

베지에 곡선을 이용한 항공기 위치 예측 및 음영 지역 진입 제어 방법

정 재 순*, 노 병 희^o

Aircraft Position Prediction and Shadow Zone Penetration Control Using Bezier Curve

Jae-soon Jeong*, Byeong-hee Roh^o

요 약

현 공중노드의 무선네트워크 환경은 지상중계소 중심으로 구축되어 있는 반면에 한반도 환경여건은 전국토의 약 70% 정도가 산악지역으로 이루어져 있어 전파 음영지역(shadow zone)이 다수 존재하는 실정이다. 항공기가 중저고도 임무 수행 도중 음영지역에 진입되어 통신 링크가 단절되지 않도록 효율적인 대응책 마련이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 Bezier Curve를 이용한 항공기 위치예측 및 음영지역 진입제어 방법을 제안한다. 제안된 방법은 항공기 이동경로 예측이 가능하여 음영지역 진입여부를 사전에 진단할 수 있으며 음영지역 진입 이전에 상황을 경고 전파하고 위험지역 이탈조치를 취하는 등 효율적인 제어가 가능하였다. 모의실험결과 제안된 방법은 항공기 위치예측 및 음영지역 진단이 용이하고 위험지역 진입 이전에 이탈조치 함으로써 항공작전 시 끊김 없는(seamless) 통신 지원이 가능한 것으로 나타나고 있다.

Key Words : Airborne Network, Bezier Curve, Position Prediction, Shadow Zone, Received Signal Strength Indicator, System Tool Kit

ABSTRACT

Currently, the wireless network environment of air node is constructed mainly of ground relay station. However, as the Korean Peninsula is composed of 70% mountainous region, there are multiple shadow zones. This is calling for effective measures to prevent aircraft from losing communication link during low-mid altitude missions. In this article we propose the utilization of Bezier Curve for estimation of aircraft flight path and control method for entering shadow zone. This method successfully estimated aircraft track, and analyzed the existence, disseminated the warning, and took measures to avoid the shadow zone before entering. This article, suggested after simulated experiments, proves that the method enables seamless communication during air operations.

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다. (NIPA-2014-(H0301-14-1011))

• First Author : Ajou University, Department of NCW, Graduate School, jjss@ajou.ac.kr, 정희원

^o Corresponding Author : Ajou University, Department of Computer Engineering, Graduate School, bhroh@ajou.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2014-09-338, Received September 1, 2014; Revised October 6, 2014; Accepted October 6, 2014

I. 서 론

네트워크 중심전 (Network-Centric Warfare, NCW)는 전투 요소들을 네트워크로 연결하여 전장상황을 공유하고 통합적이고 효율적으로 정보 우위를 달성하여, 전투력 시너지(synergy)를 창출하고 전승을 보장하는 것을 목표로 하는 개념이다^[1].

NCW 환경에서 공중 작전의 경우는 공중 네트워크를 통하여 항공기의 중단 없는 전술 정보 교환 능력이 무엇보다도 중요하다. 우리나라의 항공 작전은 항공기들이 지상 중계소를 중심으로 한 정보 교환을 기반으로 하고 있으며, 이를 위하여는 항공기와 중계소간에 가시거리(Line of Sight, LOS)가 확보되어야 하고 작전 반경까지 원활한 원거리 링크를 유지할 수 있어야 한다. 그러나, 한반도의 전장 환경은 전 국토의 70%가 산악지형으로 이루어져 있어 전파가 차폐되는 음영 지역 (shadow zone)이 다수 존재하는 열악한 환경으로서, 항공 작전 수행에 장애가 되는 상황이 발생되고 있다^[2].

우리나라 공군에서는 공중작전 수행 시 전파가 차폐되는 음영 지역을 진단하는 프로그램 도구인 RCDS (Radar Coverage Display System)를 보유하고 있어 주변 환경 분석 및 음영지역에 대한 DB를 축적하고 있으나, 항공기와 연동되어 있지 않다^[3].

단말의 무선 수신 신호 강도(Received Signal Strength Indicator, RSSI)를 측정하여 위치를 예측하는 방법^[4]을 기반으로 전술 환경에서 음영 지역에 예측하여 네트워크를 제어하는 다양한 연구들이 수행되었다. 군사작전 특성상 전술 단말의 네트워크 가입, 이탈이 빈번한 특성을 고려하여, 단말간 RSSI 측정을 통하여 통신 불가 상황을 예측하고 네트워크 탈퇴조치를 취하는 연구가 수행되었다^[5]. 그리고, 지상 전술 단말의 그룹 이동성을 기반으로 그룹 내 노드들이 음영 지역에 진입하는 것을 예측하여 효율적인 라우팅 경로를 제어하는 방법이 연구되었으며^[6], 애드혹 기반의 셀룰러 망 환경에서 지상 이동체에 AR (auto-regressive) 모델을 적용한 위치 예측을 통한 제어 방법이 제안 되었다^[7]. 그러나, 이들 연구들은 주로 지상 작전 중심으로 이루어져 공중 작전 환경에 적용하는 데는 무리가 있다. 즉, 이들 연구들은 지상의 2차원 환경에서 이루어진 것으로, 지상 중계소를 중심으로 운영되는 공중 네트워크의 3차원 환경에서 임무를 수행하는 공군의 환경에 적용에는 한계를 갖는다.

공중 네트워크에 대해서도 위치신호를 기반으로 연결 단절을 예측하여 링크를 제어하는 연구가 수행되

었다. UAV 네트워크 환경에 적합한 위치기반 라우팅 프로토콜의 성능분석에 대한 연구^[8]와 항공기간 RSSI 신호를 이용하여 통신 링크 단절을 예상하여, 이를 극복가능 하도록 라우팅 경로를 재 설정하여 끊김 없는 통신을 제공하기 위한 연구^[9]가 수행되었으나, 이들은 음영지역 전파 차폐로 인한 연결 단절은 고려하지 않았다.

본 논문에서는 우리나라 환경과 공군의 통신 운영 방식을 고려하여, 항공기가 음영지역에 진입하게 되는 상황을 예측하여, 이를 제어함으로써 정보 전달의 끊김이 발생하지 않도록 하는 방법을 제안한다. 제안 방법에서는 베지에 곡선(Bezier Curve)^[10]를 사용하여 항공기의 위치 추적 및 예측을 수행하여 항공기가 차폐 위험지역 및 음영지역에 진입되는지 여부를 진단하고 진입이 예상될 경우 미리 위험을 경고하고 안전 지역으로 이탈토록 조치하는 절차를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 본 논문의 배경이 되는 우리나라 공군의 항공기간 통신 구조와 베지에 곡선의 개요에 대하여 기술한다. 제3장에서는 베지에 곡선을 사용하여 항공기의 위치를 예측하는 방법과 이를 통하여 항공기가 음영지역에 진입하지 못하도록 제어하는 본 논문의 제안 방법을 설명한다. 그리고, 제4장에서는 실험결과를 보이고, 제5장에서는 결론을 맺는다.

II. 배 경

2.1 우리나라 공군의 항공기간 통신 운영 환경

우리나라 공군에서 운영되는 항공기간 통신 운영 환경은 그림 1과 같다. 즉, 항공기가 이륙하면 항공기간 직접 통신이 아닌 지상 중계소를 경유하여 네트워크가 구성되어 통신이 이루어지게 된다. 이를 위하여는 항공기와 중계소간에 가시거리가 확보되어야 하고 작전 반경까지 원활한 원거리 링크를 유지할 수 있어야 한다. 그러나, 전 국토의 70%가 산악지형으로 이루어진 우리나라의 경우, 중계소와 항공기간에 높은 산이 존재하여 중계소와 항공기간에 가시거리가 확보되지 못하는 상황이 발생한다. 이 경우, 중계소와 산의 반대편에 위치하는 항공기간에 전파가 차단되어 이 항공기는 중계소와 통신이 불가하게 되어 공중 네트워크에서 단절되는 상황이 발생하게 되고, 이는 작전의 운용에 있어서 치명적인 결함이 될 수 있다.

무선전술데이터 네트워크에 대해 소형 UAV (Unmanned Aerial vehicle)를 이용하여 연결성 약화 지역 탐색기법이 연구되긴 하였으나 공군에서는 실제

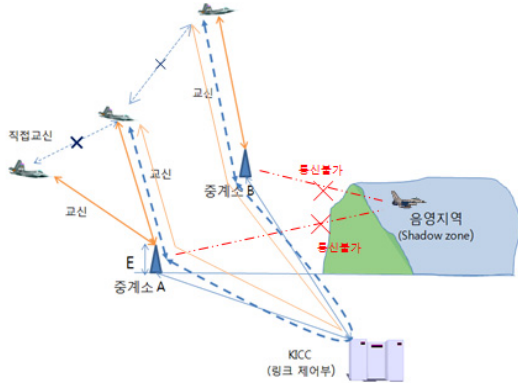


그림 1. 공중 네트워크 구성 및 운영 현황
Fig. 1. Airborne network configuration and operation status

로 이 기법을 적용하여 수행한 실적은 없으나^[11], 앞서 언급한 바와 같이 공군에는 산악지역으로 인한 전파 차폐지역 즉, 음영지역을 사전 분석할 수 있는 RCDS를 보유하고 있다. 그림 2는 임의 지점에서의 저고도 통신 소통 범위도 견본을 예시한 것이다. 여기서 원형태의 범위에서 색깔이 칠해져 있는 곳이 통신이 가능한 영역이고 나머지 부분은 산악지형으로 인해 통신이 불가능한 음영지역을 나타내는 것이다. 이 분석 틀을 이용하여 레이더 기지 및 통신 중계소를 중심으로 주변 지형분석 및 음영지역에 관한 데이터베이스를 구축하고 있다. 그러나 항공기와 연동되는 시스템은 보유하고 있지 않아 항공기가 음영지역으로 진입할 경우 통신두절이 유발되는 문제점을 안고 있다.

2.2 베지에 곡선 (Bezier Curve)[10]

베지에 곡선은 프랑스 수학자 Hermite가 개발한 에르미트 곡선 (Hermite Curve) ^[12]에서 진화되었다. 에르미트 곡선은 시작점 (P_0)과 끝점 (P_1), 그리고 이

두 점에서의 접선 기울기 벡터 (P'_0, P'_1)를 이용하여 곡선을 정의하는 것이다. 반면에, 베지에 곡선은 4개의 조절점들, 즉, $P_0(x_0, y_0, z_0), P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$ 을 이용하여 곡선을 예측한다. 이를 4점 베지에 곡선이라 하며 곡선은 처음 점과 마지막 점을 통과한다. 베지에 곡선의 일반적인 식은 다음과 같은 3차원 곡선의 일반적인 대수 공식으로 주어진다.

$$P(u) = (1-u)^3 P_0 + 3u(1-u)^2 P_1 + 3u^2(1-u) P_2 + u^3 P_3, \quad u \in [0,1] \quad (1)$$

이를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$P(u) = a_3 u^3 + a_2 u^2 + a_1 u + a_0 = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로 부터 $u=0, u=1$ 에서의 $P(t)$ 와 $P'(t)$ 값을 산출하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(0) &= P_0 = a_0 \\ P(1) &= P_3 = a_3 + a_2 + a_1 + a_0 \\ P'(0) &= 3P_1 - 3P_2 = a_1 \\ P'(1) &= 3P_3 - 3P_2 = 3a_3 + 2a_2 + a_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 a_3, a_2, a_1, a_0 는 식 (3)로 부터 구해지는 상수이고, 이를 (1)과 (2)에 적용하면 다음과 같은 형렬 형태의 식을 구하게 된다^[13].

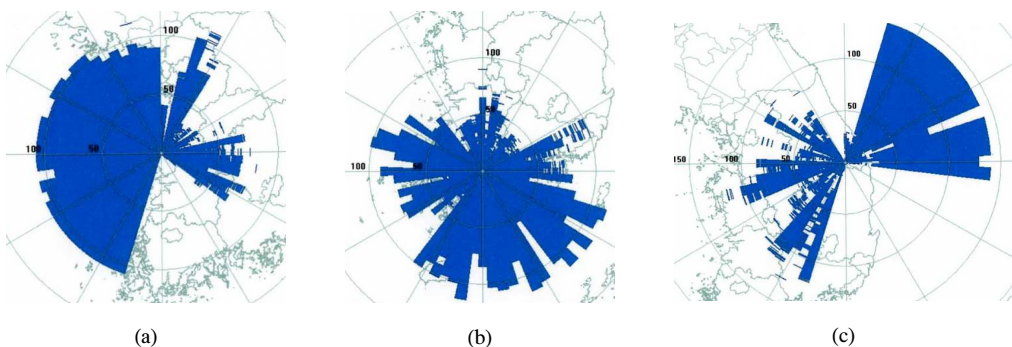


그림 2. 통신 중계소 통신소통 범위도 (저고도 커버리지 견본)
Fig. 2. Communication coverage of relay station (sample for low altitude)

$$P(u) = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 \\ 0 & 3 & -6 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 3은 $u = 1/4 (=0.25)$ 일 경우의 베지에 곡선의 예를 보여준다. 그림 3에서 보듯이, $\overline{P_0P_1}$ 와 $\overline{P_1P_2}$ 상의 1/4되는 지점들인 Q_0 와 Q_1 를 잇는 $\overline{Q_0Q_1}$ 가 만들어진다, 마찬가지로, $\overline{P_1P_2}$ 와 $\overline{P_2P_3}$ 에 대하여 $\overline{Q_1Q_2}$ 를 만들 수 있다. 이때, $\overline{Q_0Q_1}$ 과 $\overline{Q_1Q_2}$ 상의 1/4 지점 R_0 에서 R_1 을 연결한 $\overline{R_0R_1}$ 상에서 1/4 지점인 B 점이 구해진다. 이와 같이 $0 \leq u \leq 1$ 범위의 모든 u 에 대하여 만들어지는 점을 이으면 그림 3에서와 같이 붉은색으로 나타난 베지에 곡선이 구해진다. 베지에 곡선은 극초음속 하에서 항공기의 선두부 최적 형상 설계와 날개꼴 최적화 설계 등 항공기 설계, 다목적 폰트 제작시스템 그리고 축구 로봇의 경로 및 자동 파킹 경로 최적화^[14] 설계 등 매우 다양한 분야에 활용된다.

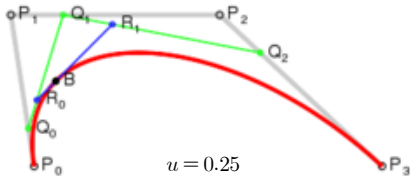


그림 3. Bezier Curve 예시
Fig. 3. Bezier Curve example

III. 베지에 곡선을 이용한 항공기 위치예측 및 음영지역 진입 제어 방법

3.1 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 항공기-통신 운영을 위한 시스템 모델을 그림 4에 나타내었다. 항공기는 이륙 후 임무 지역으로 이동하여 작전을 수행한다. 항공기가 임무 지역으로 이동하면서 통신을 수행하기 위해서는 이륙 직후 먼저 가장 가까운 통신 중계소에 접속하여 작전 정보 교환이 가능토록 통신 네트워크를 개통해야 한다. 통신 중계소는 항공기와 통신 중계소간 또는 항공기 상호간 통신 링크를 제공하는 역할을 수행하며 통상 높은 산 정상에 위치하여 LOS를 확보한다. 이렇게 함으로써 항공기가 가능한 넓은 작전반경에서 임무 수행이 가능토록 통신 네트워크 능력을 제

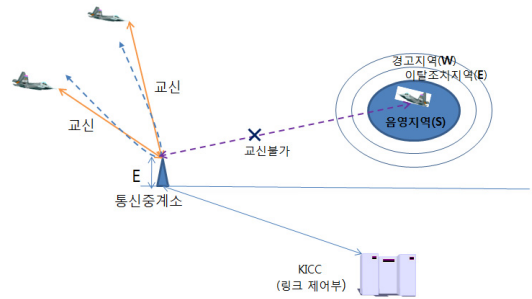


그림 4. 전파차폐 위험지역 및 음영지역
Fig. 4. A potential screen area and shadow zone

공한다. 링크 제어부인 한국 지상 연동 통제소 (KICC, Korea Interoperability Control Center)는 각 통신 중계소로부터 들어오는 정보를 수신, 통합하여 새로운 정보를 생산하고 각 임무 항공기에 작전명령 등 필요한 정보를 제공하는 역할을 수행한다.

음영 지역은 산악 지형 등에 의하여 항공기와 통신 중계소간에 전파가 차단되어 통신 링크가 단절되는 지역으로 정의된다. 음영 지역에 진입하는 경우에 대비하여 위험 지역을 그림 4와 같이 경고 지역 및 이탈 조치 지역으로 세분화하여 설정 운영한다. 경고 지역과 이탈 조치 지역은 항공기의 이동 경로를 예측하여 음영 지역으로 진입할 것이 예측되는 영역을 의미한다. 경고 지역은 항공기가 경고를 인지한 후, 스스로의 판단으로 음영 지역 진입을 제어 가능한 영역으로 정의한다. 그리고, 이탈 조치 지역은 명확한 지시에 의하여 지시한 경로로 운영되도록 강제함으로써 음영 지역 진입을 제어하는 영역으로 정의한다.

세부적인 음영지역 회피 절차를 요약하면 먼저 항공기가 이륙하면 먼저 통신 중계소에 접속하여 네트워크에 가입한 후 채널을 할당받고 통신 중계소를 경유하여 정보를 교환한다. 이후 항공기는 일정 시간 (T_r) 주기로 자신의 위치 정보를 링크 제어부에 보고하고, 링크 제어부에서는 이 정보를 이용해서 항공기의 위치를 예측하고 이를 기반으로 음영 지역과 관련한 제어를 수행한다. 즉, 항공기가 음영 지역으로 진입할 가능성이 있는 경우, 경고 지역으로 진입 예측 시에는 경고 메시지를 발령하고, 이탈 조치 지역으로 진입 예측 시에는 최적의 음영 지역 회피 경로를 산출하여 이 경로로의 회피 조치를 취하도록 한다. 이를 통하여 항공기가 음영 지역에 진입하지 않고, 끊김 없는 통신을 가능하게 한다.

이를 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 항공기 위치 예측과 관련한 가정 사항을 정의한다. 첫째, 항공

기가 보고하는 위치 정보는 손실 및 지연 없이 즉시로 링크 제어부에 도착한 것으로 가정한다. 둘째, 항공기는 위치 정보를 보고하는 연이은 시간 간격 (T_r) 동안에는 완전한 호를 그리며 비행한다. 여기서 완전한 호의 의미는 항공기가 시간 구간 (T_r)에서 90° 이하의 예각으로 급격한 기동을 하지 않고 $90^\circ \sim 180^\circ$ 의 둔각으로 완만하게 비행한다는 것을 의미한다. 셋째, 항공기는 임무수행을 가정하여 이륙부터 착륙까지 등속으로 비행하는 것을 가정한다.

3.2 베지에 곡선을 이용한 항공기 위치예측 방법

그림 5에는 베지에 곡선을 이용한 항공기 위치 예측을 위한 개략도를 나타내었다. 항공기가 네트워크 영역에 진입한 이후 시간은 일정한 크기의 미소 시간 구간 T_r 로 구분되며, t_0 는 항공기가 네트워크 영역에 진입한 최초 시간이고, t_n 은 n -번째 T_r 시간 구간을 나타낸다 ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

t_n 시간 구간에서 항공기가 보고하는 3차원 위치 좌표를 x_n, y_n, z_n 라 하고, 이를 벡터로 $P_n = (x_n, y_n, z_n)$ 으로 나타내기로 한다. t_n ($n=3, 4, 5, \dots$) 시간 구간에서 이전에 보고된 4개 시간 구간인 $t_{n-3}, t_{n-2}, t_{n-1}, t_n$ 에서의 위치 좌표 벡터인 $P_{n-3}, P_{n-2}, P_{n-1}, P_n$ 을 기준으로 한 베지에 곡선 함수는 식 (4)와 같다. 본 논문에서는 이를 확장하여 다음 시간 t_{n+1} 시간에서의 위치좌표 $\tilde{P}_{n+1} = (\tilde{x}_{n+1}, \tilde{y}_{n+1}, \tilde{z}_{n+1})$ 를 구하는 다음과 같은 방법을 제안한다. 즉, 식 (4)에서 u 의 범위는 0에서 1 사이로서 P_{n-3} 와 P_n 을 통과하는 가장 근사한 곡선을 구해내는 것으로, 4개의 점을 기준으로 하므로, 이를 확장하여 $u = 4/3$ 를 적용하여, 다음 시간 구간에서의 위치를 예측한다. 즉,

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{n+1} &= P(u)|_{u=4/3} \\ &= [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} 1-3 & 3-1 & & \\ 0 & 3-6 & 3 & \\ 0 & 0 & 3-3 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{n-3} \\ P_{n-2} \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

T_s 를 항공기가 음영지역에 진입하기 전에 이탈 제어를 위하여 필요로 하는 시간으로 정의하기로 하고, m 개의 보고 시간 구간이 소요된다고 하면, $T_s = m \cdot T_r$ 이 된다. 따라서, 음영지역 진입 경고를 위하여는 현재 시간으로 부터 m 번째 후의 시간 구간

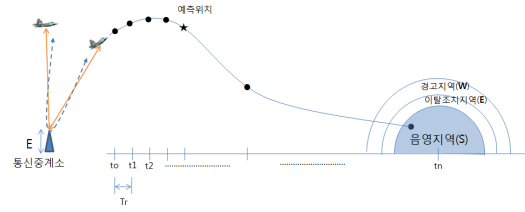


그림 5. 항공기 위치예측도
Fig. 5. Position prediction diagram of aircraft

Given $P_{n-3}, P_{n-2}, P_{n-1}, P_n$ at time t_n ;

for $k = 1 : m$

Calculate \tilde{P}_{n+k} using Eq. (5) with

$$P_{n+k-4}, P_{n+k-3},$$

$$P_{n+k-2}, P_{n+k-1};$$

$$P_{n+k} = \tilde{P}_{n+k};$$

end

그림 6. m 시간이후의 항공기 예측 알고리즘

Fig. 6. Aircraft Position Prediction Algorithm after m -th time interval

의 위치를 예측하여야 한다. 이를 위한 알고리즘을 그림 6에 나타내었다.

III장 1절 가정 사항에서 항공기가 보고하는 위치 정보는 손실 및 지연 없이 링크 제어부에 도착하는 것으로 가정하였으나, 위치정보가 손실되거나 지연이 발생될 경우에 대비하여 이전 단계에서 예측한 값으로 대체하여 다음 비행위치를 예측하도록 보완이 필요하다. 또한 항공기의 특성상 데이터의 손실에 따른 복원을 신속하게 처리하는 것이 매우 중요한 요소이다.

3.3 음영지역 진입 예측 경고

그림 5에서와 같이 음영 지역 진입 제어와 관련하여, 항공기가 경고를 인지한 후, 스스로의 판단으로 음영 지역 진입을 제어 가능한 경고 지역의 모든 좌표들의 집합을 W 로 나타내기로 하고, 명확한 지시에 의하여 지시한 경로로 운영되도록 강제함으로써 음영 지역 진입을 제어하는 영역인 이탈 조치 지역에 속하는 모든 좌표들의 집합을 E 로 표현하고, 이들 지역의 전체 좌표 집합을 S 로 표현하기로 한다.

t_n 시간 구간에서 $T_s = m \cdot T_r$ 후에 예측된 항공기의 위치 좌표를 $\tilde{P}_{n+m} = (\tilde{x}_{n+m}, \tilde{y}_{n+m}, \tilde{z}_{n+m})$ 이라 할 때, 이로부터 음영지역 진입과 관련한 경고 방법은 다음과 같다.

if ($\tilde{P}_{n+m} \subseteq W$)
 음영지역 진입 “경고” 메시지 전달;
 조종사의 판단에 의한 음영지역 이탈 조치 실시;
 else if ($\tilde{P}_{n+m} \subseteq E$),
 음영지역 “이탈 조치” 메시지 전달;
 이탈조치 메시지에 포함된 좌표를 기반으로 이
 탈 조치 실시;
 end

이와 같이 경고지역과 이탈조치지역을 진단한 다음 항공기가 이러한 위험지역에 진입되었다고 판단이 될 경우, 음영지역에 진입되기 이전에 경고를 하고 이탈 조치를 취하여 항공기가 음영지역에 진입되지 않도록 조치해야한다. 이렇게 하면 음영지역에 도달할 위기에 처해 있을 시 사전에 항공기를 위험지역에서 회피시켜 산악 등 장애물에 의한 전파차단을 방지하여 끊김 없는 통신을 제공하게 된다.

3.4 음영지역 이탈 제어 방법

음영지역 진입을 제어하는 것은 항공기의 초기위치 ($P_{n-1}, P_n, P_{n+1}, P_{n+2}$) 정보를 수신하여 베지에 곡선을 도출한 이후에 T_s 시간 뒤에 위험지역(경고 및 이탈지역) 및 음영지역 진입여부를 진단하여 단계별 조치를 취해야 한다. 위험지역 진입여부 진단은 먼저 T_s 시간 뒤의 위치가 $\tilde{P}_{T_s} \subseteq W$ 의 조건을 만족하면 ‘경고’ 메시지를 발령하고 $\tilde{P}_{T_s} \subseteq E$ 의 조건을 만족하면 이탈 조치를 취하여 네트워크 단절을 예방하여 전파 차폐에 의한 통신네트워크 단절을 방지한다. 이탈조치는 항공기가 이탈조치지역에 진입할 시 조종사에게 베지에 곡선에 의해 도출된 이탈지점을 제공해야 한다. 이렇게 하기 위해서는 항공기가 이탈지역 반구(반지름 r_2)에 진입하는 지점을 P_0 이탈하는 지점을 P_3 로 설정하고 P_1, P_2 지점은 이탈지역 반구 바깥쪽에 별도 설정하여야 한다.

그림 7에서와 같이 항공기 비행경로 상에서 이탈지역 반구와 접하는 진입지점(A)과 이탈지점(B)간의 중간점을 C라 하면 원점(O)과 중간점(C) 선상에 있는 음영지역 반구(반지름 r_1)상의 점(S)와 이탈지역 반구상의 점(E)를 구할 수 있다. 다음은 반구 중심점(O)과 C-S-E점 선상에 참조점 D를 잡는데 이는 Bezier Curve의 제어점 P_1, P_2 를 구하기 위함이다. 참조점 D는 $Q_1 = \overline{OE} / \overline{OC} \geq 1$ 일 경우 $D = Q_1 \times r_2 \times \overline{OC}$

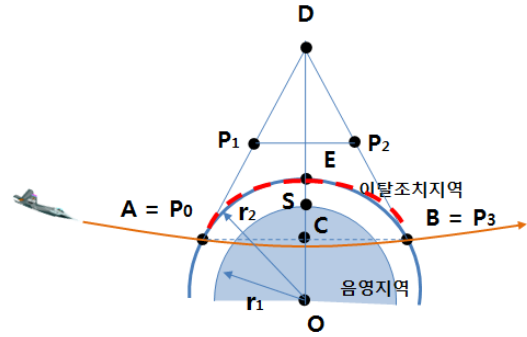


그림 7. 음영지역 이탈 개념도
 Fig. 7. Concept for detour around the shadow zone

로 놓고, $Q_1 = \overline{OE} / \overline{OC} < 1$ 일 경우 $D = 2Q_1 \times r_2 \times \overline{OC}$ 로 하면 $P_1 = (A + D) / 2$, $P_2 = (B + D) / 2$ 로 설정된다. 이와 같이 설정된 4개의 위치정보(P_0, P_1, P_2, P_3)를 Bezier Curve에 적용하여 조종사에게 제공할 위치정보를 필요한 만큼(4~10개) 산출할 수 있다. 이렇게 함으로써 그림 7과 같이 항공기가 음영지역에 진입하지 않고 빨간색 경로를 따라 부드럽게 위험지역을 이탈할 수 있도록 유도한다. 그리고 음영지역을 이탈한 후에는 정상 경로로 재진입하여 계획된 경로로 비행하면 된다.

3.5 T_s 의 결정

T_s 는 항공기가 음영지역에 진입하기 이전에 이탈 조치를 가능하도록 하는데 요구되는 최소 시간으로서, 메시지 전파 지연시간 ($T_{propagation}$), 조종사 반응시간 ($T_{pilot reaction}$), 과 항공기 반응시간 ($T_{craft reaction}$)을 고려하여 정하여야 한다. 그리고, 항공기가 경고 메시지를 받는 영역과 이탈조치 메시지를 받는 영역을 모두 점유하게 되는 경우를 고려하여야 하므로, T_s 는 다음과 같이 정해진다.

$$T_s = e \times (T_{propagation} + T_{pilot reaction} + T_{craft reaction}) \quad (6)$$

여기에서 e 는 안전을 고려하여 적용되는 가중치 값이다. 예를 들어, 전파 지연시간은 없는 것으로 가정하고, 조종사가 메시지를 식별하여 조치하기까지의 반응 시간을 약 4초, 항공기 반응시간을 1초로 할 경우, $e=2$ 로 할 경우, 총 소요 시간(T_s)은 10초로서 $m=5$ 인 경우가 된다.

IV. 성능 평가

4.1 실험 환경

실험환경은 비행 시뮬레이션 프로그램인 AGI (Analytical Graphics, Inc.)사의 STK (System Tool Kit)^[15]를 이용하여 비행경로를 설정하고 비행경로 형태별로 위치정보를 획득하였다. 위치정보 획득 주기는 전술데이터링크의 위치보고 주기 ($T_r=2$ 초)를 고려하였으며 비행경로 예측 및 그래프 도식화는 매트랩을 이용하여 수행하였다. 항공기 위치 예측 실험을 위한 시뮬레이션 경로는 국내 특정 산악지역 상공을 대상으로 전투초계, 관제경보, 전투기동 및 Dive 경로를 설정하였으며 이 시뮬레이션 경로는 특정한 어느 한 지역으로만 국한되지 않고 어떠한 환경에서도 적용이 가능하다.

전투초계는 적의 공중침투가 예상되고 공중활동이 증가되는 경우 요격기가 공중에서 대기하기 위한 궤도이고, 그림 8에서 붉은색으로 표현된 타원에 유사한 경로이다. 관제경보 경로는 공중조기경보통제기 (AWACS, Air Warning And Control Systems)가 공중탐색 및 관제임무를 수행하는 궤도로서 원형 지그재그 형태로서, 그림 8에서 파란색으로 표현하였다. 전투기동 경로는 S-자 형태의 경로이고, Dive 경로는 급강하 경로이다. 각 대상 경로는 STK 프로그램을 이용하여 모의 비행경로를 추출, 데이터베이스화하여 수행하였다.

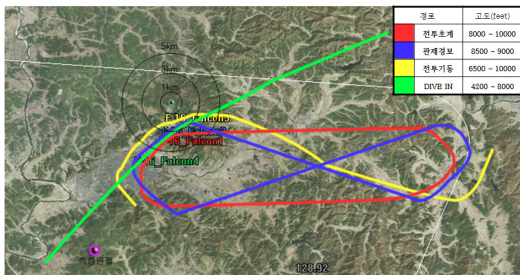


그림 8. STK 시뮬레이션 경로
Fig. 8. STK simulation route

4.2 실험 결과

4.2.1 예측 정확성 실험 결과

그림 9는 전투초계 비행경로에 대하여 적용한 실험 결과를 보여준다.

그림 9 (a)는 2초 단위의 원래 비행경로이다. 그림 9 (b)와 그림 9 (c)에는 항공기로부터 수신한 최근의

위치 정보 4개를 기반으로, 5개 시간 구간후의 항공기 위치를 베지에 곡선을 이용하여 예측한 결과와 각 시간 구간에서 예측한 오차 거리 (km)를 보여준다. (즉, $T_s = 5 \times T_r$.) 그림 9 (b)에서 보는 바와 같이, 전체적인 경로의 모습은 원래 비행경로인 그림 9 (a)를 따라가는 경향을 보여준다. 그러나, 그림 9 (c)을 보면, 비행경로가 거의 직선인 경우는 오차가 거의 나타나지 않는 반면, 회전하는 경로에서는 오차가 들쭉날쭉하게 발생되고 있으나 이 오차도 1 km보다 작은 범위에서 나타난다. 이와 같은 오차는 실 비행데이터를 이용하여 점검할 수 있으면 이상적이나 실 비행정보는 군에서 비밀로 분류되어 접근이 곤란한 문제점이 있다. 그러나 검증된 STK 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 작성된 경로도 실 비행데이터와 거의 유사하여 예측 오차 값은 신뢰성이 높은 편이라 여겨진다. 항공기 위치정보 보고 주기는 실제 전술데이터링크 보고주기 (2초)를 적용하였으며 보고 주기가 변동될 경우에도 적용이 가능하다.

그림 9 (d)에는 T_s 의 길이 변화에 따른 평균 예측 오차를 보여주는데, $m \leq 14$ 인 경우 (즉, $T_s \leq 28$ sec 인 경우) 에는 평균 오차가 1km 이내임을 보여준다. 실험에서 나타난 바와 같이 곡선경로의 정확도가 직선경로 대비 떨어지는 문제점을 보완하기 위한 대안이 필요한데 이러한 대안 중 하나로는 곡선 경로 비행 시 항공기 위치보고 즉, 데이터 정보전달 주기를 단축하는 것도 하나의 대안이 될 수 있을 것을 여겨지나 확실할 대안에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

그림 10에는 관제경보 비행경로와 전투기동 경로에 대하여 수행한 결과를 보여준다. 그림 10에서와 마찬가지로, 전체적인 경로의 모습은 원래 비행 경로와 유사한 경향을 보여준다. 그러나, 그림 9 (c)을 보면, 오차가 들쭉날쭉하게 발생되나 800 m보다 작은 범위에서 나타나고, T_s 의 길이 변화에 따른 평균 예측 오차도 모두 유사한 정확도를 보여준다.

4.2.2 진입제어 성능

다음은 4개의 실제 위치정보를 이용하여 일정시간 뒤에 음영지역에 진입되는지 여부를 사전에 진단하는 절차를 실험하였다. 위치정보를 이용한 음영지역 진입 여부 진단 절차는 다음과 같다. 4개의 위치정보 데이터를 Bezier Curve 공식에 대입하여 위험지역 통과시간인 T_s 시간(30초)동안 이동경로를 예측하여 음영지역 진입여부를 체크한다. 만약 위험지역에 진입하는

