《研究論文》

Journal of the Human Engineering Society of Korea
Vol.6 No.2,Dec. 1987

知的 遠隔操作시스템의 一環으로서 에러回復 專門家시스템에 관한 硏究

(A Study on an Error Recovery Expert System in the Advanced Teleoperator System)

李舜堯† 廉準圭†† 吳悌祥†† 李昌民††

Abstract

If an error occurs in the automatic mode when the advanced teleoperator system performs a task in hostile environment, then the mode changes into the manual mode. The operation by program and the operation by human recover the error in the manual mode. The system resumes the automatic mode and continues the given task.

In order to utilize the inverse kinematics as means of the operation by program in the manual mode, Lee and Nagamachi determined the end point of the robot trajectory planning which varied with the height of the task object recognized by a T.V monitor, solved the end point by the fuzzy set theory, and controlled the position of the robot hand by the inverse kinematics and the posture of the robot hand by the operation by human. But the operation by human did take a lot of task time because the position and the posture of the robot hand were separately controlled.

To reduce the task time by human, this paper developes an error recovery expert system (ERES). The position of the robot hand is controlled by the inverse kinematics of the cartesian coordinate system to the end point which is determined by the fuzzy set theory. The posture of the robot hand is controlled by the modulality of the robot hand's motion which is made by the posture of the task object.

The knowledge base and the inference engine of the ERES is developed using the muLISP-86 language.

The experimental results show that the average task time by human the ERES which was performed by the integration of the position and the posture control of the robot hand is shorter than that of the research, done by the preliminary experiment, which was performed by the separation of the position and the posture control of the robot hand.

A further study is likely to research into an even more intelligent robot system control using a superimposed display and digitizer which can present two-dimensional coordinate of the work space for the convenience of human interaction.

† 高麗大學校 産業工學科

†† 高麗大學校 大學院 人間工學硏究室

Ⅰ. 序 論

Advanced teleoperator system에 의해서 極限作業을 수행할 때 에러가 발생하면 자동모드에서 수동모드로 전환하여 프로그램에 의한 코맨드 操作과 인간에 의한 直接操作으로 그 에러를 回復한 후, 다시 자동모드로 복귀하여 부여된 作業을 계속하게 된다[1].

Lee and Nagamachi[2] 의 硏究에서는 에러발생시, 수동모드에서 코맨드操作의 한 수단으로 畵像을 통해서 인식된 作業對象物體의 높이에 따라 변하는 로보트 궤도계획의 end point를 fuzzy推論에 의해서 정하고, 이 점을 inverse kinematics에 적용하여 로보트손의 位置制御를 하였으며, 로보트손의 姿勢制御는 人間에 의한 直接操作으로 하였다. 여기서는 로보트 손의 位置制御와 姿勢制御를 分離하여 행하였기 때문에 많은 直接操作時間이 소요된다.

本 硏究에서는 이러한 直接操作時間의 감소를 위하여 다음과 같은 error recovery expert system(ERES)을 개발한다. 즉, 위의 Lee and Nagamachi에 의해서 硏究된 cartesian coordinate system(CCS) 내에서의 에러回復을 expert system화 한 것이다.

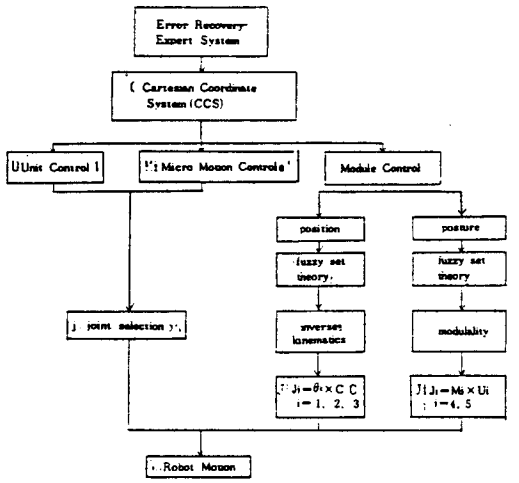

Fig 1. Flowchart of the ERES

그림 1은 ERES의 흐름을 나타내고 있으며, 이 시스템은 다음과 같은 두 가지 制御方式으로 나누어 진다. 첫째 부분은 位置制御에 해당하는 것이고, 둘째 부분은 姿勢制御에 해당하는 것이다.

로보트손의 位置制御를 위하여 fuzzy 推論에 의해서 결정된 直交座標를 geometric inverse kinematics에 적용하여 주어진 直交座標에 로보트손이 도달하기 위한 로보트의 허리, 어깨, 팔굽의 관절값을 계산하며, 이 관절값을 로보트손의 位置制御에 이용한다.

로보트의 姿勢制御를 위하여 作業場平面에 놓인 物體姿勢에 따른 로보트손의 동작을 module화 하고, 姿勢에 대한 정보가 주어지면 이를 fuzzy推論을 거쳐서 物體姿勢를 결정하고, 이 결정된 物體姿勢番號와 姿勢modulality rules를 대조시킴으로써 로보트손의 姿勢制御를 한다.

또 姿勢制御에는 로보트의 4축과 5축이 이용되는데 unit control이나 micro motion control을 이용한 直接操作으로 로보트손의 姿勢를 制御할 때에는 많은 操作時間과 操作上의 어려움이 있다.

姿勢制御를 함에 있어서 modulality control을 이용하면 物體의 놓여진 姿勢에 대한 로보트손의 姿勢를 미리 module화 해 놓을 수 있기 때문에 操作者는 단지 物體의 놓여진 姿勢의 認知로 作業操作의 번거로움없이 로보트손의 姿勢制御를 할 수 있게 된다.

이 시스템에 있어서의 知識베이스와 推論機關은 muLISP-86언어[3] 로 개발된다.

2. 基本理論

2·1 Fuzzy set theory

人間操作者가 센서역할을 하는 T.V모니터를 보면서 極限作業을 수행할 때, 作業에 관계되는 物體를 인식함에 있어서 모호하게 인식하고 판단해야하는 경우에 종종 직면하게 된다. 특

히 物體가 놓여진 直交座標上의 裝置와 物體가 놓여져 있는 姿勢에 대한 인식은 로보트 손의 位置制御와 姿勢制御에 직접적인 영향을 미치고, 人間操作者의 신속하고 即應性있는 판단과 이에 의한 로보트 制御의 필요성이 대두된다.

이러한 極限作業時에 개재되는 모호성에 대처하기 위해서는 人間操作者가 畵像을 통해서 物體를 인식할때, 모호하게 인식한 그대로 응답하게 함으로써 판단시 개재되는 어려움을 해소해줄 수 있게 될 것이다.

本 研究에서는 이를 위해서 1965년 L. A. Zadeh[4]에 의하여 제창된 이래 여러분야에서 응용되고 있는 fuzzy set theory를 도입하여 해결해보려 한다.

Fuzzy sets란 그 집합에 속하는 요소와 속하지 않는 요소사이에 명확한 경계를 갖는 집합이 아니라 그 집합의 요소로서의 자격이 [0, 1] 사이의 단계적인 자격정도(degree of membership)를 갖는 요소들로 이루어진 집합을 의미한다. 이 때 구성요소들의 자격정도를 나타내는 함수를 그 fuzzy set의 자격함수(membership function)라 한다[5,6,7].

즉, $X=\{x_i,\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$는 구성요소 x_i들로 이루어진 母集團이라 하자. 그러면, X의 부분집합인 fuzzy set A는

$$A=\mu_1(x_1)/x_1+\mu_2(x_2)/x_2+\cdots+\mu_n(x_n)/x_n$$

$$x_i\in X,\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ n$$

이다. 여기서 $\mu_i(x_i)$는 A의 자격함수로서, 구성요소의 x_i의 fuzzy set A에 대한 자격정도를 나타내며, [0, 1] 사이의 實數값을 가지며, 이는 A의 구성요소 x_i가 fuzzy set A에 속할 가능성의 정도(degree of possibility)를 나타낸다.

本 研究에서는 로보트손의 位置制御와 姿勢制御時, 入力되는 parts에 대한 fuzzy sets의 이용에 대해서 고려해 보려 한다.

2.1.1 位置設定時의 fuzzy sets

位置設定時의 fuzzy sets의 이용은 Lee and Nagamachi의 研究에서도 언급된 바와 같이 作業對象物體의 높이에 따라 변하는 end point를 효율적으로 設定하자는 것이다. 直交座標上의 X, Y, Z 座標 중 높이에 대한 Z座標의 推論을 행하고, X, Y 座標는 推論을 행하지 않는다. 이는 end point가 다음에 이루어지게 되는 人間操作者의 直接操作을 용이하게 할 수 있어야 한다는 점인데, X, Y座標를 fuzzy推論할 경우 推論을 통해서 나온 값이 實際 物體의 位置와 다름에 따라 야기되는 物體의 불합리성을 배제하기 위해서 알고 있는 것으로 가정한다. 그리고 여기서 物體의 폭은 end point 設定에 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않기로 한다.

