

19. Haptics in Manipulation

Brent Gillespie

19.1 Introduction

- 움직임을 수반한 촉각: Active Touch, Haptic Exploration
- 개체를 조작하거나 영향력을 행사하기 위한 “움직임”
 - 움직임을 감지하기 위해 만지거나, 개체를 움직이기 위해 만짐
- 개체를 감지하기 위해 만지는 것에서 개체를 조작하기 위해 만지는 것으로 관점 변화
 - 움직임은 인간의 의도와 더욱 밀접한 관련을 갖고 역할을 수행하며, 촉각은 보조적인 역할을 수행함
- 조작 작업이 수행될 때, 촉각은 작업이 의지대로 수행될지 말지를 결정하게 됨
- 조작 작업을 수행하기 위한 감각 정보와 조작 전략을 계획하거나 선택하기 위해 종속적으로 사용될 감각 정보를 구분 (피드백 제어의 영역에서 사용되는 개념을 사용)
- 피드백 제어는 공학 과정의 일부분에 해당하지만, 조작을 위한 감각 정보의 사용을 명확하게 하는데 도움을 줄 수 있음 (제어론과 심리학 사이의 교류)
- 조작 - 정보 공급 과정, 촉각 - 정보 수집 과정; 기계적인 접촉을 통해 양방향으로 동시에 정보를 주고받는 것이 가능

- 음악가는 악기를 “피드백 제어 시스템”으로서 제어함
 - 대다수의 음악적 작업은 적응 제어의 응용으로서 해석되지만, 어떠한 음악적 작업은 추적 제어의 응용으로 해석되기도 함
- 기술 습득에서의 촉각의 역할에 대한 고찰은 제어와 학습에 관한 이론의 간단한 복습을 통해 이루어 짐

19.2 The Mechanical Contact: A Two-way Street

- 물리적 접촉 - 촉각 센서로의 정보 전달을 위해 필수적 요소
- 한 점에서 접촉하고 있는 두 개체 간의 상호작용을 물리학적으로 기술하기 위해서는 2가지 요소를 추적해야 함 - 상호작용력과 접점의 위치
 - 시간에 따른 변위를 기록해 두면, 속도와 가속도의 변화 과정도 얻을 수 있음
 - : 이 과정은 단순한 로드셀(Load Cell)센서와 광학센서로 가능함
- 주어진 시간 내에서 이 두 가지 변수의 시간에 따른 변화가 있다면, 개체 간의 에너지의 흐름은 완전히 기술될 수 있음 (힘과 속도를 곱하면 에너지를 얻게 됨)

- 힘, 속도, 위치 등의 변수는 공학도나 실험자를 위한 데이터이며, 이러한 변수들은 촉각 센서나 촉각 인지 체계와 직결되지 않음
- 기계적 상호작용의 어떠한 측면이 촉각 정보를 실제로 수반하는가?
 - : 아리스토텔레스의 질문 - “음은 듣는 것이오, 색은 보는 것이라면, 촉각은 무엇인가”

- James Gibson은 힘과 움직임을 분리하여 고려하기보다, 두 변수간의 관계가 더 중요함을 제안
 - 딱딱함(힘과 위치), 제동(힘과 속도), 질량(힘과 가속도)등이 촉각 정보를 나타냄에 있어 “힘과 움직임의 시간에 따른 변위 기록”보다 적절함
 - : Object Feature, Object Invariant로 일컬어지는 이 변수들은 개체의 본질과 밀접하게 관계

19.3 Force and Position Control: Examples from Telerobotics

- Telerobotics의 가장 좋은 예: Gripper, Claw
- 일방적 원격로봇과 쌍방향 원격로봇
 - 일방적 원격로봇: Master가 Slave로 일방적인 명령을 전달함
 - 쌍방향 원격로봇: Master가 Slave로 명령을 전달하고, Slave 조작 시 일어나는 촉각 정보를 Master로 전달 (로봇의 손 안에 있는 물건에 대한 촉각 정보를 Master측으로 전달)
- 고품질의 쌍방향 원격로봇 기술은 결과적으로 원격실재(telepresence)를 가능케 하며, 촉각적으로 Master와 Slave를 구분하는 것이 불가능하게 됨
 - : 문제는 고품질의 쌍방향 원격로봇 장치를 제작하는 비용이 대단히 높다는 것과 인간의 촉각 체계에 대한 더욱 깊이 있는 연구가 필요하다는 것
- 쌍방향 원격로봇의 Slave는 Master가 감지한 위치를 재현하기 위해 가능하며, Master는 Slave가 감지한 힘을 재현하기 위해 가능함
 - : 즉 두 가지의 기능은 신호의 흐름만 동일하며, 두 신호가 동시에 한 방향으로 갈 수 없음 (그럴 경우 인과 관계 자체가 정립이 안 됨)

19.4 Feedback Control

- 피드백 제어
 - : 특정 개체의 행동을 감지하는 센서로부터 수집된 정보를 사용하여 그 개체에 대한 제어 또는 영향이 이루어지는 경우
- 제어 시스템의 2가지 요소 - 컨트롤러/플랜트(제어 당하는 개체)
- 컨트롤러는 actuator와 sensor를 지니고 있음
 - Actuator: 플랜트에 영향력을 행사 - Sensor: 플랜트 내부의 변화를 감지

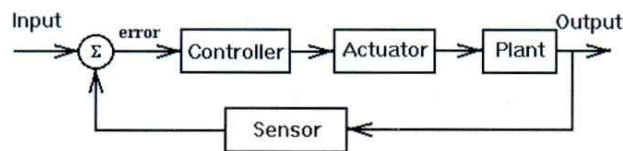


Figure 19.1 A generic feedback control system.

- 오류 신호는 입력과 감지된 플랜트 동작의 차로 계산됨
: 제어기의 목적은 오류의 양을 최소화 하는 것 - 추적 제어기

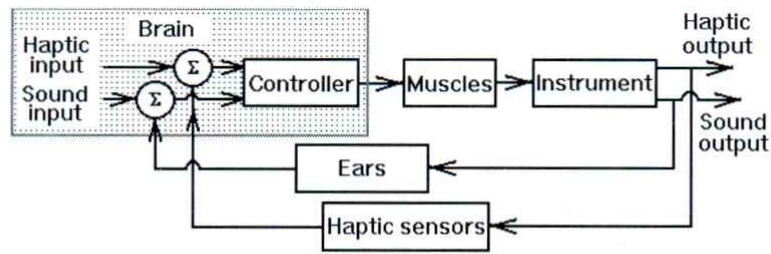


Figure 19.2 The musician and instrument in a feedback control system, showing haptic and audio feedback paths.

- 이러한 관점에서 볼 때, 연주자와 악기는 하나의 피드백 제어 시스템으로 볼 수 있음
- 연주자; 제어기, 근육; Actuator, 악기; Plant, 귀와 촉각: Sensor의 관계 성립
- 신호 오류 계산 및 명령 전달은 모두 뇌에서 이루어지며, 근육으로 신호를 전달하여 최종적으로 에너지가 악기에 전달
- 청각적 정보는 귀를 통해 피드백 되고, 촉각 정보는 촉각 센서를 통해 피드백 됨
- 원하는 음과 실제 연주되는 음을 비교하여, 연주자는 그에 따라 조작 방법을 변경
- 원하는 촉각 반응이 일어나고 있는지 기계적 정보를 비교한 후, 차이를 줄이기 위해 조작 방법을 변경
- 트롬본 슬라이드 혹은 지판(finger board)의 제어
- 촉각 정보에 의해 경험이 누적되면, 피드백 과정 없이도 올바른 소리를 얻을 수 있음
: 선형 제어(Anticipatory Control)의 예
- 피아노 건반의 letoff 탐색
- Letoff 레벨은 촉각 정보에 의해서만 얻을 수 있음
: 피아노의 감촉은 원하는 반복 속도를 위한 조작 전략을 선택함에 있어 유용한 정보를 내포하고 있음

19.5 Anticipatory Control

- 연주자가 악기에 익숙해진 경우 더 이상 피드백 제어가 필요 없는 상태가 되며, 입력되는 정보 없이도 자신의 악기를 조작할 수 있게 됨 - 선형제어
- 선형 제어는 탄도 제어와 밀접한 관련이 있음 - 어떠한 정보 없이 명령이 내려지며, 일단 내려진 명령을 제어할 수 있는 방법은 없음
- 선형제어가 반드시 최상의 선택은 아님: 익숙하지 않은 악기를 접했을 때의 대응
- 그것과 가장 비슷한 악기군의 조작법을 떠올린 후, 그 조작법을 새로운 악기의 크기와 형태에 맞게 변형하여 적용함
: 컵을 들어 올렸을 때 예상했던 것 보다 컵이 가볍고 빠르게 올라오는 것을 느끼면 놀라게 됨 (컵이 가득 차 있다는 것을 예상하고 뇌에서 명령을 내렸기 때문)

- 인간의 반응 시간은 180ms 정도 (감지 지연과 명령 지연을 포함)
 - 많은 음악적 이벤트들이 이보다 빠름 (빠른 트릴은 8~10Hz)
 - 주기가 100ms 이하인 경우, 명령은 한 주기 이전에 내려져야 함
- : 원하는 결과와 실제 결과간의 비교에 의한 피드백 제어는 불가능 함
- 악기 교육은 악기의 내적 모델을 만들어가는 과정으로 고려될 수 있음
 - 내적 모델: 악기의 입력 조작으로부터 음향과 촉각 반응으로의 관계

19.6 Hierarchical Control

- 구조적 조직은 인지, 감지, 운동근육생리 분야에 모두 적용되는 주제
 - 하위 시스템은 저수준의 작업을 수행을 담당하며, 상위 시스템은 감독을 담당
- 운동근육 프로그램은 소뇌 내부에 존재하며, 특정한 동작 패턴의 학습에 의존하여 형성된 신경 연결 역시 소뇌에서 발견됨
- 뇌 중앙의 기저 신경절(basal ganglia) 역시 동작 생성 과정에서 역할을 수행함
 - : 기저 신경절이 손상된 사람은 특정 동작을 할 수 없게 됨

19.7 Learning Theory

- 피드백을 통해 선행 제어를 위해 필요한 내적 모델을 개발할 수 있음
- 세 가지 중요한 원칙: 방법의 선택, 성분의 강화, 덩어리 짓기

19.7.1 Method Selection

- 보다 나은 문제 해결 방법의 선택이 더 나은 결과를 갖고 온다는 원칙
- : 일반적인 교육 체계는 이 원칙에 따르고 있으며, 교육자가 가장 능동적으로 역할함

19.7.2 Component Strengthening

- 순수한 반복을 통해 임무 수행을 개선
- : 반복을 통해 개선은 꾸준히 이루어지지만, 개선율은 갈수록 감소하는 경향을 보임

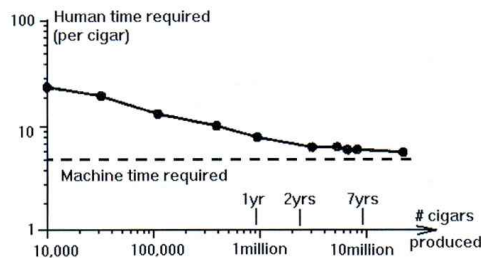


Figure 19.3 Speed of human cigarmaking as a function of practice. (From E. R. F. W. Crossman, "A Theory of the Acquisition of Speed Skill," *Ergonomics*, 2, 1959.)

19.7.3 Chunking

- 주어진 임무를 보다 작은 하위 임무로 나누는 것

: 연주자의 다양한 내적 개념화는 주어진 임무를 다양한 각도에서 단순화 할 수 있음

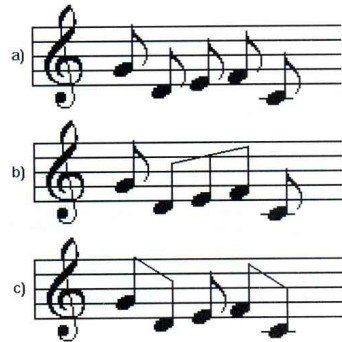


Figure 19.4 A pattern of eighth notes (a) subject to two chunking strategies (b) and (c).

- b)의 예가 가장 빠른 속도로 연주할 수 있는 형태로, 결과 자체는 모두 비슷할 수 있으나, 실제로 연주 가능한 최고 속도는 b)가 가장 높음

- 덩어리 짓기의 원칙은 한 번에 한 부분만 연습하는 것이 매우 효율적임을 보여줌

19.8 Summary: The Utility of Haptic Feedback

- 운동근육 제어는 촉각 피드백에 기반
- 선행 제어는 음향 및 촉각 피드백에 기반하여 형성된 내적 모델을 통해 사용 가능
- 악기를 설계함에 있어서 음향만큼 촉감도 중요하나, 전자악기의 설계에 있어서는 두 가지 요소의 전통적, 상식적인 관계가 반드시 지켜져야 하는 것은 아님
- 전자 악기의 설계에 있어서 현재의 상태는, 쌍방향 로봇 시대 이전의 일방향 로봇 시대에 비유할 수 있음
 - 대부분의 전자악기가 일방향 형태를 취하고 있음
- 촉각 인터페이스는 촉감과 음향의 새로운 관계를 정립함에 있어 매우 흥미로운 도구
 - : 프로그램 가능한 음향과 프로그램 가능한 촉감을 가진 악기의 개발