

레이저슬릿광과 이미지블럭을 이용한 경면물체 형상측정알고리즘 3D Shape Reconstruction using Laser Slit Beam and Image Block

°곽동식, **조형석, ***권동수

° 대우자동차 선행전자실 (Tel: 032-520-2265; Fax: 032-520-4649)

** 한국과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-869-3213; Fax: 042-869-3210; E-Mail:hscho@lca.kaist.ac.kr)

*** 한국과학기술원 자동차 및 설계공학과 (Tel:02-958-3457; Fax:02-957-5278)

Abstract Structured laser light is a widely used method for obtaining 3D range information in Machine Vision. However, The structured laser light method is based on assumption that the surface of objects is Lambertian. When the observed surfaces are highly specularly reflective, the laser light can be detected in various parts on the image due to a specular reflection and secondary reflection. This makes wrong range data and the image sensor unusable for the specular objects. To discriminate wrong range data from obtained image data, we have proposed a new algorithm by using the cross section of image block. To show the performance of the proposed method, a series of experiments was carried out on the simple geometric shaped objects. The proposed method shows a dramatic improvement of 3D range data better than the typical structured laser light method.

Keywords: Machine Vision, Structured Light, Image Block, Triangulation

1. 서론

최근들어 산업체에 널리 적용되고있는 화상처리기술은 크게 2차원 정보만을 이용하는 2-D 비전시스템과 3차원정보를 이용하는 3-D비전시스템으로 나누어질수 있다. 3-D 비전시스템은 대상물체에 대한 거리정보 혹은 형상정보를 얻을수 있다는 점에서 2-D비전시스템에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 따라서 더욱 빠르고 정확한 3차원 거리정보를 얻기위하여 여러가지 물리광학적 원리를 이용한 레인지센서(Range Sensor)가 등장하였다.[1] 일반적으로 3차원 형상측정용으로는 삼각측정법을 이용하는 레인지 센서가 쓰이고 있다. 삼각측정법을 이용하는 대표적인 방법에는 두대의 카메라와 이의 기하학적 관계로부터 거리정보를 구하는 스테레오 비전(Stereo Vision)이 있다.[2] 그러나 스테레오 비전에서는 두개의 화상정보로부터 일치되는 대응점을 찾아야하는 대응점일치 문제(Correspondence Problem)가 있기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 두대의 카메라중 하나를 프로젝터(Projector)나 레이저(Laser)와같은 광원으로 대체하여 대응점일치문제를 해결한 구조화면광(Structured Light)을 이용하는 방법이 제안되어 있다.[3] 구조화면광을 이용하는 방법은 구조가 간단하고 광원으로 레이저를 이용할 경우 높은 정밀도의 거리정보를 얻을수있기 때문에 3차원 형상측정용으로 현재 널리 사용되고 있다. 이러한 레이저 슬릿광을 이용하는 레인지 센서의 성능은 카메라 이미지 상에서 레이저광의 위치를 얼마나 정확히 추출하는가에 의하여 크게 좌우된다.따라서 카메라 보정(Camera Calibration), 레이저보정(Laser Calibration), 세선화법(Thinning)등과같은 부분에대하여 많은 연구가 이루어져 왔다.[4,5,6] 기본적으로 레이저 슬릿광을 이용하는 방법에서는 대상물체가 주로 난반사성분을 가지고 있는것을 기본가정으로 한다.[1] 이 경우 물체에 투사되는 레이저와 카메라 이미지 상에서의 레이저광 사이에는 1대1의 대응관계가 존재하고 이 대응관계는 대상물체의 고유한 높이정보를 얻게한다. 그러나 대상물체의 표면이 경면일 경우 물체에 투사된 레이저는 주위의 다른 표면부분으로부터 반사되어 카메라에 입사됨으로써 거리정보에 심각한 오차를 유발하기도 한다. [1,7,8,9] 이러한 경면물체의 2차반사(Secondary Reflection)는 레이저를 광원으로하는 삼각법을 이용한 레인지센서의 공통적인 문제이다. 또한 레이저슬릿광을 이용한 경면물체 형상측정시 발생할수 있는 여러가지 측정오차요인, 정반사된 레이저로인한 blooming문제, 광원의 난반사성분에 의한 경면반사와 같은 경면물체에대한 형상측정시 발생할수있는 문제들에대하여 체계적인 해석과 이의 해결방법은 아직 나와있지않은 상황이다. 본 연구에서는 레이저슬릿광

