

# 대구경 비구면 연마를 위한 다관절 로봇의 경로 계획 및 제어

## Path Planning and Control of an Articulated Robot for Polishing Large Aspherical Surface

김 지 수\*, 이 원 창\*\*★

Ji-Su Kim\*, Won-Chang Lee\*\*★

### Abstract

Aspherical mirrors have lighter weight and better performance than spherical mirrors, but it is difficult to process their shape and measure the processing precision. Especially, large aperture aspherical mirrors mounted on satellites need high processing precision and long processing time. The computerized numerically controlled machine of gantry type has been used in polishing process, but it has difficulties in processing the complex shapes due to the lack of degrees of freedom. In order to overcome this problem we developed a polishing system using an articulated industrial robot. The system consists of tool path generating program, real-time robot monitoring, and control program. We show the performance of the developed system through the computer simulation and actual robot operation.

### 요 약

비구면 거울은 구형 거울보다 무게가 가볍고 성능이 우수하지만, 그 형상을 가공하고 가공 정밀도를 측정하는 것이 어렵다. 특히 위성에 사용되는 대형 조리개 비구면 미러는 높은 정밀도가 필요하고 처리하는 데 시간이 오래 걸린다. 기존의 연마 공정에는 갠트리 구조를 갖는 컴퓨터 수치 제어 공작기계가 사용되고 있으나, 자유도가 부족하여 복잡한 형상을 처리하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 다관절 산업용 로봇을 사용하는 연마 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 공구 경로 생성 프로그램, 실시간 로봇 모니터링 및 제어 프로그램으로 구성되며, 시뮬레이션 소프트웨어와 실제 로봇 작동을 통해 개발된 시스템의 성능을 검증하였다.

*Key words* : aspherical mirror, precision, polishing system, articulated robot, tool path

### 1. 서론

우주 산업에 사용되는 고품질의 대구경 비구면 거울은 정밀 연삭 및 연마공정을 통해 가공되기 때

문에 기존의 연삭 및 연마공정을 이용해서는 높은 정밀도와 생산성을 동시에 달성하는 것이 어려워 이 문제를 극복하려는 연구가 많이 진행되고 있다 [1]-[4]. 본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 다

\* ColubrisMX Korea

\*\* Dept. of Electronic Engineering, Pukyong National University

★ Corresponding author

E-mail : wlee@pknu.ac.kr, Tel : +82-51-629-6219

Manuscript received Dec. 9, 2019; revised Dec. 26, 2019; accepted Dec. 30, 2019.

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.

관절 로봇을 이용하여 연삭 및 연마공정을 보다 저렴하고 효율적으로 수행하는 시스템을 구현하고자 한다. 본 논문에서 사용된 FANUC 로봇은 6자유도(DOF)를 갖는 산업용 로봇으로 실제 산업 분야에서 널리 사용되는 상용 로봇이다[5]-[6]. 이 로봇을 제어하는 데에는 두 가지 방법이 있다. 첫째는 사용자가 명령을 직접 입력하고 G 코드 명령을 실행하면 로봇이 지정된 경로로 이동하는 것이다. 그러나 이 경우 연마를 위해 로봇의 세밀한 이동을 위해 많은 양의 이동점을 포함하는 G 코드 파일을 생성해야 하므로 상황에 따라 메모리가 부족할 수가 있다. 따라서, 본 논문에서는 6자유도 산업용 로봇을 직접 제어할 수 있는 소프트웨어 및 사용자 인터페이스를 PC에서 구현하고자 한다. 공구 경로 생성 알고리즘을 통해 공구 경로를 생성하고, 비구면 연마 알고리즘이 구현된 사용자 인터페이스를 이용하면 하드웨어 제어 성능의 효율을 향상시킬 수 있다[7]-[8]. 개발된 시스템의 작동을 검증하기 위해 임의의 형상 오차 데이터를 입력한 다음 로봇 시뮬레이터에 적용하여 시스템의 성능을 확인하였다.

## II. 본론

### 1. 공구 경로 생성

비구면 거울을 설계하려면 비구면 표면의 수학적 모델이 필요합니다. 비구면 거울의 일반식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$z(x,y) = \frac{C(x^2+y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k+1)C^2(x^2+y^2)}} + \sum_{i=1}^N A_i(x^2+y^2)^i \quad (1)$$

여기서  $z$ 축은  $x, y$ 축에 수직인 축이고  $C$ 는 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수이다.  $k$ 는 코닉 상수로 원추면에 따라 달라지고  $A_i$ 는 비구면 계수를 의미한다. 코닉 상수  $k$ 에 따라 표 1에 나타낸 바와 같이 비구면 방정식은 다양한 표면형상을 표현할 수 있다. 식 (1)은 평면에서 볼 때 나타나는 곡선을 나타내는 표현 식이다. 따라서,  $xz$ -평면과  $yz$ -평면에서 좌표를 생성하고 이들을 조합하여 삼차원 입체 형상을 생성한다.

Table 1. Surface type by conic constant.

표 1. 코닉 상수에 따른 표면 형상

Conic Constant	Surface Type
$k = 0$	Sphere
$k = -1$	Parabola
$-1 < k < 0$	Prolate Ellipse
$k > 0$	Oblate Ellipse
$k < -1$	Hyperbola

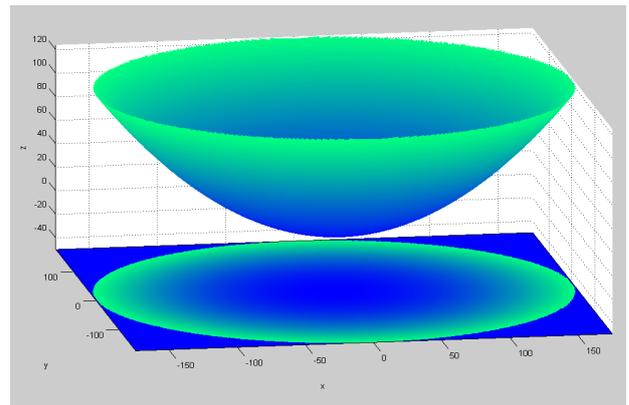


Fig. 1. Example of aspherical shape.

그림 1. 비구면 형상의 예

공구 경로를 생성할 때 연마 공구의 크기와 회전 반경을 고려해야 하는데 이는 연마 공구가 가공물의 범위를 벗어나지 않게 하기 위함이다. 연마 공구는 연마공구를 장착한 로봇의 end-effector의 중심을 기점으로 그림 2와 같이 공전을 하게 되는데 이를 바탕으로 공구 경로의 최대 반경을 구해낸다. 가공물의 반지름을  $D_{mirror}$  이라고 하고, 공구의 반지름  $D_t$ , 공전반경을  $R_{rev}$  라고 했을 때 공구 경로의 최대 반경  $R_{path}$  는 식 (2)와 같다.

$$R_{path} = D_{mirror} - (D_t + R_{rev}) \quad (2)$$

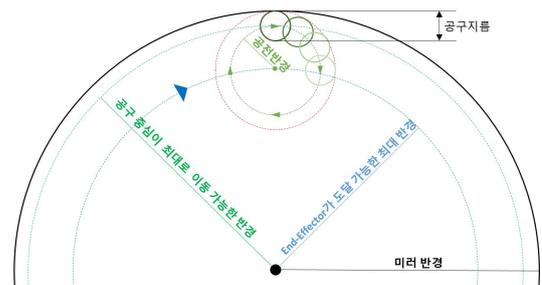


Fig. 2. Maximum radius of tool path.

그림 2. 공구 경로의 최대 반경

공구 경로의 생성 후 공구의 이동속도를 결정한다. 연삭량이나 연마량은 공구가 머무르는 시간에 비례한다고 가정하고 형상 오차에 따라 공구의 이동속도를 제어한다[9].

연마량은 공구가 머무르는 시간에 비례하는 것으로 가정되며, 공구의 이동속도는 기하학적 오차에 따라 제어된다. 사용자가 공구의 최소 이동속도와 최대 이동속도를 정의하면 평면의 특정 지점에서 기하 오차에 따라 공구 이동속도를 계산할 수 있다. 공구의 최소 및 최대 속도가 각각  $v_{min}$  및  $v_{max}$  로 정의되면, 공구의 이동속도  $v_{move}$  는 그림 3에 나타난 바와 같고, 이는 식 (3)으로 표현될 수 있다.

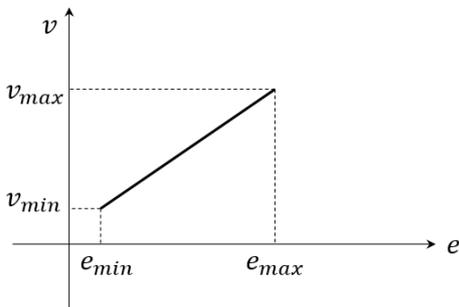


Fig. 3. Relationship between moving speed and geometric error.

그림 3. 이동속도와 기하학적 오차와의 관계

$$v_{move}(x,y) = \frac{v_{max} - v_{min}}{e_{max} - e_{min}} e(x,y) + v_{min} \quad (3)$$

공구 경로는 연마하는 로봇에 따라 좌표를 변환 해주어야 한다. 또한, 비구면의 기울기는 공구가 항상 비구면 형상에 수직으로 유지되도록 계산되어야 한다. 식(1)의 기울기는 식 (4)과 같이 얻어지며, 그림 4는 식 (1)에서  $N=4$ 일 때, 비구면 표면의 각 지점에서 기울기를 나타낸다.

$$\nabla z(x,y) = \left[ \frac{\partial z(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right] \quad (4)$$

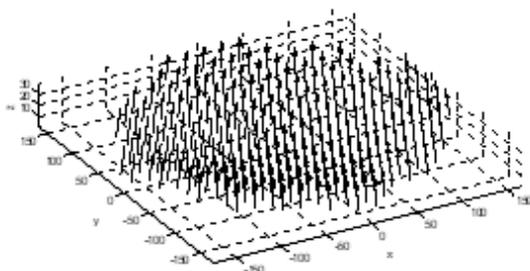


Fig. 4. Vectors normal to aspherical surface.

그림 4. 비구면 표면에 수직인 벡터

공구를 비구면 형상에 수직으로 유지하기 위해서는 그림 5와 같이 로봇팔의 end-effector에 달린 공구가 yaw, pitch 방향으로 회전하는 각도  $\theta_1, \theta_2$ 가 필요하다.

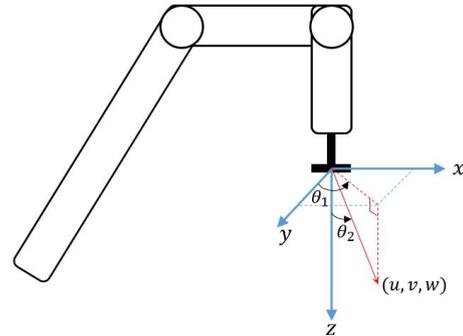


Fig. 5. End-effector coordinate system.

그림 5. 엔드 이펙터 좌표계

구현된 공구 경로 생성 프로그램에서 공구 경로 생성을 확인하기 위하여 임의의 형상 오차를 갖는 350mm 직경의 비구면 형상을 공구 경로 생성 프로그램에 입력하여 검증하였다. 그림 6은 나선형 스캔 방식을 사용하는 공구 경로 생성 프로그램의 사용자 인터페이스를 보여준다. 그림 4에서 보듯이 입력된 형상 오차를 시각적으로 표현할 수 있게 설계되어 있으며, 사용자는 나선형 혹은 래스터 스캔 방식을 선택하여 공구 경로를 생성할 수 있다.

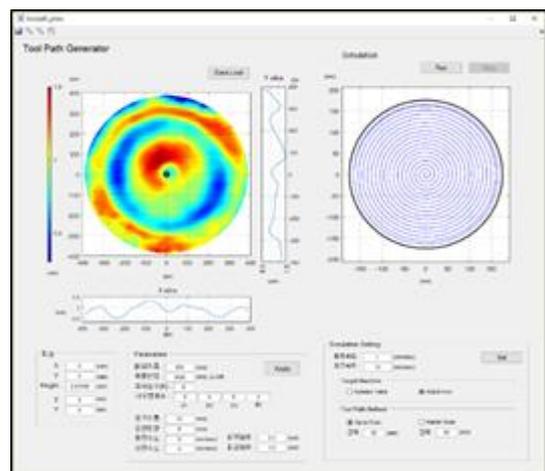


Fig. 6. User interface for tool path generator.

그림 6. 공구 경로 생성을 위한 사용자 인터페이스

## 2. 실시간 모니터링 및 제어 시스템

본 논문에서 사용하는 다관절 로봇은 FANUC Robotics社에서 생산된 R-2000ib 모델이다. 일반적

으로 로봇 모니터링과 제어는 Teach Pendant를 통해 이루어지며, 로봇이 새로운 작업을 요청할 때마다 새로운 프로그램을 만들어야 한다. 이러한 제어 방식은 단순하고 반복적인 작업에는 적합하지만, 상황에 따라 경로를 지속적으로 변경해야 하는 경우에는 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 PC에서 직접 로봇을 제어하고자 한다.

본 논문에서 사용되는 FANUC 다관절 로봇을 PC에서 모니터링하고 제어하기 위해서는 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 세 단계를 거쳐야만 한다. 먼저 PC 인터페이스 소프트웨어(PCIF)를 설치하여 FANUC社의 PC 기반 응용 소프트웨어 패키지인 PC Developers Tool Kit(PCDK)로 만든 사용자 정의 응용 프로그램과 이더넷을 통해 데이터를 교환할 수 있게 해야 한다[14-16]. PCDK는 PC와 FANUC 시스템 간의 정보 및 명령의 고성능 통신을 위한 프로그램을 개발하기 위한 소프트웨어 개발 환경으로 PCDK는 윈도우 애플리케이션이 빠르게 실행되는 개발 및 런 타임 환경을 구성해 주며, 기본적인 소스코드를 제공해준다. 본 연구에서 개발된 소스 코드는 Visual Studio C# 언어를 사용하여 개발되었으며, PCDK의 라이브러리 집합은 ActiveX 프레임 워크를 기반으로 하며 DLL 파일로 만들어져 있다.

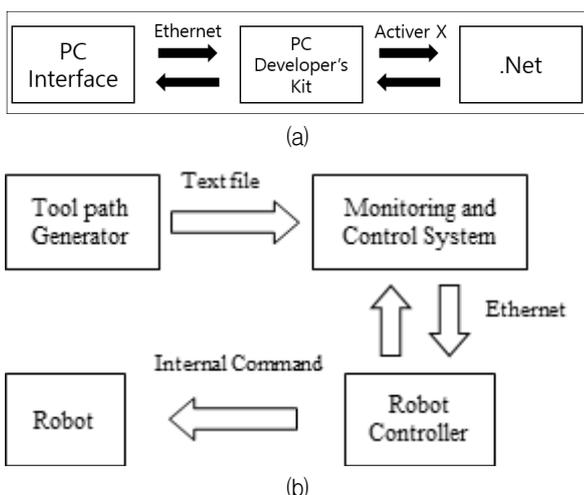


Fig. 7. Data flow diagrams in robot control system.  
 (a) Data flow between robot controller and PC  
 (b) Data flow of total system.

그림 7. 제어 시스템의 데이터 흐름도  
 (a) PC에서의 데이터 획득  
 (b) 전체 시스템의 데이터 흐름

그림 7(b)는 전체 시스템의 데이터 흐름을 보여준다. 공구 경로 생성기에서 생성된 공구 경로는 텍스트 파일로 모니터링 및 제어 시스템에 전송된다. 그다음 이더넷을 통해 로봇 제어 명령을 로봇 컨트롤러로 보내어 로봇을 제어한다. 로봇 컨트롤러는 이더넷 통신을 통해 로봇 제어를 지원한다. PCIF가 제공하는 라이브러리는 로봇의 상태, 로봇 컨트롤러의 현재 위치를 읽고 목표 위치를 설정하고 명령을 실행하는 데 사용된다.

그림 5는 로봇 모니터링 및 제어 시스템의 사용자 인터페이스이다. 사용자는 로봇의 현재 위치를 확인하고 로봇의 작동을 제어하기 위해 공구 경로를 로드 할 수 있으며, 프로그램을 통해 로봇의 작동 속도를 제어할 수 있습니다.

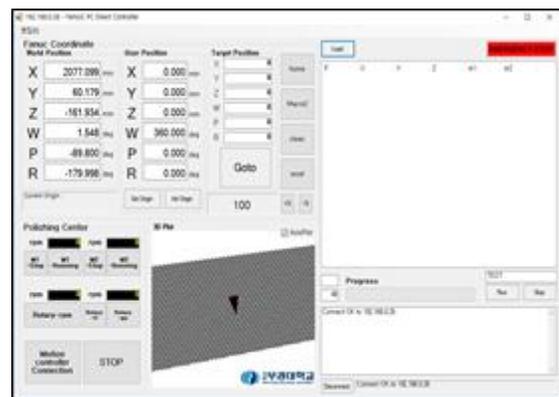


Fig. 8. User interface for robot monitoring and control system.  
 그림 8. 로봇 모니터링 및 제어 시스템의 사용자 인터페이스

### 3. 가상 환경

FANUC 로봇의 경우에는 그림 9와 같이 ROBOGUIDE를 통해 로봇의 움직임에 대한 시뮬레이션이 가능하다. FANUC社에서 제공되는 이 시뮬레이터는 오프라인 로봇 시뮬레이션 소프트웨어로 가상 로봇 제어를 사용하여 3차원 공간에서 로봇 제어 시스템을 설계하고 테스트할 수 있는 장점이 있다. 이 소프트웨어를 사용하면 실제 로봇을 사용할 때와 똑같은 통신 프로토콜이 적용되며, 부품, 공구 기계 및 작업 셀의 CAD 모델을 가져올 수 있다. ROBOGUIDE는 실제 Teach Pendant처럼 구성되어 작동되어 FANUC 로봇 시스템의 성능을 시뮬레이션할 수 있고 또한 사이클 시간 및 도달 범위를 평가하는 통합 가상 Teach Pendant도 포함한다. 본 연구에서는 개발된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 이 가상 환경을 이용하였다.

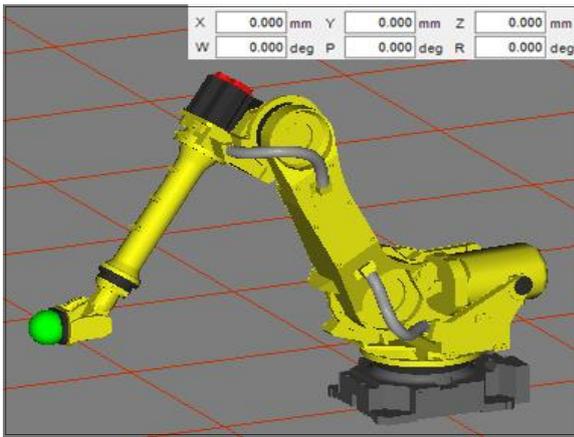
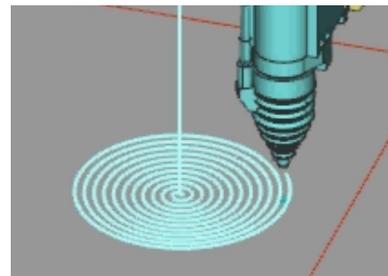
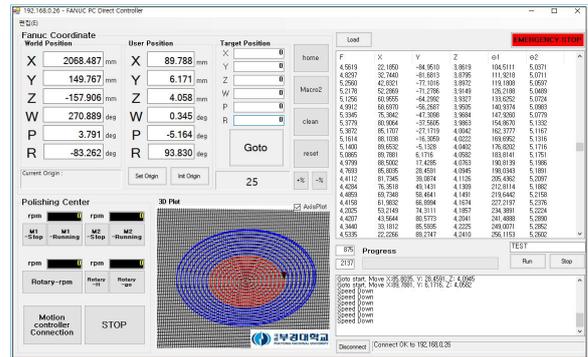


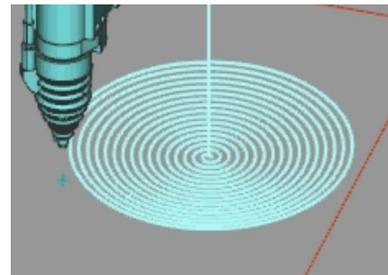
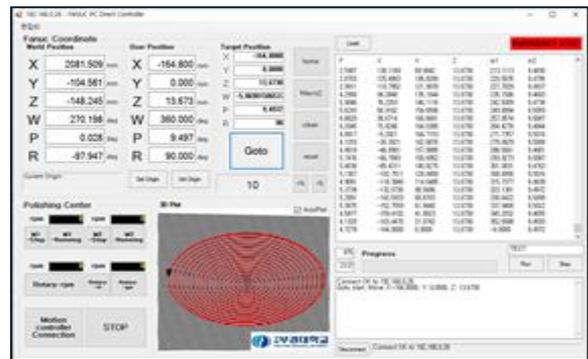
Fig. 9. Robot in virtual environment.  
그림 9. 가상환경에서의 로봇 구동

4. 실험 결과

그림 10는 연마가 진행되는 과정을 ROBO GUIDE를 사용하여 시뮬레이션한 결과이다. 이 실험에서는 나선형 스캔 방법을 사용하고 공구의 이동속도를 10mm/sec로 설정하였다. 그림 10(a)는 공구 경로를 입력한 후 연마가 시작되기 직전의 상태를 보여주고 있으며, 그림 10(b)는 연마 중인 상태, 그림 10(c)는 연마가 완성된 상태를 나타낸다. 붉은색으로 나타나는 부분은 연마가 완성된 부분이며 푸른색으로 나타난 부분은 연마해야 할 영역을 표시한다. 이 시뮬레이션을 통해 입력된 공구 경로와 실제 로봇의 경로가 일치함을 확인하였다.



(b)



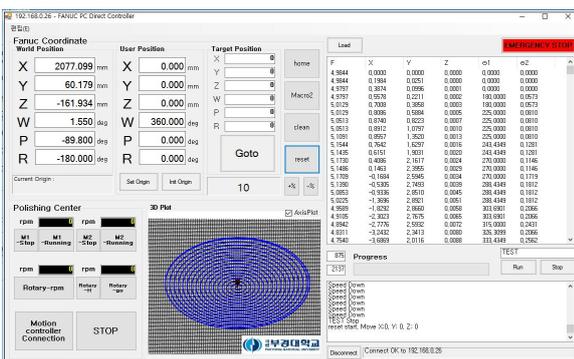
(c)

Fig. 10. Simulation results (a) Polishing start (b) During polishing (c) After polishing.

그림 10. 시뮬레이션 결과 (a) 연마 시작 (b) 연마 중 (c) 연마 완료

III. 결론

대구경 비구면 연마를 위해 다관절 로봇을 사용하였고 이를 효율적으로 모니터링하고 제어하기 위해 PC 기반의 경로 생성 및 제어 시스템을 구현하였다. 경로 생성 및 제어 시스템의 사용자 인터



(a)

페이스는 그래픽 인터페이스로 구현되었으며, 이를 이용하여 비구면에 적합한 공구 경로를 생성할 수 있을 뿐만 아니라, 사용자가 쉽게 가공 경로의 위치와 로봇의 end-effector의 위치를 확인할 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 시스템을 검증하였고 실험을 통해 성능과 보완점을 확인 및 개선하고자 한다. 본 논문 제안한 다관절 로봇을 사용하는 연마 시스템은 다양한 비구면 렌즈의 가공과 처리에 효율성을 부가함으로써 더 높은 성능과 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] T. Kuriyagawa, M. S. S. Zahmaty, and K. Syoji, "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.62, no.4, pp.387-392, 1996.  
DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02440-5
- [2] H. Suzuki, T. Kuriyagawa, K. Syoji, K. Tanaka, J. Yan, N. Wajima, K. Tanaka, J. Yan, N. Wajima, K. Tanaka, and I. Miyoshi, "Study on Ultra-precision Grinding of Micro Aspherical Surface (3rd Report)," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, vol.64, no.9, pp.1350-1354, 1998. DOI: 10.2439/jjspe.64.1350
- [3] S. Y. Baek, H. D. Lee, S. C. Kim, and E. S. Lee, "Development of Intelligent Grinding System for Aspherical Surface Machining," in *Proc. of the KSME Conference*, pp.1099-1104, 2004.  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.329.21
- [4] C. H. Park, C. K. Song, J. Hwang, and B. S. Kim, "Development of an Ultra Precision Machine Tool for Micromachining on Large Surfaces," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol.10, no.4, pp.85-91, 2009.  
DOI: 10.1007/s12541-009-0075-3
- [5] FANUC Corporation, "FANUC Robot R-2000iB Series," [https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robot/R-2000iB\(E\)\\_v08.pdf](https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robot/R-2000iB(E)_v08.pdf)
- [6] FANUC America Corporation, "FANUC R-30iB Controller Product Information," <https://www.fanucamerica.com/products/robots/controllers/other-fanuc-robot-controllers>
- [7] H. B. Chenga, Z. J. Fenga, K. Chengb, and Y. W. Wang, "Design of a Six-Axis High Precision Machine Tool and Its Application in Machining Aspherical Optical Mirrors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.45, no.9, pp.1085-1094, 2005.  
DOI: 10.1016/j.ijmactools.2004.11.018
- [8] W. Chen, J. M. Zhan, and M. Q. Zhang, "Study on Polishing Tool Contact Deformation for Large Robotic Aspheric Surface Compliant Polishing," *Advances in Mechatronics and Control Engineering II*, vol.433-435, pp.2058-2063, 2013.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.433-435.2058
- [9] H. Kim and H. Yang, and S. Kim, "A Study on the Control Method for the Tool Path of Aspherical Surface Grinding and Polishing," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol.23, no.1, pp.113-120, 2006.

## BIOGRAPHY

### Ji-Su Kim (Member)



2015 : BS degree in Electronic Engineering, Pukyong National University.

2017 : MS degree in Electronic Engineering, Pukyong National University.

2018~2019: ColubrisMX Korea

### Won-Chang Lee (Member)



1983 : BS degree in Instrumentation and Control Engineering, Seoul National University.

1985 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, KAIST.

1992 : PhD degree in Electronic and Electrical Engineering, POSTECH.

1993~2019 : Professor, Pukyong National University