運動感覚と視覚の融合の仮想環境へ及ぼす効果

柳田 康幸　　舘　暲
(東京大学先端科学技術研究センター)

Effect of Integration of Kinesthetic and Visual Sensation in Virtual Environment

Yasuyuki Yanagida and Susumu Tachi
(RCAST, The University of Tokyo)

Abstract: To realize highly realistic sensation of presence in virtual environment, it is necessary to implement virtual reality system fitting human sensory mechanism, which integrates multiple kinds of sensory information, including kinesthetic and visual sensation. To provide coherency between kinesthetic and visual sensation of presence, we have proposed the concept of *virtual human*. We made an experiment on the effect caused by the condition whether the coherency between kinesthetic and visual sensation of presence is satisfied, by executing manipulation task in virtual environment. The result shows that there is significant difference between the case which the above condition is satisfied and that does not.

Keywords: tele-existence, virtual reality, multisensor fusion

1. はじめに

宇宙ロボットなどの通信遅れが存在する状況の下や直接人間の感覚では認識不可能な環境に対してもテレイグジスタンスによる作業を実現するために、筆者らは仮想環境を介在させたテレイグジスタンスシステムを提案している [1]。

テレイグジスタンスによる作業を実行可能な、高度に臨場感のある仮想環境を創出するためには、視覚・聴覚・力感覚などの複数感覚情報を統合する人間の感覚統合メカニズムに適合する人工現実感システムを構成することが有効であると考えられる。我々は、複数の入出力チャンネルを有する仮想環境提示システムの実現を目指し、その第 1 段階として人間の運動感覚と視覚を組み込んだ人工現実感システム [2][3][4] を構築したが、高度な臨場感を得るにはこれら運動感覚と視覚との融合は重要である。

運動感覚と視覚情報提示の融合に関連する研究としては、頭部運動が視覚提示情報に反映されるまでの時間遅れによる影響を調べた研究 [5] が行なわれており、興味深い知見を与えている。これに対し、本研究では時間遅れを可能な限り小さくした上で、運動感覚と視覚情報の空間的な不一致が生じる場合について扱う。一方、ロボットによる実空間へのテレイグジスタンスにおける作業効率を異なる視覚提示方式について比較し、自己投射性の影響を調べた研究 [6][7] も行なわれているが、実環境のロボットを使用する限り、空間的な配置を変えながら実験を行なうには装置の再製作もしくはそれらが調整可能な複雑な装置の製作を行なう必要がある。しかしながら、仮想環境を用いれば、瞬時に空間的パラメータを変えた実験が可能である。

本報告では、人工現実感システムにおける運動感覚

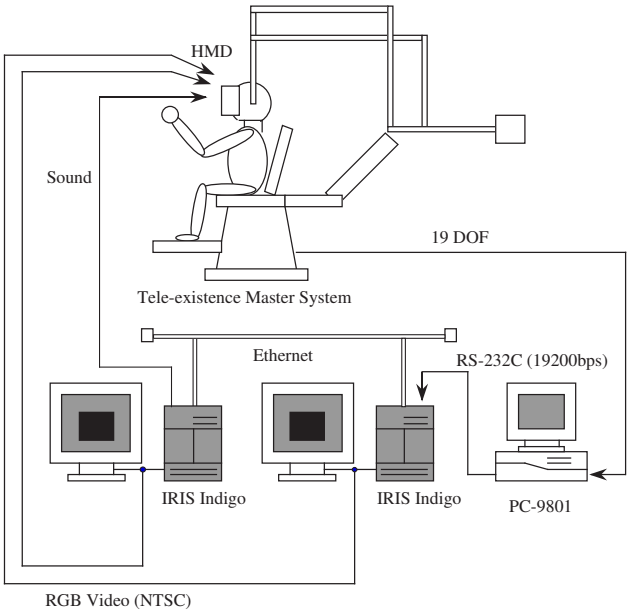

図 1 システムの構成

と視覚との融合が生じる条件について考察し、その条件が成立していることの効果について仮想環境における作業実験により評価を行なう。

2. 運動感覚と視覚の融合のための条件

現在の人工現実感システムは、人間の運動を検出してその運動に応じた視覚提示を行なうものが一般的であるが、その多くは「カメラ」と「手」だけを仮想環境中に配置しているに過ぎず、仮想環境への自己投射性を実現するには十分とは言い難い。すなわち、自分の体が存在している感覚が乏しく、仮想空間の中に何となく浮遊しているような感覚がある。そこで、オペレータのコピーとしての「仮想人間」を仮想環境に存在させることを考える。仮想人間は手先だけでなく、腕、足、体幹、感覚器を備え、仮想環境中を行動する。仮想環境中で仮想人間の目が見るもの（自分自身を含む）を実環境のオペレータに提示することにより、オペレータが仮想環境に入り込んだような感覚がより自然に得られるものと期待される。

