

< 논문 >

다중 렌즈 모듈의 기울기 측정 : 이론 및 응용

이 승 희[†], 박 종 현^{*}

(2006년 10월 31일 접수, 2007년 1월 24일 심사완료)

Tilt Measurement of Lens Module with Multiple Lenses : Algorithm and Application

Seunghee Lee and Jong Hyeon Park

Key Words : Lens Module(렌즈 모듈), Tilt Measurement(기울기 측정), Tilt Correction(기울기 보정), Compact Camera Module(초소형 카메라 모듈)

Abstract

This paper considers about the tilt measurement of lens module with multiple lenses. The tilt between lenses in lens module and barrel or between image sensor and barrel can be measured precisely with the proposed algorithm. The magnitude and direction of the tilt vector of lens and image sensor can be measured from the best focal surface. The selecting and setting of image sensor, test chart, image sensor centering to lens module, axis align, focus measure method are also explained to get highly precise tilt results. The proposed algorithm is verified with the lens module inspection system we developed, and the experimental results show that the tilt measure proposed in this paper is robust and precise. With the proposed tilt measurement algorithm, the tilt of an image sensor and any other lens which intermediates light can be measured.

기호설명

- FV : 포커스 측정값(focus value)
- θ_L : 렌즈모듈 내 렌즈의 기울기
- θ_S : 이미지 센서의 기울기

1. 서론

CCM(compact camera module)이 사용되는 이동 전화, PC 카메라, PDA 등의 수요가 급격히 증가하고 있는데, 특히 수요의 폭발적인 증가세를 기록하고 있는 이동전화에서 CCM이 장착된 제품의 비율이 급격히 증가하고 있고, 통신속도의 향

상으로 인해 PC카메라가 컴퓨터의 기본 부품으로 자리 잡아 가고 있어, CCM의 수요 확대 예상치는 매년 증가세로 수정되고 있다.⁽⁸⁾ 수요증가와 더불어 CCM의 성능 또한 매우 빠르게 향상되고 있는데, 이동전화 등에서 요구되는 CCM의 성능은 저급 디지털 카메라에 거의 접근하였다.

CCM의 성능을 결정짓는 여러 요인 중 렌즈 모듈의 성능은 큰 부분을 차지 하고 있으며, 품질의 균일성에 많은 기업들이 총력을 기울이는 점을 감안할 때, 렌즈모듈의 적절하고 빠른 성능평가는 대량생산에서 필수적이다.^(1,3,7) 렌즈모듈의 성능평가 항목은 (상대) 해상력, 외관, 이물검사, 왜곡, (상대) 밝기, 렌즈의 기울기, 중심 이동 등이 있다.⁽⁴⁾ 낮은 사양의 CCM에 사용되는 렌즈모듈의 경우 해상력, 외관, 이물검사 정도를 검사하고, 이를 양품의 기준으로 삼는다. 그러나, 고사양의 렌즈모듈에서는 위에서 열거한 성능 대

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
 E-mail : holonomic@hanyang.ac.kr
 TEL : (02)2297-3786 FAX : (02)2297-3786
^{*} 한양대학교 기계공학부

부분을 만족해야 한다. 성능 평가의 항목 중 렌즈의 기울기는 비대칭의 이미지가 이미지 센서에 맺혀 이미지의 질이 현저히 저하되는 영향을 미치는데, 사람의 눈은 전체적인 해상력 수준에는 둔감한 편이나 비대칭 해상력에는 매우 민감하게 반응하므로 중요한 요소이다. 또, 렌즈모듈을 움직여 줌을 하는 시스템에서는 렌즈모듈 내의 렌즈 기울기의 영향이 더 커지게 되므로 이 항목을 검사하는 방법이 꼭 필요하다.

렌즈 경통과 렌즈 사이의 기울기 또는 렌즈와 이미지 센서 사이의 기울기를 측정하는 방법은 특정 패턴을 이용하여 3차원 데이터를 얻어내는 방법,⁽²⁾ 해상력을 이용하는 방법, 비파괴검사를 이용하는 방법 등이 있다. 특정 패턴을 이용하는 방법의 경우 기울기 결과의 해상도가 이미지 센서의 픽셀 크기에 의존하게 되어, 결과의 정밀도가 매우 떨어지는 단점이 있다. Manoj Aggarwal⁽²⁾ 등은 패턴을 이용한 기울기 검사는 1도 정도의 정밀도를 가지는 것을 확인하였다. 그러나, 1도의 기울기는 VGA급 CCM에서조차 용인하기 어려운 기울기이고, 메가픽셀(MegaPixel) 이상의 CCM에서는 0.1도 이하의 기울기 측정이 필요하므로 정밀도 측면에서 사용하기 어렵다. 해상력을 이용하는 방법은 렌즈를 이미지 센서 방향으로 이동시킬 때 생기는 이미지 센서상에서의 중심 이동을 측정하거나, 최고 초점 곡면(BFS: Best Focal Surface)에서 렌즈모듈을 회전시키면서 해상력을 측정하여 이를 토대로 기울기를 추측하는 방법을 사용한다. 이 방법은 이미지 센서의 비 대칭성으로 인한 결과의 불안정성, BFS 결정의 불명확성 등의 이유로 신뢰하기 어렵다. 그 외, X-Ray, 초음파 등을 이용하여 조립상태를 직접 측정하는 비파괴검사의 경우 시스템 구성이 복잡하고, 정밀도를 얻기 어렵고, 외란이 심하다. 본 논문에서는 대상 픽셀에서 최대의 해상력을 갖는 렌즈와 센서 사이의 거리인 BFP(Best Focus Position)를 특정 필드(field) 내의 각 픽셀에 대해 얻어내어, 렌즈의 기울기를 경통에 대해 정확히 알아내는 것이 가능하도록 하는 알고리즘을 제안하였다. 이렇게 얻어진 기울기를 통해 렌즈모듈의 성능을 파악할 수 있고, 조립 공정에서의 문제점을 파악하고 개선할 수 있으며, 부수적으로 얻어지는 이미지 센서의 기울기나 외부 렌즈의 기울기를 통해 검사기에서 이미지 센서의 기울기 조절을 가능하게 하여 측정기의 오차 범위를 줄일 수 있도록 하고, 외부 렌즈의 기울기 측정과 조절이 가능하도록 하였다. 또한 제안된 알

