陰関数表現を用いた協調型3次元造形システムの一構成法

西野浩明[†] 宇津宮孝一[†]
吉田和幸[†] 凍田和美[††]

新製品や工芸作品などを分散環境で協同設計するための新しい3次元造形システムの構築法を提案する．設計の初期段階で新しい形状の創作を行う場合に着目して，設計者が頭に描くイメージを直観的に3次元モデル化しながら，上級者が持っている造形技能の伝習や協同設計作業を容易に行うことが可能なシステムの実現に焦点を当てる．このために，協同造形される3次元形状を陰関数表現法を用いて符号化し，各参加者が実行する一連の変形操作をネットワーク上で漏れなく共有・可視化する方法を考案した．効率的な協同作業のために，複数の参加者が同一モデルの異なる部品を同時に造形できる仕組みを実現した．また，部品単位にモデルの解像度や描画法を動的に変更しながら，使用する計算機の性能や造形操作内容に応じて応答性と描画品質を柔軟に調整できるようにした．さらに，専門知識や計算機の使用経験が異なる被験者を対象に評価実験を行い，協同造形によるデザイン作業の効率化や制作物の品質に及ぼす影響などの観点から提案手法の有効性を検証した．

A Construction Method of Collaborative 3D Modeling System Using Implicit Surfaces

Hiroaki Nishino,[†] Kouichi Utsumiya,[†] Kazuyuki Yoshida[†]
and Kazuyoshi Korida[††]

This paper proposes a new approach to building a 3D modeling system, targeted at collaboratively designing original products and crafted objects in a distributed environment. Because our attention is paid to the creation of new shapes in an early design stage, a method for intuitively putting a designer's image into a concrete 3D model is proposed. The method also aims at realization of a system to convey expert's modeling skills to others, making collaborative design an easy task. It encodes a 3D object as an implicit model to fully share and visualize a series of deforming operations performed by all participants on the network. The proposed system allows multiple participants to simultaneously work on different parts of an object for effective collaboration. Another enhancement enables to set up different resolution and rendering method for each part. It makes flexible adjustments on "speed versus quality" tradeoffs according to hardware performance and modeling operations possible. A collaborative modeling experiment by subjects with various degrees of professional knowledge and computer experiences was conducted. The result shows that the proposed method can improve both task efficiency and production quality of 3D modeling.

1. はじめに

遠隔地の参加者同士がネットワークを介して臨場感豊かに対話や協同作業を行うための分散仮想環境（Distributed Virtual Environment，以下DVE）に関する研究が活発に行われている[1)]．その中でも，3次元コンピュータグラフィックス（CG）技術を用いて製品や工芸品の設計・試作・評価を仮想環境で継ぎ目なく行う仮想プロトタイピングは，設計工程の効率化やタイムリな新製品開発などの観点から，DVEの実用的な応用として今後ますます重要になると予想される．

今日，製品開発の形態は機能・性能からデザイン重視へと変化しており，消費者の感性を刺激する新しい製品イメージや形状モデルを手軽に創作可能な設計環境の実現が望まれている．DVE技術を導入すれば，異分野の設計者や製造技術者，消費者などがネットワークを介して協同でデザイン作業を実施できる．また，経験豊かな専門家の造形手法がリアルタイムに可視化できれば，それを他の参加者が参考にして新しい形や

† 大分大学工学部
Faculty of Engineering, Oita University
†† 大分県立芸術文化短期大学
Oita Prefectural College of Arts and Culture

パターンの着想に役立てることができる．さらに，複数の参加者による並列作業で設計業務全体の効率向上も期待できる．

このようなシステムの構築には，頭の中でイメージする形を手軽に制作・変形できる造形機能に加えて，以下の機能要件を満足する新たなDVE構成法が必要である．

- 要件1：協調型造形支援機能
  複数の参加者が役割分担しながら効率良く協同作業を行うために，1つのモデルを部品分割して並列造形を行ったり，完成した部品を統合あるいは他のモデルで再利用したりして新しい形状を作る機能．
- 要件2：造形操作の無損失共有機能
  上級者が持っている造形技能の伝習や参加者相互の作業内容把握などを容易にするために，各参加者が実行する一連の造形操作を高速に漏れなく全システムへ伝達・表示する機能．
- 要件3：応答性と品質の動的調整機能
  対話操作向けに応答性を保証するか，形状の確認・評価向けに高画質なモデルを描画するかを，各システムが使用する計算機の性能や操作内容に応じて自律的に選択・調整する機能．

本論文では，これらの要件を満足するために考案した，CGモデリング手法の1つである陰関数表現法[2]を形状変形の定義・符号化・伝達の枠組みとして分散環境に拡張するという，協調型3次元造形システムの一構成法とその実現方式について述べる．

2. 提案手法の特徴

これまで多くのDVEシステムが考案・実現されてきた．大規模な軍事演習向け仮想環境のNPSNET[3]，複数サーバと仮想空間の部分共有でスケーラビリティを実現したRING[4]やNetEffect[5]，VRMLを拡張して多人数参加型システムを構築したLadakh[6]，AGORA[7]，VSPLUS[8]などがある．これらのシステムではポリゴンなどの幾何情報を共有し，3次元形状の簡略化や圧縮技法[9]を用いてデータ転送量の削減と描画の高速化を行っている．このため，高い応答性と引換えに描画品質が劣化することになる．また，受信側の機種や通信路の帯域に応じて配送するデータ量を適応的に決定する方法もあるが[6]，提示される画質がシステムごとに不均一となる．画質を落とさずにデータ転送時の遅延緩和やトラフィック軽減に有効なdead reckoning法[3]を採用するシステムも多いが，描出可能なものは車や航空機，アバタ（参加者の化身）のように動きが単純で変形しないオブジェクトに限られる．Shastra[10]のように工業製品向けの協調型設計システムもあるが，3次元モデルの制作には専用のCAD操作に精通する必要があり，専門家でなければ利用は難しい．

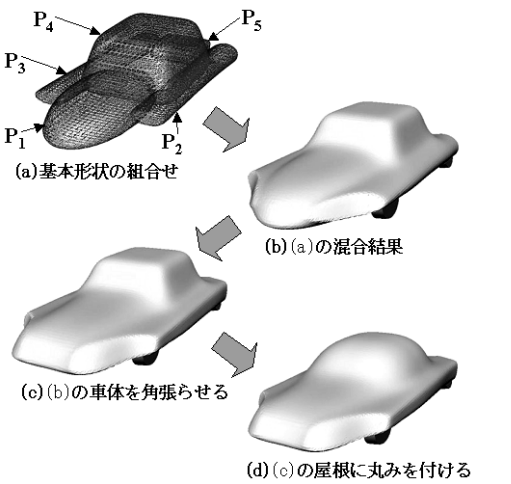


図1 陰関数モデリングによる車体設計例
Fig. 1 Auto body design example using implicit surface modeling.

これに対して我々は，上述の従来手法では実現が難しい前章で述べた3要件を満足するDVE構成法を考案・実現した．提案手法の基盤となる陰関数表現法には，**図1**に示すように基本形状を滑らかに混合しながらイメージの概形を容易かつ迅速に制作できるという特徴がある．同図は，我々が開発した陰関数モデラで車体設計を行った例である．図1 (a)に示す5つの基本形状 P_1〜P_5 を混合して(b)を作り，さらに(c)車体を角張らせる，(d)屋根に丸みをつけるといった変形操作を初心者でも直観的に行える．CADの熟練者が難解な操作を駆使して制作する詳細なデータの定義には向かないものの，市販のCADでは支援が困難な初期設計段階でのイメージ構想や3次元スケッチ作業を手軽に行うことができる．

以上の陰関数法の特徴を活用して，前述の3要件を実現するシステムを設計・開発した．すなわち要件1については，複数の参加者が基本形状単位に並列造形や統合化を行う機能を実現した．要件2に対しては，各参加者の造形操作に応じて更新される一部の関数パラメータだけを同報通知することで，頻繁に変形するモデル形状を少量のデータ転送で全システムに漏れなく伝達・表示する仕組みを実現した．要件3については，従来手法において送信者が決定していたモデルの幾何形状や描画精度を，受信者が自律的に調整できる

No.	造形操作	パラメータ名 （型）	形状および操作の例
1	型の選択 → 0: 超楕円体 (P_e) / 1: 超円環体 (P_t)	*type* (int)	超楕円体 P_e 超円環体 P_t
2	大きさの設定	r_x, r_y, r_z (float)	モデル座標系 roll yaw pitch 基本形状
3	位置の設定	x_0, y_0, z_0 (float)	
4	向きの設定	*yaw* , *pitch* , *roll* (float)	
5	トーラス半径の設定（円環体のみ有効）	r_a (float)	
6	角張り具合の設定	e_1, e_2 (float)	e_1= 1.0, e_2= 1.0 / e_1= 0.1, e_2= 1.0 / e_1= 0.1, e_2= 0.1
7	変形強度の設定（尖らせる）	k_{tpx}, k_{tpy} (float)	k_{tpx}= k_{tpy}= k_{sh}= k_{tw}= k_{bd}= 0.0; k_{tpx}= k_{tpy} = 0.5; k_{sh}= 0.5; k_{tw}=0.5; k_{bd}= 0.5
8	変形強度の設定（せん断する）	k_{sh} (float)	
9	変形強度の設定（捻る）	k_{tw} (float)	
10	変形強度の設定（曲げる）	k_{bd} (float)	尖らせる せん断 捻る 曲げる

(a) 基本形状パラメータと 10 種類の造形操作

No.	造形操作	パラメータ名 (型)	操作例
1	フィールド強度の設定	f (float)	基本形状の変形強度と同様
2	変形強度の設定 (尖らせる)	K_{tpx}, K_{tpy} (float)	
3	変形強度の設定 (せん断する)	K_{sh} (float)	
4	変形強度の設定 (捻る)	K_{tw} (float)	
5	変形強度の設定 (曲げる)	K_{bd} (float)	P_1 P_2 P_3 f=1.0 f=1.5 f=3.0

(b) 混合パラメータと 5 種類の造形操作

図 2 陰関数モデラの基本機能と関数パラメータ
Fig. 2 Implicit surface modeler's basic functions and functional parameters.

ようにして，各人の使用状況に応じた「応答性 vs. 品質」の選択を可能にした．以上の機能の導入により，直観的な陰関数モデリングを分散環境で協同利用しながら，他者の造形作業をリアルタイムで観察したり，狭帯域・低速な環境の参加者でも高品質な 3 次元モデルを復元したりできるシステムを実現した．

以下，本システムの陰関数モデラが提供する基本機能について述べた後，提案する協調型 3 次元造形システムの設計と実現方法，および評価実験について説明していく．

3. 陰関数モデラの基本機能

陰関数表現法では，物体の表面形状を以下の条件を満足する 3 次元空間内の点 p の集合として定義する[2]．

$$\{p \in R^3; F(p) = 0\}. \qquad (1)$$

R^3 は 3 次元線形空間を表す．F は n 個の基本形状 P_i $(i = 1, \ldots, n)$ を滑らかに接合する混合関数として以下のように定義される．

$$F(x, y, z) = 1.0 - (P_1^f + \cdots + P_n^f)^{\frac{1}{f}}. \qquad (2)$$

1 つの基本形状は超 2 次関数[11]で表され，**図 2** (a) に示すように，その型，大きさ，位置，向き，トーラス半径，角張り具合および変形強度に関する 10 項目の特徴を記述する計 18 個のパラメータで定義される．図 2 (a) の第 1 項（type パラメータ）で示すように，ソリッドな形の成形に利用する超楕円体 P_e か，中空や凹みのある形を作るための超円環体 P_t を組み合わせて 3 次元モデルを制作する．P_e，P_t はそれぞれ以下の式で表される．

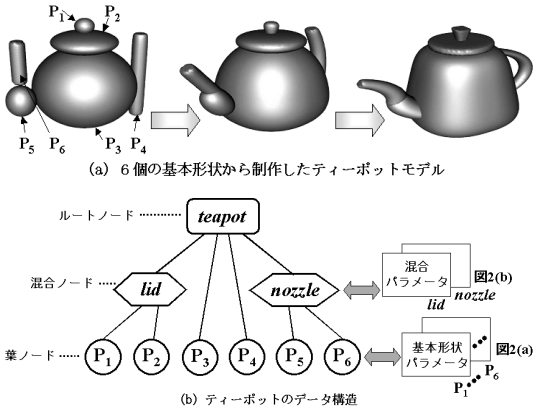


図3 3次元モデルとそのデータ構造
Fig. 3 3D model and its data structure.

$$P_e(x,y,z) = \left[\left\{\left(\frac{x}{r_x}\right)^{\frac{2}{e_2}} + \left(\frac{y}{r_y}\right)^{\frac{2}{e_2}}\right\}^{\frac{e_2}{e_1}} + \left(\frac{z}{r_z}\right)^{\frac{2}{e_1}}\right]^{e_1}, \quad (3)$$

$$P_t(x,y,z) = \left[\left[\left\{\left(\frac{x}{r_x}\right)^{\frac{2}{e_2}} + \left(\frac{y}{r_y}\right)^{\frac{2}{e_2}}\right\}^{\frac{e_2}{2}} - \frac{r_a}{\sqrt{{r_x}^2 + {r_y}^2}}\right]^{\frac{2}{e_1}} + \left(\frac{z}{r_z}\right)^{\frac{2}{e_1}}\right]^{e_1}. \quad (4)$$

式(3),(4)中の r_x, r_y, r_z(図2(a)第2項)は基本形状の大きさ,r_a(第5項)は超円環体のトーラス半径,e_1,e_2(第6項)は角張り具合をそれぞれ制御する.さらに,第3,4項はモデル座標中の基本形状の位置と向きを,第7〜10項は「尖らせる,せん断する,捻る,曲げる」という,現実の造形でも使われる変形操作の程度をそれぞれ指定する.これらの数式定義は他文献に譲る[12].

図2(b)は,式(2)で複数の基本形状を1つの形に混合するときに指定可能な5種類,計6個の特徴パラメータを表す.式(2)中の f はフィールド強度で,図2(b)の操作例に示すように混合時の基本形状間の接合度合いを調節できる.図2(a)と同じ4種の変形操作が混合形状に対しても適用できる.**図3**(a)は,6個の基本形状を変形・混合して制作したティーポットモデルの例である.

4. システムの設計と実現

本章では,1章で述べた3要件を満たすように新たに考案した機能とその実現方法について論じる.

4.1 要件1:協調型造形支援機能

造形の単位である基本形状や混合形状を,参加者間で作業を分担する単位としても活用できれば,要件1を陰関数モデリングの自然な拡張として実現できる.このためには,3次元モデルを構成する部品☆間の接続関係や変形操作の適用範囲などを柔軟に定義できるデータ構造が必要になる.本システムでは,図3(b)に示すような階層型木構造でモデルデータを管理する.同図は,図3(a)に示したティーポットモデルの定義例で,葉ノードが個々の基本形状を表す.各基本形状には図2(a)に示した10種の造形操作が可能であり,各操作の実行で対応するたかだか3個のパラメータ値が変更される.n 個の部品の混合操作は,n 分木を構成する混合ノードで表す.ノードの属性値として,図2(b)で示した5種類の操作に対応するパラメータを持つ.既存部品を他のモデルで再利用するには,**図4**に示すように対象部品を葉ノードとして再利用先モデルの木構造に追加する.同図は,ティーポットの蓋と取手を杯(cup)と壷(vase)の部品としてそれぞれ再利用した例である.

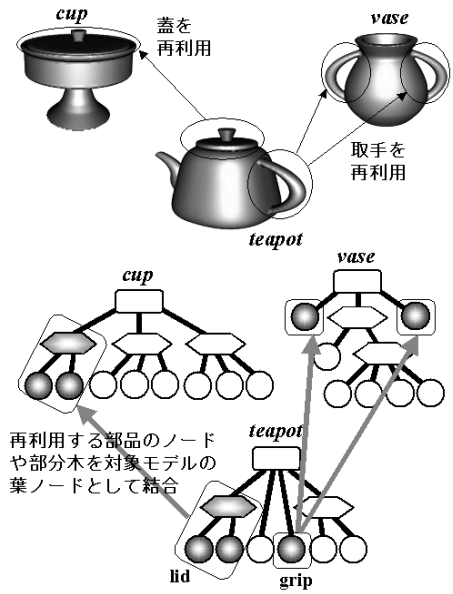


図4 既存モデルの再利用
Fig. 4 Reuse of existing 3D models.

以上の機能を用いて部品単位に並列造形を行うには,部品ごとに許される同時更新者数や排他制御の単位が問題となる.1つの部品を複数人が同時造形するという,粒度の細かい並列作業も考えられるが,そのような作業形態は現実に採用されることは少なく,通常は参加者間のコミュニケーションで競合状態を解決でき

☆ 基本形状と混合形状を合わせて部品と呼ぶ.

る．我々は，1 人の参加者がある程度まとまった成形を行うのを待って，次の参加者が異なる形の提案を続けるような緩やかな共有が，同一部品の造形には適切であると考えた．そこで，4.2.2 項でも述べるように，部品単位に更新権を設定して，権利を取得した 1 人の参加者だけがその部品を造形できるようにした．更新権はその取得者が明示的に解放するまで有効となる．図 3 の例では，各基本形状（葉ノード）あるいは混合ノードの蓋や注ぎ口という単位で更新権の取得と並列作業が可能となる．

4.2 要件 2：造形操作の無損失共有機能

4.2.1 陰関数モデラの分散化

部品単位に並列造形されるモデルに対して 1 章で示した要件 2 の機能を実現するには，各部品の更新者が造形内容を全システムに即時通知しながら最新形状を同時に描画する仕組みが必要となる．また，部品造形の流れを他の参加者に分りやすく伝えるには，なるべく高頻度に操作内容を通知できなければならない．そこで，図 2 に示した計 15 の不可分な造形操作ごとに，変更されるたかだか 3 個のパラメータ値を通知する方法を考案した．

図 5 に処理の流れを示す．本システムで実装した陰関数モデラは，同図の左端に示すように，(1) 造形操作に対応するパラメータ値の更新，(2) 陰関数モデルを描画用ポリゴンモデルに変換（ポリゴン化），(3) ポリゴンモデルの描画の 3 段階でモデルの可視化を行う．これを上述の方針で分散化するために，陰関数モデルをネットワーク上で共有して，各造形操作にともなって変更される差分パラメータ値を全システムに同報通知する．(2) のポリゴン化と (3) の描画は各システムが分担するので，可視化処理の負荷分散に加えて，要件 3 の「応答性 vs. 品質」に関して，参加者の設定に応じた精度でポリゴン生成と描画を各システムが自律的に実行できる．

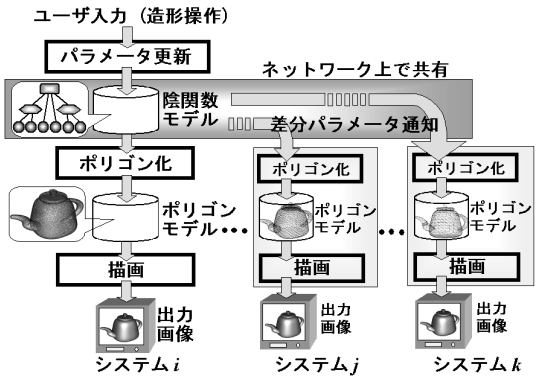


図 5 陰関数モデリングの分散化
Fig. 5 Distribution of implicit modeling method.

4.2.2 モデル管理と処理手順

前項で述べた陰関数モデルの共有と差分パラメータによる更新通知を効率良く管理するために，**図 6** に示す分散処理方式を考案・実現した[13]．各システムはモデルデータの複製を所有して，更新者から直接通知される差分パラメータ値で複製データを最新状態に維持する．最新形状の参照は複製データに対して高速に行われ，サーバを介さずに更新通知を行うため，クライアント数の増加にもスケーラブルに対応できる．更新権の発行はサーバが一元管理して一貫性を保証する．本提案方式の主な処理手順は以下のとおりである．

(1) 新規参加者がサーバへログインする（図 6 a）．このとき，ACK と一緒に最新のモデルデータがサーバから要求元のクライアントへ複写される（図 6 b）．

(2) 造形操作を希望する参加者は対象部品の更新権をサーバに要求し，許可されると ACK とともにログイン中の参加者情報がサーバから返送される（図 6 c_j, c_k）．

(3) 更新権の取得者は，(2) で得た参加者情報から差分パラメータ値を直接全システムに通知する．通知を受けた各システムは，複製データの更新とポリゴン化を行い，結果を描画する（図 6 d_j，d_k）．この例では，参加者 j と k が別の部品を並列造形しており，両者による操作結果の通知と可視化が全システムで並行して行われる．

(4) 更新権取得者が，権限の解放を最新の部品データとともにサーバへ通知する（図 6 e_j，e_k）．

4.1 節で述べた部品の再利用は，その部品の組込み先ノードの更新権を手順 (2) で取得した後に部品データを同報通知する．また，最新の部品データは手順 (4) の更新権解放時にサーバへバックアップされ，新規参加者への配付や障害復旧に利用される．

部品やモデル全体のデータを同報通知するときも，陰関数モデルの配送は転送量を大幅に削減する[14]．たとえば，ティーポット形状の陰関数モデル容量はポリゴンモデルの 1%以下となり，従来手法によるポリゴンの配送に比べて大幅に転送データ量の圧縮が実現できる．

4.2.3 無損失性の保証

図 6 に示したクライアント/サーバ間のデータ転送において，要件 2 の無損失性保証と即時性はトレードオフの関係にある．図 6 の手順 (1)，(2)，(4) は，データの信頼性に加えて更新権取得者などの状態情報の一貫性が必須のため，すべて TCP で通信を行う．しかし，手順 (3) では，即時性を犠牲にしても造形内

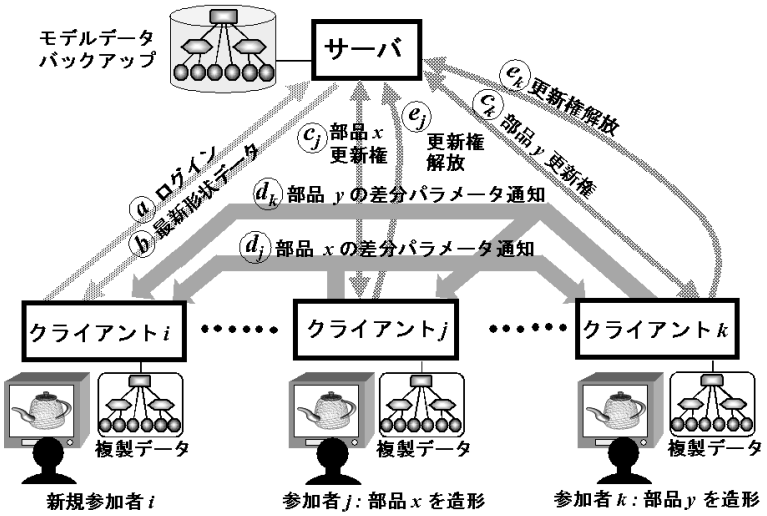


図 6 協調造形向けに提案するアーキテクチャ
Fig. 6 Proposed architecture for collaborative modeling.

容の厳密な再現が必要な場合と，逆に即時性を重視して造形順序の反転などは許容するという選択もありうる．そこで，以下の無損失性保証のモードを選択可能にした．

- 完全保証モード：TCP を用いて通知を行い，更新順序の一貫性までを完全に保証する．
- 結果保証モード：マルチキャスト（広域網の場合）か UDP（構内 LAN の場合）により即時性を上げて，結果的には必ず更新情報が通知されることを保証する．このために，更新事象の有無に関係なく最新データを一定周期で同報通知する blind broadcast 機能[1)]を併用して，損失した通知の回復を行う．

4.3 要件 3：応答性と品質の動的調整機能

図 6 の手順 (3) で各システムに通知された最新形状は，要件 3 で述べた応答性と品質の調整内容に応じて可視化されなければならない．このためには，参加者が，許容する応答時間やモデル解像度を適切かつ容易に指定できる手段が必要である．モデルの最終的な描画品質とその生成時間はポリゴン化の近似精度に依存するため，同精度の指標値を動的に調整しながら処理速度と品質を対話的に決定する機能を組み込んだ．

ポリゴン化は**図 7** に示す方法で行う．まず，可視化するモデルをその表面と交差する等幅格子（以下セル）で包含し，各セル頂点の陰関数値を求める．そして，隣接頂点の極性（正負値）が反転するエッジ上（図 7 の辺 v_iv_k，v_jv_l など）に物体表面との交差点を検出し，これらをつないでポリゴンメッシュを生成する．以上の処理に要する時間と生成されるポリゴン数

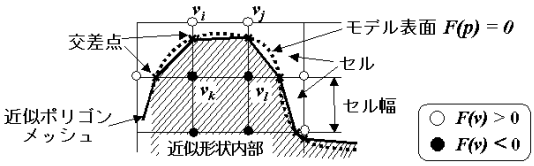


図 7 セルによるポリゴン化機構
Fig. 7 Cell polygonization mechanism.

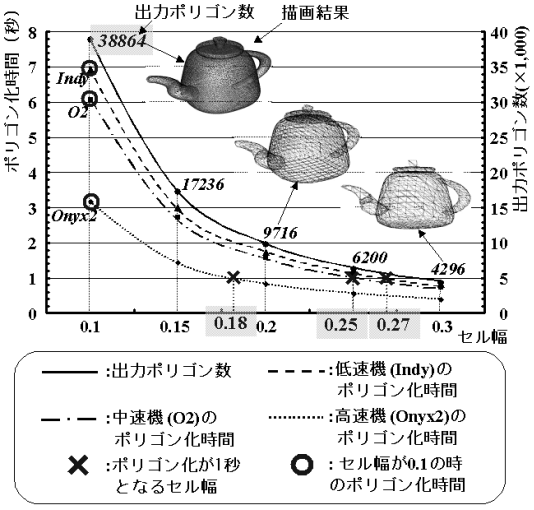


図 8 ポリゴン化時間・出力数とセル幅の関係
Fig. 8 Relation between polygonization time, the number of generated polygons, and cell size.

（メッシュの木目の細かさ）はセル幅に依存する．たとえば，**図 8** はティーポット形状で最も演算量の多い本体部分 P_3 のポリゴン化時間と出力ポリゴン数を，高速機（SGI 製 Onyx2），中速機（同 O2），低速機（同

Indy）の異なる 3 機種上でセル幅を変えながら計測した結果である．ポリゴン化時間，出力数ともセル幅と反比例関係にあるため，速度重視の場合はセル幅を広げて処理時間を削減する．図 8 の例では，Onyx2，O2，Indy で，それぞれセル幅を 0.18，0.25，0.27 に設定すれば，いずれも 1 秒以内にポリゴン化が終了する（図 8 の×点）．また，同じセル幅でポリゴン化を行えば，どの機種でもまったく同じ幾何構造のポリゴンメッシュが生成できる．たとえば，セル幅を 0.1 にすれば全機種で 38,864 ポリゴンの高品質な出力画像が得られる．ただし，ポリゴン化時間は Onyx2 の 3 秒に比べて，O2 では 6 秒，Indy では 7 秒を要する（図 8 の○点）．以上の機能の実装により，対話変形には低負荷・低解像度，形の確認には高負荷・高解像度なモデル生成を，参加者自身がセル幅の調節だけで選択することができる．

5. プログラムの実装

図 6 において，サーバは新規参加者のログインと更新権の要求・解放時の処理だけを分担し，個々の造形操作の伝達と可視化はすべてクライアント間の通信によって実現されている．このため，サーバの負荷が軽く，2 章で述べた関連研究では必須の高性能サーバは必要ない．クライアントの内部構造を**図 9** に示す．通常は，RM（rendering manager）が最新形状の描画を繰り返しており（図 9 a），ローカルに造形操作を行うか（図 9 b），他システムから更新情報を受信（図 9 c）すると IP（implicit polygonizer）がポリゴン化を行う．ポリゴン化処理には，既存手法の中からその高速性に特徴がある Bloomenthal が開発した手法[15]を採用し，4.3 節で述べた機能拡張を行った．プログラム規模は，C，C++，OpenGL を用いてクライアントが約 6,400 行，サーバが約 1,100 行となった．

図 10 は，システムの利用者インタフェースを示す．計算機の未経験者でもモデル制作に集中できるように，簡単なマウス操作だけで造形が可能な GUI を用意した．他システムへ通知される造形操作と，視点移動・セル調節・混合演算などの各システム固有の局所操作を別メニューに分けた．パラメータ値の変更は，図 10 に示すようにスライダアイコンをマウスで選択したまま上下に動かし，その移動量で変更値の増減を指定する．このとき，パラメータ値とその部品形状がマウス操作に応じてただちに更新表示されるため，実際の形を確認しながら値の設定ができる．他者が操作するパラメータとその部品形状も同様の仕組みで表示されるため，上級者の操作内容を視覚的に確認・会得できる．

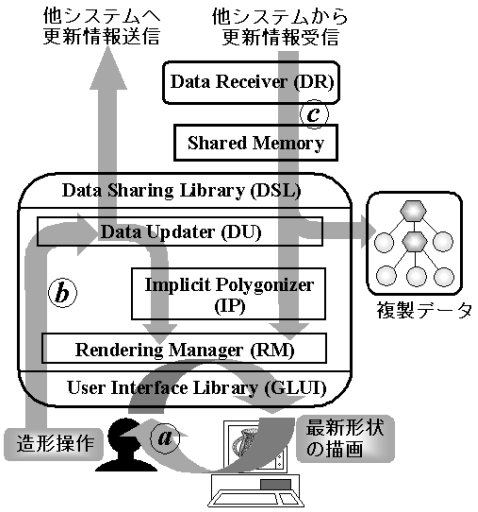


図 9 クライアントシステムの内部構造
Fig. 9 Client system's internal structure.

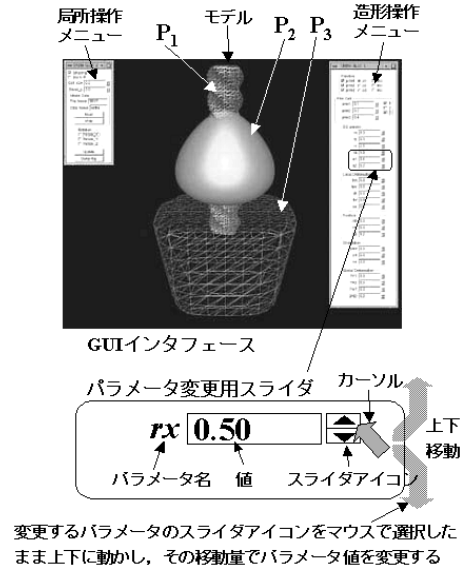


図 10 利用者インタフェースと操作法
Fig. 10 User interface and its operational technique.

また，部品単位にセル幅の設定を可変にして，造形中の部品を強調表示したり（図 10 中の P_2），単純な形を低解像度で表示（同 P_3）したりして処理時間を短縮できるようにした．

6. 評価実験

6.1 実験内容

提案した 3 要件の協同作業における支援効果と利便性について検証するために，同一モデルを単独および協同で制作する実験を行い，作業効率と完成品質の両

面から比較検討した．様々な利用者層への適用可能性も確認するために，計算機やCGに関する知識や経験が異なる以下の4グループから被験者を選んだ．

- グループ1：CGの知識・経験を持つ情報専攻大学生
- グループ2：CGの知識・経験がない情報専攻大学生
- グループ3：情報基礎教育のみを受けた文系大学生
- グループ4：計算機の利用経験がない主婦や子供

実験が長時間になると被験者の疲労などが結果に影響するため，単純な形の組合せで本システムの造形概念が理解できる課題の設定を念頭に置いた．そこで**図11**に示すように，3個の楕円体部品 P_1，P_2，P_3 を変形して「徳利」の形を作るという，変形手順が想定しやすく，かつ主要な造形操作の応用も含む例を選んだ．実験は各グループごとに3人で行い，各人が個人造形，および分担する部品を決めた後に3人で協同造形という2通りの場合について，完成までの時間と造形操作回数（パラメータの変更回数）を計測した．造形時間は，各被験者が押下する開始と終了ボタンの間隔を計測した．1時間程度の操作説明と事前練習を行い，適時小休止をはさんで全グループが2時間以内にひととおりの実験を終えた．実験は，サーバ用のノートパソコン（Windows）1台と，クライアント用に4.3節で述べたOnyx2，O2，Indyの3機種を10BASE-Tで接続したLAN環境で行った．

6.2 実験結果と考察

図12 (a) に各グループの個人および協同造形に要した時間を，同図 (b) に操作回数の総計をそれぞれ示す．両グラフで同じ S_{ij} は同一の被験者を表し，C_i は協同造形結果を示す．協同造形の時間は各グループの被験者3人中の最長時間を，操作回数は3人の平均値を用いた．

個人造形に要した時間は各グループでばらつきがあり，最短で6〜10分，最長で16〜19分という結果であった．また，個人造形の時間と操作回数の間には比例関係が認められる一方で，完成したモデルの品質と造形時間には反比例の傾向が見られた．**図13** (a) は，各グループの最短時間で個人造形されたモデル，同図 (b) が最長時間のモデルをそれぞれ表している．これらより，短時間で造形されたモデルの方が課題に近い形に仕上がっており，逆に時間がかかったモデルには図13 (b) に示した形状の誤りが観察された．これは，システムの造形概念をよく理解して操作法に慣れた被験者が，より少ない操作で速く目的形状を作成しているためと考えられる．また，グループ3，4の被験者

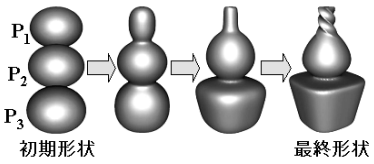


図11 実験の造形課題
Fig. 11 Modeling task for experiment.

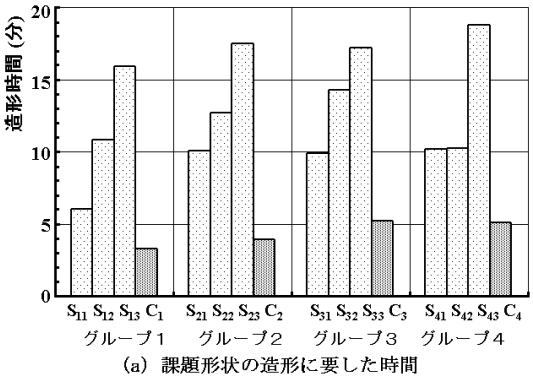


図12 実験結果（その1）
Fig. 12 Result of experiment (No.1).

S_{31}，S_{41} などはグループ1，2の被験者と比べても十分速く正確に課題形状を制作しており，提案手法が初心者を含む広範な利用者に有効な造形法であることの示唆が得られた．

協同造形では，全グループで制作時間・操作回数とも個人造形より大きく短縮され，3人の並列作業による効率向上が確認できた．どのグループも個人造形の最短時間の半分以下である3〜5分でモデルが完成している．個人造形後に協同造形を実施したので，順序効果による慣れの影響は無視できないが，グループ内の上達者の造形操作を参考あるいは真似ることで，単独作業よりも速く目的の結果が得られたことが実験後

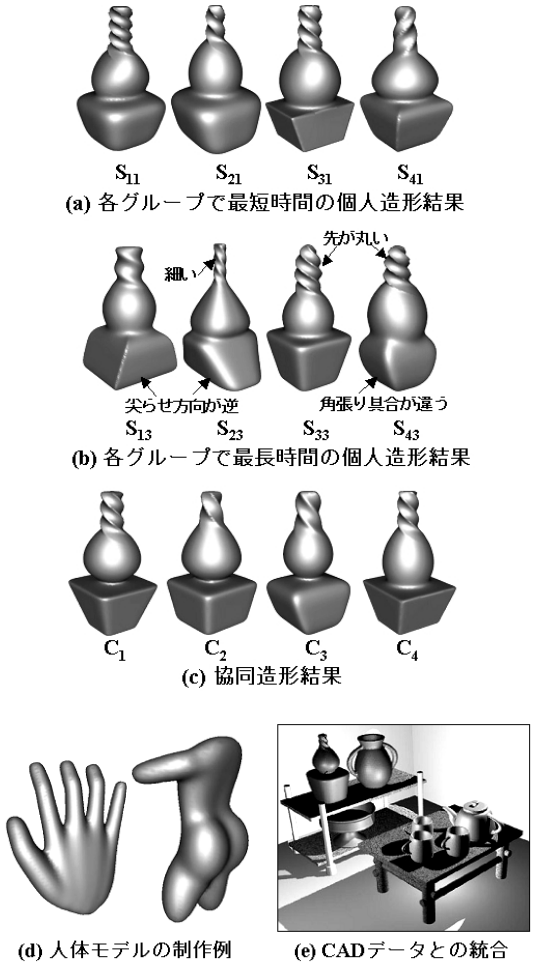


図 13 実験結果（その 2）
Fig. 13 Result of experiment (No.2).

のアンケートから判明した．したがって，要件 2 の機能により上達者の造形技能が伝習され，不慣れな被験者の作業効率向上に有効であったと考えられる．協同制作された図 13 (c) のモデルは，同図 (a) の個人造形のものに比べてさらに課題形状に近い高品質なものとなった．協同造形では，各被験者が分担部品に集中して作業できることが形状品質の向上に寄与すると考えられる．さらに，4.3 節で述べたモデル解像度の調節機能も，変形対象部品が固定される協同造形では事前に自分の担当部品以外を低解像度に設定することで，特に O2，Indy の中・低速機で応答性向上に有効活用された．造形操作の同報通知には，4.2.3 項で述べた UDP と blind broadcast による結果保証モードを用いたが，操作順の反転や通知漏れなどは認められなかった．広域網を用いた環境での検証は今後の課題である．

操作性の面では，グループ 3，4 の被験者の一部から GUI 操作の難しさが指摘された．特に，図 12 (b) で操作回数が例外的に多かった被験者 S_{33} はスライダ操作に苦慮して，意図する形に収束するまでに多くの操作を要した．計算機の初心者向けには，さらに簡略化した GUI や開発中の図像的ジェスチャを併用する形状変形法[16]などの，より直観的な操作手段の提供が必要である．

本実験では比較的単純な形を課題に選んだが，図 13 (d) に示す人体モデルのように，市販の CAD ツールでは高度な造形技能を要する自然で滑らかな形も容易に制作できる．手・足・顔などの細かい部位とその他の部分を操作の上達度に応じて分担造形すれば，様々な体形モデルを効率良く制作できる．また，CAD で作成したモデルとの統合化も可能である．図 13 (e) は我々のモデラで制作した陶芸モデルを OBJ 形式[17]に変換し，Alias 社製 maya モデラで作成したテーブルや棚と統合・描画した結果である．

協同作業には，参加者全員が同時に作業を行う同期型と，別々に分担実施した成果を後で統合化する非同期型がある．本実験では，他者の操作技能伝習などの利点も確認するために同期型の場合を評価したが，非同期型への適用とその効果についても検証が必要である．

7. おわりに

本論文では，陰関数モデリング法を分散環境に拡張して，複数参加者による新しい形の創作や他者の造形技能の伝習をネットワーク上で直観的に行える協調型 3 次元造形システムの一構成法を提案した．専門知識や経験の異なる被験者による評価実験から，協同造形が形状設計の性能・効率面にとどまらず，制作対象物の品質向上にも有効であることが判明した．また，市販ツールでは作成が難しい形状を，計算機の利用経験が乏しい被験者でも短時間に制作できることを確認した．これまで専門家の特殊技能であった 3 次元モデリングをネットワークを介してより広範な利用者層に拡大することも期待できる．

今後の課題は，広域網を介してより複雑な形の造形実験を行い，システムの拡張性や非同期型協同作業への適用について検証を行うことである．さらに，遠隔教育や実際のデザイン現場への導入・試用を通じて，システムの応用についても具体的に検討したい．

謝辞 本研究は，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業プロジェクト番号 JSPS-RFTF96P00603 の助成による．

参 考 文 献

1) Singhal, S. and Zyda, M.: *Networked Virtual Environments*, p.331, Addison Wesley (1999).
2) Bloomenthal, J., et al.: *Introduction to Implicit Surfaces*, p.323, Morgan Kaufmann (1997).
3) Macedonia, M., Zyda, M., Pratt, D., Barham, P. and Zeswitz, S.: NPSNET: A Network Software Architecture for Large Scale Virtual Environments, *Presence*, Vol.3, No.4, pp.265–287 (1994).
4) Funkhouser, T.: RING: A Client-server System for Multi-user Virtual Environments, *Proc. ACM SI3D '95*, pp.85–92 (1995).
5) Das, T., Singh, G., Mitchell, A., Kumar, P. and McGee, K.: NetEffect: A Network Architecture for Large-scale Virtual Worlds, *Proc. ACM VRST '97*, pp.157–163 (1997).
6) 中村暢達，里田浩三，平池龍一，根元啓次：インターネット対応3Dマルチユーザシステム Ladakh，信学論，Vol.J81-DII, No.5, pp.982–991 (1998).
7) 原田裕明，川口尚久，岩川明則，松井一樹，大野敬史：場の共有アーキテクチャに基づく3次元仮想空間コミュニティ，信学論，Vol.J81-DII, No.5, pp.972–981 (1998).
8) Araki, Y.: VSPLUS: A High-level Multi-user Extension Library for Interactive VRML Worlds, *Proc. VRML '98*, pp.39–47 (1998).
9) 品川嘉久：3次元形状データ圧縮手法の最近の動向，情報処理，Vol.40, No.3, pp.280–285 (1999).
10) Anupam, V. and Bajaj, C.L.: Shastra: Multimedia Collaborative Design Environment, *IEEE Multimedia*, Vol.1, No.2, pp.39–49 (1994).
11) Barr, A.H.: Superquadrics and Angle Preserving Transformations, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.1, No.1, pp.11–23 (1981).
12) Nishino, H., Fushimi, M., Utsumiya, K. and Korida, K.: A Virtual Environment for Modeling 3D Objects Through Spatial Interactions, *Proc. IEEE SMC '99*, Vol.6, pp.81–86 (1999).
13) Nishino, H., Sakamoto, A., Utsumiya, K., Yoshida, K. and Korida, K.: A Method for Sharing Interactive Deformations in Collaborative 3D Modeling, *Proc. ACM VRST '99*, pp.116–123 (1999).
14) Nishino, H., Mori, Y., Utsumiya, K., Yoshida, K. and Korida, K.: A Collaborative Design Framework in a Distributed Virtual Environment, *Proc. PDPTA '99*, Vol.1, pp.348–354 (1999).
15) Bloomenthal, J.: An Implicit Surface Polygonizer, *GRAPHICS GEMS IV*, AP Professional, pp.324–349 (1994).
16) 西野浩明，凍田和美，宇津宮孝一：両手ジェスチャで変形可能な3次元形状表現法，情報処理学会論文誌，Vol.40, No.2, pp.698–701 (1999).
17) Rule, K.: *3D Graphics File Formats*, pp.119–139, Addison Wesley (1996).

(平成12年 5 月8日受付)
(平成12年10月6日採録)



西野　浩明（正会員）

昭和60年九州大学大学院総合理工学研究科情報システム学専攻修士課程修了．同年日本電気入社．OS開発部門，米国駐在員を経て平成7年同社を退社．同年大分大学工学部助手．VR，分散処理に関する研究に従事．電子情報通信学会，日本VR学会，ACM，IEEE各会員．



宇津宮孝一（正会員）

昭和43年九州大学工学部電子工学科卒業．同年九州大学助手，昭和52年同助教授を経て，昭和61年より大分大学工学部教授．平成10年1月より2年間大分大学工学部長．工学博士．VR，計算機ネットワーク，CSCWの研究に従事．電子情報通信学会，日本ロボット学会，人工知能学会，日本VR学会，ACM，IEEE各会員．



吉田　和幸（正会員）

昭和59年九州大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了．同年大分大学工学部講師，昭和61年同助教授．平成12年4月よりミシガン大学客員研究員．工学博士．計算機ネットワーク，並列プログラミング言語の研究に従事．電子情報通信学会，ソフトウェア科学会，ACM各会員．



凍田　和美（正会員）

昭和51年熊本大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了．同年大分大学工学部助手，平成4年大分県立芸術文化短期大学助教授，現在同大学教授．VR，計算機ネットワーク，CSCWの研究に従事．電子情報通信学会会員．