

9 設計品質の向上に向けた 配管設計の不具合自動検出手法の開発

谷口 智之*, 吉富 祐介**

Detecting Similar Piping Design Failures in Shipbuilding to Improve Design Quality.

by

TANIGUCHI Tomoyuki and YOSHITOMI Yusuke

Abstract

The automation of the shipbuilding design process has become increasingly important as design lead time needs to be shortened. Specifically, the design of outfitting components such as piping has a pressing issue. Design check of CAD, such as collision checking, have been enhanced. In addition, research has been conducted on automating processes such as pipe design. To facilitate feedback on past failures for current designs, we developed a method of expressing and converting a piping design from CAD data to a graph data structure. The method uses sub-graph isomorphism to calculate the degree of similarity following certain rules for evaluating design quality, and similar failures are then presented in a ranking format during the design stage. We verified the method using actual ship CAD data and determined that the faults could be detected with an accuracy close to that of human detection. However, only some defects were covered in this study, so the versatility of the developed method will be a subject for future study.

* 産業システム系 情報システム研究グループ, ** ジャパン マリンユナイテッド株式会社

原稿受付 令和 3 年 5 月 17 日

審査日 令和 3 年 6 月 4 日

1. はじめに

近年、人工知能(AI)およびICT技術の加速度的な進展は、広範囲な産業領域や社会インフラなどに大きな影響を与えており、ものづくり産業においても自動化、最適化、さらには自律化等による生産革命の可能性が高まりつつある。海運・造船・舶用などの海事産業分野においても、IoT、ビッグデータ、AI等の情報技術等を活用した生産性向上に資する革新的技術やシステムの開発・実用化を支援・実証することにより、同産業におけるコスト競争力の強化、品質の向上、サービスの革新を図る「海事生産性革命(i-Shipping)」が国土交通省により強力に推進されている。また、造船における設計のリードタイムは短縮傾向にあり、設計業務における自動化の重要性が高まっている。特に多品種少量生産となる分野では新規設計も多い。さらに艤装品である配管設計などは船殻設計に比べて後回しになることが多く、喫緊の課題である。

上記のような状況の中、配管の設計支援を目的とした研究開発が実施されてきた。自動干渉チェックなどの一部の自動化機能はCADの機能として充実してきており、既存研究としても、例えば安藤ら¹⁾はダイクトラ法ベースの配管経路探索アルゴリズムを提案している。ほかにもRantalaら²⁾は設計初期段階におけるリユースを目的に配管系の類似度算出法を提案している。このように自動化に関する研究が実施されている中、本報では、設計CADデータの自動検図を対象として、過去に経験した類似配管設計不具合を検出する手法について検討する。Rantalaら²⁾のアプローチでも用いられた分子構造や交通ネットワークなどの表現に使われるグラフ理論に着目し、配管系から類似不具合を検索する問題を部分グラフ同型判定問題として取り扱うことで不具合を検出する手法の開発を実施する。実船の1隻分の設計データを対象として、不具合を人為的に作成し、検出性能について検討した。

2. 配管系とグラフ表現

グラフ理論のグラフ³⁾とは、ノードと呼ばれる節点とその節点間の辺を定義するエッジで構成される。通常、これらのグラフを絵で表現する際は、各ノードを点や丸、エッジを線で描かれる。また、このエッジに向きが付与された場合のグラフを有向グラフと呼び、エッジは矢印として描かれる。この有向グラフを用いて配管系を表現する。本節ではこの有向グラフへの表現方法とグラフ構造へ変換する手法、およびその変換過程において配管のつながりをチェックする機能について説明する。

2.1 配管系の有向グラフ表現

Rantalaら²⁾や山田ら⁴⁾を参考に、本報では配管系をノードとエッジの有向グラフとして表現する。表現にあたり次のような定義を導入した。

- ・管一品を中心線で代表されるライン形式で表現し、両端の位置座標をそれぞれノードの属性値として定義する。
また、名称と両端の種別を定義する。

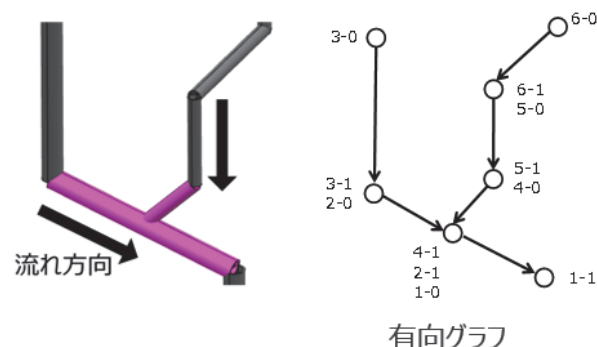


図-1 配管系の有向グラフ表現

- ・管一品のラインをエッジとして定義し、長さや局所的な円筒座標系を属性値として定義する。
- ・配管以外のフランジや機器といった形状パーツは、中心位置を属性値としたノードとする。また、パーツの名称を定義する。
- ・形状パーツに接続される他の配管や形状パーツに対して、そのノード間にエッジを定義する。
- ・全エッジに設計上想定される流れの向きを定義する。

上記により、配管をグラフ表現した例が図-1である。図-1右図は有効グラフ表現された配管系であり、図中の番号は配管番号—両端の識別番号(0または1)を示している。このように合流などを表現することが可能となる。今回は流れと形状のみで判断可能な不具合を対象としたため、流れと座標値を属性値として定義しているが、配管の径や材質といった要素も同様に定義可能である。

2.2 非グラフ構造データのグラフ構造化手法および配管の繋がリチェック

設計CADの非グラフ構造データから、管一品毎のライン形式で表現された配管データ(ラインデータと呼ぶ)と、エルボや機器など配管によって接続されるパーツが中心座標位置および形状パーツを含む最小の直方体の座標値のデータ(接続パーツデータと呼ぶ)として表現されたデータとして得られているとする。また、系統データとして、配管の流れのスタートとゴールの名称および各スタートから流れとしてたどり着くゴールのリストが得られるものと想定する。これらのデータを元に、下記Step1~Step4の手続きにより、グラフ構造化を実行する。その概略図を図-2に示す。

Step1: ラインデータの両端の点と接続パーツデータの中心座標の点をそれぞれグラフのノードとして定義する。また、ラインデータから、配管ラインの両端を表すノード間をつなぐエッジを定義する。

Step2: Step1で得られた全ノードの点群に対して、指定する半径R範囲内に存在するノードを1つのノードとみなし、それらのノードを1つのノードに縮約する。ただし、この半径Rの設定法は試行錯誤的に決める必要がある。

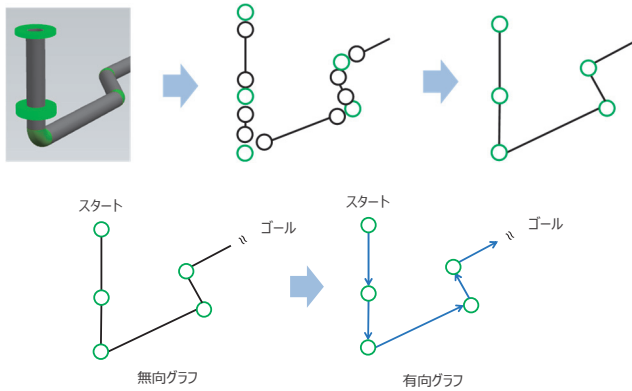


図-2 グラフ構造化の手順

Step3: 接続パーツデータで定義された直方体の内部に他の点が存在する場合は、接続パーツデータの形状パーツを表すノードと内部に存在するノードを1つのノードに縮約する。

Step4: Step1～Step3 で構築した無向グラフに対して、システムデータのスタート点とゴール点に相当するノードを検索し、その2点間のノードをつなぐ最短経路を、ダイクストラ法⁹⁾を用いて検索する。結果の経路の順に流れの向きを付与し、有向グラフを構築する。また、双方向の流れも許可する。

上記 Step1～Step4 に基づき、設計 CAD からグラフ構造化された有向グラフデータを作成し、それに基づく不具合検出を行う。ただし、流れの付与については、あくまでグラフ構造として連結する範囲での最短経路を検出するため、特定の状況においては本来あり得ない経路でスタート点とゴール点をつなげる流れを付与する可能性がある。そのため、本機能のみで配管の繋がりをすべてが検出されるわけではない点に注意したい。実用上は大半の配管の繋がりをチェックを実施することが可能である。

2.3 配管の繋がりをチェック機能

2.2 節の手続きによって配管系に計画上の流れの向きが付与されることになるが、一方で、配管の端部がずれていたり、必要な接続パーツが欠損していたりする場合は、その欠損区間を含む始点と終点のペア間をつなぐ経路が存在しないことになる。そのため、2.2 節の手続きにおける Step4 において、経路でつながることができない始点と終点のペアが見つかり、そのどこかでつながりとしての欠損が存在することとなる。この特徴は配管の繋がりをチェック機能として作用する。

3. システム概要

3.1 システム構成

本研究で検討した自動検出システムの構成図を図-3 に示す。まず、市販の CAD ソフトから 2.1 節で定義したデータを習得し、配管系の始点と終点といった繋がりの情報を持つシステムデータをインプットとして構築する。これらインプットデ

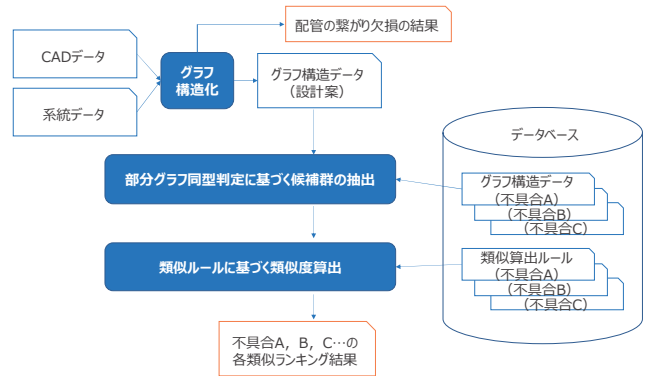


図-3 システム構成図

ータを元に 2.2 節で述べたグラフ構造化手法を用いてグラフ構造化されたデータ G_i に変換する。この時に 2.3 節で述べたように配管の繋がりの不具合が検出される。

以降の詳細は 3.2 節にて説明するが、まず、不具合とわかっているデータに対してもグラフ構造 g_j に変換し、過去の不具合データベース $\{g_1, g_2, g_3, \dots\}$ として格納しておく。この不具合データベースには、類似度を算出する計算ルールを不具合毎に構築しておく。次に、得られた設計データのグラフ構造データに対して、不具合のグラフ構造データを部分グラフと見なして、部分グラフ同型判定に基づき、同型のグラフの候補群を抽出する。その候補群に対して、類似計算ルールに基づく類似度を算出し、得られた類似度が高い順にランキング形式で結果を提示する。設計者はこの結果から類似度の高い不具合を参照することにより、効率的な設計品質の向上が期待される。

3.2 類似検索法

入力の有向グラフ G_i に対して、過去の不具合グラフ g_j を類似検索する計算手続きは、以下のステップに分けられる。

Step1: 部分グラフ同型による候補群の生成

グラフのノードおよびエッジの集合として、入力の有向グラフを $G_i = (V_i, E_i)$ 、不具合グラフを $g_j = (gV_j, gE_j)$ と表した場合、 g_j の任意の2つの頂点 u, v に対して、 $\{u, v\} \in gE_j \Rightarrow \{f(u), f(v)\} \in E_i$ が成り立つ写像 f が存在するとき、 g_j は G_i の部分グラフ同型であるという。この部分グラフの同型性を判定する問題を、Ullman ら⁹⁾の手法を用いて解き、不具合グラフ g_j に対応する候補群 $\{G_{i,0}, G_{i,1}, G_{i,2}, \dots\} \in G_i$ を作成する。Ullman ら⁹⁾の手法は、 g_j の頂点集合 gV_j と G_i の頂点集合 V_i 同士の対応の全組合せに対して、隣接関係の同一性を満たすか否かを木探索で調べる手法である。その際に隣接行列や次数を用いて枝切りを行い、探索を効率化させている。詳細は参考文献 6)を参照されたい。

Step2: ルールベースの類似度計算

Step1 で得られた任意の候補 $G_{ik} = (V_{ik}, E_{ik})$ と不具合グラフ $g_j = (gV_j, gE_j)$ の間には、 gV_j から V_{ik} への写像 f が

存在する。また、 gV_i, gE_j には2.1節で定義した属性値が存在するため、不具合の種類に応じて、写像 f および属性値を用いてルールベースの類似度算出を行う。これをすべての候補群に対して実施する。ここに、ルールベースの類似度算出は不具合毎に事前に構築しておく。

Step3：ランキング形式の表示

Step2 で不具合グラフ g_j に対する候補群 $\{G_{i,0}, G_{i,1}, G_{i,2}, \dots\} \in G_i$ に対する類似度が得られる。指定された閾値以上の類似度の候補を類似度の高い順に並び替え、ランキング形式で提示する。

4. 計算結果

4.1 計算条件

本報では、過去に熟練者によって修正された不具合を再現したデータを作成し、提案手法を適用した。1隻の船の排水管システムを対象とし、管一品の本数は数万本に及ぶ。詳細は4.2節で後述するが、逆向きに合流する配管と機能的水平配管への接続時の不具合を再現し、不具合データベースとして格納した。また入力である1隻の船の排水管システムには、上記2種類の不具合と、配管が途中で途切れるような配管の繋がりミスを人為的に作成した。

4.2 不具合対象と類似算出ルール

本報で対象とした不具合は以下の2種類である。

- ・逆向きに合流する配管
- ・機能的水平配管への誤った接続

まず、逆向きに合流する配管については、図-4のように合流する際の流れの角度が90°より大きい箇所であり、流れの不全が懸念される不具合である。以下では、流れの角度とは、上流側と下流側の流れ方向のベクトル間のなす角度として定義する。構築する類似度算出のルールベースは、設計上の許容範囲を考慮して90°より閾値を若干大きくし、100°以上の場合は類似度1.0、それ以外は0.0となるシンプルなものとした。

次に、機能的水平配管への接続については、図-5のように上流から水平な管へ分岐し、左右の鉛直な配管に接続される流れを考える。船体のローリングやピッチングなどにより、水平配管内の排水は左右に移動し、左右どちらかの排水経路を通ることがわかる。このような2つ以上の排水経路がある水平配管を機能的水平配管と呼ぶこととする。図-5は、この機能的な水平配管に対して上流側の分岐前の配管がY字に接続され、船体動揺時に逆向きの流れが発生しやすく、排水不良の恐れのある。正しくは垂直に接続されるべき不具合例である。構築する類似度算出のルールベースは、まず、水平配管を有することが前提であるため、分岐後の水平部に相当する配管の始点と終点間の高さは0.1m以下であることを条件とした。次に、その条件を満たした上で、分岐前の流れと分岐後の流れのどちらか一方の流れの角度が100°以上

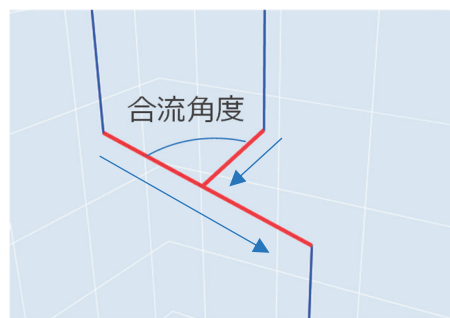


図-4 不具合例1：逆向きに合流する配管

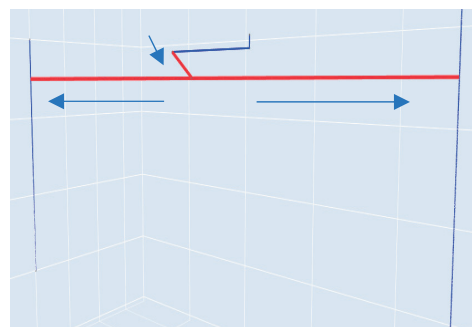


図-5 不具合例2：機能的水平配管への誤った接続

であれば類似度1.0、それ以外は0.0となるシンプルなものとした。

4.3 検出結果

図-6に提案手法の配管の繋がりチェック機能によって検出された結果の例を示す。図中の青色で示される直方体は形状パーツのバウンディングボックス、緑の実線と紫の実線はそれぞれ流れの上流側と下流側における配管の中心線を表す。図-6の上図の赤色で囲った箇所ですすように、一見つながっているように見えるが、配管の接続部が存在しないため検出された箇所がある。該当箇所は、接続先の配管が接続部で二分され、正しくは3つの配管で構成されるべき不具合箇所である。図-6の下図は、赤色で囲った箇所が示すように、明らかに配管がずれている不具合である。これは緑色の配管と紫色の配管で区画が異なっており、このようなずれのミスが起こりやすいと考えられる。上記のように、配管の繋がりミスについて人為的に作成した箇所を適切に検出できていることが確認された。

図-7は逆向きに合流する配管を検索対象として、本手法を適用した結果である。青色の実線は配管の中心線、そのうち赤色の実線は提案手法によって検出された箇所、緑色の矢印は流れの向きを示している。図-7の上図は、右側からの流れが合流する部分が検出されている。立体的に見る必要があり、逆向きの合流となっている箇所を正しく検出できている。図-7の下図は上から見た図であるが、流れが上から下方向に流れるのに対して、逆向きに合流しており、こちらも正しい検出であることが確認された。

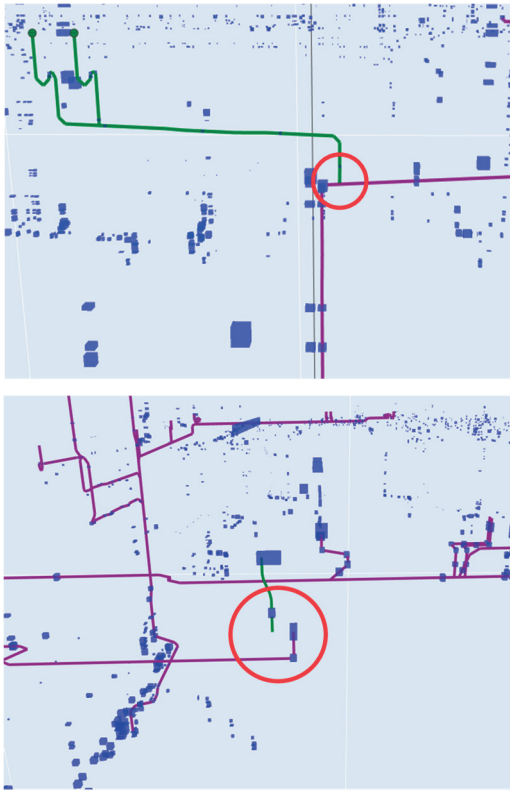


図-6 配管の繋がりチェック結果の例

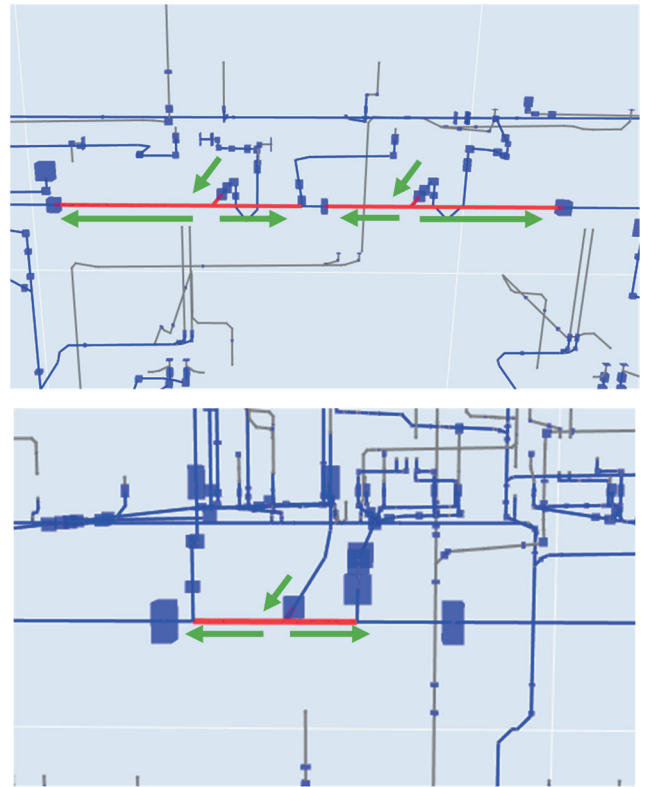


図-8 機能的水平配管への誤った接続の検出結果例



図-7 逆向き合流の検出結果例

次に、図-8 は機能的水平配管への誤った接続を検索対象とした検出結果である。図-8 の上図は機能的水平配管に斜めに接続されている配管系の2箇所を検出できている。図-8 の下図は、青色のボックスと重なって表示されているが、上流側の赤色の配管が水平部に斜めに接続されている箇所であり、同様に検出できている。グラフ構造としての同一性で判断しているため、各配管の長さなどが異なっても、同じ種類の不具合として検出できていることが確認された。

5. まとめ

本報では、過去に経験した配管設計不具合の検出を目的として、部分グラフ同型判定を用いた類似度算出法を提案した。実船のデータに対して検討した結果、繋がりチェックや逆向きの合流、機能的水平配管への接続誤りといった不具合箇所の検出が可能であることを確認した。今後は検出できる対象を拡張し、より実用化に向けた検討が課題である。

謝辞

本研究は国土交通省の海事産業の生産性革命（i-Shipping）における i-Shipping(design)の一環で令和元年から令和2年度までに実施したものである。

References

- 1) Yuto Ando and Hajime Kimura.: An Automatic Piping Algorithm including Elbows and Bends, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers., Vol 15

(2012), pp. 219-226. (in Japanese)

- 2) Miia Rantala, Hannu Niemistö, Tommi Karhela, Seppo Sierla, Valeriy Vyatkin.: Applying graph matching techniques to enhance reuse of plant design information, Computers in Industry, Vol.107 (2019), pp.81-98.
- 3) Reinhard Diestel, Graph Theory (Translation from the English language edition) (2011), Maruzen Publishing.
- 4) Yasuyoshi Yamada and Yoshinobu Teraoka.: Soft Model for Piping Plant Space and its Application to Plant Piping CAD (Basic Model for Plant Space) , Transactions of the Japan society of mechanical engineers. C., Vol.61, No.586 (1995), pp. 2624-2629. (in Japanese)
- 5) E. W. Dijkstra.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Vol.1 (1959), pp.269-271.
- 6) Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, The Design and Analysis of Computer Algorithms (1974), pp84-86, Addison-Wesley Publishing.