

한국 e-CALLISTO 관측소 자동 관측 시스템 개발 DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC OBSERVATION SYSTEM FOR KOREAN e-CALLISTO STATION

박종엽^{1,2}, 최성환^{1,2}, 봉수찬^{1,3}, 권용준^{1,2}, 백지혜¹, 장비호¹, 조경석^{1,3}, 문용재², Christian Monstein⁴
¹한국천문연구원, ²경희대학교, ³과학기술연합대학원대학교, ⁴취리히 연방 공과대학교

JONGYEOP PARK^{1,2}, SEONGHWAN CHOI^{1,2}, SU-CHAN BONG^{1,3}, YONGJUN KWON^{1,2}, JI-HYE BAEK¹, BI-HO JANG¹,
KYUNG-SUK CHO^{1,3}, YONG-JAE MOON², AND CHRISTIAN MONSTEIN⁴

¹ Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

² Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

³ University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

⁴ ETH Zurich, Zurich CH-8093, Switzerland

E-mail: parkjy@kasi.re.kr

(Received October 05, 2015; Revised November 17, 2015; Accepted November 30, 2015)

ABSTRACT

The e-CALLISTO is a network of CALLISTO (Compact Astronomical Low-frequency, Low-cost Instrument for Spectroscopy in Transportable Observatories) spectrometers which detect solar radio bursts 24 hours a day in frequency range 45-870 MHz. The number of channels per spectrum is 200 and the time resolution of whole spectrum is 0.25 second. The Korean e-CALLISTO station was developed by Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) collaborating with Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich) since 2007. In this paper, we report replacement of the tracking mount and development of the control program using Visual C++/MFC. The program can make the tracking mount track the Sun and schedule CALLISTO to start and to finish its observation automatically using the Solar Position Algorithm (SPA). Daily tracking errors (RMSE) are 0.0028 degree in azimuthal axis and 0.0019 degree in elevational axis between 2014 January and 2015 July. We expect that the program can save time and labor to make the observations of solar activity for space weather monitoring, and improve CALLISTO data quality due to the stable and precise tracking methods.

Key words: instrumentation: spectrographs, Sun: radio radiation, solar-terrestrial relations

1. 서론

태양 전파 폭발은 태양 플레어와 코로나 물질 방출(Coronal Mass Ejection: CME)과 함께 발생하며, 전파 스펙트럼에서 전파 폭발 발생 지역의 전자밀도 변화 양상이 관측되기도 한다. 강한 태양 전파 폭발은 위성 시스템이나 통신에 영향을 주기 때문에, 이를 감시하여 우주환경 예보에 활용하는 것이 중요하다(Lanzerotti, 2005; Cerruti et al., 2008).

이러한 감시활동을 위해 한국천문연구원(KASI)에서 2007년 태양 전파 수신기인 CALLISTO¹를 설치하여

관측해 오고 있다(Bong et al., 2009). CALLISTO는 스위스 취리히 연방공과대학교(ETH Zurich)에서 제작하였으며, 안테나 및 관측 시스템은 한국천문연구원에서 개발하였다. 전 세계의 약 80기의 CALLISTO 중 하나로 24시간 태양 전파 관측을 위한 e-CALLISTO 프로젝트에 포함되어 관측 자료를 제공해오고 있다.

Cho et al.(2011)은 e-CALLISTO를 사용하여 태양 유형 II 전파 폭발과 CME 발생 관계에 대한 연구를 진행하였으며, Baek et al.(2014)은 e-CALLISTO의 관측 자료를 실시간으로 처리하여 태양 전파 스펙트럼을 표출하는 서비스를 개발하였다.

e-CALLISTO는 태양 코로나 지역을 관측하는

¹ Compact Astronomical Low-cost Low-frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatories.

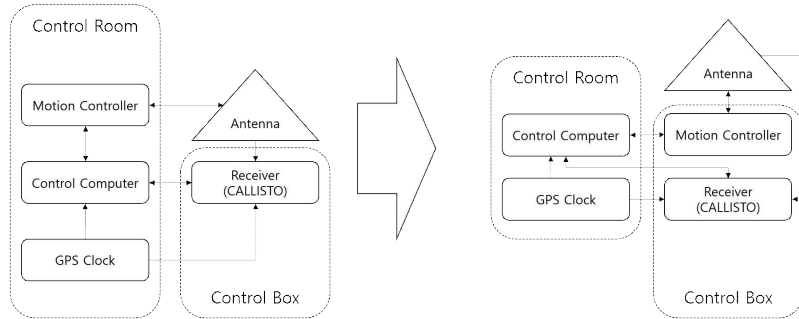


Figure 1. System diagrams: the first (left) and the final system (right). The motion controller moves to the control box under the antenna, and it is connected to the control computer via an ethernet connection.

SOHO/LASCO 위성의 보완 역할을 하며, 상시 우주환경 감시 활동을 위해서 안정적인 관측이 필요하다. 우리는 구동부의 잦은 고장으로 2011년 새 구동부와 제어 프로그램을 개발하였다. 구동부 제어 프로그램은 태양 추적 기능과 관측 스케줄러 기능을 포함하며, CALLISTO가 양질의 관측 데이터를 확보하고, 또한 안정적이고 지속적인 관측을 수행할 수 있도록 지원한다. 이 논문에서는 새로 개발한 구동부를 소개하고, 객체지향 프로그래밍을 기반으로 개발한 구동 프로그램과 태양 추적 성능 검증에 대하여 기술한다.

2. 시스템 구성

한국 e-CALLISTO의 관측 시스템은 안테나의 실제 움직임 담당하는 구동부, 모터에 전원 및 펄스를 발생시키는 모션 컨트롤러, 사용자의 구동 명령을 해석하여 전자부와 통신하는 제어 컴퓨터로 이루어진다. 관측 시스템은 두 차례에 걸쳐 변경되었으며, Figure 1은 관측 시스템 초기 모습(좌)과 현재 모습(우)을 나타낸 다이어그램이다. 초기 관측 시스템은 안테나 시설과 구동 제어 시스템이 제어실에 우선 설치되었으며, 이후 CALLISTO 수신기 설치를 위해 외부 컨트롤 박스를 구축하였다. 현재 시스템은 제어 컴퓨터와 모션 컨트롤러, 모션 컨트롤러와 모터의 연결을 단순화하고, 신호대잡음비를 개선하기 위해 모션 컨트롤러를 외부 컨트롤 박스에 설치하게 되었다. 이를 위해 제어 컴퓨터와 이더넷 통신을 지원하는 모션 컨트롤러를 사용하고 UTP 케이블을 새로 가설하였으며, 외부 컨트롤 박스의 고정 플레이트에 각 모터와 모션 컨트롤러를 연결하는 단자대를 설치하였다.

Table 1은 두 차례에 걸친 안테나 구동부의 성능 및 규격의 변경을 나타낸다. 첫번째 구동부의 모션 컨트롤러는 RS-232C 직렬 통신 인터페이스를 가지며, 제

어실에 위치하여 24V의 AC모터의 전원을 아날로그 방식으로 제어하였다. 안테나와 모터는 평기어 방식으로 연결되었고, 가변저항을 사용하여 위치제어를 하였다. 기어 감속비는 1/720으로 안테나 구동 범위는 방위각 약 360도, 고도 약 180도이다. 하지만 안테나 구동시 회전 관성이 모터로 직접 전해짐에 따라 모터가 자주 고장을 일으키는 문제가 있었다.

첫 번째 구동부의 문제를 해결하기 위해 평기어를 웜기어로 교체하고, 24V DC모터와 절대 위치 방식의 엔코더를 사용하여 두 번째 구동부를 다시 제작하였다. 이 때 모션 컨트롤러는 모터에 포함되어, 제어실 밖으로 이동하게 되었다. 모션 컨트롤러는 디지털 방식으로 RS-232C 인터페이스를 제공하였으며, 기어 감속비는 1/1200, 안테나 구동 범위는 방위각 약 360도, 고도 약 90도로 제작되었다. 그러나 안테나 구동에 따른 부하로 모터 및 연결 부위의 고장 및 파손이 발생하였다.

최종적으로 잦은 고장에 대한 근본적인 해결을 위해 2개의 스텝 모터와 높은 감속비의 웜기어, 상대 위치 방식의 엔코더를 사용하여 구동부를 제작하였다. 기어 감속비는 방위각, 고도 축 각각 1/5000, 1/3000이고, 시스템 보호를 위해 리미트 센서를 추가하여 방위각은 약 255도, 고도각은 약 95도의 구동 범위를 갖도록 하였다. 모션 컨트롤러는 AJINEXTEK사의 EIP-CPU16B와 EIP-M2Q를 사용하였고, 모터 드라이버는 Parker사의 OEM750을 사용하였다. EIP-CPU16B는 제어 컴퓨터와 이더넷으로 통신하며 최대 253개의 서브 기능 모듈들을 부착하여 제어할 수 있는 CPU 모듈이다. EIP-M2Q는 모션제어용 서브 기능 모듈 중 하나이며, 2축의 서보 드라이버나 스텝 모터 드라이버를 제어 할 수 있다. EIP-M2Q는 EIP-CPU16B의 내부 네트워크로 연결되고, Pulse/Direction 신호를 스텝 모터 드라이버로 보내 모터의 직접적인 구동을 담당한다.

Table 1. Changes of a mechanical part of the antenna system

	The first system	The second system	The final system
Motor	AC motor (24V)	DC motor (24V)	Step motor (25,000 pulse)
Controller	Analog (External)	Digital (Internal)	Digital (External)
Interface	RS-232C	RS-232C	Ethernet
Position sensor	Variable resistor	Absolute encoder (512bit)	Incremental encoder (6,000 pulse)
Observation range	-180 < Az. < 180 (deg) -90 < El. < 90 (deg)	-180 < Az. < 180 (deg) 0 < El. < 90 (deg)	35 < Az. < 290 (deg) 0 < El. < 95 (deg)
Decrease ratio	Az. : 1/720 El. : 1/720	Az. : 1/1200 El. : 1/1200	Az. : 1/5000 El. : 1/3000

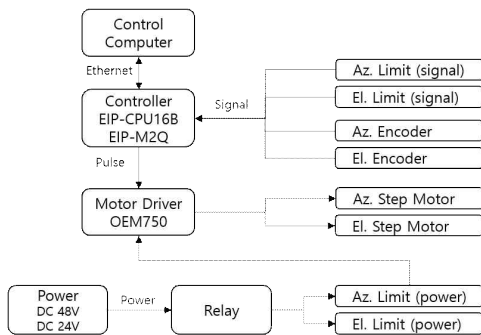


Figure 2. Hardware diagram of the motion controller.

모터 드라이버 OEM 750의 입력전압은 12-75VDC 이며, 1회전 당 최대 50,800 스텝의 해상도를 갖는다.

