

적외선 유도무기 모의비행시험 기법

김영주, 김민희, 조규필
국방과학연구소

A Hardware-In-the Loop Simulation Technique for an IR Guided Weapon

Young Joo Kim, Min Hee Kim, Kyu Pil Cho
Agency for Defense Development

ABSTRACT

A HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) technique for an IR guided weapon is proposed. The IR HILS facility functions as a testing unit for a missile guidance and control system to evaluate target acquisition, tracking, and countermeasure performance.

The configuration of IR HILS facility, modeling technique of an IR environment including target, background and countermeasure, and test and evaluation procedure are included

1. 서론

유도무기 개발 과정에서의 유도조종장치에 대한 실시간 모의비행시험(Real-time Hardware-In-the-Loop Simulation)은 유도조종 분야의 각 부체계 및 종합적인 체계의 성능 시험을 실험실에서 반복적으로 수행함으로써 개발 기간 단축, 비행시험의 실패요인을 제거, 비용 절감 효과, 설계 변수의 최적화 및 체계 요구 성능을 확인할 수 있는 유도무기 체계 성능 평가를 위한 대단히 중요한 수단이다.

공대공, 지대공 및 대전차 등의 유도무기에 널리 이용되고 있는 적외선 탐색기는 표적인 항공기 및 전차 등에서 방출되는 적외선을 탐색하여 추적하는 장치로써, 종말 호우밍 유도무기 체계의 핵심 부품이다. 적외선 탐색기를 포함한 유도무기 체계의 성능 평가를 위해서는 효율적인 모의비행시험 방안과 실시간 모의비행시험을 위한 장비 구성, 그리고 표적기와 유도탄의 운동 특성, 표적 신호, 배경 잡음 및 전자광학 방해책(Electro-optical Countermeasure) 등을 고려한 모델링과 모의비행시험 환경의 구현이 매우 중요한 요인이 된다.

본 논문에서는 적외선 탐색기를 포함한 유도무기 체계의 모의비행시험을 통하여 해석적 시뮬레이션(Analytical simulation)과 비행시험(Flight test)과의 차이점을 보완하고 컴퓨터를 이용하여 모사된 환경하에서 적외선 탐색기의 표적 인식 능력을 평가함과 아울러 유도조종 관련 부체계 성능 확인 및 종합적인 체계 성능을 확인할 수 있는 모의비행시험 기법을 제안하고자 한다. 제2장에는 적외선 발생장치(Infrared Scene Generator)를 이용한 표적

기, 배경잡음 및 전자광학 방해책 등의 환경 구현을 위한 모델링에 관하여 기술하였고, 제3장에는 적외선 탐색기를 포함한 유도무기 체계의 실시간 모의비행시험 시스템 구성에 대하여 기술하였으며, 제4장에서는 모의비행시험을 통한 체계 성능 평가 방안과 실시간 시뮬레이션 기법에 관하여 논술했다. 그리고 제5장에는 결론을 서술했다.

2. 적외선 환경 모델링

표적의 배경잡음과 전자광학적인 방해물 등의 환경하에서 표적 획득, 추적 등의 탐색기 성능을 평가하기 위하여 적외선 영상 발생장치에 의하여 투영되는 영상에는 실제 환경의 적외선 영상을 충실히 발생하기 위하여 근접되는 표적 영상과 배경잡음 영상, 그리고 표적과 상대적으로 움직이는 선험 등 전자광학 방해 영상이 포함된다. 그림 1은 적외선 영상 발생장치의 구성을 보이고 있으며 표적기 영상 발생장치(Target Scene Generator), 배경잡음 영상 발생장치(Background Scene Generator), 전자광학 방해 영상 발생장치(Flare Scene Generator) 및 광선 합성기(Beam Combiner)로 구성된다. 전체 적외선 영상 발생장치는 2축 표적 자세 모의기의 외부 김발에 장착되어 실제 표적의 운동이 모사되게 한다.

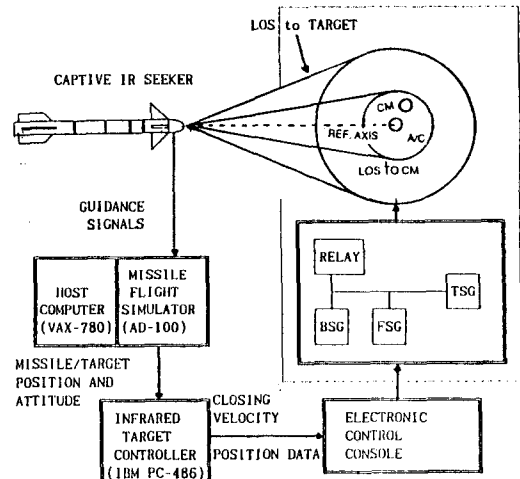


그림 1. 적외선 영상 발생장치 구성

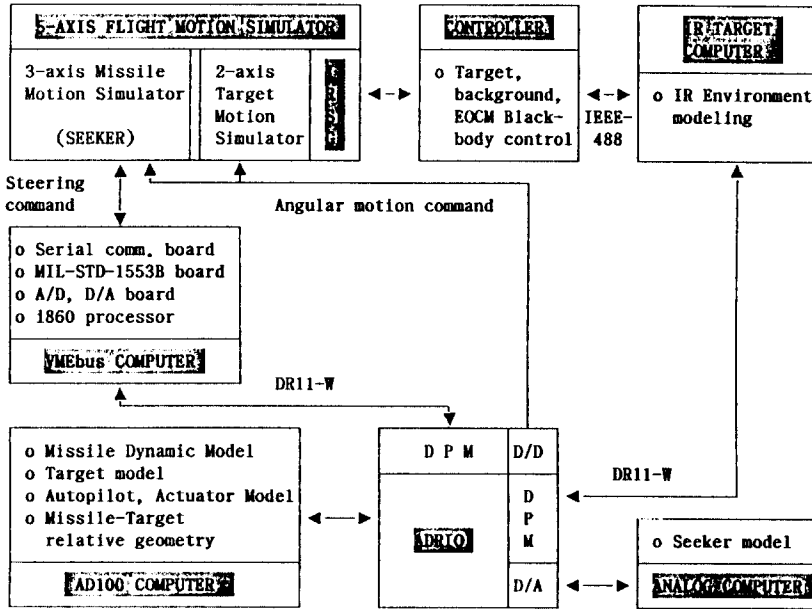


그림 3. 모의비행시험 장비 구성

함한 모의비행시험시 ADRIO를 통하여 외부 시험장치와의 통신을 수행한다.(그림 4. AD100 컴퓨터 구성 참조)

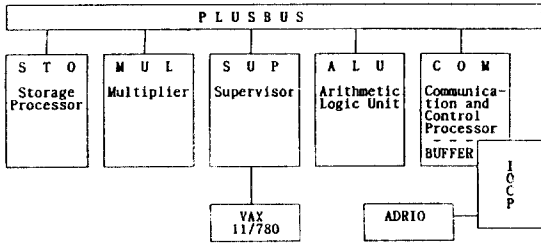


그림 4. AD100 컴퓨터 구성

② ADRIO

A/D, D/A, D/D 변환기 및 DPM(Dual Ported Memory)로 구성되며 실시간 연산처리 컴퓨터인 AD100과 외부 시험장치간의 통신을 담당한다.

③ 5-Axis Flight Motion Simulator

적외선 탐색기가 탑재되는 3축 유도탄 자세 모의기와 적외선 영상 발생장치가 탑재되는 2축 표적 자세 모의기로 구분된다. AD100 컴퓨터의 6-DOF 모델에서 구해지는 오일러 각(Euler angle)과 비행체와 표적기간의 기하학적인 관계식으로 구해지는 가시선 벡터로 3축 유도탄 자세 모의기와 2축 표적 자세모의기를 구동한다.

④ 아날로그 컴퓨터

탐색기 모델의 실시간 연산 처리는 모의비행시험의 기준 자료를 획득하는 실시간 시뮬레이션과 조종장치, 구동장치 등의 부체계들 포함한 비행체적 모의비행시험에

서 반드시 필요하다. 복잡하고 매우 빠른 동특성을 갖는 탐색기 모델은 비행체 모델, 표적기 모델, 및 유도조종 관련 부체계 모델 등을 포함하여 디지털 AD100 컴퓨터에서는 실시간 처리가 불가능하므로 아날로그 컴퓨터를 이용한다.

⑤ VMEbus 컴퓨터

VMEbus 컴퓨터는 CPU-2E, 1860, M68040 프로세서와 MIL-STD-1553B 보드, IEEE-488 보드, RS-422, RS-232C Serial 통신용 보드 및 A/D, D/A 변환기 등으로 구성되어 모의비행시험시 분산처리와 다양한 입출력 기능을 갖는다. 모의비행시험시 ADRIO의 DPM과 연결되며 모의비행시험 결과 획득 및 AD100 컴퓨터와 다양한 통신을 수행하는 실물 시험 장치 간의 인터페이스 역할을 담당한다.

⑥ 적외선 영상 모의시험 장치(Infrared Scene Simulation System)

적외선 영상 모의시험장치는 적외선 탐색기의 표적 획득, 추적 및 전자광학 방해등에 대한 성능을 평가하는 시험장치로써, 적외선 영상발생 컴퓨터, Black body 제어기 및 적외선 영상 발생장치(IRSG)로 구성된다. 적외선 영상발생 컴퓨터는 적외선 탐색기의 성능 확인을 위한 표적기, 배경잡음 및 전자광학 방해(선풍, 유인장치) 등의 다양한 시나리오를 구현하는 등 적외선 영상 환경을 모델링하며, Black body 제어기는 표적기의 크기, 종류 및 거리의 전자광학 방해물의 크기 및 변화를 그리고 배경잡음 등에 따라 Black body가 방출하는 방사열의 세기를 제어한다. 2축 표적기 자세 모의기 탑재되는 적외선 영상발생장치는 표적기 영상 발생 Black body, 전자광학 방해물 영상 발생 Black body 및 배경잡음 영상 발생 Black body와 적외선 탐색기에 영상을 투영하는 광선 분배장치로 구성되며 표적/배경/전자광학 방해 영상을 제공한다.

2.1 표적 모델링

표적 영상 발생장치는 Blackbody, 원형 Iris, 필터 및 시준기 광학장치로 구성된다. 표적기를 나타내는 원형 Iris의 크기는 표적의 크기, 거리 및 속도 따라 결정되며 다음과 같은 수식으로 구해진다.

$$a(t) = \frac{A}{R_o - (V \cdot t)} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} a(t) = \frac{A \cdot V}{(R_o - (V \cdot t))^2} \quad (2)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} (a(t)) = \frac{A \cdot V^2}{(R_o - (V \cdot t))^3} \quad (3)$$

여기서

- a : [mrad], 표적 Iris의 호각
- t : [sec], 시플레이션 시간
- A : [m], 실제 표적의 최대 크기
- R_o : [km], 유도탄과 표적의 초기 거리
- V : [km/sec], 유도탄과 표적의 근접 속도이다.

표적 영상은 모의비행시험 동안에 탐색기의 가시 영역(Field Of View)의 중앙에 항상 위치하며 유도탄에 대한 표적의 상대적인 운동은 2축 표적 자세 모의기로 구현되며 그 구동명령은 다음과 같이 구해진다.

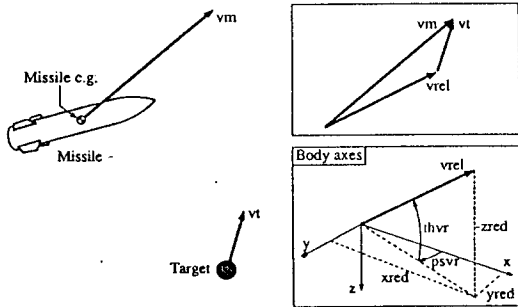


그림 2. 유도탄/표적기의 기하학적 관계

그림 2는 유도탄과 표적기 사이의 지구좌표계에서의 관계를 나타낸 것이며 이 그림으로부터 3축 유도탄 자세 모의기와 2축 표적기 자세 모의기와 기하학적 관계가 동일하게 모델링된다. 이 그림을 참고하여 나타낸 시선(Line Of Sight) 식은 다음과 같다.

지구좌표계(Earth Axes)에서의 표적기 속도 성분은

$$\begin{aligned} Xte' &= Vtx = Vt \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\psi) \\ Yte' &= Vty = Vt \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\psi) \\ Zte' &= Vtz = -Vt \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 θ, ψ 는 표적기의 고각(Elevation angle)과 방위각(Azimuth angle)이다.

지구좌표계에서의 표적기에 대한 유도탄의 속도 성분은

$$\begin{aligned} xred &= Vmx - Vtx \\ yred &= Vmy - Vty \\ zred &= Vmz - Vtz \end{aligned} \quad (5)$$

지구좌표계에서 유도탄/표적기의 상대적 속도 벡터(Relative velocity vector)의 방위각과 고각 사이의 관계식은

$$psvr = \psi_{rel} = \tan^{-1}(yred/xred) \quad (6)$$

$$thvr = \theta_{rel} = \tan^{-1}(zred/\sqrt{xred^2 + yred^2}) \quad (7)$$

식 (6), (7)로 부터 계산된 ψ, θ 값으로 2축 표적 자세 모의기의 2 짐발(Gimbal)을 구동하게 된다.

2.2 배경잡음 모델링

배경잡음 영상 발생장치는 Blackbody와 고해상도를 갖는 열상(Thermoscene) 및 시준기(Collimator)로 구성된다. 열상은 사진석판으로 식각된 것으로 열상 뒤에는 온도로 제어되는 Blackbody가 위치하여 배경 영상을 생성한다. 배경 영상으로는 맑은 하늘, 구름 낀 하늘, 땅, 바다 등이고 이 영상들은 영상 윤전기(Scene wheel)에 탑재되어 컴퓨터로 제어되며 선택된 영상은 모의비행시험 동안 고정된다.

2.3 전자광학 방해물 모델링

전자광학 방해물 영상 발생은 기본적으로 표적 영상 발생과 같으나 표적 영상에 비하여 크기가 작고 표적의 위치에 대하여 상대적으로 탐색기의 가시 영역내에서 이동한다는 데 차이가 있다. 전자광학 방해물 영상의 속도와 가속도의 모델링도 표적 모델링과 유사하며 모의비행시험 시작시 표적 영상과 같이 탐색기 가시영역 중앙에 위치하며 그 후 주어진 비행 계획에 따라 가시영역 내에서 이동한다. 영상의 이동은 컴퓨터의 제어에 따라 광선 분배기를 구동하여 수행되며, 아울러 영상의 출현과 소멸은 서티에 의한다.

3. HILS 시스템 구성

3.1 하드웨어 부분

최의선 탐색기를 포함한 유도무기 체계의 모의비행시험 장비 구성은 그림 3과 같으며 그 기능은 다음과 같다.

① AD100 컴퓨터

20메가 FLOPS(Floating-point Operations per Second)의 고속 연산 처리 기능과 SUP(Supervisor processor), ALU(Arithmetic and Logic Unit), MUL(Multiplier), COM(Communication Processor), STO(Storage processor), IOCP(Input/Output Communication Controller) 등의 다중 프로세서로 구성되며 다양한 적분 방식, 외부 장치와의 입출력 루틴, 함수 생성(Function generation) 루틴, 유틸리티 및 실시간 실행 제어 환경을 제공하는 실시간 인터프리터 컴퓨터로 유도탄 및 표적기 모델이 포함된 비행계획 프로그램을 실시간으로 실행하며 실물 하드웨어를 포

실시간 시뮬레이션 소프트웨어는 고급 시뮬레이션 언어의 기능, 시뮬레이션 모델의 실시간 실행 제어 환경 (Real-time Execute Control Environment), 다양한 적분 방식, 상호대화식 시뮬레이션 수행, 콤팩터에 의한 최적화된 프로그램 재구성, 방대한 양의 공력 계수 산출을 위한 보간법(Interpolation) 및 외삽법(Extrapolation) 루틴, 비선형 시스템을 위한 다양한 함수와 유틸리티 프로그램 제공, 외부 장치와의 입출력 루틴 제공 등의 기능을 갖는 ADSIM(Applied Dynamics Simulation Environment)과 유도무기 체계의 실시간 모의비행 시험을 위한 분산처리 및 다양한 입출력 수행을 위하여 이식성 (Portability)과 실시간 입출력 처리를 위한 Context Switch와 Interrupt Latency가 매우 빠른 Wind River Systems사의 VxWorks등이 이용된다.

4. 모의비행시험 기법

4.1 모의비행시험 방안

적외선 탐색기를 포함한 유도조종 관련 부체계를 포함하고 실제 비행시험 환경과 유사한 환경을 구현하여 적외선 탐색기의 표적 인식 능력을 평가함과 아울러 유도조종 관련 부체계 성능 확인 및 종합적인 체계 성능을 확인할 수 있는 부체계별 모의비행시험 및 종합 모의비행시험 (Integrated Hardware-In-the-Loop Simulation)을 수행, 다음 사항을 점검한다.

- o 적외선 탐색기의 성능 확인
- o 부체계 모델의 타당성(Validity) 점검
- o 부체계 탑재 프로그램 검증(Verification)
- o 부체계간 인터페이스 확인
- o 체계 요구 성능 확인

모의비행시험을 통한 체계 성능 평가 절차는 그림 5와 같이 해석적 시뮬레이션 단계, 실시간 시뮬레이션 단계, 기능점검 시험과 부체계별 모의비행시험 단계, 그리고 종합 모의비행시험 단계로 구분된다. 해석적 시뮬레이션과 실시간 시뮬레이션 단계에서 수학적 모델로 표현된 부체계들은 모의비행시험 단계에서 실제 하드웨어로 대체되며 종합 모의비행시험 단계에서는 가능한 모든 실물 하드웨어들을 통합하고 실제 비행환경에서 발생할 수 있는 오차들을 포함한 모의비행시험 조건을 선정, 종합적인 체계 요구성능을 확인한다. 실시간 시뮬레이션 단계에서 획득된 결과는 모의비행시험 결과와 비교하는 기준 자료가 된다.

부체계 성능 확인 및 체계 종합 성능 평가를 위한 모의비행시험은 기능 점검 시험(Functional test, Captive test), 개루프 모의비행시험(Open-loop HILS) 및 폐루프 모의비행시험(Closed-loop HILS)으로 구분되며 각 시험 절차의 평가 항목은 다음과 같다.

4.2.1 기능 점검시험

모의비행시험 수행 이전에 각 부체계 설계사양의 만족여부를 확인하는 시험 절차이며 구동장치, 센서(각속도 감지기, 위치 감지기 등) 및 적외선 탐색기 기능 점검시험으로 구분된다.

- ① 구동장치 기능점검 시험 - Sine 파 또는 계단 명령에 대한 구동장치 반응
- ② 센서 기능점검 시험 - 3축 유도탄 자세 모의기 (3-Axis Flight Motion Simulator)에 센서를 탑재하여 자세각 명령 및 자세각 변화를 명령에 대한 센서 반응
- ③ 적외선 탐색기 기능점검 시험 - 다중 표적기, 배경 잡음 및 전자 방해책동의 다양한 환경에서의 적외선 탐색기의 탐색 능력 및 유도성능을 확인하며 중요 평가 항목들은 다음과 같다.

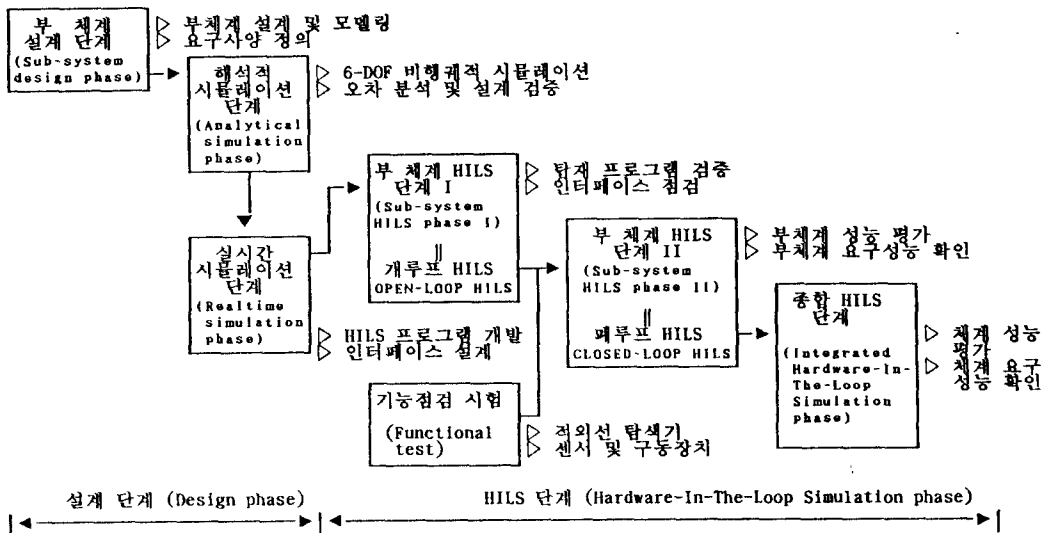


그림 5. HILS를 통한 체계성능 평가 절차

- o 추적률(Tracking-rate)
- o 가시 영역(Field of view)
- o 탐색기의 김발 제약
- o 다중 표적기에 대한 반응
- o 스펙트럼 특성 및 해상도

4.2.2 개루프 HILS

실물 하드웨어 부채계 모의비행시험을 통하여 부채계의 중요한 파라미터를 추출, 소프트웨어 부모델의 타당성을 검증함과 아울러 인터페이스 기능을 점검하는 시험 절차이다.

- o 실물 부채계의 인터페이스 기능
- o 중요 파라미터를 추출

4.2.3 폐루프 HILS

주어진 미션 프로파일에 대한 비행체적 모의비행시험으로 부채계 탑재 프로그램의 검증과 요구 성능을 확인하는 부채계별 모의비행시험과 종합적인 체계 성능을 평가하는 종합 모의비행시험을 수행한다.

- o 미션 프로파일에 대한 유도 명령, 조종 명령 및 구동 명령
- o 비행체 위치 및 자세각
- o 비행 안정성 - 공격각(Angle of attack), 옆 미끄럼각(Sideslip angle), 비행 경로각(Flight-path angle)
- o Miss distance, Kill probability

4.3 실시간 시뮬레이션 기법

시뮬레이션 모델은 일련의 미분방정식, 차분방정식 및 대수방정식 등으로 표현되며 미분방정식으로 표현된 연속 동특성 모델의 상태 변수는 독립 변수 시간에 대한 적분을 수행함으로써 해를 구한다. 여기서 적분 방식의 선형, 적분 구간의 결정 및 실시간 요구조건의 만족 등이 매우 중요하며 매우 빠른 동특성 모델이 포함된 경우에 적분 구간을 크게하면 수치적으로 부정확하고 불안정한 결과를 얻게 된다.

적분 방식의 선형의 선형과 적분구간의 결정은 먼저 시뮬레이션 모델의 폐루프 pole들을 구한 후, 가장 빠른 pole이 적분 방식에 대한 특성근 대비 적분구간 평면(λ -Plane)상에서 적분 안정 영역을 만족하는 적분 구간을 결정한다. 다음은 실시간 요구조건을 보인다.

실시간 요구조건 :

$$\text{FRAMETIME (Computation time for dynamic portion of simulation model + Time for overhead tasks)} \leq \text{STEP-TIME (Integration step size/Integration step number)}$$

여기서 프레임 타임은 시뮬레이션 모델의 one-step 연산 소요 시간과 외부장치와의 입출력 소요시간을 포함한 시간이며 스텝타임은 적분 구간을 적분 방식에 따른 적분 과정 단계로 나눈 시간이다. 즉, RK-4(Runge-Kutta 4th order) 적분 방식의 경우 적분 단계는 4이다. 이와

같이 실시간 요구조건을 만족하기 위해서는 시뮬레이션 모델에 대하여 고정된 스텝타임 내에 프레임 타임이 만족 되도록 해야 하며, 그 방법은 하드웨어/소프트웨어의 충분한 이해를 바탕으로한 최적화된 프로그램의 작성, 병렬 처리 컴퓨터와 같은 고속 연산처리 시스템의 구현 등이다.

적분 구간에 대하여 프레임 타임이 크게 되어 실시간 모의시험이 불가능한 경우에는 다중 프레임 적분 기법(Multiple Frame Rate Integration Technique)을 사용하여 수치적으로 안정된 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 모의시험시 매우 빠른 특성근을 갖는 연속 동특성 모델로 인하여 적분 구간이 작게되며 이로 인하여 실시간 수행에 제약을 받는다. 다중 프레임 적분 기법은 연속 동특성 모델을 Fast 연속 동특성 모델과 Slow 연속 동특성 모델로 구분하고 한번의 Slow 연속 동특성 모델에 대한 적분에 대하여 Fast 연속 동특성 모델의 적분을 N배 수행하는 방법이며 이것은 상대적으로 적분구간/스텝타임이 크게되어 실시간 모의시험이 가능하도록 한다.(그림 6 참조)

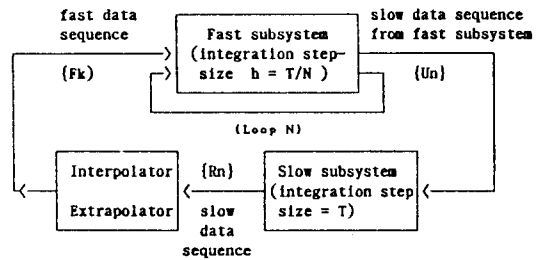


그림 6. 다중 프레임 적분

연속 동특성 모델과 디지털 제어기 모델이 포함된 시뮬레이션 모델의 실시간 모의시험에서는 A/D, D/A 변환에 따른 정량화 오차와 디지털 제어기의 연산 지연 시간 등을 고려해야 하며, 디지털 제어기의 샘플링 시간을 고려한 적분 구간과 디지털 제어기의 연산 소요시간을 포함한 프레임타임의 조정이 필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 적외선 유도무기 체계의 성능 평가를 위한 실시간 모의비행시험 기법을 제시하였다. 모의비행시험 기법은 모의비행시험을 통한 체계 성능 평가 방안, 모의비행시험 장비 구성, 실시간 시뮬레이션 기법 그리고 표적기, 배경잡음 및 전자광학 방해물 등의 환경 구현과 모델링 등이다.

실제 비행 환경과 유사한 적외선 환경의 구현과 모델링분야는 계속 보완 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Emil J. Eichblatt, Jr., Test and Evaluation of the Tactical Missile. Martin Summerfiled:Vol. 119 Progress In Astronautics and Aeronautics, 1989.
- [2] Garnell.P. and East. D.J., Guided Weapon Control Systems:Pergamon press, 1980.
- [3] A.Morin, "A Method for Digital Simulations of Countermeasures Against Infrared Guided Missiles", in proceedings of ADIUS 87, June 1987.
- [4] P.J.Jennison, "The Infrared Target Generator(IRTG)", Vol. 1110 SPIE Imaging Infrared:Scene Simulation, Modelling, and Real Image Tracking, pp.193-207, 1989.