人間操作者가 인식하여 응답하게 되는 物體의 높이에 대한 fuzzy sets는 다음과 같이 "大(large)", "中(medium)", "小(small)"로 나누었다.

small = 1/1+0.8/3+0.6/5+0.3/7+0.1/9
+0/(11+13+15+17)

medium = 0/1+0.1/3+0.4/5+0.8/7+1/9
+0.8/11+0.4/13+0.1/15+0/17

large = 0/(1+3+5+7)+0.1/9+0.4/11
+0.7/13+0.9/15+1/17

다음에 end point는 作業場平面으로부터 robot gripper 까지의 높이로서 이것에 대한 fuzzy sets는 다음과 같다.

low = 1/4+0.8/6+0.6/8+0.3/10+0.1/12
+/0(14+16+18+20)

middle = 0/4+0.1/6+0.4/8+0.8/10+1/12
+0.8/14+0.4/16+0.1/18+0/20

high = 0/(4+6+8+10)+0.1/12+0.4/14
+0.7/16+0.9/18+1/20

2.1.2 姿勢設定時의 fuzzy sets

End point에서의 높이에 대한 位置設定時와

유사하게 접근하는데, 여기서 세 가지의 경우를 고려하기로 한다. 物體가 축에 대해서 거의 틀어지지 않는 경우로서 그 표현을 "almost the same"이라고 하고, 약간 틀어졌을 경우는 "a little", 많이 틀어졌을 때 "more"로 표현한다.

이러한 物體의 姿勢에 대한 fuzzy sets는,

almost the same = 1/5° +0.8/25° +0.1/45° +0/65° +0/85°

a little = 0/5° +0.8/25° +1/45° +0.5/65° +0/85°

more = 0/5° +0/25° +0.1/45° +0.8/65° +1/85°

이고, 이는 入力에 해당된다.

그리고 物體의 姿勢에 대한 로보트손의 회전(roll)을 위한 fuzzy sets는,

not-turn = 1/5° +0.8/25° +0.1/45° +0/65° +0/85°

turn-a little = 0/5° +0.8/25° +1/45° +0.5/65° +0/35°

turn-more = 0/5° +0/25° +0.1/45° +0.8/65° +1/85°

이고, 이는 出力에 해당되고 로보트손의 姿勢制御를 위한 값이다.

2.2 Geometric inverse kinematics

Inverse kinematics를 푸는 방법은 Algebraic Approach, Iterative Approach, Geometric Approach의 세 가지로 대별된다. Algebraic Approach는 로보트 각 조인트의 각도를 오직 대수학적 방법으로 구하여 그 해가 무척 복잡하고 유일해(unique solution)를 주지 못한다. 다음으로 Iterative Approach는 計算時間이 길고 수렴을 보장하지 못한다. 끝으로 Geometric Approach는 로보트 각 조인트간의 기하학적 배치에 의해서 풀기때문에 해가 쉽고 간단하게 구해진다[8].

따라서 本 硏究에서는 이러한 이유로 Geometric Approach에 의해서 直交座標에 로보트손이 도달하기 위한 로보트 각 조인트값을 아래에서와 같이 구하고자 한다[9,10].

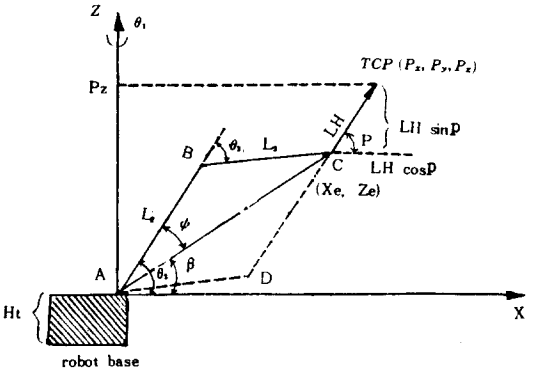

Fig 2. Plane of manipulator

• 로보트 팔굽의 끝점

그림 2에서 로보트손의 길이를 LH(length of hand)라고 하고, 로보트손의 피치(pitch)를 P라고 하면 LH에 대한 X축과 Z축으로의 성분은 그림 2에서와 같이 LHcosP와 LHsinP가된다. TCP의 座標 Px, Py, Pz, 피치에 해당하는 P와 상수인 LH의 길이에서 로보트팔굽 끝점의 座標가 구해진다.

$$Xe = RP - LH\cos P \quad \cdots\cdots (1)$$

$$Ze = Py - LH\sin P - Ht \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 RP는 그림 2에서

$$RP = \sqrt{Px^2 + Py^2} \quad \cdots\cdots (3)$$

이고, Ht는 作業場平面으로부터 어깨축의 중심까지의 거리이다.

• θ_1의 해

θ_1은 作業場平面의 直交座標만 알면 간단히 구해낼 수 있다. 그림 2에서 TCP의 作業場平面의 直交座標가 Px, Py 일 때,

$$\theta_1 = \tan^{-1}(Py/Px) \quad \cdots\cdots (4)$$

이다.

