

아아크 용접용 로봇의 오프라인 프로그램 응용을 위한 효과적인 캘리브레이션 방법 연구

범진환*

An Efficient Calibration Procedure of Arc Welding Robots for Offline Programming Application

Jin Hwan Borm*

ABSTRACT

Most industrial robots cannot be off-line programmed to carry out a task accurately, unless their kinematic model is suitably corrected through a calibration procedure. However, normal calibration is an expensive and time-consuming procedure due to the highly accurate measurement equipment required and due to the significant amount of data that must be collected. This paper presents a simple and economic procedure to improve the efficiency of robot calibration especially for arc welding application. To simplify the measurement process, an automatic data measurement algorithm as well as a simple measurement device are developed. Also, a calibration algorithm which can automatically identify the independent model parameters to be estimated is presented. To demonstrate the simplicity and the effectiveness of the procedure, experimental studies and computer simulations are performed and their results are discussed.

Key Words : Touch Sensing Device(접촉 측정기구), Arc Welding Robot(아아크용접용 로봇), Offline Programming(오프라인 프로그램), Error Propagation Model(오차 전파 모델)

1 서론

로봇의 온 라인 프로그래밍(On-Line Programming)이 실제 작업대상물과 실제 로봇을 이용하여 교시(Teaching by doing)함으로써 프로그램을 수행

하는 반면, 오프라인 프로그래밍(Off-Line Programming)방법은 컴퓨터상에 모델링된 작업대상물과 로봇을 이용하여 효율적 프로그램을 수행토록 하는 것이다. 온 라인 프로그래밍 방법은 일반적으로 시간과 노력이 매우 많이 들 뿐만 아니라, 다른 로봇이나 작업대

* 아주대학교 기계공학과

상물과의 충돌, 최적 경로 해석 불가 등으로 비효율적 로봇 프로그램이 되기 쉽다. 특히, 작업 대상물의 형태와 크기가 자주 변화할 때에는 온 라인 프로그래밍 방법을 수행하는 것은 거의 불가능하다. 오프라인 프로그래밍(Off-Line Programming) 방법에서는 정밀히 모델링된 로봇 시스템과 작업대상물의 정확한 형상정보만 있으면, 다수의 로봇을 위한 작업 프로그램들을 효율적으로 작성할 수 있을 뿐 아니라, 각종 해석을 수행할 수 있기 때문에 작업시 로봇의 오동작 및 충돌 등을 사전에 예방할 수 있는 등의 매우 많은 장점이 있다. 하지만, 이 모든 장점이 실제 상황에서 이룩되려면, 로봇 시스템 및 작업대상물에 대한 정확한 모델 파라미터 및 형상 정보가 필요하게 된다. 이와 같이 실제 상황에서의 로봇 시스템 및 작업대상물 등의 정확한 수학적 모델 파라미터의 값을 알아내는 일련의 과정이 캘리브레이션(Calibration)이며, 이들 모델 파라미터(Model Parameter)의 값들은 오프라인 프로그래밍을 위한 컴퓨터 상의 로봇 및 작업대상물 시스템 모델 및 기구학적 관계를 구축하는 데 이용되어 진다. 결국 오프라인 프로그래밍 응용에서의 로봇 절대 위치 정밀도 향상을 위한 제반 과정이 캘리브레이션이라 할 수 있다. 일반적으로 캘리브레이션은 다음과 같은 과정을 밟는다. 첫번째로는 캘리브레이션을 위한 로봇 기구 모델링 및 모델 파라미터의 오차가 로봇 절대위치 오차에 미치는 영향을 나타내는 오차 전파 모델(Error Propagation Model)을 세우는 것이고, 두번째 과정은 로봇의 여러 위치에서 로봇 손끝위치를 측정하며, 세번째는 적절한 추정 알고리즘으로 이 측정 값들을 이용하여 좀더 정확한 모델 파라미터를 추정하는 것이다. 마지막으로서는 추정된 모델 파라미터를 이용하여 손끝 위치오차를 보정하는 것이다. 즉 캘리브레이션을 위한 기구 모델의 역기구학을 계산하는 것이다.

로봇 캘리브레이션에 관한 연구는 1980년대중반 컴퓨터 통합 생산 시스템(CIM)에 관심이 모아지면서부터 시작되어 지금에 이르렀다. 하지만 대부분의 연구가 상기의 캘리브레이션의 전과정중 일부분만을 중점적으로 다루었다. Everitt⁽¹⁾와 Roth⁽²⁾는 연속된 두 좌표계의 기구학적 관계식의 완전조건(Completeness condition)을 만족하기 위해 필요한 최소한의 모델 파라미터 개수를 나타내는 관계식을 정립하였다. 한쌍의 좌표계를 정의하는데 4개의 파라미터를 사용하는 Denavit-Hartenburg 모델⁽³⁾(D-H model)이 상기 관계식을

만족하기 때문에 Waldron⁽⁴⁾, Wu⁽⁵⁾, Judd⁽⁶⁾ 등은 D-H 모델을 이용하였다. 그러나, Mooring⁽⁷⁾은 상기 D-H 모델이 두축이 거의 평행할 때 불연속이 일어나 캘리브레이션을 위한 기구 모델로서 부적절함을 보여 주었으며, Hsu⁽⁸⁾, Veitchegger^(9,10) 및 Okada⁽¹¹⁾은 D-H 모델을 변형시켜 5 개 파라미터를 사용한 모델을 이용하였다. 또한 Menq^(12,13) 및 Borm⁽¹⁴⁾는 6 개의 파라미터를 이용하였고, Whitney⁽¹⁵⁾ 등은 기하학적 파라미터와 함께 축 처짐, 기어 백래쉬 등의 비기하학적 파라미터를 포함 시키기도 하였다. 한편 몇몇 연구자들은 서로 다른 형태의 측정장치를 사용하였다.

Whitney⁽¹⁵⁾은 다각형 거울과 경위의(經緯儀, theodolite)를 개발 사용하였고, Ho⁽¹⁶⁾은 광 센서를 이용하였으며, 최근에는 레이저를 이용한 측정장치가 상품화되었다. 모델파라미터의 추정에 관해서, 대부분의 연구자^(2,17,18)들은 최소 자승법에 기초를 둔 방법을 사용하였고, Menq⁽¹³⁾는 측정오차가 파라미터의 추정에 미치는 영향을 연구하였다. Ibarra⁽¹⁹⁾, Vaishnav⁽²⁰⁾은 추정방법에서 문제시되는 특이성(Singularity)문제를 연구하였다. 위치오차 보정에 관해서는 Veitschegger⁽¹⁰⁾, Goldenberg⁽²¹⁾이 자코비안을 이용한 반복법을 이용하였다. 지금까지의 연구는 대부분 로봇 손끝 위치 및 방향을 정확히 측정할 수 있다는 가정이 내포되었으며, 이는 매우 고가의 측정장비가 필요하게 된다.

본 연구에서는 아아크용접용 로봇의 캘리브레이션을 경제적이고 쉽게 수행할 수 있는 방법을 연구하고, 캘리브레이션 장치를 제작하여 실험을 통해 이를 검증하고자한다. 본 연구에서는 고가의 측정장치를 사용하지 아니하고, 로봇에 장착된 아아크용접기 용접봉에 전압을 가하여 정밀 제작된 알루미늄 지그의 여러위치에 접촉시키고, 그 접촉 순간의 로봇 위치(엔코더 값)들을 감지한다. 이렇게 측정된 값들은 보다 정확한 로봇 모델 파라미터를 추정하는데 이용되어 진다. 이 방법은 그 측정장치 및 측정 과정이 매우 간단하여 경제적인 뿐만아니라, 일반적으로 수행되어져야하는 엔드 이펙터(End-Effector)를 위한 별도의 캘리브레이션 장치가 필요 없게된다. 상기 측정 데이터를 이용하여 캘리브레이션을 수행한 결과 절대위치 잔류오차의 RMS 가 0.112 mm, 최대오차가 0.321 mm 가 나왔으며, 이는 사용된 로봇의 반복위치 정밀도가 0.1 mm 이고 로봇이 아아크 용접용이라는 점을 감안하

변 충분한 설대 위치 정밀도라고 볼 수 있다.

2. 아아크 용접용 로봇의 캘리브레이션 장치 개요

Fig. 1은 본 연구에서 제작된 캘리브레이션을 위한 장치의 개략도이며, 좌표계 {W}는 지그 좌표계, {0}은 로봇 기준 좌표계, {6}은 로봇의 6번째 링크 좌표계, {E}는 로봇의 손끝 좌표계이다. 또한 Fig.2는 정밀제작된 지그이며, 각 면은 그 기준좌표계(W)에 대하여 특정 위치에 놓여 있다. Fig. 1에서와 같이 로봇에 장착된 아아크용접기 용접봉에 전압을 가하면 용접봉이 전도체인 지그에 접촉하는 순간, 전류가 흐르게 되며 이때 릴레이가 작동하여 전압이 걸리며, 이를 포착하여 로봇 제어기에 통보하게된다. 제어기는 이때의 각 축의 엔코더 값을 저장하고 로봇의 동작을 정지시킨다. 이를 접촉센서(Touch Sensor)라 부를 수 있으며, 용접봉이 지그의 각면에 접촉될 때 마다, 그때의 로봇 각 (θ^m) 및 좌표계 {W}에 대한 로봇 손끝의 x 혹은 y 혹은 z 위치를 알 수 있게 된다. 로봇 손끝이 지그의 한 면에 접촉되는 순간의 로봇 손끝 위치는 지그 좌표계 {W}에 대하여 표현되어지며, 접촉된 면이 Y-Z 면 이면 " f_1^m ", X-Z 면 이면 " f_2^m ", X-Y 면 이면 " f_3^m "로 표시 할 수 있다. 이 값들은 지그의 형상으로부터 알 수 있는 값들이다. 이와 같은 방법으로 지그의 각면에 접촉함으로써 많은 측정 데이터 (θ^m , " f_i^m ")를 얻을 수

있다.

본 연구에서는 로봇의 자유도가 6 일 경우, 상기와 같은 장치를 이용하여 {W}에서 {0} {0}에서 로봇 링크 좌표계 {6} 까지, {6}에서 {E}까지의 정확한 모델 파라미터값을 추정함으로써 로봇의 절대위치 정밀도를 향상 시키고자 한다.

3. 캘리브레이션을 위한 시스템 모델 및 모델 파라미터

지그 좌표계 {W}에 대한 로봇 손끝좌표계 {E}의 위치 및 방향은 아래 식으로 표현할 수 있다.

$${}^w T_f = \begin{bmatrix} {}^w n_{E_x} & {}^w o_{E_x} & {}^w a_{E_x} & {}^w p_{E_x} \\ {}^w n_{E_y} & {}^w o_{E_y} & {}^w a_{E_y} & {}^w p_{E_y} \\ {}^w n_{E_z} & {}^w o_{E_z} & {}^w a_{E_z} & {}^w p_{E_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^w T_0 {}^0 T_N {}^N T_f \quad (1)$$

또한 상기식에서의 ${}^w T_0$ 는 6 개의 파라미터를 이용하여 아래와 같이 모델되어 질 수 있다.

$${}^w T_0 = \text{Trans}(P_{0x}, P_{0y}, P_{0z}) \cdot \text{Rot}_z(\alpha_0) \cdot \text{Rot}_x(\beta_0) \cdot \text{Rot}_y(\gamma_0) \quad (2)$$

로봇 링크의 각 좌표계의 변환 행렬은 일반적 D-H 모델에 1 개의 파라미터(β), 즉 $\text{Rot}_y(\beta)$ 을 추가하여 모델하였다. 이는 전 절에서 언급하였던 문제점을 D-H 모델이 가지고 있기 때문이다⁽⁷⁾. 자유도가 N 인

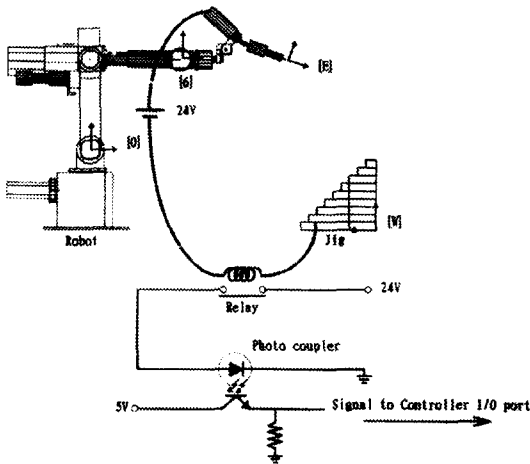


Fig. 1 Schematic Diagram of Calibration Device

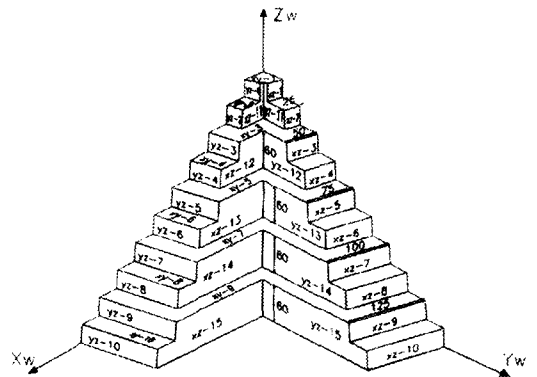


Fig. 2 A Calibration Jig

로봇의 기준 좌표계 {0}에서 좌표계{N}까지의 변환 행렬 0T_N 및 각 링크좌표간의 변환 행렬은 아래와 같이 정의하도록 한다.

$${}^0T_N = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdots {}^{N-1}A_N \quad (3)$$

여기서,

$${}^{i-1}A_i = Rot_z(\theta_i) \cdot Trans(a_i, 0, d_i) \cdot Rot_x(a_i) \cdot Rot_y(\beta_i) \quad (4)$$

마지막으로, ${}^N T_E$ 역시 아래와 같이 모델하였다.

$${}^N T_E = Trans(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}) \cdot Rot_z(\alpha_E) \cdot Rot_y(\beta_E) \cdot Rot_x(\gamma_E) \quad (5)$$

자유도가 6인 로봇의 경우, 지그좌표계{W}에 대한 로봇 손끝의 위치/방위{E}는 상기 정의내린 42개의 파라미터들로 정의할 수 있으며, 이 중 몇몇 파라미터는 서로 독립적이지 못하고 종속적일 수 있다. 이 경우, 캘리브레이션 과정에서 특이현상이 발생하기 때문에 종속 파라미터는 제거되어지고, 독립 파라미터만을 추정토록 하여야한다.

4. 오차 전파 모델

로봇 손끝 위치 및 방위를 계산하기위해 사용된 각종 파라미터의 공칭 값과 실제값이 차이가 있을 때 로봇의 손끝위치 및 방위는 오차를 발생시킨다. 이 오

차는 아래와 같이 표현할 수있다.

$${}^W dT = {}^W T_F^y - {}^W T_E^N \quad (6)$$

단 여기서, ${}^W dT$ 는 좌표계{W}에서 표현된 오차변환행렬이며, ${}^W T_F^y$ 는 {W}에서 {E}로의 실변환행렬, ${}^W T_E^N$ 는 {W}에서 {E}로의 공칭변환행렬이다. 또한, 손끝의 오차가 작다고 가정하면, 상기 식(6)은 아래와 같이 표현될 수있다⁽²²⁾.

$${}^W dT = {}^W T_E^N \cdot {}^E \Delta \quad (7)$$

여기서, ${}^E \Delta$ 는 좌표계 {E}에서의 미소변환 행렬이며, 다음과 같이 표현된다⁽²²⁾.

$${}^E \Delta = \begin{bmatrix} 0 & -{}^E \delta_z & {}^E \delta_y & {}^E d_x \\ {}^E \delta_z & 0 & -{}^E \delta_x & {}^E d_y \\ -{}^E \delta_y & {}^E \delta_x & 0 & {}^E d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 ${}^E d_x, {}^E d_y, {}^E d_z, {}^E \delta_x, {}^E \delta_y, {}^E \delta_z$ 는 손끝의 좌표계 {E}에서의 미소 병진과 미소 회전을 나타낸다. 이 손끝의 미소병진 및 미소 회전은 식(2), (4) 및 (5)에서 정의 내렸던 파라미터들의 오차로부터 기인한다고 볼 수 있으며, 이들 파라미터 오차는 좌표계 {W}과 {0} 사이의 파라미터오차 $dP_{0x}, dP_{0y}, dP_{0z}, d\alpha_0, d\beta_0, d\gamma_0$, 좌표계 {0}과 {N} 사이의 파라미터오차 $da_i, dd_i, d\theta_i, d\alpha_i, d\beta_i$ ($i=1, 2, \dots, N$) 및 좌표계 {N}과 {E} 사이의 파라미터오차 $dP_{Ex}, dP_{Ey}, dP_{Ez}, d\alpha_E, d\beta_E, d\gamma_E$ 등으로서 자유도가 N인 로봇의 경우 그 갯수는 총 $(12 + 5N)$ 개 이다.

이들 파라미터오차에 의한 로봇 손끝 위치오차를 좌표계 {E}에 대하여 표현하고자 한다. 먼저, 좌표계 {W}과 {0} 사이의 파라미터오차 $dP_{0x}, dP_{0y}, dP_{0z}, d\alpha_0, d\beta_0, d\gamma_0$ 들에 의한 로봇 손끝의 위치 오차를 구해보도록 한다. 이를 간단히 하기위해 Fig.3에서 보는 바와 같이 몇가지 변환행렬들을 정의해본다.

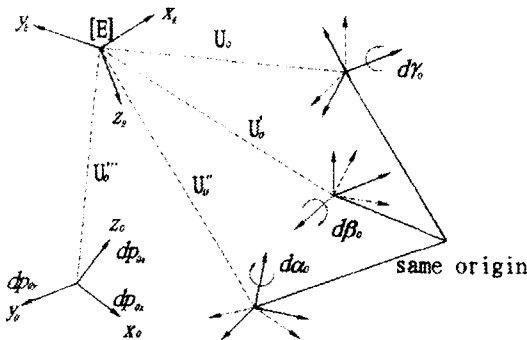


Fig. 3 Propagation of Geometric Parameter Errors between {W} and {0} to End-Effector Position Errors

$$U_0 = {}^0 T_F \quad (9)$$

$$U_0 = Rot_x(\gamma_0) \cdot U_0 \quad (10)$$

$$U_0' = Rot_y(\beta_0) \cdot U_0 \quad (11)$$

$$U_0'' = Rot_z(\alpha_0) \cdot U_0' \quad (12)$$

여기서 U_0, U_1, U_2, U_3 등은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$U_0 = \begin{bmatrix} {}^c_0 n_x & {}^c_0 o_y & {}^c_0 a_z & {}^c_0 p_x \\ {}^c_0 n_y & {}^c_0 o_x & {}^c_0 a_y & {}^c_0 p_y \\ {}^c_0 n_z & {}^c_0 o_z & {}^c_0 a_x & {}^c_0 p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^c_0 \bar{n} & {}^c_0 \bar{o} & {}^c_0 \bar{a} & {}^c_0 \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

우선 $d\gamma_0$ 에 의한 손끝에서의 위치 오차를 좌표계 [E]에 대하여 표현하고자 한다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 비틀어진 축과 손끝의 좌표계 사이의 기하학적 관계로부터, $d\gamma_0$ 에 의한 좌표계 [E]의 위치 오차는 $(\bar{i}_0 \times {}^c_0 \bar{p})d\gamma_0$ 가 됨을 알 수 있다.

여기서, \bar{i}_0 는 좌표계 [0]의 x 축 방향의 단위 벡터이다. 이 위치 오차를 좌표계 [E]로 투영하면, $d\gamma_0$ 에 의한 미소 변환 행렬에서의 병진 오차를 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^c \bar{d}_{\gamma_0} = {}^c_0 \bar{n} \cdot (\bar{i}_0 \times {}^c_0 \bar{p}) d\gamma_0 \bar{i} + {}^c_0 \bar{o} \cdot (\bar{i}_0 \times {}^c_0 \bar{p}) d\gamma_0 \bar{j} + {}^c_0 \bar{a} \cdot (\bar{i}_0 \times {}^c_0 \bar{p}) d\gamma_0 \bar{k} = [({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{n}), \bar{i} + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{o}), \bar{j} + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{a}), \bar{k}] d\gamma_0 \quad (14)$$

여기서 $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ 는 좌표계 [E]의 단위 벡터들이다. $d\beta_0, d\alpha_0, d\bar{p}_0$ 등에 의한 손끝에서의 위치 오차 들을 상기의 방법과 같이 구하여 정리하면 아래와 같다.

$${}^c \bar{d}_{\beta_0} = [({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{n}), \bar{i} + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{o}), \bar{j} + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{a}), \bar{k}] d\beta_0 \quad (15)$$

$${}^c \bar{d}_{\alpha_0} = [({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{n}), \bar{i} + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{o}), \bar{j} + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_0 \bar{a}), \bar{k}] d\alpha_0 \quad (16)$$

$${}^c \bar{d}_{p_0} = (d\bar{p}_0 \cdot {}^c_0 \bar{n}) \bar{i} + (d\bar{p}_0 \cdot {}^c_0 \bar{o}) \bar{j} + (d\bar{p}_0 \cdot {}^c_0 \bar{a}) \bar{k} \quad (17)$$

식(4)에서 정의내린 링크 좌표계 [0]에서부터 [N] 까지의 링크 파라미터들의 오차에 의한 손끝에서의 위치 오차를 좌표계 [E]에 대하여 표현하고자 한다. 이를 편리하게 하기 위해, Fig. 4 에서와 같은 몇 개의 변환 행렬을 정의한다.

$$U = \begin{bmatrix} {}^c n_x & {}^c o_y & {}^c a_z & {}^c p_x \\ {}^c n_y & {}^c o_x & {}^c a_y & {}^c p_y \\ {}^c n_z & {}^c o_z & {}^c a_x & {}^c p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_i = {}^c A_{i-1, i} \cdots {}^c A_{1, 2} \cdots {}^c A_{1, N} T_i \quad (18)$$

$$U_i = \text{Rot}_y(\beta_i) \cdot U_i \quad (19)$$

$$U_i = \text{Rot}_x(\alpha_i) \cdot U_i \quad (20)$$

$$U_i = \text{Trans}(a_i, 0, d_i) \cdot U_i \quad (21)$$

상기와 같은 방법으로 각 링크 파라미터의 오차 $da_i, dd_i, d\theta_i, d\alpha_i, d\beta_i$ ($i=1, 2, \dots, N$)에 의한 손끝 위치 오차 들을 좌표계 [E]에 대하여 정리하면 아래와 같다.

$${}^c dx = \sum_{i=1}^N [({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{n})_x d\theta_i + {}^c_i n_x dd_i + {}^c_i n_x da_i + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{n})_y d\alpha_i + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{n})_z d\beta_i] \quad (22)$$

$${}^c dy = \sum_{i=1}^N [({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{o})_x d\theta_i + {}^c_i o_x dd_i + {}^c_i o_x da_i + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{o})_y d\alpha_i + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{o})_z d\beta_i] \quad (23)$$

$${}^c dz = \sum_{i=1}^N [({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{a})_x d\theta_i + {}^c_i a_x dd_i + {}^c_i a_x da_i + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{a})_y d\alpha_i + ({}^c_0 \bar{p} \times {}^c_i \bar{a})_z d\beta_i] \quad (24)$$

같은 방법으로 좌표계 [N]과 [E]사이의 기하학적 파라미터 오차 좌표계 [N]과 [E] 사이의 파라미터 오차 $dP_i, dP_i, dP_i, d\alpha_i, d\beta_i, dy_i$ 에 의한 손끝에서의 위치 오차를 좌표계 [E]에 대하여 표현하면 다음과 같다.

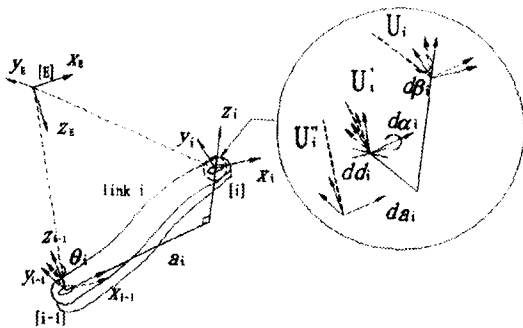


Fig. 4 Propagation of Geometric Errors between [i-1] and [i] to End-Effector Position Errors

$$U_i = i \quad (25)$$

$$U_i = Rot_x(\gamma_i) \quad (26)$$

$$U_i = Rot_y(\beta_i) \cdot U_i \quad (27)$$

$$U_i = Rot_z(\alpha_i) \cdot U_i \quad (28)$$

여기서, i 는 단위행렬이다.

$${}^E \bar{d}_{d_{r_i}} = \{({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{n})_x \bar{i} + ({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{o})_y \bar{j} + ({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{a})_z \bar{k}\} d\gamma_i \quad (29)$$

$${}^E \bar{d}_{d_{\beta_i}} = \{({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{n})_x \bar{i} + ({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{o})_y \bar{j} + ({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{a})_z \bar{k}\} d\beta_i \quad (30)$$

$${}^E \bar{d}_{d_{\alpha_i}} = \{({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{n})_x \bar{i} + ({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{o})_y \bar{j} + ({}_E^U \bar{p} \times_E^U \bar{a})_z \bar{k}\} d\alpha_i \quad (31)$$

$${}^E \bar{d}_{d_{p_i}} = (d\bar{p}_{E_i} \cdot {}^U \bar{n}) \bar{i} + (d\bar{p}_{E_i} \cdot {}^U \bar{o}) \bar{j} + (d\bar{p}_{E_i} \cdot {}^U \bar{a}) \bar{k} \quad (32)$$

식(14)~(17), (22)~(24), (29)~(32)을 다음과 같이 간단한 행렬식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^E dx \\ {}^E dy \\ {}^E dz \end{bmatrix} = [e(\bar{p}, \bar{\theta})] \bar{\varepsilon} = \begin{bmatrix} w_x(\bar{p}, \bar{\theta}) & e_x(\bar{p}, \bar{\theta}) \\ w_y(\bar{p}, \bar{\theta}) & e_y(\bar{p}, \bar{\theta}) \\ w_z(\bar{p}, \bar{\theta}) & e_z(\bar{p}, \bar{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

여기서 ${}^E dx$, ${}^E dy$, ${}^E dz$ 는 로봇트 손끝의 위치오차를 좌표계 [E]에 대하여 표현한 것이며, $\bar{\varepsilon} = [\bar{\varepsilon}_1^T, \bar{\varepsilon}_2^T]^T$ 은 파라미터의 오차 벡터들로서 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_1 &= [dp_{w_x}, dp_{w_y}, dp_{w_z}, d\alpha_w, d\beta_w, d\gamma_w]^T \\ \bar{\varepsilon}_2 &= [d\theta_1, \dots, d\theta_N, dd_1, \dots, dd_N, da_1, \dots, da_N, \\ &\quad \dots, d\alpha_1, \dots, d\alpha_N, d\beta_1, \dots, d\beta_N, dP_{E_x}, \\ &\quad dP_{E_y}, dP_{E_z}, d\alpha_E, d\beta_E, d\gamma_E]^T \end{aligned} \quad (34)$$

즉, $\bar{\varepsilon}_1$ 은 지그 좌표계 [W]와 [0]사이에서 사용된 파라미터들의 오차 벡터이고, $\bar{\varepsilon}_2$ 는 로봇트의 공칭기구학 방정식에 사용되는 파라미터의 오차와 좌표계 [N]과 [E] 사이의 기하학적 관계를 나타내기 위한 파라미터의 오차 벡터이다.

또한, $e = e(\bar{p}, \bar{\theta})$ 는 오차 전파 행렬로서, 파라미터 오차들이 로봇트 손끝 위치오차로 전파되는 특성을 보

여주고 있으며, 모델 파라미터들 (\bar{p})과 조인트 각 ($\bar{\theta}$)의 함수이다. 이 오차 전파 행렬들을 정리하면 아래와 같다.

$$w_x(\bar{p}, \bar{\theta}) = [({}_0^U n_x \quad {}_0^U n_y \quad {}_0^U n_z \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{n})_z \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{n})_y \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{n})_x] \quad (35)$$

$$w_y(\bar{p}, \bar{\theta}) = [({}_0^U o_x \quad {}_0^U o_y \quad {}_0^U o_z \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{o})_z \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{o})_y \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{o})_x] \quad (36)$$

$$w_z(\bar{p}, \bar{\theta}) = [({}_0^U a_x \quad {}_0^U a_y \quad {}_0^U a_z \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{a})_z \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{a})_y \quad ({}_0^U \bar{p} \times_0^U \bar{a})_x] \quad (37)$$

$$e_x(\bar{p}, \bar{\theta}) = [({}_1^U \bar{p}_x \times_1^U \bar{n})_z \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{n})_z \quad ({}_1^U \bar{n}_z \cdots {}_N^U \bar{n}_z \quad ({}_1^U \bar{n}_x \cdots {}_N^U \bar{n}_x \quad ({}_1^U \bar{p} \times_1^U \bar{n})_x \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{n})_x \quad ({}_1^U \bar{p} \times_1^U \bar{n})_y \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{n})_y \quad ({}_E^U n_x \quad {}_E^U n_y \quad {}_E^U n_z \quad 0 \quad 0 \quad 0)]^T \quad (38)$$

$$e_y(\bar{p}, \bar{\theta}) = [({}_1^U \bar{p}_x \times_1^U \bar{o})_z \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{o})_z \quad ({}_1^U \bar{o}_z \cdots {}_N^U \bar{o}_z \quad ({}_1^U \bar{o}_x \cdots {}_N^U \bar{o}_x \quad ({}_1^U \bar{p} \times_1^U \bar{o})_x \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{o})_x \quad ({}_1^U \bar{p} \times_1^U \bar{o})_y \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{o})_y \quad ({}_E^U o_x \quad {}_E^U o_y \quad {}_E^U o_z \quad 0 \quad 0 \quad 0)]^T \quad (39)$$

$$e_z(\bar{p}, \bar{\theta}) = [({}_1^U \bar{p}_x \times_1^U \bar{a})_z \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{a})_z \quad ({}_1^U \bar{a}_z \cdots {}_N^U \bar{a}_z \quad ({}_1^U \bar{a}_x \cdots {}_N^U \bar{a}_x \quad ({}_1^U \bar{p} \times_1^U \bar{a})_x \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{a})_x \quad ({}_1^U \bar{p} \times_1^U \bar{a})_y \cdots ({}_N^U \bar{p} \times_N^U \bar{a})_y \quad ({}_E^U a_x \quad {}_E^U a_y \quad {}_E^U a_z \quad 0 \quad 0 \quad 0)]^T \quad (40)$$

상기 식들은 Waldron⁽⁴⁾, Wu⁽⁵⁾, Mooring and Tang⁽⁷⁾, Whitney⁽¹⁵⁾, chen⁽²³⁾ 등의 결과와 같지만, 그 유도 과정은 매우 다르다. 본 연구에서는 기하학적 투사에 의하여 유도되어 졌기 때문에 그 물리적 현상을 쉽게 이해 할 수 있다.

식(6), (7) 및 (33) 으로부터 로봇트 손끝에서의 위치 오차를 지그 좌표계 [W]에 대하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^w dx \\ {}^w dy \\ {}^w dz \end{bmatrix} = {}^w R_i \cdot [e(\bar{p}, \bar{\theta})] \bar{\varepsilon} \\ = \begin{bmatrix} {}^w W_x(\bar{p}, \bar{\theta}) & {}^w e_x(\bar{p}, \bar{\theta}) \\ {}^w W_y(\bar{p}, \bar{\theta}) & {}^w e_y(\bar{p}, \bar{\theta}) \\ {}^w W_z(\bar{p}, \bar{\theta}) & {}^w e_z(\bar{p}, \bar{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

여기서, ${}^w dx$, ${}^w dy$, ${}^w dz$ 는 로봇트 손끝의 위치오차를 좌표계 [W]에 대하여 표현한 것이다.

5. 캘리브레이션 방법

로봇트 캘리브레이션의 목적은 손끝의 위치/방위(E)와 조인트 각 ($\bar{\theta}$)사이의 보다 정확한 함수 관계를 찾으므로써 오프 라인 프로그래밍 응용시 그 절대 위치 정밀도를 향상시키는데 있다. 보다 정확한 함수 관계를 찾는다는 것은 순기구학 방정식에서 사용된 링크 파라미터의 값이 실제 값과의 오차가 최소가 되는 값을 찾는 것이다. 대부분의 문헌⁽⁴⁻¹⁰⁾에서는 파라미터의 오차가 매우 적다는 가정 하에 캘리브레이션 방법을 제안하고 있으나, 본 연구에서는 오차가 커더라도 정확한 파라미터 값을 추정할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 추정하려는 모델 파라미터들 중 일부는 서로 종속적일수는 있는데 이 경우 특이(Singularity) 현상이 나타나며 이를 해결하려는 특별한 알고리즘을 고안하여야 한다.

식(1)에서의 로봇트 손끝의 위치는 다음과 같은 간단한 함수 형태로 표현할 수 있다.

$$\bar{F} = \bar{F}(\bar{p}, \bar{\theta}) \quad (42)$$

여기서 $\bar{F} = [f_x, f_y, f_z]^T$ 는 로봇트 손끝의 위치이며, $\bar{P} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{np}]^T$ (np : 모델 파라미터의 총 개수)는 모델 파라미터 벡터이며, $\bar{\theta}$ 는 로봇트 조인트 각 벡터이다. 공칭 기구학 방정식에 사용한 파라미터 값들을 \bar{p}^N , 실제의 값을 \bar{p} , 이 들의 오차를 $\bar{\varepsilon}$ 라 하면, 상기(42) 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{F} = \bar{F}(\bar{p}, \bar{\theta}) = \bar{F}(\bar{p}^N + \bar{\varepsilon}, \bar{\theta}) \quad (43)$$

임의의 작업 위치에 해당하는 역기구학 해를 구한후, 공칭 기구학 방정식을 이용하여 로봇트를 움직였다면, 실제 손끝의 위치는 원하는 작업 위치와 미소한 위치

차이가 있을 것이다. 즉,

$$d\bar{F} = \bar{F}^r - \bar{F}(\bar{p}^N, \bar{\theta}) = \bar{F}(\bar{p}^N + \bar{\varepsilon}, \bar{\theta}) - \bar{F}(\bar{p}^N, \bar{\theta}) \quad (44)$$

로봇트 손끝을 원하는 작업 위치로 정확히 움직이고자 한다면, $\bar{\varepsilon}$ 의 값을 알아야만 한다. 만약 $\bar{\varepsilon}$ 이 작다면 식(44)은 다음과 같이 근사화 할수 있다.

$$d\bar{F} \approx \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{\varepsilon}} \Big|_{\bar{\varepsilon}=0} \cdot \bar{\varepsilon} \quad (45)$$

여기서 $\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{\varepsilon}} \Big|_{\bar{\varepsilon}=0}$ 은 오차 전과 행렬로써 식(35)~(40)와 같다.

일반적으로, 모델 파라미터값을 추정하기 위해서는 여러 로봇트 위치/자세에서 손끝의 위치/자세 (${}^w \bar{F}^m$) 및 그때의 로봇트 조인트 각 ($\bar{\theta}^m$)을 측정하여야 한다. 지그의 각 y-z면에 M_x 번, x-z면에 M_y 번, x-y면에 M_z 번의 측정을 수행하였을 경우, 기구학 모델을 사용하여 표현된 로봇트 손끝의 x, y, z 위치와 측정된 위치사이의 차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$({}^w dx_f)_i = {}^w f_x(\bar{p}^N + \bar{\varepsilon}, \bar{\theta}_i) - ({}^w f_x^m)_i \quad (46)$$

$$({}^w dy_f)_j = {}^w f_y(\bar{p}^N + \bar{\varepsilon}, \bar{\theta}_j) - ({}^w f_y^m)_j \quad (47)$$

$$({}^w dz_f)_k = {}^w f_z(\bar{p}^N + \bar{\varepsilon}, \bar{\theta}_k) - ({}^w f_z^m)_k \quad (48)$$

단, $i = 1, 2, 3, \dots, M_x$, $j = 1, 2, 3, \dots, M_y$, $k = 1, 2, 3, \dots, M_z$ (M : 총 측정 횟수 = $M_x + M_y + M_z$)

여기서 ${}^w f_x^m$, ${}^w f_y^m$, ${}^w f_z^m$ 은 로봇트 손끝이 지그의 Y-Z면, X-Z면, 또는 X-Y면을 접촉하였을 때의 지그 좌표계 [W]에 대하여 표현되어진 로봇트 손끝의 위치이다. 식(41), (46), (47) 및 식(48)을 이용하여, 다음과 같이 로봇트 손끝의 위치오차를 지그 좌표계 [W]에 대하여 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} ({}^w dx_f)_1 \\ \vdots \\ ({}^w dx_f)_{M_x} \\ ({}^w dy_f)_1 \\ \vdots \\ ({}^w dy_f)_{M_y} \\ ({}^w dz_f)_1 \\ \vdots \\ ({}^w dz_f)_{M_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^w w_x(\bar{p}, \bar{\theta}_1^m) & {}^w e_x(\bar{p}, \bar{\theta}_1^m) \\ \vdots & \vdots \\ {}^w w_x(\bar{p}, \bar{\theta}_{M_x}^m) & {}^w e_x(\bar{p}, \bar{\theta}_{M_x}^m) \\ {}^w w_y(\bar{p}, \bar{\theta}_1^m) & {}^w e_y(\bar{p}, \bar{\theta}_1^m) \\ \vdots & \vdots \\ {}^w w_y(\bar{p}, \bar{\theta}_{M_y}^m) & {}^w e_y(\bar{p}, \bar{\theta}_{M_y}^m) \\ {}^w w_z(\bar{p}, \bar{\theta}_1^m) & {}^w e_z(\bar{p}, \bar{\theta}_1^m) \\ \vdots & \vdots \\ {}^w w_z(\bar{p}, \bar{\theta}_{M_z}^m) & {}^w e_z(\bar{p}, \bar{\theta}_{M_z}^m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} \quad (49)$$

이 식(49)을 다음과 같이 간단한 기호로 표현해 보자.

$$d\bar{Y} = E|_{\bar{e}} \cdot \bar{e} \quad (50)$$

많은 연구자^(4,5,18,24,25)들은 미지수의 오차벡터 \bar{e} 를 추정하기 위해서 식(50)의 최소자승해 $((F^T E)^{-1} E^T d\bar{Y})$ 를 찾았다. 이는 식의 개수(M)이 미지수 개수(np)보다 크기 때문이다. Veitschegger 와 Wu⁽¹⁰⁾는 계산된 오차 벡터 \bar{e} 로 모델 파라미터의 수치값을 갱신시킨 후, 다시 반복 계산하는 방법을 이용하였다. 파라미터 오차는 식(50)에 대한 최소자승 해를 반복적으로 구함으로써 임의의 최소값에 수렴할 것이다. 그러나, 이 방법은 식(50)의 위치오차 벡터 \bar{Y} 와 오차전파 행렬 E를 유도하는 과정에서 고차항을 무시하였기 때문에 파라미터 오차가 큰 값을 갖는 경우에는 정확히 추정할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 파라미터 오차가 포함된 식(43)의 비선형 기구학 방정식을 직접 이용한다면, 좀더 정확한 파라미터 오차 벡터 \bar{e} 를 추정할 수 있을 것이다. 이는 아래식(51) 함수값을 최소로 하는 \bar{e} 를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$\psi(\bar{e}) = [\bar{Y}(\bar{e}) - {}^m \bar{Y}]^T \cdot [\bar{Y}(\bar{e}) - {}^m \bar{Y}] \quad (51)$$

여기서 $\bar{Y}(\bar{e})$ 는 각 측정위치에서의 식(42)를 이용하여 계산된 손끝의 단 방향 위치 벡터이며, ${}^m \bar{Y}$ 는 측정된 위치들이다. 즉,

$$\bar{Y}(\bar{e}) = [{}^W f_x(\bar{p}^N + \bar{e}, \bar{\theta}_1^m) \cdots {}^W f_x(\bar{p}^N + \bar{e}, \bar{\theta}_{M_1}^m), \\ {}^W f_y(\bar{p}^N + \bar{e}, \bar{\theta}_1^m) \cdots {}^W f_y(\bar{p}^N + \bar{e}, \bar{\theta}_{M_1}^m), \\ {}^W f_z(\bar{p}^N + \bar{e}, \bar{\theta}_1^m) \cdots {}^W f_z(\bar{p}^N + \bar{e}, \bar{\theta}_{M_2}^m)]^T \quad (52)$$

$${}^m \bar{Y} = [({}^W f_x^m)_1 \cdots ({}^W f_x^m)_{M_1}, ({}^W f_y^m)_1 \cdots ({}^W f_y^m)_{M_1}, \\ ({}^W f_z^m)_1 \cdots ({}^W f_z^m)_{M_2}]^T \quad (53)$$

이 식(51)은 비선형이므로 \bar{e} 의 최적해는 반복적으로 구할 수 있을 것이다.

$\bar{Y}(\bar{e} + \Delta\bar{e}) = \bar{Y}(\bar{e}) + E(\bar{e}) \cdot \Delta\bar{e}$ 이므로, k 번째 반복 연산에서 식(51)은 다음과 같이 된다.

$$\psi_k(\bar{e}_k) = [\bar{Y}(\bar{e}_k) - {}^m \bar{Y} + E(\bar{e}_k) \cdot \Delta\bar{e}_k]^T \cdot [\bar{Y}(\bar{e}_k) - {}^m \bar{Y} + E(\bar{e}_k) \cdot \Delta\bar{e}_k] \quad (54)$$

또한, 이때의 최적해 $\Delta\bar{e}_k$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\bar{e}_k = \frac{\{[E^T(\bar{e}_k)E(\bar{e}_k)]^{-1} \cdot E^T(\bar{e}_k)\} \cdot [\bar{Y}(\bar{e}_k) - {}^m \bar{Y}]}{\quad} \quad (55)$$

따라서 (k+1)번째의 파라미터 오차값은 아래와 같다.

$$\bar{e}_{k+1} = \bar{e}_k + \Delta\bar{e}_k \quad (56)$$

상기 과정을 $\Delta\bar{e}_k$ 이 원하는 오차 범위를 만족할 때까지 반복 연산하여 파라미터 오차값을 추정한다. 식(55)을 수치적으로 풀때, 행렬 $E^T(\bar{e})E(\bar{e})$ 의 역행렬을 구할 수 없는 경우가 대부분이며, 일반적으로 이 특이현상은 파라미터 오차 \bar{e} 의 일부 요소를 중에서 로보트 손끝의 위치 오차에 주는 영향이 로보트 본래의 기구학적 특성 때문에 영향을 주지 않거나, 이들 파라미터 오차들 간에 선형 종속(linearly dependence)이 있기 때문이다. 추정하려는 모든 파라미터 오차들이 선형 독립(linearly independence)이 되도록 선형 종속한 파라미터 요소들을 매번 소거할 수 있다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이다. 이는 행렬 $E^T(\bar{e})E(\bar{e})$ 의 역행렬 계산 과정에서 피벗(pivot) 값이 아주 작은 요소의 행과 열을 소거함으로써 쉽게 해결할 수 있다. 선형 종속 파라미터를 소거한 오차전파 행렬과 파라미터 오차 벡터를 각각 $E^T(\bar{e}_k) \cdot \bar{e}^*$ 로 표시한다면, 식

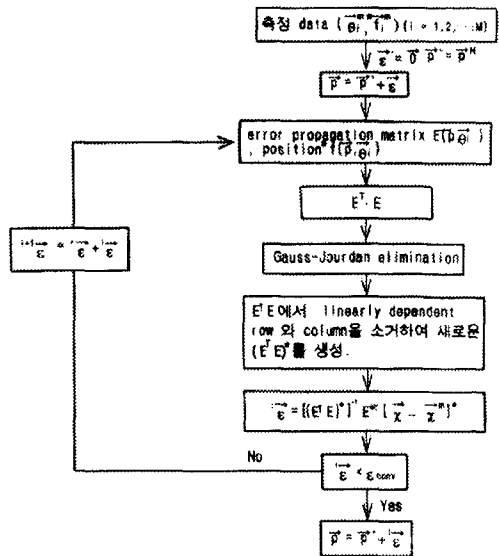


Fig. 5 Schematic Flow of Calibration Procedure

(54)의 좌측해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \hat{e}_k = \{ [E^T(\hat{e}_k) \quad E^T(e_k)] \cdot E^T(\hat{e}_k) \} / [E^T(\hat{e}_k) - E^T(e_k)] \quad (57)$$

Fig. 5는 상기 모델파라미터 추정과정을 정리한 유통도이다.

6. 실험 및 고찰

6 자유도를 갖는 아아크 용접용 로봇을 이용하여 제한한 캘리브레이션 모델과 추정 알고리즘을 검증하였다. 실험에 사용된 로봇의 재원과 로봇 좌표계의 설정은 각각 Table 1과 Fig. 6에서와 같다. 또한, 손끝위치 (${}^0T_6^m$)와 그 위치에 해당하는 로봇 축각 ($\hat{\theta}^m$)들의 데이터를 얻기위해 Fig. 1 및 Fig. 2에서와 같은 측정 시스템을 제작하여 사용하였다.

시그상의 고르게 분포된 100 점을 선택하여, 이들의 작그 좌표계(W)에 대한 위치 (0T_7)들을 구한 다음 다시 역기구학 해를 구하여 로봇에 이동명령을 내리는 프로그램을 작성함으로써 자동으로 측정이 이루어져도목하였다. Fig. 7은 실험을 수행하고 있는 장치를 보여주고 있다. 여기서 사용된 작그의 구체적 형상은 Fig. 2와 같고 그 가공오차는 0.02 mm이다. 실험에 사용된 로봇의 반복 위치정밀도가 0.1 mm 이므로 측정용 작그는 실험에 충분한 정밀도를 갖고 있다고 볼 수있다.

이들 100 개의 측정 데이터 및 추정 알고리즘을 이용하여 로봇 손끝의 오차를 최대한 줄이는 모델 파라

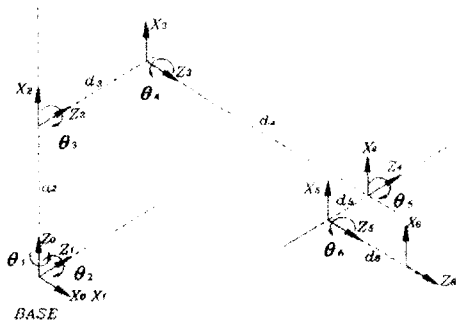


Fig. 6 An Arc Welding Robot with Axial Offset Wrist



Fig. 7 A Calibration System Using Arc Welding Wire and Measurement Jig

Table 1 Nominal Geometric Parameters of the Robot

Joint	θ	α	a	d	β
1	θ_1	90°	0	0	0
2	θ_2	0°	$a_2 = 150$	0	0
3	θ_3	90°	0	$d_3 = 80$	0°
4	θ_4	90°	0	$d_4 = 150$	0°
5	θ_5	90°	0	$d_5 = 60$	0°
6	θ_6	0°	0	0	0°

	L_1	L_2	L_3	α	β	γ
6 - E	0	0	410	0	18	0°

units are mm or degrees

미터 값들을 추정하였다. Table 2는 이들 모델 파라미터의 공칭값과 추정값을 보여주고 있으며, 또한 100 개 측정점에서의 잔류오차의 제곱평균 제곱근(Root Mean Square)를 보여주고 있다. 이때, 각 측정점에서의 잔류오차는 측정위치와 모델된 기구학 방정식을 이용한 위치의 차이며, 아래와 같다.

$$df_i = {}^m f(\hat{\theta}_i) - f(\hat{p}) + \epsilon_i \hat{\theta}_i \quad (58)$$

여기서 ${}^m f(\hat{\theta}_i)$ 는 측정된 위치이며, $f(\hat{p}) + \epsilon_i \hat{\theta}_i$ 는 계산된 위치이다. Table 2에서 보듯이 비와 같이 총 42개의 파라미터 중 24개만의 모델 파라미터 값을 추정하였고, 초기에 위치오차 RMS 값이 22.352 mm에서 캘리브레이션 후에는 0.112 mm로 줄어 들었다.

7. 결 론

본 연구에서는 아아크용접용 로봇을 위한 간단하고

Table 2 Model Parameters and their Nominal/Estimated Values

i	Nominal Values of Parameters					Estimated Values After Calibration						
	θ_i	a_i	d_i	α_i	β_i	$\Delta\theta_i$	a_i	d_i	α_i	β_i		
1	θ_1	-90	0	0	0	0	-90.216	0	0	-0.007		
2	θ_2	-90	0	0	350	0	-1.337	1.199	0	354.447	0.123	
3	θ_3	-90	80	0	0	0.536	-90.742	80	0	0		
4	θ_4	90	350	0	0	0.710	89.291	353.239	1.821	0		
5	θ_5	-90	-60	0	0	0.307	-89.705	-60	0	0		
6	θ_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	P_2	P_3	P_4	α	β	γ	P_2	P_3	P_4	α	β	γ
W-0	340	740	350	-90	0	0	339.106	740.678	351.276	-92.350	0.128	-0.244
6-E	0	0	410	0	-18	0	-2.895	7.636	411.267	0	18	0
R.M.S of Residual Position errors of the 100 Positions												
22.352						0.112						

(units are mm or degrees)

경제적인 캘리브레이션 장치 및 방법을 개발하였고, 실제 로봇트를 이용하여 실험, 검증하였다. 이 방법은 그 측정장치 및 측정 과정이 매우 간단하여 경제적이 뿐만 아니라, 일반적으로 수행되어져야하는 엔드이펙터 (End-Effector) 를 위한 별도의 캘리브레이션 장비가 필요 없게된다. 또한 측정 데이터를 얻는 과정을 쉽게 자동화시킬 수 있는 장점이 있다. 실제 실험에서 100 개의 데이터를 얻는 데 걸리는 시간은 약 15 분 정도밖에 소요되지 않았다. 실험 결과 절대위치 잔류오차의 RMS 가 0.112 mm, 최대오차가 0.321 mm 가 나왔으며, 이는 로봇트가 아아크 용접용이라는 점을 감안하면 충분한 절대 위치 정밀도라고 볼 수 있다. 본 연구에서 제작된 접촉 측정시스템은 로봇트 시스템의 캘리브레이션 뿐만아니라, 로봇트 기준좌표계와 용접 대상물 좌표계와의 위치관계를 추정하는 데에도 쉽게 이용될 수있다.

로봇트의 오프라인 프로그래밍 응용이 성공적으로 이루어지기 위해서는 로봇트 절대 위치 정밀도를 어느정도 쉽고 빠르게 확보하느냐에 달려 있다 해도 과언이 아니다. 본 연구결과는 아아크용접용 로봇트의 오프라인 프로그램응용을 좀더 쉽게 할 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

1. L.J.Everitt, M.Driels and B.W.Mooring. "Kinematic modeling for Robot Calibration", Proceedings of the 1987 IEEE international conference on Robotics and Automation, 1987, pp.183-189
2. Z.S.Roth, B.W.Mooring and B.Ravani. "An overview of Robot calibration", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. Ra-3, No.5, Oct., 1987
3. J.Denavit and R.S.Hartenberg. "A Kinematic Notation for lower link pairs based on matrices", ASME Journal of Applied Mechanics, pp.215-221, June 1955.
4. K.J.Waldron. "Positioning Accuracy of Manipulators", Proceedings of NSF sponsored workshop "A Workshop on the Impact on the Academic Community of Required Research Activity for Generalized Robotic Manipulators", University of Florida, February 1978.

5. C.Wu. "A Kinematic CAD Tool for the Design and Control of a Robot Manipulator". International Journal of Robotic Research, Vol.3, No.1, pp 58-67, Sept. 1984.
6. R.P.Judd and A.B.Knasinski, "A Technique to Calibrate Industrial Robot with Experimental Verification". IEEE international conference on Robotics and Automation, Vol 3, 1987.
7. B.W.Mooring and G.R.Tang, "An Improved Method for Identifying the Kinematic Parameters in a Six-Axis Robot". Proceeding ASME International Conference on Computers in Engineering, 1984.
8. T.W.Hsu and L.J.Everitt, "Identification of the kinematic parameters of a robot manipulator for positional accuracy improvement". Proceeding of ASME International computers in Engineering Conference, 1985, pp 263-267
9. W.K.Veitschegger and C.H.Wu, "Robot Accuracy Analysis Based on Kinematics". IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol RA-2, No. 3, pp. 171-179, Sept. 1986
10. W.K.Veitschegger and C.H.Wu, "A Method for Calibrating and Compensating Robot Kinematic Errors". IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol 1, 1987
11. T.Okada and S.Mohri, "A Method to correct Structural Errors in Articulated Robot". Bulletin of JSME, Vol. 23, No. 44, October 1985
12. C.H.Menq and J.H.Borm, "Estimation and Observability of Parameter Errors in A Robot Kinematic Model". U.S.A-Japan Symposium on Flexible Automation, Minneapolis, July 18-20, 1988.
13. C.H.Menq, J.H.Borm, "Statistical Characterization of Position Errors of an Ensemble of Robots and Its Application" Transactions of the ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. III, No. 4, pp513-518, December, 1989.
14. J.H.Borm, C.H.Menq, " Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure". The International Journal of Robotics Research, Vol. 10, No. 1, pp 51-63, February, 1991
15. D.E.Whitney, C.A.Loizinski and J.M.Rourke, "Industrial Robot Calibration Method and Results". Proceeding for the ASME conference on Computer and Engineering, pp.92-100, August 1984.
16. C.Y.Ho, "Study of precision and calibration for IBM RS-1 Robot system". Assembly Automation, Vol.2, No.4, Nov., 1982
17. P.L.Broderick and R.J.Cipra, "A Method for determining and Correcting Robot Position and Orientation Errors Due to Manufacturing". ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Dec., 1986
18. D.E.Whitney and E.F.Junkel, "Application of Kalman filter to robot calibration". Proceedings in 1985 IEEE International conference on Robotics and Automation, March, 1985
19. R.Ibarra and N.D.Perreira, "Determination of Linkage Parameter and Pair Variable Errors in Open Chain Kinematic Linkages Using a Minimal Set of Pose Measurement Data". ASME Journal of Mechanisms, Transmissions Automation in Design, Vol 108, June, 1986.
20. N.Vaishnav and E.B.Magrab, "A General Procedure to Evaluate Robot Positioning Errors". International Journal of Robotics Research, Vol 6, No.1, Spring 1987.
21. A.A.Goldenberg and R.G.Fenton,

- "Complete generalized solution to the inverse kinematics of Robots", IEEE international conference on Robotics and Automation, Vol.RA-1, No.1, March 1985.
22. K.S.Fu, R.C.Gonzalez, C.S.G.Lee. "Robotics, Control, Sensing, Vision, and Intelligence" McGraw-Hill, 1988.
23. J.Chen and L.Chao. "Positional Error Analysis for Robot Manipulators with all Rotary Joints", IEEE International conference on Robotics and Automation San Francisco, pp.1011-1016, April 1986.
24. G.V.Puskorius and L.A.Feldkamp. "Global Calibration of a robot/vision system", IEEE international conference on Robotics and Automation, 1987
25. J.Chen and Y.F.Chen. "Estimation of Coordinate Measuring Machine Error Parameters", IEEE International conference on Robotics and Automation, 1987