

タイトルカットが入ります

配管設計自動化の新しいアプローチ

曲がり部に沿った配管自動設計

正会員 木村 元*1

1. はじめに

建築物や船舶、プラント等の設備において、配管設計には膨大な作業時間を要する。作業時間短縮のため、近年では発達した情報処理技術を利用した設計作業の省力化が図られてきた。特に 3 次元 CAD の導入により、3 次元データでの設計・解析・生産技術が普及しつつある。機器配置や配管経路を 3 次元空間中に可視化することで設計案の修正が容易となり、作業の効率化が進められているが、作業そのものは未だに熟練設計者に頼っているのが現状である。近年では熟練者の確保が困難になってきており、若手技術者への技術伝承問題も発生している。配管設計の自動化は、これらの問題を解決するための有望な方法の一つである。

系統図を基に機器やパイプ同士の干渉を排した配置図を設計する問題は、電子回路のプリント基板や LSI の配線設計問題と類似する部分がある。電子工学の分野では、筆者の知る限り 1980 年代には自動配線の研究がなされており、特に障害物を避けて 2 点間を結ぶ配線 1 本の最短パスを求める問題は、重み付きグラフの最適経路探索問題として問題の記述長 $n[\text{bit}]$ に対して $O(n^2)$ の計算量で簡単に解けることが知られている。ところが複数本の配線について互いに干渉しない最短パスを求めようとすると、最適解を効率良く見出すアルゴリズムが見つかっておらず、問題の複雑さが NP-hard つまり問題の記述長に対し必要な計算量が指数オーダーで増大するため汎用ソルバ等で実問題を解くことは不可能となる。そのため、配線を 1 本ずつ引き直すタッチアンドクロス法¹⁾や焼きなまし法、遺伝的手法などの(メタ)ヒューリスティクスが用いられ、実用化されている。しかし、電子回路の配線に比べ、パイプの配置は物理的あるいは施工上の制約がかなり大きい。例えば

重力流下するため高さ方向の配置に制約があったり、曲げ半径の大きなベンドを使用したり、狭隘空間に詰め込むため S 字状に曲がったパイプを使用したり、カーブを描く船殻の構造部材に沿って配管するなど、電子回路には無い様々な条件の考慮が求められ、これが実用的配管設計問題の定式化や設計自動化を妨げてきた。本稿では、曲がった構造部材に沿った配管やサポートの位置を考慮した配管設計問題などを計算機で扱うための定式化方法および問題解決方法²⁾について紹介する。

2. 空間格子分割による配管自動設計の限界

電子回路の配線自動設計や先行研究における配管経路の自動設計法^{3,4)}のほとんどは、図 1 の例のように空間を格子分割して経路を探索するものである。

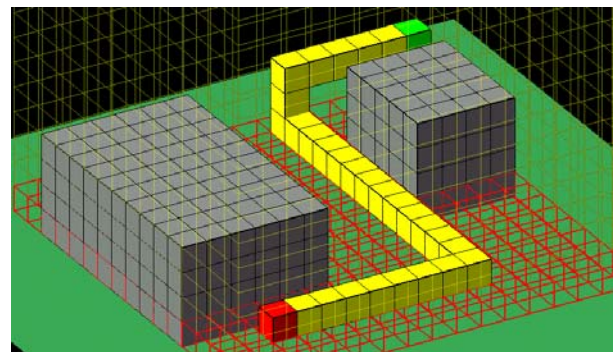


図 1 格子分割した空間での経路探索法

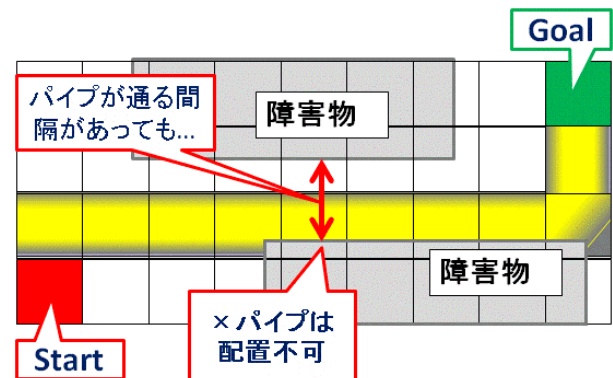


図 2 空間格子分割の問題点

*1 九州大学 大学院工学研究院海洋システム工学部門

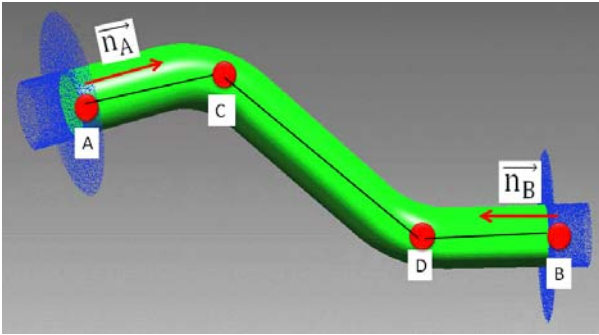


図3 2つの経路点候補 (A と B) をベンド2個で接続するパイプの例

空間を分割する格子の間隔は、経路探索アルゴリズムの都合上、管径以上の寸法が求められる。そのため設計対象のパイプが太い場合、図2に示すように実際にはパイプが通れるすき間があるのに格子の間隔が粗いため経路が生成できないという問題が生じる。曲げ半径の大きなベンド管を使用する場合には、さらに格子の間隔は大きくなる。管を設置する方向は格子の方向のみに限定されるため、曲がった構造部材に沿った配管に対応できないなど大きな制約があるため、特に造船分野において配管の自動設計の実用化は遅れていた。

3. ベンド2個を用いたパイプの幾何的性質

本章では新しい配管経路探索の基礎となるパイプ接続の幾何学的性質について説明する。図3は任意の位置と方向の2つの経路点候補 (AとB) を結ぶパイプの例を示す。パイプの直管部分の中心は線分AC, CD, DBを通る。幾何学的には、パイプの直管部分の長さ制約やベンドの角度制約が無ければ、ベンド2個以下あるいは90度エルボ2個以下のパイプであらゆる位置と方向を持つ経路点候補を接続可能である。しかし実際はベンドの曲げ半径や最大曲げ角度・曲げ部分同士をつなぐ直管部分長さの最小値などパイプベンダ等に依存する施工上の制約条件が存在するため、接続できないケースが出てくる。図4の左側は、2つの経路点候補を90度以下のある曲げ角度ベンド2個のパイプで接続した例で、図3で示した直線部分AC : CD : DB = 1 : 2 : 1を制約として与え、ベンドの角度を計算した結果を示す。図4の右側は、左側と同じ2つの経路点候補を90度のエルボ2個で接続することを制約として与え、図3で示した直線部分AC, CD, DBの長さを計算した結果を示す。

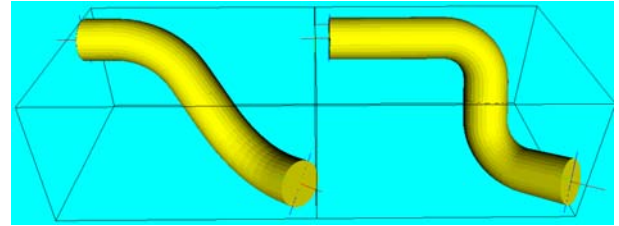


図4 左側：2つの経路点候補を90度以下の任意角度のベンド2つを有するパイプで接続した様子／右側：同じ経路点候補を90度エルボ2個を有するパイプで接続した様子

4. 位置と方向を指示する経路点候補を用いた新しい配管自動設計法

4.1 経路候補点の事前配置

船舶における配管は、ただ接続するだけの電子回路の配線とは大きく異なり、パイプを支えることが容易なパイプラック・壁や天井、サポートを取付可能な構造部材等に沿って配置するのが特徴である。筆者はこの点に着目し、各配管系統毎にパイプを配置可能な位置と方向を指示した経路候補点 (design point) を予め配置する新方式に取り組んでいる。次章で説明する自動設計アルゴリズムは、この経路候補点が予め与えられていることを前提とするが、構造部材やサポート材などを識別できれば、経路候補点を自動生成することは難しいことではない。

4.2 パイプ1本に対する経路探索アルゴリズム

経路点候補の局所座標軸方向 (6方向) をそれぞれグラフのノードとし、それら同士を第2章で説明したベンド2個またはエルボ2個以下のパイプで障害物との干渉無しに接続可能かどうかをチェックし、接続可能ならノード間にエッジ (リンク) を生成してそのエッジにパイプのコストを重みとして設定したグラフを生成する。ただし、グラフが無駄に大きくなることを防止するため、エッジ生成候補となるノードは、元ノードの局所座標軸方向に位置するものに限定し、さらに元ノードの位置からユークリッド距離の近いものを優先してエッジ生成していき、またエッジ生成個数には上限を設ける。パイプによっては重力流下配管とするため経路の途中がU字型になる鳥居配管が許されない場合があり、このような条件からもエッジ生成を制約する。

経路は以下の5つの項目をコスト設定により考慮し、その最小化を行うことにより実用的な配管経路となる：

- 1) パイプ全長が短い。

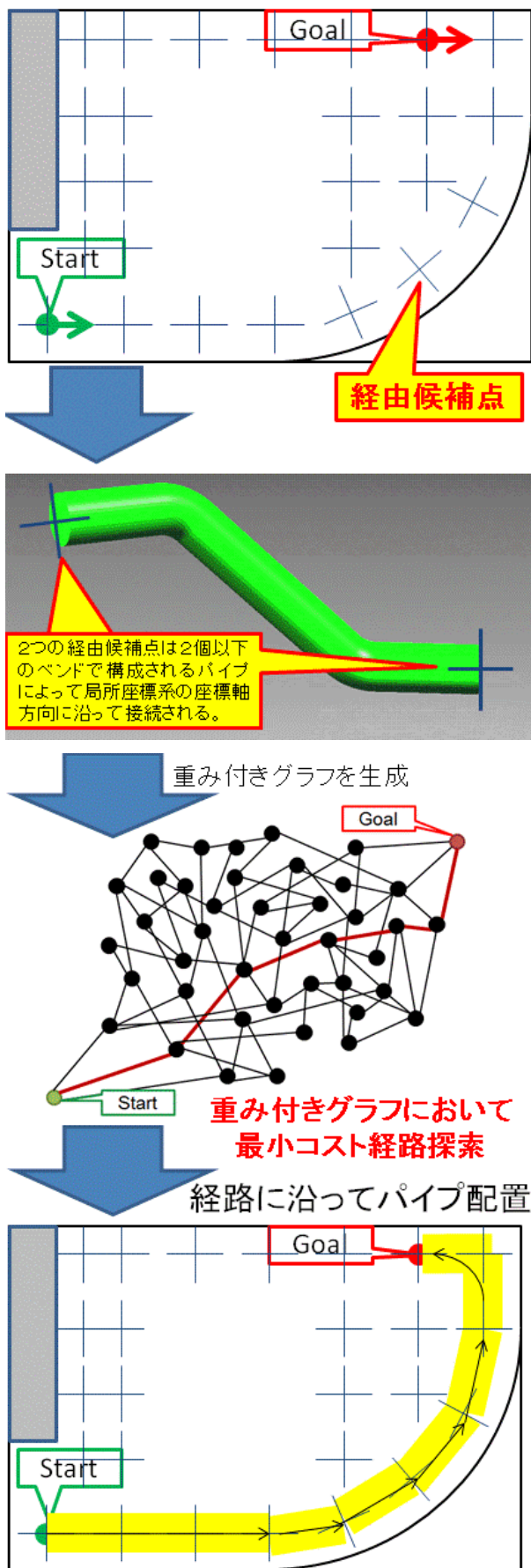


図5 パイプ1本に対する経路探索法の流れ図

- 2) エルボおよびベンドの数が少ない。
- 3) 障害物や他の配管と干渉しない。
- 4) パイプラックやサポートを通過する。
- 5) 鳥居配管を（極力）回避する。

上記の重み付きグラフ作成が終了すると、始点から終点までを結ぶエッジの重み合計が最小となる経路の探索が行われる。本手法を実装した計算機システム²⁵⁾では経路探索にダイクストラ法を用いた。グラフ上の最適経路探索が終了すると、経路を設計対象空間内の配管経路へ変換する。以上の処理により、1本のパイプの自動設計に限ってはグラフ理論により最適経路の獲得が保証される。

図5は、本節で紹介した処理手順の流れ図で説明したものである。

5. 複数系統の配管設計への対応

パイプ1本については第4章で示した方法で（適切な経路候補点を与えられれば）最適経路を得るが、複数系統についての最適経路を効率良く求めるアルゴリズムは見つかっていないため、電子回路の自動設計で用いられるタッチアンドクロス法²⁶⁾を利用して経路を得る方式に取り組んだので紹介する。

タッチアンドクロス法は、まず最初に全てのパイプを互いの干渉を無視して最短経路で結び、以降は干渉している部分のコストを少しずつ増加させながら1本ずつ引き直してパイプ同士の干渉を解消していく方法である。最初に干渉を無視して配置することにより、混雑する領域についての情報を得てパイプ同士の干渉の解消に利用するのが大きな特徴である。オリジナルのタッチアンドクロス法は、電線同士の干渉を解消するため「だけ」に用いられたが、スタート位置を共有するような木構造の枝分かれ構造を持つ同一系統のパイプについては、スタート位置から各ゴールまで別々の1本のパイプとみなして経路探索を行い、干渉回避の場合とは逆に、互いに重複する部分のコストを割引いて引き直すことにより、同一系統のパイプの経路重複を促して木構造全体の経路長が短くなるような分岐配管経路を得ることが可能である。筆者は、別系統のパイプは回避、同一系統のパイプは重複するようなタッチアンドクロス法を実装し、分岐を有する複数系統の配管設計の自動化に取り組んだ⁵⁾。

6. 配管自動設計の例

6.1 曲がった構造部材に沿った配管自動設計

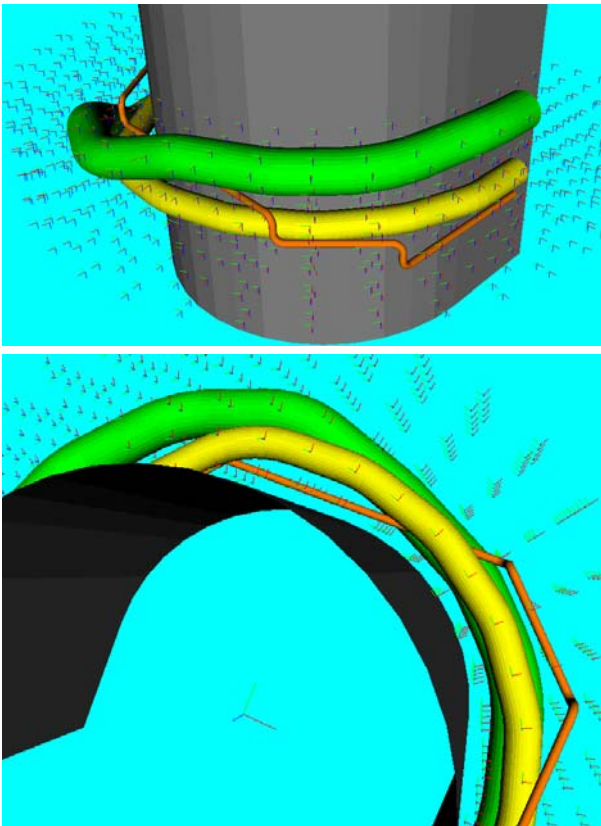
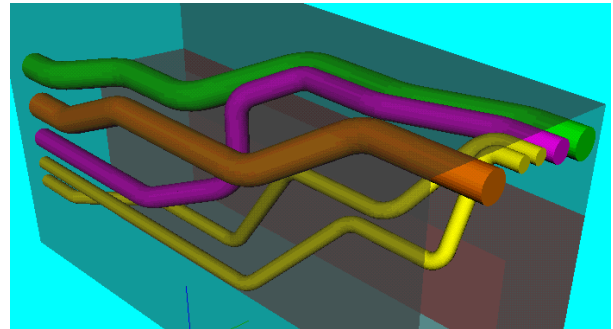


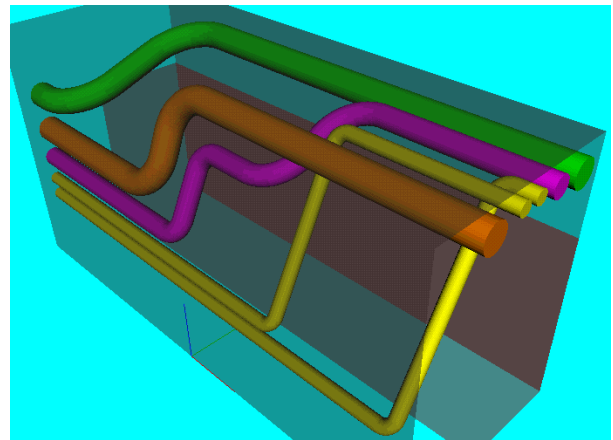
図6 曲がった構造部材に沿った自動設計の例

図6は半円筒の壁状の構造物に沿って3種類のパイプを64bit Microsoft Windows7, Intel COREi-7 2.7GHz processor 16GBメモリの標準的なスペックを有するPC上でJava-1.8.0の環境における自動設計の成功例を示す。最も太いパイプは管径の2倍または4倍の曲がり半径, 2番目に太いパイプは管径の3倍または4倍の曲がり半径で任意角度のエルボを使用し, 最も細いパイプは90度のエルボしか使用できない条件を設定した。計算には約1-2分を要したが, しばしば干渉を回避する解の獲得に失敗するケースもあった。構造物の表面に平行あるいは直角な方向に合計870個の経路候補点を与えた。図6のパイプや半円筒状の構造物以外に見える点のような図形が, 経路候補点の位置と方向を表す。一番細いパイプは90度のエルボしか用いることができない制約下にもかかわらず, パイプ同士の干渉を回避し, かつカーブした壁状の構造部材に沿った配管経路が生成されていることが分かる。

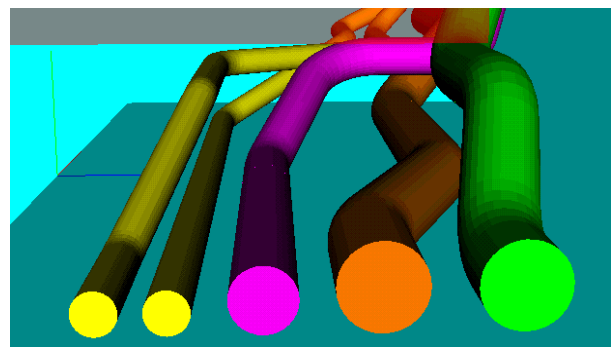
6.2 サポートを考慮した配管自動設計



(a) 全パイプを任意角度ベンドで接続



(b) 全パイプを90度エルボで接続



(c) (a)の設計案を別の方向から観測

図7 サポートを考慮した自動配管設計の例

図7(a)と(b)は, 径の異なる3種類のパイプ5本を共通のパイプラックを利用して配置することを想定した自動設計の成功例を示す。図7(a)と(b)の各パイプの始点と終点の位置と方向は同一だが, (a)では任意角度のベンド(図4左側に相当), (b)では90度エルボのみを使用(図4右側に相当)した制約下で自動設計を行った。(a)の設計案を別の方向から見ると, 図7(c)のように, パイプの径毎に適切に経路候補点を用意することにより, 径の異なるパイプを同一のサポートで支えられるような経路を得られることが

分かる。この計算に要する時間は、前節で説明したスペックの計算機で成功すれば約3分だが5分で計算を打ち切った。(a)は20試行中成功は2例、(b)は20試行中成功は14例であった。

6.3 分岐を有する配管経路の自動設計

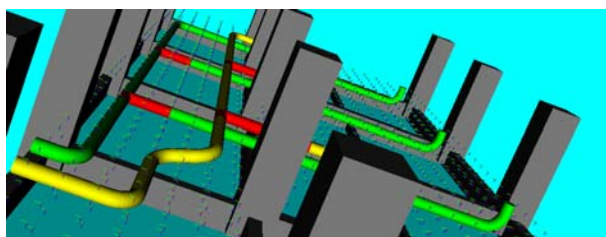
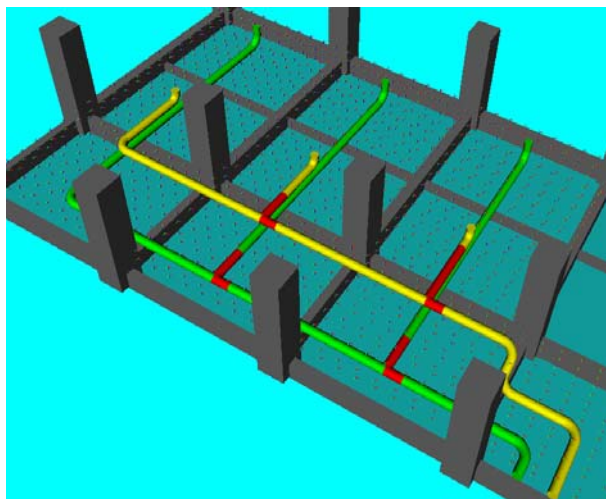


図8 分岐を有する建築設備配管経路の自動設計例

図8は、スタート位置を共有しゴール位置が3ヶ所に分かれた木構造の配管システムが2系統存在する場合において、建物の天井裏へ配置を行うような、建築設備の分岐配管自動設計の例を示す。経路候補点は天井裏の空間にほぼ均一な格子状に1288個配置した。柱や梁などの障害物は全て28個の直方体として表現した。パイプは全て90度のエルボのみ使用できるものとした。計算に要した時間は前節で用いたのと同じ計算機で約18分で、10試行全てにおいて干渉の無い経路が得られ、その経路パターンはほとんど同じだった。図8より、2系統の分岐を有するパイプ同士が互いに干渉しないような配置が得られていることが分かる。

7. おわりに

本稿では、パイプを配置可能な位置と方向を指示する経路候補点を予め配置することにより、カーブを描く船殻の構造部材に沿った配管やサポートを考慮した配管の設計を自動化する新しい取り組みについて紹介した。シミュレーション実験では、たびたびパイプ同士や障害物との干渉を回避する設計案の獲得に失敗する場合がある。今後このソルバへAIを適用し、解き方を自ら学習させるなどによってベテラン設計者による設計と比べ遜色ないレベルまで性能向上することが目標である。また、配管自動設計を設計現場で利用するにあたり、設計対象や周囲の障害物に関する情報源として3次元CADのデータを扱うことが予想される。しかし生のCADデータは配管自動設計に必要な無余計な形状情報を大量に含んでいるため、必要な形状情報だけを抽出するような処理も課題である。

参考文献

- 1) 松岡 英俊, 新田 泉: 大規模配線システム: GRP, FUJITSU, 50, 6, pp.372 - 377, 1999.
- 2) 特願 2017-96845: 配管の経路生成方法, 複数の配管の経路生成方法, 配管の経路生成装置及びプログラム
- 3) 伊藤 照明, 福田 取一: 遺伝的アルゴリズムを用いた配管経路探索法の検討, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.791-802, 1998.
- 4) 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.
- 5) Hajime Kimura: Automatic Piping Arrangement Design Considering Piping Supports and Curved Surfaces of Building Blocks, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS) Vol.3, pp.147—153, 2017.

写真

木村 元 (きむら はじめ)
九州大学
大学院工学研究院海洋システム工学部門
kimura@n a m s .kyushju-u.ac.jp