

거리 영상 측정 오차의 기하학적 분석

正會員 尹 康 植*, 李 炳 旭**, 朴 來 弘*

A Geometric Analysis of Range Measurement Error

Kang Sik Yoon*, Byung-Uk Lee**, Rae-Hong Park* *Regular Members*

요 약

삼각측량의 원리를 이용한 거리 탐색기를 사용하여 거리 영상을 취득하는 경우에 발생하는 측정오차를 직관적으로 이해할 수 있도록 기하학적 방법으로 분석하였다. 그 결과로 거리 측정 오차는 카메라에서 물체까지의 거리에 비례하는 것을 보였다. 또한 카메라 초점과 물체를 지나는 직선이 광원과 물체를 연결하는 직선과 직각인 경우 측정값이 가장 정밀한 것을 보였다. 또한 이 결과가 해석학의 기법을 사용하여 분석한 결과와 일치함을 보였고 실험을 통하여 이를 확인하였다. 본 연구 결과는 동일한 카메라와 광원을 사용한 경우에도, 카메라의 방향과 물체까지의 거리를 변화시켜서 측정 정밀도를 향상시킬 수 있다는 것을 보인다.

ABSTRACT

We investigate depth measurement error of a range finder based on triangulation method. Geometric analysis resulted in intuitive understanding of the error sensitivity. We show that the depth error is proportional to the distance between the object and the camera. The measurement value has the highest accuracy when the line connecting the focal point of the camera and the object is perpendicular to the line joining the object and the light source of the range finder. Also we analyze the error using a perturbation method and verify that the results are identical through an experiment.

I. 서 론

정밀한 3차원 거리 데이터 취득 장치들의 등장으로 인하여 거리 영상을 이용하여 물체의 3차원 형상을

측정하고 모델링하는 일이 점차 가능해지고 있고, 이에 대한 실용적인 응용이 증가되고 있다¹⁾. 거리영상을 취득하는 방법에는 초음파가 물체에 반사되어 돌아오는 반사시간을 측정하거나 진폭 변조된 레이저 광을 투사하여 반사파와의 위상 차이를 측정하는 방법이 있고 삼각측량을 이용한 방법 등이 있다. 여러 개의 거리영상을 통합하여 3차원 모델을 생성시키거나 CAD 모델과 3차원 데이터를 정합하여 그 위치와

*서강대학교 전자공학과

**이화여자대학교 전자공학과

論文番號: 97032-0122

接受日字: 1997年 1月 22日

방향을 정밀하게 측정하는 경우에 거리영상의 오차 분석이 필수적이다. 여기에서는 공간부호화된 광선을 투사하는 방법을 사용한 거리탐색기를 사용하는 경우의 측정 오차를 기하학적으로 분석하여 그 결과를 쉽게 이해할 수 있도록 한다.

대부분의 경우에 거리 탐색기로 거리영상을 계산할 때 카메라가 정확히 고정되어 있다고 가정하고 카메라의 투영행렬을 구해서 3차원 데이터 값을 계산한다^[2]. 그러나 2차원 영상에서의 측정오차로 인하여 계산된 3차원 좌표 값에 오차가 발생한다. 따라서 이러한 경우 측정오차에 대한 정확한 분석이 필요하고, 3차원 좌표를 이용한 모델링이나 등록(registration) 계수들을 구하는 과정에서 오차 가중치의 계산이 필요하기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[3-6]. 오차분석에 관한 기존의 방법들 중 3차원 점의 위치가 단위 부피 안에 균일한 확률을 가진다는 가정하에서 삼각 측량법에 의해 구하는 방법^[7]과 카메라의 위치를 변화시키면서 한 물체에 대해 2개 이상의 영상을 취득한 다음, 보다 정확한 위치정보의 추출을 위해 많은 데이터를 이용하는 방법^[8], 카메라의 화소 사이의 거리, 카메라 렌즈의 초점거리 등과 같은 변수가 오차에 관련되기 때문에 이것을 고려하는 방법^[9], 오차를 여러 파라미터의 확률분포로 표현할 수 있는 방법^[10] 등이 있다. 이러한 방법들에서는 카메라의 방향과 측정오차의 관계가 비선형적인 식으로 나타나기 때문에 정밀도를 향상시키기 위하여 물체와 카메라의 방향을 설정하는 방법을 제시하지 못한다. 본 논문에서는 기하학적으로 오차분석을 시도하였고 또한 카메라 민감도를 사용한 분석결과를 사용하여 기하학적 분석 결과가 타당함을 보였다. 본 논문의 연구 결과는 특정한 관심영역(area of interest)에 대한 측정정밀도를 향상시키는 데에 적용할 수 있다.

II. 기하학에 의한 오차분석

본 논문에서는 삼각측량 원리에 근거하고 공간부호화 방식을 사용하는 거리탐색기^[11]를 사용하는 경우의 측정오차에 대한 분석을 시도하였다. 그림 1과 같이 물체 좌표계(world coordinate)를 C_w 라고 부른다. 카메라 좌표계 C_c 은 카메라 초점 O_c 을 원점으로 하고, 카메라 영상의 수평축 u 와 평행하게 x_1 축을 정

의하고, 카메라 영상의 수직축 v 와 평행하게 y_1 축을 정의하면 z_1 축은 카메라 영상 면과 수직인 광축(optical axis)이 된다. 이 경우 물체상의 점 (x_w, y_w, z_w) 가 원근 투영된 후에 카메라 영상의 (u, v) 에 위치한다고 하고 이를 homogeneous 좌표계로 나타내면

$$(h_c \ u \ v \ h_c) = (x_w \ y_w \ z_w \ 1) \ T_c \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있고

$$T_c = \begin{pmatrix} t_{c11} & t_{c12} & t_{c13} \\ t_{c21} & t_{c22} & t_{c23} \\ t_{c31} & t_{c32} & t_{c33} \\ t_{c41} & t_{c42} & t_{c43} \end{pmatrix}$$

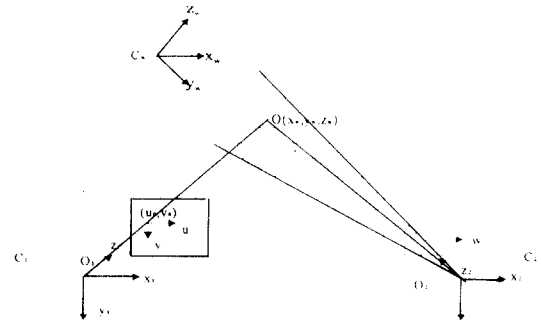


그림 1. 카메라 좌표계와 프로젝터 좌표계로부터 3차원 좌표 측정

는 카메라의 원근투영 변환행렬이다. T_c 는 카메라 고정(camera calibration) 과정에서 구해진다. 이 행렬을

$$z'_c = \frac{1}{\sqrt{t_{c13}^2 + t_{c23}^2 + t_{c33}^2}} \text{으로 정규화시킬 때 } T_c(-z'_c)$$

$T_{c1} \ T_{c2} \ T_{c3}$ 와 같은 형태로 행렬을 분해할 수 있다^[2]. T_{c1} 은 C_w 좌표계의 원점을 C_c 좌표계의 원점인 카메라 초점으로 이동시키는 변환이고, T_{c2} 는 T_{c1} 변환 후 좌표계의 방향을 C_c 좌표계로 일치시켜주는 회전 변환이다. 그리고 T_{c3} 는 영상 평면으로의 투영을 나타내는 변환이다. 따라서 world coordinate상에서의 점 (x_w, y_w, z_w) 을 카메라 좌표계에서 나타낸 점 (x_c, y_c, z_c) 라고 하면 다음과 나타낼 수 있다.

$$(x_c \ y_c \ z_c \ 1) = (x_w \ y_w \ z_w \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_{cs} & -y_{cs} & -z_{cs} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{c11} & r_{c12} & r_{c13} & 0 \\ r_{c21} & r_{c22} & r_{c23} & 0 \\ r_{c31} & r_{c32} & r_{c33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기에서 각 변수의 아래첨자 c 는 카메라 좌표계를 가리킨다.

$$(h_c \ u \ h_c \ v \ h_c) = (x_c \ y_c \ z_c \ 1) \begin{pmatrix} k_{cx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{cy} & 0 \\ u_{c0} & v_{c0} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

이므로

$$u = k_{cx} \frac{x_c}{z_c} + u_{c0} \quad (4)$$

$$v = k_{cy} \frac{y_c}{z_c} + v_{c0}$$

인 원근 투영이 된다. 여기에서 (u_{c0}, v_{c0}) 는 광축 (optical axis)인 C_1 좌표계의 z 축이 영상과 만나는 점이다. Camera의 초점거리를 f 라고 하면 x 방향의 화소 크기는 f/k_{cx} 가 된다. 이를 다시 정리하면

$$(x_w \ y_w \ z_w \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_{cs} & -y_{cs} & -z_{cs} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{c11} & r_{c12} & r_{c13} & 0 \\ r_{c21} & r_{c22} & r_{c23} & 0 \\ r_{c31} & r_{c32} & r_{c33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{cx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{cy} & 0 \\ u_{c0} & v_{c0} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (x_w \ y_w \ z_w \ 1) \begin{pmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ -x'_{cs} & -y'_{cs} & -z'_{cs} & 1 \\ u_{c0} & v_{c0} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

와 같다. 위의 (5)식에서 x_{cs}, y_{cs}, z_{cs} 는 카메라 초점의 위치를 물체좌표계로 표시한 것이고 $x'_{cs}, y'_{cs}, z'_{cs}$ 는 이를 카메라 좌표계로 회전 변환한 것이다. 즉 $(x'_{cs} \ y'_{cs} \ z'_{cs}) = (x_{cs} \ y_{cs} \ z_{cs}) \mathbf{R}_c$ 이다. 같은 방법으로 프로젝터 좌표계 (C_2)와 물체 좌표계(C_w) 사이의 변환은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$(h_p \ w \ h_p) = (x_w \ y_w \ z_w \ 1) \mathbf{T}_p \quad (6)$$

$$(\mathbf{T}_p) = \begin{pmatrix} t_{p11} & t_{p12} \\ t_{p21} & t_{p22} \\ t_{p31} & t_{p32} \\ t_{p41} & t_{p42} \end{pmatrix} \text{로 나타낸다.}$$

이러한 관계식들을 사용하여 원근투영 행렬로부터 카메라 초점의 위치, 방향, 화소의 크기 등의 변수들을 계산할 수 있고 이들을 오차의 기하학적 분석에 사용할 수 있다.

본 장에서는 카메라 영상 평면의 u, v 와 프로젝터 좌표계의 w 의 측정오차로 인한 3차원 거리 측정값의 민감도를 기하학적인 방법을 사용하여 분석한다.

2.1 u 방향의 오차 분석

3차원상의 임의의 점인 R_1 을 측정하는 경우 카메라의 u 방향의 오차 성분에 대한 민감도를 분석한다. 그림 2에서 α 는 카메라의 초점 O_1 과 R_1 을 지나는 직선인 O_1R_1 과 영상 평면의 u 축과 평행인 직선 R_1R_3 사이의 각을 표시한다. β 는 직선 O_1R_1 이 프로젝터 빔 평면과 이루는 각을 나타낸다. 카메라의 초점에서 R_1 까지의 거리가 b 이고 그의 영상인 P_1 까지의 거리가 a 이다. 만일 u 방향으로 Δu 화소의 오차가 있는 경우의 영상의 위치를 P_2 라고 하고 그 경우의 측정된 점의 위치를 R_2 라고 하자. 카메라의 초점 O_1 과 영상면과의 거리는 f 이나, 수식을 간단히 하기 위하여 $f=1$ 로 하면 $\overline{P_1P_2} = \Delta u/k_{cx}$ 가 되고 $\overline{R_1P_3} = \frac{\Delta u}{k_{cx}} \frac{b}{a}$ 이다. $\triangle R_1R_2R_3$ 에서 사인공식을 적용하여 다음 식을 얻는다.

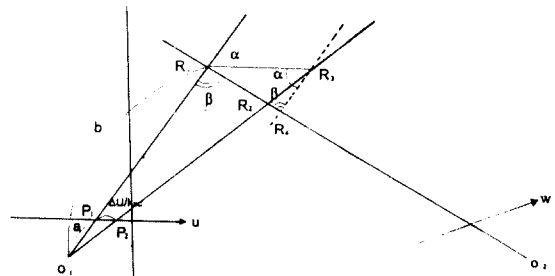


그림 2. u 방향의 오차 분석
Fig 2. Error sensitivity in the u direction

$$\overline{R_1 R_4} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \overline{R_1 R_3} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{\Delta u}{k_{xc}} \frac{b}{a} \quad (7)$$

실제 측정점의 위치 R_1 과 u 방향의 오차로 인하여 잘못 측정된 점인 R_2 사이의 거리는 $\overline{R_1 R_2}$ 이다. 오차 Δu 가 작은 경우 $\overline{R_1 R_2} \approx \overline{R_1 R_4}$ 이므로

$$\frac{\overline{R_1 R_2}}{\Delta u} \approx \frac{\overline{R_1 R_4}}{\Delta u} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{b}{a} \frac{1}{k_{xc}} \quad (8)$$

위의 결과에서 u 방향의 측정오차로 발생하는 3차원 측정점의 변화 민감도는 카메라의 초점에서부터 측정점 R_1 까지의 거리 b 에 비례하는 것을 볼 수 있다. 또한 영상의 주변으로 갈수록 $\sin \alpha$ 가 감소하므로 오차가 작아진다. 프로젝터의 빔 평면과 직선 $\overline{O_1 R_1}$ 이 수직인 경우에 $\sin \beta$ 가 최대가 되므로 민감도가 최소로 되는 것을 알 수 있다.

2.2 v 방향의 오차 분석

앞 절에서와 같이 그림 3에서 α 는 카메라의 초점과 3차원의 임의의 좌표인 R_1 을 지나는 직선 $\overline{O_1 R_1}$ 과 이미지 평면의 v 축과 평행인 직선 $\overline{R_1 R_3}$ 사이의 각을 나타내고, β 는 직선 $\overline{O_1 R_1}$ 과 프로젝터의 원점 및 R_1 을 지나는 직선 $\overline{O_2 R_1}$ 이 서로 만나는 각을 각각 나타낸다.

앞 절과 같은 방법을 적용하여

$$\frac{\overline{R_1 R_2}}{\Delta v} \approx \frac{\overline{R_1 R_4}}{\Delta v} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{b}{a} \frac{1}{k_{yc}} \quad (9)$$

를 얻는다.

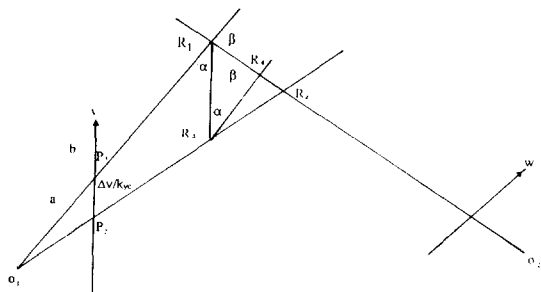


그림 3. v 방향의 기하학적 해석
Fig 3. A geometric interpretation in the coordinates

2.3 w 방향의 오차 분석

그림 4에서 α 는 프로젝터의 원점과 3차원의 임의의 좌표인 R_1 를 지나는 직선 $\overline{O_2 R_1}$ 과 프로젝터의 w 축과 평행인 직선 $\overline{R_1 R_3}$ 사이의 각을, β 는 직선 $\overline{O_1 R_1}$ 과 프로젝터의 원점 및 R_1 의 두 점을 지나는 직선 $\overline{O_2 R_1}$ 이 서로 만나는 각을 각각 나타낸다. 2.1와 2.2의 과정과 같이 전개하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\overline{R_1 R_2}}{\Delta w} \approx \frac{\overline{R_1 R_4}}{\Delta w} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{b}{a} \frac{1}{k_p} \quad (10)$$

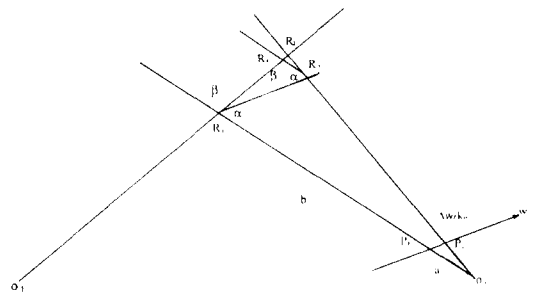


그림 4. w 방향의 기하학적 해석
Fig 4. A geometric interpretation in the coordinate

III. 미분에 의한 error analysis

앞장에서 기하학 적인 방법으로 해석한 결과를 비교하기 위하여 본 장에서는 측정값의 오차가 작은 경우에 미분을 사용하여 오차를 분석하고 두 가지의 결과를 비교하고자 한다.

위 (1)식과 (6)식에서 h_p 와 h_c 를 소거하면 $\mathbf{Q} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{F}$ 을 얻고, 이 때, $\mathbf{Q}, \mathbf{V}, \mathbf{F}$ 는 각각 다음과 같이 된다^[3].

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} t_{c11} - t_{c13}\mu & t_{c21} - t_{c23}u & t_{c31} - t_{c33}u \\ t_{c12} - t_{c13}v & t_{c22} - t_{c23}v & t_{c32} - t_{c33}v \\ t_{p11} - t_{p12}w & t_{p21} - t_{p22}w & t_{p31} - t_{p32}w \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{V} = (x_w \ y_w \ z_w)^T \quad (12)$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} t_{c43}u - t_{c41} \\ t_{c43}v - t_{c42} \\ t_{p42}w - t_{p41} \end{pmatrix} \quad (13)$$

따라서 3차원 좌표 값은

$$\mathbf{V} = \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{F} \quad (14)$$

로 구해진다. 이 때 각각의 u, v, w 값의 미소변화에 대한 3차원 좌표 값의 변화량은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\partial x_w}{\partial u}, S_2 = \frac{\partial y_w}{\partial u}, S_3 = \frac{\partial z_w}{\partial u} \\ S_4 &= \frac{\partial x_w}{\partial v}, S_5 = \frac{\partial y_w}{\partial v}, S_6 = \frac{\partial z_w}{\partial v} \\ S_7 &= \frac{\partial x_w}{\partial w}, S_8 = \frac{\partial y_w}{\partial w}, S_9 = \frac{\partial z_w}{\partial w} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 민감도 식들을 사용하여 기하학적인 해석 방법을 사용하여 분석한 결과와 비교할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{\overline{R_1 R_2}}{\Delta u} &= \frac{\partial}{\partial u} \overline{R_1 R_2} \\ &= \sqrt{\frac{\partial x^2}{\partial u} + \frac{\partial y^2}{\partial u} + \frac{\partial z^2}{\partial u}} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\overline{R_1 R_2}}{\Delta v} &= \frac{\partial}{\partial v} \overline{R_1 R_2} \\ &= \sqrt{\frac{\partial x^2}{\partial v} + \frac{\partial y^2}{\partial v} + \frac{\partial z^2}{\partial v}} = \sqrt{S_4^2 + S_5^2 + S_6^2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta w \rightarrow 0} \frac{\overline{R_1 R_2}}{\Delta w} &= \frac{\partial}{\partial w} \overline{R_1 R_2} \\ &= \sqrt{\frac{\partial x^2}{\partial w} + \frac{\partial y^2}{\partial w} + \frac{\partial z^2}{\partial w}} = \sqrt{S_7^2 + S_8^2 + S_9^2} \end{aligned} \quad (18)$$

위의 결과를 사용하여 기하학적인 해석 방법을 사용하여 분석한 결과를 미분식을 이용한 결과를 실험을 통하여 비교 확인할 수 있다.

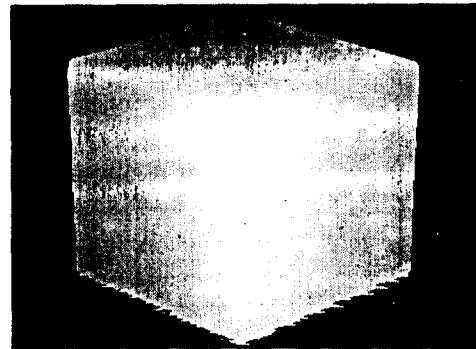
IV. 실험결과

그림 5의 (a)는 거리탐색기를 통하여 획득한 공간 부호 영상이다. 실험에 사용된 거리탐색기는 서울대학교 자동차 연구소 신호처리연구실에서 제작한 것으로 자체 제작한 프레임 그래픽과 미국 K2T사에서 제작한 LCD 패턴판 프로젝터를 사용하여 IBM PC상에서 계산을 수행한다. 여기에서 수평축은 u , 수직축은 v , 밝기는 공간부호 w 를 표시한다. 이 데이터를 사용하여 (14)식을 사용하여 계산한 거리 영상을 그림 5의 (b)에 보였다. 이 영상의 한 점에 대한 오차민감도를 식 (15)와 같이 계산하여 표 1에 보였다.

위의 표 1의 결과로부터 3차원의 좌표 값의 오차는 프로젝터의 공간부호값 w 에 대해서 매우 민감함을 알 수 있다. 그리고 각 방향의 기하학적인 해석 결과는 표 2와 같다.



(a) 공간 부호화 영상



(b) 거리 영상

그림 5. 실험에 사용된 영상들
Fig 5. Images used in experiments

표 1. 오차의 민감도
Table 1. Error sensitivity

변화량	계산값
S_1	3.58
S_2	-2.77
S_3	-0.110
S_4	11.4
S_5	13.5
S_6	-9.81
S_7	35.9
S_8	42.0
S_9	-15.9

표 2. 기하학적인 오차분석
Table 2. Geometric error analysis

실험치	u	v	w
$\sin \alpha$	0.998	0.994	0.997
$\sin \beta$	0.999	0.226	0.240
a	1.01	1.01	1.00
b	10800	10800	13900
k_{xc}	2360	2330	1060
$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{b}{a} \frac{1}{k}$	4.54 [식(8)]	20.2 [식(9)]	54.3 [식(10)]
미분에 의한 결과	4.52 [식(16)]	20.2 [식(17)]	57.5 [식(18)]

표 2에서 알 수 있듯이 $u v w$ 방향의 오차 성분은 미분에 의한 해석과 기하학적 해석이 거의 일치함을 알 수 있었다.

앞에서 유도된 결과식들에서 볼 수 있는 바와 같이 오차에 대한 민감도는 카메라, 광원 및 물체간의 상대적인 거리와 그 방향에만 영향을 받으므로 물체의 형상과는 무관하다.

V. 결 론

본 논문에서는 보다 정확한 변환계수를 구하기 위해 필요한 3차원 좌표 측정값에 대한 오차에 기하학

적인 분석을 제안하였다. 실험을 통하여 그 분석 결과가 미분에 의한 해석방법과 일치함을 확인하였다. 위의 결과에서 각 방향의 측정오차로 발생되는 3차원 측정점의 변화 민감도는 카메라의 초점에서부터 측정점까지의 거리에 비례하는 것을 알 수 있다. 또한 영상의 주변으로 갈수록 오차가 작아진다. 또한 측정점에서 카메라의 초점을 연결한 직선과 측정점 및 프로젝터 광원을 연결한 직선이 직각인 경우 오차의 민감도가 최소로 되는 것을 직관적으로 이해할 수 있도록 기하학적으로 보였다. 따라서 본 논문의 연구 결과를 적용하면 주어진 동일한 거리탐색기에서 물체까지의 거리와 카메라와 광원사이의 각도를 변경함으로써 특정 영역의 측정 정밀도를 향상시킬 수 있다.

여기에서 구한 카메라 민감도는 추후과제인 동일한 물체에 대한 여러 개의 거리영상으로부터 변환계수를 구하는 경우에 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 이병욱, "거리 영상을 이용한 3차원 물체 인식 기술," 전자공학회지, 제23권, 제6호, pp. 682-687, 1996년 6월.
2. 윤강식, 이병욱, 바래홍, "거리 탐색기를 위한 원근 투영 행렬의 분석," 신호처리합동학술대회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 541-544, 수원, 1996년 10월.
3. 정도현, 윤일동, 이상욱, "복수의 거리영상 간의 변환계수의 추출," 전자공학회논문지 제34권 S편 제2호, pp. 206-216, 1997년 2월
4. Y. Yasumoto and G. Medioni, "Robust estimation of three-dimensional motion parameters from a sequence of image frames using regularization," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, no. 4, pp. 464-471, July 1986.
5. T. Broida and R. Chellappa, "Estimation of object motion parameters from noisy images," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, no. 1, pp. 90-99, Jan. 1986.
6. J. Weng, T. S. Huang, and N. Ahuja, "3-D motion estimation, understanding, and prediction from noisy image sequences," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-9, no. 3, pp. 370-389, May

- 1987.
7. S. D. Blostein and T. S. Huang, "Error analysis in stereo determination of 3-D point positions," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-9, no. 6, pp. 752-765, Nov. 1987.
 8. J. Weng, T. S. Huang, and N. Ahuja, "Motion and structure from two perspective views: Algorithms, error analysis, and error estimation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 11, no. 5, pp. 451-476, May 1989.
 9. E. S. McVey and J. W. Lee, "Some accuracy and resolution aspects of computer vision distance measurements," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-4, no. 6, pp. 646-649, Nov. 1982.
 10. J. J. Rodriguez and J. K. Aggarwal, "Stochastic analysis of stereo quantization error," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 12, no. 5, pp. 467-470, May 1990.
 11. S. Inoguchi, K. Sato and F. Matsuda, "Range-Imaging System for 3-D Object Recognition," *Proceedings of 7th International Conference on Pattern Recognition (Montreal, Canada)*, pp. 806-808, July 1984.



윤 강 식(Kang Sik Yoon) 정회원
 1995년 2월:서강대학교 전자공
 학과 졸업(학사)
 1997년 2월:서강대학교 대학원
 전자공학과 졸업(석
 사)
 현재:대우전자 전략기술 제1연
 구소 근무중

이 병 옥(Byung-Uk Lee) 정회원
 한국통신학회논문지 제21권 제4호 참조
 현재:이화여자대학교 전자공학과 부교수

박 래 홍(Rae-Hong Park) 정회원
 한국통신학회논문지 제21권 제12호 참조
 현재:서강대학교 전자공학과 교수