Figure 2는 모션 컨트롤러 구성을 나타낸 다이어그램이다. 방위각(Azimuth) 축과 고도(Elevation) 축에 각각 리미트 센서와 엔코더를 연결하여 안테나 동작에 따른 신호를 입력받을 수 있다. 리미트 센서는 안테나의 동작 범위 이탈을 방지하며, 엔코더는 안테나의 실제 지향위치를 알 수 있게 한다. 또한 전원부에도 리미트 센서를 연결하여 동작범위 이탈시 전원 차단을 통해 동작 범위 내에서 구동될 수 있도록 설계하였다.

제어 컴퓨터는 Intel Quad Core I5-2500 (3.3GHz), DDR3 4GB의 사양을 갖고, Windows7이 설치되었다. 안테나 구동 프로그램과 CALLISTO 관측 프로그램이 동시에 실행되며, 수신기와 GPS 시계가 직렬포트, 안테나 구동부의 모션 컨트롤러가 이더넷으로 연결된다.

3. 구동 프로그램 개발

구동 프로그램은 Visual Studio C++ 2012를 사용하여 컴파일하였다. 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)는 Microsoft Foundation Class (MFC)를 사용하여 구현하였다. 태양 위치 및 일출·몰 시간 계산을 위해 National Renewable Energy Laboratory (NREL)에서 제공하는 Solar Position Algorithm (SPA)²을 사용하였다. SPA는 태양 위치를 -2000년부터 6000년까지 계산할 수 있으며, 관측 시간 및 위치에 대해 ±0.0003도의 오차를 갖는다(Reda et al., 2004). 모션 컨트롤러 EIP-CPU16B의 동작은 AJINEXTEK에서 제공하는 Software Development Kit (SDK)을 사용하여 구현하였다.

3.1. 객체지향 구조

클래스는 특정 동작을 위한 변수 및 함수의 집합이며, 객체 지향 프로그래밍에서 클래스 캡슐화, 다형성 및 상속 등의 방법을 통해 소프트웨어의 재사용성을 높이기 위해 사용한다. 이미 검증된 클래스의 동작에 대한 이해가 없어도 클래스가 제공하는 인터페이스 함수를 통해 클래스를 활용하고, 상속을 통해 기능을 확장할 수 있다. 객체 지향 프로그래밍을 통해 클래스 간의 독립성을 확보하여 소프트웨어 유지보수에 드는 노력을 줄일 수 있다.

Figure 3은 구동 프로그램의 클래스 다이어그램이다. 클래스의 연관 관계는 다른 객체를 포함하거나 참조하여 사용하는 것을 의미하고 열린 실선 화살표로 연결한다. 사용된 객체의 수를 양 끝에 표시하며, 그 수

² <http://www.nrel.gov/midc/spa/>.

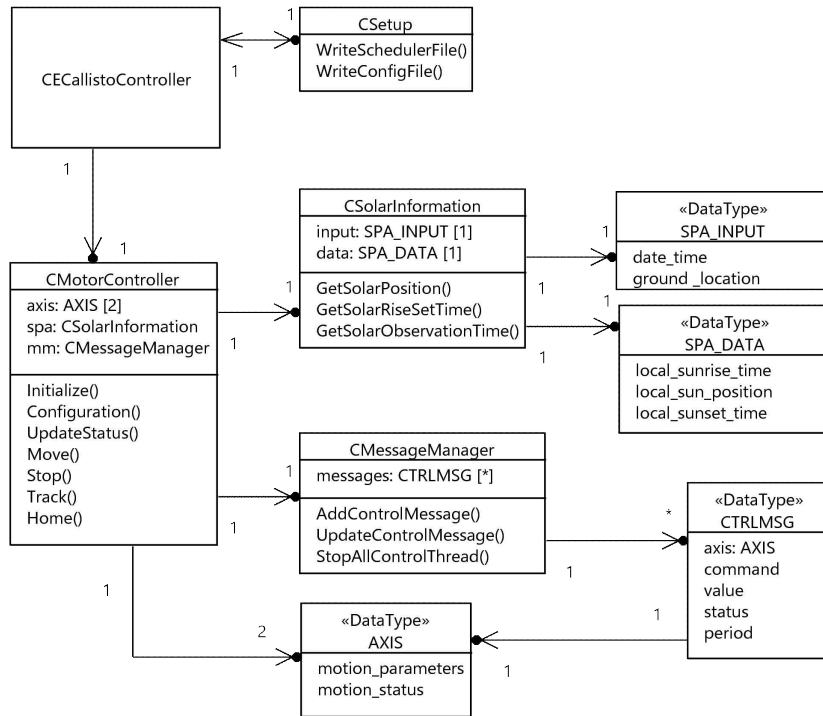


Figure 3. Class diagram of the control program for the antenna system. CECallistoController has a high-level interface depended on CMotorController and CSetup that can load/save a config file. CMotorController has two axes containing their motion parameters and status. It has Move, Stop, Track, and Home functions to control each axis. The functions construct control messages (CTRLMSG), which include motion commands and values (e.g. position, and initial direction), managed by CMessageManager.

가 가변적인 경우 별표(*)를 사용하여 표시한다. AXIS는 방위각 축과 고도 축에 대해서 2개의 객체를 생성하며, CTRLMSG는 사용자 입력에 따라 객체를 메모리에 동적으로 할당하기 때문에 그 수가 가변적이다.

CECallistoController는 GUI를 구현하며 사용자 입력을 처리하여 CMotorController와 기능적으로 연결하고 모션 컨트롤러 상태를 GUI에 표출하는 기능을 한다. 이 클래스는 MFC의 기본 윈도우 프로그램에서 사용되는 문서-뷰(Document-View) 아키텍처를 상속받아서 기능을 확장한 클래스이며, 설정 다이얼로그에서 사용자 설정 정보를 입력 받고, CALLISTO 관측 프로그램의 스케줄 파일을 저장할 수 있다.

CMotorController는 모션 컨트롤러의 설정 및 상태를 저장하는 AXIS 변수와 모션 제어 함수 Move, Stop, Track, Home를 통해 모션 컨트롤러를 제어하고 상태를 업데이트하는 기능을 한다. 모션 제어 함수는 모션 컨

트롤러 구동에 필요한 인자를 계산하고, 컨트롤 메시지(CTRLMSG)와 쓰레드를 생성하여 비동기식으로 호출된다. Initialize 함수는 모션 컨트롤러의 윈도우 백그라운드 프로세스를 초기화하고, Configuration 함수가 사용자 설정 파일을 로드하여 모션 컨트롤러를 설정한다. UpdateStatus 함수는 모션 컨트롤러의 상태를 업데이트하며 메인 쓰레드에서 주기적으로 호출된다.

CTRLMSG는 모션 제어 함수에 따라 다르게 정의되며, 쓰레드 내부로 변수를 전달해 주는 기능을 한다. Move 함수는 안테나의 지향 위치를 이동시키는 기능이며, 절대 위치 혹은 상대 위치 이동을 위한 커맨드와 각도 단위의 값이 필요하다. Stop 함수는 구동 중인 안테나를 정지시키는 기능이며, 감속 정지 혹은 긴급 정지를 위한 커맨드가 필요하다. Track 함수는 태양을 실시간으로 추적하는 기능이며, 추적 프로세스의 반복 주기가 필요하다. Home 함수는 안테나를 구동하여 리미

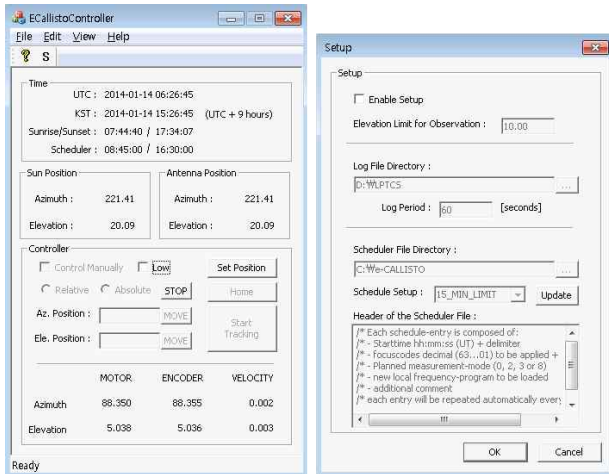


Figure 4. Graphical user interface (GUI) built by the Microsoft Foundation Class (MFC). A main frame (left) displays time information, the Sun and the antenna positions, and status of the motion controller. The antenna can be manually operated by user, or automatically in accordance with a schedule of the program. A setup dialog (right) can apply the elevation limit and a log/scheduler file path.

트 센서를 검출한 후, 리미트 센서의 위치에 해당하는 태양 좌표를 사용하여 원점을 보정하고 안테나를 사전에 설정된 위치로 구동시킨다. 기본 위치는 방위각 180도, 고도 0도이며, 태양 추적 동작 중일 경우에는 다음 날 관측 시작 지점으로 설정된다. Home 함수는 리미트 센서 검출을 위한 초기 구동 방향이 필요하다.

CSolarInformation은 태양의 위치와 시간을 계산하기 위해 SPA 라이브러리의 상위 인터페이스를 제공하는 기능을 한다. SPA_INPUT을 통해 시간 정보와 관측소 위치 정보(위도, 경도, 고도 등)를 SPA 계산 함수에 입력하면, 입력 정보에 대한 일출·몰 시간 및 태양 위치 정보(방위각, 고도 등)가 계산되어 SPA_DATA로 저장된다. GetSolarPosition 함수는 입력 시간에 대한 태양 위치 정보를 계산하며, GetSolarRiseSetTime 함수는 입력 날짜에서의 일출·몰 시간을 계산한다. GetSolarObservationTime 함수는 입력 날짜에서 태양이 입력 고도를 통과하는 시간을 계산하며, 15분 간격으로 태양의 위치를 계산한 후 입력 고도를 통과하는 두 시점을 평균하는 방법을 사용하였다. 이 시간은 관측 시작 시간과 종료 시간으로 사용된다.

CMessageManager는 CTRLMSG의 상태를 체크하고, 종료된 CTRLMSG와 쓰레드의 자원을 자동으로 회수하는 기능을 한다. 또한 모션 제어 함수에서 CTRLMSG의 중복

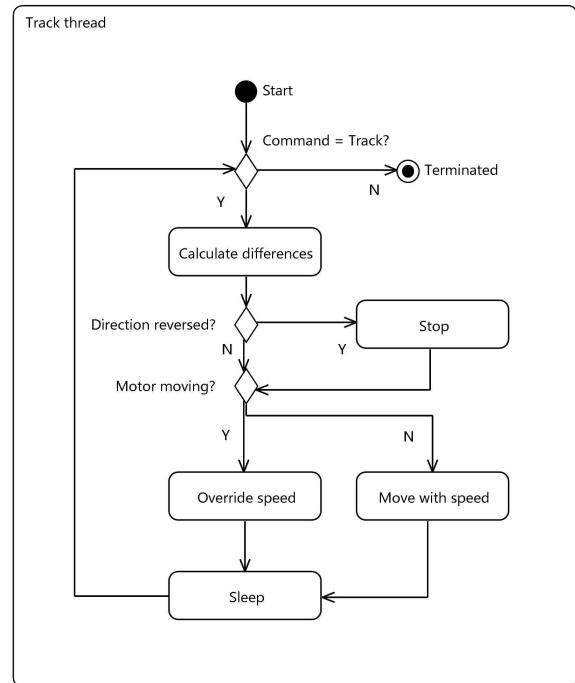


Figure 5. Flow chart for solar tracking of the antenna system.

생성을 방지하고 현재 동작 상태를 알려주는 기능을 한다. CTRLMSG는 AddControlMessage 함수를 통해 등록하고, UpdateControlMessage 함수를 통해 종료된 CTRLMSG와 쓰레드의 자원을 회수한다. StopAllControlThread 함수는 모든 CTRLMSG와 쓰레드를 강제 종료시킨 후 삭제하는 기능을 한다.

구동 프로그램을 객체 지향 구조로 설계함으로써 경위대식에서 적도의식 마운트 변경이나 구동부 변경에 따른 코드 변경을 최소화 할 수 있다. 또한 태양 위치 정보를 제공하는 CSolarInformation을 추상화하여 다른 물체 위치 정보를 제공하는 클래스를 작성하면 구동 프로그램의 추적 대상을 변경할 수 있다. 그리고 CTRLMSG의 상속을 통해 구동 프로그램의 새로운 기능에 대한 요구사항을 최소한의 코드 변경으로 대응할 수 있다. 이처럼 객체 지향 프로그래밍은 클래스 간 최소 의존성과 최대 독립성을 지향하며, 천문기기 제어 소프트웨어에 도입하여 유지보수와 외부 환경 변화에 대응하기 위한 노력을 효과적으로 경감시킬 수 있다.

3.2. 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)

Figure 4는 구동 프로그램의 GUI이며, 단순하고 직관적인 사용을 위해 필요한 정보를 위에서부터 아랫방향으

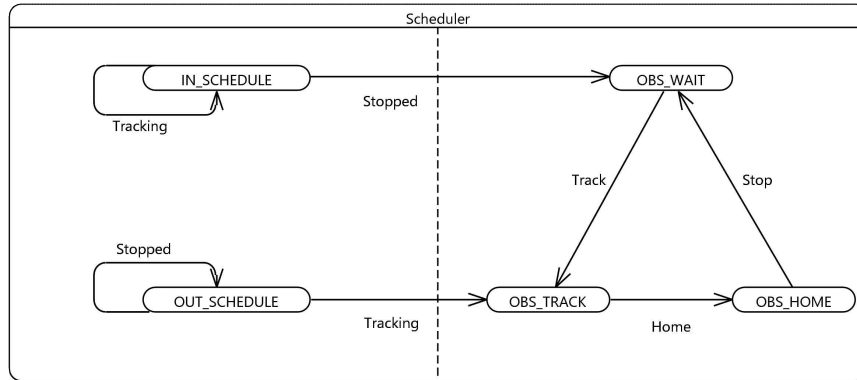


Figure 6. State machine diagram for an automatic observation of the Korean e-CALLISTO station.

로 순차적으로 배치하였다. 메인프레임은 단일 문서 인터페이스(Single Document Interface: SDI) 형식을 적용하였다. 위에서부터 세계시 및 지방시가 실시간으로 표출되며, SPA를 통해 계산된 일출·몰 시간과 스케줄러 옵션에 따른 관측 시작·종료시간을 표출하였다. 또한 현재 시각의 태양 위치와 안테나 지향 위치를 각도 단위로 표출하였다. 하단에는 안테나 구동을 위한 명령 버튼을 배치하고, 모터와 엔코더의 누적 펄스와 속도를 실시간으로 표출하여 사용자가 모션 컨트롤러의 동작 상태를 인지하도록 하였다.

사용자는 방위각 및 고도 축에 해당하는 텍스트 박스에 각도 단위의 값을 입력하고, 라디오 버튼으로 상대 혹은 절대 위치 모드를 선택한 후 Move 명령 버튼을 사용하여 안테나 구동을 할 수 있다. Home 명령 버튼은 리미트 센서를 사용한 안테나 지향 위치 원점 조정 기능을 수행하며, Track 명령 버튼은 태양 추적 기능을 수행한다. 모든 명령 버튼은 클릭 후 사용자로 인한 오동작을 방지하기 위해 비활성화 되며, Stop 명령 버튼을 클릭하여 CMessageManager에서 대기 중인 CTRLMSG가 모두 제거될 때 다시 활성화 된다.

Setup 다이얼로그는 사용자 설정을 입력받기 위해 모달(Modal) 형식으로 작성하였다. 사용자는 안테나 및 구동부 보호를 위해 소프트웨어적인 지향 고도를 제한할 수 있고, 관측 시간동안 태양 위치와 안테나 지향 위치를 기록하기 위한 기록 주기 및 저장 위치를 설정할 수 있다. 또한 자동 관측 스케줄러 옵션을 설정할 수 있으며, CALLISTO 관측 프로그램에서 사용하는 스케줄 파일의 경로를 설정하고 스케줄 파일의 헤더를 정의할 수 있도록 하였다.

자동 관측 스케줄러는 정해진 관측 시간동안 태양을 추적하는 기능으로 매일 일출·몰 시간을 계산하여 관측시간에 적용한다. 또한 계산된 관측시간을 사용하여

CALLISTO 관측 프로그램의 스케줄 파일을 작성하여 연동하는 기능을 한다. 자동 관측 스케줄러 옵션은 DISABLE, NO_LIMIT, 15_MIN_LIMIT이 있다. DISABLE은 자동 관측을 수행하지 않는 경우로써 안테나가 태양 추적 중 제한 고도 밑을 지향하면 안테나 구동을 정지하도록 하였다. NO_LIMIT과 15_MIN_LIMIT은 자동 관측을 수행하는 경우로써, CALLISTO 관측 프로그램의 스케줄 파일을 작성할 때, NO_LIMIT은 태양이 고도 제한 값을 통과하는 시간을 관측 시작과 종료 시간으로 사용하며, 15_MIN_LIMIT은 NO_LIMIT에서의 관측 시간을 CALLISTO의 관측 파일 저장 주기인 15분에 맞춰 정시부터 15분 간격으로 조정할 시간을 사용한다.

3.3. 알고리즘

3.3.1. 태양 추적

태양 추적을 위하여 모션 컨트롤러의 속도 구동 함수와 속도 오버라이드 함수 및 정지 함수를 사용하였다. Figure 5는 모션 제어 쓰레드 내에서의 동작을 표현한 다이어그램이다. 쓰레드는 모션 커맨드가 Track일 경우 반복적으로 동작한다. 모터 구동 속도와 구동 방향은 현재 태양 위치와 안테나 지향 위치 차이를 통해 계산하며, 최대 속도는 초당 1도로 제한한다. 안테나가 정지 상태이면 속도 구동을 시작한다. 구동 중인 경우 이전 구동방향과 새 구동방향이 같으면 속도를 오버라이드 하지만, 반대인 경우에는 안테나를 정지한 후 반대 방향으로 속도 구동을 시작한다. 한 주기가 끝나면 일정 시간 프로세스를 지연한다. 이 주기를 짧게 할수록 정확한 추적이 가능하지만 너무 짧을 경우 잦은 구동 커맨드로 모션 컨트롤러에 과부하를 줄 수 있으며, 오히려 추적 정밀도에 안 좋은 영향을 줄 수 있다. 지연 시간은 기본적으로 500 ms로 설정하였다.

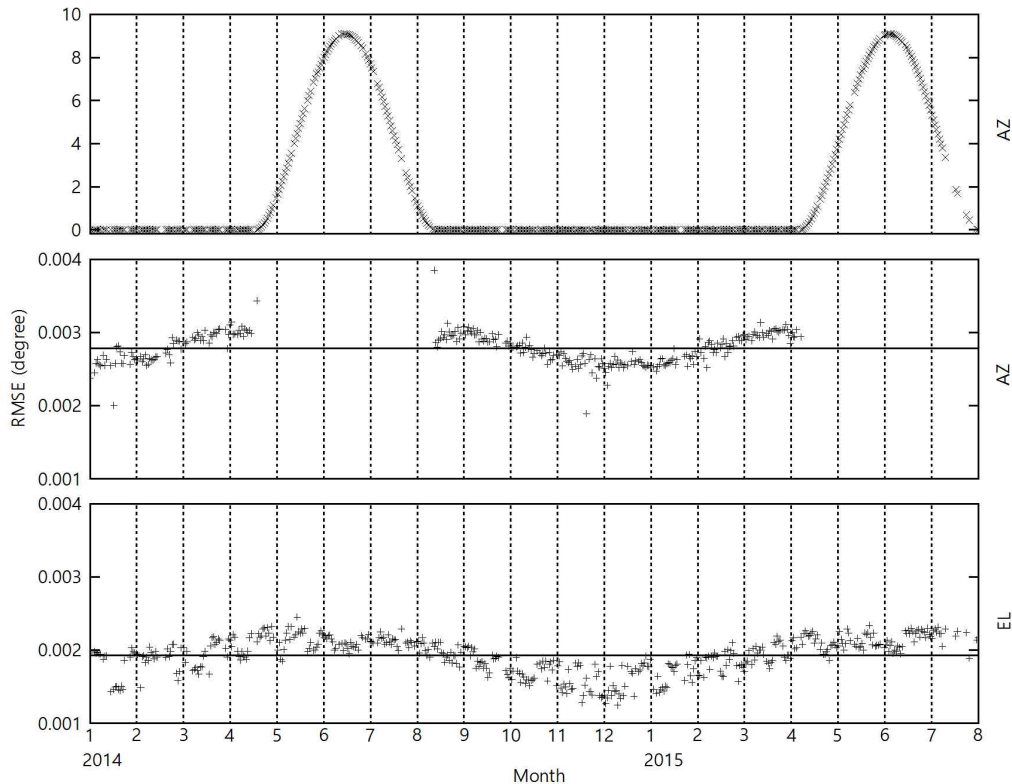


Figure 7. Daily tracking errors calculated from 2014 January to 2015 July in azimuthal axis (top and middle) and elevation axis (bottom). Unexpected tracking error happens in azimuthal axis (top) by internal problems of the motion controller which cannot override motor speed to track the Sun. Average RMSE is 0.0028 degree in azimuthal axis (middle) excluding unexpected error, and 0.0019 degree in elevation axis (bottom).

3.3.2. 자동 관측 스케줄러

Figure 6은 자동 관측을 위한 스케줄러의 상태 변화를 나타낸 다이어그램이다. 스케줄러는 프로그램이 시작할 때부터 종료할 때까지 반복적으로 동작한다. 자동 관측 프로세스는 태양 추적 모드에서만 활성화된다. 관측 스케줄러 상태 변수는 [IN|OUT]_SCHEDULE의 값을 갖고, 자동 관측을 제어하는 상태 변수는 OBS_[WAIT|TRACK|HOME] 값을 갖는다. 현재 시간이 설정된 관측 시간에 해당할 때 IN_SCHEDULE 상태이며, 그 반대의 경우 OUT_SCHEDULE 상태이다. IN_SCHEDULE 상태에서 OBS_WAIT일 때, 태양 추적 동작을 시작하고 OBS_TRACK으로 변경한다. 추적 동작은 OUT_SCHEDULE 상태로 변경되기 전까지 지속된다. OUT_SCHEDULE 상태로 변경되고 OBS_TRACK일 경우, 안테나 구동을 정지하고 OBS_HOME으로 전환, 안테나 지향 위치를 초기화하고 다음 날 관측 시작 위

치로 이동한 후 OBS_WAIT로 전환한다. 관측 대기 상태는 스케줄러 상태 변수가 IN_SCHEDULE로 변경될 때 까지 지속된다.

4. 추적 성능 평가

새로운 구동 프로그램을 적용하여 2014년 01월 01일부터 2015년 07월 31일까지의 추적 기록을 통해 가동률 및 추적 정밀도를 계산하였다. 추적 기록은 관측 시작으로부터 1분 간격으로 관측시간과 태양의 위치 및 안테나 지향 위치를 기록하였다. 총 596일 중 정전 및 구동부 오류로 인하여 관측이 수행되지 않은 날은 97일로 83.72%의 가동률을 기록하였다.

Figure 7은 테스트 기간 동안 각 구동축의 RMS 오차(RMSE)이며, 다음과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - A_i)^2}{N}}$$

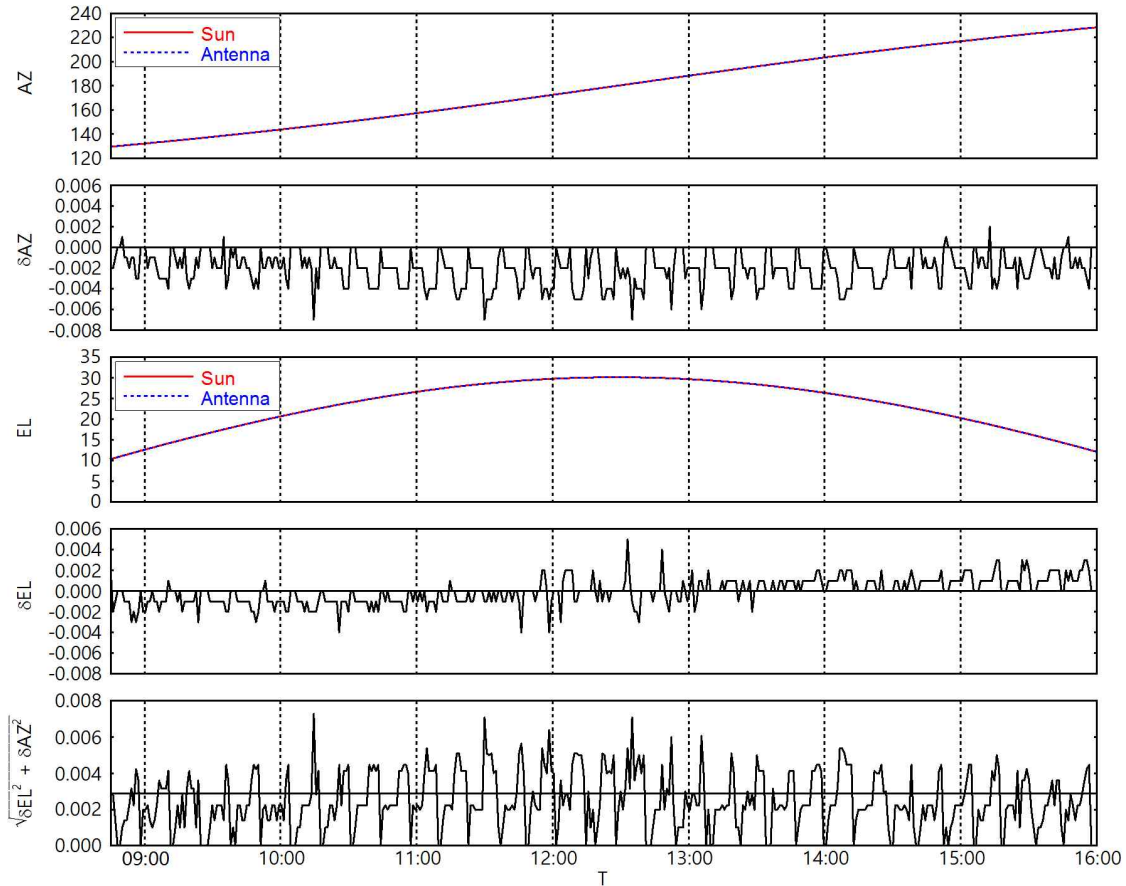


Figure 8. Positions of the Sun (red solid line) and the antenna (blue dotted) in the azimuth (top), their differential (2nd panel), the position in the elevation (3rd panel), their differential (4th panel), and total tracking error (bottom) on 2014 December 21, the winter solstice. In this observation, RMSE (black solid) is 0.003 degree.

S는 태양위치이며, A는 안테나 지향위치로 RMSE가 작을수록 추적 정밀도가 높다. Figure 7 상단 그래프에서 하지를 기준으로 약 60일 전 후(4월 24일 부터 8월 19일 까지)에 걸쳐 방위각 축의 RMSE가 비정상적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 태양 추적 동작 시, 태양의 속도에 따라 모터 속도가 정상적으로 오버라이드 되지 않아 발생하였다. 모터의 최대 속도는 초당 1도로 설정되어 있지만, 실제 추적 로그에는 분당 0.6도(초당 0.01도) 이상으로 구동하지 않았다. 태양의 속도가 가장 빠른 하짓날에 11시 30분(고도 약 72도) 부터 오차가 발생하기 시작하여 오후 3시 까지 모션 컨트롤러의 비정상적인 동작으로 오차가 발생하였다.

속도 오버라이드 구동에 대해 모션 컨트롤러 제조사는 “오버라이드 속도가 Max Velocity보다 작을 경우 속도가 천천히 변하는 문제 수정”, “AxmOverrideAccelVelDecel 함수 사용 시 지정한 가감속으로 변경되지 않는 문제 보

완”을 보고하고, 이 문제를 해결한 펌웨어를 공개하였다³. 따라서 펌웨어 업데이트를 통해 여름철 모션 컨트롤러의 비정상적인 동작으로 발생한 추적 오차를 개선할 계획이다.

Figure 7의 중간과 하단의 수평선은 여름철 모션 컨트롤러의 비정상적인 동작이 있었던 날을 제외한 방위각 및 고도 축의 평균 RMSE이며, 방위각은 0.0028도, 고도는 0.0019도의 값을 보였다. 태양의 속도는 방위각의 속도가 고도의 속도보다 크기 때문에, 방위각의 RMSE가 다소 크게 측정되었으며, 계절적으로 태양의 속도가 빠른 여름철이 겨울철보다 RMSE가 크다. 따라서 하지 부근에서 RMSE가 가장 크게 측정되고, 동지 부근에서 가장 작게 측정되는 경향을 보였다.

Figure 8은 계절적으로 가장 오차가 작은 2014년

³ <http://www.ajnextek.com>.

동지(12월 21일)에서의 안테나 및 태양의 위치 및 차이, RMSE를 보여준다. 이 날의 관측은 고도 제한 값 10도와 관측 스케줄러의 15_MIN_LIMIT 옵션으로 관측은 8시 45분부터 시작하여 16시 까지 진행되었다. 추적 알고리즘은 태양 위치와 안테나 지향 위치의 차이를 0.008도 이하로 제어하고 있으며, 이 날의 추적 정밀도는 0.003도 RMSE를 나타냈다.

5. 결론

태양 자동 관측 시스템 개발을 통해 한국 e-CALLISTO의 가동률을 극대화하여, e-CALLISTO 프로젝트를 지속적이고 안정적으로 참여 할 수 있으며, 또한 관측에 투입되는 인력 및 시간 감축을 기대할 수 있다. 이 시스템의 태양 추적 성능은 방위각 0.0028도, 고도 0.0019도 RMSE로 측정되었다. 이는 e-CALLISTO 프로젝트에 양질의 관측 데이터를 제공하고, 안테나 빔 폭이 좁은 고주파 관측에도 적용할 수 있는 수준이다. 모션 컨트롤러의 비정상적인 동작으로 발생하는 추적 오차는 태양의 고도가 높은 하지 부근 남중 시각 전 후로 발생하므로, 실제 천구 상에서의 각거리 오차는 매우 작으며, 오차가 안테나 빔 폭 65도(FWHM)보다 작기 때문에 관측 결과에 미치는 영향은 미미하다. 하지만, 우리는 빠른 시일 내에 모션 컨트롤러의 펌웨어 업데이트를 통해 문제를 개선할 계획이다.

이 시스템은 스텝 모터와 엔코더, 태양 위치 추적 라이브러리(SPA)를 통해 낮은 비용으로 구축될 수 있으며, 태양의 위치에 따라 동적으로 변하는 시스템에 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

- Baek, J. -H., Choi, S., Lee, J. -J., et al., 2013, Development of Data Integration System for Ground-Based Space Weather Observational Facilities, PKAS, 28, 65
- Bong, S. -C., Kim, Y. -H., Roh, H., et al., 2009, Construction of an E-Callisto Station in Korea, JKAS, 42, 1
- Cerruti, A. P., Kintner, P. M., Gary, D. E., Mannucci, A. J., Meyer, R. F., Doherty, P., & Coster, A. J., 2008, Effect of Intense December 2006 Solar Radio Bursts on GPS Receivers, Space Weather, 6
- Cho, K. -S., Bong, S. -C., Moon, Y. -J., Shanmugaraju, A., Kwon, R. -Y., & Park, Y. D., 2011, Relationship between Multiple Type II Solar Radio Bursts and CME Observed by STEREO/SECCHI, A&A, 530
- Lanzerotti, L. J., 2005, Solar and Solar Radio Effects on Technologies, in Astrophysics and Space Science

Library, 314, 1

Reda, I. & Andreas, A., 2004, Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, Solar Energy, 76, 5