을 이용하여 경면물체의 형상측정시 발생하는 여러가지 측정외란요소와 특성을 살펴보고 이러한 측정외란요소에 대하여도 능동적으로 대응하며 형상측정이 가능하도록 새로운 알고리즘을 제안하고 간단한 형상을 갖는 물체에 대하여 실제 형상을 측정하여 봄으로써 제안된 방법의 유용성을 입증한다.

2. 경면물체 측정외란요소

레이저 슬릿광을 이용한 3차원 형상측정장치에 있어서 경면물체를 측정할경우 그림1과같이 크게 다음과같은 요소에 의하여 오차가 발생될 수 있다.

- (1) 측정데이터유실(Missing Data)
- (2) 경면 반사(Specular Reflection)
- (3) 2차반사(Secondary Reflection)
- (4) 간접광원경면반사(Diffused Laser Reflection)

Nayar의 반사모델에 따르면 물체표면에서 반사된 광은 Diffuse lobe 성분과 Specular 성분으로 구분할수 있다.[10] Specular성분은 입사광의 방향과 입사면의 법선방향에 의하여 결정되는 방향으로 반사되는 광(경면반사성분)이고, Diffuse lobe성분은 모든 방향으로 산란되는 광(난반사성분)을 나타낸다. 측정데이터의 유실은 대상물체의 표면이 거울(Mirror)과같이 완전경면 혹은 완전경면에 가까울경우 입사되는 광은 정반사되고 카메라방향으로 입사되는 난반사 성분은 극히 작기때문에 카메라 이미지 상에 레이저광의 영상이 나타나지 않아 측정이 불가능한 경우에 나타난다. 이러한 완전 경면물체의경우 슬릿광측정장치는 측정이 어렵지만 대부분의 경면성분을 갖는 측정물은 어느정도 난반사 성분이 존재하고 또한 카메라의 조리개를 조정함으로써 해결이 가능하므로 영상상에 레이저광의 궤적이 나타나지 않아 측정에 오차를 유발하는 경우는 많지 않다. 경면반사의 경우는 대상물체가 경면성분을 강하게 가지고 있을경우 물체에 입사되는 광이 정반사되어 경면반사 성분이 카메라에 바로 들어오는 경우로써 카메라의 CCD 셀이 포화되어 이미지상에서 레이저광의 궤적을 얻을수 없다. 때문에 이와같은 경우 기존의 방법에서는 이미지정보에서 정확한 거리정보를 얻을수가 없다. 경면반사에 있어서 또다른 문제점중의 하나는 레이저출력부 광학계에서의 난반사성분이 경면으로 되어있는 측정물의 표면에서 반사되어 측정물체에 입사되는 실제레이저광 이외에 또다른 레이저광의 궤적을 생성하기도 한다.(이 외란요소를 간접광원경면반사라 칭하기로 한다) 2차반사는 측정물체에 입사되는 레

이러한 모호성을 해결하기 위한 아무런 정보도 주지 않는다는 점에서 매우 해결하기 어려운 문제이다.

