

CASE 기술동향 분석 (1)

미세외란과 상관관계를 이용한 조립자동화

이수용 박사

한국과학기술원 휴먼로봇연구센터

1. 서론

로봇을 이용한 생산자동화는 현재까지 많은 연구가 이루어졌으며, 실제 생산현장에서도 널리 사용되고 있다. 특히, 로봇의 뛰어난 위치 정확도와 반복특성으로 인하여 단순 반복작업에 많이 이용되고 있다. 대부분의 산업용 로봇은 위치 제어기만으로 구성되어 있고, 정확한 경로 명령을 오프라인으로 생성하거나, 직접 교시반을 사용하여 경로를 기록하여 두면, 이를 로봇이 매우 적은 위치 오차로 추종하게 되므로 조립, 운반, 용접 등의 작업이 가능하다. 그러나, 좀더 정밀한 조립작업이 요구되거나, 대상 물체의 위치 오차가 존재하고, 정확한 위치 정보가 부족할 때는 기존의 위치 제어기만으로는 부족한 경우가 있다. 이를 위하여, 힘제어나 적응제어기에 대한 연구가 이루어져서 이 분야 또한 많은 발전을 이루었다. 그러나, 이 제어기들은 그 안정성에 대한 보장이 어려우며, 안정성을 충분히 보장하기 위하여 큰 제한 조건이 생겨서 본래의 목적을 벗어나는 경우가 종종 발생한다.

이미 언급하였듯이 불확실한 주변 정보만으로도 원하고자 하는 작업을 수행하기 위해서는 주어진 조건에 따라 실시간으로 최적의 제어를 가능하게 하는 적응제어 방법이 필요하다. 그러나, 기존의 적응제어 방법과는 달리 간단한 구조로 기존의 위치 제어기를 그대로 사용하며, 최적의 제어가 가능한 미세외란(perturbation)과 상관관계(correlation)를 이용한 조립자동화 방법을 제안한다. 이는 인간의 인식구조에 기초하여, 이를 수학적으로 해석한 후 실제 로봇 조립 시스템에 적용한

것이다. 수학적 의미의 미세외란(perturbation)은 물리적으로 작은 변위의 진동(dither)으로 나타낼 수 있으며, 이 방법은 조립자동화 분야에서 마찰력을 감소시키기 위하여 흔히 사용되고 있는 방법이다. 예를 들면, 부품 정렬 장치, 자동 삽입 장치 등에서 진동을 첨가하여 마찰력을 줄일 수가 있다. 그러나, 이러한 수동적 진동 첨가 방법이 아니라, 진동을 가하였을 때, 이로 인한 시스템의 반응과의 상관관계(correlation)를 구하여 보면, 좀더 유용한 정보를 얻을 수 있다. 또한 미지의 비선형 특성이 존재하더라도 전체 시스템의 안정성을 보장하는 조건을 구할 수 있다.

2. 미세외란/상관관계

미세외란과 상관관계에 관하여 간단한 예를 들어보면 다음과 같다. <그림 1>과 같이 미지의 시스템에 대하여, 입력을 자유로이 변화시킬 수가 있고, 또한 출력을 측정 가능한 경우, 입력과 출력간의 정확한 관계를 알 수 없다고 해도, 입력을 변화시켜가며, 출력을 어느 정도 원하는 상태로 조절이 가능하다.

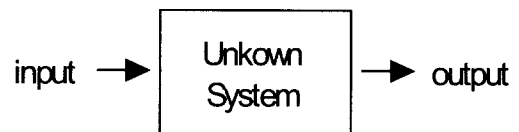


그림 1. 미지의 시스템의 입력과 출력.

예를 들어 라디오의 소리를 원하는 크기로 조절하고자 할 때, 입력은 볼륨의 회전각이고, 출력은 소리의 크기에 해당된다. 경험적으로 시계방향으로 회전하면, 소리가 커진다는 것은 알고 있으나, 이러한 사전지식이 아무것도 없다고 가정하면, 일단 한 방향으로 약간 돌려본 후 소리의 크기 변화를 볼 것이다. 만약 소리가 커진다면, 계속해서 같은 방향으로 원하는 소리 크기가 될 때까지 돌릴 것이며, 그렇지 않다면, 반대방향으로 돌려 볼 것이다. 이를 수학적으로 표현하면, 입력의 변화에 대한 출력의 변화를 구한 후 이를 바탕으로 입력을 조절하는 것이다.

$$input_{new} = input_{old} + \gamma \frac{\Delta output}{\Delta input} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta output}{\Delta input} : \text{입력에 대한 출력의 변화} \quad (2)$$

이를 좀더 수학적으로 접근하기 위하여, <그림 2>와 같이 입력과 출력 특성을 갖고, 입력 x 를 변화시켜, 출력을 최소화하려는 것은 바로 $F(x)$ 를 최소화하는 x_{opt} 를 구하는 것이다. 이를 위하여, 현재 입력 값을 중심으로 삼각함수 파형의 미세외란을 가하면, 이때의 출력 $F(x)$ 는 미세외란과 동위상 또는 역위상 관계를 나타낼 것이다.

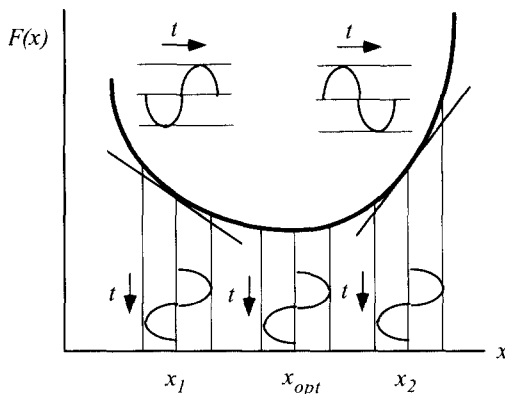


그림 2. 입력과 출력관계.

즉, (3)과 같은 상관관계으로부터 gradient값을 구할

수 있다.

$$R(x) = \int_t^{t+\frac{2\pi}{\omega_p}} \delta_x F(x) \quad (3)$$

여기서 $\delta_x = A \sin(\omega_p t)$

이 미세외란/상관관계방법은 정적 시스템의 경우는 linear regression이론을 적용하여 상관관계 값이 gradient 값에 비례한다는 것을 증명할 수 있고, 동적 시스템에 대하여는 average theorem을 적용하여 마찬가지로 증명할 수 있다. 또한, 다변수 시스템에 대하여도 orthogonality를 사용하여 증명된다 [1][2]. 따라서, 제어하고자 하는 시스템의 입, 출력간의 gradient값을 구할 수 있으므로, 출력의 최소화 또는 최대화가 가능하게 되는 것이다.

3. 미세외란/상관관계 기반 로봇 제어장치

기존의 로봇 위치제어기에 미세외란과 상관관계 기능을 첨가한 제어기의 구성은 그림 3과 같다.

이 제어기의 수학적 해석에 의하면 [3], 미세외란 주파수가 높을수록, 변위가 적을수록 효율적인 것을 알 수 있다. 그러나, 일반적 로봇 제어기는 10Hz이내의 주파수대를 갖고 있으므로 이러한 미세외란이 불가능하다. 또한 안정성 해석을 위한 Popov criterion의 적용을 위하여, 로봇위치 제어기와 미세외란 발생 부분을 분리하는 것이 바람직하다. 이를 위하여, 작은 변위, 큰 출력, 그리고, 높은 주파수대를 갖는 피에조 액츄에이터를 사용한 진동 엔드 이펙터를 제작하여, 이를 미세외란 발생부로 사용하였다 (<그림 4> 참조). 이는 두 개의 액츄에이터를 사용하여 push-pull 운동으로 인한 1차원 미세외란을 발생하며, 4개의 액츄에이터를 사용하여 2차원 상호 직교되는 미세외란도 가능하다.

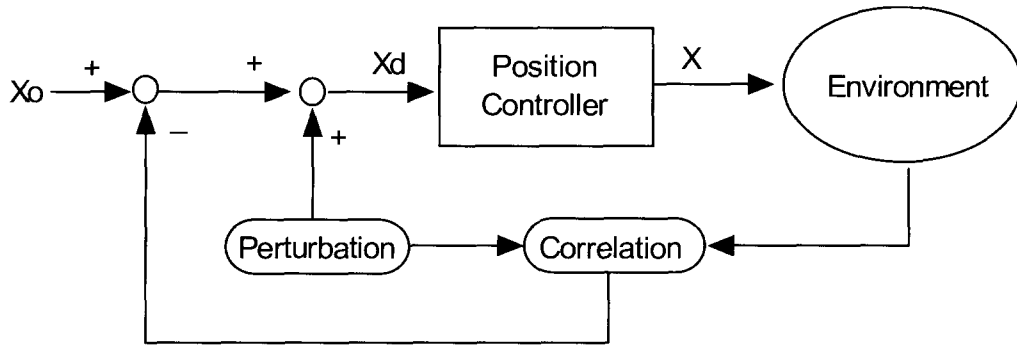


그림 3. 미세외란/상관관계 기반.

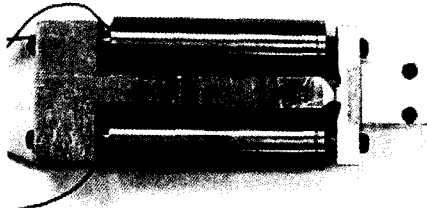


그림 4. 진동 엔드 이펙터.

4. 응용예: 열교환기 조립 로봇

미세외란/상관관계방법을 로봇을 사용한 열 교환기의 조립 작업에 대하여 응용한 예를 들어본다. 열 교환기는 매우 얇은 알루미늄 층을 적층하여, 이 사이를 동파이프가 통과하며, 열 교환이 이루어지도록 설계되었다. 그러나, 펀칭 작업으로 제작된 구멍들이 완전히 정렬되어 있지 않으며, 이러한 다층 구조에 동파이프를 삽입할 때는 동파이프와 알루미늄포일간의 접촉면적 감소로 인한 열전도성의 저하를 방지하기 위하여, 주의를 기울여 조심스럽게 삽입하여야 하므로, 이 작업은 대부분 자동화하지 못하고, 사람이 직접 조립 작업을 하고 있다. 약 1미터 길이의 동파이프 삽입시 숙련된 사람의 작업 방법을 살펴보면, 바로 미세외란과 상관관계를 모두 이용하는 것을 알 수 있다. 즉, 파이프가 어느 정도 삽입되어 더 이상 들어가려 하지 않을 때, 가볍게 이를 흔들어 마찰력을 줄이며, 또한 어느 방향으로 파이프를 틀어야 하는가를 알아내는 것이다. 이와

같은 알고리즘을 단순히 위치 제어기만을 갖춘 로봇을 사용하여 구현하기는 불가능하다. 따라서, 미세외란/상관관계방법을 사용한 제어기를 구성하여 파이프 삽입 작업을 자동화할 수 있다. 먼저, 파이프의 삽입 방향을 z-축으로 정의하고, 이 방향으로의 반발력 F_z 를 최적화 지수로 설정하며, 이를 최소화함으로써, 삽입을 수월하게 할 수 있다. 이때 횡방향으로 미세외란을 가하며, 이 미세외란과 F_z 간의 상관관계를 구하여, 이로부터 횡방향 위치 명령을 수정한다. 만약 열교환기내의 구멍이 완전한 정렬을 이루고 마찰력이 존재하지 않는다면, 기하학적 중심으로 파이프를 삽입하는 것만으로도 성공적으로 작업을 마칠 수 있으나, 실제 제작 가공상의 여러 가지 이유로 인하여, 기하학적 중심과 최적 경로와는 차이가 있다. 이를 미세외란/상관관계 방법을 이용하여 보정하여 주는 것이다. 실제 로봇 팔의 끝단에 진동 엔드 이펙터를 부착하여 파이프를 삽입하는 실험을 <그림 5>에 나타내었다.

이 방법을 사용하여 최적화 지수인 F_z 를 다른 제어 방법들과 비교한 결과를 <그림 6>에 보여준다. 일반적인 peg-in-hole 실험에 많이 사용되는 compliance 제어기는 peg의 끝단에 원하는 compliance를 갖도록 구성하는 것이므로, 파이프 삽입과 같은 multiple contacts를 갖고, 삽입 깊이가 큰 경우는 적당하지 않다.

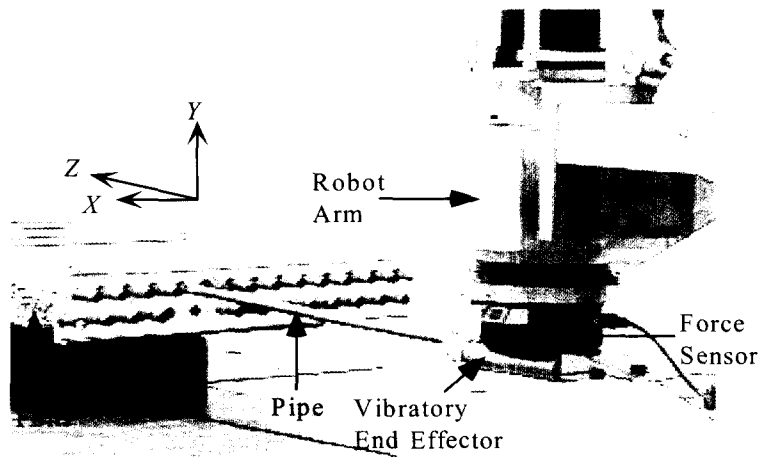


그림 5. 파이프 삽입 실험.

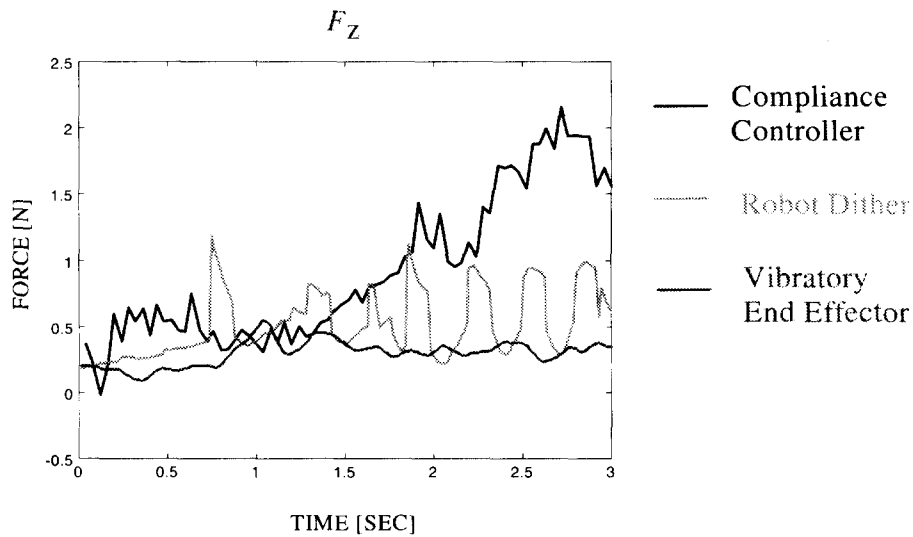


그림 6. 다른 제어기와의 비교.

5. 안정성

열 교환기와 같은 구조는 수학적으로 모델링이 불가능하며, 다만 실험적으로 근사적인 특성만을 구해볼 수 있다. 따라서, 선형 시스템 이론만으로는 이러한 구조를 포함한 제어기의 안정성을 증명할 수가 없다. 그러나, 수식적으로 정확히 나타낼 수 없는 비선형 시스템에 대하여도, 미세외란/상관관계 방법을 사용한 제어기의 안정성을 Popov criterion을 적용하여, 증명할 수 있다[3]. 이를 통하여, 안정성이 보장되는 변수 값들의 범위를 구하여, 안정된 제어기를 구현할 수 있다.

6. 결론

조립 작업시 사람이 이용하는 방법을 수학적으로 구현한 미세외란/상관관계에 기초하여, 이의 기본 원리와 응용에 대하여 살펴보았다. 이 방법의 가장 큰 특징은 기존의 위치 제어기에 외부 궤환 제어기를 첨가함으로써 힘에 의하여 안내되는 제어기로 구조를 개선할 수 있다는 점이다. 이러한 제어기를 갖는 로봇을 열 교환기 조립작업에 응용한 예를 들었으며, 로봇을 이용한 다른 조립 작업에도 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

- [1] S. Lee, H. Asada, "Force-Guided Robotic Assembly based on Perturbation/Correlation", IEEE/ASME International Conference on advanced Intelligent Mechatronics , 1997
- [2] S. Lee, H. Asada, "Assembly Automation using Perturbation/Correlation", International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997
- [3] S. Lee, H. Asada, "Assembly Automation using Vibratory End Effector: Modeling and Stability Analysis ", IEEE International Conference on Robotics and Automation , 1997

저자소개

이수용

1989년 서울대학교 기계공학과 (학사)
1991년 서울대학교 기계설계학과 (석사)
1996년 Massachusetts Institute of Technology 기계공학과 (박사)
1996년 - 현재 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원
관심분야-로봇제어이론, 자동화시스템
마이크로프로세서 응용
Tel: 02-958-5644
E-mail: gemma@kistmail.kist.re.kr

- 담당 편집위원 : 이 수용 박사
(한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터)-