(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6月6日(06.06.2024)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2024/117013 A1

(51) 国際特許分類:
G06N 5/025 (2023.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2023/042098

(22) 国際出願日： 2023年11月24日(24.11.2023)

(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：
63/428,526 2022年11月29日(29.11.2022) US

(71) 出願人: 東京エレクトロン株式会社(**TOKYO ELECTRON LIMITED**) [JP/JP]; 〒1076325 東京都港区赤坂五丁目３番１号 Tokyo (JP).

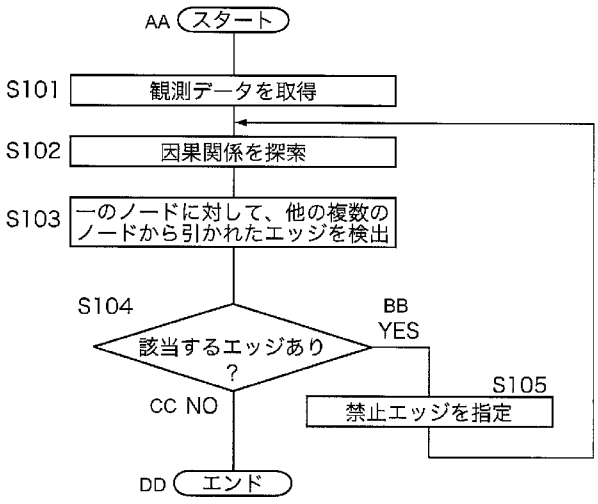
(72) 発明者: 小林 大(**KOBAYASHI, Dai**); 〒0600003 北海道札幌市中央区北３条西３丁目１大同生命札幌ビル１０階 東京エレクトロン株式会社内 Hokkaido (JP). 品川 淳(**SHINAGAWA, Jun**); 94538 カリフォルニア州フリーモント市ベイビュードライブ２８５９ 東京エレクトロンアメリカインコーポレイテッド内 California (US).

(74) 代理人: 河野 英仁，外(**KOHNO, Hideto** et al.); 〒5400035 大阪府大阪市中央区釣鐘町二丁目４番３号 河野特許事務所 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, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU,

(54) **Title:** COMPUTER PROGRAM, INFORMATION PROCESSING DEVICE, AND INFORMATION PROCESSING METHOD

(54) 発明の名称： コンピュータプログラム、情報処理装置及び情報処理方法



S101 Acquire observation data
S102 Search for causal relationship
S103 Detect edge drawn from plurality of other nodes with respect to one node
S104 Is there corresponding edge?
S105 Designate forbidden edge
AA Start
BB YES
CC NO
DD End

(57) **Abstract:** Provided are a computer program, an information processing device, and an information processing method. The present invention causes a computer to execute processes for: acquiring, from an observation system to be monitored, measurement data corresponding to a plurality of kinds of observation variables; searching for the causal relationship between the observation variables on the basis of the acquired observation data; and deriving the causal structure of the observation variables in the observation system by correcting the causal relationship according to constraint conditions to be applied between the observation variables.

(57) 要約：コンピュータプログラム、情報処理装置及び情報処理方法の提供。 監視対象の観測系から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得し、取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索し、観測変数間に適用すべき制約条件に応じて、因果関係を修正することにより、観測系における観測変数の因果構造を導出する処理をコンピュータに実行させる。

WO 2024/117013 A1

［続葉有］

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))

明　細　書

発明の名称 ：

コンピュータプログラム、情報処理装置及び情報処理方法

技術分野

[0001] 本発明は、コンピュータプログラム、情報処理装置及び情報処理方法に関する。

背景技術

[0002] 基板処理装置では、プロセスのレシピに基づいて基板に対する処理を行っている。レシピは、複数のステップで構成され、例えばステップごとに圧力や温度等の各種パラメータを制御することで、最適な処理結果を得ることができる。各種パラメータの設定値は、ステップごとに異なる場合があるため、基板処理装置に設けた複数のセンサの計測データを基板ごとに管理している。

[0003] 特許文献１には、多次元の独立変数及び従属変数を有するプロセスに関して、データを可視化する技術が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特表２０２２－５０２８０６号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 本開示は、観測データに基づき、観測変数間の因果構造を導出するコンピュータプログラム、情報処理装置及び情報処理方法の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 本開示のコンピュータプログラムは、監視対象の観測系から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得し、取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索し、前記観測変数間に適用すべき制約条件に応じて

、前記因果関係を修正することにより、前記観測系における観測変数の因果構造を導出する処理をコンピュータに実行させるためのコンピュータプログラム。

発明の効果

[0007] 本開示によれば、観測データに基づき、観測変数間の因果構造を導出できる。

図面の簡単な説明

[0008] [図1]実施の形態に係る情報処理システムの構成を説明する説明図である。

[図2]情報処理装置により導出される因果構造の一例を示す模式図である。

[図3]情報処理装置の内部構成を示すブロック図である。

[図4]観測変数の関係を表す有向非巡回グラフである。

[図5]一のノードに対して他の複数のノードからエッジが引かれた有向非巡回グラフの例を示す模式図である。

[図6]因果構造の導出手順を示すフローチャートである。

[図7]因果構造の修正操作を説明する説明図である。

[図8]ユーザによる因果構造の修正手順を示すフローチャートである。

[図9]予測モデルの生成手順を示すフローチャートである。

[図10]出来栄え予測の実行手順を示すフローチャートである。

[図11]変動原因の推定手法を説明する説明図である。

[図12]変動原因の推定手順を示すフローチャートである。

[図13]対処情報の出力手順を示すフローチャートである。

[図14]変動原因候補を絞り込む際の操作を説明する説明図である。

[図15]変動原因の絞り込み操作を受付ける際の手順を示すフローチャートである。

[図16]実施の形態７における因果構造の導出手順を示すフローチャートである。

[図17]関数形が補完された因果構造の一例を示す模式図である。

[図18]非線形関係のグラフ表示の例を示す模式図である。

[図19]プロセスメカニズムのナレッジとして可視化した例を示す模試図である。

[図20]故障予知に用いる因果構造の例を示す模式図である。

[図21]プロセスウィンドウの作成手順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

[0009] 以下、図面を参照して一実施形態について説明する。

（実施の形態１）

図１は実施の形態に係る情報処理システムの構成を説明する説明図である。実施の形態に係る情報処理システムは、通信可能に接続された情報処理装置１００及び基板処理装置２００を備える。

[0010] 基板処理装置２００は、例えば、露光装置、エッチング装置、成膜装置、イオン注入装置、アッシング装置、スパッタリング装置などを少なくとも１つ含む半導体製造装置である。代替的に、基板処理装置２００は、液晶ディスプレイパネル、有機ＥＬ（Electro-Luminescence）パネルなどのＦＤＰ（Flat Display Panel）を製造するディスプレイ製造装置であってもよい。

[0011] 基板処理装置２００には、プロセスの開始時に、基板の温度、チャンパ内の圧力やガス流量、高周波電源より印加する電圧などの各種の設定値が設定される。また、基板処理装置２００には、プロセスの実行中に、基板の温度、チャンバ内の圧力やガス流量、上部電極や下部電極に印加される電圧等を計測する複数のセンサが設けられている。基板処理装置２００は、プロセスの開始時に設定される設定値やプロセスの実行中に計測される計測値を観測データとして情報処理装置１００へ出力する。

[0012] 情報処理装置１００は、監視対象の観測系（本実施の形態では基板処理装置２００）から、観測データを取得する。情報処理装置１００は、取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索し、観測変数間に適用すべき制約条件に応じて因果関係を修正することによって、観測系における観測変数全体の因果構造を導出する。

[0013] 図２は情報処理装置１００により導出される因果構造の一例を示す模式図

である。因果構造は、例えば、各観測変数を表すノードと、ノード間の因果関係を表すエッジとを用いた有向非巡回グラフによって描画される。基板処理装置２００での実際のプロセスでは、多数の観測変数が取り扱われるが、図２では、簡略化のために８つの観測変数のみを抜粋し、それらの因果構造を示している。

[0014] 図２に示す有向非巡回グラフは、８つの観測変数に対応するノードＮＤ１～ＮＤ８と、観測変数間（ノード間）の因果関係を表す複数のエッジＥＧ１２，ＥＧ３６，ＥＧ３７，ＥＧ４６，ＥＧ５６，ＥＧ６２，ＥＧ６７，ＥＧ６８とにより構成されている。図２の例では、ノードＮＤ１～ＮＤ８を正六角形のアイコンにより示しているが、アイコンの形状は正六角形に限らず円形若しくはその他の形状であってもよい。アイコンの内部に示されている文字列は各観測変数の変数名を表す。

[0015] ２つのノードＮＤ１，ＮＤ２の間には、ノードＮＤ１からノードＮＤ２の向きに引かれたエッジＥＧ１２が示されている。２つのノードＮＤ１，ＮＤ２を接続するエッジＥＧ１２は、ノードＮＤ１に対応する観測変数（採光窓の被膜）と、ノードＮＤ２に対応する観測変数（ＯＥＳ）との間に因果関係があることを表している。採光窓の被膜は、採光窓に堆積する被膜の量を表す。ＯＥＳはOptical Emission Spectrometerであり、プラズマの発光強度の計測データを表す。エッジＥＧ１２の向き（矢符で示す向き）は、採光窓の被膜がＯＥＳに対して影響を及ぼすことを表している。他のノード間の因果関係についても同様である。

[0016] 以下の説明において、第１の観測変数が第２の観測変数に対して影響を及ぼす場合、第１の観測変数は第２の観測変数の上流にある観測変数、第２の観測変数は第１の観測変数の下流にある観測変数ともいう。

[0017] 以下、因果構造を導出する情報処理装置１００の構成について説明する。

図３は情報処理装置１００の内部構成を示すブロック図である。情報処理装置１００は、例えば、制御部１０１、記憶部１０２、通信部１０３、操作部１０４、及び表示部１０５を備える専用又は汎用のコンピュータである。

[0018] 制御部１０１は、ＣＰＵ（Central Processing Unit）、ＲＯＭ（Read Only Memory）、ＲＡＭ（Random Access Memory）などを備える。制御部１０１が備えるＲＯＭには、情報処理装置１００が備えるハードウェア各部の動作を制御する制御プログラム等が記憶される。制御部１０１内のＣＰＵは、ＲＯＭに記憶されている制御プログラムや記憶部１０２に記憶されている後述のコンピュータプログラムを読み込んで実行し、ハードウェア各部の動作を制御することにより、装置全体を本開示の情報処理装置として機能させる。制御部１０１が備えるＲＡＭには、演算の実行中に利用されるデータが一時的に記憶される。

[0019] 実施の形態では、制御部１０１がＣＰＵ、ＲＯＭ、及びＲＡＭを備える構成としたが、制御部１０１の構成は上記のものに限定されない。制御部１０１は、例えば、ＧＰＵ（Graphics Processing Unit）、ＦＰＧＡ（Field Programmable Gate Array）、ＤＳＰ（Digital Signal Processor）、量子プロセッサ、揮発性又は不揮発性のメモリ等を備える１又は複数の制御回路又は演算回路であってもよい。また、制御部１０１は、日時情報を出力するクロック、計測開始指示を与えてから計測終了指示を与えるまでの経過時間を計測するタイマ、数をカウントするカウンタ等の機能を備えてもよい。

[0020] 記憶部１０２は、ＨＤＤ（Hard Disk Drive）、ＳＳＤ（Solid State Drive）、ＥＥＰＲＯＭ（Electronically Erasable Programmable Read Only Memory）などの記憶装置を備える。記憶部１０２には、制御部１０１によって実行される各種のコンピュータプログラムや制御部１０１によって利用される各種のデータが記憶される。

[0021] 記憶部１０２に記憶されるコンピュータプログラム（プログラム製品）は、基板処理装置２００の観測データから観測変数の因果構造を導出する処理をコンピュータに実行させるための因果構造学習プログラムＰＧ１を含む。因果構造学習プログラムＰＧ１は、単一のコンピュータプログラムであってもよく、複数のコンピュータプログラムにより構成されてもよい。また、因果構造学習プログラムＰＧ１は、複数のコンピュータにより協働して実行さ

れてもよい。更に、因果構造学習プログラムＰＧ１は、既存のライブラリを部分的に用いるものであってもよい。

[0022] 記憶部１０２には、因果構造学習プログラムＰＧ１の他に、観測変数間の因果関係を基に予測モデルを生成する予測モデル生成プログラムＰＧ２、予測モデルを用いて観測データを予測する予測プログラムＰＧ３、プロセス変動の原因推定と対処推薦とを行う原因推定プログラムＰＧ４などが含まれてもよい。これらのプログラムＰＧ１～ＰＧ４は、それぞれ独立したコンピュータプログラムであってもよく、統合された１つのコンピュータプログラムであってもよい。

[0023] 因果構造学習プログラムＰＧ１を含むコンピュータプログラムは、当該コンピュータプログラムを読み取り可能に記録した非一時的な記録媒体ＲＭにより提供される。記録媒体ＲＭは、ＣＤ－ＲＯＭ、ＵＳＢメモリ、ＳＤ（Secure Digital）カード、マイクロＳＤカード、コンパクトフラッシュ（登録商標）などの可搬型メモリである。制御部１０１は、図に示していない読取装置を用いて、記録媒体ＲＭから各種コンピュータプログラムを読み取り、読み取った各種コンピュータプログラムを記憶部１０２に記憶させる。また、記憶部１０２に記憶されるコンピュータプログラムは、通信により提供されてもよい。この場合、制御部１０１は、通信部１０３を介した通信によりコンピュータプログラムを取得し、取得したコンピュータプログラムを記憶部１０２に記憶させればよい。

[0024] 通信部１０３は、外部装置との間で各種のデータを送受信するための通信インタフェースを備える。通信部１０３の通信インタフェースとして、ＬＡＮ（Local Area Network）などの通信規格に準拠した通信インタフェースを用いることができる。外部装置は、上述の基板処理装置２００やユーザ端末（不図示）などである。通信部１０３は、送信すべきデータが制御部１０１から入力された場合、宛先の外部装置へデータを送信し、外部装置から送信されたデータを受信した場合、受信したデータを制御部１０１へ出力する。

[0025] 操作部１０４は、タッチパネル、キーボード、スイッチなどの操作デバイ

スを備え、ユーザ等による各種の操作及び設定を受付ける。制御部１０１は、操作部１０４より与えられる各種の操作情報に基づき適宜の制御を行い、必要に応じて設定情報を記憶部１０２に記憶させる。

[0026] 表示部１０５は、液晶モニタや有機ＥＬ（Electro-Luminescence）などの表示デバイスを備え、制御部１０１からの指示に応じてユーザ等に報知すべき情報を表示する。

[0027] なお、本実施の形態における情報処理装置１００は、単一のコンピュータであってもよく、複数のコンピュータや周辺機器などにより構成されるコンピュータシステムであってもよい。また、情報処理装置１００は、実体が仮想化された仮想マシンであってもよく、クラウドであってもよい。更に、本実施の形態では、情報処理装置１００と基板処理装置２００とを別体として記載したが、情報処理装置１００は基板処理装置２００の内部に設けられるものであってもよい。

[0028] 以下、情報処理装置１００による因果構造の導出手法について説明する。

（１）因果関係の探索

観測変数間の因果関係は、例えば、構造方程式モデルによってモデリングされる。構造方程式モデルの１つであるLiNGAM（Linear Non-Gaussian Acyclic Model）は、線形非巡回モデルのもとで、外生変数の確率分布が非ガウシアン分布であることを仮定する。また、観測変数の関係は有向非巡回グラフによって表される。図４は観測変数の関係を表す有向非巡回グラフである。図４の例では観測変数の数を３個としているので、有向非巡回グラフは３×３の隣接行列Ｂ＝｛b_{ij}｝によって表される。b_{ij}は、線形回帰の係数であり、観測変数x_jから観測変数x_iへの結合の強さを表す。観測変数x_jの外生変数（誤差変数）をe_jとしたとき、構造方程式モデルは数１により表される。

[0029] [数1]

$$x_i = \sum_{i \neq j} b_{ij} x_j + e_j$$

[0030] 構造方程式モデルを探索するアルゴリズム（因果探索アルゴリズム）の１つとして、DirectLiNGAMアルゴリズムが提案されている（例えば、S. Shimizu et al. Journal of Machine Learning Research, 12(Apr): 1225-1248(2011)を参照）。このアルゴリズムでは、上記の仮定のもと、回帰分析と回帰残差同士の独立性の評価とを繰り返すことにより、線形回帰の係数b_{ij}を最適化することができる。最適化された係数b_{ij}に基づきノード間にエッジを引くことにより、図４に示すような有向非巡回グラフを描画することができる。

[0031] 図４の例では、観測変数の数を３個としているが、観測変数の数を一般化してｎ個（ｎは２以上の整数）とした場合も同様であり、有向非巡回グラフはｎ×ｎの隣接行列Ｂ＝｛b_{ij}｝によって表される。

[0032] （２）エッジプルーニング

上述した因果探索では、エッジが巡回しない限り、一のノードに対して他の複数のノードからエッジが引かれる場合がある。図５は一のノードに対して他の複数のノードからエッジが引かれた有向非巡回グラフの例を示す模式図である。図５の例は、ＯＥＳ、ＶＩセンサ電圧計測値、ＶＩセンサ電流計測値を表す各ノードＮＤ２，ＮＤ６，ＮＤ７から、エッチング量を表すノードＮＤ８に対して、エッジが引かれたケースを示している。このケースは、ＯＥＳ、ＶＩセンサ電圧計測値、及びＶＩセンサ電流計測値の各観測変数が互いに強い共線性を有しており、更にエッチング量を表す観測変数とも相関を有することを示している。

[0033] 本実施の形態では、このような過学習の状態を避けるために、共線性のある複数の観測変数から同時に一の観測変数に対してエッジが引かれることを禁止するという制約条件を付加する。具体的には、どのエッジを残すのが最も精度が良いかを試し、最も精度のよいエッジ以外のエッジを禁止エッジに指定する。このとき、非巡回の制約も変化するので、因果構造の再探索が併せて実行される。

[0034] 図５の例は、ノードＮＤ２，ＮＤ６，ＮＤ７からノードＮＤ８へのエッジのうち、ノードＮＤ２，ＮＤ７からＮＤ８へのエッジが禁止エッジに指定さ

れた状態を示している。禁止エッジが指定された場合、非巡回の制約も変化するため、上述した因果探索アルゴリズムが再度実行される。

[0035] 図６は因果構造の導出手順を示すフローチャートである。情報処理装置１００の制御部１０１は、記憶部１０２から因果構造学習プログラムＰＧ１を読み出して実行することにより、以下の処理を行う。

[0036] 制御部１０１は、監視対象の観測系である基板処理装置２００から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得する（ステップＳ１０１）。制御部１０１が取得する観測データは、採光窓の被膜、ＯＥＳ、下部電極の消耗、上部電極の消耗、電圧設定値、ＶＩセンサの電圧計測値、ＶＩセンサの電流計測値、エッチング量など、基板処理装置２００にて計測されるデータや基板処理装置２００にて設定されるデータを含む。制御部１０１は、通信部１０３を介して基板処理装置２００と通信することにより、これらの観測データを取得する。

[0037] 制御部１０１は、取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索する（ステップＳ１０２）。因果関係を探索する際、前処理として、因果構造の導出に用いる観測変数を選択してもよく、基板処理装置２００におけるプロセスの事前知識を用いて、観測変数間に制約条件を付加してもよい。制御部１０１は、上述した因果探索アルゴリズムを用いて、観測変数間の因果関係を探索していくことにより、観測変数全体の因果構造を導出する。具体的には、制御部１０１は、観測変数間に線形性があること、因果構造に非巡回性があること、外生変数の確率分布が非ガウシアン分布であること、異なる外生変数同士が互いに独立であることを仮定した上で、回帰分析と回帰残差同士の独立性の評価とを繰り返すことによって、線形回帰の係数b_{ij}を最適化する。制御部１０１は、最適化された係数b_{ij}に基づきノード間にエッジを引くことにより、有向非巡回グラフを生成する。これにより、共線性を有する複数のノードからのエッジが混在し得る観測変数間の因果構造が得られる。

[0038] 制御部１０１は、ステップＳ１０２で得られる因果構造から、一のノード

に対して、共線性を有する他の複数のノードから引かれたエッジを検出する（ステップＳ１０３）。制御部１０１は、該当するエッジの有無を判断し（ステップＳ１０４）、該当するエッジが有ると判断した場合（Ｓ１０４：ＹＥＳ）、共線性のある複数の観測変数から同時に一の観測変数に対してエッジが引かれることを禁止するという制約条件を付加するために、最も精度のよいエッジ以外を禁止エッジに指定した上で（ステップＳ１０５）、処理をステップＳ１０２へ戻す。

[0039] ステップＳ１０４で該当するエッジが存在しないと判断した場合（Ｓ１０４：ＮＯ）、制御部１０１は、本フローチャートによる処理を終了する。

[0040] これにより、制御部１０１は、図２に示すような観測変数全体の因果構造を導出することができる。制御部１０１は、導出した因果構造を表示部１０５に表示させてもよく、通信部１０３を通じてユーザ端末（不図示）に通知してもよい。

[0041] 以上のように、実施の形態１では、監視対象の観測系（基板処理装置２００）から得られる観測データに基づき、観測変数全体の因果構造を導出することができ、観測変数間の因果関係をユーザに提示することができる。

[0042] 実施の形態１では、共線性を有する複数のノードが他のノードに対して同時に因果関係を持つことを防止するエッジプルーニングを実施しているので、エッジの誤認を防ぎ、より信頼性の高い因果構造の学習が可能となる。

[0043]（実施の形態２）

実施の形態２では、ユーザに提示した因果構造に対し、インタラクティブな操作を受付けることにより、因果構造を修正する構成について説明する。

なお、システムの全体構成や情報処理装置１００の内部構成については、実施の形態１と同様であるため、その説明を省略する。

[0044] 図７は因果構造の修正操作を説明する説明図である。情報処理装置１００の制御部１０１は、実施の形態１に開示した手法を用いて、観測変数全体の因果構造を導出し、導出した因果構造を表示部１０５に表示させる。因果構造は有向非巡回グラフによって描画される。制御部１０１は、因果構造を導

出する過程で、一のノードから他のノードへの影響度（線形回帰の係数b_{ij}）を算出しているので、その影響度を基にノード間のエッジの太さや色を変更してもよい。例えば、一のノードから他のノードへの影響度が相対的に高い場合、これら２つのノード間を結ぶエッジの太さを太くしてもよく、赤色や青色など他のエッジとは異なる色で表示してもよい。

[0045] 図７の有向非巡回グラフにおいて、エッジＥＧ３６，ＥＧ６８は、他のエッジよりも太く示されているので、エッチング量に対するＶｉセンサ電圧計測値や下部電極の消耗の影響度は、上部電極の消耗や電圧設定値と比較して高いことを示している。

[0046] 制御部１０１は、操作部１０４を通じて、表示部１０５に表示した有向非巡回グラフに対するユーザの修正操作を受付ける。例えば、制御部１０１は、操作部１０４が備えるマウスやタッチパネルを用いて、エッジを新たに描画する操作を受け付ける。この操作により、ユーザは、任意の２つのノード間に本来あるべきエッジを新たに追加することができる。また、制御部１０１は、操作部１０４が備えるマウスやキーボードを用いて、削除対象のエッジを選択する操作と、選択したエッジを削除するために予め定められた操作（例えば、デリートキーの押下操作）とを受付けてもよい。この操作により、ユーザは、不要なエッジを削除することができる。更に、制御部１０１は、操作部１０４が備えるマウスやタッチパネルを用いて、エッジの開始点又は終了点を別のノードまで移動させる操作を受付けてもよい。この操作により、ユーザは、観測変数間の因果関係を変更することができる。

[0047] 図７は、エッジＥＧ１７の開始点をノードＮＤ１からノードＮＤ３に移動させる操作を受付けた例を示している。この場合、ノードＮＤ１，ＮＤ７間のエッジＥＧ１７はなくなり、ノードＮＤ３，ＮＤ７間に新たなエッジＥＧ７が生成される。代替的に、エッジＥＧ１７を削除する操作と、ノードＮＤ３，ＮＤ７間に新たなエッジ（エッジＥＧ３７）を描画する操作とを受け付けてもよい。

[0048] 図８はユーザによる因果構造の修正手順を示すフローチャートである。情

報処理装置１００の制御部１０１は、実施の形態１と同様の手順にて、観測変数全体の因果構造を導出し、導出した因果構造を表示部１０５に表示させる（ステップＳ２０１）。このとき、一のノードから他のノードへの影響度を基に、エッジの太さや色を変更して表示してもよい。

[0049] 制御部１０１は、表示部１０５に表示させた因果構造に対し、操作部１０４を通じて修正を受付ける（ステップＳ２０２）。制御部１０１は、操作部１０４を通じて、本来あるべきエッジを新たに追加する操作、不要なエッジを削除する操作、因果関係を変更する操作等を受付ける。

[0050] 制御部１０１は、修正後の因果構造に基づき、影響度を再計算する（ステップＳ２０３）。エッジの追加や削除に応じて、影響度が変化するので、制御部１０１は、因果構造を変化させずに、数１を用いて影響度（線形回帰の係数b_{ij}）を再計算する。

[0051] 学習に必要な観測データが十分に得られなかった場合などにおいて、因果構造アルゴリズムだけでは観測変数間の因果関係を十分に修正しきれていない可能性がある。実施の形態２では、インタラクティブな操作により、誤認エッジの削除や既知のエッジの追加が可能であり、ユーザの知見に基づいて因果構造を修正することができる。

[0052]（実施の形態３）

実施の形態３では、導出した因果構造を基に予測モデルを生成する構成について説明する。

なお、システムの全体構成や情報処理装置１００の内部構成については、実施の形態１と同様であるため、その説明を省略する。

[0053] 図９は予測モデルの生成手順を示すフローチャートである。情報処理装置１００の制御部１０１は、記憶部１０２から予測モデル生成プログラムＰＧ２を読み出して実行することにより、以下の処理を行う。なお、監視対象の観測系についての因果構造は導出済みであるとする。

[0054] 制御部１０１は、監視対象とすべき出来栄えパラメータの選択を受付ける（ステップＳ３０１）。ここでは、表示部１０５に表示した因果構造から、

監視対象とすべき一の観測変数が選択される。

[0055] 制御部１０１は、ステップＳ３０１で選択された出来栄えパラメータに対し、直接的な因果関係を有する１又は複数の観測変数を抽出する（ステップＳ３０２）。例えば、図２の因果構造が導出された因果構造であり、ノードＮＤ８のエッチング量がステップＳ３０１で選択された出来栄えパラメータであるとした場合、制御部１０１は、エッチング量と直接的な因果関係を有する観測変数として、ノードＮＤ６のＶＩセンサ電圧計測値を抽出する。

[0056] 制御部１０１は、ステップＳ３０１で選択された出来栄えパラメータを目的変数、ステップＳ３０２で選択された観測変数を説明変数として、予測モデルを生成する（ステップＳ３０３）。予測モデルには任意のモデルが用いられる。例えば、出来栄えパラメータ（＝Ｙ）と、説明変数として抽出された観測変数（＝ｘ）との間の関係が１次関数によって表される場合、予測モデルをＹ＝ａｘ＋ｂのように記述することができる。出来栄えパラメータＹ及び観測変数ｘについて観測データが得られているので、それらの観測データを用いて上記予測モデルを最適化することにより、係数ａ，ｂを求めることができる。予測モデルには、１次関数に限らず、任意の関数が用いられる。また、予測モデルは、機械学習の学習モデルであってもよい。

[0057] 以上のように、実施の形態３では、出来栄えパラメータが指定された場合、導出した因果構造に基づき、直接的な因果関係を有する観測変数を抽出し、観測変数から出来栄えパラメータを予測する予測モデルを生成することができる。すなわち、実施の形態３では、疑似相関にあたるパラメータを排除して、結果を変動させ得る要因に対してロバストな予測モデルを生成することができる。

[0058] なお、本実施の形態３では、出来栄えパラメータと直接的な因果関係を有する観測変数（説明変数）を制御部１０１が抽出する構成としたが、ユーザが任意に説明変数を選択してもよい。ユーザは、表示部１０５に表示される因果構造を参照し、操作部１０４を用いて、説明変数とすべき観測変数に対応したノードを選択すればよい。例えば、図２の因果構造において、ノード

ＮＤ８のエッチング量を出来栄えパラメータとしたとき、説明変数として抽出される観測変数はＶｉセンサ電圧計測値であるが、ユーザが希望すれば、直接的な因果関係を有していないＯＥＳ等の観測変数を説明変数に加えることができる。

[0059] （実施の形態４）

実施の形態４では、生成した予測モデルを用いて、出来栄え予測を行う構成について説明する。

なお、システムの全体構成や情報処理装置１００の内部構成については、実施の形態１と同様であるため、その説明を省略する。

[0060] 図１０は出来栄え予測の実行手順を示すフローチャートである。情報処理装置１００の制御部１０１は、予測モデルを生成した後、記憶部１０２から予測プログラムＰＧ３を読み出して実行することにより、以下の処理を行う。

[0061] 制御部１０１は、監視対象の観測計である基板処理装置２００から、予測モデルの説明変数に対応する観測データを取得する（ステップＳ４０１）。説明変数がＶｉセンサ電圧計測値であれば、制御部１０１は、Ｖｉセンサより得られる電圧計測値のデータを取得する。

[0062] 制御部１０１は、取得した観測データを予測モデルに入力し、出来栄えを予測する（ステップＳ４０２）。制御部１０１は、予測モデルを用いた演算を実行することにより、出来栄えを予測することができる。

[0063] 制御部１０１は、ステップＳ４０２で予測した出来栄えを基準値と比較し（ステップＳ４０３）、基準値を満たすか否かを判断する（ステップＳ４０４）。基準値を満たすと判断した場合（Ｓ４０４：ＹＥＳ）、制御部１０１は、基板処理装置２００で実施されているプロセスが正常であると判断し、本フローチャートによる処理を終了する。

[0064] 一方、基準値を満たさないと判断した場合（Ｓ４０４：ＮＯ）、制御部１０１は、基板処理装置２００で実施されているプロセスが正常でないと判断して、警報を出力し（ステップＳ４０５）、本フローチャートによる処理を

終了する。制御部１０１は、例えば、プロセスが正常でない旨の情報を表示部１０５に表示することによって警報を出力する。代替的に、制御部１０１は、プロセスが正常でない旨の情報を通信部１０３を通じてユーザ端末（不図示）に通知してもよい。

[0065] 以上のように、実施の形態４では、予測モデルを用いて出来栄えを予測し、予測した出来栄えが基準値を満たすか否かを判断することによって、基板処理装置２００において実施されているプロセスが正常であるか否かを判断することができる。

[0066]（実施の形態５）

実施の形態５では、因果構造に基づき、一の観測変数に対する変動原因を推定する構成について説明する。

なお、システムの全体構成や情報処理装置１００の内部構成については、実施の形態１と同様であるため、その説明を省略する。

[0067] 実施の形態５では、導出した因果構造を利用して、変動原因が不明な観測変数に対し、変動している観測変数の上流を確認することで変動原因を特定する。

[0068] 図１１は変動原因の推定手法を説明する説明図である。観測変数の因果構造として、図２に示す因果構造が得られたとする。因果構造を参照すれば、ノードＮＤ６のＶＩセンサ電圧計測値に影響を及ぼす観測変数として、ノードＮＤ３の下部電極消耗と、ノードＮＤ４の上部電極消耗と、ノードＮＤ５の電圧設定値とが存在することが分かる。また、ノードＮＤ７のＶＩ電流計測値に影響を及ぼす観測変数として、ノードＮＤ３の下部電極消耗と、ＮＤ６のＶＩセンサ電圧計測値とが存在することが分かる。

[0069] ＶＩセンサ電圧計測値及びＶＩセンサ電流計測値は、以下の計算式によって表される。

[0070] ＶＩセンサ電圧計測値＝ｗ１×電圧設定値＋ｗ２×下部電極消耗＋ｗ３×上部電極消耗

ＶＩセンサ電流計測値＝ｗ４×ＶＩセンサ電圧計測値＋ｗ５下部電極消耗

ここで、ｗ１～ｗ５は、エッジの影響度で表現される係数である。

[0071] 図１１の上段は電圧設定値の時間変動、中段はＶＩセンサ電圧計測値の時間変動、下段はＶＩセンサ電流計測値の時間変動を示している。下部電極及び上部電極の消耗がなければ、ＶＩセンサ電圧計測値は、電圧設定値のみで説明できるので、中段のグラフにおいて破線で示すように変動するはずである。しかしながら、実際の計測値が実線で示すように変動していた場合、ＶＩセンサ電圧計測値は、下部電極及び上部電極の消耗の影響を受けたと推測される。すなわち、中段のグラフにおいて、破線で示すグラフと実線で示すグラフとの間の差分は、下部電極に起因する差分ΔＶ１と、部電極の消耗に起因する差分Ｖ２とが含まれるものと推測される。

[0072] 同様に、下部電極の消耗がなければ、ＶＩセンサ電流計測値は、ＶＩセンサ電圧計測値のみで説明できるので、下段のグラフにおいて破線で示すように変動するはずである。しかしながら、実際の計測値が実線で示すように変動していた場合、ＶＩセンサ電流計測値は、下部電極の消耗の影響を受けたと推測される。すなわち、下段のグラフにおいて、破線で示すグラフと実線で示すグラフとの間の差分は、下部電極に起因した差分ΔＩが含まれるものと推測される。

[0073] 制御部１０１は、ＶＩセンサ電圧計測値及びＶＩセンサ電流計測値の推定結果と、実測値とが合うように最適化することにより、下部電極及び上部電極の消耗度を推定できる。

[0074] 図１２は変動原因の推定手順を示すフローチャートである。情報処理装置１００の制御部１０１は、因果構造を導出した後、記憶部１０２から原因推定プログラムＰＧ４を読み出して実行することにより、以下の処理を行う。

[0075] 制御部１０１は、変動原因がないものと仮定し、エッジの影響度を基に回帰して、各観測変数を推定する（ステップＳ５０１）。

[0076] 制御部１０１は、観測変数の実測値と推定値とを比較する（ステップＳ５０２）。実測値と推定値とが大きく異なる観測変数は、変動原因要素の介入によって変動したものと見なすことができる。

[0077] 制御部１０１は、実測値と推定値との間の差分を埋めるように、変動原因の変動度を最適化し、最適化した変動度が相対的に大きいものを変動原因として推定する（ステップＳ５０３）。

[0078] 図１３は対処情報の出力手順を示すフローチャートである。制御部１０１は、変動原因を推定した後、必要に応じて、以下の処理を実行する。

[0079] 制御部１０１は、変動原因の影響を抑制し得る観測変数を因果構造から探索し（ステップＳ５２１）、該当する観測変数があるか否かを判断する（ステップＳ５２２）。

[0080] 基板処理装置２００にて制御可能な変数（例えば、電圧設置値など）が探索された場合、該当する観測変数があると判断し（Ｓ５２２：ＹＥＳ）、制御部１０１は、観測変数で変動原因を抑制することを対処情報として出力する（ステップＳ５２３）。対処情報は表示部１０５に表示される。代替的に、対処情報は通信部１０３を通じてユーザ端末に通知される。

[0081] 基板処理装置２００にて制御可能な変数（例えば、下部電極や上部電極の消耗など）が探索された場合、該当する観測変数がないと判断し（Ｓ５２２：ＮＯ）、制御部１０１は、変動原因の除去又は交換を対処情報として出力する（ステップＳ５２４）。対処情報は表示部１０５に表示される。代替的に、対処情報は通信部１０３を通じてユーザ端末に通知される。

[0082] 以上のように、実施の形態５では、一の観測変数に対する変動原因を推定し、その変動原因に対する対処情報をユーザに提示できる。

[0083]（実施の形態６）

実施の形態６では、ユーザの知見に基づき、変動原因を推定する構成について説明する。

なお、システムの全体構成や情報処理装置１００の内部構成については、実施の形態１と同様であるため、その説明を省略する。

[0084] 図１４は変動原因候補を絞り込む際の操作を説明する説明図である。図１４に示すような因果構造が得られており、ノードＮＤ８のエッチング量に対する変動原因を調べることを想定する。この場合、ノードＮＤ８の上流のノ

ードＮＤ６（ＶＩセンサ電圧計測値）、並びに、更にその上流のＮＤ３（下部電極消耗）、ＮＤ４（上部電極消耗）、及びＮＤ５（電圧設定値）が変動原因候補となる。情報処理装置１００の制御部１０１は、例えば、これらのノードＮＤ３，ＮＤ４，ＮＤ５，ＮＤ６，ＮＤ８の色を変更して表示部１０５に表示する。ノードの色を変更して表示する構成に代えて、ノードの大きさを変更したり、ノード間を繋ぐエッジの太さを変更したりして、変動原因候補の表示態様を変更してもよい。

[0085] 制御部１０１は、操作部１０４を通じて、変動原因候補を絞り込むユーザの操作を受付ける。ユーザは、表示部１０５に表示される因果構造を参照し、変動原因候補について得られる観測データを確認していくことで効率良く可能性を絞り込むことができる。例えば、ＶＩセンサ電圧計測値とエッチング量との間の関係が正常であれば、ＶＩセンサ電圧計測値を変動原因候補から除外することができる。制御部１０１は、ノードＮＤ６に対する選択操作（例えば、クリック操作）を受付けた場合、ノードＮＤ６のＶＩセンサ電圧計測値を変動原因候補から除外し、ノードＮＤ６の表示態様を元に戻す。

[0086] 変動原因候補を更に絞り込むために、候補の下流にある観測変数の変動を検証してもよい。例えば、ノードＮＤ３の下部電極消耗の影響を検証するために、ＮＤ６のＶＩセンサ電圧計測値と、ノードＮＤ７のＶＩセンサ電流計測値とを確認し、下部電極消耗の影響を検証してもよい。このとき、ＶＩセンサ電圧計測値とＶＩセンサ電流計測値との間の関係が正常であれば、下部電極消耗を変動原因候補から除外することができる。制御部１０１は、ノードＮＤ３に対する選択操作（例えば、クリック操作）を受付けた場合、ノードＮＤ３の下部電極消耗を変動原因候補から除外し、ノードＮＤ３の表示態様を元に戻す。

[0087] 以上により、変動原因候補は、ＮＤ４の上部電極消耗と、ＮＤ５の電圧設定値との２つに絞り込まれるため、制御部１０１は、対処情報として、上部電極の交換を促す情報を出力する。また、制御部１０１は、対処情報として、電圧設定値の調整を促す情報を出力する。

[0088] 図１５は変動原因の絞り込み操作を受付ける際の手順を示すフローチャートである。情報処理装置１００の制御部１０１は、因果構造を導出した後、記憶部１０２から原因推定プログラムＰＧ４を読み出して実行することにより、以下の処理を行う。

[0089] 制御部１０１は、ユーザによって指定された一の観測変数に対し、変動原因候補となる１又は複数の観測変数を抽出する（ステップＳ６０１）。制御部１０１は、抽出した観測変数に対応するノードの表示態様を変更する（ステップＳ６０２）。制御部１０１は、ユーザによって指定された一の観測変数に対応するノードについても同様に表示態様を変更してもよい。

[0090] 制御部１０１は、操作部１０４を通じて、変動原因候補から除外すべき観測変数を選択する選択操作を受付け（ステップＳ６０３）、選択された観測変数を変動原因候補から除外する（ステップＳ６０４）。ステップＳ６０３－Ｓ６０４では、検証の結果、ユーザによって問題がないと判断された観測変数や、ユーザの知見により関連のない観測変数が変動原因候補から除外される。更に上流にあたる観測変数が存在する場合、ステップＳ６０３－Ｓ６０４の処理が繰り返し実行される。

[0091] 制御部１０１は、変動原因候補の下流に変動が未検証の観測変数が存在するか否かを判断し（ステップＳ６０５）、未検証の観測変数が存在する場合（Ｓ６０５：ＹＥＳ）、ユーザに検証を促す（ステップＳ６０６）。ユーザは、下流の観測変数の変動を確認し、変動がなければ、変動原因候補から除外する。すなわち、制御部１０１は、操作部１０４を通じて、変動原因候補から除外すべき観測変数を選択する選択操作を受付け（ステップＳ６０７）、選択された観測変数を変動原因候補から除外する（ステップＳ６０８）。ステップＳ６０５で、下流に未検証の観測変数がないと判断した場合（Ｓ６０５：ＮＯ）、制御部１０１は、処理をステップＳ６０９へ移行させる。

[0092] 制御部１０１は、ステップＳ６０３～Ｓ６０８の手順にて絞り込まれた変動原因候補に基づき、対処情報を出力する（ステップＳ６０９）。対処情報は表示部１０５に表示される。代替的に、対処情報は通信部１０３を通じて

ユーザ端末に通知される。

[0093] 以上のように、実施の形態６では、ユーザによる検証又はユーザの知見に基づき、変動原因候補を絞り込むことができる。また、絞り込んだ変動原因候補に基づき、ユーザに対して対処情報を提示することができる。

[0094]（実施の形態７）

実施の形態７では、非線形な系への適用例について説明する。

なお、システムの全体構成や情報処理装置１００の内部構成については、実施の形態１と同様であるため、その説明を省略する。

[0095] 線形な系に対しては、特徴量の選択や因果構造の学習を行って、説明変数を絞り込むことで、説明性が高くロバストな予測モデルや信頼できる異常原因特定モデルを構築することができる。

[0096] 一方、非線形な系に対しては、設定パラメータを説明変数、結果にあたるパラメータを目的変数としてランダムフォレストやガウス過程回帰などを使った予測モデルを構築することが多い。非線形な系では、因果構造や関数形を特定することは難しく、モデルがブラックボックス化してしまうため、それぞれの説明変数がどのように目的変数の変動に影響を与えるのか説得力が低く、設定値の微調整や信頼性の高い結果変動の修正が行えない。また、部分的な関数形などがドメイン知識として予め分かっている場合であっても、それによる補正や制約を入れることができないため、統計処理的なアプローチだけでは部分的な関数形やドメイン知識を反映したモデルを作成することは困難である。

[0097] そこで、実施の形態７では、非線形な因果関係を持つパラメータに対して、正確な関数形までは特定しないが、関係性の有無を特定できる手法を用いて因果構造の学習を実行する手法について説明する。

[0098] 図１６は実施の形態７における因果構造の導出手順を示すフローチャートである。情報処理装置１００の制御部１０１は、記憶部１０２から因果構造学習プログラムＰＧ１を読み出して実行することにより、以下の処理を行う。

[0099] 制御部１０１は、監視対象の観測系である基板処理装置２００から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得する（ステップＳ７０１）。制御部１０１が取得する観測データは、基板処理装置２００にて計測されるデータや基板処理装置２００にて設定されるデータを含む。制御部１０１は、通信部１０３を介して基板処理装置２００と通信することにより、これらの観測データを取得する。

[0100] 制御部１０１は、取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索する（ステップＳ７０２）。因果関係を探索する際、前処理として、因果構造の導出に用いる観測変数を選択してもよく、基板処理装置２００におけるプロセスの事前知識を用いて、観測変数間に制約条件を付加してもよい。関数形は不明であるが、非線形性を含んだ探索が可能なアルゴリズムは既知であるので、制御部１０１は、当該アルゴリズムを用いて、観測変数間の因果関係を探索していくことにより、観測変数全体の因果構造を導出する。因果構造を導出した後、実施の形態１と同様の手順によって、一のノードに対して、共線性を有する他の複数のノードから引かれたエッジを検出し、最も精度のよいエッジ以外を禁止エッジに指定してもよい。

[0101] 制御部１０１は、各因果関係について関数形を推定する（ステップＳ７０３）。このとき、制御部１０１は、基板処理装置２００のドメインの制約や知見に基づいて、関数形を推定すればよい。

[0102] 制御部１０１は、推定した関数形をステップＳ７０２で導出される因果構造に導入することによって、因果構造の補完を行う（ステップＳ７０４）。導出した因果構造を表示部１０５に表示させてもよく、通信部１０３を通じてユーザ端末（不図示）に通知してもよい。

[0103] 図１７は関数形が補完された因果構造の一例を示す模式図である。因果構造は、実施の形態１と同様に、各観測変数を表すノードと、ノード間の因果関係を表すエッジとを用いた有向非巡回グラフによって描画される。図１７では、簡略化のために８つの観測変数のみを抜粋し、観測変数間の関数形を補完した因果構造を示している。

[0104] 図１７に示す有向非巡回グラフは、８つの観測変数に対応するノードＮＤ１～ＮＤ４，ＮＤ７～ＮＤ１０及び２つの関数に対応するノードＮＤ５，ＮＤ６、並びに、ノード間の因果関係を表すエッジＥＧ１５，ＥＧ２５，ＥＧ２８，ＥＧ３５，ＥＧ３６，ＥＧ４６，ＥＧ５７，ＥＧ６８，ＥＧ７９，ＥＧ８１０により構成されている。図１７の例では、ノードＮＤ１～ＮＤ１０を正八角形のアイコンにより示しているが、アイコンの形状は正八角形に限らず円形若しくはその他の形状であってもよい。アイコンの内部に示されている文字列は各観測変数の変数名若しくは関数形を表す。

[0105] 図１７の例では、観測変数を示すノードＮＤ１～ＮＤ４，ＮＤ７～ＮＤ１０と、関数を表すノードＮＤ５，ＮＤ６とを色を変えて示している。アイコンの色を変えて示す以外に、アイコンの形状を変えて示すなど、表示態様を異ならせて表示するとよい。また、図１７の例では、観測変数間のエッジは実線で示し、関数への入力及び関数からの出力を表すエッジは破線で示している。線種を変えて示す以外に、色を変えて示すなど、表示態様を異ならせて表示するとよい。また、設定値及び観測値のノードを区別できるように表示態様を異ならせて表示してもよい。

[0106] 以上のように、実施の形態７では、監視対象の観測系（基板処理装置２００）から得られる観測データに基づき、観測変数間の非線形性を考慮した因果構造を導出し、ユーザに提示することができる。

[0107] なお、実施の形態７では、有向非巡回グラフに関数形を示すノードを導入することによって、非線形関係を可視化する構成としたが、非線形関係をグラフ表示してもよい。図１８は非線形関係のグラフ表示の例を示す模式図である。図１８は、観測変数Ａ，Ｂ，Ｃの間にＣ＝Ｂ×ｃｏｓ（Ａ）の関係がある場合の表示例を示している。図１８では、観測変数Ａの値は固定であり、観測変数Ｂの値をスライダーによって動かすことによって、観測変数Ｃがどのように変動するかを示している。

[0108] （実施の形態８）

実施の形態８では、プロセス開発時のナレッジとして、実験データから学

習した因果構造を可視化する構成について説明する。

[0109] 図１９はプロセスメカニズムのナレッジとして可視化した例を示す模試図である。図１９は、ガスＡの流量（Gas A Flow）、ガスＢの流量（Gas B Flow）、ＲＦ電力（RF1 Pow）と、エッチングレート（E/R）との間の関係を各観測変数の因果関係として可視化した例を示している。エッチングレート１つとっても、ガス流量、ＲＦ電力、ＤＣバイアス等をどれくらい変動させるのが適切であるのか把握することは困難であり、センサを含めて俯瞰したナレッジを参照しないと、何がずれているのか判断が難しい。そこで、実験から得られた観測データに基づいて、図７と同様の手法を用いて因果構造を作成し、図１９に示すように可視化することにより、特徴量間の関係をナレッジとして参照・活用しやすいように残すことができる。

[0110] 以上のように、実施の形態８では、因果構造の形で残せるようにすることで、熟練者以外にも展開可能な形でナレッジを残すことができる。また、関数形まで含めて因果構造として形式化・可視化することで、設定値を度のように変動させて実験すべきか、所望の出来栄えに近づけるためのナレッジが得られる。

[0111] （実施の形態９）

実施の形態９では、プロセス全体を俯瞰して予測し、故障や異常を予知・防止する構成について説明する。

[0112] 図２０は故障予知に用いる因果構造の例を示す模式図である。図２０に示す因果構造において、ＤＣ電圧（DC Volt）や冷却温度（Brine temp）の設定値を制限しただけでは、ＤＣ電流（DC Current）や下部電極温度（Lower temp）を直接的に指定することはできない。例えば、エッチングレート（E/R）は、プラズマ流量やエネルギの増大で向上が見込めるが、その一方で、電極温度の上昇が予想される。このため、ＤＣ電圧を限界まで上昇させた場合、電極の加熱で破損する虞がある。

[0113] このため、プロセス全体を俯瞰して、センサ値が異常を示す箇所がないか、因果構造に照らし合わせて判断する必要がある。すなわち、各部に限定し

た予測ではなく、全体を俯瞰することで、故障の危険を見落とさないようにすることができる。

[0114] 具体的には、制御部１０１は、因果構造を基に、プロセス可能な範囲（プロセスウィンドウ）のテーブルを作成し、ユーザに提示すればよい。プロセスウィンドウ外であった場合、制御部１０１は、最小限の修正でウィンドウ内に収める代替レシピを提案してもよい。

[0115] 図２１はプロセスウィンドウの作成手順を示すフローチャートである。制御部１０１は、実施の形態７と同様の手順にて、非線形関係に対して関数形を補完した因果構造を作成し、作成した因果構造に基づき、センサ値が許容範囲に収まるかどうかを示す判定モデルを生成する（ステップＳ９０１）。

[0116] 制御部１０１は、生成した判定モデルを用いて、流動的な設定値に対して可能な範囲を示す多次元テーブルを生成する（ステップＳ９０２）。例えば、ＲＦ電力１及びＲＦ電力２といった２つの設定値に関するテーブル（２次元テーブル）を生成する場合、（ＲＦ電力１，ＲＦ電力２）の２つの設定値の組み合わせが（１０００Ｖ，１００Ｖ）の場合に不可、（１０００Ｖ，２００Ｖ）の場合に可、…といったテーブルを生成すればよい。

[0117] 制御部１０１は、生成した多次元テーブルに基づき、固定値の設定に応じたプロセスウィンドウを提示する（ステップＳ９０３）。例えば、ＲＦ電力１（又はＲＦ電力２）を固定し、ＲＦ電力２（又はＲＦ電力１）の範囲をプロセスウィンドウとして生成し、表示部１０５に表示すればよい。

[0118] 以上のように、実施の形態９では、実験時に二次的な効果で起きる故障を予防できる。

[0119] 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一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。

[0120] 今回開示された実施形態は、全ての点において例示であって、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、上述した意味ではなく、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全ての変更が含まれることが意図される。

[0121] 例えば、実施の形態では、監視対象の観測系として、基板処理装置２００を例に挙げて説明した。監視対象の観測系は、基板処理装置２００に限らず、電気機器、化学工業製品、医薬品、食品、化学工業製品等の任意の製造プロセスが実行される製造装置であってもよい。また、監視対象の観測系は、何らかの製造プロセスが実施される装置やシステムに限らず、人の生活環境や経済活動、気象環境などを適宜組み合わせた任意のシステムであってもよい。

符号の説明

[0122] １００　情報処理装置
１０１　制御部
１０２　記憶部
１０３　通信部
１０４　操作部
１０５　表示部
ＰＧ１　因果構造学習プログラム
ＰＧ２　予測モデル生成プログラム
ＰＧ３　予測プログラム
ＰＧ４　原因推定プログラム
ＲＭ　記録媒体
２００　基板処理装置

請求の範囲

[請求項1] 監視対象の観測系から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得し、

取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索し、

前記観測変数間に適用すべき制約条件に応じて、前記因果関係を修正することにより、前記観測系における観測変数の因果構造を導出する

処理をコンピュータに実行させるためのコンピュータプログラム。

[請求項2] 各観測変数を表すノードと、ノード間の因果関係を表すエッジとを用いて、前記因果構造を示す有向非巡回グラフを生成し、

生成した有向非巡回グラフを表示する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項１に記載のコンピュータプログラム。

[請求項3] 前記制約条件は、一のノードに対して、共線性を有する他の複数のノードからエッジが引かれることを禁止するという条件を含み、

前記条件を課して観測変数間の因果関係を探索し直すことにより、前記因果構造を修正する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項２に記載のコンピュータプログラム。

[請求項4] 表示した有向非巡回グラフを修正する操作を受付け、

受付けた操作に基づき、前記因果構造を修正する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項２に記載のコンピュータプログラム。

[請求項5] 前記観測変数間の関係の一部は、非線形性を有する

請求項１に記載のコンピュータプログラム。

[請求項6] 前記非線形性を有する観測変数間の間に、前記観測変数間の関係の関数形を示すノードを補完する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項５に記載のコン

ピュータプログラム。

[請求項7] 線形性を有する観測変数間のノードと、非線形性を有する観測変数間のノードとを異なる表示態様にて表示する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項５に記載のコンピュータプログラム。

[請求項8] 前記非線形性を有する観測変数間の関係をグラフにより表示する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項５に記載のコンピュータプログラム。

[請求項9] 導出した因果構造に基づき、一の観測変数と直接的な因果関係を有する１又は複数の他の観測変数を抽出し、

抽出した１又は複数の他の観測変数を説明変数、前記一の観測変数を目的変数とした予測モデルを生成する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項１から請求項８の何れか１つに記載のコンピュータプログラム。

[請求項10] 前記観測系から、前記説明変数に対応する観測データを取得し、

取得した観測データを前記予測モデルに入力することによって、前記目的変数に対応する観測データを予測する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項９に記載のコンピュータプログラム。

[請求項11] 表示した有向非巡回グラフから、説明変数とすべき１又は複数の観測変数に対応するノードと、目的変数とすべき一の観測変数に対応するノードとを選択する操作を受付け、

受付けた操作に基づき、前記１又は複数の観測変数を説明変数、前記一の観測変数を目的変数とした予測モデルを生成する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項２から請求項８の何れか１つに記載のコンピュータプログラム。

[請求項12] 前記観測系から、前記説明変数に対応する観測データを取得し、

取得した観測データを前記予測モデルに入力することによって、前

記目的変数に対応する観測データを予測する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項１１に記載のコンピュータプログラム。

[請求項13] 導出した因果構造に基づき、一の観測変数の変動原因候補となる１又は複数の他の観測変数を抽出し、

抽出した他の観測変数に基づき、前記一の観測変数の変動を抑制するための対処情報を出力する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項１から請求項８の何れか１つに記載のコンピュータプログラム。

