

測量データに基づく河川の三次元モデルと 描画アルゴリズムの研究

吉 鴻 賓[†] 劉 真[†] 青 木 由 直[†]

本論文では測量データに基づいて、景観シミュレーション用の河川三次元モデリングとレンダリング方法について論じる。滑らかな河川模様をCGで表現するため、河川測量断面間と測量断面内部のリアルタイム地形補間アルゴリズムを提案する。水の流れを表現する1つの手法として、景観シミュレーション用の近似フローネットの計算方法を検討し、フローネットに関する密度を制御するために、フローネットの密度関数の概念を導入した。上述のアルゴリズムに基づいたコンピュータシミュレーションを行い、河川情報検索システムの応用から、本モデルの有効性と実用性を示した。

A 3D Model and Rendering Algorithms of Rivers Based on Measured Data

HONGBIN JI,[†] ZHEN LIU[†] and YOSHINAO AOKI[†]

This paper gives a computer graphics three-dimension model and rendering method of rivers for view simulation based on measured data. The interpolation method for processing the measured data was also proposed to get more smooth curves of river edges. As a representation technique of rendering river flow, a proximate computing method of flow net is discussed. The algorithms of drawing the geographic surface of a river and calculating the flow lines and same potential lines of the water flow in the river were shown. In order to control the density of the flow nets to represent the different velocity of water flow along the river, density function was introduced. Experiments were done by using the measured data of Edo river in Tokyo under Silicon Graphics machine. The simulation results show our modeling and rendering of rivers based on measured data is useful and effective.

1. はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)を用いた景観シミュレーション、描画を行うため、種々の物体を対象とするモデリングやレンダリング技法が開発されている^{1),2)}。しかし、景観シミュレーションのためのCG技法が十分に開発されていない対象も多く、河川はそのようなものの1つである。河川は今日の我々の生活に非常に密接な関係を持っている。河川氾濫予測、防災、河川施設管理、工事計画等における、CGの活用のためには、河川のリアルタイム表示および河川の景観シミュレーションが重要な課題の1つとなっている。

Sarrafらは水の流れ方向、特に湖水と風の関係についての3Dメッシュモデル³⁾を提案した。Shimizらは河水の流れと河床変化の3D計算モデル⁴⁾を提案し、多くの実験を行った。これらのモデルはストークスの

流体方程式に基づいており、流体分析の分野で役に立つ。しかし、画像表示への応用の立場から見ると、これらのモデルでは連立偏微分方程式を解くことが必要となるため、河川のリアルタイム表示が困難である。河川情報検索システムでは、リアルタイムによる河川の三次元描画が基本機能として要求される。利用者が河川とキロ程を指定すると、河川情報システムは、即座に対応地点のCGを表示する。視点やその他の条件を変化させた画像をリアルタイムにアニメーション表示することにより、利用者は河川の三次元的な情報を容易に把握できるようになる。

本論文では、河川のCG表現三次元モデル、描画アルゴリズム、河川地形の補間手法および河水の表現について検討する。次の2章では、河川の測量データ(キロ程位置データ、横断データ、水位データ)を紹介し、これらの測量データに基づいて景観シミュレーション用の河川三次元モデルを提案する。異なる座標系を持つ測量データから1つモデルを形成するため、座標の変換方法も解説する。3章では、河川らしい画

[†] 北海道大学工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

像を得るため、河川測量横断面間と横断面内部の地形補間アルゴリズム、河川地形の描画アルゴリズムを示す。河川の特異地形合流点の処理もこの章で述べる。4章では、河川の水の表現方法を検討する。河水の流れをアニメーションするために、フローネットの近似計算アルゴリズムおよび密度関数を導入した。最後では実験結果とまとめについて述べる。

2. 河川の測量データと三次元モデル

河川は流れている河水とその付近の地形から成っている⁵⁾。本モデルでも河川を地形と河水の2つの部分に分けて考える。

本論文では、横断面位置データ、横断面データおよび水位データの3種類の河川測量データに基づき、モデリングを行う。

2.1 河川の測量データ

通常、河川は、河川の管理区間の下流から均等な間隔(キロ程)で管理され、キロ程ごとに、河川断面に関する測量が行われる。

河川の横断面位置データ(あるいはキロ程位置データ) p^k は、図1(a)に示すように河川の測量断面の両端点の二次元平面座標である。

$$p^k = (p_l^k, p_r^k), \quad p_l^k = (X_l^k, Y_l^k),$$

$$p_r^k = (X_r^k, Y_r^k) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

(X_l^k, Y_l^k) , (X_r^k, Y_r^k) はそれぞれ上流から見て左側、右側の端点の座標を表し、 k は測量開始点からのキロ程の順を表す。このキロ程の間隔は、普通、大きい河川で1000m、小さい河川で500mであることが多い。測量データの座標系は平面直角座標系あるいは経緯度座標系が多く用いられる。

河川の横断面データは、測量断面の河川堤防と水が流れている所の細かな地形情報であり、次のように表される。

$$o^k = (o_1^k, o_2^k, \dots, o_{M^k}^k) \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

ただし、

$$o_i^k = (x_i^k, z_i^k) \quad (i = 1, 2, \dots, M^k) \quad (2)$$

ここで、 (x_i^k, z_i^k) は k 番目の横断面の地形データ、 x_i^k が左岸の端点からの距離で、 z_i^k がその点における高さを表している(図1(b))。 M^k は k 番目の横断面で測量された点の数を示している。この M^k は、一般に100から500くらいで、各横断面ごとに異なる。結果として、各々の横断面は異なった座標系を持つ

