (kg)	
k_A : マス剛性 (N/m)	
k_B : ブリッジ剛性 (N/m)	20
ω_A : マス固有振動数	
ω_B : ブリッジ 1 次固有振動数	
h_A : マス減衰定数	
h_B : ブリッジ減衰定数	
$u(t)$: 制御力 (N)	30
$f(t)$: 歩行荷重 (N)	

【 0 0 3 0 】

<< AMD 制御 (比較例) >>

図 3 は、比較例における AMD 制御システム構築のフロー図である。ここでは、アクティブ制御の一例として知られる最適制御を用いている。

【 0 0 3 1 】

まず、各パラメータの設定を行う (S 0 0 1)。ここでは、[マス 2 0, ブリッジ 1 0] の [変位, 速度] および制御力の絶対値を、各ステップでできるだけ小さくすることを目的として、評価関数 J を以下の式 (6) に示すように、[マス 2 0, ブリッジ 1 0] の [変位, 速度] および制御力の 2 乗に重みをかけて足し合わせたものとして定義する。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \{x(t)^T Q x(t) + \varepsilon u(t)^2\} dt \quad \dots \dots \dots (6)$$

【 0 0 3 2 】

式 (6) において、 $x(t)$ は上述の式 (4)、 $u(t)$ は制御力、 ε は制御力にかかる重みである。また、 Q は $x(t)$ にかかる重みであり、

$$Q = \begin{bmatrix} q1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q4 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

である。

【 0 0 3 3 】

ここで、式 (7) の $q_1 \sim q_4$ 及び ε の値 (重み) は、例えばブリッジ 1 0 の変位 $q_B(t)$ を小さくしたいときはこれにかかる係数 q_4 を大きくするなどして、全体の

バランスの中で経験的・試行錯誤的に調整する。

10

【 0 0 3 4 】

なお、最適制御フィードバック理論を用いると、 ω_A が以下の最適同調条件の式 (8) を満足するとき、 $q_1 = q_2 = q_3 = 0$ とし、 q_4 と ε の重みのみ調整すれば

よい。

20

$$\omega_A = \omega_B / (1 + \mu) \dots \dots \dots (8)$$

【 0 0 3 5 】

次に、制御則のフィードバックゲインを計算する (S 0 0 2) 。評価関数 J を最小にする $x(t)$ のフィードバックゲインを理論的に求めると、制御力 $u(t)$ は、次式 (9) で表される。

$$u(t) = -\frac{1}{\varepsilon} B^T P x(t) \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 P は次式 (1 0) で表されるリカッチ方程式の解である。

30

$$A^T P + P A - \frac{1}{\varepsilon} P B B^T P + Q = 0 \dots \dots \dots (10)$$

【 0 0 3 6 】

なお、制御力 $u(t)$ はゲイン $G_1 \sim G_4$ を用いて [マス, ブリッジ] の [変位, 速度] の線形結合の形で以下の式 (1 1) のように書き換えられる。

$$u(t) = G_1 \ddot{q}_A(t) + G_2 \ddot{q}_B(t) + G_3 \dot{q}_A(t) + G_4 \dot{q}_B(t) \dots \dots \dots (11)$$

40

この方程式を解くことにより制御則が得られる。

【 0 0 3 7 】

次に、歩行加振力を入力するシミュレーションにより、得られた制御則の効果を確認する (S 0 0 3) 。

【 0 0 3 8 】

制御則の確認結果が不良であれば (S 0 0 4 で No) 、ステップ S 0 0 1 に戻り、パラメータを再設定する。一方、制御則の確認結果が良好であれば (S 0 0 4 で Yes) 、実装を行う (S 0 0 5) 。すなわち、センサ群 6 0 の各センサ (加速度センサや変位センサなど) からリアルタイムに取得・計算した $x(t)$ を基に、制御力 $u(t)$ を計算しアクチュエータ 4 0 に与える。

50

【 0 0 3 9 】

なお、この例では最適制御（最適フィードバック制御、LQ制御、LQR制御、最適レギュレータ制御も同義）について説明したが、これ以外のアクティブ制御として、LQG制御、双線形最適制御、瞬間最適制御、準最適制御、準最適併合制御、極配置制御、スカイフック制御、H 制御、PID制御、スライディングモード制御、On/Off制御、EF (Energy Function)制御、ファジィ制御、予測制御、履歴制御、直接出力フィードバック制御、直接速度フィードバック制御（DVFB制御）、外乱相殺制御、 μ シンセシス制御、ゲインスケジュールド制御などの制御方法（制御則）が知られている。

