

# Integrated Human and Robot Ergonomics의 측면에서 로봇의 동작제어 개선에 관한 연구 (A Study on the Improvement of the Robot Motion Control as a part of the Integrated Human and Robot Ergonomics)

이순요† 권규식†† 홍승권††

## Abstract

Teaching Expert System/World Coordinate System(TES/WCS) was proposed to improve robot motion control. First, precise coordinate reading for getting the inherent data about position and posture of task objects was performed through the integrated image and fuzzy processing. Second, singularity and parameter limitation problems in getting the motion data about position and posture of robot in macro motion were solved by proposed geometric algorithm. Third, the unnecessary robot motion was also removed by the Robot Time and Motion(RTM) method and the Multi-Geometric Straight-Line Motion(MGSLM) method in micro motion.

This results demonstrated reduction of the average teaching task time according to task order.

### 1. 서론

Human interface기술중에서 중요한 과제로 지적되고 있는 관심분야는 인간과 로봇의 역할분담에 의한 협조작업이며, 인간의 자율성과 로봇의 범용성을 결합시키도록 하는 시스템이 human-robot system이다[1].

이러한 human-robot system에 있어서 지적 원격조작 시스템(advanced teleoperator system)이 제안되었으며[2], 시스템의 자동모드를 위하여 로봇 각 관절의 기능분석에 의하여 설계된 기능좌표계(World Coordinate System:WCS)을 적용한 교시 전문가시스템(Teaching Expert System:TES)인 TES/WCS가

구축되었다[3].

이 시스템은 integrated human and robot ergonomics의 측면에서 작업물체의 고유데이터를 얻기 위하여 WCS를 설계하고, 로봇의 동작데이터를 얻기 위하여 전문가 시스템(expert system)화하여, 이들을 결합시킴으로써 로봇의 동작제어를 개선하려는 관점에서 구축된 것이다.

이의 시도를 위한 기존 연구로서는 로봇 각 관절의 운동분석에 의하여 설계된 직교좌표계(Cartesian Coordinate System:CCS)를 적용한 교시 전문가시스템인 TES/CCS가 있었다[4].

그러나 이 시스템에서의 문제점은 첫째, 작업물체의 고유데이터를 얻는 데 있어서 좌표판독의 모호성을 해소하기 곤란하였다. 둘째, 로봇의 작업물체으

† 고려대학교 산업공학과

†† 고려대학교 산업공학과 대학원

로의 근접 이동까지인 거시적 동작시 로봇의 동작 데이터를 얻는 데 있어서 Singularity Parameter 제한범위의 해소문제가 있었다. 세째, 로봇의 작업물체 근접이동시로부터 대상물체까지의 미시적 동작시 로봇의 동작데이터를 구하는데 있어서 불필요한 로봇의 동작이 존재하였다.

따라서 본 연구에서는 human-robot ergonomics를 추구하기 위해서 교시작업을 위한 TES/WCS를 활용함으로써 TES/CCS를 다음과 같이 개선하고자 한다.

첫째, 교시를 하려는 작업물체의 고유데이터를 보다 바람직하게 얻기 위하여 판독의 부정확성을 해결하는 데는 image processing을 하고, 이에 따른 판독의 모호성을 해소하는 데는 fuzzy processing을 하는 integrated image and fuzzy processing을 고안한다.

둘째, 로봇의 거시적 동작에서 로봇의 동작데이터를 구하기 위하여 로봇의 이동시 singularity와 parameter 제한범위의 해소를 기하학적 해석에 의한 알고리즘으로 행함으로써, 작업물체까지의 이동의 부정확성을 보완할 수 있도록 하고, 이로 인한 미시적 동작시간의 단축에도 기여하고자 한다.

세째, 로봇의 미시적 동작에서 위치제어를 위한 로봇의 동작데이터를 얻기 위하여 로봇의 작업방법에 따른 동작을 분석하는 Robot Time and Motion (RTM)법에 사선을 포함한 직선운동이 가능하도록 한 Multi-Geometric Straight Line Motion(MGSIM)방식을 결합하여 미시적 동작시 요구되는 조작량과 조작시간을 감소하고자 한다. 그림 1은 전체적인 연구의 배경 및 흐름을 나타내고 있다.

## II. 본론

### 2-1 로봇의 동작제어 개선의 의의

본 연구에서 로봇의 동작제어를 효율적으로 개선하기 위하여, 작업물체의 위치와 자세값의 고유데이터 산출을 image processing을 통해 WCS의 등동작선을 기준으로 하여 산출하고, 이 고유데이터의 보정을 위하여 fuzzy processing을 함으로써 작업물체의 위치 좌표에 대한 판독의 정확성을 이루고자 한다.

그리고, 로봇의 거시적 동작시 로봇의 동작데이터를 구하기 위하여 singularity와 parameter제한범위의 해소를 Geometric Inverse Kinematics/World Coordinate System(GIK/WCS)을 이용한 기하학적 해석에 의한 알고리즘으로 행함으로써 작업물체까지의 이동의 정확성을 기하고, 이에 따른 미시적 동작

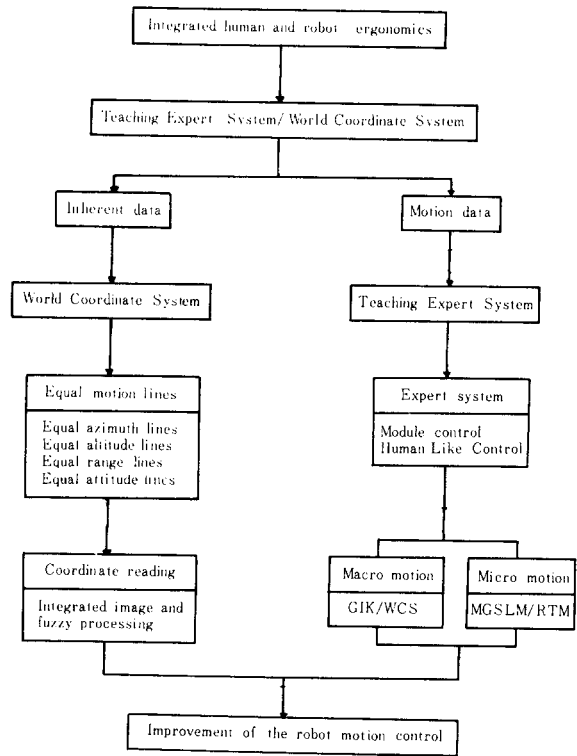


Figure 1. Overall flowchart of this study

시간의 단축에도 기여한다. 또한, 로봇의 미시적 동작시 위치제어를 Human Like Control(HLC)로 하기 위한 로봇의 동작데이터를 얻기 위하여 로봇의 작업방법에 따른 동작을 RTM법으로 분석하고, 이에 따라 MGSIM방식을 활용하여 미시적 동작시 요구되는 조작량과 조작시간을 감소하고자 한다.

따라서, 위와 같은 개선을 통하여 integrated human and robot ergonomics의 측면에서 작업물체의 고유데이터와 로봇의 동작데이터를 효율적으로 결합함으로써 로봇의 동작제어를 개선하게 된다.

### 2.2 고유데이터의 산출을 위한 좌표판독

좌표판독은 표 3과 같이 로봇 손으로부터 작업물체의 고유데이터를 얻고자 image processing을 하여 작업물체의 위치와 자세를 판독하고, 이러한 판독에서 생기는 모호성을 해소하기 위하여 fuzzy processing을 행한 다음, 이 값을 로봇의 동작 데이터로 바꿔주기 위하여 로봇 어깨축을 기준으로한 WCS값으로 변환하는 일련의 과정으로 이루어진다.

방향을 위한 image processing은 모니터상에 WCS의 등동작선중의 하나인 등방향선을 표시해줌으로써 좌표판독의 기준을 제공한다. 이는 작업물체가 맺혀

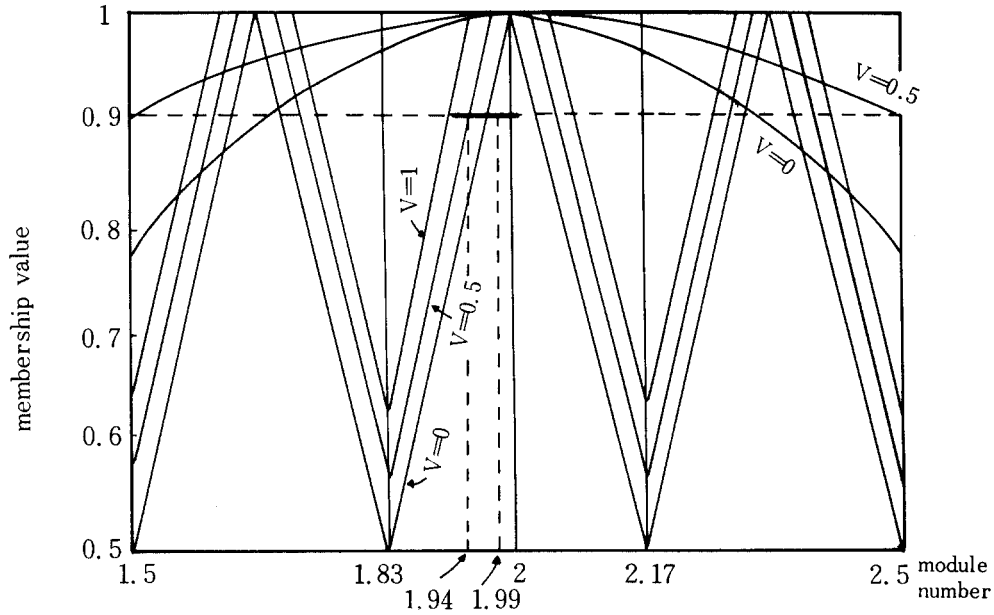


Figure 1. Membership function of horizontal module

Table 1. Procedures of the integrated image and fuzzy processing

Classification	Azimuth	Pitch	Range	Altitude	Roll
Data	image	image	image	geometric	eye
calculation	processing	processing	processing	analysis	measurement
Fuzzy processing	revised L-R fuzzy number	revised L-R fuzzy number	L-R fuzzy number + JND	using d & p'	$\pi$ membership function
Transformation processing	$\theta = \theta' - \alpha$	$p = \angle C - 180^\circ$	$\rho = [Z^2 + \{d \text{Cosp}' \pm (\rho'^2 - Z'^2)^{1/2} \cdot 2\}]^{1/2}$	$Z = Z' \pm d \text{Sinp}'$	$r = r$

있는 위치를 쉽게 파악할 수 있기 때문에 판독을 용이하게 한다. 그리고 등동작선을 기준으로 양쪽의 면적의 비를 구하여, 이를 fuzzy processing에서의 membership value로 사용한다.

방향값의 보정을 위해서 사용되는 fuzzy set theory는 L-R fuzzy number를 변형시킨 revised fuzzy number를 사용하였다[5]. 이러한 변형의 이유는 image processing을 통하여 면적의 비로 구한 membership value가 모니터상에서 작업물체의 위치를 정확히 표시해줌으로써, 이 membership value를 활용하기 위하여 대칭적이고 선형적인 membership function을 구성하려고 하기 때문이다.

이러한 revised L-R fuzzy number는 기존의 L-R fuzzy number의 적용시보다 후보 그룹이 적어지고,

작업물체의 위치를 정확히 표현해줌으로써 방향값의 보정을 행한다.

그림 1은 module number가 2인 방향에 대해 데이터 보정과정을 나타낸 그림이다. 한편, vagueness의 값은 0, 0.5, 1의 세 가지로 나누었으며, vagueness의 결정은 작업 물체의 모양이 블럭의 모양과 유사한 정도에 따라 정하였다[6].

Pitch값의 산출과정과 보정과정은 방향값의 절차와 유사하기 때문에 생략한다.

거리값은 작업물체에 대한 판독을 모니터상에 비추어진 작업물체의 면적을 두 지점에서 투영하여 계산하고, 거리의 제곱에 대한 면적의 반비례관계에 의하여 거리값을 산출하는 기하학적 방법을 사용함으로써 좌표판독의 모호성을 감소시킨다[7],[8]

고도값은 CCS에서의 pitch(p')값과 거리값을 이용하여 기하학적인 해석에 따라 구함으로써 데이터산출과 데이터보정의 과정을 거치지 않고 구할 수 있다.

Roll값에 대해서는 로봇 손목을 중심으로 회전하는 자세값이므로 그 움직임의 형태는 화상으로 인식하기 곤란하여 목측에 의해 데이터를 산출하고,  $\pi$ 형 membership function을 사용하여 보정을 한다.

2.3 거시적 동작시 동작데이터의 산출을 위한 기하학적 해석에 의한 알고리즘

동작데이터의 산출을 위한 기하학적 해석에 의한 알고리즘은 WCS의 거리값을 이용하여 기하학적으로 해석하기 때문에 singularity와 로봇트 관절 parameter 제한범위를 최대로 뺀 상태의 거리이거나 그 이상이면 singularity가 발생하고, 또한, 그 이내의 거리일 지라도 parameter제한범위 때문에 로봇트가 움직이지 않는 현상이 발생한다.

따라서 본 연구에서는 그림 2에 나타난 것과 같이 링크 2와 L34의 길이를 합한 최대 길이를 입력하지 않으면 singularity가 발생하지 않지만, 인간조작자의 실수로 그 이상의 거리로 입력하면 singularity의 상, 하한값의 방지절차에 의하여 최대거리 이하로 줄여주도록 하고자 한다.

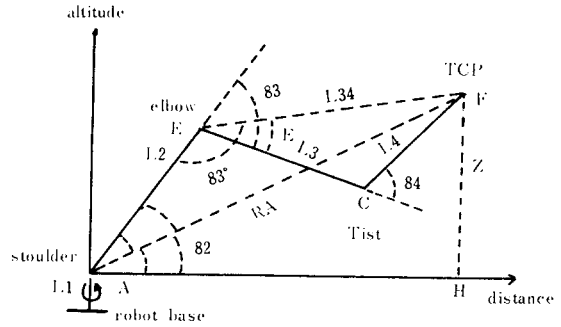


Figure 2. Geometric analysis of robot by the WCS

Parameter제한범위의 문제는 로봇트 손의 pitch각에 따른 이동 가능한 관절 parameter의 한계치 거리로써 쉽게 계산하고, 이를 이용하여 parameter 제한범위를 해소한다. 임의의 pitch각에 대하여 WCS의 기준등고도선상에서 거리만을 변경하여 GIK / WCS에 입력하면, GIK / WCS가 계산한 로봇트가 움직여야 하는 계산치와 로봇트 관절교유의 제한범위가 쉽게 비교될 수 있다. 그래서 로봇트 관절 parameter제한범위는 주어진 pitch각과 거리로써 로봇트 관절이 움직일 수 있는 범위의 상,하한값으로 나타난다.

Table 2. Algorithm by the geometric analysis

Classification	Geometric algorithm
Singularity	$ L2 - L34  \leq Range \leq L2 + L34$
Parameter limitation	$\min R = \{L2^2 + L34^2 - 2L2L34\cos(90^\circ + E)\}^{1/2}$ $\max R = L2 + L34$ $\min R \leq Range \leq \max R$
GIK / WCS	$L34 = \{L3^2 + L4^2 - 2L3L4\cos(180^\circ -  \text{Pitch} )\}^{1/2}$ $E = \cos^{-1}\{(L3^2 + L34^2 - L4^2) / (2L3L34)\}$ $\Phi = \cos^{-1}\{(L2^2 + RA^2 - L34^2) / (2L2RA)\}$ $\theta_3 = \cos^{-1}\{(L2^2 + L34^2 - RA^2) / (2L2L34)\}$ $\theta_1 = \theta \times 30, \quad \theta_2 = \beta + \Phi, \quad \beta = \sin^{-1}(Z / RA)$ $\theta_3 = 180^\circ - (\theta_3 - E), \quad \text{Pitch} \geq 0^\circ, \quad \theta_3 = 180^\circ - (\theta_3 + E), \quad \text{Pitch} < 0^\circ$ $\theta_4 = \text{Pitch} \cdot 13.3 + (\text{Roll} - \theta) \cdot 13.3, \quad \theta_5 = \text{Roll} \cdot 13.3 + (\text{Roll} - \theta) \cdot 13.3$

따라서 singularity와 parameter제한범위를 해소함으로써 로봇 이도의 정확성과 이에 따른 미시적 동작시간의 단축에 기여한다. 이러한 singularity와 parameter 절차를 거친 후에 GIK / WCS에 의하여 작업 물체의 고유데이터를 로봇의 동작데이터로 바꿔주게 된다. 이들을 표로 나타내면 표 2와 같다[9].

2.4 미시적 동작시 동작데이터의 산출을 위한 HLC

미시적 동작데이터의 산출을 위한 HLC를 위하여 integrated human and robot ergonomics의 일환으로써 인간의 손동작처럼 유사하게 로봇의 동작을 유도하고자 한다. 즉, 인간의 동작을 Methods-Time Measurement(MTM)법으로 분석하듯이 로봇의 동작도 이런 개념을 활용한 RTM법으로 분석하고, 이 분석된 자료를 바탕으로 미시적 동작의 위치제어를 MGSLM방식으로 실시하도록 하였다.

MGSLM방식은 인간의 손동작처럼 로봇을 이용하여 물체를 잡을 때, 가능한 한 로봇의 손이 물체를 향해 직선운동을 하도록 함으로써 각 축의 움직임과 상호관계를 미리 생각할 필요가 없으므로 보다 효율적으로 미시적 동작을 수행할 수 있도록 하는 것이다. [9]

이 방식에서는 로봇의 동작을 인간조작자가 움직이는 것 같이 로봇에게 재현시키기 위하여 Tool Center Point(TCP)를 중심으로 나타나는 3개의 x, y, z축을 조합하여 8가지의 방향벡터를 movement rules로 설정함으로써 로봇의 불필요한 동작을 제거하도

록 하였다. 따라서 MGSLM방식은 기하학적 해석방법에 의하여 직교좌표의 축에 따른 직선운동 뿐만 아니라 이러한 직선운동을 조합함으로써 사선방향을 포함한 직선운동이 가능하도록 한다. 기하학적 해석에 의한 로봇 관절값 계산과 방향벡터에 대한 변수는 표 3과 같다.

또한, 특정작업에 대하여 작업순서를 정하고 작업 방법을 제시하면, RTM법은 이것을 로봇 동작으로 분석하고, 이에 따른 로봇 작업시간을 측정한다. 이 방법은 10개의 기본동작을 4개의 그룹으로 나누어 분석하는 방식이다[10].

본 연구는 RTM법과 MGSLM방식을 결합시킨 방법으로 특정작업에 대한 효율적인 작업순서와 작업방법을 미리 분석하여 인간조작자에게 모니터를 통하여 알려줌으로써, 인간조작자가 MGSLM방식의 의해 로봇동작을 위한 고유데이터를 입력시켜 주게 되면 GIK / WCS에 의해서 동작데이터로 바꿔 주게 된다.

이렇게 작업물체의 고유데이터와 고보트의 동작데이터를 integrated human and robot ergonomics의 측면에서 효율적으로 결합함으로써 로봇의 동작제어를 개선하게 된다.

III. 실험

3.1 실험방법

본 연구를 실험으로는 TES / WCS의 고유데이터산출시 integrated image and fuzzy processing에 의한 좌

Table 3. Joint calculation and variables of direction

Specification	Contents
Joint calculation	$\theta_1 = \theta_1' + \alpha, \quad \alpha = \text{Cos}^{-1} \{ (AI^2 + AD^2 - ID^2) / (2 AI AD) \}$ $\theta_2 = \theta_2' + \beta,$ $\theta_2' = \text{Cos}^{-1} \{ (a_2^2 + Aa^2 - a_3^2) / (2a_2 Aa) \}$ $\beta = \text{Tan}^{-1} \{  Z' + Z  / AI \}$ $\theta_3 = \theta_3' + \gamma,$ $\theta_3' = \text{Cos}^{-1} \{ (a_2^2 + a_3^2 - Aa^2) / (2 a_2 a_3) \}$ $\gamma = \text{Cos}^{-1} \{ (a_3^2 + a_3^2 - a_4^2) / (2 a_3 a_3) \}$
Variables of direction	<p>Ad=AD+ 5, foreward</p> <p>Ad=AD- 5, backward</p> <p>Aa= AI+ (Z'+Z) , upward</p> <p>Aa= AI+ (Z'+Z) , downward</p> <p><math>\theta_1 = \theta_1' - \alpha</math> leftward</p> <p><math>\theta_1 = \theta_1' + \alpha</math>, rightward</p>

표판독과 로봇의 거시적 동작에서 동작데이터산출시 GIK / WCS에 의한 singularity 및 parameter제한범위의 해소, 그리고 로봇의 미시적 동작에서 동작데이터산출시 사용된 MGSLM / RTM방식을 기존 연구의 TES / CCS와 비교하고자 한다.

실험장치는 기존 연구에서 사용하던 장치를 그대로 활용하며, 특히 image processing을 위하여 로봇 손에 붙어있는 카메라로부터 대상물체의 정보를 추출하는 지각기능으로서 이용한 화상처리장치로는 Image Technology회사의 PC PLUS image board가 사용되며, 이는 카메라로부터의 영상신호를 화상데이터로 메모리에 기입하거나, 메모리중의 화상데이터를 모니터상에 표시하는 기능을 한다.

실험대상작업은 기존 연구에서 실시하던 램프점화작업으로서, 실험절차는 좌표판독에 따른 모호성의 해소를 검증하기 위하여 실험대상작업인 램프점화작업에 적용되는 4개의 작업물체에 대하여 두 시스템의 입력처리과정을 통해 나온 입력정보와의 Root Mean Squire(RMS)오차를 측정한다.

또한, 두 시스템에 대하여 측정되는 평균교시작업시간은 각 교시를 하려는 작업 물체에 로봇트를 움직이는 데 소요되는 시간으로서, 이는 작업물체의 고유데이터산출을 위한 좌표판독시간과 로봇트의 동작데이터를 산출하기 위한 거시적 동작시간, 그리고 미시적 동작시간으로 구분되어 측정된다.

3-2 실험결과

실험결과에 대한 분석으로부터, 다음과 같이 나타날 수 있다. 첫째, 그림 3은 측정된 RMS오차를 교시

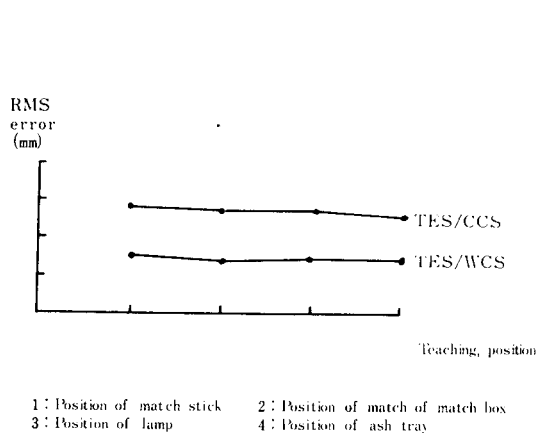


Figure 3. Comparison of the RMS error about the teaching position.

지점별로 나타낸 것으로서 좌표판독의 모호성이 해소되었음을 알 수 있다. 둘째, 그림 4는 작업순서별로 측정된 평균교시작업시간이 감소되었음을 알 수 있다.

그림 3으로부터 본 연구의 TES / WCS의 좌표판독에 사용된 integrated image and fuzzy processing의 입력처리과정이 기존 연구의 TES / CCS에서 사용된 입력처리과정보다 좀더 정확한 좌표판독의 결과를 낳았음을 알 수 있다.

이는 좌표값의 측정을 위한 좌표값산출시 image processing에 의한 작업물체의 위치와 자세값의 고유데이터를 얻기 위하여 모니터상에 WCS의 등동작선인 등 pitch선과 등방향선을 표시할 수 있으므로, 이 등동작선이 좌표판독의 기준이 되므로 판독이 용이했기 때문이다.

또한, image processing에 알맞는 fuzzy set theory를 적용한 fuzzy processing을 통하여 고유데이터의 후보 그룹의 선택범위를 좁혀주었고, 작업물체의 중심이 놓인 위치를 잘 표시해 주었기 때문이다. 따라서 좌표판독에 대한 모호성을 감소시킬 수 있었다.

또한, 그림 4로부터 첫째, 측정된 좌표값을 읽는 시간에 있어서 CCS보다 판독 시간이 감소되나, 이는 image processing을 하는 시간의 첨가로 인하여 판독 시간의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 둘째, singularity와 parameter제한범위의 해소를 위한 계산 방식은 GIK / WCS에 의한 알고리즘이므로 로봇트의 이동의 정확성을 가능케 하였으며, 이는 미시적 동작시간의 감소에 기여하였다. 셋째, 미시적 동작에 있어서는 작업을 하기전에 작업순서와 작업방법을 인간조작자에게 알려주고, 작업물체를 향해 직선운동을 가

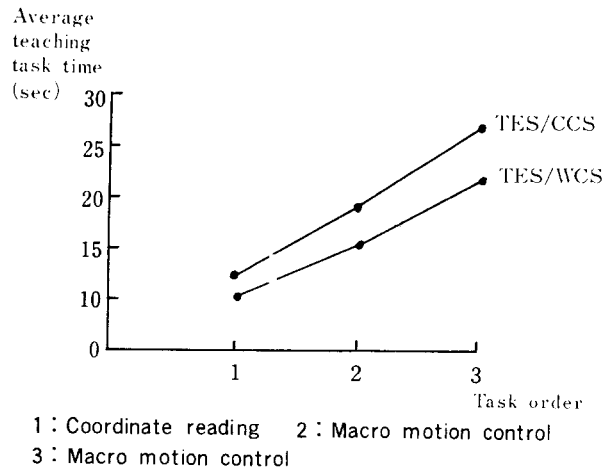


Figure 4. Comparison of the average teaching task time about task order.

Table 4. Results of t-test

t - test	
Significance level	5 %
Criterion region	(-00, 1, 74)
t - value of RMS error	-10.76
t - value of average teaching task time	-5.39
Ho	reject

능케 함으로써 작업시간의 감소를 가져왔다.

그림 3과 4로부터의 검증을 위해 t-test로 분석한 것이 표 4로서, 유의수준 5%로 다음의 가설에 의하여 본 연구의 TES/CCS보다 우월함이 검증되고 있다.

가설 : 귀무가설  $H_0 : \mu \geq \mu_0$

대립가설  $H_1 : \mu < \mu_0$

여기서, (1)  $\mu_0 = \text{TES/CCS}$ 의 RMS 오차 :

$\mu = \text{TES/WCS}$ 의 RMS 오차 :

(2)  $\mu_0 = \text{TES/CCS}$ 의 평균교시작업시간 :

$\mu = \text{TES/WCS}$ 의 평균교시작업시간

#### IV. 결론

본 연구에서는 로봇트의 동작제어개선을 위하여 human ergonomics와 robot ergonomics가 고려된 integrated human and robot ergonomics의 측면에서 TES/WCS를 활용하였다. 이를 위해 실험실내에서의 모의실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 교시를 하려는 작업물체의 위치와 자세에 관한 고유데이터를 얻기 위하여 WCS에 의한 integrated image and fuzzy processing을 적용하여 좌표판독의 모호성을 해소할 수 있었다.

또한, 대상물체까지의 거시적 동작시 로봇트의 동작데이터를 얻기 위하여 GIK/WCS에 의한 알고리즘을 보완하였다. 그리고 미시적 동작시의 로봇트의 동작데이터를 얻기 위하여 MGSLM/RTM방식으로 실행하였다. 그 결과, 로봇트의 동작을 인간의 동작처럼 유도하여 불필요한 동작을 제거함으로써 조작량과 조작시간의 감소를 가져왔다.

이러한 robot ergonomics의 연구는 로봇트 동작의 사이클 타임을 밀 예측함으로써 효율적인 로봇트 동작을 실행할 수 있도록 하기 위하여 인간의 동작분

석의 하나인 Modular Arrangement of Predetermined Time Standards(MODAPTS)를 활용한 RTM법의 깊은 연구가 요구될 것이다. 그리고, 키보드의 입력조작방법에 의하여 발생하는 인간의 작업부하를 감소시키는 한 요소로서의 Automatic Speech Recognition (ASR) 시스템의 응용을 통한 로봇트 동작제어방식으로 발전시켜 나아가야 할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] Sheridann, T.B., and Ferrell, W.R., "Supervisory control of remote manipulation", IEEE Spectrum, Vol.4, 81-88, 1967
- [2] Takese, K., and Wakamatsu, S., "A concept of intelligent teleoperation system and related technologies", Journal of the Robotics Society on Japan. Vol. 2, pp 62-71, 1984.
- [3] Lee, S.Y., and Kwon, K.S., "A Study on an improvement of the robot motion control by the robot ergonomics", Journal of Human Engineering Society of Korea, Vol. 8, pp 19~26, 1989
- [4] Lee S.Y, Nagamach, M., Ito, K., and Oh, C.S., "A study on a teaching and operating expert system in the advanced teleoperator system", 18th International Symposium on Industrial Robots, pp 441-448, 1988
- [5] Zimmermann, H.J., Fuzzy set theory and its application, Kluwer-Nijhoff Publishing
- [6] Park, s.k., "A Study for the manual mode by using the fuzzy sets in an advanced teleoperator system", Master thesis, Department of Industrial Engineering, Korea University, 1988
- [7] Ballard, D. H., and Brown, C.M., Computer vision, Prentice-Hall, Inc., 1982
- [8] 廣田薫, あいまい 制御知能ロボシト, アグロウヒ ハルブシク株式會社, 1985
- [9] Taylor, R.N., Planning and execution of straight-line manipulator trajectories in robot motion, MIT Press, 1982
- [10] Nof, S.Y., Robot ergonomics:Optimizing robot work, Handbook of industrial robotics, 1985