

(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
2018年3月8日(08.03.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/042840 A1

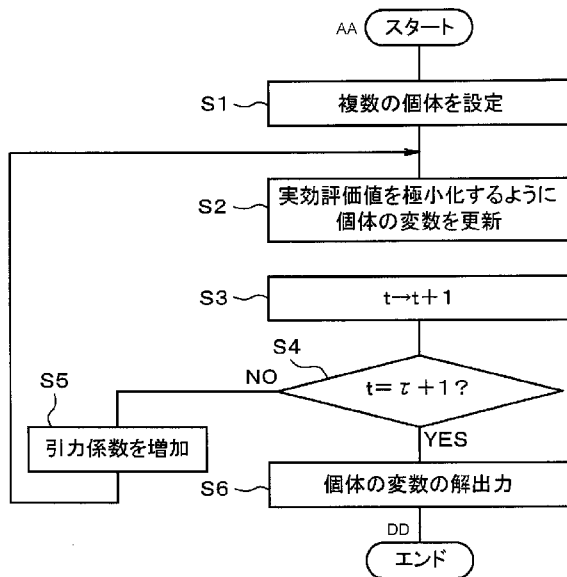
- (51) 国際特許分類:
G06N 99/00 (2010.01) *G05B 13/02* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/023050
- (22) 国際出願日: 2017年6月22日(22.06.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2016-171776 2016年9月2日(02.09.2016) JP
- (71) 出願人: 株式会社デンソー (DENSO CORPORATION) [JP/JP]; 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 Aichi (JP). 国立大学法人 京都大学 (KYOTO UNIVERSITY)

[JP/JP]; 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町3番地1 Kyoto (JP).

- (72) 発明者: 岡田 俊太郎 (OKADA, Shuntaro); 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内 Aichi (JP). 寺部 雅能 (TERABE, Masayoshi); 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内 Aichi (JP). 大関 真之 (OHZEKI, Masayuki); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町3番地1 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 サトー国際特許事務所 (SATO INTERNATIONAL PATENT FIRM); 〒4600008 愛知県名古屋市中区栄四丁目

(54) Title: CONTINUOUS VALUE OPTIMIZATION PROBLEM GLOBAL SEARCH DEVICE AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 連続値最適化問題の大域的探索装置及びプログラム



- S1 Set a plurality of individual pieces
S2 Update individual piece variables so as to minimize effective evaluation value
S5 Increase gravitational force coefficient
S6 Individual piece variables solution output
AA Start
DD End

(57) Abstract: In the present invention, a setting unit (6) sets a plurality of individual piece variables in accordance with an evaluation function in a search space. An extreme value conversion unit (7) derives a gravitational force potential that causes a gravitational force to act on at least two individual pieces selected from among the plurality of individual pieces set by the setting unit, and converts to an extreme value an effective evaluation value (Heff) obtained by adding: an evaluation addition value obtained by adding evaluation values of an evaluation function based on the plurality of individual piece variables; and a gravitational force value obtained by adding up the derived gravitational force potential between the selected individual pieces, and multiplying the addition value by a gravitational force coefficient ($g/2$) acting between the selected individual pieces. A derivation unit (8) changes the plurality of individual piece variables such that the effective evaluation value is converted to an extreme value by the extreme value conversion unit, while increasing the gravitational force coefficient gradually from an initial value, and derives various values using the individual piece variable, the optimized value of the variable, the evaluation value corresponding to the variable, or the optimized value of the evaluation value, on the basis of at



6 番 1 5 号 フォーティーンヒルズセ
ンタービル Aichi (JP).

- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

least one of the plurality of individual pieces when a prescribed end condition is satisfied.

(57) 要約: 設定部(6)は、複数の個体の変数を探索空間の中の評価関数に沿って設定する。極値化部(7)は、設定部により設定される複数の個体のうち少なくとも2つ以上の選定個体に引力を作用させる引力ポテンシャルを導出し、複数の個体の変数による評価関数の評価値を加算した評価加算値、及び、導出された選定個体の間の引力ポテンシャルを加算しこの加算値に選定個体の間に作用させる引力係数($g/2$)とを乗算した引力値、を加算した実効評価値(Heff)を極値化する。導出部(8)は、引力係数を初期値から徐々に大きくしながら極値化部により実効評価値が極値化するように複数の個体の変数を変化させ、所定の終了条件を満たしたときにおける複数の個体の少なくとも一つの個体に基づいて、個体の変数、その変数の最適値、変数に対応した評価値、又は、評価値の最適値による各種値を導出する。

明 細 書

発明の名称：連続値最適化問題の大域的探索装置及びプログラム 関連出願の相互参照

[0001] 本出願は、2016年9月2日に提出された日本出願番号2016-171776号に基づくもので、ここにその記載内容を援用する。

技術分野

[0002] 本開示は、連続値最適化問題の大域的探索装置及びプログラムに関する。

背景技術

[0003] 例えば、多次元の探索空間において変数、すなわちパラメータの最適値を求める手法が提案されている（例えば、特許文献1参照）。特許文献1記載の技術によれば、探索空間内に最適値算出対象のパラメータを要素とする複数の個体を生成し、これらの個体の評価値を算出し、個体の中から評価値の悪い個体を選択している。そして、この選択された個体を評価値の良い個体に所定の割合で近づけている。また、評価値の悪い個体を最良の評価値の個体から一定のユークリッド距離内にある任意の領域に移動させている。そして、より良い評価値の個体を選択し最良の評価値の個体を随時更新し、複数の個体の評価値を収束させ、終了判定条件を満たしたと判定した時点で最良の評価値を有する個体に含まれるパラメータをパラメータの最適値として出力している。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2007-233676号公報

発明の概要

[0005] 特許文献1等に記載の技術を用いて、例えば、複数の極値（例えば、極小値）を備えた評価関数の最小値又は最大値となる変数の最適値を探索するとき、当該変数の最適値への到達確率を高めるためには、複数の個体が最適な1カ所に収束する過程において可能な限り多くの極値（例えば、極小値）を

探索することが望ましい。

[0006] しかしながら、特許文献 1 記載の技術を適用したとしても、複数の個体を互いに近づける収束過程において、個体の移動経路はその評価関数の形状とは無関係に決定されてしまう。このため、個体が収束過程において極値を通過するとは限らず、どの個体に収束させることが望ましいか正確に判断できなかったり最適値を通過してしまうことがある。個体の移動処理を極力細かくすることにより最適値への到達確率は高まるものの、個体の移動の回数が増加してしまい好ましくない。

[0007] 本開示の目的は、複数の極値を備えた評価関数の最小値又は最大値を探索するときに、変数の最適値への到達確率を高めながら極力少ない回数で最適値へ到達できるようにした連続値最適化問題の大域的探索装置及びプログラムを提供することにある。

[0008] 本開示の一態様によれば、1 以上の次元を備えた探索空間に複数の極値を備える評価関数に個体を設定することに基づいて個体の変数又は変数の最適値を導出する最適化装置を対象としている。

[0009] 設定部は、複数の個体の変数を探索空間の中の評価関数に沿って設定する。また、極値化部は、設定部により設定される複数の個体のうち少なくとも 2 つ以上の選定個体に引力を作用させる引力ポテンシャルを導出し、複数の個体による評価関数の評価値を加算した評価加算値、及び、導出された選定個体の間の引力ポテンシャルを加算しこの加算値に選定個体の間に作用させる引力係数とを乗算した引力値、を加算した実効評価値を極値化する。そして導出部は、引力係数を初期値から徐々に大きくしながら極値化部により実効評価値が極値化するように複数の個体の変数を変化させ、所定の終了条件を満たしたときにおける複数の個体の少なくとも一つの個体の評価値に基づいて、個体の変数、その変数の最適値、変数に対応した評価値、又は、評価値の最適値を導出する。このような処理を行うことで、複数の極値を備えた評価関数の最小値又は最大値を探索するときに、変数の最適値への到達確率を高めながら極力少ない回数で最適値へ到達できる。

図面の簡単な説明

[0010] 本開示についての上記目的およびその他の目的、特徴や利点は、添付の図面を参照しながら下記の詳細な記述により、より明確になる。図面においては、

[図1A]図 1 Aは、第 1 実施形態を示す連続値最適化問題の大域的探索装置の電氣的構成図であり、

[図1B]図 1 Bは、連続値最適化問題の大域的探索装置を機能的に示すブロック図であり、

[図2]図 2 は、処理の流れを概略的に示すフローチャートであり、

[図3A]図 3 Aは、個体が探索空間内の最適解に収束するときの移動状態を示すイメージ図のその 1 であり、

[図3B]図 3 Bは、個体が探索空間内の最適解に収束するときの移動状態を示すイメージ図のその 2 であり、

[図3C]図 3 Cは、個体が探索空間内の最適解に収束するときの移動状態を示すイメージ図のその 3 であり、

[図3D]図 3 Dは、個体が探索空間内の最適解に収束するときの移動状態を示すイメージ図のその 4 であり、

[図4]図 4 は、第 2 実施形態の説明図であり個体の初期分布を示す図のその 1 であり、

[図5]図 5 は、個体の初期分布を示す図のその 2 であり、

[図6]図 6 は、個体の初期分布を示す図のその 3 であり、

[図7]図 7 は、個体の初期分布を示す図のその 4 であり、

[図8]図 8 は、個体の初期分布を示す図のその 5 であり、

[図9]図 9 は、個体の初期分布を示す図のその 6 であり、

[図10]図 1 0 は、個体の初期分布を示す図のその 7 であり、

[図11]図 1 1 は、個体の初期分布を示す図のその 8 であり、

[図12]図 1 2 は、個体の初期分布を示す図のその 9 であり、

[図13]図 1 3 は、個体の初期分布を示す図のその 1 0 であり、

[図14]図14は、第3実施形態の説明図であり個体の存在分布の例を示す図であり、

[図15]図15は、引力ポテンシャルを与える選定個体の例を示す説明図のその1であり、

[図16]図16は、引力ポテンシャルを与える選定個体の例を示す説明図のその2であり、

[図17]図17は、引力ポテンシャルを与える選定個体の例を示す説明図のその3であり、

[図18]図18は、引力ポテンシャルを与える選定個体の例を示す説明図のその4であり、

[図19]図19は、引力ポテンシャルを与える選定個体の例を示す説明図のその5であり、

[図20A]図20Aは、個体の移動過程を示す説明図のその1であり、

[図20B]図20Bは、個体の移動過程を示す説明図のその2であり、

[図20C]図20Cは、個体の移動過程を示す説明図のその3であり、

[図20D]図20Dは、個体の移動過程を示す説明図のその4であり、

[図21]図21は、第5実施形態の説明図であり補助関数法の原理を概略的に示す説明図であり、

[図22]図22は、リプシッツ定数の説明図のその1であり、

[図23]図23は、リプシッツ定数の説明図のその2であり、

[図24]図24は、処理の流れを概略的に示すフローチャートであり、

[図25]図25は、シミュレーションに用いた評価関数を示す図であり、

[図26]図26は、シミュレーションに用いた定数を示す図であり、

[図27]図27は、シミュレーション結果であり、

[図28]図28は、ある所定領域に収束する過程を示す図であり、

[図29]図29は、第6実施形態の説明図であり個体が収束した後の状態を示す説明図であり、

[図30]図30は、第7実施形態を示す電氣的構成図であり、

[図31]図3 1は、ある時刻における移動体の最適経路を示す鳥瞰図のその1であり、

[図32]図3 2は、ある時刻における移動体の最適経路を示す鳥瞰図のその2である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、本開示の連続値最適化問題の大域的探索装置及びプログラムの幾つかの実施形態について図面を参照して説明する。以下の実施形態中では、各実施形態間で同一機能または類似機能を備えた部分に同一符号を付して説明を行い、同一又は類似機能を備えた構成及びその作用、連携動作説明等を必要に応じて省略する。

[0012] (第1実施形態)

図1 A～図3 Dは第1実施形態の説明図を示している。最適化装置1は、CPU 2と、ROM、RAM等のメモリ3と、入出力インタフェース4とをバス接続して構成されたマイクロコンピュータ（以下マイコン）5、又は汎用コンピュータなどを用いて連続値最適化問題の大域的探索装置として構成される。以下、マイコン5が最適化処理を実行することとして説明を行う。マイコン5が、メモリ3に記憶された最適化プログラムを実行し、各種手順を実行することで最適化処理を実行する。メモリ3は非遷移的実体的記録媒体として用いられる。

[0013] ここで最適化処理とは、1以上の M (≥ 1)次元を備えたユークリッド空間からなる探索空間 S を想定し、この探索空間 S に予め定められる評価関数 H_{opt} の最小値又は最大値、すなわち最適値を求める処理、又は／及び、評価関数 H_{opt} が最適値となる変数 x_i を求める処理を示す。以下では、評価関数 H_{opt} の最小値を最適値として求めるための形態を示すが、最大値を最適値として求める処理に適用しても良い。評価関数 H_{opt} は、1以上の M 個の変数（パラメータ）に基づく数式による関数を示すものであり、例えば任意の多項式、有理関数、無理関数、指数関数、対数関数やその加減乗除等による組み合わせなどを挙げることができる。

- [0014] 図1Bに示すように、最適化装置1は、マイコン5により実現される機能ブロックとして、設定部6、極値化部7、及び導出部8などの各種機能ブロックを備えるものである。設定部6は、複数の個体Kの変数 x_i を探索空間Sの内部の評価関数Hoptに沿って設定する。複数の個体KはそれぞれM次元の変数 x_i を備える。
- [0015] また極値化部7は、設定部6により設定された複数の個体Kのうち少なくとも2つ以上の選定個体Kに引力を作用させる引力ポテンシャル f_{ij} を導出し、複数の個体Kの変数 x_i による評価関数Hoptの評価値Hopt(x_i)を加算した評価加算値 Σ Hopt(x_i)、及び、導出された選定個体Kの間の引力ポテンシャル f_{ij} を加算しこの加算値に選定個体Kの間に作用させる引力係数 $g/2$ とを乗算した引力値、を加算した実効評価値Heffを極値化、本実施形態では極小化する。
- [0016] そして導出部8は、引力係数 $g/2$ を初期値（例えば0）から徐々に大きくしながら極値化部7により実効評価値Heffが極値化するように複数の個体Kの変数 x_i を変化させ、所定の終了条件を満たしたときにおける複数の個体Kの少なくとも一つの個体Kの評価値に基づいて、個体Kの変数 x_i を導出する。すると、複数の個体Kが評価関数Hoptの最小値の一点に収束しやすくなる。本実施形態では、この原理を利用し、ある個体Kの変数 x_i を導出して解出力する。
- [0017] 図2に最適化処理の詳細な流れをフローチャートで示し、図3A～図3Dに探索処理のイメージ図を示している。これらの図3A～図3Dでは、探索空間Sを一次元のユークリッド空間とし、この評価関数Hoptが複数の極小値を備えた関数である場合にその中の最小値を探索する際の個体Kの移動状態のイメージ図を示している。
- [0018] まずマイコン5は、図2のS1において評価関数Hoptに沿って個体Kを設定する。図3Aには、 $N=3$ 個（ $N>2$ ）すなわち複数の個体K1～K3を設定した状態を示している。以下、断らない限り、複数の個体K1～K3のうちの一部又は全ての個体を個体Kと略して説明を行うと共に、特別な個体

Kについては符号Kの後に添え字を付して説明を行う。

[0019] 次に、マイコン5は、図2のS2において実効評価値 H_{eff} を求め、この実効評価値 H_{eff} を極小化するように個体Kの変数 x_i を変化させて更新する。実効評価値 H_{eff} は、前述したように複数の個体Kの変数 x_i を評価関数 H_{opt} に導入した評価値 $H_{opt}(x_i)$ に基づく値であり、具体例としては下記のように表すことができる。

[0020] [数1]

$$H_{eff} = \sum_{i=1}^N H_{opt}(x_i) + \frac{g}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N f_{ij}(x_i - x_j) \dots (1)$$

この(1)式のうち、 H_{eff} は実効評価値を示しており、 $H_{opt}(x_i)$ は評価関数 H_{opt} の各個体Kの評価値を示している。また、 $g/2$ は引力係数、 $\sum \sum f_{ij}(x_i - x_j)$ は引力ポテンシャルの加算値を示している。

[0021] (1)式の第1項は、複数の個体Kによる評価関数 H_{opt} の評価値 $H_{opt}(x_i)$ を加算した評価加算値、すなわち、評価関数 H_{opt} に複数の個体Kの変数 x_i を代入した評価値 $H_{opt}(x_i)$ を加算した加算値を示しており、(1)式の第2項は、複数の個体K間の引力ポテンシャル f_{ij} を加算し、この加算値に複数の個体Kの間に作用させる引力係数 $g/2$ を乗算した引力値、を示している。この引力ポテンシャル f_{ij} は、1つの個体Kが、他の全ての個体Kとの間で作用するように設定しても良いが、後述実施形態に示すように、全ての個体Kのうち一部を選定し当該選定個体Kを対象として引力ポテンシャル f_{ij} を設定しても良い。また、この引力ポテンシャル f_{ij} の関数は、後述実施形態に示すように、複数の個体K間の所謂ユークリッド距離が遠いほど引力値が大きくなる関数を適用しても良いし、ユークリッド距離に拘わらず引力値が一定値となるように設定しても良い。またこれに限られるものではなく、ユークリッド距離が遠いほど引力値が小さくなる関数を適用しても良い。マイコン5は、図2のS2においてこの評価加算値と引力値とを加算した実効評価値 H_{eff} を導出し、実効評価値 H_{eff} を小さくする個体Kの変数 x_i を探索する。この探索方法としては、後述実施形態に示す補助関数法を用

いることが望ましいが、極値を探索可能な方法であればどのような方法を用いて探索しても良い。

[0022] 例えば、評価関数 H_{opt} が図 3 A に示すように複数の極小値を備える関数であるときには、(1) 式の第 2 項の引力係数 $g/2$ を増加させると、個体 K を一点に収束させる引力が強くなり、個体 K は低い山から順に昇り、すなわち極大値を超えるように順に移動し、谷、すなわち極小値、を順に移動する。このため、例えば図 3 B に示すように、個体 K_1 は探索空間 S 内の変数 x_i を例えば増加する方向に移動すると共に、個体 K_3 は探索空間 S 内の変数 x_i を例えば減少する方向に移動する。

[0023] 次に、マイコン 5 は、図 2 の S_3 において状態更新回数 t をインクリメントすることで $t = t + 1$ とし、この状態更新回数 t が所定上限回数 τ を超えたか否か、すなわち図 2 の S_4 において $t = \tau + 1$ であるか否かを判定する。本実施形態では、この図 2 の S_4 における所定上限回数 τ を超えたか否かの判定処理を所定の終了条件としている。マイコン 5 は、状態更新回数 t が所定上限回数 τ 以下であり、この終了条件を満たしていないときには、 S_5 において引力係数 $g/2$ を例えば所定数だけ増加し、 S_2 に戻り処理を繰り返す。マイコン 5 は、このように引力係数 $g/2$ を徐々に大きくしながら $S_2 \sim S_3$ の処理を繰り返すことで、図 3 C に示すように、各個体 K は評価関数 H_{opt} の極大値の大きな山を徐々に超えるようになる。これらの処理が繰り返されることにより、図 3 D に示すように、複数の個体 $K_1 \sim K_3$ が評価関数 H_{opt} の一点に収束するようになる。そして、マイコン 5 は、図 2 の S_5 において終了条件を満たしたときに例えば個体 $K_1 \sim K_3$ のうちの何れか一つの個体 K の変数 x_i の解を出力する。これにより個体 K の変数 x_i を解出力できる。

[0024] 本実施形態によれば、引力係数 $g/2$ を初期値から徐々に大きくしながら実効評価値 H_{eff} が極値化するように複数の個体 K の変数 x_i を変化させ、状態更新回数 t が所定上限回数 τ を超えたときにおける複数の個体 K のうち少なくとも一つの個体 K に基づいて個体 K の変数 x_i を導出している。またこの

とき、評価関数 H_{opt} の評価値が最も低くなる条件を満たす個体 K の変数 x_i を解出力すると良い。これにより、変数 x_i の最適値への到達確率を高めながら極力少ない回数で最適値へ到達できるようになる。

[0025] (第2実施形態)

図4から図13は第2実施形態の追加説明図を示している。第2実施形態では、個体 K の変数 x_i の初期分布の設定方法を説明する。前述実施形態に示したように、各個体 K は M 次元の変数 x_i を備えているが、この M 次元の変数 x_i の初期分布を如何なる形態とするかに応じて、評価関数 H_{opt} の谷の通過数、すなわち極値の通過数、及び、収束方法も変化する。

[0026] 評価関数 H_{opt} の評価値がどのような値で極値、最小値となるか予め把握することはできないため、マイコン5は、予め探索空間 S を満たすように個体 K を初期設定することが望ましい。個体 K の数を多くすれば精度が高くなるが、個体 K の数を多くすれば処理時間も大きくなる。このため、限られた数の個体 K を用いて処理を行うことが望ましく、この限られた個体 K の変数 x_i の初期分布が最適値の探索処理に重要な要素を占めることになる。このためには、例えば図4から図13に示すように、個体 K の変数 x_i の初期分布を設定することが望ましい。

[0027] 図4から図6、図8から図13は、複数のそれぞれの個体 K が $M=2$ 次元の変数 x_i を備えている場合の初期分布の例を示し、図7は複数のそれぞれの個体 K が $M=3$ 次元の変数 x_i を備えている場合の初期分布の例を示している。

[0028] $M=2$ 次元の探索空間 S を想定したときに、例えば図4に示すように、探索空間 S 内に複数の個体 K の変数 x_i をランダムに設定すると良い。この場合、個体 K が一点に収束する過程において広範囲の極値を探索することができるようになる。この中でも図5の個体 K_a 、 K_b に示すように、少なくとも1つ以上の個体 K_a 、 K_b の変数 x_i を探索空間 S の上限値又は下限値とすると良い。また、その他の個体 K の変数 x_i をランダムに設定すると良い。このように設定することで、さらに広範囲の極値を探索できる。特に、探索空間

Sの中で全ての変数 x_i について上限値又は下限値となるように個体K a mの変数 x_i を設定することがさらに望ましい。

[0029] また、例えば図6に示すように、初期分布として探索空間Sを分割した格子点位置になるように個体Kの変数 x_i を設定しても良い。この場合、図6にM=2次元の例を示すように、隣接する個体Kの間を等分割して設定しても良いが、変数 x_i 毎、すなわち $x_{i,1}$ 、 $x_{i,2}$ 毎に異なる分割数となるように設定しても良い。ここで「隣接」とはユークリッド距離が最も近い個体Kを意味する。また、例えば、複数の個体KがそれぞれM=3次元の変数 x_i を備えているときには、図7に示すように、個体Kが格子点位置に位置するように変数 x_i を設定することで初期分布を構成すると良い。このように格子点位置に個体Kを初期分布させることで探索空間Sの内部における極値を網羅して探索できる。

[0030] さらに図8に示すように、個体Kの変数 x_i が谷の生成に寄与する寄与度の高い個体Kの変数 $x_{i,2}$ の分割数を寄与度の低い個体Kの変数 $x_{i,1}$ よりも大きく設定するようにしても良い。寄与度は、予め実験やシミュレーション等に応じて設定したり、実際の問題に対する定性的な考察から設定する。図8の例では、変数 $x_{i,2}$ の分割数を5とし、変数 $x_{i,1}$ の分割数を2としている。すると、初期分布として設定する個体Kの数を削減しながら探索空間Sの内部における極値を網羅して探索できる。個体Kの数を削減できるため処理時間を削減できる。

[0031] また図9に示すように、例えば図6から図8のように設定されている場合、この中から少なくとも1つ以上の変数 x_i が探索空間Sで上限値又は下限値となる個体Kだけを選定して設定しても良い。すると、個体Kの数を削減しながら広範囲において極値の探索を行うことができる。

[0032] また図10に示すように、初期分布として探索空間Sを複数の部分空間S c、S dに分けて各部分空間S c、S dにそれぞれ個体Kを設定しても良い。このとき、各部分空間S c、S d毎に実効評価値H_{eff}を求め当該実効評価値H_{eff}が所定終了条件を満たしたときにおける複数の個体Kの少なくとも一

つの個体Kに基づいて個体Kの変数 x_i を導出するようにしても良い。これにより、より少ない個体Kの数で探索空間Sを網羅的に探索できる。この場合、部分空間 S_c 、 S_d 毎に異なる評価関数 H_{opt} の最小値（最適値）を得る個体 K_{g1} 、 K_{g2} の変数 x_i を求めることができるが、最終的に部分空間 S_c 、 S_d 毎に得られた個体 K_{g1} 、 K_{g2} の変数 x_i の評価関数 H_{opt} の評価値を比較し、この評価値の最小値を得る個体 K_{g1} 、 K_{g2} の変数 x_i を選定して解として導出すると良い。

[0033] これまで説明したように、収束過程において広範囲の極値を探索できるようにするため、探索空間Sの全てを極力網羅するように個体Kを広範囲に分布させることが望ましいが、例えば探索空間Sの内部に推定解が与えられる場合もある。

[0034] 例えば、ある変数 x_i が時間的に連続して変化することを考慮する。例えばマイコン5がこのような変数 $x_i(t)$ の解をある所定の時間毎に導出するときに、次回のタイミングにおける変数 $x_i(t+1)$ の解を得るために今回の変数 $x_i(t)$ の解を推定解 x_{iz} として与えることで、次回のタイミングにおける変数 $x_i(t+1)$ の解の導出処理を素早くしかも正確に行うことができる場合もある。

[0035] このような場合、図11に示すように、初期分布として探索空間S内に限定された限定探索範囲 S_a を設け、この限定探索範囲 S_a として推定解 x_{iz} を含むように初期分布を設定することが望ましい。特にこの場合、例えば推定解 x_{iz} から所定範囲（例えば $x_{i,1} - \alpha_1 < \text{変数 } x_{i,1} < x_{i,1} + \beta_1$ 、 $x_{i,2} - \alpha_2 < \text{変数 } x_{i,2} < x_{i,2} + \beta_2$ ；但し、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 $\beta_2 > 0$ ）を満たすように限定探索範囲 S_a を絞ることが望ましい。これにより、さらに少ない評価回数で変数 x_i の最適解への到達確率を高めることができる。

[0036] さらに図12に示すように、初期分布として推定解 x_{iz} を含む空間に近いほど個体Kを密に分布させると共に推定解から遠ざかるほど個体Kの密度を減少させるように設定するようにしても良い。これにより、より少ない個体Kの数で変数 x_i の最適解への到達確率を高めることができる。

[0037] さらに図13に示すように、初期分布として推定解 x_{iz} を含む空間に近い所定範囲 S_b 内に個体 K を密に分布させると共にその他の個体 K を所定範囲 S_b の外にランダムに分布させ、その他の個体 K のうち、少なくとも1つの個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} の変数 x_i を探索範囲 S の変数 x_i の上限値又は下限値に設定するようにしても良い。これにより、変数 x_i の推定解 x_{iz} の付近を重点的に探索しながら広範囲を探索することができ、推定解 x_{iz} 又はその周辺に解が存在していなかった場合においても、変数 x_i の最適解への到達確率の低下を防ぐことができる。

[0038] (第3実施形態)

図14から図20Dは第3実施形態の追加説明図を示す。第3実施形態は、選定個体の選定方法について説明する。引力ポテンシャル f_{ij} は(1)式に示したように、 i 番目の個体 K と j 番目の個体 K の差の関数として表すことができる。この場合、引力ポテンシャル f_{ij} は、全ての2つの個体 K の組み合わせ数分の差分を求めて加算値を求めるようにすると良い。しかし図14に示すように、多数の個体 K が一の谷 H_1 の中で密に分布すると共に、他の個体 K_c が他の谷 H_2 の中で疎に分布しているときには、密度が密に分布している谷 H_1 の中の多数の個体 K の影響を受けやすくなる。

[0039] すると、図14の矢印 Y に示すように、本来評価値が最小値となり変数 x_i が最適値となる個体 K_c が、他の多数の個体 K の影響を受けて谷 H_2 を抜け出してしまうことがある。また例えば第2実施形態に初期分布を示したように、個体 K の密度がそのある所定の領域、空間毎にばらつくこともある。

[0040] このような場合を考慮し、全ての2つの個体 K の組み合わせに引力ポテンシャル f_{ij} を与えてしまうと、個体 K の密度分布の影響が強くなることが想定されるような条件(例えば、評価関数 H_{opt} の条件、又は／及び、個体 K の密度の初期分布の条件)を用いるときには、引力ポテンシャル f_{ij} を与える個体 K を選定し、特定の選定個体 K の間にだけ引力ポテンシャル f_{ij} を与えることが望ましい。

[0041] この場合、図15に変数 $M=1$ 次元の例を示すように、マイコン5が特に

複数の個体 K に対し識別符号（例えば1～5）を順序付けて付し、順序が隣接する識別符号が付された個体 K を選定個体 $K_1 - K_2$ 、 $K_2 - K_3$ 、 $K_3 - K_4$ 、 $K_4 - K_5$ として引力ポテンシャル f_{ij} を導出し、順序が隣接しない識別符号が付された個体 K を選定個体とせず引力ポテンシャル f_{ij} を0とすると良い。すると個体 K の密度の影響を強くしすぎることなく収束させることができる。

[0042] また、マイコン5が全個体 K に対し引力ポテンシャル f_{ij} を対等に印加するためには、図16に示すように、個体 K_1 と個体 K_5 との間にも引力ポテンシャル f_{ij} を印加するようにすると良い。なお図15及び図16には個体 K の変数 x_i の小さい順に識別符号1～5を付した形態を示しているが、変数 x_i の小さい順に識別符号1～5を付して並べる必要はなく、識別符号1～5を付す順序は変数 x_i の大小に影響するものではない。

[0043] また図17に $M=2$ 次元の選定個体 K の例を示す。この図17は図6のように探索空間 S における $M=2$ 次元の格子点位置に個体 K を初期分布させたときの選定個体の例を示す。また図18に変数 $M=3$ 次元の例を示す。この図18は図7のように $M=3$ 次元の格子点位置に個体 K を初期分布させたときの選定個体の例を示す。

[0044] マイコン5は、格子点位置の個体 K と隣接する格子点位置の最大 $2 \times M$ 個の個体 K を選定個体として引力ポテンシャル f_{ij} を導出し、その他の個体 K を選定個体とせず引力ポテンシャル f_{ij} を0とすることが望ましい。図17に示すように、個体 K_{d1} に隣接する格子点位置に存在する個体 $K_{d2} \sim K_{d5}$ を選定個体として引力ポテンシャル f_{ij} を設定し、その他の個体 K を選定個体としないように引力ポテンシャル f_{ij} を0に設定する。すなわち、個体 K がそれぞれ $M=2$ 次元の変数 x_i を備えるときには、最大 $2 \times M=4$ 個の隣接する格子点位置の個体 K を選定個体として引力ポテンシャル f_{ij} を導出する。

[0045] また、図18に示すように、個体 K がそれぞれ $M=3$ 次元の変数 x_i を備えるときには、最大 $2 \times M=6$ 個の格子点位置の個体 K を選定個体として引力

ポテンシャル f_{ij} を導出する。

[0046] また図 19 には図 9 に示すように $M = 2$ 次元の格子点位置の上限値又は下限値に個体 K を初期分布させたときの選定個体 K の例を示す。マイコン 5 は、これらの個体 K のうち隣接する 2 個の個体 K を選定個体として引力ポテンシャル f_{ij} を導出し、その他の個体 K を選定個体とせず引力ポテンシャル f_{ij} を 0 とする。図 19 に示すように、マイコン 5 が例えば初期分布として複数の個体 K を探索範囲 S の変数 x_i の上限値又は下限値に設定した場合には、探索空間 S において変数 x_i が上限値又は下限値となる個体 K_{am} 、 K_a 、 K_b から順次収束させることができる。すると探索空間 S を網羅して探索できる。

[0047] <評価関数 H_{opt} を考慮しない場合における初期分布からの個体 K の移動イメージ>

図 20A から図 20D に個体 K の移動イメージを示している。図 20A に初期分布を示している。この初期分布は、図 19 に示す初期分布と同様であるが、改めて説明すると、全個体 K は、変数 $x_{i,1}$ 及び $x_{i,2}$ が共に探索空間 S の上限値又は下限値となる頂点に設定された個体 K_{am} 、変数 $x_{i,2}$ が探索空間 S の上限値又は下限値となる辺部に設定された個体 K_a 、変数 $x_{i,1}$ が探索空間 S の上限値又は下限値となる辺部に設定された個体 K_b 、からなっている。すなわち、全個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} は、それぞれ 2 次元の変数 $x_{i,1}$ 、 $x_{i,2}$ の何れかの変数 x_i が上限値又は下限値となるように設定されている。

[0048] 隣接する個体 K は、2 次元の変数 $x_{i,1}$ 、 $x_{i,2}$ が等間隔で初期設定されている。そして、この例では、隣接する個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} を選定個体として引力ポテンシャル f_{ij} を印加するようにしている。なお、説明を単純化するため評価関数 H_{opt} は考慮しない例を示す。

[0049] この例の場合、矢印を付した隣接した選定個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} の間に引力がかかるため、隣接する個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} は当該引力を合成したベクトル方向に引き寄せられることになる。このため、まず図 20B に示す

ように、探索空間 S の頂点に初期設定された個体 K_a が、探索空間 S の内方に引き込まれるように移動する。さらに図 20C に示すように、探索空間 S の辺部に初期設定された個体 K_a 、 K_b が探索空間 S の内方に引き込まれるように移動する。

[0050] さらに図 20D に示すように、全個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} が徐々に探索空間 S の中央内側に引き込まれるように移動する。これにより全個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} がそれらの 2 変数 $x_{i,1}$ 、 $x_{i,2}$ が互いに同一となる一点に収束するようになる。この例では、評価関数 H_{opt} を考慮していない例を挙げているため、最終的には探索空間 S の中央に収束することになるが、実際に評価関数 H_{opt} を考慮すれば、変数 x_i に応じた評価値 $H_{opt}(x_i)$ が実効評価値 H_{eff} に反映されるため、この実効評価値 H_{eff} を最小化するように個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} が移動する。すなわち個体 K_a 、 K_b 、 K_{am} のそれぞれの変数 x_i が変化する。これにより、これらの全探索空間 S において変数 x_i の最適値を網羅的に探索できることがわかる。

[0051] (第 4 実施形態)

以下、第 4 実施形態を説明する。この第 4 実施形態では、引力ポテンシャル f_{ij} の設定方法について説明する。引力ポテンシャル f_{ij} は (1) 式に示したように、 i 番目の個体 K と j 番目の個体 K の差分の関数として表すことができる。この場合、引力ポテンシャル f_{ij} は、 i 番目の個体 K の p 番目の変数を $x_{i,p}$ と表したときに、例えば下記の (2) 式に基づいて導出することが望ましい。

[0052] [数 2]

$$f_{ij}(x_i - x_j) = \|x_i - x_j\|_2^2 = \sum_{p=1}^M (x_{i,p} - x_{j,p})^2 \dots (2)$$

この (2) 式の引力ポテンシャル f_{ij} は、複数の個体 K の間のユークリッド距離が大きいほど大きな引力値とするように設定され、複数の個体 K の間の距離が小さいほど小さな引力値とするように設定される。この場合、初期分布として広範囲に分布させた個体 K を素早く収束させることができ、例え

ば図2に示すように処理を実行したときには、状態更新回数 t の所定上限回数 τ を少なくしても十分に収束させることができる。しかも、この式は微分可能な関数となるため、微分値を0とするように実効評価値の変数 x_i を求めることで容易に極値化できる。

[0053] また、引力ポテンシャル f_{ij} を例えば下記の(3)式に基づいて導出するようにしても良い。

[0054] [数3]

$$f_{ij}(x_i - x_j) = \|x_i - x_j\|_1 = \sum_{p=1}^M |x_{i,p} - x_{j,p}| \dots (3)$$

この(3)式の引力ポテンシャル f_{ij} は、複数の個体 K の間の距離に関係なく一定の引力値とするように設定していることを示している。この場合、浅い谷、すなわち極大値を順に超えて収束させることができるようになる。

[0055] (第5実施形態)

図21～図26は第5実施形態の追加説明図を示す。本実施形態では、実効評価値 $H_{eff}(x_i)$ を極小化するように個体 K の変数 x_i を変化させるための具体例となる補助関数法について説明する。補助関数法は、(1)式の第1項の評価加算値、第2項の引力値を極小化するときに用いられる一方法であり、評価関数 H_{opt} を当該評価関数 H_{opt} に近似した2次関数に置換し、この置換した2次関数に基づいて極値化する方法を示している。

[0056] 以下、補助関数法について詳細説明する。補助関数法の詳細イメージを図21に示している。図21に示すように、変数 x の評価関数を $f_{mej}(x)$ としたときに、この評価関数 $f_{mej}(x)$ の変数 x に現在の解候補 x^* (図21では x_a 、 x_b) を代入し、この評価値 $f_{mej}(x^*)$ を通過すると共に、その微分値が評価関数の偏微分値 $\partial f_{mej}(x^*) / \partial x$ と等しく、且つ、その解候補 x^* を含む探索空間 S 内の全ての変数 x_i における評価値 $f_{mej}(x_i)$ よりも大きな値を得る条件を満たすリップシッツ定数 L を用いた2次関数 f_f を導入する。この2次関数 f_f を数式化すると、(4-1)式の右辺のように示すことができる。また、この2次関数 f_f が極値となる条件を

満たす解を x_z とすると (4-2) 式のように導出できる。

[0057] [数4]

$$f_{mej}(x) \leq f_{mej}(x^*) + \frac{\partial f_{mej}(x^*)}{\partial x}(x - x^*) + \frac{L}{2}(x - x^*)^2 \dots (4-1)$$

$$x_z = x^* - \frac{1}{L} \cdot \frac{\partial f_{mej}(x^*)}{\partial x} \dots (4-2)$$

これらの (4-1) 式、(4-2) 式において、 L はリプシッツ定数を示し、 x^* は x の現在の解候補を示している。なお (4-2) 式の右辺を微分すると (4-3) 式のように導出できる。

[0058] [数5]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[f_{mej}(x^*) + \frac{\partial f_{mej}(x^*)}{\partial x}(x - x^*) + \frac{L}{2}(x - x^*)^2 \right]$$

$$= \frac{\partial f_{mej}(x^*)}{\partial x} + L(x - x^*) \dots (4-3)$$

このとき、変数 x に解候補 x^* を代入することで (4-3) 式の第2項を0にでき、現在の解候補 x^* における微分値は (4-3) 式の第1項と等しくなる。この (4-3) 式の第1項は、解候補 x^* における評価関数 f_{mej} の偏微分値 $\partial f_{mej}(x^*) / \partial x$ に一致する。また、この2次関数 f_f は、解候補 x^* を含む全ての変数 x_i で評価関数 f_{mej} の評価値 $f_{mej}(x_i)$ よりも大きな値となっている。このような2次関数 f_f を用いて評価関数 f_{mej} の極値を求めることが望ましい方法となる。

[0059] (4-2) 式に示すように、解候補 x_z を繰り返し導出する。図21に示すように、現在の解候補を x_a としたときに、まず2次関数 f_{f1} を探索し、2次関数 f_{f1} の極値を満たす解を次回の解候補 x_b とする。その後、この次回の解候補 x_b について再度2次関数 f_{f2} の探索を行い、2次関数 f_{f2} の極値を満たす解を解候補 x_c に更新する。したがって解候補は $x_a \rightarrow x_b \rightarrow x_c$ となるように変化する。これらの処理が、例えば所定回数以上繰り返されることで評価関数 $f_{mej}(x)$ の極小値と見做すことが可能な解 (例

えば $\times c$) を得ることができる。

[0060] さて (1) 式に (2) 式の引力ポテンシャル f_{ij} を代入すると下記の (5) 式のように示すことができる。この (5) 式における引力ポテンシャル f_{ij} の関数は、第4実施形態に示したように、距離を大きくしたときに引力値を大きくする (2) 式の関数を適用している。

[0061] [数6]

$$H_{eff} = \sum_{i=1}^N \left[H_{opt}(\mathbf{x}_i) + \frac{g}{2} (\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i)^2 \right] = \sum_{i=1}^N \left[H_{opt}(\mathbf{x}_i) + \frac{g}{2} \sum_{p=1}^M (x_{i+1,p} - x_{i,p})^2 \right] \dots (5)$$

ここでは、説明を理解しやすくするため、引力ポテンシャル f_{ij} を印加する個体 K として、第2実施形態の図15に示したように、識別番号の隣接する個体 $K_1 - K_2$ 、 $K_2 - K_3$ 、…、を選定個体としている。すなわち、 i 番目と $i+1$ 番目の個体 K を選定して引力ポテンシャル f_{ij} を印加する数式を示している。ここでは、この例について説明するが、第2、第3実施形態で説明したその他の例も同様に組み合わせることが可能である。

[0062] この (5) 式の右辺において、評価関数 H_{opt} を表す第1項と、引力係数 $g / 2 \times$ 引力ポテンシャル f_{ij} を表す第2項とに分けて補助関数法を適用する。(5) 式の右辺の第1項について、補助関数法を適用して置換すると (6) 式の右辺のようになる。

[0063] [数7]

$$\sum_{i=1}^N H_{opt}(\mathbf{x}_i) = \sum_{i=1}^N H_{opt}(\mathbf{x}_i^*) + \frac{\partial H_{opt}(\mathbf{x}_i^*)}{\partial x_{j,q}} (x_{j,q} - x_{j,q}^*) + \frac{L_{j,q}}{2} (x_{j,q} - x_{j,q}^*)^2 \dots (6)$$

この (6) 式の右辺は、 j 番目の個体 K における q 番目の変数 $x_{j,q}$ を更新する場合に、(5) 式の右辺の第1項について補助関数法を適用した数式を示している。また、(5) 式の右辺の第2項を補助関数法を適用して置換すると (7) 式の右辺のようになる。

[0064]

[数8]

$$\begin{aligned} \frac{g}{2} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i) &= \frac{g}{2} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_{i+1}^* - \mathbf{x}_i^*) \\ &+ g \cdot (-x_{j+1,q}^* + 2x_{j,q}^* - x_{j-1,q}^*) \cdot (x_{j,q} - x_{j,q}^*) + \frac{g}{2} \cdot 4 \cdot (x_{j,q} - x_{j,q}^*)^2 \dots (7) \end{aligned}$$

この（７）式の右辺も同様に、 j 番目の個体における q 番目の変数 $x_{j,q}$ を更新する場合において、（５）式の右辺の第２項について、補助関数法を適用した数式を示している。このような（６）式と（７）式を加算した加算値を極小化した条件を満たす変数 x_i を最終的に解出力することになる。

[0065] リプシッツ定数 L は大きすぎると、（４－１）式の不等式を満たすことになるものの、２次係数が比較的大きくなることから、図２２に２次関数 f のイメージを示すように、解の更新処理の幅が小さくなりすぎる。このため、評価関数 H_{opt} の谷 H_2 の極値に到達するまでの処理ステップが多くなり処理時間が長くなる。

[0066] 逆に、リプシッツ定数 L が小さすぎると（４－２）式の不等式を満たさなくなり、図２３に２次関数 f のイメージを示すように、解の更新処理の幅が大きくなりすぎる。すると、１ステップの処理だけで隣接する谷 H_1 に移動してしまうことが確認されている。

[0067] このため、リプシッツ定数 L は、変数 x_i の解を更新する度に計算し直すと共に、式（４－１）の不等式を満たす中で可能な限り小さい値を設定すると良いが、特に（５）式の右辺の第２項に補助関数法を適用するときには、（７）式に示すようにリプシッツ係数 L を４に固定することが望ましい。このリプシッツ係数 $L = 4$ は変数 x_i の解を更新処理する度に導出し直す必要がないことが発明者らにより確認されている。このとき特に、第２項における j 番目の個体における q 番目の変数の更新後の解 $x_{j,q}$ は（８）式のように導出できる。

[0068] [数9]

$$x_{j,q} = x_{j,q}^* - (L_{j,q} + 4g)^{-1} \left[g(-x_{j+1,q}^* + 2x_{j,q}^* - x_{j-1,q}^*) + \frac{\partial H(\mathbf{x}_i^*)}{\partial x_{j,q}} \right] \dots (8)$$

この（８）式に示した j 番目以外の個体 K についても、 q 番目の変数 $x_{j,q}$ 、 q の更新処理を同じように行うことができ、１から N 番目の個体 K の q 番目の変数 $x_{j,q}$ は、（９－１）式のように行列式を用いて一括更新できる。ただし、変数行列 x_q 、リプシッツ係数行列 L_q 、引力係数行列 G 、評価関数偏微分行列 $\nabla_q H_{opt}$ は、それぞれ（９－２）式、（９－３）式、（９－４）式、（９－５）式に示すように表すことができる。

[0069] [数10]

$$\mathbf{x}_q = \mathbf{x}_q^* - (\mathbf{L}_q + 4g)^{-1} [g\mathbf{G}\mathbf{x}_q^* + \nabla_q H_{opt}(\mathbf{x}^*)] \dots (9-1)$$

[0070] [数11]

$$\mathbf{x}_q = \begin{pmatrix} x_{1,q} \\ x_{2,q} \\ \vdots \\ x_{N,q} \end{pmatrix} \dots (9-2)$$

$$\mathbf{L}_q = \begin{pmatrix} L_{1,q} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{2,q} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & L_{N,q} \end{pmatrix} \dots (9-3)$$

[0071] [数12]

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 & \cdots & -1 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 2 \end{pmatrix} \dots (9-4)$$

$$\nabla_q H_{opt}(\mathbf{x}^*) = \begin{pmatrix} \frac{\partial H_{opt}(\mathbf{x}_1^*)}{\partial x_{1,q}} \\ \frac{\partial H_{opt}(\mathbf{x}_2^*)}{\partial x_{2,q}} \\ \vdots \\ \frac{\partial H_{opt}(\mathbf{x}_N^*)}{\partial x_{N,q}} \end{pmatrix} \dots (9-5)$$

このようにして更新処理を行うことができる。

[0072] また、評価関数 H_{opt} に補助関数法を適用し、第 2 項の引力値に補助関数法を用いなくても良い。すなわち、 j 番目の個体の q 番目の変数 $x_{j,q}$ を更新するときに評価関数 H_{opt} だけに補助関数法を適用すると、(5) ~ (7) 式に対応した実効評価値 H_{eff} は (9-6) 式のように表すことができる。

[0073] [数13]

$$H_{eff} < \sum_{i=1}^N H_{opt}(x_i^*) + \frac{\partial H_{opt}(x_j^*)}{\partial x_{j,q}} (x_{j,q} - x_{j,q}^*) + \frac{L_{j,q}}{2} (x_{j,q} - x_{j,q}^*)^2 \\ + \frac{g}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^M (x_{i+1,p} - x_{i,p})^2 \dots (9-6)$$

このとき (9-6) 式を極値化するには、(9-7) 式に示すように変数 $x_{j,q}$ により偏微分した微分値が 0 となる条件を満たすように更新すると良い。

[0074] [数14]

$$\frac{\partial H_{opt}(\mathbf{x}_j^*)}{\partial x_{j,q}} + L_{j,q} (x_{j,q} - x_{j,q}^*) + g(-x_{j+1,q} + 2x_{j,q} - x_{j-1,q}) = 0 \dots (9-7)$$

他の個体 K の q 番目の変数 $x_{j,q}$ を一般化して考慮すると、(9-8) 式のように表すことができる。

[0075] [数15]

$$\nabla_q H_{opt}(\mathbf{x}^*) + \mathbf{L}(\mathbf{x}_q - \mathbf{x}_q^*) + g\mathbf{G}\mathbf{x}_q = 0 \dots (9-8)$$

この式を変数 x_q について解くと、(9-9) 式のように表すことができる。

[0076] [数16]

$$\mathbf{x}_q = (\mathbf{L} + g\mathbf{G})^{-1} [\mathbf{L}\mathbf{x}_q^* - \nabla_q H_{opt}(\mathbf{x}^*)] \dots (9-9)$$

この (9-9) 式を適用すると、「 $(\mathbf{L} + g\mathbf{G})^{-1}$ 」に含まれる

Gは正則行列ではないため、引力係数 $g/2$ を大きくした場合にGの特異性によって逆行列の計算精度が大幅に低下する。このため、前述したように、評価関数 H_{opt} の評価値と共に引力値についても補助関数法を適用することが望ましい。すると、マイコン5を用いたとしても、(9-1)式に基づいて計算処理することになり、(9-9)式における $(L + gG)^{-1}$ の逆行列を算出しなくても良くなり、計算精度を高めることができる。

[0077] このような最適化処理のフローチャートを図24に示している。図24に示すように、マイコン5はまずS1において探索空間S内に複数の個体Kを設定する。このとき、例えば第2実施形態に示したように個体Kを設定して初期分布を構成すると良い。マイコン5は、引力係数 $g/2$ を初期値=0とすることで実効評価値 $H_{eff} = (1)$ 式の右辺の第1項(=複数の個体Kの評価関数 H_{opt} の評価値)となるように初期設定する。そして、マイコン5はS2aにおいて補助関数法を示す(8)式を用いて個体Kの全変数 x_i を更新する。

[0078] このS2aの処理は、このタイミングで複数回行うようにしても良い。そして、マイコン5は、S4にて所定の終了条件を満たすまで、S5において複数の個体Kの間の引力係数 $g/2$ を徐々に増加させることで引力値を徐々に強くする。すると、これらのS2a~S5の処理を繰り返すことで広範囲に散らばった個体Kは1カ所に収束することになる。引力値を増加するタイミングは、S2aにおいて補助関数法を用いた更新処理を1回だけ実行した後でも良いし、S2aの処理について実効評価値 H_{eff} の極値を得られることが想定される回数だけ繰り返し実行した後であっても良い。

[0079] また、終了時点における個体Kの数は必ずしも1カ所の所定領域に収束して極値化している必要はないものの、引力により個体Kを収束させることによる優位性を活用するために、処理後には初期分布における個体Kの分散範囲よりも狭い所定範囲内に収束していることが望ましい。

[0080] <具体例>

発明者は評価関数 H_{opt} を具体的な数式とした実例に合わせて最適値を導出

するシミュレーションを行っている。以下ではこの具体例を説明する。評価関数 H_{opt} を下記の (10-1) 式と定義した。ただし、 $f(x)$ は (10-2) 式、 $g(x)$ は (10-3) 式とし、 ω は (10-4) 式としている。

[0081] [数17]

$$H_{opt}(x) = f(x) + g(x) \dots (10-1)$$

$$f(x) = V \{ 1 - \exp[-a(x - x_m)^2] \cos[\omega(x - x_m)] \} \dots (10-2)$$

$$g(x) = A(x - x_m)^6 + B(x - x_m)^4 + C(x - x_m)^2 \dots (10-3)$$

$$\omega = \frac{2\pi P}{x_{\max} - x_{\min}} \dots (10-4)$$

この評価関数 H_{opt} は、 $M = 1$ 次元の変数 x に応じた関数とされており、図 25 に示すように、複数の極小値を有する関数である。このとき図 26 に示したように、(10-1) 式、(10-2) 式、(10-3) 式、(10-4) 式の定数 x_m 、 a 、 P 、 A 、 B 、 C を設定している。このように定数 x_m 、 a 、 P 、 A 、 B 、 C を設定することで、評価関数 H_{opt} は、特に変数 x の探索範囲（探索空間 S ）を $-5.0 \leq x \leq 5.0$ としたときに、最適解が変数 0.5 となる関数を示す。

[0082] また図 26 に示したように、状態更新回数 t の所定上限回数 τ を 100 とし、個体 K の数 N を 10 とし、図 24 の S2a に示すように、補助関数法を適用した処理を実行した。また図 24 の処理ステップ S5 において、引力係数 $g/2$ を増加させているが、下記の (10-5) 式のように状態更新回数 t の増加に応じて引力係数 $g/2$ を増加するように設定した。

[0083] [数18]

$$\frac{g}{2} = \frac{g_{\max}}{2} \cdot \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 \dots (10-5)$$

(10-5) 式の $g_{\max}/2$ は引力係数 $g/2$ の最大値を示す。図 27 には、引力係数 $g/2$ の最大値 $g_{\max}/2$ を横軸とし、収束成功したと見做すことが可能なシミュレーション回数を全シミュレーション回数で除して導出され

た成功確率を縦軸として示している。

[0084] ここでは、少なくとも一つの個体 K の変数 x_i が、最適解 $x = 0.5$ の谷 H_y に含まれていることを成功条件としてカウントしている。ここでいう谷 H_y とは、図25に示すように評価関数 H_{opt} の評価値が最適解 $x = 0.5$ の評価値からその高低両側の極大値に至るまでの範囲となることを満たす領域を示している。したがって、収束後において、少なくとも一つの個体 K の変数 x_i が谷 H_y に対応した領域内に含まれることを成功と見做している。

[0085] 図27に示した結果を考慮すると、成功確率は $g_{max}/2$ に依存することがわかる。図27の範囲 g_a に示すように、引力係数 $g/2$ の最大値 $g_{max}/2$ を小さくしすぎると、引力値が弱く個体 K が収束する可能性は低くなり成功確率は比較的低くなる。この方法は所謂並列勾配法に類似した方法となる。逆に、引力係数 $g/2$ の最大値 $g_{max}/2$ を大きくしすぎると、図27の範囲 g_b に示すように、評価関数 H_{opt} を無視して収束することになり成功確率が低下する。このため、引力係数 $g/2$ の最大値 $g_{max}/2$ をそれらの範囲 g_a 、 g_b とはならないある所定範囲 g_c に設定することで成功確率を極力上げることができる。特に、引力係数 $g/2$ の最大値 $g_{max}/2$ を範囲 g_c の中でも特定の範囲 g_d に設定することで90%近い成功確率を達成できることを確認できた。

[0086] 図28は、全ての個体 K が最適解に含まれないように初期分布を構成し、当該個体 K の変数 x_i が、ある一点に収束する過程で最適解を含む谷 H_y に対応した所定領域 x_x に収束する様子について状態更新回数 t を横軸として示している。前述したように、この図28に示す所定領域 x_x に収束後の個体の変数 x が1つでも入力していれば成功と見做す。

[0087] 個体 K が収束過程における広範囲を探索処理することで評価関数 H_{opt} の極値をくまなく探索できるようになる。

しかも図25に示しているように、評価関数 H_{opt} が変数 $x \in -0.5 \sim 1.5$ の領域において極値を多数有する関数であったとしても、図28に示すように最適解 $= 0.5$ を含む谷 H_y に対応した領域 x_x 内に個体 K を収束さ

せることができることを確認できた。

[0088] (第6実施形態)

図29は第6実施形態の追加説明図を示している。第6実施形態は、収束後の処理を示す。例えば図2又は図24に示す処理を実行し、状態更新回数 t を所定上限回数 τ まで繰り返したときに実効評価値 H_{eff} が極値化している場合であっても、図29に示すように個体 K が最適値を含む谷 H_{y1} の1カ所に収束せず、他の谷 H_{y2} 等に位置していることがあり、この結果、何れの個体 K の変数 x_i を解出力するか定めることができない場合がある。

[0089] (1) 式を考慮すれば明らかなように、実効評価値 H_{eff} が極値とされていたとしても、複数の個体 K の間に引力を生じている状態で釣り合っていることになるため、ある個体 K の変数 x_i を評価関数 H_{opt} に代入してもその評価関数 H_{opt} の評価値が必ずしも極値とはならないことが多い。このため、マイコン5は最終段階の処理として(1)式の第2項の引力係数 $g/2$ を0とし、実効評価値 H_{eff} として第1項の評価関数 H_{opt} の評価値そのものの極値を導出することが望ましい。

[0090] 例えば図29に示すように、複数の個体 K がそれぞれ複数の谷 H_{y1} 、 H_{y2} に位置している場合には、例えば前述の補助関数法を用いて極値化することで、複数の個体 K がそれぞれ対応した複数の谷 H_{y1} 、 H_{y2} の極値に移動することになる。

[0091] これらの複数の個体 K の中で、変数 x_i を(1)式の第1項に代入した実効評価値 H_{eff} が最小値を満たす個体 K の変数 x_i を解として出力することが望ましい。これにより、変数 x_i の最適値を導出できる。しかも、個体 K が1カ所に収束していない場合であっても、評価関数 H_{opt} が極値となる変数 x_i を確実に得ることができる。

[0092] 本実施形態に係る処理を適用すれば、前述実施形態又はそれらの実施形態を組み合わせた方法をしたときに必ずしも1カ所の谷(例えば H_{y1})に収束している必要がなくなり、少なくとも1つの個体 K が変数 x_i の最適解を含む谷 H_{y1} に収束していればよくなる。このため、この処理を用いていない

方法に比較して、例えば所定上限回数 τ を少なく設定できるようになる。

[0093] (第7実施形態)

図30から図32は第7実施形態の追加説明図を示している。この第7実施形態では探索開始前に予め推定解が与えられる例を示す。

[0094] 例えば、車両用の運転支援装置101は、交通状況やその変化、事故防止への対応のために近年活発に開発されており、特にドライバーへの運転負担を軽減するために開発されている。例えば運転支援装置101は、図30に示すように、制御器102を備え、位置検出器103、速度センサ104、地図情報取得部105、等を接続して構成され、未来時刻における最適移動位置を通過する最適経路を最適化する最適化装置として構成される装置である。

[0095] 制御器102は、例えばCPU106、ROM、RAM、EEPROMなどのメモリ107、及び、I/O108を備えたマイクロコンピュータ109を主として構成され、モデル予測制御処理に関するプログラムがメモリ107に記憶されている。運転支援装置101は、制御器102により実現される機能ブロックとして、図示しないが、図1Bと同様の設定部6、極値化部7、導出部8としての機能を備える。

[0096] 位置検出器103は、例えばGPS (Global Positioning System) 等を用いて現在位置の情報を検出する。速度センサ104は移動体Cの移動速度を検出する。地図情報取得部105は、所定の記憶装置(例えばHDD)に予め記憶される地図情報、又は、外部の地図サーバから地図情報を取得する。制御器102は、メモリ107に記憶されたモデル予測制御処理のプログラムを実行することにより、位置検出器103から取得される現在位置情報、速度センサ104から取得される移動体Cの移動速度情報、及び、地図情報取得部105により取得される地図情報に基づいてモデル予測制御を行う。なお、その他のセンサ、例えば車両周辺の障害物Ob1、Ob2を検知するための超音波センサ、車両周辺の障害物Ob1、Ob2との距離を測定するための測距装置、などにより取得される各種情報を用いてモデル予測制御を

行っても良い。

[0097] このモデル予測制御技術は、未来予測を行う技術であり、未来を含む一定期間の最適制御を行い、これらの最適制御を所定の時間毎に更新する技術である。運転支援装置101は、モデル予測制御技術を用いることで未来を含む一定期間における移動体（例えば自動車）Cの最適な走行経路を導出したリ、障害物Ob1、Ob2に衝突することなく所定の駐車スペースに導くように支援できる。

[0098] このような運転支援装置101の制御器102が、障害物Ob1、Ob2への衝突を避けながら経路探索処理を行うときには、図31に鳥瞰図を示すように、現在時刻 t_0 から未来時刻 $t_1 \sim t_6$ までの一定期間 $t_0 \sim t_6$ における移動体Cの最適経路 R_0 を導出することで時刻 t_1 における最適移動位置 L_1 を決定する。

[0099] 図32に時刻 t_1 におけるモデル予測制御処理を鳥瞰図で示している。図32に示すように、運転支援装置101の制御器102は、時刻 t_1 において新たに現在時刻 t_1 以降における未来時刻 $t_2 \sim t_7$ における最適経路 R_1 を導出するが、時刻 t_1 における最適経路 R_1 は、時刻 t_0 における最適経路 R_0 と近い軌跡となることが考えられる。

[0100] このため、制御器102は、例えば時刻 $t_1 \sim t_6$ に対応した位置 $L_1 \sim L_6$ による最適経路 R_0 を推定解とし、この推定解に基づいて第2実施形態に示したように、例えばこの最適経路 R_0 を含む領域に近いほど個体Kを密に分布させると共に当該最適経路 R_0 から遠ざかるほど密度を減少させるように個体Kを設定して初期分布を構成する。すると、少ない探索回数で最適解に到達する確率を高めることができるようになる。

[0101] 本実施形態によれば、制御器102が、未来時刻 $t_2 \sim t_7$ における移動体Cの最適経路 R_1 を導出するときには、過去の最適経路 R_0 を推定解とし、初期分布として最適経路 R_0 を含む領域に近いほど個体Kを密に分布させると共に最適経路 R_0 から遠ざかるほど個体Kの密度を減少させる。これにより、少ない探索回数で最適解に到達する確率を高めることができる。

[0102] (他の実施形態)

本開示は、上記した実施形態に限定されるものではなく、以下のように変形又は拡張することができる。

[0103] 前述実施形態では、個体 K の変数 x_i を解出力する形態を説明しているが、変数 x_i に対応した評価値、すなわち、解出力すべき変数 x_i を評価関数 H_{opt} に代入した評価値を解出力するようにしても良い。また、引力ポテンシャル f_{ij} に基づく引力値を0にする前の変数 x_i を導出し、この変数 x_i をそのまま解出力しても良いし、第6実施形態で説明したように、引力値を0にした後の変数 x_i の最適値を導出して解出力しても良い。また、この変数 x_i の最適値を評価関数 H_{opt} に代入した評価値を導出し解出力しても良い。このような各種値を導出する場合に適用しても良い。

[0104] 評価関数 H_{opt} が極小値、最小値となる条件を満たす変数 x_i を最適値として解出力する形態を示したが、極大値、最大値となる条件を満たす変数 x_i を最適値として解出力する形態に適用しても良い。

[0105] 所定の終了条件として、状態更新回数 t が所定上限回数 τ を上回るか否かを条件としているが、これに限定されるものではなく、例えば変数 x_i を代入した評価関数 H_{opt} の評価値が所定値以下となっているか、などの異なる条件を用いても良い。

[0106] 引力係数 $g/2$ を初期値＝0から徐々に大きくする形態を示したが、初期値は0に限られない。

図面中、1は最適化装置、101は運転支援装置（連続値最適化問題の大域的探索装置）、102は制御器、6は設定部、7は極値化部、8は導出部、 K は個体、 S は探索空間、 x_i は変数、 $g/2$ は引力係数、 H_{opt} は評価関数、 H_{eff} は実効評価値、 x_{iz} は推定解、を示す。

[0107] また、請求の範囲に記載した括弧内の符号は、本開示の一つの態様として前述する実施形態に記載の具体的手段との対応関係を示すものであって、本開示の技術的範囲を限定するものではない。前述実施形態の一部を、課題を解決できる限りにおいて省略した態様も実施形態と見做すことが可能である

。また、請求の範囲に記載した文言によって特定される本質を逸脱しない限度において、考え得るあらゆる態様も実施形態と見做すことが可能である。

[0108] また本開示は、前述した実施形態に準拠して記述したが、本開示は当該実施形態や構造に限定されるものではないと理解される。本開示は、様々な変形例や均等範囲内の変形をも包含する。加えて、様々な組み合わせや形態、さらには、それらに一要素、それ以上、あるいはそれ以下、を含む他の組み合わせや形態をも、本開示の範疇や思想範囲に入るものである。

請求の範囲

[請求項1] 1以上の次元を備えた探索空間（S）に複数の極値を備える評価関数（Hopt）に個体（K）を設定することに基づいて個体の変数（ x_i ）または変数の最適値を導出する連続値最適化問題の大域的探索装置（1、101）であって、

複数の個体の変数を前記探索空間の中の評価関数に沿って設定する設定部（6）と、

前記設定部により設定される複数の個体のうち少なくとも2つ以上の選定個体に引力を作用させる引力ポテンシャルを導出し、前記複数の個体の変数による評価関数の評価値を加算した評価加算値、及び、導出された前記選定個体の間の引力ポテンシャルを加算しこの加算値に前記選定個体の間に作用させる引力係数（ $g/2$ ）とを乗算した引力値、を加算した実効評価値（Heff）を極値化する極値化部（7）と、

前記引力係数を初期値から徐々に大きくしながら前記極値化部により実効評価値が極値化するように前記複数の個体の変数を変化させ、所定の終了条件を満たしたときにおける前記複数の個体の少なくとも一つの個体に基づいて、前記個体の変数、その変数の最適値、変数に対応した評価値、又は、評価値の最適値による各種値を導出する導出部（8）と、

を備える大域的探索装置。

[請求項2] 前記変数の探索を開始する前に予め変数の推定解（ x_{iz} ）が与えられている場合には、

前記設定部は、初期分布として前記探索空間の内部に限定された限定探索範囲（ S_a ）であって当該推定解を含む限定探索範囲に前記個体の変数を設定する請求項1記載の大域的探索装置。

[請求項3] 前記設定部は、初期分布として前記探索空間に前記複数の個体の変数をランダムに設定する請求項1または2記載の大域的探索装置。

- [請求項4] 前記設定部は、初期分布として少なくとも1つ以上の個体の少なくとも一つ以上の変数を前記探索空間の上限値又は下限値とし、その他の個体の変数をランダムに設定する請求項1または2記載の大域的探索装置。
- [請求項5] 前記設定部は、初期分布として前記探索空間を分割した格子点位置になるように前記個体の変数を設定する請求項1または2記載の大域的探索装置。
- [請求項6] 前記個体の変数が谷の生成に寄与する寄与度の高い前記個体の変数の分割数を寄与度の低い個体の変数よりも大きく設定する請求項5記載の大域的探索装置。
- [請求項7] 前記設定部は、前記初期分布として少なくとも1つ以上の変数が上限値又は下限値となる個体を選定して設定する請求項5または6記載の大域的探索装置。
- [請求項8] 前記設定部は、前記探索空間を複数の部分空間（ S_c 、 S_d ）に分け、当該各部分空間にそれぞれ個体を設定し、
前記導出部は、前記極値化部により求められた実効評価値が所定終了条件を満たしたときにおける前記複数の個体の少なくとも一つの個体に基づいて前記各種値を導出する請求項3から7の何れか一項に記載の大域的探索装置。
- [請求項9] 前記変数の探索を開始する前に予め変数の推定解（ x_{iz} ）が与えられている場合には、
前記設定部は、初期分布として前記推定解を含む空間に近いほど個体を密に分布させると共に前記推定解から遠ざかるほど個体の密度を減少させるように設定する請求項1記載の大域的探索装置。
- [請求項10] 前記変数の探索を開始する前に予め変数の推定解（ x_{iz} ）が与えられている場合には、
前記設定部は、初期分布として前記推定解を含む空間に近い所定範囲（ S_b ）に個体を密に分布させると共にその他の個体を前記所定範

囲の外にランダムに分布させ、その他の個体の少なくとも1つの個体の少なくとも一つ以上の変数を前記探索範囲の上限値又は下限値に設定する請求項1記載の大域的探索装置。

[請求項11] 前記極値化部は、前記複数の個体に対し識別符号を順序付けて付し、順序が隣接する識別符号が付された個体を前記選定個体として引力値を導出し、順序が隣接しない識別符号が付された個体を前記選定個体とせず引力値を0とする請求項1から10の何れか一項に記載の大域的探索装置。

[請求項12] 前記極値化部は、変数の数をM（但しMは1以上の自然数）としたときに、前記格子点位置の個体と隣接する格子点位置の最大 $2 \times M$ 個の個体を前記選定個体として引力値を導出し、その他の個体を選定個体とすることなく前記引力値を0とする請求項5から7の何れか一項に記載の大域的探索装置。

[請求項13] 前記極値化部が前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときには、前記複数の個体の間の距離が大きいほど大きな引力値とし距離が小さいほど小さな引力値とする請求項11または12記載の大域的探索装置。

[請求項14] 前記極値化部が前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときに、

[数2]

$$f_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2^2 = \sum_{p=1}^M (x_{i,p} - x_{j,p})^2 \dots (2)$$

の(2)式により導出する請求項13記載の大域的探索装置。

[請求項15] 前記極値化部が前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときには、前記複数の個体の間の距離に依存しない一定の引力値とする請求項11または12記載の大域的探索装置。

[請求項16] 前記極値化部が前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときに、

[数3]

$$f_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| = \sum_{p=1}^M |x_{i,p} - x_{j,p}| \dots (3)$$

の(3)式により導出する請求項15記載の大域的探索装置。

[請求項17]

前記導出部は、少なくとも一つの個体の評価値に基づいて各種値を導出するときに、前記引力値を0として前記複数の個体の評価加算値による実効評価値を極値化して前記複数の個体の変数の実効評価値の最小値を導出し、当該実効評価値が最小値を満たす変数を最適値として導出する請求項1から16の何れか一項に記載の大域的探索装置。

[請求項18]

前記極値化部が、前記実効評価値を極値化するときには、

前記評価加算値及び前記引力値のそれぞれについて、当該値の解候補を求めた後、当該解候補を代入したときの微分値が当該評価関数の微分値と等しく、且つ、前記解候補を含む探索空間の内の全ての変数における評価値よりも大きな値を得る条件を満たす2次関数に置換し、当該2次関数の極値を次回の値の解候補として繰り返して更新する補助関数法を用い、

前記評価加算値と前記引力値とを加算した実効評価値を極値化する請求項1から17の何れか一項に記載の大域的探索装置。

[請求項19]

前記極値化部が、前記実効評価値を極値化するときには、

前記評価加算値及び前記引力値のそれぞれについて、当該値の解候補を求めた後、当該解候補を代入したときの微分値が当該評価関数の微分値と等しく、且つ、前記解候補を含む探索空間の内の全ての変数における評価値よりも大きな値を得る条件を満たすリプシッツ定数を用いた2次関数に置換し、当該2次関数の極値を次回の値の解候補として繰り返して更新する補助関数法を用い、

前記評価加算値と前記引力値とを加算した実効評価値を極値化するものであり、

前記極値化部が、前記引力値について前記補助関数法を用いるとき

には前記 2 次関数のリップシッツ定数を 4 に固定して設定する請求項 14 記載の大域的探索装置。

[請求項20] 前記導出部が、前記個体の変数又はその最適値として、未来時刻における最適経路 (R 1) を導出するときに、

前記設定部は、過去の最適経路 (R 0) を推定解とし、前記初期分布として前記推定解を含む領域に近いほど個体を密に分布させると共に前記推定解から遠ざかるほど個体の密度を減少させるように設定する請求項 1 記載の大域的探索装置。

[請求項21] 1 以上の次元を備えた探索空間 (S) に複数の極値を備える評価関数 (Hopt) に個体 (K) を設定することに基づいて個体の変数 (x_i) または変数の最適値を導出するプログラムであって、

大域的探索装置 (1, 101) に、

複数の個体の変数を前記探索空間の中の評価関数に沿って設定する手順と、

設定された複数の個体のうち少なくとも 2 つ以上の選定個体に引力を作用させる引力ポテンシャルを導出し、前記複数の個体の変数による評価関数の評価値を加算した評価加算値、及び、導出された前記選定個体の間の引力ポテンシャルを全て加算しこの加算値に前記選定個体の間に作用させる引力係数 ($g/2$) とを乗算した引力値、を加算した実効評価値 (Heff) を極値化する手順と、

前記引力係数を初期値から徐々に大きくしながら前記極値化部により実効評価値が極値化するように前記複数の個体の変数を変化させ、所定の終了条件を満たしたときにおける前記複数の個体の少なくとも一つの個体の評価値に基づいて、前記個体の変数、その変数の最適値、変数に対応した評価値、又は、評価値の最適値による各種値を導出する手順と、

を実行させるプログラム。

[請求項22] 前記変数の探索を開始する前に予め変数の推定解 (x_{iz}) が与えら

れている場合には、

前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、初期分布として前記探索空間に限定された限定探索範囲（ S_a ）であって当該推定解を含む限定探索範囲に前記個体の変数を設定する請求項 21 記載のプログラム。

[請求項23] 前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、初期分布として前記探索空間に前記複数の個体の変数をランダムに設定する請求項 21 または 22 記載のプログラム。

[請求項24] 前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、初期分布として少なくとも 1 つ以上の個体の少なくとも一つ以上の変数を前記探索空間の上限値又は下限値とし、その他の個体の変数をランダムに設定する請求項 21 または 22 記載のプログラム。

[請求項25] 前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、初期分布として前記探索空間において全ての個体の変数を分割した格子点位置になるように前記個体の変数を設定する請求項 21 または 22 記載のプログラム。

[請求項26] 前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、前記個体の変数が谷の生成に寄与する寄与度の高い前記個体の変数の分割数を寄与度の低い個体の変数よりも大きく設定する請求項 25 記載のプログラム。

[請求項27] 前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、前記初期分布として少なくとも 1 つ以上の変数が上限値又は下限値となる個体を選定して設定する請求項 25 または 26 記載のプログラム。

[請求項28] 前記探索空間を複数の部分空間（ S_c 、 S_d ）に分け、当該各部分空間にそれぞれ個体を設定し、前記極値化部により実効評価値を求め当該実効評価値が所定終了条件を満たしたときにおける前記複数の個体の少なくとも一つの個体の評価値に基づいて前記個体の変数又はその変数の最適値を導出する請求項 23 から 27 の何れか一項に記載の

プログラム。

[請求項29] 前記変数の探索を開始する前に予め変数の推定解（ x_{iz} ）が与えられている場合には、

前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、初期分布として前記推定解を含む空間に近いほど個体を密に分布させると共に前記推定解から遠ざかるほど個体の密度を減少させるように設定する請求項21記載のプログラム。

[請求項30] 前記変数の探索を開始する前に予め変数の推定解（ x_{iz} ）が与えられている場合には、

前記最適化装置が前記複数の個体の変数を設定する手順では、初期分布として前記推定解を含む空間に近い所定範囲内に個体を密に分布させると共にその他の個体を前記所定範囲の外にランダムに分布させ、その他の個体の少なくとも1つの個体の少なくとも一つ以上の変数を前記探索範囲の上限値又は下限値に設定する請求項21記載のプログラム。

[請求項31] 前記実効評価値を極値化する手順では、前記複数の個体に対し識別符号を順序付けて付し、順序が隣接する識別符号が付された個体を前記選定個体として引力値を導出し、順序が隣接しない識別符号が付された個体を前記選定個体とせず引力値を0とする請求項21から30の何れか一項に記載のプログラム。

[請求項32] 前記実効評価値を極値化する手順では、変数の数を M （但し M は1以上の自然数）としたときに、前記格子点位置の個体と隣接する格子点位置の最大 $2 \times M$ 個の個体を前記選定個体として引力値を導出し、その他の個体を選定個体とすることなく前記引力値を0とする請求項25から27の何れか一項に記載のプログラム。

[請求項33] 前記実効評価値を極値化する手順では、前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときには、前記複数の個体の間の距離が大きいほど大きな引力値とし距離が小さいほど小さな引力

値とする請求項 3 1 または 3 2 記載のプログラム。

[請求項34] 前記実効評価値を極値化する手順では、前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときに、

[数2]

$$f_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2^2 = \sum_{p=1}^M (x_{i,p} - x_{j,p})^2 \dots (2)$$

の (2) 式により導出する請求項 3 3 記載のプログラム。

[請求項35] 前記実効評価値を極値化する手順において、前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出するときには、前記複数の個体の間の距離に依存しない一定の引力値とする請求項 3 1 または 3 2 記載のプログラム。

[請求項36] 前記実効評価値を極値化する手順では、前記複数の個体の間の引力ポテンシャルを導出し引力値を導出するときに、

[数3]

$$f_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_1 = \sum_{p=1}^M |x_{i,p} - x_{j,p}| \dots (3)$$

の (3) 式により導出する請求項 3 5 記載のプログラム。

[請求項37] 前記各種値を導出する手順では、少なくとも一つの個体の評価値に基づいて個体の変数を導出するときに、前記引力値を 0 として前記複数の個体の評価加算値による実効評価値を極値化して前記複数の個体の変数の実効評価値の最小値を導出し、当該実効評価値が最小値を満たす変数を最適値として導出する請求項 2 1 から 3 6 の何れか一項に記載のプログラム。

[請求項38] 前記実効評価値を極値化する手順では、

前記評価加算値及び前記引力値のそれぞれについて、当該値の解候補を求めた後、当該解候補を代入したときの微分値が当該評価関数の微分値と等しく、且つ、前記解候補を含む探索空間の内の全ての変数における評価値よりも大きな値を得る条件を満たす 2 次関数に置換し、当該 2 次関数の極値を次回の値の解候補として繰り返して更新する

補助関数法を用い、

前記評価加算値と前記引力値とを加算した実効評価値を極値化する請求項 2 1 から 3 7 の何れか一項に記載のプログラム。

[請求項39]

前記実効評価値を極値化する手順では、

前記評価加算値及び前記引力値のそれぞれについて、当該値の解候補を求めた後、当該解候補を代入したときの微分値が当該評価関数の微分値と等しく、且つ、前記解候補を含む探索空間の内の全ての変数における評価値よりも大きな値を得る条件を満たすリプシッツ定数を用いた 2 次関数に置換し、当該 2 次関数の極値を次回の値の解候補として繰り返して更新する補助関数法を用い、

前記評価加算値と前記引力値とを加算した実効評価値を極値化するものであり、

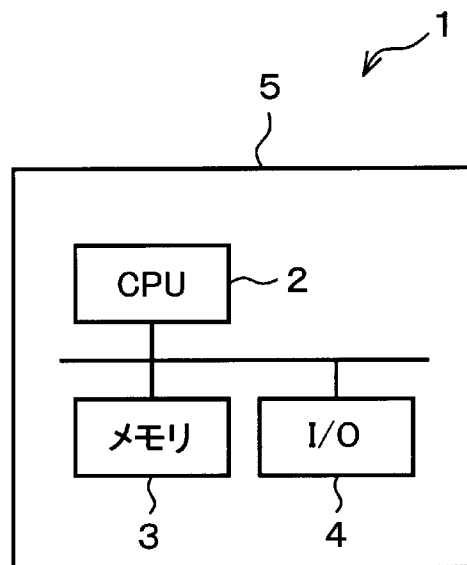
前記引力値について前記補助関数法を用いるときには前記 2 次関数のリプシッツ定数を 4 に固定して設定する請求項 3 4 記載のプログラム。

[請求項40]

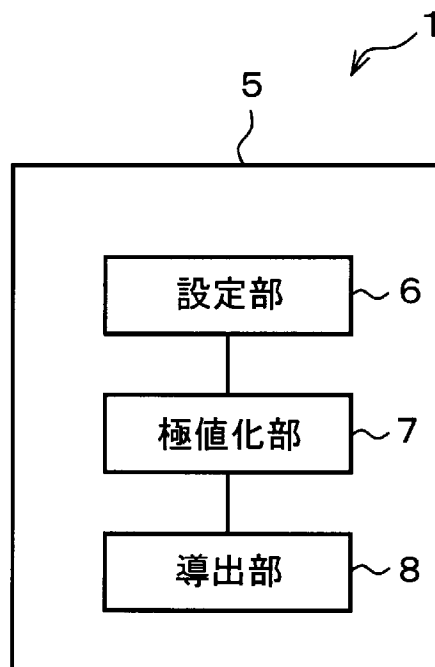
前記個体の変数又はその最適値を導出する手順では、未来時刻における最適経路（R 1）を導出するものであって、

前記複数の個体の変数を設定する手順では、過去の最適経路（R 0）を推定解とし、前記初期分布として前記推定解を含む領域に近いほど個体を密に分布させると共に前記推定解から遠ざかるほど個体の密度を減少させるように設定する請求項 2 1 記載のプログラム。

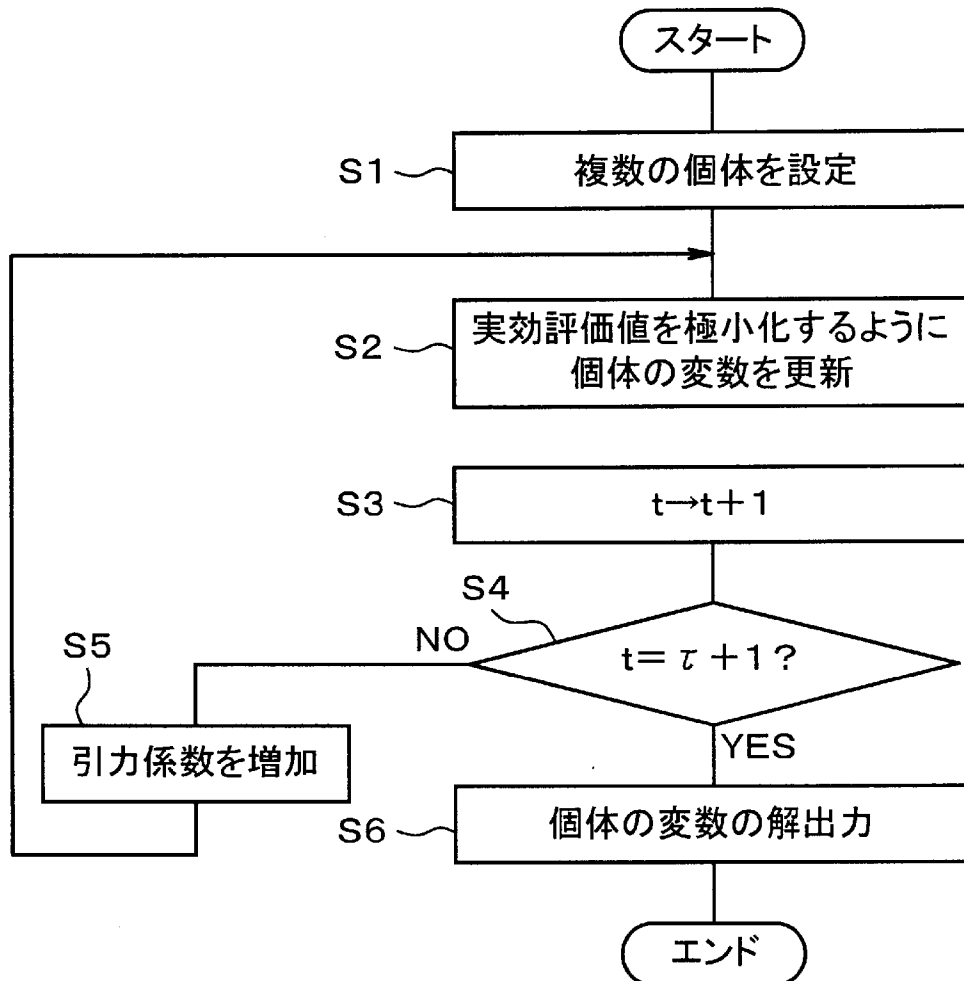
[図1A]



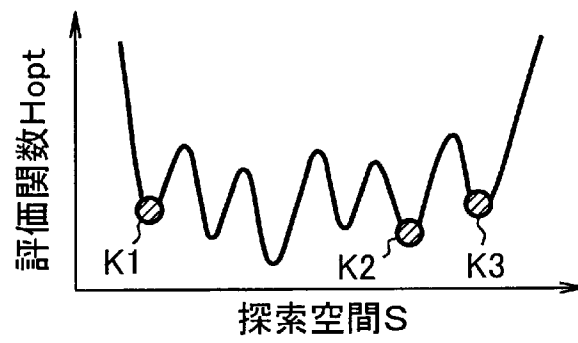
[図1B]



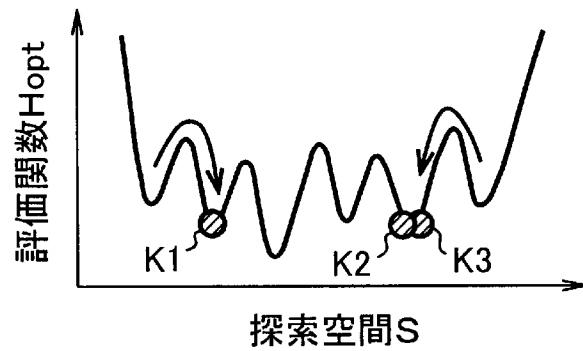
[図2]



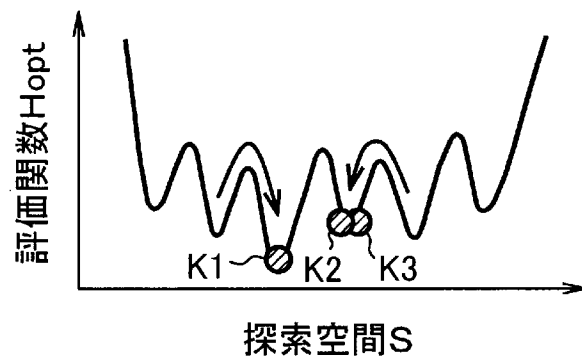
[図3A]



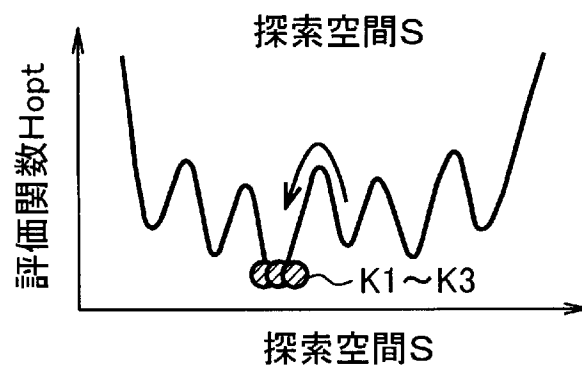
[図3B]



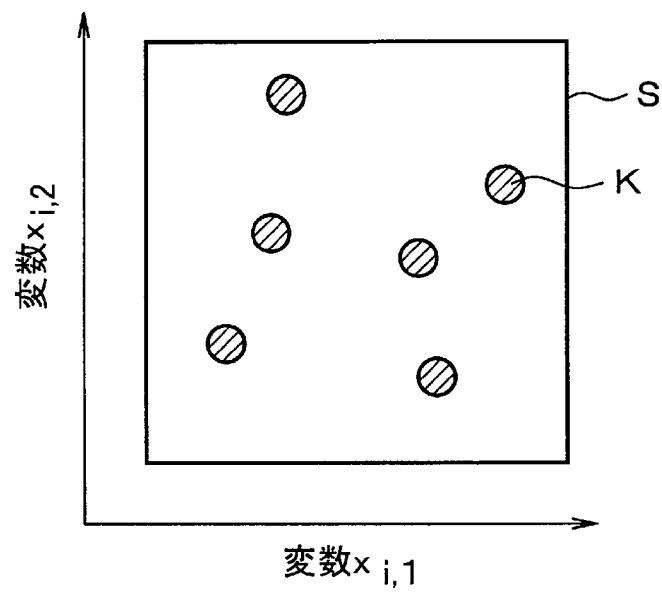
[図3C]



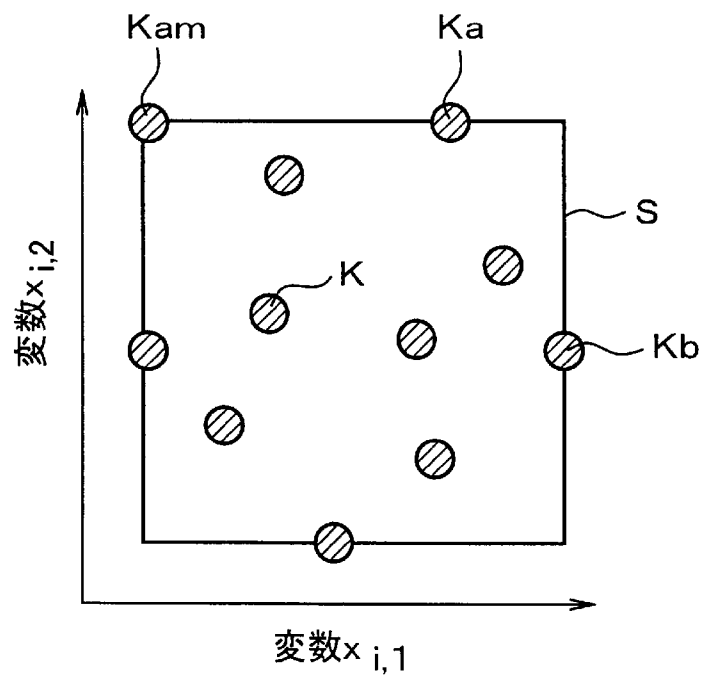
[図3D]



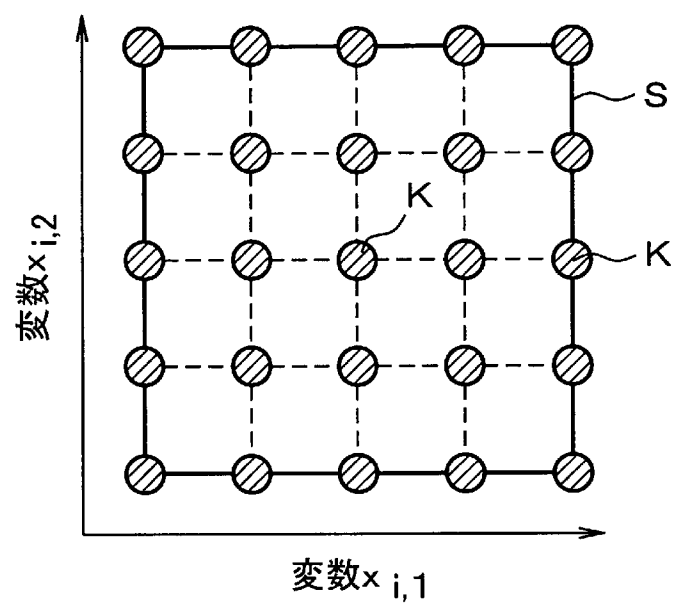
[図4]



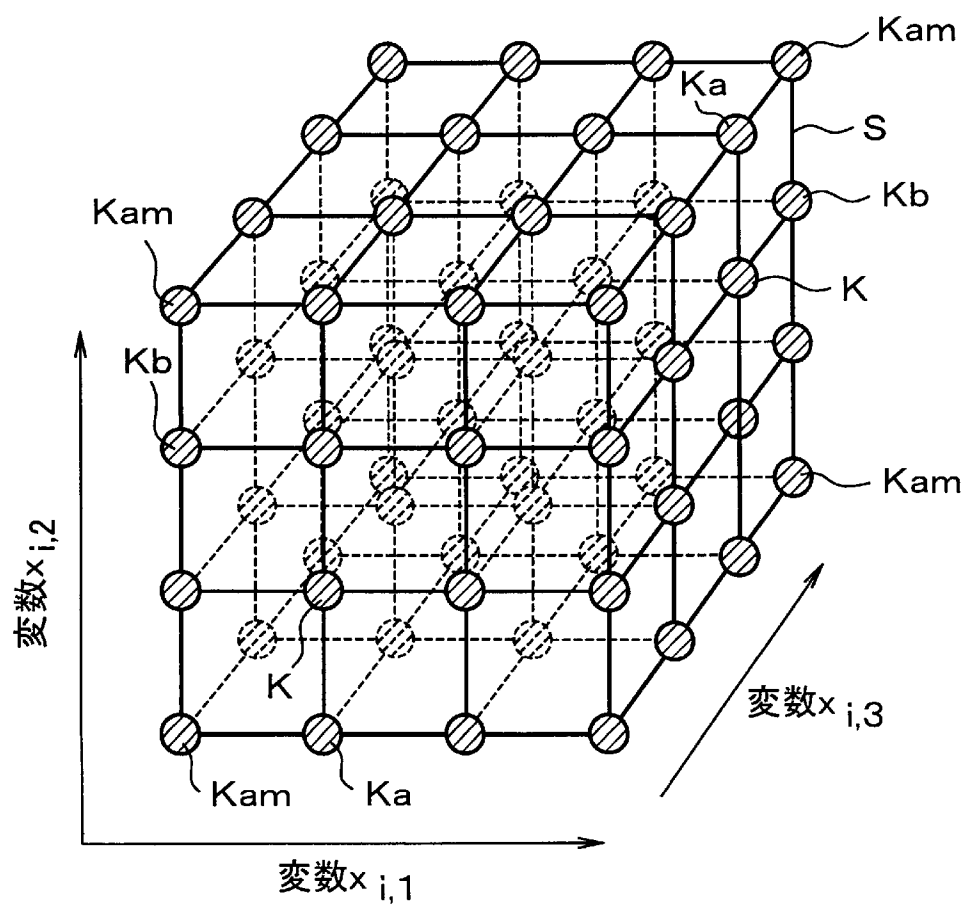
[図5]



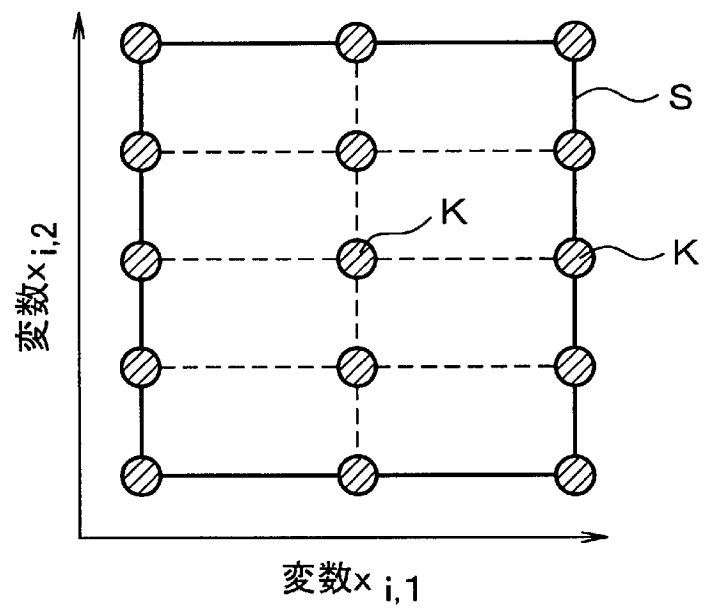
[図6]



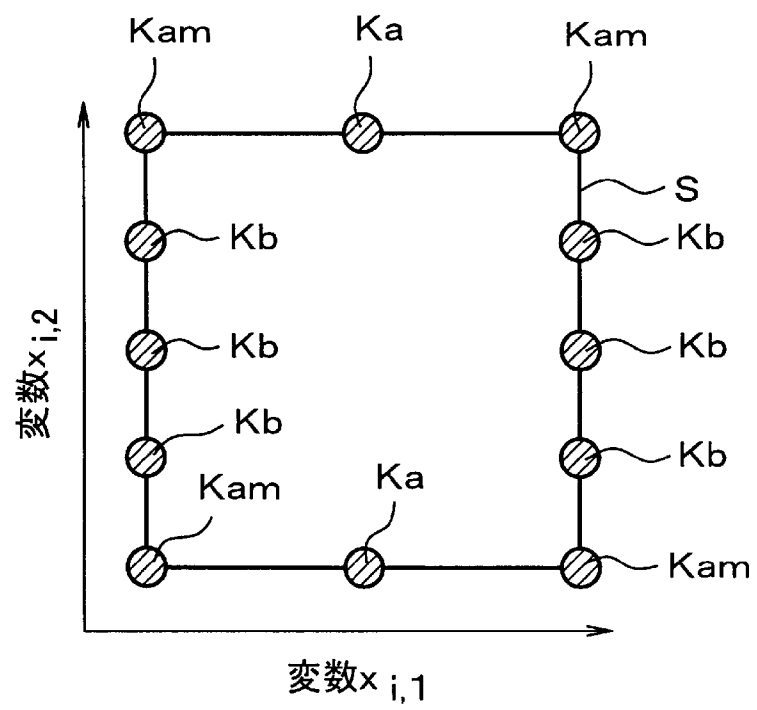
[図7]



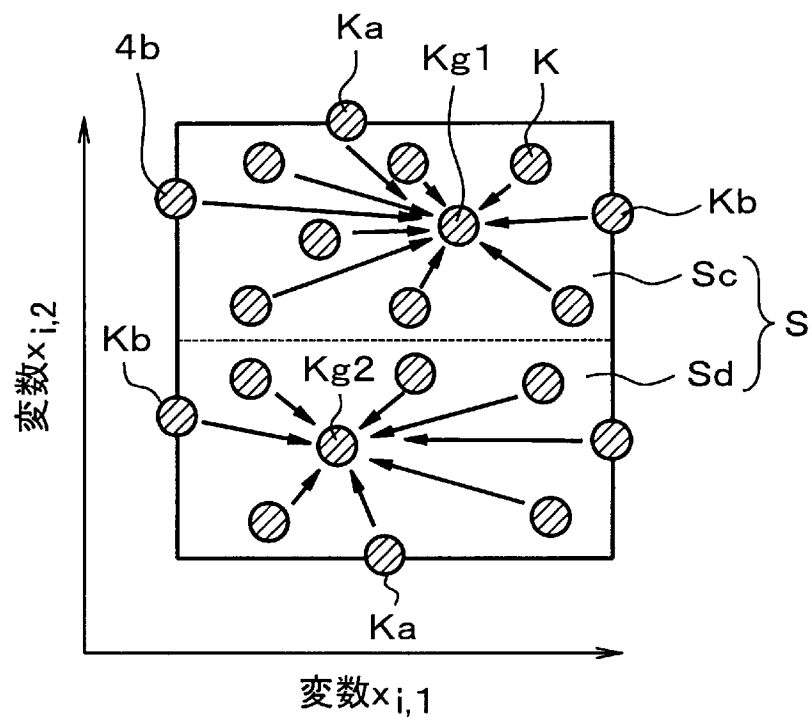
[図8]



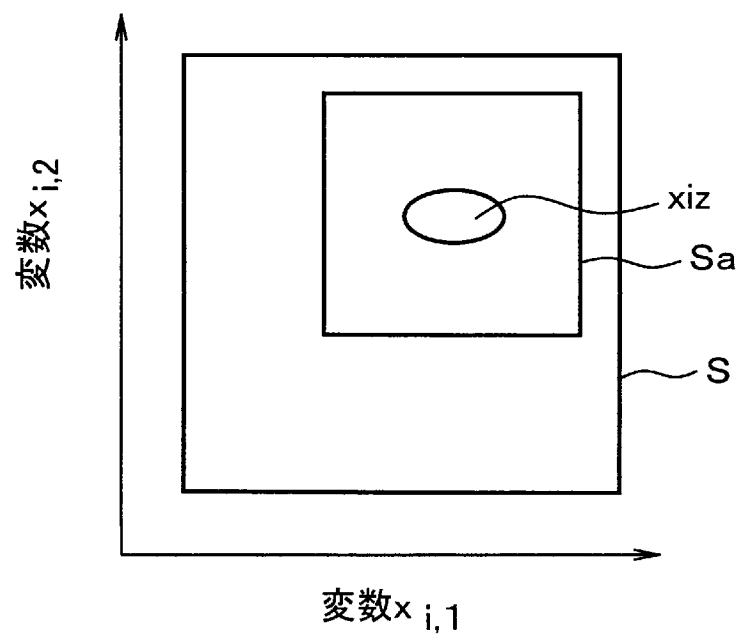
[図9]



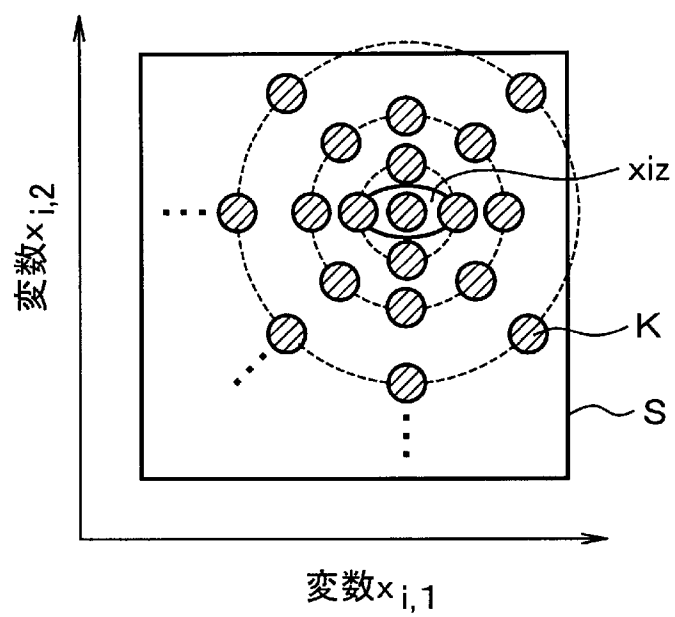
[図10]



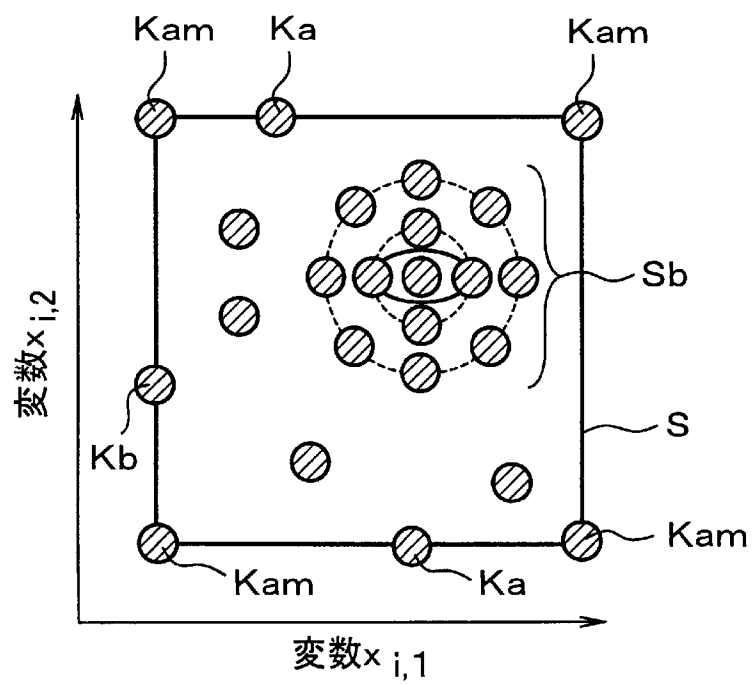
[図11]



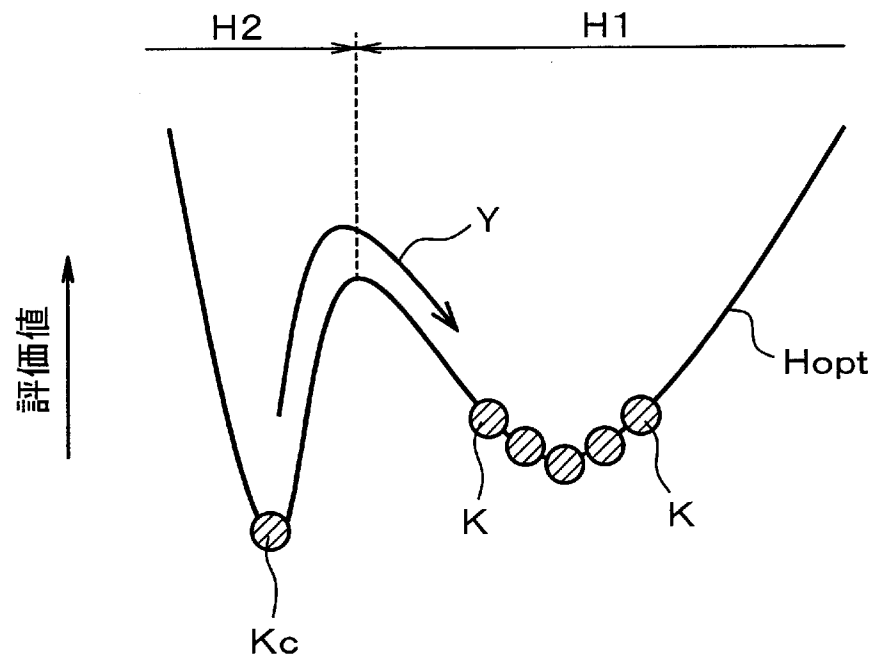
[図12]



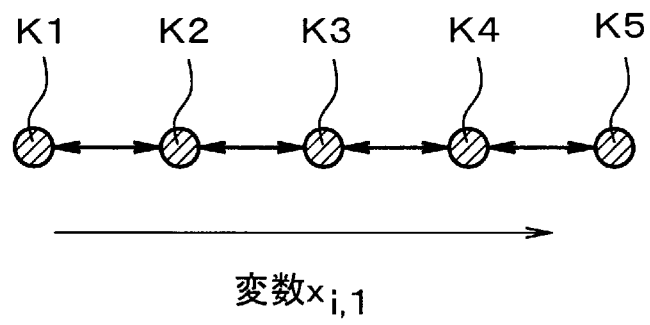
[図13]



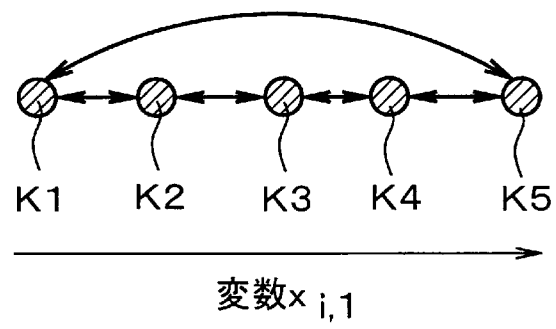
[図14]



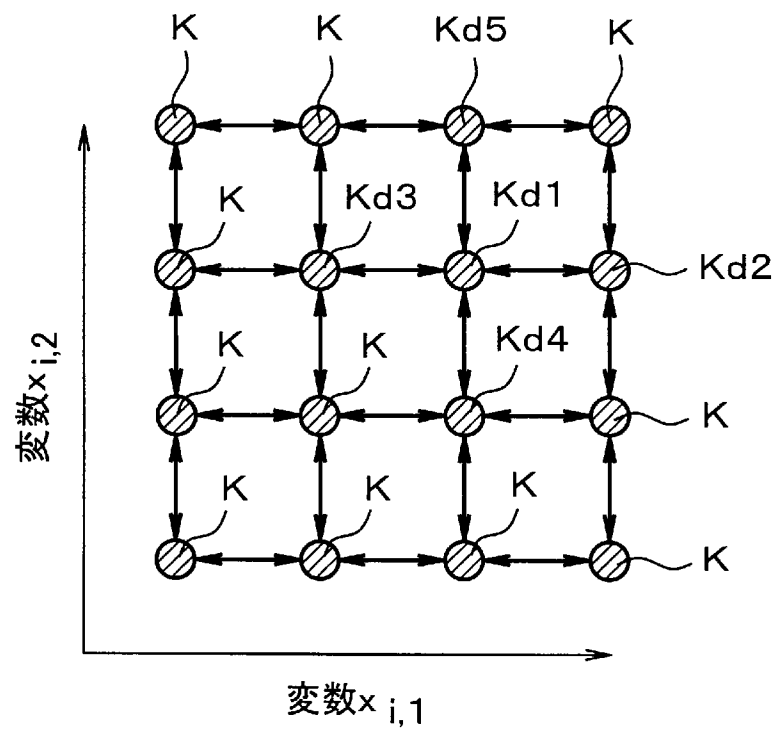
[図15]



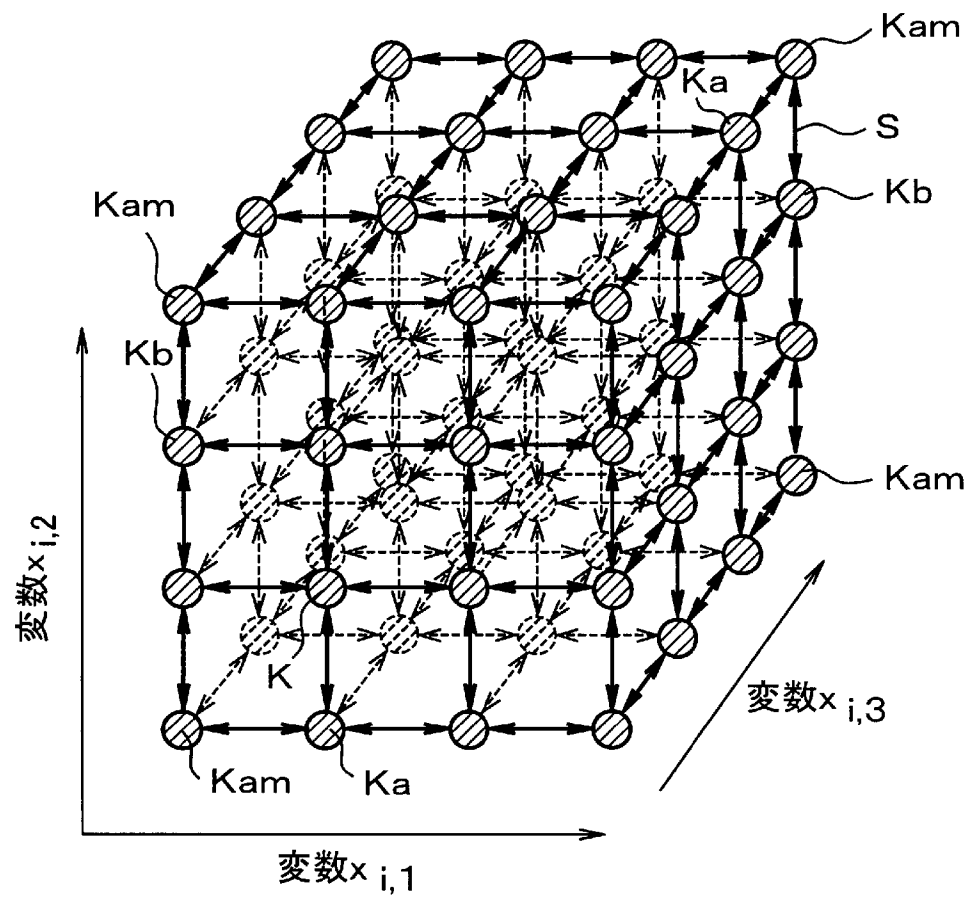
[図16]



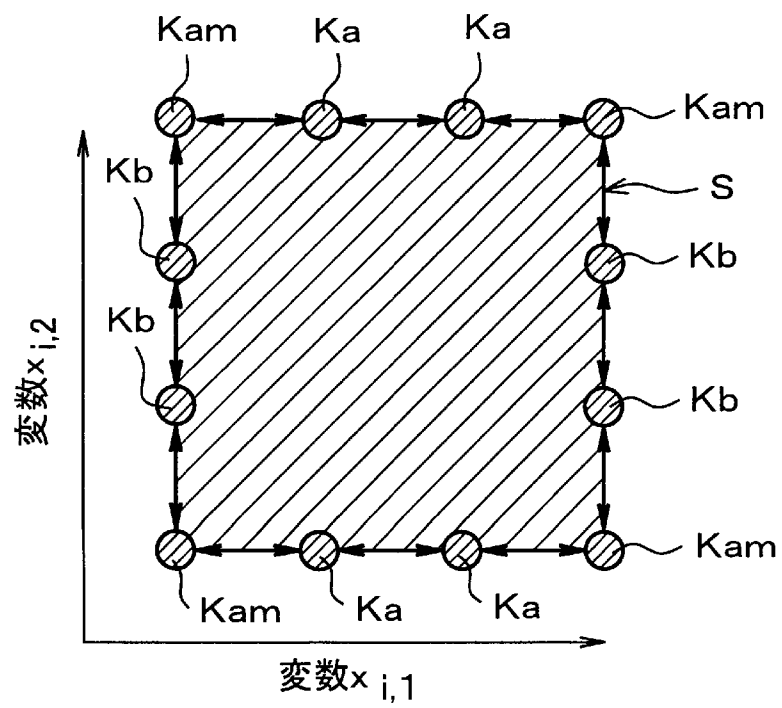
[図17]



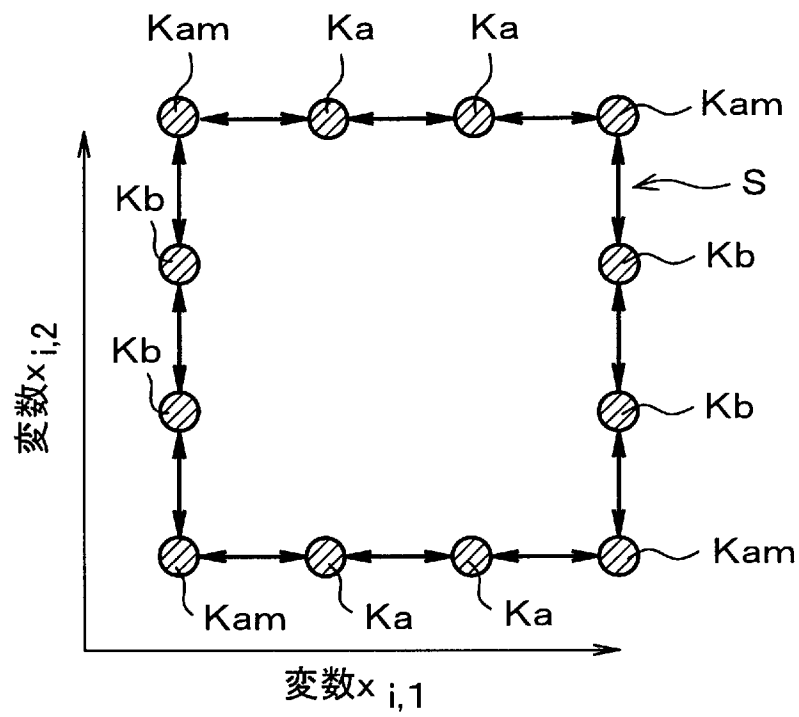
[図18]



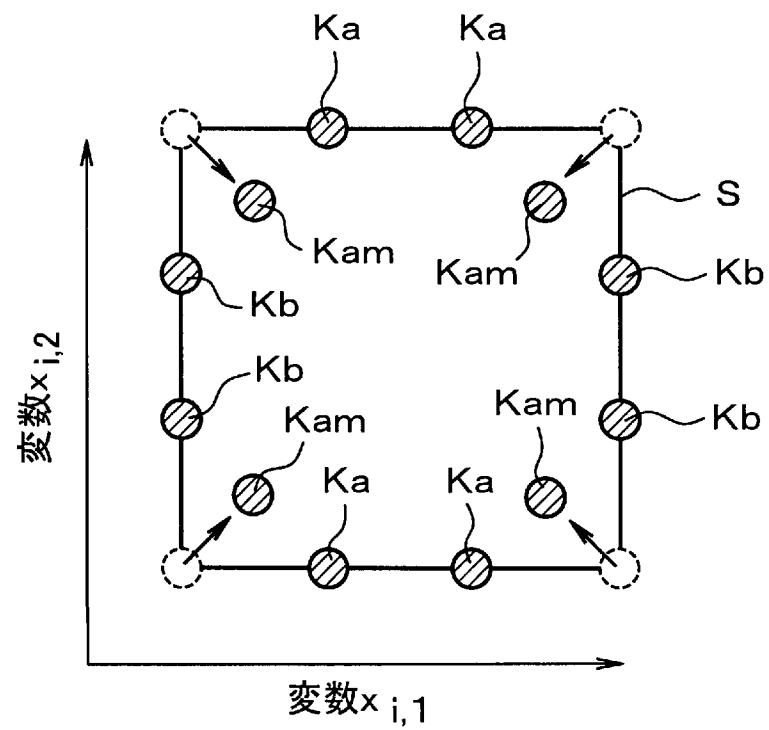
[図19]



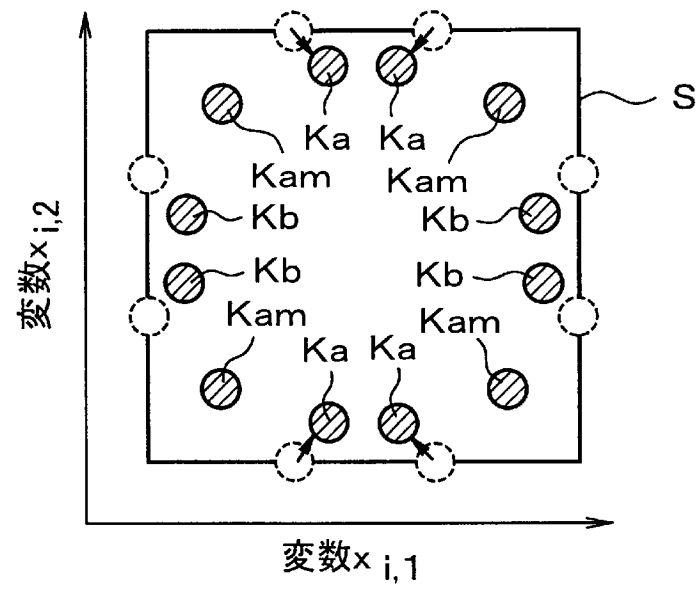
[図20A]



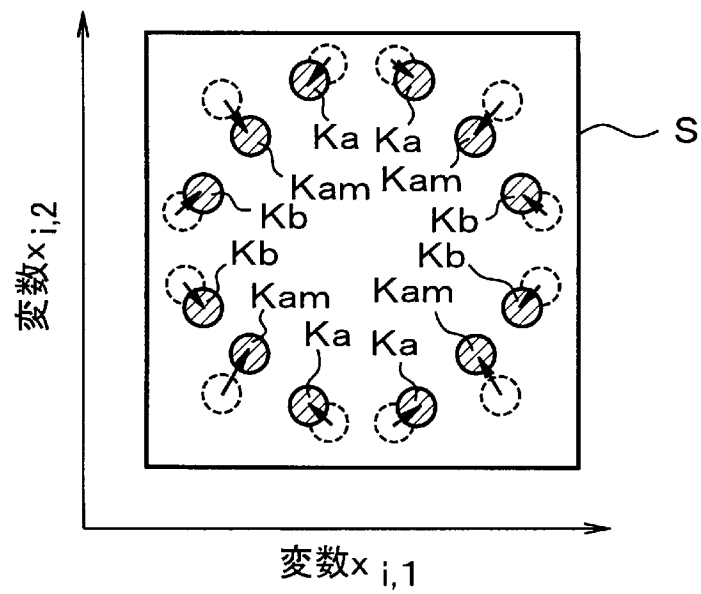
[図20B]



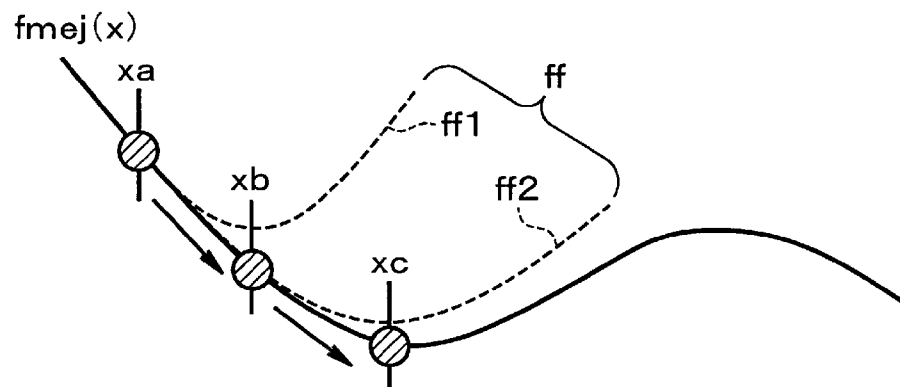
[図20C]



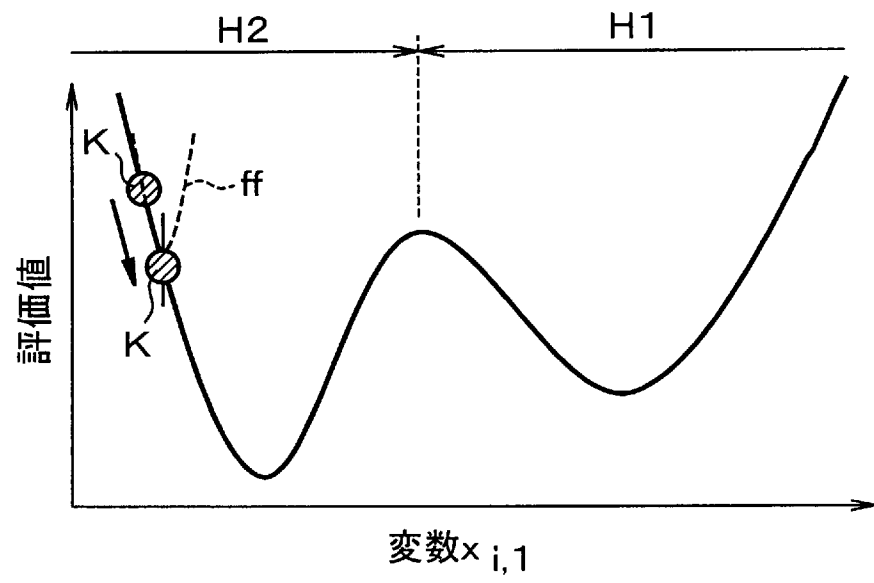
[図20D]



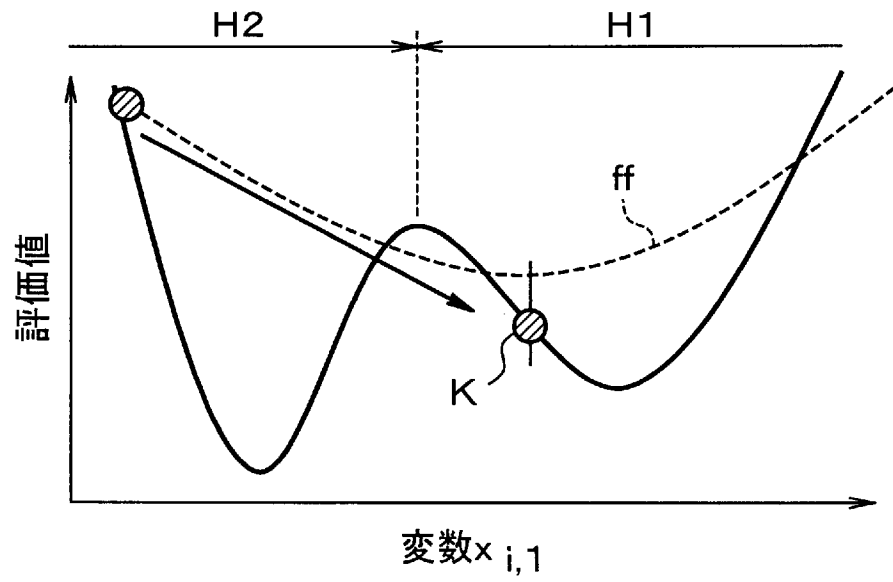
[図21]



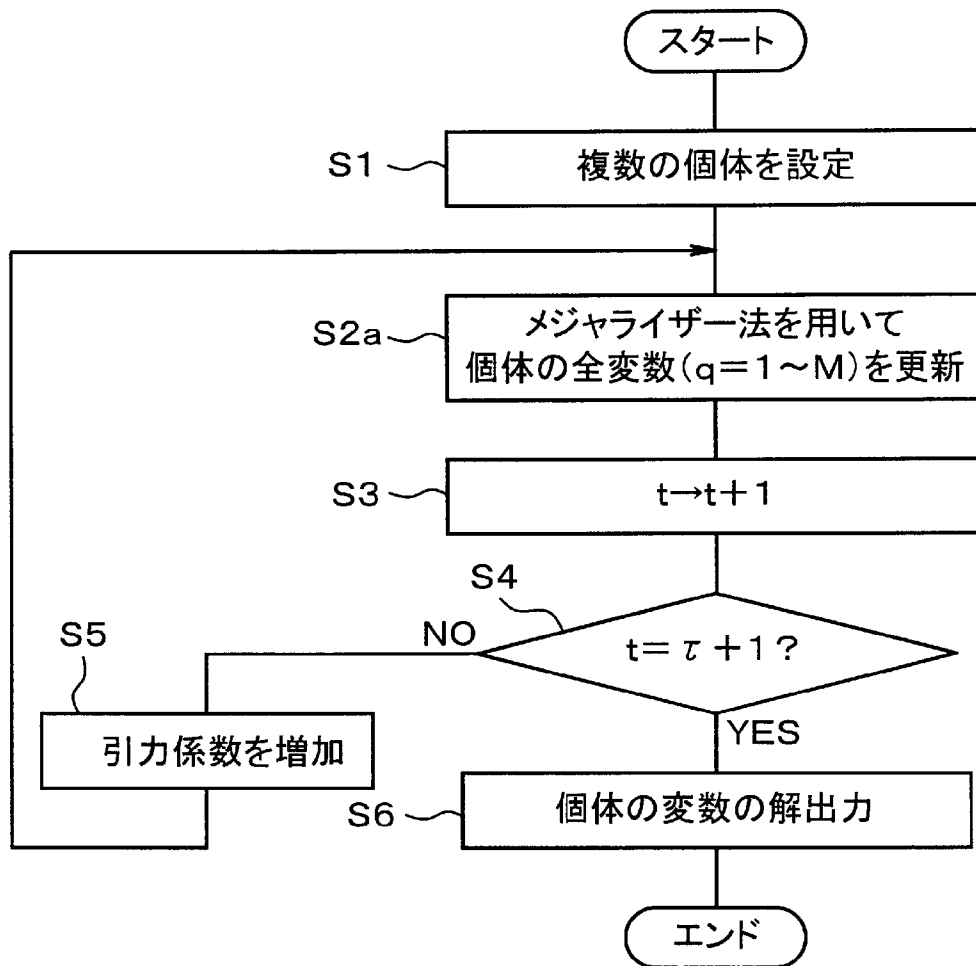
[図22]



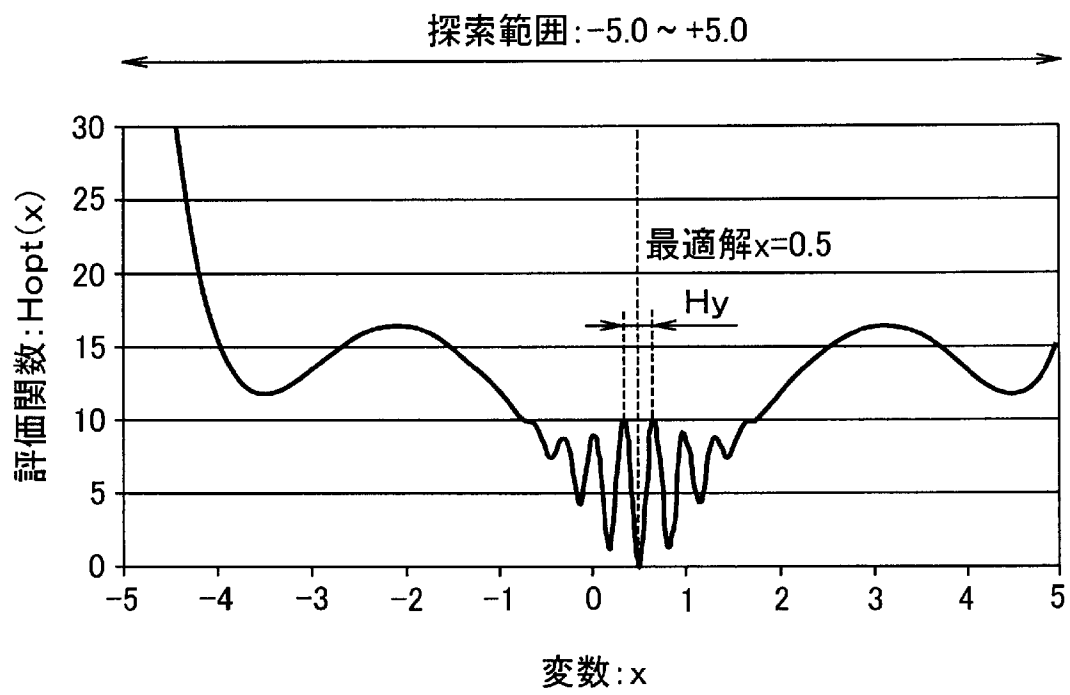
[図23]



[図24]



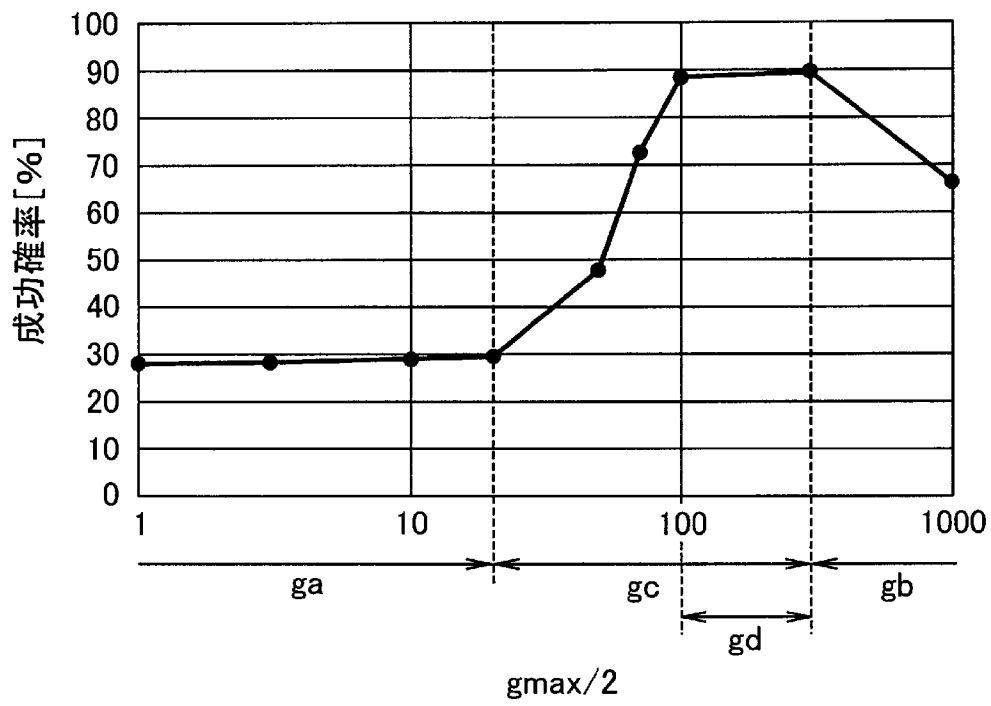
[図25]



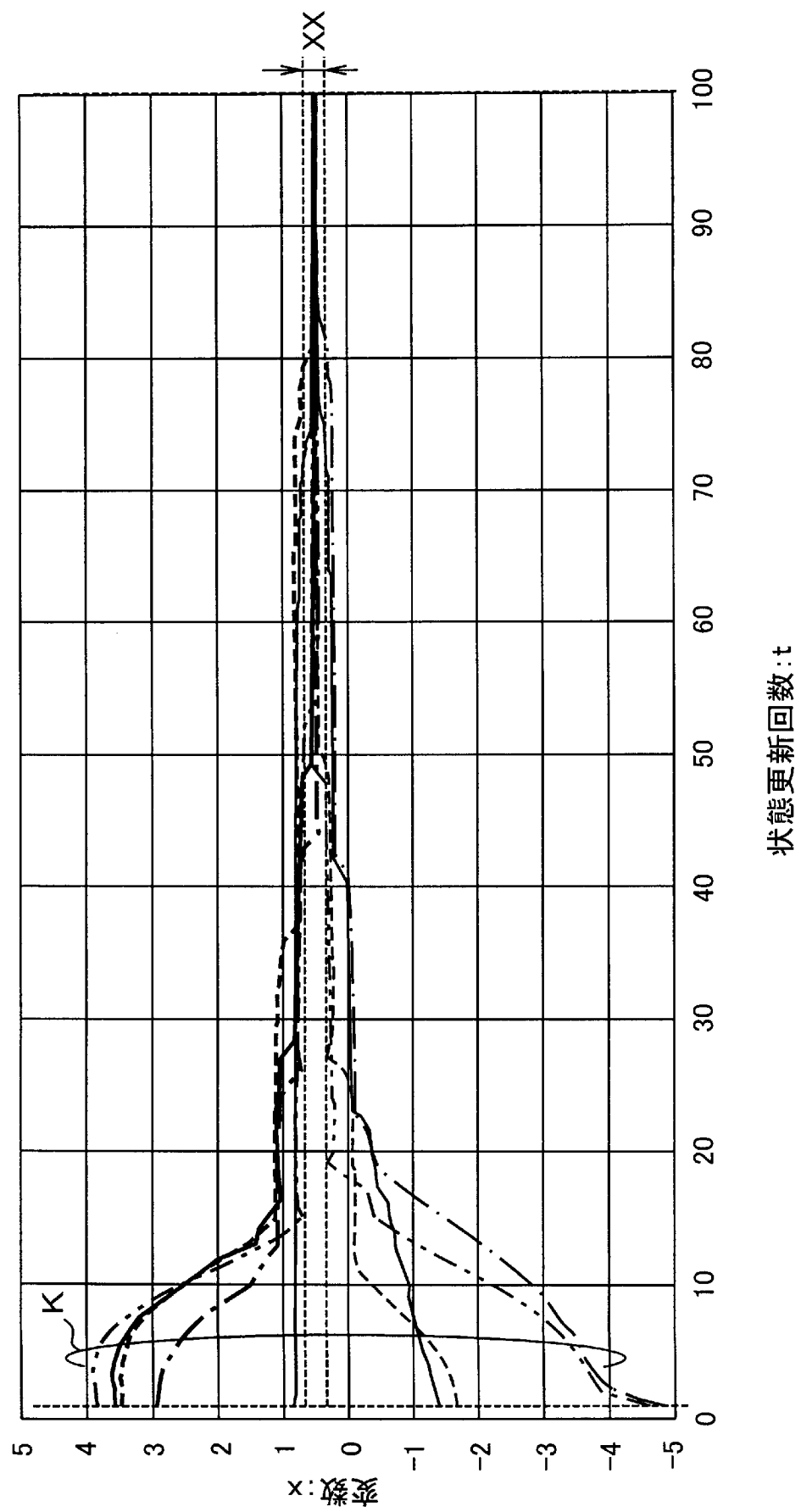
[図26]

定数	設定値	定数	設定値
x_m	0.5	A	0.012
a	2	B	-0.410
P	31	C	3.911
τ	100		
N	10		

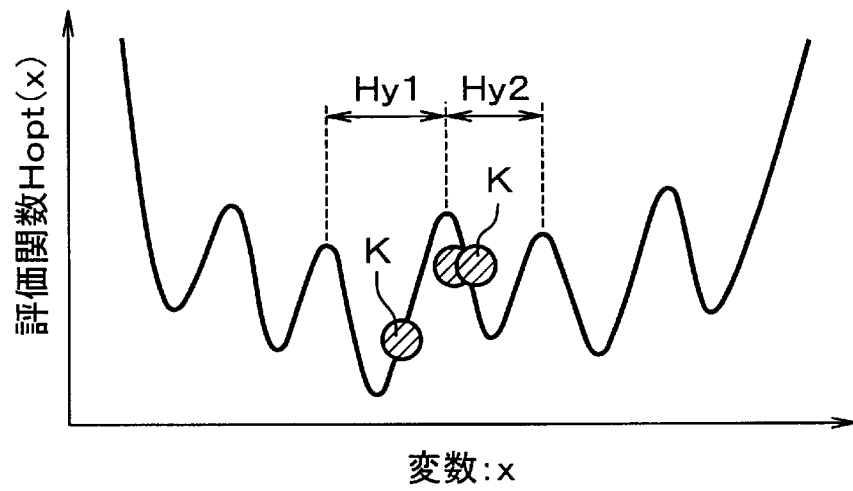
[図27]



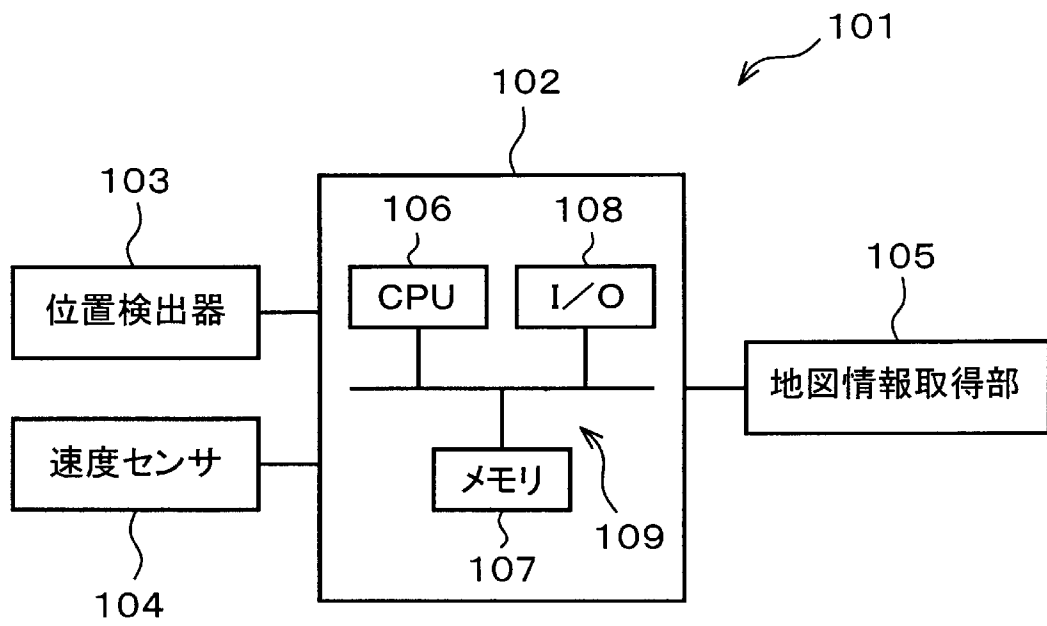
[図28]



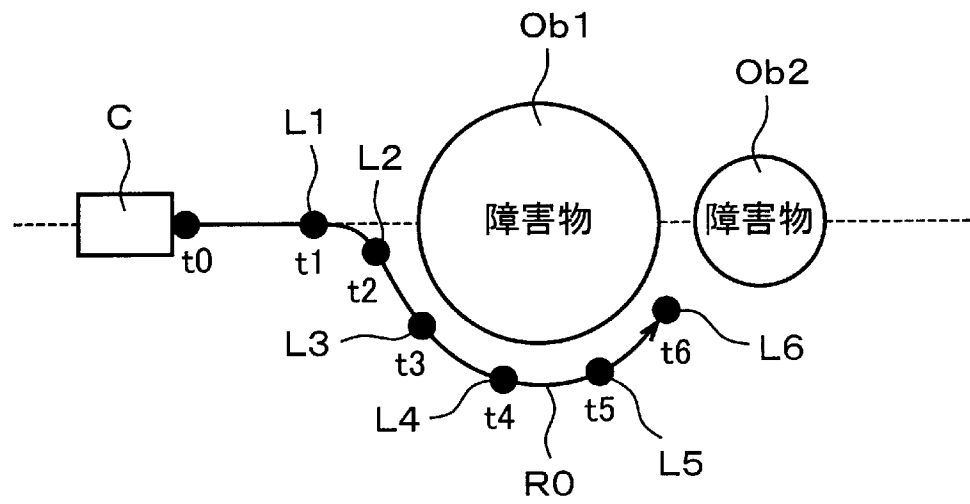
[図29]



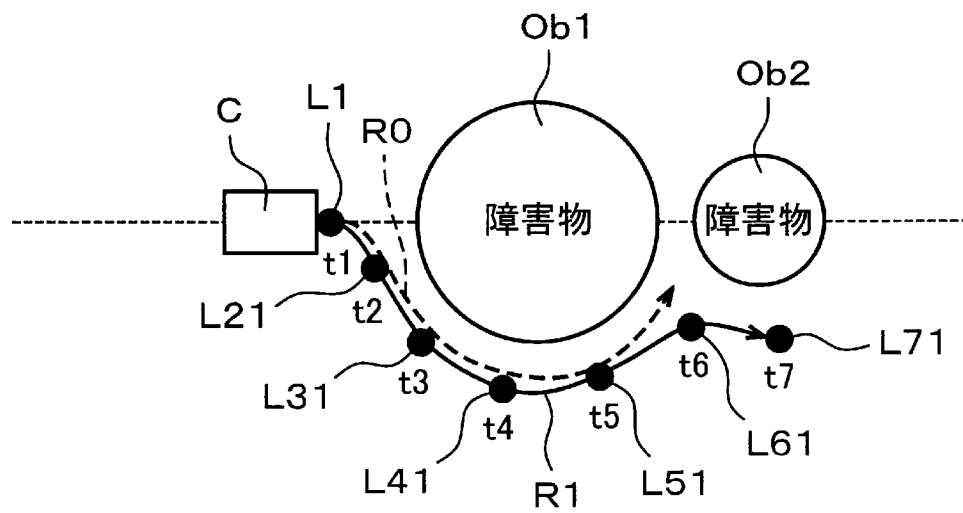
[図30]



[図31]



[図32]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/023050

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06N99/00(2010.01)i, G05B13/02(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06N99/00, G05B13/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 11-85728 A (Hitachi, Ltd.), 30 March 1999 (30.03.1999), paragraphs [0025] to [0028]; fig. 6 (Family: none)	1-40
A	JP 2013-36084 A (Kobe Steel, Ltd.), 21 February 2013 (21.02.2013), entire text; all drawings (Family: none)	1-40
A	WO 2015/168431 A1 (STC.UNM), 05 November 2015 (05.11.2015), entire text; all drawings & US 2017/0036037 A1	1-40

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
04 August 2017 (04.08.17)

Date of mailing of the international search report
15 August 2017 (15.08.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G06N99/00(2010.01)i, G05B13/02(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G06N99/00, 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	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 11-85728 A（株式会社日立製作所）1999.03.30, 段落 [0025] - [0028], 図6（ファミリーなし）	1-40
A	JP 2013-36084 A（株式会社神戸製鋼所）2013.02.21, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-40
A	WO 2015/168431 A1（STC.UNM）2015.11.05, 全文, 全図 & US 2017/0036037 A1	1-40

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

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

国際調査を完了した日

04.08.2017

国際調査報告の発送日

15.08.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

杉浦 孝光

5 B

5287

電話番号 03-3581-1101 内線 3545