

선형 CCD를 이용한 MTF방법에 의한 카메라 렌즈 초점거리의 측정 및 보정 시스템 개발

박희재*, 이석원*, 김왕도**

Computer Aided Measurement and Compensation System for Focal Length of Lenses in Camera Manufacture Based on the MTF Performance Using the Line CCD Sensor

Heui Jae Pahk*, Suk Won Lee*, Wang Do Kim**

ABSTRACT

A computer aided system has been developed for the focal length measurement/compensation in camera manufacture. Signal data proportional to light intensity is obtained and sampled very rapidly from the line CCD. Based on the measured signal, the MTF performance is calculated, where the MTF is the ratio of magnitude of the output image to the input image. In order to find the optimum MTF performance, an efficient algorithm has been implemented using the least squares technique. The developed system has been applied to a practical camera manufacturing process, and demonstrated high productivity with high precision.

Key Words : focal length measurement(초점거리 측정), compensation(보정), MTF(Modulation Transfer Function)(변조전달함수), autocollimator(오토콜리메터), line CCD(선형 CCD), camera lens (카메라렌즈), camera interface(카메라 인터페이스)

Nomenclature

$I_0(x), I_1(X)$: Intensity of object and image at x, X coordinates	OTF	: Optical transfer function, which is the ratio of output/input intensity
$G(x)$: Point spread function for image transfer from object to image	MTF, PTF	: Modulation transfer function (magnitude) and phase transfer function(phase) of OTF
$F(I_0), F(I_1), F(G)$: Fourier transformation of $I_0(x)$,	M	: Modulation, which is $(I_{max} - I_{min})$

* 서울대학교 기계설계학과
** 삼성항공

	$/(I_{max} + I_{min})$
I_{max}, I_{min}	: Maximum and minimum intensity values
E	: Sum of squares of errors of the MTF value w.r.t the parabolic curve fit
a, b, c	: Coefficients for the parabolic curve fit
M_i, X_i	: MTF value (M_i) and coordinate(X_i) at the i-th target within scanning range
f_d, f_m	: Design focal length(f_d) and measured focal length(f_m)
P_c	: Compensation parameter
Step_length	: Distance of basic compensation step

1. 서 론

현재, 카메라, 현미경과 같은 광학관련 제조산업에서 광학 부품들의 사용이 점차적으로 증가하고 있는 추세이며, 특히 초점거리는 광학부품의 기본적인 특성으로서 광학렌즈와 렌즈로부터 생성된 광학이미지의 질을 결정짓는 중요한 요소이다. 그러므로 렌즈와 같은 광학관련 생산업체에서는 렌즈의 초점거리의 엄격한 측정과 관리를 하고 있고 이의 관리 향상을 위해서 많은 노력을 하고 있다.

본 논문에서는 컴퓨터를 이용하여 카메라의 초점거리의 측정과 보정을 행하는 시스템을 개발하였다. 카메라 생산에 있어서 렌즈초점의 거리의 측정방법은 여러가지가 있으며, 사진 이미지(image)의 특성을 결정하는 데 쓰이는 MTF(Modulation Transfer Function)가 전형적으로 사용되어 왔다^(1,2).

본 연구에서 개발된 시스템의 구성은, 할로겐램프를 사용한 광원, 입력창으로 사용한 마스터차트(master chart), 오토콜리메터(autocollimator), 출력창에 사용되는 선형CCD, 선형 CCD의 제어와 데이터를 획득하기 위한 주변기기, 거울, 스캐닝(scanning)을 위한 스텝핑모터, 측정과 보정을 위한 PC등으로 이루어졌다. 초점거리의 측정을 위한 광원의 경로는 오토콜리메터를 통과하도록 설계하였다. 육안측정을 위한 집안렌즈부분을 선형 CCD로 장착하고 카메라의 렌즈를 오토콜리메터의 앞에 다 설치하였다. 오토콜리메터에서 나온 광원의 반사를 위

한 거울은 렌즈의 초점의 축을 따라서 PC에 의해서 전후진으로 이동할 수 있도록 설계하였고, 카메라가 장착되었을 때, 마스터차트로부터의 광학이미지가 오토콜리메터로 들어가고 스텝핑모터에 의해서 구동되는 마이크로미터(micrometer)의 끝부분에 위치한 거울에 의해서 반사되도록 하였다. 반사된 이미지는 다시 오토콜리메터로 들어가고 집안렌즈의 부분에 위치한 선형CCD로 입력되고, 입력된 이미지는 선형CCD에 의해서 약 100KHz로 샘플링되어 필터를 거친 후 16비트의 디지털값으로 저장되며 이를 위해서 DMA(Direct Memory Access)를 사용하여 실시간으로 측정을 하도록 구성하였다.^(3,4) 측정된 값을 이용하여 입력이미지에 대한 출력이미지의 비율을 나타내는 MTF의 값을 구할 수가 있으며, 이러한 과정을 반복하여 각각의 거울의 위치마다 전체적인 MTF의 곡선을 구한다. 최적의 MTF의 값을 구하기 위하여 최소자승법을 이용하였고^(5,6), 카메라와 컴퓨터간의 통신을 위해서 TTL을 기초로 하는 I/O 기판을 설계 제작하였다^(7,8). 측정된 초점거리와 카메라의 설계치와 비교하여 수치적으로 보정하였다. 개발된 시스템은 실제적인 생산라인에 적용하여, 높은 생산성과 고정밀성을 확보함을 입증하였다.

