

제르니케 민감도를 이용한 역최적화 정렬 알고리즘

Reverse-Optimization Alignment Algorithm Using Zernike Sensitivities

김도형 (edk@satreci.com), 최영완, 강명석, 최세철*
(주)썬트랙아이, 국방과학연구소*

위성용 광학계에 많이 쓰이는 반사 또는 반사굴절 망원경에서 통상적으로 광학계의 시야가 크거나 반사경의 개수가 많아지면 상대적으로 정밀한 광학정렬이 어렵다. 임의의 비정렬 상태에서 요구조건을 만족할만한 정렬 상태에 이르기 위해 정렬해야 할 보상자 값을 정량적으로 구할 수 있으면 정밀한 광학정렬 및 정렬 시간 단축에 많은 도움이 된다. 본 논문에서는 제르니케 민감도를 이용한 역최적화 방법으로 정량적인 정렬해를 구하는 알고리즘에 대해 논하고, 임의의 정렬보상자 개수에 대해 간섭무늬가 필요한 최소의 시야 개수를 제안한다. 역최적화 정렬 알고리즘을 카세그레인 방식의 망원경 설계와 실제 발생한 주경의 변형을 포함한 모델에 적용하여 임의의 정렬오차에 대해 정렬해를 구할 수 있음을 보여준다

같은 카세그레인 광학계라도 시준기와 같이 시야가 좁은 (+/-0.1도) 경우, 정량적인 정렬 방법을 쓰지 않고도 쉽게 정렬할 수 있다.[1] 그러나 상대적으로 시야가 큰 (+/-1.0도) 카세그레인의 경우, 역최적화 방법을 이용하지 않으면 축상 시야에서 정렬을 맞추어도 상하 또는 좌우 양 끝 비축상 시야에서의 정렬하게 파면오차 균형을 맞추기 어렵다. 소형 위성용 고해상도 카메라인 Medium-sized Aperture Camera (MAC) 정렬 시, 간섭계로 측정된 파면오차와 Code V의 ALI 함수를 이용하여 정량적으로 정렬오차를 계산하여 비축상 시야 간 파면오차의 균형을 맞추었다.[2]

본 발표에서는 Code V의 ALI와 별도로, 광학계의 정렬오차에 대한 제르니케 (Zernike) 민감도의 선형성을 이용한 정렬 알고리즘에 대해 논의한다. 제르니케 민감도를 이용한 정렬 보상자의 선택이나 정렬로직의 정립에 대해서는 잘 논의된 바 있다.[3] 그림 1은 카세그레인 광학계에서 부경의 축상 정렬오차에 따른 광학계의 특성을 보여준다. 그림 1(a)는 카메라의 MTF, (b)는 파면오차의 제르니케 계수들을 보여준다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 실용적인 범위의 정렬오차 내에서 (예: defocus +/-0.1 mm) 파면오차의 제르니케 계수들은 대체로 선형적인 특성을 보여준다. 따라서 m번 째 시야에서 특정 n번 째 제르니케 계수 mZ_n 를 여러 가지 정렬오차(x_1, x_2, \dots, x_i)에 대한 선형조합으로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다. c_n 은 모든 정렬오차가 0일 때의 제르니케 계수를 나타낸다.

$${}^mZ_n = {}^m c_n + \sum_i \left[\frac{d({}^mZ_n)}{dx_i} \right] x_i$$

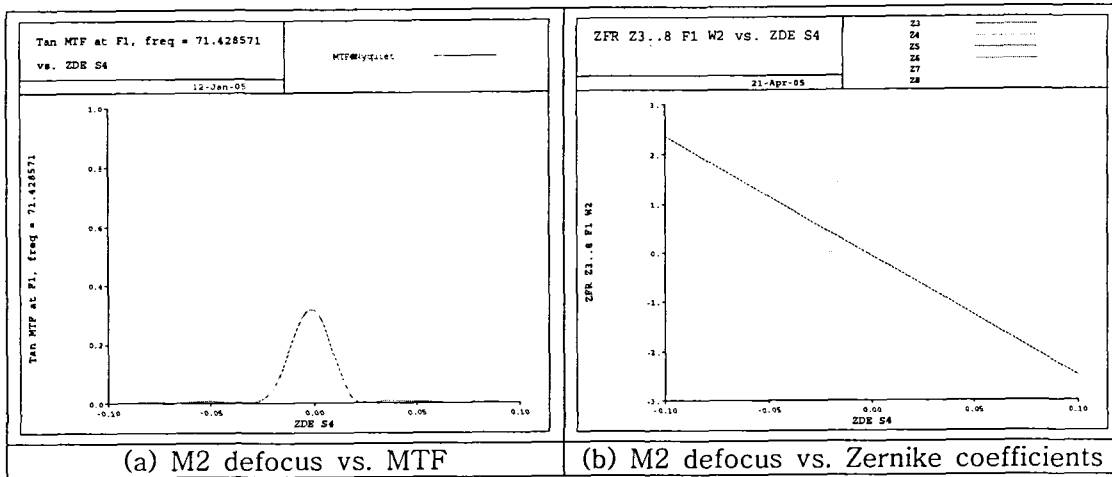


그림 1 부경 defocus 정렬오차와 MTF 및 파면오차의 제르니케 계수

따라서 i 개의 정렬보상자에 임의의 정렬오차가 있을 때, 최소한 i 개의 제르니케 계수 방정식을 얻어 내면 연립방정식을 풀어 현재 흐트러져 있는 정렬오차를 거꾸로 계산할 수 있다. 한편 시야에 따라 특정 정렬오차에 대해 제르니케 민감도가 없거나, 두 개의 제르니케 계수에 대한 방정식이 동일한 조건을 나타낼 경우가 있는데, 이와 같이 하나의 시야에서 구할 수 있는 중복되지 않는 (unique) 제르니케 방정식을 구할 수 있는 조건에 따라 측정이 필요한 최소한의 시야의 개수를 미리 알 수 있다.

MAC과 같은 카세그레인에서 5개의 정렬 보상자에 임의의 오차를 주고 역최적화 방법을 이용하여 정렬오차를 계산하였고, 하나의 시야에서 측정한 파면오차만으로도 정렬오차를 역최적화 할 수 있음을 확인하였다. 또한 MAC과 같은 카메라의 조립 시 주경에 영구 변형이 일어날 수 있는데, 설계 상의 주경 위에 측정한 주경의 변형을 간섭무늬로 포함시켜 제르니케 민감도를 구하였고 역시 계산이 잘 됨을 확인하였다. 이와 같은 제르니케 민감도를 이용한 역최적화 방법은 TMA 광학계[4]와 같이 정렬 보상자의 개수도 많고 시야도 넓은 광학계에도 적용할 수 있다. 이는 실제 간섭무늬를 여러 시야에서 측정해야 했던 것에 비해 많은 시간을 단축할 수 있음을 의미한다. 따라서 이와 같은 제르니케 민감도를 이용한 역최적화 방법이 향후 위성용 광학계 정렬에 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.



1. 양호순, 김종운, 이윤우 외, “직경 450 mm Cassegrain 형태 시준장치의 제작”, 한국광학회지, v.15, n.3, pp.241-247 (2004)
2. 김도형, 최영완, 양호순 외, “소형 위성용 고해상도 광학카메라의 광학정렬”, 한국광학회지, v.015, n.004, pp.391-396 (2004).
3. 최세철, 김연수, 김현규 외, “제르니케(Zernike)계수를 이용한 20:1 줌 적외선 광학계 민감도 분석” 한국광학회지 v.014, n.005, pp.535-544 (2003)
4. 최영완, 김이을, 강명석 외 “소형위성용 초다중채널 카메라 개발” 한국광학회 하계학술발표회 (2005).