

多目的遺伝的アルゴリズムによるバルブ操作性を考慮した配管自動設計

木村 元**
梶原 宏之**

池平 怜史*

Automatic Pipe Arrangement Design considering Operability of Valves using a Multi-objective Genetic Algorithm

By Hajime Kimura,
Hiroyuki Kajiwara

Satoshi Ikehira,

Key Words: Pipe Arrangement, Automatic Design, Operability of Valve, Multi-objective optimization, Genetic Algorithm

1. はじめに

近年、団塊世代の大量退職によるベテラン技術者の技能継承問題が顕著化しており、その解決は急務である。船舶の配管設計においては、設計手順などをマニュアル化するなどの取り組みが行われており、最終的にはベテラン技術者の行っているのと同等の設計作業を、コンピュータにより自動的に行わせ、技能継承問題を解決することが期待されている。ところが、最適設計作業の自動化は大変難しい。その大きな原因は、設計案の評価項目が複雑多岐にわたり、さらにそれらの評価が明確に数値化されていない点にあると考えられる。そこで、

1) 設計案に対するあいまいな評価を全て数値化する。

2) 設計問題を多目的最適化問題として定式化する。

以上により、多目的最適化アルゴリズムを適用することで、ベテランの設計作業をコンピュータに代行させることが可能になるであろうというのが著者らの基本的なアイデアである。

船舶における配管設計では、単にパイプやバルブ同士がぶつからないよう配置するだけでなく、配管が施された空間へ作業員が入ってバルブを操作できるよう出入口からバルブまで空間を適切に空けるなど、設計作業には高度な熟練を要し、設計の自動化については全く進んでいなかった。この設計ノウハウは暗黙知であり、バルブ操作性などを含め、一般に評価を数値化することは困難と考えられていた。本研究では、配管の設計案に対してバルブの操作性と材料コストの数値化方法を提案し、配管設計を多目的最適化問題として定式化する。第二に遺伝的手法による最適化アルゴリズムを提案し、バラストポンプ室の系統図に基づいて配管自動設計を行った結果について述べる。

2. 配管設計問題の定式化

2.1 設計変数：バルブ

バルブの配置はバルブ操作性の観点から非常に重要である。バルブ配置が適切に設計されなければ、バルブ操作性の優れた配管設計を行うことができない可能性がある。また、バルブ・機器間を結ぶパイプの全経路長もバルブ配置に大きく依存する。そこで、Fig.1 に示すように、バルブの位置・角度を設計変数とする。

2.2 設計変数：配管経路

【曲がり】始点・終点を結ぶことができる線分の長さ・数の組み合わせは無限に存在する。そこで、組み合わせの自由度を限定するために、配管経路の形をパターン化し、パイプ直線部長さを定める実数ベクトルを与えることで、配管経路を生成する。

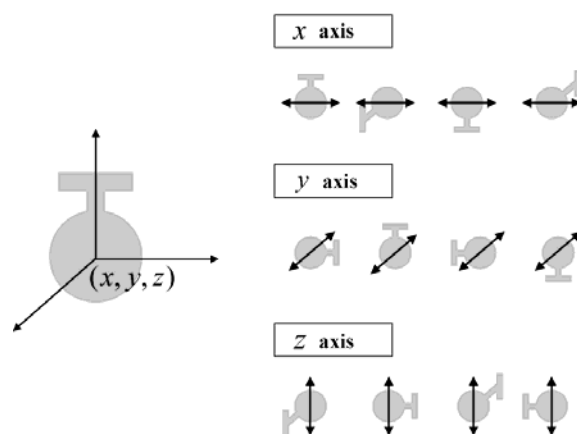


Fig.1 Location and Angle of Valve

【分岐】 Fig.2 に示すように、まず接続点の中から始点として1点選択し、それ以外の接続点を終点とする。次に、終点を1点選択し、その点と始点を結ぶ配管経路を生成する。そして、生成した経路の屈曲点を新たな始点とし、始点と終点からそれぞれ1点ずつ選択し、それらを結ぶ配管経路を生成する。同様の手順を全ての終点を選択されるまで繰り返す。このような手順により、分岐を考慮した配管経路を効率的に生成することができる。

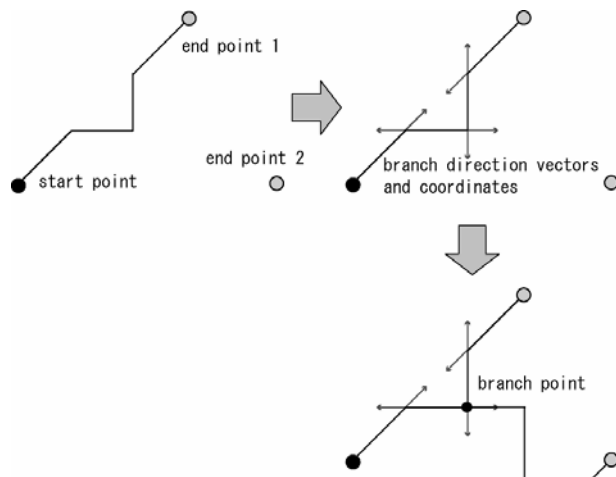


Fig.2 Branch generation algorithm

* 九州大学大学院工学府

** 九州大学大学院工学研究院

2.3 評価関数：バルブ操作性

バルブは制御系の操作部として機能し、船舶運用には欠かせない機器である。バルブを考慮して設計を行うためには、バルブの操作性をいかにして数値的に評価するかが重要であるが、バルブ操作性という技術者の技能・ノウハウが必要なものを数値的に評価することは困難である。本研究では、これまで評価が困難であったバルブ操作性を数値的に評価する評価関数を定義する。詳細については、第3章で説明する。

2.4 評価関数：材料コスト

船舶設計では、建造コスト全体に占める配管コストの比率が大きいので、配管コストは配管材料と配管工事に分けて積算されることが多いが、本研究では配管工事に関する配管コストは考慮せず、配管材料費を管路長にパイプの直径を乗じたものを材料コストとして以下の式のように定義する。

$$f_{-material} = \sum_{k=1}^{n_p} W_k L_k D_k \quad (1)$$

W_k : k 番目のパイプの材質・メッキによるコスト重み
 L_k : k 番目のパイプの長さ
 D_k : k 番目のパイプの直径
 n_p : パイプの本数

3. バルブ操作性の評価方法

3.1 バルブ操作性とは

バルブは制御系の操作部として機能し、船舶運用には欠かせない機器である。ここで、作業員がバルブを操作できるように出入り口からバルブ周囲までに十分な空間があるかどうかの評価を「バルブ操作性」と呼ぶ。

【可アクセス性】 作業員が通路からバルブ位置までアクセスできるかということである。直接手で操作できる場合と、離れた場所から道具を使って操作する場合がある。

【可ハンドル性】 バルブをどの程度操作しやすいかということである。上に述べた2つのケースでは操作のしやすさが異なる。

3.2 バルブ操作性の数値化

バルブ操作性を評価するためには、バルブの周囲にどれくらい作業可能スペースがあるかを認識する必要がある。そこで Fig.3 に示すように、空間を格子状に区切り、格子の状態（障害物が存在する範囲にある格子は塗りつぶされる）を見て、作業員が移動できるか、バルブを操作できるか、バルブを操作しやすいかを評価する。Fig.3 に示すように、まず障害物（ここでは機器・バルブ・パイプ）が存在する範囲にある格子を“障害物格子 (obstacle segment)”として認識する。次に、通路が存在する範囲にある格子を“通路格子 (aisle segment)”として認識する。そして、作業員の大きさを格子数で定義し、これを作業員格子配列 (worker segment matrix) と呼ぶ。作業員格子配列が通路のある位置を出発点として、その位置から障害物格子に交わることなく移動できる（塗りつぶすことができる）範囲を“アクセス可能格子 (accessible segment)”として認識する。そして、バルブのハンドル位置と、5方向（軸方向と軸に対して垂直な4方向）にある認識した格子の中から最短距離（ただし、ハンドル位置から認識した格子の間に障害物が存在する場合は認めない）を評価値 ($f_{-operationality}$) とする。

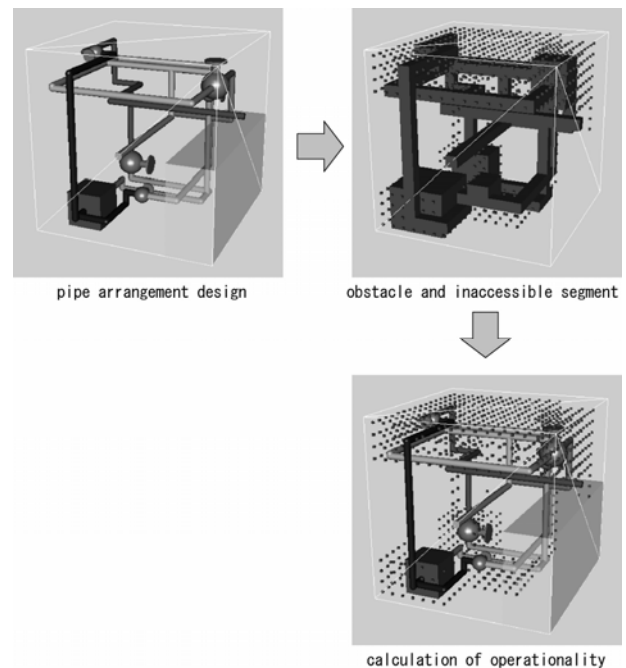


Fig.3 Procedure of calculation of operationality

4. 配管設計最適化のための多目的 GA の設計

4.1 多目的遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) は、生物の進化による環境への適応過程にヒントを得た最適化の枠組みである²⁾。GAにおける根本的な考え方は、Darwinの自然淘汰説 (natural selection) にある。自然淘汰説は、個体 (生物) 間で交配と突然変異が繰り返されて、世代が進むと環境に適応したものの子孫が増えていき、種として進化が行われるというものである。GAを多目的最適化問題に適用したのが多目的GAであり、数多くのアルゴリズムが提案され有効性が確認されている。

4.2 コード化/交叉設計

Fig.4に示すように、バルブ位置 (x, y, z) と角度 θ を個体の形質 (バルブ遺伝子と呼ぶ) としてコード化する。また、交叉方法として、1点交叉 (One Point Crossover) に基づく交叉を提案する。1点交叉とは、Fig.4に示すように、染色体の切断箇所をランダムに1カ所指定し、その箇所での親の遺伝子を交叉させる。そして、経路をランダムに生成する。

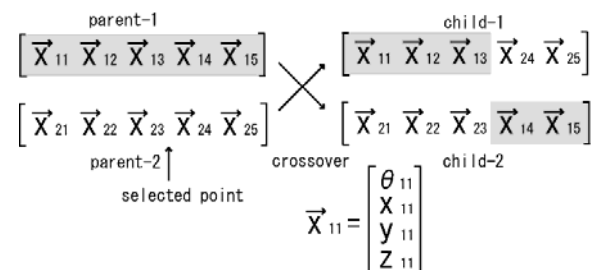


Fig.4 One point crossover

4.3 突然変異設計

1点交叉では、遺伝子をそのまま引き継ぐので、探索序盤における初期収束、探索終盤においてはその時の最良解から抜け出せない可能性がある。そこで、集団の多様性の維持、また探索終盤における探索空間外の解候補

を生成するために、すでに獲得されている形質をなるべく破壊することなく、新しい形質を生成できるような突然変異 (mutation) を設計する。まず2つの親のどちらかが選ばれ、選ばれた親に対し、ある突然変異率 (mutation rate) で定められた一定確率で突然変異が各遺伝子に適用され、新たにバルブ遺伝子がランダムに生成される。突然変異後、各バルブの存在領域が交わっている可能性がある (実行不可能) ので、交叉と同様、以下に述べるバルブ修正オペレータを適用し、実行可能解に修正する。

4.4 実行可能解に修正する修正オペレータの提案

機器、バルブ、そしてパイプ本数の増加につれて、実行可能な (お互いに交わっていない) 解候補の生成が急激に困難になるという問題が生じる。そこで、できるだけ短時間に、実行不可能な解候補をもとの形質をできるだけ残したまま実行可能な解へ修正する修正オペレータを提案する。

[バルブ修正オペレータ]

生成されたバルブ遺伝子に対して、全てのバルブが他のバルブと機器に対して交わっていない実行可能解へ修正するバルブ修正オペレータ (Modification Operator for Valve : MOV) を提案する。MOV は、インデックスが最小のバルブから順に他のバルブとの交わりを判断し、もし交わりがあれば、他のバルブとの交わりがなくなるまで、ランダムに修正していき、最後のインデックスのバルブまでこの手順を繰り返す。

[パイプ修正オペレータ]

生成された解候補に対して、全てのパイプが他のパイプと機器・バルブに対して交わっていない実行可能解へ修正するパイプ修正オペレータ (Modification Operator for Pipe : MOP) を提案する。MOP は、パイプ同士の交差点の数を保持し、交差点を持つパイプを再生成することで、パイプ同士と機器・バルブとの交わりを避ける修正オペレータである。交わりのあるパイプを同時に全て再生成するのではなく、交わり点の多いパイプを優先的に再生成することで、元の形質をできるだけ残す工夫がされている。この時、何本のパイプを同時に再生成するかは、脱却回数 α というパラメータを用いて判断する。なお、ある1本の配管経路を修正すると、それに付随して分岐点も同時に修正されることになる。分岐点は他の配管経路の始点・終点となっているので、1本のパイプのみ修正した場合、修正前と修正後では始点・終点が一致しない配管経路が存在する可能性がある。そこで、修正候補となったパイプが属するパイプラインに属するパイプを全て同時に再生成する。

4.5 NSGA-II

本研究では、Deb らによって提案された NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) を用いて多目的最適化を行う²⁾。

4.6 実験と結果

Fig.5 に示すようなバラストポンプルームの系統図に基づく配管設計を対象として、問題設定を行った。提案手法の有効性を確認するために、1点交叉 (One point crossover) とランダムに生成する手法 (random search) との比較実験を行った。

予備実験により、集団サイズを 10、修正オペレータ MOP の α を 10、突然変異率は 0.1 とした。計算環境は、OS に Microsoft WindowsXP を使用し、CPU は Pentium4 (2.40GHz)、メモリー512MB、プログラム言語は Java

を用いた。Fig.6, Fig.7 はそれぞれ、初期の解集団、400 世代目 (4000 個の個体を評価、探索に要した時間 : 約 60 分) の解集団を示す。縦軸に材料コスト (f_{material})、横軸にバルブ操作性 ($f_{\text{operationality}}$) をとり、原点に近づくほど、優れた解を表す。

また、Fig.8, Fig.9 は、一点交叉を用いた初期解集団と 400 世代目の解集団のそれぞれ自動配管結果の 3D モデルである。白のワイヤーフレームが配管すべき空間の大きさ、半透明の立方体が通路、黒の直方体がポンプを表し、同じ色のパイプはそれぞれ同じパイプラインとなっている。

4.7 考察

Fig.6, Fig.7 より、初期集団において、一点交叉・ランダムサーチ共に操作性に優れた解を探索できており、探索が進んでいくと材料コストも同時に改善されていくのが分かる。しかし、一点交叉とランダムサーチを操作性評価値が同じ個体で比較すると、一点交叉を用いた手法のほうが、より優れた材料コスト値となっている。また、解集団の分布を見ると、一点交叉を用いた手法のほうが、ランダムサーチを用いた解集団に比べ、全体的に優れた解が集まった集団となっていることが分かる。これは、一点交叉を用いた手法の場合、有効なバルブ遺伝子に対して繰り返しランダムに配管経路を生成するので、ランダムサーチに比べ、有効なバルブ位置・方向を持つ解が存在する領域で、優先的に解を探索できているからであると考えられる。

Fig.8, Fig.9 より、多目的最適化を行うことで、バルブ操作性に優れた設計案、材料コストに優れた設計案を同時に生成することができている。

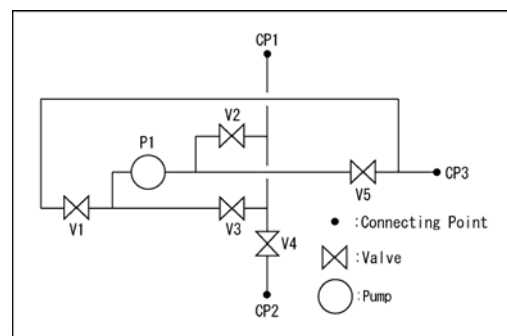


Fig.5 Diagram

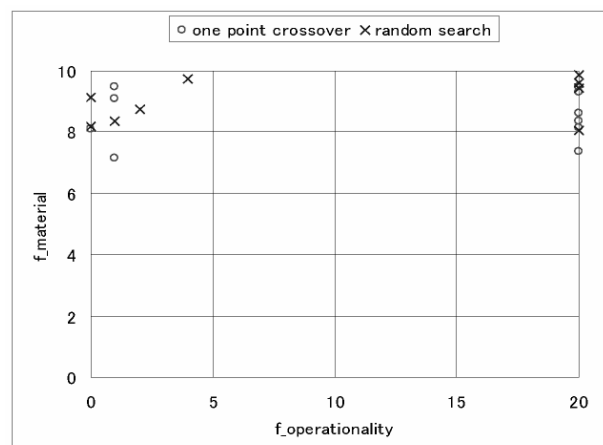


Fig.6 Solution candidates at initial generation

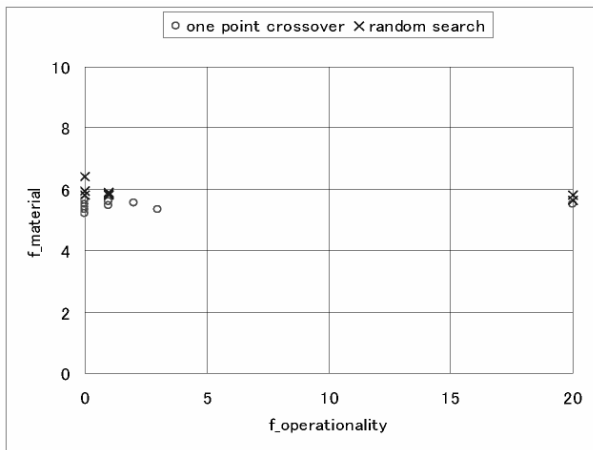


Fig.7 Solution candidates at 400th generation

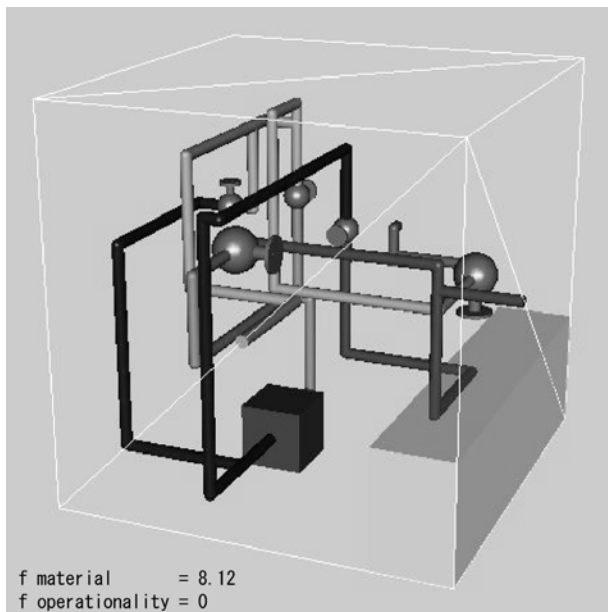


Fig.8 The resulting best design in valve operation

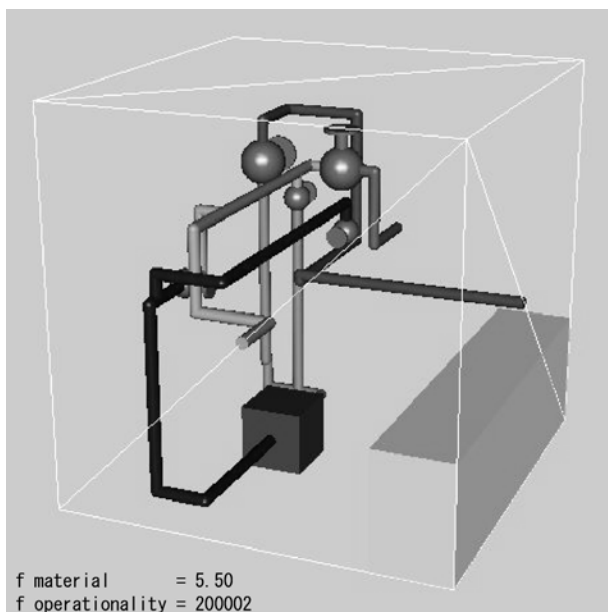


Fig.9 The resulting best design in material cost

5. おわりに

本研究では、今まで自動化が困難と考えられていた配管設計問題に対し、配管の設計案に対して人間がバルブまで到達して容易に操作できるかどうかという「操作性」というあいまいだった評価を初めて数値化し、操作性と材料コストという2目的の最適化問題に帰着して多目的最適化手法を適用することにより、ベテラン技術者の設計作業を自動化する試みを示した。また、バルブやパイプを設計変数とした場合に特化したコード化方法や修正オペレータを提案し、バラストポンプの系統図に基づいて配管自動設計を行い、有効性を示した。

しかしながら、遺伝的手法において子個体へ継承する形質としてバルブの位置と方向のみをコード化し、パイプの引き回しは個体が生成されるたびに新たに行う方法では、探索で得られた設計案のパイプ配置に無駄が多く残る問題点がある。また、ベテラン技術者からのコメントによると、実際の設計作業においてはまず系統図から3次元的なパイプの配置と分岐を決め、その後でパイプ途中の適切な箇所へバルブを配置するという作業を行っており、本研究のアプローチとはだいぶ異なる。パイプの引き回しを形質とするコード化方法の検討は今後の課題である。また、実際の配管設計問題では、材料コストや操作性の他、パイプの工作性・保守性の評価や様々な制約が存在する。よってこれらの評価を全て数値化することは今後の課題である。

参考文献

- 1) S. Ikehira, H. Kimura, H. Kajiwara: Automatic Design for Pipe Arrangement using Multi-objective Genetic Algorithms, 12th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS), Vol.2, 2005, pp.97--110, 2005.
- 2) 小野 功: 形質遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムによる最適化, 東京工業大学, 博士論文, 1997
- 3) K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab and T. Meyarivan: A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithms for multiobjective optimization: NSGA-II, KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2000.
- 4) 池平 怜史, 木村 元, 池崎 英介, 梶原 宏之: 多目的遺伝的アルゴリズムを用いた配管自動設計, 日本船舶海洋工学会論文集 Vol.2, pp.155--160, 2005.
- 5) 池平 怜史, 木村 元, 梶原 宏之: バルブ操作性を考慮した配管自動設計に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol.4 (2007年5月) pp.335--338.