한국정밀공학회지 제 42 권 제 1 호 pp. 79-88 January 2025 / 79
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 42, No. 1, pp. 79-88 http://doi.org/10.7736/JKSPE.024.120
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

다천체 분광 관측을 위한 Robotic Fiber Positioner 및 경로 계획 알고리즘 개발

Development of Robotic Fiber Positioner and Path Planning Algorithm for Multi-object Spectroscopy

임현호[1], 김재우[2], 황호성[3,4], 홍성욱[2,5], 이종철[2], 최영만[1,#]
Hyunho Lim[1], Jae-Woo Kim[2], Ho Seong Hwang[3,4], Sungwook Hong[2,5], Jong Chul Lee[2], and Young-Man Choi[1,#]

1 아주대학교기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)
2 한국천문연구원 (Korea Astronomy and Space Science Institute)
3 서울대학교 물리천문학과 (Department of Physics and Astronomy, Seoul National University)
4 서울대학교 천문연구센터 (SNU Astronomy Research Center, Seoul National University)
5 과학기술연합대학원대학교 천문우주캠퍼스 (Astronomy Campus, University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: ymanchoir@ajou.ac.kr, TEL: +82-31-219-2342
ORCID: 0000-0002-9754-0307

KEYWORDS: SCARA robot (스카라 로봇), High-precision positioning (고정밀 포지셔닝), Fiber positioner (광섬유 위치기), Swarm bot (군중 로봇), Path planning (경로 계획), Collision avoidance (충돌 방지)

A robotic focal plane system using robotic fiber positioners enables multi-object spectroscopy for hundreds to thousands of galaxies by utilizing a dense array of positioners that are closely packed at the focal plane of a telescope. While this dense arrangement increases the number of observations, it also introduces the potential for collisions between adjacent positioners. A fiber positioner is designed similarly to a SCARA robot. It is driven by two series of BLDC motors. Each positioner is manufactured with an outer diameter of 16 mm. It operates within an annular workspace with an outer diameter of 33.6 mm and an inner diameter of 12.8 mm. As these positioners are arranged with a spacing of 16.8 mm, target assignment and motion planning are critical to avoid collisions caused by overlapping workspaces. To address this, we proposed an optimized step choice algorithm using a motion planning method based on optimization with the sequential quadratic programming algorithm. Simulation results demonstrated that paths for all positioners within a tile were successfully generated with a success rate of up to 93.75% across 80 tiles.

Manuscript received: October 2, 2024 / Revised: November 5, 2024 / Accepted: November 8, 2024

1. 서론

우주의 가속 팽창을 발견한 이후 우주론의 주요 과제는 암흑에너지의 본질을 이해하는 것이다. 이를 위해 3차원 우주 지도를 작성하고, 은하의 진화 양상을 정확하게 설명할 수 있는 우주 모형을 찾는 다양한 연구가 진행되고 있다. 이런 연구에서 핵심적인 역할을 하는 것이 바로 한번에 많은 천체의 스펙트럼을 얻을 수 있는 다천체 분광기(Multi-Object Spectrograph, MOS)를 활용한 관측이다[1]. The All-sky Spectroscopic Survey of Nearby Galaxies (A-SPEC)는 국내 연구진들의 주도로 진행되는 최초의 외부 은하 분광 탐사로, K-SPEC이라는 MOS 개발을 통해 거리 200 Mpc 이내 은하들에 대한 대규모 분광 관측을 진행하고자 한다. 이를 통해 가속 팽창이 본격적으로 진행된 최근 수 억년 동안의 은하와 은하 집단들의 진화 양상을 연구하고 암흑에너지의 특성과 우주 공간 팽창 역사를 이해하고자 한다.

대규모 분광 관측을 통한 우주 연구를 위해서는 다천체 분광기의 개발이 필요하다. Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) [1-3]를 비롯한 Sloan Digital Sky Survey (SDSS)[4], Multi-object

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Optical and Near-IR Spectrograph (MOONS)[5] 등의 탐사에서는 MOS에 필요한 Robotic Focal Plane System (RFPS)을 개발하였다. RFPS은 다천체 분광기의 새로운 Focal Plate 방식으로 다수의 Robotic Fiber Positioner (RFP)를 Focal Plate에 배치하여 은하를 관측한다[6-8]. RFP는 2개의 회전 모터를 사용하는 SCARA 로봇 형태로 제작되며, 광섬유를 동작 범위 내의 원하는 위치로 이동시킨다[9,10]. RFP는 수백에서 수천 개가 Focal Plate에 일정한 배열로 배치되며, 관측 위치로 RFP 끝 단에 설치된 광섬유를 동시에 이동시킨다. RFPS는 밀도 높은 광섬유 배치 구조와 짧은 재구성 시간을 가지므로 효율적인 은하 관측이 가능하다.

그러나 RFPS의 밀집한 배치 구조로 인해 동작 시 인접한 RFP 간 충돌이 발생한다. 따라서 RFP를 사용한 분광 관측에서는 반드시 이들 간 충돌을 방지하는 동시에 지정된 위치로 이동하는 경로 계획이 필요하다. Macktoobian[11]은 다수의 RFP의 궤적 생성을 행렬 수식으로 표현하고 RFP에 할당되는 관측 대상을 변경하여, 모든 RFP가 충돌 없이 관측 대상의 위치로 수렴할 수 있는 경로 계획 알고리즘을 제안했다. 그러나 성공적으로 관측 대상의 위치로 이동하는 경로를 생성하기 위해서는 많은 계산량을 요구한다. Sayres[12]는 모터의 동작을 3가지로 제한하고, 각 시간 단계마다 충돌이 발생하지 않으면서 목표 위치와 가까워지는 모터 동작의 조합을 찾는 Greed Choice (GC) 알고리즘을 제안했다. GC는 간단하면서도 효율성이 높은 경로 계획 알고리즘으로 관측 대상의 위치에서 초기 위치 방향으로 경로를 생성하는 Reverse Path Solution을 사용한다. 그러나 Reverse Path Solution의 경우 RFP의 동작의 반대 방향으로 경로를 생성하므로 경로 생성에 실패하여 정지할 경우, 초기 위치에서부터 정지된 위치까지의 경로 데이터가 존재하지 않는다. 따라서 MOS에서 하나의 RFP라도 경로 계획을 통해 경로를 생성하지 못한 경우 은하를 관측할 수 없다.

경로 계획이 수렴할 수 있도록 RFP에 할당된 관측 대상을 변경하면 이러한 문제를 해결할 수 있다[12-14]. 그러나 주요 은하들을 반드시 관측하면서 경로 계획의 수렴 문제를 해결하기 위해서는 천문학과 경로 계획 모두 전문적인 지식을 요구한다. 그러나 관측자에게 2가지 분야에 전문적인 지식을 요구하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 최적화에 기반한 동작 선택을 통해 모든 RFP의 경로를 생성하는 경로 계획 알고리즘을 제안한다. 논문에서 제안하는 Optimized Step Choice는 Sequential Quadratic Programming (SQP) 알고리즘을 기반하여 매시간 단계마다 최적의 모터 동작을 선택하며, 이를 통해 모든 RFP가 관측 위치로 이동할 수 있는 궤적을 생성한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다천체 분광기를 위한 RFP를 설계하고, 3장에서 이를 위한 경로 계획 알고리즘인 Optimized Step Choice를 제안한다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 GC 알고리즘과 비교 검증한다.

