実物体の仮想的な形状編集のための
対話的イメージベースト・リモデリングシステム福重 真一^{*1}

Interactive image-based re-modeling system for virtual editing of real objects

Shinichi FUKUSHIGE^{*1}^{*1} Dept. of Mechanical Engineering, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Received: 21 March 2017; Revised: 22 August 2017; Accepted: 10 September 2017

Abstract

This paper proposes an interactive image-based re-modeling system for virtual reshaping of real objects via a video see-through display. The system provides a quasi-realistic design environment in which a designer manipulates the shape and location of real products installed in a real living space. A prototype of the proposed system is developed by integrating two sub-systems for solid modeling based on 3D-CAD and visualization based on image-based rendering. A case study of the virtual redesign of real products illustrates that the proposed system allows designers to examine various design changes on the existing products in an immersive and realistic 3D environment.

Key words : Editable reality, Mixed reality, CAD, Image-based modeling

1. 緒 言

工業製品や建築物のデザインの場は、それらの人工物が設置され実際に使用される環境と一致させるのが望ましい。なぜならば、実環境における製品の様々な利用シーンをリアルに体感しながら、その機能や意匠、操作性などを検証し、結果を即座にデザインに反映することができるからである。このような要求に対して、近年、製品のデザインレビューや顧客とのコミュニケーション等に Virtual Reality (仮想現実, VR) や Mixed Reality (複合現実, MR) の技術が活用されるようになってきている (Santos et al., 2007)(Ohshima et al., 2003)(田中他, 2013)(Fiorentino et al., 2002)。現実世界を忠実に再現した 3 次元仮想環境、あるいは現実世界そのものの映像に製品の仮想モデルを合成して表示することで、実際の使用環境に近い空間でのデザイン検証を支援することができるためである。しかし、VR や MR において形状の変更が可能なのは仮想オブジェクトのみであり、現実空間に実在する物体（これを実物体と呼ぶ）は背景情報として利用するのみで実物体そのものの映像を編集の対象とすることはできない。工業製品の開発プロセスにおいては、既存製品のデザインに変更を加えながら新たなデザインを生み出すことも多く、実物体の仮想的な編集を可能にし、現状とは異なる様々な形状を試みることで、実物のリアリティを保ったまま製品の新しいデザインの可能性を検証することができるようになるはずである。

本研究では、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) やカメラ付きタブレット PC 等のビデオ透過型ディスプレイを通して見た実物体を、仮想モデルと同様に变形させたり移動したりすることを可能にするイメージベースト・リモデリングシステム Editable Reality (編集可能現実, ER) を提案する。具体的には、図 1 に示すように、ディスプレイを通して実物体の形状にフィッティングさせた 3D-CAD モデルの变形操作に合わせて、実物体の見かけの 3 次元形状を対話的に編集するための画像変換手法を提案し、これを ER システムとして実装する。

ER システムの実行例として、羽の無い扇風機と椅子の背もたれを対象とした仮想的な形状変更を行い、これらの製品の実際の設置環境下において様々な形状案を検討した結果を示す。

No.17-00121 [DOI:10.1299/transjsme.17-00121], J-STAGE Advance Publication date : 19 September, 2017

本論文は、第26回設計工学・システム部門講演会 講演論文集(2016), No.3104の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail of corresponding author: fukushige@mech.eng.osaka-u.ac.jp

Fig.1 Virtual re-modeling of a real product via video see-through HMD

2. 関連研究

工業製品のデザインにおいて、製品のみならずその使用環境を計算機内にリアルに再現し、その空間内において様々な使用状況を想定しながら設計検討を行いたいという要求は大きい。しかし、空間全体の精緻な3次元モデルを作成するには膨大な作業が必要となるため、実空間のパノラマ画像を撮影し、これを環境マップとして用いる方法や(Debevec, 1998), MR技術によって実空間上に製品の仮想モデルを配置する方法(Cook et al., 2003)などが用いられている。

一方、3次元スキャナやStructure from Motion等の技術によって実物体の3次元情報を取得し、これをデザインに活用する方法も数多く提案されているが(Paquette, 1996)(福重他, 2014), これらの計測技術によって仮想化された製品モデルの多くは多数の点群や三角形メッシュの集合体であり、産業界で広く用いられる3D-CADモデルのような自由かつ対話的な形状変更が困難である。点群情報からCADの解析曲面を再構築する手法や(松崎, 鈴木, 2006)(増田, 2010), 点群モデルを直接編集するためのモデリング手法(Pauly et al., 2003)もいくつか提案されているが、設計意図を反映した変形操作を行うことは難しい。

また、多くの工業製品は金属や研磨されたプラスチックからなる光沢面を持つために、視点位置の移動に伴って周辺環境の映りこみも変化しなければならないが、実物体を仮想化した形状モデルの多くは対象物体の画像から取得したテクスチャをそのままマッピングしたものであり、環境の映りこみをリアルかつリアルタイムに反映させるためには物体表面の反射特性に関する情報をあらかじめ仮想モデルに持たせるか(Dana et al., 1997), 視点に対する面の角度に応じた複数の画像をあらかじめ取得し、これらを視点位置に応じて切り替える必要がある(Debevec et al., 1996)。

本稿で提案するERシステムでは、3D-CADに一般的に採用されているフィーチャベースモデリングの方法を用いて形状の編集を行う。これにより、点群やメッシュクラウドから成る仮想モデルを直接編集するよりも比較的直感的な形状操作を実現する。また、HMDのカメラから撮影された実物体の映像をCADモデルの変形に応じてリアルタイムに改変することで、視点移動に伴う光沢面の変化を再現する。

3. Editable Realityによる実物体の仮想的リモデリング

3・1 イメージベースストアプローチ

本研究では、ERを「ビデオ透過型ディスプレイに表示された実物体の見かけの3次元形状をリアルタイムに編集する技術」と定義する。これを実現するために、入力画像に映る任意の物体を見かけ上3次元処理したように画像変換するイメージベースのアプローチを取る。図2は、この画像変換処理の原理を示したものである。

Fig.2 Principle of the image-based deformation in ER

実物体上の点 $P(X, Y, Z)$ と、この点をカメラの画像平面に投影した点 $p(x, y)$ との関係は以下のように表すことができる。

$$s\tilde{p} = AD\tilde{P} \quad (1)$$

ここで、 A はカメラの内部パラメータを表す行列であり、 D は実物体のある3次元座標系からカメラのレンズ中心を原点とする正規化カメラ座標系へ変換を表す行列である。 s はスケール変数であり、入力画像から P の座標を推定する際に、カメラから見た奥行き方向の深度が一意に定まらないことを表している。 $\tilde{p}$ 、 $\tilde{P}$ はそれぞれ p 、 P の拡張ベクトルを表す。

実物体を変形したとき、 P が P' に移動し、それに伴って画像平面上の p が p' に移動すると仮定する。このとき、3次元空間における P の移動を表す行列を T_P とすると、 p' は以下のように表すことができる。

$$s\tilde{p}' = ADT_P\tilde{P} \quad (2)$$

実物体の仮想的な変形に伴う $p \rightarrow p'$ の変換を入力画像の全ての点について求めたものがERシステムの出力画像となる。このとき、カメラの内部パラメータ A および座標変換行列 D は、カメラキャリブレーション用のマーカ等を用いてあらかじめ推定することができる。一方、実物体上の点 P については、入力画像のみから奥行き方向の深度、すなわちスケール変数 s を特定することができないため、実物体の概形モデルであるCADモデルを用いて以下の方法により推定を行う。

入力画像はHMD前方に取り付けたカメラのリアルタイム映像であるため、HMDを装着したユーザが視点を移動させることで様々な角度から見た実物体の画像を得ることができる。ある一つの方向から見た画像のみでは実物体とCADモデルの奥行き方向の位置を一致させることが出来ないため、視点を移動させながらCADモデルを編集し実物体とモデル間のずれを修正する。その結果、画像の点 p に対応する実物体上の点 P は、カメラ座標系において原点（視点）と p を結んだ直線とCADモデルとの交点のうち最も原点に近い点として推定することができる。すなわち図2に示すように、 p を通る視線と最初に交わるCADモデル表面の点を実物体座標系に変換したものを P とすることができる。さらに、 T_P もまたCADモデルの変形に伴う各構成面の変位から推定される。これにより、式(1)と(2)を用いて入力画像の各点がCADモデルの変形によって画像上のいずれの点に移動するかを求めることで出力画像を得る。

ユーザはCADモデルの3次元形状を対話的に操作し、システムはCADモデルを媒介として、実物体を仮に変形した時の見かけの画像を入力画像からリアルタイムに生成しディスプレイに表示する。

Fig.3 Process of image-based re-modeling in ER system

3・2 ERシステムによる形状編集のプロセス

図3にERシステムを用いたリモデリングのプロセスを示す．主に以下の3つのプロセスにより実物体の仮想的な形状編集を行う．

1. CADモデルの実物体へのフィッティング
2. モデルの編集
3. モデルと連動した実物体画像の変換

本システムにおいて実物体の対話的な形状編集を行うには、まず前処理として対象となる実物体の形状にCADモデルをフィッティングさせる作業が必要となる．システムのユーザは視点を変えながらCADモデルの位置と形状をHMDに表示される実物体と一致させる．このとき、HMDのヘッドトラッキングによって現実空間に対するHMDのカメラ座標の変位が常に計算されるため、CADモデルは実物体と同じ座標空間に配置され、一度フィッティング処理を行えば視点移動によって実物体とモデルとが乖離することは無い．また、HMDのカメラ映像にCADモデルを重畳させる機能については既存のMRの技術を用いる．

上記の前処理の後、CADモデルの対話的な形状編集を行い、このモデルの変形に合わせて、3・1節に述べた原理によりHMDに映し出される実物体の見かけの形状がリアルタイムに更新される．

CADモデルのフィッティングと、対話的な操作であるCADモデルの編集と連動した実物体映像の更新について、それぞれ3・3節と3・4節に詳細を述べる．

3・3 モデルフィッティング

3D-CADで一般に用いられるソリッドモデルは、パラメトリックに定義されたプリミティブ形状やフィーチャの集合体であり、それら形状フィーチャの持つパラメータを操作することで比較的自由的な変形が可能となる．実物体と同形状のCADモデルを新規に作成するか、既存製品の改良設計であれば、製品の設計モデルを再利用する．また、WEB上のリポジトリから類似製品のモデルを取得し、これを修正して用いる方法も提案されている(Kholgade et al., 2014)．本システムでは、いずれの方法で作成したモデルであっても、入力されたCADモデルのワイヤフレームモデルを実物体の映像に合成させながら対話的に修正していくことで、モデルの3次元形状を実物体と一致させる．

Fig.4 Model fitting and image deformation

このとき、対象とする実物体全体のモデルは必要としない．本システムにおいては、形状を変更したい部分のモデルのみを用意すればよく、それ以外の部分は実物体の映像をそのまま利用できる点が特徴の一つである．例えば、椅子の背もたれ部分のデザインを変更したい場合は、椅子全体ではなく、背もたれ部分のみの CAD モデルを用意し実物体の映像にフィッティングさせればよい．背もたれの 3 次元モデルは実物体の座標空間に配置されるため、HMD のヘッドトラッキングによって視点（HMD のカメラ位置）を移動しても背もたれ部分のモデルと座面や脚などの他の部位との相対的な位置関係は変化せず、椅子全体として違和感のない映像が合成される．

図 4(a)に示すように、ER システムのユーザはディスプレイを通して実物体と同じ画面上に表示された CAD モデルのワイヤフレームを操作し、視点を移動させながら実物体と形状が一致するまで CAD モデルを編集する．

Fig.5 Correspondence between solid and polygon models

Fig.6 Model editing followed by image deformation

3・4 モデル形状の編集と出力画像の生成

図 4 (b)のように実物体とフィッティングさせた CAD モデルの各フィーチャを操作することで、図 4 (c)のように実物体の見かけの形状を仮想的に編集する。ユーザが操作するのはディスプレイ上の実物体に重ねて描画された CAD モデルのワイヤフレームであるが、その編集操作と連動して実物体の映像が変形されるのみならず、図 4 (d)のように任意の位置に視点を移動させても変形後の 3 次元形状は維持されるため、あたかも目の前の実物体を直接変形しているかのような映像が得られる。

本システムでは、CAD モデルの作成と編集に既存の 3D-CAD システムを用いるため、その編集操作についてはディスプレイ上で行う従来のモデリング操作を前提とする。よって、ER の最も重要な機能である CAD モデルの変形に伴う出力映像のリアルタイム処理について以下に詳細を述べる。

本システムでは、効率化のために入力画像をポリゴン単位で処理する。まず、システム内部において CAD モデルをポリゴンモデルに変換し、カメラ映像から各ポリゴンと対応する実物体の画像を抽出する。図 5 は CAD モデルとポリゴンモデルの関係を示したものであり、ユーザによる CAD モデルの編集と連動してポリゴンモデルもまた変形される。このとき、全てのポリゴンに対して裏面判定を行い、ユーザの視点(HMD カメラ位置)から見て裏向きのポリゴンは以後の処理から除外する。

裏面判定の結果、カメラ映像上の実物体はユーザの視点から見て可視と判定されたポリゴンによって被覆される。これらのポリゴンをデプスソートにより並べ替え、視点から見て奥のポリゴンから順に実物体の対応する部分の画像を割り当てる。このとき、画像の同じ部分が異なるポリゴンに割り当てられる場合があるが、視点に近いポリゴンを優先させる。すなわち、ペインタルゴリズムによる隠面処理の原理に従い、実際に見えている面によって隠面が上書きされる。

ユーザによる CAD モデルの編集に伴いポリゴンモデルも変形され同時に可視面もまた変化するため、各ポリゴンに割り当てられた画像を 3・1 節で述べた原理に従ってポリゴン単位で変換し、視点から見て奥のものからカメラ画像平面に描画することで、変形後の実物体の投影像が得られる。図 6 の例では、ポリゴン S_1 が S_1' に変形され、それに応じて S_1 と対応付けられた画像が S_1' の形状に射影変換(モデル座標系ではアフィン変換)されている。また、 S_1 と S_2 の画像には互いに重なる部分があるが、手前にある S_1 によって S_2 が上書きされているため最終的に得られる画像には影響を与えない。

ただし、HMD のカメラからの入力画像を直接加工するという本システムの性質上、カメラから見えない部分の情報は取得できないという問題がある。例えば、実物体に遮蔽された背景部分の映像を HMD に取り付けられたカメラからは取得できないため、対象物体の仮想的な移動や変形によって露出する部分の画像を周辺画像やから推定しなければならない。ER システムにおいては隠背景や裏面をリアルタイムに補完する必要があり、高速なアルゴリズムが求められるため、補完処理にはあらかじめ指定しておいた実物体の可視面および周辺の画像をそれぞれ裏面と隠背景として用いる。

ユーザが視点を移動させるたびに上記の画像変換および隠背景補完処理を繰り返すことで、任意の視点から見た実物体の映像が CAD モデルの形状編集操作に連動して改変される。また、HMD のカメラ映像を毎フレーム処理しながら変形後の映像を生成するため、視点の移動に伴う周辺環境の光沢面への映り込みもリアルタイムに変化する。

4. 実行例

ER システムのプロトタイプを開発し、羽の無い扇風機とオフィス用椅子を例題としたデザイン変更のケーススタディを実施した。CAD モデルの作成・編集とポリゴンモデルへの変換は Creo Parametric 2.0 の API および CGAL (The Computational Geometry Algorithms Library) を用いた。また、HMD のカメラ映像の変換処理には OpenCV を用いた。

本プロトタイプシステムは HMD (Oculus rift) を装着したデザイナーによるジェスチャ入力などの没入環境でのモデル編集の機能は未実装のため、HMD の前方に取り付けた WEB カメラ (Logicool HD Pro C922) の映像をデスクトップ PC の画面に同時に映すことで、CAD モデルの実物体へのフィッティングや形状変更といった操作は PC 画面上でマウスポインタを用いて行った。また、カメラキャリブレーションと HMD のヘッドトラッキングには図 7, 8 のようなチェッカーボードマーカを用いた。ER システムの開発環境には Microsoft Visual Studio 2013, 開発言語は C++ を用いた。本実験で用いた PC のスペックは以下の通りである。

- CPU: Intel Xeon E5-2603v4 (1.7 GHz, 6C)
- GPU: NVIDIA Quadro K620 2GB
- メモリ: 32GB (2400 MHz)
- OS: Windows 7 64 bit

図 7 は、扇風機のヘッド部と同じ形状の CAD モデルを作成し、実製品の映像にフィッティングした後、ヘッド部が縦長になるように変形した結果である。この例題では、ヘッド部のデザインのみを変更しているため、それ以外の部分のモデルは必要ではなく、扇風機本体や背景の画像は HMD のカメラ映像をそのまま用いている。図 7 (a) は HMD カメラから見た扇風機の元の映像であり、図 7 (b) は本システムを用いて扇風機のヘッド部分を見かけ上縦長に変形した映像である。

また、本システムを用いて椅子の背もたれ部分を仮想的に変形した結果を図 8 に示す。図 8 (a) は椅子の実際の映像であり、図 8 (b) は背もたれ部分を縦に、図 8 (c) は横に引き伸ばした映像である。ただし、HMD のカメラに映っていない隠背景については、使用する画像をユーザがあらかじめ壁や床などの周辺画像から指定しておき、これらを用いて補完を行った。モデルの変形によって実物体の裏面が現れる場合もまた、実物体モデルの隣接するポリゴンに割り当てられた画像を用いて補完した。

開発した ER のプロトタイプシステムでは、入力されたカメラ映像の全てのフレームに対して画像変換処理を行うため、視点の移動や変形操作に対して変形後の映像がスムーズに追従することが出来なかった。実験時のフレームレートは 0.6 から 1.3 fps であり、ユーザの入力操作に対する画面の応答の遅れが目立つ結果となった。

Fig.7 Design changes of Dyson Air Multiplier

Fig.8 Design changes of an office chair backrest

5. 考 察

実行例では既存製品のデザイン変更を想定し、羽のない扇風機とオフィス用椅子を対象にデザインを変更したい特定のパーツの変形を行った。扇風機のヘッド部と椅子の背もたれについてそれぞれソリッドモデルを作成し、これを現物の映像にフィッティングさせる前処理を行った後、3D-CAD のモデリング機能とモデルの形状変更に伴う HMD のカメラ映像の変換処理により実製品の仮想的な形状変更を行った。実物体の一部分をモデル化するだけであっても、残りの部位の映像と合成され、任意の視点から見て違和感のない実物体の変形後の像を得ることができた。

本システムは 3D-CAD のパラメトリックフィーチャベースモデリングの機能を用いたため、比較的自由的な形状操作が可能であった。ただし、変形の自由度はフィーチャに依存するため、どんな形状変更にも対応できるわけではない。一般に CAD モデルはデザイナーの設計意図を反映したフィーチャの集合体となっており、デザイナーが修正・検討したいパラメ

Fig.9 Reflections from different viewpoints

Fig.10 Failures in background image complementation (red frame) and visibility processing (blue frame)

ータはあらかじめフィーチャに組み込まれていることが多い。

図 9 より、視点の移動に伴って椅子の光沢部分が変化していることが分かる。HMD のカメラ映像をリアルタイムに処理することで光沢面の変化を再現できる点が本システムの特徴である。ただし、このような映りこみは元の映像をポリゴン単位で射影変換した擬似的なものであり、必ずしも物理的に正しい反射光とは言えない。面の法線方向や反射特性に基づいて鏡面反射と拡散反射の成分を計算しているものではないため、対象製品の形状を大きく変更し面の向きが大幅に変わる場合は不自然な映り込みになる可能性がある。

ER の特徴は入力画像を直接変換することで現実空間の背景に溶け込んだリアルな出力画像を生成するところであり、主に工業製品や建築物の概形を変更した場合の意匠性や周辺環境との調和を検討する用途に適している。一方で、厳密な寸法定義や内部構造の検討を伴う製品の詳細設計には適さない。

例題検証の結果、視点の移動やユーザの入力操作に対する出力画像の応答の遅延が課題の一つとして挙げられる。これは、カメラ映像の全てのフレームに対して画像変換処理をしていることが原因の一つと考えられる。この問題に対しては、変換元となる画像を毎フレーム更新するのではなく、数フレーム毎に更新する、あるいは視点の移動速度に応じて処理するフレーム数を増減させるなど、スムーズな表示を実現するためのアルゴリズムの改良が必要である。

また、図 10 の横長の枠内に示すように、本システムでは実際の映像には映っていない背景部分の補完にあらかじめ指定しておいた周辺画像を用いており、そのため見る角度によっては不自然な合成になっている。この問題に対しては、Image Inpainting の技術に基づく隠消現実(Kawai et al., 2013)などの画像補完手法や、HMD とは別の位置に設置したカメラから背景部分を撮影し、その情報を用いて隠背景を補完する方法(森他, 2011)などの利用が考えられる。しかし、ER には入力画像のリアルタイム処理が求められるため、高速に補完処理を行うための新しいアルゴリズムの開発が必要である。

また、図の縦長の枠内のように、ポリゴンモデルの隠面判定に失敗した箇所のテクスチャが欠損している。これは、各ポリゴンの重心を用いた単純なデプスソートによって可視面を判定しているため、視線方向に対する面の法線の角度が直角に近い場合などに判定が不正確となるためである。この問題に対しては、コンピュータグラフィックスの分野においてペイントアルゴリズムの一つとして利用されている BSP 法(Fuch et al., 1980)を用いることや、仮にテクスチャの欠損があっても目立たない程度にモデルのポリゴン数を増やすことなどが考えられるが、システムの処理速度はポリゴン数にも依存するため、描画の正確さと表示のスムーズさの間にはトレードオフの関係がある。

6. 結 言

本研究では、ビデオ透過型ディスプレイを通して見た実物体の仮想的な形状編集を可能にするため、画像をベースとした形状モデリング手法を提案し、そのプロトタイプシステムを開発した。既存の工業製品を対象としたデザイン変更のケーススタディを実施し、HMD に表示された実製品の見かけの 3 次元形状を本システムによって変更し、現実の空間に設置された製品のリアルさを維持したまま様々なデザインを検討できることを示した。本研究で提案した ER システムの主な機能は以下の 2 つにまとめられる。

1. ビデオ透過型 HMD とそのヘッドトラッキング機能を用いた CAD モデルの現実空間座標系への配置と実物体への形状フィッティング
2. システムのユーザによる CAD モデルの対話的編集操作を媒介とした HMD 前方カメラからの入力画像のリアルタイム変換処理

今後の課題としては、アルゴリズムの改良による画像変換処理の高速化、3D ポインティングデバイスやジェスチャ入力を用いたより直感的な形状操作の実現、ER システムを用いた新しいデザインプロセスの提案などが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP 26560009、矢崎科学技術振興記念財団、KDDI 財団の助成を受けて実施した。また、ER システムのプロトタイプ開発と例題検証に協力いただいた中谷光伸氏に感謝する。

文 献

- Cook, J., Gibson, S., Howard, T. and Hubbold, R., Real-time Photo-realistic augmented reality for interior design, Proceedings of ACM SIGGRAPH '03, Sketches & Applications (2003), pp. 1-1.
- Dana, K.J., Ginneken, B.V., Nayar, S.K. and Koenderink, J.J., Reflectance and texture of real world Surfaces, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97) (1997), pp.151-157.
- Debevec, P., Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, Proceedings of SIGGRAPH '98 (1998), pp. 189-198.
- Debevec, P., Taylor, C. J. and Malik, J., Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach, Proceedings of ACM SIGGRAPH '96 (1996), pp. 11-20.
- Fiorentino, M., de Amicis, R., Monno, G. and Stork, A., Spacedesign: a mixed reality workspace for aesthetic industrial design, Proceedings of ISMAR'02 (2002), 0-7695-1781-1.
- Fuchs, H., Kedem, Z. M. and Naylor, B. F., On visible surface generation by a priori tree structures, ACM Computer Graphics (1980), pp. 124-133.
- 福重真一, 中谷光伸, Sun Hongcheng, 現物をベースとしたプロダクトデザイン支援のための MR・モデリング統合環境, 信学技報, Vol. 114, No. 4 (2014), pp. 109-110.
- Kawai, N., Yamasaki, M., Sato, T. and Yokoya, N., Diminished reality for AR marker hiding based on image inpainting with reflection of luminance changes, ITE Transions on Media Technology and Applications, Vol. 1, No. 4 (2013), pp. 343-353.
- Kholgade, N., Simon, T., Efros, A. and Sheikh, Y., 3D Object manipulation in a single photograph using stock 3d models, ACM Transactions on Graphics, Vol. 33, No. 4 (2014), Article No. 127.
- 増田宏, 画像インターフェースを用いた大規模点群からのソリッドモデリングシステム, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 771 (2010), pp. 2748-2752.
- 松崎幸一, 鈴木宏正, リバースエンジニアリングソフト MOSAIC の開発: 基本構想と現段階までの適用報告, 第 16 回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2006), pp. 273-276.
- 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行, 隠消現実感の技術的枠組みと諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2 (2011), pp. 239 - 250.
- Ohshima, T., Kuroki, T., Yamamoto, H. and Tamura, H., A mixed reality system with visual and tangible interaction capability— application to evaluating automobile interior design, Proceedings of ISMAR'03, (2003), pp. 284-285.
- Paquette, S., 3D scanning in apparel design and human engineering, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 16, No. 5 (1996), pp. 11-15.
- Pauly, M., Keiser, R., Kobbelt, L. P. and Gross, M., Shape modeling with point-sampled geometry, ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3 (2003), pp. 641-650.
- Santos, P., Stork, A., Gierlinger, T., Pagani, A., Paloc, C., Barandarian, I., Conti, G., de Amicis, R., Witzel, M., Machui, O., Jiménez, J. M., Araujo, B., Jorge, J. and Bodammer, G., IMPROVE: an innovative application for collaborative mobile mixed reality design review, International Journal Interact Design and Manufacturing, Vol. 1, No. 2 (2007), pp. 115-126.
- 田中靖己, 向井利光, 麻生隆, 新井三紘, 鳥海基忠, 自動車産業における Mixed Reality 技術活用によるものづくり革新, 自動車技術, Vol. 67, No. 6 (2013), pp. 41-46.
- The Computational Geometry Algorithms Library (CGAL), available from <<http://www.cgal.org>>, (accessed on 14 March, 2017).

References

- Cook, J., Gibson, S., Howard, T. and Hubbard, R., Real-time photo-realistic augmented reality for interior design, Proceedings of ACM SIGGRAPH '03, Sketches & Applications (2003), pp. 1-1.
- Dana, K.J., Ginneken, B.V., Nayar, S.K. and Koenderink, J.J., Reflectance and texture of real world surfaces, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97) (1997), pp.151-157.
- Debevec, P., Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, Proceedings of SIGGRAPH '98 (1998), pp. 189-198.
- Debevec, P., Taylor, C. J. and Malik, J., Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach, Proceedings of ACM SIGGRAPH '96 (1996), pp. 11-20.
- Fiorentino, M., de Amicis, R., Monno, G. and Stork, A., Spacedesign: A mixed reality workspace for aesthetic industrial design, Proceedings of ISMAR'02 (2002), 0-7695-1781-1.
- Fuchs, H., Kedem, Z. M. and Naylor, B. F., On visible surface generation by a priori tree structures, ACM Computer Graphics (1980), pp. 124-133.
- Fukushige, S., Nakatani, M. and Sun H., Editable reality system for computer-aided product design, IEICE Technical Report, Vol. 114, No. 4 (2014), pp. 109-110 (in Japanese).
- Kawai, N., Yamasaki, M., Sato, T. and Yokoya, N., Diminished reality for AR marker hiding based on image inpainting with reflection of luminance changes, ITE Transions on Media Technology and Applications, Vol. 1, No. 4 (2013), pp. 343-353.
- Kholgade, N., Simon, T., Efros, A. and Sheikh, Y., 3D object manipulation in a single photograph using stock 3d models, ACM Transactions on Graphics, Vol. 33, No. 4 (2014), Article No. 127.
- Masuda, H., A solid modeling system for large-scale point-clouds using image-based interface, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 76, No. 771 (2010), pp. 2748-2752 (in Japanese).
- Matsuzaki, K. and Suzuki, H., Development of reverse engineering software MOSAIC, The 16th JSME Design and System Engineering Conference, (2006), pp. 273-276 (in Japanese).
- Mori, S., Ichikari, R., Shibata, F., Kimura, A. and Tamura, H., Framework and technical issues of diminished reality: a survey of technologies that can visually diminish the objects in the real world by superimposing, Replacing, and Seeing-Through, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.16, No.2 (2011), pp.239-250 (in Japanese).
- Ohshima, T., Kuroki, T., Yamamoto, H. and Tamura, H., A mixed reality system with visual and tangible interaction capability— application to evaluating automobile interior design, Proceedings of ISMAR'03, (2003), pp. 284-285.
- Paquette, S., 3D scanning in apparel design and human engineering, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 16, No. 5 (1996), pp. 11-15.
- Pauly, M., Keiser, R., Kobbelt, L. P. and Gross, M., Shape modeling with point-sampled geometry, ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3 (2003), pp. 641-650.
- Santos, P., Stork, A., Gierlinger, T., Pagani, A., Paloc, C., Barandarian, I., Conti, G., de Amicis, R., Witzel, M., Machui, O., Jiménez, J. M., Araujo, B., Jorge, J. and Bodammer, G., IMPROVE: An innovative application for collaborative mobile mixed reality design review, International Journal Interact Design and Manufacturing, Vol. 1, No. 2 (2007), pp. 115-126.
- Tanaka, Y., Mukai, T., Aso, T., Arai, M. and Toriumi, M., Manufacturing innovations utilizing mixed reality technology in the automobile industry, International Journal of Automotive Engineering, Vol. 67, No. 6 (2013), pp. 41-46 (in Japanese).
- The Computational Geometry Algorithms Library (CGAL), available from <<http://www.cgal.org>>, (accessed on 14 March, 2017).