

운동패턴 인식과 재생산기법에 관한 연구

A Study on Motion Recognition and Regeneration Method

Dac-Chi Dang* · 강창남** · 김영복***†

Dac-Chi Dang*, Chang-Nam Kang** and Young-Bok Kim***†

(접수일 : 2014년 05월 21일, 수정일 : 2014년 07월 04일, 채택확정 : 2014년 07월 04일)

Abstract: In this paper, the authors consider a robot motion control to cope with painting, welding jobs and etc. Especially, a method for easy recognition and regeneration of the robot motions made by the operator is proposed. The method is based on the process of accurate modelling, controller design and experimental evaluation. In this study, the model and controller for all motions are obtained individually, where the control system is designed on the robust control framework. And the experiment result with good control performance is presented.

Key Words : Robot, Painting and Welding, Recognition, Regeneration, Operator, Robust Control, Performance

1. 서 론

도장 및 용접작업은 그 환경이 열악하여 모두가 꺼려하는 기피업종 중의 하나이다. 자동화기술의 발전으로 최근에는 작업기피요인을 상당부분 해소할 수 있을 정도의 수준에 이르렀다. 그러나 자동화기술 도입만으로 도장 및 용접작업에 있어서의 불편함을 만족할 만한 수준으로 개선한다는 것은 어렵다. 그 주된 요인은 작업조건 및 작업대상이 복잡하고 다양하다는 것에서 찾을 수 있다. 예를 들어, 용접경로가 곡선형태로 복잡하게 주어지거나, 도장작업대상이 의자 등의 가구와 같이 복잡하고 다양한 형상으로 주어질 경우에는, 기존의 좌표설정을 통한 포인트-투-포인트 방식으로는

원하는 작업수행이 어렵다.¹⁻⁴⁾ 그래서 산업현장에 적용되고 있는 대부분의 로봇은 가능한 단순·반복적인 작업용으로 이용되고 있는 것이 현실이다. 즉, 자동차 차체용접과 같이, 필요한 수의 용접 포인트를 미리 설정한 후, 포인트간의 경로설정을 통해 작업을 순차적으로 수행한다.⁵⁻⁷⁾ 이러한 작업에는 포인트를 연속적으로 잇는 경로설정 및 추종알고리즘을 최적으로 설계하는 것이 가장 중요하며 보수가 필요하지 않는 한, 특별한 변경없이 지속적으로 작업이 수행된다.⁸⁻¹¹⁾ 이와 같은 단순한 작업 외, 앞서 기술한 것과 같이 작업대상이나 작업과정이 복잡하거나, 작업스케줄을 빈번하게 변경할 필요가 있는 작업환경에는 보다 간단하고 단순한 작업지시와 실현전략을 도입해야 한다.

***† 김영복(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

*Dac-Chi Dang : 부경대학교 대학원 제어기계공학과

**강창남 : 제주대학교 기계시스템공학부

***† Young-Bok Kim (Corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

*Dac-Chi Dang : Department of Control & Mechanical Engineering, the Graduate School, Pukyong National University.

**Chang-Nam Kang : Faculty of Mechanical System Engineering, Jeju National University.

그래서 본 연구에서는 단순한 학습기능과 재현 기능을 갖는 로봇운동제어시스템 구축문제에 대해 고찰한다. 즉, 작업자가 수행하는 작업패턴을 로봇에 인식시키고, 인식된 작업패턴을 로봇이 재현할 수 있는 방법에 대해 고찰한다. 예를 들어 도장작업의 경우, 우수한 도장기술을 가진 작업자의 작업패턴을 간단하게 로봇이 인식하고 재현할 수 있다면 작업환경개선을 통해 상당한 작업효율 향상을 기대할 수 있을 것이다.

이를 위해, 먼저 적절한 자유도를 갖는 로봇에 대한 운동특성을 분석한 후 이를 수식적으로 표현한다. 본 연구에서는 로봇시스템 전체에 대한 운동특성보다는 관절 및 암 하나하나에 대한 독립적인 모델을 구하고, 각 모델에 대해 독립적으로 제어계를 설계하는 방법을 적용한다. 즉, 하나의 로봇암과 구동액추에이터(모터 등)로 구성되는 각 자유도를 독립적인 모델로 고려한다. 그리고 각 자유도에 대해 제어기를 독립적으로 설계하여, 로봇 전체시스템이 바람직한 제어특성을 발휘하도록 하는 것이 최종목표가 된다. 이와 같은 전략을 통해 구축된 로봇시스템에 대한 제어성능을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하도록 한다.

