精度管理システムを用いた位置決め作業支援に関する研究

正員 武 市 祥 司* 正員 青 山 和 浩*
正員 野 本 敏 治*

Studies on the Block Positioning Metrics System for the Hull Erection Stage

by Shoji Takechi, *Member* Kazuhiro Aoyama, *Member*
Toshiharu Nomoto, *Member*

Summary

Accuracy management activities are significant problems in ship hull production. A block positioning operation in a erection stage is especially the key process in hull accuracy management. The qualities of block positioning determine not only final hull accuracy qualities, but also productivities and costs in erection stage.

The basic concept of computer aided accuracy management has already proposed by authors. Accuracy management activities are consisted of 'accuracy planning activities' and 'accuracy measure activities'. Accuracy measure activities are checking and coping with inaccuracy. Authors proposed the accuracy measure metrics: one is accuracy for completed (e.g. straightness, flatness) and the other is accuracy for construction (e.g. relative joint shapes of each part).

In this paper, detailed accuracy metrics for a block positioning operation in a erection stage are discussed. The quality of block positioning operation is estimated by this metrics: accuracy for completed can be evaluated by the concept of the tolerance, and accuracy for construction can be evaluated by the concept of labor cost. The prototype system of accuracy metrics system is implemented. This metrics system is combined with optimization software program iSIGHT to decide the best block positioning. Then some examples of block position optimizing process are shown.

1. 緒 言

近年、コスト削減や自動溶接導入の必要性などから船殻の精度管理の重要性があらためて認識されつつある。近年の計測技術や数値解析のコンピュータ技術の発展もあいまって、これらの技術に立脚したコンピュータ支援による精度管理の基本的な方向性について既報¹⁾で筆者らは提唱しており、この考えに基づいた研究活動²⁾も行われるようになった。

ところで、搭載位置決め工程は、船殻形状の最終的な

品質を保証するばかりではなく、後工程の作業性やコストに対するインパクトが大きく、船殻建造における精度管理のかなめの工程であると言える。さらに、位置決め作業は、熟練技能者になるまでに最低でも十数年の期間を要すると言われている。しかるに、焼鉄作業などと同じように、熟練技能者の高齢化や若手技能者の確保が次第に困難になりつつある状況から、技能の伝承が問題となりつつある。また、昨今の造船業界を取り巻く情勢の厳しさから、各造船所では建造量を増やすことを余儀なくされているが、搭載位置決め工程は建造量増大のための大きなボトルネックの一つになっている。例えば、曲がりブロックなどの特殊形状のブロックをクレーンで吊ったまま位置決めを実施する「吊り決め」と呼ばれる作業の存在である。精度向上により、搭載位置決め作業

* 東京大学大学院工学系研究科

原稿受理 平成 12 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 12 年 11 月 16, 17 日

の時間短縮が可能になれば建造量の増大に大きく寄与できる。

最近の計測技術の進歩により、数十メートルに及ぶ立体構造物である船殻ブロックを1mm程度のオーダーの精密さで、しかも現場作業ラインをストップさせることなく短時間のうちに容易に計測することが可能になりつつある。また、搭載位置決めに関する計測データ処理、シミュレーション、最適化などのコンピュータ技術の研究³⁾も開始されつつあり、搭載位置決め作業の近代化には強力な追い風となっている。

以上から、次世代の精度管理システムの具体的なありかたを示す上で、位置決め作業を支援するシステムの構築を目指すことは非常に貴重な示唆が多く、実際的にも利点が多いと考えられる。筆者らの既報では、三次元の形状計測を前提とする精度管理システムについて提唱しており、本報ではさらにそのコンセプトを発展させ、評価メトリクスに基づいた搭載位置決め支援システムの構築について述べる。

2. 位置決め作業と精度管理

2.1 位置決め作業

井奥によると、位置決め作業とは「外業工程においてブロックを搭載した後、最終的に別途定められた船型の基準を確保させながら、その他の関係する基準にも合致し、かつ他作業が最も効率の良いようにブロックの位置を決定する作業」と定義される⁴⁾。

