

이족 보행 로봇의 반복 걸음새 제어를 위한 학습제어기의 구현

Implementation of a Learning Controller for Repetitive Gate Control of Biped Walking Robot

임동철*, 오성남**, 국태용***

(Dong Cheol Lim, Sung Nam Oh, Tae Yong Kuc)

Abstract - This paper present a learning controller for repetitive gate control of biped robot. The learning control scheme consists of a feedforward learning rule and linear feedback control input for stabilization of learning system. The feasibility of learning control to biped robotic motion is shown via dynamic simulation and experimental results with 24 DOF biped robot.

Key Words : biped walking robot., dynamic walking, learning control

1. 서론

최근에는 스스로 환경을 인식하고, 학습, 추론을 통한 판단을 할 수 있는 지능 로봇에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이족 보행 로봇에 대한 연구는 그 목적에 따라 크게 두 가지로 나누어 질 수 있는데 그 첫째는 이족 보행 로봇의 순수 제어에 관련된 연구이고 둘째는 걸음새의 안정화에 관련된 연구이다[1][2]. 또한 로봇이 쓰러지지 않고 안정하게 걸을 수 있는 각 관절의 궤적 생성 역시 중요한 문제로서 기존 궤적의 생성 방법에 따라서는 다음과 같은 내용의 연구가 진행되어 왔다. 패시브 다이내믹스(passive dynamics)를 이용한 방법으로서 무동력 상태에서 경사를 내려오는 걸음걸이 생성방법[3], 역진자 모델에 기초한 형태로서 로봇 트렁크가 추종하게 될 기준 경로 및 각 관절의 지면과의 기구학적인 관계로부터 기준 궤적을 구하는 방법[4], 뉴턴 오실레이터를 이용하여 일정한 주기의 반복 함수를 생성하고 외부 센서로부터의 입력 데이터에 따라 보정하여 기준 경로를 생성하는 방법[5], 모의 실험이나 또는 실제 제작한 로봇에 대하여 적절한 걸음걸이가 생성될 때까지 반복적으로 보행을 시켜가면서 기준 경로를 보정하는 방법[6], 그 밖에 정역학 및 동역학을 고려하고 ZMP(Zero Moment Point), 자이로센서, 기울기 센서, 지면과의 임팩트 등 센서 입력을 참조하여 걸음걸이를 보정하면서 기준 경로를 추종하는 방법[7][8][9] 등 여러 방면의 연구가 이루어져 있다.

이족 보행 로봇의 제어에 있어서 로봇의 관절 제어를 어렵게 하는 요인은 관절에 실리는 부하와 마찰 등이 보행 주기에 따라 매우 크게 변화한다는 점이다. 여기에 파라미터와 같은 동적 특성의 변화에 대한 적응 능력이 떨어지는 선형 PID 피드백 제어기[10] 등의 일반적인 선형 제어기를 적용한다면 보행의 각 단계 마다 오차가 생기는 정도가 달라져 전체적인 걸음을 안정화시키는 이득값을 찾기는 대단히 힘들 것이다. 따라서 본 논문에서는 복잡한 보행 로봇의 동역학을

계산하지 않으면서 반복되는 학습을 통해 보행 주기에 따라 생기는 주기적 비선형 부하 변동을 학습할 수 있는 반복 학습 제어 알고리즘을 제안한다[11].

본 논문에서는 이와 같은 반복 학습 제어 기법을 24자유도를 가지는 이족 보행 로봇에 적용하여 기준 궤적 추종 작업을 수행함으로써 제안된 제어기의 안정도 보장 및 학습의 진행에 따른 위치 및 속도 오차의 수렴을 확인하고 기존의 선형 제어기와 파라미터 불확실성, 외란 등에 대한 강인성을 비교 평가하고자 한다.

2. 로봇 동역학 및 학습 제어기

n -DOF(Degrees of freedom)의 강체 로봇 시스템의 동역학 식은 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + F(q, \dot{q}) + d = \tau \quad (1)$$

여기서 $q \in R^n$ 는 로봇 관절의 일반화 좌표 벡터이다. 그리고 $D(q) \in R^{n \times n}$ 는 양의 한정(positive-definite)인 관성 행렬이며, $B(q, \dot{q}) \in R^n$ 는 구심력 및 코리올리(coriolis)력을 나타내는 벡터이다. 또한 $F(q, \dot{q}) \in R^n$, $d(t) \in R^n$, $\tau \in R^n$ 는 각각 중력과 마찰력, 크기가 유계된 미지의 반복 확정 외란, 로봇에 주어지는 입력 토크 벡터를 표시한다.

반복 학습 제어 알고리즘은 모델화되지 않은 동역학에 기인하는 외란에 따른 제어의 어려움을 극복하고자 연속된 반복 동작을 통하여 원하는 제어 입력을 찾는 제어 기법이다. q^i 를 추종하기 위한 i 번째 반복 학습시 로봇의 시스템 방정식 식 (1)을 선형화 하면 다음과 같은 선형 시변 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$C_d(\ddot{q}^i(t) - \ddot{q}_d(t)) + E_d(\dot{q}^i(t) - \dot{q}_d(t) + F_d(\dot{q}(t)) - q_i(t)) = T^i - S_d \quad (2)$$

여기서 각 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$C_d \equiv M(q(t))$$

$$E_d \equiv \frac{\partial B}{\partial q(t)} / (q^i(t), (q^i(t)))$$

$$F_d \equiv \frac{\partial M}{\partial q(t)} / (q^i(t) + \frac{\partial B}{\partial q(t)} / (q^i(t), (q^i(t))) + \frac{\partial F}{\partial q(t)} / (q^i(t),$$

저자 소개

*성균관대학교 전자전기공학부 박사과정
- (dclim@skku.edu)

**명지대학교 전기공학과 박사과정
- (rats296@hanmail.net)

***성균관대학교 전자전기공학부 조교수·공학박사
- (tykuc@skku.ac.kr)

$(q_i(t))$

$$S_d \equiv M(q_i(t))\ddot{q}_d(t) + B(q_i, \dot{q}_d) + G(q_i(t)) + d$$

로봇시스템이 요구 궤적을 추종하도록 하기 위하여 제어 법칙을 다음과 같이 구성한다.

$$T^i = T_e^i + H^i \quad (3)$$

$$T_e^i = K(q_i - \hat{q}^i) + L(\dot{q}_d - \dot{q}^i) \quad (4)$$

여기에서 T^i 는 i 번째 반복의 제어입력 토크를 의미하고 T_e 는 피드백 이득(Feedback Gain) K, L 를 가지는 일반적인 PD 제어기 형태의 제어 입력 토크이다. 식 (4)를 시스템 방정식 식 (2)에 추가함으로써 오차 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_d \ddot{e}^i(t) + (E_d + L) \dot{e}^i(t) + (F_d + K) e^i = S_d - H^i \quad (5)$$

$$\dot{e}^i(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}^i(t), \quad e^i(t) = q_d(t) - q^i(t).$$

$\ddot{e}^i(t) = \ddot{q}_d(t) - \ddot{q}^i(t)$ 는 위치, 속도, 가속도 오차로서 위와 같이 정의한다.

구현된 학습제어기의 제어 방법은 다음과 같다. 첫째, K, L 의 값은 추종 궤적에 따르는 여러 동력학이 안정할 만큼만 큰 양의 값을 가지도록 선택한다. 둘째로 $H^i(t)$ 가 비선형항 $S_d(t)$ 에 수렴하도록 하는 학습 규칙을 사용하여 $H^i(t)$ 를 갱신한다. 학습의 초기 단계에서는 H^i 를 0으로 정의한다.

H^i 를 갱신시켜서 미지의 값을 가지는 비선형항 S_d 로 수렴하도록 하는 학습 규칙은 다음과 같다.

$$H^{i+1} = H^i + \beta T_e^i \quad (6)$$

여기에서 β 는 학습 인자(training factor)로 불리는 양의 상수이고 그 범위는 H^i 의 수렴을 보장하기 위해 $0 < \beta < 2$ 사이의 값을 가져야 한다. 학습 규칙은 H^i 를 갱신하는데 사용되는 피드백 토크 인자 T_e^i 내에서 미지의 원하는 입력 토크 S_d 를 찾는 것을 그 내용으로 하고 있다. 그림 1은 이러한 목적을 위하여 구현된 학습제어기의 제어구조를 보여준다.

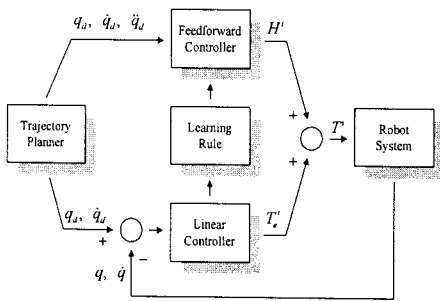


그림 1. 학습제어기의 제어구조

위에서 궤적 플래너(trjectory planner)는 원하는 궤적을 만들고 고정된 이득을 가지는 선형 PD 제어기는 일정한 오

차 한계 내로 시스템의 제어 안정성을 부여한다. 그와 동시에 피드포워드 제어기는 피드포워드 토크 요소 H^i 를 갱신하여 시스템의 오차가 0으로 수렴하도록 한다.

3. 모의 실험 및 실험 결과

제안된 반복 학습제어 기법은 24자유도를 가지는 이족 보행 로봇에 적용되었다. 로봇의 궤적은 고정된 다리와 움직이는 다리에서 엉덩이 부분과 접합점의 속도가 일정함을 가정, 순기구학을 풀어 각 조인트별로 시간에 따른 각도를 얻어냈다. 로봇의 보행 주기는 deploy, swing, heel contact, support의 순으로 설정되었다.

적용된 반복 학습 제어기의 제어 파라미터는 표 1에 기술하였다.

번호	파라미터	값	비고
1	Kp	200	비례 이득
2	Kd	100	미분 이득
3	β	0.6	학습률 상수
4	δ	0.001[sec]	샘플링 시간 간격

표 1. 반복 학습 제어기의 제어 파라미터

표 2와 그림 2는 각각 이족 로봇 스펙, 이족 로봇 모델을 나타내고 있다. 그림 2에서 좌측 그림은 VC++, Open GL을 이용한 이족 보행 로봇의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고 우측 그림은 실제 이족 보행 로봇의 모습을 나타내고 있다. 그리고 그림 3, 4는 1번째 관절과 8번째 관절의 궤적 추종 결과를 나타내고 있다.

1	이족 로봇	키	45cm
		무게	3kg
		DOF	24(다리 - 12, 허리 - 3, 팔 - 8, 목 - 1)
		기구부 재료	알루미늄 50,60
		액츄에이터	RC 모터(Hitec 5995 TG)
2	개발 환경	CPU	ATmega128
		RF 모듈	BIM418
		조이스틱	PS2 조이패드
		배터리	리튬 폴리머

표 2. 이족 로봇 스펙

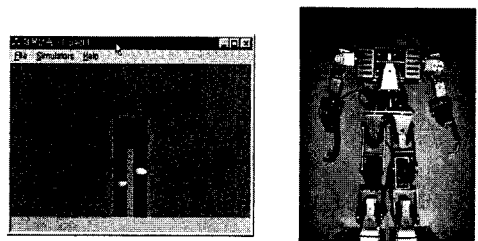


그림 2. 시뮬레이션 로봇 모델 및 실제 로봇

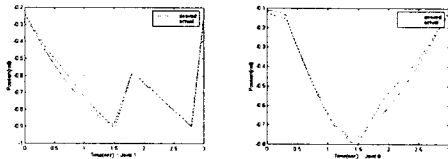


그림 3. 1번째 및 8번째 관절의 선형 PD 제어기에 대한 귀적 추종 결과

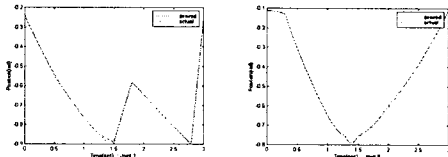


그림 4. 1번째 및 8번째 관절의 반복 학습 제어기에 대한 귀적 추종 결과

실험 결과에서 보듯이 제안된 반복 학습 제어기가 학습 제어를 하지 않는 선형 PD 제어기보다 성능이 더 뛰어나고 위치 추종 오차 또한 훨씬 작음을 알 수 있다. 그림 5의 (a)를 보면 학습의 초기 단계에서는 학습 제어기보다 선형 제어기가 제어 입력의 대부분을 차지하지만 학습이 진행됨에 따라서는 반대로 학습 제어기가 선형 제어기보다 더 많은 부분을 차지하게 됨을 알 수 있다. 그림 3의 (b)는 학습의 진행에 따른 전체 제어 입력의 합을 보이고 있다. 그림 3의 (c)는 학습 횟수의 증가에 따라 전체 관절의 RMS 값이 감소하는 것을 보이고 있는데 이는 학습이 증가함에 따라 궤적 오차가 수렴한다는 것을 보이는 결과이다. 학습률 상수 β 의 증가에 따라 RMS 오차가 변화하게 되는 데 그 내용은 그림 3의 (d)에 나타나 있다.

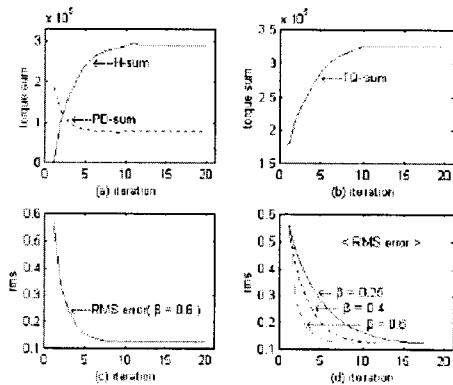


그림 5. 학습 횟수의 증가에 따른 토크 합 및 RMS 오차의 도시

4. 결론

본 논문은 제한된 환경에서만 이동할 수 있는 기존의 로봇에 비해 인간이 생활하는 환경에 적용하기가 보다 적합한 로봇으로서 이족 보행 로봇을 제어 대상으로 정하였고 제어 알고리즘으로는 복잡한 보행 로봇의 동력학을 계산하지 않으면

서, 보행주기에 따라 생기는 주기적 비선형 부하 변동을 학습할 수 있는 반복 학습 제어 알고리즘을 적용하였다. 본 연구에서는 제안된 반복 학습 제어기의 성능을 검증하기 위해 총 24 자유도를 가지는 이족 보행 로봇 시스템에 대하여 정해진 요구 궤적에 대한 추종 작업을 수행하였고 그 결과 제안된 제어기의 안정도 보장 및 학습의 진행에 따른 위치 및 속도 오차의 수렴을 확인하였고 제안된 제어기가 기존의 단순한 선형 제어기보다 미지의 파라미터, 외란 등의 측면에서 더 강인하고 뛰어난 성능을 나타냄을 보였다.

향후 연구과제는 반복 학습 제어 알고리즘 외에 기타 여러 지능 제어 알고리즘에 대해서도 그 적용 및 평가를 해내는 것이고 또한 어떠한 상황 및 환경에서도 이족 보행 로봇이 유연하게 대처하여 넘어지지 않고 걸음을 행할 수 있도록 하는 지능화된 보행 알고리즘에 대한 연구이다.

참고문헌

- [1] C. Chevallereau and Y. Aoustin, "Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot," *Robotica*, vol. 19, no. N5, pp. 557-569, 2001
- [2] J. W. Grizzle, G. Abba, and F. Plestan, "Asymptotically stable walking for biped robots : analysis via systems with impulse effects," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 46, pp. 51-64, Jan. 2001
- [3] Tad McGeer, "Passive dynamic walking", *International Journal of Robotic Research*, vol. 9, no 2, pp. 62-82, 1990.
- [4] S. Kajita and K. Tani, "Adaptive gait control of biped robot based on realtime sensing of the ground profile," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp.570-577, 1996.
- [5] W. Ilg, J. Albiez, H. Jeede, K. Berns, R. Dillmann, "Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine BISAM dynamic walk of a biped," *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2354-2359, May 1999.
- [6] J. Pratt, P. Dilworth, and G. Pratt, "Virtual model control of a bipedal walking robot," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 193-198, 1997.
- [7] G. Kinoshita, T. Kimura and M. Shimojo, "Dynamic sensing experiments of reaction force distributions on the sole of a walking humanoid robot", *IEEE Intl. Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 1413-1418, 2003.
- [8] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO : System overview and integration," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2478-2483, 2002
- [9] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa, Toru Takenaka "The development of Honda humanoid robot," *Proc. of International Conference on Robotics and Automations*, pp. 1321-1326, 1998
- [10] Levis, A. H., et al., "Challenges to control : a collective view", *IEEE Trans, AC.*, vol. 32, No.4, pp. 275-285, Apr. 1987
- [11] Tae-yong Kuc, Kwang-hee Nam, and Jin S. Lee "An iterative learning control of robot manipulator" *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.7, No.6, Dec, 1991