2. 기존 연구결과 및 연구목적

2.1 기존로봇제어기술과의 차별성

기존의 로봇운동제어방법은 로봇시스템 전체에 대한 하나의 운동방정식을 도출하고, 이에 대한 제어기를 설계하여 통합적으로 제어하는 것이다. 즉, 하나의 제어기로 전체 로봇모션을 제어하는 것이 일반적이다. 본 논문에서도 최종적으로는 기존의 제어기법과 같이 바람직한 제어성능을 얻고자 하는 목표는 동일하다. 단, 본 연구에서는 로봇 운동에 대한 통합모델을 구하지 않고, 각 자유도별로 독립적으로 운동특성을 분석하고 독립적으로 모델링을 수행한다. 그리고, 각 자유도별로 구해진 독립모델 각각에 대해 제어기를 설계한다. 이러한 전략은 로봇암 각각에 대해 독립적으로 제어해서 로봇전체 모션을 제어하고자 하는 것이다. 이것은 작업자 작업패턴을 쉽게 인식하게 하

고, 결과적으로는 작업자 작업패턴을 용이하게 재생산하기 위해서이다. 그 이유는 각 자유도에 대한 운동특성을 독립적으로 취득할 수밖에 없는 구조상의 특징과도 상관이 깊다.

따라서 본 연구에서 제안하는 작업패턴 재생산 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다. (Fig. 1 참조)

- ①로봇 암(액추에이터 포함) 각각에 대해 운동 특성을 파악하고 모델링
- ②자유도 각각에 대해 제어기를 설계 (이때 제어기는 타 관절운동에 의한 영향을 적절히 억제할 수 있는 제어성능이 확보되도록 설계)
- ③제어기와 제어대상을 포함한 페루프시스템의 전달함수를 구함
- ④페루프시스템의 역 전달함수를 구함
- ⑤속련자에 의한 로봇의 수동조작으로 속련자 작업패턴 데이터 취득
- ⑥역 전달함수에 작업자 작업패턴 데이터를 입력하여 출력신호를 획득(이것은 속련자 작업패턴을 재현하기 위한 목표신호가 됨)
- ⑦목표신호를 로봇제어시스템에 인가하여 속련자 작업패턴과 유사한 로봇 동작을 재생산

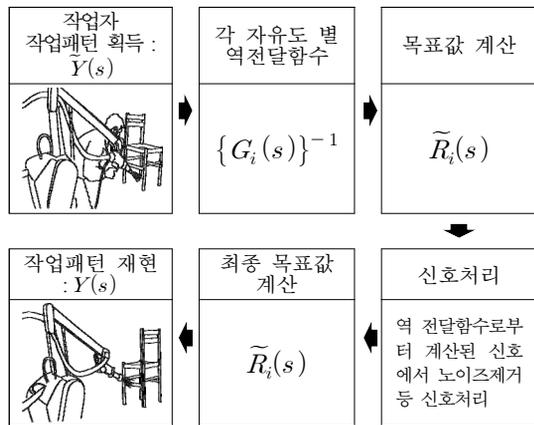


Fig. 1 Work teaching and reproduction process

2.2 작업자 작업패턴 인식 및 재생산방법

주어진 로봇시스템에는 암 각각의 운동특성을 파악할 수 있도록 관절부위에 엔코더 등의 센서가 설치된다. 로봇제작업체에 따라서는 체인방식으로 구동력을 전달하기도 하나, 본 연구에서는

각 관절부위마다 액추에이터로 모터가 장착되어 있는 로봇을 대상으로 한다. 이와 같은 시스템에서, 작업자가 로봇 끝단을 잡아 작업을 수행하게 되면 각 관절에 설치된 센서를 통해 각각의 로봇 암에 대한 운동데이터를 취득할 수 있게 된다. 이 데이터는 시간에 따른 각 암 움직임에 대한 정보로서 데이터베이스에 저장된다. 이렇게 수행된 작업자 작업패턴을 재생산하기 위해 본 논문에서는 로봇을 포함한 제어시스템 전체의 역다이나믹스를 이용한다. 정확하게 기술하면 페루프 전달함수의 역함수를 이용한다. 즉, 전달함수가 명확하게 구해졌다면 출력신호로부터 입력신호를 역으로 구할 수 있기 때문이다. 이것은 우선 제어대상에 대한 명확한 모델이 구해져야 가능하며, 아울러 각 모션을 적절히 제어할 수 있는 제어가 설계되어야 한다. 즉, 이와 같은 조건을 만족할 수 있는 페루프계가 Fig. 2와 같이 구성되어 있다고 하자. 여기서, $R_i(s)$: 목표값, $Y_i(s)$: 제어출력, $K_i(s)$: 제어기, $P_i(s)$: 액추에이터를 포함한 암 운동 모델을 각각 나타낸다. 이 경우 페루프 전달함수는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$G_i(s) : \frac{Y_i(s)}{R_i(s)} = \frac{K_i(s)P_i(s)}{1+K_i(s)P_i(s)} \quad (1)$$

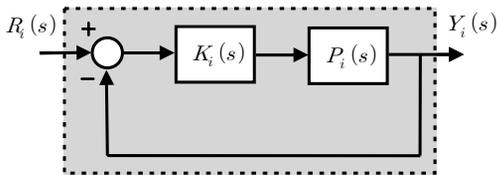


Fig. 2 A feedback system

작업자 작업패턴은 제어기가 동작하지 않는 상태에서 작업자가 로봇을 수동으로 조작할 때 얻어지는 값이고 이것을 $\tilde{Y}_i(s)$ 라 둔다. 이것은 임의의 목표값이 주어질 때 얻어지는 제어출력값과는 정확히 일치하지 않으나 가능한 유사한 값을 얻는 것이 본 연구의 최종목표가 된다. 즉, 숙련자 작업패턴을 재생산하는 것은 수동조작을 통해 얻어진 출력 $\tilde{Y}_i(s)$ 와 임의의 목표값 $R_i(s)$ 에 대한

출력 $Y_i(s)$ 가 같아지도록 하는 것이다.

이 문제는 수식적으로는 아주 간단하다. 먼저 식 (1)에서와 같이 로봇운동특성이 상세히 분석되어 각각의 전달함수 $P_i(s)$ (모델)가 명확하게 주어졌다고 가정한다. 이를 기반으로 최적의 제어성능이 보장되는 제어기 $K_i(s)$ 도 설계되어졌다고 한다. 즉, 식 (1)의 페루프 전달함수를 구성하고 있는 요소함수는 입력신호 $R_i(s)$ 외는 모두 알고 있다는 것이다. 결국 출력 $Y_i(s)$ 에 대한 정보가 주어진다면 이에 대한 입력값은 페루프 시스템의 역전달함수를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$R_i(s) = \{G_i(s)\}^{-1} Y_i(s) \quad (2)$$

이와 같은 계산은 대상시스템이 선형시스템인 경우에 대해 무리없이 가능하다. 그러나 실제시스템은 비선형특성을 내포하고 있으나 수식모델에는 나타나지 않는다. 그래서 식 (2)와 같은 방법을 적용하기 위해서는 적절한 보완과 대응이 필요하다. 다양한 방법과 전략을 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 가능한 명확한 모델을 구한 후, 비선형성 등의 불확실성에 대해 강인하게 대응하고, 오버슈트 등이 발생하지 않는 등 최적의 제어성능이 확보될 수 있도록 제어기를 설계한다. 아울러 작업자 작업패턴을 얻는 과정에서도 불필요한 동작은 가능한 억제하도록 하면서 최적의 작업패턴을 얻을 수 있도록 해야 한다.

3. 모델링

앞서 기술하였듯이 로봇시스템에 대해 각 자유도 별로 운동특성을 분석하고 모델링을 수행하는 방법을 도입한다. 아울러 수식적인 방법보다는 실험적인 방법으로 모델링을 수행하도록 한다. 즉, 스텝입력에 대한 응답으로부터 전달함수 모델을 구한다. 제어대상은 Fig. 3과 같이 1자유도 로봇시스템이고, 모델링을 위해 비례이득만 갖는 제어기를 포함한 페루프계를 구성하여 임의의 목표값에 대한 출력(회전각)응답으로부터 모델을 도출한다.

실험장치를 구성하고 있는 각 부속장치의 규격

은 Table 1에 정리하였다.

수차에 걸친 실험을 통해 스텝상 목표값을 인가하였을 때의 출력값(회전각)과, 이를 기반으로 구한 모델의 시뮬레이션응답을 Fig. 4에 나타내었다. 이때 입력값은 액추에이터(모터) 앰프 입력전압이고, 출력값은 로봇암의 회전각이다. 실험결과와 시뮬레이션결과는 유사한 응답특성을 나타내고 있으며, 이 결과로부터 구한 회전운동에 대한 모델은 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

Table 1 Specification of experimental apparatus

Items	Parameters	Spec.
Motor	Input Voltage	12[V]
	Rated current	5.5[A]
	Rated speed	5,700[rpm]
	Rated power	41.3[W]
Reduction Gear	Reduction rate	24
Encoder	Resolution	1,000 [pulse/revolution]
Arm	Length	0.25[m]
	Weight	0.125[kg]

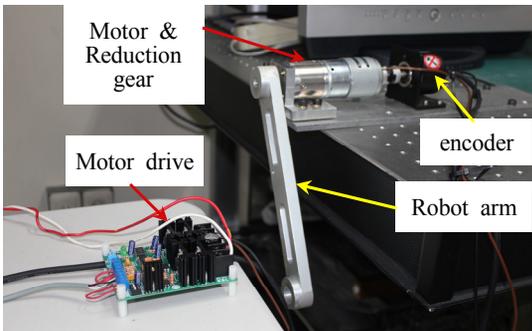


Fig. 3 Experiment setup (one-degree-of-freedom robot)

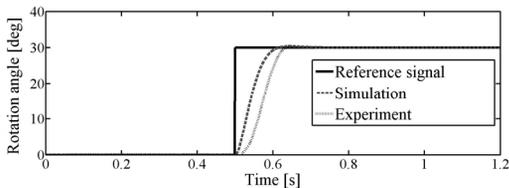


Fig. 4 Experiment and simulation result for system modeling with PID control

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (3)$$

$$N(s) = 4.332 \times 10^3 s^2 + 3.293 \times 10^5 s + 6.255 \times 10^6$$

$$D(s) = 0.345s^4 + 5.244 \times 10^3 s^3 + 2.491 \times 10^3 s^2 + 3.796 \times 10^4 s + 0.001 \quad (4)$$

4. 제어기 설계 및 기초실험

4.1 제어기 설계

본 연구에서는, 목표값 $r(t)$ 에 대해서 출력 $y(t)$ 가 오차 없이 추종하도록 강인제어기법¹¹⁻¹⁴⁾에 따라 제어기를 설계한다.

Fig. 5의 제어계는, 목표값에 대한 추종오차를 '0', 외란 d 의 영향을 억제함과 동시에 가능한 작은 제어입력을 사용해야 한다는 설계사양을 포함하고 있다. 수식적으로는 외부입력에서 출력까지의 전달함수 $T_{zw}(s)$ 가 다음의 놈 조건을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제로 정리된다. 따라서 식 (5)의 조건을 만족하는 제어기는 MatLab을 이용하여 다음과 같이 구해졌다.

$$\|T_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma \quad (\gamma > 0) \quad (5)$$

$$K(s) = \frac{N_k(s)}{D_k(s)} \quad (6)$$

$$N_k(s) = 7.85 \times 10^{-5} s^3 + 1.205 \times 10^2 s^2 + 9.299 \times 10^3 s - 0.214 \quad (7)$$

$$D_k(s) = s^3 + 8.454 \times 10^2 s^2 + 7.839 \times 10^4 s + 2.727 \times 10^3$$

이때 Fig. 5에서 도입된 각 중량함수(weighting function)는 시행착오를 거쳐 다음 식과 같이 정하였다.

$$W_p(s) = 0.82 \frac{s + 3.14 \times 10^2}{s^3 + 27s + 0.942} \quad (8)$$

$$W_u(s) = 3.0$$

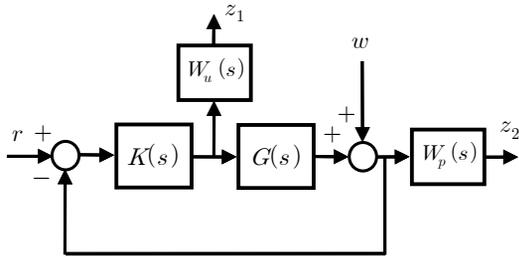


Fig. 5 A motion control system based on H_{∞} control framework

4.2 기초실험

우선 설계된 제어기의 제어성능을 실험으로 평가한다. 즉, 스텝상의 목표신호가 인가되었을 때의 추종성능을 평가한다. 먼저 Fig. 6은 단순 스텝상 목표값에 대한 추종성능을 나타낸다. 과도응답에서 과도한 오버슈트 현상도 발생하지 않으며, 목표신호에 오차없이 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 7은 크기가 다른 스텝상 목표신호가 연속적으로 주어질 때의 추종성능을 나타내고 있다. 이 경우 역시 양호한 제어성능이 얻어짐을 확인할 수 있다. 이와 같은 실험결과는 작업상황과 같이 다양한 형태의 목표신호가 주어질 경우에도 충분히 대응 가능함을 의미한다.

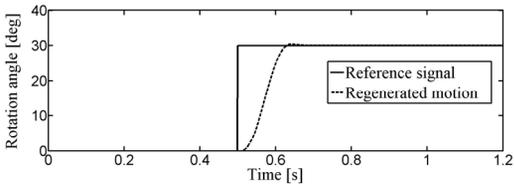


Fig. 6 Tracking performance of designed control system for a step-type reference signal

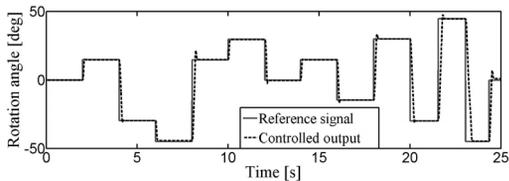


Fig. 7 Tracking performance of the designed control system for the step-type reference signal with various amplitude (experiment result)

5. 작업패턴 인식 및 재현실험

5.1 작업패턴 인식

원하는 로봇모션을 얻기 위한 목표값을 획득하기 위해, 앞서 기술한 바와 같이 로봇암 끝단을 작업자가 손으로 쥐고 임의의 작업(회전운동)을 수행한다. 이때는 액추에이터를 구동하기 위한 어떠한 제어력도 발생되지 않으며, 단지 로봇암의 회전운동상태를 실시간으로 계측할 수 있도록 센서부만 활성화되어 있다. 이와 같은 상태에서 로봇암을 임의로 회전시켰을 때의 계측된 회전운동상태를 Fig. 8에 나타내었다.

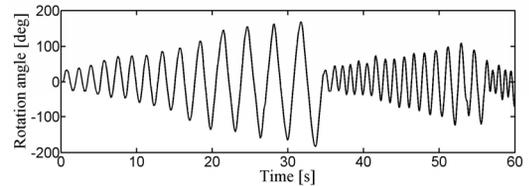


Fig. 8 Robot motion when the operator moves the robot arm by hand

5.2 목표신호 재생산

작업자가 로봇암을 임의로 조작하여 획득한 Fig. 8의 로봇모션을 재생산하기 위해서는 목표신호를 만들어 내는 것이 중요하다. 다양한 방법과 아이디어가 고려될 수 있으나, 앞서 기술한 것과 같이 본 연구에서는 가장 단순한 방법을 도입한다. 즉, 제어출력신호는 실험을 통해 Fig. 8과 같이 이미 알고 있다고 가정하고, 이를 생산하기 위한 제어계도 Fig. 5와 같이 설계되어 있다는 것을 전제로 한다. 그러면 식 (2)의 역전달함수를 이용하여 단순한 계산을 통해 목표신호 $R(s)$ 를 계산할 수 있게 된다. 따라서 Fig. 8의 작업모션 데이터와 식 (2)의 역전달함수로부터 구해진 목표신호를 Fig. 9에 나타낸다. 이것은 Fig. 8에 나타낸 출력과 거의 유사하고, 단지 과도상태에서 약간의 차이가 발생하는 정도이다.

이것으로부터 제안하는 기법에 대한 평가를 실험을 통해 수행하였고, 그 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

먼저 Fig. 10은 Fig. 9의 목표신호를 제어계에 인가하였을 때의 제어출력(regenerated output)과 작업자가 임의로 로봇암을 조작하였을 때의 로봇 운동(original output)을 함께 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 11은 두 경우의 결과값에 대한 오차를 나타내며, 이때 최대오차는 7% 정도였다. 이와 같은 실험결과를 통해 알 수 있듯이, 작업자 작업패턴을 거의 오차없이 재생산할 수 있음을 확인할 수 있으며, 도장작업 뿐만 아니라 정도가 요구되는 작업에도 충분히 응용이 가능함을 알 수 있다.

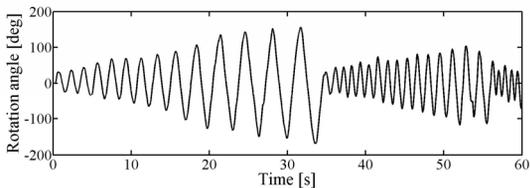


Fig. 9 Reference signal obtained by using inverse transfer function and robot motion produced by the operator

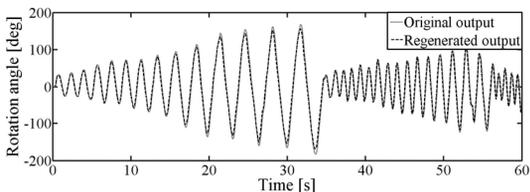


Fig. 10 Original and regenerated robot motions

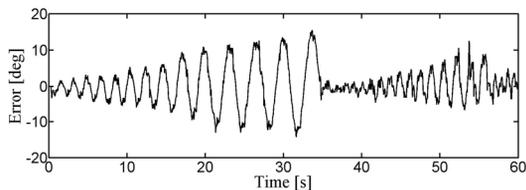


Fig. 11 Comparison result (error between two robot motions)

6. 결 론

본 논문에서는 로봇운동을 위한 새로운 방

법에 대해 고찰하였다. 로봇은 사용목적이 다양한 만큼 그것을 조작하여 목적을 달성하기 위한 방법도 다양하다. 대규모 산업현장에서 용접 및 조립공정에 이용되는 로봇은 수행하는 작업이 단순하고, 작업패턴도 빈번하게 변경되지 않는다. 그러나 작업지시를 위한 초기과정이 복잡하고 많은 시간이 필요한 것이 사실이다. 이에 반해 소규모 공정, 빈번한 작업스케줄 변경이 필요할 경우에는 기존의 포인트 지정방식으로는 대응이 어렵거나 작업이 불가능한 경우가 많다. 그 결과 소규모 도장작업공정이나 용접공정은 거의 대부분이 인력에 의존하고 있는 실정이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 작업자 작업패턴을 간편하게 인식하고 이와 유사한 운동을 로봇이 재현할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 실험을 통해 그 유효성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음 (과제번호 : CD20140188).

References

1. S. Yajima and S. Katsura, 2012, "Simplified integrated reproduction of human motion based on motion-copying system", 5th International Conference on Human System Interactions, pp. 110-115.
2. M. Jin, J. Lee, P. H. Chang, and C. Choi, 2009, "Practical non-singular terminal sliding -mode control of robot manipulators for high accuracy tracking control", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 9, pp. 3593-3601.
3. S. C. Won, D. J. Lim and D. H. Chyung, 1985, "DC Motor driven robotic manipulator control", Proc. of 24th Conference on Decision and Control, pp. 330-333.

4. D. S. Ahn and Nguyen Van Phuc, 2012, "Unified motion and force control of JS-10 robot manipulator based on operational space and 3D CAD", *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 57-63.
5. C. P Hung, Y. C. Lai, F. T. Shieh and K. C. Chang, 2012, "Embedded teaching system design for multi-jointed robots", *Int. Symposium on Computer, Consumer and Control*, pp. 560-563.
6. M. Ishii, 1992, "A robot teaching method using hyper card system", *Proc. of Robot and Human Communication*, pp. 410-412.
7. V. A. Oliveira, E. S. Tognetti and D. Siqueira, 2006, "Robust controllers enhanced with design and implementation processes", *IEEE Trans. Educ.*, Vol. 49, No. 3, pp. 370-382.
8. P. S. Shiakolas and D. Piyabongkarn, 2003, "Development of a real-time digital control system with a hardware-in-the-loop magnetic levitation device for reinforcement of controls education", *IEEE Trans. on Education*, Vol. 46, No. 1, pp. 79-87.
9. D. Wang, S. Wang, S. Wen and M. Deng, 2013, "Operator-based robust nonlinear perfect tracking control design to a robot arm with uncertainties", *Proc. of the 2013 Int. Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pp. 57-62.
10. M. T. Soylemez, M. Gokasan and S. Bogosyan, 2003, "Position control of a single-link robot-arm using a multi-loop PI controller", *Proc. of IEEE Conference*, Vol. 2, pp. 1001-1006.
11. S. Hossain, 2007, "Design of a robust controller for a magnetic levitation system", MSproject, <http://engineering.wichita.edu/esawan/projects.htm>.
12. D. W. Gu, P. H. Petrov and M. M. Konstantinov, 2005, "Robust Control Design with Matlab", Springer.
13. R. Y. Chiang and M. G. Safonov, 1996, "Robust control toolbox user guide", Natick, MA: The MathWorks, Inc.
14. K. Zhou and J. C. Doyle, 1998, "Essentials of robust control", Prentice Hall.