

配管経路の自動設計システム

An automatic design system for piping

九州大学 大学院工学研究院 木村 元, サノヤス造船株式会社 安藤 悠人
Hajime Kimura: Graduate School of Eng., Kyushu Univ, Yuto Ando: Sanoyas Shipbuilding Corporation

In the ship design of piping arrangement, automatic pipe routing is very difficult because the system is required to find shortest paths without interference and to satisfy many geometric constraints and rules in the agreements. In this research, we propose two algorithms for piping arrangement: one is a routing algorithm to find an optimum route for one pipe, and the other is a loosening algorithm for complicated multiple pipes. The performance of the system is demonstrated through several simulations.

1. 緒 言

船舶の建造において、配管艙装の設計には膨大な作業時間が必要である。近年では 3D-CAD を利用することで作業の省力化がなされているが、設計作業の自動化は未だに実現できていない。この主な原因として設計問題の複雑さが挙げられる。船舶のような狭隘な空間における配管設計では、機器類や構造部材などの障害物と干渉しないようパイプを配置するだけでなく、パイプの幾何学的な形状の制約や法令等の規則、メンテナンス性、操作性など様々な項目についての順守や配慮が求められ、これらを解決するために熟練技術者の経験に頼っているのが現状である。しかし近年、熟練技術者の減少が続いており、若手技術者への技術伝承のための設計作業の理解、および配管設計作業の自動化の必要性は日増しに高まっている。

そこで本研究では、配管設計における経路設定作業の自動化を目指し、パイプ特有の幾何学的形状の制約を満たし、障害物との干渉が無い 1 本のパイプについて、コスト関数の値が最小になる最適経路を得るアルゴリズム、および複数本のパイプの経路を設計する場合に効果的なヒューリスティクスを提案する。

2. 配管設計問題

配管設計問題を取り扱う場合、まず設計対象空間内に存在するバルブやレデューサといった移動可能な機器の配置を検討しなければならない。この際、機器の配置場所はメンテナンス性や作業性が考慮されている必要がある¹⁾。本論文ではこの問題を「機器配置問題」と呼称し、ここでは扱わないものとする。配置される機器としてバルブやレデューサといった一般的なものだけでなく、配管の分岐点も機器として扱う。このアプローチにより、配管経路は始点・終点を一つずつ含んだ単純な経路となる。その結果、配管一本の経路探索に対して、ダイクストラ法などの最適解の獲

得が保証されているアルゴリズムを使用することができる。詳細については後述するが、この手法では、設計対象となる配管が 1 本の場合は最適な経路を確実に獲得することが可能であったが、設計対象の配管が複数本になった場合において、好ましくない配管経路案が獲得されてしまうケースが存在していた。

船内には通常、複数の配管経路が複雑に配置されている。これらの複数の経路案を設計する場合、既に設定された配管経路を障害物とみなしつつ、1 本ずつ順次経路探索を進めていくことで最終的な設計案を作成するのが一般的である。しかし、このように順次経路探索を行う場合、どのパイプから経路探索を行うかによって最終的な経路案が大きく変化する。また経路探索を 1 本ずつ進めていく場合、獲得される妥当な経路として複数の解候補が出現する場合がある。すなわち経路中のエルボの個数は同じだが、その位置が異なる設計案が複数存在する場合である。そのような複数の解が発生する場合においても、どの解候補を選択するかによって、後の経路探索の結果に大きな影響を与える。しかし配管設計に関する先行研究では、解候補の選択による最終設計案の影響は未だ考慮されていない²⁾。そこで本論文では、最初はパイプ同士の干渉を無視してパイプの最短経路を求め、だんだんと干渉コストを引き上げつつ 1 本ずつパイプの引き直しを行う「タッチアンドクロス法」の適用を提案する。

3. 配管経路探索問題のモデル化

対象とする配管経路では以下の項目を前提とする：
【探索対象となる配管】始点・終点を一つずつ有しており、経路途中で分岐がなく、直径の変化もない配管経路を対象とする。通常、配管経路には分岐点が存在するが、第 2 章で述べたとおり本手法では分岐点を機器の一種とみなす。これにより、単純な経路探索アルゴリズムの使用が可能となる。

また、経路を構成するパイプ部材の形状として以下の3つを考慮しなければならない：

【直管】真直ぐに伸びているパイプピース。

【エルボ】90度に曲がっているパイプピース。曲率半径によって大きさが異なるため、経路探索を行う前にエルボに関するパラメータを設定する。

【ベンド】空間を局所的に斜めに通過するパイプピース。経路中のパイプ径以下のずれを吸収するために使用される。曲率半径等の値によって大きさが異なるため、事前にパラメータを設定しておく必要がある。

さらに配管以外にも、経路探索を行う前提条件として以下の項目を仮定する。

【設計対象空間】経路探索が行われる空間。サイズが予め設定されているものとする。本研究では設計対象空間の形状を直方体に限定している。

【配管経路の配置可能な方向】配管経路は、局所的に使用されるベンド部分を除き、設計対象空間の各辺に平行な方向に配置されることを基本とする。

【障害物】設計対象空間内に存在する構造部材や機器などが配置される空間。配管経路がこれらの空間に干渉することは許容されない。形状としては、三角形平面および直方体などを想定している。

【通路空間】作業員が通行することを想定する空間。この領域内に配管経路があることは、機器の操作性に悪影響を及ぼすため、極力避けるべきである。形状は直方体であり、位置とサイズを予め設定しておく。

【パイプラック空間】予め配管経路の通過が想定されている空間。配管経路は極度の迂回経路とならない限り、この空間内へ設置することが望ましい。この形状は直方体であり、位置とサイズおよび配管経路が通過してほしい方向を事前に設定する。

4. 配管経路探索アルゴリズム

4.1 1本の配管経路に対する経路探索アルゴリズム

本研究では1本の配管経路探索問題を重み付きグラフ（ネットワーク）上の最小コストの経路探索問題に帰着することで問題の解決を図っており、経路探索法としてはダイクストラ法を使用する³⁾。Fig.1に本経路探索の簡易的な手順を示す。まず設計対象空間においてパイプを配置することが可能な座標の候補点（以下「標準点」と呼ぶ）を配置する。この際、標準点の配置間隔を小さく設定することで、より細やかに最適経路を探索できる。また、システム内では図に示されているような均等な標準点配置だけでなく、不均一な配置も可能である。障害物や始点・終点の周りに

より細かく標準点を配置することで、計算時間の増加を抑えつつ、妥当な配管経路が獲得可能となっている。

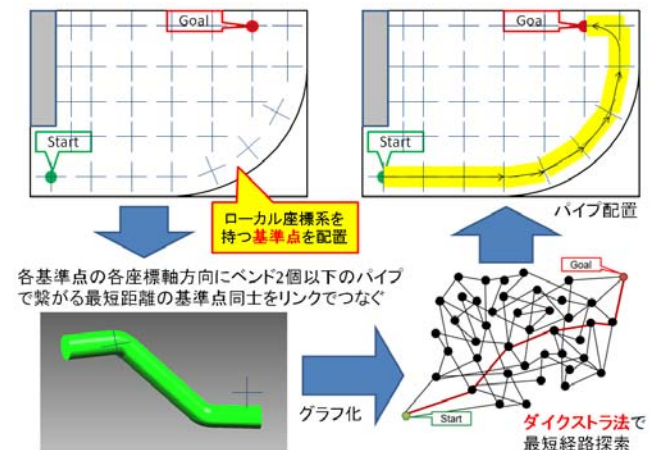


Fig.1 Process of routing for a pipe-route

標準点の配置が終了すると、各標準点における配管経路の座標と向きをノードの状態量とした重み付きグラフが作成される。グラフ内の各ノードを接続するリンクにおける重みは、各ノードに対応した標準点の方向に（直管、90度エルボ、または曲がり2か所以下のベンド管で）幾何学的制約を満たしつつ物理的に接続可能な場合の配管コストに、通路空間やパイプラック空間を通過した場合のコスト変化量が考慮されたものとなっている。すなわち経路の評価値となる総コストの値は、パイプラック空間を通過すれば割引され、それとは逆に通路空間に干渉すれば割増される。また本研究では配管における溜りに着目している⁴⁾。溜りとは配管経路が高さ方向にU形状になっている箇所のことであり、内部流体の流れに対して悪影響を有しているパイプ形状である。この溜りの生成をできる限り避けるため、高さ方向へ経路探索を進める場合、それらのノード間を結ぶリンクの重みにはコストの割増値を設定する。これにより探索される経路は水平移動を優先したものとなる。ゆえに最終的に獲得される配管経路では、極端な迂回経路となる場合を除いて、経路中に鳥居配管は生成されない。このように、ネットワークの各リンクには空間や配管形状を考慮した重み関数が設定される。

ネットワークの作成が終了すると、始点・終点間を結ぶ最適経路の探索が行われる。ここで最適経路とは始点から終点までを結ぶリンクの重みを全て足し合わせたものが最小の経路である。本システムではダイクストラ法を使用して求めている。

ネットワーク上の最適経路探索が終了すると、獲得された経路を設計対象空間内の配管経路へ変換する。以上の処理を経ることで、本システムでは最適な1本の配管経路の獲得を可能としている。なお、獲得される経路は以下の6つの条件を満たすものとなり、実用性の高い配管経路を得ることができる：

- 1) パイプ長が短いこと。
- 2) エルボおよびベンドの数が少ないこと。
- 3) 通路空間を極力回避すること。
- 4) パイプラック空間を可能な限り通過すること。
- 5) 高さ方向へ極力移動しないこと。
- 6) その他の配管経路と干渉しないこと。

(ただし探索のステージに応じて干渉を許す。)

$$C_{Parts} = C_{Parts X,Y} + C_{Parts Z} \times R_Z \quad (1)$$

ここで、式(1)として高さ方向への移動と各パイプピースの使用コストの関係性を示す。ただしXもしくはY方向に設置されているパイプピースの使用コストを $C_{Parts X,Y}$ とし、Z方向に伸びているパイプピースを $C_{Parts Z}$ とする。そしてZ方向への遷移によるコストの変化率を R_Z とする。

$$C_{Pipe} = C_{Parts} \times R_{Space} + C_{Interference} \quad (2)$$

また式(2)として6つの条件が考慮された探索コストの計算式を示す。1本の配管経路の探索コストを C_{Pipe} 、通路空間等との干渉によるコストの変化率を R_{Space} 、パイプとの干渉コストを $C_{Interference}$ として示す。 $C_{Interference}$ は経路探索中に変化する値となり、その詳細は4.3節で述べる。システム内では最適な経路案として C_{Pipe} が最小となる経路が獲得される。また、 C_{Pipe} の値が等しい経路案が複数ある場合はその中からランダムで一つが選択される。

4.2 複数本の経路探索における二つの問題点

船内では通常、複数の配管経路が複雑に絡み合っている存在する。しかし複数本のパイプを前章の方法で1本ずつ配置した場合、最終的に獲得される経路案が以下の二つの原因によって大きく変化する。

4.2.1 探索順序による設計案への影響

配管設計の現場では、一般に高価なパイプ順に経路設計が行われる。すなわち管の材料が等価な場合、径の大きなパイプから設計が行われる。しかし、径が同じパイプが複数存在する場合、設計順序に任意性が生じ、順序変化によって最終的な経路案が大きく影響を受ける。

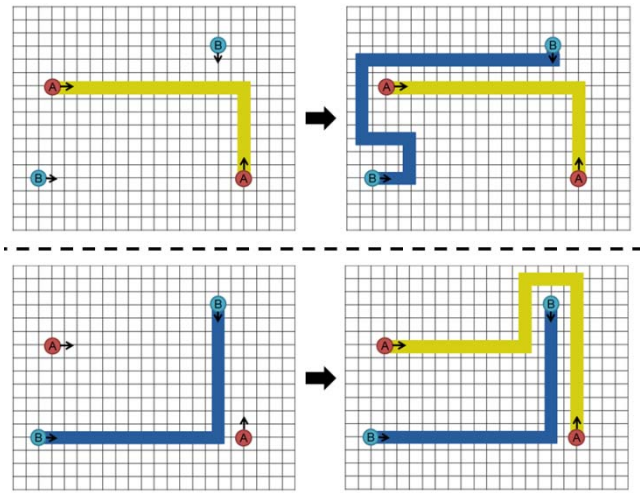


Fig.2 Influence of routing search order

Fig.2は、探索順序によって最終的に獲得される配管経路が異なる例を示す。ここでは径の等しい2本の配管経路（パイプA、パイプB）の経路探索を行う場合を想定している。ただし図では例を分かりやすいものとするために、2次元平面内での経路探索を示す。この場合、既存の手順に従うなら、2本のパイプの径は等しいため、Fig.2の上のようにパイプAから探索する場合と、下のようにパイプBから探索する場合の2通りの順序が考えられる。しかし図で示すように、最終的に獲得される経路案は、パイプの探索順序によって全く違うものになる。

4.2.2 解の選択による設計案への影響

1本の配管経路探索では、経路の最適解として複数の解が存在する場合がある。そのような場合、経路探索システムでは複数個存在する最適な経路候補の中からランダムに一つの解を選択するが、既存の配管手順では、どの最適経路を選択するかによって、最終的に得られる経路案が大きく変わってしまう場合がある。Fig.3に例を示す。

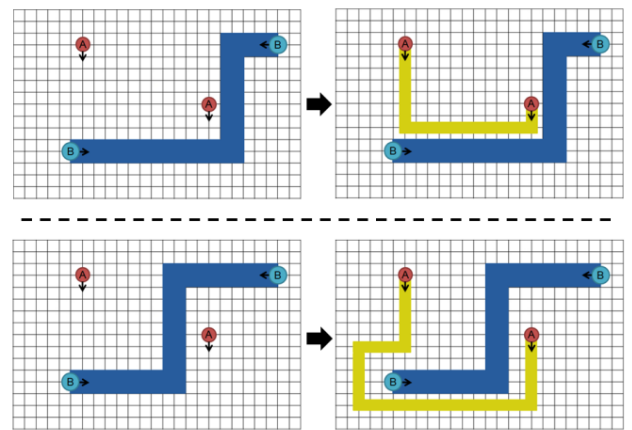


Fig.3 Influence of optimal routing selection

Fig.3 では径の大きなパイプ B と径の小さなパイプ A の経路探索を 2 次元平面で行う場合を示す。ここで、パイプ B の最適な経路候補としては図中の上の経路と、下のような経路が考えられる。しかし、Fig.3 下図ではパイプ B の経路の影響によって、後に経路探索されるパイプ A が大きく迂回してしまう。経路探索の序盤では設計対象空間内に障害物となるものが少ないため、より多くの最適経路案が存在する。しかし、これらの経路案の中からどれを選ぶかによって、後のパイプ配置結果が大きく変化していることが分かる。

4.3 タッチアンドクロス法を利用したアルゴリズム

4.2 節で述べた、二つの問題を解決するため、本論文ではタッチアンドクロス法と焼きなまし法を組み合わせた新たなアルゴリズムを提案する。

タッチアンドクロス法とは、集積回路の配線問題を解決するため、松岡ら⁵⁾によって提案された経路探索手法であり、ペナルティ関数法における外点法的一种である。タッチアンドクロス法では、タッチ（配線同士の接触）とクロス（配線同士の交差）という二つの制約違反状態をペナルティ値として表現し、目的関数にその値を加える。さらに、経路探索処理を複数回反復して行いつつ、設定された制約違反コストの値を徐々に上昇させることで、次第に経路同士が干渉していない解を獲得する。また、反復して行われる経路探索の過程では、複数ある経路の中から 1 本を選び再度経路を探索し、その経路が設定されると、他の経路を選択し同様の経路探索処理を行う。このように複数本の経路探索過程では、すべての経路を同時に探索するのではなく、経路 1 本ずつに焦点を当てているので、既存のダイクストラ法を利用した経路探索手法と容易に組み合わせることができる⁶⁾。

タッチアンドクロス法では経路同士の干渉にコストを設定している。よって配管経路探索問題でも、配管同士の経路干渉を意味する制約違反コスト（ペナルティ値）を設定する。式(3)として経路探索システム内の経路干渉コストを記す。

$$C_{Interference} = V_{Pipe} \times R_{Interference} \quad (3)$$

ただし、経路同士の干渉コストを $C_{Interference}$ 、干渉部分の配管が外接する直方体の体積を V_{Pipe} 、コストの割増率を $R_{Interference}$ とする。式(3)で設定された干渉コストは、パイプピースの使用コストのように、経路探索過程で作成されるネットワークにおけるリンクの重みとして換算される。

