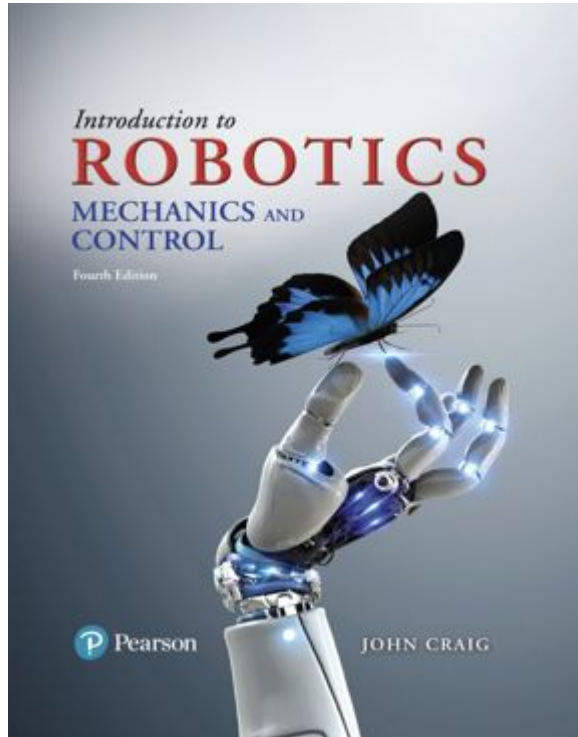


Introduction to Robotics

Mechanics and Control

4th Edition



Chapter 11

머니플레이터의 힘 제어

11.1 개요

- 머니플레이터가 공간에서 궤도를 따라갈 때는 위치 제어가 적당하지만, 말단 효과 장치가 머니플레이터 주변 환경과 접촉하게 되면 위치 제어만으로는 머니플레이터를 충분히 제어할 수 없다.
- 머니플레이터가 스펀지로 창문을 닦는 경우를 고려하면, 스펀지의 물렁물렁한 성질 때문에 말단 효과 장치의 유리에 대한 위치를 제어함으로써 유리에 가해지는 힘을 조절하는 것이 가능할지도 모른다. 만약 스펀지가 매우 물렁물렁하고 유리의 위치가 아주 정확하게 알려져 있으면, 이 방법은 잘 작동할 것이다.
- 그러나 말단 효과 장치, 공구 혹은 주변 환경의 강성이 높으면 머니플레이터가 표면 접촉하는 동작을 수행하기 어렵다. 스펀지 대신에 머니플레이터가 딱딱한 공구로 유리 위의 페인트를 긁어내는 경우를 생각해보자. 만약에 유리 표면의 위치가 불확실하거나 머니플레이터의 위치에 서보 오차가 있으면, 이 작업은 불가능해질 것이다. 유리창이 깨지거나 혹은 머니플레이터가 페인트를 긁어내는 공구를 유리창에 접촉하지 않은 상태로 움직일 것이다.
- 유리창을 닦고 페인트를 끌어내는 작업에서, 유리창 면의 위치를 지정하는 것보다는 표면에 수직으로 유지해야 할 힘을 지정하는 것이 보다 더 좋은 방법이 될 것이다.

11.2 조립 작업에서의 산업용 로봇 이용

- 머니플레이터 로봇은 **pick and place** 같은 단순한 작업에서 연삭, 디버링 같은 어려운 작업, 더 나아가서 조립과 같은 작업을 수행하고 있음
 - IKEA 조립 로봇 동영상(<https://www.youtube.com/watch?v=irt2d-W0ZMc>)
- 조립과 같은 작업에는 부품의 위치 정확도가 높아야 하고 힘 측정 정확도, 제어의 정확도도 높아야 하지만 난이도가 높고 가격이 크게 증가함

11.3 부분적으로 제한된 작업을 제어하는 구성

- 이 절에서는 머니플레이터의 운동이 1개 혹은 여러 개의 면과의 접촉 때문에 부분적으로 제한을 받는 경우로 한정함 → 말단 효과 장치와 작업 환경과의 접촉에 의해 정의되는 소작업(subtask)를 자연적 제한조건(natural constraints)라고 하는 제한 조건(작업 형상의 기계적 또는 기하학적 특성 때문에)임
 - 본 교재에서는 마찰이나 중력은 무시함. 비교적 딱딱한 물체와의 접촉에서 생긴 힘이 지배적일 때는 적절하지만 매우 단순화했기 때문에 개념 소개 수준으로 이해해야 함
 - 환경과의 접촉 모델에서 일반적으로 소작업 자세에 대한 일반화된 면(generalized surface)를 정의함
 - 면과 수직인 방향으로의 위치 제한 조건과 평행한 방향으로의 힘의 제한 조건을 갖음

