

임피던스 방식에 의한 미사일의 충돌시간 충돌각 제어

IMPACT TIME AND IMPACT ANGLE GUIDANCE FOR MISSILE BY USING IMPEDANCE CONTROL

김승현¹, 김현진¹

1) 서울대학교 기계항공공학부, 서울 151-742

교신 저자: 김현진, hjinkim@snu.ac.kr

요약

본 연구는 호밍 미사일의 충돌시간과 충돌각을 하나의 가속도 제어입력으로 동시에 제어하기 위해 임피던스 제어기법을 이용하였다. 임피던스 제어는 로봇분야에서 힘 제어와 위치 제어를 동시에 하기 위해서 둘 사이에 원하는 동역학적 관계식을 설정하고 이 관계식을 만족시키기 위해 제어입력을 계산하는 기법이다. 본 연구에서는 임피던스 기법을 미사일의 충돌시간과 충돌각을 동시에 제어하는데 적용하였다. 또한 시스템의 불확실성을 고려하기 위해서 임피던스 제어를 구현하기 위한 방법으로 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하였다.

서론

최근 표적의 성능이 향상됨에 따라 미사일의 생존율을 높이고 임무를 완수하기 위해서는 요격 외에 추가적인 조건이 필요하게 되었다. [1] 특히 대함 유도탄의 경우 요격 외에 충돌각을 추가로 제어함으로써 효과적인 임무를 수행할 수 있다. 뿐만 아니라 표적의 방어능력을 고려하여 동시다발적으로 표적을 요격하는 방법도 제안이 되고 있다. 이렇게 동시다발적으로 요격을 하기 위해서는 요격임무 외에 충돌시간을 함께 제어하여야 한다.

일반적으로 충돌각과 충돌 시간을 하나의 가속도 제어입력 만으로 제어를 하게 되면 좋은 성능을 기대하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 로봇제어 분야에서 많이 쓰이는 임피던스 기법을 미사일에 적용하여 충돌각과 충돌시간을 동시에 제어할 수 있는 방법을 시도하였다. 임피던스 제어란 로봇분야에서 힘 오차와 위치 오차간의 관계를 정의하여 줌으로써 동시에 힘과 위치를 제어할 수 있게 하는 제어방식이다. [2, 3] 즉 두 오차간의 동역학적 관계를 제어하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 임피던스 제어방식을 이용하여 미사일의 충돌각과 충돌시간 사이에 동역학적 관계를 정의하고 이를 제어하고자 한다. 또한 시스템의 불확실성을 고려하기 위해서 임피던스 제어를 구현하기 위한 방법으로 슬라이딩 모드 제어기법이 이용되었다.

교전 운동 방정식

충돌각과 충돌시간을 동시에 제어하는 유도법칙을 도출하기 위해 고려된 2 차원 교전기하를 그림 1 에 나타내었다. 이를 통하여 미사일과 표적간의 운동방정식을 도출하였다. 여기서 A 는 가속도명령, γ 은 비행경로각을 의미하며 V 는 속도를 나타낸다. 하첨자 M 과 T 는 각각 미사일과 표적을 의미한다. 본 연구에서 미사일의 속도는 상수로 가정하였고 표적은 고정점이라 가정하였다.

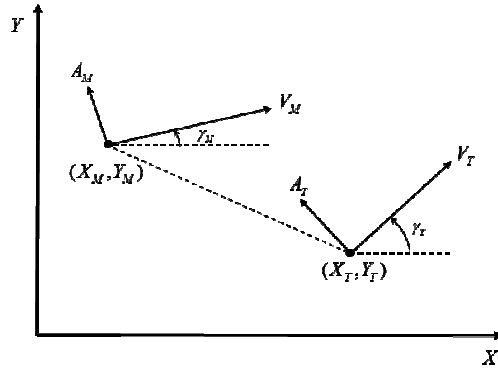


그림 1. 교전 기하

위와 같은 가정아래 교전기하는 다음과 같은 미분 방정식으로 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{R} &= -V_M \cos(\gamma_M - \lambda) \\
 R\dot{\lambda} &= -V_M \sin(\gamma_M - \lambda) \\
 \gamma_M &= \frac{a_M}{V_M}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 R 은 미사일과 표적의 상대거리를 나타내며, λ 는 시선각을 나타낸다.

임피던스 방식에 의한 출동시간 충돌각 제어

충돌각과 충돌시간을 동시에 제어하기 위한 아래와 같은 표적 임피던스를 정의한다.

$$\begin{aligned}
 M\ddot{\lambda}_e + B\dot{\lambda}_e + K\lambda_e &= K_T e_T \\
 \lambda_e &= \lambda - \lambda_d, \quad e_T = t_{go} - t_{go}^d
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $t_{go} = t_f - t$ 로 정의되며 미사일이 표적을 요격할 때까지 남은 시간을 의미하며 추정해야 할 변수이다. λ_d 는 충돌각 명령값이며 $t_{go}^d = t_f^d - t$ 로 정의된다. t_f^d 는 충돌시간 명령값이다.

충돌시간과 충돌각을 제어하기 위한 유도법칙을 설계하기 위해 남은일은 표적 임피던스 식 (2)가 만족되도록 제어기를 설계하는 것이다. 시스템의 불확실성을 고려하기 위해서 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하였다. 표적 임피던스를 만족하기 위한 슬라이딩 표면을 아래와 같이 정의 하였다.

$$s(\lambda_e, \dot{\lambda}_e, z) = \dot{\lambda}_e + F_1 \lambda_e + F_2 z \tag{3}$$

여기서 F_1, F_2 는 상수 행렬이며 F_2 는 비특이 행렬로 설계한다. z 는 표적 임피던스를 만족시키기 위해 도입된 동적 보상기 변수를 나타내며 아래와 같은 미분 방정식을 갖는다.

$$\dot{z} = Az + K_p \lambda_e + K_v \dot{\lambda}_e + K_{zT} e_T \tag{4}$$

여기서 A 는 음한정 행렬이며 K_p, K_v, K_{zT} 는 추후 결정될 설계 변수이다.

시스템이 슬라이딩 모드에 있는 동안에는 $s=0, \dot{s}=0$ 이 되고, 이는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$z = -F_2^{-1}(\dot{e} + F_1 e), \quad \dot{z} = -F_2^{-1}(\ddot{e} + F_1 \dot{e}) \quad (5)$$

식 (5)를 동적 보상기 운동방정식 (4)에 대입하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\ddot{\lambda}_e + (F_1 - F_2 A F_2^{-1} + F_2 K_v) \dot{\lambda}_e + (F_2 K_p - F_2 A F_2^{-1} F_1) \lambda_e = -F_2 K_{zT} e_T \quad (6)$$

식 (6)이 표적 임피던스 식 (2)와 같아지게 하기 위해서 식(4)의 동적 보상기 설계변수들을 아래와 같이 정한다.

$$\begin{aligned} K_v &= F_2^{-1}(M^{-1}B - F_1 + F_2 A F_2^{-1}) \\ K_p &= F_2^{-1}(M^{-1}K + F_2 A F_2^{-1} F_1) \\ K_{zT} &= F_2^{-1} M^{-1} K_T \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 동적 보상기의 제어이득을 위와 같이 설계하면 슬라이딩 모드에 있는 동안에 표적 임피던스를 만족할 수 있다.

제어 입력을 구하기 위해 양한정인 르야프노프 함수를 아래와 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (8)$$

$s=0$ 이 되기 위해선 르야프노프 함수의 미분값이 음한정이어야 한다. 식 (8)을 미분하면 아래와 같다.

$$\dot{V} = \frac{s}{R} (-\cos(\gamma_M - \lambda) a_M - 2\dot{R}\dot{\lambda} + \delta) + F_1 \dot{\lambda} + F_2 \dot{z} \quad (9)$$

여기서 δ 는 시스템 불확실성에 해당한다.

제어입력에 해당하는 가속도 입력 a_M 을 아래와 같이 설계한다.

$$a_M = \frac{1}{\cos(\gamma_M - \lambda)} (-2\dot{r}\dot{\lambda} + R F_1 \dot{\lambda} + R F_2 \dot{z} + Q \text{sign}(s)) \quad (10)$$

여기서 Q 는 $Q > \delta_{\max}$ 인 상수이며 $\delta_{\max} = \max(|\delta|)$ 이다. 위 식을 식(9)에 대입하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{s}{R} (-Q \text{sign}(s) + \delta) \\ &\leq \frac{1}{R} (-Q|s| + |s||\delta|) \leq \frac{1}{R} (-Q + \delta_{\max}) |s| < 0 \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 설계된 제어입력 식 (10)은 르야프노프 함수의 미분값을 음한정으로 만들며 $s=0$ 으로 수렴시킬 수 있다.

수치 시뮬레이션

제안된 충돌시간 충돌각 제어 유도법칙을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 충돌각 명령 0 deg, 30 deg, 60 deg 각각 대해서 다양한 충돌시간 명령을 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2 에 시뮬레이션 결과 궤적을 나타내었고, 표 1 에 자세한 제어 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과 제안된 유도법칙은 충돌시간과 충돌각을 만족할 만한 수준으로 제어하는 것을 확인 할 수 있다.

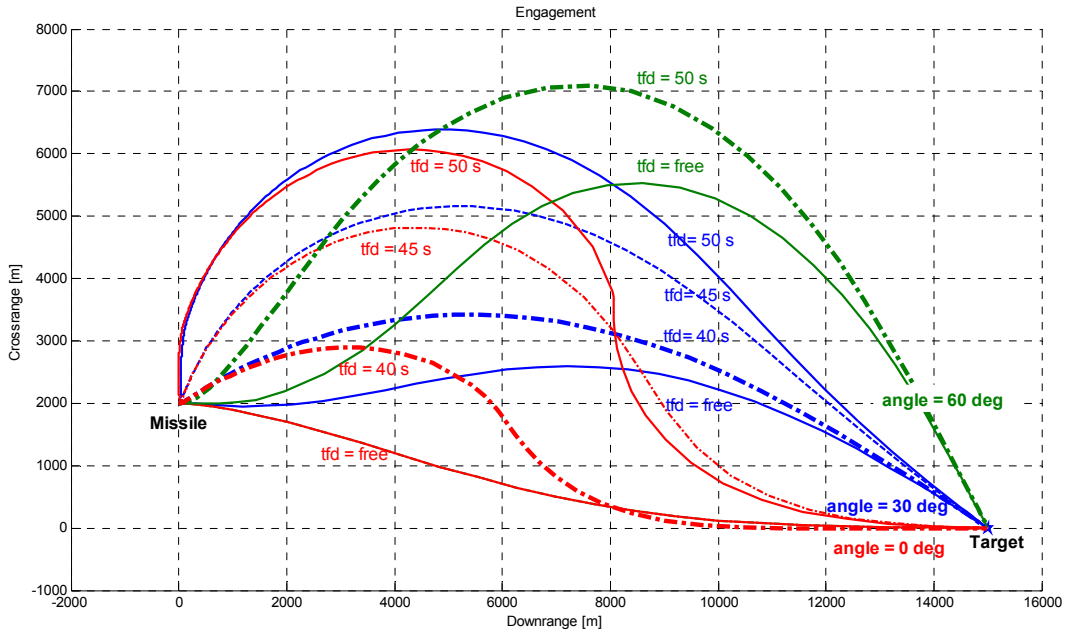


그림 2. 충돌시간 충돌각 제어 미사일 궤적

표 1. 충돌시간 충돌각 제어 시뮬레이션 결과

t_f^d (sec)	free	40	45	50	free	40	45	50	free	50
t_f (sec)	38	40	44	49	38	40	44	49	46	50
λ_d (deg)	0	0	0	0	30	30	30	30	60	60
λ (deg)	0.03	0.03	0.83	0.65	29	29	31	32	59	59

참고문헌

1. Lee, J. I., Jeon, I. S., and Tahk, M. J. "Guidance law to control impact time and angle," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2007, 43(1), pp 301-310.
2. Ha, Q. P., Nguyen, Q. H., Rye, D. C., and Durrant-Whyte, H. F., "Impedance control of a hydraulically actuated robotic excavator," Automation in Construction, 2000, 9(5), pp 421-435.
3. Chan, S. P., Yao, B., Gao, W. B., and Cheng, M., "Robust impedance control of robot manipulators," International Journal of Robotics & Automation, 1991, 6(4), pp 220-227.