

공간 부호화 레인지 센서를 이용한 3차원 표면 파라미터의 에러분석에 관한 연구

Error Analysis of 3-D Surface Parameters from Space Encoding Range Imaging

°정홍상*, 권인소**, 조태훈***

*한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(Tel: +82-2-958-3465; Fax: +82-2-960-0510; E-mail: heungsang@cais.kaist.ac.kr)

**한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Tel: +82-2-958-3415; Fax: +82-2-960-0510; E-mail: iskweon@eekaist.kaist.ac.kr)

LG 산전 연구소(Tel: +82-343-50-7538; Fax: +82-343-53-6263; E-mail: cho@cho.lgis.co.kr)

Abstract This research deals with a problem of reconstructing 3D surface structures from their 2D projections, which is an important research topic in computer vision. In order to provide robust reconstruction algorithm, that is reliable even in the presence of uncertainty in the range images, we first present a detailed model and analysis of several error sources and their effects on measuring three-dimensional surface properties using the space encoded range imaging technique. Our approach has two key elements. The first is the error modeling for the space encoding range sensor and its propagation to the 3D surface reconstruction problem. The second key element in our approach is the algorithm for removing outliers in the range image. Such analyses, to our knowledge, have never attempted before. Experimental results show that our approach is significantly reliable.

Keywords range image, space encoding, surface parameter, error analysis, outlier

1. 서론

최근 컴퓨터 비전 분야에서 3차원 거리 영상 데이터의 중요성은 하드웨어의 발전과 산업 응용분야의 확장에 힘입어 점점 더하여 가고있다. 이러한 영상 데이터로부터 3차원 표면 파라미터를 추출하여 물체인식이나 자율 로봇, CAD 입력, 가상 현실 등의 분야에 적용하기위한 여러 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 공간 부호화 레인지 센서[1]로 얻어지는 3차원 물체의 영상 데이터로부터 데이터의 에러 원인을 찾아내고 에러 모델을 작성하여 이들의 3차원 표면 파라미터로의 전파과정을 제시하였다. 3차원 거리정보와 함께 데이터의 에러 정도를 부가함으로써, 3차원 표면구조의 정밀도를 높이며 표면 파라미터의 추출 시 보다 정확한 파라미터를 얻을 수 있다. 에러분석은 일반적인 시스템 구조에 근거하였고 공간 부호화 에러, 실험적 에러의 두 가지로 구분하였다. 공간 부호화 에러는 센서의 정밀도를 높이기 위하여 부가된 양화 패턴과 음화 패턴의 차들의 함수로 나타낼 수 있으며, 이들 차들의 평균은 배경영상, occlusion 등의 outliers 제거에 유효하며, 차들의 최소값은, 3차원 표면특성의 추출 시 에러 분산 값으로서 통계적 모델에 활용된다.

에러 분석에 대한 가능성 검증과 결과를 나타내었고, 여러장의 거리영상 정합에 있어서 중요한 파라미터가 될 표면 법선 계수나 표면 구조의 에러 추론에 연구의 중점을 두어 그 결과들을 나타내었다.

2. 공간 부호화 레인지 센서

시스템 구성은 컴퓨터, 프레임그래버, 컨트롤러, 프로젝터, CCD 카메라로 구성되며 그림 1은 간단한 구성을 보여준다. 컴퓨터의 신호를 받아 컨트롤러가 프로젝터에 각기 다른 패턴광을 투사하도록 하는 동안 CCD 카메라로 부터의 영상을 디지털 이지가 취득하여 컴퓨터 내에서 일련의 처리가 이루어진다. 패

턴광 투사 후 입력된 영상을 각각 이치화 하고, 이를 순차적으로 비트 플레인 소팅한 후, 이를 공간 부호로 만든 다음 CCD 카메라 상의 픽셀 좌표와 이에 대한 공간부호로부터 시스템 파라미터를 통해 3차원 정보를 만들어 낸다. 시스템 파라미터는 캘리브레이션 박스를 이용한 캘리브레이션 작업을 통하여 미리 알고 있는 3차원 정보로부터 구해지게 된다.

