

【論文】

数値標高モデルの生成に用いる補間手法の性能評価

古舘守通・渡辺孝志・阿部英志・横山隆三

Performance Evaluation of Interpolation Methods Used to Generate a Digital Elevation Model

Morimichi FURUDATE, Takashi WATANABE, Hideshi ABE and Ryuzo YOKOYAMA

Abstract: In this paper we discuss performances of various interpolation methods used to generate a precise digital elevation model (DEM). Generally, the interpolation methods are classified into the following three types: type 1 generates a DEM from contour lines; type 2 does from knots of latticed meshes, and type 3 does from sparse points. Here, we examined type 1 and type 2. The methods of type 1 that we examined are Akima's interpolation, cubic spline interpolation, cubic surface interpolation, morphological interpolation and Inaba's interpolation. Also, the methods of type 2 we did are linear interpolation, Akima's interpolation, cubic spline interpolation, bicubic spline interpolation and FFT interpolation. Using artificial and real topographic data, we evaluated these methods systematically and made their performances of interpolation accuracy clear. We concluded that morphological interpolation and Akima's interpolation method are relatively effective in type 1, and that cubic spline interpolation and Akima's interpolation method are effective in type 2.

Keywords: 地形図 (topographic map), 数値標高モデル (DEM),
補間精度 (interpolation accuracy), 等高線 (contour line), 節点 (knot)

1. はじめに

地理情報システム (GIS) にとって, 3次元地形データは欠くことのできない基本データである。地形モデルの表現形式としては, ラスタデータの DEM (Digital Elevation Model), 等高線データの DLG (Digital Line Graph), 不規則な三角形を使う TIN (Triangulated Irregular Network) があるが, 応用上は DEM が最も広く利用されている。現在, 我が国で入手可能な DEM は国土地理院発行の「数値地図」であるが, その分解能は 50m メッシュに留まっており, 勾配計算を含む各種地形解析や高解像度リモートセンシングデータとの併用などには十分でない。このため, さらに高分解能な DEM の構

築と整備が強く望まれている。

筆者らは, 画像処理技術を用いて市販の 1/25,000 地形図や大縮尺の測量図などから等高線を抽出し, それから高分解能な DEM (例えば, 数 m メッシュ程度) を自動生成するシステムの開発を行っている (渡辺ほか, 1998)。しかし, 高分解能な DEM を生成できたとしても, その精度の検証は利用上の大きな問題である。例えば, 市販の GIS ソフトウェアの中にも等高線などから DEM を生成できるものがあるが, 一般にそのアルゴリズムは公表されておらず, その精度も明らかにされていない。

そこで, 本論文では DEM 生成法の精度について検討を行うものとした。DEM 生成法は元の標高値データの状況から次の 3 つに分類できる。

(タイプ 1) 等高線データから DEM を生成する。

(タイプ 2) 格子点状に配置された節点データから DEM を生成する。

古舘: 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5

岩手大学工学部情報工学科 渡辺研究室

Department of Computer Science, Iwate University

4-3-5 Ueda, Morioka-shi, 020-8551 Japan

E-mail: furu@cis.iwate-u.ac.jp

(タイプ3) ランダムに配置された点データから DEM を生成する。

タイプ1のDEM生成法は、ベクタデータ（等高線）からラスタデータ（DEM）への変換を行うものであり、我々の開発しているシステムに適合するものである。これまでに、線形補間によるもの（Gorte and Koolhoven, 1990 ; Cole et al., 1990）、3次多項式によるもの（稲葉, 1987）、モルフォロジー的処理によるもの（Barrett et al., 1994）、収縮変形によるもの（小松ほか, 1996）、などが提案されている。

タイプ2のDEM生成法は、ラスタデータ間の変換を行うものであり、既存のDEM（例えば、前述の数値地図など）を補間して、より高分解能なDEMを生成する場合に用いられるものである。このタイプの補間手法としては、既存の教科書に載っている補間手法の大部分が利用できる（例えば、市田・吉本, 1979）。

タイプ3のDEM生成法としては、接平面近似によるもの（塩野ほか, 1985）、曲面の変動を最小化する正則化手法（Briggs, 1974 ; Grimson, 1983 : 村木ほか, 1990）、などがある。

本論文では、高分解能なDEMを実用的に構築すると言う立場から、主としてタイプ1とタイプ2のDEM生成法について比較検討を行う（ランダムに配置された点データは特殊な場合として等高線データや節点データを含むので、原理的にはタイプ3の正則化手法をタイプ1またはタイプ2の生成法としても利用できるが、この場合は処理効率が悪く、処理時間が膨大に掛かって実用的でなくなるので、今回は検討対象から外した）。

我々の問題は、(1) 生成されるDEMの特徴は生成手法によってどう異なるのか、(2) どの手法が目的とするDEM生成に適するのか、である。これは直ぐに答えるのが難しい問題である。その理由の一つは、数 m メッシュ程度の高分解能を持つ実DEMが存在しないので、我々が目標とする精度で各生成手法を精度検証した報告がないからである。もう一つの理由は、過去に報告されたDEM生成法の精度検証結果が個別に異なったDEMを使用してなされており、それらを同一の土俵で比較検討することが難しいからである。

一方、我々が開発したシステムでは、地形図における等高線の形状はかなり正確に抽出可能である。そこで、地形図の等高線が正確であるとすれば、各手法をこれらの等高線の上で精度検証することで、一応は目標とする数 m メッシュ分解能での実DEMによる精度検証が可能になると考えられる。従って、その結果を検討することによって、各生成手法の性能について統一的な比較評価が初めて得られるものと期待できる（地形図の等高線がそれ程正確でない場合には、絶対的な精度評価は期待できないが、各手法の特徴や相対的な優劣は十分に明確化できると考えられる）。

そこで本論文では、タイプ1とタイプ2のDEM生成法について、人工地形データと実地形データに基づいた統一的で組織的な精度検証実験を行うこととした。DEM生成法は補間法を用いて構成されるが、実際に評価対象とした補間法は、タイプ1ではAkimaの補間法、直線3次スプライン補間、3次曲面当てはめ、モルフォロジー補間、稲葉の補間であり、タイプ2では線形補間、Akimaの補間法、直線3次スプライン補間、平面3次スプライン補間、FFT補間である。以下では、これらの補間法を使用するDEM生成法の概略を説明し、続いてそれらの性能を比較検討するために行った検証実験の結果について述べる。

2. 等高線データからDEMを生成する方法

(タイプ1)の原理

ここで扱う等高線データは、1画素幅に細線化された等高線画像であり、各等高線には標高値がそのラベルとして付値されているものである。

DEM生成に用いる補間法は多数存在するので、それらのすべてに対して評価実験を行うことは困難である。対象を絞るには、処理内容の良さ、インプリメントの容易性、処理の高速性、処理の代表性、などの尺度が考えられる。

最初に、補間に用いる関数族がある程度限定できることを示そう。現実の地形は一般にかなり複雑であるが、等高線は地形モデルの表現法として滑らかに変化する地形しかうまく表現できない。このことは、等高線地形図を対象とする限り、通常それが表

す地形（曲面）は滑らかであると仮定して良いことを意味する。Briggs (1974) は、離散的に分布する測定データ $\{(x_n, y_n, z_n)\}$ から滑らかな曲面 $z=f(x, y)$ を再構成する上で、曲面全体の曲率を最小化するように要請し、変分原理を用いて、これが測定データ点 $\{(x_n, y_n)\}$ 以外では次の（薄い弾性板スプラインにおける）重調和方程式

$$\nabla^2 (\nabla^2 f) = f_{xxxx} + 2f_{xxyy} + f_{yyyy} = 0$$

を満たすことに等価なことを示した（ただし、 $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ である）。重調和方程式は4階の偏微分方程式であるので、これは補間に用いる多項式の次数としては局所的には3次程度までを考えれば良いことを示唆している。実際、1次元の場合、直線3次スプラインは曲率最小化の性質を持っている（市田・吉本, 1979）。

以下では、この指摘と上記に挙げた尺度とを関連させながら、評価対象とした補間法の概要、ならびにその他の補間法との関係を説明する。その際、補間法を大別して、補間に利用するデータ点の分布が直線的なもの（1次元補間）と平面的なもの（2次元補間）とに区分して説明する。

2. 1. 1次元補間による方法

ここでは、1次元補間を次の処理手順で適用することを提案する。

（手順1）等高線画像上で、 θ° 方向（ $\theta=0, 45, 90, 135$ ）に直線を引き、直線と等高線との交点を節点データとして1次元補間を適用し、直線上の各画素の候補標高値を求める。これによって、 45° ごとの疑似DEMを4枚得る。

（手順2）画像中の各画素に対して、対応する疑似DEMの候補標高値4個を大小順に並べ、中間2つの平均値をその画素での標高値とする。これを全画素に対して行い、最終的なDEMを得る。

提案方式の特徴としては次が挙げられる。

- (1) 補間を直線上で行うので、既存の1次元補間手法がそのまま適用できる。
- (2) 4枚の疑似DEMは互いに独立して求められるので、計算効率が良い。
- (3) 4方向に対して中間2つの平均値を採用するの

で、極端に変動する方向の影響が避けられる。

ここでは、手順1で使用する具体的な1次元補間手法として、次の2つを選んだ。

(a) 直線3次スプライン補間（市田・吉本, 1979）

これは、直線上の点列（節点データ）で区分される小区間ごとに、3次以下の多項式を定めて補間を行うものである。ただし、多項式の係数は2階までの導関数が連続となるように決定する。

(b) Akimaの補間法（Akima, 1970）

これは、スプライン補間と同様に、直線上の各小区間ごとに3次以下の多項式を定めて補間を行うが、1階までの導関数が連続であれば良い点だけが異なっている。このため、スプラインに比べて振動しにくいとされている。

上記手法に類似な方法として稲葉（1987）の3次多項式による補間があり、前述の数値地図のDEM作成に使用されている（村上, 1995）。これは、まず、等高線画像上で標高値を求めたい画素（注目点）を中心として、 45° ごとの4直線（8方位）と等高線との交点から各方向の傾斜を計算し、最大傾斜方向の直線上で3次多項式（4交点で定まる）により、注目点の補間値を求めるものである。この方法についても比較検討する。

2. 2. 2次元補間による方法

まず、2次元補間の基本手法として、次に示す3次曲面当てはめを新たに考案した。

(a) 3次曲面当てはめによる補間

処理手順は以下の通りである。

（手順1）注目点を中心として両側に直線を延ばし、等高線との交点を2点ずつ計4点求める。これを8方位の4直線に対して行い、全部で16個の交点を求める。

（手順2）16個の交点を用いて、次の3次曲面式

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3$$

における係数 a_n ($n=0, 1, \dots, 9$) を重み付き最小2乗法で決定する。ただし、各交点での2乗誤差への重みは、注目点から各交点までのユークリッド距離の逆数をその総和で正規化した値とする。

(手順3) 得られた3次曲面式で注目点の標高値を求める(注目点を原点に選べば a_0 である)。

もう一つの2次元補間手法として次を選んだ。

(b) モルフォロジー補間 (Barrett et al., 1994)

これは次のような反復的な処理からなる。

(手順1) 図1に示すように、等高線画像中の隣接する2本の等高線を膨張(dilation)させ、衝突画素位置を中央線とし、これに標高値として両等高線の標高値の平均値を与える。これを全ての等高線について行う。

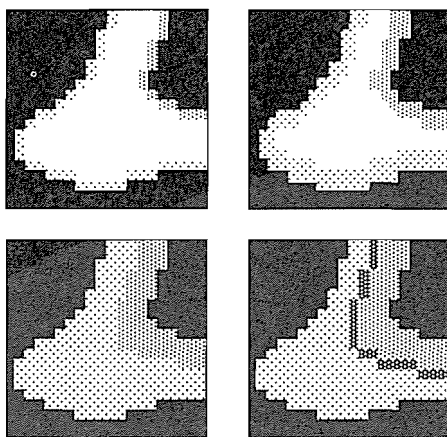


図1 モルフォロジー補間

左上: 2本の等高線(灰色)とその間の領域(白).
右上: 1段階膨張. 左下: 等高線間が全て埋まった状態. 右下: 衝突画素(濃い灰色)

(手順2) 等高線画像に手順1で得た中央線を新たな等高線として追加して、手順1の操作を繰り返す。これを、等高線の間が新しい中央線ですべて埋まるまで繰り返す。

なお、本研究では上記手順に次の2点を改良事項として新たに追加した。

(1) 最内側の等高線(山頂部など)の内部は平坦になってしまうので、これらの部分では距離変換で最内側の画素を求め、その画素位置の標高値を前述の補間法の1つ(例えば、3次曲面当てはめ)で算出し、距離変換値を参照して適当な単調増大飽和型関数で内部標高値を決定する。

(2) 膨張処理は時間が掛かるが、1回の膨張で新たに増加した画素のみをリストに登録することで、次の膨張対象はリスト中の画素だけに限定できるの

で、かなり高速に実行できる。

モルフォロジー補間は隣接等高線間で線形補間する従来手法(Gorte and Koolhoven, 1990; Cole et al., 1990)のエレガントな拡張版と考えられる。また、等高線の収縮変形を用いた方法(小松ほか, 1996)の簡易計算版としても位置付け得る。従って、ここでは、これらの手法の代表としてモルフォロジー補間をとり上げる。

3. タイプ1のDEM生成法の評価実験

3.1. 実験方法

DEM生成法の精度評価実験を行うために、基準となる検証用DEMとして人工地形データによるものと実地形データによるものを用いた。

(a) 人工地形データの場合(図2左)

まず、複数のガウス型関数を合成して人工地形のDEMを作成する(これを検証用DEMとする)。次に、この検証用DEMから等高線画像を発生させ、これからタイプ1の各手法を用いてDEMを作成する(これを生成DEMとする)。最後に、検証用DEMを基準として、全画素位置で生成DEMの標高値誤差を算出する。性能比較の指標としては、絶

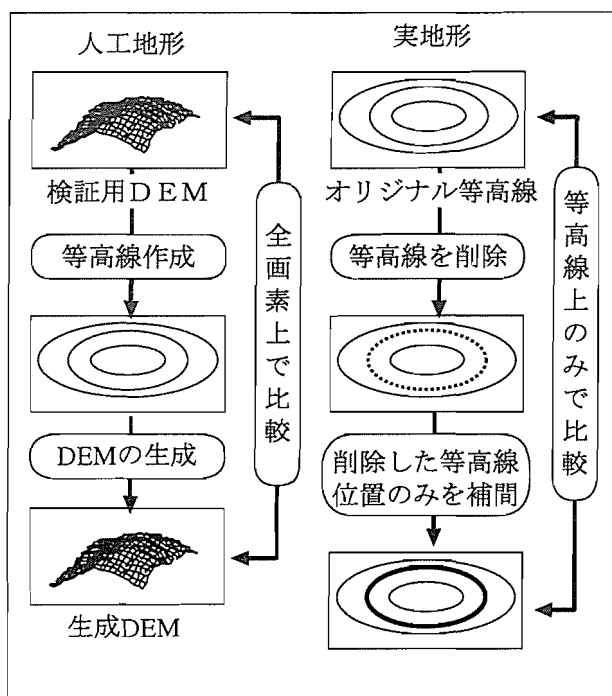


図2 タイプ1の実験方法

対値誤差の最大値（最大誤差）と絶対値誤差の平均値（平均誤差）を用いる。

この人工地形データによる精度検証の目的は、滑らかな地形に対する各補間手法の大まかな傾向を調べることにあり、本格的な評価は次に述べる実地形データによらねばならない。

(b) 実地形データの場合（図2右）

前述したように、検証用 DEM として我々が必要とする数 m メッシュ程度の分解能を持つ実 DEM は存在しないので、このままでは実地形データによる精度検証実験はできない。そこで、本研究では以下の手順を踏むことで実地形データによる精度検証を実現するものとした。

（手順1）実地形図を処理して得た等高線画像から1本の等高線を選んで、この等高線上の画素位置での新たな標高値をタイプ1の各手法で求める。ただし、選んだ等高線自体はその標高値の決定に使用しないものとする。

（手順2）手順1の処理を等高線画像のすべての等高線に対して行って、等高線の画素位置だけに新たな標高値が記入された生成 DEM を得る。

（手順3）元の等高線画像を検証用 DEM と見なして、生成 DEM と検証用 DEM とを比較する。このとき、比較は元の等高線上の画素位置のみで行う。比較の指標としては、人工地形データの場合と同様に、最大誤差と平均誤差を用いる。

この実験手順では等高線上の画素位置のみで精度検証を行うが、等高線が多数存在する等高線画像を用いれば、十分な精度検証が可能である（等高線が少ない場合は、多数の等高線画像を用いれば良い）。従って、上記手順によって、実地形データによる精度検証は十分実現できるものと考えられる。なお、等高線を精度検証に用いる考え方は稲葉（1987）にもある。そこでは、3次多項式の補間で得た DEM を（後述するタイプ2の）1次元補間でさらに補間して等高線を発生させ、元の等高線との形状の違いを比較しており、本論文の標高値で比較するという考え方とは異なっている。

3.2. 実験結果

実験に使用した等高線画像の例として、人工地形

データの場合を図3に、実地形データの場合を図4に示す。後者は、国土地理院が発行する縮尺1/25,000地形図（「大更」、「南昌山」）から特徴的な地形部分を選んで、我々が開発中のシステム（渡辺ほか、1998）で画像処理して得たものである。実地形1はなだらかな斜面、実地形2は起伏の激しい地形、実地形3は急斜面から緩斜面に変化する地形、実地形4はやや起伏のある斜面、の等高線画像である。画像サイズは512×512画素で、その分解能は1画素が地表の約1mに対応している。以下では、これらの等高線が正しいとして精度検証実験を行う（すなわち、元の1/25,000地形図における等高線の誤差は約5mとされているが、ここではその問題は考えない）。そして、これらの画像などから次のような実験結果を得た。

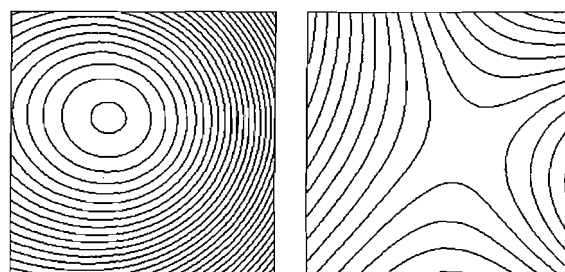


図3 人工地形の等高線画像
等高線間隔は10m, 左：地形1, 右：地形2

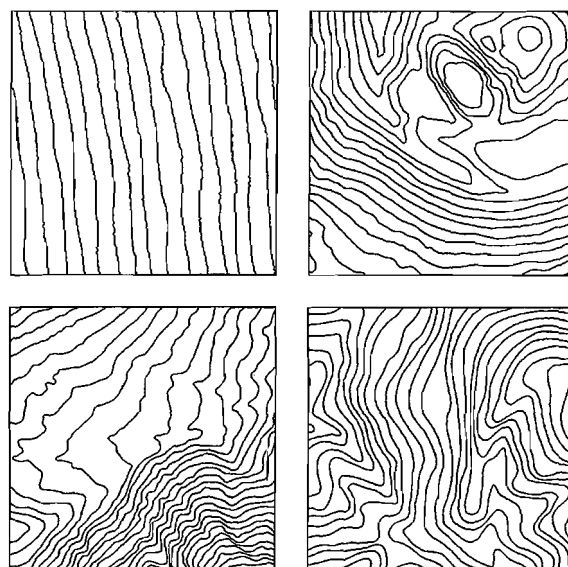


図4 実地形の等高線画像
等高線間隔は10m, 左上：地形1, 右上：地形2,
左下：地形3, 右下：地形4

人工地形データによる検証実験の結果の一部を表 1 に示す。これは前述の人工地形 1～2 に対する最大誤差と平均誤差である。各手法とも誤差は小さく、特に大きな問題点は見られなかった。強いて言えば、稲葉の補間は人工地形 2 において最大誤差が大きく、モルフォロジー補間は平均誤差が他の補間法よりもやや大きい傾向にある。後者は、モルフォロジー補間が画素の標本化誤差を受け易い処理形式となっているためである。

実地形データによる検証実験の結果の一部を表 2 に示す。これは前述の実地形 1～4 に対する最大誤差と平均誤差である（この場合の補間処理には注目等高線自体を除いているので、標高差が 20m の間を補間していることに注意されたい）。これから、すべてに渡って抜きん出た補間手法はないことが分かる。その中で、3 次曲面当てはめとモルフォロジー補間は、他の補間法に比べて、最大誤差と平均誤差が極端に大きくなることなく、全体的に安定していた。これは 2 次元補間の 1 次元補間に対する優位性のある程度表していると考えられる。Akima の補間法は、起伏の激しい地形（実地形 2）で他の補間法よりも平均誤差が大きくなる場合があったが、それ以外は 2 次元補間とほぼ同じ精度を与えた。一方、直線 3 次スプライン補間では、急斜面から緩

斜面に変化する地形（実地形 3）で大きく振動することがあり、最大誤差がかなり大きくなった。稲葉の補間は、他の補間法に比べて全体的に最大誤差がやや大きく出る傾向があり、特に実地形 2 と 3 で顕著である。

生成 DEM を鳥瞰図などで 3 次元的に表示して、定性的な傾向も調べた。その結果、モルフォロジー補間以外の手法では、地形（特に等高線の間隔の広い場所）に不自然な細かい凹凸が見られた。その例を図 5 に一部を拡大して示す。これは少数の近隣画素のみで標高値を決定する方法の一般的傾向である。一方、モルフォロジー補間ではそれらの凹凸は見られず、不自然なこぶも発生しない。しかし、完全と言う訳ではなく、等高線位置での地形変化が滑らかでない、尾根部分など等高線の形状がかなり細長くなる箇所において平坦な地形が発生する、などの不自然さが見られた。

処理時間の例を表 3 に示す。使用した計算機は内蔵 CPU が Pentium II (400MHz) のパソコンである。これから、Akima の補間法、直線 3 次スプライン補間、モルフォロジー補間は比較的高速であり、稲葉の補間と 3 次曲面当てはめはかなりの処理時間を要することが判明した。

以上を総合すると、タイプ 1 の生成法ではいずれ

表 1 人工地形（最大誤差と平均誤差）

	人工地形 1		人工地形 2	
	最大誤差	平均誤差	最大誤差	平均誤差
Akima の補間法	1.3 [m]	0.20[m]	1.2 [m]	0.12[m]
直線 3 次スプライン補間	1.0 [m]	0.20[m]	0.9 [m]	0.11[m]
3 次曲面当てはめ	1.0 [m]	0.18[m]	1.0 [m]	0.10[m]
モルフォロジー補間	2.4 [m]	0.44[m]	2.1 [m]	0.37[m]
稲葉の補間	1.1 [m]	0.24[m]	4.6 [m]	0.14[m]

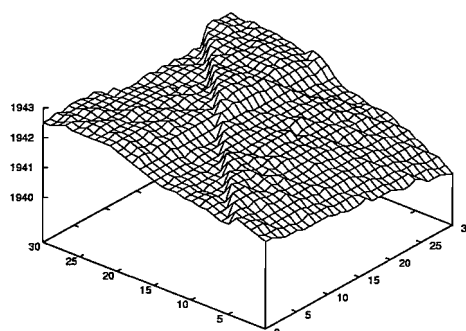


図 5 不自然な地形の例

表 2 実地形（最大誤差と平均誤差）

	実地形 1		実地形 2		実地形 3		実地形 4	
	最大誤差	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差	平均誤差
Akima の補間法	3.1 [m]	0.89 [m]	10.0 [m]	3.24 [m]	7.9 [m]	2.00 [m]	8.9 [m]	2.34 [m]
直線 3 次スプライン補間	3.5 [m]	0.94 [m]	13.5 [m]	2.78 [m]	20.2 [m]	2.36 [m]	7.8 [m]	2.02 [m]
3 次曲面当てはめ	3.4 [m]	0.92 [m]	10.5 [m]	2.76 [m]	6.7 [m]	1.83 [m]	10.8 [m]	2.16 [m]
モルフォロジー補間	3.8 [m]	0.93 [m]	9.7 [m]	2.93 [m]	8.7 [m]	1.98 [m]	8.6 [m]	2.17 [m]
稲葉の補間	3.5 [m]	1.04 [m]	26.3 [m]	2.75 [m]	27.1 [m]	2.44 [m]	10.0 [m]	2.13 [m]

表 3 処理時間（画像サイズ：1024×1024 画素）

Akimaの補間法	14.1 [s]
直線3次スプライン補間	22.1 [s]
3次曲面当てはめ	830.8 [s]
モルフォロジー補間	47.4 [s]
稲葉の補間	429.1 [s]

も生成した DEM に何らかの不自然な個所が発生しており、この意味で決定的なものはまだないと言える。どれか一つを選ぶと言うならば、図 5 のような不自然な地形を生じにくいと言う意味ではモルフォロジー補間が、処理時間が短くて大きな誤差を発生しにくいと言う意味では Akima の補間法が挙げられる。

4. 節点データから DEM を生成する方法

（タイプ 2）の原理

節点データとは、画像上において m 画素 ($m > 1$) ごとの間隔で格子点位置に標高値が配置されたものを言う。タイプ 2 の補間法も 1 次元補間による方法と 2 次元補間による方法に分けられる。

4. 1. 1 次元補間による方法

これは 1 次元補間手法を次の手順で用いる。

（手順 1）まず、節点データを縦方向に補間する。ここで、補間は節点のある列のみで行う。

（手順 2）手順 1 で得た補間画像をさらに横方向にすべての行に対して補間する。

ここでは、以上の手順で使用する 1 次元補間手法として、線形補間、Akima の補間法、直線 3 次スプライン補間を選択し、これらについて検討するものとした。なお、この場合の線形補間は結果として共 1 次元内挿法と同じものになる。

4. 2. 2 次元補間による方法

これは節点データを 2 次元的に使用して補間する方法である。ここでは、次の 2 つを選んだ。

（a）平面 3 次スプライン補間（市田・吉本，1979）

これは、平面上の節点データの座標が (x_i, y_j) で与えられるとき、矩形領域 $R_{ij} = [x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$ ごとに、共 3 次多項式を定めることで補間を行うものである。ただし、多項式の係数は 2 階までの導関

数が連続となるように決定される。

（b）FFT 補間（Ambardar, 1995）

これは、周波数帯域を n 倍にすれば時間領域での標本化間隔が $1/n$ となることを利用した補間手法である。その処理手順を次に示す。

（手順 1）節点データを空間領域データと見なして、高速フーリエ変換（FFT）を施す。ただし、節点データは帯域制限信号であると仮定する。

（手順 2）手順 1 で求めた空間周波数領域データの帯域を拡大する。すなわち、元の節点データが帯域制限信号であると仮定しているため、拡大した領域には 0 を挿入する。

（手順 3）帯域が拡大された空間周波数領域データを逆 FFT で変換して最終的な DEM を得る。

これと双対な方法に、標本化定理の復元公式において標本化関数 $\text{sinc}(x)$ を 3 次多項式で近似した 3 次畳み込み内挿法があるが、一般に誤差が大きいとされており、ここでは評価対象から外した。なお本研究では、エイリアシングの発生を抑制するために、FFT 補間は余弦変換の形で適用した。

5. タイプ 2 の DEM 生成法の評価実験

5. 1. 実験方法

（a）人工地形データの場合（図 6 左）

人工的に作成した検証用 DEM（タイプ 1 の実験と同じもの）を間引いて、節点データを作成した。ただし、FFT 補間との比較を容易にするために、画像のサイズを $2^n \times 2^n$ 画素とし、節点間隔 m も 2, 4, 8, 16, 32 画素とした。この節点データから、タイプ 2 の各手法を用いて生成 DEM を作成し、これを元の検証用 DEM と全画素位置で比較する。性能比較の指標としては、同じく、最大誤差と平均誤差を用いる。なお、一般に画像端では情報が少なく、誤差が大きくなり易いので、この影響を取り除くために、比較の範囲を画像端から $2m$ 画素以上内側に入った領域に限定した。

（b）実地形データの場合（図 6 右）

タイプ 1 の実験と同様、検証実験で必要とする数 m メッシュの分解能を持つ実 DEM は存在しないので、本研究では以下の手順に基づいて実地形データによる精度検証を実現するものとした。

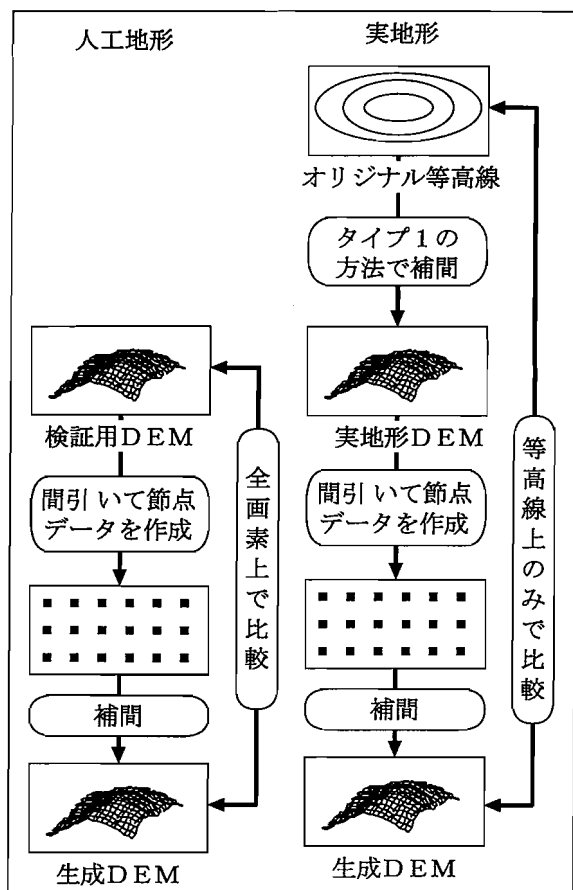


図6 タイプ2の実験方法

(手順1) 実地形図から得た等高線画像をタイプ1のDEM生成法（例えば、Akimaの補間法など）で補間し、これを間引いて節点データを作成する。

(手順2) 得られた節点データから、タイプ2の各手法を用いて生成DEMを作成する。

(手順3) 元の等高線画像を検証用DEMと見なして、生成DEMと検証用DEMとを比較する。このとき、比較は元の等高線上の画素位置のみで行う。なお、節点間隔、比較範囲、比較の指標等は人工地形データと同じである。

この手順による誤差にはタイプ1の手法による誤差も含まれてしまう。しかし、節点データとしてはタイプ1の手法で作成したDEMからさらに間引いたものを使用するので、節点間隔が広い場合には（例えば、 $m \geq 8$ 画素）、この誤差はほとんど無視できるものと考えられる。

5.2. 実験結果

人工地形データによる検証実験の結果の一部を図

7と図8に示す。これは図3の人工地形1に対する結果であるが、線形補間とFFT補間の誤差が他の補間法よりかなり大きかった。図3の人工地形2に対しては全体的に誤差は小さく、各補間手法の間に大きな違いは見られなかった。

実地形データによる検証実験の結果の一部を図9～図12に示す。これは図4の実地形1と2に対する結果であるが、全体的にスプライン補間は直線、平面ともに比較的安定していた（両者はほとんど差がない）。Akimaの補間法は、スプライン補間に比べて誤差がやや大きくなる場合があるものの、両スプライン補間とほぼ同程度である。一方、FFT補間は変化の少ない斜面の地形（実地形1）で誤差が目立った（図9、図10）。これは、人工地形データの結果と同様に、エイリアシングを完全に抑制することが難しいことを示している。また、線形補間は変化の少ない斜面では良い結果を示したが、その他の地形（例えば、実地形2）では最大誤差、平均誤差とも大きくなった（図11、図12）。なお、実地形1～4では、節点間隔が8画素程度までならば、線形補間を除いて各補間法の間には誤差に大きな違い

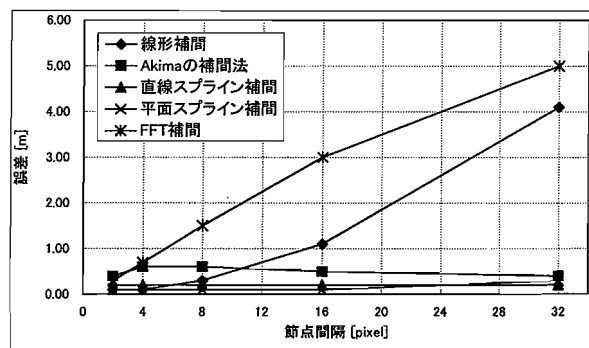


図7 最大誤差（人工地形1）

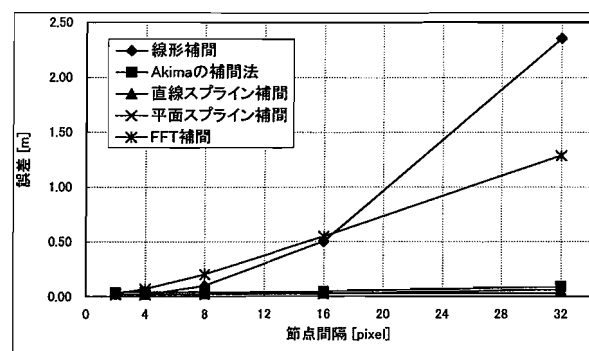


図8 平均誤差（人工地形1）

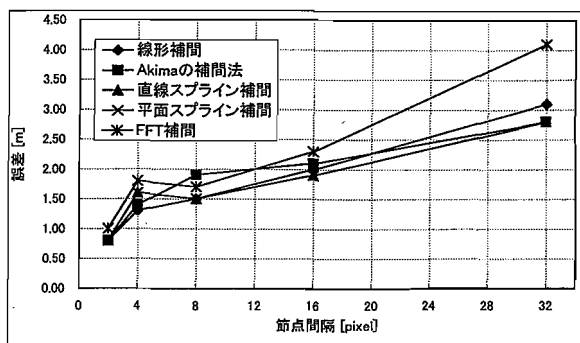


図9 最大誤差（実地形1）

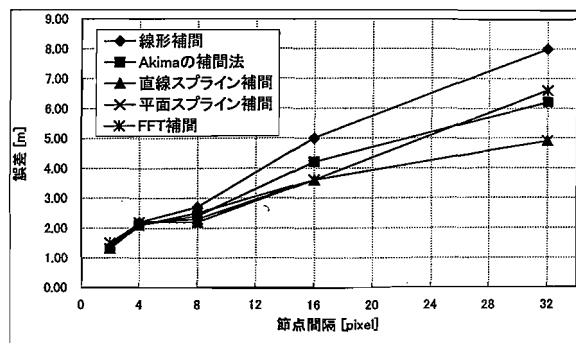


図11 最大誤差（実地形2）

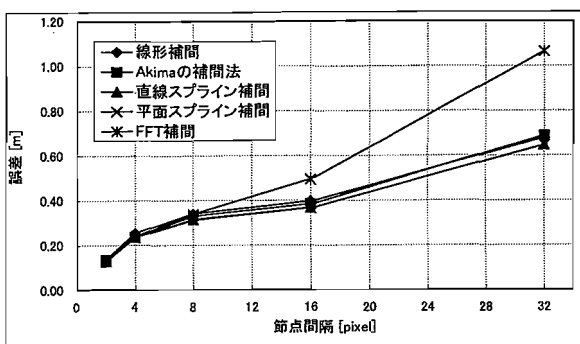


図10 平均誤差（実地形1）

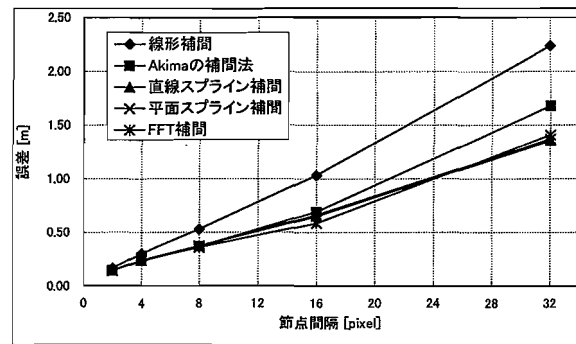


図12 平均誤差（実地形2）

はなかった。また、生成 DEM を鳥瞰図などで3次元的に表示して定性的な傾向を調べたところ、線形補間を除いて、いずれも滑らかさに関しては不自然さの少ない地形が得られていた。

各補間手法の処理時間を図13に示す。最も高速な手法は線形補間であり、次いで Akima の補間法、直線3次スプライン補間、FFT 補間、平面3次スプライン補間、の順であった。特に、平面3次スプライン補間は、節点間隔が狭い場合にはかなりの処理時間を要した。

以上を総合すると、タイプ2の生成手法として薦められるものは、処理時間が比較的短く、どの地形に対しても誤差が極端に大きくなることのないと言う意味で、直線3次スプライン補間と Akima の補間法が挙げられる。

6. おわりに

本論文では、高分解能な DEM の生成法として、等高線データから DEM を生成する方法（タイプ1）と節点データから DEM を生成する方法（タイプ2）

に対して検討を行った。検討対象とした各生成法で用いる補間手法には基本的なものを選んだが、その中で新手法と改良手法の新たな提案も行った。そして、これらの手法について組織的かつ統一的な精度検証実験を行い、各手法の性能とその特徴を明らかにした。特に、数 m メッシュの高分解能な実 DEM が存在しないにもかかわらず、等高線画素上で精度検証を行うと言う新しい方式を採用することで、この種の高分解能レベルではおそらく初めての統一的な比較検討結果が得られたことは意義が大きいと考

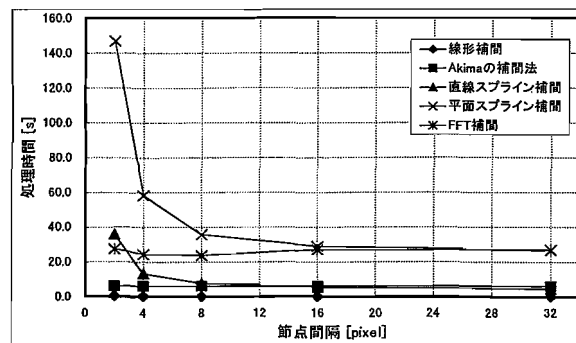


図13 処理時間（画像サイズ:1024×1024）

える（ただし、これは元の地形図の等高線が正しいと言う前提の下で得られた結果である。前述したように、1/25,000 地形図における等高線の誤差は約 5m とされているので、これらの結果は DEM 生成法の絶対的な精度評価を与えるものでなく、あくまでも相対的な精度評価を与えるものに留まっている）。

しかし、タイプ 1 の DEM 生成法については決定的なものがまだ存在していないことも明らかになり、今後もより効果的な生成手法を探索する努力が要求される（例えば、ここで検討対象としなかったタイプ 3 の正則化手法も新たに検討する必要がある）。また、本論文での補間性能検証は、画素ごとの標高値誤差（鳥瞰図による比較を含む）に基づいて行われているが、微分情報を用いた新たな評価方式の確立も今後の課題である。

参考文献

- 市田浩三・吉本富士市（1979）『スプライン関数とその応用』，教育出版。
- 稲葉和雄（1987）傾斜情報を利用した等高線からの DTM 作成法「日本写真測量学会 秋季学術講演会」，A-3，9-12。
- 小松香爾・品川嘉久・國井利泰・上田 穰（1996）等高線の収縮変形による地形復元，「電子情報通信学会論文誌」，J79-DII（6），1072-1079。
- 塩野清治・弘原海清・升本眞二（1985）パソコンで不規則に分布するデータを格子データ変換してコンターマップを作成する方法(1) -加重一次補間-「情報地質」，10，65-78。
- 村上広史（1995）国土地理院数値地図の精度に関する考察，「情報地質」，6（2），59-64。
- 村木 茂・横矢直和・山本和彦（1990）正則化法による等高線画像からの曲面再構成，「電子情報通信学会論文誌」，J73-DII（11），1854-1862。
- 渡辺孝志・山本善一・阿部英志・木村彰男（1998）拡張ボロノイ線図を用いた等高線画像の大局的復元処理，「GIS -理論と応用」，6（2），23-31。
- Akima, H. (1970) A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures, *Journal of ACM*, 17(4), 589-602.
- Ambardar, A. (1995) Analog and Digital Signal Processing, PWS Publishing Company.
- Barrett, W., Mortensen, E. and Taylor, D. (1994) An image space algorithm for morphological contour interpolation, *Graphics Interface '94*, 16-24.
- Briggs, I. C. (1974) Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, 39 (1), 39-48.
- Cole, G., Macinnes, S. and Miller, J. (1990) Conversion of contoured topography to digital-terrain data., *Computer & Geosciences*, 16 (1), 101-109.
- Gorte, B. and Koolhoven, W. (1990) Interpolation between isolines based on the Borgefors distance transform, *ITC Journal*, 1990-3, 245-247.
- Grimson, W. E. L. (1983) An implementation of a computational theory of visual surface interpolation, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 22, 39-69.