

## 複数の 3 次元形状操作を統合した直観的入力ツール

村上 存 臼井 恵

東京大学 大学院工学系研究科 産業機械工学専攻

### Deformable Input Tool for Intuitive 3-D Geometric Operations

Tamotsu MURAKAMI and Megumi USUI

Department of Engineering Synthesis, The University of Tokyo

#### アブストラクト

導電性弾性材料の塊を構造体かつ 3 次元変形センサとする入力装置を用いた、直観的 3 次元形状操作インタフェース DO-IT (Deformable Object as Input Tool) を提案する。電気抵抗値を測定するための端子対を格子状に導電性弾性材料の塊に接続し、弾性体に加えられた曲げ、ねじり、押し込みなどの 3 次元変形を、各部の電気抵抗値の変化により測定し、その変形をコンピュータ内の形状モデルに適用する。各端子対における抵抗値の変化パターンと入力装置の変形との関係をニューラルネットワークを用いて学習すると同時に、学習の過程において重要度の低い端子対を検出し除去することによって、適切な端子対の数および配置を半自動的に決定する。これらの学習、最適化によって、プログラムをほとんど書き換えることなく、目的や応用に応じたさまざまな形状の弾性体入力装置や変形の種類に対応することが可能となる。弾性体による変形入力に加えて、実際の応用のために必要となる、さまざまなモード切替、調整などの操作を行なうためのスイッチ、ボタン、ボリュームを統合した、直観的 3 次元形状操作のための入力ツールを製作した。提案したインタフェースをコンピュータ・システムとして実装し、実際に操作を行なうとともに、従来のマウスと複数投影図を用いた形状操作方式との定量的比較を行ない、研究の有効性、可能性を検証した。

#### 1. はじめに

近年、CAD、CG、VR などさまざまな分野で、コンピュータ内で 3 次元形状を操作する応用が非常に増えている。しかし、従来標準的に用いられているマウスは、本質的に 2 次元的な入力インタフェースであり、3 次元形状データの 3 次元的操作には適していない。3 次元形状の直接、直観的操作には、3 次元座標／変形の入力、および操作に対する手応えが重要であり、それを実現する手袋状の装置<sup>(1)</sup>や、リンク状の装置<sup>(2)</sup>などが研究開発されている。

それに対して筆者らは、可変形物体を入力装置とする直観的 3 次元形状変形インタフェース DO-IT (Deformable Object as Input Tool) を提案している<sup>(3)(4)</sup>。本手法では、コンピュータ内にモデリングされた対象形状を変形する仮想的な制御立体を設定し、それと同様な形状の弾性体入力装置を用意する。入力装置に素手で曲げ、ねじりなどの変形を加えることにより、コンピュータ内の形状モデルに同様な変形を適用する (Fig.1)。このアプローチは、曲げ、ねじり、絞りなど、面や体積に対する 3 次元変形を直接入力可能である点で、指の曲がりやリンク先端の位置を入力する手袋状、リンク状の装置と異なる。また、コンピュータ内の形状モデルに基づく反力計算処理や反力発生機構を用いずに、変形操作の種類や大きさに対応した手応えを弾性体の受動的な反力として得られる。

本論文では、導電性弾性材料の塊を構造体かつ 3 次

元変形センサとして用いた変形入力と、実際の応用のために必要となる、さまざまなモード切替、調整などの操作のためのスイッチ、ボタン、ボリュームを統合した、直観的 3 次元形状操作のための入力ツールについて報告する。

#### 2. 導電性弾性連続体による変形入力

筆者らは既報<sup>(3)(4)</sup>において、直方体の発泡ゴム塊を構造体とし、その 12 稜線上および 6 面の対角線上、計 18 箇所長さに変化を測定する歪みゲージを貼りつけた入力装置を製作した。しかし、大変形に対する歪みゲージの耐久性や、測定箇所の数が増した場合の製作可能性／容易性の点で問題があった。そこで本論文では、自身の変形により電気抵抗値が変化する導電性弾性体の塊に端子を埋め込み、各部の電気抵抗値の変化を測定することで、歪みゲージなどのセンサを付加することなく、弾性構造体自身を 3 次元変形センサとする方法を提案する。具体的な材料として、多孔性可変抵抗ゴム (日本ケミコン(株)、以下「導電発泡ゴム」と略記)を用いる。

導電発泡ゴムの塊に接続した端子間の抵抗値変化と、導電発泡ゴムの 3 次元変形との関係に関する予備実験を、端子形状を変えて行なった。その結果、端子間の抵抗値は、端子間距離だけでなく、端子近傍の応力状態に大きく影響されること、またどのような端子形状でも、抵抗値は圧縮率を充分反映したものになることが分かった。そこで本研究では、導電発泡ゴムの塊の表面近傍で、変形の

測定に必要と考えられる各箇所には 2 本の導線そのものを対にしてさし込み (Fig.2), 導電発泡ゴム変形時の各端子対での抵抗値変化→各位置での圧縮状態→全体の 3 次元変形の順に測定, 推定を行なう。

### 3. ニューラルネットワークによる学習・最適化

導電発泡ゴム塊は連続体であり, 変形と抵抗値の相関は複雑である。また端子接合部や導電発泡ゴム塊中の電気的特性は不均一であり, 変形と抵抗値の正確な相関を物理的解析だけで求めるのは困難である。そこで本研究では, 測定される抵抗値と入力装置の変形の相関をニューラルネットワークに学習させる。それによって, 導電発泡ゴム塊の形状や, 測定する変形の種類を変更する場合も, ソフトウェアの書き換えはほとんど不要となる。本研究において, 端子対を接続した導電発泡ゴム塊を入力装置として使用するための設定手順をFig.3に示し, 以下にその内容を説明する。これらの設定は基本的に入力装置作成後

に一度行なっておけば, 使用するたびにユーザが毎回行なう必要はない。対応する変形モードの種類を変更したり, 特定のユーザの操作の特徴などを含めて動作の最適化などを行なう場合には, 再学習を行なう。

#### 3.1 変形モードの学習

本研究では, 入力装置の変形に連動してコンピュータ内の制御立体 (Fig.1の画面中ワイヤフレーム) を変形し, それを B-Spline 基底関数を用いた自由形状変形 (Free Form Deformation)<sup>(5)</sup> によって対象形状 (Fig.1の画面中網掛け部) に写像する。そのためにもまず, Fig.2のような導電発泡ゴム塊に対応する制御立体を考え, それを用いて測定したい変形の種類を変形モードとして定義する。ここでは例として Fig.4 の "Initial", "Press", "Bend", "Shear", "Twist", "Depress" の 6 種類を考える。次に, 入力層ユニット数が導電発泡ゴム塊の端子対の数, 出力層ユニット数が変形モードの数となる 3 層のニューラルネットワークを用意する (Fig.5)。Fig.2の装置で Fig.4 の変形を処理する場合は, 入力層ユニット数 28, 出力層ユニット数 6 となる。各ユニットにおける入力と出力の関係は Sigmoid 関数を用

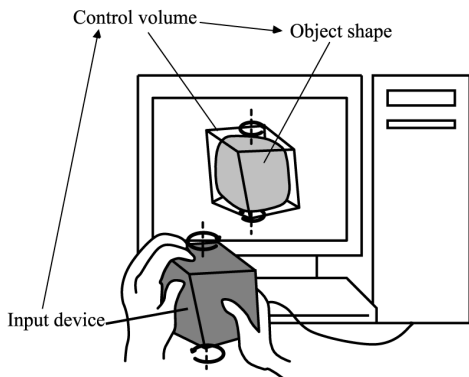
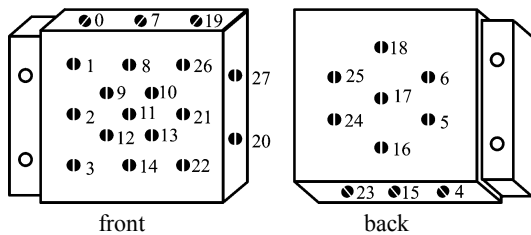
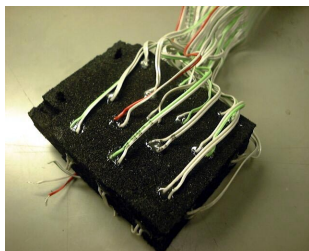


Fig.1 An elastic object as an input tool.



(a) Terminal pair layout.



(b) Conductive foam rubber with terminals.

Fig.2 An input tool and measurement terminal pairs.

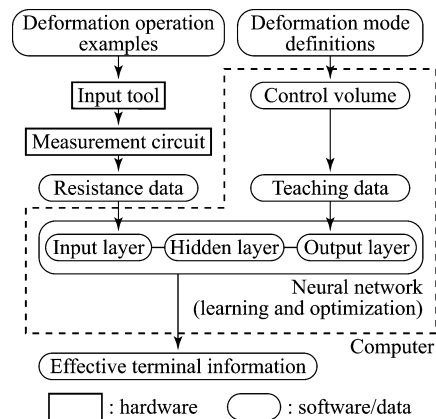


Fig.3 DO-IT interface setting-up diagram.

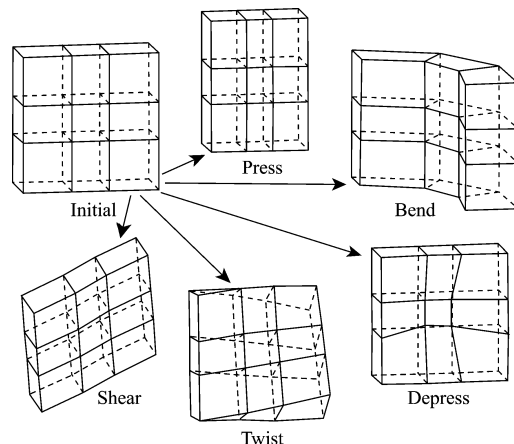


Fig.4 Deformation modes of the control volume.

い、出力値は 0 または 1 に近い値となる。

学習においては、変形モード  $i$  のときは出力層ユニット  $i$  のみ値 1、それ以外は値 0 を教師信号とし、対応する変形を導電発泡ゴム塊に加えたときの各端子対の抵抗測定値を入力信号とする。それによって、各端子対における抵抗値のパターンと、変形モードの対応を学習させる。

### 3.2 中間層ユニット数の最適化

ニューラルネットワークでは、一般的に中間層ユニット数が過多では汎化能力が低下し、過少では入出力関係を再現できないという性質があり、中間層ユニット数は非常に重要である。そこで本研究では、学習過程で中間層ユニット数を最適化する。Fig.5において、中間層の  $j$  番目ユニットの出力を  $Out_j$ 、出力層の  $k$  番目ユニットへの結合荷重を  $w_{jk}$ 、学習データのパターンを  $p$  としたとき、 $j$  番目の中間層ユニットの Goodness Factor ( $GF_j$ )<sup>(6)</sup>を式(1)で定義する。この値が小さい中間層ユニットは出力層への影響が少ないと考えられるので、この値の比較により重要度の低い中間層ユニットを削除する。

$$GF_j = \sum_p \sum_k (w_{jk} Out_j)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

### 3.3 端子対の数および配置の最適化

本研究の方法では、導電発泡ゴム塊などの特性について物理解析を行わないため、あらかじめ必要な端子対の数および配置を知ることはできない。必要な端子対の数と配置は入力装置の形状や学習させたい変形モードに依存するため、学習と切り離すことはできない。そこで本研究では、まず導電発泡ゴム塊に十分多いと考えられる入力端子対を接続し、ニューラルネットワークの学習過程で、重要度の低い入力層ユニットを判定し削除することによって、必要最小限の端子対のみを残し、最適な端子対の数と配置を求める方法を提案する。この結果に基づいて実際にゴム塊から端子を除き、構成をシンプルにするか、あるいは端子を接続したままソフトウェア的に無視することで、

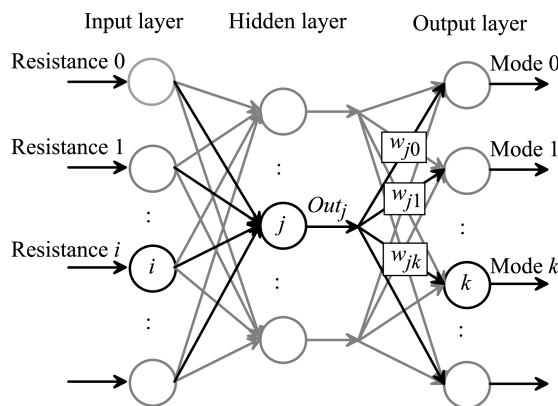


Fig.5 Neural network

再学習により異なる変形モードやユーザに対応できる可能性を残しておくことができる。削除の基準として次の 2 つを用いる<sup>(7)</sup>。

**3.3.1 分散基準による入力層ユニット削減** 入力層の  $i$  番目のユニットに、変形パターン  $p$  について測定され入ってくる値を  $x_{ip}$ 、その平均を  $x_i$  としたとき、分散基準  $S_i^2$  を(2)式により定義する。この値が小さい入力層ユニットは、変形の種類による測定値の相違が小さいことになり、変形の種類を見分ける上で重要度が低いと考えられる。

$$S_i^2 = \frac{\sum_p (x_{ip} - x_i)^2}{\sum_i \sum_p (x_{ip} - x_i)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

**3.3.2 相関基準による入力層ユニット削減** 入力層の  $u$  番目および  $v$  番目のユニットに、変形パターン  $p$  について測定され入ってくる値を  $x_{up}$ ,  $x_{vp}$ 、それぞれの平均を  $x_u$ ,  $x_v$  としたとき、相関係数  $\rho_{uv}$  を用いて相関基準  $R_{uv}$  を(3)式により定義する。

$$R_{uv} = 1 - \frac{|\rho_{uv}|}{\frac{\sum_p (x_{up} - x_u)(x_{vp} - x_v)}{\sqrt{\sum_p (x_{up} - x_u)^2 \sum_p (x_{vp} - x_v)^2}}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

相関係数  $\rho_{uv}$  は  $[-1, 1]$  の値をとり、 $|\rho_{uv}|$  が 1 に近いほど相関が強いので、相関基準  $R_{uv}$  は  $[0, 1]$  の値をとり、0 に近いほど相関が強い。この値が小さい入力層ユニット 2 つには、各変形パターンについて同様な値が測定、入力されていることになり、冗長で一方のみで十分である可能性が大きい。そこで、その場合には前述の分散基準による重要度が小さいほうを削除する。

3.2で述べた中間層ユニット削減と組み合わせ、入力層と中間層のユニットを同時に削減していく処理の流れは次のとおりである。

- (a) はじめに、分散基準によって入力層ユニットを削減する。
- (b) Goodness Factor をもとに中間層を削減する。
- (c) ある中間層ユニット数において学習が収束すれば、相関基準によって入力層ユニットを削減する。
- (d) 学習が収束しなくなるまで、もしくは入力層ユニット削減に利用する相関基準が一定以上になるまで(b), (c)を繰り返す。

## 4. 複数操作を統合した入力ツール

### 4.1 導電発泡ゴム形状と変形モード

本論文では、対象形状や変形目的を特定しない汎用的な入力ツールを実現するため、Fig.2に示す直方体状の導電発泡ゴム塊に、Fig.4に示す変形モードを設定した。これらの汎用的、基本的な変形を逐次適用していくことによ

って、さまざまな変形を実現することができる。なお、使用できる変形モードの種類と数は本論文で取り上げた 6 モードに限定されるわけではなく、ニューラルネットワークの学習能力の範囲内であれば対応することができる。

これによって、直観的 3 次元変形操作が可能となるが、CAD, CG, VR などにおける形状操作には、変形入力と同時に、さまざまな指定, 切替, 調整操作を行なう必要がある。それらの操作が変形入力部分と別になっているインタフェースでは、手が複数の入力装置を行き来することになり、操作者の思考を妨げるなど、操作が直接性, 直観性を欠くものとなる。そこで本研究では、導電発泡ゴムによる変形入力と、必要となるさまざまな操作を一つに統合した入力ツールを構成する。

#### 4.2 操作の統合

本研究のインタフェースにおいて、変形入力以外に必要なとなる次の各操作を入力ツールに実装する。

**4.2.1 変形の連動／非連動モード切替** 変形入力中は制御立体と対象形状の変形が連動し、リアルタイムで画面に表示されるため、状態を目視しながら入力を調整することができる。変形を保存したい場合は、入力装置から手を離すと元の形に戻るため、変形が連動する状態のままでは、対象形状の変形を保存できない。そこで、変形の連動を解除してから手を離すことにより、変形を保存する。この連動／非連動モード切替を行なうための on/off スイッチを実装する。

**4.2.2 変形確認のためのスナップショット** 変形保存のために非連動モードに切替えてしまうと、その時点で制御立体と対象形状の対応が切り離され、相対的な位置や姿勢がずれてしまう。そのため、保存した変形が意図と異なっていた場合でも、切替前の条件で操作をやり直すことができない。そこで、モード切替はせずに変形状態をスナップショットとして仮に保存する機能を設ける。この場合、画面上は変形が固定され、その変形状態データも一時的に保存されているが、内部処理としては制御立体と対象形状は連動している。スナップショットをとり、それが意図と異なっていた場合は、継続して変形操作に復帰できる。このスナップショットのためのボタンを実装する。

**4.2.3 制御立体のサイズ調整** 対象形状に対する制御立体のサイズを変更し、変形の適用範囲を調整して全体変形, 部分変形などを使い分けることにより、限定された変形モードによっても多様な変形操作を実現できる。この制御立体のサイズ調整のために、縦横の倍率や全体の拡大・縮小のためのスライドボリュームを実装する。

**4.2.4 空間位置・姿勢調整** 対象形状に対する制御立体の相対位置や向きを調整して、変形を適用する場所を指定したり、対象形状／制御立体を回転させて各方向

から変形状態を確認するなど、位置, 姿勢の調整が必要となる。この位置, 姿勢の調整は、入力ツールに空間磁気センサを埋め込んで実装し、入力ツールの傾きや移動量をリアルタイムに反映させる。

### 5. インタフェース・システムの実装

以上の内容を、Table 1のハードウェア, ソフトウェアを用いてシステムとして実装した(Fig.6)。入力ツールは、3次元変形入力操作のための導電発泡ゴム塊に布製カバーを被せ、スイッチ, ボタン, スライドボリューム, 空間センサのレシーバを実装するプラスチック製ケースに取り付けて製作した(Fig.7)。

#### 5.1 ニューラルネットワークによる学習・最適化

Fig.2に示す導電発泡ゴム塊に 28 個の端子対を埋め込み, Fig.4に示す 6 つの変形モードの学習を行なった。な

Table 1 Hardware and software.

Computer	HP Kayak XW Intel Pentium II 300MHz×2 HP VISUALIZE fx4
3-D motion tracking system	Polhemus ISOTRAK II
Program language	Microsoft Visual C++ 6.0
Graphics library	OpenGL +, GLUT

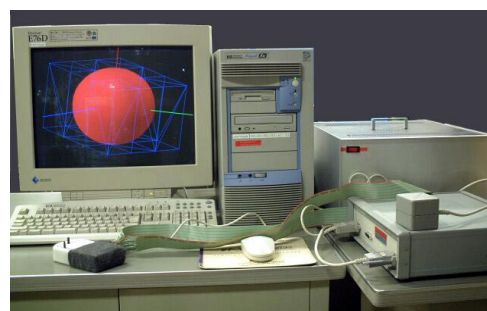


Fig.6 DO-IT System appearance.

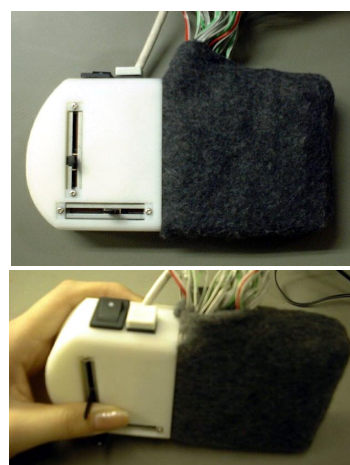


Fig.7 Deformable input tool.

お, 変形状態から初期状態への遷移を判別するため, 初期状態も 1 変形モードとして含めている. 1 変形モード毎に 40 個, 計 240 個の測定抵抗値パターンを学習の入力信号とした. 各変形における, 端子対番号 0~27 の測定抵抗値パターン例をFig.8に示す. 入力信号は変形前の抵抗値を 1 として正規化して表わし, また可読性のため 1 変形モードについて 10 パターンのみを示す.

学習の繰り返し回数によるユニット数の変化について, ほとんど変化のなかった中間を除き, 学習の最初と最後の状態をFig.9に示す. 中間層ユニット数(初期値 10)は早い段階で 6 個まで減っている. 端子対(入力層ユニット数, 初期値 28)は 26 個までは 6 つの変形モードが独立して判別できるが, 21 個まで減少すると誤判別されることが多く

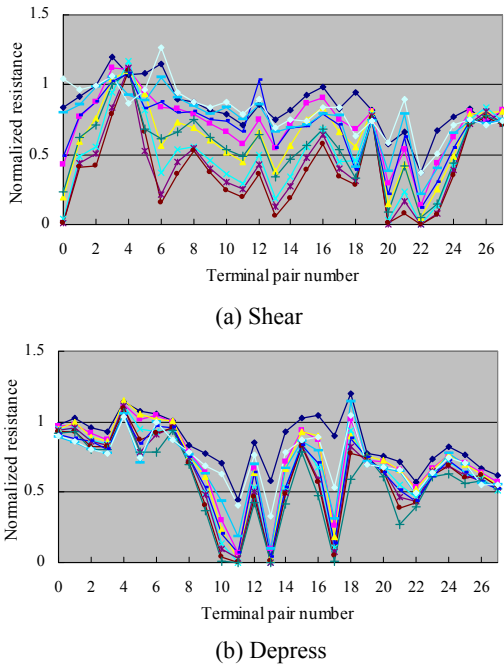


Fig.8 Measured resistance patterns for deformations.

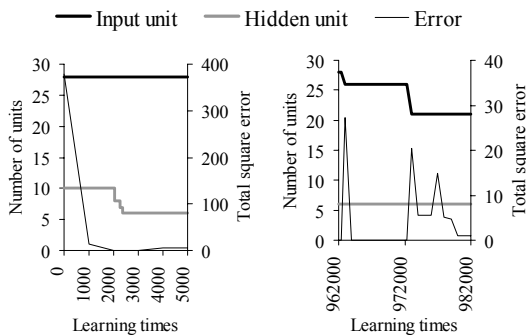


Fig.9 Input and hidden layer units optimization.

なった. 以上の結果から, この発泡ゴム形状で 6 変形モードを用いるための端子対は 26 個, 中間ユニット数は 6 個が適切であると判断できる. なお, Fig.9中の教師信号と出力信号の 2 乗誤差の総和(初期値 377)を学習・最適化の判断基準に用い, 一定回数の繰り返しを行なってもその値が減少しなくなったときは, 局所解に陥ったと判断してニューラルネットワークの結合荷重(Fig.5の"w")をランダムに初期化して学習, 最適化を継続した.

5.2 変形操作例

学習および最適化を済ませた後の, DO-IT インタフェースの基本動作をFig.10に示す. ユーザーが導電発泡ゴム塊に変形を加えると, 測定された抵抗値のパターンからニューラルネットワークが変形モードを識別し, 抵抗値の変化量により変形の大きさを決定し, 制御立体の変形を計算する. 変形モードの定義では離散値データを用いるが, 変形モードを学習したニューラルネットワークによりそれを補間し, 連続的に変形することができる. ただし, 導電発泡ゴムと金属端子の接続の不安定さやノイズのために, 精度, 解像度が低く, この点は今後の課題である. また, 本論文のインタフェースは, 入力装置への一連の変形操作を, 各変形モードおよびそれらの間の遷移として識別しており, 複数のモードが複合された変形を適用することは実現されていない. この点も今後の課題である.

制御立体の変形は, 自由形状変形により対象形状, 例えばFig.11画面中のスムーズ・シェーディングを施したポリ

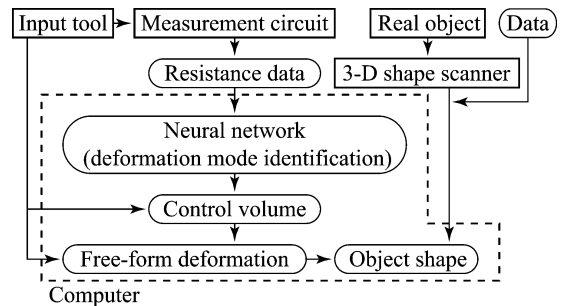


Fig.10 DO-IT interface operation diagram.

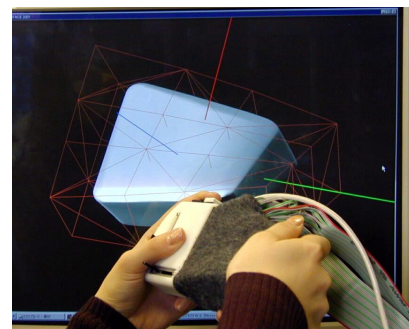


Fig.11 3-D operation by DO-IT ("Twist").



ゴンモデルに適用される。なお、対象形状のうち、制御立体に含まれる部分のみ、変形が適用される。4.2.3に述べたように、スライドボリュームで制御立体(変形適用領域)の形状を変更(Fig.12)することにより、例えば同一の「押し込み」変形操作であっても、Fig.13に示すように、面状の押し込み、線状の切り込み、点状の穿孔など、多様な変形を実現できる。また、4.2.4に述べたように、制御立体の位置や姿勢を調整し、対象形状の端部に対応させた状態で変形操作を行うことにより、形状の端を曲げたり押し込んだりする操作も実現できる。

本インタフェースの可能性として、電話器の形状デザインを想定した操作例をFig.14に示す。単純な初期形状を、押し込み、平らにつぶし、ねじることによって、思いついた形状をラフに容易に作成できる。今後の可能性として、制御立体のコピーを生成して対象形状の各所に配置し、入力装置に加えた変形操作を対象形状の複数箇所に同時に適用するなど、ソフトウェア上の拡張により、目的に応じたさまざまな機能を実装することも可能である。それらの機能を用いて作成したラフな素形状データを CAD システムに読み込み、面の滑らかさや対称性などを整えて仕上げることで、工業デザインなどに使用できると考えられる。

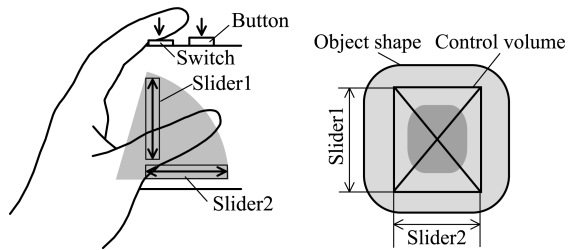


Fig.12 Combination of deformation and control operations.

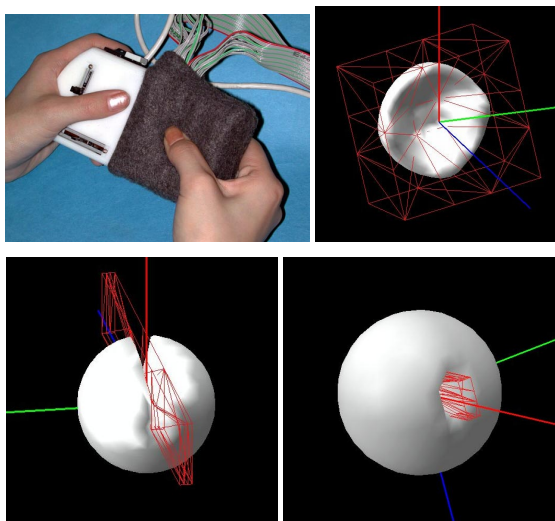
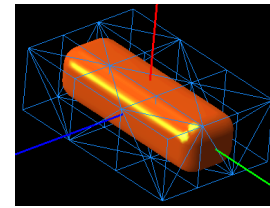


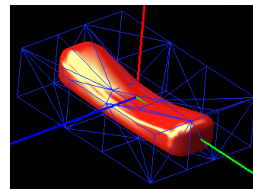
Fig.13 Example of operations and results ("Depress").

## 6. 操作性の定量的評価

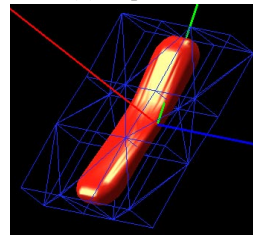
本研究の入力ツールの操作性について、マウスと複数viewを用いた既存 3-D CGソフトウェアの操作方式との定量的な比較を行った。被験者は工学部の学生 3 名で、8 枚の 3 角形ポリゴンから成る正方形板(Fig.15(a))を 3 次元的にねじれた状態(Fig.15(b))に変形させる作業を対象とした。操作性と座標系の関係を確認するため、正方形の



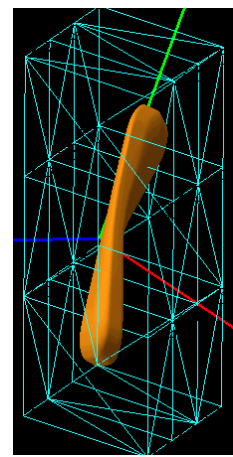
(a) Initial



(b) Depressed

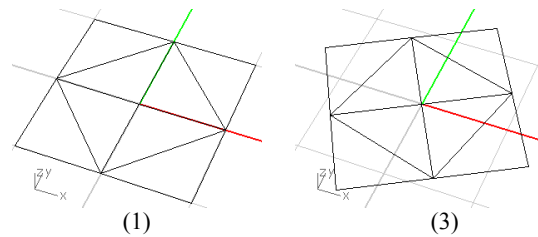


(c) Pressed

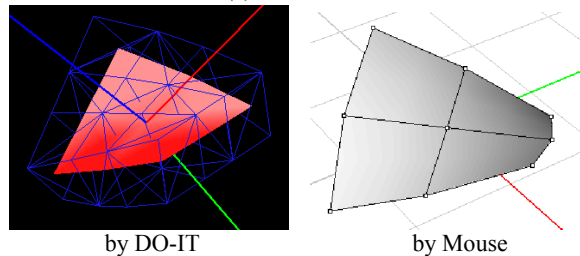


(d) Twisted

Fig.14 Rough design of a telephone handset.



(a) Initial state



(b) Target state

Fig.15 Operation task (curling 3-D square).

姿勢は、 $z, y, x$  座標軸に対して順にTable 2のように回転した 6 つの場合を設定し、順に課した。また、操作方法や作業内容への習熟度の影響を除くため、課題(1)と同じ作業を例題として与え、十分に慣れてもらってから評価実験を行った。この操作例題では、正方形の 4 頂点をそれぞれ 3 次元的に移動する必要があるが、マウスでは 1 度に 2 座標までしか操作できず、1 頂点の 3 次元的移動に最低 2 操作が必要となる。そのため制御点方式では、最短でも「制御点編集 on」、「対象形状選択」を各 1 回、「Perspective で目的頂点選択」、「Front で上下に移動」、「Top で正方形の内側に移動」の 3 操作を 4 頂点分で 12 回、計 14 操作を要する。一方、本研究の入力ツールでは、「制御立体と対象形状の位置合わせ」、「モード切替」、「視点を変更し位置関係確認」、「モード切替」、「制御立体の大小調整」、「再度位置合わせ」を各 1 回、「モード切替」を 2 回、「Twist 変形入力」を 1 回、「モード切替」を 2 回、計 11 操作となる。2 つの方式について 3 名が 6 つの場合の操作に要した所要時間をFig.16に示す。

マウスと複数 view による操作では、座標系を意識する必要があるため、対象形状の姿勢が座標軸に沿っているかどうかで、所要時間が異なっている。一方、本研究の入力ツールでは、正方形の初期姿勢によらず所要時間はほぼ一定である。これは、座標系を意識する必要なく、意図したとおりに入力装置を変形すればよいという、本インタフ

ェースの直観性を表わしていると考えられる。

以上の比較は特定の変形作業例を示したのみであるが、操作数、所要時間ともに本研究の方式が少なくなっており、この差は対象形状が複雑であるほど大きくなると予想されるため、本研究の有効性、可能性を示すと考えられる。ただし、自由形状変形の制御ネットと変形モード毎のハンドルが画面に現れ、それをマウスで操作することにより 3 次元的変形操作を行なえるソフトウェアでは、DO-IT インタフェースに近い操作が行なえる。そのようなソフトウェアに対して DO-IT インタフェースは、内部処理では変形モードが存在するがユーザがモード切替を行なう必要がないこと、2 次元画面内ではなく手元の 3 次元空間で直接変形操作が入力できること、受動的反力による手応えがあることなどの長所を有するが、一方、精度、解像度が低いなどの短所も有している。それらすべてを考慮した総合的な有効性の評価は、今後の課題である。

### 7. 関連する研究

本研究と同様に、物体を入力ツールとする研究として、物体表面に感圧センサを貼り、ユーザがそれを押し込む圧力分布を測定し、それに応じてコンピュータ内の 3 次元形状に変形を加える方法が報告されている<sup>(8)(9)</sup>。それらの研究では入力ツール自体は大きな変形をしないのに対し、本研究の手法は、入力ツール自身の変形を電氣的に測定し、またツールの変形によって現在行なっている操作を直観的に把握できる点異なる。粘土で立体形状を作成し、それを形状スキャナでコンピュータに読み込み内部で自由に変形する方法も提案されているが<sup>(10)</sup>、手応えを得ながら粘土を変形する操作自体はオフラインであり、本研究のようなリアルタイムで動的なインタフェースとはなっていない。自身の組立状態をコンピュータに通信することができるブロックを用いて、直観的に実際のブロックを組み立てながらその形状、構造をコンピュータ内に動的、自動的に入力する方法が報告されており<sup>(10)(11)</sup>、入力できる形状、構造の自由度は大きい。自身は変形しないブロックの着脱によるため、入力は離散的、デジタル的である。それに対して本研究の手法は、弾性体の変形により連続的、アナログ的な変形操作が可能である。

### 8. まとめ

本論文では、導電性発泡ゴムの塊に対する変形操作による直観的形状変形に加えて、実際の応用のために必要な、さまざまなモード切替、調整などの操作を行なうためのスイッチ、ボタン、ボリュームを統合した、直観的 3 次元形状操作のための入力ツールを提案し、コンピュータ・システムとして実装した。CAD, CG, VR などの分野における

Table 2 Initial orientation for the operation task.

Task number	$z$	$y$	$x$
(1)	0°	0°	0°
(2)	45°	0°	0°
(3)	30°	0°	0°
(4)	0°	45°	0°
(5)	45°	45°	0°
(6)	45°	45°	30°

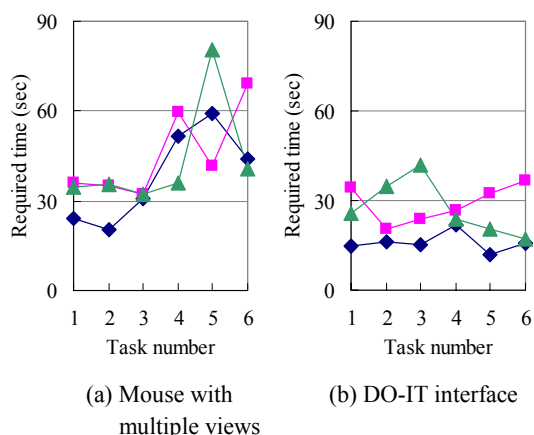


Fig.16 Required time for the task.

実際の応用への適用と、そのために必要な形状変形、操作の精度、解像度などを実現すること、目的や応用に応じたさまざまな形状の導電発泡ゴム塊や変形モードを利用する可能性、有効性を検証することが、今後の課題である。

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題番号 10555079)により行なわれた。

## 文 献

- (1) Sturman, D. and Zeltzer, D., A Survey of Glove-based Input, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 14-1 (1994), 30-39.
- (2) Massie, T., A Tangible Goal for 3D Modeling, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18-3(1998), 62-65.
- (3) 村上存・今井敦彦・高木清嘉・中島尚正, 可変形物体を入力装置とする直接・直観的3次元形状操作インタフェース, *機論*, 61-592, C (1995), 4817-4824.
- (4) Murakami, T. and Nakajima, N., DO-IT: Deformable Object as Input Tool for 3-D Geometric Operation, *Computer-Aided Design*, 32-1 (2000), 5-16.
- (5) Sederberg, T.W. and Parry, S.R., Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, *ACM Computer Graphics*, 20-4 (1986), 151-160.
- (6) 松永豊・村瀬一之・山川修・谷藤学, 競争作用により冗長中間層素子を自然淘汰する誤差逆伝播学習アルゴリズム, *電子情報通信学会論文誌*, J79-D-II-3 (1996), 403-412.
- (7) 押野隆弘・尾島潤・山本真司, 誤差逆伝播学習における中間層ユニットの逐次削減法, *電子情報通信学会論文誌*, J76-D-II-7 (1993), 1414-1424.
- (8) Kameyama, K. and Ohtomi, K., VR System Using Volume Scanning Display and Multi-Dimensional Input Device, *Proc. of ISMCR'92* (1992), 473-479.
- (9) Kang, H. and Kak, A., Deforming Virtual Objects Interactively in Accordance with an Elastic Model, *Computer-Aided Design*, 28-4 (1996), 251-262.
- (10) Anderson, D., Frankel, J.L., Marks, J., Agarwala, A., Beardsley, P., Hodgins, J., Leigh, D., Ryall, K., Sullivan, E. and Yedidia, J., Tangible Interaction + Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling, *Proc. of SIGGRAPH 2000* (2000).
- (11) Kitamura, Y., Itoh, Y. and Kishino, F., Real-time 3D Interaction with ActiveCube, *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001)* (2001), 355-356.