

機器配置およびパイプの分岐を扱う配管自動設計システム におけるバルブ操作性評価の最適化

正員

木村 元*

Valve Operability Optimization in An Automatic Designing System for Piping and Instruments
Arrangement including Branches of Pipes

by

Hajime Kimura, Member

Key Words: Pipe arrangement design, Plot plan, Pipe and Instrument Diagram, Automatic design system

1. 緒言

造船業界では、情報処理技術の発達に伴い、これを利用することで作業の省力化を図ってきた。さらに近年ではこの情報処理技術を駆使して熟練技能労働者の不足や若年層の労働価値観の変化に対応していく試みがなされつつある。詳細設計の現場においては、3次元CADの発達により、3次元データを扱った設計から解析、生産が普及してきた。本研究の対象としている配管設計作業においては、2次元平面図では熟練技術者でない限り困難だった空間上での配管のイメージを視覚化することで、容易に配管経路を確認できるようになり、作業の効率向上につながっている。しかし配管設計作業そのものは未だ熟練技術者の経験に頼る部分が大きく、設計作業の自動化には至っていない。この原因としては、配管設計問題が複雑過ぎて問題を定式化することが困難であることがまず挙げられるが、配管設計問題に限らず、システムを自動化する上で解決しなければならない共通する課題が存在する。本研究では、配管設計作業の自動化へ向けて、特に定量的な評価が困難なバルブ操作性について新しい計算方法を提案し、特徴や問題点について考察する。

本研究ではバルブと分岐を含む配管設計問題において「T分岐」もバルブ等と同等な機器の一種とすることにより、配管設計問題を機器の配置問題と分岐の無い単純なパイプ配置問題という2つの単純な複合問題として定式化し、機器の位置と方向およびこれらを繋ぐ分岐の無い単純なパイプのエルボの位置を設計パラメータとするコード化方法および遺伝的アルゴリズムを用いる。この手法による先行研究¹⁾におけるバルブ操作性評価は、作業員が通路から全てのバルブへ到達できるかどうかのみであった。本研究ではこれを拡張し、通路空間からバルブまでの移動に必要なカロリーをコストとする方法を提案し、この評価関数によって得られる設計案の妥当性をシミュレーションによって検証する。

2. 配管設計問題の定式化

配管自動設計を行うにあたり、まず以下の情報が予め与えられていなければならない：

- 1) 【設計対象空間】バルブ等の機器やパイプを配置可能な空間の範囲。本研究では直方体とする。

- 2) 【機器の幾何情報】本研究ではバルブ・ポンプ・T分岐および設計対象空間と外部との接続点などを機器と定義する。これら機器の大きさを直方体で表し、機器へパイプを接続する位置と方向およびパイプ直径を与える。また、機器の設置可能な方向（姿勢）を指示する。ポンプや外部との接続点など、予め設置場所が決められている機器については、その座標も指示する。
- 3) 【機器同士の接続情報】各機器のパイプ接続部分が互いにどのように接続しているのかについての情報である。本研究ではパイプの分岐部分を機器としているので、接続先の機器は必ず1つだけとなる。
- 4) 【障害物の幾何情報】設計対象空間内に存在する構造部材や設計対象外の機器などの位置と大きさを直方体および三角形の集合として表現する。
- 5) 【通路空間】乗組員用通路として使用するであろう設計対象空間内での領域を直方体の集合として表す。この領域では機器は配置しない。またこの領域でのパイプの配置は極力回避しなければならない。
- 6) 【機器・エルボ配置候補座標点】機器やパイプのエルボ設置座標の候補をメッシュ状の点に限定する。

以上の情報を基にして、本研究の自動配管設計システムは以下の設計パラメータを探索し出力する：

- 1) 【機器の位置と方向】予め設置場所が決めていない機器の設置位置座標と設置方向（姿勢）
- 2) 【パイプの経路】本研究ではパイプの分岐は無く、単に2つの機器同士を結ぶものとする。接続先の機器の座標を始点および終点とし、途中のエルボの座標リストでパイプ1本分の経路を表す。

