

MTF 방법에 의한 카메라 렌즈 초점 자동 측정 시스템 개발 (Focal Length Measurement System for Camera Lens using the MTF)

*이석원, 이동성(서울대원), 박희재(서울대 기계설계학과)
문호균(삼성항공), 김영식(삼성항공)

S.W.Lee, D.S.Lee, H.J.Pahk(Seoul National University), H.K.Moon, Y.S.Kim
Samsung Aerospace)

Key Word: autocollimator, MTF(modular transfer function), CCD 센서, 초점거리, 마이크로 미터, 렌즈, DMA(dynamic memory access), chart(차트)

ABSTRACT: In this paper, a computer automated system has been developed for measuring the focal length of camera lens using the MTF(Modular Transfer Function)based on the signal processing around a line CCD and autocollimator. An optical Path for the focal length measurement system has been designed around the light source, collimator, camera, mirror and the line CCD. The eyepiece of the collimator is replaced by line CCD, and the mirror is moved along the focal axis by a PC driven step motor. An efficient method has been designed for finding the optimum MTF value for the focal length based on the least squares approach. The developed system is fully computer automated: signal transmission to and from the camera, MTF evaluation based on the line CCD, step motor control, etc. The developed system has been applied to a practical camera manufacturing process and demonstrated its performance

1. 서론

최근에 광학을 기초로 한 산업계에서 중요시되는 문제는 초점을 자동으로 맞추는 문제다. 대부분 오토콜리메터(auto collimator)를 사용하여 수동으로 사람이 그 초점을 판별하여 맞추는 것이 현실이다. 하지만 산업계에서 이러한 작업을 필요로 하는 부분이 급성장하고 있으며 대량생산을 위해서는 자동화가 필수적으로 되어가고 있다. 특히 카메라 렌즈의 경우 최근 자동카메라의 급수요현상으로 조립시 카메라의 초점을 맞추는 작업은 가장 기본적인고 정교한 작업이 되고 있다. 초점을 맞추는 것은 렌즈의 절대좌표를 지정하는 것으로 줌기능을 갖춘 카메라렌즈의 구동은 이 점을 기준으로 움직이게 된다. 본 논문에서는 초점거리를 자동으로 측정 하기위한 작업으로 MTF(modulation transfer function)의 방법을 사용하였다. MTF를 사용하면 픽셀수가 현저히 작은 센서를 사용하고, 그에 따라 신호의 처리량도 줄어들어 짧은 시간에 초점의 거리를 쉽게 판단할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 논고에서는 카메라를 장착하면 퍼스널 컴퓨터를 통해서 솔레노이드와 실린더를 이용해 장착을 하고 카메라 인터페이스핀을 부착해서 카메라의 줌기능을 인터페이스하고 측정을 위한 반사판인 거울을 모터로

인터페이스화 하여 측정이 끝나면 자동으로 치구를 해제하고 그 결과값을 화면에 출력하는 자동 시스템을 기술한다.

2. 시스템 구성 및 실험

2-1. 시스템 구성

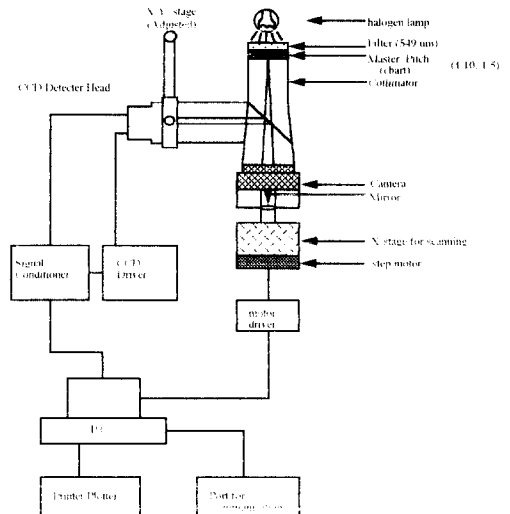


Fig.1 Schematic diagram of automatic measuring system for camera focal length

전체 시스템은 할로겐 광원에서 빛을 발생하여 카메라의 렌즈를 통과하여 렌즈 밑에 거울을 두고 그 반사광과 원래의 광과 간섭현상을 이용하여 가장 선명한 지점이 원하는 초점의 거리라고 판단한다. 종래에는 사람이 육안으로 집안렌즈를 통하여 관측하던 곳에 CCD를 대신 설치하여 신호를 얻고 CCD에서 나온 신호는 PC와 인터페이스를 하며, A/D를 사용하여 그 값을 디지털화한 값을 구하게 된다. 측정하고자 하는 렌즈를 포함한 카메라를 슬레노이드 밸브와 공압실린더를 이용하여 만든 자동 치구에 장착하여 측정하는 동안 움직이지 않도록 고정한다. 렌즈를 통과한 빛은 10 μ m단위로 위와 아래로 움직일 수 있도록 하는 마이크로미터 위에 초경합금을 연삭과 래핑을 한 거울을 통해서 반사하게 된다. CCD는 전용으로 구동하는 보드를 장착하여 신호를 송수신한다. CCD판에 놓여있는 빛의 조도를 측정하게 되는 데 이 양은 전기적인 신호로 나오게 된다. 이 아니라고 신호를 종래의 12bit A/D보다 더 정교한 16bit A/D 보드를 통해서 디지털로 컴퓨터에 입력된다. 그리고 거울이 달려있는 마이크로미터는 500펄스/회전 으로 제어되는 모터를 사용하여 1 μ m의 정밀도로 측정간격을 만들 수 있다. 거울의 거리를 자동으로 이송시키기 위해서 모터 컨트롤보드를 PC에 내장시켜서 조정할 수 있도록 하였다.

Table.1 Experimental Device

Filter	Wavelength $\lambda = 549 \mu\text{m}$
step motor Unit	resolution 1 μm
CCD detector head (Hamamatus)	No of photodiode: 256 pitch X height: 50 μm X 0.5mm
A/D converter	16 bit 100k Hz
DIO board	Camera Interface and Solenoid Drive

2-2. 측정 알고리즘

1) MTF

광학 시스템에서 렌즈의 성능을 평가하는 자료로서 Fig3.에서 볼 수 있듯이 밝은 면과 어두운 면이 주기적으로 되어있는 차트(chart)를 통과한 빛을 렌즈에 통과시키게 되면 Fig3.에서와 같은 빛의 조도 신호가 생기게 된다. 빛의 수신부에서 목적으로 하는 렌즈의 초점의 위치에 있게 되면 차

트의 어두운 면과 밝은 면이 명확하게 나타나게 되나 초점이 맞지 않게 되면 그 편차가 크게 나게 된다. 이것을 수식적으로 나타낸 값을 MTF라 한다.

렌즈를 통과한 빛의 세기의 최대값과 최소값을 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있고 그 값을 MTF라고 한다.

$$MTF = \frac{\text{max} - \text{min}}{\text{max} + \text{min}} \quad (1)$$

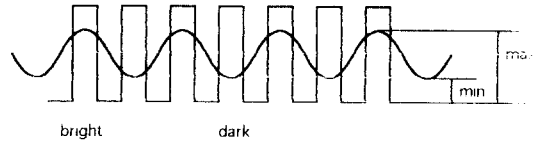


Fig.2 The Image of Bar target

렌즈를 통과한 빛의 격자간격을 고려하여 차트의 간격을 결정하기 위해서는 다음과 같은 수식을 사용할 수 있다.

$$P_s = \frac{f_c}{f_t} * P_c \quad (2)$$

여기서 f_c 는 렌즈의 초점거리, f_t 는 콜리메이터렌즈의 초점거리, P_c 는 차트의 선 간격, P_s 는 CCD에 맺힐 투영 상에서의 선 간격이 된다. 이와 같은 식에서 적절한 차트의 선 간격은 0.25mm로 결정했다.



Fig.3 The Shape of Chart

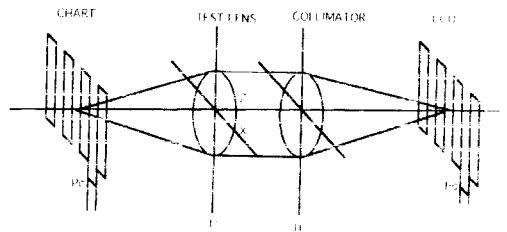


Fig.4 The Optical Path around Chart and CCD

결국 초점에 더 근접하게 될수록 MTF의 값이 크게 되고 초점에서 멀어지게 될수록 MTF의 값이 작게 된다. 본 시스템에서는 거울을 이송시키면서 각 스텝에서 MTF의 값을 구하여 최고의 값에 도달하는 경우를 찾고자하는 것을 목표로 한다.

2) 실제적인 MTF의 값의 근사방법

그림에서 CCD에서 바로 획득한 신호는 많은 노이즈를 포함하므로 알아보기가 힘들지만 이것을

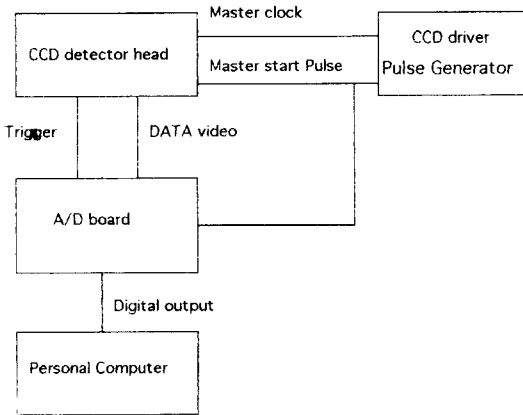


Fig.7 Block diagram of Signal flow

2) 모터의 구동

모터는 일반적으로 제어하기 쉽고 정확한 동작을 하는 스텝모터를 사용하였다. 반사판인 거울을 구동하기 위해서 리드가 1회전당 0.5mm인 마이크로미터를 커플링을 사용하여 모터와 연결하였다. 모터는 1회전당 500펄스를 내는 것으로 결과적으로 1펄스당 $1\mu\text{m}$ 의 이송거리를 가지게 된다. 먼저 프로그램이 구동되면 리미트 센서용으로 쓰이는 마이크로 포토 커프러와 모터의 원점을 잡는 슬릿모양의 센서를 추가적으로 부착한 형태로 두 개의 센서가 동시에 인식할 때를 원점으로 인식한다. 그 다음은 일정한 간격으로 이송을 하면서 MTF의 값을 측정한다. 초기의 이송때는 원점을 인식하기 위해서 거울의 이송속도를 작게 하지만 측정을 시작하게 되면 이송속도를 최대로 하여 측정시간을 최대한으로 단축시킨다. 여러 번의 스텝으로 측정을 다하고 마치면 다시 다른 카메라를 측정하기 위해서 원점으로 거울을 급속 이송한다.

3) 카메라와의 인터페이스

삼성카메라의 3배줌 기능을 갖춘 자동카메라는 마이크로프로세서를 내장한 채로 자체내의 롬(rom)을 가지고 모든 파라미터를 보관하고 있다. 5개의 통신단자를 통해서 마이크로프로세서와 인터페이스를 할 수가 있는데 크게 테스트모드(test mode), 라이트모드(write mode), 리드모드(read mode), 동작모드(execute mode)로 분류된다. 테스트모드는 카메라와의 인터페이스를 하기 위한 초기화와 다른 모드로 세팅할 준비를 한다. 그리고 라이트모드와 리드모드는 카메라의 램의 값을 읽고 쓰는 기능을 가지고 있다. 또한 동작모드에서는 카메라가 가지고 있는 기능을 동작하는 모드로 셔터를 열거나, 후레시를 켜거나, 또는 일

정한 줌(zooming)하는 기능들을 가지고 있다. 렌즈의 초점거리를 측정하기 위해서는 셔터를 열고 줌을 한 다음 측정을 시작해야 한다. 그래서 동작모드에서 다음과 같은 지령을 사용하여 카메라를 동작 시켜야 한다.

Table.2 Camera Codes at Execute Mode

Code	Function	Input Parameter
9CH	Move to target zooming point	target position
C9H	Open shutter	
CAH	Close Shutter	
08H	Wait state	

이와 같은 일련의 과정이 모두 퍼스널 컴퓨터에서 DIO 보드를 통해서 지령을 주게 한다. 그러면 카메라를 장착하고 난 다음 측정자가 카메라의 부가적인 작업을 행하지 않더라도 모든 동작을 자동적으로 할 수 있겠다. 즉 셔터를 연다든가, 다른 줌위치에서 측정을 하고 싶든가 하는 것 등 조작이 필요가 없게 된다. 카메라의 동작 지령을 위해서는 Fig.8 같은 형태로 통신을 해야 한다.

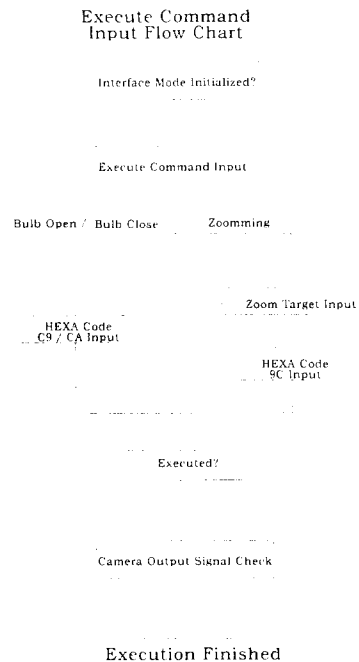


Fig.8 Camera Interface Block diagram

4) 솔레노이드와의 인터페이스

측정을 위해서는 카메라를 고정시켜야 하는 데, 그러기 위해서는 공압을 이용한 실린더와 실린더를 제어하는 솔레노이드가 부가적으로 있어야 하

averaging을 함으로써 깨끗한 sinusoidal형태의 신호를 얻을 수 있다. 실험에서 구한 데이터는 노이즈 때문에 이상적으로 구할 수가 없다. 그래서 다음과 같은 계산 방법을 사용하였다.

1. 각 픽셀에서의 평균값을 취한 것을 가지고 다음과 같은 값을 구한다.

여기서 P_j 는 j 픽셀에서의 빛의 세기
 M 은 한 번에 처리할 데이터의 수

2. 다음을 만족하는 신호의 산을 구한다.

$$\text{if}(X_{i-1} < X_i, X_i > X_{i+1}) \text{ then High}(k)=X_i$$

3. 다음을 만족하는 신호의 골을 구한다.

$$\text{if}(X_{i-1} > X_i, X_i < X_{i+1}) \text{ then Low}(k)=X_i$$

4. 골과 산의 위치를 평균한다.

$$\begin{aligned} \max &= \sum_{k=1}^M \text{High}(k) \\ \min &= \sum_{k=1}^M \text{Low}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

5. MTF의 값을 구한다.

$$MTF = \frac{\max - \min}{\max + \min} \quad (4)$$

위의 과정을 거치게 되면 노이즈에 대한 영향을 급격히 줄일 수 있으며 신호의 산과 골의 높이를 구하는 데 아무런 무리가 없었다. 위와 같은 과정을 도식적으로 표현하면 Fig.6과 같이 표현된다.

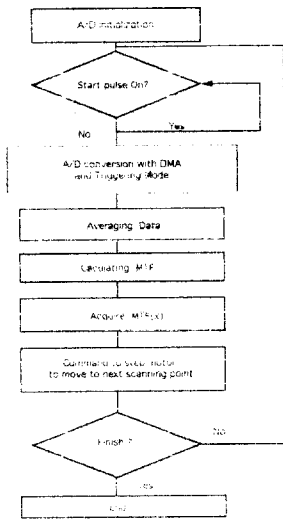


Fig.5 Flow Chart of MTF Evaluation

자동카메라들은 마이크로 프로세서를 내장하고 있어 외부와 카메라 단자를 통해서 인터페이스할 수 있는 데 프로토콜에 대한 정보를 알면 쉽게 해결할 수 있다. 이 기능을 통해서 카메라의 서터를 열고, 닫는 기능뿐만 아니라 임의의 위치까지 가도록 중심에 대한 명령도 줄 수가 있다. 즉 수동에 의해서 동작지령을 하던 것을 컴퓨터가 자동적으로 명령을 주어서 카메라의 모든 기능을 제어 할 수가 있는 것이다.

2-3. 카메라에서의 MTF의 측정

카메라에서 렌즈의 초점거리를 측정하기 위해서는 퍼스널 컴퓨터와 각 기기와의 인터페이스를 수행해야 한다. Fig.6 에서와 같이 퍼스널 컴퓨터는 A/D 보드를 통해서 CCD 센서의 신호를 입력 받고, 스텝핑모터를 구동을 위한 펄스를 모터 콘트롤러에 입력을 주어야 하며, 카메라의 인터페이스를 위해서 DIO 보드를 사용해야 한다. 일반적인

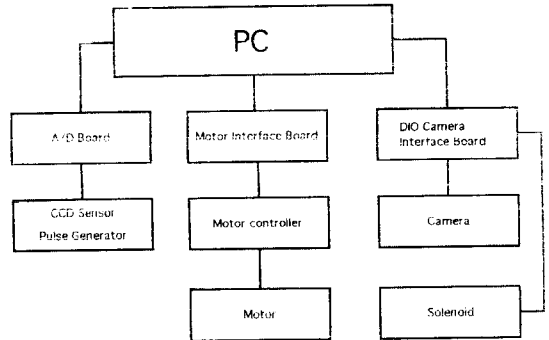


Fig.6 Measurement system for lens focal length

1) CCD 센서에서의 신호 입력

CCD에서 발생한 각 픽셀에서의 신호는 빛의 강도에 따라 비례적으로 전압을 가지게 된다. 먼저 마스터 스타트(master start)의 신호를 입력해 주면 그 신호에 의해서 각 픽셀이 동기화하여 트리거(trigger)의 신호와 함께 한 번에 한 픽셀의 전압신호(data video)와 함께 출력이 된다. 그러면 A/D 컨버터에서는 트리거에 의한 모드에서 작동을 하여서 가장 빠른 전송방법인 DMA(direct memory access)를 사용하여 전달한다. 이 과정에서 항상 존재하는 노이즈를 제거할 수가 없었다. 그래서 각 픽셀에서의 전압값을 여러 번 측정된 값을 평균하여 하나의 데이터를 얻었다. 그런 결과 Fig.10,11,12 볼 수 있듯이 노이즈의 영향이 줄어들게 되었다. 하지만 이상적인 사인 함수 형태의 파형이 발생되지 않아서 MTF를 구하기 위해서는 또 다른 신호처리 알고리즘을 필요로 하였다.

며 실린더의 위치를 확인하기 위한 센서도 부가적으로 장착을 시켜야 한다. 또한 카메라와 인터페이스용 핀도 솔레노이드를 이용해서 카메라단자와 접촉을 시켜야 한다. 이 동작도 또한 자동적으로 하기 위해서 DIO 보드중 남은 여유 분의 포트를 사용해서 솔레노이드 부분은 릴레이를 사용해서 제어를 하고 실린더의 위치는 리미트센서(limit sensor)를 사용해서 온,오프(on,off)를 체크한다.

5) MTF 값의 2차 함수 근사화

반사판거울의 각 위치에서의 MTF의 값을 구한 것을 사용해서 이차함수화 하여 그 꼭지점을 렌즈의 초점이라고 판단한다. 이차함수로 근사화 하기 위해서는 최소자승법을 이용해서 구하면,

$$E = \sum_{i=1}^N (y_i - (ax_i^2 + bx_i + c))^2 \quad (5)$$

라고 가정하고 여기에 대해서

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0, \frac{\partial E}{\partial b} = 0, \frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad (6)$$

의 조건을 사용하면

$$\sum_{i=1}^N (yx_i^2 - ax_i^4 - bx_i^3 - cx_i^2) = 0$$

$$\sum_{i=1}^N (y_i x_i - ax_i^3 - bx_i^2 - cx_i) = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) = 0$$

와 같은 식을 구할 수 있다. 여기서 a, b, c 를 구할 수 있다. 렌즈의 초점거리는

$$f = -\frac{b}{2a} \quad (8)$$

가 되는 것을 알 수 있다.

5) 측정자동화

카메라를 장착만 하면 모든 기능이 자동적으로 Fig.9와 같은 루틴으로 실행이 된다.

3. 측정결과

1) 신호의 평균

Fig.10,11,12에서 볼 수 있듯이 신호를 직접 CCD 센서에서 입력을 받았을 경우 거친 데이터를 보여주지만 20번의 스캔을 한 후 평균한 후의 데이터는 보다 나은 결과를 가져왔다. 초점이 멀어질 수록 전압이 낮기 때문에 더욱 더 노이즈에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있으며 초점에 가까이가면 선명한 화상을 가지게 됨으로써 인한 전압의 증가로 노이즈의 영향을 적게 받는다.

2) MTF의 값의 2차함수 근사화

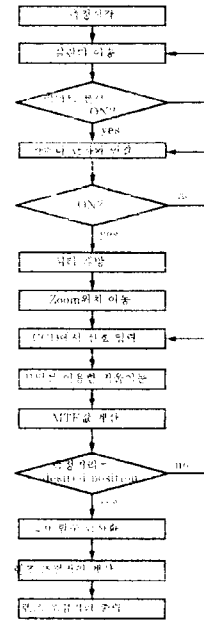


Fig.9 Block diagram for measuring system for camera lens

Fig.13,14,15에서 볼 수 있듯이 여러 가지의 원인으로 인해서 노이즈가 생겨서 깨끗한 형태가 이루어지지 않음을 알 수 있다. 이것의 여러 가지 원인이 있겠지만 유추할 수 있는 원인으로 가장 중요한 요인은 광원의 불균일성이다. 광원자체가 골고루 분포되어야 하는데 실제로 광원이 전구형태로 빛을 이루기 때문에 전구의 유리 불균일성과 필라멘트의 형상 때문에 균일한 광원을 얻을 수 없다. 그 외에 반사판에 있는 거울이 선명하기 못한 점도 있고 그 외에 렌즈 자체의 불균일한 형상 즉, 아스페릭 오차(Aspheric error) 등을 가지고 있음으로 깨끗한 형태의 곡선을 얻을 수가 없다. 하지만 각 zoom 위치에서 이차함수 근사화 시킨 결과 MTF의 그래프와 유사한 형태로 출력되는 것을 알 수 있으며 이 자료를 사용하여 같은 카메라를 여러 번 측정하여 얻은 초점거리는 차이가 적게 나타나는 것을 볼 수 있다.

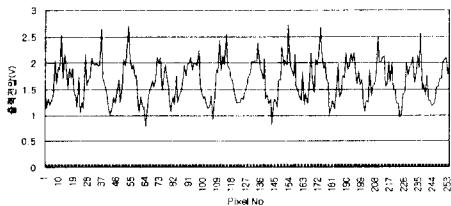
3) 초점거리의 측정 신뢰성

비록 MTF의 값의 변화가 심하지만 2차곡선으로 근사화함으로써 많은 노이즈에 대한 영향을 많이 감소하였고 그 결과가 안정된 초점거리를 구할 수가 있었다. Zoom=115mm에서의 초점거리가 Zoom= 38mm에서보다 길기 때문에 MTF곡선의 분포가 넓게 한다. 따라서 MTF의 측정을 많은 영역에서 측정을 시행하여야 한다. 그래서 이송거리는 50μm로 하고 Zoom= 115mm에서는 24회 실시하였고 Zoom= 38mm에서는 16회 실시하였다. 그

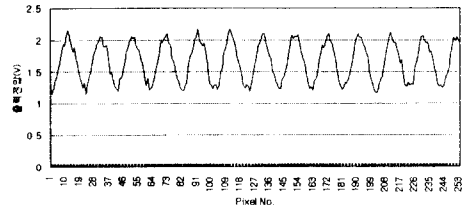
결과 Fig.16 에서 볼 수 있듯이 $\pm 10 \mu\text{m}$ 이내에서 초점거리를 판단한다. 현재 육안 검사로는 Zoom=38mm일 때가 Zoom=115mm 보다 정확하게 초점을 찾을 수 있으나 마찬가지로 Zoom 115mm 일 때는 초점을 판단하는 영역도 길어져서 약 $\pm 15 \mu\text{m}$ 의 오차를 가지고 있는 것으로 본 시스템이 더 좋은 결과를 가지고 있는 것으로 판명되었다. 또한 여러축정점에 대하여 측정을 행할수록 보다 정확한 초점거리를 구할 수가 있지만 측정시간이 아주 중요하기 때문에 임의의 Zoom점에서 측정 점의 시작과 끝 그리고 측정간격에 대해서 최적화를 수행하여야 한다.

4. 결론

- 1) 거울의 위치를 변화시키면서 CCD 에서 받은 데이터는 Fig.13,14,15에서 볼 수 있다. 격자모양의 상한값과 하한값의 차이가 많을 수록 빛의 조도가 강한 것이며 MTF의 값도 크게되며 초점에 가까이 접근하는 것을 의미한다.
- 2) 초점의 전후의 거리가 멀어짐에 따라 MTF의 값이 작아지고 있는 것을 알 수 있으며 초점이 맞는 지점에서 최고의 MTF의 값을 기지는 것을 알 수가 있다.
- 3) 거울의 거리에 따라 MTF의 값이 2차 곡선의 형태를 따르므로 최소자승법으로 이 곡선으로 근사화하여 꼭지점을 초점거리라고 판단한다.
- 4) Zoom의 값이 클수록 육안이나 본 시스템이나 모두 초점거리에 대한 편차가 크게 나타났으니 본 시스템이 낫은 결과를 가져옴을 보여준다.
- 5) 작업자는 카메라를 장착만 하면 나머지의 모든 작업은 자동으로 렌즈의 위치를 파악하고 그 결과를 출력함으로써 마지막으로 렌즈를 보정하면 원하고자 하는 상을 필름에 맺히게 할 수 있다.
- 6) 렌즈의 초점거리를 계산한 카메라에 스크류를 장착한 렌즈를 일정만큼 회전시켜서 보정하거나 내장된 마이크로프로세서의 렌즈보정값을 지닌 어드레스에 값을 변경시켜서 렌즈를 보정할 수 있다.

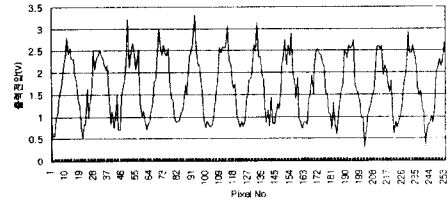


(a) Raw Data Obtained from CCD

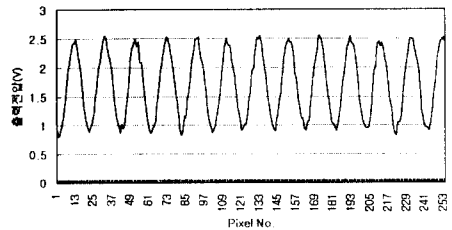


(b) Average Data

Fig.10 focus distance=375 μm

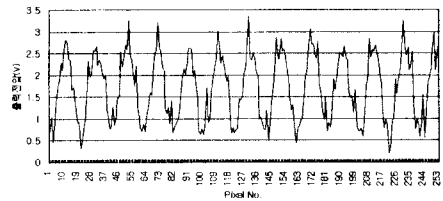


(a) Raw Data Obtained from CCD

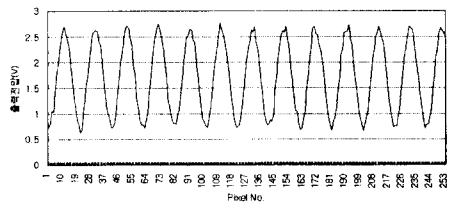


(b) Average Data

Fig.11 focus distance=125 μm



(a) Raw Data Obtained from CCD



(b) Average Data

Fig.12 focus distance=25 μm

참고 문헌

[1] Warren J.Smith., "Modern Optical Engineering", McGraw-hill Comp.

[2] Jan teuber., "Digital Image Processing", Prentice Hall. 1993.

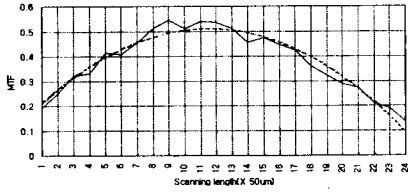


Fig.13 MTF plot at 115mm Zoom

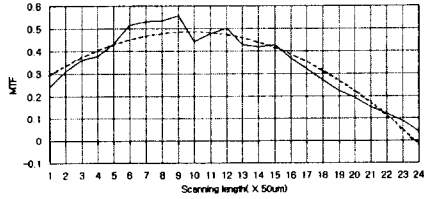


Fig.14 MTF plot at 105mm Zoom

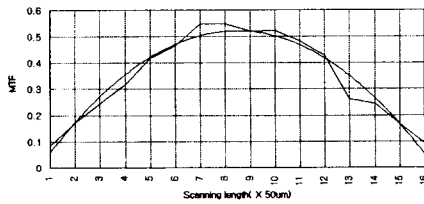


Fig.15 MTF plot at 80mm Zoom

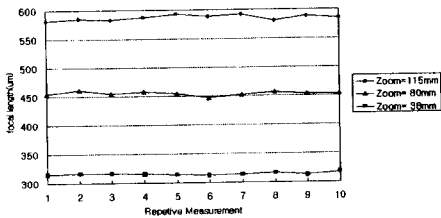


Fig.16 Repetive Measurement at each Zoom point

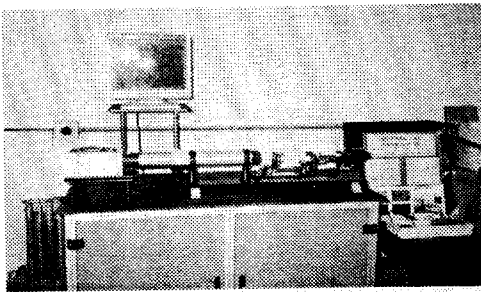


Fig.17 Photograph of System