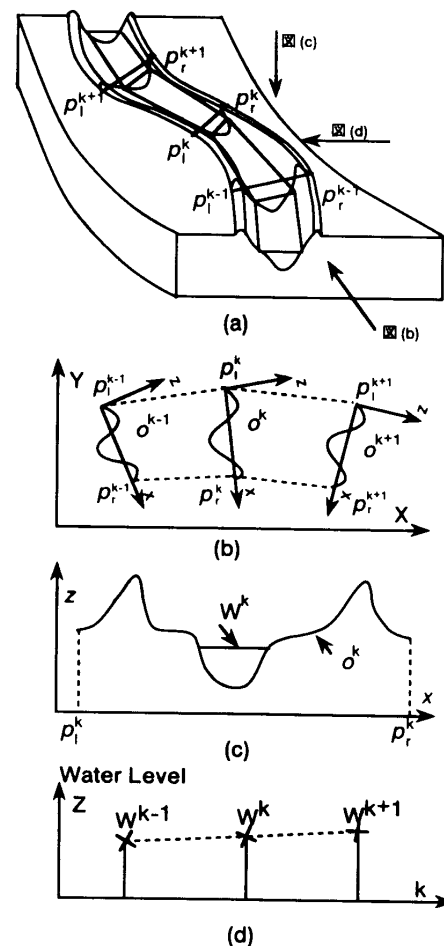


図1 河川の測量データ。(a) 河川地形図、(b) 河川横断面図、(c) 横断面データと横断面位置データの座標系、(d) 水位データの縦断面図
Fig. 1 The measured data of a river. (a) the geography surface of a river, (b) data p , o and W , (c) the relationship between data p and o , (d) data W .

ことになる。すなわち、データ o^k ($k = 1, 2, \dots, N$)はそれぞれ独立なローカル座標系で測量される。この座標系の原点は、横断面位置データ $p_l^k = (X_l^k, Y_l^k)$ である(図1(c))。

河川の水位データ W^k ($k = 1, 2, \dots, N$)は、測量基準点(三角点等)からの各横断面における水面の高さを示している(図1(d))。水位データには平均水位、高水位、低水位、計画水位、警報水位等がある。

2.2 測量データの座標変換と三次元モデル

前節で述べたように、横断面位置データと横断面データの座標系が異なるため、三次元モデリングするには、同一の座標系に変換することが必要である。この節では、上述の測量データを三次元に変換する方法について述べる。この二次元から三次元への座標変換は、測量データの種類によって手法が異なる。

水位データは各横断面におけるの水の高さなので、横断面の座標を決定することにより、水位データも

決定される。したがって、水位データの座標変換は必要ない。

キロ程位置データ p^k は二次元の座標データしか持っていないため、横断データ中の両端点のデータを用い、高さ情報 Z_l^k と Z_r^k を追加する。このようにして、変換されたキロ程位置データは次のようになる。

$$P^k = (P_l^k, P_r^k), \quad P_l^k = (X_l^k, Y_l^k, Z_l^k),$$

$$P_r^k = (X_r^k, Y_r^k, Z_r^k) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

図2に示すような関係にあることから、横断データ O_i^k は次のように計算される。

$$X_i^k = X_l^k + x_i^k \cos \theta^k, \quad Y_i^k = Y_l^k + x_i^k \sin \theta^k,$$

$$Z_i^k = z_i^k, \quad O_i^k = (X_i^k, Y_i^k, Z_i^k)$$

$$(i = 1, 2, \dots, M^k) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

ここで、 θ^k はキロ程位置データ P_l^k と P_r^k と結んだ線分と X 軸とのなす角である。 O_i^k は変換後の横断データである。

図3に示す基本測量データに基づく河川の三次元モデル R は次のように3種類のデータで表現される。

$$R = (P^k, O^k, W^k) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

ここで、 P^k, O^k, W^k は同一の三次元座標系に変換された測量データである。

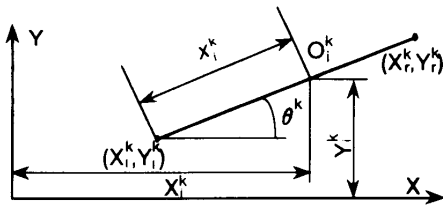


図2 二次元から三次元への座標変換
Fig. 2 The coordinate transformation from 2D to 3D.

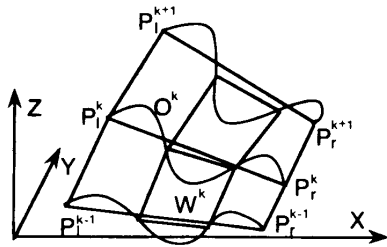


図3 河川のCG表現用三次元モデル
Fig. 3 The 3D model of a river.

3. 河川地形の描画

この章では、河川モデル R に対して河川地形の表現方法を説明する。河川横断データ O^k ($k = 1, 2, \dots, N$) はキロ程 k ごとにそれぞれ独立に測量されているため、断面 O^k 中の点と断面 O^{k+1} の点との対応付けが困難であり、断面 O^k と断面 O^{k+1} 間の地形をどのように描画するかが河川表示の1つの問題となる。本論文では、図4に示すように、河川の地形を断面 O^k と断面 O^{k+1} の間で、互に対応する2組(4点)を決め、その2組を用いて2つの三角形ポリゴン、あるいはワイヤフレームで描画する。

横断データ O^k と O^{k+1} により河川の地形を描画する一番簡単な方法は、 O^k の測量点と O^{k+1} の測量点を端点から順に連結する方法である。しかし、このアルゴリズムには2つの問題点がある。1つは、 O^k と O^{k+1} の測量点の数が異なっていることである。そのため、この方法では、対応漏れが生じる。もう1つは、各横断内部で測量点間の距離が違うことである。このため、 O^k と O^{k+1} 間で単純に測量点を順番に対応させて河川の地形を描画すると、各測量点の対応が実際の地形と異なる。たとえば、 O^k に含まれるデータ中で低い点が O^{k+1} のデータ中で高い点と連結してしまう可能性がある。この場合、実際の地形との誤差が大きくなり、画像が不自然になる。したがって、断面 O^k と断面 O^{k+1} 内で測量点の補間方法を考える必要である。

本論文では、河川の測量データの分析から、横断断面の対応付け方法と補間手法を提出する。以下の節では、これらについて詳しく説明する。

3.1 河川地形の描画アルゴリズム 1

実際の地形と測量データの考察から、 O^k の左(右)岸の最高点(天端)は O^{k+1} 中の左(右)岸の最高点に対応づけることができる。河川の測量データには、このような対応づけを可能にする性質を持っている点のほか、いくつかある。たとえば、両側の端点、河川の一番低い点(最深河床)、同じ水位の点(低水路、高水路)等である。これらの点は他の測量データよりも重

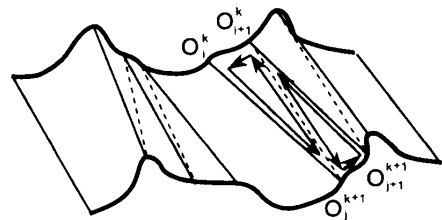


図4 河川地形の描画
Fig. 4 The geography surface of a river.