2.1 공간부호

그림 1에서 공간부호를 만드는 원리를 나타내었다. 3-비트 이진 코드를 예로 들었으며 실제 시스템에서는 서로 인접한 픽셀 사이의 오차를 줄이기 위하여 그레이 코드 패턴광을 투사한다. 그레이 코드로 먼저 부호화한 다음, 이를 LUT(Look Up Table)에 의해 이진 코드화 하여 결과적인 공간 부호를 얻는다.[1]

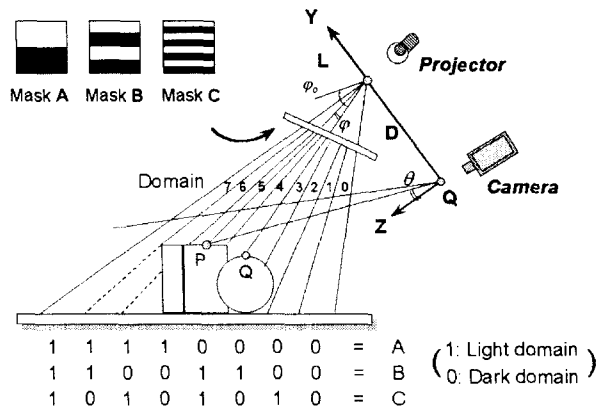


그림 1 시스템 구성도

Figure 1 System configuration

2.2 영상의 이치화

일반적으로 공간 부호화 레인지 센서에서는 한 장(8 bit)의 거리 영상을 얻기 위하여 8장의 패턴 영상이 필요하나 배경광

에 의한 오차를 없애기 위하여 한 패턴 영상의 부호화에 양, 음 두 장의 패턴을 사용한다. 즉, 그림 2 와 같이 양화 패턴 및 음화 패턴을 각각 투사하여 양화 패턴에서 음화 패턴을 뺀 값이 양일 경우에 이진코드 "1", 음일 경우에 이진코드 "0"로 한다. 본 논문에서는 이들 8 개의 양화 음화 차가 3 차원 거리 데이터의 신뢰도와 연관함을 찾아 에러 분석을 통하여 모델링을 하고 거리 정보에 불확실성 데이터를 갖게 하므로 표면 파라미터의 추출 시 신뢰도를 높이는데 기여할 수 있다.

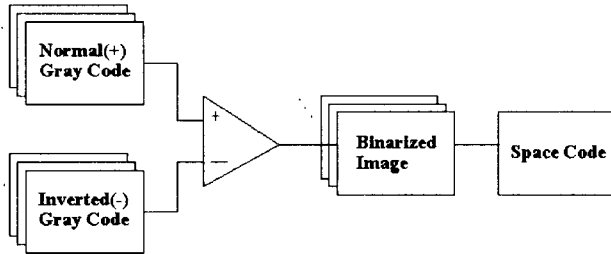


그림 2 투사된 패턴 영상의 이치화

Figure 2 Binarization of the projected pattern images

2.3 불가시 영역

카메라에서는 보이지만 프로젝터에서 투사된 빛이 물체에 도달하지 않은 부분을 불가시 영역이라 한다. 여기서는 투사된 패턴의 변화가 없으므로 공간 부호는 모두 "0" 이 되어 3 차원 거리 측정이 불가능하다. 공간 부호화 레인지 센서에서도 스테레오 기법과 같이 삼각측량에 기반을 두기 때문에 불가시영역은 불가피 하며 이를 최소화하여야 한다. 문제는 물체의 표면에 존재하는 이 영역은 일반 영상 노이즈와는 달리 일종의 outlier 로 3 차원 파라미터 추출 시 데이터의 신뢰도에 큰 영향을 주므로 배경 영상과 함께 반드시 분리되어야 한다. 본 논문에서는 이를 분리 하기 위하여 전질의 양화 음화 차의 평균을 구하여 outlier 를 제거하는 기준으로 하였다.

3. 에러 분석

거리 영상의 한 점에서 그 점에 대한 3 차원 정보와 함께 그 정보의 에러 정도를 알 수 있으면 데이터의 신뢰도는 상당히 높아지며 특히 여러 정보 중에서 가장 신뢰성 있는 데이터를 선택하거나 각 데이터에 weight 를 주는데 도움을 준다. 공간 부호화 레인지 파인더의 원리에서 언급한 바와 같이 영상의 각 픽셀에 공간 부호가 얼마나 정확하게 할당 되었는가 하는 것이 3 차원 정보의 신뢰성을 좌우한다. 이 공간 부호는 양화 패턴, 음화 패턴을 순차적으로 투사하여 두 패턴이 각각 투사된 상황에서 영상의 각 픽셀에서의 밝기 값 차이에 의해 "1" 또는 "0"을 할당하고 이를 8 비트 플레인 소팅하여 공간 부호를 얻는다. 초기화된 상황에서 3 차원 정보를 취득함에 있어서 에러의 주 원인과 이에 상응하는 에러의 정도는 다음과 같다.

3.1 에러 원인

에러는 크게 공간 부호화 에러와 일반적인 실험적 에러에 대하여 설명한다. 전자는 레인지 센서 구조적 문제로부터 기인하는 것으로 프로젝터와 카메라의 포커싱 문제, CCD 카메라의 양자화 에러 saturation 에 의한 CCD array 의 간섭에 의한 에러 등을 들 수 가 있다. 후자는 구조화 조명을 이용한 레인지 센서의 일반적인 실험적 에러로서

3.1.1 공간 부호화 에러

포커싱 에러 : 초기 세팅에 의해 잘 포커싱 되었다 하더라도 대상물의 크기 및 위치에 따라 프로젝터와의 거리에 따른 미스 포커싱이 발생한다. 이러한 미스포커싱 부분의 공간 부호화당은 불확실성을 가진다. 이 문제는 초점 심도(Depth of Focus)와 관련되어 프로젝터와 카메라 모두 해결해야 할 부분이다. 그림 3 에 초점심도의 개념을 개략적으로 표현 하였는데 aperture diameter 를 줄임으로서 초점 심도를 크게 할 수 있으나 image quality 상반 관계를 잘 조정 하여야 한다.

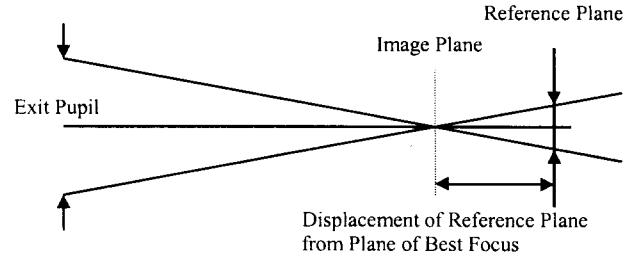


그림 3 초점 심도

Figure 3 Concept of depth of focus

양자화 에러 : 패턴광의 포커스가 잘 맞은 부분이라도 CCD Array 상에 투영되어 양자화 될 때 픽셀에 패턴의 경계가 수반될 때, 이 점에서의 공간부호는 유동성을 가질 수 있다. 반픽셀 이하이므로 x, y 방향을 고려하면 $\sqrt{n/2}$ 이내일 것이다.

CCD Array 간섭에 의한 에러 : 대상물의 표면에 밝기 정도가 서로 심하게 차이가 나는 부분이 있을 경우, 주변의 밝기에 다소 영향을 받는다. 이로 인해 공간 부호의 왜곡이 생긴다.

3.1.2 실험적 에러

공간 부호화 레인지 센서와 같은 구조화 조명을 이용한 실험에서는 부적절한 영상장치의 작동이나 캘리브레이션으로 여러 가지 에러들이 일어날 수 있다. 예를 들면 영상장치의 파라미터들이 정확하지 않거나 truncation 이나 근사화에 의한 수치에라 등을 들 수 있다.

3.1.3 불가시 영역

불가시 영역은 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 대상 물체의 occlusion 에 의하여 카메라에서는 보이지만 프로젝터에서 투사된 빛이 물체에 도달하지 않은 부분과 또 하나는 배경 영상과 같이 빛이 도달하지만 거리가 멀어 패턴이 뚜렷하게 투사되지 않는 영역이다. 이러한 outlier 를 제거하기 위하여 많은 연구가 되어 왔으며 쉽지 않은 문제이다. 특히 표면 파라미터 추출 시 데이터 신뢰도에 치명적이다. 그러나 공간 부호화 레인지 센서의 양화 음화차의 평균을 이용하여 비교적 간단하게 제거할 수 있다.

3.2 에러 모델링

3.1.1 에러의 추정

위에서 기술한 에러 정도는 양화패턴과 음화패턴 투사시의 밝기 값 차이가 작을수록 더 커진다. 따라서, 영상면의 한 픽셀에서의 에러정도는 양화 패턴과 음화패턴 투사 시 밝기 값 차이의 함수로 생각할 수 있다. 또한 불확실성이 발생할 수 있는 패턴의 경계부분은 8 가지의 패턴 사이에서 서로 겹치지는 않으며 사용한 Gray 코드는 하나의 패턴에서의 오차가 MSB, LSB 에 상관 없이 단지 공간 부호 "1"만큼의 오차를 유발하므로 8 종류의 각 두 가지 패턴에서 얻어지는 가장 작은 밝기 값의 차이가 에러정도의 함수로 된다.

$$e_s = f(\min(|P - N|_1, \dots, |P - N|_8)) \quad (1)$$

여기서 Uncertainty는 불확실성의 정도, P는 양화패턴 투사시의 밝기 값 N은 음화패턴 투사시의 밝기 값을 나타낸다.

3.1.2 Feasibility Test

(1)식을 증명하기 위한 가능성 실험을 행하였다. Bayes' formula를 이용하여 어느 정도의 큰 에러가 발생하였을 때, $\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) = i$ 일 확률을 구하였다.

$$\text{Prob}(\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) = i \mid \text{error} > E_k) = \frac{\text{Prob}(\text{error} > E_k \mid \min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) = i) \times \text{Prob}(\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) = i)}{\text{Prob}(\text{error} > E_k)} \quad (2)$$

E_k 는 $2 \times (E_{\text{mean}})$ 로 하여 X, Y, Z 면에 대해 각각 수행한 결과를 그림 4에 나타내었다.