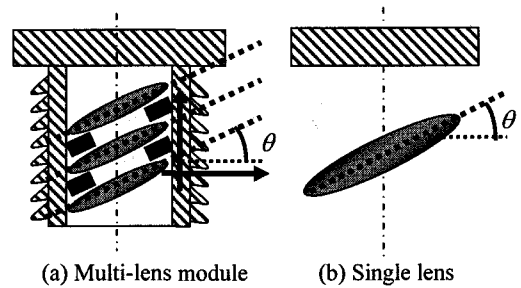


Fig. 1 Multiple lenses to single lens modeling

고리즘은 렌즈모듈의 데이터를 필요로 하지 않으며, 여러 용도로 사용될 수 있고, 빠르고 정확한 결과를 얻을 수 있어, 대량생산을 위한 검사기에 적용가능하다는 장점이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 렌즈 모듈과 이미지 센서의 기울기를 알아내기 위한 시스템의 조정 방법 및 기울기 측정 알고리즘에 대하여 기술되어 있고, 3장에서는 제안된 알고리즘이 구현된 시스템에 대한 설명 및 실험결과에 대해 기술하였고, 4장에서 결론을 맺었다.

2. 렌즈 기울기 검사

2.1 다중 렌즈 모듈의 단렌즈 모델링

여러 장의 렌즈가 사용되는 조립된 다중 렌즈 모듈을 통해 이미지 센서에 맺히는 영상을 이용하여 렌즈모듈 내 각 렌즈의 특성을 분리해 내는 것은 매우 어렵다. 그리고, 렌즈 모듈의 성능은 렌즈 모듈내의 각 렌즈의 특성이 합쳐진 결과로부터 나타나므로, 여러 개의 렌즈를 하나의 렌즈로 변환하여 해석하는 것이 필요하다.

일반적으로 렌즈모듈을 조립하는 과정에서 발생하는 렌즈의 기울기는 처음으로 조립되는 렌즈의 조립상태에 의존한다. 그 이후에 조립되는 렌즈나 스페이서 등은 매우 작은 공차를 가지고, 압력을 주어 조립하기 때문에 처음으로 삽입된 렌즈가 기울기 없는 상태로 조립되었다면 나머지 렌즈들도 그에 따르는 것이 일반적이다. 이를 역추론 하면 다중 렌즈모듈의 각 렌즈의 기울기는 거의 동일하게 나타난다고 판단할 수 있고, 각 렌즈가 다른 기울기를 가지고 있을 경우에도 동일한 중심을 갖는 경우 하나의 렌즈로 표현할 수 있으므로, Fig. 1과 같이 다중 렌즈를 하나의 렌즈로 모델링 하는 것이 타당하게 된다. 렌즈의 특성에 영향을 미치는 것이 렌즈 모듈내의 렌즈의 기울기만 있는 것은 아니나, 본 논문에서는

각 렌즈들이 정교한 생산과정을 통해 생산되어, 렌즈의 기울기가 가장 큰 영향을 미친다는 가정 하에 이 논문을 서술한다.

2.2 테스트차트, 렌즈모듈, 이미지 센서간의 정렬

정도의 차이는 있으나 모든 렌즈모듈은 중심부와 주변의 최대 해상력이 다르고, 렌즈를 통해 이미지 센서에 빛이 투영되었을 경우 각 픽셀에서의 BFP가 다르므로, 이미지 센서와 렌즈의 중심이 맞지 않는 경우 이미지 센서로부터 렌즈의 상태를 정확히 알아내는 것이 어렵다. 이미지 센서와 렌즈의 중심은 광학 현미경에 이미지 센서와 렌즈를 고정할 기구물을 놓고 얻은 이미지를 처리하면 렌즈 모듈 홀더 중심과 이미지 센서 유효 화소의 중심간의 차이를 측정할 수 있는데, 이를 이용하여 중심 조절을 할 수 있다. 이 방법은 렌즈모듈 홀더가 다수 이거나(예를 들어 회전형 인덱스에 달린 경우) 홀더를 광학 현미경에 올려 놓기 어려운 경우 사용할 수 없어 제약이 많다. 다른 방법으로는 테스트 차트에 마크를 두고 이를 이용하는 것인데, 이를 위해서는 테스트차트와 렌즈모듈간의 정렬이 필요하다. 테스트 차트와 렌즈모듈간 중심의 틀어짐은 배율 효과에 의해 렌즈와 이미지 센서 사이의 중심 편차에 비해 민감도가 떨어지므로 테스트차트와 렌즈모듈간의 정렬은 추를 이용하거나, 레이저 포인터를 사용하여 간단히 완료할 수 있다. 렌즈모듈과 이미지 센서 사이의 중심 편차는 렌즈모듈과 테스트차트 사이의 중심 편차가 무시될 수 있고, 렌즈 조립이 끼워 맞춤 방식이어서 렌즈의 중심과 경통의 중심간의 편차가 매우 작다는 가정을 한다면, Fig. 2와 같이 렌즈를 회전시켜 이미지 센서에 투영된 테스트차트의 마크 회전 중심을 이미지 센서의 중심에 맞춤으로써 조정 가능하다. 이때, 이미지 센서는 중심에서 최대의 해상력을 갖는 위치에 두는 것이 편리하며, 이미지 센서를 다른 위치에 두고 렌즈를 회전하면 렌즈 모듈과 이미지 센서 사이의 중심 편차를 검증할 수 있고, 때에 따라서는 이미지 센서 이동 축의 조정도 가능하다.

2.3 포커스 측정

BFS나 BFP는 최대의 포커스 값을 갖는 곡면이나 지점을 의미하는데, 이를 측정하기 위해서는 획득된 이미지의 관심 위치에서 포커스의 정도를 알아내야 한다. 포커스의 정도는 해상력과 달리 많은 측정방식들이 제안되어 있다.⁽⁶⁾ 계속

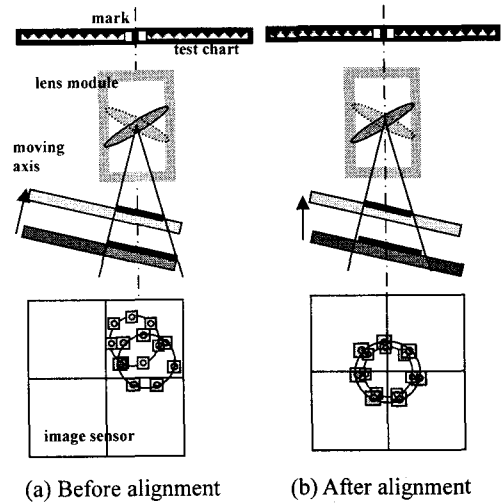


Fig. 2 Alignment of sensor and lens module

장비 등에서 일반적으로 사용되는 포커스 측정 방식은 MTF(Modulation Transfer Function)이다. MTF는 흰 선과 검은 선이 번갈아 있는 테스트 차트에서 평균 밝기에 따른 최대, 최소의 밝기 차이를 나타낸다.

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

여기서 L_{max} 는 대상 영역 내 최대 밝기 값 L_{min} 은 최소 밝기 값이다. MTF는 외란에 매우 민감한 반응을 보이는데, 이는 L_{max} 와 L_{min} 의 정의를 변형함으로써 외란에 대한 민감도를 줄일 수 있다.

$$L_{max} = \frac{1}{Q_2} \sum_{i=n-Q_1}^{n-Q_1} I_i, \quad L_{min} = \frac{1}{Q_2} \sum_{i=Q_1}^{Q_1+Q_2} I_i \quad (2)$$

여기서 n 은 전체 픽셀의 개수, Q_1 은 외란의 영역이라 판단되는 픽셀의 개수이고, Q_2 는 외란 영역 밖에서 최대, 최소의 밝기를 평균으로 구하기 위한 영역이며, $I_1 \sim I_n$ 은 지정된 구역에서 픽셀의 밝기를 정렬한 것이다 ($I_1 < I_n$). MTF는 외란에 민감하고, 테스트 차트의 피치나 측정대상거리(working distance)에 따라 값이 포화되어 민감도가 떨어지는 구간이 있어 본 연구에서는 테스트 차트를 결정하는 용도로만 MTF를 사용한다. MTF 이외에 포커스를 측정하는 여러 방식들이 제안되어 있는데, 이중 강인하며, 포화영역 없이 민감도를 유지하며, 계산량이 적은 방식을 채택하였다. 사용된 포커스 측정 알고리즘은 다음과 같다.

