

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360060

研究課題名(和文)幾何処理による曲面曲率コントロールとその Isogeometric 解析への応用

研究課題名(英文) Surface curvature control by iterative geometric algorithm and its application to isogeometric analysis

研究代表者

前川 卓 (Maekawa, Takashi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70361863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、既存の双三次B-spline曲面において等パラメータ曲線の曲率を対話的に制御することにより曲面形状を編集する手法を開発した。幾何学的な法則に従って制御点の位置を逐次的に移動させることにより交差する2方向の等パラメータ曲線上の曲率を指定した位置で対話的に制御することが可能となった。また、薄肉円筒波形管のプロファイル曲線の波長と振幅を固定し、特徴点における曲率をパラメータとして軸圧縮解析とCNC旋盤により削りだしたアルミ製波形管を用いた実験を実施し、波形の曲率がエネルギー吸収に及ぼす影響について検討した。この結果、曲率が大きくなるに従ってエネルギー吸収量も増加することが確認された。

研究成果の概要(英文)：This research presents a method for modifying the shapes of existing uniform bi-cubic B-spline surfaces by interactively editing the curvatures along isoparametric curves. The method allows us to edit the curvatures of the two intersecting isoparametric curves at each knot with specified positions, unit tangents, and unit normals. The user adjusts the radii of circles, representing the radii of curvature in the u and v isoparametric directions directly via a GUI. We also studied the energy absorption characteristics of cylindrical corrugated tubes under compression using a combination of numerical analysis and experiment. The corrugated surface is constructed by revolving a wave-like B-spline profile curve about the vertical axis. The curvature value at peaks of the profile curve is varied gradually from a smaller to a larger value keeping the wave length and amplitude unchanged. It has been shown that the amount of energy absorption becomes larger as the curvature becomes larger.

研究分野：形状処理工学

キーワード：反復幾何処理 曲率制御 isogeometric解析 コルゲート管 衝撃緩衝装置

1. 研究開始当初の背景

CAD, CAM, CG, VR等の3次元形状モデリングを扱う分野において,自由曲面の曲率を直接,自由にコントロールすることは長年の夢であり,最も重要な技術的課題の一つである.この技術開発は,自動車のボディ等の意匠曲面の設計,航空機や船舶等流体力学特性を満たす曲面の設計など様々な分野からのニーズがあり,その技術開発が急務とされている.一方,NURBS関数を直接内挿関数(形状関数)に用いる新しい有限要素法(Isogeometric解析(以下IgA))が近年開発されている.従来のFEM解析とは異なり,解析対象をメッシュ化する必要がなく,CADで生成された形状を直接解析に使用できるため計算精度を向上させることができる.本研究では,曲面の曲率を直接コントロールできるアルゴリズムを開発するとともに,曲率を厳密に考慮したモデルを対象とするIsogeometric解析の高精度化を実現することにより相乗効果を図り,軸圧縮の計算と実験を通してその妥当性を検証する.

2. 研究の目的

(1) 曲率コントロールによる意匠曲面設計

現在,CAD・CAM技術の発達により意匠曲面を多く取り入れた工業製品の設計・製造が容易になってきた.特に,自動車のボディの意匠デザインは自動車の販売台数に直接影響を与える為,設計者がしのぎを削ってデザインに取り組んでいる.このような意匠曲面の設計は,曲面形状を決定付けるフィーチャ曲線と呼ばれる特徴的な曲線を設計することから始まる.フィーチャ曲線の曲率分布は外観曲面の美しさに大きな影響を与える為,設計時には細心の注意を払いながら生成する必要がある.後の設計プロセスでは,フィーチャ曲線を基に曲面を構成し,直接的に曲面を編集しながら設計を行っていくが,曲面上の曲率を考慮した編集は一般的に行われていない.これは曲率を制御する場合,複雑な非線形偏微分方程式を解く必要があり困難な為である.本研究では,この非線形方程式を解かずに,既存の双三次 B-spline 曲面において,等パラメータ曲線の曲率を対話的に制御することにより曲面形状を編集する手法を提案する.幾何学的な法則に従って制御点の位置を逐次的に移動させることにより交差する2方向の等パラメータ曲線上の曲率を指定した位置で制御する.ユーザーは制御したい箇所の制御点やノットを直接操作することなく曲率円の半径を変えることにより,直感的に曲率を制御することができる.さらに,この点ベースの曲率制御法を用いて,既存曲面の等パラメータ曲線に対数美的曲線を埋め込む手法を開発する.

(2) 波形管のプロファイル曲線の曲率分布がエネルギー吸収特性に及ぼす影響

近年,岡庭ら[1]の研究により,Non-Uniform Rational B-splines (NURBS) で表現された回転面の曲率を直接,自由にコントロールで

きるようになった.この技術は,と緩衝材などに用いられる波形管曲面[3]の設計に有効であると考えられる.一方,Isogeometric解析(IgA)により計算精度を向上させることが可能であることを既に述べた.特に軸圧縮解析などでは形状の曲率分布が大きく計算に影響することが予測される.本研究では,波形の波長と振幅を固定し,曲率をパラメータとしてIgAによる線形軸圧縮解析を実施し,曲率と反力の関係を調べる.また,これと平行して,実際の軸圧縮試験を実施する.CNC旋盤で作成したアルミ製波形管に強制変位を加え,波形管表面に塗布したランダムパターンからデジタル画像相関法(DIC)によってひずみを算出する.変形の様子をカメラで捉えながら反力を測定し,波形管のエネルギー吸収を求め,波形の曲率がエネルギー吸収に及ぼす影響について検討する.

3. 研究の方法

(1) 曲率コントロールによる意匠曲面設計

本研究は点ベースと曲線ベースの二つの曲率制御法を提案する.入力はアンクランプトの一樣双三次 B-spline 曲面とするが,入力曲面がクランプトされたものや非一樣の曲面であっても,それらをアンクランプトの一樣双三次 B-spline 曲面に変える手法が提案されているので様々な曲面に本手法を適用出来る.

本報告では (i, j) 番目の一樣双三次 B-spline 曲面のパッチ $r_{ij}(u, v)$ を,制御点 P_{ij} を用いて以下の様に表記する.

$$r_{ij}(u, v) = \begin{bmatrix} 1 & u & u^2 & u^3 \end{bmatrix} [M] \begin{bmatrix} P_{i-1,j-1} & P_{i-1,j} & P_{i-1,j+1} & P_{i-1,j+2} \\ P_{ij-1} & P_{ij} & P_{ij+1} & P_{ij+2} \\ P_{i+1,j-1} & P_{i+1,j} & P_{i+1,j+1} & P_{i+1,j+2} \\ P_{i+2,j-1} & P_{i+2,j} & P_{i+2,j+1} & P_{i+2,j+2} \end{bmatrix} [M]^T \begin{bmatrix} 1 \\ v \\ v^2 \\ v^3 \end{bmatrix}$$

ここで

$$[M] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix}$$

である. 上式において $v=0$ である等パラメータ曲線を u 方向のフィーチャ曲線と呼ぶ. この u 方向のフィーチャ曲線の制御点 S_{ij} は次式で求まる.

$$S_{ij} = \frac{1}{6} (P_{ij-1} + 4P_{ij} + P_{ij+1})$$

同様に v 方向のフィーチャ曲線の制御点 T_{ij} は次式で求まる.

$$\mathbf{T}_{ij} = \frac{1}{6}(\mathbf{P}_{i-1j} + 4\mathbf{P}_{ij} + \mathbf{P}_{i+1j})$$

既存の B-spline 曲面が与えられたとして等パラメータ曲線のノット $\mathbf{r}_{ij}(0,0)$ における u 方向の曲率を制御する場合を考える。つまり入力としてノットの位置 $\mathbf{r}_{ij}(0,0)$, 単位接線ベクトル $\mathbf{t}_{ij}^u, \mathbf{t}_{ij}^v$, 単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{ij}^u, \mathbf{n}_{ij}^v$, 曲率 $\kappa_{ij}^u, \kappa_{ij}^v$ が与えられているとする。ここで添字の u, v はそれぞれの方向を示している。我々の手法ではまずフィーチャ曲線の連続する3点の制御点 $\mathbf{S}_{i-1j}, \mathbf{S}_{ij}, \mathbf{S}_{i+1j}$ を \mathbf{t}_{ij}^u と \mathbf{n}_{ij}^u が張る平面上に投影する。次にフィーチャ曲線の曲率を次式により制御する。

