

ま え が き

本書は、北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科情報工学コースで教えているナチュラルコンピューティング（2単位）の内容を基本としているが、執筆をお願いした北海道内の大学の先生方と内容の検討を行い、他の大学・高専でも使用できることを念頭に置き、できるだけ理解しやすいような教科書となるように心がけたものである。

ヒューリスティクスとは、発見的方法と訳されるが、ある問題に対して経験・発見を通して問題の解を見つける、あるいは改善する方法である。こうした方法は、限定された問題向きの解法となる。メタヒューリスティクスとは、発見された問題だけではなく、多くの問題に適用できるような汎用性をもつ方法をいう。近年、開発されたヒューリスティクスは、自然界（生物学や物理現象）から発想を得たものが多く、かつ、汎用性をもつため、ほとんどがメタヒューリスティクスに属する。

生物界には、あたかもある種の戦略があるかのごとく環境への適応・進化・社会性の実現、などを行っていることが観察される。また、エネルギーを最小化するような物理現象も多々見られる。例としては、ダーウィンやラマルクが発見した生物の進化、日本刀のように金属の結晶化に温度の制御を上手に行う製造法が挙げられる。これらの戦略は、自然界における情報処理技術とも考えることができ、これらをコンピュータで模倣した最適化の計算法がナチュラルコンピューティングである。本書で取り扱われる多くの方法は、ナチュラルコンピューティングに属するものである。

1章では、最適化の考え方を述べている。最適化とは、ある目的を評価とし、その評価を最大化（最小化）するようにパラメータ（変数）を与えられた制約の下で決定することである。2章では、傾斜法と線形計画法を述べた。こ

これらの二つの方法は、クラシックな計画数理（あるいはオペレーションズリサーチ）の方法であるが、山登りという重要な概念と、最適化を行う際の問題の記述やベクトル・行列に慣れることも目的としている。3章から8章までは基本的なメタヒューリスティクスを個別に説明している。それぞれの方法の名前の由来は各章で説明されているが、例えば、3章のシミュレーテッドアニーリングは鋼鉄を製造するときの焼鈍し原理を模倣したものであり、8章の自己組織化マップは人間の脳の自己組織化モデルを模倣したものである。

本書で述べられている方法は、その方法論のみとして存在するのではなく、広い分野の応用とかかわって存在している。例えば、遺伝的アルゴリズムや粒子群最適化は、人工知能や人工生命とかかわってきた分野であるが、現在では、ロボティクス、制御、経済学、建築学、土木学、化学、などで広く最適化の方法として普及している。実際に本書の執筆にかかわった先生方は、それぞれの分野で本書に述べられた方法を研究に使用しており、本書はそうした研究に裏づけされたものである。

本書が、これからいろいろな分野で活躍が期待される学生諸君の基礎的なツールとなることを願っている。

2011年11月

古川 正志

〔執筆分担〕

古川 正志	1章, 2章
川上 敬	7章
渡辺美知子	5章
木下 正博	4章
山本 雅人	3章, 6章
鈴木 育男	8章

目 次

1. ナチュラルコンピューティングと最適化問題

1.1	ナチュラルコンピューティングとメタヒューリスティクス	1
1.2	最適化問題	5
1.2.1	1変数の最適化問題の表現	5
1.2.2	多変数の最適化問題の表現	6
1.2.3	順序による最適化問題の表現	9
1.2.4	ビットを用いたときの最適化問題の表現	12
1.2.5	最適化問題の変換	14
1.3	計算の複雑さ	16
1.3.1	多項式時間アルゴリズム	17
1.3.2	手に負えない問題	19
1.4	ま と め	22
	演習問題	22

2. 山登り法

2.1	山登り法	23
2.1.1	山登り法のアルゴリズム	24
2.1.2	傾斜法	26
2.2	線形計画法	31
2.2.1	不等式制約条件の等式化と基底解	32
2.2.2	ガウス・ジョルダン法	34
2.2.3	基底解の表による表現	37

2.2.4	ピボット行とピボット列の決定	39
2.2.5	線形計画法のアルゴリズム	42
2.3	ま と め	46
	演 習 問 題	46

3. シミュレーテッドアニーリング

3.1	全探索と局所探索	49
3.1.1	しらみつぶし法	49
3.1.2	ランダム探索法	53
3.1.3	山 登 り 法	54
3.2	シミュレーテッドアニーリングの概要	59
3.3	近傍解と受理率	61
3.4	冷却スケジュール	62
3.5	収 束 性	64
3.6	SA の 適 用 例	65
3.6.1	巡回セールスマン問題と解表現	65
3.6.2	近 傍 解	66
3.6.3	各パラメータ	69
3.7	ま と め	70
	演 習 問 題	72

4. タブーサーチ

4.1	タブーサーチの概念	73
4.1.1	タブーサーチの考え方	74
4.1.2	タブーサーチアルゴリズムの一般形	75
4.1.3	タブーサーチの概念のまとめ	76
4.2	タブーサーチの方法論	77

4.2.1	タブーサーチのための表記法	77
4.2.2	タブーサーチの単純形式と山登り法	78
4.2.3	局 所 探 索 法	81
4.2.4	タブーリストの実装	83
4.2.5	タブーサーチの簡単な例題	84
4.2.6	願 望 基 準	86
4.2.7	期待レベルの利用	87
4.2.8	統合タブー制約と期待レベル基準	88
4.2.9	有向グラフによる探索の表現	90
4.3	制約付き Minimum Spanning Tree 問題	91
4.4	TS の 改 良 法	93
4.4.1	集 中 化	94
4.4.2	多 様 化	94
4.4.3	タブーリストと戦略的振動	95
4.4.4	目 標 分 析	96
4.4.5	候補リスト戦略	97
4.5	TS の適用と研究動向	97
4.6	ま と め	98
	演 習 問 題	99

5. 遺伝的アルゴリズム

5.1	進化の模倣	100
5.2	アルゴリズムの概要	101
5.2.1	アルゴリズム	102
5.2.2	ナップサック問題への適用	103
5.2.3	遺伝子表現と形質表現 (遺伝子の設計)	104
5.2.4	適応度関数の設定	104
5.2.5	遺伝オペレータ (交叉, 突然変異)	106
5.3	スキーマ理論	108
5.3.1	スキーマ長	108

5.3.2	再生, 交叉, 突然変異	109
5.3.3	統合化したスキーマ理論	112
5.4	遺伝的アルゴリズムの適用	113
5.4.1	生産計画問題 (多変数の最適化問題)	113
5.4.2	巡回セールスマン問題 (順序表現による最適化問題)	117
5.5	ま と め	123
	演 習 問 題	123

6. 粒子群最適化法

6.1	単点探索と多点探索	124
6.2	粒子による解表現と粒子の移動	125
6.3	PSO のアルゴリズム	128
6.4	PSO におけるパラメータ設定	129
6.5	PSO の適用例 — 関数最適化問題	130
6.6	ま と め	134
	演 習 問 題	134

7. アントコロニー最適化法

7.1	社会性昆虫としてのアリ	135
7.1.1	アリのうろつき行動と道標フェロモン	137
7.1.2	ダブルブリッジ実験	137
7.2	人工アリのモデリング	140
7.2.1	アリのコロニーの確率モデル	140
7.2.2	人工アリの定義	142
7.2.3	最短経路探索問題	143
7.3	アントコロニー最適化メタヒューリスティクス	145
7.4	アントコロニー最適化法の TSP への適用	147

7.4.1	TSP	147
7.4.2	TSP への AS (Ant System) の適用	148
7.4.3	TSP への <i>MAX-MIN</i> Ant System の適用	150
7.5	ま と め	151
演 習 問 題		152

8. 自己組織化マップ手法

8.1	人工ニューラルネットワークの概要	153
8.1.1	生物の神経ネットワーク	154
8.1.2	ニューロンとニューラルネットワークのモデル	155
8.1.3	ニューラルネットワークの学習	159
8.2	自己組織化マップ	161
8.2.1	SOM の 基 本	162
8.2.2	SOM の学習アルゴリズム	163
8.2.3	最適化問題への応用	168
8.3	局所クラスタリング組織化法	171
8.3.1	LCO の学習アルゴリズム	172
8.3.2	最適化問題への応用	177
8.4	ま と め	178
演 習 問 題		179

引用・参考文献	182
---------	-----

演習問題解答	186
--------	-----

索 引	193
-----	-----

1

ナチュラルコンピューティングと最適化問題

ダーウィンの種の起源に見られるように、生物は種の多様性をもって与えられたさまざまな環境に適応した子孫を現在に残している。適応したという言葉は、その環境に最良な、という意味にとれる。また、金属は温度を上手に制御した除冷によって安定した組織をつくることができる。こうした例は、自然界がもつ情報処理、あるいは物理法則がつくる情報処理ということもできる。

こうした情報処理をコンピュータで人工物の設計に利用するのがナチュラルコンピューティングである。本章では、ナチュラルコンピューティングの概念と最適化問題、および計算の複雑性について導入する。

1.1 ナチュラルコンピューティングとメタヒューリスティクス

本書では、ナチュラルコンピューティング (natural computing, natural computation) と呼ばれる分野で使用されるメタヒューリスティクス (meta-heuristics) を取り扱う。ナチュラルコンピューティングと呼ばれる分野には、主に以下の三つがある。

- (1) 自然システム (人間の社会も含まれる) に見られる最適化あるいは最良化の情報処理を、現実的な人工物の問題解決方法として開発、あるいは利用する。
- (2) 自然界に起きている種々の現象を、コンピュータを利用して総合的に理解する (人工生命)。
- (3) 自然に存在する材料 (分子あるいはDNA) を用いて、新しいコン

2 1. ナチュラルコンピューティングと最適化問題

コンピュータの設計を実現する。

本書で取り扱う分野は、これらの中で、最初の分野に限定する。(1)の分野は、自然に触発された計算モデル (nature-inspired models of computation) とも呼ばれる。

一方、ヒューリスティクスは、聞き慣れない言葉かもしれない。その意味は発見的な方法である。例えば、数学の問題を解いているとしよう。そのとき、教室では教わらないが上手に特定の問題を解くことができる方法を見つけたとしよう。このような方法をヒューリスティクスという (特別の方法という意味では、アドホック (ad-hoc) ともいわれる)。しかし、この方法は特定の問題にしか適用できないことが多い。メタが接頭語にある理由は、このような方法が特定の問題ばかりではなく、多くの問題に適用できる一般性をもつからである。最近に開発されたメタヒューリスティクスは、その多くが自然に触発された計算モデルであり、このような一般性を備えている。

「自然は、最適化 (最良化) する」と述べれば、ショッキングな言葉である。ある人は、「ふむふむ、そのとおり」というかもしれない。他の人は「そのようなことはない」と否定する反証をいくらかでも挙げるかもしれない。この言葉には目的語がないので、どのようにとることもできる、と中間的な立場をとる人もいるかもしれない。自然を神に置き換えれば納得する人もいるかもしれない。工学を目指す者にとって大事なのは、最適化が人工物の設計 (別の言葉では、意思決定) において重要な役割を果たし、自然システムで見出された方法が、最適化の有力な方法としての情報処理技術を提供していることである。

それでは、これまでに最適化の方法はなかったのだろうか。当然、人工物の設計や意思決定は多くなされ、そのためにコンピュータが使用されてきている。体系的な学問としては、最適化の方法論はオペレーションズリサーチ (operations research) や計画数理 (mathematical programming) で取り扱われている。また、システム工学においても、その方法論として取り扱われる。それらの代表的な方法としては、以下のものなどが挙げられる。

(1) 線形計画法 (シンプレックス法)

- (2) 非線形計画法 (フィボナッチ法, 最大傾斜法, 共役傾斜法, など)
- (3) 整数計画法
- (4) 動的計画法
- (5) 分岐限界法

本書では, これらの方法の有用性を否定するものではない。むしろこうした方法を学んだうえで, 本書を読むほうが望ましい。しかし, これらの知識がなくとも, 本書で述べられる方法は利用可能である。それは, プラグマチズムに基づけば, あるいは, 実践的な問題解決の立場に立てば, 本書で取り扱われるメタヒューリスティクスは, 従来のこうした最適化の方法に匹敵しうる, あるいはそれ以上の能力を備えていると期待されるからである。逆にいえば, それだけの反論を受けながらも発展してきた技術であるといえる。

それでは, 上記の方法と比較してどのような点が異なるのであろうか。その第一は, ナチュラルコンピューティングで取り扱われるメタヒューリスティクスは, 個々には発展してきているが, その多くが複雑系工学の創発技術として取り扱われている点である。複雑系工学は, 個々の要素が相互に関係をもつとき, それらの相互作用をボトムアップに総合化 (シンセシス) する工学である。この考え方は, 物事を個々に分解し, それを組み立てれば元に戻すことができるという, かつてのデカルト的な方法論と異なっている。この複雑系の考え方は, すでに1960年代の一般システム理論 [Ludwig von Bertalanffy, 1968] やサイバネティクス [Norbert Wiener, 1961] に見られる。しかし, コンピュータの発展によって, 科学や工学の方法論として手軽に実現可能となったのは最近である。

第二は, 最適化の方法として先に述べた方法の多くは, 最適解の局所解 (local maxima) に陥る可能性が大きい。しかし, ナチュラルコンピューティングのメタヒューリスティクスはできるだけ大域解 (global maxima) を見つけ出そうとしている点にある (図 1.1)。最適化の問題は, よく山登りに例えられる。鬱蒼と茂った山の頂上を目指すことを考えよう。登山者は, 自身の足下の情報しかわからないので, 足下の傾斜の大きいほうへと登ろうとする。しか

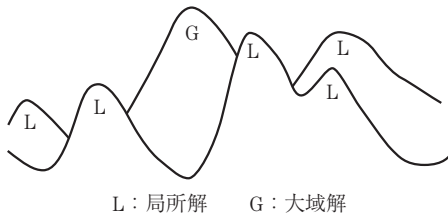


図 1.1 局所解と大域解

し、このようにしてやっと頂上に登ったとき、さらに高い頂上がある別の峰が存在したときの気落ちは想像がつく。この問題の解決法は、山に登る出発点を変えるだけである。こうした問題に対し、メタヒューリスティクスは、^{ちょうちょう}蝶々のように峰から峰へとより高い頂上へと移動できる利点を備えている。

第三は、計算時間（コンピュータリソース）と解の探索精度の問題である。解の探索精度を上げようとすれば、当然、^{ぼくだい}莫大な計算時間を要する。特に、メタヒューリスティクスが適用される最適化の問題は、従来の方法では計算時間の爆発（計算時間を莫大に要する表現）を起こすことがしばしばある。先に述べたように、メタヒューリスティクスは、問題を効率的に解くために開発された発見的な方法であるため、多少の解の探索精度を犠牲にしても高速に解を見つけ出す特徴をもつ。多くの人工物の設計問題は、その問題の制約条件を満たす解を見つけ出すだけでもたいへんであり、この視点は重要である。このため、メタヒューリスティクスでは、最適解の言葉の代わりに最良解（best solution）を使用することも多くある。

本書の1章の残りでは、最適化問題の用語や考え方と計算の複雑性について説明を行う。2章では、従来の最適化手法として重要と思われる山登り法の考え方と、線形計画法について述べる。線形計画法の説明には基本的なベクトルと行列計算の復習も含めてある。3章以降は、本書が目的とするメタヒューリスティクスを述べてある。1章以外は別々に読むことも可能である。したがって、必要な部分のみを理解、あるいは利用しようとする読者には、その章のみを読むことで、個別にその章の基本的な考え方を理解可能である。しかしながら、できるだけ本書全体を通読されるのを期待している。

1.2 最適化問題

世界1周を最小の値段で旅行する経路を求めたい、あるいは決められた値段でできるだけたくさんの買い物を行いたい、最小の燃料で月へ行きたい、などのような意思（行動）決定を行うとき、必ず「最大」あるいは「最小」の用語が使用される。このように、ある価値を最小あるいは最大にするように意思を決定する問題を、最適化問題という。

1.2.1 1変数の最適化問題の表現

ある要素によって、ある価値（評価）を最小あるいは最大にするように、その要素の値を決定する問題を最適化問題という。ある価値とは、費用や重量のように、問題によって異なる。このとき、価値を表す言葉を評価関数（目的関数）と呼び、評価関数を決める要素を変数と呼ぶ。

要素が一つの場合は、これを変数 x で表す。また、そのときの評価関数を $f(x)$ で表す。例えば、ある速度以上で車を運転すると空気抵抗が大きくなり、速度の2乗に比例してガソリン代がかかるとしよう。一方、ある速度以下で車を運転するとトルクが大きくなるのでギア比が低くなり、やはりガソリン代が速度の2乗に比例してかかるとする。このとき、速度を x とするとガソリン代を $K(x - x_0)^2$ で表すことができる。 K は比例定数である。この問題では最適速度が $x = x_0$ であるのは自明であるが、一般にはもっと複雑である。この問題を最小費用（ガソリン代）となる速度を求める最適化問題として

$$\underset{x}{\text{minimize}} f(x) = K(x - x_0)^2 \quad (1.1)$$

あるいは、単に

$$\min_x f(x) = K(x - x_0)^2 \quad (1.2)$$

と表現する。評価関数 $f(x)$ が一般的な関数を代表する場合は

$$\min_x f(x) \quad (1.3)$$

と簡単に表現する。これは、「関数 $f(x)$ を最小にするような変数 x を見つけなさい」を数式で表現したものであり、言葉で表現するよりもはるかに便利な表現である。一方、手持ちの金額が 10 000 円であるとしよう。このとき問題は、ガソリンを買う残金が最大となるような効率的な速度を見つけないさい、となる。このときの問題を

$$\text{maximize}_x f(x) = 10\,000 - K(x - x_0)^2 \quad (1.4)$$

あるいは

$$\max_x f(x) = 10\,000 - K(x - x_0)^2 \quad (1.5)$$

と表す。評価関数 $f(x)$ が一般的な関数を代表する場合は、式 (1.3) と同じようにして

$$\max_x f(x) \quad (1.6)$$

と表現する。最小（大）化の問題は最大（小）化の問題に変換することができる。変換を行う一般的な方法としては、評価を -1 倍するか、逆数を用いるかである。すなわち、一般的には式 (1.3) に対しては

$$\max_x -f(x) \quad \text{または} \quad \max_x \frac{1}{f(x)} \quad (1.7)$$

を用いる。しかし、逆数の場合は分母が 0 にならないような注意が必要である。本書では、多くの場合、最適化の問題を最大化の問題として取り扱う。なお、逆数は、 $f(x)^{-1}$ と表す。

1.2.2 多変数の最適化問題の表現

別の問題を考えよう。ある工場が 2 種類の製品を 2 台の機械で生産している。製品 1 は機械 A で 2 時間、機械 B で 3 時間の加工時間を必要とする。製品 2 は機械 A で 4 時間、機械 B で 2 時間の加工時間を必要とする。それぞれの機械はこれらの製品に対してそれぞれ、機械 A が 80 時間、機械 B が 60 時間しか使用できないとしよう。ここで、製品 1 をつくとその付加価値は 60

索 引

<p>【あ】</p> <p>アデリニン 100</p> <p>アントコロニー最適化法 135, 144</p> <p>【い】</p> <p>位置ベクトル 125</p> <p>遺伝オペレータ 101, 102</p> <p>遺伝型表現 14</p> <p>遺伝子 100, 102</p> <p>遺伝子型 100, 102</p> <p>遺伝子座 100</p> <p>遺伝子表現 100, 104, 113</p> <p>遺伝的アルゴリズム 101</p> <p>【え】</p> <p>エリート保存 108</p> <p>エリート保存戦略 106</p> <p>円環順列 10</p> <p>【お】</p> <p>オーダー 18</p> <p>温 度 60</p> <p>【か】</p> <p>解空間 49</p> <p>解集合 49</p> <p>階層型ネットワークモデル 156</p> <p>ガウス・ジョルダン法 35</p> <p>関数最適化問題 130</p> <p>願望基準 78, 86</p>	<p>【き】</p> <p>疑似焼きなまし法 49</p> <p>擬似乱数 53</p> <p>期待レベル関数 87</p> <p>基底解 32, 39</p> <p>基底変数 34</p> <p>逆 位 120</p> <p>逆位交換法 174</p> <p>逆位接続 174</p> <p>逆行列 37</p> <p>競合学習 161, 163</p> <p>競合層 162</p> <p>教師あり学習 160</p> <p>教師信号 160</p> <p>教師なし学習 160</p> <p>局所解 3, 106</p> <p>局所クラスタリング組織 化法 171</p> <p>局所探索 55</p> <p>局所探索法 81</p> <p>局所最適解 56</p> <p>禁忌探索 73</p> <p>近似解法 52</p> <p>近傍解 54</p> <p>【く】</p> <p>グアニン 100</p> <p>組合せ最適化問題 11</p> <p>グラジエントベクトル 27</p> <p>クラスタリング 154</p> <p>繰返し回数 129</p> <p>繰返し法 24</p> <p>クーリングスケジュール 62</p> <p>群 124</p>	<p>【け】</p> <p>計算の複雑さ 17</p> <p>形質型表現 14</p> <p>形質表現 100</p> <p>傾斜法 26, 29</p> <p>結合重み 155</p> <p>厳密解法 52</p> <p>【こ】</p> <p>交 叉 101, 110</p> <p>交叉率 107</p> <p>勾配法 26</p> <p>候補リスト戦略 96</p> <p>個 体 100, 102</p> <p>個体群 102</p> <p>困難な問題 20</p> <p>【さ】</p> <p>最小 (大) 化の問題 6</p> <p>最小の計算時間 19</p> <p>再スタート多様化 94</p> <p>再 生 109</p> <p>最大傾斜ベクトル 27</p> <p>最大傾斜法 30</p> <p>最大 (小) 化の問題 6</p> <p>最大反復回数 129</p> <p>最短経路探索問題 143</p> <p>最適解 50</p> <p>最適化問題 5</p> <p>最良解 4</p> <p>暫定解 51</p> <p>【し】</p> <p>シグモイド関数 156, 157</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| 指数関数的 | 20 | 世 代 | 102 | 適応度関数 | 103, 104 |
| 実行可能解 | 14, 32 | 線形計画法 | 31 | 適応度景観 | 56 |
| 始点ノード | 143 | 線形最適化問題 | 9 | デコーディング | 102 |
| シトシン | 100 | 染色体 | 100, 102 | 手に負えない問題 | 20 |
| シナプス | 154 | 戦略的振動 | 95 | | |
| シミュレーテッドアニー
リング | 49, 59 | | | 【と】 | |
| 社会性昆虫 | 135 | 【そ】 | | 等 価 | 85 |
| 集 団 | 100 | 相互結合型ネットワーク
モデル | 156, 158 | 統合化したスキーマ理論 | 112 |
| 集中化 | 94 | 速度ベクトル | 126 | 淘 汰 | 101 |
| 終点ノード | 144 | ソーティング問題 | 17 | 淘汰圧 | 101 |
| 出発点 | 26 | | | 突然変異 | 101, 111 |
| 出力関数 | 156 | 【た】 | | トポロジカルマッピング | 161 |
| 受 理 | 60 | 大域解 | 3 | 【な】 | |
| 受理率 | 61 | 大域的最適解 | 49 | 内 積 | 8, 28 |
| 巡回セールスマン問題 | 10, 65, 100, 117, 147, 168 | 対立遺伝子 | 102 | ナチュラルコンピューティ
ング | 1 |
| 巡回路 | 65 | 多項式計算アルゴリズム | 18 | ナップサック問題 | 103 |
| 順 序 | 9 | 多点探索 | 124 | | |
| 順 列 | 9 | タブー移動 | 79 | 【に, の】 | |
| 上 界 | 18 | タブーサーチ | 73 | ニュートン・ラフソン法 | |
| 商計算 | 40 | タブー集合 | 84 | | 30, 37 |
| 勝者ニューロン | 163 | タブー条件 | 79 | ノーフリーランチ定理 | 64 |
| 勝者総取り方式 | 163 | タブー制約 | 78 | | |
| しらみつぶし法 | 50 | タブーリスト | 76 | 【は】 | |
| 新近性記憶 | 94 | ダブルブリッジ実験 | 138 | パーセプトロン | 157 |
| シンプレックス規準 | 41 | 多変数関数 | 7 | 罰 金 | 15 |
| シンプレックス法 | 32 | 多変数の最適化問題 | 113 | 反復回数 | 62, 128 |
| | | 多変数問題 | 7 | | |
| 【す】 | | 多峰性関数 | 134 | 【ひ】 | |
| スキーマ | 108 | 多様化 | 94 | 非基底解 | 39 |
| ——のオーダー | 108 | 単位行列 | 37 | 非基底変数 | 34 |
| ——の定義長 | 108 | 探索空間 | 82 | 非実行可能解 | 33 |
| スキーマ理論 | 108 | 探索ベクトル | 23 | 非線形計画問題 | 12 |
| スラック変数 | 33, 42 | 単純交換法 | 172 | ビット | 12 |
| | | 単純タブーサーチ | 79 | ピポット | 38 |
| 【せ】 | | 単点探索 | 124 | ピポット行 | 38 |
| 生産計画問題 | 113 | | | ピポット列 | 38 |
| 正方行列 | 8 | 【ち, つ】 | | 非ユークリッド | 171 |
| 制約条件のない最適化問題 | 14 | チミン | 100 | ヒューリスティクス | 2 |
| 制約付き Minimum Spanning
Tree 問題 | 91 | ツーオプト | 67 | 評価関数 | 5, 23 |
| | | | | 表現型 | 100, 102 |
| | | 【て】 | | 比 率 | 107 |
| | | テイラー展開 | 26 | | |