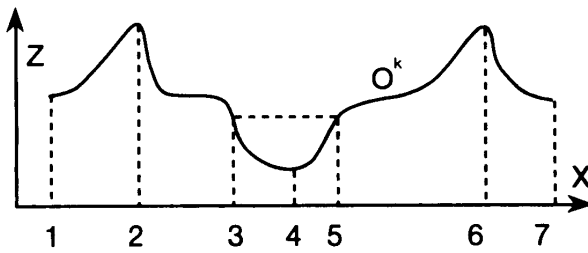
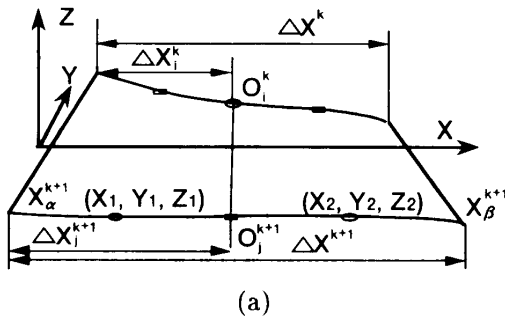
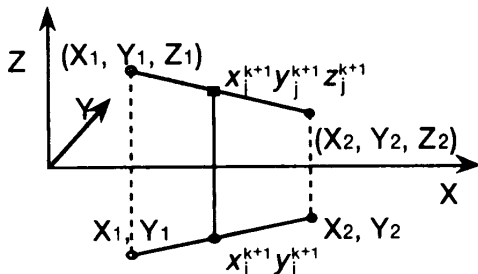


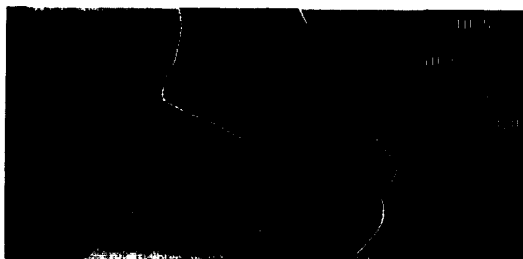
図5 河川の横断データと基準点
Fig. 5 Special points in the measured data O.



(a)



(b)



(c)

図6 基準点間の補間. (a) x方向, (b) y, z方向, (c) 描画例
Fig. 6 The interpolation method between based points. (a) The interpolation in x direction, (b) in y, z direction, (c) The geographic surface of a river.

要で、これらのデータだけでほぼ河川の形状が定まる。本論文ではこのような点を河川の基準点と呼ぶ。上述の7つの基準点（両端点1, 7, 両天端点2, 6, 両低水路3, 5, 最深河床4（図5））で河川の断面を6つの部分に分け、各々の対応する部分ごとに線形補間を行う。

図6(a), (b)に示すように、 O^k における2つの

隣接する基準点間の任意の点 $O_i^k = (X_i^k, Y_i^k, Z_i^k)$ に対して、 O^{k+1} 中の対応する2つの基準点 $O_\alpha^k = (X_\alpha^k, Y_\alpha^k, Z_\alpha^k)$, $O_\beta^k = (X_\beta^k, Y_\beta^k, Z_\beta^k)$ 間の補間点 $O_j^{k+1} = (x_j^{k+1}, y_j^{k+1}, z_j^{k+1})$ を次式で計算する。

$$x_j^{k+1} = \frac{\Delta X^{k+1}}{\Delta X^k} \Delta X_i^k + X_\alpha^{k+1},$$

$$\left(\frac{\Delta X_i^k}{\Delta X^k} = \frac{\Delta X_j^{k+1}}{\Delta X^{k+1}} \right),$$

$$y_j^{k+1} = \frac{x_j^{k+1} - X_1}{X_2 - X_1} (Y_2 - Y_1) + Y_1,$$

$$z_j^{k+1} = \frac{x_j^{k+1} - X_1}{X_2 - X_1} (Z_2 - Z_1) + Z_1 \quad (6)$$

ここで、

$$X_1 = \max\{x_s | s = 1, 2, \dots, M^{k+1} \text{かつ } x_s \leq x_j^{k+1}\},$$

$$X_2 = \min\{x_s | s = 1, 2, \dots, M^{k+1} \text{かつ } x_s \geq x_j^{k+1}\}$$

このような補間を O^k と O^{k+1} 両方向に行う。したがって、補間後の O^k のデータの数は $M^k + M^{k+1}$ となる。地形を補間することによって得られた2組のデータを表示の基本単位として使う。この2組のデータで、2つの三角形ポリゴンを用いて面を構成して描画する。このアルゴリズムは、良好なCG像を生成した（図6(c)）。しかし、地形を構成する点の数が2倍になることにより、レンダリングに約2倍の時間を要する。

3.2 河川地形の描画アルゴリズム2

測量データに基づく河川地形を表現する問題点は、横断面間の各測量点どうしを連結する情報がないことである。横断面データに連結情報を加えれば、描画が容易になる。河川の計画横断面データは河川管理者が作った河川の理想的な形状データである。すべての横断面計画データは横断面あたり15点に規格化されており（図7(a)）、断面 O^k と断面 O^{k+1} の点どうしに対応関係を持たせている。

この計画横断面データにより河川の計画地形を表示するには、順に対応する点どうしを連結すればよく、描画は簡単である（図7(b)）。本アルゴリズムは、横断面間の地形の対応関係が容易に求められる一方、細かな連結データが不足、リアル感が低下する。そこで、このデータを前節で利用した基準点として用い、河川断面を14の部分に分けて、前節のアルゴリズム1で描画する（図7(c)）。基準点が多ければ多いほど河川の地形が正確に表現できるので、測量データの表示において、計画横断面データを補助基準点としてさらに良い地形表現が期待できる。

3.3 河川横断面間の地形補間

画像を拡大したり、視点を近づけたりすると、直線

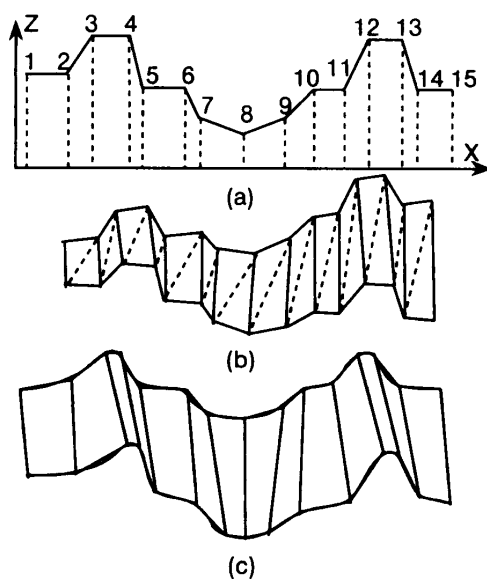


図7 計画横断データと地形の描画。(a) 計画横断データ、(b) 計画横断の地形、(c) 計画横断に基づく地形

Fig. 7 The planning data and its geographic surface. (a) The planning data, (b) the geographic surface of planning data, (c) surface based on planning data.

で連結した河川地形では不自然さが目立つ。横断データ O^k の測量点間の平均距離は3メートル程度と細かいが、キロ程位置データ P^k と P^{k+1} の平均距離は小さい川でも約500メートルと粗く測量されている。したがって、より実際の河川らしい画像を作るためには、河川の横断断面数を増やさなければならない。

図8(a)は横断断面間の補間の基本となる考え方を示している。基準点に対する補間点 $O_i^k = (x_i^k, y_i^k, z_i^k)$ の x, y 座標は次式で計算する。

$$\begin{aligned} x_i^k &= x_c^k + (d^k + i\Delta d^k) \cos(\theta^k + i\Delta\theta^k), \\ y_i^k &= y_c^k + (d^k + i\Delta d^k) \sin(\theta^k + i\Delta\theta^k), \\ \Delta d^k &= (d^{k+1} - d^k)/(n+1), \\ \Delta\theta^k &= (\theta^{k+1} - \theta^k)/(n+1) \\ (i &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \tag{7}$$

上式中 n は補間断面の数である。 n が大きれば、画像が細くなるが、データ数が増加するため、描画する時間も長くなる。 n の値は画像のサイズとスケールによって変える必要がある。実験によると $n = 3 \sim 9$ が適当である。点 $C = (x_c, y_c)$ は、断面位置データ P^k により定まる直線 l^k と、 P^{k+1} により定まる直線 l^{k+1} の交点である。角度 θ^k は直線 l^k と X 軸のなす角で、 θ^{k+1} は直線 l^{k+1} と X 軸のなす角である。 d^k, d^{k+1} は、 O^k, O^{k+1} に補間しようとする基準点から交点 C までのそれぞれの長さである。

補間横断断面中基準点の高さの値 z_i^k は、次式のよ

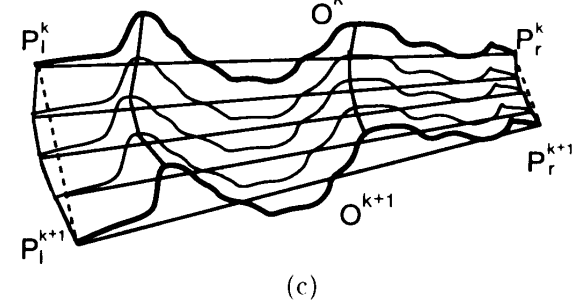
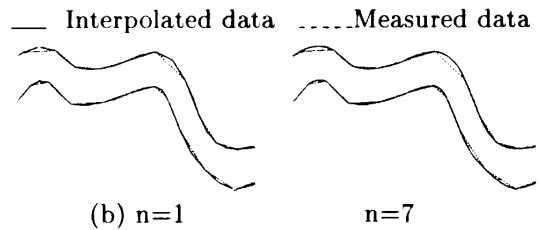
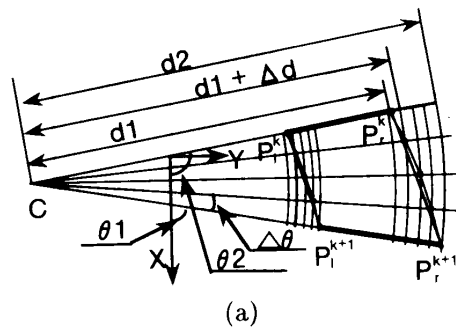


図8 横断断面間の補間。(a) 補間方法、(b) 二次元の補間結果、(c) 補間後の河川地形
Fig. 8 The interpolation method between transverses, (b) the 2D interpolation results, (c) geographic surface with interpolated transverses.

うに線形補間により決められる。

$$z_i = \frac{iZ_i^{k+1} + (n+1-i)Z_i^k}{n+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{8}$$

2つの基準点間の各点は地形描画アルゴリズム1と同様の補間方法を用いて補間する。二次元の補間結果サンプルは図8(b)に示している。

補間後の横断断面の様子は図8(c)に示すようになる。横断断面間の補間は画像を拡大するモードだけで必要なので、同時に補間する断面の数が少ないため、リアルタイムで計算できる。実際は、河川情報検索システムには10数本の河川が存在し、1つの河川でも、10数年度の測量データがあり、かつ、たくさんの他のデータが使われ、オリジナルの河川の測量データ自身もさまざまな処理に使われる。なるべく、河川の三

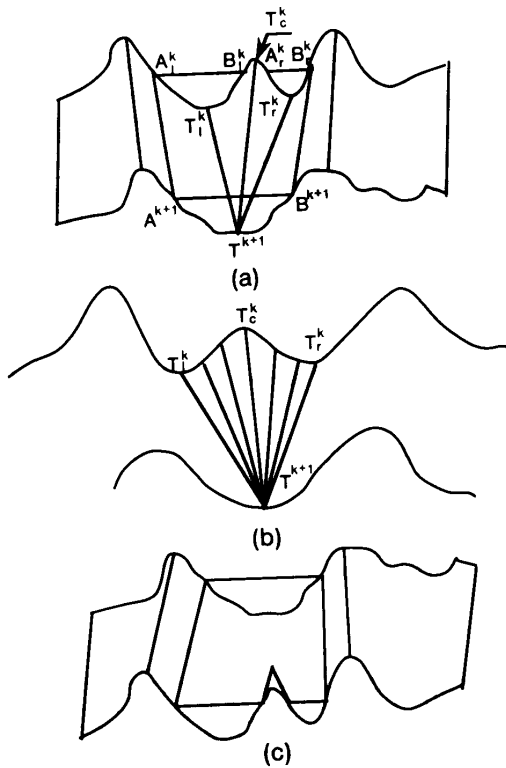


図9 河川の分流（合流）点. (a) 水面, (b) 地形, (c) CG 表現手法

Fig. 9 At branch point. (a) the water surface, (b) the geographic surface, (c) the geographic rendering method.

次元描画はデータ量を増やさない前提で行う。もちろん、特別な場合は、処理速度向上のため、補間と描画を同時に行うことを避けて、検索システムに重要な河川だけの補間は事前に行うことも可能である。得られた補間断面のデータは、標準の測量横断データと同じように使える。

3.4 合（分）流点の処理

河川の合（分）流点では図9(a)に示すように、2つの隣接する断面のうち、1つの断面で1本の水流であるものが、もう1つの断面では2本の水流になっている。この部分の地形は次のように4つの面で表す。

$$(A_l^k, A^{k+1}, T^{k+1}, T_l^k), \quad (T_l^k, T^{k+1}, T_c^k), \\ (T_c^k, T^{k+1}, T_r^k), \quad (T_r^k, T^{k+1}, B_r^k, B^{k+1})$$

面 $(A_l^k, A^{k+1}, T^{k+1}, T_l^k)$, $(T_r^k, T^{k+1}, B_r^k, B^{k+1})$ は前述のアルゴリズムによって補間を行う。これに対して面 (T_c^k, T^{k+1}, T_r^k) , (T_l^k, T^{k+1}, T_c^k) は三角に近い形である。この場合、前述した基準点内部の補間方法を使えない。測量横断データだけにより、3点 T_l^k , T_{i+1}^k , T^{k+1} ($i = l, \dots, r-1$) の三角形で河川地形を描画する（図9(b)）。合流点の水面も2つの平面で表す

（図9(c)）。合流点の描画結果を図10（267ページ参照）に示す。合流点の処理を行わなかった場合は、水流が1本しか描画されないが、上述した合流点の処理を行うことにより、測量データどおりに水流が2本描画された。

4. 河水の表現

この章では、河水の表現手法について述べる。千葉⁷⁾らは簡易的な水の表現を提案したが、彼らの研究内容は水粒子の三次元行動モデルにより水粒子群から水面を定義しCG画像を生成する方法である。中前、西田らはリアルな水の表現を発表したが⁸⁾、彼らは、水の表現を行うために、水の表面形状モデルと水面上の光学特性に基づいて、水中に生じる影の影響を考慮し、さらに、水中から水面を透過してくる光を細かく計算し、リアルな水の画像を追求することを目的としている。本論文では、河川情報検索システムにおいて、河川の三次元表示を行うためのもので、河水全体（水位、幅、動き）をリアルタイムで示すことを目的としている。

開水路問題は方程式として解くことができるが⁶⁾、この方程式の数値解法は一般に計算時間がかかり、リアルタイム処理に向かない。そのうえ、形が不定である流体をCGによりリアルタイムで表現するのは難しい。そのため、河水のシミュレーションを理論式に基づいて行うことは困難である。本論文では理論式からではなく、河川の測量データから水の流れを近似的に求め、描画する方法を提案する。静止の水の描画手法を提出する。川のアニメーションを作成することを目的として、河水の流れを表現する方法を提案する。

4.1 静止水の表現

静止水を表現する簡単な方法は、水面をその付近の陸地と異なる水色で描画することである。測量横断データ O^k と水位データで決まる交点は2つだけ限らない。まず、水位データ W^k と横断データ O^k により、河川中心部に左右両方向で最も近い高さが W^k となる2点を求める。これは水位データと横断データのメイン交点という。次は、同様に O^{k+1} でもデータ W^{k+1} と O^{k+1} によりメイン交点を求める。この4点によって定まる四角形で仮想的な水面を表す。図11は、この方法で、水面を描画した例である。

図中で、(a)は単純な四角型の平面で、(b)は測定の横断断面で色分けにして、(c)はフローネットと重ねて描画する。水位の高さを調節することにより、河川の水の幅を正確に表示でき、河川流域の水位に関連した景観シミュレーションの際に利用できる。

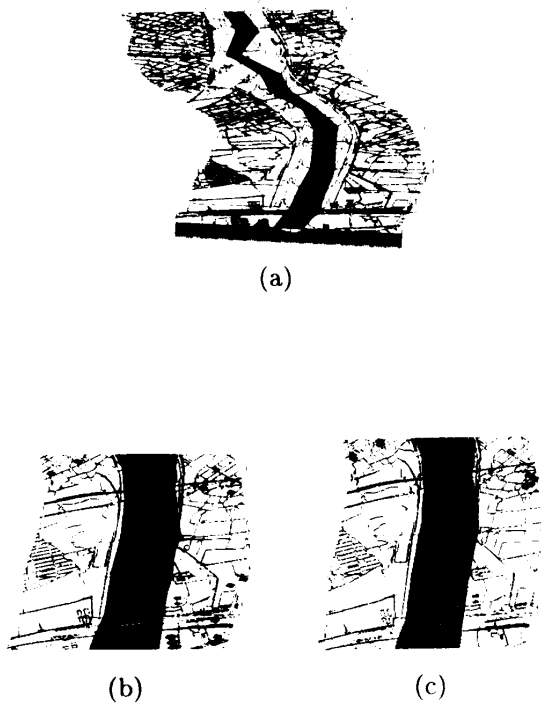


図11 河水の表現。(a)単純な四角形、(b)横断部分の色分け、(c)フローネットと重ねる
Fig. 11 The rendering of river water. (a) rectangle only, (b) with color transverses, (c) with flow net.

4.2 フローとスピードポテンシャル関数

水の流れをフローネットを表すことを考える。河水の運動は次の流体に関するストークスの方程式で記述できる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= Fx - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u, & u &= u(x, y, z, t), \\ \frac{dv}{dt} &= Fy - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v, & v &= v(x, y, z, t), \\ \frac{dw}{dt} &= Fz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w, & w &= w(x, y, z, t), \\ \mathbf{V} &= (u, v, w) \end{aligned} \quad (9)$$

二次元の流線群と等ポテンシャル線群は流関数と等ポテンシャル関数よりそれぞれに定義される。関数 Ψ が次の条件を満たすとき

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial x} = v, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial y} = u \quad (10)$$

関数 Ψ は流体の流関数という。また、関数 Φ が条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = u, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = v \quad (11)$$

を満足するとき、 Φ を等ポテンシャル関数という。

4.3 フローネット

フローネットは流線群と等ポテンシャル線群からなる。フローネットは流体分析に使われている。流れの

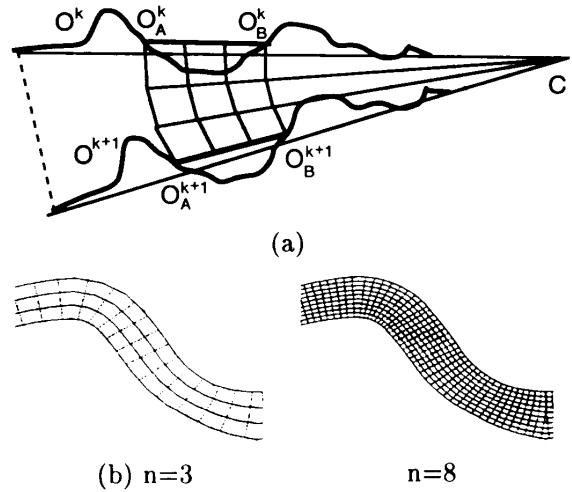


図12 フローネットの計算。(a)フローネットと河川地形、(b)計算結果例
Fig. 12 The flow lines and flow nets. (a) the calculation of flow lines, (b) samples of flow nets.

場にある1本の曲線に沿う接線方向がすべてその点でのその瞬間の流線ベクトルの方向と一致するとき、この曲線を流線と呼ぶ。本論文では測量データ (P^k, O^k, w^k) から景観シミュレーション用のフローネットを近似的に求めるアルゴリズムを提案する。

4.3.1 流線

河川横断断面の補間結果から、滑らかな形が得られることが分かる。これは水の流れと似ている。補間の数 n が水の流速と正比例している場合は、この補間点を連結した線分は、河水の流線の近似となる可能性がある。

図12(a)に示すように、横断断面 O^k の低水路基準点 O_A^k, O_B^k と横断断面 O^{k+1} の低水路基準点 O_A^{k+1}, O_B^{k+1} の間をそれぞれに n 等分にして、

$$\overline{CO}_i^k = (\overline{CO}_A^k - \overline{CO}_B^k) i / (n + 1),$$

$$\overline{CO}_i^{k+1} = (\overline{CO}_A^{k+1} - \overline{CO}_B^{k+1}) i / (n + 1) \quad (12)$$

上述した河川横断断面間の補間方法を繰り返し用いて $(i = 1, 2, \dots, n)$, n 本の線分を得ることができる。この線分と仮想の水面を重ね、奇数断面の流線と偶数断面の流線とを交互に表示することによって、河川の水の流れの様子をアニメーションする。

流関数と等ポテンシャル関数の定義から流線と等ポテンシャル線は直交していることが分かる。すなわち、

$$\Psi \cdot \Phi = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -uv + uv = 0 \quad (13)$$

となることから、流線群を基に、対応する等ポテンシャル線群を計算できる。

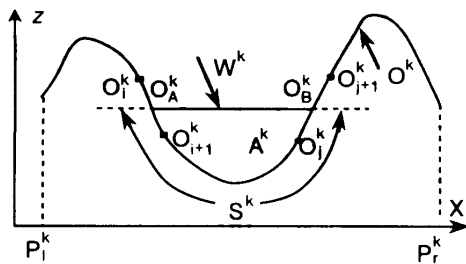


図13 横断データと水位データのメイン交点および動水半径
Fig. 13 The main cross points and dynamic water radius.

図12(b)はフローネットの計算結果である。

4.3.2 密度関数

流線の本数で水の流速を表すために、流線群を描画する前には流線の本数を決めなければならない。このために密度関数の概念を導入する。流線の本数は密度関数により計算する。密度関数の一般式は

$$f(V^k) = k_1 V^k + k_2 \quad (k_1, k_2 = \text{constant}) \quad (14)$$

である。ただし、水の平均流速 V^k は次のステップで計算する。

1) 水位と横断データのメイン交点 O_A^k , O_B^k を探す。

$$z_A^k = z_B^k = W^k \quad (15)$$

もし O_A^k が O_i^k と O_{i+1}^k の間に存在し、 O_B^k が O_j^k と O_{j+1}^k の間にあると仮定すると、メイン交点の x 値 x_A^k と x_B^k は次式で計算できる。

$$\begin{aligned} x_A^k &= \frac{(X_{i+1}^k - X_i^k)(z_A^k - Z_i^k)}{Z_{i+1}^k - Z_i^k} + Z_i^k, \\ x_B^k &= \frac{(X_{j+1}^k - X_j^k)(z_B^k - Z_j^k)}{Z_{j+1}^k - Z_j^k} + X_j^k \end{aligned} \quad (16)$$

メイン交点の y , z の値は式(16)と似ている方法で計算する。

2) 動水半径 R^k を計算する。

図13に示すように、動水半径 R^k は断面積 A^k と潤辺 S^k の比であり、潤辺 S^k は横断断面図に水と陸地と接触する部分の周長である。

$$R^k = A^k / S^k,$$

$$\begin{aligned} S^k &= \sum_{s=i+1}^{j-1} \sqrt{(X_{s+1}^k - X_s^k)^2 + (Y_{s+1}^k - Y_s^k)^2} \\ &\quad + \sqrt{(x_A^k - X_{i+1}^k)^2 + (y_A^k - Y_{i+1}^k)^2} \\ &\quad + \sqrt{(x_B^k - X_j^k)^2 + (y_B^k - Y_j^k)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

3) 平均勾配 I^k を求める。

$$I^k = (\min Y_i^{k+1} - \min Y_i^k) / \delta P \quad (18)$$

δP は P^k , P^{k+1} 間の距離である。

4) 平均流速 V^k を計算する。

$$V^k = \frac{(R^k)^{1/6}}{\lambda} \sqrt{(R^k)(I^k)} \quad (19)$$

ここで、 λ は Manning 係数である。

5. 実験結果

江戸川の測量データを利用して、これまで述べてきたアルゴリズムをSGIマシン上で実現した。

また、キロ程の順 $k = 1, 2, \dots, 120$, $M^k \equiv 200$, $\lambda = 0.25$ である。図14は江戸川の測量データを用いて河川を描画した結果である。

図中、(a)はアルゴリズム1で描画した様子である。ほぼ河川らしいCG画像を得られた。(b)は河水が地図との合成した画像である。河川を描画がワイヤだけで表現されている。背景のベクトル地図は混みいつて分かりにくい。地図にある河川の輪郭様様ははっきりしている。(c)は河川が地図との合成結果である。(c)は(b)と比べることにより、河川は地図との合成が正確であることを確認できる。(d)は河水が流線と重ねて描画した画像である。

この流線を用いて奇数断面と偶数断面を交互に表示することによって、河川の水の流れの様子をアニメーションする(図15)。

SGIのマシン(INDIGO X24)上で、河川だけで約10コマ/秒で描画できるが、合成ベクトル情報がある場合、約4コマ/秒くらいになる。

6. おわりに

上記の実験結果から、次の評価基準とする項目に対してリアルタイムで、ほぼ満足できるCG画像を得られた。

- 河川の全体の形
シミュレーションで作成した河川全体の形がその河川の特徴を正確に表しているかどうか。
- 横断断面の形
河川の横断断面、特に、堤防は河川管理者に対して、非常に重要な情報である。三次元の河川でも、指定された断面から描画する場合、その断面は、二次元の横断面と同じかどうか。
- 水位情報
本システムの利用目的の1つに、河川の水位と水の幅を知ることがある。水位の高さを調節することにより、水の幅が正しく変化するかどうか。

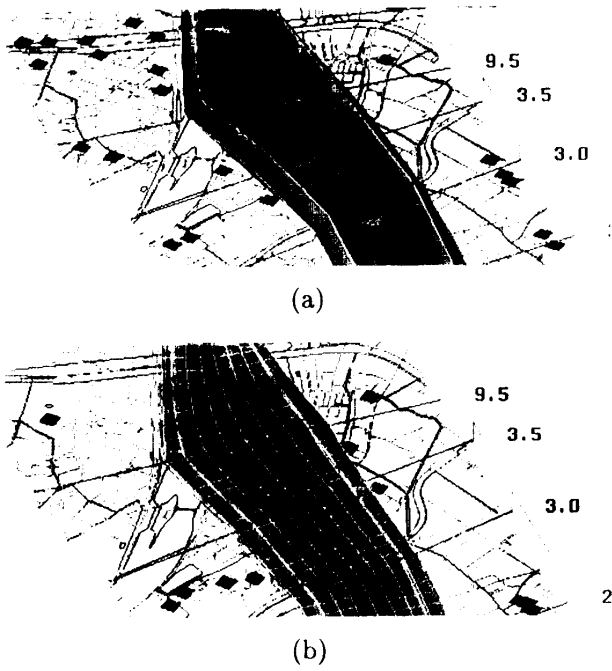


図 10 河川分流（合流）点のCG表現。(a) 分流点処理なし、(b) 分流点処理あり
 Fig. 10 Rendering the branch point of a river. (a) without branch point processing, (b) with branch point processing.

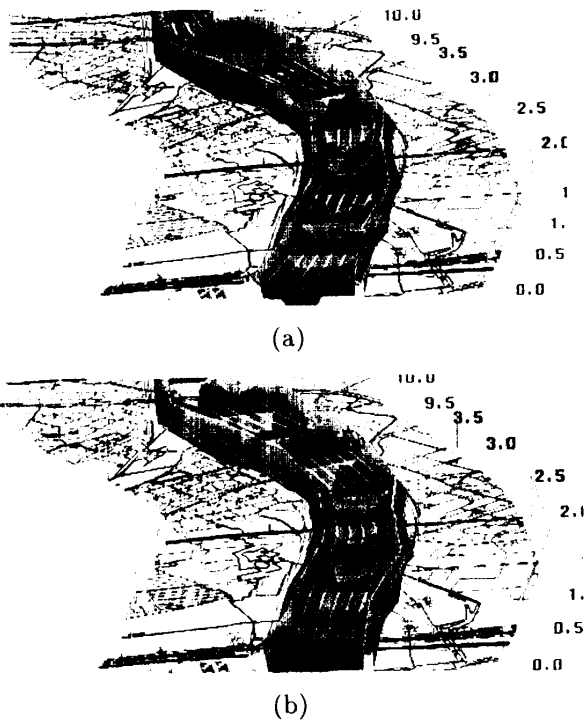


図 15 流線により水の動きをアニメーションする。(a) 偶数断面に流線の表示、(b) 奇数断面に流線の表示
 Fig. 15 The animation of the water flow with flow lines. (a) flow lines in even-numbered transverses, (b) flow lines in odd-numbered transverses.

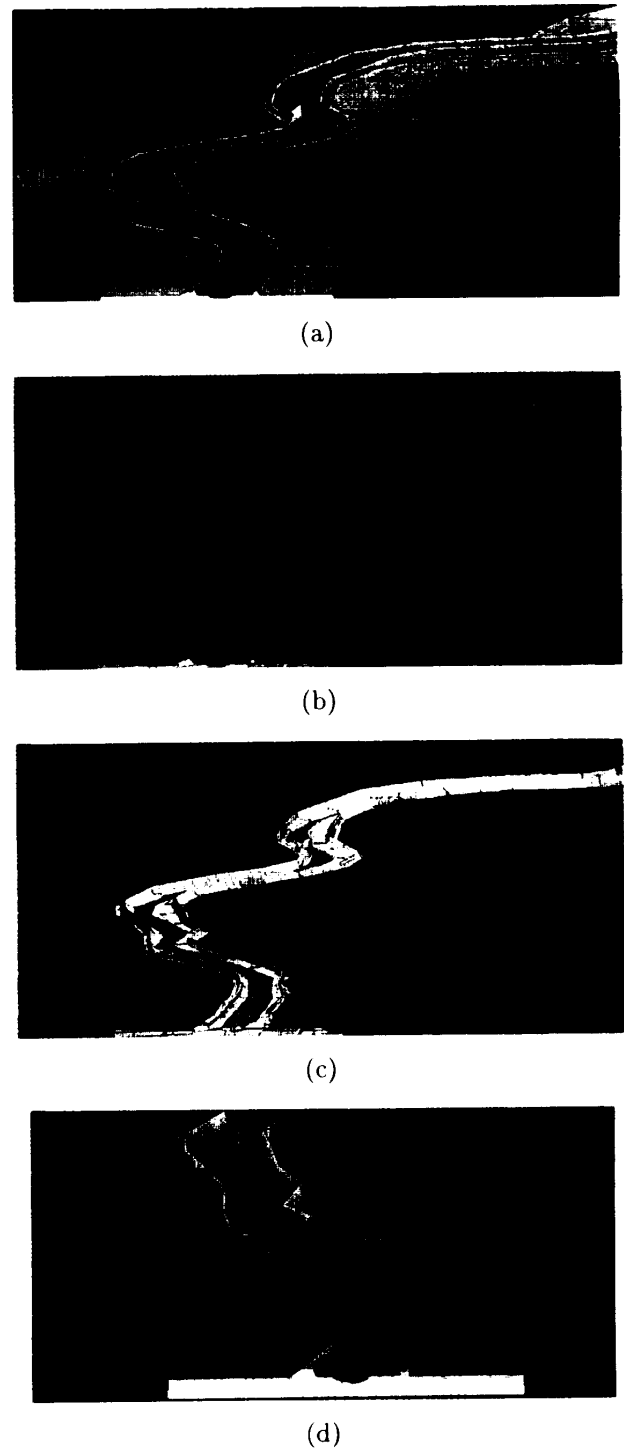


図 14 CGによる河川の表現サンプル。(a) 江戸川、(b) 河水と地図、(c) 河川と地図の合成、(d) 流線と重ねて描画結果
 Fig. 14 The rendering samples of a river. (a) Edo river rendered by algorithm 1, (b) Edo river rendered by wire only, (c) Edo river and registered with a map, (d) Edo river with flow lines.

本論文で測量データに基づいて、提案した河川の三次元モデリングとレンダリングの手法は、景観シミュレーションに利用できる。河川横断面内部と横断面間の地形補間アルゴリズムをリアルタイムで実現した。

河川地形の描画アルゴリズム 1 では、河川地形の凹凸が激しい場合、誤差が大きくなるが、実用上では問題ない程度である。江戸川の実験データにより、目立って不都合な箇所はなかった。

1つの河川に対して年度ごとモデルが形成される。同一河川の過去の測量データと現在の測量データを比べることにより、河川の変化を検出することが可能である。

本論文で実現した補間、描画アルゴリズムを用いることにより、河川の測量データもとにしてその河川をCG表現できる。

河川の水位を調節することにより、防災対策における河川氾濫予測にも使える。

また、本システムでは、三次元グローバル座標系と実際の測量データを使用するため、河川周囲のシーンと他の河川情報（映像、図面、地図、ベクトル情報）との重ね合わせが容易に行え、その有用性についても、河川情報検索システムの応用で確かめた。

今後の課題としては、CGによる描画への利用を考慮した河川の測量方法の検討、河水の波、渦、流れのモデリングやレンダリングの手法の開発があげられる。また、地形データの補間はBスプライン補間で、地形データの表現を三角形ポリゴンに代えて曲線、曲面で描画することも今後の課題である。

参考文献

- 1) 木元広次, 大野義夫: 拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示, 信学論, Vol.J75-D2, No.4, pp.706-713 (1992).
- 2) 東海彰吾, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 爬虫類皮革の質感表現の一手法, 情報処理, Vol.35, No.5, pp.801-809 (1994).
- 3) Sarraf, S., Kahawita, R. and Nassir, E.: 3-D General Movable Mesh In Water Circulation Modeling, *Journal of Computers in Civil Engineering, ASCE*, Vol.2, No.2 (1988).
- 4) Shimiz, Y., Yamaguchi, H., Itakura, T.: 3D Computation of Flow and Bed Deformation, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.116, No.9, pp.1090-1108 (1990).
- 5) 高山茂美: 河川地形, 共立出版株式会社 (1974).
- 6) 日野幹雄: 水理学, 丸善株式会社 (1991).

- 7) 三中西信治, 横山健一郎, 村岡一信, 千葉則茂: 粒子の行動モデルによる水流のビジュアルシミュレーション, *NICOGRAPH 論文集*, pp.44-54 (1993).
- 8) 中前栄八郎, 西田友是, 金田和文, 多田村克己: 散乱光モデルを用いたホトリアリスティックな画像生成, *電信論*, Vol.J76D-2, No.8, pp.1515-1527 (1993).

(平成7年8月3日受付)

(平成7年12月8日採録)



吉 鴻實 (学生会員)

昭和33年生。昭和57年中国西安公路学院計算機学部卒。平成60年中国成都電子科技大学大学院コンピュータ専攻修士課程修了。同年中国西安電子科技大学計算機学部助手。昭和62年同大講師。現在、北海道大学工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程在学中。河川情報管理システム、コンピュータグラフィックス、コンピュータネットワークに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



劉 真

昭和33年生。昭和57年中国西安電子科技大学計算機学部卒。平成7年北海道大学工学研究科情報工学専攻修士課程修了。現在、北海道大学工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程在学中。地理情報システム、コンピュータグラフィックス、デジタルマッピングに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



青木 由直 (正会員)

昭和39年北大・工・電子卒。昭和41年同大学院修士課程修了。同年同大講師。昭和42年同大助教授。昭和54年同大電気工学科教授。昭和62年同大情報工学科教授。平成7年同大電子情報工学専攻情報メディア工学講座教授。長波長ホログラフィ、信号処理、計算機画像処理、雪中レーダ、CG応用、知的通信の研究に従事。工博。米沢賞(昭43)。主な著書として「不可視情報の画像化」(分担・昭晃堂)、「BASIC 数字計算法」(コロナ社)、「波動信号処理」(森北出版)。電子情報通信学会、IEEE各会員。