

明 細 書

発明の名称：

情報処理方法、コンピュータプログラム及び情報処理装置

技術分野

[0001] 本開示は、情報処理方法、コンピュータプログラム及び情報処理装置に関する。

背景技術

[0002] 特許文献1においては、物理的システムのハードウェアに関連付けられたノードを定義する階層ツリー構造を受信し、ハードウェア構成要素に関連付けられたタイムスタンプ及び観測データを含むデータを収集し、収集したデータに基づいてノードのノード状態を導出し、タイムスタンプに基づいてノードに関連付けられた状態のシーケンスを定義した有限状態機械（FSM）モデルを構築し、FSMモデルを物理的システムの全体的有限状態機械の一部として物理的システムのモデルを作成するモデル構築方法が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特表2021-536626号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 本開示は、物理的システムを最適化するための情報処理方法、コンピュータプログラム及び情報処理装置を提供する。

課題を解決するための手段

[0005] 一実施形態に係る情報処理方法は、情報処理装置が、物理的システムに含まれる複数の物理的構成要素をそれぞれモデル化した複数の構成要素モデルを連結して前記物理的システムをモデル化したシステムモデルを記憶部に記

憶しておき、前記システムモデルの出力値を基に演算を行う目的関数の設定を受け付け、前記目的関数の出力値が所定条件を満たす入力値の許容領域を決定し、前記入力値を出力する前記構成要素モデルについて、前記構成要素モデルの出力値が前記許容領域に収まる前記構成要素モデルの入力値の許容領域を決定し、前記システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて前記許容領域の決定を行うことで、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定する。

発明の効果

[0006] 本開示によれば、物理的システムを最適化することが期待できる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]本実施の形態に係る情報処理システムの概要の一例を説明するための模式図である。

[図2]本実施の形態に係る情報処理システムが備える情報処理装置の一構成例を示すブロック図である。

[図3]本実施の形態に係る情報処理装置が行う最適化処理の手順の一例を示すフローチャートである。

[図4]許容領域の決定方法の一例を説明するための模式図である。

[図5]最適化結果の一表示例を示す模式図である。

[図6]変形例に係るシステムモデルの一構成例を示す模式図である。

[図7]実施の形態2に係る情報処理システムの概要を説明するための模式図である。

[図8]実施の形態2に係る情報処理装置が行う最適化処理の手順の一例を示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0008] 本開示の実施形態に係る情報処理システムの具体例を、以下に図面を参照しつつ説明する。なお、本開示はこれらの例示に限定されるものではなく、請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味及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。

[0009] [実施の形態 1]

<システム概要>

図 1 は、本実施の形態に係る情報処理システムの概要の一例を説明するための模式図である。本実施の形態に係る情報処理システムは、現実空間（フィジカル空間）に存在する物理的システムを仮想空間（デジタル空間又はサイバー空間）に再現し、物理的システムの管理及び制御等を行うシステムである。これは、いわゆるデジタルツインと呼ばれ得る技術である。本実施の形態において情報処理システムは、物理的システムの一例として、半導体ウェハの製造などの基板処理を行う基板処理システム 3 を仮想空間に再現したデジタルツインを扱う。

[0010] デジタルツインの技術では、基板処理システム 3 にて収集された様々なデータを基に、基板処理システム 3 をモデル化したシステムモデルが作成される。本実施の形態においてシステムモデルには、基板処理システム 3 を構成する例えばチラー、ヒータ及び時間計測等の複数の構成要素についてそれぞれ個別にモデル化した構成要素モデルが含まれる。本図においては構成要素モデルを円形のシンボルで示し、構成要素モデル A が基板処理システム 3 のチラーに対応し、構成要素モデル B がヒータに対応し、構成要素モデル C が時間計測に対応する。

[0011] また本実施の形態においてシステムモデルは、複数の構成要素モデルが階層的に連結された構成である。図示のシステムモデルには、上述の構成要素モデル A、B、C を含む階層と、この階層の 1 つ上位の階層として構成要素モデル E、U、T を含む階層とが存在する。以下、構成要素モデル E、U、T を含む階層を第 1 階層とし、構成要素モデル A、B、C を含む階層を第 2 階層とする。第 1 階層の構成要素モデル E、U、T は、第 2 階層の構成要素モデル A、B、C から得られるデータを基に、基板処理システム 3 の処理に関する様々な予測を行う。第 2 階層の構成要素モデル A、B、C は、基板処理システム 3 に対する入力データを基に、基板処理システム 3 のチラー、ヒータ及び時間計測等の機能の処理結果を予測する。

- [0012] これらの構成要素モデルは、基板処理システム3について収集されたデータの中から、構成要素への入力データ及び構成要素の出力データを抽出し、抽出したデータを基に入出力の対応関係を再現するようモデルのパラメータ等を調整することにより予め作成される。構成要素モデルは、例えば構成要素の物理的な特性に基づく演算式で表されるものであってよく、また例えばニューラルネットワーク等の機械学習モデルであってよく、これら以外の構成のモデルであってよい。
- [0013] 例えば、第2階層の構成要素モデルAは、チラー設定温度を入力データ1として取得し、基板処理システム3のチラー温度を予測するモデルである。構成要素モデルBは、ヒータ設定温度を入力データ2として取得し、且つ、ヒータのオン／オフの設定を入力データ3として取得し、基板処理システム3のヒータ温度を予測するモデルである。構成要素モデルCは、仮想空間における基板処理システム3の処理時間を計測するモデルである。なお本図では、構成要素モデルCへの入力データが図示されていないが、例えば基板処理システム3の電源のオン／オフ、基板処理の開始／停止等のデータが構成要素モデルCへ入力されてもよい。
- [0014] また例えば、第1階層の構成用モデルEは、基板処理システムの動作に伴う電気代又は二酸化炭素の排出量等の環境負荷を予測するモデルである。なお本図においては、構成要素モデルEの連結される第2階層の構成要素モデルの図示を省略している。構成要素モデルUは、第2階層の構成要素モデルAが出力するチラー温度と、構成要素モデルBが出力するヒータ温度とに基づいて、基板処理システム3が処理する基板の温度を予測するモデルである。構成要素モデルTは、構成要素モデルCが出力する時間計測の結果を基に、基板処理システム3が行う基板処理の所要時間を推定するモデルである。
- [0015] 即ち図示のシステムモデルは、第1階層に3つの構成要素モデルE、U、Tを含み、第2階層に3つの構成要素モデルA、B、Cを含む。第1階層の構成要素モデルUに対して第2階層の構成要素モデルA、Bが連結され、第1階層の構成要素モデルTに対して第2階層の構成要素モデルCが連結され

ている。なお図示のシステムモデルは、一例であって、これに限るものではない。図示のシステムモデルは簡素化されたものであり、実際のシステムモデルはより多くの階層に分けられたより多くの構成要素モデルを連結して構成され得る。即ち、情報処理システムが扱うシステムモデルは、3階層以上の階層構造を有するものであってよい。またシステムモデルは、複数の構成要素モデルが階層構造をなさないもの、換言すれば1階層のみのものであってもよい。

[0016] 例えば情報処理システムは、基板処理を行う基板処理システム3からセンサ等により測定される種々のデータを取得し、取得したデータをシステムモデルへ入力し、このデータの入力に応じてシステムモデルが出力する種々の予測値等のデータを取得する。情報処理システムは、取得したデータを基に、基板処理システム3の動作状況の監視、基板処理システム3により処理された基板の特性の予測、又は、取得したデータをフィードバックした基板処理システム3の制御等を行うことができる。

