

## 陰関数曲面のブーリアンモデリングとモーフィング

1E-04

柴田章博<sup>a)</sup> 田中覚<sup>b)</sup> 山本弘明<sup>b)</sup> 萬崎統仁<sup>b)</sup>  
a) 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター  
b) 福井大学 工学部 情報・メディア工学科

## Abstract

陰関数曲面は 3 次元コンピュータグラフィックスにおいて有効な方法であり、様々なモデリングやレンダリングの手法が提案されている。陰関数曲面は、図形の表面を正確でコンパクトに表現することができるが、モデリングは直感的でないという困難がある。本講演では、ブール代数によるモデリング法の拡張とモーフィングのアルゴリズムを提案する。

## 1 はじめに

計算機の発展とともに、コンピュータグラフィックス (CG) の研究は急速な技術進歩を遂げている。研究の領域を 2 次元から 3 次元へと広げ様々なアルゴリズムが開発されている。その中でも、陰関数曲面は CG の研究対象として大変興味深いものとなってきている。ポリウムや表面をポリゴンなどの基本図形によるメッシュを用いた近似によるモデリングは、ハードウェアを用いた高速レンダリングや記憶領域の節約など利点が多く、3 次元 CG において多用されてきた。他方、陰関数曲面は位相幾何などの数学的な対象であり、ポリゴンに基づく図形の表現に比べて、複雑形状の図形を正確かつ簡潔に表現することができる。

我々は、近年、「確率過程サンプリング法 (Stochastic Sampling Method; SSM)」に基づく、粒子レンダリングの方法を開発し、CG や複雑形状理解の応用研究を進めている [1][2][3][10][11]。確率過程サンプリング法は、ブラウン運動する仮想粒子 (パーティクル) の陰関数曲面上の軌跡を集めることで、高速かつ一般的な陰関数曲面上の点のサンプリングと各サンプル点における陰関数曲面の法線ベクトルを求めることができる。パーティクルは図形の最小構成単位であり、近似のない図形表面の代表点をあたえるため、形状理解や現象の可視化による理解に有用である。

本講演では、陰関数曲面および SSM に基づく粒子サンプリングの利点を生かすようなモデリングの

研究について報告を行う。与えられた陰関数から形状を想像することは容易ではないが、さらに要求する形状の陰関数を得ることはより困難となるが多い。これまでも、陰関数のモデリングには、メタボール、NURBS、CGS など [6][7][8] による陰関数曲面のモデリングやさまざまな拡張が行われてきた。また、形状変形 (metamorphosis) の提案も行われている。先に提案した陰関数と関連付けたブール代数による図形合成法 [3][11] を発展させ、複雑形状の図形の連続変形 (モーフィング) の手法を提案する。最初に、集合の点と陰関数との対応付けを行い、連続パラメータによる解析的で滑らかなブール代数演算を用いた合成法と図形表面の制御を導入する。また、ファジイ集合による陰関数の対応付けと図形合成法を導入にする。ブール代数に基づく連続変形は、集合表現された図形の各点に対して演算が作用を及ぼすため、演算ごとに局所的に作用させることができる点が特徴である。さらに、連続パラメータで定義されたブール代数を応用し、レベルセット関数の連続変形によるモーフィングを導入し、例を提示する。

## 2 図形の集合による表現

パーティクル (点粒子) は、CG における最小構成要素であり、図形を正確に表現する。図形を点の集合として取り扱うこととし粒子に基づくレンダリングを行うのは自然である。図形 (集合) の点を取り出して、スクリーンに投影すれば、物体を影絵としての可視化を行うことができる。位置情報だけでは、トポロジーの情報が欠落してしまうが、位置とともに図形表面での光線の反射面の法線ベクトルと視線ベクトル (カメラベクトル) が与えられれば、反射光の強度を計算し陰影のある立体的な図形として可視化できる。即ち、図形表面の点の位置  $q$  とその点での光線の反射面の法線ベクトル  $n = n(q)$  の対の集合  $A = \{(q, n); q, n \in R^N\}$  が、可視化に必要な最小限の情報であり、色などの属性を付加すれば、陰影やテクスチャー伴った図形を計算によって再構成す

ることができる。実際、SSMは陰関数曲面を与える数式から、陰関数表面上の点と接平面の法線ベクトルの対集合を一様にサンプルするアルゴリズムを与える。点で空間を埋め尽くすには膨大な情報量が必要となるが、計算機の処理能力の向上によって、粒子レンダリングも十分実用的なものとなると思われる。また、このようなアイデアに基づくCGの研究が行われている [4][5]。

### 2.1 陰関数による図形の定義

図形の可視化に必要な情報(集合A)と陰関数を対応付ける。ここでは、図形をN次元ユークリッド空間におけるものにまで広げて考える。また、ここではテクスチャーは考えない。領域  $\Omega \subset R^N$  で定義された連続な関数  $f(q)$  の地域と閾値  $\alpha$  を用いて、次のように図形  $F_\alpha \subset \Omega$  の内部、境界、外部に対応付ける<sup>1</sup>。

$$\begin{aligned} f(q) < \alpha & \quad q \in \overset{\circ}{A} \\ f(q) = \alpha & \quad q \in \partial A \\ f(q) > \alpha & \quad q \in \Omega \setminus \bar{A} \end{aligned} \tag{1}$$

このことを集合の記号を用いて次のように書く。

**Definition 1** 領域  $\Omega \subset R^N$  で定義された連続写像  $f: \Omega \rightarrow R$  に対し、図形(境界及び内部)を次のように集合で表す。

$$F_\alpha = \{q \in \Omega; f(q) \leq \alpha, \nabla f(q) \neq 0, \alpha \in I, \Omega \subset R^N\} \tag{2}$$

また、集合  $F_\alpha$  の陰関数曲面および、接平面の法線ベクトルの対集合を次のように定義する。

$$SF_\alpha = \{(q, \nabla f(q)); q \in \partial F_\alpha\} \tag{3}$$

図形表面における光の反射面は、図形  $F_\alpha$  の境界  $q_0 \in \partial F$  における接平面  $\nabla f(q_0)^t (q - q_0) = 0$  の法線ベクトル  $\nabla f(q) = \left( \frac{\partial f}{\partial q_1}(q), \frac{\partial f}{\partial q_2}(q), \dots, \frac{\partial f}{\partial q_N}(q) \right)$  で与えられる。

式(2)を用いて、図形集合のブール代数と陰関数との対応を求めることができる。図形  $F = \{q \in \Omega; f(q) \leq 0\}$ ,  $G = \{q \in \Omega; g(q) \leq 0\}$  に対し、和集合、共通集合の陰関数に表現は次のように書く

ことができる。

$$\begin{aligned} H_{F \cap G} &= F \cap G \\ &= \{h_{F \cap G}(q) = \max(f(q), g(q)) \leq 0\} \tag{4} \\ H_{F \cup G} &= F \cup G \\ &= \{h_{F \cup G}(q) = \min(f(q), g(q)) \leq 0\} \tag{5} \end{aligned}$$

しかし、合成された陰関数曲面は、つなぎ目の領域  $\{q \in \Omega; f(q) = g(q)\}$  において、 $\min(), \max()$  が微分不能となってしまうため、微分不能な領域での勾配を2つの関数の勾配の平均で再定義し、自然な陰関数曲面を導入する。<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} SH_{F \cap G} &= \{(q, \nabla f(q)); q \in \Omega, h_{F \cap G}(q) = 0\}, \tag{6} \\ SH_{F \cup G} &= \{(q, \nabla f(q)); q \in \Omega, h_{F \cup G}(q) = 0\}, \tag{7} \\ \nabla h_*(q) &= (\nabla f + \nabla g) / 2 \text{ for } f(q) = g(q) \tag{8} \end{aligned}$$

### 2.2 ブール代数の解析関数への拡張

図形の点集合と陰関数を対応付けて図形の合成を導入した。しかし、この合成された図形は、 $\min(), \max()$  による陰関数で定義されるため、式(6) - (8)に示されるように、滑らかな曲面とはならなかった。CGのモデリングでは、さまざまな滑らかさをもつ曲面を自由に合成することが要求される。[3][11]では、式(4)(5)のチェビシェフ多項式による関数フィット法や解析的に滑らかなブール代数によって、CGSなど[6][8]に代わるブール代数による滑らかな陰関数曲面の合成法を提案した。図形の連続変形にかかわる解析的に滑らかなブール代数について、その定義や性質を以下にまとめる。

解析的に滑らかなブール代数は、次のように平滑化した階段関数を用いて定義する。

$$\begin{aligned} F \overset{\lambda}{*} G &:= \left\{ q \in \Omega; \max_{\lambda}(f(q), g(q)) \leq 0 \right\}, \\ F \overset{\lambda}{+} G &:= \left\{ q \in \Omega; \min_{\lambda}(f(q), g(q)) \leq 0 \right\} \end{aligned}$$

ここで、 $\min_{\lambda}(), \max_{\lambda}()$  は、シグモイド関数  $\theta_{\lambda}(t) :=$

<sup>1</sup>集合Aの全体集合Xに対する補集合を  $X \setminus A$  と表す。集合Aの閉包を  $\bar{A}$  で表す。集合Aの内点全体を  $\overset{\circ}{A}$  と表す。集合Aの境界を  $\partial A$  と表記する。  $\partial A := \bar{A} \setminus \overset{\circ}{A}$

<sup>2</sup>この定義は、後に定義する解析的な滑らかなブール代数による合成による曲面の与える法線ベクトルと一致する。

$\frac{1}{1+\exp(-\lambda t)}$ , ( $\lambda > 0$ ) により平滑化された関数である。

$$\begin{aligned} \min_{\lambda}(x, y) &= x\theta_{\lambda}(y-x) + y\theta_{\lambda}(x-y) \\ &= \min(x, y) + m_{\lambda}(x, y), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \max_{\lambda}(x, y) &= x\theta_{\lambda}(x-y) + y\theta_{\lambda}(y-x) \\ &= \max(x, y) - m_{\lambda}(x, y), \end{aligned} \quad (10)$$

$$m_{\lambda}(x, y) = \|x - y\| \sum_{n=1}^{\infty} (-)^{n-1} e^{-n\lambda\|x-y\|} \quad (11)$$

$m_{\lambda}(x, y) > 0$  であり、 $0 < \lambda_1 < \lambda_2$  に対して次の包含関係を満たしていることが示される。

$$F \overset{\lambda_1}{*} G \supseteq F \overset{\lambda_2}{*} G \supseteq F \cap G \quad (12)$$

$$F \overset{\lambda_1}{+} G \subseteq F \overset{\lambda_2}{+} G \subseteq F \cup G \quad (13)$$

共通集合に対しては、 $\lambda$  が小さくなるにつれてもとの図形を包含するように滑らかさを増し、和集合に対しては、図形を縮小するように滑らかさを増すことを示している (図 1 参照)。しかし、式 (11) の項のために、一般には結合則や分配則などが満たされない。 $m_{\lambda}(x, y)$  の級数は初項が  $e^{-n\lambda\|x-y\|}$  で始まるため、 $\|x - y\| < 1/\lambda$  において  $m_{\lambda}(x, y) \neq 0$  である領域、即ち

$$M = \left\{ q \in F \cup G - F \cap G; \|f(q) - g(q)\| < \frac{1}{\lambda} \right\} \quad (14)$$

において、結合則や分配則が満たされない。一方、領域  $M$  の外では、 $\min_{\lambda}(x, y) \simeq \min(x, y)$ 、 $\max_{\lambda}(x, y) \simeq \max(x, y)$  であり、この領域を含まないブール代数については、交換則を満たすとしてよい。

### 2.3 ファジイ集合と陰関数

もうひとつの陰関数曲面の集合表現として、ファジイ集合との陰関数との対応付けを行う。ファジイ集合は、全体集合  $\Omega \subset R^N$  の対し、各元が集合に属するグレードを表すメンバーシップ関数  $\mu \in [0, 1]$  と判定の閾値  $(\alpha, \beta)$  を用いて集合要素の包含を表す。

$$\begin{cases} \mu(q) \geq \beta & \text{集合の要素} \\ \alpha < \mu(q) < \beta & \text{どちらもいえない} \\ \mu(q) \leq \alpha & \text{集合の要素でない} \end{cases}$$

メンバーシップ関数は様々なもの考えることができるが、図形の  $F$  の内部、境界、外部となるに従ってグレードが低下するよう、 $f(q_1) < f(q_2)$  に対して  $\mu_F(q_1) > \mu_F(q_2)$  となるようにメンバーシップ関数を定義するのが自然である。

**Definition 2** 図形  $F$  に対応したファジイ集合を次のメンバーシップ関数を用いて定義する。<sup>3</sup>

$$\mathcal{F}_{F;\lambda} : = \{(q, \mu_{F;\lambda}); q \in \Omega\}$$

$$\mu_F(q) = \frac{1}{1 + \exp(\lambda f(q))}$$

また、グレード  $\theta$  ファジイ集合と図形、及び陰関数曲面とを次のように対応付ける。

$$\mathcal{F}_{F;\lambda}[\theta] = \{(q, \mu_{F;\lambda}); q \in X, \mu_F \geq \theta\}$$

$$\partial \mathcal{F}_{F;\lambda}[\theta] = \{(q, \mu_{F;\lambda}); q \in X, \mu_F = \theta\}$$

グレード表示したファジイ集合は、次のように図形の通常集合により表現される。

$$\mathcal{F}_{F;\lambda}[\theta] = F_{\frac{1}{\lambda} \ln(1/\theta-1)}$$

特に  $\mathcal{F}_{F;\lambda}[1/2] = F$  であり、 $f(q) = 0$  の境界を得ることができる。ファジイ集合の包含関係  $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$  は、メンバーシップ関数を用いて、 $\mu_F(q) \leq \mu_G(q)$  と、また  $\mathcal{F} = \mathcal{G}$  は  $\mu_F(q) = \mu_G(q)$  と表される。また、補集合は  $\mu_{\Omega \setminus F}(q) := 1 - \mu_{F;\lambda}(q)$  である。和集合や共通集合はそれぞれ、

$$\mathcal{F} \cup \mathcal{G} : \mu_{\mathcal{F} \cup \mathcal{G}}(q) := \max\{\mu_F(q), \mu_G(q)\}$$

$$\mathcal{F} \cap \mathcal{G} : \mu_{\mathcal{F} \cap \mathcal{G}}(q) := \min\{\mu_F(q), \mu_G(q)\}$$

とメンバーシップ関数を用いて定義される。 $\max\{\mu_F(q), \mu_G(q)\} = \min\{f(q), g(q)\}$ 、 $\min\{\mu_F(q), \mu_G(q)\} = \max\{f(q), g(q)\}$  が成立するので、グレードで表示されたファジイ集合と図形  $F, G$  との間には次の関係が成立する。

$$\mathcal{F}_{F;\lambda} \cap \mathcal{G}_{G;\lambda}[1/2] = F \cap G$$

$$\mathcal{F}_{F;\lambda} \cup \mathcal{G}_{G;\lambda}[1/2] = F \cup G$$

通常集合とファジイ集合の図形合成の相違は、代数積及び代数和の演算に現れる。

$$\text{代数積 } \mathcal{F} \mathcal{G} : \mu_{\mathcal{F} \mathcal{G}}(q) := \mu_F(q) \mu_G(q)$$

$$\text{代数和 } \mathcal{F} \dot{+} \mathcal{G} : \mu_{\mathcal{F} \dot{+} \mathcal{G}}(q) := \mu_F(q) + \mu_G(q) - \mu_F(q) \mu_G(q)$$

代数和や代数積で合成された図形はメンバーシップ関数の定義から明らかなように解析的で滑らかな曲面を与える。また、ブール代数の演算規則が成立する<sup>4</sup>。代数和、代数積は、和集集合、共通集合との間に次の包含関係が成立する。

$$\mathcal{F} \mathcal{G} \subset \mathcal{F} \cap \mathcal{G} \quad (15)$$

$$\mathcal{F} \dot{+} \mathcal{G} \supset \mathcal{F} \cup \mathcal{G} \quad (16)$$

<sup>3</sup>一般のファジイ集合を表す場合には、集合の記号  $\mathcal{F}_{F;\lambda}$  やメンバーシップ関数  $\mu_{F;\lambda}$  に添え字  $\lambda$  をつけないと約束する。

<sup>4</sup>ただし、相補律は一般には成立しない。 $\mathcal{F} \cup \mathcal{F}^c \neq X, \mathcal{F} \cap \mathcal{F}^c \neq \emptyset$

しかし、解析的に滑らかなブール代数の拡張、式(12),(13)とでは包含関係の向きが逆である(図2参照)。このことを利用して、目的に応じたブール代数を用いることで、陰関数曲面を自由にコントロールした図形合成を行うことができる。

### 3 図形の連続変形

これまで見てきた、連続パラメータをもつブール代数による図形の合成を拡張し、パーティクルによるレンダリングに適した図形のモーフィング、即ち、ある図形から他の図形へ連続的に変化させる手法を提案する。陰関数で定義される図形の連続的な変形は、連続パラメータの作用する空間で基本的な変換に分類して調べる。図形の各点の変換を定義するもの、陰関数の関数形を変換するもの、ブール代数の連続パラメータを用いるものの3種類に分類する。

#### 3.1 点変換 (ホモトピー)

領域  $\Omega \subset R^N$  で定義された1対1連続写像による図形  $F_\alpha$  の変換を考える。

$$U(F_\alpha) = \{q \in \Omega; y \in F_\alpha, y = U(q)\}$$

この変換によって構成される、陰関数曲面の点は、合成関数微分法則に注意すると

$$SU(F_\alpha) = \left\{ \left( q_i, \sum_j \frac{\partial f(y)}{\partial y_j} \frac{\partial U_j}{\partial q_i} \right); q \in U(F_\alpha) \right\}$$

で与えられる。すなわち、 $U$ により変換された図形は、陰関数曲面  $SF_\alpha$  の要素と関数  $U$  のみで計算される。 $U$ の簡単な例は、アフィン変換であり、文献[6]では局所化したアフィン変換をモーフィングに活用している。

$U_0(F_\alpha), U_1(F_\alpha)$  で表される二つの図形をパラメータ  $\theta \in I = [0, 1]$  を用いて連続的につなぐ変換を考えよう。もし、変換  $U_0, U_1$  を連続的につなぐ変換(ホモトピー)が存在すれば  $U_0(F_\alpha), U_1(F_\alpha)$  のモーフィングを定義できる。最も簡単なホモトピーとして

$$U_\theta = (1 - \theta)U_0 + \theta U_1 \quad (17)$$

が定義できる。二つの図形の変化の速度は、 $\theta = \theta(t)$  として時間依存を調節することができる。いま、 $\theta = 0$  の図形  $U_\theta(F_\alpha)$  が得られていれば、 $\theta = 0$  から少しづつ  $t$  を増加させ、 $U_t(q) = y$  の解を  $U_t(q) = y$  の解を初期値とするニュートン法により、 $U_t(F_\alpha)$  を再びサンプリングすることなく逐次求めることができる。

#### 3.2 陰関数の変形 (イソトピー)

前節では、陰関数を与える関数を保ったまま、図形の点に対する変換を定義した。ここでは、図形を定義する陰関数同士を変換することで、異なる図形  $F, G \subset \Omega$  の連続変形を導入する。レベルセット法[9]では、陰関数に対する偏微分方程式を導入したが、ここでは、偏微分方程式のような膨大な計算を行うことなく、陰関数  $f, g$  をパラメータ  $\theta$  を用いて連続的につなぐ変換を構成する。様々な変換を考えることができるが、先ほどのホモトピーとの類似で、

$$h_\theta = (1 - \theta)f + \theta g \quad (18)$$

で定義される図形  $H(\theta)$  を導入し、 $H(0) = F, H(1) = G$  を図形ソースとターゲットとするの連続変形とする。このとき、 $\theta_1 \leq \theta_2$  について、 $(F - G) \cap H_{\theta_1} \supset (F - G) \cap H_{\theta_2}$  と  $\theta$  が増加するにつれ領域が減少する。また、 $F \cap G \subset H(\theta)$  であるから、図形が消滅することなく変形されるためには、 $F \cap G \neq \emptyset$  となるよう、二つの図形初期状態を設定することが重要である。

また、ファジイ集合の図形に対しても、メンバーシップ関数に対するイソトピーを定義することでモーフィングを定義することができる。

$$\mathcal{H}_{H_\theta; \lambda} : \mu_{H_\theta; \lambda} = \sqrt[n]{(1 - \theta)(\mu_{F; \lambda}(q))^n + \theta(\mu_{G; \lambda}(q))^n} \quad (19)$$

この変換は、変換場の最小化に基づく陰関数曲面を用いたモーフィング[6]の定義と類似している。しかし、式(19)は各点において変換を定義しているため、モーフィングに要する計算量が少ないという利点がある。

#### 3.3 連続パラメータのブール代数

連続パラメータで特徴付けたブール代数演算を用いてモーフィングを定義する。解析的に滑らかなブール代数による図形合成を  $H^{(1)}(\lambda) = F \overset{\wedge}{+} G, H^{(2)}(\lambda) = F \overset{\vee}{*} G$  と書くと、次のように和集合から積集合への連続変形が導入できる。

$$F \cup G = H^{(1)}(\infty) \longleftrightarrow H^{(1)}(0) \quad (20)$$

$$H^{(1)}(0) = H^{(2)}(0) \quad (21)$$

$$H^{(2)}(0) \longleftrightarrow H^{(2)}(\infty) = F \cap G \quad (22)$$

#### 3.4 部位変形

これまででは、図形全体に対するモーフィングについて扱ってきた。コンピュータグラフィクスでは、図

形 (物体の) 一部分の連続的な動きや変形を要求することが多い。図形の一部を変形する場合、局在したアフィン変換 [6] やレベルセット法 [9] の局在した曲面の制御を導入することでモーフィングを定義することができる。ここでは、より簡便な定義で部位の変形を実現する方法を考える。任意の陰関数曲面にブール代数が定義されていること、及び、図形  $A, C$  に関する次の恒等式

$$A = (A - C) \cup (A \cap C) = (A \cap C^c) \cup (A \cap C)$$

に注目する。図形  $A$  から図形  $C$  を切り取り、切取った部分  $A \cap C$  を図形  $B$  に置き換えたのち、再び合成すれば、図形を変形することができる。この新しい図形を  $A'(\lambda)$  とし、 $B(0) = A \cap C$  から出発する連続的な変形

$$A'(\lambda) = (A - C) \cup B(\lambda)$$

により部位のモーフィングが実現される。

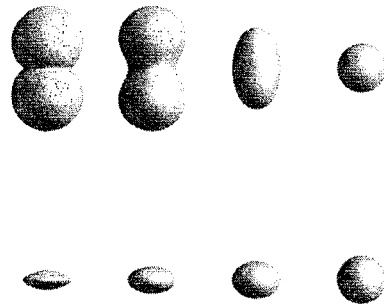


Figure 1:

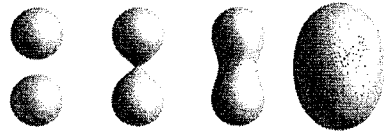


Figure 2:

#### 4 SSM によるシミュレーション

前節で定義したモーフィングの例を取り上げる。図形の陰関数曲面は SSM を用いてサンプリングとレンダリングを行う。

**Example 1** ブール代数によるモーフィング式 (21) - (22) を次の図形に適用する。

$$F = \{(x, y, z); x^2 + (y - 1.5)^2 + z^2 - 4 \leq 0\},$$

$$G = \{(x, y, z); x^2 + (y + 1.5)^2 - 4 \leq 0\}$$

図 1 において、上段は、式 (20) を左から  $\theta = 1.6, 0.3, 0.08, 0.001$  と変化させ図形を変形した。下段は、式 (22) を左から、 $\theta = 1.6, 0.3, 0.08, 0.001$  と変化させ図形を変形した。 $F \cup G$  から  $F \cap G$  の連続変形で図形が縮小される様子が示されている。

**Example 2** ファジィ集合による図形の連続的結合

$$F = \{(x, y, z); x^2 + (y - 2)^2 + z^2 - 1.5^2 \leq 0\},$$

$$G = \{(x, y, z); x^2 + (y + 2)^2 + z^2 - 1.5^2 \leq 0\}$$

に対して、次の  $\theta \in [0, 1]$  の連続変形を行う。

$$H_\theta = (F_{F;\theta} + G_{G;\theta}) [1/2] \quad \theta \in [0, 1]$$

図 2 は  $\theta = 1.6, 0.5, 0.3, 0.1$  のパラメータによる図形を示している。ファジィ集合の代数和では、図形を拡大をしながら合成する様子が示される。合成された図形は、メタボールと類似している。

**Example 3** イソトピーによる変換

式 (18) による次の図形間の連続変形の例を示す。

$$K = \{(x, y, z); x^2 + y^2 + z^2 - 6 \leq 0\}$$

$$L = \{(x, y, z); u \leq 0\}$$

$$u = a^{-12} (x^2 + y^2 + z^2)^{-6} + b^{48} (x^8 + y^8 + z^8)^6 - 1$$

図 3 では、 $a = 1/2.3, b = 1/2$  を用いた。 $\theta = 0, 0.25, 0.5, 0.70, 1.0$  について可視化した例を示す。

#### 5 まとめと討論

陰関数を用いて合成法を応用し、ブール代数による図形合成の利点を生かしたモーフィングの手法を提案した。我々の提案する図形の合成法は、図形がレベルセット陰関数として与えられれば、

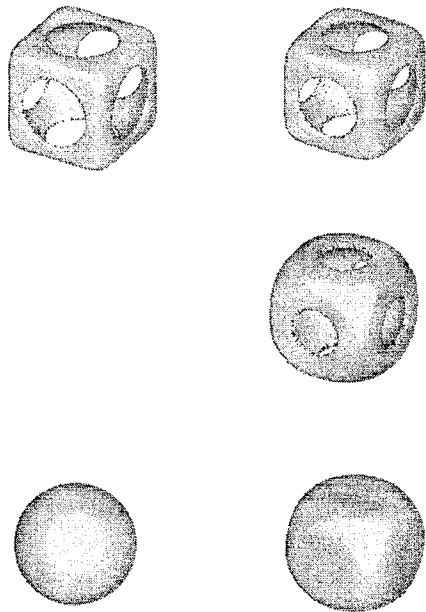


Figure 3:

合成された陰関数を提供できる。また、平滑化や表面のコントロールは、図形の全体や部分を切り出して演算を適用できるため、局在した図形の変形や合成が直感的である点が他の方法に比して有利である。

## References

- [1] S. Tanaka, A. Morisaki, S. S. Nakata, Y. Fukuda, H. Yamamoto, "Sampling implicit surfaces based on stochastic differential equations with converging constraint" *Computers & Graphics* 2000;24(3) 419-31
- [2] S. Tanaka, A. Shibata, H. Yamamoto, H. Kotsuru, "Generalized Stochastic sampling Method for Visualization and Investigation of Implicit Surface" *Computer Graphic Forum* 2001;20(3) C359-367
- [3] A. Shibata, S. Tanaka, H. Yamamoto, Y. Tsuji. "Merging Implicit Surfaces Based on Analytical Smoothing. KEK Preprint 2001-30
- [4] M. Gross "Are Points the better primitives?" *Computer Crgaphic Forum* 2001;20(3) xvii, Invited talk at EG2001,Manchester.
- [5] H. Pfister, M. Zwicker, J. van Barr, M. Gross, "Sufrels: Surface Elements as Rendering Primitives", *SIGGRAPH* 2000
- [6] Jin X, Toufu, Peng Q. General constrained deformation based on generalized metaballs. *Computers & Graphics* 2000;24:219-231
- [7] Wyvill B, Guy A, Galin E. "Extending the CSG three-wrapping blending and Boolean operations in an implicit surface modeling system", *Implicit surface '98, The Third Internal Workshop on Implicit Surface*.
- [8] Fang X, Bao H, Heng PA, Wong T, Peng Q, "Continuous filed based free-form surface modeling and morphing", *Computers & Graphics* 2000;25(2):235-43
- [9] D. Breen, S. Mauch, R. T. Whitake, J. Mao "3D Metanorphosis Btween Differnt Types of Geometric Models", *Computer Crgaphic Forum* 2001; 20(3) C36-48
- [10] 田中覚 柴田章博 山本弘明 小鶴尚亨 清水直美 佐々木節 「拡張された確率過程的サンプル法に基づく複雑曲面の形状理解」 情報処理学会第62回全国大会
- [11] 柴田章博 田中覚 山本弘明 津持吉行 「プールの代数にオブジェクトモデリングと確率微分方程式によるサンプリング」 情報処理学会第62回全国大会