

コンピュータグラフィックシミュレーションを利用した知的遠隔操作作業におけるエラー回復に関する研究*

李舜堯**, 長町三生***, 伊藤宏司***, 辻 敏夫***

The present paper deals with obtaining the properly mixed application criteria for the manual mode, using computer graphic simulation, in order to recover the error effectively occurring in the advanced teleoperator work of man-robot system.

In the experiments, the error which is occurred during performing the automatic mode is recovered by the manual mode properly combined operation by a human and the control program. The result shows an improvement availability of the system not only with efficient combination of the manual mode according to trajectory planning, but also with effective error recovery. Therefore, we suggest that the operation by the control program should be applied to macro-motion of control and the operation by a human to micro-motion of control.

本論文では、マン-ロボットシステムの知的遠隔操作作業において、エラー回復のためにコンピュータグラフィックシミュレーションを利用して、手動モードの効率的な設定基準を提案する。

本実験では、自動操作中にエラーが発生したとき、これを回復、復帰する方法として、手動モードであるコマンド操作と直接操作を適切に配分させた。本実験の結果、軌道計画の条件による考察では、最も少ない移動時間をもつ運動軌道が望ましい軌道であり、それは、軌道 I、II、III のなかでは軌道 I であった。この軌道の 3 つのモードのなかではモード 1 がコマンド操作と直接操作の効率的な配分のための最も望ましい手動モードであることがわかった。したがって、巨視的な動作はコマンド操作で、また微視的な動作は直接操作するという具合に、手動モードを効率的に配分することによって、マン-ロボットシステムの有用性をいっそう高めることができる。

1. 序 論

1-1. 研究の意義と目的

極限作業用のマン-ロボットシステムにおいて、ロボットの環境適応能力を最大限に生かしながら、安全な遠隔地点からオペレータの巨視的な判断と操作により、人間とロボットが単独には成し遂げられない作業を、

協力して能率的に実施する遠隔操作技術が提案されている^{3,5,8)}。

その後、極限作業用のマン-ロボットシステムを実現するためのヒューマンインタフェース技術が提案されたが、これを知的遠隔操作 (advanced teleoperator) という⁷⁾。この技術は、全自動ロボットシステムに人間の援助を導入するもので、すなわち、ロボットシステムにおいて人間の巨視的な判断によって行動監視とエラー回復などを実施することになる。いいかえれば、ロボットシステムがなんらかの障害要素のために作業を推進することができなくなった場合、またはエラーが発生した場合、人間の援助を望み、人間は手動モードでこれを操作し、問題が解決された後、すぐに自動モードに復帰して作業を続行する技術をさすのである。

* 昭和 62 年 10 月 1 日受付

** 高麗大学校工科大学
College of Eng., Korea Univ.

*** 広島大学 工学部
Faculty of Eng., Hiroshima Univ.

したがって、巨視的な意志決定はコンピュータがし、人間は単にこれを補助する微視的な機能を遂行する。すなわち、作業実施中にエラーが発生しても、作業を中断することなくエラーを回復・復帰することによって、マン・ロボットシステムの有用性をいっそう向上させようとするのである。

本研究では、極限作業用のマン・ロボットシステムを構成するために、ヒューマンインタフェース技術の一環としての知的遠隔操作作業に関する研究をすることにした。したがって、このためにコンピュータグラフィックシミュレーションを利用して、知的遠隔操作作業においてエラーが発生した場合、これを回復・復帰するために、直接操作とコマンド操作による2つの手動モードを軌道計画によってどのように配分するかに対する設定基準を立てることにした。これはロボットの自律性と人間操作上の汎用性を、人間工学的側面から効率的に結合させるためである。

1-2. 研究の概要

本研究では、図1のような知的遠隔操作作業において、プログラムによる自動操作中にエラーが発生したとき、これを回復・復帰する方法として、直接操作およびコマンド操作の2つの手動モードを配分（モード1～3）した作業実施手順を提案しており、ここでは、プログラムによる自動モードと人間による手動モードをより有機的に結合させている⁷⁾。

エラー回復のための手動モードのうち、直接操作は微視的な動作の人間操作を要し、経済的な動作を作業空間に伝達しようと意図するものである。一方、コマンド操作は、監視制御のコマンドと似たものであり、これは主に巨視的な動作の人間操作を制御プログラムによって部分空間に伝達するものであり、キーボード

などを通じて操作することができる⁷⁾。しかし、エラーを回復し自動モードに復帰する際には、ある一定の運動軌道に従って運動をさせねばならない。そして、このような運動軌道での手動モードは、最適の条件下で運動するように軌道計画を実施せねばならない。

2. 実験

2-1. 実験計画

(1) 作業環境モデル

作業環境モデルを媒介とする人間とロボットの対話は、知的遠隔操作技術において、最も重要な機能要素のひとつであり、機器の修理、復旧作業などを行うとき、システムが対象物に関するデータをもたない場合は、オペレータがすべてを手動で行う必要があり、このとき能率は極めて低下する。したがって、システムが対象物に関するいろいろな種類のデータをもっている場合は、現場で行う作業の一部をあらかじめ準備しうるので、作業の部分的自動化を行うことができる。このようなデータのなかで最も基本的、かつ重要な事項は、一般に管理しやすい形式に構成化されているために幾何モデルとよばれる対象物を含む環境モデルをもつことである^{1,2)}。

図2に示した作業環境モデルにおけるBeamとBeam-holeなどは、対象物各部の名称であると同時に、位置と姿勢のデータも含んでおり、これによる環境データ構造は図3のように表される。

このようなデータ構造を利用して、システムはロボットアームの動きに従い、すべての対象物の位置、姿勢の変化を追跡し、いつでも正しい値になるように管理する。

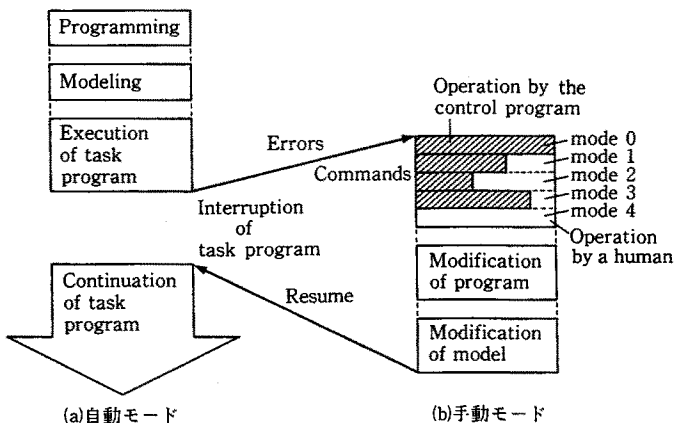


図1 知的遠隔操作システムの作業実施手順

Fig. 1 The flowchart of the work performance in the advanced teleoperator system.

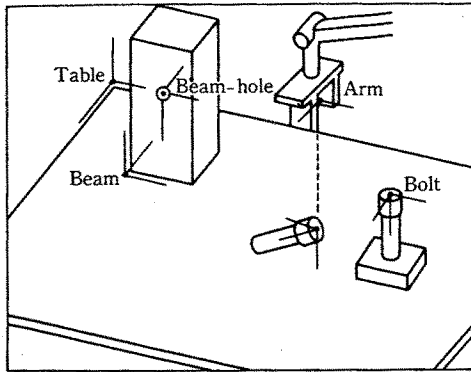


図2 作業環境モデル
Fig. 2 A model of task environment.

したがって、このような幾何モデルがあれば、作業命令を容易に下せるのであって、作業環境モデルを表示装置上で確認しながら利用し、また、作業をプログラミングして作業計画を立てることによってシステムを設計する。

2-2. 実験方法と手順

(1) 実験作業

グラフィックシミュレーションを通じて成し遂げられる作業は、ロボット作業のうち一般に行われているのは機器修理事業の一部であり、ここではスタンドに置かれたペグ (peg) を一定の場所に運搬して挿入する作業を選んだ。

この作業中に図2の作業環境モデルに示された破線

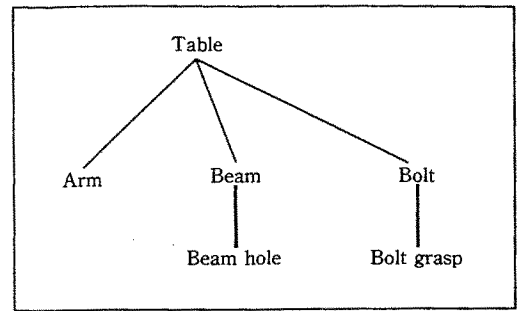


図3 環境データ構造
Fig. 3 A structure of environmental data.

部分においてエラーが発生した場合、表1のような作業内容、手順に従って回復し、自動モード軌道に復帰することによって、作業を続行させるようにした。

(2) 手動モードの設定

本研究におけるエラー回復のための手動モードは、エラーを回復し、自動モードに復帰させるために実施するコマンド操作と直接操作の配合比率によって変化する。表1に示した3つのモードは、図1にも示されているように、モード1は、手動モードのうちコマンド操作による実験作業の数が直接操作より多く、モード2は、これと反対に直接操作による実験作業の数がコマンド操作より多い。モード3は、コマンド操作による実験作業の数ははるかに多い場合である。

これらのモードは、ワークファクタ法による作業難易度を零にし、遂行度尺度は作業エラー、作業時間、

表1 実験作業の作業内容および手順
Tab.1 The working procedure order of the mode.

作業 順序	手動モード記号						作業内容
	直接動作			コマンド操作			
	モード			モード			
	1	2	3	1	2	3	
1				*	*	*	Move hand to Peg Grasp
2		0		*		*	Move hand vertically until it reaches floor
3	0	0				*	Position and Grasp Peg Grasp
4				*	*	*	Affix Peg to hand
5				*	*	*	Move Peg to upside
6		0		*		*	Move Peg to normal position
7	0	0	0				Stepback or Stepforward Peg until it resumes

作業正確度によって反復的に実験された学習効果によって得られたものである。これらの実験結果は、図14~16の作業難易度零に対する3つの遂行度尺度の値からもわかる。

(3) 軌道設定

本研究では、いくつかの特定地点による関節座標の位置、速度、加速度の時間計画計算のために Khalil のアルゴリズムを使用したり、

軌道は最小の移動時間をもって与えられた一連の点を円滑に通ることになり、このような円滑な動きとは、軌道上のすべての点において、位置、速度、加速度が連続的だということである。したがって連続性の条件から、出発点と目標点では位置が指定されるので、速度および加速度が存在しない。

各関節の軌道は、各時刻における各地点から得られ、このような点を円滑に連結するためには、各区間の軌道を従属変数である関節変数と独立変数である時間 t の多項式から構成する。各多項式は時間 T の間の一定の加速度(定数 A)を仮定することによって得られる。

すなわち独立変数時間 t で成し遂げられる従属変数(ジョイント変数) $q(t)$ は、

$$q(t) = A, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

(1)式を2回積分すれば、

$$Q(t) = \int q(t) dt \quad (2)$$

$$\int Q(t) dt = A \frac{t^2}{2} + Bt + C \quad (3)$$

となる。ここで、 B と C は $t = 0$ における速度と位置である。

したがって、本研究においてエラー回復時、最適の軌道を探すために、上記の式によって軌道計画を立てた。本実験で利用した運動軌道は、コマンド操作と直

接操作を含んだ手動モードのなかから前述した3つのモードによる可動運動範囲内で、探索的方法によって選択した。ここで、軌道Iは与えられたロボットの運動範囲内でエラーを回復するための最適な条件(最小の移動時間)をもつ軌跡であり、軌道IIは細密で微視的な動作の動きを要する軌跡である。また、軌道IIIは巨視的な動作の動きを要する軌跡である。

これらの軌道は、最小の移動時間とロボットのジョイントの円滑な動きなどを遂行度尺度として、反復的に実験された学習効果により得られたものであり、この実験の結果は図4~7に示したとおりである。図4は、前述したアルゴリズムによって軌道計画を実施した結果、運動軌道によるエンドエフェクターの移動位置を表したものであり、図5~7は運動軌道によるジョイントの移動位置をモデル別に表したものである。

したがって、本実験においては以上のような図を考察することによって、次のような事実を知ることができた。3つの運動軌道によるジョイントの移動位置をモード1に対して表したのが図5である。ここで、各ジョイントによる運動軌道と比較してみると、コマンド操作と直接操作が適切に配分されたモード1では、与えられたロボットの運動範囲内でエラーを回復するための最小の移動時間をもつ軌跡である軌道Iにおいて、使用されたジョイントをradianで表した位置量(動いた量)の差が少なかった。すなわち、各ジョイントを有効適切に使用した結果、他の軌道II、IIIより円滑な位置の配分を成し遂げることができた。

図6では直接操作が多いモード2が軌道IIであり、図7ではコマンド操作が多いモード3が軌道IIIであり、各々円滑な位置の配分を表している。それゆえ、コマンド操作と直接操作による2つの手動モードの効率的な配分が各ジョイントの移動位置に及ぼす影響は大き

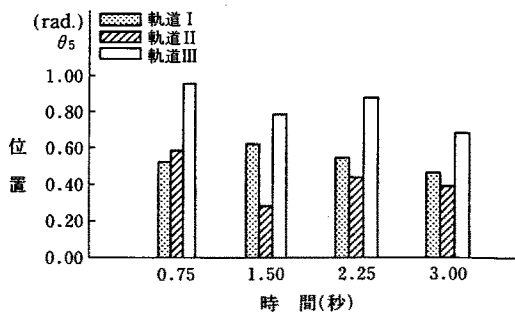


図4 運動軌道によるエンドエフェクターの移動位置

Fig. 4 The moving position of end effector through the movement trajectory.

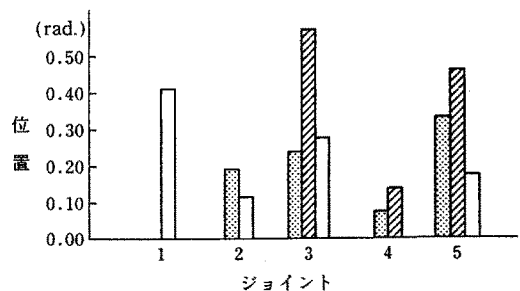


図5 運動軌道によるジョイントの移動位置(モード1)

Fig. 5 The moving position of joint through the movement trajectory in mode 1.

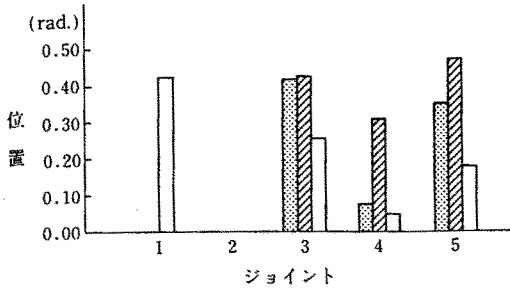


図6 運動軌道によるジョイントの移動位置 (モード2)

Fig. 6 The moving position of joint through the movement trajectory in mode 2.

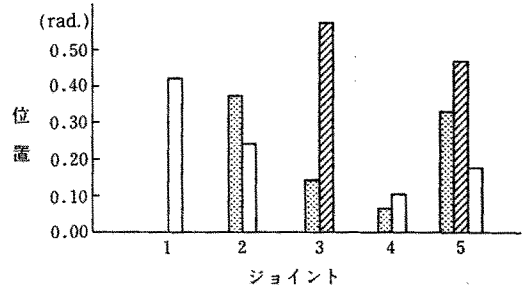


図7 運動軌道によるジョイントの移動位置 (モード3)

Fig. 7 The moving position of joint through the movement trajectory in mode 3.

いといえる。

図8は運動軌道による移動時間を、図9は運動軌道によるエンドエフェクターの移動時間を表している。また図10は運動軌道によるモードの移動時間を表したものである。これらは軌道計画の実験結果で得られた図5~7を分析することによって得た結果である。

図10において、運動軌道を通る各モードを調査した結果、軌道Iではモード1が、軌道IIではモード2が、そして軌道IIIではモード3が最小の移動時間を示している。ところで、図8と同様に最も少ない移動時間をもつ運動軌道が望ましいという軌道計画の条件によって考察したところ、軌道Iが望ましいものであった。これを図10のモードに対して考察した結果、モード1が最も望ましい手動モードであることがわかった。

したがって本研究では、軌道Iを各モードによる運動軌道と定め、エラー回復に関する効率的な手動モードの配分に対して、モード1, 2, 3につき各々実験を実施した。

(4) 実験の手順

本研究において、遂行度尺度として使われた作業時間と作業エラーは、各々1回エラー回復作業時の総時

間と総エラー回数とした。また、作業正確度はエラー回復後、自動モードの復帰地点に復帰するときの距離誤差(画素間=1mm)とし、作業難易度はワークファクタ法により落とされた物体の状態による握る動作の難易度によって0, 1, 2とした⁶⁾。

被験者としては、本研究に対する理解度の比較的高い人間工学専攻の大学院生3名を選定した。実験は、各モードに対して10回ずつ反復実施し、学習効果に対

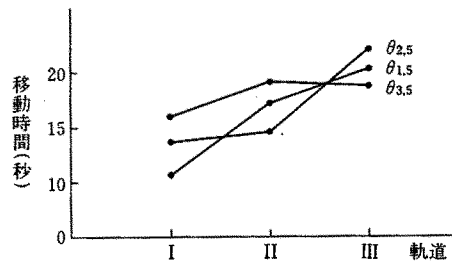


図9 運動軌道によるエンドエフェクターの移動時間

Fig. 9 The moving time of end effector through the movement trajectory.

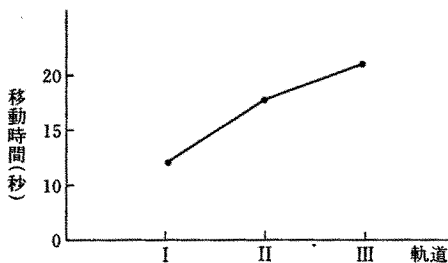


図8 運動軌道による移動時間

Fig. 8 The moving time through the movement trajectory.

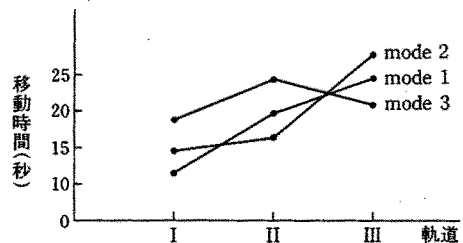


図10 運動軌道によるモードの移動時間

Fig. 10 The moving time of mode through the movement trajectory.

する過度の時間量を排除した。

2-3. 実験の結果および分析

本研究で用いた知的遠隔操作作業において、作業遂行中にエラーが発生したとき、これを回復するための手動モードの効率的な配分による作業の遂行度を評価

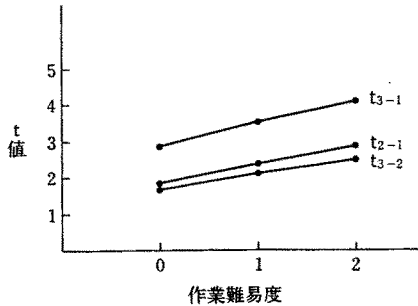


図 11 作業難易度による作業エラーの t 値
Fig. 11 t value of task error according to the degree of difficulty.

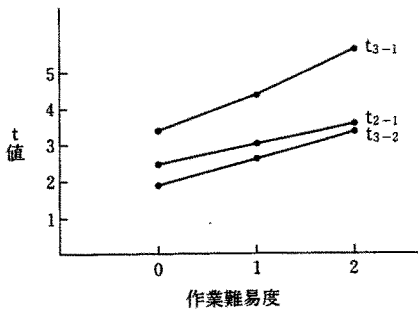


図 12 作業難易度による作業時間の t 値
Fig. 12 t value of task time according to the degree of difficulty.

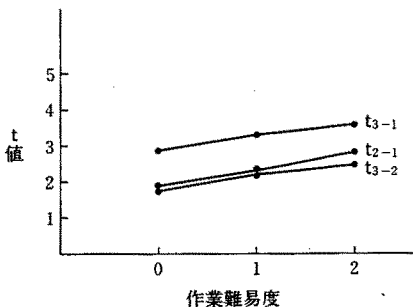


図 13 作業難易度による作業正確度の t 値
Fig. 13 t value of task accuracy according to the degree of difficulty.

するため予備実験を実施し、その結果を t 検定で分析・比較した。その結果、本研究で有意であると認定された有意水準 5% ($t_{0.05}=1.83$) において、作業エラーと作業時間、そして作業正確度の t 値は、図 11~13 に示すように $t_{3-1} > t_{2-1} > t_{3-2} (> 1.83)$ であり、モード 1 の優越性が検証された。すなわち、各遂行度尺度の比較では、モード 3 の平均値がモード 1 の平均値より大きく、モード 2 がモード 1 より、そしてモード 3 が 2 より大きかった。

これは新しい変動要因の影響を調べるための基盤を提供するものであり、したがって本実験では、作業難易度により人間オペレータの作業エラーと作業時間、作業正確度がどんな影響を受けるかについて実験を実施し、その結果を t 検定によって分析・比較した。その結果、有意水準 5% ($t_{0.05}=1.83$) で、作業エラーと作業時間、そして作業正確度の t 値は $t_{3-1} > t_{2-1} > t_{3-2} (> 1.83)$ であり、モード 2 とモード 3 よりもモード 1 の優越性が検証された。

上記の結果について、二元配置による分散分析を実施した結果が、表 2~4 である。表 2 は図 11 に対応するもので、作業エラーに関しての F 検定の結果である。作業難易度およびモードの種類ともに統計的に有意であるが、交互作用については有意ではなかった。表 3 は図 12 に対応する作業時間に関しての F 検定の結果であり、作業難易度およびモードの種類で統計的に有意であった。表 4 は作業正確度に関する F 検定であり、上記と同様の統計的な有意差が生じている。ただし、表 4 に関しては作業難易度の有意差検定は他の表と異なって 5% 程度であり、これは図 13 からも、作業難易度が変化しても t 値に大きな変動がみうけられないことからわかる。

これら 3 種の F 検定結果も明確な有意差が統計的に得られており、図 11, 12, 13 で表示した t 検定による有意差を支持する結果となっている。

各作業難易度によるモード別の遂行度尺度を比較した結果、モード 1 が最も優位であることがわかったが、これは作業難易度が増加するにつれて同じ結果になることもわかった。また、各モードによる遂行度尺度の変動量は、作業難易度の増加につれてモード 1 では大きな差異が現れなかったが、モード 2 とモード 3 では、ますます大きくなる傾向があることがわかった。

以上の点から本実験の資料を分析した結果は次のとおりである。

(1) エラーの発生時に人間オペレータが回復操作をするとき、作業難易度によるモード別人間オペレータの作業エラーの平均回数は図 14 のとおりであり、モード 1 において最も少なくなった。これは、コマンド操

表2 作業エラーに関する分散分析表

Tab. 2 Two-factor analysis of variance for task error.

変動因	平方和	自由度	平方平均	F値
作業難易度(A)	19.756	2	9.878	9.55***
操作モード(B)	26.022	2	13.011	12.58***
A × B	5.044	4	1.261	1.22
誤差	83.800	81	1.035	
計	134.622	89		

*: p<.05, **: p<.01, ***: p<.001

表3 作業時間に関する分散分析表

Tab. 3 Two-factor analysis of variance for task time.

変動因	平方和	自由度	平方平均	F値
作業難易度(A)	5.585	2	2.792	6.96***
操作モード(B)	6.681	2	3.340	8.33***
A × B	.893	4	.223	.56
誤差	32.479	81	.401	
計	45.638	89		

表4 作業正確度に関する分散分析表

Tab. 4 Two-factor analysis of variance for task accuracy.

変動因	平方和	自由度	平方平均	F値
作業難易度(A)	6.221	2	3.110	4.08*
操作モード(B)	20.832	2	10.416	13.67***
A × B	1.541	4	.385	.51
誤差	61.722	81	.762	
計	90.316	89		

作により与えられたロボット経路発生命令によって、一定の作業の遂行を巨視的に実施し、物体を握る動作と復帰するときの微視的な動作を直接操作で成し遂げたからである。これは、モード2やモード3ではなく、モード1でコマンド操作と直接操作をより効率的に配分したことによる。

(2) 平均作業時間によって比較したものを図15に示す。ここでもモード1の作業時間が最も少なくなっている。これも、モード2とモード3においてコマンド操作の長所と直接操作の長所を生かし、これらの配分を有効・適切に実施した結果である。

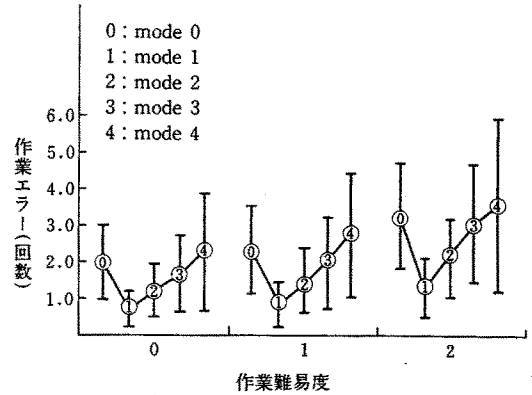


図14 作業難易度による手動モードの作業エラー
Fig. 14 Task error of manual mode according to the degree of difficulty.

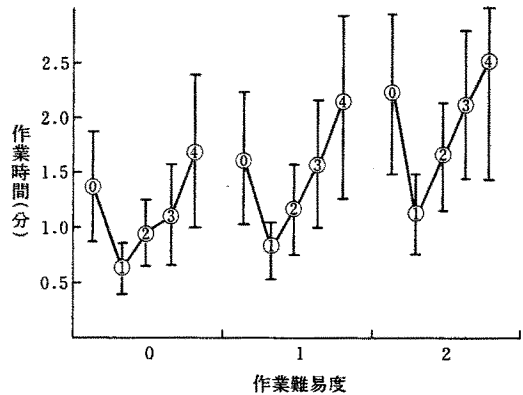


図15 作業難易度による手動モードの作業時間
Fig. 15 Task time of manual mode according to the degree of difficulty.

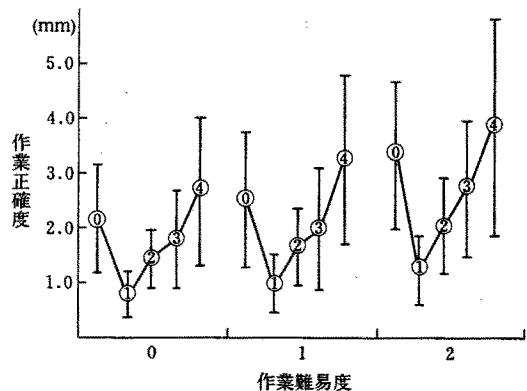


図16 作業難易度による手動モードの作業正確度
Fig. 16 Task accuracy of manual mode according to the degree of difficulty.

(3) 作業正確度の距離誤差を RMS (Root Mean Square) 誤差で表すと図 16 のようになる。すなわち、エラー回復後に復帰地点まで復帰するとき、モード 3 では、復帰命令の操作のなかではコマンド操作部分が大きく、直接操作部分が少ない回数で行われたために誤差が大きく現れたのである。モード 2 では直接操作の回数が多かったため、遂行時間はかかっているものの、復帰地点まで復帰する正確度はモード 3 より良好であった。モード 1 では、上記のようなモード 2 とモード 3 の欠点を補完しながら、両操作を効率的に利用することによって、最も良好な正確度を得ることができた。

3. 結 語

コンピュータグラフィックシミュレーションを利用した知的遠隔操作作業において、エラーを効率的に回復し、復帰するためのコマンド操作と直接操作において、軌道計画により 2 つの手動モードをどのように配分するかの設定基準を立てた。そして、ロボットの自律性と人間操作上の汎用性を人間工学的な側面で効率的に配分するように意図した。

本実験の結果によれば、軌道計画の条件から考察すると、移動時間の最も少ない運動軌道は軌道 I であり、これによるモード 1 がコマンド操作と直接操作を効率的に配分した手動モードであることがわかった。いいかえれば、たとえコマンド操作が容易で作業時間が少なくすむとしても、作業の難易度が増加するにつれて作業エラーは直接操作で少なくなるため、巨視的な動作はコマンド操作で遂行し、微視的な動作は直接操作で成し遂げるように手動モードを効率的に配分することによって、マン-ロボットシステムの有用性をいっそう高めることができることがわかった。

ところで、運動軌道が変わるにつれて効率的な手動モードの配分も変わるので、手動モードの効率的な配分のためには、より細密な軌道計画による運動軌道の

適切なシミュレーションと、それによるモード数などに関する多くの研究が進められるべきであろう。

今後の課題は、本実験の結果分析を基盤として、コマンド操作を成し遂げる際に、inverse kinematics を通じた軌道計画を実施し、これを直接操作とともに、今まで実施してきた遂行度尺度に従って考察し、遂行度尺度を最小化させることのできるコマンド操作においての end point を探しだし、より効率的な手動モードを設定することである。

参考文献

- 1) Hasegawa, T. : An Interactive System for Modeling and Monitoring a Manipulation Environment, IEEE Trans., Systems, Man, Cybernetics, SMC-12, No. 3, May/June, 250~258, 1982.
- 2) 長谷川 勉 : 環境教示と環境モデル, JRSJ, 2 (6), 95~98, 1984.
- 3) Johnsen, E. G. and Corliss, W. R. : Teleoperators and Human Augmentation, An AEC-NASA Technology Survey, NASA SP-5047, 1967.
- 4) Khalil, W. : Trajectories Calculations in the Joint Space of Robots, Advanced in Software Robotics, 177~186, 1984.
- 5) Kevin Corker and John Lyman : Research Issues in Implimenting Remote presence in Teleoperator Control, 17th Annual Conference on Manual Control, Vol. 1, 109~126, 1983.
- 6) 李舜堯 : 作業管理, 博英社, 397~400, 1975.
- 7) 高瀬国克, 若松清司 : 知能的テレオペレーションシステムの構成法とその要素技術, JRSJ, 2 (6), 63~64, 1984.
- 8) 辻 三郎, 江尻正員 : ロボット工学とその応用, 電子通信学会, 168~171, 1984.