$$\hat{\mathbf{S}}_{i-1j} = \mathbf{S}_{i-1j} + \frac{1}{2}\mathbf{t}_{ij}^u \left(\|\mathbf{S}_{i+1j} - \mathbf{S}_{i-1j}\| - \sqrt{\frac{12}{\kappa_{ij}^u} ((\mathbf{r}(0,0) - \mathbf{S}_{i-1j}) \times \mathbf{t}_{ij}^u) \cdot \mathbf{t}_{ij}^u \times \mathbf{n}_{ij}^u}} \right)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{ij} = \frac{3}{2}\mathbf{r}(0,0) - \frac{1}{2}\mathbf{S}_{i-1j} - \frac{1}{4}\|\mathbf{S}_{i+1j} - \mathbf{S}_{i-1j}\| \mathbf{t}_{ij}^u$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{i+1j} = \mathbf{S}_{i+1j} + \frac{1}{2}\mathbf{t}_{ij}^u \left(\|\mathbf{S}_{i+1j} - \mathbf{S}_{i-1j}\| - \sqrt{\frac{12}{\kappa_{ij}^u} ((\mathbf{r}(0,0) - \mathbf{S}_{i-1j}) \times \mathbf{t}_{ij}^u) \cdot \mathbf{t}_{ij}^u \times \mathbf{n}_{ij}^u}} \right)$$

ただし「 $\hat{\cdot}$ 」は新しい制御点を意味する。実際にはユーザーは図1に示すような曲率円の半径を対話的に変えることで曲率を制御できる。そして最後にフィーチャ曲線の制御結果を曲面へと反映させる操作を次式で行う。

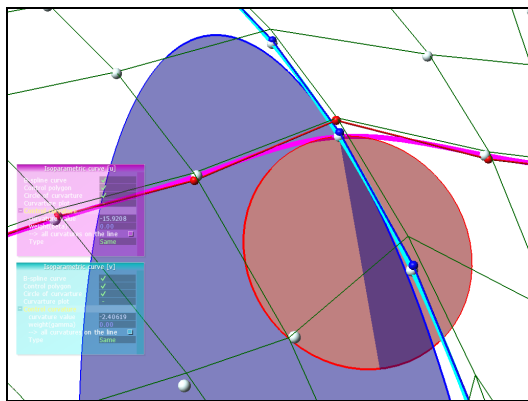


図1 点ベース曲率コントロール

$$\hat{\mathbf{P}}_{i-1j} = \frac{1}{4}(6\hat{\mathbf{S}}_{i-1j} - \mathbf{P}_{i-1j-1} - \mathbf{P}_{i-1j+1})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{ij} = \frac{1}{4}(6\hat{\mathbf{S}}_{ij} - \mathbf{P}_{ij-1} - \mathbf{P}_{ij+1})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{i+1j} = \frac{1}{4}(6\hat{\mathbf{S}}_{i+1j} - \mathbf{P}_{i+1j-1} - \mathbf{P}_{i+1j+1})$$

ただし上記の操作では $\mathbf{P}_{i-1j-1}, \mathbf{P}_{ij-1}, \mathbf{P}_{i+1j-1}, \mathbf{P}_{i-1j+1}, \mathbf{P}_{ij+1}, \mathbf{P}_{i+1j+1}$ は動かない。この手法は v 方向の曲率も同様に制御でき、それぞれの方向で独立して変形することが可能である。

実際の意匠設計ではフィーチャ曲線に沿った曲線ベースの制御に対する需要が多い。そこで以下に曲線ベースでの曲率制御方法について述べる。

点ベースの曲率制御法では制御した点の周辺のノットが移動する為、全てのノットを独立して任意に制御することは出来ない。よって曲線ベースの曲率制御には自由度の増加が必要となる。これは B-spline 曲面の各スパンに2回ノット挿入を行うことにより実現できる。

4. 研究成果

(1) 曲率コントロールによる意匠曲面設計

図2は 5×5 の制御点から構成される一様双三次 B-spline 曲面で表された自動車のフェンダーのモデルとそのガウス曲率を示す。制御前のモデル(a)では中央でガウス曲率の絶対値が大きくなっているが、この手法を用いて曲率を制御したことによりモデル(b)ではガウスの絶対値を小さくすることが出来ることが分かる。これにより応力集中などを避けることが可能となる。

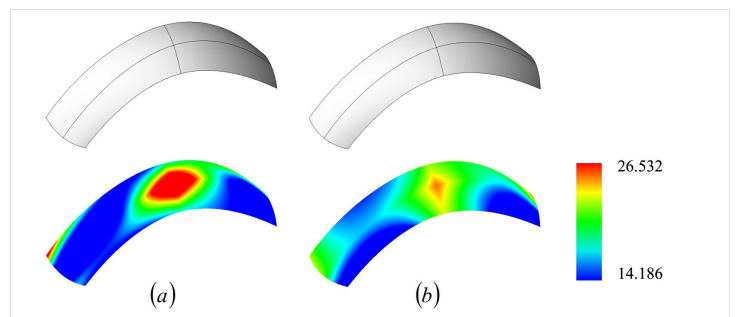


図2 点ベースによる曲率制御の適用例

図3は中央に対数美的曲線[2]をフィーチャ曲線として持つ自動車のボンネットのモデルの制御前と制御後の曲面形状を示している。制御前に比べフィーチャ曲線が曲面上で

強調されていることが分かる．この制御の手順を以下に示す．

曲率対数グラフの直線の傾き α , 切片 , θ の範囲を決定する .

標準系で描かれた対数美的曲線を並進, 回転, スケーリングの操作を施しボンネット形状に合わせる .

得られた対数美的曲線を元の曲線のスパンの数で分割し分割点での情報を格納する .

ノット挿入を行う .

得られた対数美的曲線の分割点における位置, 単位接線, 単位法線, 曲率の値を補間する .

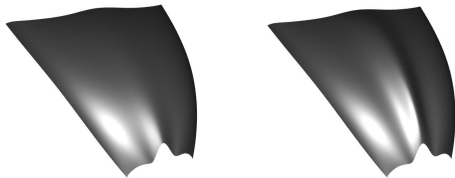


図 3 対数美的曲線を埋め込んだ自動車フード曲面(右). 左はオリジナル曲面.

本研究では既存の双三次 B-spline 曲面を元にして等パラメータ曲線のノットにおける位置, 単位接線及び単位法線の方向そして曲率を対話的に制御する方法を提案した. 本手法による貢献は以下の通りである .

- 点ベースでの等パラメータ曲線のノットにおける位置, 単位接線及び単位法線の方向そして曲率を対話的に制御することが可能となり, シェル構造物の応力集中を減らすことに応用できる.
- 曲面上のフィーチャ曲線に対数美的曲線を埋め込むことが可能となり, 意匠曲面設計へのツールとして期待ができる .

しかし現時点で提案手法には以下の制約が存在する .

- フィーチャ曲線は入力曲面の等パラメータ曲線上になければならない .
- ベースとなる曲面を大きく変形するとユーザーの意図しないくぼみが曲面上に現れる .

今後の展望として以下の様なものがある .

- 曲面上の任意の曲線での制御手法の開発する .
- 変形量が多い際の意図しないくぼみを改善する手法を開発する .
- 双三次より次数の高い B-spline 曲面へ拡張する .

(2) 波形管のプロファイル曲線の曲率分布がエネルギー吸収特性に及ぼす影響

振幅 a , 波長 2λ で定義される波形の特徴点において設定された曲率ベクトル(図 5(a)参照)を一様 B-spline 曲線で補間する(図 5(b)参照)ことによって図 4 に示すようなさまざまなプロファイル曲線を生成することができる[1]. 次にプロファイル曲線にオフセットを施し(図 5(c)参照), 1 回転させることによって波形管形シェル・ヴォリューム(図 5(d)参照)を生成する .