2. MTF에 대한 이론적 배경

2.1 MTF(Modulation Transfer Function)

광학시스템에서 물체(Object)와 이에 의한 상(Image) 사이에는 일대일 대응관계가 존재한다. 즉, 물체의 광도(Intensity of Object) $I_o(x)$ 와 상의 광도(Intensity of Image) $I_i(X)$ 의 전달함수 특성은 다음과 같은 점분포함수(Point spread function)를 컨벌루션(Convolution)하여 표현된다⁽²⁾. 즉 상의 광도 I_i 는

$$I_i(X) = \int G(X-x)I_o(x)dx \quad (1)$$

가 되고, G는 전달함수가 된다.

여기서 $I_i(x)$, $I_i(X)$ 는 물체의 광도와 상의 광도이고, x , X 는 물체의 광도와 상의 광도에서의 좌표값을 의미한다. 따라서 식(1)은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$I_i = G \otimes I_o \quad (2)$$

식(1)을 푸리에변환(Fourier transform)을 수행하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(I_i) = F(G) \cdot F(I_o) \quad (3)$$

여기서 $F(I_i)$, $F(I_o)$, $F(G)$ 는 I_i , I_o , G 의 푸리에 변환값이다.

식(3)에서 $F(G)$ 는 일반적으로 광학전달함수(Optical Transfer Function)라고 하는데, 이는 공간주파수영역(Spatial frequency domain)에서 입력과 출력의 비와 관계가 있으며, 광학시스템에서 출력이미지의 특성을 표현한다. 일반적으로 광학전달함수, OTF는 크기와 위상차로 구성되며 다음과 같이 복소수의 형태로 표현된다. 즉,

$$OTF = MTF * e^{j(PTF)} \quad (4)$$

여기서 MTF는 광학적인 시스템에서 광도의 크기의 비이고, PTF는 위상차 함수이다. 광학적인 시스템의 특성을 파악하기 위해서 사용하는 측정 타겟은 Fig.1의 바차트(Bar chart)와 같이 검은 띠와 투명한 띠를 주기적으로 배열한 차트를 사용한다.



Fig. 1 Bar Chart

이런 종류의 패턴이 광학적인 시스템에서 사용되면, 각각의 기하학적인 선이 변화되어 흐릿한 선으로 나타나는 데, 그 선의 단면은 선분포함수의 형태를 가지게 된다. Fig.2a 는 점분포함수에 의해서 상의 이미지가 어떻게 부드럽게 변화하는가를 잘 나타내고 있으며, 더 세밀한 패턴을 사용할 경우, 상의 변화를 나타내고 있고, Fig.2b 는 점진적으로 세밀한 패턴의 경우, 흐릿한 이미지(blur image)가 나타나는 것을 보여 주고 있으며, 이 때 분해능은 감지할 수 있는 최대주파수가 된다.

Fig.1의 바차트가 광학계를 통해서 상으로 비춰질 때, 상의 콘트라스트(Contrast)는 변조량(Modulation) M 과 관계가 있으며, 이 때 변조량 M 은 다음과 같이 표현된다.

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

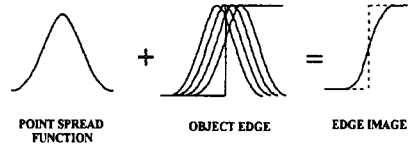


Fig. 2a Point spread function and edge image

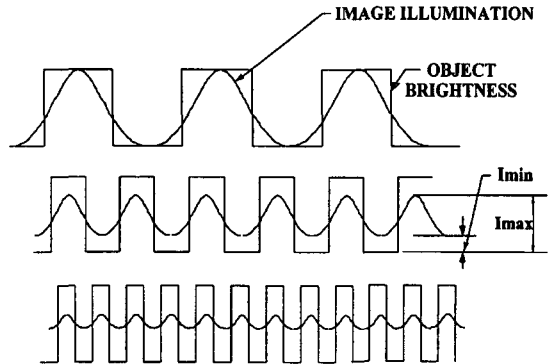


Fig. 2b Effect of the image blur on progressively finer pattern

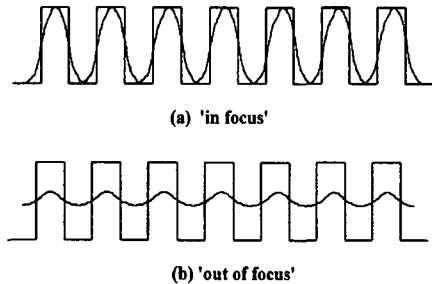


Fig. 2c Case of 'in focus' and 'out of focus'

여기서 I_{\max} , I_{\min} 는 상의 최대, 최소 광도가 되고, 따라서 MTF는 변조량의 비로서 정의될 수 있다.

$$MTF = \frac{M_i}{M_o} \quad (6)$$

여기서 M_o , M_i 는 물체와 상의 변조량이다.

위와 같은 바차트를 사용하면 카메라의 렌즈가 초점축의 위치에 따라 상의 광도가 달라지게 되는데, Fig.2c는 초점이 맞는 경우와 맞지 않는 경우에 따른 출력이미지의 상을 나타내고 있다. 이 때 초점이 맞는 경우의 이미지의 콘트라스트가 크게 되며, 이는 초점이 맞는 경우 MTF값도 크게 된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 초점의 위치는 MTF의 값의 변화로서 알 수 있으며 이를 이용하여 카메라 렌즈의 초점거리를 측정할 수가 있다.

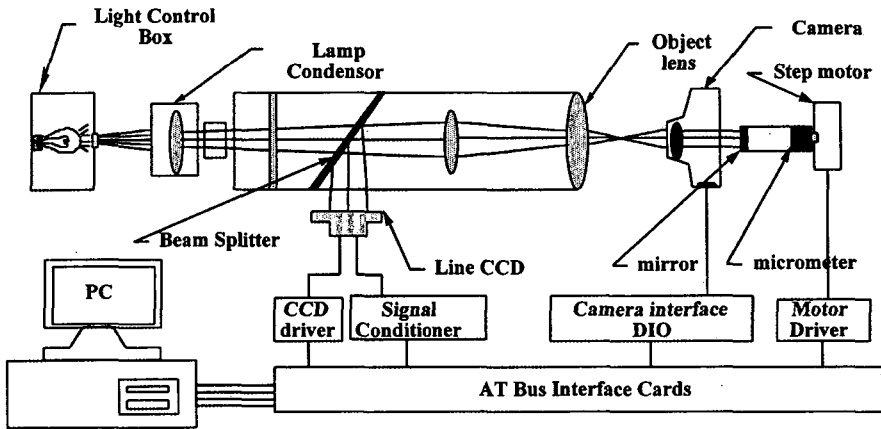


Fig. 3 Schematic diagram of the focal length measurement system developed

3. 카메라 렌즈의 초점거리 측정

3.1 초점거리 측정 시스템 개요

카메라는 피사체의 이미지를 카메라 렌즈로 보내고 그 이미지를 필름의 표면에 인화시키는 것이다.

이 때, 카메라 렌즈의 초점이 필름의 표면에 위치할 때, 가장 선명한 화상을 얻을 수가 있다. 그러므로 카메라 렌즈 초점거리의 정확한 측정과 보정은 카메라의 품질을 향상시키는 데 있어서 중요한 요소이다. Fig.3은 카메라 렌즈의 초점거리를 측정하기 위한 개발된 시스템을 나타내고 있다.

초점거리의 측정시스템의 구성은, 광원, 오토콜리메터, 선형 CCD, 카메라, 마이크로미터, 거울, 스텝핑모터, PC와 인터페이스 유닛으로 구성된다. 여기서 광원은 백색광원으로 높은 광도를 가지고 있으며, 광도를 조절하기 위한 별도의 광원제어 설비와 함께 사용하고 있다. 또한 광원에서 나온 빛은 광학렌즈를 통하여 더욱 밝아지게 되며, 이 빛은 바차트를 통하여 초점거리의 측정을 위한 물체상을 만들게 된다.

물체상은 오토콜리메터로 들어가서 빛을 시준(Collimation)하고, 시준된 빛은 오토콜리메터 뒤에 있는 카메라 렌즈를 통하게 되며 다시 마이크로미터의 헤드의 거울에 의해 반사되어 오토콜리메터로 들어가게 된다. 빛분리기(Beam splitter)는 반사된 빔을 분할하여 접안렌즈에 위치한 선형CCD로 보낸다. 마이크로미터는 PC제어에 의해서 전후진 하며 카메라 초점거리의 범위를 스캐닝(Scanning)한다. 선형 CCD로부터 데이터(Data)를 얻

기 위해서는 먼저 CCD를 구동하는 파형발생기와 구동회로를 필요로 하며, 또한 획득된 신호를 디지털화하기 위하여 A/D보드와 소프트웨어도 필요로 한다. 카메라의 셔터의 개방과 폐쇄, 주밍(Zooming)등의 기능을 동작시키기 위한 PC와의 통신을 하는 소프트웨어와 보드를 개발하였다.

3.2 선형 CCD로부터의 신호의 획득

선형CCD는 256개의 일렬의 픽셀로 구성되어 있으며, 신호를 얻기 위해서는 구동회로와 파형발생기를 필요로 한다. 이의 구성 형태는 Fig.4에 블록 다이어그램으로 자세히 나타나 있다.

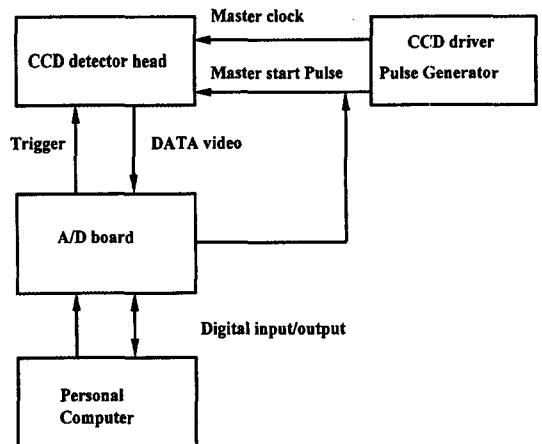


Fig. 4 Block diagram of signal flow

선형CCD내의 모든 픽셀은 광도에 비례하는 전압을 출력한다. 파형발생기의 마스터 스타트 펄스(Master start pulse)는 픽셀(Pixel)의 출력을 동기시키고, 픽셀의 출력은 트리거신호(Trigger signal)를 이용하여 아날로그-디지털(A/D)보드로 전달된다. A/D보드는 DMA를 이용하여 약 100KHz의 속도로 데이터를 획득하며, 이렇게 전달된 데이터를 이용하여 MTF의 값을 구한다.

3.3 거울의 스캐닝 메카니즘

카메라 렌즈의 최적의 초점거리를 구하기 위해서 미소한 간격으로 마이크로미터의 끝에 부착된 거울을 전후로 이동시킨다. 마이크로미터의 피치는 0.5mm이며, 회전당 500펄스의 분해능을 가지는 스텝핑모터에 연결되어 있어서, 1펄스당 1μm의 이송을 하게 된다. 리미트 스위치(Limit switch)를 사용하여 스캐닝하는 출발과 끝을 감지하게 하여 스캐닝범위를 벗어나지 않도록 하였다. 스텝핑모터의 구동을 위해서 모터의 인터페이스와 제어를 위한 보드를 중심으로 시스템이 구현되었다.

4. 초점거리의 계산과 보정

카메라 렌즈의 초점거리는 필름면에 초점이 맺히도록 설계되어 있다. 그래서 카메라의 필름면을 기준으로 한 초점거리의 오차를 측정하고 보정하여 가장 좋은 화상을 얻을 수 있게 해야 한다. 이와 같은 초점거리의 오차는 각 단계별로 다음과 같은 순서로 MTF의 값을 계산되어 진다.

- (1) DMA 를 이용한 아날로그-디지털 변환
- (2) 측정 데이터를 평균함
- (3) 픽셀 데이터 중에서 최대 및 최소 광도값을 찾음
- (4) 식(5),(6)을 이용한 MTF값 계산

위의 순서(1)에서 (4)를 거울의 매 위치마다 반복하여 MTF의 값을 구하고, 그 값이 최대가 될 때의 위치와 필름 기준면과의 거리가 초점거리가 된다. 일반적으로 거울의 위치와 MTF의 값의 관계는 볼록한 곡선 형태로 나타나며 MTF의 최대값은 최소자승법을 이용하여 포물선의 형태로 곡선맞춤(Curve fitting)한 꼭지점 값으로 구할 수 있다.

M_i 를 MTF값, X_i 를 거울의 위치라 하면 포물선 곡선맞춤과 측정데이터와의 편차 제곱의 합 E는 다음과 같이 구해진다.

$$E = \sum_{i=1}^N (M_i - (aX_i^2 + bX_i + c))^2 \quad (7)$$

여기서 a, b, c 는 포물선의 계수이며, N 은 초점거리 범위에서의 측정점이 된다. 변분원리를 이용해서 식 (7)은 다음과 같은 식으로 변환된다. 즉,

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^N (M_i - (aX_i^2 + bX_i + c)) X_i^2 = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^N (M_i - (aX_i^2 + bX_i + c)) X_i = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^N (M_i - (aX_i^2 + bX_i + c)) = 0 \quad (10)$$

식 (8)~(10)에서 수치적으로 가우스소거법(Gauss elimination)을 이용하여 계수값 a, b, c 를 구할 수 있으며 MTF값이 최대일 때의 초점거리, f_m 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_m = -\frac{b}{2a} \quad (11)$$

Fig.5 는 개발된 초점거리 측정 시스템의 순서도를 보이고 있다. 즉, 카메라가 장착되었을 때, 카메라의 인터페이스 단자와의 접촉을 위한 솔레노이드 밸브를 작동 함으로서 카메라 제어를 시작한다. 카메라의 셔터를 열고 주밍을 하여 렌즈를 원하는 위치에 둔 다음, 마이크로미터의 끝에 있는 거울을 전후로 이동하면서 선형 CCD의 신호를 이용하여 MTF의 값을 계산한다. 전체 초점거리 구간을 스캐닝하고 나서, 위에서 언급한 방법으로 최적의 MTF의 값을 구한다. 따라서, 초점거리의 구간에서의 초점거리를 계산할 수 있으며 보정도 할 수 있다.

5. 초점거리 보정을 위한 카메라 인터페이스 시스템

최근의 카메라는 촬영 성능을 높이기 위해서 초점거리 보정을 위한 수치적인 보정 기능을 가지고 있다. 즉, 카메라의 롬(ROM)의 특정한 주소에 보정 파라미터(Parameter)를 입력함으로써 수치적인 보정을 행할 수가 있다. f_d 를 각각의 주밍위치에서의 설계 초점거리라고 하고 f_m 을 실제로 측정된 초점거리라 하면 보정파라미터 P_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

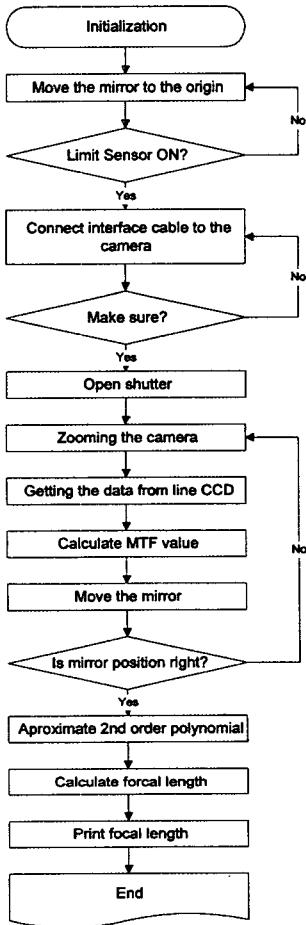


Fig. 5 Flow chart of the focal length measurement system

$$P_c = \text{round}[(f_d - f_m) / \text{step_length}] \quad (12)$$

여기서 step_length 는 기본적인 보정스텝의 거리로 주밍의 위치에 따라 다르게 나타난다. 식 (12)에 의해서 구한 P_c 는 임시적인 램(RAM)에 저장한다. 저장된 P_c 는 초점의 이동량으로 수치적인 보정을 한 후에 다시 한 번 초점거리를 확인하기 위하여 초점거리 측정을 수행한다. 수치적인 보정 후에 측정결과가 만족스러운 경우, 별도의 EPROM에 저장한다. 초점거리 계산과 보정은 모든 주밍 위치에서 정확히 반복적으로 수행된다. Fig.6 은 초점거리 보정을 위한 순서도이며 tolerance는 설계치에서 허용하는 초점거리의 오차를 의미한다.

카메라의 보정과 통신을 위해서 컴퓨터 인터페이스 시스템을 구성하였다. 일반적으로 카메라는 타이밍차트를

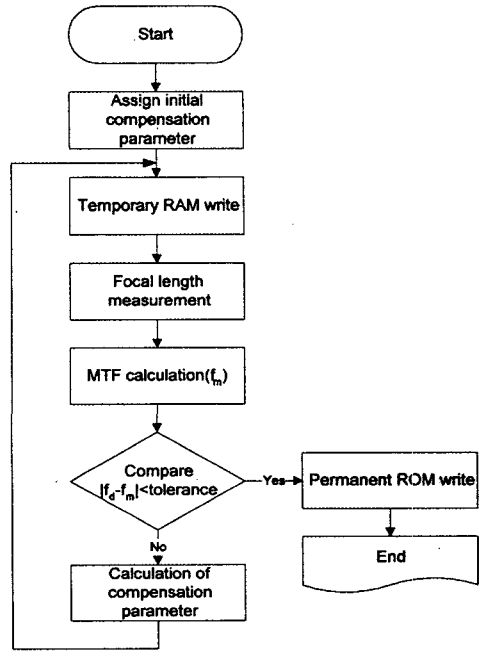


Fig. 6 Flowchart of the focal length compensation

기초로한 TTL 로직(Logic)의 통신 포트를 가지고 있으므로 이를 위한 통신 I/O회로를 설계하였다. 카메라의 시스템은 4가지 통신모드, 즉, 테스트모드(test mode), 라이트모드(write mode), 리드모드(read mode), 실행모드(execute mode)를 가지고 있다. 테스트모드는 통신의 초기화를 위한 것이고, 라이트/리드 모드는 카메라의 메모리에 특별한 파라미터를 쓰거나 읽는 데 사용된다. 실행모드는 셔터의 개방과 폐쇄, 플래시(Flash)의 켜고 끄, 주밍등의 기능을 실행하는 모드이다. 모드의 선택과 지령 코드는 디지털입출력(DIO)인터페이스 카드와 소프트웨어를 이용하여 통신하도록 구현되었다. 또한 통신을 위한 핀의 접촉을 위하여 공압 솔레노이드 제어 시스템도 구현되었다.

6. 실험장치의 구성

MTF를 기초로 한 초점거리 측정과 보정 시스템을 오토콜리메터, 선형CCD, PC등을 통하여 실제적으로 구현하였다. Fig.3에서와 같이 구성하고 이를 이용하여 실제로 구성한 시스템이 Fig.7에 나타나 있다. 카메라에서의 초점거리를 측정하기 위해서는 경통의 주밍위치가 38mm에서 115mm까지 적당한 간격으로 위치하게 되며

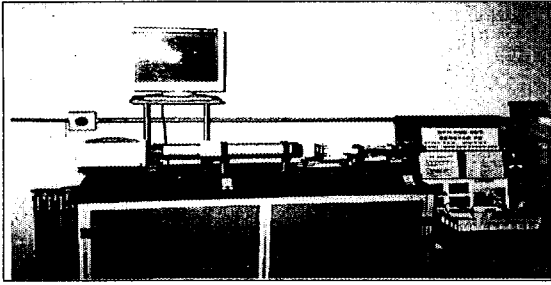


Fig. 7 Developed System Setup

각각의 주밍위치에서 초점거리가 필름면과 일치하게 해야 한다. 이를 위해서 Fig.5와 같은 순서에 의해서 초점의 거리를 측정하고 Fig.6의 그림에서처럼 카메라의 ROM에 실제로 초점의 거리를 변경하여 주는 과정을 수행하여 주는 알고리즘을 구현하였다.

7. 실험결과 및 고찰

Fig.8a는 카메라의 주밍위치38mm에서 50 μ m간격으로 측정한 순수한 선형CCD에서의 신호를 나타내고,

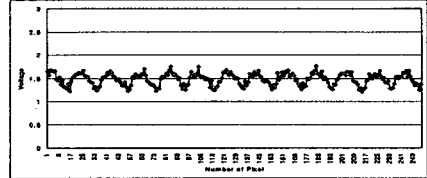
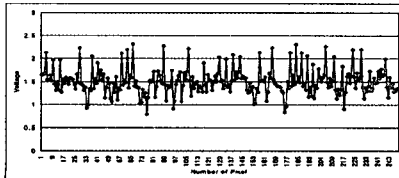
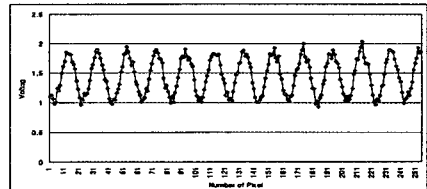
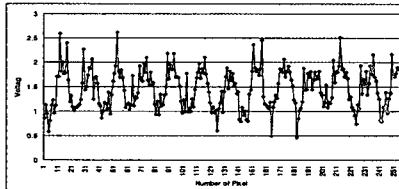
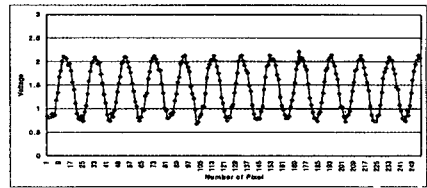
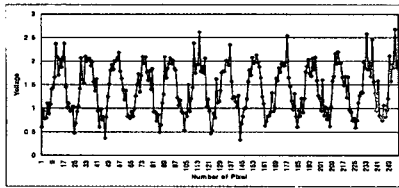
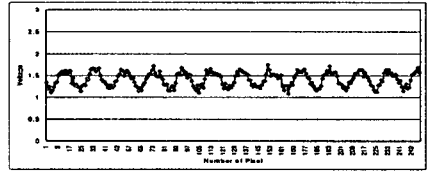
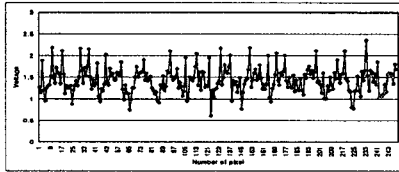
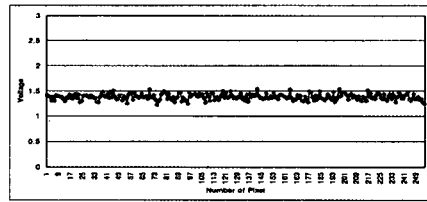
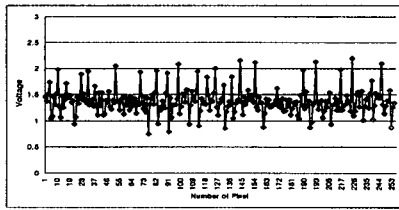


Fig.8a Raw signal from CCD

Fig.8b Average signal from CCD

Fig. 8 Singal from CCD at 38mm zooming position

Fig.8b는 주밍위치38mm에서 측정 데이터를 평균화한 값을 나타낸 것이다. Fig.8 에서 알 수 있듯이 순수한 CCD에서의 신호는 많은 노이즈를 포함하고 있고, 평균화를 하고 난 다음의 데이터는 많은 노이즈가 제거 되었음을 알 수 있다. 따라서 Fig.8(b)를 이용해서 쉽게 MTF의 값을 구할 수가 있다. 또한 초점거리의 위치가 가까워질수록 마스터차트의 상이 명확하게 나타나고, CCD의 출력의 값도 명확하게 나타나는 것을 알 수가 있다. 마찬가지로 주밍위치80mm에서 200 μ m의 간격으로 측정한 선형CCD의 신호와 주밍위치115mm에서 400

μ m의 간격으로 측정한 선형CCD신호의 평균 출력은 Fig.9와 Fig.10에 나타나 있다. 그리고 Fig.11에서는 38mm, 80mm 115mm 에서의 거울의 이동한 거리에 대한 각각의 MTF값을 나타낸 것이다. Fig.11에서 점으로 표현된 것은 실제로 측정된 값이고, 곡선은 2차 포물선으로 곡선맞춤한 형태를 각각 보여주고 있으며 곡선의 꼭지점은 실제로 초점의 위치를 나타내고 있다. 또한 38mm에서는 측정범위의 영역이 115mm에서보다 적게 나타나고 있는데 이는 렌즈의 초점거리가 길어지게 됨에 따라 나타나는 결과라 볼 수 있다. 그리고 Fig.12는 개발

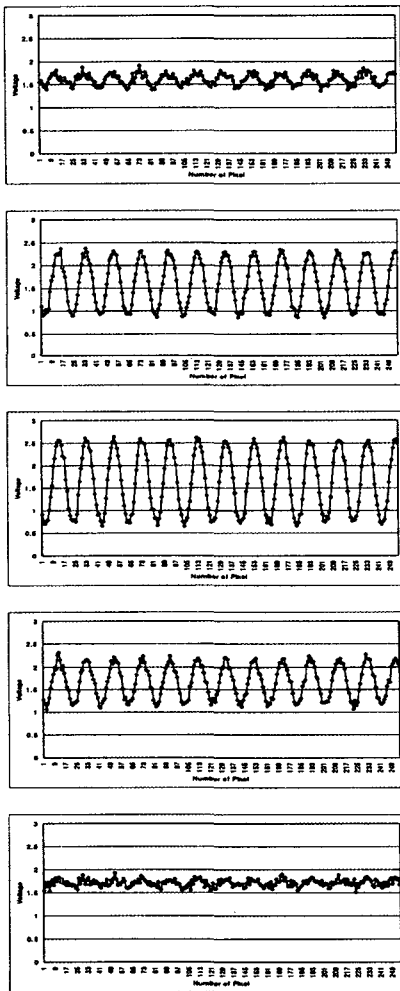


Fig. 9 Average signal from CCD (at 80mm zooming position)

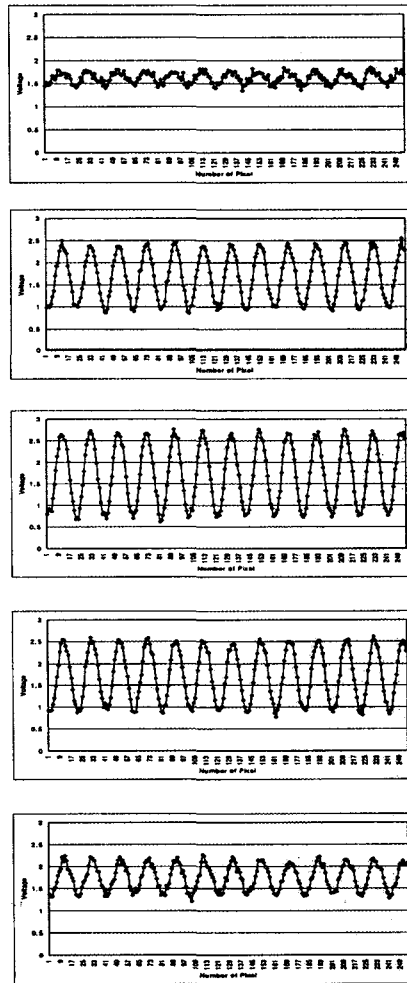


Fig. 10 Average signal from CCD (at 115mm zooming position)

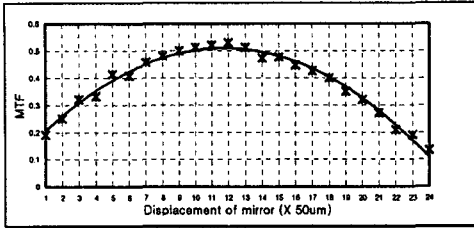


Fig. 11a MTF plot and parabolic curve fit at 115mm zoom

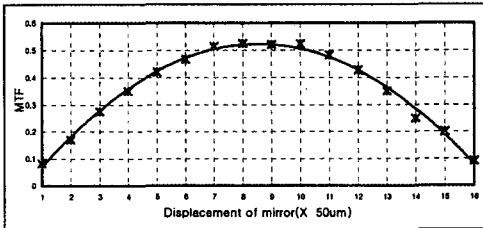


Fig. 11b MTF plot and parabolic curve fit at 80mm zoom

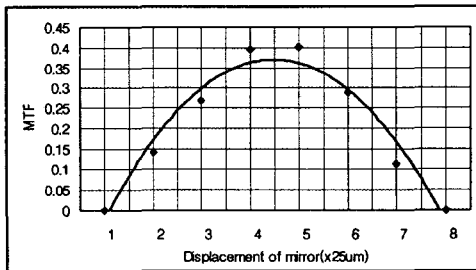


Fig. 11c MTF plot and parabolic curve fit at 38mm zoom

된 시스템의 반복성을 평가하기 위해서 각 주밍의 위치에서 반복적인 초점거리를 측정하였다. 측정결과 대부분 10-20 μ m의 이내로 측정이 되어서 반복성이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 이렇게 측정된 초점거리는 카메라의 필름면에서의 위치와의 편차를 구하여 컴퓨터와 카메라 간의 인터페이스를 통하여 수치적으로 보정하게 된다. 실제로 보정된 카메라를 이용하여 사진현상결과 신뢰성을 평가받았다.

8. 결 론

컴퓨터를 이용한 카메라 렌즈의 초점거리 측정과 보정 시스템이 개발되었으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 카메라와 같은 광학적인 렌즈 초점거리의 새로운 측정 시스템을 선형CCD와 오토콜리메터를 이용하여

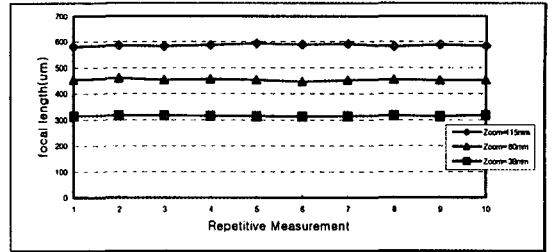


Fig. 12 Repeatability Measurement

구성하였고, 카메라 렌즈의 초점거리 측정에 매우 유용한 것으로 나타났다.

(2) MTF(Modulation Transfer Function)를 기초로 한 초점거리 측정 시스템을 개발하였고 정확성과 반복성에서 좋은 결과를 얻었다. 그러므로 렌즈나 렌즈군, 또는 광학적인 장비의 초점거리 측정에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

(3) 최적의 초점거리 측정을 위한 최소자승 알고리즘을 개발하였으며, 이 알고리즘의 개발로 높은 반복 성능을 가지는 초점거리 평가가 가능하였다.

(4) 카메라의 렌즈 측정과 계산된 초점거리 데이터를 이용하여 수치적으로 보정파라미터를 카메라의 특정한 주소에 입력하는 초점거리 실시간 측정 및 보정 시스템을 개발하였다.

(5) 컴퓨터를 이용한 다양한 주변기기 제어 시스템을 구현하였다. 즉, 개발된 시스템은 선형CCD로부터의 이미지 획득, 자동적인 스캐닝, MTF값의 계산, 초점거리 계산과 보정, 카메라와 컴퓨터간의 통신등으로 구성되었다. 개발된 시스템은 실제적인 카메라 생산에 적용하여 높은 생산성과 고정밀성을 얻었으며, 다양한 광학적인 부품에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구에 도움을 준 서울대 대학원의 이동성군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. W. J. SMITH., Modern Optical Engineering, McGraw-Hill, 1966.
2. D. C. O'SHEA, Elements of Modern Optical Design, John Wiley & Sons, 1985.
3. J. TEUBER., Digital Image Processing, Prentice Hall, 1993.
4. A. V. OPPENHEIM, R. W. SCHAFER, Discrete Time Signal Processing, Prentice Hall, 1989.
5. Sudhakar M. pandit, Shien-ming wu, Time series and system analysis with application, John Wiely & Sons, 1983.
6. Jasbir s.arora, Introduction to optimum design, McGraw-Hill, 1989.
7. Paul Horowitz, Winfield Hill, The Art of electronics, Cambridge, 1989.
8. John P. Hayes, Digital system design and microprocessors, McGraw-Hill, 1987.
9. C. W.deSILVA, Control Sensors and Actuators, Prentice Hall, 1989.
10. 박희재, 이석원, "MTF방법에 의한 카메라렌즈 초점자동측정 시스템 개발," 한국정밀공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 264-270, 1996.