

HYPERREAL 三次元形状デザイン支援システム

山本 景子[†] 久田 理[†]
金谷 一朗^{†,††} 佐藤 宏介[†]

本論文は、複合現実感技術を応用した工業デザイン向け製品デザインシステムに関するものである。従来のコンピュータ支援設計 (CAD) システムでは、ユーザが自由に形状を変形できる反面、表示は平面ディスプレイや両眼視差を利用したステレオディスプレイを用いており、最終製品の持つボリューム感、実在感を提示することは困難であった。そのため、CAD システムで一旦設計した後、製品デザインの評価のために三次元プリンタなどのラピッドモデラを用いてモックアップを作成する必要があり、最終デザインに至るまでこのサイクルを繰り返す必要があった。本研究では、複合現実感技術を応用し、モックアップにバーチャルな陰影情報を付加することで、モックアップの実在感を損なわずにボリューム感を制御し、また形状のトリミング操作を行えるようにし、CAD システムの設計自由度とモックアップの実在感を両立させるシステムを提案する。また、ユーザが自然かつ直観的に形状操作できるようなユーザインタフェースを提案する。

HYPERREAL — Designing Physical Objects As If They Were Digital

KEIKO YAMAMOTO,[†] MASARU HISADA,[†] ICHIROH KANAYA^{†,††}
and KOSUKE SATO[†]

The “HYPERREAL” is a new computer aided design system that allows users to virtually modify physical objects as if they were digital objects like ones on conventional CAD systems. The HYPERREAL controls the virtual shape of real objects with shading-pattern projection. Users eyes preserve the spatial and stereoscopic effect when seeing the real objects which are projected by special modulated light. An intuitive input device is introduced for trimming the object’s 3-D surface appearance. The reality of the objects is not degraded while users are trimming the shape of the surface during virtual shape designing. A prototype system demonstrated its naturalness of computer controlled mixed reality appearance.

1. はじめに

製品企画のマネージメント法の発展により、工業製品はユーザの要求を機能的に充足させるだけでなく、製品コンセプトから意匠的、審美的な形態までも含めて製品設計の過程の中で意図されるようになった。特に、機能には直接関係がなく、デザイナーの意匠的な意図をもって設計された曲面は意匠曲面と呼ばれ、製品の印象を左右する重要な要素の一つとなっている。しかし意匠設計の分野では、他の設計分野（概念設計、機能設計、生産設計など）に比べてデザイナーの作業を十分に支援するコンピュータツールがないのが現状で

ある。

工業製品の現在主流のデザイン工程は、デザイナーがまずイメージを二次元スケッチし、ついで二次元のデザインイメージから、モデラ（三次元造形作業の専門家）がクレイ（工業用粘土）を用いて三次元製品モデルを造形することから始まる。クレイモデルの製作は、実物体がもつ実在感、ボリューム感をデザイナー自身が感性評価する上で欠かせないステップである。その後、クレイモデルを三次元形状計測し、CAD (Computer Aided Design) で形状モデルを数値化し、モデルの凹凸の小変形から調整を行い、NC 工作機、三次元プリンタ等を用いて再び実モデルを製作し、デザイン評価が行われる。このプロセスは、最終デザインが決定するまで繰り返し行われる。

CAD は数値的な三次元データを扱うのに適しているが、その独特のマウス操作を使いこなすには熟練が必要であり、また CAD データから最終製品の実在感、ボリューム感を感じ取ることは熟練者にも困難である。

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††} 科学技術振興機構さきがけ

PRESTO, Japan Science and Technology Agency

一方、クレイモデルの制作は直感的である反面、時間的にも金銭的にもコストがかかってしまう。

これらの問題を解決すべく MR (Mixed Reality) や VR (Virtual Reality) といった技術を活用して、クレイモデル製作をデザインプロセスから省略するための様々な研究が行われている。代表的なものに三次元 CG を HMD (Head Mounted Display) で提示するものがあるが^{1),12)}、実物体が本来持つ実在感やボリューム感といった感性評価上非常に重要な指標が損なわれてしまうという問題点がある。また、これらのシステムでは、モデルの操作にクレイモデルのような実物体を伴わないため、モデリング操作(造形操作)を直截的に行うためには新たな工夫が必要であり、デザイナー、モデラにとって苦痛とならない代替ユーザインタフェースを考慮しなければならない。マウスやデータグローブによる入力システムも開発されているが、ポインタによる操作感覚や装着感の問題からデザイン支援ツールと呼ぶにふさわしいとは言えない。

本論文では、工業製品の意匠設計を支援するために、実物体がもつ実在感、ボリューム感を損なわないまま、仮想的に自由な形状変形が可能な、コンピュータ支援設計システム“HYPERREAL”を提案する。具体的には、実物体上の適切な位置に人間の視覚特性に合致した光学パターンを投影することで、実物体の仮想的な形状変形(以降本論文ではこれを視覚的の形状変形とする)を実現する実物体に対応したコンピュータグラフィクスをその実物体に重畳させることで、ユーザはモデルの実在感、ボリューム感を評価できる上に、CAD 操作のような自由な形状変形を行うことができるようになる。また形状変形を行う入力デバイスは、マウスやキーボード、機械式三次元位置デジタイザなど熟練を必要とするインタフェースではなく、デザイナーの創作活動を妨げることなく操作可能な直感的非拘束形状操作インタフェースを提案する。これらにより高い立体感を持った直観的操作が可能な新たな造形支援環境を実現し、実物体ベースのデザイン支援システムの構築を目指す。

この HYPERREAL システムを用いることによって、クレイモデルやモックアップの試作回数を減少させることができる他、デザイナーがアイデアを自ら具現化するのが容易になることから、これまでデザイナーとモデラが行っていた自然言語やジェスチャなどによるあいまいなやりとりをなくし、製品の最終形状につながるモックアップの製作作業を円滑に行うことが可能となると考える。

第 2 章では、研究背景として形態デザインと MR

技術を用いたデザイン支援システムの現状について述べ、関連研究を挙げ、本研究の位置付けを明らかにする。第 3 章は、本システムに用いられているプロジェクトによる視覚的の形状変形手法及び非拘束型形状操作インタフェースについて述べ、これらの手法を用いたシステムの全体像について述べる。第 4 章では、HYPERREAL のディスプレイシステムと形状操作システムの有効性を検証する実験と、その結果について述べ、得られた結果に対する考察と課題、また今後の展望について第 5 章で述べる。第 6 章で、本論文のまとめを述べる。

2. 関連研究

VR 技術、MR 技術を用いたデザイン支援システムの研究例を以下に挙げる。

空間スケッチシステム¹⁾は、液晶シャッターを用いた立体視環境とペン型のポインティングデバイスを用いることで、デザイナーが三次元空間をキャンバスとして線や面を直接自由に描くことができるというもので、大型スクリーンを用いることでデザイン検討のための立体形状表示能力を有している。しかしながら、この手法は画像品質の面で適しているとはいえず、ユーザの得る現実感が損なわれてしまうという問題がある。また平面画像による立体視がベースとなっているため、立体感、実在感を得るといった形状評価の観点においても適しているとはいえない。また、HMD を用いる手法は仮想空間への高い没入感を得ることができるが「VR 酔い」を引き起こしやすいという問題がある。「VR 酔い」は HMD を長時間使用すると起きる現象で、その原因として考えられているものの一つとして、センサの計測結果からコンピュータが映像を計算し直し再表示するまでに生じる時間遅れがある。これによりユーザの感覚とディスプレイに映し出される画像に時間ずれが発生するため、ユーザの脳内過程が混乱すると言われている^{7)~9),13)}。

MR 技術を活用し HMD を用いずとも高い立体感、実在感提示能力を持ったディスプレイシステムも多く研究されている。Shader Lamps⁴⁾ や Dynamic Shader Lamps⁵⁾ は、まず三次元形状の投影用白色実物体と、それと同形状の三次元 CG をコンピュータ上の仮想空間にモデル化しておく。そしてコンピュータ上で三次元モデルの表面上に質感や材質などの表面属性パラメータを与え、それをある視点からみたときの平面画像を求める。その後求めた画像を白色実物体をスクリーンとしてプロジェクタから投影することで、単に実物体表面上に仮想世界情報を重畳するのではなく、

投影光が重畳された実物体の総合的な見え方を変化させることができる。しかし、これらのシステムでは表面情報の自由設定は可能であるが、形状情報の操作に関しては考慮されておらず、提示したい形状の数だけ投影用の実物体が必要である。

一方、FreeForm²⁾ モデリングシステムは、触感によるモデリングというものに着目したモデリングツールである。フォースフィードバックデバイス PHANToM で三次元位置を取り込みながら、三次元の粘土の固まりを道具で削ったり彫ったり研磨でき、また絵の具のチューブをひねり出すように新しい物質を付け加えて形状を作ることができる。このように各々の入力操作が日常の動作を模して設計されているため、操作に熟練を要さないというを有する。しかし入力デバイスであるツールの可動域と作業スペースが同一空間でないことや、出力が平面ディスプレイによるため、製品デザインの評価上重要な指標である実在感、ポリウム感を喪失してしまうといった問題がある。

また、二次元のデザイン支援システムの入力インタフェースとしてタブレットがある。これはペン型デバイスで二次元のスケッチを描画するには極めて有効かつ有用であるが、三次元形状のデザインを三次元空間で行えるものではなく、本システムの入力インタフェースには適さない。

3. HYPERREAL - 三次元形状デザイン支援システム

本論文の目的は、従来の CAD システムのようにコンピュータ上で形状データが保持され、かつ直截的な操作が行える入力デバイスを用いて変形操作が行え、実際にクレイモデル製作を必要としなくなるような実在感を伴ったデザイン支援環境の構築である。現実には、クレイモデルの形状をリアルタイムにコンピュータに取り込むことや、コンピュータ上の三次元形状をリアルタイムにクレイモデルに反映させることは困難である。そこで、視覚的形状変形(3.1節)と、非拘束型形状操作インタフェース(3.2節)を組み合わせることで本目的を実現するシステム(3.3節)を構築する。

3.1 視覚的形状変形手法

本論文では、プロジェクション方式による実物体の仮想変形システムを提案する。一般的にプロジェクション方式はプロジェクタから投影する映像は任意に変えられるが、投影対象となる物体の形状自体は変化しないため、立体感の提示に、輻輳、焦点などの生理的なものは使えない。そのためこれら生理的奥行情報の代

わりに本手法では、高次奥行情報(明暗、コントラスト、陰影などの光学的な情報や隠蔽関係、遠近法などの幾何学的な情報から心理的記憶的に奥行きを知覚するための情報)による立体感提示を行う。この心理的奥行視覚情報を用いた立体感の提示は現在の CG 技術(シェーディング、シャドウイング等)を用いることで高品位に実現が可能である。

本研究では CG 技術を利用し実物体上に高次奥行情報を付加した画像を重畳することで高い立体感、実在感を保持しつつ、物体の形状の視覚的変形を実現する。この手法では実物体を目視するため、形状の変形を施していない部分については焦点調節などの生理的な情報に矛盾は起きない。そのため製品のシルエットラインの細かな修正や、商品の印象に大きく影響するキャラクタラインやハイライトライン等の意匠のシミュレーションなどには特に有用であると考えられる。

3.2 非拘束型形状操作インタフェース

本システムでは、いかにデザイナーの身体を拘束せずにその動きをコンピュータに取り込むかが重要である。現在多くのデザイン支援システムで用いられている入力インタフェースは、キーボードやマウス、機械式三次元位置デジタイザ、データグローブなどであるが、キーボードやマウスはユーザを二次元平面に、位置デジタイザやデータグローブは身体を自由度を奪ってしまう。

また、これらは一般のデザイナーが使い慣れた道具とはまったく異種であるため、使いこなすには熟練が必要であったり、実際に操作するオペレータを介しながら創作せざるを得ず、製品開発を効率化させる妨げとなっている。以上をふまえ本論文では、非拘束にユーザの動きを捕らえ三次元のデザイン支援ができる仕組みを考える。本システムの入力インタフェースは、光学マーカを搭載したデバイスを用い、対象物体の変形させたい箇所を光学マーカを点灯させることでユーザの指示をカメラで捕らえることとする(本論文では以降この入力デバイスを「バーチャルスパチュラ」と呼ぶ)。

3.3 システム構成

提案システムの構成図を図 1 に示す。本システムの構成要素は、投影用プロジェクタ、スクリーン用白色実物体、頭部位置計測用の磁気トラッカ、制御用コンピュータである。

まず、形状が既知である投影スクリーン用の白色実物体を用意する。白色無光沢物体はプロジェクタで投影可能な位置に固定する。物体形状の変形は、コンピュータ上の仮想空間で行う。形状変形後、実世界の

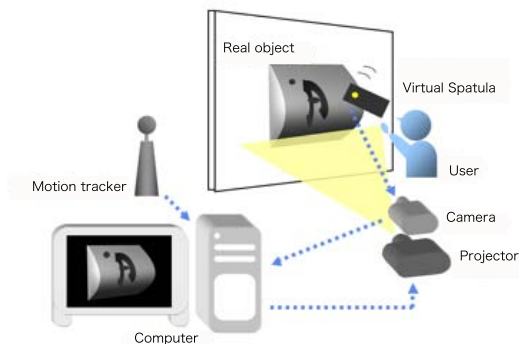


図 1 システム構成

視点に対応する仮想世界の視点から見た物体の見え方をコンピュータグラフィックスを用いてシミュレートし、変形後の実物体表面上に生じるべき光学情報を求める。その後、求めた光学パターンをプロジェクタから実物体表面の対応する位置に投影する。また、バーチャルスパチュラに付加した光学マーカは、形状変形対象物体にデバイスの裏面を接触させることで点灯させる。変形操作はこの点灯位置をカメラで取り込み、その位置に光学情報を与えることで行う。この一連の処理をリアルタイムに行うことで、視覚的な形状変形を実物体に加えることが可能になる。

4. 実験と結果

本提案システムの有効性を確認するために、次に述べるような三次元形状デザイン支援システムを実装し、視覚的変形効果の実証およびその有効範囲（変形量、視点位置）とマニピュレーションシステムの評価実験を行った。

4.1 節で本システムの実装について、4.2 節ではシステムの有効性を示す。また、4.3 節で仮想的変形と物理的変形の比較実験について、4.4 節では視点位置と立体感に関する比較実験を、4.5 節では入力インターフェースとしてマウスと本入力インターフェースを用いた場合での比較実験について述べる。

4.1 システムの実装

HYPERREAL システムを実装した結果を図 2 に示す。

本システムでは実物体表面上に適切なテクスチャ画像を投影することにより物体の視覚的変形を行うため、投影光が重畳された実物体の総合的な見え方は投影する画像の画質に依存する。しかし、画質を向上させるとその分テクスチャ画像生成に計算コストがかかり、リアルタイム性が損なわれてしまう可能性がある。そのため画質とリアルタイム性の両方を考慮し投影画像

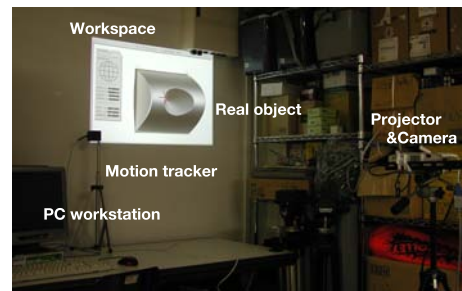


図 2 システムの外観



図 3 白色実物体（左）、投影画像（CG 画像）（中）、投影結果（実写）（右）

を生成する必要がある。本システム実装では、テクスチャ画像生成に、視覚上十分な高解像度コンピュータグラフィックスを生成できる実時間三次元 CG 生成ランタイムシステム OpenGL/Cg を用い、画像生成には PC (Intel Xeon 3.4GHz CPU, 2GB RAM, nVidia Quadro FX4500 GPU, 512MB VRAM) を用いた。本システムでの投影画像生成は次に述べるとおりである。まず、入力された実物体の頂点位置情報からポリゴンパッチを形成し、色彩、質感などの属性パラメータを設定する。次に、視点位置情報から物体の姿勢を求め、仮想光源も設定する。本システムでは、グローバルシェーディングをハードウェア計算することで高速かつリアルスティックな陰影計算を行った。上記のようにして求めた仮想変形後の物体の視点スクリーン画像に、視点スクリーン-プロジェクション座標系間の対応付けの座標変換テーブルを用いて、投影画像に変換した。頭部（視点）位置のトラッキングには、磁気センサ（POLHEMUS 社、FASTRAK）を用いた。本システムの描画フレームレートは常に 30[fps] 以上である。

本システムを用いた動作例を図 3 に示す。左から順に光学パターン投影前の白色実物体、プロジェクタから投影する CG 画像データ、投影後の白色実物体である。物理的に形状変形しているものと同程度の立体感を保った実物体を観察可能であることを、目視で確認した。本システムを用いた視覚的変形の有効範囲を、以降の実験で明らかにする。

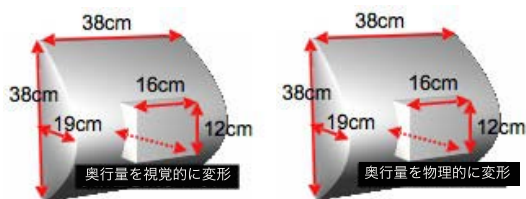


図 4 変形対象物体形状

4.2 視覚的・形状変形の有効変形量

本システムでは立体感を保持しつつ変形形状提示を行うため、どの程度の奥行き変化まで視覚的変形が可能であるかは応用分野を決めるために非常に重要である。理論的には、物体を変形することによって実物体表面上に本来生じるべき光学情報を実物体表面上の適切な位置に重畳できれば、ユーザに正確な奥行きを提示できるはずである。しかしながら、本手法においては形状の変形に視覚特性の輻輳や焦点等の生理的な要因ではなく、単眼立体視による高次奥行情報を利用しているためこれらの矛盾によりユーザの形状知覚に違和感生じる可能性がある。

そこで試作システムを用いて実際に形状の変形を行い、その変化量に対してどのような視覚的振る舞いが生じるかを調べ、どの程度の変形量であれば違和感なく変形物体を観測することができるかの心理実験を行った。

4.2.1 実験方法

白色実物体中心の長方形部分の奥行きを、本システムを用いて視覚的に変化させたものと実際に変形させたものを左右に並べ、その変形形状を、視点を物理的に移動させることにより様々な方向から観測し、どのように形状が知覚されるかを調べる。視点位置は両眼視差、輻輳、焦点調節が効果的に機能する比較的近距离(数メートル未満)である必要がある³⁾、本実験では簡単のため視点は実物体から半径 100[cm] の半球面上を移動するものとする。視覚的変形に用いる長方形のサイズは 16[cm] x 12[cm] であり、その高さは壁から 18[cm] を原点として手前と奥にそれぞれ 3.0[cm] と 5.0[cm] ずつ合計 5 パターンに変化させる(図 4 参照)。

合計 5 パターンの変化量に変形させたときの物体の見えのうち、視覚的・形状変形前の見えと、奥行き変形量が -5.0, 0.0, +5.0[cm] の 3 パターンについて、ある視点から観察した様子を図 5, 6, 7, 8 に示す。左の物体が視覚的変形したもので、右の物体が実際に物理的な形状変形を行ったものである。

4.2.2 実験結果

両物体を目視により観察した結果、実物体表面から



図 5 視覚的・形状変形前の物体 図 6 奥行き変形量 -5.0[cm]



図 7 奥行き変形量 0.0[cm] 図 8 奥行き変形量 +5.0[cm]

5.0[cm] の変形量においても視覚的変形も実変形も同じ形状が同じ立体感で知覚されたため、実物体曲面の小変形であれば視覚的・形状変形で十分模倣可能であることがわかった。また、操作量が手前に大きくなると視点位置によっては変形しているようには見えないことがあり、得られる立体感は基準位置からの奥行き操作量が小さい場合に特に大きいことがわかった。

4.3 視覚的・形状変形効果の有効視点位置

人間の奥行き知覚には様々な要因によるものがあるが、焦点調節、運動視差、視野、両眼輻輳、両眼視差などをまとめた生理的要因によるものと、高次奥行情報を含む心理的・経験的要因によるものの二種類に大別できる。生理的要因による奥行き知覚は近距离に、心理的・経験的要因は遠距離においてより強く働く。ユーザが入力デバイスを把持して対象物体に接近して操作する際、生理的奥行き知覚と心理的・経験的奥行き知覚が矛盾し形状知覚に違和感を感じさせることがあるかどうかを明らかにする必要がある。

そこで提案システムを用いて、視覚的に変形を施し、その視点位置に対してどのような視覚的振る舞いが生じるかを調べ、どの程度の距離であれば違和感なく変形物体を観測することができるかを明らかにした。

4.3.1 実験方法

提案システムを用いて実物体を視覚的に変形した形状を 150[cm] 離れて見た時を基準として、100, 50, 30[cm] の三カ所において実験を行い、対象物体とユーザ視点位置がどの程度の距離で自然に視覚的・形状変形が知覚できるかを比較した。被験者は、21 歳から 24 歳の男性 9 名および女性 1 名である。



図 9 150[cm] 距離での観察

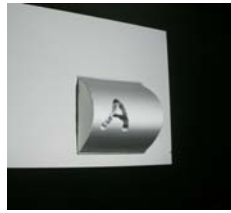


図 10 100[cm] 距離での観察

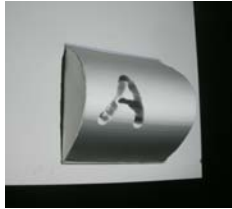


図 11 50[cm] 距離での観察



図 12 30[cm] 距離での観察

表 1 実験 1 における数量化の基準

5 …	150[cm] 離れて見たときに得られる立体感と同等
4 …	5 より劣るが立体的に見える
3 …	立体的に見える
2 …	言われてみれば立体的に見える
1 …	立体的に見えない

表 2 視点位置と立体感の評価

視点位置 [cm]	回答					評価値 の平均
	1	2	3	4	5	
100	0	0	4	3	3	3.9
50	2	7	1	0	0	1.9
30	7	3	0	0	0	1.3

4.3.2 実験結果

150, 100, 50, 30[cm] から見た実物体投影結果を図 9, 10, 11, 12 に示す。また、視点位置と立体感の比較実験の結果を表 2 にまとめる。評価基準は表 1 に示す。

表 2 から視点位置 100[cm] では 150[cm] と同等もしくはそれより劣るが立体感が得られる、形状変形しているように見えると評価した被験者が多かったが、50, 30[cm] の視点位置では立体的に見えるとは言えない、形状変形しているように見えないと答えた被験者が多かった。

4.4 マニピュレーションシステムの有効性評価

本論文は、デザイナーが熟練を要せずに直観的に操作できる非拘束型入力インタフェースを提案することも目的の一つである。

そこで、現在 CAD システムの操作においても多用されているマウスと本システムの入力デバイスであるバーチャルスパチュラでの操作時の感覚を比較実験で評価する。バーチャルスパチュラでの作業の様子を図



図 13 形状操作の様子

表 3 主観評価の数量化

5 …	とても使いやすい
4 …	使いやすい
3 …	普通
2 …	やや使いにくい
1 …	かなり使いにくい

表 4 マウスとの比較結果

入力方法	回答					評価値 の平均
	1	2	3	4	5	
マウス	0	1	5	2	2	3.5
バーチャルスパチュラ	0	5	0	4	1	3.1

13 に示す。

4.4.1 実験方法

被験者に、マウスとバーチャルスパチュラの両方でそれぞれ実物体上に変形操作を行うタスクを与えた。その後、表 3 の基準によりデバイス毎に使いやすさを評価させた。また、意図した場所のポインティングのしやすさと、意図した曲線のドローイングのしやすさについては、マウスとバーチャルスパチュラで比較評価させた。なお、被験者は 21 歳から 33 歳の男性 7 名および女性 3 名、マウス使用歴は平均 7.4 年で全員ほぼ毎日使用している。操作方法の説明として以下の説明をし、実験順序の影響を排除するため、入力デバイスをを用いる順序はランダムにした。

<操作方法の説明>

マウス … カーソルを物体の変形させたい部分にもっていき、その位置でクリックおよびドラッグする。右ボタンを押している間、変形操作が可能となる。

バーチャルスパチュラ … 実物体上の変形させたい位置で、デバイスを物体に接触させることで LED が点灯する。接触している間、変形操作が可能となる。

4.4.2 実験結果

入力デバイスの操作感に関する実験の結果を以下の表 4、図 14、図 15 にまとめる。評価の数値化は表 3 による。

また、実験後被験者からヒアリングした主観評価を表 5 にまとめる。

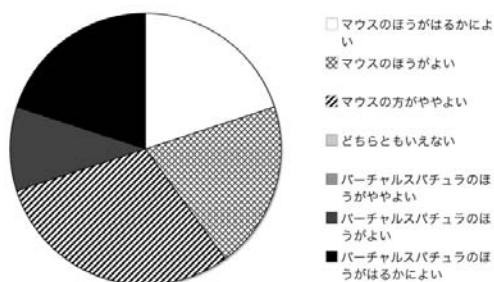


図 14 評価結果 (ポインティングのしやすさ)

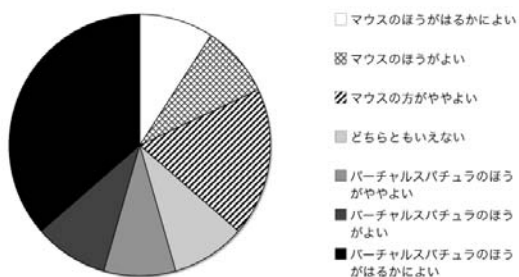


図 15 評価結果 (ドローイングのしやすさ)

表 5 被験者からヒアリングした意見

マウス	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・日頃使い慣れているため使いやすい ・変形箇所に表示されるためわかりやすい
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・操作画面中の変形と三次元物体状での作業結果が完全に一致しない ・対象との距離感がつかみにくい
バーチャル スパチュラ	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・作業対象と操作領域が一致しているのでわかりやすい ・対象に直接触れられるため操作して感覚がある ・変形幅が意図通りにあわせられる
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・オクルージョンが気になる ・視点位置が近距離だと形状変形しているように見えない ・削られる箇所はずれが生じる ・ポインティング位置がどこにあたるのかわかりにくい

5. 考 察

図 3 より、本提案システムによる視覚的形状変形は、実物体が物理的には変形していないにもかかわらず、あたかも変形したかのような視覚効果を与えることに成功している。4.3 節の実験結果から、視覚的変形量が物体表面から 5.0[cm] 以内であれば実変形との差がなく、違和感なく変形結果の目視が可能であると言え

る。しかし、変形量が特に手前方向に関して大きくなるほど、視点位置によっては立体知覚に違和感を生じる場合があることから、操作量に応じて視点位置を制限する必要があると考えられる。また、本手法による立体提示はプロジェクタからの投影によるものであるため、対象物体は自己隠蔽（オクルージョン）を避けるため比較的単純な形状である必要があるが、本システムの対象としているものは車のボディ形状などの意匠上の小変形であるためこの点は問題とはならない。表面に施す意匠的な加工深度は比較的小さいものであるため、変形量が 5[cm] 程度というのは十分な有効変形量と言える。

また 4.4 節の実験結果（表 2）から、対象物体との距離が 100[cm] 未満となるバーチャルスパチュラによる入力方法では、変形操作中に視覚的形状変形の結果を観察しにくいと言える。この改善策としてはステレオプロジェクタなどによる出力が考えられる。4.5 節の実験結果から、表 4 および図 14 に示すようにバーチャルスパチュラよりもマウスの方が相対評価値は高かった。しかしながら、図 15 に示したとおりポインティングとドローイングのしやすさについてはバーチャルスパチュラの方が使いやすいという評価をしているユーザも見られた。表 5 に示したとおり、バーチャルスパチュラとマウスにはそれぞれに長所短所があることがわかる。今後、これらのバーチャルスパチュラにおける短所は、ポインティング位置をユーザにフィードバックすること、ユーザ身体の空間的割り込みによるオクルージョンは背面投影によって解決できると考える。また、近距離における立体視の問題は、ステレオプロジェクタを用いることによって立体視の生理的要因を付加することやパーティクルのフローを付加する特殊効果を加えることで改善できると考える。

6. おわりに

本論文では、プロジェクション方式を用いた MR 環境において、仮想的な陰影情報を実物体に重畳することで、光学式モーションキャプチャデバイスによって視覚的に実物体の形状を変形操作する手法について述べた。本システムを利用することで実際に物体形状を変形させることなく容易に変形後の形状を視覚的にシミュレートすることが可能であり、三次元形状デザイン支援システムとしての有用性も示した。

本システムは一つのクレイモデルやモックアップのままその形状を小変形させることができるため、デザイン検討時にモックアップの試作件数を総合的に減らすことができ、コストと時間の大きな削減が期待でき

る。またデザイン分野以外にも、教育、医療、美術、エンターテインメントなど幅広い分野で応用が考えられる。今後は、デザイン性評価のために環境像の写り込みを考慮することや、握り替えによって機能切り替えができる入力インタフェースを開発することで、デザイナーにとって自然でかつ有益な支援システムに近づきたい。

参 考 文 献

- 1) 吉田俊介, 星野俊二, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹: コンセプトデザインのためのデジタルツール「空間スケッチシステム」の開発; 日本 VR 学会論文誌, Vol. 6, No. 4, pp. 313-322, 2001.
- 2) SensAble Technologies, inc., : FreeForm, <http://www.sensable.com/>
- 3) 長田昌次郎: 視覚の奥行距離情報とその奥行き感度, テレビジョン学会誌, 31, 649-655, 1977.
- 4) Raskar, R., Welch G., Chen, W.C. : “Table-Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery” ; Proc. 2nd Int'l Workshop on Augmented Reality, pp.64-71, 1999.
- 5) Bandyopadhyay, D., Raskar, R., Fuchs, H. : “Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects” ; IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp. 207-216, 2001.
- 6) 畑田, 齋田: 奥行知覚の要因とメカニズム; テレビジョン学会誌, Vol. 43, No. 8, 1989.
- 7) 江本正喜, 矢野澄男, 長田昌次郎: 立体画像システム観察時の融像性輻輳限界の分布; 映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 5, 2001.
- 8) 矢野澄男, 井出真司, ハルスワイテス: 立体画像の見やすさと調節応答からみた視覚疲労; 映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 5, 2001.
- 9) 吉田俊介, 宮崎慎也, 星野俊二, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹: ステレオ視表示における高精度な奥行き距離補正の一手法; 日本 VR 学会論文誌, Vol. 5, No. 3, pp. 1019-1026, 2000.
- 10) 久田理, 金谷一朗, 佐藤宏介: 陰影投影型複合現実重畳による実物体の視覚的変形; 2004 年信学総大予稿集, A-16-21, 2004.
- 11) 日本視覚学会 編: 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, 2000.
- 12) Monno, G., Persiani, F., Uva, A., Liverani, A.: La Realtá Virtuale al servizio dell'Ingegnere ; Proc. XI International Conf. on Design Tools and Methods in Industrial Engineering, Sess. C, pp. 131-137, 1999.
- 13) Persiani, F., Liverani, A., De Crescenzo, F.: 3D positioning issues in virtual reality environments; Proc. XI International Conf. on Design Tools and Methods in Industrial Engineering, Sess. C, pp. 123-130, 1999.
- 14) Liverani, A., Piraccini, G.: Full-scale surface modeling in virtual reality; Proc. XII International Conf. on Design Tools and Methods in Industrial Engineering, 2001.
- 15) Persiani, F., Liverani, A., De Crescenzo, F.: Augmented Reality approach to Vehicle Prototyping; Proc. First International Industrial Engineering Conf., pp. 257-462, 2001.