• θ_3의 해

첫째, above arm시, 그림 2의 三角形 ABC에서,

$$\overline{AC} = \sqrt{(Xe^2 + Ze^2)} \quad \cdots\cdots (5)$$

이고,

$$\cos\theta_3 = \frac{\overline{AC}^2 - L2^2 - L3^2}{2\ L2\ L3} \quad \cdots\cdots(6)$$

이다. 이때, $L2$와 $L3$는 각각 어깨와 팔굽에 해당하는 링크이다.

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{AC}^2 - L2^2 - L3^2}{2\ L2\ L3}\right) \quad \cdots\cdots(7)$$

단, 이때 (7)식이 존재하기 위해서는

$$\overline{AC} \le L2 + L3 \quad \cdots\cdots(8)$$

$$0^\circ \le \theta_3 \le 180^\circ$$

의 두 식이 만족되는지 체크되어야 한다.

둘째, below arm시, 三角形 ACD에서 이것은 對稱에 의해서 구해질 수 있으며, 즉,

$$\theta_3 = -\theta_3 \quad \cdots\cdots(9)$$

이다.

• θ_2의 해

끝으로 θ_2를 구하려면 그림 2에서, ,

$$\beta = \tan^{-1}(Ze/Xe) \quad \cdots\cdots(10)$$

이고, cosine 제 2 법칙을 이용하여 ϕ를 구하면,

$$\cos\phi = \frac{\overline{AC}^2 + L2^2 - L3^2}{2\,\overline{AC}\ L2} \quad \cdots\cdots(11)$$

이고,

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{AC}^2 + L2^2 - L3^2}{2\,\overline{AC}\ L2}\right) \quad \cdots\cdots(12)$$

단, 이때 (11)식은

$0^\circ \le \phi \le 180^\circ$ 에서 해를 갖는다.

(10)식과 (12)식에서

$$\theta_2 = \begin{cases} \beta + \phi, & \text{if } \theta_3 < 0 \\ \beta - \phi, & \text{if } \theta_3 > 0 \end{cases} \quad \cdots\cdots(13)$$

이다.

3. ERES의 知識習得 및 表現

그림 3은 ERES의 구조인데, 知識 베이스의 세 가지 objects인 parts, rules, goals와 이들의 연관관계를 나타내고 있다.

知識베이스는 ROB-501 로보트 매뉴얼[11], 人間專門家로부터의 遠隔操作知識, fuzzy set theory, inverse kinematics로부터 구성되며, 人間-로보트 시스템상에 영향을 미치는 요인들을 고려한다.

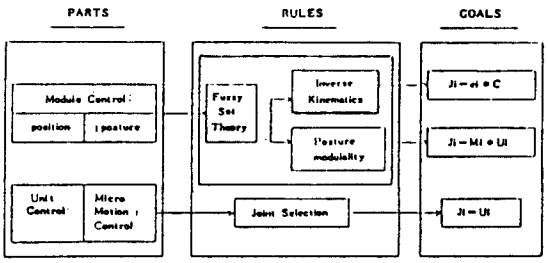

Fig 3. Architecture of the ERES

3.1 Parts

知識베이스의 parts는 로보트의 教示를 위해 ERES에 入力되는 實體들이고 다음의 세 가지 즉, module control (MC), unit control (UC) 및 micro motion control (MMC) 이다.

3.1.1 Module control

位置座標는 物體가 놓여진 로보트손이 도달하게 되는 直交座標이며 姿勢는 物體와 로보트베이스를 잇는 선에 대해서 틀어진 정도를 말한다. module control은 操作者가 T. V카메라로부터 받은 位置의 Z座標와 物體의 姿勢를 畵像을 통해서 認知하고 rules의 fuzzy set theory에 入力해 주는데, 이는 "small", "medium", "large", "almost the same", "a little", "more" 등으로 표현된다.

3.1.2 Unit control과 micro motion control

Unit control과 micro motion control은 로보트를 直接操作하기 위한 增分式 制御方式을 말한다. 각각에 10개의 function key가 할당되어 있는데 어느 하나를 누름에 따라 해당되는 로보트 조인트를 일정한 양만큼씩 움직일 수 있다.

그런데, micro motion control은 unit control에 비해 세밀한 操作을 하게끔 되어 있으며 이들은 rules의 推論을 거쳐 직접 로보트의 해당 축을 制御한다.

3.2 Rules

人間操作者가 인식하는 物體의 位置, 姿勢에 대한 모호성을 배제시키기 위해서 fuzzy推論을 통한 후, 位置와 姿勢制御를 위한 inverse kinematics와 姿勢 modulality rule에 入力시킨다.

3.2.1 Fuzzy 推論

End point의 直交座標中 높이에 대한 Z座標값의 fuzzy推論과 로보트손의 姿勢制御를 위한 fuzzy推論을 행하며 이 fuzzy推論은 知識 베이스에 내장되어 있다.

먼저 位置制御에 대한 fuzzy推論의 세 가지 rules는 다음의 rule 1, rule 2 및 rule 3이다.

rule 1 : IF scale is small THEN height is low.
rule 2 : IF scale is medium THEN height is middle.
rule 3 : IF scale is large THEN height is high.

그리고, 각각의 rule에 대해서 推論을 위한 relational matrix가 있는데, 本 論文에서는 Mizumoto [12] 등이 硏究한 方式을 사용하였다. 즉,

$$Rsg = (UXA \rightarrow VXB) \cap (UX\neg A \rightarrow UXB) = Rs \cap Rg \cdots (1)$$

이고, 여기서 U는 scale, V는 height이고 ¬A는 A의 여집합을 의미한다. 그리고 Rs Rg와는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$Rs = \begin{cases} 1, & \mu_A \le \mu_B \\ 0, & \mu_A > \mu_B \end{cases}, \quad Rg = \begin{cases} 1, & \mu_A \le \mu_B \\ \mu_B, & \mu_A > \mu_B \end{cases} \cdots (2)$$

Rule 1에 대한 relational matrix의 Rsg 1은 위의 (1)식과 (2)식을 통해서 다음과 같이 나타내어지며, 나머지도 이와 같은 식으로 나타내어질 수 있다.

$$Rsg\ 1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .1 & .3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .1 & .3 & .6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .1 & .3 & .6 & .9 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & .1 & .3 & .6 & .9 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & .1 & .3 & .6 & .9 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & .1 & .3 & .6 & .9 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 Z座標값의 fuzzy推論에 대한 한 예를 들어 보기로 한다.

more or less small = small

1 3 5 7 9 11 13 15 17

= (1 0.95 0.84 0.63 0.32 0 0 0 0)

에서 scale의 small에 관련되는 rule 1에 적용하면,

more or less small Rsg 3

4 6 8 10 12 14 16 18 20

= (1 0.95 0.84 0.63 0.32 0 0 0 0)

= more or less low

의 結果가 나온다.

다음으로, 姿勢制御에 대한 fuzzy推論의 세 가지 rules는 rule 4, rule 5 및 rule 6이다.

rule 4 : IF almost the same THEN not-turn.
rule 5 : IF a little THEN turn-a little.
rule 6 : IF more THEN turn-more.

rule 5의 relational matrix의 Rsg 5는 위의 (1)식과 (2)식을 통해서 다음과 같이 나타내어지며, 나머지도 같은 식으로 나타내어 질 수 있다.

$$Rsg\ 5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & .5 & 0 & .5 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 姿勢制御를 위한 fuzzy推論의 한 예

를 들어보면,

more or less a little Rsg 5

5° 25° 45° 65° 85°

=(0 0.71 1 0.71 0)

=more or less turn-a little

가 推論되어 나온다.

이렇게 Z좌표값과 姿勢에 대한 fuzzy推論의 結果는 制御를 위해 계량화되어 각각 位置制御를 위한 inverse kinematics와 姿勢制御를 위한 姿勢 modulality rules로 들어가게 된다.

3.2.2 位置制御를 위한 geometric inverse kinematics

이는 parts에서 入力된 直交座標上에 로보트손이 도달하기 위한 허리, 어깨, 팔굽에 대한 θi (i=1, 2, 3) 값을 구해낸다. 이에 대한 計算例는 다음과 같다. 즉, 直交座標上의 한 점 (Px, Py, Pz)=(30, 20, 5), P(pitch)=−60이주어진 경우의 계산예를 표 1에서 보이고 있다.

3.2.3 姿勢制御를 위한 modulality rules

作業場平面에 놓여진 物體의 姿勢에 따라 로보트손의 姿勢制御를 행한다. 그리고, fuzzy推論에 의해 物體姿勢番號가 결정되면 이와 姿勢 modulality rules와의 대조에 의하여 로보트손을 制御하게 된다. 그림 4는 物體가 作業場平面에 놓여진 姿勢를 나타내고 있는데, 각각을 番號로 구분하고 있다.

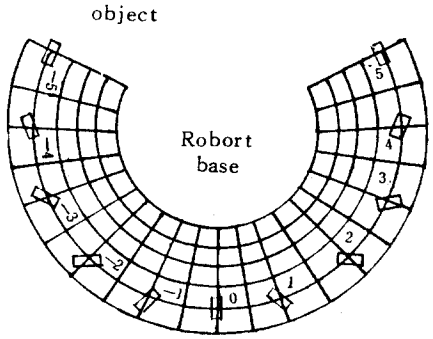

Fig 4. Posture of an object

姿勢 modulality rules는 로보트손목의 4, 5축을 이용하여 로보트손의 姿勢制御를 효과적으로 하기 위해 知識베이스내에 예측되는 姿勢를 미리 module화 하여 만들어둔 rules를 말하며, 이 modulality rules는 11개로 되어 있다.

姿勢 modulality rues의 知識베이스에 내장되는 형식은 다음과 같다.

IF Module #=j THEN (M4=BB4,

Table 1. An example of geometric inverse kinematics calculations

Equations	Calculations
$RP=\sqrt{(Px^2+Py^2)}$	$RP=\sqrt{(30^2+20^2)}=36$
$Xe=RP-LH\ cos\ P$	$Xe=36-24.5^*\ cos\ (-60)=23.75$
$Ze=Py-LH\ sin P-Ht$	$Ze=5-24.5^*\ sin\ (-60)-25=1.22$
$\theta_1=tan^{-1}\ (Py/px)$	$\theta_1=tan^{-1}\ (20/30)=33.7$
$\overline{AC}=\sqrt{(Xe^2+Ze^2)}$	$\overline{AC}=\sqrt{(23.75^2+1.22^2)}=23.78$
$\theta_3=cos^{-1}\left(\frac{\overline{AC}^2-L2^2-L3^2}{2*L2*L3}\right)$	$\theta_3=cos^{-1}\left(\frac{23.75^2-22^2-16^2}{2*23.75*22}\right)$
$\beta=tan^{-1}\ (Ze/Xe)$	$\beta=tan^{-1}\ (1.22/23.75)=2.94$
$\phi=cos^{-1}\left(\frac{L2^2+\overline{AC}^2-L3^2}{2*\overline{AC}*L3}\right)$	$\phi=cos^{-1}\left(\frac{23.75^2+22^2-16^2}{2*23.75*22}\right)$
$\theta_2=\beta+\phi$	$\theta_2=2.94+4.07=43.64$

M5 = BB5)
where, j = 0, ±1, ±2, ± 3, ±4, ±5

위의 rules은 module 番號가 임의의 j로 들어올 때의 4축과 5축을 움직여야 하는 單位制御時의 횟수를 결정하는 것이다.

다음의 표2는 姿勢 modulality rules의 知識베이스내의 예를 보인 것이다.

Table 2. An example of posture modulality rules in the knowledge base

```
(Cond
  ((Eq Module# 0)(setq wristpitch 0
  wristroll 0))
  ((Eq Module# 1) (setq wristpich − 3
  wristroll 0))
  ((Eq Module# 2) (setq wristpitch− 5
  wristroll 1)))
```

3.3 Goals

物體의 位置와 姿勢를 위한 rules는 ROB-501 로보트의 制御를 위한 관절에 대한 동작데이터를 推論해 낸다. 그 推論結果, goals의 action parts는 로보트의 位置와 姿勢制御를 한다.

로보트손의 位置는 直交座標上의 X, Y, Z座標값에 의하여 결정되고, 位置制御에 대한 허리, 어깨, 팔굽에 해당하는 로보트의 관절값 Ji (i = 1 , 2 , 3)는 inverse kinematics에 의해 구한 θ_i (i = 1 , 2 , 3)에 1°당 pulses 수를 곱하여 구해낼 수 있다. 즉,

Ji = θi * C (i = 1, 2, 3, C = 40 pulses/1°)

姿勢制御에 대한 로보트손목의 4, 5축은 module 番號에 따른 로보트 손목의 관절값을 계산하여 ROB-501로보트손목을 움직인다. 즉,

$Ji = Mi * Ui$

이다. 여기서 Mi는 module 番號이고, Ui는 unit pulse를 말한다.

Ⅳ. 實驗 및 結果分析

4.1 實驗裝置의 構成

그림 5와 같이 極限作業場에서 作業을 수행하는 manipulator로서 ROB-501 로보트와 이

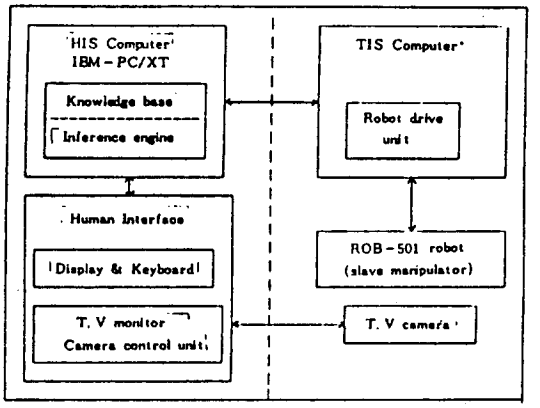

Fig 5. Experimental design of the ERES

를 制御하는 TIS (task interactive subsystem) 컴퓨터의 역활을 하는 robot drive unit, 센서 역할을 하는 T. V카메라가 설치되어 있다. 制御室에는 極限作業場으로부터 피이드 백되는 정보를 入出力하는 Human interface로서, display와 keyboard, T. V Monitor 및 Camera control unit가 있고, 知識베이스와 推論機關을 내장하고 있는 HIS (human interactive subsystem)인 IBM-PC/XT 컴퓨터가 있다.

4.2 實驗節次

ERES를 위한 實驗으로서는 豫備實驗[2]에서 실시한 peg를 잡는 作業으로 하였다. 被實驗者는 本 研究에 대한 이해가 높은 大學院生과 學部 4學年生으로 하였으며, 實驗은 각 5회씩 반복실시하고, 遂行度尺度로서는 에러回復時 直接操作의 平均時間으로 하고, 豫備實驗 에서와 같은 實驗裝置와 作業環境모델을 이용하였다.

그림 4의 姿勢 module 중에서 難易度 0 , 1 , 2 (module 番號 0 , 3 , 5)를 택한 것은 11개의

姿勢를 대표할 수 있도록 0°, 45°, 90°를 택하였으며 이는 그림 6의 實驗結果에서도 알 수 있다. 그리고 陰(−)의 module番號는 陽(+)의 것과 마찬가지의 結果를 갖는다.

實驗의 分析節次는 다음의 두가지 방법 으로 실시하였다. 첫째, 難易度에 따른 각 방법의 유의성검정은ANOVA로 하였다. 즉,

가설 :

귀무가설 H_0; $\mu_{x0} = \mu_{x1} = \mu_{x2}$

대립가설 H_1; 모든 μ_{xj} 가 동일하지는 않다.

귀무가설 H_0'; $\mu_{y0} = \mu_{y1} = \mu_{y2}$

대립가설 H_1'; 모든 μ_{yj} 가 동일하지는 않다.

여기서, μ_{xj}; ERES 實驗의 평균조작시간

μ_{yj}; 豫備實驗의 평균 조작 시간

j; 作業難易度 0, 1, 2,

둘째, 각 難易度에서 ERES實驗과 豫備實驗과의 平均値의 차이에 대한 검정은 T-test로 하였다. 즉,

가설 :

귀무가설 H_0; $\mu_{xj} \leq \mu_{yj}$

대립가설 H_1; $\mu_{xj} > \mu_{yj}$

여기서, μ_{yj} ; ERES의 平均操作時間

μ_{xj} ; 豫備實驗의 平均操作時間

j; 作業難易度 0, 1, 2

이다.

4.3 實驗分析結果

ERES實驗과 豫備實驗에 대한ANOVA와 t-test를 실시한 實驗分析結果는 표3과 같다.

먼저ANOVA의 결과를 보면, ERES 實驗에 대한 F값인 0.22는 채택역(0, 3.22)내에 포함되므로 귀무가설(H_0)이 채택되었고, 각 難易度에 따른 ERES實驗의 分散値에 대한 차이가 없으므로 操作時間의 차이가 없음을 알수 있다. 반면, 豫備實驗에 대한 F값인 45는 채택역 (0, 3.22)내에 포함되지 않으므로 귀무가설(Ho′)이 기각되었고, 각 難易度에 따른 操作時間의 차이가 있음을 알 수 있었다.

Table 3. An experimental results

ANOVA		
1	significant level	5%
2	acceptance region	[0 3.22]
3	F-value of the ERES	0.22
4	F-value of the preliminary	45.00
5	Ho	accepted
6	Ho′	rejected

t-test		
1	significant level	5%
2	acceptance region	[−∞, 1.696]
3	t-value of task difficulty 0	−33.54
4	t-value of task difficulty 1	−39.75
5	t-value of task difficulty 2	−63.57
6	Ho	accepted

다음으로 t-test의 결과를 보면, ERES實驗과 豫備實驗간의 平均操作時間의 검정을 위한 t값은 難易度 0이 −33.54, 難易度 1이 −39.75, 難易度 2가 −63.57로 모두다 채택역 [−∞, 1.696]내에 포함됨에 따라 각 難易度에서의 ERES 實驗이 豫備實驗에 비해 平均操作 時間이 적음을 알 수 있었다.

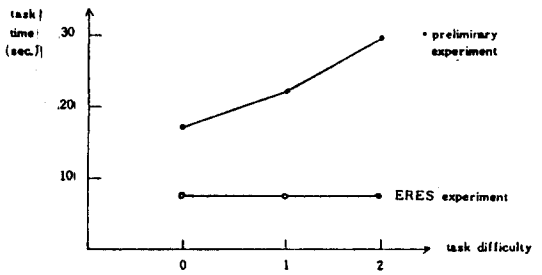

Fig 6. Comparison ERES with Preliminary experiment

그림 6에서 알 수 있는 바와같이 豫備實驗에서는 難易度가 증가함에 따라 操作時間이 증대하는 경향이 있으나, ERES實驗에서는 操作時間이 거의 동일함을 알 수 있었다. 또한, 어떤

難易度에 대해서도 ERES에 의한 平均操作 時間이 豫備實驗의 平均操作時間보다 적음을 알 수 있다.

그 이유는 豫備實驗에서는 로보트손의 位置와 姿勢制御를 分離하여 행하였기 때문에 로보트손의 姿勢制御時, 直接操作이 많이 요구되었고, 難易度의 증가에 따라 直接操作時間이 증대되었다. ERES實驗에서는 로보트손의 位置와 姿勢를 統合하여 制御하였기 때문에 로보트손의 姿勢制御時 直接操作부분을 미리 module화 하여 이용하므로 直接操作이 적었고, 難易度에 관계없이 直接操作時間의 차이가 거의 없었다.

V. 結 論

人間操作者가 極限作業環境下에서 遠隔操作業을 수행할 때, 많은 操作時間이 소요되는데, 本 研究에서는 advanced teleoperator system의 수동모드에서 에러回復時, 人間에 의한 불필요한 直接操作時間을 줄이기 위한 에러回復 專門家시스템을 구축하였다. 이 시스템에서 物體認識의 모호성을 해소하기 위해, fuzzy set theory를 도입하였고, inverse kinematics를 적용하여 로보트손의 位置制御를 하였으며, 姿勢 modulality rules를 사용하여 로보트손의 姿勢制御를 하였다.

本 研究의 豫備實驗에서는 難易度에 따른 直接操作에 의한 平均操作時間의 차이가 많았으나, ERES實驗에서는 難易度에 따른 時間차이가 거의 없었다.

그 이유는, 豫備實驗에서는 位置制御時 inverse kinematics를 이용하였지만, 姿勢制御時에는 人間에 의한 直接操作에 의존할 수 밖에 없었기 때문이다. 반면에, ERES實驗에서는 姿勢 modulality rules에 의해서 해당되는 姿勢番號에 따라 姿勢制御가 용이하였고, 또한 이것은 知識베이스 내에서 位置制御와 姿勢制御가 統合되었기 때문이다.

앞으로의 研究課題는, 人間과의 相互作用이 보다 편리하도록 作業場을 2次元座標로 표시할 수 있는 digitizer와 superimposed display를 이용한 지능적인 로보트시스템이 연구되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

[1] K. Takase and S. Wakamatsu, "A Concept of Intelligent Teleoperation System and Related Technologies", *JRSJ*, Vol.2, No.6, pp.62-71, 1984.

[2] S.Y. Lee, M. Nagamachi and K. Ito, "A Study on an Efficient Dicision of the Manual Mode through on Advanced Teleoperator System", *SICE '87, Proceeding of the 26th SICE Annual Conference Vol.2*, Hiroshima Japan, pp.1265-1268, July, 1987.

[3] Microsoft Corp., *muLISP-86 Reference Manual*, Software House, Inc., 1986.

[4] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control* 8, pp.338-353, 1965.

[5] W.B. Rouse, *Systems Engineering Models of Human-Machine Interaction*, Elsovier North Holland, Inc. pp.87-101, 1980.

[6] L.A. Zadeh, "Communication Fuzzy Algorithm", *Information and Control 12*, pp.94-102, 1968.

[7] L.A. Zadeh, "Out Line of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol.SMC-3, No.2, Jan., 1983.

[8] C.S.G. Lee, "Robot Arm Kinematics and Dynamics", *CICE/ECE/IOE 494*, pp.43-57, 1983.

[9] L. Heath, *Fundamentals of Robotics : Theory and Aplication*, Reston Publishing Company, Inc. pp.93-100, 1985.

[10] J.J. Craig, *Introduction to Roboitics : Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing Company, pp.104-111, 1986.

[11] 三星生産技術研究所, "Move Master Ⅱ (ROB-501) 使用者案內書", pp.3-50, 1986.

[12] M. Mizumoto, S. Fukani and K. Tanaka, *Some Method of Fuzzy Reasoning . Advances in Fuzzy Sets Theory and Application*, NorthHolland Publishing Company, pp.117-136, 1981.