

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6513015号
(P6513015)

(45) 発行日 令和1年5月15日(2019.5.15)

(24) 登録日 平成31年4月19日(2019.4.19)

(51) Int.Cl.

F I

G 0 5 B 13/04 (2006.01)

G 0 5 B 13/04

請求項の数 15 外国語出願 (全 27 頁)

| | | | |
|--------------|-------------------------------|-----------|-------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2015-218271 (P2015-218271) | (73) 特許権者 | 000006013 |
| (22) 出願日 | 平成27年11月6日(2015.11.6) | | 三菱電機株式会社 |
| (65) 公開番号 | 特開2016-100009 (P2016-100009A) | | 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 |
| (43) 公開日 | 平成28年5月30日(2016.5.30) | (74) 代理人 | 100110423 |
| 審査請求日 | 平成30年9月5日(2018.9.5) | | 弁理士 曾我 道治 |
| (31) 優先権主張番号 | 14/552,788 | (74) 代理人 | 100111648 |
| (32) 優先日 | 平成26年11月25日(2014.11.25) | | 弁理士 梶並 順 |
| (33) 優先権主張国 | 米国 (US) | (74) 代理人 | 100122437 |
| 早期審査対象出願 | | | 弁理士 大宅 一宏 |
| | | (74) 代理人 | 100147566 |
| | | | 弁理士 上田 俊一 |
| | | (74) 代理人 | 100161171 |
| | | | 弁理士 吉田 潤一郎 |
| | | (74) 代理人 | 100161115 |
| | | | 弁理士 飯野 智史 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 機械の動作を制御する方法、および機械の動作を反復的に制御する制御システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

機械動特性のモデルに従って機械の動作を制御する方法であって、

制御入力に対する制約、および前記機械の状態に対する制約を条件としたコスト関数の最適化に基づいて前記モデルを用いて求められた前記制御入力を用いて、前記機械の前記動作を反復的に制御することを含み、

前記動作は、複数の反復にわたってオンラインで制御され、

各反復は、

以前の反復について求められた以前の制御入力を用いて制御された前記機械の出力の測定結果を用いて、前記機械の現在の状態を求めることと、

前記機械の物理量を表す、前記機械動特性のモデルのパラメーターを更新し、前記現在の状態と、前記機械動特性の前記モデルを用いて推定された状態との間の予測誤差を縮小することと、

前記コスト関数を最適化し、制御入力を生成することと、

前記制御入力を用いて前記機械を制御することと、

を含み、

前記コスト関数は、前記機械の性能に係る第1の項と、前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターの推定を改善する第2の項を含み、前記第2の項は、前記予測誤差の関数によって重み付けられ、前記第2の項は、前記機械動特性の前記モデルの予測されたパラメーター誤差共分散の情報関数を含み、

該方法は、方法を実行する格納された命令がプロセッサにより実行されるとき、前記命令は、前記方法の少なくともいくつかのステップを実行する、機械動特性のモデルに従って機械の動作を制御する方法。

【請求項 2】

前記予測誤差の関数は、非負の非減少関数である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記機械動特性の前記モデルは、前記モデルのパラメーター間の関係を規定する公称モデルと、前記モデルの少なくとも 1 つのパラメーターの値の範囲を規定する不確実性モデルとを含み、前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターは、前記パラメーターの更新された値が前記値の範囲内になるように更新される、請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 4】

前記不確実性モデルは、前記公称モデルおよび前記不確実性モデルの組み合わせが、加法性外乱の凸結合を有する線形モデルの凸結合に含まれるように拡張される、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記機械動特性の前記モデルは、前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターが前記線形モデルの凸結合および前記加法性外乱の凸結合内になるように再帰的に更新される、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

前記機械動特性の前記モデルを更新することは、
前記線形モデルの組み合わせベクトルおよび前記加法性外乱の組み合わせベクトルを求めることと、
前記線形モデルの前記組み合わせベクトルを前記線形モデルの前記凸結合に投影することと、
前記加法性外乱の前記組み合わせベクトルを前記加法性外乱の前記凸結合に投影することと、
を含む、請求項 4 に記載の方法。

20

【請求項 7】

前記制御入力に対する前記制約は、前記制御入力に対する制御不変制約であって、該制御不変制約を満たす前記制御入力の任意の値が、前記機械の前記動作に対する制約を満たす状態の制御不変部分集合内に前記機械の状態を維持するように選択された前記制御入力に対する制御不変制約を含み、前記制御不変部分集合内の前記機械の任意の状態について、前記制御不変制約を満たすとともに、前記不確実性モデルによって規定された前記範囲内の前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターの全ての値について前記機械の前記状態を前記制御不変部分集合内に維持する、許容可能な制御入力が存在する、請求項 3 に記載の方法。

30

【請求項 8】

前記制御入力に対する前記制約は、前記機械の前記動作に対する制約を満たす状態の制御不変部分集合内の任意の状態について、制御不変制約が、前記公称モデルおよび前記不確実性モデルによって規定された前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターの全ての値について前記動作中満たされるような制御入力が存在することを保証する後方到達可能反復によって前記線形モデルの前記凸結合および前記加法性外乱の前記凸結合から求められた前記制御不変制約を含む、請求項 4 に記載の方法。

40

【請求項 9】

前記制御入力に対する前記制約は、前記公称モデルおよび前記不確実性モデルによって規定された前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターの全ての値について、前記機械の前記状態を目標値に収束させる安定性制約を含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 10】

前記安定性制約は、前記機械の制御リアプノフ関数を含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

50

前記制御リアプノフ関数は、前記制御不変制約を満たす前記機械の全ての状態について実現可能値低減テストを満たす無限ノルム制御リアプノフ関数であり、前記実現可能値低減テストは、

前記無限ノルム制御リアプノフ関数を記述する行列の行を選択することと、

前記制御不変制約を満たす前記機械の少なくとも１つの入力について前記無限ノルム制御リアプノフ関数を記述する前記行列の前記行に対する実現可能値低減を、正の条件および負の条件について満たす前記機械の前記状態の凸成分を求めることと、

前記凸成分の和集合を求めることと、

前記機械の前記状態の前記制御不変部分集合内の前記機械の全ての前記状態が前記凸成分の前記和集合に含まれることを検証することと、

からなる、請求項１０に記載の方法。

10

【請求項１２】

前記最適化は、数値最適化アルゴリズムによって解かれる、請求項１に記載の方法。

【請求項１３】

機械動特性のモデルのパラメーター間の関係を規定する公称モデルと、前記モデルの少なくとも１つのパラメーターの値の範囲を規定する不確実性モデルとを含む前記機械動特性の前記モデルに従って機械の動作を制御する方法であって、

コスト関数の最適化に基づいて前記機械動特性の前記モデルを用いて求められた制御入力を用いて、前記機械の前記動作を反復的に制御すること、

を含み、前記最適化は、前記制御入力に対する制約、および前記機械の状態に対する制約を含む前記機械の前記動作に対する制御不変制約であって、該制御不変制約を満たす前記制御入力の任意の値が、前記機械の前記動作に対する制約を満たす状態の制御不変部分集合内に前記機械の状態を維持するように選択された前記制御入力に対する制御不変制約を条件とし、前記制御不変部分集合内の前記機械の任意の状態について、前記制御不変制約を満たすとともに、前記不確実性モデルによって規定された前記範囲内の前記モデルの前記パラメーターの全ての値について前記機械の前記状態を前記制御不変部分集合内に維持する、許容可能な制御入力が存在し、前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターは、前記機械の物理量を表し、前記動作は、複数の反復にわたってオンラインで制御され、各反復は、

20

以前の反復について求められた以前の制御入力を用いて制御された前記機械の出力の測定結果を用いて、前記機械の現在の状態を求めることと、

30

前記パラメーターの更新された値が前記値の範囲内にあるように前記機械動特性のモデルのパラメーターを更新し、前記現在の状態と、前記機械動特性の前記以前のモデルを用いて推定された状態との間の予測誤差を縮小することと、

前記コスト関数を最適化し、制御入力を生成することと、

前記制御入力を用いて前記機械を制御することと、
を含み、

前記コスト関数は、前記機械の性能に係する第１の項と、前記機械動特性の前記モデルの前記パラメーターの推定を改善する第２の項を含み、前記第２の項は、前記予測誤差の関数によって重み付けられ、前記第２の項は、前記機械動特性の前記モデルの予測されたパラメーター誤差共分散の情報汎関数を含み、

40

該方法は、方法を実行する格納された命令がプロセッサにより実行されるとき、前記命令は、前記方法の少なくともいくつかのステップを実行する、機械動特性のモデルに従って機械の動作を制御する方法。

【請求項１４】

機械動特性のモデルに従って機械の動作を反復的に制御する制御システムであって、

前記モデルのパラメーター間の関係を規定する公称モデルと、前記モデルの少なくとも１つのパラメーターの値の範囲を規定する不確実性モデルとを含む前記機械の前記モデル、および制御入力に対する制約と前記機械の状態に対する制約を含む前記機械の前記動作に対する前記制約を記憶するメモリと、

50

少なくとも１つのプロセッサであって、

前記機械の出力の測定結果を用いて、前記機械の現在の状態を求め、

前記機械動特性のモデルのパラメータを更新し、前記現在の状態と、前記機械動特性の前記モデルを用いて推定された状態との間の予測誤差を縮小し、前記パラメータの更新された値が前記値の範囲内になるようにし、

コスト関数を最適化して制御入力を生成し、前記コスト関数は、前記機械の性能に係する第１の項と、前記機械動特性の前記モデルの前記パラメータの推定を改善する第２の項を含み、前記第２の項は、前記予測誤差の関数によって重み付けられ、前記第２の項は、前記機械動特性の前記モデルの予測されたパラメータ誤差共分散の情報関数を含み、

10

前記制御入力を用いて前記機械を制御する、機械動特性のモデルに従って機械の動作を反復的に制御する制御システム。

【請求項１５】

前記制御入力に対する前記制約は、前記制御入力に対する制御不変制約であって、該制御不変制約を満たす制御入力の任意の値が、前記機械の前記動作に対する制約を満たす状態の制御不変部分集合内に前記機械の状態を維持するように選択された前記制御入力に対する制御不変制約を含み、前記制御不変部分集合内の前記機械の任意の状態について、前記制御不変制約を満たすとともに、前記不確実性モデルによって規定された前記範囲内の前記モデルの前記パラメータの全ての値について前記機械の前記状態を前記制御不変部分集合内に維持する、許容可能な制御入力が存在する、請求項１４に記載の制御システム

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、包括的には、機械の動作を制御することに関し、より詳細には、後退ホライズンにわたってモデル予測制御（ＭＰＣ）を用いて動作を制御することに関する。

【背景技術】

【０００２】

機械制御では、ソフトウェアまたはハードウェアの一方または組み合わせを用いて実施することができるコントローラが、例えば、センサーおよび／または推定器、機械の出力から取得された測定値に基づいて、この機械への入力のコマンド値を生成する。コントローラは、機械が所望のとおり動作するように、例えば、動作が所望の基準プロファイルに従うか、または出力をある特定の値に調整するように、入力を選択する。いくつかの場合には、コントローラは、例えば、対応する変数がいくつかの所定の範囲内にあることを確保して物理的仕様から安全な機械動作を確保する制約を機械の入力および出力に対して課す。そのような制約を課すために、コントローラは、多くの場合、機械のモデルを用いて、コマンド、すなわち、制御入力が印加されたときに機械がどのような挙動を引き起こすのかを予測する。制約を機械の入力および出力に対して課している間に機械の制御を達成することが可能なコントローラにおけるプロセスの１つの例は、モデル予測制御（ＭＰＣ）である。

30

40

【０００３】

ＭＰＣは、機械のモデルの反復的な有限ホライズン最適化に基づいており、適切な制御動作を取るために将来のイベントを予想する能力を有する。これは、制約を条件として、将来の有限時間ホライズンにわたって機械の動作を最適化し、あとは、現在のタイムスロットにわたって制御を実施するだけで達成される。例えば、制約は、機械の物理的限界、機械の動作に対する安全性限界、および軌道上の性能限界を表すことができる。機械の制御戦略は、そのような制御戦略について、機械によって引き起こされた運動が全ての制約を満たすときに許容することができる。例えば、時間 t において、機械の現在の状態がサンプリングされ、許容可能なコスト最小化制御戦略が、将来における比較的短い時間ホライズンについて求められる。具体的には、オンライン計算また

50

はリアルタイム計算が、時間 $t + T$ までのコスト最小化制御ストラテジーを求める。制御のステップが実施された後、状態が再びサンプリングされ、計算がその時の現在の状態から開始して繰り返され、新たな制御および新たな予測された状態パスが得られる。予測ホライズンは、前方にシフトし、この理由から、MPC は、後退ホライズン制御とも呼ばれる。

【0004】

MPC は、システムの様々な物理的制約および仕様制約を条件として、有限の将来の時間にわたって最適制御問題を解くことによって、システムのモデルおよび所望の基準軌道に基づいて、機械の運動の実際の軌道を生成するのに用いることができる。MPC は、機械の基準運動と実際の運動との間の誤差、機械のエネルギー消費、および誘発されるシステム振動等の機械の運動の性能指数を最小化することを目標とする。

10

【0005】

MPC は、モデルベースのフレームワークであるので、MPC の性能は、必然的に、最適制御計算において用いられる予測モデルの品質に依存する。しかしながら、ほとんどの場合、いくつかのパラメーターは、正確に測定されないので、機械動特性のモデルは、事前には未知である。このため、コントローラは、機械がすでに動作中に、機械のモデルの未知のパラメーターを推定することが必要な場合があり、このため、パラメーターが推定されている間、制約を課す場合もある。そのような問題を取り扱う従来の手法は、適応型 MPC または学習ベースの MPC を含み、これらの MPC では、未知の機械パラメーターを学習するために、MPC 制御問題が、閉ループ同定方式を用いて強化される。未知のパラメーターを学習することによって、コントローラによって達成される機械の動作が改善される。

20

【0006】

しかしながら、適応型 MPC および学習ベースの MPC の現在の手法は、複数の理由のために限界がある。第 1 に、未知のパラメーターを推定している間、制約が違反される可能性があるか、または制約を控えめに課すために、制御性能が過度に低減される場合がある。実際に、特許文献 1 に記載されている方法等のいくつかの既存の方法は、制約を単に無視し、このため、制約を条件として機械の許容可能な制御ストラテジーを生成することが可能でない。

【0007】

30

第 2 に、閉ループ同定方法を MPC コントローラに単に含めることによって生成される、所望の値への推定される未知のパラメーターの収束は、遅くなる可能性がある。これは、パラメーターを推定するために機械の強い励振が同定に必要とされている間、コントローラは、機械の励振を制限するので、適応型制御における一般的な問題を反映している。また、未知のパラメーターを用いて制約を課す控えめな方法は、多くの場合、制約の違反を防止するために大きな励振を回避し、このため、推定値のさらに遅い収束が得られる。最後に、適応型 MPC のいくつかの方法は、かなりの計算量を必要とし、高価なプロセッサにおいても低速でしか実行することができず、低い応答帯域幅を有する機械を制御することしか可能でない。

【先行技術文献】

40

【特許文献】

【0008】

【特許文献 1】米国特許出願公開第 2011/0022193 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

したがって、不確実性を含む MPC を用いて制約を受ける機械の動作を制御する方法が必要とされている。

【課題を解決するための手段】

【0010】

50

本発明のいくつかの実施の形態は、機械の動作に対する制約がモデルのパラメータの任意の許容可能な値について違反されないことを保証しつつ、機械の各状態に印加することができる制御入力に対する制約を用いることによって、機械の動作に対して制約を課すことと、機械のモデルのパラメータの値への高速な収束とを有するモデル予測制御(MPC)方法を提供することが可能であるという認識に基づいている。いくつかの実施の形態では、MPCの制御戦略は、制御の性能と、パラメータの推定率とを合わせて最適化する。

【0011】

いくつかの実施の形態は、機械パラメータの不確実な値の許容可能な範囲に基づいて規定されたモデルのファミリーに対して制約を課することが可能であるという認識に基づいている。このモデルのファミリーは、実現可能な状態の集合を提供する。例えば、これらの実現可能な状態の特別な部分集合は、この部分集合内の全ての状態について、それらの既知の範囲内の未知の機械パラメータの全ての値について、状態をその部分集合内に維持する実現可能な制御入力が存在するように、設計することができる。

【0012】

最適化された入力が状態を上記特別な部分集合内に維持するように、MPCを用いてシステムを制御することが可能であるということがさらに認識されている。これによって、MPCによって制御されるシステムは、パラメータが不確実である場合を含む全ての制約を常に満たすことが保証される。

【0013】

状態を上記特別な部分集合内に維持する入力の中で、制御と同定性能との間のトレードオフを最適化する入力を選ぶことができるということがさらに認識されている。構築することによって、この入力も、未知のパラメータの真の値にかかわらず、制約の充足を保証する。

【0014】

MPC予測モデルおよび制御と同定との間のトレードオフは、未知のパラメータの同定に基づいてオンラインで更新することができるということ、並びに制御と同定性能との間のトレードオフは、残っている不確実性に基づいて調整することができるということも認識されている。

【0015】

したがって、本発明の1つの実施の形態は、機械のモデルに従って機械の動作を制御する方法を開示する。本方法は、制御入力に対する制約を条件としたコスト関数の最適化に基づいて前記モデルを用いて求められた前記制御入力を用いて、前記機械の前記動作を反復的に制御すること、を含み、少なくとも1つの現在の反復は、前記機械の以前のモデルを用いて以前のコスト関数を最適化することによって以前の反復について求められた以前の制御入力を用いた前記制御の後に、前記機械の現在の状態を求めることと、前記機械の現在のモデルを求めて、前記現在の状態と、前記機械の前記以前のモデルを用いて推定された状態との間の相違を縮小することと、前記以前のモデルと前記現在のモデルとの間の相違に基づいて前記コスト関数を更新して、現在のコスト関数を生成することと、前記現在のモデルおよび前記現在のコスト関数を用いて前記現在の反復における前記制御の現在の制御入力を求めることと、を含み、該方法のステップは、前記機械の前記動作を制御するコントローラのプロセッサによって実行される。

【0016】

別の実施の形態は、機械のモデルのパラメータ間の関係を規定する公称モデルと、前記モデルの少なくとも1つのパラメータの値の範囲を規定する不確実性モデルとを含む前記モデルに従って前記機械の動作を制御する方法を開示する。本方法は、コスト関数の最適化に基づいて前記機械の前記モデルを用いて求められた制御入力を用いて、前記機械の前記動作を反復的に制御すること、を含み、前記最適化は、前記制御入力に対する制御不変制約であって、該制御不変制約を満たす前記制御入力の任意の値が、前記機械の前記動作に対する制約を満たす状態の制御不変部分集合内に前記機械の状態を維持するように

10

20

30

40

50

選択された前記制御入力に対する制御不変制約を条件とし、前記制御不変部分集合内の前記機械の任意の状態について、前記制御不変制約を満たすとともに、前記不確実性モデルによって規定された前記範囲内の前記モデルの前記パラメータの全ての値について前記機械の前記状態を前記制御不変部分集合内に維持する、許容可能な制御入力が存在し、少なくとも1つの現在の反復は、前記機械の以前のモデルを用いて以前のコスト関数を最適化することによって以前の反復について求められた以前の制御入力を用いた前記制御の結果から得られる前記機械の現在の状態を求めることと、前記機械の現在のモデルの前記パラメータの現在の値が前記値の範囲内にるように前記現在のモデルを求めて、前記測定された現在の状態と、前記機械の前記以前のモデルを用いて推定された状態との間の相違を縮小することと、前記以前のモデルと前記現在のモデルとの間の相違に基づいて前記コスト関数を更新することとであって、前記コスト関数は、前記動作の目的に従って前記制御入力の第1の値を求める第1の項を含むとともに、前記機械の前記現在の状態と前記機械のモデルを用いて推定された状態との間の前記相違を縮小する前記制御入力の第2の値を求める第2の項を含み、前記最適化は、前記第1の項および前記第2の項の組み合わせを最適化するようになっており、前記コスト関数を前記更新することは、前記組み合わせにおける前記第2の項の重みを変化させることを含むことと、前記現在のモデルおよび前記現在のコスト関数を用いて前記現在の反復における前記制御の現在の制御入力を求めることと、を含み、該方法のステップは、前記機械の前記動作を制御するコントローラのプロセッサによって実行される。

【0017】

さらに別の実施の形態は、機械のモデルに従って機械の動作を反復的に制御する制御システムを開示する。本システムは、前記モデルのパラメータ間の関係を規定する公称モデルと、前記モデルの少なくとも1つのパラメータの値の範囲を規定する不確実性モデルとを含む前記機械の前記モデル、および前記機械に対する前記制約を記憶するメモリと、少なくとも1つのプロセッサであって、前記機械の現在のモデルを用いて現在の制御入力に対する制約を条件として現在のコスト関数を最適化することによって現在の反復中の前記制御の前記現在の制御入力を求める制御入力モジュールと、前記現在のモデルの前記パラメータの現在の値が、前記値の範囲を有するとともに、前記機械の以前のモデルを用いて以前のコスト関数を最適化することによって以前の反復について求められた以前の制御入力を用いた前記制御の結果から得られた前記機械の現在の状態と、前記機械の前記以前のモデルを用いて推定された推定状態との間の相違を縮小するように、前記機械の前記現在のモデルを求めるモデル学習モジュールと、前記機械の前記現在の状態と、以前の機械状態および以前の機械制御入力から前記現在の機械モデルを用いて推定された前記機械の状態との間の相違を用いて、前記以前のコスト関数を更新するコスト関数モジュールと、を含む前記コントローラのモジュールを実行する、少なくとも1つのプロセッサと、を備える。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1A】本発明の1つの実施の形態による機械の動作を制御するコントローラのブロック図である。

