

デジタルオフセット技術による石垣模様の検出

乾 正知

茨城大学工学部システム工学科

E-mail: *Masatomo.Inui@dse.ibaraki.ac.jp*

デジタル・アーカイブ技術を用いて、発掘された石垣の記録作業を効率化する研究が進んでいる。現在最も一般的なレーザ・レンジファインダによる計測では、石と石の隙間部分を精度よく測定できないため、得られた石垣の多面体モデルに荒れた形状が生じてしまう。われわれは多面体のオフセット技術を用いることで、隙間部分の形状の「荒れ」を選択的に除去し、石積み状態をより鮮明にする技術を開発したので報告する。レンダリング・ハードウェアを用いたデジタルなオフセット技術により、この処理をごく短時間に、しかも安定におこなうことに成功した。

Extraction of Stone Wall Pattern Using Digital Offset Technology

Masatomo INUI

Dept. of Systems Engineering, Ibaraki University

E-mail: *Masatomo.Inui@dse.ibaraki.ac.jp*

Scanning and digitally recording the stone wall shape in the excavation site is actively studied. Typical laser rangefinder is not suitable for measuring the gap part between the stacked stones in the wall, and the result geometric model often has some visible roughness in such portions. In this paper, the author proposes a refining method of the gap shape of the stone wall model so that archaeologists can easily understand the pattern of stacked stones based on the model. Our implementation uses the polygon rendering hardware for accelerating the computation, which enables the refining operation in an interactive time period.

1 はじめに

発掘された文化財の情報を、正確に記録し後世へ伝えることは、私たちの義務であり責任である。石垣のように移設が困難な埋蔵物の場合には、現地ですできるだけ正確に情報を収集しなくてはならない。石垣の情報は、写真撮影や現地での計測に基づいて、石積み状態を正投影でスケッチし記録することが一般的である。図1には、そのようなスケッチの例を示した。積まれた石と石の隙間や石の輪郭を太線で描き、さらに各石の特徴的な線を補足的に描くことで、石積み状態を表現している。このようなスケッチを正確に作成するには、かなりの熟練と時間を要する。しかし年間に1万件を超す発掘があり、その多くが開発工事に伴う緊急発掘という現状では、作業時間に制限があり、従来の記録法で対応することが難しくなっている。

埋蔵文化財の、特に形状データを、非接触の3次元計測器を用いて測定し記録するデジタル・アーカイブ技術が、近年盛んに研究されている[1]。デジタルに記録された情報は劣化しないので、遺跡の資料的な価値を最大限保存し、その情報を後日時間をかけて解析することが可能になる。記録には、レーザ光をスリット状もしくはスポット状

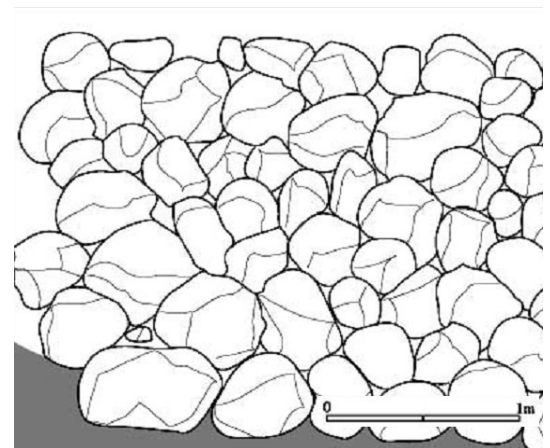


図1: 石垣の積み石の状態のスケッチ。石の輪郭と隙間の部分を太線で強調して描き、各石の特徴的な線を補足的に描き加えている(データ提供: 日立エンジニアリング(株))。

