

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年9月6日(06.09.2024)



(10) 国際公開番号

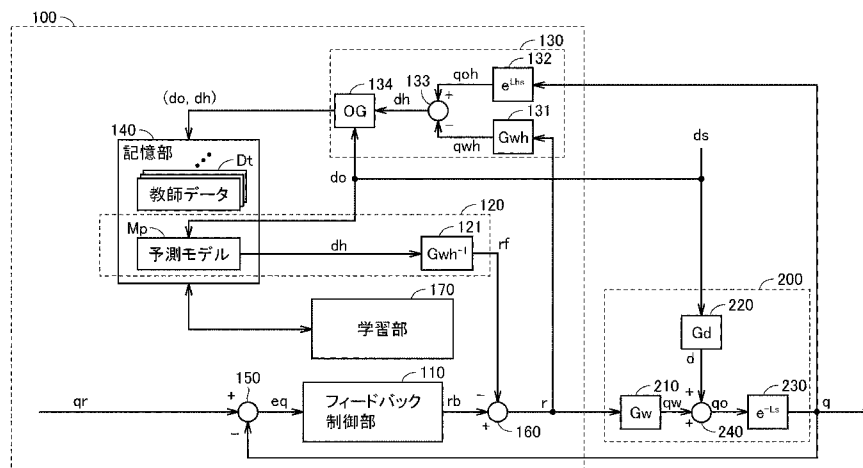
WO 2024/181536 A1

- (51) 国際特許分類:
G05B 11/32 (2006.01) *G05B 13/02* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2024/007551
- (22) 国際出願日: 2024年2月29日(29.02.2024)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2023-032164 2023年3月2日(02.03.2023) JP
- (71) 出願人: オムロン株式会社 (OMRON CORPORATION) [JP/JP]; 〒6008530 京都府京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町801番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 藤井 高史 (FUJII, Takashi); 〒6008530 京都府京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町801番地 オムロン株式会社内 Kyoto (JP).
浪江 正樹 (NAMIE, Masaki); 〒6008530 京都府京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町801番地 オムロン株式会社内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 弁理士法人深見特許事務所 (FUKAMI PATENT OFFICE, P.C.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島三丁目2番4号 中之島フェスティバルタワー・ウエスト Osaka (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC,

(54) Title: DEVICE FOR MACHINE LEARNING RELATED TO FEEDFORWARD CONTROL FOR CONTROL TARGET, TEACHER DATA GENERATION PROGRAM, AND TEACHER DATA GENERATION METHOD

(54) 発明の名称: 制御対象に対するフィードフォワード制御に関する機械学習のための装置、教師データの生成プログラム、および教師データの生成方法

FIG.1



110 Feedback control unit
140 Storage unit
170 Learning unit
Dt Teacher data
Mp Prediction model

(57) Abstract: The present invention improves the accuracy of feedforward control for a control target. A training data generation unit (130): acquires a measurement value (do), an operation amount (r), and a control amount (q); generates a first estimation value (qwh) for a primary control amount (qw) from the operation amount (r) by using a mathematical

EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

model (131) of a control element (210); generates a second estimation value (dh) for a variation amount (d) on the basis of the control amount (q) and the first estimation value (qwh) at a point in time a prescribed period (Lh) before the point in time when the control amount (q) was acquired; and outputs teacher data (Dt) in which the second estimation value (dh) for the point in time of the measurement value (do) has been associated with the measurement value (do) as a correct answer.

- (57) 要約: 制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させる。学習データ生成部 (130) は、計測値 (d o)、操作量 (r)、および制御量 (q) を取得し、制御要素 (210) の数式モデル (131) を用いて操作量 (r) から一次制御量 (q w) の第1推定値 (q w h) を生成し、制御量 (q) と、制御量 (q) が取得された時刻から特定時間 (L h) だけ戻された時刻の第1推定値 (q w h) とに基づいて変動量 (d) の第2推定値 (d h) を生成し、計測値 (d o) に、計測値 (d o) の時刻の第2推定値 (d h) を正解として対応させた教師データ (D t) を出力する。

明 細 書

発明の名称：

制御対象に対するフィードフォワード制御に関する機械学習のための装置
、教師データの生成プログラム、および教師データの生成方法

技術分野

[0001] 本開示は、制御対象に対するフィードフォワード制御に関する機械学習のための装置、教師データの生成プログラム、および教師データの生成方法に関する。

背景技術

[0002] 従来、制御対象に対してフィードフォワード制御を行なう制御装置が知られている。たとえば、特開平 10-222207 号公報（特許文献 1）には、外乱を受ける所定のプロセスに対して、フィードフォワード信号発生器による制御を行うフィードフォワード制御装置が開示されている。当該フィードフォワード制御装置は、フィードフォワード信号発生器における演算に必要なパラメータを、当該フィードフォワード信号発生器において算出されたパラメータから学習するパラメータ学習器を備える。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献 1：特開平 10-222207 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 特許文献 1 に開示されているフィードフォワード信号発生器に含まれるフィードフォワード補償器の構成は、予め定められている。一般に、フィードフォワード補償器のようなフィードバック制御のフィードフォワード補償値を算出する構成は、制御対象のプロセスの逆モデル（逆系）として設計される。プロセスの逆モデルの設計にはプロセスの分析を要するため、外乱の変

動およびプロセスの特性の変化に応じて逆モデルの構造を短時間で更新することは困難である。そのため、特許文献1に開示されたフィードフォワード制御装置によると、外乱の変動の程度またはプロセスの特性の変化の程度によっては制御対象に対する制御への外乱の影響を抑制することが困難になり得る。

[0005] 本開示は上記のような課題を解決するためになされたものであり、その目的は、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることである。

課題を解決するための手段

[0006] 本開示の一局面に係る装置は、外乱を受ける制御対象へのフィードバック操作量のフィードフォワード補償値の生成に必要な特定値を予測する予測モデルに対する機械学習のための装置である。フィードバック操作量は、目標値と制御対象の制御量との誤差に基づいて、制御量が目標値に近づくように制御対象の制御装置のフィードバック制御によって決定される。フィードバック操作量からフィードフォワード補償値を引いた値が、操作量として制御装置から制御対象に出力される。制御対象は、操作量を受ける数式モデルとして表現された制御要素と、外乱を受ける外乱要素と、むだ時間要素とによって表現される。制御要素は、操作量を受けて一次制御量を出力する。外乱要素は、外乱を受けて変動量を出力する。むだ時間要素は、一次制御量と変動量との和が制御対象の外部に出力されることを遅延させる。予測モデルは、外乱の計測値から変動量を特定値として予測する。装置は、学習データ生成部を備える。学習データ生成部は、計測値、操作量、および制御量を取得し、制御要素の数式モデルを用いて操作量から一次制御量の第1推定値を生成し、制御量と、制御量が取得された時刻から特定時間だけ戻された時刻の第1推定値とに基づいて変動量の第2推定値を生成し、計測値に、計測値が取得された時刻の第2推定値を正解として対応させた教師データを出力する。

[0007] この開示によれば、教師データにおいて計測値に対して適切な正解が関連

付けられるため、教師データを用いて予測モデルに対して機械学習を行うことにより、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

[0008] 上記の開示において、装置は、教師データを用いて予測モデルに対して機械学習を行う学習部をさらに備える。学習部は、予測モデルによって表現される、計測値と第2推定値との関係を、第2推定値を目的変数とするとともに、計測値を説明変数とする関数として近似する。

[0009] この開示によれば、フィードフォワード制御と並行して、計測値および制御対象の特性に予測モデルをリアルタイムに適合させることができる。

[0010] 上記の開示において装置は、数式モデルの逆モデルを用いて、予測モデルによって予測された変動量からフィードフォワード補償値を生成するフィードフォワード補償部をさらに備える。

[0011] この開示によれば、特定時間だけ経過後に制御対象から出力される制御量を、制御量の時刻から特定時間だけ遡った時刻のフィードバック操作量に対応する正常な値に近づけることができる。

[0012] 本開示の他の局面に係る教師データの生成プログラムは、外乱を受ける制御対象へのフィードバック操作量のフィードフォワード補償値の生成に必要な特定値を予測する予測モデルに対する機械学習のためのプログラムである。フィードバック操作量は、目標値と制御対象の制御量との誤差に基づいて、制御量が目標値に近づくように制御対象の制御装置のフィードバック制御によって決定される。フィードバック操作量からフィードフォワード補償値を引いた値が、操作量として制御対象に制御装置から出力される。制御対象は、操作量を受ける数式モデルとして表現された制御要素と、外乱を受ける外乱要素と、むだ時間要素とによって表現される。制御要素は、操作量を受けて一次制御量を出力する。外乱要素は、外乱を受けて変動量を出力する。むだ時間要素は、一次制御量と変動量との和が制御対象の外部に出力されることを遅延させる。予測モデルは、外乱の計測値から変動量を特定値として予測する。プログラムは、プロセッサに実行されることによって、計測値、

操作量、および制御量を取得し、制御要素の数式モデルを用いて操作量から一次制御量の第1推定値を生成し、制御量と、制御量が取得された時刻から特定時間だけ戻された時刻の第1推定値とに基づいて変動量の第2推定値を生成し、計測値に、計測値が取得された時刻の第2推定値を正解として対応させた教師データを出力する。

[0013] この開示によれば、教師データにおいて計測値に対して適切な正解が関連付けられるため、教師データを用いて予測モデルに対して機械学習を行うことにより、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。なお、本開示に係る発明は、上記プログラムを記憶する非一時的なコンピュータ可読媒体としても実現可能である。

[0014] 本開示の他の局面に係る教師データの生成方法は、外乱を受ける制御対象へのフィードバック操作量のフィードフォワード補償値の生成に必要な特定値を予測する予測モデルに対する機械学習のための方法である。フィードバック操作量は、目標値と制御対象の制御量との誤差に基づいて、制御量が目標値に近づくように制御対象の制御装置のフィードバック制御によって決定される。フィードバック操作量からフィードフォワード補償値を引いた値が、操作量として制御対象に制御装置から出力される。制御対象は、操作量を受ける数式モデルとして表現された制御要素と、外乱を受ける外乱要素と、むだ時間要素とによって表現される。制御要素は、操作量を受けて一次制御量を出力する。外乱要素は、外乱を受けて変動量を出力する。むだ時間要素は、一次制御量と変動量との和が制御対象の外部に出力されることを遅延させる。予測モデルは、外乱の計測値から変動量を特定値として予測する。方法は、計測値、操作量、および制御量を取得することと、制御要素の数式モデルを用いて操作量から一次制御量の第1推定値を生成することと、制御量と、制御量が取得された時刻の第1推定値とに基づいて変動量の第2推定値を生成することと、計測値に、計測値が取得された時刻の第2推定値を正解として対応させた教師データを出力することを含む。

[0015] この開示によれば、教師データにおいて計測値に対して適切な正解が関連

付けられるため、教師データを用いて予測モデルに対して機械学習を行うことにより、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

発明の効果

[0016] 本開示に係る装置、プログラム、および方法によれば、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]実施の形態1に係る制御装置の機能構成を示すブロック図である。

[図2]複数の教師データの分布の一例、および回帰曲面としての予測モデルの一例を併せて示す図である。

[図3]図1のフィードバック制御系、フィードフォワード制御系、学習データ生成部、および学習部の各々によって行われる処理の流れを示すフローチャートを示す図である。

[図4]図3の学習データ生成処理の具体的な処理の流れを示すフローチャートである。

[図5]図4の計測値、操作量、制御量、推定一次制御量の時刻と、制御量の時刻からむだ時間だけ戻された推定二次制御量の時刻との対応を説明するための図である。

[図6]実施の形態1の変形例1に係る制御装置の機能構成を示すブロック図である。

[図7]実施の形態2に係る制御システムの機能構成を示すブロック図である。

[図8]実施の形態3に係る制御システムのネットワーク構成例を示す模式図である。

[図9]図8の制御装置のハードウェア構成例を示すブロック図である。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、実施の形態について図面を参照しながら詳細に説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は原則として繰り返さない。

[0019] [実施の形態 1]

<適用例>

図 1 は、実施の形態 1 に係る制御装置 100 の機能構成を示すブロック図である。図 1 に示されるように、制御装置 100 は、フィードバック制御部 110 と、フィードフォワード補償部 120 と、学習データ生成部 130 と、記憶部 140 と、減算器 150 と、減算器 160 と、学習部 170 とを備える。

[0020] 制御装置 100 は、外乱 d_s を受ける制御対象 200 の出力値である制御量 q が目標値 q_r に近づくように、制御対象 200 へのフィードバック操作量 r_b からフィードフォワード補償値 r_f を引いた値を操作量 r として制御対象 200 に出力する。記憶部 140 には、予測モデル M_p および教師データ D_t が保存されている。制御装置 100 と制御対象 200 とは、ネットワーク（たとえば、インターネット、あるいはクラウドシステム）を介して接続され、互いに遠隔に配置されていてもよい。予測モデル M_p を構築する機械学習アルゴリズムとしては、ディープバイナリツリー、あるいはサポートベクターマシンを挙げることができる。

[0021] 外乱 d_s とは、制御装置 100 と制御対象 200 とを含む制御系の状態を乱す量である。外乱 d_s は、複数の外乱要素を含み、たとえば、制御対象に偶発的あるいは突発的に入力される光量、電圧、電流、および温度を含む。外乱 d_s の計測値が d_o と表現される。

[0022] 制御対象 200 における情報（信号）の伝達は、制御要素 210、外乱要素 220、むだ時間要素 230、加算器 240 によって表現される。制御要素 210 は、操作量 r を受けて一次制御量 q_w を加算器 240 に出力する。外乱要素 220 は、外乱 d_s を受けて変動量 d を加算器 240 に出力する。加算器 240 は、一次制御量 q_w に変動量 d を加算して二次制御量 q_o をむだ時間要素 230 に出力する。むだ時間要素 230 は、二次制御量 q_o が制御対象 200 の外部に出力されることを遅延させる。具体的には、むだ時間要素 230 は、二次制御量 q_o を受けてからむだ時間 L の経過後に二次制御

量 q_o を制御量 q として制御対象 200 の外部に出力する。

[0023] 以下では、フィードバック制御部 110 と減算器 150 とを含む構成をフィードバック制御系とも呼び、フィードフォワード補償部 120 と減算器 160 とを含む構成をフィードフォワード制御系とも呼ぶ。

[0024] 減算器 150 は、目標値 q_r と制御量 q との誤差 $e_q (= q_r - q)$ をフィードバック制御部 110 に出力する。フィードバック制御部 110 は、誤差 e_q に基づいてフィードバック操作量 r_b を決定して減算器 160 に出力する。

[0025] 学習データ生成部 130 は、予測モデル M_p に対する機械学習において用いられる教師データ D_t を生成する。学習データ生成部 130 は、複数のタイミングの各々において、計測値 d_o と、操作量 r と、制御量 q とを取得する。学習データ生成部 130 は、操作量 r および制御量 q から、変動量 d を推定変動量 d_h として推定する。学習データ生成部 130 は、計測値 d_o (説明変数) と、推定変動量 d_h (目的変数) との組合せを教師データ D_t として記憶部 140 に出力する。なお、学習データ生成部 130 は、教師データ D_t を学習部 170 に直接出力してもよい。

[0026] 時刻 t_1 の計測値 d_o に対応する変動量 d は、時刻 t_1 において一次制御量 q_w に加算され、二次制御量 q_o となる。しかし、二次制御量 q_o が制御対象 200 から制御量 q として出力されるタイミングは、時刻 t_1 からむだ時間 L だけ経過した時刻 $t_2 (= t_1 + L)$ である。そこで、学習データ生成部 130 は、時刻 t_1 の計測値 d_o に、時刻 t_1 における制御量 q ではなく、時刻 t_2 における制御量 q を対応させる。その結果、学習データ生成部 130 から出力される教師データ D_t においては、計測値 d_o が計測された時刻と同時刻の変動量 d の推定変動量 d_h が計測値 d_o に対する正解とされる。すなわち、学習データ生成部 130 によって生成された教師データ D_t においては、説明変数と目的変数との対応関係が正しく設定される。制御装置 100 によれば、適切な対応関係を有する教師データ D_t を用いて予測モデル M_p に対する機械学習を行うことができるため、予測モデル M_p の予測

精度を向上させることができる。その結果、学習済みの予測モデル M_p を用いて行われる、制御対象200に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

[0027] 学習データ生成部130における情報の伝達は、数式モデル131、時刻変換器132、減算器133、および出力生成器134によって表現される。数式モデル131は、操作量 r と一次制御量 q_w との対応関係として推測され、操作量 r を引数とする関数として表現される。数式モデル131は、以下では $G_w h(r)$ とも表現される。

[0028] 数式モデル131は、操作量 r を受けて推定一次制御量 q_{wh} （第1推定値）を減算器133に出力する。推定一次制御量 q_{wh} は、一次制御量 q_w に対応する推定値である。時刻変換器132は、制御量 q の測定時刻 t_{10} を推定むだ時間 L_h （特定時間）だけ戻して、推定二次制御量 q_{oh} を減算器133に出力する。推定むだ時間 L_h は、むだ時間 L の推定値である。推定二次制御量 q_{oh} は、二次制御量 q_o の推定値である。なお、数式モデル131および推定むだ時間 L_h は、制御対象200に対するフィードバック制御における一般的な設計情報に基づく物理モデリングあるいはシステム同定において決定され得る。たとえば、開ループ状態にされたフィードバック制御部110が制御対象200へステップ信号を印加して、その制御量の応答データからゲイン、時定数、およびむだ時間が算出されてもよい。これらの算出結果からZiegler-Nichols法、あるいはCHR (Chien-Hrones-Reswick) 法等によってフィードバック制御のPID (Proportional-Integral-Differential) パラメータを決定することができる。

[0029] 時刻 t_{11} において取得された二次制御量 q_o から時刻 t_{11} において取得された一次制御量 q_w を引いた値が時刻 t_{11} の変動量 d である。一次制御量 q_w は、時刻 t_{11} からむだ時間 L だけ経過した時刻 t_{12} の制御量 q である。時刻 t_{12} において取得された制御量 q は、時刻変換器132によって時刻 t_{12} から推定むだ時間 L_h だけ戻された時刻 t_{11} の推定二次制御量 q_{oh} とされる。時刻 t_{11} の推定二次制御量 q_{oh} から時刻 t_{11} の

推定一次制御量 q_{wh} を引いた値は、時刻 t_{11} の変動量 d の推定値である推定変動量 d_h （第2推定値）となる。

[0030] 減算器 133 は、推定二次制御量 q_{oh} から、推定二次制御量 q_{oh} と同時刻の推定一次制御量 q_{wh} を引いて、推定変動量 d_h を出力生成器 134 に出力する。出力生成器 134 は、計測値 d_o と、計測値 d_o と同じ時刻の推定変動量 d_h との組合せを教師データ D_t として記憶部 140 に出力する。

[0031] 学習部 170 は、複数の教師データ D_t を用いて、計測値 d_o と、推定変動量 d_h との関係を、推定変動量 d_h を目的変数とするとともに、計測値 d_o を説明変数とする関数（回帰曲線あるいは回帰曲面）として近似する。予測モデル M_p は、当該関数を含む。学習部 170 は、予測モデル M_p に対する機械学習（初回の学習または追加学習）が終了し、かつ、制御対象 200 の特性が変化した場合、予測モデル M_p に対する機械学習（追加学習）を再開する。制御対象 200 の特性には、たとえば、計測値 d_o および操作量 r と、制御量 q との対応関係が含まれる。

[0032] 図 2 は、複数の教師データ D_t の分布の一例、および回帰曲面としての予測モデル M_p の一例を併せて示す図である。図 2 においては、計測値 d_o が複数の要素（次元） d_{o1} 、および d_{o2} を含み、 $G_{wh}(r) = 1.23 \times r$ である場合が示されている。

[0033] 再び図 1 を参照して、フィードフォワード補償部 120 は、予測モデル M_p を用いて計測値 d_o から推定変動量 d_h を取得する。フィードフォワード補償部 120 は、逆モデル 121 を含む。逆モデル 121 は、推定一次制御量 q_{wh} を引数とし、操作量 r を出力する、数式モデル 131 の逆関数 $G_{wh}^{-1}(q_{wh})$ として構成される。逆モデル 121 には、予測モデル M_p から推定変動量 d_h が入力される。

[0034] フィードフォワード制御の目的は外乱 d_s による一次制御量 q_w の乱れを抑制することである。そこで、フィードフォワード補償部 120 は、制御要素 210 から出力される値が推定変動量 d_h となるような制御要素 210 に

入力される操作量を、フィードフォワード補償値 r_f として、逆モデル 121 から取得する。減算器 160 は、フィードフォワード補償部 120 からのフィードフォワード補償値 r_f をフィードバック操作量 r_b から引いて、操作量 $r (= r_b - r_f)$ を制御要素 210 に出力する。操作量 r に対応する一次制御量 q_w においては、フィードフォワード補償値 r_f によって予め変動量 d の増加分が抑制されている。そのため、変動量 d が一次制御量 q_w に加算されても、二次制御量 q_o において変動量 d による乱れがフィードフォワード補償値 r_f によって打ち消される。その結果、むだ時間 L だけ経過後に制御対象 200 から出力される制御量 q は、制御量 q の時刻からむだ時間 L だけ遡った時刻のフィードバック操作量 r_b に対応する正常な値に近づく。

[0035] 制御装置 100 によれば、教師データ D_t において計測値 d_o に対して適切な正解が関連付けられるため、教師データ D_t を用いて予測モデル M_p に対して機械学習を行うことにより、制御対象 200 に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。また、制御装置 100 によれば、フィードフォワード制御と並行して、計測値 d_o および制御対象 200 の特性に予測モデル M_p をリアルタイムに適合させることができる。また、予測モデル M_p の精度が十分に高くなるまで機械学習が継続されるため、制御対象 200 に対するフィードフォワード制御の精度を十分に向上させることができる。さらに、制御対象 200 の特性の変化に応じて予測モデル M_p が当該特性に再適合されるため、制御対象 200 の特性の変化によるフィードフォワード制御の精度の低下を抑制することができる。

[0036] 図 3 は、図 1 のフィードバック制御系、フィードフォワード制御系、学習データ生成部 130、および学習部 170 の各々によって行われる処理の流れを示すフローチャートを示す図である。フィードバック制御系およびフィードフォワード制御系の各々のフローチャートに対応するルーチンは、たとえば、サンプリングタイム毎に実行される。学習データ生成部 130 および学習部 170 の各々のフローチャートに対応するルーチンは、たとえば、フ

ィードフォワード制御系の各々のフローチャートに対応するルーチンの初回実行に応じて実行される。以下ではステップを単にSと記載する。

[0037] 図3に示されるように、減算器150は、S111において、目標値 q_r と制御量 q との誤差 e_q を算出してフィードバック制御部110に出力する。フィードバック制御部110は、S312において、誤差 e_q に基づいてフィードバック操作量 r_b を決定して減算器160に出力して、処理を終了する。

[0038] フィードフォワード補償部120は、S121において、計測値 d_o からフィードフォワード補償値 r_f を決定して減算器160に出力する。減算器160は、S122において、フィードバック操作量 r_b からフィードフォワード補償値 r_f を引いた差を操作量 r として制御対象200および学習データ生成部130に出力して、処理を終了する。

[0039] 学習データ生成部130は、S130において教師データ D_t を生成して処理を終了する。学習部170は、S170において予測モデル M_p に対して教師データ D_t を用いた機械学習を行って、処理を終了する。

[0040] 図4は、図3の学習データ生成処理S130の具体的な処理の流れを示すフローチャートである。図5は、図4の計測値 d_o 、操作量 r 、制御量 q 、および推定一次制御量 q_{wh} の時刻と、制御量 q の時刻から推定むだ時間 L_h だけ戻された推定二次制御量 q_{oh} の時刻との対応を説明するための図である。図5においては、時刻 $t_{21} \sim t_{24}$ までの試行期間において、複数の計測値 d_o 、複数の操作量 r 、および複数の制御量 q が取得される場合が示されている。時刻 t_{22} は、時刻 t_{21} から推定むだ時間 L_h だけ経過した時刻($t_{21} + L_h$)である。時刻 $t_{23} (> t_{22})$ は、時刻 t_{24} から推定むだ時間 L_h だけ遡った時刻($t_{24} - L_h$)である。

[0041] 図4および図5を併せて参照しながら、学習データ生成部130は、S131において、複数のタイミングの各々において計測値 d_o 、操作量 r 、および制御量 q を取得し、処理をS132に進める。学習データ生成部130は、S132において、数式モデル131を用いて操作量 r から推定一次制

御量 q_{wh} を取得し、処理を S 1 3 3 に進める。学習データ生成部 1 3 0 は、制御量 q の時刻を推定むだ時間 L_h だけ戻して推定二次制御量 q_{oh} を生成し、処理を S 1 3 4 に進める。図 5 に示されるように、S 1 3 3 の処理によって、S 1 3 1 において取得された時刻 $t_{22} \sim t_{23}$ に含まれる複数の制御量 q は、推定むだ時間 L_h だけ時刻を遡る方向に、全体としてスライドされる。

[0042] 再び図 4 も参照して、学習データ生成部 1 3 0 は、推定二次制御量 q_{oh} から推定二次制御量 q_{oh} の時刻の推定一次制御量 q_{wh} を引いて推定変動量 d_h を生成し、処理を S 1 3 5 に進める。学習データ生成部 1 3 0 は、計測値 d_o に対する正解を、計測値 d_o の時刻の推定変動量 d_h に設定して教師データ D_t を生成し、処理を終了する。

[0043] 図 5 に示されるように、時刻 $t_{21} \sim t_{24}$ の試行期間において取得された複数の制御量 q のうち、時刻 $t_{21} \sim t_{22}$ に取得された制御量 q の時刻は、S 1 3 3 の処理によって時刻 t_{21} の前まで戻される。時刻 t_{21} の前には、対応する推定一次制御量 q_{wh} が存在しない。そのため、時刻 $t_{21} \sim t_{22}$ に取得された制御量 q は、教師データ D_t の生成において使用されない。また、時刻 $t_{23} \sim t_{24}$ の推定二次制御量 q_{oh} 、および推定変動量 d_h は存在しない。そのため、時刻 $t_{23} \sim t_{24}$ の期間に取得された計測値 d_o 、操作量 r 、および推定一次制御量 q_{wh} は、教師データ D_t の生成において使用されない。

[0044] [実施の形態 1 の変形例 1]

実施の形態 1 においては、フィードバック制御系およびフィードフォワード制御系の両方が含まれる構成について説明した。実施の形態 1 の変形例 1 においては、フィードバック制御系が含まれない構成について説明する。

[0045] 図 6 は、実施の形態 1 の変形例 1 に係る制御装置 1 0 0 A の機能構成を示すブロック図である。制御装置 1 0 0 A の構成は、図 1 の制御装置 1 0 0 から減算器 1 5 0 およびフィードバック制御部 1 1 0 が除かれた構成である。これ以外は同様であるため、同様の構成についての説明を繰り返さない。な

お、減算器 160 は、制御装置 100A に含まれていなくてもよい。

[0046] 図 6 に示されるように、制御装置 100A は、計測値 d_o を受ける制御対象 200 の制御量 q が目標値 q_r に近づくように制御対象 200 へのフィードバック操作量 r_b のフィードフォワード補償値 r_f を決定する。制御装置 100A によれば、既存のフィードバック制御系を残存させながら、当該フィードバック制御系に制御装置を追加することにより、既存のフィードバック制御系をフィードフォワード制御系および学習機能を含む制御系に容易に拡張することができる。

[0047] 以上、実施の形態 1 および変形例 1 に係る装置および方法によれば、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

[0048] [実施の形態 2]

実施の形態 1 においてはフィードバック制御系と、フィードフォワード制御系と、予測モデルに対して機械学習を行う構成とが 1 つの制御装置に含まれている場合について説明した。実施の形態 2 においては、フィードバック制御系と、フィードフォワード制御系と、予測モデルに対して機械学習を行う構成とが互いに別個の装置に分かれている構成について説明する。

[0049] 図 7 は、実施の形態 2 に係る制御システム 2 の機能構成を示すブロック図である。図 7 において図 1 と同様の参照符号が付されている構成は、実施の形態 1 において説明された当該参照符号によって特定される構成と同様の機能を有するため、当該同様の構成についての説明を繰り返さない。

[0050] 図 7 に示されるように、制御システム 2 は、フィードバック制御装置 11 と、フィードフォワード補償装置 12 と、学習データ生成装置 13 と、記憶装置 14 と、学習装置 17 とを備える。学習データ生成装置 13、記憶装置 14、および学習装置 17 は、図 1 の学習データ生成部 130、記憶部 140、および学習部 170 にそれぞれ対応する。フィードバック制御装置 11 は、フィードバック制御部 110 と、減算器 150 とを含む。フィードフォワード補償装置 12 は、フィードフォワード補償部 120 と、減算器 160 とを含む。フィードバック制御装置 11、フィードフォワード補償装置 12

、学習データ生成装置 13、記憶装置 14、学習装置 17、および制御対象 200 は、ネットワークを介して互いに接続され、互いに遠隔に配置されていてもよい。なお、減算器 160 は、フィードフォワード補償装置 12 ではなく、フィードバック制御装置 11 に含まれていてもよい。

[0051] 制御システム 2 によれば、既存のフィードバック制御装置を残存させながら、当該フィードバック制御装置にフィードフォワード補償装置、学習データ生成装置、および学習装置を追加することにより、既存の制御システムを容易に拡張することができる。

[0052] 以上、実施の形態 2 に係る装置および方法によれば、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

[0053] [実施の形態 3]

実施の形態 3 においては、実施の形態 1 に係る制御装置の一例として、当該制御装置が PLC (Programmable Logic Controller) を含む構成について説明する。

[0054] <制御システムのネットワーク構成例>

図 8 は、実施の形態 3 に係る制御システム 3 のネットワーク構成例を示す模式図である。図 8 に示されるように、制御システム 3 は、複数のデバイスが互いに通信可能に構成されたデバイス群を含む。典型的には、デバイスは、制御プログラムを実行する処理主体である制御装置 300 と、制御装置 300 に接続される周辺装置とを含み得る。制御装置 300 は、図 1 に示される制御装置 100 と同様の機能構成を有する。

[0055] 制御装置 300 は、各種の設備または装置などの制御対象を制御する産業用コントローラに相当する。制御装置 300 は、制御演算を実行する一種のコンピュータであり、典型的には、PLC (Programmable Logic Controller) を含む。制御装置 300 は、フィールドネットワーク 20 を介してフィールドデバイス 200C に接続されている。制御装置 300 は、フィールドネットワーク 20 を介して、少なくとも 1 つのフィールドデバイス 200C とデータを遣り取りする。

- [0056] 制御装置300において実行される制御演算は、フィールドデバイス200Cにおいて収集または生成されたデータを収集する処理、フィールドデバイス200Cに対する指令値（操作量）などのデータを生成する処理、および生成した出力データを対象のフィールドデバイス200Cへ送信する処理などを含む。フィールドデバイス200Cにおいて収集または生成されたデータには、フィールドデバイス200Cに入力された外乱に関するデータ、および指令値に従ってフィールドデバイス200Cが実際に動作した結果としての制御量が含まれる。フィールドデバイス200Cに対する指令値は、制御装置300によって実行される制御プログラムに基づいて算出された制御目標値（目標値）と実際の制御量との誤差に基づいて暫定的に算出された操作量に、予測モデルによって外乱から予測されたフィードフォワード補償値が加算されることによって決定される。
- [0057] フィールドネットワーク20は、定周期通信を行うバスまたはネットワークを採用することが好ましい。このような定周期通信を行うバスまたはネットワークとしては、EtherCAT（登録商標）、EtherNet/IP（登録商標）、DeviceNet（登録商標）、またはComponent（登録商標）などが知られている。データの到達時間が保証される点において、EtherCAT（登録商標）が好ましい。
- [0058] フィールドネットワーク20には、任意のフィールドデバイス200Cを接続することができる。フィールドデバイス200Cは、フィールド側にあるロボットまたはコンベアなどに対して何らかの物理的な作用を与えるアクチュエータ、および、フィールドとの間で情報を遣り取りする入出力装置などを含む。
- [0059] 制御システム3においてフィールドデバイス200Cは、複数のサーボドライバ220__1、および220__2と、複数のサーボドライバ220__1、および220__2にそれぞれ接続された複数のサーボモータ222__1、および222__2とを含む。フィールドデバイス200Cは、「制御対象」の一例である。

- [0060] サーボドライバ220__1、および220__2は、制御装置300からの指令値（たとえば、位置指令値または速度指令値など）に従って、サーボモータ222__1および222__2のうちの対応するサーボモータを駆動する。このようにして、制御装置300は、フィールドデバイス200Cを制御することができる。
- [0061] 制御装置300は、上位ネットワーク32を介して、他の装置にも接続されている。上位ネットワーク32は、ゲートウェイ700を介して、外部ネットワークであるインターネット900に接続されている。上位ネットワーク32には、一般的なネットワークプロトコルであるイーサネット（登録商標）、あるいはE t h e r N e t / I P（登録商標）が採用されてもよい。より具体的には、上位ネットワーク32には、少なくとも1つのサーバ装置600および少なくとも1つの表示装置500が接続されてもよい。
- [0062] サーバ装置600としては、データベースシステム、または製造実行システム（M E S : Manufacturing Execution System）などが想定される。製造実行システムは、制御対象の製造装置または設備からの情報を取得して、生産全体を監視および管理するものであり、オーダ情報、品質情報、あるいは出荷情報などを扱うこともできる。これらに限らず、情報系サービスを提供する装置を上位ネットワーク32に接続するようにしてもよい。情報系サービスとしては、制御対象の製造装置または設備からの情報を取得して、マクロ的またはミクロ的な分析などを行う処理が想定される。たとえば、情報系サービスとしては、制御対象の製造装置または設備からの情報に含まれる何らかの特徴的な傾向を抽出するデータマイニング、あるいは制御対象の設備または機械からの情報に基づく機械学習を行うための機械学習ツールなどが想定される。
- [0063] 表示装置500は、ユーザからの操作を受けて、制御装置300に対してユーザ操作に応じたコマンドなどを出力するとともに、制御装置300での演算結果などをグラフィカルに表示する。
- [0064] 制御装置300には、サポート装置400が接続可能になっている。サポ

ート装置４００は、上位ネットワーク３２またはインターネット９００を介して制御装置３００に接続されてもよい。サポート装置４００は、制御装置３００が制御対象を制御するために必要な準備を支援する装置である。具体的には、サポート装置４００は、制御装置３００で実行されるプログラムの開発環境（プログラム作成編集ツール、パーサ、およびコンパイラなど）、制御装置３００および制御装置３００に接続される各種デバイスの構成情報（コンフィギュレーション）を設定するための設定環境、生成したプログラムを制御装置３００へ出力する機能、および制御装置３００上で実行されるプログラムなどをオンラインで修正および変更を行う機能などを提供する。

[0065] 制御システム３においては、制御装置３００、サポート装置４００、および表示装置５００がそれぞれ別体として構成されているが、これらの機能の全部または一部を単一の装置に集約するような構成が採用されてもよい。

[0066] 制御装置３００は、一の生産現場のみで使用される場合に限らず、他の生産現場においても使用される。また、一の生産現場内においても複数の異なるラインで使用される場合もある。

[0067] <制御装置のハードウェア構成例>

図９は、図８の制御装置３００のハードウェア構成例を示すブロック図である。図７に示されるように、制御装置３００は、プロセッサ３０２と、メインメモリ３０４と、ストレージ３６０と、メモリカードインターフェイス３１２と、上位ネットワークコントローラ３０６と、フィールドネットワークコントローラ３０８と、ローカルバスコントローラ３１６と、ＵＳＢ（Universal Serial Bus）インターフェイスを提供するＵＳＢコントローラ３７０とを含む。これらのコンポーネントは、プロセッサバス３１８を介して接続されている。

[0068] 図９に示されるように、プロセッサ３０２は、制御演算を実行する演算処理部に相当し、ＣＰＵ（Central Processing Unit）などで構成される。プロセッサ３０２は、ＧＰＵ（Graphics Processing Unit）を含んでいてもよい。具体的には、プロセッサ３０２は、ストレージ３６０に保存されたプ

プログラムを読み出して、メインメモリ304に展開して実行することで、制御対象に対する制御演算を実現する。

[0069] メインメモリ304は、DRAM (Dynamic Random Access Memory) などの揮発性記憶装置などで構成される。メインメモリ304は、SRAM (Static Random Access Memory) を含んでいてもよい。ストレージ360は、たとえば、SSD (Solid State Drive) などの不揮発性記憶装置などで構成される。ストレージ360は、HDD (Hard Disk Drive) を含んでいてもよい。

[0070] ストレージ360には、制御プログラムPcと、教師データDtと、予測モデルMpとが保存されている。ストレージ360は、図1の記憶部140に対応する。制御プログラムPcは、制御装置300を統合的に制御して、制御装置300の各機能を実現するためのプログラムを含む。すなわち、制御プログラムPcを実行するプロセッサ302が、図1のフィードバック制御系（フィードバック制御部110および減算器150）、フィードフォワード制御系（フィードフォワード補償部120および減算器160）、ならびに学習データ生成部130および学習部170に対応する。

[0071] メモリカードインターフェイス312は、着脱可能な記憶媒体の一例であるメモリカード314を受け付ける。メモリカードインターフェイス312は、メモリカード314に対して任意のデータの読み書きが可能になっている。

[0072] 上位ネットワークコントローラ306は、上位ネットワーク32（たとえばローカルエリアネットワーク）を介して、上位ネットワーク32に接続された任意の情報処理装置との間でデータを遣り取りする。

[0073] フィールドネットワークコントローラ308は、フィールドネットワーク20を介して、サーボモータ222__1、および222__2等の任意のデバイスとの間でデータを遣り取りする。

[0074] ローカルバスコントローラ316は、ローカルバス122を介して、制御装置300を構成する任意の機能ユニット380との間でデータを遣り取り

する。機能ユニット380は、たとえば、アナログ信号の入力および出力の少なくとも一方を担当するアナログI/Oユニット、デジタル信号の入力および出力の少なくとも一方を担当するデジタルI/Oユニット、ならびにエンコーダなどからのパルスを受け付けるカウンタユニットなどからなる。

[0075] USBコントローラ370は、USB接続を介して、任意の情報処理装置との間でデータを遣り取りする。USBコントローラ370には、たとえばサポート装置400が接続される。

[0076] 以上、実施の形態3に係る装置、プログラム、および制御方法によれば、制御対象に対するフィードフォワード制御の精度を向上させることができる。

[0077] <付記>

上記したような本実施の形態は、以下のような技術思想を含む。

[0078] [構成1]

外乱(d_s)を受ける制御対象(200)へのフィードバック操作量(r_b)のフィードフォワード補償値(r_f)の生成に必要な特定値を予測する予測モデル(M_p)に対する機械学習のための装置(100)であって、

前記フィードバック操作量(r_b)は、目標値(q_r)と前記制御対象(200)の制御量(q)との誤差に基づいて、前記制御量(q)が前記目標値(q_r)に近づくように前記制御対象(200)の制御装置(100)のフィードバック制御によって決定され、

前記フィードバック操作量(r_b)から前記フィードフォワード補償値(r_f)を引いた値が、操作量(r)として前記制御対象(200)に前記制御装置(100)から出力され、

前記制御対象(200)は、前記操作量(r)を受ける数式モデル(131)として表現された制御要素(210)と、前記外乱(d_s)を受ける外乱要素(220)と、むだ時間要素(230)とによって表現され、

前記制御要素(210)は、前記操作量(r)を受けて一次制御量(q_w)を出力し、

前記外乱要素（220）は、前記外乱（ d_s ）を受けて変動量（ d ）を出力し、

前記むだ時間要素（230）は、前記一次制御量（ q_w ）と前記変動量（ d ）との和が前記制御対象（200）の外部に出力されることを遅延させ、

前記予測モデル（ M_p ）は、前記外乱（ d_s ）の計測値（ d_o ）から前記変動量（ d ）を前記特定値として予測し、

前記装置（100）は、学習データ生成部（130）を備え、

前記学習データ生成部（130）は、

前記計測値（ d_o ）、前記操作量（ r ）、および前記制御量（ q ）を取得し、

前記数式モデル（131）を用いて前記操作量（ r ）から前記一次制御量（ q_w ）の第1推定値（ q_{wh} ）を生成し、

前記制御量（ q ）と、前記制御量（ q ）が取得された時刻から特定時間（ L_h ）だけ戻された時刻の前記第1推定値（ q_{wh} ）とに基づいて前記変動量（ d ）の第2推定値（ d_h ）を生成し、

前記計測値（ d_o ）に、前記計測値（ d_o ）が取得された時刻の前記第2推定値（ d_h ）を正解として対応させた教師データ（ D_t ）を出力する、装置（100）。

[0079] [構成2]

前記教師データ（ D_t ）を用いて前記予測モデル（ M_p ）に対して前記機械学習を行う学習部（170）をさらに備え、

前記学習部（170）は、前記予測モデル（ M_p ）によって表現される、前記計測値（ d_o ）と前記第2推定値（ d_h ）との関係を、前記第2推定値（ d_h ）を目的変数とするとともに、前記計測値（ d_o ）を説明変数とする関数として近似する、構成1に記載の装置（100）。

[0080] [構成3]

前記数式モデル（131）の逆モデル（121）を用いて、前記予測モデル（ M_p ）によって予測された前記変動量（ d ）から前記フィードフォー

ド補償値 (r_f) を生成するフィードフォワード補償部 (120) をさらに備える、構成1または2に記載の装置 (100)。

[0081] [構成4]

外乱 (d_s) を受ける制御対象 (200) へのフィードバック操作量 (r_b) のフィードフォワード補償値 (r_f) の生成に必要な特定値を予測する予測モデル (M_p) に対する機械学習のための教師データの生成プログラムであって、

前記フィードバック操作量 (r_b) は、目標値 (q_r) と前記制御対象 (200) の制御量 (q) との誤差に基づいて、前記制御量 (q) が前記目標値 (q_r) に近づくように前記制御対象 (200) の制御装置 (100) のフィードバック制御によって決定され、

前記フィードバック操作量 (r_b) から前記フィードフォワード補償値 (r_f) を引いた値が、操作量 (r) として前記制御対象 (200) に前記制御装置 (100) から出力され、

前記制御対象 (200) は、前記操作量 (r) を受ける数式モデル (131) として表現された制御要素 (210) と、前記外乱 (d_s) を受ける外乱要素 (220) と、むだ時間要素 (230) とによって表現され、

前記制御要素 (210) は、前記操作量 (r) を受けて一次制御量 (q_w) を出力し、

前記外乱要素 (220) は、前記外乱 (d_s) を受けて変動量 (d) を出力し、

前記むだ時間要素 (230) は、前記一次制御量 (q_w) と前記変動量 (d) との和が前記制御対象 (200) の外部に出力されることを遅延させ、

前記予測モデル (M_p) は、前記外乱 (d_s) の計測値 (d_o) から前記変動量 (d) を前記特定値として予測し、

前記プログラムは、プロセッサに実行されることによって、

前記計測値 (d_o)、前記操作量 (r)、および前記制御量 (q) を取得し、

前記制御量 (q) の時刻を特定時間 (L h) だけ戻し、
前記数式モデル (1 3 1) を用いて前記操作量 (r) から前記一次制御量 (q w) の第 1 推定値 (q w h) を生成し、
前記制御量 (q) から前記制御量 (q) の時刻の前記第 1 推定値 (q w h) を引くことによって前記変動量 (d) の第 2 推定値 (d h) を生成し、
前記計測値 (d o) に、前記計測値 (d o) の時刻の前記第 2 推定値 (d h) を正解として対応させた教師データ (D t) を出力する、教師データの生成プログラム。

[0082] [構成 5]

外乱 (d s) を受ける制御対象 (2 0 0) へのフィードバック操作量 (r b) のフィードフォワード補償値 (r f) の生成に必要な特定値を予測する予測モデル (M p) に対する機械学習のための教師データの生成方法であって、

前記フィードバック操作量 (r b) は、目標値 (q r) と前記制御対象 (2 0 0) の制御量 (q) との誤差に基づいて、前記制御量 (q) が前記目標値 (q r) に近づくように前記制御対象 (2 0 0) の制御装置 (1 0 0) のフィードバック制御によって決定され、

前記フィードバック操作量 (r b) から前記フィードフォワード補償値 (r f) を引いた値が、操作量 (r) として前記制御対象 (2 0 0) に前記制御装置 (1 0 0) から出力され、

前記制御対象 (2 0 0) は、前記操作量 (r) を受ける数式モデル (1 3 1) として表現された制御要素 (2 1 0) と、前記外乱 (d s) を受ける外乱要素 (2 2 0) と、むだ時間要素 (2 3 0) とによって表現され、

前記制御要素 (2 1 0) は、前記操作量 (r) を受けて一次制御量 (q w) を出力し、

前記外乱要素 (2 2 0) は、前記外乱 (d s) を受けて変動量 (d) を出力し、

前記むだ時間要素 (2 3 0) は、前記一次制御量 (q w) と前記変動量 (

d) との和が前記制御対象 (200) の外部に出力されることを遅延させ、
前記予測モデル (Mp) は、前記外乱 (ds) の計測値 (do) から前記
変動量 (d) を前記特定値として予測し、
前記方法は、
前記計測値 (do)、前記操作量 (r)、および前記制御量 (q) を取得
することと、
前記制御要素 (210) の数式モデル (131) を用いて前記操作量 (r
) から前記一次制御量 (qw) の第1推定値 (qwh) を生成することと、
前記制御量 (q) と、前記制御量 (q) が取得された時刻から特定時間 (Lh) だけ戻された時刻の前記第1推定値 (qwh) とに基づいて前記変動
量 (d) の第2推定値 (dh) を生成することと、
前記計測値 (do) に、前記計測値 (do) が取得された時刻の前記第2
推定値 (dh) を正解として対応させた教師データ (Dt) を出力すること
とを含む、教師データの生成方法。

[0083] 今回開示された各実施の形態は、矛盾しない範囲で適宜組み合わせられて実施されることも予定されている。今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

符号の説明

[0084] 2, 3 制御システム、11 フィードバック制御装置、12 フィード
フォワード補償装置、13 学習データ生成装置、14 記憶装置、17
学習装置、20 フィールドネットワーク、32 上位ネットワーク、100
0, 100A, 300 制御装置、110 フィードバック制御部、120
フィードフォワード補償部、121 逆モデル、122 ローカルバス、
130 学習データ生成部、131 数式モデル、132 時刻変換器、1
33, 150, 160 減算器、134 出力生成器、140 記憶部、1
70 学習部、200 制御対象、200C フィールドデバイス、210

制御要素、220 外乱要素、222 サーボモータ、230 むだ時間要素、240 加算器、302 プロセッサ、304 メインメモリ、306 上位ネットワークコントローラ、308 フィールドネットワークコントローラ、312 メモリカードインターフェイス、314 メモリカード、316 ローカルバスコントローラ、318 プロセッサバス、360 ストレージ、370 コントローラ、380 機能ユニット、400 サポート装置、500 表示装置、600 サーバ装置、700 ゲートウェイ、900 インターネット、 D_t 教師データ、 L むだ時間、 L_h 推定 むだ時間、 M_p 予測モデル、 P_c 制御プログラム、 d 変動量、 d_h 推定変動量、 d_o 計測値、 d_s 外乱、 e_q 誤差、 q 制御量、 q_o 二次制御量、 $q_o h$ 推定二次制御量、 q_r 目標値、 q_w 一次制御量、 $q_w h$ 推定一次制御量、 r 操作量、 r_b フィードバック操作量、 r_f フィードフォワード補償値。

請求の範囲

[請求項1]

外乱を受ける制御対象へのフィードバック操作量のフィードフォワード補償値の生成に必要な特定値を予測する予測モデルに対する機械学習のための装置であって、

前記フィードバック操作量は、目標値と前記制御対象の制御量との誤差に基づいて、前記制御量が前記目標値に近づくように前記制御対象の制御装置のフィードバック制御によって決定され、

前記フィードバック操作量から前記フィードフォワード補償値を引いた値が、操作量として前記制御対象に前記制御装置から出力され、

前記制御対象は、前記操作量を受ける数式モデルとして表現された制御要素と、前記外乱を受ける外乱要素と、むだ時間要素とによって表現され、

前記制御要素は、前記操作量を受けて一次制御量を出力し、

前記外乱要素は、前記外乱を受けて変動量を出力し、

前記むだ時間要素は、前記一次制御量と前記変動量との和が前記制御対象の外部に出力されることを遅延させ、

前記予測モデルは、前記外乱の計測値から前記変動量を前記特定値として予測し、

前記装置は、学習データ生成部を備え、

前記学習データ生成部は、

前記計測値、前記操作量、および前記制御量を取得し、

前記数式モデルを用いて前記操作量から前記一次制御量の第1推定値を生成し、

前記制御量と、前記制御量が取得された時刻から特定時間だけ戻された時刻の前記第1推定値とに基づいて前記変動量の第2推定値を生成し、

前記計測値に、前記計測値が取得された時刻の前記第2推定値を正解として対応させた教師データを出力する、装置。

[請求項2] 前記教師データを用いて前記予測モデルに対して前記機械学習を行う学習部をさらに備え、

前記学習部は、前記予測モデルによって表現される、前記計測値と前記第2推定値との関係を、前記第2推定値を目的変数とするとともに、前記計測値を説明変数とする関数として近似する、請求項1に記載の装置。

[請求項3] 前記数式モデルの逆モデルを用いて、前記予測モデルによって予測された前記変動量から前記フィードフォワード補償値を生成するフィードフォワード補償部をさらに備える、請求項1または2に記載の装置。

[請求項4] 外乱を受ける制御対象へのフィードバック操作量のフィードフォワード補償値の生成に必要な特定値を予測する予測モデルに対する機械学習のための教師データの生成プログラムであって、

前記フィードバック操作量は、目標値と前記制御対象の制御量との誤差に基づいて、前記制御量が前記目標値に近づくように前記制御対象の制御装置のフィードバック制御によって決定され、

前記フィードバック操作量から前記フィードフォワード補償値を引いた値が、操作量として前記制御対象に前記制御装置から出力され、

前記制御対象は、前記操作量を受ける数式モデルとして表現された制御要素と、前記外乱を受ける外乱要素と、むだ時間要素とによって表現され、

前記制御要素は、前記操作量を受けて一次制御量を出力し、

前記外乱要素は、前記外乱を受けて変動量を出力し、

前記むだ時間要素は、前記一次制御量と前記変動量との和が前記制御対象の外部に出力されることを遅延させ、

前記予測モデルは、前記外乱の計測値から前記変動量を前記特定値として予測し、

前記教師データの生成プログラムは、プロセッサに実行されること

によって、

前記計測値、前記操作量、および前記制御量を取得し、

前記数式モデルを用いて前記操作量から前記一次制御量の第1推定値を生成し、

前記制御量と、前記制御量が取得された時刻から特定時間だけ戻された時刻の前記第1推定値とに基づいて前記変動量の第2推定値を生成し、

前記計測値に、前記計測値が取得された時刻の前記第2推定値を正解として対応させた教師データを出力する、教師データの生成プログラム。

[請求項5]

外乱を受ける制御対象へのフィードバック操作量のフィードフォワード補償値の生成に必要な特定値を予測する予測モデルに対する機械学習のための教師データの生成方法であって、

前記フィードバック操作量は、目標値と前記制御対象の制御量との誤差に基づいて、前記制御量が前記目標値に近づくように前記制御対象の制御装置のフィードバック制御によって決定され、

前記フィードバック操作量から前記フィードフォワード補償値を引いた値が、操作量として前記制御対象に前記制御装置から出力され、

前記制御対象は、前記操作量を受ける数式モデルとして表現された制御要素と、前記外乱を受ける外乱要素と、むだ時間要素とによって表現され、

前記制御要素は、前記操作量を受けて一次制御量を出力し、

前記外乱要素は、前記外乱を受けて変動量を出力し、

前記むだ時間要素は、前記一次制御量と前記変動量との和が前記制御対象の外部に出力されることを遅延させ、

前記予測モデルは、前記外乱の計測値から前記変動量を前記特定値として予測し、

前記教師データの生成方法は、

前記計測値、前記操作量、および前記制御量を取得することと、
前記数式モデルを用いて前記操作量から前記一次制御量の第1推定値を生成することと、

前記制御量と、前記制御量が取得された時刻から特定時間だけ戻された時刻の前記第1推定値とに基づいて前記変動量の第2推定値を生成することと、

前記計測値に、前記計測値が取得された時刻の前記第2推定値を正解として対応させた教師データを出力することを含む、教師データの生成方法。

[図1]

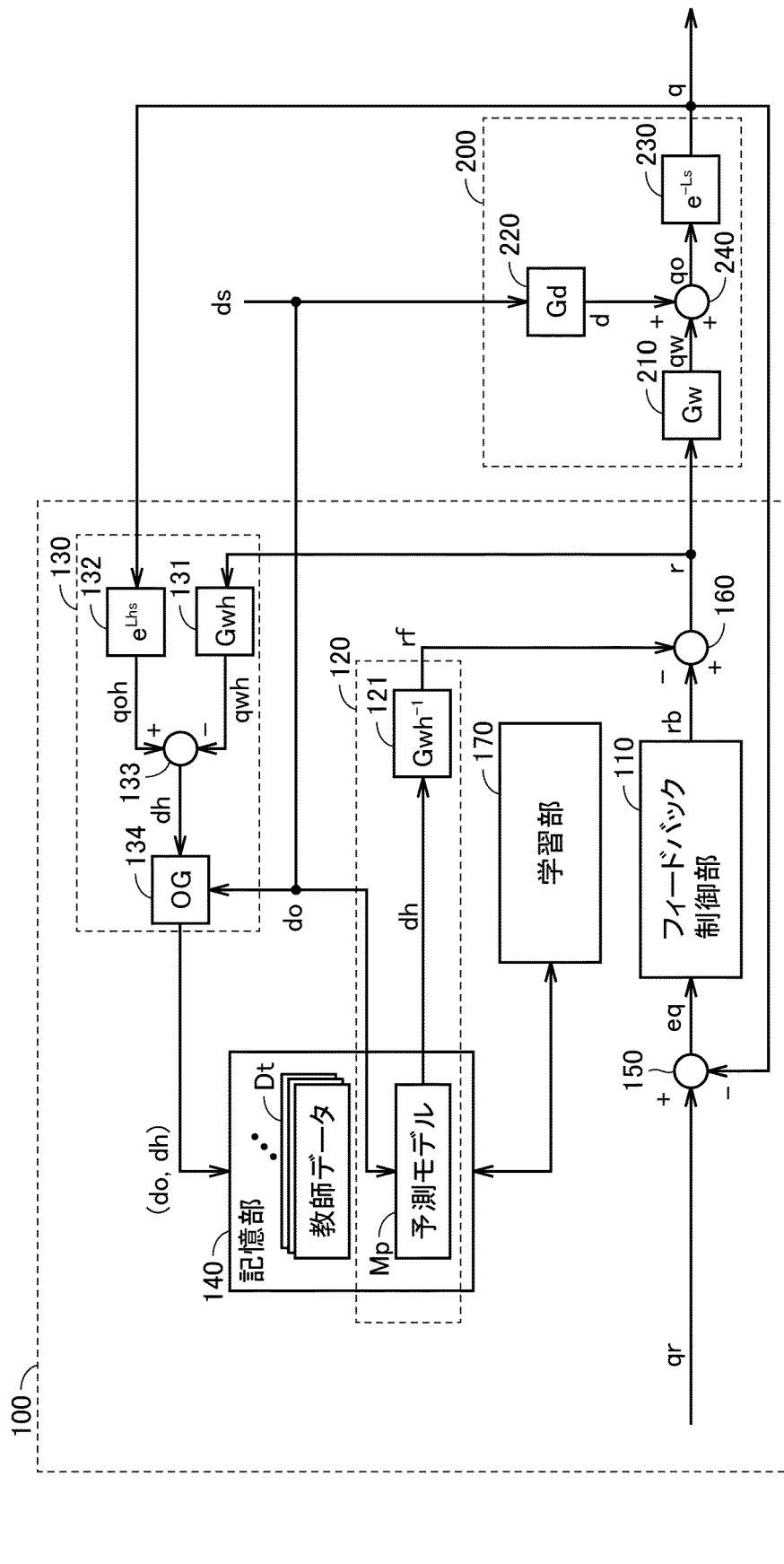
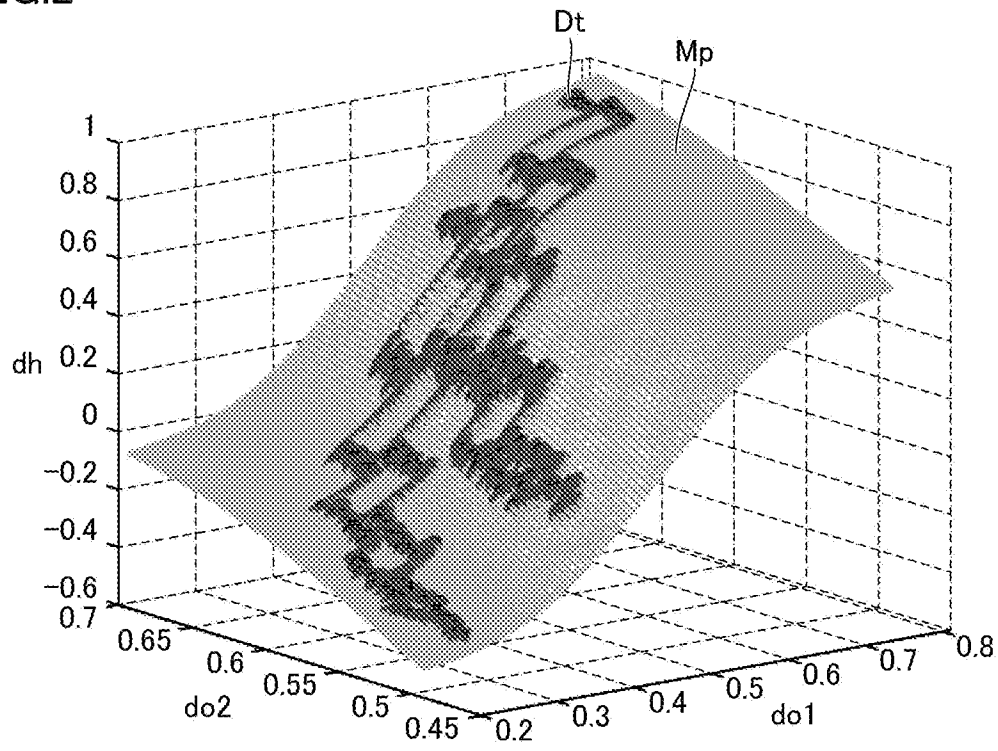


FIG.1

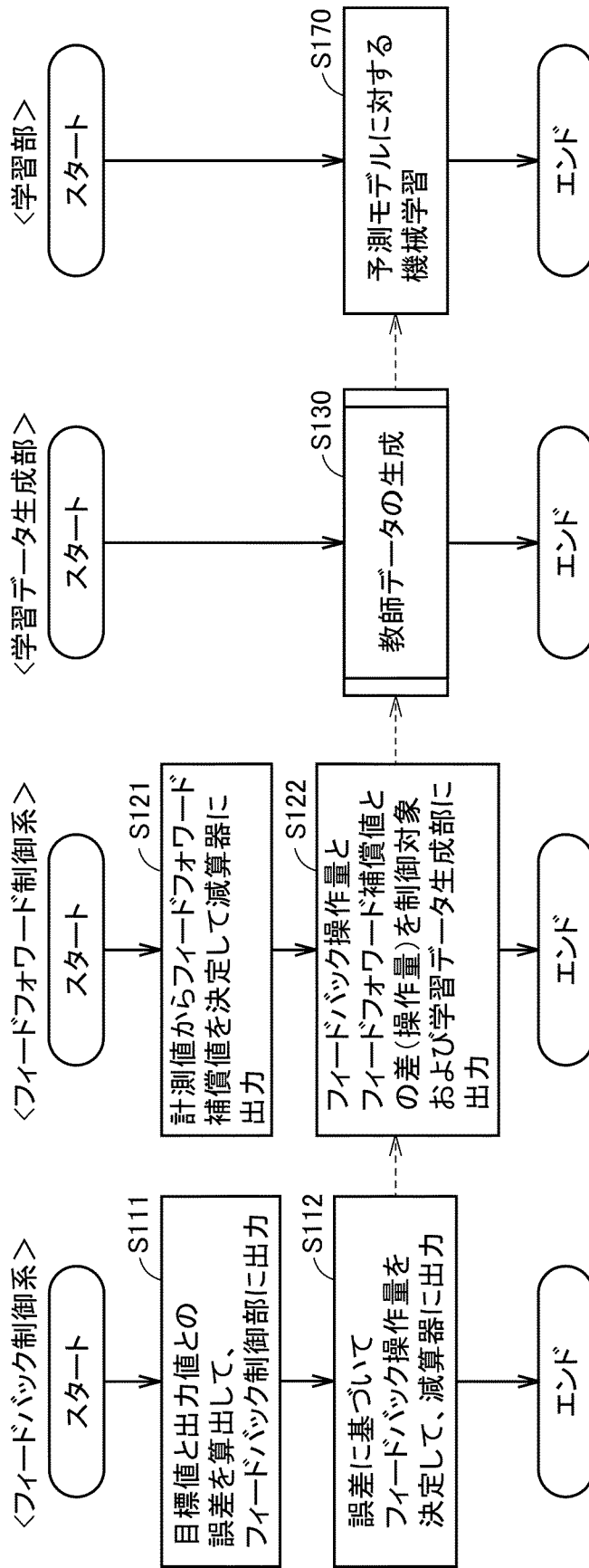
[図2]

FIG.2



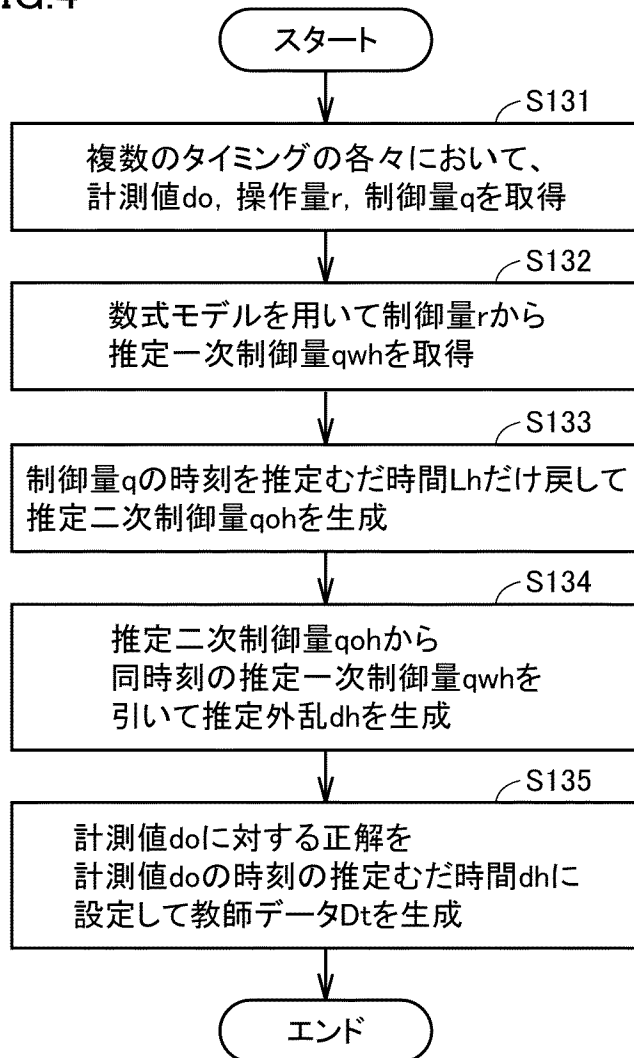
[図3]

FIG.3



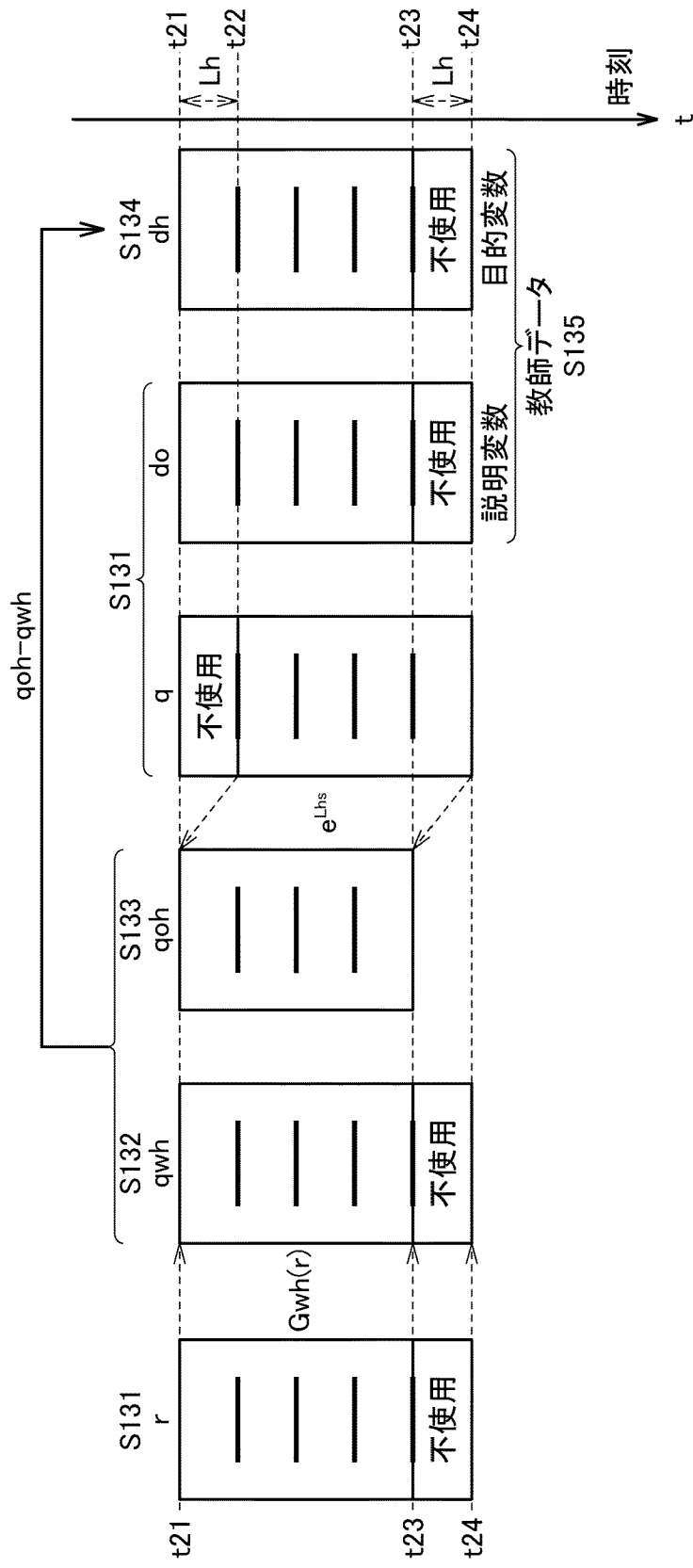
[図4]

FIG.4



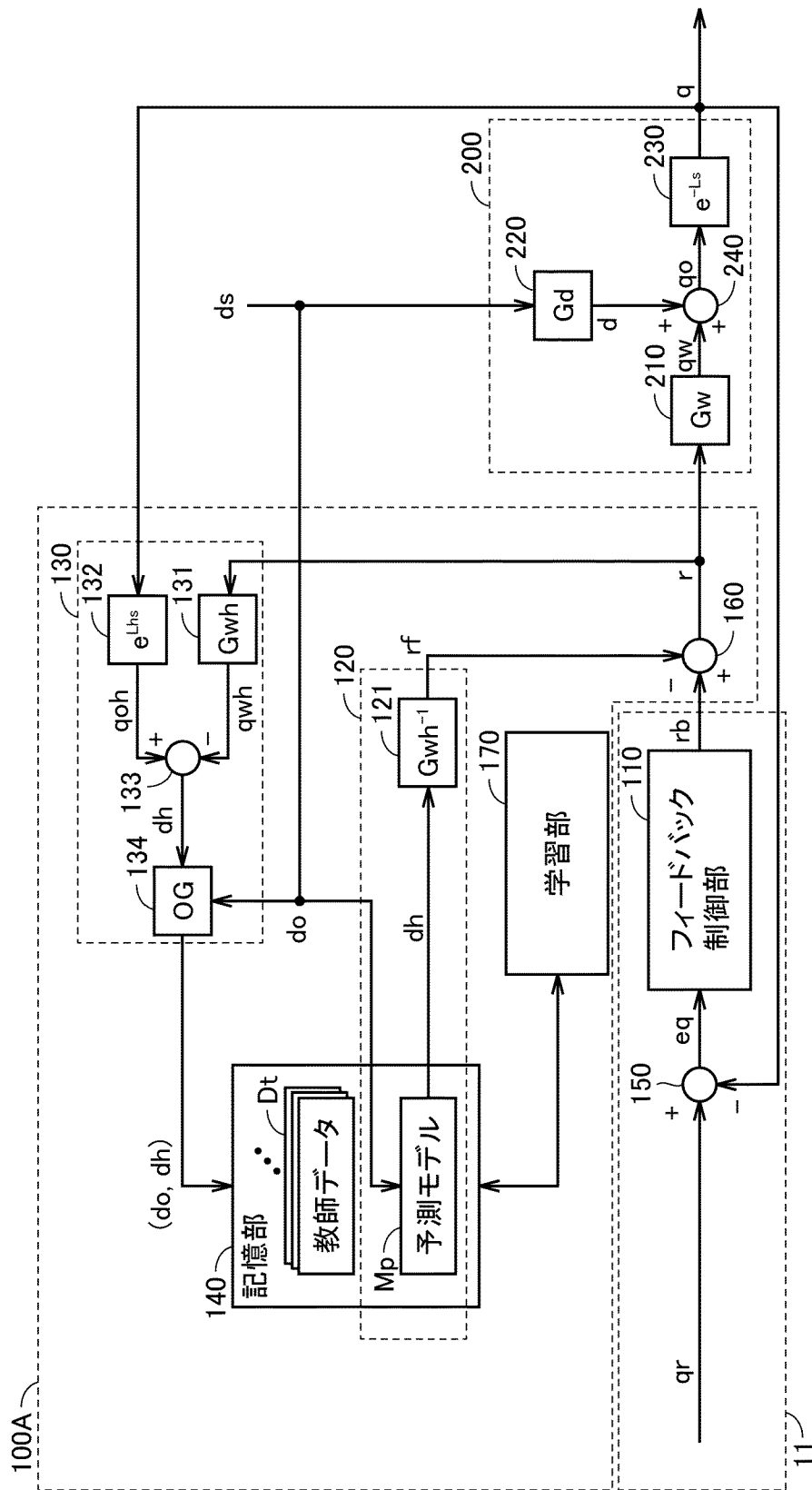
[図5]

FIG.5



[図6]

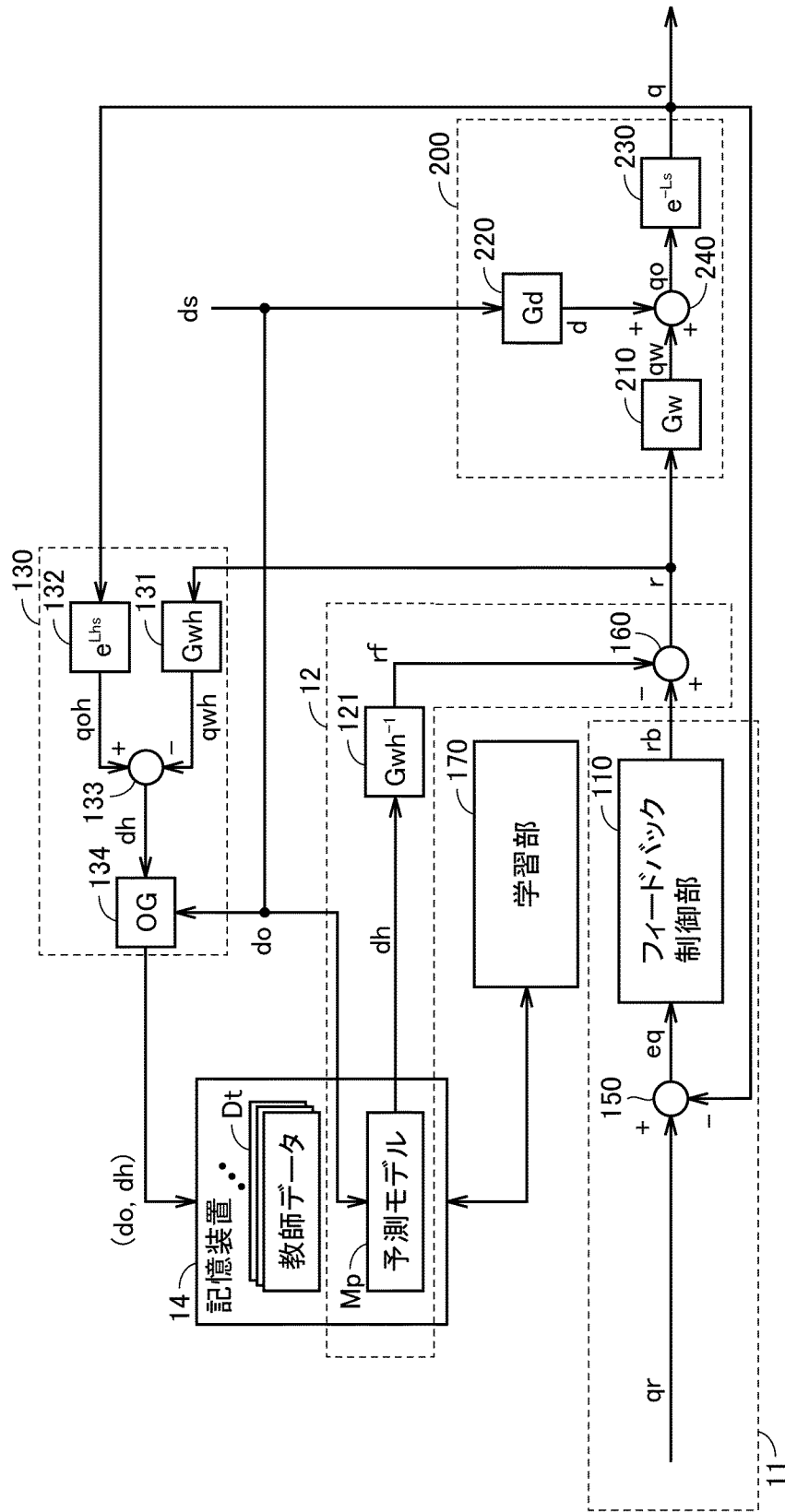
FIG.6



[図7]

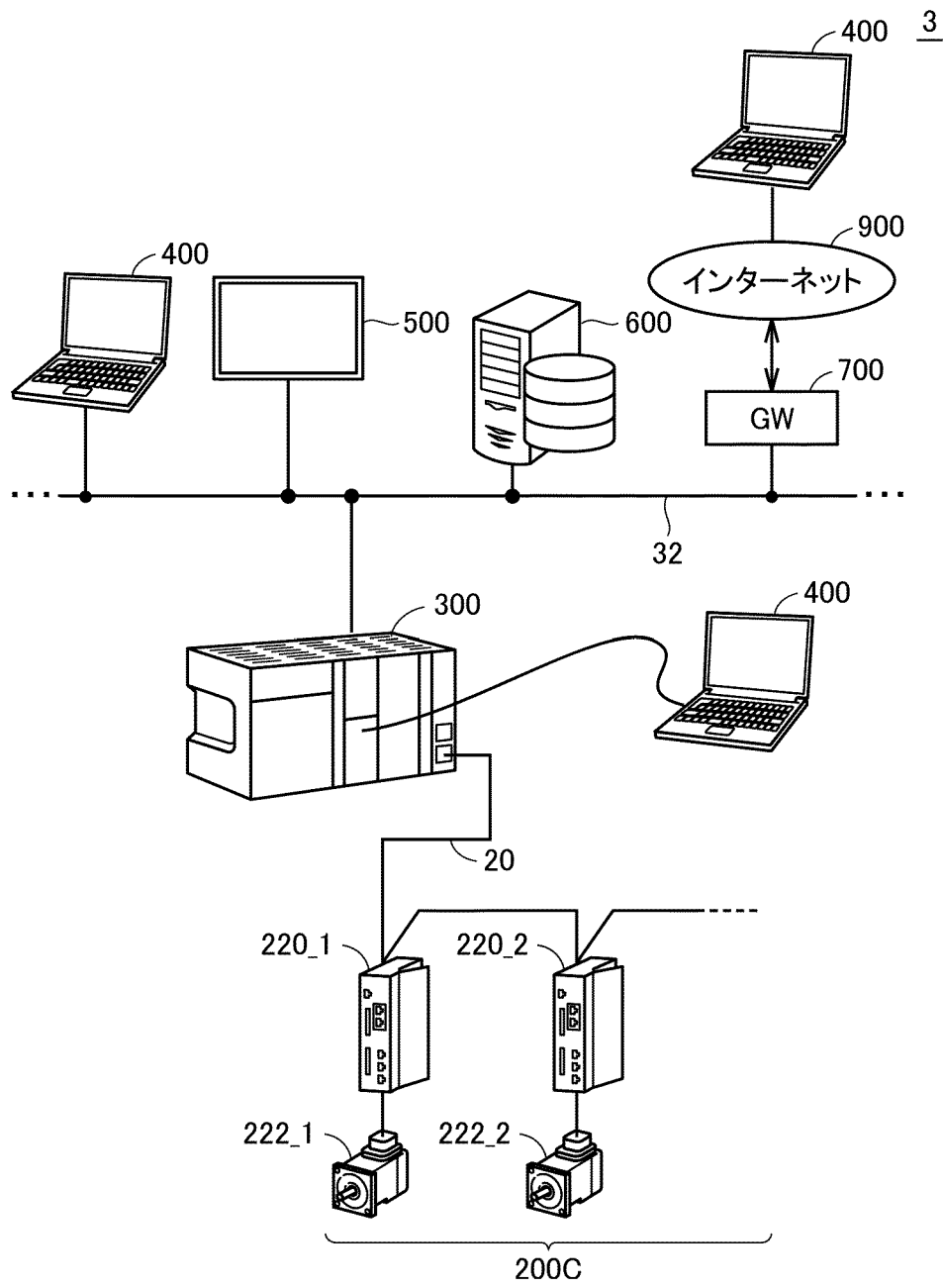
FIG.7

2



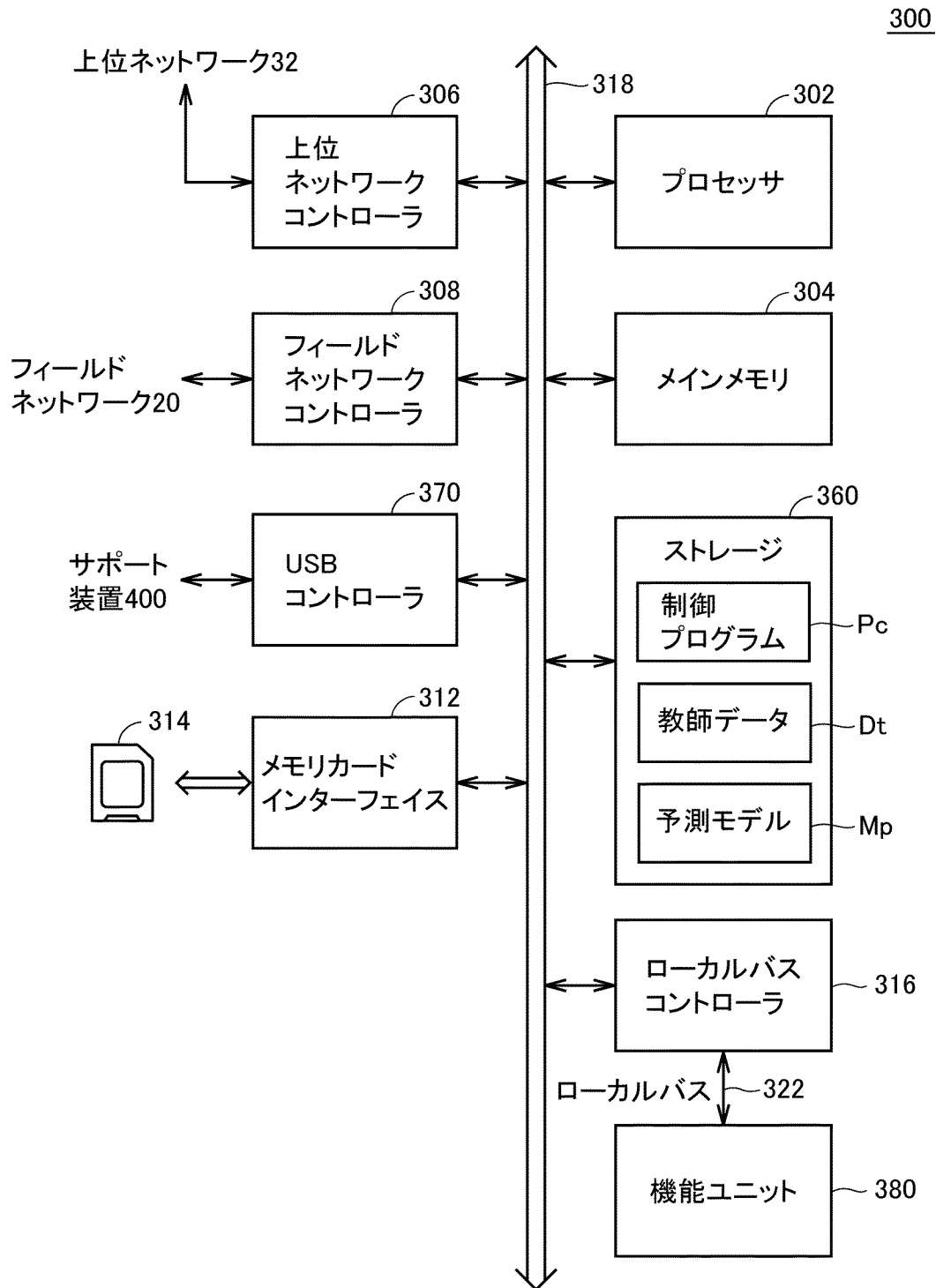
[図8]

FIG.8



[図9]

FIG.9



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/007551

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G05B 11/32 (2006.01)i; G05B 13/02 (2006.01)i FI: G05B11/32 F; G05B13/02 C According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G05B11/32; G05B13/02 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024 Registered utility model specifications of Japan 1996-2024 Published registered utility model applications of Japan 1994-2024 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2021-176047 A (MHI POWER CONTROL SYSTEMS CO., LTD.) 04 November 2021 (2021-11-04) entire text, all drawings	1-5
A	JP 2020-60827 A (HITACHI, LTD.) 16 April 2020 (2020-04-16) entire text, all drawings	1-5
A	JP 2010-218007 A (OMRON CORPORATION) 30 September 2010 (2010-09-30) entire text, all drawings	1-5
A	JP 5-27808 A (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 05 February 1993 (1993-02-05) entire text, all drawings	1-5
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance “D” document cited by the applicant in the international application “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed “T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art “&” document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 16 April 2024		Date of mailing of the international search report 14 May 2024
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2024/007551

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
JP	2021-176047	A	04 November 2021	WO	2021/220901	A1	
JP	2020-60827	A	16 April 2020	DE	102019214548	A1	
				CN	111001660	A	
JP	2010-218007	A	30 September 2010	(Family: none)			
JP	5-27808	A	05 February 1993	(Family: none)			

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））
G05B 11/32(2006.01)i; G05B 13/02(2006.01)i
FI: G05B11/32 F; G05B13/02 C

B. 調査を行った分野
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））
G05B11/32; G05B13/02
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの
日本国実用新案公報 1922 - 1996年
日本国公開実用新案公報 1971 - 2024年
日本国実用新案登録公報 1996 - 2024年
日本国登録実用新案公報 1994 - 2024年
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2021-176047 A（株式会社MHIパワーコントロールシステムズ） 04.11.2021 (2021 - 11 - 04) 全文, 全図	1-5
A	JP 2020-60827 A（株式会社日立製作所） 16.04.2020 (2020 - 04 - 16) 全文, 全図	1-5
A	JP 2010-218007 A（オムロン株式会社） 30.09.2010 (2010 - 09 - 30) 全文, 全図	1-5
A	JP 5-27808 A（株式会社東芝） 05.02.1993 (1993 - 02 - 05) 全文, 全図	1-5

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献

“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日
16. 04. 2024

国際調査報告の発送日
14. 05. 2024

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

権限のある職員（特許庁審査官）
大古 健一 3U 1180
電話番号 03-3581-1101 内線 3364

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2024/007551

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2021-176047	A	04.11.2021	WO	2021/220901	A1	
JP	2020-60827	A	16.04.2020	DE	102019214548	A1	
				CN	111001660	A	
JP	2010-218007	A	30.09.2010	(ファミリーなし)			
JP	5-27808	A	05.02.1993	(ファミリーなし)			