

エルボおよびベンドを考慮した配管設計アルゴリズム

An Automatic Piping Algorithm Including Elbows and Bends

安藤 悠人¹ 木村 元¹

Yuto Ando¹, Hajime Kimura¹

¹九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

¹Naval Architecture and Marine Systems Engineering

Abstract: Nowadays, the pipe arrangement has been enabled to be more efficient and economical by development and spread of CAD(Computer-Aided Design). However, it is difficult to design a piping layout automatically because there are many regulations and functional design rules which must be satisfied. We propose an automatic routing method for simple pipes including elbows and bends. In a practical design of a piping layout, there are many bends connecting straight eccentric pipes which have gaps within the pipes' diameter. However, no precedence automatic piping algorithm has been taken into account pipelines with such bends. The proposed method finds piping routes making use of not only elbows but the bends in order to minimize costs of the path connecting start point to goal point, while avoiding obstacles such as structures, equipments and the other circuits. In our approach, we regard the piping route design problem as a routing problem in a directed and weighted graph. Note that the nodes in the proposed graph have state variables not only locations but directions of the pipes. This graph can easily express the bends as simple edges, and then the routing algorithm can easily handle the bends. In addition, the presented method has specifications that the sizes of each cell, which is generated by decomposing of a free space, are not restricted within the diameter of the pipe. The routing algorithm uses Dijkstra's method to provide candidate paths. The efficiency of the proposed method is demonstrated through several experiments

1 緒言

近年造船業界では、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。しかし配管設計作業は未だ熟練技術者の経験に頼る部分が多く、設計作業の自動化には至っていない。本研究では、熟練技術者の設計理念を含んだ配管自動システムの構築を目的として、配管経路中にエルボや空間を斜めに通るベンドを使用した配管設計問題をグラフ上の経路探索問題へ帰着することにより最適な経路を見つけ出す新しい手法の提案を行う。

配管設計問題における先行研究でのアプローチとして、空間を離散化せずにパイプの経路を探索する手法と、空間を離散化して探索する手法が存在する。ここで、空間を離散化する手法とは、設計対象となる空間をパイプ直径以上の幅を有するメッシュで分

割するアプローチを意味する。まず、空間を離散化しないアプローチを適用している研究例としては、蔭・山口ら¹⁾、池平ら²⁾の研究が挙げられる。これらのアプローチでは経路探索の際の計算量を抑えることができるが、複雑な経路に対応できないといった問題が生じる。一方で、空間の離散化を行うアプローチを適用している研究として、Asmaraら³⁾、Pauloら⁴⁾、Parkら⁵⁾、伊藤ら⁶⁾の研究が挙げられる。これらのアプローチは、各メッシュに異なるコストを設定することにより、作業員用の経路を避けつつ壁際にパイプを配置することが可能になるなどの優れた特徴を有している。しかし、先行研究での手法では、空間を分割するメッシュの幅がパイプの径に依存するという問題が生じている。これにより、実際の配管設計問題では始点・終点や障害物などがパイプの径に依存した位置に存在するとは限らないなどの理由から、経路の自動生成が不可能となる場合が考えられる。そこで本研究では、メッシュの幅がパイプの径に依存しない、より実用的な手法を提案する。

さらに本研究の独自のアプローチとして、経路中に空間を局所的に斜めに通る経路を探索の考慮に入

*九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門
システム計画学研究室
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
E-mail: y-andou@system.nams.kyushu-u.ac.jp

れる。このような経路はベンドと呼ばれており、パイプ曲げ加工機を使用して直管を任意の角度で曲げることで工作可能である。ベンドの可能性を経路探索の中に組み込むことで、メッシュの幅がパイプの径よりも細かい場合における探索上の制約やコストの観点から、探索された経路を現実的なものにするのが可能となる。しかし、既存の先行研究ではベンドを適用した手法は無かった。そこで本研究では、パイプの経路中にベンドを局所的に考慮することで、より実問題に即した配管経路の自動生成を試みる。本研究では、いくつかのシミュレーションを通じて本手法の有用性を検証する。

2 配管経路設計問題のモデル化

配管設計を行う際に、以下の条件を仮定する：

【対象とするパイプ】本問題設定では、分岐を持たず、かつ始点から終点まで直径が変化しない1本のパイプを対象とする。複数パイプを設計対象とする場合は配置を終えた他のパイプを障害物とみなして1本のパイプの経路設計を繰り返すので、本条件は実用上差し支えない。

【パイプの配置可能な方向】パイプは、局所的に使用されるベンド部分を除いて、直方体の設計対象の各辺に平行な方向へ配置されるものとする。また、進行方向を変える際はJIS規格に対応した90度のエルボを使用するものとする。配管設計においては、保守管理や工作の容易さ、およびパイプ支持や機器配置の都合上、上記の設定が基本となっている。

【パイプの始点・終点・直径】対象とするパイプの始点の位置座標とそこからパイプが伸びている方向ベクトル、および終点の位置座標とそこからパイプが伸びている方向ベクトルが与えられているものとする。またパイプの直径も予め与えられている。

【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機器などの位置情報が与えられているものとする。設計対象のパイプは、これらとの干渉を許されない。

【通路空間】乗組員用通路として使用すると予想される設計対象空間内での領域が予め与えられているものとする。この領域内へパイプを通すことは、極度な迂回経路となる場合を除いて、極力回避しなければならない。

【パイプラック空間】予めパイプを通すことを前提として用意された空間や、パイプラックが設置しやすい天井付近や壁付近の空間が定義されているものとする。このような空間を本研究では「パイプラック空間」と呼ぶ。設計対象のパイプは、このパイプラック空間を通ることが望ましい。

以上の条件のもとで、以下のパラメータを探索する：

【パイプの経路】設計対象である直径が変化せず、分岐の無い1本のパイプの始点と終点を結ぶ経路は、途中のエルボとベンドの座標リストで表される。

パイプ経路の設計目標は、以下のとおりである：

- 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) 通路空間中を通ることを極力回避すること
- 4) 遠回りにならない限りパイプラック空間を通ること

これらの配管設計問題を単目的最適化問題へ定式化するため、パイプの長さに比例したコスト、エルボおよびベンドのコスト、通路空間やパイプラックを通る場合のコストをそれぞれ与えておくものとする。パイプ経路探索アルゴリズムは、上記コストの合計が最小になる最適な経路を探索する。

3 配管経路探索アルゴリズム

3.1 対象空間のグラフ表現

本研究では経路探索アルゴリズムとして、先行研究で提案しているダイクストラ法を適用したアルゴリズムを使用する⁷⁾。このアルゴリズムでは配管経路探索問題を重み付きグラフ（ネットワーク）上の経路探索問題に帰着させることで最小コストの経路を探索している。また、このアルゴリズムは、設計対象空間を格子状に分割する際に、重み付きグラフのノード（節点）を特徴付ける状態量として、格子分割した各格子の位置座標に加え、その格子を通るパイプの方向を考慮することにより、格子間隔がパイプの直径に依存しないといった優れた特徴を有しており、本研究では先行研究での配管経路探索アルゴリズムをエルボだけでなくベンドも考慮する仕様に拡張している。

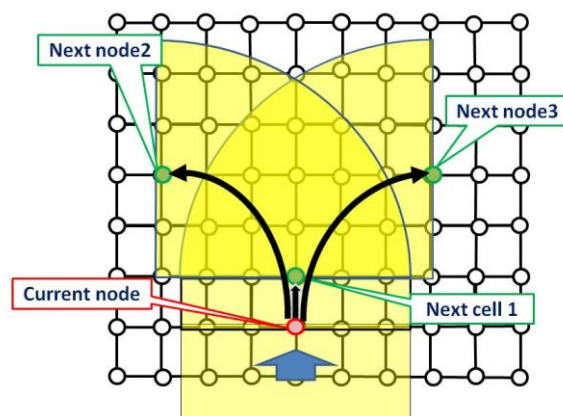


Fig.1 A grid partitioning network model in case of straight and elbows

Fig. 1 は経路中において、直進およびエルボを配置して左右に方向を変える場合のノード間の遷移先例を示している。Fig. 1 の Current node で示されているノードは、探索中のパイプが下方から現在そのノードまで伸びていることを示している。パイプは Current node で示されたノードの下方にある長方形であり、空間を分割したメッシュの幅よりも大きな直径を有している。本手法では Current node におけるノードの位置座標およびパイプの方向をダイクストラ法で扱う 1 つの状態量とする。Current node から直進する場合に移動可能なノードは、パイプの進行方向に沿って、1 つ先に位置している Next node1 である。この場合は、パイプをメッシュの寸法分だけ伸ばすことに相当するので、その距離に比例したコストが加算される。さらに Current node から直進した場合に障害物との干渉判定が行われ、干渉しないと確認された場合、新たな遷移先候補となる。

次に、エルボを経由して左右に曲がる場合での遷移先ノードは Next node2 および Next node3 で示されている。これらのノードは、直管およびエルボを配置することで遷移可能な最も近い位置に存在し、これらのノードを探索する際にも直進時と同様の干渉判定が行われる。さらに、コストとして Current node から Next node までのマンハッタン距離にエルボに応じた値を付与する。本手法では、遷移先までの距離をその都度計算していくので、空間を分割しているメッシュ幅が等間隔でなくとも処理が可能である。

3.2 ベンドのグラフ表現方法の提案

本手法では、先行研究では考慮されていなかったベンドを経由した場合の遷移先例も探索している。まず、ベンドをグラフ表現するにあたり、Fig. 2 で示しているようにベンドを上下に位置する曲管部分と、その中間に位置する直管部分の 3 つの部分に分割して考える。

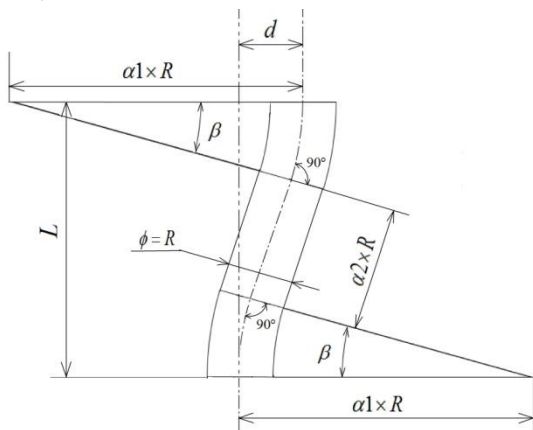


Fig. 2 A bend part composed of three primitives

ここでベンドの工作上的な制約から決まる曲げ半径係数 α_1, α_2 及び設計上の要求から決まる d を与えることで、ベンドの曲がり角度 β を以下の式で求める。

$$\beta = \arcsin \left\{ \frac{d - 2 \times \alpha_1 \times R}{\sqrt{(2 \times \alpha_1)^2 + (\alpha_2)^2}} \right\} + \arcsin \left\{ \frac{2 \times \alpha_1}{\sqrt{(2 \times \alpha_1)^2 + (\alpha_2)^2}} \right\} \quad (1)$$

さらに、式(1)により与えられた β を用いて、ベンドの設置に必要な最小の距離である L を以下の式より求める。

$$L = (2 \times \alpha_1 \times R \times \sin \beta) + (\alpha_2 \times R \times \cos \beta) \quad (2)$$

ただし、本研究では $\alpha_1 = 5, \alpha_2 = 0, d < R$ と設定した。本手法は、式(2)により求めた L 以上の距離に存在し、かつ最も近い場所に位置するノードに対してベンドの適用も考慮しながら経路の探索を行う。

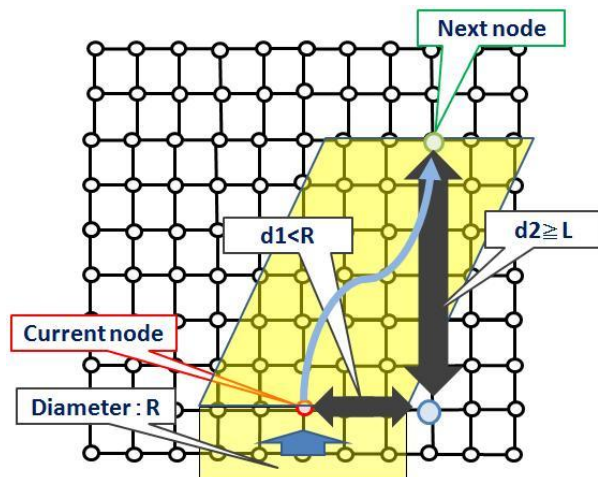


Fig. 3 A grid partitioning network model in case of bends

Fig. 3 は 2 次元空間におけるベンドを経由した場合におけるノードの状態遷移例である。Fig. 3 において Current node で示されたノードは、探索中のパイプ経路が下方から上方へ伸び、現在そのノードまで伸びていることを示しており、パイプは空間を分割したメッシュの幅より大きな径を有している。この Current node から右にずれるベンドを経由することで到達可能となるノードが図中の Next node である。Next node を探索する際には、ベンドを配置するための空間中に障害物があるかどうかの干渉判定を行い、物理的に配置可能な場合のみ、これらのノードを新しいリンク（エッジ）で結びネットワークを構成していく。ここでもし障害物と干渉することが判明した場合、リンク作成されない。この新しいリンクには、エルボを配置する場合と同様に、ノード間を接続したパイプの長さおよびベンドに応じたコストを寄与する。

4 計算機シミュレーション実験

4.1 実験設定

本手法の動作を確認するため、x 座標 0~16m, y 座標 0~3m, z 座標 0~3m の空間内に障害物として 10 個の障害物を配置した。パイプの始点は座標(0.5, 1.75, 1.5)であり x 軸正方向へ伸びる。パイプの終点は座標(15.75, 1.5, 1.5)であり x 軸正方向からパイプが伸びてきて終点の座標にて止まる。この設計対象空間を 0.25m 間隔で格子分割し、始点・終点および障害物の位置を変化させずに、直径のみを変化させた場合にどのような経路が獲得されるのかについて確認する。パイプの直径は 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9m の計 8 種類について扱う。また、単位長(1m)をコスト 1 とし、エルボのコストとしてはパイプ長に相当するコストに加え、エルボ 1 つあたりにコスト 0.1 を加算した。またベンドのコストに関してもパイプ長に相当するコストに加え、ベンド 1 つあたりにコスト 0.3 を加算した。なお、詳しい障害物の配置については Appendix に記載する。

4.2 実験結果

計算環境は、OS に Windows7 を使用し、CPU は Intel Core2 Duo 2.5Ghz, メモリーは 2.00GB, プログラム言語は Java version 1.6 を用いた。本手法で獲得された経路を Fig. 4 ~ Fig. 11 に示す。また、経路中のエルボの数、ベンドの数、始点から終点までのコスト合計、経路探索に要した時間についてパイプの直径ごとに Table1 にまとめた。経路中にベンドの出現が確認されたのは、直径がそれぞれ 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.9m の場合である。またパイプ直径が格子間隔以下である 0.2m の場合は、その他の場合と比較して数倍の探索時間が必要であることが確認された。

Table 1 Features of obtained solutions with 0.25(m) meshes of x direction

Diameter [m]	Num. of Elbows	Num. of Bends	Total Costs	Time [s]
0.2	9	0	17.9	1285
0.3	7	1	19.0	447
0.4	7	1	19.5	387
0.5	8	1	19.6	373
0.6	7	1	21.5	80
0.7	9	0	22.4	68
0.8	9	0	22.4	63
0.9	14	1	26.7	45

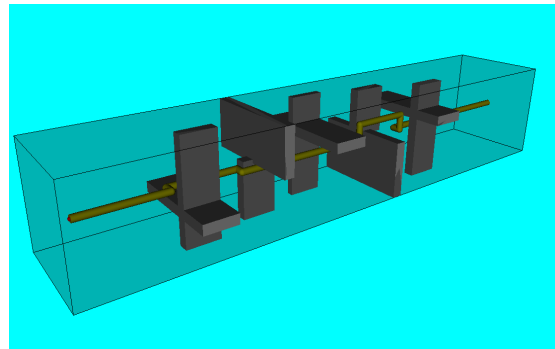


Fig. 4 An obtained route with 0.2(m) diameter of the pipe

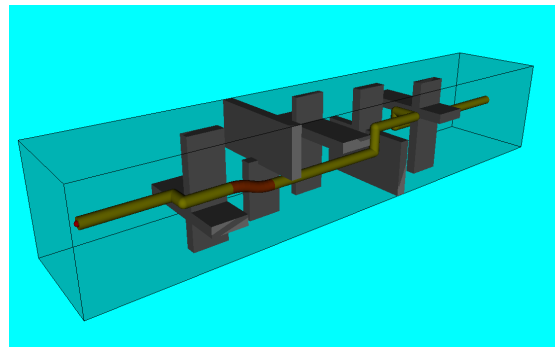


Fig. 5 An obtained route with 0.3(m) diameter of the pipe

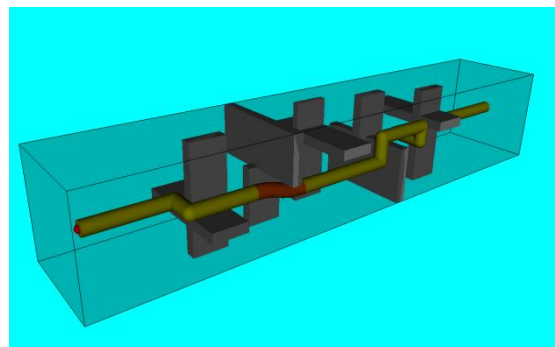


Fig. 6 An obtained route with 0.4(m) diameter of the pipe

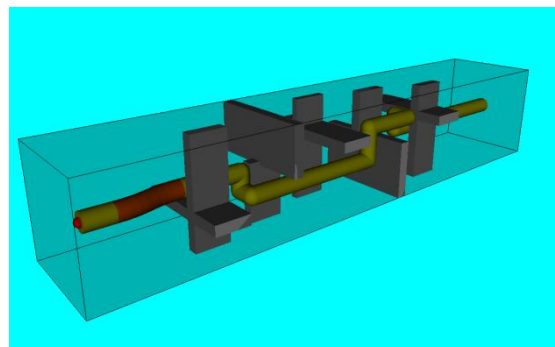


Fig. 7 An obtained route with 0.5(m) diameter of the pipe

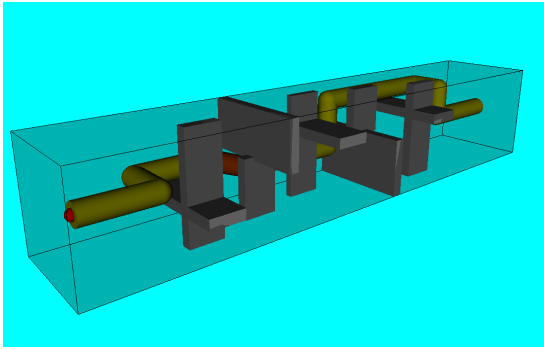


Fig. 8 An obtained route with 0.6(m) diameter of the pipe

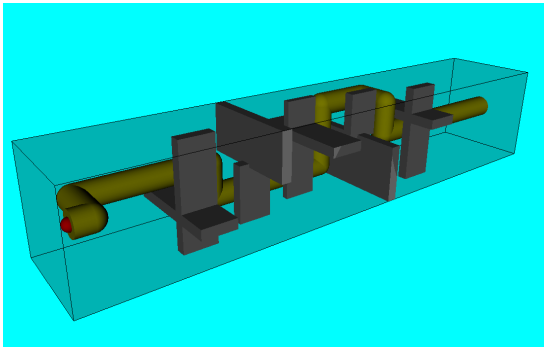


Fig. 9 An obtained route with 0.7(m) diameter of the pipe

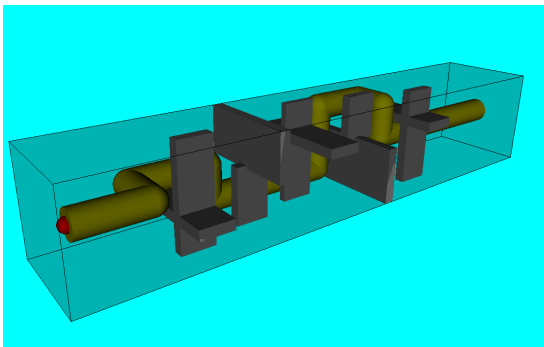


Fig. 10 An obtained route with 0.8(m) diameter of the pipe

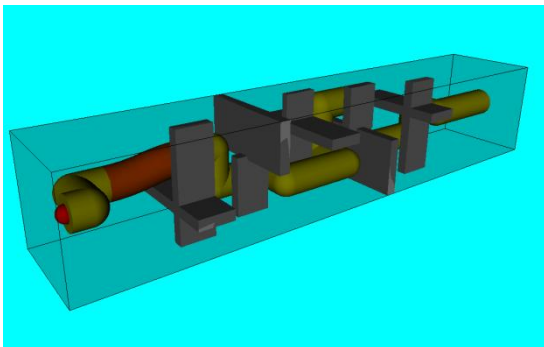


Fig. 11 An obtained route with 0.9(m) diameter of the pipe

5 考察

5.1 実験結果について

Fig. 5 ~ Fig. 8 および Fig. 11 の配管経路中において、オレンジ色で示されている部分がベンドであり、従来手法では得られなかった解である. Fig. 4 で示されているケースでは、パイプの径が空間を分割しているメッシュ幅よりも小さく、経路のコストも全経路の中で最小であることが確認される. これに対して、パイプの径が大きくなるにつれて、コストが大きくなっていることから、この実験により本来はU字型もしくは、大きく迂回していた経路に対して、ベンドを適用することで各パイプ直径に応じた制約条件を満たす最適な経路を獲得することが確認された.

またパイプの直径が小さくなるにつれて経路探索時間が増加していることが Table 1 より確認できる. 特にパイプの直径が格子幅より小さい 0.2(m) の場合において、その他の探索時間と比べ数倍の時間を要していることが確認された. これはパイプの直径が小さくなることで、設計対象空間内での経路探索を行う領域が増加したためであると考えられる. よってパイプの直径が小さい場合の処理時間短縮を目的とした配管経路探索アルゴリズムの改良を計画している. 本手法において経路探索アルゴリズムとして活用しているダイクストラ法は、グラフ問題の探索において隣接した全てのノードについて探索を行う横型探索に分類されるが、この横型探索を適用した場合、解の生成に多くのメモリと時間を要する. よって、今後の方針として、ダイクストラ法をさらに改良した A* アルゴリズムの適用を検討している.

5.2 メッシュ間隔における問題について

本実験とは計算環境、設計空間のサイズ、障害物および始点・終点の位置は変えずに、x 軸方向における格子分割幅を 0.5m とした場合の実験結果を Table 2 に示す.

この実験で獲得された経路は、格子幅 0.25m の場合と比べ、全く同様の経路であった. しかし、探索に要した時間が、特にパイプの径がメッシュ幅よりも小さい場合に大幅に短縮されたことが Table 1 と Table 2 を比較することから確認される. この結果より、設計空間における各方向について適切なメッシュ間隔を設定することで、経路探索に要する時間を短縮することが可能であると考えられる. よって、様々な設計対象空間に対して、どの程度のメッシュ間隔を設定すれば妥当であるかに関して、今後さらなる研究が必要である.

Table 2 Features of obtained solutions in 0.5(m) meshes of x axis

Diameter [m]	Num. of Elbows	Num. of Bends	Total Costs	Time [s]
0.2	9	0	17.9	213
0.3	7	1	19.0	146
0.4	7	1	19.5	126
0.5	8	1	19.6	126
0.6	7	1	21.5	24
0.7	9	0	22.4	23
0.8	9	0	22.4	22
0.9	14	1	26.7	12

5.3 経路探索における問題について

本実験とは異なった実験条件下で、Fig. 12のようなパイプが自身と干渉した解が得られるケースが確認された。このような経路は実現不可能であるので、パイプが自身と干渉している解が得られた場合、その解を自動的に除去するようなアルゴリズムの改良が必要である。

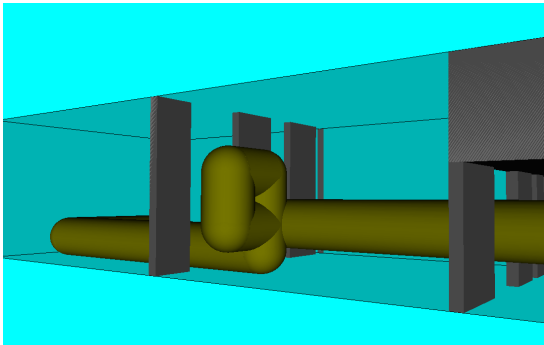


Fig. 12 An obtained self interfered route

6 結言

本研究では、配管設計作業の自動化に向けて、障害物が多数存在する複雑な空間内で分岐のない1本のパイプの最適な経路を見出すため、ベンドを経路中に考慮する手法を提案した。また、本研究で使用している経路探索アルゴリズムは、空間を格子分割する際のメッシュの幅がパイプの径に依存しないアプローチを採用することで、より実問題に対応した経路案を獲得できる仕様となっている。さらに、経路探索の際にダイクストラ法を適用しているので、獲得される経路案は最小コストが保証されている。これらの手法をjavaプログラムに実装し、設計対象、始点・終点、障害物の配置は変化させずに、パイプ

の径のみを変化させた場合における例題へ適用することで、それらの獲得された経路がパイプの各直径に応じた最適解となっていることを検証した。

謝辞

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

参考文献

- [1] 蔦 敏和, 山口 太郎: 機器配置・配管の自動化と3次元表示, 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, vol.27, pp.327-330 (2004年12月)
- [2] 池平 怜史: 船舶分野における配管設計の自動化手法に関する研究, 九州大学, 博士論文 (2010年)
- [3] Asmara, A. and U. Nienhuis: Automatic piping system in ship, proceedings of the 5th International Conference. on Computer and IT Application (COMPIT), (Mar. 2006)
- [4] T. M. Paulo, and V. J. A S Lobo: A Tool for Automatic Routing of Auxiliary Circuits in Ships, Proceedings of 14th Portuguese Conference on Artificial Intelligence (EPIA 2009), Aveiro (Oct. 2009)
- [5] J. H. Park, and R. L. Storch: Pipe-routing Algorithm Development: Case Study of A Ship Engine Room Design, Journal of Expert Systems with Applications, Vol.23, No.1, pp.299-309 (2002)
- [6] 伊藤 照明, 福田 収一: 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年)
- [7] 木村 元: ダイクストラ法を用いた配管設計アルゴリズム, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.11, pp.121-124, 2010年11月.

Appendix

4章の実験における障害物の座標リスト

	x_min [m]	x_max [m]	y_min [m]	y_max [m]	z_min [m]	z_max [m]
Area	0	16	0	3	0	3
Obstacle1	3	4	0	3	0.8	1.1
Obstacle2	3	4	1.8	2.1	0	3
Obstacle3	7	8	0	3	1.9	2.2
Obstacle4	7	8	0.9	1.1	0	3
Obstacle5	11	12	0	3	1.9	2.2
Obstacle6	11	12	1.9	2.2	0	3
Obstacle7	5	6	1.3	1.6	0	1.7
Obstacle8	5.3	5.6	0	3	1.6	3
Obstacle9	9	10	1.3	1.6	1.6	3
Obstacle10	9.3	9.6	0	3	0	1.7