

(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
2020年11月19日(19.11.2020)



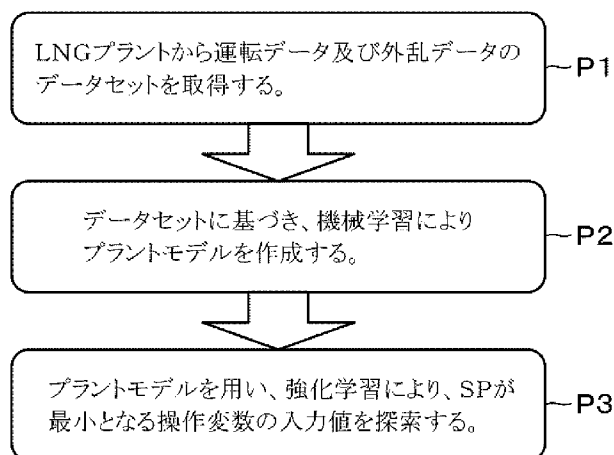
(10) 国際公開番号

WO 2020/230239 A1

- (51) 国際特許分類:
F25J 1/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/018954
- (22) 国際出願日: 2019年5月13日(13.05.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 日揮グローバル株式会社 (JGC CORPORATION) [JP/JP]; 〒2206001 神奈川県横浜市西区みなとみらい二丁目3番1号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 毛利 謙司 (MOURI, Kenji); 〒2206001 神奈川県横浜市西区みなとみらい二丁目3番1号 日揮株式会社内 Kanagawa (JP). 内
- 田 啓克 (UCHIDA, Hirokatsu); 〒2206001 神奈川県横浜市西区みなとみらい二丁目3番1号 日揮株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人弥生特許事務所 (YAYOIY PATENT OFFICE); 〒2310058 神奈川県横浜市中区弥生町2丁目15番1号 ストックタワー大通り公園3601号 Kanagawa (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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,

(54) Title: OPERATION GUIDANCE SEARCHING METHOD AND OPERATION GUIDANCE SEARCHING SYSTEM

(54) 発明の名称: 運転指針探索方法、及び運転指針探索システム



P1 Acquire data set of operation data and disturbance data from LNG plant.

P2 Use data set to generate plant model through machine learning.

P3 Use plant model to search for input value of operation variables for which SP is lowest through reinforcement learning.

(57) Abstract: [Problem] To provide a technique for searching for an operation guidance that is for operating a liquefied natural gas plant efficiently. [Solution] This operation guidance searching method for a liquefied natural gas plant involves acquiring data sets of disturbance data and operation data of process variables for a plurality of target devices, and generating, through machine learning, a plant model indicating the correspondence between the output values of the process variables and the input values of operation variables and disturbances. After that, through reinforcement learning, a search

MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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)）

for the input value of the operation variables for which the compression power per production unit is the lowest is made under the condition where the outlet temperature of liquefied natural gas is at or lower than a preset restriction temperature.

(57) 要約：【課題】液化天然ガスプラントを効率的に運転するための運転指針を探索する技術を提供する。【解決手段】液化天然ガスプラントの運転指針探索方法は、複数の対象機器についてのプロセス変数の運転データと外乱データとのデータセットを取得し、機械学習により、操作変数及び外乱の入力値に応じたプロセス変数の出力値の対応関係を表すプラントモデルを作成する。次いで強化学習により、液化天然ガスの出口温度が予め設定された制約温度以下となる条件下で、単位生産量当たりの圧縮動力が最小となる前記操作変数の入力値を探索する。

明 細 書

発明の名称： 運転指針探索方法、及び運転指針探索システム

技術分野

[0001] 本発明は、液化天然ガスプラントの稼働を解析する技術に関する。

背景技術

[0002] 天然ガスの液化を行う液化天然ガスプラント（以下、「LNGプラント」ともいう）においては、冷媒を用いて天然ガス（NG：Natural Gas）を冷却し、液化天然ガス（LNG：Liquefied Natural Gas）を得る処理が行われる。LNGプラントは、冷媒を用いて被冷却流体（NGや他の冷媒など）を冷却する熱交換器や、気化した冷媒を圧縮する圧縮機、圧縮後の冷媒の冷却を行う空冷式熱交換器（ACHE：Air-Cooled Heat Exchanger）などの多数の機器を備えている。

[0003] これらの機器は、外気温度やNGの供給圧力、NG組成などの外乱に応じて運転状態が変化する。LNGプラントにおいては、外乱の影響を受けつつも、より少ないエネルギー投入量で効率的にLNGを生産することができるように、種々の運転調整が行われる。しかしながら、外乱の種類や、各外乱による影響の受け方は機器によって異なる。また特定の機器が外乱の影響を受けて運転状態が変化した結果、他の機器の運転状態に影響を及ぼすこともある。

[0004] このように、LNGプラントにおいては、多数の機器が複数種類の外乱の影響を受けつつ互いに関連して運転状態が変化する。このため、外乱の変化が発生したとき、LNGプラントに含まれる多数の機器において、いかなる運転調整を行うことがより効率的であるのかを特定することが困難であった。

[0005] ここで特許文献1には、LNG生産プラントの現在のカレントパラメータを測定し、カルノー係数を運転効率の指標として、LNGの液化を行う混合冷媒の最適組成をモデル予測制御によって求める技術が記載されているが、

他の手法を用いて最適化を図る技術は記載されていない。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：オーストラリア特許第2018202638号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 本発明は、このような背景の下になされたものであり、液化天然ガスプラントを効率的に運転するための運転指針を探索する技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明の運転指針探索方法は、液化天然ガスプラントの運転指針探索方法であって、

前記液化天然ガスプラントは、液化用冷媒を用い、天然ガスを液化して液化天然ガスを得る液化用熱交換器と、前記液化用冷媒を含む、前記液化天然ガスプラント内で用いられる冷媒が気化した後の冷媒ガスを圧縮する圧縮機とを備えることと、

前記圧縮機の圧縮動力を少なくとも含み、前記液化天然ガスプラントを構成する複数の対象機器についての制御変数及び操作変数を含むプロセス変数の実績値を示す運転データと、前記プロセス変数に影響を及ぼす外乱の実績値を示す外乱データと、を含む複数のデータセットを取得する工程と、

前記複数のデータセットに基づき、コンピュータを用いた機械学習により、前記操作変数及び外乱の入力値に応じた、前記操作変数以外のプロセス変数の出力値の対応関係を表すプラントモデルを作成する工程と、

前記プラントモデルに対して前記外乱の入力値と前記操作変数の初期値とを与え、コンピュータを用いた強化学習により、前記液化天然ガスの出口温度が予め設定された制約温度以下となる条件下で、前記液化天然ガスの単位生産量当たりの前記圧縮動力が最小となる前記操作変数の入力値を探索する工程と、を含むことと、を特徴とする。

[0009] 前記運転指針探索方法は以下の特徴を備えてもよい。

(a) 前記操作変数の入力値を探索する工程にて探索された前記操作変数の複数の入力値に基づき、前記操作変数として、前記液化天然ガスプラントの運転に実際に使用する入力値を決定する工程を含むこと。

(b) 前記外乱として、前記液化天然ガスプラントの設置エリアの外気温度、前記液化天然ガスプラントへの天然ガスの供給圧力、天然ガスの組成、天然ガスの供給温度、天然ガスの供給量からなる外乱群から選択された外乱を含むこと。

(c) 前記機械学習は、ディープニューラルネットワーク、サポートベクターリگرेशन、ランダムフォレストリگرेशन、部分最小二乗法少なくとも1つの手法を用いて前記プラントモデルを作成すること。

(d) 前記圧縮機の圧縮動力以外の前記プロセス変数として、前記液化用熱交換器の入口側の天然ガスの温度、前記液化用熱交換器の入口側の液化用冷媒温度、液化用冷媒圧縮機吐出圧からなるプロセス変数群から選択されたプロセス変数を含み、前記操作変数として、前記液化用冷媒のガス流量、前記液化用冷媒の液体流量、前記液化用冷媒の組成、前記圧縮機が回転駆動機により駆動される場合の回転数、または前記圧縮機のインレットガイドベーン開度からなる操作変数群から選択された操作変数を含むこと。前記冷媒が、前記液化用冷媒により液化される前の前記天然ガスの予冷却を行う予冷用冷媒、または前記液化用冷媒の冷却を行う冷媒冷却用冷媒の少なくとも一方を含む場合に、前記プロセス変数群はさらに前記予冷却後の天然ガスの温度、前記冷却後の液化用冷媒の温度の少なくとも一つをプロセス変数として含むこと。

[0010] また、本発明の運転指針探索システムは、液化天然ガスプラントの運転指針探索システムであって、

液化用冷媒を用い、天然ガスを液化して液化天然ガスを得る液化用熱交換器と、前記液化用冷媒を含む、冷媒が気化した後の冷媒ガスを圧縮する圧縮機とを備える前記液化天然ガスプラントから、前記圧縮機の圧縮動力を少な

くとも含み、前記液化天然ガスプラントを構成する複数の対象機器についての制御変数及び操作変数を含むプロセス変数の実績値を示す運転データと、前記プロセス変数に影響を及ぼす外乱の実績値を示す外乱データと、を含む複数のデータセットを取得するデータ取得部と、

前記データ取得部にて取得した複数のデータセットに基づき、コンピュータを用いた機械学習により、前記操作変数及び外乱の入力値に応じた、前記操作変数以外のプロセス変数の出力値の対応関係を表すプラントモデルを作成するプラントモデル作成部と、

前記プラントモデル作成部にて作成したプラントモデルに対して前記外乱の入力値と前記操作変数の初期値とを与え、コンピュータを用いた強化学習により、前記液化天然ガスの出口温度が予め設定された制約温度以下となる条件下で、前記液化天然ガスの単位生産量当たりの前記圧縮動力が最小となる前記操作変数の入力値を探索する運転指針探索部と、を備えることを特徴とする。

発明の効果

[0011] 本技術によれば、液化天然ガスプラントのプラントモデルを機械学習により作成し、さらに強化学習を行って液化天然ガスの単位生産量当たりの冷媒の圧縮動力が最小となる操作変数の値を探索するので、外乱に応じた最適な運転を行うことができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]実施の形態に係る運転指針探索方法が適用される前記LNGプラントの構成例である。

[図2]運転指針探索システムの構成図である。

[図3]前記運転指針探索方法の実施手順を示す説明図である。

[図4]プラントモデルを作成する動作の流れを示すフロー図である。

[図5]外乱とプロセス変数との対応関係の学習結果を示す説明図である。

[図6]前記強化学習の動作の流れを示すフロー図である。

[図7]運転指針を探索する強化学習に係る説明図である。

[図8] L N Gプラントに対して実際に設定される操作変数を決定する動作の流れを示すフロー図である。

[図9] S Pの実績値と予測値の経時変化を示す説明図である。

発明を実施するための形態

[0013] 図1は、本例の運転指針探索方法が適用されるL N Gプラント1の構成例である。

本来のL N Gプラント1は、前処理により不純物が除去されたN G（天然ガス）を予冷熱交換器31にて予冷却し、スクラブカラム32にて気液分離した後、液化用熱交換器である極低温主熱交換器（M C H E : Main Cryogenic Heat Exchanger）33にて液化、過冷却してL N Gを得る。スクラブカラム32にて気液分離された液体は、精留部34にて精留され、精留の際に分離された軽質成分はM C H E 33へと送られてL N Gとなる。

[0014] N Gの液化・過冷却を行う液化用冷媒としては、窒素と、炭化水素であるメタン、エタン、プロパンとを含む冷媒原料群から選択した複数種類の冷媒原料を混合した混合冷媒（M R : Mixed Refrigerant）が用いられる。

N Gの液化・過冷却に使用されたM Rは、気体の状態でM C H E 33から流出し、ガスタービン（G / T）などにより駆動される複数のM R圧縮機36にて順次、圧縮され、各M R圧縮機36の出口側に設けられたM Rクーラー204（A C H E（Air-Cooled Heat Exchanger）2により構成される）にて冷却される。圧縮・冷却後のM Rは、M R冷却器37にてさらに冷却されてからM C H E 33へと再供給される。M Rは、L N Gプラント1内で用いられる冷媒の1つに相当する。

[0015] 本例のL N Gプラント1は、予冷熱交換器31にてN Gの予冷を行う冷媒、及びM R冷却器37にてM Rの冷却を行う冷媒として、プロパンまたはプロピレンの単一成分からなるC 3冷媒を用いている。N Gの予冷やM Rの冷却に使用されたC 3冷媒についても、圧縮・冷却された後、予冷熱交換器31やM R冷却器37へと再供給される。

液体C 3冷媒は、不図示の膨張弁を介して降圧され、断熱膨張により温度

低下した状態でC 3 冷却器 3 1、3 7 に供給されて各被冷却流体（N G や M R）を冷却する。C 3 冷媒は、L N G プラント 1 内で用いられる冷媒の 1 つに相当する。

[0016] C 3 冷媒圧縮機 3 5 の後段には、圧縮の過程で温度上昇した気体 C 3 冷媒を気体の状態で冷却するためのデスーパーヒーター 2 0 1 と、デスーパーヒーター 2 0 1 にて冷却された気体 C 3 冷媒をさらに冷却して凝縮させるコンデンサー 2 0 2 と、コンデンサー 2 0 2 から流出した液体 C 3 冷媒を溜めるレシーバー（受槽） 3 5 3 と、液体 C 3 冷媒をさらに冷却して過冷却状態とするサブクーラー 2 0 3 とが、上流側からこの順に設けられている。サブクーラー 2 0 3 にて過冷却された液体 C 3 冷媒は、既述の膨張弁を介して再び C 3 冷却器 3 1、3 7 に送られる。これらデスーパーヒーター 2 0 1、コンデンサー 2 0 2 及びサブクーラー 2 0 3 についても A C H E 2 により構成される。

[0017] L N G プラント 1 は、上述の各圧縮機（C 3 冷媒圧縮機 3 5、M R 圧縮機 3 6）、M R 冷却器 3 7、予冷熱交換器 3 1、スクラブカラム 3 2、精留部 3 4 の各精留塔、M C H E 3 3、N G の前処理を行う各種前処理設備など、多数の機器により構成されている。これらの機器には、塔槽や熱交換器などの静機器、ポンプなどの動機器などが含まれている。

[0018] そしてこれらの機器の中には、外気温度の変化など、外乱のある条件下で操作変数を調節することにより、制御変数を設定値に近付ける制御が行われる多数の機器（本例の「対象機器」に相当する）が設けられている。また、対象機器の運転状態は、圧力計（P I）、温度計（T I）、流量計（F I）、組成分析計（A I）や各圧縮機 3 5、3 6 の動力を計測する動力計測器（S C）などの各種測定器（不図示）により測定される。

[0019] 各種測定器は、上述の制御対象の機器の操作変数、制御変数の他、制御対象とはなっていない機器（本例の「対象機器」に相当する）における各種の測定値も測定することもできる。以下、各種測定器を用いてデータを取得可能な操作変数、制御変数、及びこれら以外の変数をまとめてプロセス変数と