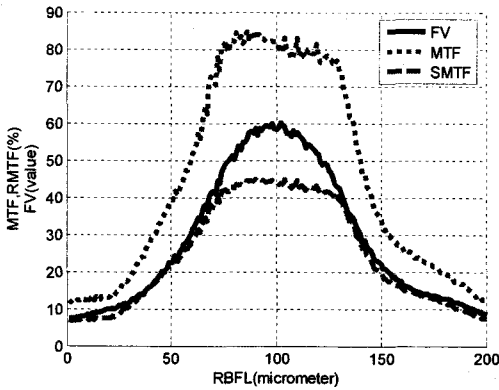


Fig. 3 FV and MTF value with respect to distance between lens module and sensor

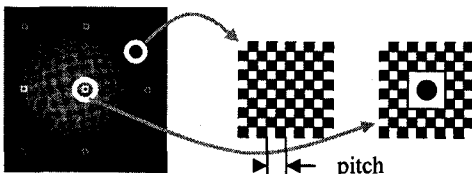


Fig. 4 Test chart with chess pattern

$$FV = \frac{\sum_{i=p}^{p+m} \sum_{j=q}^{q+n} (P_{ij} - P_{(i-1)j})^2}{\sum_{i=p}^{p+m} \sum_{j=q}^{q+n} |P_{ij} - P_{(i-1)j}|} \quad (3)$$

여기서 p_{ij} 는 (i, j) 에서의 픽셀 값을 의미하고, n 은 포커스 측정 영역의 너비, m 은 높이를 나타낸다. 그리고, p 와 q 는 검사영역의 시작점을 나타낸다. FV(Focus Value)는 주변 픽셀과의 차이 값의 제곱의 합을 차이 값의 절대값의 합으로 나누어 준 것으로 주변 픽셀과의 차이가 크면 클수록 큰 값을 가지므로 조밀한 패턴을 가지는 테스트 차트에 대해 포커스의 정도를 잘 표현한다. 또한, 최대와 최소값을 이용하는 MTF와 달리 차이 값의 전체 평균을 이용하므로 외란에 강인한 성질을 가진다. Fig. 3은 MTF와 FV를 같은 조건에서 실험하여 경향과 민감성을 확인한 실험 결과이다. 그래프에서 SMTF(Scaled MTF)는 MTF에 상수를 곱하여 FV와 매칭시킨 것이며, RBFL(Relative Back Focal Length)은 렌즈와 센서 사이의 상대적 거리를 의미한다. 실험결과로부터 MTF와 FV가 비슷한 경향을 보임을 알 수 있고, MTF는 포커스의 정도가 큰 정상부근에서 값이 거의 변하지 않는 포화상태를 보이는데 비해, FV는 그렇지 않다는 것을 알 수 있다.

2.4 테스트 차트

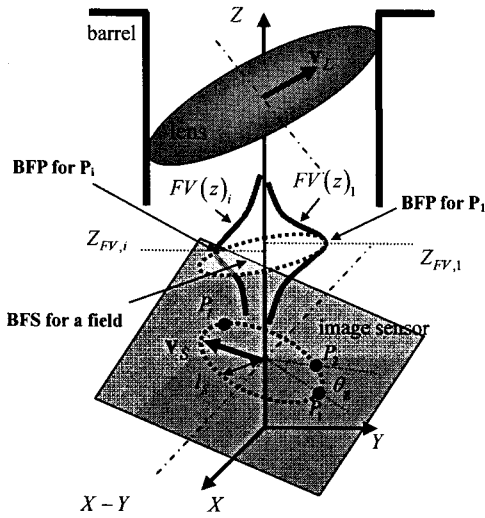
본 연구에서 사용된 포커스 측정 방식은 인접한 픽셀간의 밝기 값 차이의 관계식을 이용하므로, 한 방향의 포커스 성분만을 가지는 바 차트(bar chart)나 방사형 차트가 사용되면 렌즈모듈에서 나타나는 비선형성이 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 신뢰할만한 결과를 얻기 위해서는 포커스 측정이 이미지 센서의 어떤 부분에서라도 가능해야 하고 테스트 차트의 모든 부분이 동일한 패턴을 가져야 한다. 체스패턴(chess pattern)은 이런 조건들을 모두 만족하는데, 흑색과 백색이 수평 수직으로 서로 조화되어 렌즈 모듈의 수평 수직 성분을 모두 잘 표현할 수 있으며, 차트의 전 영역이 같은 패턴을 가질 수 있다.(Fig. 4)

포커스 측정에 있어 결과값이 외란의 영향을 쉽게 받게 되면 측정 결과의 안정성이 떨어지게 되고, 이는 측정의 반복성에 큰 영향을 미치게 되어 바람직하지 않다. 그리고, 과도한 강인성은 민감도의 감소를 가져와 외부 상황의 변화(예를 들어 렌즈 성능의 변화)가 결과에 미치는 영향이 적어져 결과를 통해 렌즈를 분석하는 것이 어려워진다. 테스트 차트를 이용해 포커스를 측정할 때 강인성과 민감도에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 테스트 차트의 피치이며 피치가 커지면 강인성이 증가하고 민감도가 감소하는 경향을 보인다. 적절한 테스트 차트의 피치는 실험 대상 렌즈의 평균 성능, 측정대상거리, 조명강도, 포커스 측정 방식, 이미지 센서의 특성 등에 따라 달라지므로 결정이 매우 어렵다.

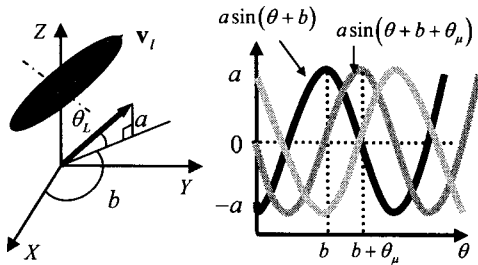
본 연구에서 사용되는 포커스 측정방식은 포화영역이 명확히 나타나지 않는데 반해, MTF의 측정결과는 테스트 차트의 피치에 따른 포화영역이 현저히 나타나는 경향이 있다. MTF와 FV는 같은 경향을 가지고 있으므로, MTF의 민감도 강인성 경계가 FV에도 비슷한 영향을 미칠 것이라는 가정하에 본 연구에서는 MTF의 민감도, 강인성 경계를 찾아 테스트 차트의 피치를 결정하였다. MTF의 민감도, 강인성의 경계는 정해진 조건 내에서 테스트 차트의 피치를 변형해 가며 실험하여 결과의 포화영역이 사라지는 경계의 피치로 결정하면 된다.

2.5 기울기 검사 알고리즘

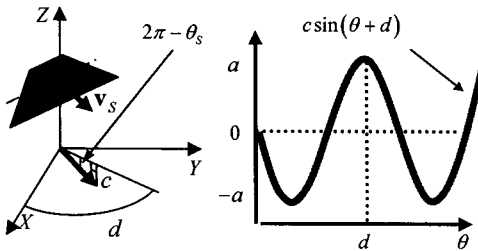
렌즈 모듈의 경통을 좌표축으로 설정할 경우 렌즈와 이미지 센서는 Fig. 5(a)로 표현할 수 있다. 렌즈 모듈의 경통과 이미지 센서 사이의 기울기는 검사기에서 렌즈 모듈의 성능 검사를 부



(a) Lens, barrel and image sensor



(b) Lens vector and lens tilt with rotation



(c) Sensor vector and sensor tilt

Fig. 5 Lens and sensor tilt

정확하게 만드는 큰 요인 중 하나인데, 이를 측정할 마땅한 수단이 없어, 정밀한 조정이 매우 어렵다.

렌즈 모듈내의 렌즈가 경통과 직각을 이루고 중심 편차가 없는 이상적인 렌즈모듈에 렌즈 모듈내의 렌즈와 평행한 이미지 센서를 접근 시키며 이미지 센서 상에 특정 필드의 FV를 측정하면, FV가 최대가 되는 이미지 센서의 위치(BFP)는 이미지 센서의 중심에서 같은 거리에 있는

픽셀들의 집합인 필드를 이루고 있는 모든 픽셀에서 동일하다. 이미지 센서와 렌즈가 경통에 대해 기울어져 있을 경우, 이미지 센서를 렌즈모듈에 접근시켰을 때의 필드 내 각 픽셀에 대한 BFP는 이미지 센서의 기울어짐과 렌즈의 기울어짐이 합쳐진 결과로서 나타난다. 이미지 센서의 기울어짐과 렌즈의 기울어짐을 분리해 내기 위해서는 렌즈를 회전 시키는 것이 필요하다. 렌즈를 일정 각도 회전 시킨 후 이미지 센서를 접근시켜 결과를 얻는 경우 이전의 결과에 비해 달라진 부분은 순전히 렌즈 기울기 변화에 의한 것이므로, 두 결과를 비교하여 렌즈의 기울기를 알아낼 수 있고, 결과에서 렌즈의 기울기를 제거하면 이미지 센서의 기울기를 알아낼 수 있다.

Fig. 5(a)와 같이 이미지 센서의 특정 필드의 한 픽셀을 P_i 라 정의하고, 특정 필드 전체의 픽셀 벡터를 P 라 정의한다.

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T \quad (4)$$

여기서 $n\theta_g = 2\pi$ 이다. 이미지 센서를 초기 위치에서 정해진 위치까지 움직이면서 P_i 에서의 FV를 얻으면 Fig. 5(a)의 $FV(z)_i$ 와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 결과에서 최대의 FV를 갖는 z위치(BFP)를 $z_{FV,i}$, 특정 필드의 BFP를 벡터로 나타낸 것을 z_{FV} 라 정의한다.

$$z_{FV} = [z_{FV,1} \ z_{FV,2} \ \dots \ z_{FV,n}]^T \quad (5)$$

z_{FV} 는 렌즈와 이미지 센서의 중심이 일치하고, 이미지 센서 이동 축이 경통과 평행한 경우 사인함수의 형태를 갖는다. z_{FV} 에서 렌즈의 기울기와 이미지 센서의 기울기를 분리하기 위해서는 렌즈를 일정 각도 회전하여 z_{FV} 를 다시 얻어야 하는데, 이론적으로는 180도의 1회전만으로도 이미지 센서와 렌즈의 기울기를 분리할 수 있으나, 실험의 오차, 렌즈 조립 불량으로 인한 센터의 이동 등의 영향을 줄이기 위해서는 여러 각도에 대해 실험하는 것이 타당하다. 렌즈 회전 실험 시 렌즈 회전량을 θ_μ 라 하면, 렌즈의 회전 분할 m 은 $(m-1)\theta_\mu = 2\pi$ 을 만족하도록 설정한다. 특정 회전 k 에 대한 z_{FV} 는 $z_{FV,k}$ 로 정의한다.

$z_{FV,k}$ 에서 렌즈의 기울기와 이미지 센서의 기울기 영향은 각각 사인함수로 표현할 수 있는데, 렌즈 모듈내의 렌즈의 특성 중 필드의 접선 방향으로의 비선형 특성이 작아 무시할 수 있다고 가정하면, 렌즈의 기울기와 이미지 센서 기울

기에 대한 사인 함수는 같은 주기를 갖는다. 사인 함수의 도메인 θ 를 다음과 같이 정의하면,

$$\theta \in \{0, \theta_g, 2\theta_g, \dots, (n-1)\theta_g, n\theta_g\} \quad (6)$$

렌즈의 기울기에 의한 사인 함수는 $a \sin(\theta + b + i\theta_\mu)$, 이미지 센서의 기울기에 의한 사인 함수는 $c \sin(\theta + d)$ 로 일반화 할 수 있는데, m 등분의 1 회전에 대한 $z_{FV,i}$ 의 관계는 다음의 식으로 표현된다.

$$a \sin(\theta + b + i\theta_\mu) + c \sin(\theta + d) = z_{FV,i} \quad (7)$$

여기서 $i = 0, 1, 2, \dots, m$ 이다. 180도의 위상차를 갖는 렌즈 기울기에 대한 사인 함수의 합에 대하여 다음이 만족되므로,

$$a \sin(\theta + b + (i-1)\theta_\mu) + a \sin(\theta + b + (i-1+m/2)) = 0 \quad (8)$$

이미지 센서의 기울기는 다음의 식으로 결정되며, 이는 Fig. 5(c)로 표현된다.

$$c \sin(\theta + d) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_{FV,i} \quad (9)$$

식 (9)의 우변은 실험의 결과값이므로 커브 피팅을 통해 사인곡선의 계수 값인 c 와 d 를 구한다. 식 (9)을 다시 정리하면 식 (10)로 표현할 수 있는데, 여기서 $z_{FV,i}(\theta)$ 는 $z_{FV,i}$ 를 θ 만큼 위상이동시킨 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} a \sin(\theta + b) &= z_{FV,i}((1-i)\theta_\mu) - c \sin(\theta + d + (1-i)\theta_\mu) \\ &= Q \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $i = 0, 1, 2, \dots, m$ 이다.

식(10)의 열을 합하면 다음의 식을 얻을 수 있고,

$$a \sin(\theta + b) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Q_i \quad (11)$$

식 (11)의 우변을 curve fitting 하여 a 와 b 값을 구한다.

구하여진 이미지 센서와 렌즈에 대한 sinusoidal function을 이용하여 이미지 센서와 렌즈의 기울기 벡터를 다음과 같이 구할 수 있으며 Fig. 5(b), (c)와 같이 표현된다.

$$v_L = l_s \begin{bmatrix} \cos \theta_L | \cos b \\ \cos \theta_L | \sin b \end{bmatrix} \sin \theta_L \quad (12)$$

$$v_s = l_s \begin{bmatrix} \cos \theta_s | \cos d \\ \cos \theta_s | \sin d \end{bmatrix} \sin \theta_s \quad (13)$$

이미지 센서와 렌즈의 기울기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_L = \tan^{-1} \left(\frac{a}{l_s} \right) \quad (14)$$

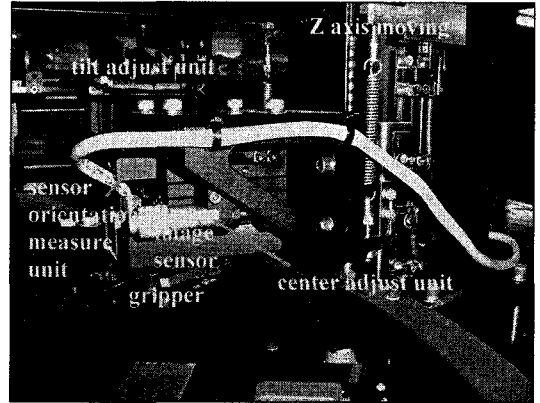


Fig. 6 Resolution and tilt inspection unit

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{c}{l_s} \right) \quad (15)$$

대량 생산에서 렌즈 모듈내의 렌즈 기울기 값을 렌즈의 회전 실험을 통해 얻어내는 것은 기구의 복잡성 및 단위 생산 시간(tact time)의 증가를 야기하여 사용하기 적합하지 않다. 대량생산에서는 미리 이미지 센서의 기울기 벡터를 실험을 통해 알아내고, 한번의 스캔으로 렌즈의 기울기를 측정하면 된다.

$$a \sin(\theta + b) = z_{FV,i} - c \sin(\theta + d) \quad (16)$$

식 (16)에서 우측 항을 커브 피팅 하면 렌즈 모듈내의 렌즈의 기울기가 구해진다.

3. 적용 및 결과

구현된 시스템은 렌즈모듈의 기울기, 해상력, 왜곡, 상대 밝기, 외관 이상 여부를 측정하여 렌즈모듈의 양품여부를 판단하는 것이 목적이다. 그 중 렌즈의 기울기와 해상력을 검사하기 위한 모듈은 Fig. 6과 같이 구성되었다. 테스트 차트는 바닥에 있으며, 이미지 센서는 아래를 향하도록 설계하였다. 이미지 센서의 기울기를 조정하기 위해 이미지 센서의 기울기 조정부를 두었으며, 이미지 센서의 z축 이동은 AC 서보 모터를 사용하였다. z축의 구동 정밀도는 $1\mu\text{m}$ 이다. 검사대상 렌즈는 2메가 픽셀의 핸드폰용 렌즈모듈이며, 측정대상거리는 1m로 하였다. 테스트 차트에서 체스패턴의 피치는 실험을 통해 4.4mm로 정하였다.

렌즈모듈 내 렌즈의 기울기를 측정하기 위해서는 이미지 센서의 기울기에 대한 정보가 있어야 한다. 이를 위해서 앞에서 제안한 렌즈의 회

전을 통한 이미지 센서와 렌즈의 기울기 측정 방식을 사용하였다. 구성된 시스템에 렌즈를 자동으로 회전시키는 모듈이 존재하지 않으므로 실험에서는 렌즈를 수동으로 회전하여 실험하였다. 렌즈의 회전 분할 수 m 이 클수록 결과의 정확성이 커지지만, 수동으로 렌즈를 회전해야 하기 때문에 렌즈의 회전량을 쉽게 측정할 수 있도록 m 을 4로 설정하여 실험하였다. FV의 측정은 이미지 센서의 중심에서 200 픽셀 떨어진 지점에서 수행하였으며, 이를 거리로 환산하면 $6.4mm$ 이다. 실험결과는 Fig. 7(a), (b)와 같으며 (a)는 렌즈의 기울기 (b)는 이미지 센서의 기울기를 나타낸다. 결과로부터 얻어진 이미지 센서의 기울기 사인함수는 $-11.427\sin(x+1.303)$ 이다. 이를 이미지 센서가 경통에 대해 최대도 기울어진 각도로 환산하면 1.023 도이다. 렌즈의 기울기 사인함수는 $11.086\sin(x+2.166)$ 이며, 렌즈가 경통에 최대도 기울어진 각도는 0.992 도이다.

렌즈 모듈내의 렌즈의 기울기나 이미지 센서의 기울기를 실측하는 것은 매우 어렵다. 실험 결과의 신빙성을 알아보는 방법은 이미지 센서 기울기의 결과를 사용하여 이미지 센서의 기울기를 조정된 후 재 실험하여 이미지 센서의 기울기가 조정되고, 렌즈의 기울기가 동일한 결과가 나오는 것을 확인하면 된다.

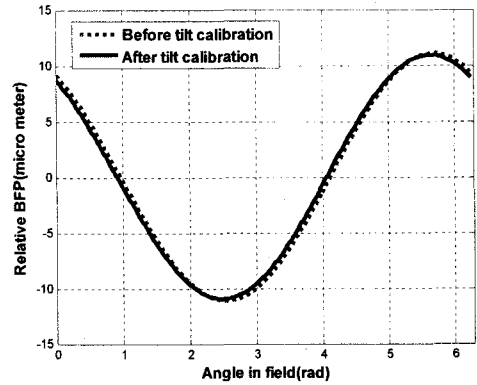
기울기 조정부는 세 개의 기울기 조정 볼트로 이루어져 있고, 세 점의 높이를 조정하면 이미지 센서의 기울기를 조정할 수 있게 되어 있다. 이미지 센서 기울기 조정을 위한 회전 행렬은 다음과 같다.

$$R_k(\theta) = \begin{bmatrix} k_x k_x v\theta + c\theta & k_x k_y v\theta - k_z s\theta & k_x k_z v\theta + k_y s\theta \\ k_x k_y v\theta + k_z s\theta & k_y k_y v\theta + c\theta & k_y k_z v\theta - k_x s\theta \\ k_x k_z v\theta - k_y s\theta & k_y k_z v\theta + k_x s\theta & k_z k_z v\theta + c\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

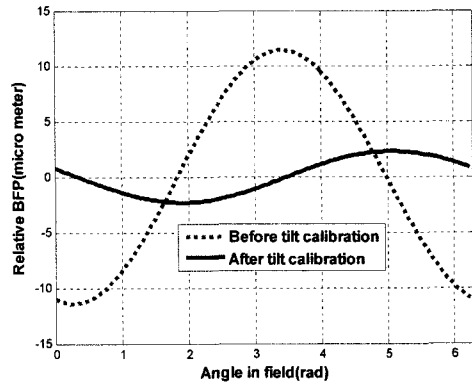
여기서 ${}^A \hat{\mathbf{k}} = [k_x \quad k_y \quad k_z]^T$, $v\theta = 1 - \cos\theta$, $c\theta = \cos\theta$, $s\theta = \sin\theta$ 이다.