2. Robotic Fiber Positioner

K-SPEC은 A-SEPC을 위한 다천체 분광기 시스템으로, 주경 1.6 m 망원경인 K-MTNet을 이용해 6 deg^2 하늘 영역에서 한번에 150여개의 천체를 관측하기 위해 개발된다[15]. Fig. 1은 K-SPEC의 Focal Plate의 구조를 보여준다. RFPS를 통해 밀집한 은하를 관측하기 위해서는 다양한 설계 조건을 고려해야 한다. 2장에서는 K-SPEC의 설계 요구 조건에 맞는 RFP의 설계 과정을 보여준다.

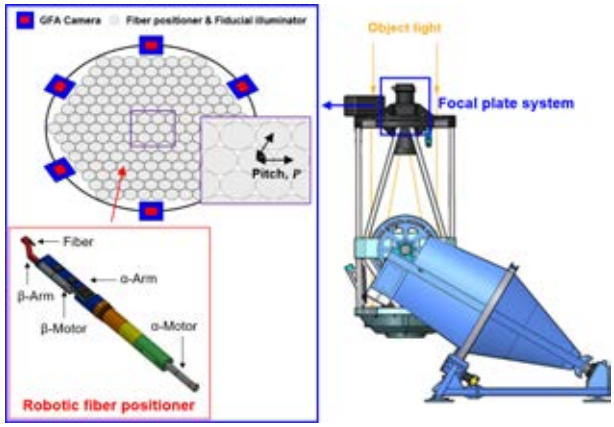


Fig. 1 Multi-object spectroscopic telescope: K-SPEC

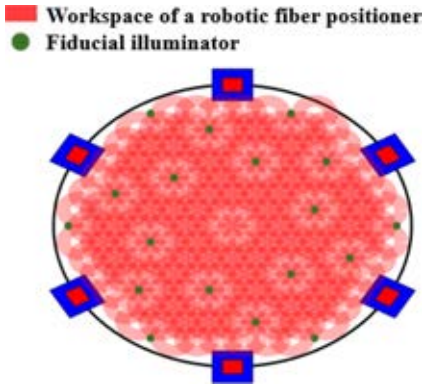


Fig. 2 Focal plate layout for the K-SPEC telescope

2.1 K-SEPC의 Focal Plate 구성

Focal Plate에는 RFP 이외에 다양한 요소가 배치되어 있다. Fiducial Illuminator (FI)는 내부에 있는 LED를 통해 빛을 발생시킬 수 있다. 이 빛을 Focal Plate 맞은편에 있는 Metrology Camera를 통해 관측하고 Focal Plate의 기준점으로 사용하면 RFP의 Calibration에 사용할 수 있다. FI는 Focal Plate 내 특정한 위치에 배치되어 있다. RFP와 FI는 일정한 간격 Pitch(P)로 배치되며, 이 값에 따라 Focal Plate에 배치할 수 있는 RFP의 수가 결정된다. 최종적으로 RFP와 FI가 부착된 Focal Plate는 Fig. 2와 같다. 256 mm 직경의 Focal Pate에 150개의 RFP와 18개의 FI를 배치하기 위해 P는 16.8 mm로 정의하였다.

2.2 Robotic Fiber Positioner 설계

RFP의 높은 위치 분해능 성능을 얻기 위해 일반적으로 소형 회전 모터에 높은 기어비의 기어 헤드를 부착한다. 논문의 RFP에 사용된 2개의 모터는 6 mm 직경의 BLDC 모터(ECX SPEED 6 M,

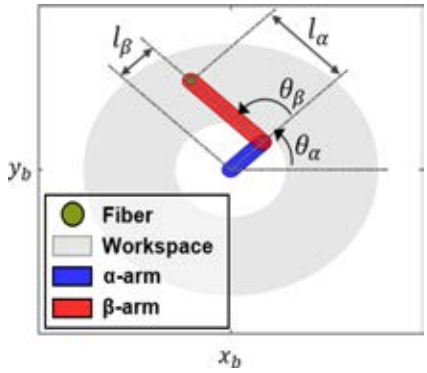


Fig. 3 Kinematics of RFP

Maxon)로 854:1의 기어 헤드(GPX 6, Maxon)를 연결하여 사용한다. 2개의 모터는 각각 α-arm과 β-arm을 움직인다. 이때 α-arm의 길이(l_a)를 수식(1)을 만족하는 범위에서 선정하면 RFP의 충돌은 β-arm에서만 발생하므로, 경로 계획의 충돌 방지 문제를 단순화할 수 있다. 이때 D_{motor}는 모터 직경을 의미한다.

$$l_a \le \frac{P}{2} - \frac{D_{motor}}{2} \tag{1}$$

Focal plate에는 RFP 이외에 은하를 관측할 수 없는 FI가 같이 부착된다. Focal plate의 빈 공간 없이 모든 영역을 관측하기 위해서 RFP의 두 Arm의 길이는 수식(2)를 만족해야 한다. 이때 모터 및 RFP 부품의 가공 오차를 고려하여, α-arm의 길이는 5.2 mm, β-arm의 길이는 11.6 mm로 설계하였다.

$$l_\alpha + l_\beta \le P \tag{2}$$

Fig. 3은 RFP의 기구학을 보여준다. 광섬유의 위치는 모터의 각도와 Arm의 길이에 따라 결정되며, 좌표 값은 수식(3)과 같다. (x_b, y_b)는 RFP의 중심 좌표이다. 반대로 관측 대상의 좌표 값이 주어지면, 역 기구학을 통해 해당 위치에 도달하기 위한 모터의 각도 값을 계산할 수 있다. 이때 좌표 값에 대한 역 기구학이 하나의 해를 가지기 위해 β-모터의 각도는 0에서 180°로 제한된다.

$$\begin{bmatrix} x_f \\ x_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cos(\theta_\alpha) & cos(\theta_\alpha + \theta_\beta) \\ sin(\theta_\alpha) & sin(\theta_\alpha + \theta_\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_\alpha \\ l_\beta \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\theta_\beta = cos^{-1} \frac{x_f^2 + y_f^2 - l_\alpha^2 - l_\beta^2}{2 l_\alpha l_\beta} \tag{4}$$

$$\theta_\alpha = tan^{-1} \frac{y_f}{x_f} - tan^{-1} \frac{l_\beta sin\,\theta_\beta}{l_\alpha + l_\beta cos\,\theta_\beta} \tag{5}$$

최종적으로 설계된 RFP는 Fig. 4와 같다. 광섬유는 β-arm 끝에 연결되며, RFP 내부를 통과하여 분광기와 연결된다. 이를 위해서는 샤프트는 광섬유가 연결된다. 이를 위해서는 샤프트는 광섬유가 통과할 수 있도록 중공 형태로 제작되어야 한다. 그러나 중공 형태의 샤프트를 α-모터에 직접적으로 연결하기 어려우므로 Lollipop Feature 부품이 필수적이다[8,10]. 이를 통해 α-모터는

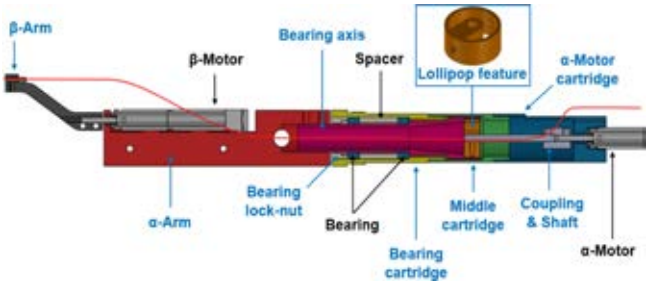


Fig. 4 Robotic fiber positioner for K-SPEC

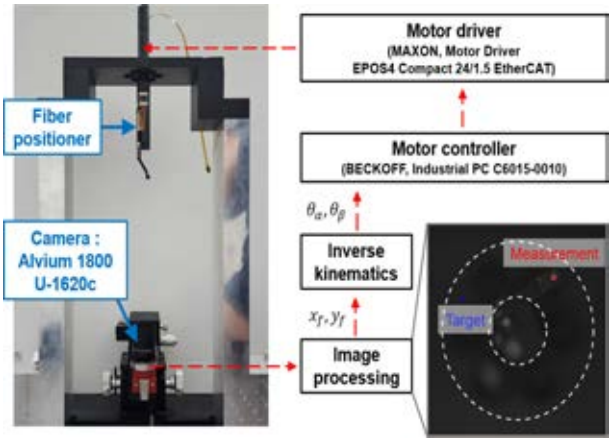


Fig. 5 Testbed of fiber positioner

RFP의 최 하단에 부착되어 샤프트를 통해 α-arm에 회전력을 전달하면서 광섬유가 이를 통과하여 분광기로 연결될 수 있도록 한다.