いう。プロセス変数の実績値を示す運転データは、各種測定機器にて直接計測して得られたデータであってもよいし、計測した結果に基づいて算出したデータであってもよい。

[0020] また、L N Gプラント1には、L N Gプラント1が設置されているエリアの外気温度や風向、風速、N Gの供給圧力、N Gの組成などの外乱の測定を行う各種測定器（不図示）が設けられている。これら外乱の実績値を示す外乱データについても、各種測定器にて直接計測して得られたデータや、計測した結果に基づいて算出したデータが用いられる。

L N Gプラント1に設けられた各種測定器は、時系列に沿って、測定機器ごとに予め設定されたデータ取得間隔（例えば1秒間隔や1分間隔）にて運転データや外乱データ、またはこれらの算出用のデータを取得する。

[0021] 図2は、本例の運転指針探索システム4の構成例である。運転指針探索システム4は、上述の運転データ及び外乱データを用いて、所定の外乱条件下にてL N Gの単位生産量当たりの圧縮機（本例ではC 3冷媒圧縮機35、M R圧縮機36）の動力（圧縮動力）が最小となる操作変数の入力値の探索を行う。以下、L N Gの単位生産量当たりの圧縮機動力を「S P（Specific Power）」ともいう。

[0022] 運転指針探索システム4は、L N Gプラント1から時系列に沿って取得された運転データと外乱データとのデータセットを多数取得するデータ取得部と、これら多数のデータセットに基づき、機械学習によりL N Gプラント1のプラントモデルを作成するプラントモデル作成部41と、このプラントモデルを用い、強化学習により前記S Pが最小となる操作変数の入力値を探索する運転指針探索部42とを備えている。

[0023] 本例の運転指針探索システム4は、例えばL N Gプラント1が設置されているエリアから遠隔の地に設けられたコンピュータにより構成することができる。この場合は、データ取得部は、データ通信によりL N Gプラント1から前記多数のデータセットを取得するデータ通信部として構成される。データ取得部は、所定の期間（例えば1週間や1ヶ月）中にL N Gプラント1に

て取得された全運転データ、外乱データを取得する。これらのデータ中にはプラントモデル作成部41にてプラントモデルの機械学習に用いる運転データ及び外乱データが含まれている。なお、全データの取得に替えて、前記機械学習に用いる運転データ、外乱データを予め選択して、これらのデータのみを取得してもよい。

[0024] 時系列に沿った各時点における運転データと外乱データとの組をデータセットとすると、プラントモデル作成部41は、多数のデータセットを用いて機械学習により、前記操作変数及び外乱の入力値に応じた、プロセス変数（操作変数を除く）の出力値の対応関係を表すプラントモデルを作成する。例えばプラントモデル作成部41は、当該機械学習を実行するためのプログラムを搭載したコンピュータにより構成される。

[0025] プラントモデル作成部41は、公知のディープニューラルネットワーク、サポートベクターリグレッション、ランダムフォレストリグレッション、部分最小二乗法の少なくとも1つの手法を用いて機械学習を実施してもよい。また、これらの手法を2つ以上組み合わせて機械学習を実施してもよい。

[0026] プラントモデル作成部41は、少なくとも圧縮機（C3冷媒圧縮機35、MR圧縮機36）の圧縮動力を含む運転データを用いて前記機械学習を実行する。さらにこの運転データには、MCH E33の入口側のNGの温度、MCH E33の入口側のMR温度、MR圧縮機36の吐出圧、MR圧縮機36の動力などからなるプロセス変数群から選択された少なくとも1つのプロセス変数を用いて機械学習を実施することができる。またNGの予冷またはMRの冷却用のC3冷媒を用いるLNGプラント1においては、前記プロセス変数群には、さらに予冷却後のNGの温度、冷却後のMRの温度の少なくとも一つをプロセス変数として含んでもよい。

[0027] また本例のプラントモデル作成部41は、MR冷媒のガス流量、MR冷媒の液体流量、MR冷媒の組成、圧縮機（C3冷媒圧縮機35、MR圧縮機36）が回転駆動機により駆動される場合の回転数、またはこれら圧縮機のインレットガイドベーン開度などからなる操作変数群から選択された少なくと

も 1 つの操作変数の運転データを用いて機械学習を実施することができる。

機械学習に用いる運転データには、上述のプロセス変数群や操作変数群に列挙した各変数に限定されず、他のプロセス変数の運転データを含んでもよい。

[0028] またプラントモデル作成部 4 1 は、外乱として、L N G プラント 1 の設置エリアの外気温度、L N G プラント 1 への N G の供給圧力、N G の組成、N G の供給温度、N G の供給量などからなる外乱群から選択された外乱についての外乱データを用いて機械学習を行うことができる。

[0029] 運転指針探索部 4 2 は、プラントモデル作成部 4 1 にて作成したプラントモデル用い、強化学習により、既述の S P が最小となる操作変数の入力値を探索する。例えば運転指針探索部 4 2 は、当該強化学習を実行するためのプログラムを搭載したコンピュータにより構成される。

例えば運転指針探索部 4 2 は、公知のプロキシマルポリシーオプティマイゼーションやディープキューネットワークなどの深層強化学習により S P が最小となる操作変数の入力値を探索する場合を例示することができる。なお、運転指針探索部 4 2 は、深層強化学習に限定されず、他の種類の強化学習により前記操作変数の入力値の探索を行うように構成してもよい。

[0030] 特に運転指針探索部 4 2 は、M C H E 3 3 からの L N G の出口温度が予め設定された制約温度以下となる条件下で前記探索を行う点に特徴を有している。この制約を加えることにより、非現実的な操作変数の入力値が探索される可能性を効果的に排除することができる。

[0031] 上述の構成を備える運転指針探索システム 4 を用い、S P が最小となる操作変数の入力値を探索する手法について図 3 ～ 9 を参照しながら説明する。

はじめに、L N G プラント 1 から運転指針探索システム 4 へと運転データ及外乱データのデータセットを多数セット取得する（図 3 の処理 P 1）。

[0032] 次いで、これらのデータセットに基づき、機械学習によりプラントモデルを作成する（同処理 P 2）。図 4 のフローに基づき当該処理の内容を詳しく説明する。

はじめに、取得したデータセットから、異常データを含むデータセットや、一部の運転データ、外乱データが欠損したデータセットなどを除く前処理を行う（ステップS201）

[0033] しかる後、プラントモデルの作成に用いる変数（プロセス変数、外乱）と機械学習のモデルタイプ（既述のディープニューラルネットワーク、サポートベクターリグレッションなどやその組み合わせ）を選択する（ステップS202）。変数には、少なくとも圧縮動力を含み、さらに既述のプロセス変数群から選択したプロセス変数やその他のプロセス変数、外乱群から選択した外乱やその他の外乱を選択することができる。

[0034] 次いで、プラントモデル作成部41にて機械学習によりプラントモデルの作成を行う（ステップS203）。図5（a）～（c）は、作成されたプラントモデルの出力の一部を示している。例えば図5（a）～（c）は外乱の1つである外気温度と、プロセス変数であるMCH E33入口のNGの温度、MCH E33入口のMR温度、MR圧縮機36吐出圧力との各対応関係を示している。プラントモデルにおいては、選択された外乱や操作変数と、プロセス変数（操作変数を除く）との対応関係が多数組取得される。

[0035] しかる後、作成されたプラントモデルがLNGプラント1の実運転から乖離しているか否かの確認を行う（図4のステップS204）。例えば外乱や操作変数の変化方向に対して実際の因果関係や物理法則などに反したプロセス変数の対応関係が作成されていないか、LNGプラント1の実際の運転を熟知した評価者が評価を行う。

[0036] そして、乖離が大きい場合には（ステップS204；NO）、変数やモデルタイプの選択を変更し（ステップS202）、再度、機械学習を行う（ステップS203）。また、乖離が小さい場合には（ステップS204；YES）、運転指針探索部42による機械学習を終了する（エンド）。

[0037] 次いで、運転指針探索部42を用いて作成したプラントモデルを用い、公知の深層強化学習により、SPが最小となる操作変数の入力値を探索する（図3の処理P3）。

図 7 に示すように、運転指針探索部 4 2 は既述のプラントモデルを含む環境 4 2 1 と、強化学習エージェント 4 2 2 とを用いて強化学習を実施する。環境 4 2 1 は、外乱及び操作変数の入力値を受け取り、前記プラントモデルを用いて指定されたプロセス変数（操作変数を除く）の値を出力する。

[0038] 強化学習エージェント 4 2 2 は、環境 4 2 1 から出力されたプロセス変数の値（状態）、及びこの値を用いて報酬計算を行った結果を取得し、予め設定された学習方針に従って、前記報酬を向上させる（プラントモデルより得られる S P の値を低下させる）ことが可能な新たな操作変数の組を作成する。学習方針としては、ディープキューネットワークなどのバリューベースや、プロキシマルポリシーオプティマイゼーションなどのポリシーベースを例示できる。

[0039] 図 6 を用い、図 3 に記載の処理 P 3 の具体的な内容を説明すると、初めに環境 4 2 1 から出力されたプロセス変数の値を評価するための報酬計算用の関数を作成する（ステップ S 3 0 1）。また、強化学習エージェント 4 2 2 の学習方針を決定する（ステップ S 3 0 2）。

[0040] 次いで、プラントモデル作成部 4 1 にて作成したプラントモデルを環境 4 2 1 として用い、強化学習エージェント 4 2 2 の強化学習を実施する（ステップ S 3 0 3）。このとき、強化学習の開始時には、外乱の入力値と、操作変数の適当な初期値とを環境 4 2 1 に与え、図 7 に示す強化学習のループを繰り返す。そして、1 回の学習ループにおける報酬の向上幅が無視小となったら、強化学習を終える（エンド）。

[0041] 図 9（a）は、L N G プラント 1 における S P の実績値の経時変化を示している。また、図 9（b）は、図 9（a）の実績値が得られた期間中の運転データ、外乱データを用いてプラントモデルを作成し、当該期間中の外乱の条件下で強化学習を行って求めた操作変数の入力値により推定される S P の予測値を示している。S P の実績値、予測値は、共通の値を 1 0 0 % として規格化した値を示してある。

[0042] 図 9（a）によると、昼夜の温度変化に応じて S P が大きく変化している

ことが確認される。即ち、温度が上昇する昼の期間中はS Pが上昇している。

一方、強化学習の結果得られる最適なS Pの値は、非常に短い間隔で大きく変動し、巨視的にみると図9（b）に示すように所定のバンド幅を持って変化することが確認された。このとき、強化学習の結果得られた操作変数の入力値をそのままL N Gプラント1における操作変数の設定値とすることは、非常に短い間隔で設定値を変化させることとなり現実的ではない。

[0043] そこで、L N Gプラント1にて実際に使用する入力値を求める場合には、図8に示すように、強化学習の結果を用い、ある時刻の操作変数と外乱の入力値に対する、その時刻以降の操作変数の入力値を計算する（ステップS 401）。この結果、各時点においてS Pを最小化することが可能な操作変数の入力値が出力される。次いで、図9（a）の過去のS Pの実績値とS Pの予測値との残渣の大小などを判断指標として、安定して運転可能な、実運転で使用する操作変数の入力値（即ち設定値）を定める。

[0044] この結果、図9（b）中に横線で示すように、プラントモデル上、S Pの値が最適に近くなる操作変数の設定値を決定することができる。この設定値を運転指針として利用し、所定の外乱条件下におけるL N Gプラント1の新たな操作変数として用い、S Pの値を低減する運転を行うことができる。

[0045] 本例の運転指針探索システム4によれば、L N Gプラント1のプラントモデルを機械学習により作成し、さらに強化学習を行って液化天然ガスの単位生産量当たりの圧縮動力が最小となる操作変数の値を探索するので、外乱に応じた最適な運転を行うことができる。

特に、プラントモデル作成のために運転データや外乱データとしてプロセス変数や外乱の実績値を用いているので、プラントシミュレーションのようにシミュレーション結果と実運転とが乖離することによって最適値の妥当性が判断できないことや、シミュレーションが収束する条件を個別に探索する必要がない。この結果、多数の外乱やプロセス変数を用い、精度の高い予測を高速で行うことができる。

[0046] ここで、上述の実施形態では、NGの予冷及びMR（液化用冷媒）の冷却を行うためにC3冷媒を用いるLNGプラント1について本例の運転指針探索方法を適用した例を説明した。但し、本例の運転指針の探索方法を適用可能なLNGプラント1は、図1に示す例に限定されない。

例えば予冷用冷媒や冷媒冷却用冷媒（本例ではC3冷媒）を用いず、液化用冷媒である混合冷媒（MR）のみを用いた1段階圧力式MR方式のLNGプラント1であってもよい。

[0047] また、予冷用冷媒を用いる場合においても、単独の液化用冷媒（冷媒原料：窒素やメタン）を用いたLNGプラント1でもよい。反対に、予冷用冷媒についてもプロパンやプロピレンなどの単独の冷媒原料を用いる場合に限定されず、メタン、エタン、プロパン、ブタンなどの混合冷媒を用いてもよい。また、窒素やメタンを冷媒原料とする過冷却用冷媒を用いてLNGを過冷却する過冷却器を備えたLNGプラント1であってもよい。

この他、プロパン冷媒、エチレン冷媒、メタン冷媒を用いて、NGを順次、冷却することによりLNGを得るカスケード方式のLNGプラント1に対しても、本技術を適用することができる。

[0048] また、運転指針探索システム4はLNGプラント1の設置エリアの遠隔地に設ける場合に限定されない。操業管理システムの一部として、LNGプラント1の制御室に設けてもよい。

符号の説明

[0049] 1 LNGプラント
4 運転指針探索システム
4 1 プラントモデル作成部
4 2 運転指針探索部
4 2 1 環境
4 2 2 強化学習エージェント

請求の範囲

[請求項1]

液化天然ガスプラントの運転指針探索方法であって、

前記液化天然ガスプラントは、液化用冷媒を用い、天然ガスを液化して液化天然ガスを得る液化用熱交換器と、前記液化用冷媒を含む、前記液化天然ガスプラント内で用いられる冷媒が気化した後の冷媒ガスを圧縮する圧縮機とを備えることと、

前記圧縮機の圧縮動力を少なくとも含み、前記液化天然ガスプラントを構成する複数の対象機器についての制御変数及び操作変数を含むプロセス変数の実績値を示す運転データと、前記プロセス変数に影響を及ぼす外乱の実績値を示す外乱データと、を含む複数のデータセットを取得する工程と、

前記複数のデータセットに基づき、コンピュータを用いた機械学習により、前記操作変数及び外乱の入力値に応じた、前記操作変数以外のプロセス変数の出力値の対応関係を表すプラントモデルを作成する工程と、

前記プラントモデルに対して前記外乱の入力値と前記操作変数の初期値とを与え、コンピュータを用いた強化学習により、前記液化天然ガスの出口温度が予め設定された制約温度以下となる条件下で、前記液化天然ガスの単位生産量当たりの前記圧縮動力が最小となる前記操作変数の入力値を探索する工程と、を含むことと、を特徴とする運転指針探索方法。

[請求項2]

前記操作変数の入力値を探索する工程にて探索された前記操作変数の複数の入力値に基づき、前記操作変数として、前記液化天然ガスプラントの運転に実際に使用する入力値を決定する工程を含むことを特徴とする請求項1に記載の運転指針探索方法。

[請求項3]

前記外乱として、前記液化天然ガスプラントの設置エリアの外気温度、前記液化天然ガスプラントへの天然ガスの供給圧力、天然ガスの組成、天然ガスの供給温度、天然ガスの供給量からなる外乱群から選

択された外乱を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の運転指針探索方法。

[請求項4] 前記機械学習は、ディープニューラルネットワーク、サポートベクターリグレッション、ランダムフォレストリグレッション、部分最小二乗法の少なくとも 1 つの手法を用いて前記プラントモデルを作成することを特徴とする請求項 1 に記載の運転指針探索方法。

[請求項5] 前記圧縮機の圧縮動力以外の前記プロセス変数として、前記液化用熱交換器の入口側の天然ガスの温度、前記液化用熱交換器の入口側の液化用冷媒温度、液化用冷媒圧縮機吐出圧からなるプロセス変数群から選択されたプロセス変数を含み、

前記操作変数として、前記液化用冷媒のガス流量、前記液化用冷媒の液体流量、前記液化用冷媒の組成、前記圧縮機が回転駆動機により駆動される場合の回転数、または前記圧縮機のインレットガイドベーン開度からなる操作変数群から選択された操作変数を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の運転指針探索方法。

[請求項6] 前記冷媒が、前記液化用冷媒により液化される前の前記天然ガスの予冷却を行う予冷用冷媒、または前記液化用冷媒の冷却を行う冷媒冷却用冷媒の少なくとも一方を含む場合に、前記プロセス変数群はさらに前記予冷却後の天然ガスの温度、前記冷却後の液化用冷媒の温度の少なくとも一つをプロセス変数として含むことを特徴とする請求項 5 に記載の運転指針探索方法。

[請求項7] 液化天然ガスプラントの運転指針探索システムであって、
液化用冷媒を用い、天然ガスを液化して液化天然ガスを得る液化用熱交換器と、前記液化用冷媒を含む、冷媒が気化した後の冷媒ガスを圧縮する圧縮機とを備える前記液化天然ガスプラントから、前記圧縮機の圧縮動力を少なくとも含み、前記液化天然ガスプラントを構成する複数の対象機器についての制御変数及び操作変数を含むプロセス変数の実績値を示す運転データと、前記プロセス変数に影響を及ぼす外

乱の実績値を示す外乱データと、を含む複数のデータセットを取得するデータ取得部と、

前記データ取得部にて取得した複数のデータセットに基づき、コンピュータを用いた機械学習により、前記操作変数及び外乱の入力値に応じた、前記操作変数以外のプロセス変数の出力値の対応関係を表すプラントモデルを作成するプラントモデル作成部と、

前記プラントモデル作成部にて作成したプラントモデルに対して前記外乱の入力値と前記操作変数の初期値とを与え、コンピュータを用いた強化学習により、前記液化天然ガスの出口温度が予め設定された制約温度以下となる条件下で、前記液化天然ガスの単位生産量当たりの前記圧縮動力が最小となる前記操作変数の入力値を探索する運転指針探索部と、を備えることを特徴とする運転指針探索システム。

[請求項8]

前記プラントモデル作成部は、前記外乱として、前記液化天然ガスプラントの設置エリアの外気温度、前記液化天然ガスプラントへの天然ガスの供給圧力、天然ガスの組成、天然ガスの供給温度、天然ガスの供給量からなる外乱群から選択された外乱についての外乱データを用いて機械学習を行うことを特徴とする請求項7に記載の運転指針探索システム。

[請求項9]

前記プラントモデル作成部は、ディープニューラルネットワーク、サポートベクターリグレッション、ランダムフォレストリグレッション、部分最小二乗法の少なくとも一つの手法を用いて前記プラントモデルを作成することを特徴とする請求項7に記載の運転指針探索システム。

[請求項10]

前記プラントモデル作成部は、

前記圧縮機の圧縮動力以外の前記プロセス変数として、前記液化用熱交換器の入口側の天然ガスの温度、前記液化用熱交換器の入口側の液化用冷媒温度、液化用冷媒圧縮機吐出圧からなるプロセス変数群から選択されたプロセス変数の運転データと、

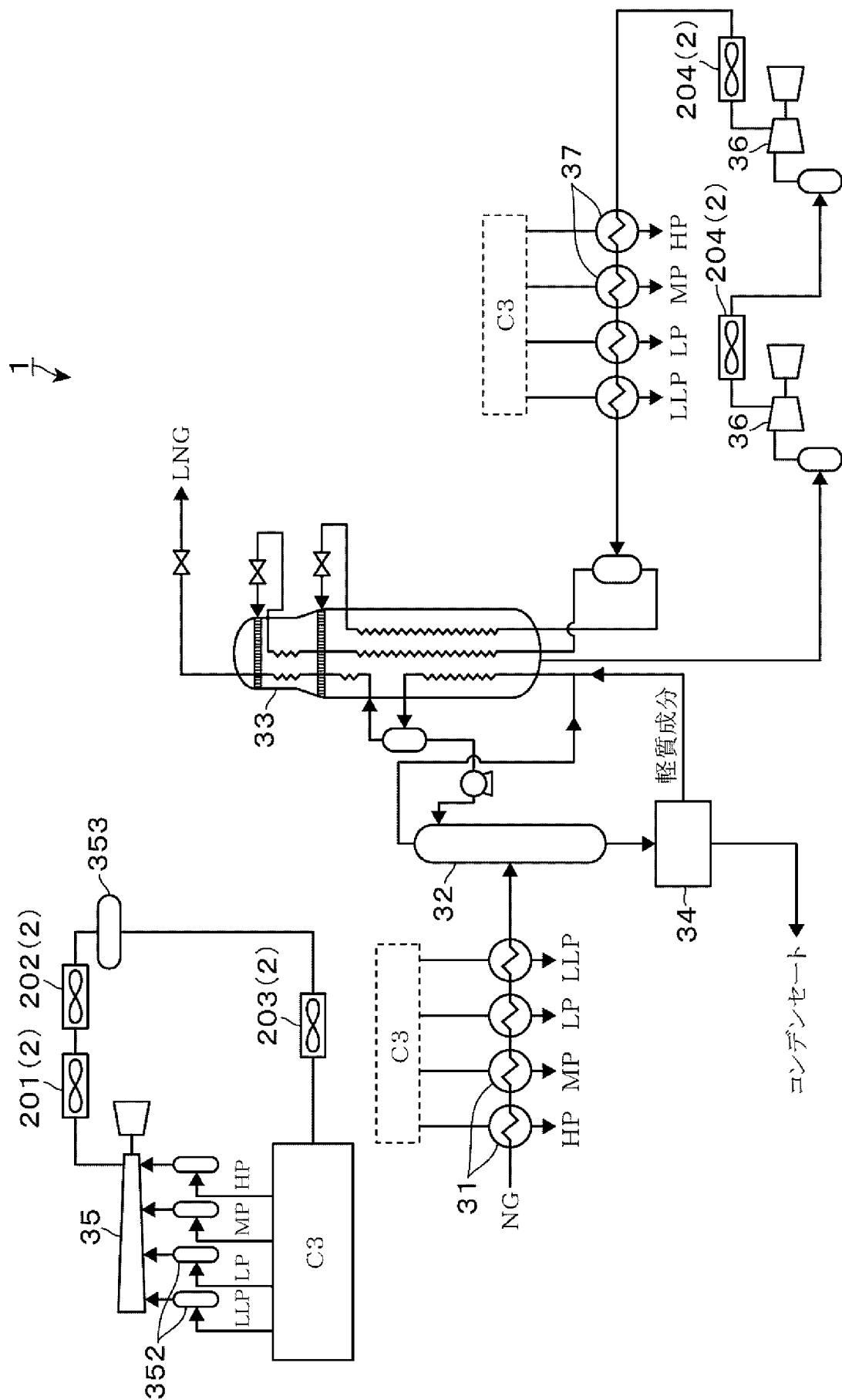
前記操作変数として、前記液化用冷媒のガス流量、前記液化用冷媒の液体流量、前記液化用冷媒の組成、前記圧縮機が回転駆動機により駆動される場合の回転数、または前記圧縮機のインレットガイドベーン開度からなる操作変数群から選択された操作変数を含むプロセス変数の運転データとを用いて機械学習を行うことを特徴とする請求項 7 に記載の運転指針探索システム。

[請求項11]

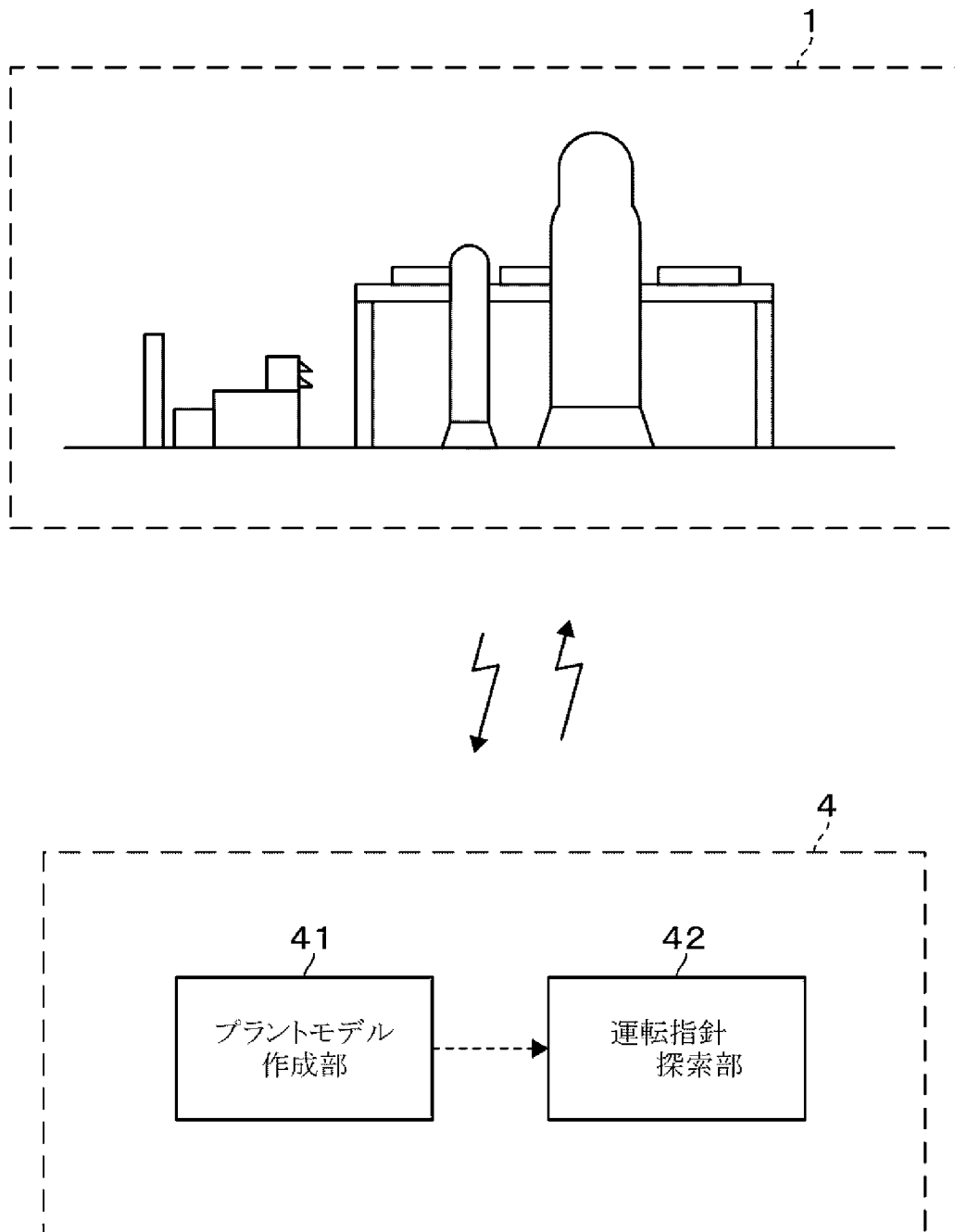
前記冷媒が、前記液化用冷媒により液化される前の前記天然ガスの予冷却を行う予冷用冷媒、または前記液化用冷媒の冷却を行う冷媒冷却用冷媒の少なくとも一方を含む場合に、

前記プラントモデル作成部は、さらに前記予冷却後の天然ガスの温度、前記冷却後の液化用冷媒の温度の少なくとも一つをプロセス変数として含む前記プロセス変数群から選択されたプロセス変数の運転データを用いて機械学習を行うことを特徴とする請求項 10 に記載の運転指針探索システム。

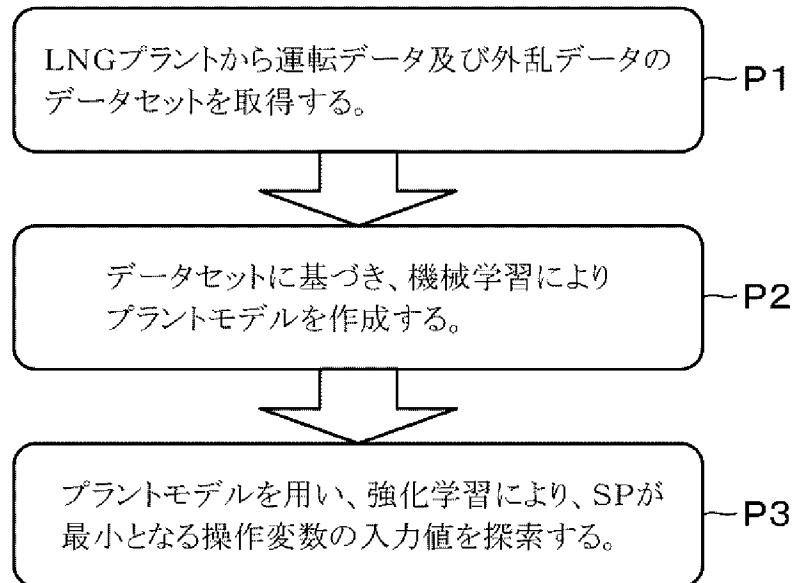
[図1]



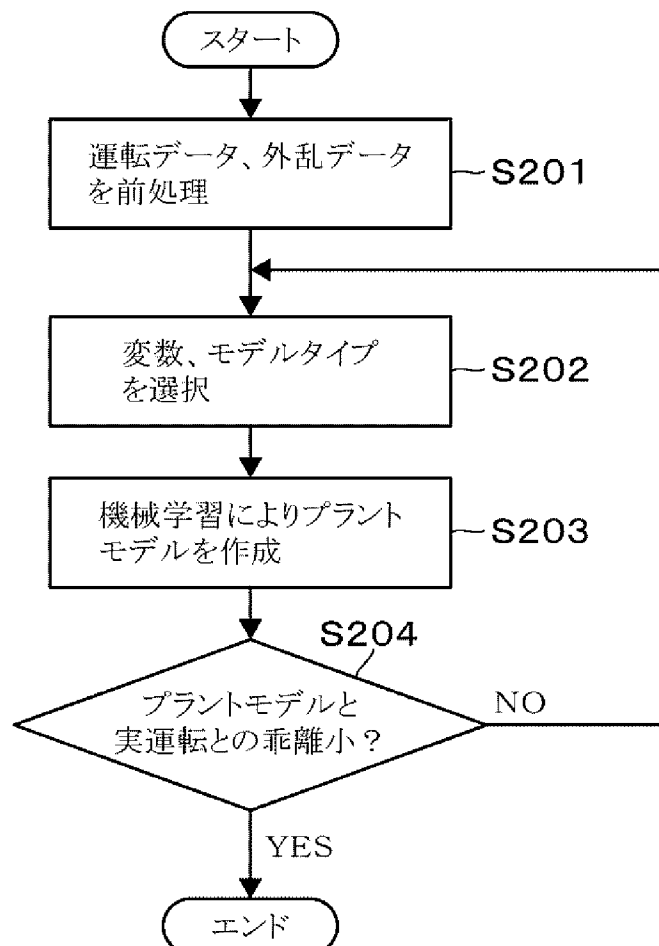
[図2]



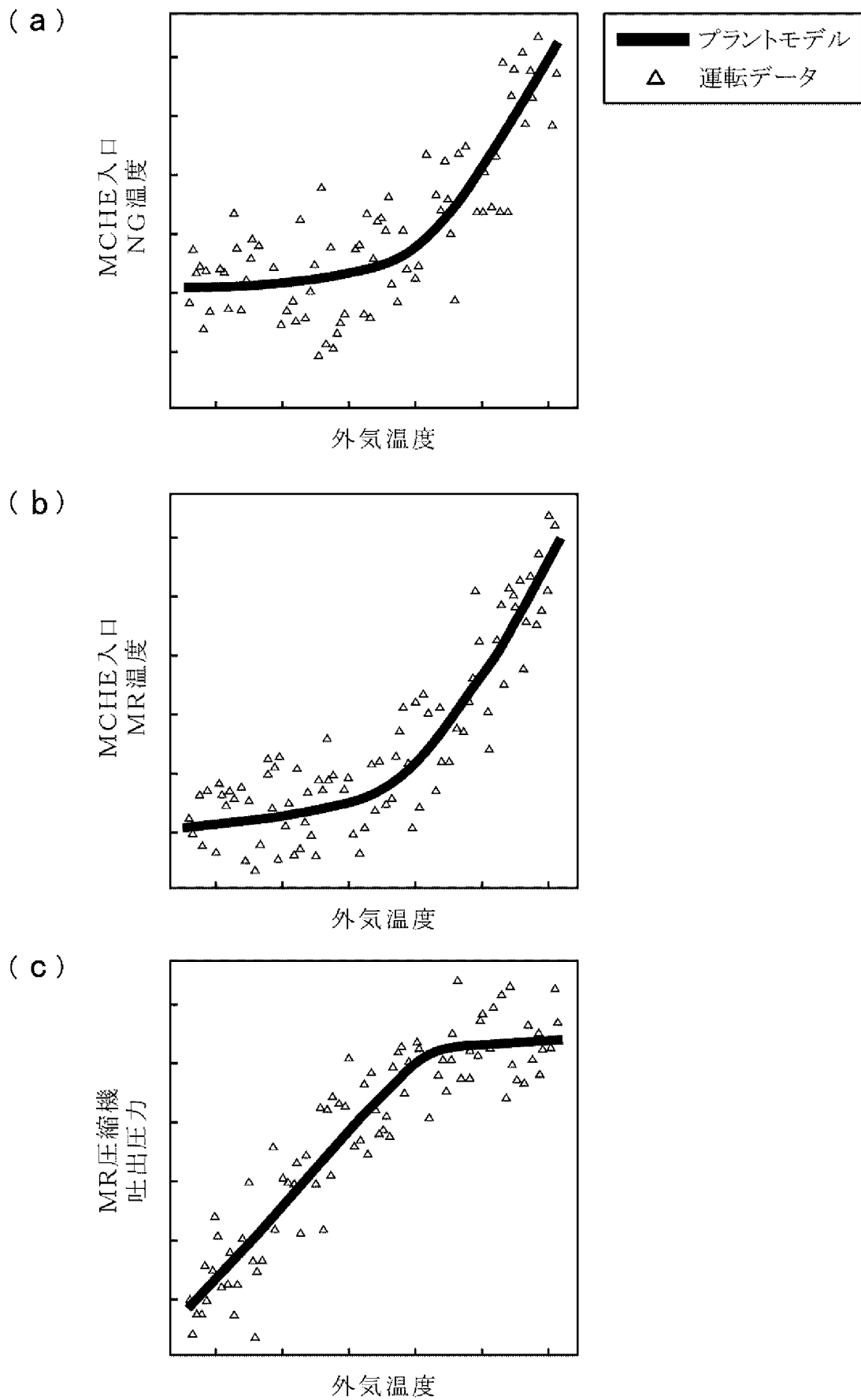
[図3]



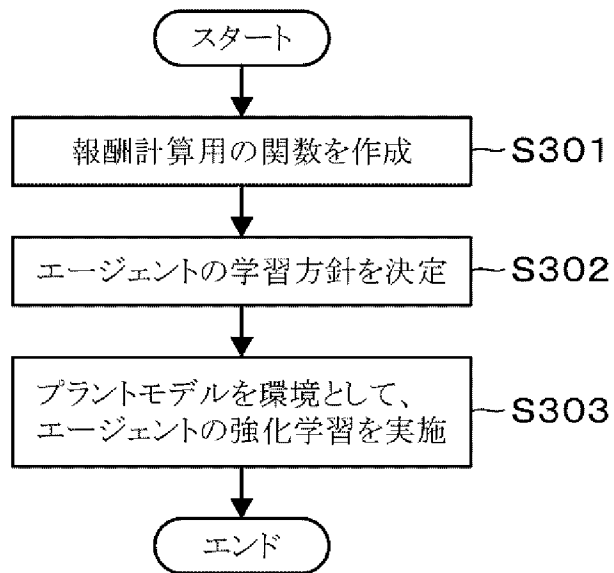
[図4]



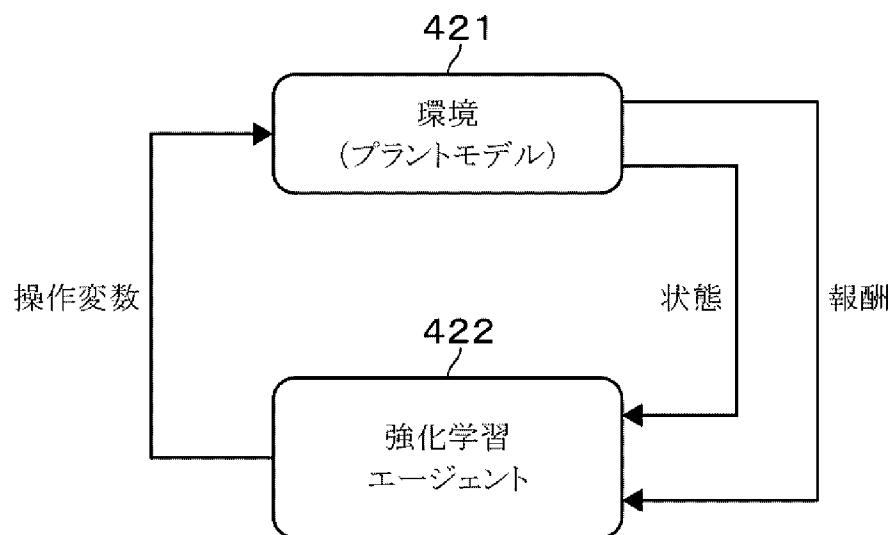
[図5]



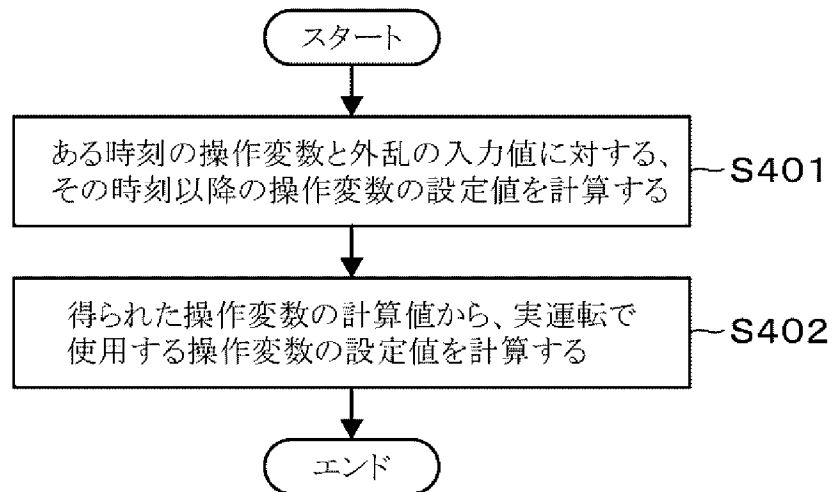
[図6]



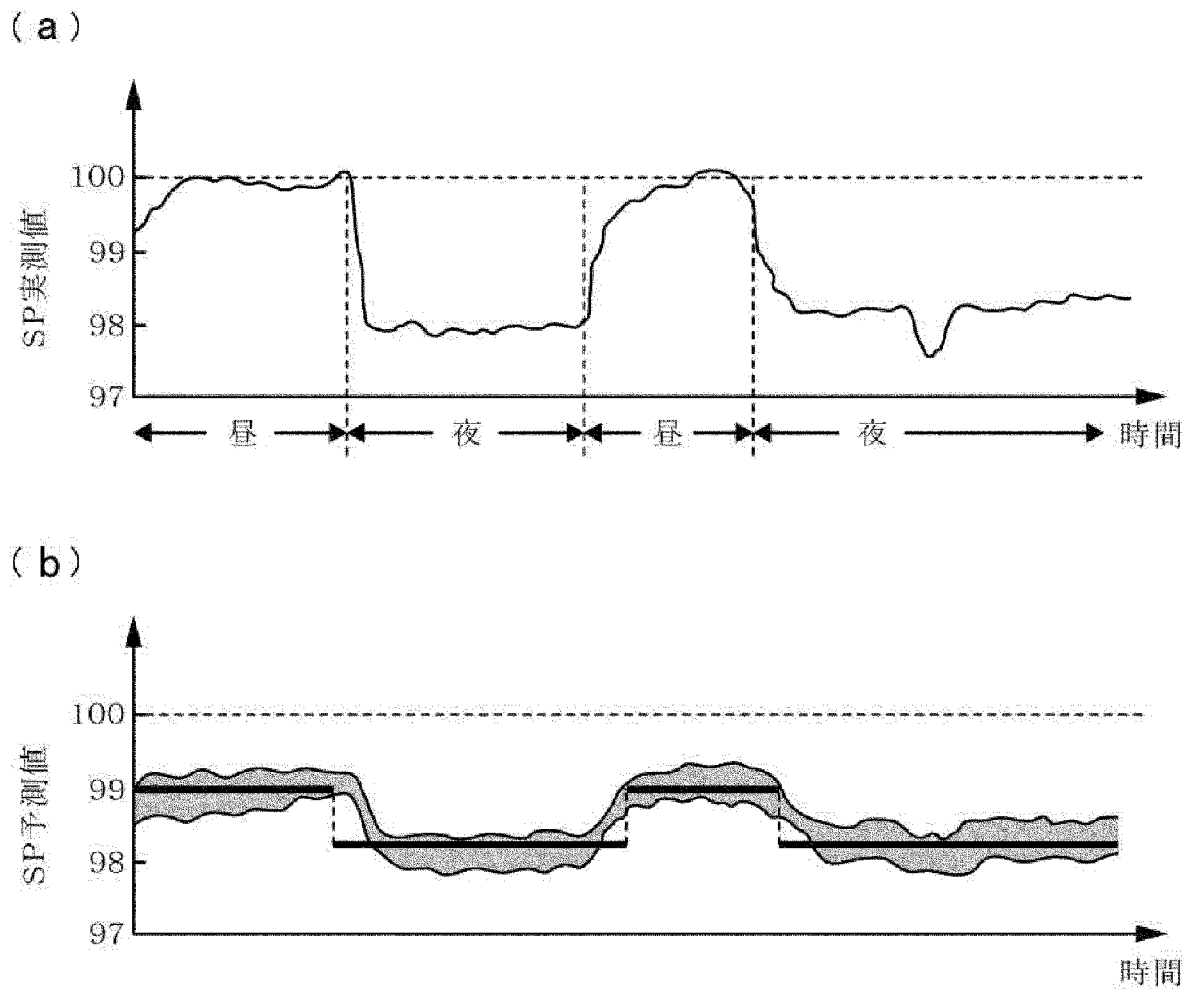
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/018954

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. F25J1/00 (2006.01) i

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)

Int.Cl. F25J, G06Q50/04-50/06

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 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

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.
Y	JP 6286812 B2 (JGC CORPORATION) 07 March 2018, claims, paragraphs [0037]-[0056], fig. 1, 2 & WO 2017/154181 A1	1-11
Y	JP 2017-142595 A (FANUC LTD.) 17 August 2017, paragraphs [0027]-[0058], fig. 2 & US 2017/0227950 A1, paragraphs [0038]-[0073], fig. 2 & DE 102017000955 A1 & CN 107045330 A	1-11



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

"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

23.07.2019

Date of mailing of the international search report

30.07.2019

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office

3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,

Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/018954

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2013-540973 A (THE UNIVERSITY OF MANCHESTER) 07 November 2013 & US 2013/0008204 A1 & GB 2491796 A & WO 2011/117655 A2 & EP 2550496 A2 & CN 103415752 A & KR 10-2016-0049040 A	1-11
A	WO 2007/123924 A2 (SAUDI ARABIAN OIL COMPANY) 01 November 2007 & US 2007/0245770 A1	1-11

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. F25J1/00(2006.01)i

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））

Int.Cl. F25J, G06Q50/04-50/06

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	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019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
Y	JP 6286812 B2（日揮株式会社）2018.03.07, 特許請求の範囲, [0037]-[0056], 図 1-2 & WO 2017/154181 A1	1-11
Y	JP 2017-142595 A（ファナック株式会社）2017.08.17, [0027]-[0058], 図 2 & US 2017/0227950 A1, [0038]-[0073], 図 2 & DE 102017000955 A1 & CN 107045330 A	1-11

☒ 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

「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矛盾するものではなく、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

23.07.2019

国際調査報告の発送日

30.07.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

関根 崇

4Q

3838

電話番号 03-3581-1101 内線 3468

C (続き) . 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 2013-540973 A (ザ・ユニバーシティ・オブ・マンチェスター) 2013. 11. 07, & US 2013/0008204 A1 & GB 2491796 A & WO 2011/117655 A2 & EP 2550496 A2 & CN 103415752 A & KR 10-2016-0049040 A	1-11
A	WO 2007/123924 A2 (SAUDI ARABIAN OIL COMPANY) 2007. 11. 01, & US 2007/0245770 A1	1-11