また、複数の配管経路を含んだ設計案の評価値としては式(2)で示された各経路の探索コストをすべて足し合わせたものを使う。式(4)に N 本の配管経路を含んだ設計案の評価パラメータを示し、これがペナルティ関数法における拡張目的関数を意味する。ただし設計案の評価パラメータを総コスト C_{Total} と表わす。

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^N C_{Pipe,i} \quad (4)$$

Fig.4 にタッチアンドクロス法による経路探索の例を示す。経路探索の序盤では干渉コストが小さい値のため、経路同士が干渉を無視した単純な最短経路となっている。しかし、探索回数が進むにつれて干渉コストが増大し、徐々に経路同士の干渉が少なくなり、最終的に干渉のない妥当な設計案を獲得している。

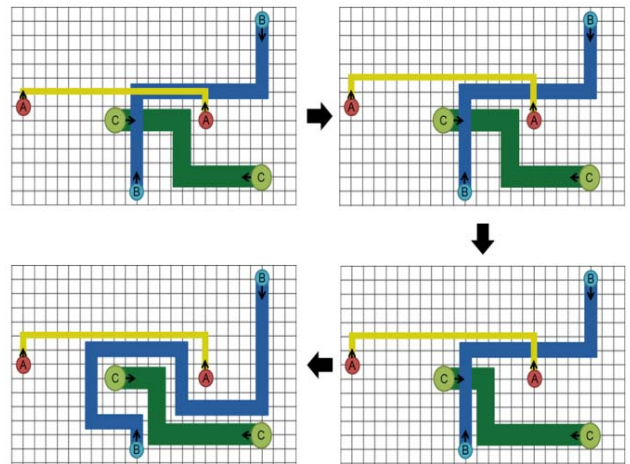


Fig.4 Process of routing with Touch and Cross method

4.4 タッチアンドクロス法への焼きなまし法の導入

前節で示したように、タッチアンドクロス法では経路を一本ずつ順次引き直して改善を繰り返すことで探索を進めていく。しかし、常に改善を繰り返すだけでは、最適解へ到達する前に局所解へ陥って探索が行き詰ってしまうケースがある。そこで本研究ではタッチアンドクロス法のプロセス中に、焼きなまし法を導入して探索の後戻りを許容することで、探索の行き詰まりを回避する⁶⁾。紙面の都合により、詳細については割愛する。

5. 計算機シミュレーション実験

5.1 実験設定

バラストポンプルームを想定した各辺 6[m]の直方体を用意し、その中に障害物 3 個、通路空間 3 個、パイプラック空間 2 個を配置した。また、経路探索を行うパイプ 13 本、パイプ径 0.8[m]が 1 本、0.6[m]が 2

本, 0.4[m]が 4 本, 0.3[m]が 6 本である. また, R_z の値は 2.0 とした. その他の各パラメータの数値を Appendix に示す. 計算環境は, OS に Windows7 を使用し, CPU は Intel Core i7 3.4Ghz, メモリーは 8.00GB, プログラム言語は Java version 1.7 を用いた.

5.2 実験結果

Fig.5 に最終的に獲得された経路案を示す. この設計案を得るのに要した時間は約 18 時間であった. 各経路は干渉なく接続されており, 尚且つ可能な限りパイラック空間を通過し, 通路空間を避けたものとなっている. また鳥居配管についても可能な限り避けたものとなっている. 同じ実験条件でシミュレーションを 10 回繰り返したところ, 全ての実験結果で Fig.5 で示す経路案を獲得した. 同様の実験条件の下で, 先行研究のシステムを動作させたところ, 実験を繰り返すたびに異なる設計案が獲得されることが確認されている. 本実験を 10 回行い獲得された総コスト C_{Total} の平均値を比較すると, 先行研究のシステムでは平均で 40.2, 本システムでは平均で 38.6 となっている. また以前のシステムでは設計案に平均で 1.4 個の溜りが確認され, パイラックを通過する配管の数も平均 2.6 本であったが, 本システムでは溜り 1.0 個, パイラックを通過する配管も 4.0 本となり, 溜りの発生を抑え, パイラックを可能な限り通過させる設計案の生成に成功している. よってタッチアンドクロス法と焼きなまし法を適用した提案手法は, 配管経路が複数本ある場合でも, 妥当な設計案を高確率で獲得することが可能であることが確認された.

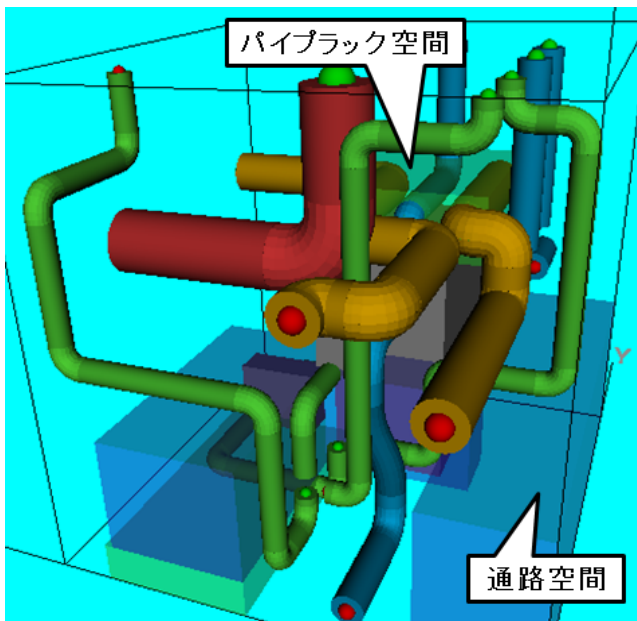


Fig.5 Final result of the simulation

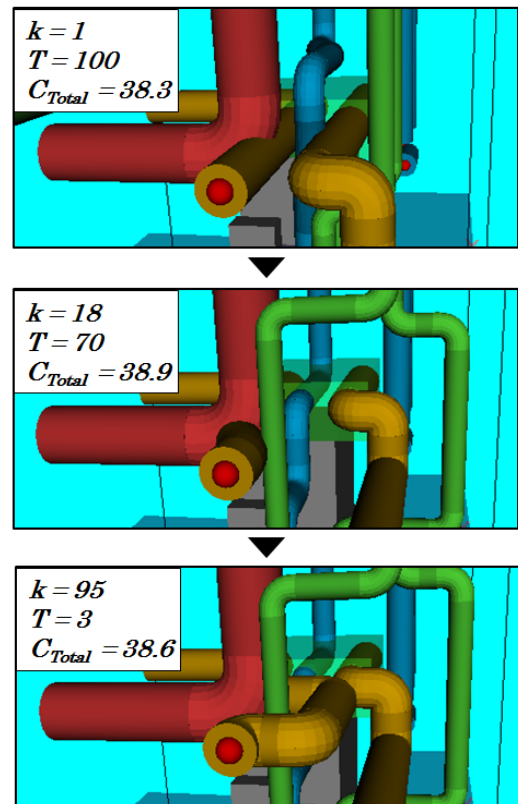


Fig.6 Obtained pipe-routes during the simulation

また Fig.6 に探索途中で獲得された経路を示す. 図中の k が探索回数, T がその時点での温度関数の値をそれぞれ示す. ここでの探索回数は, 焼きなまし法の過程で全ての配管について経路探索を行うことを一単位としている. さらに表示されている経路案の総コストを C_{Total} と表わす. 探索回数が小さい時点では温度関数の値が高く, 干渉コストの値が小さいため, 獲得された設計案は経路同士を無視した単純な最短経路群になっている. しかし探索回数が増加するにつれて温度関数の値は小さくなり, それに伴って干渉コストが増大していくことで経路同士の干渉が徐々に少なくなっていく. 最終的には図中下段で示されているような干渉のない妥当な設計案が獲得されている.

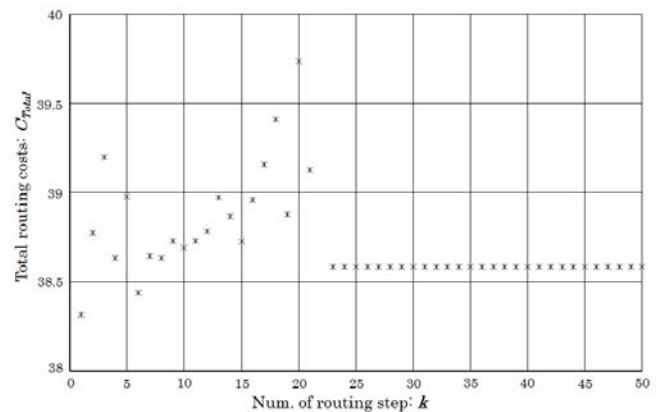


Fig.7 Total results of the simulation

Fig.7に横軸に探索回数 k , 縦軸に総コスト C_{Total} を表したグラフを示す. このグラフでは本システムを同じ実験条件で10回繰り返した後に得られた総コストの平均値を表示している. Fig.7から探索回数が増加するにつれて総コストが徐々に増加していることが分かる. これは干渉コストが探索回数に伴い徐々に増加するという提案手法の特徴によるものである. また本実験では探索回数が約22回前後で妥当な解に収束していた. ここで, 解が収束するとき総コストの下降が確認できるが, これは妥当な設計案では配管同士の間隔が無くなることやパイプラックの通過による影響であると考えられる.

6. 考察

本手法では, 4章で述べたように複数本のパイプの中から1本ずつ選択して経路探索を行っている. この処理を全てのパイプについて繰り返すことにより, 設計案の生成を行っている. この反復される経路探索過程の中で, どの順序で経路を選んでいけばよいかという問題が発生する. すなわち, 実際の設計者と同様に径の大きい配管から順で設計を繰り返すべきなのか, ランダムで探索を繰り返すのか, もしくはその他の順序なのかといった問題である. 本研究では, 径の大きいもの順, 小さいもの順, ランダムな順序, そして始点・終点距離の短いもの順, 長いもの順の5つのパターンでそれぞれ探索を繰り返す予備実験を行い, 定性的な比較を行った. その結果, 始点・終点距離の短いもの順で経路探索を反復させることが最も効率的に妥当な設計案を獲得できることを確認した. これは始点・終点距離が短い経路は, 経路中に最適解のパターンが少なく, それらを先に配置しておくことで, 後の経路探索における最適解の選択幅が減少するためであると考えられる. よって6章で示したシミュレーション実験では, 距離が短い配管経路から探索を繰り返している. 今後, この手法がどれほど有効であるかについて検証が必要である.

7. 結言

本論文では配管設計作業の自動化へ向けて, パイプの幾何学的制約を含めた様々な評価項目を考慮したパイプ1本についての自動経路探索アルゴリズムと, 配管経路が設計空間内に複数本存在する場合を想定した自動経路探索アルゴリズムの提案を行った. 提案手法では, パイプ1本の経路探索法としてダイクスト

ラ法を使用し, 複数本の経路探索を効率よく行うためにタッチアンドクロス法と焼きなまし法を組み合わせている. これにより, 複数本の経路探索を行う際に問題となっていた経路探索の順序や, 経路探索中における解の選択による影響の緩和を可能とした.

謝 辞

本研究は, 日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 課題番号 23360388 より一部補助を受けた.

参 考 文 献

- 1) 木村 元: 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, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号, pp. 165 - 173, 2011.
- 2) A. Asmara, U. Nienhuis: Automatic piping system in ship, proceedings of the 5th International Conference on Computer and IT Application (COMPIT), Mar. Ind. 2006. Leiden.
- 3) 安藤 悠人, 木村 元: エルボおよびベンドを考慮した配管設計アルゴリズム, 日本船舶海洋工学会論文集, 第15号, pp. 219 - 226, 2012.
- 4) 安藤 悠人, 木村 元: 溜りの影響を考慮した自動配管設計, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第16号, pp. 179 - 182, 2013.
- 5) 松岡 英俊, 新田 泉: 大規模配線システム: GRP, FUJITSU, 50, 6, pp. 372 - 377, 1999.
- 6) 安藤悠人, 木村 元: 自動経路探索システムにおける複数本配管への対応, 日本船舶海洋工学会論文集, 第20号, pp. 221-230, 2014

Appendix

実験 1, 2 で使用された各パラメータの値.

Variable	Type	Value
C_{Parts}	Straight	1.0/m
	Elbow	Manhattan Distance + 0.1
	Bend	Manhattan Distance + 0.3
R_{Space}	Pipe-rack	0.4
	Aisle	2.0