

입체화상으로부터 3차원 마이크로계의 효과적인 깊이측정

황진우⁺, 이 증⁺⁺, 윤도영^{*}

(논문접수일 2007. 6. 29, 심사완료일 2007. 8. 13)

An Efficient Depth Measurement of 3D Microsystem from Stereo Images

J.-W. Hwang⁺, J. Lee⁺⁺, D.-Y. Yoon^{*}

Abstract

This study represents the efficient depth measurement for 3-dimensional microsystems using the disparity histogram from stereo images. Implementation of user-friendly Windows program written in C++ involves the various methods for the stereo-image processing in which the minimization of matching-pixel error upon the unique point for stereo images was carried out as a pre-processing method. Even though MPC among various methods was adopted in the present measurement, the resulting measurements seem to require optimizations of the windows sizes and corrections of post-manipulation for stereo images. The present work using Windows program is promising to measure the 3-dimensional depth of micro-system efficiently in implementing the 3-dimensional structure of micro-systems.

Key Words : depth measurement(깊이측정), stereo image(입체화상), 3D microsystem(3차원 마이크로계), disparity histogram(변위 그래프), Windows program(윈도우즈 프로그램)

1. 서론

최근 3차원 영상분석 기법의 발전으로 이를 응용한 물질의 공간적 좌표 및 위치, 크기 정보에 대한 해석이 진행되고 있다. 피사체의 3차원 형상을 측정하는 기술은 스테레오 항공사진을 사용한 지도의 작성에서 시작되어 컴퓨터그래픽(CG: Computer Graphics)이나 전산설계(CAD: Computer-

Aided Design)에 대한 데이터 입력으로서 또는 신체 계측 등에 의한 의료·의류 디자인 등의 분야에서와 같이 다양하게 적용되고 있다. 또한 로봇비전으로 불리고 있는 연구에서는 로봇의 눈으로 카메라를 사용하여 외계의 3차원 정보를 얻으려는 시도가 활발히 이루어지고 있다.

Mori 등⁽¹⁾은 영역기반방법에 의한 반복 방법후원으로서 항공사진에 스테레오 카메라법을 성공적으로 적용하였으며,

+ 광운대학교 대학원 화학공학과
++ 광운대학교 화학공학과/국립과학수사연구소
* 교신저자, 광운대학교 화학공학과 (yoondy@daisy.kw.ac.kr)
주소: 139-701 서울시 노원구 월계동 447-1

이러한 연구를 통하여 추출된 이미지로와 사전 예측된 피사체와의 이미지를 통하여 두 이미지의 형태에 있어서 타당할 만한 유사성을 가짐을 처음으로 확인하였다. 이때의 방법은 폐색영역에서는 적용이 불가능하여, Hannah⁽²⁾는 인공지능을 도입한 영역기반방법에 적용시켜 상관관계의 정확성을 높여 폐색 영역에서의 측정을 가능하게 하였다. Banard와 Fischler⁽³⁾는 일반적인 스테레오이미지로부터 3차원 정보를 획득하는 과정에 대하여 기술하였으며, Arnold⁽⁴⁾는 윤곽선을 정합하는 여러 방법을 사용하여 스테레오 이미지로부터 3차원 정보를 획득하는 특징기반방법을 사용하였다. Geman⁽⁵⁾은 Gibbs분포함수를 도입하여 이미지 간 상관 관계를 모델링하는 통계론적 방법을 도입하였으며, Hoff 등⁽⁶⁾은 등고선 예측과 보간을 하나로 결합하여 특징기반 방법을 개선하였다. 1992년에는 Cochran과 Medioni⁽⁷⁾는 영역기반방법 중 피라미드 예측으로 정확성을 개선하였다.

본 연구에서는 스테레오 사진을 이용한 3차원 변위추출 알고리즘들의 실효성을 검토하고, 마이크로크기 물질의 표면 형태 구현 및 피사체의 두께를 측정하고자 한다. 이를 위하여 알고리즘 구현을 위한 시스템에 대하여 약술한 후, 스테레오 이미지로부터 피사체의 두께를 추출하는 결과에 대해 기술하였다. 본 연구에 의하여 구현된 3차원 입체영상의 프로그램은 마이크로크기의 계를 포함하는 3차원 입체영상의 구현과 관련된 용도에 있어 직접적으로 사용될 수 있을 것이다.

2. 거리 정보 추출 알고리즘

2.1 스테레오 카메라 배치 및 촬영

동일한 광학적 특성을 갖는 두 카메라로 서로 다른 방향에서 하나의 물체를 촬영하여 얻게 되는 두 영상은 피사체의 특정 부분이 서로 다른 위치에 투영되게 된다. 투영된 특정

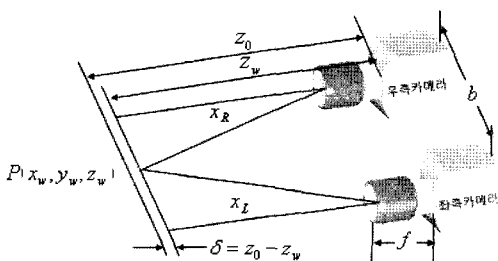


Fig. 1 Arrangement of stereo camera

부분에 대한 두 영상에서의 위치 차이를 변위차라 한다. 이때 좌, 우 카메라를 광축과 서로 평행하지 않게 배치하면 대응점을 찾는 탐색범위가 동일 선상으로 제한되지 않기 때문에 변위계산에 있어서 오차가 발생할 확률이 높고, 탐색 범위가 증가하는 단점을 가진다. 그렇기 때문에 Fig. 1에 나타난 것처럼 두 대의 입체 카메라는 동일한 y, z 좌표 값을 가지며 x 좌표 값의 차가 b 가 되도록 배치한다. 이와 같이 배치함으로써 대응점을 찾는 탐색범위가 동일선상으로 제한될 수 있고 3차원 거리 정보 또한 비교적 쉽게 계산할 수 있다.

그림에서 좌, 우 카메라의 초점거리를 f , 카메라 사이의 거리를 b 를 나타낸다. 3차원 공간상의 임의의 한 점 P 의 좌표를 (x_w, y_w, z_w) , 좌표 P 가 좌, 우 카메라의 영상면에 투영되는 이미지 좌표를 각각 $(x_L, y_L), (x_R, y_R)$ 로 정의 하면 삼각형의 비례관계에 의하여 다음과 같은 식을 정의할 수 있다⁽⁸⁾.

$$x_L = \frac{fx_w}{z_w}, \quad x_R = \frac{f(x_w - b)}{z_w} \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 z_w 를 구하면 다음과 같다.

$$z_w = \frac{bf}{x_L - x_R}, \quad \frac{bf}{d} \quad (2)$$

기본적으로 위 식 (2)를 이용하여 최종적으로 피사체의 두께 정보 δ 의 예측이 가능하다. 깊이 정보 δ 와 달리 $d(=x_L - x_R)$ 는 변위를 나타낸다. 좌, 우 카메라에 투영된 대응점의 x 좌표로부터 변위를 구할 수 있다. 카메라로부터 가까울수록 변위가 커지고 먼 거리에 있는 물체의 변위가 작아진다.

2.2 스테레오 이미지 정합

Geman 등⁽⁵⁾에 의한 영역기반의 통계론적 방법은 계산시간이 많이 걸리고 한쪽 영상에서는 계측되는 영역이 반대쪽 영상에서 계측되지 않는 폐색(occlusion)영역이나 화소간의 밝기 변화가 빈약한 영역에서는 수렴할만한 결과가 나오지 않는 단점이 있지만 계산이 단순하고 조밀한 변위에서도 사용 가능하다는 장점이 있어 스테레오 정합방법으로 많이 사용되고 있으며, 이러한 장점을 근거하여 본 연구 역시 영역기반법을 도입하였다.

양 이미지의 유사도를 계산하는 방법으로는 화소간의 밝기차를 비교하는 SSD(sum of squared distance), SAD(sum of absolute distance), 상관관계를 비교하는 NCC(normalized correlation coefficient), 유사 화소의 개수를 비교하는 MPC(mixed pixel count)방법 등이 있다. SSD, SAD, NCC법 등은 화소

간의 밝기 변화가 큰 영역이 작은 영역으로 경계선이 연장되는 현상(boundary overreach)으로 인하여 경계 부근에서의 값이 발산 되는 반면 MPC법은 화소의 밝기 값에 관계없이 화소간 정합결과가 일정하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 MPC 법을 이용하였다.

$$MPC(x, y, z) = \sum_w T(x, y, z) \quad (3)$$

여기서 $T(x, y, z)$ 는 좌, 우 영상에서 각각의 위치 (x, y) , $(x+d, y)$ 에서의 화소 밝기에 대한 임계값이다. 이때 두 이미지 간 화소 밝기가 비슷하면 1, 비슷하지 않으면 0의 값을 가지게 된다. 영역 기반 방법의 전체 계산량은 영역 기반방법이 내재하고 있는 중복계산을 제거함으로써 정체 계산량을 감소시킬 수 있다. 이때 MPC를 계산하는 방법은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} MPC(x+1, y, d) &= MPC(x, y, d) \\ &+ V(x+1+w_x, y, d) \\ &- T(x-w_x, y, d) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 V 는 정합창의 높이에 해당하는 W_y 크기의 수직선 간의 정합, MPC는 창간의 정합, w_x 는 창의 중심으로부터 수평거리, 그리고 w_y 는 창의 중심으로부터의 수직거리를 각각 나타낸다.

2.3 후처리과정

우선 인접한 화소의 변위 값은 서로 비슷하다는 제한 조건을 이용하여 비슷한 값을 가지는 인접한 변위들이 안정한 상태에 도달 할 때까지 연산 혹은 미리 설정된 횟수만큼 서로 후원하는 반복후원방법을 적용한다. 모든 화소가 모든 가능한 변위를 가질 초기 확률 값들을 계산한 후에 초기 확률 값들은 비슷한 변위들 간의 반복적인 후원을 통하여 실험하였다. 변위와 거리와의 관계를 이용하여 변위로부터 거리 정보를 실제 얻을 수 있다.

우측 영상을 기준으로 계산된 변위와 좌측 영상을 기준으로 계산된 변위가 서로 일치하지 않을 때에는 두 영상 제한법을 이용하여 정합 요소에서 제외시킨다. 다음으로 우 영상을 기준으로 계산된 변위 영상에서 두 영상 제한법으로 제외된 화소를 중심으로 왼쪽에 있는 제외되지 않은 화소의 변위 값이 오른쪽에 있는 화소의 변위 값과 비교하여 미리 정의된 값보다 클 때 이러한 영역을 폐색 영역으로 지정한다. 최종적으로 보간하고자 하는 화소를 중심으로 한 일정한 크기의 창 내의 화소들의 변위 값의 평균과 표준편차를 구하고 평균

을 중심으로 표준편차 범위내의 변위 값들에 대해서만 다시 평균을 구함으로써 경계를 보존하면서 보간한다.

2.4 이산푸리에변환

본 연구에서 적용된 푸리에 변환은 화상 정보를 주파수 영역으로 변화시켜서 화상의 주파수 성분의 해석을 가능하게 하고 공간영역의 상승적분 등의 복잡하고 계산이 힘든 수식을 간편하게 하여 화상 보정 필터의 설계를 용이하게 한다. 유한한 $N \times N$ 크기의 화상에 대해서 푸리에 변환 및 역푸리에 변환의 정의는 다음과 같다.

$$S(w_1, w_2) = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} s(n_1, n_2) e^{-jw_1 n_1} e^{-jw_2 n_2} \quad (5)$$

$$S(n_1, n_2) = \sum_{w_1=0}^{w_x-1} \sum_{w_2=0}^{w_y-1} s(w_1, w_2) e^{-jw_1 n_1} e^{-jw_2 n_2} \quad (6)$$

주파수변환을 통한 스테레오 화상정보로부터 무방향성의 2차 미분연산자를 일반화 Gaussian-Laplacian 모델에 대하여 1차원 Gaussian 함수 $g(x)$ 는 다음과 같이 정의 된다⁹⁾.

$$g(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma}\right) \quad (7)$$

여기서 σ 는 Gaussian의 분산정도를 나타내는 표준편차이다. 식 (7)의 Fourier 변환을 2차원 평면공간에서 중심에서부터의 거리 ρ 의 함수로 나타낸 후 다시 국소적 픽셀 명암도를 $f(r, c)$ 로 치환한 후 가중적분 연산 후의 Laplacian을 취하면 다음과 같다.

$$h(r, c) = \nabla^2 [g(r, c) * f(r, c)] \quad (8)$$

이때 ρ 는 원점에서부터 해당 픽셀까지의 거리이므로 이를 적용하면 다음과 같다.

$$\nabla^2 g(\rho) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{\rho^2}{2\sigma}\right) \left(-\frac{\rho^2}{2\sigma}\right) \quad (9)$$

$\Delta^2 g(\rho)$ 부터 얻을 수 있는 마스크를 국소적 픽셀 명암도 $f(r, c)$ 와 가중적분시킴으로써 무방향성의 2계 미분된 Gaussian 영상을 얻을 수 있다. 그 결과 값에 대하여 영점을 통과한다는 확신을 가지게 되는 윤곽점으로 판별할 수 있다. 실제 연산에 있어서 각 픽셀의 중심점에 위치한 $\Delta^2 g(\rho)$ 의 마스크를 가중적분 시킴으로서 이웃하는 픽셀에서의 가중적분 값이 서로 부호가 다른 조건이 되면 영점을 통과하는 것

으로 인식함으로써 이미지 윤곽을 판별할 수 있다. 이상에 열거한 알고리즘은 본 연구의 프로그램 구현에 있어서 핵심적인 내용들이다. 이는 수집된 다수의 2차원 화상으로부터 입체화상을 구현하는데 사용되며, 이를 위하여 적절한 형태의 전처리 과정을 통한 입체화상의 정합이 반드시 선행되어야 한다. 이러한 정합 과정을 거친 정보들을 적절히 후처리하여 최종적으로 3차원 곡면을 구현가능하였다.

3. 프로그램구현 및 실험

입체화상구현을 위한 C++ 언어를 윈도우 환경하에서 구동 될 수 있도록 프로그래밍하였다. 스테레오 이미지 구현을 위하여 SAMSUNG SHC-650A CCD 카메라를 사용 하였다. CCD 카메라로 얻어진 스테레오 이미지는 압축파일의 정보 손실을 방지하기 위하여 비압축 파일 형식인 BMP 타입으로 저장하여 MDI 형식 프로그래밍하였다.

3차원 이미지 구현 프로그램은 산출된 변위 히스토그램을 3차원의 모든 방향에서 이미지의 돌출 및 함몰을 확인 할 수 있도록 설계하여 이용자의 편의를 도모 하였다. 스테레오

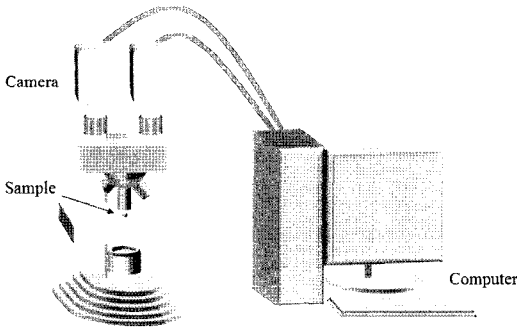


Fig. 2 Schematic diagram of stereo-image experiment

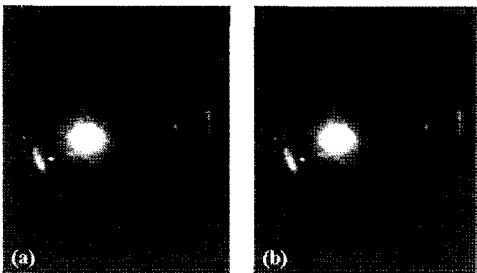


Fig. 3 Stereo images of micro-size sphere:
(a) left image (b) right image

이미지 획득을 위한 개략적인 실험 장치도를 그림 4에 나타내었다. Fig. 2는 광학현미경을 변형하여 마이크로 크기의 물체의 외형이미지를 스테레오로 추출하기 위한 장치의 설계로서 National Instrument 사의 이미지보드를 LabView 로서 연결한 구성도를 보여주고 있다.

4. 결과 및 검토

두 대의 카메라로 얻어진 390 μ m크기의 구리 도금된 구형 비드의 스테레오 이미지를 LabView 를 이용하여 Fig. 3에 나타내었다. 결과에 대한 시각적 표현을 위해 산출된 변위들을 0~255의 정수 값으로 선형 정량화 시켜 0은 검은색, 255는 흰색, 중간 값들은 대응되는 명암으로 나타내었다. 이로부터 Fig. 4에 스테레오 이미지 구현 기법에 대한 여러 기법을 비교하였다. 그림 (a)의 NCC 기법과 그림 (b)의 SAD 기법의 경우 MPC 기법의 경우 보다 정합 연산이 조금 더 정확함을 확인 할 수 있다. 반면에 MPC 기법의 경우 다른 기법들과 비교하여 노이즈가 다소 많음을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 Fig. 4에서 생성된 이미지를 바탕으로 명암 대비를 이용하여 정합된 플라스틱 비드 이미지의 최종 3차원 이미



Fig. 4 Comparison of image processing technique:
(a) NCC, (b) SAD, (c) MPC

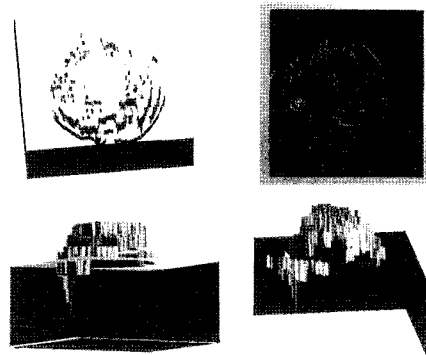


Fig. 5 3D display from stereo images of spheres

지이다. 모사된 이미지를 통하여 돌출된 영역과 더불어 함몰된 영역까지의 깊이를 확인할 수 있으며, 이러한 연산 및 작업을 통하여 마이크로 물질의 두께 정보 역시 취득 가능하다. Fig. 5는 입체화상을 이용한 마이크로 크기의 물체에 대한 3차원 구현으로, 비록 많은 노이즈는 동반하나 전체적으로는 구의 형태를 가짐을 확인할 수 있었다.

그림에 보이는 바와 같이 마이크로 크기의 구형 물질에 대한 3차원 공간 좌표 구현은 형태상으로 많은 잡음을 보여주고 있다. 비록, 최적 구의 형태에 접근하지는 못하였지만, 외경상 구현을 취하고 있으며, 실측한 깊이 또는 두께에는 5%이내의 오차를 보여주고 있다. 이러한 문제들은 향후 지속적인 연구와 측정 장치들의 발전과 더불어 극복 가능할 것으로 전망된다. 정밀 촬영 시 획득한 이미지의 질을 결정하는 중요 요인으로 영상 촬영 시 입사 되는 빛의 광 및 반사 광을 고려 할 수 있다. 미세 물질의 촬영 시 광의 역할은 일반 영상 촬영 시 보다 훨씬 큰 비중을 가지며 이러한 빛의 영향으로 인하여 이미지 정합 및 최종 3차원 이미지 구현의 질이 결정될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 현미경을 통하여 관찰 되는 마이크로 물질에 대하여 스테레오 이미지 변위 추출 및 3차원 형상 해석을 수행 하였다. 변위 추출 알고리즘으로서 SSD, NCC, MPC 기법을 적용하여 이미지간 상호 효용성을 비교하였으며, 이를 토대로 추출된 변위 정보에 대한 3차원 영상을 구현하여, 마이크로 크기의 깊이를 효과적으로 계측하였다. 스테레오 이미지를 이용한 형상 분석 기법은 모든 위치에서의 변화 현상을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 타 기법보다 구현비가 매우 적게 소요되므로 향후 발전 가능성이 클 것으로 예상된다. 그러나 본 논문에서 사용된 방법은 현미경이라는 제한적인 조건에서 시행하여 변위의 제한이 많았으며, 이로 인하여 비교적 정확한 이미지 구현에 한계를 가지고 있다. 컴퓨터의 발달과 더불어 본 연구에서 구축 된 스테레오 이미지 3차원 모사 프로그램은 연속적으로 운동하는 물질에 대한 모사 및 추적분석이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 서울특별시가 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합공정 및 장비개발)으로 지원과 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2006-C1090-0603-0018).

참고 문헌

- (1) Mori, K., Kidode, M. and Asada, H., 1973, "An iterative prediction and correction method for automatic stereocomparison," *Comput. Graphics Image Processing*, Vol. 2, pp. 393~401.
- (2) Hannah, M. J., 1974, "Computer matching of areas in stereo images," Ph. D. Thesis, Stanford University.
- (3) Barnard, S. and Fischler, M., 1984, "Computational stereo," *ACM Comput. Surveys*, Vol. 14, pp. 553~572.
- (4) Arnold, R. D., 1983, "Automated stereo perception," Ph. D. thesis, Stanford University.
- (5) Geman, S. and Geman, D., 1984, "Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images," *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 6, pp. 721~741.
- (6) Hoff, W. and Ahuja, N., 1989, "Surfaces from stereo: Integrating feature matching, disparity estimation, and contour detection," *IEEE Trans. MI*, Vol. 2, pp. 121~136.
- (7) Cochran, S. D. and Medioni, G., 1992, "3-D surface description from binocular stereo," *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 14, pp. 981~994.
- (8) O'Neill, M. and Denos, M., 1996, "Automated system for coarse-to-fine pyramidal area correlation stereo matching," *Image and Vision Computation*, Vol. 14, pp. 220~236.
- (9) Marr, D. and Hildreth, E., 1980, "Theory of edge detection," *Proc. R. Soc, London, B* 207, pp. 187~217.