



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(11), 953-960(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.11.953

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 추적마운트 지향 정밀도 분석

성기평¹, 임형철², 박종욱³, 최만수⁴, 유성열⁵, 박은서⁶, 류재철⁷

Pointing Accuracy Analysis of Space Object Laser Tracking System at Geochang Observatory

Ki-Pyoung Sung¹, Hyung-Chul Lim², Jong-Uk Park³, Man-Soo Choi⁴, Sung-Yeol Yu⁵, Eun-Seo Park⁶
and Jae-Cheol Ryou⁷

Korea Astronomy and Space Science Institute¹⁻⁶, Chungnam National University⁷

ABSTRACT

Korea Astronomy and Space Science Institute has been verifying the multipurpose laser tracking system with three functions of satellite laser tracking, adaptive optics and space debris laser tracking for not only scientific research but also national space missions. The system employs an optical telescope consisting of a 100 cm primary mirror and an altazimuth mount for fast and precise tracking. The precise pointing and tracking capability in a tracking mount is considered as one of important performance metrics in the fields of automatic tracking and precise application research. So it is required to analyze a mount model for investigating pointing error factors and compensating pointing error. In this study, we investigated various factors causing static pointing errors of tracking mount and analyzed the pointing accuracy of the tracking mount at Geochang observatory by estimating mount parameters based on the least square method.

초 록

거창 우주물체 레이저 추적 시스템은 인공위성 레이저 추적, 적응광학, 우주쓰레기 레이저 추적 등 과학 연구 및 국가적 미션을 수행하기 위해 100cm 크기의 광학 망원경을 가지고 있으며, 빠르고 정밀한 구동을 위하여 경위대식 방식의 추적마운트를 개발하여 테스트 관측 중에 있다. 최근 레이저 추적 시스템의 자동 관측 및 응용 연구 분야에서 추적 대상을 정밀하게 추적할 수 있는 능력은 시스템 성능을 판단할 수 있는 중요한 지표 중 하나이다. 그러기 위해서는 정밀 추적을 저해하는 요인을 파악하고 보정하기 위한 지향 보정 모델이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 추적마운트 제작, 조립 및 설치 과정에서 발생 할 수 있는 정적 지향 오차 발생 원인들을 분석하였으며, 거창 우주물체 레이저 시스템의 추적마운트에 적용된 지향 보정 모델 및 최소자승법을 통해 추적마운트 파라미터를 추정하고, 지향 정밀도 분석 결과를 제시하였다.

Key Words : Tracking Mount(추적 마운트), Altazimuth Mount(경위대식 마운트), Mount Modeling(마운트 모델링), Least Square Method(최소 자승법)

† Received : June 30, 2021 Revised : September 1, 2021 Accepted : September 27, 2021

¹ Researcher, ^{2,3,6} Principal Researcher, ^{4,5} Senior Researcher, ⁷ Professor

¹ Corresponding author, E-mail : kpsung@kasi.re.kr, ORCID 0000-0003-2639-4127

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

I. 서 론

우주물체 레이저 추적 시스템은 레이저 반사경이 장착된 인공위성 또는 우주쓰레기를 대상으로 미리 계산된 궤도 정보(consolidated prediction format 또는 two line elements)를 이용하여 지상에서 표적까지의 거리를 측정하는 시스템이다. 레이저 반사경을 장착한 인공위성의 경우 수 cm 수준, 우주쓰레기의 경우 수 m 수준으로 정밀하게 거리 측정이 가능하다. 지상에서 극초단파 펄스 레이저 발사 시간과 표적으로부터 반사되어 되돌아온 레이저의 도착 시간을 바탕으로 비행시간(time-of-flight)을 측정하고 이를 이용하여 거리를 계산하는 원리이다[1].

거창 우주물체 레이저 추적 시스템은 2019년 개발이 완료되어 2020년부터 시험 운영 중에 있으며, 우주 감시, 지구 과학, 자국의 우주 미션 등 다양한 분야에 활용될 예정이다. 지상에서 인공위성 또는 우주쓰레기를 추적하기 위해서는 초고속 및 초정밀 추적마운트가 필요하며, 추적 대상의 고도와 이동 속도에 맞게 신속하고 정확하게 지향하는 것은 레이저 추적 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다[2]. 특히, 자동 및 주간 관측 또는 태양빛에 반사되지 않아 관측 대상이 보이지 않는 경우에는 초정밀 추적마운트가 더욱이 중요하다[3].

최근에는 우주물체 레이저 추적은 물론 우주 감시, 국방, 위성 광통신 등 다양한 분야에서 추적마운트 수요가 증가하고 있다. 특히, 제한된 대역폭, 낮은 전파 통신 속도, 스펙트럼 라이선스 등 다양한 문제점이 있는 전파 통신을 대체할 수 있는 대안으로 레이저 통신이 대두되고 있다. 인공위성 또는 큐브셋(CubeSat)과의 레이저 통신을 위해서 가장 중요한 기술은 안정적으로 높은 지향 정밀도를 유지하는 것이다[4,5]. 또한 레이저를 활용한 국방 무기체계는 초고속 및 초정밀 추적마운트가 필수적으로 요구되어 사용목적에 따라 타국으로의 기술 수출이 금지하고 있을 만큼 중요성이 대두되고 있다[2].

거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 자동 관측을 통해 인공위성 또는 우주쓰레기 레이저 추적을 안정적으로 관측하기 위해서는 정확한 추적마운트 지향 보정 모델이 필요하다. 이러한 추적마운트 지향 보정이 요구되는 요인은 마운트의 타입, 광학 시스템의 정렬, 기구학적 문제, 인코더 문제, 제작 및 설치 과정에서 발생하는 직교 문제, 열에 의한 변형 등이다[6,7]. 이러한 요인들은 관측 시스템의 효율성, 레이저 거리 측정에 대한 시스템 정확도, 통신 시스템의 데이터 전송 속도 감소 등에 영향을 준다[8,9]. 또한 지향 정밀도 오차를 증가시켜 추적 대상으로부터 되돌아오는 광자 수를 감소시키므로 전체적인 시스템 성능을 저하시킨다.

추적마운트 지향 보정 모델은 망원경을 정밀하게 표적을 지향하기 위해 추적마운트 방향(orientation) 및 기계적인 영향을 기술하는 보정 계수(coefficients) 또는 보정 파라미터들로 구성된 수학적 표현식으로, 이러한 파라미터들은 정밀한 위치가 알려진 별 관측을 바탕으로 최적한 문제를 통해 추정한다. 최적화 문제에 대해 일반적으로 사용되는 접근 방식은 최소자승법(least square method)을 이용하는 방법이다. 이러한 목표를 위해 본 논문에서는 별 관측을 통해 얻은 전하 결합 소자(charge coupled device, CCD) 카메라의 이미지를 이용한다. 별 관측은 이미지로부터 추적마운트의 지향 잔차(residual)를 계산하고, 최소자승법을 이용하여 추적마운트 지향 보정 파라미터를 추정함으로써, 거창 우주물체 레이저 추적 시스템이 1 arcsec RMS(root mean square) 수준의 지향 정밀도 요구사항을 만족하는지 분석하였다.

II. 본 론

2.1 추적마운트의 지향 보정 모델

거창 광학 망원경의 추적마운트는 Fig. 1과 같이 경위대식 마운트(Altazimuth mount) 형식으로 개발되었다. 일반적으로 광학 망원경은 두 가지 기능을 수행하는 데 추적마운트를 통해 대상을 추적하고, 미약한 빛을 모아 수신 검출기 또는 다른 기기로 전달하는 역할을 수행한다. 현재까지 다양한 형식의 추적



Fig. 1. The mount for laser tracking system at Geochang observatory

마운트가 존재하지만, 거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 경위대식 마운트 방식은 기계 설계가 단순하다는 장점이 있어 천체망원경, 카메라, 레이더 등 많은 분야에서 사용되고 있는 형식이다. 또한, 인공위성과 같이 큰 각속도로 운동하는 우주물체를 빠르고 정밀하게 추적할 수 있는 메커니즘을 제공한다. 기본적인 운동학적 표현은 방위각(azimuth)과 고도각(elevation) 축으로 구성된다. 이는 로봇 분야와 비슷한 운동학적 표현으로 사용되지만, 자유도(degrees-of-freedom) 수는 서로 다르다는 차이가 있다[10]. 일반적으로 추적 마운트에 발생할 수 있는 관측 지향 오차 요인은 다음과 같다[11].

- 인코더 영점변위(Encoder zeropoint displacement)
- 인코더 스케일(Encoder scales)
- 베어링 오차(Bearing Error)
- 장축 기울기(Tilt of the major)
- 보조축의 비 직교성(Non-orthogonality of the secondary axis)
- 마운트 튜브의 휨(Bending in the mount tube)
- 마운트의 휨 또는 비틀림(Bending or torsion of the mount)
- 환경과 온도에 변화에 따른 에러(Error caused by changes in the environment and temperature)
- 북쪽 지향 오차(Setting error of north direction)
- 수신 검출기 픽셀 위치 오차(Inaccurate pixel positioning of CCD)

이러한 다양한 요인으로 인해 계산된 표적의 지향 위치와 관측된 표적의 지향 위치 사이의 잔차가 발생한다. 예를 들면 추적마운트의 수평축과 수직축은 두 축이 모두 완벽한 수직, 수평이어야 하지만 제작, 조립 및 설치 과정에서 두 축 사이의 직교 차이가 존재하여 지향 오차를 유발한다. 또한, 축 방향 변화로 인한 흔들림과 진동에 의해 순간적인 회전 변화로 인하여 지향 오차가 발생하기도 한다[12]. 이러한 지향 오차를 보정하기 위해 사전에 정밀하게 계산된 별의 지향 위치와 관측된 별 이미지를 이용하여 광학 망원경 지향 중심과의 오차를 계산한 후 잔차가 최소가 되도록 추적마운트 보정 파라미터를 추정한다. 이때 사용한 추적마운트 보정 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다[6,13].

$$A(o-c)_i = \Delta A_i = \sum_{j=1}^m x_j F_j(A_i, E_i), \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

$$E(o-c)_i = \Delta E_i = \sum_{j=1}^m x_j G_j(A_i, E_i), \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

여기서 식 (1)의 ΔA_i 는 i 번째 관측한 별에 대해서 관측된 방위각(o , observed)과 계산된 방위각(c , calculated)의 잔차(Δ)를 나타내며, 식 (2)의 ΔE_i 는 고도

각의 잔차를 의미한다. x_j 는 방위각과 고도각 추적마운트 보정 모델에 사용되는 파라미터를 의미하고 m 은 파라미터 개수이다. 식 (1)과 식 (2)에서 $F_j(A_i, E_i)$ 및 $G_j(A_i, E_i)$ 는 추적마운트 보정 함수로도 불리며, 관측된 별의 수 i 의 방위각 A 와 고도각 E 에 따른 정렬 불량을 나타내는 방위각 및 고도각 잔차 함수이다.

현재 추적마운트 지향 보정을 위한 가장 효율적인 방법은 정밀하게 위치가 알려진 다수의 별을 관측하여 일련의 별의 관측값 A_o , E_o 을 취득하고, 시간에 따른 별의 위치가 계산된 계산값 A_c , E_c 를 이용하여 추적마운트의 지향 잔차 $\Delta A_i = A_o - A_c$, $\Delta E_i = E_o - E_c$ 를 바탕으로 최적화 문제를 통해 파라미터를 추정하는 것이다.

2.2 추적마운트 파라미터 추정

거창 추적마운트 지향 보정 모델에 사용하는 파라미터는 Table 1에 자세히 나타내고 있다. 앞서 언급한 오차 요인으로 인해 추적마운트 지향 오차가 발생하고, 거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 추적마운트는 이를 보정하기 위해 최대 35개 파라미터를 이용하여 보정한다. 추적마운트 파라미터 추정을 위해 사용되는 최소 자승법은 일반적으로 선형 모델 파라미터로 구성된 수학적식을 사용한다. 최소 자승법은 추적마운트 보정 모델에 의해 계산된 지향 위치와 관측된 지향 위치간의 차이를 제공한 것의 합으로 그 오차를 최소화하여 보정 파라미터를 추정한다. Table 1을 이용한 추적마운트 보정함수의 모델을 다음과 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta A \\ \Delta E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_A \\ A_E \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \eta \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $A_A = [F_1 F_2 \dots F_k]^T$, $A_E = [G_1 G_2 \dots G_l]^T$ 그리고 ε 및 η 는 각각 방위각 및 고도각에 대한 관측오차이다. 최소 자승법을 적용하기 위해서 식 (3)은 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\Delta = Ax + \nu \quad (4)$$

식 (4)를 이용한 모든 관측 지향 오차에 대한 제곱의 합은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q &= (\Delta - Ax)^T (\Delta - Ax) \\ &= (\Delta_A - A_A x)^T (\Delta_A - A_A x) \\ &\quad + (\Delta_E - A_E x)^T (\Delta_E - A_E x) \end{aligned} \quad (5)$$

or

$$\begin{aligned} Q &= (\Delta_A^T \Delta_A + \Delta_E^T \Delta_E) - 2x^T (A_A^T \Delta_A + A_A^T \Delta_E) \\ &\quad + x^T (A_A^T A_A + A_E^T A_E) x \end{aligned} \quad (6)$$