[請求項14] 導出した因果構造に基づき、一の観測変数の変動原因候補となる１又は複数の他の観測変数を抽出し、

抽出した１又は複数の他の観測変数に対応するノードの表示態様を変更し、

表示態様を変更したノードから、変動原因候補を絞り込む操作を受付け、

絞り込まれた変動原因候補に基づき、前記一の観測変数の変動を抑制するための対処情報を出力する

処理を前記コンピュータに実行させるための請求項２から請求項８の何れか１つに記載のコンピュータプログラム。

[請求項15] 前記観測系は、基板処理装置であり、

前記観測データとして、前記基板処理装置にて設定されるデータ、及び前記基板処理装置にて計測されるデータを取得する

請求項１に記載のコンピュータプログラム。

[請求項16] 監視対象の観測系から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得する取得部と、

取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索する探索部と、

前記観測変数間に適用すべき制約条件に応じて、前記因果関係を修

正することにより、前記観測系における観測変数の因果構造を導出する導出部と

を備える情報処理装置。

[請求項17] 監視対象の観測系から、複数種の観測変数に対応する観測データを取得し、

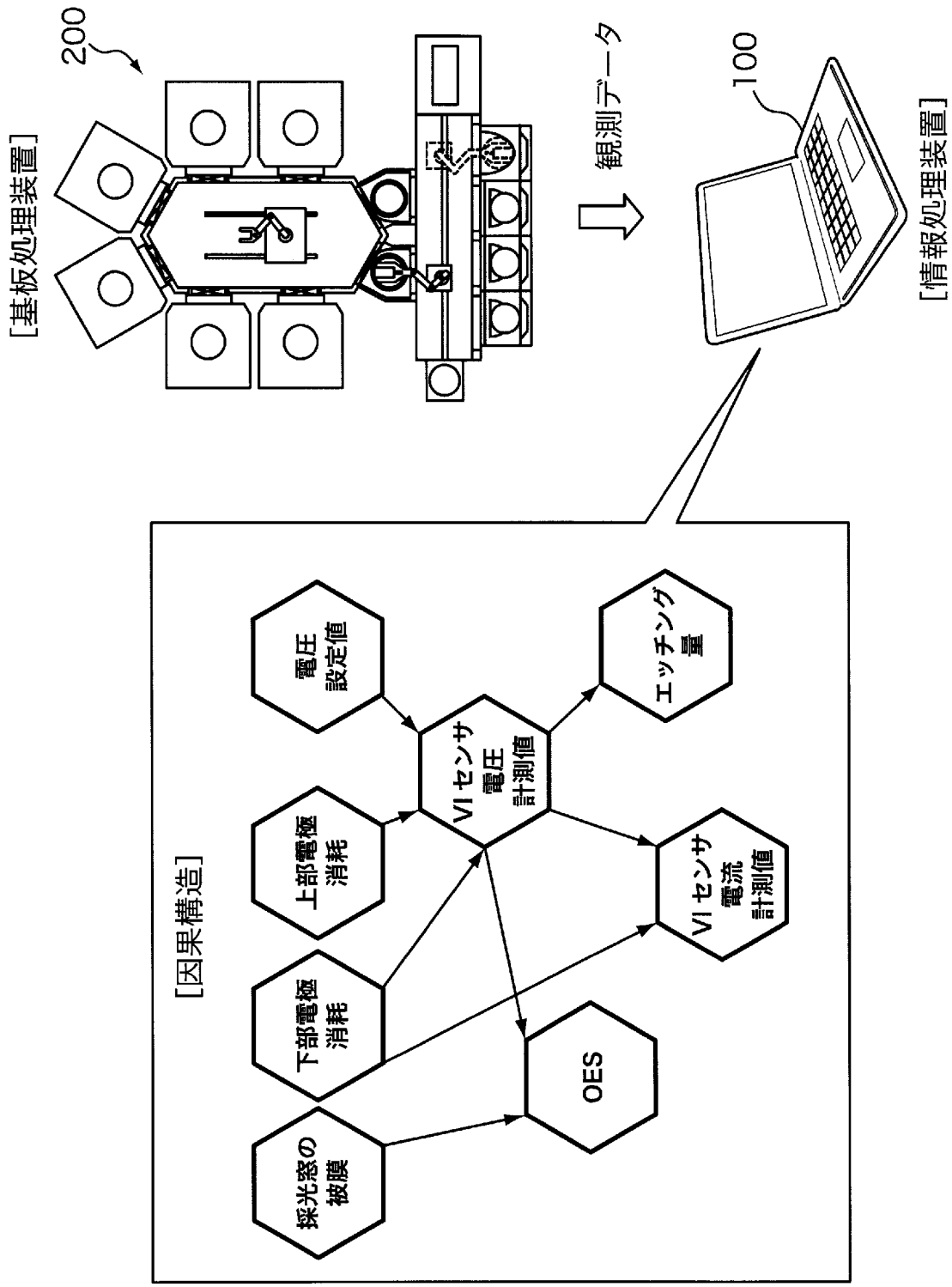
取得した観測データに基づき、観測変数間の因果関係を探索し、

前記観測変数間に適用すべき制約条件に応じて、前記因果関係を修正することにより、前記観測系における観測変数の因果構造を導出する

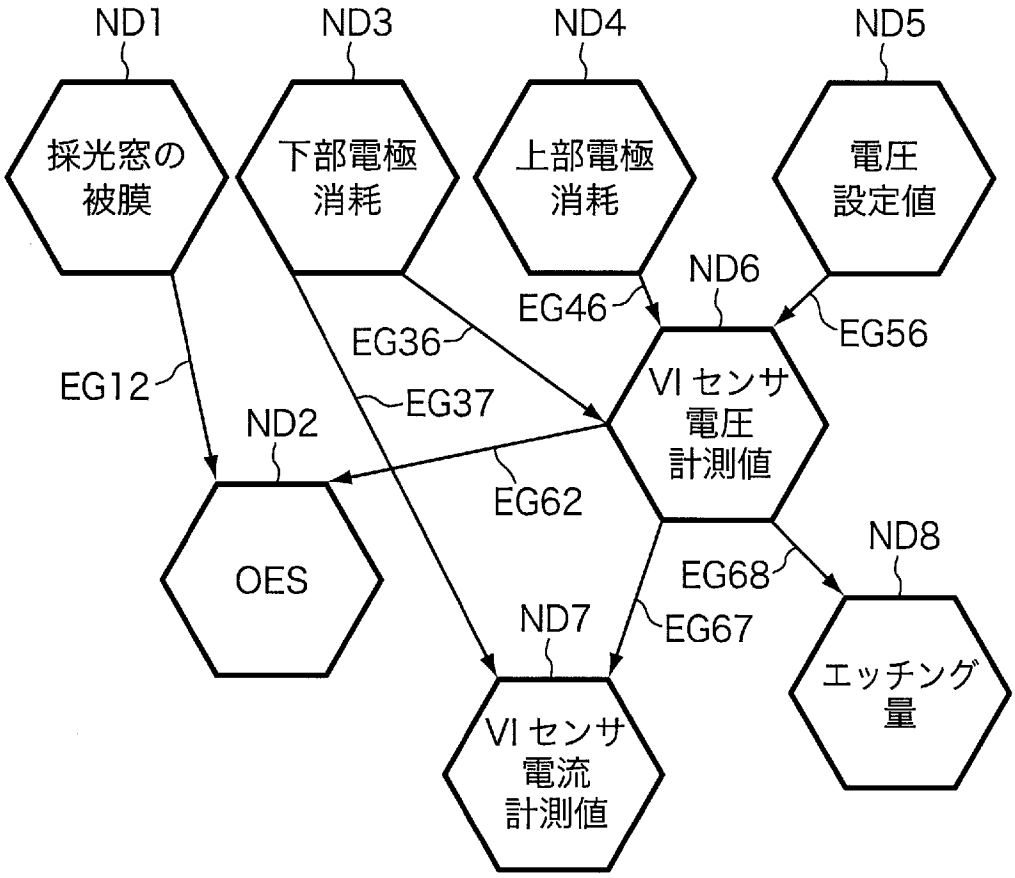
処理をコンピュータにより実行する情報処理方法。

[図1]

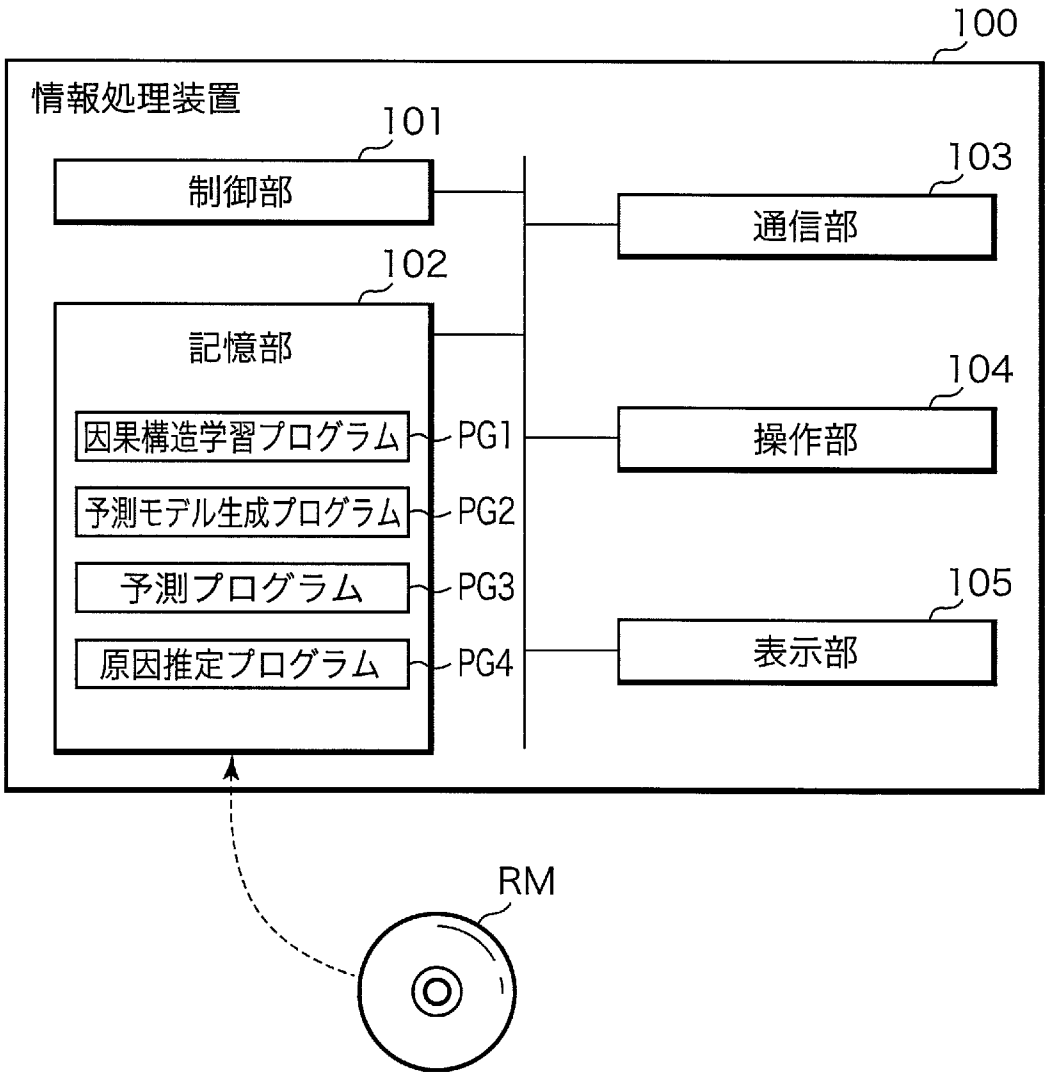
【図１】


200
[基板処理装置]
観測データ
100
[情報処理装置]
[因果構造]
電圧
設定値
上部電極
消耗
下部電極
消耗
採光窓の
被膜
VI センサ
電圧
計測値
OES
エッチング
量
VI センサ
電流
計測値

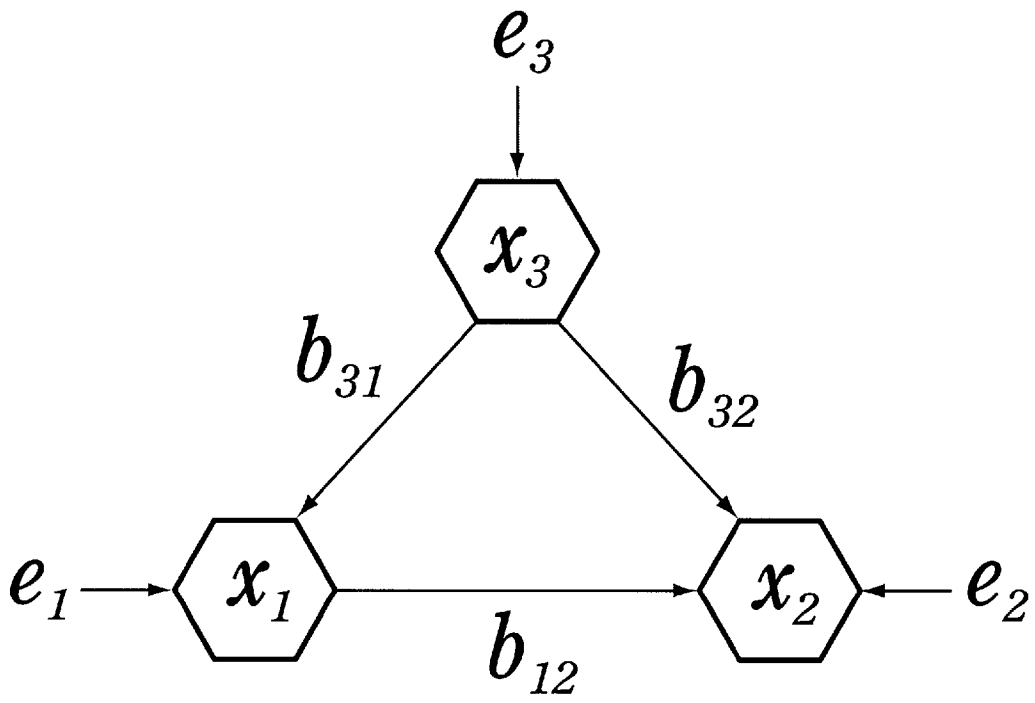
[図2]


ND1
ND3
ND4
ND5
採光窓の被膜
下部電極消耗
上部電極消耗
電圧設定値
ND6
EG46
EG56
EG36
EG12
EG37
VIセンサ電圧計測値
ND2
EG62
OES
ND8
EG68
ND7
EG67
エッチング量
VIセンサ電流計測値

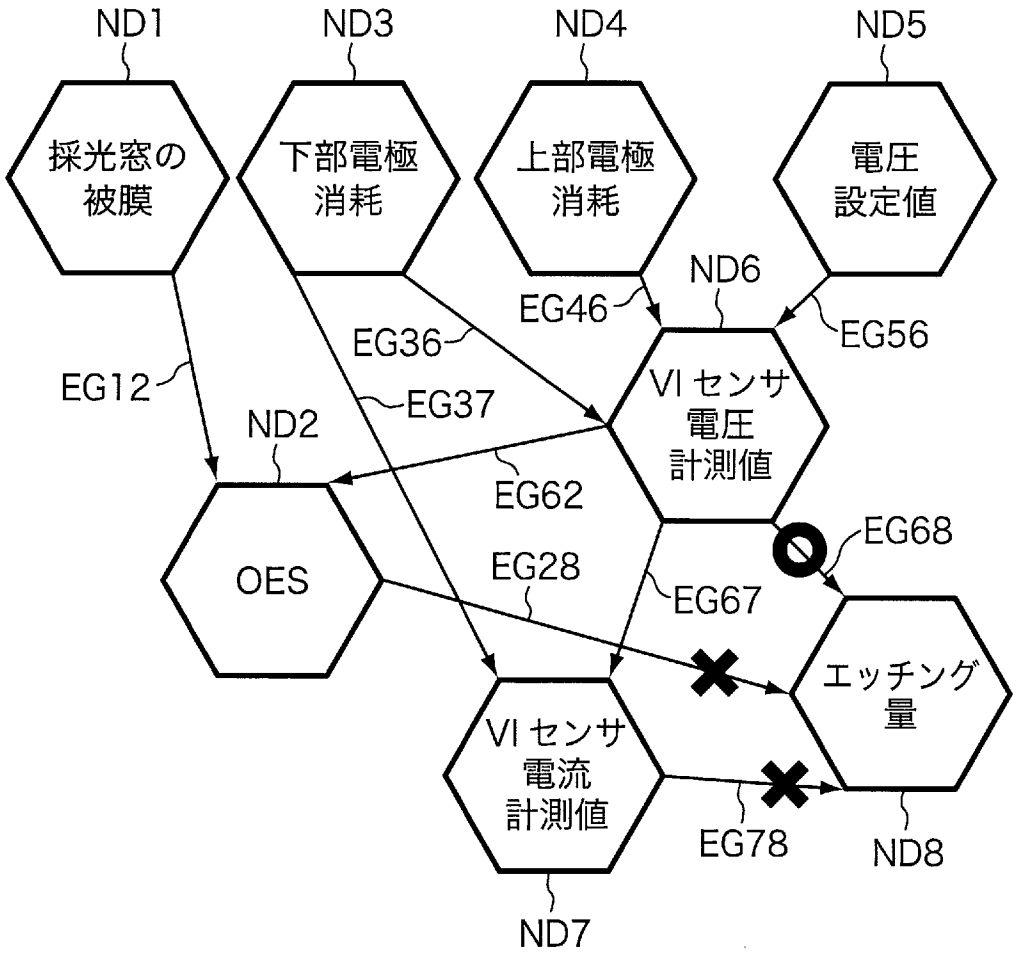
[図3]


100
情報処理装置
101
制御部
102
記憶部
因果構造学習プログラム
PG1
予測モデル生成プログラム
PG2
予測プログラム
PG3
原因推定プログラム
PG4
103
通信部
104
操作部
105
表示部
RM

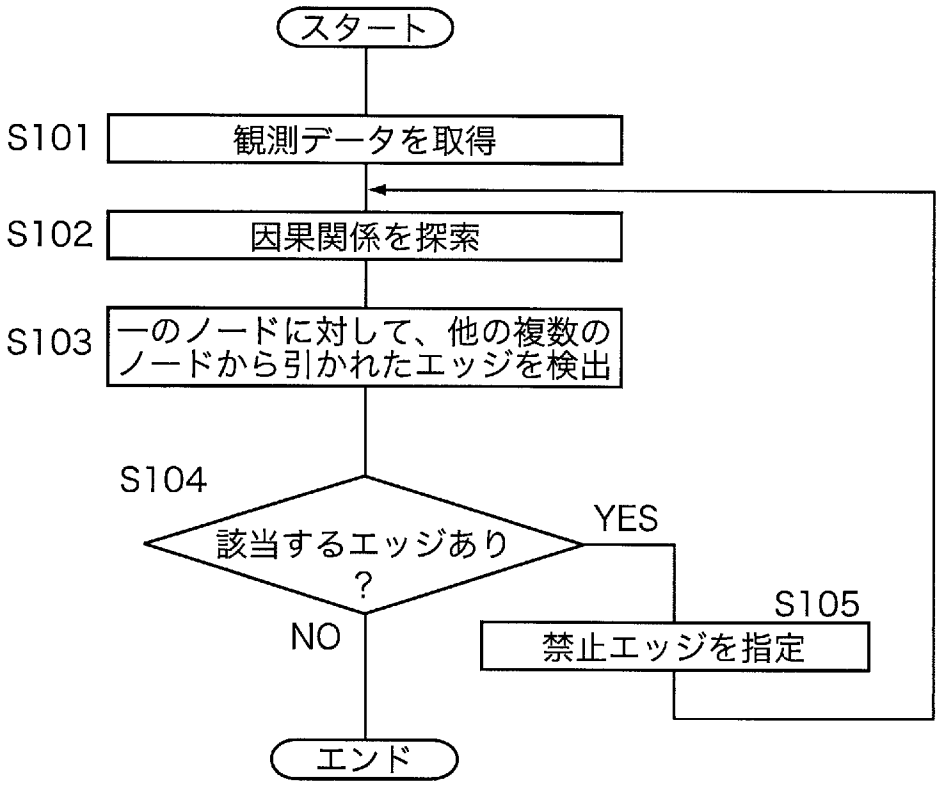
[図4]


e_3
x_3
b_{31}
b_{32}
e_1
x_1
x_2
e_2
b_{12}

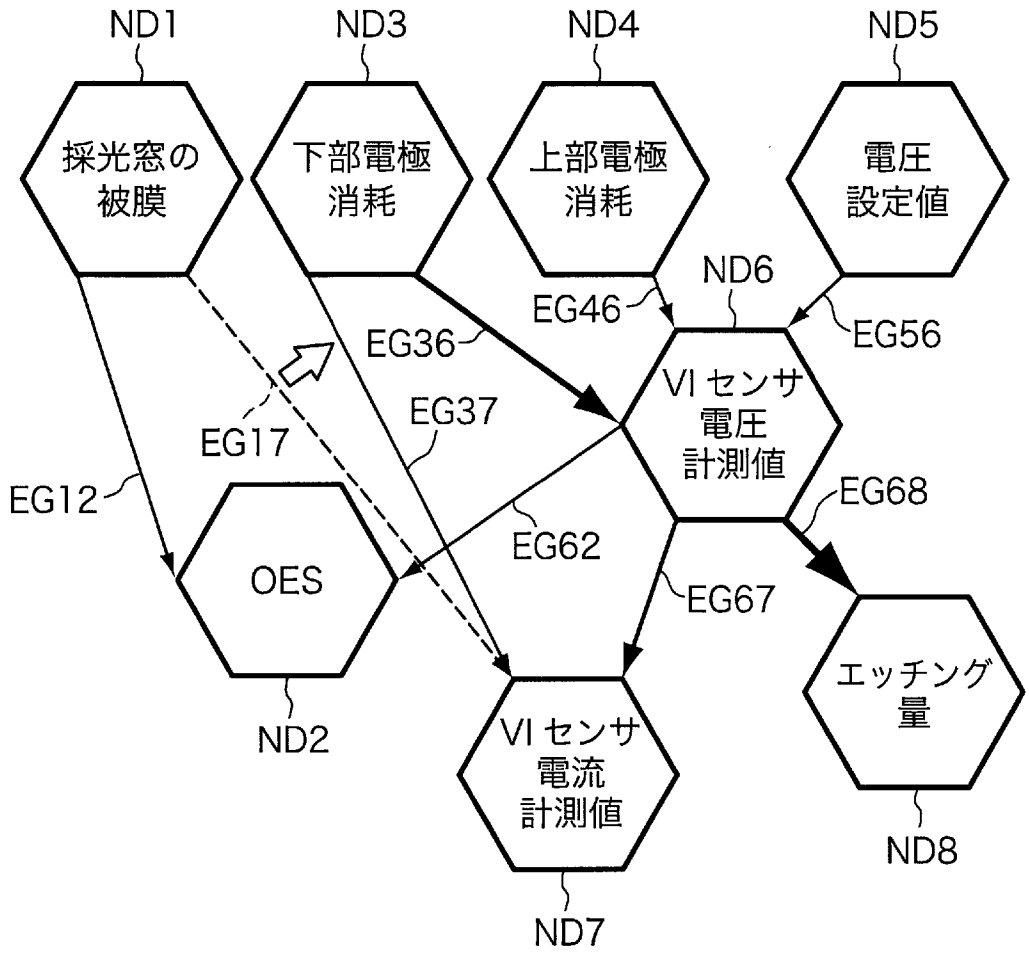
[図5]


ND1
ND3
ND4
ND5
採光窓の被膜
下部電極消耗
上部電極消耗
電圧設定値
ND6
EG46
EG56
EG36
EG12
EG37
VI センサ電圧計測値
ND2
EG62
EG68
OES
EG28
EG67
エッチング量
VI センサ電流計測値
EG78
ND8
ND7

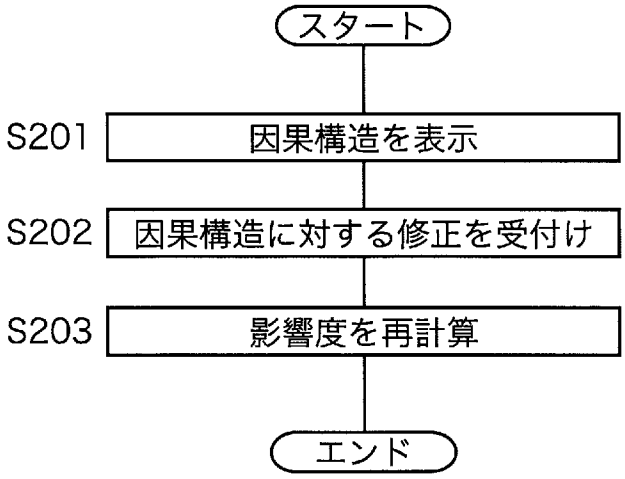
[図6]


スタート
S101
観測データを取得
S102
因果関係を探索
S103
一のノードに対して、他の複数のノードから引かれたエッジを検出
S104
該当するエッジあり？
YES
NO
S105
禁止エッジを指定
エンド

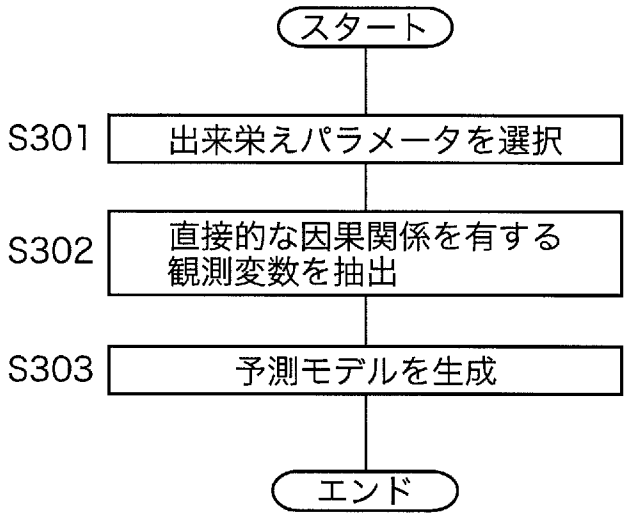
[図7]


ND1
ND3
ND4
ND5
採光窓の被膜
下部電極消耗
上部電極消耗
電圧設定値
ND6
EG46
EG56
EG36
VI センサ電圧計測値
EG37
EG17
EG12
EG68
EG62
OES
EG67
エッチング量
ND2
VI センサ電流計測値
ND8
ND7

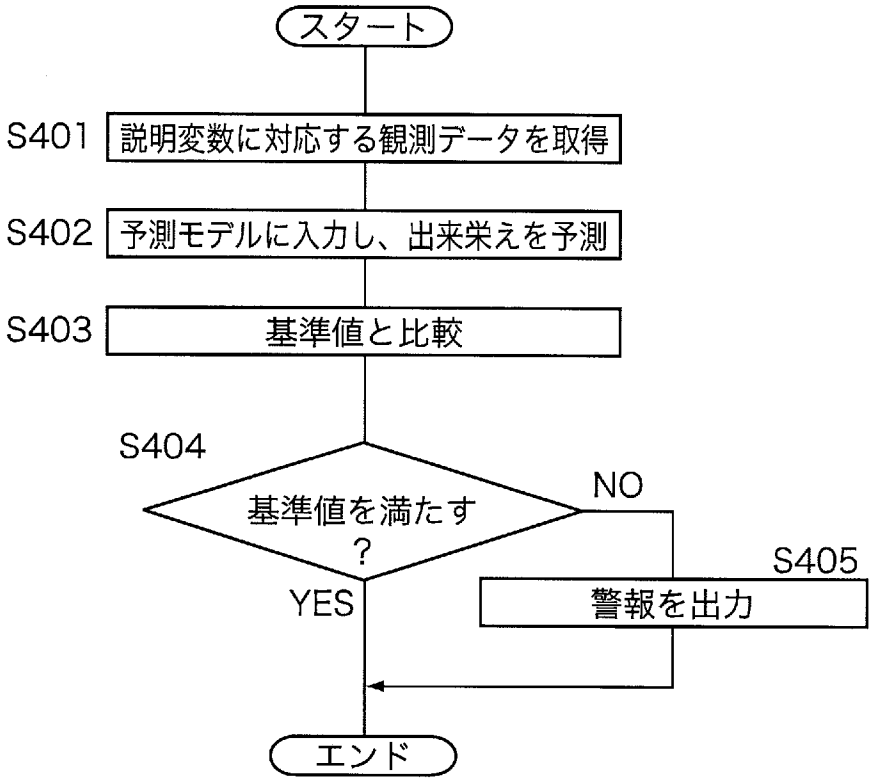
[図8]


スタート
S201
因果構造を表示
S202
因果構造に対する修正を受付け
S203
影響度を再計算
エンド

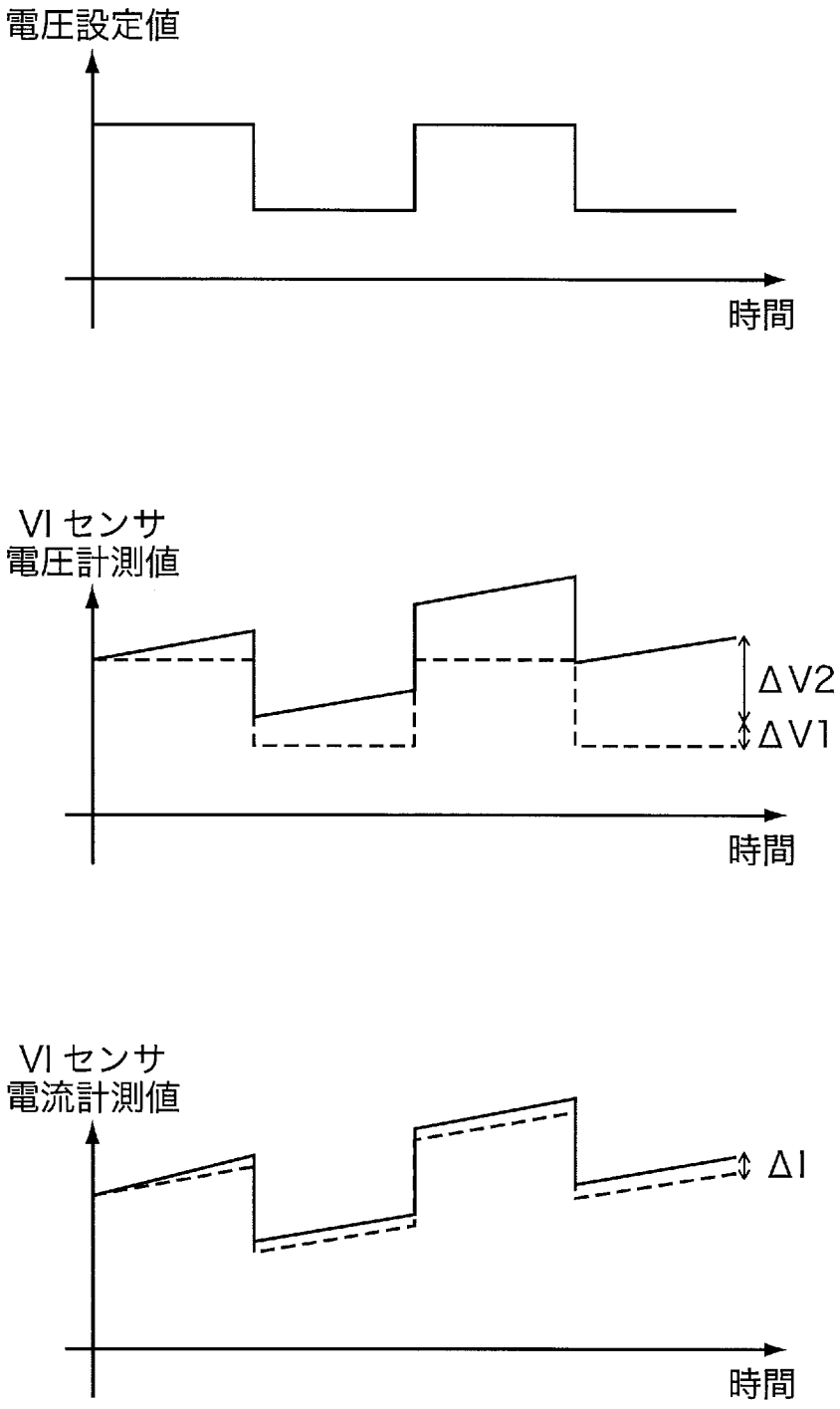
[図9]


スタート
S301
出来栄えパラメータを選択
S302
直接的な因果関係を有する
観測変数を抽出
S303
予測モデルを生成
エンド

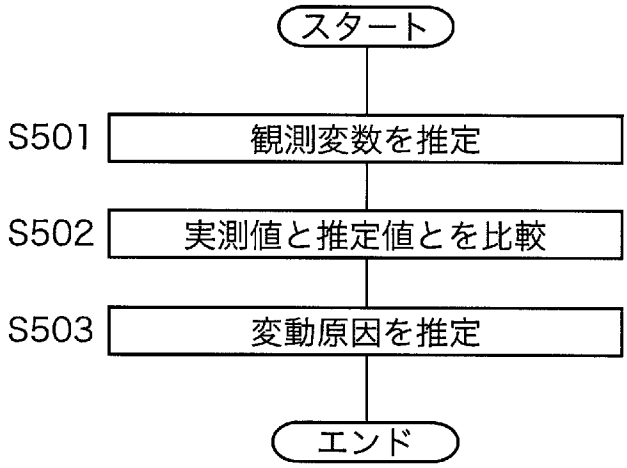
[図10]


スタート
S401
説明変数に対応する観測データを取得
S402
予測モデルに入力し、出来栄えを予測
S403
基準値と比較
S404
基準値を満たす
?
NO
S405
警報を出力
YES
エンド

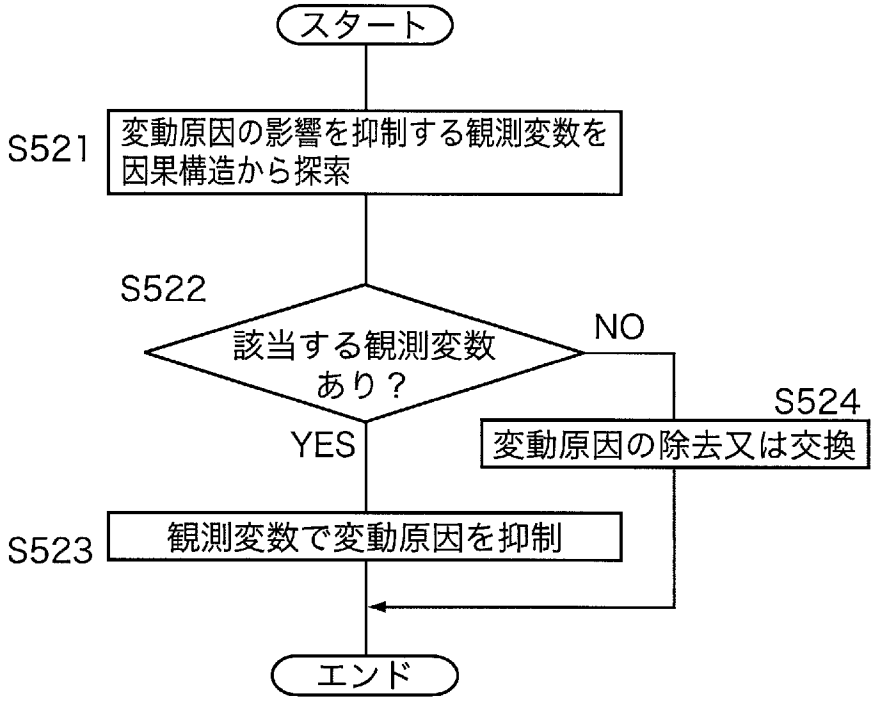
[図11]



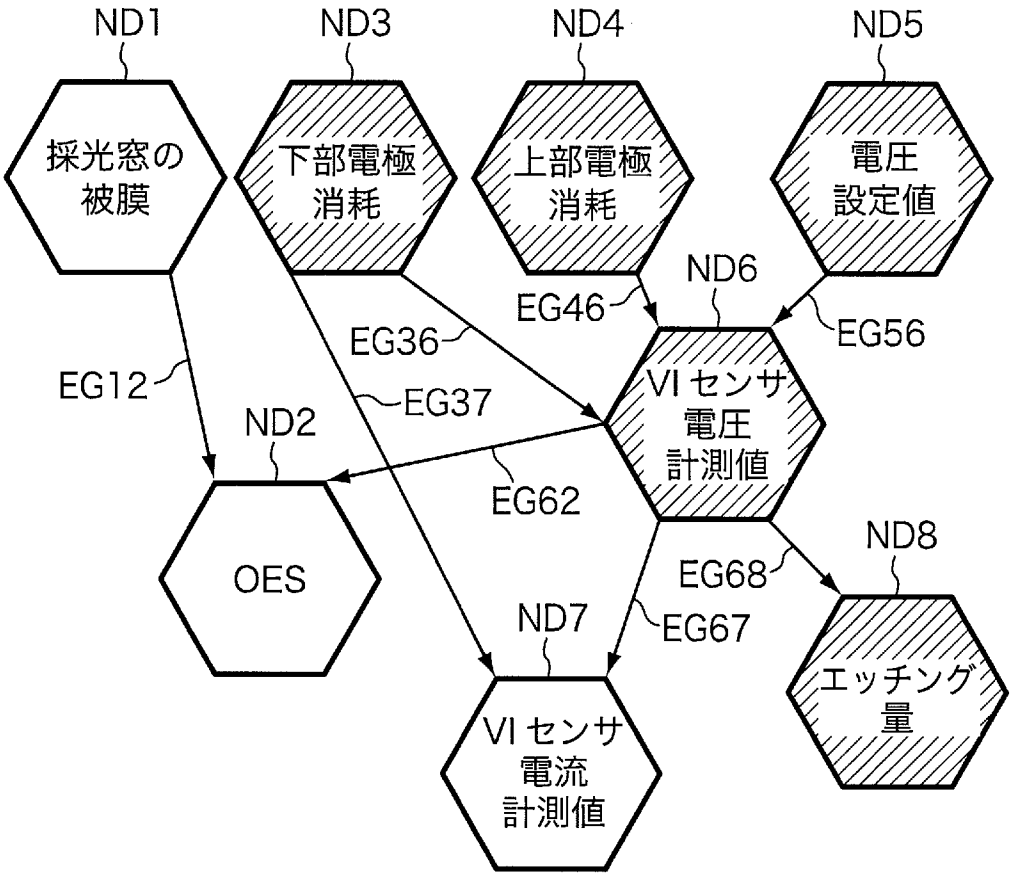
[図12]


スタート
S501
観測変数を推定
S502
実測値と推定値とを比較
S503
変動原因を推定
エンド

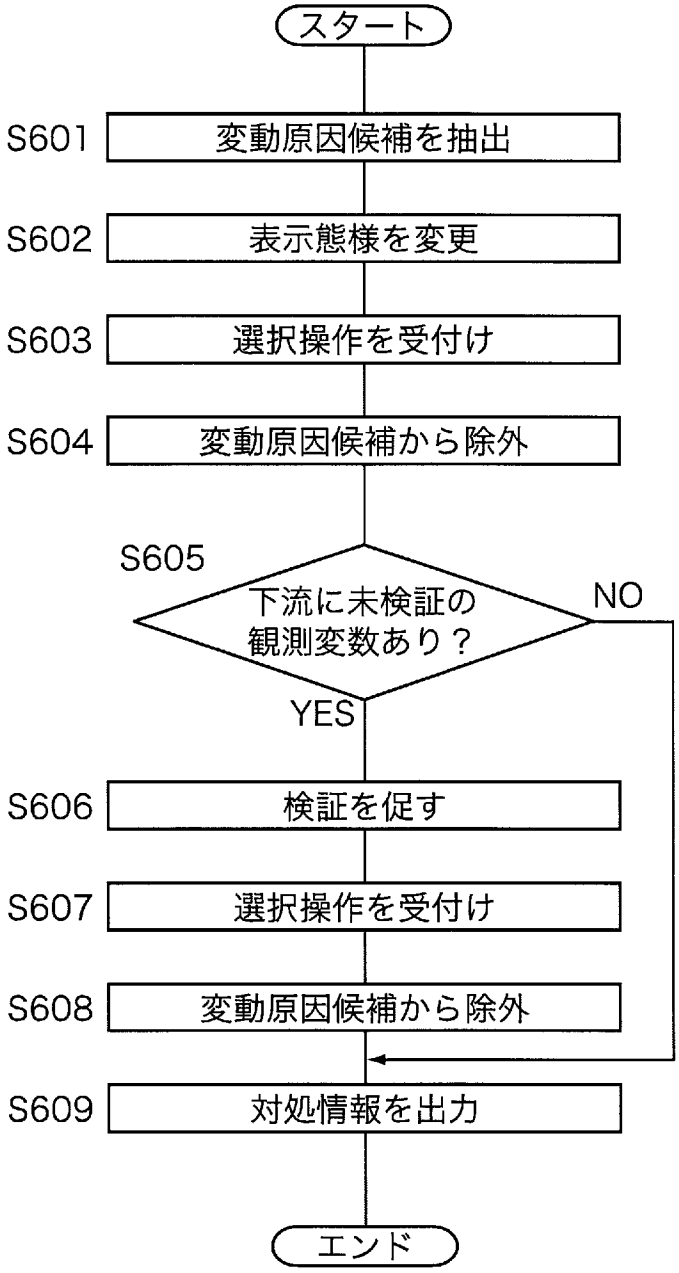
[図13]


スタート
S521
変動原因の影響を抑制する観測変数を因果構造から探索
S522
該当する観測変数あり？
NO
S524
変動原因の除去又は交換
YES
S523
観測変数で変動原因を抑制
エンド

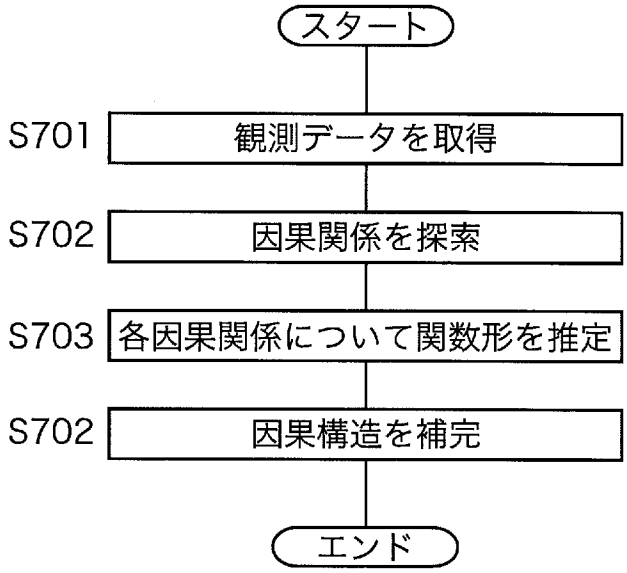
[図14]


ND1
ND3
ND4
ND5
採光窓の被膜
下部電極消耗
上部電極消耗
電圧設定値
ND6
EG46
EG56
EG36
EG12
EG37
ND2
VIセンサ電圧計測値
EG62
OES
ND8
EG68
ND7
EG67
エッチング量
VIセンサ電流計測値

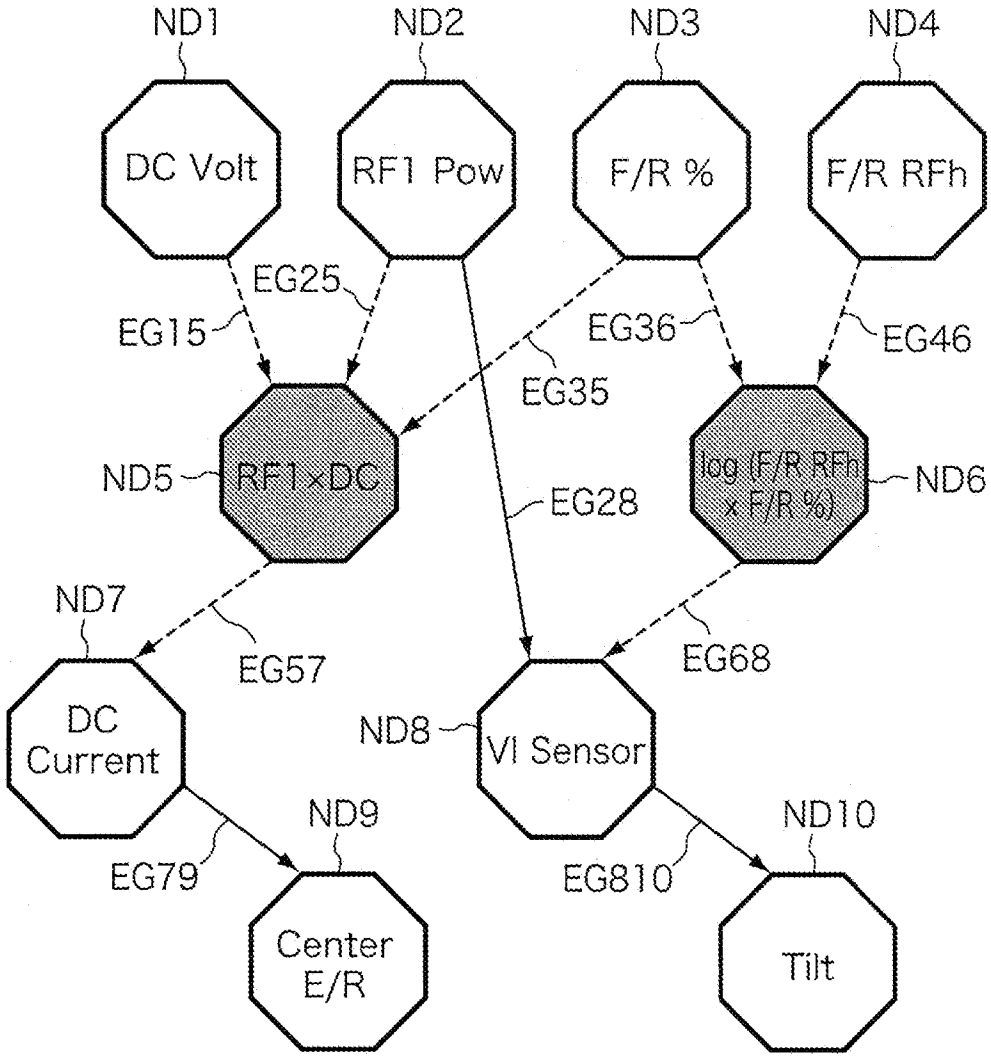
[図15]


スタート
S601
変動原因候補を抽出
S602
表示態様を変更
S603
選択操作を受付け
S604
変動原因候補から除外
S605
下流に未検証の
観測変数あり？
NO
YES
S606
検証を促す
S607
選択操作を受付け
S608
変動原因候補から除外
S609
対処情報を出力
エンド

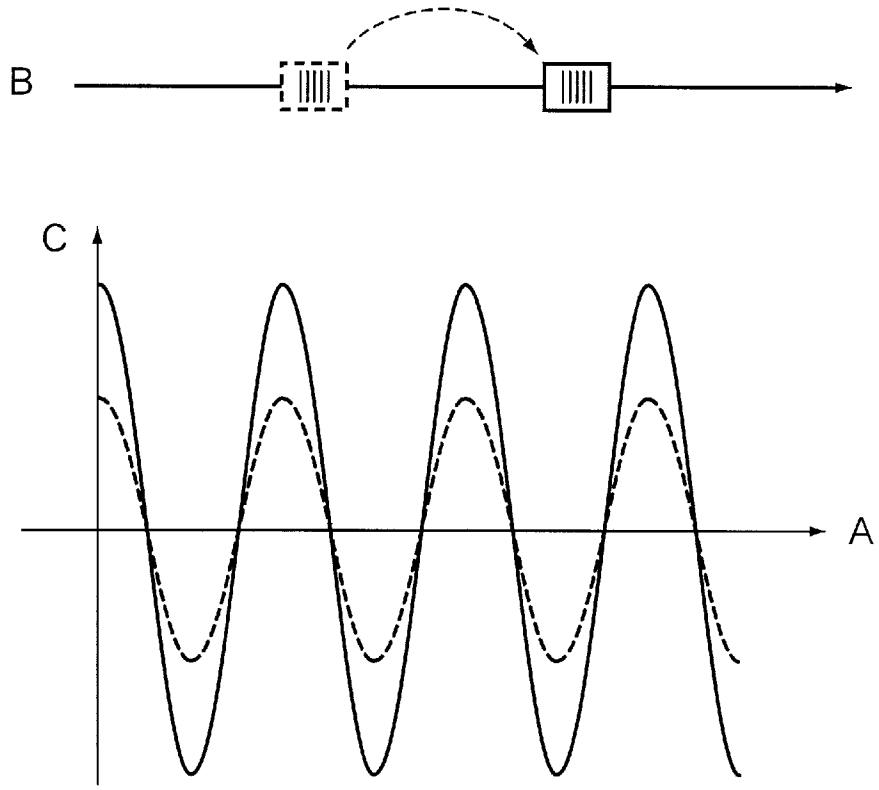
[図16]


スタート
S701
観測データを取得
S702
因果関係を探索
S703
各因果関係について関数形を推定
S702
因果構造を補完
エンド

[図17]

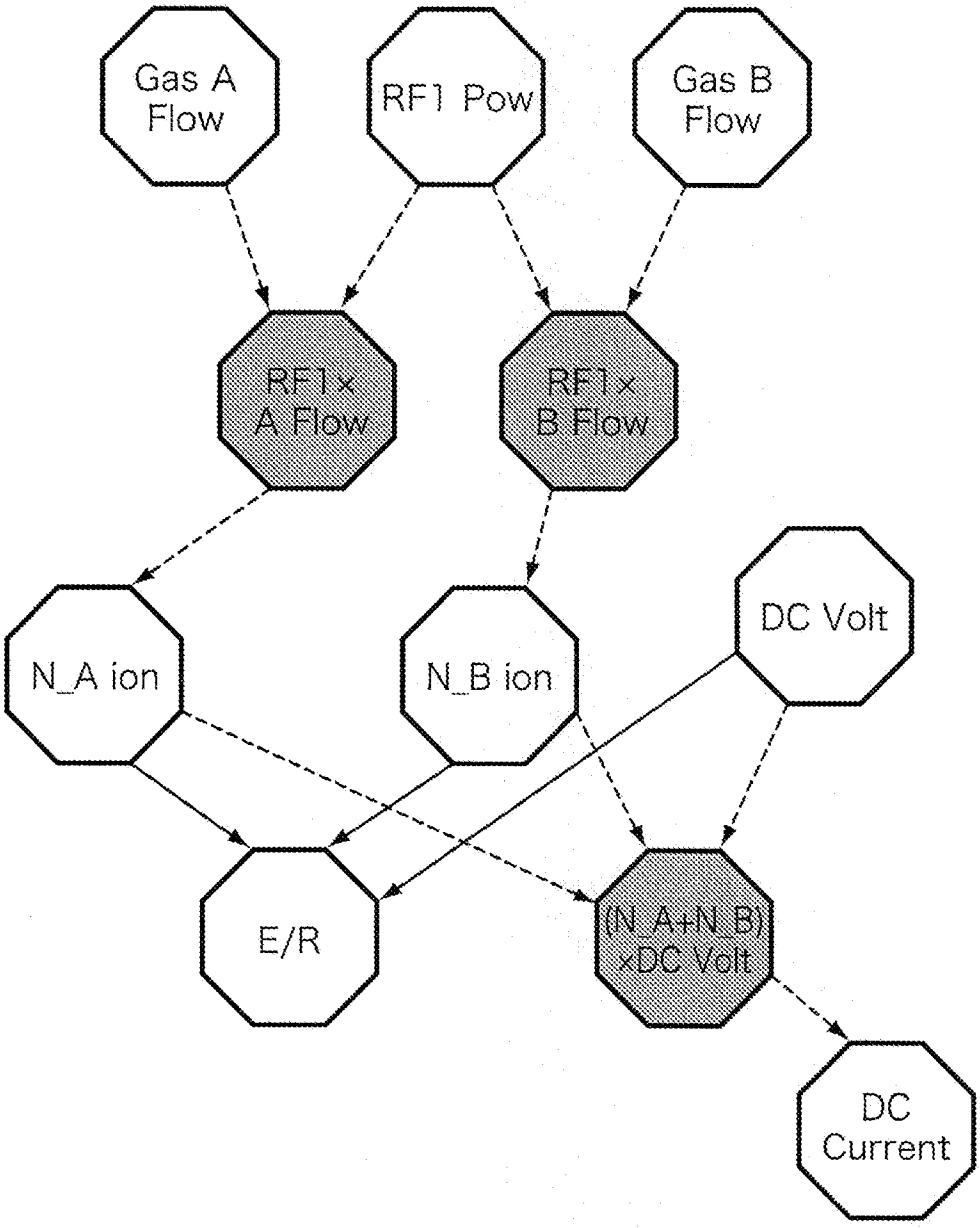

ND1
ND2
ND3
ND4
DC Volt
RF1 Pow
F/R %
F/R RFh
EG25
EG15
EG36
EG46
EG35
ND5
RF1×DC
log (F/R RFh × F/R %)
ND6
EG28
ND7
EG57
EG68
DC Current
ND8
VI Sensor
ND9
ND10
EG79
EG810
Center E/R
Tilt

[図18]

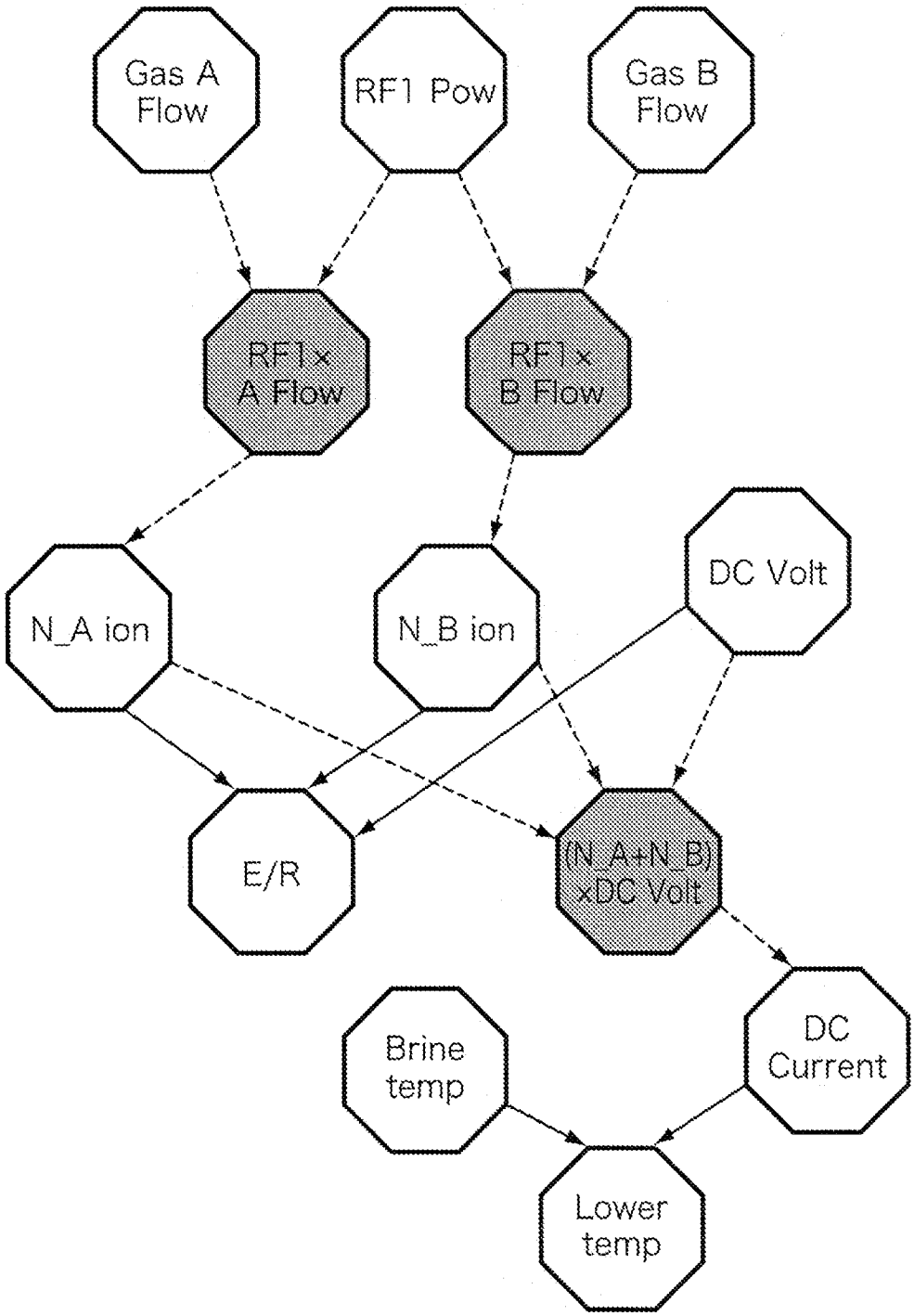


$$C = B \times \cos(A)$$

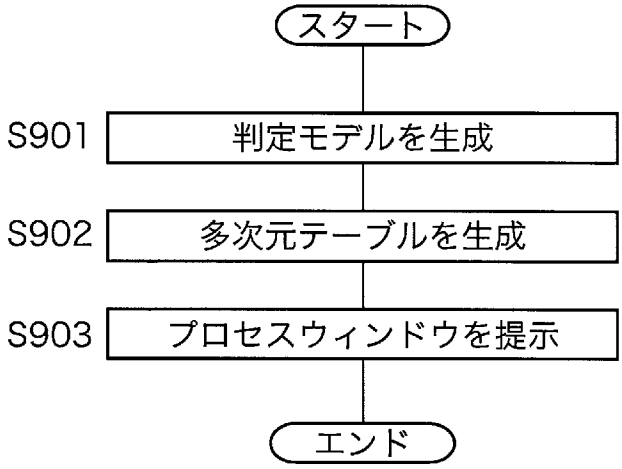
[図19]


Gas A Flow
RF1 Pow
Gas B Flow
RF1× A Flow
RF1× B Flow
N_A ion
N_B ion
DC Volt
E/R
(N_A+N_B) ×DC Volt
DC Current

[図20]


Gas A Flow
RF1 Pow
Gas B Flow
RF1× A Flow
RF1× B Flow
N_A ion
N_B ion
DC Volt
E/R
(N_A+N_B) ×DC Volt
Brine temp
DC Current
Lower temp

[図21]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2023/042098

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06N 5/025(2023.01)i
FI: G06N5/025

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)

G06N5/025

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.
X	JP 2020-149301 A (OMRON CORPORATION) 17 September 2020 (2020-09-17) paragraphs [0039], [0052]-[0053], [0063], [0069], [0113]-[0115]	1-4, 16-17
Y		5-15
Y	WO 2022/104616 A1 (ALIBABA GROUP HOLDING LIMITED) 27 May 2022 (2022-05-27) paragraphs [0010]-[0016]	5-14
Y	JP 2020-149299 A (OMRON CORPORATION) 17 September 2020 (2020-09-17) paragraphs [0168], [0172]-[0176]	6-14
Y	JP 2022-170171 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP) 10 November 2022 (2022-11-10) paragraphs [0042], [0055]-[0057], [0064]	9-12
Y	JP 2020-052714 A (HITACHI LTD) 02 April 2020 (2020-04-02) paragraphs [0011], [0058]-[0073]	13-14

☑ 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
02 February 2024	**13 February 2024**

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 02-102453 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD) 16 April 1990 (1990-04-16) p. 2, lower left column, lines 7-13, p. 3, upper left column, line 15 to upper right column, line 6	13-14
Y	JP 2008-217711 A (OMRON CORPORATION) 18 September 2008 (2008-09-18) paragraphs [0049]-[0058], [0142]-[0144]	15
A	US 2022/0343193 A1 (ABB SCHWEIZ AG) 27 October 2022 (2022-10-27) paragraphs [0016]-[0051]	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2023/042098

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2020-149301 A	17 September 2020	US 2021/0165401 A1 paragraphs [0059], [0072]-[0073], [0083], [0089], [0136]-[0138] WO 2020/184087 A1 EP 3940484 A1 CN 112543897 A	
WO 2022/104616 A1	27 May 2022	US 2023/0289634 A1 paragraphs [0011]-[0017] CN 114080609 A	
JP 2020-149299 A	17 September 2020	US 2021/0325840 A1 paragraphs [0245]-[0246], [0251]-[0256] WO 2020/184130 A1 EP 3940485 A1 CN 112543898 A	
JP 2022-170171 A	10 November 2022	(Family: none)	
JP 2020-052714 A	02 April 2020	US 2021/0240174 A1 paragraphs [0045], [0092]-[0107] WO 2020/066052 A1 EP 3859472 A1	
JP 02-102453 A	16 April 1990	(Family: none)	
JP 2008-217711 A	18 September 2008	(Family: none)	
US 2022/0343193 A1	27 October 2022	EP 4080303 A1 paragraphs [0041]-[0068] CN 115237086 A	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2023/042098

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G06N 5/025(2023.01)i
FI: G06N5/025

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））

G06N5/025

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
X	JP 2020-149301 A (オムロン株式会社) 17.09.2020 (2020-09-17) 段落[0039], [0052]-[0053], [0063], [0069]及び[0113]-[0115]	1-4, 16-17
Y		5-15
Y	WO 2022/104616 A1 (ALIBABA GROUP HOLDING LIMITED) 27.05.2022 (2022-05-27) 段落[0010]-[0016]	5-14
Y	JP 2020-149299 A (オムロン株式会社) 17.09.2020 (2020-09-17) 段落[0168]及び[0172]-[0176]	6-14
Y	JP 2022-170171 A (三菱電機株式会社) 10.11.2022 (2022-11-10) 段落[0042], [0055]-[0057]及び[0064]	9-12
Y	JP 2020-052714 A (株式会社日立製作所) 02.04.2020 (2020-04-02) 段落[0011]及び[0058]-[0073]	13-14
Y	JP 02-102453 A (三菱重工業株式会社) 16.04.1990 (1990-04-16) 第2頁左下欄第7-13行及び第3頁左上欄第15行－同頁右上欄第6行	13-14

☑ 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
02.02.2024	13.02.2024

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）

坂庭　剛史 5B 9288

電話番号 03-3581-1101 内線 3545

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 2008-217711 A (オムロン株式会社) 18.09.2008 (2008-09-18) 段落[0049]-[0058]及び[0142]-[0144]	15
A	US 2022/0343193 A1 (ABB SCHWEIZ AG) 27.10.2022 (2022-10-27) 段落[0016]-[0051]	1-17

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/JP2023/042098

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2020-149301 A	17.09.2020	US 2021/0165401 A1 段落[0059], [0072]-[0073], [0083], [0089]及び[0136]-[0138] WO 2020/184087 A1 EP 3940484 A1 CN 112543897 A	
WO 2022/104616 A1	27.05.2022	US 2023/0289634 A1 段落[0011]-[0017] CN 114080609 A	
JP 2020-149299 A	17.09.2020	US 2021/0325840 A1 段落[0245]-[0246]及び[0251]-[0256] WO 2020/184130 A1 EP 3940485 A1 CN 112543898 A	
JP 2022-170171 A	10.11.2022	（ファミリーなし）	
JP 2020-052714 A	02.04.2020	US 2021/0240174 A1 段落[0045]及び[0092]-[0107] WO 2020/066052 A1 EP 3859472 A1	
JP 02-102453 A	16.04.1990	（ファミリーなし）	
JP 2008-217711 A	18.09.2008	（ファミリーなし）	
US 2022/0343193 A1	27.10.2022	EP 4080303 A1 段落[0041]-[0068] CN 115237086 A	