

논문 99-8-1-11

로봇의 3차원 작업을 위한 효율적 센서위치의 결정기법 :
스테레오 카메라를 중심으로
도용태

A Technique to Efficiently Place Sensors for Three-Dimensional
Robotic Manipulation : For the Case of Stereo Cameras

Yongtae Do

요약

본 논문에서는 로봇의 3차원 작업을 위한 센서로 사용된 스테레오 카메라의 위치 결정 문제를 다룬다. 공통의 기준선상에 평행한 시선을 가지도록 설치된 스테레오 카메라의 모델이 주어진 후, 보정에 사용된 제어점들의 불확실성에 둔감하고 로봇의 반복정밀도를 고려한 오차 조건을 만족시킬 수 있도록 센서의 계측거리가 결정된다. 두 카메라간의 간격은 3차원 위치 오차와 스테레오 영상좌표 오차와의 관계를 고려하여 이들이 최소화될 수 있도록 결정하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 기법들과는 달리 3차원의 문제를 피계측체의 모델링 과정이나 복잡한 제한조건없이 접근함으로써 일반적이며, 모의실험을 통하여 유용함을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper deals with the position determination problem of stereo camera systems used as a sensor for 3D robotic manipulation. Stereo cameras having parallel rays of sight and been set up on the same baseline are assumed. The distance between the sensor and the space measured is determined so as to get insensitive parameters to the uncertainty of control points used for calibration and to satisfy the error condition set by considering the repeatability of the robot. The baseline width is determined by minimizing the mutual effect of 3D positional error and stereo image coordinate error. Unlike existing techniques, the technique proposed here is developed without complicated constraints and modelling process of the object to be observed. Thus, the technique of this paper is more general and its effectiveness is proved by simulation.

1. 서 론

로봇은 대표적인 산업용 자동화기기로 재프로그래밍 가능성(reprogrammability)에 기반한 융통성있는(flexible)

* 대구대학교 정보통신공학부 (School of Computer & Communication Eng., Taegu Univ.)

※ 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.
<접수일자 : 1999년 1월 7일>

동작을 주요한 특징으로 한다. 로봇의 이러한 특징은 센서에 의한 작업공간과 피작업체에 대한 빠르고 신뢰성있는 정보의 획득에 의존하는 바 크며, 특히 시각(vision)은 로봇의 외부센서들(external sensors)중 가장 중요한 요소로서 오랫동안 주요 연구의 대상이 되어 왔다.

로봇시각용 센서로는 전자식 카메라가 대체로 사용되고 있는데, 근래 급속히 발전한 반도체 및 컴퓨터 기

술에 힘입어 고성능의 카메라와 영상처리회로가 개발, 활용되고 있다. 그러나 시각센서의 하드웨어적 발전에 비해 그 처리기술과 활용능력은 여전히 많은 연구의 여지가 있다. 특히 최근에는 물리적 센서를 적절히 구성하고 설치하여 주어진 기능을 효율적으로 사용할 수 있게 하는 이른바 센서 계획(sensor planning)의 문제가 중요하게 대두되고 있다^[1]. 기존의 연구들에서는 대체로 센서의 파라미터들은 주어진 조건일 뿐 제어 가능한 영역에 포함되지 않는 경향이 있었으나, 센서를 단순한 수단으로서만이 아니라 제어의 목적으로서 고려할 필요성이 증대되고 있다.

센서의 제어는 센서의 파라미터를 목적에 적합하게 능동적으로 조정함을 뜻하며, 특히 계측 위치는 시각을 비롯한 거의 모든 센서 장치들의 설계와 설치에 있어서 가장 기본적인 파라미터이다. Durrant-Whyte^[2]가 지적한 바와 같이 센서의 위치는 계측의 불확실성에 민감하게 작용하는 요소이지만, 지금까지는 전문가의 휴리스틱한 기준에 의존하여 시행착오를 거치면서 결정되는 경우가 대부분이었다. 이러한 방식은 시간과 노력면에서 소모적이며 환경의 변화에도 효율적으로 대처할 수 없다는 문제가 있으며, 잘못된 센서의 배치는 곧바로 계측의 실패(sensor failure)로 이어질 수 있고, 주어진 센서의 기능을 효율적으로 활용한다는 보장도 불가능하다.

상기의 사실들을 배경으로 본 논문에서는 로봇의 일반적인 3차원 작업을 위해 사용된 스테레오 카메라 장치의 위치 결정에 대한 문제를 다룬다. 이는 구조화되어 있지 못한(unstructured) 환경에서 작업하는 로봇에 있어 3차원 위치계측은 필연적이며, 스테레오 카메라는 로봇에 있어 가장 일반적인 3차원 센서 장치임에 따른 것이다. 뿐만 아니라 시각은 로봇의 감각기능 중 가장 상위의 단계(high level)에 있으며, 여타의 센서에 비해 그 관측 위치의 결정이 복잡하며, 결정된 위치가 계측의 성능에 중대한 영향을 끼치게 된다. 더욱이 기존의 스테레오 시각에 대한 연구는 주로 정합(stereo matching)과 보정(calibration)의 문제에 집중되어 왔으나, 스테레오의 위치 설정은 오히려 이에 선행하여 정합과 보정의 성능을 좌우할 수 있는 요소가 된다.

시각 센서의 파라미터를 결정하는 작업은 이처럼 중요한 문제임에도 관련 연구는 여러 가지로 부족한 실정에 있다. Cowan^[3]은 센서 위치결정에 관한 초기 연구를 행함에 있어, 목표물의 모델을 사용하여 광학적

조건을 만족시키면서 카메라의 가시영역내에 목표물을 위치시키는 연구의 결과를 발표하였다. 이들의 연구결과는 후에 조명장치의 위치선정에 대한 연구로 확장되었고^[4], Abrams^[5]와 Tarabanis^[6]의 연구도 제한조건과 대상체의 모델에 기초한 카메라 위치의 결정법이라는 점에서 같은 부류로 구분될 수 있을 것이다. 한편 Cameron^[7]은 시각센서의 기하학적 파라미터 결정을 위한 확률적 기법을 제안하였다. 그들이 사용한 방법은 2차원 작업공간에 대한 확률적 membership 함수와 각 위치에 대한 utility 함수를 함께 사용하여 Bayes 결정법에 의해 확률적 의미에서 최적인 위치를 결정하는 것이었다. Zhang^[8]은 Cameron의 연구에서 고려하지 않았던 센서의 불확실성을 주요 고려인자로 하고, 다중센서일 경우의 문제를 여전히 2차원의 영역에서 카메라의 방향만을 제어 파라미터로 하여 다룬 바 있다. Sakane^[9]은 generate-and-test 기법을 활용하여 센서 파라미터 설정 형상(configuration)이 제한적으로 주어졌을 때 이들로부터 조건에 적절하다고 여겨지는 것을 선택하는 기법을 제시하였으나, BMA(British Museum Algorithm)로 분류할 수 있는 기법들에서 일반적으로 나타날 수 있는 문제들, 즉 주어진 조건을 충분히 활용하지 못할 수 있다는 점과 문제의 영역이 방대해질 수 있다는 우려가 있다.

본 논문에서는 기존 연구들에서 흔히 차후 과제로 유보되어온 3차원 계측의 문제를 피계측체에 대한 특별한 제한조건이나 모델링 과정 없이 보정에 사용된 제어점들(control points)과 측정된 스테레오 영상좌표의 불확실성(uncertainty)을 해석하는 방식으로 접근한다. 따라서 그 결과는 대부분의 스테레오 카메라에 의한 3차원 계측 문제에 적용할 수 있을 만큼 일반적이다. 논문의 구성은 우선 II장에서 이후 사용할 3차원 계측모델을 전개하고, III장에서 카메라의 위치결정법을 제시하며, IV장에서 모의실험과 그 결과를 보이고, V장에서 결론을 내리는 것으로 하였다.

II. 스테레오 시각에 의한 3차원 위치계측의 모델

그림 1에서와 같이 동일한 기준선(baseline) 상에 평행한 시선(ray of sight)을 가지도록 설치된 스테레오 카메라 장치를 고려한다. 세계좌표계(world coordinate system) (W)내 임의의 한 점 $P=(x,y,z)$ 는 두 카메라 좌표계 (C_1)과 (C_2)에서 각각 $P_{C1}=(x_1,y_1,z_1)$ 과

$P_{C2}=(x_2, y_2, z_2)$ 로 표현되며, 이들은 다시 아래의 식(1)과 같이 각각 (u_1, v_1) 과 (u_2, v_2) 로 투영된다. 단, 식에서 f_1 과 f_2 는 각 카메라의 초점거리(focal length)이다.

$$u_1 = -f_1 \frac{x_1}{z_1}, \quad v_1 = -f_1 \frac{y_1}{z_1} \quad (1.a)$$

$$u_2 = -f_2 \frac{x_2}{z_2}, \quad v_2 = -f_2 \frac{y_2}{z_2} \quad (1.b)$$

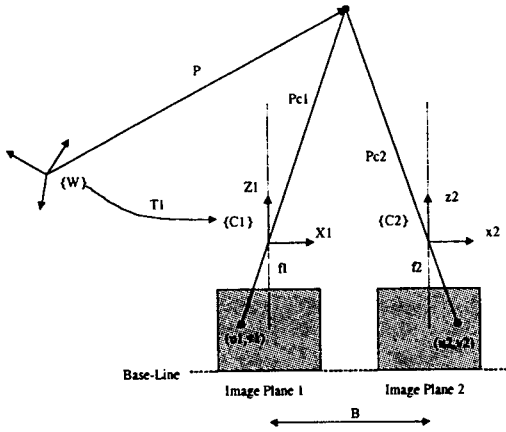


그림 1. 스테레오 시각에 의한 3차원 위치 계측 모델
Fig. 1. Stereoscopic 3d position measurement model

설치의 조건으로부터 $x_2 = x_1 - B$, $y_1 = y_2 \equiv y_c$, $z_1 = z_2 \equiv z_c$, $v_1 = v_2 \equiv v$ 의 관계를 얻을 수 있으며, $f_1 = f_2 \equiv f$ 라고 가정하면 쉽게 식 (2)에 이른다. 여기서 B 는 두 카메라간의 기준선상의 간격이다.

$$x_1 = \frac{Bu_1}{u_1 - u_2} \quad (2.a)$$

$$x_2 = \frac{Bu_2}{u_1 - u_2} \quad (2.b)$$

$$y_c = \frac{Bv}{u_1 - u_2} \quad (2.c)$$

$$z_c = \frac{-Bf}{u_1 - u_2} \quad (2.d)$$

식(3)에서와 같이 $\{W\}$ 에서 $\{C_i\}$ 으로의 동차변환(homogeneous transformation)을 T_1 이라 하면, 이는 3개의 회전각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 로부터 결정되는 회전행렬의 요소

$(r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33})$ 와 3개의 전이(translation) 요소 t_x, t_y, t_z 를 포함한 4×4 행렬이다.

$$P = T_1 P_{C_i} \quad (3)$$

$$\text{단, } T_1 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이를 이용하면 스테레오 카메라에 의해 관측된 임의의 3차원 점의 $\{W\}$ 에서의 표현을 아래의 식(4)와 같이 얻는다.

$$x = \frac{\{(Br_{11} + t_x)u_1 + (-t_x)u_2 + (Br_{12})v + (-r_{13})fB\}}{(u_1 - u_2)} \quad (4.a)$$

$$y = \frac{\{(Br_{21} + t_y)u_1 + (-t_y)u_2 + (Br_{22})v + (-r_{23})fB\}}{(u_1 - u_2)} \quad (4.b)$$

$$z = \frac{\{(Br_{31} + t_z)u_1 + (-t_z)u_2 + (Br_{32})v + (-r_{33})fB\}}{(u_1 - u_2)} \quad (4.c)$$

식 (4)를 아래의 식(5)과 같이 다시 쓰고

$$x = \frac{(k_{x1}u_1 + k_{x2}u_2 + k_{x3}v + k_{x4})}{(u_1 - u_2)} \quad (5.a)$$

$$y = \frac{(k_{y1}u_1 + k_{y2}u_2 + k_{y3}v + k_{y4})}{(u_1 - u_2)} \quad (5.b)$$

$$z = \frac{(k_{z1}u_1 + k_{z2}u_2 + k_{z3}v + k_{z4})}{(u_1 - u_2)} \quad (5.c)$$

$n(>4)$ 개의 제어점(control points)과 스테레오 영상좌표들로부터 식(6)을 얻게 되면, 미지의 파라미터들은 과결정되어(over-determined) 있으므로 제곱오차가 최소가 되도록 하여 구해질 수 있다. 또, 필요한 경우 T_1 및 B 와 f 는 구해진 파라미터들로부터 부록에서와 같은 방식으로 계산될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} u_{(1)1} & u_{(1)2} & v_{(1)} & 1 \\ u_{(2)1} & u_{(2)2} & v_{(2)} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{(n)1} & u_{(n)2} & v_{(n)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{x1} & k_{y1} & k_{z1} \\ k_{x2} & k_{y2} & k_{z2} \\ k_{x3} & k_{y3} & k_{z3} \\ k_{x4} & k_{y4} & k_{z4} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= (u_1 - u_2) \begin{pmatrix} x_{(1)} & y_{(1)} & z_{(1)} \\ x_{(2)} & y_{(2)} & z_{(2)} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{(n)} & y_{(n)} & z_{(n)} \end{pmatrix}$$

단, $u_{(i)1}, u_{(i)2}, v_{(i)}$ 는 제어점 $p_{(i)}(x_{(i)}, y_{(i)}, z_{(i)})$,

$1 \leq i \leq n$, 의 영상좌표

III. 스테레오 시각센서의 위치 결정

1. 보정의 불확실성을 고려한 계측위치

스테레오 카메라를 사용하여 3차원 위치를 측정하기 위해서는 우선 카메라 장치가 보정되어야 한다. 보정의 오차는 곧바로 3차원 위치측정의 오차로 결과되며^[10], 보정은 스테레오 정합을 위한 선행작업이 되므로^[11], 보정의 정확도를 높이는 것은 매우 중요한 작업이다. 그러나 본 논문은 보정 그 자체보다는 카메라 위치의 결정이 목적이므로, 보정에 관한 자세한 이론 전개는 약한다. 다만 보정에 사용된 제어점들에 실제적으로 존재하는 불확실성이 계측의 정확도에 영향을 작게 미칠 수 있도록 카메라의 설치 조건을 구한다.

스테레오 시각장치의 보정을 위한 식(6)은 임의의 3차원 위치좌표 $p = (x, y, \text{or } z)$ 에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(u_1 \ u_2 \ v \ 1)(k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4)^T = (u_1 - u_2)p \quad (7)$$

이 식에서 3차원 좌표의 변화에 대한 파라미터의 변화를 구하여 보면 다음과 같다.

$$\partial k_1 / \partial p = (u_1 - u_2) / u_1 \quad (8.a)$$

$$\partial k_2 / \partial p = (u_1 - u_2) / u_2 \quad (8.b)$$

$$\partial k_3 / \partial p = (u_1 - u_2) / v \quad (8.c)$$

$$\partial k_4 / \partial p = (u_1 - u_2) \quad (8.d)$$

이로부터 3차원 좌표의 변화 Δp 에 대한 파라미터의 변화 Δk 는 $|u_1 - u_2|$ 가 작을수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 식(2.d)로부터 얻어진 다음의 식으로부터,

$$u_1 - u_2 = -fB/z_c \quad (9)$$

피계측 공간내 존재하는 제어점들과 시각 센서간의 거리, 즉 z_c 가 클수록 파라미터는 제어점의 오차에 둔감한 결과가 얻어짐을 알 수 있다. 부가적으로 계측거리가 길어지면 제어점의 영상좌표 분포가 축소되는 결과가 초래되고, 이는 렌즈에 의한 왜곡이 영상의 광학적 중심(optical center)으로부터 멀어질수록 커지는 효과

가 있음^[12]을 고려할 때 광학적 왜곡이 보정의 정확도에 끼치는 영향을 줄일 수 있게 하는 조건도 된다. 식(9)를 결정짓는 나머지 요소들 중 f 는 고정된 값이며, B 는 다음 절에서 그 결정법을 논한다.

2. 기준선 간격의 결정

앞 절에서는 불확실성이 존재하는 보정환경에서 피계측 공간에 대한 카메라 장치의 상대적 위치에 대하여 해석하였다. 이어서 본 절에서는 같은 상황에서 두 카메라간 간격의 결정에 대해서 해석한다.

우선 해석을 간편하게 하기 위하여 제어점들의 오차는 주로 이들의 z_c 좌표의 오차에 의해 지배받는다고 가정한다. 이는 두 가지 사실에 의해 뒷받침될 수 있다. 첫째로 피계측 공간의 폭이 시각센서로부터의 거리에 비해 충분히 작을 때 이러한 가정은 사실이 된다.

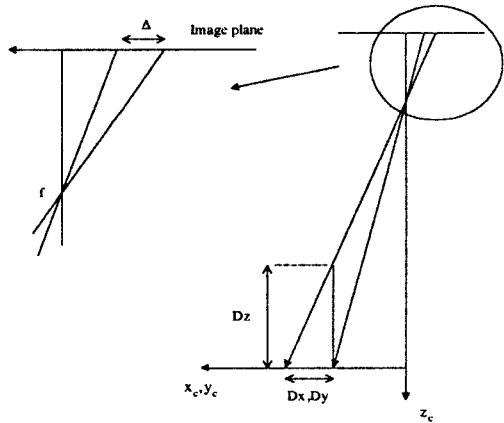


그림 2. 깊이(z_c) 오차와 너비(x_c, y_c) 오차

Fig. 2. Errors in depth (z_c) and width (x_c, y_c)

그림 2에서 볼 수 있듯이 피계측점까지의 거리가 상대적으로 길 때, 영상좌표의 오차 Δ 에 해당하는 z_c 좌표의 오차 D_z 는 x_c 나 y_c 좌표의 오차 D_x, D_y 에 비해 크다. 또한 카메라의 관측영역(field of view)은 사용된 CCD 소자의 크기에 의해 제한을 받으며, 특히 스테레오 카메라의 계측영역은 두 카메라 관측영역의 교집합이므로 카메라로부터의 거리보다 통상 훨씬 작다. 특히 로봇 시각으로 사용될 경우 로봇의 말단동작부(end-effector)에 카메라가 장착된 경우를 제외하고는 로봇의 동작공간 밖에 카메라가 설치되므로 가정은 성

림하게 된다. 둘째로 보정을 위한 제어점과 영상좌표는 통상 보정판(calibration plane)에 다수의 점들을 표시하고 이를 카메라 장치 앞 몇몇 위치로 이동하면서 촬영하는 방식으로 얻어지는 것이 보통이다. 이 경우 평판상의 제어점은 플롯터등을 사용하여 정밀하게 표시할 수 있으며, 설혹 있을 수 있는 오차도 다수의 점들이 사용되므로 상쇄될 수 있으나, 제어판의 움직임은 상대적으로 덜 정밀하며, 몇몇 위치만 사용되므로 오차 상쇄의 가능성도 작다.

만약 임의의 제어점의 z_c 좌표가 오차인 D_z 를 포함하고 있다면, 이점의 영상좌표는 이로 말미암은 $(\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta v)$ 의 요소를 가지게 된다. $z_c + D_z$ 에 의한 영상좌표는 식(1)로부터 아래 식과 같이 표시된다.

$$u_1 + \Delta u_1 = -fx_1 / (z_c + D_z) \quad (10.a)$$

$$u_2 + \Delta u_2 = -f(x_1 - B) / (z_c + D_z) \quad (10.b)$$

$$v + \Delta v = -fy_c / (z_c + D_z) \quad (10.c)$$

여기서 $z_c \gg D_z$ 의 조건을 사용하여 영상좌표 오차의 제곱합을 근사화하면 식(11)이 얻어진다.

$$\Delta u_1^2 + \Delta u_2^2 + \Delta v^2 \approx f^2 D_z^2 (2x_1^2 + y_c^2 - 2x_1 B + B^2) / z_c^4 \quad (11)$$

식 (11)을 최소화시킬 수 있는 B 의 조건은 이에 대한 편미분으로부터

$$B = x_1 \quad (12)$$

과 같이 얻어진다. B 에 대한 식(12)는 제어점의 오차에 대해 영상좌표의 오차를 최소화하는 조건이며, 보정 후에는 역으로 영상좌표로부터 3차원 위치의 계속오차를 최소화시킬 수 있는 조건이 된다.

3. 정밀도 조건

보정시 제어점들의 불확실성에 강건한 파라미터의 결정을 위해서는 피계측 공간과 스테레오 시각장치가 가능한 멀어야 한다는 III.1절의 결과는 측정의 정밀도(precision)나 해상도(resolution)를 고려할 때 바람직하

지 못할 수 있다. 즉, 카메라와 피측정체와의 거리가 크면 클수록 계측의 정밀도가 낮아지는 것은 당연한 사실이므로, 식(9)로부터 얻어진 z_c 에 대한 결론은 시각장치가 사용되어진 로봇의 작업에서 요구되어지는 정밀도 조건을 만족시키는 범위안에서만 유효할 수 있다.

로봇 동작의 정밀도를 결정하는 요소들 중 가장 중요한 것은 반복정밀도(repeatability)이므로^[13,14], 이는 로봇을 위해 사용된 센서 오차의 허용 한계를 결정하는 기준이 될 수 있다. II장에서 서술된 스테레오 시각장치의 기능을 고려할 때, 그림 3에서와 같이 영상좌표의 불확실성(Image Region of Uncertainty; IRU)은 3차원 공간에서의 불확실성(Spatial Volume of Uncertainty; SVU)으로 나타난다. 본 절에서는 로봇의 반복정밀도를 고려할 때 허용되는 SVU에 대한 카메라의 위치를 결정한다.

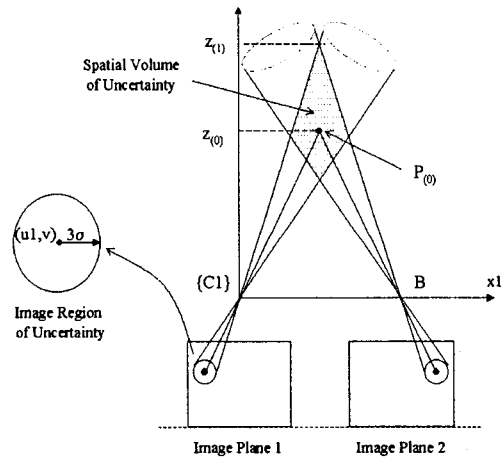


그림 3. 스테레오 영상에서의 오차에 의한 3차원 위치 계측의 오차

Fig. 3. 3D positional measurement error due to the errors of stereo images

앞 절에서 사용된 가정이 계속 유효하다고 가정하면, 그림 3에서 오차가 없는 경우의 계측점 $P_{(0)}$ 로부터 SVU를 구성하는 변들사이의 최대 거리는 x_c 나 y_c 보다 z_c 상에 존재하므로, 최악의 경우에도 이 길이가 로봇의 반복정밀도를 정의하는 구의 반지름보다 충분히 작도록 센서의 위치를 결정되면 된다.

만약 부화소(subpixel) 단위로 측정된 영상좌표의 오차를 $\Delta i = (\Delta u_1, \Delta u_2, \text{ or } \Delta v)$ 라 하면 이들은 서로

독립이며 평균이 영(zero)이고 표준편차가 σ 인 정규분포를 이룬다는 가정이 성립한다^[15]). 이 경우 각 영상 좌표에 대한 오차의 최대범위는 $\pm 3\sigma$ 로 볼 수 있으며, 그림 3의 최대 오차는 $z_{(1)}$ 과 $z_{(0)}$ 사이의 거리가 된다. 이 두 좌표값은 식(2.d)에서 $(u_1+3\sigma, u_2-3\sigma)$ 와 (u_1, u_2) 에 의해 각각 얻을 수 있는 값이므로 다음의 식에 이른다.

$$z_{(1)} - z_{(0)} = (6Bf\sigma) / \{(u_1 - u_2)(u_1 - u_2 + 6\sigma)\} \quad (13)$$

식 (13)으로 얻어진 길이는 로봇의 정밀도를 고려할 때 요구되어지는 센서 계측오차의 임계치(threshold)인 임의의 값 a 보다 작아야 하므로 아래의 식을 얻을 수 있고,

$$(6Bf\sigma) / \{(u_1 - u_2)(u_1 - u_2 + 6\sigma)\} < a \quad (14)$$

식(2.d)를 사용하면 z_c 에 대한 조건을 얻는다.

$$(6\sigma z_c^2) / (Bf - 6\sigma z_c) < a \quad (15)$$

식(15)을 만족시키는 z_c 는 다음과 같으며,

$$z_c < (-a \pm \sqrt{a^2 + 2aBf/3\sigma}) / 2 \quad (16)$$

카메라로부터 피계측체까지의 거리가 음이 될 수 없으며 $2aBf \gg 3\sigma$ 이고 통상 $a \leq 1$ 임을 이용하면 근사적으로

$$z_c < \sqrt{2aBf/3\sigma} / 2 \quad (17)$$

과 같은 결론을 얻는다.

1) 만약 영상좌표가 화소단위로 측정될 경우 오차는 \pm 화소규격/2의 범위 안에서 균등분포 (uniform distribution)하고 있다고 가정할 수 있으나^[16], 본 논문에서는 정규분포의 가정을 사용하면서도 오차의 최대 범위를 고려하므로 확률적 가정만 다를 뿐 최대오차에 대한 접근이라는 점에서 차이가 없게 된다.

4. 절대위치의 설정

지금까지는 피계측 공간과 시각 센서장치, 그리고 카메라 상호간의 상대적 위치 조건을 결정하였다. 이체는 3차원 위치의 기준이 되는 세계좌표계(world frame) $\{W\}$ 에 대한 조건이 존재하는지 살펴본다. 즉, 그림 1에서와 같은 모델에서 카메라의 기준좌표계에 대한 위치에 따라 임의의 카메라 좌표계 $\{C\}$ 에서의 오차가 $\{W\}$ 에서 어떠한 값으로 나타나는가를 해석한다.

$\{C\}$ 좌표계에서 오차에 의해 3차원 위치의 계측치가 $(x_c + D_x, y_c + D_y, z_c + D_z)$ 로 나타나면, 이는 $\{W\}$ 에서 다음의 식과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} x + \Delta x &= r_{11}(x_c + D_x) + r_{12}(y_c + D_y) + r_{13}(z_c + D_z) + t_x \\ y + \Delta y &= r_{21}(x_c + D_x) + r_{22}(y_c + D_y) + r_{23}(z_c + D_z) + t_y \\ z + \Delta z &= r_{31}(x_c + D_x) + r_{32}(y_c + D_y) + r_{33}(z_c + D_z) + t_z \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $\{r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}\}$ 와 $\{t_x, t_y, t_z\}$ 는 $\{C\}$ 와 $\{W\}$ 사이에서 정의되는 동차변환의 회전요소와 전이요소이다. 회전요소들 사이에 존재하는 직교단위성(orthonormality)[12,14]을 이용하면 오차에 대한 아래 식(19)를 얻을 수 있다. 즉, 카메라 좌표계에서 전파되는 기준좌표계에서의 오차는 카메라의 절대위치와 무관하다.

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = D_x^2 + D_y^2 + D_z^2 \quad (19)$$

IV. 모의실험의 결과

본 논문에서 제안된 방식을 점검하기 위하여 모의실험이 행하여 졌다. 그림 4에서와 같이 기준선을 따라 평행한 시선을 가지도록 배치된 두 대의 카메라가 가정되었다. 실험에 사용된 카메라의 광학적 파라미터로 초점거리 $f=20[\text{mm}]$ ²⁾와 화소규격 0.015×0.015 의 값이 사용되었다.

우선 세계좌표계 $\{W\}$ 에서 $350 \leq x \leq 650$, $350 \leq y \leq 650$ 의 범위에 있는 점들과 이들 점들이 위치하는 보정판이 $z = -100, -50, 0, 50, 100$ 위치에서 스테레오 카메라에 의해 촬영되었을 때의 영상

2) 이하 모든 길이 단위도 동일한 단위임.

좌표들을 식(1)과 같은 이상적인 투영의 방정식에 의하여 구하였다. 이들 중 $z = -100, 0, 100$ 의 위치에 있는 20개의 점들은 제어점으로 가정하여 시스템의 보정에 사용하고, 나머지 $z = -50, 50$ 에 존재하는 98개의 점들을 시험용으로 사용하였다. 카메라 좌표계 $\{C_i\}$ 과 $\{W\}$ 간의 회전은 존재하지 않는다고 가정하였다.

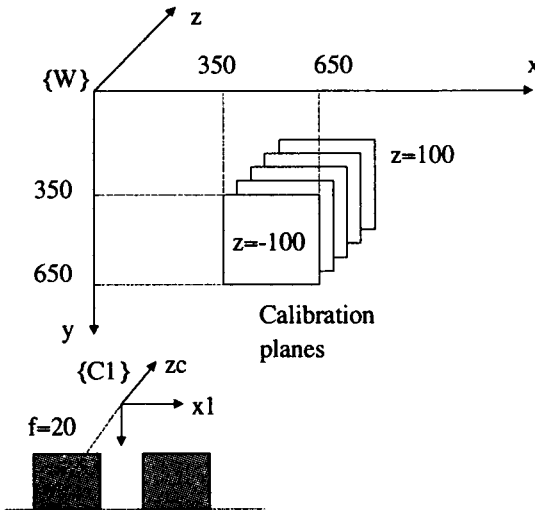


그림 4. 모의실험의 환경설정
Fig. 4 Simulation set-up

제어점의 불확실성에 강건한 카메라의 위치조건을 구하기 위하여, $\{C_i\}$ 의 $\{W\}$ 로부터의 전이를 $t_x = 200$, $t_y = 500$ 로 두고 $B = 300$ 으로 둔 후, 사용된 제어점의 x 와 y 좌표값에 각각 $\sigma = 0.03$ 인 잡음과 z 좌표에 $\sigma = 0.09$ 인 잡음을 첨가한 후 보정하였다. 보정은 이들 잡음 때문에 부정확해지게 되며, 보정오차를 피계측공간과 센서장치와의 거리, 즉 t_z 를 가변시키면서 살펴 보았을 때 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림은 III.1절의 결론을 뒷받침하고 있다.

카메라간의 기준선상의 거리인 B 의 설정을 위한 실험이 행하여졌다. 잡음이 첨가된 3차원 점들의 투영에 의해 얻어지는 영상점들의 오차를 B 를 변화시키면서 계산하였을 때의 결과는 그림 6과 같다. $B = 300$ 일 때 최소의 오차가 나타나며, 이는 $350 \leq x \leq 650$ 의 공간내 점들의 평균 x_1 좌표로 식(12)에 의해 예측가능한 값이다.

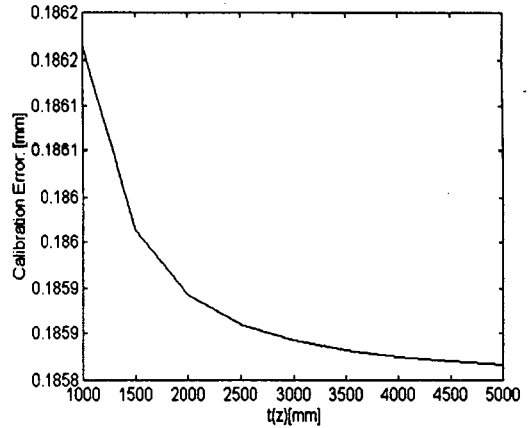


그림 5. 관측거리가 보정 오차에 미치는 영향
Fig. 5 Effect of sensing distance on the calibration error

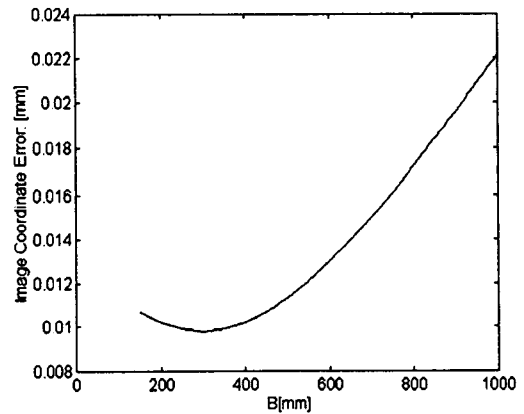


그림 6. 카메라간 간격의 변화에 따른 영상점 좌표의 오차
Fig. 6 Error of image coordinates depending on the baseline width of the stereo

정밀도 조건을 만족시키는 센서의 관측거리에 대한 실험이 행하여 졌다. 로봇의 반복정밀도를 1이라 가정할 때 이의 10%를 허용가능한 최대 계측오차라 하고, 영상좌표 잡음의 표준편차가 화소 규격의 1/10이라고 했을 때, 이를 만족시키는 피계측공간과 센서와의 최대 거리는 식(17)에 의해 약 258.2이다. 그림 7은 카메라의 관측거리를 변경시키면서 3차원 측정의 최대오차와 평균오차를 얻은 것으로, 계산치와 거의 근사한 결과가 나타남을 알 수 있다.

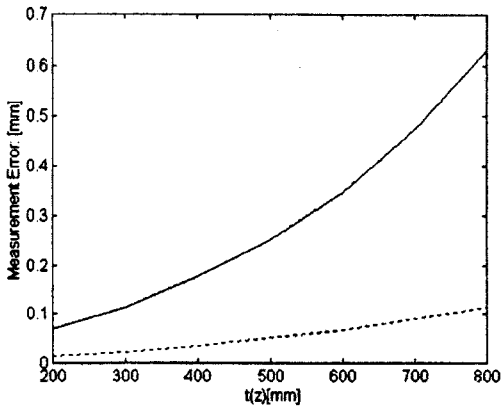


그림 7. 관측거리가 3차원 계측오차에 미치는 영향 (실선:최대오차, 점선: 평균오차)

Fig. 7 Effect of sensing distance on the 3D measurement error (solid line: maximum error, broken line: average error)

V. 결론

로봇의 3차원 위치 측정 센서로 널리 사용되는 스테레오 시각센서의 위치결정에 관한 연구의 결과가 서술되었다. 스테레오 카메라의 계측 모델을 이용하여 실제 상황에서 발생할 수 있는 여러 오차들의 영향을 줄일 수 있도록 센서의 위치가 결정되었으며, 결과된 기법은 센서의 위치결정을 위한 기존의 접근법과 몇가지 점에서 구별될 수 있다: (i) 본 논문은 복수의 카메라에 의한 3차원 계측의 문제를 다루고 있으며, 이는 단수 카메라의 위치를 2차원 문제를 중심으로 다룬 기법들 [3-8]과 다른 영역에 있다. (ii) 기존의 기법들에서는 흔히 피계측 물체의 기하학적 특성이 알려져 있다는 가정을 사용하게 되지만^[3-6], 본 논문에서는 불확실한 공간에서 미지의 물체를 다루게 되는 경우를 고려하고 있다. (iii) 본 논문에서는 스테레오의 설치에 필요한 모든 요소, 즉 카메라의 세계좌표계내 절대위치와 두 카메라간, 혹은 피계측영역과 카메라간의 상대적 위치를 다루고 있으므로 이들 중 일부만을 다루고 있는 경우에 비해 일반적이다. 예를 들면^[8,9]에서는 피계측체와 카메라간의 거리는 주어진 조건이다. (iv) 본 논문에서 제안된 기법은 주어진 조건하에서 최적의 위치를 결정하는 방식이다. 이는 주어진 여러 가지 조건들을 최소한 만족시키는 영역을 구하거나^[3], 단지 가려짐 (occlusion)이 없이 계측가능한 영역을 구하는 방식^[6]과

는 구별된다. 또, 제한된 센서의 형상들 중에서 적절한 것을 고르는 방식으로 전체적인 최적성을 보장할 수 없는 경우^[9]와도 구별된다.

본 논문은 센서의 사용에 기반한 유연한 자동화의 수요가 급격히 증대되고 있으며, 센서의 설계와 배치에 따른 기초적 연구가 부족하며, 시각장치는 가장 중요하고 고급 정보를 제공할 수 있는 비접촉식 계측방식이고, 카메라의 파라미터들이 계측의 성능에 끼치는 영향이 지대하다는 점을 고려할 때 그 의미가 크다고 하겠다. 제안된 방식은 모의실험을 통하여 그 유용성을 점검할 수 있었다.

실제 카메라를 통한 종합적인 실험은 본 논문에서 제안된 방식의 장단점을 보다 실제적으로 확인할 수 있게 할 것으로 사료되므로 향후 과제로 남아있다. 그러나 실제 실험에서는 각 점점 요소들 외에도 고려되지 않은 물리적 파라미터들이 결과에 영향을 미치게 될 것이며, 카메라의 종류에 따라 특성이 상이하다는 점과 같은 문제가 극복되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] K.A.Tarabanis, *et al.*, "A survey of sensor planning in computer vision," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.11, no.1, pp.86-104, 1995.
- [2] H.F.Durrant-Whyte, "Consistent integration and propagation of disparate sensor observations," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1464-1469, 1986.
- [3] C.K.Cowan and P.D.Kovesi, "Automatic sensor placement from vision task requirements," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.10, no.3, pp.407-416, 1988.
- [4] C.K.Cowan and B.Modayur, "Edge-based placement of camera and light-source for object recognition and location," in *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*, 1993.
- [5] S.Abrams, *et al.*, "Computing camera viewpoints in a robot work-cell," in *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp.1972-1979, 1996.
- [6] K.Tarabanis *et al.*, "Computing occlusion-free viewpoints," *IEEE Trans. Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence*, vol.18, no.3, pp.279-292, 1996.
- [7] A.Cameron and H.Durrant-Whyte, "A Bayesian approach to optimal sensor placement," *Robotics Research Group report*, no.OUEL 1759/89, Dept. of Eng. Sci., Oxford University, Oxford, UK, 1989.
- [8] H.Zhang, "Two-dimensional optimal sensor placement," *IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics*, vol.25, no.5, pp.781-792, 1995.
- [9] S.Sakane and T.Sato, "Automatic planning of light source and camera placement for an active photometric stereo system," in *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp.1080-1087, 1991.
- [10] M.Ito, "Robot vision modelling - camera modelling and camera calibration," *Advanced Robotics*, vol.5, no.3, pp.321-337, 1991.
- [11] O.D.Faugueras and G.Toscani, "The calibration problem for stereoscopic vision," in *Sensor Devices and Systems for Robotics* (A.Casals, Ed.), NATO ASI Series, vol.F52, Springer-Verlag, Berlin, pp.195-213, 1989.
- [12] H.Zhuang and Z.S.Roth, *Camera Aided Robot Calibration*, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [13] M.P.Groover, et al., *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [14] J.J.Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 2nd Ed., Addison-Wesley, Reading, 1992.
- [15] H.Naruse, et al., "High-accuracy multiviewpoint stereo measurement using the maximum-likelihood method," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.44, no.4, pp.571-578, 1997.
- [16] S.Das and N.Ahuja, "Performance analysis of stereo, vergence, and focus as depth cues for active vision," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.17, no.12, pp.1213-1219, 1995.

부록

식(4)와 식(5)을 연립하면 T_1 행렬의 전이요소가 다음과 같이 구하여 지며,

$$t_x = -k_{x2}, t_y = -k_{y2}, t_z = -k_{z2} \quad (A1)$$

$\sqrt{r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2} = 1$ 이므로 카메라간의 간격은

$$B = \sqrt{k_{x3}^2 + k_{y3}^2 + k_{z3}^2} \quad (A2)$$

와 같이 얻어지며, 이를 이용하여 회전요소들은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{11} &= (k_{x1} - t_x)/B, & r_{21} &= (k_{y1} - t_y)/B, \\ r_{31} &= (k_{z1} - t_z)/B, & r_{12} &= k_{x3}/B, \\ r_{22} &= k_{y3}/B, & r_{32} &= k_{z3}/B, \\ r_{13} &= r_{21}r_{32} - r_{31}r_{22}, & r_{23} &= r_{31}r_{12} - r_{11}r_{32}, \\ r_{33} &= r_{11}r_{22} - r_{21}r_{12} \end{aligned} \quad (A3)$$

마지막으로 초점거리는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} f &= -k_{x4}/r_{13} \\ &= -k_{y4}/r_{23} \\ &= -k_{z4}/r_{33} \\ &= \sqrt{k_{x4}^2 + k_{y4}^2 + k_{z4}^2} \end{aligned} \quad (A4)$$

著 者 紹 介

도용태

『센서학회지 제7권 제6호』 논문98-7-6-06, p.42참조
현재 대구대학교 공과대학 정보통신공학부 부교수