

# 레이저-비전 센서를 이용한 Autonomous Robot Kinematic Calibration

정정우\*, 강희준\*\*

## Autonomous Robot Kinematic Calibration using a Laser-Vision Sensor

Jeong Woo Jeong\* and Hee Jun Kang\*\*

### ABSTRACT

This paper presents a new autonomous kinematic calibration technique by using a laser-vision sensor called "Perceptron TriCam Contour". Because the sensor measures by capturing the image of a projected laser line on the surface of the object, we set up a long, straight line of a very fine string inside the robot workspace, and then allow the sensor mounted on a robot to measure the point intersection of the line of string and the projected laser line. The point data collected by changing robot configuration and sensor measuring are constrained to on a single straight line such that the closed-loop calibration method can be applied. The obtained calibration method is simple and accurate and also suitable for on-site calibration in an industrial environment. The method is implemented using Hyundai VORG-35 for its effectiveness.

**Key Words** : Autonomous Kinematic Calibration(자동 기구학적 캘리브레이션), Line Constraint(선구속) Closed-Loop Constraint(폐루프구속), Perceptron Sensor(퍼셉트론센서), Laser-Vision Fusion Sensor(레이저-비전 융합 센서)

### 1. 서론

일반적으로 산업용 로봇의 반복정밀도(Repeatability)는 대략 0.1 mm 정도로 우수한 편이지만, 절대정밀도(Accuracy)는 대략 5-10 mm로 로봇을 이용한 오프라인 프로그래밍 작업이나 로봇에 부착된 시각 센서를 이용한 위치보정과 같은 작업을 수행할 때는 보다 정밀한 절대정밀도가 요구된다. 절대정밀도는 Denavit-Hartenberg

Parameters (이후 DH parameters)와 기본 좌표계의 위치와 같은 기하학적 인자의 부정확성과 기어의 백래쉬, 관절 콤포라이언스등과 같은 비기하학적 인자들에 의해 결정되는데 위치 오차의 90% 이상이 기하학적 인자와 관절 콤포라이언스에 의해 발생하고 비기하학적 인자들은 실험에 근거한 모델을 사용하여야 하므로, 본 논문에서는 일반적으로 모델이 가능한 기하학적인 인자만을 고려하는 Kinematic Calibration을 수행하여 절대 정밀도를

\* 울산대학교 제어계측공학과 대학원

\*\* 울산대학교 제어계측공학과

향상시키고자 한다.

기존에 제시된 Kinematic Calibration 방법 중 Motion Tracking System<sup>1</sup>, Theodolites<sup>(8,9)</sup> 등과 같이 외부에 3차원 정밀 측정 장비를 이용하여 로봇 공구 위치 측정을 통한 Calibration 방법은 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있지만 사람의 관여도가 높고 많은 셋업 시간이 필요하게 된다. 최근에는 로봇 자체 센서(관절 센서값과 로봇에 부착된 비전 센서)만을 이용하여 사람의 관여를 최소한으로 줄이면서 짧은 시간 내에 로봇 인자들을 추정할 수 있는 Autonomous Calibration<sup>7</sup> 방법들이 제시되고 있다. 로봇 자체 센서만으로 캘리브레이션을 수행하기 위해서는 로봇의 구속조건이 형성되어야 하는데, 기존에 제시된 방법들로는 Laser Line Tracking을 이용한 작업 구속 조건<sup>13</sup>, Trigger Probe를 이용한 평면에 대한 구속조건을 이용하는 방법<sup>10</sup>, 로봇이 문을 여는 작업을 할 때 생기는 페루프(Closed-Loop) 구속조건을 이용하는 방법<sup>3</sup>, 관절 센서값과 로봇에 부착된 비전센서를 이용한 페루프 구속조건을 사용하는 방법<sup>(6,7)</sup> 그리고 Implicit Loop Method<sup>(2,3)</sup> 등이 있다. 관절 센서값과 작업의 구속조건을 이용하는 방법은 로봇 링크 중에서 어느 하나의 정확한 길이를 알고 있어야 한다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 로봇 관절의 센서값과 로봇의 공구 부분에 부착된 Perceptron TriCam Contour 센서(이하 퍼셉트론)로 공간상 직선의 임의의 한 점에 대한 측정값을 이용하여 페루프 구속조건을 만드는 새로운 Autonomous Robot Kinematic Calibration 방법을 제시한다. 본 논문에서 사용된 퍼셉트론 센서는 미 퍼셉트론사에서 제작된 레이저-비전 융합 센서로 Fig. 1-2에서 볼 수 있듯이 측정대상의 표면에 조사된 레이저 라인의 이미지를 카메라로 획득하여 측정대상의 표면 윤곽이나 위치 등을 비교적 고정밀도(최대오차: 0.1 mm)의 2차원 정보(퍼셉트론 센서 좌표계의  $y, z$  값)를 삼각법의 원리를 이용하여 획득할 수 있는 센서이다. 이 센서는 측정 환경 변화에 대하여 일반 비전 센서보다 강인하고 보다 정밀한 측정값을 줄 수 있어 일반 공장 환경에서 산업용 로봇에 부착하여 로봇의 위치 보정 시스템 등과 같은 로봇 응용에 사용되곤 한다. 이 경우 로봇과 퍼셉트론 센서사이의 기구학적 변환 파라미터들이 정확히 결정하는 Hand-Eye Calibration 문제가 제기된다.

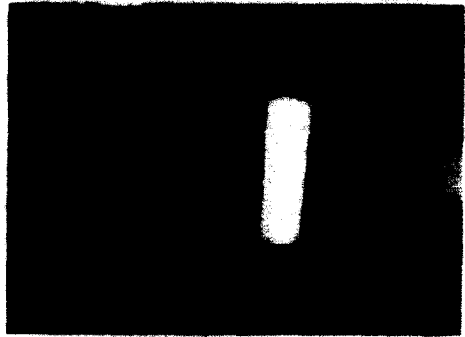


Fig. 1 Perceptron Sensor

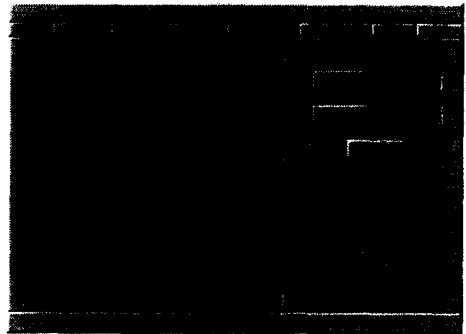


Fig. 2 Measurement by Perceptron Sensor

제시된 알고리즘은 로봇 캘리브레이션 및 Hand-Eye Calibration을 동시에 수행한다.

본 논문의 2절에서는 Kinematic Calibration을 수행하기 위한 전체 시스템과 기본 좌표계, 로봇 각축 좌표계와 퍼셉트론 센서 좌표계의 설정에 대하여 설명하고, 3절에서는 2절에서 설정된 캘리브레이션 시스템에서 구속 조건을 도출하여 반복 최소자승법(Iterative Least Square Method)으로 파라미터들을 추정하는 Kinematic Calibration 알고리즘을 제시한다. 마지막으로, 4절에서는 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 현대 VORG-35 산업용 로봇을 이용한 실제 실험을 수행하고 검토한다.

## 2. 전체 시스템 구성 및 좌표계 설정

Kinematic Calibration을 수행하기 위한 전체 시스템의 구성은 아래의 Fig. 3과 같이 현대 VORG-35 산업용 로봇, 퍼셉트론사의 P-4000 시

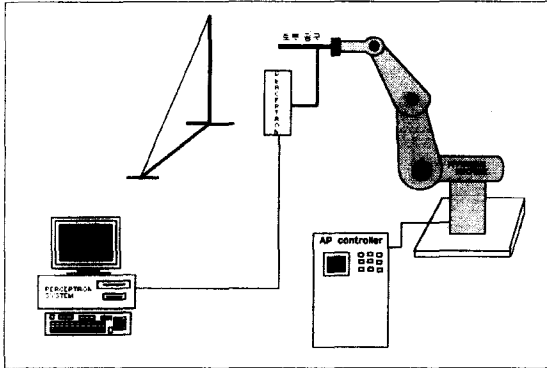


Fig. 3. Autonomous Robot Calibration System

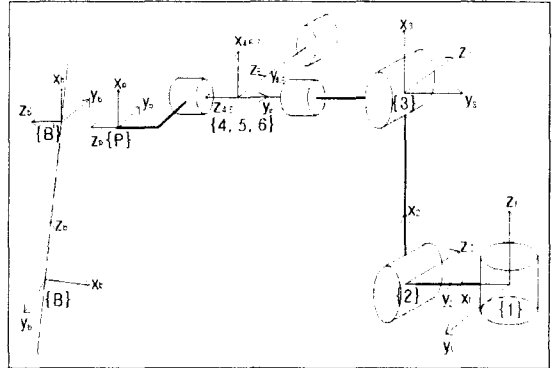


Fig. 4. Coordinate Assignment of Calibration System

스텝 및 공간상에 직선을 만들 수 있는 지그로 구성된다. 현대 VORG-35 로봇은 6축 범용 산업용 로봇으로 실제 생산라인에서 많이 사용되는 로봇이며 로봇 공구 좌표계 부분에 부착된 퍼셉트론 P-4000 시스템은 TriCam Contour 센서 이외에도 퍼셉트론사에서 제공하는 여러 종류의 비전 센서를 부착할 수 있으며 이미지 획득, 소프트웨어를 통한 이미지 처리 및 2차원 정보의 추출까지 할 수 있는 통합 시스템이다. 여기서 2차원 정보란 센서 좌표계에 대한 y, z값을 의미하며, 레이저라인이 x축을 형성하므로 측정점의 x값은 항상 0이다. 그리고, 고려된 지그는 양쪽에 기둥을 세우고 기둥 사이에 가는 강선(Fine Steel Cable)을 연결하여 공간상에 직선이 만들어지게 구성하였고 이때 사용되는 강선은 측정 오차에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 되도록 지름이 작은 강선을 사용하는 것이 유리하다. 공간상의 직선을 구성하는 것은 비전 센서에서 마킹에 의한 특징점을 추출하듯이 퍼셉트론 센서가 레이저라인 중에서 특징점을 추출할 수 있도록 고려한 결과이다.

Fig. 3에 제시된 캘리브레이션 시스템에 필요한 기본 좌표계와 로봇 각 축의 좌표계 및 퍼셉트론 센서 좌표계는 Fig. 4에 제시된다. 우선 페루프 구속조건이 만들어 질 수 있게 하기 위하여 기본 좌표계 {B}의 원점 위치 및 {1}로의 변환 관계를 선정하여야 하는데, 그 요구 조건은 {B}의 z축을 공간상의 직선과 반드시 일치시켜야 한다는 것이다. 다음, 일반적인 DH parameter에 의한 좌표계 설정 방법을 따르면, Fig. 5와 같이 {B}-좌표계 원점의 위치가 선정되고, 그에 따른 {B}-좌표

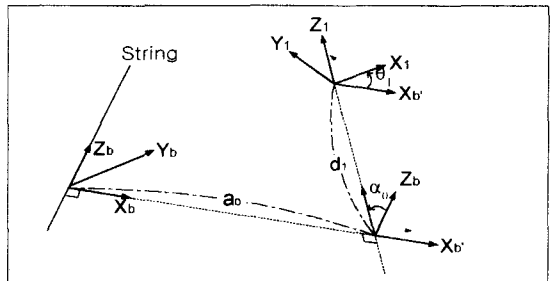


Fig. 5. Coordinate Transformation from {B} to {1}

계 설정 방법을 따르면, Fig. 5와 같이 {B}-좌표계 원점의 위치가 선정되고, 그에 따른 {B}-좌표계에서 {1}-좌표계로의 변환을 표현할 수 있다. 얻어진 {B}-좌표계에서 {1}-좌표계로의 좌표 변환 관계식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_1^B = Trn(x)Rot(a)Trn(d_1)Rot(\theta_1) \quad (1)$$

나머지 로봇의 1축으로부터 6축까지의 좌표변환은 간단하게 DH Parameters를 이용하여 변환할 수 있지만, Kinematic Calibration에서 이미 잘 알려진 문제점 중의 하나인 이웃한 두 축이 거의 평행할 경우에는(현대 VORG-35의 경우에는 2, 3축이 평행) Hayati가 제시한 Modified DH Parameter<sup>11</sup>를 사용하여야 한다. 좌표계 {6}로부터 좌표계 {P}로의 좌표변환 방법은 좌표계 {6}을 x, z의 이동만으로 좌표계 {P}의 원점에 도달할 수 있게 설정을 하면 먼저 2개의 Translation 인자 x, z로 {6}의 원점과 {P}의 원점을 일치시킨 후 3개의 Rotation 인자 X-Y-Z Euler Angle을

사용하여 Rotation을 맞추면 5개의 변환 인자로 좌표변환을 할 수 있게 된다. {B'}-좌표계는 {P}-좌표계로부터 Translation y, z 만으로 좌표 변환이 이루어 질 수 있게 설정을 한다. 여기서 y, z 값은 퍼셉트론 센서가 {B} 좌표계 z축 상의 임의의 점을 측정할 때 얻어지는 값이 된다.

### 3. Autonomous Kinematic Calibration 알고리즘

외부 센서에 의한 로봇 끝점 측정에 의한 캘리브레이션 방법<sup>(1,8,9)</sup>과 다르게 Autonomous Kinematic Calibration은 서론부에서 언급한바와 같이 단지 로봇의 내부 센서만을 이용하고, 대신에 전체 캘리브레이션 시스템으로부터 내부 구속 조건을 도출하여야 한다. 본 절에서는 로봇의 내부 센서인 관절 센서값과 퍼셉트론 센서의 측정값 그리고 현 캘리브레이션 시스템에서 도출될 수 있는 부가 구속조건들로부터 얻어지는 Autonomous Kinematic Calibration 알고리즘을 Fig. 4를 이용하여 설명하고자 한다.

퍼셉트론 좌표계 {P}와 레이저 라인과 직선사이의 교차점에 {P}-좌표계의 y, z 평행 이동으로 얻어지는 {B'}-좌표계의 변환 관계  ${}^P_B T$ 는 아래의 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$${}^P_B T = \begin{bmatrix} & & 0 \\ I_{3 \cdot 3} & \begin{matrix} y_p \\ z_p \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $y_p, z_p$ 는 퍼셉트론의 각각 y, z 방향 측정값들이고, 레이저 라인은 x축을 형성하므로 x축 평행 이동량은 0이다. 로봇의 기본 좌표계 {B}로부터 새롭게 정의된 {B'} 좌표계까지의 좌표 변환 관계식을 표현하면 다음과 같다.

$${}^B_{B'} T = {}^B_1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 T_P^6 T_B^P T_B^P T = \begin{bmatrix} & & \Delta x \\ & {}^B_B R_{3 \cdot 3} & \Delta y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

{B'}-좌표계의 원점이 {B} 좌표계의 z축상에 존

재하므로 식 (3)에 나타나는  $\Delta x, \Delta y$ 는 실제로 0이 되어야만 한다. 주어진 파라미터에 근거하여 계산된 식 (3)의 실제값은 아래의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$${}^B_{B'} T = \begin{bmatrix} & & 0 \\ & {}^B_B R_{3 \cdot 3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이와같이 로봇의 한 자세에 대한 한번의 퍼셉트론 측정으로부터  $\Delta x = \Delta y = 0$ 이 되는 2개의 구속 조건식을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 구속 조건들로부터 필요한 파라미터를 추정하는 반복 최소화승법을 이용하여 Autonomous Kinematic Calibration 알고리즘이 다음과 같이 도출된다. 먼저 로봇 작업공간의 편리한 지점에 강선을 설치하고, 로봇 자세를 변화시키면서 직선과 레이저 라인 사이의 교점을 n회 측정하고, 각각의 로봇 자세에 대한 관절각 set ( $\theta$ )를 기록한다. 각각의 로봇 자세에 대하여 로봇 인자의 Nominal Value와 센서 측정값을 이용하여 {B}-좌표계로 표현되는 {B'}-좌표계의 원점값 중에서 x, y를 2x1 위치 벡터( $r$ )로 설정한다. 실제 로봇 인자에 대하여 구해지는 실제의 위치 벡터 ( $r^*$ )와 계산된 위치 벡터 ( $r$ )사이의 차이는 다음과 같이 표현된다.

$$r_i - r^* = \Delta r_i = [J_{\theta_i}^{xy}] \Delta \theta = [[J_{\theta_i}^{xy}] : [J_{a_i}^{xy}] : [J_{d_i}^{xy}] : [J_{d_i}^{xy}]] \begin{bmatrix} \Delta \theta_{offset} \\ \Delta a \\ \Delta a \\ \Delta d \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

여기서,  $J_i^y = [J_i^x \ J_i^y]^T$ 이고 a, a, d는 각각 DH 파라미터 중 링크 트위스트각, 링크 길이, 링크 오프셋이다. 또한  $J$ 는 일반적인 자코비안 매트릭스이고, 실제 관절각  $\theta$ 는  $\theta_R + \theta_{offset}$  이라고 가정하는데, 여기서  $\theta_R$ 은 관절각 측정값이고  $\theta_{offset}$ 은 비기하학적 인자에 의해서 발생하는 관절각 오차를 상수로 가정한 항이다. 식 (5)에서 알지 못하는 실제값  $r^*$ 를 제거하기 위하여 식 (5)의 첫번

제 식으로부터  $i$ 번째 식을 빼게되면 그 결과식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (r_1 - r^*) - (r_i - r^*) &= r_1 - r_i = \Delta r_i \\ &= [J_{\phi_1}] \Delta \phi_1 - [J_{\phi_i}] \Delta \phi_i, \quad i=2 \dots n \end{aligned} \quad (6)$$

$(n-1)$ 개의 벡터 방정식은 식 (7)과 같이 매트릭스를 이용하여 결합시킬 수 있고, 간단히 표현할 수 있다.

$$\Delta r = \begin{bmatrix} \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \vdots \\ \Delta r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\phi_1} - J_{\phi_2} \\ J_{\phi_1} - J_{\phi_3} \\ \vdots \\ J_{\phi_1} - J_{\phi_n} \end{bmatrix} \Delta \phi = C \Delta \phi \quad (7)$$

식 (7)에 반복 최소 자승법을 적용하여 새로운 인자값  $\phi$ 를 결정하는 방법은 다음과 같다.

- 1)  $\theta_i, \alpha_i, d_i, a_i$  에 의하여  $\Delta r_i$ 와  $C_i$ 를 계산하여  $\Delta r_i = C_i \Delta \phi_i$ 를 구한다.
- 2)  $\Delta \phi_i = (C_i^T C_i)^{-1} C_i^T \Delta r_i$
- 3)  $\phi_{i+1} = \phi_i + \Delta \phi_i$
- 4) 위에서 수행한 단계들을  $\Delta \phi$  값이 0이 될 때까지 반복 수행하여야 하나 측정값의 한계 때문에 일정한 값 이하가 되면 계산수행을 정지한다.

반복 최소 자승법의 단계 2)에서 Transient Singularity Problem이 발생하는 경우가 있는데  $\Delta \phi = (C^T C + \lambda I)^{-1} C^T \Delta r$ 를 사용하면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 여기서,  $I$ 는 단위 행렬 매트릭스이고, 가중치  $\lambda$ 값에 따라 다양한 수렴 특성을 보이게 된다.  $\lambda$ 값에 적절한 실수값을 사용하게 되면 일반적으로 초기 단계에서 좋은 수렴 특성을 보이거나 최종 단계에서는 수렴속도가 느려지는 단점이 있다. 그러므로,  $\lambda$ 값이 가변적으로 변화하면서, Singularity 부분에서는 큰 값을 갖고 Singularity에서 멀어지면 0으로 변환(Switching)되는 방법이 사용된다<sup>12</sup>.

#### 4. 실험 결과

이 절에서는 앞에서 제시된 캘리브레이션 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 현대 VORG-35 산업용 로봇과 퍼셉트론 센서 측정값을 이용하여 실험을 수행하였고 그 결과는 뒤에 정의되는 구속 조건 위반량에 의하여 검토하였다. Fig. 6은 실험 데이터 획득을 위하여 구성된 현대 VORG-35 산업용 로봇과 P-4000 퍼셉트론 센서 그리고 로봇 작업 공간을 지나가는 가는 강선을 보여준다. Table 1은 로봇의 설계상의 Nominal 기구학적 인자값 및 퍼셉트론 센서를 로봇에 부착할 때의 로봇의 {6}-좌표계로부터 {P}-좌표계의 변환인자의 설계값을 나타낸다.

본 실험에서는 로봇의 Kinematic 모델 인자 및 {6}으로부터 {P}로의 좌표 변환 인자까지 포함하여 28개의 인자에 대하여 Calibration을 수행하였으며 측정 횟수는 한번에 2개의 구속식이 발행하므로 최소한 14회가 필요하나 충분한 수의 구속식을 획득하기 위하여 70회를 수행하였다. 캘리브레이션 수행 결과는 Table 2에 제시된다. Table 2에서  $i=1$ 의 결과 값들은 {B}에서 {1}로의 좌표변환에 필요한 인자들인데, 일반적으로 로봇 좌표계 설정에서 {B}-좌표계와 {1}-좌표계를 공간상에서 일치시키므로,  $\theta_1$ 의 offset값 이외에는 로봇의 인자로 특별한 의미가 없는 값이고, VORG-35 산업용 로봇의 경우는 2축과 3축이 Nearly parallel한 경우에 해당하게 되므로  $i=3$ 은 Hayati가 제시한 Modified DH parameter를 사용하였다. 그러므로  $\alpha_2$ 는 x축에 대한 Rotation인자,



Fig. 6 Experimental Setup

Table 1. Nominal Kinematic Parameters of VORG-35 Robot and Designed Transformation Parameters from {6}-frame to {P}-frame

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	
1	0	0	0	0	
2	90	200	0	0	
3	0	700	0	0	
4	90	155	750	0	
5	-90	0	140	0	
6	90	0	160	0	
7	Trn_x	Trn_z	Rot_x	Rot_y	Rot_z
	-60	122	0	0	-88

Translation Parameter: mm,  
Rotation Parameter : deg(°)

Table 2. Calibration Results

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	
1	-1532.34	158.6061	43.2621	-15.0230	
2	90.109	200.298	-1.300	0.097	
3	-0.108	700.451	0.017	0.166	
4	90.069	154.070	749.459	0.234	
5	-90.103	0.7736	139.341	0.171	
6	90.069	-0.053	160.000	88.745	
7	Trn_x	Trn_z	Rot_x	Rot_y	Rot_z
	-59.593	121.899	0.395	-0.234	-88.562

Translation Parameter: mm,  
Rotation Parameter : deg(°)

$a_2$ 는 x축에 대한 Translation 인자,  $d_3$ 는 y축에 대한 Rotation 인자,  $\theta_3$ 는 z축에 대한 Rotation 인자에 해당한다. Table 2에 표시된 캘리브레이션 결과의 타당성을 검증하기 위하여  $\Delta x = \Delta y = 0$ 의 구속 조건 위반량( $e = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ )을 이용하였다. 구속 조건 위반량에 의하여 캘리브레이션된 경우와 Calibration되지 않은 경우의 비교를 Fig. 7 제시였다. 구속 조건 위반량의 계산 중에서 캘리브레이션되지 않은 경우의  $i=1$ 에 해당하는 값들은 실제적인 측정이 불가능하므로 캘리브레이션 결과 하에서 나온 값을 사용하였고, {6}에서 {P}로의 좌표변환값( $i=7$ )들은 Table 2의 초기 설

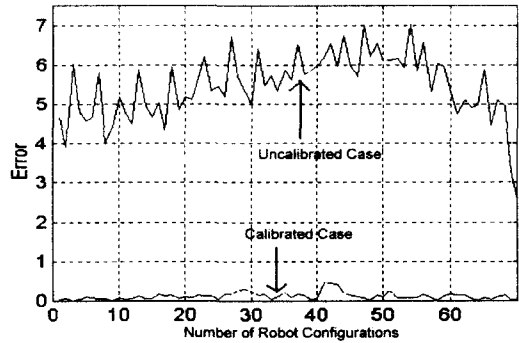


Fig. 7 The comparison of the error quantities between calibrated and uncalibrated case

계값을 사용하였다. 구속조건의 위반 정도를 나타내는  $e$ 가 작을수록 얻어진 결과가 실제 로봇 인자에 근접함을 의미하는데, Fig. 7의 결과에서 보는 바와 같이 캘리브레이션되지 않은 경우 보다 캘리브레이션된 경우의 구속조건 위반량( $e$ )이 눈에 띄게 줄어든 것을 알 수 있으며 캘리브레이션을 수행하지 않은 경우에는 최대 구속조건 위반양이 7.0191mm인 것에 반하여 캘리브레이션을 수행하고 난 후의 최대 구속조건 위반양은 0.4698mm로 줄어든 것을 알 수 있다. 로봇의 절대 정밀도는 z-방향 오차( $\Delta z$ )를 포함하여  $\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$ 로 표현되는데  $\Delta z$ 의 발생 정도가  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 와 같은 정도로 발생한다면 절대 정밀도는 대략 0.6mm 이하로 추정된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 짧은 시간 내에 간단한 작업을 통하여 로봇과 퍼셉트론 센서간의 좌표변환 인자 및 로봇 자체 인자까지 캘리브레이션할 수 있는 새로운 Autonomous Kinematic Calibration 알고리즘을 제시하고, 현대 VORG-35 산업용 로봇을 이용하여 실제 적용 실험에서 절대 정밀도를 0.6mm이하로 향상시켰다. 특히, 비전 센서를 로봇에 부착할 시 발생하는 Hand-Eye Calibration 문제는 많은 문헌에 보고된 바 있지만, 퍼셉트론 센서와 같은 레이저-비전 센서의 Hand-Eye

Calibration 문제에 대한 해결 방안 제시는 저자가 문헌상에서 확인한 바 없어 주목할 만하다고 생각한다.

일반적인 Autonomous Kinematic Calibration 알고리즘들은 구속조건을 만들기 위하여 외부에 정밀가공된 지그가 요구되거나 로봇에 부착하여 사용하는 비전센서의 측정 범위의 한계 때문에 로봇자세의 제약이 있는 반면 제시한 알고리즘은 지그 제작이 용이하고 공간상의 직선의 길이를 길게 하면 로봇 자세의 제약을 없앨 수 있다. 또한 퍼셉트론 센서는 일반적인 비전 센서 보다 쉽게 정밀한 측정값을 얻을 수 있는 장점이 있다.

제시한 알고리즘은 퍼셉트론 센서 측정의 정확도가 캘리브레이션 결과에 영향을 미치게 된다. 퍼셉트론 센서 측정의 정확도를 높이기 위한 방법으로는 공간상의 라인을 만들기 위하여 사용되는 강선의 지름이 작게 되면 퍼셉트론 센서의 레이저 라인과 공간상의 직선이 교차하는 부분의 면적이 작아지게 되므로 측정 오차를 줄일 수 있고, 퍼셉트론 센서 자체의 캘리브레이션을 통하여 센서 측정의 정확도를 높일 수 있다. 이러한 사항들이 보완된다면 보다 좋은 캘리브레이션 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. J. M. Hollerbach, and D. J. Bennett, "Automatic Kinematic Calibration Using a Motion Tracking System," J. of Robotics Research, pp. 191-198, 1988.
2. M. Ikits, and J. M. Hollerbach, "Kinematic Calibration Using a Plane Constraint," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3191-9196, 1997.
3. D. J. Bennett, and J. M. Hollerbach, "Identifying the Kinematics of Robots and their Tasks," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 580-586, 1989.
4. A. Goswami, A. Quaid, and M. Peshkin, "Complete Parameter Identification of a Robot from Partial Pose Information," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 168-173, 1993.
5. L. J. Everett, and T. W. Hsu, "The theory of Kinematic Parameter Identification for Industrial Robots," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pp. 96-100, 1988.
6. H. Zhuang, L. Wang and Z. S. Roth, "Simultaneous Calibration of a Robot and a Hand-Mounted Camera," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 149-154, 1993.
7. D. J. Bennett, D. Geriger, and J. M. Hollerbach, "Autonomous Robot Calibration for Hand-Eye Coordination," The International Journal of Robotics Research Vol. 10, NO. 5, pp. 550-559, 1991.
8. L. M. Chao, and J. C. S. Yang, "Development and Implementation of a Kinematic Parameter Identification Technique to Improve the Positioning Accuracy of Robot," Robots 10 Conference Proceedings, pp. 69-81, 1986.
9. R. P. Judd, and A. B. Knasinski, "A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 351-357, 1987.
10. X. L. Zhong, and J. M. Lewis, "A New Method for Autonomous Robot Calibration," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 1790-1795, 1995.
11. S. A. Hayati, and M. Mirmirani, "Improving the Absolute Positioning Accuracy of Robot Manipulators," Journal of Robotic Systems, pp. 397-413, 1985.
12. L. Kelmar and P. K. Khosla, "Automatic Generation of Kinematics for a Reconfigurable Modular Manipulator System," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 663-668, 1988.
13. W. S. Newman and D. W. Osborn, "A New Method for Kinematic Parameter Calibration via Laser Line Tracking," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 160-165, 1993.