최소 제어 인자 도출을 통한 사용편의성 높은 제어시스템 설계

Design of a User-Friendly Control System using Least Control Parameters

허영진¹, 박대길², 김진현[†]

Youngjin Heo¹, Daegil Park², Jinhyun Kim[†]

Abstract An electric motor is the one of the most important parts in robot systems, which mainly drives the wheel of mobile robots or the joint of manipulators. According to the requirement of motor performance, the controller type and parameters vary. For the wheel driving motors, a speed tracking controller is used, while a position tracking controller is required for the joint driving motors. Moreover, if the mechanical parameters are changed or a different motor is used, we might have to tune again the controller parameters. However, for the beginners who are not familiar about the controller design, it is hard to design pertinently. In this paper, we develop a nominal robust controller model for the velocity tracking of wheel driving motors and the position tracking of joint driving motors based on the disturbance observer (DOB) which can reject disturbances, modeling errors, and dynamic parameter variations, and propose the methodology for the determining the least control parameters. The proposed control system enables the beginners to easily construct a controller for the newly designed robot system. The purpose of this paper is not to develop a new controller theory, but to increase the user-friendliness. Finally, simulation and experimental verification have performed through the actual wheel and joint driving motors.

Keywords: Robust Control, Disturbance Observer (DOB), User-Friendliness, Nominal Model.

1. 서론

대표적인 구동기인 전기 모터는 로봇 제작에 있어 필수적인 요소이다. 주로 이동로봇의 바퀴를 구동하기 위해서 사용하거나, 로봇 팔의 관절을 구성하는데 사용된다. 이때 로봇에서 어떤 목적으로 사용하느냐에 따라서 모터의 선정과 제어 방법은 달라진다^[1,2].

예를 들어 이동로봇의 바퀴 역할을 위해 사용되는 모터는 정확한 위치 제어보다는 일정한 속도를 유지하기 위한

속도 제어 성능이 더 중요하며, 모터의 선정 시에도 정격 RPM과 공칭 토크(Nominal torque)가 무엇보다 중요하다[3]. 반면 로봇 팔에 사용되는 모터의 경우 정확한 위치 제어가 중요하며, 빠른 가속, 감속 및 하중 변화에 대응하기 위해 정지 토크(Stall torque), 최대 토크(Maximum torque), 토크상수(Torque constant) 등이 주요 선정 인자가 된다[4]. 또한 로봇 팔에 사용되는 모터라고 할 지라도 어느 부위에 사용되느냐에 따라서 모터의 선정은 달라져야 한다. 인간형 팔의 어깨관절과 손목관절에 사용되는 관절, 각 관절 중에서도 피치 각(Pitch)을 구동하는 모터와 롤 각(Roll)을 구동하는 모터는 각각 다른 성능이 요구된다.

이처럼 같은 모터라 할지라도 사용 용도에 따라서 다양한 성능이 요구되며, 이를 위한 제어 역시 모터가 사용되는 환경에 따라서 적합하게 이루어져야 한다. 제어 분야

Received : Jan. 19, 2014; Reviewed : Jan. 28, 2014; Accepted : Feb. 7, 2014

※ This study was (partially) supported by Seoul National University of Science and Technology.

¹ Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology (heodeede@gmail.com)

² Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology (very.lucky.park@gmail.com)

[†] Corresponding author: Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology(jinhyun@seoultech.ac.kr)

전문가라면 각각의 조건에 맞게 최적 성능의 제어기 설계를 통해서 목적을 달성할 수도 있지만, 로봇 설계자 또는 개발자의 경우 모든 경우에 대해 적합한 제어기 설계를 한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

이동로봇의 바퀴에 사용되는 바퀴구동 모터는 속도 제어가 필요하고, 로봇 팔 관절에 사용되는 관절구동 모터의 경우에는 토크 제어 또는 위치 제어가 요구된다. 여기에 더해 이러한 모션 제어는 하중의 변화와 같은 주변 환경 변화에 자주 노출되기 쉬우며 이에 대한 강인 제어기는 설계가 복잡하고 운용하기가 쉽지 않다. 바퀴 구동 모터의 경우 적재하중을 고려하여 기구부의 무게에 대한 보상이 필요하며 외란(disturbance)과 모델링 오차 등에 강인한 속도 제어가 필요하다. 로봇 팔 구동모터 또한 무게변화에 강인한 제어 성능이 필요하다.

또한 제어기 운용 시 가장 어려운 부분 중 하나는 제어 성능을 확보하기 위한 제어 인자(parameter)의 정밀조정 작업이다. 기계시스템의 변경이나 모터의 변경으로 인하여 모델링 인자가 바뀌는 경우, 하중의 변화가 자주 발생하거나 외란의 영향이 증가할 경우 변경된 환경에 맞게 제어기의 인자를 조정해야 하는 경우가 생긴다. 그러나 제어기에 익숙하지 않은 사용자일 경우 이러한 복잡한 시스템 인자를 적절하게 선정하고 제어 이득(control gain) 값 조절 등 시스템에 영향을 미치는 요소들을 결정짓는 것에 힘들어 하는 경우가 많다. 심지어 시스템에 대한 모델을 정확히 알지 못하는 경우에는 제어기 설계 자체를 하지 못하는 경우도 있다.

본 논문은 로봇에서 사용되는 대표적인 구동기인 모터를 크게 바퀴구동 모터와 관절구동 모터로 나누고, 바퀴구동 모터의 속도 추종과 관절구동 모터의 위치 추종을 위한 최소 제어 인자 선정하는 방법을 제안하고 이를 통해 제어 이론에 익숙하지 사용자를 위한 사용자 편의성이 높으며 임베디드 시스템에 적합한 가벼운 제어 시스템 설계를 목표로 한다. 새로운 제어 이론의 제안보다는 기존의 널리 사용되는 검증된 제어기를 활용하여 사용편의성을 높이는 것에 중점을 두었다.

이를 위해 두 가지 경우에 대한 공칭 모델(nominal model)을 구하고 간단한 사용자 입력 제어 인자를 선정하여 간편하며 외란과 모델링 인자 오차의 변동 등을 효율

적으로 제거할 수 있는 강인 제어 알고리즘을 개발하고 모의 실험과 실험을 통해 성능을 검증 하였다.

강인 제어 이론 중에는 대표적으로 MPC(Model Predictive Control)^[5], H- ∞ (H-infinity)^[6], DOB(Disturbance Observer based Control)^[7] 등이 있는데 이 중 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 PID 제어기처럼 설계가 비교적 쉽고 성능이 좋아서 1990년대 후반부터 많이 활용되어 왔다^[8]. 외란 관측기 기반의 제어 시스템은 외란, 모델링 오차, 매개 변수의 변화를 모두 외란으로 다루어 제거하여 실제 모델(real model)를 공칭 모델처럼 거동하도록 만들어 주는 역할을 한다^[9-12]. 본 논문에서는 바퀴구동 모터와 관절구동 모터 시스템에 대한 외란 관측기 기반의 제어 시스템과 PID 제어 시스템의 성능을 모의 실험과 실제 모션제어 실험을 통해 비교 하였으며 이를 통해 외란 관측기 기반의 강인 제어 시스템의 성능을 검증하였다.

Katoh와 Fujiwara^[13]는 본 논문에서 제시한 방법과 유사한 2 자유도 강인 제어기를 설계하고 자동 이득 조절(auto gain tuning) 방법을 제안하였으나, 제어기 설계가 복잡하고 고려해야 할 인자가 많기 때문에 초보자가 쉽게 사용하기에는 무리가 있다. 이동 로봇의 바퀴구동 모터에 적용이 가능한 자동 이득 조절 방법도 제안된 바 있으나^[14], 이 역시 제어 성능을 극대화하기 위해서 복잡한 제어기를 설계해야 하는 단점이 있다.

2장에서는 외란 관측기 기반의 제어 시스템 설계에 대해 소개하고 바퀴구동 모터와 관절구동 모터 각각에 대한 동역학 시스템 모델링을 수행 하였다. 3장에서는 최소 제어 인자를 도출하는 과정을 설명하고, 4장에서는 이를 기반으로 두 가지 시스템에 대한 모의 실험을 실시 하여 PID 제어기와 DOB 제어의 성능을 비교하였고, 5장에서는 실제 제어 실험을 통해 두 가지 시스템이 모의 실험과 동일한 결과를 보이는데 대한 검증을 수행하였다.

2. 제어시스템 설계

2.1 외란 관측기의 구조

그림 1은 일반적인 외란 관측기의 블록선도이다. 이 때의 출력 값, $y(s)$ 은 식(1)과 같다.

Fig. 1. Block diagram of DOB based control system

$$y(s) = P(s)[u(s) + d(s)] \quad (1)$$

여기서 $P(s)$ 는 시스템의 전달함수, $u(s)$ 는 외란을 제거하기 위한 인자를 포함한 제어 입력이며, $d(s)$ 는 외란을 의미한다.

이 때 외란 $d(s)$ 은 식(3)과 같으며,

$$u(s) + d(s) = \frac{1}{P(s)} y(s) \quad (2)$$

$$d(s) = \frac{1}{P(s)} y(s) - u(s) \quad (3)$$

피드백 입력 값 $u(s)$ 는 식(5)와 같다.

$$u(s) = u_r(s) - \left(\frac{1}{P(s)} y(s) - u(s) \right) \quad (4)$$

$$u(s) = u_r - d(s) \quad (5)$$

이론적으로는 사용자 제어 입력($u_r(s)$)에서 외란이 완전히 제거된 입력 값 $u(s)$ 가 모델 $P(s)$ 에 인가된다. 그러나 식 (2)~(5)의 실제 모델의 역 모델을 구현하는 것은 현실적으로 불가능하므로 저주파 필터인 Q-filter를 사용하게 된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 DOB 기반의 제어 시스템은 내부루프와 외부루프로 구성된다. 내부 루프는 외란, 모델링오차, 시스템의 변화로 인해 발생하는 공칭 모델과의 오차를 보상하도록 제어 입력을 생성하는 부분이며 외부루프는 공칭 모델의 명령을 추종하도록 하여 제어 입력을 생성하는 부분이다.

즉, 외란 관측기는 그림 2의 사각형 영역에서처럼 제어 시스템의 실제 제어 대상인 $P(s)$ 와 Q-filter, 외란을 포함한 이상적인 제어 대상인 $P_n(s)$ 를 구성한다. 이 때의 $P_n(s)$ 는

Fig. 2. Structure of the DOB system (real plant)

실제 모델 $P(s)$ 와 다른 공칭 모델이기 때문에 추가적으로 실제 외란 및 신호 잡음뿐 아니라 제어대상인 $P(s)$ 와 공칭 모델 사이의 모델링 오차까지도 외란으로 인식하게 된다. 외란 관측기를 통해 $P(s)$ 는 피드백 루프에 의해서 $P_n(s)$ 로 보정이 되며, 이론적으로 외란이 없는 이상적인 제어 대상인 공칭 모델 $P_n(s)$ 와 같이 사용자가 원하는 형태로 거동하게 만들 수 있다. 결과적으로 외란 관측기는 외란, 모델링 오차, 매개변수의 변화를 모두 외란으로 다루어 제거하여 실제 모델을 공칭 모델처럼 거동하도록 만들어 주는 역할을 한다.

그렇다고 터무니 없는 공칭 모델을 설계한다고 해서 원하는 대로 동작하는 것은 아니며, 실제 모델의 시스템 차수 및 형태가 비슷한 모델을 선정해야 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 역시 시스템 모델링에 대한 이해나 제어에 익숙지 않은 사람들에게는 쉬운 일이 아니다. 이를 해결하기 위해 모델에 대한 시스템 식별(Identification)과 선형화를 통하여 공칭 모델을 선정하고, 이를 제어하는 모델 기반(Model-based) 방법과 모델이 아닌 실제 모델의 입출력 데이터를 토대로 제어기의 이득 값들을 반복 조절하는 모델이 필요 없는(Model-free) 방법 등이 있다.

하지만 본 논문의 목적은 누구나 쉽게 사용할 수 있고 임베디드 시스템에 쉽게 적용이 가능한 가벼운 제어기 개발에 있다. 따라서 상기 방법보다는 로봇에 널리 사용되는

Fig. 3. Structure of the DOB system (nominal plant)

두 가지 시스템 모델인 바퀴구동 모터 시스템과 관절구동 모터 시스템에 대한 시스템 모델링을 통해서 시스템 차수와 가장 적합한 공칭 모델을 도출하여 쉽게 제어를 수행할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2.2 동역학 방정식 및 시스템 모델링

2.2.1 바퀴구동 모터

본 논문에서는 두 가지 시스템에 대한 모델링을 수행하였으며, 첫째로 그림 4와 같은 바퀴구동 모터에 대한 기구부의 동역학 모델링을 라그랑지(Lagrange) 방법을 이용하여 유도하였다. 우선 기어 내장 모터의 동역학 방정식은 기어의 관성 모멘트가 무시할 정도로 작다고 가정하면 아래의 식과 같다.

$$T = nk_t i - f_m \dot{\theta} - J_m \ddot{\theta} \quad (6)$$

$$L\dot{i} + R_m i = V - k_b \dot{\theta} \quad (7)$$

여기서 모터의 토크 T 는 전류 i 와 토크상수 k_t 의 곱이며 n 은 기어 비를 나타낸다. f_m 은 회전 마찰 계수, J_m 은 모터의 회전 관성이며, θ 는 모터의 회전 각이다. 식(7)에서 L 은 모터 코일의 인덕턴스, R_m 은 저항, k_b 는 역기전력 상수, i 는 전류, V 는 전압을 의미한다. 여기서 모터의 인덕턴스를 0으로 가정하면 모터의 구동 토크는 식(9)와 같다.

$$i = \frac{1}{R_m} (V - k_b \dot{\theta}) \quad (8)$$

$$T = \frac{nk_t}{R_m} (V - k_b \dot{\theta}) - f_m \dot{\theta} - J_m \ddot{\theta} \quad (9)$$

또한 이동 로봇과 바퀴의 경우 직선 운동 만을 한다고

Fig. 4. Mechanism of wheel drive motor system

Fig. 5. Free body diagram of wheel

가정하고, 자유 물체도를 통해 운동방정식을 구하면 식(10)-(12)와 같다.

$$T_{wT} = \frac{1}{2} M_w \dot{x}^2 \quad (10)$$

$$T_{wR} = \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}^2 \quad (11)$$

$$T_c = \frac{1}{2} m_c \dot{x}^2 \quad (12)$$

여기서 M_w 는 바퀴 무게, J_w 는 바퀴 관성, m_c 는 이동 로봇의 무게를 나타내며, x 는 이동 로봇의 이동 거리, r 은 바퀴의 반지름을 의미한다. 따라서 T_{wT} 는 바퀴의 병진 운동에너지이고 T_{wR} 은 회전 운동에너지이다. 그리고 T_c 는 이동 로봇의 운동에너지를 나타낸다. 이를 통해 바퀴 하나에 대한 라그랑지안(Lagrangian)과 라그랑지 방정식을 이용하면 바퀴구동 모터에 의해 구동되는 기구에 포함된 바퀴 구동 모터의 동역학 방정식은 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} & (M_w r^2 + \frac{1}{4} m_c r^2 + J_w + J_m) \ddot{\theta} + (\frac{nk_t k_b}{R_m} + f_m) \dot{\theta} \\ & = \frac{nk_t}{R_m} V - T_f \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 T_f 는 바퀴의 마찰력을 의미하며, 바닥의 상태 및 시스템 하중에 의해서 계속해서 변하기 때문에 정확한 모델링이 쉽지 않다. 따라서 외란으로 가정하고 무시한다. 식(13)을 최종적으로 인가전압에 대한 각속도의 전달함수로 나타내면 식(14)와 같다.

$$\frac{\omega}{V} = \frac{nk_t / R_m}{(M_w r^2 + m_c r^2 / 4 + J_w + J_m)s + (nk_t k_b / R_m + f_m)} \quad (14)$$

2.2.2 관절 구동 모터

다음으로 그림 6과 같은 로봇 관절구동 모터에 대한 시스템 모델링을 수행하였다. 제어 환경은 크게 구동기(DC 모터)와 제어할 기계시스템(빔)으로 나눌 수 있으며 앞서 수행한 바퀴구동 모터 시스템과 동일한 과정으로 모델링이 가능하다. 구동기의 경우 바퀴구동 모터와 동일하게 식 (6), (7)과 같으며, 기계시스템은 바퀴구동 시스템에 비해 단순하며, 빔의 회전 모멘트(J_0)만 고려해준다면 아래와 같은 식이 된다.

$$T = J_0 \ddot{\theta} \quad (15)$$

바퀴구동 시스템과 동일하게 모터의 인덕턴스를 0으로 가정하면 식(16)과 같은 식이 유도된다.

$$T = J_0 \ddot{\theta} = \frac{nk_t}{R_m} (V - k_b \dot{\theta}) - f_m \dot{\theta} - J_m \ddot{\theta} \quad (16)$$

최종적으로 인가전압에 대한 각도의 전달함수로 나타내면 식(17)과 같은 식으로 유도가 가능하다.

$$\frac{\Theta}{V} = \frac{nk_t / R_m}{(J_0 + J_m)s^2 + (nk_t k_b / R_m + f_m)s} \quad (17)$$

Fig. 6. Mechanism of joint drive motor system

2.3 Q-filter 설계

제어기 설계 시 각 부분의 전달함수는 분자의 차수가 분모의 차수보다 크게 되면 제어기를 설계할 수 없기 때문에 항상 분모의 차수 m 은 분자의 차수 n 보다 커야 한다.

이 때문에 외란 관측기에서 공칭 모델의 역함수 $1/P_n(s)$ 는 분자의 차수가 분모보다 커지게 되므로 $m > n$ 을 만족하게 하는 필터를 $1/P_n(s)$ 에 곱하여 모델의 안정화 및 강인제어의 핵심적인 역할을 하게 되는데, 이것을 Q-filter라고 한다. 외란 관측기의 성능은 이 Q필터에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 실제 필터의 적용 시 의 상태 차수는 공칭 모델의 차수보다 크거나 같도록 정해야 하며 이 조건을 만족하는 공칭 모델의 역 모델이 구현 가능하다는 것은 알려져 있다^[15]. 필터의 설계에 대한 연구는 Ohnishi^[16], Umeno와 Hori^[17], 그리고 Lee^[15] 등의 방법들이 있다. 이 중 가장 널리 사용되는 방법은 이항식(binomial)의 형태를 갖는 식 (18)와 같다.

Q-filter는 Q_{mn} 의 형태로 표현 할 수 있다.

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi} (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (18)$$

$$a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)!} \quad (19)$$

여기서 τ 는 시정수(time constant)이다.

3. 최소 제어 인자 도출

제어에 대한 이론이 부족한 사용자를 위한 최소 제어 인자를 도출하기 위해서 필요한 제어 요소를 도출해 보기로 하자. DOB를 이용한 제어기 설계에서 사용자가 고려해야 하는 제어 인자는 다음과 같다.

- (1) 공칭 모델
- (2) Q-filter 설계
- (3) 제어기 형태 및 변수 설계 (그림3의 C(s))

첫째, 공칭 모델은 2.1절에서 설명한 바와 같이 제어 대상 시스템과 근사한 형태로 이루어져야 한다. 따라서 모든 제어 시스템에 적합한 공칭 모델이라는 것은 정의하기 어렵다. 하지만 본 논문에서는 로봇 제작에서 가장 빈번히 사용되는 모델인 바퀴구동 모터 및 관절구동 모터로 한정하였기 때문에 2가지 형태에 대해서만 고려하기로 하며,

거의 대부분의 경우를 포함할 수 있다. 둘째, Q-filter의 형태는 2.3절에서 설명한 안정적인 성능을 보이면서도 설계가 간편한 이항식 형태의 Q-filter를 사용하고자 한다. 마지막으로 제어기 설계에서는 외란 관측기의 내부 루프가 잘 동작한다고 가정하면 기본적인 PID 제어기와 이상적인 시스템에 대한 제어 인자로 제어기를 설계할 수 있다.

3.1 공칭 모델 설계

공칭 모델은 기본적으로 시스템의 차수와 동일하게 설계가 이루어져야 한다. 따라서 바퀴구동 시스템의 경우 1차 시스템, 관절구동 시스템의 경우 2차 시스템으로 설계가 되어야 하는데, 정상상태 오차를 최소화하기 위해서 각각 1형 시스템과 2형 시스템으로 설계하는 것을 제안한다.

자연계 시스템에서는 가속도입력($1/s^3$)을 초과하는 경우는 거의 없다. 따라서 바퀴구동 시스템일 경우 $P_n(s) = 1/I_0 s$, 관절구동 시스템일 경우 $P_n(s) = 1/I_0 s^2$ 으로 설계하면 모두 가속도 입력에 대해서만 관성모멘트 I_0 만큼의 오차가 발생한다. 따라서 PID 제어기를 사용하면 오차를 제거할 수 있다. 따라서 최종적으로 아래와 같은 공칭 모델을 유도하였다.

$$\text{바퀴구동 시스템 공칭 모델 : } p_n(s) = \frac{1}{I_0 s}$$

$$\text{관절구동 시스템 공칭 모델 : } p_n(s) = \frac{1}{I_0 s^2}$$

관성모멘트의 경우 바퀴구동 시스템은 (15)에서 관성모멘트에 가장 영향을 크게 미치는 $I_0 = (m_c/n)(D^2/4)$ 로 선정하였다. m_c 는 시스템의 대략적인 무게, n 은 전체 무게를 지지하는 바퀴의 수, D 는 바퀴의 직경을 나타낸다.

관절구동 시스템의 경우 관절에 연결된 링크의 관성이 가장 큰 영향을 미치기 때문에 관절에 주로 연결되는 링크의 형태를 육면체 빔으로 가정하고 빔의 길이(l), 넓이(a)와 질량(m)을 이용하여 $I_0 = 1/12 m(4l^2 + a^2)$ 로 선정하였다.

3.2 Q-filter 설계

식(20)과 같이 이항식 형태의 Q-filter는 일반적으로 가장 안정적인 성능을 보인다. 본 논문에서 제안하는 방법은 어렵고 고성능의 제어기가 아니라 쉽게 사용이 가능하면서

도 안정적인 성능을 보이는 간단한 제어기를 설계하는 것이다. 따라서 Q-filter의 경우 바퀴구동 시스템의 경우 1차 시스템이기 때문에 Q_{10} , Q_{21} , Q_{32} 의 형태가 가능하며, 관절구동 시스템의 경우 2차 시스템이기 때문에 Q_{20} , Q_{31} , Q_{42} 와 같은 형태가 가능하다. 이 때 Q필터의 시정수(time constant)인 τ 값이 필요한데 시정수는 이론적으로는 제거할 수 있는 외란의 주파수 범위를 의미한다. 본 논문에서는 모터 매뉴얼상의 기계적 시정수(Mechanical time constant)값을 활용하여 Q필터의 시정수로 사용하였다. 모터의 기계적 시정수는 모터의 최대 주파수 응답 성능을 나타내는 것으로 이 값 이상으로 작용하는 외란에 대해서는 물리적으로 제거가 불가능하다. 또한 외부에 기구적인 바퀴, 링크가 부착되면 기계적 응답 성능은 저하된다. 따라서 Q-filter의 시정수는 모터의 기계적 시정수 보다 높은 값으로 선정해야 하며 다수 시스템에서의 결과를 바탕으로 10배의 값으로 선정하였다. 이 값은 다음 절에서 설명할 유저 인터페이스를 통해서 조절이 가능하다.

3.3 최소 제어 인자 선정

앞에서 살펴본 바와 같이 사용자가 입력해야 하는 제어 인자는 공칭 모델 인자와 Q-filter의 시정수 값이다. 사용자는 유저 인터페이스(UI)를 통해 최소한의 정보를 지시에 따라 입력하게 되고, 내부 프로그램은 간단한 연산을 통해 손쉽게 제어기를 설계하게 된다. 즉, 사용자가 입력해야 하는 최소 제어 인자는 모터 매뉴얼에서 확인할 수 있는 기계적 시정수 값과 빔의 무게와 길이 또는 바퀴의 직경 및 시스템의 무게이다.

예를 들어 바퀴구동 시스템의 경우 지시에 따라 이동로봇 및 바퀴 정보를 입력하고, 다음으로 모터 정보를 입력하면 기본적인 제어 성능을 검증할 수 있는 인터페이스가 도출된다. 기본적인 성능 제어를 위해서 PID 제어기가 구현되어 있으며, 제어 이득은 I_0 값에 비례하여 사전에 정의된 값으로 결정된다. 모터 정보에서는 기본적으로 기계적 시정수만 입력해도 되지만, 유저 인터페이스에서는 보다 정밀한 성능을 위해 모터의 사양들에 대한 추가 입력이 가능하도록 구현되어 있다. 최종적으로는 성능을 관측하면서 사용자가 Q-filter 시정수와 모터의 기계적 시정수의 비율, PID 제어기의 제어 이득 등을 조정할 수 있다.

4. 모의 실험

4장과 5장에서는 모의 실험과 실험을 통해 제어 성능을 살펴봄으로써 제안한 방법의 유효성을 검증하고자 한다.

모의 실험과 실험에서 비교 대상으로 사용한 PI/PD 제어기의 경우 MATLAB의 자동 이득 조절 도구를 이용하여 최대의 성능을 내도록 이득 값을 설정하였다. 바퀴구동 모터의 속도 추종 제어의 경우 속도에 대한 PI 제어기를 사용하였는데, 이는 위치 제어에서의 PD 제어기와 동일하며, 속도 추종 제어에서 PID 제어기는 속도의 미분 값이 필요하기 때문에 성능이 오히려 나빠지는 경향이 있어서 일반적으로 사용하지 않는다. 관절구동 모터의 위치 제어에는 PD 제어기를 사용하였는데, PID 제어기에 비해서 안정성이 높으며, 빠른 응답 특성을 보여주기 때문이다.

4.1 DOB 설계 및 Q-filter 선정

모의 실험은 MATLAB Simulink를 이용하여 실시하였다. 식(20), (21)은 각각 바퀴구동과 관절 구동 모터 시스템에 사용된 Q-filter를 나타내며 본 연구에서의 τ 값은 0.01이다. 실험에서 사용한 모터의 기계적 시정수 값이 0.001이므로 10배 값을 사용하였다. Q-filter의 형태 선정에 따른 실험결과에는 큰 차이를 보이지 않았기 때문에, 가장 안정적이면서 널리 쓰이는 형태를 선정하였다.

$$Q_{10} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (20)$$

$$Q_{31} = \frac{3\tau + 1}{1 + 3\tau \cdot s + 3\tau^2 \cdot s^2 + \tau^3 \cdot s^3} \quad (21)$$

Fig. 7. Configuration of the DOB based robust control system-Wheel drive motor system.

DOB 기반의 속도추종 강인 제어기 설계를 위해 DOB 내부루프와 PI/PD 제어기를 함께 사용하였으며 그림 7은 바퀴구동 모터 시스템의 전체 Simulink 블록도를 나타낸다.

관절구동 모터 시스템은 Simscape 모델링을 이용하였으며 그림 8은 이에 관한 전체 Simulink 블록도를 나타낸다.

Fig. 8. Configuration of the DOB based robust control system-Arms drive motor system

4.2 모의 실험 결과

4.2.1 바퀴구동 모터

DOB기반 제어기의 외란 제거 성능을 관찰하기 위해 PI 제어기만을 사용한 경우와 PI 제어기를 DOB와 함께 사용한 경우 각각에 정현파 입력과 외란을 인가했을 때의 응답특성을 확인하였다.

그림 9에서 보는 바와 같이 DOB 기반의 제어기가 PI 제어기만을 사용했을 때 보다 외란 제거 성능이 뛰어난 것을 모의 실험을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 9. Velocity tracking simulation result

4.2.2 관절구동 모터

관절구동 모터는 Q_{31} 필터를 이용한 DOB 기반의 제어기와 PD 제어기를 설계하여 각각의 위치추종 성능을 비교하였다.

그림 10은 외란이 없을 때 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 로의 위치제어 결과를 나타낸다. DOB 기반의 제어가 PD 제어만을 사용했을 때 보다 오버슈트(overshoot)가 적음을 확인할 수 있으며 정상상태에 안정적으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 외란을 인가했을 때의 모의 실험 결과를 나타내며 DOB 기반의 제어가 외란 제거 성능이 뛰어난 것을 보여 준다.

그림 12는 모델링 오차에 대한 제어성능을 비교하기 위해서, 빔의 무게를 10배로 증가시켰을 때의 결과를 나타낸다. PD 제어기의 경우 응답시간이 3배정도 더 걸리는 것을

Fig. 10. Position control with non-disturbance input

Fig. 11. Position control with disturbance input

Fig. 12. Position control with vague modeling parameter

확인할 수 있는 반면, DOB 기반의 제어기의 경우 외란이 없을 때와 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 DOB 기반의 제어기가 무게 변화(인자 변화)에도 강한 제어 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

5. 실험 및 결과

5.1 하드웨어 및 기구부 구성

5.1.1 바퀴구동 모터

바퀴구동을 위한 DC 모터로는 Maxon사의 기어, 엔코더(encoder) 내장형 249529, 118752 모델을 사용하였으며 모터 컨트롤러는 동일 회사의 145391 모델을 사용하였다. 제어 실험을 위해 NI DAQ PCI-6221 모델을 사용하였으며 그림 13(a)는 기구부 구성을 나타내며 그림 13(b)는 실험장치의 모습을 나타낸다.

그림 13(b)에서 보는 바와 같이 기구부를 PCI와 유선으로 연결하여 LabVIEW를 이용하여 제작한 컨트롤 인터페이스를 통해 제어 실험을 실시 하였다.

Fig. 13. (a) Wheel drive motor mechanism (b) Experiment environment

5.1.2 관절구동 모터

관절구동 실험 또한 동일한 DC 모터를 사용하였으며 실험장치 구성은 그림 14와 같다.

동일한 DAQ 모델을 사용하여 PC와 유선 연결 후 제어 실험을 실시 하였다.

모든 DOB 기반 제어기 설계 과정은 제안한 방식으로 사용자로부터 입력을 받아서 진행하였으며 추가적인 제어 이득 조절 등은 수행하지 않았다. 비교 대상으로 사용한 PI/PD 제어기의 경우에는 앞서 언급한 것처럼 다수의 실

(a) (b)
Fig. 14. Arms drive motor mechanism

험을 수행하여 가장 좋은 결과를 얻는 이득 값 조정을 수행한 결과이다.

5.2 실험 결과 – 비궤구동 모터의 속도 제어

실험은 그림 13(b)에서와 같이 컨베이어벨트 위에서 주행하도록 구성되었으며, 추가 하중이 없는 경우와 7000g의 하중을 기구부 위에 올려놓은 경우 두 가지 조건에서 실시되었다. 또한 각각의 조건에 대해 5m/s와 10m/s의 속도

를 입력하였다. 실험에서는 PI 제어기만 사용했을 때와 DOB 기반의 제어를 사용했을 때의 속도추종 성능을 비교하였다. 그림 15는 하중이 없을 시 각각 5m/s와 10m/s의 속도를 입력했을 때의 결과를 나타낸다.

그림 16은 동일한 제어기에 대해 7000g 하중의 외란을 인가하였을 경우의 결과를 나타낸다. DOB 기반 제어기에서는 큰 차이가 없지만, PI 기반 제어기의 경우 오차 폭이 더 커짐을 볼 수 있다.

그림 15, 16에서와 같이 모든 실험결과에서 DOB 기반의 제어가 PI제어기에 비해 오차범위가 작은 것을 알 수 있으며 외란 제거 성능도 PI 제어기에 비해 우수함을 알 수 있다.

5.3. 실험 결과 – 관절구동 모터의 위치 제어

관절구동 모터의 위치제어는 그림 14의 관절 구동 모터에 무게가 다른 빔을 연결하여 실시하였다. 하중의 무게가 280g, 530g 일 때와 하중이 없을 때 세 가지 경우에 대해 실험을 진행 하였으며 각각의 경우에 대해 PD 제어만을 사용했을 때와 DOB 기반 제어를 사용했을 때의 제어

(a)

(b)

Fig. 15. Result of output velocity using PI and DOB with no load (a) 5m/s input, (b) 10m/s input

(a)

(b)

Fig. 16. Result of output velocity using PI and DOB with 7000g load (a) 5m/s input, (b) 10m/s input

성능을 비교하였다.

그림 17은 빔의 하중이 280g일 때 $0^\circ \sim 90^\circ$ 로의 위치 제어 성능을 나타내며 각각의 경우에 PD제어, $DOB(Q_{20})$, $DOB(Q_{31})$ 의 성능을 비교 하였다. 그림 18과 19는 하중이 없을 때와 하중이 530g 일때의 실험 결과를 나타낸다.

그림 17-19의 결과를 보면 하중이 다른 세 가지 경우 모두 Q31 필터를 사용한 DOB 기반의 제어 시스템이 빠른 응답속도로 정상상태에 안정적으로 도달하는 것을 확인할 수 있다. 비교 대상으로 사용한 PD 제어기에 비해서 제어 성능이 월등히 좋다고 할 수는 없지만, 제안한 제어기의 경우에는 사용자의 입력으로 받은 값들만을 이용하여

Fig. 17. Result using PD and DOB (280g load)

Fig. 18. Result using PD and DOB (no load)

Fig. 19. Result using PD and DOB (530g load)

제어 전문가가 정밀하게 조정한 PD 제어기의 제어 결과와 유사한 수준의 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 사용자 편의성이 높은 제어기 설계가 성능 면에서도 충분히 사용 가능하다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 강인제어에 대한 이론 및 DOB 기반의 제어 시스템 설계방법, 그리고 PID 제어기와와의 모의 실험과 실험을 통해 DOB 기반의 제어 시스템의 성능을 확인하였다. 바퀴구동 모터의 실험을 통해 하중의 변화(주변 환경 및 인자 변화)에 대해 외란 극복 성능이 PI 제어기만 사용했을 때 보다 좋아짐을 확인할 수 있었고, 관절 구동 모터 실험을 통해서도 인자 변화에 강인한 제어 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

PID 제어만 사용했을 때에는 각각의 이득 값에 시스템이 민감하게 반응하여 여러 번의 시행착오를 거쳐야 설계가 가능하였다. 또한 하중의 변화, 주변환경의 변화, 모터의 변화 등 여러 인자가 변했을 때에도 그에 맞는 이득 값과 시스템 인자를 수정해야 한다. 반면 DOB 기반의 제어기의 경우 이러한 변동에 대해 강인한 제어 성능을 보여 제어기에 익숙하지 않은 사용자 일지라도 쉽게 다룰 수 있음을 확인할 수 있었다.

비록 제안한 방법으로 설계한 제어기의 성능이 시스템의 최대 성능이라는 것을 보장할 수는 없지만, 사용자가 편리하게 설계가 가능하면서도 기본 성능을 보여준다는 장점을 보여주었다.

References

- [1] J. Vaidya, "Motor selection for actuation systems," Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp.385-391, Sep., 1995.
- [2] B.K. Fussell, and C.K. Taft, "Brushless DC motor selection," Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp.345-353, Sep., 1995.
- [3] S. Kimbrough, and L. Dewell, "Electric Motor Selection for Motion Control Systems," American Control

- Conference, pp.2079-2082, May, 1990.
- [4] C. Choi, S. Jung; S. Kim, J. Lee, T.S. Choe, S. Chung, and Y. Park, "A motor selection technique for designing a manipulator," International Conference on Control, Automation and Systems, pp.2487-2492, Oct., 2007.
- [5] M. Morari, and J.H. Lee, "Model predictive control: past, present and future," Computers & Chemical Engineering, vol.23, pp.4-5, 1999.
- [6] J.B. Burl, Linear Optimal Control: H₂ and H_∞ Methods, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998.
- [7] Y. Choi, K. Yang, W.K. Chung, H.R. Kim and I.H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.48, no.2, pp.315-320, Feb., 2003.
- [8] H.T. Choi, "Analysis for understanding of disturbance observer and its general structure," World of Electricity, vol.60, no.7, pp.31-40, 2011.
- [9] Y.S. Chang, J.E. Keh, and M.H. Lee, "Attitude Control of the Unmanned Robot System Using Disturbance Observer," The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.12, no.14, pp.1864-1865, 2006.
- [10] S.-J. Kim, M.-J. Shin, Y.-I. Son, K.-I. Kim, S.-C. Lim, and H.-I. Kang, "Design of a Disturbance Observer for DC Motor Speed Control under Load Variation," 2006 Conference on Information and Control Systems (CICS 2006), pp.133-135, 2006.
- [11] Y. Choi, K. Yang, W.K. Chung, H.R. Kim and I.H. Suh, "Design of Disturbance Observer Considering Robustness and Control Performance (1) : Analysis on Second Order System," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, vol.8, no.8, pp.655-664, 2002.
- [12] H.R. Kim, Y. Choi, I.H. Suh, W.K. Chung, M.K. Park, and K.H. Lee, "Design of Disturbance Observer Considering Robustness and Control Performance (2) : It's Application for Optical Disc Drive Servo System," Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, vol.9, no.4, pp.270-276, 2003.
- [13] H. Xiao and S. Wang, "Auto-tuning PID module of robot motion system," 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp.668-673, June, 2011.
- [14] M. Katoh and A. Fujiwara, "Auto tuning on robust parameters of a PID controller for a 2nd-order adjusted system with one changeable parameter," SICE Annual Conference 2007, pp.1624-1630, Sep., 2007.
- [15] H. S. Lee, Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High-Accuracy Positioning Systems, Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994.
- [16] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," Transactions of Japanese Society of Electric Engineering vol.107-D, pp.83-86, 1987.
- [17] T. Umeno and Y. Hori, "Robust speed control of dc servomotors using two degrees-of-freedom controller design," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.38, no.5, pp.363-368, 1991.

허영진

2013 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (공학사)
2013~현재 포항공과대학교
기계공학과 석박사 통합과정

관심분야 : Micro/Nano Manipulation

박대길

2011 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (공학사)
2011~현재 포항공과대학교
기계공학과 석박사 통합과정

관심분야 : Underwater Localization, Underwater Robots, Swarm Robots

김진현

1998 포항공과대학교 기계공학(공학사)
2000 포항공과대학교 기계공학(공학석사)
2005 포항공과대학교 기계공학(공학박사)

2005~2007 한국생산기술연구원 로봇기술본부 선임연구원

2007~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 부교수

관심분야 : Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics