

# 원형 지그를 이용한 레이저-비전 센서의 가상 공간 교정에 관한 연구

김진대#, 조영식\*, 이재원\*\*

## Virtual Space Calibration for Laser Vision Sensor Using Circular Jig

Jin-Dae Kim<sup>#</sup>, Young Sik Cho<sup>\*</sup>, Jeh-Woon Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Recently, the tele-robot operations to an unstructured environment have been widely researched. The human's interaction with the tele-robot system can be used to improve robot operation and performance for an unknown environment. The exact modeling based on real environment is fundamental and important process for this interaction. In this paper, we propose an extrinsic parameter calibration and data augmentation method that only uses a circular jig in the hand-eye laser virtual environment. Compared to other methods, easier estimation and overlay can be done by this algorithm. Experimental results using synthetic graphic demonstrate the usefulness of the proposed algorithm.

Key Words : Tele-Operation Robot (원격 제어 로봇), Interaction(상호 작용), Virtual Environment (가상 환경), Hand-Eye Laser System (핸드-아이 레이저 시스템), Virtual Augmentation(가상 중첩), Calibration (보정), Circular Jig (원형 지그).

### 1. 서론

최근 로봇 기술의 발달로 거의 모든 분야에서 인간의 역할을 로봇이 대신하는 것이 가능하게 되었으며 근래에 들어서는 인간이 직접 접근해서 작업하기가 어려운 극한 환경에 대한 원격 제어 로봇에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>1</sup> 원격 제어는 가상 현실과의 연계를 통하여 로봇이 지닌 정밀성에 인간의 상호 작용을 도입함으로써 효과적인 작

업 계획 및 평가가 가능하다. 원격 제어 로봇에서 인간의 상호 작용은 원격 작업 환경을 바탕으로 한 정확한 가상 환경의 구축을 기본으로 한다.<sup>2</sup> 그러므로, 가상 공간 교정은 원격 작업 환경의 정확한 3차원 정보를 얻어내어 원격 작업 환경에 대한 실제 측정 데이터와 작업 환경을 3차원 그래픽으로 모델링 한 것과 정확히 일치 시킬 수 있게 되는 과정을 말한다. 레이저 3차원 라인 센서는 표면의 윤곽 정보를 얻는 측정 장치로서 6자유도 로봇 응용에 필

2002년 12월 31일 접수; 게재승인일:2003년 11월 14일

# 교신저자, 영남대학교 대학원 기계공학과

Email p9950086@hanmail.net Tel. (053) 810-3568

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남 대학교 기계공학과

요한 시각 정보를 제공할 수 있는 센서이다.

본 연구에서는 레이저 라인 센서를 로봇에 장착하여 표면 형상 정보를 이용하는 원격 로봇 작업에서 실제 레이저센서의 기구학적 파라미터를 원형 지그를 이용하여 얻어내는 방법을 제시하며 이를 이용한 가상 공간상의 레이저 센서 보정 방법을 제시한다. 이 방법을 사용해서 병진 행렬과 회전 행렬을 찾으면, 가상 공간 레이저 측정 데이터와 원격 공간 레이저 측정 데이터의 3차원 그래픽을 정확히 중첩 시킬 수 있게 된다. 이렇게 함으로써 보다 정확한 시각 정보를 제공하게 되므로 더 실제적이고 정확한 원격 작업을 할 수 있게 된다

## 2. 기본 이론

가상 공간 상에서의 핸드-아이 레이저 센서를 모델링 하는 작업은 6자유도 로봇의 움직임에 따른 레이저의 위치와 방향에서 임의의 물체상의 점까지의 거리 값으로 구할 수 있고, 가상 공간 상에서의 중첩은 실제 핸드-아이 로봇으로 측정한 결과를 3차원 그래픽으로 표현하는 작업이다.

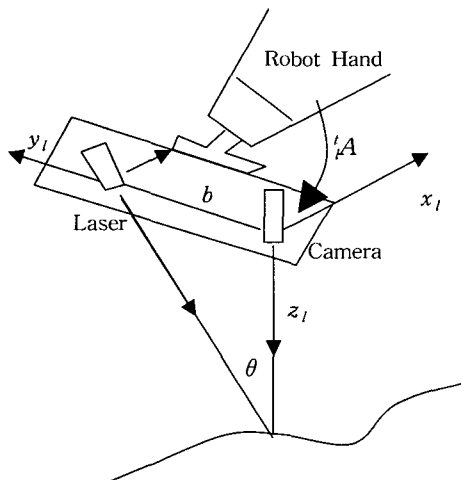


Fig. 1 Hand-Eye laser vision robot system

그러므로 로봇의 움직임에 따른 레이저의 외부 파라미터 결정은 가상 공간 교정에서 기본적으로 이루어져야 하는 작업이 된다. 즉, Fig. 1에서 로봇 핸드와 레이저간의 상관 관계인 'A'의 변환식이 요구되며, 이는 로봇의 이동성과 레이저 측정값 및 원형 지그를 이용하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 좌표계간의 변환 식을 정의하기 위하여 회전 변수와 관련된 4원수(Quaternion)와 병진 변수를 다음과 같이 정의 하였다.

$$A = [Q, T] = [q_0, q_1, q_2, q_3, t_x, t_y, t_z]^T \quad (1)$$

여기에서  $Q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$   
 $T = [t_x, t_y, t_z]^T$

### 2.1 레이저 측정법

레이저 형상 측정법은 레이저 광을 측정 물체에 투영시키고 형상에 따라 변형된 레이저 광을 카메라로 획득하여 레이저 광과 카메라 사이의 기하학적 관계로부터 3차원 좌표를 산출하는 방법이다. Fig.1은 레이저 형상 측정 원리를 나타내고 있으며 삼각 측정법에 의해 레이저 좌표계에 대한 3차원 좌표값은 식(2)로부터 간단히 구할 수 있다.

$$z_l = \frac{bf}{(f \cot \theta + v)}, \quad x_l = \frac{bu}{(f \cot \theta + v)} \quad (2)$$

$$y_l = \frac{bv}{(f \cot \theta + v)}$$

여기에서  $f$ : focal length,  $u, v$ : pixel value

### 2.2 로봇 모델

연구에 사용된 로봇은 6R이며, Fig. 2는 로봇의 기구학적 모델을 보이고 있고 S는 나선 축(screw axis)을 의미한다

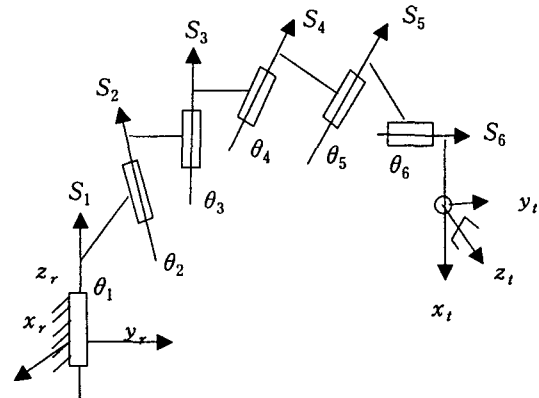


Fig. 2 Kinematic parameters of 6R robot

로봇의 회전 및 병진 변환을 나타내는 정기구학은 식(1)을 각 조인트에 적용하여 연결 체인으로 아

래와 같이 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^i Q &= {}^1 Q \circ {}^2 Q \circ {}^3 Q \circ {}^4 Q \circ {}^5 Q \quad (3) \\ {}^i T &= {}^1 T + {}^1 Q \circ {}^2 T \circ {}^1 Q^* + {}^2 Q \circ {}^3 T \circ {}^2 Q^* \\ &\quad \dots + {}^5 Q \circ {}^5 T \circ {}^5 Q^* \end{aligned}$$

여기에서,  ${}^i Q = \cos(\theta_i/2) + \sin(\theta_i/2)S_i$ ,  $i=1, 2, \dots, 5, t$ .  $\circ$ : 4원수 연산자

### 2.3 원형 지그

핸드에 장착된 레이저 센서의 경우 로봇의 이동에 따른 동일한 물체 윤곽선을 측정하기는 어려움이 따른다. 그래서 본 연구에서는 동일한 물체 윤곽을 얻기 위해서 다음의 Fig. 3과 같은 원형 지그를 사용하였다.

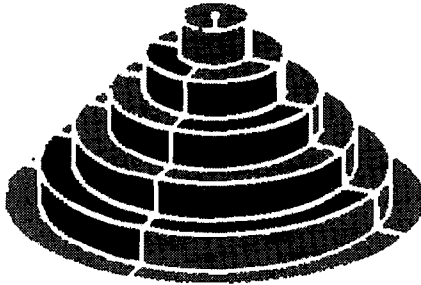


Fig. 3 Circular Jig for calibration

이 원형 지그는 그 중심점에 좌표계 원점을 가지며 레이저 라인 센서의 특성상 90도 각도 계단 형식을 갖추도록 하였다.

### 2.4 레이저와 지그간의 위치 및 방향 보정

아래의 Fig. 4는 레이저 센서와 지그간의 위치 및 방향을 보정하기 위한 변환 그래프를 보인다.

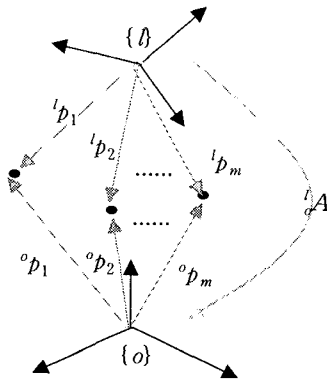


Fig. 4 Localization between Jig and Laser

본 연구에서는 원형의 지그를 이용하였으므로 지그의 중심 좌표계 즉, 물체 좌표계에 대한 측정 점들에 대한 좌표값은 주어진다. 그리고 이들 물체 좌표계 상의 측정 점들에 대한 레이저 좌표계 상에서의 데이터는 앞 절에서 서술한 바와 같이 실제 레이저 측정으로 가능하므로 이들 간의 관계로부터 다음의 과정으로 구한다. Fig. 4에 나타난 벡터 쌍들은 식(4)의 관계로 형성 되어 있으며 레이저와 지그간의 보정 문제는  $Q(q)$ 와  ${}^l T$ 를 추정하는 작업이 된다.

$${}^l p = Q(q) \cdot {}^o p + {}^l T \quad (4)$$

먼저, 회전과 관련된  $Q(q)$ 를 구하고  ${}^l T$ 를 구할 수 있다.  $Q(q)$ 를 얻어내기 위해서는 레이저 좌표계  $\{l\}$ 와 물체 좌표계  $\{o\}$ 에서의 각각의 상태 벡터를 식(5)로 만든다.

$$s_{o,i} = {}^o p_i - {}^o p_{i+1} \quad (5)$$

$$s_{l,i} = {}^l p_i - {}^l p_{i+1} \quad \text{여기서, } i=1, 2, \dots, m-1.$$

식 (5)로부터  $s_{o,i}$ 를  $Q(q)$ 만큼 회전시켜  $s_{l,i}$ 와 일치시키기 위한 방법으로는 이들 간의 상관 행렬 식(6)으로부터 구할 수 있다.

$$L = \begin{bmatrix} k_{11}+k_{22}+k_{33} & k_{32}-k_{23} & k_{13}-k_{31} & k_{21}-k_{12} \\ k_{32}-k_{23} & k_{11}-k_{22}-k_{33} & k_{12}+k_{21} & k_{31}-k_{13} \\ k_{13}-k_{31} & k_{12}+k_{21} & -k_{11}+k_{22}-k_{33} & k_{23}+k_{32} \\ k_{21}-k_{12} & k_{31}+k_{13} & k_{23}+k_{32} & -k_{11}-k_{22}+k_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $k = \sum_{i=1}^{m-1} w_i \cdot s_{o,i} \cdot s_{l,i}^T$ ,  $w_i$ : weight

식(6)으로부터  $Q(q)$ 에 해당되는 단위 쿼터니언은 가장 큰 양의 고유치에 해당하는 고유 벡터  $v = [v_0 \ v_1 \ v_2 \ v_3]$ 가 된다. 이로부터 구하는 회전 각과 회전축은 식(7)과 같다.

$$\theta = 2 \cos^{-1}(v_0) \quad k_x = v_1 \sin^{-1}(\theta/2) \quad (7)$$

$$k_y = v_2 \sin^{-1}(\theta/2) \quad k_z = v_3 \sin^{-1}(\theta/2)$$

$Q(q)$ 가 구하여 지고 나면 이를 이용하여 병진량은 식(8)로 간단히 구할 수 있다.

$${}^i T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i ({}^i p - Q(q) \cdot {}^o p) \quad (8)$$

여기서,  $w_i$ : weight

이상의 레이저와 지그간의 위치와 방향 보정문제는 가상 환경 교정을 위한 기본 과정이다.

### 3. 가상 공간을 위한 외부 파라미터 보정

로봇 핸드에 장착된 레이저 센서의 병진과 회전 인자들은 가상 공간 상에서 레이저 센서를 모델링하는데 기본이 된다. 부착 지그의 설계 사양으로부터 대략적으로 구할 수도 있으나 장착 및 가공 오차 등의 원인으로 가상 공간에서 데이터 측정이나 중첩에 심각한 오류를 유발시킨다. 그러므로, 로봇이 이동했을 경우의 레이저 측정 정보로부터 정밀한 보정을 할 수 있는 방법을 제시 한다.

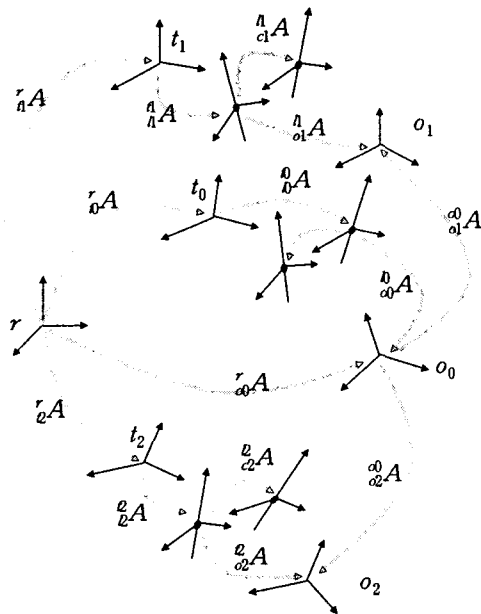


Fig. 5 Loop for extrinsic parameter calibration

위의 Fig. 4는 원형 지그를 작업대에 두고 3번의 로봇을 이동성을 이용하여 레이저 센서로 측정하는 경우의 변환 관계를 표현하고 있다. 이에 대한 폐루프 방정식은 식(9)와 같이 유도할 수 있다.

$${}^1 A \cdot {}^r A \cdot {}^0 A = {}^1 A \cdot {}^1 A {}^0 A {}^0 A \quad (9)$$

$${}^2 A \cdot {}^r A \cdot {}^0 A = {}^2 A \cdot {}^2 A {}^0 A {}^0 A$$

$$\text{여기서, } {}^0 A = {}^1 A = {}^2 A = X$$

윗 식에서  ${}^r A$ ,  ${}^1 A$ ,  ${}^2 A$ ,  ${}^1 A$ ,  ${}^2 A$ ,  ${}^0 A$ ,  ${}^0 A$ ,  ${}^0 A$ ,  ${}^0 A$ 는 앞에서 구한 로봇의 기구학식과 레이저와 지그간의 위치 및 방향 보정 식 및 원형 지그로부터 구할 수 있으므로,  ${}^1 A = {}^2 A = X$ 을 다음의 과정으로 구한다. 식(9)에서  ${}^1 A \cdot {}^r A$ 와  ${}^2 A \cdot {}^r A$ 를  $C_1, C_2$ 로  ${}^1 A {}^0 A {}^0 A$ 과  ${}^2 A {}^0 A {}^0 A$ 를 각각  $D_1, D_2$ 로 두고,  $X$ 로 둔 다음 이를 정리하면 식(10)과 식(11)의 회전 부분과 병진 부분으로 나누어 쓸 수 있다.

$$Q_{C1} \circ Q_X = Q_X \circ Q_{D1} \quad (10)$$

$$Q_{C2} \circ Q_X = Q_X \circ Q_{D2}$$

$$Q_{C1} T_X + T_{C1} = Q_X T_{D1} + T_X \quad (11)$$

$$Q_{C2} T_X + T_{C2} = Q_X T_{D2} + T_X$$

여기서,

$$Q_{C1,2} = C_0 + \vec{C}_{1,2} = \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2)S_{C1,2}$$

$$Q_{D1,2} = D_0 + \vec{D}_{1,2} = \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2)S_{D1,2}$$

$$Q_X = X_0 + \vec{X} = \cos(\omega/2) + \sin(\omega/2)S_X$$

식(10)에 4원수 연산을 수행하면 아래의 식(12)가 유도된다.

$$\begin{aligned} & [C_0 X_0 - \vec{C}_1 \cdot \vec{X}, (C_0 \vec{X} + X_0 \vec{C}_1 + \vec{C}_1 \times \vec{X})] \\ & = [X_0 D_0 - \vec{X} \cdot \vec{D}_1, (X_0 \vec{D}_1 + D_0 \vec{X} + \vec{X} \times \vec{D}_1)] \\ & [C_0 X_0 - \vec{C}_2 \cdot \vec{X}, (C_0 \vec{X} + X_0 \vec{C}_2 + \vec{C}_2 \times \vec{X})] \\ & = [X_0 D_0 - \vec{X} \cdot \vec{D}_2, (X_0 \vec{D}_2 + D_0 \vec{X} + \vec{X} \times \vec{D}_2)] \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서 첫 번째 항목은 스칼라 부분이고 두 번째 항목은 벡터 부분으로 각각의 성분끼리 동치되어야 한다. 이로부터 식(13)을 유도할 수 있다.

$$\tan(\omega/2)(S_{C1} + S_{D1}) \times S_X = S_{D1} - S_{C1} \quad (13)$$

$$\tan(\omega/2)(S_{C2} + S_{D2}) \times S_X = S_{D2} - S_{C2}$$

식(13)을 유사 대칭 행렬 형태로 바꾸면 아래의

식(14)와 같이 행렬 형태로 표현 할 수 있다. 식(14)는 미지수 3개에 방정식 4개인 형태의 식으로 전개된다. 따라서 최소 자승법으로 해를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Omega(S_{C1} + S_{D1}) \\ \Omega(S_{C1} + S_{D1}) \end{bmatrix} [Z] = \begin{bmatrix} \Omega(S_{D1} - S_{C1}) \\ \Omega(S_{D2} - S_{C2}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad Z = \tan(\omega/2) S_X$$

이로부터 X의 회전 인자 성분을 계산하는 식은 (15)와 같다.

$$S_X = Z/\|Z\|, \quad \omega = 2 \tan^{-1}(\|Z\|) \quad (15)$$

회전 인자가 먼저 구하여 지고 나면 나머지 병진 인자는 식(11)을 식 (16)으로 정리하여 계산할 수 있게 된다.

$$\begin{bmatrix} \Omega(S_{C1} - I) \\ \Omega(S_{C2} - I) \end{bmatrix} [T_X] = \begin{bmatrix} Q_X \cdot T_{D1} - T_{C1} \\ Q_X \cdot T_{D2} - T_{C2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

#### 4. 실험 및 결과

##### 4.1 외부 파라미터 보정

본 연구에서 제안한 가상 센서 외부 파라미터 보정 방법 알고리즘을 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행하여 그 성능 실험 하였다. A를 x축으로 -1.2도, y축으로 2.5도, z축으로 3.5도로 임의 회전시키고 x, y, z각각의 병진량을 80.77mm, -15.3mm, -120.23mm로 설정하여 시뮬레이션 하였다. 아래의 Fig. 6은 시뮬레이션으로 구한 3번의 로봇 끝단의 위치와 레이저 센서의 위치와 물체 좌표계를 나타낸다.

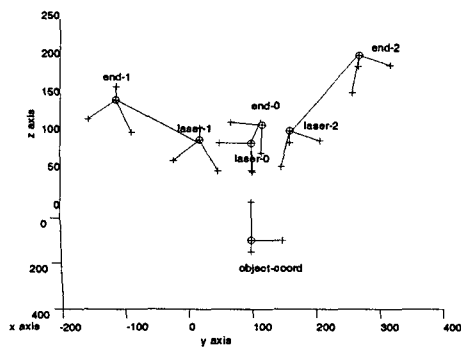


Fig. 6 Configuration of computer simulation

이를 이용하여 구한 시뮬레이션 값은 다음과 같이 정확하게 나옴을 확인 할 수 있었다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.9971 & -0.063 & 0.042 & 80.770 \\ 0.062 & 0.9978 & 0.0236 & -15.3 \\ -0.043 & -0.0209 & 0.9988 & -120.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

##### 4.2 가상 공간 모델링

핸드-아이 레이저 센서를 사용하는 가상 공간 시스템은 우선적으로 실제 작업 공간상의 로봇과 작업 대상물 및 레이저 센서가 가상 환경상에서 모델링 되어야 한다. 일반적으로 로봇 모델이나 작업 대상물에 대한 정보는 CCD 카메라를 이용하여 중첩 시키는 방법을 사용하지만 본 연구에서는 카메라 영상을 처리하는 시간과 레이저 센서의 특성을 고려하여 로봇이나 작업 대상물에 대한 3차원 정보는 CAD도면을 사용하였다. 실험에 사용된 레이저 센서의 사양은 Table 1과 같고 실험 장치는 Fig. 7에 나타내었다.

Table 1 Specification of laser sensor

사양	
영상분해능	640×480
초점 거리	1000
베이스거리	250mm
레이저 각도	15°
측정 정밀도	0.3mm/pixel

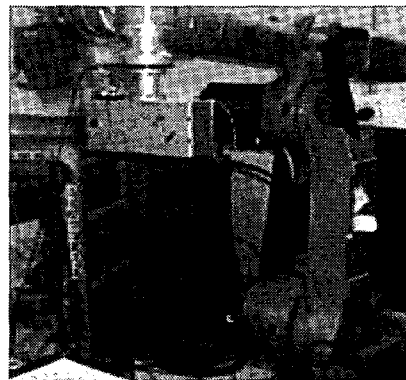


Fig. 7 System configuration

실제 실험에 있어서도 3번의 로봇 측정을 수행

하였고 측정 데이터를 이용하여 지그와 레이저 센서간의  ${}^1A, {}^4A, {}^2A$ 를 선행하였다. 이를 바탕으로 하여 가상 공간 외부 파라미터 보정을 수행하였다. 실험으로 구한 회전 각도는  $\omega=0.079$ , 나선 회전의 축  $S_x=(0.2817, -0.5431, -0.7910)$ 이고,

$T_x=(-84.83, -17.83, -117.039)$ mm 였다.

아래의 Fig. 8은 본 연구에서 제시한 원형 지그를 이용한 레이저 센서 가상 공간 보정 방법으로 즉, 앞에서 구한 외부 파라미터를 이용하여 가상 공간 상에 모델링 한 결과이다. 이는 컴퓨터 그래픽 환경 상에서 로봇 TCP 끝에 새로운 노드(node)를 하나 설정함으로써 구현하였다. 레이저는 직선으로 모델링 하였고 카메라는 새로운 뷰(view) 포인트를 추가하여 로봇의 움직임으로 인한 원하는 뷰를 획득할 수 있도록 하였다.

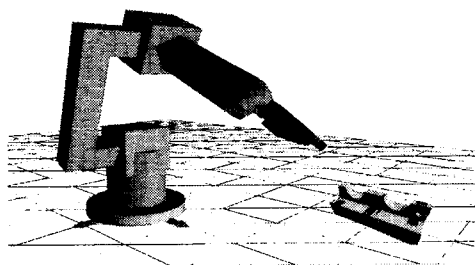


Fig. 8 Modeling of virtual laser sensor

다음의 Fig. 9는 임의의 주어진 모델에 대하여 가상 공간 레이저 센서와 실제 작업 환경으로부터 측정된 데이터를 가상 공간 상에서 중첩한 결과를 보이고 있다.

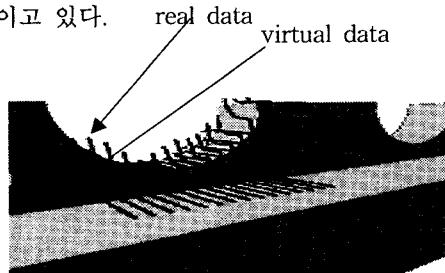


Fig.9 Augmentation real and virtual data

Fig. 10은 중첩 결과에서 임의의 한 개 레이저 라인에 대하여 가상 측정 결과와 실제 측정 결과

사이의 오차를 구한 그래프이며 최대1mm정도의 오차를 보이고 있다. 이는 카메라 자체의 왜곡이나 로봇 기구학 오차 등으로 인한 것으로 판단된다.

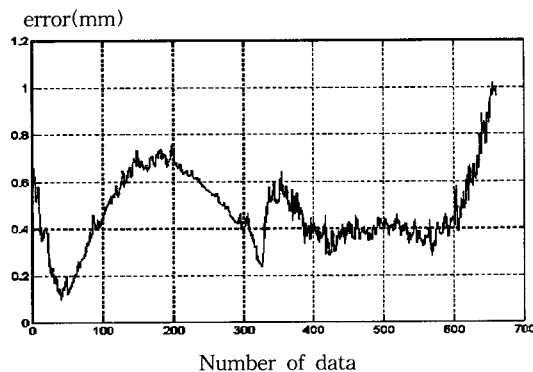


Fig. 10 Error between real and virtual data

이상의 결과들로부터 본 논문에서 제시한 원형 지그를 이용한 핸드-아이 레이저 시스템의 외부 파라미터 보정이 보다 효과적으로 센서를 모델링 할 수 있고 또한 가상 공간에서 중첩할 수 있음을 확인 할 수 있다. 향후 로봇 자체 보정이나 카메라의 왜곡을 고려한 에피폴라 기하학 등에 대한 추가 연구가 진행될 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 가상 공간 상에서 핸드-아이 레이저 로봇 시스템을 보다 정확히 모델링 할 수 있도록 외부 파라미터를 정확히 보정하는 방법을 제시하였다. 원형 지그를 이용하여 기존의 복잡한 외부 파라미터 보정 방법을 단순화시켜 가상 환경 교정이나 3차원 그래픽 중첩을 쉽게 이룰 수 있도록 하였다.

이는 원격 작업에 있어서 정확한 교정을 수행하도록 하여 실제 환경에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있도록 할뿐만 아니라 작업 환경에 변화가 발생 하였을 때 최신의 것으로 갱신할 수 있는 신속하고 빠른 방법이다. 실험을 통하여 제시된 방법의 타당성을 확인 하였다.

## 후기

본 논문은 2002년도 BK21사업에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

1. Gerard T. McKee and Paul S. Schenker, "Human-robot cooperation for automated viewing during teleoperation," In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.1, pp. 124-129, 1995.
2. M. Bajura and U. Neumann, "Dynamic registration correction in video-based augmented reality systems," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 15, pp.52-60, 1995.
3. Chou, J.C.K, "Quaternion Kinematics and Dynamic Differential Equations," IEEE Trans. Robotics & Automation, Vol.8, pp.53-64, 1992
4. R.K. Lens, R.Y.Tsai, "Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology," Proc. IEEE Conf. On Robotics and Automation, Vol.1, pp.68-75, 1987
5. A. Krupa, J. Gangloff, M. de mathelin, C. Doignon, G. Morel, L. Soler, J. Leroy and J. Marescaux, "Autonomous Retrieval and Positioning of Surgical Instruments in Robotized laparoscopic Surgery Using Visual Servoing and Laser Pointers," IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp. 3769-3774, 2002