

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360388

研究課題名(和文) 配管および機器配置の自動設計システムに関する研究

研究課題名(英文) A study of an automatic design system for arrangement of piping and equipments

研究代表者

木村 元 (Kimura, Hajime)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40302963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,400,000円、(間接経費) 1,620,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、今まで学術的な研究がほとんどなされていなかった配管設計問題に対し、問題の定式化および解決方法の提案を行った。
まず配管設計問題において探索すべき設計パラメータを機器の位置と方法および分岐の無いパイプの経路に分け、問題の表現を単純化していくつかの既存の問題解決法を組み合わせることで適用することにより、配管設計の自動化を可能とした。設計案の評価方法として、それまでベテラン技術者の経験頼みだったバルブ操作性等について幾何学的に計算し定量化する方法を提案し、最適な設計案を自動計算で得ることを可能とした。

研究成果の概要(英文)：This research proposed a formulation of piping and instruments arrangement problems and algorithms for solving it since there scarcely exists academic works in the research field. This result simplifies the arrangement problems, and enables it to be solved automatically by means of applying existing algorithms for the pipe routing problems and arrangement problems of equipments. Instead of human's ambiguous evaluation of valve operability, a new method is proposed which calculates the valve operability costs making use of geometric features of the arrangement design. It enables us to optimize the arrangement design by computer calculation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 船舶海洋工学

キーワード：配管 自動設計 パイプ 艦装 配管自動設計 パイプルーティング 配管設計 機器配置

1. 研究開始当初の背景

【配管設計作業におけるベテラン技術者の勘や経験頼りの現状と技能継承問題】

近年の熟練技術者の大量退職に伴い深刻化しつつある本問題に対処するため、各造船所ではベテラン技術者への聞き取り等によって、作業の明文化・マニュアル化が進められてきた。しかし、十分な技術継承は難しく、コンピュータによる作業自動化はほとんど進んでいない。これにはいくつかの原因が考えられる。その1つとして、設計案に対する評価が数値化されていない点が挙げられる。設計現場では、例えば「バルブの操作性」などのように如何に数値化すべきか分からない評価項目があったり、考慮すべき事項や制約条件が多すぎるために単純な数値化ができないと考えられており、結果として評価はベテラン設計者の経験や勘に頼ったあいまいなものとなる。もう1つの原因は、設計案に対する評価は、実は多目的関数になっており、設計問題は多目的最適化になっているのだが、ベテラン設計者自身がそれに気付いていない点である。

多目的最適化では、「パレート解」と呼ばれる最適解が無数に存在し、ただ1つの最適解が存在するとは限らない。パレート解集合の解をみると、あっちを立てればこっちが立たずというトレードオフが見られ、ある評価項目のみ優れるが他の評価項目が悪い解や、バランスのとれた解などがあり、優劣をつけることができないが、ベテラン設計者は(無意識に)その中の1つを解として選択していると考えられる。よって

- 配管設計問題における様々な評価項目を全てリストアップする
- 明示的であいまいな評価項目について、妥当な数値化方法を与える
- 設計問題を多目的最適化問題として捉え、パレート解集合を成す複数の設計案を提示する

上記のアプローチにより、ベテラン技術者の勘や経験頼りだった設計作業をコンピュータによる自動計算に置き換え、コンピュータにより提示された複数のパレート最適解の設計案から個別の事情に応じて設計者が選択し、必要に応じて修正を加えるといった形で設計支援を行うことにより、大幅に設計作業効率が向上することが期待できる。

オランダの Delft 工科大学では、造船業界がスポンサーとなって自動配管システム「Delft Route」の研究開発が進められており、この種のプロジェクトが皆無の我が国は遅れを取っている。

【設計案の評価ルールや設計案の生成方法等の変更や追加が容易な実用的システム】

本申請者は研究応募時において配管設計における機器配置設計技術ならびにパイプルーティング設計技術については、文献調

査や聞き取り調査をした限りにおいて世界最高水準にあると自負している。しかしながら、それほどの設計技術では無いにしても実用に耐えうる自動パイプルーティングアルゴリズムを開発し、自動配管システムの構築を行ったにもかかわらず実用化へ至っていない事例がいくつか存在している。聞き取り調査の結果、その原因は主に以下の3点であると考えられる：

- (1) 自動配管アルゴリズムそのものが貧弱で役に立たない
- (2) 自動配管システムが出力する解が1つだけであり、その解に満足できない
- (3) 複雑な機器配置や配管のルールは頻繁に変更・追加される可能性があり、そのたびにプログラムのソースコードを書き換えては、システムのメンテナンスが不可能

上記の問題点の1と2については、申請時の研究成果を発展させることにより対処可能である。実用的なシステムを構築するには問題点3を克服しなければならない。配管設計における設計思想や評価基準は、各造船所やエンジニアリング会社によって異なり、それが各社の製品の付加価値を特徴付けている。また、それらの評価基準や、設計における制約条件は、設計ポリシーの変更など内的要因や新しい国際条約による規制など外的要因によって時勢とともに変化していく。よって、自動配管システムは、機器配置や配管のルールを「非明示的な評価」の数値化アルゴリズムとともに、誰でも容易に解読可能で、かつ変更や新しい評価の追加などが容易に行えるよう表現する仕様でなければならない。

また、本研究のシステムは、配管系統図や様々な3次元形状を与えて、バルブやパイプの適切な配置を出力とするものであるから、CADとのデータ交換が容易であることが求められる。

2. 研究の目的

本研究は、現在ベテラン技術者の勘と経験頼みとなっている船舶の配管設計について、配管設計作業の素人化を目的として、コンピュータによる配管自動設計システムの実現を目指している。本研究により、以下の効果が期待される：

- (1) 設計作業をプログラムで明示することにより、配管設計問題に対する理解が深まる。
- (2) 配管設計作業の自動化・省力化によりベテラン設計技術者の技能継承問題を解消する。
- (3) 機器配置・パイプルーティング技術は配管設計だけでなくスケジューリングへ利用できる。

3. 研究の方法

- (1) 国内外の関係研究機関・造船会社およびCADのベンダーへ聞き取りを行い、配管設計自動化システムの有無や、その実用化への障害となっている事項について調査を行う。
- (2) より強力なパイプルーティングアルゴリズムおよび機器配置アルゴリズムの開発を行う。申請者はパイプの径に依存せず障害物の存在する空間をエルボを用いるという制約のもとで2点間を確実に結ぶパイプルーティング法を開発したが、ベンドも考慮に入れるよう拡張する。さらに複数のパイプを干渉することなく適切に配置するための方法について、電子回路の設計において利用されている方法を参考にパイプ設計用にアレンジする。
- (3) 設計案の評価ルールや各種制約などの変更や追加が容易な実用的システムの検討・XMLを用いた表現・CADオペレータへの作業指示ツールの開発

4. 研究成果

【2点間を結ぶ配管経路探索アルゴリズム】

設計対象の空間を等間隔メッシュに分割し、配管経路探索アルゴリズムにダイクストラ法を適用することで最適な経路を探索するアプローチが多数提案されているが、従来方法では設計対象の空間を必ずパイプ径以上の等間隔メッシュで分割し、配管経路を直管とエルボのみで構成するのが一般的であった。そのためパイプの始点や終点を構成する機器や障害物などの位置や寸法に大きな制約が課せられ、さらに設計対象空間に比して比較的径の大きな管などS字状のベンドを多用しなければならない状況には対処不能などの問題があり非実用的だった。

本研究では、設計対象の空間をパイプ直径に依存しない自由な寸法でメッシュ分割する方法を提案した。これは、設計対象空間を格子状に分割して重み付きグラフを生成する際、グラフのノード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ものである。また、管径以下のずれ d が存在する直管同士を接続する場合、図1のようにS字状に曲がったベンド管が使用され、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 よりベンド設置に必要な最小距離 L が求められる。これより、S字状のベンドを使用した場合のグラフ表現を与えることが可能であり、ダイクストラ法による経路探索を可能とした。

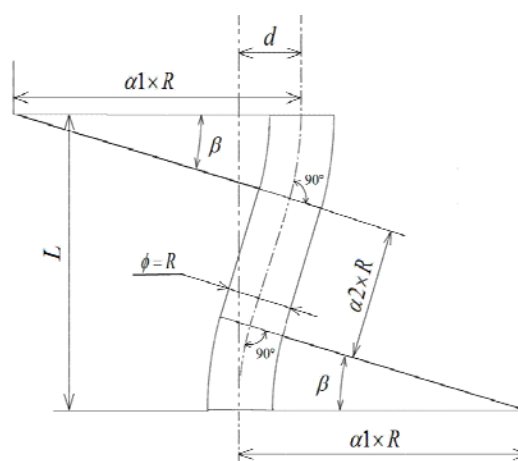


図1：S字状のベンド管ピース

図2と図3は、幅3[m]高さ3[m]奥行16[m]の空間に10個の直方体の障害物を配置し、空間を250[mm]の等間隔格子に分割して上記の新しい経路探索法を適用して得た配管経路である。全てにおいて障害物の位置とパイプの始点および終点座標は同一であるが、管径が異なる。標準的なMS-Windows搭載のPC上で計算した場合、管径が太い場合は数秒、管径が細い場合はネットワーク構造が大きくなる関係で数分を要する。径が小さい場合は障害物の回避が簡単なのでほぼ直線状の経路が得られているのに対し、径が大きいと障害物回避が難しいため遠回りになり、さらにベンドを用いる複雑な経路が最小コストの経路となっている。このような最適経路をハンドコーディングで得ることは困難であり、提案手法の自動計算が実用的なものであることを実証した。

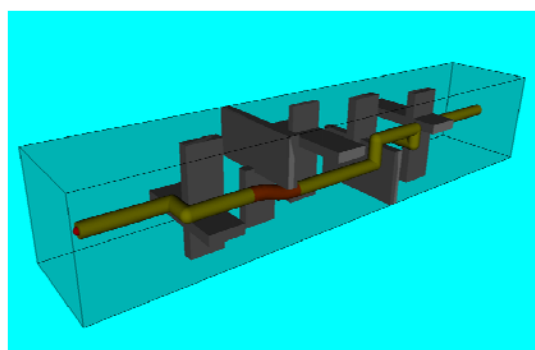


図2：φ400のパイプの経路探索結果

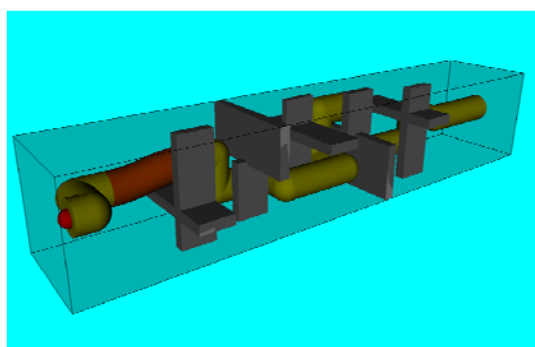


図3：φ900のパイプの経路探索結果

【複数配管経路探索アルゴリズム】

複数の配管経路を探索する問題は、電子回路の配線設計問題と類似しているため、集積回路の配線問題を解決するために提案されたタッチアンドクロス法を基に、物理的制約のさらに大きい配管設計問題に適したアルゴリズムを開発した。

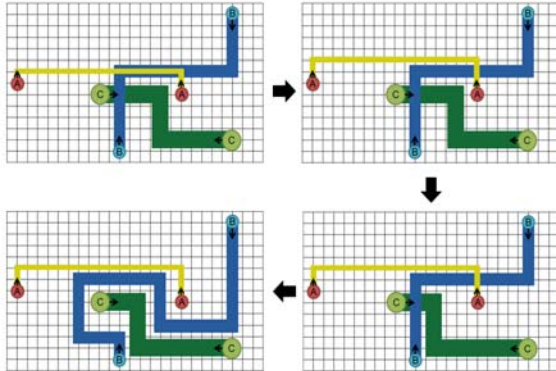


図4：タッチアンドクロス法の動作例

タッチアンドクロス法の主な特徴は、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コストとして表し、配線処理が終了するまではそれらを許しているという点である。さらに全体の経路探索を反復して行い、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、最終的に配線同士が干渉していない解を獲得する。この手法を適用することで、単純に最適解を1本1本探索するだけでは得ることのできない経路案を獲得することが可能となる。このタッチアンドクロス法と前述の「2点間を結ぶ配管経路探索アルゴリズム」を組合せ、さらに焼きなまし法を組合わせたアルゴリズムを構築し、コスト関数の計算を工夫することによりパイプラック空間を通りやすく通路空間をなるべく避け、さらに鳥居配管（重力方向にU字状になった配管）形状を可能な限り回避するような設計案を得ることを可能とした。

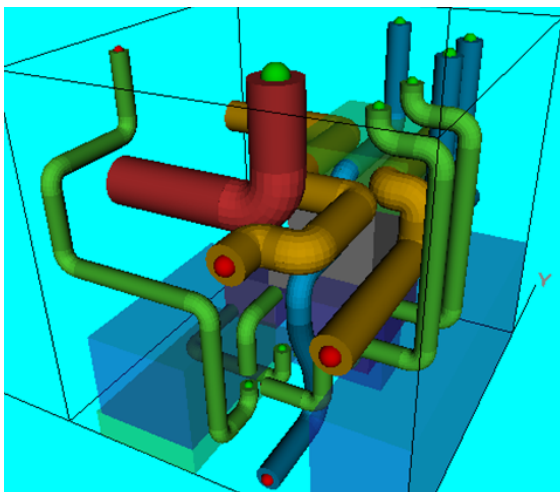


図5：提案手法で得た複数配管の設計例

【バルブ操作性評価の数値化】

バルブは通常手動で操作される。ここで、作業員がバルブを操作できるように通路や出入り口からバルブまでに十分な空間を確保しなければならない。これを「バルブ操作性」における「可アクセス性」と呼ぶ。またバルブがアクセス可能であっても設置の位置や高さなどによって操作しにくかったりロッドなど専用ツールが必要になる場合があり、これを「可ハンドル性」と呼ぶ。本研究では、配管設計案に対するこれらバルブ操作性評価を数値化する方法として、塗りつぶしアルゴリズムを提案した。これは、設計案に従ってパイプやバルブが配置された空間を等間隔のメッシュに分割し、人間の形状をメッシュで模した配列をブラシのように動かして障害物やパイプ等と干渉せずに動ける領域を塗りつぶしていくことにより、作業員のアクセス可能領域を判定するものである。後は各バルブが作業員のアクセス可能領域に面しているかどうかを判定したり、アクセス可能領域を移動してバルブに到達するのに必要なカロリーを計算することによりバルブ操作性を数値化できる。図6は本研究の可動領域塗りつぶしアルゴリズムで判定した作業員の移動可能スペースを通して通路からバルブへの最短経路を点列で示した様子である。

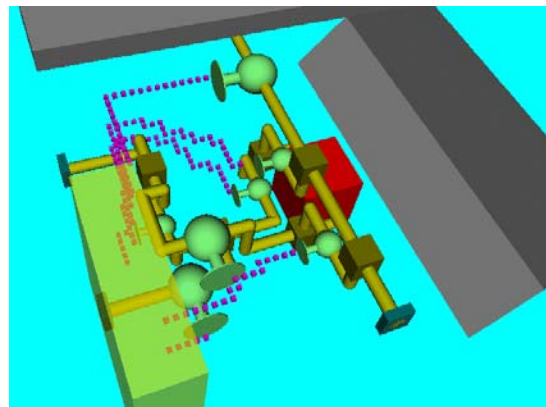


図6：通路からバルブへの経路探索によるバルブ操作性の評価例

【機器配置およびパイプの分岐を含む配管設計問題の扱い】

配管設計問題を扱った従来手法においては、パイプの分岐を扱うものは極めて少なく、分岐を扱っている場合でも探索の都合により空間メッシュ制約が大きすぎるなど実用に耐える方法は無かった。本研究では、パイプの分岐をバルブ等と同様の「機器」とみなして問題を表現することにより、機器の配置とそれに繋がるパイプの経路の両方を同時に探索する遺伝的アルゴリズムのコード化・交叉方法を提案した。この場合、探索すべき設計パラメータは機器の位置座標と設置方向、およびそれらに繋がる全パイプの経路を示すエルボの座標リストであり、これらパラメータ集合を遺伝子とする。ただし、

機器の座標と方向パラメータは、各機器の座標と設置方向を遺伝子1単位とする。また、パイプの始点と終点の座標はそれぞれに繋がる機器の位置座標と設置方向に依存することから、パイプ経路パラメータは各機器の遺伝子に付属する可変長の遺伝子とする。

遺伝的アルゴリズムにおいて探索性能を最大限に引き出すためには、2つの異なる設計案（親個体）からそれらの特徴を受け継いだ新しい設計案（子個体）を生成するための適切な交叉オペレーションを定義することが極めて重要である。これは対象問題の種類毎に開発しなければならない。前述のとおり「T分岐」もバルブ等と同等な機器の一種とすることで、配管設計問題を機器の配置問題と分岐の無い単純なパイプ配置問題という2つの単純な問題の組み合わせとして表現したことにより、以下のように直感的で妥当な交叉方法を提案した。まず交叉オペレーションにより親個体AおよびBの遺伝子から子個体Cの遺伝子を生成するものとする。子個体Cにおける機器の座標と設置方向は、対応する機器の座標と設置方向を親AまたはBのどちらかより確率50%で継承する。このとき、機器同士の位置が干渉せず、また少なくとも1つ以上の機器を異なるほうの親個体から継承した機器の組合せが見つかるまで処理をやり直す。条件を満たす機器配置と方向の組合せが見つかったら、これら機器同士を結ぶ配管経路を以下の手順で生成する。まず、親Aから継承された機器同士を結ぶ配管経路は、親Aの対応する配管経路を子個体Cへそのまま継承する。同様に親Bから継承された機器同士を結ぶ配管経路は、親Bのものを子個体Cへそのまま継承する。親Aから継承した機器と親Bから継承した機器を結ぶ配管経路は、親Aからの機器に接続されている親Aのパイプを途中の任意のエルボで切断し、親Bから継承した機器に接続されている親Bのパイプも途中の任意のエルボで切断し、切断された部分同士を新しいパイプでエルボ3個以下を用いて接続する。

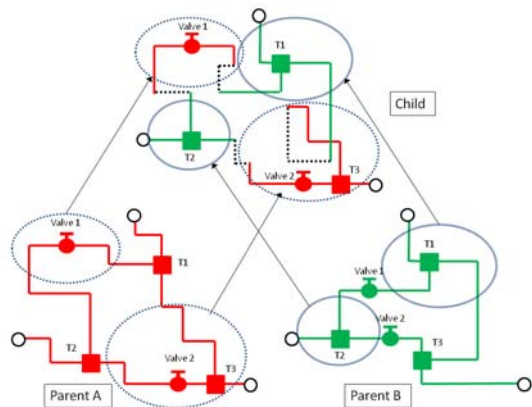


図7：機器配置と配管経路の交叉オペレーションの模式図

図7に配管設計案の交叉オペレーションの模式図を示す。子個体は、親Aからバルブ1とバルブ2およびT分岐3を受け継ぎ、親BからT分岐1と2を受け継いでいる。パイプについてはそれぞれの親から引き継いだ機器に接続されているパイプ経路を引き継ぐが、途切れている部分については図7の点線で示されている部分のように新しく引き直す。

【遺伝的アルゴリズムのための機器配置および配管経路の初期解生成方法：自己組織化機器配置法】

遺伝的アルゴリズムでは、前述の交叉オペレーションの他、突然変異オペレーションなどを用いて解候補を改善していくが、それに先立ち実行可能な（致死解ではない）初期解候補を生成しておかなければならない。一般にランダムに生成されるが、より良い初期配置をより早く得るため、自己組織化機器配置法を提案した。

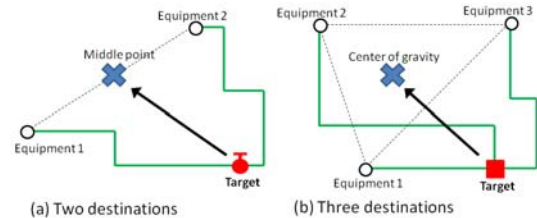


図8：自己組織化機器配置法の基本操作

図8に示すように、まず任意の移動可能な機器を1つ選択し、その機器と接続された相手先機器の位置座標を調べ、注目している機器の位置座標をそれら接続先機器の位置座標の中心に最も近い配置可能な座标点候補へ修正する（実際にはパイプの太さも考慮するため、接続相手先座標をパイプ径で重み付けする）。このとき注目する機器の設置方向は、接続するパイプ長が最小になる方向に修正される。このような処理を全ての移動可能な機器についてランダムに選択して適用することにより、全体として配管経路に無駄のないすっきりした機器配置が自発的に形成される。ただしあくまでも遺伝的アルゴリズムの初期解として使用する。

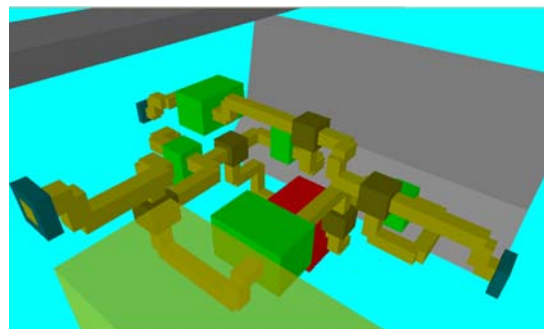


図9：自己組織化機器配置法で得たバルブと分岐の配置例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件) 査読あり

- ① 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年6月
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjasnaoe/15/0/15_219/_pdf
- ② 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 -パイプ材料コストおよびバルブ操作性評価の多目的最適化-, 日本船舶海洋工学会論文集 第14号, pp. 165--173, 2012.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjasnaoe/14/0/14_0_165/_pdf

[学会発表] (計 8件)

- ① 安藤 悠人, 木村 元: タッチアンドクロス法を利用した配管自動ルーティング, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol. 18, pp. 183--186 (2014年5月26~27日, 宮城県仙台市 仙台国際センター).
- ② Yuto Ando and Hajime Kimura: Automatic Pipe Routing to Avoid Ar Pockets, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2013 (ICCAS2013) 24-26 September 2013, Busan, Korea, Vol. 2, pp. 147--153.
- ③ Kazumasa Noda, Shohei Shindo and Hajime Kimura: A Material Distribution Scheduling for Rigging Ship-Hull Blockis, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2013 (ICCAS2013) 24-26 September 2013, Busan, Korea, Vol. 2, pp. 197--202.
- 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会論文集 Vol. 16, pp. 179--182 (2013年5月27~28日, 広島県広島市広島国際会議場).
- ⑤ 進藤翔平, 木村 元: 配管工事におけるパイプ配材計画の自動生成に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol. 16, pp. 183--186 (2013年5月27~28日, 広島県広島市広島国際会議場).
- ⑥ Yuto Ando and Hajime Kimura: An Automatic Pipe Arrangement Algorithm Considering Elbows and Bends, Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC2012) June 11-14, 2012, Glasgow, Scotland, Vol. 3, pp. 427--436.
- ⑦ Hajime Kimura: Automatic Designing System for Piping and Instruments Arrangement including Branches of

Pipes, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2011 (ICCAS2011) 20-22 September 2011, Trieste, Italy, Vol. 3, pp. 93--99.

- ⑧ Yuto Ando and Hajime Kimura: An Automatic Piping Algorithm including Elbows and Bends, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2011 (ICCAS2011) 20-22 September 2011, Trieste, Italy, Vol. 3, pp. 153--158.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

・ホームページ等

<http://sysplan.nams.kyushu-u.ac.jp/gen/edu/Pipe/index.html>

・解説記事

木村 元: 配管自動設計システム実現の試み: 配管経路探索と機器配置の最適化, 配管技術 734, Vol. 55, No. 2, pp. 12--18 (2013) 日本工業出版.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 元 (Kimura Hajime)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 40302963

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: