協同作業可能な三次元手書きモデリングインタフェースの実現

櫻 庭 康 紘† 藤 永 芳 弘† 山 崎 貴 仁†
渡 部 聡 朗† 金 子 輝 良† 佐 賀 聡 人†

我々は既に三次元手書きモデリングインタフェース BlueGrotto を提案している．この BlueGrotto では没入型 VR 環境での空中描画によって様々な幾何立体プリミティブを入力できる．本論文では BlueGrotto を拡張することで複数のユーザが同一のモデル空間を共有してモデリングを行えるインタフェースを実現する．また実験により，拡張 BlueGrotto を用いて複数のユーザが協同作業を行い実用 CAD のための幾何立体モデリングを完了できることを示す．

A 3D Sketch-Based Modeling Interface for Cooperative Work

Yasuhiro Sakuraba,† Yoshihiro Fujinaga,†
Takahito Yamazaki,† Toshiaki Watanabe,† Teruyoshi Kaneko†
and Sato Saga†

We have proposed a 3D sketch-based modeling interface, BlueGrotto, where a single user can input various geometric 3D primitives by midair freehand drawing in an immersive VR environment. This paper extends the BlueGrotto so that multiple users can share an identical model space while modeling. Experimental results show multiple users can do cooperative work using the extended BlueGrotto and finish 3D geometric modeling for a practical CAD system.

1. はじめに

例えば「雪像作り」などのように現実世界において立体造形を行う際には，複数人でリアルタイムに作業の進捗を確かめ合い，議論し，そしてイメージを膨らませながら協調的に共同作業を行うことがある．しかし，一般の実用 CAD を用いた幾何立体モデリングを行う際には，分業作業は可能であっても，このような協調的な共同作業を行うことは困難である．これは，通常の CAD ユーザインタフェースでは平面上のポインティング操作やメニュー操作といった間接的な操作で造形を行うためと考えられる．このような間接的な操作では，その操作過程と造形結果が直感的には結びつかない．そのため，他者の操作状況からその造形意図を刻一刻とリアルタイムに感じることは難しく，協調的な状況とはなりにくい．

ところで，直感的な操作で対話的に幾何立体図形を入力する方法として，我々は三次元手書きモデリングインタフェース BlueGrotto を提案した[1]．BlueGrotto は，没入型の VR 環境における三次元空間中への直接的な手書き描画によって多様な幾何立体プリミティブを入力する手書きインタフェースであり，これ自体は CAD とは独立したユーザインタフェースとして動作する．そして，BlueGrotto が手書き入力フロントエンドプロセッサとして既存の様々な実用 CAD ソフトと連携して動作することで，全体として直感的な手書き CAD 環境を実現する[2]．ただし，この BlueGrotto は単数ユーザに対する手書きインタフェースを提供することしかできず，複数ユーザには対応していない．

本論文では，従来の BlueGrotto を拡張することで，複数の BlueGrotto を一つの CAD のフロントエンドプロセッサとして動作させる機構を提案する．これにより，一つのモデル空間を複数ユーザで共有できる BlueGrotto を実現し，実用 CAD を用いた幾何立体モデリングにおける協調的な共同作業を可能にする．

2. BlueGrotto の概要

本論文で提案する機構の基盤となる従来の BlueGrotto の概要を示す．

2.1 設計方針

BlueGrotto は一貫した手書き描画によって多様な

† 室蘭工業大学
Muroran Institute of Technology

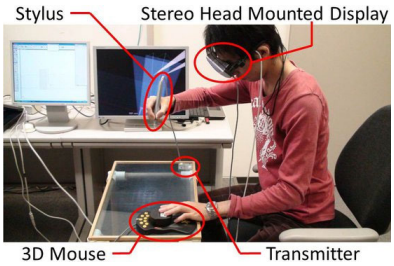


図 1　BlueGrotto の没入型 VR 環境
Fig. 1　Immersive VR environment for BlueGrotto

幾何立体プリミティブを入力できるインタフェースとして開発されており，既存の様々な実用 CAD のフロントエンドとして汎用的に利用されることが想定されている．このため設計方針として以下の 3 点を掲げている[1]．