このとき、オペレータの運動感覚と提示される視覚情報とがオペレータの感覚において融合されるには、以下のような条件を満たす必要がある。

- 仮想環境が自然な 3 次元空間を構成していること。仮想空間の物体が実寸で記述され、適切な位置関係で配置されていることが重要である。
- 仮想環境中の仮想人間が自然な動きを行なえること、すなわち仮想人間の運動の自由度が大きいこと。このためには、計測されるオペレータの運動の自由度が十分大きいことが必要である。仮想人間の運動の自由度が制約されると、実環境でのオペレータの運動自由度が仮想環境に反映されず、オペレータの運動に対応した視覚情報を生成することが不可能になる。
- オペレータの運動が、仮想人間の運動に正確にかつリアルタイムで反映されること。このためには、オペレータの運動計測を正確かつ高速に行ない、仮想空間の状態を更新する必要がある。ここでの注意点としては、画像更新レートなどの感覚情報の更新の頻度を十分大きくするばかりでなく、システム全体としての時間遅れが最小限に抑えられていることが重要である。
- 仮想環境中の仮想人間のサイズが、実オペレータのそれを正確に反映していること。作業対象が人間の生活している世界と同等のスケールを有する場合には、環境への効果器である手やその位置を決定する腕のサイズ、感覚器である目の位置が実オペレータのものと一致していることが重要である。マイクロテレオペレーションなど、対象のスケールが異なっており、仮想人間と実オペレータのサイズを一致させることがそもそも不可能な場合には、仮想人間のスケーリングを注意深く行なう必要がある。
- 仮想人間の目がとらえた視覚情報が、オペレータに正しく提示されること。これには、視覚提示装置の構造、設計パラメータ（視野角など）を考慮した上で画像を生成する必要がある。

3. システムの概要

運動感覚と視覚を融合する条件を考慮し、人工現実感実験システムを構成した。本システムの構成を 図 1 に示す。本システムは、人間運動計測装置、計測用計算機、仮想環境構成/提示画像生成用計算機、頭部搭載型ディスプレイで構成される。

オペレータの運動は、テレイグジスタンス作業用マスタシステム [8] によって実時間で計測される。計測される自由度は、頭部並進 3、頭部回転 3、上腕 7、ハンド開閉 1、ジョイスティック 3、フットペダル 2 の計 19 自由度である。頭部運動および上肢運動はリンク機

構に取り付けられたロータリーエンコーダ、ハンドおよびジョイスティックはポテンショメータにより計測が行なわれる。

本システムではオペレータ頭部の回転運動だけでなく体幹に対する相対位置も計測しており、オペレータの上体運動の感覚を仮想環境において再現することが可能である。また、運動計測における時間遅れがほとんど存在せず、システムの応答特性を良好に保つことに寄与している。

計測用計算機 (NEC PC-9801) は信号を計測して数値に変換し、シリアル回線 (19200bps) を通してデータを仮想環境構成/提示画像生成用計算機に送る。仮想環境構成/提示画像生成用計算機 (Silicon Graphics IRIS Indigo $\times 2$) は送られたデータを元に仮想環境を構成し、適切な視点 (仮想人間の目の位置) から見た提示画像をフレームバッファ上に展開する。

生成された画像は、NTSC タイミングの RGB 信号として出力され、頭部運動計測機構に取り付けられた頭部搭載型ディスプレイ [9] (HMD: 画素数 720×240, 視野角は $40°$) によりオペレータに提示される。この部分は従来ワークステーションの CRT 上に表示された画像を CCD カメラで撮影し、コンポジット/RGB 変換を行なって HMD に表示していたが、直接 RGB 信号を送るようになったため、より鮮明な画像が提示できるようになった。また、CRT 画面上での CCD カメラとの位置合わせも不要になった。

仮想環境は C++言語のクラスを用いて階層的に記述している [10]。仮想環境中の物体それぞれに物体フレームを定義し、「親 (基準) 」物体フレームからその物体フレームへの変換行列を付随させることにより、位置関係の記述および変更が容易に行なえる。クラスライブラリの形で実装されており、機能拡張や各種パラメータの変更などが容易である。

4. 実験

運動感覚と視覚の融合の効果を評価するため、実環境でのテレイグジスタンスの作業性評価に用いた積木作業実験 [8] を仮想環境に構築して行なった。この作業は、実環境においては、オペレータがマスタシステムを操作して、オペレータ自身が遠隔のスレーブロボットの中に入り込んだかのような感覚を有してロボットを制御し、台の上に載せた積木を積み上げるというものである。今回の実験は、作業の操作対象が実環境ではなく仮想環境に置き換えられたものであり、遠隔ロボットではなく仮想環境中の仮想人間が環境への操作を行なう。この概念を 図 2 に示す。

仮想環境は、正方形の部屋の中に配置された仮想人間と作業実験用対象物から構成されており、前述のシステムを用いて、平均毎秒約 20 フレームの画像を提示している。

作業課題は、 図 3 に示すように、オペレータがジョイスティックを利用して初期位置から積木の台の位置まで移動し、3 個の積木を仮想オペレータの手でつかんで積み上げ、そのあと積木が 1 個ずつ台の上に置かれている状態に戻すというものである。仮想人間の運動や画像提示条件を実オペレータのものと一致させた場合と、それらを意図的にずらした場合について、作業の完了までの時間を計測して、作業所要時間の比較を行なった。

比較は、

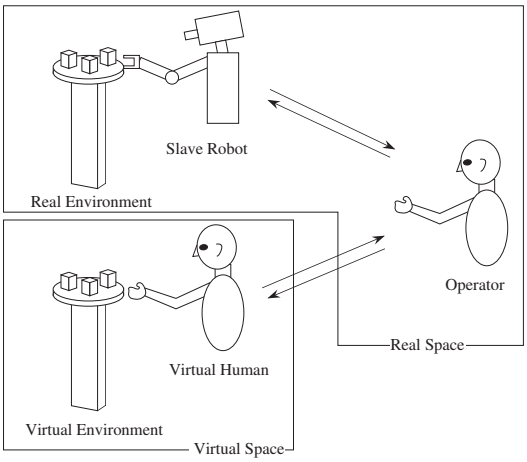

図 2 実環境と仮想環境へのテレイグジスタンス

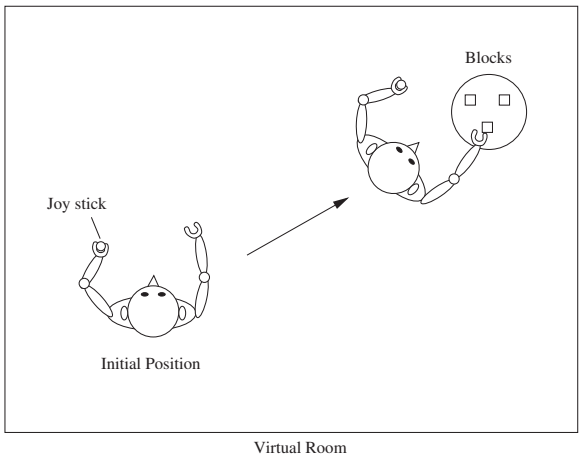

図 3 評価実験の課題

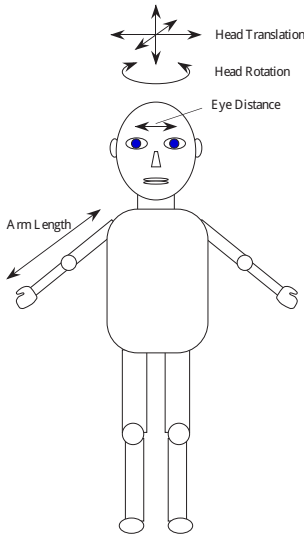

図 4 仮想人間のパラメータ

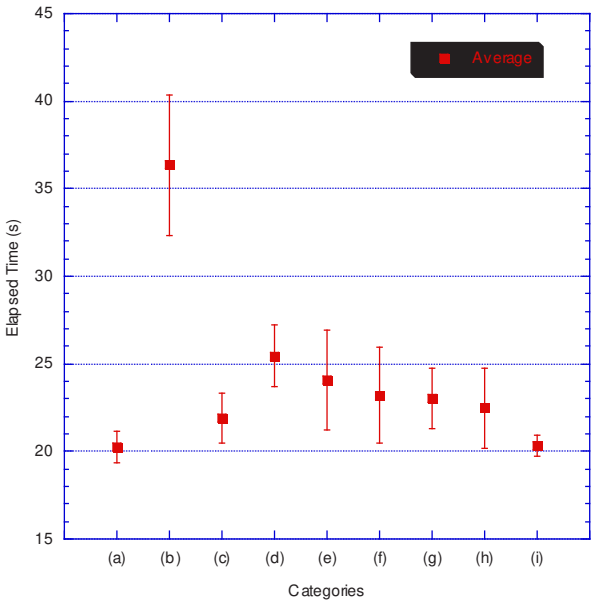

図 5 作業所要時間の平均値と標準偏差

(a) すべての運動パラメータおよび提示条件を実オペレータのものと一致させた場合、

(b) 仮想人間の頭部並進運動 (上体運動) の量を実オペレータの 4 倍にした場合、

(c) 仮想人間の頭部並進運動が全く行なわれない場合、

(d) 仮想人間の頭部回転運動の量を実オペレータの 2 倍にした場合、

(e) 仮想人間の眼間距離を実オペレータ (64mm) の 2 倍にした場合、

(f) 頭部搭載型ディスプレイに提示する画像の視野角を、実際の視野角の 1.5 倍にした場合、

(g) 上記 (f) の視野角と頭部回転運動の量の両方を 1.5 倍にした場合、

(h) 仮想人間の腕の長さを 1.5 倍にした場合、

(i) 頭部並進運動、眼間距離、および腕の長さをそれぞれ 1.5 倍にした場合

について行なった。仮想人間のパラメータを 図 4 に示す。

仮想人間の運動および感覚器の配置が適切に設定されている場合 (a) と比較して、(b), (c), (d) は実オペレータの運動が仮想人間の運動に反映される条件が崩された場合、(e), (f) は仮想人間の視覚器の配置が実オペレータと異なるかもしくは視覚提示条件が崩された場合、(h) は仮想人間の骨格が変形された場合、(g), (i) はそれらの組合せにあたる。(b) に関しては、上体の大きさが変わったと見なすこともできる。

実験は、それぞれの場合について作業完了までの所要時間の計測を 5 回ずつ行ない、平均値をとって比較した。

表 1 所要時間差に関する t-検定の結果

	(b)	(c)	(d)	(e)
(a)	9.7649	3.4428	5.3049	3.2950
(b)	–	9.1126	4.4637	8.0768
(c)	–	–	3.6467	3.0832
(d)	–	–	–	0.9724
(e)	–	–	–	–
(f)	–	–	–	–
(g)	–	–	–	–
(h)	–	–	–	–

(f)	(g)	(h)	(i)
1.8712	2.9187	2.0579	0.1804
5.6234	5.4443	6.3175	7.5183
0.9155	1.2402	0.7912	2.2967
1.2529	3.5212	3.1612	6.7583
0.5284	0.7738	1.9025	2.7927
–	0.1000	0.4295	1.9482
–	–	0.8297	4.8402
–	–	–	2.3325

ある被験者 (A) が行なった、それぞれの条件における作業所要時間の平均値と標準偏差を 図 5 に示す。平均値を ■ 印、これを中心に標準偏差の範囲を I 印で示している。

仮想人間と実オペレータのパラメータを一致させた場合 (a) と他の場合 (b) ~ (i) とで作業時間の平均値を比較すると、(i) を除いて作業性が悪化していることがわかる。

作業時間の差を統計的に評価するため、それぞれの条件における所要時間差が有意であるかどうかを t 検定にかけた。その結果を表 1 に示す。

(a) と他の場合との組合せでは、危険率 5% ($t = 2.776$) で (b), (c), (d), (e), (g) が有意であり、(f), (h), (i) が有意でないと検定された。

別の被験者 (B) が作業を行なった結果は、作業時間の平均値は被験者 (A) と同様の傾向が見られるものの、作業時間のばらつきが大きく、t-検定の結果は危険率 5% でいずれの場合も有意とは認められなかった。

また、被験者が作業を行なった感想としては、(b) は頭の位置が定まらず非常に作業しづらい、(c) はあまり違和感を感じない、(d) や (f) は頭を動かすと酔いそうで気持ち悪い、(e) は腕や対象物が不自然に小さく感じられる、(g) は頭の回転に伴って周囲の形が歪む、(h) は腕が長く感じる、(i) は比較的自然な感じがするが対象物が小さく感じられる、といったことが報告された。

5. 考察

被験者 (A) の結果について、(a) とその他の場合との組合せを見ると、以下のようなことが言える。(b) は、特に目立った差が観察され、操作感でも作業のしづらさが報告された。これはパラメータの変化量が 4 倍と大きいことも関係しているものと思われるが、上体運動に伴う頭部並進運動量が実際のそれと対応していないと、臨場感を損なうことがわかる。(c) は、頭部が自然に並進運動することにより作業が容易になることを示している。(d) は、単純に少ない運動でより広い範囲を見渡せるように仮想人間の頭部回転運動の量を増幅しても、かえって効率の低下を招くことを示している。(e) は、「顔が大きい」場合に相当するが、人間とサイズの異なるものへテレイグジストする場合に、単に視覚器の位置を変更しただけでは作業しづらくなることを示している。(f) は、視覚提示デバイスの視野角と提示画像の対応の必要性を示している。いたずらに提示画像の視野を大きくとっても、臨場感が低下する。(g) は、(f) と比べて操作感の報告ではより自然であったが、パラメータを一致させた場合には及ばない。(h) は、大きさの異なるマニピュレータを持つロボットなどへテレイグジストする場合、注意が必要であることを示している。(i) は、(a) と作業時間の相違がほとんど見られない。(b), (e), (h) と比較すると、いずれも作業時間差が有意である。これは、スケールの異なるものへテレイグジストする場合、(b), (e), (h) のように部分的なスケーリングを行なうのではなく、全体のパラメータを考慮することにより、自分がその大きさの存在になったかのような、自然な臨場感を得ることができることを示している。

以上のように、人工現実感システムにおいては運動感覚と視覚が融合するようにパラメータを考慮して、適切な設計を行なうことが重要であることが示される。

同時に、本実験の結果は、以下のような側面も示している。例えば、(f) と (g) の比較のように、操作感でははっきりとした差が報告されていながら、作業時間の比較では有意な差が見られない場合が存在する。また、被験者によっては作業時間のばらつきが大きく、この実験では各条件間の有意性を検出することができないという結果も得られた。これらは、実験で行なった積木作業自体が、一旦作業可能範囲への移動を行なってしまえばそれほど頭部の運動を必要としないことに起因するのではないかと考えられる。また、作業を繰り返し行なうことにより、運動感覚の方が主体になり、視覚情報は補助的な役割しか果たしていないことも考えられる。これらの問題を解決するために、より頭部および上肢の運動を必要とし、運動感覚と提示視覚の密接な連係が必要とされる実験課題を設定することが求められる。

6. おわりに

運動感覚と視覚が融合することの効果を、仮想環境における作業実験を行なって検証した。仮想人間のパラメータのバランスが崩れている場合は作業効率の低下が確認され、臨場感を損なわないためにはこれらのパラメータが適切に設定されていることが重要であることが示された。また、パラメータが実際のオペレータと異なっていてもすべてのパラメータが同様にスケーリングされていれば、作業効率に変化は認められず、巨大ロボットやマイクロロボットなどを用いたテレイグジスタンス作業への応用が期待される。

今後はさらに精密な実験を行ない、テレイグジスタンスおよび人工現実感システムの評価手法の研究を行なっていく所存である。

参考文献

[1] 舘、前田 ：人工現実感を有するテレイグジスタンスロボットシミュレータ、電子情報通信学会論文誌、J75-D-II, 179/189 (1992)

[2] 柳田、舘 ：センサフュージョン機能を有する人工現実感システム (第 1 報)—システムの構成—、第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集、1087/1088 (1992)

[3] 柳田、舘 ：運動感覚と視覚を融合する人工現実感システム、Human Interface News and Report, **8**–3, 325/330 (1993)

[4] Yanagida and Tachi: Virtual Reality System with Coherent Kinesthetic and Visual Sensation of Presence, Proceedings of 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM), 98/103 (1993)

[5] Hirose et al.: A Study on Synthetic Visual Sensation through Artificial Reality, ヒューマン ・インタフェース研究論文集、**1**-1, 19/26 (1992)

[6] 舘、安田 ：テレイグジスタンスの研究 第 27 報、第 31 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、439/440 (1992)

[7] Tachi and Yasuda: Evaluation Experiments of Tele-Existence Manipulation System, Proceedings of the Third International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT), 17/26 (1993)

[8] 舘、荒井、前田 ：テレイグジスタンスの研究 第 18 報、第 28 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、433/434 (1989)

[9] 前田、荒井、舘 ：頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価、日本ロボット学会誌、**10**–5, 655/665 (1992)

[10] 柳田、舘 ：仮想環境作業システムのためのモデル構成法、第 32 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、885/886 (1993)