

タイトルカットが入ります

プラントにおける配管設計の自動化方法およびシステム

木村 元*1

1. はじめに

ビルや船舶、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。3次元CADの導入により、機器配置や配管経路を計算機上の仮想空間中に3次元で可視化することで設計案の修正・解析・生産設計が容易となり、作業の効率化が図られたが、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。近年では熟練設計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の無い配置を求める問題は、電子回路のプリント基板やLSIの配線設計問題に類似する。電子工学の分野では、筆者の知る限り1980年代にすでに自動配線の研究が存在し、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 $O(n^2)$ の計算量で最適解を得られ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る問題は、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試みられている。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、特に船舶の場合はカー

ブを描く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、上記のような厄介な制約を伴う配管設計問題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

電子回路の自動配線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。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の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。

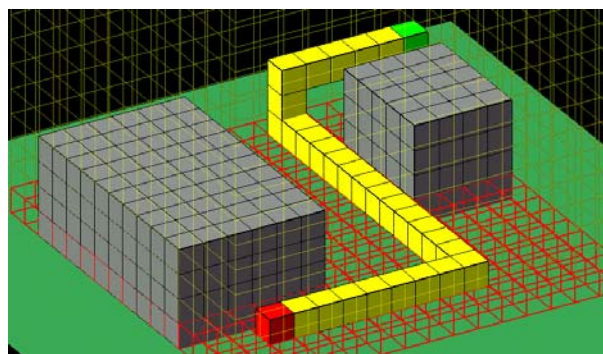


図1 格子分割した空間での経路探索法

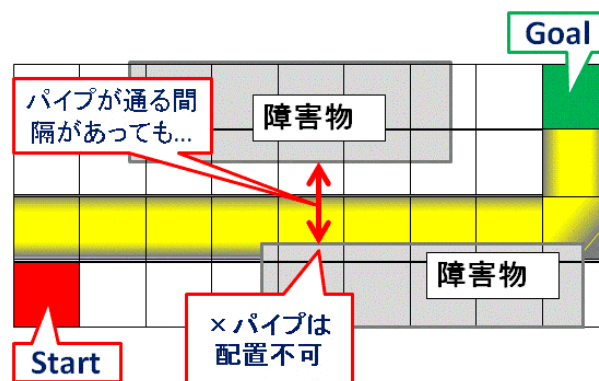


図2 空間格子分割の問題点

*1 九州大学 大学院工学研究院海洋システム工学部門

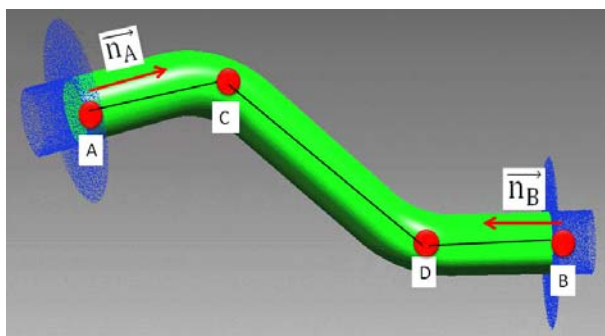


図3 2つの経路点候補 (A と B) をベンド2個で接続するパイプの例

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。このような格子の制約がを受けずに配管経路の自動設計を行う商用のソフトとして ASD 社の OptiPlant があるが、パイプを配置可能な方向は依然 xyz 軸方向に限定されており、曲がった構造部材に沿った配管が求められる造船分野では特に配管自動設計の手段は無かった。

3. ベンド2個を有する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の加工に依存する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。

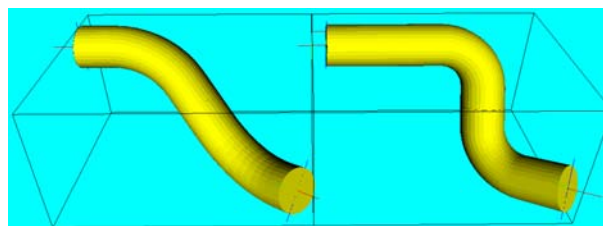


図4 左側：2つの経路点候補を90度以下の任意角度のベンド2つを有するパイプで接続した様子／右側：同じ経路点候補を90度エルボ2個を有するパイプで接続した様子

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。

4.2 パイプ1本に対する経路探索アルゴリズム

経路候補点の局所座標軸方向 (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、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、その最小化により実用的な配管経路を得る：

- 1) パイプ全長が短い。
- 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。

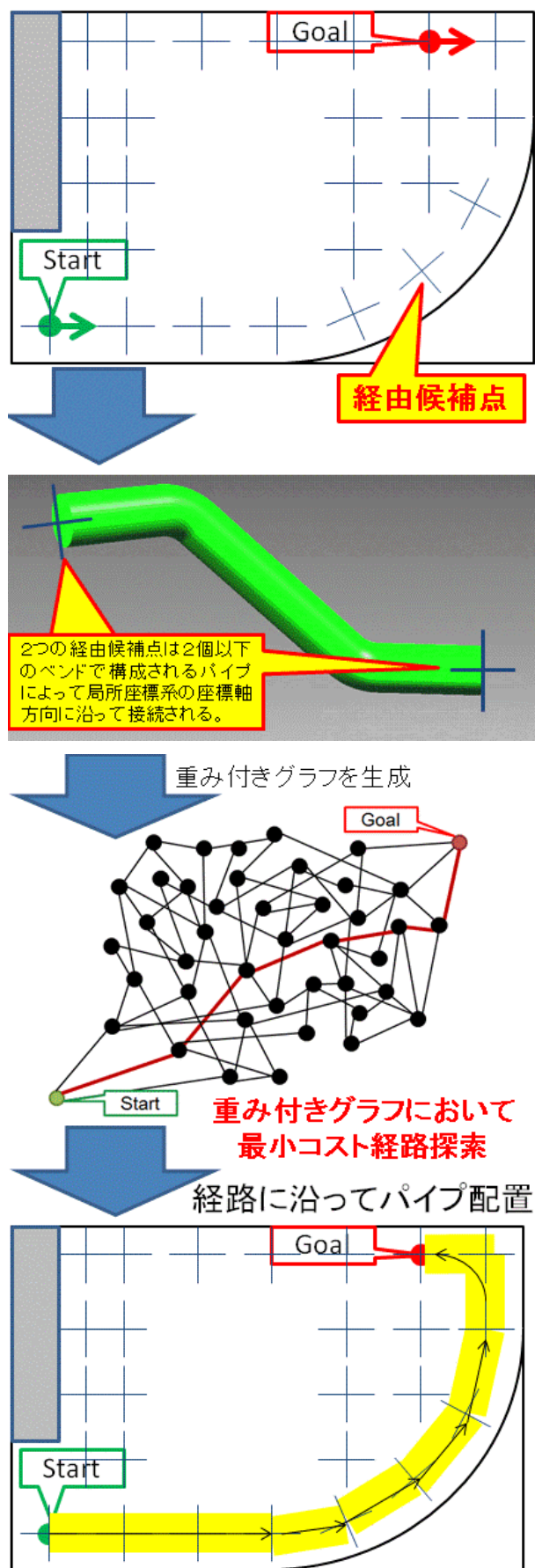


図5 パイプ1本に対する経路探索法の流れ図

上記の重み付きグラフが完成すると、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^{2,5)}では経路探索にダイクストラ法を用いた。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、本処理手順を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

複数のパイプを1本ずつ配置していくと、設計対象空間に余裕があるうちは問題無いが、配置済みのパイプの増加に伴ってスペースに余裕がなくなりそれ以上の配置が不可能な状況に陥る。このような複数同時配管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。そこで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⁶⁾を利用して複数経路を得る方式に取り組んだので紹介する。

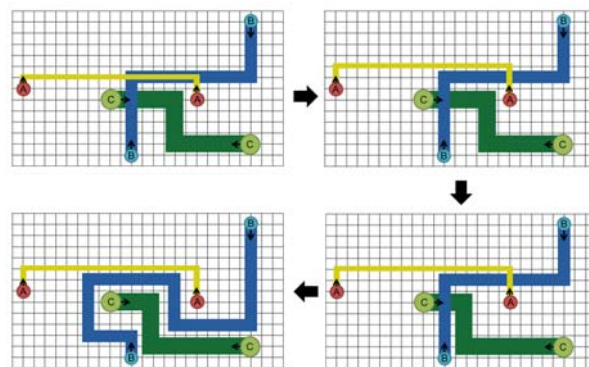


図6 タッチアンドクロス法によるパイプ同士の干渉の解消

図6にタッチアンドクロス法の動作例を示す。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。最初に干渉を無視して配置することにより、混雑する領域を特定してパイプ同士の干渉解消に利用することを特徴とする。逆に、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、なるべく重なるように引き直すことにより、分岐の存在する配管経路の探索にも対応できる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

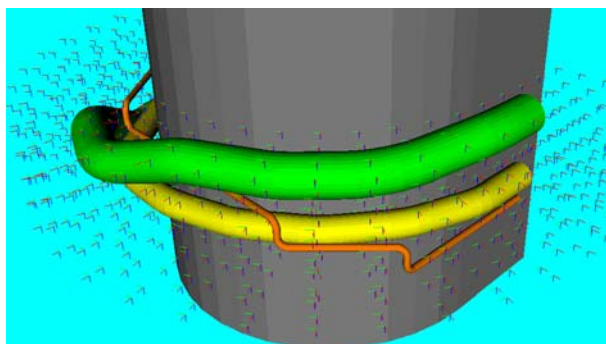
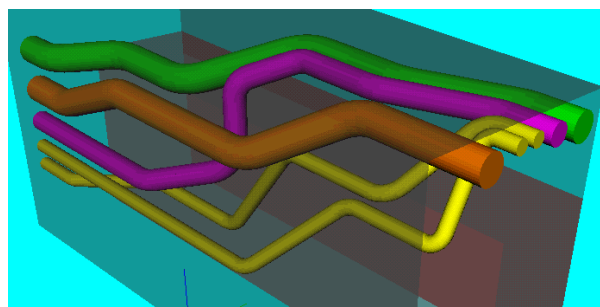


図7 曲がった構造部材に沿った自動設計の例

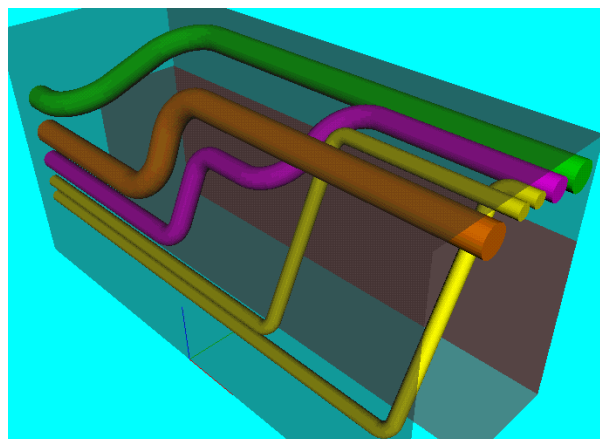
図7は半円筒の壁状の構造物に沿って3種類のパイプを標準的なスペックを有するPC上での環境における自動設計の成功例を示す。最も太いパイプは管径の2倍または4倍の曲がり半径、2番目に太いパイプは管径の3倍または4倍の曲がり半径で任意角度のエルボを使用し、最も細いパイプは90度のエルボしか使用できない条件を設定した。計算には約1-2分を要したが、しばしば干渉を回避する解の獲得に失敗するケースもあった。構造物の表面に平行あるいは直角な方向に合計870個の経由候補点を与えた。図7中の多数見える点のような図形が、経由候補点の位置と方向を表す。一番細いパイプは90度のエルボしか使えない制約にもかかわらず、パ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

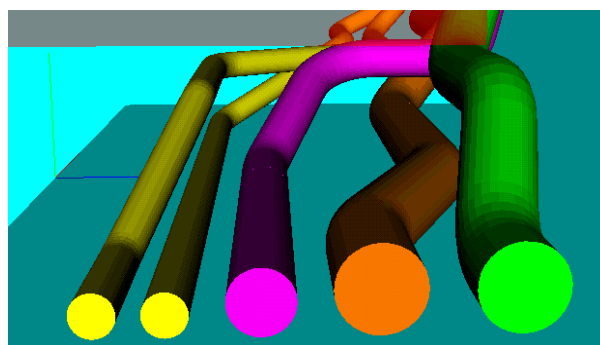
図8(a)と(b)は、径の異なる3種類のパイプ5本を共通のパイプラックを利用して配置することを想定した自動設計の成功例を示す。図8(a)と(b)の各パイプの始点と終点の位置と方向は同一だが、(a)では任意角度のベンド(図4左側に相当)、(b)では90度エルボのみを使用(図4右側に相当)した制約下で自動設計を行った。(a)の設計案を別の方向から見ると、図7(c)のように、パイプの径毎に適切に経由候補点を用意することにより、径の異なるパイプを同一のサポートで支えられるような経路を得られることが分かる。この計算に要する時間は、標準的計算機で成功すれば約3分だが5分で計算を打ち切った。(a)は20試行中成功は2例、(b)は20試行中成功は14例であった。



(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

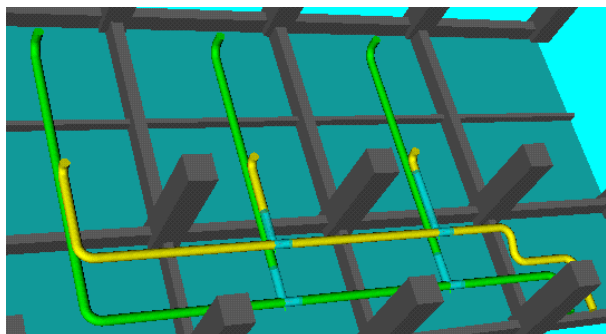


(c) (a)の設計案を別の方向から観測

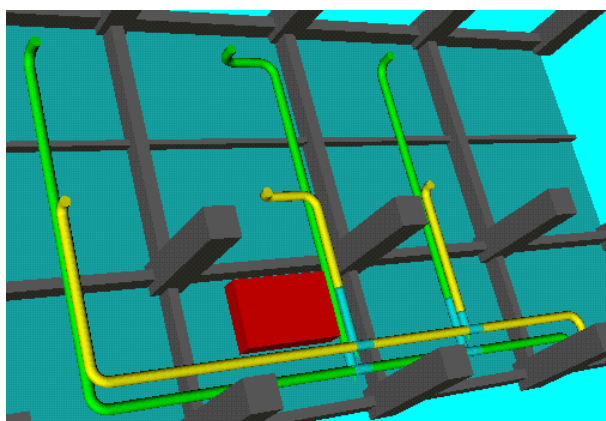
図8 サポートを考慮した配管自動設計の例

6.3 分岐を有する配管経路の自動設計

図9(a)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系統が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。経由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9(b)は、配管経路上に障害物を追加して経路探索をやり直した結果を示す。



(a) 当初の自動配置結果



(b) 障害物を追加して再探索した結果

図9 分岐を有する建築設備配管経路の自動設計例

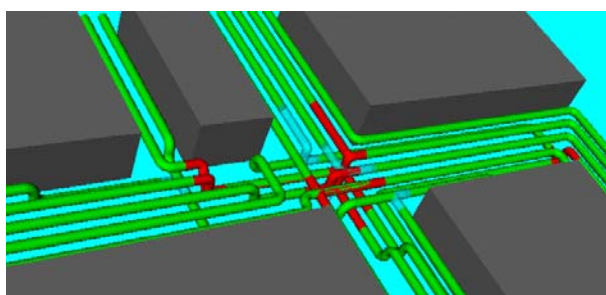


図10 始点終点が順に並ぶ5系統の分岐配管結果

図10は5系統の分岐配管問題であり、始点と終点の位置がきれいに並んでいるため、人が設計すれば単に整然と並べるだけで済む簡単な問題なのだが、本自動配管システムでは1本ずつパイプを配置することが「整然と並べる」ことを難しくしている。自動配管システムにより、図10のように干渉の無い経路を獲得してはいるが、解の質は悪い。

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。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求められるが、本システムは研究用のため市販のCADのデータフォーマットには対応しておらず、企業との共同研究においてネックになっている。この解決策として、日本船舶海洋工学会において仕様策定が進められている「海事産業における製品情報の高度利用のための情報共有基盤 SPEEDS」の利用を検討中である。

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@nams.kyushju-u.ac.jp