

—両眼立体視機能を有するソリッドモデルロボットシミュレーター—

機械技術研究所 ○館 隅、前田太郎、荒井裕彦

Study on Tele-existence (X)

-Binocular Solid Model Robot Simulator-

Mechanical Engineering Laboratory ○Susumu Tachi, Taro Maeda, Hirohiko Arai

1. はじめに

離れたところにいるオペレータ（操作者）が、ロボットの存在する場所で直接作業しているかのような高度な臨場感を有してロボットを制御することをテレイグジスタンスと呼んでいる。つまり、自分の分身のロボットが自分の代りに仕事をしていて、それでいてその状況が手にとるように分る。また必要な時には、そのロボットに代って、自分でその仕事を直接しているような感覚を持ちながら実行できる^{1,2)}。

現在このテレイグジスタンスを、人の感覚が有効でない環境に拡張するための基礎的研究を開始している。すなわち、ロボットが持つ放射線、赤外線、マイクロ波、超音波、極低周波などのセンサ情報（超感覚情報）を、人間の感覚で認識できる形に変換し、かつある種の臨場感をオペレータに与えることを狙っている。

前報では、その第一段階として、暗闇での作業を想定して、作業対象やロボットのマニピュレータをソリッドモデルで構成し、シェイディングを施して提示しつつ、人間の腕の動作に追従して作動するロボットシミュレータの試作結果を報告した³⁾。

本報告では、このシミュレータに両眼立体視機能を付加して、両眼立体視の効果及びソリッドモデルによる提示の効果を立体視をしない場合やワイヤフレームとの比較から定量的に評価する。

2. 両眼立体視の提示法

両眼立体視の提示を行うことの最も重要な特徴は、この方法によれば対象物を、実際と同一の大きさで任意の距離の場所に任意の姿勢角をもって提示し得ることである。

そのためには、左右両眼に提示する提示像の左右の対応点に、距離に対応する両眼視差を与えると共に、

みえの大きさ =

網膜上の像の大きさ × 像までの距離

が保たれるように視覚を調節する必要がある。

Fig. 1に示すように、計算機内に $O' - X'Y'Z'$ で示される物体に固定した座標系でソリッドモデルとして表現した提示対象物体を用意する。これは、実物大の寸法で記述する。

次に、提示したい位置と姿勢とを観測者の座標系 $O - XYZ$ で指定する。すなわち、距離 A_{PORG} と姿勢角 θ_{eR} の指定から(1)式に示す Homogeneous Transformationを用いてモデルの点を観測者から見た座標に変換する。

$$\begin{bmatrix} X_1, \dots, X_n \\ Y_1, \dots, Y_n \\ Z_1, \dots, Z_n \\ W_1, \dots, W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & A_R \\ 0 & I \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_1, \dots, X'_n \\ Y'_1, \dots, Y'_n \\ Z'_1, \dots, Z'_n \\ 1, \dots, 1 \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

$$x_i = \frac{x'_i}{w_i}, \quad y_i = \frac{y'_i}{w_i}, \quad z_i = \frac{z'_i}{w_i} \quad (i=1, \dots, n)$$

その後、それを観測者から f だけ離れた垂直面に射影する。しかし、このままでは左右の射影像が重なってしまうため、それを分離して提示できるよう変換し、かつ人間が観測した場合には、理想的な重なりの状態に戻るようにしなければならない。また、提示距離も人間の眼球の緊張弛緩の条件と一致させる必要がある。

Fig. 2にそのための装置を示す。鏡により前者の条件をレンズにより後者の条件を満足させていける。なおレンズの焦点距離は282mmとし提示位置500mmに対応させてある。

次式に左右両眼像への変換を示す。なおこれらはすべて物理的次元で記述されているので実際の提示では、機器に特有の値に再変換する(1)式 \times 0.5mm)。

$$\begin{bmatrix} X_1^L, \dots, X_n^L \\ Y_1^L, \dots, Y_n^L \\ Z_1^L, \dots, Z_n^L \\ W_1^L, \dots, W_n^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{f}{f-d} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^L, \frac{x_1^L}{w_1^L} \\ y_1^L, \frac{y_1^L}{w_1^L} \\ z_1^L, \frac{z_1^L}{w_1^L} \\ 1, \dots, 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_1^R, \dots, X_n^R \\ Y_1^R, \dots, Y_n^R \\ Z_1^R, \dots, Z_n^R \\ W_1^R, \dots, W_n^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{f}{f-d} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^R, \frac{x_1^R}{w_1^R} \\ y_1^R, \frac{y_1^R}{w_1^R} \\ z_1^R, \frac{z_1^R}{w_1^R} \\ 1, \dots, 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

ソリッドモデルのディスプレイ装置としては前報のシステムを利用している。すなわち、計算機にマイクロVAX II、ディスプレイにはLEX90、手先等の位置姿勢の実時間入力には、磁場検出センサ3SPACE ISOTRAKを用いてシステムを構成している。Fig.3にシステムの外観を示す。

3. 実験

3.1両眼立体視の効果

(a) 概要 両眼立体視の効果を測定するためFig.4に示すような対象物のハンドリング実験をシミュレータ上で行った。

対象物は縦70mm横50mm厚さ50mmの直方体をワイヤフレームモデルで構成し、70×50mmの面に×印を施して目印をつける。

対象物を観測者の前方500mm±50mmの位置にランダムに配し、姿勢角として目印のついた面を正面にする姿勢を中心として各軸で±0.75radの範囲でやはりランダムの角度をとらせる。

被験者は、この像をみながら、自分の手を動かすと、ディスプレイ上のマニピュレータの位置と姿勢がその位置と姿勢に追従して変化する（前報参照）。

そこで、そのディスプレイ上のマニピュレータの軸方向 h_z が目印のついた面の法線 o_z に一致し、かつ o_x と h_x が一致するように姿勢を制御しつつ、マニピュレータの手先の中心点 (x_h, y_h, z_h) が、対象物体の重心 (x_0, y_0, z_0) に合致するよう位置あわせを行う。

ただしここでは簡素化のため、干渉は無視し、どの方向からでも物体を貫いて重ね合わせができるようにしてある。

なお、提示速度は、1フレーム左右両画面で約0.3秒であり、ダブルバッファで切り換えて提示している。両眼提示方式のためチラツキが全くなないので、この程度の速度でも十分滑らかな運動感覚が得られた。

(b) 提示方法 比較する提示方法としては、①両眼立体視を2.で述べた方法で距離と大きさを实物大に保って行った場合、②両眼立体視を行わず、両眼に同一の画像を提示した場合（大きさは①と同一の条件になっている：以下単眼視と呼ぶ）に大別した。

さらに、単眼視の場合には画像の大きさしか距離の手掛りがないので、③画面上に対象物体の重

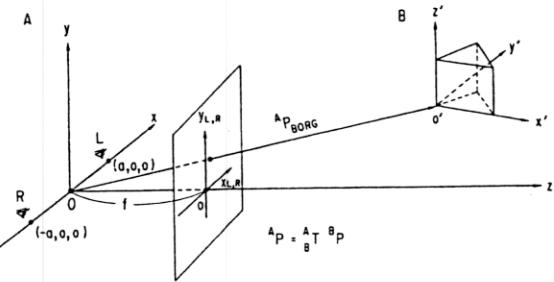


Fig. 1 Representation of the Model and the Space.

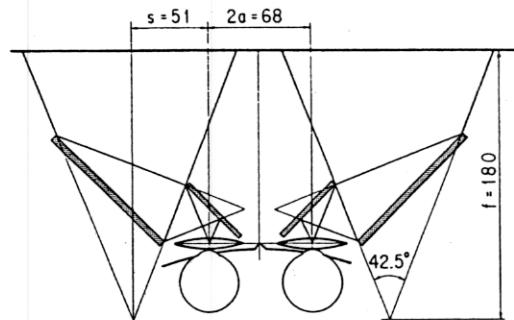


Fig. 2 Binocular Display Unit.

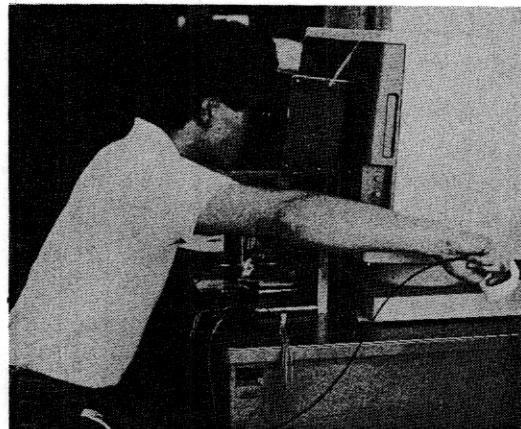


Fig. 3 General View of the Binocular Solid Model Robot Simulator.

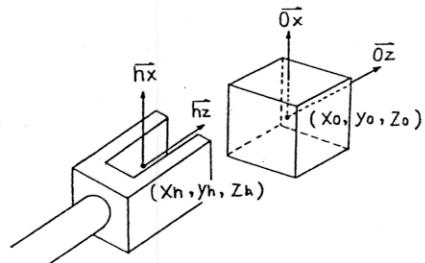


Fig. 4 Experimental Conditions.

心位置とハンドの中心との距離差を数字にしてスーパーインポーズする方法、④距離差をバーグラフとしてやはり画面上にスーパーインポーズする方法、⑤距離差を音響的に表示する方法を加えて、それらの効果もあわせ比較した。

距離-音響変換は、提示周波数を f 、距離の差を Δd として

$$f = f_0 e^{-\lambda \Delta d} \quad \dots (3)$$

とした。ただし $f_0 = 4167 \text{ Hz}$, $\lambda = 0.01$ である。

またこの記号を連続的に与えると聴覚が順応するので 180ms を提示し 50ms 休止のパターンで断続させている。Fig. 5 にディスプレイの例を示す。この場合バーグラフと数字の情報は左右同位置に入れてあるので、両眼立体視を行っても行わなくても、無限遠にあたるところに提示されている。

対象物体とミニピュレータハンドの位置姿勢あわせの評価は、次式に示す Δd , $\Delta \theta$, $\Delta \phi$ を用いて行った。

$$\begin{aligned} \Delta d &= \sqrt{(x_o - x_h)^2 + (y_o - y_h)^2 + (z_o - z_h)^2} \\ \Delta \theta &= \cos^{-1}(\vec{o}_z \cdot \vec{h}_z) \\ \Delta \phi &= \cos^{-1}\left(\frac{\vec{o}_z \times \vec{h}_z}{|\vec{o}_z \times \vec{h}_z|} \cdot \vec{o}_x\right) - \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad \dots (4)$$

Δd は距離の誤差、 $\Delta \theta$ は目印のついた面の法線とハンドの軸との誤差、 $\Delta \phi$ は目印のついた面内の回転をあらわす。

ただし \vec{o}_z と \vec{h}_z が一致した場合には、

$$\Delta \phi = \cos^{-1}(\vec{o}_x \cdot \vec{h}_x) \quad \dots (5)$$

(c) 提示時間の影響

ミニピュレータハンドを提示された対象物体に一致させる作業の精度が提示時間によってどのように影響を受けるかを調べるために、最も良いと考えられる条件、すなわち、両眼立体視でバーグラフ、数値、音のすべてを同時に提示した状態で、提示時間をパラメータとして誤差を調べた。

その結果の一例を Fig. 6 に示す。

それぞれの実験をランダムに提示される異なる位置と姿勢角に対し 20 回行って平均をとった。図は距離についての結果である。法線のずれ $\Delta \theta$ と回転 $\Delta \phi$ も同様の傾向を示した ($\Delta \theta$ と $\Delta \phi$ は絶対値を平均した。)。

すなわち、8 秒程度までは提示の時間を長くすることにより誤差が減少する。しかし約 8 秒の提示のところで定常な誤差を生じはじめ、あとは提示時間をかえても誤差はそれ以上減少しない。

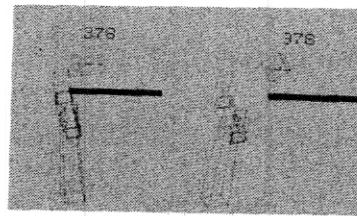


Fig. 5 Example of Display Image.

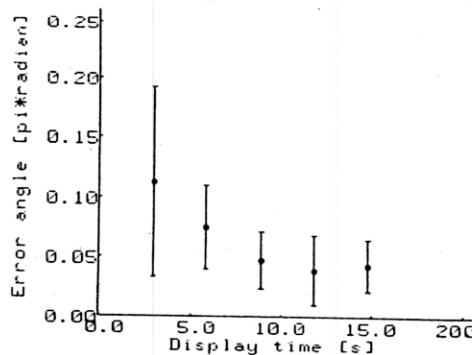
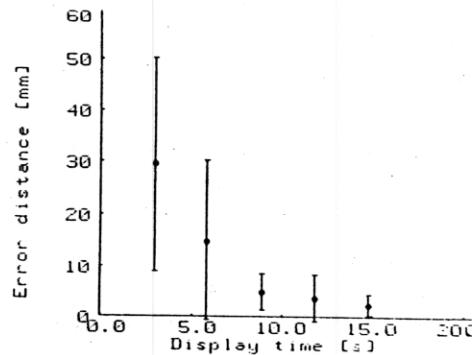


Fig. 6 Experimental Results.
-Effect of Display Time-
(a) Δd (b) $\Delta \theta$

main_display	sub_display	numeric	bar_graph	pitch	no_aid
(error)					
stereo view	Δd (mm)	22.7	10.4	15.0	24.6
	$\Delta \theta$ (°)	11.7	15.8	8.45	10.0
	$\Delta \phi$ (°)	5.14	8.69	6.10	5.25
monocular view	Δd (mm)	48.3	18.9	35.7	35.7
	$\Delta \theta$ (°)	12.1	14.7	16.1	15.3
	$\Delta \phi$ (°)	15.0	5.85	6.40	12.4

Table 1. Comparision among Several Display Schemes.

従って、以下の実験では、提示時間は9秒に固定した。

(d) 提示方法の定量的比較

両眼視と単眼視を大きな分類とし、それらに数值、バーグラフ、音などの補助を加えた場合のすべての組み合わせについて、(c)と同様の実験を提示時間を9秒に固定して行った。

その結果をTable1に示す。それぞれ20回の平均をとっている。

両眼視と単眼視では距離で0.7倍、角度で1.5~2.4倍優れている。

補助を加える場合には、バーグラフが最も効果的である。

単眼視の場合、バーグラフが効果があり、音を付加すると距離自体は変わらないが回転角の誤差が向上する。これは、こちらへ注意を集中できるためと考えられる。

数字の付加は、どちらの場合もおもわしくない。むしろ注意を奪われるためではないかと思われる。

3.2 ソリッドモデル表示の効果

ソリッドモデルにした場合の提示の良さを定量的に調べるために両眼立体視のもとマニピュレータのハンドの姿勢を3.1(b)と同様にランダムに変化させてマニピュレータの手先の形を提示する。

この提示をソリッドモデルとワイヤフレームで行って、提示の後、自分の腕を動かしディスプレイ上の同一のハンドの位置と姿勢を、今度は被験者の思ったように制御して記憶していた姿勢に再現する。

これを、記憶のために提示する時間をパラメータとして姿勢角の誤差 $\Delta\theta$ と $\Delta\phi$ とを求めた。

Fig.7にソリッドモデルの提示像を示す。

Fig.8は再現誤差 $\Delta\theta$ について示している。実験では提示距離は500mmに固定した。図中の■印がソリッドモデルの結果で●印がワイヤフレームのそれぞれ提示10回の平均の結果である。

それぞれ提示時間はあまり関係せず、記憶は十分になされているといえる。 $\Delta\phi$ に関しては、ソリッド、ワイヤフレームとも顕著な有意差は認められないが、 $\Delta\theta$ については、ソリッドモデルのほうが優れた結果を示している。

4.まとめ

前報のシミュレータに両眼立体視機能を付加した。ソリッドモデルでGouraudシェイディングを

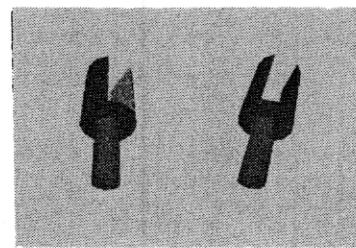


Fig.7 Solid Model Display Image.

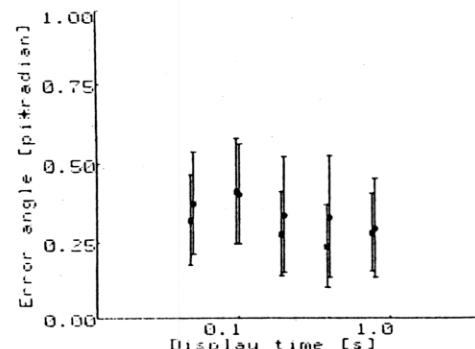


Fig.8 Experimental Results for $\Delta\theta$.

-Comparison between Solid Model(■)
and Wireframe(●)-

施してダブルバッファでマニピュレータのハンド部分のみの左右像を提示した場合、1秒間に約3フレームの提示が可能である。両眼提示方式であるため、画面のちらつきが全くなく、物体の大きさと距離情報が人間が直接視する場合とほぼ同一の状態になるよう設計されていることから、極めて現実感があり、応答も実時間性をそこなわない程度になっている。

試作装置を用いた実験の結果、両眼立体視方式の優位性とソリッドモデルでの表現のメリットが定量的に示された。

今後は、さらに複雑な臨場的実時間提示システムへと発展させていく所存である。

参考文献

- 1)館ほか：テレイグジスタンスの研究 第1報、第21回SICE学術講演会予稿集、pp. 167/168(1982).
- 2)S.Tachi and H.Arai: Study on Tele-existence (II) Three-dimensional Color Display with Sensation of Presence, Proc.'85 ICAR, 345/352 Tokyo(1985).
- 3)館、荒井、前田：テレイグジスタンスの研究 第9報、第26回SICE学術講演会予稿集、pp. 339/340(1987).