ただし、本研究では設計対象空間の直方体の各辺に平行な座標軸方向のみに全てのパイプが引かれ、これら座標軸に対してパイプが斜めに引かれることは無い。

本システムでは、設計パラメータは後述の多目的最適化アルゴリズムを用いて探索され、その最適化目標は材料コスト・バルブ操作性コスト・エルボの個数などであるが、この部分は要求に応じて任意に設定可能である。

3. バルブ操作性評価方法の提案

本稿では、作業員が移動することが可能な空間を「アクセス可能空間」と呼び、既存研究の再帰格子塗り潰しアルゴリズム²⁾を拡張して、立った姿勢のまま移動できる場所としゃがんだ姿勢でしか移動できない場所を区別す

* 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

原稿受付（学会にて記入します）

春季講演会において講演（学会にて記入します）

©日本船舶海洋工学会

る。Fig.1に2次元平面を用いて模式的に説明する。まず設計対象の空間を等間隔の格子状に分割する。次に通路として定義された領域内の格子から作業員のしゃがんだ姿勢を反映する形状の格子集合図形をペイントのブラシのような要領で平行移動させて領域を塗り潰す (Fig.1 左上図および右上図) ことによりしゃがんだ姿勢で通過できる空間を識別する。さらに、そのしゃがんだ姿勢で塗りつぶした空間に対して、作業員の立ち姿勢を反映する形状の格子集合図形を移動させて領域を塗り潰すことにより、立った姿勢で通過できる空間を識別する (Fig.1 右下図)。以上の処理によりアクセス可能空間を識別する。

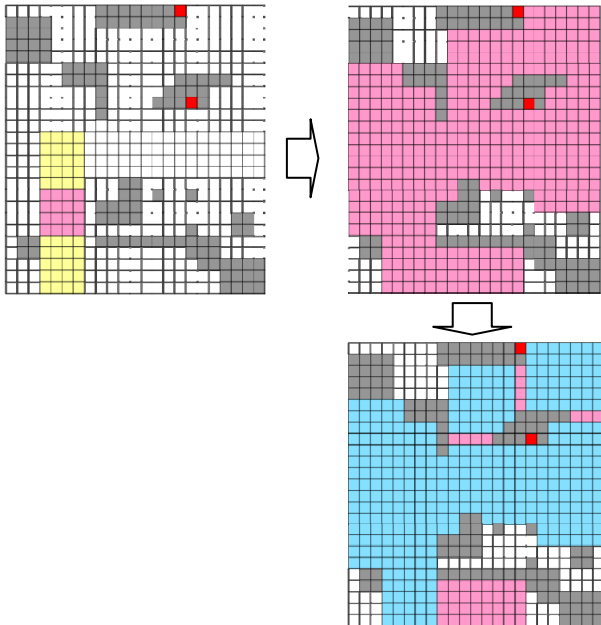


Fig.1 Recursive Fill algorithm to find accessible space

次に、バルブへの移動コストについて評価する。まず作業員がバルブを操作するための立ち位置上に存在する格子の存在を確認する。次に、注目するバルブから通路空間、あるいは別のバルブの立ち位置上の格子まで移動するための経路探索を行う。この経路探索の方法として、ダイクストラ法を用いる。移動にかかるコストとして、人間の消費エネルギーを求める係数であるRMRを利用する。立った姿勢で移動する場合としゃがんだ姿勢で移動する場合は消費エネルギーが異なるため、例えばFig.2のように2通りの経路が存在する場合はしゃがんで移動する区間の短い右側の経路のほうが良い。