ここで、「別途定められた基準」「その他の関係する基準」とは、主に日本造船学会鋼船工作法研究委員会が発行している『日本鋼船工作法精度標準』（略称JSQS）⁵⁾および各造船所が自ら規定している精度基準のことであり、位置決め作業の目的の一つは、これらの船型確保である。また、他作業とは位置決め作業の後工程の取付作業や溶接作業および艤装工事作業のことであり、これらの作業量を最小化することが位置決め作業のもう一つの目的である。従って、位置決め作業の目的は「船型確保」と「作業量最小化」の二つに大別されることがわかる。

船型確保：船としての機能（船速や積荷容積を保証するための船殻形状）を保証する。軸芯見透し、キール見透し、二重底平面度、上甲板キャンバード度など。

作業量最小化：取付作業、溶接作業、修正作業

これらの目標を達成するために、ブロックの何処を活かして何処を捨てていくかが位置決め作業者の最も重要な技量であり、ベテラン位置決め作業者は以下の能力に優れていると思われる。

- 鋼尺や下げ振りなどの簡易な機器を用いた計測結果から、複雑な立体構造を頭の中に再構成する
- 複数の位置決め案を頭の中でシミュレートし、船型の精度を許容範囲内に収めつつ、下流工程のコストや作業性を考慮して、最適な位置決め案を選択する
- 上流工程である組立工程のブロック製作について、製作許容誤差や精度確保のためのポイントについての確かな指示を出す

ベテラン位置決め作業者は、この他にも、日照による変形、姿勢変化等による自重による変形、溶接による変形などの変形挙動までも考慮して位置決めを行っていると言われており、多岐にわたる項目を適正に評価してバランス良く判断することが必要であると推察される。

2.2 公差と精度管理

一般に大量生産方式の機械部品製造の精度管理には公差⁶⁾が用いられる。機械工学における公差の問題は、公差制御と公差配分の二つに大別される。公差制御(tolerance control)とは、複数部品から構成される組立品に要求される機能を達成できるかどうかを検証するために実施される。公差配分(tolerance distribution)とは、経済的な評価を利用して、指定された信頼度に基づいて、個々の寸法の寸法公差や和寸法の寸法公差を決定すること。公差制御と公差配分は補完的な関係にある。特に公差配分では、加工能力(process capability)と公差範囲トレードオフが重要である。すなわち、公差を狭くすると、加工コストは増大するものの、合格品は必ず要求された機能を達成する。公差を広くすると、逆に加工コストは低下するものの、機能を達成できず廃棄する品数が増加する。そのためにコスト増になる。そこで、公差とコストのバランスをうまくとる必要がある。

造船業では、前述のようにJSQSという精度標準および各造船所内基準はあるものの、上記のように体系付けられた公差により精度管理を実施するという概念は非常に乏しい。この理由は、

- 受注生産であり、大量生産の機械類と比較すると規格化・標準化が困難であること
- 労働集約型の人手に頼る作業が多いため、作業者によるバラツキが大きいこと

- 溶接変形や自重による変形あるいは日照による変形などが不可避の原因による変形のオーダーが、管理すべき精度よりもはるかに大きいこと。

などが挙げられる。端的に言うと、公差配分を行って各工程に割り付けられるべき精度の許容限界の値を、船殻建造の各工程における工程能力が到底満たし得ないことが最大の原因ではないかと筆者は考えている。公差は精度管理においては非常に有効な概念であるが、造船工作、殊に位置決めにおいては公差のみでは精度指標として十分ではなく、他の指標も必要であると考えられる。

3. 位置決め評価メトリクス

人間の知的思考作業に依存する部分が大きく、従来の統計的品質管理手法に必ずしも上手く適合しないソフトウェアなどの分野の品質管理において、メトリクスと呼ばれる概念が近年提唱されている。ソフトウェアなどの品質管理においては、生産性や品質の尺度の設定と、計量方法(データの収集と加工の仕方)および分析評価のためのモデル(コストモデルや品質モデル)等を作成し、これらを因果つけて定量的に評価する必要がある。この品質の尺度、測定の方法をメトリクスという。メトリクスで重要な事は、測定の対象を明確にし、測定値の解釈方法および測定結果を作業と関連づけることである。本章では、搭載位置決め作業のメトリクスを明確にして、位置決め作業の良否を定量的に評価する手法を述べる。

3.1 船型確保と作業量最小

すでに2.1節で述べたように位置決め作業の主目的は、船型確保と後工程作業量の最小化の二つである。本研究では、評価の指標を出来上がり精度と取り合い精度の二種類に大別する(Fig.1)。ここで、出来上がり精度は船型確保のための指標であり、公差で評価する。また、取り合い精度は後工程のトータルの作業量で評価する。これにより、位置決め作業の良否を定量的に評価する体系を構築する。

なお、本研究では、立体構造ブロックを表現するのに特徴点の計測を行い、これら計測点の三次元座標が既に計測されていることを前提とする。計測を行う点は、部材の端点、部材同士の交差部など構造形状の特徴点とし、計算機上にブロック形状を再現するのに必要な点の計測は行われているものとする。

3.2 出来上がり精度

船型確保は、出来上がり精度を保証することにより実現される。出来上がり精度は、正規形状と計測された形状を比較する絶対的な精度であり、公差で評価される(Fig.2)。

Fig.1 Two Types of Accuracy Metrics

3.2.1 位置度

位置度は点の位置精度を評価する指標である。ブロック端部や主要部材の交差部などである特徴点の正規位置と計測された位置の誤差で表される。本研究では、位置度の公差域は正規位置を中心とした幾何学的球で表現され、公差の値はその球の半径で表される。ここで、 p_n はある点の正規位置、 p_m は p_n に対応する点の計測された位置、 e_p は正規位置と計測された位置の誤差ベクトル、位置度の公差値(スカラー量)は $t_{position}$ とすると、位置度の精度評価メトリクス $E_{position}$ は以下のように定義される。

$$e_p = p_m - p_n \quad (1)$$

$$E_{position} = \begin{cases} 0 & (|e_p| \leq t_{position}) \\ |e_p| - t_{position} & (|e_p| > t_{position}) \end{cases} \quad (2)$$

(ただし、 $|e_p|$ は e_p の絶対値)

3.2.2 真直度

真直度は直線精度を評価する指標である。船底や二重底のセンターライン、舵芯・軸芯、あるいは、パトックラインなど船体上の直線部位の正規形状に対して、計測された線形状の誤差で表される。本研究では、真直度の公差域は円筒形で表現され、公差の値はその円筒底面の半径で表される。ここで、 l はある直線の正規形状、 $p_m^{(i)}$ は本来 l 上にあるべき点の計測された位置、 $r_m^{(i)}$ は $p_m^{(i)}$ と l との距離、真直度の公差値(スカラー量)を $t_{straightness}$ とすると、真直度の精度評価メトリクス $E_{straightness}$ は以下のように定義される。

$$r_m = \max_i r_m^{(i)} \quad (3)$$

$$E_{straightness} = \begin{cases} 0 & (r_m \leq t_{straightness}) \\ r_m - t_{straightness} & (r_m > t_{straightness}) \end{cases} \quad (4)$$

3.2.3 平面度

平面度は平面の精度を評価する指標である。本研究では平面度の公差域を、正規平面に平行かつ一定の距離で表現される三次元空間内の二平面で挟まれた領域で表現し、公差の値は正規平面からの距離で表される。ここで、 S はある平面の正規形状、 $p_m^{(i)}$ は本来 S 上にあるべき点の計測された位置、 $d_m^{(i)}$ は $p_m^{(i)}$ と S との距離、

平面度の公差値（スカラー量）を $t_{planeness}$ とすると、平面度の精度評価メトリクス $E_{planeness}$ は以下のように定義される。

$$d_m = \max_i d_m^{(i)} \quad (5)$$

$$E_{planeness} = \begin{cases} 0 & (d_m \leq t_{planeness}) \\ d_m - t_{planeness} & (d_m > t_{planeness}) \end{cases} \quad (6)$$

3.2.4 出来上がり精度の評価関数

出来上がり精度の評価メトリクスは、前述の 3.2.1 項から 3.2.3 項の各公差の評価に重み係数 w_i を乗じたものと定義する。重み係数は、設定した公差の中でも重要度に違いがある場合、その重要度に応じて利用者が適宜決定するスカラー量である。この評価メトリクスを E_i とすると、以下の式(7)で表現される。

$$E_i = \sum_i w_i E_{position}^{(i)} + \sum_j w_j E_{straightness}^{(j)} + \sum_k w_k E_{planeness}^{(k)} \quad (7)$$

船型確保すなわち出来上がり精度の評価メトリクス E_i はゼロあるいは正の実数の値を取る。 E_i は公差範囲内からの超過量を定量的に表現したものであり、その値はゼロが理想であり、このとき評価する部位がすべて公差領域内に収まっていることを表す。また、正数を取る場合はその値が小さいほど良い位置決めであることを示す。

Fig.2 Tolerance Zone

3.3 取り付け精度

船台・ドック内での搭載後の船殻建造作業の作業量を、すでに搭載済みのブロックと、搭載を行うブロックの取り付け部の精度により評価を行う。取り付け精度は、計測した形状同士を比較し、その相対的な関係によって定まる精度である。計測して得られた幾何形状情報を、接合関係情報を利用して作業情報へと変換を行う。この作業情報から後工程で発生する作業量を推定し、その作業量の多寡によって取り付け精度は評価される。

3.3.1 計測情報からルートギャップ量・目違い量への変換

既搭載ブロックを基準として、搭載ブロックの取り付け部の形状を相対的に比較する。本研究では、取り付け部の一致すべき点を座標が双方のブロックともに計測されていることを前提とする。

まず、複数の計測点から双方のブロックの取り付け部

Fig.3 Transformation of Root-gap and Dislocation

の（溶接）線形状を作成する。この溶接線の作成には接合関係情報を用いる。次に、計測線を適当な単位長さの溶接線素に分割する。双方のブロック取り付け部の各溶接線素の中央点をサンプリングする。接合関係情報により、全体座標系（船体座標系）から局所座標系へのアフィン変換 A_j を求める。既搭載ブロックの取り付け部の溶接線素の中央点を基準とし、搭載ブロックの対応する溶接線素の中央点との座標差を求め、この座標差に変換 A_j を施し、取り付け部のルートギャップ量（ずれの面内方向成分） g と目違い量（ずれの面外方向成分） d を算出する(Fig.3)。

3.3.2 ルートギャップ量から作業量への変換

本項では、取り付け部の i 番目の溶接線内の j 番目の溶接線素の中央部でのルートギャップ量 g から作業量を推定する。以下の四種類の作業、すなわち切断、肉盛り整形、裏当金、母材一部取替は、ルートギャップにより発生する作業であり、その作業量はルートギャップ量 g の関数であるとする。

a) 切断: $l_{cut-hull}$

g が適正ギャップ値より小さい、あるいは重なった場合に実施

b) 肉盛り整形: $l_{overlay}$

g が適正ギャップ値より大きい場合に実施

c) 裏当金: l_{strap}

g が適正ギャップ値より大きい場合に実施

d) 母材一部取替: $l_{renew-g}$

g が適正ギャップ値より相当大きい場合に実施

3.3.3 目違い量から作業量への変換

本項では、取り付け部の i 番目の溶接線内の j 番目の溶接線素の中央部での目違い量 d から作業量を推定する。以下の三種類の作業、すなわちメチ払い、バラシ、母材一部取替は、目違いにより発生する作業であり、その作業量は目違い量 d の関数であるとする。

e) メチ払い: l_{fining}

Fig.4 Accuracy – Labor (Man-hour) Functions

dが許容値より大きい場合に実施するジャッキ押しなどの付帯作業

f) バラシ: $l_{cut-fillet}$

dが許容値より大きい場合に実施する付帯作業であり、特にすみ肉の溶接済みの箇所を溶断する作業。ここでは、溶断作業量とその箇所を再度すみ肉溶接する作業を合計した作業量で表す

g) 母材一部取替: $l_{renew-d}$

dが許容値より相当に大きい場合に実施

上記の作業量変換関数の一例を Fig.4 に示す。なお、Fig.4 中のいずれのグラフも、溶接線素の長さが 100mm の場合の作業量変換関数であり、横軸はルートギャップ量あるいは目違い量、縦軸は作業量（工数）を表す。

3.3.4 取り合い精度の評価関数

前項 3.3.3 までに述べた作業量換算を各溶接線素ごとに行い、各溶接線の作業量を算出する。さらに、各溶接線ごとに狭隘箇所などの環境因子を考慮した作業環境係数 $w_{surround}$ と、自動溶接機の使用などを考慮した作業能力係数 $w_{ability}$ を用いて、重みを付けて総和を取ったものを取り合い精度の評価メトリクスとする。この評価メトリクスを E_l は式(8)で表現される。なお、式(8)中の l_{weld} はルートギャップ量と目違い量が適正範囲内の理想的な溶接条件での作業量とする。

$$E_l = \sum_i (w_{surround}^{(i)} \times w_{ability}^{(i)} \times \sum_j (l_{weld}^{(i,j)} + l_{cut-but}^{(i,j)} + l_{overlay}^{(i,j)} + l_{strap}^{(i,j)} + l_{fitting}^{(i,j)} + l_{cut-fillet}^{(i,j)} + \max(l_{renew-g}^{(i,j)}, l_{renew-d}^{(i,j)}))) \quad (8)$$

E_l は正の実数の値を取り、その値が小さいほど作業量が少ないことを意味し良い位置決めであることを表す。

3.4 やわらかい箇所

実際の位置決めでは、日照による変形や姿勢変化等による自重による変形までも考慮しており、非常に剛な構造部分と比較的でもない構造部分を位置決め作業者は経験的に区別している。比較的に剛でない構造部分はわずかな荷重で大きく変形する。このため、ブロック姿勢などの影響を受けやすいため、比較的に剛でない構造部分の計測結果は再現性に乏しく不確定な割合が高く、メチ払いなどの修正作業も格段に容易である。

本研究では、船殻構造の比較的に剛でない部分を以後「やわらかい箇所」と呼び、位置決め評価メトリクスを、より現実の位置決め作業が行っている判断に近づけるため、「やわらかい箇所」の概念を導入する。やわらかい箇所は、その場所と主に面外方向の変動幅の二つによって定義される。

4. 位置決め最適化

第3章で述べた位置決めメトリクスによる定量的な評価が可能になれば、数値的な最適化手法を用いることにより、位置決め最適化を実施することが可能になる。本章では、位置決め評価メトリクスに基づく最適化について述べる。なお、本研究では、ブロックは剛体、すなわち計測後にはブロックの形状は変化せず、また位置決め後の溶接作業後にも変形しないという仮定を設けて以

後の議論を進めていく。

4.1 設計変数

最適化の設計変数を剛体の平行移動と回転移動の自由度とする。すなわち、三次元直交座標である船体座標系における

$$x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$$

の6自由度を設計変数とする。ただし、回転はブロックの重心を中心とするX軸、Y軸、Z軸周りの自由度である。

4.2 制約条件

最適化の制約条件は船型の確保とする。船型確保を出来上がり精度で評価することは既に述べた通りだが、出来上がり精度を評価する際に設定したそれぞれの公差域を T_i とすると、ブロックの評価部の剛体移動の可動領域は T_i 内のみであることから、設計変数の制約条件が定まる。この個々の制約条件を C_i と表現すると、全体での制約条件 C は積集合

$$C = C_1 \cap C_2 \cap \cdots \cap C_i \cap \cdots \cap C_n \quad (9)$$

で表現される。ところで、 C_i では設計変数どうしは独立ではなく互いに関係する制約条件も含むことから、式(9)における C は空集合以外の解の存在が一般には保証されていない。そこで、本研究では設計変数同士の関係を除外し、設計変数は互いに独立であると仮定し、設計変数の可動範囲を制約条件とする。この仮定により簡略化された制約条件は、式(9)で示した条件より一般には緩い条件になるが、計算機上での制約条件の抽出や取扱いが容易になる。もちろん、厳密な意味で式(9)は満足されないが、式(7)の出来上がり精度の評価メトリクス E_i の最小化と、この簡略化した制約条件を組み合わせることにより、実用的には式(9)の制約条件をほぼ満足させることが可能となる。

4.3 目的関数

最適化の目的関数を作業量最小とする。すなわち、取り付け精度の評価メトリクス E_i を最小化することである。

$$\text{minimize } E_i \quad (10)$$

ただし、4.2 節で述べたように、本研究では制約条件の簡略化を行った関係から、目的関数に制約条件の項を付け加えたものを実際には利用する。

$$\text{minimize } (E_i + k E_p) \quad (\text{ただし, } k \gg 1) \quad (11)$$

5. 位置決め作業支援システム

5.1 システム構成

本研究の位置決め作業支援システムは、形状生成シス

テム、位置決め評価システム、最適化プログラムの三つから構成されている。

形状生成システムは、いわゆる CAD システムであり、VRML(Virtual Reality Modeling Language)形式の形状データを作成できるシステムであることが必要である。逆に言えば、VRML 形式のファイルが作成できれば、どのような CAD システムを用いても利用可能である。本研究では、著者らの開発した SODAS(System of Design and Assembling for Shipbuilding)の CAD 機能を用いて、形状データ・ファイルを VRML 形式に従って出力する機能を用いている。

位置決め評価システムは、位置決め評価メトリクスに関する最も主要なシステムであり、オブジェクト指向言語である Smalltalk の一種の VisualWorks2.5.1J を用いて構築されている。位置決め評価システムは、以下の機能を有する。

- i) 形状生成システムとのインターフェイス
 - VRML 形式での形状情報の取り込み
- ii) システム利用者とのインターフェイス
 - 接合関係情報の設定
 - 出来上がり精度のための公差の設定
 - 取り付け精度のための各係数の入力
 - やわらかい箇所の設定
 - 計測点の提示、追加入力
- iii) メトリクス評価のためのシステム内部処理
 - 計測点の実計測座標値の取り込み
 - 位置決め：ブロックの剛体移動機能
 - 出来上がり精度の評価
 - 取り付け精度の評価
- iv) 最適化プログラムとのインターフェイス
 - 制約条件の算出
 - 最適化プログラムへのデータ出力と最適化結果のデータ取り込み

なお、上記の iii) iv) は、システム内ではほぼ自動的に行われるようになっている。システムの表示系では三次元グラフィック・ソフトウェア「じゅん」⁷⁾ をベースに、強力な GUI(Graphical User Interface)が構築され、ユーザ・フレンドリな環境を提供している。

本研究では、最適化には Engineous Software 社の汎用最適化プログラム iSIGHT V5.0 を用いている。iSIGHT は、逐次線形計画法や外点法などの数理的最適化手法、遺伝的アルゴリズムやシミュレーテッド・アニーリング法などの探索的最適化手法、直接ヒューリスティック探索法などのエキスパート・システムの手法などの数値最適化手法が利用できるプログラムである。位置決め評価システムからの算出された設計変数、制約条件、

Fig.5 Flow Chart

目的関数のデータをもとに、iSIGHTと位置決め評価システムが、設計変数と位置決め評価メトリクス値のデータをやりとりし、最適な位置決めとなる設計変数の6自由度を求めていく。なお、以上の手順をFig.5に示す。

5.2 実行例

本節では、5.1節のシステムを用いた実行例を示す。

5.2.1 簡単な形状のブロックの位置決め

本項では、底面板と縦通材の二部材から構成される簡単な形状のブロックを例に取り、システムの実行例を説明する。

1) 形状データ作成

搭載済みの基準ブロック(Fig.6 左上図)と、これから位置決めするブロック(Fig.6 右上図)がある。これら二つのブロックの正規形状は同一であり、底面板が10,000mm×10,000mmの正方形、縦通材は10,000mm×1,000mmの長方形であるとする。

2) 形状データ読み込みと各種設定

この正規形状のVRMLファイルを読み込んだ後に、底面板と縦通材にそれぞれ許容範囲5.0mmの平面度の公差を設定し、底面板と縦通材のそれぞれの取り付け部(Fig.6 左上図・右上図の太線部)に接合関係情報を設定し、取り付け精度のための諸係数を入力する。なお、本例では式(7)(8)のすべての重み係数を1.0すなわち同値にして重みをつけないことにする。さらに、計測点の候補として、各部材の隅点(各ブロック8つの計測点)をシステムから提示されるので、計測点の追加や修正が

Fig.6 Models for a Simple Example

必要ならば適宜行う。本例では、各ブロック8つの計測点のみとして、計測された座標値を取り込む。ここで、基準ブロックは正規形状通りに製作されており、搭載するブロックはFig.6下図のように変形し、正規位置から変位しているとする。Fig.6下図で、点線が正規形状、実線が計測形状を示し、()内の数値は図中の座標系での各計測点における正規形状からのズレを示す。

3) 位置決めシミュレーションとメトリクス評価

次に、搭載ブロックの初期位置決めを行う。本例では、Fig.6下図を初期状態とすると、この位置決め状態での評価メトリクスの値は以下のように位置決め評価システムから算出され、ウィンドウに表示される(Fig.7)。

$$E_f = 10.0$$

$$E_f = 20.7 \text{ (工数)}$$

出来上がり精度の評価メトリクス E_f では設定された二つの平面度公差5.0に対して、それぞれ5.0ずつ超過していることから式(5)~(7)に従って、10.0という値が算出された。また、取り付け精度の評価メトリクス E_f ではFig.4に示した関数および式(8)に従って、作業量は20.7工数と算出された。

4) 位置決め最適化

Fig.6下図のような初期位置決め状態の場合、システムが自動的に算出した制約条件は以下になる(水平移動の自由度の単位はmm、回転移動の自由度の単位はdegree。本例で設定した公差ではy方向の自由度を制約する条件は存在しない)。

Fig.7 Windows of Positioning Metrics System

$$\begin{aligned} -15.0 \leq x \leq -5.0 \\ -15.0 \leq z \leq -5.0 \\ -0.057 \leq \theta_x \leq 0.057 \\ -0.057 \leq \theta_y \leq 0.057 \\ -0.057 \leq \theta_z \leq 0.057 \end{aligned}$$

位置決め評価システムは、最適化プログラム iSIGHT とのインターフェイスを有しており、iSIGHT に必要な description ファイル⁸⁾が自動的に生成されるようになっている。この description ファイルに基づき、iSIGHT が位置決め評価システムを呼び出し、最適位置決めを実施する。iSIGHT では最適化手法を組み合わせ最適化を実施することが可能であり、本例では修正実行可能法方向法と遺伝的アルゴリズム手法を組み合わせ最適化を実施した。後続作業を最小にする位置決め最適化の経過を Fig.8、最適化の結果を Table 1 に示す。 E_{t1} と E_{t2} はそれぞれ底面板と縦通材に設定した平面度公差に対する出来上がり精度評価メトリクスの値であり、 E_t は取り合い精度評価メトリクスである作業量の値である。繰り返し試行は 229 回で、後工程の作業量は初期状態と比較するとほぼ 95% 近く削減されたことがわかる。

なお、特に最適化プログラムを利用しなくとも、この位置決め評価システムの位置決め機能を用いてマニュアルで試行錯誤的にシミュレーションを行い、最適な位置決めを求めることも可能である。

5) 最適化の簡単な検証

Fig.8 Optimization Process

さらに、位置決め最適化の妥当性の簡易な検証のために、Fig.4(a)に示した 100mm あたりの切断の作業量変換関数を $l_{cut-hull}$ を 1/90 工数から倍の 1/45 工数に変更して最適化を実施する。この最適化では、切断の作業量変換関数以外はまったく同様のデータと手順を用いた。最適化の結果は Table 1 に最適化 II としてあわせて示してある。最適化後の y 方向の移動量を比較すると、小さくなっていることがわかる。これは、部材どうしの重なりが小さくなり、切断作業を行う個所が少なくなったことを意味する。切断の作業量変換関数を大きくしたことから、最適化は切断個所が少なくなる方向に向かうことは定性的には明らかである。簡易な例ではあるがこの種の検証を継続していく現実と合致したデータを蓄積することにより、現実利用可能な位置決め支援システムの実現が可能になる。

5.2.2 やわらかい個所の概念を導入した位置決め最適化

やわらかい個所という概念を導入し、二重底ブロック上へのロア・スツール・ブロックの搭載位置決めを例に最適化を実施する(Fig.9)。出来上がり精度評価のために、ロア・スツール斜板の足元の端点に位置度公差を設定する。取り合い部は、ロア・スツール斜板の足元と二重底上面とする。この例では、計測点の座標値は乱数を用いて発生させた適当な値を利用している。

Table 1 Optimum Results

	x	y	z	Θ_x	Θ_y	Θ_z	E_{t1}	E_{t2}	E_t
初期位置決め	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	5.0	20.7
最適化	-8.3	-3.4	-11.3	-0.0056	-0.0022	-0.0002	0.0	0.0	1.14
最適化 II	-8.7	-0.44	-9.7	0.00057	0.016	-0.017	0.0	0.0	1.37

本例では iSIGHT の逐次 2 次計画法, 修正実行可能法方向法, 逐次 2 次計画法, 外点法の手法を組み合わせることで四段階のステップを踏んで最適化する。最適結果はやわらかい個所の概念の導入前後でそれぞれ 25.4 工数, 導入後は 22.0 工数であり 13% 良化されている。

5.2.3 複数ブロックの位置決め同時最適化

本システムでは, 取り付け部が複数のブロックにまたがる場合や, 次の搭載ブロックの形状まで考慮しての同時に最適な位置決めを行うことが可能である。これを示すために, ビルジ底板ブロックを基準ブロックとして, ビルジ・ホッパー斜板ブロック, 側外板ブロックの二つのブロックの同時に考慮した位置決め最適化の例を示す(Fig.10)。設計変数は, 2 ブロックの 6 自由度となり計 12 変数で最適化を行っている。

本例題も 5.2.2 項と同様に計測値は乱数を用いて発生した適当なものを用いており, 逐次 2 次計画法, 修正実行可能法方向法, 逐次 2 次計画法, 外点法の四段階のステップを踏んで最適化を行っている。

6. 結 言

本研究では, 以下の知見が得られた。

- (1) 熟練技能である位置決め判断の整理を行い, 出来上がり精度と取り付け精度の二つを軸とする位置決め判断基準(位置決めメトリクス)を明確にした。
 - (2) 位置決めメトリクスとして, 公差による船型確保を評価する手法, 作業量変換関数による作業量を評価する手法を提案し, 評価値の定量化を行った。
 - (3) 位置決め評価システムを実装し, 最適化プログラム iSIGHT を利用することにより位置決め最適化を支援する精度管理支援システムを構築した。
- また, 本研究の今後の課題や展開として以下が挙げられる。
- (4) 作業量変換関数とやわらかい個所の変動幅を実作業観測により検証して, より現実に即したバック・データの収集と蓄積

- (5) やわらかい個所の概念や構造剛性を考慮した, 計測点の自動生成
- (6) 搭載中の姿勢変化などによるブロックの弾性的な形状変化, あるいは工作中的の溶接変形を考慮するための解析的 CAE システムとの連携
- (7) 本システムを利用して, 位置決め熟練作業者の知識を収集・整理・活用できるようにするナレッジ・エンジニアリングの構築

謝 辞

本研究の一部は, 平成 11 年度東京大学工学部船舶海洋工学科の卒業論文として古川雄太氏によって実施されました。同氏には謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 野本敏治, 武市祥司, 青山和浩: 組立工程における製品の精度管理システムに関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第 178 号(1995), pp.725 - 737
- 2) (社)日本造船研究協会 第 237 研究部会: 高度工作精度管理技術に関する研究 成果報告書 (2000)
- 3) 奥本泰久, 吉田壮志: ニューラルネットワークを利用した船殻ブロック搭載シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 186 号(1999), pp.689 - 695
- 4) 井奥孝一: 造船の職人芸一決め方, 日本造船学会誌, 第 817 号(1997), pp.64 - 67
- 5) (社)日本造船学会工作法研究委員会: 日本鋼船工作法精度標準 1999 年版, CD-ROM 版(2000)
- 6) 中野健一: 精密形状測定の実際一幾何公差の解釈と幾何偏差の測定・処理一, 海文堂出版(1992)
- 7) 青木淳他: フリーソフトウェア「じゅん」, <http://www.sra.co.jp/people/aoki/Jun/Main.htm>
- 8) iSIGHT V5.0 Online Help & Documentation : Engineous Software Inc. (2000)

Fig.9 Example with the Concept of Flexible

Fig.10 Some Block Positioning Optimization