

三次元レーザープロファイラを用いた城郭石垣計測システムの開発

Development of Measurement System for the State of rampart using 3-D Laser Profiler

大津慎一¹・佐田達典²・水本雅夫³

Shun-ichi Ohtsu, Tatsunori Sada, Masao Mizumoto

抄録: 石垣修復では石垣の現況計測および解析を行い、解析結果から修復が必要な箇所と不必要な箇所を算定して施工を行う。従来計測では断面図などを作成して修復が必要な個所の特定を行っていたが、断面図を作成した位置でしか変形の把握をすることができない。そこで三次元レーザープロファイラを用いて石垣の全体的な形状の計測・解析を行うことで石垣面全体の曲率変化を把握し、視覚的に修復が必要な箇所と不必要な箇所の特定を行うことを試みた。これにより詳細な石垣面全体の状態を把握することができるので、今まで見逃していた局所的な変形を把握することも可能となった。さらにカラースペクトル画像として視覚的に変形を表現するため修復の必要性などを示す資料としての活用も可能となった。

Abstract: Measurement and analysis of rampart's status are performed in rampart restoration. And, a part to be restored and an unnecessary part are investigated from the analysis result. The part to be restored is usually investigated using the sectional view. However, modification can be grasped only in the position that the sectional view is created. There, we tried to grasp curvature change of the whole rampart face by performing measurement and analysis of the overall form of the rampart using 3D laser profiler, and to pinpoint a part to be restored and an unnecessary part visually. By this method it became possible to grasp the state of the detailed whole rampart face, it also became possible to grasp the local modification overlooked until now. Furthermore, since modification was visually expressed as a color spectrum picture, the practical use was also attained as data that show the necessity for restoration etc.

キーワード: 三次元レーザープロファイラ, CAD, CG

Keywords: 3D-Laser Profiler, CAD, CG

1. はじめに

近年、地方都市の活性化、市民の憩いの場創出、歴史遺産保護などの機運が高まりを見せ、城跡に往時の天守閣や櫓を復元してこれらをシンボルとした公園を整備する構想が全国各地で具体化している。それに伴い城郭の基礎となる石垣修復のニーズも高まってきている。石垣修復では石垣の現況計測および解析を行い、解析結果から修復が必要な箇所と不必要な箇所を算定して施工を行う。しかしトータルステーションや三次元写真解析などを用いた従来計測方法では得られる成果品は、断面図などの断片的な情報であるため、断面図を作成した位置のみの形状しか把握することができない。

三次元レーザースキャナーは、対象物の詳細な表面形状の計測を非接触かつ遠隔で計測することができるという特長を持っているので、筆者らは崖面や法面などの地形計測¹⁾、プラントにおける配管計測²⁾などといった分野での利用技術の研究を進めてきた。これにより足場などの仮設や危険個所の立ち入りなどを行わなくても対象物の計測が可能となったため、現地計測日数の短縮や

安全な計測を行うことが可能となった。またあらかじめ決められた点を計測するのではなく表面形状を面的に捉えるといった特長から、解析時に断面抽出位置を任意に決定するなどといった柔軟な解析も可能となった。今回、いままでの利用技術の研究によって確立した本機特長の活用手法を活かして、石垣全体の詳細な形状を計測して現況解析を行う『城郭石垣計測システム』の開発を行った。

本稿は、『三次元レーザープロファイラを用いた城郭石垣計測システム』の開発と適用事例の報告である。

2. システム概要

三次元レーザープロファイラは、1計測で本機を中心として最大距離60mの全周計測が可能である。計測は、本体より赤外線レーザーを計測対象に発射しその反射光を検知することで距離および振り角度を検出することで行う。また対象物からの乱反射光を検知するため計測対象にミラーや反射板などの特別な処理は必要としない。

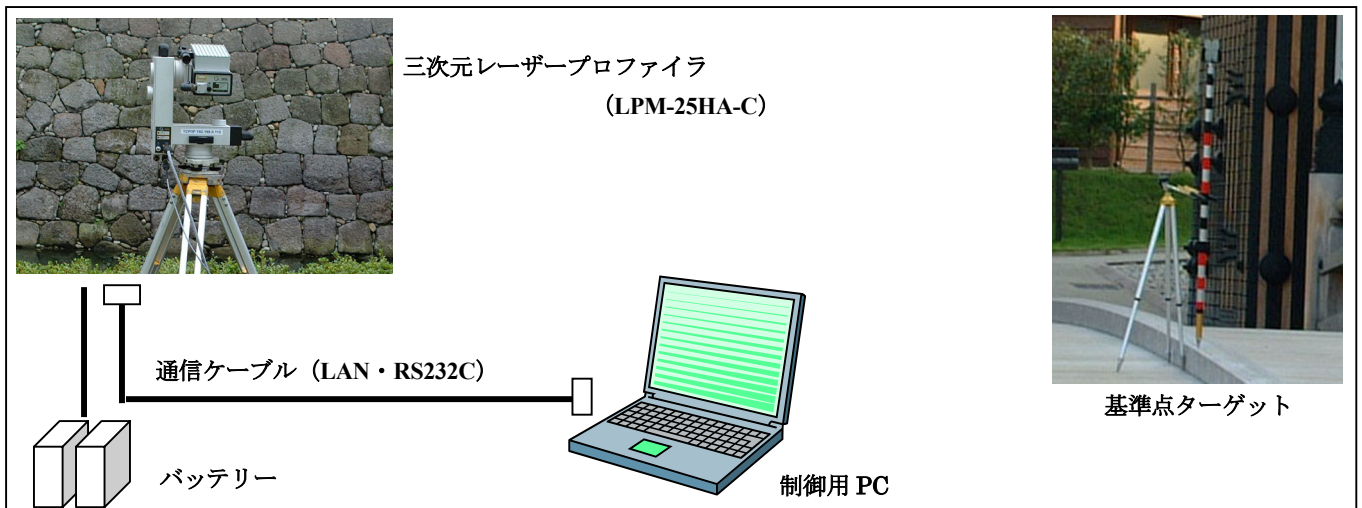
本システムでは、計測可能な位置に機器を設置して解

1 : 正会員 三井住友建設株式会社 技術研究所

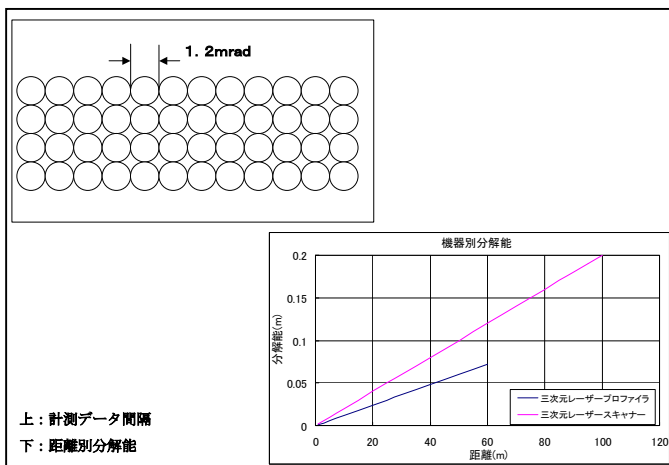
(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1, Tel :04-7140-5203, E-mail : ohtsushunichi@smcon.co.jp)

2 : 正会員 工博 三井住友建設株式会社 技術研究所

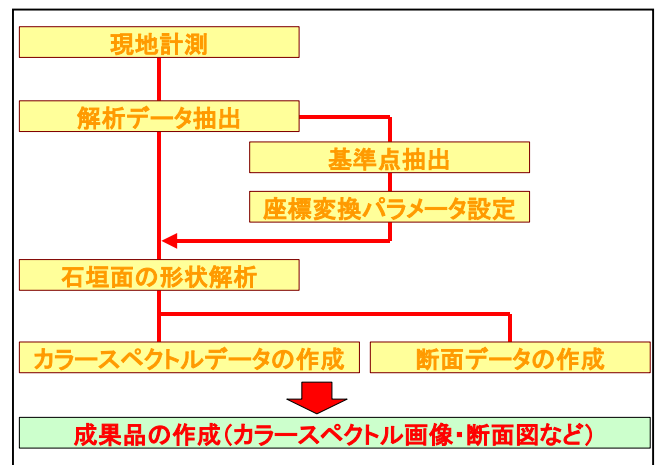
3 : 正会員 三井住友建設株式会社 土木設計部



図—1 現地計測機器構成



図—2 計測データ分解能



図—3 システム作業フロー

析を行う石垣面の計測を行い、その計測データを用いて解析・成果品の作成を行う。計測対象となる石垣が、『石垣面延長が長い』『樹木などの障害物によって一部計測が不可能である。』等で全体計測が行えない場合には、計測箇所を変えながら計測を行う。多点から計測を行った場合でも、解析作業の段階で座標変換を行い計測データ全体の座標系を統一することで、1計測で石垣全体を計測した場合と同様な解析・成果作成を行うことが可能である。

以下に、本システムによる現地計測方法および形状の解析手法、成果品の表現方法について示す。

3. 現地計測

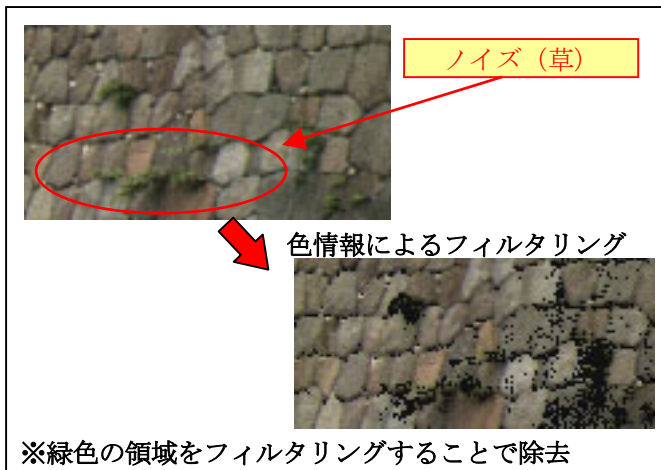
本システムでは、図—1の機器構成に示す三次元レーザープロファイラ (LPM-25HA-C) を用いて現地計測を行う。本機は、接続されたノートPCによって制御・データ収集がなされる。本機は最大距離で60mの計測が可能であるが、図—2に示すように計測対象までの距離が遠くなるとCCDカメラ画像と同じように1画素当りの分解能が低下するので、石垣までの距離が遠くなると

石垣面の細かな形状変化を捉えることが困難となる。そのため石垣を構成する石の大きさを考慮して、1計測当りの計測距離と範囲を現地の状況から判断して機器設置を行う必要がある。本機を使用する場合、レーザーの広角が1.2mradであるため、10cm程度(握コブシ大程度)の石の表面を最低一点捉えようとする、有効となる計測距離は40m程度となる。

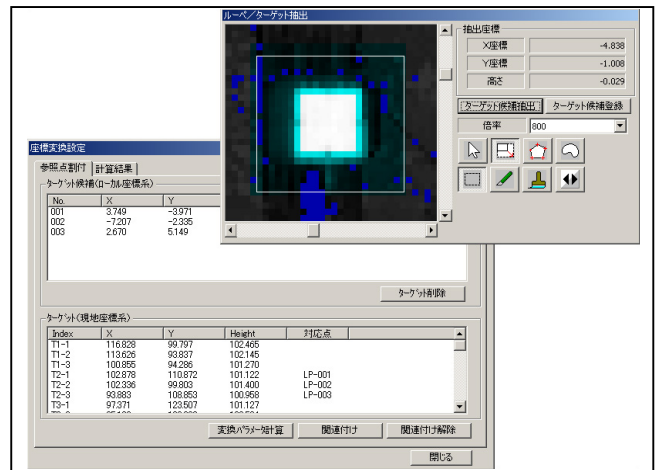
機器設置状況により1計測で対象となる石垣面の全体が計測できない場合には、分割計測を行う。また樹木などの障害物によって一計測で全体の計測が行えない場合についても計測位置を変え、対象となる石垣面全体の計測を行う。ただし分割計測を行った場合には、図—1に示す基準点ターゲットを用いて現地に基準点を設けて解析時に座標変換が行えるようにする必要がある。

4. 解析手法

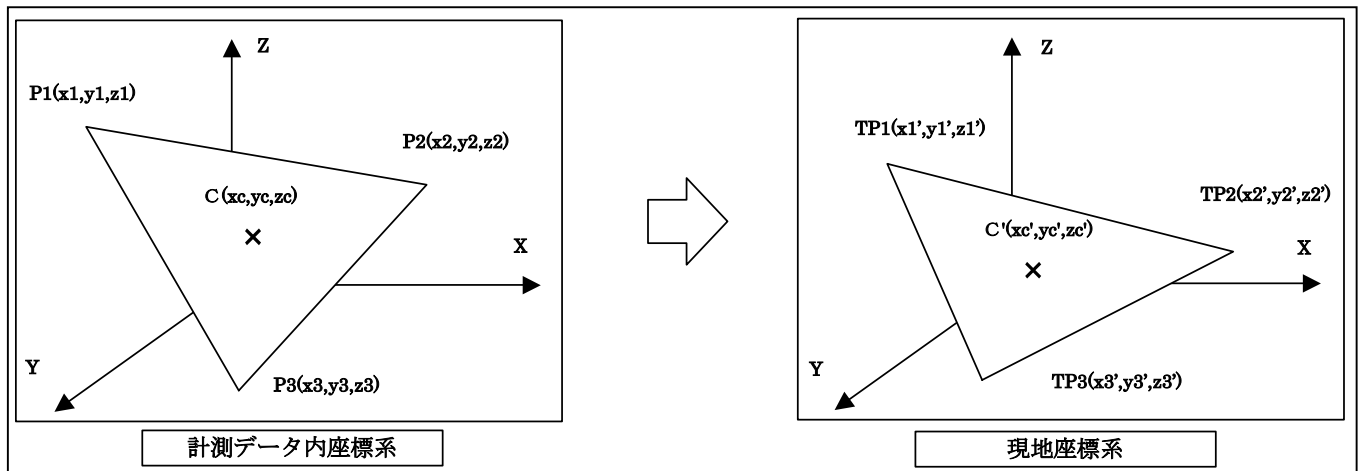
データ解析は、図—3の流れに示すように『ノイズ除去・解析データの抽出』『座標変換パラメータ設定』『石垣面の形状解析』『カラースペクトルデータの作成』『断面データの作成』の各プロセスに分けて作業を行う。



図—4 ノイズ除去例



図—5 基準ターゲット座標値の抽出



図—6 座標変換手法

(1) ノイズ除去・解析データの抽出

三次元レーザープロファイラによって取得された計測データは、**図—4**に示すように同時に樹木などのノイズも含まれている。石垣面の形状解析を行う場合、ノイズは解析の精度を低下させる要因となる。そこで解析を行う前にノイズの除去を行い、解析に用いるデータのみを抽出を行う。ノイズの除去は、計測データに格納されている距離（三次元座標）、レーザー反射強度、色情報の各要素をもとにフィルタリング処理を行って除去する。フィルタリング処理のみでは除去できないノイズについては、視覚的に確認しながら手動で除去を行う。

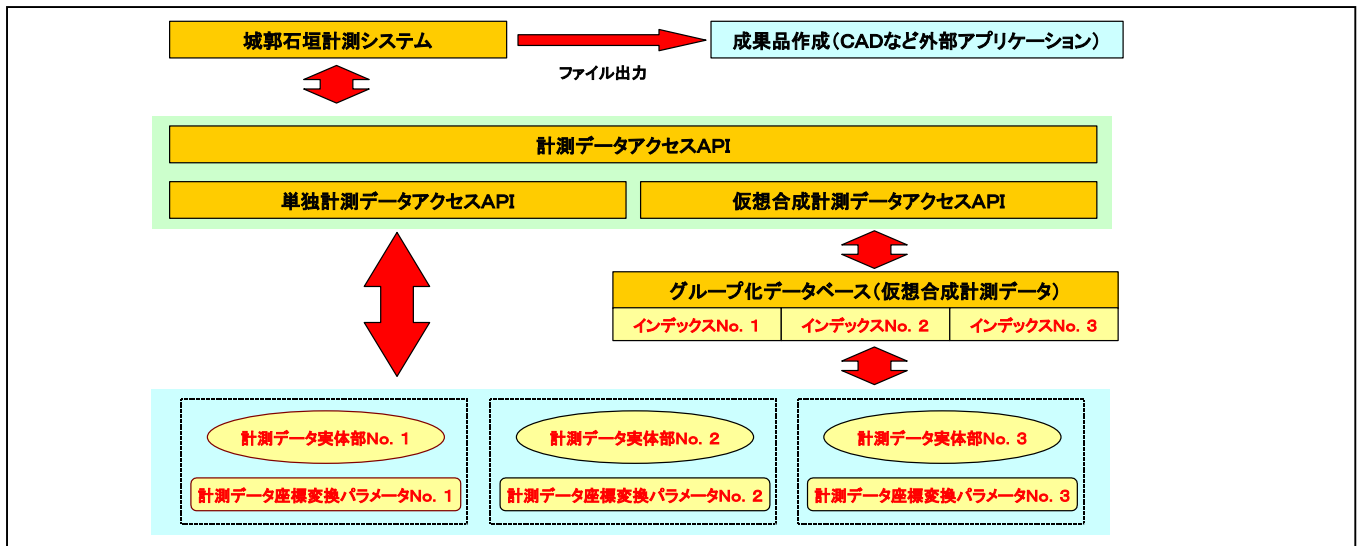
(2) 座標変換パラメータ設定

現地計測時に樹木などの障害物や1計測当りの計測距離と範囲の制約などによって、1計測で石垣全体を計測できない場合がある。この場合には計測する位置を変えながら分割して石垣の計測を行う。ただし分割して計測を行った場合、各計測データ内のローカル座標系が異なるため、計測データを座標変換して統一された座標系上のデータとする必要がある。同一座標系上への変換は、**図—1**に示す基準ターゲットの設置位置に公共座標系などのすべての基準ターゲット位置を管理可能な現地座

標系上の三次元座標値を設定して、各計測データ内のローカル座標系と関連付けることで座標変換を行う。関連付けるローカル座標値は、計測データ内に写っている基準ターゲットを抽出することで三次元座標値を算出している（**図—5**）。1計測データ内で現地座標値とローカル座標値の関連付けを最低3点行うことで、**図—6**に示す三角形から座標変換パラメータの算出を行う。変換公式は以下となる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix}$$

上記変換式の変換行列は、三次元のヘルメート変換行列である。ただし、パラメータ算出にはオイラー角を用いた算出方法は適用せず、重心Cおよび重心C'を基準としたときの各頂点が構成する三角形の合同性から座標変換パラメータを算出している。また本変換方法では、三角形の合同性からパラメータ算出を行っているので縮尺の補正は行われぬ。つまり、三次元の回転と移動だけを行うだけの座標変換となる。



図—7 システム内データ管理手法

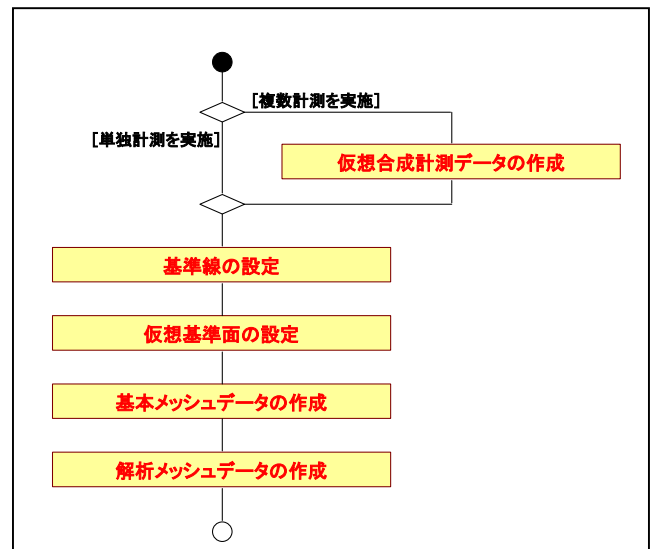
(3) 計測データの合成

本システムでは、三次元座標値で表現された計測データを用いて石垣面の解析を行う。1計測で計測対象を計測した場合には、1つの計測データを三次元座標値に変換して解析を行えるが、複数計測データの場合には前述の座標変換を行い、複数計測データを1つの計測データとして合成することによって初めて解析が可能となる。しかし本機によって取得される計測データは計測する範囲および計測分解能によって異なるが、1計測データ当たり約180万点（計測範囲100°×45°，計測分解能0.05°）となる。つまり単純に計測データの合成を行うと、合成後の計測データが肥大化して石垣面の形状解析などシステムが行う処理に対して大きな負荷が生じることとなる。そのため肥大化による負荷を軽減することが可能となる合成方法を検討する必要がある。

本システムでは、合成を行うことによって計測データの肥大化による負担を軽減するため、図—7に示すようにグループ化を行う計測データ一覧と各計測データに関連付けを行う座標変換パラメータをデータベース化することで仮想的に計測データの合成を行っている。システム内部で合成された計測データが必要になる場合には、データベースを介して仮想的に合成された計測データへのアクセスを行う。

(4) 石垣面の形状解析

石垣面の形状解析では、解析対象となる石垣面を計測した1ないし複数の計測データを用いて構築時の状態からどのような変形が生じているかの解析を行う。しかし城郭石垣は、構築されてから数百年経っているものがほとんどであるため、構築時の状況を示す資料等の入手が非常に困難である。そのため石垣全体から構築時の状況を想定して孕み出しや反り具合などを数値情報として把握する必要がある。ただし、孕み出しや反り具合など判断する資料として石垣全体の状況がメッシュ図のような



図—8 石垣面の形状解析フロー

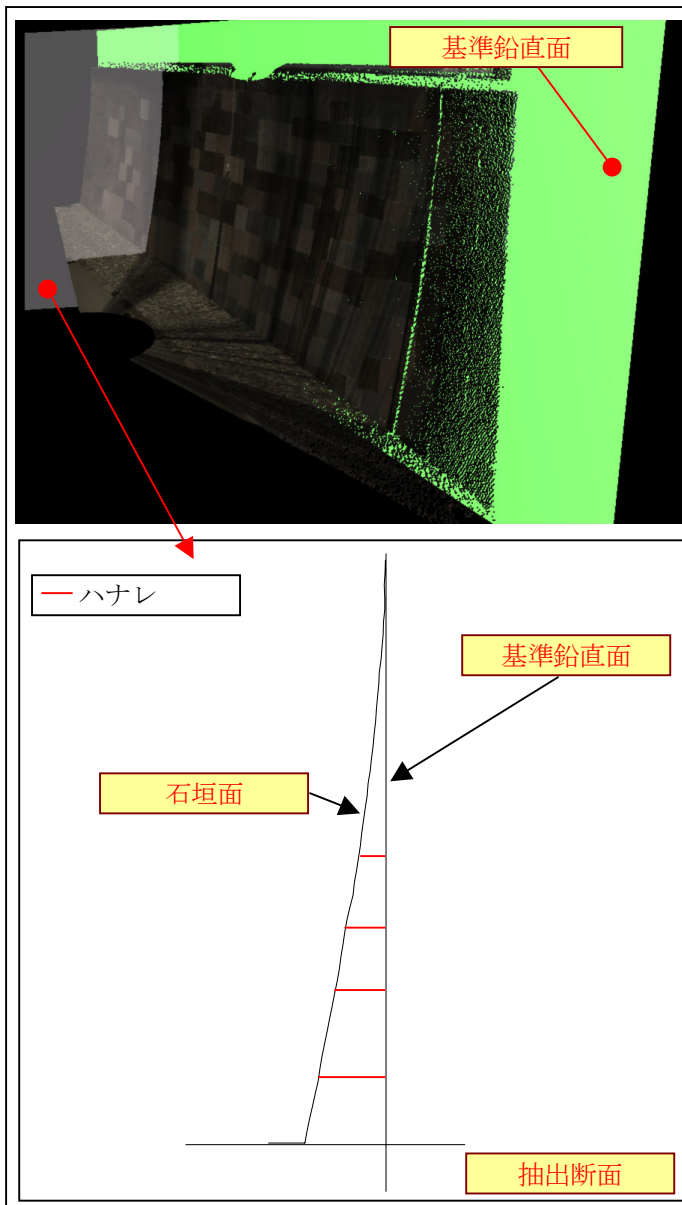
数値の羅列であると、視覚的に異常個所の特定をすることが困難となる。そこで解析結果をカラーグラデーションによる視覚的な情報に置き換えて表現することも考慮し解析方法を検討する必要がある。

本システムでは、図—8に示すような流れで視覚的な情報の基礎となるメッシュデータの作成を行っている。以下に各解析工程における解析手法を示す。

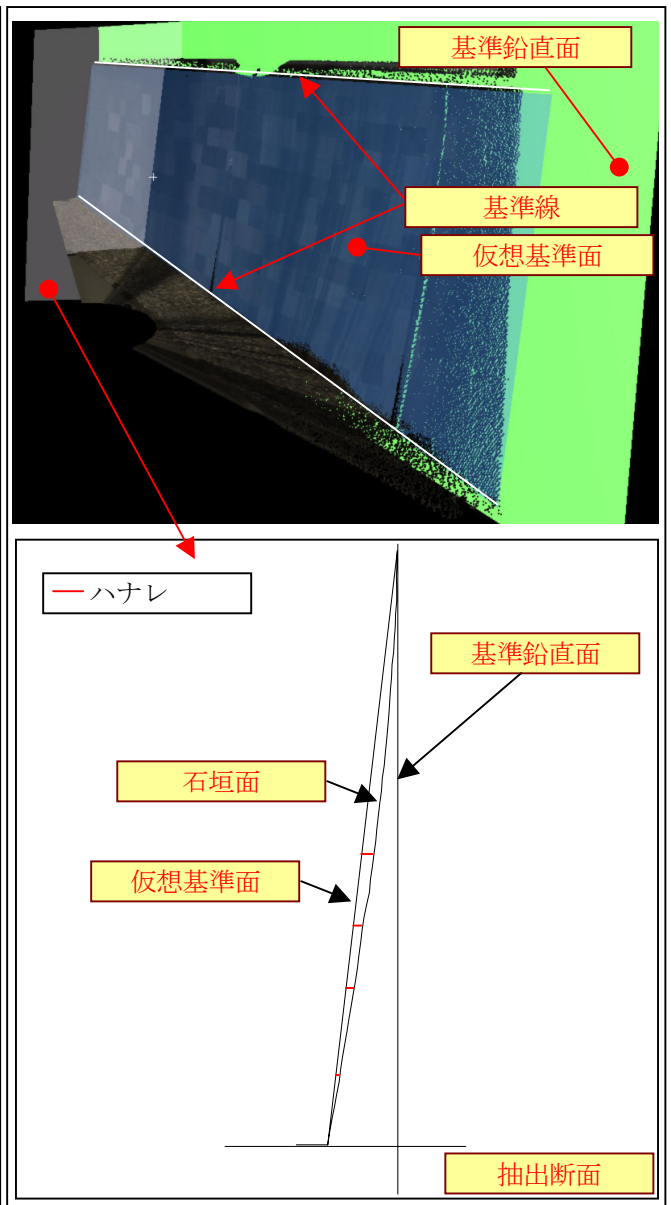
a) 仮想基準面の設定

把握の方法としては、石垣の断面方向に対して鉛直な面からの絶対的なハナレとして把握する方法と石垣全体の形状から仮想的な基準面を設定して相対的なハナレとして把握する方法の2通りがある。

絶対的なハナレとして把握は、まず図—9に示すように石垣面の背面（前面）に基準となる鉛直面を設けて、鉛直面からのハナレを算出する方法である。この方法では解析結果を数値として表現する場合には、十分有効な表現方法である。しかし図—9に示すようにハナレは絶



図—9 絶対的なハナレ把握方法



図—10 相対的なハナレ把握方法

対的な値であるため、最大値と最小値の差が大きくなり解析結果をカラーグラデーションとして表現した場合、色情報で表現可能な分解能が低下し細かい変化を捉えることが困難となる。

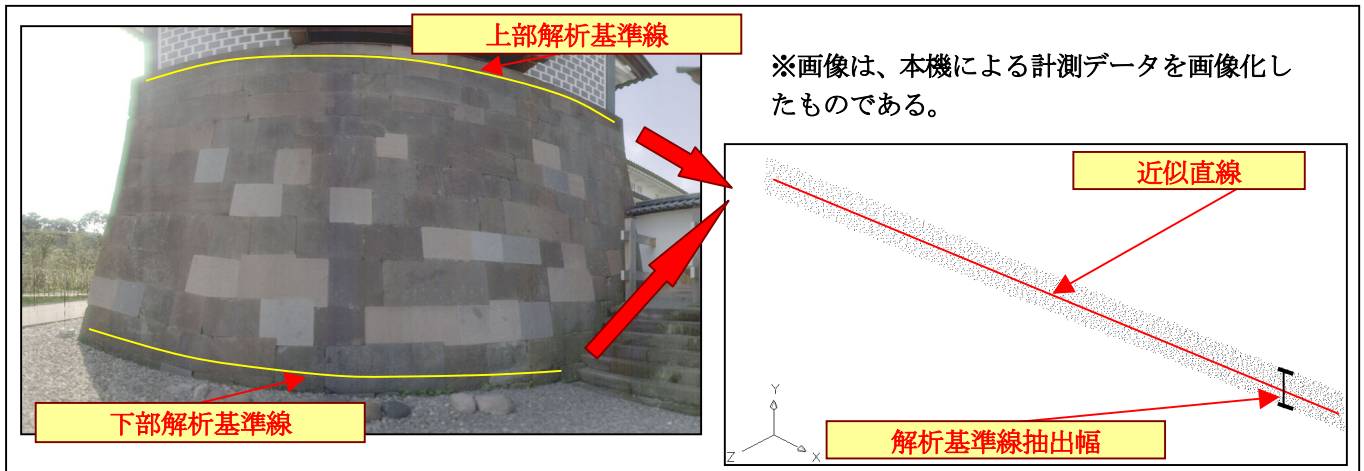
一方、相対的なハナレとして把握は、**図—10**に示すように石垣の比較の変位が発生しにくい位置に仮基準を設け、基準をもとに比較対象となる仮想的な基準線(面)を設定して基準面からの相対的なハナレとして把握する方法である。本システムでは、**図—10**に示すように石垣の上部と下部付近が石垣の変形などによる影響が比較的少ない位置であると仮定し、上部と下部に基準線を設定してこの2本の基準線によって仮想基準面を定義している。この方法では、石垣の水平方向の捩れなど絶対的な数値でのみ判断できる異常は検知できないが、ハナレの最大値と最小値の差が少なくなるため、色情報で表現可能な分解能が向上してカラーグラデーションとして表

現した場合、局所的な反り具合の変化やわずかな孕み出しなど微妙な変位を視覚的な情報として取得することが可能となる。

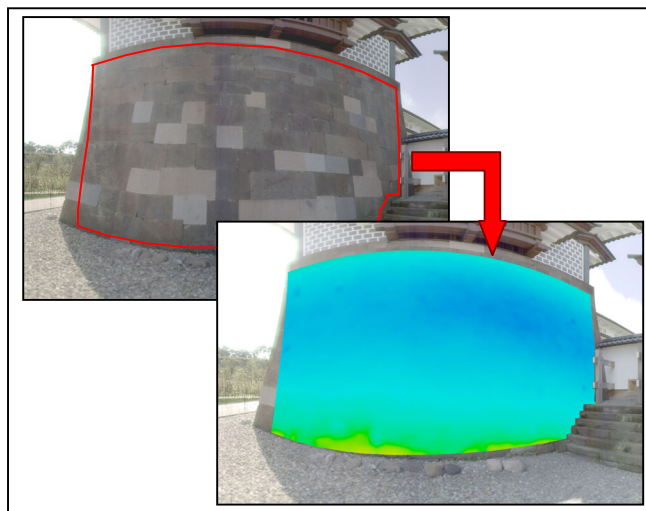
本システムでは、石垣における微妙な変位を視覚情報として取得することに重点をおき、相対的なハナレの把握方法を採用している。なお上部および下部に設定する基準線は、基準線を設置する位置を高さによって指定し、同じ高さの計測データを抽出・解析して近似直線を求め設定を行う。しかし計測データにはばらつきがあるため、一定の抽出幅を設けて抽出を行い最小二乗法により近似直線の解析を行っている(**図—11**)。

b) メッシュデータの作成

仮想基準面と計測データを比較することでも石垣の形状を表現することは可能である。しかし本機によって取得される計測データは**図—2**に示す計測分解能を持つため、計測データの中央部など計測距離に近い個所では



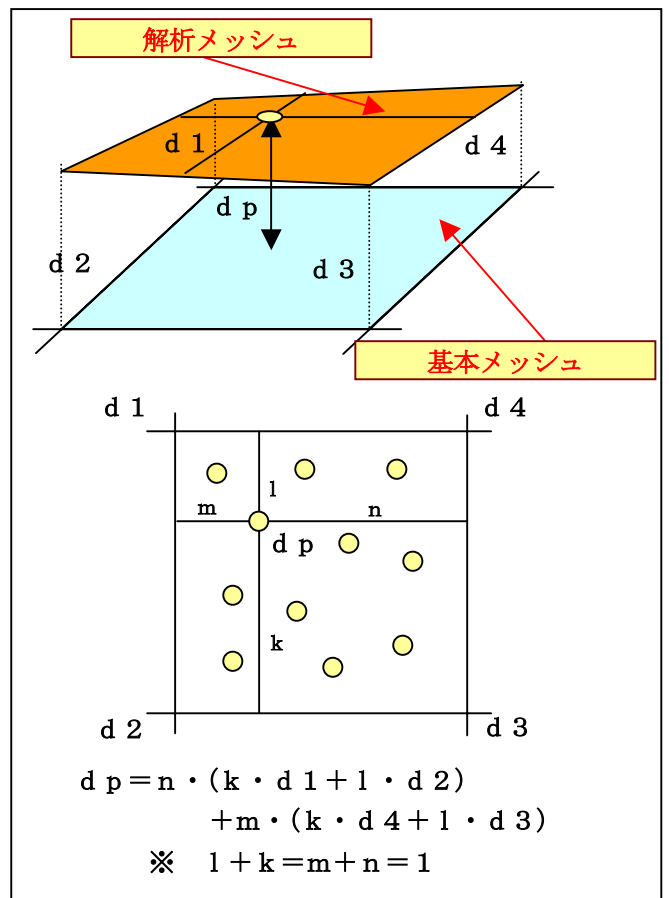
図—1 1 計測データ内における基準線の設定



図—1 2 カラースペクトルへの置き換え

データの密度が高くなり石垣を構成する石そのものの形状が解析結果に反映されてしまう。また一計測で広範囲を計測した場合、計測データの端部と中央部でデータ密度が異なるため、一様な解析結果が得られない場合がある。そのため石垣の曲率変化など石垣全体の状況を把握することが困難となる可能性がある。

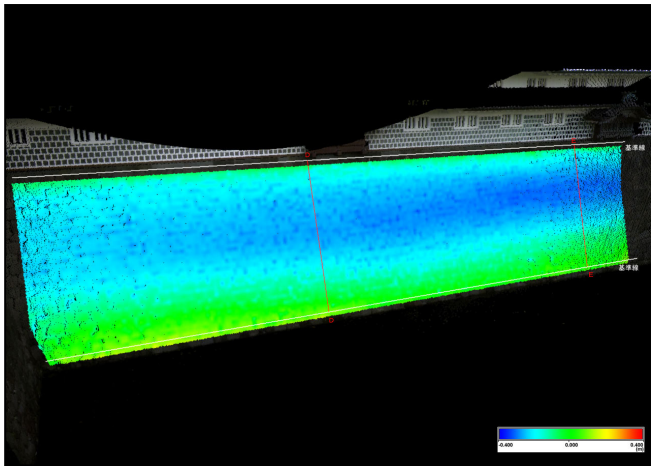
そこで仮想基準面および計測データをそれぞれメッシュ化することにより、計測データの密度によって解析結果が左右されない石垣全体の状況を把握可能な解析データの作成を行う。メッシュ化を行う際には、**図—1 0**に示す鉛直基準面を基準平面として設定し、基準平面がXY平面となるように仮想基準面および計測データの座標変換を行い、仮想基準面からは基本メッシュデータ、計測データからは解析メッシュデータをそれぞれ作成する。基本メッシュデータは、XY平面から仮想基準面に伸ばした垂線の足の長さを標高値とする。また解析メッシュデータは、重み付き平均によってメッシュの格子点を内挿した値を標高値としている。石垣の形状変化を示すカラースペクトルは、両メッシュデータを用いて作成を行う。



図—1 3 画素におけるメッシュ差の算出手法

(4) カラースペクトルデータの作成

カラースペクトルデータの作成では、各メッシュ格子点における基本メッシュデータと解析メッシュデータの差を視覚的な情報（カラースペクトル）に置き換えることによって表現を行う。カラースペクトルとは、観測値を色相（赤・緑・青紫と連続的に変化する色合い）に置き換えることで視覚的な情報に変換して表現する方法である。しかしメッシュを単純にカラースペクトルの色情報に置き換えて図化しただけでは、孕み出しなどの異常が検出されても石垣のどの位置が孕んでいるかといった



図—1 4 カラースペクトル画像

ことを直感的に判断することが難しい。そこでカラースペクトルを解析元となった計測データと重ね合わせることで視覚的に石垣の状態を把握することが可能となるデータ作成をする必要がある。

本システムでは、計測データの各画素が持つ色情報を図—1 2 に示すようにカラースペクトルに置き換えることで位置情報と石垣の状態を関連付けて、より視覚的なデータ作成を実現している。

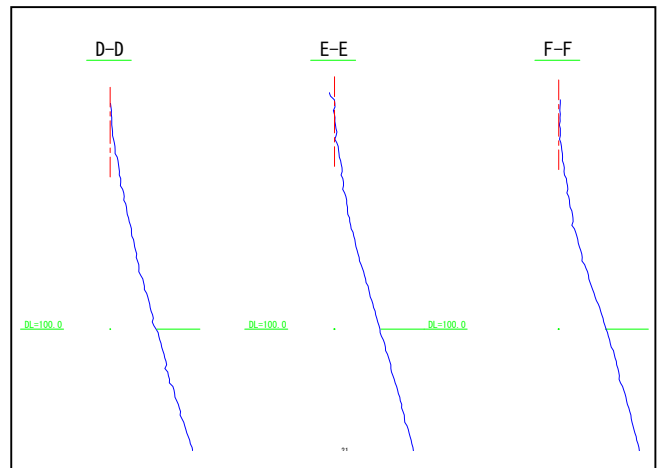
関連付けは、図—1 3 に示すように置き換えを行う画素ごとに内包されるメッシュの検索を行って各格子点の値と線分比から計算式より画素に割り当てる値を算出して行う。内包されるメッシュが存在しない場合には、置き換えを行わずに三次元レーザープロファイラで取得した色情報を保持する。カラースペクトルと関連付けが行われた計測データは、成果品を作成する段階で外部アプリケーションに取り込まれてカラースペクトル画像として出力される。

(5) 断面データの作成

断面データの作成では、従来手法による成果と同じように断面図のもととなるデータの作成を行う。ただし従来手法と大きく異なる点は、従来手法が現地計測時に設定した断面図しか作成できないのに対して、本システムで作成する断面データは、解析時に作成を行いたい位置を指定することによって任意位置のデータを作成可能な点にある。また三次元レーザープロファイラによる計測であるので、在来手法よりも詳細な断面形状を表現することも可能となる。断面図として成果品の作成を行う場合には、この断面データをDXFファイルとして出力することによってCAD上で縮尺や書式などといった最終的な調整を行う。

5. 成果品の作成

本システムによって作成される成果品は、図—1 4 および図—1 5 に示すカラースペクトル画像と断面図で



図—1 5 断面図

ある。成果品の作成は、本システムにより作成されたカラースペクトルを含む計測データおよび断面データを外部アプリケーションに取り込みを行うことによって最終的に外部アプリケーションに依存した形で作成が行われる。断面データから断面図を作成するには座標変換は必要ないが、複数計測データを組み立ててカラースペクトル画像を作成する場合には、外部アプリケーションによって座標変換を行う必要がある場合がある。座標変換が必要な場合には、本システムから座標変換処理を行うアプリケーションに依存した座標変換パラメータも同時に出力を行う。

6. 適用事例

過去に石垣の修復工事を行った実績のある箇所では試験計測および本システムの適用を行った。また2断面において三次元写真解析による計測との比較を行った。

(1) 適用案件概要

- ・試験範囲：施工実績箇所（総石垣面6面）
- ・計測延長：約150m（最大延長石垣面約70m）
- ・試験期間：平成15年9月2日（火）
～平成15年9月3日（水）

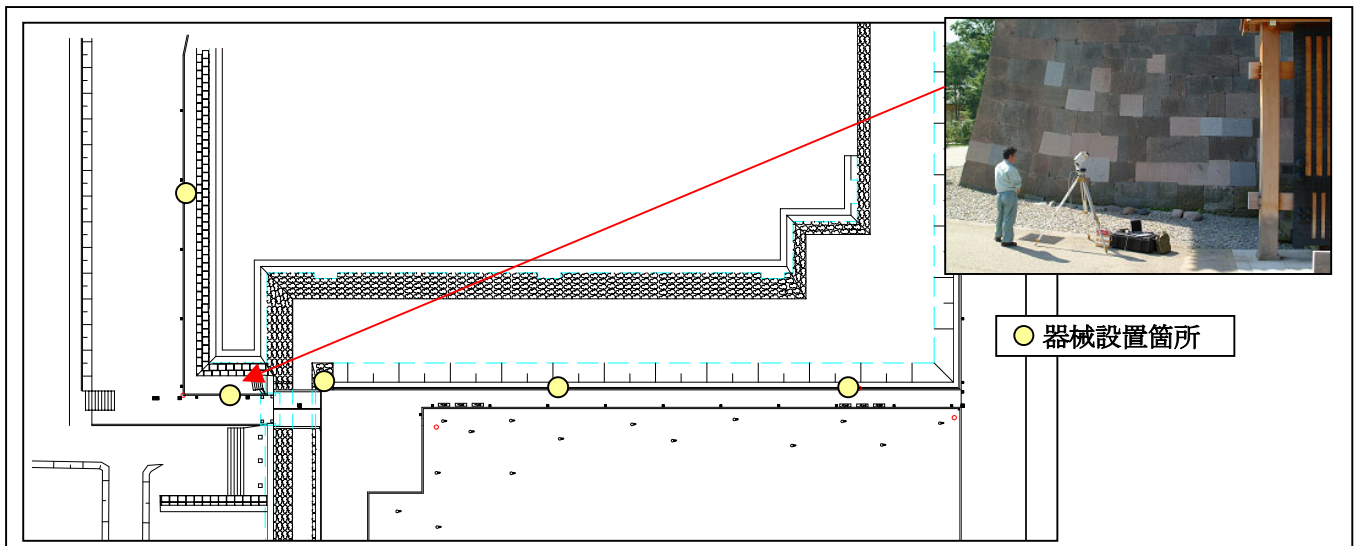
(2) 現地計測

現地計測では、試験計測区間における石垣面を5つの石垣面に分けて計測を行った。計測箇所および計測状況を図—1 6 に示す。

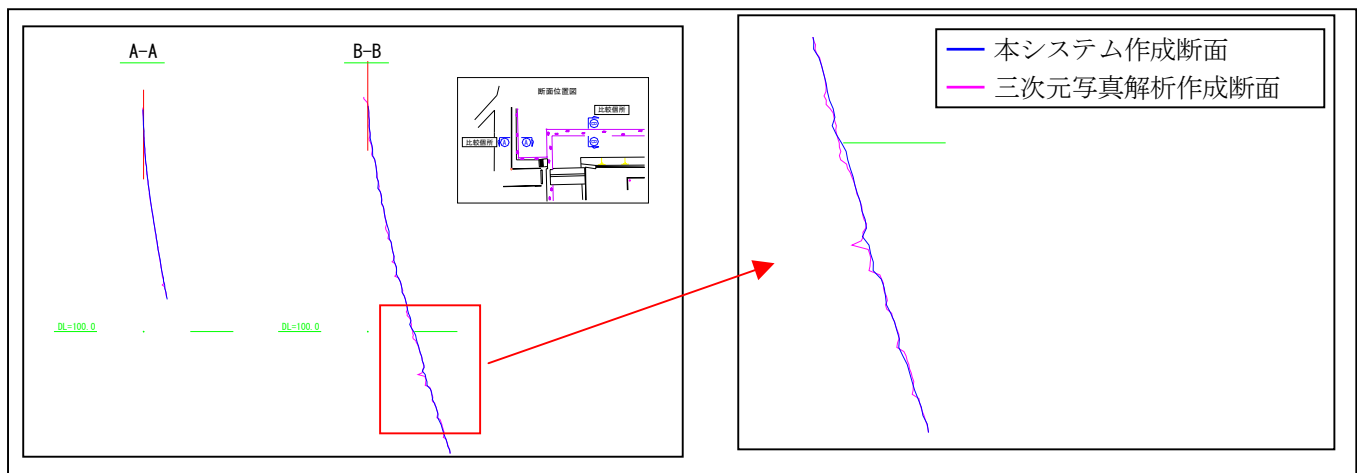
(3) 成果品の作成

作成を行ったカラースペクトル画像および断面図の一例を図—1 4 および図—1 5 に示す。

カラースペクトル画像は、本システムによって作成されたカラースペクトルを含む計測データを市販アプリケーションに取り込み、カメラアングルやカメラ位置などを決定してデジタル画像として出力を行う。本適用事例の成果品は、LeicaGiosystem 社から販売されているCycloneによってデジタル画像の作成を行っている。



図—16 計測箇所概略図および計測実施状況



図—17 三次元写真解析との断面比較

また断面図については、本システムから作成した断面データをDXFファイルとして出力することによって、CAD上で最終的な調整を行っている。

(6) 精度検証

図—17に三次元写真解析との比較結果を示す。両計測手法を比較した結果としては、図—16右に示す個所が最も差が大きい個所であり、最大較差は200mmとなった。また断面全体の較差平均は、約30mmとなった。

7. まとめ

精度検証の結果から、従来手法で作成される断面図として比較した場合に較差平均は、約30mmとなり、従来手法とほぼ同等の計測精度を得られることがわかった。また、成果品としてカラースペクトル画像を加えることで石垣全域において孕み出しや反り具合が視覚的に把握可能となり、より精度の高い石垣修復個所の特定が可能となった。これにより今後、石垣崩壊の危険性の判断や城郭石垣の修復での活用を期待できる。

また今後の課題としては、現在石垣の上部および下部に設定した基準線をもとに仮想平面を作成して比較対象としているが、上部または下部において変形や崩落などが発生していた場合に本システムの適用が困難となる。そこで古文書・古記録などが入手可能な場合には、これらをもとに比較対象となる基準の作成方法³⁾についての検討も行っていきたい。

- 1) 大津慎一, 佐田達典, 村山盛行: RTK-GPS/三次元レーザースキャナーを用いた自走型地形計測システムの開発, 土木学会第58回年次学術講演会, 2003年9月
- 2) 大津慎一, 佐田達典: 三次元レーザースキャナーを用いたプラント配管図作成システムの開発, 土木学会第57回年次学術講演会, 2002年9月
- 3) 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄, 森本浩行: 城郭石垣断面形状の設計方法とその数式表示に関する考察, 土木学会論文集 No.750/III-65, P.89-98, 2003年12月

(2004.5.21受付)