講 義

バーチャルリアリティの要素技術 II*

佐 藤 誠**

Elementary Techniques for Virtual Reality II

Makoto SATO

1. はじめに

MIT の Zeltzer¹⁾ は、バーチャルリアリティを実現するための三つの基本要素として、自律性 (Autonomy)、インタラクション (Interaction)、プレゼンス (Presence) の三つの要素を取り上げ、これを AIP キューブと呼んでいる (図1)。

例えば、仮想積木の世界を考えてみることにしよう。仮想積木の世界が現実感をもつためには、まず、実世界の積木に近い情景が眼前にディスプレイされなければならない。仮想世界のディスプレイがすなわちプレゼンスである。これは、何も視覚ディスプレイに限ることはない。積木どうしだぶつかった時に出る音や、積木をつかんだときの触覚などのディスプレイも含んでいる。つぎに、仮想世界の積木を持ち上げようとしたら、実世界と同様に、速やかに仮想の積木は持ち上がらなければならない。このように仮想世界のオブジェクトと人間とが自然に相互関係を持てること、これがインタラクションである。自律性とは、個々の積木というオブジェクトが自律的に動けるか、ということである。積木を空中で離せば、積木は自ら床の上に落ちて静止する。これは、積木が物理法則に基づいてエネルギーの安定状態に自律的に動いたためである。

理想的なバーチャルリアリティは図1の○印に示すように、この三つの要素がすべて十分に満足された場合である。実際のシステムは、このキュー

ブの内部のどこかにプロットされる。できるだけ○印に近づくように、システムを構成しなければならない。

本稿では、この三つの要素の一つである、インタラクションを実現するための要素技術である、人間の動作のセンシングについてみてみることにしよう。インタラクションがうまく実現するためには、人間が仮想世界にどのような働きかけを行おうとしているかをすばやく、しかも正確にシステムは知る必要がある。このためには、人間の身体の動作をセンシングする必要がある。身体の動作にもさまざまなあるが、ここでは、空間のポインティングと手の動作について、取り上げることにしたい。

2. 空間のポインティング

仮想空間へのインタラクションのもっとも基本的な操作は、3次元空間のポインティングである。仮想空間の数多くのオブジェクトの中の一つのオブジェクトを指定したり、そのオブジェクトの移

図1 Zeltzer の AIP キューブ

*原稿受付 1994年3月28日

**東京工業大学 精密工学研究所

動先を指示したりするとき、このポインティング操作が使われる。3次元空間をポインティングするためには、空間座標の三つの値 x, y, z を何らかの方法で操作者の手の指先の動きから計測する必要がある。

指定したオブジェクトを移動するだけでなく、その姿勢を変える必要がある場合には、単なるポインティングだけでなく、指先に付けられたポインタの姿勢も計測する必要がある。この場合は、位置座標 (x, y, z) とともに姿勢角 (θ, ϕ, ω) を求めなければならない。位置座標 (x, y, z) と姿勢角 (θ, ϕ, ω) の定義は、図2に示す²⁾。

操作者のポインティング操作をセンシングするための方法について試みることにしよう。

2.1 磁気を用いた方法

Polhemus 社の ISOTRAK あるいは FASTRAK と呼ばれるポインティングセンサがすでに商品化されており、仮想環境システムの多くに利用されている。これらのセンサは、磁気を利用した方法である。

この方法では、図3に示すように、仮想空間に磁界を放射する発信素子と、その磁界を読み取る小コイルのセンサとから成る。発信素子は仮想環境の操作の妨げにならない位置に固定し、仮想環境に一定の磁気勾配をもつ磁界を発生する。空間位置センサは、この磁束密度を計測するための互いに直交する三つの小コイルから成る。磁界を発生した際に、これらの小コイルに発生する起電力

図2 3次元空間の位置 (x, y, z) と姿勢角 (θ, ϕ, ω)

図3 磁気を用いた空間センサ (Polhemus 社)

を測定することにより、その空間位置センサの位置 (x, y, z) と姿勢角 (θ, ϕ, ω) が求められる。

FASTRAK の場合、半径 75 cm の球内において、空間内の位置と姿勢をそれぞれ 0.8 mm, 0.15° の精度で、毎秒120回サンプリングすることができる。後述する光センサや音響センサに異なり、いわゆる観測の死角が生じない点が利点であるが、その反面、環境内の金属物体が磁界を歪める可能性があり、測定誤差につながる。近年の磁気センサの改良は著しく、ロバストで安定したセンサとして広く使用されている。

2.2 音響を用いた方法

音響センサによる位置計測では、環境内の発信源の位置を、三角測量により行う。音響信号としては、高周波の超音波が使われる。超音波発信子から発せられた超音波パルスが受信マイクで受信されるまでの時間遅れを Δt とすると、発信子と受信マイクとの距離 Δx は、 $\Delta x = v \cdot \Delta t$ のように求められる。ただし、 v は音速である。操作環境内に三つの受信マイクを設置し、発信子との距離を求めることにより、その空間位置が与えられる。超音波による空間位置センサの具体例を図4に示す。

2.3 光を用いた方法

ポインタに赤外線 LED あるいは、小さな赤外線反射鏡を取り付け、この小さなマーカの動きを周囲の二つ、またはそれ以上のカメラによって追跡し、三角測量の原理で位置計測を行うのが光を用いた方法である。

バイオメカニクスあるいはリハビリテーションの分野においては、従来から人間の身体や関節の動きを解析する必要から、この光を用いた方法が用いられてきた。身体に、赤外線 LED または反射鏡のマーカを複数取り付け、その動きを複数

図4 超音波による空間位置センサ (VPL)

のカメラで追跡することにより、身体の動きを解析することができる。

最近では、コンピュータグラフィックスにおいて人間の形状モデルを自然に動かし、アニメーションを作成するために、この解析手法が用いられている。モーションキャプチャという名前で、実用化されている。

これらの手法では、いくつかのカメラからの入力画像を解析し、マーカの3次元位置を決定しなければならず、かなりの解析時間が必要となり、実時間計測が一般には困難である。このため、主にパッチモードに利用されてきた。しかし、画像処理技術の高速化や、位置計測素子 PSD (Position Sensing Device) の利用により、実時間計測の可能な計測システムも開発されており、仮想空間のインタラクティブな操作にも適用可能になってきている。

3次元のポインタとして光によるセンサを商品化したものとして、Digital Stream 社の DS C3-D マウスがある²⁾。このセンサは図5に示すように、ペン先にバッテリー駆動の LED を取り付け、これを受光部で追跡するものであり、非常に簡便な構成となっている。

2.4 リンク機構による方法

多自由度のリンク機構の先端をポインタとして、各リンクの間の関節角を測定することにより、機械的に空間位置を求めることが可能である。従来から精密機械における3次元座標測定機では、このような機械的な測定方法が用いられてきた。こ

図5 Digital Stream 社の三次元ポインタ²⁾

の測定方法は極めて高精度の座標計測が可能であるが、この方法を仮想環境のポインティングの入力装置として用いることが考えられる。図6にその例を示す。ヒューマンインターフェースの立場からみたリンク機構による方法の問題点は、ポインタにつながる機構部品を動かす必要があることによる拘束感の増大である。物理的にリンクを動かさねばならないという物理的拘束感と、周囲に機械部品がまつわり付くという心理的拘束感の二つが考えられる。これらの拘束感を軽減するための工夫が、いろいろと提案されている。東大先端研の館ら³⁾は、リンク構造にカウンタフェイトを設け、重力補償機構を付けることにより、操作性の向上を計る工夫を行っている。

2.5 糸による方法

空間位置のポインティングのもう一つの方法として、糸を使用する方法がある。佐藤ら⁴⁾が提案している空間インターフェース装置 SPIDAR においては、指先のポインタが図7に示すように、立方体の四つの支点から4本の糸により吊られている。ポインタの空間座標は、これらの4本の糸の支点からポインタまでの長さを計測することにより比較的容易に計算することができる。

ポインタの座標を (x, y, z) 、四つの支点の座標を (a_i, b_i, c_i) $i=0\sim3$ 、それぞれの糸の長さを

図6 リンク機構による3次元入力装置

$l_i, i=0\sim3$ とすれば、次式が成り立つ。

$$\begin{cases} (x-a_0)^2+(y-b_0)^2+(z-c_0)^2=l_0^2 \\ (x-a_1)^2+(y-b_1)^2+(z-c_1)^2=l_1^2 \\ (x-a_2)^2+(y-b_2)^2+(z-c_2)^2=l_2^2 \\ (x-a_3)^2+(y-b_3)^2+(z-c_3)^2=l_3^2 \end{cases}$$

隣り合う二つの式の差をとることにより、次式が得られる。

$$\begin{cases} (a_1-a_0)x+(b_1-b_0)y+(c_1-c_0)z=L_1-L_0 \\ (a_2-a_1)x+(b_2-b_1)y+(c_2-c_1)z=L_2-L_1 \\ (a_3-a_2)x+(b_3-b_2)y+(c_3-c_2)z=L_3-L_2 \end{cases}$$

ただし

$$L_i=(a_i^2+b_i^2+c_i^2-l_i^2)/2, i=0\sim3$$

これらの式は、 x, y, z に関する連立一次方程式であるから、この方程式を解くことにより、位置座標 (x, y, z) が求まる。

糸を用いた空間座標ポイントのもう一例を紹介しよう⁵⁾。図8に示すように、この座標検出装置では、1本の糸が使われている。マイクロスイッチの付いたポイントは1本の糸により吊られている。糸はシリンダにより巻き取られており、ポイントを空間的に動かしたときの糸の長さはシリンダの回転角をロータリエンコーダで測定することにより求まる。ポイントの座標を決定するには、糸の方向が求まればよい。この装置では、糸の方向を計測するために、直交する二つのラインセンサを用い、図に示すようにして糸の方向を測定している。

以上、みてきたように、3次元空間における位置座標のセンシング方法については、さまざまな方法が提案されている。指先に何も装着を行わずに、しかも精度良く

図7 空間インタフェース装置 SPIDAR における空間位置計測

その位置座標を求めることができるような理想的なセンシングの方法は存在しない。それぞれの方法が、一長一短をもっている。構築すべき仮想空間の特徴に合わせて、センシングの方法を選択する必要がある。

3. 手の動作のセンシング

3.1 グローブデバイス

仮想環境へのもっとも自然なインタフェースの一つは、操作者の手の動きによる直接操作である。このためには、指先や掌を含めた手の動作をリアルタイムで計測しなければならないが、そのセンシングデバイスとしてさまざまなグローブデバイスが提案されている。中でも、1987年、T. Zimmerman らによって開発された DataGlove は有名であり、広く利用されている。ここでは、1983年に Bell 研究所の G. Grimes によって開発されたデータ入力用グローブを紹介することにしよう⁶⁾。

米国の手話においては、図9に示すように片手の動作により、アルファベット A～Z および数字 0～9 を表現する。この手の動作を英数字アルファベットの信号に変換する装置として、Grimes は図10のようなデータ入力用グローブを開発した。グローブの指先、指の中程の腹には、タッチセンサが取り付けられている。また、指関節の曲りを検出するための曲げセンサが親指や人差し指

図8 糸を用いた3次元座標検出装置 (キャノン)

に付けられている。これらの曲げセンサは図11に示すような光センサである。発光ダイオードaからの光の量を光センサbで検出する。指が曲がるとガイドcを通じて導びかれる光量が減り、これにより指の曲りを計測することができる。このような光センシングの考えが、DataGloveの光ファイバの利用に受け継がれたものと考えられる。グローブの各所のタッチセンサと曲げセンサの

出力の組み合わせにより、手の動作の大半を識別することができる。しかし、アルファベットのJやZ（図9）などは、手の動的な動きを計測する必要があり、このためのセンサとして、さらに水銀スイッチによる傾斜センサdや慣性センサeが取り付けられている。さまざまなセンサの検出パターンは組合せ回路により識別され、アルファベットの信号が出力される。

図9 手動作によるアルファベット

図10 データ入力用グローブ (Grimes)

図11 指の曲げセンサ (Grimes)

Grimes のグローブは、手動作によるアルファベット入力にインタフェース機能が限定されており、手の動きの幾何学的情報を入力することはできないが、DataGlove の前身として興味深いデバイスと言えよう。

手の動作入力デバイスとして、グローブに類似した装置に、1989年にユタ大で開発された Dexterous Hand Master (DHM) がある⁷⁾。これは図12に示すように、外骨格状のデバイスを指にはめるものである。外骨格の各ジョイントの角度を計測するためにホール効果素子を用いることにより、各指の三つの関節の曲りを正確に測定することができる。装着に多少手間取ること、軽量でないことなどの問題点はあるものの、DataGlove に比べて指の動きの測定精度が高いため、細かい動きの操作に適した入力デバイスである。

現在、もっとも広く用いられているグローブデバイスは、指の曲げ計測のために曲げセンサとして光ファイバを用いた DataGlove である (図13)²⁾。データに縫い付けられた光ファイバに伝わる光が指の曲げの程度に応じて減衰することを利用している。DataGlove では、手の位置を計測するために、手の甲に Polhemus の位置センサが併用されている。

DataGlove の各関節の回転角の精度は約1度といわれているが、実際には、5～10度の精度であり、簡単な手によるトラッキングやジェスチャならば十分であるが、細かなマニピュレーションや複雑なジェスチャのためには、センサの精度

図12 Exos の Dexterous Hand Master⁷⁾

図13 光ファイバを用いた DataGlove の構造²⁾

は必ずしも十分ではない。また、センサの測定速度は約 30 Hz であり、素早い手の動作には、やはり若干不十分である。

3.2 画像解析によるセンシング

グローブデバイスのようなデバイスを装着せずに手の動きをセンシングできれば、仮想環境との理想的なインタラクションが可能となると考えられる。このための一つのアプローチが画像解析による手の動作のセンシングがある。

実は、20年以上も前に、Myron Krueger は、すでに画像解析による自然な計算機とのインタラクションを行うシステムを開発している⁸⁾。彼は、人間の身体のシルエット画像を2値画像として解析することにより、専用のハードウェアを用いずに複雑な動作を実時間でセンシングすることに成功している。1つの具体例として、手の直接操作によるスプライン曲線のモデリングを紹介しよう。図14に示すように、システムは操作者の両手のシルエット画像を入力して、それぞれの手の親指と人差し指の位置を求める。この位置情報に基づいて、両手の間に自然に納まるようにスプライン曲線のパラメータを調整する。この処理を実時間で実行することにより、操作者は両手で自由にスプライン曲線を変形し、モデリングすることができる。Krueger の開発したインタラクティブな仮想環境は Videoplace と呼ばれている。

Krueger が行ったように、画像解析による手の動作センシングは極めて魅力的な方法である。しかし、画像解析による手の動きのセンシングには、次のような技術的問題点がある⁷⁾。

図14 シルエット画像による直接操作
(Myron Krueger)

1. 指先の動きを解析し、しかも広範囲の手の動きを捕える視野を解析するためには、通常のビデオカメラの解像度は低過ぎる。
2. 素早い手の動きを捕えるためには、毎秒30フレームのビデオ技術は不十分である。
3. 指の動きのトラッキングは画像解析として容易でない。特に指同士や指と掌の間のオクルージョンの解析は難しい。
4. 複雑な視覚パターンの解析を実時間で行うのは、容易ではない。

ビデオ技術や画像処理技術の高性能化、高精度化に伴い、部分的ではあるが上記の問題点も解決されつつある。我国においては、ATR 通信システム研究所などで、画像解析による手の動作の実時間センシングのシステムが研究開発されており、期待がもたれている。

4. おわりに

バーチャルリアリティの実現のための基本要素の一つであるインタラクションのためには、仮想世界に入り込む人間の動作を実時間でセンシング

する技術が必要である。本稿では、特にポイントの空間位置のセンシングと手の動作のセンシングにしばって、開発、実用化されているいくつかの要素技術について紹介した。人間の動作には、このほかにも、頭部の動きや歩行動作などさまざまな動作があり、これらについてもセンシングの方法が工夫され、開発されている。

バーチャルリアリティのためのセンシング技術がほかのセンシング技術と大きく違う点は、単にセンシングの計測精度だけが問題なのではなく、ヒューマンインタフェースとして優れていることが必要なことである。バーチャルリアリティのためのセンシング装置は、シンプル (simple) でスムーズ (smooth) でしかも速やか (speedy) でなければならない。これら三つのSをバランスよく満足するようなセンシング技術を今後も開発してゆく必要があるだろう。

参考文献

- 1) D. Zeltzer : Autonomy, Interaction and Presence, PRESENCE, vol 1, no 1, pp. 127-132 (1992)
- 2) 廣瀬通孝: バーチャル・リアリティ, 産業図書 (1993)
- 3) 館, 廣瀬: バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会 (1992)
- 4) 佐藤, 平田, 河原田: 空間インターフェース装置SPIDARの提案, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J74-D-II, No. 7, pp. 887-894 (1991)
- 5) キャノン: 3次元座標検出装置, 特開 昭61-38410
- 6) G. J. Grimes: Digital Data Entry Glove Interface Device, Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, N. J., US Patent 4, 414, 537, Nov. 8 (1983).
- 7) D. J. Sturma, D. Zeltzer: A Survey of Glove-based Input, IEEE CG & A, Vol. 14, No. 1, pp. 30-39 (Jan. 1994)
- 8) M.W. Krueger: Artificial Reality, 2nded., Addison-Wesley, Reading, Mass. (1990)