【図1B】本発明の1つの実施の形態による図1Aのコントローラの一般的な構造のブロック図である。

【図2A】本発明の1つの実施の形態によるコントローラの様々なモジュールのブロック図である。

【図2B】本発明の1つの実施の形態によるコントローラのモジュールによって実行される方法のブロック図である。

【図3A】本発明のいくつかの実施の形態の原理を視覚化した座標系に配置された一例示のポリトープの概略図である。

【図3B】機械の状態に対するモデルのパラメータの不確実性の影響の概略図である。

【図4A】本発明のいくつかの実施の形態による機械の動作に対する様々な制約によって

規定された状態の制御不変部分集合の２次元投影の一例の概略図である。

【図４Ｂ】本発明のいくつかの実施の形態に従って求められた、機械の状態の実現可能領域と制御不変部分集合との間の関係を示す概略図である。

【図５】本発明の１つの実施の形態による制御不変部分集合を求める後方可到達領域計算のブロック図である。

【図６】本発明の１つの実施の形態による状態の以前の集合を求める一例示の実施の態様のブロック図である。

【図７】本発明の１つの実施の形態による状態 - 入力の組を求める方法のブロック図である。

【図８】本発明の１つの実施の形態による制御不変リアプノフを求める方法のブロック図である。

10

【図９】本発明の１つの実施の形態による候補のリアプノフ関数の状態の部分集合を求める方法のブロック図である。

【図１０Ａ】有効な制御不変リアプノフ関数および無効な制御不変リアプノフ関数を判断するテストの概略図である。

【図１０Ｂ】有効な制御不変リアプノフ関数および無効な制御不変リアプノフ関数を判断するテストの概略図である。

【図１１】本発明の１つの実施の形態による機械のモデルを更新する方法のブロック図である。

【発明を実施するための形態】

20

【００１９】

図１Ａは、機械１０２の動作を制御する制御システム１０１のブロック図を示している。機械１０２は、その動作が、コマンドに応答して、位置、速度、電流、温度、数値等の量を変化させる装置である。機械の動作は、本明細書において用いられるように、そのような量を変化させる機械の運動を決定する。制御システムは、上記量のうちのいくつかの所望の軌道または目標点等の機械の所望の運動１０３を受け取り、制御入力１０４を介して機械を制御する。これらの制御入力は、機械の動作のパラメータを変化させるコマンドを含むこともできるし、機械の運動に影響を与え、その結果、機械の量１０５を生成する電圧、圧力、トルク、力等のパラメータの実際の値を含むこともできる。

【００２０】

30

制御システム１０１は、機械に直接またはリモートに接続されたセンサー、ハードウェア、またはソフトウェアから、機械の運動についての情報１０６を受信する。情報１０６は、機械の状態を含む。機械は、この状態を制御入力１０４の選択に用いる。情報１０６は、運動の量１０５のうちのいくつかまたは全てを含むことができ、機械についての追加の情報も含むことができる。量１０５、制御入力１０４、またはそれらの組み合わせには、機械の動作に対する制約１１４によるいくつかのあらかじめ規定された範囲内に留まるように要求することができる。

【００２１】

図１Ｂは、本発明の１つの実施の形態による制御システム１０１の一般的な構造を示している。制御システム１０１は、コントローラのモジュールを実行する少なくとも１つのプロセッサ１３０を備える。プロセッサ１３０は、モデル１１２および制約１１４を記憶するメモリ１２０に作動接続されている。本発明のいくつかの実施の形態の目的は、制約１１４を条件として機械１１２のモデルを用いて制御入力１０４を求めることである。いくつかの実施の形態の別の目的は、制約１１４が更新中満たされるように、機械のモデルを動作中に更新する（１１６）ことである。

40

【００２２】

図２Ａは、本発明の１つの実施の形態による制御システム１０１の様々なモジュールのブロック図を示している。本発明のいくつかの実施の形態では、機械のＭＰＣまたはモデルは、不確実性の少なくとも１つのパラメータを含む。例えば、ロボットのアームのモデルは、物体をケアするアームの質量についての不確実性を含むことがある。列車の移動

50

のモデルは、現在の天候条件における車輪とレールとの摩擦についての不確実性を含むことがある。いくつかの実施の形態では、制御システム 101 は、制御の不確実性を求めるのに用いられる。

【0023】

いくつかの実施の形態では、機械のモデルは、モデル 112 のパラメーター間の関係を規定する公称モデル 202 と、モデル 112 および / または公称モデル 202 の少なくとも 1 つのパラメーターの値の範囲を規定する不確実性モデル 203 とを含む。例えば、公称モデルのパラメーターは、当該パラメーターのデフォルト値を用いることができる。例えば、公称モデル 202 は、理想的な条件における機械の運動を記述することができる。しかしながら、機械は、摩耗、外部動作、時間および天候に起因した変動、製造プロセスにおける不完全性に起因した正確に知られていない物理量、または測定誤差等の外部の影響を受け、したがって、機械の実際の運動は、公称モデルのものと正確に同じではない。例えば、1 つの実施の形態は、公称モデルから開始して、機械状態値のシーケンスの観点から、現在のモデルが観察された機械の運動と一致するまで、現在のモデルを反復的に更新する。

10

【0024】

機械量のうちのいくつかは、機械の動作に対する制約 205 によって規定される所望の範囲内に留まる必要がある。本発明のいくつかの実施の形態は、制御入力に対する制約 206 を、不確実性モデル 203 を考慮に入れて、機械の動作に対する制約 205 から求めることができるという付加的な認識に基づいている。例えば、制御入力に対する制約 206 は、制約 206 を満たす制御入力 104 によって制御される機械 102 が、不確実性モデル 203 によって規定された許容可能な範囲内にあるモデルのパラメーターの値の全ての変動について制約 206 を満たすことを保証するように求められる。

20

【0025】

いくつかの実施の形態では、制約 206 は、オフラインで求められ、制約 205 は、機械の制御に用いられない。いくつかの実施の形態では、制約 206 は、機械を制御する少なくともいくつかの制約 205 と組み合わせて用いられる。

【0026】

いくつかの実施の形態では、制御入力 104 は、当該制御入力に対する制約 206 を条件としたコスト関数 209 の最適化に基づいて求められる。制約 206 は、制御の実現可能性を保証するので、いくつかの実施の形態は、機械の動作の目的を達成する制御と、機械のモデルのパラメーターの不確実性を低減する割合を増加させる制御との間のトレードオフのための種々の項をコスト関数に含む。

30

【0027】

例えば、コスト関数は、動作の目的に従って制御入力の第 1 の値を求める第 1 の項を含むことができ、機械の現在の状態と、機械のモデルを用いて推定された状態との間の相違を縮小する制御入力の第 2 の値を求める第 2 の項を含み、そのため、最適化は、これらの第 1 の項および第 2 の項の組み合わせを最適化し、コスト関数を更新することは、この組み合わせにおける第 2 の項の重みを変化させることを含む。

【0028】

したがって、いくつかの実施の形態では、制御システム 101 の様々なモジュールは、異なる制御目的について異なる項を含むコスト関数の最適化を用いて、機械の公称モデルおよび不確実性モデルによって規定された値の範囲内で機械のモデルのパラメーターを更新しながら、機械の動作の目的を満たす機械の制御を達成する。

40

【0029】

制御システムは、機械のモデルを記憶するメモリ 120 と、コントローラのモジュールを実行するプロセッサ 130 とを備える。モジュールは、現在のコスト関数 209 を最適化することによって現在の反復中に制御する現在の制御入力 104 を求める制御入力モジュール 208 を含む。この制御入力モジュールは、現在の制御入力に対する制約 206 を条件として、機械の現在のモデル 201 を用いて現在のコスト関数を最適化する。

50

【 0 0 3 0 】

制御システムは、機械の現在のモデル 2 0 1 を求めるモデル学習モジュール 2 0 4 も備える。このモデル学習モジュールは、現在のモデルのパラメーターの現在の値が、公称モデル 2 0 2 および不確実性モデル 2 0 3 によって規定された値の範囲を有するとともに、機械の以前のモデルを用いて以前のコスト関数を最適化することによって以前の反復の間に求められた以前の制御入力を用いて制御した結果得られた機械の現在の状態 1 0 6 と、機械の以前のモデルを用いて推定された推定状態 2 1 6 との間の相違を縮小するようになっている。

【 0 0 3 1 】

コントローラは、現在のコスト関数 2 0 9 を求めるコスト関数モジュール 2 0 7 も備える。例えば、コスト関数モジュールは、以前のモデルと現在のモデルとの間の相違を用いて以前のコスト関数を更新し、現在のコスト関数を生成する。制御のステップは、反復的に実行されるので、現在のモデルおよび現在のコスト関数は、後続の反復については以前のモデルおよび以前のコスト関数になる。例えば、以前のモデル、以前のコスト関数、および以前の制御入力は、以前の反復においては、現在のモデル、現在のコスト関数、および現在の制御入力として求められる。

【 0 0 3 2 】

図 2 B は、制御システム 1 0 1 のモジュールによって実行される方法のブロック図を示している。本方法は、コスト関数の最適化に基づいて機械のモデルを用いて求められた制御入力を用いて、機械の動作を反復的に制御する (2 7 0)。本方法は、機械の以前のモデルを用いて以前のコスト関数を最適化することによって以前の反復について求められた以前の制御入力を用いた制御の結果から得られる機械の現在の状態を求める (2 1 0)。

【 0 0 3 3 】

本方法は、測定された現在の状態と、機械の以前のモデルを用いて推定された状態との間の相違を縮小する機械の現在のモデルを、この現在のモデルのパラメーターの現在の値が上記値の範囲を有するように調整し (2 2 0)、以前のモデルと現在のモデルとの間の相違に基づいてコスト関数を更新する (2 3 0)。この更新 2 3 0 は、機械の動作の目的を達成する制御と、機械のモデルのパラメーターの不確実性を低減する割合を増加させる制御との間のトレードオフを提供する。

【 0 0 3 4 】

いくつかの実施の形態では、コスト関数は、動作の目的に従って制御入力の第 1 の値を求める第 1 の項を含むとともに、機械の現在の状態と機械のモデルを用いて推定された状態との間の相違を縮小する制御入力の第 2 の値を求める第 2 の項を含み、最適化は、第 1 の項および第 2 の項の組み合わせを最適化する。それらの実施の形態では、コスト関数は、その組み合わせにおける第 2 の項の重みを変化させることによって更新される。例えば、以前のモデルと現在のモデルとの間の相違が小さいほど、組み合わせにおける第 2 の項の重みは、低減される。

【 0 0 3 5 】

次に、本方法は、現在のモデルおよび現在のコスト関数を用いて、現在の反復における制御のための現在の制御入力を求める (2 8 0)。例えば、本方法は、更新された現在のコスト関数および現在の機械モデルを用いて、現在の時刻から、少なくとも新たな機械状態の測定値を取得するのに十分な長さの将来の固定時間量の間の将来の入力のシーケンスを、予測された将来の機械状態および入力に対する制約を満たすように求める (2 4 0)。機械の状態の新たな測定値を取得するのに必要とされる時間量に等しい継続期間の間の入力シーケンスの第 1 の部分は、現在の制御入力として機械に印加される (2 5 0)。機械の現在の状態、機械の現在のモデル、および機械への現在の制御入力に基づいて、機械の次の状態が求められ (2 6 0)、コントローラは、新たな状態測定値が受信されるまで待機する (2 7 0)。

【 0 0 3 6 】

不確実性モデリング

10

20

30

40

50

本発明のいくつかの実施の形態は、モデルのパラメーターの真の値が不確実であっても、モデルのパラメーターの不確実性が既知の範囲内にあるという認識に基づいている。例えば、列車の質量は、空の列車および一杯に荷を積んだ列車の値の範囲内とすることができる。同様に、モデルのパラメーターの値に対する外乱には、限界が存在するとすることができる。不確実性モデル 203 は、公称モデルおよび不確実性モデルの組み合わせを用いて MPC の機械の現在のモデルを求めることができるように、モデルの少なくとも 1 つのパラメーターの可能な値の範囲を表す。

【0037】

図 3 A は、上記認識の原理を視覚化した座標系 320 に配置された一例示のポリトープ 310 を示している。座標系 320 は、通常、不確実性を有するモデルのパラメーターの低次元系である。例えば、モデルが、不確実性を有する 4 つのパラメーターを含む場合、座標系 320 は、4 次元であり、パラメーターの組み合わせの新たな値、例えば、値 333、335、337 がポリトープ 310 内で選択されるように、パラメーターのそれぞれにつき、1 つの次元 322、324、326、および 328 を有する。

【0038】

例えば、所与の機械状態、入力、および不確実性の組み合わせった影響を表す外乱 d の連立差分方程式によって、等時間間隔のサンプリング時点における機械の運動を記述する関数は、以下の式となる。

【数 1】

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), u(k), d(k)) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 k はサンプリング時点のインデックスであり、 f は汎用関数であり、 C は行列であり、 x は機械状態 106 であり、 u は機械入力 104 であり、 y は機械出力 105 である。外乱の状況の数は、範囲 D 内に制限され、状態は範囲

【数 2】

\mathcal{X}

内に制限され、制御入力は、範囲 \mathcal{U} 内に制限されることが了解されている。

【数 3】

$$x \in \mathcal{X}, u \in \mathcal{U}, d \in D \quad (2)$$

【0039】

例えば、値の範囲 D は、機械質量の最小値および最大値、外力の最小値および最大値によって求めることができる。同様に、入力および状態の範囲は、速度、位置、電圧、またはトルクの最小値および最大値によって求めることができる。

【0040】

いくつかの実施の形態は、 f および D に基づいて、それぞれ

【数 4】

$$\{(A_i, B_i)\}_{i=1}^{\ell}, B_w, \mathcal{W} \quad (3)$$

である行列の集合、加法線形外乱行列、および加法性外乱の多面体集合を構築し、この結果、任意の所与の x および u について、

【数 5】

$$\text{co}\{A_i x + B_i u\}_{i=1}^{\ell} \oplus \text{co}\{B_w w_i\}_{i=1}^{\eta} \supseteq f(x, u, d), \quad \forall d \in D \quad (5)$$

となるような多元差分包含

【数 6】

$$\text{co}\{A_i x + B_i u\}_{i=1}^{\ell} \oplus \text{co}\{B_w w_i\}_{i=1}^{\eta} \quad (4)$$

が得られる。ここで、

10

20

30

40

50

【数 7】

$$W = \text{co}\{w_i\}_{i=1}^{\eta}$$

であり、 w_i は W の頂点であり、「co」はこの集合の凸包を示すようになっている。

【0041】

式(4)における線形モデルは、例えば、 D によって許容されるベクトル d を形成するパラメータおよび/またはそれらの組み合わせの最大値および最小値を選ぶことによって求めることができる。

【0042】

図3Bは、機械の状態を推定する際の、式(4)によって求められたモデルのパラメータの不確実性の影響の概略図を示している。機械の現在の状態 x_{301} および制御入力を与えられると、機械の次の状態は、機械のモデルのパラメータの d の種々の可能な値について、集合 302 内で変動する可能性がある。例えば、ベクトル d の特定の値に応じて、状態 301 は、制御入力の同じ値について集合 302 内で異なる状態 310 に遷移する可能性がある。

10

【0043】

本発明のいくつかの実施の形態では、不確実性モデルは、公称モデルおよび不確実性モデルの組み合わせが、加法性外乱の凸結合を有する線形モデルの凸結合 303 に含まれるように拡張される。例えば、 $W = 0$ のとき、式(4)のモデルは、有界多面体、すなわちポリトープである集合 303 によって集合 302 を過剰近似する。ここで、頂点 304 は、以下の式から求められる。

20

【数 8】

$$v_i = A_i x + B_i u, i = 1 \dots \ell \quad (6)$$

ここで、 1 、 (A_i, B_i) 、 $i = 1 \dots \ell$ は、それぞれ、式(3)において規定された数および行列である。 $W = 0$ である実施の形態では、集合 303 は、集合

【数 9】

$$\text{co}\{B_w w_i\}_{i=1}^{\eta}$$

の凸包から取得された和集合である。

30

【0044】

式(4)に基づいて、全てが

【数 10】

$$A_i x + B_i u + B_w w_j \in \mathcal{X}, i = 1 \dots \ell, j = 1 \dots \eta \quad (7)$$

を満たす範囲

【数 11】

\mathcal{U}

内の入力 u によって、集合 303 は、完全に、許容可能な状態の範囲 320 内となり、したがって、(1)による機械の可能な次の状態 302 も 320 内になる。このため、式(4)に対して制約を課すことによって、式(1)に対して制約を課することが保証される。式(4)によって求められたモデルを用いる実施の形態は、計算上有利である。なぜならば、式(4)によって求められたモデルは、式(1)に記述された不確実な非線形モデルではなく、線形モデルの集合を含むからである。

40

【0045】

機械への制御入力に対する制約

本発明のいくつかの実施の形態は、機械の運動に対する制約が、所定の範囲内のモデルのパラメータの値の全ての変動について、機械の動作中満たされることを保証するために、状態の実現可能領域

【数 1 2】

\mathcal{X} の部分集合を、機械の状態がそのような部分集合内にあるときは、常に、その状態がパラメータの全ての可能な値および外乱について、その部分集合内に留まるような少なくとも1つの許容可能な制御入力が存在するように求めることができるという認識に基づいている。部分集合内に留まることによって、その部分集合は、実現可能領域

【数 1 3】

\mathcal{X} に含まれるので、全ての機械の運動制約が満たされる。

【0 0 4 6】

本発明のいくつかの実施の形態は、本明細書において制御入力に対する制御不変制約と呼ばれる制御入力に対するそのような制約を求めて用い、本明細書において状態の制御不変部分集合と呼ばれる状態の実現可能領域

【数 1 4】

\mathcal{X} のそのような部分集合内に機械の状態を維持する制御入力を求める。この構成によって、制御不変制約を満たす制御入力は、不確実性モデルによって規定された範囲内のモデルのパラメータの全ての値について、機械の状態を、機械の動作に対する制約を満たす状態の制御不変部分集合内に維持する。

【0 0 4 7】

図 4 A は、本発明の実施の形態による、機械の動作に対する様々な制約によって規定された状態の制御不変部分集合の 2 次元投影 4 1 0 の一例を示している。通常、この実現可能領域は、動作に対する制約に対応する複数の次元に沿って、1 次不等式によって表される超平面によって決定された多次元ポリトープである。

【0 0 4 8】

後退ホライズン制御の性質に起因して、ある特定のホライズンの解が存在することは、それだけで、後続のホライズンの解が存在することを保証するものではない。例えば、機械の状態および基準軌道の状態 4 2 0 は、1 つの反復にとって最適かつ実現可能である可能性があるが、コントローラが次の反復中に取りることが可能な全ての制御動作 4 2 1 ~ 4 2 4 は、機械の状態を実現可能領域 4 1 0 の外部に持っていく可能性がある。

【0 0 4 9】

本発明のいくつかの実施の形態は、実現可能領域の制御不変部分集合 4 1 5 を、その制御不変部分集合内の機械の任意の状態から、基準軌道の既知の将来の状態または基準軌道の全ての許容可能な将来の状態について、その部分集合内に機械の状態を維持する制御入力が存在するように選択することが可能であるというさらに別の認識に基づいている。例えば、部分集合 4 1 5 内およびコントローラが実行することができる全ての可能な制御入力 4 3 1 ~ 4 3 4 内の状態 4 3 0 等の任意の状態について、機械および基準の状態を部分集合 4 1 5 内に維持する少なくとも 1 つの制御入力 4 3 4 が存在する。この場合、部分集合 4 1 5 は、制御不変部分集合である。

【0 0 5 0】

いくつかの実施の形態は、制御不変部分集合内の状態ごとに、式 (5) による全ての可能な状態値について、機械の状態を制御不変部分集合内に維持する少なくとも 1 つの制御動作が存在するように、式 (4) のモデルの状態の制御不変部分集合を求める。

【0 0 5 1】

図 4 B は、機械の状態の実現可能領域 4 0 1 と、

【数 1 5】

\mathcal{X} 内における式 (1) による不確実性を有するモデルの状態の最も大きいロバスト制御不変部分集合 4 0 2 との間の関係を示している。いくつかの実施の形態では、制御不変部分集合 4 0 2 は、この部分集合 4 0 2 よりも小さいが、線形方程式によって形成されるより単

10

20

30

40

50

純な形状を有する制御不変 4 0 3 を形成するように縮小される。部分集合 4 0 2 は、非線形方程式によって求められるので、部分集合 4 0 2 の形状は、非凸である可能性がある。このように、4 0 3 の計算は、より単純で、より効率的であり、制御目的に有利である。

【 0 0 5 2 】

図 5 は、本発明の 1 つの実施の形態による実現可能領域

【数 1 6】

\mathcal{X}

4 0 1 から開始してロバスト制御不変部分集合 4 0 3 を求める後方可到達領域計算のブロック図を示している。後方可到達領域計算は、ロバスト制御不変部分集合 \mathcal{C}_x を求めるとともに、制御不変集合 $\mathcal{C}_u(x)$ も求める。この計算は、 \mathcal{C}_x 内の任意の x について、印

10

【数 1 7】

\mathcal{U}

内の入力 u の集合を、(4) による全ての可能な次の状態が \mathcal{C}_x の内部となるように求める。

【 0 0 5 3 】

後方可到達領域計算は、現在の集合

【数 1 8】

\mathcal{X}_c

20

を実現可能集合

【数 1 9】

\mathcal{X}

に初期化し (5 0 1)、 P 内のパラメータ p の全ての可能な値について、更新された状態が現在の集合

【数 2 0】

\mathcal{X}_c

内となるような

【数 2 1】

\mathcal{U}

30

内の入力 u が、

【数 2 2】

\mathcal{X}_p

内の全ての状態 x について存在するように、状態の以前の集合

【数 2 3】

\mathcal{X}_p

を、現在の集合

40

【数 2 4】

\mathcal{X}_c

の部分集合として求める (5 0 2)。

【 0 0 5 4 】

5 0 3 において、以前の集合

【数 2 5】

\mathcal{X}_p

が空である場合 (5 0 4)、コントローラの正しい動作を保証することができない。これは、パラメータの可能な値の集合 P のサイズが、場合によっては機械の動作の設計または目的を変更することによって、縮小されるべきであることを意味する。5 0 5 において

50

、現在の集合と以前の集合とが等しい場合には、以前の集合が現在の集合となるように割り当てられ（５０７）、計算が再び反復され（５０８）、等しくない場合には、５０６において、集合 C_x も計算される。集合 C_x が見つかった場合、状態 - 入力対の最後に計算された集合が、 C_x 内の全ての x についてのロバスト許容可能入力集合 $C_u(x)$ である。

【００５５】

図６は、１つの実施の形態による状態の以前の集合を求める（５０２）一例示の実施の態様のブロック図を示している。この実施の形態は、パラメーターの全ての値について現在の集合内にある更新された状態を生成する状態 - 入力対を特定し（６０１）、これらの状態入力対を状態値に投影する（６０２）。すなわち、この実施の形態は、そのような状態 - 入力対のうちの少なくとも１つに属する状態を特定する。

10

【００５６】

図７は、１次不等式が集合

【数２６】

\mathcal{X}

および

【数２７】

\mathcal{U}

を記述しているときの状態 - 入力の対の計算（６０１）の方法のブロック図を示している。本方法は、現在の集合を以下の式とみなし、

20

【数２８】

$$H^{(c)}x \leq K^{(c)} \quad (8)$$

現在の集合に対する加法性外乱 w の最悪の場合の影響

【数２９】

$$i. \quad [S]_i = \max_{w \in W} [H^{(c)}B_w w]_i, \quad i = 1, \dots, n_q^{(c)} \quad (9)$$

を求める（７０１）。ここで、 $H^{(c)}$ は、（８）において規定された現在の集合を記述する行列であり、

30

【数３０】

$n_q^{(c)}$

は、現在の集合の行列 $H^{(c)}$ の行の数である。

【００５７】

次に、本方法は、これらの最悪の場合の外乱の影響分だけ現在の集合を縮小して（７０２）、

【数３１】

$$H^{(c)}x \leq K^{(c)} - S_i \quad (10)$$

40

によって記述される縮小された現在の集合

【数３２】

\mathcal{X}_s

を生成し、次いで、更新された状態が（１８）における全ての頂点系について現在の集合の内部になるような、すなわち、

【数３３】

$$A_i x + B_i u \in \mathcal{X}_s, \forall i = 1, \dots, \ell$$

となるような対 (x, u) を求める（７０３）。

【００５８】

安定性制約

50

本発明のいくつかの実施の形態では、制御入力に対する制約は、公称モデルおよび不確実性モデルによって規定された機械のモデルのパラメーターの全ての値について、機械の状態を目標値に収束させる安定性制約を含む。1つの実施の形態では、これらの安定性制約は、機械の制御リアプノフ関数を含む。例えば、式(4)のモデルの制御リアプノフ関数(CLF)は、以下の実現可能値低減を満たす関数である。

【数34】

$$\mathcal{V}(f(x, u)) \leq \rho \mathcal{V}(x) \quad (11)$$

ここで、 f は、式(4)のモデルであり、 \mathcal{V} は、所望の目標においては0であり、それ以外のあらゆる箇所においては正である関数であり、 ρ は、0 ~ 1の値である。

10

【0059】

いくつかの実施の形態では、制御リアプノフ関数は、制御不変である。本明細書において規定されているように、有効な不変制御リアプノフ関数は、例えば、式(4)のモデルについて求められた制御不変部分集合 C_x の内部の全ての x について、 $C_u(x)$ の内部に制御入力 u が存在するような制御リアプノフ関数、すなわち、式(11)が満たされるように制御不変制約を満たす制御リアプノフ関数である。

【0060】

図8は、本発明の1つの実施の形態による制御システムの不変制御リアプノフ関数を求める方法を示している。本方法は、候補のCLFを生成し(801)、この候補のCLFの状態の部分集合を、式(11)が有効であるように

20

【数35】

U

の内部に u が存在するような C_x の部分集合として求める(802)。次に、本方法は、部分集合802が部分集合 C_x に等しいか否かを検証する(803)。これに該当する場合(804)、候補のCLFは、制御不変リアプノフ関数であり、そうでない場合(805)、異なる候補のCLFが生成される。

【0061】

図9は、 $(x) = ||Px||$ である1つの実施の形態による、候補のリアプノフ関数の状態の部分集合を求める(802)方法のブロック図を示している。ここで、 P は、 n_p 個の行を有する無限ノルム制御リアプノフ関数を記述した行列である。この実施の形態は、行列 P のこれまでに選択されていない行911を選択し(901)、正の条件 $= +1$ について、不等式

30

【数36】

$$\begin{aligned} \varepsilon &\geq [P(A_i x + B_i u)]_j, \forall j = 1, \dots, n_p, \forall i = 1, \dots, \ell \\ \varepsilon &\geq -[P(A_i x + B_i u)]_j, \forall j = 1, \dots, n_p, \forall i = 1, \dots, \ell \\ \varepsilon &\leq \rho [Px]_r \\ \sigma[Px]_r &\geq [Px]_h, \forall h = 1, \dots, n_p, \\ \sigma[Px]_r &\geq -[Px]_h, \forall h = 1, \dots, n_p, \end{aligned} \quad (12)$$

40

が $= +1$ の場合に当てはまるような u および x が存在するように x の集合を計算することによって、行911に関係した部分集合の凸成分を求める(902)。ここで、 n_p は、行列 P の行の数である。

【0062】

次に、この実施の形態は、負の条件 $= -1$ について、行911に関係した部分集合の凸成分を求め(903)、 -1 は、(12)がこの時は $= -1$ で満たされるような u および x が存在するように x の集合として計算される。全ての行が選択されると、全ての凸成分の和集合は、部分集合802を形成する。

【0063】

50

図 10 A および図 10 B は、有効な制御不変リアプノフ関数および無効な制御不変リアプノフ関数を判断するテストの説明図を示している。制御不変部分集合 1001 内の部分集合 1002 は、部分集合 1003 が候補の CLF の複数の凸成分 1003 の和集合である場合に有効である。図 10 A では、部分集合 1002 および 1001 が異なるので、CLF は、制御不変ではない。図 10 B では、部分集合 1004 が部分集合 1001 のエリア全体を包含することから、有効な部分集合 1004 を有する候補の CLF が部分集合 1001 について有効であるので、CLF は、制御不変である。

【0064】

例えば、本発明の 1 つの実施の形態では、制御リアプノフ関数は、制御不変制約を満たす機械の全ての状態について実現可能値低減テストを満たす無限ノルム制御リアプノフ関数である。このテストは、無限ノルム制御リアプノフ関数を記述する行列の行を選択することと、制御不変制約を満たす機械の少なくとも 1 つの入力について無限ノルム制御リアプノフ関数を記述する行列の行に対する実現可能値低減を、正の条件および負の条件について満たす機械の状態の凸成分を求めることとを含むことができる。次に、この実施の形態は、これらの凸成分の和集合を求め、機械の状態の制御不変部分集合内の機械の全ての状態が凸成分の和集合に含まれることを検証する。

【0065】

モデル学習

1 つの実施の形態では、機械の現在のモデル 201 は、公称モデル 202 に基づいて初期化される。この初期化では、一对の推定されたシステム行列

【数 37】

$$(\hat{A}, \hat{B})$$

が、式 (3) における行列の集合の凸包から選択され、

【数 38】

$$(\hat{A}, \hat{B}) \in \text{co}\{(A_i, B_i)\}_{i=1}^{\ell} \quad (13)$$

加法性外乱推定値

【数 39】

$$\hat{w}$$

が、式 (3) における加法性外乱の多面体集合から選択される。

【数 40】

$$\hat{w} \in \mathcal{W} \quad (14)$$

【0066】

式 (13) ~ (14) における現在のモデルは、現在のモデルが、機械状態値のシーケンスの観点から、観察された機械の運動と一致するまで、入力 104 および状態 106 を用いて各時間ステップにおいて、そのそれぞれの集合内で更新される。

【0067】

1 つの実施の形態では、このモデル更新の実施の態様は、(13) および (14) におけるモデルを、式 (6) の頂点と W の頂点との線形結合であるとみなす。

【数 41】

$$\hat{A}x + \hat{B}u + B_w \hat{w} = \sum_{i=1}^{\ell} [\theta]_i (A_i x + B_i u) + \sum_{i=1}^p [\eta]_i B_w w_i \quad (15)$$

ここで、 \hat{A} は、線形モデルの組み合わせベクトルであり、 \hat{B} は、加法性外乱の組み合わせベクトルである。

10

20

30

40

【数 4 2】

$$\theta \in \mathbb{R}^\ell, \quad 0 \leq [\theta]_i \leq 1, \quad \sum_i [\theta]_i^\ell = 1$$

$$\eta \in \mathbb{R}^p, \quad 0 \leq [\eta]_i \leq 1, \quad \sum_i [\eta]_i^p = 1$$

(15b)

そのため、結合パラメーターベクトル

【数 4 3】

$$\lambda = [\theta \quad \eta]^T$$

(16)

について、線形回帰モデルを形成することができる。

【0 0 6 8】

この線形回帰モデルは、以下の形を取る。

【数 4 4】

$$y = \sum_{i=1}^{\ell} [\theta]_i (A_i x + B_i u) + \sum_{i=1}^p [\eta]_i B_w w_i + \epsilon,$$

$$= \Gamma(x, u) \theta + \Upsilon \eta + \epsilon,$$

$$= M^T(x, u) \lambda + \epsilon,$$

(17)

ここで、 ϵ は、測定雑音を表し、

【数 4 5】

$$\Gamma(x, u) = [A_1 x + B_1 u, \dots, A_\ell x + B_\ell u]$$

$$\Upsilon = [B_w w_1, \dots, B_w w_p]$$

$$\text{and } M^T(x, u) = [\Gamma(x, u) \quad \Upsilon]$$

(18)

である。

【0 0 6 9】

線形回帰 (17) は、この場合、いくつかの方法によって解くことができる。例えば、1つの実施の形態は、回帰の出力 $y = [y(t+1)]^T$ が、(15b) によるその許容された範囲内にあることを確実にするように修正された再帰的最小二乗 (RLS) 方法を用いる。

【0 0 7 0】

例えば、RLS 方法は、以下の式の解を含むことができる。

【数 4 6】

$$\Psi(t+1) = (I - \mathcal{K}_{\text{RLS}}(t+1) M^T(x(t), u(t))) \Psi(t)$$

$$\mathcal{K}_{\text{RLS}}(t+1) = \Psi(t+1) M(x(t), u(t)),$$

$$\hat{\lambda}(t+1) = \hat{\lambda}(t) + \mathcal{K}_{\text{RLS}}(t+1) \left(y(t+1) - M^T(x(t), u(t)) \hat{\lambda}(t) \right),$$

$$\hat{\lambda}(t+1) = \text{proj}_{\lambda}(\hat{\lambda}(t+1))$$

(18b)

ここで、 \mathcal{K}_{RLS} は、推定訂正利得であり、 Ψ は、推定共分散行列であり、 proj_{λ} は、その引数を λ のドメイン内に投影する演算子である。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 1 】

図 1 1 は、本発明の 1 つの実施の形態に従って、修正された R L S を用いて機械のモデルを更新し、機械の現在のモデルを生成するブロック図を示している。各ステップにおける修正された R L S は、以前の入力および以前の状態を用いてリグレッサー行列 M を形成する (1 1 0 1) とともに、現在の時間ステップの状態を測定値 y として用いる。修正された R L S は、予測誤差共分散行列 を更新し (1 1 0 2)、推定利得 を更新する (1 1 0 3)。

【 0 0 7 2 】

次に、修正された R L S は、パラメーターの第 1 の推定値

【数 4 7】

$$\hat{\lambda}(t+1)$$

を求め (1 1 0 4)、パラメーターの第 1 の推定値を、(1 5 b) によって求められた $= [\quad]^T$ の許容可能な範囲上に投影することによってパラメーターの第 2 の推定値

【数 4 8】

$$\hat{\lambda}(t+1)$$

を求める (1 1 0 5)。次に、修正された R L S は、次の測定まで待機する (1 1 0 6)。

【 0 0 7 3 】

第 2 のパラメーター推定値は、複数の方法で求めることができる (1 1 0 5)。例えば、1 つの実施の形態は、まず、パラメーターの第 1 の推定値

【数 4 9】

$$\hat{\lambda} = [\hat{\theta} \quad \hat{\eta}]^T$$

の各成分を 0 と 1 との間にサチュレートさせ、次いで、パラメーターの第 1 の推定値における

【数 5 0】

$$\hat{\theta}$$

および

【数 5 1】

$$\hat{\eta}$$

の各成分を、当該パラメーターの第 1 の推定値における

【数 5 2】

$$\hat{\theta}$$

および

【数 5 3】

$$\hat{\eta}$$

のサチュレートされた成分の合計により除算することによって、それらの各成分を正規化することで、第 2 のパラメーターを求める。この結果、現在の時間ステップにおけるパラメーターベクトル (1 6) の推定値が得られ、それによって、(1 3) および (1 4) における現在のモデルの更新された推定値が与えられる。他の実施の形態では、他の回帰モデルおよび / または推定アルゴリズムが、(1 3) および (1 4) に基づいて機械の現在のモデル 2 0 1 を更新するのに用いられる。

【 0 0 7 4 】

コスト関数

本発明のいくつかの実施の形態では、コスト関数モジュール 207 は、公称コスト関数に基づいて現在のコスト関数 209 を初期化する。1つの実施の形態では、この公称コスト関数は、多面的であり、相反する目的を有する。例えば、コスト関数は、動作の目的に従って制御入力第 1 の値を求める第 1 の項を含むことができるとともに、機械の現在の状態と、機械のモデルを用いて推定された状態との間の相違を縮小する制御入力第 2 の値を求める第 2 の項を含み、そのため、最適化は、これらの第 1 の項および第 2 の項の組み合わせを最適化し、コスト関数を更新することは、この組み合わせにおける第 2 の項の重みを変化させることを含む。

【0075】

1つの実施の形態では、コスト関数は、以下の式の形を取る。

10

【数54】

$$F_t(x_N) + \sum_{k=1}^N L_t(x_k, u_k, P_k) \quad (19)$$

ここで、 F_t および L_t は、機械の状態にバイアスかけるそれらの引数と、多面的な目的を反映した値への入力との関数であり、 P_k は、RLS アルゴリズムからの予測されたパラメータ誤差共分散行列である。1つの実施の形態では、 L_t は、機械の状態およびモデルのパラメータを学習する目的の二元的な客観的取引規則を含む。例えば、コスト関数の第 1 の項は、機械の性能に関係し、第 2 の項は、モデルのパラメータの推定を改善することに関係し、第 2 の項は、現在のモデルの予測誤差の非負の非減少関数として測定された機械の現在のモデルの信頼性によって重み付けされる。

20

【0076】

1つの実施の形態では、関数 L_t は、以下の式となる。

【数55】

$$L_t(x_k, u_k, P_k) = x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k + \gamma \left(y(t) - M^T(x(t-1), u(t-1)) \hat{\lambda}(t-1) \right) \psi(P_k)$$

ここで、 ψ は、現在のモデル 201 によって予測された状態と、測定された実際の状態 106 との間の残余誤差の関数であり、 $\psi(P_k)$ は、予測されたパラメータ誤差共分散行列の情報汎関数である。

30

【0077】

この情報汎関数は、未知のパラメータベクトル (16) と関連付けられた情報の尺度である。この例には、トレース、行列式、および最大固有値が含まれる。情報汎関数が、コスト関数において優先権を与えられた場合、すなわち、 γ が大きい場合、機械の状態および入力には、モデル学習を改善する値に向けてバイアスがかけられ、そうでない場合、状態および入力には、機械の状態の調整に向けてバイアスがかけられる。

【0078】

現在のコスト関数 (19) は、残余誤差が大きいときは、コスト関数がモデル学習の改善のみを試みるように、各時間ステップにおいて、現在のモデルによって予測された状態および測定された実際の状態を用いて更新される。例えば、コスト関数の第 2 の項は、以前のモデルと現在のモデルとの間の相違の関数を含み、更新することは、以前のモデルと現在のモデルとの間の相違を求め、求められた相違を用いてコスト関数の第 2 の項を更新する。

40

【0079】

別の実施の形態では、コスト関数は、入力計算 208 に用いられる 2 つのコスト関数に分離される。ここで、第 1 のコスト関数は、モデル学習にのみ関係があり、すなわち、 $F_t = 0$ および $L_t = \psi(P_k)$ であり、第 2 のコスト関数は、機械の状態および第 1 のコスト関数の適用によって生成された入力シーケンスからの逸脱にペナルティを科すことの二元的な客観的取引規則を形成する。

50

【 0 0 8 0 】

入力計算

いくつかの実施の形態では、入力計算 2 0 8 は、以下の式の有限ホライズン数値最適化問題の形を取る。

【数 5 6】

$$\begin{aligned} \min_U \quad & F_t(x_N) + \sum_{k=1}^N L_t(x_k, u_k, P_k), \\ \text{s.t.} \quad & x_{k+1} = M^T(x_k, u_k) \hat{\lambda}(t), \\ & x_0 = x(t), \\ & P_0 = P(t), \\ & u_k \in C_u^\infty(x_k), \end{aligned} \tag{20}$$

10

この式は、現在のコスト関数（ F_t および L_t ）2 0 7 と、ホライズンにわたって状態の展開を予測する現在のパラメーター推定値

【数 5 7】

20

 $\hat{\lambda}$

を有する機械モデル 2 0 1 と、ロバスト制約

【数 5 8】

$$C_u^\infty(x_k)$$

2 0 6 と、現在の時間ステップにおける状態 $x(t)$ とから形成されている。問題（2 0）は、問題制約を条件として現在のコスト関数を最小化する入力シーケンス $U = [u_1, \dots, u_N]^T$ を見つけ出す数値ソルバーを用いて解かれる。この入力シーケンスにおける第 1 の入力 u_1 は、入力計算 2 0 8 の出力とみなされ、機械 1 0 2 に印加される。次の時間ステップ $t + 1$ において、モデルおよびコスト関数が更新され、状態が更新され、数値最適化問題が再び解かれる。

30

【 0 0 8 1 】

代替の実施の形態では、問題（2 0）は、以下の 2 つのフェーズに分解される。

i) モデル学習フェーズ、例えば、 $L_t = (P_k)$ 。このフェーズは、予測されたパラメーター誤差共分散行列の情報汎関数を最小化する入力シーケンスを生成することのみに関係する。

ii) 制御フェーズ。このフェーズは、機械を起点に調整する入力シーケンスを生成することのみに関係し、例えば、以下の式である。

【数 5 9】

40

$$L_t = x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k$$

【 0 0 8 2 】

モデル学習フェーズから制御フェーズへの切り替えは、現在のモデル 2 0 1 によって予測された状態と測定された実際の状態 1 0 6 との間の残余誤差に基づく。すなわち、この誤差が、設定された閾値未満であるとき、モデル学習は、もはや必要ではなく、制御フェーズへの切り替えが実施される。モデル学習フェーズへの戻し切り替えは、上記誤差が、設定された閾値を上回った場合に実施される。

【 0 0 8 3 】

本発明の上記で説明した実施の形態は、数多くの方法のうちの任意のもので実施するこ

50

とができる。例えば、これらの実施の形態は、ハードウェア、ソフトウェア、またはそれらの組み合わせを用いて実施することができる。ソフトウェアで実施されるとき、ソフトウェアコードは、単一のコンピュータに設けられるかまたは複数のコンピュータ間に分散されるかを問わず、任意の適したプロセッサまたはプロセッサの集合体上で実行することができる。そのようなプロセッサは、集積回路コンポーネントに1つまたは複数のプロセッサを有する集積回路として実施することができる。ただし、プロセッサは、任意の適した形式の回路部を用いて実施することができる。

【0084】

さらに、コンピュータは、ラックマウントコンピュータ、デスクトップコンピュータ、ラップトップコンピュータ、ミニコンピュータ、またはタブレットコンピュータ等の複数の形態のうちの任意のもので具現化することができることが理解されるべきである。そのようなコンピュータは、エンタープライズネットワークまたはインターネット等のローカルエリアネットワークまたはワイドエリアネットワークを含む1つまたは複数のネットワークによって任意の適した形態に相互接続することができる。そのようなネットワークは、任意の適した技術に基づくことができ、任意の適したプロトコルに従って動作することができ、無線ネットワーク、有線ネットワーク、または光ファイバーネットワークを含むことができる。

10

【0085】

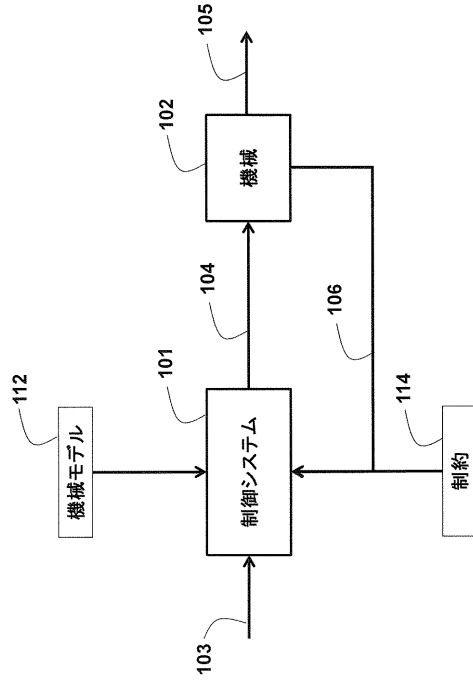
また、本明細書において略述した様々な方法またはプロセスは、様々なオペレーティングシステムまたはプラットフォームのうちの任意の1つを用いる1つまたは複数のプロセッサ上で実行可能なソフトウェアとしてコード化することもできる。加えて、そのようなソフトウェアは、複数の適したプログラミング言語および/またはプログラミングツールもしくはスクリプティングツールのうちの任意のものを用いて記述することができる。

20

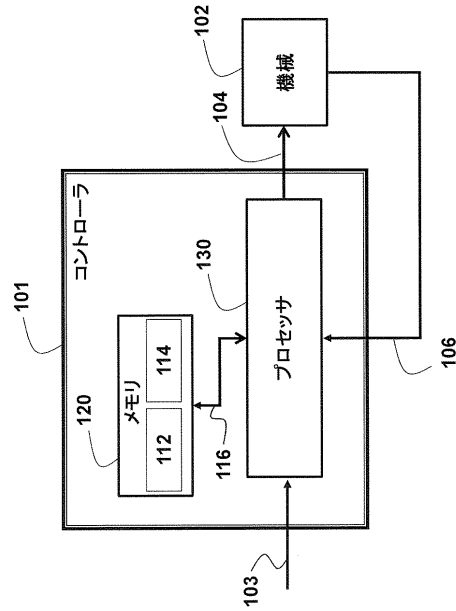
【0086】

また、本発明の実施の形態は、方法として具現化することもできる。この方法の一例が提供されている。この方法の一部として実行されるステップは、任意の適した方法で順序付けることができる。したがって、例示されたものと異なる順序で動作が実行される実施の形態を構築することができ、これらの実施の形態は、いくつかの動作を、例示の実施の形態では順次的な作用として示されていても、同時に実行することを含むことができる。