[0017] また本実施の形態に係る情報処理システムは、予め生成された基板処理システム3のシステムモデルを用いて、ユーザが設定した目的及び制約等においてこの基板処理システム3を最適に動作させる入力データの条件を決定する処理、即ち最適化処理を行うことができる。この場合にユーザは、基板処理システム3に対する最適化の目的を関数化した目的関数Gと、各構成要素モデル又はその組み合わせに対する制約条件とを設定する。

[0018] 目的関数Gは、システムモデルの最上位層（第1階層）の一又は複数の構成要素モデルに連結される関数である。目的関数Gは、連結された構成要素モデルが出力する一又は複数のデータを入力として受け付けて、入力データに対する所定の演算を行った結果を出力する関数であり、この関数が行う所定の演算と関数の出力値に対する条件とがユーザにより設定される。図示の目的関数Gは、構成要素モデルEの出力データを e とし、構成要素モデルUの出力データを u とし、構成要素モデルTの出力データを t とした場合、例えば以下の(1)式のように設定され得る。なお(1)式において、 w_1 ,

w_2 , w_3 は重みであり、 Z は任意の数値である。

$$\text{目的関数 } G : w_1 \times e + w_2 \times u + w_3 \times t \leq Z \quad \dots (1)$$

[0019] この (1) 式を設定することによってユーザは、例えば図 1 に示す基板処理システム 3 について、電気代を出来るだけ低く抑えることと、基板温度の目標値からの差異を出来るだけ小さくすること、所要時間を出来るだけ短くすることとを、最適化の目的とすることができる。またユーザは重み w_1 , w_2 , w_3 を適宜に設定することによって、これら 3 つの最適化のいずれに重点を置いて最適化を行うかを設定することができる。

[0020] なお目的関数の設定方法は、上記の (1) 式によるものに限らず、様々な方法が採用され得る。また目的関数は、ユーザ等の人手により設定されるのではなく、例えば情報処理装置等の装置により自動的に設定されてもよい。例えば情報処理装置等は、基板処理システム 3 に対して適宜に設定された一又は複数の条件等を基に目的関数を決定してもよい。また例えば情報処理装置等は、基板処理システム 3 から得られる様々なデータを用いた機械学習により目的関数を決定してもよい。また例えば、既に稼働している同様又は同型の他の情報処理システムにおいて設定された目的関数を取得して、本情報処理システムの目的関数として利用してもよい。

[0021] ユーザが設定する各構成要素モデルに対する制約条件は、例えば構成要素モデルの出力データがとり得る値の範囲として、以下の (2) 式のように設定され得る。なお (2) 式において、 e_1 及び e_2 は構成要素モデル E の出力データ e に対する閾値であり、 u_1 及び u_2 は構成要素モデル U の出力データ u に対する閾値であり、 t_1 及び t_2 は構成要素モデル T の出力データ t に対する閾値である。

$$\begin{aligned} e_1 < e < e_2 \\ u_1 < u < u_2 \\ t_1 < t < t_2 \end{aligned} \quad \dots (2)$$

[0022] なお制約条件の設定方法は、上記の (2) 式によるものに限らず、様々な方法が採用され得る。また制約条件は、ユーザにより設定されるのではなく

、例えば基板処理システム3の設計者もしくは管理者等、又は、システムモデル及び構成要素モデル等の作成者等により予め設定されてもよい。これらの設計者等が予め設定した制約条件に対して、ユーザが制約条件の修正又は追加等を行うことが可能であってよい。

[0023] また上記の制約条件は、構成要素モデルに対して個別に設定される条件の一例である。制約条件は、複数の構成モデルの組み合わせに対して設定されてもよい。例えば図1に示したシステムモデルのチラー及びヒータの2つの構成要素モデルの組み合わせにおいて、過加熱を防止するために、チラーが稼働していなければヒータをオンすることができないよう制約条件を定めておくことが考えられる。

[0024] ユーザが作成した目的関数Gが連結されたシステムモデルは、図1に示すように、目的関数Gをルートノードとし、ルートノードに第1階層の一又は複数の構成要素モデルが連結され、第1階層の各構成要素モデルに第2階層の一又は複数の構成要素モデルが連結され、第2階層の各構成要素モデルに対する一又は複数の入力データをリーフノードとした、いわゆる木構造のモデルとなる。なお、目的関数及び入力データが連結されていないシステムモデルは、第1階層の構成要素モデルをルートノードとする複数の木構造を内包したモデルである。

[0025] なお本実施の形態においては、目的関数及びシステムモデルが木構造になるものとするが、これに限るものではない。目的関数及びシステムモデルは、例えば第2階層の1つの構成要素モデルが第1階層の複数の構成要素モデルに連結されるなど、木構造とは異なる構造を含むものであってよい。

[0026] 本実施の形態に係る情報処理システムは、ユーザが設定した目的関数及び制約条件を基に、目的関数への各入力データがとり得る値の範囲（許容領域）を決定する。情報処理システムは、目的関数の各入力データの許容領域を基に、1階層下の一又は複数の構成要素モデルについて、各構成要素モデルへの各入力データがとり得る値の範囲（許容領域）を決定する。このようにして情報処理システムは、最上位の目的関数から順に1階層下の構成要素モ

デルへの入力データの許容領域を決定していくことを再帰的に繰り返すことで、最終的に最下位の構成要素モデルへの入力データの許容領域を決定することができる。即ち、図1に示す例では、目的関数Gによる最適化処理の結果として、入力データ1, 2, 3のそれぞれについて許容領域を決定することができる。決定した許容領域内となるように、基板処理システム3への各入力データを設定することによって、基板処理システム3に対して目的関数及び制約条件を満たす処理を行わせることができる。

[0027] <装置構成>

図2は、本実施の形態に係る情報処理システムが備える情報処理装置1の一構成例を示すブロック図である。本実施の形態に係る情報処理装置1は、基板処理システム3に通信ケーブル等を介して接続され、基板処理システム3の動作の監視及び制御等を行う装置である。また本実施の形態に係る情報処理システムは、基板処理システム3をモデル化したシステムモデル（基板処理システム3のデジタルツイン）を利用して上記の監視及び制御等を行うと共に、このシステムモデルを利用して基板処理システム3の動作を最適化するための処理を行う。本実施の形態に係る情報処理装置1は、例えばパーソナルコンピュータ又はサーバコンピュータ等の汎用の情報処理装置に、本実施の形態に係るコンピュータプログラムをインストールすることにより実現され得る。本実施の形態に係る情報処理装置1は、処理部11、記憶部12、通信部13、表示部14及び操作部15等を備えて構成されている。なお本実施の形態においては、1つの情報処理装置1にて処理が行われるものとして説明を行うが、情報処理装置1の処理を複数の装置が分散して行ってもよい。

[0028] 処理部11は、CPU（Central Processing Unit）、MPU（Micro-Processing Unit）、GPU（Graphics Processing Unit）又は量子プロセッサ等の演算処理装置、ROM（Read Only Memory）及びRAM（Random Access Memory）等を用いて構成されている。処理部11は、記憶部12に記憶されたプログラム12aを読み出して実行することにより、基板処理システム3の

動作を監視及び制御等する処理、並びに、システムモデルを利用した最適化処理等の種々の処理を行う。

[0029] 記憶部 12 は、例えばハードディスク等の大容量の記憶装置を用いて構成されている。記憶部 12 は、処理部 11 が実行する各種のプログラム、及び、処理部 11 の処理に必要な各種のデータを記憶する。本実施の形態において記憶部 12 は、処理部 11 が実行するプログラム 12 a を記憶する。また記憶部 12 には、基板処理システム 3 のシステムモデルに関する情報を記憶するモデル情報記憶部 12 b が設けられている。

[0030] 本実施の形態においてプログラム（コンピュータプログラム、プログラム製品） 12 a は、メモリカード又は光ディスク等の記録媒体 99 に記録された態様で提供され、情報処理装置 1 は記録媒体 99 からプログラム 12 a を読み出して記憶部 12 に記憶する。ただし、プログラム 12 a は、例えば情報処理装置 1 の製造段階において記憶部 12 に書き込まれてもよい。また例えばプログラム 12 a は、遠隔のサーバ装置等が配信するものを情報処理装置 1 が通信にて取得してもよい。例えばプログラム 12 a は、記録媒体 99 に記録されたものを書込装置が読み出して情報処理装置 1 の記憶部 12 に書き込んでもよい。プログラム 12 a は、ネットワークを介した配信の態様で提供されてもよく、記録媒体 99 に記録された態様で提供されてもよい。

[0031] 記憶部 12 のモデル情報記憶部 12 b は、予め作成された基板処理システム 3 のシステムモデルに関する情報を記憶する。システムモデルに関する情報には、例えばシステムモデルに含まれる複数の構成要素モデルの情報、及び、各構成要素モデルがいずれの構成要素モデルと連結されているかに関する情報等が含まれ得る。また構成要素モデルの情報には、例えばモデルの構成を示す情報、及び、機械学習等により決定されたモデルの内部パラメータ等の情報が含まれ得る。情報処理装置 1 は、モデル情報記憶部 12 b に予め記憶された情報を読み出すことでシステムモデルを構成し、基板処理システム 3 の制御及び最適化等の処理に用いることができる。

[0032] なお、基板処理システム 3 のシステムモデル（基板処理システム 3 のデジ

タルツイン)の生成方法は、既存の技術であるため本実施の形態において詳細な説明を省略する。システムモデル及び構成要素モデルは、例えば基板処理システム3から得られる様々なデータを用いた機械学習の処理を行うことによって生成され得る。これらのモデルの生成は情報処理装置1により行われてもよく、情報処理装置1とは異なる装置が生成したモデルの情報を情報処理装置1が取得してモデル情報記憶部12bに記憶してもよい。いずれにせよ本実施の形態に係る情報処理システムでは、図1に示すような基板処理システム3のシステムモデルが適宜の手法で予め生成される。システムモデルは、情報処理装置1が基板処理システム3の制御及び最適化等を行う際に利用できるよう、予めモデル情報記憶部12bにその情報が記憶される。

[0033] 通信部13は、通信線又は信号線等のケーブルを介して基板処理システム3に接続され、このケーブルを介して基板処理システム3との間でデータの送受信を行う。本実施の形態において通信部13は、処理部11から与えられた制御入力データを基板処理システム3へ送信する。また通信部13は、基板処理システム3から送信されるデータを受信して、受信したデータを処理部11へ与える。

[0034] 表示部14は、液晶ディスプレイ等を用いて構成されており、処理部11の処理に基づいて種々の画像及び文字等を表示する。本実施の形態において表示部14は、例えば基板処理システム3の動作状況等の種々の情報を表示すると共に、最適化処理の結果に関する情報等を表示する。操作部15は、ユーザの操作を受け付け、受け付けた操作を処理部11へ通知する。例えば操作部15は、機械式のボタン又は表示部14の表面に設けられたタッチパネル等の入力デバイスによりユーザの操作を受け付ける。また例えば操作部15は、マウス及びキーボード等の入力デバイスであってよく、これらの入力デバイスは情報処理装置1に対して取り外すことが可能な構成であってもよい。

[0035] なお記憶部12は、情報処理装置1に接続された外部記憶装置であってもよい。また情報処理装置1は、複数のコンピュータを含んで構成されるマルチ

コンピュータであってよく、ソフトウェアによって仮想的に構築された仮想マシンであってもよい。また情報処理装置 1 は、上記の構成に限定されず、例えば表示部 1 4 及び操作部 1 5 等を備えていなくてもよい。

[0036] また本実施の形態に係る情報処理装置 1 には、記憶部 1 2 に記憶されたプログラム 1 2 a を処理部 1 1 が読み出して実行することにより、制御処理部 1 1 a、設定受付部 1 1 b、最適化処理部 1 1 c 及び表示処理部 1 1 d 等が、ソフトウェア的な機能部として処理部 1 1 に実現される。

[0037] 制御処理部 1 1 a は、例えば予め定められた基板処理の手順（半導体の製造手順、レシピ）に従って基板処理システム 3 の動作を制御する。また制御処理部 1 1 a は、基板処理の実行に伴って基板処理システム 3 から得られるデータを基に基板処理システム 3 の動作を監視する処理を行う。本実施の形態において制御処理部 1 1 a は、モデル情報記憶部 1 2 b に記憶されたシステムモデルを利用して、基板処理システム 3 が実行している処理について良否又は精度等を予測すると共に、予測結果をフィードバックして基板処理システム 3 の制御を調整する。

[0038] なお本実施の形態に係る情報処理システムでは、基板処理システム 3 の制御とシステムモデルを利用した最適化との両方を情報処理装置 1 が行うものとするが、これに限るものではない。例えば、基板処理システム 3 の制御を行う情報処理装置と、システムモデルを利用した最適化を行う情報処理装置とを別に設けてもよい。この場合、例えば一方の情報処理装置が行った最適化の処理結果を他方の情報処理装置へ与え、他方の情報処理装置がこの結果を利用して基板処理システム 3 の制御を行うことができる。また本実施の形態に係る情報処理システムにて行われる処理は、3 つ以上の情報処理装置にて適宜に分散して実行されてよい。

[0039] 設定受付部 1 1 b は、基板処理システム 3 のシステムモデルを利用した最適化処理を行うための設定、例えば目的関数及び制約条件等の設定をユーザから受け付ける処理を行う。設定受付部 1 1 b は、例えば図 1 に示したシステムモデルの階層構造（ツリー構造）のグラフを表示部 1 4 に表示し、目的

関数Gをシステムモデルの第1階層の任意の構成要素モデルに接続する操作、及び、目的関数Gの具体的な関数を入力する操作等を受け付けることで、最適化の目的関数Gをユーザから受け付けることができる。また設定受付部11bは、例えば表示したシステムモデルの階層構造のグラフから構成要素モデルを選択する操作、及び、選択した構成要素モデルに対する具体的な制約条件を入力する操作等を受け付けることにより、各構成要素モデルに対する制約条件をユーザから受け付けることができる。なおこれらの目的関数及び制約条件の入力受付の方法は一例であって、これに限るものではなく、設定受付部11bはどのような方法で設定を受け付けてもよい。

[0040] 最適化処理部11cは、モデル情報記憶部12bに記憶された基板処理システム3のシステムモデルと、設定受付部11bがユーザから受け付けた目的関数及び制約条件等の設定とに基づいて、目的関数で表された目的を最適化する基板処理システム3の動作条件を決定する処理を行う。本実施の形態において目的関数が連結されたシステムモデルは、目的関数をルートノードとする木構造となる。最適化処理部11cは、ルートノードである目的関数から順に第1階層の構成要素モデル、第2階層の構成要素モデル…と再帰的に階層を上位から下位へ辿り、目的関数の最適化に対して各構成要素モデルの入力データがとり得る範囲（許容領域）を決定する。システムモデルの階層構造を上位から下位へ辿って入力データの許容領域を決定していくことで、最適化処理部11cは、最終的にシステムモデルへの入力データの許容領域を決定することができる。決定されたシステムモデルへの入力データの許容領域は、目的関数を最適化する基板処理システム3への入力データであり、この許容領域内で稼働させることにより、基板処理システム3を最適に稼働させることができる。

[0041] 表示処理部11dは、種々の文字及び画像を表示部14に表示する処理を行う。本実施の形態において表示処理部11dは、例えば制御処理部11aの制御により動作している基板処理システム3から得られる各種のデータを表示部14に表示する。また表示処理部11dは、設定受付部11bが設定

を受け付けるための画面表示を行う。また表示処理部 11d は、最適化処理部 11c による最適化の結果に関する情報を表示する。

[0042] <最適化処理>

図 3 は、本実施の形態に係る情報処理装置 1 が行う最適化処理の手順の一例を示すフローチャートである。本実施の形態に係る情報処理装置 1 の処理部 11 の設定受付部 11b は、ユーザによる操作部 15 の操作に基づいて、基板処理システム 3 の最適化に関する目的関数の設定の入力を受け付ける（ステップ S1）。また設定受付部 11b は、基板処理システム 3 のシステムモデルに含まれる構成要素モデルに関する制約条件の設定を受け付ける（ステップ S2）。このときに処理部 11 は、例えば基板処理システム 3 のシステムモデルの構成を示すグラフ等を含む入力画面を表示部 14 に表示して、ユーザによる目的関数及び制約条件の入力を受け付けてよい。

[0043] 処理部 11 の最適化処理部 11c は、ステップ S1 にて設定を受け付けた目的関数をシステムモデルに連結して木構造とし、その最上位層（ルートノード）である目的関数の出力を最適化（最大化又は最小化）する入力範囲（許容領域）を決定する（ステップ S3）。

[0044] 図 4 は、許容領域の決定方法の一例を説明するための模式図である。本例では、システムモデルの第 1 階層の 2 つの構成要素モデルが最上位の目的関数に連結される場合を想定している。図 4 に示すグラフは、第 1 階層の 1 つ目の構成要素モデルの出力値を f_1 とし、2 つ目の構成要素モデルの出力値を f_2 とし、この 2 つの値 f_1 、 f_2 に応じた目的関数の出力値を G として、 f_1 、 f_2 及び G の対応関係を 3 次元でグラフ化したものである。本例では、最適化の目的として、目的関数の出力値 G が所定の閾値を超えることが設定されているものとし、 $f_1 \geq 0$ 及び $f_2 \geq 0$ の制約条件が設定されているものとする。この場合、図示のグラフでは破線で示した境界線 101 が閾値に相当し、境界線 101 より上の領域が目的を満たす領域となる。この境界線 101 を $f_1 - f_2$ 平面に投射したものが、図示のグラフにおいて破線で示した境界線 102 である。この境界線 102 と f_1 軸及び f_2 軸とで囲

まれた領域が、目的関数を最適化し得る領域であり、いかではこの領域を許容領域と区別して許容可能領域と呼ぶ。この許容可能領域に含まれる f_1 及び f_2 の組み合わせが得られれば目的関数の出力値 G が閾値を超える。

[0045] 更に本実施の形態に係る情報処理装置 1 は、上記の方法で得られる許容可能領域に包含される矩形領域（超立方体領域）を 1 つ決定する。図示のグラフでは、矩形領域の一例が一点鎖線で示されている。なお 1 つの許容可能領域には複数の矩形領域が包含され得るが、情報処理装置 1 は、これら複数の矩形領域から、例えば最も面積が大きい矩形領域を選択する。ただし情報処理装置 1 は、例えば最も正方形に近い矩形領域等を選択してもよく、また例えばランダムに 1 つの矩形領域を選択してもよい。情報処理装置 1 は、予め定められた適宜の手順で 1 つの矩形領域を決定すればよい。情報処理装置 1 は、非矩形の許容可能領域から決定した 1 つの矩形領域を、図 3 に示したフローチャートのステップ S 3 の処理結果の許容領域とし、後続のステップの処理を行う。

[0046] このように決定された矩形の許容領域においては、目的関数への入力である f_1 及び f_2 を独立して変化させることが可能である。この矩形領域に収まる f_1 の範囲を、この f_1 を出力する構成要素モデルについての最適化の目的とすることができる。同様に、この矩形領域に収まる f_2 の範囲を、この f_2 を出力する構成要素モデルについての最適化の目的とすることができる。 f_1 及び f_2 は独立して変化させることが可能であるため、 f_1 を出力する構成要素モデルについての最適化と、 f_2 を出力する構成要素モデルについての最適化とを分けて行うことができる。情報処理装置 1 は、 f_1 を出力する構成要素モデルについて同様の方法で入力の許容範囲を決定することができ、 f_2 を出力する構成要素モデルについて同様の方法で入力の許容範囲を決定することができる。情報処理装置 1 は、上の階層から下の階層へ順に矩形の許容領域を決定する処理を再帰的に繰り返し行うことによって、最終的にシステムモデルへの入力に関する許容領域を決定することができる。

[0047] なお上位階層から下位階層へ順に矩形領域を許容領域として決定していく

場合、上位階層で決定された矩形領域では下位階層にて許容可能領域又は矩形領域が得られない事態が起こり得る。このような場合、情報処理装置 1 は、1 つ以上の階層を遡って矩形領域を選択し直してよい。例えば情報処理装置 1 は、許容可能領域又は矩形領域が得られない場合、まず 1 階層だけ上位階層へ遡って別の矩形領域を再選択することを繰り返し、所定回数の再選択を行っても許容可能領域又は矩形領域が得られない場合には更に上の階層へ遡って矩形領域の再選択を行う。情報処理装置 1 はどのような基準で矩形領域を再選択してもよく、下位階層から上位階層へ再選択に寄与し得る情報をフィードバックしてもよい。

[0048] また情報処理装置 1 は、許容可能領域から 2 つ以上の矩形領域を選択し、複数の矩形領域を許容領域としてもよい。この場合に情報処理装置 1 は、共通部分を持たないように複数の矩形領域を選択することが好ましいが、複数の矩形領域の一部が共通部分となってもよい。情報処理装置 1 は、上位階層において複数の許容領域を決定した場合、下位階層では各許容領域に対してそれぞれ許容可能領域を決定し、各許容可能領域から矩形領域を選択し、選択した複数の矩形領域の中から所定条件に従って、例えば面積が大きい 1 つの矩形領域を選択して残りの矩形領域を破棄することができる。また情報処理装置 1 は、下位階層で矩形領域を破棄することなく、複数の許容領域を並列的に維持して最下位層まで矩形領域の選択を繰り返し行ってもよい。情報処理装置 1 が複数の矩形領域を許容領域として決定することを可能とすることにより、例えば許容可能領域が複雑な形状であることで十分な面積の矩形領域が得られずに、下位階層での矩形領域の選択に著しい制限が加わることを防止することができる。

