

Off-line programming system을 위한
로봇운동계의 calibration

김 문 상
한국과학기술원 CAD/CAM 연구실

Calibration of robot kinematics for the off-line
programming system.

Mun-Sang Kim
CAD/CAM Lab. Korea Advanced Institute of Science & Technology

Abstract

Movement order program of robot operating program is generally made by teach-in method. Therefore in most cases it is sufficient as long as the robot system shows a required repeatability for the working conditions. But the trend in the robot application moves to the automatic generation of the working programs. A mathematical robot model similar to the reality is necessary for the analysis of the kinematic transformation of the robot system. The purposes of this paper are to make a better describing form and to suggest an automatic algorithm for kinematic parameter identification.

1. 서 론

일반적으로 로봇작업 프로그램중의 동작명령 프로그램은 주로 교육(teach-in)방식으로 이루어지이다. 따라서 대부분의 경우에는 로봇시스템이 가공기술적인 작업조건에 충분한 반복정확도(repeatability)를 제시하면 문제없이 쓰여진다. 그러나 컴퓨터를 이용한 가공시스템 분야에서의 앞으로의 추세는 작업 프로그램의 자동생성에 초점이 맞추어지고 있다. 한 컴퓨터를 이용한 설계(Computer aided design)시스템의 기하학적 모델내지는 데이터(data)로부터 오프라인(off-line)로 유도된 동작명령이 정확하게 행하여지기 위해서는, 로봇의 운동학적인 전달관계 해석을 위한, 실제와 매우 가까운 계산 모델이 필요하다. 로봇의 공구중심점(Tool-Center-Point)을 정의함에 있어서의 수학적 모델과 실제로봇의 기구학의 차이는 "절대 위치 정확도(absolute positioning accuracy)" 라는 개념으로 설명되어진다. 가공기술적인 문제제시의 측면에서 절대위치정확도는 다음과 같은 경우에 지배적인 영향을 끼친다.

- 로봇제어기(controller)에서 보간(interpolation)된

연속경로(continuous path)상의 정적 위치 정도(accuracy)의 향상.

- 프로그램된 기하학적 데이터(data)의 수정이 없는 상황에서 생산라인상의 산업로봇의 대치(change)
- 현장에서 과제중심의 기하학적 data의 수정이 없는 오프라인(off-line)로 생성된 작업프로그램의 수행성.

공구중심점(TCP)에서의 절대위치오차는 주로 로봇의 불완전한 수학적 모델과 운동학적인 모델 계수(parameter) 오차에 기인한다. 오늘날 일반적으로 로봇제어기에 장착된 좌표계변환은 계수로써 단지 기구학적 부분(element)의 길이와 축에 관련된 관절변수를 포함하고 있으며 따라서 불완전하다. 이는 이러한 계수들-길이와 관절각도-은 단지 길이 오차와 영점 오차(Zero point error)만을 허용할뿐 기구학적 체인(chain)의 임의의 가공오차(tolerance)는 고려할 수 없다. 그러나 절대정확도의 향상을 위한 알고리즘의 전개를 위해서는 복잡한 기구학적 구조의 완전한 기술형식이 필요하다.

본 논문의 목표는 이러한 완전한 기술형식의 추구와 이를 기본으로 한 그 계수들의 소프트웨어적인 자동식별 알고리즘의 제시에 있다.

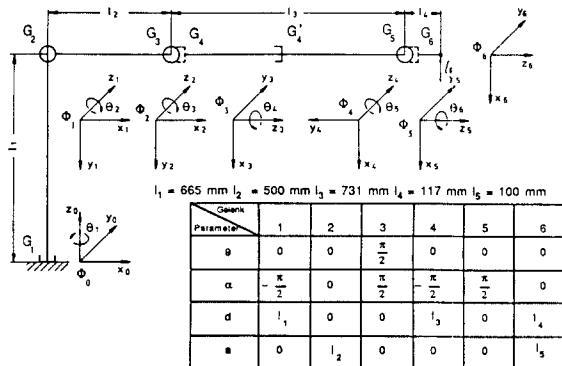


Fig.1 zero position of a 6-link robot with

DH-matrix

2. 로봇트 운동학의 일반적인 기술

모든 로봇트는 관절과 그 관절을 잇는 요소로 구성된 운동학적 체인으로 관찰되어질 수 있다. 모든 관절 G_1, G_2, \dots 에는 하나의 좌표계 (frame) ϕ_0, ϕ_1, \dots 이 지정되어지며 (그림1), 그 좌표계중의 한축이 관절의 축과 일치한다. 이러한 방식으로 각요소의 상대적인 위치와 회전을 등차변환 (homogeneous transformation)의 형식으로 기술할 수 있다. 일반적으로 두개의 인접한 요소를 기술하는 등차변환은 4×4 행렬(matrix)로 표시되며 A-matrix로 이름지워진다. 기본 좌표계(base coordinate system) ϕ_0 를 중심으로 i -번째 좌표계 ϕ_i 의 위치를 표시하는 변환행렬은 T_i -matrix로 표시된다. 따라서

$$T_i = \prod_{j=1}^i A_j \quad \text{----- (1)}$$

산업용 로봇트의 운동학을 기술함에 있어서 등차행렬을 이용한 여러 기술방법이 존재한다. 각 관절에 속 한 좌표계의 위치를 표시하기 위하여 위에서 언급한 길이와 관절변수이외에 추가적인 계수를 도입함으로써 전체 체인을 완전하고 일반적(universal)으로 기술하는 행렬표현방식이 실현되어진다. Denavit과 Hartenberg에 의해 정립된 방식(DH-방식) /1/은 위에서 제시한 조건을 만족하며, 그외에도 로봇트 기구학의 전체운동을 최소의 계수조합(set)으로 기술할 수 있다는 강점을 지니고있다. DH-방식에 따른 변환행렬의 요소(component)를 구성함에 있어 계수의 계산은 관절축 G_1, \dots, G_n 에 귀속된 좌표시스템 $\phi_0 \dots \phi_n$ 를 정의함에 있어 다음과 같은 관계를 준수하여야 한다.

1. i -번째 좌표시스템 ϕ_i 의 Z_i 축은 $i+1$ 번째 관절 축의 방향을 가리킨다. 관절이 회전운동을 하면, Z_i 는 회전축에 위치한다. 직선운동관절에서는 Z_i 가 직선운동방향과 일치한다.
2. X_i 축은 Z_{i-1} 축에 수직한다. Z_i 와 Z_{i-1} 축이 교차하지 않으면 X_i -축은 Z_{i-1} 축으로부터 나오는 방향을 가리킨다.
3. X_i 축은 오른손 좌표계시스템을 완성시키도록 정의된다. Z_0 축이 첫번째관절의 운동축을 따라 위치한다는 전제아래, 좌표시스템 ϕ_n 는 X_n 축이 Z_n -1축에 수직을 이루고 있는한 로봇트 핸드(hand)에 아무곳에나 위치할 수있다. 강성 (rigid)의 운동요소를 위한 DH-방식은 4개의 계수로 기술된다. 이 네개의 계수는 회전축뿐만이 아니라 직선운동을 완전하게 기술한다. (그림2)

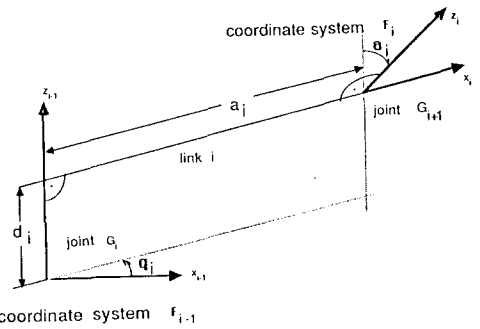


Fig.2. DH-parameters

그림1에서 한 6 자유도를 가진 산업용로봇트의 예에서 DH-방식으로 표시된 좌표계의 구성을 볼 수 있다.

3. DH-방식에 대한 고찰

DH-방식을 도입함에 있어 몇몇의 특별한 경우를 유의해야 하는데 구체적으로 다음과 같다. /2/

가. 일반적으로 대부분의 산업용로봇트의 경우에는 중간 좌표계들이 기구학적인 관절점에 일치하지만, 좌표계는 기본적으로 DH-방식을 이용할 경우 실제 로봇트 기구학적 구조에서 멀리 떨어져 위치할 수 있다. 관절중심점에서의 Z-축에 정확히 정의된 점에 좌표계가 위치하는 것은 강요되어질 수 없다.

나. 공구좌표계는 사용자로부터 확실하게 정의되고 또한 DH-방식에 준하지 않게 정의될 수 있기때문에, 마지막 두 좌표계 간의 $-\phi_n$ -과 ϕ_n -관계를 DH-방식에 준해 형성된 변환행렬 A로 기술되어지지 않을 가능성이 존재한다.

이러한 DH-방식의 특수성들은 다음과 같이 구체적으로 설명되어진다. 기술된 첫번째 특수성은 인접한 관절들이 거의 -그러나 정확하지는 않게-평행한 축 Z_{i-1} 과 Z_i '들을 가지면 발생한다. (그림3)

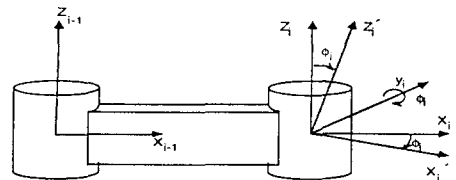


Fig.3. Parallel axes

그림에서 평행오차는 Y_i 축을 중심으로 각도 ϕ_i 만큼의 회전을 나타내어진다고 정의하고 다른 오차는 존재치 않는다고 가정한다. 이러한 전제하에 두개의 축 Z_{i-1} 과 Z_i '는 어느한 점에서 교차하고 DH-방식의 도입했을 경우 ϕ_i 의 크기가 점점 작아질수록 계수 d_i 와 d_{i-1} 이 매우 커짐을 알 수 있다. (그림4)

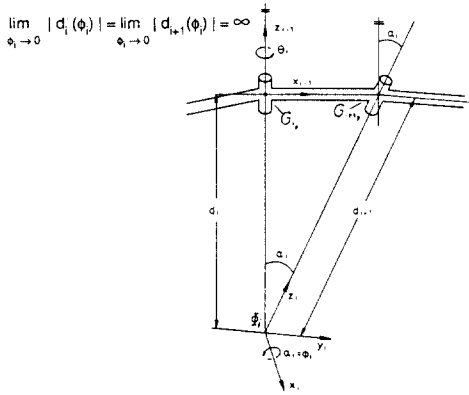


Fig.4. dislocation of coordinate system

이러한 사실은 몇몇의 계수가 - 예를 들면 d_i - 가 다른 계수에 비해 상대적으로 매우 커짐으로써 DH-행렬의 나쁜 수배열조건 (numerical condition)을 야기 한다. 이러한 이유로 유사 평행축에는 DH-방식이 쓰여질 수 없다. /3,4,5/ 로봇트 운동학을 위하여 DH-방식을 도입할 경우에는 이러한 사실이 유의되어야 한다. 다시말하면 DH-방식으로는 평행오차를 표현하기에는 부적당하며 실제적으로 고려될 수 없다. 두번째 특수성은 공구좌표 계가 사용자에 의해 자유롭게 선택되어질 경우에 발생되는데 이러한 불가피한 경우 또하나의 중간 변환 행렬이 요구되어진다.

위의 이러한 DH-방식의 제약점(특수성1)으로 인하여 평행 오차가 무시할 수 없는 경우에는 - 예를 들면 SCARA 형식의 로봇트- 다른 표현방식이 요구된다. Hayati는 DH-계수조합에 추가적으로 또하나의 계수를 삽입하여 평행오차를 기술하였다. 그림5는 이 평행오차가 어떻게 기술되어지는지를 보여주며, 이 오차는 $Rot(y, \beta)$ 로 표시되었다.

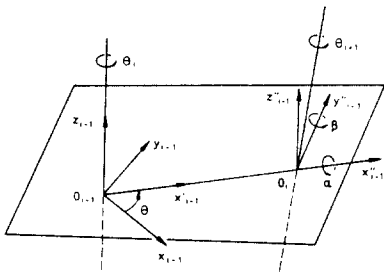


Fig.5. Hayati-form for a rotating link

4. 오차해석

산업용 로봇트의 절대위치오차의 원인과 그 영향이 조사 되어야하며 식별가능한 오차의 수학적 표현이 이루어져야 한다. 우선 반복정확도와 절대정확도에 대한 정의를 다음과 같이 할 수 있다. 반복정확도 /6/는 여러 방향으로부터 정격하중을 가진상태로 teach-in된 위치로 여러번 반복 구동 시킴으로써 계산된다. 반복정확도의 크기는 단지 도달 하여야 할 위치에 대한 상대오차만을 포함한다. 한 로봇트시스템의 반복정확도는 주로 엔코더등 위치검출센서의 정확도

(resolution), 기어의 백래쉬, 위치제어기의 위치결정구역 (positioning window), 베어링의 구동여유(tolerance), 그리고 장기적으로는 마모와 실내온도등에 달려있다.

이에반하여 절대정확도는 로봇트 기본 좌표계에 정의된 절대 좌표계상에서 한 공간상의 점을 도달하는 것으로 표시되어질 수 있다. /그림6/

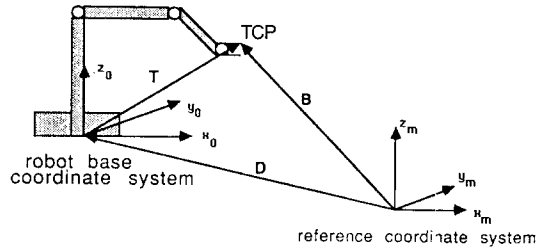


Fig.6. TCP in reference coordinate system

오차가 없는 이상적인 상황에서 공구좌표계의 위치는 절대 좌표계상에서 행렬 D와 T의 급인 행렬 B로 나타내어진다.

$$B = DT \quad (2)$$

로봇트 기본좌표계상에서 운동학적 오차로 인해 야기된 공구 좌표계의 변화를 B' 로 표시하면, 다음과 같다.

$$B' = DT' \Delta \quad (3)$$

계산된 행렬 B와 측정된 위치 B'와의 차이를 B^Δ 로 표시하면

$$B^\Delta = DT' \Delta \quad (4)$$

윗식으로부터

$$\Delta = T^{-1} D^{-1} B^\Delta \quad (5)$$

Δ 의 요소들은 따라서 로봇트 기본좌표계상에서 위치오차의 절대치를 나타낸다. 이러한 형식을 이용하여 로봇트시스템의 절대위치오차를 정의함에 있어서도 반복위치정확도를 정의할 때 사용된 방식을 도입할 수 있다. 반복위치오차를 야기하는 요인들은 대부분 무작위 (random)한 특성을 가지며 비선형이다. 절대위치오차를 결정하는 요인으로서의 위에서 언급한 무작위한 요소들이외에 모델계수오차로 명명된 정형의 오차 요인들이 있다. 이를 정리하여 분류하면 다음과 같다.

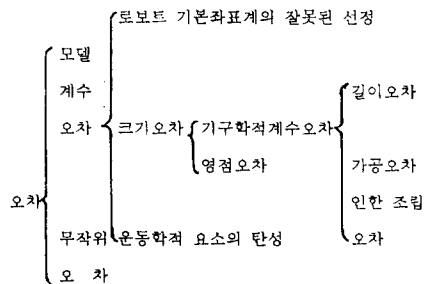


Fig.7. error classification

여기서 무작위오차는 위에서 언급했듯이 반복정확도를 결정 짓는 요인으로서 대부분 식별되어지지 않으며 일차적인 식별프로세스에서는 제외된다. 모델계수오차로 정의된 요인

들은 선형화가 가능하며 선형식으로 표시되어 궁극적으로 식별되어져야 할 부분이다. 이를 위한 모델화 작업이 다음장에 소개된다.

4.1. 오차의 모델화

로봇 운동학적 상태를 기술하는 수학적 모델은 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{X}_r = f(e_r, p_r) \quad \text{----- (7)}$$

- e_r : 관절계수 (variable)
- p_r : 로봇의 운동학을 결정하는 일정한 계수
- X_r : 공구좌표계의 위치와 회전
- f : 로봇의 운동을 결정하는 함수

여기서 p_r 는 운동모델에 사용된 모든 계수를 나타낸다. 따라서 기구학적 계수 뿐만이 아니라 탄성계수가 될 수도 있다. 여기에서 인덱스(index) s 는 이상적인 상태를 그리고 앞으로 is 는 실제 상태를 표시한다.

로봇 운동학의 실제상태는 다음의 식으로 표시되어 진다.

$$\dot{X}_{is} = f'(e_{is}, p_{is}) \quad \text{----- (8)}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } e_{is} &= e_s + \Delta e_{is} \\ p_{is} &= p_s + \Delta p_{is} \end{aligned}$$

Δe_{is} 와 Δp_{is} 는 정량적인 계수오차 뿐만아니라 무작위한 오차들도 포함한다. 절대위치오차는 두 위치-(7)과 (8)-의 차이로 표시된다.

$$\Delta X = X_{is} - X_s \quad \text{----- (9)}$$

따라서 수식화가 가능한 계수에 대한 위치오차의 표현은 해당하는 계수에 오차를 부가함으로써 식(9)를 이용 얻어진다. 그림8은 이러한 해석의 한 예로서 그림1에 표시된 로봇 기구학의 두번째 축에 1°의 영점오차를 가정했을때 한 X-Z평면상에서 얻어진 절대위치오차를 나타낸다. 전체 평면의 오차는 0부터 10까지로 구분되었으며 여기서 0은 최소오차 4.36mm 10은 최대오차 7.39mm를 보여준다.

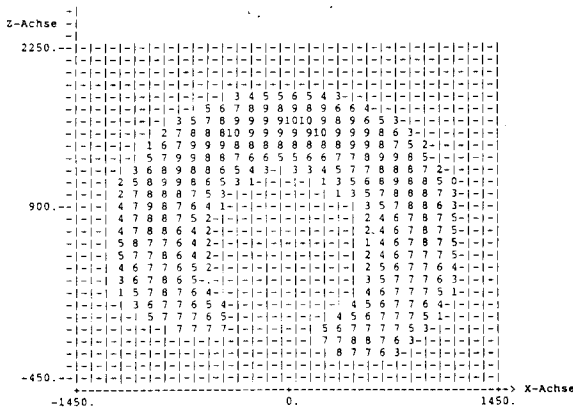


Fig.8. error field in x-y plane

4.2. 크기오차 및 로봇 기본좌표계오차의 표현

그림7에서 분류된 오차중 기본좌표계의 절대좌표에 대한 오차는 다음과 같이 표현된다.

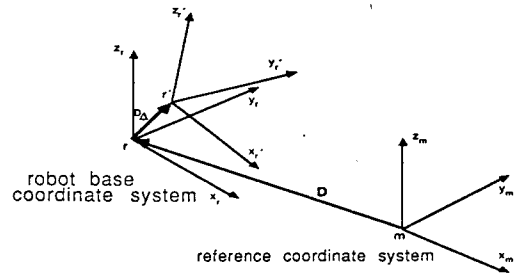


Fig.9. base coordinate system error

그림9에서 보는바와 같이 위의 오차를 선형화된 형식인 행렬 ΔA 로 표시하면 이로 인해 TCP에서 발생하는 위치오차는 다음과 같이 표현된다.

$${}^B \Delta A = B^{-1} D \Delta A T \quad \text{----- (10)}$$

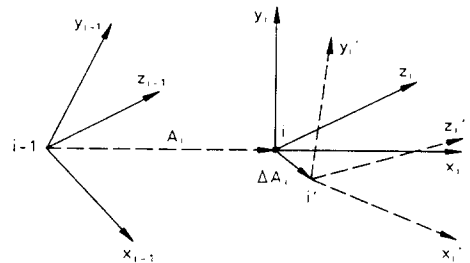


Fig.10. coordinate change according to the parameter errors
각 관절에서의 크기오차는 선형화가 이루어진후 그림10에서 정의되었듯이 다음과 같다.

$$A_i' = A_i \Delta A_i \quad \text{----- (11)}$$

$$\Delta A_i = A_i^{-1} \cdot A_i' \quad \text{----- (12)}$$

여기에서 미분행렬 ΔA_i 는 6개의 요소로 표시할 수 있으며 따라서 하나의 벡터 형식으로 표현된다.

$${}^i \Delta A_i = [\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z, \Delta \psi, \Delta \phi, \Delta \gamma]^T \quad \text{--- (13)}$$

여기서 $\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z$ 는 각 관절좌표계 i의 x,y,z축에 대한 미소 병진운동을 $\Delta \psi, \Delta \phi, \Delta \gamma$ 는 미소 회전운동의 크기를 나타낸다. 따라서 전체 운동계에 대한 크기 오차를 기본좌표계 상에서 표시하면,

$$\begin{aligned} & \text{II} \\ {}^0 \Delta T_n &= \prod_{i=1}^n A_i \Delta A_i \quad \text{----- (14)} \end{aligned}$$

절대좌표계상에서 표시하면

$${}^m \Delta T_n = D \Delta A \prod_{i=1}^n A_i \Delta A_i \quad \text{----- (15)}$$

로 된다.

4.3. 운동체인의 탄성에 대한 관찰

운동체는 매우 견고하게 설계된 구조라 할지라도 단지 제한적으로 강체로 고려되어질 수 있다. 실제로 있어서는 하중에 따른 변형이 발생하는데, 이들은 운동모델을 사용하는데 있어서 해당하는 탄성계수로 고려되어야 한다. /7/ 몇가지 가정하에 작용하는 힘과모멘트, 그리고 이로 인해야기되는 운동 벡터(movement vector)의 요소 간에 Hook의 법칙이 성립한다. 운동체인의 요소에 일어나는 탄성변형은 그림11에서 행렬 E_i 로 표시되어 있다.

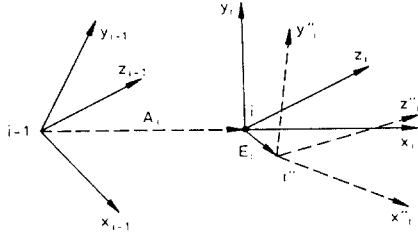


Fig.11. transformation with elastic change

차등행렬(differential transformation) E_i 가 부가된 전체 운동학은 다음과 같다.

$$T_n = \prod_{i=1}^n A_i E_i \quad \text{----- (16)}$$

해당하는 관절좌표계 ϕ_i 에서 기술된 탄성은 세 직각 좌표상의 병진운동 $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 와 회전운동변화 $\Delta \theta x_i, \Delta \theta y_i, \Delta \theta z_i$ 의 형식을 가진 운동벡터로 표시되어진다.

$$d_{\phi_i} = [\Delta x_i \ \Delta y_i \ \Delta z_i \ \Delta \theta x_i \ \Delta \theta y_i \ \Delta \theta z_i] \quad \text{--- (17)}$$

운동벡터와 탄성계수와와의 관계 그리고 각축에서의 힘과 모멘트로 인한 처짐등에 대한 상세한 고찰은 생략하기로 한다. /8/. i -번째 운동요소에 대한 탄성변형에 대한 운동벡터

$$d_{\phi_i} = \underline{V}(\underline{C}_i, \underline{F}_i, \underline{M}_i) \quad \text{----- (18)}$$

여기에서는 \underline{C}_i 는 5내지 6개의 탄성계수를 포함하며, \underline{F}_i 는 힘벡터를 \underline{M}_i 는 모멘트 벡터를 표시한다. \underline{V} 는 이들을 설명하는 함수이다.

5. 산업용 로봇의 운동학적 계수의 식별방법과

절대 정확도 향상을 위한 보정방법

5.1. 기본고찰

운동학적 계수를 수동(manual)의 측정방식을 통해 결정하는 것은 매우 복잡하고 노력이 드는 일이다. 매우 정밀한 측정장비가 여럿 필요할 뿐만 아니라 로봇을 측정장치를 옮겨야 되고, 시간적으로도 매우 오래걸리는 등 여러가지 문제점을 갖고 있다. 따라서 컴퓨터를 이용하여 로봇의 운동계수를 자동적으로 결정할 수 있는 간편한 측정 알고리즘의 전개는 매우 고무적이다. 이러한 계수식별을 위한 방법은 지금까지 몇몇 사람들에 의해 제기되었다.

Mooring /3/은 로봇의 각축을 분리해서 구동한후 측정할

으로써 각 요소에 해당하는 계수를 인식하는 방법을 사용했다. 이 방법은 비교적 간단하고 시각적이나 측정오차등으로 인한 전체 알고리즘의 불안정, 그리고 영점오차를 측정할 수 없다는 제한을 가지고 있다. 그의 Scheffer /4/ Foulley/5/, 그리고 Whitney/6/ 등이 각기 여러 알고리즘을 발표하였으나, 역시 제한성을 갖고있다. /8/

5.2. 계수식별을 위한 이론적 배경

계수인식방법의 기본적 아이디어는 가능한한 운동학을 정확하게 기술하는 수학적 모델로부터 위치오차를 야기하는 원인을 모델에 쓰여진 계수로 인식시키는 데에 있다. 위에서 이미 언급했듯이 모델에 의해 고려되어지지 않은 요소들은 무작위한 외란으로 취급되어진다. 이러한 이유로 계수의 식별을 위해서는 이러한 외란에 근거하여 하나의 평균치를 구하는 최소 자승법(least square method)이 이용되어질 수 있다.

몇가지수렴과 예상분포에 관한 조건하에 이 방법은 다음과 같이 이용되어 진다.

5.3. 계수식별방법

이론의 전개는 앞에서 언급된 식(7)로 부터 시작 되어진다.

$$\underline{X} = \underline{f}(\underline{e}, \underline{p})$$

여기에서 \underline{e} 는 변수인 관절계수 그리고 \underline{p} 는 그외의 탄성계수를 포함한 운동계수를 나타내며 \underline{X} 는 TCP의 상태-위치 및 회전-를 나타낸다. \underline{X}' 를 실제 측정된 TCP상태라 하면, 차이 $\Delta \underline{X}$ 는 계수오차로 연결 지워진다.

$$\underline{X}' = \underline{X} + \Delta \underline{X} = \underline{f}(\underline{e} + \Delta \underline{e}, \underline{p} + \Delta \underline{p}) \quad \text{---- (19)}$$

여기에서 $\Delta \underline{e}$ 와 $\Delta \underline{p}$ 가 궁극적으로 인식되어야할 계수 오차이다. 계수 \underline{e} 와 \underline{p} 는 인식 프로세스상에서 구분될 필요가 없으므로 새로운 계수 $\underline{q} = (\underline{e}, \underline{p})$ 로 나타내 어질 수 있으며, k 개의 측정점에서의 관계를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\underline{X}_i' = \underline{f}(\underline{q}_i + \Delta \underline{q}) \quad \text{----- (20)}$$

좌표변환을 나타내는 벡터함수 \underline{f} 는 해석적이며, 따라서 Taylor series로 표시되어진다.

$$\underline{f}(\underline{q} + \Delta \underline{q}) = \underline{f}(\underline{q}) + \frac{\partial}{\partial \underline{q}} \underline{f}(\underline{q}) \Delta \underline{q} + R(\underline{q}, \Delta \underline{q}) \quad \text{---- (21)}$$

오차계수 $\Delta \underline{q}$ 가 충분히 작으면 R 은 무시되어질 수 있다. 따라서,

$$\Delta \underline{X} = \frac{\partial}{\partial \underline{q}} \underline{f}(\underline{q}) \Delta \underline{q} = \underline{J}(\underline{q}) \Delta \underline{q} \quad \text{----- (22)}$$

여기에서 J는 계수오차와 위치오차와의 선형화된 관계를 기술하는 Jacobi-행렬이다. k개의 점에서의 관계를 행렬의 형식으로 표현하면

$$\Delta \underline{S} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \vdots \\ \Delta X_k \end{bmatrix} = J \cdot \Delta \underline{q} = \begin{bmatrix} J(q_1) \\ \vdots \\ J(q_k) \end{bmatrix} \Delta \underline{q} \quad (23)$$

여기서 TCP의 회전까지 측정되면

$$\underline{X}, \Delta \underline{X} \in \mathbb{R}^6 : \Delta \underline{S} \in \mathbb{R}^{6k} \quad J \in \mathbb{R}^{6k \times n}$$

최소자승법은 다음의 값이 최소가 되는 q의 값을 제시한다.

$$\| \Delta \underline{S} - J \Delta \underline{q} \|^2 \quad (24)$$

위의 조건을 만족하는 값은

$$\Delta \underline{q} = [J^T W J]^{-1} J^T W \Delta \underline{S} \quad (25)$$

의 형식으로 표시된다.

식 (21)에서 보여주듯이 이러한 계수인식 프로세스는 의란을 고려할 경우 비선형적인 해결문제로 취급될 수 있다. Stoer /9/는 이를 해결하기 위해 반복(Iterative) 해결방법을 제시한다. 여기서는 자세한 설명을 피하기로 한다.

5.4. Jacobi-행렬의 구조와 알고리즘

그림12는 미분행렬 Ak, Ek를 보여주는데, 각 행렬은 계수오차와 탄성오차로 인한 변형을 나타낸다.

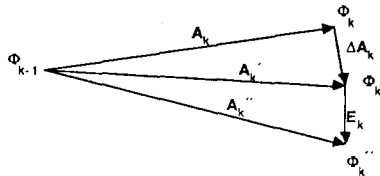


Fig.12. differential transformations

실제행렬 Ak''는 다음과 같다.

$$A_k'' = A_k \Delta A_k E_k \quad (26)$$

두 미분행렬들을 벡터형식 d_{AA}^k, d_E^k 로 표시하여 각 관절에서의 오차계수를 나타내면

$$d_{AA}^k = H_{AA}^k \Delta q_{AA}^k \quad (27)$$

$$d_E^k = H_E^k \Delta q_E^k \quad (28)$$

로 표시되어진다. 여기에서 Δq_{AA}^k 는 운동학적 계수오차를 d_E^k 는 탄성계수를 나타낸다. k-번째 관절좌표계에서의 미소변형을 나타내는 전체 운동벡터를 d^k 라하면 높은 차수를 무시함으로써 다음과 같이 얻어진다.

(27), (28)

$$d^k = d_{AA}^k + d_E^k = [H_{AA}^k : H_E^k] \begin{bmatrix} \Delta q_{AA}^k \\ \Delta q_E^k \end{bmatrix} = H^k \Delta q^k \quad (29)$$

G^k 라는 행렬이 k-번째 좌표계에서의 미소변형 d^k 와 그로 인하여 기본좌표계상에서의 TCP의 변형을 기술한다고 정의하면

$$\Delta X^k = G^k \cdot d^k = G^k \cdot H^k \cdot \Delta q^k = J \cdot \Delta q^k \quad (30)$$

로 표시되며 k개의 측정점에서의 관계를 도합하면,

$$\Delta X^k = \sum_{k=0}^1 \Delta X^k = \sum_{k=0}^1 J^k \Delta q^k = J \cdot \Delta q \quad (31)$$

로 표시된다.

6. 보정방법에 대한 고찰

위치오차의 일반적인 감소를 위해서는 여러가지 개념을 도입할 수 있는데, 이들은 그 적용방법과 특성에 있어서 단속적(discrete)인 방법과 연속적(continuous)인 방법으로 구분되어질 수 있다.

단속적인 보정방법은 궁극적으로 오차보정이 개개의 프로그램된 작업점에서 일어나는 경우이다. 이 방법은 대부분 간접적인 성격을 띠고있는데, 왜냐하면 오차원인을 직접적으로 다루는 것이 아니라 그 결과 를 보정하기 때문이다. 이러한 보정방법은 일반적으로 실현시키기에 간단하며, 이미 프로그램을 생성 시키는 과정에서 이용되어질 수 있기때문에, 시스템 소프트웨어나 로봇제어기에 아무런 변화를 요하지 않는다. 이러한 보정방법은 예를 들면 시스템제어기에 좌표변환을 위하여 단순한 기술형식-예를 들면 단지 길이와 관절변수-이 쓰여진 경우에, 그럼에도 불구하고 높은 절대 정확도를 필요로 할 경우 도입 되어질 수 있다. 그림13은 이러한 예를 보여준다.

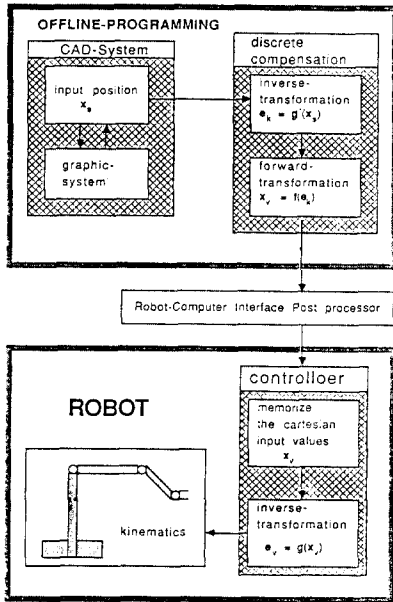


Fig.13. discrete compensation

f' 와 q' 가 실제 운동계를 f 와 q 가 제어기에 장착된 정방향 (forward) 좌표변환과 역방향(inverse) 좌표 변환을 표시한다고 정의하면, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\underline{x}_v = f(q'(x_s)) \quad \text{-----} \quad (32)$$

단속적인 방법 적용의 근본적인 제한은 보정된 보간 된 점들 사이의 연속경로상의 정확도를 보장할 수 없다는 데에 있다. 이상적인 경우에 있어서는 무수히 많은 보조위치를 전송 하여야만 해결될 수 있을 것이다. 오차보정이 연속적으로 일어나면 이는 직접적이고 연속적인 보정에 해당된다. 이러한 보정 방식은 제어기에 내장된 오차모델을 전제로 한다. 이는 앞장에서 언급된 완전한 수학적 모델을 필요로 한다. 어떤 방식이 쓰여질 것인가를 결정하는 것은 경제적인 관점에서 결정되어질 것이다.

7. 결 론

산업용 로봇의 충분히 높은 절대정확도는 열의로 생성된 작업프로그램의 직접적인 작동이라는 관점에서 그리고 현장에서 직접 추가보정없이 실행시킨다는 점에서 불가결한 전제조건이다. 그 외에도 연속경로의 경로정확도를 유지하기 위하여 또는 광범위한 센서류를 사용함에 있어 매우 중요하다. 절대정확도는 주로 제어기에 내장된 로봇모델의 질 (quality)과 모델계수의 정확한 결정에 달려있다. 위에 제시된 인식알고리즘은 확장된 오차모델에 근거하며, 그 모델계수들의

자동적인 인식을 가능하게 한다. 특히 위의 알고리즘에 포함된 탄성계수는 하중 에 의한 처짐을 보정하여 열의로 생성된 프로그램의 적용폭을 한결 넓혀준다. 적용하중이 약 40kg인 로봇트에 대해 실험이 이루어진 후의 결과는 계수 인식이 일어난후 절대정확도가 로보 트가 제시하는 반복정확도 수준으로 감소함을 보여 준다.

8. Appendix

1. Paul, R.P.: Robot manipulator, M.I.T. Press, 1982
2. Heiss, H.: Die explizite Loesung der kinematischen Gleichung fuer eine Klasse von Industrierobotern. Dissertation, T.U. Berlin, 1985
3. Mooring, B.: The Effect of Joint Misalignment on Robot Positioning Accuracy. ASME Computers in Engineering Conference 1984.
4. Scheffer, B.: Geometric Control and Calibration Method of an Industrial Robot. 12th International symposium on industrial robotics, 1982.
5. Foulley L.P.: Improving the Precision of a Robot Kelley, R.B.: IEEE International Conference on Robotics, 1984
6. N.N.: Richtlinie VDI 2861 "Kenngrößen fuer Handhabungseinrichtungen"
7. Book, W.J.: Analysis of Massless Elastic Chains with servo controlled Joints. J. of Dynamic System, Measurements and control, Sep.(1979)
8. Kim, M.S.: Entwicklung eines Parameteridentifikationsverfahrens zur Erhoehung der absoluten Positioniergenauigkeit von Industrierobotern. Dissertation, Hanser Verlag, 1987
9. Stoer, J.: Einfuehrung in die Numerische Mathematik, 1. Springer Verlag. 1976