

機関番号：32629

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20700098

研究課題名（和文） Delaunay 分割に基づいた陰関数曲面の生成

研究課題名（英文） Generation of an Implicit Surface Based on the Delaunay Tetrahedralization

研究代表者

伊東 拓 (TAKU ITOH)

成蹊大学・理工学部・助教

研究者番号：80433853

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、Delaunay 分割によって高速に 3 次元物体を再構成すると共に、再構成された曲面に陰関数の性質を付加することで、高速な可視化が可能な陰関数を生成することである。研究成果としては、まず、Delaunay 分割結果に現れうる不要な面の大部分を削除する方法を開発した。この方法では、簡易的に生成した陰関数を使用することで、不要な面かどうかを判断している。また、前述の簡易的に生成した陰関数を利用し、「可視化のための処理」と「陰関数生成」を完全に分離することで、Delaunay 分割結果に陰関数の性質を付加した。さらに、本研究において重要な法線情報を持っていない節点データもあることから、節点座標のみから法線を推定する方法を開発した。推定された法線を用いることで、入力節点が法線情報を持たなくても、入力データが元々形作っていた表面に近い Delaunay 分割結果を得られる例も、実験的に確認した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is generation of an implicit function that can be fast visualized. To this end, the implicit surface is replaced by a reconstructed result generated by the Delaunay tetrahedralization. In addition, the characteristics of conventional implicit functions are appended to the reconstructed result. Study results of this program are as follows: first, a method for erasing redundant surfaces of a reconstructed result generated by the Delaunay tetrahedralization has been developed. In this method, the redundant surfaces are recognized by using a simplified generated implicit function. In addition, by using the simplified generated implicit function, procedures of visualization and those of generating an implicit function are completely separated, and the characteristics of conventional implicit functions are appended to the result generated by the Delaunay tetrahedralization. Moreover, in order to obtain a reconstructed result from the point data without normals, a method for estimation of point normals has been developed. Experiments illustrate that, by using the estimated point normals, some expected results generated by the Delaunay tetrahedralization are obtained from the point data without normals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：Delaunay 分割，陰関数曲面，3 次元形状再構成，可視化，CG，法線推定

## 1. 研究開始当初の背景

3次元領域において、 $n$ 個の重複のない節点群 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ が与えられたとする。これらの節点群はある3次元物体の表面上の点群であり、本研究ではこれらの点群から3次元物体を再構成する問題を考える。節点群 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ に加えて法線 $\{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ がそれぞれ与えられたとき、陰関数曲面による3次元物体の再構成が可能となる。3次元物体を表現する際に、ポリゴンを用いた方法をしばしば目にするが、陰関数曲面はポリゴンとの親和性も高く、近年注目されている3次元物体の表現法である。

陰関数曲面を用いて3次元物体を可視化するまでには、大きく分けて2つのステップがある。第1ステップにおいては、与えられた節点上で0になるような滑らかな陰関数 $f(\mathbf{p})$ を決定する。ただし、 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ である。陰関数 $f(\mathbf{p})$ を決定する代表的な方法としては、Ohtakeらによって提案されたMPU (Multi-level Partition of Unity implicits) 法やToborらによって提案されたRBF (Radial Basis Functions) とPU (Partition of Unity) を用いた方法などが挙げられる。

第2ステップにおいては、陰関数曲面によって3次元物体を可視化するために、陰関数 $f(\mathbf{p})$ の零等値面 $f(\mathbf{p})=0$ を探す。零等値面を探す際にしばしば用いられるのがBloomenthalのポリゴナイザーである。Bloomenthalのポリゴナイザーを使うことによって、零等値面をポリゴンデータのセットとして獲得できる。

これまでの国内外における陰関数曲面に関する研究のほとんどは、第1ステップに関するものであった。したがって、MPU法などを筆頭に、陰関数 $f(\mathbf{p})$ を高速に生成する方法は提案されてきている。しかしながら、第1ステップと比較して第2ステップのCPU時間は大きくなるのがほとんどであり、「3次元物体を再構成して可視化する」という一連のプロセスを考えたとき、陰関数曲面による再構成法は高速な方法とはいえない。第2ステップのCPU時間が大きくなるのは、陰関数の性質に起因している。すなわち、陰関数曲面によって可視化する際に必要となる零等値面 $f(\mathbf{p})=0$ が陽に表現されないがために、零等値面の探索というプロセスが必要になり、そのプロセスがボトルネックになっているのである。

一方、3次元物体を再構成する方法として、Delaunay分割がある。Delaunay分割は節点群のみから再構成が可能であるが、単純にDelaunay分割をした場合、凹になっている箇所には不要な面が張られ、結果は凸多面体となる。一方、陰関数生成と同様の条件、すなわち、節点群に加えて法線も与えられていると

き、山下らの方法を用いることによって、簡単に不要な面を削除することが可能となる。山下らの方法では、法線ベクトルによって追加される補助点と元々与えられている節点群の情報を用いることによって、不要な面のみを抽出可能なためである。

Delaunay分割では曲面を陽に表現できるため、陰関数曲面による可視化と比較して高速である。また、再構成された曲面は与えられた節点を必ず通るため、陰関数曲面と比較して節点上の曲面の精度においても問題はない。

上述の通り、曲面生成だけを考えてとき、Delaunay分割は高速に可視化までのプロセスを完了することが出来る。したがって、Delaunay分割によって生成された曲面を陰関数曲面による可視化における関数の零等値面と考え、この曲面に陰関数の性質を付加していくことが出来れば、高速な可視化が出来る陰関数曲面を生成できる可能性があるのである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、Delaunay分割によって高速に3次元物体を再構成すると共に、再構成された曲面に陰関数の性質を付加することで、高速な可視化が可能な陰関数を生成することである。具体的には、下記の陰関数の5つの性質(利点)を付加することを目標とする。

- 1) 物体表面上だけでなく、曲面から外れた箇所においても関数値をもつ。
- 2) 3次元物体の内部と外部の判定が容易であるため、衝突判定に適する。
- 3) 物体同士の集合演算によるCSG (Constructive Solid Geometry) を簡潔に実現できる。
- 4) 2つの曲面を補間する曲面を生成することで、モーフィングが用意に実現できる。
- 5) 欠損データがある程度復元可能である。

また、本研究で扱うDelaunay分割および陰関数曲面による3次元物体の再構成には、前提条件として節点群に加えて法線ベクトルの情報が必要不可欠であるが、法線ベクトルが与えられなかったとしても、節点群から法線を推定することで対応できるようにすることも目的の1つである。

## 3. 研究の方法

### (1) Delaunay分割結果の修正

本研究では、Delaunay分割結果を陰関数曲面の零等値面の代わりに使用する。しかしながら、Delaunay分割結果に不要な面が発生す

る場合がある。例えば、図 1(a)に示した法線付き節点群に対して、Delaunay 分割を適用した場合、図 1(b)に示したような不要な面を含む結果が得られる。

不要な面を削除するために、本研究では、計算コストを抑えて生成された陰関数を利用する。具体的には、まず、法線情報を利用して、複雑に物体表面が変化している部分の節点を主として抽出し、同節点を用いて従来の方法によって陰関数を生成する。その後、Delaunay 分割によって生成される各三角形の重心において関数値を計算する。ただし、同方法において生成される陰関数の精度は高くないため、重心において計算されるそのままの関数値ではなく、補正した値を使用する。陰関数は物体表面において関数値が 0 になるように生成されるため、補正された値が微少でないとき、不要な面であると判断する。

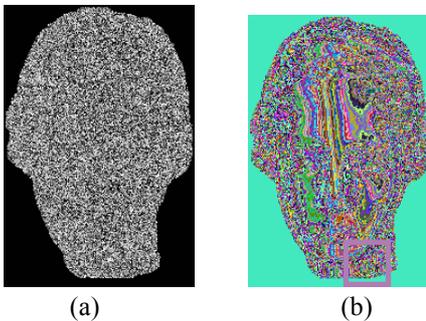


図 1. Delaunay 分割結果に不要な面が表れる例。(a) 法線付きの入力節点データ (Igea Artifact, Cyberware), (b) Delaunay 分割結果。不要な面を赤い四角で囲んでいる。

## (2) Delaunay 分割によって再構成された曲面への陰関数の性質付加

研究開始当初の計画とは多少異なるが、「高速な可視化が可能な陰関数」を生成するために、「可視化のための処理」と「陰関数生成」を完全に分離することで、Delaunay 分割結果に陰関数の性質を付加する方法を採用する。まず、陰関数  $f(\mathbf{p})$  を可視化する際に、通常は  $f(\mathbf{p}) = 0$  を探索して零等値面を描くが、 $f(\mathbf{p}) = 0$  の探索は計算量が大きいので、 $f(\mathbf{p}) = 0$  の代わりに「Delaunay 分割によって得られた曲面」を用いることは、研究開始当初の計画通りである。一方、陰関数の性質を付加する際には、「(1) Delaunay 分割結果の修正」の過程で生成した陰関数を利用する。

## (3) 節点座標のみが与えられたときの法線推定と 3 次元物体の表面推定

研究開始当初の計画とは異なるが、次のような方法を採用する。まず、ある程度の精度の陰関数  $f_1(\mathbf{p})$  を法線なしの離散点群から生成する。陰関数  $f_1(\mathbf{p})$  を生成するには、 $m$  個の

補助節点  $\mathbf{p}_i$  を付加し、 $\mathbf{p}_i$  における陰関数の値  $h_i$  を適切に定める必要がある。まず、 $\mathbf{p}_i$  は「節点群が元々形作っていたと予想される表面 (オリジナル表面)」の明らかに外部と分かる位置に付加する。明らかに外部の位置は、法線無し節点群に対する Delaunay 分割の結果から知ることが出来る。また、 $h_i$  は、現在注目している補助節点  $\mathbf{p}_i$  の近傍に位置する幾つかの節点を探し出し、補助節点  $\mathbf{p}_i$  と近傍節点とのそれぞれの距離の重み付き平均として決定される。重みとしては、MPU 法などで用いられている Partition of Unity を使用する。陰関数  $f_1(\mathbf{p})$  が生成されれば、与えられた各節点において  $\text{grad } f_1$  を計算することで、法線を得ることができる。

獲得した法線を用いれば、補助点を付加して Delaunay 分割が可能となる。しかしながら、 $\text{grad } f_1$  によって獲得した法線の精度がいいとは限らないため、分割結果に不要な三角形が現れる場合がある。不要な三角形は大きい傾向があるため、ある程度大きい三角形を分割結果から削除する。このとき、不要でない三角形も一緒に削除されるが、後に修正されるので問題ない。残った三角形の面上の法線  $\mathbf{n}^s$  は外積で計算可能であり、節点  $\mathbf{p}_i$  における法線は、 $\mathbf{p}_i$  を取り囲む三角形の面上の法線を平均化した結果として推定出来る。ただし、幾つかの節点周りに三角形が存在しないこともあるため、全ての節点において法線を推定出来るわけではない。

部分的に獲得した法線を利用すれば、陰関数  $f_2(\mathbf{p})$  を生成可能である。さらに、 $\text{grad } f_2$  によって法線を全ての節点において推定可能であり、この法線を利用して再度 Delaunay 分割することが可能である。 $\text{grad } f_2$  によって推定された法線は、 $\text{grad } f_1$  によって推定される法線よりも精度が向上していると予想される。また、精度向上した法線を使っているため、推定された表面も、オリジナル表面に近いと予想される。

## 4. 研究成果

### (1) Delaunay 分割結果の修正について

Delaunay 分割のプログラムに、計算コストを抑えて生成された陰関数によって不要な面を削除する方法を実装した。実験例として、同法を実装する前の結果を図 2(a)に、実装した後の結果を図 2(b)にそれぞれ示す。両結果より、本方法を用いることで、再構成結果に不要な面が残っても、その大部分を削除出来る例が確認できた。したがって、本方法を実装することで、Delaunay 分割のプログラムの頑健性が高まったといえる。

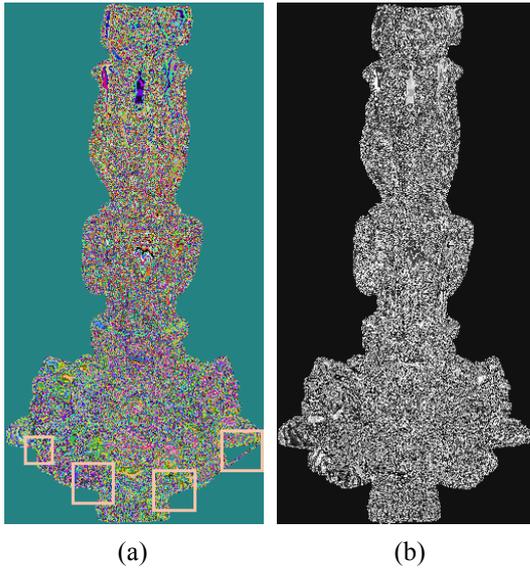


図 2. Thai Statue (Stanford 3D Scanning Repository, XYZ RGB Inc.) を入力データとしたときの Delaunay 分割結果. (a) 提案法実装前の結果. 不要な面を赤い四角で囲んでいる. (b) 提案法実装後の結果.

(2) Delaunay 分割によって再構成された曲面への陰関数の性質付加について

Delaunay 分割結果に陰関数の性質を付加するために、「(1) Delaunay 分割結果の修正」の過程で生成した陰関数を利用した. この場合, 入力節点数よりもはるかに少ない節点から陰関数を生成するため, 高速な陰関数生成が可能である. また, 簡易的ではあるものの陰関数  $f(p)$  を従来通り生成するため, 通常陰関数が持つべき性質は備えているのである.

(3) 節点座標のみが与えられたときの法線推定と 3 次元物体の表面推定について

入力節点として, 図 3(a)を与えたときの物体表面の推定過程を図 3(b)~(g)に示す. 図 3(b)は, 図 3(a)に対して Delaunay 分割をした結果である. 分割結果は凸多面体になり, 凸多面体の外部は入力節点の外部であるため, 適切に補助節点を配置可能である. 図 3(c)は陰関数  $f_1(p)$  の零等値面  $f_1(p) = 0$  である. ただし, ここでは零等値面を示したが, 実際には  $f_1(p) = 0$  を探索する必要はない. 図 3(d)は,  $\text{grad } f_1$  で獲得した法線を利用して補助点を付加し, Delaunay 分割した結果である. 図 3(d)より, 分割結果には不要な面が発生していることが分かる. 不要な面を削除するために, 図 3(d)の結果を構成する三角形のうち, 比較的大きい三角形を削除したのが図 3(e)である. 図 3(e)では, 不要な面と共に, 不要でない面も削除されている. 図 3(e)の結果を利用することで幾つかの節点において法線を推定可能であり, 陰関数  $f_2(p)$  を生成出来る. 図 3(f)

は, 零等値面  $f_2(p) = 0$  である. 視覚的に図 3(c)と図 3(f)を比較すると, 図 3(f)のほうが入力節点から予測されるオリジナル表面により近いといえる. 比較のために図 3(f)に零等値面を示したが, 実際には  $f_2(p) = 0$  を探索する必要はない.  $\text{grad } f_2$  で全ての節点で法線を獲得後に再度補助点を付加し, Delaunay 分割した結果が図 3(g)である. 図 3(g)より, 視覚的には, 入力節点から予測されるオリジナル表面に近い結果が得られている. したがって, 図 3(g)を得るために使用した法線も高精度であるといえる.

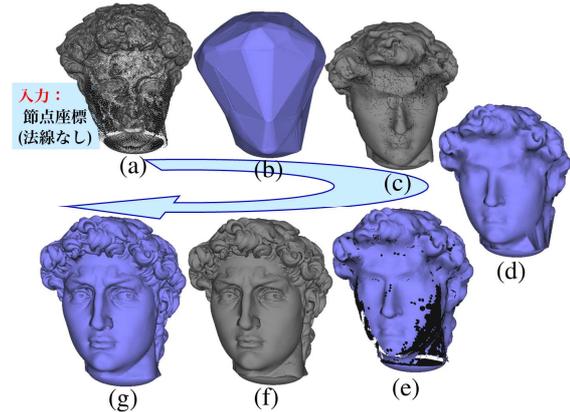


図 3. 法線無しの節点データから表面推定をするまでの流れ. (a) 入力節点群 (Head of David, Stanford 3D Scanning Repository). (b) Delaunay 分割結果. (c) 陰関数  $f_1(p)$  の零等値面  $f_1(p) = 0$ . (d)  $\text{grad } f_1$  で獲得した法線を利用して補助点を付加し, Delaunay 分割した結果. (e) (d)からある程度大きい三角形を削除した結果. (f) 陰関数  $f_2(p)$  の零等値面  $f_2(p) = 0$ . (g) 最終的な表面推定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- [1] T. Itoh, "A Method of Boundary Estimation from 3D Scattered Point Data without Normals by Implicit Function and Delaunay Tetrahedralization," Journal of Visualization (in press), 査読有.
- [2] T. Itoh, A. Saitoh, A. Kamitani, and H. Nakamura, "Efficient Evaluation of Influence Coefficients in Three-Dimensional Extended Boundary-Node Method for Potential Problems," Plasma and Fusion Research (in press), 査読有.
- [3] A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, and H. Nakamura, "New Implementation Method for Essential Boundary Condition to Extended Element-Free Galerkin Method: Application

- to Nonlinear Problem," Plasma and Fusion Research (in press), 査読有.
- [4] A. Kamitani, T. Takayama, T. Itoh, and H. Nakamura, "Extension of Meshless Galerkin/Petrov-Galerkin Approach without Using Lagrange Multipliers," Plasma and Fusion Research (in press), 査読有.
- [5] S. Ikuno, N. Fujita, Y. Kawaguchi, T. Itoh, S. Nakata and H. Nakamura, "High Performance Iterative Solver for Linear System using Multi GPU," Plasma and Fusion Research (in press), 査読有.
- [6] A. Saitoh, N. Matsui, T. Itoh, and A. Kamitani, "Development of 2-D Meshless Approaches without Using Integration Cells," Trans. on Magn., Vol. 47, No. 5, pp. 1222—1225 (2011), 査読有.
- [7] T. Itoh, A. Saitoh, A. Kamitani, and H. Nakamura, "Three Dimensional Extended Boundary Node Method to Potential Problem," Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S2111 (2010), 査読有.
- [8] A. Saitoh, T. Itoh, A. Kamitani, N. Matsui, and H. Nakamura, "Application of Two Dimensional Extended Boundary Node Method to Potential Problem," Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S2108 (2010), 査読有.

[学会発表] (計 23 件)

- [1] 生野壮一郎, 伊東拓, 高山彰優, 神谷淳, "EFG 法を用いた超伝導内遮蔽電流密度シミュレーション," 第 19 回 MAGDA コンファレンス, 2010 年 11 月 23 日, 札幌.
- [2] 神谷淳, 高山彰優, 伊東拓, 生野壮一郎, "構成方程式修正法による高温超伝導体内遮蔽電流密度解析," 第 19 回 MAGDA コンファレンス, 2010 年 11 月 23 日, 札幌.
- [3] 生野壮一郎, 藤田典久, 伊東拓, 仲田晋, "可変の前処理付き反復法の GPU による高速化とその Web アプリケーション," 静止器 回転機 合同研究会, 2010 年 9 月 28 日, 鹿児島.
- [4] A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, and A. Kamitani, "New Method for Implementing Essential Boundary Condition to Element-Free Galerkin Method," In AIP Conference Proceedings 1281, Vol. 3, pp. 2053—2056, 21 Sep. 2010, Rhodes.
- [5] S. Ikuno, N. Fujita, T. Itoh, "Web Application for Evaluating Performance of Linear System Solver Using GPU," In AIP Conference Proceedings 1281, Vol. 1, pp. 675—678, 20 Sep. 2010, Rhodes.
- [6] T. Itoh, A. Saitoh, and A. Kamitani, "Generation of a Smooth Implicit Function Distributed over the Entire Domain from Large Scattered Point Data," In AIP Conference Proceedings 1281, Vol. 3, pp. 2188—2191, 19 Sep. 2010, Rhodes.
- [7] 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳, 中村浩章, "領域型メッシュレス法の拡張—基本境界条件の新たな組み込み方法—," 第 4 回シミュレーション科学シンポジウム, 2010 年 9 月 14 日, 土岐.
- [8] 伊東拓, 齋藤歩, 神谷淳, 中村浩章, "3次元拡張境界節点法のための全領域で定義される陰関数生成," 第 4 回シミュレーション科学シンポジウム, 2010 年 9 月 14 日, 土岐.
- [9] 生野壮一郎, 藤田典久, 川口優樹, 伊東拓, 仲田晋, "RBF 法から得られる連立 1 次方程式の反復法の数値的評価," 第 4 回シミュレーション科学シンポジウム, 2010 年 9 月 14 日, 土岐.
- [10] 柳沢洋平, 伊東拓, 神田芳文, "エレメントフリー Galerkin 法による GPU における高速化," 2010 年度年会, 2010 年 9 月 7 日, 東京.
- [11] 伊東拓, 齋藤歩, 神谷淳, "3次元拡張境界節点法における影響係数評価の高速化," 日本応用数理学会 2010 年度年会, 2010 年 9 月 6 日, 東京.
- [12] 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳, "2次元境界型及び領域型拡張メッシュレス法の開発," 日本応用数理学会 2010 年度年会, 2010 年 9 月 6 日, 東京.
- [13] 伊東拓, 齋藤歩, 神谷淳, "3次元拡張境界節点法のための MRBF 法をベースとした陰関数生成," 第 29 回日本シミュレーション学会大会, 2010 年 6 月 20 日, 米沢.
- [14] 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳, "積分セルを用いない領域型及び境界型メッシュレス法の開発," 第 29 回日本シミュレーション学会大会, 2010 年 6 月 19 日, 米沢.
- [15] T. Itoh, A. Saitoh, and A. Kamitani, "Development of Three-Dimensional Extended Boundary-Node Method for Potential Problem," In IEEE CEFC 2010 proceedings (CD-ROM), Paper ID: 1497, 11 May 2010, Chicago.
- [16] T. Itoh, "Surface Reconstruction with an Interactive Modification of Point Normals," In Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6026, pp. 263—274, 6 May 2010, Buffalo.
- [17] 伊東拓, 齋藤歩, 神谷淳, "3次元拡張境界節点法の開発," 日本応用数理学会 2009 年度年会, 2009 年 9 月 30 日, 大阪.
- [18] 齋藤歩, 伊東拓, 神谷淳, "2次元拡張境

界節点法の開発，”日本応用数学会  
2009年度年会，2009年9月30日，大阪。

- [19] A. Saitoh, T. Itoh, and A. Kamitani, “Development of Dual-Reciprocal Extended Boundary-Node Method,” In AIP Conference Proceedings 1168, Vol. 1, pp. 350—353, 22 Sep. 2009, Crete.
- [20] T. Itoh, “A Method of Normal Estimation from Node Coordinates by an Implicit Function with Appropriate Constraints,” In AIP Conference Proceedings 1168, Vol. 1, pp. 482—485, 18 Sep. 2009, Crete.
- [21] 伊東拓，“陰関数を用いた Delaunay メッシュクリーニングの高速化，”電子情報通信学会 2009 年総合大会，2009 年 3 月 19 日，松山。
- [22] T. Itoh, and, Y. Kanda, “Surface Reconstruction from 3D Scattered Points with Normals Using Both Delaunay Tetrahedralization and Implicit Function,” In Asia Simulation Conference 2008 proceedings, pp. 950—955, 11 Oct. 2008, Beijing.
- [23] 伊東拓，神田芳文，“Delaunay 分割と MPU 法による法線情報付き 3 次元離散点データからの形状再構成，”第 27 回日本シミュレーション学会大会，2008 年 6 月 20 日，草津。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊東 拓 (TAKU ITOH)  
成蹊大学・理工学部・助教  
研究者番号：80433853