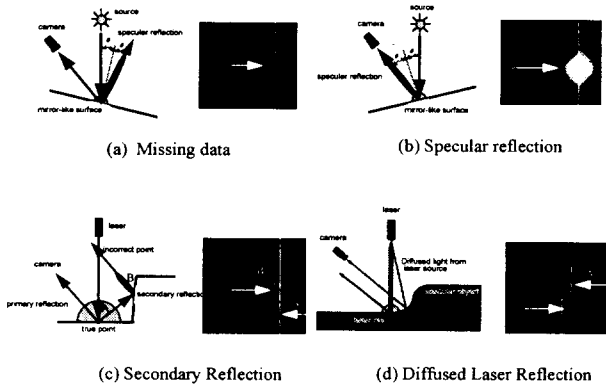


그림 1. 경면물체 측정외란요소

3. 경면물체 측정외란요소 제거 알고리즘

3.1 Image Block

본 연구에서는 슬릿광 형상측정장치에서 경면물체형상 측정시 발생할수 있는 오차요인에 대응할수 있도록 이미지블럭이라는 개념을 사용하였다. 이미지 블럭이란 대상물체를 이동시켜가며, 또는 카메라를 이동시켜가며 변화하는 영상을 순차적으로 집적시켜 블럭의 형태로 만든것으로써 이러한 기법은 Bolles가 Epipolar Plane Analysis를 통하여 Mobile Robot이 주행하기 위한 3D Map을 얻는데 사용하였다.[11] 본 연구에서 사용된 시스템에서는 대상물체에 수직으로 슬릿광을 입사시키고 XY-Table을 이용하여 그림 2와같이 측정대상물체를 순차적으로 스캐닝 시켜가며 얻어진 영상을 이용하여 이미지블럭을 구성하였다. 이러한 이미지블럭의 기법을 이용할 경우 레이저광의 궤적은 'Y-Z'영역에서만 아니라 'X-Y-Z'영역에서 해석이 가능하고 본연구에서는 레이저광의 궤적을 이미지블럭의 단면을 잘라 'X-Z'영역에서 조사하고 형상측정에 이용하였다.

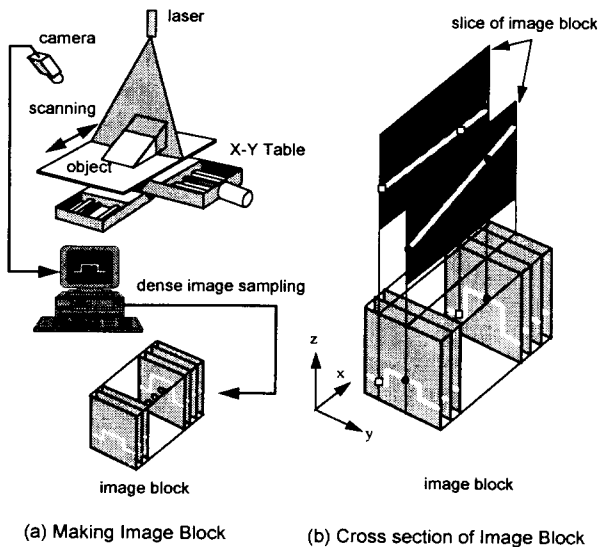


그림 2. 슬릿광형상측정장치와 이미지블럭

3.2 Constraint 를 이용한 측정외란요소 제거알고리즘

레이저 슬릿광을 이용하는 형상측정장치에서는 측정시스템 설계시 결정된 카메라각도와 스캐닝방향으로 수직으로 입사하는 레이저의 구조자체에 의하여 그림 3과같이 카메라에서 볼수없는 영역과 측정이 불가능한 영역이 이미지 블럭의 단면상에 존재한다. 이와같은 측정면 표면법선벡터의 제한조건을 이용하여 1차반사와 2차반사성분을 구분하기위한 다음과 같은 constraint를 제안한다.

측정대상물체에 수직으로 입사하는 레이저에대하여 카메라가 이루는 각을 θ_c 라하고 이미지블럭 단면상에서 측정된 표면의 각도를 θ_m 이라할때

$$-\frac{\pi}{2} + \theta_c < \theta_m < \frac{\pi}{2}$$

또는

$$\frac{\pi}{2} + \theta_c < \theta_m < \frac{3\pi}{2} \quad (1)$$

와 같은 조건을 만족시키는 점만을 실제레이저광의 궤적으로 선정한다. 즉 이미지블럭의 단면에서 레이저광의 궤적이 형성하는 각도를 조사하고 (1)식의 constraint를 만족하는가 여부를 판별하여 실제레이저의 궤적과 외란요소에의한 레이저의 궤적을 구분한다.

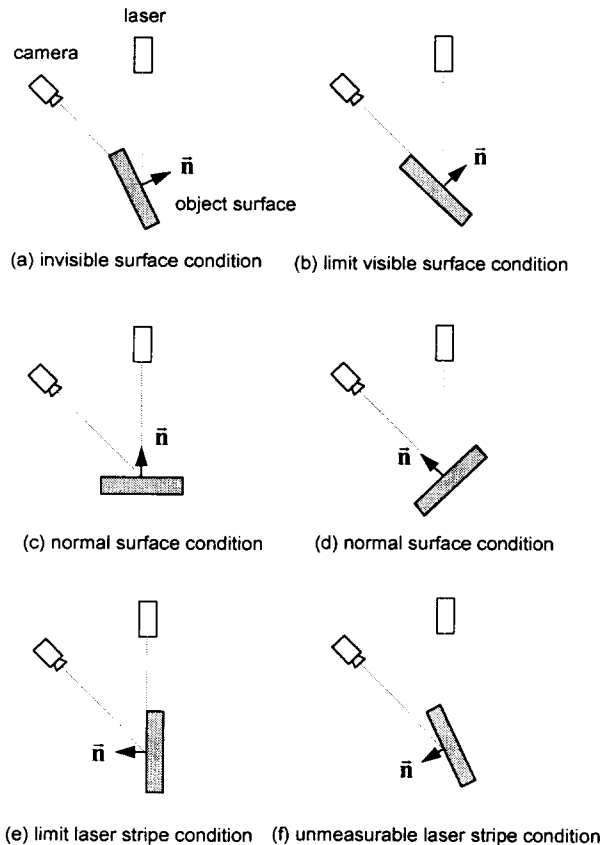


그림 3. 측정가능 표면법선벡터의 존재조건

식(1)의 Constraint를 적용하기 위하여 우선 레이저광의 궤적은 세선화과정을 거치게 된다. 슬릿광형상측정장치에서 많이 사용되어온 세선화방법으로는 이미지상에서 레이저광의 밝기값을 가중치로하여 레이저광의 중심을 찾는방법이 주로 사용되어왔다. 이 방법은 레이저광의 중심값을 서브픽셀

(subpixel)단위까지 구할수있어 빠르고 정확한 측정이 가능하다. 그러나 이 방법은 밝기값의 도심(centroid)을 찾는 방법이므로 경면물체 형상측정시 2차반사외같은 외란요소가 존재할경우 실제레이저의 궤적과 외란요소예외한 레이저의 궤적과의 평균값을 구하게되므로 상당한 오차를 유발시키게 된다. 때문에 본 연구에서는 레이저광의 세선화를위하여 화상처리에서 쓰이는 FDG(First Derivative of Gaussian)오퍼레이터를 사용하였다.[12] 레이저 광의 밝기값의 분포는 이미지 상에서 가우시안 형태와 유사하게 나타나게되고 이와같은 일종의 루프에지(roof edge)에 FDG오퍼레이터를 이용하여 컨벌루션(Convolution)을 취할경우 제로크로싱(zero crossing)되는점에서 레이저광의 밝기값이 최대가 되는점을 subpixel단위로 구할수 있으며 또한 Smoothing효과가 있으므로 정확한 레이저광의 궤적을 구해낼수 있다. 세선화작업이 끝난 이미지에대하여 제안된 constraint를 적용하기 위하여는 찾아진 레이저광 궤적이 형성하는 각도를 알아내야 하므로 현재의 세선화된 레이저광 위치를 중심으로 임의의 $M \times M$ 영역에대하여 1차함수로 least square fitting하여 레이저광의 궤적이 형성하는 각도를 알아내었다. 그림4는 이러한 일련의 과정이 이미지블럭 단면상에서 수행되는 과정을 나타낸다.

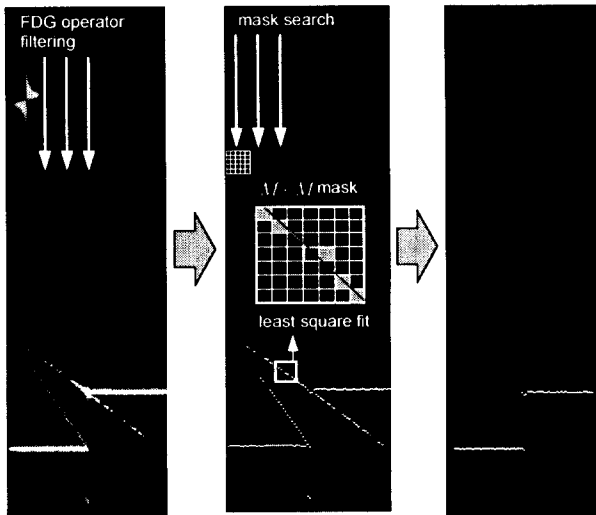


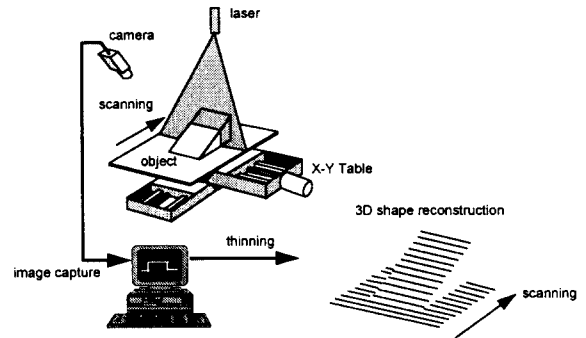
그림4. 이미지블럭단면상에서의 측정외란요소제거

4. 측정시스템

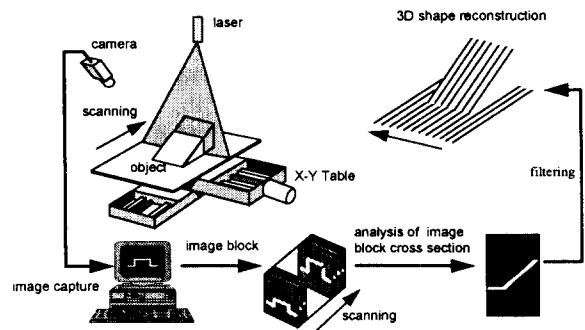
4.1 측정원리

슬릿광을 이용한 3차원 형상측정장치는 크게 슬릿광을 만들어내는 레이저광학과 영상을 획득하는 카메라와 영상으로부터 높이정보를 알아내는 화상처리부, 그리고 스캐닝을위한 XY-Table 4부분으로 구성되어있다. 레이저가 실린더렌즈를통과하여 슬릿광형태로 대상물체에 투사되면 대상물체의 형상에 따라 카메라에서는 레이저광의 형상이 변형되어 나타난다. 그림5에서와 같이 대상물체의 높이에따라 화면상에서 서로 다른 픽셀위치에 레이저광의 영상이 맺히게 되므로 카메라 이미지상에서 레이저광의 궤적을 세선화기법을 통하여 정확히 찾아낸뒤 이를 통하여 정확한 높이정보를 얻어낼수있다. 기존의 3차원 형상측정장치에서는 그림5-(a)에서와 같이 XY-Table을 일정간격씩 움직여가며 이러한 일련의 작업을 수행함으로써 전체 측정물체에대한 3차원 형상정보를 얻어내었다. 그러나 경면물체의 형상측정시 발생하는 문제를 해결하기위하여 본 연구에서는 그림5-(b)에서와 같이 전체 스캐닝 이미지를 블럭형태로 저장한후

이의 단면상에서 2차반사성분을 제거하고 올바른 물체의 3차원 형상을 복원하도록 하였다.



(a) 기존의 3차원 형상측정방법



(b) 제안된 3차원 형상측정방법

그림5. 레이저 슬릿광을 이용한 형상측정방법

4.2 측정장치구성 및 보정

제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 슬릿광형상측정장치를 그림5과같이 구성하였다. 레이저는 670nm 3mW 다이오드레이저를 사용하였고 원통형렌즈를이용하여 fan angle 30도인 슬릿광을 만들었다. 카메라는 510(H) X 492(V)의 화소를 가지는 Watec사의 카메라에 f:16mm렌즈를 사용하였다. 카메라는 레이저와 45도 각도로써 설치되었고 레이저는 XY-Table과 수직으로 입사되도록 설치하였다. XY-Table은 정밀도 0.005mm를 가지는 터보테크사 제품을 사용하였다. 화상처리를 위하여는 Data Translation사의 DT2867 화상처리보드를 사용하였고 486PC의 Windows환경하에서 측정작업을 수행하였다. 측정시스템의 측정영역은 $300 \times 163.31 \times 176.9 (mm^3)$ 이되고 측정분해능은 $0.26 \times 0.37 (mm)$ 으로 설계하였다.

슬릿광형상측정장치에서 공간상의 3차원 정보는 영상상에 2차원으로 매핑된다. 영상상에서의 2차원 정보로부터 3차원 정보를 얻어내기 위하여 기존의 방법에서는 카메라모델의 2차원 영상좌표계를 3차원 센서좌표계로 변환시키는 4×3 변환행렬을 이용한다. 그러나 Fisher, Trucco는 Direct Calibration방법을 제안하여 카메라에대한 모델없이 즉 절대좌표계로부터의 카메라의 자세와 위치, 2차원으로부터 3차원으로의 변환행렬등과같은 요소등을 구하지 않고 직접 삼차원 좌표계상의 값을 카메라 이미지상의 이차원 좌표계로 매핑시켜 사용하였다.[8] 이러한 방법은 측정물체와 카메라 이미지까지의 광학계를 일종의 블랙박스화 시키고 측정물의 3차원 좌표와 이에 대응하는 화면상의 좌표를구하여 이를 Look Up Table화 시킨다. 이 방법의 장점은 측정오차가 이미지상에서 균일하며 보정작업이 매우 손쉽게 이루어질수 있다. 이러한 Direct Calibration작업을 수행하기위하

여 각 단의 높이가 2mm이고 50개의 단을 갖도록 설계된 보정판을 사용하였다. 보정판은 XY-Table상에서 수직,수평으로 일정 간격씩 움직이며 각 높이에대한 이미지상의 좌표를 Subpixel단위로 구하여 사용하였다.

4.3 실험 및 측정결과

경면물체에 있어서 2차반사및 측정외란요소들이 측정결과에 어느정도의 영향을미치고, 이러한 측정외란요소들이 제거되었을 경우 얼마만큼 형상정보를 향상시키는가에 대하여 알아보기 위하여 테스트 시편을 만들어 형상을 측정하여 보았다. 각 시편은 표면을 연삭처리하여 경면반사성분을 강하게 갖도록 제작되었다. 그림 6은 각각의 시편에 대하여 기존의 방법으로 형상을 측정하였을 경우와 제안된 방법으로 2차반사와같은 측정외란요소성분을 제거한후에대한 측정된 3-D 형상이다. 기존의 형상측정방법으로는 매 스캐닝 단계마다 획득된 영상이미지에서 가중치법을 이용하여 세선화한후 높이정보를 알아내는 방법을 사용하였다. 기존의 방법을 사용하여 측정된 형상에서는 2차반사,간접광원경면반사와 같은 외란요소에의하여 실제 높이보다 높게 혹은 낮게 큰 오차를 수반하며 형상이 측정되었고 정반사에의한 경면반사 성분에 의하여 폭 방향으로도 큰 오차를 형성하게됨을 알수있다. 그러나 제안된 방법에서는 측정오차요인이 효과적으로 제거되었고 측정된 형상정보가 비약적으로 향상되었음을 알수있다. 이와같은 결과에서 제안된 알고리즘은 2차반사 및 정반사에의한 경면반사, 그리고 간접광원경면반사와 같은 측정외란요소들이 효과적으로 제거가 가능함을 확인할수있다

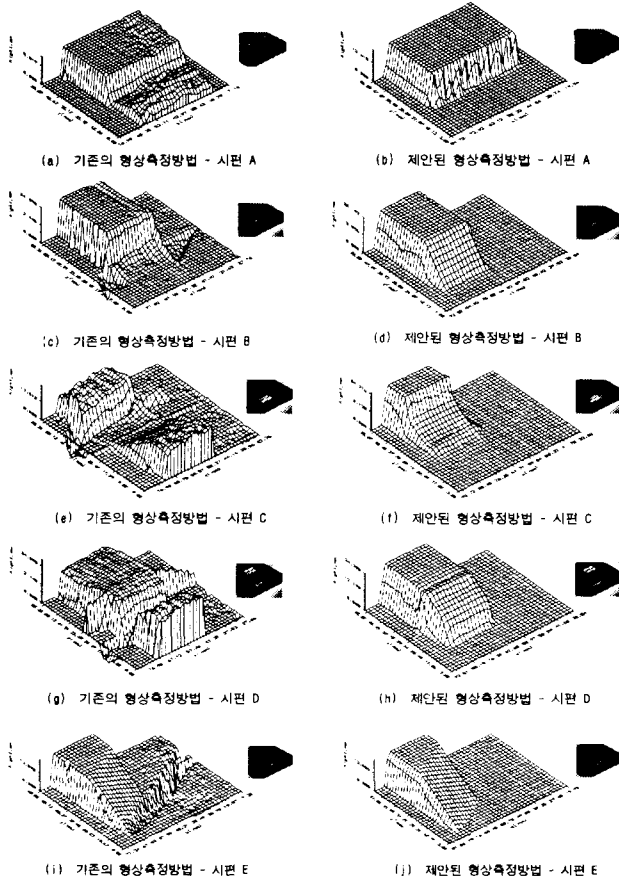


그림6. 경면물체의 3차원형상 측정결과

5. 결론 및 향후 연구과제

경면물체를 슬릿광을 이용하여 형상을 측정하려할때 2차반사와 같은 측정외란요소들은 측정결과에 심각한 영향을 줄뿐아니라 해결하기 매우 어려운 문제로 작용하여왔다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 이미지블럭이라는 새로운 개념을 도입하였으며 이미지블럭의 단면상에서 나타나는 레이어제적의 특성을 이용하여 측정외란요소를 제거하기 위한 각도 constraint를 제안하였다. 또한 이를 적용하기위한 세선화방법 및 각도추출알고리즘을 제안하였다. 그리고 실제 경면물체의 형상을 측정하기위하여 슬릿광 측정장치를 설계,구성하였으며 제안된 알고리즘을 이용하여 간단한 형상을 갖는 경면물체에 대하여 형상을 측정하여 보았으며 기존의 방법에비하여 측정정보가 비약적으로 향상됨을 알수있다.

향후 연구에 있어서는 처리속도 및 메모리사용의 효율을 향상시키기위하여 측정지점 전후의 몇장의 이미지만을 가지고 단면을 조사하는 방법에대한 연구와 3차원적으로 임의의 형상을 갖는 물체에 있어서 2차반사 혹은 경면반사등과같은 측정외란요소가 같은 특성에대한 3차원적 해석 및 또다른 측정외란요소 제거방법, 반사광의 광량에 영향을 미치는 여러가지 요인 및 이에 대한 해석등과같은 부분에대하여 연구가 진행되어야 할것이다.

참고문헌

- [1] David Nitzan, "Three-Dimensional Vision Structure for Robot Applications", IEEE Trans. on PAMI, Vol.10, No.3, May 1988, 291-309
- [2] Olivier Faugeras, "Three-Dimensional Computer Vision" MIT Press,1993.
- [3] Paul J.Besl, Ramesh C.Jain, "Three-Dimensional Object Recognition",Computing Surveys, Vol.17, No.1, March 1985, 75-145
- [4] Roger Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.4, August 1987
- [5] H.A. Martins, J.R.Birk and R.B.Kelley, "Camera models based on data from two calibration planes", Computer Graphics and Image Processing, Vol.17, 1981, 173-180
- [6] Robert M. Haralick, Linda G.Shapiro, "Computer and Robot Vision", Vol.1, Addison-Wesley Publishing Company, 1992
- [7] D.D. Harrison, M.P.Weir, "High-Speed Triangulation-Based 3-D Imaging with Orthonormal Data Projections and Error Detection", IEEE Trans. on PAMI, Vol.12, No.4, April 1990, 409-416
- [8] Emanuele Trucco, Robert B.Fisher, "Acquisition of Consistent Range Data Using Local Calibration", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994, Vol.4, 3410-3415
- [9] J.Clark, E.Trucco, H-F. Cheung, "Improving Laser Triangulation Sensors Using Polarization", Fifth International Conference on Computer Vision, June 1995, 981-986
- [10] S.K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling", IEEE Trans on Robotics and Automation, 6(4), 1990, 418-431
- [11] Robert C. Bolles, H. Harlyn Baker, David H. Marimont, "Epipolar-Plane Image Analysis:An Approach to Determing Structure from Motion", IJCV, Vol.1, 1987, 7-55
- [12] John Canny, "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Trans. on PAMI, Vol.8, No.6, November 1986