11.3 부분적으로 제한된 작업을 제어하는 구성

- 인위적 제한 조건(**artificial constraints**): 원하는 운동을 시키거나 힘을 작용하기 위해 지정하는 제한조건
- 조립 전략(**assembly strategy**): 원하는 방법으로 작업이 진행되도록 계획된 인위적 제한조건의 시퀀스(sequence)

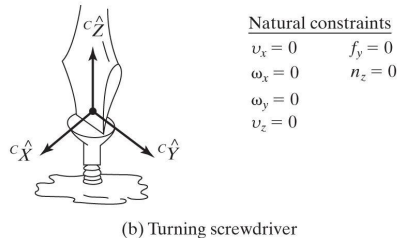
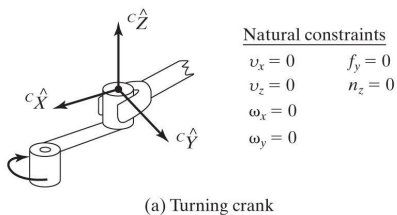


Figure 11.1
The natural constraints
for two different tasks.

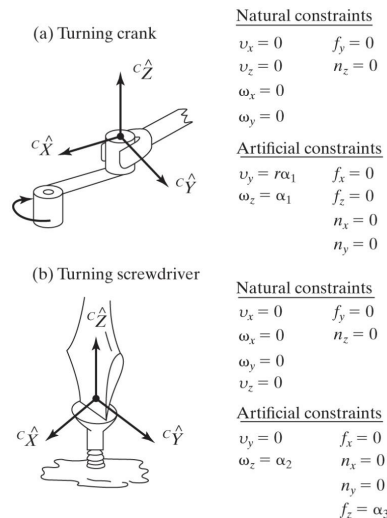


Figure 11.2
The natural and artificial
constraints for two tasks.

예제 11.1 둥근 마개를 둥근 구멍에 집어넣는 조립 과정의 조립 전략을 세워라.

두번째로 그림 11.3(b)처럼

자연적 제한 조건은

$${}^c v_z = 0$$

$${}^c \omega_x = 0$$

$${}^c \omega_y = 0$$

$${}^c f_x = 0$$

$${}^c f_y = 0$$

$${}^c n_z = 0$$

인위적 제한 조건 ${}^c v_x = v_{\text{slide}}$

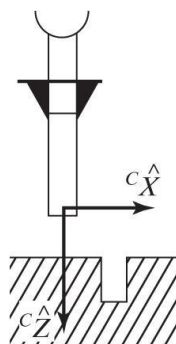
$${}^c v_y = 0$$

$${}^c \omega_z = 0$$

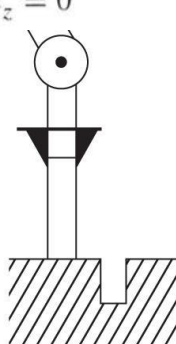
$${}^c f_z = f_{\text{contact}}$$

$${}^c n_x = 0$$

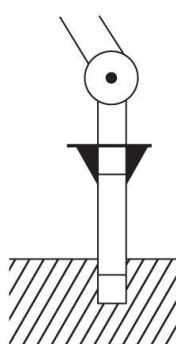
$${}^c n_y = 0$$



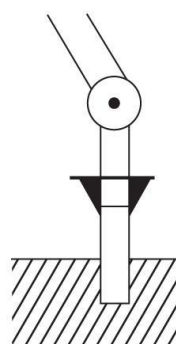
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 11.3

The sequence of four contacting situations for peg insertion.

예제 11.1 둥근 마개를 둥근 구멍에 집어넣는 조립 과정의 조립 전략을 세워라.

세번째로 그림 11.3(a)처럼

자연적 제한 조건은

$$\begin{aligned} c_{v_x} &= 0 \\ c_{v_y} &= 0 \\ c_{\omega_x} &= 0 \\ c_{\omega_y} &= 0 \\ c_{f_x} &= 0 \\ c_{n_z} &= 0 \end{aligned}$$

인위적 제한 조

$$\begin{aligned} c_{v_z} &= v_{\text{insert}} \\ c_{\omega_z} &= 0 \\ c_{f_x} &= 0 \\ c_{f_y} &= 0 \\ c_{n_x} &= 0 \\ c_{n_y} &= 0 \end{aligned}$$

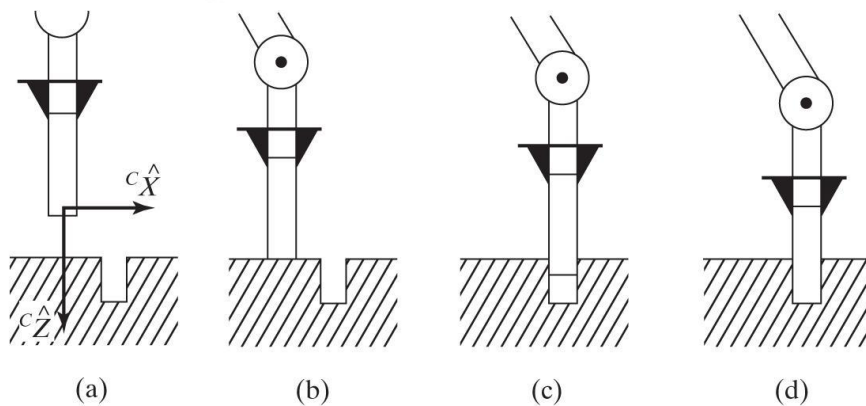


Figure 11.3
The sequence of four
contacting situations for
peg insertion.

예제 11.1 둥근 마개를 둥근 구멍에 집어넣는 조립 과정의 조립 전략을 세워라.

네번째로 그림 11.3(d)처럼 cZ 방향의 힘이 한계치 이상으로 증가하면 감지됨

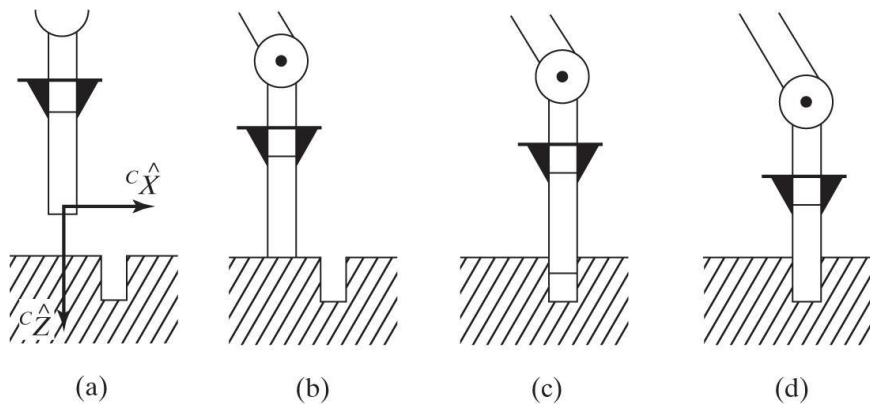


Figure 11.3
The sequence of four
contacting situations for
peg insertion.

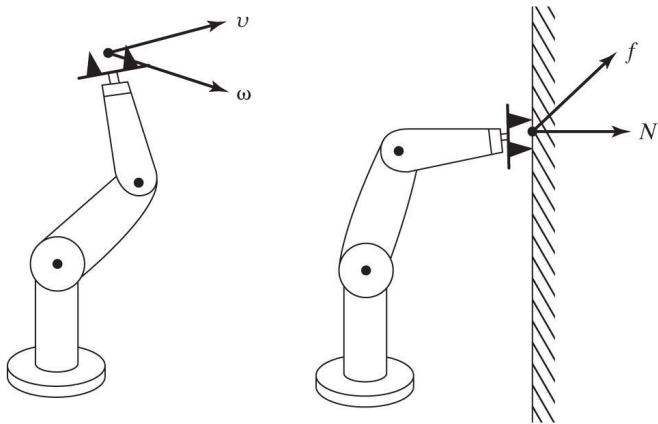
11.4 복합 위치/힘 제어 문제

- 복합 위치/힘 제어(hybrid position/force control) 방법
 - 자연적 힘 제한조건이 존재하는 방향으로의 매니퓰레이터의 위치 제어
 - 자연적 위치 제한조건이 존재하는 방향으로의 매니퓰레이터의 힘 제어
 - 임의의 계 $\{C\}$ 에서 서로 직교하는 자유도를 따라서 위의 조건을 임의로 혼합되도록 하는 방법

Figure 11.4

The two extremes of contacting situations. The manipulator on the left is moving in free space where no reaction surface exists.

The manipulator on the right is glued to the wall, so no free motion is possible.



11.5 질량-스프링의 힘 제어

- 접촉 힘을 고려하려면 로봇이 활동하는 주변 환경의 모델을 만들어야 한다. 개념 개발을 위해 제어되는 물체와 주위의 물체 사이에서의 상호작용을 나타내는 매우 간단한 모델을 사용하기로 한다. 주위 물체와의 접촉을 스프링으로 나타낸다. 즉 우리의 시스템이 강성체이고 주위의 물체는 강성도 k_e 를 갖고 있다고 가정함

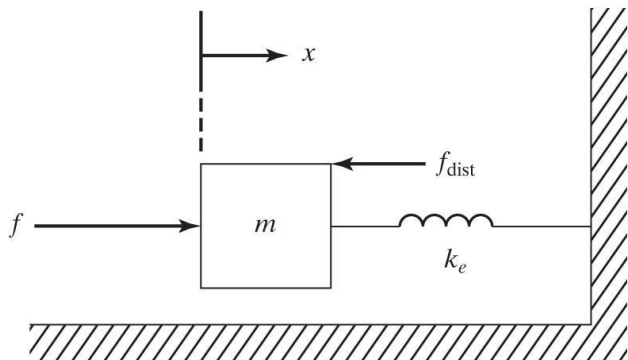


Figure 11.5
A spring–mass
system.

11.5 질량-스프링의 힘 제어

- 스프링에 붙어 있는 질량의 제어를 고려하자. 미지의 외란 힘인 f_{dist} 도 포함시키는데, 이것은 미지의 마찰력이거나 머니플레이터의 기어와 기어 사이에서 생기는 힘을 모델한 것으로 생각할 수 있음. 제어하기를 원하는 변수는 주위의 물체에 작용하는 힘 f_e 이며, 이것은 스프링에 작용하는 힘임

$$f_e = k_e x$$

$$\alpha = mk_e^{-1}$$

$$f = m\ddot{x} + k_e x + f_{dist}$$

$$\beta = f_e + f_{dist}$$

$$f = mk_e^{-1} \ddot{f}_e + f_e + f_{dist}$$

$$f = mk_e^{-1} [\ddot{f}_d + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f] + f_e + f_{dist}$$

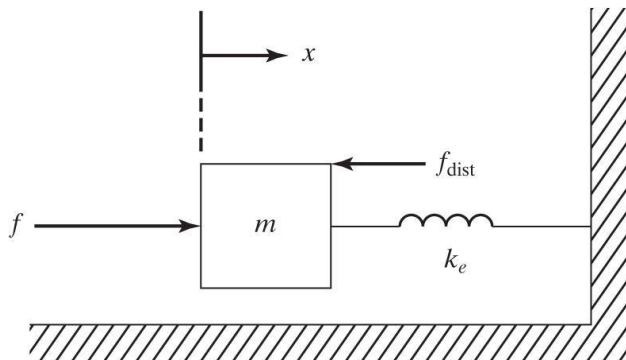


Figure 11.5
A spring–mass
system.

$e_f = f_d - f_e$ 는 원하는 힘 f_d 와 주위의 물체에 작용하여 감지된 힘 f_e 와의 차

$$\ddot{e}_f + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f = 0$$

9.5절의 제어 법칙 분할
방법을 구한 것임

11.5 질량-스프링의 힘 제어

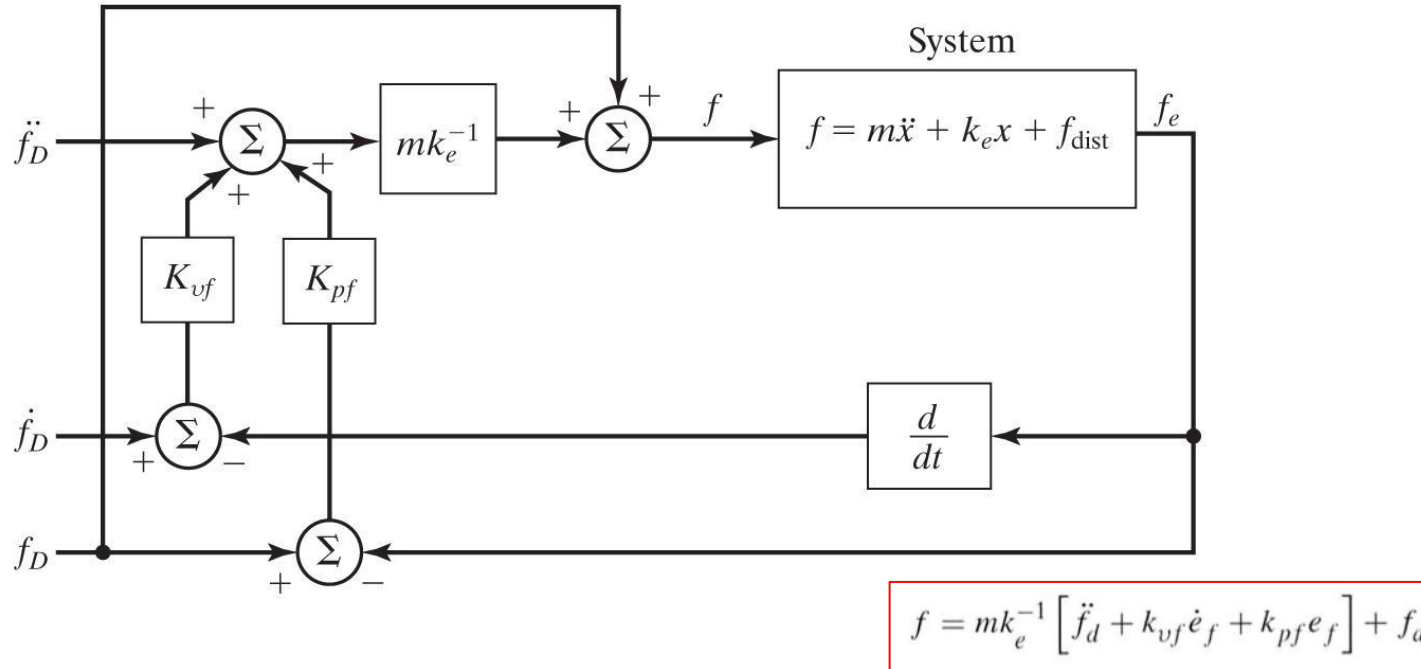
$$\begin{aligned}
 f &= m\ddot{x} + k_e x + f_{dist} & f_e &= k_e x \Rightarrow x = k_e^{-1} f_e \\
 f &= m k_e^{-1} \ddot{f}_e + f_e + f_{dist} \\
 f &= \alpha \ddot{f} + \beta \\
 \alpha \ddot{f} + \beta &= m k_e^{-1} \ddot{f}_e + f_e + f_{dist} \\
 \left(\begin{aligned} \alpha &= m k_e^{-1} \\ \beta &= f_e + f_{dist} \end{aligned} \right. & \ddot{f} = \ddot{f}_e = -k_{vf} \dot{e}_f - k_{pf} e_f \\
 \text{if } \ddot{f}_d = 0, & \ddot{f}_e - \ddot{f}_d = \ddot{e}_f = -k_{vf} \dot{e}_f - k_{pf} e_f \\
 & \therefore \ddot{e}_f + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f = 0
 \end{aligned}$$

- 정상 상태 해석은 $e_f = \frac{f_{dist}}{\alpha}$ $\alpha = m k_e^{-1} k_{pf}$
- $f_e + f_{dist}$ 항 대신에 f_d 를 적용해보면, $e_f = \frac{f_{dist}}{1+\alpha}$ 주위 물체의 강성이 높을 경우 α 가 작을 수도 있으므로 이 방법이 더 좋음

$$f = m k_e^{-1} \left[\ddot{f}_d + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f \right] + f_d$$

Figure 11.6

A force control system for the spring–mass system.



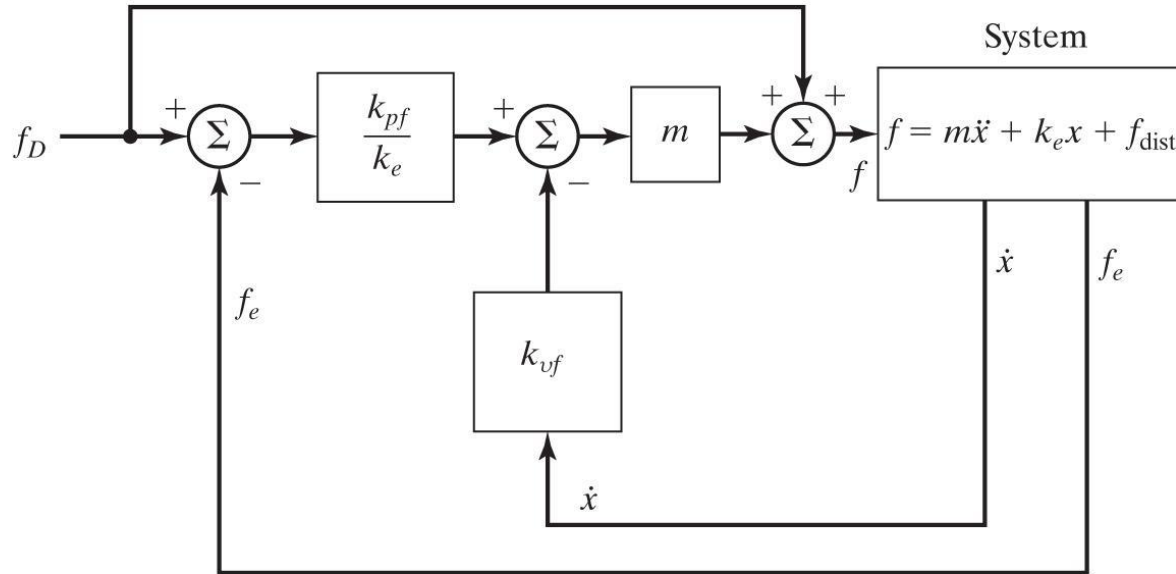
11.5 질량-스프링의 힘 제어

- 그런데, 실제적인 경우는 조금 다름
 - 제어 시스템의 \dot{f}_d 또는 \ddot{f}_d 입력을 영으로 놓는 때가 많음
 - 감지된 힘이 '잡음'이 많기 때면 \dot{f}_e 계산을 수치 미분으로 하는 것은 적절치 $\dot{f}_e = k_e \dot{x}$ (사용)
- 따라서 그림 11.6은 그림 11.7처럼 요구하는 경우가 많음

$$f = m \left[k_{pf} k_e^{-1} e_f - k_{vf} \dot{x} \right] + f_d$$

Figure 11.7

A practical force-control system for the spring–mass system.



$$f = m \left[k_{pf} k_e^{-1} e_f - k_{vf} \dot{x} \right] + f_d$$

11.6 복합 위치/힘 제어 방법

- cY 방향으로 힘의 궤도에 따른 힘 제어, cX 와 cZ 방향으로 위치 궤도에 따른 위치 제어

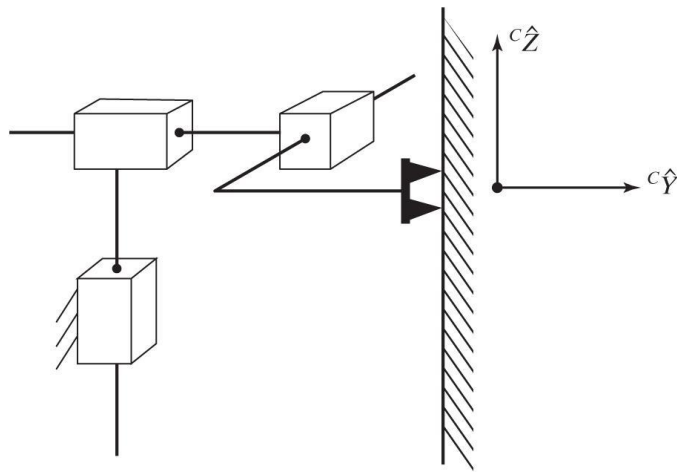
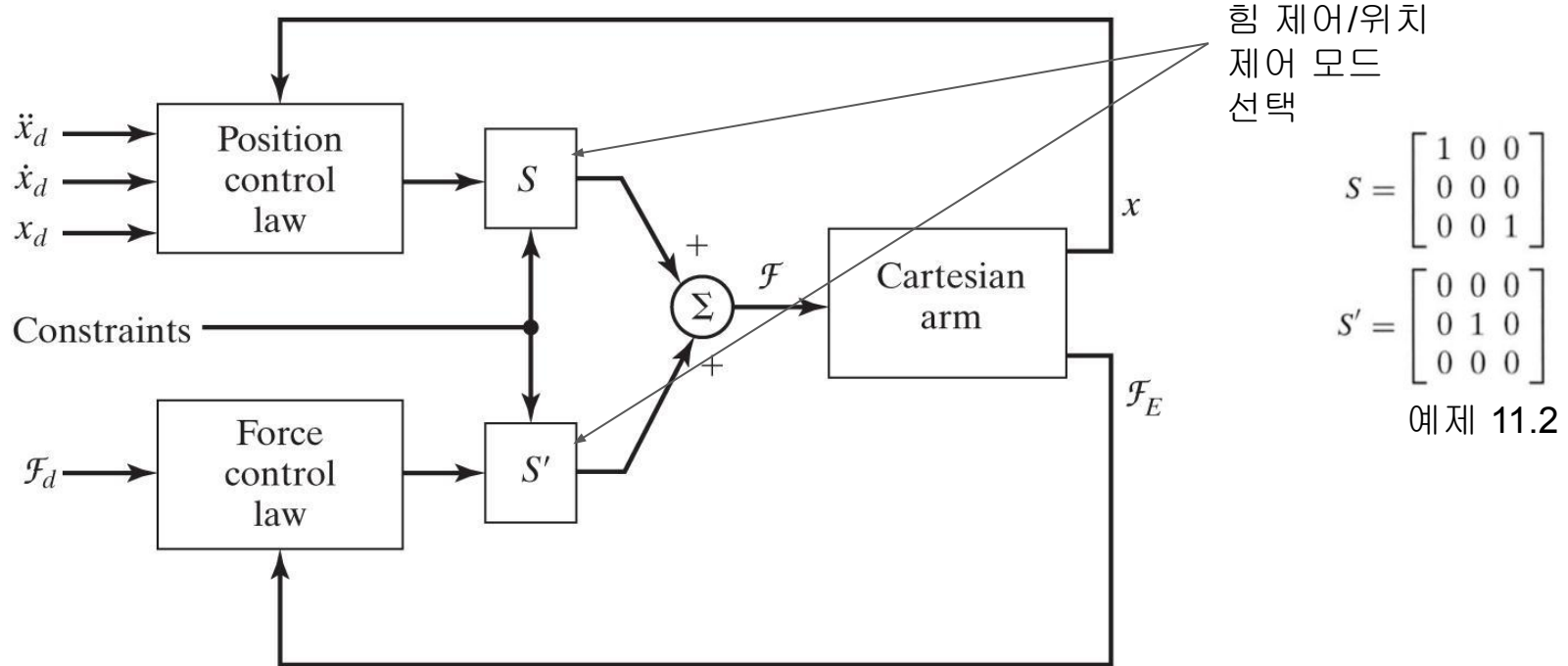


Figure 11.9

A Cartesian manipulator with three degrees of freedom in contact with a surface.

Figure 11.10

The hybrid controller for a 3-DOF Cartesian arm.



11.6 복합 위치/힘 제어 방법

- 일반적인 머니플레이터

Figure 11.11

The Cartesian decoupling scheme introduced in Chapter 10.

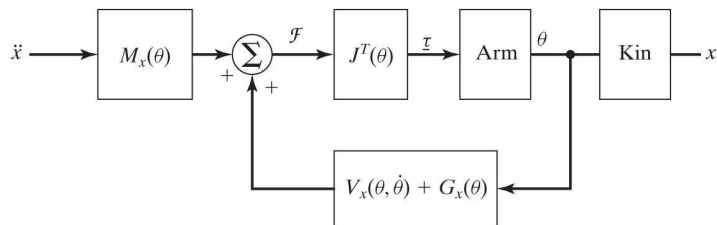


Figure 11.12

The hybrid position/force controller for a general manipulator. For simplicity, the velocity-feedback loop has not been shown.

