

# 비디오 측정 시스템을 위한 효율적인 자동 초점 조절 알고리즘

(An Efficient Auto-focusing Algorithm for Video Measuring System)

한 광 수 †

(Kwang-Soo Hahn)

**요 약** 수동형 초점 조절 방식은 카메라를 통해 입력된 영상들을 분석하여 초점을 조절한다. 본 논문에서는 카메라를 이용한 정밀 측정 장비에 효율적으로 적용할 수 있는 수동형 자동 초점 조절 알고리즘을 제안한다. 영상에서 초점값 계산 알고리즘으로 가우시안 필터와 변형된 라플라시안 연산자를 사용한 SMLoG(Sum Modified Laplacian of Gaussian) 방법을 적용하고 초점값들을 이용한 정초점 위치 검색 방법으로 가우시안 곡선 정합을 이용한다. 다양한 조명과 대상에 대하여 실험한 결과를 기존의 방법들과 비교하여 제안된 방법의 정확성과 효율성을 검증하였다.

**키워드** : 자동 초점 조절, 비디오 측정 장비, VMS

**Abstract** The passive focusing method finds the in-focus position by analyzing images captured by a camera. In this paper, we propose an efficient passive auto-focusing algorithm for video measuring systems. The sum of modified Laplacian of Gaussian is used to calculate focus values from images and Gaussian curve fitting is applied to estimate the optimal in-focus position. The proposed method is tested for various objects and illuminations. The test result is compared with other methods to verify accuracy and efficiency of the proposed algorithm.

**Key words** : Auto-focusing, Video Measuring System, VMS

## 1. 서 론

컴퓨터 비전을 이용한 정밀 측정 장비(VMS: Video Measuring System)에서 정확한 측정을 하기 위해서는 카메라의 초점 조절이 필수적이다. 카메라 초점 조절 방법은 크게 능동형(active focusing) 방식과 수동형(passive focusing) 방식으로 나눌 수 있는데 본 논문에서는 레이저와 같은 별도의 부가 장치를 사용하지 않고 카메라를 통해 입력된 영상에 대한 처리만으로 초점을 맞추는 수동형 초점 조절 방식에 대해 연구한다[1]. 수동형 초점 조절 방법은 카메라로부터 얻은 영상들의 특성을 분석하여 초점 조절에 사용할 초점값(focus value)들을 계산하고, 계산된 초점값들을 분석하여 전역 최대 초점값을 갖는 카메라의 위치를 찾는다. 카메라와 물체와의 관계에서 카메라가 한쪽 끝에서 반대편 끝으로 이동해 나갈 때, 즉 카메라와 물체 간의 거리가 멀어지면서 입력 영상이 선명

해지며 초점값이 증가하게 되고 최적의 초점 위치인 정초점(in-focus) 위치에서 초점값이 최대가 되며 이를 지나면서 초점값이 감소하게 된다. 이러한 최대의 초점값을 갖는 최적의 카메라 정초점 위치를 정확하고 효율적으로 찾는 것이 수동형 초점 조절의 관건이다.

정확한 정초점 위치를 찾기 위해서는 사용한 초점값이 초점이 잘 맞을수록 큰 값이 되어야 하고 최적의 초점 위치에서 최대값을 보아야 하며 잡음을 포함한 영상에서 국지적인 최대값이 아니라 전역적인 최대값을 찾을 수 있도록 하여야 한다. 효율적인 초점 조절은 카메라를 얼마나 빨리 정초점 위치에 가져다 놓을 수 있느냐에 달려있다. 초점 조절에 걸리는 시간은 카메라를 초점값 계산을 위한 영상 획득 위치로 옮기는데 걸리는 시간과 획득한 영상에서 초점값 계산에 필요한 시간의 합으로 결정된다. 따라서 효율적으로 정초점 위치를 찾기 위해서는 영상에서 초점값 계산이 쉬워야 하고 초점값을 측정하기 위하여 요구되는 카메라 위치 이동 회수가 작아야 한다. 초점값 계산 시간은 카메라의 이동과 같은 기계적인 동작에 소요되는 시간에 비하면 매우 짧

† 정 회 원 : 국민대학교 컴퓨터학부 교수

kshahn@kookmin.ac.kr

논문접수 : 2005년 2월 14일

심사완료 : 2005년 8월 1일

다. 또한 카메라가 현재 진행 방향과 반대되는 방향으로 움직여야 하는 경우와 같이 카메라를 완전히 정지시킨 후 다시 움직이는 경우 카메라 동작 제어 모터의 감속과 가속 운동으로 많은 시간을 소요하게 되어 초점 조절의 효율성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 효율적인 정초점 위치 검색은 카메라의 이동 회수를 최소화하는 것이 핵심이다.

초점이 잘 맞은 영상일수록 영상에 포함된 형상의 경계가 선명해지며 이것은 영상에 고주파 성분이 많이 포함된다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 영상에 포함된 고주파 성분 분석을 위한 라플라시안 필터와 잡음 처리를 위한 가우시안 필터를 동시에 적용하는 라플라시안-가우시안(Log: Laplacian of Gaussian) 필터를 변형하여 적용한 초점값 계산과 계산된 초점값들을 이용한 정초점 위치 검색 방법으로 비선형 회귀 분석 기법을 이용한 가우시안 곡선 정합(Gaussian curve fitting)을 제안한다. 제안된 방법을 사용하면 카메라를 상하로 한번 스캔하며 적은 소수의 영상들을 이용하여 초점 조절이 가능하고 이를 다양한 실험 환경에 적용하여 정확성과 효율성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 기존의 초점 조절 방법들에 대하여 기술하고, 3장에서 변형된 LoG를 이용한 초점값 측정 방법과 가우시안 곡선 정합을 통한 정초점 위치 검색 방법을 제안하였다. 4장에서는 실험 및 결과 분석을 하고, 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 초점값 측정 알고리즘

영상 처리에 의한 자동 초점 조절의 기본 원리는 영상에서 초점이 잘 맞을수록 값이 커지는 초점값을 정의하고 검색 범위 내의 여러 카메라 위치에서 입력된 영상들에서 구한 초점값들을 분석하여 최대의 초점값을 갖는 카메라의 위치를 찾아 이를 정초점 위치로 결정하는 것이다. 일반적으로 영상이 선명하여 초점이 잘 맞았다는 것은 영상에 포함된 물체간의 경계가 뚜렷하다는 것이고 이것은 영상에 고주파 성분이 많이 포함되어 있다는 것을 의미한다. 이러한 특성을 이용한 초점값 측정 방법은 여러 논문들에서 다양하게 제안되고 있으며 대표적으로 Tenengrad, SMD, FSWM, SML 등이 있다.

Tenengrad 방법은 초점의 정확도가 에지(edge)의 선명도에 영향을 미친다는 것을 이용하여 다음 식과 같이 특정 임계치 보다 큰 에지 기울기 크기 제곱의 총 누적치를 초점값으로 사용하며 Tenenbaum이 제안하였다[2].

$$F_{Tenengrad} = \sum_x \sum_y G(x, y)^2, \quad G(x, y)^2 > T$$

위 식에서 T는 임계치이며, G(x,y)는 소벨 마스크를

사용하여 계산된 에지 기울기 크기를 나타낸다.

SMD(Sum-Modules-Difference) 방법은 Tenengrad 방법과 유사하지만 2차원 마스크를 사용하지 않으므로 연산 속도를 높였고 다음 식과 같이 영상의 수평 방향과 수직 방향에 대한 픽셀들의 명암 차를 각각 계산한 후 두 값의 절대값의 누적치의 합을 초점값으로 한다[3].

$$SMD_x = \sum_x \sum_y |f(x, y) - f(x, y + 1)|$$

$$SMD_y = \sum_x \sum_y |f(x, y) - f(x + 1, y)|$$

$$F_{SMD} = SMD_x + SMD_y$$

FSWM(Frequency Selective Weighted Median) 방법은 영상의 에지 성분들은 보존하면서 임펄스 잡음을 제거하는데 유용한 미디언 필터 기법을 응용하여 일정 간격만큼 떨어진 두 기준 픽셀들을 중심으로 가장 미디언 값을 계산하고, 이들 값의 차에 대한 절대치를 누적하여 초점값으로 사용하는 방법으로 초점값 계산식은 다음과 같다[4].

$$G(x, y) = MED\{a_0 * f(x - m, y), \dots,$$

$$a_{m-1} * f(x, y), \dots, a_{2m-1} * f(x + m, y)\}$$

$$F_x(x, y) = |G(x, y) - G(x + \Delta k, y)|$$

$$F_y(x, y) = |G(x, y) - G(x, y + \Delta k)|$$

$$F_{FSWM} = \sum_x \sum_y (F_x + F_y)$$

마지막으로, 라플라시안 연산자를 이용한 방법이 있는데 라플라시안 연산자는 영상에서 고주파 성분을 뽑아내는 필터로 사용되며 다음 식과 같이 고주파 필터를 통과한 성분의 제곱치만을 누적하여 초점값으로 사용한다.

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$$

$$F_{Laplacian} = \sum_x \sum_y \{ \nabla^2 f(x, y) \}^2$$

이 방법은 수평, 수직 방향의 2차 미분 값이 정반대의 부호를 가질 때 서로 상쇄되므로 정확한 초점값을 얻기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Nayar는 수평, 수직 방향 각각에 대한 이차 미분값의 절대값을 이용하는 변형된 라플라시안 방법을 제안하였다. 이 방법을 SML(Sum-Modified-Laplacian)이라고 하며 초점값 계산식은 다음과 같다[5].

$$F_{SML} = \sum_x \sum_y \left\{ \left| \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \right| \right\}$$

이 외의 방법으로 FFT(Fast Fourier Transform), 히스토그램 엔트로피(Histogram Entropy), HLV(Histo-

gram of Local Variations)를 이용한 방법들이 있으나 효율성에서 위에 열거한 방법에 비해 떨어지는 것으로 알려져 있어 본 논문에서는 제외시켰다[1-3].

**2.2 정초점 위치 검색 알고리즘**

초점값 측정 알고리즘으로 초점값들을 계산한 후 이 초점값들을 분석하여 초점값이 최대가 되는 최적의 초점 위치를 찾아야 한다. 최적의 초점 위치를 결정하기 위한 가장 단순한 방법은 광학축 검색 범위의 전 영역에 걸친 초점값들을 계산하고 여기서 최대 초점값을 갖는 위치를 찾는 전역 검색 방법이다. 이 방법은 전체 검사 구간에 대하여 초점값을 계산하므로 잡음으로 인한 국지적 최대값을 찾을 오류 가능성이 작은 가장 확실한 초점 위치 검색 방법이지만 가장 많은 연산을 필요로 한다.

전역 검색에 대한 개선 방법으로 Krotkov가 제안한 피보나치 검색(Fibonacci search) 방법은 검색 범위를 피보나치 수열에 의해 결정하는 방법으로 기본 검색 원리는 이진 검색과 같다[3]. 이 검색 방법은 한 카메라 위치에서 초점값을 계산한 후에 그 결과에 따라 미리 정해 놓은 각각의 카메라의 단계를 키 값으로 하는 피보나치 트리에 따라 다음 카메라 위치를 선정하여 검색하는 방법이다. 이 방법은 현재 측정된 초점값을 평가하여 다음 위치로 정확히 카메라를 이동시켜야 하며 이때 카메라의 진행 방향을 계속 바꾸어주어야 하는 문제가 있다.

이러한 방법 외에도 Percentage Drop 검색과 Hill Climbing 검색 등이 있으나 이들 방법들은 피보나치 검색과 마찬가지로 현재 측정된 초점값의 평가를 통해 다음 초점값 측정 위치를 예측해 나가는 순차적인 방법으로, 입력 영상의 질과 예측 시스템의 성능에 따라 측정 결과에 많은 영향을 주게 된다[3,6].

**3. 제안하는 자동 초점 조절 알고리즘**

본 논문에서는 그림 1과 같은 자동 제어가 가능한 X, Y, Z축을 갖는 컴퓨터 비전을 이용한 측정 장비(VMS)에 적용할 수 있는 효율적인 자동 초점 조절 방법을 제안한다. 카메라와 렌즈는 Z축에 장착이 되어 상하로 움직일 수 있으며 이 축을 광학축이라 한다. 측정 대상은 X, Y축으로 구성된 스테이지 상에 놓여 각 축 방향으로 움직일 수 있다. 또한 밝기 조절이 가능한 상부, 하부, 횡부 조명이 장착되어 있어 각 조명 밝기 단계마다 정밀한 측정을 할 수 있다.

**3.1 자동 초점 조절 절차**

VMS에 초점 조절 요청 시 광학축 제어기는 현재 위치를 기준으로 그림 2와 같이 카메라를 상하 각각 제한된 구간  $\Delta d$  사이를 이동하며 각 위치에서 입력한 영상

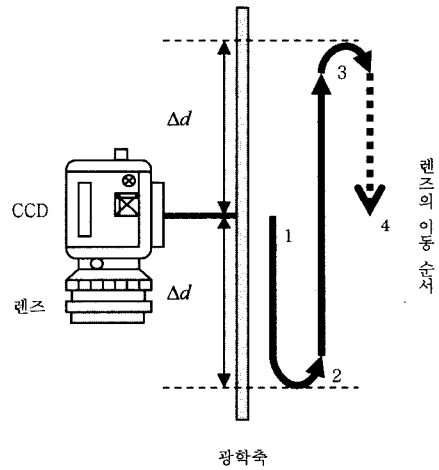


그림 2 VMS에서의 카메라 위치 이동 순서

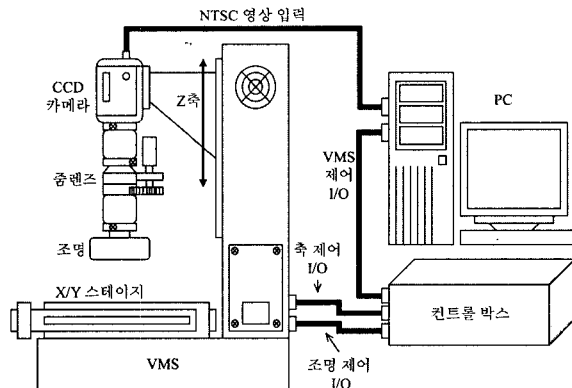
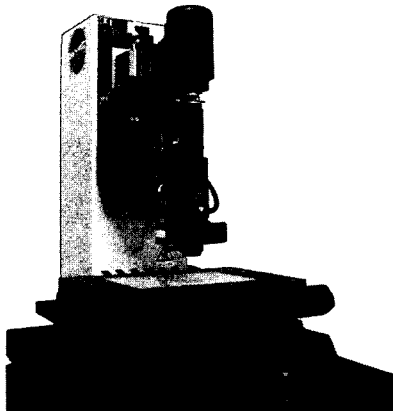


그림 1 VMS의 구성 요소

의 초점값을 계산하여 최대 초점값을 갖는 정초점 위치를 찾는다. 이때  $\Delta d$ 는 카메라 정초점 위치를 포함하도록 충분히 큰 값이어야 한다. 기존의 방법들은 카메라를  $-\Delta d$  위치에서  $+\Delta d$  위치로 스캔하며 입력한 영상들을 이용하여 정초점 위치를 찾거나, 현재 위치와  $-\Delta d$ ,  $+\Delta d$  위치에서 초점값을 계산하여 정초점 위치가 포함된 구간을 추정하고 추정된 구간을 다시 분할하여 정초점 위치를 검색해 나간다. 전자와 같은 전역 검색 방법은  $\Delta d$ 가 크거나 정밀 조절이 필요한 경우 많은 수의 영상 분석을 필요로 한다. 후자와 같은 이진 검색 방법이나 이를 개선한 피보나치 검색 방법은 작은 수의 영상 분석으로 정확한 정초점 위치 추적이 가능하나 분할된 구간 검색 시 특정 위치로 카메라를 이동시켜야 하며 이때 카메라가 상하로 계속 진행 방향을 바꾸어 주어야 할 경우가 발생한다. 이 경우 광학축 제어 모터의 감속과 가속 운동이 필요하게 되어 초점 조절 시간에 큰 영향을 미칠 수 있다.

제안하는 초점 조절 방법은 카메라를 현재 위치에서 상하로 한번 이동하며 특정 위치에서 샘플링한 소수의 영상들을 분석하여 정초점 위치를 찾는다. 그림 2에서 1~4의 숫자는 카메라의 이동 순서와 위치를 나타낸다. 제1위치는 초점 조절을 시작하는 현재 카메라의 위치를 나타내고, 이 위치에서 시작하여 아래로 카메라를 이동시키면서 일정 위치 단계마다 영상을 획득하여 초점값을 계산하고, 하향 초점 검사 위치 경계인 제2위치에 도착하면 카메라를 위로 이동시키며 제1위치를 지날 때부터 이후의 카메라 위치 단계마다 초점값을 계산한다. 제3위치는 제2위치와 마찬가지로 상향 초점 검사 위치 경계로 이곳까지 초점 값 측정을 끝낸 후 초점 위치를 분석한 결과를 토대로 예측된 정초점 위치인 제 4 위치로 이동하며 초점 조절을 마치게 된다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 자동 초점 조절에 대한 구성도를 보여주고 있다. 우선 현재의 카메라 위치에서 입력된 영상에 대해 초점값을 계산하고 일정 간격의 다음 카메라 위치로 이동하여 초점값을 계산한다. 전체 검색 기간에 걸쳐 초점값 계산을 한 후, 최적의 초점 위치 계산을 위한 초점값 정합을 통하여 정초점 위치를 예측하고 마지막으로 카메라를 예측된 위치로 이동시킴으로써 초점 조절이 완료된다.

그림 3에서 초점값 계산을 위한 다음 카메라 위치 결정에 대한 식은 다음과 같다.

$$\Delta w = \frac{2 \times \Delta d}{n}, \quad n \geq 5$$

$$Pos_i = Pos_{START} + (\Delta w \times i), \quad -\frac{n}{2} \leq i \leq \frac{n}{2}$$

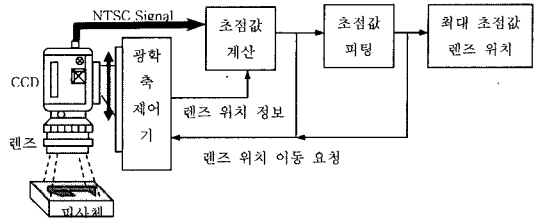


그림 3 제안된 자동 초점 조절 구성도

위 식에서  $n$ 은  $2 \times \Delta d$  구간에서 찾을 초점값의 개수를 의미하며 실험 결과 분석을 통하여 신뢰성 있는 초점 조절을 위해서는 최소 5개 이상의 초점값을 이용하는 것이 바람직함을 확인하였다.  $\Delta w$ 는 초점값을 측정할 카메라 위치에 대한 간격이고  $i$ 는 카메라의 상대적인 위치를 나타내는 정수이다.

정초점 위치 검색에 필요한 카메라 위치 이동의 수는 검색 범위 내에서 조절 가능한 전체 카메라 위치 수를  $N$ 이라 하면 전역 검색 방법은  $N+1$ 번이고, 피보나치 검색은  $\log_2 N$ 번이며, 본 논문에서 제안하는 방법에 의하면  $n+1$ 번이다. 예를 들어 카메라 단계가 128개라면 전역 검색 방법은 129번의 카메라 위치 이동이 필요하며 피보나치 검색은 7번, 제안된 방법은 최소 6번의 카메라 이동이 필요하다. 이때 피보나치 검색은 피보나치 트리를 만들고 피보나치 키 값에 따라 카메라 위치들을 정렬하여 다음 위치로 카메라를 이동시켜야 하는 과정이 필요하고, 제안된 방법은 카메라를 상하로 한번 이동하며 측정된 초점값들을 정합하여 정초점 위치를 예측하므로 카메라의 불규칙한 상하 이동이 불필요한 장점이 있으나 초점값들이 정합에 적합한 분포를 보여야 한다.

### 3.2 초점값 측정 방법

2장의 1절에서 언급된 대부분의 초점값 측정 방법들은 영상에 포함된 고주파 성분의 크기를 이용하고 영상에서 고주파 성분을 추출하기 위하여 다양한 형태의 고주파 통과 필터를 사용한다. 영상에 포함된 잡음은 보통 고주파 특성을 지니고 있어 고주파 통과 필터 적용 시 잡음도 함께 증폭되는 바람직하지 않은 결과를 초래한다. 기존의 초점값 계산 방법에서 FSWM을 제외한 Tenengrad, SMD, SML 등의 방법들은 영상에 포함된 잡음 처리 기능이 없어 초점값이 잡음에 의한 국지적 최대값을 갖는 문제점이 발생할 수 있다. 또한 검색 구간에서 측정된 초점값들이 가우시안 분포를 보이기는 하나 오차가 커서 가우시안 곡선 정합에 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 이러한 잡음에 대한 처리를 위한 전처리 과정으로 가우시안 필터를 사용하고 초점값 계산을 위한 과정으로 SML을 적용한 변형된 라플라시안-가우시안(SMLoG: Sum-Modified-Laplacian of Gaussian)

방법을 제안한다. 주파수 공간에서 SML 방법 역시 고주파 성분의 잡음까지 같이 증폭시키는 효과를 가져오기 때문에 이 잡음을 둔화시키기 위해 영상에 가우시안 평활화(Gaussian smoothing)를 적용하는 것이다. 제안된 SMLoG 방법을 이용하여 계산된 초점값들은 다른 방법들에 비해 더 가우시안 분포를 보이는 것을 확인할 수 있으며 이를 이용하여 전역 최대값을 갖는 정초점 위치를 효율적으로 찾을 수 있다.

영상 잡음 제거를 위한 일반적인 2차원 가우시안 필터 함수 식은 다음과 같다.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \left[ \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \times \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \right]$$

위 식에서  $\sigma$  값이 클수록 함수의 분산 폭이 넓게 되므로 에지 영역의 흐림(blur) 현상이 심하게 나타나 잡음 뿐 아니라 에지에 대한 고주파 성분까지 감소시키는 효과가 발생하고,  $\sigma$  값이 작을수록 함수의 분산 폭이 좁아져 에지의 흐림 현상이 적게 나타나 에지 성분을 유지할 수 있으나 고주파 성분의 잡음 제거 효과가 떨어지게 된다. 따라서 가우스 평활화 함수를 적용할 때 적절한  $\sigma$  값 선택이 필요하다. 가우시안 함수  $G(x,y)$ 에 대한 2차 미분을 통하여 다음 식과 같은 LoG 함수를 구할 수 있다.

$$\nabla^2 G(x, y) = \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2}$$

$$LoG(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}}$$

위 LoG 식이 X축, Y축으로 분리되는 특성을 이용하여  $\sigma$ 에 따라 가변 크기의 1차원 커널을 만들고 이를 영상의 X축, Y축 방향으로 각각 적용한 결과들의 절대값들의 합을 초점값 계산에 사용하였다. 그림 4는 제안된

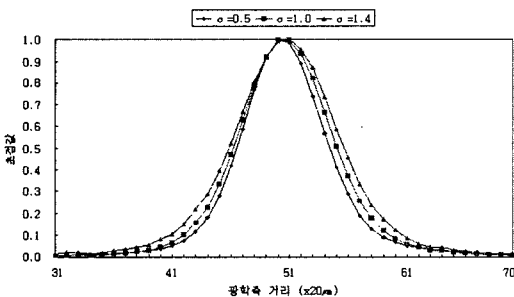


그림 4  $\sigma$  값에 따른 SMLoG 초점값 분포도

SMLoG 초점값 측정 알고리즘을  $\sigma$  값 별로 다음 장에 포함된 그림 6의 실험 영상에 적용하여 매 카메라 위치 단계마다 초점값 측정을 한 결과를 최대치를 1로 정규화하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서  $\sigma$  값이 1.4일 경우 곡선의 폭이 넓고,  $\sigma$  값이 0.5일 경우 곡선의 폭이 좁음을 알 수 있다. 이 분산폭과 필터를 통과한 영상의 흐림 정도와 잡음 제거 효과는 비례하게 된다. 또한 그림의 초점값 분포도에서 가장 큰 값을 갖는 카메라 위치는 50번째이며 이 위치를 정초점 위치로 결정할 수 있다.

3.3 가우시안 곡선 정합을 통한 정초점 위치 검색

그림 4와 같이 카메라 위치에 따른 SMLoG 초점값은 가우시안 분포를 보임을 알 수 있다. SMLoG 초점값 측정 알고리즘뿐 아니라 기존의 대부분의 초점값 측정 알고리즘들의 초점값 분포는 가우시안 분포와 유사하다. 본 논문에서 제안하는 정초점 위치 검색 방법은 초점값의 분포가 이러한 가우시안 형태를 갖는다는 사실을 이용하여 검색 구간에서 측정된 초점값들을 비선형 최소 제곱 회귀 분석 기법을 이용한 가우시안 곡선 정합에 적용하여 가우시안 곡선을 구하고 이 곡선이 최대값을 갖는 위치인 중앙(평균) 위치를 최적의 정초점 위치로 결정하는 방법이다.

비선형 회귀 분석은 선형 회귀 분석과 마찬가지로 오차의 제곱 합을 최소로 하는 매개 변수를 구하는데 바탕을 둔다. 본 논문에서 사용한 가우시안 곡선 모델의 식은 다음과 같다.

$$y = a_0 \exp\left[-\left(\frac{x - a_1}{a_2}\right)^2\right]$$

위 식에서  $x$ 는 카메라의 위치이고  $y$ 는 그 위치에서 입력한 영상에서 계산한 초점값이며  $a_0, a_1, a_2$ 는 추정해야 할 파라미터들이다.  $a_0$ 는 가우시안 곡선의 높이를 나타내며,  $a_1$ 은 가우시안 곡선의 중앙값으로 이 값이 바로 예측된 정초점 위치를 나타낸다.  $a_2$ 는 가우시안 곡선의 분산을 나타낸다. 일반적으로 파라미터 3개의 값을 계산하기 위한 방정식을 풀기 위해서는 카메라의 위치  $x$ 와 그 위치에서의 초점값  $y$ 의 쌍이 최소 3개만 존재해도 된다. 하지만 실험 결과 최소 5개 이상의 데이터를 이용하여야 실제 정초점 위치에 근사한 값을 획득하는 것을 확인할 수 있었다.

가우시안 곡선 정합은 Levenberg-Marquardt 방법을 이용하였으며 정합 결과에 대해 오차의 제곱의 합(SSE: Sum of Square Error)과 R-Square( $R^2$ )를 사용하여 신뢰도를 측정하였다[8]. SSE는 입력 데이터 값들과 정합 곡선 상의 값들의 총 제곱 편차를 측정한 것으로 식은 다음과 같다.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

위 식에서 n은 정합에 참여한 데이터의 개수이고  $y_i$ 와  $\hat{y}_i$ 는 각각 정합에 사용된 초점값 데이터와 정합 결과 값을 의미한다. SSE의 결과 값은 0에 가까울수록 정합 오차가 작다는 것을 나타낸다.

R-Square는 추정된 회귀 곡선이 표본 관측 값에 얼마나 잘 정합 되었는지를 판단하는 근사성의 척도 (goodness-of-fit)로 다음 식으로 계산된다.

$$R\ Square = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

위 식에서  $\bar{y}_i$ 는 초점값 데이터의 평균값이다. R-Square는 0과 1 사이의 값을 가지며 그 값이 1에 가까울수록 실제 관측된 값들이 회귀 곡선을 중심으로 밀집된 것으로 볼 수 있고, 이는 정합이 잘 되었다는 것을 의미하게 된다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

본 장에서는 제안된 방법의 정확성과 효율성을 검증하기 위하여 VMS 환경에서 수행한 실험 및 그 결과에 대하여 기술한다.

##### 4.1 실험 환경

실험에는 그림 1과 같은 VMS를 사용하였다. 이 시스템은 1배에서 9배까지 제어가 가능한 줌렌즈를 가지고 있으나 실험에는 3배의 고정 배율을 사용하였으며 수 0m 이내의 오차로 측정이 가능하다. 조명은 상부 조명(top light)과 하부 조명(back light), 횡부 조명(side light)이 장착되어 있으며, 각 조명 밝기 단계에 대한 미세 조정이 가능하다. 실험에서는 그림 5와 같은 실험 대상에 따라 각기 다른 조명을 사용하여 실험을 하였다. 그림 5의 (a)와 (b)와 같은 PCB 기판의 배선 부위 또는 칩(chip) 부위에 대한 초점 조절 실험에서는 상부 조

명을 이용하였고, 유리판 위에 그려진 (c)와 같은 정밀자와 (d)와 같은 동심원 형태의 투명한 대상에는 하부 조명을 사용하였다.

카메라 시스템은 아날로그 칼라 CCD 카메라와 프레임 그래버(frame grabber)를 사용하여 NTSC 방식의 640×480 크기의 영상을 입력 받는다. 영상은 16비트 YUV 칼라 형식으로 입력되는데, 본 실험에서는 8비트 Y 채널을 256 레벨을 갖는 8비트 흑백(gray-scale) 영상으로 간주하여 초점값 계산을 적용한다.

##### 4.2 초점값 측정 실험 결과

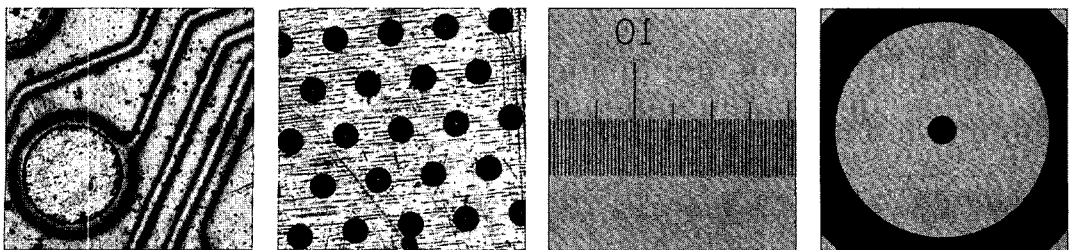
본 절에서는 자동 초점 조절을 위해 2장에서 기술된 기존의 방법과 3장에서 제안된 초점값 측정 알고리즘에 대한 실험 결과를 비교 검토한다. 각 초점값 측정 알고리즘 비교를 위하여 20μm 단위로 카메라 위치를 이동해가며 획득한 영상을 이용하였다. 그림 6은 상부 조명을 사용한 PCB 기판의 일부분으로 먼저 육안으로 초점을 맞춘 후 그 위치를 기준으로 상하 각각 1000μm 구간에 대하여 20μm 간격으로 찍은 50장씩의 영상의 일부를 보여준다. 그림 6의 (a)는 0번째 위치의 영상으로 카메라가 물체에 제일 가까운 경우이고 나머지 영상들은 각각 10장 간격으로 획득된 영상들로 (f)영상이 50번째 영상으로 최적의 정초점 위치를 갖는다. 초점값 계산에는 NTSC 640×480 크기의 영상 전 영역에 대하여 영상 중앙을 기준으로 320×240 크기의 영상 영역을 이용하였다.

그림 7의 (a)는 2장에서 설명한 초점값 측정 알고리즘들을 적용한 측정 결과를 보여준다. 그래프에서 x축은 광학축 거리이고 그림 6의 영상 101장에 대한 초점값 계산 결과를 최대값을 1로 정규화하여 초점 곡선을 그린 것이다. 초점값 계산은 2장에서 기술한 식들을 사용하였고 FSWM은 다음 식을 사용하였다.

$$F_x(x, y) = MED\{f(x-1, y), f(x, y), f(x+1, y)\}$$

$$-\frac{1}{2}MED\{f(x-3, y), f(x-2, y), f(x-1, y)\}$$

$$-\frac{1}{2}MED\{f(x+1, y), f(x+2, y), f(x+3, y)\}$$



(a) PCB 기판

(b) PCB 기판

(c) 정밀 자

(d) 동심원

그림 5 다양한 조명에서의 실험 영상들

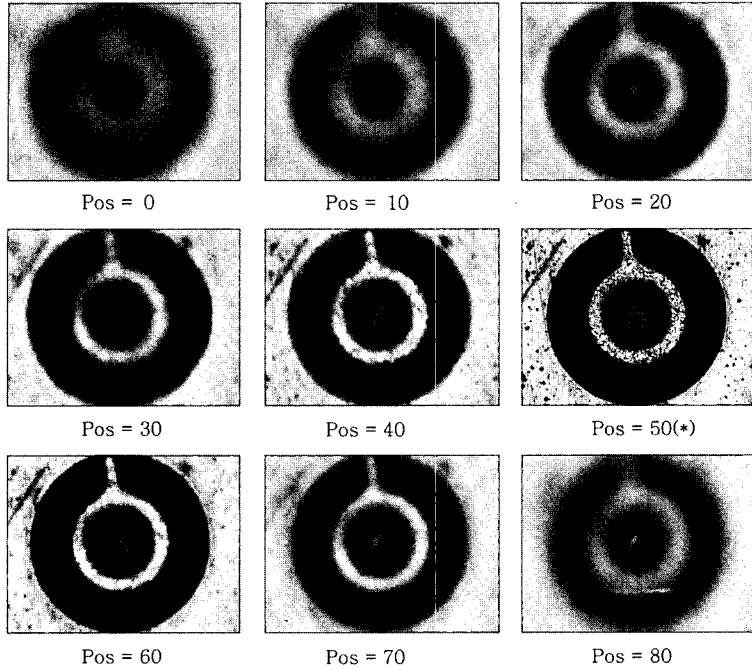


그림 6 실험 영상 (PCB 기판)

$$F_y(x, y) = MED\{f(x, y-1), f(x, y), f(x, y+1)\}$$

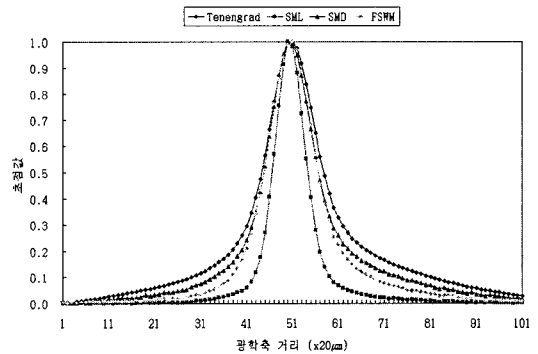
$$-\frac{1}{2}MED\{f(x, y-3), f(x, y-2), f(x, y-1)\}$$

$$-\frac{1}{2}MED\{f(x, y+1), f(x, y+2), f(x, y+3)\}$$

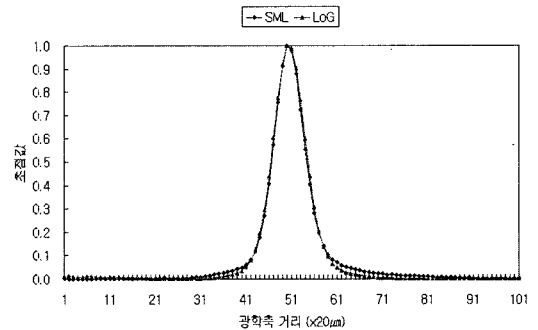
$$F_{FSWM} = \sum_x \sum_y |F_x(x, y)| + \sum_x \sum_y |F_y(x, y)|$$

그림에서 볼 수 있듯이 모든 초점 곡선이 50번째 영상 주변에서 최대값을 가지며 이는 초점값이 최대가 되는 위치의 영상이 가장 초점이 잘 맞은 영상이라는 것을 확인할 수 있다. 실험에서 Tenengrad와 FSWM 방법은 49번째 영상에서 최대값을 갖고 SMD와 SML은 50번째 영상에서 최대값을 갖는데 이러한 현상은 초점값 측정 방법마다 이용하는 영상의 정보가 틀리기 때문이다.

그림 7의 (b)를 보면 SMLoG의 초점 곡선은 다른 방법을 이용한 초점 곡선에 비하여 더 좌우 대칭적인 가우시안 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 초점값의 분포가 좌우 대칭이 될수록 곡선 정합 적용 시 정합에 대한 오차 크기는 작아지게 된다. 그림 7의 여러 초점값 측정 알고리즘들의 분포도를 보면 SMLoG를 제외한 다른 방법들은 정초점 위치 좌우, 즉 광학축 상의 정초점 위치를 기준으로 상하 위치에 따라 초점값의 크기가 대칭을 형성하지 않는 것을 확인 할 수 있는데 이는 카메라를



(a) Tenengrad, SML, SMD, FSWM을 이용한 초점값 분포



(b) SML과 SMLoG 방식의 초점값 분포  
그림 7 각 방식의 초점값 분포

통한 영상 획득 시 카메라 위치에 따라 FOV(field of view)의 크기가 약간씩 변하게 되고, 이에 따라 입력되는 빛의 양이 달라지기 때문에 발생하는 현상으로 추정된다. SMLoG는 이 현상에 대한 영향을 거의 받지 않고 정합에 사용되는 가우시안 곡선 모델과 같이 평균 위치(정초점 위치)를 기준으로 좌우 대칭 구조를 보이므로 제안된 SMLoG 방법이 정합에 가장 적합함을 확인할 수 있다.

**4.3 정초점 위치 검색 결과**

가우시안 분포의 최대값은 평균 위치에 있으므로 초점값 분포가 가우시안 분포를 보일 경우 가우시안 곡선 정합으로 초점값을 최대를 하는 정초점 위치를 추정할 수 있다. 이 경우 가우시안 곡선 정합도가 높다는 것이 추정된 정초점 위치의 정확도가 높다는 것을 의미하는 것은 아니다. 실험에 사용한 모든 방법들이 49번째 또는 50번째 영상에서 최대 초점값을 보였다. 이는 각 방법으로 찾은 정초점 Z축 카메라 위치의 최대 편차가 20 $\mu$ m 이내임을 의미하고 이 정도 오차는 대부분의 응용 분야에서 허용 가능한 범위이다. 그러나 특정 위치에서 찍은 소수의 샘플 영상에서 계산한 초점값을 이용하여 정초점 위치를 추정하는 경우에는 가우시안 곡선 정합도가 큰 의미를 갖는다.

실험에는 정초점 위치를 포함하는 검색 구간에서 동일한 간격으로 찍은 7장의 영상에서 계산한 초점값들을

사용하여 가우시안 정합 곡선을 구하여 정초점 위치를 추정하고 정합도를 평가하였다. 그림 8은 50번째 위치에서 상하 각각 3개의 영상에서 SMLoG와 FSWM으로 계산한 초점값 데이터를 가우시안 곡선 정합에 적용한 결과를 보여준다. 이 실험은 정초점 위치가 초점값 데이터의 중앙 부분에 위치하고 있을 경우이고 SMLoG 초점값을 이용한 정합 점들이 FSWM 초점값을 이용한 정합 점들보다 가우시안 곡선에 더욱 인접해 있음을 볼 수 있다. 표 1은 정합 신뢰도를 보여주며 정합 오차 SSE 값은 SMLoG의 값이 FSWM의 값보다 작고, 정합도 R-Square는 SMLoG가 FSWM보다 더 1에 가까우므로 SMLoG 방법이 가우시안 곡선 정합에 더 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

표 1 가우시안 곡선 정합 결과 분석표 (1)

	FSWM	SMLoG
정초점 위치	49.88	50.04
SSE	0.008327	0.000069
R2	0.988700	0.999999

실제 초점 조절 환경에서 그림 8과 같이 정초점 위치가 정합에 사용된 데이터의 중간 위치에 오기는 어렵다. 그림 9는 정초점 위치가 실험 데이터의 아래쪽으로 치우쳐 있는 경우에 대해 정초점 위치 추정을 한 결과를 보여준다. 이 경우에도 역시 앞의 실험과 마찬가지로 두

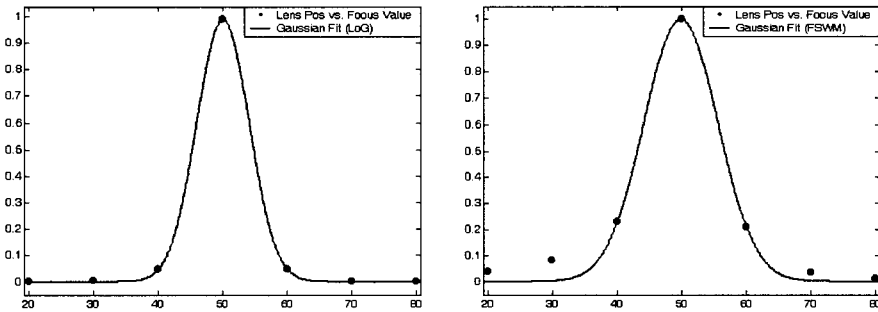


그림 8 SMLoG(a)와 FSWM(b) 초점값을 이용한 가우시안 정합 결과 (1)

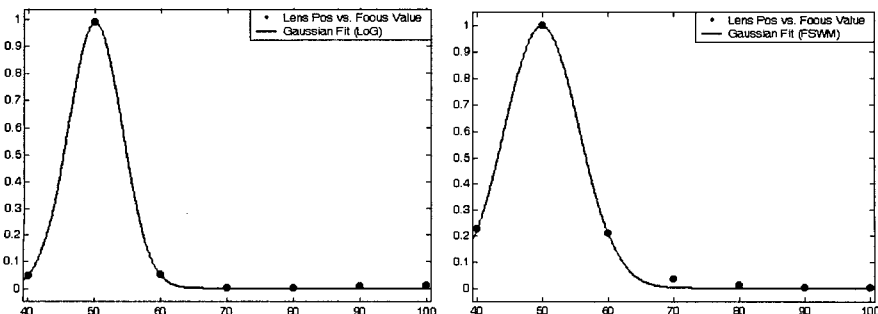


그림 9 SMLoG(a)와 FSWM(b) 초점값을 이용한 가우시안 정합 결과 (2)



표 2 가우시안 곡선 정합 결과 분석표 (2)

	FSWM	SMLoG
정초점 위치	49.89	50.04
SSE	0.001297	0.000241
R2	0.998300	0.999700

초점값 데이터들이 모두 정초점 위치 부근에서 최대값을 갖는 가우시안 정합 곡선을 이루는 것을 확인할 수 있고 SMLoG 초점값을 이용한 정합이 FSWM 초점값을 이용한 정합보다 우월하다는 것을 표 2를 통해 확인할 수 있다.

**4.4 정초점 위치 검색의 효율성 검토**

자동 초점 조절의 효율성은 카메라를 얼마나 빨리 정초점 위치로 가져다 놓을 수 있는냐에 달려있다. 초점 조절에 걸리는 시간은 카메라를 초점값 계산 위치로 움직이는 시간과 그 위치에서 획득한 영상에서 초점값을 계산하는 시간의 합으로 결정된다. 초점값 계산 시간은 제안된 방법이 가우시안 필터링을 필요로 하므로 기존의 방법보다 좀 더 많이 걸린다. 그러나 초점값 계산 시간은 카메라를 움직이는 기계적인 운동에 필요한 시간에 비해 훨씬 짧다. 특히 카메라의 진행 방향을 바꾸어 주어야 하는 경우처럼 카메라를 정지시켰다가 다시 움직여야 하는 경우 모터의 감속과 가속 운동에 많은 시간을 소요하게 된다. 그러므로 자동 초점 조절의 효율성은 얼마나 적은 수의 카메라 운동을 필요로 하는냐에 주로 결정된다.

표 3은 SMLoG를 사용하여 측정된 초점값들에 대한 가우시안 곡선 정합 시 초점값의 개수에 따른 정초점 위치와 신뢰성의 측정 결과를 보여준다. 정합도는 각 경우에 추정된 가우시안 곡선과 전체 영상에서 계산한 초점값들 사이의 SSE와 R-Square이다. 우선 전체 101장에 대한 정합의 결과를 볼 수 있고 다음으로 파라미터 추정에 필요한 최소의 데이터인 3개의 초점값들로 계산

된 결과를 볼 수 있다. 이 두 결과를 비교해 보면 3개의 초점값들로 계산된 결과의 정합 오차가 상당히 크다는 것을 확인 할 수 있다. 그 다음 5개 데이터를 사용했을 경우는 3개를 사용했을 경우보다 상당히 정합 오차가 작고 실제 값과 유사함을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 신뢰성 있는 초점 조절을 위하여 최소 5개 이상의 초점값을 정합에 사용할 것을 제시한다.

7개의 초점값을 이용한 실험에서는 각기 다른 카메라 위치 분포의 경우에 대하여 실험하였다. 그림 7에서 보면 SMLoG에 대한 가우시안 분포를 갖는 곡선의 편차가 상당히 좁은 것을 확인할 수 있다. 따라서 초점값에 대한 적절한 임계치를 적용하면 검사 구간을 줄일 수 있는데, 이 경우를 고려하여 낮은 임계치를 적용한 넓은 검색 구간에서의 실험과 높은 임계치를 적용한 좁은 구간에서의 실험을 하였다. 실험 결과에서 보면 20에서 80 위치의 넓은 구간에 대한 결과보다 35에서 65 사이의 곡선의 분포가 급격한 좁은 부분의 데이터만 사용했을 경우 더 정합이 잘 된 것을 확인할 수 있다.

6개의 초점값들을 이용한 실험은 정초점 위치가 중앙이 아닌 오른 쪽과 왼 쪽으로 치우친 경우의 결과를 보여준다. 두 실험 결과 모두 동일한 값을 나타내어 SMLoG 방법의 좌우 대칭 성향을 뚜렷하게 보여주며 정초점 위치도 앞의 실험과 큰 오차가 없는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 정초점 위치를 벗어난 구간의 초점값들을 이용한 정합 실험을 하였다. 이 실험 결과를 보면 실제 정초점 위치에서 상당히 벗어난 위치로 정초점 위치를 추정하였으며 큰 정합 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 곡선 정합을 통한 정초점 위치 검색 방법은 검색 영역이 정초점 위치를 포함한 경우에만 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

**4.5 실험 결과 분석**

자동 초점 조절에서 고려해야 할 두 가지 중요한 사

표 3 SMLoG 초점값 개수에 따른 가우시안 정합 결과

	전체구간	3개	5개	7개
초점위치	50.4900	50.0000	50.0000	50.0400
SSE	0.0131	0.2081	0.0742	0.1223
R2	0.9976	0.9613	0.9862	0.9772
카메라 위치	0~100	20,50,80	10,30,50,70,90	20,30,40,50,60,70,80
	7개	아래 6개	위 6개	벗어난 6개*
초점위치	50.44	50.44	50.44	65.09
SSE	0.0140	0.0157	0.0157	25.0334
R2	0.9974	0.9971	0.9971	NaN
카메라 위치	35,40,45,50,55,60,65	15,25,35,45,55,65	35,45,55,65,75,85	12,18,24,30,36,42

\* : 정초점 위치를 포함하지 않는 구간

항은 정확한 정초점 위치 결정이 가능한 초점값 측정 방법과 초점값을 이용한 정초점 위치 탐색 속도이다. 초점값 계산 실험 결과는 제안된 SMLoG 방식이 기존의 방법과 마찬가지로 정초점 위치에서 최대값을 보이고 물체와 카메라와의 거리에 따른 초점값 분포는 기존의 방법보다 더 가우시안 곡선과 유사함을 보였다. 기존의 초점 조절 방법은 초점값 계산 후에 다음 검색 위치를 예측하고 그 위치로 카메라를 이동하여 초점값을 재 측정해 나가며 정초점 위치를 찾는 반면, 제안된 초점 조절 방법은 일정한 방향으로 카메라를 이동시키며 얻은 소수의 영상들에서 초점값들을 계산한 후 이들에 대한 가우시안 곡선 정합을 통해 정초점 위치를 추정한다. 정초점 위치 검색 실험 결과 제안된 방법은 정초점을 포함한 구간의 5개 이상의 위치에서 얻은 초점값을 이용하면 전역 검색으로 찾은 정초점 위치와 근접한 정초점 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다. 초점 조절에 걸리는 시간은 모터를 구동시켜 카메라를 초점값 계산을 위한 영상 획득 위치로 이동시키는 기계적인 운동 시간에 좌우된다. 제안된 방법은 기존의 방법보다 작은 수의 초점값을 이용하므로 초점값 측정 회수와 이에 따른 카메라 이동 시간을 줄일 수 있어 빠른 정초점 위치 검색이 가능하다. 결과적으로 제안된 방법을 이용하여 정확하고 효율적인 초점 조절이 가능함을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 SMLoG를 이용한 초점값 계산과 가우시안 곡선 정합 알고리즘을 이용한 VMS에서의 자동 초점 조절 방법을 제안하였다. 잡음 처리를 위한 가우시안 필터를 이용함으로써 초점값이 국지적 최대값을 갖는 현상을 줄였으며, 변형된 라플라시안 필터를 통하여 고주파 성분을 이용한 초점값을 효과적으로 계산할 수 있었다. SMLoG로 계산한 초점값들이 기존의 방법들보다 더 가우시안 곡선 정합도가 높은 점을 이용하여 정초점 위치 검색 단계에서는 정초점 위치를 포함하는 검색 구간에서 일정한 간격으로 측정된 소수의 초점값들을 가우시안 곡선 모델에 정합하여 최적의 초점 위치를 추정하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 기존의 전역 검색에 비해 월등히 적은 수의 초점값 측정만으로 전역 검색에 근사한 초점 위치를 찾을 수 있었으며, 피보나치 검색과 같이 초점값 측정 시마다 특정 위치로 카메라를 이동시켜야 하는 작업을 필요로 하지 않아 효율적인 정초점 위치 검색이 가능하였다. 제안된 방법을 실제 VMS에 적용하여 신속하고 정확하게 정초점 위치로 카메라를 이동하여 효율적인 정밀 측정 작업이 가능함을 확인하였다.

제안된 방법은 정초점을 포함하는 구간에서 균일하지 않은 임의의 간격으로 획득한 영상들을 사용할 경우에도 정확한 정초점 위치 추정이 가능하며 이는 카메라를 광학축에 따라 수동으로 조작하여 이동시켜야 할 경우에 큰 장점이 된다. 제안된 방법은 일정한 거리에서 입력한 일련의 2D 영상에서 초점값을 이용하여 3D 정보를 추출하는 분야에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다[8].

참고 문헌

[1] Subbarao, M., Choi, T. and Nikzad, A., "Focusing Techniques," Journal of Optical Engineering, Vol. 32, No. 11, pp. 2824-2836, November 1993.  
 [2] Krotkov, E., "Focusing," International Journal of Computer Vision, Vol. 1, pp. 223-237, 1987.  
 [3] Chern, N. K., Neow, P. A. and Ang Jr., M. H., "Practical Issues in Pixel-Based Autofocusing for Machine Vision," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, pp. 2791-2796, May 21-26, 2001.  
 [4] 이성희, 김주현, 최병태, 고성제, "미디어 필터의 차이를 이용한 비디오 카메라의 자동 초점 조절 알고리즘", 한국통신학회, 제 23권, 제 1호, pp. 41-51, Jan. 1998.  
 [5] Nayar, S. K. and Nakagawa, Y., "Shape from focus," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, pp. 824-831, Aug. 1994.  
 [6] 이준석, 최강선, 고성제, "비디오 카메라의 효과적인 자동 초점 조절 기술", 대한전자공학회 추계종합학술 발표회 논문집, 제 22 권, 제 2 호, pp. 617-620, Nov. 1999.  
 [7] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press, 1999.  
 [8] Subbarao, M. and Tyan, J. K., "Selecting the Optimal Focus Measure for Autofocusing and Depth-from-Focus," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 8, pp. 864-870, August 1998.



한 광수

1978년 서울공대 공업교육과 학사. 1978년~1980년 금성통신연구소 연구원. 1986년 미국 Texas Tech University 전산학 석사. 1989년 미국 Texas Tech University 전산학 박사. 1990년~1992년 현대전자 산업전자연구소 수석연구원. 1992년~1993년 수원대학교 전임강사. 1994년~현재 국민대학교 컴퓨터학부 부교수. 관심분야는 컴퓨터 비전, 패턴인식 등임