

오프라인 프로그래밍에서 스카라 로봇의 보정

SCARA Robot Calibration on Off-Line Programming

°정성우*, 손권*, 이민철**, 최재원***

*부산대학교 기계공학과 (Tel: 051-510-2308; Fax: 051-512-9835; E-mail: kson@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

**부산대학교 기계공학과 (Tel: 051-510-2439; Fax: 051-512-9835; E-mail: mclee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

***부산대학교 기계공학과 (Tel: 051-510-2470; Fax: 051-514-0685; E-mail: choijw@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

Abstracts Off-line programming systems are widely spread in assembly lines of minute electronic products to huge offshore structures. Any OLP system has to be calibrated before the on-line robot tasks are performed because there are inherent differences between the CAD model on OLP and the real robot workspace. This paper uses simple geometric expressions to propose a calibration method applicable to an OLP for SCARA robots. A positioning task on the two-dimensional horizontal surface was used in the error analysis of a SCARA robot and the analysis shows that the inaccuracy results from the two error sources: non-zero offset angles of two rotational joints at the zero return and differences in link lengths. Pen marks on a sheet of plotting paper are used to determine the accurate data on the joint centers and link dimensions. The calculated offset angles and link lengths are fed back to the OLP for the calibration of the CAD model of the robot and task environments.

Keywords Robot Calibration, Off-Line Programming(OLP), SCARA Robot, Offset Angle, Absolute Position Accuracy

1. 서론

생산 라인에서 온라인으로 로봇의 작업을 일일이 교시하는 것은 상당한 시간과 노력 그리고 숙련된 기술을 필요로 한다. 따라서 자주 변하는 작업과 환경에 능동적으로 대처하기가 어렵고, 최적 경로의 해석이 곤란하여 비효율적인 교시가 되기 쉽다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 컴퓨터 상에서 모델링된 로봇과 작업 환경을 이용하여 효율적인 로봇 프로그램을 신속하게 생성하는 오프라인 프로그래밍 기법이 도입되고 있다. 그러나 오프라인으로 작성된 프로그램을 실제의 로봇에 적용하기 위해서는 로봇과 작업 환경에 대한 정확한 모델 파라미터 및 형상정보를 찾는 보정의 과정이 필수적이다[6]. 1980년대 중반 컴퓨터 통합 생산에 대한 관심이 증가하면서 로봇의 보정에 관한 연구가 시작되었는데 대부분 부분적인 연구였다[1-5]. Everitt 등[3]과 Roth 등[4]은 연속된 두 좌표계 사이의 기구학적 관계식에서 완전조건(completeness condition)을 만족하기 위해 필요한 최소의 모델 파라미터 개수를 나타내는 관계식을 정립하였다. 한 쌍의 좌표계를 정의하는데 4개의 파라미터를 사용하는 Denavit-Hartenberg(D-H) 모델은 상기의 관계식을 만족하므로 Judd와 Knasinski[5]는 D-H 모델을 사용하였다. 그러나 Mooring과 Tang[1]은 D-H 모델이 두축이 거의 평행할 때 불연속이 일어나 보정을 위한 기구 모델로서 부적절함을 보여 주었고, D-H 모델을 변형시켜 5개나 6개의 파라미터를 사용하는 기구 모델들도 제안되었다. 또한 Whitney 등[2]은 기하학적인 파라미터뿐 아니라 처짐, 기어 백래쉬 등의 비기하학적 파라미터를 포함시키기도 하였다. 이러한 연구는 대부분 로봇 단말 효과기의 위치와 방향을 정확히 측정할 수 있다는 가정 하에 고가의 3차원 측정 장비를 이용하였다.

본 연구에서는 고기능 조립용 스카라 로봇을 오프라인으로 교시하는 과정에서 로봇의 절대 위치 오차를 유발하는 원인을

분석하고, 이를 제거하여 컴퓨터 상의 가상 작업과 실제 작업을 일치시키는 보정 방법을 제안하고자 한다. 특히 관절 1과 2의 영점 위치 오프셋 각과 링크 1과 2의 길이를 간단한 기하학적 방법으로 측정하고, 이를 OLP 소프트웨어에 반영하여 평면상에서 로봇의 절대 위치 정도를 향상시키는데 초점을 맞춘다. 측정된 링크길이를 D-H 모델의 기구학에 반영하고 오프셋 각으로 오차를 보정한 기준 관절값을 생성한다. 또한 보정 전후의 위치 오차를 비교함으로써 절대 위치의 정도를 평가하였다.

2. 시스템 구성

하드웨어는 호스트 컴퓨터(Pentium 100 MHz), 4관절 스카라 로봇(삼성 FARA SM5), 4개의 서보 드라이버(삼성 FARA CSD), 그리고 4개의 DSP(TMS320C50)를 사용하는 독립적인 관절 제어기와 인터페이스 보드로 구성되며, 그림 1과 같이 로봇

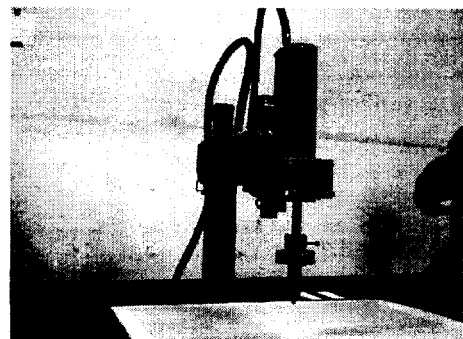


그림 1 보정에 사용된 스카라 로봇
Fig. 1 SCARA robot used in calibration

끝단에 펜을 설치하여 모눈종이 위에 표시할 수 있도록 하였다. OLP 소프트웨어는 DOS용으로 C언어를 사용하여 개발하였으며, 표시, 계획 계획, 제어 시뮬레이션, 온라인 구동, 성능 평가 등의 기능[7]에 보정 기능을 추가하였다. 32 kB의 전역 메모리를 사용하는 메모리 맵 I/O 인터페이스를 통해 관절 제어기와 실시간 통신이 가능하며 I/O 맵 I/O 인터페이스로 각종 신호를 주고 받는다(그림2).

3. 로봇 사양의 측정

삼성전자의 SM5 스카라 로봇은 각 관절의 위치 센서로서 증분형 엔코더를 사용한다. 따라서 각 관절의 영점 위치를 찾는 영점 복귀 과정이 필수적인데 이 과정에서 관절 1과 2는 모델링된 로봇의 영점 위치와 차이를 나타낸다(그림 3). 이러한 오프셋 각은 모델링된 로봇에서 생성된 기준 궤적을 로봇 제어기에 보내었을 때 단말 효과기가 원하는 절대 위치로 가지 못하는 일차적인 원인으로 작용한다. 따라서 영점 복귀 시의 관절 1과 2의 오프셋 각을 측정하여 그 각도만큼을 미리 보상한 관절 위치로 기준 궤적을 생성하면 이를 극복할 수 있다.

오차의 또다른 원인은 모델링에서 사용된 링크 1과 2의 길이가 실제 로봇과 다르다는 점인데, 이를 측정하여 모델링된 로봇의 기구학에 반영하면 보다 나은 절대 위치 정밀도를 얻을 수 있다.

위의 두 가지를 동시에 측정하는 간단한 방법으로 로봇을 영점 복귀한 후 관절 1과 2를 회전시켜 원주상의 세 점을 작도하는 방법을 사용하였다(그림 4). 이때 로봇의 좌표계는 작업 대상이 되는 모눈종이의 좌표계와 평행하도록 잡으며, 로봇 끝단의 수직 위치는 로봇의 좌표계를 기준하여 358 mm, 즉 관절 3이 영점 위치에서 70 mm 아래로 이동한 위치를 선정하였다. 측정에 사용된 각 관절 위치와 측정 결과를 표 1에 나타내었으며 모눈 좌표값은 모눈종이의 좌표계를 기준한 것이다.