- 手書き描画動作を中心とする空中への直接的なスタイラス操作で幾何立体プリミティブの入力を完了させる
- 論理的な原則に従った一貫した入力方針による多様な幾何立体プリミティブの入力を実現することで汎用性を高める
- 機能を「幾何立体プリミティブの入力」のみに限定し，CAD が有すべきその他の機能の実装を避ける

2.2　入出力デバイス

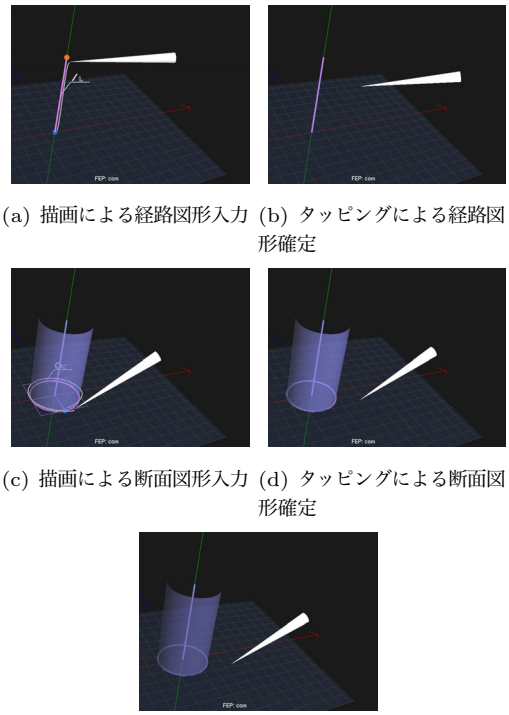
BlueGrotto の操作は図 1 に示す没入型 VR 環境で行われる．ここで使用される入出力デバイスは，スタイラス，ステレオヘッドマウントディスプレイ（HMD），3D マウスの三つである．スタイラスはボタン付きのペン型センサで，トランスミッタに対する三次元的な位置・姿勢を 6 自由度でリアルタイムに計測する．HMD は装着式のディスプレイで両眼立体視を可能にする．また，HMD にはスタイラスと同様のセンサが取り付けられており視点を 6 自由度でリアルタイムに計測する．3D マウスはノブの付いた操作デバイスで，ノブの「ずらし」や「ひねり」の度合いを 6 自由度でリアルタイムに計測する．

2.3　ユーザインタフェース

BlueGrotto のユーザが行う操作は以下の三種となる．

2.3.1　幾何立体プリミティブ入力・修正操作

BlueGrotto では，一つの「幾何立体プリミティブ」は一つの「経路図形」と一つ以上の「断面図形」の組み合わせとして表現される．ここで，各々の「経路図形」および「断面図形」は，7 種類の「基本幾何曲線」（すなわち「線分」,「円」,「円弧」,「楕円」,「楕円弧」,「閉自由曲線」,「開自由曲線」）のいずれかが一つ以上連結した「基本幾何曲線列」として構成される．ユーザはスタイラスで空中描画を行うことで一筆の描画ストロークごとに経路図形と断面図形を入力していく．このとき BlueGrotto は描画ストロークを手書き図形認識エンジン FSCI[3] で逐次的に基本幾何曲線列として認識し，その結果から幾何立体プリミティブを随時生成する．実際に幾何立体プリミティブの入力を行っている様子を図 2 に示す．



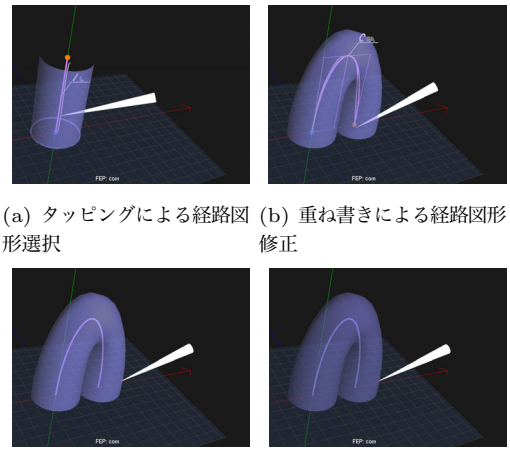
(a) 描画による経路図形入力　(b) タッピングによる経路図形確定

(c) 描画による断面図形入力　(d) タッピングによる断面図形確定

(e) タッピングによる幾何立体プリミティブ確定

図 2　BlueGrotto における幾何立体プリミティブ入力操作例
Fig. 2　Input of geometric 3D primitive in BlueGrotto

ここで，経路図形，断面図形，および幾何立体プリミティブの三種類のオブジェクトはそれぞれ，入力途中である「アクティブ状態」と，確定後の「非アクティブ状態」の二つの状態を持つ．ユーザは，非アクティブ状態の「経路図形」または「断面図形」をタッピングすることで，それをアクティブ状態に変更することができる．このとき，それを含む幾何立体プリミティブも同時にアクティブ状態となる．一方，アクティブ状態の「経路図形」または「断面図形」があるとき，ユーザは何も無い空中をタッピングすることで，これを非アクティブ状態に変更することができる．さらに，アクティブ状態の「経路図形」も「断面図形」も存在しないときには，ユーザは何も無い空中をタッピングすることで，幾何立体プリミティブを非アクティブ状



(a) タッピングによる経路図形選択　(b) 重ね書きによる経路図形修正

(c) タッピングによる経路図形確定　(d) タッピングによる幾何立体プリミティブ確定

図 3　BlueGrotto における幾何立体プリミティブの修正操作例
Fig. 3　Edit of geometric 3D primitive in BlueGrotto

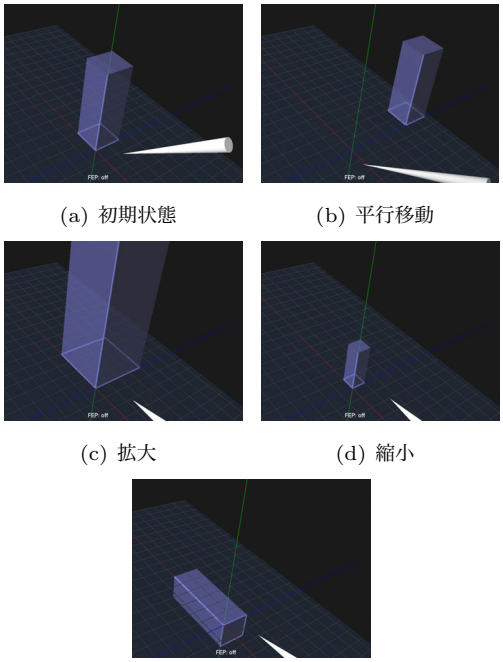
態に変更することができる．

ユーザは，重ね書き操作やジェスチャ操作を用いることで，アクティブ状態の経路図形および断面図形のを修正を行うことができる[4),5)]．実際に既に入力を終えた幾何立体プリミティブの経路図形に対して重ね書き操作を行い修正する様子を図 3 に示す．

2.3.2　モデル空間操作

BlueGrotto ではオブジェクトが存在する「モデル空間」とユーザが存在する「ユーザ空間」との相対位置関係を 3D マウスで操作することができる．これを「モデル空間操作」と呼ぶ．この操作により，ユーザは自分にとって入力しやすい位置・姿勢・大きさにオブジェクト群が配置されるようにモデル空間を調整することができる．実際にモデル空間操作を行う様子を図 4 に示す．

これらの操作を行うと，ユーザには目の前のモデル空間が平行移動，回転，拡大・縮小している様に知覚される．しかし，システムから見ると，ユーザの存在するユーザ空間の方が，BlueGrotto のモデル空間の中で平行移動，回転，拡大・縮小したと捉えることもできる．この考え方に基づくモデル空間操作によるユーザ空間の変化の様子を図 5 に示す．ここで，図中の X_{model}，Y_{model}，Z_{model} が BlueGrotto のモデル空間，X_{user}，Y_{user}，Z_{user} がユーザ空間を示している．初期状態である図 5(a) ではモデル空間とユーザ空間とが一致しているが，この状態からモデル空間操作を行った結果，ユーザ空間が図 5(b) のようにモデル空間中で変化することになる．このように考えると，例えば，ユーザから見てモデル空間を拡大させる操作は，システム側から見るとユーザ空間を縮小させる，

