

## 形状デザインにおける変形ツールの構築環境

栗山 繁 橋 啓八郎

kuriyama@im.hiroshima-cu.ac.jp

広島市立大学 情報科学部

〒731-31 広島市 安佐南区 沼田町 大塚 151-5

本研究では、インダストリアル・デザインの対象となるような複雑な曲面形状を対話的に設計するための、直観的な変形操作を可能とする3次元ウィジェットを作成する環境を提案する。プログラミングの知識のないデザイナーにでも、計算機内に構築される3次元空間での物体との視覚的および対話的な操作によって変形ツールが作成できるインタフェースを提供することを目的とする。本報告では、形状を制御する格子点を直観的かつ簡略に操作するための3次元ウィジェットの構成法とその対話手法について取り上げ、オブジェクト指向のグラフィクス・アプリケーション構築ツールを用いて変形ツールの構築環境を開発する手法について述べる。

## CONSTRUCTION OF DEFORMATION TOOLKIT FOR SHAPE DESIGN

Shigeru Kuriyama and Keihachiro Tachibana

Hiroshima City University, Information Sciences

151-5, Ozuka, Numata-cho, Asa-minami-ku, Hiroshima, 731-31 Japan

We propose an environment of constructing the three dimensional widgets that enable intuitive deformations for interactive design of complicated shapes. Even non-programmers can create their own deformation tools through visual and interactive manipulations of the geometric entities in a computer-generated three dimensional space. This report focuses on the method of constructing and manipulating the three-dimensional widgets that enable simple and intuitive manipulations of control points, and presents the techniques of implementation based on an object-oriented programming toolkit for graphics applications.

## 1 はじめに

3次元グラフィックスの生成・表示速度が向上するに従い、仮想環境・仮想現実感の技術が普及し、計算機内部に構築される3次元世界の物体を対話的に操作する技術が重要視されている。人間と計算機との間の対話を支援する技術として、ウインドウ・システムを拡張した Motif [1] などのグラフィックス・ユーザ・インタフェース（以後、GUI）が開発されてきたが、これはウィジェットと呼ばれる対話的操作のための部品をウインドウ上に配置して、ユーザに視覚的かつ直観的な対話手段を提供している。このウィジェットを3次元的な形状とその振る舞いに拡張した、3次元ウィジェットと呼ばれるツールが近年提案された[2,3,4]。この3次元ウィジェットを操作することによって、3次元の形状に対して対話的にアフィン変換などの線形変換を施すことができる。しかしながら、これらの3次元ウィジェットが提供する変形操作の種類は限られているので、3次元空間における物体の配置には役立つが、曲面形状の設計には機能的に不十分である。

曲面形状の設計を支援するCADシステムは、形状を設計するのに制御点を用いる。しかし、マウスなどの2次元ポインティング・デバイスには、制御点の平面上における操作には向いているが、平面上に拘束されない点を操作するには、3面図などの複数の対話ウインドウを用いた操作によって、その3次元空間での位置を指定しなければならず、その操作に熟練するには訓練が必要とされる。また、制御点が形状に影響を及ぼす範囲は他の制御点の影響範囲と重なっているのが一般的であり、制御点群の部分集合を一定の条件で同期させて操作する方が、各点を個別に操作するよりも効率の良い操作環境となる場合がある。一方、3次元空間での複雑な変形操作を実現するための手法として、制御点を

3次元格子状に配置してパラメトリック空間を定義し、その制御点を操作してパラメトリック空間内部に包含される幾何形状の変形操作を実現する手法 [5,6,7,8] は、曲面を定義する制御点群の数に依存しない大域的な変形操作を実現するのに有効なツールとなるが、これもまた制御点を操作する際に直観的なインタフェースを必要とする。

以上に述べた背景から、制御点を3次元空間で操作するための3次元ウィジェットを構築すれば、直観的な対話操作のためのインタフェースを提供できる。本研究では、デザイナーが計算機内に構築される3次元空間での視覚的および対話的な操作によって、制御点を操作する変形ツールとしての3次元ウィジェットを容易に作成できる環境を開発することを目的とする。この環境は、変形ツールの構築のために以下に列挙する機能を備える。

- ・ 制御点とその隣接関係を表わす幾何単体を複合的に3次元ウィジェット化し、それらとの対話的操作を通して、制御点の動作を定義できる。
- ・ 変形ツールとしての複合3次元ウィジェットに対して、視覚的に容易に機能を把握できるように、その形状および属性を編集できる。
- ・ 構築した複合3次元ウィジェットを統一したファイル形式で保存でき、変形ツールのデータベースが構築できる。

これらの機能により、プログラミングの知識を持たないインダストリアル・デザイナーにでも、複雑な変形操作を可能にする独自の3次元ウィジェットが作成でき、その変形ツールを他のデザイナーと共有することにより、計算機を介した曲面形状の共同設計作業に役立てることができる。

## 2 システム開発環境

我々は、3次元ウィジェットを用いた対話環境を実現するためのシステムの開発用ツールとして、Silicon Graphics 社が Open GL 上に開発した Open Inventor [9,10] と呼ばれるツールを用いた。Open Inventor は、シーン・データベースと呼ばれるオブジェクトに基づいた、オブジェクト指向のグラフィクス・アプリケーション構築ツールであり、これをプログラミング・インタフェースとして用いることにより、試作システムの開発コストを大幅に削減することができた。このツールは、3次元物体の形状および属性を定義するオブジェクトのクラス・ライブラリに加えて、3次元物体のアフィン変換を行う対話型オブジェクトである Dragger やイベント駆動型のデータ処理を行うアニメーション・オブジェクトである Engine を提供する。我々のウィジェット構築システムでは、この Dragger や Engine に対するC++のクラス・ライブラリを拡張して、制御点の操作を行う3次元ウィジェットのクラス・ライブラリを構築する。また、対話的な操作を通して、ウィジェットの形状および属性を編集するGUIも、Open Inventor のクラス・ライブラリを利用する。

Open Inventor は、幾何形状と同様に対話モデルに関しても標準的なファイルデータ形式を定義しているので、変形ツールのデータが幾何形状や面の属性や光源などのデータと明確な区別なくデータベース化できるという利点を有する。また、Open Inventor のファイルデータ形式は計算機の機種に依存しないように設計されているので、この形式を用いることにより変形ツールの可搬性、互換性が達成される。

## 3 複合3次元ウィジェットの構築

### 3.1 ウィジェットの機能

制御点を操作するための3次元ウィジェットに必要とされる機能として、以下のものが列挙される。

- ・ 格子を構成する複数の制御点を同時に操作できる。
- ・ 同時に操作される制御点の動作に関して、任意の拘束条件を設定できる。
- ・ 制御点の動作状態、拘束条件を容易に変更できる。

我々は格子状に配置された制御点およびその隣接関係を定義するのに、3次元空間に配置される幾何単体(点、辺、面等)を3次元ウィジェット化し、それらを操作して制御点の動作を指定する。このとき、辺は隣接する制御点間の拘束条件を指定するウィジェットとして、面は互いに点を共有する辺間の拘束条件を指定するウィジェットとして設計される。

### 3.2 幾何単体のウィジェット

格子状に配置された制御点およびその隣接関係を表わす幾何単体(点、辺、面等)に対するウィジェット(以後、単体ウィジェット)としてのクラス・オブジェクトは、Open Inventor の提供する InteractionKit の基底クラスを継承して実装される。単体ウィジェットのクラスは、イベントに対する処理を行う Engine の生成およびその入出力の接続に関する初期化をインスタンス生成時に行う。単体ウィジェット間の拘束条件の設定は、各クラスがメンバ変数として定義する Engine の入出力の接続または切断により行われ、幾何単体間にイベントが伝播していく機構が生成される。

### 3.3 対話操作のウィジェット

単体ウィジェットを対話的に操作するためのウィジェット（以後、操作ウィジェット）は、Open Inventor の提供する対話型オブジェクトである Dragger の基底クラスを継承して実装される。操作ウィジェットのクラスは、平行移動、回転移動、拡大縮小のアフィン変換を施す対話オブジェクトとして設計され、単体ウィジェットは操作ウィジェットを装着することによって操作される。操作ウィジェットは制御点を操作するための対話部品とウィジェット自身の位置および向きを操作する対話部品より構成され、制御点の平行移動の向きや回転移動の回転軸などは、操作ウィジェットの3次元空間での位置および向きを操作して指定される。また、操作ウィジェットのクラスは、図1に示すように、内部で構成される Engine のネットワークにより、制御点に対するアフィン変換行列を供給する。この変換行列は、制御点を操作する対話部品から供給される局所的な変動量と、ウィジェットに対するアフィン変換行列を用いて計算される。

一方、各単体ウィジェットはそのクラスに従って操作ウィジェットを装着する際のメソッドが定義されており、例えば辺を表わす単体ウィジェットの場合はその両端点に相当する制御点、面を表わす単体ウィジェットの場合はその頂点に相当する制御点群が操作ウィジェットの動作と同期するように、ウィジェットの Engine 間の入出力が接続される。また、複数の単体ウィジェットが同一の操作ウィジェットに装着された場合にも、それらに関連する制御点は同期して動作する。

操作ウィジェットの Engine の入出力は、データ・タイプの変換を行う Engine を介して互いに接続され、アフィン変換の種類異なる複数の操作ウィジェットが同期して動作することを可能にする。このとき、入出力のデータ・タイプ

の異なる操作ウィジェット間の接続や、その拘束条件の設定などが、付随する対話部品の直接操作のみによって指定できるように、操作ウィジェットのクラスを設計する。

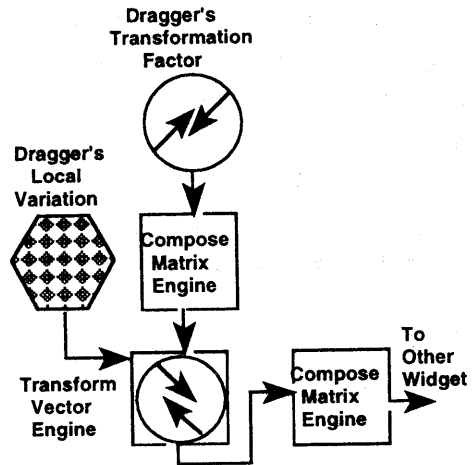


図1. 操作ウィジェットの構成

### 3.4 ユーザ・インタフェース

我々の試作したシステムでは、3次元ウィジェットの構築環境として以下のユーザ・インタフェースを提供する。

- ・ 格子を定義する座標系の種類と各軸に沿った制御点の数の指定して、格子を複合的に構成する単体ウィジェット群を生成する、ダイアログ・ボックス。
- ・ 操作ウィジェットを選択するメニュー。
- ・ 単体ウィジェットや操作ウィジェット間の接続および切断を実行するメニュー。
- ・ 3次元ウィジェットの形状、および属性を編集するエディタ。

本システムでは、ウィジェット構築用に特別に用意するインタフェースをこれらのものに限定し、残りの操作はウィジェットそのものを直

接操作するか、一般的な操作（ファイルの読み書き、物体の選択など）に対する Motif の標準的なメニューを提供して、ユーザが覚えなければならない操作項目を極力減らすようにする。また、ウィジェット間の接続および切断やアニメーションの制御を、付属的な対話部品を直接操作して実行する機構も、現在試作中である。

#### 4 変形ツールの作成例

我々は、制御点を操作するウィジェットを用いた変形ツールの構築例として、Free-From Deformation（以後、FFD）と呼ばれるモデルを取り挙げる。この手法は、3次元格子状に配置された制御点を操作して幾何形状を変形させるもので、変形の大域的な指定が可能であり、変形を任意の解析曲面、ポリゴンデータ等に適用できるので汎用性を有する。また、格子点の数を増やすことにより、いくらでも複雑な変形を指定することが可能である。これらの利点により、我々は変形ツールの作成例として、FFDを実行するための3次元ウィジェットの構築環境を Open Inventor のイベント駆動型オブジェクト Engine を拡張して試作した。

FFDの数学モデルは、3次元格子状の制御点を3変数の基底関数の係数に用いる以下の式で表わされる。

$$X_{FFD} = \sum_{i,j,k} B_i(u) B_j(v) B_k(w) P_{i,j,k} \quad (1)$$

FFDを用いた変形操作は、変形される物体の形状を定義する点を、FFDを定義する3次元格子内での局所的な座標値（ $u, v, w,$ ）に埋め込み計算と、その局所座標系を用いて式(1)により、点  $P_{i,j,k}$  を点  $X_{FFD}$  に写像する計算に2分される。FFDの機構は、図2に示すように局所座標への埋め込みを計算する Embed Engine と、写像点の計算を行う Map Engine で、

ネットワークを構成して実現される。このとき、Embed Engine は、変形する物体に対するFFDの制御点の初期配置が決まったときのみ値が計算され、Map Engine は制御点が位置を変化させる、すなわちウィジェットによる対話操作が行われる毎に値が計算される。

FFDを用いた変形ツールは制御点を操作する3次元ウィジェットを対話部品とし、Open Inventor の提供する Manipulator のクラスとして作成される。ただし、Open Inventor が標準で提供する Manipulator は、シーン・データベースのアフィン変換行列を操作するものであるが、FFD用のものは物体の座標（Open Inventor のクラスでは SoCoordinate3）を操作するものとして実装される。

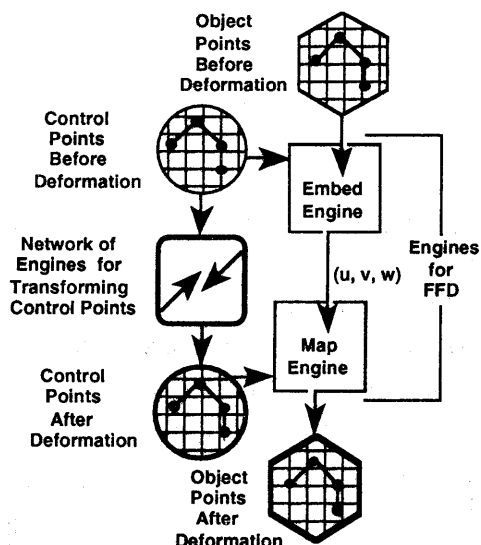


図2. FFDのネットワーク

図3にFFD格子の制御点を操作する、複合3次元ウィジェットの構成例を、図4にそれらを用いて実際に3次元幾何物体を変形した例を示す。

## 5 おわりに

本研究では、3次元形状に対する複雑な変形操作を実現するツールとしての3次元ウィジェットを、視覚的および対話的な操作によって構築する環境を、Open Inventorのグラフィクス・アプリケーション構築ツールを用いて開発した。

本システムにより構築される複合3次元ウィジェットは、格子状に配置された制御点の動きを単純化あるいは類型化することにより、形状の変形操作をより直観的に把握するのに役立つ。また、視覚的なウィジェットの構築環境を提供することにより、プログラミングの知識のないデザイナーにでも、自分自身の変形ツールが容易に作成できるという利点を有する。

また、本システムで試作されたFFDの数学モデルに基づく変形ツールはその手法の全ての利点を継承する。例えば、時間因子を3次元ウィジェットに対して導入することにより、アニメーションの動作の設計に対しても用いることが可能である [11]。

今後の研究課題としては、スペース・ボール、データ・グローブ等の3次元ポインティング・デバイスを用いた3次元ウィジェットの操作法の検討が挙げられる。また、階層的に配置された制御点を操作する、階層化された変形ツールの構築方法も今後の検討課題である。

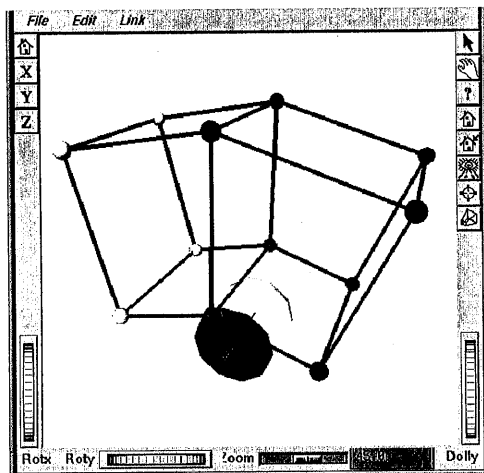
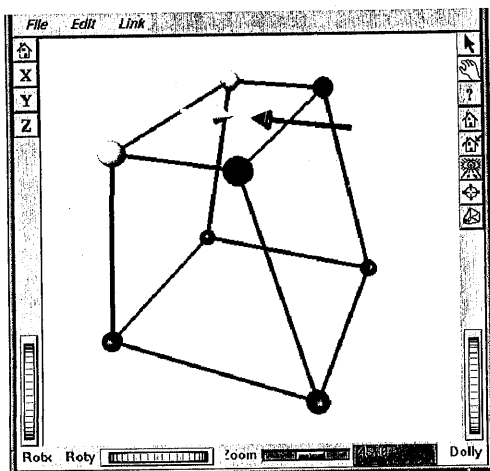


図3. FFD格子のウィジェット



図4. FFDによる変形操作例

## 謝辞

本研究は、広島市立大学、特定研究1号研究、“次世代・インダストリアルデザイン支援システムの開発”の助成を受け、同大学芸術学部・デザイン工学学科との共同によってなされた。

有益なる御助言を頂いた、デザイン工学学科の中嶋健明氏と吉田幸弘氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Open Software Foundation. *OSF/Motif Reference Guide*.
- [2] Scott S. Snibbe, Kenneth P. Herdon, etc., "Using Deformation to Explore 3D Widget Design", *Computer Graphics* 26, 2, pp.351-352, July 1992.
- [3] Robert C. Zeleznik, Kenneth P. Herndon, etc., "An Interactive 3D Toolkit Constructing 3D Widgets", *Computer Graphics* 27, 4, pp.187-196, August 1993.
- [4] Paul S. Strauss and Rikk Carey, "An Object-Oriented 3D Graphics Toolkit", *Computer Graphics* 26, 2, pp.341-349, July 1992.
- [5] Thomas W. Sederberg and Scott R. Parry, "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models", *Computer Graphics* 20, 4, pp.151-160, August 1986.
- [6] Sabin Coquillart, "Extended Free-Form Deformation: A Sculpting Tool for 3D Geometric Modeling", *Computer Graphics* 24, 4, pp.187-196, August 1990.
- [7] Henry J. Lamousin and Warren N. Waggenspack Jr., "NURBS-Based Free-Form Deformations", *IEEE Computer Graphics and Applications*, 14, 6, pp.59-65, November 1994.
- [8] William M. Hsu, John F. Hughes and Henry Kaufman, "Direct Manipulation of Free-Form Deformations", *Computer Graphics* 26, 2, pp.177-184, July 1992.
- [9] Josie Wernecke and Open Inventor Architecture Group, *The Inventor Mentor: Programming Object-Oriented 3D Graphics with Open Inventor™*, Release 2
- [10] Josie Wernecke and Open Inventor Architecture Group, *The Inventor Toolmaker: Extending Open Inventor™*, Release 2
- [11] Sabin Coquillart and Pierre Jancene, "Animated Free-Form Deformation: An Interactive Animation Technique", *Computer Graphics* 25, 4, pp.23-26, July 1991.