《研究論文》

Journal of the Human Engineering Society of Korea
Vol. 8 No. 1, June 1989

기능좌표계를 이용한 교시 및 실행 전문가 시스템 (TOES/WCS)에 있어서의 로보트의 동작제어 개선에 관한 연구

A Study on Improvement of Robot Motion Control in Teaching and Operating Expert System/World Coordinate System(TOES/WCS)

이순요† 한장희††

Abstract

The purpose of this study is to improve robot motion control in teaching and operating the expert system/world coordinate system(TOES/WCS) constructed in the previous study. The major contribution of this study is reduction of the inaccuracy in coordinate reading and the movement time of robots in macro motion control. This study also reduces undesirable time of micro motion control by using an unit control (UC) and a micro unit control (MUC) in micro motion control.

I. 서 론

극한작업용의 인간-로보트 시스템에서 인간과 로보트가 단독으로는 할 수 없는 작업을 협조하여 능률적으로 실시하는 원격조작기술이 제안되었고, 이에 좀더 지능을 부여하고자 지적 원격조작 시스템(advanced teleoperator system)이 제안되었다. 이 시스템은 프로그램에 의한 자동모드에서 작업수행 중에 에러가 발생하면 프로그램의 사용을 중단하지 않고 인간이 개재하는 수동모드로 들어가 에러를 회복한 후, 자동모드로 복귀하여 주어진 작업을 계속 실시함으로써 시스템의 기동성을 향상시키고 있다.[1][2].

이 시스템의 자동모드를 위하여 전문가시스템을 적용한 교시 및 실행전문가 시스템(teaching and operating expert system : TOES)이 연구되어 왔다. 특히, 다른 연구에서 일반적으로 사용되어 온 로보트 관절운동분석에 의한 직과좌표계 대신에 로보트 관절기능분석에 의한 기능좌표계(world coordinate system : WCS)를 사용했다.

그러나 기존 연구의 TOES/WCS(1)에서는 다음과 같은 문제점이 발생하였다. 첫째, WCS를 이용한 죄표판독시 인간조작자의 목측에 의한 좌표판독으로 모호성이 존재하였다. 둘째, heuristic rules에 의한 관절값 계산시 로보트의 하드웨어상 존재하는 관절제한범위를 고려하지 못하여 관절조작에러가 발생하였다. 셋째, unit control (UC)과 micro unit control(MUC)의 사용시, 로보트 각 축의 움직임과 그 상호관계를 미리 생각해서 조작하여야 하기 때문에 조작시간과 조작량이 많이 소요되었다. 본 연구에서는 기존 연구의 TOES/WCS(1)에서의 비효율적인 면들을 해소하고자, 다음과 같이 개선된 TOES/WCS(2)를 구

† 고려대학교 산업공학과
†† 고려대학교 산업공학과 대학원

축하고자 한다. 로보트의 거시적 동작제어를 위하여 작업물체의 위치와 자세를 판독할 때 발생하는 모호성을 해결하기 위하여 fuzzy number와 linguistic variable을 이용하는 fuzzy sets와 vagueness 개념을 포함하는 probabilistic sets를 결합하여 Combined fuzzy process를 활용한다. 그리고 관절값 산출시 heuristic rules를 이용하여 로보트의 하드웨어 제약상 발생하는 관절조작에러를 제거하기 위하여 pitch/range test와 pitch change rules 및 joint output rules를 보완하여 사용한다. 또한 미시적 동작을 제어할 때 teaching box 방식에 의한 로보트의 불필요한 동작을 제거하기 위하여 기하학적인 분석을 통한 multi-geometric straight line motion(MGSLM)을 개발하여 사용한다. 이렇게 함으로써 전체 교시작업시간의 감소와 전체 교시작업의 정확성에 기여하고자 한다. 그림 1은 TOES/WCS의 전체 흐름도를 보여 주며, 이중선부분이 본 연구에서 다루고자 하는 부분이다.

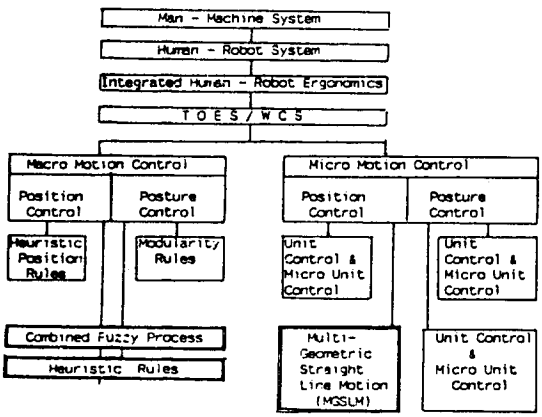

Fig. 1. Overall flowchart of TOES/WCS

2. 로보트의 동작제어개선

2-1 거시적 동작제어개선

(1) Combined fuzzy process

인간조작자에 의한 좌표판독시 존재하는 모호성을 제거하고자 다음과 같은 입력처리과정을 고안한다. 즉, 거시적 동작제어를 위하여 입력되는 자료는 WCS의 "방향(θ), 고도(Z), 거리(ρ), pitch, roll"이며, 이러한 각각의 입력자료에서 고도와 거리는 cm단위로 측정되므로 수치입력을 우선으로 하고, 상황에 따라서 linguistic variable 로도 입력할 수 있도록 하였다. 방향의 경우에는 각도를 나타내는 module number로 나타내므로 수치만을 사용해서 입력할 수 있고 자세는 각도자체로 측정되므로 linguistic variable로만 입력할 수 있게 하였다. 또한 입력된 측정치외에 인간조작자가 판단하는 vagueness 정도를 함께 입력하게 된다. 입력자료로 사용되는 방향, 고도, 거리, 자세 중에서 여기서는 대상물체의 높이를 나타내는 고도에 대해서 fuzzy number가 쓰이는 경우만 보인다. 입력은 cm단위의 수치가 우선적으로 사용되며, linguistic variable로도 입력이 가능하도록 했다. 먼저 수치입력시에는 L-R fuzzy number를 사용하며, 아울러 이 fuzzy number에 vagueness를 첨가함으로써 probabilistic sets의 개념을 함께 사용한다. 고도를 L-R fuzzy number로 표현하기 위해서는 reference function이 선정되어야 하는데, 본 연구에서는 일반적인 membership function으로 널리 사용되며 L-R fuzzy number의 요건에 맞는 조건하[4]에서 $L(x)=(R(x)=(1/(1+x^2))$으로 정했으며, vagueness는 [0, 1]사이에서 임의의 실수값을가질 수 있으나 v=0, v=0.5, v=1 중의 한 값만을 가질 수 있도록 하였다[5]. 이들 각각은 "확실, 적정, 불확실"의 의미를 가지고 있다. L-R fuzz number에 이러한 vagueness를 적용하면 L-R fuzzy number의 왼쪽 전개와 오른쪽 전개가 vagueness의 역할을 하게 됨을 알 수 있다. 즉, 고도와 vagueness와 함께 입력되면 그에 따른 membership function은

$$\mu(x)=L((a-x)/\alpha)=1/(1+((a-x)/\alpha)^2),\ x\leq a$$
$$R((x-a)/\beta)=1/(1+((x-a)/\beta)^2),\ x\geq a$$

가 되며, 이 때 α와 β는 vagueness에 따라 v=0이면 $\alpha=\beta=10$, v=0.5이면 $\alpha=\beta=15$, v=1이면 $\alpha=\beta=20$으로 설정된다. 이로써 구해지는 각각의 membership function에 대해 임의의 임계치(critical value)를 설정하여 이에 따라 입력되는 고도의 competition group은

$$Cg=\{[-x,+x]\mid[\mu(x)\leq c)\ \text{and}\ [\mu(x)\neq 1]\}$$

가 나오며, 이 구간내에서 랜덤으로 선택하여 이를 고도로 한다.

(2) Heuristic rules의 개선

거시적 동작제어시 combined fuzzy process를 통한 작업물체의 위치와 자세를 가지고 로보트의 관절값을 계산할 때, 이 값들이 로보트의 각관절이 움직일 수 있는 관절제한범위를 벗어나게 되면 에러가 발생하게 된다. 이러한 에러를 사전에 방지하기 위하여 발생여부를 실험하는 pitch/range test와 pitch change rules 그리고 위치 및 자세에 대한 관절값을 계산하는 joint output rules로 이루어 진다. 입력된 위치와 자세정보에 대해서 먼저 pitch로 입력된 거리내로 갈 수 있는지 없는지를 판단하는 ($L \leqq range \leqq U$)의 pitch/range test를 거치게 된다. 여기에서 range란 줄어진 pitch로 갈 수 있는 거리를 말하며, L과 U는 주어진 pitch로 갈 수 있는 거리의 하한치와 상한치를 나타낸다. 이에 따라 주어진 pitch로 갈 수 있는 범위내에 거리가 있으면 joint output rules에 의해 관절값을 계산하고, 범위밖에 있으면 그 거리에 해당하는 새로운 pitch를 찾아내어 pitch change rules로 들어간다. 그 결과, pitch에 관계없이 로보트 손이 움직일 수 있는 영역내에서는 관절조작에러가 발생하지 않으므로 로보트 손의 이동가능범위가 확대된다.

joint output rules는 pitch/range test와 pitch change rules로부터 들어오는 입력자료들을 받아서 실제로 로보트의 관절값을 계산하는 단계로써, 위치에 대해서는 기존에 구성된 rules를 사용하고 여기서는 자세에 관하여만 설명한다. 자세에 대해서는 측정된 자세와 이 자세를 가지고 원하는 자세값을 구하기 위해서 아래와 같은 rules를 구성한다.

Rule 1 : if (roll=LS) or (roll=RS) or
(roll=LM) or (roll=RM)
then ($\theta 5$=roll$-\theta 1$)

Rule 2 : if (roll=LA) and ($\theta 1 > 0$)
then ($\theta 5$=roll$-\theta 1$)
else ($\theta 5 = -(\theta 1 + roll)$)

Rule 3 : if (roll=ZE)
then ($\theta 5 = -\theta 1$)

2 - 2. 미시적 동작제어개선

(1) Multi-geometric staight line motion

기존 연구에서 미시적 동작제어시 사용되어진 UC, MUC는 joint coordinate motion을 하게 되고 이 때 형성된 경로는 지그재그의 모양으로 나타나 로보트의 불필요한 동작을 낳게 된다. 이러한 로보트의 불필요한 동작을 제거하기 위하여 다음과 같은 MGSLM을 고안한다.

본 연구에서 고안된 MGSLM은 기하학적 분석방법에 의하여 직교좌표의 축에 따른 직선운동뿐만 아니라 이러한 직선운동을 조합함으로써 사선방향을 포함한 직선운동이 가능토록 한다. 이러한 cartesian straight line motion에 관한 기존 연구로는 직교좌표축에 따른 직선운동에 관한 기하학적 분석방법과 대수적인 분석방법이 있다[6][7].

거시적 동작이 이루어진 후 TCP를 중심으로 형성되는 3개의 직교좌표축(즉, fore-back, left-right, up-down)을 조합하여 2^3=8개의 vector를 설정할 수 있다. 8가지 vector에 해당되는 성분은 다음과 같이 구성된다.

(fore, up, left) (fore, down, left)
(back, up, left) (back, down, left)
(fore, up, right) (fore, down, right)
(back, up, right) (back, down, right)

8가지 vector에 대하여 관절값과의 관계는 $\theta 2$, $\theta 3$가 위의 모든 직교좌표축과 관련되어지는 반면 $\theta 1$은 left와 right에만 관련되고 나머지 직교좌표축과는 관련되어지지 않는다. 위의 8가지 vector에 대한 관절값을 구하기 위하여 다음과 같은 예를 보이고, 나머지 7가지 경우에는 소요되는 변수만 변화시키면 같은 방법으로 산출해 낼 수 있다. 거시적 동작이 끝난 후 TCP를 중심으로 앞으로(=fore) t1cm, 위로(=up) t2cm, 왼쪽으로(=left) t3cm 움직이고자 할 때 다음과 같은 입력형식을 취한다 : (fore=t1, up=t2, left=t3). 그림 4는 입력을 위와 같이 한 경우, 로보트의 이동전과 이동후의 모습을 보여주며, 이를 이용하여 다음과 같이 관절값을 계산할 수 있다.

그림 2로부터 TCP인 점 0는 WCS에 의해 기준등방향선 AO'로부터

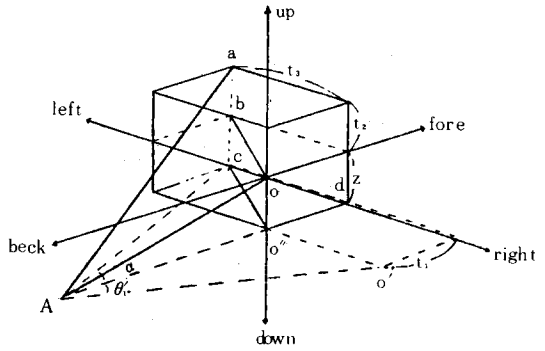

Fig. 2. Position of robot in TCP

$\theta 1'$ 만큼 왼쪽으로 틀어진 상태이고, 고도는 Z이며 거리는 AO인 상태를 보여준다. 여기서 원하는 지점 a까지 가기 위해서는 거리 Aa와 고도 ca, 방향 α를 알면 원하는 관절값을 구할 수 있다. 삼각형 AO"c로부터 cosine 제2법칙을 이용하여 다음과 같이 $\theta 1$을 구할 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{Ac^2 + AO''^2 - cO''^2}{2\,Ac\;AO''}\right)$$

$$\theta 1 = \theta 1' + \alpha$$

그림3은 그림2의 측면도를 보여주며, 이를 이용하여 $\theta 2$, $\theta 3$를 구할 수 있다. 그림3으로부터 link 2의 끝점 B와 a를 잇는 가상선을 만들어 a34를 이용한다. 여기서는 p는 pitch값을 말하고 ai(i=1, 2, 3, 4,)는 link i의 길이이다.

$$a34 = (a3^2 + a4^2 + 2a3a4\cos p)^{\frac{1}{2}}$$

삼각형 Aca로부터 β는

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{|Z + t2|}{Ac}\right)$$ 이고,

$$\theta 2 = \theta 2' + \beta$$

$$\text{where } \theta 2' = \cos^{-1}\left(\frac{a2^2 + Aa^2 - a34^2}{2\,a2\;Aa}\right)$$

이다. 삼각형 BCa로부터 r은 다음과 같다.

$$r = \cos^{-1}\left(\frac{a3^2 + a34^2 - a4^2}{2\,a3\;a34}\right)$$

그리고, $\theta 3 = \theta 3' + r$

$$\text{where } \theta 3' = \cos^{-1}\left(\frac{a2^2 + a34^2 - Aa^2}{2\,a2\;a34}\right)$$

8가지 vector에 대해 3개의 직교좌표축에 해당되는 변수는 다음과 같다.

fore인 경우는 $Ad = AO'' + t1$,

back인 경우는 $Ad = AO'' - t1$,

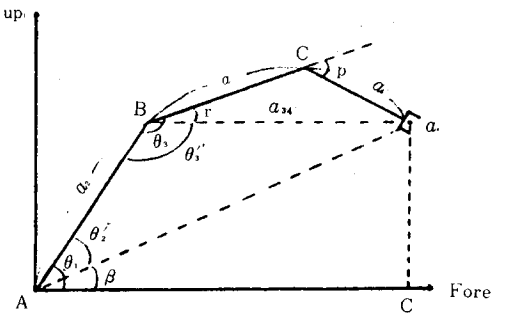

Fig. 3. Side of robot moved in TCP

up 인 경우는 $Aa = (Ac^2 + (Z + t2)^2)^{\frac{1}{2}}$,

down인 경우는 $Aa = (Ac^2 + (Z - t2)^2)^{\frac{1}{2}}$,

left인 경우는 $\theta 1 = \theta 1' - \alpha$,

right인 경우는 $\theta 1 = \theta 1' + \alpha$.

따라서 위의 8가지 방향 vector를 구하기 위하여 해당되는 변수를 가지고 각 관절값을 산출하며, 산출방법은 동일하다.

3. 실 험

3 - 1. 실험방법

실험은 기존 연구의 TOES/WCS (1)과 본 연구의 TOES/WCS(2)를 비교하는 것으로 한다. 수행도척도는 교시시간 및 위치제어의 정확도로 한다. 교시작업에 관한 실험은 로보트가 놓여진 성냥을 잡아 성냥통에 가지고가 불을 붙인 다음, 알콜램프에 점화한 후 재떨이에 버리는 일련의 램프점화작업으로 한다. 교시시간은 거시적 동작제어시 원하는 지점의 위치와 자세를 판독하는데 걸리는 좌표판독시간, 좌표가 입력된 후 원하는 지점까지 움직이는 이동시간 및 미시적 동작제어시 드는 미세조작시간으로 구성된다. 이들 시간은 각 작업에서 분류하여 측정한다. 정확도에 관한 실험은 로보트가 이동한 위치좌표와 작업물체가 놓여진 위치좌표와의 차이를 측정하는 것이다. 그 비교 방법으로는 RMS(root mean squre)가 사용된다.

3 - 2. 실험결과 및 분석

실험결과 및 분석은 두가지 수행도척도에 의하여 분석된다. 첫째, 각 작업에서 작업순서별로 측정된 시간은 평균시간이다. 이 평균시간의 차이는 각 작업순서별로 분석된다. 각 작업에서 작업순서별로

분류하여 측정된 각 시간을 합해서 평균 교시작업 시간을 구하고 이는 ANOVA에 의하여 분석된다. 그리고 그 검증은,

귀무가설 Ho : $\mu \geqq \mu o$

대립가설 H1 : $\mu < \mu 0$

여기서, $\mu 0$=TOES/WCS(1)의 평균 교시작업 시간

μ=TOES/WCS(2)의 평균 교시작업 시간

이다. 그리고, 유의수준은 5%이고, 표 1은 ANOVA의 결과이며, 그림4는 각 작업에서 작업순서별로 측정된 평균 교시작업시간을 보인다. 교시작업은 좌표판독과 로보트의 이동으로 구성된 거시적 동작제어와 미시적 동작제어로 구성된다. 대부분의 작업에 있어서 TOES/WCS(2)가 우월성을 갖는다. 좌표판독의 시간차가 크지 않은 것은 combined fuzzy process를 적용한다는 사실이 시간보다는 불확실한 자료에 객관성을 부여할 수 있는데 의의가 있다. 또한 TOES/WCS(2)가 관절제한범위를 고려한 결과로써, 이동시간의 우월성을 갖는다. 그리고 TOES/WCS(2)의 미시적 동작제어시, 사선방향을 포함한 직선운동이 가능한 MGSLM 때문에 우월성을 갖는다.

Table 1. Results of t-test

t - test	
significance level	5 %
rejection region	$(-\infty, 1.74)$
t - value in coordinate reading time	- 5. 97
t - value in movement time	- 13. 94
t - value in time of micro motion control	- 26. 8
Ho	rejection

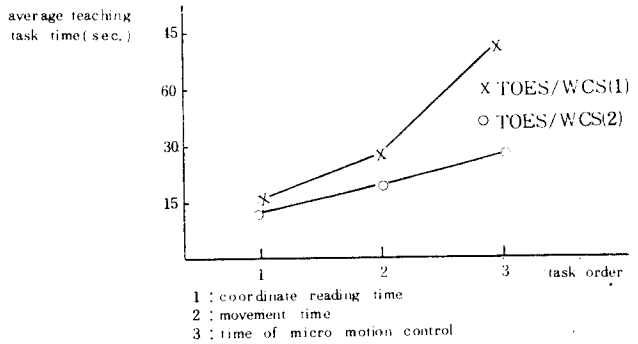

Fig. 4. Comparision between the average teaching task time

두 TOES/WCS사이의 RMS오차는 작업역 내에 존재하는 범위에서 거리별로 측정된 오차를 계산하며, 그의 결과는 그림5에서 보여준다.

그림5에서 TOES/WCS(2)의 RMS오차는 TOES/WCS(1)의 오차 보다 적은 것은 좌표판독시 combined fuzzy process를 사용하였기 때문이다.

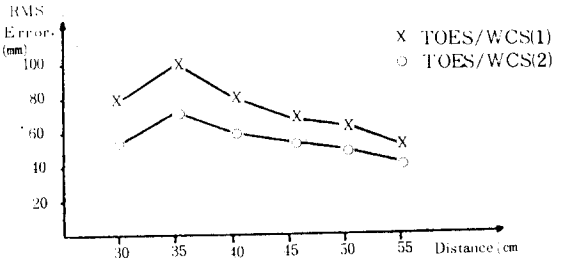

Fig. 5. Comparision between the average RMS error to the range

4. 결 론

본 연구에서는 기존 연구의 TOES/WCS에 의한 로보트의 동작제어를 다음과 같이 개선함으로써 좀 더 효율적으로 교시작업을 수행할 수 있었다. 첫째, 좌표판독시 combined fuzzy process를 사용하여 인간조작자의 목측에 의한 모호성을 해결할 수 있었다. 둘째, 개선된 heuristic rules를 사용하여 관절조작에러를 제거할 수 있었다. 셋째, MGSLM을 사용하여 UC, MUC에 의한 불필요한 동작을 제거할 수 있었다. 이렇게 함으로써 전체 교시작업시간의 감소와 전체 교시작업의 정확성에 기여할 수 있었다. 앞으로의 연구과제로는 음성입력을 가능케 하는 automatic speech recognition (ASR)을 이용한 로보트의 동작제어와 실제 극한작업장에서의 작업을 위해 정교한 센서 및 그에 따른 제어방법들이 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] K. Takase and S. Wakamatsu, "A Concept of Intelligent Teleoperator System and Related Technologies," JRSJ, Vol. 2, No. 6, pp. 62-71, 1967

[2] S. Hirai and T. Sato, "Advanced Master-Slave Manipulator Augmented with World Model," 15th ISIR, pp. 137-144, 1985

[3] S. Y. Lee, M. Nagamachi, K. Ito ahd C. S.

Oh," A Study on a Teaching and Operation Expert System and Error Recovery Expert System using a World Coordinate System in the Advanced Teleoperator System," 10th Congress IEA, Australia, pp. 645－647, 1988

[4] H. J. Zimmermann : Fuzzy Set Theory and Its Application, Klawer-Nijhoff Publishing, 11/38 1985

[5] Hirota, K. et al., "Robot Control Based on Membership and vagueness," in Approximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland, pp. 621－635, 1985

[6] R. P. Richard : Robot Manipulators, MIT Press, pp. 137－143, 1981

[7] R. N. Taylor, "Planning and Excution of Straight-Line Manipulator Trajectories," in Robot Motion, MIT Press, pp. 265－286, 1982