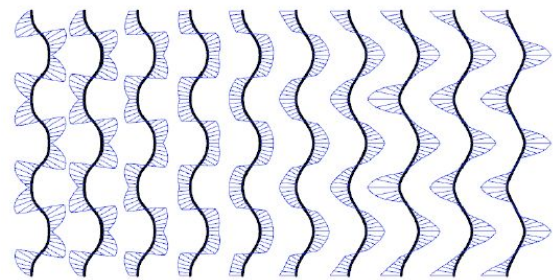


図 4 特徴点における曲率を $\kappa = -0.02$ (左端)から $\kappa = -0.2$ (右端)まで変化させた曲線群とそれらの曲率分布

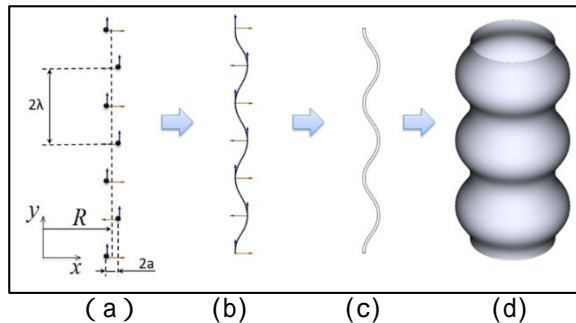


図 5 波形管形シェル・ヴォリュームの生成方法

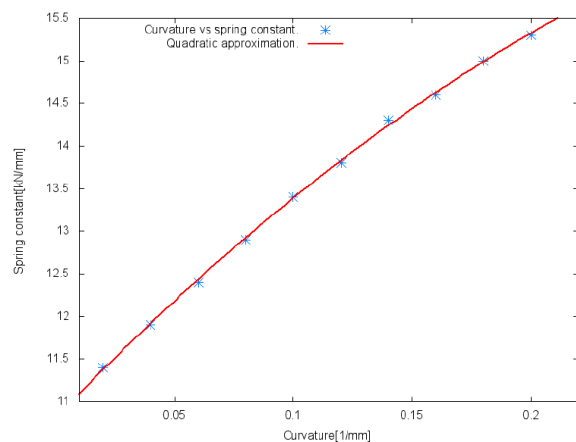


図 6 特徴点における曲率を変化させた場合の波形管のバネ定数

波形管(外形 36 mm, 内径 32mm, 長さ 94mm)のプロファイル曲線($\rho=15$ mm, $a=3$ mm)の特徴点における曲率を変化させた場合の波形管のバネ定数を線形軸圧縮 1gA により求めた。図 6 に示すとおり, バネ定数は特徴点の曲率の増加と共に上がり, 凸の 2 次曲線に沿って増加していることが分かる。次にアルミ製波形管に対して強制変位を加え, 波形曲率分布によるエネルギー吸収特性の影響について調べた(図 7, 10 参照)。実験に際し, 波形管表面にはランダムパターンを塗布し, デジタル画像相関法(DIC)によりひずみの測定を行った(図 9 参照)。



図 7 強制変位による軸圧縮試験: 波形管表面にはランダムパターンが塗布しており DIC により歪を算出する。

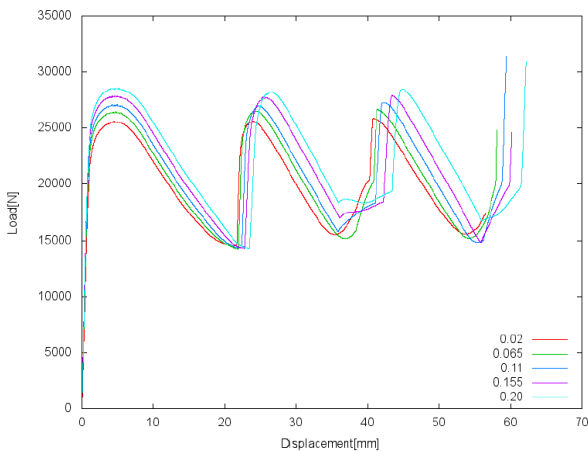


図 8 特徴点における曲率が $\rho=0.02, 0.065, 0.11, 0.155, 0.2$ の場合の荷重変位曲線

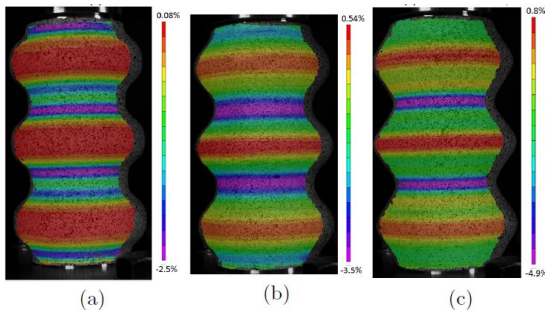
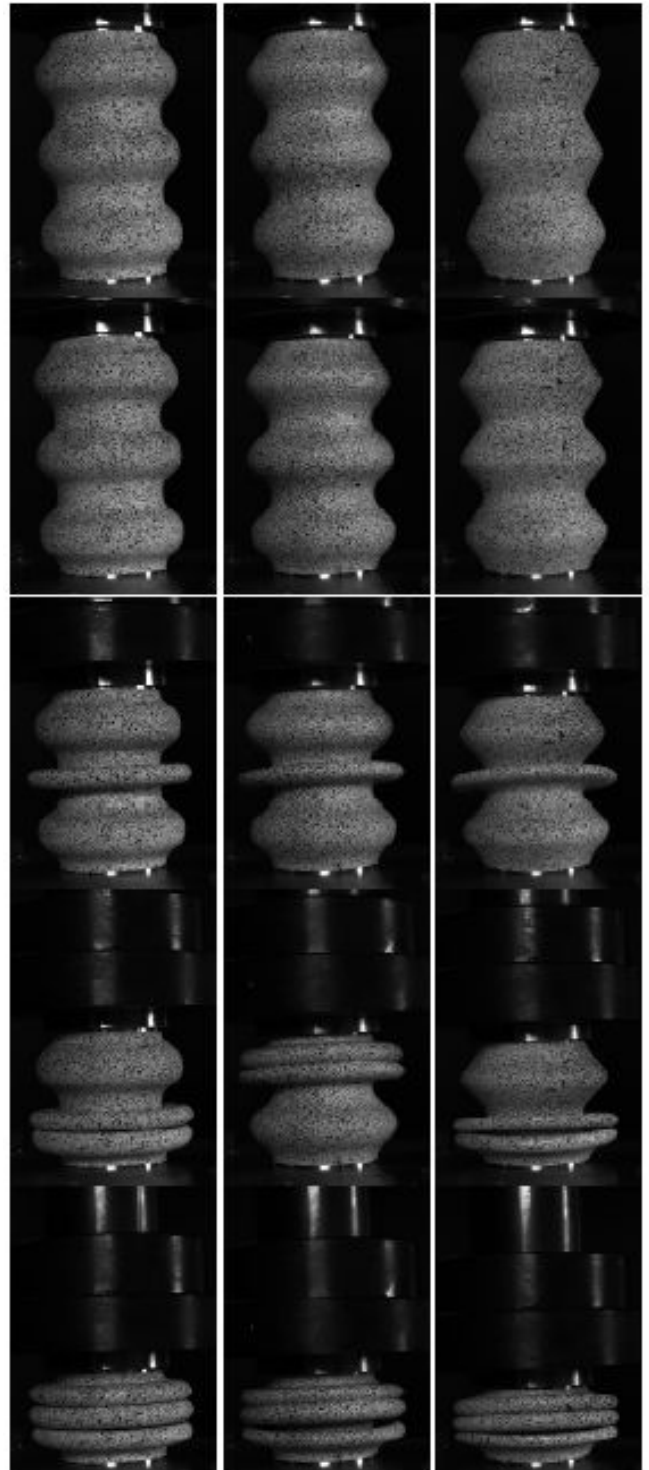


図 9 DIC によって計測された軸方向歪. (a) $\rho=0.02$ (b) $\rho=0.11$ (c) $\rho=0.2$



(a) $\rho=0.02$ (b) $\rho=0.11$ (c) $\rho=0.2$
図 10 波形管の軸圧縮試験

軸圧縮試験時の特徴点における曲率が $\rho=0.02, 0.065, 0.11, 0.155, 0.2$ の場合の荷重変位曲線を図 8 に示す。図 9 は図 8 の反力の最初のピークにおける軸方向の歪である。歪が曲率の大きい箇所集中していることが分かる。このことにより, 歪硬化が発生し, 曲率が高いほど高い反力が得られることが分かる。さらに, 図 10 より波形管の特徴点における曲率が高いほど平たく折りたたまれ

ていることがわかる．以上より以下のような結論が得られる．

- 特徴点における曲率が大きくなるに従って，波形管のバネ定数が大きくなりエネルギー吸収量も大きくなる．
- また，曲率の大きい箇所で応力が集中し，歪硬化により大きな反力が得られる．
- さらに，曲率が大きいほど折りたたみ効果が大きく大きなエネルギー吸収がえられる．

<引用文献>

[1] S. Okaniwa, A. Nasri, H. Lin, A. Abbas, Y. Kineri, and T. Maekawa, "Uniform B-spline curve interpolation with prescribed tangent and curvature vectors", IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics 18(9), pages 1474 - 1487, 2012.

[2] R. Ziatdinov, N. Yoshida, T. Kim, Analytic parametric equations of log-aesthetic curves in terms of incomplete gamma functions. Computer Aided Geometric Design, 29 (2) pages 129-140, 2012

[3] D. H. Chen and S. Ozaki, "Numerical study of axially crushed cylindrical tubes with corrugated surface", Thin-walled Structure, 47, pages 1387-1396, 2009.

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 1件)

Y. Kineri, S. Endo and T. Maekawa, "Surface design based on direct curvature editing", Computer Aided Design 55(10), pages 1-12, 2014. 査読有
doi:10.1016/j.cad.2014.05.001

[学会発表](計 9件)

金 勝基, 佐々木 雄飛, 竹澤 正仁, 前川 卓, 「幾何処理による B-SPLINE VOLUME フィッティングとその可視化」, 関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会 No.1317, pages 1-2, 日本機械学会, 2015 年 3 月 20 日. 横浜国立大学, 横浜市保土ヶ谷区

今井 琢麻, 熊谷 盛徳, 前川 卓, 「波形管軸圧縮時に波形曲率が最大応力に及ぼす影響の研究」, 関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会, No.1314, pages 1-2, 日本機械学会, 2015 年 3 月 20 日 横浜国立大学, 横浜市保土ヶ谷区

佐々木 雄飛, 竹澤 正仁, 金 勝基, 前川 卓, 「幾何処理による離散データの B-spline volume 補間」, 第 24 回設計工学・システム部門講演会 CD-ROM 論文集, No. 2415, 日本機械学会, pages 1-5, 2014 年 9 月 18 日. 徳島大学 常三島キャンパス, 徳島市南常三島

青柳 広太, チャン ダン ティエン, 松井

和己, 前川 卓, 「NURBS ソリッドを用いた 3 次元アイソジオメトリック解析環境の開発」, 第 19 回日本計算工学講演会, 2014 年 06 月 12 日, 広島国際会議場(広島市).

蓼沼 周, 遠藤 修平, 前川 卓, 「微分幾何学に基づく NACA 翼型形状の B-spline 曲線による近似方法」, 関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会, No. 1913, pages 1-2 日本機械学会, 2014 年 3 月 14 日. 東京農業大学 小金井キャンパス, 東京都小金井市

遠藤 修平, 前川 卓, 「美的曲線を取り入れた意匠曲面の曲率コントロール」, 第 23 回設計工学・システム部門講演会 CD-ROM 論文集, No. 3102, 日本機械学会, pages 1-5, 2013 年 10 月 25 日. 読谷村文化センター会議室, 沖縄県読谷村

チャン ダン ティエン, 前川 卓, 「Isogeometric 解析用 3D NURBS ソリッドの生成方法」, 第 23 回設計工学・システム部門講演会 CD-ROM 論文集, No. 3103, 日本機械学会, pages 1-6, 2013 年 10 月 25 日. 読谷村文化センター会議室, 沖縄県読谷村

Y. Kineri, W. Choi, and T. Maekawa, "Constrained B-spline Surface Fitting by Iterative Geometric Approximation Algorithm", ACDDE2012, Niseko Japan, December 2012.

木練 佑樹, 前川 卓, 「幾何アルゴリズムによる拘束条件付き B-spline 曲面フィッティング」, 第 22 回設計工学・システム部門講演会 CD-ROM 論文集, No. 3307, 日本機械学会, 2012 年 9 月 28 日. 広島大学工学部, 広島県東広島市鏡山

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://maekawalab-ynu.com/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 卓 (MAEKAWA, Takashi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 70361863

(2) 研究分担者

澁谷 忠弘 (SHIBUTANI, Tadahiro)

横浜国立大学・安心・安全の科学研究教育センター・准教授

研究者番号: 10332644

松井 和己 (MATSUI, Kazumi)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号: 00377110