《研究論文》

Journal of the Human Engineering Society of Korea
Vol. 8 No. 2, Dec. 1989

Robot Ergonomic에 의한 로보트의 동작제어 개선에 관한 연구

(A Study on an Improvement of the Robot Motion Control by the Robot Ergonomics)

이순요† 권규식††

Abstract

This study, as a part of integrated human-robot ergonomics, improves the robot motion control on the robot task in the TOES/WCS whose purpose is improving the teaching task constructed in the previous study.

First, the updated combined fuzzy process using a new membership function with Weber's law is constructed for the purpose of coordinate readings of the end points in the macro motion control.

Second, an algorithm using the geometric analysis is desinged in order to calculate position values and posture values of the robot joints.

Third, the MGSLM method is designed to remove unnecessary the robot motion control caused by the GSLM method in the micro motion control.

Consequently, proposed methods in this study lessen burden of a human operator by means of an improvement of the robot motion control and reduce the teaching time of a human operator and inaccuracy of the teaching task, which contribute to the integrated human-robot ergonomics.

I. 서 론

극한작업용의 인간-기계시스템에서 로보트의 환경적응능력을 최대한으로 살리면서 안전한 원격지점으로부터 인간조작자의 거시적인 판단과 조작에 따라 인간과 로보트가 단독으로는 할 수 없는 작업을 협력하여 능률적으로 실시하는 원격조작(teleoperation) 기술이 제안되었으나, 원격조작용 로보트(teleoperator)가 학습기능이나 계획기능을 가지고 있지 못하기 때문에 그 조작성이 좋지 않으며, 인간조작자가 심한 피로를 느낀다는 사실이 지적되고 있다[1], [2]. 따라서 대상작업의 대부분은 컴퓨터 프로그램에 의하여 제어하며, 인간조작자는 단지 이를 보조하는 제어방식인 지적 원격조작시스템(advanced teleoperator system)이 제안되었다[3]. 이 시스템에서 로보트의 교시와 실행작업을 할 때 인간조작자의 부담을 경감시키고, 특정분야의 문제해결을 위한 전문가의 지식을 지식베이스내에 저장해 둠으로써 전문지식이 부족한 사용자가 컴퓨터에 의한 추론으로 문제해결을 도와주는 시스템인 TOES가 연구되었다[4].

본 연구에서는 이 TOES에 로보트 각 관절의 기능분석에 의한 기능좌표계(WCS)를 적용하

† 고려대학교 산업공학과
†† 고려대학교 산업공학과 대학원

여 구축된 기존 연구의 TOES/WCS중 교시작업을 위한 TES/WCS에서 로보트의 동작제어 개선을 위하여 거시적 동작제어와 미시적 동작제어로 나누어 integrated human-robot ergonomics의 측면에서 다루고자 한다[5].

첫째, 기존 연구의 거시적 동작제어에서 교시를 원하는 작업물체의 end point지점을 combined fuzzy process인 입력처리과정에 의한 좌표판독을 시행하는 것보다 본 연구에서는 상대적 식별(Weber's law)을 이용하여 설정된 자격함수를 사용한 updated combined fuzzy process에 의한 좌표판독의 결과가 정확함을 보여준다.

둘째, 기존 연구에서는 거시적 동작제어시 위치와 자세계산 절차를 heuristic rules에 의하여 행하던 것을 본 연구에서는 기하학적 해석에 의한 알고리즘으로 행함으로써 end point까지의 이동의 정확성을 기할 수 있도록 하고, 이로 인한 미시적 동작제어시간의 단축에 기여함을 보여준다.

세째, 미시적 동작을 제어할 경우, 기존 연구의 위치제어시 geometric straight line motion (GSLM) 방식에 의한 로보트의 불필요한 동작을 제거하기 위하여 본 연구에서는 인간조작자의 동작과 유사하게 로보트의 동작을 유도하여 사선을 포함한 직선운동이 가능하도록 한 multi-geometric straight line motion (MGSLM) 방식을 활용하여 미시적 동작제어시 요구되는 조작량과 조작시간을 감소할 수 있음을 보여준다. 그림 1은 전체적인 연구의 배경 및 실행의 흐름을 나타내며, 이중선으로 되어 있는 부분이 본 연구에서 행하고자 하는 내용을 나타내고 있다.

Ⅱ. 본 론

2. 1. TES/WCS구축을 위한 WCS의 설계

기존에 사용되어온 로보트 각 관절의 운동분석에 의한 직교좌표계(CCS)에서의 문제점은 첫째, 인간조작자가 로보트 작업역내에서의 로보트와 작업물체간의 관계를 판독하기가 곤란하다. 둘째, 로보트 작업시 작업물체의 배치에 기준을 제공하지

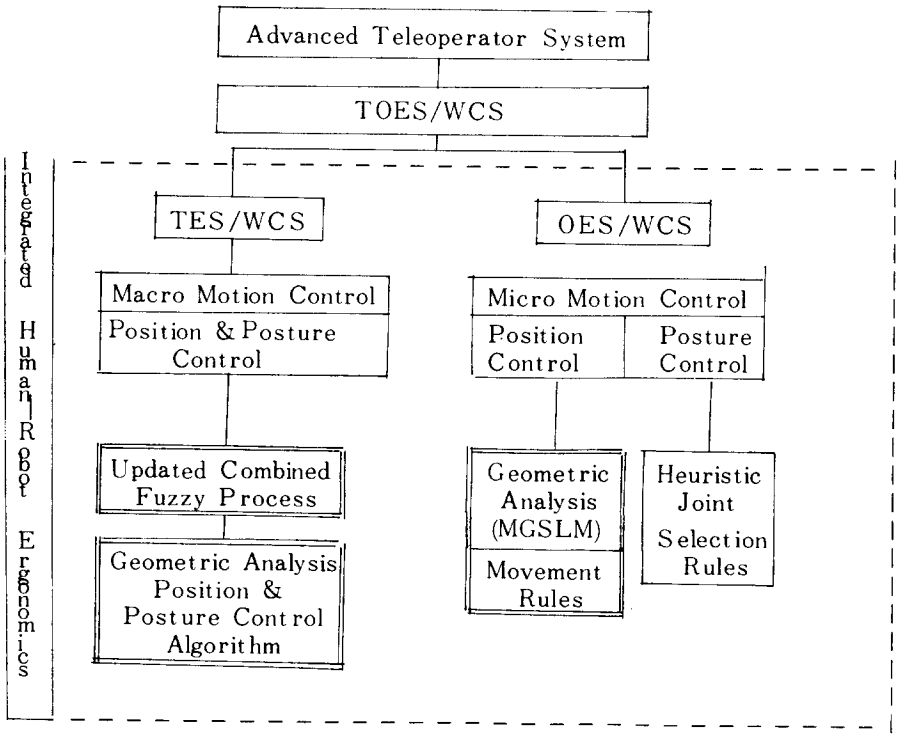

Fig. 1 Overall flow chart of this study

못한다. 세째, CCS에서는 singularity를 방지하기 위하여 x, y, z 좌표들과 로보트손의 pitch 까지 4가지 요인을 동시에 고려해 주어야 하므로 singularity 를 해결하기란 대단히 곤란하다. 네째, 로보트 관절파라미터의 제한범위를 주어진 pitch각과 x, y, z거리에 따라 도달 가능한 거리의 상한치와 하한치의 거리를 기하학적 해석방법으로 계산하기란 대단히 어렵고, 각각의 경우가 너무 많아서 고려할 수가 없다.

CCS의 이러한 문제들로 인하여 인간조작자가 로보트를 직접 조작해야 하는 경우가 많기 때문에 직접조작시간이 길어진다. 이러한 CCS의 문제들을 해결하기 위하여 integrated human-robot ergonomics를 추구할 수 있는 로보트의 각 관절의 기능분석에 의한 WCS를 설계하고자 한다. 따라서 작업역의 WCS설정을 위한 작업역의 등동작선은 등방향선, 등고도선, 등거리선 및 등자세선으로 구성되며, 이들 4개의 등동작선을 이용하여 작업역의 WCS를 설정하면 첫째, 등동작선에 따른 각 좌표의 기준을 부여하여 코맨드 조작에 의한 end point까지의 동작제어시 좌표판독을 용이하게 할 수 있다. 둘째, 등동작선의 개념을 적용하여 작업물체의 배치에 따른 불필요한 로보트의 동작을 제거할 수 있다. 세째, singularity는 WCS의 거리좌표로써 쉽게 판단할 수 있으므로 제거될 수 있다. 네째, 주어진 pitch각과 거리에 따라 로보트 작업역내에서의 팔굽 관절각은 항상 일정한 값을 갖기 때문에 관절파라미터의 제한범위를 해소할 수 있다.

2. 2. 로보트의 동작제어 개선

TES/WCS는 기존 연구에 대한 로보트의 동작을 효율적으로 제어하기 위하여 거시적 동작제어시 교시를 원하는 작업물체의 end point에 대한 좌표판독의 모호성을 제거하기 위하여 updated combined fuzzy process라는 입력처리 과정을 고안하였고, 또한 위치와 자세의 계산절차를 기하학적 해석에 의한 알고리즘으로 행함으로써 end point까지의 이동의 정확성을 기할 수 있도록 한다. 미시적 동작제어에서는 로보트의 불필요한 동작을 제거하기 위하여 MGSLM방식을 고안하여 로보트의 동작제어 개선을 하려는데 그 의의가 있다.

2. 2. 1. 거시적 동작제어 개선

(1) updated combined fuzzy process의 고안

본 연구에서는 combined fuzzy process 에서 사용되어진 membership function 중에서 고도와 거리를 인간조작자의 목측에 의하여 판단할 경우, 실질적인 거리를 판단하게 되고 따라서 길이라는 차원 속에서 모호성을 해결하고자 상대식별중에서 인간조작자가 가까스로 느낄 수 있는 길이의 차이인 just noticeable difference(JND)를 이용하여 본 시스템에 적합한 membership function을 설정하고자 한다. 입력자료로 사용되는 방향, 고도, 거리, 자세중에서 본 연구에서는 길이라는 차원에서의 모호성을 다루기 때문에 길이에 해당하는 고도와 거리에 대해서 다루기로 한다. 즉, 길이라는 차원에서 다른 크기의 길이중 어느 하나를 기준자극으로서 선정하고, 여기서 제시된 기준자극과 다른 자극과의 차이를 느낄 수 있다고 판별할 확률을 0.5로서 선정하기 위하여 기준자극과의 차이를 요하는 양인 JND를 이용할 수 있는 것이다. 여기서 제시된 기준자극과 JND의 비는 항상 일정한 비례관계로 존재하고, 이 비례를 나타내는 상수 "K"를 Weber's fraction이라고 한다. 즉, Weber's law는 $\triangle I/I = K$이며, 여기서 $\triangle I$는 JND의 크기이고, I 는 기준자극의 크기이다. 특히, 길이에 대한 K 는 항상 0.29로서 일정하다[6].

고도와 거리는 수치입력 혹은 linguistic variable로도 입력이 가능하며, 먼저 수치입력에 따른 membership function의 설정을 다음과 같이 거리가 40cm인 경우를 예로서 제시하고, 이에 따른 일반적인 membership function 을 설정할 수 있도록 알고리즘화 하고자 한다. 또한, 고도의 경우도 같은 방법으로써 membership function을 설정할 수 있다. 인간조작자가 거리를 40cm로 판단한 후 40cm로 입력하는 경우의 membership function 및 자격함수값은 다음과 같이 형성된다. 즉, 40cm라는 기준자극과 차이를 느낄 수 있다고 판단할 확률이 0.5가 되기 위한 JND의 크기는 11.6cm의 차이를 가져와야 한다. 다시 말해서 28.4 (=40-

11.6) cm와 51.6 (=40+11.6) cm에 해당되는 자격함수값은 0.5로서 결정할 수 있다. 또한, 기준자극 40cm와 28.4 cm의 차에 따른 JND의 크기는 3.364 (=11.6×0.29) cm가 되고, 이에 해당되는 36.636 (=40−3.364) cm의 자격함수값은 0.75 (=0.5+0.25) 이며, 아울러 43.364 (=40+3.364) cm의 자격함수값도 0.75가 된다. 결국, 이러한 과정을 반복하면 40cm에 대한 자격함수값은 1로서 수렴하고, 따라서 이러한 과정을 통하여 40cm에 대한 membership function은 그림 2와 같이 설정된다.

(2) 기하학적 해석에 의한 알고리즘으로 위치와 자세의 계산절차

그림 3과 같이 기능좌표를 이용한 로보트 손의 pitch각(θ_4)은 로보트 링크 3 (L3)의 연장선과 로보트 손의 길이(L4)가 이루는 각이다. 이렇게 pitch각을 정하는 이유는 인간조작자가 3차원공간선상에서 로보트 손목의 pitch각이 절대적인 수평선을 기준으로 몇 도인가를 요구하기는 쉽지만 이렇게 정해진 pitch각으로 geometric inverse kinematics (GIK)의 singularity 해소와 관절파라미터 제한범위의 관절값을 산출하기 위해서는 x, y, z를 조합한 거리범위를 쉽게 판단할 수 없을 뿐만아니라 이 범위를 해결할 수 없어 로보트 작업이 중단되는 경우가 있다. 이러한 문제점 해결을 위한 수단으로 L3의 연장선과 L4가 이루는 상대적인 각도를 활용한다. 이러한 pitch를 이용할 때에 다음과 같은 2가지의 삼각형으로부터

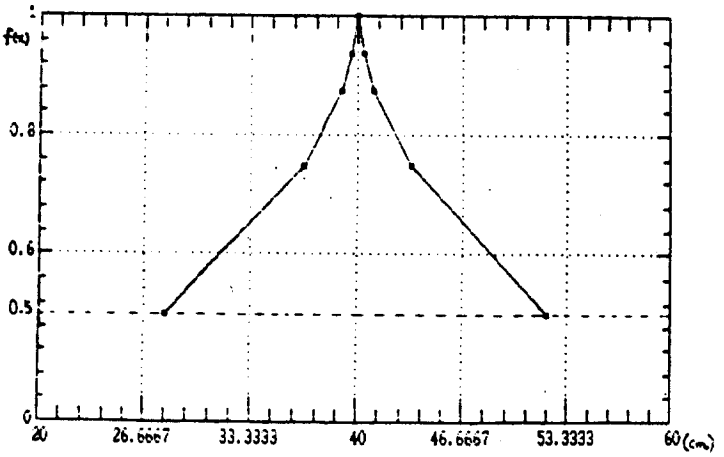

Fig. 2. Membership function of range "40" (cm)

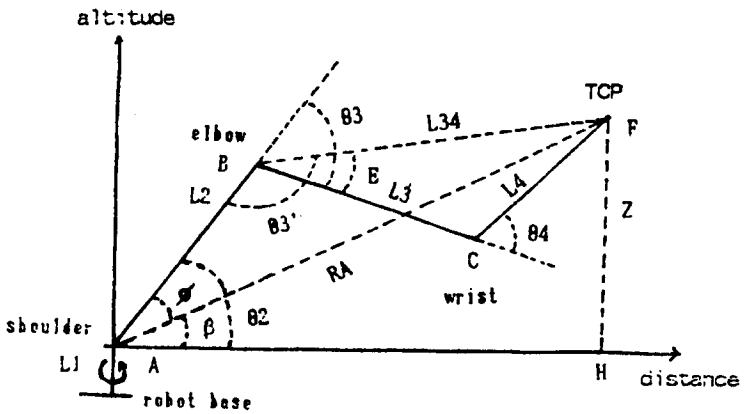

Fig. 3. Geometric analysis of the robot using WCS

원하는 로보트의 어깨 관절값(θ_2)과 팔굽 관절값(θ_3)을 구할 수 있다. 첫째, 로보트 손의 pitch가 주어지면 각 ($180° - |\theta_4|$)의 마주보는 변 L34는 항상 일정하다. 즉, 한번 주어진 로보트손의 pitch는 로보트의 다른 관절-허리, 어깨, 팔굽-들의 움직임과는 무관하게 항상 일정한 특성을 가지므로 L3 와 L4로 이루어지는 삼각형에서 빗변 L34와 cosine 제2법칙을 이용하여 각 E는 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$L34=[\{(L3^2+L4^2-2L3L4\cos(180°-|\text{pitch}|)\}]^{\frac{1}{2}}$$

$$E=\cos^{-1}\{(L3^2+L34^2-L4^2)/(2L3L34)\}$$

여기서 알고 있는 L3과 L4를 이용하여 빗변 L34를 구할 수 있으며, 이 빗변은 일종의 링크 역할을 하므로 가상의 링크 L34라 한다. 그래서 θ_4의 자유도가 하나 감소되는 결과를 가져온다. 둘째, 로보트 손의 pitch가 주어진 상태에서 가상의 링크 L34가 결정되고, 로보트의 어깨 관절로부터 로보트 TCP까지의 기능좌표인 거리(RA)가 주어지면, 이 거리도 역시 로보트 관절값 계산시 하나의 링크 역할을 하므로 가상링크 RA라 한다. 어깨 링크(L2), 가상링크 L34와 RA로 삼각형을 형성한다. 이 삼각형에서 ϕ와 θ_3'을 구하면 다음과 같다.

$$\phi=\cos^{-1}\{(L2^2+RA^2-L34^2)/(2L2RA)\}$$

$$\theta_3'=\cos^{-1}\{(L2^2+L34^2-RA^2)/(2L2L34)\}$$

결과적으로 위의 두 삼각형에서 구한 값들과 입력되는 값인 고도(Z), RA, θ_4를 이용해서 로보트 손을 움직이는데 필요한 θ_2와 θ_3를 간단히 구할 수 있다. 여기서 Z와 RA는 로보트 작업장의 WCS에서 로보트 어깨 관절로부터 로보트 TCP가 위치할 작업물체 위의 Z와 RA이다. 그래서 θ_2와 θ_3는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2=\beta+\phi$$

여기서 $\beta=\sin^{-1}(|Z|/RA)$이다.

$$\theta_3=180° - (\theta_3' - E),\ \text{pitch} \geq 0'$$

$$\theta_3=180° - (\theta_3' + E),\ \text{pitch} < 0'\ \text{이다.}$$

위치계산 절차는 WCS를 이용한 로보트 손의 위치제어를 위하여 입력되는 위치좌표와 pitch각으로 기하학적 해석에 의한 알고리즘을 통하여 로보트 관절값 계산을 하게 된다. 다시 말해서 이 위치계산절차에 의하여 주어진 pitch각으로 이동할 수 있는 위치값들을 계산한다. 자세계산 절차는 WCS를 이용한 로보트 손의 자세제어를 위하여 입력되는 θ_4와 손목 roll(θ_5)은 다음과 같은 식에 의하여 계산하게 된다.

$$\theta_4=\text{pitch}\ 13.3+(\text{roll}-\theta_1)\ 13.3$$

$$\theta_5=\text{roll}\ 13.3+(\text{roll}-\theta_1)\ 13.3$$

2.2.2. 미시적 동작제어 개선

기존 연구에서 직접조작에 의한 미시적 동작제어시 사용되어진 unit control(UC)과 micro unit control(MUC)은 로보트의 각 관절축이 joint coordinate motion에 따라서 움직이므로 function key를 사용하여 해당되는 각 관절축을 일정량씩 움직여 원하는 지점까지 도달하기 위하여 형성된 경로는 지그재그의 모양으로 나타난다. 그런데 인간의 손동작처럼 로보트를 이용하여 물체를 잡을 때 가능한 한 로보트의 손이 물체를향해 직선운동을 할 수 있도록 한다면 UC와 MUC에서 처럼 각 축의 움직임과 상호관계를 미리 생각할 필요가 없으므로 보다 효율적으로 미시적 동작제어를 수행할 수 있을 것이다. 이를 위하여 기존의 cartesian straight line motion을 대수적이 아닌 기하학적 방법으로 분석하여 직교좌표의 축에 따른 직선운동에 필요한 각 축의 값을 산출하도록 하며, 이를 GSLM방식이라고 명명하였다[7]. 이 방식은 로보트의 베이스를 중심으로 CCS의 각 축에 따른 fore-back, left-right, up-down의 6개 동작에 해당하는 로보트의 허리, 어깨, 팔굽축의 상호관계를 기하학적인 방법으로 도출하여 rule로서 프로그램내에 내장한다.

이러한 GSLM방식을 한층 더 발전시켜 로보트의 동작을 인간조작자가 움직이는 것과 같이 로보트에게 재현시키기 위하여 로보트의 동작을 가능한 한 원하는 지점까지 빠르게 움직이도록 TCP를 중심으로 나타나는 3개의 축을 조합할 수 있었고, 따라서 어느 방향에 대한 방향 vector에 대해서도 로보트를 제어할 수 있는 MGSLM방식을 활용하였다[5]. 이 MGSLM방식은 코맨드 조작에 의한

거시적 동작제어가 끝난 후 TCP를 중심으로 형성되는 3개의 직교좌표축을 기준으로 원하는 지점의 방향 vector를 형성하고, 이 때 로보트의 허리, 어깨, 팔굽축의 상호관계를 기하학적인 해석방법으로 원하는 관절값을 구하여 미시적 동작제어에서 위치를 결정하고, 자세에 대해서는 기존의 UC와 MUC 방식을 사용한다.

Ⅲ. 실 험

3. 1. 실험방법 및 절차

본 연구를 위한 실험장치는 기존 연구에서 사용하던 장치를 그대로 활용한다. 먼저 교시작업을 위하여 중추적 역할을 수행하며 지식베이스의 추론기관과 제어를 담당하는 human interactive subsystem (HIS) 컴퓨터로는 IBM-PC/XT가 사용되며, 이는 인간조작자의 코맨드를 받아 작업을 수행하고, 그 결과를 피이드 백하는 interface 기능을 한다. 다음으로 task interactive subsystem(TIS) 컴퓨터의 기능은 ROB-501 로보트의 drive unit가 담당하며, 이는 HIS로부터 로보트의 동작 데이터를 받아 각 관절의 이동량을 동작신호로 전환하는 역할을 한다. 실험으로는 기존 연구의 TES/WCS(1)과 본 연구의 TES/WCS(2)를 비교하는 것으로 수행도 척도로는 거시적 동작제어에서 좌표판독에 따른 root mean squre(RMS)오차와 미시적 동작제어에서 소요되는 미시적동작제어시간이다. 실험대상작업은 기존 연구에서 실시하던 램프점화작업으로 한다. 즉, 실험작업은 먼저 성냥을 잡고 성냥을 성냥통으로 가져가서 불을 켜고, 알콜램프로 이동하여 심지에 불을 붙인 다음 성냥을 재털이에 버리는 일련의 연속된 램프점화작업을 선정한다.

실험절차는 좌표판독에 따른 정확성을 검증하기 위하여 실험대상작업인 램프점화작업에 적용되는 4개의 작업물체에 해당하는 end point를 피실험자가 판독하고 입력하게 된다. 이 때 실험자는 미리 설정된 end point에 대하여 두 시스템의 입력처리과정을 통해 나온 입력정보와의 RMS 오차를 측정한다. 또한, 두 시스템에 대해 측정되는 평균교시작업시간은 램프점화작업을 위해 각 교시를 원하는 작업물체에 로보트를 움직이는데 소요되는 시간으로서 여기에는 좌표판독시간과 이동시간을 합친 거시적 동작제어시간과 미시적 동작제어에 소요되는 미시적 동작제어시간으로 구분하여 측정한다.

3. 2. 실험결과 및 분석

실험의 결과 및 분석으로부터 첫째, 그림 4는 측정된 RMS 오차를 교시지점별로 나타낸 것으로 좌표판독에 대한 정확도가 향상되었음을 알 수 있다. 둘째, 그림 5는 각 작업순서별에 따른 평균교시작업시간중에서 미시적 동작제어에서 기존 연구의 heuristic 방식 및 GSLM방식과 본 연구의 GA 알고리즘방식 및 MGSLM 방식의 교시지점별 소요되는 조작시간을 보여주고 있으며, GA 알고리즘방식 및 MGSLM방식에 의한 미시적 동작제어시간이 각 교시지점에서 감소되었음을 알 수 있다.

세째, 그림 4와 5로 부터 본 연구의 TES/

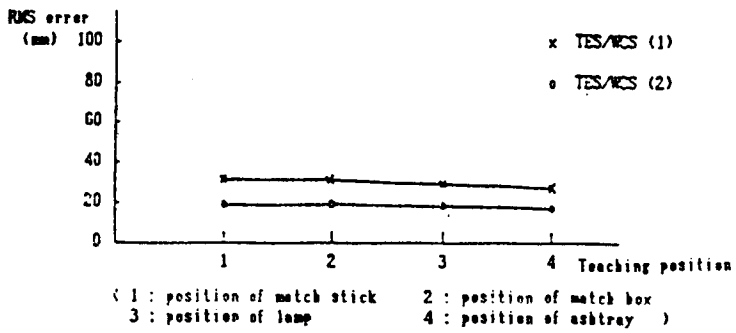

Fig. 4. Comparision of the RMS error about the teaching position

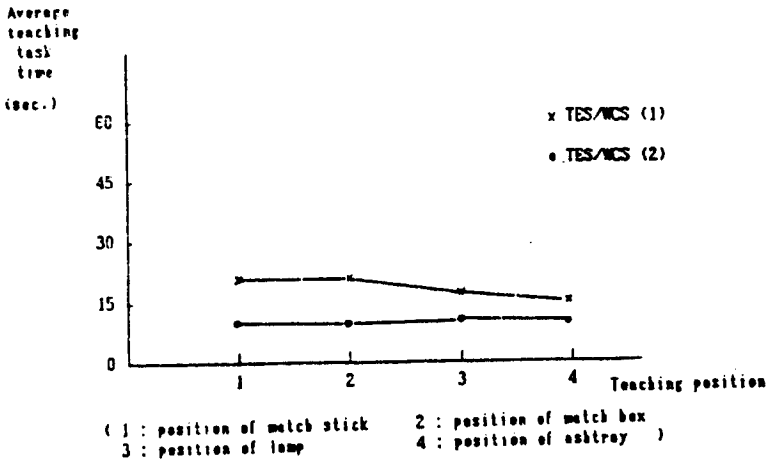

Fig. 5. Comparison of the average time about the teaching positions

WCS(2)가 기존 연구의 TES/WCS(1)보다 우월함을 검증하는 방법으로는 t-test를 사용하며, 그에 대한 가설은 다음과 같다.

가설 : 귀무가설 $H_0 : u \geq u_0$

대립가설 $H_1 : u < u_0$

(1) 여기서, u_0 = TES/WCS(1)의 평균 RMS 오차

u = TES/WCS(2)의 평균 RMS 오차

(2) 여기서, u_0 = TES/WCS(1)의 평균미시적 동작제어시간

u = TES/WCS(2)의 평균미시적 동작제어시간

실험결과에 대하여 앞에서 언급된 가설을 가지고 유의수준 5%로 하여 t-test한 결과가 표 1이다.

Table 1. Results of t-test

t-test	
Significance level	5 %
Criterion region	$(-\infty, 1.74)$
t-value of RMS error in coordinate reading	-9.58
t-value of time in micro motion control	-9.30
Ho	reject

따라서 본 연구의 TES/WCS(2)에서 좌표판독에 사용된 updated combined fuzzy process의 입력처리과정이 기존 연구의 TES/WCS(1)에서 좌표판독에 사용된 combined fuzzy process의 입력처리과정보다 좀 더 정확한 좌표판독의 결과를 낳는다고 판명할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 TES/WCS에 의한 로보트의 동작제어개선을 위하여 거시적 동작제어시 좌표판독에 따른 모호성을 해결하고자 행한 기존 연구의 combined fuzzy process에 의한 좌표판독의 결과보다 본 연구의 updated combined fuzzy process에 의한 좌표판독의 결과가 정확함을 실험결과 분석으로 알 수 있었다. 또한, 미시적 동작제어 시간을 감소시키고자 행한 기존 연구의 heuristic방식 및 GSLM방식에 의한 것보다 본 연구의 GA알고리즘방식 및 MGSLM방식에 의하여 여 행한 것이 미시적 동작제어를 위한 조작량과 조작시간을 감소시킬 수 있음을 실험결과 분석을 통하여 알 수 있었다. 앞으로의 연구과제는 force contorl을 위한 compliance의 문제해결과 좀 더 복잡한 작업이나 개선된 음성인식 방법을 이용한 교시시스템에 인간의 작업부하를 감소시키는 한 요소로서 자동음성인식(ASR)시스템의 응용을 통한 로보트의 동작제어방식으로 발전시켜 나아가야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Croker, K. and Lyman, J., "Research issues in implementing remote presence in teleoperator control", 17th Annual Conference on Manual Control, Vol. 1, pp. 109-126, 1983.

[2] Sato, T. and Hirai, S., "Language aided robotic teleoperator system (LARTS) for advanced teleoperation", 85 ICAR, pp. 329-336, 1985.

[3] Takase, K. and Wakamatsu, S., "A concept of intelligent teleoperation system and related technologies", JRSJ Vol. 2, No. 6, pp. 62-71, 1984.

[4] Lee, S. Y., Nagamachi, M., Ito, K. and Oh, C. S., "A study on a teaching and operating expert system in the advanced teleoperator system", 18th ISIR, pp 441-448, 1988.

[5] Lee, S. Y. and Han, J. H., "A study on Improvement of Robot Motion Control in Teaching and Operating Expert System/World Coordinate System (TOES/WCS)", HESK, Vol. 8, No. 1, pp. 44-46, 1989.

[6] Stanley, C., Sensation and perception, Academic Press, 1979.

[7] Taylor, R. N., Planning and excution of straight-line manipulator trajectories in robot motion, MIT Press, 1982.

[8] Samsung Electronic Co., ROB-501 robot user manual, 1985.

[9] Shimon, Y. N, Robot ergonomics : Optimizing robot work, Handbook of Industrial Robotics, 1985.

[10] Zimmermann, H. J., Fuzzy set theory and its application, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.