

三次元形状デザインのための道具握り判別型インタフェース

山本景子[†] 金谷一朗^{††} 佐藤宏介[†]

本論文は、工業デザイン支援システムのための三次元形状操作インタフェースに関するものである。従来のコンピュータ支援設計 (CAD: Computer Aided Design) システムは、操作が複雑かつ非直観的であるため、専門の CAD オペレータを介して形状操作する必要があり、デザイナーの造形上の意図を直接表現することが困難という問題がある。本論文では、複合現実感技術によるデザイン支援システムのための新たなユーザインタフェースを提案する。本提案インタフェースは、道具を握るときの手を埋込型センサにより取り込むことによって、実際に道具を持ち替えるのではなく握りを変えることによって道具を持ち替えるのと同様の効果をもたらすものである。著者らは本提案の試作システムを作成し、評価実験により三次元形状デザインシステムの入力インタフェースとしての有効性を確認した。

キーワード：ヒューマンインタフェース、道具握り形状、デザイン支援、プロダクトデザイン

Grasping Interface for 3-D Model Designing System

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

This paper presents a new computer-human interface for 3-D modeling systems, which is intended for use in product design. Conventional computer aided design (CAD) systems have had a major problem: it has been troublesome for designers to operate icons or input devices for creating various shapes on the CAD systems, as to realize their ideas to the shape of the objects. The proposed human-interface device detects user's gripping form with embedded touch sensors on the device so that users can choose a specific function from one to another virtually without unnatural actions. A prototype of the proposed system demonstrates its effectiveness as a designing tool in a mixed reality environment.

Keywords: Human interface, Gripping form, Computer aided design, Product design

1. はじめに

近年、コンピュータテクノロジーが劇的に進化し、工業デザイン分野においても製品開発の初期段階から最終的な評価に至るまで一貫してデジタル三次元形状データを活用することで、高い品質の製品を短期間かつ低コストで開発することが可能となっている。

現在広く普及しているコンピュータ支援設計 (CAD) システムはコンピュータ上の三次元データを利用するため、形状や材質の変更、追加等の編集作業や様々なシミュレーションを簡単に行うことができ、デジタルデータを解釈可能なその他の生産システムとの相性

も良い。そのため、一般に行われている自動車など多くの工業製品のデザイン過程は、デザイナーがスケッチなどで審美的なイメージを練り、物理的なモックアップ (フィジカルモデル) を作り、ある程度形状が決まった後はそれらを三次元計測し CAD データ (デジタルモデル) に移行し加工することが多い。

デザイナー自身による CAD の形状操作の妨げとなっているのは、変形箇所のポインティングの不自然さと、機能選択の不自然さによるものである。ポインティングの不自然さに関しては、対象となる三次元物体の存在する空間と作業空間を一致させることにより解決されることが示されている²⁾。ところが機能選択に関しては、アイコンやメニュー選択による切り替えやデバイスの持ち替え、ジェスチャ割り当てなどによって行なわれており、不自然かつ直観的でないため、操作には CAD オペレータとしての熟練が必要である。

そこで本論文は、ユーザの握り動作をセンシングす

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††} 大阪大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

ることで機能選択を行なう「握りインタフェース」を提案する。握りインタフェースは、デバイスの使い方を意識することなく、また用途に合わせてデバイスを選択して持ち替える必要もない、まるでデバイス側からユーザの意図を読み取るかのような応答を示すインタフェースである。これを筆者らが先行研究³⁾で提案したデザイン支援システムに統合することで、デザイナーが熟練を必要とせず自らアイデアをラフスケッチを描くように具現化し、同時にその三次元形状を簡易評価することが可能なシステムを構築することによって、デザイナー支援を行うことを目的とする。

以降第2章では、研究背景として操作インタフェースに関する研究を挙げ、本研究の位置付けを明らかにする。第3章では、手の働きの中でも重要である「握り動作」と道具の関係について紹介する。第4章では、入力情報として握り動作を用いた直観的非拘束型インタフェースである握りインタフェースについて、被験者実験とその知見に基づく設計について述べる。第5章では、4章で提案したインタフェースを用いて形状操作するシステムを構築し、システム全体について述べる。第6章では、5章で実装した試作システムを用いてインタフェースの動作確認実験と、その結果について述べる。第7章では、得られた結果に対する考察と課題、今後の展望について述べる。最後に第8章で、本論文のまとめを述べる。

2. 形状操作インタフェースに関する研究

本章では三次元形状操作ヒューマンインタフェースについて、その機構や形式から、道具把持型、デバイス直接操作型、ジェスチャ型の三つに分類し紹介する。

道具把持型インタフェースは、ペンなどのデバイスを把持しそれを介することで変形指示を与えるものであり、本論文で提案するインタフェースもここに分類される。その例として PHANTOM を利用したデザイン支援システム FreeForm⁴⁾がある。これはまるで粘土細工をするような反力を感じながらデザイン作業を行うシステムであるが、マウスやペンタブレットを用いた CAD システムと同様に、GUI によるデバイス機能の切り替え動作を伴う。道具把持型は、着脱や交換が容易であるという長所を有する一方、使用環境がデスクトップに限られるという短所がある。

次に、デバイス直接操作型インタフェースは、仮想物体を模倣したデバイス自体を変形したり移動させたりすることによって、変形を指示するものであり、その例として iSphere⁵⁾ や DO-IT⁶⁾がある。これらはセンサを配置したデバイスをユーザが直接変形させる

ことによって、デバイスと同様の形状変形をリアルタイムに仮想物体に反映させることができるため、直観的な入力が可能である。しかしその変形の程度はデバイスの形態や自由度に大きく依存するため、変形の自由度に限界があるのが現状である。

最後に、ジェスチャ型インタフェースは、ユーザの身体にセンサを貼り巡らせることで、ユーザの物理的な運動を仮想空間で再現することによって入力操作を行うものである。ジェスチャ型はデータグローブと三次元位置センサを組み合わせた装置が多い。その例に西野らのシステム⁷⁾がある。これらはユーザの動きを細部まで正確に仮想空間中に再現することが可能であり、かつ指の各部位にフォースフィードバックを与えることも可能であることから、よりリアルな触覚を伴った感覚的な変形操作が行えると言える。また、設置型のインタフェースに比べユーザの自由度が高いという長所を有するが、装着が煩雑であり拘束感を与えてしまうという短所も有する。

3. 道具と握り

形状操作インタフェースに限らず、我々が道具を用いて何かをするときに手で握るという行為は必ず行われる動作である。鉛筆を握る手のかたち、グラスを保つ手のかたち、金槌を打つ手のかたちなど多少の個人差はあるものの、誰もがよく似たイメージを思い浮かべるものである。

把持の型の分類として Brunnstrom¹⁴⁾は「鉤握り」、「筒握り」、「こぶし握り」、「球握り」、「指尖掴み」、「掌側面掴み」、「側面掴み」の7種類を挙げている。彼は義肢の末端装置をデザインするために把握の研究をした人であるが、手指の機能の検査項目として各々の握りに対して、ハンドバック、小さなコップ、カード、鉛筆、ボールなどと掴む対象となる物を設定している。つまり握り動作はその対象物によって決定されると考えた。一方、Napier¹⁵⁾は把持の型を決めるのは物の形や大きさではなく作業目的だと考えた。彼は手の機能は把握と非把握の大きく二つに大別され、さらに把握は握力把握と精密把握に分類されるとした。握力把握は、物体をそれに巻き付けた指（母指以外）と手掌（母指球と小指球）でしっかりと締めつけて持つ型である。一方、精密把握は手掌は物体に接触せず、曲げた指の末端の掌側面とこれに向き合う母指末端の掌側面との間に物体を把える型である。例えば物体が長細い棒形状のものであった場合、鉛筆のように握れば精密把握であり、金槌のように握れば握力把握である。

この Napier の考えに基づきさらに把持の型を実験

表 1 把握の分類 (鎌倉・他)

大項目	小項目
握力把握系	握力把握 - 標準型
	握力把握 - 鉤型
	握力把握 - 示指伸展型
	握力把握 - 伸展型
	握力把握 - 遠位型
中間把握系	側面把握
	三面把握 - 標準型
	三面把握 - 亜型 I
	三面把握 - 亜型 II
精密把握系	並列軽屈曲把握
	包囲軽屈曲把握
	指尖把握
	並列伸展把握
母指不関与系	内転把握

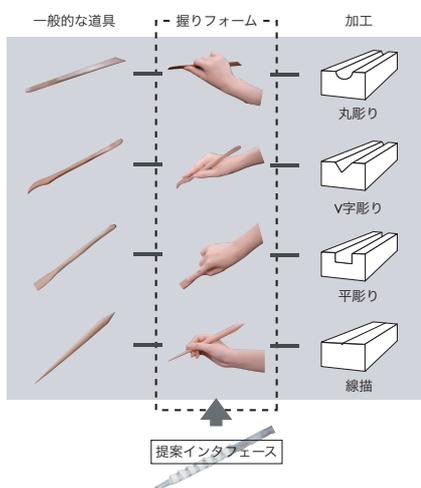


図 1 道具と把持とその結果の関係

的方法でさらに細分化したのが、鎌倉ら^{17)~20)}である。鎌倉は、「手の働き」を「手の構造特性がとくに生かされている状態」、「把持」を「物体を手のなかに取り込んだ後の状態、すなわち物体と手との間で相対的な位置の変化が生じなくなった状態のこと」、「把持(把握)のパターン」を「持ち続けている状態の手のかたち」と定義した上で、身の回りにあるものの中から 100 余種の物品を選び被験者に普段と同じようにそれらを把握してもらい、安定した状態になったところでそのときの手のかたちを多方向から写真に撮った。また、物品に墨を塗ってから安定状態と同じ握りを再現してもらい、そのときの痕跡を写真に撮った。そして手のフォームと接触部位を目安に把握の型を分類することを試みた(表 1)。

このように、一般的な道具とそれを用いる作業とを

つなぐものとして「握り」が手の機能の中でも非常に重要であり、「道具」とそれを用いて行う「作業」とその時の道具の「握り」には対応関係がある(図 1)。そこで本論文では、鎌倉らの定義に従い、「握り」もしくは「把持」を「物体と手の相対的な位置変化がない状態」とし、その状態のときの手の形を「握りフォーム」と表現し、これを利用した道具判別型インタフェースと作業支援システムを提案する。

上述の通り、道具の握り方について様々な分類研究がなされているが、その工学的応用に踏み込んだものは(1)家電機器のリモートコントローラや自動車の操作レバーなどのヒューマンインタフェース機器の形状設計(エルゴノミクス, 人間工学的設計)(2)コンピュータグラフィクスによる手の視覚的再現(3)ロボットハンドの制御, ないしは義手の制御に限られており, 人とコンピュータとの間の積極的なユーザインタフェースとしての活用事例はほとんど報告されていない。

従来の CAD システムの入力インタフェースは、機構が特殊なデバイスや複雑な GUI を用いていることから操作に熟練が必要であった。本システムの変形操作インタフェースは、三次元形状を作製する際に使用するペンやペンなど、デザイン作業をするときに通常使用する道具を模倣した操作が可能である。それらを把持するときの握りフォームに着目し、握りフォームを判別することによって道具を認識する仕組みを持つインタフェースである。図 2 の左側は一般的な道具使用時のユーザの行動遷移で、右側が提案する握りインタフェース使用時の行動遷移である。本論文ではこのような遷移となる握替による機能切り替え手法を提案する。また、その手法による三次元形状デザインのための握り判別型ユーザインタフェース(以降、握りインタフェース)について次章以降に述べる。

4. 三次元形状デザインのための道具握り判別型インタフェース

本章では、握替に関する被験者実験と、握りインタフェースについて具体的に述べる。4.1 節では、まず握替による機能切り替えの有効性評価のための被験者実験について述べる。また、4.2 節では、提案する握りインタフェースにより取得することが可能な握りパターンを検証する被験者実験について述べる。続いて、それらの知見に基づき 4.3 節では、握りインタフェースの設計論について説明し、4.4 節で握り判別手法について述べる。

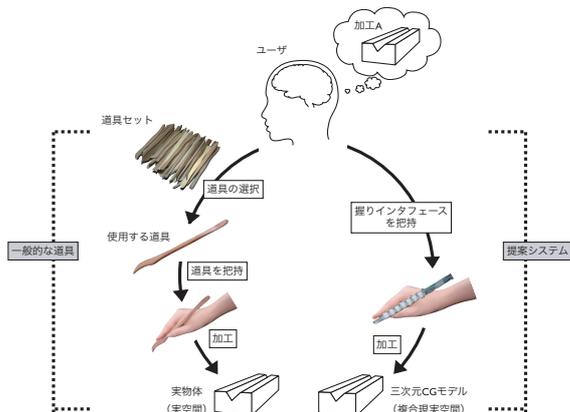


図 2 道具と行動遷移

4.1 被験者実験 1: 握り替えと持ち替えの比較検証
握り替えによる機能切り替えの円滑さを評価するために、作業過程に持ち替え操作が挿入する場合と、握り替え操作が挿入する場合のドローイングタスクの作業性の比較実験を行った。

4.1.1 実験方法

被験者にはタスクとして、以下(1)(2)の二通りの入力方法で、図 3 上側に示した見本の通りに横線 4 本が 1 本の直線に繋がるようにタブレット上にドローイング行為をさせる。その際、ドローイング軌跡(図 3 下側)は、インクチップのない通常のタブレットペンでの描画のためタブレット上に描出されない。軌跡の記憶のみから、被験者にはなるべく正確にかつ素早くタスクを達成するように指示し、その際、4 本の線を引く間の経過時間およびストロークの座標を記録した。被験者毎の試行回数は方法(1)(2)でそれぞれ 5 サイクルずつである。

<入力方法>

- (1) ペンの持替: A, B, C, D とマーキングしたペン 4 本を使用し、例えばペン B → ペン A → ペン D → ペン C の順に持ち替えて横線を 1 本ずつ引く(ペン A, B, C, D の順序は被験者内で固定とし、被験者毎にランダムとした)
- (2) ペンの握替: ペンを 1 本使用し、握りを 4 種類事前に教示し、例えば握り B → 握り A → 握り D → 握り C の順に握り替えて横線を 1 本ずつ引く(握り A, B, C, D の順序は被験者内で固定とし、被験者毎にランダムとした)

なお実験順序の影響を押さえるため、入力方法(1), (2)の順序はランダムにした。被験者は 19 歳から 47 歳の大学生、大学院生および社会人の計 32 名(うち

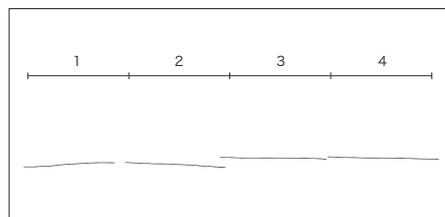


図 3 提示した描画指示(上)とある被験者のドローイング軌跡(下、実際は可視化されない)

表 2 被験者実験 1 の結果(全被験者)

		持替	握替
タスク達成時間 [s]	平均値	15.98	11.72
	最大値	28.24	23.74
	最小値	8.51	5.41
線分接続誤差 [%]	平均値	9.78	6.42
	最大値	17.80	13.74
	最小値	3.10	1.54

男性 15 名、女性 17 名)で、それぞれ利き手でペンを把持させた。

4.1.2 実験結果

実験結果を表 2 に示す。時間は、タスク達成時間 [s] で、誤差は、ドローイングしたストローク 4 本の 3 箇所の線分接続点間の距離の総和の全長に対する比 [%] である。被験者の中には、持替の方が握替よりスムーズにまたは正確に行えた場合も若干名(時間に関しては 1 名、誤差に関しては 5 名)いたが、全被験者の時間平均値、誤差平均値ともに、握替の方がよいという結果が得られた。

また実験後に実施したアンケートから、握替の欠点として不慣れな握りによるドローイングの困難さがあげられたが、一方「握りに慣れると道具を持ち替えるわずらわしさのない握替が快適だった」、「慣れれば速くできそう」などの評価や「視点の移動がなく作業対象へ集中できる」、「握替では作業対象への視野が確保されてよい」、「動きがコンパクトで楽」など実際のデザイン作業への有用性が示された。

4.2 被験者実験 2: 握り判別のための握りパターン取得

握りインタフェースを適用した三次元造形システム(後述)に実装した変形形状は線、平彫り、丸彫り、穴の 4 種である。そこでまず、それらの変形操作を行うときに一般的に使用する 4 種類のへらを事前に設定した。図 4(a) の toolA が線描用、(b) の toolB が平彫り用、(c) の toolC が丸彫り用、(d) の toolD が穴空け用のへらである。

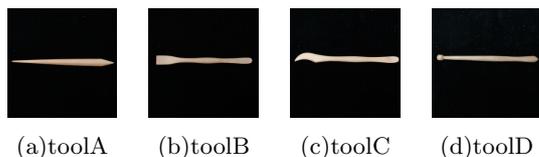


図 4 4 種類のへら

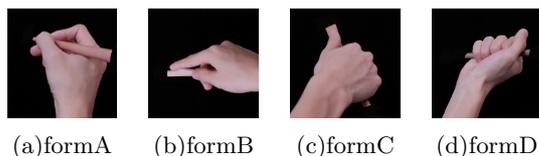


図 5 握りのフォーム

また、各変形形状に応じた握りフォームも事前に設定した(図5)。以降の実験のために、各握りフォームに名称をつける。図5(a)で示した握りをformA、(b)をformB、(c)をformC、(d)をformDと呼ぶ。なお、これらの握りフォームは鎌倉ら¹⁸⁾による名称では、formAが「三面把握 標準型(Tpd)」のフォーム、formBが「握力把握 示指伸展型(Pol)」、formCが「握力把握 標準型(Pos)」、formDが「握力把握 鉤型(PoH)」に分類される。

これらの握りに対して、提案する握りインタフェースによりユーザ毎の各握りを識別可能であるかどうかを検証するために、接触データ(握りパターン)の収集を行った。以下にその方法と結果を示す。

4.2.1 実験方法

前項で示した4種類の握りフォームでデバイス把持部を握る動作をformA、B、C、Dの順に複数回繰り返しながら握りパターンを記録した。そのデータを元に拡大マッチングパターンを計算機によって生成し、握りパターンとの完全一致マッチングにより、フォームに対応するへら(a)、(b)、(c)、(d)がformA、B、C、Dによって切り替えられることを確認する。

被験者は23歳から25歳の大学院生4名(うち男性3名、女性1名)で、それぞれ利き手でデバイスを把持させた。

4.2.2 実験結果

接触データの収集結果の例として、表3はある被験者の各握りフォームにおける握りパターンのデータを示す。握りインタフェースの長軸回りに配置した8個1セットの各面のスイッチ列をX面、Y面、Z面とした。本予備実験により、ユーザ毎に4種の握りに対応する固有のパターンが複数種類検出されたため、これを検出し拡大パターンを生成することにより、設定した4

表 3 ある被験者の各握りフォームにおける握りパターン(1:オン, 0:オフ)

		formA	formB	formC	formD
ボタン 1	X	01000000	00100000	11000000	01100110
	Y	01000000	00010000	00010000	01000100
	Z	00100000	10000000	00100010	00110000
ボタン 2	X	01000000	00010000	11000000	01100110
	Y	01100000	00000000	00000000	00100000
	Z	00100000	10000000	00010010	00101100
ボタン 3	X	00100000	00110000	01000000	00011000
	Y	00100000	00010000	00000000	00000000
	Z	00010000	10000000	00100000	00001000
ボタン 4	X			11000000	00011100
	Y			00000000	00000000
	Z			00000000	00000000

種類の握りフォームの違いをユーザ毎に認識し、機能選択することが可能であることを確認した。

4.3 握りインタフェースの提案と設計

握りを変えその違いを検出することにより道具を取り替えるという動作を行うことなく道具の機能を切り替えることを可能とする。握りを検出するために接触センサを用いてデバイスを握ったときの指の接触状態を検出する。また光マーカをデバイス先端に付加し、カメラによりその三次元位置を取得することでデバイスの位置を検出する。

これらの入力量によって以下の三つの機能を持つインタフェースを図6に示すように実装する。

- 指とデバイスの接触状態を検出することによって握りパターンを生成し、そのパターンに対応した変形形状を選択できる。
- 握りフォームと道具の機能の対応関係をカスタマイズできる。
- デバイス先端で対象箇所に接触することによってそこに対する操作が行える。

これらの機能によって、ユーザは物理的に道具の切り替えを行うことなく、本質的に道具の切り替えを行うことができる。そのため、ユーザは視点を対象物体から動かすことなくデザイン作業に集中することができ、かつ道具の切り替えもスイッチやダイヤル操作のような間接的なインタフェース操作ではなくこれまでのへらを握った経験をそのまま活かせるので、デザイン作業の妨げにならない。以上の機能をもつ本インタフェースを用いたシステムによってデザイン作業が支援されるかについて、6章の確認実験によって明らかにする。

4.4 握り判別手法

本提案インタフェースでは、握替により機能を切り替えることを実現するために、まず把持動作時の指と

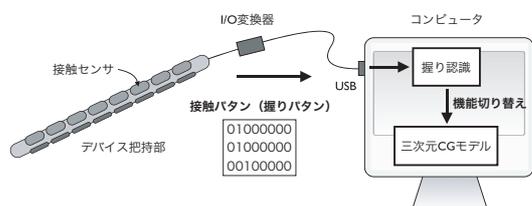


図 6 握りインタフェースの構成

デバイスの接触情報を握りフォーム毎に学習することを行う。ユーザ毎に、特定の握りフォーム時に得られる握りパタンを事前学習データとしてサンプリングする。各フォーム毎に得られた複数種類のパタンを元に、デバイス把持部の長軸周りの回転移動のパタンとスイッチ間隔一つ分（試作デバイスでは15[mm]に設定）の平行移動のパタン、ハミング距離1以内の隣接したパタンの3種類を作成した。これらの作成したパタンと事前学習データを合わせたパタン（以降、拡大パタン）とデバイス把持時の入力パタンの完全一致マッチングをとることにより、握りフォームの判別を行う。なお、入力パタンが完全一致するパタンを持たないときはいずれの変形形状にも対応しないとして選択不可とする。

5. 三次元形状デザイン支援システムの試作

本章では、4章に述べた握りインタフェースの使用例として、実物体への陰影投影型複合現実重畳による表示システムである HYPERREAL³⁾ に握りインタフェースを統合した、三次元形状デザイン支援システムの試作について述べる。本システムの目指すところは、現在の CAD システムのようにコンピュータに形状データが保持され、かつ実際にクレイモデルを作るかのようにへら型の入力デバイスを用い、形状の修正が行えるシステムである。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、表示システムとして HYPERREAL と、入力インタフェースとして4章の握りインタフェースを組み合わせることで提唱する支援システムを実現する。

5.1 試作システムの実装

操作インタフェースを用いた形状デザイン支援システムを試作した。試作システムの外観を図7に示す。本システムの構成要素は、投影用プロジェクタ、カメラ、スクリーン用白色実物体、制御用コンピュータ、握りインタフェースである。

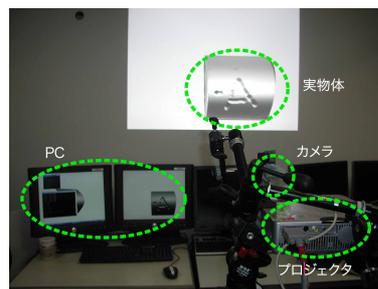


図 7 実験システム外観



図 8 握りインタフェース把持部の外観

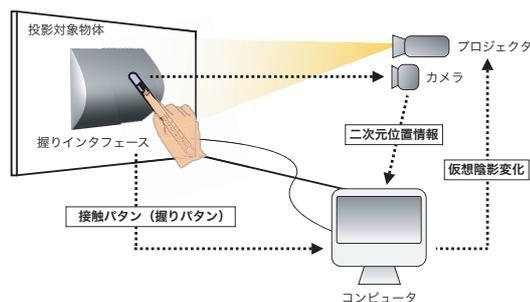


図 9 陰影投影型複合現実重畳による実験システムの構成

5.2 握りインタフェースの構造

握りインタフェースを実現するために、握りフォームの違いをリアルタイムに判別する必要がある。把持時の指の接触位置をデジタル値で入力するインタフェースとして、棒形状物体の長軸周り三面にタクトスイッチを均等に8個ずつ配置したもの（デバイス把持部）を製作した。それら24箇所の接触の状態をコンピュータで検出するために、USB-パラレルポートチップ¹¹⁾を使用し、デバイス把持部とコンピュータを接続した。各面のスイッチ毎のオンオフを3面合計24ビットの信号にし、コンピュータに送信する。提案インタフェース把持部の構造を図8に示す。

5.3 試作システムの構成

本システムの構成図を図9に示す。HYPERREALの処理のプロセスは、インタフェースの先端位置をカメラで取り込むことによってプロジェクタからコンピュータ制御された画像が対象物体に投影されるとい

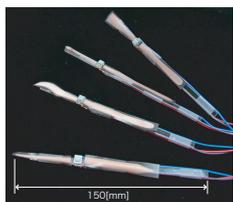


図 10 持替インタフェース

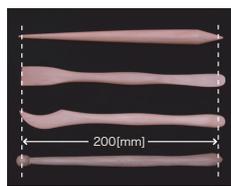


図 11 識別用に提示したへら（実物）



図 12 機能切り替えのタスク画面

うサイクルである。また、握りインタフェースの処理のプロセスはコンピュータに接続されたデバイス把持部の握り方をユーザ（デザイナー）が変更することで、仮想的なへら先端形状が自動的に変更（選択）され、ユーザがへらを動かしたとき、握りフォームに対応する形状の溝が三次元 CG モデルに削られるというサイクルで行われる。変形位置の指定は、変形形状の決定後にデバイス把持部先端でクレイ表面を指示することによって行う。

6. 動作確認実験

本論文で提案した握りインタフェースの有効性を検証するために、へらの持ち替えと比較する被験者実験を、また試作インタフェースを HYPERREAL に適用したシステムを用いた三次元形状デザインの検証実験を行った。

6.1 比較実験：握替と持替による機能切り替え操作

本論文はデザイナーが自然に入力が行え、かつ熟練を要せずに直観的に操作でき、イメージの具現化の過程を支援する操作インタフェースを提案することが目的である。そこで日常使用される道具のような単一機能を有する複数のデバイスを持ち替えることによって変形形状を切り替える図 10 に示す「持替インタフェース」と本提案インタフェースを比較して、どちらがよりスムーズに選択形状を切り替えられるかを評価する。

持替インタフェースは図 11 の各へらの写真を貼ることで識別を可能としており、各デバイスに一つずつ組み込んでいるタクトスイッチをユーザが押すことで、どのデバイスが選択されたかをコンピュータが認識する。

6.1.1 実験方法

「握りインタフェース」「持替インタフェース」のそれぞれで機能切り替えタスクを以下の手順で行った。事前に各インタフェースによる画面の切り替え方については、握りインタフェースに関しては、へらに対応した握りフォームを指導し、その握りフォームでインタフェースの把持部を握ることで切り替えを行い、持替インタフェースに関してはへらに対応した棒状デバ

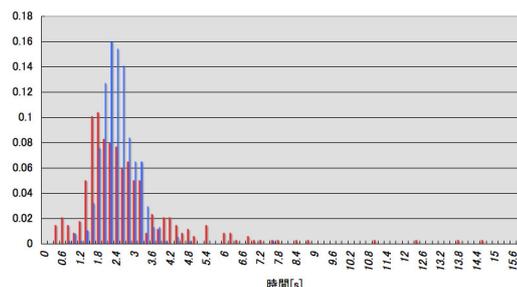


図 13 機能切り替え時間のヒストグラム（全被験者合計）

イスを選択し、デバイス上のスイッチを押すことで切り替えを行うと説明した。

<実験手順>

1. タスク画面（図 12 参照）の左側に指示画像としてへらの写真を提示
2. 提示された指示画像のへらと同じへらになるように各方法で切り替える
3. 1 と 2 を 20 回繰り返す
4. 3 までを 5 サイクル繰り返す

計測時間は 1 と 2 の間である。なお実験順序の影響を押さえるため、入力デバイスを用いる順序はランダムにした。

6.1.2 実験結果

実験結果は図 13, 14 に示す。黒（または赤）が握りインタフェース、灰（または青）が持替インタフェースのヒストグラムである。切り替え時間の平均値は、被験者全体で平均すると握りインタフェースでは 2.74[s]、持替インタフェースでは 2.38[s] となった。その一方、被験者全体の中央値は、平均すると握りインタフェースが 2.21[s]、持替インタフェースが 2.33[s] となった。中央値に関して握りインタフェースの方が小さいことは、図 14 に示した各被験者毎の結果からも言える。これらの結果についての考察は 7 章で述べる。

また実験後、被験者からヒアリングした主観評価として持替インタフェース、提案インタフェースの長所と短所を表 4 にまとめる。これにより握りインタ

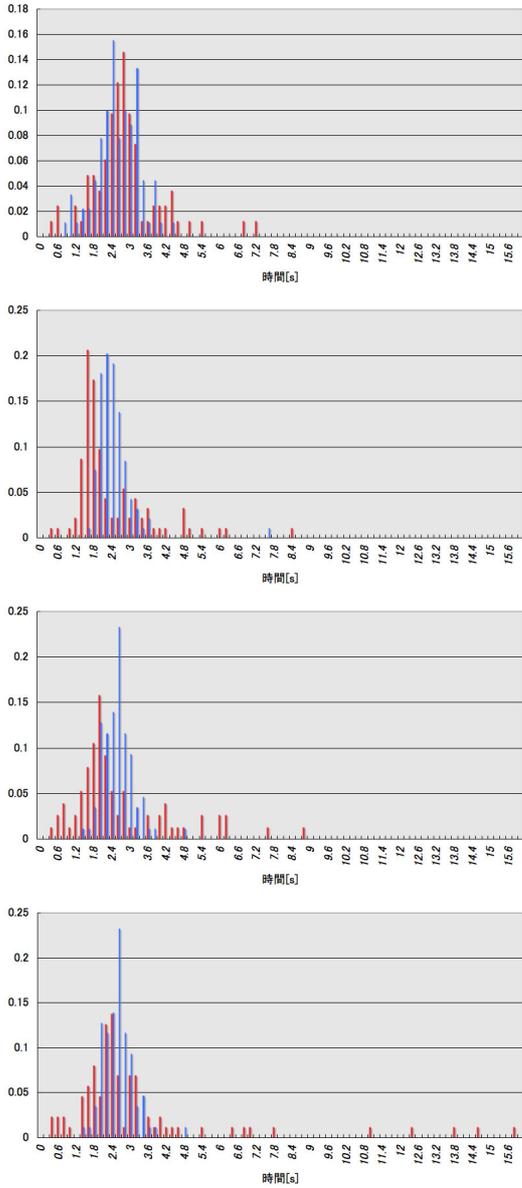


図 14 各被験者の機能切り替え時間のヒストグラム（ユーザ 1，ユーザ 2，ユーザ 3，ユーザ 4 の順）

フェースは、デバイス探索のために集中を途切れさせることがないという利点を確認できたが、一方、握りフォームを安定して検出し判別するための工夫がさらに必要であることがわかる。

6.2 検証実験：HYPERREAL を用いたデザイン作業

本研究では三次元形状デザインのための操作インタフェースとして握りインタフェースを提案した。本提案インタフェースの三次元形状デザインに対する有用

表 4 実験 2/被験者のヒアリング意見

持替インタフェース	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・選択した道具の視覚情報のフィードバックがあるため安心感がある ・システムの誤認識がないのでストレスがない
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・道具の場所と作業対象を交互に見る必要があり集中が途切れる ・デバイスを探すのが億劫である ・選び間違えることがあり作業が中断される
握りインタフェース	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・作業対象に集中できる ・デバイスを探す必要がない
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・認識精度が低くストレスを感じる ・へらに合った握りを覚えるまでは切り替え操作に時間がかかる ・力覚フィードバックがないため握りが安定しない

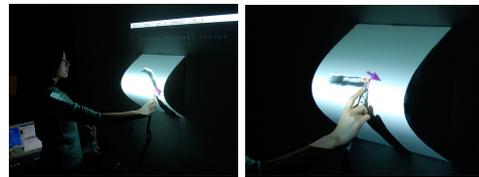


図 15 握りインタフェースによる作業風景

性を検証するために HYPERREAL 上で形状変形操作を行った。

6.2.1 実験方法

HYPERREAL を利用して、握りインタフェースによる入力でのデザイン作業を行う。使用前には予め握りインタフェースの二つ目の機能として 4.3 節で述べた握りパターンと変形形状の対応関係をカスタマイズする。formA には線描，formB には平彫り，formC には丸彫り，formD には穴空けを対応させる。

6.2.2 実験結果

図 15 に HYPERREAL を用いた握りインタフェースでのデザイン作業の様子を示す。formA によって選択された線描，formB の平彫り，formC の丸彫り，そして formD の穴空けの結果を図 16 に示す。この検証実験により，HYPERREAL 上で握りインタフェースを用いて造形操作するのに十分な速度（10[fps] 以上）で動作することを確認した。さらに，本インタフェースを用いながら変形対象形状の立体感を損なわずに形状デザイン作業が可能であることも確認した。

7. 試作システムに関する考察

被験者実験（4.1 節）において、一連するドロ잉作業における握替と持替の比較を行ったが、その結果全被験者のタスクの達成時間の全被験者平均、精度の全被験者平均ともに持替より握替の方が向上した。

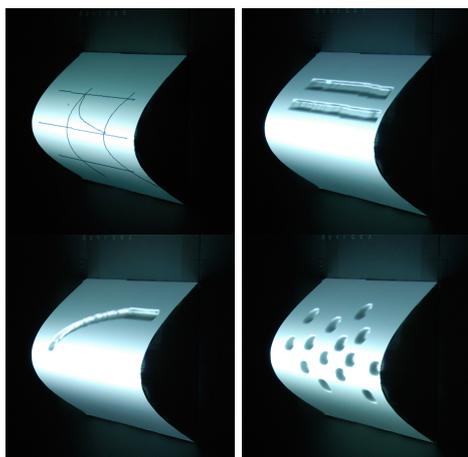


図 16 線描(左上), 平彫り(右上), 丸彫り(左下), 穴付け(右下)

また、被験者対象のアンケート調査からも、「慣れない握りに対するストレスはあったものの、後半の試行になるにつれ慣れによりスムーズな操作が可能になった」、「ペンを探したりする必要がなくコンパクトな動きですむので快適である」といった操作性のよさと評価できる意見が得られた。また、「作業対象を注視し続けることが可能でタスクに集中できる」、「道具のための視野を確保する必要がなく対象のための視野を広げられる」といった創作活動に有用であると評価できる意見も得られた。

一方、比較実験(6.1節)において、切り替え時間の中央値を比べれば握りインタフェースのほうが優れているが、平均値を比べれば差が無いという結果が得られた。しかしこれは握りフォームの判別ミスに因るものであることが被験者4名の実験時の観察からも明らかであり、判別精度を上げることにより、図14の握りインタフェースのヒストグラムに見られるような切り替え時間の極度に大きいものが減少し、握りインタフェースのほうが優れた結果が得られると考えられる。握りフォームの判別精度を向上させるためには、本論文では、位置ずれの平行移動量をスイッチ1間隔分、およびハミング距離1の誤差を許容した完全一致マッチングを採用したが、一つ前の握りを考慮した動的なパターンマッチングを行なう必要があると考える。また、平行移動量をスイッチ2間隔分(30[mm])、ハミング距離を2とした場合でも切り替え時間を計測したが、ボタンが重複するなどの問題が発生し、判別精度は改善されなかった。

本実験における認識精度低下の原因の一つに、ユーザが握りフォーム時に確実にタクトスイッチを押下し

ていない可能性も考えられる。握りインタフェース使用時に切り替えが遅延した原因は、握りフォームが不安定で握りボタンが拡大ボタンとなかなかマッチしないことによるものであった。その要因として考えられるのが、formDのときに顕著であったが手の接触部位がスイッチボタン部と合わないことが挙げられる。本実装ではデバイスと指の接触部分の検出のためにタクトスイッチを使用した。その作動力が比較的大きいことや、スイッチの構造から垂直方向には押しやすいが斜め方向からは押しにくいといった特性があり、指の接触が安定に検出できなかったことが切り替え時間の遅延につながったと考えられる。また、今回の実験では試行回数、試行時間が短かったため観察されなかったが、長時間の使用により握力の低下が発生し、握りボタンが時間的に変化することも考えられる。今後はタクトスイッチに代わり、圧力センサなど接触の度合いを検出するためのセンサを配置することで、空間的、時間的な握りパタンの変化を計測し、握りフォームの判別精度を改善することで、握り動作によるスムーズな切り替えを実現する。

本システムでは握りインタフェースによる機能の切り替えは4種類としたが、三次元造形に関してはグリッドのON/OFF、加工範囲の限定など、種々様々な機能の切り替えが想定し得る。また、コンピュータ支援システムとしてUndoやCopyなどの機能の入力も必要になるだろう。握りインタフェースは、作業過程の自然な動きを機能切り替えに利用するコンセプトで設計しており、本論文では対象外としたこれらの機能の入力に関しては握りを利用せず、インタフェースを離れた状態で行うものと考えている。ただし、曲率や加工幅、加工深度などの変形量の調整には握り圧やデバイスの加工面に対する傾き、握り位置等を検出することで可能とすることを検討している。この機能により、作業中に頻繁に使用する操作に対し、握りインタフェースのみで同時に各種の機能設定が可能となり、よりよいデザイン支援に繋がると考える。

実世界での作業過程では道具の持ち替えが煩わしさや作業の妨げになる一方、意識的に行うことでデザインのリズムや思考の切り替えをあえて行っている可能性も考えられる。この点に関しては、握り判別精度を向上させた後にデザイナーに使用してもらい、握りインタフェースを再評価する中で明らかにすることを今後の課題としたい。

8. おわりに

本論文では、三次元物体の変形操作を行うためのイ

インタフェースとして「握りインタフェース」を提案した。被験者実験から、握替により、通常の持替による機能切り替え時よりも素早く正確に作業でき、またペン探索や取得の動作が不要であることから作業負担が軽減される、視線移動がないため作業に集中できるなど創作支援インタフェースとしての有用性を示す知見を得た。

ペンの握り動作をセンシングするインタフェースデバイスを試作し、デザイナーの創作過程における自然な握り動作を検出することで機能の切り替えを実現し、またその結果を同時に確認できることを実験により検証した。これによりツール選択のための視線移動や余分な手腕の動きが不要となり、デザイナーが想起している加工作業のイメージを不必要に妨げることなく、創作を円滑に行うことが可能である。

握替に関する人間工学的知見は HYPERREAL に限らず他のインタフェースデバイスに波及させることができる。今後は、コンピュータ初学者にも使用可能な入力デバイスとして絵画作成支援システムのインタフェースに応用するなど、幅広いユーザに対する芸術創作活動の支援環境を構築することを目指す。

参 考 文 献

- 1) 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, A-16-21, 2004.
- 2) 山本景子, 金谷一朗, 佐藤宏介: ハイパーリアル三次元形状デザイン支援システム; システム制御情報学会第 49 回大会予稿集, 4C4-4, 2005.
- 3) 久田理, 山本景子, 金谷一朗, 佐藤宏介: HYPERREAL 三次元形状デザイン支援システム, インタラクション 2007 論文集, Vol.2007, No.4, pp.145-152, 2007.
- 4) SensAble Technologies, inc.: FreeForm, Datasheet.
- 5) Chia-Hsun Jackie Lee, Yuchang Hu, Ted Selker: iShere: A Proximity-based 3D Input Interface; CAAD Futures2005.
- 6) 村上 存, 臼井 恵: 複数の 3 次元形状操作を統合した直観的入力ツール; 芸術科学会論文誌 Vol. 1 No. 1 pp.46-53.
- 7) Hiroaki Nishino, Kouichi Utsumiya, and Kazuyoshi Korida: 3D Object Modeling Using Spatial and Pictographic Gestures; Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'98), pp.51-58, Taipei, ROC, Nov.1998.
- 8) Tovi Grossman, Ravin Balakrishnan, Karan Singh: An interface for creating and manipulating curves using a high degree-of-freedom input device.; CHI 2002 Conference Proceedings ACM Conference on Human Factors in Computing Systems p. 121-128, 2002.
- 9) Jia Sheng, Ravin Balakrishnan, Karan Singh: An interface for virtual 3d sculpting via physical proxy; Siggraph2006, pp213-220, 2006.
- 10) Shumin Zhai: User Performance in Relation to 3D Input Device Design; ACM Siggraph Computer Graphics, Vol.32, No.4, pp50-54, 1998.
- 11) USB 汎用インターフェース・キット: CQ 出版社; ISBN4-7898-3829-3.
- 12) J. J. ギブソン: 生態学的視覚論; 勁草書房, 2000.
- 13) 川人 光男: 脳の計算理論; 産業図書株式会社, 1996.
- 14) Brunnstrom, S. (田口 順子・他 訳): 臨床運動学; 医歯薬出版, 1970.
- 15) Napier, J. R.: The prehensile movements of the human hand J. Bone and Joint Surg., 38B(4); 902913, 1956.
- 16) 鎌倉 矩子, 大村 通子, 石井 晴美, 三星 文子, 三浦 香織: 健常手の把握様式 分類の試み ; リハビリテーション医学, 15, pp.65-82, 1978.
- 17) 鎌倉 矩子, 三星 文子, 浅海 奈津美, 中田 眞由美: 物体操作における健常手の動きパターン; リハビリテーション医学, Vol.23, No.2, pp.59-67, 1986.
- 18) 鎌倉 矩子: 手のかたち手のうごき; 医歯薬出版, 1989.
- 19) 中田 眞由美, 鎌倉 矩子, 大滝 恭子, 三浦 香織: 健常者における箸使用時の手のかまえと操作パターン; 作業療法, Vol.12, No.2, pp.137-145, 1993.
- 20) 中田 眞由美: 箸使用時の手のフォームと操作パターン 鎌倉の分析方法を用いて ; 電子情報通信学会, Vol.106, No.410, pp.35-38, 2006.
- 21) 福田 浩士, 福村 直博, 片山 正純, 宇野 洋二: 対象物の認知と手の把持形状の計算との関係 ヒトの把持運動への計算論的アプローチ ; 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol.J82-D-2, No.8, pp.1315-1326, 1999.

山本 景子



2005年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在、同大学大学院博士後期課程在籍。ハプティックインタフェース、投影型複合現実感、ヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。芸術科学会、人間工学会会員。

員研究員。1994年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。2003年大阪大学大学院基礎工学研究科教授。三次元画像計測、映像情報メディア、実世界インタフェース等の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、VR学会、SICE、IEEEほか各会員。

金谷 一朗



1995年関西大学工学部電気工学科卒業。1997年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。1999年同後期課程修了。1997年ATR人間情報通信研究所研修研究員。1999年和歌山大学システム工学部助手。2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2003年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。2004年科学技術振興機構さきがけ研究員兼任。2008年同工学研究科准教授。デザイン理工学、情報考古学、画像処理に関する研究に従事。工学博士。ACM、IEEE、電子情報通信学会、VR学会ほか各会員。

佐藤 宏介



1983年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985年同大学大学院博士前期課程修了。1986年同大助手。1988～1990年カーネギーメロン大学ロボット工学研究所客