

# LabVIEW<sup>®</sup>를 이용한 6축 수직 다관절 로봇의 퍼지 로직이 적용된 게인 스케줄링 프로그래밍에 관한 연구

강석정\*, 정원지\*\*,#, 박승규\*\*\*, 노성훈\*\*\*\*

\*창원대학교 대학원, \*\*창원대학교 기계공학부, \*\*\*창원대학교 전기공학부, \*\*\*\*(주)영창로보테크

## A Study on Gain Scheduling Programming with the Fuzzy Logic Controller of a 6-axis Articulated Robot using LabVIEW<sup>®</sup>

Seok-Jeong Kang\*, Won-Jee Chung\*\*,#, Seung-Kyu Park\*\*\*, Sung Hun Noe\*\*\*\*

\*Graduate School of Mechanical Engineering, Changwon National UNIV.,

\*\*School of Mechanical Engineering, Changwon National UNIV.,

\*\*\*School of Electrical Engineering, Changwon National UNIV., \*\*\*\*Youngchang Robo-tech

(Received 30 June 2017; received in revised form 20 July 2017; accepted 22 July 2017)

### ABSTRACT

As the demand for industrial robots and Automated Guided Vehicles (AGVs) increases, higher performance is also required from them. Fuzzy controllers, as part of an intelligent control system, are a direct control method that leverages human knowledge and experience to easily control highly nonlinear, uncertain, and complex systems. This paper uses a LabVIEW<sup>®</sup>-based fuzzy controller with gain scheduling to demonstrate better performance than one could obtain with a fuzzy controller alone. First, the work area was set based on forward kinematics and inverse kinematics programs. Next, LabVIEW<sup>®</sup> was used to configure the fuzzy controller and perform the gain scheduling. Finally, the proposed fuzzy gain scheduling controller was compared with to controllers without gain scheduling.

**Key Words :** Gain Scheduling(게인스케줄링), 6-axis Articulated Robot(6축 다관절로봇), AGV(무인운반차), Fuzzy Gain Tuning(퍼지 게인튜닝), LabVIEW<sup>®</sup> Programming(랩뷰 프로그래밍)

## 1. 서 론

최근 산업용 로봇 또는 AGV(Automated Guided Vehicle)의 수요는 점점 증가하는 추세이고, 적용 분야와 범위가 확대되고 있으며 더욱 향상된 성능이 요구됨에 따라 고차원적인 로봇 또는 AGV의 제어 기술도 개발되어지고 있다<sup>[1]</sup>.

퍼지 제어기는 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로, 비선형이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 장점을 가진다. 퍼지 제어를 PID제어에 접목하면, 비선형적이고 고차원적인 시스템을 보다 높은 응답성으로 제어할 수 있다. 특히, 산업 현장에서 복잡한 기능을 수행하는 AGV에도 Fuzzy PID 제어를 적용할 경우 기존 제어 기법에 비하여 향상된 성능을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 LabVIEW 프로그래밍을 이용하

# Corresponding Author : wjchung@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3624, Fax: +82-55-263-5221

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <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.



Fig. 1 RS2 system with servo driver and PXI® equipment

여 6축 다관절 로봇(연구실 자체 제작이며 ‘RS2’라고 불림, Fig. 1 참조)의 순기구학 및 역기구학을 포함한 기구학 분석을 개인 스케줄링에 포함하였다.

본 연구의 순서는 다음과 같다. 작업 영역을 순기구학 및 역 기구학 프로그램을 통하여 설정하고, LabVIEW®를 이용하여 퍼지 제어를 구성한 뒤 개인 스케줄링을 실시하며 퍼지 개인 스케줄링의 응답성 결과를 개인 스케줄링을 실시하지 않았을 때의 응답성 결과와 비교한다.

## 2. 순 기구학과 역 기구학

### 2.1 순 기구학

순 기구학에서는 각 링크의 길이와 각 관절의 각도가 주어지면 로봇의 모든 점의 위치를 계산하며, 로봇의 엔드 이펙터의 위치( $X, Y, Z$ ) 및 방향( $\alpha, \beta, \gamma$ )을 계산한다. Fig. 2는 LabVIEW®로 구현한 순 기구학 솔루션의 블록 다이어그램의 일부를, Fig. 3은 프런트 패널을 나타낸다. 동질의 변환 행렬  ${}^0_6T$ 을 통해 각 조인트의 입력 각에 해당하는 엔드 이펙터의 위치와 방향을 계산한다. 이 순기구학 루틴은 종종 RS2용 보간 프로그램에서 호출된다<sup>[2]</sup>.

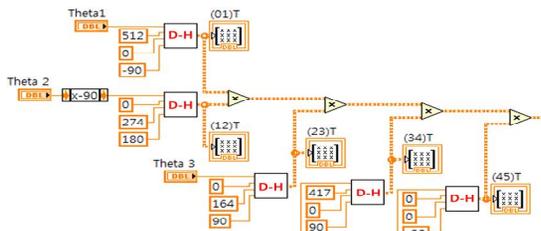


Fig. 2 Block diagram of forward kinematics program

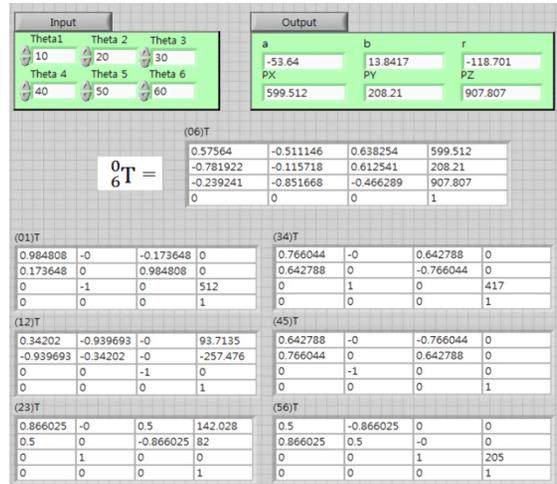


Fig. 3 Front panel of forward kinematics program

### 2.2 역 기구학

역 기구학에서는 각 링크의 길이와 점의 위치가 주어질 때, 각 관절의 각도를 계산하며, 6자유도( $X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$ )의 입력 값에 해당하는 관절 각을 계산한다. Fig. 2는 LabVIEW®로 구현한 역 기구학 솔루션의 블록 다이어그램의 일부를, Fig. 3은 프런트 패널을 나타낸다. 역 기구학 프로그램은 Sub VI로서 보간 프로그램에 연결되며, 보간 프로그램에서 역 기구학 프로그램은 샘플링 시간(a few milliseconds)마다 각 관절의 각도를 계산한다.

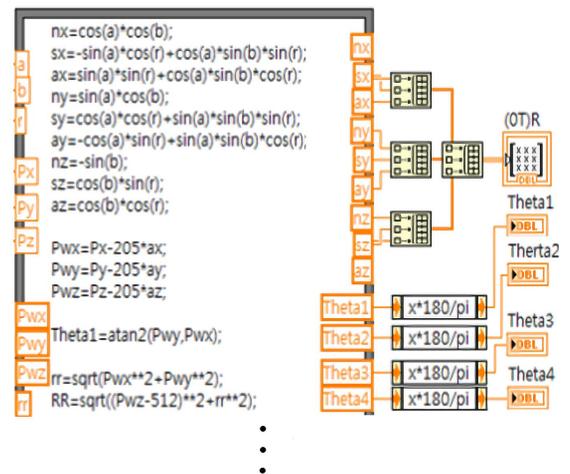


Fig. 4 Block diagram of inverse kinematics program

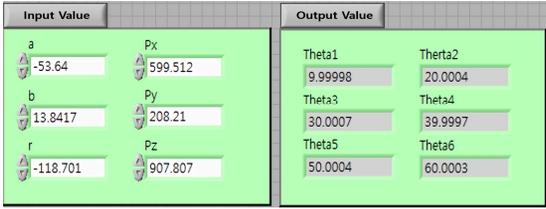


Fig. 5 Front panel of inverse kinematics program

### 3. 게인 튜닝 파라미터

#### 3.1 속도 제어 루프의 비례 이득( $K_V$ )

파라미터 조정은 내부 루프부터 실시하는 것이 효율적이고, 속도 제어 루프에서 위치 제어 루프 순으로 조정을 실시해나감에 비례이득 값( $K_V$ )에 대하여 제일 먼저 조정을 실시한다. 폐루프의 보테 선도(Bode Plot)를 이용해 개루프 전달함수의 보테 선도로 바꿀 수 있으며, 변환된 개루프 전달함수의 보테 선도로부터 이득여유와 위상여유를 구하고 비례 이득 선정 기준으로 삼는다.

이득 여유는 -6dB ~ -20dB 이어야 하고 위상 여유는 45도 이상이어야 한다. 따라서 구해진 비례 이득 값을  $K_V$ 라고 하며 응답성을 향상시키기 위하여 이득 여유를 -6dB이 되도록 식 (1)을 이용한다.

$$20 \log x = (-6 \text{ dB}) - (-a \text{ dB})$$

$$x = 10^{\frac{-6 - (-a)}{20}} \quad (1)$$

$$K_V' = x K_V$$

#### 3.2 속도 제어 루프의 적분 이득( $K_I$ )

적분 이득 값( $K_I$ )은 적분 시정수( $T_i$ )에 의해 결정되는데, Fig. 6의 블록선도를 통해 적분기의 개루프

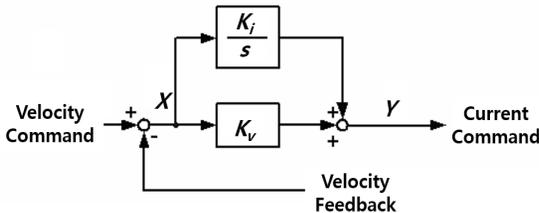


Fig. 6 Block diagram for finding integral gain

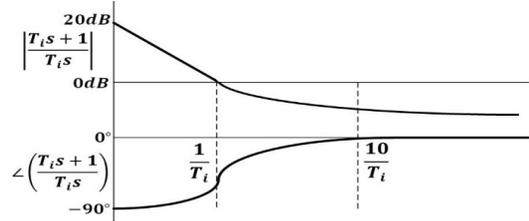


Fig. 7 Bode plot of open loop transfer function

전달함수를 얻을 수 있다. Fig. 7을 통해 전달함수의 보테 선도 특성은  $T_i$ 가 계산된 지점의 10배에서 위상이 0으로 근접한다. 입력  $X$ (속도 명령 - 속도 피드백)와 출력  $Y$ (전류 명령) 사이의 블록 다이어그램을 이용하여 전달함수  $G_{VO}$ 를 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$G_{VO} = \frac{Y}{X} = \left( \frac{K_I}{s} + K_V \right)$$

$$= K_V \left( \frac{\frac{K_V}{K_I} s + 1}{\frac{K_V}{K_I} s} \right) = K_V \left( \frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (2)$$

#### 3.3 위치 제어 루프의 비례 이득( $K_P$ )

위치 제어 루프의 비례 이득 값( $K_P$ )이 클수록 서보 시스템의 응답성은 향상되나 로봇 암의 진동이 커지게 된다. Fig. 8과 같이 앞서 구한 폐루프 전달함수의 보테 선도에서 이득이 -3dB되는 곳에 위치하고 있으며 이 지점을 Cut-Off Frequency라 한다.

최종적으로 식 (3)으로  $K_P$ 를 조정한다. 여기서 감쇠비( $\zeta$ )는 실험적으로 구해지는 값이며 일반적으로 산업용 로봇의 경우 0.707의 값을 사용한다.

$$K_P = \frac{\pi f_c}{2\zeta^2} \quad (3)$$

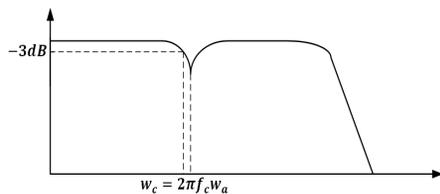


Fig. 8 Bode diagram of closed loop transfer function

## 4. 퍼지 게인 스케줄링

### 4.1 퍼지 인터페이스

일반적인 제어기의 전달함수의 형태는 식 (4)와 같다.

$$K(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} \equiv \frac{u(s)}{e(s)} \quad (4)$$

여기서  $u(s)$ 는 입력이고  $e(s)$ 는 기준 값과 출력 값 사이의 오차이다. 사용된 제어기의 구조는 Fig. 9와 같다. 게인 파라미터  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_V$  는 식 (5)를 만족 시킨다고 가정하였다.

$$K_{j\min} \leq K_j \leq K_{j\max} \quad (j = P, I, V) \quad (5)$$

편의를 위해서  $K_j$ 는 식 (6)과 같은 선형 변환에 의해 정규화 시켰다.  $K_j^n$ 은 0과 1 사이의 범위이다.

$$K_j^n = \frac{K_j - K_{j\min}}{K_{j\max} - K_{j\min}} \quad (j = P, I) \quad (6)$$

### 4.2 퍼지 룰과 멤버십 함수

이제  $\{K_P^n, K_I^n, K_V^n\}$ 은 식 (7)과 같은 퍼지 룰에 의하여 결정된다.

If  $e(t)$  is  $A_i$  and  $\dot{e}(t)$  is  $B_i$ , then  $K_P^n$  is  $C_i$ ,  $K_V^n$  is  $D_i$ , and  $K_I^n$  is  $E_i$ , for  $i = 1, 2, \dots, N$  (7)

여기서  $A_i$ ,  $B_i$ 의 값은 퍼지 집합의 일반적인 삼각형 멤버십 함수에 의해 결정된다.  $e(t)$ ,  $\dot{e}(t)$ 에 대한 퍼지 집합의 멤버십 함수는 Fig. 10과 같다.

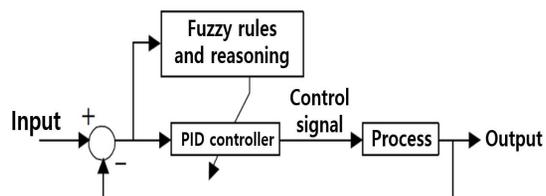


Fig. 9 Gain scheduler's controller structure

$$\mu_s(x) = -\frac{1}{4} \ln(x) \quad (8)$$

$$\mu_B(x) = -\frac{1}{4} \ln(1-x) \quad (9)$$

$C_i$ ,  $D_i$ ,  $E_i$ 의 퍼지 집합은 식 (8)과 식(9)에 의해 B(big) 또는 S(small)로 결정된다.

본 논문에서 사용한 퍼지 룰은 다음과 같다. 응답에 도달하기 위해 큰  $K_V$ 값과 작은  $K_P$ 값, 그리고 큰  $K_I$ 값을 가져야 하며, 초과 응답의 경우 작은  $K_V$ 값, 큰  $K_P$ 값, 작은  $K_I$ 값을 가져야 한다. 이에 대한 퍼지 룰 테이블은 Table 1과 같다.

식 (7)에서  $i$ 번째 룰의 실제 값  $\mu_i$ 는 식 (10)과 같이 가정되는 부분에서의 멤버십 함수의 곱에 의해 구해진다.

$$\mu_i = \mu_{A_i}(e(t)) \times \mu_{B_i}(\dot{e}(t)) \quad (10)$$

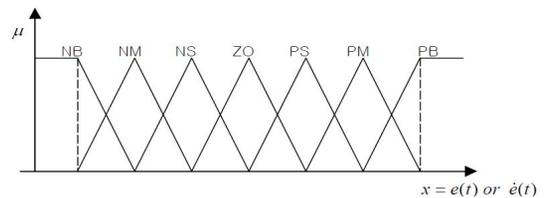


Fig. 10 Membership function for  $e(t)$  and  $\dot{e}(t)$

Table 1 Fuzzy rule table

		$e(t)$					
		NB	NS	ZE	PS	PB	
$\dot{e}(t)$	NB	NB	NB	NS	NS	ZE	
	NS	NB	NS	NS	ZE	PS	
	NE	NS	NS	ZE	PS	PS	
	PS	NS	ZE	PS	PS	PB	
	PB	ZE	PS	PS	PB	PB	

