

センサの有効範囲を考慮した離散センサデータを用いた 屋内人物位置推定

小川 郁人† 川北 光起† 大谷 雅之†

1. はじめに

近畿大学水産研究所では、マグロの養殖において稚魚の死亡率の高さが問題となっている。一定期間、稚魚は屋内水槽で飼育されるが、屋内を照らす光量の変化や騒音といった外部からの刺激によって、遊泳行動に乱れが生じる。それにより狂奔という現象を引き起こして、内壁や他の稚魚に衝突してしまい死亡する。外部刺激として現場の作業員の移動や接近が関係すると考えられており、人間の行動がどのような影響を与えるのか詳細に分析する必要がある。

マグロの視力は低く、作業員の細かい動作を判別することはできないため、作業員自身の移動が影響していると考えられる。以上の理由から作業員の位置や移動経路を推定する必要がある。

屋内を移動する人物の位置推定には Wi-Fi 電波を利用した手法¹⁾や RFID を利用した手法²⁾、カメラ撮影による映像データを用いた人物位置トラッキング手法³⁾が提案されている。前者の二つの手法については電波を発する機器を配置し、作業員に受信機を持たせることで位置を推定することができる。しかし、マグロの稚魚養殖現場において屋内水槽に落下の可能性のある機器を持たせることはリスクの観点から考えて極力避けるべきである。稚魚は感覚が敏感であるため、電波を利用するセンサの利用は極力避けるべきである。後者のカメラによる作業員のトラッキング手法については作業員のプライバシー保護に関わるので利用する際に障壁が大きい。また、カメラを利用して撮影する際、精度を高めるために複数台設置する必要があり、費用がかかってしまうだけでなく設置箇所の確保といった場所を要するという問題点も挙げられる。そのため、比較的安価かつ電波を放出するセンサを避けた上で、必要以上に場所を要しない手法を用いる必要がある。

この方法の先行研究として、複数の赤外線感知式人感センサを用いて屋内で人物位置推定を行う手法⁴⁾が提案されている。この手法では、一定の時間間隔でセンサから得られる 0 と 1 の離散データ（センサの範囲内の人の有無を意味する）のみを用いて、人の軌跡を算出する。具体的には、センサデータの取得間隔、センサデータが変化するタイミングなどを用いて人の位置座標に対する制約条件を設定し、制約違反量を最小化する非線形計画問題として定式化したのち、モンテカルロ・シミュレーションなどの最適化手法を用いて位置推定を行なっている。

この既存研究では、センサデータが変化した瞬間にセンサの境界線上から人物が多少離れていても、境界線上に存在すると仮定して設計している。これにより目的関数の最小化計算に影響を及ぼしているため、最適化手法の精度が低下している。本研究では、この既存手法の人物の位置推定アルゴリズムを改良することで、より有効的な解を導き

出すことを目的とする。具体的にはセンサの有効範囲とその誤差を考慮し、山登り法⁵⁾による局所探索を行うことで、屋内人物の位置を推定する。山登り法とは対象となる関数の極値を探すような局所探索法であり、現在の状態の近傍の中で一番評価が高くなる状態を評価の改善がなくなるまで繰り返し選択していく手法のことである。この手法によって、境界線上に存在することを示す等式制約を境界線上の点を中心座標とする小円を考えることで不等式制約化し、精度に与える誤差を最小に抑える。最後に人物の位置を二点推定した場合と三点推定した場合を比較することで改良したアルゴリズムの有効性を検証する。

2. 離散センサデータを用いた人物位置推定

本研究では、既存研究で使用している離散センサデータを利用し、屋内人物の位置推定を行う。

ある範囲における人物の有無を 0 もしくは 1 と表現し、一定時間ごとにその離散値と出力する。得られた離散センサデータから各センサ間の境界線を通過するまでの時間と制約条件を満たしながらモンテカルロ・シミュレーションによってランダムに配置された座標間の距離を求める。距離と時間の比から目的関数を作成し、これを最小化するような位置を最終的な人物の移動位置として導き出している。このアルゴリズムの問題として、完全にランダムな点と直線の場合しか有効でない点が挙げられる。モンテカルロ・シミュレーションはランダムに位置を作り出してシミュレーションを行う手法であるため、実行した際に正解となる人物位置が必ず有効的な解として含まれているとは限らない。複数回実行して一度も有効解が含まれない場合も存在すれば、一度だけ実行して上位に有効解が存在する可能性だっただけでありうるので再現性が低い。また、誤差に着目した目的関数について、距離と時間の比を利用しているためにセンサ内の人物の移動経路の曲率が極端に大きい場合、検出された移動距離と時間の比が大幅にずれてしまい正常に有効解を導き出すことが困難になってしまう。

本研究では、局所探索アルゴリズムの山登り法を用いて有効的な解が必ず含まれるような人物位置推定を行う。具体的には、既存研究の制約条件のうち等式制約を境界線上の点座標を中心とした小円を考えることで不等式制約化し、その後山登り法による探索を行う。

3. 改良した局所探索アルゴリズム

3.1 等式制約の不等式制約化

既存研究では、問題を単純化するために 3 次元空間ではなく 2 次元空間として考えており、人感センサの検出可能領域は円形として問題設計を行なっている。

†近畿大学

制約条件として与えられているのは人物がセンサの境界線上を通過したときに境界線上に存在するという等式制約と他センサにおける人物の有無に関する不等式制約である。 n 個あるうちの i 番目($0 \leq i \leq n$)のセンサについて円周上に人物が存在する見なした上で1つの等式制約、そしてその他全てのセンサについて人物がそれぞれのセンサ内に存在するかどうかを判別する $n-1$ 個の不等式制約が制約条件として加えている。しかし、この手法ではセンサデータ変化時の点座標が境界線上に存在すると見なしているため、実の座標とずれてしまい誤差計算に少なからず影響を与えてしまう。また、境界線上の位置のみを推定しようとすると、人物の移動経路と交わる1点を推定できなければ、有効的な解を見つけることができない。

そこで等式制約を不等式制約化することによって、位置のずれを考慮し、解の候補を境界線上のような1次元だけでなく2次元的に増やすことで有効的な解をより探索できるようにする。本研究での不等式制約化手法の手順は以下の通りである。

- ① 着目したセンサ以外の不等式制約を考慮した上で一定間隔の角度ごとに着目したセンサの境界線上の点を取得
- ② 取得した境界線上の点を中心座標とした小円を考え、その小円を八等分した点群を有効解の候補とする

下記に示す Fig.1 は人物がセンサ $c1$ のみ通過したときに手順①を行なった際の一例である。赤色の点はセンサ $c1$ 、青色の点はセンサ $c2$ 、緑色の点はセンサ $c3$ の境界線上の点を表しており、各センサは10度の間隔で点を取得している。

センサ $c1$ に注目した際、センサ $c2$ とセンサ $c3$ の不等式制約では人物が他センサ内に存在しない、つまりそれぞれのセンサの外部にいるという状態なのでセンサ $c1$ の境界線上の一部の点のみ取得している。センサ $c2$ とセンサ $c3$ について着目した場合もそれぞれ二つの不等式制約を満たした状態で点を取得している。

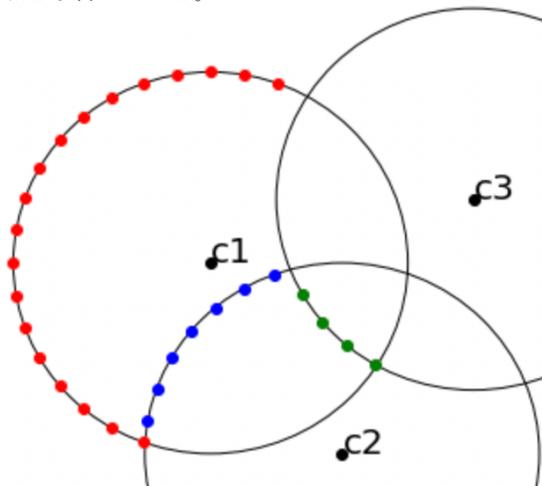


Fig. 1: 一定間隔の角度で境界線上の点群を取得

下記に示す Fig.2 は手順②を行なったもので、等式制約を不等式制約化している。手順①で得た境界線上の点を中心座標とする小円を作成し、八等分した点群を解の候補としている。センサの半径を d 、この小円の半径を d_s とする。 i 番目のセンサの中心座標を (x_{ci}, y_{ci}) 、推定される人物位置を (x_p, y_p) と定義する。すると既存研究では下記に示す(式

1)のような等式制約だったのに対し、本研究では(式2)のような不等式制約となる。

$$(x_{ci} - x_p)^2 + (y_{ci} - y_p)^2 = d^2 \text{ (式 1)}$$

$$(d - d_s)^2 \leq (x_{ci} - x_p)^2 + (y_{ci} - y_p)^2 \leq (d + d_s)^2 \text{ (式 2)}$$

既存研究で導き出せる有効解が人物の移動経路と円周上の1点だったのに対し、これにより2次元空間として拡張したことで移動経路上のより多くの有効的な解を候補として導き出せるようになる。

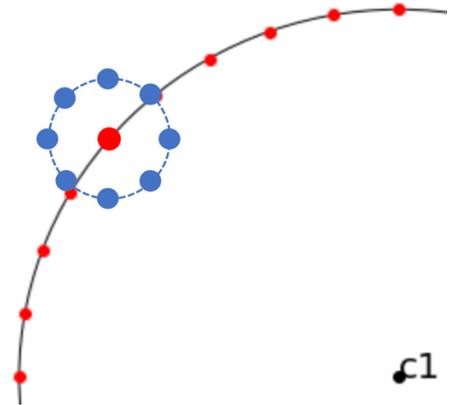


Fig. 2: 八等分小円による不等式制約化

3.2 山登り法の適用

3.1 節で等式制約を不等式制約化した後、局所探索アルゴリズムである山登り法を用いて人物の位置推定を行う。本研究では、2点推定した後に3点目の人物位置の座標を推定するが、動的な2点を探索する2点推定と動的な1点のみを推定する3点推定の両方とも同様のアルゴリズムで探索するので、2点推定のパターンのみを述べる。

今回は下記のような手順で山登り法を適用していく。

- ① センサデータから得られる秒数と固定している人物の移動速度から移動距離を算出
- ② 対象となるセンサについて他センサの不等式制約を満たした境界線上の点をランダムに選択
- ③ 片方の点を固定し、もう片方の点の両隣それぞれについて八等分した小円の点群を考える。ここで、左隣の点群を $P_{n+1} = \{p_{i,n+1}; (1 \leq i \leq 8)\}$ 、右隣の点群を $P_{n-1} = \{p_{i,n-1}; (1 \leq i \leq 8)\}$ とする
- ④ 両隣のそれぞれの点群の中で一番距離が近くなるような点を各点群における候補となる点とする。左隣の場合は点 $p_{s,n+1}$ 、右隣の場合は点 $p_{s,n-1}$ とそれぞれ表記
- ⑤ 固定した点とそれぞれ点 $p_{s,n+1}$ 、点 $p_{s,n-1}$ との距離を計算し、算出した移動距離との誤差が小さい方へと点を動かす
- ⑥ 動かした方の点を今度は固定し、固定した点について②~⑤を繰り返す
- ⑦ ②~⑥を繰り返して、両方の点が動かないかつ正解の距離の誤差が一定以下になった場合に終了

手順①からセンサデータが変化してから再度変化するまでの秒数を用いて正解となる移動距離を算出する。その際、秒数はそれぞれセンサデータが変化した時の中間の秒数を用いることで、位置のずれによる誤差を極力最小にしている。手順②~⑦が山登り法を実行している箇所、正解となる距離へより近づくように繰り返し点を動かしている。

本来であれば山登り法は評価が改善されなければ終了するという手法だが、今回は一定の誤差以下になるという条件を付け加えている。これによりある程度の最適な距離の組が得られる。

また、3点推定は2点推定で得られた片方の点を固定し、動的な1点のみを探索するので、手順⑥を行わず動的な片方の点のみ繰り返し動かす。

4. 考案した局所探索アルゴリズムの動作確認

4.1 想定する状況

下記に示すFig.3は今回改良した局所探索アルゴリズムを動作させるために設定した状況図であり、Table.1は時系列変化における離散センサデータである。

Fig.3について、青色の曲線を人物の移動経路とし、 $v = 0.05$ (/s)の速さで移動しているものとする。今回推定する位置は青線の人物の移動経路のうちの $c1 \rightarrow c2 \rightarrow c3$ と通過した3点で、 $c1 \rightarrow c2$ の2点推定を行ってから $c2 \rightarrow c3$ の3点目を推定する。センサの半径はそれぞれ同様の $d = 0.3$ で、各センサの中心座標は $c1 = (0.3, 0.6)$, $c2 = (0.5, 0.3)$, $c3 = (0.7, 0.7)$ と設定した。

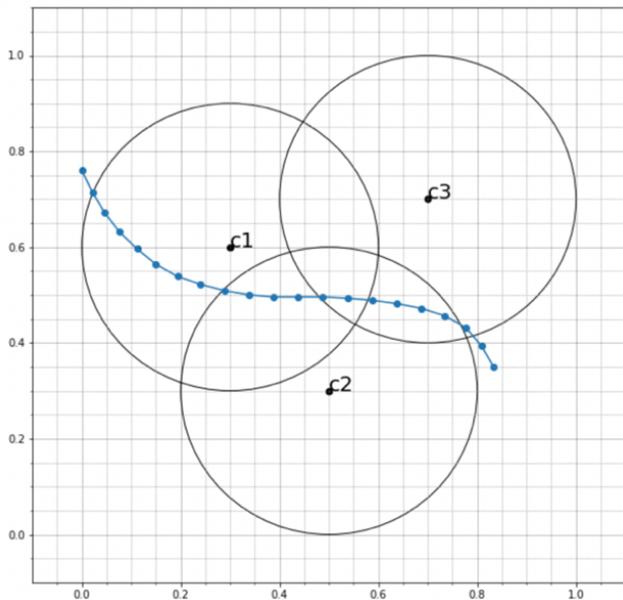


Fig. 3: 推定する人物の移動経路と状況

Table.1は $c1 \rightarrow c2 \rightarrow c3$ と通過した時のセンサデータの変化のみを表にしたもので、センサデータが変化しているのは1秒から2秒、7秒から8秒、11秒から12秒の箇所である。極力秒数による誤差を最小にするためにそれぞれ中間の秒数を取ることにし、通過した瞬間の秒数をそれぞれ1.5秒、7.5秒、11.5秒と見なす。これにより $c1 \rightarrow c2$ 区間は6秒、 $c2 \rightarrow c3$ 区間は4秒の時間がかかっていることになるので、人物の移動速度 $v = 0.05$ より、 $c1 \rightarrow c2$ 区間:0.30、 $c2 \rightarrow c3$ 区間:0.20となる。

時刻t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
センサ1の出力値	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
センサ2の出力値	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
センサ3の出力値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Table. 1: 時間経過によるセンサデータ

等式制約を不等式制約化する際と山登り法を行うときのパラメータは下記のように設定した。

- センサの境界線上の点を取得する角度：10度
- 不等式制約化する際の小円の半径：0.05
- 探索終了する際の許容誤差：0.001

また、3点目を推定した際には区間が二つあるため、3点推定の終了後、結果を並び替えるときは各区間の誤差の平均値を利用する。

試行回数については2点推定で100個のパターンを取得するようにし、3点推定でその100個に対して1点を推定する山登り法を適用して絞り込んでいく。つまり2点推定は100個の結果が存在し、3点推定すると n 個($0 \leq n \leq 100$)の結果が出力されることになる。

4.2 結果と考察

改良した局所探索アルゴリズムを実行したときの結果について上位5位までをプロットかつ表示し、どのような結果になったかを述べて考察する。

Fig.4とTable.2はアルゴリズムを実行した時における結果で、それぞれ推定した人物位置と誤差を示すものである。この実験例では3点推定した際に100個のパターンから32個のパターンに絞り込まれている。

3点推定した際に算出した誤差平均を昇順に並び替えたとき、有効解として見なせるようなパターンが第一位になっていることがFig.4からわかる。また、2位から5位が全く同じ座標と誤差平均になっているのは一定の角度で取得した座標群の中から探索しているため一部の座標や誤差平均が重なるパターンが現われる。

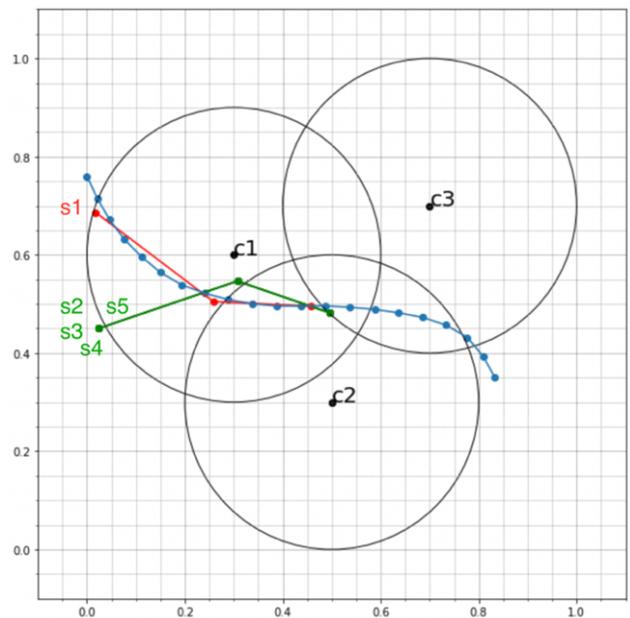


Fig. 4: 上位5位と有効解の位置関係

	センサc1	センサc2	センサc3	誤差平均
1位(s:1)	(0.018, 0.685)	(0.258, 0.504)	(0.458, 0.495)	6.26×10^{-4}
2位(s:2)	(0.023, 0.450)	(0.307, 0.546)	(0.495, 0.481)	2.47×10^{-3}
3位(s:3)	(0.023, 0.450)	(0.307, 0.546)	(0.495, 0.481)	2.47×10^{-3}
4位(s:4)	(0.023, 0.450)	(0.307, 0.546)	(0.495, 0.481)	2.47×10^{-3}
5位(s:5)	(0.023, 0.450)	(0.307, 0.546)	(0.495, 0.481)	2.47×10^{-3}
有効的な解(s:1)	(0.018, 0.685)	(0.258, 0.504)	(0.458, 0.495)	6.26×10^{-4}

Table. 2: 上位5位の推定座標と誤差平均

今回の一例では有効的な解が第一位になっていたが、必ず有効的な解が上位 5 位になるのは限らない。他の実行例では第 8 位や第 10 位などそもそも上位 5 位に入らないパターンも存在した。既存研究に比べて必ず有効解が結果に含まれるようには改良できたが、その解が必ず第一位になることはなかった。この問題は昇順に並び替える際に誤差の平均だけではなく、各区間における誤差のばらつきを示す分散や急激な角度変化を考慮した数式を考えることで解消できると考えられる。誤差の平均がたとえ低くとも極端に誤差が大きい区間があつては決して有効解とは言えない。

また、人物の移動経路において急激な方向転換は実際の現場における作業員の行動としては不適切なので、急激な方向転換をすると誤差が大きくなるように角度を考慮すべきである。

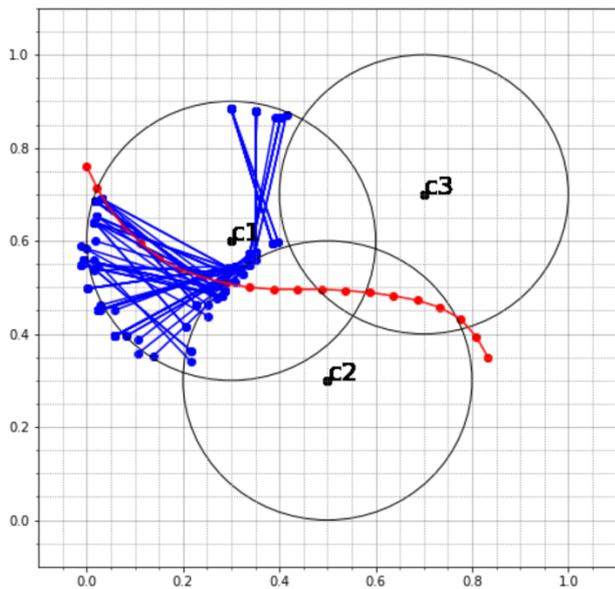


Fig. 5: 2 点推定

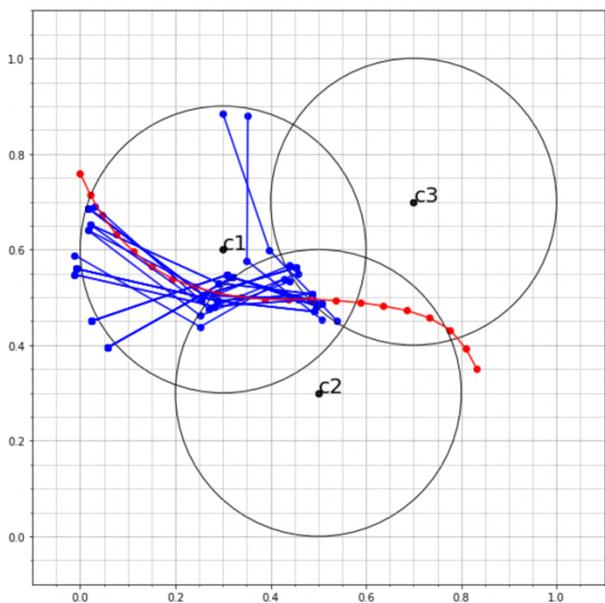


Fig. 6: 3 点推定

Fig.5 と Fig.6 はそれぞれ 2 点推定と 3 点推定を行った場合の一例である。2 点推定では 100 個の候補をプロットし、

3 点推定はそこから絞り込まれた 32 個をプロットしている。赤色の曲線が人物の移動経路を示しており、青線が解の候補を表している。

この二つの結果を比較すると、2 点推定でのセンサ c1 の左下の端に位置しているいくつかのパターンが、3 点推定では除外されていることがわかる。4 点目や 5 点目の位置推定を行えば、解の候補がより絞り込まれて有効解がより上位に入ってくると考えている。

また、3 点推定を行うと最終的に探索したい人物の位置へと解の候補が密集しているので人物の位置推定による点を増やせば、やはり有効的な解を見つけ出せると考える。

5. 結論

本研究では、既存研究で考案された複数台から出力された離散センサデータから人物の位置推定を行うアルゴリズムの改良を行った。具体的には、等式制約として加えられていた条件を八等分した小円による不等式制約として拡張し、局所探索アルゴリズムの山登り法を用いて 2 点推定と 3 点推定を行った。その結果、(1) 既存研究のアルゴリズムに比べて本手法で導き出した複数解に有効的な解が必ず含まれていたこと、(2) 2 点推定した後に 3 点推定を行うと解としてあり得ないパターンが除外され、有効解を含む解のパターンが実際の人物の移動経路付近に密集したこと、(3) 算出した誤差で並び替えた時に誤差平均のみでは上位 5 位に現れない場合があるため、各区間の誤差のばらつきや急激な角度の変化を考慮した関数を作成する必要があること、などを明らかにした。

今後の課題として、有効的な解が上位 1 位になるように誤差のばらつきや移動経路の角度を考慮した上で評価する関数の設計やより精度が高まるようなパラメータを設定する必要があると考えている。

6. 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費若手研究(20K19792, 令和 2 年度～令和 4 年度)の助成を受けた。

参考文献

- 1). Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1067-1080.
- 2). 楓仁志, 山原裕之, 野口豊司, 島田幸廣, 島川博光. 接触物体から個人の行動を認識するための確率的な手法. *情報処理学会論文*, vol.48, no.3, pp. 1479-1490, 2007.
- 3). Yang, C., Duraiswami, R., & Davis, L. Fast multiple object tracking via a hierarchical particle filter. In *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1*, pp. 212-219. IEEE, 2005.
- 4). 川北光起, 大谷雅之. 離散センサデータを用いた人の位置推定. 第 48 回 知能システムシンポジウム, 2021 (最終閲覧日: 2021 年 7 月 3 日) https://www.sice.or.jp/org/i-sys/is48/paper/SICE-IS_2021_paper_16.pdf
- 5). 古川 正志, 川上 敬, 渡辺 美知子, 木下 正博, 山本 雅人, 鈴木 育男. (2012) *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*, コロナ社.