

# AR空間における立体モデルの形状演算と局所変形†

阿部直樹\*, 向井伸治\*\*

## Geometric Set Operation and Local Deformation of Solid Model in AR Space†

Naoki Abe\* and Shinji Mukai\*\*

For developing design tools that everyone can understand and use easily, the application of interaction techniques such as sketch interface and augmented reality (AR) has attracted attention in recent years. In this paper, we propose a method for generating 3D models through intuitive manipulations of primitives in AR space. This method has the following features. (1) In order to make efficient processing, vertex based data structure is used for storing shape data of objects. (2) The main modeling functions consists of geometric set operations and local deformations for primitive shapes. (3) Since historical data is managed in the process of creating 3D objects, undo/redo operations can be performed efficiently. Based on the user questionnaire after creating a simple object, the performance of the proposed system is evaluated. Illustrative examples are also shown.

**Key words** : Augmented Reality, Solid Modeling, Set Operation, Local Deformation

### 1 はじめに

近年、現実世界の映像に計算機によって生成された情報や3次元オブジェクトをオーバーレイ表示する、AR (Augmented Reality : 拡張現実感) 技術が注目を集めている。この技術は新しいユーザインタフェースの構築や、作業支援、情報提示に役立てることを目的にさまざまな分野での活用が期待されている。この技術を活用した研究として、AR空間上でオブジェクトを生成するシステムがいくつか報告されており、モデリングを簡単に行えるようなインタフェースや手法が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、従来の3次元CG・CADシステムが持つ機能を簡単に使えるようにするには、多くの考慮すべき課題がある。さらに、一般ユーザが手軽に創造的なデザインに関われるようにしていくには、感性に基づく簡易モデリング<sup>2)</sup>を実現できる機能の開発が必要である。

本研究は、立体モデリングの簡便化を図るために、あらかじめ作成しておいた基本形状をAR空間上に配置していき、これに対し形状編集操作として集合演算と局所変形を繰り返し行うことで、任意の形状を生成する立体モデリングシステムを開発している。システム構築における立体モデルのデータ記憶方式には、クリスタル構造と呼ばれる頂点ベースのデータ構造を採用している。これにより、形状処理が効率化され、形状の編集履歴を少ない情報量で保持することが可能である。本稿では、AR

を用いた形状モデリングの方法論を述べ、提案システムの実用例と評価を示す。

### 2 関連研究

AR空間で立体モデルを生成するシステムがいくつか報告されている。Lauらは、AR空間上に基本形状を配置していき、家具のモデルを生成するシステムを提案している<sup>3)</sup>。この基本形状には円柱や板などがあり、これらと同じ大きさの実際の木材にARマーカを取り付け、この上に立体モデルが表示される。これにより、基本形状を配置する際に立体モデルに直接触れているかのような力覚的フィードバックを得ている。当然ながら、生成できる形状はあらかじめ用意された基本形状に制約される。青木らは、エアブラシ型入力インタフェースを用いてボクセルを塗料のように吹き付けることでモデリングを行うシステムを提案している<sup>4)</sup>。ボクセルの吹き付け、消去、彩色によって簡易なモデリングを行うことができるシステムとなっている。しかし、オブジェクトの一括切断や、やり直し機能など、モデリングを効率的に行うための諸機能が充実していないという問題点がある。

これらのシステムに共通しているのは、一般的なCADシステムのように、2次元図形をスケッチしてから3次元立体モデルを生成するような方法をとっていない点である。本システムはこれを参考に、モデリングの簡易化

† 原稿受理 平成28年2月26日 Received February 26, 2016

\* 工学研究科システム生体工学専攻大学院生 (Graduate school of Engineering, Division of Systems Life Engineering)

\*\* システム生体工学科 (Department of Systems Life Engineering)

のために3次元立体モデルをAR空間上に配置していくことで、モデルを生成していくシステムの構築を試みる。

### 3 システム構築のための要素技術

#### 3・1 ARToolKit

システム構築には、C/C++用プログラミングライブラリであるARToolKit<sup>5),6)</sup>を使用した。これにより、カメラから画像を取得し、その画像からマーカを検出してパターンを認識することができる。検出したマーカ-の3次元位置・姿勢をリアルタイムで計測し、この情報を元に現実世界の映像に立体モデルをオーバーレイ表示することができる。これを通じて、マーカ-上もしくはその周囲に立体モデルが存在しているような仮想現実感が得られる。

複数マーカ-間の座標変換行列を取得する方法について考える。ARToolKitにおいて、マーカ-のカメラに対する3次元位置・姿勢は、式(1)のような回転成分 $r$ と並進成分 $t$ を含んだ変換行列 $T$ として得られる。マーカ-1とマーカ-2の変換行列をそれぞれ $T_1, T_2$ とし、マーカ-1とマーカ-2の座標系をそれぞれ $[X_1 Y_1 Z_1 1]^T, [X_2 Y_2 Z_2 1]^T$ とすると、マーカ-1におけるマーカ-2の座標系は式(2)のようになる。

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = T_1^{-1} T_2 \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

これを適用することにより、あるマーカ-を基準の座標系とした場合に、その座標系における他のマーカ-の3次元位置・姿勢を取得できる。

#### 3・2 クリスタル構造

一般的に立体モデルはハーフエッジ構造で記述されることが多いが、本システムにおける立体モデルのデータ構造にはクリスタル構造<sup>7),8)</sup>を採用している。クリスタル構造とは、各頂点に対して隣接する点の情報を与えるだけのものであり、単純で冗長度が少ないデータ構造となっている。各頂点に対する隣接頂点は、立体モデルを外側から見て左回りになるように隣接頂点表に整理される。この隣接頂点表の頂点ポインタを規則的にたどることにより、面を構成する頂点群を取り出すことができる。すなわち、面の外向き法線ベクトルが定まるので、ソリッドモデルを表現できる。平面と曲面が混在する立体であっても、この構造を用いて統一的に記述することができる。また、点に何らかの変更が加えられた箇所に限定して履歴の更新が可能のため、全ての操作履歴を記憶させておいても、メモリ量の深刻な増加にはつながらない。このことから、形状演算や局所変形を頻繁に行う本システムの構築に際して、クリスタル構造は最適であると考えられる。



Fig. 1 An example of using the modeling system

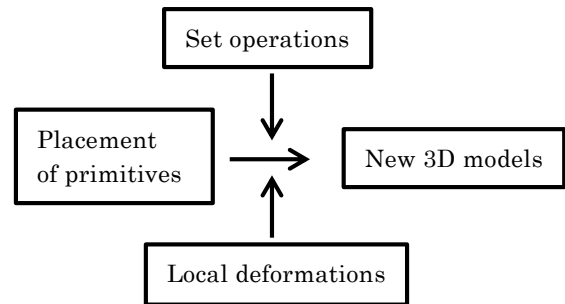


Fig. 2 Conceptual diagram of generating 3D objects

### 4 提案システム

#### 4・1 システムの構成

本システムは、ビデオシースルー型ヘッドマウントディスプレイ、PC、キーボード、USBマウスをベースに作成した入力デバイス、基準マーカ-、操作マーカ-で構成される。入力デバイスの先端に各ARマーカ-をマグネットに取り付けて使用する。入力デバイスのボタンは3つあり、それぞれARマーカ-「A」「B」に表示される立体モデルの切り替え、操作の実行の機能を持つ。Fig. 1は実際にシステムを使用している様子を示している。ユーザはヘッドマウントディスプレイを装着し、利き手でボタンのある入力デバイス、もう片方の手でボタンのないデバイスを持つ。ユーザはARにより表示された立体モデルを任意の位置に移動させることで、モデリングを行う。

使用したPCはDell OptiPlex 9010(CPU: Intel Core i7-3770 3.40GHz, Memory: 8GB, OS: Windows 7 Professional 64bit), ビデオシースルー型ヘッドマウントディスプレイはVUZIX製Wrap1200ARである。開発環境はMicrosoft Visual Studio Professional 2013, 立体モデルの表示にはOpenGLを使用した。

#### 4・2 モデル生成の流れ

立体モデル生成のイメージをFig. 2に示す。はじめに、ユーザはAR空間上に基本形状を1つ配置する。この配置された基本形状に対し、ユーザは局所変形を行うかどうかを選択する。もし局所変形を行う場合は、後述する

本システムにおいて実行可能な局所変形操作を加えることで、新たな形状へと更新することができる。局所変形を行わない場合は、すでに配置されている基本形状と重なり合うように新たな基本形状を配置することで、集合演算を行うことができる。これにより新たな形状へと更新される。そして、新たに生成された形状に対して、さらに集合演算と局所変形を繰り返すことで任意形状を生成することができる。

#### 4・3 基本形状の配置

AR 空間上での立体モデリングは、基準マーカーの中心を原点とした3次元座標で行われる。Fig. 3は基本形状の配置の流れを示している。まず、ユーザは入力デバイスを操作し、配置する基本形状を選択する。その後、入力デバイスに取り付けられた操作マーカーを任意の位置・姿勢へ移動し、入力デバイスの決定ボタンを押すことで基準マーカー座標系へ配置される。このとき、操作マーカー座標系に存在している基本形状は、式(2)より基準マーカー座標系へと変換される。これにより、ユーザは視覚的な情報を頼りに、直感的に基本形状を配置できる。本研究で用意した基本形状は、立方体、正四面体、円柱、四角柱、球体、矩形板、円板の7種類である。

#### 4・4 集合演算

基本形状の単純な配置だけでは生成可能なモデルが

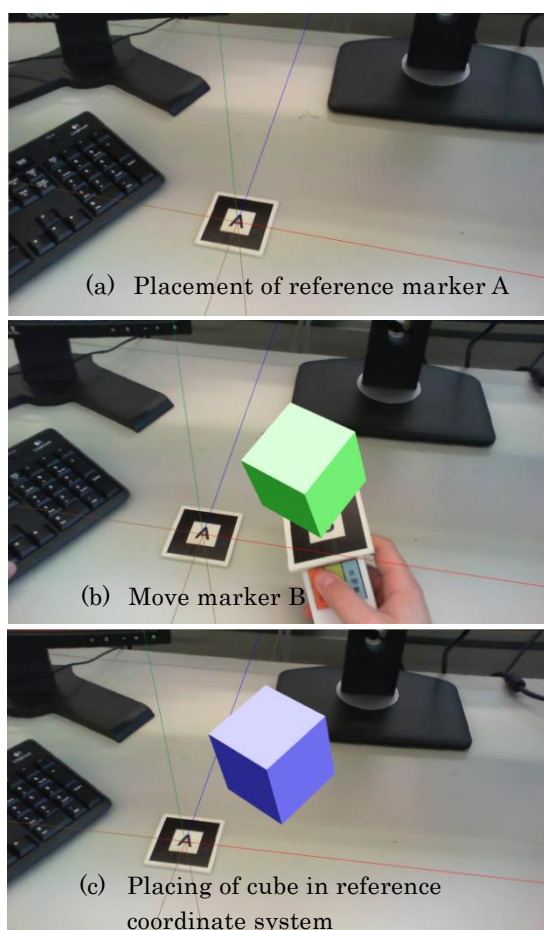


Fig. 3 Flow of placement of primitives

限られるため、集合演算を行うことでこれを解決する。基準マーカー座標系にすでに存在している形状と、新たに配置する基本形状が重なり合うように配置することで、形状どうしの和・差・積を取ることができる。Fig. 4は、1つの立方体と球体による集合演算の例を示している。

#### 4・5 局所変形

モデリングにおいては、より直感的な形状の編集を行うために、局所変形が実行可能である。局所変形操作として、頂点・稜線の削除、頂点・稜線・面の移動、面取り、フィレット、面の細分化<sup>9)</sup>、形状の切断が実装されている。いずれの変形も、頂点・稜線・面の選択指定によって施すことができる。面の細分化手法には、Catmull-Clark 細分割曲面を適用している。形状の切断は、任意平面を指定してこの平面に沿って立体を分離する操作である。

Fig. 5とFig. 6は局所変形の例を示している。局所変形を実行する部位の決定には仮想カーソルを使用する。仮想カーソルは操作マーカーに表示される。仮想カーソルの先端の座標値に最も近い頂点・稜線・面を選択することができる。頂点・稜線・面を移動させる場合、移動箇所を選択した状態で入力デバイスの決定ボタンを押した座標から、決定ボタンを離した座標への移動量分だけ、移動させることができる。形状を切断する場合は、操作マーカーに切断面を表示し、これと切断対象となる形状が重なり合うように配置しなければならない。切断面を配置後に入力デバイスの決定ボタンを押すことで、切断が実行される。本システムにおける切断とは、切断面の正領域側に負領域側に存在する、形状の一部分を削除することである。どちら側を削除するかは任意に選択できる。

#### 4・6 履歴操作

集合演算と局所変形を繰り返し行い、目的の形状を構築していくには、undo/redo操作が必要である。本システムはこの履歴操作を備えており、ユーザは形状に不満がある場合や操作を間違えた場合に、形状の履歴をさかのぼり、やり直すことが可能である。

### 5 作成例とシステムの評価

本システムを用いて生成したモデルの例をFig. 7とFig. 8に示す。Fig. 7のモデルは、和と差の集合演算、頂点の移動を行うことで生成した。Fig. 8のモデルは、和の集合演算、頂点の移動、形状の切断、面の細分化を行うことで生成した。

本システムの使いやすさについて評価するため、立体モデリングの未経験者を含む20名の学生を対象に、簡易ユーザテストとアンケート調査を実施した。ユーザに対しシステムの概要を簡単に説明し、デモンストレーションを行った後に、実際に操作を行ってもらった。操作内容は、システムの基本的な機能の実行である。調査項目は、(1)任意の位置に立体モデルを表示できたか、(2)表示する立体モデルの切り替えができたか、(3)切断ができたか、(4)和演算ができたか、(5)差演算ができたか、(6)積演

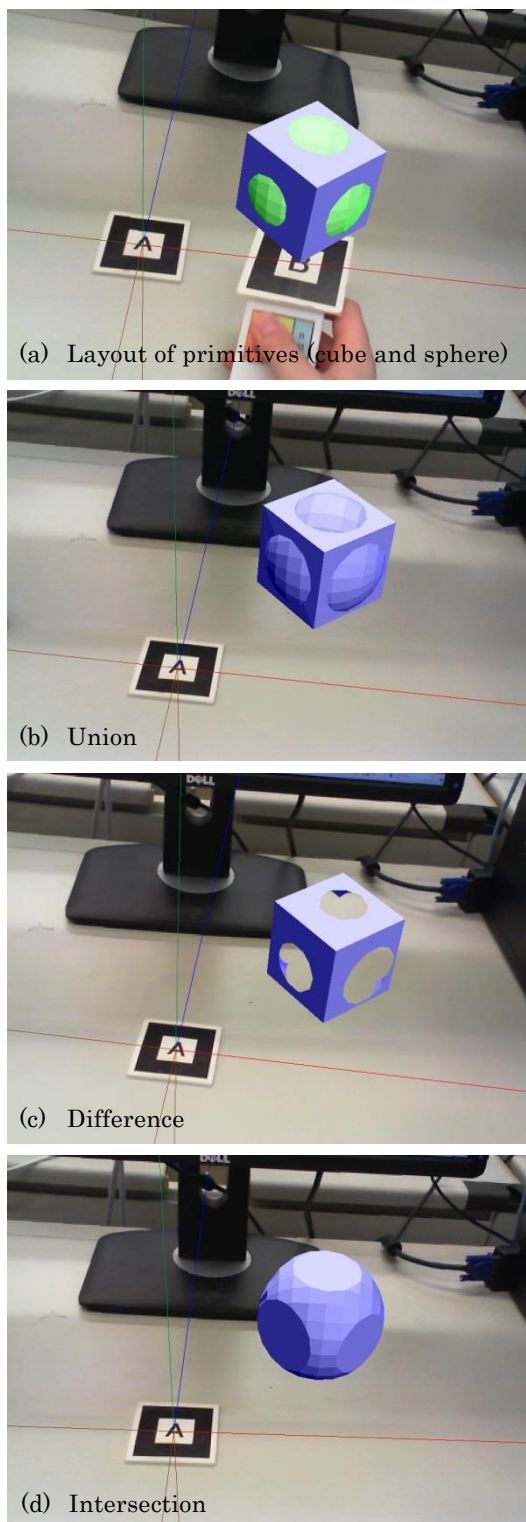


Fig. 4 Examples of geometric set operations

算ができたか, (7)任意の形状を作成できたか, (8)あれば良いと思う機能はあるか, (9)あれば良いと思う基本形状はあるか, (10)本システムを用いてどのようなものを作りたいか, の 10 項目である. (1)~(7)の項目は, 5段階の評価(5:良くできた, 4:できた, 3:どちらともいえない, 2:あまりできなかった, 1:全くできなかった)

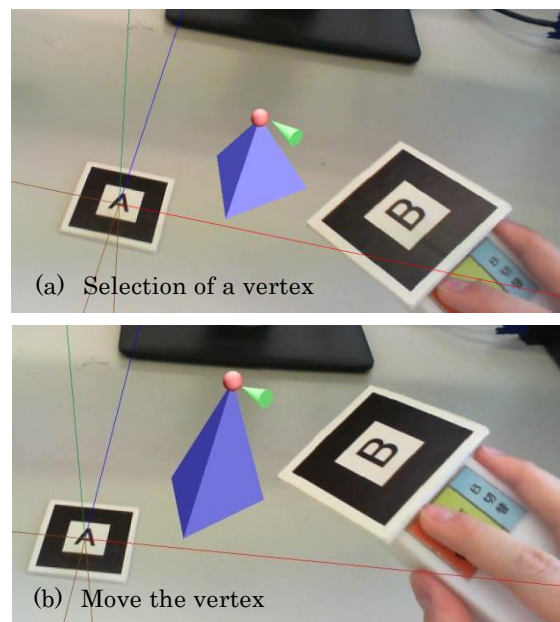


Fig. 5 An example of local deformation on vertex

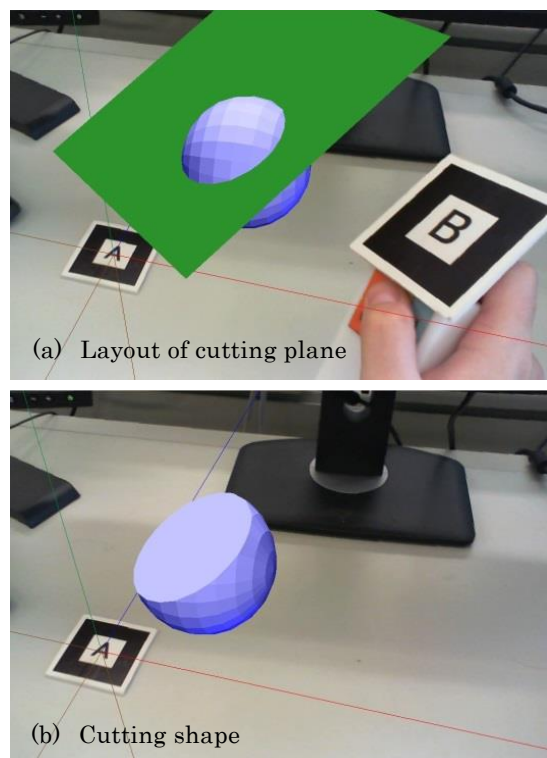


Fig. 6 An example of local deformation on cutting

とした. Fig. 9 に評価の平均値を示す. 項目(2)~(6)において高い評価を得た. これより, 多くのユーザが本システムの特徴をすぐに理解し, 操作方法を習得できていたことがわかった. 項目(1)については, AR マーカーの素材に問題があり, 光反射でうまく認識されなかったことが要因である. 項目(7)は, 複数回の形状演算におけるア

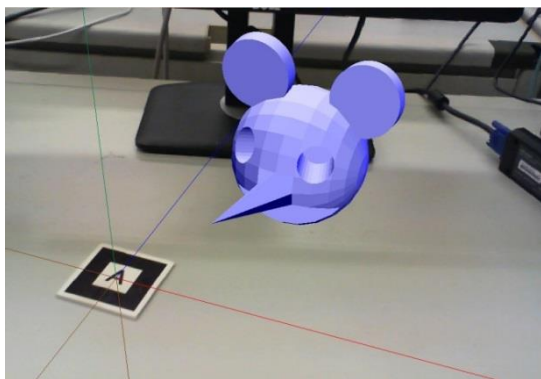


Fig. 7 An example of Model 1

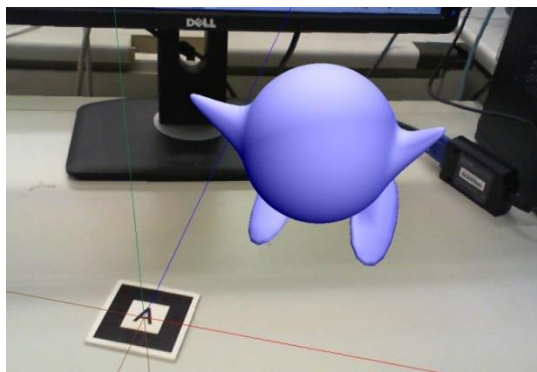


Fig. 8 An example of Model 2

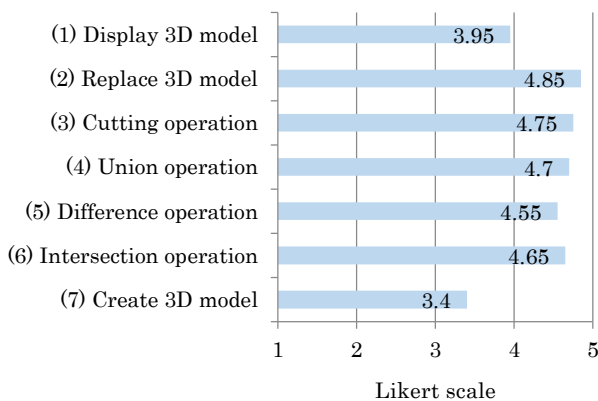


Fig. 9 Results of the user questionnaire (the average of 20 participants)

ルゴリズムの例外処理に対して十分に対応できていないことが要因であり、この機能の再構築が必要である。

システムで使用する専用ツールに関して、次の10項目についてアンケートをとった。(1)どのような人でも使いやすいか、(2)利き手を選ばずに使えるか、(3)直感的に使えるか、(4)視覚的に操作方法を理解できるか、(5)事故を起こさないように配慮されているか、(6)長く使っても疲れないか、(7)適切な大きさか、(8)耐久性があるか、(9)使い心地がよく美しいデザインか、(10)十分な機能が

備わっているか。全項目について、PPP評価に基づき5段階で評価した。項目(2)~(5)がスケール平均4以上で比較的评价が高かった。一方で、項目(6)の評価が他項目と比べやや低い結果となった。モデリングの際には腕の動作を要するため、専用ツールのいっそうの小型化・軽量化が必要である。

## 6 まとめと今後の課題

本研究では、基本形状を直感的にAR空間上に配置していくことで立体モデルを生成するシステムを開発した。その特徴は、形状編集操作として集合演算と局所変形が実行できることである。これにより、基本形状の組み合わせだけでも、多様な立体モデルを生成可能である。基本形状の配置や局所変形には、基準マーカに対する操作マーカ的位置・姿勢を利用しているため、ユーザは操作マーカを任意の位置に動かすことで形状編集操作ができるようになっている。履歴操作も行えるため、ユーザは試行錯誤を繰り返しながら立体モデリングを実行できる。

本システムは、基本形状を配置する際にユーザが目分量で決定していることから、整った寸法を持ったオブジェクトの生成ができず、既存オブジェクトと完全に同じものを作ることは困難である。今後、これを解決する方法を検討していきたい。

## 参考文献

- 1) 五十嵐健夫, 他, “デジタルファブリケーション”, 情報処理, Vol.54, No.2, pp.84-134 (2013).
- 2) 青山英樹, “3D-CAD/CAMの現状と方向性”, 精密工学会誌, Vol.81, No.3, pp.206-210, (2015).
- 3) M. Lau, et al., “Situating Modeling: A Shape-Stamping Interface with Tangible Primitives”, Proc. of 6th Int. Conf. on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, ACM, pp.275-282 (2012).
- 4) 青木紘史, 他, “AR空間におけるエアブラシ型インタフェースによる形状モデリングシステム”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.36, No.16, pp.1-4 (2012).
- 5) 加藤博一, “拡張現実感システム構築ツール ARToolKitの開発”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU, Vol.101, No.652, pp.79-86 (2002).
- 6) 谷尻豊寿, “拡張現実感を実現する ARToolKit プログラミングテクニック”, カットシステム (2008).
- 7) 清水誠司, 他, “多様体ソリッドモデル記述用の新しいデータ構造について”, 日本設計工学会誌, Vol.42, No.1, pp.53-60 (2007).
- 8) 清水誠司, 他, “二次元・三次元図形の統一的データ表現と形状変形履歴の操作”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-A, No.10, pp.750-757 (2007).
- 9) M. Antonelli, et al., “Subdivision Surfaces Integrated in a CAD System”, Computer-Aided Design, Vol.45, No.11, pp.1294-1305 (2013).