

擬似的三次元コピーとインタラクションの提案

上原 悠永^{1,a)} 水野 慎士^{1,b)}

概要：本論文では三次元物体をコピーして複製を制作することを擬似的に体験するとともに，そのコピー物体とのインタラクションを行うことができる CG システムを提案する．ユーザが三次元物体をシステムのスクリーン上にセットすると，システムは上方から物体をスキャンして三次元形状と色を取得する．そして物体を取り除くと，システムはスキャンデータに基づいて三次元物体の CG を生成してスクリーンに表示する．このときシステムはユーザの視点位置を認識して運動視差立体視による三次元 CG を生成しており，取り除いた三次元物体のコピーがそのまま残っているような三次元 CG 映像を様々な位置から観察することができる．そして静止している物体だけでなく，動いている物体に対してもデータのスキャンと三次元 CG アニメーションの生成して，様々な位置から観察することができる．さらにユーザが三次元 CG のコピー物体に手を近づけることで変形などの操作を対話的に行うことができる．

Making Virtual 3D Photocopies and Interaction with them

UEHARA YUTO^{1,a)} MIZUNO SHINJI^{1,b)}

Abstract: In this paper, we propose a novel CG system in which users can make 3D photocopies of physical objects simulatively and execute an interaction with them. A user puts 3D objects on a screen of the system, and the system scans the 3D objects to get their 3D shapes and colors. After taking away the 3D objects, the system generates a 3DCG image of the 3D objects based on their scan data. The system can create a stereoscopic 3DCG image based on motion parallax by following a viewpoint of the user, and the user could feel the removed objects being left as they were, and the user can observe the 3DCG image from any positions. It is possible to use our system for moving 3D objects and can see a 3DCG animation from any points. It is also possible to execute an interaction with the 3DCG objects such as deformation by bringing the user's hand close to the 3DCG objects.

1. はじめに

近年のコンピュータ技術や映像技術の発達は，現実世界の三次元データとしての記録や，それらのデータを用いた現実世界の三次元 CG 映像再現などを実現して，その活用が多いに注目を浴びている．例えばレーザスキャナを用いて遺跡や文化財の三次元形状を取得してデジタル保存する研究 [1][2] や，複数ビデオによる多視点映像やモーションキャプチャを用いて舞踊データを保存する研究 [3][4] などが報告されている．一般大衆向けの 3D カメラや 3D ビデオも開発されており，家族の思い出などを三次元映像とし

て記録したり，3D 写真を作成することもできる．さらに最近では 3D プリント技術の進化と普及が進んでおり，実世界を三次元的に記録したり映像で確認するだけでなく，実際の物として作り出すことも可能となり，工業，医療，広告，教育など様々な分野で活用されるようになってきた．このように現実世界の三次元データの取得とそのデータの様々な提示方法やインタラクション方法の提案・実現は一層重要なトピックになってくると思われる．

そこで本研究では現実世界の三次元物体の記録と映像提示を行う新しい CG システムを提案する．ユーザが三次元物体をシステムのスクリーン上にセットすると，システムは物体を上方から瞬時にスキャンして三次元形状と色を取得する．そして物体を取り除くと，システムはスキャンデータに基づいて三次元物体の CG を生成してスクリー

¹ 愛知工業大学, Aichi Institute of Technology
1247, Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota 470-0392, Japan
^{a)} ue.to120@gmail.com
^{b)} s.mizuno@aitech.ac.jp

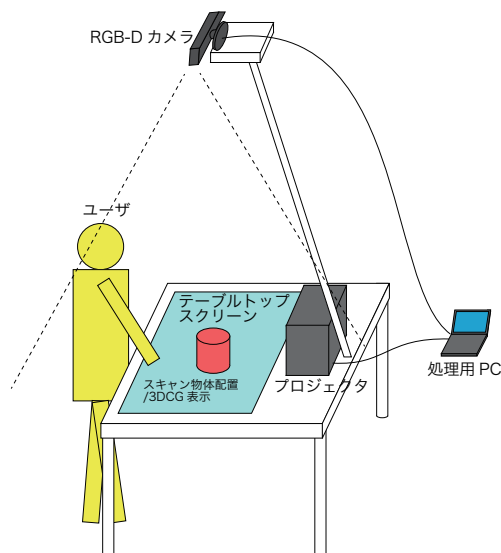


図 1 システム構成

ンに表示する．このときシステムはユーザの視点位置を認識して運動視差立体視による三次元 CG を生成する．そのため，ユーザは取り除いた三次元物体がそのまま立体映像として残っているように感じ，それを様々な位置から観察することができる．すなわち，現実世界の三次元物体をコピーしてその場でコピー物体を制作することを擬似的に体験できる CG システムである．そして，このシステムでは静止した三次元物体だけではなく，動きのある三次元物体のデータ取得と提示も可能である．さらにユーザが三次元 CG のコピー物体に手を近づけることで，変形などのコピー物体とのインタラクションを行うことができる．

本論文では，提案システムの概要，運動視差立体視の詳細，システム実現法，実験と考察について述べる，

2. 提案システムの概要

提案システムはデスクトップスクリーン，処理用 PC，プロジェクタ，そしてスクリーン上方に設置された RGB-D カメラで構成される．図 1 にシステム構成を示す．

システムはスキャンモードとディスプレイモードを切り替えて動作する．スキャンモードでは，ユーザがスクリーン上に三次元物体を置くとシステムは RGB-D カメラで三次元物体の色データと深度データを取得する．提案システムは動きのある三次元物体の場合でもデータを継続的に取得することで対応可能である．そして取得したデータに基づいて物体の三次元データを生成する．

次にディスプレイモードでは，スクリーン上の物体を取り除くとその物体の三次元データを CG としてスクリーン上に表示する．このとき，システムは RGB-D カメラの情報を用いてユーザの視点位置を追跡する．そしてユーザの視点位置の移動に応じて三次元 CG をリアルタイムで更新していく．これにより運動視差に基づく立体視 CG を実現して，ユーザは三次元 CG を様々な位置から観察しながら，

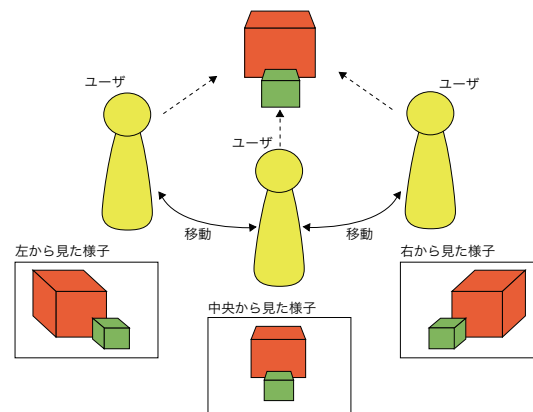


図 2 運動視差の概要

まるで取り除いた物体のコピーがスクリーン上に残っているように感じることができる．動きのある物体の場合には，スクリーン上で動いている物体の三次元 CG アニメーションを様々な位置から観察することが可能である．さらにユーザがコピー物体に手を近づけた場合には，RGB-D カメラの情報を用いてその位置を認識して，手の位置とコピー物体との接触判定を行って，接触していると判定した場合にはコピー物体を変形させたり効果音を再生したりする．これによりユーザは擬似的にコピー物体にふれることが可能である．

3. 運動視差立体視と三次元 CG への適用

3.1 運動視差立体視の概要

立体視は人間の三次元知覚の仕組みを利用して，映像中の物体の立体感を感じさせる手法である．人間の三次元知覚には，物体の大きさや重なり，輻輳，焦点距離，視差など様々なものがあるが，一般的な立体視コンテンツでは両眼視差を用いて三次元知覚させるものが多い．両眼視差は両眼の位置の違いから左右の目に映る映像が微妙に異なることであり，人間の脳はその画像の違いに基づいて奥行き感を認識する．両眼視差を用いた立体視コンテンツでは右目用と左目用の映像を用意しておき，立体視対応ディスプレイなどを用いてそれぞれの目に各映像を同時に送ることによって両眼視差を実現して奥行き感を知覚させている．

一方，人間は運動視差によっても三次元知覚を行う．運動視差は立体物を観察するときに観察者または立体物が移動することで生じる見え方の変化である．図 2 に運動視差の概要を示す．運動視差ではユーザの移動に伴って今まで見えなかった部分が見えるようになったり，近くの物体が遠くの物体に比べて見え方が大きく変化する．Rogers らの研究では，運動視差のみで三次元形状と奥行きに関する十分な情報が得られることを示している [5]．

3.2 三次元 CG での運動視差立体視の実現

三次元 CG においても，ユーザの視点に合わせて運動視

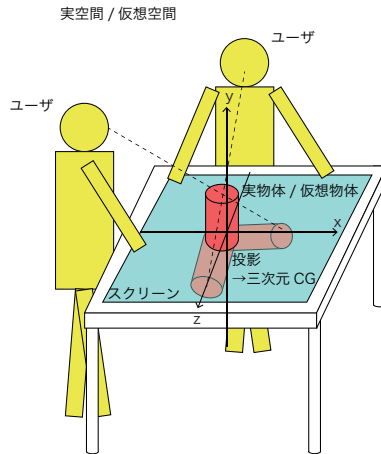


図 3 運動視差立体視に対応した三次元 CG 生成

差と同様の映像を生成することで、生成される CG 映像から立体感を得ることができる。この運動視差立体視では専用のディスプレイやメガネ等ではなく、ホログラフィックのように CG で表示された物体が実際にその場に存在するような感覚となる。そして運動視差立体視を利用した応用研究もいくつか報告されている [6][7][8]。

本研究ではこの原理を応用して、運動視差による立体視を用いた三次元 CG を生成する。図 3 に仕組みを示す。まず CG 生成のための仮想空間の座標を実空間の座標と一致させる。本研究ではスクリーン中心を原点とし、 $x-z$ 平面がスクリーン面、 y 軸が鉛直上向き方向となっている。そしてスクリーン上に表示対象となる仮想物体を配置する。ユーザはスクリーン上に表示された仮想物体を観察するが、見る位置によって見え方が変化するという運動視差を実現するためにユーザの視点位置を常に追跡する。そして、ユーザの視点位置からスクリーン上に仮想物体を投影した三次元 CG をリアルタイムで生成することで、運動視差立体視が実現して仮想物体がまるでスクリーン上に存在するような感覚を得ることができる。

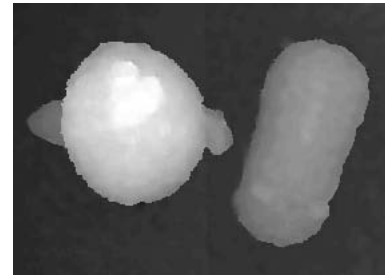
4. 提案システムの実現方法

4.1 三次元物体のデータ取得

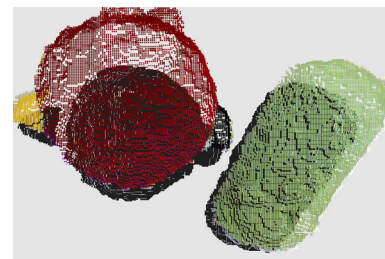
本研究では RGB-D カメラとして Microsoft Kinect を用いており、システムのスクリーン上方に設置している。スキャンモードでは、Kinect はスクリーンに置いたコピー対象三次元物体をスキャンして、図 4 に示すような色データおよび深度データを取得する。動きのある三次元物体に対しては色データと深度データを連続的に取得することで時系列データとして取得する。そして、取得したデータから図 4(a) のような色情報を持つ三次元点群データを生成する。また $x-z$ 平面上に配置した三角形メッシュ平面の各頂点の y 座標を深度データに基づいて変化させることで、三次元物体の形状を表現する三角形メッシュデータを生成する。第 3 章で述べたように、提案システムでは CG 生成



(a) 色データ



(b) 深度データ



(c) 三次元点群データの CG 表示

図 4 Kinect で取得した色データと深度データ、および三次元 CG

のための仮想空間の座標を実空間の座標と一致させている。そのため、三次元点群データや三角形メッシュデータは三次元物体が置いてあったスクリーン上の場所にそのまま配置される。

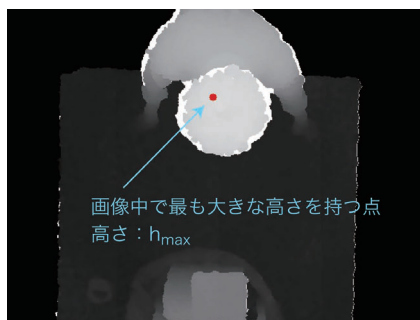
4.2 視点位置の推定と映像生成

ディスプレイモードでは、スクリーン上方に設置した Kinect はユーザの視点位置の推定に用いる。図 5 にユーザ視点位置の決定の様子を示す。ユーザはスクリーンの周囲で映像を観察するため、Kinect から見てユーザの頭部が最も高い点となる (図 5(a))。そこで、スクリーン上方から取得した深度データの中で最も大きな高さ h_{max} を求めて (図 5(b))、 h_{max} との差がしきい値 h_t 以下の高さを持つ領域をユーザの頭部として抽出する。そして頭部領域の高さの平均値 h_{avg} を求めてから、頭頂部から目までの高さの差 e を考慮して $(h_{avg} - e)$ を視点の y 座標とする。そして頭部領域の中心を x, z 座標としてユーザの視点位置を決定する (図 5(c))。なお、 h_t の値および e の値は実験的にそれぞれ 100(mm)、50(mm) としている。

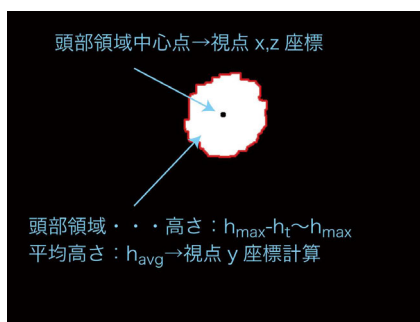
視点位置が決定すると、第 3 章で述べた手法に基づいて三次元点群データや三角形メッシュデータをユーザの視点位置からスクリーンに向けて投影して、コピー物体の三次



(a) ユーザとシステムの位置関係



(b) 深度データから最も大きな高さの値を取得



(c) 頭部領域の抽出と視点座標決定

図 5 Kinect 深度データに基づくユーザ視点位置の推定

元 CG 映像を生成する．そのため，スクリーンに映されたコピー物体はユーザ位置からは実際に物体が置いてあった場合と同様に観察される．映像生成はユーザの移動に対してリアルタイムで行っており，視点位置によって見え方が変化する運動視差を実現している．また動きのある三次元物体から得られた時系列データの場合には，データを逐次変更しながら三次元 CG アニメーションを生成する．

4.3 手の位置の推定とコピー物体とのインタラクション

スクリーン上方の Kinect はユーザの手の位置の推定にも用いる．ユーザがコピー物体を観察しながら手を差し出した場合，手の位置はスクリーン面よりも上にある物体の中で最も低い位置となることが多い．そこで，スクリーン上方から取得した深度データの中で，スクリーン面よりもしきい値 h_{ts} 以上上方かつ，頭部位置 h_{max} よりしきい値 h_{th} 以上下方にある点のうち，最も小さな高さ h_{min} を求めて， h_{min} との差がしきい値 h_t 以下の高さを持つ点をユーザの手領域として抽出する．そして，頭部領域と同じ手法



図 6 提案システムの外観

で手の中心座標を決定する．なお， h_{ts} の値および h_{th} の値は実験的にそれぞれ 100(mm)，300(mm) としている．また，現時点では片手操作にのみ対応している．

そして，手の中心に仮想的に半径 r の球を配置して，三次元コピー物体を表す点群の各点との距離を調べることで接触判定を行う．距離が r 以下の場合には，その点が手に触れていると判断して点を球の外側方向に移動させ，同時に効果音も再生する．これにより，コピー物体の三次元 CG が変形して，まるでユーザがコピー物体を触って変形させているような感覚となる．

5. 実験と考察

5.1 実験

提案システムを実装して実験を行った．使用した機材は MacBookPro(Core i7, 2.7GHz)，Kinect，超単焦点プロジェクタで，スクリーンの大きさは 1220×725(mm) となっている．Kinect はスクリーン直上の 1800(mm) の位置に設置して，640×480(画素) で色データおよび深度データを取得する．データの取得および三次元 CG の表示は 30(フレーム/秒)で行う．図 6 にシステムを設置した様子を示す．

実験結果を図 7 に示す．初めにシステムをスキャンモードにして，ユーザはスキャンしたい三次元物体をスクリーン上に配置する (図 7(a))．物体の大きさはユーザが実際に観察できる程度であれば特に制限はない．スキャンは瞬時に終わり，自動的にディスプレイモードに移行する．そして物体をスクリーンから取り除くと，ユーザの位置からはコピー物体がそのまま残像のように残っているような三次元 CG 映像を観察することができた (図 7(b))．その後ユーザが移動すると，ユーザの視点位置を推定しながらリアルタイムで三次元 CG を更新することで，コピー物体の三次元 CG 映像を様々な位置から観察することができ，運動視差の効果によってコピー物体がまるでそこにあるような立体感を得られることも確認した (図 7(c)(d))．三次元 CG

は三次元点群データまたは三角形メッシュデータに基づいて生成され、表示方法はいつでも切り替えることができる(図 7(e)(f))。その他の三次元物体に対する実験例を図 8 に示す。

図 9 にコピー物体を手で仮想的に触って変形させる例を示す。ユーザが表示されているコピー物体に手を近づけると、手の位置付近に表示されている点群が移動して、コピー物体を対話的に変形できることを確認した。効果音も付加することで、触感はないものの視覚と聴覚の効果によってコピー物体に触っているような感覚が得られた。

動きのある三次元物体に対する時系列データの取得と映像生成の例を図 10 に示す。現状は最大 4 秒 (120 フレーム) のデータ取得と映像生成が可能である。そしてユーザは動きのある三次元物体の三次元 CG アニメーション映像を物体がそこに存在しているような感覚で様々な方向から観察することができた。

5.2 考察

実験では、提案システムは三次元物体の大まかな形状を立体視 CG で再現することはできるが、詳細な形状を再現するのは困難であった。Kinect で得られる深度データは 640×480(画素)であり、詳細形状を表現するには解像度が不足している。また、スクリーン上方に設置した 1 台の Kinect のみで三次元物体のデータを取得しており、データが取得できない死角が多く存在する。これらの問題を解決するためには、より高精細なデータを取得できる RGB-D カメラの利用や複数台の RGB-D カメラの利用などが必要である。

また、視点位置や手の位置の推定には三次元物体スキャン用の Kinect をそのまま用いており、上方から得られた深度データに基づいて行った。これにより、スクリーン周辺であればユーザが左右どの位置からどの方向を向いて映像を観察した場合でも比較的安定して視点位置や手の位置を推定することができた。ただし、ユーザが大きく首や腰を曲げた場合には、最も高い位置が首や背中になる場合があり、適切に視点位置が推定できなかったり、手が頭で隠れて認識できない場合があった。

6. おわりに

本研究では現実世界の三次元物体の記録と映像提示を行う新しい CG システムを提案した。提案システムを用いることで、任意の三次元物体を動作を含めて瞬時にコピーして、三次元映像として再現しながら任意の位置から立体感を感じながら観察することが可能となった。またコピー物体を手で仮想的に触れて対話的に変形させることも可能となった。現在は提案システムを科学館の展示物として使用したり、教育やエンターテインメントの分野で活用することを検討している。

今後の課題としては、高精細の RGB-D カメラを複数台使用することで正確で死角の少ない三次元形状の擬似的複製を行うことや、より安定した視点位置の推定、表示物体の移動などのインタラクションの実現、提案手法を拡張した遠隔コミュニケーションなどが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究 (C)(23500139) による。

参考文献

- [1] 大石岳史, 増田智仁, 倉爪亮, 池内 克史: 改創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 429-436 (2005).
- [2] 西村正三, 原健司, 木本啓介, 松田浩: 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成 -3D 点群のレンダリング・ひび割れ描画支援システム-, 日本写真測量学会誌・写真測量とリモートセンシング, Vol. 51, No. 1, pp. 46-53 (2012).
- [3] 徐建鋒, 山崎俊彦, 相澤清晴: 極座標表現を用いた形状特徴ベクトルによる 3 次元ビデオのセグメンテーション, 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 47, SIG_10(CVIM_15), pp. 208-217 (2006).
- [4] 吉村ミツ, 甲斐民子, 黒宮明, 横山清子, 八村広三郎: 赤外線追跡装置による日本舞踊動作の解析, 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J87-D-II(3), pp. 779-788 (2004).
- [5] Rogers, B. J., Graham, M.: Motion Parallax as an Independent Cue for Depth Perception, *Perception*, No. 8, pp. 125-134 (1979).
- [6] 原田一馬, 菅野祐介, 佐藤洋一: 運動視差を用いたマルチタッチインタラクション, *Interaction 2012 論文集*, pp. 795-800 (2012).
- [7] 玉井康之, 末永剛, 栗田雄一, 松本吉央, 小笠原司: 運動視差提示による実画像 3 次元ディスプレイの提案, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 1H-12 (2007).
- [8] 塚田真未, 川島卓也, 水野慎士: 運動視差を用いた立体視 CG システムの構築と科学館での活用の検討, 情報処理学会研究報告, デジタルコンテンツクリエイション, 2013-DCC-4, No. 3, 6 pages (2013).