2.3 Robotic Fiber Positioner 성능 측정

2.3.1 테스트 베드 셋업

RFP의 성능을 평가하기 위한 테스트 베드는 Fig. 5와 같다. 테스트 베드는 실제 망원경 환경과 유사하게 RFP는 지면을 바라보며 하단의 맞은편에는 Metrology Camera를 배치하였다. Metrology Camera는 CCD 카메라(1800 U-1620c, Allied Vision)에 렌즈(25 mm 1" HPr Lens f/1.8, Edmund Optics)를 부착하여 사용하였다.

2.3.2 위치 정확도 및 반복능 측정

RFP의 위치 오차는 관측 대상의 광 손실을 의미하며, 허용치는 광섬유의 코어 직경에 비례한다. 제작된 RFP의 광섬유 코어 직경은 75 μm이며, A-SPEC에서는 5 μm 이내의 위치 정확도로 RFP를 위치 제어하고자 한다.

RFP는 측정 대상의 좌표 값이 주어지면, 역 기구학을 통해 이동할 모터의 각도 값을 계산한다. 동작은 오픈 루프로 이루어지며, 이러한 동작을 Blind Move라고 한다. 동작 후 Metrology Camera는 Focal Plate의 상태를 확인한다. 이를 통해 RFP의 광섬유의 위치와 관측 대상의 위치 간의 오차를 계산할 수 있다. 계산된 차이만큼 추가적으로 RFP를 구동하여 최종적으로 광섬유를 관측 대상의 위치로 정확하게 이동하는 과정을 Calibration Move라 한다. Calibration 과정의 예시는 Fig. 6과 같다.

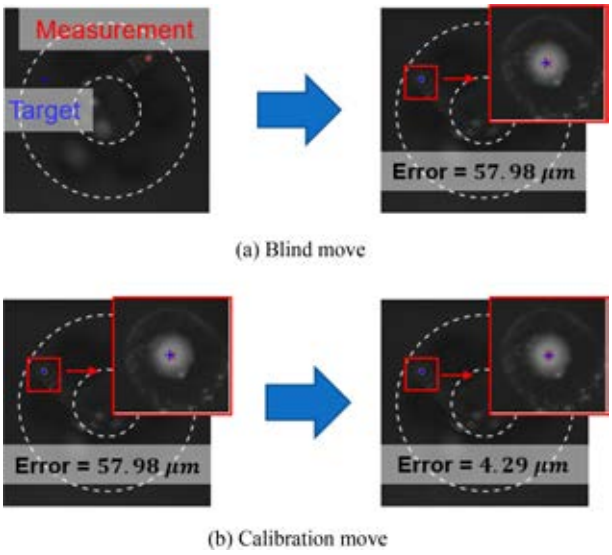


Fig. 6 Calibration process

RFP의 위치 정확도 측정을 위하여 Fig. 7(a)과 같이 관측 영역 내의 임의의 32개의 관측 대상을 설정하였다. 측정은 다음과 같이 진행하였다. RFP는 각 대상으로 Blind Move로 이동한 후 위치 오차를 측정한다. 이후 Calibration Move를 진행한 뒤 다시 오차를 측정한다. Calibration Move는 위치 오차 값이 5 μm보다 작도록 하되 최대 4회 진행하였다. 측정 결과 Blind Move 성능은 Figs. 7(b), Calibration Move의 성능은 7(c)와 같다. Blind Move의 평균 위치 오차는 118 μm이다. Blind Move의 위치 오차는 기어 박스의 백래시 및 제작 공차로 인해 발생한다. 이 오차는 Calibration Move를 통해 개선 가능하며, 평균 위치 오차는 3.1 μm로 감소하였다. 이는 논문의 RFP가 A-SPEC에서 요구하는 위치 오차 크기 이내로 위치 제어가 가능함을 보여준다.

RFP의 또다른 중요한 지표로는 반복능이 있다. RFP의 반복능을 측정하기 위해 동일한 관측 위치로 Blind Move를 통해 광섬유를 반복적으로 이동시키고, 위치를 측정하였다. 총 50회 측정을 수행하였으며, 결과는 Fig. 8에 나타나 있다. 측정된 RMS 오차는 6.40 μm으로, 이는 Blind Move의 위치 정확도인 118 μm에 비해 매우 작은 값이다. 이러한 두 가지 성능 지표를 통해 제작된 RFP가 Calibration을 통해 원하는 관측 대상을 충분히 정확하게 분광 관측할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 경로 계획 알고리즘

A-SPEC은 1차 탐사에서 209일 동안 16만개의 천체를 관측한다. 따라서 한정된 시간에 목표하는 모든 천체를 관측하기 위해서는 효율적인 관측 계획이 필요하다.

3.1 Target Assignment

K-SPEC은 150개의 RFP를 사용하므로, 한 번에 관측할 수 있는 은하의 개수가 한정되어 있다. 그러나 보통 Focal Plate 영역에서 관측 가능한 은하의 개수는 150개보다 많으므로, 어떤 우선 순위로 은하를 관측해야 할 지 계획이 필요하다. 계획에 따라 각각의

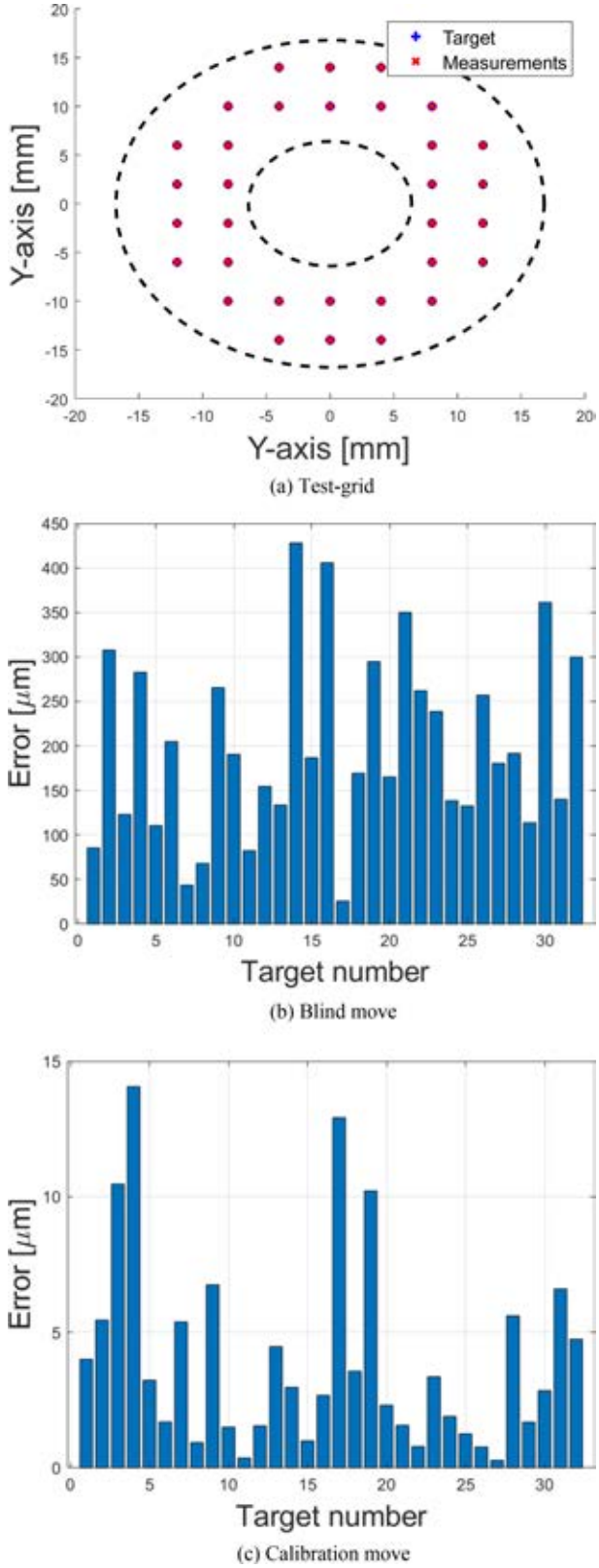


Fig. 7 Accuracy measurement results of an RFP

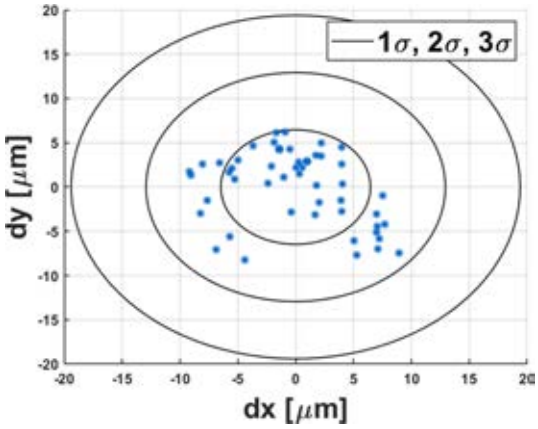


Fig. 8 Repeatability measurement results of an RFP

RFP에는 관측할 은하가 할당되며, 모든 RFP가 동시에 해당 위치로 광섬유를 이동시킨 뒤 관측이 이루어진다. 이때 관측 대상이 할당된 전체 RFP의 구성을 Tile이라 부른다. 실제 관측은 동일 영역에 대해 다수의 Tile로 구분하여 진행된다. A-SPEC은 209일 동안 2,198개의 Tile로 천체를 관측한다. Fig. 9는 400여개의 관측 대상을 3개의 Tile로 나누어 관측하는 예시를 보여준다. 각 Tile의 관측 대상은 주된 목표 대상인 Primary Target과 추가 대상인 Secondary Target, 하늘의 스펙트럼 보정을 위한 빈 하늘을 포함한다. 이러한 RFP에 관측 대상을 할당하는 과정을 Target Assignment라고 한다.

RFP는 분광 관측을 위해 초기 위치에서 각 Tile에 부여된 관측 대상의 위치로 이동한다. 분광 관측 후 RFP는 다시 초기 위치로 돌아가며, 모든 측정이 완료될 때까지 해당 과정을 반복한다. 논문에서는 Target Assignment를 통해 RFP에 측정 대상이 효과적으로 할당되었다고 가정하고, 충돌을 회피하고 관측 대상의 위치로 광섬유를 움직이는 경로 계획 알고리즘에 초점을 맞춘다.

3.2 충돌 방지

광섬유 로봇 위치기 시스템의 RFP는 동시에 초기 위치에서 관측 대상의 위치로 이동한다. 그러나 각 RFP의 관측 영역은 인접한 RFP와 겹치므로 이동 중 충돌이 발생할 수 있다. 이때 모든 RFP의 충돌은 β-arm에서만 발생하므로 RFP의 충돌 영역은 β-arm의 형상에 따라 결정된다. Fig. 10은 RFP의 β-arm 간에 충돌이 발생하는 예를 보여준다. 그림에서 충돌 영역은 β-arm의 선분과 선분을 감싸는 일정한 크기의 영역으로 구성된다. 이때 선분을 감싸는 영역을 충돌 감지 영역(σ_{cd})라 부르며, 인접한 RFP간 충돌 감지 영역이 겹치게 될 경우 충돌이 발생하게 된다. 따라서 RFP의 충돌 여부는 두 선분 사이의 최소 거리(D_{ij})를 계산하여 수학적으로 판단할 수 있다. 각 선분은 RFP의 광섬유의 위치(x_f, y_f)와 β-모터 축(x_e, y_e)의 위치로 결정된다. 광섬유의 위치는 수식(1)을 통해 계산되며, β-모터 축의 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_\alpha \cos(\theta_\alpha) \\ l_\alpha \sin(\theta_\alpha) \end{bmatrix} \tag{6}$$

RFP간 충돌이 발생하는 경우는 수식(7)과 같다.

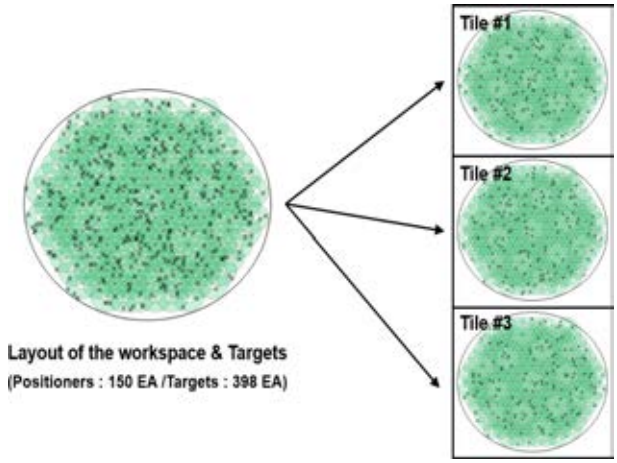


Fig. 9 Example of target assignment

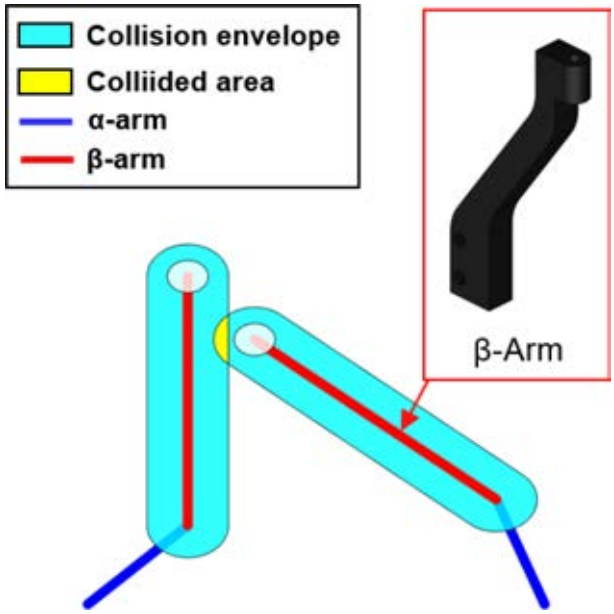


Fig. 10 Geometrical representation of collision in robotic fiber positioners

$$D_{ij} \le 2\sigma_{cd} \tag{7}$$

3.2.1 Greedy Choice 알고리즘

GC는 간단한 충돌 방지를 적용한 MOS의 경로 계획 알고리즘으로 각 시간 단계마다 모터의 동작을 계산한다. 모터의 동작은 [-Δθ, 0, Δθ] 3개 중 하나가 선택된다. 이때 RFP는 2개의 모터로 구동하므로, 총 9개의 동작이 가능하다. 이러한 동작 중 인접한 RFP와 충돌하지 않으면서 최종 위치와 가장 가까운 방향으로 궤적을 선택한다. 이때 GC는 충돌 영역을 뛰어넘어 동작하는 Tunneling Collisions을 고려하여 충돌 조건을 보수적으로 설정하였다. 따라서 충돌 조건인 수식(8)에 RFP의 최대 변위 항 D_{max}을 추가하여 충돌 제한 조건을 수식(10)과 같이 계산하였다. 수식에서 N_i는 RFP i와 인접한 RFP의 집합을 의미한다. 또한 G는 모든

RFP의 집합이며, C_i는 RFP i의 중심 좌표를 의미한다.

$$N_i = \{j \in G, j \neq i \| C_j - C_i \| \leq 2(P + \sigma_{cd})\} \tag{8}$$

$$D_{max} = (l_\alpha + l_\beta) sin(2\Delta\theta) \tag{9}$$

$$min\{j \in N_i | D_{ij}\} > 2\sigma_{cd} + 2D_{max} \tag{10}$$

3.2.2 Optimized Step Choice 알고리즘

Fully-convergent Tile은 Tile 내 모든 RFP가 경로 계획을 통해 지정된 관측 대상 위치로의 경로를 생성한 경우를 의미한다. GC의 Path Solution 방식에는 Forward Path Solution과 Reverse Path Solution 2가지가 있다. 그 중 Reverse Path Solution은 관측 대상의 위치에서부터 초기 위치로 돌아가는 방향으로 경로를 생성한다. 이때 경로 생성 도중 RFP의 이동 동작이 모두 충돌 제한 조건을 만족하지 못하면 교착 상태에 빠진다. 이 경우 경로는 관측 대상의 위치부터 정지된 위치까지만 생성된다. 그러나 실제 MOS 관측은 모든 RFP가 초기 위치로 배치된 상태에서 관측 위치로 이동하므로, Reverse Path Solution에서 하나의 RFP만이라도 경로 생성에 실패할 경우 생성된 경로 데이터를 실제 MOS 관측에 사용할 수 없다.

우리는 RFP에 더 많은 동작 선택지를 부여하면 이러한 문제를 해결할 수 있다고 판단하였다. 따라서 최적화를 통해 다양한 선택지를 제공하고 이들 중 최선의 동작을 선택한다면, 더 많은 Fully-convergent Tile을 생성할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 Optimized Step Choice (OSC)를 제안한다. OSC는 최적화를 통해 시간 단계 당 충돌 제약 조건을 충족하면서 모터의 각도를 목표값에 가까워지도록 선택한다. 최적화는 SQP 알고리즘을 통해 진행되며, 설계 파라미터는 RFP의 각 모터 회전 각도($\phi_{i,\alpha}$, $\phi_{i,\beta}$)로 설정하였다. 이때 각 모터의 회전 각도의 크기는 -$\Delta\theta$에서 $\Delta\theta$ 범위 내에서 최적화된다. 또한 α-모터의 각도($\theta_{i,\alpha}$)는 0 deg 에서 360 deg 범위에서 동작하며, β-모터의 각도($\theta_{i,\beta}$)는 0 deg 에서 180 deg 범위에서 동작한다. 최적화의 Cost Function은 수식(11)과 같다. 수식에서 θ_i^c는 RFP의 현재 모터 각도 상태를 의미하며, θ_i^D는 RFP의 목표 각도 상태를 의미한다.

$$minimize\ f(\phi_{i,\alpha}, \phi_{i,\beta}) = \| \theta_i^c - \theta_i^D \| \tag{11}$$

이때 최적화의 제약 조건은 GC와 동일하게 수식(10)과 같이 설정하였다. 최적화를 통한 동작 선택은 모든 RFP가 순차적으로 진행되며, 각 RFP 상태를 갱신한다. 최적화는 모든 RFP가 수식(12)를 만족할 때까지 이루어진다.

$$\| \theta_i^c - \theta_i^D \| \leq \Delta\theta \tag{12}$$

Fig. 11은 18개의 RFP에 임의의 관측 대상을 설정하여 GC와 OSC로 각각 경로 계획을 진행한 결과이다. 그림에서 초록색 실선은 각 RFP의 이동 경로를 나타낸다. 생성된 경로를 볼 때, 일부 OSC를 통해 생성된 경로가 GC에 비해 더 짧은 이동거리를 보여준다. 실제로 GC와 OSC의 생성된 경로의 이동 시간은 각각 5.5초와 4.3초로 OSC가 GC보다 더 짧은 시간 내에 목표하는 위치로 RFP를 이동시킬 수 있었다.

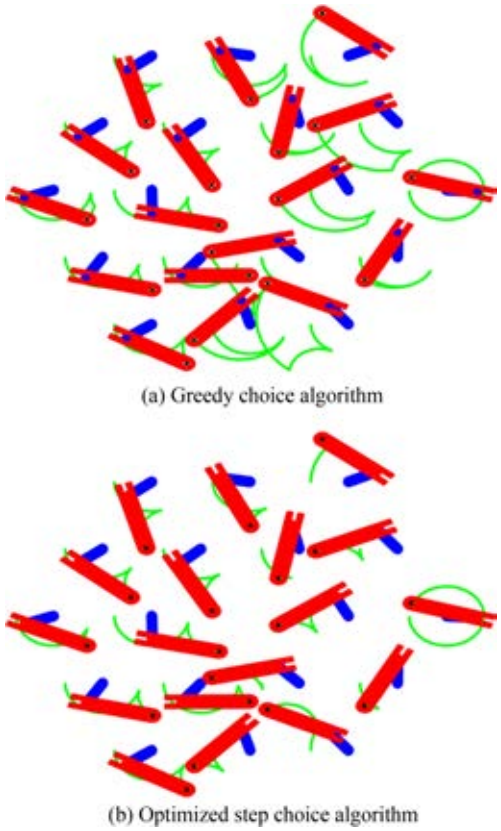

(a) Greedy choice algorithm
(b) Optimized step choice algorithm

Fig. 11 Simulation results of the path planning algorithm

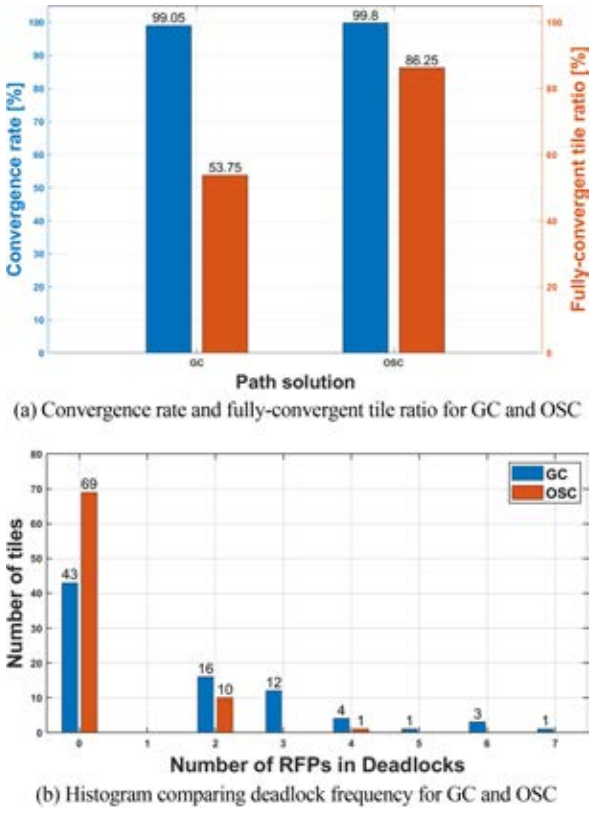


Fig. 12 Path planning simulation results for 80 tiles

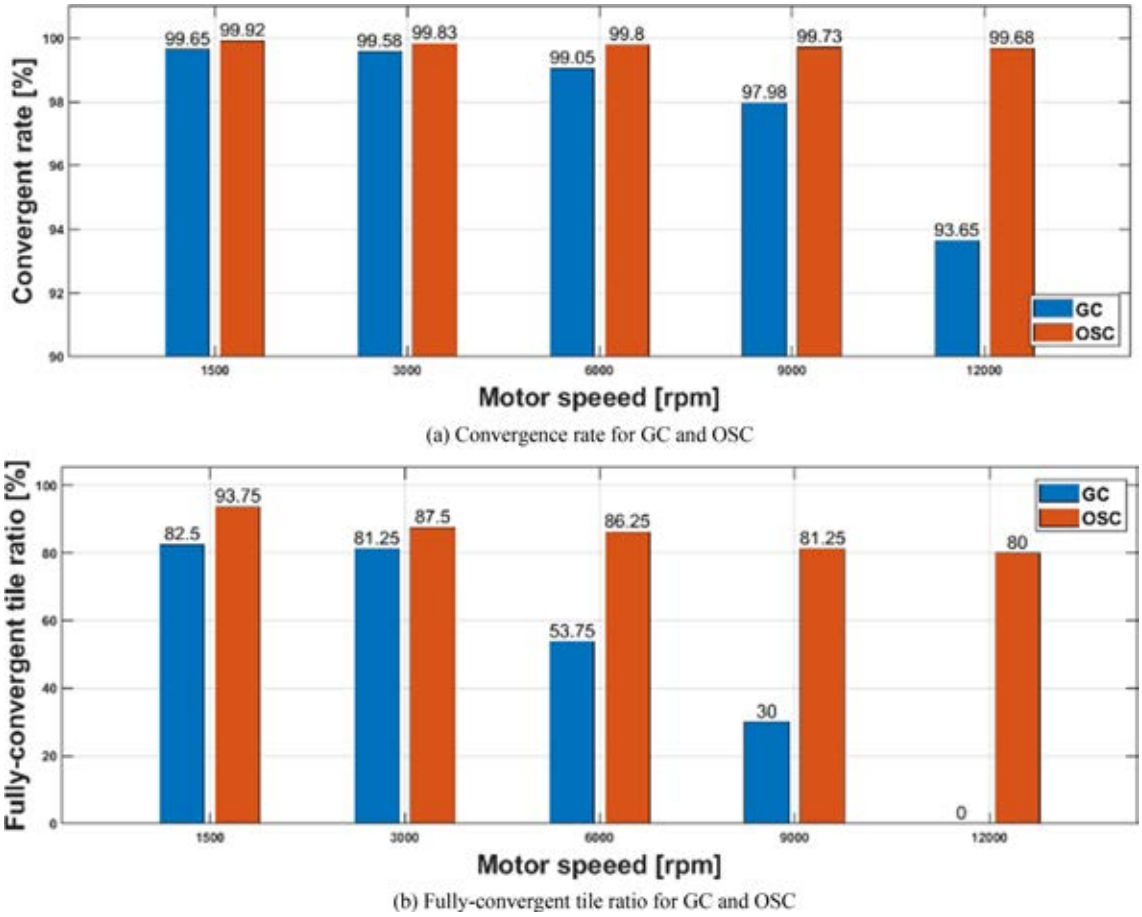


Fig. 13 Simulation results according to motor speed conditions

3.3 성능 비교

두 경로 계획 알고리즘의 성능을 비교하기 위해150개의 RFP를 가지는 RFPS에서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 총 80개 Tile에서 진행하였으며, 모터의 속도는 6,000 RPM으로 설정하였다. 논문에서 알고리즘의 성능 비교를 위해 2가지 성능 지표를 정의한다. Convergent Rate는 모든 Tile에서 RFP가 성공적으로 경로를 생성한 비율이며, Fully-convergent Tile Ratio는 전체 Tile 중 Fully-convergent Tile을 생성한 비율을 의미한다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12(a)에서 Convergence Rate는 GC와 OSC가 각각 99.05와 99.80%로 두 알고리즘 모두 거의 모든 RFP의 경로를 성공적으로 생성할 수 있었다. 그러나 Fully-convergent Tile Ratio의 경우 GC는 53.75%로 절반에 가까운 Tile에서 교착 상태가 발생하였으며, 46.25% Tile은 MOS 관측의 경로 데이터로 사용할 수 없다. 반대로 OSC의 경우 Fully-convergent Tile Ratio는 88.25%로 기존 GC 대비 32.5% 더 많은 Tile에서 성공적으로 관측할 수 있는 경로 데이터를 생성한다. Fig. 12(b)는 시뮬레이션에서 교착 상태의 빈도를 히스토그램으로 나타낸 결과이다. 그림에서 GC는 80개의 Tile 중 16개의 Tile에서 2개의 RFP에 대한 경로 생성에 실패한 반면, OSC는 10개의 Tile에서만 경로 생성에 실패하였다. 또한 GC는 총 21개의 Tile에서 3개 이상의 RFP 경로 생성에 실패한 것으로 나타났으나, OSC는 80개 중 단 1개의 Tile에서만 3개 이상의 RFP 경로 생성에 실패하였다. 이는 논문에서 제안한 OSC가 기존 GC에 비해 복잡하게 얽혀있는 RFP의 경로 생성 문제를 더 잘 해결하고 있음을 보여준다. 상세한 두 알고리즘의 성능 비교를 위해 모터의 다양한 속도 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13(a)는 속도 조건 별 Convergence Rate를 비교한 결과이다. OSC는 속도 조건이 달라지더라도 성능의 큰 변화가 없었으나, GC는 속도 조건에 따라 경로 생성에 실패하는 RFP의 비율이 높아졌다. Fully-convergent Tile Ratio를 비교한 결과는 Fig. 13(b)와 같으며, GC와 OSC 모두 Convergence Rate의 결과와 유사하게 나타났다. OSC는 시뮬레이션 결과 모든 속도 조건에서 80% 이상의 비율로 Fully-convergent Tile을 생성한 반면, GC는 12,000 RPM 조건에서는 하나의 Fully-convergent Tile도 생성할 수 없었다. 이러한 시뮬레이션 결과는 논문에서 제안한 OSC가 다양한 Tile 및 RFP 조건에서도 성공적으로 Fully-convergent Tile을 생성할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

RFPS는 MOS를 위한 다천체 분광기의 새로운 Focal Plate 방식이다. 본 논문에서는 RFPS의 필수 요소인 RFP를 설계하고 및 성능

측정을 진행하였다. 제작된 RFP의 평균 위치 오차를 측정한 결과 Blind Move는 118 μm, Calibration Move는 3.1 μm로, 광섬유의 수광 효율에 영향이 없는 수준으로 제어할 수 있었다. 또한 논문에서는 제작된 RFP를 통해 여러 은하를 순차적으로 관측하기 위한 경로 계획 알고리즘을 제안했다. OSC 알고리즘은 최적화를 통해 RFP의 동작을 선택하여 충돌을 방지하고 광섬유들을 관측 대상의 위치로 이동시킨다. 제안한 알고리즘의 성능 측정을 위해 80개 Tile에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 다양한 모터 속도 조건에서 진행하였으며, OSC는 모든 모터 속도 조건에서 80% 이상의 비율로 Fully-convergent Tile을 생성할 수 있었다. 따라서 논문에서 개발한 RFP와 경로 계획 알고리즘은 추후 천문학적 대형 분광 탐사를 기획하고 추진하는 데 큰 도움이 될 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 한국항공우주청의 주관 하에 한국천문연구원 연구개발사업(No. 2024-1-830-00)의 지원을 받아 수행되었습니다. 황호성은 삼성전자의 지원(No. IO220811-01945-01)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2021R1A2C1094577)에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Levi, M. E., Allen, L. E., Raichoor, A., Baltay, C., BenZvi, S., Beutler, F., Bolton, A., Castander, F. J., Chuang, C.-H., Cooper, A., Cuby, J.-G., Dey, A., Eisenstein, D., Fan, X., Flaugher, B., Frenk, C., Gonzalez-Morales, A. X., Graur, O., Guy, J., Habib, S., Honscheid, K., Juneau, S., Kneib, J.-P., Lahav, O., Lang, D., Leauthaud, A., Lusso, B., Macorra, A., Manera, M., Martini, P., Mao, S., Newman, J. A., Palanque-Delabrouile, N., Percival W. J., Pridto, C. A., Rockosi, C. M., Ruhlmann-Kleider, V., Sehlegel, D., Seo, H.-J., Song, Y.-S., Tarle, G., Wechsler, R., Weinberg, D., Yeche, C., Zu, Y., (2019), The dark energy spectroscopic instrument (DESI), The Bulletin of the American Astronomical Society, 57(7).

2. Martini, P., Bailey, S., Besuner, R. W., Brooks, D., Doel, P., Edelstein, J., Eisenstein, D., Flaugher, B., Gutierrez, G., Harris, S. E., Honscheid, K., Jelinsky, P., Joyce, R., Kent, S., Sevi, M., Prada, F., Poppett, C., Rabinowitz, D., Rockosi, C., Cardiel Sas, L., Schlegel, D. J., Schubnell, M., Sharples, R., Silber, J. H., Sprayberry, D., Wechsier, R., (2018), Overview of the dark energy spectroscopic instrument, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII, 10702, 410-420.

3. Abareshi, B., Aguilar, J., Ahlen, S., Alam, S., Alexander, D. M., Alfarsy, R., Allen, L., Prieto, C. A., Alves, O., Ameel, J., Armengaud, E., Asorey, J., Aviles, A., Bailey, S., Balaguera-Antolínez, A., Ballester, O., Baltay, C., Bault, A., Beltran, S. F., Benavides, B., BenZvi, S., Berti, A., Besuner, R., Beutler, F., Bianchi, D., Blake, C., Blanc, P., Blum, R., Bolton, A., Bose, S., Bramall, D., Brieden, S., Brodzeller, A., Brooks, D., Brownewell, C., Buckley-Geer, E., Cahn, R. N., Cai, Z., Canning, R., Capasso, R., Carnero Rosell, A., Carton, P., Casas, R., Castander, F. J., Cervantes-Cota, J. L., Chabanier, S., Chaussidon, E., Chuang, C., Circosta, C., Cole, S., Cooper, A. P., da Costa, L., Cousinou, M.-C., Cuceu, A., Davis, T. M., Dawson, K., de la Cruz-Noriega, R., de la Macorra, A., de Mattia, A., Della Costa, J., Demmer, P., Derwent, M., Dey, A., Dey, B., Dhungana, G., Ding, Z., Dobson, C., Doel, P., Donald-McCann, J., Donaldson, J., Douglass, K., Duan, Y., Dunlop, P., Edelstein, J., Eftekharzadeh, S., Eisenstein, D. J., Enriquez-Vargas, M., Escoffier, S., Evatt, M., Fagrelius, P., Fan, X., Fanning, K., Fawcett, V. A., Ferraro, S., Ereza, J., Flaugher, B., Font-Ribera, A., Forero-Romero, J. E., Frenk, C. S., Fromenteau, S., Gänsicke, B. T., Garcia-Quintero, C., Garrison, L., Gaztañaga, E., Gerardi, F., Gil-Marín, H., Gontcho A Gontcho, S., Gonzalez-Morales, A. X., Gonzalez-de-Rivera, G., Gonzalez-Perez, V., Gordon, C., Graur, O., Green, D., Grove, C., Gruen, D., Gutierrez, G., Guy, J., Hahn, C., Harris, S., Herrera, D., Herrera-Alcantar, H. K., Honscheid, K., Howlett, C., Huterer, D., Iršič, V., Ishak, M., Jelinsky, P., Jiang, L., Jimenez, J., Jing, Y. P., Joyce, R., Jullo, E., Juneau, S., Karaçaylı, N. G., Karamanis, M., Karcher, A., Karim, T., Kehoe, R., Kent, S., Kirkby, D., Kisner, T., Kitaura, F., Koposov, S. E., Kovács, A., Kremin, A., Krolewski, A., L'Huillier, B., Lahav, O., Lambert, A., Lamman, C., Lan, T.-W., Landriau, M., Lane, S., Lang, D., Lange, J. U., Lasker, J., Le Guillou, L., Leauthaud, A., Le Van Suu, A., Levi, M. E., Li, T. S., Magneville, C., Manera, M., Manser,C. J., Marshall, B., Martini, P., McCollam, W., McDonald, P., Meisner, A. M., Mena-Fernández, J., Meneses-Rizo, J., Mezcua, M., Miller, T., Miquel, R., Montero-Camacho, P., Moon, J., Moustakas, J., Mueller, E., Muñoz-Gutiérrez, A., Myers, A. D., Nadathur, S., Najita, J., Napolitano, L., Neilsen, E., Newman, J. A., Nie, J. D., Ning, Y., Niz, G., Norberg, P., Noriega, H. E., O'Brien, T., Obuljen, A., Palanque-Delabrouille, N., Palmese, A., Zhiwei, P., Pappalardo, D., PENG, X., Percival, W. J., Perruchot, S., Pogge, R., Poppett, C., Porredon, A., Prada, F., Prochaska, J., Pucha, R., Pérez-Fernández, A., Pérez-Ràfols, I., Rabinowitz, D., Raichoor, A., Ramirez-Solano, S., Ramírez-Pérez, C., Ravoux, C., Reil, K., Rezaie, M., Rocher, A., Rockosi, C., Roe, N. A., Roodman, A., Ross, A. J., Rossi, G., Ruggeri, R., Ruhlmann-Kleider, V., Sabiu, C. G., Gaines, S., Said, K., Saintonge, A., Catonga, J. S., Samushia, L., Sanchez, E., Saulder, C., Schaan, E., Schlafly, E., Schlegel, D., Schmoll, J., Scholte, D., Schubnell, M., Secroun, A., Seo, H., Serrano, S., Sharples, R. M., Sholl, M. J., Silber, J. H., Silva, D. R., Sirk, M., Siudek, M., Smith, A., Sprayberry, D., Staten, R., Stupak, B., Tan, T., Tarlé, G., Tie, S. S., Tojeiro, R., Ureña-López, L. A., Valdes, F., Valenzuela, O., Valluri, M., Vargas-Magaña, M., Verde, L., Walther, M., Wang, B., Wang, M. S., Weaver, B. A., Weaverdyck, C., Wechsler, R., Wilson, M. J., Yang, J., Yu, Y., Yuan, S., Yèche, C., Zhang, H., Zhang, K., Zhao, C., Zhou, R., Zhou, Z., Zou, H., Zou, J., Zou, S., Zu, Y., (2022), Overview of the instrumentation for the dark energy spectroscopic instrument, The Astronomical Journal, 164(5), 207.

4. Kollmeier, J., Zasowski, G., Rix, H.-W., Johns, M., Anderson, S., F., Drory, N., Johnson, J. A., MacDonald, N., Merloni, A., Ness, M. K., O'Brien, T., Sanchez-Gallego, J. R., Sayres, C. C., Shen, Y., Thakar, A. R., Tkachenko, A., Aerts, C., Blanton, M. R., Eisenstein, D. J, Holtzman, J. A., Maoz, D., Nandra, K., Rockosi, C., Weinberg, D. H., Bovy, J., Casey, A. R., Chaname, J., Clerc, N., Conroy, C., Eracleous, M., Gansicke, B. T., Hekker, S., Home, K., Kauffmann, J., McQuinn, K., Pellegrini, E. W., Schinnerer, E., Schlafly, E. F., Schwope, A. D., Seibert, M., Teske, J. K., Saders, J., (2019), SDSS-V pioneering panoptic spectroscopy, Bulletin of the American Astronomical Society.

5. Cirasuolo, M., Afonso, J., Carollo, M., Flores, H., Maiolino, R., Oliva, E., Paltani, S., Vanzi, L., Evans, C., Abreu, M., Atkinson, D., Babusiaux, C., Beard, S., Bauer, F., Bellazzini, M., Bender, R., Best, P., Bezawada, N., Bonifacio, P., Bragaglia, A., Bryson, I., Busher, D., Cabral, A., Caputi, K., Centrone, M., Chemla, F., Cimatti, A., Cioni, M,-R., Clementini, G., Coelho, J., Cronojevic, D., Daddi, E., Dunlop, J., Eales, S., Feltzing, S., Ferguson, A., Fisher, M., Fontana, A., Fynbo, J., Garilli, B., Gilmore, G., Glauser, A., Guinouard, I., Jammer, F., Hastings, P., Hess, A., Ibison, R.., Jagourel, P., Jarvis, M., Kaper, L., Kauffman, G., Kitching, A. T., Lawrence, A., Lee, D., Lemasle, B., Licausi, G., Lilly, S., Lorenzetti, D., Lunney, D., Mannucci, F., McLure, R., Minniti, D., Montgomery, D., Muschielok. B., Nandra, K., Navarro, R., Norberg, P., Oliver, S., Origlia, L., Padilla, N., Peacock, J., Pedichini, F., Peng, L., Pentericci, L., Pragt, J., Puech, M., Randich, S., Rees II, P., Renzini, A., Ryde, N., Rodrigues, M., Roseboom, I., Royer, F., Saglia, R., Sanchez, A., Schiavon, R., Schnetler, H., Sobral, D., Speziali, R., Sun, D., Stuik, R., Taylor, A., Taylor, W., Todd, S., Tolstoy, E., Torres, M., Tosi, M., Vanzella, E., Venema, L., Vitali, F., Wegner, M., Wells, M., Wild, V., Wright, G., Zamorani, G., Zoccali, M., (2014), MOONS: the multi-object optical and near-infrared spectrograph for the VLT, Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, 9147, 202-214.

6. Schubnell, M., Ameel, J., Besuner, R. W., Gershkovich, I., Hoerler, P., Kneib, J.-P., Heetderks, H. D., Silber, J. H., Tarlé, G., Weaverdyck, C., (2016), The DESI fiber positioner system, Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, 9908, 2715-2720.

7. Leitner, D., Aguilar, J., Ameel, J., Besuner, R., Claybaugh, T., Heetderks, H., Schubnell, M., Kneib, J.-P., Silber, J., Tarlé, G., (2018), Dark energy spectroscopic instrument (DESI) fiber positioner production, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III, 10706, 1790-1798.

8. Hörler, P., Kronig, L., Kneib, J.-P., Bouri, M., Bleuler, H., von Moos, D., (2018), High density fiber postitioner system for massive spectroscopic surveys, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 481(3), 3070-3082.

9. Fisher, C., Morantz, C., Braun, D., Seiffert, M., Aghazarian, H., Partos, E., King, M., Hovland, L. E., Schwochert, M., Kaluzny, J., Capocasale, C., Jouck, A., Gross, J., Reiley, D., Mao, P., Riddle, R., Bui, K., Henderson, D., Haran, T., Culhane, R., Piazza, D., Walkama, E., (2014), Developing engineering model cobra fiber positioners for the subaru telescope's prime focus spectrometer, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, 9151, 661-673.

10. Fisher, C. D., Braun, D. F., Kaluzny, J. V., Seiffert, M. D., Dekany, R. G., Ellis, R. S., Smith, R. M., (2012), Developments in high-density cobra fiber positioners for the subaru telescope's prime focus spectrometer, Modern Technologies in Space-and Ground-based Telescopes and Instrumentation II, 8450, 410-417.

11. Makarem, L., Kneib, J.-P., Gillet, D., Bleuler, H., Bouri, M., Jenni, L., Prada, F., Sanchez, J., (2014), Collision avoidance in next-generation fiber positioner robotic systems for large survey spectrographs, Astronomy & Astrophysics, 566, A84.

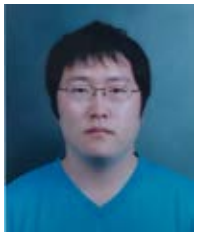
12. Sayres, C., Sánchez-Gallego, J. R., Blanton, M. R., Araujo, R., Bouri, M., Grossen, L., Kneib, J.-P., Kollmeier, J. A., Kronig, L., Pogge, R. W., Tuttle, S., (2021), SDSS-V algorithms: Fast, collision-free trajectory planning for heavily overlapping robotic fiber positioners, The Astronomical Journal, 161(2), 92.

13. Macktoobian, M., Gillet, D., Kneib, J.-P., (2019), Complete coordination of robotic fiber positioners for massive spectroscopic surveys, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 5(4), 045002.

14. Macktoobian, M., Araújo, R., Grossen, L., Kronig, L., Bouri, M., Gillet, D., Kneib, J.-P., (2021), Experimental evaluation of complete safe coordination of astrobots for Sloan Digital Sky Survey V, Experimental Astronomy, 51, 77-94.

15. Kim, S.-L., Lee, C.-U., Park, B.-G., Kim, D.-J., Cha, S.-M., Lee, Y., Yuk, I., Han, D., Chun, M.-Y., Yuk, I., (2016), KMTNET: a network of 1.6 m wide-field optical telescopes installed at three southern observatories, Journal of The Korean Astronomical Society, 49(1), 37-44.

Hyunho Lim
Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is high-precision machines and compliant mechanism.
E-mail: qwecsz@ajou.ac.kr



Jae-Woo Kim
Senior researcher at the Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interest is extragalactic astronomy.
E-mail: kjw0704@kasi.re.kr

Ho Seong Hwang
Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is high-precision machines, mass metrology and wearable mechatronics.
E-mail: galaxy79@snu.ac.kr

Sungwook Hong
Senior researcher at the Korea Astronomy and Space Science Institute and professor at the Astronomy Campus of the University of Science and Technology. His research interests include cosmology, large-scale structure, and astrobiology using cosmological simulations, artificial intelligence, and spectroscopic instrumentations.
E-mail: sungwook.e.hong@gmail.com

Jong Chul Lee
Staff scientist in the Galaxy Evolution Research Group at the Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include extragalatic astronomy and multi-wavelength observations.
E-mail: jclee@kasi.re.kr

Young-Man Choi
Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is high-precision machines, mass metrology and wearable mechatronics.
E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr