3 次元数値モデル作成のための腐食表面形状データの高精度統合手法

An accurate unification of individual corroded surface data sets to generate fully 3D-numerical model

後藤芳顯*，藤原英之**，百合野博光***
Yoshiaki Goto, Hideyuki Fujiwara, Hiromitsu Yurino

*工博, 名古屋工業大学大学院教授, 社会工学専攻（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）
**名古屋工業大学大学院博士課程後期, 社会開発工学専攻（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）
***名古屋工業大学大学院博士課程前期, 社会工学専攻（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）

3D lazer scanners with motor-driven X-Y stage are often used to measure the surface roughness of corroded specimens. However, due to the limitations of these apparatuses, the specimen surfaces, such as upper surface, lower surface and side surfaces, must be measured indivisually by changing the locations of the specimen or the lazer scanner. Therefore, in order to generate the 3D numerical models of corroded specimens, it is necessary to unify these indivisual surface data sets. Herein, an accurate method is proposed to unify adjacent two indivisual surface data sets by utilizing the centers of three globes as benchmarks common to the two surfaces. The surface data of the globes measured by the lazer scanner can be used to identify their center locations accurately. The repetition of this procedure leads to the generation of a fully 3D-numerical model.

Key Words: 3D measuremnent, 3D laser scanner, data unification, corroded steel
キーワード：3 次元計測，3 次元レーザースキャナ，データ統合，腐食鋼材

1. はじめに

近年，腐食した鋼構造の力学性能評価が関心を集めている．主として腐食した鋼構造物の力学性能に影響を与えるのは腐食欠損による鋼部材表面の幾何形状の変化であるが，力学性能を正確に評価するには，これをいかに精度良く計測するかが重要になってくる．とくに，引張りによる延性破壊での変形能を評価するには，幾何形状の変化によるひずみ集中化が大きな影響を与えるためにより高精度の幾何形状の把握が重要になる．FEM 解析などで評価するためには 200~500 μm ピッチで腐食による凹凸の計測が必要であるとの報告[1)]もなされている．

腐食した鋼材の表面形状の測定には，レーザーセンサなど非接触型位置計測器と，二軸移動装置を組み合わせた 3 次元レーザースキャナが多く用いられている[1)~4)]．なかでも，小型の試験片の腐食形状計測には，電動の二軸移動ステージを持つ市販されている高精度の 3 次元スキャナが多く用いられる[1),2)]．このような，計測システムでは表と裏など，対象物体の 3 次元的腐食形状を一度に測定することが困難であるので，限定された範囲の表面形状について個別に計測し，計測データを結合することにより全体的な 3 次元腐食欠損形状を再現することが必要になる．このため，各個別の範囲での表面形状の計測のみならず，互いの計測データを精度良く統合することが重要である．デジタルカメラによる 3 次元計測[5)]で用いられているように，被計測物体の角部を基準点とし，これを 3 点以上設けることで，隣接する表面データを結合する方法も簡便であるが，写真と異なり，等間隔に位置を測定する 3 次元レーザースキャナでは，基準点の位置をもれなく正確に視準することは非常に難しく，各表面形状の計測において基準点の空間位置座標を一貫して精度良く求めることは困難である．

また，腐食欠損した板状試験片の立体形状を再現する場合や板厚の測定時には，被計測物体の厚みが既知な位置でおもて面とうら面に的 (ターゲット)を設定し，表裏の個別の計測データを結合している場合が多いようである．このような方法では板状試験片にそりなどが有る場合には 3 次元レーザースキャナの精度が十分生かされないことになる．

本研究では，上記のような表面形状計測器による個別の表面形状データを精度良く連結し，対象構造の立体形状を再現する一般性のある手法を検討したので報告する．

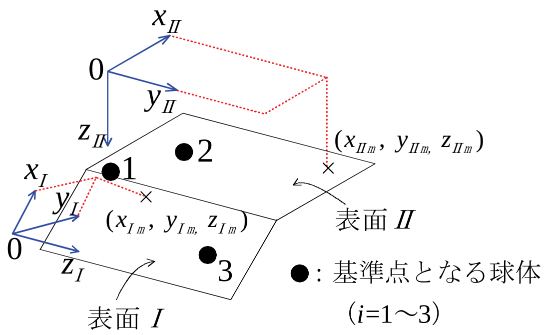
2. 独立に計測された個別表面形状データの統合手法

2.1　基本

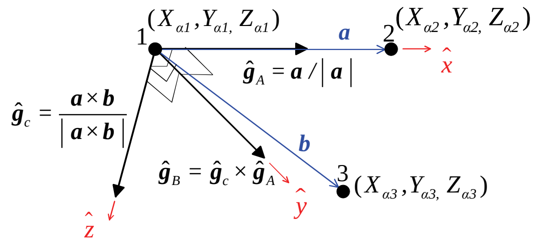
個別に計測された被計測物体の各表面データはそれぞれ異なった直交直線座標系で測定されるため，互いの表面データを結合するためにはそれぞれの座標系を結びつけることが必要になる．すなわち，互いの座標の位置関係を規定する必要があるが，このためには，座標系の剛体運動を規定する共通の 3 点以上の基準点を設定すればよい．ただし，これらの基準点は互いの表面測定時に，計測器からいずれも視準でき，かつ各座標系での位置データが得られなければならない．また，基準点の計測精度が結合データに大きく影響するため，どこから視準しても正確な点(ポイント)を示すことが要求される．このように本来，基準点となる的は点であることが理想である．しかしながら，上述した表面形状計測器の機構では，設定した一定のピッチで水平面内を碁盤目状に被計測物の表面形状（鉛直座標）を計測するため，測定データは離散的なものである．したがって，計測時に間違いなく基準点となる的を測定するためには，測定ピッチを極力小さく設定した上で，的を許容できる範囲で大きくすることが必要となる．ただし，測定ピッチを小さく設定することは計測時間の増加や不必要なデータ数の増大を招き，一方，基準点となる的を大きくすることはデータ結合時の精度を低下させるので，その兼ね合いを考慮して調節するという煩雑な手続きが必要となる．また，複数の表面計測において共通して視準できる小さな的を設定すること自体も困難な場合が多い．

こうした課題を解決すべく，ここでは被計測物体に接着した真球に近い高精度の球体を的として用いることを提案する．的である球体の径を計測ピッチに対して十分に大きく（球体の直径が計測ピッチの 5 倍程度以上）することで，球体表面はどの角度からも視準できるとともに，表面形状計測器により複数の球体表面の位置座標を逃すことなく計測することが可能である．続いて，計測された複数の球体の表面位置座標から基準点となる球体の中心座標を最小自乗法で精度良く求める．球体の中心座標は 3 成分であるので，これらを逆算するための球体表面の位置座標は，球径が既知の場合は 3 点以上，球径が未知の場合は 4 点以上の計測値が必要である．実際には精度を確保するために，10 点～数百点が望ましい．このような球体を用いた基準点を 3 個以上設けるが，個別の表面計測時に各基準点を識別するために，径の異なった球体を用いることも考えられる．基準球体の中心座標算定時には球体の半径も同時に算定されるので，径の異なった球体を用いることで容易に各基準点を識別することが可能となる．

つぎに, 3 個の基準点を用いた複数の 3 次元表面データ統合方法のための定式化を示す．



図－1　計測時の座標系と基準点となる球体



図－2　基準点により定義される座標系$(\hat{x},\hat{y},\hat{z})$と基底ベクトル$(\hat{\boldsymbol{g}}_A,\hat{\boldsymbol{g}}_B,\hat{\boldsymbol{g}}_C)$

2.2　2 セットの個別表面データ統合のための定式化

複数の 3 次元表面データ統合のための定式化として，独立する 2 セットの表面データを共通に計測された 3 個の基準点を用いて一つに統合する場合について具体的に提示する．なお，3 セット以上のデータでも本定式化を繰り返すことにより対応できる．

図－1に示すように表面形状計測器により得られる2面$(\alpha = I, II)$の表面位置データセットは空間固定の右手系の直交直線座標系$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$で表されると仮定する．ここで，$(x_\alpha, y_\alpha)$は二軸移動装置により設定される座標値，そして$z_\alpha$はレーザーセンサなどで測定される位置座標である．座標系$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$の基底ベクトルを$(\boldsymbol{i}_{\alpha x}, \boldsymbol{i}_{\alpha y}, \boldsymbol{i}_{\alpha z})$，得られた表面の位置データを$(x_{\alpha m}, y_{\alpha m}, z_{\alpha m})$（$m$ はデータ番号)，また，各面の計測で得られた 3 個の共通の基準点$(i = 1, 2, 3)$の位置座標を$(X_{\alpha i}, Y_{\alpha i}, Z_{\alpha i})$とする．なお，各面計測時には被計測物体の位置が変化するので，空間固定の座標系$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$は$\alpha = I, II$でそれぞれ異なったものになる．

$\alpha = I, II$ の 2 面の位置データを統合するための座標系として, 被計測物体に固定された共通の基準点の位置座標より，原点を基準点 1 にもち，基底ベクトル$(\hat{\boldsymbol{g}}_A, \hat{\boldsymbol{g}}_B, \hat{\boldsymbol{g}}_C)$が図－2 に示すように式(1)で規定される右手系直交直線座標系 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ を定義する．この座標系は 3 点の基準点で定義される被計測物体（計測時にはほぼ剛体と考えてよい）に固定され，その剛体運動とともに移動する．

$$\begin{Bmatrix}\hat{\boldsymbol g}_A\\ \hat{\boldsymbol g}_B\\ \hat{\boldsymbol g}_C\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\boldsymbol a/|\boldsymbol a|\\ \hat{\boldsymbol g}_C\times\hat{\boldsymbol g}_A\\ \boldsymbol a\times\boldsymbol b/|\boldsymbol a\times\boldsymbol b|\end{Bmatrix} = \left[R_\alpha\right]\begin{Bmatrix}\boldsymbol i_{\alpha x}\\ \boldsymbol i_{\alpha y}\\ \boldsymbol i_{\alpha z}\end{Bmatrix} \qquad (1)$$

ここに

$$\boldsymbol a = (X_{\alpha 2}-X_{\alpha 1})\boldsymbol i_{\alpha x} + (Y_{\alpha 2}-Y_{\alpha 1})\boldsymbol i_{\alpha y} + (Z_{\alpha 2}-Z_{\alpha 1})\boldsymbol i_{\alpha z}$$

$$\boldsymbol b = (X_{\alpha 3}-X_{\alpha 1})\boldsymbol i_{\alpha x} + (Y_{\alpha 3}-Y_{\alpha 1})\boldsymbol i_{\alpha y} + (Z_{\alpha 3}-Z_{\alpha 1})\boldsymbol i_{\alpha z} \qquad (2a,b)$$

また，$[R_\alpha]$は直交変換の行列式であり，すべて基準点の位置データ$(X_{\alpha i}, Y_{\alpha i}, Z_{\alpha i})$により表される．

各表面計測時の表面位置データ$(x_{\alpha m}, y_{\alpha m}, z_{\alpha m})$を被計測物体固定座標系$(\hat x, \hat y, \hat z)$による値$(\hat x_{\alpha m}, \hat y_{\alpha m}, \hat z_{\alpha m})$に変換すると，この物体固定座標を介して2面($\alpha = I, II$)の表面位置データを統合することができる．したがって，つぎに空間固定座標系$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$に関する$\alpha$面の点$m$の位置データ$(x_{\alpha m}, y_{\alpha m}, z_{\alpha m})$を物体固定座標系 $(\hat x, \hat y, \hat z)$の値$(\hat x_{\alpha m}, \hat y_{\alpha m}, \hat z_{\alpha m})$へ変換する方法を示す．$(\hat x, \hat y, \hat z)$の原点が基準点1であることから，基準点1に関する表面位置データ点$(x_{\alpha m}, y_{\alpha m}, z_{\alpha m})$の位置ベクトル$\hat{\boldsymbol r}_{\alpha m}$を求めると

$$\hat{\boldsymbol r}_{\alpha m} = \left(x_{\alpha m}-X_{\alpha 1}, y_{\alpha m}-Y_{\alpha 1}, z_{\alpha m}-Z_{\alpha 1}\right)\begin{Bmatrix}\boldsymbol i_{\alpha x}\\ \boldsymbol i_{\alpha y}\\ \boldsymbol i_{\alpha z}\end{Bmatrix} \qquad (3)$$

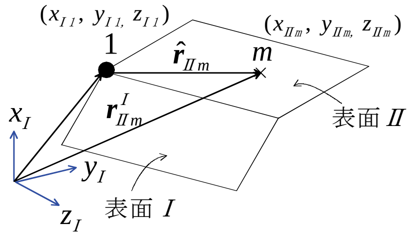
式(1)で示される$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$と$(\hat x_\alpha, \hat y_\alpha, \hat z_\alpha)$の基底ベクトルの関係を式(3)に代入すると，次式のように$(x_{\alpha m}, y_{\alpha m}, z_{\alpha m})$は$(\hat x_{\alpha m}, \hat y_{\alpha m}, \hat z_{\alpha m})$へ容易に変換される．

$$\hat{\boldsymbol r}_{\alpha m} = (\hat x_{\alpha m}, \hat y_{\alpha m}, \hat z_{\alpha m})\begin{Bmatrix}\hat{\boldsymbol g}_A\\ \hat{\boldsymbol g}_B\\ \hat{\boldsymbol g}_C\end{Bmatrix} \qquad (4a,b)$$

$$= \left(x_{\alpha m}-X_{\alpha 1}, y_{\alpha m}-Y_{\alpha 1}, z_{\alpha m}-Z_{\alpha 1}\right)\left[R_\alpha\right]^T\begin{Bmatrix}\hat{\boldsymbol g}_A\\ \hat{\boldsymbol g}_B\\ \hat{\boldsymbol g}_C\end{Bmatrix}$$

式(4)より変換される各表面（$\alpha = I, II$）の位置データ$(\hat x_{\alpha m}, \hat y_{\alpha m}, \hat z_{\alpha m})$は物体固定座標系$(\hat x, \hat y, \hat z)$に関して統合されたことになる．

さらに，ここでは式(4)をもとに$\alpha = II$のデータを$\alpha = I$の面の計測時に定義される空間固定の座標系(x_I, y_I, z_I)に統合する場合について説明する．すなわち，図−3のように空間固定の座標系(x_{II}, y_{II}, z_{II})で表した$\alpha = II$の面における点mの位置座標$(x_{IIm}, y_{IIm}, z_{IIm})$を空間固定座標系$(x_I, y_I, z_I)$に変換する．このように変換された位置座標を$(x^I_{IIm}, y^I_{IIm}, z^I_{IIm})$，$\alpha = II$面上の点$m$の空間固定座標$(x_I, y_I, z_I)$に関する位置ベクトル$\boldsymbol r^I_{II\,m}$とすると，これらは$\hat{\boldsymbol r}_{\alpha m}$ ($\alpha = II$)を用いて次のように表される．



図−3 面IIの面Iへの統合

$$\boldsymbol r^I_{II\,m} = (x^I_{IIm}, y^I_{IIm}, z^I_{IIm})\begin{Bmatrix}\boldsymbol i_{Ix}\\ \boldsymbol i_{Iy}\\ \boldsymbol i_{Iz}\end{Bmatrix} = (X_{I1}, Y_{I1}, Z_{I1})\begin{Bmatrix}\boldsymbol i_{Ix}\\ \boldsymbol i_{Iy}\\ \boldsymbol i_{Iz}\end{Bmatrix} + \hat{\boldsymbol r}_{IIm} \qquad (5)$$

式(5)の最右辺に式(4b)を代入し，物体固定座標系の基底ベクトル$(\hat g_A, \hat g_B, \hat g_C)$を式(1)により空間固定座標系$(x_I, y_I, z_I)$の基底ベクトル$(i_{Ix}, i_{Iy}, i_{Iz})$で表すと，最終的に$(x_{IIm}, y_{IIm}, z_{IIm})$は次式のように$(x^I_{IIm}, y^I_{IIm}, z^I_{IIm})$に変換される．

$$\boldsymbol r_{II\,m} = (x^I_{IIm}, y^I_{IIm}, z^I_{IIm})\begin{Bmatrix}\boldsymbol i_{Ix}\\ \boldsymbol i_{Iy}\\ \boldsymbol i_{Iz}\end{Bmatrix} \qquad (6a,b)$$

$$= \begin{pmatrix}(X_{I1}, Y_{I1}, Z_{I1}) + \\ \left(x_{IIm}-X_{II1}, y_{IIm}-Y_{II1}, z_{IIm}-Z_{II1}\right)\left[R_{II}\right]^T\left[R_I\right]\end{pmatrix}\begin{Bmatrix}\boldsymbol i_{Ix}\\ \boldsymbol i_{Iy}\\ \boldsymbol i_{Iz}\end{Bmatrix}$$

このように$\alpha = II$の表面データは$\alpha = I$の表面データに統合される．

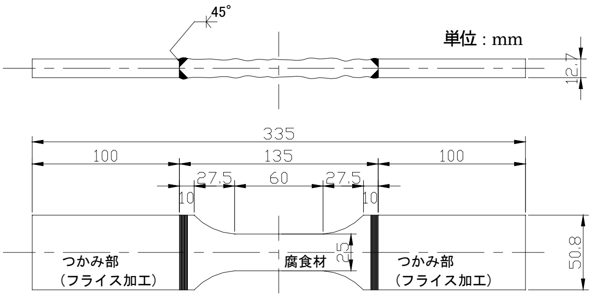
2.3 基準点となる球体の中心座標の同定

ある表面αの位置計測データから，球体iの球体表面の位置データ$(x_{\alpha im}, y_{\alpha im}, z_{\alpha im})$を抽出する．この球体が半径$r_i$の真球で計測データに誤差がない場合，球表面は$\alpha$の計測時に用いる空間固定の右手系直交直線座標$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$に関して以下の方程式を満足する．

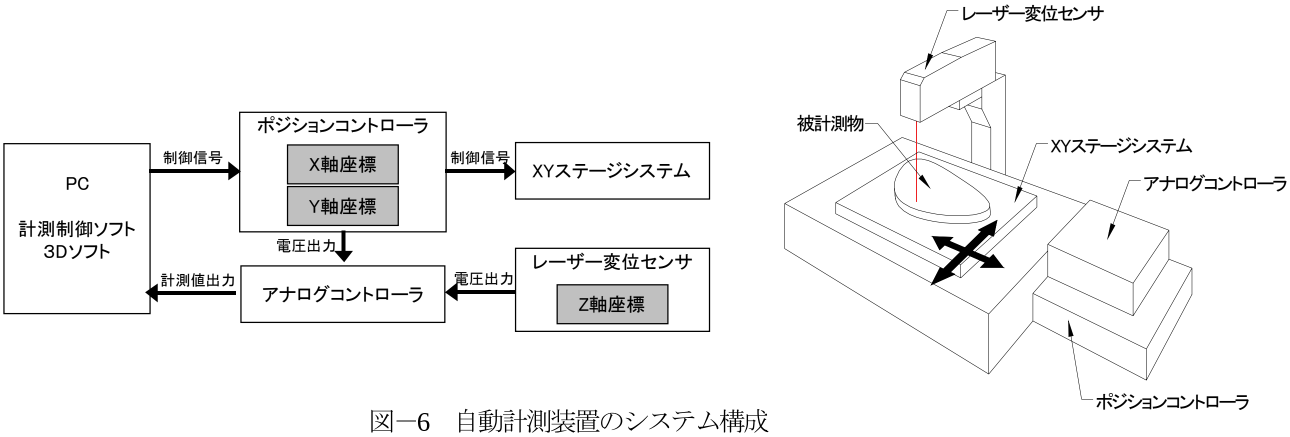
$$(x_\alpha - X_{\alpha i})^2 + (y_\alpha - Y_{\alpha i})^2 + (z_\alpha - Z_{\alpha i})^2 = r_i^2 \qquad (7)$$

したがって，球体の中心座標$(X_{\alpha i}, Y_{\alpha i}, Z_{\alpha i})$を同定するためには，異なる3点の表面位置データがあれば良く，また球体の半径が未知の場合も4点のデータがあれば良い．しかしながら，球体の形状ならびに球体表面の位置計測データには誤差が含まれているので，実際には上記のよ

図−4　引張試験片を採取した撤去桁のフランジ



図−5　腐食鋼材から採取した引張試験片形状



図−6　自動計測装置のシステム構成

うな手法では基準点となる中心座標$(X_{\alpha i}, Y_{\alpha i}, Z_{\alpha i})$を精度良く同定することはできない．ここでは球体半径に誤差が含まれていることから，球体の中心座標$(X_{\alpha i}, Y_{\alpha i}, Z_{\alpha i})$に加え半径$r_i$を未知量$r_{\alpha i}$とする．そして，次式で表される球体$i$の表面位置計測データ$(x_{\alpha im}, y_{\alpha im}, z_{\alpha im})$に関する式(8)で示す標準偏差が最小になるように未知量の最適化を行うことにより中心座標$(X_{\alpha i}, Y_{\alpha i}, Z_{\alpha i})$と半径$r_i$を求める．

$$\Delta_{\alpha i} = \sqrt{\sum_{m}^{n}\left(\sqrt{(x_{\alpha im}-X_{\alpha i})^2+(y_{\alpha im}-Y_{\alpha i})^2+(z_{\alpha im}-Z_{\alpha i})^2}-r_{\alpha i}\right)^2/n} \tag{8}$$

ここに，nは球体iの表面データ数を表す．

3. X-Y ステージを持つ3次元レーザースキャナによる腐食引張試験片の形状計測への適用

3.1　表面計測と装置の概要

2.で説明した個別表面形状データの統合手法を具体的にX-Y ステージとレーザー変位センサからなる3次元レーザースキャナによる腐食鋼材の平板引張試験片の形状計測に適用する．腐食鋼材の引張試験片は，図−4に示す昭和9年竣工の一色大橋(名古屋市中川区)の中間支点ゲルバー部の主桁上フランジから切り出し，除錆のため10%クエン酸水素二アンモニウムで72時間浸漬した腐食鋼材片の両端につかみ部を溶接することにより図−5のように製作する．　ここでは，腐食した試験片のおもて面とうら面を計測し，これらのデータを統合して立体形状データを構築する．なお，試験片側面（板厚方向の面）の計測については，つかみ部から平行部にかけての板幅方向の擦り付け幅が片側約13mmと大きく，計測作業時の試験片の傾きなどを考慮すると本計測装置のレーザー変位センサーの測定可能な範囲をはずれることが懸念されること，ならびに側面は切削仕上げ（▽▽6.3a程度）により板厚方向の平坦性は確保されていることから，ここではおもて面とうら面の統合データにおいて，各面の外縁の直近のデータ点どうしを直線で結ぶことにより側面形状を構築した．もちろん，測定レンジが大きく，かつ精度が確保できるレーザー変位センサーを用いれば，すべての面に対して提示した統合化手法が可能である．

表−1　自動計測装置構成機器の主な仕様

機器名	主要スペック	
アナログコントローラ	入力電圧範囲	±5V
	分解能	16bit
	直線性	±0.2%
XYステージシステム	XY移動量	300×300mm
	真直度(垂直･水平)	2μm(ストローク 30mm時)
		20μm(フルストローク時)
	位置決め精度	4μm(ストローク 10mm時)
		25μm(フルストローク時)
	繰返し位置決め精度	±1μm
レーザー変位センサ	測定範囲	±15mm
	分解能	3μm
	直線性	±0.1%

本計測で用いる3次元レーザースキャナの略図とシステム構成を図−6に，その主な仕様を表−1に示す．なお，本論文の目的は3次元形状計測に関するものであるので，試験片の詳細については割愛する．

3.2　基準点を設定する球体

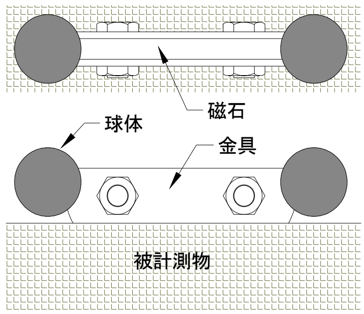
基準点を設定する的として用いる球体は真球に近い高精度の鋼製球体（半径＝約5.5mm）を用いる．本球体によれば，今回の100μm ピッチの計測で球体の中心ならびに半径を同定するのに十分な球体表面位置データ（数千点）が得られる．鋼製球体は図―7 に示す治具に固定し，磁石で試験片に取り付けられるようになっている．

ここでは，2 個の鋼製球体を固定した治具を示しているが，1 個の球体を単体で固定した治具でも良い．供試体の表と裏の表面形状データを結合するには基準点となる球体は最低3カ所必要となるので，図―7 の 2 個の鋼製球体を固定した治具を表と裏の計測時にそれぞれ視準できるように図―8 のように引張試験片の両側面に接着する．ただし，片側の側面にこのような治具を接着し，他方の側面に1個の球体を固定した治具を接着し3個の球体を用いてもよい．今回は4 点の球体を用いるが，表裏の形状データの結合には球体中心座標の算定精度が良い方から 3 点を基準点として選ぶ．ここでは，簡単のために基準点となる球体は全て同一径のものを用いるが，先に述べたように表面計測時に各球体を識別するために径の異なった球体の利用も考えられる．また，レーザーセンサの特性などで金属表面の反射が計測の障害となる場合や，より高精度な測定が必要な場合には，鋼製球体の代わりにセラミックス球体も使用しうる．

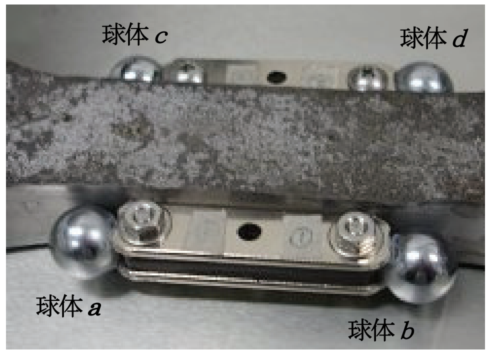
3.3　球体の中心座標と半径の同定法とその精度

腐食表面計測データから球体の表面データを識別し，このデータ内で(x_α, y_α)座標に関して球体の中心座標に最も近いものを探索する．ここでは，球体の表面データからz_αが数値的に極値となるものを選ぶ．このようにして求まったデータの(x_α, y_α)座標を$(x_{\alpha 0}, y_{\alpha 0})$とする．この点を図心とし，一辺が aの正方形領域を$x_\alpha - y_\alpha$平面上で考える．この正方形領域内の表面データをもとに，球体の同定計算を行う．このとき，a を変化させ同定の精度が最も良い場合として式(8)の標準偏差$\Delta_{\alpha i}$が最小のものを選ぶ．同定に用いる非線形最適計算は準ニュートン法である．図―9 には球体の実測例としてz_αの等高線図に同定計算で用いる正方形領域を併せて示す．

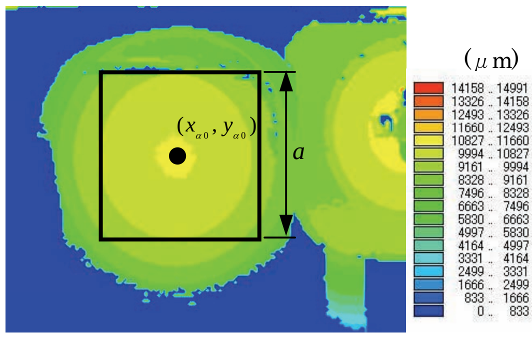
本手法に基づき今回の計測では，正方形領域を $600 \le a \le 7000\mu m$ の範囲で $400\mu m$ おきにa を変化させて試算する．なお，今回おこなった100μm ピッチの計測では，球体の表面データ数は 領域の大きさに応じて $49 \le n \le 4983$ となる．同定結果を球体 a について表―2 にまとめる．また式(8)の標準偏差Δ_{I1}と領域a との関係を図－10 に示す．これより，最もΔ_{I1}が小さいのは $a = 5400\mu m$ のときである．これ以上に領域a を大きくしても，球表面のz_α方向の勾配の増加に伴うレーザー変位センサの測定可能範囲の限界近傍での精度低下や，傾斜角



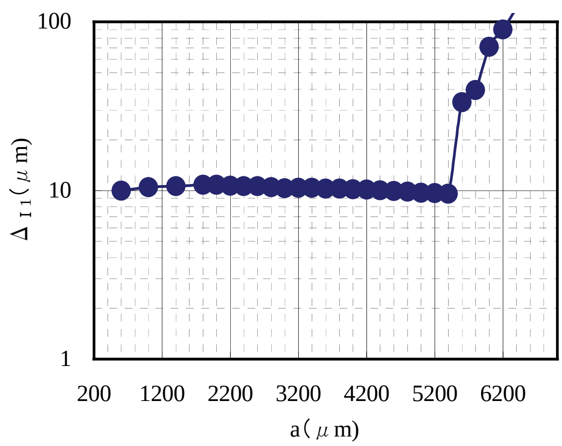
図―7　　基準点となる球体の取付け治具



図―8　　球体の取付け状況



図―9　　球体中心座標の検索領域



図―10　　標準偏差Δ_{I1}と領域a との関係

表─2　球体中心座標および半径の同定結果（球体 a の表面）

正方形領域の辺長 a (μm)	球体 a				欠損データ数（点）	領域データ数（点）	標準偏差 Δ_{Ia} (μm)
	中心座標			半径			
	X_{Ia} (μm)	Y_{Ia} (μm)	Z_{Ia} (μm)	r_{Ia} (μm)			
600	33622	8438	4426	6450	0	49	9.98
1000	33651	8451	5246	5631	0	121	10.46
1400	33644	8435	5559	5320	0	225	10.59
1800	33645	8431	5571	5309	0	361	10.82
2000	33638	8432	5606	5274	0	441	10.80
2200	33636	8435	5467	5411	0	529	10.69
2400	33637	8436	5420	5457	0	625	10.62
2600	33639	8438	5392	5486	0	729	10.61
2800	33638	8438	5372	5506	0	841	10.45
3000	33636	8436	5367	5511	0	961	10.30
3200	33638	8436	5356	5521	0	1089	10.37
3400	33638	8436	5357	5520	0	1225	10.37
3600	33639	8436	5357	5521	0	1369	10.28
3800	33639	8435	5358	5519	0	1521	10.25
4000	33638	8435	5347	5530	0	1681	10.18
4200	33638	8436	5346	5531	0	1849	10.13
4400	33639	8437	5347	5530	0	2025	10.03
4600	33640	8437	5349	5528	0	2209	9.95
4800	33640	8438	5349	5528	0	2401	9.84
5000	33640	8438	5348	5528	0	2601	9.71
5200	33641	8438	5350	5527	0	2809	9.66
5400	33641	8438	5353	5524	0	3025	9.58
5600	33634	8433	5442	5443	2	3247	33.29
5800	33632	8431	5472	5416	4	3477	39.34
6000	33632	8409	5718	5196	21	3700	70.99
6200	33641	8395	5867	5068	45	3924	90.22
6400	33640	8350	6031	4924	54	4171	118.55
6600	33641	8314	6107	4860	55	4434	134.78
7000	33629	8293	6006	4951	58	4983	150.19

表─3　球体中心座標と半径の同定結果

(単位：μm)

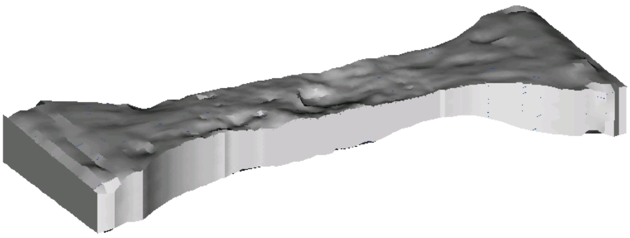
	球体	中心座標			半径	標準偏差
		$X_{\alpha i}$	$Y_{\alpha i}$	$Z_{\alpha i}$	$r_{\alpha i}$	$\Delta_{\alpha i}$
表面計測データ ($\alpha = I$)	a	33641	8438	5353	5524	9.58
	b	81558	8614	5634	5503	10.13
	c	35583	43967	5427	5504	9.74
	d	83793	44138	5627	5495	9.60
裏面計測データ ($\alpha = II$)	a	34070	44053	5253	5509	9.92
	b	81986	44184	5016	5530	9.63
	c	36222	8521	5094	5515	11.20
	d	84441	8659	4943	5510	9.26

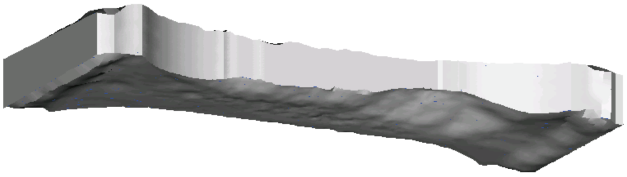
とレーザー光の入反射特性に起因すると思われるデータの欠損点などが生じるため，Δ_{I1} も急に増加する．従って，計測領域は，基準球体の径，レーザー変位センサの測定可能範囲，測定ピッチなどの影響を考え合わせる必要がある．

つぎに，$a = 5400\mu m$ とした時の各球体の中心座標，半径の値に関するおもて面からの測定データによる同定値とうら面からのデータによる同定値を標準偏差とともに表─3 に示す．このデータより，標準偏差値は大きくばらつくことはないので表裏計測での標準偏差値の平均値が最も大きな c の球体を除いた a, b, d の球体の中心座標を統合のための基準点として用いる．以降，球体 a, b, d, c をそれぞれ 1,2,3,4 と名付ける．

3.4　表と裏のデータの統合とその精度

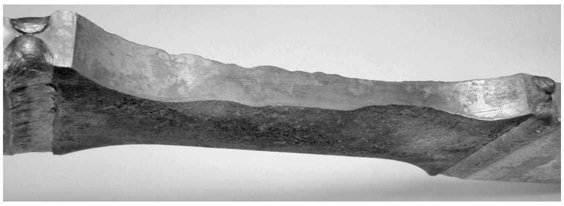
球体 1, 2 ,3 の中心座標を基準点 1, 2, 3 として用い，**2.2** に示した統合化の手法により裏 $(\alpha = II)$ の形状データ $(x_{IIm}, y_{IIm}, z_{IIm})$ を表 $(\alpha = I)$ のデータ (x_{Im}, y_{Im}, z_{Im}) へ結合して試験片の 3 次元形状を数値的に再現する．なお，切削仕上げ（▽▽6.3a 程度）により平坦化されている側面については，**3.1** で述べた理由によりおもて面とうら面の統合データにおいて，おもて面端部とうら面端部の直近のデータ点どうしを直線で結ぶことにより側面形状を構築する．





おもて面　　　うら面

(a) 計測データの CG 画像



おもて面　　　うら面

(b)　実物の写真

図−11　計測データによる腐食試験片の 3D 画像

表−4　統合後の球体中心座標の比較

(単位：μm)

球体番号	表面の計測による中心座標			裏面の計測による中心座標※1)			誤差※2)		
	X_{Ii}	Y_{Ii}	Z_{Ii}	X^I_{IIi}	Y^I_{IIi}	Z^I_{IIi}	ΔX_i	ΔY_i	ΔZ_i
2	81558	8614	5634	81556.2	8600.2	5634.0	-1.8	-13.8	0.0
3	83793	44138	5627	83794.8	44139.3	5627.0	1.8	1.3	0.0
4	35583	43967	5427	35576.8	43982.6	5431.8	-6.2	15.6	4.8

※1)　うら面計測による球体中心座標をおもて面計測に用いた座標系 (x_I, y_I, z_I) で表わしたもの.

※2)　$\Delta X_i = X^I_{IIi} - X_{IIi},\ \Delta Y_i = Y^I_{IIi} - Y_{IIi\,Ii}, \Delta Z_i = Z^I_{IIi} - Z_{IIi}$

表と裏のデータを統合し，試験片の 3 次元形状を再現した結果を CG で図−11 に示す.

再現された 3 次元形状の精度を確認するために，裏の計測時に得られた球体の中心座標を，式(6)により表の座標データに統合したときの座標値 $(X^I_{IIi}, Y^I_{IIi}, Z^I_{IIi})$ と，表の計測で直接得られた球体の中心座標値 (X_{Ii}, Y_{Ii}, Z_{Ii}) とを比較する．このとき，統合のために用いる被計測物体の固定座標 $(\hat{x}_\alpha, \hat{y}_\alpha, \hat{z}_\alpha)$ の原点とした球体 1 の中心座標を除く球体 2, 3 および座標統合では使用していない球体 4 を含めた中心座標を比較の対象とする．結果を表−4 に示すが，誤差は (x_I, y_I) 座標で最大 15.6 μm， z_I 座標で 4.8 μm となる.

つぎに，この誤差と計測装置が有する精度に起因する誤差とを比較する．まず (x, y) 平面座標の計測誤差はアナログコントローラの誤差と (x, y) ステージの位置決め誤差により影響される．また， z 方向の計測誤差はアナログコントローラの誤差，レーザ変位センサの分解能による誤差に加えて, (x, y) ステージの真直度によっても影響をうける．これらの誤差要因に対して，表−1 に示す使用機器の仕様，ならびに計測レンジおよび球体の間隔，サイズから計測誤差量を推定する.

今回の計測では，側面に設置した 2 個の球体の間隔は約 50mm で， X-Y ステージのほぼ中央に配置している．これより， (x, y) 平面の測定レンジを±25mm とした場合，アナログコントローラ出力の誤差(直線性±0.2%)で最大 50.0 μm (25mm×0.2%)の誤差が生じる．また (x, y) ステージの位置決め誤差(フルストローク±150mm 時に±25 μm)がストロークに比例するとすれば，測定レンジ±25mm では±4.2 μm (±25 μm ×25/150)の誤差が生じ得る．よって, (x, y) 平面座標の計測値には，最大で 54.2 μm 程度の誤差が見込まれることになる.

z 方向の計測誤差は今回の測定レンジが約 2mm であることから，アナログコントローラの出力誤差(直線性±0.2%)と変位センサの出力誤差(直線性±0.1%)を合わせて±6.0 μm (±25mm×0.3%)，変位センサの分解能が 3.0 μm ，加えて，X-Y ステージの真直度(フルストローク±150mm 時に±20 μm)から，±25mm 位置で±3.3 μm (±20 μm ×25/150)の誤差が生じる．これらを加えると z 方向の計測誤差は最大で 12.3 μm となる.

以上，計測装置が有する (x, y, z) 座標の計測誤差の推定値と比較して，表−4 に示す基準点である球体中心の位置決め精度は十分であり裏と表の統合は正確に行えることがわかる.

4. まとめ

レーザーセンサなどの非接触型の計測器と，等間隔で移動する二軸移動装置を組み合わせることにより，被計測物体の各腐食面の 3 次元形状を測定し，各面の計測データを統合して被計測物体全体の 3 次元形状を精度良く再現する方法を検討した．ここでは，各面の計測時に用いた互いの座標の位置関係を規定するために，共通の 3 つの基準点を用い，各表面形状データを統合する方法を示した．これらの基準点はいずれの表面測定時においても視準でき，しかも，その位置が精度良く測定されることが重要である．

ここでは，基準点を測定間隔に較べ十分大きな半径を持つ真球に近い球体の中心に設定する方法を検討した．これは，球体表面はどの角度からも視準できるとともに，汎用の 3 次元スキャナによる等間隔の離散的な計測においても球体表面の位置座標を逃すことなく計測でき，複数の球体の表面位置座標から基準点となる球体の中心座標を最小自乗法で精度良く求めることができるからである．このような手法の精度を確認するために，腐食鋼板の平板引張り試験片を例に表と裏の計測データを統合する場合に適用した．その結果，統合された表面の位置精度は 3 次元スキャナの計測精度とほぼ同等の精度が確保されることが判明した．本手法の実際の適用先としては複雑な腐食欠損形状をもつ鋼構造部材の FEM モデルの作成や腐食鋼板の板厚測定等で，これらはいずれも精度よく実行できると考える．

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費基盤研究(B)課題番号 17360211「腐食と補修の履歴を考慮した既設構造物の 3 次元耐震性能評価法に関する研究」（代表：後藤芳顯)の援助を受けた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 杉浦邦征，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿，岡扶樹：腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察，構造工学論文集，Vol.52A，pp.679-687，2006.3.
2) 森猛，渡邊一，正井資之：腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐力，構造工学論文集，Vol.49A，pp.675-686，2003.3
3) 大西弘志，松井繁之：腐食 PC 鋼材の表面凹凸がその強度に与える影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.7，pp.203-208，1999.11
4) 山沢哲也，野上邦栄，森猛，塚田祥久：腐食鋼部材の腐食形状計測と曲げ耐荷力実験，構造工学論文集，Vol.52A，pp.711-720，2006.3
5) 倉敷紡績株式会社エレクトロニクス事業部：三次元写真計測システム Kraves-k 製品説明，http://www.kurabo.co.jp/el/3d/kuraves_01.htm

（2006 年 9 月 11 日受付）