【 0 0 4 0 】

但し、上述したような制御則を用いてもAMDの能力を最大限に発揮した制御が行えないおそれがあった。具体的には、上述の最適制御では状態量の線形結合で表される制御力を前提としているため、各種制約に対して安全率を見込んで設計せざるを得ず、非効率な制御則となるおそれがあった。また、物件ごとに異なる各種制約を満足するように、設計者が複数のシミュレーションによりパラメータを試行錯誤的に調整する必要があった。そのため、設計者の経験による所が大きく、必ずしも最適な解が得られない上、設計に時間と労力を要していた。また、理論解を求める必要があるため、評価関数の自由度が低く、特定の外乱に対して最適化することが困難であった。また、主にコンクリート構造物のように、非線形な復元力を有する構造物に対して線形の理論を適用することは困難であった。

10

【 0 0 4 1 】

そこで、本実施形態ではAMD制御に人工知能（artificial intelligence: 以下AI）を用いることにより、制振性能の向上を図っている。なお、AIによる機械学習は、教師あり学習、教師なし学習、強化学習の3つに分類されるが、本実施形態では、このうち強化学習を用いた。

20

【 0 0 4 2 】

<< AMD制御（本実施形態） >>

図4は、本実施形態におけるAMD制御システム構築のフロー図である。本実施形態では、上述したようにAIによる強化学習を用いている。強化学習とは、教師データが無くても、試行錯誤を通じて価値を最大化するような行動を学習するものである。また、強化学習のアルゴリズムとしては、Q-Learning及びDQN（Deep Q-Learning）を用いた。

30

【 0 0 4 3 】

< パラメータ設定 >

まず、各パラメータ（状態 s_t 、報酬 R_t 、行動 a_t ）の設定を行う（S101）。

【 0 0 4 4 】

〔 行動 a_t 〕

行動 a_t は、時刻 t においてアクチュエータ40に出力する制御力である。アクチュエータ40の制御力について、離散化数と最大制御力を設定する。本実施形態では以下のように最大制御力100(N)とし、5分割で設定した。

$$a_t = \{-100, -50, 0, 50, 100\} \quad \dots (12)$$

【 0 0 4 5 】

〔 状態 s_t 〕

状態 s_t は、時刻 t におけるブリッジ10、マス20の状態量であり、何を入力として行動 a_t を決定するかを設定するものである。状態量を小さくした行動に報酬を与えたい所であるが、パネに起因する振動においては、状態量が小さくなったのが、振動により自然に小さくなったものなのか、アクチュエータ40の制御により小さくなったものなのかを区別する必要がある、特に、本実施形態のように対戦型の報酬設定（後述）とした場合、両者の振動数がずれていると、両者の応答中の位相差によって振動の影響が顕著になる。

40

【 0 0 4 6 】

これを明確にするために、振動による影響をできるだけ排除し、応答中の位相に関わらない状態量として以下の式（13）で定義する保存量 $S(t)$ を考える。

50

$$S(t) = f(P(t)) \quad \dots \quad (13)$$

$$P(t) = \alpha \cdot |q_B(t)|^n + \beta \cdot |\dot{q}_B(t)|^n + \gamma \cdot q_B(t)\dot{q}_B(t) \quad \dots \quad (14)$$

特に、 $n = 2$, $\alpha = \frac{1}{2}K_B$, $\beta = \frac{1}{2}m_B$, $\gamma = 0$ のとき、 $P(t)$ はブリッジ 10 の力学的エネルギー（運動エネルギー＋バネ系の位置エネルギー）となる（条件 1 とする）。また、 $\alpha = \frac{1}{1-h_B^2}$, $\beta = \frac{1}{\omega_B^2(1-h_B^2)}$, $\gamma = \frac{2h_B}{\omega_B(1-h_B^2)}$ のとき、 $P(t)$ は所定座標系における原点との距離の 2 乗となる。

10

【0047】

また、 $\frac{2}{K_B(1-h_B^2)}$ （定数）で括りだして整理すると、 $\alpha = \frac{1}{2}K_B$, $\beta = \frac{1}{2}m_B$, $\gamma = \frac{1}{2}c_B$ となり、力学的エネルギー＋減衰項となる（条件 2 とする）。簡易的に、 $h_B = 0$ （ $c_B = 0$ ）としたものは、力学的エネルギー（条件 1）と一致する。

20

【0048】

また、 $f(x)$ は単調増加関数である。特に、 $f(x) = x$ のときは、 $S(t)$ がエネルギーの次元となり、 $f(x) = \sqrt{x}$ のときは、距離の次元となる。 $f(x) = \log(x)$ の場合は、指数関数的に減衰する自由振動の振幅を線形に変換することができる。また、これらに限らず、単調増加関数であれば何でもよく、例えば、 $a > 0$ として、 $f(x) = a^x$ 、 $f(x) = x^a$ などとしてもよい。

30

【0049】

〔報酬 r_t 〕

報酬 r_t は、応答低減効果に応じた値であり、一般的に、1 step 毎（行動の刻み時間毎：例えば、0.01 秒毎）に各時刻の観測物理量から計算される即時報酬 sr_t と、過去の履歴に基づく非即時報酬 rr_t の和で定義している。

$$r_t = sr_t + rr_t \quad \dots \quad (15)$$

40

【0050】

（即時報酬 sr_t について）

本実施形態で設定した報酬を拡張すると、以下の式（16）で表すような対戦型とすることができる。

50

$$sr_t = \epsilon S_T(t) - \delta S_L(t) \quad \dots \quad (16)$$

ここで、 $S_L(t)$ ：学習対象の保存量

$S_T(t)$ ：対戦相手（ターゲット）の保存量

δ ：学習対象のゲイン（ $\delta > 0$ ）

ϵ ：対戦相手のゲイン（ $\epsilon \geq 0$ ）

10

【0051】

・対戦相手は、マスなし、パッシブ制御（減衰ありでも減衰なしでも良い）、既往のアクティブ制御、自分自身のアクティブ制御（自己対戦型）などについて、事前の応答解析を行った上で $S(t)$ を計算したものでよいし、適宜設定した時間 t に関する関数 $F(t)$ でもよい（0や定数も含む）。

・学習対象がセミアクティブの場合、対戦相手をセミアクティブとしても良いし、前述の対戦相手としてもよい。

・ $\epsilon =$ が標準であるが、 ϵ の値を よりも小さくすることで、より強い対戦相手を設定できる。

・最初からあまり強い相手をターゲットにすると学習が収束しない。徐々に対戦相手を強くしていくとよい。

20

【0052】

また、その他の即時報酬 sr_t として、以下の例が挙げられる（〔〕内は複合任意）。

・ $S(t)$ を直近 n タイムステップの〔ブリッジ10・マス20〕の〔変位・速度・加速度〕の〔絶対値・そのままの値・逆数・逆数の絶対値〕の〔平均値・総和・最大値〕の線形結合とする。

・ $S(t)$ の〔差分・2回差分・微分・2回微分・逆数〕を報酬とする（この場合、対戦相手はなし）。

・ $S(t)$ に、マス20の項を入れても良い。

・収束するまでステップ毎にマイナスの報酬を与えてもよい。

・クリアランスを超えた場合に、マイナスの報酬を与えてもよい。

・報酬のclippingを行ってもよい。

30

【0053】

（非即時報酬 rr_t について）

・一定ステップ毎（終了時のみも含む）に、時系列の揺れの大きさを表す特殊な指標に応じた報酬を与える。なお、特殊な指標とは、居住性能評価ランク、計測震度、Unity等を用いて室内環境やラックのシミュレーションをし、被災状況や積荷落下状況を評価した値などである。

・その他、一定の所望の状態（例えば、 $S_T(t)$ が、一定ステップ以上、一定値以下を記録した場合等）を達成した場合に、プラスの報酬を与える。

40

【0054】

<学習の実行>

次に、学習を実行する（S102）。前述したように本実施形態では強化学習を実行する。強化学習とは、ある環境におかれたエージェントが、環境との相互作用を通じて、最適な行動規則を獲得するための枠組みである。ここでは、学習波を入力とする質点モデルのシミュレーションを複数回繰り返し、以下に従い学習を行う。

50

本実施形態では、減衰自由振動をできるだけ早く収束させることを目的として、学習波をインパルス波（0.01秒のみ5000Nを与える波形）とした。ここで、 $Q(s_t, a_t)$ は、ある状態 s_t にてある行動 a_t を選択し続けた時に得られる報酬の期待値の総和 G_T を定義したものである。

【0055】

〔Q学習〕

Q学習(Q-learning)は、行動価値関数(Q関数)を用いて最適方策を獲得する強化学習の代表的手法である。Q関数は、ある状態にてある行動を選択し続けた時に将来にわたり得られる累積報酬の期待値を、全ての状態と行動の組み合わせについてテーブル形式で定義したものである。次式に従ってQ関数の更新を繰り返すことにより、累積報酬が最大化される最適方策を獲得する。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha\{r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1})\} \quad \dots \quad (17)$$

ここで、 α は学習率($0 < \alpha < 1$)で、Q関数の更新スピードを調整する係数、 γ は割引率($0 < \gamma < 1$)で、将来におけるQ値(報酬)をどれだけ割り引いて考慮するかを定める係数である。

【0056】

そして、行動した結果の報酬(r_{t+1})と最良のQ値をQテーブルに反映する。これにより、累積報酬が最大化される最適なルールを獲得する。

【0057】

〔DQN〕

Q学習における $Q(s, a)$ は、全ての状態と行動の組み合わせを定義する必要があるため、状態変数が連続の場合、状態分割による離散化が必要になり状態観測精度が損なわれる。そこで、深層学習を導入し $Q(s, a)$ をパラメータ θ のニューラルネットワークで関数近似($Q(s, a) \doteq Q(s, a; \theta)$)することで、すべての (s, a) の組み合わせを定義することを回避する。深層学習を導入したQ学習はDQN(Deep Q-learning)と呼ばれ、次式(18)で定義する損失関数L

(θ_t)を最小化する最適な $Q(s_t, a_t; \theta_t)$ を獲得する。

$$L(\theta_t) = E \left[\{r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta_{t-1}) - Q(s_t, a_t; \theta_t)\}^2 \right] \quad \dots \quad (18)$$

【0058】

<制御則の確認>

10

20

30

40

50

次に、学習により得られた制御則を確認する（S 1 0 3）。本実施形態では、歩行加振力等を入力するシミュレーションにより、得られた制御則の効果を確認する。Q-Learningの場合は次式（19）、DQNの場合は次式（20）に示す通り、 G_t が最大になる行動 a_t を選択したものを制御力 $u(t)$ とする。

$$u(t) = \operatorname{argmax}_{a_t} Q(s_t, a_t) \quad (\text{Q-Learningの場合}) \quad \dots \quad (19) \quad 10$$

$$u(t) = \operatorname{argmax}_{a_t} Q(s_t, a_t; \theta_t) \quad (\text{DQNの場合}) \quad \dots \quad (20)$$

【0059】

そして、その結果の良否を判定する（S 1 0 4）。結果が不良であれば（S 1 0 4でN O）、ステップS 1 0 1に戻り再度パラメータを設定する。

【0060】

結果が良好であれば、（S 1 0 4でY E S）、実装を行う（S 1 0 5）。すなわち、センサ群60の各センサ（加速度センサ、変位センサ等）からリアルタイムに取得・計算した s_t を基に、式（19）又は式（20）にて計算した制御力 $u(t)$ をアクチュエータ40に与える。 20

【0061】

このような本実施形態（AI制御）によると、ステップS 1 0 3のシミュレーション、及び、ステップS 1 0 5の実装（実験）での検証において、比較例（最適制御）と比べて、高い制振効果が得られた。特に、強化学習のアルゴリズムとしてDQNを用いた場合に高い制振効果が得られた。

【0062】

また、報酬 r （即時報酬 sr_t ）の計算の一例として、変位、速度、加速度のそれぞれの絶対値を加算して負の係数を掛けることが考えられる。例えば、減衰自由振動においてできるだけ振動を小さくするように足し算するには、 30

$$S(t) = \omega_B \cdot |q_B(t)| + |\dot{q}_B(t)| \quad \dots \quad (21)$$

等とすればよい（条件3とする）。この条件3と、前述の条件1及び条件2を比較した場合、条件2（力学的エネルギー+減衰項）、条件1（力学的エネルギー）、条件3の順で振動を適切に制振できることが確認された。このように、強化学習における報酬をブリッジ10の力学的エネルギーに基づいて定めることで優れた制御則を得ることができ、これにより制振性能を高めることができる。 40

【0063】

以上説明したように、本実施形態では、AMD制御を行う制御則（アクチュエータ40の加振力を制御する制御則）をAIによる強化学習で獲得している。これにより、AMDの能力を最大限に発揮させることができ、制振性能の向上を図ることができる。

【0064】

また、AI制御では、最大制御力やクリアランス等の各種制約を、状態や報酬の形で定義することができる上、ニューラルネットワークを用いた非線形な制御が可能であるため、各種制約の中で制御効果を最大限に高めた制御則が得られる。

【0065】

また、状態や報酬の設定方法、各種ハイパーパラメータを定めておけば、物件ごとの試 50

行錯誤は少なく済む。そのため、安定した制御則が得られる上、設計に要する時間と労力が短縮される。

【 0 0 6 6 】

また、繰り返しのシミュレーションにより最適な制御則を逐次更新するため（理論解を得る必要がないため）、自由度の高い制御則の設計が可能である。例えば対戦型の報酬設定を考えると、優れた制御を対戦相手として更に制御効果を高めたり、制御効果はそのままに装置の制約を加味したカスタマイズを加えたりすることができる。また、外乱をインパルスにして自由振動に対して制御を最適化することも可能であるし、例えば、構造物に生じやすいと考えられる外乱に対して制御を最適化することも可能である。これにより、比較例（最適制御）よりも制振効果が優れた制御則や、より固有の環境に特化した制御則

10

【 0 0 6 7 】

＝ ＝ 第 2 実施形態 ＝ ＝

図 5 A は、第 2 実施形態に係る構造物の制振システム構成を示す図である。また、図 5 B は図 5 A をモデル化した図である。

【 0 0 6 8 】

図 5 A に示すように、第 2 実施形態の制振対象となる構造物は建物 1 0 0 であり、建物 1 0 0 の頂部にマス 2 0 0 が水平方向に転がり可能に配置されている（転がり型の頂部 A M D）。また、第 1 実施形態と同様に、建物 1 0 0 とマス 2 0 0 の状態を検出する各センサ（不図示）や、センサの出力に基づいてアクチュエータ 4 0 0 を制御するコントローラ

20

【 0 0 6 9 】

図 5 A を質点モデルにモデル化すると図 5 B に示す 2 質点のモデルとなる。図 5 B では、建物 1 0 0 とマス 2 0 0 がそれぞれ質点で示されている。このうち、建物 1 0 0 を示す質点は第 1 質点に相当し、マス 2 0 0 を示す質点は第 2 質点に相当する。

【 0 0 7 0 】

図 5 B の質点モデルにおいて、建物 1 0 0 は支持端 1 0 2（ここでは地盤）と鉛直方向（所定方向に相当）に並んでいる。また、図 5 B のバネ要素 1 0 4 は、建物 1 0 0 の剛性に相当する。バネ要素 1 0 4 は、支持端 1 0 2 と建物 1 0 0（第 1 質点）を結んでおり、建物 1 0 0 と支持端 1 0 2 の並ぶ方向（ここでは鉛直方向）と直交する方向（ここでは水平方向）に沿って作用する弾性反力を発生する。

30

【 0 0 7 1 】

マス 2 0 0 は、A M D 制御を行うための錘（質量体）であり、建物 1 0 0 の頂部に配置されている。また、建物 1 0 0 の上（建物 1 0 0 とマス 2 0 0 の間）には、マス 2 0 0 を水平方向に転がり可能に支承する転がり支承 5 0 0（ローラー等）が設けられている。これにより、マス 2 0 0 は、建物 1 0 0 に対して水平方向に相対変位可能となっている。

【 0 0 7 2 】

アクチュエータ 4 0 0（加振器）は、建物 1 0 0 に接続されて、マス 2 0 0 を水平方向に加振する。このアクチュエータ 4 0 0 の加振力（制御力）を調整（制御）することにより、建物 1 0 0 の横揺れ（水平振動）を抑制することができる。

40

【 0 0 7 3 】

この第 2 実施形態の場合においても、第 1 実施形態と同様に、アクチュエータ 4 0 0 を A I による制御則で制御することにより、制振性能の向上を図ることができる。

【 0 0 7 4 】

なお、ここでは転がり型（転がり支承）の A M D であったが、これには限られず、滑り型（滑り支承）の A M D であっても同様に制振することができる。

【 0 0 7 5 】

＝ ＝ 第 3 実施形態 ＝ ＝

図 6 A は、第 3 実施形態に係る構造物の制振システム構成を示す図である。また、図 6 B は図 6 A をモデル化した図である。なお、第 2 実施形態（図 5 A、図 5 B）と同一構成

50

の部分には同一符号を付し説明を省略する。

【 0 0 7 6 】

第 3 実施形態では、建物 1 0 0 とマス 2 0 0 との間に積層ゴム 3 0 1 が設けられている。積層ゴム 3 0 1 は、マス 2 0 0 を水平方向に変位可能に支承している。また積層ゴム 3 0 1 は、マス 2 0 0 が水平方向に変位した場合、元の位置に復元させる。これにより、図 6 B に示すように、建物 1 0 0 とマス 2 0 0 との間には、積層ゴム 3 0 1 の水平方向の剛性であるバネ要素 3 0 0 がアクチュエータ 4 0 0 と並列に設けられていることになる。この図 6 B は、第 1 実施形態の図 1 C と同じ質点モデル（但し方向は異なる）となるので、この場合も、アクチュエータ 4 0 0 を A I による制御則で制御することにより、制振性能の向上を図ることができる。

10

【 0 0 7 7 】

< 変形例 >

図 7 は、第 3 実施形態の変形例を示す図である。図 7 では、建物 1 0 0 の頂部において、マス 2 0 0 が振り子 3 0 2 によって吊り下げられている。これにより、マス 2 0 0 は、建物 1 0 0 に対して水平方向に相対変位可能となっている。また、振り子 3 0 2 の水平方向の剛性はバネ要素 3 0 0 に相当する。

【 0 0 7 8 】

また、図 8 は、第 3 実施形態の別の変形例を示す図である。この変形例では、建物 1 0 0 の頂部に台 3 0 3 が設けられている。台 3 0 3 の上面は、緩い勾配を持つすり鉢状に構成されている。そして、台 3 0 3 上には、転がり支承 5 0 0 によって転がり可能に支承されたマス 2 0 0 と、アクチュエータ 4 0 0 が設けられている。これにより、マス 2 0 0 が水平方向に変位した場合に、中央に戻る復元力（剛性：バネ要素 3 0 0 ）を発生する構造となっている。

20

【 0 0 7 9 】

これらの変形例（図 7 及び図 8 ）の場合も、モデル化すると図 6 B と同じモデルになる。よって、アクチュエータ 4 0 0 を A I による制御則で制御することにより、制振性能の向上を図ることができる。

【 0 0 8 0 】

=== 第 4 実施形態 ===

図 9 A は、第 4 実施形態に係る構造体の制振システム構成を示す図である。また、図 9 B は図 9 A をモデル化した図である。なお、第 3 実施形態（図 6 A、図 6 B ）と同一構成の部分には同一符号を付し説明を省略する。

30

【 0 0 8 1 】

第 4 実施形態では、建物 1 0 0 とマス 2 0 0 との間にマス 1 5 0 が設けられている。マス 1 5 0 は、建物 1 0 0 の頂部に積層ゴム 1 6 1 を介して設けられており、建物 1 0 0 の揺れに同調して建物 1 0 0 の振動を抑制する T M D（Tuned Mass Damper）として機能する。

【 0 0 8 2 】

また、マス 1 5 0 の上には、転がり支承 5 0 0 により支承されたマス 2 0 0 と、アクチュエータ 4 0 0 が設けられている。マス 2 0 0 は、転がり支承 5 0 0 によって、マス 1 5 0 に対して水平方向に転がり可能（水平変位可能）に支承されており、アクチュエータ 4 0 0 は、マス 1 5 0 と接続され、マス 2 0 0 を水平方向に加振する（A M D）。

40

【 0 0 8 3 】

図 9 A を質点モデルにモデル化すると図 9 B に示す 3 質点のモデルとなる。図 5 B では、建物 1 0 0 とマス 1 5 0 とマス 2 0 0 がそれぞれ質点で示されている。マス 1 5 0 と建物 1 0 0 との間には、積層ゴム 1 6 1 の水平方向の剛性（バネ要素 1 6 0 ）が付与されているこの場合においても、建物 1 0 0 とマス 1 5 0 が同調して動くため、一つの質点（第 1 質点に相当）としてみなすことができる。また、バネ要素 1 0 4 とバネ要素 1 6 0 を一つのバネ要素（第 1 バネ要素に相当）とみなすことができる。よって、前述の実施形態と同様に、この第 4 実施形態においても、前述の実施形態と同様に、アクチュエータ 4 0 0

50

をAIによる制御則で制御することにより、制振性能の向上を図ることができる。

【0084】

<変形例>

図10は、第4実施形態の変形例を示す図である。この例では、建物100の頂部に振り子162（バネ要素160）によってマス150が吊り下げられている。そして、マス150の上には、転がり支承500により転がり可能に支承されたマス200と、アクチュエータ400が設けられている。マス200は、マス150に対して水平方向に相対変位可能であり、アクチュエータ400は、マス200を水平方向に加振する。

【0085】

また、図11は、第4実施形態の別の変形例を示す図である。この例では、建物100の頂部には、上面に緩い勾配を持つすり鉢状の台163（バネ要素160）が配置されており、その上には転がり支承600により転がり可能に支承されたマス150が配置されている。さらに、マス150の上には転がり支承500で支承されたマス200と、アクチュエータ400が配置されている。マス200は、マス150に対して水平方向に相対変位可能であり、アクチュエータ400は、マス200を水平方向に加振する。

【0086】

これらの変形例（図10及び図11）の場合も、モデル化すると図9Bと同じモデルになる。よって、アクチュエータ400をAIによる制御則で制御することにより、制振性能の向上を図ることができる。

【0087】

=== その他の実施の形態 ===

以上、本発明の実施形態について説明したが、上記の実施形態は、本発明の理解を容易にするためのものであり、本発明を限定して解釈するためのものではない。また、本発明は、その趣旨を逸脱することなく、変更や改良され得るとともに、本発明にはその等価物が含まれるのはいうまでもない。例えば、以下に示すような変形が可能である。

【0088】

前述の実施形態では、強化学習のアルゴリズムとして、Q学習(Q-learning)とDQN(Deep Q-Learning)を用いていたが、これには限られず、他の強化学習アルゴリズム(例えば、Sarsa、モンテカルロ法など)を用いても良い。

【0089】

前述の実施形態では、構造体(第1質点)として、理解を容易にするためブリッジ10や建物100を記載していたが、柱、梁、壁、床等により構成されてもよいことは言うまでもない。

【符号の説明】

【0090】

10 ブリッジ、12 支持端、14 バネ要素(第1バネ要素)、
 20 マス、
 30 バネ(第2バネ要素)、40 アクチュエータ、
 60 センサ群、70 コントローラ、
 100 建物、102 支持端、104 バネ要素(第1バネ要素)、
 150 マス、160 バネ要素、
 161 積層ゴム、162 振り子、163 台、
 200 マス、
 300 バネ要素(第2バネ要素)、301 積層ゴム、
 302 振り子、303 台、
 400 アクチュエータ、
 500 転がり支承、600 転がり支承、

10

20

30

40

50

【図面】

【図 1】

図1A

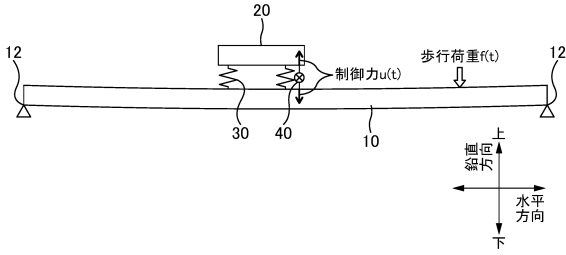


図1B

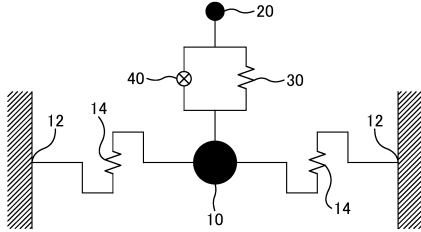
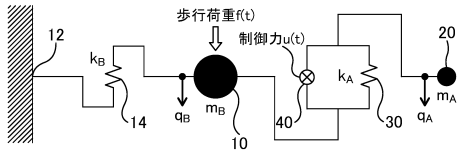
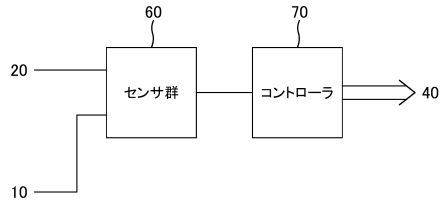


図1C



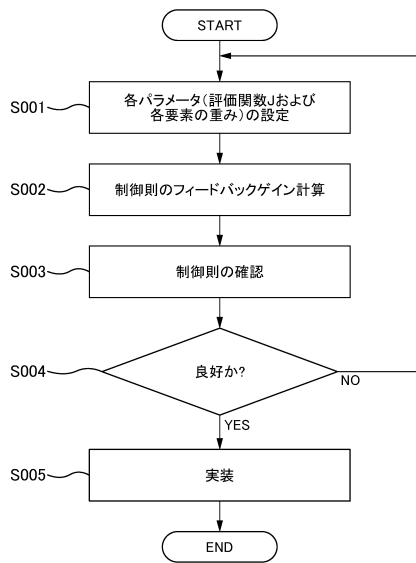
【図 2】



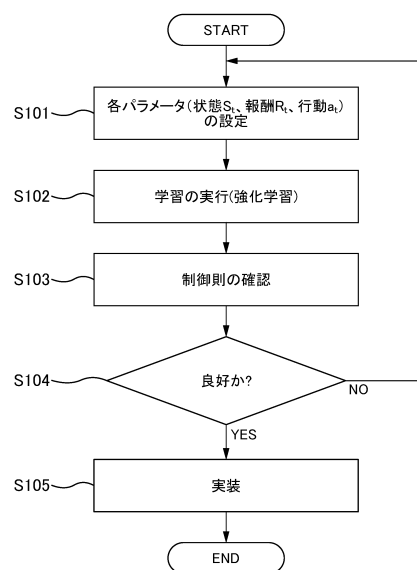
10

20

【図 3】



【図 4】

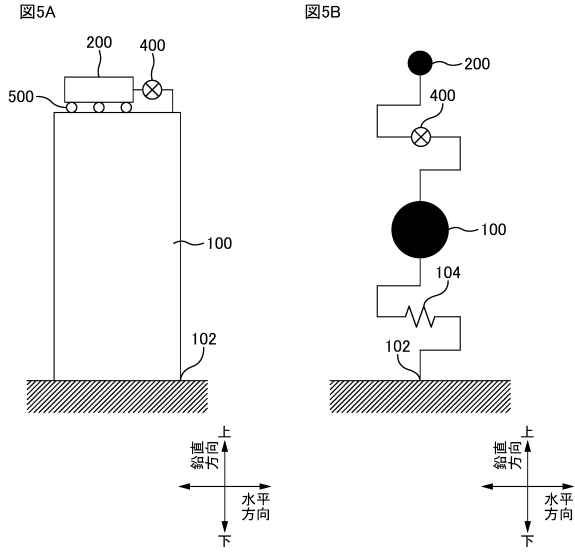


30

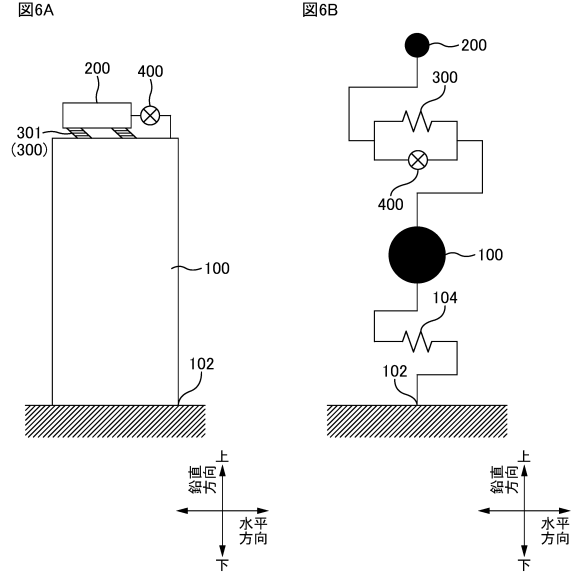
40

50

【 図 5 】

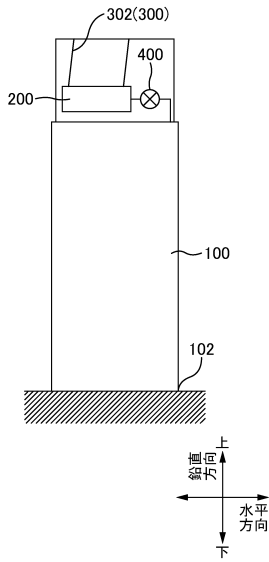


【 図 6 】

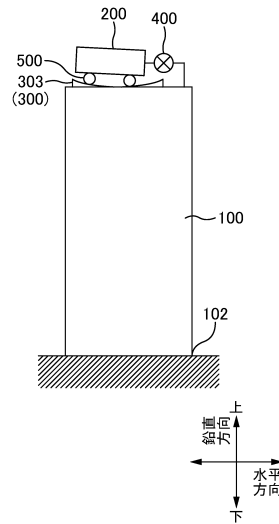


10

【 図 7 】



【 図 8 】



20

30

40

50

【 図 9 】

図9A

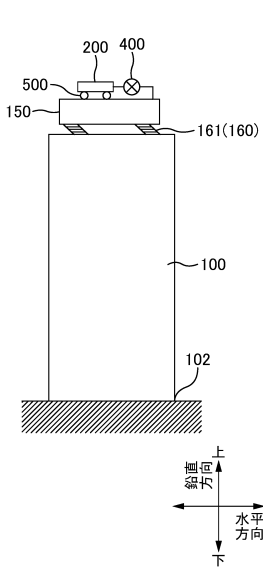
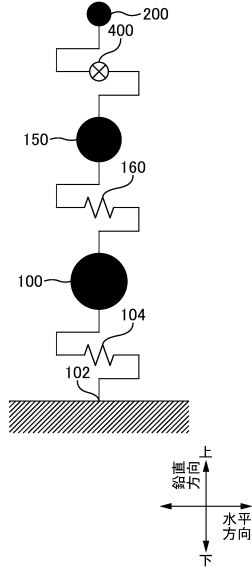
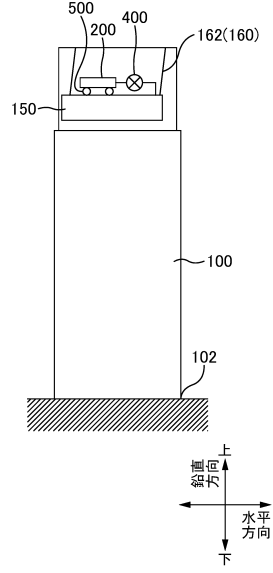


図9B

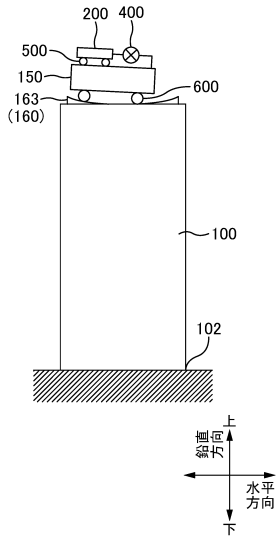


【 図 1 0 】



10

【 図 1 1 】



20

30

40

50

フロントページの続き

- 東京都港区港南2丁目15番2号 株式会社大林組内
(72)発明者 鈴木 貴博
東京都港区港南2丁目15番2号 株式会社大林組内
(72)発明者 佐野 剛志
東京都港区港南2丁目15番2号 株式会社大林組内
(72)発明者 椎橋 徹夫
東京都中央区銀座8丁目11番1号 株式会社Laboro.AI内
(72)発明者 井澤 敦
東京都中央区銀座8丁目11番1号 株式会社Laboro.AI内
(72)発明者 吉岡 琢
東京都中央区銀座8丁目11番1号 株式会社Laboro.AI内
- 合議体
審判長 中屋 裕一郎
審判官 小川 恭司
審判官 内田 博之
- (56)参考文献 特開平1-275867(JP,A)
特開2019-86468(JP,A)
特開2002-138701(JP,A)
特開2008-202371(JP,A)
特開平11-280833(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
F16F 15/02 - 15/08
E04H 9/02