ビルディングブロック 131
 頻度記憶 94
【ふ】
 フィットネスランドスケープ 56
 フェロモン 136
 複雑系 125
 複雑系工学 3
 不足 85
 分枝限定法 52
【へ】
 平滑法 175
 ヘッセ行列 27
 ペナルティ 15
 ペナルティ関数 77

ベンチマーク問題 51
【ほ】
 ポジティブフィードバックプロセス 139
 ホップフィールドネットワークワーク 180
【み, め】
 道標フェロモン 137
 メタヒューリスティクス 2
 目標分析 96
【や, よ】
 山登り法 24, 31, 54
 ——の変種 57
 山登り法ヒューリスティクス 78

余裕変数 33
【ら】
 ラグランジェ未定乗数法 16
 ランダム探索法 53
【り】
 リカッチ型学習 163
 離散計画問題 12
 粒子 124
 粒子群最適化法 124
【れ】
 冷却スケジュール 62
 列挙法 50
 連続多様化 94

【A】
 ACO 144
 argmax 44
 argmin 43
 AS 147
【G~I】
 GA 101
 GJ法 35
 Hebb学習則 160
 IEM 174
【K, L】
 KP 103
 LCO 171
 lock box アプリケーション 95
 LP 31
 LS 81
【M, N】
 MAX-MINAS 149

NP完全 22
 NPクラス 20
 NP困難 20
 NP問題 20
【O】
 OneMax問題 50
 OPTIMUM関数 80
 Or-opt近傍 69
【P, R】
 p-fixed問題 95
 p-median問題 95
 PSO 124
 Pクラス 20
 P問題 20
 Rosenbrock関数 130
【S】
 SA 49, 59
 SEM 172
 SM 175
 Stigmergy 136

subject to 7
 SUMT 15
【T, W】
 TS 73
 TSP 10, 65, 100, 117, 147, 168
 Winner-Take-All方式 163
【数字】
 0-1計画問題 12
 1次元配列 100
 1世代 102
 2-opt 67
 2-opt近傍 67
 3-opt近傍 69
 4塩基 100

— 著者略歴 —

古川 正志 (ふるかわ まさし)

1971年 北海道大学工学部精密工学科卒業
1973年 北海道大学大学院修士課程修了
(精密工学専攻)
1981年 工学博士(北海道大学)
1973年 ~
2006年 旭川工業高等専門学校助手, 助教授,
教授
2006年 北海道大学教授
2012年 北海道大学名誉教授
2013年 北海道情報大学教授
現在に至る

渡辺 美知子 (わたなべ みちこ)

1978年 旭川工業高等専門学校技術職員
1994年 旭川大学経済学部経済学科卒業
2003年 博士(工学)(北海道大学)
2008年 北見工業大学准教授
現在に至る

山本 雅人 (やまもと まさひと)

1991年 北海道大学工学部情報工学科卒業
1993年 北海道大学大学院修士課程修了
(システム情報工学専攻)
1996年 北海道大学大学院博士課程修了
(システム情報工学専攻)
博士(工学)
1997年 北海道大学助手
2000年 北海道大学助教授
2000年 科学技術振興機構(JST) さきがけ研
究員兼任(2003年まで)
2004年 米国デューク大学客員研究員兼任
(2005年まで)
2007年 北海道大学准教授
2012年 北海道大学教授
現在に至る

川上 敬 (かわかみ たかし)

1988年 北海道大学大学院修士課程修了
(精密工学専攻)
1988年 ~90年 凸版印刷株式会社勤務
1990年 北海道女子短期大学専任講師
1996年 北海道大学大学院博士後期課程修了
(情報工学専攻)
博士(工学)
1998年 北海道工業大学助教授
2007年 ヘルギーブリュッセル自由大学客員
研究員
2008年 北海道工業大学教授
2014年 北海道科学大学教授
現在に至る

木下 正博 (きのした まさひろ)

2003年 博士(工学)(北海道大学)
2004年 北海道工業大学講師
2005年 北海道工業大学助教授
2010年 北海道工業大学教授
2014年 北海道科学大学教授
現在に至る

鈴木 育男 (すずき いくお)

1999年 北海道大学工学部情報工学科卒業
2001年 北海道大学大学院修士課程修了
(システム情報工学専攻)
2004年 北海道大学大学院博士課程修了
(システム情報工学専攻)
博士(工学)
2004年 室蘭工業大学研究員
2007年 北海道大学助教
2012年 北見工業大学准教授
現在に至る

メタヒューリスティクスとナチュラルコンピューティング

Metaheuristics and Natural Computing

© Furukawa, Kawakami, Watanabe, Kinoshita, Yamamoto, Suzuki 2012

2012年1月6日 初版第1刷発行

★

2014年11月30日 初版第2刷発行

検印省略

著者 古川正志
川上敬
渡辺美知子
木下正博
山本雅人
鈴木育男
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02461-6 (金) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします