

유도무기 유도개념 및 설계기술 발전추세

宋澤烈 / 국방과학연구소
책임연구원, 공학박사

産·學·研 기술협력 증진과 핵심요소기술의 국내기반 구축을 도모하기 위한 제1차 유도무기 유도조종 학술대회가, 8월 23일 國科研에서 2백여명의 관계인사들이 참석한 가운데 열렸습니다. 이번 학술대회에서는 유도, 관성항법 등 6개 부문에서 9편의 논문이 발표되었으며, “최초의 일반 공개”라는 점에서 주요 자료로서의 가치가 높다고 思料되어, 5개를 발췌하여 소개합니다

(편집자 주)

유도탄 은 무인유도(無人誘道) 비행체로 탄두를 표적에 운반하여 소정의 군사목적을 달성하는 무기체계로서 제2차 세계 대전시 독일의 V1, V2가 효시(嚆矢)이다. V-2는 장거리 전략 탄도탄 형태의 유도탄이며, 독일의 과학자들에 의해 14년간에 걸쳐 개발되어 1944년 가을에 전장에 배치되었다.

이 유도탄의 제원은 중량이 3만파운드이고 최고속도 마하 6에 이르며 2백30마일의 사정거리를 가졌고 부정확한 유도기술에 대해 2천 파운드의 탄두로서 보상하고자 했다. 1944년 9월에서 1945년 3월까지 독일은 3천기 이상의 V-2 유도탄을 발사하였으며 그 중 1천백기는 유럽대륙의 연합군을 나머지는 런던과 잉글랜드 남부를 공격했다.

전쟁 후 미국 육군은 80기분의 V-2 부품과 독일 기술자를 미국으로 데려가서 1940년대 후반부터 1950년대 초반에 걸쳐 70기의 V-2를 시험발사했으며, 이때 축적된 기술들이 미국의 전략탄도탄 기술과 우주탐사기술의 기초가 되었다.

미국은 V-2 유도탄 제작의 경험을 토대로 보다 정확한 관성 센서를 개발하였고, 유도기술은 정확도면에서 획기적인 도약을 했다.

단거리 전술유도탄의 효시는 미국 해군의 Lark 유도탄으로서 미국 해군에 의해 1944년 개발이 시도되었다. 이 유도탄은 6년간의 개발 기간을 거쳐 1950년 12월 첫번째로 무인비행기의 요격에 성공했다.

유도기술의 발전

V-2와 Lark를 효시로 한 전략·전술 유도탄 기술은 40여년에 걸쳐 개선 발전을 해오고 있으며, 현대에 이르러 정밀센서, 전자소자의 개발에 따라 소형 경량화, 고도정밀화 추세로 발전해오고 있다.

유도탄의 종류는 발사대와 목표물에 의해 공대공, 지대공, 공대지, 지대지 유도탄 등으

로 분류 할수 있고 사거리에 의해 단거리, 중거리, 장거리 유도탄으로 나누며 사용목적에 의해 전술, 전략 유도탄으로 분류된다.

유도탄은 유도조종장치, 신관 및 탄두, 추진기관, 구동장치로 구성되어 있으며 공기역학, 기체구조, 기계, 화학, 전자, 전기 및 소프트웨어, 물리, 제어 분야들의 종합기술을 필요로 한다.

이에따라 체계 요구사항을 만족시키기 위한 각 분야의 인터페이스, 종합성능분석 및 Trade Off 연구등의 체계 종합 업무가 핵심을 이룬다. 이를 위해 반복적인 시험, 분석, 보완등이 필수적이다.

유도의 목적은 목표물과 탄과의 상대위치를 산출하여 탄착점에서의 위치 오차를 최소화 하는 것이다. 유도분야는 레이다, EOTS, 탐색기, 관성장치 등에 의한 목표물과 탄과의 상대위치 및 속도등의 정보획득기능, 목표물

이 글에서는 유도무기의 유도개념에 대한 간략한 소개와 함께 현대 제어 이론의 발전에 따른 유도루우프 설계기술의 발전추세를 살펴보기로 한다. 유도무기의 유도개념을 지령유도, 비례항법유도, 프로그램유도로 구분하여 소개하며, 설계기술의 발전추세는 최적제어 이론, 확률제어 이론 등과 연계하여, 다른 학술지에 게재된 논문의 내용과 접근방식을 소개하였다 (필자 주)

과 탄과의 위치 오차를 최소화 하기 위한 유도지령 신호계산 기능과 지령 신호전달 기능을 갖추어야 한다.

유도방식으로는 크게 지령유도, 호우밍유도, 프로그램 유도방식을 들수 있으며 단거리일 경우 단일유도 방식, 중·장거리일 경우 복합유도방식이 쓰여진다.



● 지령유도방식

지령유도의 경우 정보획득은 탄외부의 레이다, EOTS, 열상장비 또는 이들이 복합된 Multi-sensor 시스템에 의해 이루어지며 지령 신호는 시선지령유도(CLOS)나 빔라이딩 유도법칙에 의해 계산되며, 유선 또는 무선으로 유도탄에 전달된다.

지령유도방식에서는 목표물의 상태변수 즉 위치 속도벡타가 필요하며 이는 추적필터에서 계산되어진다.

시선지령 유도의 원리는 추적장치와 목표물을 잇는 시선 상에 유도탄이 항상 놓이도록 유도하는 것으로 3-point Guidance라고도 한다.

이를 위해 목표물 LOS 벡타와 유도탄과의 편차를 없애주도록 하는 보상회로에 의한 지령과 목표물의 동력학을 보상해주는 Feed forward 지령으로 구성되어 있다. 기동표적인 경우 Feedforward 지령은 오차를 줄여 주는 역할을 한다.

● 호우밍 유도 방식

호우밍 유도의 경우 목표물과 유도탄의 상대위치나 속도등의 상태변수에 대한 정보획득이 탄내부의 탐색기에 의해 이루어지며 탐색기의 종류와 기능에 따라 수동, 능동, 반능동 방식의 호우밍이 이루어진다.

지령신호 산출은 탐색기의 목표물시선의 변화량과 비례항법유도(PNG) 법칙으로 이루어지며, 최근에는 목표물의 회피운동이 있을 경우를 고려하여 목표물시선에 수직인 목표물의 가속도를 추정해 이를 기존 PNG 법칙에 적용해 보완된 비례항법유도(APNG) 법칙을 개발 및 활용하고 있다.

보다 정확한 유도를 위해 사용되는 APNG의 경우 탐색기로 부터의 거리나 각도 정보로부터 목표물과 탄과의 상대위치, 속도와 목표물의 가속도벡타를 추정하는 Kalman Filter류의 추정자가 필요하며 유도법칙도 최적제어 이론을 이용해 지령신호를 계산하게 된다.

단거리 지대공 유도탄인 경우 주로 적외선 탐색기를 사용하며 사수가 지시하는 표적을

독일의 V-2와 미국의 Lark를 호시로 한 전략·전술 유도탄 기술은 현대에 이르러 정밀센서, 전자소자의 개발에 따라 소형 경량화, 고도정밀화의 추세로 발전해오고 있다. 현재 필터링 이론은 Kalman Filter의 아폴로 우주계획에의 적용 이후, 유도탄 및 목표물 추적 유도분야에 활용되고 있다

탐색기가 포착한 후 발사하는 LOBL(Lock-On-Before-Launch)방식을 채택하고 있으나, 사거리를 연장시키기 위해 초기에 관성유도 또는 지령유도를 사용하고 종말유도단계에서 탐색기에 의한 호우밍유도를 하는 LOAL(Lock-On-After-Launch) 방식이 개발되고 있다.

● 프로그램 유도 방식

프로그램 유도의 경우 정보획득은 관성항법장치(INS, SDINS)에 의해 주로 이루어지며 장시간 비행인 경우 시간의 함수인 관성항법장치의 오차를 줄여주기 위해 Kalman Filter와 지형 대조 항법 장치, 도플러 레이다, GPS 수신 장치등에 의한 보조관성항법(AIN)을 사용하게 된다.

이러한 프로그램 유도는 주로 장거리 유도탄의 초기 및 중기 유도에 주로 사용되며 정확한 목표물 요격을 위해 영상 탐색기 등에 의한 종말 유도 방식을 채택 하는 복합유도방식을 사용한다.

현대 설계기술의 발전추세

유도무기의 성능은 적의 공격력 강화 등의 전장환경요소의 변화에 대처하기위해 끊임없이 발전되어 오고 있다. 예로서 기동성이 뛰어난 목표물을 요격하는데 기존 PNG로서는 많은 control energy가 필요함에 비해 목표물의 가속도를 추정하여 이를 유도명령에 응용하는 APNG는 적은 control energy 로서도 PNG 보다 우수한 성능을 갖는다.

이 APNG의 유도방정식을 산출하는데 있어서 상태변수공간을 이용한 최적화제어 이론이 쓰여지고 있으며 1960년대 이후에 급속도로 발전해온 현대제어 이론이 유도무기의 효율증대를 위해 많이 적용되고 있다. 현대제어 이론을 유도조종체계의 설계에 적용시킨 경우를 살펴보자.

● **Deterministic 환경의 최적제어** —————

Bryson 등에 의해 체계가 잡힌 최적제어 이론은 지대기 유도탄의 사거리 최대화, miss distance의 최소화에 쓰이며 유도무기의 실제 비선형 동력학 모델을 사용할 경우 2점 경계치 문제(TPBVP)에 귀착되어 단순한 모델일 지라도 수치해석 방법에 의거 그 해를 구해야 한다.

따라서 실시간 실현은 어려우며 off-line simulation에 의한 기준궤도를 얻는데 사용되어 진다. 이 기준궤도를 중심으로 실제의 비행궤도가 벗어난 정도를 선형화된 동력학모델로 표시하고 Quadratic form의 performance index를 최소화 할 경우 LQ 문제가 되며 리카티 미분 방정식의 해를 유도컴퓨터에 기억 시킴으로써 실시간 유도가 가능해진다.

또한 비선형 동력학 모델 중 시간응답이 느리고 빠른 상태변수를 구별하여 TPBVP의 근사해를 singular perturbation 방법을 사용하여 컴퓨터의 계산량을 줄임으로써 실시간 계산이 용이하도록 해주는 방법도 쓰고 있다.

유도탄과 목표물간의 상대운동을 시불변 선형 미분 방정식으로 모델링 할 경우의 LQ 문제는 Closed form의 최적제어를 해석적으로 구할수 있게 된다.

기존 PNG의 유도방정식도 이 closed form의 해로써 나타낼수 있으며 목표물의 가속도를 동력학 모델에 적용 할 경우 APNG의 유도방정식이 된다. 이 APNG의 실현에 있어서 유도종결 시간 t_f 와 목표물의 가속도 A_T 의 계산이 가장 중요한 요소들이다.

유도종결시간 t_f 는 능동 호우밍일 경우 쉽게 산출될수 있으나 재밍등의 잡음환경에서나 수동 호우밍인 경우는 추정이론을 이용한 필터를 설계하여 산출해 낸다.

목표물의 가속도 A_T 를 추정하는데 목표물의 동력학 모델이 필요하며 Singer가 변화시킨 형태들도 쓰이고 있다.

● **필터링 기법** —————

시스템의 동력학이 stochastic 모델이라 가정할때 가속도 A_T 와 같은 상태변수의 추정치를 얻기 위해서 동력학 및 측정치 모델이 선형일 경우 칼만필터가 쓰여진다.

비선형 모델일 경우 유도조종 체계에서 최적 추정치는 무한 차수의 확률변수가 계산되어야 하므로 실현이 불가능하여 근사적인 확장 칼만필터가 주로 쓰인다.

칼만필터는 아폴로 우주 계획에 쓰여짐으로 인해 각광을 받게 되었으며 디지털 컴퓨터에서의 계산시 오차를 줄이고 계산의 안정도를 보장하기 위해 square root filtering 기법 및 UDU^T factorization 기법등이 쓰이고 있다.

능동 호우밍인 경우의 유도탄과 목표물간의 상대 운동의 상태변수 추정치는 obserbability의 보장에 따라 비교적 쉽게 산출될수 있다.

一 笑 一 少 一 怒 一 老

먼저 지친 남편

어떤 노(老)부부가 건강을 위해 하루 2Km씩 걷기로 했다. 노부부는 목표지점까지 갔다가 돌아올때 차를 타게 될까봐 대중 교통이 없는 한적한 시골길을 택했다. 1Km를 걸어서 목표지점에 도착했을 때 남편이 아내에게 물었다.

남 편 : 임자 돌아갈수 있겠소? 지치지 않았소?

아 내 : 지치다니요.

돌아갈수 있고 말고요.

남 편 : 그럼 난 여기서 기다릴테니, 돌아가서 차좀 몰고 오구려...

그러나 각도정보만이 얻어지는 수동 호우밍인 경우는 observability를 얻기 위해 유도탄이 항상 기동해야 하며, 상태변수 추정치는 확장칼만 필터에 의하거나 수정이득확장칼만 필터에 의해 얻어질수 있다.

또한 가설검증에 의한 적응필터 기법, x^2 검증에 의한 목표물의 기동으로 인한 상태변수의 변화를 감지하고 그 변화량을 추정하는 input estimation 기법이 제기되고 있으나, 계산량이 많으므로 반응시간이 짧은 유도탄의 유도조종체계에 응용되기 위해서는 알고리즘의 수정이 필요하다.

● 최적 확률 제어

잡음환경에서의 유도방정식을 산출하는데 있어서는 최적확률제어 이론이 쓰여지고 있으며, 비선형계에서는 제어변수가 상태변수를 추정하는 과정 및 performance index의 기대치를 최소화하는 과정도 개선해야 하는 二重 목적을 가져야 하는데, 이를 dual control이라 한다. 실제로 비선형계의 최적확률 제어 이론으로는 실현가능한 알고리즘을 얻기 힘들다.

가우시안 잡음에 오염된 선형계에 있어서 Quadratic performance index의 기대치를 최소화하는 LQG(Line-Quadratic-Gaussian) 방법의 해는 Dynamic programming 기법에 의해 구한다.

이러 결과는 칼만 필터와 앞서의 Deterministic한 환경에서의 최적제어를 따로 구성하여 최적제어의 상태변수 대신에 칼만필터의 상태변수의 추정치로 대치하는 것이 된다. 이를 Separation Theorem이라 한다.

또한 최적제어의 이득은 시스템 잡음 확률변수에 전혀 무관한데 이를 Certainty Equivalence Principle이라 한다. 비선형계에서는 준최적 방식을 적용시켜 확장 칼만 필터등을 응용하여 Certainty Equivalence Principle이 성립한다고 가정해 제어변수를 구한다. 잡음환경에서의 APNG는 LQG 문제로 다룰수 있다.

Speyer는 Gaussian 잡음환경에서 선형계에 대해 지수함수의 performane index를 최소화

하는 LEG(Linear-Exponential-Gaussian) 이론을 호우밍 유도탄의 유도 방정식의 산출에 적용시켜서 새로운 유도법칙을 얻었는데 LEG의 해로는 Certainty Equivalence Principle은 성립되지 않으나, miss distance의 공분산이 LQG 해 보다 훨씬 줄어들며, 재밍환경에서 상태변수 추정치의 불확실성에 비례하여 제어이득이 줄어드는 기민성을 보인다.

● 유도 성능 분석 기술

설계된 유도 루우프의 성능분석은 실제 비행시험전에 설계사양의 부합여부를 판단하기 위해서 필수적으로 행해져야 한다. 그리고 제작된 하드웨어가 설계사양을 만족하는지 여부를 판단하기 위해 Hybrid Computer 또는 real-time digital computer를 통한 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)를 해야한다. 이러한 과정은 고가의 비행시험 횟수를 절감시키는 경제적인 의미도 크다.

잡음환경에서의 성능분석의 해석적인 방법으로는 유도조종 체계의 비선형 요소를 확률적인 선형화를 통해 Describing Function을 얻은 후 리아프노프 공분산 전달 미분 방정식의 해를 얻는다.

이에 따라 시스템의 모든 오차 요인들이 출

一笑一少一怒一老

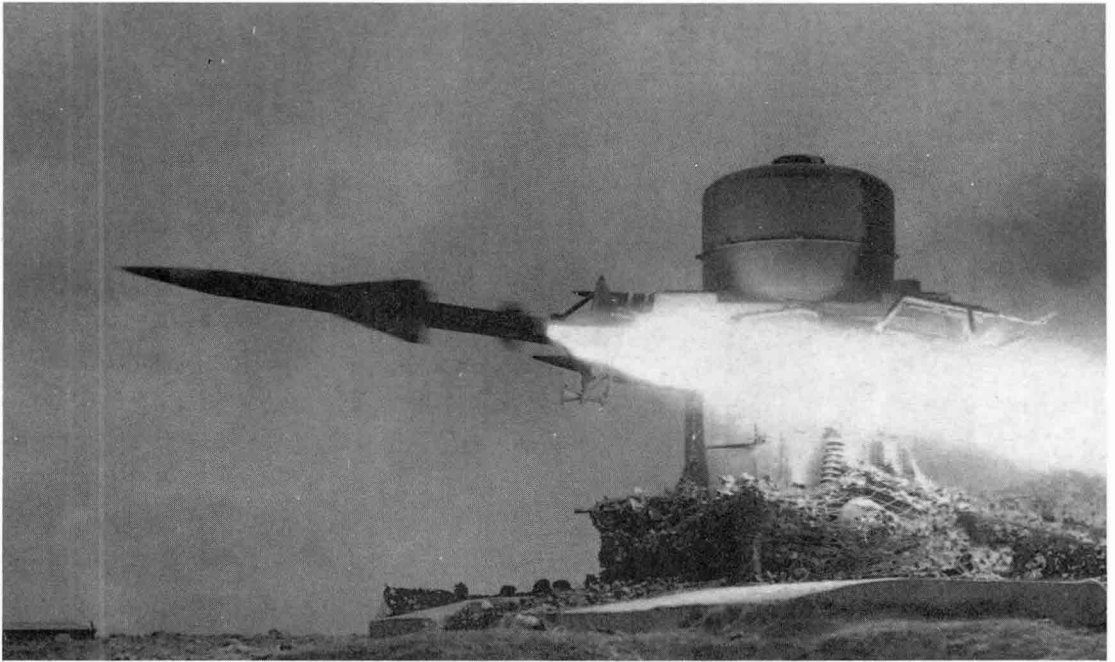
거리의 영업사원

마음씨 착한 金노인이 절름발이 거지에 게 돈을 주면서 친절한 말로 위로하였다.

노부인 : 펍 불편하겠군요. 그렇지만 앞을 못보는 사람보단 나은 편이예요. 매사는 마음먹기에 달렸으니까...

거지가 고개를 끄덕이며 말했다

거지 : 할머니 말씀이 옳아요. 제가 장님거리 노릇을 할땐 가짜 돈이나 돌맹이를 넣고 가는 놈들도 있었으니까요



력에 미치는 영향을 한번에 얻는 CADET (Coveriance Analysis DEscribing function Technique)가 있고, 각 오차 요인들이 시스템 출력에 미치는 영향을 개별적으로 분석하는 SLAM(Statistical Linearization Adjoint Method)가 있다.

실제로 비선형 요소가 많고 차수가 높은 유도조종 체계에서는 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 유도탄 체계의 CEP(Circular Error Probability)를 구하는 것이 일반적인 방법이다.

맺는 말

유도분야는 60년대 이후 발전해 온 현대제어이론을 통해 기존의 유도방식을 보완하고 효율을 증대시키는 방향으로 발전되고 있다.

유도에 필요한 목표물과 유도탄의 상대적인 상태변수를 잡음환경에서 추정해 내기 위한 필터링 이론은 Kalman Filter의 아폴로 우주계획에의 적용 이후로 유도탄 및 목표물 추적 유도분야에 크게 활용되고 있다.

해외에서는 현대제어이론의 적용분야로서 광범위한 연구활동이 수행되고 있으며, 우리

나라 제어학계의 보다 많은 연구활동을 기대한다. *

참 고 자 료

- ▲Lee, R.G. et al, (Guided Weapons), Royal Military College of Science, Brassey's Defense Publishers, 1988.
- ▲Kuritsky, M., and Goldstein, (Inertial Navigation), M., Proceedings of the IEEE, Vol. 71, 1983
- ▲P. Zarchan, (Tactical and Strategic Missile Guidance), AIAA Inc. 1990
- ▲V.H.L Cheng and N.K. Gupta, (Advanced Midcourse Guidance for Air-to-Air Missile), J. of Guidance, Control Vol. 9, No. 2, P 135-142, 1983
- ▲T.L. Song and J.L. Speyer, (A Stochastic Analysis of a modified gain extended Kalman Filter with Application to estimation with Bearings only measurements), IEEE Trans. on Automatic Control Vol. 30, No. 10, P 940-949, 1985
- ▲P.L. Bogler, (Tracking a Maneuvering Target Using Input Estimation), IEEE Trans on AES Vol. 23, No. 3, P 298-310, 1987
- ▲T.L. Song et al, (Suboptimal Filter Design with Pseudomeasurements for Target Tracking), IEEE Trans. on AES, Vol 24, Jan, 1988