

仮想空間のための前庭感覚表現手法

広田光一 杉田雄一郎 廣瀬通孝

東京大学 工学部 機械情報工学科

前庭感覚に対する情報提示を可能とする仮想空間の試作について述べる。前庭感覚は頭部の動き
の速度および加速度の大きさを受容する感覚であり、これに対する情報提示は、モーションベッド
を利用して人間の体に運動を与えることで実現される。前庭感覚は乗物を利用した移動などに
おける運動の感覚の表現に不可欠であるが、モーションベッドのテーブルのストロークは乗物の運
動範囲に比べて小さいため、乗物の運動モデルより求まる並進加速度をそのまま表現する
ことができない。本研究では、モーションベッドを利用して、ウォッシュアウト、ウォッシュバック
などの手法により並進加速度を近似的に表現するアルゴリズムの試作について論じる。また、
これによる加速度と視覚情報とを統合的に提示する枠組みの実現について論じる。

Development of Artificial Sensations of Acceleration in Virtual Environments

Koichi Hirota · Yuichiro Sugita Michitaka Hirose

Department of Mechano-Informatics, Faculty of Engineering, University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

The sensation of acceleration is an essential factor to passengers of vehicles in motion for
purposes of movement recognition. A three-dimensional motion simulator is often used for
purposes of generating this sensation of acceleration in virtual environments. However, the realistic
artificial generation of this acceleration is limited by the fixed location of the motion simulator
itself. Hence, long durations of acceleration cannot be easily realized. In this paper, the design
and implementation of an algorithm to convert a given acceleration input into a time-series posi-
tional output from the motion simulator is discussed. Using this method, attempted alterations
were made to better simulate and control the motion simulator. The obtained experimental
results are discussed along with areas for future research and improvement. The integration of
visual information and sensations of acceleration are also discussed.

1 はじめに

前庭感覚は、頭部の運動の速度と加速度に関する感覚である。このように頭部に運動が生じる状況は、日常生活においては乗物などの運動によって作り出される。この感覚は自動車や航空機などのような人間-機械系インタフェースの重要な要素であり、これを疑似的に提示するための枠組はシミュレータと呼ばれている。人工現実感の領域においても、このような前庭感覚の提示の技術には、仮想空間における移動の際の運動の現実感の向上や、これに伴う位置・方向感覚の改善への寄与が期待されている^[1]。

本研究では、モーションベッドを利用した前庭感情報提示の技術的基礎である加速度表現の手法に関する検討を行ない、その実現のためのアルゴリズムが試作された。また、前庭感覚と視覚との連動表現を実現するための手法に関する整理がなされ、これらに基づいて仮想世界のための移動インタフェースのプロトタイプが作成された。

2 前提感覚のシミュレーションの枠組

加速度は運動速度の変化の大きさとして定義される。実際の乗物では広い運動範囲のなかでの速度変化により加速度が生じるが、モーションベッドの可動範囲はこれに比べて非常に狭いのが普通である。したがって、乗物の運動が何らかのモデルに基づいて決定されたとしても、これをモーションベッドの運動に直接的に結び付けることはできない。すなわち、加速度の表現について考えると、与えられた乗物の運動加速度の時間変化をモーションベッドのテーブルの位置・姿勢の時間変化に変換するアルゴリズムが必要である^[2]。

一方、仮想空間の生成に視覚情報は不可欠である。視覚情報は、基本的には乗物と視覚世界との位置関係のみに依存するものである。すなわち、視覚ディスプレイがモーションベッドの上に搭載されている場合には、視覚世界における視点位置におけるディスプレイへの投影変換を行なうことになる。しかしながら、本研究で使用したシステムでは、視覚ディスプレイがモーションベッドではなく床面に固定されているため、モーションベッドの運動に伴い目とディスプレイの関係が変化する。

違和感のない視覚情報提示の実現には、この関係の変化を考慮した映像の作成が不可欠である。

3 モーションベッドによる加速度表現

3.1 モーションベッドの仕様

本研究で使用したモーションベッドは、油圧シリンダによるパラレルリンク構造のアクチュエータで構成され、これにより6自由度の運動出力が実現される。以下では、この装置の仕様について説明する。

モーションベッドの制御には姿勢に関するサーボ系が構成されており、運動の指示は目標姿勢の入力により行なわれる。したがって、滑らかな姿勢の変化は目標姿勢の時系列変化により実現される。テーブルの位置および姿勢は、 x_{mb} , y_{mb} , z_{mb} , $\theta_{x_{mb}}$, $\theta_{y_{mb}}$, $\theta_{z_{mb}}$ の指示入力に対して次のような座標変換として定義される。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{t0} &= T(x_{mb}, y_{mb}, z_{mb})R_x(\theta_{x_{mb}})R_y(\theta_{y_{mb}}) \\ &\quad R_z(\theta_{z_{mb}})\mathbf{p}_t \\ &\equiv M_{t \rightarrow t0}\mathbf{p}_t \end{aligned}$$

ここに、 \mathbf{p}_{t0} および \mathbf{p}_t はモーションベッドの中立状態および運動状態でのテーブル座標系にて表現された位置ベクトルである(図1)。

テーブルの可動範囲は、各自由度の単独変位では次のようである。

$$\begin{aligned} \text{並進:} & \quad -200 \leq x, y, z \leq 200(\text{mm}) \\ \text{回転:} & \quad -20 \leq \theta_x, \theta_y, \theta_z \leq 20(\text{deg}) \end{aligned}$$

機構の構造上、各自由度の同時的变化の際の可動範囲は自由度間で独立ではなく、上述の範囲を上回る場合も下回る場合も起こり得るが、以下の加速度表現の試みの議論の中では、複合的な変位においても上述の範囲が独立に保証されているものと仮定している。

3.2 加速度表現のアルゴリズム

モーションベッドによる加速度の表現は、はじめに述べたように、並進運動のみで行なうことは困難である。そこで、テーブルの傾倒による重力加速度成分を利用することが行なわれる。実際に

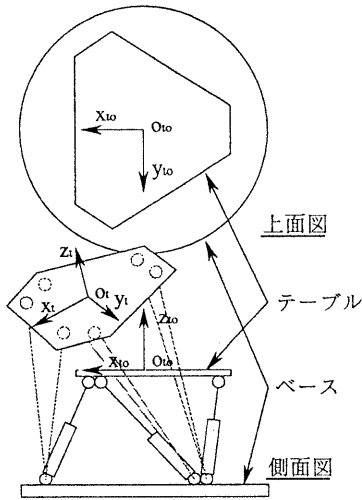


図 1: モーションベッドの座標系

はテーブルを急速に傾倒させると回転の感覚を生じてしまうため、テーブルの並進可動の範囲内で並進による加速度表現をおこないつつ、並行してテーブルを傾倒させる方法がとられる。この操作はウォッシュアウトと呼ばれる。また、次の加速動作に備えて傾倒状態でテーブルを中立に戻すことが行なわれ、これはウォッシュバックと呼ばれる。以下では、これらの手法を実現するアルゴリズムについて述べる。

上述のような操作の実現のためには、制御が(1)並進加速、(2)ウォッシュアウト、(3)減速状態、(4)ウォッシュバック、(5)中立位置の5つの状態を持つ必要がある(図2)。ある与えられた加速度に対して、並進運動による加速が表現できる範囲ではこれを行ない、これが困難になった時点から傾倒による疑似表現を行なうウォッシュアウトの操作を開始する。ウォッシュアウト終了の状態では、加速度の全てが傾倒により表現されているが、並進加速によりテーブルが得た速度は残っている。これを、人間に感じられない程度に微小な加速度で減速する。テーブルが静止した時、これは可動範囲の限界近くにあることが予想されるため、次の加速動作に備えるために減速状態の場合と同様に微小加速度でテーブルを中心位置に戻す。

各々の状態での運動の計算は、具体的には次のように行なわれる。ここに、計算は時間について

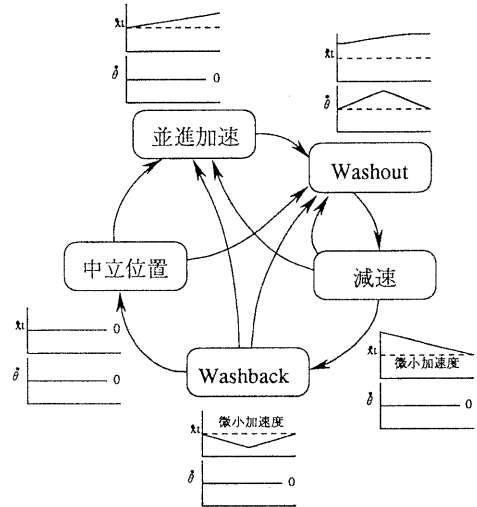


図 2: 制御の状態遷移

て離散的に行なわれ、この時間間隔は τ であるとした。これにより、以下の式では時刻 $t = n\tau$ での変数の値は添え字 n で表現される。また、前(x)方向へ1自由度の加速を想定し、これに関与する $x, z, \theta(\equiv \theta_y)$ を求めるものとする。

1. 並進加速状態

与えられた目標加速度 a について、現在の傾倒により疑似的に表現されている大きさを差し引いたものを並進加速度の目標値とし、傾倒操作は行なわない。この目標加速度はテーブル座標系で与えられるため、その姿勢を考慮して(x, z)の座標系での値を求める必要がある。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n &= \cos \theta_{n-1}(a - G/\kappa \sin \theta_{n-1}) \\ \ddot{z}_n &= -\sin \theta_{n-1}(a - G/\kappa \sin \theta_{n-1}) \\ \ddot{\theta}_n &= 0 \end{aligned}$$

ここに、 κ は定数でその意味については後述する。これをもとに、速度および位置・姿勢を求める。

$$\begin{aligned} \dot{x}_n &= \dot{x}_{n-1} + \ddot{x}_n \tau \\ x_n &= x_{n-1} + \dot{x}_n \tau + \frac{1}{2} \ddot{x}_n \tau^2 \end{aligned}$$

z および θ についても同様であり、また、他の状態においても、この計算式は共通である。

2. ウォッシュアウト状態

この状態では、加速度を傾倒により生じる重力の成分で置き換えていく。ここでは、この操作を N サイクルで完了するものとし、これに必要な角加速度でテーブルを傾倒させる。

$$\ddot{\theta}_n = \begin{cases} \ddot{\theta}_{washout} & (0 < n \leq N/2) \\ -\ddot{\theta}_{washout} & (N/2 < n \leq N) \end{cases}$$

ここに、 $\ddot{\theta}_{washout}$ はウォッシュアウトをおこなう角加速度で次のように決定される。

$$\ddot{\theta}_{washout} = \frac{4(\sin^{-1}(\kappa a/G) - \theta_0)}{(N\tau)^2}$$

また、 κ は傾倒表現の割引率である。これは、傾倒表現を計算される理論的な値で行なった場合、回転の角加速度が違和感を生じることが予想されるため、その操作を割り引くことを目的に導入されたものである。

なお、 x 方向および z 方向については、並進加速状態におけるものと同じ式で計算される。また、操作を完了するまでの時間は、後述の加速度の実測の例では、 $N = 14$ としている。

3. 減速状態

テーブルがもつ速度を微小加速度 a_{insens} で減衰させ、静止させる。微小加速度とは、理想的には人間にとって知覚することのできない程度に小さい加速度を指す。ここでは、この値として $0.3[m/sec^2]$ を用いている。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n &= -a_{insens} \cos(\theta_{n-1}) \\ \ddot{z}_n &= a_{insens} \sin(\theta_{n-1}) \\ \ddot{\theta}_n &= 0 \end{aligned}$$

この操作は、次の式で与えられる時間で完了する。

$$N = \frac{\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{z}_0^2}}{a_{insens}\tau}$$

4. ウォッシュバック状態

この状態では、テーブルを傾倒状態のまま中

心位置に微小加速度 a_{insens} で復帰させる。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n &= \begin{cases} -a_{insens} \cos(\theta_{n-1}) & (0 < n \leq N/2) \\ a_{insens} \cos(\theta_{n-1}) & (N/2 < n \leq N) \end{cases} \\ \ddot{z}_n &= \begin{cases} a_{insens} \sin(\theta_{n-1}) & (0 < n \leq N/2) \\ -a_{insens} \sin(\theta_{n-1}) & (N/2 < n \leq N) \end{cases} \\ \ddot{\theta}_n &= 0 \end{aligned}$$

この操作に要する時間は減速完了時のテーブルの原点状態からの位置 (x_0, z_0) に依存し、これは次の式で求められる。

$$N = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{4}{a_{insens}} \sqrt{x_0^2 + z_0^2}}$$

5. 中立状態

テーブルが中立位置に静止し、次の加速度変化を待っている状態である。

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= 0 \\ \ddot{z} &= 0 \\ \ddot{\theta} &= 0 \end{aligned}$$

ところで、入力である乗物の加速度は時系列的に変化するものである。したがって、テーブルが中立状態に戻ってなくても、これを反映した動作を行なうことが望ましい。そこで、減速、ウォッシュバック、中立位置の3状態においては入力加速度が変化した際には、並進加速またはウォッシュアウト状態への遷移を可能とした。なお、並進加速およびウォッシュアウト状態への遷移の可否の判定は、与えられた加速度における並進加速、ウォッシュアウト、減速の一連の操作を計算の上で行ない、操作が完了した際のテーブルの位置および姿勢が可動範囲内に入っているか否かを調べることで行なっている。また、ウォッシュアウト状態での加速度の変化の受け付けは操作によるテーブルの移動量の見積りを困難にするため、ここではこれを無視するものとした。

3.3 加速度の実測

以上のアルゴリズムに基づいて計算されるテーブルの運動と表現される加速度の観測を試みた(図

3)。ここに、計算のサイクルタイムは10[msec]、傾倒表現の割引率は $\kappa = 0.35$ とし、中立状態 ($x = z = \theta = 0$) から $2[m/sec^2]$ の加速度を表現するものとした。

テーブルが最大で4[deg]程度しか傾いていないのは、 κ の影響による。並進加速度の実測値は、振動ピックアップを用いてテーブル座標 x 方向の加速度を測定したものである。モーションベッドの固有振動数と思われるノイズが重畳しているが、立ち上がりの加速とこれに続く減速の様子は読みとることができる。

4 視覚情報の運動表示

本研究で使用したシステムでは、視覚ディスプレイがテーブルではなく床面に固定されているため、視覚表現の計算は乗物と視覚世界および目とスクリーンの位置関係をもとに行なわれる。

はじめに、目とスクリーンの位置関係であるが、これはテーブル座標系で定義される目の位置を、スクリーンの持つ座標系で表現することで明らかとなる。なお、運動状態と中立状態とのテーブル座標の関係式はすでに与えられているので、中立状態でのテーブル座標とスクリーン座標の関係を求める必要があり、これは次のように表現される(図4)。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_s &= R_x(\alpha_{ofs})R_z(90 \text{ deg})T(\mathbf{s}_{to})\mathbf{p}_{to} \\ &\equiv M_{to-s}\mathbf{p}_{to} \end{aligned}$$

ここに、 $\alpha_{ofs}, \mathbf{s}_{to} = (x_{sto}, y_{sto}, z_{sto})$ はスクリーンとモーションベッドのとりつけ状態によって決まる定数であり、実測では次のようである。

$$\begin{aligned} \alpha_{ofs} &= 85.43 \quad [\text{deg}] \\ \mathbf{s}_{to} &= (1.37, 0, 0) \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

この関係を用いることで、スクリーン座標系における目の位置を求めることができる。

$$\mathbf{e}_s = M_{to-s}M_{t-to}\mathbf{e}_t$$

ここに、 $\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_t$ はスクリーンおよびテーブル座標系での目の位置である。立体視を実現する場合には、左右の目についてこの計算を適用する。この値は、個人差が予想されるが、ここでは定数として次の値を使用している。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{t_left} &= (-0.10, 0.03, 0.75) \quad [\text{m}] \\ \mathbf{e}_{t_right} &= (-0.10, -0.03, 0.75) \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

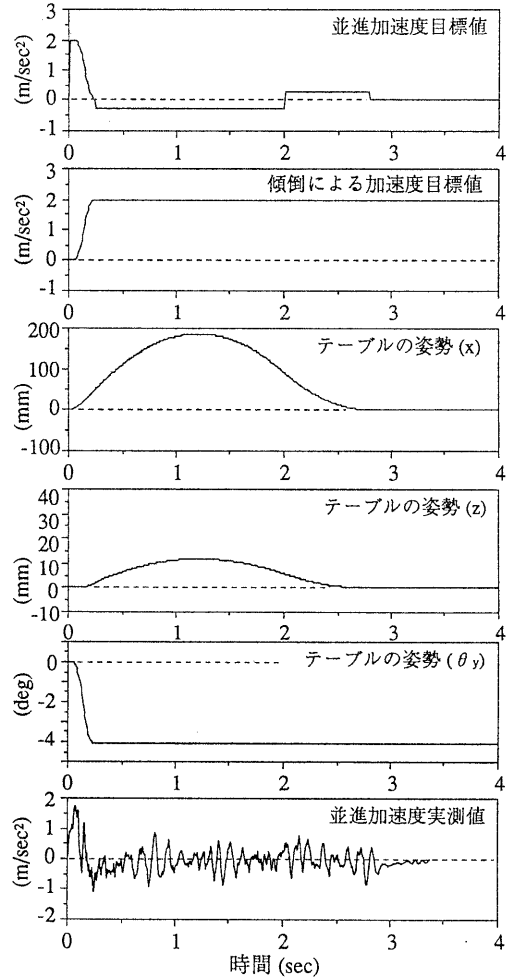


図 3: 加速制御の様子

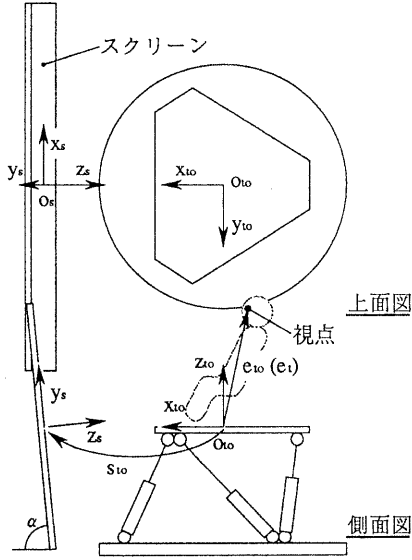


図 4: スクリーンとモーションベッドの位置関係

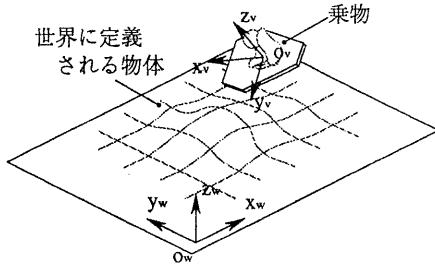


図 5: 世界と乗物の位置関係

つぎに、視覚世界と乗物の位置関係を定義する必要がある。ここでは、乗物の世界における位置と姿勢を $x_{ve}, y_{ve}, z_{ve}, \theta_{x_{ve}}, \theta_{y_{ve}}, \theta_{z_{ve}}$ により、次のように記述する (図 5)。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_w &= T(x_{ve}, y_{ve}, z_{ve})R_x(\theta_{x_{ve}}) \\ &\quad R_y(\theta_{y_{ve}})R_z(\theta_{z_{ve}})\mathbf{p}_v \\ &\equiv M_{v-w}\mathbf{p}_v \end{aligned}$$

ここに、 \mathbf{p}_w および \mathbf{p}_v は世界および乗物座標で表現された位置のベクトルである。なお、ここでは乗物座標とモーションベッドのテーブル座標とが一致するものとし、相互の変換を省略した。

以上により、世界座標に定義される可視物体と目およびスクリーンの位置関係が明らかになっ

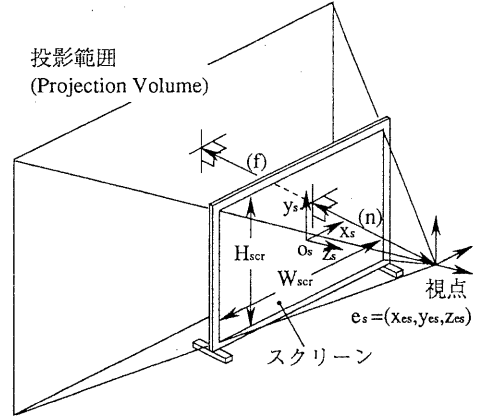


図 6: スクリーンへの投影変換

た。最後に、これに基づいて物体を描画するために、視点位置からスクリーン面への透視投影変換を求める必要がある。これは、スクリーン座標系での目の位置ベクトル $\mathbf{e}_s = (x_{es}, y_{es}, z_{es})$ を用いて次のように表現される (図 6)。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_d &= Window\left(-\frac{W_{csr}}{2} - x_{es}, \frac{W_{csr}}{2} - x_{es}, \right. \\ &\quad \left. -\frac{H_{csr}}{2} - y_{es}, \frac{H_{csr}}{2} - y_{es}, z_{es}, f\right) \\ &\quad T(-\mathbf{e}_s)\mathbf{p}_s \\ &\equiv M_{s-d}\mathbf{p}_s \end{aligned}$$

ここに、 W_{csr}, H_{csr} はスクリーンの幅と高さでその実測値は次のようである。

$$\begin{aligned} W_{csr} &= 3.06 \text{ [m]} \\ H_{csr} &= 2.26 \text{ [m]} \end{aligned}$$

また、Window は次で定義される座標変換である [3]。

$$Window(l, r, b, t, n, f) = \begin{pmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & 0 & 0 \\ \frac{r+l}{r-l} & \frac{t+b}{t-b} & -\frac{f+n}{f-n} & -1 \\ 0 & 0 & -\frac{2fn}{f-n} & 0 \end{pmatrix}$$

これは、視線に対して非対象なウィンドウに対する投影変換を実現するための変換行列で、ディスプレイ座標での正規化された位置および距離を返す。

以上の座標変換を用いて、物体の投影は次の座標変換により実現される。

$$\mathbf{p}_d = M_{s-d}M_{to-s}M_{t-to}M_{w-v}\mathbf{p}_w$$

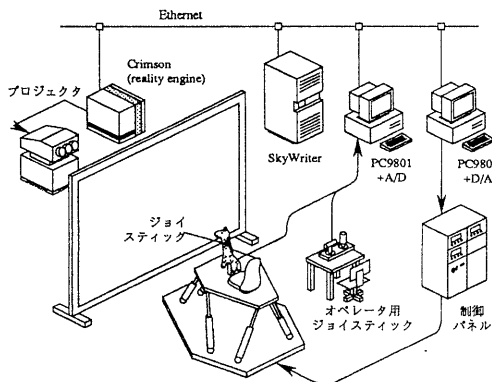


図 7: システム構成

5 前庭感覚提示システムの応用

上述のように実現された前庭感覚提示システムを利用した、仮想空間移動インタフェースを試作した(図7)。ここでは、運動の計算と視覚情報の生成とで処理を行なう計算機を分けることで負荷の分散をはかった。すなわち、モーションベッドの運動の計算は SkyWriter で、映像の生成は Crimson で行っている。これらの計算機とアナログ入出力を行なう PC との間は Ethernet で接続し、遅れを最小限にするために UDP (User Datagram Protocol) で通信を行なっている。乗物のモデルは、ジョイスティックからの指令に基づき加減速、上昇下降、左右旋回を行なう単純なものとし、これらの際に生じる水平方向 2 自由度の加速度の表現を行なった。また、視覚情報としては仮想空間内に作られた仮想の地形とした。これらの、前庭感覚を利用した仮想空間は、乗馬療法などのような前庭刺激に対する人間の振舞いに関する研究への応用が検討されている(図8)。

6 おわりに

以上、モーションベッドを利用した加速度表現の具体的アルゴリズムの試作とこれを利用した仮想空間移動インタフェースの実現について述べた。人工現実感のように人間に対する情報提示のあり方を問う分野においては、前庭感覚に対する刺激提示の基礎をなす技術として、汎用性の高い加速度表現手法の確立が急務である。また、今後、加

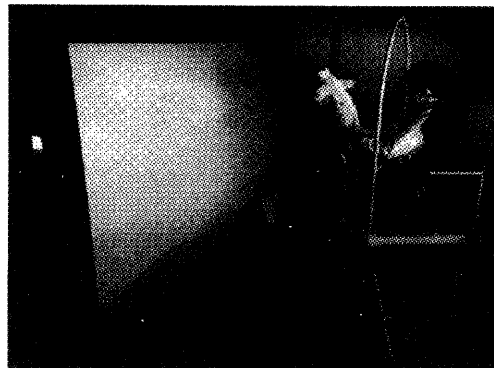


図 8: 試作システム全景

速度の表現が移動の際の距離・方向感覚などに与える影響の観察などを行なっていきたいと考えているが、これは仮想空間における移動手段に関する議論に判断基準や根拠を与えるものになるものと期待している。

参考文献

- [1] 広瀬 通孝, “バーチャル・リアリティ”, 産業図書 (1993)
- [2] 館 すすむ, 広瀬通孝, “バーチャル・テック・ラボ”, 工業調査会 (1992)
- [3] Silicon Graphics Inc., “Graphics Library Programing Guide”, Document Number 007-1210-040 (1991)