

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6136494号
(P6136494)

(45) 発行日 平成29年5月31日(2017.5.31)

(24) 登録日 平成29年5月12日(2017.5.12)

(51) Int.Cl.

F I

G O 5 B 13/04 (2006.01)

G O 5 B 13/04

F O 2 D 41/18 (2006.01)

F O 2 D 41/18 Z

F O 2 D 45/00 (2006.01)

F O 2 D 45/00 3 6 6 E

請求項の数 11 (全 37 頁)

(21) 出願番号 特願2013-82605 (P2013-82605)
 (22) 出願日 平成25年4月11日(2013.4.11)
 (65) 公開番号 特開2014-206802 (P2014-206802A)
 (43) 公開日 平成26年10月30日(2014.10.30)
 審査請求日 平成28年1月13日(2016.1.13)

(73) 特許権者 000005223
 富士通株式会社
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号
 (74) 代理人 100103528
 弁理士 原田 一男
 (72) 発明者 梅田 裕平
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号 富士通株式会社内

審査官 川東 孝至

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 情報処理方法、装置及びプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

(a) モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ制御対象の状態方程式に関する第1の関数との和を含む第2の関数を前記ラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第1の一次式群と、(b) 前記第2の関数を前記制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記ラグランジュ乗数を変数として含む第2の一次式群と、(c) 前記第2の関数を前記制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つ前記ラグランジュ乗数及び前記制御対象の状態偏差を変数として含む第3の一次式群とを格納するデータ格納部から前記第1の一次式群を読み出して、前記状態偏差の現在値を除き前記状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第1の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第4の一次式群に変形し、

前記データ格納部から前記第2の一次式群を読み出して、前記ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第2の一次式群を、前記状態偏差を変数として含む、前記ラグランジュ乗数についての第5の一次式群に変形し、

前記データ格納部から前記第3の一次式群を読み出して、前記第4の一次式群及び前記第5の一次式群を用いて、前記第3の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第6の一次式群に変形し、

前記第6の一次式群を、第1の係数行列と前記線形化制御入力についてのベクトルとの

積が、前記状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形し、

前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の微分関数及び2階偏微分した第2の微分関数を生成し、

前記第4の一次式群から前記線形化制御入力についての係数を抽出し、前記ペナルティ関数について予め定められている第2の係数行列及び係数ベクトルを算出する

処理を、コンピュータに実行させるためのプログラム。

【請求項2】

前記ペナルティ関数が、前記状態偏差が第1の値以上第2の値以下で0となり、前記状態偏差が前記第1の値より小さい場合及び前記第2の値より大きい場合前記状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する関数である

請求項1記載のプログラム。

【請求項3】

前記ペナルティ関数が、前記状態偏差が第1の値以上第2の値以下で0となり、前記状態偏差が前記第1の値より小さい場合に前記状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する第1の関数と、前記第2の値より大きい場合前記状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する第2の関数とで表され、

前記第1及び第2の微分関数を、前記第1の関数及び前記第2の関数の各々について生成する

請求項1記載のプログラム。

【請求項4】

モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における前記制御対象に対する線形化制御入力のベクトルとの積が前記関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第1の係数行列と、前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第2の係数行列及び係数ベクトルと、前記ペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の式及び2階偏微分した第2の式とを格納するデータ格納部から前記第1の式及び第2の式を読み出して、前記状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第1の値及び第2の値を算出し、

前記データ格納部から前記第1の係数行列及び前記第2の係数行列を読み出して、前記第2の値と前記第2の係数行列との積と前記第1の係数行列との和である第1の行列を算出し、

前記データ格納部から前記関数ベクトルを読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、前記第1の値と前記第2の値との差に前記線形化制御入力の1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と前記係数ベクトルとの積との差である第2のベクトルを算出し、

前記第1の行列の逆行列と前記第2のベクトルとの積により、前記線形化制御入力のベクトルを生成し、

前記線形化制御入力のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する

処理をプロセッサに実行させるためのプログラム。

【請求項5】

前記状態偏差の現在値が所定範囲内であるか判断する処理をさらに含み、

前記状態偏差の現在値が前記所定範囲内であれば、前記第1の値及び第2の値を算出する処理と、前記第1の行列を算出する処理と、前記第2のベクトルを算出する処理と、前記線形化制御入力のベクトルを生成する処理と、前記線形化制御入力を抽出する処理とを実行する

請求項4記載のプログラム。

【請求項6】

前記データ格納部が、

前記状態偏差の現在値の値域に応じた前記第 1 の式及び第 2 の式を格納しており、
前記第 1 の値及び前記第 2 の値を算出する処理が、
前記状態偏差の現在値が属する値域を特定し、当該特定された値域に応じた前記第 1 の式及び前記第 2 の式を読み出す処理
を含む請求項 4 又は 5 記載のプログラム。

【請求項 7】

前記状態偏差の現在値が前記所定範囲外であれば、
前記データ格納部から前記関数ベクトル及び前記第 1 の係数行列を読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第 1 のベクトルと、前記第 1 の係数行列の逆行列との積により、前記線形化制御入力第 2 のベクトルを生成し、
前記線形化制御入力第 2 のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する
処理をさらに含む請求項 4 乃至 6 のいずれか 1 つ記載のプログラム。

【請求項 8】

(a) モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ制御対象の状態方程式に関する第 1 の関数との和を含む第 2 の関数を前記ラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第 1 の一次式群と、(b) 前記第 2 の関数を前記制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記ラグランジュ乗数を変数として含む第 2 の一次式群と、(c) 前記第 2 の関数を前記制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つ前記ラグランジュ乗数及び前記制御対象の状態偏差を変数として含む第 3 の一次式群とを格納するデータ格納部から前記第 1 の一次式群を読み出して、前記状態偏差の現在値を除き前記状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第 1 の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第 4 の一次式群に変形し、

前記データ格納部から前記第 2 の一次式群を読み出して、前記ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第 2 の一次式群を、前記状態偏差を変数として含む、前記ラグランジュ乗数についての第 5 の一次式群に変形し、

前記データ格納部から前記第 3 の一次式群を読み出して、前記第 4 の一次式群及び前記第 5 の一次式群を用いて、前記第 3 の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第 6 の一次式群に変形し、

前記第 6 の一次式群を、第 1 の係数行列と前記線形化制御入力についてのベクトルとの積が、前記状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形し、

前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数を前記状態偏差について 1 階偏微分した第 1 の微分関数及び 2 階偏微分した第 2 の微分関数を生成し、

前記第 4 の一次式群から前記線形化制御入力についての係数を抽出し、前記ペナルティ関数について予め定められている第 2 の係数行列及び係数ベクトルを算出する

処理を含み、コンピュータにより実行されるオフライン処理方法。

【請求項 9】

モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における前記制御対象に対する線形化制御入力第 1 のベクトルとの積が前記関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第 1 の係数行列と、前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第 2 の係数行列及び係数ベクトルと、前記ペナルティ関数を前記状態偏差について 1 階偏微分した第 1 の式及び 2 階偏微分した第 2 の式とを格納するデータ格納部から前記第 1 の式及び第 2 の式を読み出して、前記状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第 1 の値及び第 2 の値を算出し、

前記データ格納部から前記第 1 の係数行列及び前記第 2 の係数行列を読み出して、前記第 2 の値と前記第 2 の係数行列との積と前記第 1 の係数行列との和である第 1 の行列を算

10

20

30

40

50

出し、

前記データ格納部から前記関数ベクトルを読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、前記第1の値と前記第2の値との差に前記線形化制御入力1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と前記係数ベクトルとの積との差である第2のベクトルを算出し、

前記第1の行列の逆行列と前記第2のベクトルとの積により、前記線形化制御入力のベクトルを生成し、

前記線形化制御入力のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する

処理を含み、プロセッサにより実行される制御方法。

10

【請求項10】

(a) モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ制御対象の状態方程式に関する第1の関数との和を含む第2の関数を前記ラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第1の一次式群と、(b) 前記第2の関数を前記制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記ラグランジュ乗数を変数として含む第2の一次式群と、(c) 前記第2の関数を前記制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つ前記ラグランジュ乗数及び前記制御対象の状態偏差を変数として含む第3の一次式群とを格納するデータ格納部から前記第1の一次式群を読み出して、前記状態偏差の現在値を除き前記状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第1の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第4の一次式群に変形する手段と、

20

前記データ格納部から前記第2の一次式群を読み出して、前記ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第2の一次式群を、前記状態偏差を変数として含む、前記ラグランジュ乗数についての第5の一次式群に変形する手段と、

前記データ格納部から前記第3の一次式群を読み出して、前記第4の一次式群及び前記第5の一次式群を用いて、前記第3の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第6の一次式群に変形する手段と、

前記第6の一次式群を、第1の係数行列と前記線形化制御入力についてのベクトルとの積が、前記状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形する手段と、

30

前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の微分関数及び2階偏微分した第2の微分関数を生成する手段と、

前記第4の一次式群から前記線形化制御入力についての係数を抽出し、前記ペナルティ関数について予め定められている第2の係数行列及び係数ベクトルを算出する手段と、

を有するオフライン処理装置。

【請求項11】

モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における前記制御対象に対する線形化制御入力のベクトルとの積が前記関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第1の係数行列と、前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第2の係数行列及び係数ベクトルと、前記ペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の式及び2階偏微分した第2の式とを格納するデータ格納部から前記第1の式及び第2の式を読み出して、前記状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第1の値及び第2の値を算出する第1の算出部と、

40

前記データ格納部から前記第1の係数行列及び前記第2の係数行列を読み出して、前記第2の値と前記第2の係数行列との積と前記第1の係数行列との和である第1の行列を算出し、前記データ格納部から前記関数ベクトルを読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、前記第1の値と前記第2の値との差に前記線形化制御入力1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と

50

前記係数ベクトルとの積との差である第2のベクトルを算出する第2の算出部と、

前記第1の行列の逆行列と前記第2のベクトルとの積により、前記線形化制御入力
のベクトルを生成する生成部と、

前記線形化制御入力
のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を出力
する出力部と、

を有する制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本技術は、モデル予測制御に関する。

10

【背景技術】

【0002】

モデル予測制御は、各時刻において有限時間未来までの応答を最適化することによって
制御対象への入力を決定する制御方法である。操作量飽和などの不等式制約条件を陽に扱
うことができる制御手法として高い制御性能を期待されている。

【0003】

このモデル予測制御の適用については様々な分野について考察されているが、ディーゼ
ルエンジンの吸気系制御への適用も考察されている。ディーゼルエンジンの吸気系は、E
G R (Exhaust Gas Recirculator: 排気循環器)とV N T (Variable Nozzle Turbo: 可
変ノズルターボ)を用いて、M A F (Mass Air Flow: 新気量)とM A P (Manifold Absolu
te Pressure: 吸気圧)を独立に、S I S O (Single Input Single Output)としてP
I D (Proportional, Integral and Differential)制御を行っていることが多い。しか
しながら、E G RとV N Tは排気を共有して互いに干渉することから、現行の手法では低
環境負荷性能を達成するために十分な目標追従性を確保することが難しくなっている。

20

【0004】

このため、E G R及びV N TでM A F及びM A Pを制御する2入力2出力のM I M O (Multi-Input and Multi-Output)制御が検討されているが、ここでE G RバルブとV N T
ノズルの操作量の飽和に起因する目標値追従性能の劣化が大きな問題となっている。この
問題の解決策として、上で述べたモデル予測制御が期待されている。

【0005】

30

しかしながら、吸気系のような応答の速い対象に対してモデル予測制御を適用する場合
、大きな課題となるのが、サンプル時間間隔毎に行う最適化計算に要する計算時間である
。この問題に対しては様々な取り組みがなされているが、その中で使われる手法が、操作
量(制御入力とも呼ぶ)飽和条件付きの最適化問題をペナルティ関数を用いて緩和する方
法である。

【0006】

一方、エンジンなどの制御対象となるプラントに状態制約が存在する場合については、
あまり検討がなされていない。そして、どのようにすれば実時間処理における計算時間を
抑えることができるかという点については、具体的に考察されていない。

【先行技術文献】

40

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献1】梅田裕平, 丸山次人, 志村知洋, 穴井宏和, "代数的簡略化を用いたモ
デル予測制御の効率的解法", 第11回計測自動制御学会制御部門大会予稿集, 171 -
1 - 3 (2011)

【非特許文献2】Y. Umeda, T. Maruyama, H. Anai, A. Ejiri and K. Shimotani, "A Fas
t Model Predictive Control Algorithm for Diesel Engines", Proceedings of 4th IFA
C Nonlinear Model Predictive Control Conference International Federation of Auto
matic Control., Paper SuDR.6, 2012.

【非特許文献3】梅田裕平, 丸山次人, 志村知洋, 穴井宏和, 下谷 圭司, "ディーゼルエ

50

ンジンの効率的なモデル予測制御のためのペナルティ関数の設定に関する一考察”，第12回計測自動制御学会制御部門大会予稿集，P0066（2012）

【非特許文献4】梅田裕平，丸山次人，志村知洋，穴井宏和，下谷圭司，“GAを用いたディーゼルエンジンの効率的なモデル予測制御のためのペナルティ関数の設定”，第3回進化計算学会研究会予稿集，P1-5（2012）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

従って、本技術の目的は、一側面として、モデル予測制御において制御対象の状態制約を適切に取り扱うための技術を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本技術の第1の態様に係るオフライン処理方法は、（A）（a）モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ制御対象の状態方程式に関する第1の関数との和を含む第2の関数をラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ制御対象の状態偏差及び制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第1の一次式群と、（b）第2の関数を制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ制御対象の状態偏差及びラグランジュ乗数を変数として含む第2の一次式群と、（c）第2の関数を制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つラグランジュ乗数及び制御対象の状態偏差を変数として含む第3の一次式群とを格納するデータ格納部から第1の一次式群を読み出して、状態偏差の現在値を除き状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、第1の一次式群を、状態偏差の現在値と線形化制御入力とを変数として含む第4の一次式群に変形し、（B）データ格納部から第2の一次式群を読み出して、ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、第2の一次式群を、状態偏差を変数として含む、ラグランジュ乗数についての第5の一次式群に変形し、（C）データ格納部から第3の一次式群を読み出して、第4の一次式群及び第5の一次式群を用いて、第3の一次式群を、状態偏差の現在値と線形化制御入力とを変数として含む第6の一次式群に変形し、（D）第6の一次式群を、第1の係数行列と線形化制御入力についてのベクトルとの積が、状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形し、（E）モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数を状態偏差について1階偏微分した第1の微分関数及び2階偏微分した第2の微分関数を生成し、（F）第4の一次式群から線形化制御入力についての係数を抽出し、ペナルティ関数について予め定められている第2の係数行列及び係数ベクトルを算出する処理を含む。

【0010】

本技術の第2の態様に係る制御方法は、（A）モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における制御対象に対する線形化制御入力のベクトルとの積が関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第1の係数行列と、モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第2の係数行列及び係数ベクトルと、ペナルティ関数を状態偏差について1階偏微分した第1の式及び2階偏微分した第2の式とを格納するデータ格納部から第1の式及び第2の式を読み出して、状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第1の値及び第2の値を算出し、（B）データ格納部から第1の係数行列及び第2の係数行列を読み出して、第2の値と第2の係数行列との積と第1の係数行列との和である第1の行列を算出し、（C）データ格納部から関数ベクトルを読み出して、関数ベクトルに状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、第1の値と第2の値との差に線形化制御入力の1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と係数ベクトルとの積との差である第2のベクトルを算出し、（D）第1の行列の逆行列と第2のベクトルとの積により、線形化制御入力のベクトルを生成し、（E）線形化制御入力のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する処理を含む。

【発明の効果】

【 0 0 1 1 】

一側面によれば、モデル予測制御において制御対象の状態制約をペナルティ関数で適切に取り扱うことができるようになる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 2 】

【図 1】図 1 は、ディーゼルエンジンの吸気システムの一例を示す図である。

【図 2】図 2 は、エンジン制御装置のブロック線図の一例を示す図である。

【図 3】図 3 は、オフライン処理装置の機能ブロック図である。

【図 4】図 4 は、オフライン処理装置により実行される処理の処理フローを示す図である。

。

【図 5】図 5 は、モデル予測制御部の機能ブロック図を示す図である。

【図 6】図 6 は、モデル予測制御部により実行される処理の処理フローを示す図である。

【図 7】図 7 は、従来の問題を説明するための図である。

【図 8】図 8 は、従来の問題を説明するための図である。

【図 9】図 9 は、ペナルティ関数の一例を示す図である。

【図 10】図 10 は、ペナルティ関数を説明するための図である。

【図 11】図 11 は、第 2 の実施の形態に係るモデル予測制御部により実行される処理の処理フローを示す図である。

【図 12】図 12 は、第 3 の実施の形態におけるペナルティ関数の適用切り替えを説明するための図である。

【図 13 A】図 13 A は、第 3 の実施の形態の効果を説明するための図である。

【図 13 B】図 13 B は、第 3 の実施の形態の効果を説明するための図である。

【図 14】図 14 は、コンピュータの機能ブロック図である。

【図 15】図 15 は、制御装置の機能ブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 3 】

〔実施の形態 1〕

図 1 にディーゼルエンジンの吸気システムを示す。ディーゼルエンジンの吸気制御系は、吸気圧制御系と新気量制御系を含む。吸気圧制御系は、排気中の微粒子物質（PM：Particulate Matter）を低減するために、可変ノズルターボ VNT のノズル径を制御して吸気圧を吸気圧目標値に追従するようにコントロールしている。一方、新気量制御系は、排気中の窒素酸化物（NO_x）を低減するために、排気をシリンダ内に再循環させる排気循環器 EGR のバルブ開度を制御して新気量を新気量目標値に追従するようにコントロールしている。

【 0 0 1 4 】

すなわち、エンジン本体 1 には、エンジン本体 1 からの排ガスを供給する排気循環器 EGR と、排ガスの圧力にてタービンを回して新気（Fresh Air）を圧縮してエンジン本体 1 に供給する可変ノズルターボ VNT とが接続されている。可変ノズルターボ VNT のノズル開度を調整することによって、可変ノズルターボ VNT のタービンの回転が調整され、吸気圧（MAP）センサで測定される吸気圧（MAP）が調整される。一方、排気循環器 EGR に設けられている EGR バルブのバルブ開度を調整することによって、新気量（MAF）センサで測定される新気量（MAF）が調整される。

【 0 0 1 5 】

本実施の形態に係るエンジン制御装置 1000 には、MAP センサからの吸気圧測定値と、MAF センサからの新気量測定値と、外部から与えられる燃料噴射量の設定値と、同じく外部から与えられるエンジン回転数の設定値とが入力されるようになっている。また、エンジン制御装置 1000 からは、EGR バルブのバルブ開度の操作量が EGR バルブに出力され、VNT ノズルのノズル開度の操作量が VNT ノズルに出力されるようになっている。

【 0 0 1 6 】

10

20

30

40

50

以下、エンジンをプラントの一例として説明するが、本実施の形態の適用範囲は、エンジンに限られない。

【 0 0 1 7 】

本実施の形態に係るエンジン制御装置 1 0 0 0 のブロック線図を図 2 に示す。エンジン制御装置 1 0 0 0 は、計画器 2 1 0 と、モデル予測制御部 2 2 0 と、変換部 2 2 5 とを有する。プラント 2 4 0 は、例えばモデル化されたエンジン特性に相当し、E G R バルブ及び V N T ノズルの開度には物理的に制限があるため、飽和要素 2 3 0 も設けられている。すなわち、プラント 2 4 0 への操作量は、飽和要素 2 3 0 による制限を受ける。

【 0 0 1 8 】

このようなエンジン制御装置 1 0 0 0 の計画器 2 1 0 には、燃料噴射量の設定値とエンジン回転数の設定値とが入力されて、燃料噴射量の値及びエンジン回転数の値に対応付けて E G R バルブの状態目標値及び V N T ノズルの状態目標値 V_{ref} 、燃料噴射量の値及びエンジン回転数の値に対応付けて吸気圧 M A P の目標値及び新気量 M A F の目標値 X^{ref} が登録されている。本実施の形態では、計画器 2 1 0 は、E G R バルブの状態目標値及び V N T ノズルの状態目標値 V_{ref} 、及び吸気圧 M A P の目標値及び新気量 M A F の目標値 X^{ref} を出力する。

【 0 0 1 9 】

この目標値 X^{ref} とプラント 2 4 0 からの出力 y (例えば M A F センサ出力及び M A P センサ出力) との差が、モデル予測制御部 2 2 0 に入力される。モデル予測制御部 2 2 0 は、以下で述べるモデル予測制御の処理を実施して、線形化制御入力 u を出力する。この線形化制御入力 u は、以下で説明する変換部 2 2 5 (g^{-1}) で、E G R バルブの状態及び V N T ノズルの状態 v に変換される。そして、状態 v は、計画器 2 1 0 からの状態目標値 V_{ref} とは加算されて操作量が生成され、当該操作量が飽和要素 2 3 0 を介してプラント 2 4 0 に入力される。このような処理が繰り返される。

【 0 0 2 0 】

このようなエンジン本体 1 の吸気系システムは、E G R バルブ及び V N T ノズルについて非線形であり、エンジンのモデルとしても、エンジン回転数 及び燃料噴射量 に応じて非線形に変化する。

【 0 0 2 1 】

ここで、エンジン回転数 及び燃料噴射量 が固定であるとして、エンジンモデルは、以下のように定式化される。

【数 1】

$$\begin{bmatrix} x_{maf}(k+i+1) \\ x_{map}(k+i+1) \end{bmatrix} = A_{\omega(k+i), \sigma(k+i)} \begin{bmatrix} x_{maf}(k+i) \\ x_{map}(k+i) \end{bmatrix} + B_{\omega(k+i), \sigma(k+i)} g \left(\begin{bmatrix} v_{egr}(k+i) \\ v_{vnt}(k+i) \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

【 0 0 2 2 】

ここで $A_{\omega(k), \sigma(k)}$ 及び $B_{\omega(k), \sigma(k)}$ は、時刻 k における運転条件 ($\omega(k)$, $\sigma(k)$) によって変化する非線形の 2×2 行列関数である。なお、時刻 k における回転数を $\omega(k)$ と表し、燃料噴射量を $\sigma(k)$ と表す。また、時刻 k における M A F の状態偏差を $x_{maf}(k)$ と表し、M A P の状態偏差を $x_{map}(k)$ と表す。また、時刻 k における M A F の測定値を $y_{maf}(k)$ と表し、M A P の測定値を $y_{map}(k)$ と表す。さらに、時刻 k における E G R バルブの状態を $v_{egr}(k)$ と表し、V N T ノズルの状態を $v_{vnt}(k)$ と表す。また、吸気圧 M A P の目標値を X_{map}^{ref} と表し、新気量 M A F の目標値を X_{maf}^{ref} と表す。

【 0 0 2 3 】

従って、状態偏差ベクトル $x(k)$ 、測定値ベクトル $y(k)$ 、目標値ベクトル $X^{ref}(k)$ 及び状態ベクトル $v(k)$ は、以下のように表される。

10

20

30

40

【数 2】

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_{maf}(k) \\ x_{map}(k) \end{bmatrix}, y(k) = \begin{bmatrix} y_{maf}(k) \\ y_{map}(k) \end{bmatrix}$$

$$X^{ref}(k) = \begin{bmatrix} X_{maf}^{ref}(k) \\ X_{map}^{ref}(k) \end{bmatrix}, v(k) = \begin{bmatrix} v_{egr}(k) \\ v_{vnt}(k) \end{bmatrix}$$

【0024】

$x(k)$ 、 $y(k)$ 及び $X^{ref}(k)$ の関係は以下のようになっている。

10

【数 3】

$$x(k) = X^{ref}(k) - y(k) \quad (2)$$

【0025】

また、非線形関数 g を以下のように表す。

【数 4】

$$g \left(\begin{bmatrix} v_{egr}(k+i) \\ v_{vnt}(k+i) \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} g_1(v_{egr}(k+i)) \\ g_2(v_{vnt}(k+i)) \end{bmatrix} \quad (3)$$

20

【0026】

g_1 及び g_2 は、単調増加関数である。実験データからすると、このような仮定は妥当性がある。非線形モデルでは計算速度等から取り扱いが困難なため、以下では、非線形なエンジンモデルを線形モデルに変換する。そこで、上で述べた線形化制御入力 u_{egr} 及び u_{vnt} を導入することで、線形化する。

【数 5】

$$\begin{bmatrix} u_{egr}(k+i) \\ u_{vnt}(k+i) \end{bmatrix} = g \left(\begin{bmatrix} v_{egr}(k+i) \\ v_{vnt}(k+i) \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

30

【0027】

なお、線形化制御入力ベクトル $u(k)$ を以下のように表す。

【数 6】

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_{egr}(k) \\ u_{vnt}(k) \end{bmatrix}$$

【0028】

本実施の形態では、典型的な運転条件を選択して、セットポイントと呼ぶことにする。そして、モデル予測制御部 220 は、運転条件 ($x(k)$, $y(k)$) を取得すると、対応するセットポイントについての $x(k)$ 及び $y(k)$ についての行列 A 及び B を選択し、以下で述べる処理を行って線形化制御入力 u を算出する。また、変換関数 225 は、線形化制御入力 u を、変換関数 g^{-1} により非線形の最適状態 v に変換する。この最適状態 v と状態目標値 V^{ref} とは加算されて操作量が生成され、エンジンのプラント 240 に出力される。

40

【0029】

モデル予測制御部 220 は、セットポイントについて最適な線形化制御入力 u を、1 サンプル時間毎に、以下の線形モデルに従って算出する。

【数 7】

$$\begin{bmatrix} x_{maf}(k+i+1) \\ x_{map}(k+i+1) \end{bmatrix} = A_{\omega,\sigma} \begin{bmatrix} x_{maf}(k+i) \\ x_{map}(k+i) \end{bmatrix} + B_{\omega,\sigma} \begin{bmatrix} u_{egr}(k+i) \\ u_{vnt}(k+i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

【0 0 3 0】

但し、線形化制御入力 u についての制約条件は以下のとおりである。

【数 8】

$$g \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \leq \begin{bmatrix} u_{egr}(k+i) \\ u_{vnt}(k+i) \end{bmatrix} \leq g \left(\begin{bmatrix} 100 \\ 100 \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

10

【0 0 3 1】

例えば、 $\quad = 2000 \text{ rpm}$ 、 $\quad = 20 \text{ mm}^3 / \text{ s t}$ の場合、以下のような行列が用いられる。

【数 9】

$$A_{2000,20} = \begin{pmatrix} 0.928192326 & 0.000101829 \\ -1.015716036 & 0.984926428 \end{pmatrix} \quad (7)$$

