

궤도 차량에 대한 예견 제어 응용

Application of Look-ahead Preview Control to the Tracked Vehicles

강옥현† · 박영진* · 박윤식** · 서문석***

Okhyun Kang, Youngjin Park, Younsik Park and Moonsuk Seo

Key Words : look-ahead preview control(예견 제어), tracked vehicle(궤도차량), Actuator dynamics(구동기 동역학), road information reconstruction(노면 정보 재생성)

ABSTRACT

In this paper, practical problems will be covered in applying preview control to real tracked vehicle systems. Previous researches about the preview control assume that the vehicle speed is constant and the actuators have full frequency bandwidth. However, in order to apply it to real systems, those should be taken into account. Therefore this paper show the algorithm to apply the preview control to speed changing vehicles and performance variation according to a restricted frequency bandwidth.

1. 서 론

예견 제어란 차량의 전방 노면 정보를 예견 센서를 이용하여 미리 획득함으로써 제어기 설계 시 보다 향상된 진동 저감 성능을 얻을 수 있는 제어 기법이다[4]. 향후 궤도 차량의 평균 주행속도가 현재 30km/h 에서 60km/h 로 증가될 것으로 예상된다. 궤도 차량의 특성상 주행 노면이 야지와 같이 불규칙하므로 평균 주행속도의 증가는 차체에 심각한 진동을 발생시킨다. 이러한 진동은 운전자의 승차감을 떨어뜨려 운전자의 지속적인 운전 능력을 상실시키게 된다. 이를 해결하기 위하여 능동 현수 장치 기반의 예견 제어를 설계함으로써 차량의 진동을 효과적으로 줄이기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 이러한 예견 제어를 실제 궤도 차량에 적용하기 위하여 고려해야 할 사항들에 대하여 다루고자 한다. 실제 궤도 차량의 경우는 항상 일정한 주행 속도만으로 운행하지 않는다. 기존의 연구에서는 차량의 속도를 일정하다는 가정하에 예견 제어를 설계하였으나, 본 연구에서는 궤도 차량의 주행 속도가 변하는 상황에서도 적용 가능한 예견 제어를 설계하고자 한다. 다음으로는 본 연구에서 기반으로 하는 능동 현수장치의 경우 실제 구동기의 주파수 대역폭이 제한적이다. 따라서 구동기의 동특성 변화에 따른 예견 제어 성능을 분석하고 가용한 구동기의 주파수 대역을 제시하고자 한다.

2. 궤도 차량 모델링

2.1 선형 궤도 차량 모델

본 장에서는 제어기 설계를 위하여 선형된 궤도 차량을 소개할 것이다. 선형화된 궤도 차량 모델은 그림 1 에서 보듯이 트레일링 암 형태로 2 차원 평면 좌표계에서 모델링이 수행되었다[1].

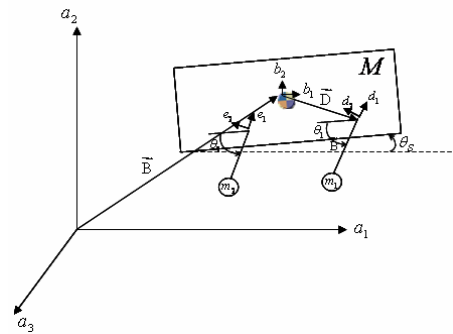


그림.1 선형화된 궤도 차량 모델

운동 방정식은 라그랑지 방정식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} = Q_j^{(m)}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

편의를 위해 두 개의 바퀴를 가지는 경우에 대하여 유도한 다음 여섯 개로 확장하였다. 그리고 모델의 복잡성을 피하기 위해 궤도의 영향은 무시하였다.

2.2 비선형 궤도차량 모델

선형화된 모델은 제어기 설계를 위하여 사용되

† 강옥현; 한국과학기술원
E-mail : kissmequick00@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

* ** 한국과학기술원

*** 국방과학연구소

고 설계된 제어 입력이 들어갈 비선형 궤도 차량 모델이 필요하다. 실제 궤도 차량에 대하여 제어 알고리즘을 적용할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 상용 동역학 해석 프로그램인 리커다인 (Recurdyn™)을 사용하여 비선형 모델을 생성하였다. 비선형 모델은 그림 2에서 보는 것과 같다.

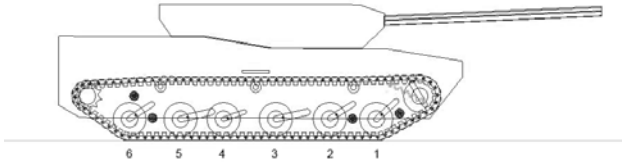


그림.2 비선형 궤도 차량 모델

현수장치에 장착되는 스프링과 댐퍼의 비선형적인 특성이 비선형 모델에 고려되었다.

2.3 예견 제어기 설계

(1) LQR 기반의 예견 제어기

예견 제어기는 기존에 널리 이용되고 있는 최적 제어기법인 LQR 를 이용하여 설계하였다. 목적 함수는 식(2)와 같다. 본 연구의 목적은 운전자의 승차감 향상에 있기 때문에 차체 중심의 수직 가속도와 피치 각 가속도에 큰 비중을 두었다 [3].

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T (\rho_1 \ddot{y}^2 + \rho_2 \dot{\theta}_s^2 + \rho_3 \sum_{k=1}^6 \theta_k^2 + \rho_4 \sum_{k=1}^6 (y_{rk} - w_k)^2 + \rho_5 \sum_{k=1}^6 u_k^2) dt \quad (2)$$

위의 목적함수를 바탕으로 이산 영역에서 설계된 예견 제어기는 다음과 같은 형태를 가진다.

$$u(k) = -R^{-1} \{ (N^T + B^T \phi^{-1}(k) P(k+1) A_n) x(k) + B^T \phi^{-1}(k) P(k+1) D w(k) + B^T \phi^{-1}(k) r(k+1) \} \quad (3)$$

제어기의 특징은 상태 변수 $x(k)$ 에 의존하는 피드백 항과 예견 정보 $r(k+1)$ 에 의존하는 피드포워드 항의 조합으로 이루어져 있다.

(2) 기준 모델 추종 예견 제어기

전체적인 시스템의 예견 제어는 그림 3과 같다. 이를 기준 모델 추종 예견 제어기라 부르겠다[1]. 그림에서 보듯이 기준 모델 부분에서는 노면 정보를 습득하여 선형 모델을 기반으로 예견 제어기를

설계한다. 이렇게 설계된 제어 입력을 비선형 모델인 Tracked vehicle 로 보내준다. 다음으로는 선형 모델에서 나오는 상태변수와 비선형 모델에 나오는 상태변수의 차이를 보정하기 위하여 비선형 제어기인 TDC 제어기를 사용한다.

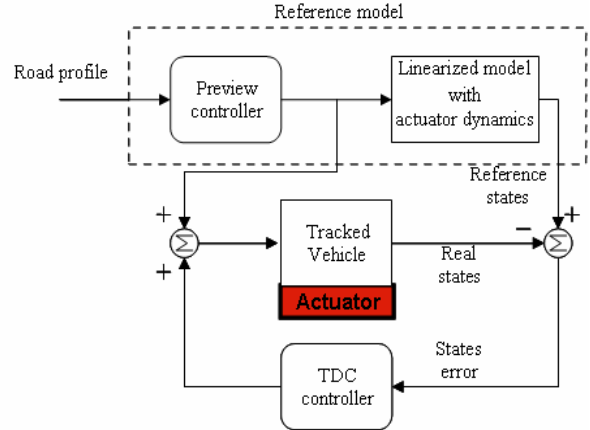


그림.3 기준 모델 추종 예견 제어기

3. 노면 정보의 재생성

기존의 예견 제어기 기법을 적용한 예들은 차량의 속도를 정속으로 가정하였다. 하지만 실제 궤도 차량의 경우는 속도가 일정하지 않고 수시로 변하게 된다. 이를 위해서 변화하는 속도에 맞도록 노면 정보를 재생성 할 필요가 있다. 즉, 궤도 차량이 임의의 속도 v_k 로 주행하다가 v_{k+1} 로 증가할 경우, 이전의 속도에서 받아들인 노면 정보를 v_{k+1} 의 속도에 해당하는 노면 정보로 재생성 해야 한다. 그렇게 함으로써 제대로 된 예견 제어기를 설계할 수 있다.

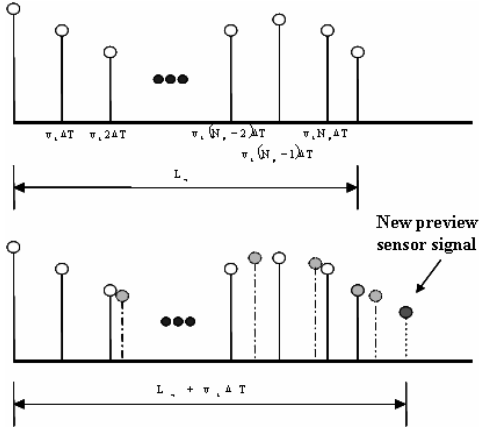
노면 정보의 재생성을 위해 현재 순간 이전에 들어오는 노면 정보를 식 (4)와 같이 속도에 대하여 정규화한다. 이러한 과정을 통해 노면의 변위를 진행 방향의 거리에 대한 함수로 표현할 수 있다. 거리에 따른 노면 정보를 안다고 가정할 경우 보간을 통해 노면 정보를 재생성 할 수 있다 [2].

$$w(t) = \frac{\partial z_0}{\partial t} = \frac{\partial z_0}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial t} = \frac{\partial z_0}{\partial x_1} \cdot v$$

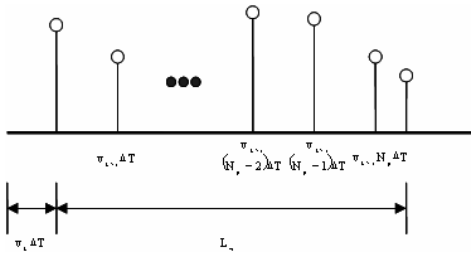
$$\Rightarrow \frac{w(t)}{v} = \frac{\partial z_0}{\partial x_1} \quad (4)$$

그림 4는 식(4)를 이용하여 노면을 보간하는 방법을 보여준다. 속도가 변하면 한 샘플당 움직이는 차량의 이동거리가 변하게 된다. 그림 4의

(a)에서는, 이전 속도에서 얻은 거리에 따른 노면 정보를 변화된 속도에 맞는 거리에 따른 노면 정보로 보간을 통해서 재생성 할 수 있다. 이렇게 재생성된 노면 정보는 (b)에서 볼 수 있다.



(a) 노면 보간



(b) 재생성된 노면 정보

그림.4 보간을 이용한 노면 재생성

4. 구동기를 고려한 제어기 설계

4.1 구동기 동특성

구동기의 동특성은 1 차의 lowpass 필터로 가정하였다.

$$H'(s) = \frac{u'(s)}{u(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (5)$$

전달 함수로 주어진 구동기 동특성을 상태 공간으로 변환하여 표현하면 다음과 같은 상태공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= A_d x_d(t) + B_d u(t) \\ y(t) &= u'(t) = C_d x_d(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $x_d = [u'_1 \ u'_2 \ \dots \ u'_6]^T$ 는 상태 변수로 구동기의 출력을 나타내고 $u(t)$ 는 구동기로 들어가는 제어 입력이다.

4.2 구동기 동특성을 고려한 예견 제어기

4.1 에서 가정한 구동기 동특성을 원래 시스템의 상태변수에 추가함으로써 구동기의 동특성이 고려된 시스템의 상태 공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew \quad (7)$$

원래 시스템의 상태 방정식 (7)에서 제어 입력이 구동기를 거친 후의 출력이 입력으로 들어가야 한다. 이를 고려하면 식(8)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu' + Ew \\ &= Ax + BC_d x_d + Ew \end{aligned} \quad (8)$$

구동기를 고려한 전체 시스템의 상태 변수를 다음과 같이 원래 시스템의 상태 변수와 식(6)에서의 상태 변수를 추가시켜서 다음과 같이 정의한다.

$$x_a(t) = [x^T \ x_d^T]^T$$

위의 상태 변수를 정의함으로써 전체 상태 공간 방정식을 얻을 수 있다

$$\dot{x}_a(t) = \begin{bmatrix} A & BC_d \\ 0 & A_d \end{bmatrix} x_a + \begin{bmatrix} 0 \\ B_d \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} w \quad (10)$$

위의 상태 공간 모델에 2.3 절의 (1)에서 사용한 LQR 제어 기법을 적용함으로써 구동기의 동특성이 고려된 예견 제어기를 설계할 수 있다.

5. 모의 실험

5.1 주행 속도를 고려한 예견 제어기 설계

(1) 사인파 입력에 대한 성능 분석

속도 변화에 따른 성능 변화를 쉽게 알아보기 위하여 노면의 변위 정보는 식 (11)와 같이 사인파 입력으로 가진하였다.

$$z(x) = 0.04 \sin\left(\frac{2\pi}{12}x + \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

그림 5 은 사인파의 노면 정보를 가진하고 차량의 속도를 30km/h~60km/h 로 선형적으로 증가시켰을 때 운전석에서의 수직 방향의 가속도 값을 나타낸다. 이때 예견 거리는 2m 이고 예견 스텝은 240 이다. 샘플링은 1ms 이다. 그림에서 보듯이 고속을 기준으로 설계된 예견 제어기의 경우는 저속에서 성능이 나빠지고 고속으로 갈수록 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 반면 저속을 기준으로 설계된 경우는 저속에서 성능이 좋고 고속으로 갈수록 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 보간법을 이용하여 노면 정보를 변화

하는 속도에 맞게 재생성 하였을 경우는 차량의 속도 변화에도 그 성능이 우수하게 유지됨을 볼 수 있다.

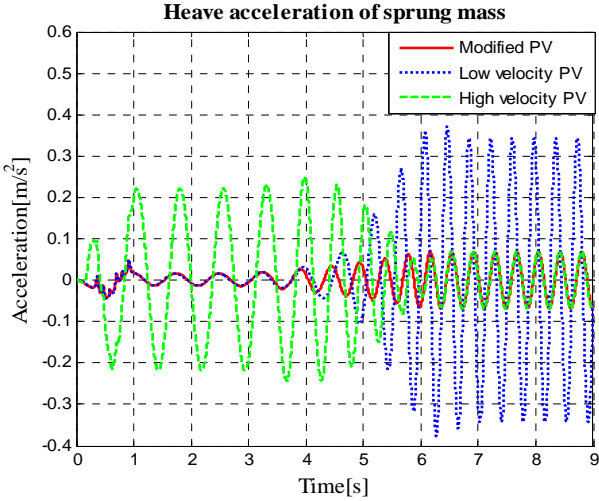


그림.5 궤도 차량의 수직 가속도 성능

(2) 프로파일 IV

탱크와 같은 궤도 차량의 성능 평가를 위해 프로파일 IV 라는 노면 정보가 공식적으로 사용되고 있다. 그림 6 은 프로파일 IV 의 노면을 나타낸다. 저주파의 삼각형의 노면과 고주파의 사각파 형상의 노면으로 이루어져 있다.

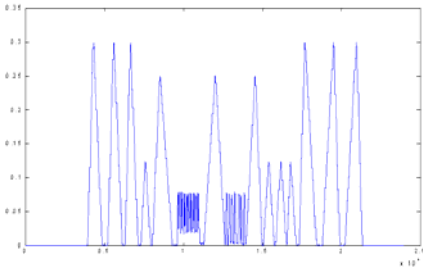


그림.6 프로파일 IV

위의 노면을 리커다인으로 모델링된 비선형 시스템으로 구동시켰을 때의 운전석에서의 수직 가속도의 rms 값을 구하였다. 궤도 차량의 속도 변화는 그림 7 과 같이 주었다. 제어를 수행하지 않았을 때의 운전석에서의 수직 가속도는 2.7993m/s^2 이고 노면 정보 재생성의 알고리즘을 포함한 예견 제어를 수행하였을 경우의 rms 값은 0.5341m/s^2 이다. 약 80%정도의 성능 향상이 있음을 확인하였고, 이를 바탕으로 본 연구에서 사용된 노면 정보 재생성을 통하여 변화하는 속도에도 적용할 수 있는 예견 제어기를 설계할 수 있었다.

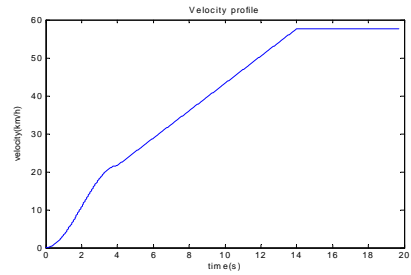


그림.7 궤도 차량의 속도 프로파일

5.2 구동기 동특성을 고려한 제어 성능 분석

4.2 절에서 유도된 구동기 동특성이 고려된 예견 제어기를 바탕으로 설계된 예견 제어기를 이용한다. 궤도 차량의 성능을 분석하기 위해 널리 이용되는 프로파일 IV 라는 노면 정보에 대하여 구동기 대역폭의 변화에 따른 성능 변화를 알아보자.

노면 정보는 그림 6 에서 보듯이 프로파일 IV 를 사용하였고, 궤도 차량의 속도는 각각 30km/h 와 60km/h 의 두 가지 경우에 대하여 구동기의 대역폭을 증가시켜가며 모의 실험을 수행하였다.

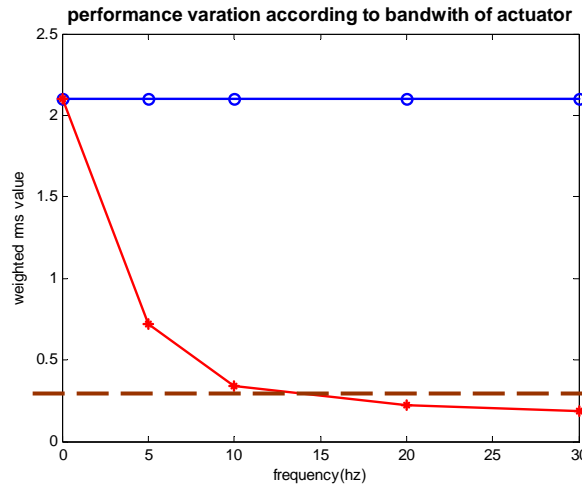


그림.8 구동기 대역폭 변화에 따른 성능 분석

그림 8 은 30km/h 로 주행할 경우의 모의 실험 결과를 보인다. 'o' 라인은 제어를 수행하지 않았을 경우이고 '*' 라인은 구동기의 대역폭에 따른 예견 제어기의 성능 결과를 나타낸다. 예측 할 수 있듯이 구동기의 주파수 대역폭이 커질수록 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 그리고 구동기의 대역폭이 10hz 이상이 되면 되면 0.315m/s^2 이하의 rms 값을 갖는데 이 값은 ISO-2631 의 성능 지표에 따라 운전자가 편안함을 느끼는 기준 값이 된다. 마찬가지로 그림 9 는 60km/h 의 경우일 때의 결과를 나타낸다. 하지만 60km/h 의 경우는 0.315m/s^2 이하로 rms 값을 줄이기 위

해서는 약 30hz 의 대역폭을 가지는 구동기가 필요하다는 것을 알 수 있다.

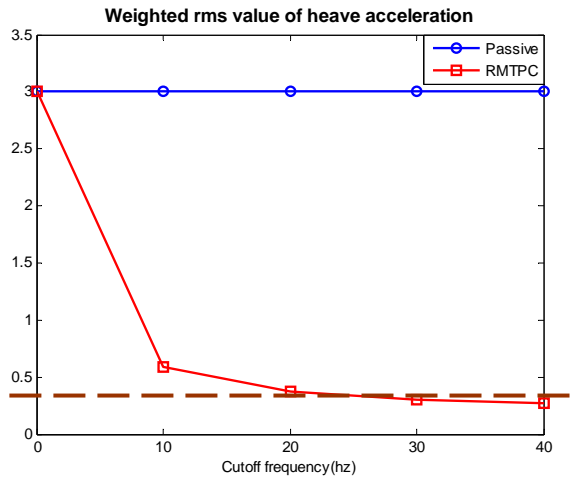


그림.9 프로파일 IV

실제 사용되는 능동형 구동기의 경우는 응답 속도가 제한적이다. 실제 구동기의 경우 약 10hz 정도의 응답을 가진다고 할 경우 ISO-2631 의 규격에 의하여 운전자의 승차감이 'comfortable' 하지 않지만 10hz 의 경우라도 수동형의 경우에 비해서는 약 80%의 성능 향상을 보인다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구는 기존에 연구가 진행되고 능동 현수장치 기반의 예견 제어를 실제 궤도 차량에 적용하기 위하여 그 실제 적용 가능성을 타진하는데 있다. 먼저 실제 차량의 경우 주행 속도가 일정하지 않기 때문에 주행 속도가 변하는 상황에서도 적용하기 위하여 보간법을 이용한 노면 재생성을 수행하였다. 모의 실험을 통하여 속도가 변하더라도 우수한 성능을 유지하는 것을 검증하였다. 다음으로는 예견 제어 입력을 발생시킬 구동기의 경우 구동기가 낼 수 있는 주파수 대역에 한계가 있다. 따라서 구동기의 동특성을 고려한 예견 제어기를 설계하여 그 대역폭에 따른 성능을 분석하여 보았다. 그 결과 ISO-2631 의 규격을 기준으로 약 30Hz 의 대역폭을 가지는 구동기가 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 추후로는 3 차원 궤도 차량에 대한 예견 제어 알고리즘에 관한 연구를 계속 수행할 것이다.

후기

본 연구는 국방과학 연구소의 기초연구과제 UD30031AD, 국가 지정 연구실(NRL) 사업 M1050000 0112-05J0000-11210, 그리고 2007 년 BK21 의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다

참고문헌

- (1) Kim, Yoonsun, Preview Control of High Mobility Tracked Vehicle Suspension, Ph.D. thesis, KAIST, 2003.
- (2) Roh, HyounSurk, Observer-based Preview Control of Active Vehicle Suspensions, Ph.D. thesis, KAIST, 1999.
- (3) Ryu, Seongpil, Kim, Yoonsun, and Park, Youngjin, Preview Control of High Mobility Tracked Vehicle Suspensions Based on a Ride Quality, APVC, 2003
- (4) A. hac, Optimal Linear Preview Control of Active Vehicle Suspension, Vehicle System Dynamics, Vol.21, pp.167-195 (1992)