

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.4.370

이동형 SLR의 실시간 추적 및 산출물 생성 알고리즘 연구

서윤경*, 류동영**, 임형철*, Georg Kirchner***, 박종욱****, 윤 청*****

A study on tracking method and normal point formation algorithm of new mobile SLR system in Korea

Yoon-Kyung Seo*, Dong-Young Rew**, Hyung-Chul Lim*, Georg Kirchner***, Jong-Uk Park**** and Cheong Youn*****

ABSTRACT

Korea Astronomy and Space Science Institute(KASI) has been developing one mobile SLR system since 2008 named as ARGO-M. Control logic in real-time laser ranging and data processing for normal point from the ranging data are key elements in the operation system of ARGO-M. KASI operation system team performed software logic analysis and related operations for SLR observation with help of Graz SLR station in Austria. This paper describes the algorithm required for SLR operation based on the method in Graz station. We figured out the essential logic for SLR operation and the remedy for the observation quality enhancement through this study.

초 록

한국천문연구원은 2008년부터 수행중인 우주측지용 레이저 추적시스템 개발 사업과 관련하여 이동형 시스템인 ARGO-M 1기를 개발 중에 있다. ARGO-M을 구성하는 서브시스템 중 하나인 운영시스템은 실시간 레이저 거리 측정 시 제어 로직과 관측된 데이터로부터 정규점 추출을 위한 데이터 처리 과정이 핵심 요소이다. 이에 한국천문연구원의 운영 시스템 팀은 오스트리아 Graz시에 위치한 SLR 관측소의 지원을 통해 소프트웨어 로직 분석과 관련된 SLR 운영 기술에 대해 공동 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 SLR의 운영에 필요한 알고리즘을 Graz 관측소에서 사용하는 방식을 기반으로 분석하고 정리하였다. 이러한 분석을 통해 SLR의 운용에 필수적인 로직과 관측 품질을 향상시킬 수 있는 방안을 파악하였다.

Key Words : Satellite Laser Ranging(인공위성 레이저 거리측정 시스템), Space geodesy(우주측지), Normal point(정규점), ILRS(국제 레이저 관측 기구)

Nomenclature

AT_High : Pre-defined high quote for a designated satellite type

AT_Low : Pre-defined low quote for a designated satellite type

ATPeriod : Fixed integration time for auto-track (sec)

ATQuote : Actual return quote for auto-track

ATQuote_Old : Last value of ATQuote

Az : Azimuth of target satellite in user oriented coordinate (deg)

† 2010년 9월 4일 접수 ~ 2011년 3월 10일 심사완료

* 정회원, 한국천문연구원

** 정회원, 한국항공우주연구원

*** Space Research Institute/Austrian Academy of Sciences

**** 정회원, 한국천문연구원

***** 정회원, 충남대학교 컴퓨터공학과
교신저자, E-mail : cyoun@cnu.ac.kr
대전광역시 유성구 공동

C ₀	: Speed of light (m/sec)	RS_Del	: Increment of range shift (sec)
CA	: Closest approach (deg)	RS_Del_Min	: Minimum value of RS_Del (sec)
CA_Limit	: Fraction of pass time around CA (%)	StratEP	: Start Epoch (sec)
El	: Elevation of target satellite in user oriented coordinate (deg)	t	: Current time (sec)
FR	: Fit residuals (m)	T_Elapsed	: Elapsed time (sec)
IdMax	: Maximum number of identified return signal	TB	: Biased time of satellite (sec)
IdReturnCounter	: Counter of return signal	TB_Avg	: Averaged value of time bias (sec)
Idsignal	: Number of identified return signal	TB_New	: Calculated value of time bias (sec)
MinRets	: Minimum number of return signal	TF	: Time of Flight (sec)
MinRetsBack	: Minimum number of return signal in backward search	Update0	: Initial value of update interval
PR	: Prediction residuals (m)	X	: Satellite position on X axis in cartesian coordinate (m)
Pre_RG	: Pre-start time of range gate (sec)	Y	: Satellite position on Y axis in cartesian coordinate (m)
Ra	: Range (m)	Z	: Satellite position on Z axis in cartesian coordinate (m)
RAz	: Azimuth rate (deg/sec)		
REl	: Elevation rate (deg/sec)		
RES	: Residual (m)		
RG	: Range gate (sec)		
RRa	: Range rate (m/sec)		
RS	: Range shift (sec)		
			Subscripts
		b	: biased
		o	: Observed
		p	: Predicted
		tb	: Time bias

1. 서 론

SLR(Satellite Laser Ranging)을 이용한 인공위성 관측은 고정밀 측정 기술에 해당되며, 관측 결과 데이터는 측지 및 지구 동역학 연구 분야에서 광범위하게 활용되고 있다[1]. 한국천문연구원에서 개발중인 kHz급 레이저 반복율을 가진 국내 첫 SLR 시스템인 ARGO-M은 광학계, 레이저부, 광전자부, 추적마운트부, 돔 및 이동형 컨테이너 그리고 운영시스템으로 구성된다[2][3]. 이 중 운영시스템은 레이저 관측에 필요한 각종 서브시스템을 제어하고 환경을 종합 판단한 후 이를 관측에 반영하며, 실제 관측을 통해 획득한 데이터를 통합 처리 및 전송하는 역할을 담당하고 있다[4][5]. ARGO-M 운영시스템은 2008년도에 요구사항 도출을 시작으로 요구사항 분석, 개념 및 예비 설계를 수행하였으며, 현재는 상세 설계를 진행하고 있다. 전체 소프트웨어 구성과 시스템적인 흐름을 파악할 수 있는 운영시나리오에 대한 설명은 [4]와 [5]에 정리하였다. ARGO-M 운영시스템 중 소프트웨어 중심으로 진행되는 개발은 현재까지 SLR 시스템과 관련한 국내 개발 경험이 전무한 관계로 해외 기술 협력선이 필요하였다. 이에 오스트리아

의 Graz시에 위치한 IWF(Institut für Weltraumforschung) 소속 SLR 관측소와 기술 협력 및 공동 연구를 진행하였다. 오스트리아 Graz 관측소는 ARGO-M의 가장 주요 사양인 kHz급 레이저 반복율을 가진 시스템을 자체 개발하여 수년간 운영하고 있으며, ARGO-M 개발에 우호적 지원 의사를 표명하여 개발 초기부터 기술적 조언과 요구사항 결정에 많은 도움을 주고 있다.

SLR 관측 운영을 위한 컴퓨터 시스템은 크게 실시간으로 위성까지의 거리 측정을 담당하는 실시간 시스템과 이러한 측정을 통해 저장한 관측 원시 자료를 분석 수행하는 비 실시간 시스템으로 나눌 수 있다. 실시간 시스템은 예정된 위성의 관측 일정에 따라 해당 시각에 SLR 관측을 수행하는 대부분의 기능이 포함된다. 또한 추적 정확성을 높이기 위해 운용자의 수동 제어가 함께 수행되기도 한다. 전 세계 40여개의 SLR 시스템 중 자동화로 운영되는 경우는 몇 군데 되지 않으며, 최근에 개발되는 시스템일수록 자동화를 지향하는 추세이다. 이러한 자동화가 가능하기 위해서는 관측 중 추적 정확성을 높이기 위한 소프트웨어 로직이 먼저 정확하게 구현되어야 한다. 비 실시간 시스템은 관측에

의해 획득된 원시 자료 분석을 통해 시간 및 거리 바이어스(bias) 보정, 이상치(outlier) 및 노이즈 제거 등의 후처리 과정을 수행한다. 그리고 다양한 통계 결과 분석과 SLR시스템의 최종 산출물인 정규점 생성 후 국제 레이저 관측 기구인 ILRS(International Laser Ranging Service)에 보고하는 기능 등을 수행한다.

이 논문에서는 ARGO-M 운영 소프트웨어 구성시 주요 실시간 추적에 필요한 로직의 정확성을 높여서 운용자의 개입없이 자동으로 관측이 진행될 수 있도록 도출한 알고리즘에 대해 설명하고자 한다. 그리고 관측 수행 후 산출해야 하는 관측 결과값의 생성 방법 및 특징에 대해서도 설명하고자 한다.

II. 본 론

2.1. SLR의 거리 측정 개념

레이저를 사용한 정밀 거리 측정은 cm급의 single shot 정확도와 mm급의 정규점 정밀도를 가지는 것으로 알려져 있다[6]-[8]. SLR을 이용한 거리 측정은 지상 관측소에서 관측하고자 하는 측지 위성을 향해 레이저를 발사하여 위성에서 반사된 되반사체(retro-reflector)에 반사되어 되돌아오는 레이저 빔을 광검출기(C-SPAD; Compensated-Single Photon Avalanche Diode [9])를 통해 감지함으로써 이 왕복 시간을 측정하는 것이다[5][10]. 즉, Fig. 1에서와 같이 송광과 수광이 이루어지는 순간적인 시각을 정밀하게 측정함으로써 레이저의 비행시간을 획득하고 지상의 관측소와 위성간의 거리를 결정하는 것이다.

SLR은 국제적인 우주측지관련 데이터 센터인 CDDIS(Crustal Dynamics Data Information

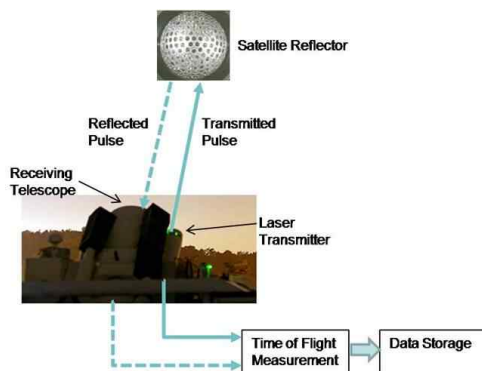


Fig. 1. Theory of SLR measurement

System) 또는 EDC(Eurolas Data Center)외에 ILRS에서 지정한 다수의 지역 데이터 센터를 통해 사전에 CPF(Consolidated Prediction Format) [11] 파일을 전자 메일 또는 File Transfer Protocol을 통해 다운로드 받아 관측하고자 하는 위성의 위치값을 미리 예측할 수가 있다[12]. CPF를 사용한 예측 결과는 매우 정확한 편에 속하여 SLR에서의 예측 정확도는 $\pm 20\text{nsec}$ 범위 내에는 90% 정도이며, $\pm 100\text{nsec}$ 범위 내에서는 99%의 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다[11]. 그러나 mm 수준의 정확도를 관측하고자 하는 위성에 대해 매우 정밀한 위치 판단을 위해서는 다음의 절에서 설명하는 여러 가지 실시간 로직과 데이터 처리 기술이 적용되어야 한다.

2.2 실시간 위성 위치 추정 계산

레이저를 이용한 위성 추적 시스템 구성을 위해서는 추적 대상 위성의 위치를 실시간으로 정확하게 추정하는 과정이 필요하다. 추적 루프 내에서 추정된 위성의 위치 정보는 크게 세 가지의 기능 구현을 위해 사용된다. 첫째, 추적 위성을 지향하여 레이저를 송신하고, 돌아오는 레이저 신호를 수신하기 위한 추적 마운트의 지향각을 생성하기 위해 사용된다. 둘째, 광전자부에 전달하여야 하는 거리 게이트(Range gate) 시간 계산 시 사용되며, 이 거리 게이트는 레이저 수신 센서인 광검출기의 작동 신호에 해당된다. 셋째, 입력된 종료 이벤트(stop event)신호가 위성으로부터 반사된 신호인지 배경 잡음에 의한 신호인지의 유효성 판별을 위한 관측 잔차(Residual) 계산시 사용된다.

실시간 위성 위치는 사전에 계산된 위성 위치 데이터를 기반으로 필요한 시각에 보간법을 사용하여 계산된다. 보간은 급격한 수치의 변화가 없는 X-Y-Z 좌표계에서 수행되고, 그 결과를 관측소 중심의 위도-경도-고도 좌표계의 값으로 변환하여 사용한다. 보간법은 8차 라그랑지(Lagrange) 보간법을 사용하여 계산한다. 이러한 보간법은 추적 마운트부에서 위성에 대한 추적 제어기 구성시에도 동일한 방법이 적용되어 위도, 경도 및 각각의 변화율이 계산된다. 이 중에서 위도, 경도의 변화율은 마운트 제어기에서 위치 추적의 지연을 방지하기 위하여 사용된다. 그리고 각각의 변화율은 보간법으로 계산한 위치 데이터에 유한 차분 방법을 적용하여 계산한다.

Fig. 2는 앞에서 설명한 위성의 위치 및 위치 변화율 계산을 위해서 사용되는 알고리즘을 도식화한 것이다.

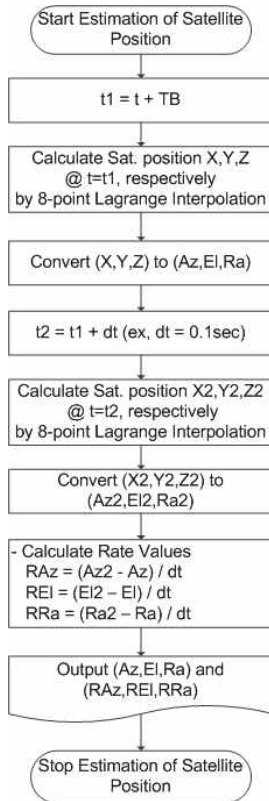


Fig. 2. Flowchart of estimation of satellite position in real-time

2.3 거리 게이트 자동 조정

거리 게이트는 레이저 수신을 위해 장착되는 센서인 광검출기가 정밀하게 감지할 수 있도록 열어주는 시각에 해당되며, 광검출기의 올바른 작동을 위해서 필수적이다. 거리 게이트는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$RG = startEP + TF \quad (1)$$

여기서, RG 는 거리 게이트, $startEP$ 는 레이저의 발사 시각 정보이며, TF 는 관측소로부터 위성까지 레이저가 도달하게 될 예상 시간을 의미한다. 거리 게이트의 위치는 리턴값의 평균을 구한 다음, 이 평균값이 거리 게이트 윈도우의 앞부분에 오도록 게이트를 여는 시각을 조정하는 방법을 사용한다. 이때 윈도우 개방 신호에 광검출기가 반응하는 시각을 고려하여 일정 시간의 여유를 반영하여야 한다.

Fig. 3은 앞에서 설명한 평균 관측 잔차를 사용하여 거리 게이트의 시작점을 자동으로 계산하기 위한 흐름도를 나타낸 것이다.

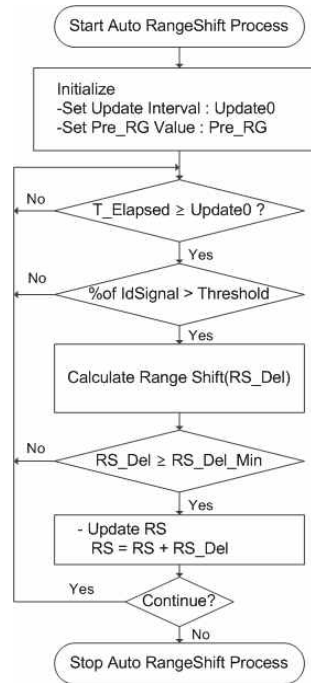


Fig. 3. Flowchart of auto range gate shift process

2.4 대상 위성 자동 탐색

대상 위성 자동 탐색 기능은 예정된 관측 시점상의 위성 이동 경로에서 추적할 대상 위성을 처음으로 포착하거나 추적 도중에 레이저의 리턴값이 발생하지 않는 경우에 위성을 자동으로 찾기 위해 필요로 한다. 위성 탐색의 범위는 위성에 대한 예측 지향각인 고도 및 방위각에서 일정 범위인 오프셋(offset) 이내로 한정하여 탐색을 진행한다. 이때 관측 운용자는 관측 장비의 특성을 고려하여 특정 범위 내에서만 탐색하도록 범위를 제한할 수 있다. Fig. 4의 왼편 그림은 전체 사분면을 Q0의 탐색 범위로 선택하여 찾는 방법을 설명하고 있다. Fig. 4의 오른편 그림은 관측 경험을 통해 특정 사분면에 오프

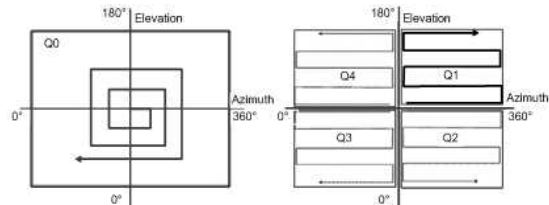


Fig. 4. Satellite search method with specified searching area

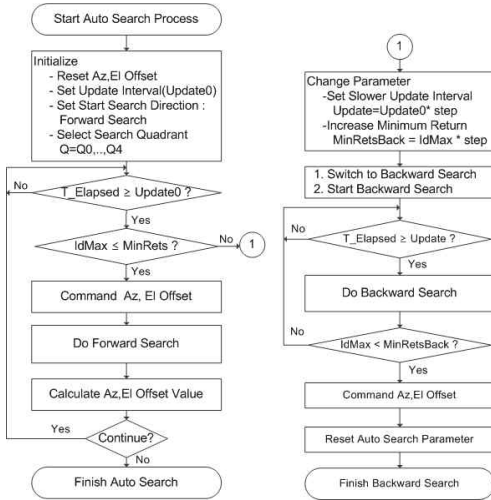


Fig. 5. Flowchart of auto search process

셋이 존재함을 알고 있는 경우에 그 특정 범위에서만 검색하는 경우를 나타낸 것이다. Q1~Q4와 같이 사분면으로 분할하여 위성의 탐색 범위를 제한함으로써 탐색 시간을 줄이는 이점이 있다. Fig. 5는 위성을 탐색하기 위한 알고리즘을 도식화한 것이다. Fig. 5에서 설명하는 위성의 탐색은 같은 경로를 따라 지향각 오프셋을 변경하면서 위성 추적 과정을 진행하고 이때 되돌아오는 유효 리턴율의 크기가 일정 값 이상이 될 때까지 계속한다. 결과적으로 추적마운트에 전달되는 위성의 위치는 관측하는 시점의 실시간 위성 위치 추정 값에 계산된 오프셋 값을 더하여 사용한다.

2.5 대상 위성 자동 추적

대상 위성 자동 추적 기능은 추적할 대상 위성을 탐색한 후 유효한 리턴값이 일정 기준 이상인 경우에 해당된다. 지속적으로 최대 리턴값이 될 수 있도록 하는 위성 자동 추적 방법을 사용하면 운용자의 수동 조작없이 지속적인 위성 추적이 가능하다. Fig. 6은 위성의 자동 추적을 위한 계산 절차를 도식화한 것이다. 이미 충분한 리턴율이 있어서 오프셋 값을 수정할 필요가 없는 경우 또는 리턴율이 너무 낮아서 리턴 신호에 대한 신뢰성이 없는 경우(Low Return Case Process)에는 오프셋 값을 조정할 필요가 없다. 그러나 리턴율이 특정 범위 안에 있는 경우(Medium Return Case Process)에는 오프셋을 변경해 가며 리턴율 변화를 감지한 다음 재차 오프셋을 변경하며 사용한다. 실제 오프셋의 변경 방향은 그래디언트 방법을 사용하여 계산

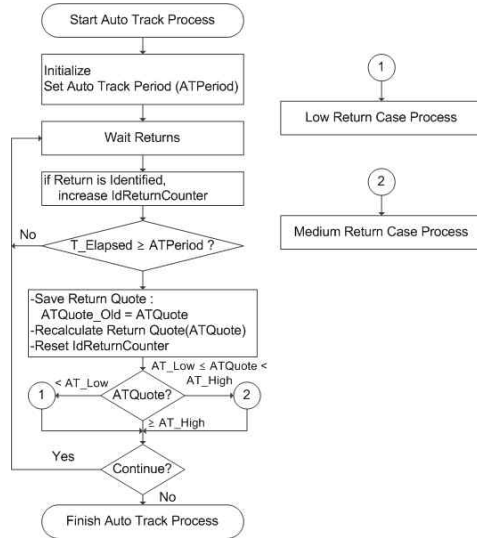


Fig. 6. Flowchart of auto track process

한다. 이는 결과적으로 계산된 오프셋 값에 실시간 위성 위치 추정 계산을 통하여 얻어진 위치값을 더하여 추적마운트의 구동값을 산출하고 이를 추적마운트에 전달한다.

2.6 실시간 위성 시각 편이 추정 계산

위성 시각 편이는 관측 전 CPF 자료 생성과 같은 위성의 위치를 예측할 때 사용하는 시각 기준과 관측 시 사용되는 시각 기준이 달라져서 레이저를 조사하는 방향에 오차가 발생하는 경우에 해당된다. 이러한 위성의 시각 편이는 근처의 다른 추적 관측소에서도 공통적으로 나타나게 되어 이 시각 편이 정보를 관측소간에 공유하여 위성 위치 계산 시 사전에 반영하는 방법을 사용하기도 한다. 그러나 경우에 따라서는 자체적으로 시각 편이 값을 추정하고 이를 반영하여 위성을 추적할 필요도 있다. Fig. 7은 위성

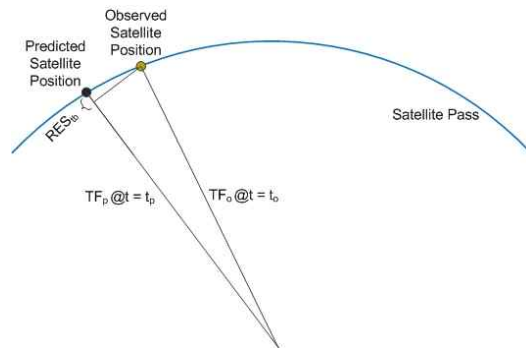


Fig. 7. Time bias and range rate

시각 편이와 거리 변화율과의 관계를 보여 준다. 시각 편이에 의한 관측 잔차는 관측된 레이저의 비행시간과 예측한 비행시간과의 차이로 정의되며 다음과 같이 거리변화율과 시각 편이로 표현될 수 있다.

$$RES_{tb} = TF_o - TF_p \quad (2)$$

$$= \frac{2}{C_0} \{Ra(t_p + t_b) - Ra(t_p)\}$$

시각 편이가 짧은 경우, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Ra(t_p + t_b) = Ra(t_p) + \dot{Ra}(t_p) TB \quad (3)$$

식 (3)에 의해 식 (2)는 다음과 같이 정리된다.

$$RES_{tb} = \frac{2}{C_0} \dot{Ra}(t_p) TB \quad (4)$$

따라서 거리 변화율이 0이 아닌 경우($\dot{R}(t_p) \neq 0$), 시각 편이는 다음과 같다.

$$TB = RES_{tb} \frac{C_0}{2} \frac{1}{\dot{Ra}(t_p)} \quad (5)$$

Fig. 8은 위성 시각 편이 값을 계산하기 위한 절차를 도식화한 것이다. 위성이 관측소 위치와

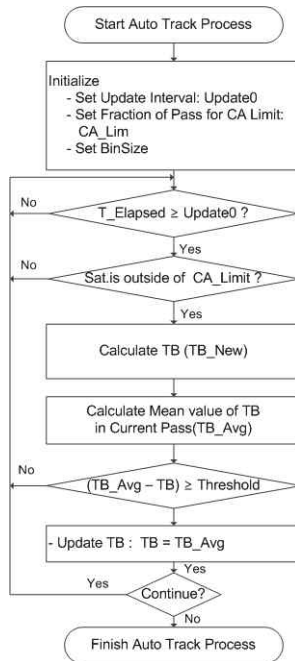


Fig. 8. Flowchart of time bias compensation in real-time

가장 근접한 위치에 있는 경우에는 거리의 변화율이 0에 가까운 값을 갖게 되므로 가장 근접한 위치에서는 시각 편이 값을 계산하지 않는다. 위성 시각 편이로 인한 오차의 특징은 가장 가까운 위치를 중심으로 오차의 부호가 '+'에서 '-'로 또는 '-'에서 '+'로 변경되어 관측되는 것이다. 그리고 관측 잔차는 매 계산 시 마다 나오는 값을 사용하지 않고 평균값을 사용한다. 결과적으로 위성의 시간 편이는 위성과의 거리 변화율 정보를 이용하여 계산한 것임을 설명한다.

2.7 정규점 생성

정규점은 ILRS에 가입되어 있는 SLR 관측소들의 공식적인 관측 산출물에 해당된다. 이후 GEODYN과 같은 고정밀 자료처리 소프트웨어의 국제 표준 관측 자료로 사용된다. 이러한 SLR 관측 자료는 국제 기준 좌표계 결정, 지구 중력장, 지구 자전 그리고 지각 운동 감시 연구 등에 활용된다[5]. SLR 관측 자료로부터 산출되는 정규점은 관측 진행 기간을 기 정의된 bin이라는 시간 단위로 나누어 각 bin별로 계산된 관측값들의 평균에 근사한 특정 측정값으로 규정한다. bin에 대한 크기 정의 역시 ILRS의 규정 [13]을 따른다.

정규점의 산출 방식은 Fig. 9와 같다. 정규점 산출은 먼저 SLR 관측시 저장된 관측 데이터를 바탕으로 이상치와 노이즈 제거 그리고 시각 편이 및 거리 편이 보정 등의 데이터를 거르는 과정으로 시작한다. 다음으로는 bin 단위로 데이터를 처리하는 후분석 과정을 진행하여야 한다.

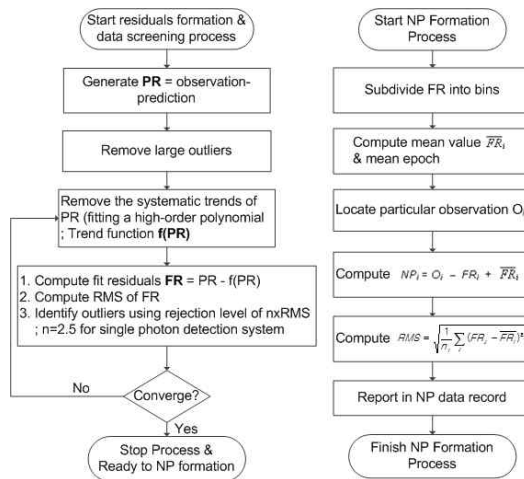


Fig. 9. Flowchart of data screening and normal point formation [13]

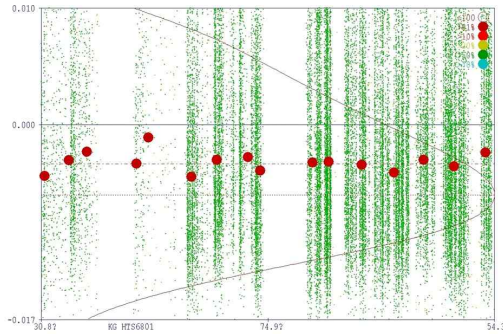


Fig. 10. Normal point display using Lageos-1 data in Graz SLR station

이 후분석 과정은 전 세계 SLR 사이트마다 각기 고유의 방식이 사용되고 있으며, 영국의 Herstmonceux SLR 관측소의 방식이 ILRS의 공식 홈페이지 [14]에 소개되어 있다. Fig. 9의 오른쪽 순서도에 각 bin별로 정규점 및 제곱평균제곱근(root-mean square)값을 산출하는 알고리즘을 나타내었다.

Fig. 10은 Graz SLR 관측소에서 관측한 Lageos-1 위성의 SLR 관측 결과를 사용하여 산출한 정규점들과 각각의 분석값들을 보여준다. 가로 축은 관측된 위성의 고도각 변화이며, 단위는 도이다. 세로 축은 분석에 포함된 관측값들의 관측 잔차를 나타낸 것이며, 단위는 미터이다. 세로 줄무늬를 형성하는 각각의 작은 점들이 관측시 리턴값들에 해당된다. 그리고 조밀하게 모여있는 리턴 값에 하나씩 찍혀있는 보다 큰 점들이 바로 정규점에 해당된다. Graz SLR 관측소의 경우, 정규점이 산출된 해당 bin의 관측값 수량에 따라 정규점을 나타내는 색상을 달리하여 가시적으로 리턴 신호의 수신 정도를 판단할 수 있는 방법을 제공한다. 운영자가 처리된 관측 결과의 정도를 판단하기 위하여 제곱평균제곱근 값을 사용할 수 있다. 이 제곱평균제곱근은 Fig. 9의 RMS에 해당되는 값이며, 해당 bin내 존재하는 관측값들의 평균으로부터 산출된 것이다. 또한 모든 분석 작업을 완료한 후 결과 데이터의 업로드를 위한 산출물 형식 구성 시 정규점과 함께 표기해야 하는 값이기도 하다.

III. 결론 및 향후 계획

이 연구에서는 자동화된 SLR의 운영에 필요한 알고리즘 부분을 Graz 관측소에서 사용하는

방식을 기반으로 분석하고 정리하였다. 자동화에 필수적인 실시간 위성 위치 계산, 항후 광전자 센서의 구동 신호로 사용될 거리게이트 계산 및 자동 조정 방법 등이 분석되었다. 또한 자동으로 추적 대상 위성을 탐색하고, 탐색에 성공하여 정상적으로 리턴 신호가 수신되는 위성을 지속적으로 추적하기 위한 방법이 분석되고 정리되었다. 위성 궤도 계산에서 사용된 시각과 실 관측 사이의 시각차에 의해 발생하는 시각편이를 보정하는 방법을 기술하였다.

이외에 관측한 데이터로부터 정규점을 계산하기 위하여 1차적으로 데이터를 처리하고, 후처리를 통하여 Bin 단위로 정규점을 산출하고 정규점의 정도를 통계적으로 나타내는 제곱평균제곱근을 계산하는 방법을 정리하였다. 데이터 처리로직의 확인을 위하여 실제 SLR 관측 자료를 사용한 정규점 계산 결과 화면을 도시하였다.

향후 ARGO-M 운영시스템의 개발 방향은 SLR 시스템마다 가지게 되는 고유의 시스템 오차를 최소화하거나 명확히 수치화 되도록 진행될 예정이다. 이를 위하여 이 연구의 분석을 통해 얻어진 기술을 ARGO-M 운영시스템에 최적화하도록 재구성하여 운영 소프트웨어 개발에 반영하는 절차가 필요할 것이다. 또한 이 연구에서 제안한 자동 탐색 등의 자동화 방법은 ARGO-M 전체 시스템 차원의 적용과 시험을 통하여 개선 및 검증 과정을 거쳐 탐색 시간을 줄이고 동일 관측 시간 내 성공률을 높이는 방향으로 진행되어야 할 것이다.

후 기

이 연구는 한국천문연구원 우주측지용 레이저 추적시스템 개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 자료 제공과 관련하여 Graz SLR 관측소의 Dr. Georg Kirchner께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Seeber, G., Satellite Geodesy, 2nd Ed., Walter de Gruyter, Berlin, 2003, pp. 424.
- 2) Park, J., Lim, H., Seo, Y., Park, J., Kim, Y., Son, Y., and Kim, Y., "Status and Progress of ARGO", Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging, Vol. 2, 2008, pp. 492~495.
- 3) Lim, H. C., Seo, Y. K., Na, J. K., Bang,

S. C., Lee, J. Y., Cho, J. H., Park, J. H., and Park, J. U., "Tracking Capability Analysis of ARGO-M Satellite Laser Ranging System for STSAT-2 and KOMPSAT-5", J. Astron. Space Sci., Vol. 27, No. 3, 2010, pp. 245~252.

4) Seo, Y. K., Rew, D. Y., Lim, H. C., Park, I. K., Yim, H. S., Jo, J. H., and Park, J. U., "A Study on the Deriving Requirements of ARGO Operation System", J. Astron. Space Sci., Vol. 26, No. 4, 2009, pp. 643~650.

5) Seo, Y. K., Lim, H. C., Rew, D. Y., Jo, J. C., Park, J. U., Park, E. S., and Park, J. H., "Study on the preliminary design of ARGO-M Operation System", J. Astron. Space Sci., Vol. 27, No. 4, 2010, pp.3 93~400.

6) Degnan, J., "SLR2000: An autonomous and eyesafe satellite laser ranging station", Proc. 9th International Conference on Laser Ranging Instrumentation, 1994, pp. 312~323.

7) Degnan, J., McGarry, J., Zagwodzki, T., Titterton, P., Sweeney, H., Donovan, H., Perry, M., Conklin, B., Decker, W., Cheek, J., Mallama, A., and Dunn, P., "SLR2000: An Inexpensive, Fully Automated, Eyesafe Satellite Laser Ranging System", Proc. 10th International Conference on Laser Ranging Instrumentation, 1996, pp. 367~377.

8) Degnan, J. J. and McGarry, J. F., "SLR2000: EYESAFE AND AUTONOMOUS

SINGLE PHOTOELECTRON SATELLITE LASER RANGING AT KILOHERTZ RATES", Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques, Vol. 3218, 1997, pp. 63~77.

9) Kirchner, G., Koidl, F., Prochazka, I. and Hamal, K., "SPAD Time Walk Compensation and Return Energy Dependent Ranging", Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, 1998, pp. 521-525.

10) 박필호, 박종욱, 임형철, 조성기, 장정균, 민병희, 한정열, "위성추적 및 우주감시 시스템 기반기술 개발"과제 보고서, 한국천문연구원, 2005, pp. 21.

11) Ricklefs, R., "Consolidated Laser Prediction and Data Formats: Supporting New Technology", Proceedings of the 15th International Workshop on Laser Ranging, Vol.2, 2006, pp. 535~538.

12) International Laser Ranging Service Homepage, NASA, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/products_formats_procedures/predictions/index.html

13) International Laser Ranging Service Homepage, NASA, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/slr_sats.html#npt

14) International Laser Ranging Service Homepage, NASA, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/products_formats_procedures/normal_point/np_algo.html