

스카라 로봇의 오프라인 제어를 위한 OLP 개발 및 제어기설계에 관한 연구

A Study on The OLP Development and Controller Design for off-line Control of SCARA Robot

서운학¹, 정영태², 최우형¹, 한성현³

- 1. (주) 현대테크(TEL:+82-551-285-8825, FAX:+82-551-285-8842)
- 2. (주) 현대정공 3. 경남대 매카트로닉스 대학원
- 3. 경남대 기계자동화공학부 (TEL: +82-551-249-2624, E-mail : shhan@kyungnam.ac.kr)

Abstract

In this paper, an off-line programming(OLP) system is presented as the three dimensional graphic simulator and one of the human-robot interface systems for industrial robots. The OLP system has been especially developed to testify robot programs visually using three dimensional geometric modeling and graphics technologies in personal computers. A special feature is its capability of collision detection and of comparing performance of control algorithms. This paper places the focus on the structure and major characteristic of OLP system.

1. 서 론

로봇의 사용이 보편화됨에 따라 우수한 성능과 함께 사용편의성이 요구되어, 변화하는 작업환경과 조건에 신속하고 능동적으로 대처할 수 있는 운용프로그램의 개발이 필요하게 되었다. 이러한 문제점들은 로봇과 작업환경을 컴퓨터에서 구현하여 시뮬레이션을 할 수 있는 오프-라인 프로그래밍(off-line programming, OLP)을 이용함으로써 해결이 가능하다.

현재 대부분의 산업용 로봇에서 사용되는 고전적 제어방식으로는 고속 운전이나 빈번한 부하 변동에 의해 나타나는 각 관절간의 비선형성, 연성, 불확실성 등으로 인하여 로봇의 성능과 응용 범위에 크게 제약을 받고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 동적 제어 알고리즘으로 계산토크법, 극배치보상법, 슬라이딩 모드 제어와 적응제어등의 성능 및 특성에 대해 검토하였으며, 이들의 성능평가를 OLP로 할 수 있게 하였다. 작업 영역내에 장애물이 있는 경우에 제어를 위한 작업경로의 계획계획으로 로봇과 장애물과의 충돌회피를 위하여 최단거리의 유연한 궤적을 작업좌표상에서 자동적으로 생성해내는 알고리즘을 개발하였다.

동적 제어 알고리즘을 실제 시스템에 적용하기 위하여 실시간 제어가 가능하도록 SCARA 로봇의 제어

시스템을 구성해야 한다 특히 동적 제어 알고리즘의 실현을 위하여서는 많은 계산량의 처리가 실시간에 이루어져야 하며, 이를 위하여 최근에 고속 제어 분야에서 그 활용이 증대되고 있는 DSP를 채택하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 각 관절제어기에 DSP를 활용하여 실현하고 궤적계획 및 센서 통합환경을 위하여 주 제어기로 범용의 PC-486을 사용하고자 한다.

2. OLP의 개요

본 연구에서는 4축 SCARA형 로봇을 위한 OLP(off-line programming)를 개발하였다. 특히 PC 상에서 편리하게 운용될 수 있으며, 다양한 제어 알고리즘을 적용할 수 있도록 OLP를 구성하였다. 로봇에 대한 기구학적, 역학적 모델링과 그래픽을 위한 데이터베이스를 바탕으로 직각좌표계상에서는 연속경로법을, 그리고 관절좌표계에서는 PTP법을 이용하여 궤적계획을 수행하였다. 동일한 궤적계획에 대해 계산토크법에 의한 PD 비선형보상제어⁽¹⁾, 역시스템과 극배치방법⁽²⁾, 슬라이딩 모드 제어⁽³⁾, 적응제어⁽⁴⁾ 등의 제어 알고리즘에 대하여 그 성능의 비교와 평가가 가능한 OLP를 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 OLP의 첫화면이다.