これらアクセス可能空間の識別およびバルブへの経路探索については、実際には3次元空間上で行われ、上下方向への移動コストについても考慮する。

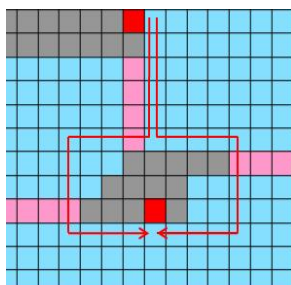


Fig.2 Two routes to a valve

4. 配管自動設計システムの概要

4.1 GAのためのコード化・交叉

(1) コード化方法

2章で述べたとおり、探索すべき設計パラメータは機器の位置座標と設置方向、およびそれらに繋がる全パイプの経路を示すエルボの座標リストであり、これらパラメータ集合を遺伝子とする。ただし、機器の座標と方向パラメータは、各機器の座標と設置方向を遺伝子1単位とする。また、パイプの始点と終点の座標はそれぞれに繋がる機器の位置座標と設置方向に依存することから、パイプ経路パラメータは各機器の遺伝子に付属する可変長の遺伝子とする。

(2) 交叉オペレーション

交叉オペレーションにより親個体AおよびBの遺伝子から子個体Cの遺伝子を生成する。子個体Cにおける機器の座標と設置方向は、対応する機器の座標と設置方向を親AまたはBのどちらかより確率50%で継承する。このとき、機器同士の位置が干渉せず、また少なくとも1つ以上の機器を異なるほうの親個体から継承した機器の組合せが見つかるまで、処理をやり直す。条件を満たす機器配置と方向の組合せが見つかったら、これら機器同士を結ぶ配管経路を以下の手順で生成する。まず、親Aから継承された機器同士を結ぶ配管経路は、親Aの対応する配管経路を子個体Cへそのまま継承する。同様に親Bから継承された機器同士を結ぶ配管経路は、親Bのものを子個体Cへそのまま継承する。親Aから継承した機器と親Bから継承した機器を結ぶ配管経路は、親Aからの機器に接続されている親Aのパイプを途中の任意のエルボで切断し、親Bから継承した機器に接続されている親Bのパイプも途中の任意のエルボで切断し、切断された部分同士を新しいパイプでエルボ3個以下を用いて接続する。パイプ同士あるいはパイプと機器が干渉する場合は、親から継承するパイプの切断位置をランダムに変えてパイプ経路を引き直す。このとき、他の要素との干渉箇所の多いパイプから優先的に引き直す。

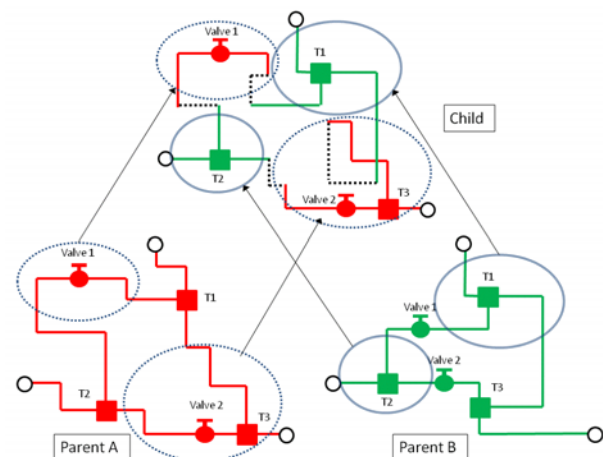


Fig.3 A sample of crossover operation

Fig.3に交叉オペレーションの例を示す。子個体は、親Aからバルブ1とバルブ2およびT分岐3を受け継ぎ、親BからT分岐1と2を受け継いでいる。パイプについてはそれぞれの親から引き継いだ機器に接続されているパ

イブ経路を引き継ぐが、途切れている部分については Fig.3 の点線で示されている部分のように新しく引き直す。

(3) 突然変異オペレーション

本研究では、ランダムに機器を1つ選び、この機器の配置座標に対してのみ突然変異オペレーションを作用させる。また、ほとんどの場合、ランダムな位置への機器の移動は解の劣化をもたらすことから、元の位置の近傍にある座標候補点へ50%の確率でランダムに移動、残りの確率で該当機器と接続先の全機器との間を接続しているパイプ長が最短になる位置へ移動する。また、この突然変異オペレーションを適用された機器は、この機器と接続先の全機器とのパイプ長が最小になるよう姿勢を変更する。もし機器を移動および姿勢を変化させた結果、パイプや機器が干渉した場合は、機器をランダムに一つ選ぶ処理から再度やり直す。

4. 2 GA の初期解集合の生成

GAでは、前節で説明した交叉・突然変異オペレーションを用いて解候補を改善していくが、それに先立ち実行可能な(致死解ではない)初期解候補を生成しておくなければならない。本システムにおける最適化目標の一つであるバルブ操作性コストの小さい解を生成するヒューリスティクスは存在しないため、これに対してはランダムに解候補を生成するしか無いが、材料コストの小さい解を生成する方法については、以下に説明するヒューリスティクスによる機器配置法が有効である。以下、本手法で使用している2種類の初期解生成法を説明する。

(1) 解候補のランダム生成

まず全ての機器の座標を、機器・エルボ座標候補点集合からランダムに選び、姿勢もランダムに選ぶ。このとき機器と障害物あるいは機器同士が干渉している場合は、該当する機器を再度ランダムに配置し直す。全ての機器が配置できたら、機器同士を繋ぐ全てのパイプをエルボ3個以下の単純な経路で結ぶ。このとき、他の機器やパイプと干渉しているパイプのうち、最も干渉している箇所が多いパイプの両端に位置している機器の位置をランダムに配置し直してから再び全てのパイプをエルボ3個以下の単純な経路で結ぶ処理からやり直す。この処理を全ての機器やパイプが互いに干渉しなくなるまで繰り返す。ランダム生成は、実行可能解の発見が困難な場合がある。

(2) 総パイプ長を短くする自己組織化機器配置法

前述の方法により解候補を生成すると、設計対象空間一杯にパイプが張り巡らされる傾向があり、材料コストを考えると大変無駄の多い設計案ばかりが生成されやすい。そこで以下の自己組織化アルゴリズムにより、配管経路長をなるべく短く、かつ機器同士が干渉しにくいように機器を配置する。

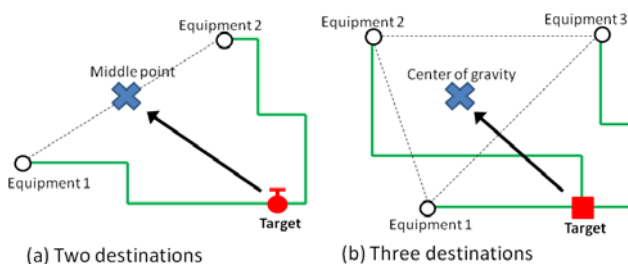


Fig.4 A basic concept of self-organization for equipments

Fig.4に示すように、まず任意の移動可能な機器を1つ選択し、その機器と接続された相手先機器の位置座標を調べ、注目している機器の位置座標をそれら接続先機器の位置座標の中心に最も近い配置可能な座標点候補へ修正する(実際にはパイプの太さも考慮するため、接続相手先座標をパイプ径で重み付けする)。このとき注目する機器の設置方向は、接続するパイプ長が最小になる方向に修正される。このような処理を全ての移動可能な機器についてランダムに選択して適用することにより、全体として配管経路に無駄のないすっきりした機器配置が自発的に形成される。ただしこのままではデザイン対象空間内に多数の障害物が存在する場合には対処が困難であり、またバルブ操作性などについては考慮できないなどの問題があるため、あくまでも遺伝的アルゴリズムの初期解として使用する。

5. 計算機シミュレーション実験

5.1 実験設定

本システムの動作を確認するため、Fig.5 および Fig.6 に示すバラストポンプルームの系統図に基づく配管設計を試みた。Fig.5 の系統図は文献¹⁾と同じであるが、デザイン対象空間は5m×5m×高さ2mであり文献¹⁾の設定より高さが1mほど低く、CP0 から T-000, T-004 および Valve-004 を経由して CP1 へ至るパイプの径が2倍になり、配管制約が大きく設定されている。Fig.6 の系統図では、先の系統図にバルブ2個、T分岐1個、外部への接続点を1ヶ所追加した、より複雑な問題設定となっている。