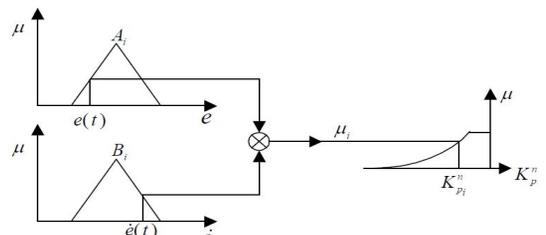


Fig. 11 Progress of fuzzy rule

여기서  $\mu_{A_i}$ 는 주어진  $e(t)$ 에 대한 퍼지 집합  $A_i$ 의 멤버십 함수의 값이고 또한  $\mu_{B_i}$ 도 주어진  $\dot{e}(t)$ 에 대한 퍼지 집합  $B_i$ 의 멤버십 함수의 값이다. 식 (10)을 따라 각각의 룰에 대해서  $\{K_P^n, K_I^n, K_V^n\}$ 의 값이 결정 된다. 이 과정을 도식적으로 나타낸 그림이 Fig. 11이다.

또한 Fig. 10과 같은 멤버십 함수가 사용됨으로서 식 (11)과 같은 조건이 따르고, 비퍼지화 부분에서는 식 (12)와 같은 조건이 따른다.

$$\sum_{i=1}^N \mu_i = 1 \quad (11)$$

$$K_j^n = \sum_{i=1}^N \mu_i K_{ji}^n \quad (j = P, I, V) \quad (12)$$

$\{K_P^n, K_I^n, K_V^n\}$ 이 결정되면 PID제어기의 계수는 식 (5)와 식 (6)에 의한 식(13)에 의해 계산된다.

$$K_j = (K_{j\max} - K_{j\min})K_j^n + K_{j\min} \quad (j = P, I, V) \quad (13)$$

### 4.3 게인 튜닝 수행 및 속도 응답의 비교

식 (12)를 바탕으로 LabVIEW®를 이용하여 Fuzzy Logic을 적용한 Fuzzy PID 제어기를 구성하였다.

좌표를 입력하면 각 관절의 각도를 계산하며 이동하고, 해당 좌표로 이동 시 이동경로에 해당하는 Subspace에서 Fuzzy PID로 제어되며 이동하게 된다.

성능 검증을 위하여 RS2에 0.5Vrms로 속도명령을 인가하였다. Fig 12와 같이, RS2가 A에서 B로 이동하는 경로(로봇이 이동하는 경로) 내의 무작위 점 C에서의 응답을 비교한다.

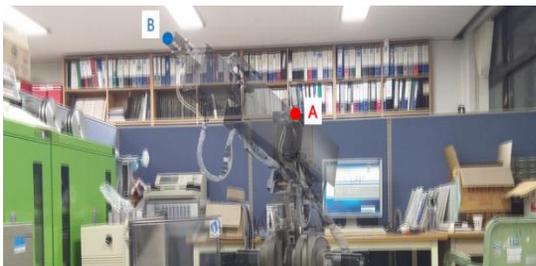


Fig. 12 Coordinated motion on RS2

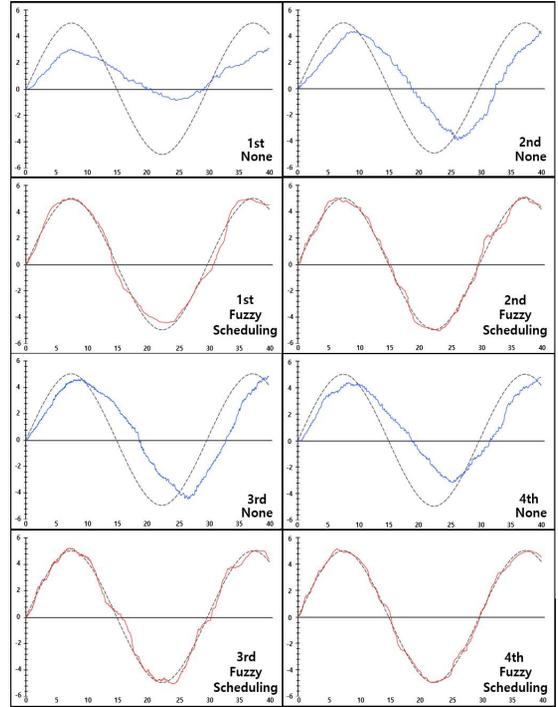


Fig. 13 Comparison of velocity response levels

Fig. 13은 게인 스케줄링을 적용하기 전과 퍼지 게인 스케줄링을 적용한 후의 1, 2, 3, 4축의 속도 응답을 측정하여 응답오차를 비교한 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 로봇의 다양한 동작을 자동으로 스케줄링하며, 퍼지 PID 제어를 통해 높은 응답성을 가지는 LabVIEW® 프로그래밍에 대하여 연구하였다. PID 게인 변수들을 이용하여 퍼지 룰과 멤버십 함수를 구성하고, 퍼지 게인 스케줄링을 LabVIEW® 프로그래밍으로 구현하였다. 성능을 검증하기 위해 게인 스케줄링을 적용하지 않은 경우와 퍼지 게인 스케줄링 프로그래밍을 적용한 경우의 속도 응답을 비교하였으며, 게인 스케줄링을 적용하지 않았을 때보다 더 나은 속도 응답을 보여주었다. 본 연구의 결과는 산업용 로봇, 나아가서 고차원적인 산업용 AGV의 제어에 대한 연구에 도움이 될 것으로 사료된다.

## 후 기

“이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(No. 2016-0143)”

## REFERENCES

1. Kim, S. B., Chung, W. J. and Kim, H. G., “Application of LabView<sup>®</sup>-Based Parameter Scheduling Programming for a 6-Axis Articulated Robot”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 327-333, 2015.
2. Kim, M. S., Chung, W. J. and Kim, S. B., “Gain Scheduling in a 6-Axis Articulated Robot Based on LabVIEW<sup>®</sup>”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 23, No. 3, pp. 318-324, 2014.
3. Jung, C. D., Chung, W. J. and Ahn, J. S., “A Study of 6-Axis Articulated Robot Gain Tuning”, Proceedings of the KSMTE Autumn Conference, pp. 236, 2011.
4. Ko, C. M., Park, S. K. and Lim, J. H. and Chung, W. J. and Kim, D. H. and Chung, G. J., “A Study on the PI Control Parameter Gain Tuning of Heavy Duty Handling Robot”, Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Spring Conference, pp. 469-470, 2008.
5. Ahn, S. W., “Design of autoland guidance control system using optimization of fuzzy logic gain scheduler”, A Thesis for a Master, Ulsan University, Republic of Korea, 2004.
6. Kuo, B. C., “Automatic control system”, Prentice-Hall, pp. 448-467, 1991.
7. Haugen, F., “PID Control of Dynamic Systems”, Intel Specialized Book Service Inc, 2004.
8. Ahn, J. S., “A study on Orientations Interpolation of 6-Axis Articulated Robot using Quaternion”, A Thesis for a Master, Changwon National University, Republic of Korea, 2011.
9. Choo, Y. G., “A Study on Designing Autonomous Parking Assistance using Fuzzy Controller”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 1, pp. 70-76, 2013.
10. Lim, J. U., Lee, S. J. and Chai, C. H., “Trajectory Tracking Control for Two Wheeled Mobile Robot using Fuzzy Sliding Mode Control based Hyperbolic Function”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 28-34, 2014.