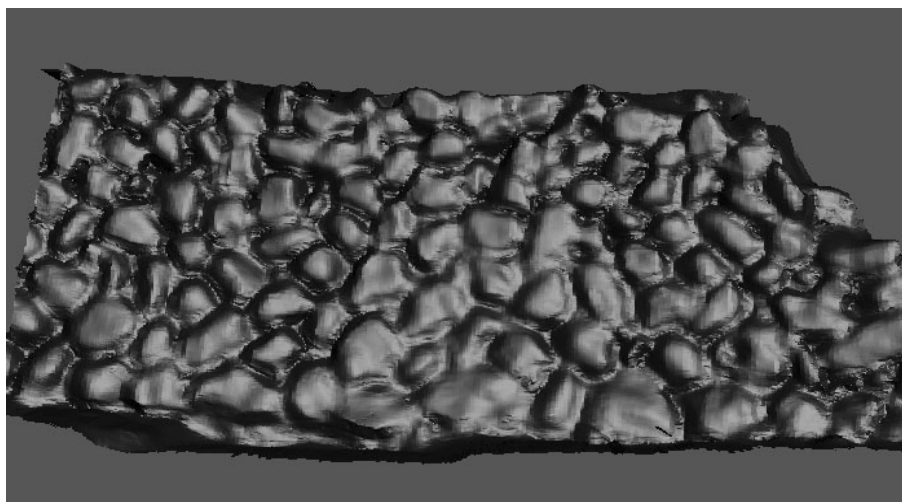


図 2: レンジファインダにより得られた点群に基づいて作成した石垣の多面体モデルを、そのまま描画した結果。ポリゴン数は 454,178 枚 (データ提供: 日立エンジニアリング (株))。

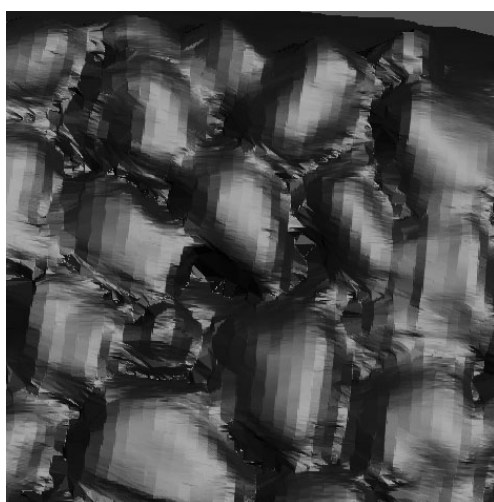


図 3: 多面体表現された石垣モデルの部分拡大。石と石の隙間の部分の形状が荒れている。

に照射し、三角測量の原理で距離を測定する、レーザ・レンジファインダを用いることが一般的である。しかし石垣の場合には、積まれた石の隙間の部分にはレーザ光が入らないため、その部分を十分な精度で記録することができない。図 2 に、レーザ・スポット式の計測装置 (パルステック工業 (株) 製 TDS-130L) を用いて石垣の表面を覆う点群を記録し、それを多面体化した結果を、また図 3 にはその一部を拡大した様子を示す。石と石の隙間部分の形状が荒れ、表示品質が低下していることが分かる。このような表示では、石積み状態を正しく判断することが難しい。

本研究では、多面体モデルに対して幾何的な変換を施すことで、石積み状態をより鮮明にする技術を開発したので報告する。この処理を適用すると、石垣を表す多面体データから、低品質な荒れた形状を除去し、石の輪郭を際立たせることができるので、処理結果に基づいて石積み状態を評価し、図 1 のようなスケッチを容易に作成できる。提案する手法では、多面体に対するオフセット処理を繰り返し適用する。石垣形状は、数十万から数百万枚の微小なポリゴンで表現されているので、通常のソフトウェアによるオフセット処理では、計算時間が膨大なものになってしまう。本研究では、スケッチを得るためには、石垣のある特定の方向から眺めた画像が得られれば十分なことに着目し、レンダリング・ハードウェアを利用した超高速なオフセット技術を用いることにした。その結果、対話処理が可能な時間で石垣モデルを変換し、石積み状態を鮮明に表示することに成功した。

