

스튜어트 플랫폼의 기구학적 교정기법에 관한 연구

Study on Kinematic Calibration Method of Stewart Platforms

구 상 화, 손 권
(Sang-Hwa Goo and Kwon Son)

Abstract : The accuracy problem of robot manipulators has long been one of the principal concerns in robot design and control. A practical and economical way of enhancing the manipulator accuracy, without affecting its hardware, is kinematic calibration. In this paper an effective and practical method is presented for kinematic calibration of Stewart platforms. In our method differential errors in kinematical parameters are linearly related to differential errors in the platform pose, expressed through the forward kinematics. The algorithm is tested using simulated measurements in which measurement noise is included.

Keywords : kinematic calibration, Stewart platform, forward kinematics, inverse kinematics

I. 서론

매니플레이터의 정확도 향상에 관한 문제는 오랫동안 매니플레이터의 설계나 제어분야에 있어서 주 관심사의 하나였다. 매니플레이터의 정확도는 작업공간 내에서 지시된 자세 즉 위치 및 방향으로 이동하는 능력으로 이에 영향을 미치는 주요 오차요소들로는 제작과정이나 설치과정에서 발생하는 오차, 조인트 제어기에서의 정상상태 오차, 링크나 조인트에서의 컴플라이언스 및 사용 환경 등이 있다[1].

매니플레이터의 정확도를 개선하는 방법으로는 조인트와 링크를 강화하고 제작시의 허용오차를 보다 엄격히 하면 되나 이렇게 하면 매니플레이터가 매우 커지고 가격이 비싸진다. 보다 실용적이고 경제적으로 정확도를 개선할 수 있는 방법이 기구학적 교정(kinematic calibration)이다. 이것은 매니플레이터의 조인트 위치, 링크 크기 등의 기구학적 인자들(kinematic parameters)이 제작이나 설치 과정에서 발생한 오차를 확인하여 제어기에 있는 기구학적 모델을 수정하는 과정이다. 이러한 기구학적 교정을 통하여 매니플레이터의 정확도를 상당히 개선시킬 수 있다고 보고되고 있다[2][3].

직렬형 매니플레이터의 교정에 관하여는 많은 연구가 수행되어[2]-[5] 왔으나 최근 각종 시뮬레이터, 정밀 작업용 혹은 대부하 작업용으로 많은 관심을 받고있는 병렬형 매니플레이터의 교정에 대한 연구는 별로 없다. Wang은 스튜어트 플랫폼(Stewart platform)을 2R-P-3R의 구조를 갖는 6개의 직렬형 매니플레이터로 모델링하여 교정하는 방법을 제안하였으나 단지 8개의 측정 데이터를 사용하여 42개의 인자들을 추정하는데 40-50 시간이 소요되어, 인자들의 추정에 시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있다[6]. Zhuang 등은 한 개의 링크를 교정시키고 다른 5개의 링크를 움직이면서 단말 효과기의 자세를 측정하여 한번에 한 개 링크씩의 기구학적 인자들을 계산하는 방법을

제안하였으나 이 방법은 링크사이의 연성 효과가 완전하게 조사되지 않고 제한된 작업영역만 고려하므로 구한 해가 최적이지 아닐 수도 있다[7]. Innocenti는 기구학적 인자들을 미지수로 하는 20차의 대수방정식을 유도하여 인자들을 구하는 방법을 제시하였으나 여러 개의 임시 해가 구하여져 정확한 해를 다시 찾아야 한다[8]. Zhuang은 관절에 여분의 센서를 설치하여 단말효과기 자세의 측정없이 스스로 교정할 수 있는 방법을 제안하였으나 센서장착 문제 및 비용의 문제가 있다[9].

본 연구에서는 대표적인 병렬형 매니플레이터인 스튜어트 플랫폼의 기구학적인 교정을 위하여 단말효과기 자세의 실제값과 공칭값 사이의 오차와 조인트의 기구학적 인자 공칭값과 실제값 사이의 오차관계를 순기구학 모델의 차분근사를 이용하여 빠른 시간 내에 인자들의 실제값을 추정하는 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안된 교정방법의 타당성을 평가하였다.

II. 기구학 모델

그림 1은 스튜어트 플랫폼의 기구학적 형태를 간단하게 도식화한 것이다. 이 스튜어트 플랫폼은 하판(base plate), 상판(payload plate), 그리고 6개의 구동기로 구성되어 있다.

하판에 대한 상판의 운동을 기술하기 위해 그림과 같이 상판 및 하판 각각의 중심에 좌표계 {P}와 {B}를 설정한다. 그림에서 상첨자 P와 B는 각 벡터들이 설정된 좌표계를 나타내며, p_i 및 b_i ($i=1, \dots, 6$)는 6개의 구동기가 상판과 하판에 연결되는 조인트의 위치를 나타낸다. 각 구동기 길이 벡터 ${}^B \mathbf{q}_i$ 와 좌표계 {B}의 원점에 대한 좌표계 {P}의 원점을 나타내는 벡터 ${}^B \mathbf{d}$ 를 나타내면 다음과 같다.

$${}^B \mathbf{d} = [x \ y \ z]^T \quad (1)$$

$${}^B \mathbf{q}_i = [q_{ix} \ q_{iy} \ q_{iz}]^T \quad (2)$$

$${}^B \mathbf{q}_i = {}^B \mathbf{x}_i + {}^B \mathbf{p}_i \quad (3)$$

접수일자 : 2000. 9. 1., 수정완료 : 2000. 11. 18.

구상화 : 부산대학교 기계공학과(cpggsh@sunam.kreonet.re.kr)

손 권 : 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소(kson@hyowon.pusan.ac.kr)

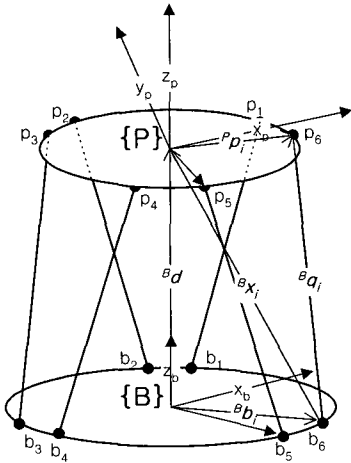


그림 1. 스투어트 플랫폼의 좌표계.
Fig. 1. Coordinate system of Stewart platform.

여기서 ${}^B x_i$ 는 하판의 b_i 지점에서 상판에 부착된 좌표계 {P}의 원점까지의 거리벡터이며, ${}^B p_i$ 벡터는 ${}^P p_i$ 벡터를 좌표계 {B} 즉 기준 좌표계에서 표현한 벡터이다. 위 식에서 각각의 벡터를 표현하면 다음과 같다.

$${}^B x_i = {}^B d - {}^B b_i = \begin{bmatrix} x - b_{ix} \\ y - b_{iy} \\ z - b_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^B p_i = {}^P R {}^P p_i \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} r_{11}p_{ix} + r_{12}p_{iy} + r_{13}p_{iz} \\ r_{21}p_{ix} + r_{22}p_{iy} + r_{23}p_{iz} \\ r_{31}p_{ix} + r_{32}p_{iy} + r_{33}p_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}$$

여기서 행렬 ${}^P R$ 는 좌표계 {P}의 좌표계 {B}에 대한 방향을 나타내는 변환행렬이며 브라이언트 각(Bryant angle)을 사용하면 다음과 같이 된다.

$${}^P R = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma & -S_\gamma C_\beta & S_\beta C_\gamma \\ C_\gamma S_\alpha S_\beta + C_\alpha S_\gamma & -S_\alpha S_\gamma S_\beta + C_\alpha C_\gamma & -S_\alpha C_\beta \\ -C_\gamma C_\alpha S_\beta + S_\alpha S_\gamma & C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma & C_\alpha C_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 구동기인 실린더의 길이 $l_i (= |{}^B a_i|)$ 는 (2), (3), (4)를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l_i = \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2} \\ = \sqrt{(\bar{x}_i + u_i)^2 + (\bar{y}_i + v_i)^2 + (\bar{z}_i + w_i)^2} \quad (7)$$

(7)은 좌표계 {B}에 대하여 좌표계 {P}의 병진운동과 회전운동으로부터 구동기 길이 l_i 를 구하는 역기구학의 닫힌 해(closed form solution)를 나타내는 식을 의미한다.

III. 기구학적 교정

스튜어트 플랫폼의 기구학적 교정은 측정된 여러 개의 상판자세 및 구동기 길이를 이용하여 제작 혹은 설치 과정에서 기구학적 인자들에 발생한 오차를 확인하여 기구학 모델을 보정하는 과정이다. 기구학 모델에 영향을 끼치는 오차들로는 6개의 구동기가 상판과 하판에 연결되는 조인트의 위치오차, 구동기 길이 측정시의 오프셋 및 조인트의 제작오차 등이 있다. 그러나 이들 오차가 상판의 자세에 미치는 영향을 분석한 결과 조인트의 제작오차는 조인트 위치오차에 비하여 아주 미세한 것임을 보여주고 있으며 [6], 또한 구동기 길이 측정시의 오프셋은 각각의 구동기 별로 다양한 변위 명령에 대한 구동기의 실제 변위 측정을 통하여 독자적으로 추정 가능하므로 [10] 본 연구에서는 상판과 하판에서의 조인트 위치 $b_i, p_i (i=1, \dots, 6)$ 만을 추정대상 인자 $u_i (36 \times 1$ 벡터)로 하였다.

측정한 상판의 자세와 구동기 길이를 각각 $X^m, d^m (i=1, 2, \dots, 6)$ 이라 하고, 측정된 구동기 길이 d^m 과 추정되기 이전의 인자들을 사용하여 순기구학 해석을 통해 구한 상판자세를 X 라 둔다. X^m 과 X 사이의 차이가 아주 작으면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X^m \cong X + J\delta u \quad (8)$$

$$dX = X^m - X \cong J\delta u \quad (9)$$

(9)에서 dX 는 상판자세의 오차를 나타내며 다음과 같이 표현되는 $6s \times 1$ 벡터이다.

$$dX = [dX_1^T, dX_2^T, \dots, dX_s^T]^T \quad (10)$$

(10)에서 s 는 매개변수 추정을 위하여 측정된 총 횟수이고 dX_j 는 j 번째 측정에 대한 상판의 위치오차(3×1 벡터) 및 방향오차(3×1 벡터)로 구성되는 6×1 벡터이다. 또한 (9)에서 J 는 $6s \times m$ 의 크기를 갖는 자코비안 행렬로 상판자세에서의 오차와 스투어트 플랫폼의 기구학적 인자에서의 오차와의 관계를 나타내어주며 다음과 같이 표현된다.

$$J = [J_1, J_2, \dots, J_s]^T \quad (j=1, 2, \dots, s) \quad (11)$$

$$J_j = [j_{1j}, j_{2j}, \dots, j_{mj}] \quad (12)$$

여기서 m 은 추정되어야 할 인자들의 개수이고 $j_{ij} (i=1, 2, \dots, m)$ 는 6×1 벡터인데, i 번째 매개변수 u_i 에 관한 상판자세 벡터 X_j 의 편미분을 나타내며 다음과 같이 수치적으로 구할 수 있다.

$$j_{ij} = \frac{X_j(u + \Delta u_i) - X_j(u)}{\Delta u_i} \quad (13)$$

기구학적 인자의 추정은 (9)에서 상판자세의 오차 dX 를 충분히 작게 하는 u 의 값을 찾으면 되는데 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 상판자세 $X_j^m (j$ 는 측정 횟수, $j=1, 2, \dots, s)$ 과 그

매의 구동기 길이 d_{ij}^m ($i=1, 2, \dots, 6$)을 측정한다.

2) 기구학적 인자들의 초기 추정값을 $u_{k/k=0} = u^n$ 라 둔다. 여기서 u^n 은 인자들의 공칭값이고 k 는 반복 횟수이다.

3) d_{ij}^m 와 u_k 를 사용하여 스튜어트 플랫폼의 순기구학 문제를 풀어 상판의 자세 X_{jk} 를 구한다.

4) X_j^m 와 X_{jk} 로부터 상판자세의 오차 벡터 dX_k ($6s \times 1$ 벡터)를 계산한다.

5) 종료조건을 확인하기 위해 dX_k 의 노름(norm)을 사용한다. $|dX_k| <$ 허용오차이면 추정된 인자 $u^a = u_k$ 이고 프로그램을 중단하며, 그렇지 않으면 단계 6으로 간다.

6) (11), (12) 및 (13)을 사용하여 자코비안 J_k 를 계산한다.

7) u_k 를 $u_{k+1} = u_k + \delta u_k$ 로 갱신하고 단계 3으로 돌아간다. 여기서 $\delta u_k = [(J_k^T J_k)^{-1} J_k^T] dX_k$ 이며 $[(J_k^T J_k)^{-1} J_k^T]$ 는 J_k 의 의사 역행렬(pseudo inverse matrix)이다.

IV. 시뮬레이션

III장에서 제안한 교정기법의 타당성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 시뮬레이터는 부산대학교에서 개발한 굴삭기 시뮬레이터를 대상으로 하였으며 그 주요 제원은 표 1과 같은데[11], 시뮬레이션을 위하여 각각의 조인트 위치가 다음과 같은 균일분포(uniform distribution)를 갖는 오차가 있는 것으로 가정하였다.

- 1) 하판 조인트의 위치오차
: $\Delta b_x, \Delta b_y \leq |13.95|, \Delta b_z \leq |11.70|$ mm
- 2) 상판 조인트의 위치오차
: $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z \leq |11.70|$ mm

표 1. 주행 시뮬레이터의 제원.
Table 1. Specification of driving simulator.

Lower radius	930 [mm]
Upper radius	780 [mm]
Lower joint distance	150 [mm]
Upper joint distance	150 [mm]
Cylinder stroke	945~1445 [mm]
Cylinder Outer diameter	80 [mm]

매니퓰레이터의 실제 교정시에는 기구학적 인자들의 실제값을 추정하기 위하여 다양한 상판 자세 및 구동기 길이의 측정 데이터가 필요하다. 시뮬레이션시에는 스튜어트 플랫폼의 기구학적 구속조건인 실린더 길이, 조인트 각도 및 실린더 사이의 간섭여부를 조사하여 실제 작업영역에 포함되는 상판의 자세 중에서 전체 작업영역에 대한 정보를 반영할 수 있도록 가급적 극한 자세가 포함되도록 선정 후, 선정된 이들 상판자세와 역기구학 해석을 통해 구한 구동기 길이를 측정 데이터로 사용하였다. 또한 상판자

세로부터 얻어지는 자코비안 행렬 J_k 의 각각의 행들이 서로 독립적이어야 의사 역행렬을 구할 수 있으므로 시뮬레이션 과정에서 의사 역행렬이 구해지지 않으면 새로운 상판자세를 선정하여 이로 대체한 후 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 과정에서 자코비안 행렬을 구하기 위하여는 순기구학 해석이 많이 필요하다. 본 연구에서는 순기구학의 해를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨 방법을 사용하였으며 그 절차는 다음과 같다. 먼저 반복 수치 해석법인 뉴턴-랩슨 방법을 사용하기 위해서 다음과 같은 목적 함수를 정의한다.

$$f_i(\mathbf{X}) = (\bar{x}_i + u_i)^2 + (\bar{y}_i + v_i)^2 + (\bar{z}_i + w_i)^2 - (d_i^m)^2 = 0 \quad (i=1, \dots, 6) \tag{14}$$

여기서 d_i^m 는 구동기의 길이를 선형변위 측정기로 읽은 값이며, \mathbf{X} 는 구하고자 하는 상판의 자세를 나타내는 벡터이다. \mathbf{X} 를 구하기 위해서 다음의 알고리즘을 적용한다.

- 1) \mathbf{X} 의 초기값을 설정한다.
- 2) \mathbf{X} 를 (6)에 대입하여 변환행렬을 구한 후, (4)와 (5)를 사용하여 ${}^B x_i, {}^B p_i$ 를 구한다.
- 3) (14)를 사용하여 $f_i(\mathbf{X})$ 와 $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial X_j}$ 를 계산한다.
- 4) $B_i = -f_i(\mathbf{X})$ 를 계산한다. 만일 $\sum_{j=1}^6 |B_j| <$ 허용오차이면 중단하고 \mathbf{X} 를 해로 선정하고, 만족하지 않으면 다음 단계로 간다.
- 5) δX_j 에 대하여 $\sum_{j=1}^6 A_{ij} \delta X_j = B_i$ 를 푼다. 만일 $\sum_{j=1}^6 |\delta X_j| <$ 허용오차이면 중단하고 \mathbf{X} 를 해로 선정하고, 만족하지 않으면 다음 단계로 간다.
- 6) $\mathbf{X}^{new} = \mathbf{X} + \delta \mathbf{X}$ 를 선택하고 1)~5)의 과정을 반복한다.

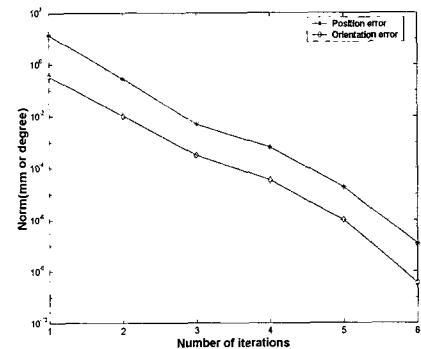


그림 2. 추정기법의 반복 수행에 대한 상판자세 오차.
Fig. 2. Pose error vector norm versus number of iteration of the identification algorithm.

1. 기구학적 인자들의 실제값 추정
추정하여야할 기구학적 인자들은 각각의 구동기가 상판과 하판에 연결되는 조인트의 위치로 모두 36개이므로 6개의 상판자세가 필요하다. 이 시뮬레이션에서는 인자들

의 실제값의 추정 능력을 확인하기 위한 것이므로 상판자세의 측정시의 측정오차는 없는 것으로 가정하였다.

그림 2는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 상판자세의 오차 벡터는 위치오차 및 방향오차로 구분될 수 있는데 각각의 유클리드 노름(Euclidian norm)은 그림에서와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 위치오차는 약 14 mm, 방향오차는 약 0.4° 였는데 단지 4회의 반복으로 두 오차는 거의 0으로 수렴하였다.

2. 측정오차가 기구학적 인자의 실제값 추정에 미치는 영향

교정을 위한 상판자세의 측정시에는 측정오차가 존재하므로 기구학적 인자들의 추정 결과를 최소자승의 관점에서 개선시키기 위하여는 추정에 필요한 측정횟수는 6회 이상이어야 한다. 이 시뮬레이션에서는 측정시 수반되는 측정오차에 의한 이 교정기법의 민감도와 측정횟수에 따른 이 기법의 효율성을 검토하기 위하여 표 2와 같이 균일분포를 갖는 2가지 형태의 인위적인 측정오차를 추가하여 여러 가지 측정횟수에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3과 표 3은 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 3은 측정횟수별로 추정된 12개 조인트 위치의 추정값에 대하여 그 위치오차의 노름을 평균한 것이다. 추정된 인자들의 위치오차는 측정된 횟수에 비례하여 줄어들었으며 측정오차가 작은 경우(noise type II)에는 측정횟수가 20회 이상이면 충분히 정확한 추정값을 얻을 수 있었다. 표 3은 측정횟수가 24회일 경우 측정오차가 작은 경우에 대하여 하판 조인트 위치의 추정결과와 그 오차를 보여주는데 측정시의 오차가 1/10일 경우 최종적으로 추정되는 인자들의 오차도 약 1/10 정도로 줄어들음을 보였으며 상판 조인트 위치에 대한 추정결과도 유사하게 나타났다. 그러나 어느 경우에도 추정된 인자들의 정확도는 측정오차 이하로 되지 않고 또한 측정오차가 큰 경우에는 추정전보다 오차가 더 큰 경우도 발생하므로 실제 교정시 사용하는 측정장비의 정확도가 중요함을 알 수 있다.

3. 교정결과 성능확인

IV.2절에서 사용한 상판자세와는 다른 임의로(random)로 추출한 다양한 상판자세에 대하여 교정결과에 성능을 확인하였다. 표 4는 IV.2절에서 추정된 인자(측정횟수 24회의 noise type II의 경우)들과 교정되기 전의 인자들을 사용하여 순기구학을 해석한 결과를 비교한 것으로 1000개의 상판자세에 대하여 위치 및 방향에서 발생하는 최대 및 평균오차를 보여준다. 상판자세 측정시 오차가 존재하는 경우에도 24회의 측정 데이터를 사용하여 추정한

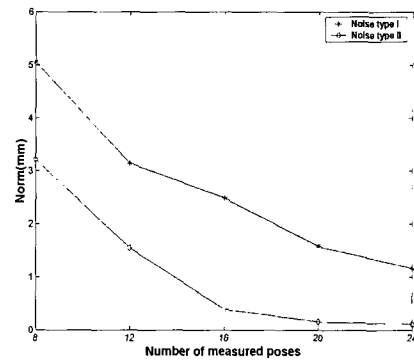


그림 3. 측정오차 및 측정횟수에 따른 추정 인자의 오차. Fig. 3. Parameters error vector norm versus number of measured poses and measurement noise type.

표 3. 하판 조인트 위치들의 실제값, 공칭값 및 추정값과 오차.

Table 3. Actual, nominal and identified values and errors at base plate position.

Parameter	Actual	Nominal		Noise type I		Noise type II	
		nominal	deviation	identified	deviation	identified	deviation
b_{1x}	597.99	588.82	9.17	598.13	0.14	597.97	0.02
b_{1y}	710.55	719.86	9.31	710.70	0.15	710.57	0.02
b_{1z}	-2.99	0.00	2.99	-2.61	0.38	-3.07	0.08
b_{2x}	326.05	329.01	2.96	325.90	0.15	326.04	0.01
b_{2y}	870.44	869.86	0.58	871.30	0.86	870.57	0.13
b_{2z}	-7.02	0.00	7.02	-7.54	0.52	-6.98	0.04
b_{3x}	-911.74	-917.82	6.08	-911.93	0.19	-911.80	0.06
b_{3y}	151.93	150.00	1.93	153.02	1.09	151.99	0.06
b_{3z}	1.56	0.00	1.56	1.37	0.10	1.45	0.11
b_{4x}	-918.92	-917.82	1.10	-919.25	0.33	-918.93	0.01
b_{4y}	-151.53	-150.00	1.53	-151.71	0.18	-151.59	0.06
b_{4z}	0.52	0.00	0.52	-0.54	1.06	0.53	0.01
b_{5x}	317.51	329.01	11.50	316.23	1.28	317.44	0.07
b_{5y}	-871.44	-869.86	1.58	-871.56	0.12	-871.56	0.12
b_{5z}	6.32	0.00	6.32	7.92	1.60	6.37	0.05
b_{6x}	585.09	588.82	3.73	584.63	0.46	585.13	0.04
b_{6y}	-725.37	-719.86	5.51	-725.94	0.57	-725.46	0.09
b_{6z}	7.57	0.00	7.57	7.24	0.33	7.51	0.06

표 4. 교정된 플랫폼의 정확도 시뮬레이션.

Table 4. Simulated accuracy improvements for a calibrated platform.

Motion	Calibrated		Original	
	Max.	Avg.	Max.	Avg.
Orientation(deg)	0.0042	0.0022	0.7891	0.3631
Position(mm)	0.0400	0.0073	17.5686	13.2627

표 2. 측정오차.

Table 2. Measurement noise.

Noise type	Orientation noise (degree)	Position noise (mm)
I	$\alpha, \beta, \gamma \leq 0.1 $	$x, y, z \leq 0.1 $
II	$\alpha, \beta, \gamma \leq 0.01 $	$x, y, z \leq 0.01 $

인자들로 기구학 모델을 수정한 결과 상판자세의 오차는 크게 줄일 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 스투어트 플랫폼의 기구학적인 교정을 위하여 상판 자세의 실제값과 공칭값 사이의 오차와 조인트의 기구학적 인자의 공칭값과 실제값 사이의 오차관계를 순기구학 모델의 차분근사를 이용하여 빠른 시간 내에 인자들의 실제값을 추정하는 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안된 교정방법의 타당성을 확인하였다.

시뮬레이션 결과 측정오차가 없는 경우 단지 4회의 반복 수행으로 오차가 거의 0으로 수렴하였고, 측정오차가 존재하는 경우에도 측정횟수가 20회 이상이면 충분히 정확한 값을 추정할 수가 있었다. 본 연구에서 제안된 교정 기법은 비교적 빠른 시간(측정횟수가 24회인 경우 계산시간은 약 5시간)내에 비교적 적은 측정 데이터로 충분히 정확한 인자 값을 추정할 수 있어 실제 플랫폼의 교정 작업 시에도 쉽게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] R. Bernhardt and S. L. Albright, *Robot Calibration*, Chapman and Hall, London, 1993.
- [2] B. W. Mooring, Z. S. Roth, and M. Driels, *Fundamentals of Manipulator Calibration*, Wiley, New York, 1991.
- [3] S. A. Hayati, K. Tso, and G. Roston, "Robot geometry calibration," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 947-951, 1988.
- [4] T. W. Hsu and L. J. Everette, "Identification of kinematic parameters of robot manipulator for positional accuracy improvement," *Proc. of ASME 1985 Int. Computers in Engineering Conf.*, pp. 263-267, 1985.
- [5] Z. S. Roth, "An overview of robot calibration," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 377-385, 1987.
- [6] J. Wang, *Workspace Evaluation and Kinematic Calibration of Stewart Platform*, Ph. D. dissertation, Florida Atlantic University, Boca Raton, 1992.
- [7] H. Zhuang and Z. S. Roth, "Method for kinematic calibration of stewart platforms," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 391-405, 1993.
- [8] J. P. Merlet and B. Ravani(eds), *Computational Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
- [9] H. Zhuang, "Self-calibration of parallel mechanisms with a case study on stewart platforms," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 3, pp. 387-397, 1997.
- [10] A. Nahvi, J. M. Hollerbach, and V. Hayward, "Calibration of a parallel robot using multiple kinematic closed loops," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 407-412, 1994.
- [11] 손권, 구상화, 유완석, 이민철, 이장명, "건설 중장비용 주행 시뮬레이터의 구현," 한국정밀공학회지, 제 16권, 6호, pp. 66-76, 1998.



손 권

1978년 서울대 기계공학과 졸업. 한국 과학기술원 생산공학과 석사(1980). Univ. of Michigan at Ann Arbor 기계 및 응용역학과 박사(1988). 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 생체역학, 가상 현실을 이용한 주행 시뮬레이터, 오프라인 프로그래밍, 감성공학.



구 상 화

1981년 부산대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1986). 동대학 박사과정 수료(1996). 1986년 ~ 현재 국방과학연구소 근무. 관심분야는 주행 시뮬레이터, 차량 동력학, 정밀계측.