

三次元コンピュータグラフィックスによる遺構表示システム

島田和明 碓崎賢一

九州工業大学 情報工学研究科

遺跡は多くの場合，発掘調査が終了すると破壊され二度と観察することができなくなってしまう．このため，遺跡保存の問題が全国各地で起こっている．また近年，考古学分野での情報化は著しく，発掘調査報告書や遺跡の測量データの電子化が進んでいる．そこで，我々はこの測量デジタルデータを利用し，パーソナルコンピュータ上で遺構の3次元表示を行うシステムの研究・開発を行っている．本システムを利用することにより，破壊されてしまった遺跡であっても任意の視点から再び観察できるようになるため，遺跡保存問題に対する一つの解決策となり得る．本論文では，既存の測量デジタルデータから遺構の3次元表示に使用するデータを自動的に生成する過程と，生成したデータを使用した遺構の3次元表示方法について述べる．

A Real-time Three-dimensional Remains Display System

Kazuaki SHIMADA Ken'ichi KAKIZAKI

Graduate School of Computer Science and Systems Engineering,
Kyushu Institute of Technology

We have been researching and developing a system that displays remains using real-time three-dimensional computer graphics. In our system, remains are displayed in the form of a real-time three-dimensional graphics, so users from amateurs to archeologists can easily observe the terrain of the remains from any points of view, even if the remains are already destroyed. In order to display the terrain of remains, our system automatically generates their DEM data from existing digital survey maps that are recorded in the form of the three-dimensional DXF. In this paper, we describe the method of generating DEM data and of displaying the remains with the DEM data.

1. はじめに

遺跡は多くの場合、道路や公共施設・住宅の建設途中で発見される。このため、遺構や遺物の発掘調査が終了した遺跡のほとんどは、本来の土地利用のために破壊され、再び観察できなくなってしまう。このような遺跡の破壊による遺跡保存問題は考古学分野のみならず社会的に大きな問題となっている。

一方、近年さまざまな分野において情報が進められており、考古学の分野においても例外ではなく、発掘調査報告書の電子化¹⁾や、測量調査によって得られた 3 次元測量座標値をデジタルデータとして記録・保管することが多くなっている。コンピュータを利用した考古学研究支援として、データベースとネットワークを利用した属性情報の管理・検索・分析に関する研究²⁾³⁾⁴⁾が広く行われている。これらの研究は、文書のみを取り扱う分析に対して大きな効果をもたらす、地形の特徴と密接に関係するような空間情報を視覚的に分析することが困難である。また、コンピュータを利用した新しい考古学研究として古代・中世の景観をコンピュータ内に再現するシステムの研究⁵⁾⁶⁾が行われている。これらのシステムでは、過去において、実際に存在していたと思われる景観をコンピュータ内に再現することが可能となっている。しかしながら、これらのシステムは、オーサリングに多くの時間を要するため、その技能や時間に制約がある考古学研究への導入は困難である。また、利用者の視点が固定されており、利用者が再現された景観を自由に動き回りながら観察することができないという問題がある。そのため、分析の対象となる空間内を自由に移動可能で、その空間内に関わる属性情報を視覚的に分析可能であり、さらに、オーサリングに多くの労力を要しない三次元的な表示システムが重要となってくる。

本報告では、DXF ファイルで記録された遺構図を利用し、遺構の 3 次元表示に使用する DEM データを自動的に生成する手法と、その DEM データと遺構写真を利用した遺構の 3 次元表示手法について述べる。

2. 考古学研究支援地理情報システム

地理情報システム (Geographic Information System : GIS) は、地理的・空間的要素を持つ情報の管理・分析を支援する情報システムである。遺跡発

掘を始めとして、遺構の時代・種類といったさまざまな属性情報が地理に強く結び付けられる考古学分野において、GIS を利用することにより、情報の整理・分析を効率よく行うことができる。

現在、我々は考古学研究を支援する 3 次元 GIS の研究・開発を行っている。この考古学支援 3 次元 GIS により、これまで考古学研究に必要であった遺跡や遺構に関する膨大な量の属性情報を総括的に管理・分析を行えるようになるため、考古学研究作業の煩雑さを軽減できる。また、各遺構の属性情報に応じ、ある時期に存在していた遺構、或いは、ある種類の遺構のみについて選択的に表示を行うことで、遺構の時間的な流れ、空間的な広がりを直感的に理解できるようになる。

本研究では、このような考古学支援 3 次元 GIS の要素技術として、遺構をパーソナルコンピュータ内に再現し、再現された空間を自由に移動できるシステムの開発を行った。本システムでは、遺跡の 3 次元測量値が記録されている既存のデジタルデータとして、太宰府市教育委員会が整備・管理を行っている DXF (Drawing Interchange Format) ファイルを用いて、遺構の 3 次元地形表示を行った。

本システムは、遺跡データを記録している DXF ファイルがあれば、考古学研究室においてすぐに遺跡形状を観察することができる。また、本システムを利用することで、すでに破壊されてしまい二度と観察することのできなくなってしまう遺跡であっても再び観察することができるようになり、各地で大きな問題となっている遺跡保存問題の一つの解決策になるのではないかと考える。さらに、本システムはこれまで紙に描かれた遺構図とは異なり、自由な位置・角度から遺構を観察することができるため、考古学研究者だけでなく、一般の人にも遺構の深さや形状を直感的に理解でき、考古学に関する強い知的好奇心を促すことが可能である。この特徴を利用し、本システムは展示会や歴史資料館での遺跡景観シミュレータとして活用できる。

3. 使用するデジタルデータについて

本章では、本システムで使用する DXF ファイルについて紹介し、太宰府市教育委員会から提供を受けた DXF ファイル形式の遺構図を利用して 3 次元表示に利用する DEM データを生成する際の問題点につい

て述べる。

3.1. DXF ファイルについて

DXF ファイルは、Autodesk 社が自社の CAD(Computer Aided Design)である AutoCAD 用に開発したデータフォーマットであり、多くの CAD や GIS ソフトウェアでサポートされており、遺構図などの考古学データも DXF で記録されることが多い。

DXF ファイルは、HEADER セクション・CLASSES セクション・TABLES セクション・BLOCKS セクション・ENTITIES セクション・OBJECTS セクションの 6 つのセクションから構成されている。このうち、遺構の 3 次元表示に利用する遺跡の形状情報は ENTITIES セクションに格納されている。

3.2. 使用するデータの問題点

太宰府市教育委員会が維持・管理している遺跡図の DXF ファイルには、3 次元値で座標が格納されている。しかしながら、これまで太宰府市教育委員会には 3 次元で遺構を表示する技術がなかったため、発掘調査報告書などに掲載されるような 2 次元の遺構実測図(図 1)を作成するためのみに使用されていた。

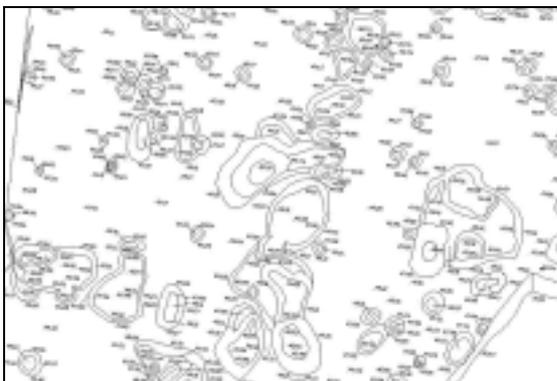


図 1 DXF ファイルの遺跡形状データの表示例

このため、遺構図の描画には有用であるが、遺構の 3 次元表示に必要としない標高を示す数値や縮尺目盛などが形状データとして数多く含まれていた。また 2 次元での表示には必要とされない高さの値には誤りがみられたため、このファイルに対し抽出・修正の処理を行い、3 次元表示を行うことのできるデータを生成する必要がある。

4. 表示に用いる DEM データの自動生成

3 章で述べたような遺構図の DXF ファイルを用いて遺構の 3 次元表示を実現するために以下の 3 つの処理を行い、DXF ファイルから DEM データを自動的に

生成する。

- DXF ファイルから遺構の 3 次元表示に必要な地形データの抽出
- 高さの値に誤りのあるデータの修正
- 抽出・修正した不規則頂点データから DEM データの生成

本章では、まず始めに 3 次元コンピュータグラフィックス、特に遺跡のような地表面を表示するためによく用いられるデータモデルについて説明を行い、次に、以上の 3 つの処理について述べる。

4.1. 3 次元地形表示で用いるデータモデル

コンピュータグラフィックスによる 3 次元地形表示でよく用いられるデータモデルである、不規則三角形網(Triangulated Irregular Network : TIN)モデルと数値標高モデル(Digital Elevation Model : DEM)について説明を行う。通常、これらのデータモデルで格納されている頂点を結んでポリゴンを生成し、3 次元地形表示を行う。

4.1.1. TIN モデル

TIN モデルは、不規則頂点群(図 2)の隣接する 3 点から面(図 3)を構成し、面として地形を表現しようというモデルである。

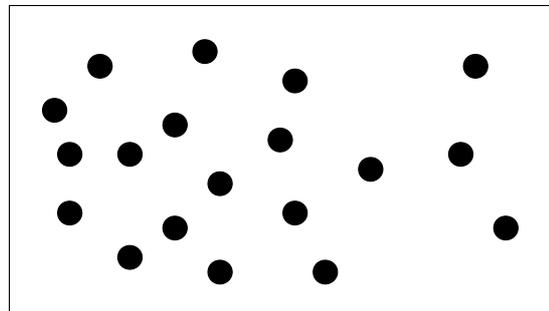


図 2 不規則頂点群

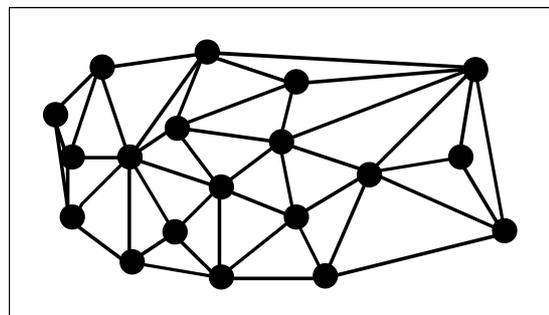


図 3 TIN による三角形ポリゴン

通常、測量によって得られる点是不規則に分布する頂点であり、TIN モデルは、この不規則頂点をその

まま利用して地表面を表現できる。このため、元の地表面の形状をほぼ正確に再現できるという利点をもっている。しかし、TIN モデルには不規則頂点から三角形の平面を作成する場合、大きな問題がある。それは TIN モデル作成のアルゴリズムである。このアルゴリズムの中で最も代表的なものに Delanuy 三角形分割法(Delanuy Triangulation) ⁷⁾がある。このアルゴリズムにより TIN モデルを作成する場合、非常に多くの時間を必要としてしまうという問題がある。

4.1.2. DEM (Digital Elevation Model)

DEM は、同一サイズの正方形(長方形・六角形・三角形の場合もある)メッシュを用いて、メッシュの交点、あるいはメッシュの中心点に高さの値を与えたもの(図 4)である。このメッシュ上に並ぶ頂点を結んでポリゴン(図 5)を作成する。

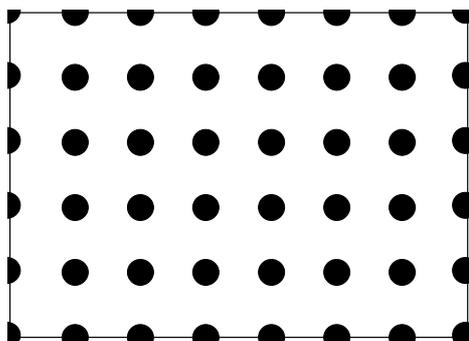


図 4 DEM データ

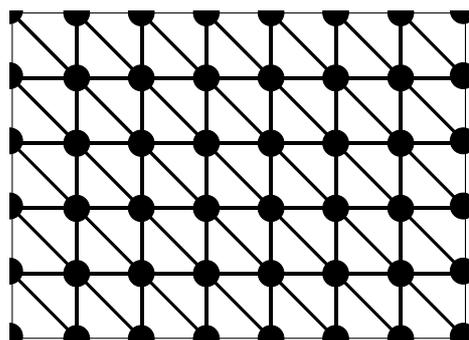


図 5 DEM による三角形ポリゴン

DEM は構造が単純であるため、PC の限られた描画性能で、描画するポリゴンを削減し描画の高速化を図るための処理が非常に簡単に行えるという大きな利点を持っている。しかしながら、 xy 座標に関して値が規則的に格納されているため地形の傾斜が急変するような場合、正確に地形を再現できないこと

がある。この問題は、地形の傾斜が急変するような場所を正確に再現できるだけの細かいメッシュサイズの DEM データを作成することで解決できる。

4.1.3. 本システムで用いるデータモデル

本システムで使用する DXF ファイルから抽出を行ったデータは、不規則頂点群データである。この不規則に分布する頂点をそのまま利用してポリゴンを作成する、TIN モデルにより 3 次元表示を行った場合、実時間表示が困難となり、利用者が 3 次元空間内に再現した遺跡内を自由に移動し見て回ることができない。したがって、本システムでは、構造が単純であり、ポリゴン削減し描画の高速化を図るのための処理が簡単に行える DEM データを使用する。

4.2. DXF ファイルからのデータ抽出

太宰府市教育委員会が維持・管理を行っているデータの中には、遺構の輪郭線、遺跡内の測量点、測量点の標高を示す数字、測量点と数字を結ぶ線、縮尺の目盛、外枠などのような、遺構実測図を構成する図形要素がレイヤ別(表 1)に格納されていた。この全てのレイヤを表示すると図 6 のようになる。

このうち、遺構の 3 次元表示に必要な、遺構上部の輪郭線(1102)・遺構下部の輪郭線(1103)・遺跡外周輪郭線(1200)・遺跡内周輪郭線(1201)・遺跡内の測量点(3901)のレイヤに属している地形の頂点データの抽出を行った。その結果得られた頂点によって表示を行ったものを図 7 に示す。

表 1 DXF ファイル内のレイヤ番号と遺構の図形要素

レイヤ番号	遺構の図形要素
0000	外枠(カギ括弧)
0001	目盛・縮尺
0002	外枠
0003	文字(太宰府市教育委員会)
1101	遺構の切り合いを示す線
1102	遺構上部の輪郭線
1103	遺構下部の輪郭線
1200	遺跡外周輪郭線
1201	遺跡内周輪郭線
3900	遺跡内の測量点の標高値を示す数字
3901	遺跡内の測量点

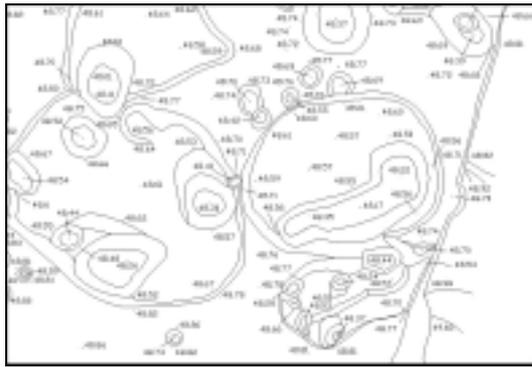


図 6 抽出前の遺跡図形データ



図 7 抽出後の遺跡図形データ

4.3. 高さ値の修正

3.2. においても述べたように、この DXF ファイルに格納されている頂点データの中には高さの値に誤りがあるものが見られた。この誤りのあるデータをそのまま利用し、遺構の 3 次元表示を行うと図 8 のようになる。

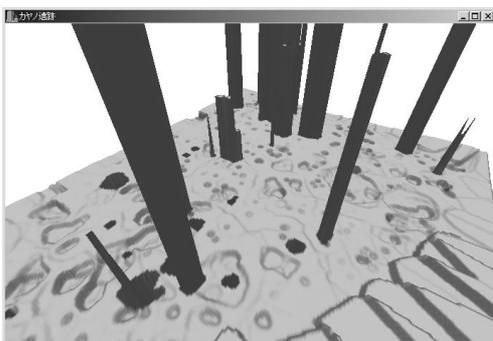


図 8 誤りのあるデータを利用した遺構の 3 次元表示

遺跡の形状が格納されている DXF ファイルを CAD ソフトウェアで見ると、遺構の輪郭線が滑らかな曲線である必要がある。図 8 のような頂点の高さ値の誤りは、測量によって得られた少数のデータを利用

してこの滑らかな曲線を作成するために、頂点の補間を行う際に発生したものである。

一方、この補間作業を行わない遺跡内の測量点には誤りが発生しない。また、測量点はそれぞれ遺構に対し、遺構の底面の高さ値、遺構周辺の高さ値を記録しているため、遺構輪郭線の高さ値は底面の高さ値と周辺の高さ値の間に位置する。そこで、誤りの生じていない遺跡内の測量点座標の最大値と最小値の間を遺構の高さデータのあるべき範囲とし、この範囲の外にあるデータを全て誤りのあるデータとして、高さ値の修正を行った。高さデータの修正は、誤りがあると判断した高さデータに対し、その周辺にある頂点の高さの値で補間し、遺構の形状の修正(図 9)を行った。この処理により、明らかに高さの値に誤りのあるデータを自動的に修正することができる。

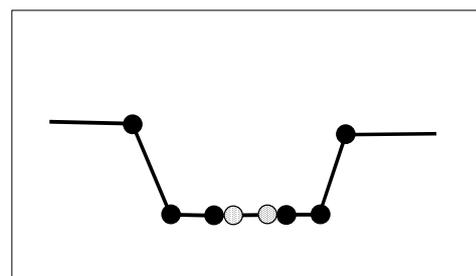
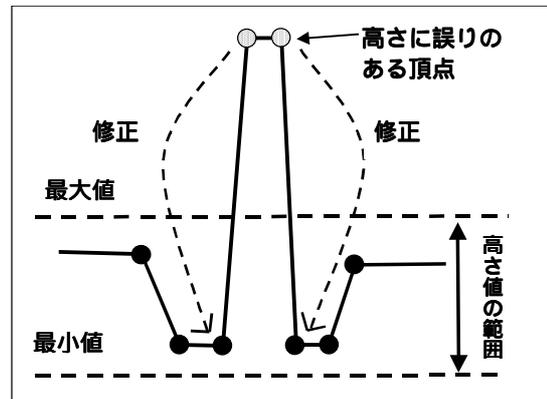


図 9 誤りのある高さの値の修正

4.4. DEM データへの変換

DXF ファイルから抽出したデータは図 10 のような不規則頂点群データとなる。

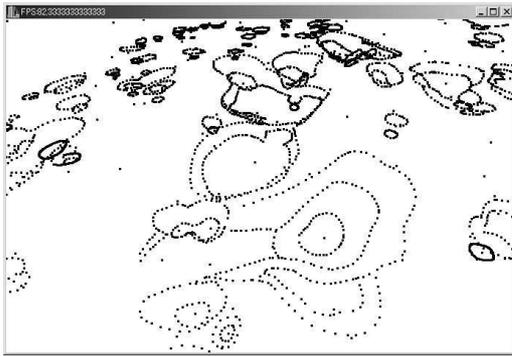


図 10 抽出を行った不規則頂点群

この不規則頂点群データから DEM データへの変換は以下のような手順で行った。

- (1) メッシュサイズを決定し、メッシュの格子点に隣接する 4 つのメッシュの中から、格子点に近い上位 3 点を求める(図 11)。
- (2) メッシュの格子点に近い上位 3 点が一直線上に並んだとき、3 点中で最も遠い頂点を破棄し、次に近い頂点を候補として採用する(図 12)。
- (3) 3 点を通る平面とメッシュの格子点との交点の値から高さの値を算出する(図 13)。

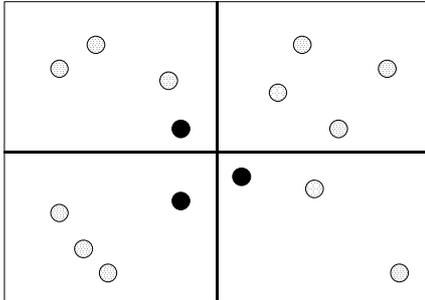


図 11 メッシュの格子点に近い上位 3 点

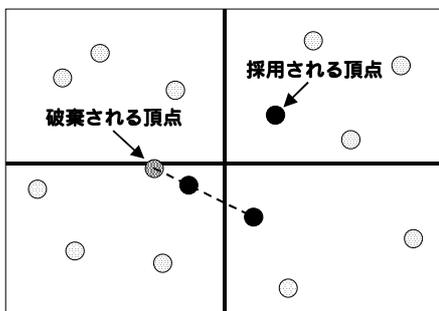


図 12 上位 3 点が一直線上に並んだときの処理

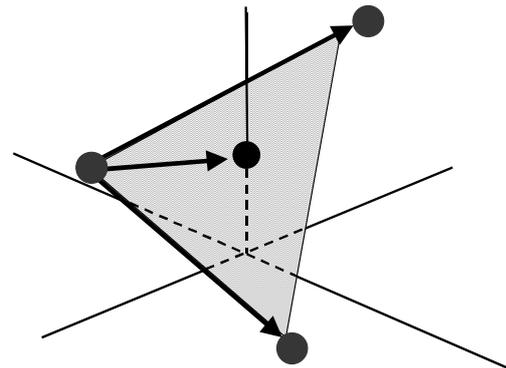


図 13 高さの値の算出

- (1) ~ (3)の処理で格子点の高さの値を算出できなかった場合、次の処理を行う。
- (4) 高さの値を求めたいメッシュの格子点に近い上位 4 点を求め、四角形を作る(図 14)。
- (5) (4)で求めた四角形の対角線の短いものを用いて三角形を作成し(図 15)、メッシュの格子点を内側に含む三角形を選ぶ。

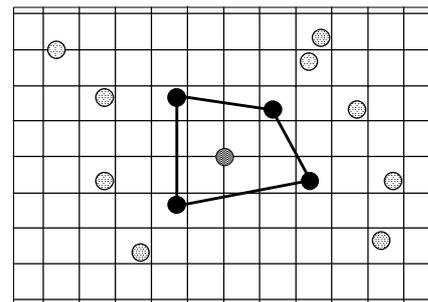


図 14 メッシュの格子点に近い上位 4 点

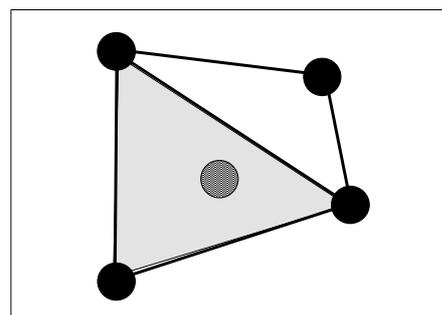


図 15 三角形の作成と選出

- (6) (3)の方法で高さの値を算出する。
- (7) 四角形内にメッシュの格子点が存在しなかった場合、4 点の平均の高さをメッシュの格子点の高さとする。

5. 遺構の3次元表示

本章では、不規則頂点群データから作成した DEM データを利用して、遺構の3次元表示を行う方法について述べる。

5.1. 遺跡形状の再現

遺構の3次元表示は、4.4.の方法で作成した DEM データを利用して、多くの三角形ポリゴン(図 16)を組み合わせて行う。

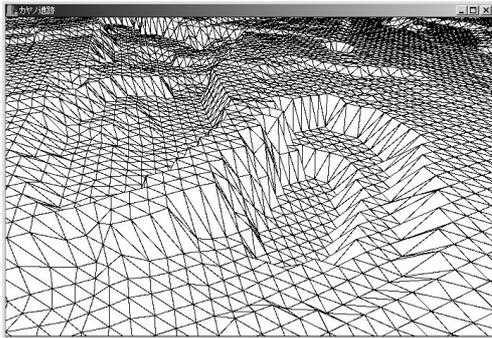


図 16 三角形ポリゴンを組み合わせて表示した遺構

ポリゴンを黄褐色で塗り、陰影付けを行い表示することで遺構の形状や配置を理解しやすい形で観察できるようにした。この方法で表示を行った遺跡を図 17に示す。

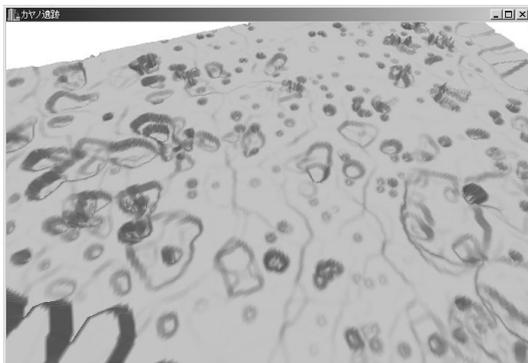


図 17 遺跡の3次元表示

5.2. テクスチャマッピングによる景観再現

5.1.の方法で表示した遺跡は図 17のように、遺跡内のすべてが同系色で塗りつぶされてしまい、遺跡の質感を捕らえにくい。そこで、遺跡の質感を表現し、より現実の遺跡景観に近づけるために、表示を行う遺跡に航空写真(図 18)を貼り付けた。

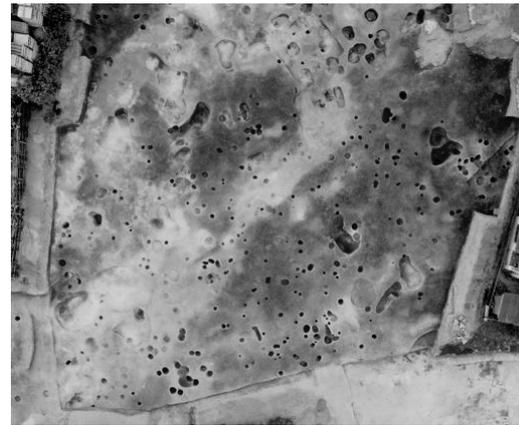


図 18 遺跡の航空写真

このようにオブジェクトの表面に写真(テクスチャ)を貼り付けることをテクスチャマッピングという。このテクスチャマッピングは、描画に必要とする新たな負荷が少ないため、描画性能を低下させずオブジェクトの質感を表現することができる。テクスチャマッピングにより表示を行った遺跡を図 19に示す。

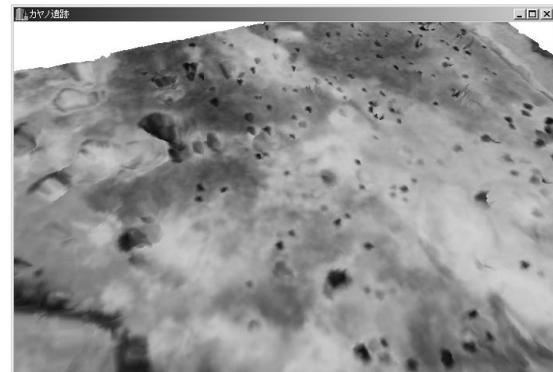


図 19 テクスチャマッピングを用いた遺跡表示

この処理は、航空写真とその航空写真を貼り付ける位置の情報があれば自動的に行うことができる。

6. 試作システムとその評価

本システムを利用して太宰府市にあるカヤノ遺跡の3次元表示を行った。表示を行う遺跡の広さは40m×30mで、DEM データを作成する際に設定した一つのメッシュの大きさは10cmである。

本システムにより作成した遺跡内を自由に移動し、遺構を観察できる実時間表示が達成されていることを確認するために、フレームレートの測定を行った。測定には表 2のような PC を使用した。

表 2 評価に使用した PC

CPU	Pentium 700MHz
メインメモリ	256MB
グラフィックスカード	nVIDIA GeForce2 GTS
OS	Windows2000

その結果、平均のフレームレートが 20.3fps であり、我々が実時間表示に必要であると考えている平均 10fps 以上のフレームレートが得られた。この結果、測定に用いたようなミドルレンジ PC であれば、遺跡内を自由に移動し、遺構を観察できるだけの描画性能が得られていることがわかった。

7. 今後の課題

本システムは考古学研究支援 GIS の要素となるシステムであり、考古学研究支援 GIS として以下のような課題がある。

7.1. 属性情報を付加した考古学研究支援機能

冒頭で述べたように、考古学研究を支援する機能として、遺構の種類や時代などといった属性情報毎に表示を行うことを考えている。しかしながら、今回使用したデジタルデータには、各遺構に関する属性情報が付加されていなかったため、このような属性情報の表示はできなかった。今後、遺跡の測量データをデジタル化する際、遺構に対しこのような属性情報を付加することが望まれる。

7.2. 高速表示手法の適用

今回試作したシステムでは、遺跡の広さが 40m × 30m で、一つのメッシュサイズは 10cm という DEM データを使用して遺構の 3 次元表示を行った。この領域・メッシュサイズでは実時間に十分な描画性能が得られたが、さらに広い領域の遺跡を表示する場合や、さらに細かいメッシュサイズで遺跡を表示する場合、実時間表示に十分な描画性能を得ることが困難となる。そこで、カリニングと LOD などの高速描画のための手法を適用する必要がある。

8. まとめ

本論文では、考古学研究支援 3 次元地理情報システムの要素技術として 3 次元遺構表示システムについて述べた。その実現方法として、DXF ファイルで記録された遺構図を利用し、遺構の 3 次元表示に使用する DEM データを自動的に生成する手法と、その DEM

データと遺構写真を利用した遺構の 3 次元表示手法について述べた。

現在、太宰府市教育委員会では、博物館・歴史資料館での遺跡景観シミュレータとして本システムの導入が検討されている。

謝辞 データの提供、考古学研究に関するご助言を頂いた太宰府市教育委員会文化ふれあい館の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水山明弘：“報告書の電子化-考古学及び理文関連書の電子化と公開について-”，『考古学ジャーナル』(6月号)，pp.37-45，1997。
- 2) 伊東幸宏，小西達裕，三浦崇，赤塚大輔，田村貞雄，赤石美奈，中谷広正，阿部圭一：“テキスト史料の抜粋・分類機能と分類結果の俯瞰機能による歴史学研究支援”，『情報処理学会論文誌』，vol.40，No.3，pp.821-829，1999。
- 3) 岡安光彦，石川佳治，植村俊亮：“データベースを基盤とする考古学ネットワークシステム”，『情報処理学会データベースシステム研究会報告』，109-53，pp.317-322，1996。
- 4) 小林勉，加藤常員，小沢一雅：“WWW による考古学データベースの発信”，『情報処理学会人文科学とコンピュータ研究会報告』33-7，pp.37-42，1997。
- 5) 岡本稔，小沢一雅：“考古学景観シミュレーションのためのモデリング支援システムの試み”，『情報処理学会論文誌』，vol.40 No.3 pp949-957，1999。
- 6) 奥住洋介，吉川眞：“元禄空間の復元”，『地理情報システム学会講演論文集』，Vol.9，pp.113-118，2000。
- 7) Mark de Berg，Marc van Kreveld，Otfreid Shwarzkopf：“コンピュータジオメトリ 計算幾何学：アルゴリズムと応用”，近代科学社 2000。
- 8) 工藤大輔，碓崎賢一：“3 次元地理情報システムのための地表面の実時間描画方法”，『地理情報システム学会』，Vol.9，pp.239-244，2000。