2 石積み状態の鮮明化

点群に基づいて作成された石垣の多面体モデルから、隙間部の形状の荒れだけを選択的に除去し、石積み状態をより鮮明にすることを考える。荒れた形状は、他の部分と比較して形状変化が激しい部分と見なせるので、ある種のフィルター処理により、形状の高周波成分だけを除去する手法がまず考えられる (例えば [2])。しかしこの手法では、積石の角の部分も平滑化されてしまうため、石の特徴的な形状が失われてしまう。そこで本研究では、多面体のオフセット処理に基づく、新しい手法を用いることにした。

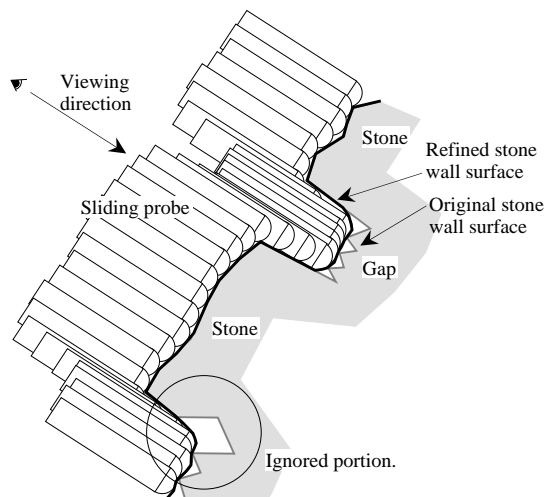


図 4: 石垣の多面体モデルの上を滑る，先端が半球形のプローブの様子。

2.1 基本的な考え方

レンジファインダを用いて石垣を計測する場合，測定結果に荒れが生じるのは，石の隙間のような凹形状である．逆に凸の形状は，石の角の部分のように，積石の形態を特徴付けている場合が多いと考えられる．そこで本研究では，石垣の多面体モデルの凸部の形状を保存し，凹部の形状の荒れだけを除去する手法として，以下に示すような幾何的な変換手法を用いることにした．先端が半球状の棒（これをプローブと呼ぶ）を用意し，これを石垣モデルの表面に押し付けながら，モデル上を縦横に滑らせる．このとき棒の中心軸の方向は，スケッチを作成する際に石垣を観察する方向と一致させる．プローブの直径を適切に与えると，図 4 に示すように，プローブの先端が石と石の隙間には入り込むが，隙間の底面に生じている荒れは跨ぐようにすることができる．

プローブの先端の掃引形状（図中の太線）は，石垣モデルの形状とほぼ一致しているが；

- プローブが跨ぎ超えたので隙間部分（凹形状）の荒れは消失している，
- 積石の形状を特徴付ける凸形状は保存されている，

ので，この形状は，もとの石垣モデルと比較して，積石のパターンをより鮮明に表現したものになる．プローブの掃引形状では，石の側面の凹みも埋もれて再現されないことになるが（図中の円で囲んだ部分），もともとこの凹みはスケッチの際の観察方向からは見えない場所にあるので，問題にはならない．

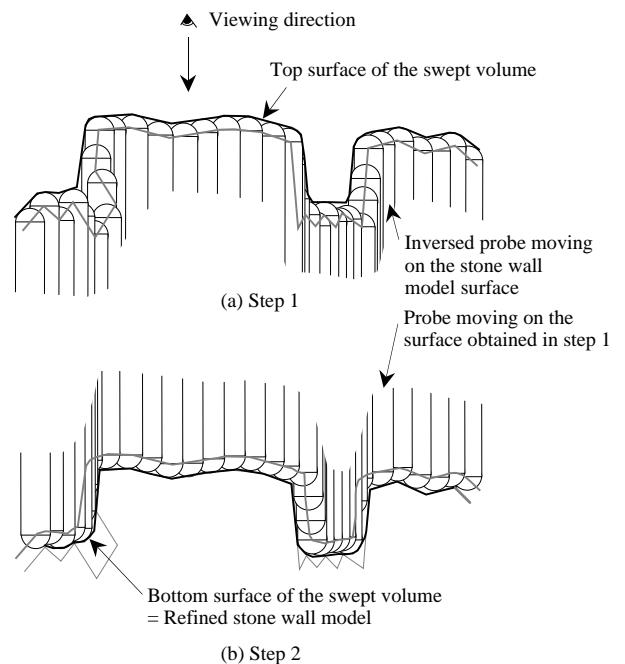


図 5: プローブの掃引形状の計算手順．プローブの逆形状ともとの石垣モデルのミンコウスキ和 (Step 1)．プローブ形状と Step 1 で得られた形状のミンコウスキ和 (Step 2)．

2.2 計算手順

上述の石垣モデルの鮮明化処理は，以下の 2 ステップで計算できる．

Step 1 プローブを，先端の半球の中心を通過する軸の周りに 180° 回転させた逆形状を考える．この逆形状を，半球の中心が常に石垣モデルの表面に存在するように保ちつつ縦横に移動させ，掃引形状を生成する（図 5(a) 参照）．この処理は，ミンコウスキ和とよばれる，二立体のベクトル和の計算に相当する．

Step 2 プローブ形状を，その中心が常に Step 1 で得られた掃引形状の最上面に存在するように保ちつつ移動させ，再度掃引形状を計算する（図 5(b) 参照）．得られた掃引形状の最下面が鮮明化した結果に対応する．

図 5(a) と (b) を比較すれば分かるように，二つの処理は幾何的に同じ手続きの繰り返しとなる．したがって，Step 1 において，石垣モデルとプローブの逆形状のミンコウスキ和の最上面を多面体形式で出力できれば，同じ処理を，得られた多面体とプローブ形状に対して上下逆向きに施すことで Step 2 が実現できる．そこで以下では，Step 1 の実現法についてのみ議論する．

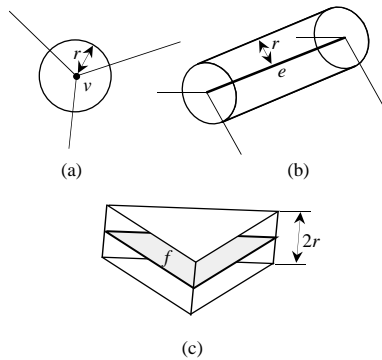


図 6: 球の掃引形状の構成要素．頂点 v を中心とする球面 (a)，辺 e を中心軸とする円筒形 (b)，面 f を中央面とする厚板形状 (c)．

3 デジタルオフセット

石垣形状を表す多面体モデルとプローブの逆形状のミンコウスキ和を，高速に計算する技術を示す．この手法は，以下に示す二つの特徴を持つ．

逆オフセット法 ミンコウスキ和を，視線に垂直な平面上に用意された直交格子に基づいて離散的に計算する．

ハードウェアの利用 レンダリング用ハードウェアの隠面消去機能を用いて，逆オフセット法を高速処理する．

これら二つの手法を，デジタルオフセットと総称する．

3.1 逆オフセット法

ミンコウスキ和の最上面は，プローブの逆形状の上端の半球の移動により生成される．そこでプローブの逆形状の代わりに，上端と同一半径 r の球を，その中心が常に石垣モデルの表面に存在するように滑らせた時の，掃引形状の計算を考える．この計算は，石垣モデルを r だけオフセットする処理と同じなので，以後は「ミンコウスキ和」の代わりに「オフセット」という用語を用いる．石垣モデルが多面体形状のとき，球の掃引形状は，多面体の全ての頂点 v ，辺 e ，多角形 f を，以下の手順で球面，円筒形，厚板形状に置き換えた時の集合和となる（図 6 参照）．

頂点 頂点 v を中心とする，半径 r の球面に置き換える．

辺 辺 e を中心軸とする，半径 r の円筒形に置き換える．

多角形 多角形 f を中心面とする，厚さ $2r$ の厚板形状に置き換える．

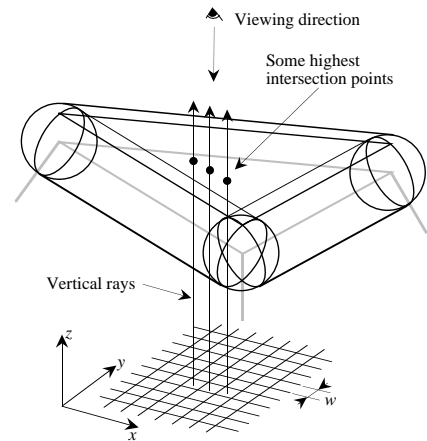


図 7: xy -平面上の格子から伸びた垂直な直線と要素形状の交点のうち，最も上方の点を選択した結果．

石垣形状を精密に測定し多面体化した場合，そのポリゴン数はしばしば数十万枚を超える．上述した手法による掃引形状の計算では，膨大な回数の集合演算を繰り返すことになり，実用的ではない．逆オフセット法は，最終的に必要になるのが，ミンコウスキ和の最も上側の面（＝オフセット面）だけであることに着目し，以下の手順で離散的に処理することで，効率的かつ安定な計算を実現する [3]．

まず処理の基準となる直交座標系を，図 7 に示すように，その z 軸が石垣の観察方向の逆方向を指すように与える．そして座標系の xy -平面上に， x 軸と y 軸に平行かつ等間隔な直交格子を，球の掃引形状の xy -平面への投影を覆うように生成する．格子間隔 w を小さくするほど精密な計算が可能になるが，必要な記憶容量が膨大なものになる．本研究では，精度と利用可能な記憶容量の両方を勘案して，格子の総数が 1000×1000 個程度になるように，格子間隔を調整した．

各格子について，その中心を通過する z 軸に平行な直線を考え，この直線と球の掃引形状を構成するすべての球面，円筒形，厚板形状の交差を調べる．そして最も上側の交点，すなわち z 座標値が最大の交点を選択する（図 7 参照）．この処理をすべての格子について繰り返すと，オフセット面を覆う稠密な点群を得ることができる．これらの点は格子状に配置されているので，隣接する点を適切に選択しポリゴンへ置き換えることで，逆プローブの掃引形状を表す多面体を計算できる．

3.2 ハードウェアの利用

3次元コンピュータグラフィックスでは，他の面に隠されて観察者から見えない「隠面」を消去した画像を生成す

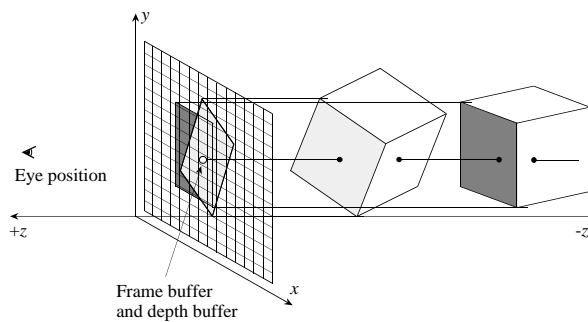


図 8: デプスバッファを用いた隠面消去。

るために、デプスバッファを用いる。図 8 のように配置された 2 個の立方体を図の左側から観察した画像を、平行投影により画面へ描く場合を例に、この技術を説明する。処理の基準となる座標系を画面の左下隅に、その x 軸と y 軸が画面を構成するピクセルの格子と平行になるように、また z 軸の方向が観察者の視線方向と逆向きになるように与える。また各ピクセルと 1 対 1 に対応する要素からなる、デプスバッファと呼ばれる配列を用意し、その全要素に初期値として十分に小さな数値を与えておく。

以上の準備の後、立方体を構成する多角形を順に画面へ描画していく。その際に、各ピクセルへ投影される多角形上の点の z 座標値を計算し、対応するデプスバッファ要素の値（これをデプス値とよぶ）と比較する。もしも z 座標値がデプス値よりも大きいときには、ピクセルを多角形の色で染め、その z 座標値を新しいデプス値として記録する。この処理をすべての多角形について繰り返すと、デプスバッファの各要素には、視点に最も近い多角形上の点の z 座標値が格納される。また各ピクセルには、その点の色が染められることになり、結果として隠面を消去した画像が画面に描かれる。

画面のピクセル群を xy -平面上の直交格子と対応付けると、

- すべての格子について、その中心を通過する z 軸に平行な直線と、球の掃引形状の最上面の交点を計算すること。
- 掃引形状を構成するすべての球面、円筒形、厚板形状を平行投影した画像を、デプスバッファを用いて描くこと。

は、等価な処理になる。全球面、円筒形、厚板形状を描き終えたとき、デプスバッファの各要素には、対応する直線と掃引形状の最上側の交点の z 座標値がデプス値として格納されているので、その値から、石垣モデルを半径 r だけオフセットした形状を表す点群を、容易に得ることができる [4][5]。

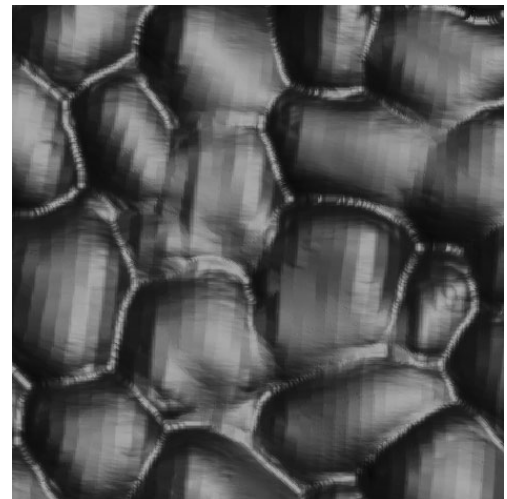


図 10: 鮮明化した石垣モデルの部分拡大。

多くのレンダリング・ハードウェアは、デプスバッファを用いた多面体の隠面消去処理を、直接実行する機能を備えている。したがって掃引形状を構成する球面と円筒形を適切に多面体近似し、近似球面、近似円筒形、厚板形状群を平行投影した画像を、レンダリング・ハードウェアを用いて描画することで、オフセット面を高速に計算できる。レンダリング用 LSI は、今後の高速化が最も期待されている半導体デバイスなので、その機能を利用することで処理を将来さらに高速化できる。

4 計算実験

本手法の有効性を検証するために、石垣の多面体モデルを与えると、その石積パターンを鮮明化した画像を出力するプログラムを試作し、計算実験をおこなった。利用した計算機は、Intel Xeon (2.0GHz) を CPU とする、主記憶 2GB のワークステーションである。このワークステーションには、NVIDIA 社の Quadro4 700XGL とよばれるレンダリング用 LSI が搭載されている。実験における逆オフセット法の計算では、格子の総数が 1000×1000 になるように調整した直交格子を用いた。本研究では、グラフィックスライブラリとして OpenGL を利用した。OpenGL には、デプスバッファの値を参照する関数が用意されており、デプス値を自由にに取り込み処理に利用できる。

レンダリング用ハードウェアの機能を用いて、Step 1 の処理を行う関数を作成し、この関数の出力する逆プロブの掃引形状の最上面のデータを、上下逆にして再度同じ関数に入力することで Step 2 の処理を行った。図 2 に示した、454,178 枚のポリゴンからなる石垣モデルを入力

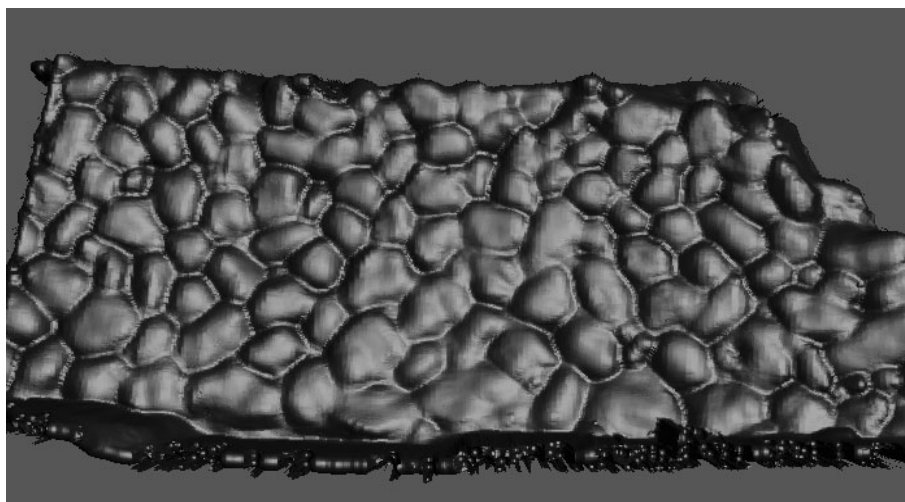


図 9: 図 2 に示した石垣の多面体モデルの石積のパターンを鮮明化した結果 .

し, その荒れた形状を提案した手法を用いて除去し, 石積みパターンを鮮明化した結果を図 9 に示す. またその部分拡大図を図 10 に示す. 一見して明らかなように, 図 2 とは比較にならないほど, 積石の状態がはっきりと表示されていることが分かる. この処理に要した時間は, Step 1 と Step 2 の計算時間を合計して 7.68 秒であった .

5 まとめ

遺跡発掘では, 石垣に積まれた石の状態をスケッチし, 記録する作業がよく行われる. 埋蔵文化財の形状を 3 次元的に記録するデジタル・アーカイブ技術を用いて, 石垣の記録作業を効率化する研究が進んでいる. しかしレーザ・レンジファインダによる手法では, 石と石の隙間部分を精度よく測定できないため, 得られた石垣の多面体モデルに荒れた形状が生じてしまう. 隙間部分の形状の「荒れ」を除去し, 石積みの状態をより鮮明に表示するために, 多面体のオフセット技術に基づく新しい手法を開発した .

この手法は, 石垣の多面体モデルを構成する各ポリゴンに対して, オフセット処理を上方向と下方向に 2 回施すことで, 石垣の隙間部の荒れを選択的に除去する. 石垣モデルは, 数十万におよぶ微細なポリゴンからなるため, 従来のソフトウェアによる処理では, 計算時間と安定性に問題があった. レンダリング用ハードウェアを用いたデジタルなオフセット技術を用いることで, この処理をごく短時間に, しかも安定におこなうことに成功した. プログラムを試作し計算実験をおこなうことで, 提案したアルゴリズムの有効性を検証した .

提案した手法では, プローブの半径を, 石と石の隙間に

は入るが隙間の底面の荒れは跨ぐように決める必要がある. 現在の実装では, この値を処理結果を見ながら試行錯誤的に与えている. 将来的には, この値を自動決定し, さらに鮮明化された石垣の多面体モデルから, 石積み状態のスケッチを自動生成する方向へ研究を進めたい. 本研究を進めるにあたって, 日立エンジニアリング(株)より, 石垣の形状データをご提供いただいた. この場を借りて深く感謝する .

参考文献

- [1] 塚本敏夫: 考古遺物用 3D デジタルアーカイブシステムの開発とデータ活用法の研究, 情報処理, 43, 10 (2002) 1070.
- [2] 神鳥泰章, 鈴木宏正, 金井 崇, 木村文彦: 測定点群からの三角形メッシュ生成 (第 2 報) —初期メッシュの改良法—, 精密工学会誌, 64, 10 (1998) 1471.
- [3] 近藤 司, 岸浪建史, 斎藤勝政: 逆オフセット法をもとにした形状加工, 精密工学会誌, 54, 5 (1988) 971.
- [4] K. E. Hoff III, T. Culver, J. Keyser, M. C. Lin and D. Manocha: Fast Computation of Generalized Voronoi Diagrams Using Graphics Hardware, Computer Graphics Proc., SIGGRAPH 99 (1999) 277.
- [5] 乾 正知, 垣尾良輔: NC 加工命令の高速な生成手法 —逆オフセット法のハードウェアによる高速化—, 精密工学会誌, 66, 12 (2000) 1901 .