

Man - Robot System의 일환으로서 에러회복
전문가시스템에 관한 연구

이 순 요 , 김 참 대
고려대학교 산업공학과

A Study on an Error Recovery Expert System as a part of
Man - Robot System

Soon Yo Lee Chang Dae Kim
Korea University

Abstract

A Teaching and Operating Expert System(TOES) was designed in order to perform a task effectively which is inaccessible to man. Once an error occurs in the middle of the task operation, the automatic mode is converted into a manual mode. After recovering the error by the manual mode, the manual mode should be converted into the automatic mode. It was necessary to improve the manual mode in order to increase the availability of a man-robot system, a part of the human interface technique. Therefore, the Error Recovery Expert System must be constructed and developed.

1. 서론

(1) 연구의 의의 및 배경

극한작업용의 인간-로봇 시스템에 있어서 로봇의 환경적응능력을 최대한으로 살리면서 안전한 원격지점으로부터 인간조작자의 거시적인 판단과 조작에 의해 인간과 로봇이 단독으로서는 할 수 없는 작업을 협력하여 효율적으로 실시하는 원격조작기술(Teleoperation)이 제안되었다(1). 더욱이, 극한작업용의 인간-로봇시스템을 실현하기 위한 Human-interface 기술에서, 지적원격조작기술(Advanced Teleoperator System)은 원격조작작업에 컴퓨터를 도입하여 인간의 부담을 경감시키고 작업의 고도화를

실현하는 방법과 전자동로봇시스템에 인간의 원조를 도입하여 행동감시와 에러회복을 실시하는 방법이다(2).

본 연구에서는 극한작업용의 인간-로봇시스템을 구성하기 위하여 human - interface 기술의 일환으로서 지적원격작업에 관한 연구를 실시하고자 한다. 먼저, 극한 작업환경이나 불확실한 상황하에서의 작업을 보다 지능적으로 수행하기 위하여 인간조작자의 원격조작에 관련된 지식과 경험을 지식베이스화하는 전문가시스템을 이용하여 교시 및 실행전문가시스템(TOES:Teaching and Operating Expert System)을 구축하였다(3, 4).

TOES는 교시전문가시스템(TES)과 실행전문가시스템(OES)으로 나뉘어지며, 실행전문가시스템에 의한 작업의 수행도중 에러가 발생하면 자동모드에서 수동모드로 변환하여 에러를 회복한 후 자동모드로 복귀하여야 한다. 이와같은 인간-로봇시스템의 유용성을 향상시키기 위하여 수동모드의 개선이 필요하다. 따라서, 수동모드중에서 로봇의 자율성을 나타내는 코멘드조작과 인간조작자의 범용성을 나타내는 직접조작을 인간공학적 측면에서 효율적으로 결합시킨 에러회복전문가시스템을 개발한다.

(2) 연구의 개요 및 특징

수동모드에서의 에러회복작업은 프로그램에 의한 코멘드조작과 인간조작자에 의한 직접조작에 의해 수행되어진다. 원격조작작업중 작업물체를 떨어뜨리는 에러에 대해서, 코멘드조작은 떨어진 물체의 위치와 자세를 판독하여 key board를 통해 입력하는

좌표판독시간과 입력된 좌표값에 의해 관절값을 산출하여 end point에 이르는 이동시간으로 구성한다. 직접조작은 end point로 부터 인간조작자의 직접조작에 의해 최종으로 에러를 회복하는것이다.

이러한 수동모드의 두 조작을 보다 효과적으로 수행하기 위하여 인간조작자의 에러회복지식을 지식베이스화하여 에러회복전문가시스템을 구축하며, 특히 에러회복의 대부분을 차지하고 있는 코멘트조작을 개선하고자한다.

작업장의 공간상에 로봇의 관절운동분석에의해 로봇베이스를 기준으로 x, y, z축을 형성한 직교좌표계를 적용하며 로봇관절값 계산에 geometric inverse kinematics을 이용한 ERES/CCS (Error Recovery Expert System/Cartesian Coordinate System)를 구축한다. ERES/CCS에 의한 에러회복작업의 수행도중, 좌표판독에 의해 입력된 위치와 자세값이 로봇관절에 의해 이루어지는 삼각형을 형성하지 못하여 관절값 계산이 불가능한 singularity조작에러와 계산된 관절값이 주어진 각 관절의 hardware상의 parameter 제한범위를 초과할때 일어나는 parameter 조작에러가 발생하게된다(5, 6, 7). 이러한 문제점을 정확히 규명하며 geometric inverse kinematics에 의한 관절값 산출시 에러가 발생하면 heuristic rule을 적용하여 에러발생을 해결하며 작업물체의 판독시 x, y좌표에 의해 방향을 설정하고 대략적인 linguistic variable에 의한 자세판독에 의해 fuzzy inference를 적용하여 자세제어시의 어려움을 해결함으로써 코멘트조작의 성능향상을 도모한다.

2. 본론

(1) ERES/CCS모델의 구성

지적원격시스템의 자동모드에서 error가 발생하면 수동모드로 넘어가, module control에 의해 입력된 직교좌표계의 위치정보와 피치각 및 자세번호의 자세정보에 따라 관절값의 계산을 geometric inverse kinematics에 의해 산출되며 modularity rules를 거쳐 코멘트조작을 수행하게 된다. 또한 UC(unit control)와 MMC(micro motion control)에 의해 직접조작을 수행하여

에러를 회복하는 시스템이 ERES/CCS이다.

그림 1과 같이 ERES/CCS는 robot base를 기준으로한 직교좌표계를 이용하며, 작업물체가 놓인 직교좌표상의 위치에 따라 end point에 해당하는 좌표의x, y, z값 및 원하는 자세정보를 입력하면, 그 입력정보를 이용하여 θ_1 을 구하고 L2, L3, AC에 의해 결정되는 삼각형에의해 θ_2 , θ_3 및 pitch각을 이용하여 θ_4 를 구하게 된다.

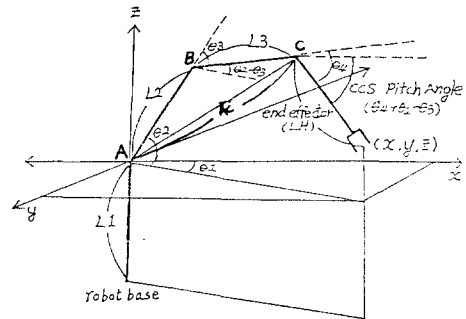


Fig. 1. ERES/CCS의 직교좌표계

(2) ERES/CCS모델의 문제점

Geometric inverse kinematics에 직교좌표의 위치를 입력하기 위하여 monitor에 입력되는 극한작업장에서 robot base로부터 작업물체에 대한 좌표(x, y, z) 및 자세를 판독하여야 한다. 그러나, 좌표판독은 공간상의 직교좌표계에서 가상의 X, Y, Z축을 형성하여, 이 세 축으로부터 좌표를 판독하게 된다. 이 가상의 축으로부터 좌표를 판독하기란 용이하지 않으며, 따라서 좌표를 판독하는데 많은 시간이 소요되며, 정확한 좌표를 추정하기도 곤란하다.

이동시간은 수식에 의해 계산되어 end point에 이르는 계산시간과 parameter 제한범위를 초과하여 발생하는 error에 소요되는 error 회복시간 및 singularity를 벗어나 발생하는 error에 소요되는 error회복시간으로 이루어진다.

1) Singularity조작error

ERES/CCS에 있어 geometric inverse kinematics에 의해 계산되는 관절값 중 θ_2 와 θ_3 의 계산에서 arccosine이 이용되며, 따라서 $\cos^{-1}(t)$ 에서 t 값이

절대치 1을 초과하지 않아야 한다.

만약 t값이 절대치 1을 초과하게 되면 계산상의 error가 발생하여 좌표를 재판독하여 입력하여야 한다. 이때 t값이 절대치 1이되는 경우는 L2, L3, AC가 형성하는 삼각형이 일직선이 되는 경우이다. 다시 말해서 두 번의 길이의 합이 한 번의 길이와 같아지는 경우에 singularity가 발생하며, L3와 end effector가 일직선이 되도록 pitch각을 주었을때 발생하는 singularity를 work space boundary singularity라 한다.

Singularity에서 pitch각에 따라 singular point는 boundary singularity 안쪽에 나타나며, 이와같이 작업내부에 형성된 singularity를 work space interior singularity라 한다.

2) parameter조작error

ERES/CCS는 robot 각 관절의 parameter제한범위를 고려하지 못한 geometric inverse kinematics에 의해 계산된 관절값이 제한범위를 벗어나게 되면 error가 발생하게 된다. 따라서 error를 수정한 후 제한범위 속에 들어가는 입력정보를 가질 때까지 반복작업을 하게 된다.

본 연구에서 사용하는 ROB-501 robot에 대한 각 관절의 parameter제한범위를 나타낸 것이 그림 2.이다.

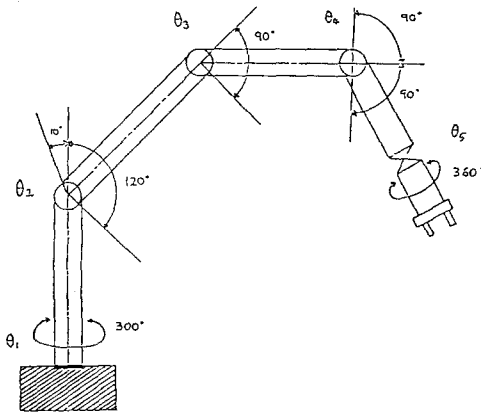


Fig. 2. ROB-501 robot 관절의 parameter제한범위

이와같은 parameter조작 error와 singularity조작 error를 고정된 y,z값에 대해 X,pitch각의 입력정보에 따라 살펴 보면 그림 3.과 같다.

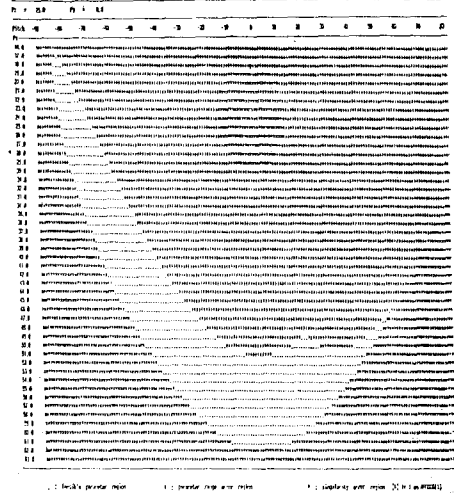


Fig. 3. pitch각과 x에 따라 singularity조작error와 parameter조작error가 발생하는 범위

(3) ERES/CCS모델의 보완

1) Singularity와 parameter조작에러에 대한 수식해

a. Singularity조작에러

Singularity는 다음의 두 가지 경우에 대해 발생한다.

i. $L2 = L3 + \overline{AC}$ 인 경우

$$\begin{aligned} \cos^{-1}((\overline{AC}^2 - L2^2 - L3^2) / (2 L2 L3)) \\ = \cos^{-1}(((L2 - L3)^2 - L2 - L3) / (2 L2 L3)) \\ = \cos^{-1}((-2 L2 L3) / (2 L2 L3)) \\ = \cos^{-1}(-1) = 0 \end{aligned}$$

ii. $\overline{AC} = L2 + L3$ 인 경우

$$\begin{aligned} \cos^{-1}((\overline{AC}^2 + L2^2 - L3^2) / (2 L2 L3)) \\ = \cos^{-1}((\overline{AC} + L2 - (\overline{AC} - L2)^2) / (2 L2 L3)) \\ = \cos^{-1}((2 \overline{AC} L2) / (2 \overline{AC} L2)) \\ = \cos^{-1}(1) = 0 \end{aligned}$$

이를 $\overline{AC} > L2 + L3$ 인 경우에 대해 살펴보면 $\theta 2$ 의

계산중,

$$\cos^{-1}((\overline{AC}^2 + L2^2 - L3^2) / (2 \overline{AC} L2))$$

분자 $\overline{AC}^2 + L2^2 - L3^2$ 은 조건 $\overline{AC} > L2 + L3$ 을 제공하여 이항하면 $\overline{AC} + L2 - L3 > 2 \overline{AC} L2$ 를 만족하며, 따라서

본자는 본모보다 큰 값으로 절대치 1을 초과하게 되어 error가 발생한다. $L2 > L3 + \overline{AC}$ 에 대해서도 같은 방법으로 살펴 볼 수 있다.

b. Parameter 조작에러

01의 제한범위

01의 경우, 초기자세를 기준으로 좌우 150° 회전이 가능하며, 따라서 입력정보인 x, y 가 $x \geq 2y$ 나 $x \geq -2y$ 중 한 조건을 만족하여야 한다. 그렇지 못하면 계산된 관절값이 제한범위를 벗어나 error가 발생하는 경우가 생긴다.

02, 03의 제한범위

그림 1에서와 같이 $L2, L3, \overline{AC}$ 에 의해 형성된 삼각형에 의해 02, 03를 구할 수 있으며, 그 값이 그림 3의 제한범위속에 포함되어야 한다. 만약, 그렇지 못할 경우 hardware상의 error가 발생하며, 새로운 입력정보를 제공하여야 한다.

04의 제한범위

04의 제한범위는 $L3$ 와 end effector가 이루는 각이 $\pm 90^\circ$ 속에 포함되어야 한다. 그런데 ERES/CCS에서는 pitch각을 수평면과 end effector가 이루는 각으로 설계하여 pitch각이 $\pm 90^\circ$ 범위 속에 있다 하여도 04가 그 제한범위를 벗어나는 경우가 발생한다. 따라서, CCS pitch각으로 04를 계산하여 그 값이 제한범위 속에 있는가를 살펴보아야 하며, 이와같은 CCS pitch각(04+02-03)은 그림 1에 나타나 있다.

2) Singularity와 parameter 조작에러에 대한 heuristic rules

ERES/CCS의 이동시간에서 발생하는 두 가지 에러에 대한 문제를 algorithm적으로 해결하여 코멘드조작시간을 줄일 수 있으나 heuristic rule에 비해 계산시간이 상대적으로 길며 발생한 에러에 대한 1차적인 수정이 더 필요하게 된다. 이에 대한 heuristic rule의 문제해결 능력의 우월성에 의해 ERES/CCS를 개선한 시스템인 Revised ERES/CCS의 관절값 계산법은 heuristic rule을 사용하며, 이는 아래와 같다.

작업물체에 놓인 직교좌표상의 위치에 따라 end point에 해당하는 좌표값 및 원하는 pitch각을 입력하면 singularity test를 거쳐 singularity조작error가

발생하지 않는 값이면 그대로 관절값 계산에 들어가며 singularity조작error가 발생하는 값이면 x, y, z 값을 줄여 singular point까지 당겨 geometric inverse kinematics에 의한 관절값 계산에 들어간다.

이상과 같은 과정을 거쳐 관절값 계산이 이루어졌을 경우, 마지막으로 최종 관절값이 산출되어 나올때, parameter test를 거쳐 parameter 제한범위를 초과하는 관절값이 나오면 제한범위까지 움직이게 한다.

Revised ERES/CCS 는 ERES/CCS에서 geometric inverse kinematics전후에 singularity heuristic rules와 parameter heuristic rules을 삽입하여 구성한다.

3) Fuzzy inference의 적용

물체의 자세판독시 개재되는 어려움에 의해 많은 판독시간이 소요되었다. 이러한 물체자세에 대한 판독의 어려움을 모호한 linguistic variable 을 입력케 함으로써 자세판독의 어려움을 해소하며 로봇트 베이스에 대한 방향을 함께 고려하여 정확한 자세제어가 되도록 한다.

방향을 x, y 좌표로서 표현하면,

방향 = $TAN^{-1}(x/y)$ 로 x, y 에 의해 형성되는 4 사분면에서 1 사분면과 2 사분면은 부호에 상관없이 앞의 식으로 나타낼 수 있으나, 3 사분면과 4 사분면은 부호가 바뀌므로 $x < 0$ 일때는 방향에 1을 곱해준다.

방향과 자세를 함께 고려함으로써 정확한 자세제어에 따라 직접조작도 줄여줄 수 있게 된다.

(4) 실험 및 결과분석

1) 지식습득 및 표현

ERES/CCS의 지식기반을 위한 지식습득은 크게 인간조작자의 지식, 작업환경모델과 기본이론, ROB-501 로봇트교범에 의해 얻어지며 그림 4.와 같이 지식베이스의 세 가지 objects인 parts, rules, goals로 ERES/CCS의 architecture이 구성되어 진다.

2) 실험장치

에러회복을 위한 인간-로봇트 시스템의 실험장치를 나타낸 것이 그림 5. 이다.

에러회복을 위한 중추적 역할을 수행하는 knowledge base 내의 inference engine 과 제어를 담당하는 HIS

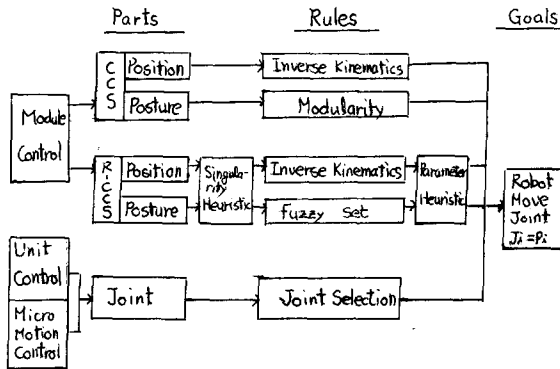


Fig. 4. ERES/CCS의 Architecture

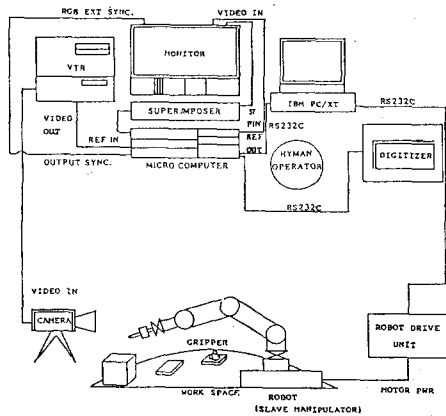


Fig. 5. 에러회복을 위한 인간-로봇 시스템의 실험장치도

(Human Interactive Subsystem) 컴퓨터로는 IBM-PC/XT가 사용되며, 이는 인간작업자의 command를 받아 작업을 수행하고 그 결과를 feed back 하는 interface 기능을 수행한다. TIS(Task Interactive Subsystem) 컴퓨터의 역할은 ROB-501 robot drive unit가 담당하며, 이는 HIS로부터 동작데이터를 받아 각 조인트의 이동량을 actuator signal로 전환시킨다.

극한작업환경하의 작업을 수행하는 manipulator로는 ROB-501 robot를 사용하며, PTP 제어방식과 step motor로 구동된다. 또한 원거리조작의 수행을 위해 작업장에

sensor의 역할을 수행하는 T.V camera가 설치되어 있으며, 인간조작자는 monitor에 의해 화상을 전달받는다.

3) 실험 방법

ERES에 의한 에러회복실험은 ERES/CCS 및 Revised ERES/CCS에 대한 비교실험으로 행한다. 피실험자는 본연구에 대한 이해가 깊은 대학원생 3명으로 한다. 수행도 척도로는 에러회복작업에 소요되는 시간이며 비교대상의 두 시스템은 동일한 실험장치와 작업환경모델을 사용한다. 실험작업은 작업장평면의 한 위치에 놓여 있는 성냥통을 잡고, 성냥통으로 이동하여 불을 켜는 lamp점화작업중에 발생하는 에러를 회복하는 실험에 대해 실시한다.

4) 실험결과 분석

기존의 ERES/CCS와 Revised ERES/CCS에 대해 두 시스템을 이동시간과 좌표판독의 command조작과 직접조작 각각에 대해 비교분석한다. 기존의 ERES/CCS와 Revised ERES/CCS의 평균에러회복시간이 같다는 가정에 대한 기각역 $F > F_{0.05}(v_1, v_2) = 3.65$ 분산분석결과 산출된 F 값이 포함되어 평균치가 같다는 귀무가설,

$$H_0 : u_1 = u_2, \quad H_1 : u_1 \neq u_2$$

where, u_1 : 기존 ERES/CCS의 평균에러회복시간

u_2 : Revised ERES/CCS의 평균에러회복시간

에 위배되며 아래 그림 6.에서 알 수 있는 바와 같이 Revised ERES/CCS의 전체적인 에러회복시간이 적게 소요됨을 검증할 수 있다.

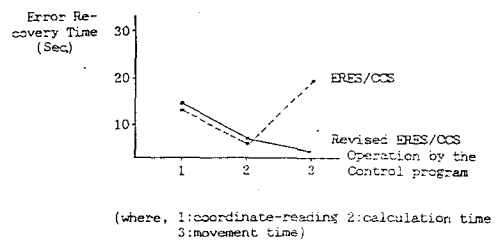


Fig. 6. 기존의 ERES/CCS와 Revised ERES/CCS의 세부작업별 비교도

에러회복작업은 코멘드조작과 직접조작에 의해 이루어진다. 코멘드조작은 좌표판독과 이동시간으로 나누어지며, 이동시간은 계산시간과 이동시간으로 구분된다. 이와같은 좌표판독, 계산시간, 이동시간에 대해 그 작업이 차지하는 에러회복시간을 나타낸 것이 그림 6.이며, 대부분의 작업에서 Revised ERES/CCS의 우월성을 볼 수가 있다.

첫째, 좌표판독시 보완된 ERES/CCS는 자세판독시의 어려움을 fuzzy set theory의 적용에 의해 linguistic variable을 입력함으로써 빠르고 쉬운 좌표판독을 할 수 있다.

둘째, geometric inverse kinematics에 heuristic rule을 추가하여 singularity조작에러와 parameter 조작에러를 해결함으로써 작은 이동시간이 소요되었다.

3. 결론

인간이 작업하기 곤란한 극한 작업환경하에서 지적원격조작시스템중 교시 및 실행전문가시스템의 프로그램에 의한 자동모드로 작업을 수행할 때 에러가 발생하면, 인간에 의한 수동모드로 에러를 회복하여 자동모드로 복귀하여야 한다.

이러한 human interface 기술의 일환인 지적원격조작 기술의 발전을 위해 인간-로봇시스템의 유용성을 가져다 줄 수 있는 에러회복전문가시스템인 ERES/CCS가 개발되었다. 이 ERES/CCS는 직교좌표를 이용한 입력정보에 대해 geometric inverse kinematics에 의해 로봇관절값을 계산하여 에러를 회복하는 시스템으로 내포된 여러문제점에 의해 많은 에러회복시간을 요구하였다. 따라서 이와같은 좌표판독시의 어려움, singularity조작에러와 parameter조작에러를 해결하기 위해 다음과 같은 연구개선이 이루어졌다.

첫째, 좌표판독시 fuzzy set theory를 이용하여 linguistic variable을 입력케 함으로써 자세판독의 모호성을 해결하였다.

둘째, geometric inverse kinematics에 의한 관절값 계산시 발생하는 singularity조작에러와 parameter 조작에러를 heuristic rule을 통하여 해결할 수 있었다. ERES/CCS의 singularity 조작에러를 singularity test를

통해 새로운 입력정보를 산출하여 이 값을 이용한 관절값 계산으로 문제를 해결할 수 있었으며 계산된 관절값이 parameter 제한범위를 벗어날 경우 parameter test를 거쳐 관절값을 조절함으로써 error가 발생치 않게 하였다.

이상과 같은 ERES/CCS의 개선에 의해 많은 에러회복시간을 줄일 수 있었다. 그러나 이는 주로 command 조작을 개선한 방법으로, 그 결과 직접조작의 상대적 비중이 증가하여 직접조작시 compliance의 작용과 modularity rules에 의한 직접조작의 프로그램화 및 ASR(Automatic Speech Recognition)의 적용에 의한 직접조작의 향상도 고려하여야 한다.

Reference

- 1) S. Hirai and T. Sato, Language Aided Robotics Teleoperation System(LARTS) for Advanced Teleoperation, ICAR, 15th, 329/336, 1985
- 2) K. Takase and S. Wakamatsu, A Concept of Intelligent Teleoperation System and Related Technologies, JRSJ, Vol.2, No.6, 62/71, 1984
- 3) W. R. Ferrell and T. B. Sheridan, Supervisory Control of Remote Manipulation, IEEE Spect., Vol.4, No.10, Oct., 81/88, 1967
- 4) S. Y. Lee, M. Nagamachi, K. Ito and C. S. Oh, A Study on a Teaching and Operating Expert System and Error Recovery Expert System using a World Coordinate System in the Advanced Teleoperator System, 10th Congress, International Ergonomics Association, Sydney, Australia, 645/647, 1988
- 5) S. Ahmad, S. Luo, Coordinated Motion Control of Multiple Robotics Devices for Welding, Applied Motion Control, Con., 117/124, 1984
- 6) C. S. G. Lee, Robot Arm Kinematics and Dynamics, CICE/ECE/IOE 434, 1983
- 7) J. J. Craig, Introduction to Robotics-Mechanics and Control, 104/111, Addison-Wesley Publishing Company, 1986