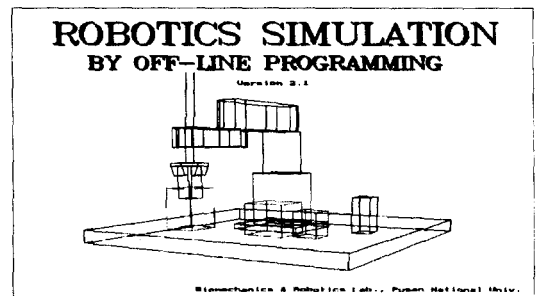


Fig. 1 Opening screen of OLP system

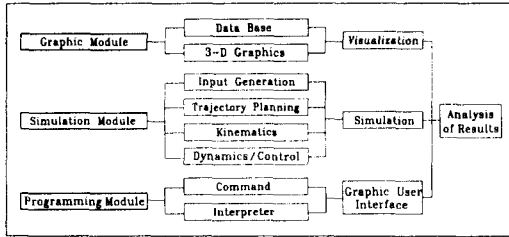


Fig. 2 Structure of OLP system

2.1 OLP의 구조 및 특성

본 연구의 OLP시스템은 Fig. 2와 같이 그래픽, 시뮬레이션, 프로그래밍의 세 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 세부적인 구성모듈을 포함하고 있으나 총체적인 기능을 수행하기 위해 서로 연관지어져 있다.

그래픽모듈에서는 로봇의 모델링과 3차원 그래픽 처리를, 시뮬레이션모듈에서는 궤적계획, 기구학, 동역학, 제어 알고리즘을 통한 동적시뮬레이션의 수행을, 프로그래밍모듈에서는 로봇 명령어와 이를 해석하는 기능을 담당하고 있다.

2.2 그래픽모듈

본 연구에서 개발되어진 OLP는 편리한 사용자 인터페이스를 위하여 다양한 그래픽적 기능들을 보유한다. 이러한 기능들을 위해서는 3차원적 데이터베이스의 구축 및 그래픽적 알고리즘의 구축이 필요하게 된다. 특히 본 OLP는 PC에서 운용될 수 있도록 구축되고 있으므로 여기에 따른 문제점들을 해결해야만 한다. 은선 및 은면제거기술이나 음영처리기술은 PC에서 이용되기 위하여 상당히 까다로우며, OLP에 적용하기 위해서 기존의 알고리즘을 수정, 보완하여 적용하였다.

2.3 3차원적 그래픽의 구현

3차원적 그래픽을 위한 알고리즘의 개발로 시뮬레이션 결과를 3차원 영상으로 볼 수 있게 된다. 이를 위해서 실제좌표계에서 시각좌표계로의 변환 및 원근 투영 기술이 포함되었다. 그래픽을 이용한 시뮬레이터의 경우 가장 빈번히 사용되는 기능중의 하나가 시각위치 변경기능이므로 본 연구에서는 보다 편리하게 시각위치를 변경할 수 있는 기능을 갖추었다. Fig. 3은 시각위치를 변경하는 화면이다.

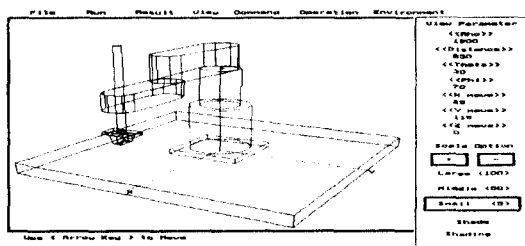


Fig. 3 Change of view angle

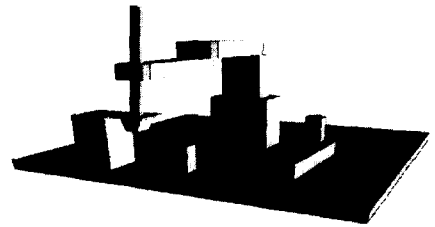


Fig. 4 Graphics with hidden lines and Shading

2.4 은선, 은면의 제거 및 음영처리

본 연구에서는 은선 및 은면의 제거를 위해 스캔 라인 z-버퍼 방식을 채택하였고 개인용 컴퓨터상에서 구현이 가능하게 하였다. 이는 메모리 사용을 극단적으로 줄여 개인용 컴퓨터에서 실현이 가능한 알고리즘이지만 실행속도의 저하를 감수해야만 한다. 또한 음영처리 알고리즘으로는 Phong 음영처리 방식을 사용하였는데 이 방법은 면의 법선 벡터를 이용하여 면의 밝기를 계산하는 방식으로 우수한 음영처리 결과를 보여준다. 먼저 표면기초모델(surface based model)을 생성하고 그후 시점으로부터 보이지 않는 배면을 소거한 후 z-버퍼법에 의한 은선, 은면 제거를 한후 음영처리를 하는 순서로 구성된다. Fig. 4는 은선, 은면, 음영처리를 한 화면이다.

3. 시뮬레이션모듈

시뮬레이션모듈은 로봇을 구동하기 위한 요소인 입력생성, 궤적계획, 기구학, 동역학 및 제어 등의 세부모듈로 구성된다. 입력생성모듈은 시뮬레이션에 필요한 정보인 경유점, 각 구간에서의 경유시간, 단말효과기의 각도 등을 사용자 대화식 또는 데이터 화일식으로 제공한다. 이러한 정보를 이용하여 궤적계획모듈에서 선택된 경로계획법에 따라 궤적을 생성하고, 기구학모듈로 필요한 자료형태로 변환하고, 선택된 제어 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션을 하게 된다.

3.1 궤적계획

로봇 매니퓰레이터가 장애물을 회피하는 궤적을 생성하는 데 있어서 먼저 고려해야 될 것은 장애물에 대한 표현의 방법이다. 우선 간단히 이차평면에 대해 고려할 때 아래의 Fig. 5(a)와 같은 장애물은 각 표면이 $ax + by + c = 0$ 의 형태의 직선으로 표현된다.

장애물회피를 위한 궤적계획의 알고리즘은 경유점의 발생, 궤적생성, 충돌확인 순서로 하게되는데 먼저 경유점의 발생은 각 표면들의 교점인 모서리 점들의 좌표를 구해낸다. 경유점은 교점에서 일정한 안전거리 δ 를 두고 외향법선 벡터의 평균방향으로 발생시킨다. 경유점을 설정한 뒤에 궤적생성의 방법은 curve fitting에 알맞은 Bezier 함수를 사용해서 생성하게 되

는데, 이 함수의 특징은 지정된 경유점을 통과하여 각 구간간의 연속성을 보장하고 근사직선의 생성을 쉽게 할 수 있다는 것이다. Bezier 함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \sum_{i=0}^n f_i \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad 0 \leq t \leq 1$$

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot f_i : \text{Bezier points}$$

아래의 Fig. 5(b)와 (c)는 경유점이 4점인 경우의 Bezier 함수를 이용한 근사직선의 경로생성을 한 시뮬레이션 결과이다. 이때에 필요한 조건은 각 구간에서의 경유점의 좌표와 경유점을 경유할때의 속도이고 출발점과 종점의 속도는 0이다.

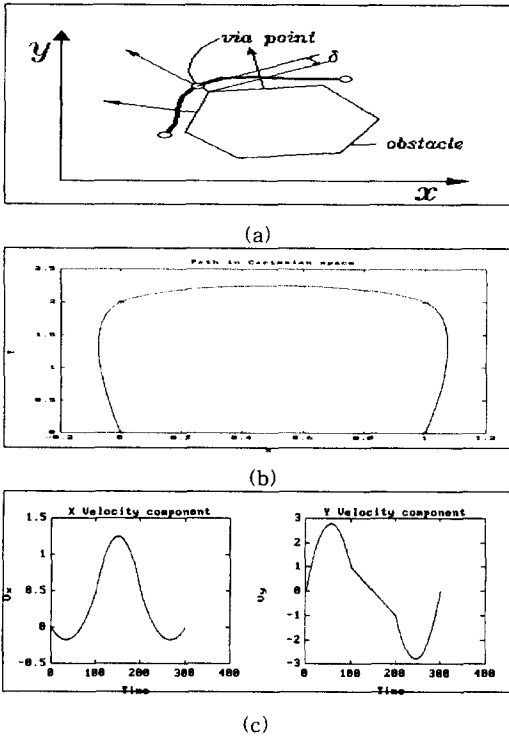


Fig. 5 Trajectory planning using Bezier function

Bezier 함수를 이용하여 궤적을 생성한 다음 장애물에 대한 궤적의 충돌확인은 모든 경유점들에 대해 충돌확인을 하지 않고 교점부근의 경유점들만을 충돌확인을 하게 된다. 이때 장애물의 각 선의 중점에서의 외향법선 벡터와 중점에서의 경유점 방향의 벡터와의 내적 값이 음의 값이면 충돌한 경우가 된다. 만약 처음 설정한 경유점의 충돌확인에서 충돌이 검색되면 안전거리 δ 를 증가시켜 새로운 경유점을 설정하게 된다.

3.2 계산토크법

동적모델식이 정확하다는 가정하에서 사용할 수 있

는 계산토크법(computed torque method)⁽¹⁾은 원하는 각도와 그 순간의 속도와 가속도를 이용하여 동적모델식에서 제어입력항인 토포크나 힘을 계산한다. 제어 알고리즘의 블록선도는 Fig. 6과 같으며, 그림에서 번호 1, 2, 3은 각각 관성모멘트, 코리올리력, 중력항의 보상을 의미하고, K_p 와 K_v 는 각각 비례계인과 미분계인을 나타낸다.

3.3 역시스템과 극배치 방법에 의한 제어

제어기의 기본구조를 Fig. 7과 같이 독립다변수 피이드포워드 제어기와 피이드백 제어기로 구성하였다. 이전의 연구⁽²⁾에서 빈번한 부하변동, 파라미터 불확실성, 계산시간 지연 등의 많은 외란이 존재하는 경우에도 고정도의 실시간 제어성능이 유지됨을 알 수 있었다.

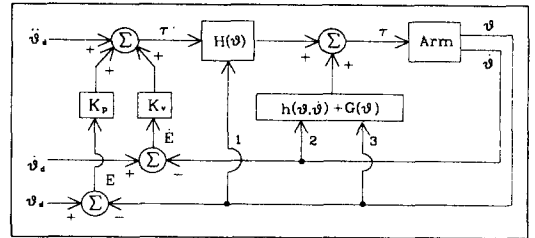


Fig. 6 Computed torque method

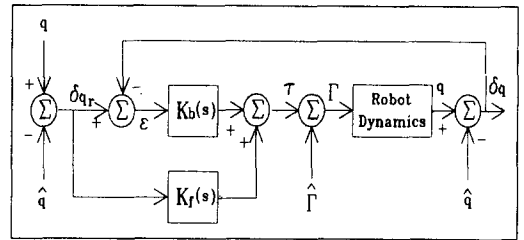


Fig. 7 Pole placement method

3.4 슬라이딩모드제어

4 자유도를 갖는 SCARA 로봇에 대하여 매니플레이터의 운동방정식 중 비선형 성분을 외란으로 간주하고 서보계의 동특성을 합한 로봇시스템 전체의 운동방정식을 구하면 식 (1)과 같다.

$$J_i \ddot{\theta}_{Li} + B_i \dot{\theta}_{Li} + F_i = k_i u_i \quad (1)$$

여기서 J_i 는 관성모멘트의 선형요소만의 합을 나타내고, B_i 는 모터회전자의 감쇠계수항, 역기전력에 의한 항, 매니플레이터의 점성감쇠계수항의 합을 나타내고, F_i 는 관성모멘트의 비선형요소, 원심력, 코리올리력, 마찰력, 중력 등의 합을 나타낸다. 식 (1)과 같은 동특성을 갖는 SCARA 로봇에 슬라이딩모드제어를 적용하기 위해서 오차와 오차의 시간미분을 상태로 하는 상태공간상에 슬라이딩모드가 발생하는 전환선을 식

(2)와 같이 정의한다. 그리고 비선형 성분을 외란으로 간주하였으므로 외란의 영향을 억제하기 위해서 식 (3)과 같은 제어입력을 선정하고 슬라이딩모드의 존재 조건 $ss < 0$ 을 만족하도록 절환과라미터를 선정한다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (2)$$

$$u_i = \Psi_{0i} e_i + \Psi_{fi} + \Psi_{di} \dot{\theta}_{di} + \Psi_{vi} \ddot{\theta}_{di} \quad (3)$$

과도한 제어입력에 의한 절환선 주변에 채터링이 발생하는데 이를 경감시키는 방안으로 절환선 주변에 일정한 폭을 갖는 불감대를 설정하고 상태의 값이 불감대 이내로 수렴하였을 경우에 외란에 대응하기 위한 제어입력을 작게 가변함으로써 채터링 발생을 경감시키고자 하였다. 실제 로봇트는 작업물체를 운반하는 기능을 수행하므로 이러한 부하의 변동에 의한 영향을 검토하기 위해서 그리퍼가 절점질량을 집어 이동할 때 나타나는 동역학적인 영향을 고려할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 그리고 그 성능을 평가하기 위해서 비선형성분이 완벽하게 보상되고, 쿨롱마찰력과 서보계가 고려되지 않은 선형요소만으로 등가된 계산토크법의 경우와 제적추종결과를 비교 평가하였다.

기준좌표계에서 단말기의 위치를 $X = 250$ mm, $Y = 100$ mm, $Z = 20$ mm, grip angle = 40 도에서 $X = 250$ mm, $Y = -100$ mm, $Z = 200$ mm, grip angle = -40 도로 이동시킬 때의 제적추종 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

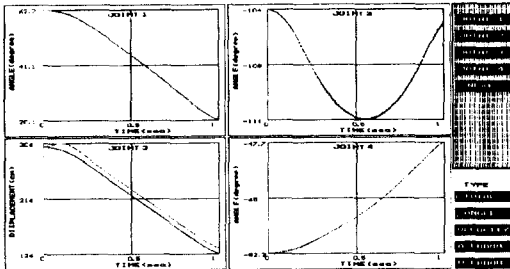


Fig. 8. Trajectory tracking using computed torque method with a 4 kg payload

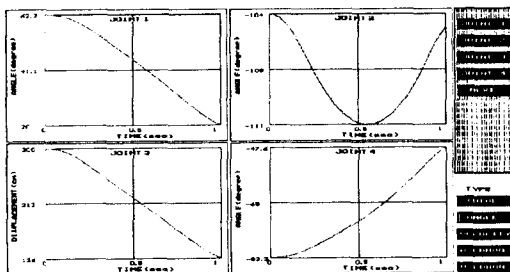


Fig. 9. Trajectory tracking using sliding mode control with a 4 kg payload

3.5 적응제어

일반적으로 매니플레이터의 운동이 거친 운동(gross motion)의 경우에는 공칭작동점과 선형화된 모델의 매개변수는 실질적으로 시간에 따라 변하게 된다. 그러므로 전체 제어칙에 의하여 안전성과 제적 추적을 보장하기 위하여 피이드포워드 제어기 및 피이드백 제어기의 게인이 적절히 조절되어지고 공칭작동점에 대한 항도 시간의 경과에 따라 조절되어야 한다. 부하 하중을 고려한 Fig. 10의 매니플레이터에 대한 동적 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau(t) = K_A^*(m, q, \dot{q}) \dot{q}(t) + K_B^*(m, q, \dot{q}) \ddot{q}(t) + K_C^*(m, q, \dot{q}) q(t) \quad (4)$$

여기서 K_A^* , K_B^* , K_C^* 는 매개변수로서 q , \dot{q} , m 의 함수로 비선형 행렬($n \times n$)이다.

작동점의 변화에 대응하기 위하여 피이드포워드 제어기 및 피이드백 제어기의 게인이 시간에 따라 변화되어지고 공칭작동점에 의한 성분인 시변신호 $F(t)$ 는 구조상으로 합성되어지는 적응보조 신호로 고려된다. 위의 사항들을 바탕으로 적응 제어칙은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau(t) = F(t) + [K_p(t)E(t) + K_v(t)\dot{E}(t) + [K_c(t)q_d(t) + K_B(t)\dot{q}_d(t) + K_A(t)\ddot{q}_d(t)] \quad (5)$$

설계된 제어기의 적응 게인은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} K_p(t) &= K_p(0) + b_2 M(t) E^T(t) + b_1 \int_0^t M(t) E^T(t) dt \\ K_v(t) &= K_v(0) + c_2 M(t) \dot{E}^T(t) + c_1 \int_0^t M(t) \dot{E}^T(t) dt \\ K_c(t) &= K_c(0) + a_2 M(t) q_d^T(t) + a_1 \int_0^t M(t) q_d^T(t) dt \\ K_B(t) &= K_B(0) + \beta_2 M(t) \dot{q}_d^T(t) + \beta_1 \int_0^t M(t) \dot{q}_d^T(t) dt \\ K_A(t) &= K_A(0) + \gamma_2 M(t) \ddot{q}_d^T(t) + \gamma_1 \int_0^t M(t) \ddot{q}_d^T(t) dt \\ F(t) &= F(0) + a_2 M(t) + a_1 \int_0^t M(t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 11과 Fig. 12는 제안된 적응제어에 대한 SCARA 로봇트 관절의 위치 및 속도의 제적 추적 성능 결과를 나타내고 있다.

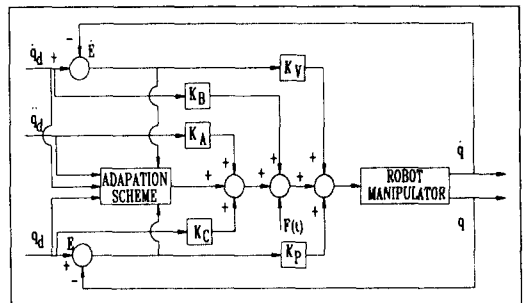


Fig. 10 The structure of adaptive control system

1) 교시모드 화일이용 기능

교시모드에서 버튼이나 마우스를 이용하여 만든 교시모드 화일을 불러 각 경유점에 대한 정보를 읽은 후 지정된 궤적계획법에 의해 궤적을 생성하게 된다.

2) 시뮬레이션 기능

입력 기능이나 교시모드 화일이용 기능으로 생성된 궤적계획 경로를 따라 로봇트가 3차원 화면으로 움직이면서 셋업모드에서 지정한 제어 알고리즘으로 동적 시뮬레이션이 행하여진다.

3) 성능평가 기능

성능평가 기능에서는 지정된 제어 알고리즘에 의한 동적 시뮬레이션의 결과를 사용자가 쉽게 평가할 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 본 OLP시스템에서는 관절좌표계와 직각좌표계에서의 각 링크의 궤적과 속도, 그리고 각각의 오차를 평가할 수 있는 기능과 직각좌표계에서의 단말효과기의 경로를 평가할 수 있는 기능을 가지고 있다.

Fig. 17은 A점에서 물체를 잡아 정해진 경로를 따라 이동하여 B에서 내려놓는 작업에 대하여 직각좌표계에서의 단말효과기의 경로를 나타내는 화면이다. Fig. 18은 계산토크법에 의한 관절좌표계에서의 각변위의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

4) 비교분석 기능

본 OLP에서는 여러가지 제어알고리즘의 시뮬레이션이 가능하며 그 결과의 비교분석을 위한 기능을 포함하고 있다. Fig. 19는 Fig. 17의 궤적에 대하여 동일한 자료추출시간에서의 계산토크법, 극배치 방법, 슬라이딩 모드제어, 적응제어의 시뮬레이션 결과를 동시에 한 화면에서 비교·분석하는 화면이며, Fig. 20은 각각의 오차를 비교한 화면이다. 실제 화면상에서는 각 제어 알고리즘에 의한 결과가 서로 다른 색으로 구별되어 경로추적과정을 용이하게 볼 수 있다.

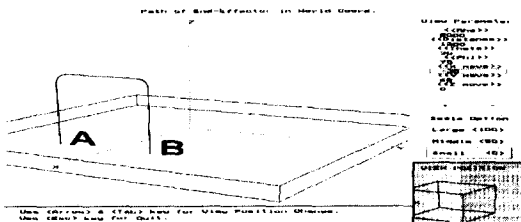


Fig. 17 End-effector path

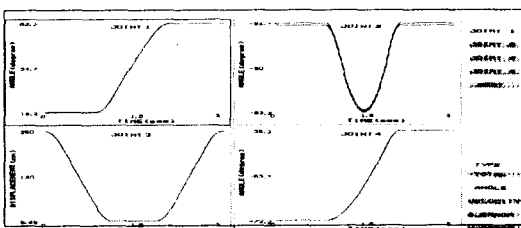


Fig. 18 Simulated joint angles

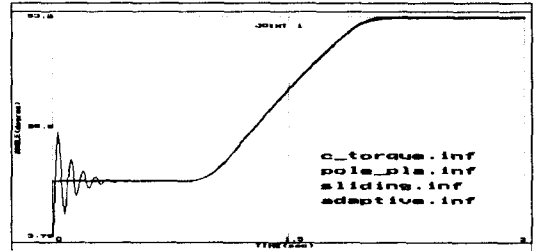


Fig. 19 Comparison of angles at joint 1

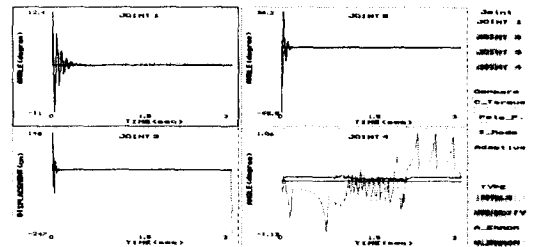


Fig. 20 Comparison of errors at all joints

5. 제어기 시스템의 설계

기존의 SCARA 로봇트를 최적의 동적 제어 알고리즘으로 실시간에서 제어하기 위해서는 고속 수치 전용 Chip을 사용한 관절 제어가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 고속 수치 연산을 위하여 TI사의 TMS320C50을 이용하였고, CSA12 SERIES 전원분리형 관절구동부(이하 관절구동부)를 통해서 SCARA 로봇트의 제어를 행하는 제어기 시스템을 설계한다. 먼저 관절구동부의 원리부터 살펴본다.

5.1 관절구동부

본 SCARA로봇트에 사용된 관절구동부는 DC Brushless Motor(AC Servo Motor)를 구동하여 고정밀도의 위치와 속도제어를 할 수 있도록 고안된 AC 관절구동부이다. 구조는 Fig. 21과 같이 구성되어 있다.

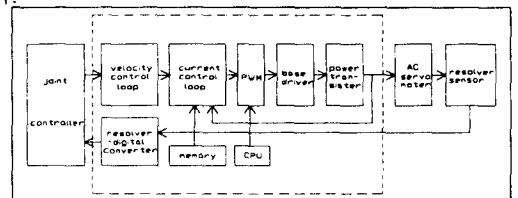


Fig. 21 AC joint driver

관절제어기와 관절구동부 사이의 입출력 관계는 다음과 같다. 관절제어기로부터 관절구동부로 전달되는 신호로서는 속도명령, 전류명령, 서보 ON/OFF명령, 서

6. 결 론

본 연구에서 수행된 시뮬레이터의 개발을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) OLP 시스템을 통해 여러 종류의 제어 알고리즘을 사용하여 시뮬레이션한 작업수행 결과를 동시에 비교하여 주어진 작업에 가장 적합한 알고리즘을 효율적으로 선정할 수 있었다.
- (2) 로봇의 작업조건이나 환경이 변화할 경우 등의 새로운 작업교시가 필요한 경우 본 시스템을 통해 작업교시 및 시뮬레이션을 수행하고, 그 교시 내용을 온-라인상태의 로봇에 적용할 수도 있으므로 시간과 비용을 절감할 수 있었다.
- (3) 장애물 회피를 위한 최단거리의 유연한 궤적을 작업좌표계상에서 자동적으로 생성할 수 있는 장애물 회피 알고리즘을 개발하여 적용가능성을 확인하였다.
- (4) 강인한 궤적추종제어를 실현하기 위하여 운동방정식의 비선형 성분을 외란으로 간주하여 실시간에 적용을 용이하게한 슬라이딩모드제어의 경우 부하변동, 외란 등이 존재하더라도 뛰어난 궤적추종 성능을 나타냄을 확인하였다.
- (5) 역 시스템의 기본 원리 및 기준 모델 적용 제어기의 기본 구조를 바탕으로 한 견실 적용 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 미지 외란 및 파라미터의 불확실성, 궤적 변화에 대한 궤적추종성능 시험결과 항상 고 정도의 견실한 제어 성능이 유지됨을 보였다.
- (6) 최적 제어 알고리즘의 구현을 위해 설계된 관절 제어기는 TMS320C50의 Local Memory와 Global Memory의 활용으로 실시간 제어를 실현할 수 있다. 또한, 주 제어기로 사용된 범용의 PC-486은 센서 통합 환경 및 사용자 편의성을 도모하여 제어의 효율성을 높일 수 있다.

참고문헌

- (1) 정창욱, 손권, 이민철, 이만형, 한성현, 1994, "제어 알고리즘의 평가기능을 갖춘 오프라인 프로그래밍", '94 기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 729~733.
- (2) 한성현, 안두성, 이민철, 이장명, 손권, 이만형, 1993, "극배치와 역모델을 이용한 로봇 매니플레이터의 견실한 제어기 설계", '93 기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 333~337.
- (3) 신기태, 이민철, 손권, 이만형, 1994, "슬라이딩 모드 제어를 이용한 SCARA 로봇의 동적 시뮬레이터 개발", '94 기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 577~582.
- (4) 이현철, 한성현, 손권, 이만형, 1994, "MRAC 기법과 역모델을 활용한 로봇 매니플레이터의 견실

적용제어," '94 기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 734~739.

- (5) 이민철, 靑島伸治, 1991, "비선형 성분을 외란으로 간주하였을 때의 매니플레이터의 슬라이딩 모드 제어", 한국자동제어학술논문집, pp. 286~291.
- (6) Craig, J. J., 1989, Introduction to Robotics Mechanics and Control, Addison-Wesley, New York.
- (7) Fu, K. S., Gonzalez, R. C., and Lee, C. S. G., 1987, Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, New York.
- (8) Asada, H. and Slotine, J. J. E., 1986, Robot Analysis and Control, John Wiley & Sons, New York.
- (9) Young, K. K. D., 1978, "Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure System ", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 8, No. 2, pp. 101~109
- (10) Lee, M. C. and Aoshima, N., 1993, "Real Time Multi-Input Sliding Mode Control of a Robot Manipulator Based on DSP", Proc. of SICE '93, pp. 1223~1228.