

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16037

研究課題名(和文)「手にとれる」デジタル/フィジカル融合モデルを用いるデザイン支援環境の構築

研究課題名(英文)Rapid Designing System based on Fusion and Illusion of Digital/Physical Models

研究代表者

山本 景子(Yamamoto, Keiko)

京都工芸繊維大学・情報工学・人間科学系・助教

研究者番号：10585756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの創造活動におけるコンピュータ支援は、感性評価が十分に行えない、アイディアのディテール度の変化に追従できない、システム利用の習熟が必要である。そこで本研究では、形状既知の白色物体に陰影情報を重畳することにより、仮想的に形状変形が知覚されるディスプレイシステムと、デバイス先端形状をユーザ自身が変形させ、それをコンピュータで取り込むことにより、任意形状で加工が可能となるインプットシステムを統合したデザイン支援環境を実装した。評価実験により、先端形状に応じた削れ方の違いが確認できることがわかったが、実物体と入力デバイスのトラッキング手法自体を変更する必要性があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：During the design process in the industrial product development, the common method is creating clay models or 3D printing objects for the evaluation and modification of the model repeated several times. This process is important in the design development. However, conventional methods are not friendly to novices and the cycle of "creation", "evaluation" and "modification" using them takes a long time. To solve these problems, I proposed and implemented a projection AR based modeling system utilizing the input device with a transformable tip. The user can modify the model with the transformable tip of which shape the user wants, and evaluate virtual sculpted model in real-time so that the design cycle with the system can be done quickly. As the result of the evaluation of the system, it is found that participants can check the virtual sculptures created by themselves, but the tracking method for the object and input device should be replaced with a highly accurate one.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：デザイン支援 入力インタフェース プロジェクション型AR

## 1. 研究開始当初の背景

人を感動させる音楽や絵画，問題を解決する道具やシステムなど，人はこれまでに様々な事物を創造してきたが，その無から有を生み出す「創造力」は人に残された最も重要な能力の一つである．このことは，人が生み出してきた人工物が直接的に事物を創造することは未だ不可能であることから明らかである．創造的な活動（以降，創造活動）は，頭の中でアイデアを生み出すことと，それをアウトプットし確認（以降，外化）すること（以降，イテレーション）の繰り返しであり，また一般に，アイデアはラフなものから始まり，イテレーションを複数回経ることにより徐々にディテールが定まって行く．例えば，絵を描くときには，素描と呼ばれるアウトラインから描き始め，そのラインをベースに細部を埋めていく．物語をつくる際には，起承転結を決め，その間をストーリーでつないでいく．このような創造活動を効率化するためには，その1回1回のイテレーションを少しでも円滑に行う必要がある．

これまでもそれらの活動を支援することを目的とした，CAD(Computer Aided Design)システムや，スケッチベースインタラクション，TUI(Tangible User Interface)などが提案・実現されている．しかしCADは，高機能がゆえに入力操作が複雑なため，ラフアイデアをすぐに外化するには不適切である．スケッチベースインタラクションを用いる手法はこの問題を解決しているが，平面ディスプレイによる出力であるため，プロダクトデザインにおいて重要なボリューム感などの感性評価を行いつつイテレーションすることが困難である．またTUIにおいては，直感的な入力およびリアルタイムな出力を実現している一方，入出力デバイスの分解能が固定であるため，イテレーションの過程に伴い，徐々にアイデアのディテール度を変化させていくことは困難である．

## 2. 研究の目的

本研究では，1.に挙げた問題を解決することを目的とする．申請者はこれまでに，実物体に陰影情報をプロジェクションすることで対象物体の外観を自由にデザインすることが可能なHYPERREALというシステムを提案・実装している．また，ユーザの握り方を判別することで動的にツールのモードを切り替えることが可能なペン型入力デバイスも提案・実装している．本研究ではこれらの研究成果を発展させ，近年発展を遂げている3Dプリンティング技術とシースルー型HMD(Head Mounted Display)を利用するMR(Mixed Reality)技術を統合した新しいデザイン支援環境を構築することで，直観的な入力によりデザインでき，すぐさまその評価を行えることにより，プロダクトデザインにおけるイテレーションコストを下げることを目指す．

## 3. 研究の方法

本研究では，プロダクトデザインに焦点をあて，アイデアの外化の初期段階から使用可能であり，かつ最終段階までのプロセスを支援することを目的に，(1)実物体へデジタルデータを重畳する出力システムの構築とその評価，(2)入力デバイスの実装およびその評価，(3)(1)および(2)を統合したデザイン支援環境の構築およびその評価の3点を実施した．

(1)把持可能な実物体へデジタルデータを重畳する出力システムの実装

申請者がこれまでに実装した，位置姿勢固定の白色実物体に対し，プロジェクタにより陰影情報を重畳することにより，仮想的に形状が変化して知覚されるディスプレイシステムを応用し，ユーザが把持した実物体に対しデジタルデータを重畳することにより，表面のテクスチャおよび凹凸の変更を可能とするディスプレイシステムを構築した．

(2)先端形状が変形することで入力モードを変更する入力デバイスの実装

申請者がこれまでに実装した，握り方をセンシングするペン型デバイスでは，変形形状数が有限であり，ユーザの任意形状への適用が困難であったことを考慮し，先端形状が任意に形状に変更可能なペン型デバイスを実装した．ペンにも実物体と同様にマーカを付与することで空間中の位置姿勢をトラッキングする．

(3)(1)と(2)を統合したデザイン支援環境の構築

(1)および(2)を組み合わせたシステムを構築し，それを用いて被験者数名にプロダクトを制作させる被験者実験を行った．

## 4. 研究成果

当初は3.に挙げた(1)のディスプレイシステムにはシースルー型HMDを利用する予定であったが，実装方法および解像度に問題があったため，プロジェクション型ARに変更した．また，(2)に関しても，ユーザの握り動作から自動的にモード変更を行うのではなく，ユーザがデバイス先端を任意形状に変更し，その形状で変形作業が行えるツールを新たに提案・実装し，(1)の基本性能評価および(2)の使用感評価を行った．

### 4.1. 設計

具体的なシステム全体の設計は以下の通りである．

1. 仮想モデルを実物体にプロジェクションすることにより視覚的に形状変形させる
2. 実物体に対し，先端形状が変形可能な入力デバイスで変形操作を加えることで，プロジェクションしている仮想モデルの形状を変形させる

実物体の形状変形を仮想的な形状変形で表現するために、まず、形状が既知である実物体に仮想モデルをプロジェクションする。その上で、先端形状が変形可能な入力デバイスで、クレイモデル製作時の削る動作のように実物体の修正箇所直接接触する操作をする。そして、その変形操作に合わせて重畳している仮想モデルの形状を変化させるということを繰り返す。これにより、実物体が変形しているように見せかけることができる。

実物体があることで、実物体の実在感を伴いながら直接作業を行うことができ、同時に評価することができる。また、ユーザはその実物体を自由に動かすことができ、実物体の動きに応じて仮想モデルも同時に動くため、変形形状を360度どの向きからでも確認することができる。さらに、入力デバイスの先端形状を自由に变形させることができるため、ユーザはイメージ通りに変形を加えることが容易となる。

しかし、実際には実物体は変形していないため、2. で述べた HYPERREAL のように、プロジェクションで表現できる範囲を超えた変形をすると実在感を損なってしまう可能性がある。そこで、正確な評価を望む場合には、そのときに改めて3Dプリンタで出力することによって、形状変形後の実物体を再度作り、デザインの評価を行う。すなわち、実在感を損なわない範囲の変形であれば3Dプリンタで出力しなくても形状の評価を行うことができる。よって、3Dプリンタでの出力による時間の浪費を抑えつつ、修正と評価の回数を増やすことができるため、素早くイメージを反映できるようになると考えられる。したがって製品開発におけるデザイン工程を円滑に進められることが期待される。

以上の設計に基づく提案システムの全体図および動作の流れを図1に示す。提案システムは、仮想モデルを実物体に重畳するための「視覚提示部」と、実物体に仮想的に形状変形を加えるための「インタラクション部」に分けることができる。本システムの動作の流れを以下に示す。なお、以下の番号は図1中の番号と一致している。

1. カメラで実物体の位置・姿勢を取得する
2. カメラと入力デバイスから実物体への仮想的な形状変形を受け取る
3. 1と2のデータを取得する
4. 仮想モデルを形状変形させる
5. 形状変形した仮想モデルを実物体にプロジェクションする
6. 形状変形後の実物体を出力するよう要求する
7. 現行の実物体と新しい実物体を取り替える

本システムでは基本的に1～5を繰り返す。6～7は仮想的な形状変形がプロジェクションで表現できないほど大きくなった場合にのみ起こる。

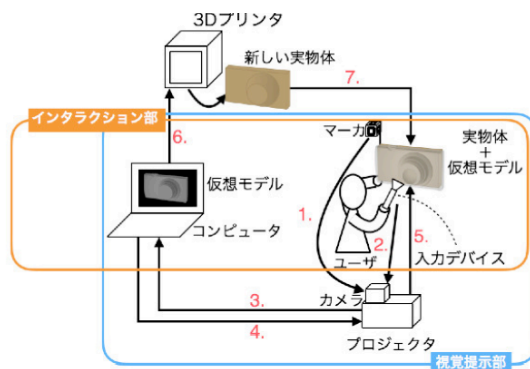


図1：システム概観と動作の流れ

#### 4.2. 実装

本システムの(1)視覚提示部と(2)インタラクション部の実装は以下の通りである。

##### (1) 視覚提示部

申請者がこれまでに開発してきた HYPREAL システムでは、変形対象である白色実物体が壁面に固定されており、デザイナーが任意視点から評価することが困難であった。そこで本研究では、実物体をトラッキングし、実物体の正しい位置に仮想モデルをプロジェクションする方法によって視覚的な形状変形を実現する。そのために、実物体の位置と姿勢をリアルタイムにトラッキングする。

実物体の位置および姿勢を得るためには既存技術のARマーカを用いる。しかし、プロジェクション対象の実物体に直接ARマーカを貼り付けてプロジェクションすると、ARマーカとプロジェクションされる仮想モデルの映像が重なってしまい、ARマーカをカメラで認識することが困難となる。また、もしARマーカを認識できたとしても、ARマーカの模様と形状変形の映像とが重なることにより、正しく形状変形の様子をユーザが確認できないことが考えられる。ARマーカを不可視インクで実物体に塗布することも考えられるが、本システムではプロジェクション対象の実物体は都度3Dプリンティングされることを想定しているためこの方法は利用できない。

そこで、図2に示すように、6面にARマーカを貼り付けた立方体型マーカをプロジェクション対象の実物体に取り付ける。そして、立方体型マーカをトラッキングすることにより実物体の位置および姿勢を得る。この立方体型マーカはARマーカを6面全てに貼っているため、360度の角度に回しても、いずれかのARマーカを認識できる。また、立方体型マーカと実物体の相対距離は既知であるため、立方体型マーカの位置および姿勢を取得すれば、プロジェクション対象の実物体の位置および姿勢が得られる。よって、カメラの画角から立方体型マーカが外れない限り、プロジェクション対象の実物体の位置および姿勢を常にトラッキング