계산결과 기울기 조정 값은 Fig. 7(c)와 같다. Fig. 7(c)의 initial value는 조정하기 전 이미지 센서의 기울기를 위치 상대 값으로 표현한 것이고, target value는 조정 값과 초기 위치를 더하여 조정해야 하는 상대 위치를 표현한 것이다. 표시된 숫자의 단위는 마이크로미터이다.

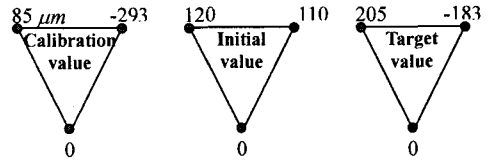
이미지 센서 기울기 조정 후의 이미지 센서와 렌즈의 기울기는 Fig. 7(a), (b)에서 실선으로 표시된 그래프로 표시된다. 이미지 센서의 기울기 사



(a) Lens tilt



(b) Sensor tilt



(c) Sensor tilt calibration value (μm)

Fig. 7 Experimental results and calibration value

인함수는 $2.293 \sin(x+2.795)$, 이미지 센서가 경통에 최대도 기울어진 각도는 0.205 도이다. 렌즈의 기울기 사인함수는 $10.92\sin(x+2.225)$ 이며, 렌즈가 경통에 최대도 기울어진 각도는 0.978 도이다. 이미지 센서의 기울기 조정 전, 후의 실험결과에서 렌즈의 기울기는 0.03 도 이내의 차이로 매우 근접함을 알 수 있다. 이를 통해 렌즈의 기울기를 측정된 결과가 이미지 센서 기울기의 변화에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그리고, 이미지 센서의 기울기는 1.023 도에서 0.205 로 변한 것을 확인할 수 있는데, 이미지 센서 기울기 조정이 올바르게 되었다는

것을 알 수 있으며, 미세한 조정이 가능한 시스템으로 구성하면 더 작은 기울기를 갖는 검사 시스템을 구성할 수 있을 것이라 판단된다.

z축의 구동 정밀도가 $1\mu\text{m}$ 이고, l_z 가 6.4mm이므로 외란이 없다고 가정할 경우 측정의 정밀도는 0.0027도이다. z축의 구동 정밀도를 더 높이면 측정정밀도도 높아질 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 BFS 를 이용하여 렌즈 모듈내의 렌즈 기울기를 정밀하게 측정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 또한, 정확한 측정을 위한 테스트 차트, 이미지 센서 및 포커스 측정법의 선택법과 이미지 센서와 렌즈의 중심보정, 이동축의 중심보정 방법에 대한 방법을 제시하였다. 제안된 기울기 측정 알고리즘을 실제 시스템에 적용한 결과 매우 안정되고, 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 알고리즘을 이용하면 측정 시스템 내의 이미지 센서와 렌즈 모듈 사이의 기울기도 측정가능하며, 거리 보정 렌즈의 기울기도 측정할 수 있어 렌즈와 이미지 센서를 이용하는 여러 시스템의 보정 및 성능 평가에 이용 가능하다.

후 기

본 연구는 ㈜레이시스(www.raysyskorea.com)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chowdhury, A., Darveaux, R., Tome, J., Schoonejongen, R., Reifel M., De Guzman A., Sung Soon Park, Yong Woo Kim and Hyung Wook Kim, 2005, "Challenges of Megapixel Camera Module Assembly and Test," *IEEE Conf. on Electronic Components and Technology*, Vol. 2, pp. 1390~1401.
- (2) Manoj Aggarwal and Narendra Ahuja, 2000, "Estimating Sensor Orientation in Cameras," *IEEE Int'l Conf. on Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 896~899.
- (3) Kuk Won Ko, Yu Jin Lee, Beong Wuk Choi, Kyoung Cheol Koh and Jong Hyeong Kim, 2004, "Development of Automatic Inspection of Defect of Compact Camera Module," *Proc. SPIE International Society for Optical Engineering*, Volume 5603, pp. 191~198.
- (4) Romain Ramel, 2005, "CCM End-user Optical Specifications," *SPIE International Society for Optical Engineering*, Volume 5872, pp. 83~93.
- (5) Murali Subbrarao and Jenn-Kewi Tyan, 1998, "Selecting the Optimal Focus Measure for Autofocusing and Depth-from-focus," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 8, pp. 864~870.
- (6) Nanying He, Weipu Jia, Dingwen Yu, Lei Huang and Mali Gong, 2004, "A novel Type of 3-axis Lens Actuator with Tilt Compensation for High-density Optical System," *Sensors and Actuators*, A.115, pp. 126~132.
- (7) Nokia and ST, 2004, "SMIA(Standard Mobile Imaging Architecture) Characterization Specification," <http://www.smia-forum.org>.
- (8) Asif Chowdhury, 2006, "Camera Module Assembly and Test Challenges," *Semiconductor International*, 2/1/2006.