移動最小自乗法による任意曲面上のメッシュレス測地線探索

川島 徹也[*1]　矢橋 晋太郎[*2]　野口 裕久[*3]　横堀 一雄[*4]

梗　概

膜構造物の設計において、平面に展開する際の裁断線となる測地線の探索は非常に重要である。一般的な三次元膜構造上の測地線を求めるには、その形状解析に用いられた有限要素メッシュを用いて測地線探索を行うことが多いが、メッシュ境界にて曲率が不連続となるために、なめらかな測地線を求めることは非常に困難である。一方、近年構造解析の分野ではメッシュレス法と呼ばれるメッシュを必要としない解析手法の研究が注目されている。有限要素による離散化と異なり、近傍の節点における値から移動最小自乗法を用いて場の近似を行うことで、関数の微分まで連続となる近似関数を得ることができる。本論文ではこの移動最小自乗法を用いた、メッシュを必要としない新しい測地線探索手法を提案する。いくつかの解析例により手法の妥当性を示し、一連の設計解析を同一のモデルで行うことが可能となるメッシュレス法の有用性についても述べる。

1. 緒言

近年、膜構造物は、その材料開発の進展に伴い、大規模で恒久的な建造物の一部として用いられる機会が増えている。空間構造物である膜構造は、しばしば意匠を凝らした設計がなされ、そのしなやかな形態を実現するために一般の構造物とは大きく異なる設計技術を要する。特に膜構造物を設計する上で、膜面を平面に展開する裁断線の探索は非常に重要である。一般には、膜曲面の裁断線には曲面上の 2 点を結ぶ距離が最小となる「測地線」が用いられることが多い。

測地線の探索手法は石井 [1]の研究をはじめとして、安宅 [2]ら、鈴木 [3]の研究などがあげられる。特に従来の研究では、任意曲面上での測地線を求めるために、任意曲面としてしばしば初期形状解析で用いた有限要素モデルが流用される。ここで初期形状解析とは、初期張力下での釣合形状を求めるための解析である。すなわち膜構造は、初期張力により得られた釣合形状を、測地線を利用していくつかの平面に分割して製造される。しかし、膜構造のような柔な構造の有限要素メッシュは、変形後に大きくゆがんでいることが多く [4]、そのまま測地線探索のモデルとして用いることができない場合もある。そのような場合はメッシュの再分割を行うことでゆがみを軽減することが可能となるが、大森ら [5]は釣合形状を求めつつ同時に裁断線を決定することでこの問題を解決している。しかしながら、実際には滑らかな曲面となる膜面を有限要素メッシュで表現することは、要素境界において曲面の曲率が不連続になることを意味しており、特に任意曲面に対して良く用いられる三角形メッシュの場合は、その不連続性が顕著となる。このため、測地線探索の際の収束性に問題が生じることも多い。

一方、近年構造解析の分野では、メッシュレス法、メッシュフリー法などと呼ばれる、要素分割を必要としない解析手法の研究が盛んに行われている。この手法では、解析対象に節点を配置するだけで解析が可能となり、従来の有限要素解析において計算以上に労力を要したモデル作成の手間が軽減される。また、代表的なメッシュレス法では場の近似に移動最小自乗法が用いられており [6,7]、その結果、変位法 (構造解析の場合) に基づく有限要素法では不連続であった変位勾配が、連続に得られることが報告されている。また、要素がないために変形による要素のゆがみが解の精度に与える影響が少ないことも示されている。

本研究では、メッシュレス法に基づく新たな測地線探索手法を提案する。以下ではまずその定式化について示し、解析例題としていくつかの曲面における測地線を探索する。次に得られた測地線の妥当性について検討し、メッシュを排除することで要素の存在による弊害が改善されることを示す。最後に、メッシュレス法による膜構造の形状解析結果を用いて測地線探索を行い、一連の設計解析をシームレスに行うことができる解析手法としての可能性を示す。

*1 慶應義塾大学 機械工学専攻　大学院生
*2 慶應義塾大学 政策・メディア研究科　大学院生
*3 慶應義塾大学 システムデザイン工学科　助教授・工博
*4 太陽工業株式会社

2. メッシュレス法の概要

現在、代表的な数値解析手法である有限要素法（Finite Element Method 以下、FEM）は、構造解析をはじめとする様々な分野で用いられている。FEM は精度、汎用性、計算速度などの点で十分な信頼を得ているが、解析対象が複雑になる程、解析データ作成に多大の時間を費やさなければならない。膜構造においても、ケーブルで補強された自由曲面を有する構造物のメッシュ切りは、容易ではないと考えられる。

メッシュレス法とは、その名の示すようにメッシュを必要としない解析手法である。FEM のように解析対象を要素に分割する必要が無く、節点を配置するのみで解析が可能となる。現在までメッシュレス法は、1994 年に Belytschko らによって開発された Element Free Galerkin Method[6),7)] (以下、EFGM）をはじめとして、構造、流体解析の分野で研究が進められている。本研究では膜構造上の測地線探索という一種の最適化手法に、このメッシュレスを応用するものである。

一方、膜構造の設計において必要な解析は測地線の探索だけでなく、初期形状に張力を与えて釣合形状を求める形状解析、風荷重などの外力による変形、応力状態を調べる応力解析などがある。従来の FEM による解析では、形状解析により変形したメッシュをその他の解析に用いると、要素のゆがみにより正しい解が得られないことが多くあった。そのため、解析ごとにメッシュ再分割が必要となるが、メッシュが存在しないメッシュレス法ではその必要が無く、EFGM を用いた幾何学的非線形膜構造解析手法[8)]等を用いることで、本論文で述べる測地線の探索を含むすべての解析を同一のモデルで行うことが期待できる。

3. 移動最小自乗法[6),9)]

多くのメッシュレス法では移動最小自乗法（Moving Least Squares Interpolation 以下、MLSI）を用いて場の近似を行う。有限要素メッシュを用いて膜曲面を表すと、要素境界で勾配が不連続になるのに対して、MLSI を用いることでその微分まで連続ななめらかな形状が得られる。

MLSI は、通常の最小自乗法に重みを付加したものであり、EFGM をはじめとする多くのメッシュレス法で近似手法として用いられている。なお、以下では曲面の離散化に用いる点をサンプリング点、曲面上の測地線を表す点を節点と呼ぶ。

図 1 に示すように FEM では、任意の位置における値はその点が含まれる要素を構成する点から内挿されるのに対して、MLSI では、評価する点からある距離 ρ 内に存在するサンプリング点から重みつき最小自乗法により近似される。すなわち、MLSI ではサンプリング点の位置を $\mathbf{x}_I$（I=1–N、N は総サンプリング点数)、その点における離散化された値を u_I、評価点における近似関数を $u^h(\mathbf{x})$とすれば、次式の J の値が最小となるように変位場が決定される。

$$J=\sum_{I=1}^{N} w(r_I)(u^h(\mathbf{x}_I)-u_I)^2,\quad r_I=|\mathbf{x}-\mathbf{x}_I| \tag{1}$$

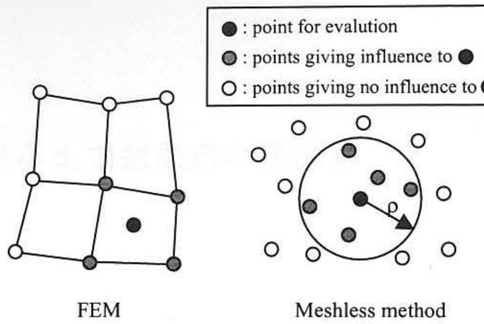

Fig.1 FEM and Meshless method

ここで w(r)は評価点と各サンプリング点との距離 r に関する重み関数であり、影響半径 ρ の外では、w(r)=0 となる。MLSI に使用する重み関数はいくつか提案されているが、本研究では、場およびその微分量が連続になるように定められた[9),10)]次の四次スプライン関数で表される重み関数を用いた。

$$w(r_I)=\begin{cases}1-6\left(\dfrac{r_I}{\rho}\right)^2+8\left(\dfrac{r_I}{\rho}\right)^3-3\left(\dfrac{r_I}{\rho}\right)^4 & (0\le r_I\le\rho)\\ 0 & (\rho\le r_I)\end{cases} \tag{2}$$

次に、近似関数 $u^h(\mathbf{x})$ が式 (3) のように表せるものとする。

$$u^h(\mathbf{x})=\mathbf{a}^T(\mathbf{x})\mathbf{p}(\mathbf{x}) \tag{3}$$

ここで、$u^h(\mathbf{x})$ を多項式で近似する場合、例えば基底ベクトル $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ は次のようにおくことができる。

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x})=\{1,\ \ x,\ \ y\}\qquad m=3 \tag{4}$$

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x})=\{1,\ \ x,\ \ y,\ \ x^2,\ \ xy\ \ y^2\}\qquad m=6 \tag{5}$$

二次元問題の場合、m=3 は線形基底、m=6 は完全二次基底を表している。このように m の値を変更することで、近似関数の次数を増やすことができる。また、$\mathbf{a}(\mathbf{x})$ は基底ベクトルの各項に対応する係数を並べたベクトルである。詳細は文献に譲るものとして、式 (1) から $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ が決定され、最終的に $u^h(\mathbf{x})$ は形状関数 $\phi_I(\mathbf{x})$ を用いて有限要素法と同様に、以下のように表される。

$$u^h(\mathbf{x})=\sum_{I=1}^{N}\phi_I(\mathbf{x})u_I \tag{6}$$

MLSI による近似の概念を図 2 に示す。図に示すように得られる近似関数と、サンプリング点における離散値とは一致しない。このため、例えば MLSI を偏微分方程式の解法に用いた場合、その境界条件処理の際はサンプリング点における値ではなく、近似関数の値を拘束する必要がある[6)]。図 3 は FEM と MLSI により得られる近似関数の概念図である。低次要素を用いた FEM では、節点間が直線で補間され、その微分が要素間で不連続であるのに対してるのに対

して、MLSI の場合、線形基底を用いても一階微分までが連続な近似関数が得られることがわかる。

本研究では、この MLSI を曲面の近似に用いる。すなわち曲面の z 方向の位置を x, y の関数として、サンプリング点における離散値から曲面を近似し、得られる連続的な曲面の勾配を利用して、より精度良く測地線が求められることを示す。

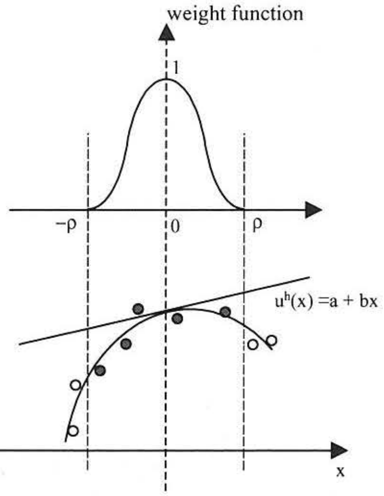

Fig.2 Approximation by MLSI

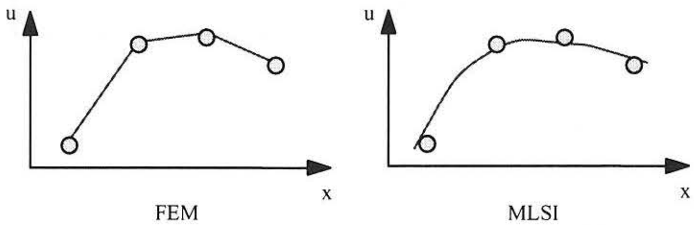

Fig.3 Comparison between approximation functions by FEM and MLSI

4. 測地線探索手法 [11]

測地線は、曲面上の任意の 2 点を結ぶ距離が極小となるように決定される。ここでは、指定された 2 点を通る曲面上の最短曲線を求めるものとする。この時、2 点を通る曲線を表す関数群を $\mathbf{g}(\mathbf{x})$、曲面の方程式を $f(\mathbf{x}) = 0$ とすると、測地線は次の拘束条件付汎関数を最小にすることにより求められる。ここで、| | は 2 点間の長さを表す。

$$\pi = |\mathbf{g}(\mathbf{x})| + \lambda\, f(\mathbf{x}) \tag{7}$$

また、あらかじめ曲面上のみで解を探索する場合には、第 2 項の拘束条件式は省略できる。

本研究では、曲面を表すサンプリング点の位置情報から測地線を求める。ここでは、まず 2 点を通る曲線は、有限の線分で構成されるものとする。初期値として、曲面上に適当に m 個の節点 ${}^0\mathbf{x}_i = ({}^0x_i, {}^0y_i, {}^0z_i)$ を配置し、それらを結ぶ m-1 本の線分の長さの和が最小になるまで反復的に節点を移動させ、測地線を求める。今、k 回目の反復における節点の位置を ${}^kx_i, {}^ky_i, {}^kz_i$、曲線の一要素の長さを ${}^kL_i$ とすると、曲線全体の長さ ${}^k\Pi$ は、

$$ {}^kL_i = \sqrt{({}^kx_{i+1} - {}^kx_i)^2 + ({}^ky_{i+1} - {}^ky_i)^2 + ({}^kz_{i+1} - {}^kz_i)^2} \tag{8}$$

$$ {}^k\Pi = \sum_{i=1}^{m-1} {}^kL_i \tag{9}$$

で表される。各節点の z 座標は近傍のサンプリング点における z 座標から MLSI により近似されるため、x, y の関数として与えられる。また 1 つの節点 ${}^k\mathbf{x}_i$ はその前後の要素の長さ ${}^kL_{i-1}, {}^kL_i$ のみに影響を及ぼし、この時式 (9) の変分をとると次式を得る。

$$\delta\Pi = \sum_{i=2}^{m-1}\left(\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k x_i}\delta x_i + \frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k y_i}\delta y_i \right) \tag{10}$$

よって各節点において、

$$\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k x_i} = 0, \quad \frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k y_i} = 0 \tag{11}$$

を満たすように座標を決定する。式 (11) は非線形方程式になるため、Newton-Rapson 法による反復解法を用いて解を求める。この時、各式の増分は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
\Delta\left(\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial x_i} \right) &= \frac{\partial}{\partial^k x_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i}\Delta x_{i-1} + \frac{\partial}{\partial^k y_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i}\Delta y_{i-1} \\
&+ \frac{\partial}{\partial^k x_i}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i}\Delta x_i + \frac{\partial}{\partial^k y_i}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i}\Delta y_i \\
&+ \frac{\partial}{\partial^k x_i}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k x_i}\Delta x_i + \frac{\partial}{\partial^k y_i}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k x_i}\Delta y_i \\
&+ \frac{\partial}{\partial^k x_{i+1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i}\Delta x_{i+1} + \frac{\partial}{\partial^k y_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k x_i}\Delta y_{i+1}
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\Delta\left(\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial y_i} \right) &= \frac{\partial}{\partial^k x_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k y_i}\Delta x_{i-1} + \frac{\partial}{\partial^k y_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k y_i}\Delta y_{i-1} \\
&+ \frac{\partial}{\partial^k x_i}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k y_i}\Delta x_i + \frac{\partial}{\partial^k y_i}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k y_i}\Delta y_i \\
&+ \frac{\partial}{\partial^k x_i}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k y_i}\Delta x_i + \frac{\partial}{\partial^k y_i}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k y_i}\Delta y_i \\
&+ \frac{\partial}{\partial^k x_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k y_i}\Delta x_{i+1} + \frac{\partial}{\partial^k y_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k y_i}\Delta y_{i+1}
\end{aligned} \tag{13}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
{}^k\mathbf{D}_i = \Bigg(& \begin{matrix}
\frac{\partial}{\partial^k x_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i} & \frac{\partial}{\partial^k y_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k x_i} & \frac{\partial}{\partial^k x_i}\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k x_i} \\
\frac{\partial}{\partial^k x_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k y_i} & \frac{\partial}{\partial^k y_{i-1}}\frac{\partial^k L_{i-1}}{\partial^k y_i} & \frac{\partial}{\partial^k x_i}\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k y_i}
\end{matrix} \\
& \begin{matrix}
\frac{\partial}{\partial^k y_i}\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k x_i} & \frac{\partial}{\partial^k x_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k x_i} & \frac{\partial}{\partial^k y_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k x_i} \\
\frac{\partial}{\partial^k y_i}\frac{\partial({}^kL_{i-1} + {}^kL_i)}{\partial^k y_i} & \frac{\partial}{\partial^k x_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k y_i} & \frac{\partial}{\partial^k y_{i+1}}\frac{\partial^k L_i}{\partial^k y_i}
\end{matrix} \Bigg)
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\Delta \mathbf{x}_i = (\Delta x_{i-1} \quad \Delta y_{i-1} \quad \Delta x_i \quad \Delta y_i \quad \Delta x_{i+1} \quad \Delta y_{i+1})^T \tag{15}$$

$$\mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} \dfrac{\partial^k \Pi}{\partial^k x_i} \\ \dfrac{\partial^k \Pi}{\partial^k y_i} \end{pmatrix} \tag{16}$$

とおくと、各節点ごとに次式が得られる。

$$\mathbf{P}_i + \mathbf{D}_i \Delta \mathbf{x}_i = \mathbf{0} \tag{17}$$

各節点に対する式を順に書き並べると (重ね合わせると) 式 (18) のようにマトリクス表記することができる。ここで $\mathbf{D}$ は重ね合わせ後の係数マトリクス、$\Delta\mathbf{x}$ は全体節点修正ベクトル、$\mathbf{P}$ は全体残差ベクトルである。

$$\mathbf{D}\Delta\mathbf{x} = -\mathbf{P} \tag{18}$$

$$^{k+1}\mathbf{x} = {}^{k}\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x} \tag{19}$$

式 (18) より得られた$\Delta\mathbf{x}$ を用いて、式 (19) に従って節点の座標を更新する。この計算を$\delta\Pi = 0$ になるまで反復して、測地線を求める。

5. 数値解析例

ここでは、各種膜構造物に対して、本解析手法を用いて求めた測地線解析結果について示す。

a) hp 曲面

次式で表される hp 曲面 [1]上の測地線を探索する。

$$z = -0.2\,(xy - 5x - 5y) \tag{20}$$

ただし、$0 \le x \le 10$, $0 \le y \le 10$

曲面を表すサンプリング点はx-y 平面で等間隔に 11x11 点を配置し、初期節点は x-y 平面上で直線になるように配置した。また、MLSI の基底ベクトルには、次式で表される双一次基底を用いた。

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x}) = (1, \quad x, \quad y, \quad xy) \tag{21}$$

図 4 は hp 曲面を x-y 平面に投影した図であり、点線は節点の初期配置を、プロットは収束後に得られた節点位置を示している。line 1 は 11 点、line 2 は 26 点、line 3 は 31 点の節点からなっている。図 5 は hp 曲面上に得られた測地線を描いたものである。図において黒点は hp 曲面上のサンプリング点を表しており、この点群より MLSI によって、任意の (x, y) 座標における z 座標、ならびに曲面の曲率を求める。この解析結果は理論的に得られる解 [1]と完全に一致している。また、図 6 に $\delta\Pi$ の収束の様子を示す。得られた測地線ごとに速さは異なっているが、収束解が得られていることがわかる。

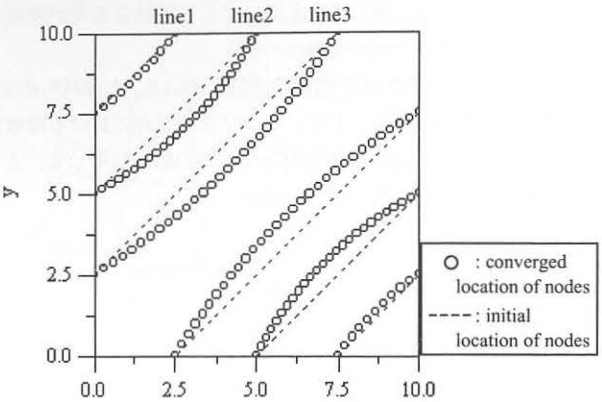

Fig.4 x-y projection of hp surface

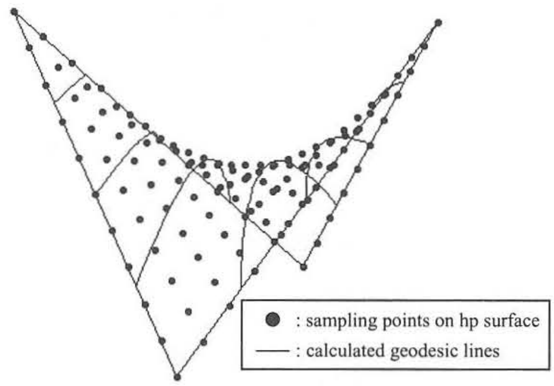

Fig.5 Geodesic lines on hp surface

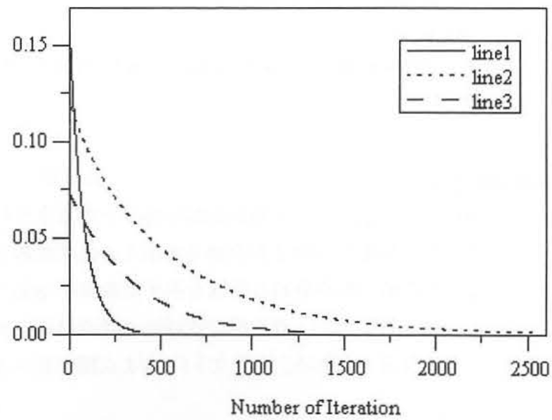

Fig.6 Convergence of $\delta\Pi$

b) 円柱状曲面

次に、半径 1、高さ 2 の円柱の表面における測地線を探索した。サンプリング点は円周方向に 37 点、高さ方向に 21 点配置し、基底ベクトルは二次基底を用いた。

x-y 平面への投影図を図 7 に、鳥瞰図を図 8 に示す。先の例題同様に黒点は曲面上に配置されたサンプリング点、点線は節点の初期配置、実線は収束後に得られた測地線を表している。

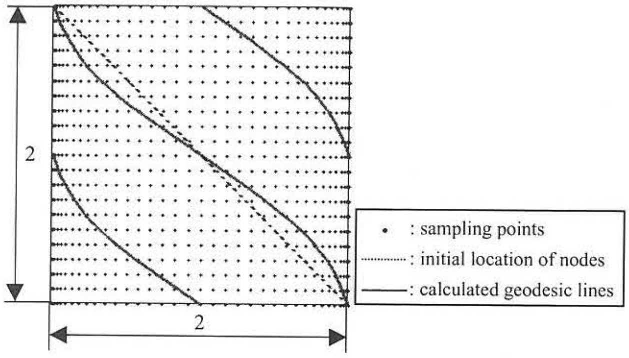

Fig.7 x-y projection of cylinder

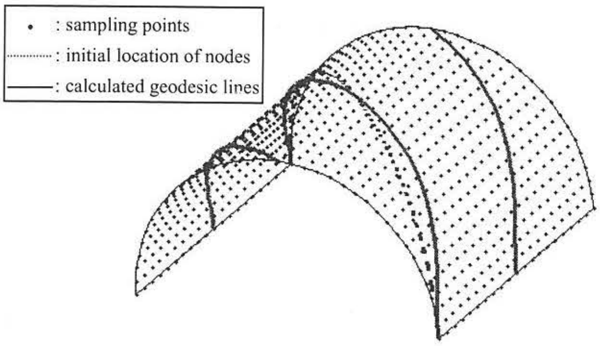

Fig.8 Geodesic lines on cylinder

本手法で求めた測地線は、円筒曲面を平面に展開した時に直線になるように得られており、正しく 2 点間の距離が最小となる曲線が得られていることがわかる。

c) 2 次曲面膜構造

実際の膜構造の設計では、形状解析後の釣合形状における測地線を探索する。本例題では、荷重による変形形状を、筆者らが開発した膜構造用メッシュレス法 (幾何学的非線形 EFGM[8]) を用いて求め、その形状での測地線を同一モデルを用いて探索する。ここで初期形状は式 (22) で与えられるものとする。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} 5r^1 \\ 5r^2 \\ (1-(r^1)^2)(1-(r^2)^2) \end{Bmatrix} \tag{22}$$

ただし、$-1 \le r^1 \le 1$, $-1 \le r^2 \le 1$

この膜構造に、z 方向に一様分布荷重を与え、変形前と変形後の測地線を求める。サンプリング点数は x-y 平面上で等間隔に 11x11 点を配置し、膜面の近似には二次基底を用いた。解析結果を図 9, 10 に示す。このように変形の前後でも問題なく測地線を求めることができる。

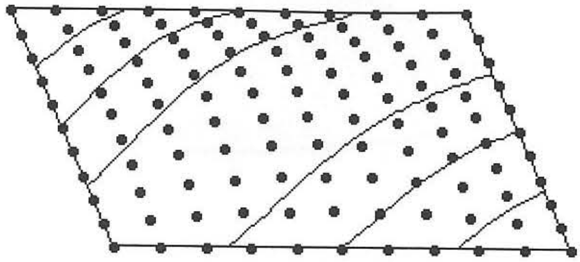

Fig.9 Geodesic lines on initial configuration

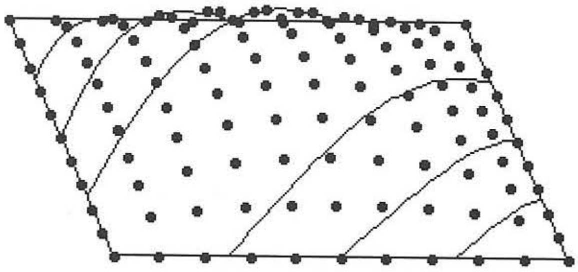

Fig.10 Geodesic lines on deformed shape

d) 特殊な測地線

本解析手法では、膜面を x-y 平面に投影し、平面の任意の位置における z 座標を MLSI により近似する。そのため図 11 に示すような、ある x-y 座標において z 座標の値が 2 つ得られる曲面では、正しく近似を行うことが困難となる。このような場合には、投影する平面を回転させることで、近似曲面が滑らかな勾配を有するように変換することで、本手法を適用することができる。なお本手法では、$\delta\Pi = 0$ となる点を求めているため、あくまでも最小ではなく極小解が得られる。換言すれば大きく異なる初期値に対して、それぞれ別の測地線が得られる場合がある。図 11 にその一例を示す。この場合は設計者の判断により最適な測地線を選ばねばならない。

また、図 12, 13 は膜面を飛び越える測地線の解析結果である。このような測地線の探索は従来の有限要素メッシュを利用した手法では困難であったと考えられる。この場合も点 A, B を結ぶ線分を測地線の一部として考えることで、本研究で提案する方法をそのまま適用することができ、図 12, 13 に示すように、滑らかな測地線が得られていることがわかる。

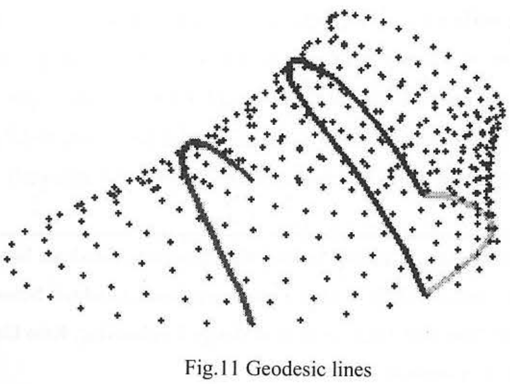

Fig.11 Geodesic lines

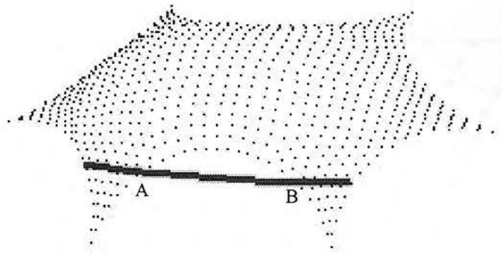

Fig.12 'Jump' of Geodesic line (a)

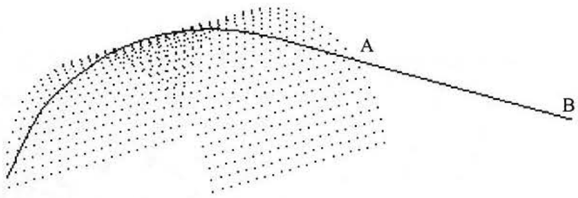

Fig.13 'Jump' of Geodesic line (b)

6. 結言

本研究ではメッシュを排除し、離散化されたサンプリング点のみを用いて曲面を評価するメッシュレスアプローチによる測地線探索手法を提案した。本論文の結論を以下に示す。

1) 本手法では、任意の曲面をメッシュ分割することなく、サンプリング点を配置するだけで測地線の探索が可能である。
2) 投影面を変更することで勾配の反転する膜面へ対応でき、また、従来の手法では困難な膜面を飛び越す測地線なども探索が可能であることを示した。
3) 従来は、膜構造の形状解析等に用いた有限要素メッシュを測地線探索に流用しており、メッシュのゆがみが大きい場合、要素を再分割する必要があった。本研究で提案した手法では、メッシュ再分割を実施することなく、膜構造の設計に必要な一連の解析を同一のモデルを用いて行うことが可能となり、膜構造のより円滑な設計作業が期待できる。

参考文献

(1) 石井一夫：曲面の平面への近似展開 – 膜構造曲面のカッティング図について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.783-784、(1972).

(2) 安宅信行、小塚裕一：膜構造における膜曲面上の測地線の決定方法について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.2603-2604、(1984).

(3) 鈴木俊男：曲面上の測地線を求める有限要素解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1387-1388、(1993).

(4) 石井一夫：膜構造の形状解析（形状決定の問題）概説、膜構造研究論文集'89、日本膜構造協会、pp.83-107、(1989).

(5) 八木孝憲、大森博司：膜構造物の釣合形状と裁断形状の同時解析手法に関する研究、膜構造研究論文集'97、日本膜構造協会、pp.39-46、(1997).

(6) T. Belytschko, Y. Y. Lu and L. Gu : Element free Galerkin methods, I. J. Num. Meth. Eng., Vol. 37, pp.229-256, (1994).

(7) Y. Y. Lu, T. Belytschko and L. Gu : A new implementation of the element free Galerkin method, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 113, pp.397-414, (1994).

(8) 宮村倫司、野口裕久、横堀一雄：幾何学的非線形エレメントフリーガラーキン法の定式化と膜構造解析への応用、日本機械学会論文集（A編）、Vol. 64、No. 623、pp.1753-1760、(1998).

(9) 野口裕久：エレメントフリーガラーキン法の精度と実用性に関する考察、日本機械学会第8回計算力学部門講演会論文集、pp.439-440、(1995).

(10) S. Beissel and T. Belytschko : Nodal integration of the element-free Galerkin method, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 139, pp.49-74, (1996).

(11) 矢橋晋太郎、川島徹也、野口裕久、横堀一雄：メッシュレスアプローチによる任意曲面上の測地線探索、日本計算工学会講演会論文集 Vol.4、pp.59-60、(1999).

Meshless Method for Searching Geodesic Line by using Moving Least Squares Interpolation

Tetsuya Kawashima[*1], Shintaro Yabashi[*2], Hirohisa Noguchi[*3], Kazuo Yokohori[*4]

SYNOPSIS

In the analysis for design of membrane structure, cutting analysis is indispensable. In the cutting analysis, cutting lines on the surface are determined so that curved surface can be expanded into several plane surfaces. In practice situation, geodesic line is often regarded as cutting line. Conventionally, the geodesic line on arbitrary membrane surface is searched by using available finite element mesh. It is difficult, however, to obtain the smooth geodesic line due to discontinuity of slope at the element boundary. In this paper, a new method for searching geodesic line by meshless approach using the moving least squares interpolation (MLSI). This method requires only nodal data and C1 continuity of approximation function of field is assured. Therefore, the variation of functional to be minimized is smoothly and efficiently. Some numerical examples are demonstrated to show the validity of the proposed method.

*1 Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Keio Univ.

*2 Graduate Student, Dept. of Media and Governance, Graduate School, Keio Univ.

*3 Associate Professor, Dept. of System Design Engineering, Keio Univ.

*4 Taiyokogyo Corporation