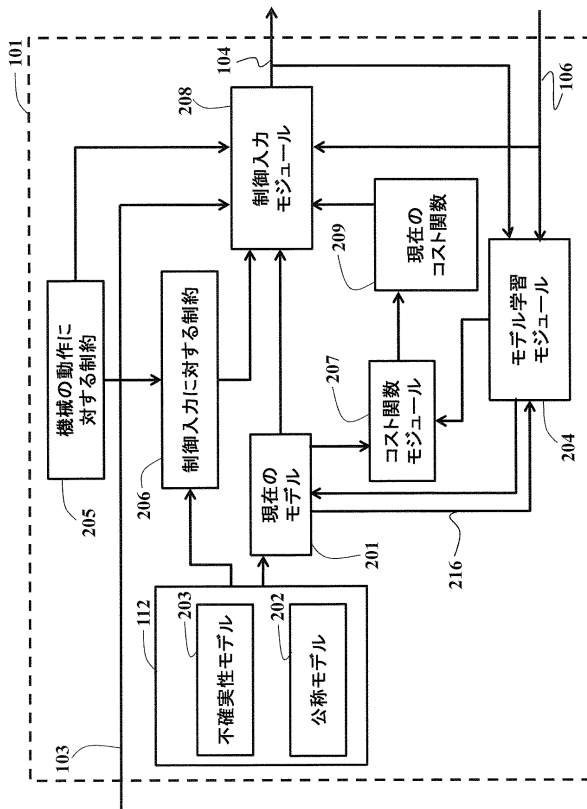
【図 1 A】



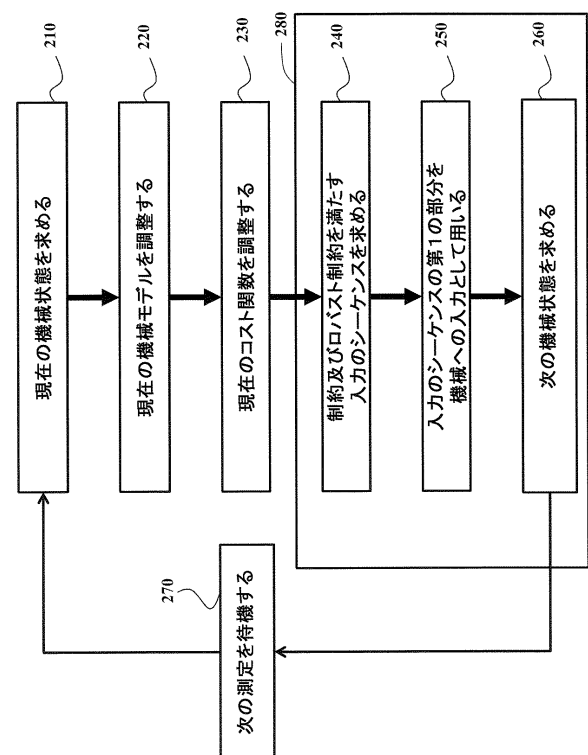
【図 1 B】



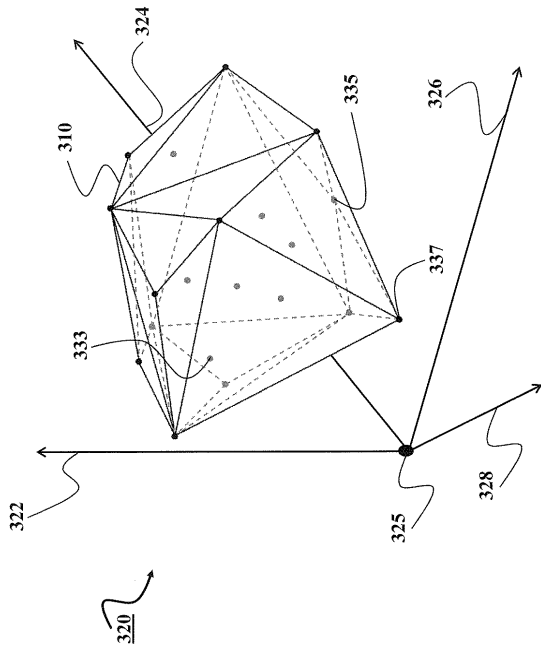
【図 2 A】



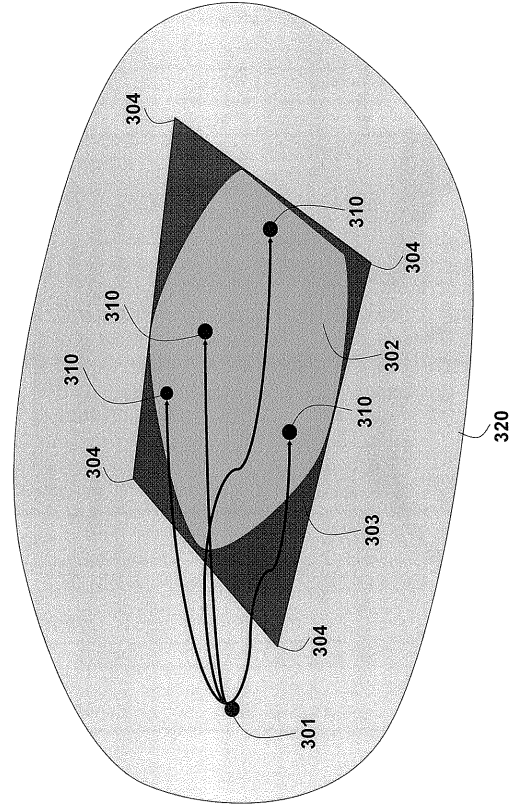
【図 2 B】



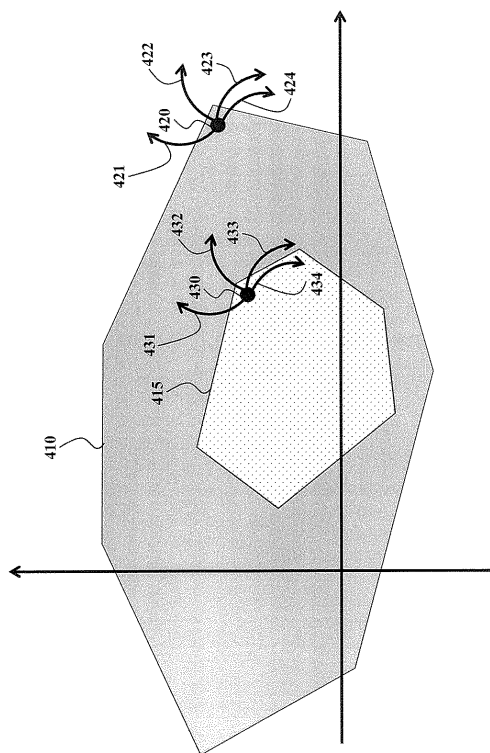
【図 3 A】



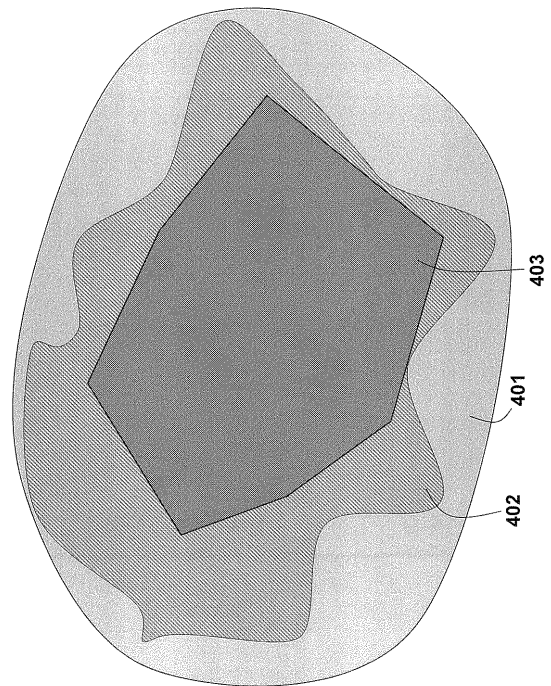
【図 3 B】



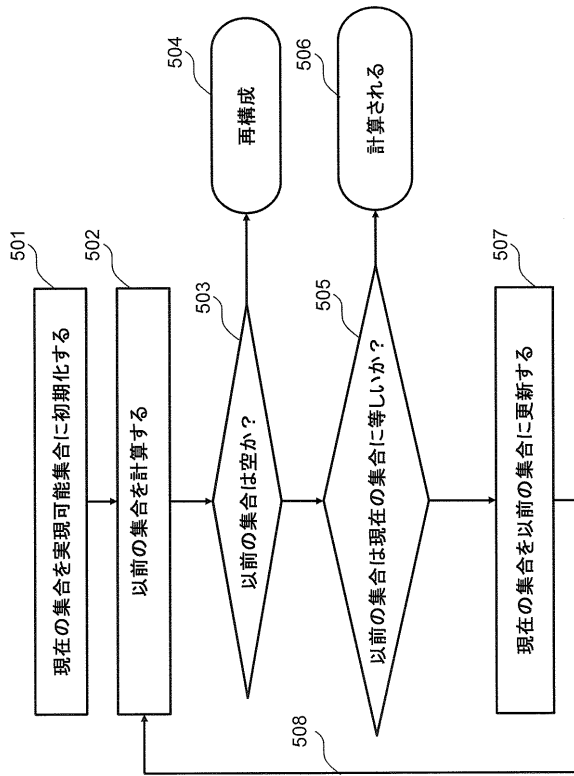
【図 4 A】



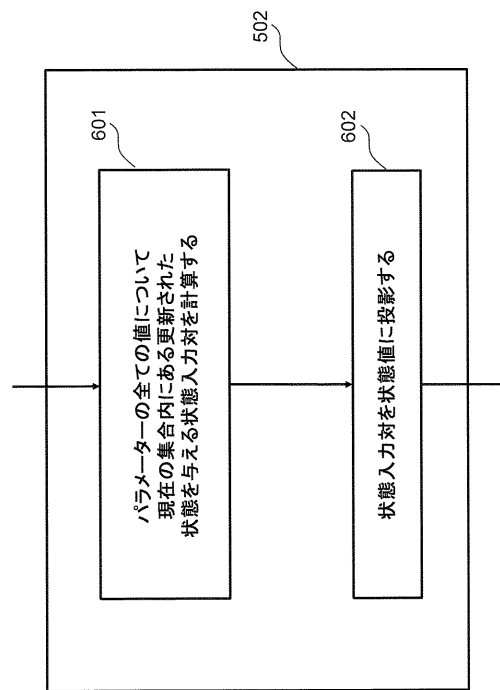
【図 4 B】



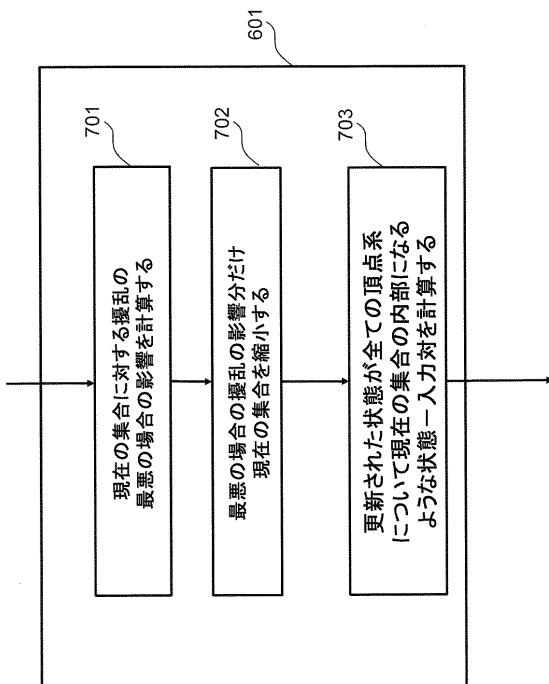
【図 5】



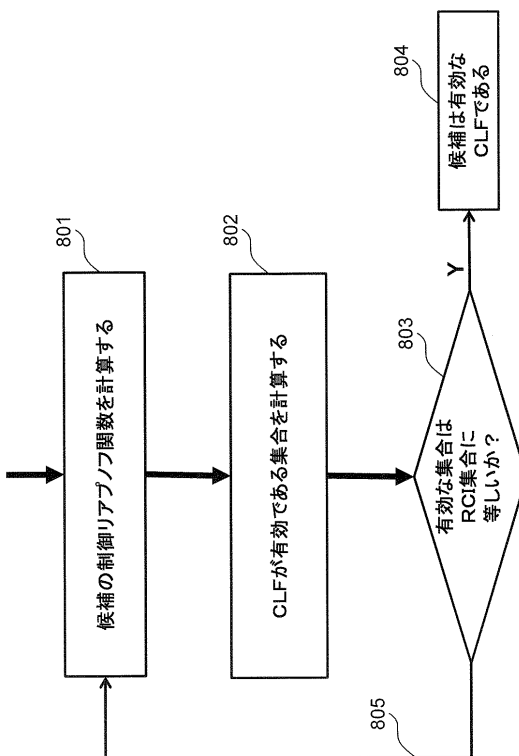
【図 6】



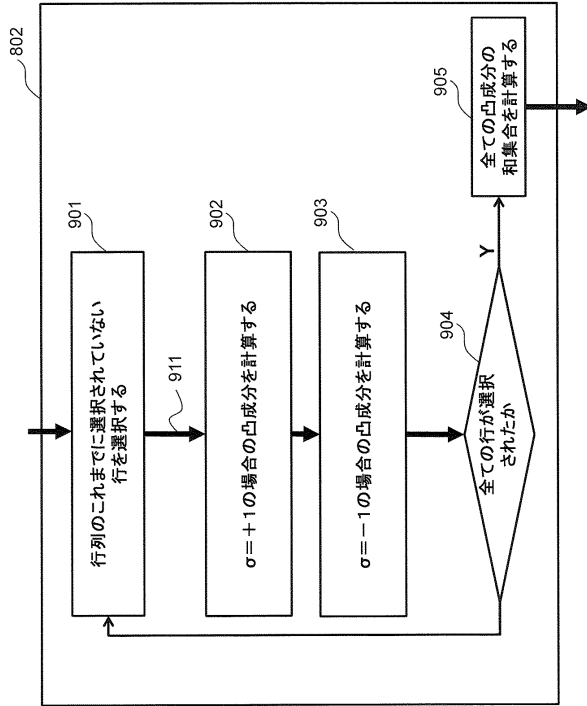
【図 7】



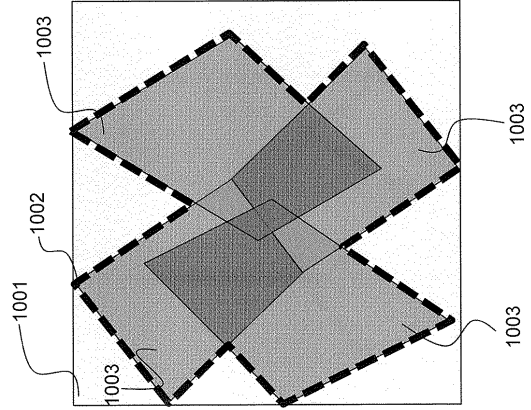
【図 8】



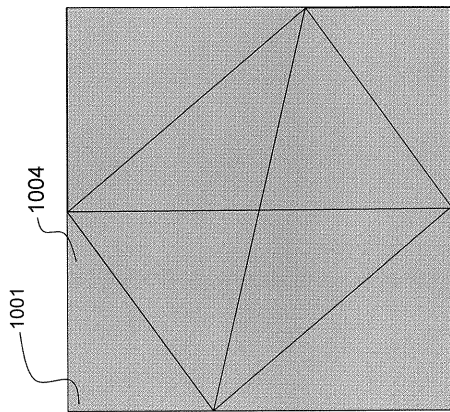
【図 9】



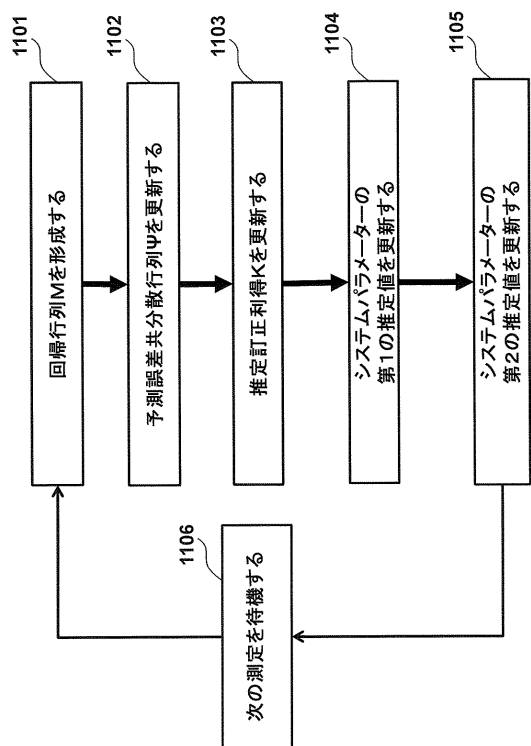
【図 10 A】



【図 10 B】



【図 11】



フロントページの続き

- (72)発明者 ステファノ・ディ・カイラノ
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミッ
ピシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド
- (72)発明者 アビシャイ・ワイス
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミッ
ピシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

審査官 影山 直洋

- (56)参考文献 特開2004-288161(JP,A)
特開2011-198327(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G05B 13/04