표 1 측정에서 얻어진 좌표

Table 1 Coordinates experimentally obtained

	측정값 (mm)	관절 1 (deg)	관절 2 (deg)
(x_{00}, y_{00})	(174.8, -294.0)	0	0
(x_{01}, y_{01})	(160.1, -83.9)	20	0
(x_{02}, y_{02})	(115.5, -497.9)	-20	0
(x_{03}, y_{03})	(89.3, -49.1)	0	60
(x_{04}, y_{04})	(4.0, -491.5)	0	-60

위에서 측정된 좌표들을 원의 방정식에 대입하여 링크 1과 2의 모눈종이 상의 회전 중심 (x_1, y_1) 과 (x_2, y_2) 를 구하였다.

$$(x_{00} - x_1)^2 + (y_{00} - y_1)^2 = r_1^2 \quad (1)$$

$$(x_{01} - x_1)^2 + (y_{01} - y_1)^2 = r_1^2 \quad (2)$$

$$(x_{02} - x_1)^2 + (y_{02} - y_1)^2 = r_1^2 \quad (3)$$

식 (1)~(3)을 연립하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있으며, $x_1 = -424.3$, $y_1 = -230.4$, $r_1 = 602.4$ 를 얻었다.

$$x_1 = \frac{B_{21}C_{10} - B_{10}C_{21}}{2(A_{10}B_{21} - A_{21}B_{10})} \quad (4)$$

$$y_1 = \frac{C_{10} - 2x_1A_{10}}{2B_{10}} \quad (5)$$

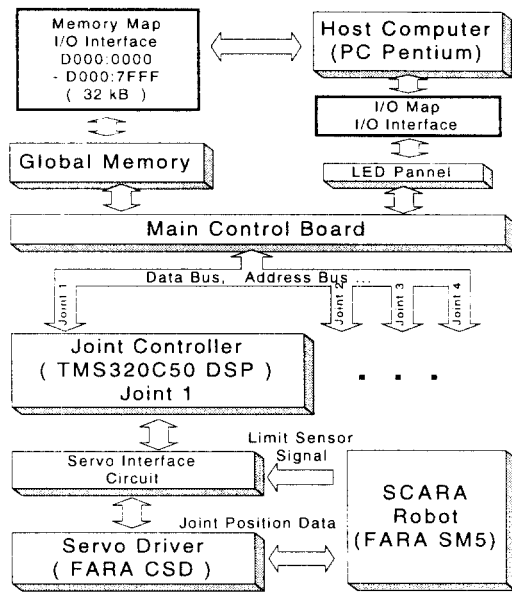


그림 2 OLP 시스템의 전체 구성도
Fig. 2 Overall structure of the OLP system

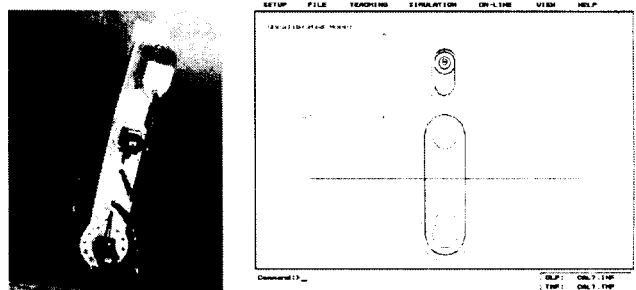


그림 3 실제 로봇과 모델링된 로봇의 영점 위치
Fig. 3 Zero positions of the real world and OLP

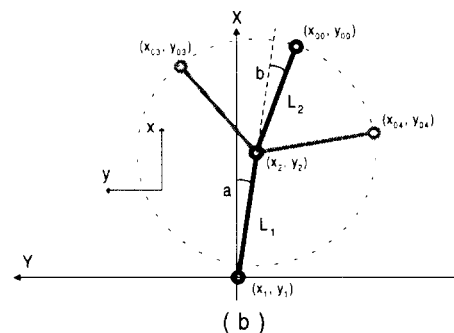
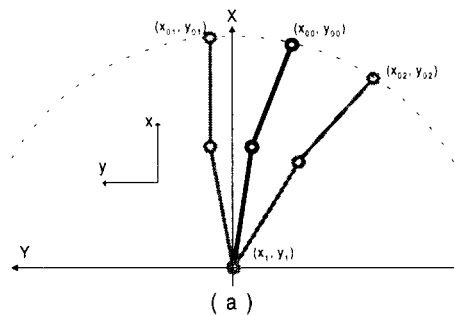


그림 4 영점 복귀 후 관절 1과 2의 회전
Fig. 4 Rotation of Joints 1 and 2 after zero return

$$r_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (6)$$

여기서,

$$A_{10} = (x_{01} - x_{00}), A_{21} = (x_{02} - x_{01}),$$

$$B_{10} = (y_{01} - y_{00}), B_{21} = (y_{02} - y_{01}),$$

$$C_{10} = (x_{01}^2 - x_{00}^2 + y_{01}^2 - y_{00}^2),$$

$$C_{21} = (x_{02}^2 - x_{01}^2 + y_{02}^2 - y_{01}^2)$$

같은 방식으로 식 (7)~(9)를 연립하면 x_2, y_2, r_2 를 구할 수 있고, $x_2 = -80.6, y_2 = -245.8, r_2 = 259.9$ 를 얻었다.

$$(x_{00} - x_2)^2 + (y_{00} - y_2)^2 = r_2^2 \quad (7)$$

$$(x_{03} - x_2)^2 + (y_{03} - y_2)^2 = r_2^2 \quad (8)$$

$$(x_{04} - x_2)^2 + (y_{04} - y_2)^2 = r_2^2 \quad (9)$$

위에서 얻은 값들을 이용하여 링크 1과 2의 길이(L_1, L_2)와 모눈종이 좌표계를 기준한 관절 1과 2의 오프셋 각(a, b)을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$L_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (10)$$

$$L_2 = r_2 \quad (11)$$

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{|x_2 - x_1|}{|y_2 - y_1|}\right) \quad (12)$$

$$b = \tan^{-1}\left(\frac{|x_0 - x_2|}{|y_0 - y_2|}\right) - a \quad (13)$$

표 2는 식 (10)~(13)에 의해 계산된 L_1, L_2, a, b 를 모델링된 로봇의 사양과 비교하여 나타낸 것이다.

표 2 모델링된 로봇의 사양과 측정된 로봇의 사양
Table 2 Modeled and measured robot specifications

	L_1 (mm)	L_2 (mm)	a (deg)	b (deg)
모델링된 로봇	350	260	0	0
실체의 로봇	344.1	259.9	2.6	8.1

4. 보정을 고려한 오프라인 프로그래밍

보정 작업을 수행한 이후 얻어진 링크 길이와 오프셋 각을 오프라인 프로그래밍에 반영하는 과정을 그림 5에 나타내었다.

4.1 보정을 위한 궤적 계획

링크 길이와 오프셋 각을 측정하기 위해 오프라인으로 계획된 기준 궤적은 그림 6과 같다. 각 경유점은 관절 공간상에서 3차 스플라인 법으로 보간되었으며, 전체 경유 시간은 47.6초이고 샘플링 시간은 0.016초이다. 이렇게 생성된 기준 궤적으로 시뮬레이션을 수행하고 슬라이딩 모드 제어 알고리즘으로 온라인 구동을 수행하여 모눈종이 위에 필요한 점들을 작도하였다.

4.2 기구학 보정과 기준 궤적 수정

위에서 측정된 값을 입력하여(그림 7) 기구학 파라미터를 수정하고 기준 궤적을 생성할 때 오프셋 각을 보상한다. 또한 로봇의 좌표계를 모눈종이의 좌표계와 평행하게 설정함으로써 모눈

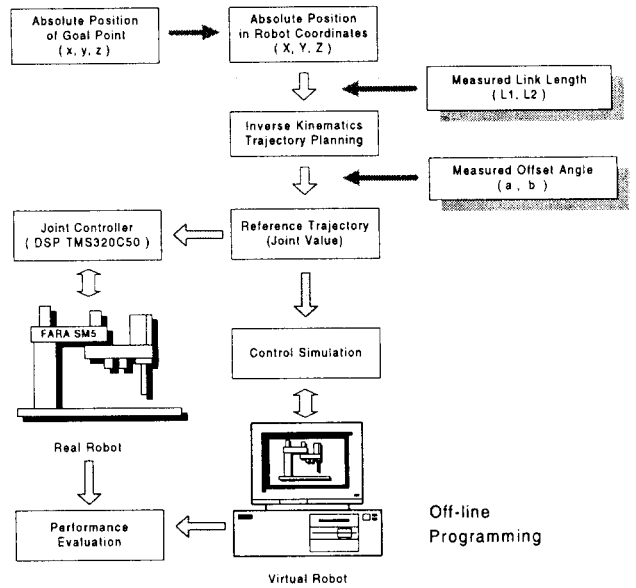


그림 5 오프라인 프로그래밍에서의 보정
Fig. 5 Calibration in OLP

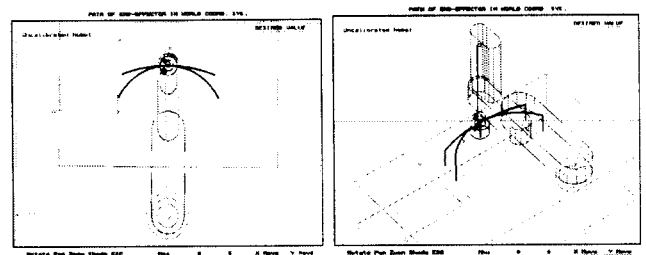


그림 6 보정을 위한 궤적 계획
Fig. 6 Trajectory planning for calibration

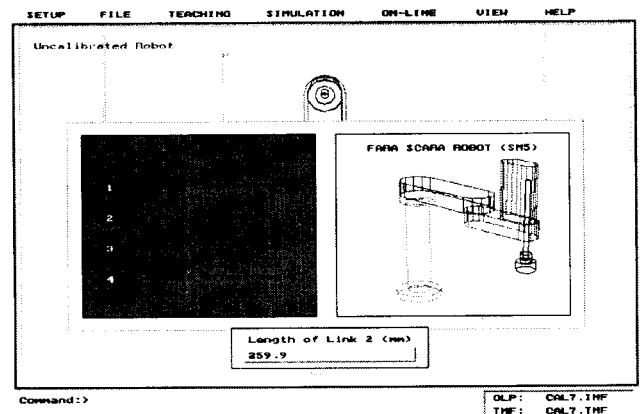


그림 7 로봇 사양의 수정
Fig. 7 Change of robot specifications

종이 위의 임의의 좌표를 로봇의 좌표계로 간단하게 변환할 수 있고 이 좌표를 오프라인으로 교시할 수 있다.

4.3 절대 위치 정도 평가

절대 위치의 정도를 평가하기 위해 모눈종이 좌표계의 원점을 로봇 좌표계의 절대 위치로 변환하여 오프라인으로 교시하였다. 그림 8(a)는 보정되지 않은 로봇에 대해 OLP 소프트웨어에서 생성된 기준 궤적이며, 그림 8(b)는 보정된 로봇에 대해 생성된

기준 궤적이다. 각 경유점은 모두 관절 공간상에서 3차 스플라인법에 의해 보간하였으며, 관절 1과 2의 관절 공간상의 기준 궤적을 그림 9와 10에 표시하였다. 여기서 실선은 원하는 위치까지 가기 위해 수정된 관절값이며, 링크 1과 2의 길이만을 보정하고 오프셋 각은 고려하지 않았을 때 생성되는 기준 궤적도 함께 나타내었다. 이 경우 관절 1과 2에서 보정 전후의 최종 관절값의 차이가 오프셋 각 a, b가 됨을 볼 수 있다. 표 3은 교시된 목표점의 좌표와 보정 전후의 절대 위치 오차를 나타낸 것이다.

표 3 목표점의 좌표와 절대 위치 오차
Table 3 Goal point and absolute position error

	교시된 좌표 (mm)	측정된 좌표(mm)		위치 오차(mm)	
		보정 전	보정 후	보정 전	보정 후
모눈종이 좌표계	x	0.0	43.5	-0.2	55.6
	y	0.0	-34.7	0.0	
로봇 좌표계	X	424.3	467.8	424.1	0.2
	Y	230.4	195.7	230.4	

5. 결론

작업 대상에 대한 CAD 정보나 계측장치에서 제공되는 위치 정보를 사용하여 계획한 로봇 작업을 자동화된 생산라인에 직접 적용하기 위해서는 보정이 필수적이다. 본 논문에서는 전자부품 조립 라인에서 폭넓게 이용되는 스카라 로봇을 대상으로 고가의 위치 측정 장비 없이 모눈종이를 이용하여 간단하게 보정하는 방법을 제안하였다. 원의 방정식을 이용하여 임의의 작업 대상을 기준한 로봇 좌표계의 원점, 링크 1과 2의 길이, 영점 복귀시 관절 1과 2의 오프셋 각을 구하는 관계식을 유도하였다. 그리고 로봇 끝단의 위치 오차를 발생시키는 가장 큰 원인인 영점 복귀시 오프셋 각을 고려하여 오프라인 프로그래밍을 수행하였다. 그 결과 약 0.2 mm의 절대 위치 정도를 쉽게 얻을 수 있었으나, 기어의 백래쉬, 링크의 유연성, 불안정한 영점 복귀 등으로 로봇 사양에 나타난 반복 정밀도(± 0.03 mm)에는 미치지 못했다. 모눈종이와 펜 대신 카메라와 같은 정밀한 측정 장비를 이용하여 동일한 원리를 적용하면 보다 높은 정도를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] B. W. Mooring and G. R. Tang, "An Improved Method for Identifying the Kinematic Parameters in a Six-Axis Robot", *Proceeding ASME International Conference on Computers in Engineering*, pp. 79-84, 1984.
- [2] D. E. Whitney, C. A. Lozinski and J. M. Rourke, "Industrial Robot Calibration Method and Results", *Proceeding for the ASME Conference on Computer and Engineering*, pp. 92-100, 1984.
- [3] L. J. Everitt, M. Driels and B. W. Mooring, "Kinematic modeling for Robot Calibration", *Proceedings of the 1987 IEEE international conference on Robotics and Automation*, pp. 183-189, 1987.
- [4] Z. S. Roth, B. W. Mooring and B. Ravani, "An overview of Robot calibration", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 5, pp. 377-384, 1987.
- [5] R. P. Judd and A. B. Knasinski, "A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 1, pp.20-30, 1990.
- [6] 변진환, "아아크 용접용 로봇의 오프라인 프로그램 응용을 위한 효과적 캘리브레이션 방법 연구", 한국정밀공학회지, 제 13권, 제1호, pp. 131-142, 1996.
- [7] 송종탁, 손권, 이민철, "오프라인 프로그래밍에서의 실시간 통신", '96 한국자동제어학술회의 논문집, 제1권, pp. 40-43, 1996.

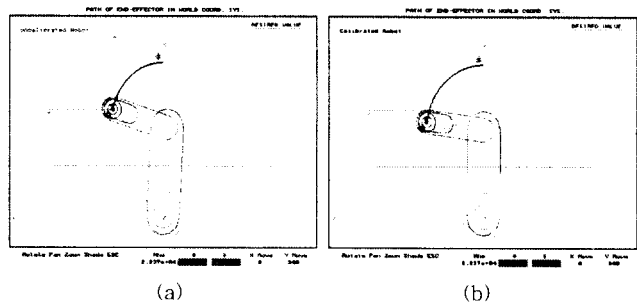


그림 8 보정 전(a)과 후(b)의 기준 궤적

Fig. 8 Reference trajectory (a)before and (b)after calibration

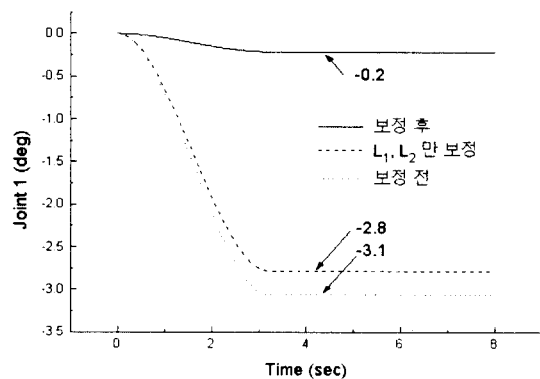


그림 9 관절 1의 기준 궤적 비교

Fig. 9 Comparison of reference trajectories at Joint 1

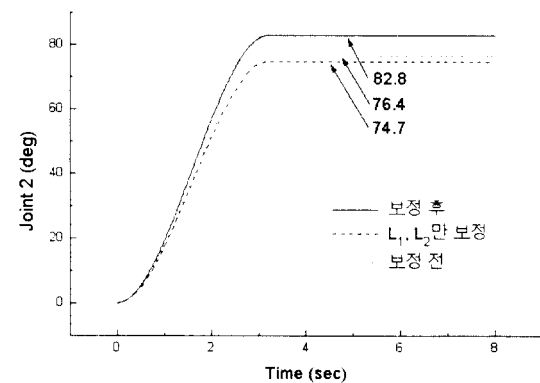


그림 10 관절 2의 기준 궤적 비교

Fig. 10 Comparison of reference trajectories at Joint 2