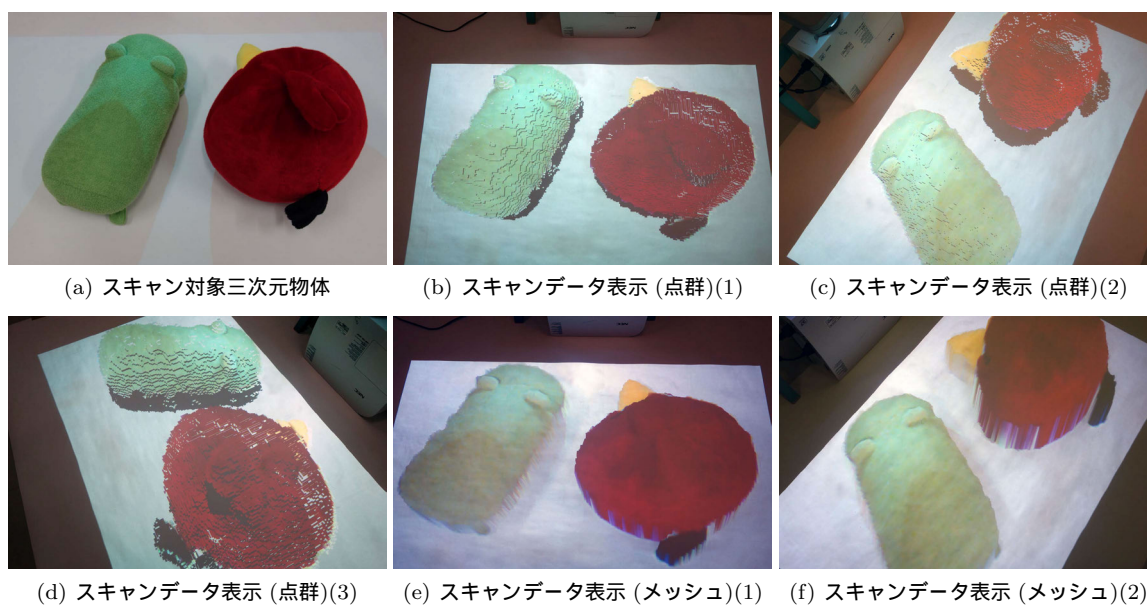


図 7 三次元物体のスキャンとコピー物体表示の実験例 (1)



図 8 三次元物体のスキャンとコピー物体表示の実験例 (2)

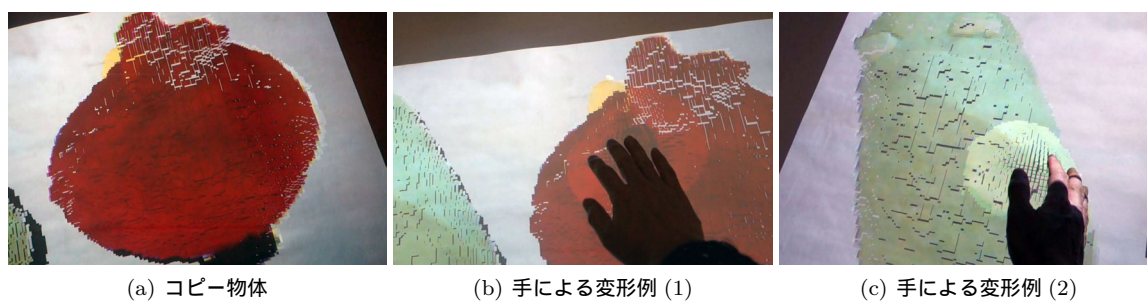


図 9 コピー物体を手で仮想的に触って対話的に変形させる実験例

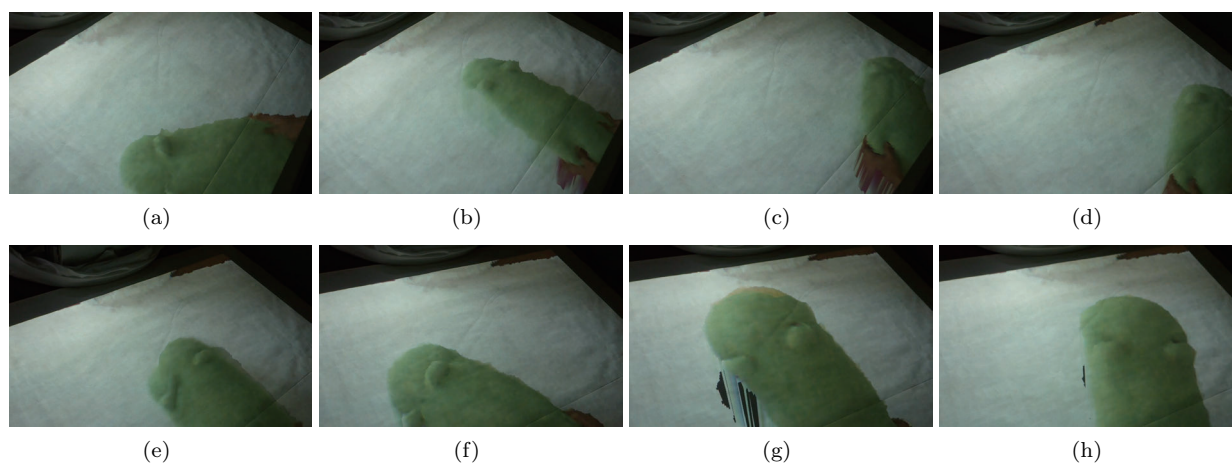


図 10 動作する三次元物体のスキャンと表示の実験例