(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
2025年7月3日(03.07.2025)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2025/142170 A1

(51) 国際特許分類:
*G05B 13/02* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2024/040223

(22) 国際出願日： 2024年11月12日(12.11.2024)

(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 2023-221828 2023年12月27日(27.12.2023) JP

(71) 出願人: 株式会社ＳＣＲＥＥＮホールディングス (**SCREEN HOLDINGS CO., LTD.**) [JP/JP]; 〒6028585 京都府京都市上京区堀川通寺之内上る四丁目天神北町１番地の１ (JP).

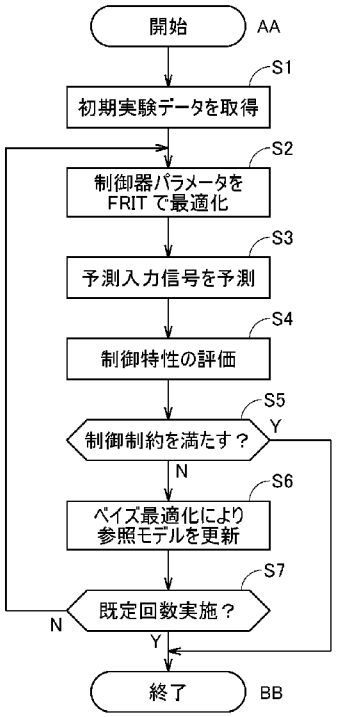
(72) 発明者: 仲村 武瑠 (**NAKAMURA Takeru**); 〒6028585 京都府京都市上京区堀川通寺之内上る四丁目天神北町１番地の１ 株式会社ＳＣＲＥＥＮホールディングス内 (JP). 斎藤 奎介 (**SAITO Keisuke**); 〒6028585 京都府京都市上京区堀川通寺之内上る四丁目天神北町１番地の１ 株式会社ＳＣＲＥＥＮホールディングス内 (JP).

(74) 代理人: 西田 隆美 (**NISHIDA Takami**); 〒5300047 大阪府大阪市北区西天満３丁目１４番１６号西天満パークビル３号館４階 (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,

(54) **Title:** CONTROLLER PARAMETER CALCULATION METHOD, COMPUTER PROGRAM, AND RECORDING MEDIUM

(54) 発明の名称： 制御器パラメータ算出方法、コンピュータプログラムおよび記録媒体




S1 Acquire initial test data
S2 Optimize controller parameters by FRIT
S3 Predict predicted input signal
S4 Evaluate control characteristics
S5 Are control constraints satisfied?
S6 Update reference model by Bayesian optimization
S7 Implemented specified number of times?
AA Start
BB End

(57) **Abstract:** Provided is a technology that enables generalized optimization of controller parameters according to FRIT while taking control constraints into account. This controller parameter calculation method comprises: an optimization step (S2) for optimizing controller parameters using an FRIT-based evaluation function that includes time-series data of an input signal and an output signal and a predetermined reference model; a prediction step (S3) for predicting a predicted input signal, which is a predicted value of the input signal, by data-driven prediction using the controller parameters

WO 2025/142170 A1

［続葉有］

CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, 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：

— 国際調査報告（条約第21条(3)）

calculated in the optimization step (S2); an evaluation step (S4) for evaluating whether the predicted input signal deviates from control constraints; an update step (S6) for, if the predicted input signal deviates from the control constraints, updating the reference model by global optimization using a cost function that includes a value related to the FRIT-based evaluation function and a violation amount representing the extent of deviation of the predicted input signal from the control constraints; and a step for repeating the optimization step (S2) to the reference model update step (S6).

**(57)** 要約：制御制約を考慮しつつＦＲＩＴに従って制御器パラメータを汎用的に最適化することができる技術を提供する。制御器パラメータ算出方法は、入力信号と出力信号の時系列データと、予め決定された参照モデルとを含む、ＦＲＩＴに基づく評価関数とを用いて、制御器パラメータを最適化する最適化工程（Ｓ２）と、最適化工程（Ｓ２）によって算出された制御器パラメータを用いたデータ駆動予測により、入力信号の予測値である予測入力信号を予測する予測工程（Ｓ３）と、予測入力信号が制御制約を逸脱しているか評価する評価工程（Ｓ４）と、予測入力信号が前記制御制約を逸脱していた場合に、ＦＲＩＴに基づく評価関数に関する値と、予測入力信号の制御制約から逸脱した違反量とを含むコスト関数を用いた大域的最適化により、参照モデルを更新する更新工程（Ｓ６）と、最適化工程（Ｓ２）から参照モデル更新工程（Ｓ６）を繰り返す工程とを含む。

# 明　細　書

## 発明の名称 ：

# 制御器パラメータ算出方法、コンピュータプログラムおよび記録媒体

## 技術分野

[0001]　本明細書で開示される主題は、制御器パラメータ算出方法、コンピュータプログラムおよび記録媒体に関する。

## 背景技術

[0002]　例えば、熱または流体を用いるプロセスシステムは、非線形性によりシステムの第一原理モデル化が困難であること、また、制御対象の挙動をもとにしたパラメータ調整は直観的に理解しやすいことから、フィードバック制御としてＰＩＤ制御が広く用いられている。しかしながら、固定のＰＩＤパラメータを用いた制御器では、常に良好な制御結果を得ることが困難であるため、所望の制御性能を満たすことができない場合が多い。そこで、ＰＩＤ制御器を用いた場合には、設計時、立ち上げ時等に調整することはもとより、使用条件の変化等に合わせて再調整が行われている。

[0003]　近年、制御対象のモデル化なしで所望の制御性能を満たすような手法がいくつか提案されている。その中でも有力な手法の１つとして、データ駆動制御が知られている。データ駆動制御は、制御対象のモデルを用いずデータを直接的に用いることによって目標を達成するような制御器を設計する手法である。

[0004]　データ駆動制御には、幾つかのバリエーションが知られており、例えば、非特許文献１は、そのバリエーションの１つであるＦＲＩＴ（Fictitious Reference Iterative Tuning）を提案している。ＦＲＩＴは、一回の閉ループ系の制御実験で得られた実験データをもとに、制御器パラメータの調整が可能である。このため、ＦＲＩＴは、繰り返し実験が必要な他の手法と比べ、時間や費用といったコスト面で優位である。

[0005]　しかしながら、ＦＲＩＴ等のデータ駆動制御により得られた制御パラメー

タを用いて制御したとしても、所望の制御性能が得られない場合がある。特に、ＦＲＩＴで用いられる参照モデルの応答を実現するような制御パラメータが存在しない場合、制御系が不安定となりやすいことが知られている。

[0006] このような課題に対し、例えば、特許文献１は、相補感度関数から得られた出力と設計者が設定した参照モデルの出力の二乗誤差が最小になる制御器パラメータを粒子群最適化等の最適化手法により求めることを提案している。しかしながら、ＦＲＩＴで得られた制御器を使って制御した際に、制御器が制御対象に対してどのような入力信号を出力するか不明である。このため、入力信号が制御制約を満たすこと、あるいは、入力信号が制御器の出力可能な範囲に収まっていることは、必ずしも保証されない。

[0007] このような特許文献１の課題に対して、非特許文献２は、ＦＲＩＴと入力信号を予測可能な手法とを組み合わせる手法を提案している。非特許文献２では、あらかじめ定義された参照モデル（目標伝達関数）を用いたＦＲＩＴにより、制御器パラメータが最適化される。そして、最適化された制御器パラメータを用いたデータ駆動予測により、入力信号の予測値である予測入力信号が算出される。算出された予測入力信号が、制御制約を違反していた場合、参照モデル（目標伝達関数）の時定数τを所定量だけ大きくし、その更新された参照モデルを用いたＦＲＩＴにより、制御器パラメータが更新される。

## 先行技術文献

### 特許文献

[0008] 特許文献1：特開２０２１－５１４６２号公報

### 非特許文献

[0009] 非特許文献1：相馬将太郎，金子修、藤井隆雄、一回の実験データを用いた制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ－Fictitious Reference Iterative Tuningの提案、シス テム制御情報学会論文誌、Vol. 17、No. 12、pp. 528-536、2004

非特許文献2：池澤 美紅、金子 修、カスケード制御系に対する入力制限を考

慮した目標値応答更新を伴うFRIT、第 64 回自動制御連合講演会 1A2-2、pp. 216-220、2021

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0010] しかしながら、非特許文献２のように、参照モデルの時定数τを所定量だけ大きくする手法の場合、初期参照モデルの時定数τが、初期実験データの時定数よりも小さい（すなわち、応答が早い）ことが前提となる。したがって、初期実験の結果によっては、制御器パラメータを最適化することが困難である。すなわち、非特許文献２の手法は、初期実験の結果に依存するという点で、汎用性が低いという課題があった。

[0011] 本発明の目的は、制御制約を考慮しつつＦＲＩＴに従って制御器パラメータを汎用的に最適化することができる技術を提供することにある。

### 課題を解決するための手段

[0012] 上記課題を解決するため、第１態様は、制御器と、前記制御器からの出力を入力とする制御対象とを含むフィードバック制御システムにおいて、前記制御器の制御器パラメータを算出する制御器パラメータ算出方法であって、ａ）実機において、前記制御器から前記制御対象に入力された入力信号、および、前記制御対象から出力された出力信号の時系列データを取得する工程と、ｂ）前記制御システムの参照モデルを設定する工程と、ｃ）前記時系列データと、前記参照モデルとを含む、ＦＲＩＴ（Fictitious Reference Iterative Tuning）に基づいた評価関数を用いて、前記制御器パラメータを最適化する工程と、ｄ）前記工程ｂ）によって算出された制御器パラメータを用いたデータ駆動予測により、前記入力信号の予測値である予測入力信号を予測する工程と、ｅ）前記予測入力信号が制御制約を逸脱しているか評価する工程と、ｆ）前記工程ｅ）により、前記予測入力信号が前記制御制約を逸脱していた場合に、前記ＦＲＩＴに基づいた前記評価関数に関する値と、前記予測入力信号の前記制御制約から逸脱した違反量とを含むコスト関数を用いた大域的最適化により、前記参照モデルを更新する工程と、ｇ）前記時系列

データと、前記工程ｆ）によって更新された参照モデルを含む前記評価関数を用いて、前記制御器パラメータを最適化する工程と、を含む。

[0013] 第２態様は、第１態様の制御器パラメータ算出方法であって、ｈ）前記工程ｄ）から前記工程ｇ）を規定回数繰り返す工程、をさらに含む。

[0014] 第３態様は、第１態様または第２態様の制御器パラメータ算出方法であって、前記制御器は、ＰＩＤ制御器である。

[0015] 第４態様は、第３態様の制御器パラメータ算出方法であって、前記制御器の伝達関数は、式

[数1]

$$C_{PID}(s,\rho)=\rho_p\left(1+\frac{1}{\rho_i s}+\frac{\rho_d s}{\frac{\rho_d}{\gamma}s+1}\right)$$

で表される。

[0016] 第５態様は、第３態様または第４態様の制御器パラメータ算出方法であって、前記参照モデルは、少なくとも時定数、次数および、むだ時間をパラメータとして含む。

[0017] 第６態様は、第５態様の制御器パラメータ算出方法であって、前記参照モデルは、式

[数2]

$$T(s)=\frac{e^{-Ls}}{(\tau s+1)^n}$$

で表される。

[0018] 第７態様は、第１態様から第６態様のいずれかの制御器パラメータ算出方法であって、前記ＦＲＩＴに基づく前記評価関数は、式

[数3]

$$J_{\mathrm{FRIT}}(\rho)=\frac{1}{N}\Sigma_{t=1}^{N}\left(y_0(t)-\tilde{y}(t,\rho)\right)^2$$

[数4]

$$\tilde{y}(t,\rho)=T(s)\left(C(\rho)^{-1}u_0(t)+y_0(t)\right)$$

[数2]

$$T(s)=\frac{e^{-ls}}{(\tau s+1)^n}$$

で表される。

[0019] 第８態様は、第１態様から第７態様のいずれかの制御器パラメータ算出方法であって、前記大域的最適化は、ベイズ最適化である。

[0020] 第９態様は、第８態様の制御器パラメータ算出方法であって、前記コスト関数は、前記ＦＲＩＴに基づく前記評価関数に関する値と、前記予測入力信号が前記制御制約を逸脱した違反量に関する値との和である。

[0021] 第１０態様は、第９態様の制御器パラメータ算出方法であって、前記コスト関数は、前記ＦＲＩＴに基づく前記評価関数に関する値が、前記違反量よりも大きくなるように設計された式である。

[0022] 第１１態様は、コンピュータが読取可能なコンピュータプログラムであって、前記コンピュータに、第１態様から第１０態様のいずれかの制御器パラメータ算出方法を実行させる、コンピュータプログラム。

[0023] 第１２態様は、コンピュータが読取可能な記録媒体であって、第１１態様のコンピュータプログラムが記録されている。

## 発明の効果

[0024] 第１態様から第１２態様によれば、制御制約を逸脱した場合に大域的探索

によって参照モデルが更新される。このため、初期の実験データに依存せずに参照モデルを適切に更新できるため、制御器パラメータを汎用的に最適化することができる。

## 図面の簡単な説明

[0025] [図1]実施形態に係る情報処理装置のハードウェア構成を示すブロック図である。

[図2]フィードバック制御システムを示すブロック図である。

[図3]情報処理装置が制御器パラメータρを算出する処理を示すフロー図である。

[図4]初期実験データ取得工程Ｓ１によって得られた流量波形を示す図である。

[図5]制御器パラメータρを最適化した後に得られた流量波形を示す図である。

## 発明を実施するための形態

[0026] 以下、添付の図面を参照しながら、本発明の実施形態について説明する。なお、この実施形態に記載されている構成要素はあくまでも例示であり、本発明の範囲をそれらのみに限定する趣旨のものではない。図面においては、理解容易のため、必要に応じて各部の寸法や数が誇張又は簡略化して図示されている場合がある。

[0027] ＜１． 実施形態＞

図１は、実施形態に係る情報処理装置１のハードウェア構成を示すブロック図である。情報処理装置１は、専用のコンピュータプログラムＰがインストールされた汎用コンピュータによって構成されている。情報処理装置１は、プロセッサ１１と、メモリ１２と、ストレージ１３と、操作デバイス１５と、ディスプレイ１６と、入出力インターフェース１７とを備える。

[0028] プロセッサ１１は、例えば、ＣＰＵを含む。メモリ１２は、例えば、半導体メモリであるＲＡＭを含む。ストレージデバイス１３は、補助記憶装置であって、例えば、ハードディスクドライブ（ＨＤＤ）またはソリッドステー

トドライブ（ＳＳＤ）を含む。ストレージデバイス１３は、コンピュータプログラムＰおよび各種データを記憶する。

[0029] プロセッサ１１は、ストレージデバイス１３に保存されたコンピュータプログラムにしたがって処理を実行する。メモリ１２は、プロセッサ１１の作業領域として使用される。操作デバイス１５は、ユーザの操作入力を、プロセッサ１１に入力する。操作デバイス１５は、例えば、キーボードまたはポインティングデバイスを含む。ディスプレイ１６は、プロセッサ１１の制御に基づいて、各種情報を表示する。ディスプレイ１６は、例えば、液晶ディスプレイである。

[0030] 入出力インターフェース１７は、外部から情報処理装置１の内部にデータを入力するため、および、情報処理装置１から外部にデータを出力するためのインターフェースである。入出力インターフェース１７は、例えば、ＵＳＢインターフェースなどである。

[0031] コンピュータプログラムＰは、ＵＳＢメモリなどの半導体メモリ、または、光学式あるいは磁気式のメディアなど、非一過性の記録媒体に保存されていてもよい。そして、当該記録媒体のコンピュータプログラムＰが、入出力インターフェース１７を介して情報処理装置１に提供されてもよい。また、コンピュータプログラムＰは、インターネットなどのネットワークを介して情報処理装置１に提供されてもよい。

[0032] 図２は、フィードバック制御システム１００を示すブロック図である。フィードバック制御システム１００は、減算器２０と、制御器３０と、制御対象４０とを含む。減算器２０は、目標値ｒと、出力信号ｙとの偏差Ｅ（＝ｒ－ｙ）を制御器３０に入力する。制御器３０は、制御器パラメータρを有する伝達関数Ｃ（ρ）に従って、偏差Ｅに対する制御対象４０への入力信号ｕ（＝Ｃ（ρ）・Ｅ）を出力する。制御対象４０からの出力信号ｙは、図示しない計測器によって計測されて、減算器２０に入力される。

[0033] 制御器３０は、フィードバック制御器であって、例えば、ＰＩＤ制御器である。制御器３０の伝達関数Ｃ（ρ）は、例えば、次式で表される。

[0034] [数5]

$$C_{PID}(s,\rho)=\rho_p\left(1+\frac{1}{\rho_i s}+\frac{\rho_d s}{\frac{\rho_d}{\gamma}s+1}\right) \quad (1)$$

上記式（１）において、γは定数（例えば１０）である。

[0035] 情報処理装置１は、フィードバック制御システム１００における制御器３０の制御器パラメータρを算出する処理を実行する。図３は、情報処理装置１が制御器パラメータρを算出する処理を示すフロー図である。

[0036] なお、以下の説明では、制御対象４０が流体の流量を調節可能な電動ニードルバルブであり、制御器３０が流量をＰＩＤ制御する場合について説明する。電動ニードルバルブは、バルブの開度がステッピングモータによって制御可能となっており、制御器３０により、出力信号ｙである流量と、目標値ｒである目標流量との偏差が０となるように開度が調整される。

[0037] 図３に示されるように、情報処理装置１は、まず、初期実験データ取得工程Ｓ１を行う。初期実験データ取得工程Ｓ１では、実機において、上記式（１）で表される適当な制御器３０（$C_{PID}(\rho_0)$）を用いて、目標値ｒ（目標流量時系列データ）のもと、流量制御が実施される。これにより、入力信号ｕと出力信号ｙ（流量）との組み合わせである一組の時系列データが取得される。以下、この初期実験によって得られた入力信号ｕの時系列データを$u_0(t)$、出力信号ｙの時系列データを$y_0(t)$とする。なお、$u_0(t)$，$y_0(t)$は、ＵＳＢメモリ等の記録媒体やネットワークなど介して、情報処理装置１に入力されてもよい。そして、情報処理装置１のプロセッサ１１は、入力された$u_0(t)$，$y_0(t)$を、メモリ１２またはストレージデバイス１３に記憶させてもよい。

[0038] 続いて、情報処理装置１は、初期実験データ取得工程Ｓ１によって得られた$u_0(t)$，$y_0(t)$を用いて、制御器３０の制御器パラメータρの最適化を行う（最適化工程Ｓ２）。最適化工程Ｓ２では、ＦＲＩＴのアルゴリズ

ムに基づいて定義された評価関数$J_{FRIT}(\rho)$が用いられる。評価関数$J_{FRIT}(\rho)$は、例えば、次式で表される。

[0039] [数6]

$$J_{FRIT}(\rho)=\frac{1}{N}\Sigma_{t=1}^{N}\left(y_0(t)-\tilde{y}(t,\rho)\right)^2 \quad (2)$$

[数7]

$$\tilde{y}(t,\rho)=T(s)\left(C(\rho)^{-1}u_0(t)+y_0(t)\right) \quad (3)$$

[数8]

$$T(s)=\frac{e^{-Ls}}{(\tau s+1)^n} \quad (4)$$

[0040] 式（4）に示されるＴ（ｓ）は、図１に示される閉ループ系全体の参照モデルであって、目標値ｒから出力信号ｙまでの伝達関数である。参照モデルＴ（ｓ）は、時定数τおよび次数ｎ、およびむだ時間Ｌを含む。

[0041] 式（２）に示されるように、評価関数$J_{FRIT}(\rho)$は、制御パラメータρの関数である。そこで、情報処理装置１は、最適化工程Ｓ２において、非線形計画最適化方法により、評価関数$J_{FRIT}(\rho)$を最小にする制御器パラメータ$\rho^*$を算出する。

[0042] 次に、情報処理装置１は、最適化工程Ｓ２によって算出された制御器パラメータ$\rho^*$が適用された伝達関数Ｃ（$\rho^*$）を用いたデータ駆動予測により、入力信号ｕの予測値である予測入力信号$u_p$を予測する（予測工程Ｓ３）。データ駆動予測は、制御対象の入出力データをもとに 制御器パラメータを調整する手法である。データ駆動予測としては、具体的には、非特許文献２に記載された手法を適用することができる。

[0043] データ駆動予測では、評価関数$J_{FRIT}$（ρ）を最小にする参照モデルT（ｓ）のパラメータθ*が取得される。そして、取得されたパラメータθ*を用いて、予測入力信号$u_p$を算出される。非特許文献２によれば、予測入力信号$u_p$は、次式により求められる。

[0044] [数9]

$$u_p = C\left(\rho^*\right)\left(1 - T\left(\theta^*\right)\right)r \tag{5}$$

[0045] 続いて、情報処理装置１は、制御対象４０の制御制約を満たしているか否かを評価する（制御特性評価工程Ｓ４）。具体的に、電動ニードルバルブの制御制約としては、例えば、バルブ開度の上限（$u_{max}$）と下限（$u_{min}$）およびステッピングモータの回転速度制限（$\Delta u_{lim}$）が挙げられる。バルブ開度の上限$u_{max}$および下限$u_{min}$については、予測入力信号$u_p$の最大値ｍａｘ（$u_p$）および最小値ｍｉｎ（$u_p$）が上限$u_{max}$と下限$u_{min}$との間に収まっているかどうかにより評価される。また、ステッピングモータの回転速度制限については、予測入力信号$u_p$の１ステップ偏差$\Delta u_p$（＝ｕ（ｔ＋１）－ｕ（ｔ））の最大値ｍａｘ（$\Delta u_p$）が、回転速度制限$\Delta u_{lim}$以下に収まっているかどうかにより評価される。

[0046] 情報処理装置１は、制御特性評価工程Ｓ４の結果に基づいて、予測入力信号$u_p$が制御制約を満たすか否かを判定する（判定工程Ｓ５）。予測入力信号$u_p$が制御制約を満たしている場合、情報処理装置１は、処理を終了する。一方、予測入力信号$U_p$が制御制約を満たしていない場合、情報処理装置１は、次の参照モデル更新工程Ｓ６を実行する。

[0047] 参照モデル更新工程Ｓ６において、情報処理装置１は、大域的最適化により参照モデルＴ（ｓ）を更新する。大域的最適化には、例えば、ベイズ最適化を用いることができる。参照モデルＴ（ｓ）の最適化対象は、時定数τおよび次数ｎ、およびむだ時間Ｌである。ベイズ最適化には、例えば、次式で表されるコスト関数Ｊを用いることができる。

[0048] [数10]

$$J = J_u + J_{\mathrm{FRIT}} \tag{6}$$

[数11]

$$J_{\mathrm{FRIT}} = \begin{cases} \alpha J_{\mathrm{FRIT}}(\rho^*), & \alpha J_{\mathrm{FRIT}} \le \beta \\ \beta, & \alpha J_{\mathrm{FRIT}} > \beta \end{cases} \tag{7}$$

[数12]

$$J_u = \begin{cases} \left|\max(u_p) - u_{\max}\right| + \beta, & u_p > u_{\max} \\ \left|\min(u_p) - u_{\min}\right| + \beta, & u_p < u_{\min} \\ \left|\min(\Delta u_p) - \Delta u_{\lim}\right| + \beta, & \Delta u_p > \Delta u_{\lim} \\ 0, & u_{\min} \le u_{pred} \le u_{\max}, \Delta u_p > \Delta u_{\lim} \end{cases} \tag{8}$$

[0049] 式（６）～（８）において、$J_{FRIT}$は、上記式（２）の$J_{FRIT}(\rho)$に、最適化された制御器パラメータ$\rho^*$を代入した$J_{FRIT}(\rho^*)$に定数$\alpha$を掛けた値である。$J_u$は、予測入力信号$u_p$の制御制約からの違反量を示す値である。予測入力信号$u_p$が制御制約を満たす場合、$J_u$はゼロとなるように設計されている。

[0050] $\alpha$および$\beta$は、ユーザにより適宜決定される定数である。$\alpha$は、$J_{FRIT}$と$J_u$のスケールを揃えるために、$J_{FRIT}$に掛けられる係数である。$\beta$は、予測入力信号$u_p$が制御制約を満たさない場合に、$J_u$の値が$J_{FRIT}$よりも大きくなるように設計されている。本例では、$J_{FRIT}$は、最大値が$\beta$となるように設計されている。そして、式（8）に示されるように、違反量$J_u$は、予測入力信号$u_p$が制御制約を満たさない場合には、必ず$J_{FRIT}$よりも大きくなるように、$\beta$が加算されるように設計されている。

[0051] 情報処理装置１は、参照モデル更新工程Ｓ６の実行回数をメモリ１２またはストレージデバイス１３に記憶させる。そして、情報処理装置１は、参照モデル更新工程Ｓ６を実行した後、参照モデル更新工程Ｓ６の実行回数が予め設定された既定回数を超えるか否かを判定する（判定工程Ｓ７）。判定工程Ｓ７において、実行回数が既定回数を超えた場合、情報処理装置１は、処理を終了する。

[0052] 判定工程Ｓ７において、実行回数が既定回数を超えていない場合、情報処理装置１は、最適化工程Ｓ２を再び実行する。すなわち、情報処理装置１は、予測入力信号$u_p$が制御制約を満たさない限り、参照モデルを既定回数更新する。これにより、情報処理装置１は、制御制約を考慮した制御器パラメータ$\rho^*$を算出することが可能である。なお、情報処理装置１は、最もコスト値が低い参照モデルを用いて算出された制御器パラメータ$\rho^*$を、制御器３０の最適化された制御器パラメータとしてメモリ１２またはストレージデバイス１３に記憶させてもよい。これにより、望ましい制御性能を備えた制御器パラメータを取得することができる。

[0053] 図４は、初期実験データ取得工程Ｓ１によって得られた流量波形Ｗ２１を示す図である。図５は、制御器パラメータ$\rho$を最適化した後に得られた流量波形Ｗ２２を示す図である。図４および図５中、横軸は時間（秒）を示しており、縦軸は流量（ｍｌ／ｍｉｎ）を示している。また、図４および図５中、波形Ｗ１１，Ｗ１２は参照モデルの出力を示しており、破線は目標流量を示している。

[0054] 図４および図５から明らかなように、図３に示されるフローによって、所望の制御性能を備えた制御器パラメータ$\rho$を算出できる。特に、０秒から２秒の流量が立ち上がる区間において、所望の制御性能を得ることができる。

[0055] 複数の評価指標がある際にベイズ最適化を適用した場合、段階に分けてパラメータ空間を探索することで、最適化が安定することが経験的に知られている。本実施形態では、$J_{FRIT}$と違反量$J_u$の２つの指標を指標としてベイズ最適化を適用している。また、コスト関数Ｊの場合、制御制約を満たさない

制御器パラメータはコスト値が高いため、探索の優先度が下がりやすくなる。そのため、ベイズ最適化の初期段階（若いエポック数）において制御制約を満たすパラメータを見つけだし、後段階において制御制約を満たすパラメータの中から所望の制御性能を満たすような探索が可能となる。したがって、安定した制御器パラメータ最適化を実施することができる。

[0056] ＜２．　変形例＞

以上、実施形態について説明してきたが、本発明は上記のようなものに限定されるものではなく、様々な変形が可能である。

[0057] 例えば、上記実施形態の参照モデル更新工程Ｓ６では、大域的最適化として、ベイズ最適化を用いているが、その他のアルゴリズムが採用されてもよい。大域的最適化として、例えばメタヒューリスティックな手法である、遺伝的アルゴリズムまたは焼きなまし法等が用いられてもよい。

[0058] また、フィードバック制御システム１００の制御対象４０は、電動ニードルバルブに限定されるものではない。

[0059] この発明は詳細に説明されたが、上記の説明は、すべての局面において、例示であって、この発明がそれに限定されるものではない。例示されていない無数の変形例が、この発明の範囲から外れることなく想定され得るものと解される。上記各実施形態及び各変形例で説明した各構成は、相互に矛盾しない限り適宜組み合わせたり、省略したりすることができる。

## 符号の説明

[0060] １０　：情報処理装置

３０　：制御器

４０　：制御対象

１００　：フィードバック制御システム

# 請求の範囲

[請求項1] 制御器と、前記制御器からの出力を入力とする制御対象とを含むフィードバック制御システムにおいて、前記制御器の制御器パラメータを算出する制御器パラメータ算出方法であって、

ａ） 実機において、前記制御器から前記制御対象に入力された入力信号、および、前記制御対象から出力された出力信号の時系列データを取得する工程と、

ｂ） 前記制御システムの参照モデルを設定する工程と、

ｃ） 前記時系列データと、前記参照モデルとを含む、ＦＲＩＴ（Fictitious Reference Iterative Tuning）に基づいた評価関数を用いて、前記制御器パラメータを最適化する工程と、

ｄ） 前記工程ｂ）によって算出された制御器パラメータを用いたデータ駆動予測により、前記入力信号の予測値である予測入力信号を予測する工程と、

ｅ） 前記予測入力信号が制御制約を逸脱しているか評価する工程と、

ｆ） 前記工程ｅ）により、前記予測入力信号が前記制御制約を逸脱していた場合に、前記ＦＲＩＴに基づいた前記評価関数に関する値と、前記予測入力信号の前記制御制約から逸脱した違反量とを含むコスト関数を用いた大域的最適化により、前記参照モデルを更新する工程と、

ｇ） 前記時系列データと、前記工程ｆ）によって更新された参照モデルを含む前記評価関数を用いて、前記制御器パラメータを最適化する工程と、

を含む、制御器パラメータ算出方法。

[請求項2] 請求項１に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

ｈ） 前記工程ｄ）から前記工程ｇ）を規定回数繰り返す工程、

をさらに含む、制御器パラメータ算出方法。

[請求項3] 請求項１または請求項２に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記制御器は、ＰＩＤ制御器である、制御器パラメータ算出方法。

[請求項4] 請求項３に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記制御器の伝達関数は、式

[数1]

$$C_{PID}(s,\rho)=\rho_p\left(1+\frac{1}{\rho_i s}+\frac{\rho_d s}{\frac{\rho_d}{\gamma}s+1}\right)$$

で表される、制御器パラメータ算出方法。

[請求項5] 請求項３または請求項４に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記参照モデルは、少なくとも時定数、次数および、むだ時間をパラメータとして含む、制御器パラメータ算出方法。

[請求項6] 請求項５に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記参照モデルは、式

[数2]

$$T(s)=\frac{e^{-Ls}}{(\tau s+1)^n}$$

で表される、制御器パラメータ算出方法。

[請求項7] 請求項１から請求項６のいずれか１項に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記ＦＲＩＴに基づく前記評価関数は、式

[数3]

$$J_{FRIT}(\rho)=\frac{1}{N}\Sigma_{t=1}^{N}\left(y_0(t)-\tilde{y}(t,\rho)\right)^2$$

[数4]

$$\tilde{y}(t,\rho)=T(s)\left(C(\rho)^{-1}u_0(t)+y_0(t)\right)$$

[数2]

$$T(s)=\frac{e^{-Ls}}{(\tau s+1)^n}$$

で表される、制御器パラメータ算出方法。

[請求項8] 請求項１から請求項７のいずれか１項に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記大域的最適化は、ベイズ最適化である、制御器パラメータ算出方法。

[請求項9] 請求項８に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

前記コスト関数は、前記ＦＲＩＴに基づく前記評価関数に関する値と、前記予測入力信号が前記制御制約を逸脱した違反量に関する値との和である、制御器パラメータ算出方法。

[請求項10] 請求項９に記載の制御器パラメータ算出方法であって、

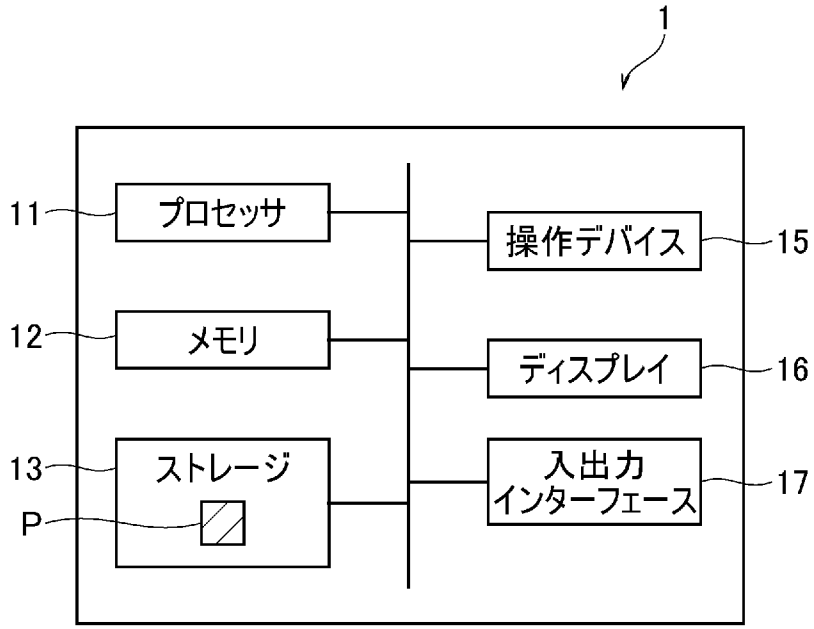
前記コスト関数は、前記ＦＲＩＴに基づく前記評価関数に関する値が、前記違反量よりも大きくなるように設計された式である、制御器パラメータ算出方法。

[請求項11] コンピュータが読取可能なコンピュータプログラムであって、前記コンピュータに、請求項１から請求項１０のいずれか１項に記載の制御器パラメータ算出方法を実行させる、コンピュータプログラム。

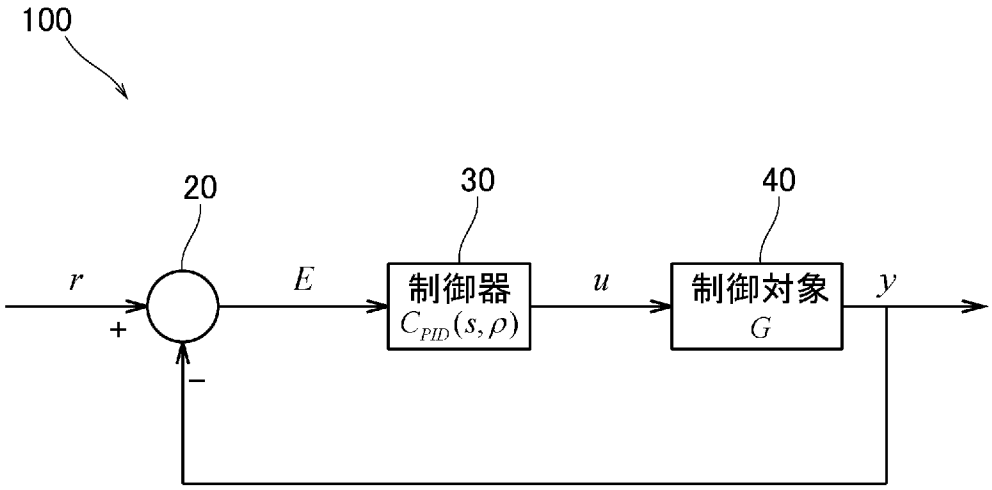
[請求項12] コンピュータが読取可能な記録媒体であって、

請求項１１に記載のコンピュータプログラムが記録されている、記録媒体。

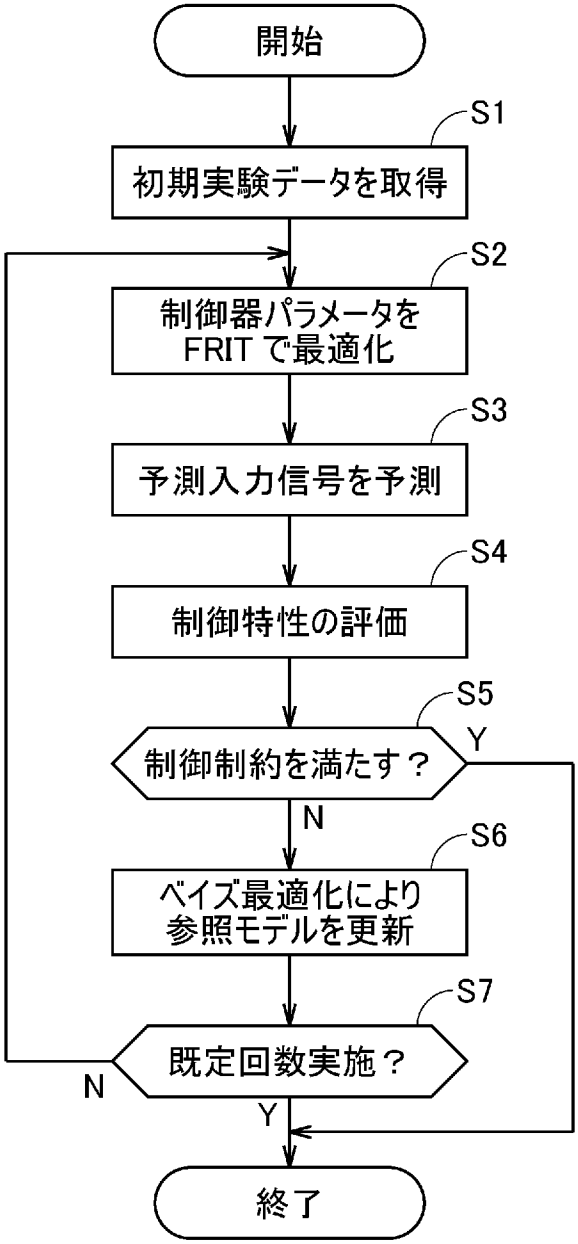
[図1]


1
11
プロセッサ
12
メモリ
13
ストレージ
P
操作デバイス
15
ディスプレイ
16
入出力
インターフェース
17

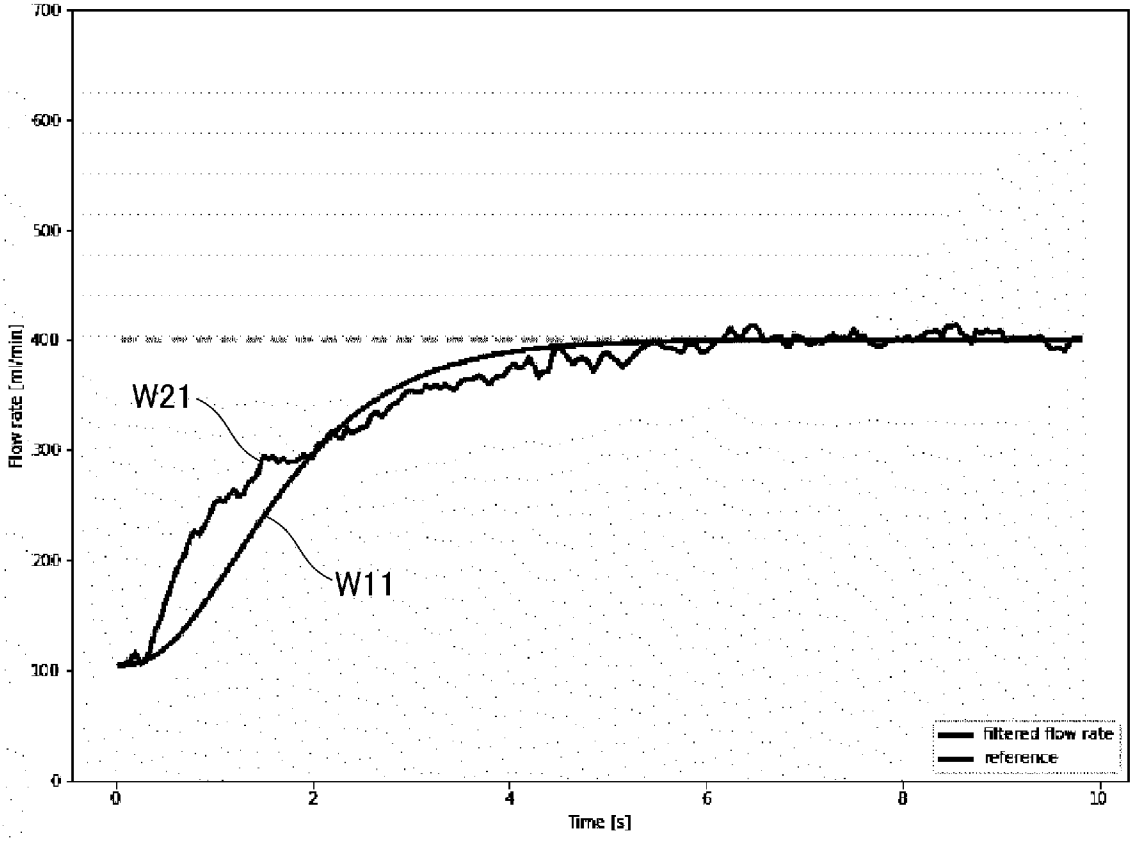
[図2]



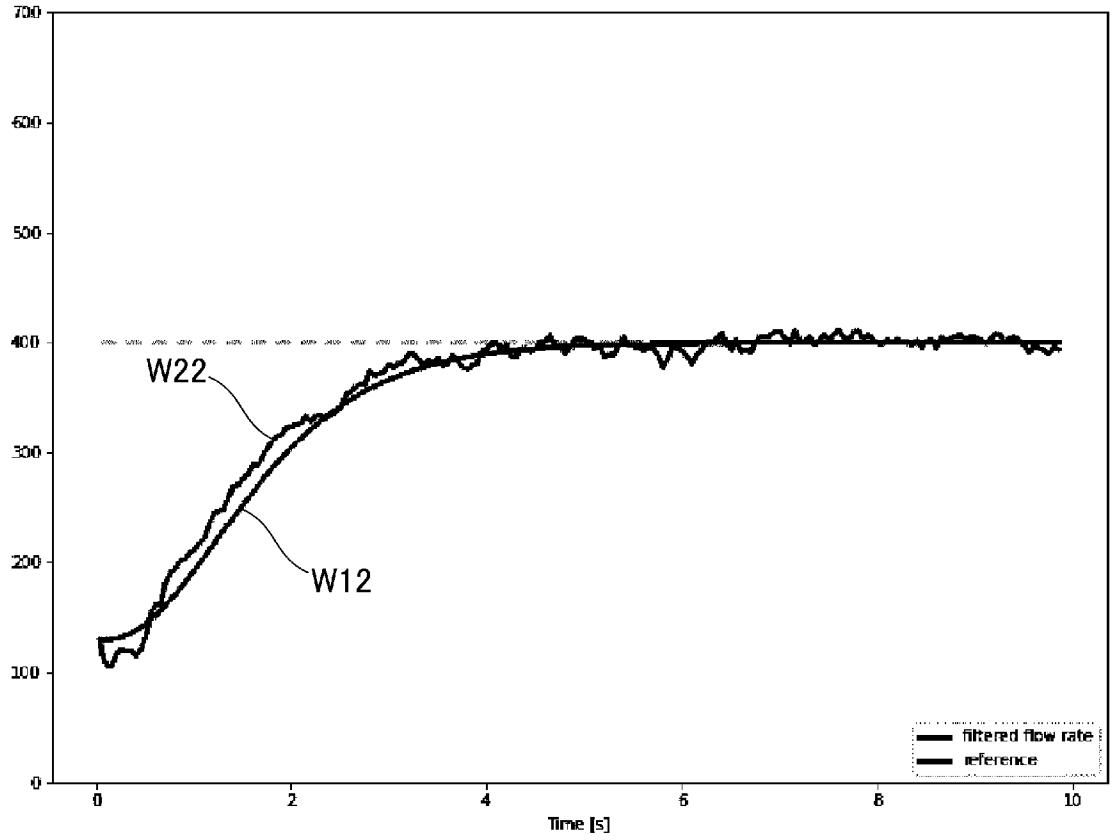
[図3]


開始
S1
初期実験データを取得
S2
制御器パラメータを
FRIT で最適化
S3
予測入力信号を予測
S4
制御特性の評価
S5
制御制約を満たす？
Y
N
S6
ベイズ最適化により
参照モデルを更新
S7
既定回数実施？
N
Y
終了

[図4]


700
600
500
400
300
200
100
0
Flow rate [ml/min]
W21
W11
0
2
4
6
8
10
Time [s]
filtered flow rate
reference

[図5]


700
600
500
400
300
200
100
0
0
2
4
6
8
10
Time [s]
W22
W12
filtered flow rate
reference

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
**PCT/JP2024/040223**

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

***G05B 13/02***(2006.01)i
FI: G05B13/02 A

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)

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. |
|---|---|---|
| Y | JP 2023-32320 A (ISUZU MOTORS LIMITED) 09 March 2023 (2023-03-09) paragraphs [0011]-[0064], [0077]-[0080] | 1-12 |
| Y | JP 2002-373002 A (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 26 December 2002 (2002-12-26) paragraphs [0056]-[0058] | 1-12 |
| Y | JP 2021-51462 A (ISUZU MOTORS LIMITED) 01 April 2021 (2021-04-01) paragraph [0048] | 5-6 |

☐ 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 | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| **05 December 2024** | **17 December 2024** |

| Name and mailing address of the ISA/JP | Authorized officer |
|---|---|
| **Japan Patent Office (ISA/JP)**<br>**3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915**<br>**Japan** | Telephone No. |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**
**Information on patent family members**

International application No.
**PCT/JP2024/040223**

| Patent document cited in search report | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) | Publication date (day/month/year) |
|---|---|---|---|
| JP 2023-32320 A | 09 March 2023 | (Family: none) | |
| JP 2002-373002 A | 26 December 2002 | (Family: none) | |
| JP 2021-51462 A | 01 April 2021 | (Family: none) | |

# 国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2024/040223

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G05B 13/02(2006.01)i
FI: G05B13/02 A

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））

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 |
|---|---|---|
| Y | JP 2023-32320 A (いすゞ自動車株式会社) 09.03.2023 (2023-03-09)<br>[0011]-[0064],[0077]-[0080] | 1-12 |
| Y | JP 2002-373002 A (株式会社東芝) 26.12.2002 (2002-12-26)<br>[0056]-[0058] | 1-12 |
| Y | JP 2021-51462 A (いすゞ自動車株式会社) 01.04.2021 (2021-04-01)<br>[0048] | 5-6 |

☐ 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 | 国際調査報告の発送日 |
|---|---|
| 05.12.2024 | 17.12.2024 |

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）
牧　初 3U 9064
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/JP2024/040223

| 引用文献 | 公表日 | パテントファミリー文献 | 公表日 |
|---|---|---|---|
| JP 2023-32320 A | 09.03.2023 | （ファミリーなし） | |
| JP 2002-373002 A | 26.12.2002 | （ファミリーなし） | |
| JP 2021-51462 A | 01.04.2021 | （ファミリーなし） | |