【数 1 0】

$$B_{2000,20} = \begin{pmatrix} -0.000488023 & 0.000295048 \\ -0.015300326 & -0.003700605 \end{pmatrix} \quad (8)$$

20

【0 0 3 2】

各時刻 k についての線形化制御入力 u は、以下に示すような評価関数 J を最小化することで決定される。なお、予測ホライズン H_p 及び制御ホライズン H_c は、予め設定されるものとする。

【数 1 1】

$$J(k) = \sum_{i=1}^{H_p-1} x(k+i)^T Q x(k+i) + \sum_{i=0}^{H_c-1} \Delta u(k+i)^T R \Delta u(k+i) + x(k+H_p)^T S x(k+H_p) \quad (9)$$

30

【0 0 3 3】

ここで、 Q^T は行列 Q の転置行列である。また、 $Q \in M(n, R)$ 、 $R \in M(n, R)$ 及び $S \in M(n, R)$ は、重み行列であり、予め設定される。なお、 $M(n, R)$ は $n \times n$ 行列を表す。(9) 式において、無限ホライズンについての最適化問題を、有限ホライズンについての最適化問題にしており、このため、Ricatti 代数方程式を解く行列として重み行列 S を用いている。

40

【0 0 3 4】

本実施の形態では、モデル予測制御の問題は、有限ホライズンの最適制御問題を解くことに変形される。

【数 1 2】

$$\text{Minimize } J \quad (10)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} x(k+i+1) = Ax(k+i) + Bu(k+i) & (11a) \\ x(k) = x & (11b) \\ u_{\min} \leq u(k+i) \leq u_{\max} & (11c) \end{cases}$$

ここで、 x は、現在の状態偏差ベクトルを表す。

10

【0035】

最適解を求める手法として、ラグランジュの未定乗数法が効率的であるが、不等式制約がある場合にはこの手法をそのまま用いることができない。従って、不等式制約の代わりにペナルティ関数を導入して、不等式制約のない評価関数に緩和する。

【0036】

すなわち、以下のような評価関数 Jb に緩和する。

【数 1 3】

$$Jb = \sum_{i=1}^{H_p-1} x(k+i)^T Q x(k+i) + \sum_{i=0}^{H_c-1} \Delta u(k+i)^T R \Delta u(k+i) + p(u(k+i)) \\ + x(k+H_p)^T S x(k+H_p) \quad (12)$$

20

【0037】

ここで、 $p(u(k+i))$ はペナルティ関数であり、入力値 $u(k+i)$ が、可能な値域の境界に近づくと、大きな値を評価関数 J に加えることになる。

【0038】

一般的に、不等式制約 $u \leq u^{\max}$ に対して用いられるペナルティ関数としては以下のものがある。

【数 1 4】

30

$$(a) \quad p(u) = r \left(\min(0, u^{\max} - u) \right)^2$$

$$(b) \quad p(u) = -r \log(u^{\max} - u)$$

$$(c) \quad p(u) = \frac{r}{(u^{\max} - u)}$$

40

$$(d) \quad p(u) = \begin{cases} 0 & \text{if } u \leq u^{\max} \\ \infty & \text{if } u > u^{\max} \end{cases}$$

r は、ペナルティ関数の係数であり、不等式制約に対する重みを表している。

【0039】

本実施の形態では、以下の演算のためには、(c) のようなシンプルなペナルティ関数が好ましいので、(c) を用いることにする。

50

【 0 0 4 0 】

ディーゼルエンジンの場合、線形化制御入力 u には以下のような制約が存在する。

【 数 1 5 】

$$u_{egr}^{\min} \leq u_{egr}(k+i) \leq u_{egr}^{\max} \quad (13)$$

$$u_{vnt}^{\min} \leq u_{vnt}(k+i) \leq u_{vnt}^{\max} \quad (14)$$

【 0 0 4 1 】

(c) のような形のペナルティ関数を採用する場合には、ペナルティ関数は以下のように表される。

10

【 数 1 6 】

$$p(u) = \sum_{i=0}^{Hu-1} \frac{r_{egr}^{\max}}{u_{egr}^{\max} - u_{egr}(k+i)} + \sum_{i=0}^{Hu-1} \frac{r_{egr}^{\min}}{u_{egr}(k+i) - u_{egr}^{\min}} \\ + \sum_{i=0}^{Hu-1} \frac{r_{vnt}^{\max}}{u_{vnt}^{\max} - u_{vnt}(k+i)} + \sum_{i=0}^{Hu-1} \frac{r_{vnt}^{\min}}{u_{vnt}(k+i) - u_{vnt}^{\min}} \quad (15)$$

【 0 0 4 2 】

(1 5) 式を用いて制約条件を緩和する場合、以下に示すような、有限ホライズンにつ

20

【 数 1 7 】

$$\text{Minimize } Jb \quad (16)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} x(k+i+1) = Ax(k+i) + Bu(k+i) & (17a) \\ x(k) = x & (17b) \end{cases}$$

【 0 0 4 3 】

このような最適制御問題を解くためには、ラグランジュの未定乗数法が用いられる。ここで、ラグランジュ乗数 $(j) = [\text{maf}(j), \text{map}(j)]^T$ を用い、ハミルトニ

30

【 数 1 8 】

$$H = Jb + \chi \quad (18)$$

【 0 0 4 4 】

ここで、(の大文字) は、以下のように定義される。

【 数 1 9 】

$$\chi = \sum_{j=0}^{H_p-1} \lambda(j+1) (x(k+j+1) - Ax(k+j) - Bu(k+j)) \quad (19)$$

40

【 0 0 4 5 】

$x, u, H = 0$ と置けば、以下のような方程式が得られる。

【数 2 0】

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial J}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial J}{\partial u} + \frac{\partial \chi}{\partial u} + \frac{\partial p}{\partial u} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = 0 \quad (22)$$

なお、(20)式において $J_b / x = J / x + p(u) / x = J / x$ 10
と変形されている。

【0046】

なお、 $\partial / \partial x$ 、 $\partial / \partial u$ 、 $\partial / \partial \lambda$ は、以下のような演算である。

【数 2 1】

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \left[\frac{\partial}{\partial x_{maf}(k+1)}, \frac{\partial}{\partial x_{map}(k+1)}, \frac{\partial}{\partial x_{maf}(k+2)}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{map}(k+H_p)} \right]^T \\ \frac{\partial}{\partial u} &= \left[\frac{\partial}{\partial u_{egr}(k)}, \frac{\partial}{\partial u_{vnt}(k)}, \frac{\partial}{\partial u_{egr}(k+1)}, \dots, \frac{\partial}{\partial u_{vnt}(k+H_c)} \right]^T \\ \frac{\partial}{\partial \lambda} &= \left[\frac{\partial}{\partial \lambda_{maf}(k+1)}, \frac{\partial}{\partial \lambda_{map}(k+1)}, \frac{\partial}{\partial \lambda_{maf}(k+2)}, \dots, \frac{\partial}{\partial \lambda_{map}(k+H_p)} \right]^T \end{aligned} \quad 20$$

【0047】

なお、方程式(20)乃至(22)は、 p / u の部分を除き線形方程式となっている。 p / u を、直前のステップの最適線形化制御入力 $u \sim$ ("～"は u の上に付される)でテイラー展開することで線形化すると、以下のように表される。 30

【数 2 2】

$$\frac{\partial p}{\partial u}(u) = \frac{\partial p}{\partial u}(\tilde{u}) + \frac{\partial^2 p}{\partial u^2}(\tilde{u})(u - \tilde{u}). \quad (23)$$

【0048】

(23)式の第1項のEGR成分は、以下のように表される。なお、VNT成分も同様の形で表される。

【数 2 3】

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial u_{egr}(k)} &= \left(\frac{2r_{egr}^{\max}}{(u_{egr}^{\max} - \tilde{u}_{egr}(k))^3} - \frac{2r_{egr}^{\min}}{(u_{egr}^{\min} - \tilde{u}_{egr}(k))^3} \right) u_{egr}(k) - \frac{2r_{egr}^{\max} \tilde{u}_{egr}(k)}{(u_{egr}^{\max} - \tilde{u}_{egr}(k))^3} \\ &\quad + \frac{2r_{egr}^{\min} \tilde{u}_{egr}(k)}{(u_{egr}^{\min} - \tilde{u}_{egr}(k))^3} + \frac{r_{egr}^{\max}}{(u_{egr}^{\max} - \tilde{u}_{egr}(k))^2} - \frac{r_{egr}^{\min}}{(u_{egr}^{\min} - \tilde{u}_{egr}(k))^2} \end{aligned} \quad (24) \quad 40$$

【0049】

このような線形近似を行えば、(20)乃至(22)式は線形となる。そうすると、線形近似された(20)乃至(22)式は以下のように表される。

【数 2 4】

$$MU = b \quad (25)$$

ここでMは、 $(2H_p + H_c) \times (2H_p + H_c)$ の行列であり、U及びbは、 $(2H_p + H_c)$ ベクトルである。ベクトルUは、以下のように表される。

【数 2 5】

$$U = \begin{bmatrix} x_{maf}(k+1), x_{map}(k+1), x_{maf}(k+2), \dots, x_{maf}(k+H_p), x_{map}(k+H_p), \\ u_{egr}(k), u_{vnt}(k), u_{egr}(k+1), \dots, u_{egr}(k+H_c), u_{vnt}(k+H_c), \\ \lambda_{maf}(k+1), \lambda_{map}(k+1), \lambda_{maf}(k+2), \dots, \lambda_{maf}(k+H_p), \lambda_{map}(k+H_p) \end{bmatrix}^T \quad (26)$$

10

【0 0 5 0】

また、ベクトルbは、以下のように表される。なお、 b_{maf} 、 b_{map} 及び b_{const} は、行列の変換によって算出される $(2H_p + H_c)$ 行列である。

$$b = x_{maf} b_{maf} + x_{map} b_{map} + b_{const} \quad (27)$$

【0 0 5 1】

最適な線形化制御入力は、この線形方程式を解くことによって得られる。しかしながら、行列Mのサイズが大きければ計算時間は長くなってしまいますので、行列Mのサイズをオフラインの前処理にて削減する。

20

【0 0 5 2】

まず、(22)式の第1乃至第3の方程式を具体的に書き下すと以下ようになる。

【数 2 6】

$$x_{maf}(k+1) = a_{11}x_{maf}(k) + a_{12}x_{map}(k) + b_{11}u_{egr}(k) + b_{12}u_{vnt}(k) \quad (28-1)$$

$$x_{map}(k+1) = a_{21}x_{maf}(k) + a_{22}x_{map}(k) + b_{21}u_{egr}(k) + b_{22}u_{vnt}(k) \quad (28-2)$$

$$x_{maf}(k+2) = a_{11}x_{maf}(k+1) + a_{12}x_{map}(k+1) + b_{11}u_{egr}(k+1) + b_{12}u_{vnt}(k+1) \quad (29)$$

【0 0 5 3】

(28-1)式及び(28-2)式の状態偏差 $x_{maf}(k)$ 及び $x_{map}(k)$ は、現在値である。従って、(28-1)式によれば、 $x_{maf}(k+1)$ は線形化制御入力 $u(k)$ の1次式で表される。(28-2)式によれば、 $x_{map}(k+1)$ も、線形化制御入力 $u(k)$ の1次式で表される。また、(29)式によれば、 $x_{maf}(k+2)$ は、状態偏差及び線形化制御入力の1次式で表される。しかしながら、(28-1)式及び(28-2)式を(29)式に代入すると、 $x_{maf}(k+2)$ を、線形化制御入力 $u(k)$ 及び $u(k+1)$ で表すことができるようになる。これをiを増加させつつ繰り返せば、状態偏差 $x_{maf}(k+i)$ 及び $x_{map}(k+i)$ は、線形化制御入力の1次式として以下のように表される。

30

【数 2 7】

$$x(k+i) = F(x(k), u(k), \dots, u(k+H_c-1)) \quad (30)$$

40

【0 0 5 4】

一方、(20)式の $(2H_p - 1)$ 番目及び $(2H_p - 3)$ 番目の方程式を具体的に書き下すと以下ようになる。

【数 2 8】

$$s_{11}x_{maf}(k+H_p)+\lambda_{maf}(H_p)=0 \quad (31)$$

$$s_{22}x_{map}(k+H_p)+\lambda_{map}(H_p)=0 \quad (32)$$

$$r_{11}x_{maf}(k+H_p-1)+\lambda_{maf}(H_p-1)-a_{11}\lambda_{maf}(H_p)-a_{22}\lambda_{map}(H_p)=0 \quad (33)$$

ここで、 s_{11} 、 s_{22} 、 r_{11} は、重み行列 S 及び R の行列成分を表す。

【0 0 5 5】

この(31)式及び(32)式は、 $\lambda_{maf}(H_p)$ 及び $\lambda_{map}(H_p)$ の一次式で表されることが分かる。そこで、(31)式及び(32)式を、(33)式に代入すると、 $\lambda_{maf}(H_p-1)$ が、目標値 x^{ref}_{maf} 、状態偏差 $x(k+H_p)$ 及び $x(k+H_p-1)$ で表すことができる。このような処理を i を減少させつつ順次行うことで、ラグランジュ乗数 $(k+i)$ は、以下のように表される。

【数 2 9】

$$\lambda(k+i)=G_1(x(k),\dots,x(k+H_p)) \quad (34)$$

【0 0 5 6】

さらに、(30)式を(34)式に代入することで、ラグランジュ乗数 $(k+i)$ は、線形化制御入力 $u(k)$ の一次式に変形される。

【数 3 0】

$$\lambda(k+i)=G_2(x(k),u(k),\dots,u(k+H_c-1)) \quad (35)$$

【0 0 5 7】

最後に、(30)式及び(35)式を、(21)式に代入すると、以下のように表される。

【数 3 1】

$$\frac{\partial H}{\partial u}=\frac{\partial H}{\partial u}(x(k),u(k),\dots,u(k+H_c-1))=0 \quad (36)$$

【0 0 5 8】

このように、(21)式は、状態偏差の初期値 $x(k)$ 及び線形化制御入力 u の一次式で表されることができるようになる。そうすると、(36)式は、以下の形式に直すことができる。

【数 3 2】

$$M_2U_2=b_2 \quad (37)$$

【0 0 5 9】

ここで M_2 は $H_c \times H_c$ 行列である。 U_2 及び b_2 は、以下のような形のベクトルである。

【数 3 3】

$$U_2=[u_{egr}(k),u_{vnt}(k),u_{egr}(k+1),\dots,u_{egr}(k+H_c-1),u_{vnt}(k+H_c-1)] \quad (38)$$

【数 3 4】

$$b_2=x_{maf}(k)b_{2maf}+x_{map}(k)b_{2map}+b_{2const} \quad (39)$$

なお、 b_{2maf} 、 b_{2map} 及び b_{2const} は、行列の変換によって算出される $(2H_p+H_c)$ 行列である。

【0 0 6 0】

このような処理を数式処理を用いてオフラインで行っておけば、エンジン制御装置 1000 では、(37)式を解く演算を行えばよい。行列 M_2 のサイズは、行列 M よりも小

10

20

30

40

50

くなっており、計算量も削減されるため、高速に制御入力を得ることができるようになる。

【 0 0 6 1 】

次に、定常偏差を削減するために、状態制約を導入する場合を考える。説明を簡単にするために、M A F の状態偏差について以下のような制約を導入する。M A P についてはここでは取り扱わないが、同様に設定する場合もある。

【数 3 5】

$$x_{\min} \leq x_{maf}(i) \leq x_{\max} \quad (40)$$

【 0 0 6 2 】

しかしながら、このままではモデル予測制御問題が不等式制約を含む問題となり、現実的には解けないので、例えば、以下に示すようなペナルティ関数を導入することで、不等式制約問題を等式制約問題に緩和する。

【数 3 6】

$$\sum_{i=1}^{H_p} q(x(k+i)) = \sum_{i=1}^{H_p} \left(\frac{r_{\max}}{x_{\max} - x_{maf}(k+i)} + \frac{r_{\min}}{x_{maf}(k+i) - x_{\min}} \right) \quad (42)$$

【 0 0 6 3 】

ここでは、評価関数 J b に対して (4 2) 式のペナルティ関数を加える。そうすると、

【数 3 7】

$$J_c = J + p(u) + \sum_{i=1}^{H_p} q(x(k+i)) \quad (43)$$

$$H_2 = J_c + \chi \quad (44)$$

【 0 0 6 4 】

そして、(3 0) 式からすると、 $x(k+i)$ は、以下のように書き下される。

【数 3 8】

$$x_{maf}(k+i) = \alpha_1^i u_{egr}(k) + \alpha_2^i u_{vnt}(k) + \alpha_3^i u_{egr}(k+1) + \dots + \alpha_{2H_c}^i u_{vnt}(k+H_c-1) + \beta_1^i x_{maf}(k) + \beta_2^i x_{map}(k) \quad (45)$$

【 0 0 6 5 】

そうすると、 $x(k+i)$ は、全ての i について、 $u(0)$ 乃至 $u(H_c-1)$ の関数であるので、(4 2) 式のペナルティ関数についても $u(0)$ 乃至 $u(H_c-1)$ の関数と考えることができる。よって、入力制約について (2 0) 式乃至 (2 2) 式で記述された最適化問題は、以下のように変形される。

【数 3 9】

$$\frac{\partial H_2}{\partial x} = \frac{\partial J}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial x} = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial u} = \frac{\partial J}{\partial u} + \frac{\partial \chi}{\partial u} + \frac{\partial p}{\partial u} + \sum_{i=1}^{H_p} \frac{\partial q(x(k+i))}{\partial u} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial \lambda} = 0 \quad (48)$$

【 0 0 6 6 】

このような(46)式乃至(48)式を解くことになるが、そのためには状態についてのペナルティ関数に関する $q(x)/u$ を線形化する。

【0067】

まず、 $q(x_{maf}(k+i))/u_{egr}(k+j)$ は以下のように表される。

【数40】

$$\frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial u_{egr}(k+j)} = \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)} \frac{\partial x_{maf}(k+i)}{\partial u_{egr}(k+j)} \quad (49)$$

【0068】

10

ここで(45)式があるので、(49)式は、以下のように表される。

【数41】

$$\frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial u_{egr}(k+j)} = \alpha_{2j+1}^i \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)} \quad (51)$$

【0069】

次に、(51)式中の $q(x_{maf}(k+i))/x_{maf}(k+i)$ を線形化する。その際、以下の最適な線形化制御入力 u で1次のテイラー展開を行うと、 $q(x_{maf}(k+i))/x_{maf}(k+i)$ は以下のように表される。

20

【数42】

$$\tilde{u} = (\tilde{u}_{egr}(k), \tilde{u}_{vnt}(k), \dots, \tilde{u}_{vnt}(k+H_c-1))$$

【数43】

$$\begin{aligned} \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)}(u) &\approx \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)}(\tilde{u}) + \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i) \partial u_{egr}(k)}(\tilde{u})(u_{egr}(k) - \tilde{u}_{egr}(k)) + \\ &\dots + \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i) \partial u_{vnt}(k+H_c-1)}(\tilde{u})(u_{vnt}(k+H_c-1) - \tilde{u}_{vnt}(k+H_c-1)) \end{aligned} \quad (52) \quad 30$$

【0070】

また、(51)式と同様に、以下のように表される。

【数44】

$$\frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i) \partial u_{egr}(k+j)} = \alpha_{2j+1}^i \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)^2} \quad (53)$$

【0071】

40

従って、以下のような近似式を得られる。

【数45】

$$\begin{aligned} \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)}(u) &\approx \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)}(\tilde{u}) + \alpha_1^i \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)^2}(\tilde{u})(u_{egr}(k) - \tilde{u}_{egr}(k)) + \\ &\dots + \alpha_{2H_c}^i \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)^2}(\tilde{u})(u_{vnt}(k+H_c-1) - \tilde{u}_{vnt}(k+H_c-1)) \end{aligned} \quad (54)$$

【0072】

50

よって、(51)式及び(54)式を組み合わせると、以下のような近似式が得られる。

【数46】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial u_{egr}(k+j)} \\ &= \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)^2} (\tilde{u}) \left(\alpha_{2j+1}^i \alpha_1^i u_{egr}(k) + \alpha_{2j+1}^i \alpha_2^i v_{vnt}(k) + \dots + \alpha_{2j+1}^i \alpha_{2H_c}^i u_{vnt}(k+H_c-1) \right) \\ & \quad + \alpha_{2j+1}^i \left(\frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)} (\tilde{u}) - \right. \\ & \quad \left. \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)^2} (\tilde{u}) \left(\alpha_1^i u_{egr}(k) + \alpha_2^i u_{vnt}(k) + \dots + \alpha_{2H_c}^i u_{vnt}(k+H_c-1) \right) \right) \end{aligned} \quad (55)$$

10

【0073】

ここで、 $x_{\sim maf}(k+i)$ （“ \sim ”は x の上に載っているものとする）を、 u_{\sim} に対応する状態偏差ベースポイントと設定する。そして、短い時間における状態偏差の値の変動は小さいので、 $x_{base\ maf}(k)$ は以下のように表される。

20

【数47】

$$x_{maf}^{base}(k) = (1 \ 0) \left(Ax(k) + Bu^*(k-1) \right) \quad (56)$$

そして、全ての i について $x_{\sim maf}(k+i)$ を $x_{base\ maf}(k)$ と近似する。 $x(k)$ は、上でも述べたように現在の状態偏差の値を表しており、 $u^*(k-1)$ は、1単位時間前の最適な線形化制御入力である。

【0074】

そうすると、(45)式から、(55)式の定数部分は、以下のように表される。

30

【数48】

$$\begin{aligned} & \alpha_1^i \tilde{u}_{egr}(k) + \alpha_2^i \tilde{u}_{vnt}(k) + \dots + \alpha_{2H_c}^i \tilde{u}_{vnt}(k+H_c-1) \\ &= \tilde{x}_{maf}(k) - \beta_1^i x_{maf}(k-1) - \beta_2^i x_{map}(k-1) \end{aligned} \quad (57)$$

【0075】

また、 $x_{\sim maf}(k)$ を $x_{base\ maf}(k)$ と近似する。そうすると、(56)式から、以下のような近似式が得られる。

【数49】

$$\alpha_1^i \tilde{u}_{egr}(k) + \alpha_2^i \tilde{u}_{vnt}(k) + \dots + \alpha_{2H_c}^i \tilde{u}_{vnt}(k+H_c-1) \quad (58)$$

40

$$= \tilde{x}_{maf}(k) - \beta_1^i x_{maf}(k-1) - \beta_2^i x_{map}(k-1) \quad (59)$$

$$\approx x_{maf}^{base}(k) - (1 \ 0) Ax(k) \quad (60)$$

$$= (1 \ 0) Bu(k-1) \quad (61)$$

【0076】

そこで、

$$d(x_{base\ maf}(k)) = (1 \ 0) Bu(k-1) \quad (1 \ 0 \ 1) \text{と置く。}$$

50

【 0 0 7 7 】

さらに、 $x_{maf}(k+i)$ を $x_{maf}^{base}(k)$ と近似すれば、 $\{ \frac{\partial^2 q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)^2} \}$ (u~) は、全ての i についてベース状態偏差 $x_{maf}^{base}(k)$ に関して同じ関数になる。同様に、 $\{ \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial x_{maf}(k+i)} \}$ (u~) は、全ての i についてベース状態偏差 $x_{maf}^{base}(k)$ に関して同じ関数になる。

【 0 0 7 8 】

以下、ペナルティ関数の x ((4 2) 式であれば x_{maf}) についての一階偏微分を $\frac{\partial q}{\partial x}$ と表し、二階偏微分を $\frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$ と表し、 $x = x_{maf}^{base}(k)$ についての $\frac{\partial q}{\partial x_{maf}^{base}(k)}$ 及び $\frac{\partial^2 q}{\partial (x_{maf}^{base}(k))^2}$ によって、(5 5) 式は以下のように表される。

10

【 数 5 0 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q(x_{maf}(k+i))}{\partial u_{egr}(k+j)} \\ & \approx \partial^2(x_{maf}^{base}(k)) \left(\alpha_{2j+1}^i \alpha_1^i u_{egr}(k) + \alpha_{2j+1}^i \alpha_2^i u_{vnt}(k) + \dots + \alpha_{2j+1}^i \alpha_{2H_c}^i u_{vnt}(k+H_c-1) \right) \\ & \quad + \alpha_{2j+1}^i \left(\frac{\partial q(x_{maf}^{base}(k))}{\partial x_{maf}^{base}(k)} - \partial^2(x_{maf}^{base}(k)) d(x_{maf}^{base}(k)) \right) \end{aligned} \quad (62)$$

【 0 0 7 9 】

この (6 2) 式から、以下のような近似も行われる。

20

【 数 5 1 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q(x_{maf})}{\partial u_{egr}(k+i)} = \frac{\partial \sum_{i=1}^{H_p} q(x_{maf})(k+i)}{\partial u_{egr}(k+i)} \\ & \approx \partial^2(x_{maf}^{base}(k)) \left(\sum_{i=1}^{H_p} \alpha_{2j+1}^i \alpha_1^i u_{egr}(k) + \sum_{i=1}^{H_p} \alpha_{2j+1}^i \alpha_2^i u_{vnt}(k) + \dots + \sum_{i=1}^{H_p} \alpha_{2j+1}^i \alpha_{2H_c}^i u_{vnt}(k+H_c-1) \right) \\ & \quad + \sum_{i=1}^{H_p} \alpha_{2j+1}^i \left(\frac{\partial q(x_{maf}^{base}(k))}{\partial x_{maf}^{base}(k)} - \partial^2(x_{maf}^{base}(k)) d(x_{maf}^{base}(k)) \right) \end{aligned} \quad (63)$$

30

【 0 0 8 0 】

さらに、この (6 3) 式から、以下のような近似も行われる。

【 数 5 2 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q(x_{maf})}{\partial u} = \left[\frac{\partial q(x_{maf})}{\partial u_{egr}(k)}, \frac{\partial q(x_{maf})}{\partial u_{vnt}(k)}, \dots, \frac{\partial q(x_{maf})}{\partial u_{vnt}(k+H_c-1)} \right]^T \\ & \approx \partial^2(x_{maf}^{base}(k)) \Lambda U_2 + \left(\frac{\partial q(x_{maf}^{base}(k))}{\partial x_{maf}^{base}(k)} - \partial^2(x_{maf}^{base}(k)) d(x_{maf}^{base}(k)) \right) \nu \end{aligned} \quad (64)$$

40

ここで、 Λ 及び ν は以下のように表される。

【 数 5 3 】

$$\Lambda = \left(\sum_{i=1}^{H_p} \alpha_p^i \alpha_q^i \right)_{p,q}$$

【数 5 4】

$$\nu = \left[\sum_{i=1}^{H_p} \alpha_1^i, \dots, \sum_{i=1}^{H_p} \alpha_{2H_c}^i \right]^T$$

なお、における p は $2j + 1$ で固定で、 q については、1 から H_c まで増加する。すなわち、は、1 行 H_c 列の行列である。

【0 0 8 1】

従って、(6 4) 式及び (3 7) 式から、状態についてのペナルティ関数を伴う最適化問題は、以下のように緩和される。

10

【数 5 5】

$$\left(M_2 + \partial^2 \left(x_{maf}^{base}(k) \right) \Lambda \right) U_2 = b_2 - \left(\partial \left(x_{maf}^{base}(k) \right) - \partial^2 \left(x_{maf}^{base}(k) \right) d \left(x_{maf}^{base}(k) \right) \right) \nu \quad (65)$$

【0 0 8 2】

(6 5) 式をエンジン制御装置 1 0 0 0 で解くためには、 M_2 、 b_2 、及びを予めオフラインで用意しておき、ペナルティ関数の x_{maf} についての一階偏微分 $\partial(x)$ と、二階偏微分 $\partial^2(x)$ を予めオフラインで算出しておく。そして、エンジン制御装置 1 0 0 0 では、 $x_{maf}^{base}(k)$ を (5 6) 式で算出するとともに、 $\partial(x_{maf}^{base}(k))$ 及び $\partial^2(x_{maf}^{base}(k))$ を算出し、さらに $d(x_{maf}^{base}(k)) = (1 \ 0) B u(k - 1)$ を算出する。そして (6 5) 式を解くことになる。

20

【0 0 8 3】

なお、上では x_{maf} について状態制約を設ける例を示したが、 x_{map} について状態制約を設けるようにしてもよいし、それら両方に状態制約を設けるようにしてもよい。基本的な処理は上で述べたとおりである。

【0 0 8 4】

次に、本実施の形態に係るオフライン処理装置 1 0 0 の機能ブロック図を図 3 に示す。本実施の形態では、オフライン処理装置 1 0 0 は、入力部 1 0 1 と、入力データ格納部 1 0 2 と、第 1 変形処理部 1 0 3 と、第 1 データ格納部 1 0 4 と、第 2 変形処理部 1 0 5 と、第 2 データ格納部 1 0 6 と、第 3 変形処理部 1 0 7 と、第 3 データ格納部 1 0 8 と、第 1 行列生成部 1 0 9 と、第 4 データ格納部 1 1 0 と、第 2 行列生成部 1 1 1 と、微分処理部 1 1 2 とを有する。

30

【0 0 8 5】

次に、オフライン処理装置 1 0 0 の処理内容を図 4 を用いて説明する。まず、入力部 1 0 1 は、ユーザからの入力データとして、行列 A 、 B 、 S 及び R 、予測ホライズン H_p 及び制御ホライズン H_c などの値の入力を受け付け、入力データ格納部 1 0 2 に格納する (図 4：ステップ S 1)。なお、入力データ格納部 1 0 2 に格納されていない場合には、(4 6) 乃至 (4 8) 式のデータも入力部 1 0 1 を介して入力データ格納部 1 0 2 に格納されるものとする。同様に、入力制約に係る項の式のデータ ((2 4) 式) についても同様に、入力データ格納部 1 0 2 に格納されており、格納されていない場合には入力部 1 0 1 を介して入力される。さらに、状態制約に係る式のデータについても同様に、入力データ格納部 1 0 2 に格納されており、格納されていない場合には入力部 1 0 1 を介して入力される。

40

【0 0 8 6】

次に、第 1 変形処理部 1 0 3 は、入力データ格納部 1 0 2 に格納されているデータを用いて、状態偏差 x についての第 1 変形処理を実行し、処理結果を第 1 データ格納部 1 0 4 に格納する (ステップ S 3)。(2 2) 式に由来する (2 8 - 1) 及び (2 8 - 2) 式を (2 9) 式に代入する処理を i を増加させながら繰り返して実行し、(3 0) 式を生成する処理を実行する。なお、(3 0) 式については、(4 5) 式のように書き下される。

【0 0 8 7】

また、第 2 変形処理部 1 0 5 は、入力データ格納部 1 0 2 に格納されているデータを用

50

いて、ラグランジュ乗数 についての第2変形処理を実行し、処理結果を第2データ格納部106に格納する(ステップS5)。(20)式に由来する(31)及び(32)式を(33)式に代入する処理をiを減少させながら繰り返して実行し、(34)式を生成する処理を実行する。

【0088】

さらに、第3変形処理部107は、第1データ格納部104及び第2データ格納部106に格納されているデータを用いて、ラグランジュ乗数 についての第3変形処理を実行し、処理結果を第3データ格納部108に格納する(ステップS7)。(30)式を(34)式に代入する処理を実行して、(35)式を生成する。

【0089】

そして、第1行列生成部109は、(30)式(第1データ格納部104に格納されている)及び(35)式(第3データ格納部108に格納されている)を(21)式(入力データ格納部102に格納されている)に代入して連立方程式(36)式を生成し、これを(37)式の形に変形することで、行列 M_2 及び b_2 を算出し、第4データ格納部110に格納する(ステップS9)。ここまでの処理は、特開2012-194960号公報に記載の技術とほぼ同様である。

【0090】

その後、第2行列生成部111は、第1データ格納部104に格納されている、 x についての第1変形処理の結果((30)式)を用いて、入力データ格納部102に格納されている式に従って、係数行列 及び係数ベクトル を生成し、第4データ格納部110に格納する(ステップS11)。

【0091】

さらに、微分処理部112は、第1データ格納部102に格納されている、状態制約についてのペナルティ関数の x についての1階偏微分関数 (x) と、2階偏微分関数 $^2(x)$ を生成し、第4データ格納部110に格納する(ステップS13)。1階偏微分関数及び2階偏微分関数の生成については、周知であるからここでは説明を省略する。

【0092】

以上のような処理を実行することで、エンジン制御装置1000の処理負荷を大幅に削減でき、処理速度を高速化できる。

【0093】

次に、図5にエンジン制御装置1000におけるモデル予測制御部220の構成例を示す。モデル予測制御部220は、微分値算出部2201と、行列算出部2202と、出力生成部2203と、データ格納部2205とを有する。

【0094】

データ格納部2205には、第4データ格納部110に格納されているデータが格納される。

【0095】

次に、図6を用いて、エンジン制御装置1000におけるモデル予測制御部220の処理内容について説明する。

【0096】

まず、モデル予測制御部220は、 $x(k) (= X_{ref}(k) - y(k))$ を取得する(図6:ステップS21)。

【0097】

そうすると、モデル予測制御部220は、関数ベクトル b_2 に $x(k)$ を代入して関数ベクトル b_2 を数値ベクトル化する(ステップS23)。

【0098】

また、微分値算出部2201は、 $x^{base}(k) (x^{base}_{maf}(k))$ であれば(56)式)を算出し、データ格納部2205に格納されているペナルティ関数の1階偏微分関数 (x) と、2階偏微分関数 $^2(x)$ に $x^{base}(k)$ を代入し、 $(x^{base}(k))$ 及び $^2(x^{base}(k))$ を求める(ステップS25)。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 9 】

そして、行列算出部 2 2 0 2 は、 M_3 及び b_3 を算出する（ステップ S 2 7）。

【 0 1 0 0 】

（ 6 5 ）式の左辺におけるベクトル U_2 以外の部分である $(M_2 + {}^2(x^{base}(k)))$ が M_3 である。また、（ 6 5 ）式の右辺が b_3 である。すなわち、 $b_3 = b_2 - (x^{base}(k)) - {}^2(x^{base}(k))d(x^{base}(k))$ である。 b_3 を算出するためには、 $d(x^{base}(k))$ を、 $Bu(k-1)$ で算出する。

【 0 1 0 1 】

そして、出力生成部 2 2 0 3 は、 $U = M^{-1}_3 b_3$ によってベクトル U を算出する（ステップ S 2 9）。さらに、出力生成部 2 2 0 3 は、ベクトル U から線形化制御入力 $u(k)$ ($i = 0$) を抽出し、出力する（ステップ S 3 1）。

10

【 0 1 0 2 】

その後、モデル予測制御部 2 2 0 は、処理が終了するのかを判断し（ステップ S 3 3）、処理終了でなければ処理はステップ S 2 1 に戻り、処理終了であれば処理は終了する。

【 0 1 0 3 】

以上のような処理で分かるように、オフライン処理によって算出されているデータを活用でき、 M_3 のサイズも削減されているので、状態制約についてのペナルティ関数を導入することでステップ S 2 5 及び S 2 7 が追加されていても、高速に線形化制御入力を得ることができるようになる。さらに、ペナルティ関数の近似も適切に行われており、高い精度で適切な制御がなされるようになる。

20

【 0 1 0 4 】

なお、ディーゼルエンジンの吸気系制御では、図 7（縦軸は MAF を表し、横軸は時間を表す）に示すように MAF の状態 y_{maf} が目標値 x^{ref}_{maf} を下回ると大量の微粒子物質が発生し、吸気系のつまりの原因となることがある。そのため、上で述べたように MAF に対して下限値を設定して制御を行うこととする。

【 0 1 0 5 】

例えば、以下のようなモデルを採用するものとする。

【数 5 6】

$$\begin{bmatrix} x_{maf}(k+1) \\ x_{map}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{maf}(k) \\ x_{map}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2 & 10 \\ -30 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{egr}(k) \\ u_{vnt}(k) \end{bmatrix}$$

30

【 0 1 0 6 】

この時に、例えば $x_{maf} = 10$ という状態制約を設定する。そして、予測ホライズン $H_p = 4$ ステップ、制御ホライズン $H_c = 2$ ステップとする。この際、状態制約についてのペナルティ関数は、以下のような 1 階偏微分関数及び 2 階偏微分関数が用いられる。

【数 5 7】

$$\partial(x) = -\frac{1}{(x+10)^2}$$

40

$$\partial^2(x) = \frac{2}{(x+10)^3}$$

【 0 1 0 7 】

また、以下に示すような 及び が得られる。

【数 5 8】

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 174.6 & -106.5 & 196.3 & -379.8 \\ -106.5 & 172.9 & -54.0 & 190.4 \\ 196.3 & -54.0 & 250.4 & -438.9 \\ -379.8 & 190.4 & -438.9 & 847.0 \end{bmatrix}$$

$$\nu = \begin{bmatrix} -23.8 \\ 23.5 \\ -22.9 \\ 48.4 \end{bmatrix}$$

10

【0 1 0 8】

このようにすれば、大量の微粒子物質の発生を抑制させることができる。

【0 1 0 9】

なお、エンジンの制御だけではなく、例えば自動車の運転支援のための制御アルゴリズムにおいて、ハンドル（ステアリング）の位置とアクセル開度から、自動車の位置と速度を制御する場合にも本実施の形態は適用可能である。例えば、自動車は白線を越えてはいけないため、白線の位置が状態制約となる。自動車のモデルは非線形であるため、区分的線形なモデルに近似することによって、本実施の形態を適用すれば、安全な運転支援が可能となる。

20

【0 1 1 0】

さらに、空調機で室内の温度を使用電力が最小になるように制御する場合にも、本実施の形態を適用可能である。室内で、ある一定の温度区間外の室温となった時、室内にいる住人は不快に感じるため、それらの境界の温度が状態制約となる。本実施の形態を適用することで、不快温度にすることなく室内の温度の制御することができる。

【0 1 1 1】

〔実施の形態 2〕

30

ディーゼルエンジンは、EGRバルブとVNTノズルを操作することでMAFとMAPを最適に制御することで、最適な燃焼状態を保ち、有害物質（例えばNOx、PM）の発生を抑制する。

【0 1 1 2】

EGR及びVNTによってMAF及びMAPを制御する際、過渡運転状態においてMAF状態が最適な状態（目標値）を上回るオーバーシュートを起こすことがあり、NOx発生の原因となっている。図8は、縦軸がMAFを表し、横軸は時間を表し、点線が目標値を表し、実線が実際のMAFの値 x_{maf} を表す。この例でも、オーバーシュートが発生している。また、図8のように、目標値が下がっていく時でも、MAFの状態が目標値を上回った状態を続けることが多くなると、この点にてもNOx発生の要因となる。また、図7に示したように目標値を大きく下回ると、PMが過剰に発生する。

40

【0 1 1 3】

第1の実施の形態のように状態制約を取り扱うモデル予測制御を行えば、改善が見込まれるが、以下のような問題もある。

【0 1 1 4】

（a）目標値が上がっていく運転状態（上りの状態）と下がっていく状態（下りの状態）、変わらない状態（定常状態）で状態制約の意味合いが変わってしまう。

すなわち、上りの状態の時は上限の設定が難しく、下りの時は目標値を上回る状態が続くことが多いため、現在の状態が制約を満たさない場合がある。

（b）運転状態は運転手に依存するため、状態制約を切り替えて制御することが難しい。

50

(c) 外乱やノイズの影響で状態制約を超えてしまう可能性があり、最適解を求めることができなくなることがある。

【0115】

そこで、本実施の形態では、以下のような状態制約を導入してオーバーシュートやアンダーシュートを抑制する。

【数59】

$$q(x(i)) = \begin{cases} \gamma_1 \left(e^{\gamma_2(x_{\min} - x(i))} - 1 \right) & \text{if } (x(i) < x_{\min}) \\ 0 & \text{if } (x_{\min} \leq x(i) \leq x_{\max}) \\ \gamma_3 \left(e^{\gamma_4(x(i) - x_{\max})} - 1 \right) & \text{if } (x_{\max} < x(i)) \end{cases} \quad 10$$

γ_1 乃至 γ_4 についてはチューニングパラメータである。また、本実施の形態ではMAFについての状態制約として採用する。

【0116】

このペナルティ関数は、図9に示すような関数である。 $x(i)$ 、 x_{\min} 及び x_{\max} は、目標値を基準にした値、すなわち $x(i)$ は状態偏差であり、 x_{\min} 及び x_{\max} はそれぞれ目標値から下又は上にどこまでずれても対処しないかを表しており、その範囲を出た場合には、その範囲内に戻ろうとする。図10に示すように、目標値曲線の上側の上限曲線と、下側の下限曲線との間であればペナルティ関数の値は0であるが、それを外れると値が急激に大きくなるペナルティ関数を採用する。

20

【0117】

なお、上で述べたペナルティ関数は一例であり、 $(x - x_{\max})$ や $(x_{\min} - x)$ を e のべき数としていたが、これらを基数として n 乗(n は3以上)するような関数($\max(x - x_{\max})^n$ 、 $\min(x_{\min} - x)^n$)を採用してもよい。

【0118】

このような状態制約を導入したとしても、基本的に第1の実施の形態で説明したオフライン処理は同じである。但し、上限値を超えた場合の関数と、下限値を超えた場合の関数とは形が異なるので、それぞれについて x_{\max} についての1階偏微分関数及び2階偏微分関数を算出する。すなわち、ステップS13では、下限側の1階偏微分関数 $\min(x)$ 及び2階偏微分関数 ${}^2\min(x)$ と、上限側の1階偏微分関数 $\max(x)$ 及び2階偏微分関数 ${}^2\max(x)$ とを生成する。

30

【0119】

そして、 x_{\max} (k)の値に応じて、下限側の1階偏微分関数 $\min(x)$ 及び2階偏微分関数 ${}^2\min(x)$ と、上限側の1階偏微分関数 $\max(x)$ 及び2階偏微分関数 ${}^2\max(x)$ と、制約なしとを切り替えることになる。

【0120】

具体的に、図11を用いてモデル予測制御部220の処理内容を説明する。

【0121】

まず、モデル予測制御部220は、 $x(k) (= X_{ref}(k) - y(k))$ を取得する(図11:ステップS41)。

40

【0122】

そうすると、モデル予測制御部220は、関数ベクトル b_2 に $x(k)$ を代入して関数ベクトル b_2 を数値ベクトル化する(ステップS43)。

【0123】

また、微分値算出部2201は、 $x(k)$ がペナルティ関数の適用範囲のうち下限値未満についての適用範囲0であるか、上限値を超える範囲についての適用範囲1であるか、それ以外の範囲である適用範囲2であるかを判断する(ステップS45)。

【0124】

50

適用範囲 1 であれば、微分値算出部 2201 は、 $x^{base}(k)$ ($x^{base}_{maf}(k)$) であれば (56) 式) を算出し、データ格納部 2205 に格納されているペナルティ関数の 1 階偏微分関数 $\min(x)$ と、2 階偏微分関数 ${}^2\min(x)$ に $x^{base}(k)$ を代入し、 $\min(x^{base}(k))$ 及び ${}^2\min(x^{base}(k))$ を求める (ステップ S47)。

【0125】

そして、行列算出部 2202 は、範囲 1 についての M_3 及び b_3 を算出する (ステップ S49)。

【0126】

(65) 式の左辺におけるベクトル U_2 以外の部分である ($M_2 + {}^2\min(x^{base}(k))$) が M_3 である。また、(65) 式の右辺が b_3 である。すなわち、 $b_3 = b_2 - (\min(x^{base}(k)) - {}^2\min(x^{base}(k)) d(x^{base}(k)))$ である。 b_3 を算出するためには、 $d(x^{base}(k))$ を、 $Bu(k-1)$ で算出する。そして処理はステップ S57 に移行する。

10

【0127】

一方、適用範囲 0 であれば、微分値算出部 2201 は、 $x^{base}(k)$ ($x^{base}_{maf}(k)$) であれば (56) 式) を算出し、データ格納部 2205 に格納されているペナルティ関数の 1 階偏微分関数 $\max(x)$ と、2 階偏微分関数 ${}^2\max(x)$ に $x^{base}(k)$ を代入し、 $\max(x^{base}(k))$ 及び ${}^2\max(x^{base}(k))$ を求める (ステップ S51)。

【0128】

そして、行列算出部 2202 は、範囲 0 についての M_3 及び b_3 を算出する (ステップ S53)。

20

【0129】

(65) 式の左辺におけるベクトル U_2 以外の部分である ($M_2 + {}^2\max(x^{base}(k))$) が M_3 である。また、(65) 式の右辺が b_3 である。すなわち、 $b_3 = b_2 - (\max(x^{base}(k)) - {}^2\max(x^{base}(k)) d(x^{base}(k)))$ である。 b_3 を算出するためには、 $d(x^{base}(k))$ を、 $Bu(k-1)$ で算出する。そして処理はステップ S57 に移行する。

【0130】

さらに、適用範囲 2 であれば、微分値算出部 2201 は、 $M_3 = M_2$ 及び $b_3 = b_2$ と設定する (ステップ S55)。状態制約についてのペナルティ関数は適用されない。その後処理はステップ S57 に移行する。

30

【0131】

そして、出力生成部 2203 は、 $U = M^{-1}_3 b_3$ によってベクトル U を算出する (ステップ S57)。さらに、出力生成部 2203 は、ベクトル U から線形化制御入力 $u(k)$ ($i = 0$) を抽出し、出力する (ステップ S59)。

【0132】

その後、モデル予測制御部 220 は、処理が終了するのかを判断し (ステップ S61)、処理終了でなければ処理はステップ S41 に戻り、処理終了であれば処理は終了する。

【0133】

このような処理を実行すれば、適切なペナルティ関数が適用されるようになり、オーバーシュートやアンダーシュートを効果的に抑制できるようになる。

40

【0134】

[実施の形態 3]

一般に MAF と MAP の追従性にはトレードオフの関係があるため、MAF の追従性を上げるために MAP は悪化するという現象が発生する。そこで、以下のような制御を行うと効果的である。

【0135】

(A) MAP がある程度目標値に近い場合は、できるだけ MAF を近づけたいので、MAF のペナルティ関数を加える。

(B) MAF はある程度目標値に近いが MAP が目標値から大きく離れている場合、MA

50

Fにペナルティ関数を加えて得られる効果よりMAPの悪化が大きくなることが多いので、ペナルティ関数を加えない。

(C)MAF及びMAPともに目標値から離れている場合には、MAF重視であってもMAPもある程度追従していなければNOx及びPMは減らないし、MAF及びMAPともに大きく変化させようとする場合、入力バルブが全開もしくは全閉になることが多く、ペナルティ関数を入れたとしても入力制約の影響で効果が出ないことが多い。従って、計算量の観点もあり、ペナルティ関数を加えない。

【0136】

そこで、図12に示すような領域分割を行って、MAF及びMAPがいずれの領域に入っているか否かを判断することで、制御を切り替えるものとする。図12の例では、縦軸はMAPの偏差 x_{map} を表し、横軸はMAFの偏差 x_{maf} を表す。そして、MAPの基準値A及びBを設け、 x_{max} とMAPの基準値A及びBで囲まれる範囲を領域0と設定してMAFの状態制約についての上限側のペナルティ関数を適用する。また、 x_{min} とMAPの基準値A及びBで囲まれる範囲を領域1として設定してMAFの状態制約についての下限側のペナルティ関数を適用する。それ以外の領域については、領域2として設定し、ペナルティ関数を適用しない。

【0137】

このような領域設定を行う場合には、第2の実施の形態における処理フローのステップS45において、MAF及びMAPの状態偏差 $x(k)$ に基づき、いずれの領域に $x(k)$ が入っているかを判定するようにする。後の処理については図11と同様である。

【0138】

このような制御の切り替えを行った結果の効果を、図13A及び図13Bに示す。図13Aは、MAFの値の時間変化を表しており、図13Bは、MAPの値の時間変化を表している。MAPについてはあまり変化していないが、MAFについては、部分Pではオーバーシュートが低減されており、部分Qでは目標値への追従性が向上している。これによって、NOx及びPM排出量のさらなる低減がなされる。

【0139】

以上本技術の実施の形態を説明したが、本技術はこれに限定されるものではない。例えば、上で述べた機能ブロック構成については、プログラムモジュール構成とは一致しない場合もある。また、処理結果が変わらない限り、処理フローについても、ステップの順番を入れ替えたり、複数のステップを並列実行するようにしてもよい。

【0140】

なお、上で述べたオフライン処理装置100は、コンピュータ装置であって、図14に示すように、メモリ2501とCPU2503とハードディスク・ドライブ(HDD)2505と表示装置2509に接続される表示制御部2507とリムーバブル・ディスク2511用のドライブ装置2513と入力装置2515とネットワークに接続するための通信制御部2517とがバス2519で接続されている。オペレーティング・システム(OS: Operating System)及び本実施例における処理を実施するためのアプリケーション・プログラムは、HDD2505に格納されており、CPU2503により実行される際にはHDD2505からメモリ2501に読み出される。CPU2503は、アプリケーション・プログラムの処理内容に応じて表示制御部2507、通信制御部2517、ドライブ装置2513を制御して、所定の動作を行わせる。また、処理途中のデータについては、主としてメモリ2501に格納されるが、HDD2505に格納されるようにしてもよい。本技術の実施例では、上で述べた処理を実施するためのアプリケーション・プログラムはコンピュータ読み取り可能なリムーバブル・ディスク2511に格納されて頒布され、ドライブ装置2513からHDD2505にインストールされる。インターネットなどのネットワーク及び通信制御部2517を経由して、HDD2505にインストールされる場合もある。このようなコンピュータ装置は、上で述べたCPU2503、メモリ2501などのハードウェアとOS及びアプリケーション・プログラムなどのプログラムとが有機的に協働することにより、上で述べたような各種機能を実現する。

10

20

30

40

50

【 0 1 4 1 】

また、上で述べたエンジン制御装置 1 0 0 0 は、コンピュータ装置であって、図 1 5 に示すように、R A M (Random Access Memory) 4 5 0 1 とプロセッサ 4 5 0 3 と R O M (Read Only Memory) 4 5 0 7 とセンサ群 4 5 1 5 とがバス 4 5 1 9 で接続されている。本実施の形態における処理を実施するための制御プログラム及び存在している場合にはオペレーティング・システム (O S : Operating System) は、R O M 4 5 0 7 に格納されており、プロセッサ 4 5 0 3 により実行される際には R O M 4 5 0 7 から R A M 4 5 0 1 に読み出される。プロセッサ 4 5 0 3 は、センサ群 4 5 1 5 (例えば、吸気圧センサ及び新気量センサ。場合によっては燃料噴射量測定部及びエンジン回転数測定部など。) を制御して、測定値を取得する。また、処理途中のデータについては、R A M 4 5 0 1 に格納される。なお、プロセッサ 4 5 0 3 は、R O M 4 5 0 7 を含む場合もあり、さらに、R A M 4 5 0 1 を含む場合もある。本技術の実施の形態では、上で述べた処理を実施するための制御プログラムは、コンピュータ読み取り可能なリムーバブル・ディスクに格納されて頒布され、R O M ライタによって R O M 4 5 0 7 に書き込まれる場合もある。このようなコンピュータ装置は、上で述べたプロセッサ 4 5 0 3、R A M 4 5 0 1、R O M 4 5 0 7 などのハードウェアと制御プログラム (場合によっては O S も) とが有機的に協働することにより、上で述べたような各種機能を実現する。

10

【 0 1 4 2 】

以上述べた本実施の形態をまとめると以下ようになる。

【 0 1 4 3 】

20

本実施の形態の第 1 の態様に係るオフライン処理方法は、(A) (a) モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ制御対象の状態方程式に関する第 1 の関数との和を含む第 2 の関数をラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ制御対象の状態偏差及び制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第 1 の一次式群と、(b) 第 2 の関数を制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ制御対象の状態偏差及びラグランジュ乗数を変数として含む第 2 の一次式群と、(c) 第 2 の関数を制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つラグランジュ乗数及び制御対象の状態偏差を変数として含む第 3 の一次式群とを格納するデータ格納部から第 1 の一次式群を読み出して、状態偏差の現在値を除き状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、第 1 の一次式群を、状態偏差の現在値と線形化制御入力とを変数として含む第 4 の一次式群に変形し、(B) データ格納部から第 2 の一次式群を読み出して、ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、第 2 の一次式群を、状態偏差を変数として含む第 5 の一次式群に変形し、(C) データ格納部から第 3 の一次式群を読み出して、第 4 の一次式群及び第 5 の一次式群を用いて、第 3 の一次式群を、状態偏差の現在値と線形化制御入力とを変数として含む第 6 の一次式群に変形し、(D) 第 6 の一次式群を、第 1 の係数行列と線形化制御入力についてのベクトルとの積が、状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形し、(E) モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数を状態偏差について 1 階偏微分した第 1 の微分関数及び 2 階偏微分した第 2 の微分関数を生成し、(F) 第 4 の一次式群から線形化制御入力についての係数を抽出し、ペナルティ関数について予め定められている第 2 の係数行列及び係数ベクトルを算出する処理を含む。

30

40

【 0 1 4 4 】

このような処理をオフラインで実行しておくことにより、状態制約を導入したモデル予測制御を行うことができるようになる。

【 0 1 4 5 】

上で述べたペナルティ関数が、状態偏差が第 1 の値以上第 2 の値以下で 0 となり、状態偏差が第 1 の値より小さい場合及び第 2 の値より大きい場合状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する関数である場合もある。制御対象の特性に応じた適切な関数が用いられる。

【 0 1 4 6 】

50

また、上で述べたペナルティ関数が、状態偏差が第1の値以上第2の値以下で0となり、状態偏差が第1の値より小さい場合に状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する第1の関数と、第2の値より大きい場合状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する第2の関数とで表される場合もある。この場合、第1及び第2の微分関数を、第1の関数及び第2の関数の各々について生成する場合もある。このようにすれば、制御実行時に第1の関数と第2の関数とを切り替えて用いることができるようになる。

【0147】

本実施の形態の第2の態様に係る制御方法は、(A)モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における制御対象に対する線形化制御入力ベクトルとの積が関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第1の係数行列と、モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第2の係数行列及び係数ベクトルと、ペナルティ関数を状態偏差について1階偏微分した第1の式及び2階偏微分した第2の式とを格納するデータ格納部から第1の式及び第2の式を読み出して、状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第1の値及び第2の値を算出し、(B)データ格納部から第1の係数行列及び第2の係数行列を読み出して、第2の値と第2の係数行列との積と第1の係数行列との和である第1の行列を算出し、(C)データ格納部から関数ベクトルを読み出して、関数ベクトルに状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、第1の値と第2の値との差に線形化制御入力の1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と係数ベクトルとの積との差である第2のベクトルを算出し、(D)第1の行列の逆行列と第2のベクトルとの積により、線形化制御入力ベクトルを生成し、(E)線形化制御入力ベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する処理を含む。

【0148】

このような処理を実行することで、高速に状態制約を伴うモデル予測制御を実行できるようになる。

【0149】

上で述べた制御方法は、(F)状態偏差の現在値が所定範囲内であるか判断する処理をさらに含むようにしてもよい。この場合、状態偏差の現在値が所定範囲内であれば、第1の値及び第2の値を算出する処理と、第1の行列を算出する処理と、第2のベクトルを算出する処理と、線形化制御入力ベクトルを生成する処理と、線形化制御入力を抽出する処理とを実行するようにしてもよい。制御対象によっては、状態制約に基づく処理を行うことが好ましくない場合もあるためである。

【0150】

さらに、上で述べたデータ格納部が、状態偏差の現在値の値域に応じた第1の式及び第2の式を格納している場合もある。この場合、(a1)上記第1の値及び第2の値を算出する処理が、状態偏差の現在値が属する値域を特定し、当該特定された値域に応じた第1の式及び第2の式を読み出す処理を含むようにしてもよい。適切な式を状況に応じて切り分けて用いることで、適切な制御を行うことができるようになる。

【0151】

また、本制御方法が、上で述べた状態偏差の現在値が所定範囲外であれば、(G)データ格納部から関数ベクトル及び第1の係数行列を読み出して、関数ベクトルに状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、第1の係数行列の逆行列との積により、線形化制御入力の第2のベクトルを生成し、(H)線形化制御入力の第2のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する処理をさらに含むようにしてもよい。状態制約を考慮しないモデル予測制御を高速に実行できる。

【0152】

なお、上記方法による処理をプロセッサ(又はコンピュータ)に行わせるためのプログラムを作成することができ、当該プログラムは、例えばフレキシブルディスク、CD-ROM、光磁気ディスク、半導体メモリ、ハードディスク等のコンピュータ読み取り可能な

10

20

30

40

50

記憶媒体又は記憶装置に格納される。尚、中間的な処理結果はメインメモリ等の記憶装置に一時保管される。

【0153】

以上の実施例を含む実施形態に関し、さらに以下の付記を開示する。

【0154】

(付記1)

(a) モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ前記制御対象の状態方程式に関する第1の関数との和を含む第2の関数を前記ラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第1の一次式群と、(b) 前記第2の関数を前記制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記ラグランジュ乗数を変数として含む第2の一次式群と、(c) 前記第2の関数を前記制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つ前記ラグランジュ乗数及び前記制御対象の状態偏差を変数として含む第3の一次式群とを格納するデータ格納部から前記第1の一次式群を読み出して、前記状態偏差の現在値を除き前記状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第1の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第4の一次式群に変形し、

10

前記データ格納部から前記第2の一次式群を読み出して、前記ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第2の一次式群を、前記状態偏差を変数として含む第5の一次式群に変形し、

20

前記データ格納部から前記第3の一次式群を読み出して、前記第4の一次式群及び前記第5の一次式群を代入することで、前記第3の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第6の一次式群に変形し、

前記第6の一次式群を、第1の係数行列と前記線形化制御入力についてのベクトルとの積が、前記状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形し、

前記モデル予測制御の制御対象についての制約条件に対応するペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の微分関数及び2階偏微分した第2の微分関数を生成し、

前記第4の一次式群から前記線形化制御入力についての係数を抽出し、前記ペナルティ関数について予め定められている第2の係数行列及び係数ベクトルを算出する

30

処理を、コンピュータに実行させるためのプログラム。

【0155】

(付記2)

前記ペナルティ関数が、前記状態偏差が第1の値以上第2の値以下で0となり、前記状態偏差が前記第1の値より小さい場合及び前記第2の値より大きい場合前記状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する関数である

付記1記載のプログラム。

【0156】

(付記3)

前記ペナルティ関数が、前記状態偏差が第1の値以上第2の値以下で0となり、前記状態偏差が前記第1の値より小さい場合に前記状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する第1の関数と、前記第2の値より大きい場合前記状態偏差の値に応じて指数関数的に増加する第2の関数とで表され、

40

前記第1及び第2の微分関数を、前記第1の関数及び前記第2の関数の各々について生成する

付記1記載のプログラム。

【0157】

(付記4)

モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における前記制御対象に対する線形化制御入力のベクトルとの積が前記関数ベク

50

トルと等しくなるように予め算出されている第 1 の係数行列と、前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第 2 の係数行列及び係数ベクトルと、前記ペナルティ関数を前記状態偏差について 1 階偏微分した第 1 の式及び 2 階偏微分した第 2 の式とを格納するデータ格納部から前記第 1 の式及び第 2 の式を読み出して、前記状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第 1 の値及び第 2 の値を算出し、

前記データ格納部から前記第 1 の係数行列及び前記第 2 の係数行列を読み出して、前記第 2 の値と前記第 2 の係数行列との積と前記第 1 の係数行列との和である第 1 の行列を算出し、

前記データ格納部から前記関数ベクトルを読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第 1 のベクトルと、前記第 1 の値と前記第 2 の値との差に前記線形化制御入力の 1 単位時間前の値から得られる第 3 の値を乗じた結果と前記係数ベクトルとの積との和である第 2 のベクトルを算出し、

前記第 1 の行列の逆行列と前記第 2 のベクトルとの積により、前記線形化制御入力のベクトルを生成し、

前記線形化制御入力のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する

処理をプロセッサに実行させるためのプログラム。

【 0 1 5 8 】

(付記 5)

前記状態偏差の現在値が所定範囲内であるか判断する処理をさらに含み、

前記状態偏差の現在値が前記所定範囲内であれば、前記第 1 の値及び第 2 の値を算出する処理と、前記第 1 の行列を算出する処理と、前記第 2 のベクトルを算出する処理と、前記線形化制御入力のベクトルを生成する処理と、前記線形化制御入力を抽出する処理とを実行する

付記 4 記載のプログラム。

【 0 1 5 9 】

(付記 6)

前記データ格納部が、

前記状態偏差の現在値の値域に応じた前記第 1 の式及び第 2 の式を格納しており、

前記第 1 の値及び前記第 2 の値を算出する処理が、

前記状態偏差の現在値が属する値域を特定し、当該特定された値域に応じた前記第 1 の式及び前記第 2 の式を読み出す処理

を含む付記 4 又は 5 記載のプログラム。

【 0 1 6 0 】

(付記 7)

前記状態偏差の現在値が前記所定範囲外であれば、

前記データ格納部から前記関数ベクトル及び前記第 1 の係数行列を読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第 1 のベクトルと、前記第 1 の係数行列の逆行列との積により、前記線形化制御入力の第 2 のベクトルを生成し、

前記線形化制御入力の第 2 のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する

処理をさらに含む付記 3 乃至 5 のいずれか 1 つ記載のプログラム。

【 0 1 6 1 】

(付記 8)

(a) モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ前記制御対象の状態方程式に関する第 1 の関数との和を含む第 2 の関数を前記ラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第 1 の一次式群と、(b) 前記第 2 の関数を前記制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記ラグランジュ乗数を

10

20

30

40

50

変数として含む第2の一次式群と、(c)前記第2の関数を前記制御対象の線形化制御入力について偏微分することで得られ且つ前記ラグランジュ乗数及び前記制御対象の状態偏差を変数として含む第3の一次式群とを格納するデータ格納部から前記第1の一次式群を読み出して、前記状態偏差の現在値を除き前記状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第1の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第4の一次式群に変形し、

前記データ格納部から前記第2の一次式群を読み出して、前記ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第2の一次式群を、前記状態偏差を変数として含む第5の一次式群に変形し、

前記データ格納部から前記第3の一次式群を読み出して、前記第4の一次式群及び前記第5の一次式群を代入することで、前記第3の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第6の一次式群に変形し、

前記第6の一次式群を、第1の係数行列と前記線形化制御入力についてのベクトルとの積が、前記状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形し、

前記モデル予測制御の制御対象についての制約条件に対応するペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の微分関数及び2階偏微分した第2の微分関数を生成し、

前記第4の一次式群から前記線形化制御入力についての係数を抽出し、前記ペナルティ関数について予め定められている第2の係数行列及び係数ベクトルを算出する

処理を含み、コンピュータにより実行されるオフライン処理方法。

【0162】

(付記9)

モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における前記制御対象に対する線形化制御入力のベクトルとの積が前記関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第1の係数行列と、前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第2の係数行列及び係数ベクトルと、前記ペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の式及び2階偏微分した第2の式とを格納するデータ格納部から前記第1の式及び第2の式を読み出して、前記状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第1の値及び第2の値を算出し、

前記データ格納部から前記第1の係数行列及び前記第2の係数行列を読み出して、前記第2の値と前記第2の係数行列との積と前記第1の係数行列との和である第1の行列を算出し、

前記データ格納部から前記関数ベクトルを読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、前記第1の値と前記第2の値との差に前記線形化制御入力の1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と前記係数ベクトルとの積との和である第2のベクトルを算出し、

前記第1の行列の逆行列と前記第2のベクトルとの積により、前記線形化制御入力のベクトルを生成し、

前記線形化制御入力のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を抽出する

処理を含み、プロセッサにより実行される制御方法。

【0163】

(付記10)

(a)モデル予測制御の評価関数とラグランジュ乗数を含み且つ前記制御対象の状態方程式に関する第1の関数との和を含む第2の関数を前記ラグランジュ乗数について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記制御対象に対する線形化制御入力を変数として含む第1の一次式群と、(b)前記第2の関数を前記制御対象の状態偏差について偏微分することで得られ且つ前記制御対象の状態偏差及び前記ラグランジュ乗数を変数として含む第2の一次式群と、(c)前記第2の関数を前記制御対象の線形化制御入

10

20

30

40

50

力について偏微分することで得られ且つ前記ラグランジュ乗数及び前記制御対象の状態偏差を変数として含む第3の一次式群とを格納するデータ格納部から前記第1の一次式群を読み出して、前記状態偏差の現在値を除き前記状態偏差の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第1の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第4の一次式群に変形する手段と、

前記データ格納部から前記第2の一次式群を読み出して、前記ラグランジュ乗数の変数を消し込むように順次代入を行って、前記第2の一次式群を、前記状態偏差を変数として含む第5の一次式群に変形する手段と、

前記データ格納部から前記第3の一次式群を読み出して、前記第4の一次式群及び前記第5の一次式群を代入することで、前記第3の一次式群を、前記状態偏差の現在値と前記線形化制御入力とを変数として含む第6の一次式群に変形する手段と、

10

前記第6の一次式群を、第1の係数行列と前記線形化制御入力についてのベクトルとの積が、前記状態偏差の現在値の関数ベクトルと等式で表されるように変形する手段と、

前記モデル予測制御の制御対象についての制約条件に対応するペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の微分関数及び2階偏微分した第2の微分関数を生成する手段と、

前記第4の一次式群から前記線形化制御入力についての係数を抽出し、前記ペナルティ関数について予め定められている第2の係数行列及び係数ベクトルを算出する手段と、

を有するオフライン処理装置。

【0164】

20

(付記11)

モデル予測制御の制御対象についての状態偏差の現在値についての関数ベクトルと、制御期間内における前記制御対象に対する線形化制御入力のベクトルとの積が前記関数ベクトルと等しくなるように予め算出されている第1の係数行列と、前記モデル予測制御の制御対象における状態制約に対応するペナルティ関数について予め算出されている第2の係数行列及び係数ベクトルと、前記ペナルティ関数を前記状態偏差について1階偏微分した第1の式及び2階偏微分した第2の式とを格納するデータ格納部から前記第1の式及び第2の式を読み出して、前記状態偏差の現在値から得られる基点の値を代入することで、第1の値及び第2の値を算出する第1の算出部と、

前記データ格納部から前記第1の係数行列及び前記第2の係数行列を読み出して、前記第2の値と前記第2の係数行列との積と前記第1の係数行列との和である第1の行列を算出し、前記データ格納部から前記関数ベクトルを読み出して、前記関数ベクトルに前記状態偏差の現在値を代入することで得られる第1のベクトルと、前記第1の値と前記第2の値との差に前記線形化制御入力の1単位時間前の値から得られる第3の値を乗じた結果と前記係数ベクトルとの積との和である第2のベクトルを算出する第2の算出部と、

30

前記第1の行列の逆行列と前記第2のベクトルとの積により、前記線形化制御入力のベクトルを生成する生成部と、

前記線形化制御入力のベクトルの要素のうち最初の時刻のための線形化制御入力を出力する出力部と、

を有する制御装置。

40

【符号の説明】

【0165】

101 入力部

102 入力データ格納部

103 第1変形処理部

104 第1データ格納部

105 第2変形処理部

106 第2データ格納部

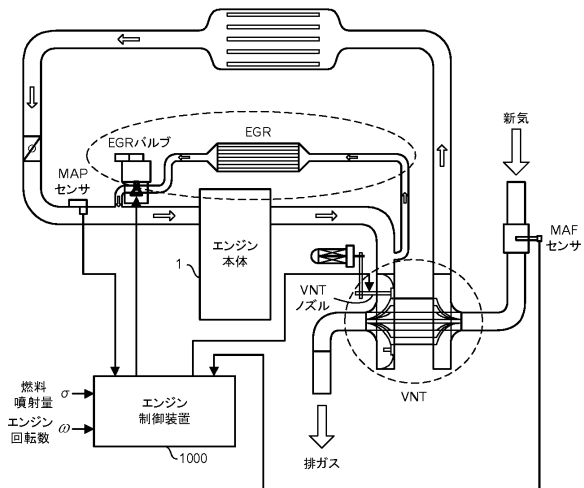
107 第3変形処理部

108 第3データ格納部

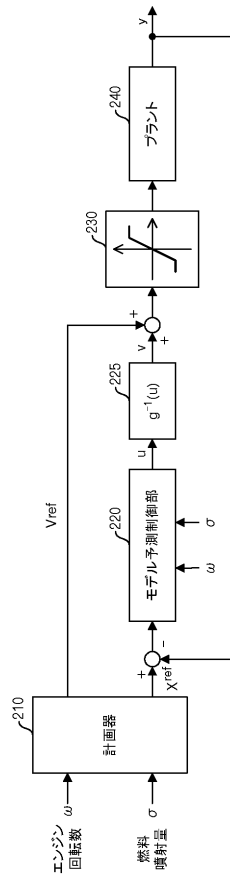
50

- | | |
|-------|------------|
| 1 0 9 | 第 1 行列生成部 |
| 1 1 0 | 第 4 データ格納部 |
| 1 1 1 | 第 2 行列生成部 |
| 1 1 2 | 微分処理部 |

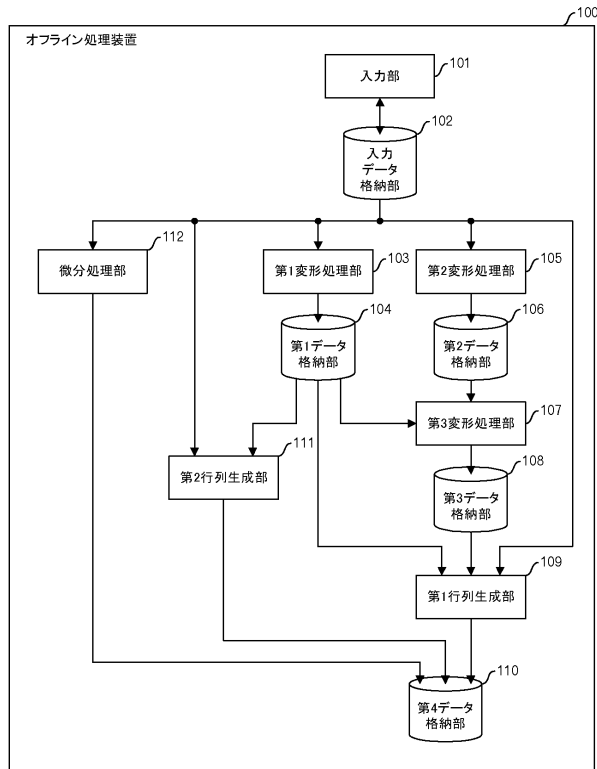
【 図 1 】



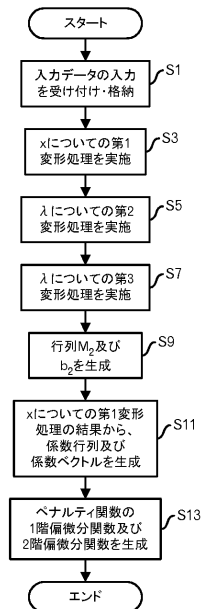
【 図 2 】



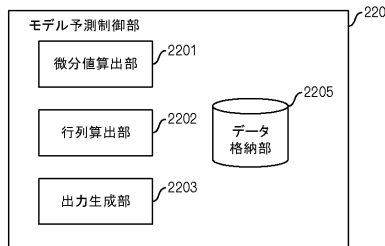
【図 3】



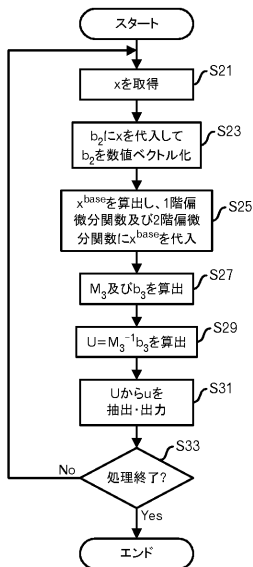
【図 4】



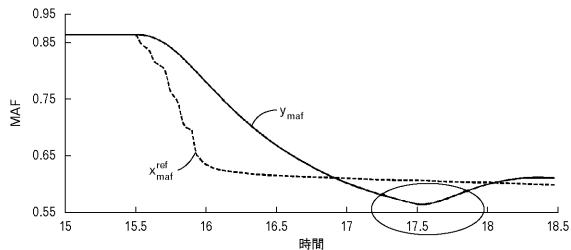
【図 5】



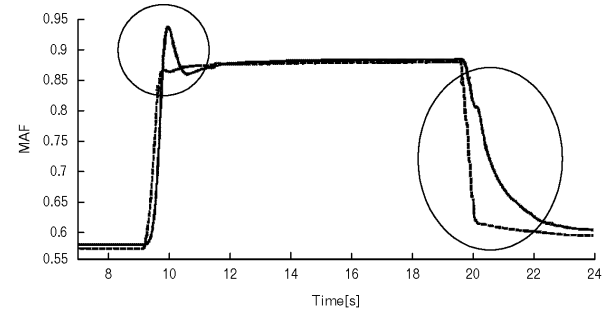
【図 6】



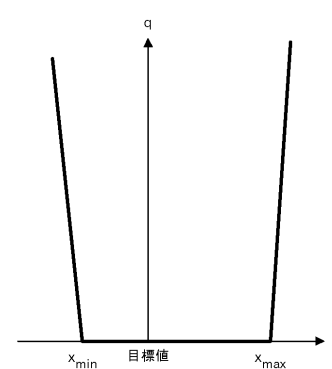
【図 7】



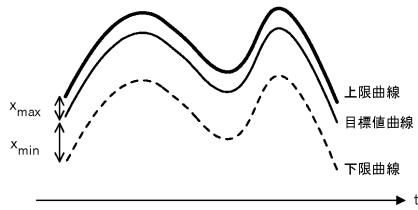
【図 8】



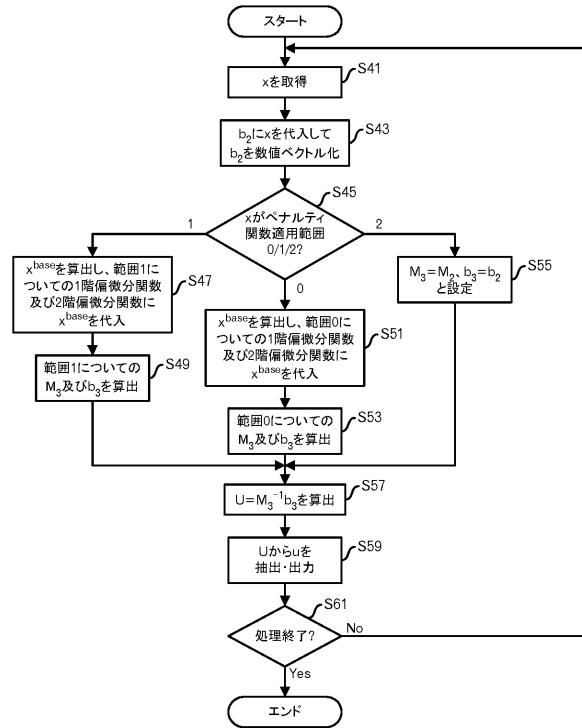
【図 9】



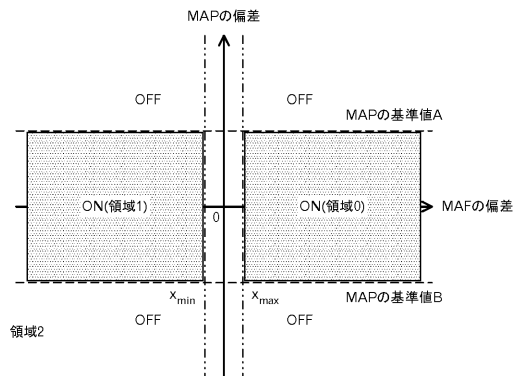
【図 10】



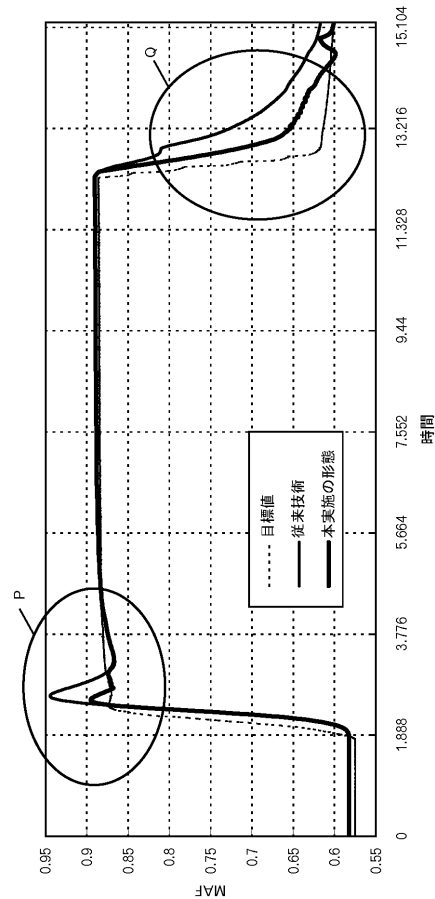
【図 11】



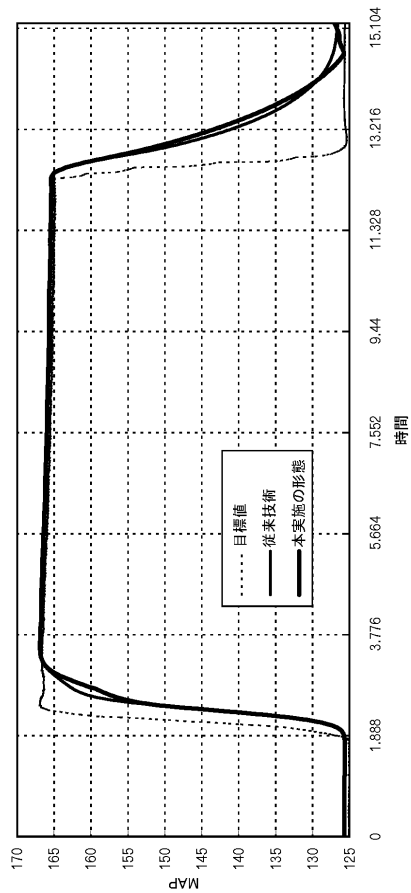
【図 12】



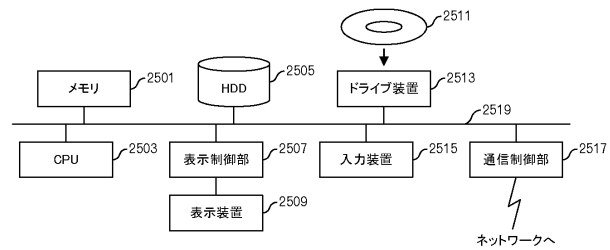
【図 13 A】



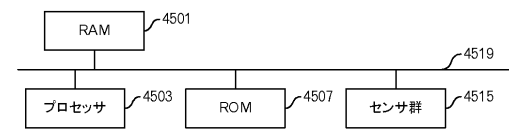
【図 13B】



【図 14】



【図 15】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2012-194960(JP,A)
特開2006-072700(JP,A)
特開2001-067103(JP,A)
特開平09-029057(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G05B 13/04
F02D 41/18
F02D 45/00