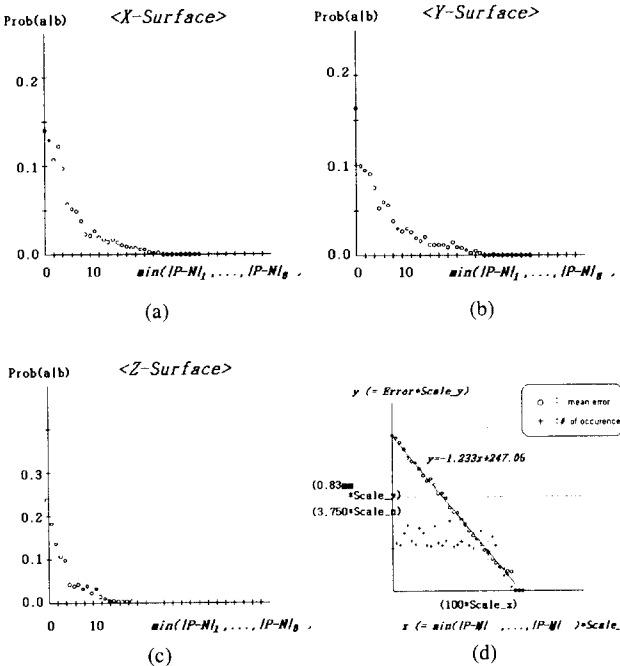


그림 4 가능성 실험 결과
Figure 4 Feasibility test results

Prob(a/b)로 표기된 것은 $\text{Prob}(\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) = i \mid \text{error} > E_k)$ 을 나타낸 것으로 평균 에러의 두배 이상의 큰 오차가 발생하였을 때 두 패턴 투사시의 밝기 값 차이의 최소값이 i 일 확률을 나타낸다. i는 0부터 255까지의 값을 가질 수 있으나 8개의 패턴 쌍에서의 최소 값을 택하므로 이보다는 작게 나오며, 결과로부터 이 i 값이 작을수록 큰 오차가 발생할 확률이 높아짐을 볼 수 있으며 이를 에러 정도로 볼 수 있게 된다. 에러의 척도를 정의하기 위하여 캘리브레이션 박스를 대상으로 하여 4-1-1 절에서 기술한 바와 같이 X, Y, Z 면을 각각 선정하고 $\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|)$ 에 대하여 각 경우에 발생된 평균오차를 구한 후, Line fitting 한 불확실성 그래프를 그림 4(d)에 도시하였다. 불확실성 그래프를 얻을 때 상대적으로 아주 적은 발생 수(30 이하)의 데이터는 오차 그 자체가 오차 평균이 되어 무의미하게 되므로 Line fitting에서 제외시켰다.

그림 4(d)는 X면에 대한 것으로 Y면, Z면에서도 비슷한 형태의 그래프를 볼 수 있다. 그림에서의 x, y는 각각 $\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|)$ 및 Error를 나타내었다. 여기서 불확실성의 그래프로 X면을 선정한 것은 4-1-2 절의 <표 4.1>에서

보는 바와 같이 본 연구를 위한 실험 시 X방향의 오차변동과 전체 오차변동과의 상관계수가 가장 높아서 전체오차를 가장 잘 나타내어 줄 수 있기 때문이다. 실제 시스템에서는 그 당시의 측정조건에 따른 각 방향에 따른 상관계수를 구한 다음, 상관계수가 가장 큰 방향의 면을 불확실성 그래프로 선정하도록 한다. <그림 5.3>의 불확실성 그래프로부터 불확실성은 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Uncertainty} = \begin{cases} \frac{a(\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) \times \text{Scale}_x) + b}{b}, & \text{if } \min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|) < (-b/a) \times \text{Scale}_x \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

즉, 실제 $\min(|P - N_{1j}, \dots, |P - N_{lg}|)$ 에 해당하는 점에서의 오차는 정규분포를 가지나 그 평균값에 해당하는 오차가 가장 많이 발생한다고 할 수 있으므로 평균값을 종속 변수로 하고 이를 Normalize 시켜 불확실성의 척도로 한다.

본 실험의 Scale_x 는 3, Scale_y 는 180, Scale_z 는 1/25로 하였으며 Line fitting 한 결과로 a는 -1.233, b는 247.05가 얻어졌다.

4. 실험결과

표면 파라미터는 2D 영상으로부터 3차원 형상복원을 하기 위하여 표면 구조 및 표면법선, 주곡률 표면방정식 계수 등 여러 가지 계수가 필요하며, 그 응용도 물체인식, 로봇, 가상 현실, 리 엔지니어링 등 다양하다. 여기서는 여러 장의 거리영상 정합에 있어서 중요한 파라미터가 될 표면 법선 계수나 표면 구조의 에러 추론에 연구의 중점을 두어 그 결과들을 나타내었다.

표 1은 에러 정도에 따른 정밀도의 측정결과를 나타내었으며, 최소 오차는 각 측정면에서 모두 0이다. U를 불확실성의 정도로 할 때, 각각 U가 1 이하, 0.8 이하, 0.7 이하, 0.6 이하인 데이터만을 취하였을 때의 결과이다.

표 1 불확실성에 따른 정밀도 측정결과

오차(mm)		X	Y	Z
U<=1.0	평균	0.789	0.782	0.309
	최대	5.122	5.089	3.147
	편차	0.534	0.521	0.224
U<=0.8	평균	0.628	0.639	0.283
	최대	4.068	4.354	1.266
	편차	0.440	0.434	0.225
U<=0.7	평균	0.528	0.553	0.224
	최대	3.810	4.028	1.005
	편차	0.382	0.388	0.202
U<=0.6	평균	0.425	0.468	0.301
	최대	3.453	3.433	0.653
	편차	0.314	0.339	0.176

그림 5는 평균에러, 최대에러 및 편차를 비교하였는데, 결과로부터, 에러 정도가 낮을 수로 에러 및 편차가 줄어들 수 있다. U<=0.6 일 때의 Z방향에서의 평균 오차가 다소 증가한 것은 U<=0.6 이하인 Z표면상의 점의 수가 급격히 줄었기 때문이다. Z면의 오차가 상대적으로 적은 이유는 캘리브레이션

및 측정시의 해상도가 X,Y 면에 비해 높기 때문이다.

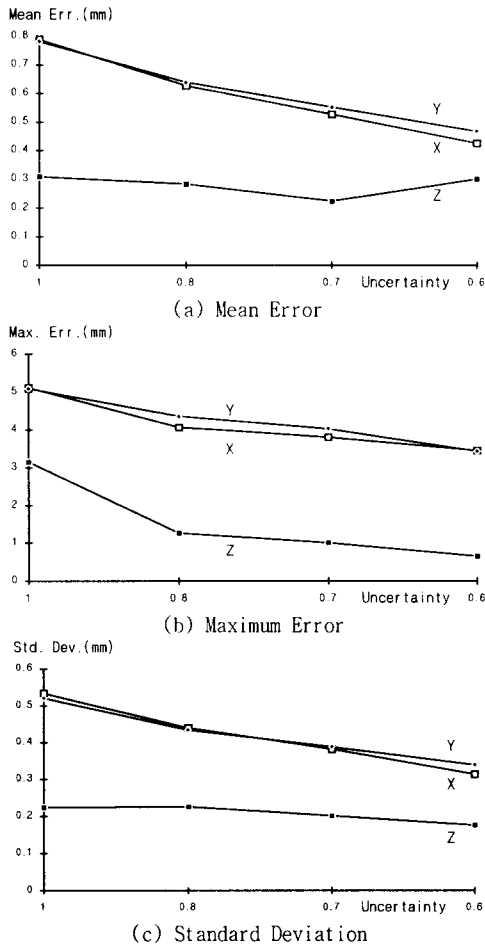
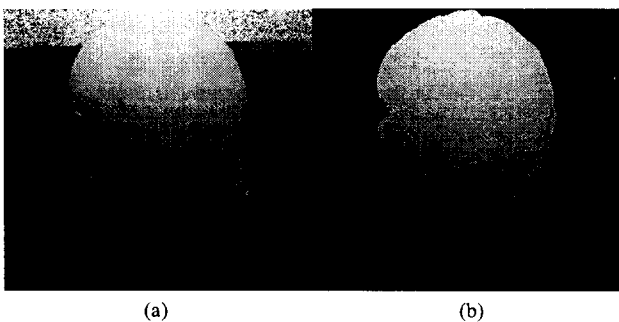


그림 5. 에러정도에 따른 통계치
Figure 5 Statistical value

그림 6에서 outlier를 제거하기 전(a) 후(b)의 Z-축 방향 거리 영상을 보여 주고 있다. 일반 농담 영상에서는 배경이 검게 보여 outlier가 존재하지 않은 것처럼 보이지만 이처럼 거리 영상에서는 배경이 outlier로서 뚜렷이 나타나고 있다. 그림 6에서 Agrippa 두상의 표면 파라미터를 추출 하기 위하여 불가시 영역의 제거는 필수적이다. 특히 귀밑과 눈, 턱 밑을 보면 outlier가 제거되는 부분이 검게 되는데 이 부분이 occlusion에 의한 outlier가 된다.



(a) (b)
그림 6 Outlier 제거 결과
Figure 6 Outlier elimination result

표면법선으로의 에러 전파를 검증 하기위해 Chen 과 Medioni 가

발표한 ICP 알고리즘(surface normal intersection algorithm)에 적용하여 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 한 변 150 cm의 정육면체 calibration box의 정합과정의 단면을 보여준다.

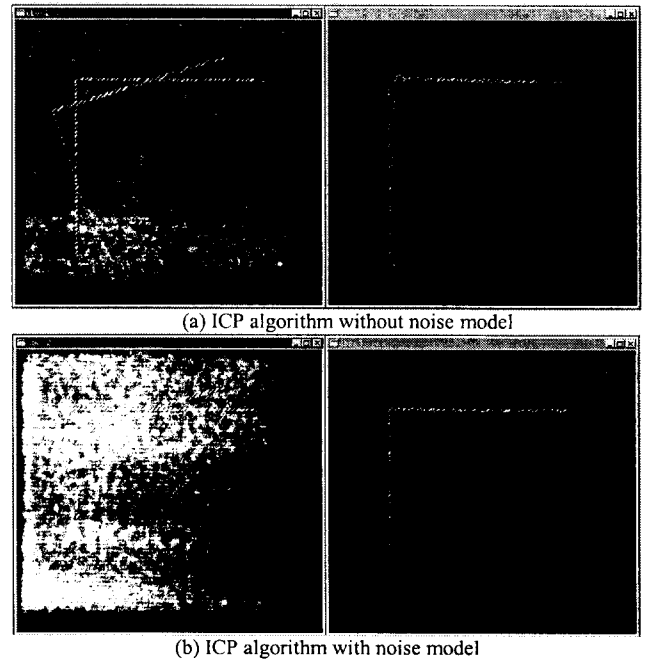


그림 6 ICP algorithm의 실험결과
Figure 6 Experimental result of ICP algorithm

5. 결론

본 연구에서는 공간 부호화 레인지 센서로 얻어지는 3차원 물체의 영상 데이터로부터 데이터의 에러 원인을 찾아내고 에러 모델을 작성하여 이들의 3차원 표면 파라미터로의 전파과정을 제시하였다. 3차원 거리정보와 함께 데이터의 에러 정도를 부가함으로써, 3차원 표면구조의 정밀도를 높이며 표면 파라미터의 추출 시 보다 정확한 파라미터를 얻을 수 있다. 여러 가지 장점을 갖고 있는 공간 부호화 레인지 센서에 outlier를 제거하고 영상의 각 픽셀에서 거리정보와 함께 에러 정도를 포함하게 하여 표면 정보의 추출에 유용하리라 사료된다.

참고문헌

- [1] Kosuke Sato and Seiji Inokuchi, "Three-Dimensional Surface Measurement by Space Encoding Range Imaging", Journal of Robotics System, 2(1), pp. 27-39, 1985
- [2] Yang Chen and Gerard Medioni, "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2724-2729, Sacramento, April 1991.
- [3] Juyang Weng, Thomas S. Huang and Narendra Ahuja, "Motion and Structure from Two Perspective Views: Algorithms, Error Analysis, and Error Estimation," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 5, May 1989
- [4] Seungku Yi, R. M. Haralik, and Linda G. Shapiro, "Error propagation in machine vision," Machine Vision and Applications, 7:93-114, 1994.