でき、実物体の正確な位置に仮想モデルをプロジェクションすることができる。

## (2) インタラクション部

インタラクション部では、実物体に対し直接、クレイを削るような変形操作を加えることで実物体に重畳している仮想モデルの変形を実現する。提案システムの入力デバイスを図3に示す。デバイスの先端には、先端形状を変更可能とするため変形可能な黒色ワイヤを取り付ける。また、デバイス把持部には任天堂社製Wiiリモコンを使用する。先端の反対側にはトラッキングのための立方体型マークを取り付ける。

### (2-1) 入力デバイスのトラッキング

入力デバイスのトラッキングも実物体のトラッキングと同様に立方体型マークを用いて行う。ただし、仮想モデルに変形を加えるためには座標変換が必要である。取得された入力デバイスのビュー座標系での座標を、実物体のマーク座標系へ逆変換を行うことにより、実物体のモデル座標系での、入力デバイスの座標を取得することができる。そこで、取得した実物体のビュー座標系での座標と入力デバイスのビュー座標系での座標の差分を取ることで、実物体のビュー座標系での実物体から見た入力デバイスの座標を計算できる。これを実物体のモデル座標系での入力デバイスの座標とする。

また、本システムでは、トラッキングのミスにより、仮想モデルの意図していない変形を防ぐために、デバイス把持部であるWiiリモコンのボタンを押している間のみを変形の対象区間とする。

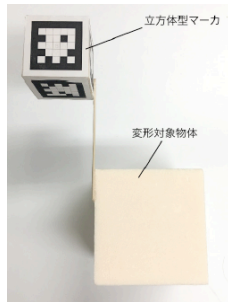


図2：立方体マークと変形対象実物体



図3：入力デバイスのプロトタイプ

### (2-2) 入力デバイスの先端形状認識

入力デバイスの先端形状は、デバイス先端の黒色ワイヤ部をカメラで読み込むことで認識する。その形状に応じて仮想モデルの頂点の移動量を変更することによって削れ方を変更する。形状認識にはOpenCVを用いる。以下に形状認識の流れを示す。

1. 先端形状のカラー画像を取得する
2. 取得したカラー画像をグレースケール化する
3. グレースケール化した画像を二値化する
4. 二値化した画像から先端形状の高さ  $d$  を検出する
5. 二値化した画像から先端形状の幅  $w$  を検出する
6.  $d$  と  $w$  と  $\Delta w$  を用いて、 $\Delta w$  ごとの先端形状の高さ  $\Delta d$  を算出する

ある入力デバイスの先端形状を例に、4~6を行ったときの  $\Delta w$  と  $\Delta d$  の関係を図3に示す。以上の動作例を図3に示す。なお、本システムで用いる入力デバイスの先端形状は、「上に凸」かつ「山が一つ」で「線対称」の形状に限定している。そのため図3に示すように、デバイス先端の中心から右半分のみを認識する。図3の○印は6.で求めた  $\Delta w$  ごとの先端形状の高さ  $\Delta d$  である。また、 $d$  はカメラに映り込む先端形状の大きさによって決定しているため、同形状の先端形状を用いても、カメラに映り込む大きさを変えることによって、削る深さを変えることができる。

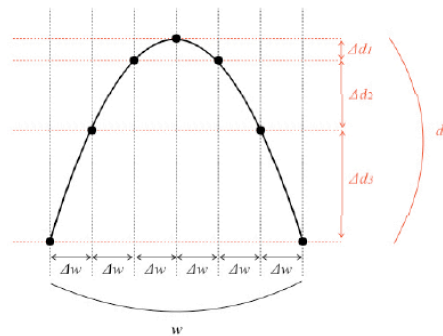


図4：ある入力デバイスの先端形状に対する  $\Delta w$  と  $\Delta d$  の関係

### (2-3) 仮想モデルの形状変形

本システムの仮想モデルでは三角ポリゴンを構成する全ての頂点情報を保存している。そのため、頂点のある一点を移動させると、その動きに応じて三角ポリゴンが変形されるため、表面が削れている（凹んでいる）仮想モデルが作成される。移動させる仮想モデルの頂点の座標は、入力デバイスの先端で指定した座標に一番近い頂点の座標とする。しかし、このままでは一点のみしか移動すること



ができないため、5.の方法で検出した先端形状の幅  $w$  を利用して、先端形状の幅内にある頂点を移動対象とする。

また、 $\Delta w$  ごとの削る深さ  $\Delta d$  を算出しているため、先端形状の幅内にある  $\Delta w$  ごとに座標を移動する距離を変更することにより、入力デバイスの先端形状通りに削ることができる。変形を加える箇所の頂点座標が持つ法線ベクトルと逆方向へと頂点座標を移動させることにより、仮想モデルの形状変形を表現している。

図5の左に入力デバイスの先端形状を、右にその先端形状で削ったときの動作例を示す。

また、本システムではその他の機能としてアンドゥを実装している。本システムでは仮想モデルをボタンを押す度に保存しているため、入力デバイスに割り当てている別のボタンを押す度に一つ前の仮想モデルへ戻すことができる。

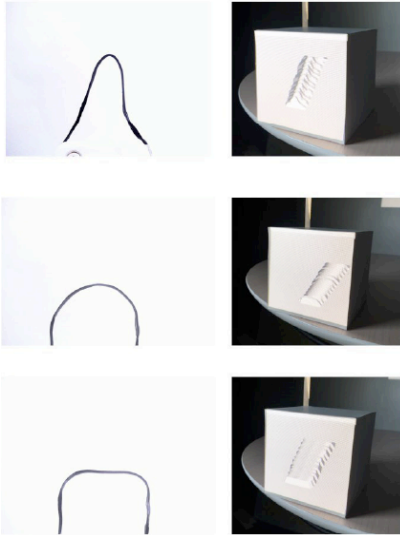


図5：プロトタイプを用いた動作例

#### 4.3. 評価実験

##### (1) 視覚提示部の位置ずれ・時間遅れ評価

本評価で使用する実物体は1辺10[cm]の立方体である。また、立方体マーカは1辺4[cm]のマーカを貼り付けた1辺5[cm]の立方体である。このマーカを立方体から8[cm]の距離で固定したものに対し、実物体と同じ大きさの仮想モデルのCGを投影する。カメラおよびプロジェクタから見た実物体の姿勢は図6に示す。位置ずれを評価するために実物体の頂点と、実物体にプロジェクションした仮想モデルの頂点との位置ずれを測定している。表1に示すように、実物体の大きさに対して最大65[%]の誤差が発生した。特に、実物体がカメラ-プロジェクタから見てz軸方向に対する距離の変化が生じると誤差も大きくなるのがわかる。キャリブレーションシステムで得られた値が正しく、正しい値を用いて正常に座標変換が行われていると仮定すると、ずれ

の原因はマーカのトラッキング精度にあると考えられる。評価では比較的小さい場合でも位置ずれが5[%]発生してしまったため、提案システムを実際のデザイン工程で使用する場合はより奥行き方向の精度が十分得られるトラッキング方法を採用する必要があることがわかった。

また時間遅れに関しては、システムが動作している様子として、平行移動、x軸回転、y軸回転の3つの動作を4つのパターンで撮影し、それぞれ動作に対する平均遅延フレーム数を求めた。その結果を表2に示す。この結果より、移動平均を計算する場合でも遅延フレーム数に大きな差は見られなかった。さらに、移動平均を計算していない場合でも31フレームの遅延がある(15[fps]時)ことがわかった。これもマーカ検出の処理による遅延がそもそも大きいことが考えられるため、トラッキング手法を変更する必要性が高いと言える。

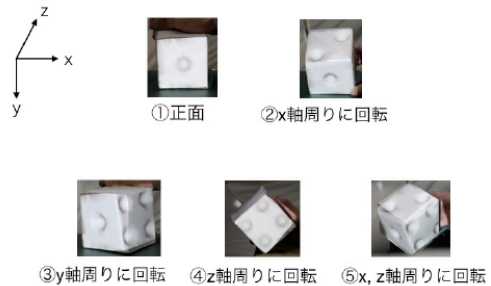


図6：評価する実物体の回転

表1：プロジェクション時の位置ずれ

|          | x軸<br>方向<br>[mm] | 誤差率<br>[%] | y軸<br>方向<br>[mm] | 誤差率<br>[%] |
|----------|------------------|------------|------------------|------------|
| 正面       | 5                | 5          | 3                | 3          |
| x軸・回転    | 6                | 6          | 25               | 25         |
| y軸・回転    | 24               | 24         | 6                | 6          |
| z軸・回転    | 6                | 6          | 11               | 11         |
| x, z軸・回転 | 65               | 65         | 17               | 17         |

表2：移動平均幅毎の遅延

| 移動平均幅[frame] | 遅延[frame] |
|--------------|-----------|
| 0            | 31        |
| 3            | 32        |
| 5            | 33        |
| 10           | 33        |

##### (2) 使用感評価

提案システムが、仮想的に変形している様子を確認できるか、入力デバイスの先端形状によって削れ方の違いを確認できるか、自分で変形した入力デバイスの先端形状で変形操作を行ったときイメージ通りに削れるかどうか、一般的な3Dモデリングシステムと比べて操作が直観的であるかの4項目を評価するために、モ

デリングソフトの操作方法を習得しており、立体物のプロダクトを作製した経験を有する20～22歳の大学生4名を被験者として、実際にシステムのプロトタイプを使用させ、使用感をアンケートで問う実験を行った。

各被験者が変形した入力デバイスの先端形状と、その先端形状で削ったときの仮想モデルの変形結果の一例を図7に示す。

以上の結果を考察すると、本実験環境下では、プロジェクションによる仮想的な変形は概ね実現できたと言える。しかし、デバイス先端を極端に細くて短い形状にした場合や、素早く細かい動きで入力デバイスを動かした場合に、システムによる認識がうまくいかないことがあることがわかった。

また、評価実験中の意見として、「実物体を動かし斜めから見た時が、削れ方が見やすい」や「もう少し精度が高ければ面白そう」、「思ったところに削ることが難しい」と答えていた被験者がいたことから、視覚提示部のトラッキングの精度および、入力デバイスのトラッキング精度の向上が欠かせないことがわかった。

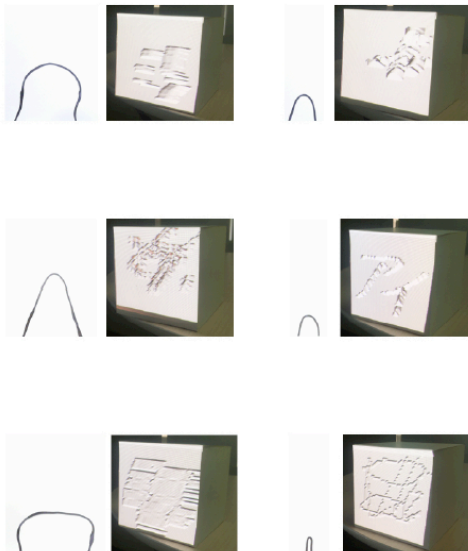


図7：ある被験者による対象物体の変形形状と入力デバイス先端形状の例

#### 4.5. まとめ

以上の通り、最終年度までに実施した予備的な実験を通し、本実験に耐える精度が望めないことが明らかとなったため、本実験は実施せず、またその成果発表も実施できなかった。今後、トラッキング手法を変更した上で、再度デザイン工程に適用できるかを評価し、その発表を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山本 景子 (Yamamoto, Keiko)  
京都市芸繊維大学・情報工学・人間科学系  
研究者番号：10585756

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )