《研究論文》

Journal of the Human Engineering Society of Korea
Vol. 6 No. 1, April .1987

軌道計劃에 의한 手動모드의 效率的 配合에 關한 硏究

(A Study on an efficient combination of the manual mode according to trajectory planning)

李舜堯[†] 長町三生 伊藤宏司[††] 權奎植 吳悌祥[†††]

Abstract

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 these experiments the error which is occurred during performing the automatic mode is recovered by the manual mode which is combined properly the operation by human with the operation by control program.

The result shows an improvement availibility of the system by not only establishing an efficient combination of the manual mode according to trajectory planning but also recovering the error effectively.

Therefore we suggest that the operation by control program should be applied in macro motion of control and the operation by human in micro motion of control.

Ⅰ. 序 論

1. 硏究의 意義와 目的

人間에게 있어서 苛酷한 環境下에서의 極限作業을 실시하기란 대단히 곤란하여 이를 로보트의 活躍에 기대하려고 하는 應用分野는 점점 擴大되어 가고 있다. 그러나 오늘날의 技術水準으로서는 이렇게 로보트化할 수 있는 作業의 種類는 대단히 制限되어 있다. 工場內에서의 量産工程과는 달리 機器의 修理作業 등은 로보트에게는 익숙되지 않은 場所에서 한번 한번 그 場所別로 행하는 作業이며, 또한 整備되지 않은 作業을 能率的으로 實行하기 위해서는 로보트 그 自體의 作業能率 뿐만 아니라 指令을 주는 人間과 로보트와의 關係를 면밀하게 檢討할 必要가 있다[19].

그러므로 로보트의 活躍에 기대하는 應用分野가 점점 擴大됨에 따라 人間과 로보트와의 關係가 더욱 중요시되고 있다. 宇宙, 深海, 原子力프란트 등 최근에 增大해가고 있는 危險 즉,

† 高麗大学校 産業工学科
†† 日本広島大学人間工学研究所
††† 高麗大学校 人間工学研究室

人間이 接近하기 힘든 作業環境下에서 로보트가 機器裝置類의 組立, 分解, 修理 등의 作業을 행할 경우, 高度의 知識이나 經驗을 가진 人間 操作者의 狀況判斷과 적절한 指令이 없으면 그 作業의 수행은 곤란하게 될 것이다. 이러한 極限作業用의 人間-로보트시스템에 있어서 로보트의 環境適應能力을 최대한으로 살리면서 安全한 遠隔地點으로부터 操作者의 巨視的인 判斷과 操作에 따라 人間과 로보트가 단독으로서는 할 수 없는 作業을 協力하여 能率的으로 實施하는 遠隔操作(teleoperation) 技術이 提案되었다[18,22].

이 技術에서 로보트는 操作者로부터 巨視的인 指令에 따라 미리 蓄積되어 있는 對象作業에 관한 知識 및 視覺, 觸覺 등 센서(sensor)에 의한 周圍의 環境認識을 통하여 自律的으로 作業을 實行해 나가게 되나, 作業이 곤란한 狀況이나 해결할 수 없는 局面에 直面했을 때, 로보트는 操作者에게 指示를 바라고 그 指令에 따라서 다음의 行動으로 옮겨 目的으로 하는 作業을 수행하게 된다[13,14].

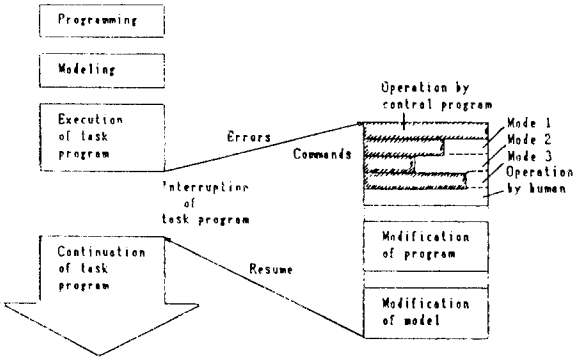
이와 같이 極限作業用 人間-로보트시스템을 實現하기 위한 human interface 技術은 全自動 로보트시스템에 人間의 援助를 導入하는 것으로서 즉, 로보트시스템에 있어서 巨視的인 判斷에 따라 다음에 해야될 것을 決定하는 것과 自己行動이 妥當한지를 監視하고 만약 妥當하지 않은 것이 있으면 修正한다고 하는 行動監視와 에러回復(motion monitoring and error recovery) 등을 실시하게 한다. 다시 말해서 로보트시스템이 어떤 장해요소 때문에 作業을 앞으로 推進할 수 없게 되거나 에러가 發生하거나 하면 人間의 援助를 바라고, 人間은 手動모드로 이를 操作한 후 문제가 해결되면 그후 바로 自動모드로 復歸하여 作業을 續行하게 하는 것이다.

本 硏究에서는 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션을 利用하여 human interface 技術의 一環으로서 知能的 遠隔操作作業에서의 에러發生時 이를 回復하고 復歸하기 위하여 直接操作과 코맨드操作에 의한 두 개의 手動모드를 軌道計劃에 따라서 어떻게 配合할 것인가에 대한 設定基準을 세움으로써 로보트의 自律性과 人間操作上의 汎用性을 人間工學的 側面에서 效率的으로 結合시키고자 한다.

2. 硏究의 槪要

1) 指能的 遠隔操作시스템의 構成

本 硏究에서는 그림 1과 같은 知能的 遠隔操作作業에서 프로그램에 의한 自動操作中 에러가 발생했을 때 이를 回復하고 復歸하기 위한 方法으로써 두 가지의 手動모드(直接操作, 코맨드操作)를 配合한 作業實施順序를 提案하고 있으며, 여기서는 프로그램에 의한 自動操作과 人間에 의한 手動作業을 보다 有機的으로 結合시키려 하고 있다[19].



(a) 自動모드 (b) 手動모드

그림 1. 知能的 遠隔操作시스템의 作業實施順序圖

다시 말해서 自動모드에 의한 作業實施中에 에러가 발생했을 경우 自動모드로부터 手動모드로 바로 轉換하여 에러를 回復하고 다시 自動모드로 復歸함으로써 시스템의 機能性을 한층 向上시키게 된다.

2) 手動모드

그림 1에 있어서 프로그램과 作業環境모델에 의한 自動모드의 수행중 에러가 발생했을 경우, 手動모드로 轉換하고 人間의 손에 의하여 이를 조이스틱(joy stick)이나 master arm 등을 操作하여 slave arm에 直接 傳達하는 直接操作과 코맨드命令을 부여함으로써 動作프로그램을

作動하는 코맨드操作에 의해서 回復되게 한다.

에러回復을 위한 手動모드중 直接操作은 微視的 動作의 人間操作을 요하는 것으로서 經濟的인 動作을 作業空間에 傳達하려고 試圖하는 것이고, 다른 한편 코맨드操作은 監視制御의 코맨드와 類似한 것으로서 이는 주로 巨視的 動作의 人間操作을 制御프로그램에 의해서 部分空間에 傳達하는 것이며, 이는 키보드(key board) 등을 통해서 操作할 수 있다[19].

3) 軌道計劃

本 硏究에서의 에러回復을 위한 手動모드는 에러를 回復하고 自動모드로 復歸함에 있어서 어느 一定한 運動軌道에 따라 運動을 하게 되며, 따라서 이러한 運動軌道에서의 手動모드는 最適의 條件下(例, 最小의 移動時間)에서 運動을 하도록 軌道計劃을 實施해야 한다.

여기서 軌道計劃이란 要求된 運動 즉,"move (P_1)"을 出發點 P_0로부터 目標點 P_1 까지 로보트팔의 空間形狀에 대한 時間順序를 規定하는 軌道로 變換하는 것이다[1]. 軌道가 實行됨에 따라 집게(end effector)는 空間上의 어떤 曲線을 따라 그 方向이 變化되며, 이러한 집게의 實質的인 움직임은 平行移動과 回轉으로 進行되어, 집게에 의해서 軌道의 經路(path)라는 空間曲線을 이루게 된다. 이때 經路와 回轉의 曲線은 位置에 對應한 單一媒介變數(parameter) 函數이다[1].

運動軌道는 速度 및 加速度情報도 포함하고 있으므로 만약 媒介變數가 時間과 關係하고 있으면 팔의 平行移動 및 回轉의 速度, 加速度는 經路를 規定하는 方程式을 微分함으로써 알 수 있다. 이러한 軌道計劃으로 얻어진 結果는 k개의 形狀으로 나타나는 로보트팔의 順序$\{e_i\}$, $1 \leq i \leq k$로 이루어진다[1].

Ⅱ. 本 論

1. 實驗設計

1) 作業環境모델

作業環境모델을 媒介로 한 人間과 로보트의 對話는 知能的 遠隔操作技術에 있어서 가장 중요한 機能要素中의 하나로서 機器의 修理, 復舊作業 등을 행할 때 시스템이 對象物에 관한 데이터를 가지고 있지 않을 경우는 操作者가 모두를 手動으로 행할 필요가 있으며, 이 때에는 극히 能率이 저하된다. 따라서 시스템이 對象物에 관한 여러 종류의 데이터를 가지고 있을 경우는 現場에서 행하는 作業의 일부를 미리 準備할 수가 있어 作業의 部分的 自動化를 행할 수가 있다. 이러한 데이터중에서 가장 基本的이고 중요한 것은 一般的으로 管理하기 쉬운 形式으로 構造化되어 있어 幾何모델이라고 부르는 對象物을 포함한 環境에 대한 幾何學的 데이터이다[2,21].

操作을 실시함에 있어서 중요한 場所에 설치된 座標系의 位置와 姿勢로서 對象物의 幾何學的 特徵을 나타내기 위한 作業環境모델의 構成과 프로그램을 위해서 作業計劃(task planning)을 행한다[10,17].

그림 2에 나타난 作業環境모델에서의 BEAM과 BEAM HOLE 등은 對象物 各部의 이름을 나타냄과 동시에 位置와 姿勢의 데이터도 포함하고 있으며, 이에 따른 環境데이터構造는 그림 3에 나타나 있다.

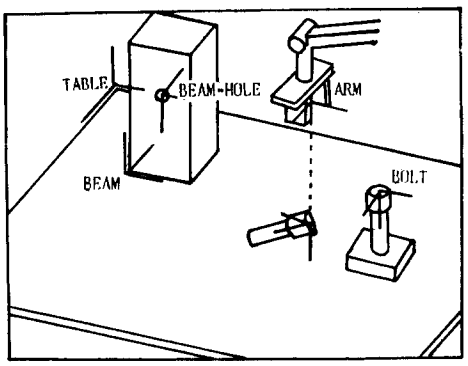


그림 2. 作業環境 모델

가는 선으로 連結된 關係는 相對位置가 자유로이 變化될 수 있는 關係이며 굵은 선은 固定된 關係를 나타내고 相對位置關係가 變化되는 경우가 없이 作業의 수행에 따라 動的으로 變化한다. 이러한 데이터 構造를 이용하여 시스템

은 로보트팔의 움직임에 따라 모든 對象物의 位置, 姿勢의 變化를 追跡하고 항상 올바른 값이 될 수 있도록 管理한다.

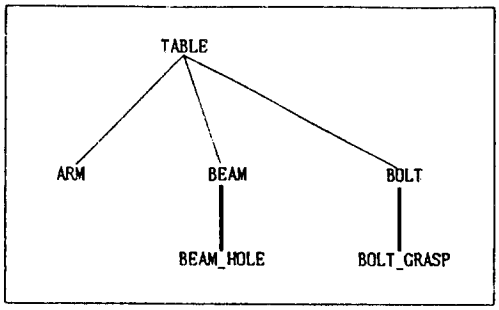


그림 3. 環境데이터 構造

그러므로 이러한 幾何모델을 가지고 있으면 作業命令이 대단히 쉽게 이루어질 수가 있으며, 따라서 作業環境모델을 表示裝置上에서 확인하면서 그 모델을 이용하고 또한, 作業을 프로그래밍하여 作業計劃을 함으로써 시스템을 設計한다.

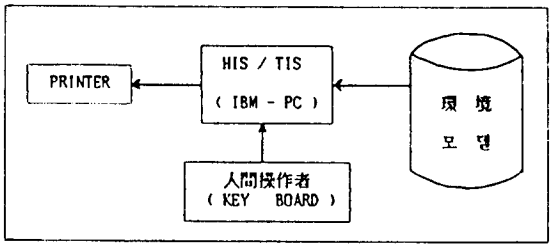


그림 4. 實驗裝置 構成圖

2) 實驗裝置

人間-로보트시스템에 있어서 人間操作者의 命令을 받고 作業을 수행하며 그 結果의 情報를 피이드백 (feedback)하는 干涉作用機能을 하는 機器로 IBM-PC를 使用하였으며, 그 實驗裝置의 構成圖는 그림 4에 나타나 있다[3].

本 實驗에서는 人間操作者와 情報交換을 하는 HIS(human interactive subsystem) 컴퓨터와 서로 干涉作用을 하며, HIS로부터의 命令을 받아 作業을 수행하고 피이드백하는 TIS (task interactive subsystem) 컴퓨터의 機能을 한 대의 컴퓨터가 수행하는 것으로 간주하였다[12,15].

그래픽 시뮬레이션에 쓰여진 컴퓨터言語는 一般的인 高水準 言語에 運動經路方程式(kinematic eguation)을 適用한 것을 使用하였으며, 프로그램에 의하여 形成된 로보트는PUMA type 5軸 로보트팔이다[8,9].

2. 實驗方法

1) 實驗作業

그래픽 시뮬레이션을 통하여 수행된 作業은 로보트作業中에서 一般的으로 행해지는 것 중의 하나인 機器修理作業의 一部로서 스탠드(stand)에 놓여진 패그(peg)를 일정한 場所로 運搬하여 挿入하는 作業을 택하였고, 이 作業中 그림 2의 作業環境모델에 나타난 點線部分에서 에러가 發生했을 때 表 1과 같은 作業實施內容 및 順序에 따라 이를 回復하고 自動모드軌道에 復歸함으로써 作業을 續行하도록 하였다.

表 1. 實驗作業의 作業實施內容 및 順序

作業順番	制御모드記號		作業內容
	直接操作	코맨드操作	
1		*	Move hand to peg-grasp
2		*	Move hand vertically until it reaches floor
3	o		Position and grasp peg-grasp
4		*	Affix peg to hand
5		*	Move peg to upside
6		*	Move peg to normal position
7	o		Stepback or stepforward peg until it resumes

2) 手動모드設定

本 硏究에서의 에러回復을 위한 手動모드는 에러를 回復하고 自動모드로 復歸하는 데 있어서 人間에 의한 直接操作과 制御프로그램에 의한 코맨드操作의 配合比率로 變動하게 된다. 모드 1에 대한 作業實施順序를 나타낸 것이 表1이며, 이 表에서 *표는 코맨드操作, o표는 直接操作을 나타내고, 모드1에서 모드2와의 차이점은 모드2에서 作業順番 2와 6이 直接操作으로써 수행되며, 모드3과의 차이점은 모드3에서 作業順番 3이 코맨드操作으로써 수행되게 된다.

3) 軌道設定

本 硏究에서는 몇 개의 特定한 地點에 따른 關節座標의 位置, 速度, 加速度의 時間計劃計算을 위해서 Khalil의 알고리즘(algorithm)을 使用하였다[5].

軌道는 最小의 移動時間을 가지고 주어진 一聯의 점들을 원활하게 지나가게 되며, 이러한 원활한 움직임이란 軌道上의 모든 점에 있어서 位置, 速度, 加速度가 連續的이라고 하는 것이다. 따라서 連續性의 條件으로부터 出發點과 目標點에서는 位置가 指定되므로 速度, 加速度가 存在하지 않는다[22].

각 關節의 軌道는 그 時刻에 있어서의 그 地點에서 얻어지게 되며, 이러한 점들을 원활하게 連結하기 위해서는 각 區間의 軌道를 從屬變數인 關節變數와 獨立變數인 時間 t의 多項式으로 構成한다. 각 多項式은 時間 T 동안의 一定한 加速度를 假定함으로써 얻어질 수 있다.

즉,

$$\ddot{q}(t) = A, \quad 0 \le t \le T \qquad (1)$$

(1)를 두번 積分하면,

$$\dot{q}(t) = At + B \qquad (2)$$

$$q(t) = A\frac{t^2}{2} + Bt + C \qquad (3)$$

이 된다.

여기서, B와 C는 t = 0에서의 速度와 位置이다.

따라서, 本 硏究에서는 에러回復時 最適의 軌道를 찾기 위해서 위의 式에 따라 軌道計劃을 實施하였다. 그리고 本 實驗에서 이용한 運動軌道는 軌道計劃을 실시함에 있어서 直接操作과 코맨드操作에 의한 두개의 手動모드에 따른 可用運動範圍中에서 探索的 方法으로 選擇하였다.

3. 實驗節次

本 硏究의 實驗에 있어서 實驗을 수행할 被實驗者는 비교적 本 硏究에 대한 理解度가 높은 人間工學 專攻의 大學院 1學年生 3명으로 選定하였다. 그리고 實驗은 軌道計劃에 의한 運動軌道 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ으로 하였으며, 또한 手動모드에 의한 直接操作과 코맨드操作의 比率을 달리한 모드 1,2,3에 대하여 각 10回씩 反復 實施하였다[24].

4. 實驗結果

本 硏究에서 수행한 知能的 遠隔操作作業에 있어서 作業遂行中에 에러가 발생했을 때, 이를 回復하고 復歸하기 위하여 直接操作과 코맨드操作에 의한 두 개의 手動모드를 軌道計劃에 따라 어떻게 配合할 것인가에 대하여 實驗을 實施하였다.

그 實驗結果는 아래와 같은 그림들로 나타났다. 그중 그림 5는 前述한 알고리즘에 의해서 軌道計劃을 實施한 結果, 運動軌道에 따른 집게의 移動位置를 나타낸 것이며, 그림 6, 7, 8은 運動軌道에 따른 조인트의 移動位置를 모드별로 나타낸 것이다.

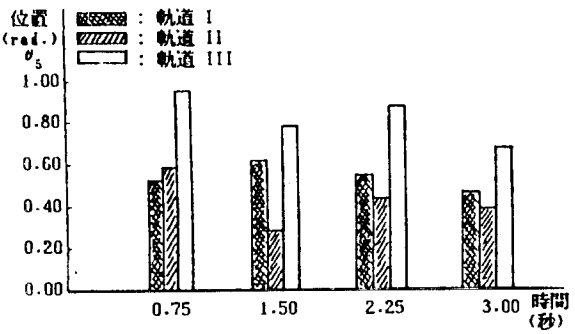


그림 5. 運動軌道에 따른 집게의 移動位置

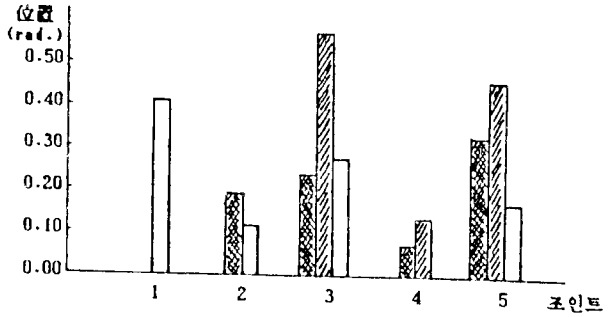


그림 6. 모드 1에서의 運動軌道에 따른 조인트의 移動位置

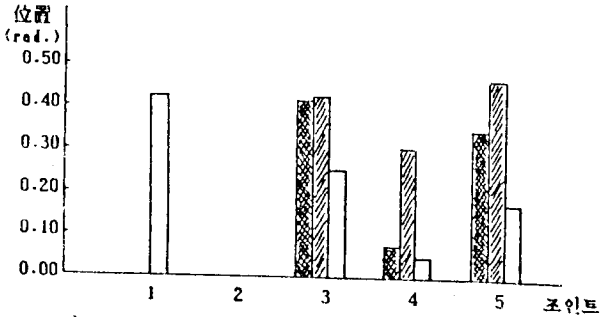


그림 7. 모드 2에서의 運動軌道에 따른 조인트의 移動位置

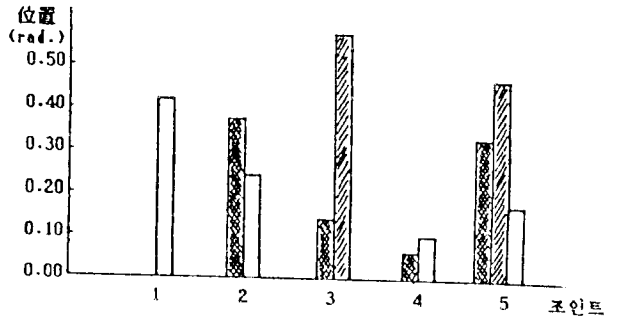


그림 8. 모드 3에서의 運動軌道에 따른 조인트의 移動位置

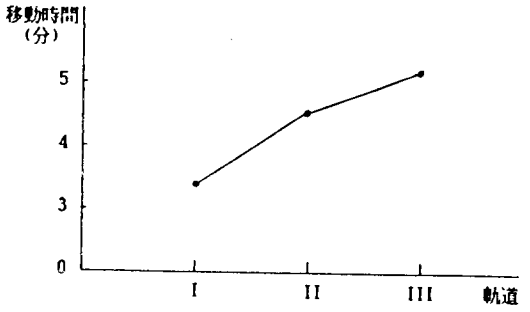


그림 9. 運動軌道에 따른 移動時間

그림 9는 運動軌道에 따른 移動位置를 나타냈으며, 그림 10은 運動軌道에 따른 집게의 移動時間을 나타냈다. 그리고 그림 11은 運動軌道에 따른 모드의 移動時間을 각각 나타낸 것으로서 이들은 軌道計劃의 實驗結果로 나타난 그림 5-8을 分析함으로써 얻어진 結果이다.

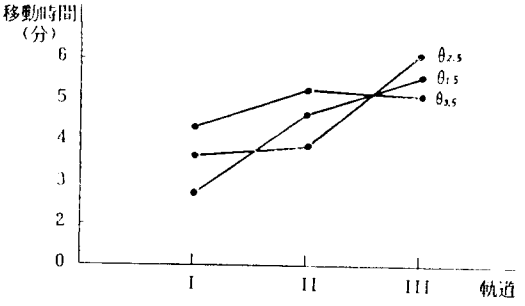


그림 10. 運動軌道에 따른 집게의 移動時間

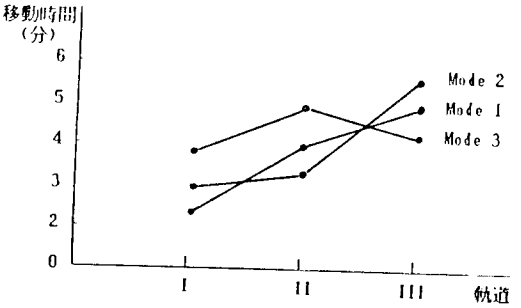


그림 11. 運動軌道에 따른 모드의 移動時間

그런데 그림 9에서와 같이 가장 적은 移動時間을 갖는 運動軌道가 바람직하다는 軌道計劃의 條件에 따라 考察할 때 「軌道 I 」이 바람직한 軌道였으며, 이를 그림 11의 모드에 대해서 考察해 본 結果 「모드 I 」이 가장 바람직한 手動모드임을 알 수 있었다.

다른 한편 運動軌道가 변함에 따라서 이러한 手動모드의 效率的인 配合도 변한다는 것을 알 수 있었으며, 요구된 에러를 回復하고 自動모드로 復歸하기 위한 手動모드의 配合은 그에 알맞는 바람직한 軌道計劃에 의해서 實行되어야 함을 알 수 있었다.

Ⅲ. 結　論

컴퓨터 그래픽 시뮬레이션을 이용한 human interface 技術의 一環으로서 知能的 遠隔操作作業에서의 에러發生時 이를 效率的으로 回復하고 復歸하기 위하여 直接操作과 코맨드操作에 의한 두 개의 手動모드를 軌道計劃에 따라 어떻게 配合할 것인가에 대한 設定基準을 세움으로써 로보트의 自律性과 人間操作上의 汎用性을 人間工學的인 側面에서 效率的으로 配合시키려고 하였다.

本 實驗結果에 의하면 軌道計劃의 條件에 따라 考察해 볼 때 가장 적은 移動時間을 갖는 運動軌道는 「軌道Ⅰ」이었으며, 이에 따른 「모드1」이 直接操作과 코맨드操作의 效率的인 配合에 의한 手動모드임을 알 수 있었다.

그런데 運動軌道가 변함에 따라서 效率的인 手動모드의 配合도 변하게 되므로 手動모드의 效率的인 配合을 위해서는 作業難易度에 따른 作業時間, 作業過誤 및 作業의 正確度 등을 遂行度尺度로 活用하여 硏究를 繼續하여야 하겠으며, 또한 이를 위해서는 軌道計劃에 의한 運動軌道의 알맞는 시뮬레이션과 그에 따른 많은 硏究가 進行되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

[1] Brady, M., "Trajectory Planning", *Robot Motion : Planning and Control,* MIT Press, 1982.

[2] Hasegawa, T., "An Interactive System for Modeling and Monitoring a Manipulation Environment", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics,* SMC-12, No. 3, May/June, 1982.

[3] *IBM Reference Handbook,* International Business Machines Corporation, 1984.

[4] Kevin Corker, Andrew, H. Mishkin and John Lyman, "Research Issues in Implimenting Remote Presence in Teleoperator Control", *17th Annual Conference on Manual Control,* Vol. 1, 1983.

[5] Khalil, W., "Trajectories Calculations in the Joint Space of Robots", *Advanced in Software Robotics,* 1984.

[6] Ozaki, H., Mohri, A. and Takata, M., "On The Collision Free Movement of A Manipulator", *Advanced in Software Robotics,* 1984.

[7] Park, C.S., *Interactive Microcomputer Graphics,* Addison Wesley Publishing Company, 1985.

[8] Paul, R., "Kinematic Control Equations for Simple Manipulators", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics,* SMC-11, No. 6, Jun. 1981.

[9] Paul, R., *Robot Manipulators,* MIT Press, 1982.

[10] Paul Sjolund and Max Donath, "Robot Task Planning : Programming using Interative Computer Graphics", *Proc. 13th International Symposium on Industrial Robots,* Vol. 1, 1983.

[11] Rouse, W. B., *Advances in Man - Machine Systems Research,* Vol. 1, JAI Press, 1984.

[12] Sheridan, T. B., "Supervisory Control of Remote Manipulators, Vehicles and Dynamic Process : Experiments in Command and Display Aiding", *Advances in Man - Machine Systems Research,* Vol. 1, 1984.

[13] Sheridan, T. B. and Ferrell, W. R., "Supervisory Control of Remote Manipulation", *IEEE Spectrum,* Vol. 4, No. 10, Oct. 1967.

[14] Shirai, Y., "Key Issues of Robotics Research", *2nd International Symposium of Robotics Research,* 1985.

[15] Starr, G. P., "Supervisory Control of Remote Manipulation : A Preliminary Evaluation", *17th Annual Conference on Manual Control,* Vol. 1, 1983.

[16] Tachi, S. and Arai, H., "Study on Tele-Existence (II)", *Proc. 85 International Conference on Advanced Robotics,* 1985.

[17] Takase, K., Raul, R. and Berg, E. J., "A Structured Approach to Robot Programming and Teaching", *IEEE Trans. Systems, Man,*

Cybernetics, SMC-11, No. 4, 1981.

[18] Vertut, J. and Coiffet, P., "Key Note on Teleoperation", *Proc. 85 International Conference on Advanced Robotics*, 1985.

〔19〕 高瀬國克, 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*, vol.2, No.6, 1984.

〔20〕 平井成興, 佐藤知正, " LARTS/T を用いた言語主導型 マスタスレーブマニピュレーション法", *JRSJ*, Vol.2, No.6, 1984.

〔21〕 長谷川勉, "環境教示 環境 モデル", *JRSJ*, Vol.2, No.6, 1984.

〔22〕 辻三郎, 江尻正員, " ロボット工學 とその應用, " 電子痛信學會編, 1984.

〔23〕 上原明, " ロボットの特色と今後の發展の方向, " *Robot Engineering*, Dec., 1982.

〔24〕 李舜堯, 梁瑄模, "컴퓨터 그래픽 시뮬레이션을 利用한 監督者制御에 관한 硏究", 大韓人間工學會誌, Vol.4, No. 2, 1985.

〔25〕 李舜堯 著, 作業管理, 博英社, 1975.