차량의 개폐력 보조 여닫이 문의 되먹임 선형화를 이용한 속도 제어 및 충돌 감지

이 병 수^{*1)} · 박 민 규²⁾ · 성 금 길²⁾

계명대학교 기계자동차공학과¹⁾ · 영남이공대학교 기계학과²⁾

Velocity Control and Collision Detection by Feedback Linearization for an Power-assisted Automotive Swing Door

Byoungsoo Lee^{*1)} · Min-Kyu Park²⁾ · Kum-Gil Sung²⁾

¹⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾School of Mechanical and Automotive Engineering Technology, Yeungnam College of Science and Technology,
Daegu 705-703, Korea

(Received 3 May 2012 / Revised 21 August 2012 / Accepted 21 February 2013)

Abstract : Automatic swing door for an automotive application is considered. The equation of motion for a driver side swing door is introduced and gravity cancellation control scheme is adapted. The control scheme supposed to cancel the moment due to the tilt of the car. A speed control is suggested for door operation automation but the output of the speed control is not suppose to be precise as for the manufacturing system control. In the frame of the velocity control of the door, feedback linearization was applied for collision detection. The collision detection performance is satisfactory. The estimate of the magnitude of disturbance due to the collision is close to the actual magnitude of disturbance. Simulation study has been performed to gain insight into the system behavior. Also real test on the prototype hardware has been performed for verification purpose.

Key words : Automotive swing door(차량 여닫이 문), Automatic door(자동문), Collision detection(충돌 감지), Feedback linearization(되먹임 선형화), 개폐력 보조문(Power-assisted door)

1. 서 론

차량용 편의장치로 전동식 파워도어 시스템이 개발되어 보고되었다.¹⁻⁴⁾ 이 시스템은 자동차의 주차 각도에 따른 문 개폐력의 변화를 보상할 수 있으며 편리성과 안정성을 높여줄 수 있다고 기대된다. 기존의 자동차 문 내부에는 차체와 문 사이에 도어 체커(door checker) 또는 가이드라는 부품을 장착하여 문 개폐시 문이 제한 각도를 넘어 열리는 것을 방지하도록 배려하고 있다. 그러나 좁은 공간이나, 내리막 경사 및 측면으로 경사진 곳 등에 주차할 경우 문의

자중에 의하여 승객이 원하는 적당한 위치에서 문이 고정되지 않는다. 이런 경우 문이 옆 차, 주변의 보행자, 혹은 벽 등에 부딪칠 위험이 있고, 문을 잡고 불편한 자세로 승하차를 해야 하는 단점이 있다.

이런 불편함과 안전을 위협하는 문제를 해결하기 위해 차량의 롤(roll) 및 피치(pitch) 각도의 변화에 따라 자동차 문의 개폐력을 변화시킬 수 있는 개폐력 보조(power-assist) 장치를 Fig. 1과 같이 부착하였다. 즉, 모터 등의 능동 부품을 사용하여 승객이 자동차 문 개폐시 힘을 보완할 수 있도록 개폐력을 보조하는 것이다. 또한 안전을 도모하기 위해서는 작동 중 문과 외부 보행자 혹은 장애물과의 충돌 감

*Corresponding author, E-mail: blee@kmu.ac.kr

Fig. 1 The guide bar removed and an actuator installed

지는 필수 요건이라 할 수 있다. 하지만 충돌을 감지하기 위해 센서를 채용하려면 상당한 차량 가격 상승 요인이 되며 기술적으로 어려움이 있다. 그러므로 충돌 감지를 외란 관측으로 대신하려 한다.

본 연구에서는 승용차용 문의 개폐시 편의성과 안전성을 증대시키기 위한 문 개폐력 보조 장치에 대한 충돌 감지 시스템을 제안한다. 연구를 수행하기 위하여 문의 동적 모델을 제시하고 운동방정식을 유도한다. 그리고 충돌감지기로써 되먹임 선형화를 통한 외란 관측기를 제안하며 문 닫기 열기 동작 속도 제어를 설계한다. 이를 장착한 문의 제어 시스템 모델을 완성하고 시뮬레이션 해석 및 외란 산출 알고리즘을 시험을 수행하였다. 또한 제작한 프로토타입 실험을 통하여 제안한 외란 산출 알고리즘의 유용성을 입증한다. 하지만 충돌을 감지한 이후의 문의 동작에 대한 논의 및 제어에 대해서는 다루지 않는다.

2. 개폐력 보조 여닫이문의 동역학 모델

체커 또는 가이드를 제거하고 능동 장치를 부착한 장치를 제어하고 외란을 관측하기 위하여 SAE가 정한 좌표 표준을 적용한 문의 동역학적 모델을 작성하였다(Fig. 2 참조).⁴⁾ 이 모델에서는 지형의 경사를 적용하기 위하여 지역좌표를 회전하는 대신 중력 벡터를 회전시켰다. 그러므로 지표면에서의 중력가속도를 g , 피치각을 ϕ_y , 롤각을 ϕ_x 라며 회전 중력벡터는 다음과 같다.⁴⁾:

$$\mathbf{g}_{rot} = g \begin{bmatrix} -\cos\phi_x \sin\phi_y \\ \sin\phi_x \\ \cos\phi_x \cos\phi_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

벡터곱을 이용하여 중력에 의해 문에 작용하는 토크 성분 중 힌지 축 성분, 즉 z성분은 다음과 같이

Fig. 2 Weight and position vector described in door fixed coordinates

계산할 수 있다.

$$\Gamma_g = -r_g mg (\cos\theta \sin\phi_x + \sin\theta \cos\phi_x \sin\phi_y) \quad (2)$$

여기서 θ 는 문의 각도이고 r_g 는 힌지 축에서 무게 중심까지의 수직 거리이다. 또한 설치된 액츄에이터가 발생하는 힘을 F 라 할 때 이 힘에 의한 모멘트를 계산할 수 있다.

$$\Gamma_f = \frac{r(\epsilon_x \sin\theta + \epsilon_y \cos\theta)}{\sqrt{(r \cos\theta - \epsilon_x)^2 + (r \sin\theta + \epsilon_y)^2}} F \quad (3)$$

그러므로 문의 회전축에 대한 2차질량관성모멘트를 J , 감쇠계수를 c , 힌지축의 마찰에 의한 토크를 Γ_{fric} 그리고 외란 토크를 Γ_d 라 할 때 다음과 같은 운동방정식을 얻는다.

$$J \frac{d\omega}{dt} + c\omega + \Gamma_{fric} = \Gamma_f + \Gamma_g + \Gamma_d \quad (4)$$

3. 외란 검출 및 속도 제어

3.1 되먹임 선형화와 충돌 감지

여닫이문의 자동화 편의성과 안전을 위하여 외란 관측이 필요하다. Oh & Hori⁵⁾는 전달함수로 표현되는 선형시스템에 대한 아주 간단하지만 유효한 외란관측기를 제안하였다. 그리고 이 기법을 센서 없는 로봇 암의 힘 보조력 제어와 전동휠체어 제어에 성공적으로 적용하였다. 이 기법은 기본적으로 공칭시스템 $G_m(s)$ 의 역전달함수와 컷오프 주파수가 τ 인 두 개의 저역통과필터를 활용하며 이로부터 외란관측기는 시스템 응답에서 외란을 추출할 수 있다(Fig. 3 참조).

Fig. 3 Schematic block diagram of a disturbance observation proposed by Oh⁵⁾

이 기법을 활용하려면 우선 식 (4)의 비선형 운동방정식을 선형 운동방정식으로 변환해야 한다. 힌지에 작용하는 마찰토크를 외란에 포함시켜 하나의 외란 항으로 만들고

$$u = \Gamma_f + \Gamma_g = lF + \Gamma_g \quad (5)$$

와 같이 되먹임 선형화(feedback linearization) 제어 입력으로 변환하면 다음과 같이 외란이 존재하는 선형 운동방정식과 Fig. 3의 공칭전달함수를 얻는다.⁶⁾ 여기서 l 은 식 (3)에서 F 앞에 곱해지는 항 전체이다.

$$J \frac{d\omega}{dt} + c\omega = u + \Gamma_d \quad (6)$$

$$G_m(s) = \frac{1}{Js + c} \quad (7)$$

3.2 문 개폐 자동화를 위한 속도 제어

이 장에서는 여닫이문의 속도제어에 대해 다루고, 비선형 시스템을 대상으로 적용할 수 있는 외란관측 기법을 제안한다. 속도 제어를 사용하여 여닫이문의 개폐를 자동화 하는 방법은 다음의 설명과 같다. 문을 열고자하여 제어 시스템의 입력에 열림 속도를 제어 입력으로 가하면 제어기는 해당 속도 입력을 추종하여 결과적으로 문이 열리게 된다. 문을 닫을 때는 반대 방향의 속도 명령을 준다. 물론, 닫힘과 열림 동작 시 동작 완료가 임박한 시점에서 속도 명령의 크기를 줄여 문 여닫힘의 충격을 줄인다.

차량이 평지에 주차되어 있다면 여닫이문을 그 자리에 유지시키는데 필요한 힘은 영이다. 하지만 경사면에 주차되어 있다면 문을 평형상태로 유지하

기 위하여 액츄에이터가 발생해야 하는 힘은 다음과 같다.¹⁾

$$F_{eq} = \frac{r_y m g (\cos\theta \sin\phi_x + \sin\theta \cos\phi_x \sin\phi_y)}{\sqrt{(r \cos\theta - \epsilon_x)^2 + (r \sin\theta + \epsilon_y)^2}} \quad (8)$$

힘 F_{eq} 는 경사면에 주차한 차량의 여닫이문을 평형 상태로 유지하기 위하여 필요한 액츄에이터의 힘이다. 만약 액츄에이터가 이런 힘을 발생시킨다면 경사면에 주차하였더라도 문을 여닫는데 필요한 노력은 차량이 평지에 있는 것처럼 느껴질 것이다.

식 (5)와 (8)로부터 제어 입력을 차량의 기울어짐에 따른 힘과 여닫이문의 개폐 속도 제어를 위한 힘으로 분리한다.

$$F = F_{eq} + F_u \quad (9)$$

식 (9)를 식 (5)에 그리고 다시 식 (6)에 대입하고, $lF_{eq} = -\Gamma_g$ 이므로 다음과 같은 운동방정식을 얻는다.

$$J \frac{d\omega}{dt} + c\omega = lF_u + \Gamma_d \quad (10)$$

이제 여닫이문의 개폐 시 속도조절 제어를 설계한다. 속도 제어기는 어떤 것이든 본 연구의 주요 주제가 아니며 여닫이문의 개폐 자동화 문제에 있어서 속도 제어의 정밀성이 중요한 인자도 아니므로 간단한 게인 제어기를 채용하였다. 즉 제어력은 다음과 같이 간단하게 계산한다.

$$F_u = K_p(\omega_{ref} - \omega) \quad (11)$$

여기서 K_p 와 ω_{ref} 는 각각 속도 제어의 이득이며 문의 각속도 명령이다. 최종적인 속도 제어와 더불어 충돌 감지기로서의 외란관측 시스템을 Fig. 4와 같이 제안한다.

Fig. 4 Schematic block diagram for proposed speed control and disturbance estimation by feedback linearization

4. 수치해석 및 시뮬레이션

여닫이문의 동역학, 속도 제어 그리고 외란 관측기는 Simulink와 SimMechanics⁷⁾을 이용하여 모델링하였다. 여기서 프레임과 여닫이문은 질량과 2차관성모멘트를 갖는 링크로 모델링된다. 도어 힌지는 핀 조인트, 액츄에이터는 두 개의 가벼운 막대가 1자유도의 프리즘 조인트로 구속되도록 모델링된다. 이 막대의 한쪽 끝은 문의 작용점에 핀 조인트로, 또 다른 끝은 프레임 상의 가이드 바 설 치점에 핀 조인트로 연결된다. 중력가속도는 외부 벡터로 설정하여 차량의 기울어짐을 모사하도록 하였다. 시스템 파라미터 Table 1에 주어진 값을 사용하였다.

Table 1 System parameters

Parameter	Value
m	28kg
b	1.1m
r_g	0.6m
c	0 Nm/rad/s
ϵ_x	50mm
ϵ_y	65mm

실제 문에는 문의 열림을 제한하는 스톱퍼가 장착되어 있는데 실제에 가까운 모사를 위해 하드 스톱(hard stop) 모델을 포함한다. 또한 이 하드 스톱 모델은 문의 닫힘에도 적용된다. 여러 연구에서 많이 사용하는 모델은 다음의 형태를 갖고 있다.

$$T_{HS} = k_{HS}\psi + |\psi|c_{HS} + \dot{\psi} \quad (12)$$

여기서 ψ 는 문의 제한 각도를 넘어서 각도이며 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta \leq \theta_{\lim} \\ \theta - \theta_{\lim} & \text{for } \theta > \theta_{\lim} \end{cases} \quad (13)$$

하드 스톱 모델의 파라미터는 Table 2에 지정한 값을 이용한다. SimMechanics에서는 하나의 조인트에 오직 하나의 액츄에이터 혹은 운동 입력 블록을 적용할 수 있으므로 마찰 모델을 하드 스톱 모델에 포함시켰다. 안정적인 강건한 마찰 모사를 위해서 Reset Integrator^{8,9)} 마찰모델을 채용하였다. 하드 스톱 모델은 문이 제한 각도까지 완전히 열릴 때와 문이 닫힐 때 작동한다. Fig. 5에 시뮬레이션을 위한 Simulink와 SimMechanics 모델을 나타내었다.

Fig. 5 Simulink and SimMechanics simulation block diagram

Table 2 Hard stop parameter

Parameter	Value
k_{HS}	1×10^4 Nm/rad
c_{HS}	5×10^4 Nm/rad/s

4.1 속도 제어 시뮬레이션

문이 닫힌 상태에서 자동으로 열리는 상황을 속도 제어에 적용하여 시뮬레이션 수행하였다. 문이 닫혔을 때의 각도가 0이고 60도가 약간 넘는 각도까지 열리며 속도제어기로 비례제어가 사용되고 속도 목표 값은 초기에는 0.6 rad/s로 설정되었다. 이후 문이 거의 다 닫히면 각속도 목표 값을 낮추어 충돌에 의한 충격을 줄인다. Fig. 6에 시뮬레이션 결과를 그래프로 그렸다. 위 그래프를 살펴보면 시뮬레이션이 시작되면 서 각도와 각속도는 서서히 증가하며 속도는 0.6rad/s로 접근해가며 2.7초 후 문은 완전히 닫힌다. 닫히기 직전 속도 목표 값이 설정한 작은 값으로 바뀌기 때문에 각속도는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 아래 그래프는 액추에이터에 작용한 힘 그래프이다.

Fig. 6 History plots of a door closure with speed control (simulation)

4.2 외란관측을 통한 충돌 감지 시뮬레이션

외란 관측 성능을 살펴보기 위해서 문이 열리는 도중에 외부에서 문 열림을 방해하는 방향으로 알고 있는 토크를 가하고 외란 관측기가 얼마나 충실

Fig. 7 History plots of a door closure with speed control and collision detection (simulation)

히 그 값을 추정하는지 살펴보았다. 그 시뮬레이션 결과가 Fig. 7에 있다. 속도 제어가 작동하고 초기에 문이 열리기 시작한다. 잠시 후 외란 토크가 가해지면 문은 닫히는 방향으로 움직이지만 곧 다시 열리는 방향으로 각속도가 증가하기 시작하고 문은 완전히 열린다. 두 번째 그래프는 참고로 액추에이터의 작용력을 그린 것이며 세 번째 그래프는 실제 작용한 외란 토크와 추산한 외란이다. 시뮬레이션이 시작되고 1.5초 후 100Nm의 외부 충격 토크가 0.2초간 가해졌으며 외란 산출알고리즘은 충격에 의한 토크를 훌륭하게 감지하고 있음을 확인시켜준다. 본 연구 주 목표는 여단이문의 외란의 감지이며 충격 감지 이후의 동작 설정 및 제어에 대해서는 다루지 않는다.

5. 실험 및 검증

차량용 여단이 문 자동화에 따른 개폐 속도 제어와 충돌 감지 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 실제 문을 사용하고 액추에이터를 제작 부착하며, MathWorks의 Matlab/Simulink와 Humusoft의 Real Time Toolbox 환경을 이용하여 실험을 수행하였다. Real Time Toolbox를 사용하면 Simulink로 구성된 시뮬레이션 블록에서 입출력 블록들만 추가하여 바

Fig. 8 History of responses obtained from door closure experiment with a speed control (real)

Fig. 9 History of responses obtained from door closure experiment with a speed control and disturbance estimation (real)

로 실시간 실험이 가능하며 데이터 입출력 인터페이스는 Humusoft가 제공하는 MF624보드를 사용하였다.

문이 완전히 열려있는 상태에서 문을 닫는 실험을 먼저 수행하였는데 이때 인위적인 외란을 가하지 않았다. Fig. 8에 실험 중 획득한 문의 각변위, 각속도와 액추에이터가 발생하는 힘을 그래프로 그렸다. 각속도 측정 센서는 별도로 부착하지 않았으므로 각변위를 미분하고 저역필터를 통과한 값을 사용하였다. 각속도는 정밀하게 목표치인 -0.5 rad/s 를 추종하지 않지만 여닫이문의 자동화에는 아무런 지

장이 없을 정도의 응답을 보여주었다. 각속도를 정밀하게 제어하지 않는 또 다른 이유는 액추에이터의 힘 발생 용량이 작기 때문에 제어력이 포화되기 때문이다. 아래 그래프의 시뮬레이션 초기 상태를 관찰하면 액추에이터가 하한 값으로 포화됨을 알 수 있다.

다음으로는 동일한 실험을 하면서 문이 닫히는 도중에 닫힘을 방해하는 외력을 가하여 인위적인 충돌 상황에서 외란감지기가 외란을 성공적으로 감지하는지 확인하였다. Fig. 9의 위 그래프는 문의 각변위와 각속도 그래프인데 이 그래프에서 각변위 0은 완전히 열림을 뜻한다. 아래 그래프에서 외란 산출 값이 두 번 피크치를 보이는데 첫 번째는 인위적이며 크기를 모르는 외란을 가한 것에 대한 것이고 두 번째 피크는 문이 완전히 닫히며 프레임과 충돌하는 것에 상응한다. 그러므로 외란 감지 알고리즘은 상당히 정확히 외란을 감지하였다고 평가한다. 그러므로 충돌을 감지하기 위해서는 외란이 일정 값 이상의 크기를 갖을 상황을 설정하여 감지하는 것이 가능할 것이다. 또한 두 번째 외란 그래프의 피크는 문이 완전히 닫힌 상황에서 발생한 것이라 무시하여 충돌로 보지 않으면 된다.

6. 결 론

차량의 개폐력 보조 시스템이 설치된 여닫이문의 작동 시 충돌을 감지하는 알고리즘을 제안하고, 모의 실험과 프로토타입 실험으로 그 성능을 검증하였다.

- 1) 직류모터로 작동되는 여닫이문의 개폐력 보조 시스템의 비선형 방정식을 되먹임 선형화 기법을 이용하여 선형화 하였다.
- 2) 선형화 시스템에 대하여 외부 충돌(외력에 의한 외란)을 감지하는 외란 산출 방법을 제안하였다.
- 3) Simulink와 SimMechanics를 이용하여 문 개폐력 보조 기구의 동역학 모델, 힌지 부위의 건마찰, 외란 산출 알고리즘, 도어 래치 및 스톱퍼의 충돌 모델 및 속도 선형 제어를 구성하고 시뮬레이션 해석을 수행하였다.
- 4) 속도 제어기로는 속도 오차에 대한 게인 값만을 사용하였다. 문의 개폐 자동화를 목적으로 할 경우 정밀한 속도 제어의 필요성이 없다고 판단하

였기 때문이며 적용 결과 만족할만한 개폐 성능을 보였다.

- 5) 시뮬레이션 해석을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 확인하고 실제 승용차의 운전자측 도어를 사용하여 프로토타입을 제작하였으며 실험을 수행하였다. 문을 열고 닫는 동작을 속도 제어로 실현하는 실험과, 문을 열고 닫는 중 외부 충돌이 가해졌을 때 외란을 산출하는 알고리즘의 동작 확인 실험이었다.
- 6) 프로토타입 실험 결과로 제안한 외란 산출 기법의 우수한 성능을 뒷받침 하였으며 실용 가능성을 확인하였다.

References

- 1) K. G. Sung, M. K. Park and B. Lee, "Design and Experiment Verification of Power-assisted Smart Door System," 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Funchanl, Madeira, Portugal, pp.443-444, 2010.
- 2) M. K. Park, K. G. Sung and B. Lee, "Design of Power Assist Control System for Smart Door," Proceedings of the KSNVE Twentieth Anniversary Spring Conference, pp.443-444, 2010.
- 3) K. G. Sung, M. K. Park and B. Lee, "Development and Experiment Verification of Power-assisted Door," Proceedings of the KSNVE Twentieth Anniversary Spring Conference, pp.445-446, 2010.
- 4) B. Lee, M. K. Park and K. G. Sung, "Power-assisted Door for a Passenger Vehicle," J. of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.16, No.6, pp.532-538, 2010.
- 5) S. Oh and Y. Hori, "Sensor Free Power Assisting Control Based on Velocity Control and Disturbance Observer," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Dubrovnik, Croatia, pp.A5-05, 2005.
- 6) J. J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- 7) The Mathworks, Inc., Simulink User's Guide, 2008.
- 8) D. A. Haessig and B. Friedland, "On the Modeling and Simulation of Friction," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.113, pp.354-362, 1991.
- 9) B. Lee, "Automotive Manual Transmission Clutch System Modeling for Foot Effort Hysteresis Characteristics Prediction," Transactions of KSAE, Vol.16, No.5, pp.164-170, 2008.