Table 1. Parameters of mount model at Geochang observatory

Index	Description	Azimuth Function(F)	Elevation Function(G)
1	Azimuth encoder offset	1	-
2	Elevation encoder offset	-	1
3	Azimuth axis tilt about North	$-conA \tan E$	$\sin A$
4	Azimuth axis tilt about East	$-\sin A \tan E$	$-\cos A$
5	Collimation (optical axis misalign)	$\sec E$	-
6	Non-orthogonality of Az & El axes	$-\tan E$	-
7	Azimuth bearing ellipticity (sin)	$\sin A$	-
8	Azimuth bearing ellipticity (cos)	$con A$	-
9	Elevation bearing ellipticity (sin)	-	$\sin E$
10	Elevation bearing ellipticity (cos)	-	$\cos E$
11	Telescope tube flexure	-	$\cot E$
12	Azimuth encoder scale error	$A/2\pi$	-
13	Elevation encoder scale error	-	$E/2\pi$
14	Bi-periodic in azimuth (empirical)	$\sin 2A$	-
15	Bi-periodic in azimuth (empirical)	$\cos 2A$	-
16	Elevation encoder stiction (sin)	-	$\sin A$
17	Elevation encoder stiction (cos)	-	$\cos A$
18	Elevation bearing stiction (sin)	-	$E \sin A$
19	Elevation bearing stiction (cos)	-	$E \cos A$
20	Scaled bi-periodic in azimuth (sin)	$\sin 2A \sec E$	-
21	Scaled bi-periodic in azimuth (cos)	$\cos 2A \sec E$	-
22	Bi-periodic in elevation (sin)	-	$\sin 2A$
23	Bi-periodic in elevation (cos)	-	$con 2A$
24	Scaled bi-periodic in azimuth (sin)	$\sin 3A \sec E$	-
25	Scaled bi-periodic in azimuth (cos)	$\cos 3A \sec E$	-
26	Bi-periodic in elevation (sin)	-	$\sin 3A$
27	Bi-periodic in elevation (cos)	-	$con 3A$
28	Scaled bi-periodic in azimuth (sin)	$\sin 4A \sec E$	-
29	Scaled bi-periodic in azimuth (cos)	$\cos 4A \sec E$	-
30	Bi-periodic in elevation (sin)	-	$\sin 4A$
31	Bi-periodic in elevation (cos)	-	$con 4A$
32	Scaled bi-periodic in azimuth (sin)	$\sin 5A \sec E$	-
33	Scaled bi-periodic in azimuth (cos)	$\cos 5A \sec E$	-
34	Bi-periodic in elevation (sin)	-	$\sin 5A$
35	Bi-periodic in elevation (cos)	-	$con 5A$

x 에 대해 Q 를 미분한 결과가 0이 되도록 최소화하면 다음과 같다.

$$Q|_{x=\hat{x}} = \min \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -2(A_A^T \Delta_A + A_E^T \Delta_E) + 2(A_A^T A_A + A_E^T A_E)x = 0$$

따라서 관측오차를 최소화하는 추정된 \hat{x} 값은 다음과 같이 계산할 수 있다[12].

$$\hat{x} = (A_A^T A_A + A_E^T A_E)^{-1} (A_A^T \Delta_A + A_E^T \Delta_E) \quad (8)$$

2.3 관측 및 분석결과

거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 추적마운트 지향 정밀도 분석을 위해 주경 100cm 크기의 광학 망원경 및 CCD를 이용하여 별 관측을 수행하였다.

추적마운트 지향 정밀도 분석을 위한 절차는 다음과 같다. 별 카탈로그(Fifth fundamental catalogue 5,

FK5)를 이용하여 선택된 별의 위치를 계산하여 추적하고 Fig. 2와 같이 CCD 카메라 영상으로부터 얻은 별 이미지를 활용하여 추적마운트가 지향하고 있는 CCD 카메라 중심점과 관측된 별의 중심점의 잔차를 계산하여 관측별의 지향 잔차를 산출한다[14]. 이러한 과정을 다수별에 대해서 반복적으로 수행하여 얻은 추적마운트의 지향 잔차로부터 보정 파라미터를 추정하고, 후적합 잔차(postfit residual)를 통해서 추적마운트의 지향 정밀도를 산출한다. 즉, 관측값과 추정된 보정 파라미터를 이용한 계산값과의 차이 $\Delta \hat{A}_i$, $\Delta \hat{E}_i$ 를 계산하고, 후적합 잔차 $\sqrt{\Delta \hat{A}_i^2 + \Delta \hat{E}_i^2}$ 를 이용한 RMS을 계산한다. 여기서 사용된 CCD 카메라는 미국 Raptor photonics사에서 개발된 KI2470-CL 모델을 이용하였다.

본 논문에서 추적마운트 지향 정밀도 산출을 위해서 관측한 81개 별의 분포(Distribution)를 Fig. 3에 보여주고 있다. 별의 광도(Star Magnitude)가 4등급 이하 중 방위각 0~360도, 고도각 20~90도 사이의 별 99개 별에 대해서 관측을 수행하였으며, 후적합 잔차가 2 arcsec를 초과하는 18개 별을 제외하였는데, 이는 별 관측 중 관측자의 오류를 포함한 다양한 요인에 기인하기 때문에 81개만을 적용하였다.



Fig. 2. The star tracking using CCD camera

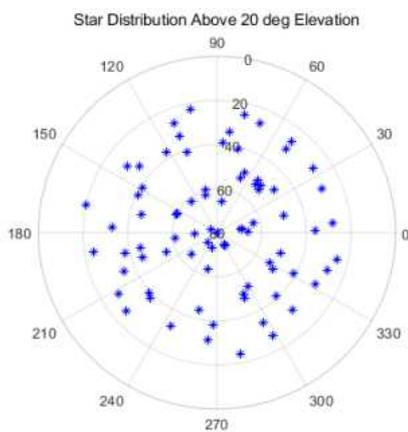


Fig. 3. The sky distribution of 81 stars above 20 degree elevation(postfit residual<=2 arcsec)

관측 분포는 FK5 카탈로그에서 여러 개의 작은 영역을 가상으로 구분하고, 구분된 작은 영역 중심에서 가장 가까운 별을 선택하는 알고리즘을 적용하여 최대 관측되는 별의 분포가 균등 되도록 하였다. 관측된 별의 분포를 균등하게 관측할수록 추적마운트 지향 보정 모델 안정성이 향상되는 효과가 있기에 관측한 별의 분포는 매우 중요하다[13]. 이렇게 관측한 결과로 81개 별에 대해서 추적마운트 지향 위치와 관측된 별의 위치 사이의 관측 잔차 ΔA_{81} , ΔE_{81} 를 얻을 수 있다. 이러한 관측 잔차를 이용하여 추적마운트 지향 보정 모델 및 최소 자승법을 통해 결정된 파라미터는 Table 2에 나타내고 있다. 거창 우주

Table 2. Result of pointing correction parameters determined for modeling

Index	Value (arcsec)	Standard Deviation (arcsec)
1	-1792.22	2.48
2	-1191.87	134.00
3	-5.01	0.41
4	176.43	0.62
5	-236.77	3.50
6	-103.40	2.65
7	9.59	0.48
8	6.02	0.47
9	-70.80	54.84
10	156.94	100.59
11	0.93	6.23
12	0.33	0.35
13	482.01	756.54
14	-5.09	0.77
15	-3.28	0.71
16	3.50	0.74
17	21.70	0.96
18	-5.16	0.75
19	-14.19	0.78
20	1.26	0.50
21	1.51	0.47
22	0.78	0.20
23	0.12	0.21
24	-0.07	0.17
25	1.06	0.17
26	-0.36	0.21
27	0.04	0.21
28	0.53	0.17
29	-0.58	0.17
30	-0.17	0.21
31	0.22	0.21
32	0.10	0.19
33	-0.30	0.18
34	-0.27	0.23
35	-0.10	0.21

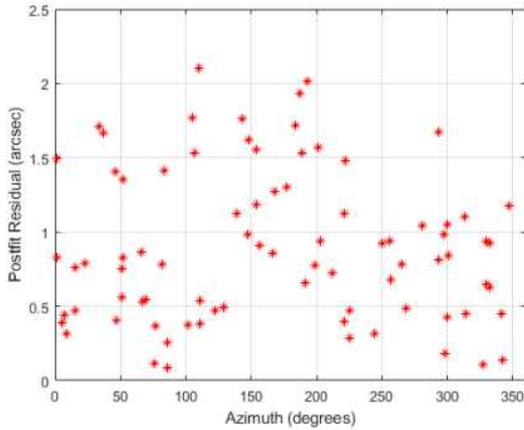


Fig. 4. Postfit residual in terms of azimuth

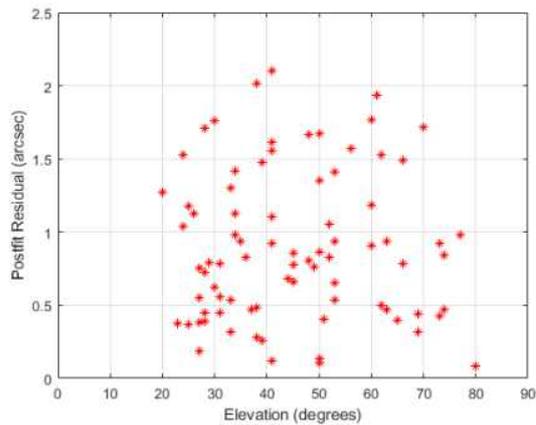


Fig. 5. Postfit residual in terms of elevation

물체 레이저 추적 시스템의 마운트의 지향 오차 원인 중 엔코더(1,2,13), 베어링(10), 축 정렬(4,5,6) 관련한 파라미터가 지향 오차에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 엔코더와 베어링은 모터를 고정하고 회전속도를 감지하여 현재 위치를 인지하는 장비로써 기계적, 물리적 한계로 인해 모든 우주물체 레이저 추적 시스템에서 파라미터 추정을 통한 보정을 하고 있다. 이렇게 결정된 파라미터를 이용하여 관측한 각 별의 $\Delta \hat{A}_{81}$, $\Delta \hat{E}_{81}$ 을 도출한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내고 있다. Fig. 4는 방위각 기준의 후적합 잔차를 나타내고 있고, Fig. 5는 고도각 기준의 후적합 잔차를 나타내고 있다. 이러한 잔차 값이 작을수록 추적마운트의 지향 오차는 작다고 할 수 있다. 81개 관측 데이터를 이용한 후적합 잔차 평균 지향정밀도는 방위각 0.72 arcsec, 고도각 0.73 arcsec로 방위각 및 고도각이 모두 정밀하게 지향되고 있음을 확인할 수 있었다.

지향 정밀도는 이전에 언급한 지향 오차 원인 이외에도 외부 환경 및 시간에 따라 추적마운트 자세 변화가 발생하기에 지향 보정 모델의 파라미터 값은 유효한 시간을 갖는다. 따라서 정밀한 지향을 위해서

추적마운트 보정 작업은 주기적으로 수행해야 지향 정밀도의 신뢰성 및 안정성을 유지할 수 있다. 일반적으로 관측 시점에서의 주변 온도, 기압, 습도, 구름 여부 등 날씨의 변화에 따른 환경적 요인과 관측자의 숙련도, 적용된 지향 보정 모델, 관측한 별의 개수 등 비 환경적인 요인에 의해서도 추적마운트 지향 정밀도는 변화한다.

그중 적용하는 보정 파라미터 개수에 따라 지향 정밀도의 변화를 분석하였는데 이는 Fig. 6에 그 결과를 보여주고 있다. 선택된 총 99개의 별 관측 데이터에 대해서 35개 보정 파라미터를 적용하여 산출된 후적합 잔차가 각각 1 arcsec(42개), 2 arcsec(81개), 3 arcsec(94개) 초과된 관측 데이터를 배제하였는데, 이는 관측자의 오류 등에 기인하는 관측값을 제거함으로써 객관적인 관측값을 바탕으로 보정 파라미터 개수에 따른 추적마운트 정밀도를 분석하기 위함이다. 여기서 괄호 안의 숫자는 99개 관측 데이터 중 지향 보정 모델에 사용된 관측 데이터 개수를 의미한다.

추적마운트 지향 보정 모델을 통해 적용되는 파라미터가 많을수록 지향 정밀도는 공통적으로 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 온도 및 바람과 같은 환경요소에 의한 지향 오차는 모델링할 수 없기에 지향 보정 모델에 적용하는 파라미터 개수는 지향 정밀도를 향상시키는 데 한계가 존재한다[15,16]. Fig. 6에서 보면 파라미터를 15개를 적용한 지향 정밀도보다 25개를 적용한 지향 정밀도가 큰 차이로 향상되지만, 그 이후로는 지향 정밀도에 큰 영향을 주지 않으므로 지향 보정 모델에 사용되는 파라미터를 30개 이상 적용하면 충분한 추적마운트 지향 정밀도를 제공한다고 할 수 있다. 따라서, 보정 파라미터 개수 증가를 통한 지향 정밀도 향상은 한계가 있기에 지향 정밀도를 안정적으로 향상시키기 위한 방법으로 후적합 잔차를 분석하면서 그 결과에 따라 추적마운트 지향 정밀도 계산에 관측 데이터 적용 여부를 조정하는 것이 효과적인 방법 중 하나이다[13].

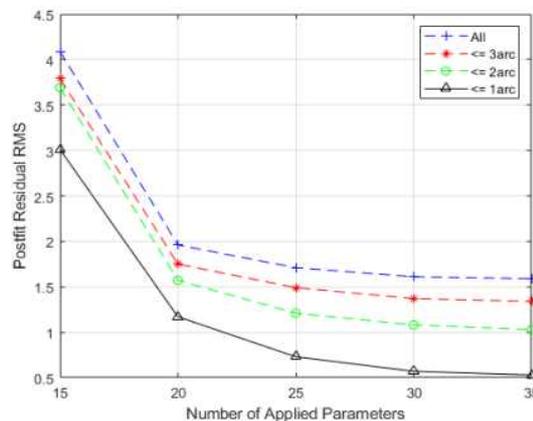


Fig. 6. RMS of postfit residuals in terms of the number of applied mount parameters

CCD를 통해 관측된 별빛은 열은 구름과 대기에 의한 산란으로 인해 관측자 판단으로 발생하는 별의 중점점 오차로 해당별의 후적합 잔차가 크게 발생하기 때문에 일반적으로 후적합 잔차가 큰 관측 데이터는 추적마운트 지향 정밀도 계산에서 제외시킨다. 또한 추적마운트 모델링을 통한 파라미터 추정 시 사용되는 최소 자승법의 위험 요소 중 하나는 RMS을 줄이려는 과정에서 over-fitting이 발생하여 다수의 관측 데이터를 제외시켜 별 분포의 균등성을 저해한다. 이는 최소 자승법에 포함되지 않은 별의 영역에서 추적마운트의 지향 정밀도가 크게 떨어질 수 있으므로, 지향 정밀도의 신뢰성에 부정적인 영향을 줄 수 있다. Fig. 6을 보면 관측 데이터의 지향 정밀도가 1 arcsec 이하의 관측 데이터를 기준으로 35개 파라미터를 적용한 평균 지향 정밀도는 0.53 arcsec로 매우 정밀하다. 하지만 관측 데이터를 추적마운트 지향 정밀도 계산에서 제외하는 과정에서 under-fitting 때문에 관측 오차를 가지는 관측 데이터를 효과적으로 제외시킬 수 없어, 오히려 지향 정밀도를 떨어뜨릴 수 있다. 이러한 관측 오차는 대기 요동에 의한 별 이미지의 왜곡 또는 블러링(blurring), 카메라 노출에 따른 퍼짐(spreading) 등의 영향에 기인한다.

후적합 잔차가 2 arcsec 이하의 관측 데이터 분포(Fig. 3)와 비교해 볼 때 후적합 잔차를 1 arcsec로 기준으로 하는 Fig. 7은 over-fitting 영향을 잘 보여주고 있다. 이러한 over-fitting 영향으로 인해서 방위각 120도~210도, 고도 20~60 사이에는 존재하는 관측된 데이터가 적기 때문에 모델링의 신뢰성 및 안정성이 보장될 수 없으며, 이러한 특정 구간에서의 지향 정밀도는 평균 지향 정밀도 대비 현저히 더 큰 오차를 유발할 수 있기에 주의해야 한다. 따라서 거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 추적마운트 보정을 위해서 관측 데이터 중 후적합 잔차가 2 arcsec 미만, 35개의 보정 파라미터를 적용하는 전략이 지향 정밀도

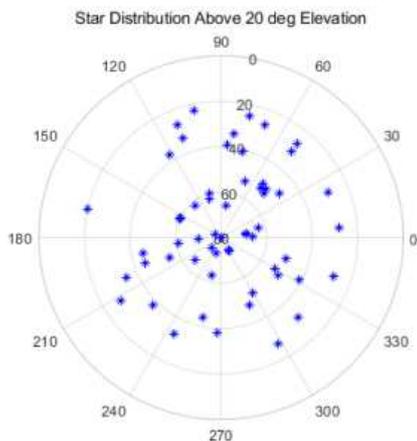


Fig. 7. The sky distribution of 42 stars above 20 degree elevation(postfit residual \leq 1 arcsec)

Table 3. Pointing accuracies in three sets of observation

Stars	Azimuth(")	Elevation(")	Residual(")
40	0.43	0.83	0.93
50	0.58	0.69	0.90
81	0.72	0.73	1.03
Average RMS	0.58	0.75	0.95

의 신뢰성 및 안정성을 확보할 수 있다. 이러한 전략을 적용하여 환경적 및 비환경적 요인을 고려하여 월 1회씩 총 3번의 관측을 통한 거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 평균 지향 정밀도를 분석하였다. Table 3은 40개, 50개, 81개의 관측한 데이터에 대한 추적마운트 지향 정밀도를 보여주고 있는데, 방위각($\Delta \hat{A}_i$) 및 고도각($\Delta \hat{E}_i$)에 대한 평균 지향 정밀도는 각각 0.58 arcsec, 0.75 arcsec이며, 평균 지향 정밀도 $\sqrt{\Delta \hat{A}_i^2 + \Delta \hat{E}_i^2}$ 는 0.95 arcsec로 안정적인 추적마운트 지향 정밀도를 유지하고 있으며, 거창 우주물체 레이저 추적시스템의 추적마운트 요구조건을 만족한다.

III. 결 론

본 논문에서는 거창 우주물체 레이저 추적 시스템을 위해 개발된 추적마운트가 제작, 조립 및 설치 과정에서 다양하게 발생할 수 있는 정적 지향 오차 요인을 기술하고, 이를 보정하기 위한 지향 보정 모델과 함께 보정 전략을 수립하였다. 이를 바탕으로 거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 추적마운트의 지향 정밀도를 도출하였다.

추적마운트 지향 정밀도의 신뢰성 및 안정성을 확보하기 위해 보정 파라미터 및 후적합 잔차 측면에서 보정 전략을 분석하였다. 선형 보정 모델을 구성하는 35개 보정 파라미터를 적용하고, 운영자 판단으로 인한 관측 오차를 제거하기 위해 후적합 잔차가 2 arcsec 이하인 관측 데이터와 최소 자승법을 적용하여 보정 파라미터를 추정하였다. 추적마운트 지향 정밀도는 환경적 및 비환경적 요인에 의해 변화하기 때문에 객관적인 분석을 위해서 이러한 보정 전략을 바탕으로 총 3회 별 관측한 데이터를 통해 거창 우주물체 레이저 추적 시스템의 지향 정밀도를 분석하였다. 평균 지향 정밀도는 0.95 arcsec로 제시된 요구조건을 만족하여 초정밀 추적을 수행할 수 있다. 이러한 보정 전략을 적용함으로써 지향 정밀도의 신뢰성 및 안정성을 제공하여 자동 및 주간 관측 시에 추적 카메라에 보이지 않는 표적의 경우에도 추적을 가능하게 한다.

본 논문에서 제시한 추적마운트 모델 및 추적마운트 보정 전략은 정밀한 지향 정밀도를 요구하는 고출력 레이저 위성추적체계 등 우주감시 및 국방 관련 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 한국천문연구원 주요사업 “우주물체감시 관측인프라 통합운영(2021185403)” 과제로 수행된 연구 결과이며, 본 연구에 대한 검토 의견을 주신 최철성 박사님께 감사드립니다.

Reference

- 1) Sung, K. P., Choi, E. J., Lim, H. C., Jung, C. G., Kim, I. Y. and Choi, J. S., “Development of Operation Software for High Repetition rate Satellite Laser Ranging,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 12, December 2016, pp. 1103~1111.
- 2) Choi, M. S., Lim, H. C. and Lee, S. J., “Development and Preliminary Performance Analysis of a fast and high precision Tracking Mount for 1m Satellite Laser Ranging,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 11, November 2016, pp. 1006~1015.
- 3) Medvedsky, M. and Pap, V., “The new pointing model of telescope based on tracking data,” *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*, Poznan Poland, October 2008.
- 4) Lim, H. C., Park, J. U., Choi, M. S., Choi, C. S. and Choi, J. D., “Performance Analysis of DPSK Optical Communication for LEO-to-Ground Relay Link Via a GEO Satellite,” *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 44, No. 1, January 2020, pp. 11~18.
- 5) Lim, H. C., Yu, S. S., Sung, K. P., Park, J. U., Choi, C. S. and Choi, M. S., “Performance Analysis of M-ary Optical Communication over Log-Normal Fading Channels for CubeSat Platforms,” *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 37, No. 4, November 2020, pp. 219~228.
- 6) Zhang, X. X. and WU, L. D., “The Basic Parameters of Static Pointing Model of Telescope,” *Chinese Astronomy And Astrophysics*, Vol. 25, No. 4, 2001, pp. 499~505.
- 7) Wang, Y., Lou, Z, Zuo, Y. X., Kang, H. R. and Zhang M. Z., “Study on the pointing model of a slant-axis terahertz antenna,” *Research in Astronomy and Astrophysics*, Vol. 20, No. 4, April 2020.
- 8) Keitzer, S., Kimbrell, J. and Greenwald, D., “Deterministic errors in pointing and tracking system I: identification and correction of static errors,” *Proceedings of the SPIE 1482 Acquisition Tracking and Pointing V*, August 1991, pp. 406~411.
- 9) Prabu, K., Cheepalli, S. and Kimar, D. S., “Analysis of PolSK based FSO system using wave-length and time diversity over strong atmospheric turbulence with pointing errors,” *Optics Communications*, Vol. 324, August 2014, pp. 318~323.
- 10) Hus, Y. Y. and Wang, S. S., “A new compensation method for geometry errors of five-azis machine tools,” *Optics International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, February 2007, pp. 352~360.
- 11) Yang, L., Cunbo, F., Han X., Chengzhi L., Zhipeng, L., Mingguo, S., Xue, D., Qingli, S. and Haitao, Z., “Research on Pointing Model of Telescope Based on SLR Tracking Data,” *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Beijing China, Vol. 8201, November 2011.
- 12) Huang, L., Ma, W. and Huang, J., “Modeling and calibration of pointing error with alt-az telescope,” *New Astronomy*, Vol. 47, February 2016, pp. 105~110.
- 13) Luck, M. J., “Mount Model Stability,” *Proceedings of 14th International Workshop on Laser Ranging*, San Fernando, Spain, June 2004.
- 14) Rickelfs, R. L., “Orienting a Transportable Alt-Azimuth Telescope,” *Proceedings of the 4th International Workshop on Laser Ranging*, Austin TX USA, October, 1981.
- 15) Schipani, P., Arcidiacono, C., Argomedo, J. and Dall’Ora, M., “Pointing and tracking results of the VST telescope,” *proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 8444, September 2012.
- 16) Zheng, X. M., Wang, Wu., Zhang Y. C. and Feng, H. S., “Research on the Pointing Model of the 1.2-m Altazimuth Telescope(1. Modeling of the global pointing),” *Chinese Astronomy and Astrophysics*, Vol. 28, No. 1, 2004, pp. 105~111.