

계수도법을 이용한 휠체어 로봇의 자세제어

°박성진 * 정상철 * 김관형 ** 안영주 * * * 이형기 * * *
 * 부경대학교 대학원 제어계측공학과 , * * 동명정보대학교 컴퓨터공학과, * * * 부경대학교 제어계측공학과

Motion control of a wheel-chair robot using CDM

°Sung-Jin Park * Sang-Chul Jeong * Gwan-Hyung Kim * * Young-Joo An * * * Hyung-Ki Lee * * *
 * , * * * Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University
 * * Department of Computer Engineering, Tongmyong University of Information Technology

Abstract - In this paper, I designed the inverter pendulum controller to control the position of a wheel-chair. I used coefficient diagram method (CDM) to design the controller. The CDM is available, because it can make an engineer know all about the characteristic, stability, response time and robustness, of closed loop system. Writing this paper, I simulated the controller to know whether is can control the position of wheel-chair using the theorem of inverter pandulum controll, and I identified the usefulness of it.

A/D 보드를 통하여 휠체어 몸체의 경사각 속도를 검출하고, 휠체어 몸체의 경사각은 경사각 속도의 적분을 통해 얻을 수 있다. 광학 엔코더는 counter 보드에 의해 뒷바퀴 축의 각을 검출한다. PC에서 계산된 제어입력은 D/A 보드를 통하여 모터구동 드라이버로 출력된다.

1. 서 론

로봇의 직립보행, 자세제어등에 사용되는 역진자 제어는 여러방면에서 사용되고 있다. 다른사람의 도움없이 휠체어에 의지한 환자가 단층을 올라갈 수 있는 파워어시스트 휠체어가 제안되었으며, 단층을 올라가기 위해 휠체어의 앞바퀴를 단층 높이만큼 들어 역진자 제어를 유지한채로 단층까지 전진이 가능해야 한다. 본 논문에서는 이러한 파워 어시스트형 휠체어의 자세를 제어하기 위한 역진자 제어기를 설계하고자 한다.

휠체어로봇이 앞바퀴를 들어 역진자 제어를 하는동안 사람의 자세는 변할수 있으며, 이러한 자세의 변화는 무게중심의 변화로써 제어시스템의 외란으로 고려된다. 역진자 제어기는 이러한 외란에 강인성과 안정성을 갖는 계수도법(CDM)으로 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 휠체어 로봇 시스템

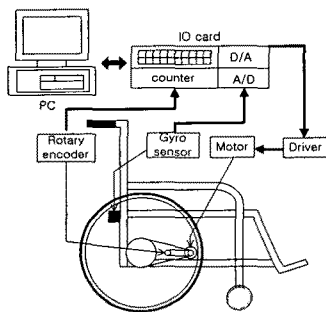


Fig.1 Wheel chair and control system

Fig.1은 휠체어 기구와 제어시스템을 나타낸다. 뒷바퀴 구동장치 시스템은 기어 DC모터, 체인, 톱니바퀴, 그리고 광학 엔코더로 구성된다. 카운터, A/D, D/A 보드를 가진 PC는 제어기로 사용된다. 자이로 센서의 출력은

2.2 휠체어 로봇의 모델링

휠체어 로봇의 수학적 모델링은 Lagrange의 운동방정식에 의해 유도된다. Fig.2은 휠체어, 바퀴, 그리고 지면의 경사각에 대한 관계를 나타낸다.

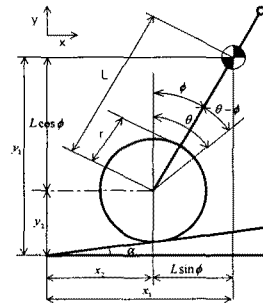


Fig.2 Dynamical model of wheel chair robot

시뮬레이션에 사용되는 파라미터는 아래와 같다.

- phi 휠체어 몸체의 경사각 [rad]
- theta 바퀴의 회전각 [rad]
- alpha 경사각 [rad]
- v DC모터의 입력 [V]
- R DC모터의 저항 : 0.84 [Ohm]
- Mb 휠체어 의자와 사람의 전체 질량 : 84.16 [kg]
- Mw 바퀴의 질량 : 6.52 [kg]
- Jb 의자와 사람의 전체 관성모멘트 : 29.3 [kg m²]
- Jw 바퀴의 관성모멘트 : 0.11 [kg m²]
- Jm DC모터 로터의 관성모멘트 : 7.0 [x10⁻⁶kgm²]
- L 휠체어 축과 사람몸체의 중심중력 사이의 길이 : 0.29 [m]
- r 바퀴의 반지름 : 0.305 [m]
- Kcf 지면과 바퀴사이의 Damping 상수 : 8.78 [N · m/(rad/sec)]
- Kcs 바퀴축의 Damping 상수 : 12.3 [N · m/(rad/sec)]
- Kt DC모터의 토크상수 : 0.0239 [Nm/A]
- Kg 기어 비 : 772

휠체어의 운동방정식은 식 (1), (2)와 같이 된다.

$$(M_b L^2 + J_b + J_m K_g^2) \ddot{\phi} + (M_b r L - J_m K_g^2) \ddot{\theta} + K_{cs}(\dot{\phi} - \dot{\theta}) - M_b g L \dot{\phi} = - \frac{K_g K_t}{R} v \quad (1)$$

$$(M_b rL + J_m K_g^2) \ddot{\phi} + \{(M_w + M_b)r^2 + J_w + J_m K_g^2\} \dot{\theta} - K_{cs} \dot{\phi} + (K_{cs} + K_{cf}) \theta = \frac{K_g K_t}{R} v \quad (2)$$

지면의 경사가 없다고 가정하고 $\alpha=0$ 으로 둔다. 휠체어가 역진자 제어를 유지할 때, ϕ 와 ϕ 값은 영(zero)으로 고려한다. 그러므로, 운동방정식은 식 (3)의 관계식을 사용하여 선형화 된다.

$$\sin(\phi) \approx \phi, \quad \cos(\phi) \approx 1, \quad \dot{\phi}^2 \approx 0 \quad (3)$$

휠체어의 상태방정식은 식 (4)와 같이 유도된다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_1 & 0 & -A_2 & A_3 \\ -A_4 & 0 & A_5 & -A_6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \frac{a_4 b_1}{a_1 b_1 - a_2^2}, \quad A_2 = \frac{a_2 a_3 + a_3 b_1}{a_1 b_1 - a_2^2}, \quad A_3 = \frac{a_2 b_2 + a_3 b_1}{a_1 b_1 - a_2^2},$$

$$A_4 = \frac{a_2 a_4}{a_1 b_1 - a_2^2}, \quad A_5 = \frac{a_2 a_3 + a_1 a_3}{a_1 b_1 - a_2^2}, \quad A_6 = \frac{a_2 a_3 + a_1 b_2}{a_1 b_1 - a_2^2}$$

$$B_1 = \frac{a_2 a_5 + a_5 b_1}{a_1 b_1 - a_2^2}, \quad B_2 = \frac{a_2 a_5 + a_1 a_5}{a_1 b_1 - a_2^2} \quad (4)$$

$$a_1 = m_B L^2 + J_B + K_G^2 J_M, \quad a_2 = m_B rL - K_G^2 J_M$$

$$a_3 = K_{cs}, \quad a_4 = m_B gL, \quad a_5 = \frac{K_G K_t}{R}$$

$$b_1 = (M_b + M_w)r^2 + J_w + K_g^2 J_m, \quad b_2 = K_{cs} + K_{cf}$$

여기서, 식 (5)의 상태변수들을 사용한다.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\phi \ \theta \ \dot{\phi} \ \dot{\theta}]^T \quad (5)$$

시스템에서 측정된 값은 엔코더 $\phi - \theta$ 의 출력과, 자이로 센서 $\dot{\phi}$ 의 출력이다. 그러므로, 출력방정식은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi - \theta \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x = Cx \quad (6)$$

Fig.3은 휠체어시스템의 블록 다이어그램이다.

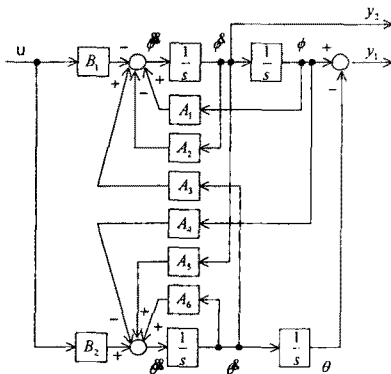


Fig.3 Block diagram of wheel chair robot

2.3 CDM 제어기 설계

2.3.1 CDM의 개요

계수도법은 전달함수로 표현된 시스템에 대해 특성방

정식에 근거한 극배치방법을 이용하여 관측기 구조의 제어기를 설계하는 기법이다. CDM은 먼저 설계 명세를 만족하는 전체 전달함수를 찾은 뒤에 여기에 맞추어 내부의 제어기와 피드백 구조를 설계하는 인워드(Inward) 방식이다.

Fig.4는 CDM설계를 위한 피드백 형태의 표준형이다.

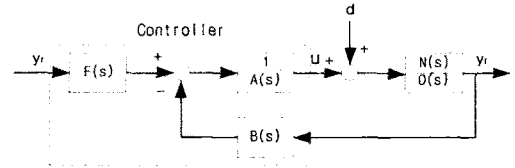


Fig.4 The CDM standard block diagram

여기서 페루프 시스템의 특성방정식은 식 (7)과 같다.

$$P(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (7)$$

일반적인 제어기 설계순서는 다음과 같다. 먼저, 설계 명세를 등가 시정수와 안정도 지수로 표현한다.

i) 등가 시정수

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (t_s = (2.5 \sim 3)\tau) \quad (8)$$

ii) 안정도 지수

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{(a_{i-1} a_{i+1})}, \quad i = 1, \dots, (n-1) \quad (9)$$

안정도 지수는 Manabe 표준형인 $\gamma_i = [2 \ 2 \ 2 \ 2.5]$ 를 권장하며, 이렇게 선택된 γ_i 와 τ 를 식 (10)에 대입하여 페루프 특성다항식의 계수를 구한다.

$$a_i = \frac{a_0 \tau^i}{(\gamma_{i-1} \gamma_{i-1}^2 \dots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1})} \quad (10)$$

마지막으로, 페루프의 안정도는 설계 파라미터인 γ_i 와 안정도한계지수(Stability limit) γ_i^* 를 Lipatov의 안정도 충분조건을 만족시키도록 고려한다. 안정도 한계지수는,

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}, \quad \gamma_n = \gamma_0 = \infty \quad \text{Lipatov가 제시한 충분조건으로서 CDM에서의 특성다항식의 안정도 판별법은 식 (10)~(14)와 같다.}$$

i) 안정도 조건

$$a_i > 1.1237 \left[\frac{a_{i-1}}{a_{i+1}} a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} a_{i-2} \right] \quad (11)$$

$$\gamma_i > 1.1237 \gamma_i^* \quad i = 2, 3, \dots, (n-2) \quad (12)$$

ii) 불안정 조건

$$a_{i+1} a_i \leq a_{i+2} a_{i-1} \quad (13)$$

$$\gamma_{i+1} \gamma_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, (n-2) \quad (14)$$

이상의 설계과정을 계수로도 표현할 수 있으며 기하학적으로 Shaping 할 수 있다.

2.3.2 휠체어 로봇의 역진자 제어기 설계

역진자 제어를 위해 CDM에 의한 제어기 설계를 SIMO 시스템에 적합하도록 Fig.5와 같은 제어기 형태로 설계하였다.

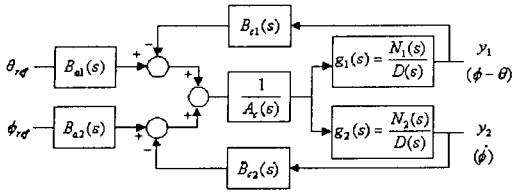


Fig.5 CDM 제어기의 block diagram.

여기서,

$$D(s) = d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0 = s^4 + 2.162s^3 - 5.81s^2 - 9.984s \quad (15)$$

$$N_1(s) = n_3s^3 + n_2s^2 + n_1s + n_0 = 1.776e - 15s^3 - 2.602s^2 - 0.3819s + 10.4 \quad (16)$$

$$M_1(s) = m_3s^3 + m_2s^2 + m_1s + m_0 = -0.6955s^3 - 0.3819s^2 + 1.066e - 14s \quad (17)$$

$$A_c(s) = a_1s + a_0 \quad (18)$$

$$B_{d1}(s) = b_1s + b_0 \quad (19)$$

$$B_{d2}(s) = c_1s + c_0 \quad (20)$$

으로 나타낸다. 등가시정수 $\tau=0.5$ 로 정하고, 안정도지수 γ_i 는 식 (21)과 같은 마나베 표준형을 사용한다.

$$\gamma_i = [2 \ 2 \ 2 \ 2.5] \quad (21)$$

등가시정수와 안정도지수를 가지고 페루프 특성방정식을 구하면 식 (22)와 같다.

$$P_5 = P_0\tau^5/2500 = 1.0109e - 5$$

$$P_4 = P_0\tau^4/125 = 6.7392e - 4$$

$$P_3 = P_0\tau^3/12.5 = 0.0225$$

$$P_2 = P_0\tau^2/2.5 = 0.3744$$

$$P_1 = P_0\tau = 3.12$$

$$P_0 = 10.4$$

$$P(s) = 1.0109 \times 10^{-5}s^5 + 6.7392 \times 10^{-4}s^4 + 0.0225s^3 + 0.3744s^2 + 3.12s + 10.4 \quad (22)$$

제어기 계수를 구하기 위해 식 (23), (24)와 같이 나타내고, 미지수 행렬 X를 식 (25)에 의해 구할 수 있다.

$$S \times X = P \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} d_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_3 & d_4 & n_3 & 0 & m_3 & 0 \\ d_2 & d_3 & n_2 & n_3 & m_2 & m_3 \\ d_1 & d_2 & n_1 & n_2 & m_1 & m_2 \\ d_0 & d_1 & n_0 & n_1 & m_0 & m_1 \\ 0 & d_0 & 0 & n_0 & 0 & m_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_0 \\ b_1 \\ b_0 \\ c_1 \\ c_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \\ p_2 \\ p_1 \\ p_0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$X = S^{-1} \times P \quad (25)$$

이렇게 구한 제어기는 다음과 같다.

$$A_c(s) = 1.3 \times 10^{-4}s - 0.5316 \quad (26)$$

$$B_{e1}(s) = 0.0263s + 1 \quad (27)$$

$$B_{e2}(s) = -0.7715s - 1.4782 \quad (28)$$

2.4 시뮬레이션 및 결과

휠체어 로봇의 역진자 제어를 매트랩을 사용하여 시뮬레이션하였다. Fig.6은 역진자 제어를 수행하면서 휠체어 로봇을 전진하기 위해 휠체어 로봇의 뒷바퀴를 50° 만큼 회전하도록 입력을 주었을 때, 휠체어 뒷바퀴 회전각과 휠체어 몸체의 경사각을 나타낸다. 휠체어 몸체의 경사각이 정상상태에서 출력의 변화가 적음을 알 수 있다.

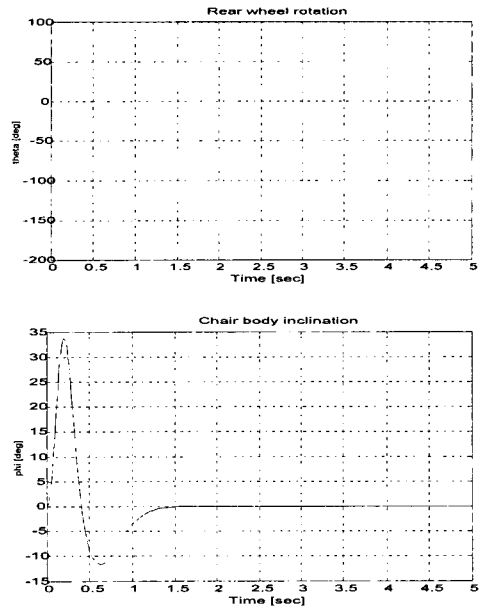


Fig.6 Simulation results

3. 결 론

계수도법은 특성방정식의 계수들을 안정도지수 (Stability Index) γ_i 와 등가시정수(Equivalent Time Constant) τ 의 함수로 표현하고, 이들 특정 파라미터가 페루프 시스템의 시간응답, 안정도 및 강인성과 관련성을 갖는다는 점에 착안하여 제어기를 설계하는 방법이다. 본 논문은 이러한 특징을 갖는 계수도법을 이용하여 설계한 휠체어 로봇의 역진자 제어를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, pp.199-210, Aug. 1998
- [2] Y. Takahashi, S. Ogawa and S. Machida, "Front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheel chair robot", Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON'99), PP.668-673, Nov, 1999
- [3] 허명준, 김영철, 정동근, "CDM과 ICD에 의한 루퍼시스템의 제어기 설계", 순천향산업기술연구소 논문집, 제5권 1호, pp.31-38, 1999
- [4] Y. Takahashi, S. Machida, and S. Ogawa, "Analysis of front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheel chair robot", Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON2000), pp.96-101, Nov, 2000
- [5] 황현철, "CDM을 이용한 PENDUBOT 제어기 설계", 울산대학교 석사학위논문, 2001