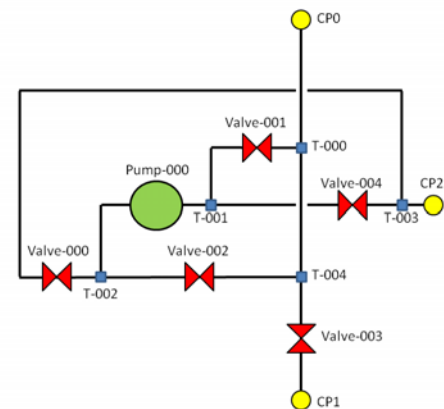


Fig. 5 Piping and instrument diagram (PID) of 5 valves

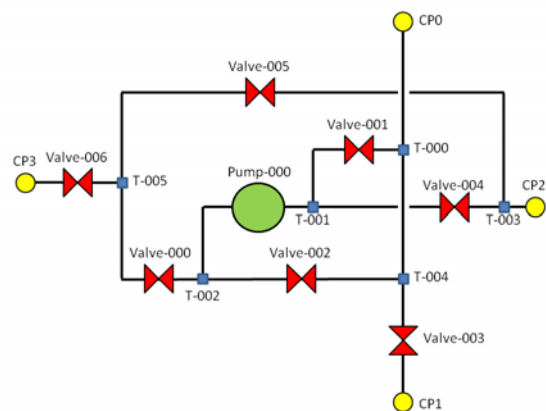


Fig. 6 Piping and instrument diagram (PID) of 7 valves

本実験では「パイプ材料コスト」「エルボの数」および「バルブ操作性」の3つのコスト関数を最小化する3目的の最適化問題とした。パイプ材料コストについては文献²⁾、バルブ操作性の計算方法は提案手法を用いるが、各バルブから通路空間までの移動コストのみを考え、バルブ間の移動については考慮しない。多目的最適化であるので、GAの世代交代方法として文献³⁾で使用されているNSGA-IIを用いた。予備実験によりFig.5の問題では集団サイズは80個体、Fig.6の問題では200個体とした。

5.2 実験結果

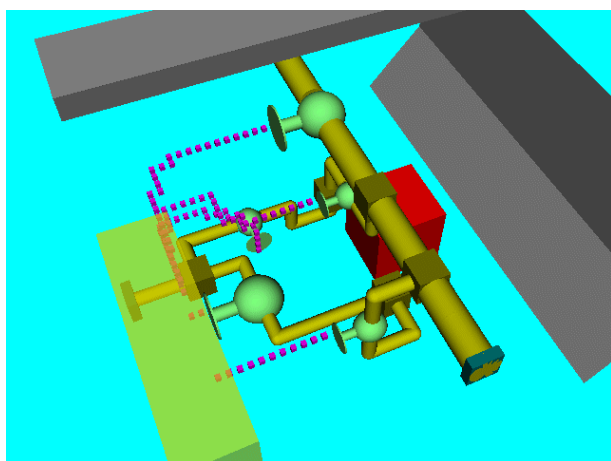


Fig.7 An obtained solution in the problem of 5-valves

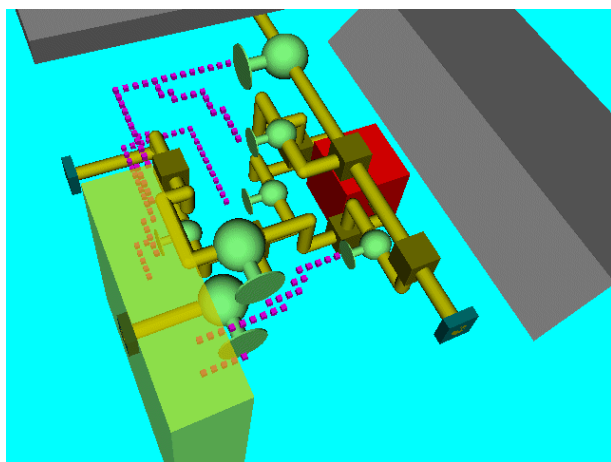


Fig.8 An obtained solution in the problem of 7-valves

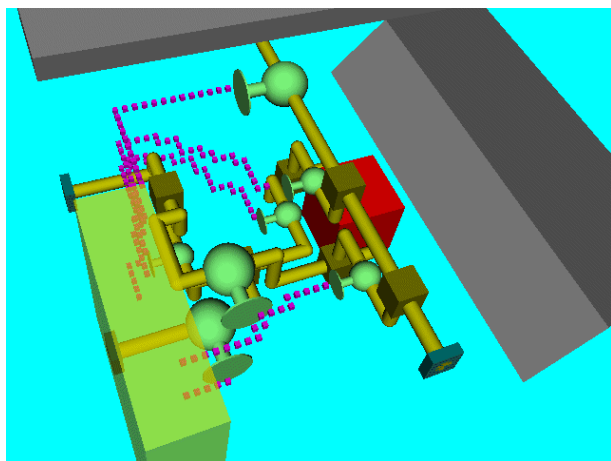


Fig.9 An obtained solution in the problem of 7-valves

計算環境は、OSにWindows-XPを使用し、CPUはIntel Core2 Quad 2.664GHz、メモリーは2GB、プログラム言語はJava 1.6を用いた。Fig.5のバルブ5個の問題において評価回数18880回に要した時間は約10日、うち80個体分の初期解生成に要した時間は3日半であった。Fig.6のバルブ7個の問題において評価回数20000回に要した計算時間は約1週間、うち200個体分の初期解生成に要した時間は約2日であった。本手法では初期解生成において機器をランダムに配置した解候補の生成を試みているが、本実験の設定のように狭い空間に機器やパイプを配置する場合、ランダム配置では実行可能解の生成が大変難しく、そのために初期解生成に多くの時間を要した。

Fig.7はFig.5のバルブ5個の問題で評価回数18880回における解候補の1つで、エルボ個数が最小の13個で構成されたパレート解である。パレート解集合の全てにおいて太いパイプと関連する機器が直線状に配置された設計案を得た。しかし、Fig.7のように紫色の小さな立方体で示される移動経路をパイプの上やバルブの上に見出すケースが多く、グレーチングの設置コストやバルブを操作する時の姿勢をコストとして考慮する必要がある。

Fig.8およびFig.9はFig.6のバルブ7個の系統図の問題において評価回数20000回で観察されたパレート解を2つ選んだものである。紫色の小さな立方体はバルブ操作時の最小コスト移動経路を示す。Fig.8は材料コスト2.7975、バルブ操作性コスト270.8、エルボ数24である。Fig.9の解では材料コスト2.6475、バルブ操作性コスト286.0、エルボ数22である。よって数字の上ではFig.8の設計案がバルブ操作性に優れるが、作業員が通る空間が広く確保されているという意味ではFig.9の解候補のほうが好ましいとも考えられ、今後評価法に検討を要する。

また紙面の都合上詳細は説明できないが、本手法は3目的のパレート解集合を保持しており、Fig.7,8,9に示した以外にも多様で有用と思われる解を生成した。

6. 結言

本論文では、配管設計作業の自動化へ向けて、作業員のバルブへの移動に必要なカロリーに基づいて機器配置を評価する新しい方法を提案した。次に配管設計問題を分岐の無い単純なパイプの経路設計問題とパイプ以外の機器(分岐を含む)の配置問題の複合問題へ定式化し、2つの設計案からそれらの特徴を継承する子の設計案を生成する交叉方法を採用し、またGAで優れた初期解を生成するための方法としてランダム配置法と自己組織化機器配置法を用いて多目的GAによって設計案の自動生成を試みた。提案手法を仮想的なバラストポンプルーム配管設計問題へ適用し、提案評価法の妥当性を考察した。

参考文献

- 1) 木村元：配管自動設計システムの実用化に向けての考察，日本船舶海洋工学会講演会論文集，Vol.11, 2010, pp.117—120.
- 2) 池平怜史，木村元：バルブ操作性を考慮した配管自動設計手法の開発，日本船舶海洋工学会論文集，第9号，2009, pp.231-236.
- 3) 池平怜史，木村元：機器配置図・系統図に基づく配管自動設計手法の開発，日本船舶海洋工学会論文集，第9号，2009, pp.223-229.