船型設計における高品質な曲面生成手法に関する研究

正員 増田 宏* 正員 大和 裕幸**
学生員 古川 慈之***

Fair Surface Generation in Ship Hullform Design

by Hiroshi Masuda, *Member* Hiroyuki Yamato, *Member*
Yoshiyuki Furukawa, *Student*

Summary

This paper describes about the method for fair surface generation in ship hullform design aiming at the automatization of surface fairing. It generates an approximating surface from section curves according to the distribution of curvature. The generated surface has dense parameters in high curvature areas, and sparse parameters in low curvature areas. This method has three advantages described below. First, it can suppress the distortions generated by traditional methods. Second, it can use additional curves that cannot be used in traditional skinning methods. Finally, it can do surface fairing efficiently without the great loss of geometric feature.

1. 緒 言

設計生産の情報化と自動化が進み、製造業務全体の一貫した効率化が着々と行われている。船型設計においても、形状処理技術の導入で手書きの図面による線図設計から 2 次元 CAD を用いた設計への置き換えが行われ、さらに 3 次元 CAD システムの導入により、設計データの 3 次元化も行われるようになりつつある。3 次元 CAD システムの導入による利点は設計された形状データが評価や解析、設計支援に利用可能なことである。そのためには後工程で利用しやすいデータの生成を実現する必要がある。

一般に船型は滑らかな自由曲面形状を持つという特徴がある。その設計のためには、曲面を直接操作するより線図として表現された断面線などの曲線群を操作する方法が一般的である。3 次元形状である自由曲面を断面線などの平面曲線で記述する場合、滑らかさを保ちながら形状を変化させるためには対象とする曲線群を互いに関連付けて形状を操作する必要がある。

既存のシステムにおいて複数の曲線群を互いに関連付けることによる形状操作は実現されているが、その関連付けの仕方に対する系統的な研究はなされておらず、設計者の知識と経験によるところが大きい。また、このような表現では、面としてのデータは作成されていないため、計算機を用いた解析や加工には適していない。

一方、船型を設計の早い段階から 3 次元曲面データとして扱うという考え方は古くからある。だが、曲面を早い段階から作成することは従来の船型設計のプロセスとは必ずしもなじみやすいものではなく、定着しているとは言えない。そこで、現実的な方法として線図などの曲

* 東京大学人工物工学研究センター

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

*** 東京大学大学院工学系研究科

線群から曲面を生成する方法がとられている。しかし、この方法では生成された曲面に歪みが発生することが多いという問題がある。そのため、このような曲線群による間接的な修正により全体の整合性や収束性を保つことが必要になり、作業量が増加するという問題がある。

そこで、従来の設計作業に沿った方法である曲線群の操作による曲面の設計という立場をとりながら、かつ曲面としての情報を利用することで曲線の関連付けを行い、形状の品質を確保することを考える。この観点から必要とされる手法は、曲線群が入力として与えられた場合に高品質な曲面を自動的に生成するというものである。よって本研究は船体自由曲面形状の設計における曲面の生成とフェアリングを自動化するための曲面生成手法を構築することを目的とする。

2. 研究の範囲と従来研究

2.1 船型設計の流れとフェアリング

船型設計において曲線群から曲面を生成するための従来手法の流れを Fig.1 に示す。(文中の括弧内は Fig.1 との対応を示す。)

Fig. 1 Flow of surface generation in ship hullform design

まず種々の設計条件 (L, B, D, C_p curve, etc.) を満たす概略形状を正面線図 (*Lines*) として作成する (1)。個々の曲線をフェアリングするとともに、各曲線を横断する方向の曲線群を考慮して全体の整合性を確保する (2)。次に概略形状から詳細化した線図 (*Lines*) を作成し、それに対する修正やフェアリングを行う (2)。線図による詳細な形状が確定した後、曲線群の補間による曲

面 (*Surface*) 生成を行う (3)。また、生成した曲面に対してフェアリングを行う (4)。

このように曲線群による形状の確定後に曲面生成を行う方法では、生成された曲面に歪みが生じることが多いという問題がある。そのため、現実には多くの場合、歪みが少なくなりかつその曲面を大きく変えないように手作業で線図を修正することが必要となる (5)。

従って、歪みの少ない高品質な曲面を生成するためには線図や曲面に繰り返しフェアリングを施したり (2)(4)、曲面生成後に曲線設計に立ち返り、試行錯誤的に線図の修正をして滑らかな曲面を生成する (5) ということが行われている。特に曲線の設計に立ち返る作業 (5) では、どのように曲線を修正すれば修正後の曲面が充分利用可能な品質の曲面になるかが自明ではないため、作業を行うこと自体に熟練を要し、作業時間の増大も招いている。設計作業の迅速化と省力化を図るためには、このような作業の自動化により非熟練者でも短時間で十分に滑らかな曲面を生成可能にする必要がある。

そこで本研究では初期概略形状の設計時から曲面の生成とフェアリングを行い、詳細形状の設計時にもその情報を利用することで効率的に船型設計を行うことを目指す。

2.2 従来手法による曲面のフェアリング

線図による船型設計の流れに関連していくつかの研究が知られている。Harries と Nowacki¹⁾ による高品質な船型生成手法は設計条件から滑らかな曲線群を生成し、曲面まで生成する。しかし、そこで対象としているのは個々の曲線の自動フェアリングであり、それぞれに関連付けたフェアリングには触れていない。

また、曲線群に関連付けたフェアリングの研究としては Eida ら²⁾ によるものがある。これは 3 方向の断面曲線群の整合性を保つことで曲面形状フェアリングを行っている。しかし、扱っている曲線群が断面線であり曲面の特徴を表すものではないため、形状が曲面としてのうねりを含んでいたとしても検知しにくいという問題がある。

一方、一般的な形状処理の分野でも 3 次元曲面形状に対する直接フェアリングの研究は多数行われている。ここで述べる曲面とは CAD などによく用いられる B-spline や NURBS といったパラメトリック曲面のことである。4.1 節で詳細に説明するように、これらの曲面は制御点と呼ばれる格子状の点列によって定義され、曲面上の各点は 2 つのパラメータによって一意に決まる。曲面形状は制御点の並びに近い滑らかな形状になるという特徴がある。

このような曲面のフェアリング手法として最も多いも

のは曲面全体または複数の曲面パッチに対して評価関数と制約条件を設定して最適化計算を行うもの^{3)~9)}が多い。また、同様な最適化計算の一部であるが局所的にフェアリングを行う手法¹⁰⁾¹³⁾もある。これらと趣向の異なる手法としては曲面に対する光線の反射を用いて曲面の形状を修正するという手法^{14)~16)}がある。

Fig. 2 Characteristics of ship hullform

初めに最適化計算を用いた曲面のフェアリングに関して考察を行う。評価関数として最もよく使われているものは薄板の曲げひずみ E に関するものである。制約条件として最もよく使われているものは曲面上の点や制御点の移動量 V であり、 $\alpha E + \beta V$ (ただし、 α, β は定数) を最小に抑えるように制御点を移動させるというものである。^{6)~9)} しかしながら、船体の自由曲面に関してこの手法をそのまま適用しようとすると問題が生じる。それは、Fig.2に示すように船体の自由曲面は全体として滑らかな形状であるが、曲率分布には非常に大きな偏りがあるという特徴を持つためである。例えば薄板の曲げ歪み E を用いる場合、曲率の大きい部分が平坦になるという効果がある。これを船体の自由曲面に対して適用すると、船型の特徴を損なうことになる。それを防ぐため移動量 V が小さくなるように設定すると、形状のうねりが取り除けないという問題が生じる。

次に局所的なフェアリング手法に関して考察を行う。この手法はもともと曲線を対象にしたもの¹¹⁾である。それに関連して、曲線に対するフェアリングの自動化に関する研究¹²⁾がなされているため、曲面の自動フェアリングも理論的には可能である。この手法の評価基準は曲率の変化率であり、曲率の変化が不連続な部分に対して曲率の不連続性を抑えるような修正を行うものである。自動化の手法では曲率の変化率が大きいものからフェアリングの対象とする。これは局所的な手法であるため、

大域的な形状の修正には別の手法との組合せが必要である。

Fig. 3 Example of section curves

Fig. 4 Distortion of surface generated with skinning

最後に、Harries と Nowacki¹⁾の研究で用いられる曲面生成手法であるスキニングについての詳細を述べ、従来手法の問題点を明確にし、解決法を探ってみる。スキニングは複数の断面曲線が存在するとき、それらを通してような横断曲線群を求めることによって断面を通して曲面を生成する手法である。

船型設計でスキニングを利用する場合に問題となることは、スキニングによって生成される曲面が断面として与えられた曲線による拘束を受けすぎることにある。曲面は1方向のパラメータに関して単独のノットベクトルを持つため、曲線の形状や配置が複雑になると生成される曲面のある部分では良好だがある部分では不適切な形状になるという問題が発生する。Fig.3に示す断面曲線群から、一般的なスキニングによって生成した曲面形状の例をFig.4に示す。Fig.4の例においても船首バルブの船底部に著しい歪みが生じていることがわかる。またスキニングは曲線群の配置にも大きな制約があり、Fig.5に

Fig. 6 Flow of this method

Fig. 5 Section curves that cannot be skinned

示すように断面曲線群が交点を持つような場合はスキニングを用いることができないという問題がある。

断面曲線群を横断する曲線群を求めることで曲面生成するスキニング手法の概念は船型設計において本来は有効であるが、バルブ形状などの複雑な形状を持つ船型の場合、既存の手法では曲線群の形状と配置に拘束を強く受けすぎるため完全な自動化は難しい。スキニングの有効性を保持しつつ、形状の不具合を抑える機構の導入が必要である。

2.3 曲面生成手法に対する要求

以上をまとめると、船体自由曲面形状の設計では曲面生成の自動化が望ましい。そのためには従来の自動生成において発生する歪みの抑制を行う必要がある。また、従来の自動生成では利用できない配置の曲線群を利用可能にする必要がある。次に要求されるのはフェアリングの自動化である。そのためには曲線群の配置による拘束

を緩和し、曲面の特徴に応じた拘束を与える必要がある。また、それに伴い船型の曲面に適したフェアリング手法を選択する必要がある。

よって、本研究で対象とする問題を解決するには以下の手法の確立が必要となる。

1. 曲線からの自動生成における歪みを抑制する
2. 曲線群の配置による拘束を緩和する
3. 従来の手法では曲面生成に利用不可能な曲線群の利用を実現する
4. 自動化に適する曲面フェアリング手法の選択を行う

3. 提案する手法の概要

曲面のフェアリングを行う場合には対象とする形状と修正の度合により拘束を変化させる必要があることは既に述べた。そこで本研究ではこのような拘束の変化を自動的に行うことで、従来のフェアリング手法を船体の自由曲面に対して適用する。

Fig.6に本手法の流れを示す。はじめに、断面曲線群の曲率分布からそれぞれの断面曲線における拘束点を再配置することで曲線の近似を行う。拘束点の変化によって各断面曲線のパラメータ分布が変化し、曲線間の新たな関連付けがなされる。新たに関連付けられた曲線上の拘束点の配置によって各拘束点のパラメータ値を修正し、生成曲面の歪みを抑制する。

次に、関連付けられた断面を横断する曲線群を生成する。その際、従来の手法では曲面が生成不可能な配置を

持つ断面曲線群に対しても自動的に横断曲線群を生成する機構を導入する。

最後に、生成した横断曲線群に関しても曲率分布をもとに拘束点の再配置を行い、最終的な曲面形状を得る。これによって曲面としての曲率分布に対応したパラメータ分布を持つ曲面が得られる。Fig.7に本手法による曲面生成の概念図を示す。Fig.2で示した曲率分布に対応して、曲率の大きい領域ではパラメータが密に、曲率の小さい領域ではパラメータが疎になるように拘束点が移動する。

この曲面に対してさらにフェアリング手法を適用して滑らかさの向上を図る。

Fig. 7 Surface generation with constraint sliding using distribution of curvature

本手法を実現するために必要な個々の要素は以下の通りである。

1. 曲率分布を考慮した拘束点の移動による曲線曲面近似：拘束点の与え方として曲線上に定義される曲率分布と弧長を用いる。新たに生成された曲線群を等パラメータ値で結ぶ横断曲線群を考えることで曲面の生成を行う。
2. 拘束点配置の補正：個々の曲線上で独立に配置された拘束点の並びにはばらつきがあり、曲面としての品質を損ねやすいという問題がある。関連付

けられた拘束点の配置に関して局所的な修正を行うことにより、拘束点配置の補正を行う。

3. 局所パラメータの定義による補助的な曲線群の利用：本来曲面の自動生成に利用不可能な配置の曲線群を、局所パラメータを定義することで利用可能にする。
4. 曲面フェアリング手法の選択：従来あるフェアリング手法の中から代表的な手法を選び、本研究における曲面生成手法と組み合わせることで曲面のフェアリングを行う。

4. 曲率分布を考慮した曲面生成手法

4.1 B-spline 表現

本研究では曲線と曲面の表現式として B-spline 表現を用いる。

ノットベクトル $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ により、 p 次の B-spline 基底関数 $N_{i,k}$ ($k = 0, \dots, p$) は以下のように表される。ノットベクトル U は減少しない実数の並びで、それぞれの値はノットと呼ばれる。

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (2)$$

曲線 C は 1 方向のパラメータ u に関して次数 p 、ノットベクトル U 、 n 個の制御点 P_i によって定義され、以下のように表される。

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i,p}(u) P_i \quad (3)$$

また、曲面 S は 2 方向のパラメータ (u, v) に関して次数 (p, q) 、ノットベクトル (U, V) 、 $(u$ 方向に n) $\times$ $(v$ 方向に m) 個の制御点 P_{ij} によって定義され、以下のよう表される。

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{ij} \quad (4)$$

4.2 拘束点の移動による曲面近似

一般的なスキニングによって生じる歪みを解消し、かつ曲線群の特徴にもとづいて関連付けを行う機構として、拘束点の移動による曲線近似を導入する。拘束点の移動による曲線近似とは、Fig.8に示すように既存の曲線上に点列を発生させ、その点列を新たな拘束点として曲線を再構成することを指す。生成された曲線はもとの曲線上の点を厳密には通過しないため近似となるが、本研究で対象とする曲線群では曲率や接線ベクトルが急激に変化する曲線が通常扱われないため、ほとんど形状のずれは起こらない。これは、拘束点再配置による曲線近似が点と曲線の距離を広げる方向ではなく、曲線に沿った方向にずれを生じる近似だからである。

この手法によって一連の断面曲線群を近似した後、スキニングと同様にそれらを横断する曲線群を生成する。生成された横断曲線群に対してさらに拘束点再配置を行うことで、曲面に対してもこの手法を適用する。このように曲面の生成時に拘束点を再配置することで従来発生していた歪みを防ぎ、曲面のフェアリングにおける拘束点配置の調整を可能にする。その詳細な手順を以下に示す。

Fig. 8 Curve approximation with constraint sliding

まず対象とする断面曲線群 $\mathbf{C}_l^s (l = 0, \dots, m-1)$ が以下のように表されるとする。

$$\mathbf{C}_l^s(u) = \sum_{i=0}^{n_l-1} N_{i,p_l}(u) \mathbf{P}_{il}^s \quad (5)$$

ここでは、曲線の次数 p_l と制御点の数 n_l 、ノットベクトル U_l がそれぞれの断面曲線間で共通である必要はない。それぞれ曲線として最も充分な品質を確保できる条件で曲線を定義する。これらの断面曲線群から拘束点

再配置によって次数、制御点の数、ノットベクトルが共通である曲線群 $\hat{\mathbf{C}}_l^s$ を求める。

$$\mathbf{C}_l^s(u_{k,l}) = \hat{\mathbf{C}}_l^s(u_{k,l}) \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_l^s(u) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i,p}(u) \hat{\mathbf{P}}_{il}^s \quad (7)$$

ここで $u_{k,l}$ はそれぞれの断面曲線群に対して独立に与えられる拘束点のパラメータ値である。

次に断面曲線を横切るような曲線群 $\mathbf{C}_k^c (k = 0, \dots, n-1)$ を以下のように定義する。

$$\mathbf{C}_k^c(v) = \sum_{j=0}^{m-1} N_{j,q}(v) \mathbf{P}_{kj}^c \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_k^c(v_{l,i}) = \hat{\mathbf{P}}_{il}^s \quad (9)$$

ここでは曲線の次数 q と制御点の数 m は共通だが、ノットベクトル V_i は別々に定義される。

次に曲線群 $\mathbf{C}_k^c$ に対して断面曲線群と同様にパラメータ再配置による近似を行う。

$$\hat{\mathbf{C}}_k^c(v) = \sum_{j=0}^{m-1} N_{j,q}(v) \hat{\mathbf{P}}_{kj}^c \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_k^c(\bar{v}_{l,i}) = \mathbf{C}_k^c(\bar{v}_{l,i}) \quad (11)$$

ただし、曲線の次数 q と制御点の数 m 、ノットベクトル V は共通である。これによって生成される曲面 $\mathbf{S}$ は以下のように表される。

$$\mathbf{S}(u, v) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \hat{\mathbf{P}}_{ij}^c \quad (12)$$

ただし、曲面の次数とノットベクトルは u 方向と v 方向それぞれ p と q 、 U と V である。

4.3 曲線の曲率分布を考慮したパラメータ配置

ここでは拘束点の移動による曲線近似に用いるパラメータ値の決定方法に関して述べる。

拘束点の移動による曲線曲面近似を導入する理由は、曲面生成時の歪みを抑制するためと、曲面フェアリングの自動化に適する拘束点配置を持つ曲面を生成するためである。船型における自由曲面形状の特徴は前に述べたように曲率分布に大きい偏りがあることである。曲率の大きい値が集中する領域に拘束点を集めることで曲面フェアリングに適し、かつ曲率の小さい領域で拘束点

Fig. 9 Points distributed with arc length

Fig. 10 Distribution of curvature

Fig. 11 Points distributed with arc length and curvature

が分散することで局所的な歪みをさらに除去できると考える。

しかしながら、曲率分布のみによって生成する拘束点では直線部やそれに近い形状と円弧が滑らかに接続したような曲線に対しては拘束点の配置に著しい偏りが生じ、生成される曲線の形状も折れが発生するなどの問題が起こる。このため、曲率分布だけでなく弧長も考慮することでこれを防ぐ必要がある。

曲率分布を考慮して点列を配置することで曲線を再構成する場合、点列に固定長パラメータを割り当てることで曲率分布に応じたパラメータ配置を得ることを考えるが、固定長パラメータからの曲線生成では不具合が起こりやすい。¹⁷⁾

一方、弦長パラメータを割り当てた場合には生成される曲線はたいいてい滑らかになるが、これでは拘束点を曲

率分布に従って配置したにも関わらず、生成される曲線はやはりパラメータ配置が弧長に対応してしまう。

そこで、弦長パラメータにより生成した滑らかな曲線を固定長パラメータに変換する。これにより生成される曲線は本研究の対象とする領域では十分な品質を保持する。

以上の考えから構築した拘束点配置のパラメータ値決定のための評価式を以下に示す。

定義域 $[u_{min}, u_{max}]$ の曲線 $C(u)$ を考える。この曲線上の全ての点で曲率 $\kappa(u)$ が定義されるとする。ここで、あるパラメータ範囲 $[a, b]$ における弧長と曲率の積分値をそれぞれ以下のように定義する。

$$V^d(a, b) = \int_a^b |\dot{C}(u)| du \quad (13)$$

$$V^c(a, b) = \int_a^b \kappa(u) du \quad (14)$$

曲線に配置する拘束点の数 n_{div} が与えられたとき、曲率分布を考慮したパラメータ配置 $\{u_i | i = 0, \dots, n_{div} - 1\}$ ($u_0 = u_{min}, u_{n_{div}-1} = u_{max}$) は次式を満たすとする。

$$V^d(u_{i-1}, u_i) + k^c V^c(u_{i-1}, u_i) = \frac{V^d(u_{min}, u_{max}) + k^c V^c(u_{min}, u_{max})}{n_{div}} \quad (15)$$

$$k^c = w^c \frac{V^d(u_{min}, u_{max})}{V^c(u_{min}, u_{max})} \quad (16)$$

ここで w^c は弧長に対する曲率分布の重みを表す。 w^c の値は経験的に求める。これによって弧長と曲率分布によるパラメータ配置を求める。

断面曲線形状は通常、点列を滑らかに補間する曲線として設計される。その場合、パラメータ配置は弦長を用いることが多い。そのような曲線は Fig.9 に示すように、等パラメータ間隔で曲線上に点を配置するとそれぞれの点で区切られる曲線の弧長はほぼ同じになる。

一方、Fig.10に曲線上の点における曲率ベクトルの様子を示す。ここでは曲率ベクトルの長さが曲率の相対的な大きさを示している。また、(15) 式によって配置された点の様子を Fig.11に示す。このように本手法による拘束点パラメータ値を決定することで、曲率分布の影響による拘束点の移動を実現する。

4.4 曲線群の関連付けによるパラメータ修正

Fig.12に示すのは、実線で表される各断面曲線に対して (15) 式により決定した拘束点列を丸印で表したもの

Fig. 12 Network of points distributed with arc length and curvature parameterization

Fig. 13 Fairing parameters with connecting constraint

である。断面を横断する方向に関連付けられる拘束点の並びが点線で表されている。それぞれの曲線の曲率分布から独立に点列を配置すると、曲線を横断する方向の点列の並びにばらつきが生じる。この状態で曲面を生成すると曲面のパラメータ配置に歪みが生じることになる。それを解決するために隣接する拘束点との間に局所的なバネモデルを定義し、隣接する拘束点のパラメータを参照して各パラメータ値を補正することで各曲線上に点列が滑らかに配置されるようにする。

Fig.13に示すように、対象とする拘束点と曲線があるとき、その曲線に隣接する曲線と拘束点により構成される局所的なパラメータ平面を考える。

m 本の曲線上で(15)式により各パラメータ値 $\{u_{i,j} | i = 0, \dots, n_{div} - 1, j = 0, \dots, m - 1\}$ が与えられたとして、

以下の式を導入する。

$$\bar{u}_{i,j} = \frac{k_{i,j-1}^m u_{i,j-1} + k_{i,j}^m u_{i,j} + k_{i,j+1}^m u_{i,j+1}}{k_{i,j-1}^m + k_{i,j}^m + k_{i,j+1}^m} \quad (17)$$

ただし $k_{i,j}^m$ は各パラメータに対する重みである。 $k_{i,j}^m$ は拘束点間の距離等の影響を考慮して経験的に求める。求められた $\{\bar{u}_{i,j} | i = 0, \dots, n_{div} - 1, j = 0, \dots, m - 1\}$ を修正パラメータ値とし、繰り返し計算を行うことでパラメータ配置の修正を行う。

4.5 局所パラメータ導入による補助曲線の利用

Fig. 14 Additional curves

従来のスキニングでは利用不可能な配置を持つ曲線群を、曲面を生成する際の補助曲線として利用することを考える。従来の自動生成に利用不可能な配置の曲線とは、Fig.14に示すように他の断面曲線上に端点が存在する曲線のことである。今後はこの曲線を補助曲線と呼ぶことにする。

曲線はそれぞれ独自のパラメータ配置を持つ。補助曲線のパラメータを局所パラメータとみなし、通常の断面曲線が持つパラメータを大域パラメータとする。大域パラメータから局所パラメータへの変換式を導入し、隣接する通常の断面曲線の拘束点から補助曲線上の拘束点配置を求める。

定義域 $[u_{min}^l, u_{max}^l]$ の補助曲線 $C_c^a(u^l)$ 、補助曲線の端点が存在する定義域 $[u_{min}^g, u_{max}^g]$ の断面曲線 $C_b^a(u^g)$ 、補助曲線を挟む断面曲線 $C_b^g(u^g)$ とする。

補助曲線の始点と終点に対応する大域パラメータ値をそれぞれ u_s^g, u_e^g とすると、大域パラメータから局所パラメータへの変換は次式で表される。

Fig. 15 Arranging constraint on an additional curve

$$f(u_g) = u_{min}^l + \frac{u_s^g - u_e^g}{u_e^g - u_s^g} (u_{max}^l - u_{min}^l) \quad (18)$$

断面曲線 C_a^n 上のパラメータ領域 $[u_s^g : u_e^g]$ 内に存在する拘束点のパラメータ値 $u_{a,i}^g$ を求める。また、それと関連付けられる曲線 C_b^n 上のパラメータ値 $u_{b,i}^g$ を用いて補助曲線上の拘束点の大域パラメータ値 $u_{c,i}^g$ を求める式は次式で表される。

$$k_a^a = |C_b^n(u_{b,i}^g) - C_c^a(f(u_{a,i}^g))| \quad (19)$$

$$k_b^a = |C_a^n(u_{a,i}^g) - C_c^a(f(u_{a,i}^g))| \quad (20)$$

$$u_{c,i}^g = \frac{k_a^a u_{a,i}^g + k_b^a u_{b,i}^g}{k_a^a + k_b^a} \quad (21)$$

4.6 曲面のフェアリング

本研究で構築した曲面生成手法と既存のフェアリング手法を組み合わせ、状況に応じて使い分けることで最終的なフェアリングを行う。ここでは従来手法として、金井⁹⁾の手法と Farin¹⁰⁾の手法を例にとる。

金井の手法は大域的な最適化計算を行うもので、曲面上に拘束点を配置してその点における評価式と制約条件を用いる。曲面の曲率分布による拘束点配置の移動を本手法で導入しているため、従来の手法に対する要求は曲面上の点や曲面の制御点の移動量を調整することである。大域的な手法では移動量の調整を行う係数が含まれているため、この係数を調整することで要求を満たすことが可能である。

Farin¹⁰⁾の手法は局所的な最適化計算を行うもので、曲率の変化が大きい箇所を選択して曲率の変化が小さくなるように制御点を移動させる。この手法は局所的であり、移動量を調整することはできない。しかし大域的な手法に比べて移動量が非常に微小であり、全体の形状として変化はほとんど生じない。曲面上のどの位置をフェアリングするかという判断を適切に行えば有効である。船型としての特徴を参考にすればその要求を満たすことが可能である。

5. 実行例

Fig. 16 Arranging constraint points on section curves

Fig. 17 Generation of cross-sectional curves

Fig. 18 Arranging constraint points on cross-sectional curves

Fig. 19 Generated surface

Fig. 20 Comparing generated sections with original points

以上のような手法を用いて実際に曲面を生成した例を示す。入力とした断面曲線群は Fig.5に示す従来の曲面生成では不可能な曲線配置を含むものである。また、(16)式において $w^c = 1$ 、(17)式において $k_{i,j}^m = 1$ ($i = 0, \dots, n_{div} - 1, j = 0, \dots, m - 1$) を用いた。

Fig.16で断面曲線群上に個々のパラメータ点を発生させ関連付けによる修正を行い、それを用いて Fig.17に示すように断面を横断する曲線群を生成する。Fig.18では断面と同様に横断曲線群上にもパラメータ点を発生させ、それによって Fig.19の曲面を生成した。

生成した曲面は目的としたように曲率分布に従って疎密のあるパラメータ配置になっている。また、Fig.20に本手法によって生成された曲面の断面線と入力とした断面線の比較を示すが、大きなずれは生じていないことがわかる。

6. 結 言

本研究は船型設計における曲面の生成とフェアリングを自動化するための手段として、断面曲線群を入力とする曲面生成手法の構築を目的とした。

断面曲線群の曲率分布を考慮し、各曲線の拘束点を再配置することで曲線群の関連付けを行い、曲率分布に対応したパラメータ分布を持つ曲面の生成を可能にした。その際、それぞれの拘束点配置で生じる振動を抑制するため隣接する曲線の拘束点配置を参照することで高品質な曲面生成を実現した。また、従来の手法では利用不可能な配置を持つ曲線群の利用も実現した。構築した手法に関して実例を用いてその効果を検証し、次のような知見が得られた。

本手法による曲面生成は近似であるが、入力とした断面曲線上の点と生成された曲面の断面曲線との比較によると大きなずれは生じず、手法として有効であることを示した。また、曲線の配置と形状に強く拘束された歪みの存在がなく、形状全体として滑らかな曲面生成を達成することを示した。

今後は従来手法の曲面フェアリングとの組合せにより、さらに曲面としての品質向上を自動化するための研究を行う。

参 考 文 献

- 1) S.Harries and H.Nowacki: Form parameter approach to the design of fair hull shapes, *Proceedings of 10th ICCAS* Vol.2, 1999, pp.341-356
- 2) Y.Eida, Y.Nishikido and Y.Sasaki: Development of practical 3-D lines fairing system for ship hull form (MELFAS) and its application to CIMS, *Proceedings of 10th ICCAS* Vol.2, 1999, pp.373-386
- 3) J.Kjellander: Smoothing of bicubic parametric surfaces, *CAD*, 15(5), (1983), pp.288-293
- 4) N.G.Fog: Creative definition and fairing of ship hulls using a B-spline surface, *CAD*, 16(4), (1984), pp.225-229
- 5) D.F.Rogers and N.G.Fog: Constrained B-spline curve and surface fitting, *CAD*, 21(10), (1989), pp.641-648
- 6) H.Hagen and G.Schulze: Automatic smoothing with geometric surface patches, *CAGD*, 4, (1987), pp.231-235

- 7) D.Ferguson, P.Frank and A.Jones : Surface shape control using constrained optimization on the B-spline representation , *CAGD*, 5, (1988), pp.87-103
 - 8) N.J.Lott and D.I.Pullin : Method for fairing B-spline surface, *CAD*, 20(10), (1988), pp.597-604
 - 9) 金井崇 : 複合多項式曲面の線形平滑化理論, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士論文, 1995
 - 10) G.Farin and N.Sapidis : Curvature and the Fairness of Curves and Surfaces, *IEEE Computer Graphics and Applications* , March, (1989), pp.52-57
 - 11) G.Farin, G.Rein, N.Sapidis and A.Worsey : Fairing cubic B-spline curves, *CAGD*, 4, (1987), pp.91-103
 - 12) N.Sapidis and G.Farin : Automatic fairing algorithm for B-spline curves, *CAD*, 22(2), (1990), pp.121-129
 - 13) S.Hahmann and S.Knoz : Knot-removal surface fairing using search strategies, *CAD*, 30(2), (1998), pp.131-138
 - 14) R.Klass : Correction of local surface irregularities using reflection lines, *CAD*, 12(2), (1980), pp.73-77
 - 15) E.Kaufmann and R.Klass : Smoothing surfaces using reflection lines for families of splines, *CAD*, 20(6), (1988), pp.312-316
 - 16) C.Zhang and F.Cheng : Removing local irregularities of NURBS surfaces by modifying highlight lines, *CAD*, 30(12), (1998) , pp.923-930
 - 17) L.Piegl and W.Tiller : The NURBS Book, 2nd edition, Springer, 1997
 - 18) 古川慈之 : 曲率分布を考慮した船体自由曲面の生成手法に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻修士論文, 2000
-