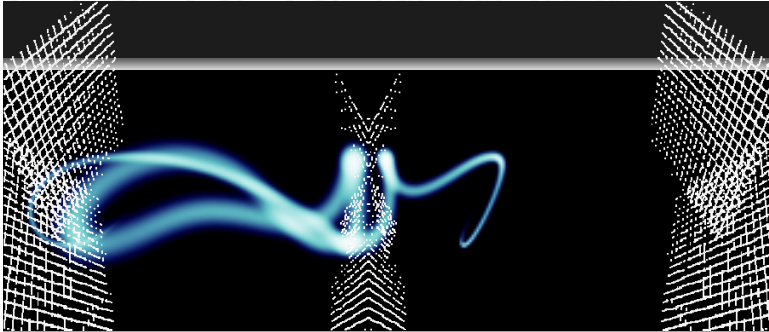


2015 항공우주학회 춘계 학술대회



선형 교전기하를 고려한 스트랩다운 탐색기 기반 유도탄 안정성 해석

23 April 2015

이석원*, 이재호, 김유단(서울대학교), 엄태윤(ADD)

서울대학교 비행역학 및 제어 연구실



발표 순서

1

서론

2

시간지연에 의한 내부루프의 안정성

3

교전기하를 고려한 안정성 분석

4

수치 시뮬레이션

5

연구 요약 및 향후 연구계획



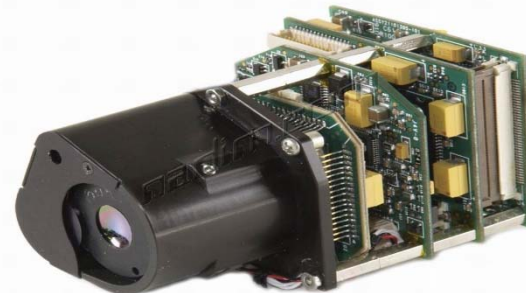
I. 서론 (1/3)

능동호밍 유도를 위한 탐색기 장착 방법

- 김벌형 탐색기(Gimbal seeker) : 탐색기가 김벌에 부착되어 표적의 정보를 동체자세와 독립적으로 추적하는 방식. 성능, 고해상도의 표적 추적이 가능함.
- 스트랩다운 탐색기(Strapdown seeker) : 동체에 부착된 탐색기를 이용하여 표적을 추적하는 방식.



Gimbal type seeker (AIM-9 Sidewinder)



Strapdown type seeker (SCC500L, BAE Systems)

- 스트랩다운 탐색기를 장착한 유도무기의 특징
 - 장점
 - 김벌형 탐색기에 비해 구조가 단순하고 내구성이 우수함.
 - 무게가 가볍고 가격 효율면에서 우수함.
 - 단점
 - 동체 부착으로 인한 잡음 및 외란에 민감, 시선각 추정에 따른 불안정성.
 - 저해상도, 관측 시야가 제한적



I. 서론 (2/3)

기생루프(Parasitical loop)에 의한 안정성 분석

- 스트랩다운 탐색기 이용 유도조종루프 설계에서는 **시선각 변화율**을 얻기 위하여 동체각속도 정보를 사용하는 방법에 따라 다양한 합성 구조가 나타남.
- 정보 합성과정에서 시선각 변화율에 불필요한 자세각속도 정보 잉여항이 발생. 이에 의한 효과로 parasite effect 발생

Parasite effect 발생 요인에 따른 안정성 분석

1. 탐색기와 자이로의 신호 처리 속도 차이에 의한 효과

- 김태훈, 박봉균, 권혁훈, 김윤환, 탁민제, “스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 안정성 해석.” 한국항공우주학회지, 제 39권 제 4호, 2011년, pp.332-340.
- S. Jang, et al, “Guidance Algorithms for Tactical Missiles with Strapdown Seeker,” SICE Annual Conference, Tokyo, Japan, August 2008.
- 홍주현, 유창경, “스트랩다운 탐색기 기반 호밍루프 설계,” 한국항공우주학회지, 제 42권 제4호, 2014년, pp. 317-325.

2. 스케일 상수 오차에 의한 효과

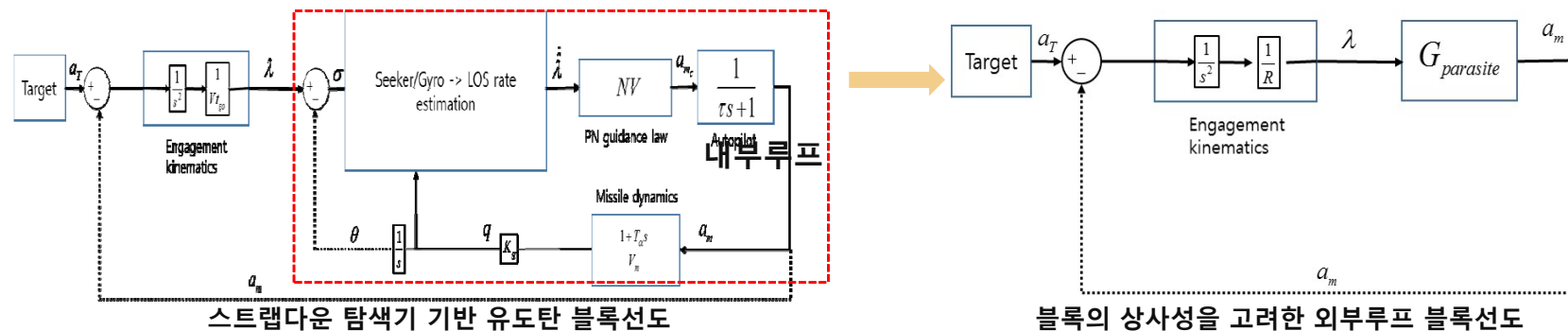
- W. Willman, “Effects of Strapdown Seeker Scale-Factor Uncertainty on Optimal Guidance,” Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.11, No. 3, 1988, pp.199-206.
- J. Song, et. al, “Precision Analysis of the Semi-Strapdown Homing Guided System,” Journal of Aerospace Engineering, Vol.27, No.1, 2012, pp.151-167.
- Y. Du, Q. Xia, and T. Guo, “Study on Stability of Strapdown Seeker Scale Factor Error Parasitical Loop,” International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun, China, August 2010.
- 김태훈, 박봉균, 권혁훈, 김윤환, 탁민제, “스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 안정성 해석.” 한국항공우주학회지, 제 39권 제 4호, 2011년, pp.332-340.
- 이창훈, “스트랩다운 영상탐색기를 장착한 유도 무기의 유도 법칙 설계 및 유도 루프 해석,” KAIST 석사학위 논문, 2010.



I. 서론 (3/3)

연구 내용 및 기여도: 교전기하를 포함한 전체루프의 안정성

- 연구 목적: 기생루프 (Parasitical loop)의 안정성을 고려하여 파라미터를 설정하더라도 교전사항에서 Homing 말기에 급격한 기동, 또는 불안정 현상 발생 [김태훈, 2011]
→ 고속 /기동 표적의 경우 교전 기하를 고려한 파라미터의 재설정 필요
- 연구 수행내용
 - 선행연구에서 분석한 내부루프의 안정성을 토대로 외부루프의 폐회로를 구성. 교전기하를 고려한 안정성 분석 수행
- 기여도
 - 고전제어 기반 안정성 기반, 상대거리에 따른 stability criterion을 새로 제시.
 - 안정화 영역에 해당하는 거리와 시간을 계산, 고속 표적 타격 시나리오에 적합한 안정성 및 개선점 확보.



- 김태훈, 박봉균, 권혁훈, 김윤환, 탁민제, "스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 안정성 해석." 한국항공우주학회지, 제 39권 제 4호, 2011년, pp.332-340.



발표 순서

1

서론

2

시간지연에 의한 내부루프의 안정성

3

교전기하를 고려한 안정성 분석

4

수치 시뮬레이션

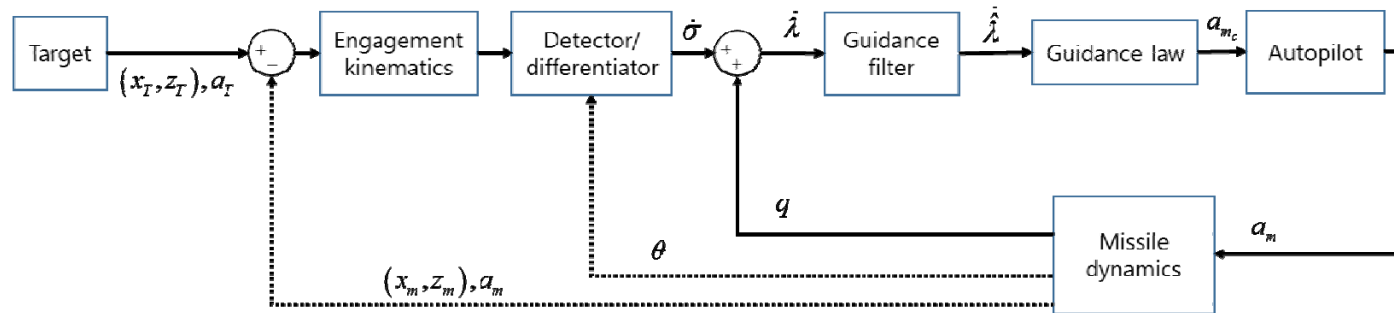
5

연구 요약 및 향후 연구계획



II. 시간지연에 의한 내부루프의 안정성(1/4)

스트랩다운 탐색기 기반 유도탄의 전체루프 구조



- 표적 정보(Target): 정지/ 저속 표적 (Stationary/ Slow moving)
- 관측각속도 추정을 위한 미분기/추정기 모델: High-pass filter

$$G_{filter} = \frac{s}{k\tau s + 1}$$

- 유도탄 운동방정식 : Constant turning rate을 고려한 전달함수

$$\frac{q}{a_m} = \frac{1 + T_\alpha s}{V_m}$$

- 자동조종장치: Time-lag model: (1st order)

$$\frac{a_{m_c}}{a_m} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

- 유도법칙: 비례항법유도(PNG)



II. 시간지연에 의한 내부루프의 안정성(2/4)

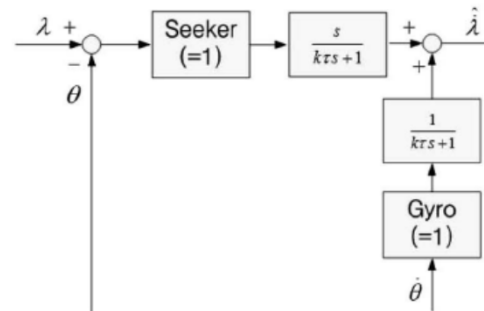
관측각속도 시간지연에 의한 기생효과(Parasite effect) 분석

- 이상적인 관측각과 시선각과의 관계

$$\lambda = \sigma + \theta$$

λ : Line of sight, σ : Look angle, θ : Pitch angle

- 시선각 변화율을 위한 자이로와 탐색기의 정보융합방법: 각속도 단위 합성



정보융합방법: 각속도 합성

- 각속도 추정에 의한 시간지연 (센서/탐색기 동역학 무시)

$$\dot{\lambda} = \frac{s}{k\tau s + 1} \sigma + \dot{\theta}$$

- 시선각으로 표현된 시선각 변화율 추정치

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{k\tau s + 1} \dot{\lambda} + \frac{k\tau s}{k\tau s + 1} \dot{\theta}$$

→ 시선각 추정식에 피치각속도 잉여항이 포함됨



II. 시간지연에 의한 내부루프의 안정성(3/4)

관측각속도 시간지연에 의한 기생효과(Parasite effect) 분석

- 내부루프의 전달함수

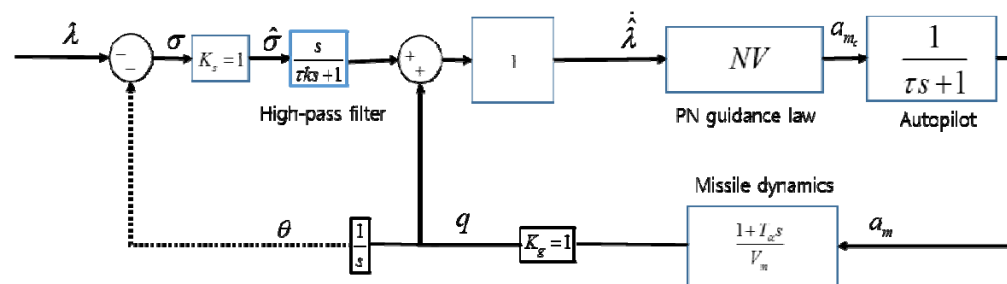
$$\frac{a_n}{\dot{\lambda}} = \frac{NV_c}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) - \frac{NV_c}{V_M}(k\tau s)(1 + T_\alpha s)}$$

- 고전제어 이론을 이용한 (Routh 판별법) 안정성 영역

$$\begin{cases} \tau / T_\alpha > N' \\ 1 > (N' - 1)k \end{cases} \rightarrow N' < \min \left(\tau / T_\alpha, \frac{k + 1}{k} \right)$$

→ 루프의 안정화를 위해 자동조종장치의 반응을 느리게 ($\tau \uparrow$) 해야 함

→ 루프의 안정화를 위해 관측각 미분기(High-pass filter)의 반응을 빠르게 ($k \downarrow$) 해야 함



관측각속도 시간지연이 반영된 내부루프



II. 시간지연에 의한 내부루프의 안정성(4/4)

관측각속도 시간지연에 의한 기생효과(Parasite effect) 수치 시뮬레이션

시뮬레이션 결과

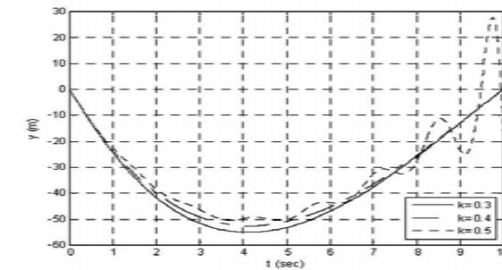
• 시뮬레이션 파라미터

$$\tau : 1, N = 3 (\text{Optimal gain}), T_\alpha = 0.3$$

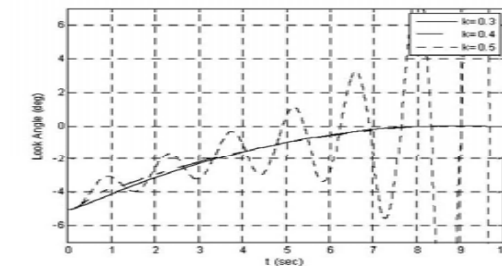
$$(x_T, y_T) = (3000, 1000), V_T = 0 : \text{stationary target}$$

$$(x_m, y_m) = (0, 1000) \quad V_m = 0, \theta_0 = 5 \text{ deg}$$

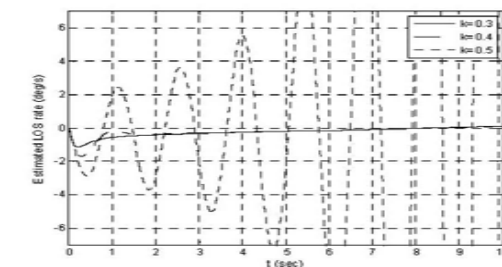
- 시뮬레이션 시나리오: 미분기 시상수 변화 k : variable
- 결과: k 값을 증가시킬수록 (미분기 반응 느릴수록) 점차 반응이 느려지고, k 가 0.5일 때 루프가 불안정해짐



(a) 거리오차



(b) 지향각



(c) 시선각속도 추정치

시뮬레이션 결과 (내부루프 안정성)



발표 순서

1

서론

2

시간지연에 의한 내부루프의 안정성

3

교전기하를 고려한 안정성 분석

4

수치 시뮬레이션

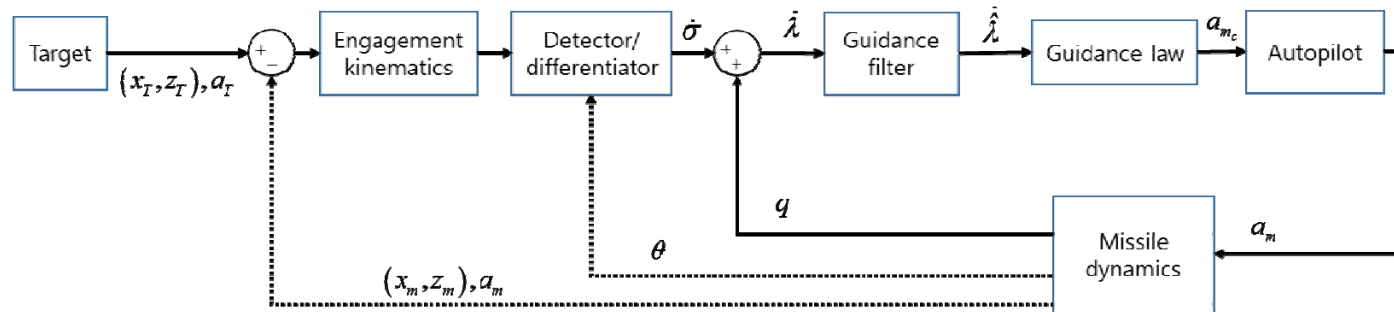
5

연구 요약 및 향후 연구계획



III. 교전기하를 고려한 안정성 분석(1/4)

스트랩다운 탐색기 기반 유도탄의 전체루프 구조



스트랩다운 탐색기 기반 유도탄 루프 구조

- 표적 정보(Target): 고속 접근 탄도탄 궤적
- 교전기하모델(Engagement kinematics): 선형 교전기하

- Small angle 가정에 의한 시선각

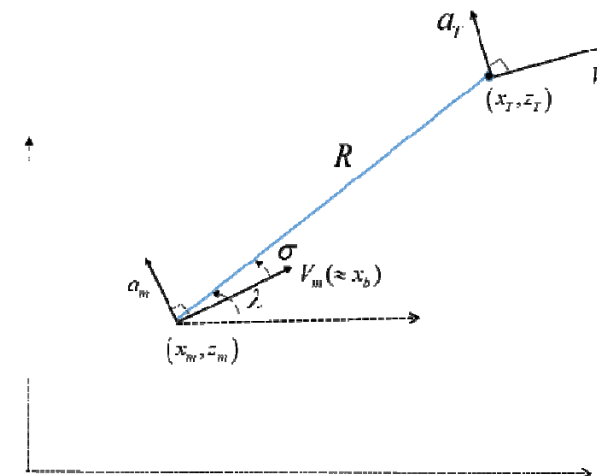
$$\lambda \approx \frac{z}{R}$$

- 유도탄과 표적 사이 거리(Closed distance)

$$R = V(t_f - t) = Vt_{go}$$

- Detection by seeker

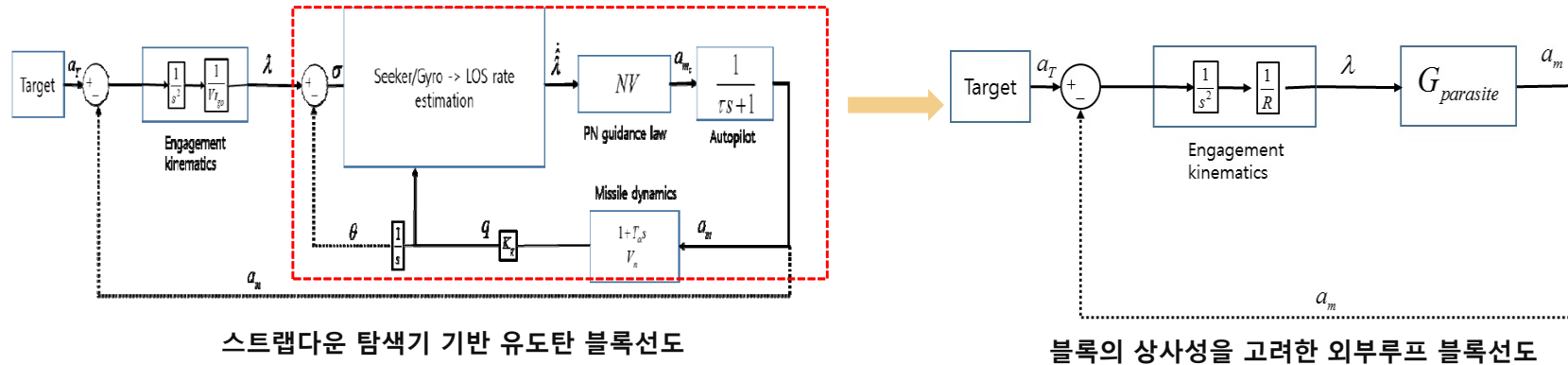
$$\sigma = \lambda - \theta$$



Engagement geometry

III. 교전기하를 고려한 안정성 분석(2/4)

교전기하 및 내부루프를 고려한 전체폐회로 구성



- 교전기하를 고려한 미분기 시간지연에 대한 외부루프의 전달함수

$$\frac{y_{miss_dist}}{a_T(s)} = \frac{1}{s^2} \left(1 - \frac{\frac{1}{s^2} \frac{1}{R} G_{parasite}}{1 + \frac{1}{s^2} \frac{1}{R} G_{parasite}} \right) = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{R} G_{parasite}}$$

where

$$G_{parasite} = \frac{a_m(s)}{\lambda(s)} = \frac{NV_c s}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) - N'(k\tau s)(1 + T_\alpha s)}$$

$$N' = NV_c / V_m$$

y_{miss_dist} : miss distance, R : distance, τ : time constant(Autopilot)

k : time constant(filter), T_α : turning constant



III. 교전기하를 고려한 안정성 분석(3/4)

교전기하를 고려한 전체 폐회로의 안정성 분석

- 전달함수의 안정성을 판단하기 위한 특성방정식(Characteristic Equation)

$$s^2 + \frac{1}{R} \frac{NV_c s}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) - N'(k\tau s)(1 + T_\alpha s)} = 0$$

- 고전 제어이론을 이용한 안정화 영역

$$\left. \begin{array}{l} \tau / T_\alpha > N' \\ 1 + (1 - N')k > 0 \end{array} \right\} \text{ 내부루프에 의한 안정화 영역}$$

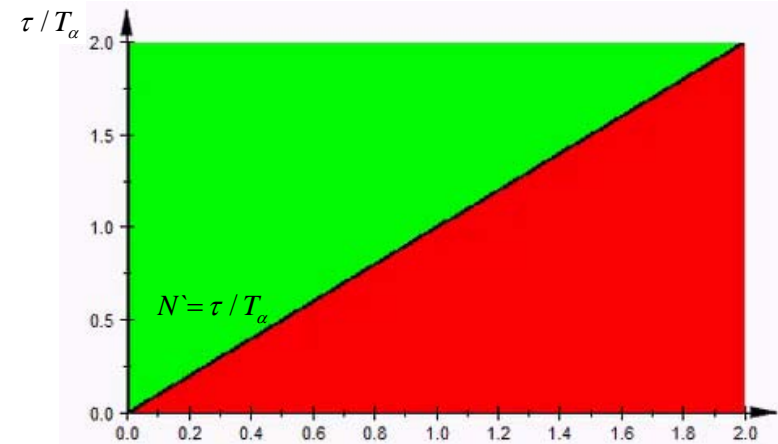
$$\{1 + (1 - N')k\} > \frac{1}{R} NV_c (\tau - N'T_\alpha)k$$

$$\frac{1}{R} NV_c > 0$$

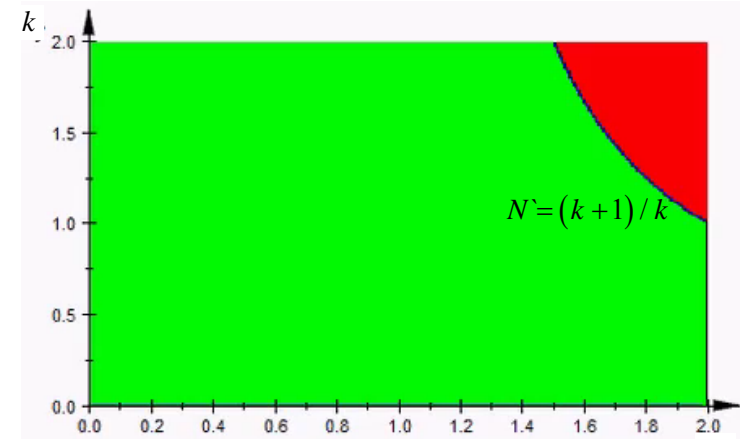
- 일정 접근속도 ($R = V_c t_{go}$)를 고려한 불안정화 충돌 잔여시간

$$t_{go, \text{unstable}} = \frac{N(\tau - N'T_\alpha)k}{1 + (1 - N')k} = NT_\alpha \frac{-N' + \frac{\tau}{T_\alpha}}{-N' + (k+1)/k} = NT_\alpha \frac{-N' + N_1'}{-N' + N_2'}$$

$$\text{where } N_1' = \frac{\tau}{T_\alpha}, N_2' = \frac{k+1}{k}$$



상대거리에 따른 안정화 영역 변화: τ / T_α 변수 N'



상대거리에 따른 안정화 영역 변화: k 변수 N'



III. 교전기하를 고려한 안정성 분석(4/4)

교전기하를 고려한 전체 폐회로의 안정성 분석

- 유효 이득 변화에 따른 충돌 잔여시간 안정한계 분석

$$\text{where } N_1' = \frac{\tau}{T_\alpha}, N_2' = \frac{k+1}{k}$$

- $N_1' < N_2'$ 경우: 내부루프에서 설정한 안정영역 내에서는 유효이득이 증가할수록 $t_{go_unstable}$ 감소함.

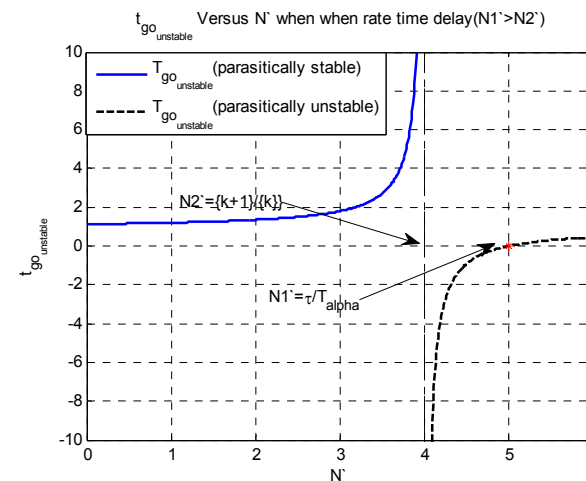
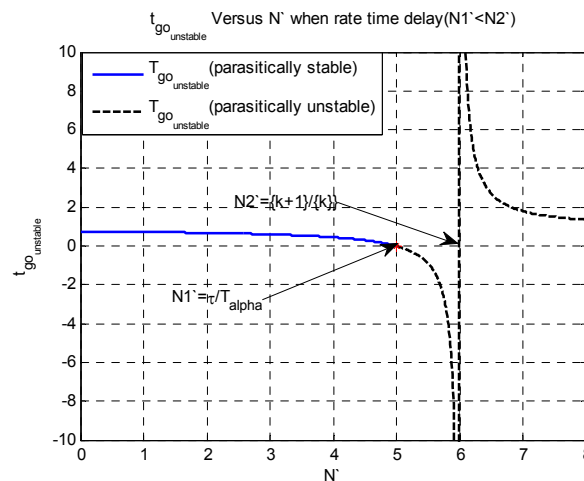
$$t_{go_unstable} \leq t_{go}(0) = \frac{N\tau k}{k+1}$$

→ 유효이득을 안정영역 내에서 최대로 증가시켜 불안정 지속시간을 줄일 수 있음

- $N_1' > N_2'$ 경우: 유효이득이 증가할수록 $t_{go_unstable}$ 발산함.

$$\frac{N\tau k}{k+1} \leq t_{go_unstable} \rightarrow \infty$$

→ 유효이득의 크기를 줄여 불안정 지속시간이 줄어들도록 파라미터를 재설정



유효이득 변화(목표물 속도)에 따른 충돌 잔여시간 안정한계 변화



발표 순서

1

서론

2

시간지연에 의한 내부루프의 안정성

3

교전기하를 고려한 안정성 분석

4

수치 시뮬레이션

5

연구 요약 및 향후 연구계획



IV. 수치 시뮬레이션(1/4)

수치 시뮬레이션 : 시나리오 1 – 일정 속도로 접근해오는 표적 요격

- 시뮬레이션 파라미터: (김태훈 외, 2011)의 설정된 파라미터를 토대로 내부루프가 안정되도록 설정

$$T_a = 0.3, N = 3, k = 1/6, \tau = 1.5$$

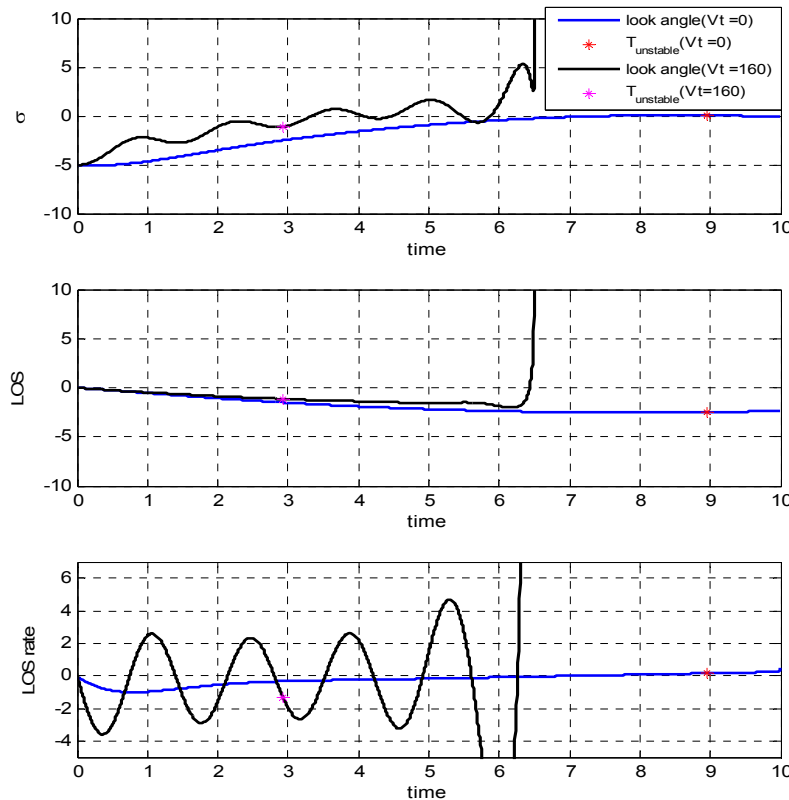
- 초기조건

	변수	값
표적 초기위치	(X_T, Y_T)	(3000, 1000)
표적 초기속도/가속도	(V_T, a_T)	(0, 0), (160, 0)
유도탄 초기위치	(X_m, Y_m)	(0, 1000)
초기 자세/ 각속도	(θ_0, q_0)	(5, 0)
유도탄 초기속도/가속도	(V_m, a_m)	(300, 0)



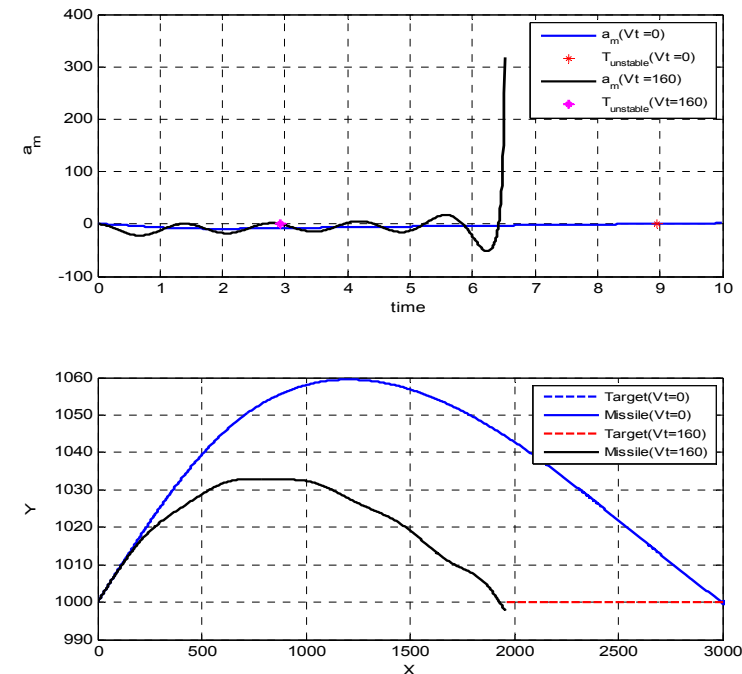
IV. 수치 시뮬레이션(2/4)

시뮬레이션 결과: 시나리오 1 - 일정 속도로 접근해오는 표적 요격



시뮬레이션 결과(관측각, 시선각, 시선각 변화율)

- Parasitical loop 에서는 안정하지만 고속으로 접근하는 목표물의 접근거리가 가까워짐에 따라 불안정화 발생



시뮬레이션 결과(유도탄 가속도, 궤적)

	$V_T = 0$	$V_T = 160$
$t_{go_{unstable}}$	1.0588(s)	3.6(s)
$y_{miss\ dist}(t_f)$	-0.1221(m)	1.8716(m)
$\sigma(t_f)$	-0.089(deg)	21.28 (deg)



IV. 수치 시뮬레이션(3/4)

수치 시뮬레이션 : 시나리오 2 – 안정성을 고려한 유도이득 재설정

- 시뮬레이션 파라미터: (김태훈 외, 2011)의 설정된 파라미터를 토대로 내부루프가 안정되도록 설정

$$T_\alpha = 0.3, k = 1/6, \tau = 1.5$$

- 초기조건

	변수	값
표적 초기위치	(X_T, Y_T)	(3000, 1000)
표적 초기속도/가속도	(V_T, a_T)	(160, 0)
유도탄 초기위치	(X_m, Y_m)	(0, 1000)
초기 자세/ 각속도	(θ_0, q_0)	(5, 0)
유도탄 초기속도/가속도	(V_m, a_m)	(300, 0)

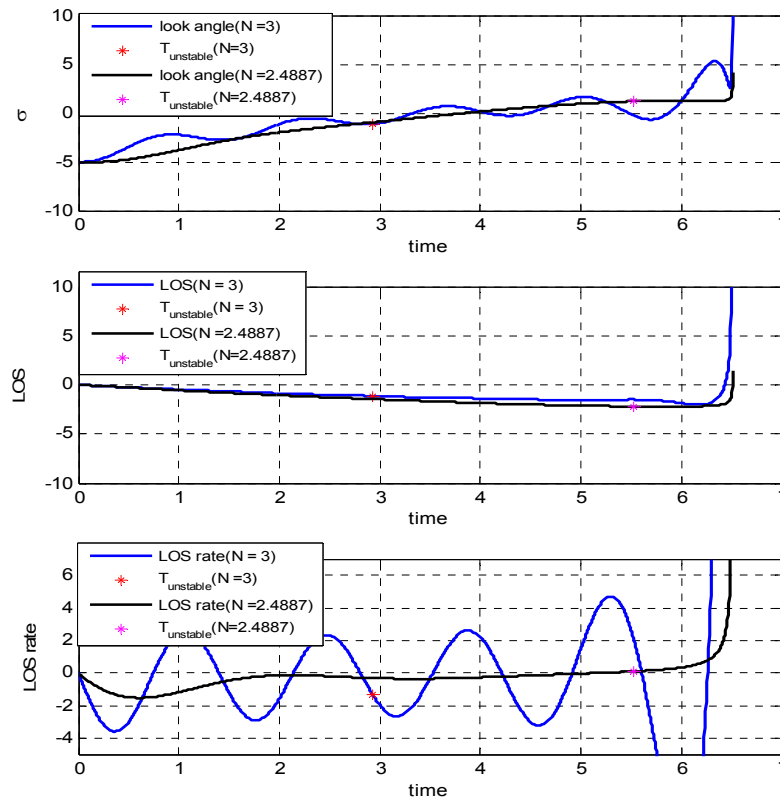
- 불안정화 지속시간이 1초 이내가 되도록 설정한 유도이득

$$T_\alpha \frac{V_c}{V_m} N^2 - \left(\frac{V_c}{V_m} + N_1 T_\alpha \right) N + N_2 = 0$$



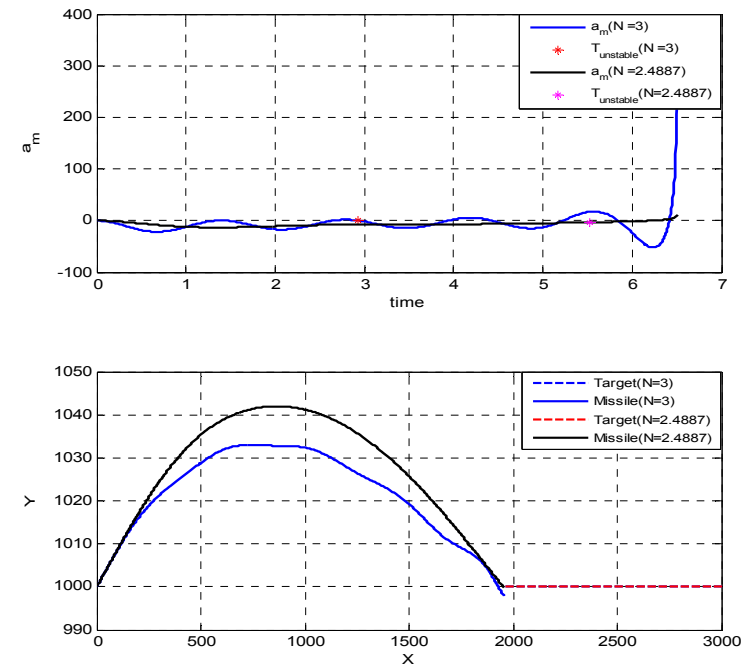
IV. 수치 시뮬레이션(4/4)

시뮬레이션 결과: 시나리오 2 - 안정성을 고려한 유도이득 재설정



시뮬레이션 결과(관측각, 시선각, 시선각 변화율)

- 불안정화 지속시간을 줄이도록 유도이득을 설정함으로써 호밍유도 전체루프의 안정성 향상



시뮬레이션 결과(유도탄 가속도, 궤적)

	$N = 3$	$N = 2.4887$
$t_{go_{unstable}}$	3.6(s)	1(s)
$y_{miss\ dist}(t_f)$	1.8716(m)	0.0762(m)
$LOS\ rate(t_f)$	1.170e+3(deg/s)	35.9029(deg/s)



발표 순서

1

서론

2

시간지연에 의한 내부루프의 안정성

3

교전기하를 고려한 안정성 분석

4

수치 시뮬레이션

5

연구 요약 및 향후 연구계획



V. 연구 요약 및 연구계획

연구 요약

- 기생루프 (Parasitical loop)의 안정성을 고려하여 파라미터를 설정하더라도 교전사항에서 Homing 말기에 급격한 기동, 또는 불안정 현상 발생
- 고속 /기동 표적의 경우 교전 기하를 고려한 파라미터의 재설정 필요
- 선행연구에서 분석한 내부루프의 안정성 을 토대로 외부루프의 폐회로를 구성. 안정화 영역에 해당하는 거리와 시간을 계산
- 고전제어 기반 안정성 기반, 상대거리에 따른 stability criterion 제시.

향후 연구 계획

- 관측각 제한 조건/ 비선형 유도 및 운동방정식에 적용 가능한 안정성 해석 확장
- 관측각 포화(Saturation)가 고려된 유도조종 시스템 안정성 : Describing function analysis
- 비선형 기반 유도조종/ 유도탄 모델의 안정성: 르야프노프 안정성 기반 해석기법

