

## 論文

## 触覚機能をもつ仮想物体操作システム

正員 石井 郁夫<sup>†</sup> 正員 柄沢 達明<sup>†</sup> 正員 牧野 秀夫<sup>†</sup>

## A Handling System of Virtual Object with the Sense of Touch

Ikuo ISHII<sup>†</sup>, Tatsuaki KARASAWA<sup>†</sup> and Hideo MAKINO<sup>†</sup>, Members

あらまし 工業デザインや芸術分野における造形処理, シミュレーションなどに人工現実感技術を応用する目的で, 仮想物体を実空間側から対話的に直接操作する場合のいくつかの問題を検討した. 第1に, 応答遅れを感じない運動視差表現の可能な表示系の実現のために, 操作者の両眼位置計測時間の短縮について検討した. PSDによる両眼位置計測法を開発して, この問題を解決した. 次に仮想物体に対する直接的な操作指示を実空間側から正確に行う方法を検討した. 手やスタイラスなどの実空間上の物体を用いて直接指示する方法は, 実空間と仮想空間の座標系間の誤差が直接視覚的に感知されて正確な操作に支障が出る. そこで, 実空間に握り部, 仮想空間に先端部がある特殊な構造の仮想物体操作用スタイラスを開発し, 誤差による視覚的な位置関係のずれの除去に成功した. 更に, スタイラス先端と被操作仮想物体の接触判定と触覚生成の実時間処理について検討した. 仮想先端型スタイラスの特徴を生かし, 描画機構を活用することによって実時間処理を実現した.

キーワード 人工現実感, 仮想物体操作, 運動視差, 触覚生成

## 1. まえがき

立体映像で仮想環境を表示して, 自分がその中で行動したり, 仮想の物体を操作する人工現実感技術が注目されている. 危険を伴う環境のシミュレーションによる体験や, 現実には存在しない世界の体験などへの応用が期待されている. 我々は, 工業デザインや芸術分野における造形処理, シミュレーションなどを仮想環境下で行うことのできる仮想物体操作システムの実現を目指して, 実用化上の諸問題を検討している.

実現したい仮想物体操作システムは, スクリーン上に表示された仮想物体に対して組立て・分解, 移動などさまざまな操作を実空間側から実際の物体を扱っているような感覚で行うものである. Head Mounted Display を付けて仮想環境中を動き回るような利用法は想定しないので, 機能が限定されて実現しやすい反面, 仮想環境表現や操作精度に高度な性能が要求される.

視覚仮想環境の生成については, 複雑なシーンや自由形状物体に対して良好な運動視差表現を実現する方法を確立する必要がある<sup>(1),(2)</sup>. 運動視差表現には観察者

の両眼位置計測が必要であるが, 計測時間の短縮が課題である. 現在利用されている直交電磁界を利用した3次元ディジタイザ<sup>(3)</sup>や超音波方式<sup>(2)</sup>の両眼位置計測法は座標値の導出までに数十 mS を費やしてしまう. そこで PSD を利用した高速・高精度両眼位置計測装置を開発し問題の解決を図った.

実空間側から仮想空間にアクセスする手段の開発も重要である. 仮想空間を3次的に移動できるカーソルを利用したいくつかの方法<sup>(4)~(6)</sup>や, 実際の手の動きを仮想空間に伝えるデータグローブなどさまざまな方法が考えられている. しかし, 直接的な操作感覚が得られないこと, 座標指示精度, 操作精度, 操作機能などが十分でないことなどの問題がある. 我々はこれらの問題を解決できる特殊な構造の仮想空間操作用3次元スタイラスを開発した<sup>(7)</sup>. その結果, 直接的な操作感覚と正確な座標指示を実現することができた.

仮想物体操作には触覚生成も必要であり, いくつかの方法が試みられている<sup>(8),(9)</sup>. 我々はこの3次元スタイラスの特殊な構造を活用して, 複雑な仮想物体に対する実時間接触判定と触覚生成を簡便な方法で実現することに成功した.

<sup>†</sup> 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市  
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21  
Japan

## 2. 視覚仮想環境の生成

### 2.1 運動視差表現における問題点

運動視差を表現するには、観察者の両眼の位置を計測し、その位置から見た物体の両眼視立体像を実時間で求めてスクリーンに表示する。観察者に遅れを感じさせない良好な運動視差を表現するには、視点計測から像の表示までの遅延時間を 60 mS 以内にするのが望ましい<sup>(1),(2)</sup>。精巧で複雑なシーンの運動視差表現には毎秒数百万ポリゴンの描画能力を有する超高速グラフィックスプロセッサの開発を必要とするが、まだ実現されていない。従って現状では比較的単純な形状の仮想物体を対象としたものに限定される。我々はボクセルチェーン形状定義法を考案し、精巧な自由形状物体の運動視差表現を比較的簡単なハードウェアで実現することに成功した<sup>(2)</sup>。しかしこの形状定義法は、要求される実時間処理に対して、物体の回転・移動のようなアフィン変換操作には適用できるが、物体の変形操作が困難である。現在、運動視差表現と実時間形状変更操作がともに可能な形状定義法と描画処理方式を開発中であるが未完成である。そこで操作範囲をアフィン変換に限定し、ボクセルチェーン方式描画ハードウェアを用いて操作実験を行っている。

良好な運動視差表現に必要な許容遅延時間内には、グラフィックスプロセッサの描画処理時間の他に両眼位置計測時間が含まれる。現在利用されているさまざまな 3 次元デジタル<sup>(3),(10)</sup> や超音波伝搬遅延時間を利用した方式<sup>(2)</sup> では、両眼の座標値の算出までに数十 mS を要し、許容遅延時間のかなりの部分を消費してしまう。許容遅延時間の大部分が描画処理に利用できるように両眼位置計測時間を短縮する必要がある。

### 2.2 PSD による両眼位置計測

高速高精度両眼位置計測のため PSD (位置検出素子-Position Sensitive Detectors)<sup>(11)</sup> による計測システムを開発した。PSD はホトダイオードの表面抵抗を利用した光スポット位置センサである。2次元 CCD のような走査や画像処理を必要とせず、高速に座標値が得られる。位置検出誤差も中央部で受光面幅の 0.7 % 程度、周辺部で 1.2 % 程度と高精度である。

図 1 に仮想物体操作システムの外観を示す。上部のテレビカメラ状のものが PSD センサ部である。操作者の装着する液晶シャッター眼鏡の図 2 の矢印の位置に 3 個の赤外線 LED を取り付け、時分割点灯し、2 台の PSD 素子上の LED 像の座標値をそれぞれ求める。背

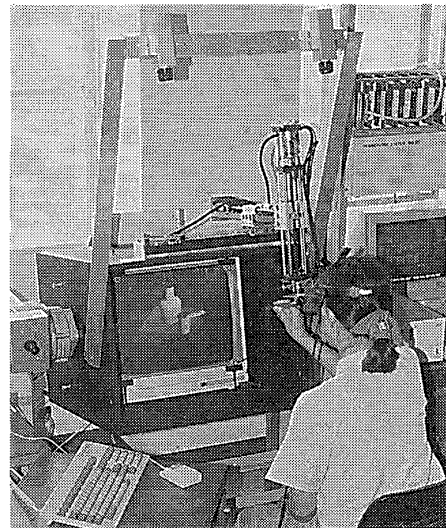


図 1 仮想物体操作システムの外観  
Fig. 1 The appearance of the virtual object handling system.



図 2 液晶シャッター眼鏡と赤外線発光ダイオード  
Fig. 2 LCD shutter glasses and IR LEDs.

景光の影響を除去するため、発光ダイオード点灯サイクル中に背景光による電極電流値をサンプルホールドする時間を設け、各 LED 点灯時の電流と背景光電流との差を用いて座標値を計算する。座標演算はアナログ回路で実行し、結果を A-D 変換して制御 CPU に送る。これらの処理を点灯サイクルに同期した周期 70  $\mu$  秒のパイプライン方式で実行している。この計測原理から、蛍光灯のような点滅光源による照明下や、明るい照明下では測定できない。

LED の 3 次元座標の計算は三角法による。2 台の PSD カメラの光軸を平行にして光軸間距離を 50 cm とする。観察者の頭部付近の測定範囲を 50 cm  $\times$  50 cm 程度とすればカメラの視野は 100 cm  $\times$  50 cm が必要である。従って PSD から直接得られた座標値による位置検出誤差は、視野の周辺部で 1.2 cm 程度になる。精度

向上のため、観察者頭部付近に光軸と直交する基準面を設け、この面内に縦横 5 cm 間隔の格子を作り、各格子交点で LED を点灯したときの PSD 座標値を読み取って、PSD 座標値と基準面座標値の変換テーブルを作成して補正を行う。基準面座標から図 2 の 3 個の LED の 3 次元座標を求め、観察者頭部の位置と姿勢を求める。更に、LED と両眼の位置関係を常に一定と考えて両眼の位置を求める。制御 CPU に 16 ビットのマイクロプロセッサを用いた場合、両眼位置導出時間 1 mS 以内、座標誤差が基準面内で 2 mm 以内、それと直角方向で 4 mm 以内の精度を実現することができた。誤差はそのまま観察者と仮想物体間の相対的位置誤差となるが、運動視差による像の変化と共に現れるので、ほとんど知覚されない。

### 3. 仮想物体操作機構

#### 3.1 仮想物体操作方式の問題点

仮想物体に対する座標や操作の指示法として、仮想空間内を 3 次元的に移動するカーソルを表示し、3 次元マウス、トラックボール、ジョイスティックなどで制御する間接的指示法と、スタイラスやデータグローブを付けた手などの実空間上の道具を直接仮想空間に挿入して操作を行う直接的指示法がある。前者は、実空間と操作対象のある仮想空間が一体化されていないので直接的な操作感覚が得られないこと、カーソルの 3 次元的位置や姿勢が視覚的に把握しにくいことなどの問題がある。一方後者の場合、実空間上の道具の位置や姿勢を 3 次元ディジタイザなどで計測して仮想空間に反映させる必要がある。このとき計測誤差が操作者に視覚的に感知される。操作者は特に指先やスタイラス先端に注目しているので、位置関係の誤差を鋭敏に感じて、精密な操作指示を困難にする。

#### 3.2 仮想先端をもつスタイラス

操作性を向上する一方法として、仮想先端をもつ 3 次元スタイラスを用いる方式を提案する。図 1 に示すように、立体像表示装置で作り出される仮想空間の手前に、仮想空間内の物体や位置、操作内容などを指示するスタイラス機構を設置する。操作者のもつスタイラスの握り部は、直交する 3 軸のスライダの先端に図 3 のように 2 軸の回転関節を介して取り付ける。このスタイラスは、先端部が仮想空間に立体表示された仮想物体であることを特長とする。握り部の位置と姿勢ならびに操作者の両眼の位置を計測し、操作者には先端部が握り部と一体に見えるように表示制御する。仮

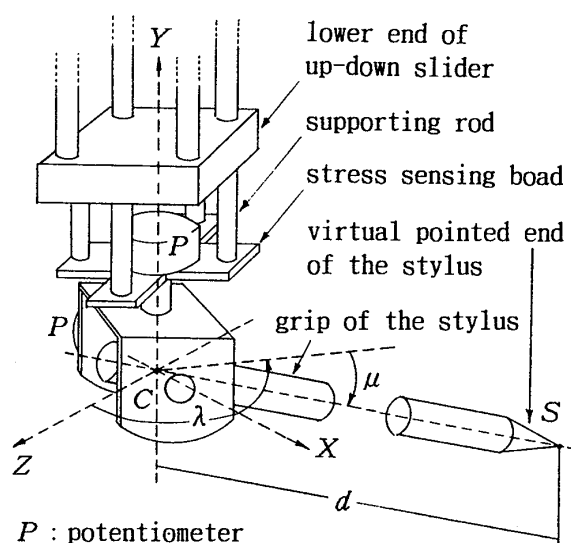


図 3 仮想先端をもつスタイラスの構造  
Fig. 3 The construction of the stylus with virtual pointed end.

想物体と共に運動視差も表現されるので被操作物体との間の位置関係の把握が容易である。仮想先端をもつスタイラスの利点を列挙すると、

① 実際の物体で操作しているような直接的な操作感覚が得られる。

② 先端部が仮想空間にあるので、注目している先端と被操作物体間の位置関係が、視覚的に把握される位置関係と完全に一致する。従って、仮想物体に対する精密な操作が容易になる。

③ 先端と被操作物体がともに仮想空間にあるので、相互の接触を仮想空間内だけで判定することができる。描画処理機構を利用して、実時間接触判定を容易に実現することができる。

④ スタイラス握り部の駆動機構を利用して触覚を生成することができる。

⑤ 先端が仮想物体なのでデータの変更だけで機能の異なる先端部に変換できる。例えばさまざまな刃先形状の彫刻刀や筆先形状の異なる筆など、目的に応じた仮想の道具を利用することが可能になる。

などである。1 本のスタイラスを握って行う操作に限定されるので、物体をつかむような操作はできない。しかし操作対象が仮想物体であり実空間の物理法則に制約されないで、スタイラス先端に物体を接続して移動するなど、結果として操作目的を達成する便利な方法を考えればよい。1 本のスタイラスだけでも実際の物体操作より容易に目的を達成することもできる。

#### 3.3 握り部の駆動機構

スタイラス握り部の位置と姿勢を計測し、更に触覚

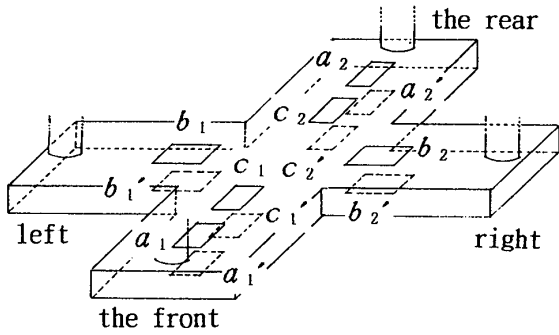
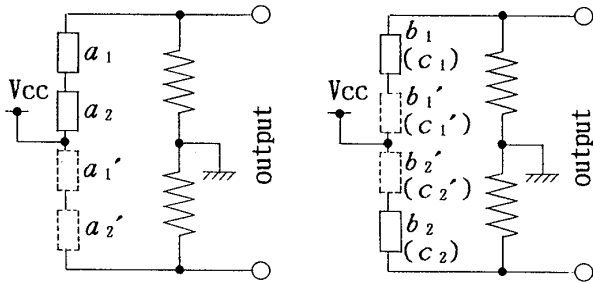


図4 応力検出板の構造

Fig. 4 The construction of stress sensing board.



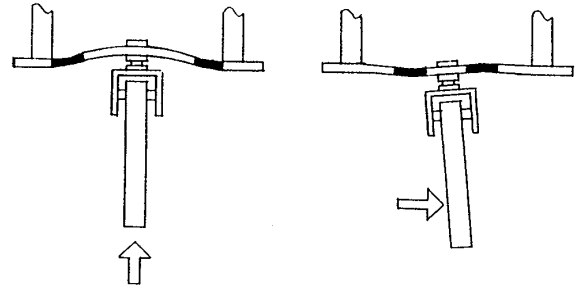
(a) Up-down sensor. (b) Left-right and front-rear sensors.

図5 ひずみゲージのブリッジ接続法

Fig. 5 The bridge connection of strain gages.

を生成するために、握り部を保持し駆動する機構を設ける(図1)。ディスプレイ枠に左右方向のスライダ、その可動部分に前後方向のスライダ、更にその可動部分に上下方向のスライダを組む。更に、上下方向スライダの下端に図3のような水平方向と垂直方向の回転関節を介してスタイラス握り部を取り付ける。各スライダは直流サーボモータにより制御装置からの指令で駆動される。また、ロータリーエンコーダで位置情報を制御装置に伝える。各回転関節の回転角度はポテンシオメータで読み取る。各軸スライダの位置分解能は±0.1 mm、回転角度分解能は12ビットA-D変換器使用時で0.12°である。

操作者がどの方向にスタイラスを動かそうとしているかを検出するため、上下スライダ下端の回転関節支持部に応力センサがある。この応力センサは、図4のような形状の厚さ約3 mmの塩化ビニール板の両面に、図示のようにピエゾ抵抗効果を利用したひずみゲージを張り付けたものである。スライダの左右、前後および上下の移動情報が独立に検出できるような構造になっている。上下方向検出用ひずみゲージ  $a_1, a_2$  (上面) および  $a_1', a_2'$  (下面) は図5(a)のようにブリッジ接続する。左右および前後検出用ひずみゲージ  $b_1, b_2, b_1', b_2'$



(a) A case of upward stress. (b) A case of left-right or front-rear stress.

図6 応力検出板におけるひずみの集中

Fig. 6 Strain concentration on the stress sensing board.

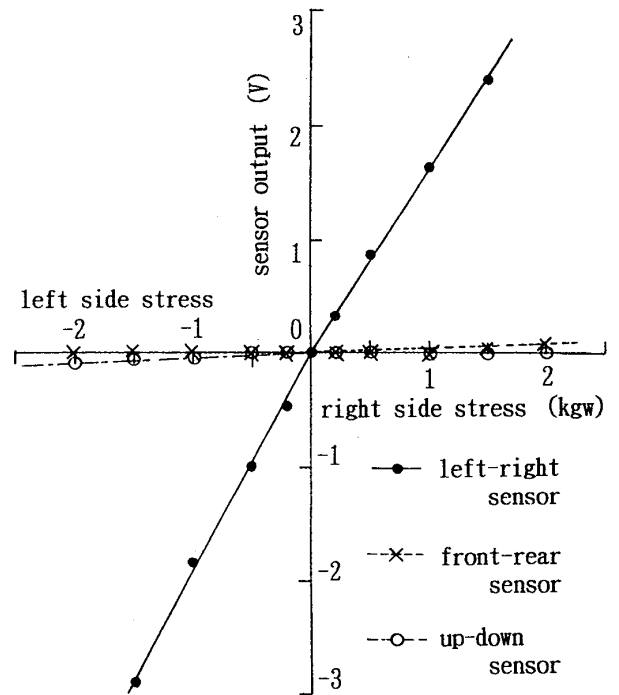


図7 左右方向に力を加えたときのセンサ出力

Fig. 7 The sensor output at impressed left and right side stress.

および  $c_1, c_2, c_1', c_2'$  は同図(b)のように接続する。この構造により、図6のようなひずみ(誇張して表示してある)に対して、各方向独立に、相互のクロストークを抑圧した出力が得られる。

各ブリッジ出力データを増幅し、A-D変換をして駆動制御CPUへ送る。ノイズやドリフトの影響を除去するため、印加した力に対する最小分解能を、前後左右方向で50 gw、上下方向で150 gwとした。左右方向に力を加えた場合の各軸のセンサ出力を図7に示す。軸間のクロストークは-40 dB以上で、実用範囲で加えた力にほぼ正比例した出力が得られた。他の軸方向に対しても同様の傾向が得られた。また3軸以外の方向

に力を加えた場合は、3軸方向の分力に対応した出力が得られる。各軸方向のブリッジ出力が一定のしきい値を超えた場合に、その軸のスライダを駆動する。またブリッジ出力値に応じて速度を制御する。

### 3.4 仮想先端部の姿勢制御

あらかじめスタイラス先端の形状をスタイラス定義座標系  $PQR$  で定義しておく。回転関節の回転中心が  $PQR$  座標の原点に、また先端点が  $R$  軸上  $r=d$  の位置になるように定義する。

スタイラス握り部の位置をスクリーン座標系  $XYZ$  上で求める。  $XYZ$  座標は、原点をスクリーン中央点、  $X$  軸、  $Y$  軸をそれぞれスクリーンの水平、垂直軸方向、  $Z$  軸をスクリーン面法線方向にとる。握り部回転関節の回転中心のスクリーン座標値  $C(x_c, y_c, z_c)$  は3軸のスライダの位置から求める。回転関節の水平面内回転角を  $\lambda$ 、垂直面内回転角を  $\mu$  とし、各回転軸に取り付けたポテンシオメータによって読み取る。

$PQR$  座標系から  $XYZ$  座標系へのアフィン変換は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_c \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_c \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

但し、

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\lambda, & a_{12} &= -\sin\lambda\cos\mu, & a_{13} &= \sin\lambda\cos\mu, \\ a_{21} &= 0, & a_{22} &= \cos\mu, & a_{23} &= \sin\mu, \\ a_{31} &= \sin\lambda, & a_{32} &= \cos\lambda\sin\mu, & a_{33} &= -\cos\lambda\sin\mu \end{aligned}$$

である。スタイラス握り部の姿勢変化に伴って、これらの変換係数の更新を行う。

スタイラス先端部形状をボクセルチェーンで定義した場合は差分座標に対する変換となり、隣接ボクセル間の差分  $p_a, q_a, r_a$  は  $1, 0, -1$  のいずれかの値しかとらないので式(1)は単なる座標変換係数の加減算になる<sup>(2)</sup>。変換された差分座標値を順次積算することにより、各ボクセルの絶対座標値が得られる。

アフィン変換により得られた座標点  $(x_j, y_j, z_j)$  をスクリーン面座標値  $(x'_j, y'_j)$  へ透視投影変換するため、前述の両眼位置計測装置で得られたデータを用いる。目の位置の  $XYZ$  座標を  $(x_E, y_E, z_E)$  とすれば、

$$\kappa = z_E / (z_E - z_j) \quad (2)$$

とすると、スクリーン面座標値は、

$$\begin{cases} x'_j = \kappa(x_j - x_E) + x_E \\ y'_j = \kappa(y_j - y_E) + y_E \end{cases} \quad (3)$$

となる。定期的に計測される両眼位置に対して、透視

投影像を左右独立のフレームメモリ上に生成し、液晶シャッター眼鏡に同期して左眼用と右眼用の像を切り替えてスクリーンに表示することにより、運動視差を伴った両眼視立体像が得られる。仮想先端部は握り部の動きと両眼位置の変化に応じて実物と同様に表示されるので、直接的な操作感覚が得られる。また、握り部の位置と姿勢の計測誤差は、握り部と仮想先端部との接続部分に生じるが、操作者は主に先端を注視しているため、誤差の存在はほとんど感知されない。

## 4. 接触判定と触覚生成

### 4.1 接触判定法

実際の物体の操作では視覚だけでなく触覚からもさまざまな情報を得ている。特に精密な操作が要求される場合には、触覚に頼る場合が多い。スタイラスの仮想先端が仮想物体表面に触れたときに触覚が伝達されると相互の位置関係の把握が容易になる。

仮想物体を実空間上の道具で直接操作する場合、道具と仮想物体の接触を直接判定する必要がある。この場合、道具の位置、姿勢、移動方向を計測し、道具と仮想物体相互の形状を考慮して幾何学的に接触の有無を判定する。物体形状が簡単な関数で定義されている場合はスタイラス先端の1点点との接触の有無を比較的簡単に求めることができるが、自由形状の表現や変形処理のため形状をポリゴンやボクセルチェーンで定義した場合には演算量が多く実時間化が困難である。

仮想先端スタイラスの場合、接触部分が被操作物体と同じ仮想空間上にあり、スクリーンに描画されるので、描画機構を利用した接触判定ができる。本システムでは  $Z$  バッファ法による隠面消去方式を用いている。スクリーンの画素ごとに  $Z$  バッファと呼ぶメモリ領域を用意し、その画素に投影された物体上の点までの奥行き値 ( $Z$  値) を記憶する。その際に、既に記憶済みの  $Z$  値と比較を行い、手前にあるデータだけを残すことによって、隠面消去された画像を生成する。

操作者は被操作部分とスタイラスの両方が見える状態で操作を行うことが多いので、スタイラスと物体の接触判定を画面上で行うことができる。被操作物体を含む仮想空間上の諸物体を先に描画した後、スタイラス先端部を描画する。先端部描画時の  $Z$  値検査で、既に描画されている物体の  $Z$  値に等しいか奥に入り込んでいる場合に、先端が物体に接触したとみなすことができる。描画装置では、運動視差表現のため1画面の描画処理を最大 50 mS 程度の周期で実行し、接触判定

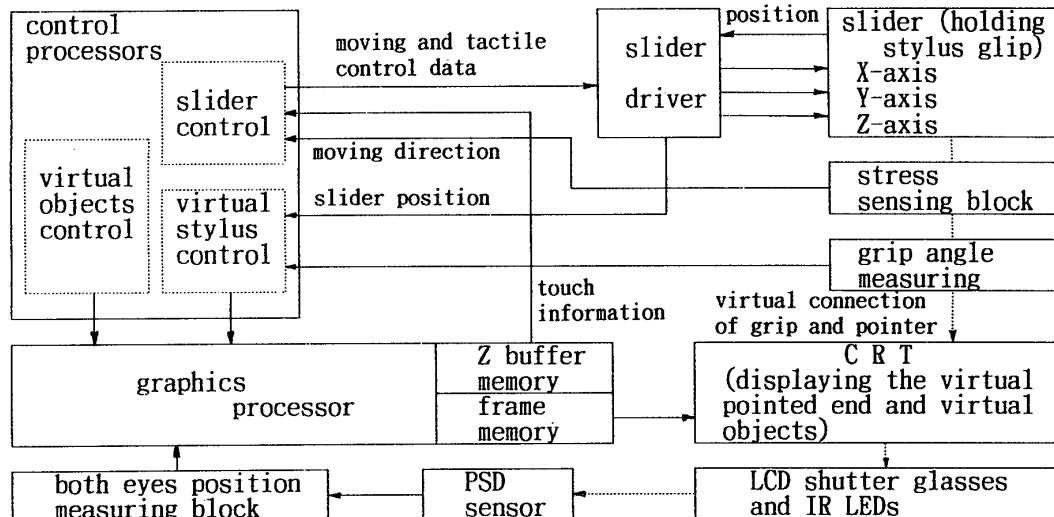


図8 仮想物体操作システムの制御ブロック図

Fig. 8 Control block diagram of the virtual object handling system.

もこの周期で行われるので、操作速度に対する実時間条件を十分満足する。

この方法は、スタイラス先端と被操作物体表面間の接触判定だけでなく、スタイラス先端に物体を接続して移動した場合、移動物体と周辺の物体との接触判定にも利用できる。周辺の物体を先に描画し、その後移動物体を描画してZ値検査による接触判定を行う。画面に表示されている部分の判定であれば、複雑な形状の物体同士の接触でも実時間判定が可能である。複雑な形状同士が画面に現れない部分で接触する場合にも正しく判定するには、描画用Zバッファではなく、スタイラス移動方向を奥行き軸とした接触判定専用のバッファメモリ機構を用いるとよい。現在その実時間制御法などを検討中である。また、接触の有無の判定だけでなく、移動物体と固定物体相互の接触部位の実時間読取り法も検討中である。

#### 4.2 触覚生成法

接触したと判定された場合、スタイラス先端が被操作物体内部に入り込まないように、握り部を支持しているスライダの動きを制御して、疑似的な触覚を生成する。このような単純な触覚でも、位置関係把握上重要な手掛りとなり、精密な操作が容易になる。

触覚生成制御系の構成を図8に示す。操作者の意図するスタイラス移動方向と力の大きさを応力検出板で検出し、制御用プロセッサで読み取って、X、Y、Z3軸のスライダの移動方向と速度を制御する。その結果得られるスライダ位置情報と、回転関節部ポテンシオメータから得られるスタイラス姿勢情報を制御用プロ

セッサで読み取って式(1)の先端部描画用の座標変換係数を求め、グラフィックスプロセッサに送る。グラフィックスプロセッサでは、両眼位置計測装置のデータから式(2)の投影変換係数を求め、式(3)の演算により先端部の描画像をフレームメモリに生成する。このとき、Z値検査による接触判定を行う。判定結果を割込みで制御用プロセッサに送り、スライダを制御して触覚を生成する。

試作システムでは、慣性の影響で先端が物体表面で止まらず、物体の内部に入り込むなどの誤差を生じることがある。そこで、先端の移動速度と方向から接触点を線形予測し、その距離に応じて移動速度を制御している。すなわち、式(3)から得られる先端座標値

$$\left. \begin{aligned} x_s &= x_c + d \sin \lambda \cos \mu \\ y_s &= y_c + d \sin \mu \\ z_s &= z_c - d \cos \lambda \cos \mu \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

に移動予測ベクトル

$$x_v = g x_n, \quad y_v = g y_n, \quad z_v = g z_n \quad (5)$$

を加えて得られる座標点を求める。ここで、 $x_n$ 、 $y_n$ 、 $z_n$ はスタイラス移動方向を示す単位ベクトル、 $g$ は移動速度に依存する予測係数である。この点のスクリーン上への透視投影座標におけるZ値比較により移動速度を決定している。

接触部分の被操作物体面の接平面または法線方向を操作実時間で得ることができれば、単に触れたという情報だけでなく、スタイラス先端を物体表面に沿って移動させ、触覚で物体形状を認識する作業が可能になる。また、表面の滑らかさなど触覚上の質感の表現も

可能と思われる。現在、これらの実時間処理法を検討中である。

## 5. 操作感覚の評価

仮想先端の採用によりスタイラス先端と物体間の位置関係の視覚的誤差を除去することができたが、握り部と先端部の接続部分に誤差が残る。この影響も含めた総合的な操作性を評価するため、①仮想先端をもつ3次元スタイラス、②先端部を実物にしたスタイラス、③仮想先端をジョイスティックで制御する方式の3方法の比較実験を行った。

操作者の眼の前方約40 cmに1辺3 mmの微小正方形平面をスクリーン面に平行に表示する。スタイラス先端がこの正方形の手前右上約15 cmの位置にある状態から出発して、先端で正方形に触れるまでの所要時間を計測する。①②は先端が触れると触覚が生成される。③は接触を音で知らせる。接触判定は①③ではZバッファ法で、②では直接計算で行う。慣れによる影響を排除するため、5分間隔で1回ずつ各々20回の試行を行い所要時間の平均を求めた。その結果、①1.7秒、②8.4秒、③3.2秒を得て①の有効性が確認できた。①ではほぼ最短距離の移動で目標に達することができるが、②では実先端と仮想空間上の先端座標が誤差をもつので、誤差分だけずれた見えない目標を探す必要がある。③ではジョイスティックと仮想先端部の動きの関係を把握する時間が必要になる。

①では先端点だけでなく軸部の接触についてもZバッファ法で正確な触覚が得られる。しかし、接触後のスタイラスの動きを物体形状に応じて制約するための制御の必要性を感じた。実現のためには接触部分の双方の面の法線データなどを必要とする。

スタイラスの長さ(図3の $d$ )を30 cmとしたので、この長さの棒で操作するような感覚になる。指先の動きが先端では約3倍に拡大されるが、先端部の動きを見ながら操作するので支障は感じなかった。

触覚生成の式(5)の予測係数 $g$ はスタイラスの移動速度が2 cm/秒以下のとき $g=0$ 、2 cm/秒を超えたとき $g=0.25$ とし、予測点が目標点を超えたとき2 cm/秒以下に減速している。速度が2 cm/秒を超えていると目標点の手前で減速による抵抗を感じるが、一般に先端が目標点に近づくと操作者自身が減速を行うので予測点が目標点を超える時には2 cm/秒以下になっている場合が多く、違和感を感じることは少ない。

スタイラス握り部には姿勢保持機構があるので重量

は感じないが、長時間の使用に対して腕を支えるための疲労を感じる。疲労を与えない構造について更に検討を要する。

## 6. むすび

高性能な仮想物体操作実現のため、以下の問題を解決した。

観察者両眼位置計測にPSDを利用した測定法を採用し、測定時間の大幅な短縮を実現した。その結果、運動視差表現に必要な許容遅延時間の大部分を3次元シーンの描画処理時間に充てることが可能になり、より精巧な仮想物体表現に寄与することができた。

仮想物体操作ツールとして仮想先端をもつスタイラスを開発した。握り部を駆動機構に取り付け、そこから得られる位置と姿勢データによって、仮想先端部が握り部と一体に見えるように表示制御を行う方式とした。この構造によって、直接的な操作感覚が得られる、先端と被操作物体間の座標誤差を感じないので精密な操作に適する、接触判定と触覚生成が容易などの特長が得られた。更に、この構造を活用して実時間接触判定を実現した。Zバッファの原理を応用して、複雑な形状の物体に対する接触判定を操作実時間で行い、触覚を生成することに成功した。

あたかも実際の物体を操作しているような仮想物体操作の実現までには、まだ以下のように多くの課題がある。

仮想環境表示の問題として、複雑で精巧な仮想物体の良好な運動視差表現ができる高速グラフィックスプロセッサの開発が必要である。単に運動視差表現だけでなく、変形など仮想物体操作に適した処理を実現する方法や、スタイラス先端の仮想の道具の動きとグラフィックス処理を結合して彫刻や彩色などのリアルな操作感覚を生成する方法なども課題である。

接触判定に関しては、Zバッファとは別に、スタイラスの移動方向を奥行き軸とした接触判定専用のバッファを設けた方がよい。複雑な形状の物体同士が接触した場合の、接触部位特定の実時間化などの問題もある。触覚生成に関しても、単に接触したことを伝えるだけでなく、触覚による形状把握や物体表面の質感把握が操作実時間でできることが望ましい。

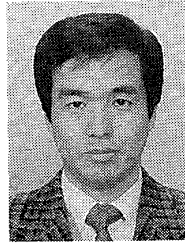
課題は多く残されているが、仮想先端をもつスタイラスがこれらの問題の解決の糸口になるものと考えられる。

なお、本研究は文部省科学研究費(課題番号

03650297)の交付を受けて実施した。

### 文 献

- (1) 佐藤隆宣, 伴野 明, 岸野文郎: “運動視差表示の遅延による仮想空間操作への影響”, テレビ学技報, **14**, 68, pp. 1-6 (1990).
- (2) 石井郁夫, 五十嵐透, 大和淳二, 牧野秀夫: “視点移動に追従するステレオ像表示の一方法”, 信学論(D-II), **J72-D-II**, 9, pp. 1348-1355 (1989-09).
- (3) MCDONNELL DOUGLAS 社, 3D Digitizer カタログ: 日商エレクトロニクス.
- (4) CWAN van Overveld: “Application of a perspective cursor as a 3D locator device”, Computer Aided Design, **21**, 10, pp. 618-629 (1989).
- (5) 坂本英男, 加藤敏春, 岸本和一郎, 多田幸生, 村上明: “靴用 CAD システムにおける 3次元カーソル機能の開発”, 情処学論, **29**, 12, pp. 1151-1157 (1988).
- (6) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘: “仮想空間操作のためのインタフェースデバイス—SPIDAR”, 信学技報, **89**, 109, pp. 87-94 (1989).
- (7) 石井郁夫, 牧野秀夫: “視点移動追従型 3次元スタイラスによる仮想物体の操作”, 平 3 連大, **S16-5** (1991).
- (8) Iwata H.: “Artificial Reality with Force-Feedback Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator”, Computer Graphics, SIGGRAPH'90, **24**, 4, pp. 165-170 (1990).
- (9) 竹村治雄, 伴野 明, 岸野文郎: “ステレオグラフィックスを用いた仮想操作環境について”, 情処学グラフィックスと CAD 研報, **90**, 19, 43-6 (1990).
- (10) Mcmillan, T.: “3D Digitizing”, Computer Graphics World, **12**, 1, pp. 45-50 (1989).
- (11) 大面積 PSD データシート: 浜松ホトニクス.  
(平成 4 年 8 月 27 日受付, 5 年 1 月 8 日再受付)



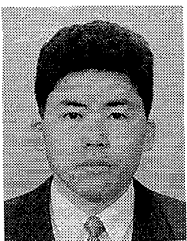
牧野 秀夫

昭 51 新潟大・工・電子卒, 昭 53 同大大学院修士課程了, 昭 54 同大・情報・助手, 平 2 同助教授, 現在に至る。平 1 より 1 年間カナダ・トロント大にて生体信号処理の研究に従事。最近は, 植込み型医用機器, 福祉機器, 人工現実感, 画像処理などの研究を行っている。工博。日本 ME 学会, IEEE 会員。



石井 郁夫

昭 38 新潟大・工・電気卒, 同大・電子助手, 助教授を経て現在同大・情報・教授。この間, 電子回路, 画像・図形処理等の研究に従事。現在, 人工現実感, 立体視, グラフィックスプロセッサ, 画像・図形処理装置などの研究を行っている。工博(東工大)。情報処理学会会員。



柄沢 達明

平 2 新潟大・工・情報卒, 平 4 同大大学院修士課程了。同年 4 月より(株)東芝, 柳町工場画像情報機器部に勤務。修士課程在籍中人工現実感の研究に従事。現在, 画像ファイル装置の開発を行っている。