

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-133460

(P2020-133460A)

(43) 公開日 令和2年8月31日(2020.8.31)

(51) Int. Cl.

F03B 13/16 (2006.01)

F1

F03B 13/16

テーマコード(参考)

3H074

審査請求 未請求 請求項の数 20 O L (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願2019-25942 (P2019-25942)

(22) 出願日 平成31年2月15日(2019.2.15)

(71) 出願人 501204525

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術
研究所

東京都三鷹市新川6丁目38番1号

(74) 代理人 100098545

弁理士 阿部 伸一

(74) 代理人 100087745

弁理士 清水 善廣

(74) 代理人 100106611

弁理士 辻田 幸史

(74) 代理人 100189717

弁理士 太田 貴章

最終頁に続く

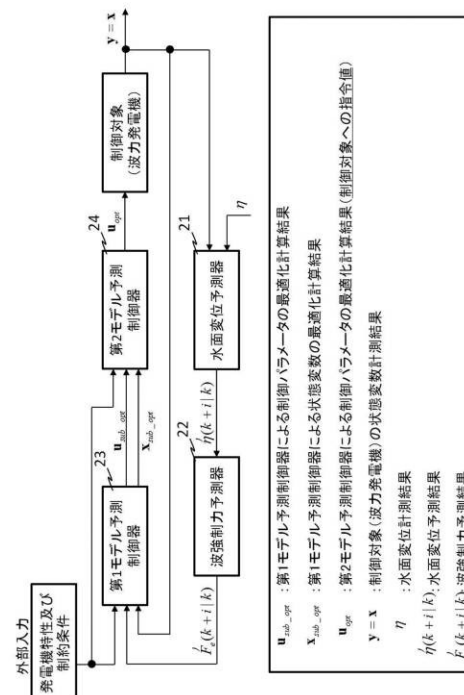
(54) 【発明の名称】 波力発電機の実時間制御方法、及び波力発電システム

(57) 【要約】

【課題】波力発電機に適用可能な拘束条件付き最適化問題をリアルタイムに解くことができ、高効率かつ安全性を確保した波力発電機の実用化に資する波力発電機の実時間制御方法、及び波力発電システムを提供すること。

【解決手段】波に対する可動部11と発電主体部12を有した多自由度をもつ波力発電機10の実時間制御方法であって、多自由度をもつ波力発電機10の第1モデルを用いた第1モデル予測制御計算により第1の制御パラメータ及び第1の状態変数の時系列を求め、波力発電機10の発電量に影響の大きい自由度に限った第1の制御パラメータ及び第1の状態変数を波力発電機10の第2モデルに適用し、第2モデル予測制御計算により第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出し、最終の制御パラメータに基づいて波力発電機10を制御する。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

波に対する可動部と発電主体部を有した多自由度をもつ波力発電機の実時間制御方法であって、多自由度をもつ前記波力発電機の第 1 モデルを用いた第 1 モデル予測制御計算により第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の時系列を求め、前記波力発電機の発電量に影響の大きい自由度に限った前記第 1 の制御パラメータ及び前記第 1 の状態変数を前記波力発電機の第 2 モデルに適用し、第 2 モデル予測制御計算により第 2 の制御パラメータ及び第 2 の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出し、前記最終の制御パラメータに基づいて前記波力発電機を制御することを特徴とする波力発電機の実時間制御方法。

10

【請求項 2】

前記波力発電機の周囲の前記波による水面の変位に基づいて波予測を行い、前記波予測の結果を前記第 1 モデル予測制御計算に反映することを特徴とする請求項 1 に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 3】

前記波予測は、前記水面の変位の時系列データを基に時系列予測手法を用いて予測するものであることを特徴とする請求項 2 に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 4】

前記第 1 モデル予測制御計算により、前記可動部と前記発電主体部との相対変位の変化に対する速度影響及び／又は相対変位影響を考慮した前記第 1 の制御パラメータ及び前記第 1 の状態変数を求めることを特徴とする請求項 1 から請求項 3 のいずれか 1 項に記載の波力発電機の実時間制御方法。

20

【請求項 5】

求めた前記第 1 の制御パラメータを用いて前記第 1 モデル予測制御計算を繰り返し、前記第 1 の制御パラメータ及び前記第 1 の状態変数の最適値の近似解を得ることを特徴とする請求項 4 に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 6】

前記第 1 モデル予測制御計算に当たって、前記可動部の前記発電主体部に対する機械的制約条件及び／又は前記波力発電機の内部消費エネルギーを考慮することを特徴とする請求項 4 又は請求項 5 に記載の波力発電機の実時間制御方法。

30

【請求項 7】

前記第 2 モデル予測制御計算において、前記可動部と前記発電主体部との前記波力発電機の前記発電量に影響の大きい自由度に限った計算及び／又は求める解の探索範囲を限定する計算を行なうことを特徴とする請求項 4 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 8】

求めた前記第 2 の制御パラメータを用いて前記第 2 モデル予測制御計算を繰り返し、前記第 2 の制御パラメータ及び前記第 2 の状態変数の最適値を得ることを特徴とする請求項 7 に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 9】

前記第 2 モデル予測制御計算に当たって、前記可動部の前記発電主体部に対する機械的制約条件及び／又は前記波力発電機の内部消費エネルギーを考慮することを特徴とする請求項 7 又は請求項 8 に記載の波力発電機の実時間制御方法。

40

【請求項 10】

前記第 1 モデル予測制御計算及び前記第 2 モデル予測制御計算を、前記波の 1 周期未満で完了するように時間制限をかけることを特徴とする請求項 1 から請求項 9 のいずれか 1 項に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 11】

前記波力発電機の制御は、前記最終の制御パラメータに基づいて前記可動部と前記発電主体部の相対運動を制御し、前記波力発電機の前記発電量の最大化を図る制御であること

50

を特徴とする請求項 1 から請求項 10 のいずれか 1 項に記載の波力発電機の実時間制御方法。

【請求項 12】

波に対する可動部と発電主体部を有した多自由度をもつ波力発電機を、請求項 1 から請求項 11 のいずれか 1 項に記載の波力発電機の実時間制御方法を用いて制御することを特徴とする波力発電システム。

【請求項 13】

前記可動部の近傍の前記波の波高を計測する波高計測手段を備えたことを特徴とする請求項 12 に記載の波力発電システム。

【請求項 14】

前記波による波力の影響を計測する検力手段を備えたことを特徴とする請求項 12 又は請求項 13 に記載の波力発電システム。

【請求項 15】

前記可動部と前記発電主体部の相対変位を計測する相対変位計測手段を備えたことを特徴とする請求項 12 から請求項 14 のいずれか 1 項に記載の波力発電システム。

【請求項 16】

前記波力発電機の姿勢を計測する姿勢計測手段を備えたことを特徴とする請求項 12 から請求項 15 のいずれか 1 項に記載の波力発電システム。

【請求項 17】

前記波力発電機は、前記可動部として電機子又は永久磁石が積層されたシャフトを有した回生運転と力行運転が可能なりニア P T O（パワー・テイク・オフ）であることを特徴とする請求項 12 から請求項 16 のいずれか 1 項に記載の波力発電システム。

【請求項 18】

前記波力発電機は、前記可動部の動きを油圧に変換して利用する油圧式リニア P T O（パワー・テイク・オフ）であることを特徴とする請求項 12 から請求項 16 のいずれか 1 項に記載の波力発電システム。

【請求項 19】

前記波力発電機は、前記可動部として軸の周りに運動可能な浮体を有した P T O（パワー・テイク・オフ）であることを特徴とする請求項 12 から請求項 16 のいずれか 1 項に記載の波力発電システム。

【請求項 20】

前記波に対する前記可動部と前記発電主体部の相対運動における前記可動部の端部の変位を制限する端部安全手段を備えたことを特徴とする請求項 12 から請求項 19 のいずれか 1 項に記載の波力発電システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、波や水面の上下動を利用して発電を行う波力発電機の実時間制御方法、及び波力発電システムに関する。

【背景技術】

【0002】

波力発電機は、水の上下動による可動部と、その可動部の動きを発電機に伝えるジグ機構と、電気を発生させる発電主体部によって構成され、波や水面の上下動に伴う発電主体部との相対変位を可動部で発生させ、その変位差を利用して電力が発生する。

波力発電機は、拘束条件（例えば、可動部の変位、制御力の制限）を満たしつつ発電量最大化を実現する必要がある。この問題は、拘束条件付き最適化問題とみることができ、様々な解法が存在する。しかし、従来の解法に基づく制御器を波力発電機の模型や実機に実装しても、サンプリング周期内に最適化の演算を完了できず、実装不可能になる場合が多い。

【0003】

ここで、特許文献1には、密閉ケーシングの内部に取り付けられたリニアモータ又は発電機として動作する電機機械を有する電力発生装置と、最適制御アルゴリズムを備えリニアモータや電力貯蔵装置と通信する制御システムと、密閉ケーシングに対するリニアモータ／発電機の磁界源の一等を測定するセンサと、空気バネ等により構成された復元力装置とを備えた波力発電機において、波と同調するように位置差を感知し、復元力を発生させることが開示されている。

また、特許文献2には、密閉浮遊要素と、その内部に配置された質量形成要素と、質量形成要素の動きをロックするロック手段とを備えた波エネルギーを電力に変換する装置において、質量形成要素を選択的にロック又はロック解除するようにロック手段を制御手段で制御し、水面変位との共振現象を発生させることが開示されている。

10

また、特許文献3には、プロセスモデルの形態を変更するモデル形式変更ブロックを含むモデル適応ネットワークと、多変数プロセスモデルを有するプロセスモデルブロック、及びプロセスの制御に用いられる操作変数信号を生成するMPCコントローラを含むMPC制御システムとを備えた適応型多変数プロセスコントローラにおいて、単一入力・単一出力の多プロセスモデルの適応に関して、多段階の制御を用いることが開示されている。

また、特許文献4には、フィードフォワード制御装置と、フィードバック制御装置とを備えた位置決めシステムにおいて、磁気ディスクのトラックアクセスを目的として、フィードバック、フィードフォワード制御を組み合わせ、高速に位置決めを行うことが開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特表2015-524034号公報

【特許文献2】特表2008-517197号公報

【特許文献3】特開2005-202934号公報

【特許文献4】特開昭54-12082号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

波力発電機に関する先行研究等では、上記の拘束条件付き最適化問題に対して、2次計画法を適用する例が多い。しかし、それらの例では、波力発電機の自由度を1自由度に限定したり、制約条件数を減らしたりすること等により問題を単純化している。そのため、従来技術を浮体式波力発電機にそのまま適用することはできない。その上、先行研究等のように問題を単純化しても実時間制御（リアルタイム制御）を行うことは難しく、実装時の性能及び安全性検証等が不十分であるため、実用化を阻害している。

30

【0006】

また、特許文献1は、制御パラメータは、水面変位との共振現象を発生させることに注力しており、可動部及び発電主体部の自由度、その環境下での最適パラメータの導出方法については何ら開示されていない。

また、特許文献2は、発電出力を最大化させるための多段階化アルゴリズムを開示しているものではない。

40

また、特許文献3及び特許文献4は、最適制御を行う許容時間を前段階で求め、役割の異なる制御アルゴリズムの構成を変化させることについては開示されていない。

【0007】

そこで本発明は、波力発電機に適用可能な拘束条件付き最適化問題をリアルタイムに解くことができ、高効率かつ安全性を確保した波力発電機の実用化に資する波力発電機の実時間制御方法、及び波力発電システムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

請求項1記載に対応した波力発電機の実時間制御方法においては、波に対する可動部と

50

発電主体部を有した多自由度をもつ波力発電機の実時間制御方法であって、多自由度をもつ波力発電機の第1モデルを用いた第1モデル予測制御計算により第1の制御パラメータ及び第1の状態変数の時系列を求め、波力発電機の発電量に影響の大きい自由度に限った第1の制御パラメータ及び第1の状態変数を波力発電機の第2モデルに適用し、第2モデル予測制御計算により第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出し、最終の制御パラメータに基づいて波力発電機を制御することを特徴とする。

請求項1に記載の本発明によれば、多自由度系に対応した第1モデル予測制御計算（第一段階）と、発電量に影響の大きいものに限った自由度系に対応した第2モデル予測制御計算（第二段階）を組み合わせることにより、拘束条件付き最適化問題をリアルタイムで短時間のうちに解いて最終の制御パラメータを求めることができるため、求めた最終の制御パラメータに基づいて多自由度をもつ波力発電機の実時間制御を精度よく行い発電効率を向上させることができる。また、実装時の性能及び安全性検証等を十分に行うことが可能となるため、安全性を確保できる。

【0009】

請求項2記載の本発明は、波力発電機の周囲の波による水面の変位に基づいて波予測を行い、波予測の結果を第1モデル予測制御計算に反映することを特徴とする。

請求項2に記載の本発明によれば、第1モデル予測制御計算の精度を向上させることができる。

【0010】

請求項3記載の本発明は、波予測は、水面の変位の時系列データを基に時系列予測手法を用いて予測するものであることを特徴とする。

請求項3に記載の本発明によれば、波予測の精度を上げ第1モデル予測制御計算の精度をさらに向上させることができる。

【0011】

請求項4記載の本発明は、第1モデル予測制御計算により、可動部と発電主体部との相対変位の変化に対する速度影響及び／又は相対変位影響を考慮した第1の制御パラメータ及び第1の状態変数を求めることを特徴とする。

請求項4に記載の本発明によれば、第1モデル予測制御計算の精度を向上させることができる。

【0012】

請求項5記載の本発明は、求めた第1の制御パラメータを用いて第1モデル予測制御計算を繰り返し、第1の制御パラメータ及び第1の状態変数の最適値の近似解を得ることを特徴とする。

請求項5に記載の本発明によれば、得られた第1の制御パラメータ及び第1の状態変数の最適値の近似解を第2モデル予測制御計算の初期値として用いることができるため、第2モデル予測制御計算の初期値をより良好なものとすることができる。

【0013】

請求項6記載の本発明は、第1モデル予測制御計算に当たって、可動部の発電主体部に対する機械的制約条件及び／又は波力発電機の内部消費エネルギーを考慮することを特徴とする。

請求項6に記載の本発明によれば、波力発電機の実時間制御を、機械的制約条件や内部消費エネルギーを考慮したものとすることができる。

【0014】

請求項7記載の本発明は、第2モデル予測制御計算において、可動部と発電主体部との波力発電機が発電量に影響の大きい自由度に限った計算及び／又は求める解の探索範囲を限定する計算を行なうことを特徴とする。

請求項7に記載の本発明によれば、第2モデル予測制御計算を精度よくスピーディに行うことができる。

【0015】

10

20

30

40

50

請求項 8 記載の本発明は、求めた第 2 の制御パラメータを用いて第 2 モデル予測制御計算を繰り返し、第 2 の制御パラメータ及び第 2 の状態変数の最適値を得ることを特徴とする。

請求項 8 に記載の本発明によれば、得られた第 2 の制御パラメータ及び第 2 の状態変数の最適値から導出した最終の制御パラメータに基づいて波力発電機を制御することができるため、波力発電機の実時間制御をよりの確なものとすることができる。

【0016】

請求項 9 記載の本発明は、第 2 モデル予測制御計算に当たって、可動部の発電主体部に対する機械的制約条件及び／又は波力発電機の内部消費エネルギーを考慮することを特徴とする。

請求項 9 に記載の本発明によれば、波力発電機の実時間制御を、機械的制約条件や内部消費エネルギーを考慮したものとすることができる。

【0017】

請求項 10 記載の本発明は、第 1 モデル予測制御計算及び第 2 モデル予測制御計算を、波の 1 周期未満で完了するように時間制限をかけることを特徴とする。

請求項 10 に記載の本発明によれば、波力発電機の実時間制御の継続性をより強固なものとすることができる。

【0018】

請求項 11 記載の本発明は、波力発電機の制御は、最終の制御パラメータに基づいて可動部と発電主体部の相対運動を制御し、波力発電機の発電量の最大化を図る制御であることを特徴とする。

請求項 11 に記載の本発明によれば、発電量を最大化した波力発電機の実時間制御を実現することができる。

【0019】

請求項 12 記載に対応した波力発電システムにおいては、波に対する可動部と発電主体部を有した多自由度をもつ波力発電機を、本発明の波力発電機の実時間制御方法を用いて制御することを特徴とする。

請求項 12 に記載の本発明によれば、多自由度系に対応した第 1 モデル予測制御計算（第一段階）と、発電量に影響の大きいものに限った自由度系に対応した第 2 モデル予測制御計算（第二段階）を組み合わせることにより、拘束条件付き最適化問題をリアルタイムに解いて最終の制御パラメータを求めることができるため、求めた最終の制御パラメータに基づいて多自由度をもつ波力発電機の実時間制御を精度よく行い発電効率を向上させることができる。また、実装時の性能及び安全性検証等を十分に行うことが可能となるため、安全性を確保できる。

【0020】

請求項 13 記載の本発明は、可動部の近傍の波の波高を計測する波高計測手段を備えたことを特徴とする。

請求項 13 に記載の本発明によれば、波高計測手段が計測した波高を波予測等に利用することができる。

【0021】

請求項 14 記載の本発明は、波による波力の影響を計測する検力手段を備えたことを特徴とする。

請求項 14 に記載の本発明によれば、検力手段が計測した波力の影響を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0022】

請求項 15 記載の発明は、可動部と発電主体部の相対変位を計測する相対変位計測手段を備えたことを特徴とする。

請求項 15 記載の本発明によれば、相対変位計測手段が計測した可動部と発電主体部の相対変位を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0023】

10

20

30

40

50

請求項 16 記載の本発明は、波力発電機の姿勢を計測する姿勢計測手段を備えたことを特徴とする。

請求項 16 に記載の本発明によれば、姿勢計測手段が計測した波力発電機の姿勢を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0024】

請求項 17 記載の本発明は、波力発電機は、可動部として電機子又は永久磁石が積層されたシャフトを有した回生運転と力行運転が可能なりニア P T O（パワー・テイク・オフ）であることを特徴とする。

請求項 17 に記載の本発明によれば、リニア P T O である波力発電機の実時間制御を精度よく行うことができる。

【0025】

請求項 18 記載の本発明は、波力発電機は、可動部の動きを油圧に変換して利用する油圧式リニア P T O（パワー・テイク・オフ）であることを特徴とする。

請求項 18 に記載の本発明によれば、油圧式リニア P T O である波力発電機の実時間制御を精度よく行うことができる。

【0026】

請求項 19 記載の本発明は、波力発電機は、可動部として軸の周りに運動可能な浮体を有した P T O（パワー・テイク・オフ）であることを特徴とする。

請求項 19 に記載の本発明によれば、可動部として軸の周りに運動可能な浮体を有した P T O である波力発電機の実時間制御を精度よく行うことができる。

【0027】

請求項 20 記載の本発明は、波に対する可動部と発電主体部の相対運動における可動部の端部の変位を制限する端部安全手段を備えたことを特徴とする。

請求項 20 に記載の本発明によれば、可動部の変位が予想を超える場合であっても、可動部の端部と発電主体部等との接触による破損を防止することができる。

【発明の効果】

【0028】

本発明の波力発電機の実時間制御方法によれば、多自由度系に対応した第 1 モデル予測制御計算（第一段階）と、発電量に影響の大きいものに限った自由度系に対応した第 2 モデル予測制御計算（第二段階）を組み合わせることにより、拘束条件付き最適化問題をリアルタイムで短時間のうちに解いて最終の制御パラメータを求めることができるため、求めた最終の制御パラメータに基づいて多自由度をもつ波力発電機の実時間制御を精度よく行い発電効率を向上させることができる。また、実装時の性能及び安全性検証等を十分に行うことが可能となるため、安全性を確保できる。

【0029】

また、波力発電機の周囲の波による水面の変位に基づいて波予測を行い、波予測の結果を第 1 モデル予測制御計算に反映する場合には、第 1 モデル予測制御計算の精度を向上させることができる。

【0030】

また、波予測は、水面の変位の時系列データを基に時系列予測手法を用いて予測するものである場合には、波予測の精度を上げ第 1 モデル予測制御計算の精度をさらに向上させることができる。

【0031】

また、第 1 モデル予測制御計算により、可動部と発電主体部との相対変位の変化に対する速度影響及び／又は相対変位影響を考慮した第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数を求める場合には、第 1 モデル予測制御計算の精度を向上させることができる。

【0032】

また、求めた第 1 の制御パラメータを用いて第 1 モデル予測制御計算を繰り返し、第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の最適値の近似解を得る場合には、得られた第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の最適値の近似解を第 2 モデル予測制御計算の初期値

10

20

30

40

50

として用いることができるため、第2モデル予測制御計算の初期値をより良好なものとすることができる。

【0033】

また、第1モデル予測制御計算に当たって、可動部の発電主体部に対する機械的制約条件及び／又は波力発電機の内部消費エネルギーを考慮する場合には、波力発電機の実時間制御を、機械的制約条件や内部消費エネルギーを考慮したものとすることができる。

【0034】

また、第2モデル予測制御計算において、可動部と発電主体部との波力発電機の発電量に影響の大きい自由度に限った計算及び／又は求める解の探索範囲を限定する計算を行なう場合には、第2モデル予測制御計算を精度よくスピーディに行うことができる。

10

【0035】

また、求めた第2の制御パラメータを用いて第2モデル予測制御計算を繰り返し、第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の最適値を得る場合には、得られた第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の最適値から導出した最終の制御パラメータに基づいて波力発電機を制御することができるため、波力発電機の実時間制御をよりの確なものとすることができる。

【0036】

また、第2モデル予測制御計算に当たって、可動部の発電主体部に対する機械的制約条件及び／又は波力発電機の内部消費エネルギーを考慮する場合には、波力発電機の実時間制御を、機械的制約条件や内部消費エネルギーを考慮したものとすることができる。

20

【0037】

また、第1モデル予測制御計算及び第2モデル予測制御計算を、波の1周期未満で完了するように時間制限をかける場合には、波力発電機の実時間制御の継続性をより強固なものとすることができる。

【0038】

また、波力発電機の制御は、最終の制御パラメータに基づいて可動部と発電主体部の相對運動を制御し、波力発電機発電量の最大化を図る制御である場合には、発電量を最大化した波力発電機の実時間制御を実現することができる。

【0039】

本発明の波力発電システムによれば、多自由度系に対応した第1モデル予測制御計算（第一段階）と、発電量に影響の大きいものに限った自由度系に対応した第2モデル予測制御計算（第二段階）を組み合わせることにより、拘束条件付き最適化問題をリアルタイムに解いて最終の制御パラメータを求めることができるため、求めた最終の制御パラメータに基づいて多自由度をもつ波力発電機の実時間制御を精度よく行い発電効率を向上させることができる。また、実装時の性能及び安全性検証等を十分に行うことが可能となるため、安全性を確保できる。

30

【0040】

また、可動部の近傍の波の波高を計測する波高計測手段を備えた場合には、波高計測手段が計測した波高を波予測等に利用することができる。

【0041】

また、波による波力の影響を計測する検力手段を備えた場合には、検力手段が計測した波力の影響を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

40

【0042】

また、可動部と発電主体部の相對変位を計測する相對変位計測手段を備えた場合には、相對変位計測手段が計測した可動部と発電主体部の相對変位を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0043】

また、波力発電機の姿勢を計測する姿勢計測手段を備えた場合には、姿勢計測手段が計測した波力発電機の姿勢を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0044】

50

また、波力発電機は、可動部として電機子又は永久磁石が積層されたシャフトを有した回生運転と力行運転が可能なりニアPTO（パワー・テイク・オフ）である場合には、リニアPTOである波力発電機の実時間制御を精度よく行うことができる。

【0045】

また、波力発電機は、可動部の動きを油圧に変換して利用する油圧式リニアPTO（パワー・テイク・オフ）である場合には、油圧式リニアPTOである波力発電機の実時間制御を精度よく行うことができる。

【0046】

また、波力発電機は、可動部として軸の周りに運動可能な浮体を有したPTO（パワー・テイク・オフ）である場合には、可動部として軸の周りに運動可能な浮体を有したPTOである波力発電機の実時間制御を精度よく行うことができる。

10

【0047】

また、波に対する可動部と発電主体部の相対運動における可動部の端部の変位を制限する端部安全手段を備えた場合には、可動部の変位が予想を超える場合であっても、可動部の端部と発電主体部等との接触による破損を防止することができる。

【図面の簡単な説明】

【0048】

【図1】本発明の一実施形態による波力発電システムの概要図

【図2】同波力発電システムの制御ブロック図

【図3】同波力発電システムの制御フロー図

20

【図4】同波強制力の推定に関する説明図

【図5】同波力発電システムに適用した端部安全手段の概要図

【図6】本発明の一実施例による波力発電システムの概要図

【図7】同波力発電システムの制御フロー図

【図8】本発明の他の実施例による波力発電システムの概要図

【図9】同波力発電システムの制御フロー図

【図10】本発明のさらに他の実施例による波力発電システムの概要図

【発明を実施するための形態】

【0049】

以下に、本発明の実施形態による波力発電機の実時間制御方法及び波力発電システムについて説明する。

30

【0050】

図1は本発明の一実施形態による波力発電システムの概要図である。

海洋等に設置される波力発電システム1は、6自由度をもつ浮体式の波力発電機10と、波力発電機10を実時間制御（リアルタイム制御）する制御部20と、波高を計測する波高計測手段30と、波による波力の影響を計測する検力手段40と、相対変位量を計測する相対変位計測手段50と、波力発電機10の姿勢を計測する姿勢計測手段60を備える。

波力発電システム1は複数の係留索70で水底Xに係留されている。係留索70の一端は波力発電機10の下部に接続され、他端はアンカー80に接続されている。

40

なお、図1には、波力発電機10の6自由度の運動方向（前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、及び船首揺れ）も併せて示している。

【0051】

波力発電機10は、波に対する可動部11と、電気を発生させる発電主体部12を有する。

可動部11は、一方の端部に位置するフロート11Aと、他方の端部に位置する棒状部材11Bと、フロート11Aと棒状部材11Bとの間に位置するフレーム11Cを有する。

発電主体部12は、PTO（パワー・テイク・オフ）部12Aと、上部を水面上に出して立設した柱状のスパー12Bと、スパー12Bの下部に張り出した円板状のヒーププレ

50

ート12Cを有する。フロート11Aは、実際は環状を成していて、図1では省略しているがスパー12Bの左右に対称を成すように配置される。

水面Yに浮かぶフロート11Aは、スパー12Bの外側面に隣接するように配置され、水の上下動に伴い鉛直方向に往復動する。棒状部材11Bは、例えばシャフトやピストン等であり、スパー12Bの内部に配置されている。フレーム11Cは、スパー12Bの上部を覆うように配置され、フロート11Aと連結したフロート連結材11Caと、棒状部材11Bと連結した棒状部材連結材11Cbとを有し、フロート11Aの動きを棒状部材11Bに伝える。

P T O部12Aは、スパー12Bの内部に配置されている。また、P T O部12Aの内部には棒状部材11Bが通されている。波力発電機10は、波や水面Yの上下動に伴う発電主体部12との相対変位を可動部11で発生させ、その変位差を利用して電力を発生する。発電主体部12は、水面変位の動きに応じて発電することが可能であると同時に、蓄積したエネルギー等を用いて可動部11を強制加振し、水面変位との同調現象を引き起こすことで、より大きな水面変位エネルギーの吸収を可能とする機器である。

【0052】

制御部20は、スパー12Bの内部においてP T O部12Aよりも下方に配置されている。

波高計測手段30は、フロート11Aの上部に配置され、フロート11Aの近傍の波の波高を計測する。波高計測手段30としては、例えば超音波、加速度、水圧、レーダ等を利用した各種の波高計を用いることができる。

検力手段40は、棒状部材11Bと棒状部材連結材11Cbとの連結部分に配置され、波力発電機10に対する波による波力の影響を計測する。検力手段40としては、例えばコラム型、ダイヤフラム型、S字型、また歪ゲージ式、静電容量式、磁歪式等の各種の検力計を用いることができる。

相対変位計測手段50は、棒状部材11Bに近接して配置され、可動部11と発電主体部12との相対変位を計測する。相対変位計測手段50としては、例えばリニアエンコーダやロータリエンコーダ等を用いることができる。

姿勢計測手段60は、スパー12Bの上部に配置され、波力発電機10の姿勢を計測する。姿勢計測手段60としては、例えばジャイロや傾斜計等を用いることができる。

【0053】

次に、制御部20による波力発電機10の実時間制御方法を説明する。

図2は本発明の一実施形態による波力発電システムの制御ブロック図、図3は同波力発電システムの制御フロー図である。

制御部20は、水面変位予測器21と、波強制力予測器22と、第1モデル予測制御器23と、第2モデル予測制御器24を備える。

【0054】

まず波力発電システム1は、波等の水面変位を計測する。波等の水面変位は、波力発電機10に取り付けられた波高計測手段30により、発電主体部12との相対変位から計算され、データ保管部（図示無し）に格納される（S1：ステップ1）。

【0055】

水面変位予測器21は、データ保管部に格納された水面変位の時系列データである水面変位計測結果 η に基づいて、現時点から未来の水面変位の時系列を計算する波予測を行う。水面変位予測器21は、波予測の結果である水面変位予測結果 $\eta'(k+i|k)$ （'は η の上）を波強制力予測器22へ向けて出力する（S2：ステップ2）。

なお、現時点から未来の水面変位の時系列を計算する手法としては、AR（自己回帰）、ARMA（自己回帰移動平均）、ARIMA（自己回帰和分移動平均）等のパラメトリックモデル、及びカルマンフィルタ等がある。

【0056】

波強制力予測器22は、入力された水面変位予測結果 $\eta'(k+i|k)$ （'は η の上）に基づいて、可動部11と発電主体部12に作用する波強制力を計算する。波強制力予測器2

10

20

30

40

50

2 は、算出した波強制力予測結果 $F_e'(k+i|k)$ （' は F_e の上）を第 1 モデル予測制御器 23 へ向けて出力する（S3：ステップ 3）。なお、波強制力の計算例については後述する。

【0057】

第 1 モデル予測制御器 23 は、ステップ 4 からステップ 6 において、多自由度をもつ波力発電機 10 をモデルとする第 1 モデルを用いた第 1 モデル予測制御計算を行い、第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の時系列を求める。

まず、第 1 モデル予測制御器 23 は、入力された波強制力予測結果 $F_e'(k+i|k)$ （' は F_e の上）に基づいて、6 自由度（可動部 11、発電主体部 12 の最大自由度）で可動部 11 と発電主体部 12 の挙動計算を行う（S4：ステップ 4）。 10

ステップ 4 の後、第 1 モデル予測制御器 23 は、ステップ 4 での挙動計算結果に基づいて第 1 の制御パラメータの最適化を行う（S5：ステップ 5）。第 1 の制御パラメータは、可動部 11 と発電主体部 12 の相互位置差の変化に対する速度影響と相対変位影響（位置差影響）のパラメータで構成される。なお、速度影響と相対変位影響のどちらか一方の場合も存在する。また、各項は高次までの多項式で構成することも選択の一つとする。

ステップ 5 の後、第 1 モデル予測制御器 23 は、最適制御に伴う可動部 11 と発電主体部 12 の挙動計算を行い、複数・多項式制御パラメータを含んだ多浮体 6 自由度系（2 浮体以上）における第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の時系列について、繰り返し収束法や代数方程式法によって、近似解（制御パラメータの最適化計算結果 $u_{sub,opt}$ 、状態変数の最適化計算結果 $x_{sub,opt}$ ）を得る（S6：ステップ 6）。本実施形態において、浮体は、可動部 11 と発電主体部 12 の 2 浮体である。なお、本発明は、可動部 11 と発電主体部 12 が一つの容器内に収容され、波等による水面変位により可動部 11 が発電主体部 12 に対して相対的に変位して発電を行う場合など、浮体の一つとみなされる場合であっても適用可能である。また、ステップ 6 においては、外部入力手段（図示無し）から第 1 モデル予測制御器 23 に入力された発電機特性及び制約条件に基づいて、波力発電機 10 の内部消費エネルギーと、可動部 11 の発電主体部 12 に対する機械的制約条件も評価パラメータに加え、得られるエネルギーが最大化されるよう計算する。機械的制約条件としては、例えば変位制限や推力制限等がある。 20

第 1 モデル予測制御器 23 における第 1 モデルを用いた第 1 モデル予測制御計算には、多自由度をもつ機械系に対して実時間制御を行うことができるモデル予測制御法を適用することができる。多自由度系に対応したモデル制御法によって、予測ホライズン間（評価区間）の近似解を得る。得られた近似解は、最適値ではないものの最適値に近い系列である。 30

ステップ 6 の後は、ステップ 5 に戻り、先の第 1 モデル予測制御計算で得られた第 1 の制御パラメータを基に再度第 1 の制御パラメータの最適化を行い、ステップ 6 へ進み近似解を得る。このように第 1 モデル予測制御器 23 は、第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の最適化計算を繰り返す。

第 1 モデル予測制御器 23 は、算出した近似解（制御パラメータの最適化計算結果 $u_{sub,opt}$ 、状態変数の最適化計算結果 $x_{sub,opt}$ ）を第 2 モデル予測制御器 24 へ向けて出力する。 40

【0058】

第 2 モデル予測制御器 24 は、ステップ 7 からステップ 8 において、波力発電機 10 の発電量に影響の大きい自由度に限った第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数を波力発電機 10 の第 2 モデルに適用し、第 2 モデル予測制御計算により第 2 の制御パラメータ及び第 2 の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出する。

まず、第 2 モデル予測制御器 24 は、入力された近似解（制御パラメータの最適化計算結果 $u_{sub,opt}$ 、状態変数の最適化計算結果 $x_{sub,opt}$ ）を初期値として、可動部 11 と発電主体部 12 の自由度を 1 自由度まで減らし、また、必要に応じて多項式制御パラメータを線形化する等、求める解の探索範囲を限定することで第 2 の制御パラメータの最適化を行う（S7：ステップ 7）。なお、自由度は 1 自由度に限らず、例えば 2 自由度であって 50

もよく、6自由度未満の自由度であれば、第2モデル予測制御器24はより短時間のうちに解を求めることができる。

ステップ7の後、第2モデル予測制御器24は、最適制御に伴う可動部11と発電主体部12の挙動計算を行い、厳密解に近い必要解（第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の時系列）を得て最終の制御パラメータを導出する（S8：ステップ8）。ステップ8においては、第1モデル予測制御器23のステップ6と同様に、外部入力手段から第2モデル予測制御器24に入力された発電機特性及び制約条件に基づいて、波力発電機10の内部消費エネルギーと、可動部11の発電主体部12に対する機械的制約条件も評価パラメータに加え、得られるエネルギーが最大化されるよう計算する。

第2モデル予測制御器24における第2モデルを用いた第2モデル予測制御計算には、1自由度系の波力発電機を対象として発電量最適制御を実現するモデル予測制御法を適用することができる。制御する運動モードに対して1自由度系モデル予測制御法にて最適化計算を行う。この時、第1モデル予測制御器23で求めた近似解（制御パラメータの最適化計算結果 u_{sub_opt} 、状態変数の最適化計算結果 x_{sub_opt} ）は、最適化計算の良好な初期値、及び最適解の探索範囲の絞り込みに用いる。また、予測ホライズン間の状態量の時系列が既知であり、第1モデル予測制御器23で求めた状態変数の最適化計算結果 x_{sub_opt} は最適値を与える時系列に近いという仮定の下、他の運動モードの中で制御モードに対して影響が大きい運動モードは連成影響も考慮する。最適解に近い範囲で1自由度系等に限定したモデル予測制御法を利用することで、速やかに最適化演算が完了するアルゴリズムとすることができる。

ステップ8の後、ステップ7に戻り、先の第2モデル予測制御計算で得られた第2の制御パラメータを基に再度第2の制御パラメータの最適化を行い、ステップ8へ進み必要解を得て最終の制御パラメータを導出する。このように第2モデル予測制御器24は、第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の最適化計算を繰り返す。

第2モデル予測制御器24は、算出した最終の制御パラメータ（制御パラメータの最適化計算結果 u_{opt} ）を出力する。制御器20は、この最終の制御パラメータを指令値として、制御対象である波力発電機10の可動部11と発電主体部12の相対運動を制御し、波力発電機10の発電量の最大化を図る。

必要解である第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の時系列から導出した最終の制御パラメータに基づき、発電主体部12内の発電機起動部を強制制御加振し、水面変位との同調現象を引き起こすことで、より大きな水面変位エネルギーを吸収することができる。

【0059】

なお、第1モデル予測制御器23における最適化計算の繰り返し数と、第2モデル予測制御器24における最適化計算の繰り返し数は、波予測（水面変化の予測）に基づく1周期未満で最適化計算が終わるように構成させ、水面変位時間に応じて構成を変化させる。なお、最適化計算にかかる時間の長短、機構系、制御回路系の遅れ要素やヒステリシス等に起因した制御的な誤差は、適宜タイミングや制御パラメータ等を補正して、波力発電機10の可動部11と発電主体部12との相対運動を制御することができる。

また、検力手段40、相対変位計測手段50及び姿勢計測手段60によって波力発電機10の状態変数が計測され、波力発電機10の状態変数計測結果（ $y=x$ ）は、水面変位予測器21にフィードバックされる（S10：ステップ10）。これにより、水面変位予測器21が算出する未来の水面変位の時系列の精度が向上する。

また、図2に示すように、波力発電機10の状態変数計測結果（ $y=x$ ）を第1モデル予測制御器23にフィードバックすることもできる。これにより、第1モデル予測制御器23が算出する近似解の精度が向上する。

【0060】

次に、波強制力予測器22における波強制力の計算例を図4を用いて説明する。図4は波強制力の推定に関する説明図である。

波強制力の計算にあたって計測する量は、波高計測手段30によって計測される水面変

位（水面変位計測結果 η ）の時系列と、検力手段 40 によって計測される波強制力（ F_i ）の時系列である。

波強制力予測器 21 は、例えば、水面変位計測結果 η の時系列を AR モデルとしてモデリングして予測する。AR モデルで水面変位計測結果 η がモデリングできると仮定し、AR モデルのパラメータ推定問題として最小二乗推定法で解き、AR モデルを状態空間で実現しカルマンフィルタを用いて長期予測を行う。

【0061】

次に、第 1 モデル予測制御器及び第 2 モデル予測制御器における拘束条件付き最適化演算のアルゴリズムの例を説明する。

まず、第 1 モデル予測制御器 23 の多自由度系における定式化の例を説明する。

10

図 1 のように、波力発電機 10 が可動部 11 と発電主体部 12 を有し、発電装置にリニア PTO を用いる波力発電システム 1 を例とする。可動部 11 は水面上で 6 自由度の運動が可能とする。この例の場合、可動部 11 が波浪中で上下揺れすることで発電を行う。

可動部 11 の運動を表す状態ベクトルを下式（1）で表す。式（1）中の x 、 y 、 z 、 ϕ 、 θ 、 ψ はそれぞれ、可動部 11 の前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、及び船首揺れを表し、上付きドットはこれらの時間微分を示す。これ以降は $x_1 \sim x_{12}$ という記号で示す。

【数 1】

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}]^T \\ &= [x, y, z, \phi, \theta, \psi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T \end{aligned} \quad \dots (1)$$

【0062】

制御力（ F_g ）は、 C_g （可動部 11 の運動速度に比例する制御パラメータ： u_1 ）、及び K_g （可動部 11 の変位に比例する制御パラメータ： u_2 ）の 2 つの制御パラメータを用いて下式（2）でモデル化する。なお、 F_g は、可動部 11 に対して上下力としてのみ作用すると仮定する。

【数 2】

$$\begin{aligned} F_g &= -C_g \dot{z} - K_g z \\ &= -u_1 x_9 - u_2 x_3 \end{aligned} \quad \dots (2)$$

【0063】

不規則波中において、ラディエーション流体力（ F_{rj} ）に対するメモリー影響は下式（3）で与えられる。なお、式（3）中の $m_{ij}(\infty)$ 、 K_{rj} 、 $\dot{x}_j$ （ x の上にはドット）はそれぞれ、周波数無限大での付加質量係数、ラディエーション流体力に対するメモリー影響関数（運動速度に対するインパルス応答関数）、可動部 11 の j モードの運動速度である。また、式（3）では $t = 0$ 以前で可動部 11 は運動していないと仮定している。 K_{rj} は下式（4）で求める。なお、式（4）中の B_{ij} は造波減衰力係数である。

40

【数 3】

$$F_{rj}(t) = -m_{ij}(\infty) \ddot{x}_j - \int_0^t K_{rj}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau \quad \dots (3)$$

【数 4】

$$K_{rj} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad \dots (4)$$

【0064】

50

本例では、上下揺れとの連成運動の中で、縦揺れのみが無視できないと仮定する。即ち、可動部 1 1 の上下揺れに関する K_{rj} の中で、 K_{r33} 、 K_{r35} の 2 つを考慮して定式化を行うが、どの運動モード (j) が上下揺れに対して影響が大きいかは可動部 1 1 の水線面下の形状に依存する。

式 (3) 中の積分項は、 $t = 0$ から現在までの運動履歴がすべて影響することを意味するが、このままでは第 1 モデル予測制御器 2 3 を構成する上で不都合である。そこで式 (3) 中の積分項を下式 (5) に示す線形時不変システムでモデル化する (参照: Taghipour, R., Perez, T. and Moan, T. : Hybrid frequency-time domain models for dynamic response analysis of marine structures, Ocean Engineering, Vol. 35, Issue 7, 2008, pp. 685-705.)。式 (5) 中の A_r^{ij} 、 B_r^{ij} 、及び C_r^{ij} は線形時不変システムの係数行列、 x_r^{ij} はこの線形時不変システムの状態ベクトル、 u_r^j はシステムへの入力であり、 K_{r33} の場合は x_9 、 K_{r35} の場合は x_{11} である。

【数 5】

$$\begin{aligned}\dot{x}_r^{ij}(t) &= A_r^{ij} x_r^{ij}(t) + B_r^{ij} u_r^j(t) \\ x_r^{ij}(0) &= \mathbf{0} \\ y_{rj} &= C_r^{ij} x_r^{ij}(t) \approx \int_0^t K_{rj}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau\end{aligned} \quad \dots (5)$$

【0065】

線形時不変システムの次数、 A_r^{ij} 、 B_r^{ij} 、及び C_r^{ij} の推定にはいくつかの方法がある (参照: Taghipour, R., Perez, T. and Moan, T. : Hybrid frequency-time domain models for dynamic response analysis of marine structures, Ocean Engineering, Vol. 35, Issue 7, 2008, pp. 685-705.)。ここでは、 F_{r33} 中の積分項について、次数が n_{r33} 、係数行列が A_r^{33} 、 B_r^{33} 、及び C_r^{33} と推定でき、 F_{r35} 中の積分項について、次数が n_{r35} 、係数行列が A_r^{35} 、 B_r^{35} 、及び C_r^{35} と推定できたと仮定する。

F_{r33} 及び F_{r35} の積分項を線形時不変モデルでモデル化する際に用いた状態ベクトル (x_r^{33} 及び x_r^{35}) を式 (1) の状態ベクトルに加えて下式 (6) の拡大状態ベクトル (X) を定義すると、拡大状態ベクトルを用いた波力発電システム 1 の運動方程式は下式 (7) で与えられる。式 (7) 中の M は X に対応した慣性行列、 F は外力のベクトルである。まず、慣性行列は下式 (8) で定義される。式 (8) 中の I は適切な次元の単位行列であり、 0 は適切な次元のゼロ行列である。また、 $m_{6 \times 4}$ は下式 (9) で与える。式 (9) 中の m_1 、 I_{44} 、 I_{33} 、 I_{44} はそれぞれ、可動部 1 1 の質量、横揺れ慣性モーメント、縦揺れ慣性モーメント、船首揺れ慣性モーメントである。また、 a_{44} は付加質量若しくは付加慣性モーメントをあらわす。

拡大状態ベクトル X に対応した外力のベクトル F を下式 (10) に示す。式 (10) 中の F_1 、 F_2 、 F_3 、 M_1 、 M_2 、 M_3 はそれぞれ、可動部 1 1 に働く前後力、横力、上下力、横揺れモーメント、縦揺れモーメント、船首揺れモーメントを示す。また、 F_r^{33} 及び F_r^{35} は、式 (3) 中の積分項をモデル化した線形時不変システムに由来し、式 (5) の第 1 式の右辺に相当する。

式 (7) は、MPC-C/GMRES 法 (参照: Toshiyuki Ohtsuka : A continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control, Automatica, Vol. 40, 2004, pp. 563-574.) におけるダイナミカルシステムの定式化と同形式である。

【数 6】

$$X = [x^T \ x_r^{33T} \ x_r^{35T}]^T \quad \dots (6)$$

【数 7】

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F} \quad \dots (7)$$

【数 8】

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times (n_{r33} + n_{r35})} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{m}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times (n_{r33} + n_{r35})} \\ \mathbf{0}_{(n_{r33} + n_{r35}) \times 6} & \mathbf{0}_{(n_{r33} + n_{r35}) \times 6} & \mathbf{I}_{(n_{r33} + n_{r35}) \times (n_{r33} + n_{r35})} \end{bmatrix} \quad \dots (8)$$

【数 9】

$$\mathbf{m}_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} m_f + a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ 0 & m_f + a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_f + a_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & I_{44} + a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & I_{55} + a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{66} + a_{66} \end{bmatrix} \quad \dots (9)$$

【数 10】

$$\mathbf{F} = [x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ F_1 \ F_2 \ F_3 \ M_4 \ M_5 \ M_6 \ \mathbf{F}_r^{33T} \ \mathbf{F}_r^{35T}]^T \quad \dots (10)$$

【0066】

また、波力発電システム1の可動範囲等の機械的制約条件、発電装置の制御力に関する制約条件などを設定する。本例では、上下変位に下式(11)の不等式制約条件を設定する。なお、上下変位は式(1)の定義に従い x_3 で表す。

【数 11】

$$x_{3\min} \leq x_3 \leq x_{3\max} \quad \dots (11)$$

30

【0067】

不等式制約条件をダミー入力(u_3)を用いて等式拘束条件に変換する。下式(12)に示した上下変位に関する等式制約条件は、 x_3-u_3 平面において、中心が $((x_{3\min} + x_{3\max})/2, 0)$ 、半径が $(x_{3\max} - x_{3\min})/2$ の円をあらわし、その円周上の点 (x_3, u_3) は、必ず式(11)を満たす。

【数 12】

$$\mathbf{C}_{eq} = \left[\left(x_3 - \frac{x_{3\min} + x_{3\max}}{2} \right)^2 + u_3^2 - \left(\frac{x_{3\max} - x_{3\min}}{2} \right)^2 \right] = 0 \quad \dots (12)$$

【0068】

また、制約条件で導入したダミー入力も制御ベクトルに加えて、制御入力ベクトルを下式(13)に拡張する。

【数 1 3】

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T \quad \dots (13)$$

【0069】

評価関数（J）は、リニアPTOで生じる銅損も考慮した発電電力を含む下式（14）で定義する。式（14）中のQ、Rは対角行列である。Q、Rの対角要素を $q_1 \sim q_{12+13}$ 及び $r_1 \sim r_3$ とし、これらは全て非負の値とする。また、 t_f 、 R_s 、及び K_t はそれぞれ、評価区間長、リニアPTOの巻線抵抗、及び推力係数を示している。なお、評価関数にダミー入力の1次の項を加えたのは、式（12）がダミー入力に対して2次の項しか含まず、停留条件からダミー入力の符号が決まらず、解の追跡に失敗する場合があるためである。Q、Rの対角要素及びダミー入力の係数 r_{d1} は、モデル予測制御法（MPC）のチューニングパラメータである。

10

【数 1 4】

$$J = \int_t^{t+t_f} L(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau)) d\tau$$

$$L = \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} - \left(-(-u_1 x_9 - u_2 x_3) x_9 - R_s \left(\frac{(-u_1 x_9 - u_2 x_3)}{K_t} \right)^2 \right) + r_{d1} u_3 \quad \dots (14)$$

$$= \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} - \left((u_1 x_9 + u_2 x_3) x_9 - R_s \left(\frac{(-u_1 x_9 - u_2 x_3)}{K_t} \right)^2 \right) + r_{d1} u_3$$

【0070】

上述のように、ダイナミカルシステムの定式化、制約条件、及び評価関数を与えることができたので、MPC-C/GMRES法等を用いて最適制御問題を解くことができる。

【0071】

次に、第2モデル予測制御器24の1自由度系における定式化の例を説明する。

第1モデル予測制御計算によって、発電量に最も影響が大きい運動モードが可動部11の上下揺れと同定され、縦揺れについても上下方向力への無視できない影響があったと仮定する。

30

第2モデル予測制御計算において、可動部11の運動を表す状態ベクトルは下式（15）となる。なお、記号は、第1モデル予測制御器23の説明で用いた記号を踏襲している。

【数 1 5】

$$\mathbf{X} = [x_3, x_9]^T \quad \dots (15)$$

$$= [z, \dot{z}]^T$$

【0072】

制御力は、第1モデル予測制御計算と同様に式（2）でモデル化し、可動部11の上下力としてのみ作用すると仮定する。

40

不規則波中において、上下方向のラディエーション流体力（ F_{r33} ）に対するメモリー影響は、式（3）、式（5）により、 K_{r33} の積分項を線形時不変システムでモデル化して下式（16）であらわす。

【数 1 6】

$$F_{r33}(t) = -m_{33}(\infty) \dot{x}_9 - \mathbf{C}_r^{33} \mathbf{x}_r^{33} \quad \dots (16)$$

【0073】

50

第1モデル予測制御計算により、評価区間（ t_f ）における、縦揺れ、縦揺れ速度、縦揺れ加速度、及び、 K_{33} を線形時不変モデルでモデル化した際に用いた状態ベクトルの時系列が得られていると仮定し、これらを下式（17）で表す。なお、式（17）中の k は現在時刻を示す。

【数17】

$$x_5(k+i|k), x_{11}(k+i|k), \dot{x}_{11}(k+i|k), \mathbf{x}_r^{35}(k+i|k) \quad \dots (17)$$

where $0 \leq i \leq N-1, t_f = k+N-1$

【0074】

上下揺れに影響が大きいと仮定した縦揺れによって上下揺れ方向に働く流体力の時系列は、式（17）を用いて下式（18）で表す。式（18）中の第一項と第二項はラディエーション流体力の連成項、第三項は復原力の連成項である。なお、式（18）中の C_{35} は上下揺れと縦揺れの連成復原力係数である。

【数18】

$$F_{35}(k+i|k) = -m_{35}(\infty)\dot{x}_{11}(k+i|k) - \mathbf{C}_r^{35} \mathbf{x}_r^{35}(k+i|k) - C_{35}x_5(k+i|k) \quad \dots (18)$$

where $0 \leq i \leq N-1, t_f = k+N-1$

【0075】

式（15）と $\mathbf{x}_r^{33}$ を合わせた拡大状態ベクトル（ $\mathbf{X}'$ ）を下式（19）とし、これを用いて可動浮体の運動方程式は下式（20）で表せる。式（20）中の F_{e33} 、 C_{33} はそれぞれ、可動部11に働く上下方向の波強制力、上下方向の復原力係数である。

【数19】

$$\mathbf{X}' = [x_3, x_9, \mathbf{x}_r^{33T}]^T \quad \dots (19)$$

【数20】

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{\mathbf{x}}_r^{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_9 \\ \frac{1}{m_f} \{ F_{e33} + (-u_1x_9 - u_2x_3) - F_{r33} - F_{r35}(k+i|k) - C_{33}x_3 \} \\ \mathbf{A}_r^{33} \mathbf{x}_r^{33} + \mathbf{B}_r^{33} x_9 \end{bmatrix} \quad \dots (20)$$

【0076】

式（20）は、一部非線形項を含むものの、2次計画法におけるダイナミカルシステムの定式化として利用できる。

なお、制約条件と評価関数は、第1モデル予測制御計算と同じように定義するので記載を省略する。

【0077】

次に、端部安全手段について説明する。図5は本実施形態による波力発電システムに適用した端部安全手段の概要図である。

端部安全手段90は、内径ガイド付き皿バネ90Aと樹脂製の衝撃吸収材90Bを有し、可動部11の他方の端部側に配置される。フレーム11Cは、スパー12Bの上方に配置される上部ビーム11Ccと、スパー12Bの内部に配置される下部ビーム11Cdを有する。

皿バネ90Aは、スパー12Bの上面を挟み込むように上下一対で棒状部材連結材11Cbの周囲に配置される。皿バネ90Aの上端及び下端には、衝撃吸収材90Bがそれぞれ取り付けられている。

端部安全手段 90 を備えることにより、フロート 11C が大幅に下降し下限値を超えて下降制限域に進入した場合は、上部ビーム 11Cc と上方の衝撃吸収材 90B が接触し、フロート 11C の運動を減衰させる。また、フロート 11C が大幅に上昇し上限値を超えて上昇制限域に進入した場合は、下部ビーム 11Cd と下方の衝撃吸収材 90B が接触し、フロート 11C の運動を減衰させる。

このように、可動部 11 の変位が上限値又は下限値を超える場合、端部安全手段 90 が上部ビーム 11Cc 又は下部ビーム 11Cd と接触し、可動部 11 の運動エネルギーを消散させる。制御器 20 から波力発電機 10 への指令値である最終の制御パラメータは、変位制限値等を考慮することで可動部 11 の端部の変位幅が所定範囲内に収まるように設定されているが、端部安全手段 90 を備えることで、予期せぬ大きさの波や揺動等の発生により可動部 11 の変位が予想を超える場合であっても、可動部 11 の端部と発電主体部 12 等との接触による破損を防止することができる。

10

また、本実施形態のように、端部安全手段 90 を、少ない変位で大きなエネルギーを吸収できる皿パネ 90A と樹脂製の衝撃吸収材 90B を組み合わせた設計とすることで、可動部 11 の可動範囲を大きく損なわずに十分な制動力を持たせることができる。

【0078】

以上のように、本実施形態による波力発電機の実時間制御方法は、波に対する可動部 11 と発電主体部 12 を有した多自由度をもつ波力発電機 10 を、多自由度をもつ波力発電機 10 の第 1 モデルを用いた第 1 モデル予測制御計算により第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の時系列を求め、波力発電機 10 の発電量に影響の大きい自由度に限った第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数を波力発電機 10 の第 2 モデルに適用し、第 2 モデル予測制御計算により第 2 の制御パラメータ及び第 2 の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出し、最終の制御パラメータに基づいて波力発電機 10 を制御する。

20

多自由度系に対応した第 1 モデル予測制御計算（第一段階）と、発電量に影響の大きいものに限った自由度系に対応した第 2 モデル予測制御計算（第二段階）を組み合わせることにより、拘束条件付き最適化問題をリアルタイムで短時間のうちに解いて最終の制御パラメータを求めることができるため、求めた最終の制御パラメータに基づいて多自由度をもつ波力発電機 10 の実時間制御を精度よく行い発電効率を向上させることができる。また、実装時の性能及び安全性検証等を十分に行うことが可能となるため、安全性を確保できる。

30

【0079】

また、波力発電機 10 の周囲の波による水面 Y の変位に基づいて波予測を行い、波予測の結果を第 1 モデル予測制御計算に反映することで、第 1 モデル予測制御計算の精度を向上させることができる。

なお、波予測は、波高計測手段 30 で検出される実際の水面変位に基づいて行う他、水面変位に起因して検力手段 40 で検出される波強制力に基づいて行うこともできる。

【0080】

また、波予測は、水面 Y の変位の時系列データを基に時系列予測手法を用いて予測することで、波予測の精度を上げ第 1 モデル予測制御計算の精度をさらに向上させることができる。

40

【0081】

また、第 1 モデル予測制御計算により、可動部 11 と発電主体部 12 との相対変位の変化に対する速度影響及び／又は相対変位影響を考慮した第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数を求めることで、第 1 モデル予測制御計算の精度を向上させることができる。

【0082】

また、求めた第 1 の制御パラメータを用いて第 1 モデル予測制御計算を繰り返し、第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の最適値の近似解を得ることで、得られた第 1 の制御パラメータ及び第 1 の状態変数の最適値の近似解を第 2 モデル予測制御計算の初期値として用いることができるため、第 2 モデル予測制御計算の初期値をより良好なものとする

50

ことができる。

【0083】

また、第1モデル予測制御計算に当たって、可動部11の発電主体部12に対する機械的制約条件及び／又は波力発電機10の内部消費エネルギーを考慮することで、波力発電機10の実時間制御を、機械的制約条件や内部消費エネルギーを考慮したものとする

【0084】

また、第2モデル予測制御計算において、可動部11と発電主体部12との波力発電機10の発電量に影響の大きい自由度に限った計算及び／又は求める解の探索範囲を限定する計算を行なうことで、第2モデル予測制御計算を精度よくスピーディに行うことができる。

10

【0085】

また、求めた第2の制御パラメータを用いて第2モデル予測制御計算を繰り返し、第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の最適値を得ることで、得られた第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の最適値から導出した最終の制御パラメータに基づいて波力発電機10を制御することができるため、波力発電機10の実時間制御をよりの確なものとする

【0086】

また、第2モデル予測制御計算に当たって、可動部11の発電主体部12に対する機械的制約条件及び／又は波力発電機10の内部消費エネルギーを考慮することで、波力発電機10の実時間制御を、機械的制約条件や内部消費エネルギーを考慮したものとする

20

【0087】

また、第1モデル予測制御計算及び第2モデル予測制御計算を、波の1周期未満で完了するように時間制限をかけることで、波力発電機10の実時間制御の継続性をより強固なものとする

【0088】

また、波力発電機10の制御は、最終の制御パラメータに基づいて可動部11と発電主体部12の相対運動を制御し、波力発電機10の発電量の最大化を図る制御とすることで、発電量を最大化した波力発電機10の実時間制御を実現することができる。

30

【0089】

また、可動部11の近傍の波の波高を計測する波高計測手段30を備えることで、波高計測手段30が計測した波高を波予測等に利用することができる。

【0090】

また、波による波力の影響を計測する検力手段40を備えることで、検力手段40が計測した波力の影響を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0091】

また、可動部11と発電主体部12の相対変位を計測する相対変位計測手段50を備えることで、相対変位計測手段50が計測した可動部11と発電主体部12の相対変位を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

40

【0092】

また、波力発電機10の姿勢を計測する姿勢計測手段60を備えることで、姿勢計測手段60が計測した波力発電機10の姿勢を波予測やモデル予測制御計算等に利用することができる。

【0093】

また、波に対する可動部11と発電主体部12の相対運動における可動部11の端部の変位を制限する端部安全手段90を備えることで、可動部11の変位が予想を超える場合であっても、可動部11の端部と発電主体部12等との接触による破損を防止することができる。

【実施例】

50

【0094】

図6は本発明の一実施例による波力発電システムの概要図であり、図6(a)は全体概要図、図6(b)はリニアPTOの動作説明図である。なお、上記した実施形態と同一機能部材には同一符号を付して説明を省略する。

本実施例の波力発電システム1は、6自由度をもつ波力発電機10と、波力発電機10を実時間制御する制御部20と、波高計測手段30と、検力手段40と、相対変位計測手段50と、姿勢計測手段60を備え、複数の係留索70で水底Xに係留されている。

なお、図6には、波力発電機10の6自由度の運動方向（前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、及び船首揺れ）も併せて示している。

【0095】

本実施例における波力発電機10は、可動部11として電機子又は永久磁石が積層されたシャフト（棒状部材）11Bを有した回生運転と力行運転が可能なリニアPTO（パワー・テイク・オフ）としている。発電主体部12のPTO部12Aには、電機子（コイル）が内蔵されている。相対変位計測手段50は、シャフト11Bの変位量を計測する。

スパー12Bの内部には、制御器20とバッテリー制御システム100が配置されている。制御器20は、バッテリー制御システム100からリニアPTOに供給される電流を制御する。バッテリー制御システム100は、リニアPTOが発電した電力を蓄電し、制御器20からの指令に応じてリニアPTOに電流を供給する。

【0096】

図6(b)の上段の図は、回生運転（発電時）の状態を示している。シャフト11Bの運動により生じる磁界変化で誘導起電力が生じ、電力が回生する。また、発電負荷が減衰力として作用する。生じた回生電力はバッテリー制御システム100の蓄電装置に蓄電される。回生運転においては、シャフト11Bの進行方向と制御力が反対方向となる。

図6(b)の下段の図は、力行運転（非発電時）の状態を示している。力行運転ではリニアモータとして利用する。発電量の一部は巻線抵抗により失われる。力行運転においては、シャフト11Bの進行方向と制御力が同方向となる。

【0097】

図7は本実施例における波力発電システム1の制御フロー図である。

制御器20は、制御を開始すると、波高計測手段30によって計測される水面変位、検力手段40によって計測される波力の影響、相対変位計測手段50によって計測されるシャフト11Bの変位、及び姿勢計測手段60によって計測される波力発電機10の姿勢を取得する（S20：ステップ20）。

ステップ20の後、制御器20は、水面変位予測器21による水面変位予測結果 $\eta'(k+i|k)$ （'は η の上）に基づき、波強制力予測器22において波強制力を推定する（S21：ステップ21）。波強制力の推定には、例えば線形カルマンフィルタ等を用いることができる。

ステップ21の後、制御器20は、第1モデル予測制御器23及び第2モデル予測制御器24によって拘束条件付き最適化演算を行い、必要解である第2の制御パラメータ及び第2の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出する（S22：ステップ22）。

ステップ22の後、制御器20は、求めた最終の制御パラメータに基づき、必要な制御力が出力されるようにバッテリー制御システム100に対して電流供給指令を行う（S23：ステップ23）。

ステップ23の後はステップ20に戻り、次の予測ホライズン間における制御を開始する。

このように、本実施例によれば、リニアPTOである波力発電機10の実時間制御を精度よく行うことができる。

【0098】

図8は本発明の他の実施例による波力発電システムの概要図であり、図8(a)は全体概要図、図8(b)は油圧式リニアPTOの動作説明図である。なお、上記した実施形態

10

20

30

40

50

又は実施例と同一機能部材には同一符号を付して説明を省略する。

本実施例の波力発電システム１は、６自由度をもつ波力発電機１０と、波力発電機１０を実時間制御する制御部２０と、波高計測手段３０と、検力手段４０と、相対変位計測手段５０と、姿勢計測手段６０を備え、複数の係留索７０で水底Ｘに係留されている。

なお、図８には、波力発電機１０の６自由度の運動方向（前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、及び船首揺れ）も併せて示している。

【００９】

本実施例における波力発電機１０は、可動部１１の動きを油圧に変換して利用する油圧式リニアＰＴＯ（パワー・テイク・オフ）としている。

波力発電機１０は、ピストン（棒状部材）１１Ｂと発電主体部１２のＰＴＯ部１２Ａ内に配置されたシリンダによって制御力を発生させる。相対変位計測手段５０は、ピストン１１Ｂの変位量を計測する。

スパー１２Ｂの内部には、制御器２０と油圧制御システム１１０と油圧モータ１２０が配置されている。制御器２０は、油圧制御システム１１０から油圧式リニアＰＴＯに供給される圧油を制御する。油圧制御システム１１０は、油圧式リニアＰＴＯで生成された圧油を蓄圧器１３０に送る。また、制御器２０の指令に応じて可変絞り弁１１１の開度を制御し、油圧式リニアＰＴＯに圧油を送る。蓄圧器１３０は、高圧側蓄圧器１３０Ａと、低圧側蓄圧器１３０Ｂからなる。また、油圧制御システム１１０には、複数の逆止弁１１２が設けられている。

【０１０】

図９は本実施例における波力発電システム１の制御フロー図である。

制御器２０は、制御を開始すると、波高計測手段３０によって計測される水面変位、検力手段４０によって計測される波力の影響、相対変位計測手段５０によって計測されるピストン１１Ｂの変位、姿勢計測手段６０によって計測される波力発電機１０の姿勢、及び蓄圧器１３０の圧力値を取得する（Ｓ３０：ステップ３０）。

ステップ３０の後、制御器２０は、水面変位予測器２１による水面変位予測結果 $\eta'(k+i|k)$ （'は η の上）に基づき、波強制力予測器２２において波強制力を推定する（Ｓ３１：ステップ３１）。波強制力の推定には、例えば線形カルマンフィルタ等を用いることができる。

ステップ３１の後、制御器２０は、第１モデル予測制御器２３及び第２モデル予測制御器２４によって拘束条件付き最適化演算を行い、必要解である第２の制御パラメータ及び第２の状態変数の時系列を求めて最終の制御パラメータを導出する（Ｓ３２：ステップ３２）。

ステップ３２の後、制御器２０は、求めた最終の制御パラメータに基づき、必要な制御力が出力されるように油圧制御システム１１０に対して圧油供給指令を行う（Ｓ３３：ステップ３３）。

ステップ３３の後はステップ３０に戻り、次の予測ホライズン間における制御を開始する。

このように、本実施例によれば、油圧式リニアＰＴＯである波力発電機１０の実時間制御を精度よく行うことができる。

【０１０１】

図１０は本発明のさらに他の実施例による波力発電システムの概要図である。なお、上記した実施形態又は実施例と同一機能部材には同一符号を付して説明を省略する。

本実施例の波力発電システム１は、６自由度をもつ波力発電機１０と、波力発電機１０を実時間制御する制御部２０と、波高計測手段３０と、検力手段４０と、相対変位計測手段５０と、姿勢計測手段６０を備え、複数の係留索７０で水底Ｘに係留されている。

なお、図１０には、波力発電機１０の６自由度の運動方向（前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、及び船首揺れ）も併せて示している。

【０１０２】

本実施例は、いわゆる屈曲揺動型の波力発電システムであり、波力発電機１０は、可動

10

20

30

40

50

部 1 1 として軸 1 7 の周りに運動可能な浮体を有した P T O (パワー・テイク・オフ) であり、P T O を油圧式リニア P T O としている。

可動部 1 1 は、一方のフロート 1 1 A a と他方の浮体 1 1 A b を有する。一方の浮体 1 1 A a 及び他方の浮体 1 1 A b は、平板状又は棒状等である。一方の浮体 1 1 A a と他方の浮体 1 1 A b は、向かい合わせに配置され、対向する端部同士が軸 1 7 を介して接続されている。一方の浮体 1 1 A a の上面には、波高計測手段 3 0、姿勢計測手段 6 0、油圧制御システム 1 1 0、油圧モータ 1 2 0、及び蓄圧器 1 3 0 が配置されている。他方の浮体 1 1 A b の上面には、制御器 2 0 及び姿勢計測手段 6 0 が配置されている。軸 1 7 には検力手段 4 0 及び相対変位計測手段 5 0 が配置されている。P T O 部 1 2 A 及びピストン (棒状部材) 1 1 B は、横倒しに配置され、一方の浮体 1 1 A a と他方の浮体 1 1 A b のそれぞれに立設したフレーム 1 1 C に支えられた状態で、一方の浮体 1 1 A a と他方の浮体 1 1 A b に跨って配置されている。ピストン 1 1 B は、水平方向に往復動する。

10

なお、本実施例における波力発電システム 1 の制御フローは、上記の図 9 を用いて説明したものと同様であるため説明を省略する。

また、本実施例においては P T O を油圧式リニア P T O としたが、可動部 1 1 として電機子又は永久磁石が積層されたシャフト (棒状部材) 1 1 B を有した回生運転と力行運転が可能なりニア P T O とすることもできる。この場合の波力発電システム 1 の制御フローは、上記の図 7 を用いて説明したものと同様である。

また、P T O は、リニア式以外の、例えば回転軸の相対運動により発電する方式とすることもできる。

20

また、本実施例の波力発電機 1 0 に、波に対する可動部 1 1 と発電主体部 1 2 の相対運動における可動部 1 1 の端部の変位を制限する端部安全手段 9 0 を備えることもできる。

このように、本実施例によれば、可動部 1 1 として軸の周りに運動可能な浮体 1 1 A a、1 1 A b を有した P T O である波力発電機 1 0 の実時間制御を精度よく行うことができる。

【産業上の利用可能性】

【0 1 0 3】

本発明は、浮体式の波力発電機に適用し、高効率かつ安全性を確保した波力発電機の実用化に資することができる。また、波力以外の潮流や海流等に起因した水面変動に伴う力を利用した発電機にも展開が可能である。

30

【符号の説明】

【0 1 0 4】

1 波力発電システム

1 0 波力発電機

1 1 可動部

1 2 発電主体部

3 0 波高計測手段

4 0 検力手段

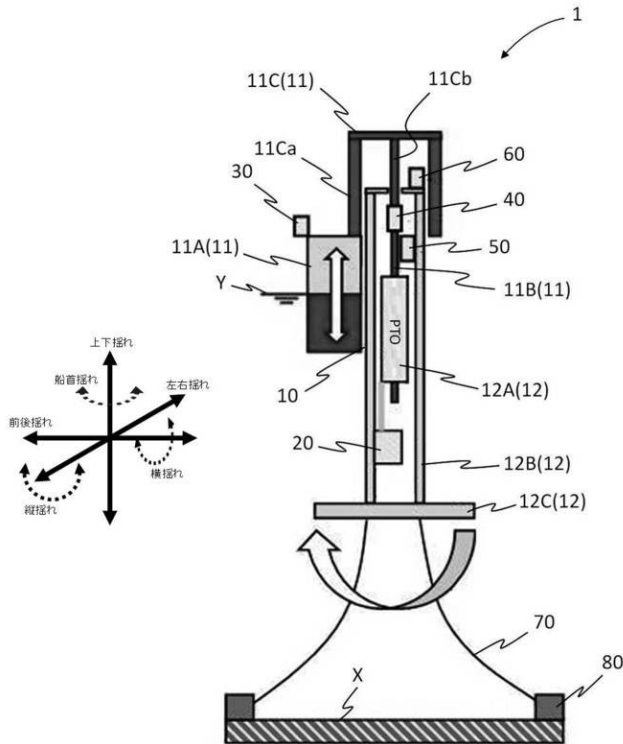
5 0 相対変位計測手段

6 0 姿勢計測手段

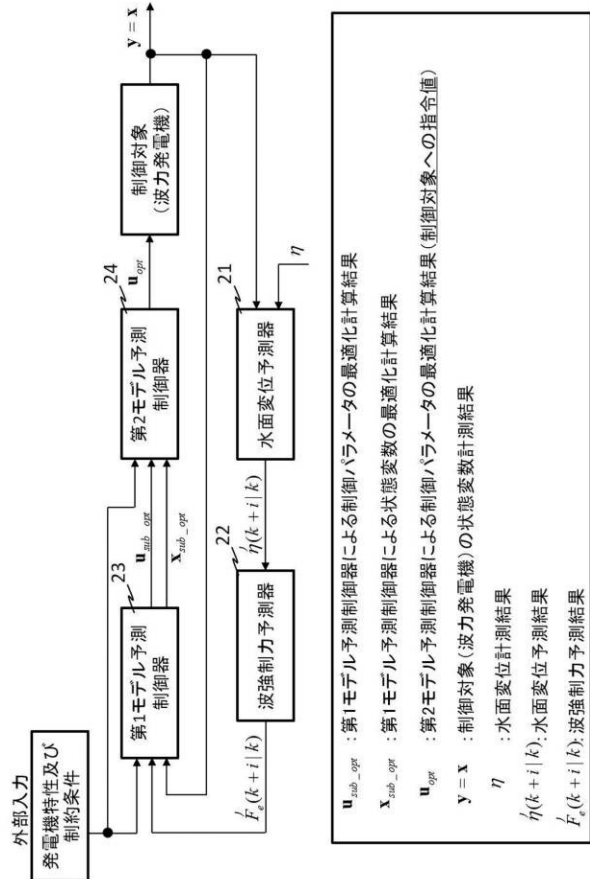
9 0 端部安全手段

40

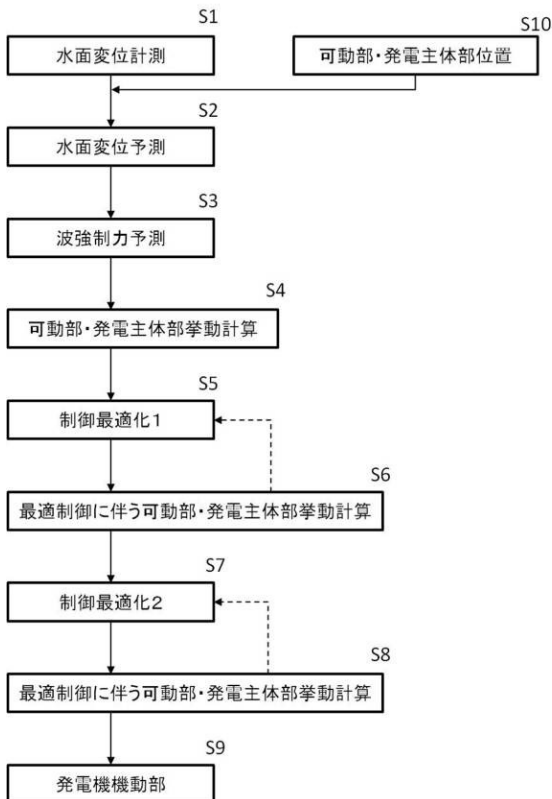
【図 1】



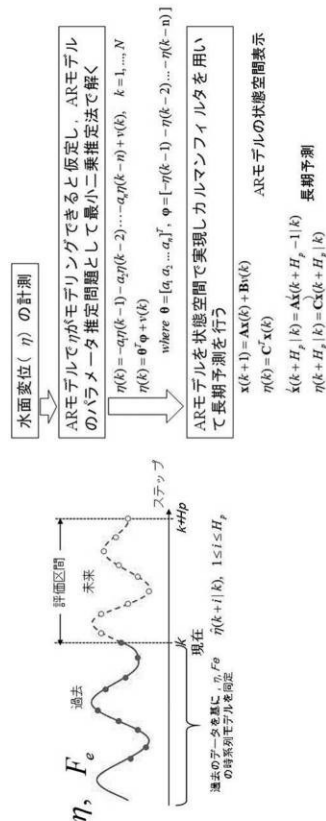
【図 2】



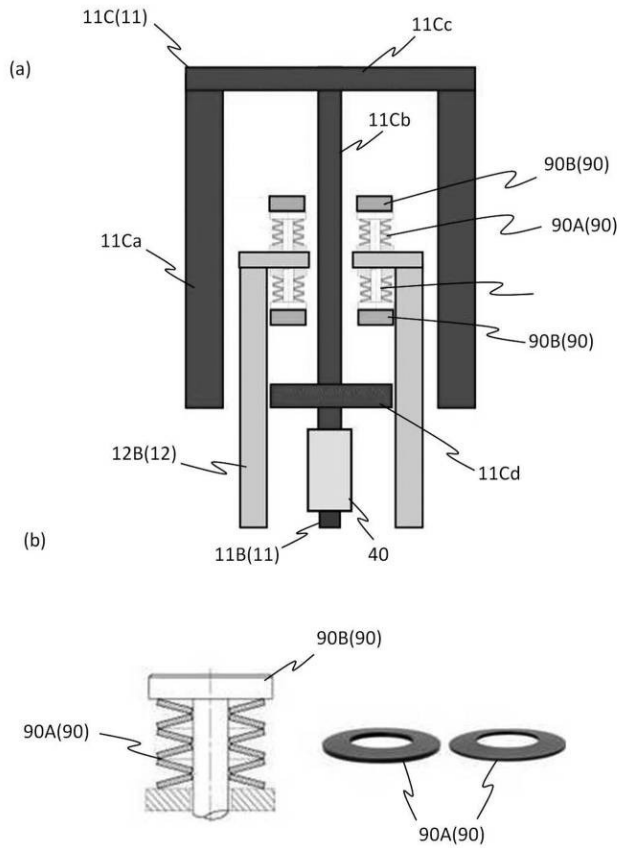
【図 3】



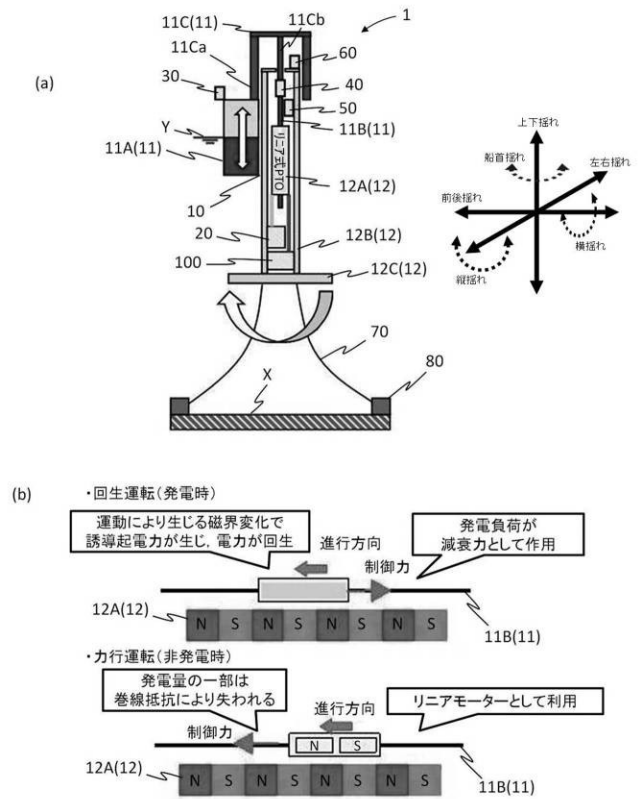
【図 4】



【図 5】



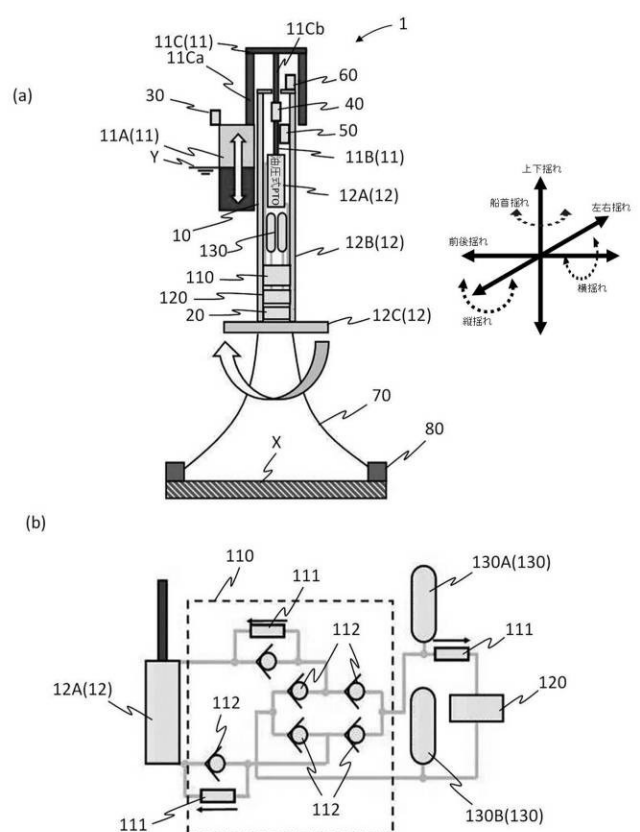
【図 6】



【図 7】



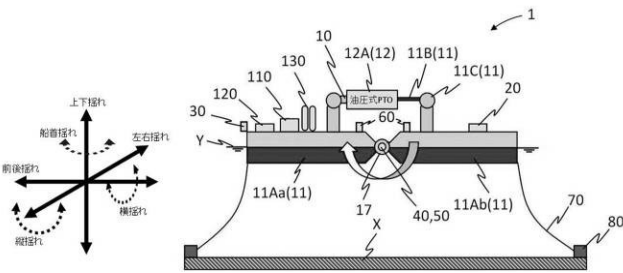
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(72)発明者 藤原 敏文

東京都三鷹市新川6丁目3番1号 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所内

(72)発明者 谷口 友基

東京都三鷹市新川6丁目3番1号 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所内

Fターム(参考) 3H074 AA02 AA12 BB11 BB19 CC04