

Evolution Strategy 를 이용한 로봇 매니플레이터의 슬라이딩 모드 제어

Sliding Mode Control for Robot Manipulator Using Evolution Strategy

김 현 식, 박 진 현*, 최 영 규*

*부산대학교 전기공학과(Tel: 051-510-1544; Fax: 051-513-0212; E-mail: ykichoi@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

Abstracts Evolution Strategy is used as an effective search algorithm in optimization problems and Sliding Mode Control is well known as a robust control algorithm. In this paper, we propose a Sliding Mode Control Method for robot manipulator using Evolution Strategy. Evolution Strategy is used to estimate Sliding Mode Control Parameters such as sliding surface gradient, continuous function boundary layer, unknown plant parameters and switching gain. Experimental results show the proposed control scheme has accurate and robust performances with effective search ability.

Keywords Evolution Strategy, search algorithm, Sliding Mode Control, robust control algorithm

1. 서론

플랜트 파라미터와 부하의 변동, 비선형성분 등의 외란에 대해 우수한 강인성을 갖는 슬라이딩모드제어(Sliding Mode Control : SMC)는 슬라이딩면의 기울기, continuous 함수의 경계면, 플랜트 파라미터, 스위칭게인 등과 같은 제어기 파라미터들을 적절히 선택하면 우수한 성능을 얻을 수 있다[2,3,7]. 그러나 이들 파라미터의 선택에 있어서 이전의 시행착오법은 어려움이 있다.

본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 뛰어난 최적해 탐색능력을 가진 Evolution Strategy(ES)[1]가 SMC의 제어기 파라미터들을 자동 동조 하도록 하였다. 제어대상은 공장자동화에 널리 사용되고 있는 조립용 로봇인 SCARA 로봇 매니플레이터이며, 시뮬레이션을 통해서 제안한 제어알고리즘의 강인성, 효율성 등을 보이고자 한다.

본 논문의 2장에서는 제어기 설계를, 3장에서는 로봇 매니플레이터의 수학적 모델 및 실험장치들, 4장에서는 시뮬레이션 및 결과의 고찰을, 5장에서는 결론 및 향후과제를 밝힌다.

2. 제어기 설계

2.1 SMC의 설계

SMC는 상태공간상에서 상태벡터가 항상 임의의 슬라이딩면 (switching surface)을 향하도록 불연속적인 제어입력을 가하여 슬라이딩 모드 존재조건을 만족 시키는 hitting 동작과 상태벡터가 빠른 속도로 정해진 슬라이딩면을 따라서 이동하면서 강인성을 나타내는 슬라이딩 모드 동작을 두가지 기본동작으로 한다. 여기서 스위칭함수가 $s = CX$ (C 는 상수, X 는 상태벡터)일 때, 상태벡터가 $s=0$ 인 슬라이딩면을 향하도록 하기 위해서는 $s \dot{s} < 0$ 을 만족하도록 가변이득을 결정하고, 원점으로 수렴하게 하기 위해서는 슬라이딩면의 기울기 C 를 적절히 선택하여야 한다[4].

먼저, SMC 설계를 위해서는 제어대상인 로봇 매니플레이터의 운동방정식이 요구된다. 따라서, Lagrange-Euler 공식을 이용하여 비선형 요소를 외란으로 간주하면 각각의 link에 대한 전체 시스템의 운동방정식은 다음의 (1)식과 같이 간단히 표현될 수 있다 [8].

$$\tau_i = J_i \ddot{\theta}_i + B_i \dot{\theta}_i + F_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

앞의 식에서 n 은 link 수를 나타내고, J_i 는 관성모멘트 요소이며 B_i 는 점성마찰요소이다. 그리고 F_i 는 부하토크성분과 여러 가지 동역학적 비선형성분들의 합이다. (1)식을 플랜트 dynamics 벡터 $\Phi_i = [\ddot{\theta}_i \ \dot{\theta}_i \ 1]^T$ 와 플랜트 파라미터 벡터 $\alpha_i = [J_i \ B_i \ F_i]^T$ 로 분리하면 (2)식과 같이 된다[6].

$$\tau_i = [\ddot{\theta}_i \ \dot{\theta}_i \ 1]^T \begin{bmatrix} J_i \\ B_i \\ F_i \end{bmatrix} = \Phi_i \alpha_i \quad (2)$$

다음으로 SMC의 강인성과 수렴성을 가질수 있도록 스위칭 함수 $s_i = C_i e_i + \dot{e}_i$ (e_i 는 link i 의 오차이고, \dot{e}_i 는 오차의 미분치)와 reference variable $\hat{\theta}_i = C_i e_i + \dot{\theta}_i$ 을 정의한 후, 제어입력 u_i 를 (3)식과 같이 구성하였다[6].

$$u_i = \Phi_i \hat{\alpha}_i + K_i \text{conti}(s_i) \quad (3)$$

(3)식에서 Φ_i 는 $[\ddot{\theta}_i \ \dot{\theta}_i \ 1]^T$ 로 정의된 벡터이고, $\hat{\alpha}_i$ 는 (2)식의 α_i 의 추정치로서 $\hat{\alpha}_i = [\hat{J}_i \ \hat{B}_i \ \hat{F}_i]^T$ 이다. K_i 는 불연속적인 스위칭과 관련된 스위칭게인이고, C_i 는 상태벡터의 원점에서의 수렴여부와 응답곡선의 과도성능에 관련된 슬라이딩면의 기울기이고, $\text{conti}(s_i)$ 는 경계면 δ_i 이내에서는 연속적인 s_i 값을 내줌으로써 채털링문제를 감소시키는 역할을 하는 continuous 함수로서 (4)식과 같이 표현된다.

$$\text{conti}(s_i) = \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \quad (4)$$

다음으로는 SMC의 설계과정에서 얻어진 (3), (4)식의 제어기 파라미터인 C_i , δ_i , \hat{J}_i , \hat{B}_i , \hat{F}_i , K_i 를 ES의 문자열에 포함시켜 ES를 설계하고자 한다.

2.2 ES의 설계

최적해 탐색에 유용한 ES는 다음의 특징을 가진다. 첫째, 생물 진화의 원리를 모방하였다. 둘째, 목적함수의 연속성이나 미분가능성이 불필요하다. 셋째, 다른 진화알고리즘에서 요구되는 부호화 과정이 필요없고 실제변수를 사용한다.

그런데 ES는 수렴속도와 정확도를 결정하는 탐색영역이 랜덤변수의 표준편차값의 크기에 의존하는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 ES가 가지는 수렴속도와 정확도를 개선하기 위해 문자열 생성에 (5)식과 같은 방법을 사용하였다.

$$X^{i+1} = X^i \cdot \text{ZOOM} \cdot \text{SCALE} \cdot N(0,1) \quad (5)$$

X^t 는 t 세대에서의 문자열이며, $N(0,1)$ 은 평균이 0이고 표준편차가 1인 랜덤변수이고, ZOOM은 (6)식과 같이 최대적합도(MAX)와 평균적합도(AVG)를 고려해 탐색영역의 크기를 조절한다[5].

$$ZOOM = \begin{cases} a*MAX + b, & \text{if } MAX < d \\ c/(MAX - AVG), & \text{if } MAX \geq d \end{cases} \quad (6)$$

윗식에서 $a < 0, b, c, d > 0$ 인 상수이다. $MAX < d$ 인 경우에는 MAX가 작으면 ZOOM이 크므로 탐색영역이 크게 되어 전역탐색을 하고, MAX가 크면 ZOOM이 작으므로 국부탐색을 하므로 일정한 탐색영역을 갖는 탐색에 비해 수렴속도가 개선된다.

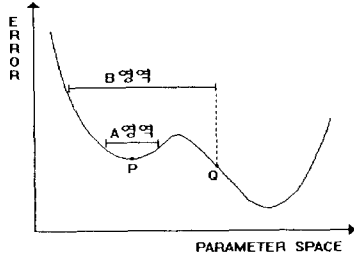


그림 1. 목적함수
Fig. 1. Objective function

$MAX \geq d$ 인 경우는 그림 1의 탐색영역 A를 갖는 P점과 같은 국부점에서는 일반적으로 $MAX - AVG$ 값이 작으므로 ZOOM이 크게 되어 탐색영역 B를 가질 수 있다. 따라서 Q점으로 이동하여 국부점 P를 빠져나올 확률이 높아진다. SCALE은 최적의 제어기 파라미터 값이 상이한 것을 고려한 것으로 탐색영역의 크기를 다르게 설정하여 탐색의 효율을 높인다.

SMC 설계과정에서 얻은 슬라이딩면의 기울기 C_i , continuous 함수의 경계면 δ_i , 플랜트 파라미터 추정치 $\hat{J}_i, \hat{B}_i, \hat{F}_i$, 스윓칭계인 K_i 로 구성된 ES의 문자열의 구조는 그림 2와 같다.

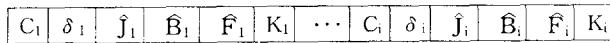


그림 2. 문자열의 구조
Fig. 2. Structure of the String

그림 3은 ES의 흐름도이다.

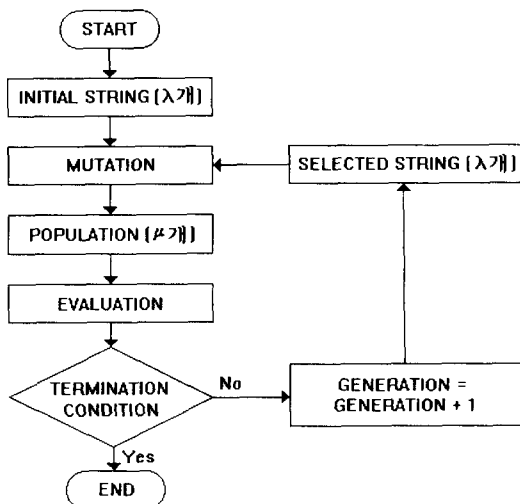


그림 3. ES의 흐름도
Fig. 3. Flowchart of the Evolution Strategy

그림 3의 흐름도의 순서는 다음과 같다. 먼저 높은 적합도를 갖는 문자열 λ 개에 각각 랜덤변수를 더하여 μ 개의 문자열집단을 만든다. 다음으로 각각의 문자열에 대해 적합도를 평가하고 Termination condition이 만족될 때까지 앞의 과정을 반복한다. 본 논문에 사용된 적합도 함수는 (7)식과 같다.

$$Fitness(j) = \frac{1}{1 + p * \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (e_{ij}(k)^2 + q * s_{ij}(k)^2)} \quad (7)$$

(7)식에서 p, q 는 상수이며 m 은 총 샘플링 수이고, n 은 link 수이다. $e_{ij}(k)$ 와 $s_{ij}(k)$ 는 각각 j 번째 문자열의 i 번째 축의 k 스텝시간에서의 오차와 스윓칭함수값이다. s_{ij} 항은 채털링현상을 줄이기 위해 사용한 δ_i 의 영향으로 강인성이 감소되는 것을 보상하기 위한 것으로 이상적인 슬라이딩모드가 발생하는 개체는 s_{ij} 항의 값이 작으므로 상대적으로 높은 적합도를 주었다.

3. 로봇 매니플레이터의 수학적 모델 및 실험장치

Lagrangian formulation을 이용하여 SCARA 로봇 매니플레이터의 운동방정식을 유도한 후에 link 1과 link 2에 관한 방정식만을 기술하면 다음의 (8)식과 같다[8].

$$\begin{aligned} H_{11} \dot{\theta}_1 + H_{12} \dot{\theta}_2 + h_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{122} \dot{\theta}_2^2 + \nu_1 \dot{\theta}_1 + k_1 \text{sgn}(\dot{\theta}_1) &= \tau_1 \\ H_{21} \dot{\theta}_1 + H_{22} \dot{\theta}_2 + h_{211} \dot{\theta}_1^2 + h_{212} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{221} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \nu_2 \dot{\theta}_2 + k_2 \text{sgn}(\dot{\theta}_2) &= \tau_2 \end{aligned} \quad (8)$$

위의 (8)식에서 $\nu_i \dot{\theta}_i$ 와 $k_i \text{sgn}(\dot{\theta}_i)$ 는 각각 각 link의 점성마찰력과 쿨롱마찰력이다. 그리고 방정식에 나타난 나머지 요소를 구체적으로 기술하면 다음의 (9)식과 같다.

$$\begin{aligned} H_{11} &= \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_2 (l_1^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2) \\ &\quad + (m_3 + m_4) (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2) + \frac{1}{3} m_4 l_4^2 \\ H_{12} &= H_{21} = \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ &\quad + (m_3 + m_4) (l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2) + \frac{1}{3} m_4 l_4^2 \\ H_{22} &= \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + \frac{1}{3} m_4 l_4^2 \\ h_{112} &= -m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 - 2(m_3 + m_4) l_1 l_2 \sin \theta_2 \\ h_{122} &= -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 - (m_3 + m_4) l_1 l_2 \sin \theta_2 \\ h_{211} &= \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 + (m_3 + m_4) l_1 l_2 \sin \theta_2 \\ h_{212} &= -h_{211} \\ &= -\frac{1}{4} m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2} (m_3 + m_4) l_1 l_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (9)$$

위의 (9)식에서는 m_i 와 l_i 와 θ_i 는 차례로 각 link의 질량과 길이와 위치를 나타낸다.

실제 실험을 위한 전체 시스템의 구성은 다음과 같다. 제안한 제어기를 turbo C-언어로 TMS320C40(DSP board)에서 구현하였고, 로봇으로부터의 위치신호와 서보드라이브로 전송되는 여러가지 서보신호는 TMS320C40과 fully compatible한 PC/32DIO card를 사용하여 전송하였으며, D/A전류명령도한 TMS320C40과 fully compatible한 16CH card를 사용하여 전송하였다. 로봇의 위치정보의 resolution은 1 회전당 16 bit 이다.

그림 4는 실제 실험을 위한 하드웨어 구성도이다.

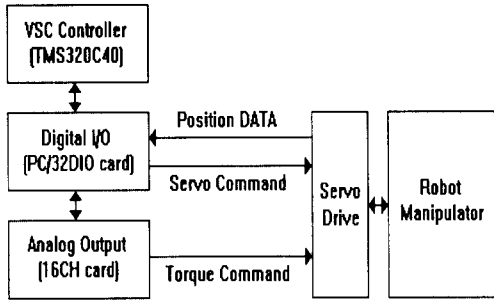


그림 4. 하드웨어 구성도
Fig. 4. Hardware schematic diagram

4. 시뮬레이션 및 결과의 고찰

그림 5는 제안한 제어알고리즘을 나타내는 블록선도이다.

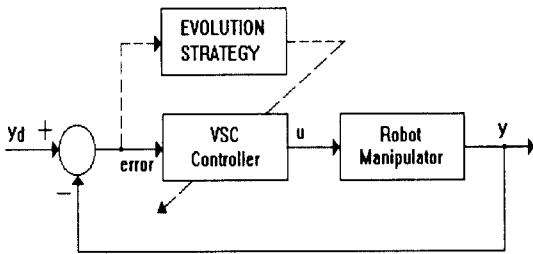


그림 5. 제안한 제어시스템의 블록선도
Fig. 5. Blockdiagram of the Proposed Control System

본 시뮬레이션에서는 $m_1 = m_2 = 1$ 이고, $l_1 = l_2 = 1$ 인 2 link SCARA 로봇에 대하여 IBM PC 486DX2-66 에서 제안한 제어 알고리즘을 구현하여 적용하였다.

그외에 시뮬레이션에 사용된 각종 파라미터는 다음과 같다.

로봇 각각의 link에 대해 앞의 그림 2에 나타난 SMC 설계과정에서 얻어진 슬라이딩면의 기울기 C_i , continuous 함수의 경계면 δ_i , 플랜트 파라미터 추정치 \hat{J}_i , \hat{B}_i , \hat{F}_i , 스위칭계인 K_i 로 구성된 ES 문자열의 크기는 12 이고, ES 문자열 집단의 갯수 μ 는 10, 시뮬레이션이 진행된 전체 학습의 세대수 t 는 20, 로봇의 위치 지령치는 0.5π (스텝입력), 샘플링 간격은 1msec 이며, 하나의 문자열에 대해 1초간 실험을 하였다.

시뮬레이션의 결과와 그 분석은 그림 6에서 그림 10에 나타난 것과 같다. 그림 6, 7은 각각 link 1과 link 2의 1~20 세대동안의 스텝응답이다. 응답곡선을 살펴보면 세대가 진행됨에 따라 점차로 ES의 제어기 파라미터 탐색능력에 의해 성능이 개선되고 있음을 알 수가 있다. 그림 8, 9는 각각 link 1과 link 2의 10세대의 스위칭 함수 값이다. 제안된 적합도 함수에 의해 스위칭 함수 s_i 의 값이 $s_i = 0$ 인 슬라이딩면에 비교적 많은 시간동안 머무르고 있으므로, 채터링 현상을 줄이기 위해 사용한 δ_i 의 영향으로 인한 강인성의 감소를 보상하고 있다. 그림 10은 1~20 세대 전과정에 걸친 최대적합도와 평균적합도의 추이곡선이다. 세대가 진행됨에 따라 최대적합도와 평균적합도가 증가하는 방향으로 나아감을 알 수 있다.

즉, Evolution Strategy를 이용한 로봇 매니플레이터의 슬라이딩 모드 제어에서는 ES의 효과적인 파라미터 자동동조에 의해 학습 세대가 증가할수록 로봇의 위치제어응답의 상승시간과 정착시간을 개선하였다.

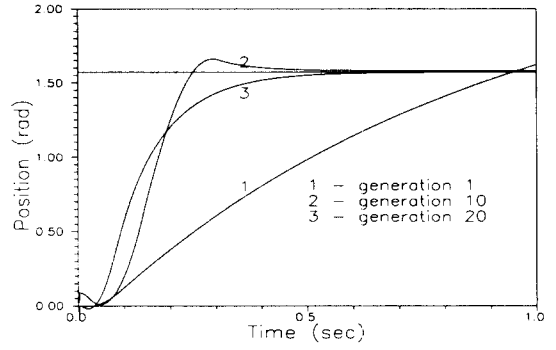


그림 6. 1축의 스텝응답(1~20 세대)
Fig. 6. Step response of link 1

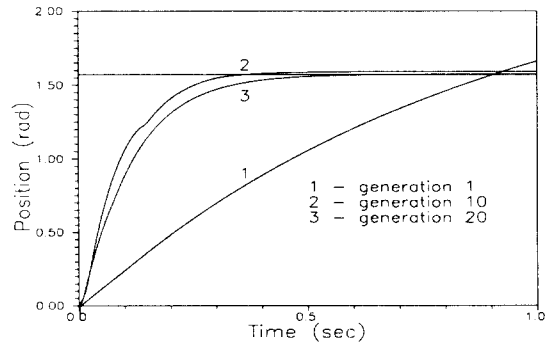


그림 7. 2축의 스텝응답(1~20 세대)
Fig. 7. Step response of link 2

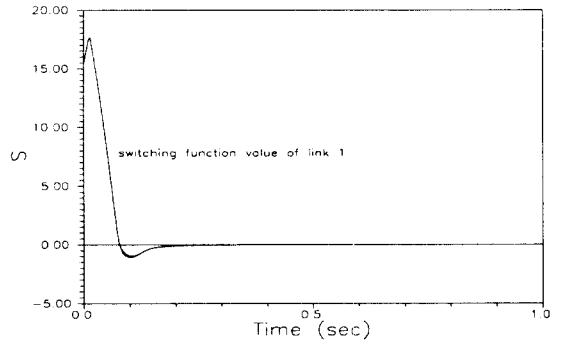


그림 8. 1축의 스위칭 함수 값(20 세대)
Fig. 8. Switching function value of link 1

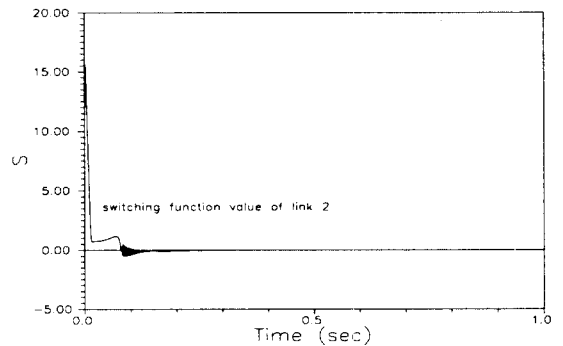


그림 9. 2축의 스위칭 함수 값 (20세대)
Fig. 9. Switching function value of link 2

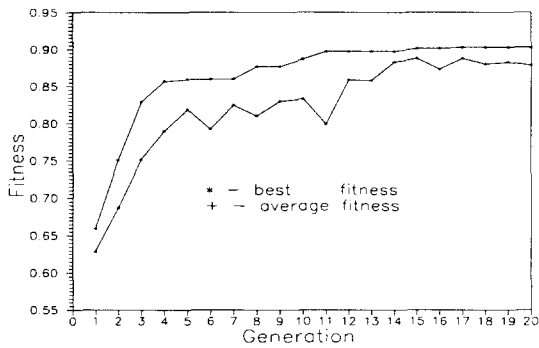


그림 10. 적합도의 추이
Fig. 10. Trends of fitness

5. 결론 및 향후과제

SCARA 로봇 매니플레이터의 위치제어에 Evolution Strategy와 슬라이딩모드제어를 사용하여 정확한 위치제어성과 비선형성분과 토크외란 등의 외란에 잘 대응하는 강인한 성능을 얻었다. ES의 효과적인 최적점 탐색능력은 SMC의 우수한 제어성과 강인성을 보장하였고, 외란에 대한 제어기 파라미터의 적응동조로 제어기의 강인성 증대를 가져왔다.

본 연구의 향후과제는 제안된 알고리즘을 앞의 그림 4에서와 같이 TMS320C40 (DSP board)에서 구현을 하고 SCARA 로봇 매니플레이터(SM5)에 실제 적용을 하여 그 우수성과 실용성을 확인하고자 한다.

참고문헌

- [1] Tomas Bäck, "Selective Pressure in Evolutionary Algorithms: A Characterization of Selection Mechanisms," *Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Vol.1, pp. 57-62, 1994.
- [2] S. V. Drakunov and V. I. Utkin, "Sliding mode control in dynamics systems", *INT. J. Control*, 1992. vol. 55, NO. 4, pp, 1029-1037
- [3] J. H. Lee, S. K. Chung, G. W. Moon, I. S. Kim, M. J. Yoon and T.Y. Ahn, "Design of a Variable Structure Controller Using an Integral-Augmented Sliding Surface for Position Control of BLDDSM with Prescribed Output Dynamics", *Journal of KIEE* vol. 8, no. 1, pp. 16-26, 1995
- [4] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, "Control of Robot Manipulators", Macmillan
- [5] J. H. Park, Man Suck Son, Young Kiu Choi, "Parameter Tuning for Controller using Evolution Algorithms", *Proceedings of the 1st KECW* pp. 25-31, 1994
- [6] Chun-Yi Su and Tin-Pui Leung "A Sliding Mode Controller with Bound Estimation for Robot Manipulators", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 2, pp. 208-214, 1993
- [7] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. AC-22, NO.2, pp, 212-221. 1977

[8] 신기대, 이민철, "DSP를 이용한 SCARA 로봇의 슬라이딩모드 제어", '94한국자동제어학술회의논문집, pp. 48-51, 1994.