

한국형전술데이터링크(Link-K) 기반 상대항법 시스템의 시뮬레이터 설계 및 성능분석

Simulator Design and Performance Analysis of Link-K Based Relative Navigation System

이 주현¹ · 이 진 혁¹ · 최 현 호² · 최 효 기³ · 박 찬 식⁴ · 이 상 정¹ · 이 승 찬^{5*}

¹충남대학교 전자공학과, ²한국항공우주연구원 위성항법팀, ³한화시스템 위성.데이터링크팀

⁴충북대학교 제로로봇공학과, ⁵국방과학연구소 지휘통제체계단

Ju Hyun Lee¹ · Jin Hyuk Lee¹ · Heon Ho Choi² · Hyogi Choi³ · Chansik Park⁴ · Sang Jeong Lee¹ · Seung Chan Lee^{5*}

¹Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Satellite Navigation Department, Korea Aerospace Research Institute, Deajeon 16984, Korea

³Satellite.Datalink Team, Hanwha Systems, Gyeonggi-do 17121, Korea

⁴Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Chung-cheong-bukdo 28644, Korea

⁵Command Control PMO, Agency for Defense Development, Seoul 05661, Korea

[요 약]

본 논문에서는 한국형 전술데이터링크 기반의 상대항법 운용을 위해 확장 칼만필터 기반의 상대항법 알고리즘을 적용한 항법 시스템을 제안하였다. 한국형 전술데이터링크는 한국군 합동작전 수행능력 향상을 위해 Link-16을 기반으로 설계된 전술데이터 링크로 작전수행 및 표적재원 등의 정보를 다루고 있다. 한국형 전술데이터링크의 통신 채널에서 위치정보를 포함하는 PPLI 메시지와 터미널로부터 산출 가능한 TOA 측정치를 활용하여 항법 백업 시스템으로 운용이 가능하다. 본 논문에서는 제안한 한국형 전술데이터링크 기반의 상대항법 시스템의 운용 가능성 및 오차요소에 따른 성능분석을 수행하였으며, 이를 위해 소프트웨어 기반의 상대항법 시뮬레이션 플랫폼을 설계하여 다양한 환경에서 추정 성능을 분석하였다.

[Abstract]

In this paper, an extend kalman filter based relative navigation algorithm is proposed for Link-K based relative navigation. Link-K is a tactical data link system for joint operation capability upgrade of ROK forces. Link-K is inter-operable with Link-16 and transmit and received information of operations and target. In Link-K communication channel, PPLI message including transmitter position and TOA measurement can be used for relative navigation. Therefore Link-K based relative navigation system can be operated. In this paper, software based simulations were carried out for operational feasibility test and performance verification as error factors of proposed Link-K based relative navigation system.

Key word : Relative navigation, Link-16, Link-K, Time division multiple access, Extended Kalman filter.

<https://doi.org/10.12673/jant.2016.20.6.528>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 17 October 2016 Revised 25 November 2016

Accepted (Publication) 27 December 2016 (30 December 2016)

*Corresponding Author; Seung Chan Lee

Tel: +82-42-825-3991

E-mail: eesjl@cnu.ac.kr

I. 서론

상대항법 시스템은 군 무기체계에 주로 사용되며, 위성항법 시스템의 백업 시스템으로도 활용되고 있다. 상대항법 시스템은 NTR (navigation controller and time reference) 기준 위치 및 시각 유닛을 상대항법 좌표계의 원점으로 하여, 작전을 수행하는 유닛의 위치를 추정한다. 현재 상대항법 시스템 운용을 위해서 Link-16을 활용하고 있다. Link-16은 미국 및 영국, 프랑스, 독일 등 NATO (North Atlantic Treaty Organization) 주요 국가의 군용 시스템으로 운용되고 있다 [1]. Link-16 기반의 상대항법 시스템의 항법 정확도 및 정밀도는 다양한 오차요소에 의해 정의된다. 주요 상대항법 오차요소로는 RTT (round trip time)의 시각동기 오차, 송신 유닛의 위치정확도, DOP (dilution of precision), PPLI (precise participant location and identification) 메시지 할당 방식 등이 있다. Link-16은 항법 시스템을 목적으로 설계된 통신시스템이 아니므로 각 오차요소에 따라 큰 성능변화가 발생하며 따라서 오차요소에 따른 상대항법 성능분석이 요구된다.

본 논문에서 대상으로 하는 한국형 전술데이터링크 Link-K는 Link-16 전술데이터링크를 기반으로 설계되었으며, 한국군 합동작전 수행능력 향상을 목적으로 한다. Link-K는 터미널 간의 메시지 송수신을 통해 트랙 관리, 교전 관리, 전술 자료 공유 등을 수행하며, 미군의 Link-16 과의 연계를 통하여 한 미 전술 상황인식 및 합동작전 능력 향상에 기여하고 있다 [1],[2].

본 논문에서는 Link-K 기반의 상대항법 시스템을 제안하고, 운용 환경에 따른 오차요소를 정리하며, 이에 대해 분석하였다. 상대항법 오차요소 분석을 위하여, 소프트웨어 기반 상대항법 성능평가 플랫폼을 설계하였다. 본 논문에서 설계한 소프트웨어 플랫폼은 각 오차요소를 반영한 Link-K 상대항법 신호생성부, 신호처리 및 상대항법 수행부, 성능평가 및 분석부로 구성되어 있다. Link-K 신호생성부는 시나리오 생성 과정으로 산출한 항체의 위치 및 시각 정보를 활용하여 Link-K에 적용되어 있는 PPLI 메시지를 포함한 TDMA (time division multiple access) 통신 방식 기반의 신호를 생성한다. 또한 Link-K 신호처리 및 상대항법 수행부는 생성한 신호를 이용하여 송신 유닛의 위치 및 시각 정보를 디코딩하고 의사거리 측정치 생성 및 EKF (extended Kalman filter) 기반의 상대항법을 수행한다. 마지막으로 성능평가부는 위치추정 결과 활용하여 위치오차를 산출하는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 각 오차요소에 따른 Link-K 기반 상대항법 성능 분석을 통하여 하드웨어 개발 시 발생할 수 있는 위치추정 성능 열화를 예측하였다. 본 연구에서는 상대항법 운용 시 고려 대상으로 운용 배치 환경, 일반적인 동적 환경, 가상 작전 환경 및 시각 슬롯 할당의 불규칙성에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며, 각 항목들에 대한 위치추정 정확도 및 수렴시간 결과를 도출하였다.

II. Link-K 기반의 상대항법

본 장에서는 Link-K 기반의 상대항법 알고리즘 운용 시 고려해야 할 Link-K 통신 터미널, 확장칼만필터 기반의 수신기 위치 추정 알고리즘, 소프트웨어 기반의 성능분석을 위한 플랫폼 구조를 소개한다.

2-1 Link-K 통신 터미널

Link-K는 네트워크를 통하여 지휘통제 및 무기체계를 유. 무선으로 연결하는 통신 체계이며 미래의 전장 환경에서 중요하게 여겨지는 네트워크 중심전의 핵심 체계의 역할을 하고 있다. Link-K 통신 터미널은 TDMA 기반으로 운용되며, 각 시각슬롯은 전송지터, 동기 부, 데이터 부, 전송지연으로 구성되어 있다. 시각 슬롯 구조는 그림 1과 같다 [3],[4].

Link-K 기반의 상대항법을 운용하기 위해서 위치정보 및 TOA(time Of arrival) 측정치 정보가 요구되며, 송신 개체의 위치 정보는 PPLI 메시지 포맷의 정보를 활용하여 사용할 수 있다. 또한 TOA 측정치의 경우 Link-K 터미널에서 메시지 송수신 과정의 시각정보를 활용하여 산출할 수 있다. 이러한 TOA 측정치를 산출하기 위하여 Link-K 터미널 간 시각동기가 이루어져야 하며, 시각동기를 위하여 RTT 기법을 활용하고 있다. RTT 시각동기 기법 과정은 다음 그림 2와 같으며, RTT 시각동기 기법을 활용할 경우의 오차는 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다 [5].

$$e_i = \frac{(T_s - T_i + t_d)}{2} \tag{1}$$

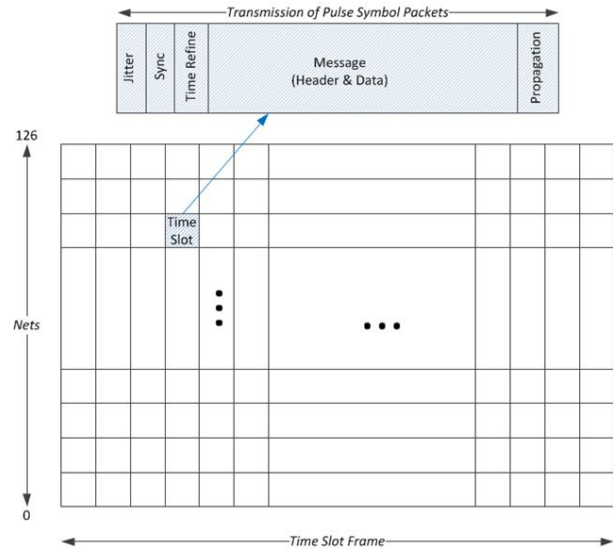


그림 1. Link-K 시각 슬롯 구조
Fig. 1. Link-K time slot structure.

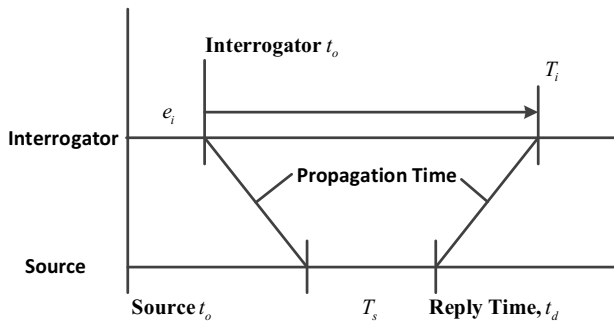


그림 2. RTT 시각동기 기법 및 오차
 Fig. 2. RTT time synchronization method and error.

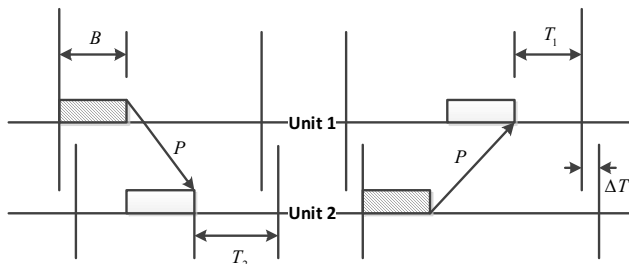


그림 3. TOA 측정치 산출 개념
 Fig. 3. TOA measurement concept.

여기서 e_i 는 수신 개체의 시각 오차이며, T_i 는 시각동기 요청 개체의 메시지 수신 시각, T_s 는 시각 기준 개체의 메시지 수신 시각, t_d 는 표준 응답 지연 시간이다.

또한 Link-K 터미널에 산출하는 TOA 측정치 산출 과정은 그림 3과 같으며, Link-K 터미널의 데이터 송수신 시각 정보를 활용한 TOA 측정치 산출 식은 수식 (2)와 같다.

$$\rho = c \left(k - B - \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \tag{2}$$

수식 (2)에서 ρ 는 개체 1번과 개체 2번간의 Link-K 터미널로부터 산출한 TOA 측정치를 의미하며, k 는 시각 슬롯의 전체 길이 B 는 데이터 전송 길이, T_1 는 1번 개체에서 2번 개체에 메시지 송신 시 2번 개체의 메시지 수신 시각이며, T_2 는 2번 개체에서 1번 개체에 메시지 송신 시 1번 개체의 메시지 수신 시각이다. 수식 (2)와 같이 TOA 측정치를 산출할 경우 개체 간 시각 오차를 보상할 수 있으나 이를 위해서는 개체 간 메시지의 송신 및 수신 과정이 필요하며, 추정 개체가 고 기동 특성을 갖는 경우 수식(2)와 같이 TOA 측정치를 도출하기 어렵다. 이러한 경우 수신된 메시지 시간만을 활용하여 TOA 측정치를 도출하며, 이는 다음 수식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_{2,1} &= c(k - B - T_1) \\ \rho_{1,2} &= c(k - B - T_2) \end{aligned} \tag{3}$$

수식 (3)에서 $\rho_{2,1}$ 은 개체 2에서 개체 1로 메시지가 전달되는 경우 개체 1에서 산출하는 TOA 측정치이며, $\rho_{1,2}$ 는 개체 1에서 개체 2로 메시지가 전달되는 경우 개체 2에서 산출하는 TOA 측정치이다. 본 논문의 운용 개념상 고 기동 환경을 가정하므로 수식 (3)과 같은 TOA 측정치 산출 방식을 가정하였다.

2-2 확장칼만필터 기반의 상대항법 알고리즘

본 절에서는 수신기 위치추정을 위한 확장 칼만 필터 기반 상대항법 알고리즘을 소개하며, 항법 수행을 위한 의사거리 측정치 모델은 다음 수식 (4)와 같다[6].

$$\begin{aligned} \rho &= \bar{\rho} - c b_t + c b_u + w \\ \bar{\rho} &= \sqrt{(x_t - x_u)^2 + (y_t - y_u)^2 + (z_t - z_u)^2} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\bar{\rho}$ 는 수신 개체와 송신개체 간의 실제 거리, b_t 는 송신 개체의 시각 옵셋, b_u 는 수신 개체의 시각 옵셋, c 는 빛의 속도, w 는 의사거리 측정치 잡음, x_t, y_t, z_t 는 NTR을 기준으로 한 ENU (east north up) 좌표계에서의 송신 위치이며 x_u, y_u, z_u 는 동일한 ENU 좌표계에서의 수신 개체 위치이다.

여기서 b_t 의 경우 수신기에서 확보할 수 없으므로 b_t 를 잡음으로 포함하여, 따라서 의사거리 측정치 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho = \sqrt{(x_t - x_u)^2 + (y_t - y_u)^2 + (z_t - z_u)^2} + c b_u + w \tag{5}$$

위 수식을 테일러 급수 전개를 활용하여 선형화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho &\approx \hat{\rho} + c \hat{b}_u + \frac{\hat{x}_u - x_t}{\hat{\rho}} (x_u - \hat{x}_u) + \frac{\hat{y}_u - y_t}{\hat{\rho}} (y_u - \hat{y}_u) \\ &+ \frac{\hat{z}_u - z_t}{\hat{\rho}} (z_u - \hat{z}_u) + (c \hat{b}_u - c b_u) + w \\ \hat{\rho} &= \sqrt{(\hat{x}_t - \hat{x}_u)^2 + (\hat{y}_t - \hat{y}_u)^2 + (\hat{z}_t - \hat{z}_u)^2} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\hat{\rho}$ 는 송신 유닛의 위치와 수신유닛이 추정된 위치 간의 실제거리, $\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{b}_u$ 는 선형화 기준점으로 정의한 수신기 추정 위치 및 수신개체의 시각 옵셋이다. 이를 행렬 형태로 변환하면 다음 수식과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta \rho = \rho - (\hat{\rho} + c \hat{b}_u) = \mathbf{h} \mathbf{x}^T + \delta b_u + w \tag{7}$$

수식 (7)에서 \mathbf{h} 는 $\begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_u - x_t}{\hat{\rho}} & \frac{\hat{y}_u - y_t}{\hat{\rho}} & \frac{\hat{z}_u - z_t}{\hat{\rho}} \end{bmatrix}$ 이며, \mathbf{x} 는

그림 4에서 X_{k-1}, X_k, X_k^- 는 모두 수식 (9)에서 정의한 모델의 상태 벡터이며 각각 $k-1$ 시점의 추정결과, k 시점의 추정결과, k 시점의 예측 결과를 의미한다. 또한 R_M 은 플랜트 의사 거리 측정치 오차 분산을 의미하고, z 는 Link-K 터미널로부터 확보한 TOA 측정치, z_p 는 시각 업데이트로부터 산출한 수신 개체 위치와 송신 개체 위치간의 예측 거리이다. z_p 는 다음 수식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$z_p = \rho^- + b_u^- \tag{14}$$

$$\rho^- = \sqrt{(x_t - x_u^-)^2 + (y_t - y_u^-)^2 + (z_t - z_u^-)^2}$$

수식 (14)에서 $x_u^-, y_u^-, z_u^-, b_u^-$ 는 시각 업데이트로부터 산출한 수신 개체의 위치 및 시각 오프셋이다.

III. Link-K 기반 상대항법 시스템의 시뮬레이션 플랫폼 설계 및 성능분석

본 장에서는 Link-K 기반의 상대항법 시스템에 대한 성능 분석을 위하여 소프트웨어 기반의 시뮬레이션 플랫폼을 설계하였으며, 설계한 플랫폼을 활용하여 다양한 환경에서의 시뮬레이션을 수행하고 환경에 따른 결과를 도출하였다.

3-1 Link-K 기반 상대항법 시스템 시뮬레이션 플랫폼

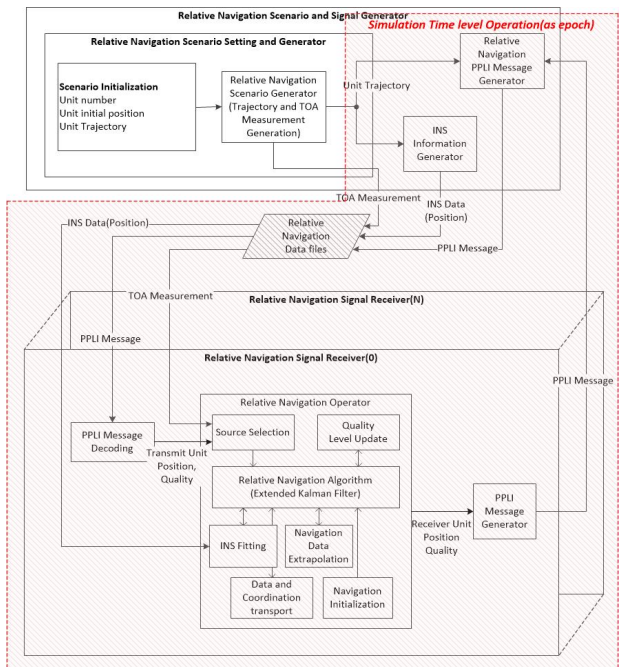


그림 5. Link-K 상대항법 시뮬레이션 플랫폼 구조
 Fig. 5. Link-K based relative navigation simulation platform structure.

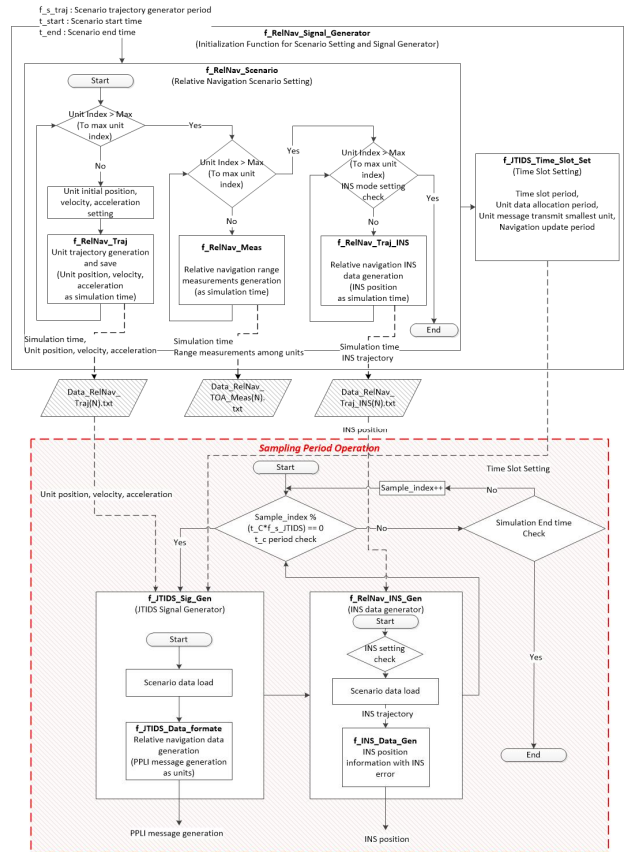


그림 6. 상대항법 시나리오 및 신호 생성부 구조
 Fig. 6. Scenario and signal generator of relative navigation simulation platform.

Link-K 기반 상대항법 시뮬레이션 플랫폼은 그림 5와 같다. 본 논문에서 설계한 시뮬레이션 플랫폼은 소프트웨어 기반으로 설계하였으며, 크게 시나리오 및 신호 생성부와 상대항법 신호 수신 및 항법 수행부로 구성되어 있다.

상대항법 시나리오 및 신호 생성부는 사용자가 설정한 개체 수, 각 개체의 위치, 개체의 동적 특성, 시각 슬롯 정보 등 환경 정보를 입력받아 각 개체의 위치, 속도, 가속도 및 TOA 측정치 정보를 생성한다. 또한 위치정보를 전달하기 위하여 생성한 각 개체의 궤적 정보를 PPLI 메시지로 변환한다. 본 논문에서는 운용 대상 개체를 항공기로 설정하였으며, 이에 따라 Air PPLI(J2.2) 메시지 포맷을 활용하였다. 본 논문에서 설계한 상대항법 시나리오 및 신호 생성부의 구조는 그림 6과 같다.

상대항법 시나리오의 경우 전체 시뮬레이션 시간에 대해 초기에 한번만 계산하고 데이터를 저장하고 불러오는 구조로 설계하였으며, 메시지 생성의 경우 시뮬레이션 시간에 따라 생성하도록 구성하였다.

상대항법 신호 수신 및 항법 수행부 구조는 그림 7과 같다. 상대항법 신호 수신부는 PPLI 메시지 및 TOA 측정치 데이터를 시나리오 생성 및 신호 생성부 결과로부터 불러오고 정해진 시각 슬롯에 따라 각 개체의 항법 수행 여부를 확인한다. 해당 개

체가 항법 수행 가능 개체인 경우 본 논문에서 구성한 확장칼만 필터 기반 상대항법 알고리즘을 활용하여 항법 수행하고 추정된 위치 정보를 활용하여 PPLI 메시지로 생성하도록 설계하였다. 또한 해당 항법 알고리즘은 NTR을 원점으로 한 상대좌표계를 기준으로 하였으며 이에 따라 PPLI 메시지 디코딩 및 인코딩 과정을 포함하여 설계하였다.

본 논문에서 설계한 소프트웨어 기반 상대항법 시뮬레이션 플랫폼을 활용하여 설정한 환경에 따른 시뮬레이션 수행 및 성능분석을 수행하였다.

3-2 시뮬레이션 환경 및 성능분석 결과

본 논문에서 설계한 시뮬레이션 플랫폼을 활용하여 상대항법 오차 요소에 대한 성능분석을 진행하였으며, 시뮬레이션 대상으로 시스템 운용 배치, PPLI 확보주기, 시각 슬롯 불규칙성 및 동적 특성을 선정하여 테스트를 수행하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션 수행을 위해 TOA 측정치 오차의 경우 1σ 10 m, 시각 동기 오차 1σ 25 ns로 가정하였다[5]. 또한 설계 파라미터인 확장칼만필터 파라미터 R_M 및 Q 에 대하여 표 1과 같이 설정하였다.

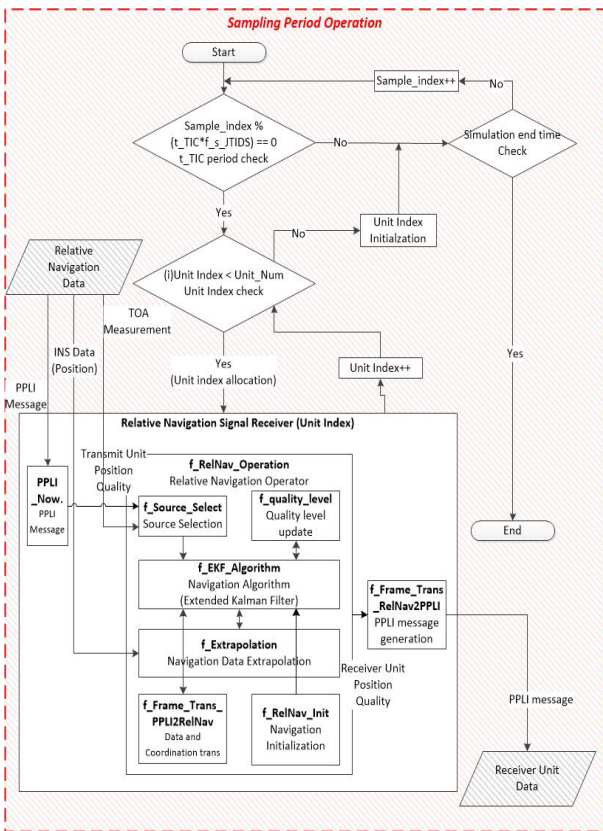


그림 7. 상대항법 신호 수신 및 항법부 구조
Fig. 7. Signal receiver and navigation part of relative navigation simulation platform.

표 1. 상대항법 시뮬레이션 환경

Table 1. Simulation environment of relative navigation.

Types	Parameter	Setting
EKF Navigation Algorithm Setting	R_M	500 m ²
	Q	$\sigma_{cb}^2 = 1.8 \times 10^{-3}$
		$\sigma_{cb'}^2 = 1.0 \times 10^{-7}$
$\sigma_{x''}^2, \sigma_{y''}^2, \sigma_{z''}^2 = 1.0 \times 10^{-6}$		
Measurement Setting	RTT Time Sync Error 1σ	25 ns
	TOA Measurement Error 1σ	10 m

1) 상대항법 운용 배치에 따른 성능분석

상대항법 운용 배치에 따른 성능분석 환경은 표 2와 같다. 상대항법 운용 시 NTR 및 PR (position reference) 개체의 배치가 상대항법 성능에 큰 영향을 미치며 따라서 배치 종류에 따른 PDOP 분석 및 각 배치의 가장 높은 PDOP (position-DOP)를 가지는 위치를 선정하여 상대항법 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 고려한 Link-K 통신 채널의 운용 유효 반경은 250 km 이며, 이에 따라 운용 가능 반경을 250 km 이내 중 최대 PDOP를 갖는 위치를 시뮬레이션 종류별 대상으로 하였다. 개체 배치 설정 환경은 그림 8과 같으며, 배치에 따른 고도 8 km 대상 위치의 PDOP 수치는 그림 9와 같다.

표 2. 상대항법 운용 배치에 따른 시뮬레이션 환경

Table 2. Simulation environment of relative navigation as unit arrangement.

Types	Parameter	Setting
Case 1	Arrangement	5 PR, TPR Unit, (PR, NTR)
	Estimate Unit	250 km radius, + Arrangement (x,y,z) 1unit
Case 2	Arrangement	9 PR, TPR Unit, (PR, NTR)
	Estimate Unit	250 km radius, + Arrangement (x,y,z) 1unit
Case 3	Arrangement	5 PR, TPR Unit, (PR, NTR)
	Estimate Unit	125 km radius, + Arrangement (x,y,z) 1unit
Case 4	Arrangement	9 PR, TPR Unit, (PR, NTR)
	Estimate Unit	250 km radius, ○Arrangement (x,y,z) 1unit
Trajectory Unit		Static
Time Slot Setting	transmit period	0.1 s
	Total 1 cycle period	1.0 s
EKF Setting	Navigation update period T	0.1 s

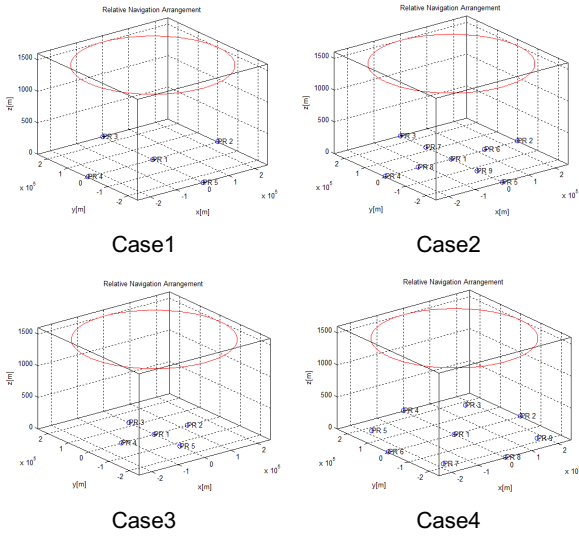


그림 8. 상대항법 운용 배치에 따른 시뮬레이션 환경
 Fig. 8. Relative navigation simulation environment as unit arrangement.

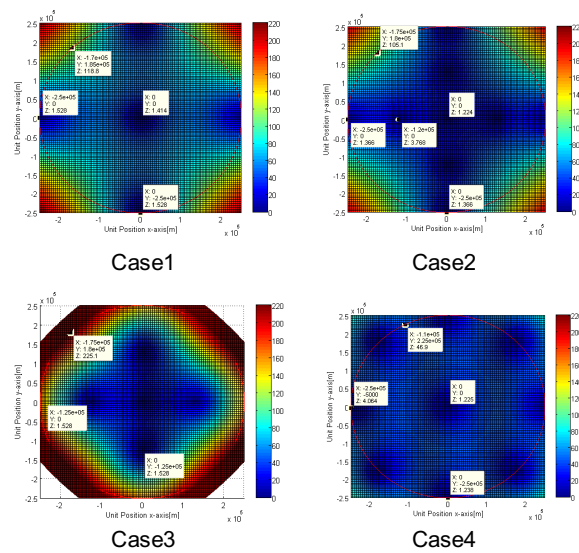


그림 9. 상대항법 운용 배치에 따른 PDOP
 Fig. 9. PDOP as relative navigation unit arrangement.

상대항법 운용 배치에 따른 시뮬레이션 수행 결과는 그림 10 과 같다. 시뮬레이션 수행 결과 전체 영역에 대하여 낮은 PDOP 을 확보하기 위해서는 다수의 개체를 넓은 영역에 고루 분포해 야 한다. 또한 PR 또는 NTR 개체 근처에 있을수록 낮은 PDOP 의 확보가 가능하다. 그림 10을 통하여 추정 위치의 PDOP과 위 치추정 정확도간의 관계를 확인할 수 있으며, 상대적으로 낮은 PDOP이 확보 가능한 Case4에서 가장 낮은 RMSE(Root Mean Square Error)를 보였으며, PDOP이 높아질수록 기하급수적으 로 위치추정 정확도가 열화 되는 결과를 보였다.

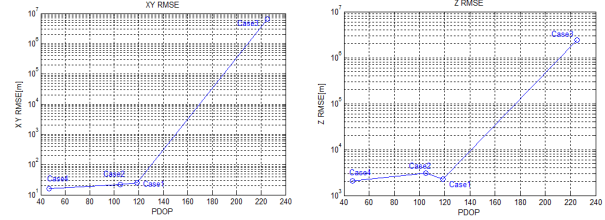


그림 10. 상대항법 운용 배치에 따른 RMSE
 Fig. 10. RMSE as relative navigation unit arrangement.

2) 동적 환경에서 PPLI 메시지 확보 주기에 따른 성능 분석

동적 환경에서 PPLI 메시지 확보 주기에 따른 시뮬레이션 환경은 표 3과 같다. 해당 시뮬레이션 수행을 위해 50 km 반경 의 원형 궤적을 구성하였으며, 개체 간 배치 및 추정 개체의 궤 적은 그림 11과 같다. 해당 시뮬레이션 수행 시 PPLI 메시지 확 보 주기를 0.1 초부터 10.0 초까지 가변하며 테스트를 진행하였 다.

표 3. 동적 환경 PPLI 메시지 확보 주기 따른 시뮬레이션 환경
 Table 3. Simulation environment of relative navigation as PPLI message period in dynamic unit.

Types	Parameter	Setting
Unit Arrangement Setting	Unit 1 (PR 1)	$x=0.0, y=0.0, z=0.0$ km
	Unit 2 (PR 2)	$x=-58.0, y=-83.2, z=0.6$ km
	Unit 3 (PR 3)	$x=-26.0, y=-244.0, z=0.7$ km
	Unit 4 (PR 4)	$x=164.0, y=0.0, z=1.5$ km
	Unit 5 (Starting Position)	(Circular : Center position) $x=-80.0, y=-20.0, z=8.0$ km Trajectory : Circular(50 km radius) velocity : 34 m/s (0.1 mach)
	Unit Number	5
Time Slot Setting	Unit transmit period	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 2.0 s
	Total 1 cycle period	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.0, 10.0 s
EKF Setting	Navigation update period T	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 2.0 s

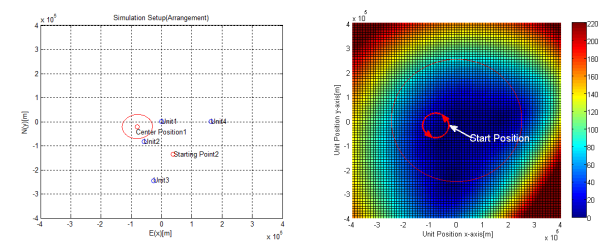


그림 11. 동적 환경 PPLI 메시지 확보에 따른 시뮬레이션 환경
 Fig. 11. Simulation environment as PPLI message period in dynamic unit.

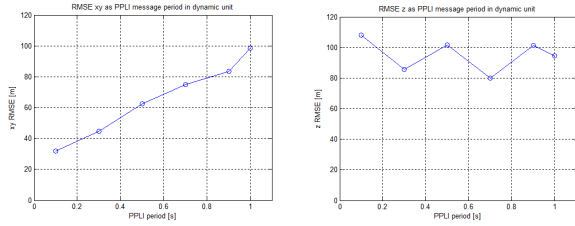


그림 12. 동적 환경 PPLI 메시지 확보에 따른 RMSE
 Fig. 12. RMSE as PPLI message period in dynamic unit.

동적 환경에서 PPLI 메시지 확보에 따른 위치추정 정확도 산출 결과는 그림 12와 같다. 시뮬레이션 수행 결과 PPLI 메시지가 더 자주 확보 가능할수록 상대적으로 낮은 평면 오차를 보였다. 또한 VDOP (vertical-DOP)에 비해 HDOP (horizontal-DOP)이 낮은 배치를 대상으로 시뮬레이션을 진행하였고, 이에 따라 고도 오차의 경우 PPLI 메시지가 더 자주 확보 되더라도 추정성능에 큰 차이가 없었다.

3) 동적 환경에서 운용 개체의 속도에 따른 성능분석

동적 환경에서 운용 개체의 속도에 따른 성능 분석 환경은 표 4와 같다. 시뮬레이션 수행 배치 및 궤적 환경은 그림 11과 동일하며, 속력을 0.1 마하에서 1.0 마하까지 가변하며 시뮬레이션을 진행하였다.

표 4. 동적 환경 속도 따른 시뮬레이션 환경

Table 4. Simulation environment of relative navigation as velocity of dynamic unit.

Types	Parameter	Setting
Unit Arrangement Setting	Unit 1 (PR 1)	x= 0.0, y= 0.0, z= 0.0 km
	Unit 2 (PR 2)	x= -58.0, y= -83.2, z= 0.6 km
	Unit 3 (PR 3)	x= -26.0, y= -244.0, z= 0.7 km
	Unit 4 (PR 4)	x= 164.0, y= 0.0, z= 1.5 km
	Unit 5 (Starting Position)	(Circular : Center position) x= -80.0, y= -20.0, z= 8.0 km Trajectory : Circular(50 km radius) velocity : 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 Mach
	Unit Number	5
Time Slot Setting	Unit transmit period	0.1 s
	Total 1 cycle period	0.5 s
EKF Setting	Navigation update period T	0.1 s

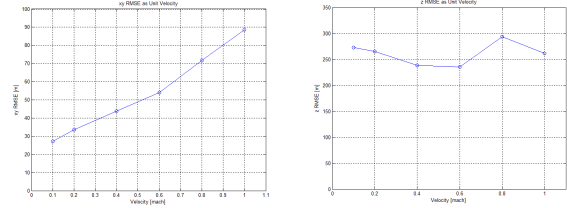


그림 13. 동적 환경 속도에 따른 RMSE 및 수렴시간
 Fig. 13. RMSE and convergence time as velocity of dynamic unit.

동적 환경에서 추정 개체 속도에 따른 시뮬레이션 수행 결과는 그림 13과 같다. 그림 13의 왼쪽 그림은 개체 속도에 따른 평면 위치추정 결과 RMSE 이며, 오른쪽 그림은 개체 속도에 따른 수렴 시간이다. 시뮬레이션 수행 결과 개체의 속도가 증가할수록 추정 성능이 열화되며, 수렴시간의 경우 속도가 증가하더라도 상대적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 해당 시뮬레이션을 통해 고 기동 환경에서 위치추정 정확도의 성능 열화가 발생함을 확인하였다.

4) 가상 운용 환경에서 시각 슬롯 불균형성에 따른 성능분석

표 5. 가상 운용 환경 시각 슬롯 불균형성에 따른 시뮬레이션 환경

Table 5. Simulation environment of relative navigation as time slot imbalance.

Types	Parameter	Setting
Unit Arrangement Setting	Unit 1 (PR 1)	x= 0.0, y= 0.0, z= 0.0 km
	Unit 2 (Starting Position)	Initial Pos : x= -80.0, y= -20.0, z= 0.0 km Trajectory : Fig. 14
	Unit 3 (PR 2)	x= -58.0, y= -83.2, z= 0.6 km
	Unit 4 (PR 3)	x= -26.0, y= -244.0, z= 0.7 km
	Unit 5 (PR 4)	x= 164.0, y= 0.0, z= 1.5 km
	Unit 6~10 (PR 5-9)	Arrangement : Fig. 14
	Unit Number	10
Time Slot Setting	Unit transmit period	※ In imbalance simulation case, units were allocated in the front part of total one cycle 0.1 s : imbalance (Maximum PPLI loss time : 11.0 s)
		0.3 s : imbalance (Maximum PPLI loss time : 9.0 s)
		0.6 s : imbalance (Maximum PPLI loss time : 6.0 s)
		1.2 s : balance
	Total 1 cycle period	12.0 s
EKF Setting	Navigation update period T	0.1, 0.3, 0.6, 1.2 s

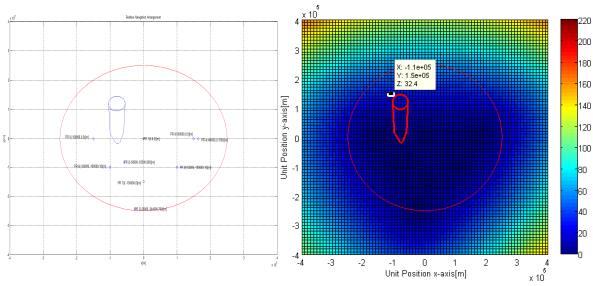


그림 14. 가상 운용 환경 시각 슬롯 불균형성에 따른 시뮬레이션 환경
Fig. 14. Simulation environment as time slot imbalance.

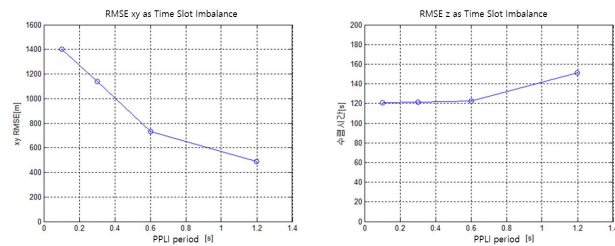


그림 15. 가상 운용 환경 시각 슬롯 불균형에 따른 RMSE 및 수렴 시간
Fig. 15. RMSE and convergence time as time slot imbalance.

가상 운용 환경에서 시각 슬롯 불균형성에 따른 시뮬레이션 환경은 표 5와 같다. 궤적은 추정 개체가 초기 고도 0 km에서 8 km로 상승하는 궤적을 생성하였으며, 개체는 작전 지역에서 선회 운동을 한 후 다시 초기 위치로 돌아오는 환경을 가정하였다. 가상 운용 환경에 대한 추정 개체의 궤적 및 PR, NTR 배치 환경은 그림 14와 같다. 시각 슬롯 불균형성에 따른 시뮬레이션 수행을 위해 시각 슬롯 전체 주기를 12 초로 고정하고 한 주기 시작 시점 근처에 10 개의 개체가 순서대로 메시지를 방송하는 형태로 구성하였으며, 0.1 초부터 1.2 초 까지 가변하여 시뮬레이션을 수행하였다. 개체 신호 전송 최소 간격이 0.1 초인 경우 시각 슬롯내 개체의 불균등성이 가장 심하며, 1.2 초인 경우는 시각 슬롯내 모든 개체가 균등한 시간 간격으로 할당된 상태를 의미한다.

시뮬레이션 수행을 통해 그림 15의 결과를 도출하였다. 그림 15의 왼쪽은 시각 슬롯 불균등성에 따른 평면 RMSE이며, 오른쪽 그림은 시각 슬롯 불균등성에 따른 수렴 시간이다. 시뮬레이션 수행 결과 시각 슬롯 불균등성이 높아질수록, 위치추정 성능이 열화됨을 확인할 수 있었으나, 시각 슬롯 불균등성과 수렴 시간과는 큰 연관관계가 없음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Link-K 기반의 상대항법 시스템을 제안하고

제안한 상대항법 시스템에 대한 운용 가능성 및 운용 고려사항에 대해 판단하기 위하여 소프트웨어 기반의 성능분석을 수행하였다.

Link-K는 미국의 Link-16과 연동 가능한 한국형 전술데이터 링크이며, PPLI 메시지 포맷을 통해 개체 간 위치정보를 전송할 수 있고, 통신 터미널로부터 TOA 측정치를 생성할 수 있다. 따라서 주요 항법 시스템인 GNSS(global navigation satellite system)의 운용이 어려운 채밍 및 간섭 신호 환경 하에서 백업 시스템으로 Link-K 채널을 활용할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 Link-K 통신 터미널에 대해 서술하였으며, 위치정보 전송위한 PPLI 메시지 및 TOA 측정치 산출 방식에 대하여 언급하였다. 그리고 TDMA 통신 채널에서 운용하기 용이한 확장할 만필터 기반의 상대항법 알고리즘을 활용한 항법 시스템을 제안하였다.

제안한 Link-K 상대항법 시스템의 운용 환경 및 오차 요소에 따른 성능 분석을 수행하기 위해서 소프트웨어 기반의 시뮬레이션 플랫폼을 설계하였다. 본 논문에서 설계한 소프트웨어 플랫폼은 시나리오 및 신호 생성부와 상대항법 신호 수신 및 항법 수행부로 구성되어 있다.

시뮬레이션 대상으로 상대항법 운용 배치, PPLI 확보주기, 동적 특성, 시각 슬롯 불균형성을 선정하였으며 이에 따라 시뮬레이션 환경을 설정하여 위치추정 정확도 및 수렴 시간을 산출하였다. 시뮬레이션 수행 결과 낮은 PDOP이 확보 가능한 경우, PPLI 메시지가 자주 확보 될수록, 추정 개체의 속도가 낮을수록, 시각 슬롯에 개체가 균등하게 할당될수록 상대적으로 우수한 위치추정 정확도를 보였으며, 수렴 속도의 경우 각 오차 요소에 큰 영향을 받지 않음을 확인하였다. 또한 수평 위치추정 오차의 경우 고려한 오차에 따른 영향이 나타나지만 수직 위치추정 오차의 고려한 오차에 따른 영향이 미비하였다.

본 논문을 통해 Link-K 기반의 상대항법 시스템의 구현 시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대되며, Link-K 통신 채널 뿐만 아니라 항법 백업시스템 요구되는 기타 통신 채널에서 활용 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 한화탈레스(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

[1] D. Akers, J. Casey, M. Ruiz, C. Sivertson, D. Solorzano, and M. Schepps, Understanding voice and data link networking ,Northrop Grumman, 9326 Spectrum Center Boulevard San Diego, Dec. 2013.

- [2] I. Koromilas, C. Robertson, and F. Kragh, "Performance analysis of the LINK-16/JTIDS waveform with concatenated coding in both AWGN and pulsed-noise Interference," in *The 2010 Military Communications Conference*, San Jose: CA, pp.2074-2081, Oct. 2010.
- [3] Y. B. Kim, "A study on the estimation of required communication capacity for Link-16 based tactical networks", *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 11, No. 1, pp.105~111, Feb. 2012.
- [4] S. M. Baek, S. W. Park, and Y. U. Chung, "Performance evaluation of non-coherent detection based cyclic code shift keying," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 47, No. 6, pp.42-48, Jan. 2010,
- [5] M. Kayton, and W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, 2nd ed. New York, NY: Wiley-Interscience, pp. 283-312, 1997.
- [6] W. R. Fried, "Principles and simulation of JTIDS relative navigation," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 14, No. 1, pp.76-84, Jan. 1978.
- [7] B. Anderson, J. B. Moore, *Optimal filtering*, Englewood Cliffs: EC, Prentice-Hall Inc., pp.90-127, 1979.



이 주 현 (Ju Hyun Lee)

2011년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학부 (공학사)
 2011년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 전자공학과 석박통합과정
 ※ 관심분야 : GNSS, 실내항법, Anti-Jamming



이 진 혁 (Jin Hyuk Lee)

2015년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학부 (공학사)
 2015년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 ※ 관심분야 : GNSS receiver, Relative Navigation



최 현 호 (Heon Ho Choi)

2008년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학사)
 2010년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학석사)
 2015년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 2015년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원
 ※ 관심분야 : Anti-jamming, GNSS applications



최 효 기 (Hyogi Choi)

2001년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학(공학사)
 2003년 2월 : 숭실대학교 통신 및 신호처리(공학석사)
 2002년 11월 ~ 현재 : 한화시스템 데이터링크 전문연구원
 ※ 관심분야 : 국방전술데이터링크 시스템, 모뎀 및 채널코딩.



박 찬 식 (Chansik Park)

1984년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
 1986년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)
 1997년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)
 1997년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 교수
 ※ 관심분야 : GNSS, SDR, AJ, ITS, WSN



이 상 정 (Sang Jeong Lee)

1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1987년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)
1988년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전기정보통신공학부 교수
2010년 11월 ~ 현재 : 국방위성항법특화 연구센터 센터장
※ 관심분야 : 강인제어, GNSS, 항법 및 산업제어



이 승 찬 (Seung Chan Lee)

2005년 2월 : 연세대학교 컴퓨터산업공학전공 (공학사)
2007년 2월 : 연세대학교 컴퓨터과학과 (공학석사)
2007년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
※ 관심분야 : Tactical Data Link Protocol, Relative Navigation