

VMS에서의 자동 초점 조절

한광수⁰ 최준수 김자근 백경순
국민대학교 컴퓨터학부
{kshahn⁰, jschoi}@kookmin.ac.kr}

Autofocusing algorithm for the Video Measuring System

Kwang-Soo Hahn⁰ Junsoo Choi Ja-Geun Kim Kyungsoon Baek
School of Computer Science, Kookmin University

요약

고배율 렌즈를 장착한 3차원 비접촉 측정 장비에서 컴퓨터 비전을 이용한 정밀도 높은 형상의 측정을 위해선 선명한 영상 획득을 위한 정확한 초점 위치 결정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 정초점 위치를 찾기 위하여 수동형 초점 조절 방법을 사용한다. 각각의 렌즈 위치에서의 입력 영상에 대해 초점 위치 추적의 척도가 되는 초점값을 변형된 LoG 방법을 이용하여 측정하고, 측정된 초점값들의 렌즈 위치에 따른 분포 곡선에 대한 가우시안 정합을 적용한 정초점 위치 검색을 통해 최적의 초점 위치를 결정하는 기법을 제안한다.

1. 서론

컴퓨터 비전을 이용한 3차원 정밀 형상 측정 시스템(Video Measuring System, 이하 VMS)에서 초점 조절은 측정 정밀도에 큰 영향을 미친다. 형상의 정밀한 측정을 위해서는 CCD 카메라를 통해 입력되는 영상에서 정확한 에지 성분을 찾아야 한다. 이러한 정확한 에지 성분을 찾아내기 위한 실행 과정이 카메라와 검사 형상간의 초점 거리 조절이다. 본 논문에서는 카메라와 검사 형상간의 정확한 초점 위치를 분석하기 위하여 레이저 등의 부가적인 장치를 사용하지 않는 수동형 초점 조절 방법을 기반으로 한다. 우선 카메라로부터 입력 받은 영상의 특성 분석을 통해 초점 조절에 이용하기 위하여 m-LoG (modified-Laplacian of Gaussian)를 적용하여 초점값을 측정한 후, 가우시안 정합 알고리즘을 적용하여 광학축의 측정 범위 안에서 측정된 각 초점값들에 대한 전역 최대값을 갖는 정초점 위치를 찾는 방법을 제안하였다.

2. 자동 초점 조절 시스템

수동형 초점 조절 방법인 영상처리에 의한 자동 초점 조절의 기본 원리는 초점 위치를 검색하기 위하여 부가적인 장치를 사용하지 않고 입력된 영상 신호만으로 초점값을 계산하여 초점값이 커지는 방향으로 렌즈 위치를 이동시키는 것이다.

그림 1은 VMS에서의 일반적인 자동 초점 조절 방법의 예를 보이고 있다. VMS는 자동 제어가 가능한 X, Y, Z축을 갖고 있으며, 카메라와 렌즈는 Z축(광학축)에 장착되어 있다. 대부분의 VMS는 배율 조정이 가능한 줌렌즈를 장착하고 있으나, 자동 초점 조절에는 고정 배율로 광학축만을 이동하여 초점 위치를 검색하게 된다. 자동 초점 조절은 그림과 같이 현재의 카메라 위치를 기준으로 상하 각각 Δd 의 검사 구간을 이동하며 매

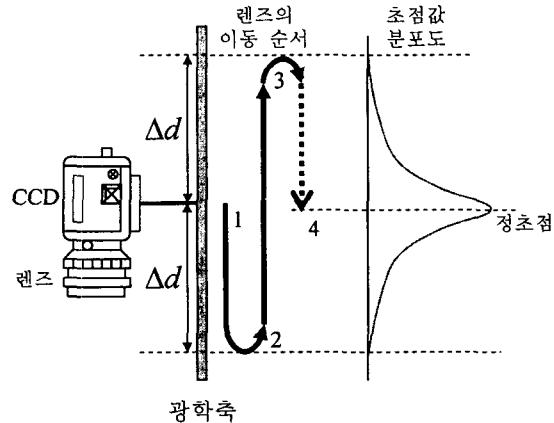


그림 1. VMS에서의 자동 초점 조절의 개념

렌즈 단계마다 초점값을 계산한다. 그림에서 1~4의 숫자는 렌즈의 이동 순서와 위치를 나타낸다. 제 1 위치에서 시작하여 제 2 위치와 제 3 위치를 지나 모든 검사 영역에 대한 초점값 계산을 마친 후, 가장 큰 초점값을 갖는 정초점 위치인 제 4 위치로 이동하며 초점 조절을 마치게 된다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 자동 초점 조절의 구성도를 보이고 있다. 우선 현재 위치에서 입력된 영상에 대해 초점값을 측정하고, 일정 간격의 약속된 다음 렌즈 위치로 이동해 가며 초점값을 측정한다. 전체 렌즈 검사 구간에 대하여 초점값을 측정한 후 가우시안 정합을 이용하여 예측된 정초점 위치로 이동시킴으로써 초점 조절을 완료하게 된다. 이 방법은 최소한의 초점값 측정만으로 최적의 초점 위치를 찾는 장점을 갖고 있다.

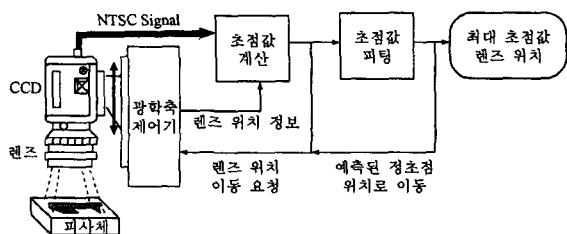


그림 2. 제안된 자동 초점 조절 구성도

3. m-LoG 초점값 측정 알고리즘

입력 영상의 초점이 잘 맞을수록 영상 내의 경계가 선명해지는 것은 영상에 고주파 성분이 많이 분포하게 되는 것을 의미한다. 이러한 사실에 기인한 여러 종류의 초점값 측정 알고리즘들이 알려져 있다. 대표적인 초점값 측정 방법으로는 Tenengrad, SMD(Sum Modulus Difference), FSWM(Frequency Selective Weighted Median), SML(Sum Modified Laplacian) 등이 있다. CCD 카메라를 통한 영상 획득 시 잡음들이 발생하게 되는데, 기존의 초점값 측정 방법들은 미디언 필터에 기반한 FSWM을 제외하고는 영상에 발생 가능한 고주파 성분의 임펄스 잡음이나 가우시안 잡음인 열 잡음에 대한 처리가 고려되어 있지 않다는 문제점을 가지고 있다.

위 방법들 중 SML은 고주파 성분 분석에 대표적인 고역 통과 필터인 라플라시안 필터에서 수직, 수평 성분의 2차 미분치의 크기가 같고 부호가 반대일 때 서로 상쇄하게 되는 문제점을 해결한 방법이다. SML에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{\text{Laplacian}} &= \sum_x \sum_y \{\nabla^2 f(x, y)\}^2 \\ &= \sum_x \sum_y \left\{ \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \right\}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{SML}} &= \sum_x \sum_y \{\nabla^2 f(x, y)\}^2 \\ &= \sum_x \sum_y \left\{ \left| \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \right| \right\}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)은 일반적인 라플라시안 필터를 이용한 초점값 측정식이고, 식 (4)는 라플라시안 필터의 문제점을 해결한 SML의 측정식이다.

본 논문에서는 임펄스 잡음과 열 잡음을 처리하기 위하여 전처리 과정으로 가우시안 필터를 사용하고, 초점값 측정을 위한 과정으로 SML을 사용하는 변형된 라플라시안-가우시안 필터 m-LoG(modified Laplacian of Gaussian)를 적용하였다.

가우시안 필터는 미디언 필터에 비하여 임펄스 잡음을 제거 능력이 떨어지나, 열 잡음과 같은 가우시안 잡음에 대한 처리 능력도 가지고 있으므로 초점값 측정에 유용한 필터이다. 또한, σ 값이 고정되어 있다면, 미리 정의된 가우시안 마스크를 사용함으로써 처리 속도를 향상 시킬 수 있다.

4. 가우시안 정합을 통한 정초점 위치 검색

그림 3에 나타나듯이 렌즈 이동에 따른 m-LoG 초점값 곡선

은 가우시안 분포를 나타낼 수 있다. m-LoG 초점값 측정 알고리즘뿐 아니라 앞에서 기술한 대부분의 초점값 측정 알고리즘들의 곡선은 가우시안 형태의 분포도를 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 초점 위치 검색 방법은 초점값의 분포가 이러한 가우시안 형태를 갖는다는 사실에 기인한 것으로 가우시안 곡선의 최대값을 갖는 위치인 중앙(평균) 위치를 최적의 초점값 위치로 하는 비선형 최소 제곱 회귀 분석 기법의 한 방법인 곡선 정합을 적용하여 최적의 초점 위치를 예측하는 방법이다. 비선형 회귀 분석은 선형 회귀 분석과 마찬가지로 오차의 제곱 합을 최소로 하는 매개 변수를 구하는데 바탕을 둔다. 본 논문에서는 곡선 정합에 참여하는 모델로 가우시안 모델을 사용한다. 곡선 정합에 사용되는 가우시안 모델의 식은 다음과 같다.

$$f(x) = w_a \exp \left[- \left(\frac{x - w_c}{w_w} \right)^2 \right] \quad (5)$$

식 5에서 계산해 내야 할 파라미터는 w_a , w_w , w_c 총 세 가지이다. w_a 는 가우시안 곡선의 진폭을 나타내며, w_w 는 가우시안 곡선의 너비를 나타내며, w_c 가 구하고자 하는 가우시안 곡선의 중앙값, 즉 최적의 초점 위치를 나타낸다. 일반적으로 파라미터 3개의 값을 계산하기 위한 방정식을 풀기 위해서는 렌즈의 위치 x 와 그 위치에서의 초점값 $f(x)$ 의 쌍이 최소 3개만 존재해도 된다. 하지만 본 논문에서는 가우시안 정합에 대한 신뢰도를 높이기 위해 $(x, f(x))$ 쌍의 개수를 최소 5개 이상으로 제한하였다. 이는 실험에서 5개 이상의 데이터 적용 시에 실제 정초점 위치에 근사한 값이 획득된다는 것에 기인하였다.

5. 실험 및 결과 분석

초점 조절을 위한 전제 조건으로 초점 조절 과정 중에는 렌즈의 변동을 고려치 않는 고정 렌즈를 사용하며, 렌즈 검사 구간 내에는 항상 정초점이 존재해야 한다. 또한, 영상의 초점 조절 시 검사 영역을 줄여 처리 속도를 향상시키기 위하여 초점을 맞출 피사체의 중심이 화면 중앙 부위에 위치해 있어야 한다.

효율적인 자동 초점 조절의 방법을 찾기 위하여 앞에서 기술한 여러 초점값 측정 알고리즘들에 대해, 공정하게 테스트하기 위하여 그림 4와 같이 각각 20 μm 간격으로 렌즈 위치를 이동해 가며 캡쳐한 영상 101장을 이용하여 실험하였다. 그림은 각각 10 간격(200 μm)의 영상들을 보이고 있다. 그림에서 50번째 영상 (e)가 최적의 정초점 위치를 나타낸다. 그림 3은 이 영상들에 대한 FSWM과 m-LoG의 초점값 분포를 비교한 것으로, m-LoG의 초점값 곡선은 FSWM의 초점값 곡선에 비하여 더욱 좌우 대칭적인 가우시안 분포를 갖는 것을 알 수 있다.

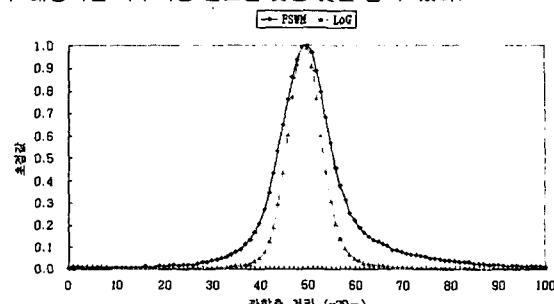


그림 3. FSWM과 m-LoG 초점값에 대한 초점 곡선의 비교

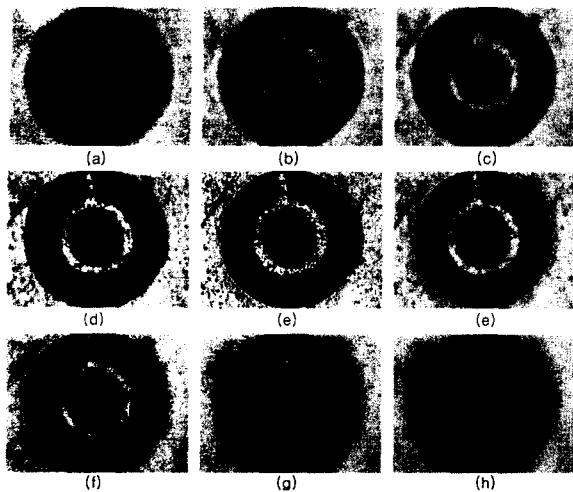


그림 4. 실험 영상 (PCB 기판)

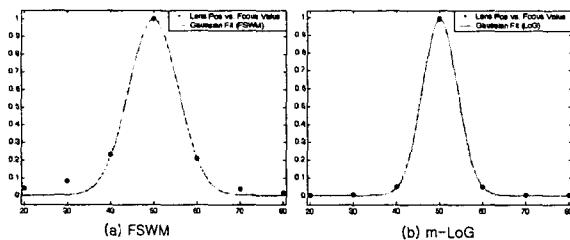


그림 5. FSWM과 m-LoG의 가우시안 정합 결과

표 1. FSWM과 m-LoG의 가우시안 정합 결과 분석표

	FSWM	LoG
정초점 위치	49.88	50.04
SSE	0.008327	0.000069
RMSE	0.045630	0.004163
결정계수 R	0.988700	0.999999
수정 결정계수 R	0.983100	0.999999

초점값의 분포가 좌우 대칭이 될수록 가우시안 정합 적용 시 정합에 대한 오차 크기는 작아지게 된다. 그림 3에서 m-LoG가 FSWM에 비하여 더욱 좌우 대칭 구조를 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 전체 렌즈 위치에서 등 간격으로 7곳의 렌즈 위치에서 초점값을 측정하여 가우시안 정합에 대한 곡선을 보이고 있다. 그림에서 m-LoG가 FSWM에 비해 가우시안 곡선에 근사하게 정합된 것을 볼 수 있다. 표 1은 이에 대한 회귀 분석을 통하여 m-LoG의 초점값 데이터가 가우시안 정합에 더 적합하다는 것을 객관적으로 보여주고 있다.

표 2는 m-LoG를 사용하여 측정된 초점값들에 대한 가우시안 정합 시 초점값의 개수에 따른 정초점 위치와 측정 결과의 신뢰도를 나타낸 것이다. 정합 결과에 대한 신뢰도 측정을 위하여 각 실현에서 계산된 w_a , w_w , w_c 파라미터의 값을 식 (5)에 대입하여 만들어진 새로운 식을 전체 영상에 대입한 결과이다. 본 결과에서 렌즈 검사 구간 내에 정초점 위치를 포함하지 않을 경우 상당히 벗어난 위치에서 정초점 위치를 검출하는 것

표 2. m-LoG 초점값 개수에 따른 가우시안 정합 결과

구간전체	초점위치	SSE	RMSE	결정계수R	렌즈위치
3개	50.00	0.2081	0.0458	0.9613	20,50,80
5개	50.00	0.0742	0.0274	0.9862	10,30,50, 70,90
7개	50.44	0.0140	0.0119	0.9974	35,40,45,50 55,60,65
아래 6개	50.44	0.0157	0.0126	0.9971	15,25,35, 45,55,65
위 6개	50.44	0.0157	0.0126	0.9971	35,45,55, 65,75,85
벗어난 6개*	65.09	25.0334	0.5029	NaN	12,18,24, 30,36,42

* : 정초점 위치를 포함하지 않는 구간

을 볼 수 있었다. 다시 말해 가우시안 정합을 통한 초점 위치 검색 방법은 정초점 가능성이 있는 위치를 포함한 렌즈 검사 영역 내에서는 항상 신뢰할 수 있는 결과를 얻는다는 근거가 된다.

정합의 결과에서 m-LoG가 FSWM보다는 더 많은 연산 시간을 요구하지만, m-LoG 초점값을 이용한 가우시안 정합 시 소수개의 위치에서 측정된 초점값으로 최적의 초점 위치를 찾을 수 있으므로 이 단점을 보완 할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 m-LoG를 이용한 초점값 측정과 가우시안 정합을 이용한 초점 위치 검색이라는 두 단계의 처리 과정을 갖는 자동 초점 조절을 위한 기법에 대하여 알아보았다. 초점값 측정에서는 가우시안 필터를 사용함으로써 잡음에 대한 처리 과정을 포함하고 있으며, 초점 위치 검색에서는 가우시안 정합을 통한 정초점 위치 예측의 과정을 통해 최소의 초점값으로 처리 시간을 단축할 수 있었다.

자동 초점 조절은 그 자체만으로도 중요한 의미를 갖지만 초점이 맞은 영상에 대해 다른 작업을 하기 위한 전처리 과정으로서도 중요한 의미를 갖는다. 본 논문에서 제안하는 자동 초점 조절 방법은 소프트웨어 방식으로 구현이 되어 있으므로, 필요로 하는 어떠한 시스템에도 쉽게 적용할 수 있는 확장성을 갖는다.

7. 참고 문헌

- [1] E. Krotkov, "Focusing," International Journal of Computer Vision, vol.1, pp.223-237, Oct. 1987.
- [2] K.C. Ng, A.N. Poo, M.H. Ang Jr., "Practical Issues in Pixel-Based Autofocusing for Machine Vision," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2791-2796, May. 2001.
- [3] M. Subbarao, T. Choi, and A. Nikzad, "Focusing Techniques," SPIE Conference Journal of Optical Engineering, vol.1833, pp.163-174, Nov. 1992.
- [4] S.C. Chapra, R.P. Canale, Numerical Methods for Engineers with Software and Programming Applications, McGraw-Hill, 2001.
- [5] 이준석, 최강선, 고성제, "비디오 카메라의 효과적인 자동 초점 조절 기술," 대한전자공학회 추계종합학술발표회 논문집, 제 22 권, 제 2 호, pp. 617-620, Nov. 1999.