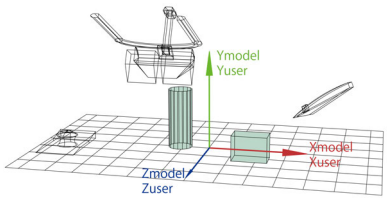


(a) 初期状態　(b) 平行移動

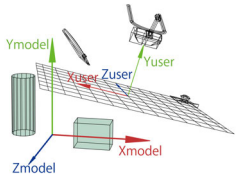
(c) 拡大　(d) 縮小

(e) 回転

図 4　BlueGrotto におけるモデル空間操作例
Fig. 4　Model space operation in BlueGrotto



(a) BlueGrotto の起動直後のユーザ空間



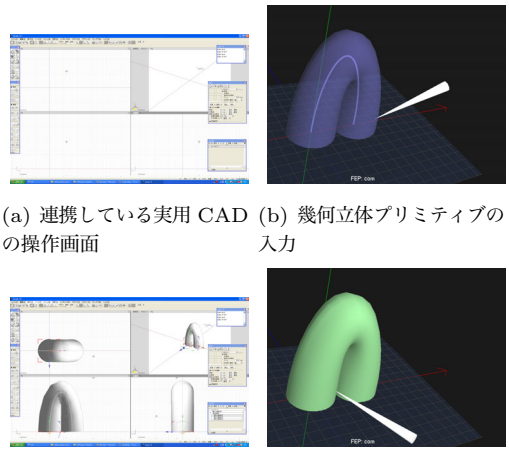
(b) モデル空間操作後のユーザ空間

図 5　モデル空間操作によるユーザ空間の変化
Fig. 5　Transformation of user space by model space operation

つまりユーザが「小人化」する操作となる．

2.3.3　実用 CAD との連携操作

BlueGrotto は，既存の様々な実用 CAD に対して空中手書き描画による幾何立体プリミティブ入力機能を提供する汎用フロントエンドプロセッサとして設計されている．また既に，既存の様々な実用 CAD と汎用的に連係動作することが確認されている[2)]．BlueGrotto と実用 CAD との間におけるデータのやり取



(a) 連携している実用 CAD の操作画面　(b) 幾何立体プリミティブの入力

(c) 実用 CAD に幾何立体プリミティブを登録　(d) 実用 CAD 上の幾何立体プリミティブを表示

図 6　BlueGrotto と実用 CAD との連係動作例
Fig. 6　Combination between BlueGrotto and a practive CAD

りには，TCP/IP プロトコルを用いた通信が利用されている．

実際に BlueGrotto が実用 CAD と連携して動作する様子を図 6 に示す．図 6(a) は BlueGrotto の連係相手となる実用 CAD の動作画面である．図 6(b) は，2.3.1 節で述べた操作によって BlueGrotto の図形データベースに幾何立体プリミティブを登録したところである．この状態で，実用 CAD との連携操作を行うことで，BlueGrotto の図形データベースのすべての幾何立体プリミティブの情報を実用 CAD 側の図形データベースに登録することができる．図 6(c) は，図形データベースに幾何立体プリミティブを登録した直後の実用 CAD の操作画面である．なお，実用 CAD の図形データベースに幾何立体プリミティブを登録する操作を行うと，その時点で BlueGrotto の図形データベースに存在するすべての経路図形や断面図形に関する情報をクリアする．再び実用 CAD との連携を開始すると，BlueGrotto では図 6(d) のように先に BlueGrotto 側から送信した幾何立体プリミティブを含む実用 CAD の図形データベースにあるすべての幾何立体オブジェクトのポリゴンが表示される．この後，BlueGrotto ではさらに新たな幾何立体プリミティブの入力を続けることができる．

3. 協同作業可能な BlueGrotto の構築

BlueGrotto のユーザは仮想環境に没入してモデリング作業を行う．そのため，直接的な幾何立体プリミティブの入力と，作業内容の直感的な視認が可能である．また BlueGrotto はユーザの描く一筆の描画ストロークごとにリアルタイムに反応して幾何立体プリミティブを更新し表示するため，幾何立体プリミティブを対話的に創造していくことができる．したがって，もし BlueGrotto を複数ユーザで同時に利用しモデル空間を共有することができれば，従来は困難であった実用 CAD を用いた幾何立体モデリングにおける協調的な共同作業を実現できる可能性がある．ここでは，その具体的な実現方法として，従来の BlueGrotto を拡張し複数の BlueGrotto を一つの CAD のフロントエンドプロセッサとして動作させる機構を提案する．

3.1 設計方針

従来の BlueGrotto の基本的な操作性を損なうことなく複数ユーザでの操作を可能にするための基本方針を以下に掲げる．

- 従来の BlueGrotto の設計方針（2.1 節）から逸脱しない
- 従来の BlueGrotto が持つ入出力デバイス（2.2 節）とユーザインタフェース（2.3 節）を可能な限り再現する
- 複数のユーザによる協同作業を実現する

以上の方針を遵守することで，従来の BlueGrotto の操作性を損なわずに，協同作業可能な BlueGrotto を構築できると考えられる．

3.2 入出力デバイス

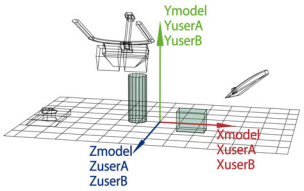
基本方針に従い，ユーザ一人一人に従来と同等の入出力デバイス（図 1）を割り当てる．したがってシステム全体としては参加するユーザの数だけ従来の入出力デバイスを準備する．

3.3 ユーザインタフェースの設計

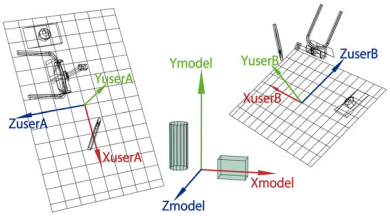
複数の BlueGrotto を TCP/IP 通信で一つの実用 CAD と連携させることで協同作業が可能なユーザインタフェースを実現する．ここで基本方針に従い，個々の BlueGrotto では従来の BlueGrotto とほぼ同様のユーザインタフェースを再現する．しかし，協同作業を行う場合，各々のユーザが行った操作は他のユーザにも影響を与える．そのため，まず各操作に対して適切な権限を設定する．

3.3.1 幾何立体プリミティブ入力・修正操作の操作権

幾何立体プリミティブの入力・修正操作は，2.3.1 節で説明したように，一貫した流れの中で行われる．そのため，入力・修正中は，他のユーザからの割り込みを制限する必要がある．そこで，あるユーザが経路図形または断面図形をアクティブにした時点で，それを含む幾何立体プリミティブに対する操作権をそのユーザが取得するようにする．



(a) BlueGrotto の起動直後の各ユーザ空間



(b) モデル空間操作後の各ユーザ空間

図 7　モデル空間操作による二人のユーザ空間の変化
Fig. 7　Transformation of user spaces of two users by model space operation

一方，図形の操作権を一人のユーザが占有し続けては協同作業が阻害される．そこで，ユーザが操作権のある幾何立体プリミティブを非アクティブにした時点で，その操作権をそのユーザが放棄するようにする．

3.3.2　モデル空間操作の操作権

BlueGrotto におけるモデル空間操作は，2.3.2 節で説明したように，BlueGrotto のモデル空間とユーザ空間との相対位置関係を操作するものである．そのため，ユーザがどのようにモデル空間操作を行っても，他のユーザには影響を与えない．例えば，図 7 を考える．ここで，BlueGrotto を起動した直後の図 7(a) の段階では，二人のユーザ空間は共にモデル空間と一致している．ここで，各ユーザがそれぞれ独立にモデル空間操作を行っても，これをシステム側から見れば，図 7(b) のように，各ユーザ空間がモデル空間中で移動，回転，拡大・縮小するだけで，互いに他のユーザには影響を与えていないのがわかる．したがって協同作業を行う BlueGrotto であっても，モデル空間操作に関しては，常にすべてのユーザに操作権を設定してよいことになる．

3.3.3　実用 CAD との連携操作の操作権

2.3.3 節で説明したように，実用 CAD との連携操作を行うと BlueGrotto で作成中の幾何立体プリミティブは全てポリゴン情報に置き換り，他のユーザに多大な影響を与えることになる．したがって，連携操作に関しては，予め定めた特定の一名のユーザに対してのみ，その操作権を設定することとする．

3.4　データ共有機構の導入

円滑な協同作業を実現するためには，すべてのユーザが一つのモデル空間を共有して作業を行えるようなデータ共有機構を実現する必要がある．そのために以下の条件を満たすような BlueGrotto ネットワークを構築する．

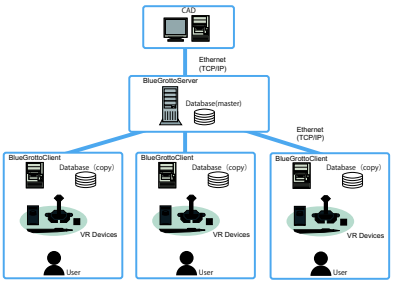


図 8　BlueGrotto のネットワーク構成
Fig. 8　Network topology of BlueGrotto

操作への即応　ユーザ操作に対して即座にシステムが反応するようにする

操作の共有　行われている操作がすべてのユーザに欠損や誤りなく通知され知覚されるようにする

結果の一致　操作の結果生成された幾何立体がすべてのユーザで一致するようにする

これらの条件を満たすために，まず図 8 のようなトポロジーを持つクライアントサーバ型のネットワークシステムを TCP/IP 接続で構成する．ただしここで，サーバは BlueGrotto の図形データベースを一元的に管理するノードであり，クライアントは BlueGrotto の没入型 VR 環境によるユーザインタフェースを各ユーザに提供するノードである．

つぎに，そのネットワークシステム上で図 9 の流れに従った情報更新機構を実現することで所望のデータ共有機構を実現する．ただし図 9 は，ある一人のユーザの操作に着目したもので，そのユーザのクライアントを「着目クライアント」として示していることに注意する．この流れが全てのクライアントから発生することにより，全クライアント間のデータ共有が実現される．ここで，着目クライアント内では，現在の「スタイラス情報」と「3D マウス情報」の更新に従って即座に「入力ストローク情報」や「タッピング情報」が更新されるため「操作への即応」が実現される．着目クライアントでの「スタイラス情報」と「3D マウス情報」の更新はサーバを介して各クライアントに通知されるため，すべてのユーザ間での「操作の共有」が実現される．さらに，着目クライアントにおける「ストローク情報」と「タッピング情報」の更新をサーバに通知し，この更新に基づいてサーバで一括して「図形群情報」（経路図形，断面図形，幾何立体プリミティブなど）の更新を行い，それを各クライアントに配信

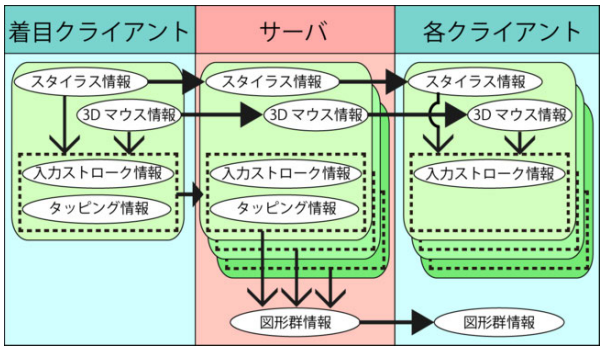


図 9 BlueGrotto ノードの情報更新の流れ
Fig. 9 Data update flow of BlueGrotto nodes

するという手順を踏むことで「結果の一致」が保証される．

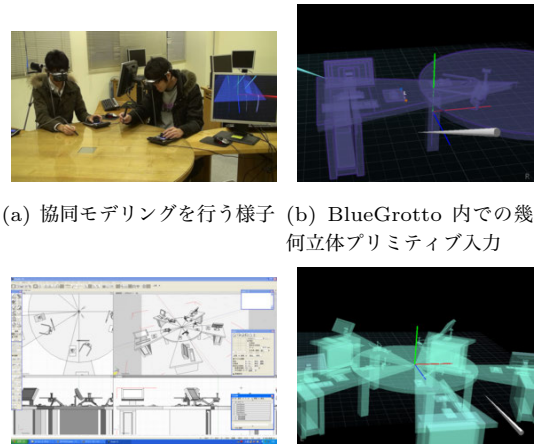
4. 動作実験

協同作業可能な BlueGrotto を実装し，二人のユーザで実際に協同モデリングを行った様子を図 10 に示す．この例では，二人のユーザが互いに声を掛け合いながら協調したモデリングを行い，約 4 時間ですべてのモデリングを完了することができ，提案システムが所望のモデリングインタフェースとして基本的に動作することが確認された．ここで例えば，作業中に一方のユーザ A がモデル空間操作でモデル空間を拡大して詳細なモデリングを行うと，他方のユーザ B にはユーザ A（実際にはユーザ A の「仮想スタイラス」）が「小人化」したように知覚され，ユーザ A が細部のモデリング作業に取りかかっていることをユーザ B は自然に感じ取ることができた．これに類する効果は作業中の様々な場面で観察されており，このような効果が円滑な協調作業に大きく貢献しているように推察された．

多数のユーザによる負荷実験も試みた．その結果 10 名のユーザ（10 台のクライアントノード）による同時協同作業を行った場合でも提案システム自体は支障なく動作することが確認された．ただし，10 名のユーザが互いに声を掛け合うことは困難であるため，現在のシステムのままでは，このような規模での全体的な協調作業は事実上困難であることも明らかとなった．

5. おわりに

本論文では，複数の三次元手書きモデリングインタフェース BlueGrotto を一つの実用 CAD のフロントエンドプロセッサとして動作させる機構を提案した．また，これによって一つのモデル空間を複数のユーザで共有できる BlueGrotto が実現され，二人のユーザ



(a) 協同モデリングを行う様子 (b) BlueGrotto 内での幾何立体プリミティブ入力

(c) 実用 CAD 上で詳細な編集作業 (d) 完成した幾何立体モデルの BlueGrotto での表示

図 10 BlueGrotto を用いた協同作業
Fig. 10 Cooperative work with BlueGrotto

による協調的な幾何立体モデリングが実際に可能となることを実験により示した．

今後は，BlueGrotto による協調立体モデリングの有効性を定量的に評価すると共に，ユーザ数が増加したりユーザ間が物理的に離れている場合のような「声掛け」が困難な状況への対処についても検討する予定である．

謝辞 本研究は科学研究費補助金（課題番号 21500193）による研究成果の一部である．

参考文献

1) 井上智之，西住直樹，鈴木伸明，安福尚文，佐賀聡人：仮想空間中での手書き認識に基づいた 3 次元モデリングインターフェース”BlueGrotto” の提案，電子情報通信学会論文誌 D， Vol.87, No.6, pp.1309–1318 (2004).
2) 松浦修一，佐賀聡人：複数の CAD アプリケーションに 3 次元スケッチによるモデリングインタフェースを提供するフロントエンドプロセッサの提案，電子情報通信学会技術研究報告書， Vol.MVE2007-38, pp.7–12 (2007).
3) 佐賀聡人，牧野宏美，佐々木淳一：ファジースプライン曲線同定法，電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理， Vol.77, No.8, pp.1620–1629 (1994-08-25).
4) 鈴木伸明，岩佐善昭，阿部修人，佐賀聡人：重ね書きスケッチによる立体図形プリミティブ入力インタフェース BlueGrotto2 の試作，インタラクション， Vol.1, pp.189–190 (2004).
5) 中野将志，佐賀聡人：ジェスチャ操作可能な 3 次元スケッチモデリングインタフェースの試作，電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集, Vol.1, p.0115 (2008).