

# 効率のよい計測のためのナビゲーションを実現する 領域制限に基づく 3D インタラクティブモデリング

上羽優貴<sup>†1</sup> 酒田信親<sup>†1</sup> 西田正吾<sup>†1</sup>

近年、家庭用ゲーム機や 3D プリンタへの入力として、広く 3D モデルが扱われ始めている。そのため、一般のユーザに向けた 3D モデリングの需要が高まってきたと言える。従来のハンドヘルド型の 3D モデリングシステムでは、ユーザはディスプレイに表示された対象のモデリングの生成状況を何度も確認しながら、未計測箇所を見つけ出して計測し、ユーザ自身が満足した時点でモデリングを完了としていた。このようにユーザが行わなければならない操作が多いため、負担が大きいという問題がある。そこで本稿では、領域制限に基づく 3D インタラクティブモデリングシステムを提案する。領域を制限することにより、未計測領域を推定するアルゴリズムを実装でき、そのアルゴリズムを用いることで最適な計測位置へのナビゲーションを行え、モデリングの完了も自動的に判断できる。そして、領域制限を用いた際、モデリングに所要する時間やユーザへの心理的な負荷を調査するため実験を行った。その結果、モデリングを開始する前に領域制限を行なうだけで、素早く簡単に、少ない心理的負荷でモデリングを実現できることが判った。

## Interactive 3D Modeling with Automatic Termination and Route Navigation Based on Area Limitation

YUKI UEBA<sup>†1</sup> NOBUCHIKA SAKATA<sup>†1</sup>  
SHOGO NISHIDA<sup>†1</sup>

In these days, 3D models are introduced as new digital contents such as video games and data material for 3D printer. The demand of 3D modeling for ordinary people has been increased. While using existed hand-held 3D modeling system, users have to estimate unmeasured area through a display. Also users have to terminate modeling with watching a process of modeling. Thus, many user operations such as estimating unmeasured spot and moving the hand-held device impose burdens to users. In this paper, we propose a novel modeling system which provides route guidance for users by means of area limitation of modeling at the beginning. By area limitation of modeling, users can obtain desired 3D model with watching effective route guidance for measuring and automatic termination of modeling. To realize route guide and automatic termination, we propose new method to find unmeasured and measurable spot. We conduct experiment to investigate required time, and mental effort by means of our proposed area limitation. As a result, our proposed method can realize 3D modeling with low burden effectively, easily and quickly.

### 1. はじめに

近年、家庭用ゲーム機[1]や 3D プリンタ[2]への入力として 3D モデルが多用されている。従来、このような 3D モデルは専門家により作成されてきたが、3D モデルに対する需要の高まりにより、一般のユーザでも気軽に 3D モデリングを行える手法の提案は意味があるといえる。

従来の 3D モデリングシステムでは、一般のユーザにとって実物体の 3D モデルを得ることは難しかった。ここで本論文では、実物体の 3D 形状計測を 3D モデリングと称する。例えば、Rapidform[3]は対象を回転台の上に置くことにより、モデリングを行うものである。これは簡単な操作で高精度の 3D モデルを得られるが、回転台の上に計測対象を設置する必要があり、モデリング可能な対象の大きさに制限がある。Artec Eva[4]では、画面上に表示された対象のモデルの生成状況を確認しながら、ハンドヘルド型デバイスによりモデリングを行う。これは対象の大きさによらずモデリング可能であるが、ディスプレイを何度も見るこ

とで未計測部分をユーザ自身が考えて推定しなければならないため、所要時間が長くなる。これらの問題に対して、一般のユーザでも容易にモデリング可能な手法の研究が進んでいる[5, 6]。これらの手法では、未計測部分をユーザに提示することにより、一般のユーザにとって容易なモデリングを実現している。しかしこれらの手法では、ハンドヘルド型のデバイスを用いているにも関わらず、紙上に乗せた物体[5] や把持した物体[6]しかモデリングできないため、大きさに制限があるという問題は残ったままである。

そこで本研究では、一般のユーザでも容易に素早くモデリング可能な領域制限に基づく手法を提案する。モデリングの開始時に領域を制限することにより、未計測領域推定アルゴリズムを実装でき、そのアルゴリズムに基づいて計測位置ナビゲーションをユーザに与えられる。さらにモデリングの完了も自動的に判断できるため、容易で素早いモデリングが可能となる。なお本研究では、建築物や歴史的遺物など高精度な計測を必要とするものではなく、ユーザに身近な物体を対象とする。取得した 3D モデルはオークションサイトなどの WEB サイトに掲載したり、3D プリンタへの入力に用いることを想定している。

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

## 2. 関連研究

実物体のモデリングを行う手法としては、レーザ測距装置を用いる方法[3, 4], ビデオカメラにより得られた動画から視体積交差法を用いて 3D モデルを生成する方法[5, 7]などがある。近年では安価な深度センサ[9, 10]の登場により、3D モデリングに関する研究は盛んに行われている[11, 12, 13]。どのモデリング手法においても、一度に形状を計測できるのは全体の一部分であり、さまざまな角度から対象物体を観測する必要がある。そこで、実物体の全周を一度で計測するために様々な 3D スキャナのインタフェースが提案されてきた。3D モデリングシステムのユーザインタフェースには主として回転台型インタフェース[3], ハンドヘルド型インタフェース[4]が存在する。回転台型インタフェースでは、対象物体を回転台に乗せることで、3D モデリングを自動的に行える。これは、計測を始める前に対象を回転台の上に乗せる必要があるため、台の上に寄せられる大きさの対象しかモデリングできない。一方ハンドヘルド型インタフェースでは、対象物体の大きさによらずモデリングが可能であるが、ユーザはモデリング中に未計測の部分を推定して計測を続ける必要がある。またユーザの望むタイミングでユーザ自身がモデリングの完了を判断しなければならない。このようにユーザに要求する操作が多いために、計測に時間が掛かるという問題点がある。また対象の上から箱型のデバイスをかぶせることにより、瞬時に対象の 3D モデルを取得する研究も行われている[14]。しかしこの方法でも、予め決められた箱の大きさの対象しかモデリングできない。これらの特徴をまとめたもの表 1 に示す。

表 1 3D モデリングインタフェースの比較  
Table 1 Comparison of Interface for 3D Modeling

| インタフェース | ユーザ操作 | 対象の大きさ | 所要時間 |
|---------|-------|--------|------|
| 回転台     | 少ない   | 小さい対象  | 短い   |
| ハンドヘルド  | 多い    | 幅広い対象  | 長い   |
| 箱型      | 少ない   | 小さい対象  | 短い   |
| 提案手法    | 少ない   | 幅広い対象  | 短い   |

表 1 のように、回転台型、箱型の 3D モデリングシステムでは、対象の大きさに制限がある。そのため、計測可能な対象の大きさの範囲を広げようとすると、それに従い装置が大型化してしまうため、一般のユーザを対象としたモデリングには向かない。一方でハンドヘルド型の 3D モデリングシステムでは、ユーザ操作が多く、他のインタフェースよりもモデリングの所要時間が長いという問題点が存在するが、ユーザ操作を少なくすることでこの問題を解決できると考えられる。そこで本研究では、幅広い大きさの対象を計測可能なハンドヘルド型のモデリングシステムに着目する。ハンドヘルド型のモデリングシステムにおいて、対象物体の形状を推定することにより、モデリングシステ

ムがユーザに対象の測定方法を提示することで、ユーザ操作を少なくし、短い時間で効率的に 3D モデルを獲得する手法について様々な研究が行われている。不殿らの研究[5]では、ハンドヘルドビデオカメラでの撮影位置の指示と、モデルのプレビューを表示することにより、簡便なモデリングを提案している。しかしこのシステムでは、対象の大きさが紙上に乗せて動かせるものに制限され、モデリングの完了の判断もユーザがしなければならない。松本らによる研究[15]では、対象物体の再計測が必要な部位を多く計測できる位置と姿勢をユーザに提示することにより、取りこぼしが少ない 3D モデルを得ることが可能となっている。しかしこのシステムでは、再計測のたびに長い時間を所要するため、リアルタイム性に欠けるという問題点がある。

## 3. 領域制限に基づく 3D モデリング

ここでは本研究で提案する領域制限に基づく 3D モデリングについて述べる。

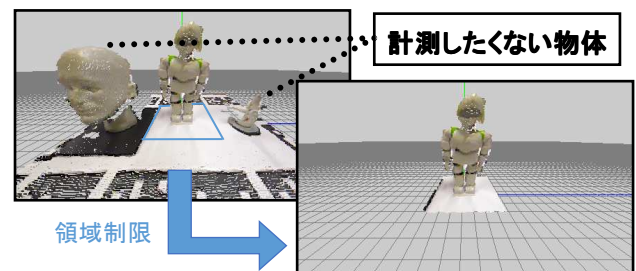


図 1 3D モデリングインタフェースの比較  
Fig. 1 Comparison of Interface for 3D Modeling

領域を制限しないでモデリングを行う場合、図 1 の左部に示すように、3D モデルを得たい対象以外にもその周りに存在する物体まで計測されてしまう。そのため、作成した 3D モデルから余分なデータを除去する必要があり、ユーザの手間が増えてしまう。また未計測領域を推定した時に、その推定した未計測領域が対象以外の物体であった場合、ユーザが所望しない物体の 3D データまでモデリングさせることになり、適切な指示をユーザに与えるのが困難になる。そのため、ディスプレイに表示されているモデリングの生成状況を確認しながらモデリングを行い、ユーザのタイミングで完了を決める必要がある。

一方で領域を制限してモデリングを行う場合、図 1 の右部に示すように、ユーザが望む対象のみ 3D モデルが作成されていることがわかる。そのため後処理として余分なデータを除去する必要がない。また未計測領域を推定した時、その領域は必ず対象物体に属するため、ユーザに適切な指示を与えられる。この手法は 3D モデリング上でのある種のマスキングと考えている。

これを実現するため、領域制限に基づく 3D インタラク

タイプモデリングシステムを提案する。モデリング開始時に、あらかじめ計測領域をユーザの手動操作によって制限する。制限することにより定義される有限の領域のうち、計測された領域が占める割合を調べることにより、モデリングの完了率を決定できる。そしてこの完了率が閾値を超えた時にモデリング完了と判断できる。また全体のうち、計測がまだ終わっていない部分を未計測領域と推定でき、ユーザに計測位置のナビゲーションを与えられる。

次に領域制限に関するインタラクション手法について述べる。従来の研究では紙上の領域[5]や把持物体[6]をモデリング領域としていたので、モデリング可能な対象の大きさに制限があった。ここではモデリング領域の大きさを自由に変えられる手軽な手法について述べる。

本研究ではハンドヘルド型のシステムを想定しており、一般のユーザにとって簡単で素早いモデリングを目指している。ディスプレイ上で領域を制限する場合[7]、3次元を対象としているので複雑な操作が要求される。そのため素早く領域を制限できず、ユーザが気軽にモデリングを始めようとするモチベーションを下げてしまうことが懸念される。そこで本研究では、領域の制限を実世界で行うこととする。ClippingLight[16]のように対象物体の周りにプロジェクタで枠を投影し枠の内部をモデリング領域とすることにより、実世界での領域制限を行なう。これにより素早く容易に領域制限ができると考えられる。

図2のようにプロジェクタにより枠を投影する。ハンドヘルドデバイスの傾きにより枠の大きさを変化させ、その

内部がモデリング領域として定義される。なお、領域の高さ方向の長さは予め設定したが、自動的に推定することも可能である。このとき、対象が置かれている面は平面であると仮定し、RANSACにより対象が置かれている平面を推定した。

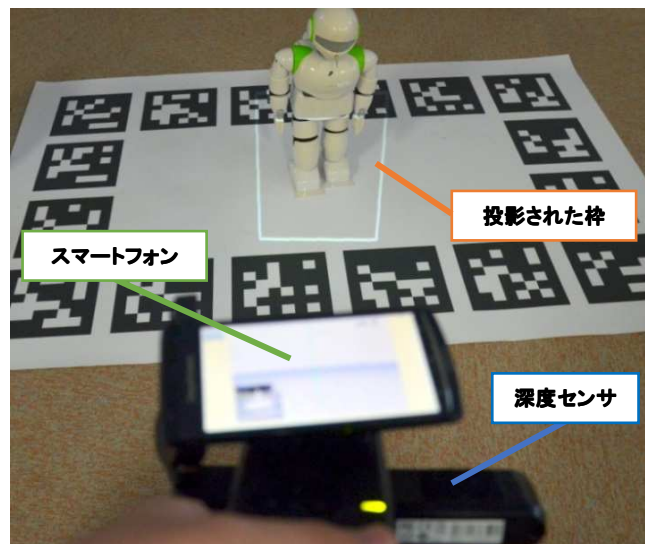


図2 投影枠による領域の制限

Fig. 2 Projecting Frame to Limit Modeling Area

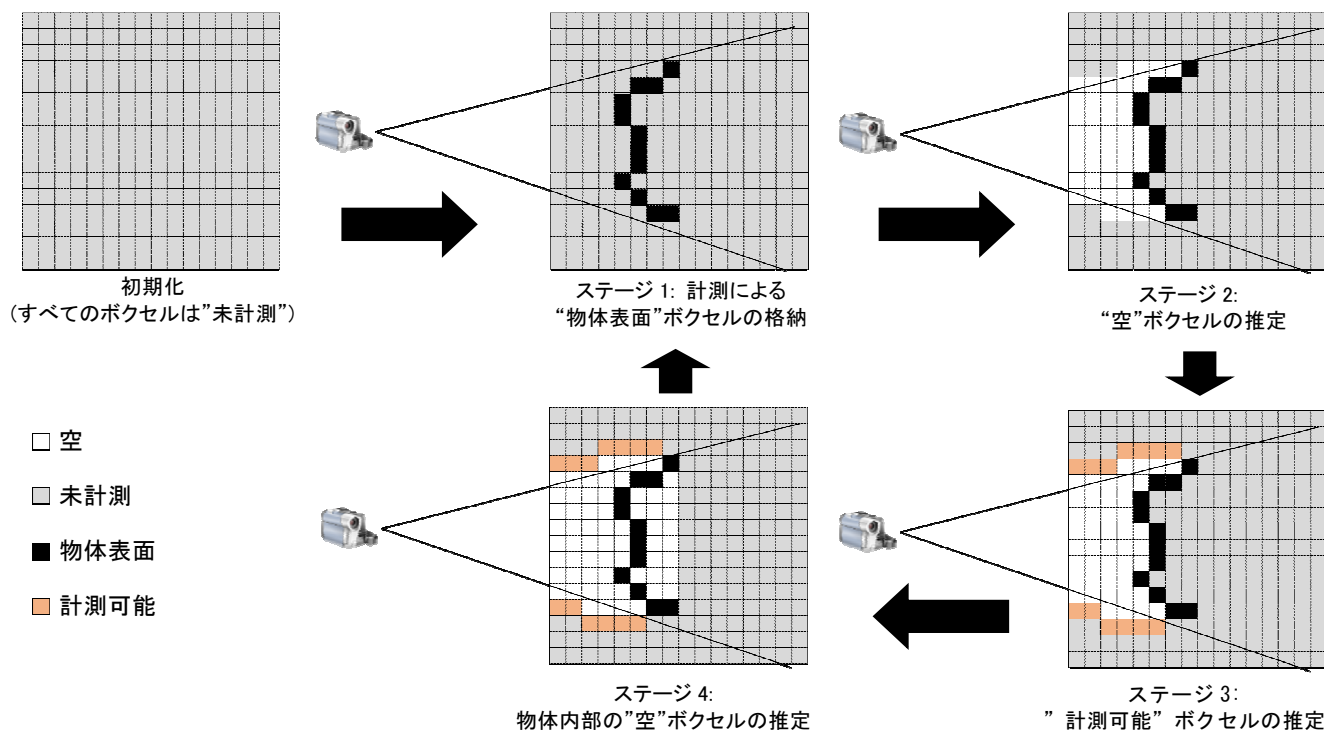


図3 ボクセル属性決定の処理の流れ

Fig. 3 Outline of Judging Attribute of Voxels

## 4. 未計測領域推定アルゴリズムに基づくモデリング完了の自動化と計測位置ナビゲーション

ここでは未計測領域推定アルゴリズムの提案、及びモデリングを自動的に完了させるための手法と、ユーザへの計測位置ナビゲーションの提供方法について述べる。本研究では 3D モデルを表現するためにボクセルを用い、それぞれのボクセルに四属性のいずれかを持たせることにより、これを実現した。

### 4.1 ボクセル属性に基づく未計測領域推定アルゴリズム

実装したシステムではモデリングの完了率を計算するため、ボクセルを用いて 3D モデルを表す。ボクセルのサイズは処理速度などを考慮して  $5 \times 5 \times 5$  [mm]とした。

本研究で提案する手法ではモデリング完了率を計算するために、ボクセルは"物体表面"、"空"、"未計測"、"計測可能"の四属性のいずれかを持つ。図 3 に、ボクセル属性決定の処理の流れを示す。これは 2 次元上の画素により表したものであるが、容易に 3 次元に拡張できる。ステージ 1 からステージ 4 を繰り返すことにより、ボクセルの属性を更新していく。以下より、処理の詳細について述べる。

初期化: モデリング領域を制限しボクセル空間が作成された時、すべてのボクセルは"未計測"の属性(図 3 の灰色のボクセル)である。

ステージ 1: 深度センサにより計測された対象の 3D データは、ボクセル空間上の対応する点に格納される。この時、対象表面に相当するボクセルは"物体表面"の属性(図 3 の黒色のボクセル)に変化する。

ステージ 2: デバイス位置とそのフレームで取得した"物体表面"ボクセル間の線分上に存在するボクセルは"空"の属性(図 3 の白色のボクセル)に変化する。デバイス位置をボクセル空間の座標系で表し、"物体表面"ボクセルとの線分上に存在するすべてのボクセルを"空"の状態とした。なお、線分はブレゼンハムのアルゴリズム[17]により求めた。

ステージ 3: システムが"未計測"ボクセルを計測するようにユーザに指示を与えたとしても、対象物体の内部に存在するものは深度センサでは計測できないため、それらのボクセルの計測を終えられない。そこで計測位置のナビゲーションのため、"未計測"ボクセルの中から、"計測可能"であるものを見つけ出すことが必要となる。ある一つの"未計測"ボクセルに着目し、その上下、左右、前後の六つのボクセルの中に、一つでも"空"のボクセルが存在するとき、そのボクセルは"空"のボクセルの方向から計測可能と判断できる。そこで、ボクセルの属性を"計測可能"に変化させる(図 3 の橙色のボクセル)。このような"計測可能"ボクセルを計測するようにユーザへ指示を与えることにより、効率的にモデリングを進められる。

ステージ 4: 全ボクセルのうち、"空"ボクセルと"物体表面"

ボクセルが占める割合を調べることにより、モデリングの完了率を計算できる。しかし、物体の内部など、外から計測できない領域に多く"未計測"ボクセルが残っているため、ある値以上"未計測"ボクセルの数を減らすことができず、モデリングが完了となる閾値にとどかない可能性がある。そのため、モデリング完了の判断を自動的に行うのが困難になる。そこでこの問題を解決するための手法について述べる。図 4 は、水平面上のボクセルを表している。図 4 のように、物体の内部のある 1 ボクセルに着目した時、そのボクセルを通る任意の直線には、少なくとも二つの"物体表面"ボクセルが存在する。そのため、二つの"物体表面"ボクセル間を結ぶ直線に存在するボクセルは、物体内部に存在するボクセルとみなせる。ボクセル空間に対して、水平方向にラスタ走査していき、一つの線上で"物体表面"ボクセルが偶数回目に出現した時、その前に出現した"物体表面"ボクセルとの間に存在するボクセルを物体内("空"のボクセル)と判断する。

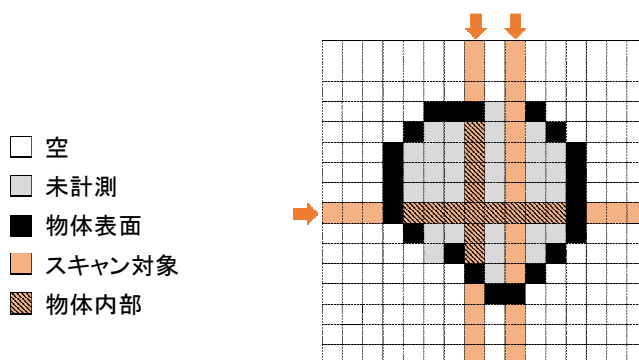


図 4 物体内部の推定

Fig. 4 Detecting Inside of the Target

これらの処理を施した後、全ボクセル中の、"空"と"物体表面"ボクセルの占める割合を調べることでモデリングの完了率を決定する。これらの処理を繰り返し、その割合が 1% を下回った時にモデリング完了と判断した。図 5 に示すのは、計測途中の 3D モデルを表示したものである。赤い領域が"計測可能"ボクセル、青い領域が制限された領域を表している。

### 4.2 計測位置のナビゲーション方法

"計測可能"ボクセルを効率良く計測するために最適な計測位置のナビゲーション方法について述べる。

図 5 に示すように、"計測可能"ボクセルの数は対象を見る角度により大きく異なる。そのため"計測可能"ボクセルが多く見える位置から計測を行なうようにユーザに指示すれば、効率的に未計測ボクセルを減らせると考えた。

予めいくつかの計測候補位置をターゲットの周りに配置しておく。その各候補位置から見える"計測可能"ボクセルの数を調べていく。なお、各ボクセルと候補位置の間の

線分上に存在するボクセルを調べていき、すべてのボクセルが”空”の属性であればそのボクセルは候補位置から観測できると判断した。また、デバイス位置と各候補位置との距離も計算する。”計測可能”ボクセルの数と候補位置までの距離の重みの比を 4:1 として、各候補位置に対してスコア付けを行う。このスコアが最も高い位置をユーザへ提示する指示位置とした。今回の実装では計算量を考慮して、図 6 のように有限の数の撮影の候補位置を、対象を中心とした半球上に、緯度 30° ずつ、経度 30° ずつの計 36 ヶ所を配置した。

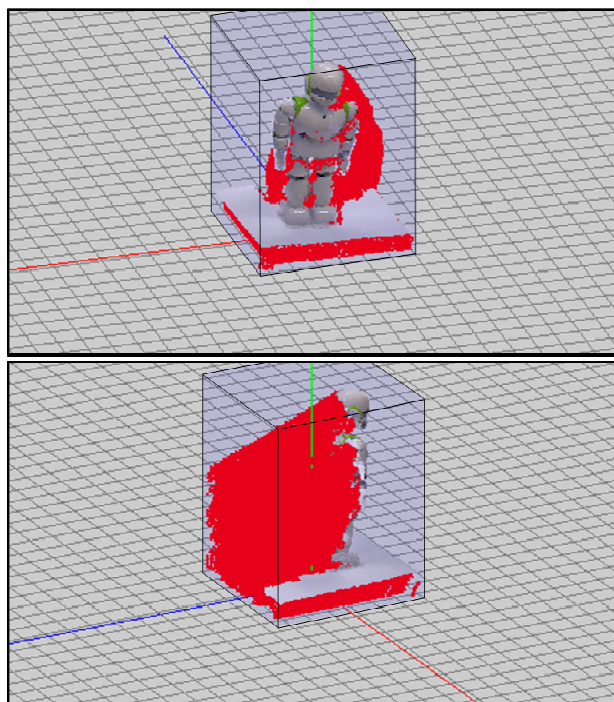


図 5 “計測可能”ボクセルの可視化

Fig. 5 Visualization of “Measurable” Voxels

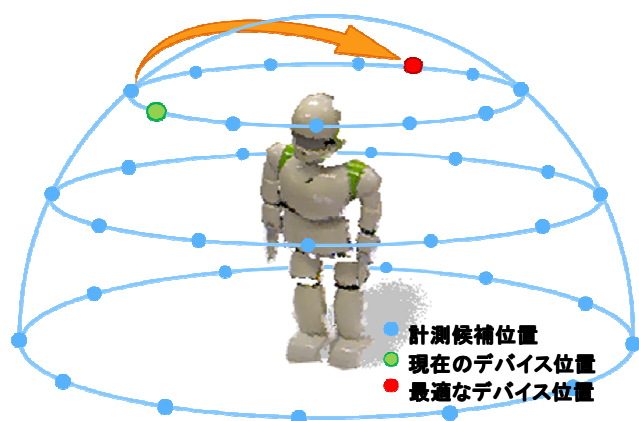


図 6 計測候補位置の配置

Fig. 6 Candidate Camera Position

## 5. 実装

図 7 に本研究で用いたハンドヘルド型モデリングシステム

を示す。Asus Xtion Pro を用いて 3 次元計測を行った。また領域制限のためにハンドヘルドプロジェクタ (3M MP160) を用いた。スマートフォン (Sony Ericson Xperia arc) のディスプレイにモデルのプレビューを表示した。なお、スマートフォン内蔵の慣性センサによりデバイスの回転角を取得し、領域の大きさの調整に用いる。デバイス位置のトラッキングには ARToolKitPlus を用いた。なお本研究ではトラッキングではなく、モデリングにおけるインタラクション技術に焦点を当てて研究を行っている。そのため、実装が容易でロバストなビジュアルマーカを用いた。またこのビジュアルマーカは計測対象の大きさを制限することはない。今後は SLAM などによるマーカレスのトラッキング手法を取り入れていく予定である。

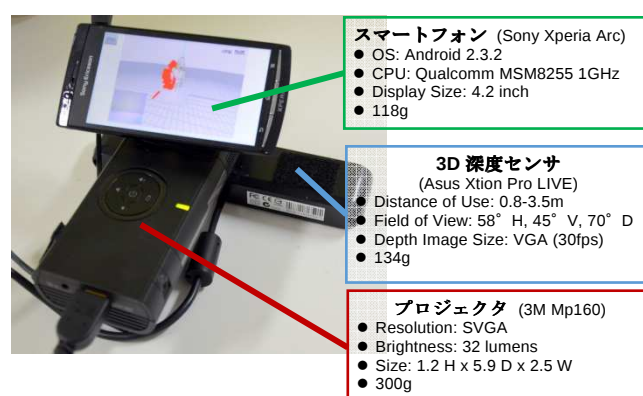


図 7 3D モデリングインタフェースの比較

Fig. 7 Comparison of Interface for 3D Modeling

本研究で用いたシステムには、ディスプレイ、プロジェクタとビジュアルフィードバックを与えられるデバイスで二つ持つ。そこで予備実験としてディスプレイ、プロジェクタにより指示を受けながらモデリングを行った際に、ユーザが受ける影響を比較調査した。その結果プロジェクタによる指示では、ユーザが計測している範囲を把握することが俯瞰的に困難であるため、対象を捉え続けることが難しいことが分かった。また、プロジェクタでは空中に映像を結像できないために、未計測領域がどこに存在するかユーザは確認できない問題があった。一方でディスプレイによる指示では、指示と同時に未計測領域の位置をひと目で把握できる。そのため、ディスプレイによる指示の方が好まれる傾向にあった。プロジェクタの輝度が低いことも、この結果に影響を与えたと考えられる。そのため本研究ではディスプレイ上でユーザに指示を与えることにした。

ユーザにスマートフォンの画面上で提示する指示インタフェースを図 8 に示す。3D モデルのプレビューを”計測可能”ボクセルを赤くして表示している。ユーザはタッチパネルにより、このモデルを自由に回転できる。またモデリングの完了率と、撮影画像をリアルタイムで表示している。ユーザに与える指示は、図のように矢印と文字で表される。

ユーザはこれに従ってデバイスを動かすことにより、効率よく”計測可能”ボクセルを計測できる。今回の実装では、"Up", "Down", "Right", "Left", "Stay"の5種類の指示を用意した。これらは現在のデバイス位置と指示位置により決定される。また指示位置までの距離に応じて矢印の色を変化させた(近: 黄色, 遠: 赤)。

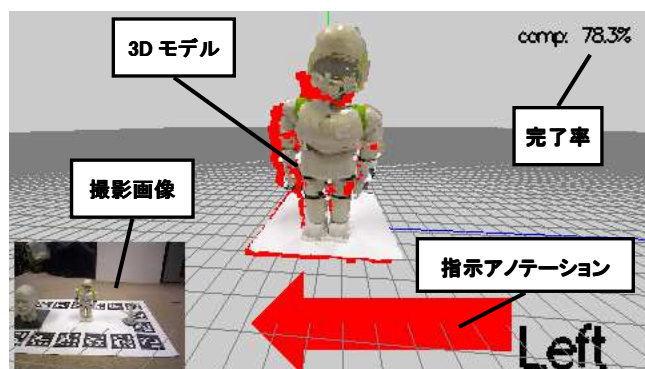


図 8 指示インターフェース

Fig. 8 Instruction Interface

## 6. 評価実験

上記の未計測領域推定アルゴリズムにより、ユーザは対象に合わせて適切な大きさの領域に制限することにより、未計測領域を効率的に撮影できる計測位置のナビゲーションを受けられるようになった。そこで、領域制限によって手軽で素早い撮影が行なえることを確認するため、実験を行った。予め大きめに設定された領域でモデリングを行った場合と、領域制限によりモデリングを行った場合とで比較を行った。仮説として領域制限を行った場合、未計測ボクセルは撮影対象上のみ存在するため、無駄な指示が減ると予想される。そのため、素早くモデリングを完了でき、心理的にも負担が少なくなると考えている。

### 6.1 実験設定

モデリング対象を、指示を受けながらモデリングしてもらい、完了と判断されるまで計測を続けることを実験タスクとした。図9に示すように、対象が置かれたマーカシートはA0のサイズ(84.1x118.9[cm])である。複数の物体からユーザの望む対象のみをモデリングすることを想定し、マーカシート上には、中央に配置された対象物体以外にも対象の左右に二つの物体を配置した。なお、対象の高さは40[cm]であり、余裕を持ってモデリング領域は45[cm]に設定した。ここでは高さを予め設定したが、この高さを自動的に推定することも可能である。ボクセル空間のうちの水平面がすべて”空”のボクセルである場合、その高さまでをモデリング領域の高さとすることにより、高さを自動的に推定可能である。

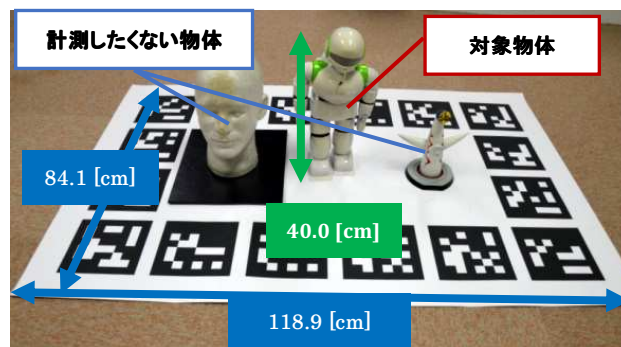


図 9 実験における対象物体の配置

Fig. 9 Configuration of the Target Object at Experiment

ユーザにはモデリングを開始する際に固定の位置に立ってもらい、ディスプレイ上のSTARTボタンを押すと同時にタスクを開始した。計測を行なっている最中にユーザがモデリング状況を詳細に確認するために、ユーザにはディスプレイに表示されている3Dモデルのプレビューをタッチパネルにより自由に回転してもらった。また計測の初期段階では、すべてのボクセルが”未計測”の属性であるため、どこから計測を始めてもよいが、例えば真上から計測を開始する場合と、低い位置から計測を開始する場合といったように、その初期動作によって残存する未計測領域にばらつきが出ることが考えられる。そのため対象の周りに90°ずつ四つのチェックポイントを設定し、それらを通り過ぎてから指示を与えることにした。指示が与えられてからはその指示に従いモデリングを行なってもらった。ユーザは領域制限がある場合、ない場合のそれぞれの状況で実験を行う前に1回の練習を行ってもらい、本実験のモデリングをそれぞれ5回行ってもらった。

なお、領域制限の際に対象の一部が見切れたり、人によって領域の大きさが違ったりする場合も想定される。そこで、領域指定というインタラクションの効果を純粋に評価するため、実験ではユーザに領域制限の作業も行なってもらうが、実際にはモデリング領域は対象が完全に収まるように予め設定し、比較を行った。なお領域の大きさは30x30x45[cm]とした。

予め大きめに設定された領域でモデリングを行う場合を”領域制限なし”の実験条件として設定し、比較対象とした。なお、従来の様にマーカシート上にモデリング領域が存在する場合[5]を想定し、A0のマーカシートの面積で領域制限ありの場合と同じ高さを持つ大きさをモデリング領域として設定した(84.1x118.9x40.0[cm])。この条件においても、ユーザは提案手法と同じように計測の指示を受けられる。

実験手順は、まず被験者にモデリングシステムの使用手法と計測対象について説明し、しばらくの間練習を行ってもらい、その後実験を開始した。デバイスによる順序効果を打ち消すため、被験者の半分は領域制限を先に、もう半

分は領域制限なしを先に実験した. 図 10 に実験風景を示す.

## 6.2 実験結果

被験者は 21 歳から 24 歳の 14 人である. それぞれの状況下で定性的な評価を行うため, 実験タスク後に 5 段階評価のアンケートも実施した. 指示の分かりやすさ (1: 分かりにくい, 5: 分かりやすい), 早く終わったと感じたか (1: 遅い, 5: 早い), 短い距離で終わったと感じたか (1: 短い, 5: 長い), 容易さ (1: 困難, 5: 容易), プレビューの見易さ (1: 見にくい, 5: 見やすい) の項目を調査した. さらに定量的な調査項目として, 撮影が完了する時間とデバイスを動かした距離についても計測した. 領域制限ありの場合, タスク完了時には領域制限に要する時間も含まれている.

それぞれの状況で, ウィルコクソンの符号順位和検定により領域制限の有りと無しの差を危険率 0.05 で統計的に分析した. 結果を図 11, 12 に示す.

指示の分かりやすさ, プレビューの見やすさの項目では, 有意な差が見られなかったが, その他のすべての項目において, 領域制限ありの方がポジティブな結果となり, 統計的にも有意差が見られた.



図 10 実験風景

Fig. 10 Experiment Apparatus

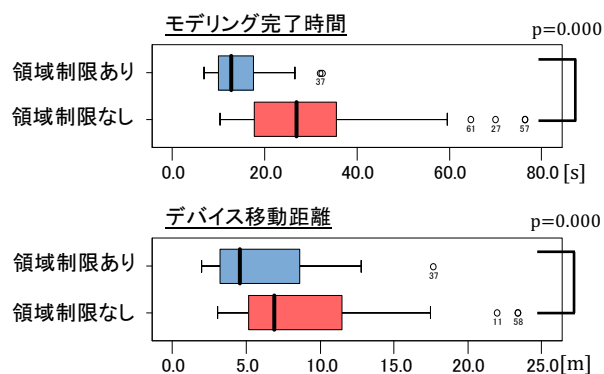


図 11 実験における定量評価結果

Fig. 11 Result of Quantitative Evaluation

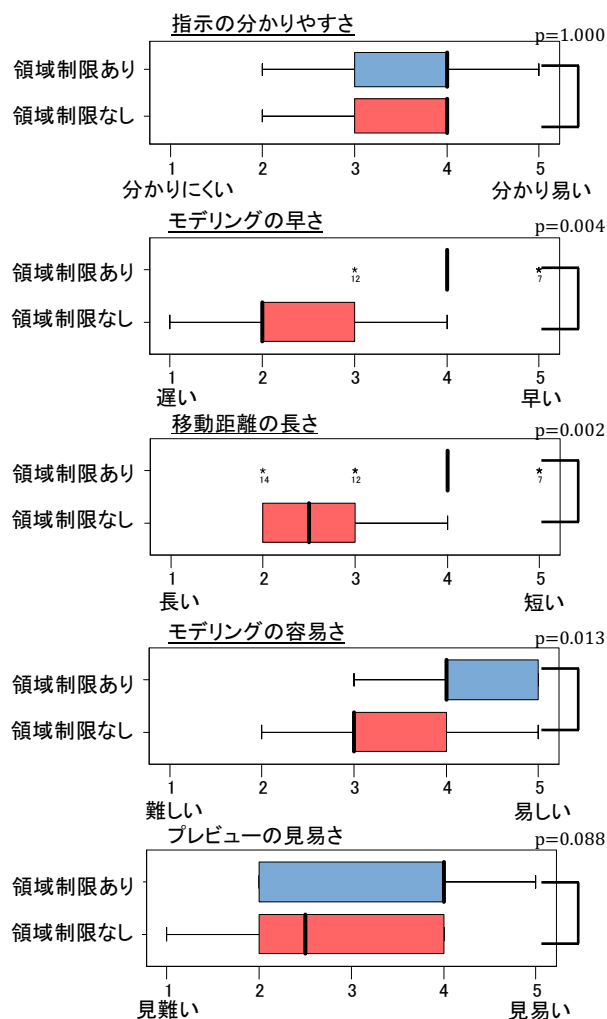


図 12 アンケート結果

Fig. 12 Questionnaire Survey

## 7. 考察

モデリング時間とデバイス移動距離に関して, 領域制限を行ったほうが短い時間・移動距離でモデリングが可能であるという結果を得た. 対象物体以外の計測のための指示がないため, このような結果になったと予想される. モデリング領域が小さくなっているため, このようになるのは自然な結果であるが, 領域制限ありの場合のモデリング時間には, 領域制限に所要する時間も含まれているため, 提案手法は有効であると考えられる. また, 上羽ら[16]によると, プロジェクタにより領域制限を行った場合, ユーザの望む領域と実際に制限した領域の大きさの比が平均で 0.8 と, おおよそ一致する結果となっている. そのため, 実際に制限した領域がユーザの望む領域の大きさと違っていても差は僅かであり, モデリング完了時間も長くなりにくいと考えられる.

また, いずれの場合もモデリングに所要する時間が大きくなることがあった. これは, AR マーカによるトラッキング

ングが少しずれた結果、計測できない位置に”計測可能”ボックスが位置してしまったためだと考えられる。将来的には、[18][19][20]のような、ハンドヘルドカメラによるトラッキング手法を用いることにより、マーカレスで高精度のトラッキングすることを考えている。これにより、トラッキングエラーが解消され、モデリングの終了判定が正確に行えると考えている。

指示の分かりやすさに関しては有意な結果は得られなかった。指示の提示方法自体が同じなので、このような結果になったと考えられる。モデリングの速さ、移動距離の少なさに関しては、領域制限を行った方が良いという結果を得た。定量的にも示されているように、ユーザが感じる肉体的な負担も少なくなった。何人かの被験者から、領域制限がある方がタスク中のプレビュー表示が見やすいという意見も得た。対象物体のみがディスプレイに表示されるため、未計測領域を把握しやすかったからだと考えられる。

本実験では、対象物体の大きさを固定してタスクを実行したが、我々は対象が大きくなればなるほど、領域制限による効果も大きくなると予想している。なぜならば対象の大きさが大きくなるほど、未計測領域が増えるため、対象以外を計測する機会が増えるからである。そこで領域制限を用いれば、無駄な指示を大幅に減らせるため、対象が大きいほど、領域制限により削減できるモデリング時間も大きくなると考えている。一方で小さい対象をモデリングするとき、領域制限により削減できる無駄な指示は少なくなるが、後処理として無駄なデータを除去する必要がなくなるため、いずれにせよ領域制限による貢献は大きいと考えている。

## 8. おわりに

本稿では、モデリングの開始時に領域を制限することにより、未計測領域推定アルゴリズムの提案と実装、それに基づいたモデリングの完了の自動化と、効率的な計測のための指示をユーザに与えるモデリングシステムを提案した。また、この効果を確かめるために被験者実験を行った。その結果、領域指定を行うことにより短い時間、少ない心理的な負荷でモデリングを行えた。今後の方針としては、ハンドヘルドカメラによる高精度なトラッキング手法を取り入れることにより、マーカレスで3Dモデルを取得可能にするを考えている。また制限された領域内の情報だけでなく、その周辺の情報も計測し利用することにより、対象以外の物体による隠蔽なども考慮したより効率のよい計測方法のナビゲーションについても考察する予定である。

## 参考文献

- 1)Nintendo 3DS  
<http://www.nintendo.co.jp/3ds/software/built-in/camera/index.html>

- 2)Cube 3D Printer  
<http://cubify.com/cube/>
- 3)Roland 3D LASER SCANNER  
<http://www.nextengine.jp/>
- 4)Artec 3D scanners  
<http://www.datadesign.co.jp/artec3d/>
- 5)不殿健治, 佐藤智和, 横矢直和: ハンドヘルドビデオカメラを用いた撮影位置支持機能を有するインタラクティブ3次元モデリングシステム, MIRU2005, OS7A-30, 2005.
- 6)Qi Pan, Gerhard Reitmayr, Tom Drummond: ProFORMA: Probabilistic Feature-based On-line Rapid Model Acquisition, In Proc of BMVC 2009, 112.1-112.11, 2009.
- 7)Atsushi Umakatsu, Hiroyuki Yasuhara, Tomohiro Mashita, Kiyoshi Kiyokawa and Haruo Take-mura: "Camera-based In-situ 3D Modeling Techniques for AR Diorama in Ubiquitous Virtual Reality", In Proc of HCI International 2011, pp. 113-122, 2011.
- 8)芳賀 浩嗣, 佐藤 宏介: ハンドプロジェクトによる支援光を用いた形状計測, 計測自動制御学会大会9回パターン計測シンポジウム, pp.33-38, 2004.
- 9)Kinect  
<http://www.xbox.com/kinect>
- 10)Xtion  
<http://event.asus.com/wavi/product/xtion.aspx>
- 11)Peter Henry, Michael Krainin, Evan Herbst, Xiaofeng Ren, and Dieter Fox: "RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments", Journal International Journal of Robotics Research, pp. 647-663, 2012.
- 12)Huang, Bachrach, Henry, Krainin, Maurana, Fox and Roy: "Visual Odometry and Mapping for Autonomous Flight using and RGB-D Camera", In Proc of ISRR 2011, 2011.
- 13)Hao Du, Peter Henry, Xiaofeng Ren, Marvin Cheng, Dan B Goldman, Steven M. Seitz, Dieter Fox: "Interactive 3D Modeling of Indoor Environments with a Consumer Depth Camera", In Proc of UbiComp 2011, pp. 75-84, 2011.
- 14)有賀 玲子, 前田 篤彦, 小林 稔: 瞬時に全周を計測可能な箱型3Dキャプチャデバイスのための基礎検討, 日本VR学会論文誌, Vol.17 No.2 p119-127, 2012.
- 15)M. Matsumoto, M. Imura, Y. Yasumuro, Y. Manabe and K. Chihara: "Support system for measurement of relics based on analysis of point clouds", Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, p.195 Gifu, Japan, 2004.
- 16)上羽優貴, 梶原康弘, 上村敬志, 酒田信親, 西田正吾: "ClippingLight: 投影式ビューファインダとひねりズームによる手軽で素早い撮影手法", 情報処理学会論文誌, vol 54, No 4, pp.1489-1497, 2013.
- 17)J. E. Bresenham: "Algorithm for computer control of a digital plotter", IBM Systems J., Vol. 4, No.1, pp. 25-30, 1965.
- 18)Richard A. Newcombe, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, David Molyneaux, David Kim, Andrew J. Davison, Pushmeet Kohli, Jamie Shotton, Steve Hodges, and Andrew Fitzgibbon: "Kinectfusion: Real-time dense surface mapping and tracking", In Proc of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.127-136, 2011.
- 19)Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, and Olivier Stasse: "MonoSLAM: Real-time Single Camera SLAM", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), pp. 1052-1067, 2007.
- 20)David Molyneaux, Shahram Izadi, David Kim, Otmar Hilliges, Steve Hodges, Xiang Cao, Alex Butler, and Hans Gellersen: "Interactive environment-aware handheld projectors for pervasive computing spaces", In Proc of Pervasive 2012, pp. 197-215, 2012.