[0049] なお本例では、目的関数への入力が入力が 2 入力の場合を例に示したが、入力が 1 つ又は 3 つ以上の場合についても同様に許容領域を決定することができる。例えば 1 入力の場合には、上記の矩形領域は例えば直線（線分）状の領域となる。例えば 3 入力の場合には、上記の矩形領域は例えば直方体状の領域となる。即ち、上記の説明で用いた「矩形領域」の表現は 2 次元に限る表現

であり、多次元に拡張する場合には例えば「超直方体領域」と呼ぶことができる。超直方体領域は、1次元において線分、2次元において長方形（矩形）、3次元において直方体の領域であり、4次元以上についても同様に定義される。

[0050] 図3のステップS3において目的関数の入力データについて許容領域を決定した最適化処理部11cは、1階層下の一又は複数の構成要素モデルについて、同様の方法で入力データの許容領域を決定する（ステップS4）。最適化処理部11cは、システムモデルを構成する多階層の構成要素モデルについて、入力データの許容領域を決定する処理が最下位層に到達したか否かを判定する（ステップS5）。最下位層に到達していない場合（S5：NO）、最適化処理部11cは、ステップS4へ処理を戻し、1階層下の構成要素モデルについて入力データの許容領域を決定する処理を行う。最適化処理部11cは、上の階層から下の階層へ順に許容領域を決定する処理を再帰的に繰り返し行い、最下位層に到達したと判定した場合（S5：YES）、最下位層の入力データについて決定した許容領域の情報を最適化の結果として記憶部12に記憶する（ステップS6）。

[0051] 次いで最適化処理部11cは、最下位層の入力データについて決定した許容領域を基に、1階層上の構成要素モデルについてステップS4にて決定した許容領域を修正する処理を行う（ステップS7）。このときに最適化処理部11cは、最下位層について決定した許容領域内のデータを構成要素モデルへ入力した場合に、この構成要素モデルが出力するデータの範囲を算出し、算出した範囲となるように1つ上の階層の構成要素モデルの入力に関する許容領域を修正する。最適化処理部11cは、最下位層の構成要素モデルから最上位層の目的関数まで、同様に許容領域を修正する処理を再帰的に繰り返し行い、最終的に目的関数の入力データについての許容領域を修正することができる。これにより最適化処理部11cは、例えばハードウェアの制約等により下位階層の許容領域が制限されている場合に、この内容を上位階層へフィードバックして、上位階層の許容領域を実現可能な範囲に修正するこ

とができる。

[0052] 最適化処理部 11c は、1 階層上の構成要素モデルについて許容領域を修正する処理が最上位層に到達したか否かを判定する（ステップ S 8）。最上位層に到達していない場合（S 8：NO）、最適化処理部 11c は、ステップ S 7 へ処理を戻し、1 階層上の構成要素モデルについて許容領域を修正する処理を行う。最適化処理部 11c は、下の階層から上の階層へ順に許容領域を修正する処理を繰り返し行い、最上位層に到達したと判定したい場合（S 8：YES）、最上位層である目的関数について、修正した許容領域に対応する目的関数の出力値（又は出力値の範囲）を算出する（ステップ S 9）。

[0053] 次に最適化処理部 11c は、ステップ S 9 にて算出した目的関数の値又はその範囲について、設定された最適化の目的に対してどの程度の余裕があるかを示す余裕度を算出する（ステップ S 10）。例えば目的関数の出力が設定された閾値を超える必要がある場合、ステップ S 9 にて算出した目的関数の出力値と設定された閾値との差又は比等を余裕度とすることができる。処理部 11 の表示処理部 11d は、ステップ S 6 にて記憶した許容領域、ステップ S 9 にて算出された目的関数の値、及び、ステップ S 10 にて算出した余裕度等の情報を含む最適化の結果を表示部 14 に表示して（ステップ S 11）、処理を終了する。

[0054] なお情報処理装置 1 は、例えばステップ S 10 にて算出した余裕度が予め定められた所定余裕度を超える場合、即ち十分に余裕がある場合に、目的関数の出力に対する閾値を厳しくなる方向へ（最大化であれば閾値を大きく、最小化であれば閾値を小さく）調整し、ステップ S 3～S 10 の処理を繰り返し行ってもよい。余裕度が 0 又はその近傍になるまで閾値を調整して最適化の処理を繰り返し行うことによって、情報処理装置 1 は、より適した（最適な）目的関数の出力値とこれを実現するシステムモデルの入力値とを得ることができる。

[0055] 図 5 は、最適化結果の一表示例を示す模式図である。本実施の形態に係る

情報処理装置 1 は、図 3 に示したフローチャートのステップ S 1 ～S 1 0 の最適化処理により得られた情報を基に、ステップ S 1 1 にて図 5 に示す最適化結果表示画面を表示部 1 4 に表示する。本例の最適化結果表示画面には、例えば最適化の対象となるシステムモデルの階層構造を表示するモデル構造表示領域 1 1 1 と、最適化処理により得られた種々の情報を表示する最適化結果表示領域 1 1 2 とが左右に並べて設けられている。モデル構造表示領域 1 1 1 には、最適化の対象となる基板処理システム 3 のシステムモデルに含まれる複数の構成要素モデル並びに関連する目的関数及び入力データをノードとし、複数のノードを線で結んだグラフが表示される。

[0056] また最適化結果表示領域 1 1 2 には、例えば最上部に「最適化結果」のタイトル文字列が表示されて、このタイトル文字列の下方に種々の情報が一覧表示される。図示の例では、システムモデルへの入力データとして、例えばチラー設定温度が $X^{\circ}\text{C} \sim Y^{\circ}\text{C}$ 、ヒータ設定温度が $Z^{\circ}\text{C} \sim W^{\circ}\text{C}$ 、且つ、ヒータオン／オフ設定としてオンを設定することが最適であることが示されている。またこれらの設定範囲で基板処理システム 3 の基板処理を実行した場合の目的関数の値の予測値が α であり、予め設定された目標に対する余裕度が β であることが示されている。

[0057] また情報処理装置 1 は、最適化結果表示画面を表示部 1 4 に表示している場合に、例えばモデル構造表示領域 1 1 1 に表示された目的関数を選択する操作を受け付ける。情報処理装置 1 は、目的関数の選択操作に応じて、目的関数の設定画面等を表示部 1 4 に表示し、ユーザによる目的関数の再設定の操作を受け付ける。目的関数の再設定を受け付けた情報処理装置 1 は、同様の手順により、再設定された目的関数に基づく最適化の処理を行い、最適化結果表示画面に表示する最適化結果の情報を更新することができる。

[0058] なお、図 5 に示した最適化結果表示画面の構成は一例であって、これに限るものではない。情報処理装置 1 は、最適化により得られた情報をどのような態様で表示してユーザに提供してもよい。

[0059] <変形例>

図6は、変形例に係るシステムモデルの一構成例を示す模式図である。上述の図1に示したシステムモデルは、目的関数をルートノードとし、このルートノードに対して木構造となるように複数の構成要素モデルがノードとして接続された構成である。木構造のシステムモデルでは、あるノードの出力は1つ上の階層の1つのノードへ入力される。しかしながら基板処理システム3をモデル化する場合には、このような完全な木構造でのモデル化が難しい場合があり得る。

[0060] そこで変形例に係るシステムモデルでは、ルートノード（目的関数）及び複数のノード（構成要素モデル）を木構造で接続する構成を基本とし、その一部において例えば1つのノードの出力データが上位階層の複数のノードへ入力される構成、及び、1つのノードの出力データが同階層の他のノードへ入力される構成等が許容される。図6に示す変形例のシステムモデルでは、例えば構成要素モデルCの出力データが上位階層の構成要素モデルTへ入力されると共に、上位階層の構成要素モデルE及び同階層の構成要素モデルBへも入力される。

[0061] 変形例に係る情報処理装置1は、構成要素モデルCの出力データに関する許容領域（矩形領域）を、例えば構成要素モデルTに基づいて決定された矩形領域と、構成要素モデルEに基づいて決定された矩形領域と、構成要素モデルBに基づいて決定された矩形領域とを基に決定する。情報処理装置1は、例えば3つの矩形領域が重なる領域を構成要素モデルCの出力データに関する矩形領域とすることができる。

[0062] <まとめ>

以上の構成の本実施の形態に係る情報処理システムは、基板処理システム3等の物理的システムに含まれる複数の物理的構成要素をそれぞれモデル化した複数の構成要素モデルを階層的に連結したシステムモデルを情報処理装置1がモデル情報記憶部12bに記憶している。情報処理装置1は、目的関数の出力値が所定条件を満たすように入力データの許容領域を決定する。情報処理装置1は、この入力データを出力する構成要素モデルについて、構成

要素モデルの出力値が決定した許容領域に収まるよう構成要素モデルの入力データの許容領域を決定する。情報処理装置 1 は、システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて、上位階層から下位階層へ（階層の出力側から入力側へ）順番に入力データの許容領域の決定を再帰的に繰り返し行い、最終的にシステムモデルの入力データの許容領域を決定する。これにより本実施の形態に係る情報処理システムは、目的関数を最適化し得るシステムモデルの入力データの許容領域を決定することができ、決定した許容領域内の入力データで基板処理システム 3 を動作させることにより、基板処理システム 3 の動作を最適化することが期待できる。

[0063] また本実施の形態に係る情報処理システムでは、情報処理装置 1 が、決定した許容可能領域に内包される矩形領域を決定する。情報処理装置 1 は、システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて、上位階層から下位階層へ順番に矩形領域の決定を再帰的に繰り返し行う。これにより情報処理システムは、構成要素モデルへの複数の入力データについてそれぞれ決定した許容領域を独立して扱うことができ、上位階層から下位階層へ再帰的に行う許容領域の決定を容易化することが期待できる。

[0064] また本実施の形態に係る情報処理システムでは、情報処理装置 1 が、システムモデルの入力データの許容領域を決定した後、下位階層から上位階層へ（入力側から出力側へ）許容領域の修正を再帰的に繰り返し行い、最終的に目的関数の出力値を算出する。これにより情報処理システムは、許容領域内の入力データで基板処理システム 3 を動作させた場合の目的関数の出力値を予測し、例えば設定された目的に対する余裕度等を算出することができる。

[0065] また本実施の形態に係る情報処理システムでは、情報処理装置 1 は、決定したシステムモデルの入力データの許容領域及び算出した目的関数の出力値に関する情報を、最適化の結果として表示部 14 に表示する。このときに情報処理装置 1 は、例えば構成要素モデルをノードとし、複数のノードを線で接続したシステムモデルの構成を示すグラフを表示してもよい。これらの情報の表示に基づいてユーザは、例えば自身が設定した目的関数の是非を再検

討し、目的関数の再設定を行うことができる。

[0066] また本実施の形態に係る情報処理システムでは、基板処理システム 3 をモデル化したシステムモデルは、目的関数をルートノードとして複数の構成要素モデルを階層的に連結した木構造のモデルである。このような木構造のモデルは、情報処理装置 1 が行う上位階層から下位階層へ許容領域の決定を再帰的に繰り返す最適化処理に好適である。

[0067] なお本実施の形態においては、情報処理システムが扱う物理的システムとして基板処理システム 3 を例に説明を行ったが、物理的システムは基板処理システム 3 に限らず、物理的構成要素のモデル化が可能な様々なシステムであってよい。図 1 に示したシステムモデルの構造は、一例であって、これに限るものではない。

[0068] [実施の形態 2]

図 7 は、実施の形態 2 に係る情報処理システムの概要を説明するための模式図である。実施の形態 2 に係る情報処理システムは、実施の形態 1 に示した情報処理システムが備えるシステムモデル及び目的関数等を、学習又はデータ同化等の手法を用いて最適化する。

[0069] なお実施の形態 2 においては、システムモデル及び目的関数（図 7 において破線で囲んだブロック）をデジタルツインと呼ぶ。デジタルツインは、対象となる装置のユニットの動作を模倣するハードウェアモデル、複数のユニットの物理的な相関を反映する相互作用モデル、並びに、ユニットを制御する制御モデル等を備えて構成される。

[0070] システムモデルが扱う物理的システムが基板処理システム 3 である場合、基板処理システム 3 は複数の動作条件（レシピ）で動作させる必要があるため、デジタルツインの内部パラメータ及び最適化処理に用いられるパラメータ等は動作条件毎に異なるものが情報処理装置 1 に保持される。情報処理装置 1 は、基板処理システム 3 の動作条件に応じてこれらのパラメータを切り替えてデジタルツインを用いることができる。デジタルツインの内部パラメータは、例えばシステムモデルに含まれる各種装置の状態、並びに、この装

置状態及び入力信号から予測を行う予測モデルの内部パラメータ等が含まれる。

[0071] 実施の形態 2 に係る情報処理装置 1 は、実施の形態 1 に係る情報処理装置 1 の構成に加えて、第 2 最適化処理部 1 1 e 及び学習処理部 1 1 f 等を備える。第 2 最適化処理部 1 1 e 及び学習処理部 1 1 f は、処理部 1 1 が記憶部 1 2 のプログラム 1 2 a を実行することにより実現されるソフトウェア的な機能部である。

[0072] 第 2 最適化処理部 1 1 e は、最適化処理部 1 1 c の最適化処理により得られるデジタルツイン（基板処理システム 3）の最適な動作条件に基づき、制御処理部 1 1 a を介して基板処理システム 3 を動作させる。第 2 最適化処理部 1 1 e は、基板処理システム 3 の動作結果として得られるセンサ値と、デジタルツインを用いて得られるこのセンサ値の予測値とを比較する。

[0073] 基板処理システム 3 による実際の動作結果とデジタルツインの予測結果との誤差が大きいと判断した場合、第 2 最適化処理部 1 1 e は、デジタルツインの学習（最適化）又はデータ同化を実施し、デジタルツインの内部パラメータを更新することで、デジタルツインを最適化する。なおデジタルツインの内部パラメータには、この時点での更新が禁止されたものが含まれていてもよい。

[0074] 学習処理部 1 1 f は、第 2 最適化処理部 1 1 e により基板処理システム 3 の動作が実施された場合に、基板処理システム 3 への入力データ（動作条件など）と出力データ（センサ値など）とを取得し、取得した入出力のデータを対応付けて学習用データとして記憶する。学習処理部 1 1 f は、第 2 最適化処理部 1 1 e がデジタルツインの最適化を行うと決定した場合、記憶した学習用データを用いた学習（最適化）を行うことにより、デジタルツインの内部パラメータを更新する。なおデジタルツインの内部パラメータの更新には、例えば深層展開、微分可能アルゴリズム、勾配法、グリッドサーチ、ランダムサーチ、進化的計算（遺伝的アルゴリズムもしくは群知能等）、ベイズ最適化、量子アニーリング、又は、ゲート型量子計算機を使った組み合わせ

せ最適化もしくは連続値最適化等のアルゴリズムが採用され得る。

[0075] なお本実施の形態においては、学習処理部 11f がデジタルツインの学習を行うことで予測精度の向上を図っているが、これに限るものではなく、例えばデータ同化の処理を行ってデジタルツインの予測精度の向上を図ってもよい。データ同化は、例えばカルマンフィルタ又は粒子フィルタ等のように、センサ値などの誤差を含んだ観測データとデジタルツインの予測データとの両方を用いてデジタルツインの内部状態の予測及び更新を行う方法である。

[0076] また情報処理装置 1 は、デジタルツインの内部パラメータの更新と同様の手法で、入力データの許容領域を最適化して決定する際の最適化アルゴリズムのパラメータの更新を行ってもよい。最適化アルゴリズムのパラメータは、入力データの許容領域を決定する最適化アルゴリズムとして例えば最急降下法が採用される場合に、学習率又は繰り返し回数等のユーザが設定可能な値であり、いわゆるハイパーパラメータである。情報処理装置 1 は、例えば入力データの許容領域を決定する最適化の初期には学習率を小さく且つ最大繰り返し回数を大きく設定して慎重に最適化（許容領域の修正）を行い、徐々に学習率及び最大繰り返し回数を更新（最適化）することで、徐々に最適化に要する時間を短縮することができる。なお最適化アルゴリズムは最急降下法に限らず、例えば準ニュートン法又はニュートン法等の種々のアルゴリズムが採用されてよく、また例えば最適化アルゴリズムにニューラルネットワークなどが含まれてもよく、これらの場合にも調整可能なパラメータを情報処理装置 1 が更新することで最適化の処理に要する時間を短縮することが期待できる。

[0077] 図 8 は、実施の形態 2 に係る情報処理装置 1 が行う最適化処理の手順の一例を示すフローチャートである。実施の形態 2 に係る情報処理装置 1 の処理部 11 の第 2 最適化処理部 11e は、対象となる基板処理システム 3 に関する動作条件、装置状態又は制約条件等の最適化に対する条件情報を取得する（ステップ S 1）。

- [0078] 次いで処理部11の最適化処理部11cは、デジタルツインを用いた最適化処理を行う（ステップS32）。なおこのステップにおいて最適化処理部11cが行う処理は、図3に示した最適化処理であり、デジタルツインを用いて基板処理システム3の入力の範囲及び出力の値について最適値を予測する処理である。
- [0079] 処理部11の第2最適化処理部11eは、ステップS32の最適化処理にて得られた最適な入力範囲に基づいて、基板処理システム3の動作を実施する（ステップS33）。このときに第2最適化処理部11eは、最適な入力範囲に基づいて基板処理システム3の動作条件等を決定し、決定した動作条件等による動作を行う命令を制御処理部11aへ与えることにより、基板処理システム3を動作させる。
- [0080] 第2最適化処理部11eは、基板処理システム3の動作結果として、基板処理システム3が備えるセンサにより測定されたセンサ値を取得する（ステップS34）。第2最適化処理部11eは、ステップS34にて取得したセンサ値と、ステップS32の最適化処理にてデジタルツインの出力として得られたセンサ値の予測値とを比較する（ステップS35）。なお、例えばデジタルツインを用いて予測される値が基板処理システム3のセンサにて直接的に測定できない値である場合などには、第2最適化処理部11eは、得られたセンサ値に適宜の演算を行い、センサ値を予測値と同じ種類の情報に変換して比較を行ってもよい。同様に第2最適化処理部11eは、デジタルツインによる予測値に適宜の演算を行い、予測値をセンサ値と同じ種類の情報に変換して比較を行ってもよい。
- [0081] 第2最適化処理部11eは、ステップS35での比較結果に基づいて、例えばセンサ値及び予測値の誤差が閾値未満であるか否か等を判定することにより、デジタルツインを用いた予測が十分な精度であるか否かを判定する（ステップS36）。
- [0082] デジタルツインを用いた予測が十分な精度を得られていない場合（S36：NO）、処理部11の学習処理部11fは、ステップS33の基板処理シ

ステム3の動作に伴って得られたデータを基に学習処理を行い（ステップS37）、ステップS31へ処理を戻す。デジタルツインを用いた予測が十分な精度を得られている場合（S36：YES）、第2最適化処理部11eは、処理を終了する。

[0083] なお情報処理装置1は、基板処理システム3のセンサにより測定されたセンサ値と、最適化処理にてデジタルツインの出力として得られたセンサ値の予測値との比較結果を基に、基板処理システム3の故障の有無を予測することができる。

[0084] また情報処理装置1は、学習処理に必要なデータが不足している場合に、不足するデータを補うために必要な実験条件を決定し、決定した実験条件を表示してユーザに提案してもよい。

[0085] 学習処理に必要なデータが足りているか又は不足しているかの判定は、例えば既存のベイズ最適化の手法により行うことができる。例えば学習処理により調整されるモデルのパラメータの分布を含めてベイズ最適化の処理を行うことで、分布の幅が狭くなった場合には、新しいデータにより情報が増えてモデルの不確実性が減ったとみなすことができ、学習処理に必要なデータが足りていると判断できる。情報処理装置1は、分布に関する統計量（分散、標準偏差、四分位点の間隔など）が所定の基準を満たす場合にデータが足りていると判定し、基準を満たさない場合にデータが不足していると判定することができる。

[0086] 不足するデータを補うために必要な実験条件の決定は、同様にベイズ最適化の手法により行うことができる。情報処理装置1は、ベイズ最適化の手法により、モデルの不確実性が減少するような実験条件を決定することができる。またベイズ最適化を用いない場合、例えば情報処理装置1は、ある実験条件を基に既存のモデルで予測を行い、この予測結果が実測値であるものとみなしてデータを追加し、このデータを用いた学習処理を行ってモデルの不確実性を算出して、この不確実性の減少量が最大となるように実験条件を決定することができる。

- [0087] また、学習処理に必要なデータが足りているか又は不足しているかの判定、並びに、不足するデータを補うために必要な実験条件の決定を、情報処理装置 1 が行うのではなく、ユーザが行ってもよい。情報処理装置 1 は、例えばモデルの不確実性を示す値などの情報を表示し、学習処理に必要なデータが足りているか又は不足しているかをユーザに問い合わせ、ユーザの判断を受け付けることができる。更に情報処理装置 1 は、データが不足しているとユーザが判断した場合に、不足しているデータを補う実験条件の入力をユーザから受け付けて、受け付けた実験条件にて基板処理システム 3 による基板処理を実施し、必要なデータを収集することができる。
- [0088] 以上の構成の実施の形態 2 に係る情報処理システムでは、情報処理装置 1 が、実施の形態 1 に係る最適化により決定されるデジタルツインへの入力の許容領域に基づいて物理的な基板処理システム 3 を動作させる。情報処理装置 1 は、基板処理システム 3 の動作結果としてセンサ値等を取得し、取得したセンサ値に基づいてデジタルツインの学習又はデータ同化等の最適化を行う。これにより実施の形態 2 に係る情報処理システムは、デジタルツインを最適化して予測精度等の向上を図ることが期待できる。最適化により十分な精度が得られたデジタルツインの一部又は全部は、本実施の形態に係る情報処理システムとは別のシステムに流用してもよい。例えば、物理的システムの故障予知、モデルベースのハードウェア開発、又は、基板処理システム 3 のレシピ設計等にデジタルツインの利用が期待できる。
- [0089] なお、実施の形態 2 に係る情報処理システムのその他の構成は、実施の形態 1 に係る情報処理システムと同様であるため、同様の箇所には同じ符号を付し、詳細な説明を省略する。
- [0090] 今回開示された実施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。本開示の範囲は、上記した意味ではなく、請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味及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。
- [0091] 各実施形態に記載した事項は相互に組み合わせることが可能である。また

、請求の範囲に記載した独立請求項及び従属請求項は、引用形式に関わらず全てのあらゆる組み合わせにおいて、相互に組み合わせることが可能である。さらに、請求の範囲には他の2以上のクレームを引用するクレームを記載する形式（マルチクレーム形式）を用いているが、これに限るものではない。マルチクレームを少なくとも1つ引用するマルチクレーム（マルチマルチクレーム）を記載する形式を用いて記載してもよい。

符号の説明

- [0092] 1 情報処理装置（コンピュータ）
- 3 基板処理システム
- 1 1 処理部
- 1 1 a 制御処理部
- 1 1 b 設定受付部
- 1 1 c 最適化処理部
- 1 1 d 表示処理部
- 1 1 e 第2最適化処理部
- 1 1 f 学習処理部
- 1 2 記憶部
- 1 2 a プログラム（コンピュータプログラム）
- 1 2 b モデル情報記憶部
- 1 3 通信部
- 1 4 表示部
- 1 5 操作部

請求の範囲

- [請求項1] 情報処理装置が、
- 物理的システムに含まれる複数の物理的構成要素をそれぞれモデル化した複数の構成要素モデルを連結して前記物理的システムをモデル化したシステムモデルを記憶部に記憶しておき、
- 前記システムモデルの出力値を基に演算を行う目的関数の設定を受け付け、
- 前記目的関数の出力値が所定条件を満たす入力値の許容領域を決定し、
- 前記入力値を出力する前記構成要素モデルについて、前記構成要素モデルの出力値が前記許容領域に収まる前記構成要素モデルの入力値の許容領域を決定し、
- 前記システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて前記許容領域の決定を行うことで、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定する、
- 情報処理方法。
- [請求項2] 前記システムモデルは、複数の構成要素モデルが階層的に連結されたモデルであり、
- 前記システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて、階層の出力側から入力側へ順に入力値の許容領域の決定を再帰的に行うことで、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定する、
- 請求項1に記載の情報処理方法。
- [請求項3] 出力値が前記許容領域を満たす入力値の許容可能領域を決定し、
- 決定した前記許容可能領域に内包される超立方体領域を決定し、
- 決定した超立方体領域を入力値の許容領域とする、
- 請求項2に記載の情報処理方法。
- [請求項4] 決定した前記システムモデルの入力値の許容領域を基に、当該入力値が入力される前記構成要素モデルの出力値に関する許容領域を修正

し、

修正した出力値の許容領域を基に、当該出力値が入力される前記構成要素モデルの出力値に関する許容領域を修正し、

前記システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて、階層の入力側から出力側へ順に出力値に関する許容領域の修正を再帰的に行い、

修正した許容領域に基づいて、前記目的関数の出力値を算出する、
請求項 2 に記載の情報処理方法。

[請求項5] 決定した前記システムモデルの入力値の許容領域及び算出した前記目的関数の出力値に関する情報を表示部に表示し、
前記目的関数の再設定を受け付ける、
請求項 4 に記載の情報処理方法。

[請求項6] 前記構成要素モデルをノードとし、複数のノードを線で接続した前記システムモデルのグラフを生成し、
前記情報と共に、生成した前記グラフを前記表示部に表示する、
請求項 5 に記載の情報処理方法。

[請求項7] 前記システムモデルは、前記目的関数をルートノードとして複数の前記構成要素モデルを階層的に連結した木構造のモデルである、
請求項 1 に記載の情報処理方法。

[請求項8] 決定した許容領域に基づいて前記物理的システムを動作させ、
前記物理的システムの動作結果を取得し、
取得した動作結果に基づいて前記システムモデルのパラメータ、又は、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定するアルゴリズムのパラメータを最適化する、
請求項 1 に記載の情報処理方法。

[請求項9] 前記物理的システムの動作結果と前記システムモデルによる予測結果との比較に基づいて、前記システムモデルのパラメータ、又は、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定するアルゴリズムのパラ

メータを最適化する、

請求項 8 に記載の情報処理方法。

[請求項10] 前記システムモデルのパラメータ、又は、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定するアルゴリズムのパラメータの最適化を、データ同化により行う、

請求項 8 に記載の情報処理方法。

[請求項11] 前記パラメータを最適化する際に、前記物理的システムの動作結果に関するデータが不足している場合、不足しているデータを取得するための前記物理的システムの動作条件を推定し、

推定した前記動作条件を出力する、

請求項 8 に記載の情報処理方法。

[請求項12] 前記システムモデル又は前記システムモデルのパラメータを前記記憶部に複数記憶しておき、

前記物理的システムの動作条件に応じて、前記システムモデル又は前記システムモデルのパラメータを選択する、

請求項 1 に記載の情報処理方法。

[請求項13] コンピュータに、

物理的システムに含まれる複数の物理的構成要素をそれぞれモデル化した複数の構成要素モデルを連結して前記物理的システムをモデル化したシステムモデルを記憶部に記憶しておき、

前記システムモデルの出力値を基に演算を行う目的関数の設定を受け付け、

前記目的関数の出力値が所定条件を満たす入力値の許容領域を決定し、

前記入力値を出力する前記構成要素モデルについて、前記構成要素モデルの出力値が前記許容領域に収まる前記構成要素モデルの入力値の許容領域を決定し、

前記システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて前記

許容領域の決定を行うことで、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定する

処理を実行させる、コンピュータプログラム。

[請求項14]

処理部と

物理的システムに含まれる複数の物理的構成要素をそれぞれモデル化した複数の構成要素モデルを連結して前記物理的システムをモデル化したシステムモデルを記憶した記憶部と

を備え、

前記処理部は、

前記システムモデルの出力値を基に演算を行う目的関数の設定を受け付け、

前記目的関数の出力値が所定条件を満たす入力値の許容領域を決定し、

前記入力値を出力する前記構成要素モデルについて、前記構成要素モデルの出力値が前記許容領域に収まる前記構成要素モデルの入力値の許容領域を決定し、

前記システムモデルを構成する複数の構成要素モデルについて前記許容領域の決定を行うことで、前記システムモデルの入力値の許容領域を決定する、

情報処理装置。