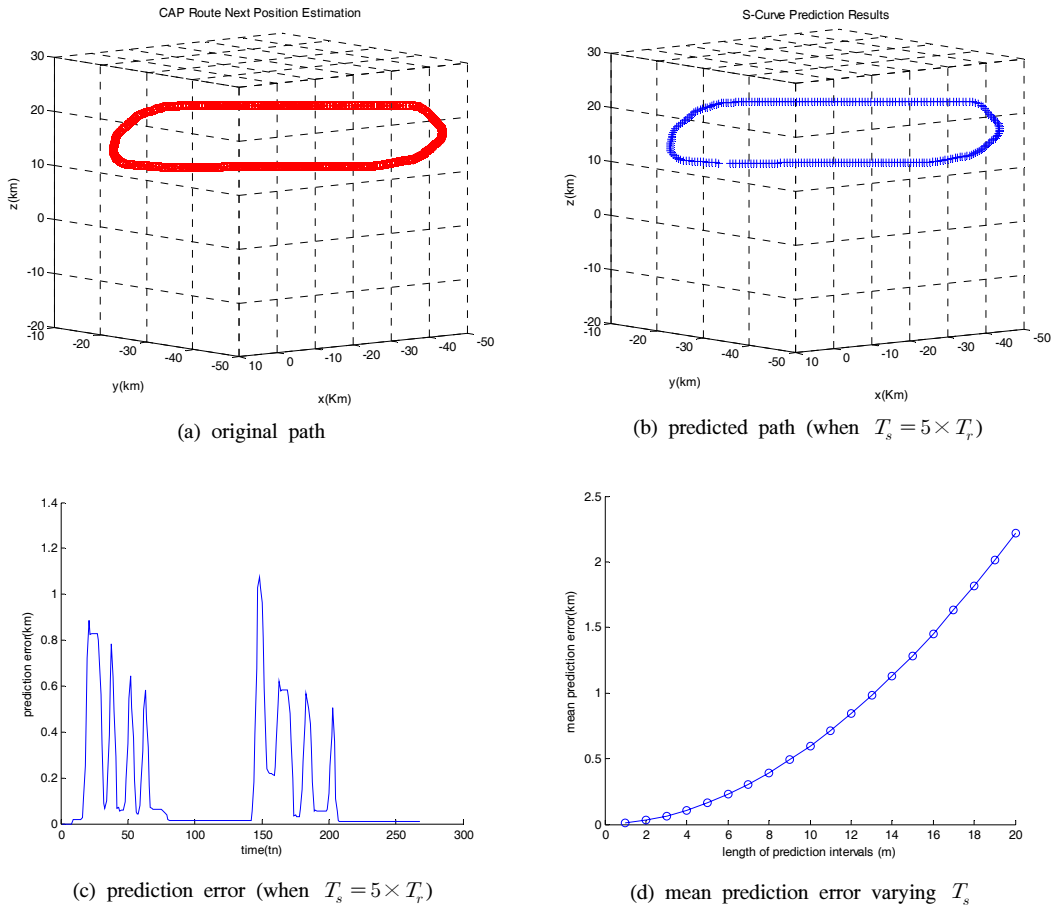


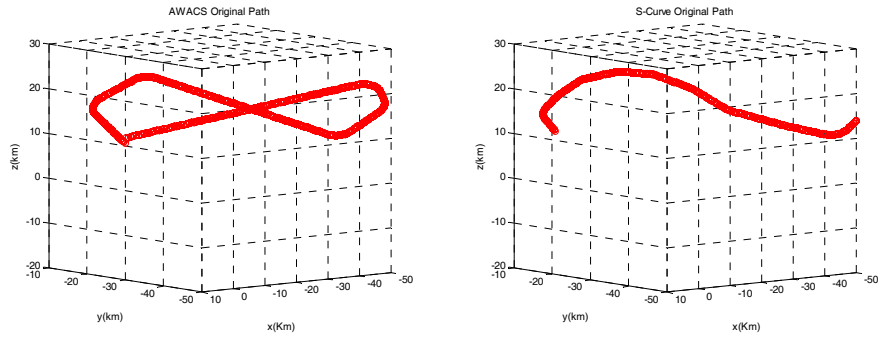
그림 9. 전투기 초계 비행경로에 대한 위치예측 결과도
 Fig. 9. Position prediction result diagram for flight on patrol

것으로 판단되면 몇 초 후에 음영지역에 진입한다는 메시지를 발령한다. 이 절차는 그림 11에 표시된 Dive 경로에 대해 초기 4개의 위치정보를 이용하여 음영지역 진입 여부를 점검하는 개념도를 도시하였다. 도시된 바와 같이 4개의 위치정보에 대해 음영지역 진입 여부를 사전에 파악하는 것으로 그림 11에서는 196초 후에 경고지역에 진입함을 알 수 있다.

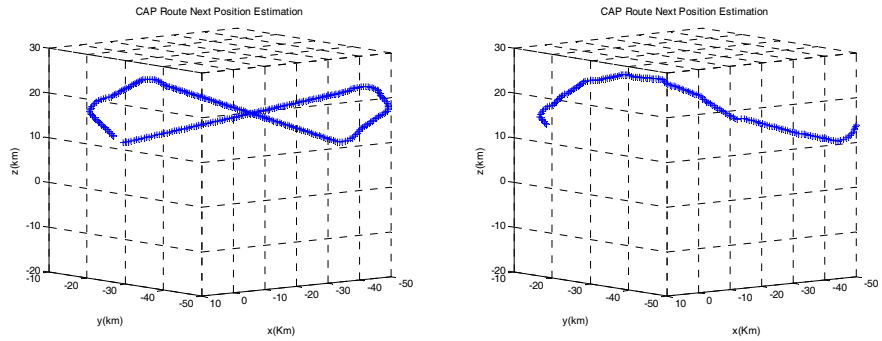
그림 12에는 실제 비행경로 상에서 어느 때 음영지역에 진입되는지를 지속적으로 점검한 결과를 실험하여 도식화 한 것이다. 이 그림에서 보면 4번째 점검시 음영지역(반경 7Km 반구)에 진입하나는 것을 나타내는 것으로 4 번째 점검한 지점에서 관성에 의해 비행을 계속할 경우 28초 후에 음영지역에 진입된다는 것을 의미하는 것이다.

실제 음영지역 진입이 예상될 시는 경고지역(L_w)에서 경고메시지를 발령한 다음, 이탈조치지역(L_e)에

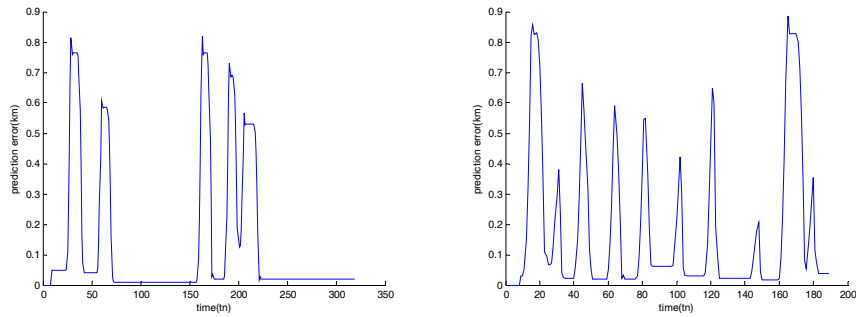
서는 항공기가 음영지역에 진입되지 않도록 이탈조치를 취하여야 한다. 이 조치는 항공기가 이탈조치지역에 진입할 시 조종사에게 이탈 지점에 관한 위치정보를 제공하여 그림 13과 같이 부드러운 곡선비행을 통해 음영지역을 이탈하도록 조치한다. 조종사에게 제공되는 이탈지점 위치정보는 III장 3절에서 논의한 바와 같이 4점 베지에 곡선을 이용하여 부드러운 곡선을 도출하여 제공하며 음영지역 이탈이 완료된 이후에는 정상적인 경로를 따라 비행하면 된다. 음영지역에 진입되면 데이터 등의 복원이 단시간 내에 이루어져야 하며 음영지역에 진입되었다 이탈한 이후 항공기가 기존의 비행경로로 복원되는지 여부가 궁금해질 수 있다. 이는 음영지역 진입 전 위치와 이탈 후 위치, 두 점을 알고 있고 추가로 두 개의 조절점을 찾으면 베지에 커브를 적용하여 이탈곡선을 지나는 몇 개의 위치 정보를 산출할 수 있다. 따라서 음영지역 진입 후에는 정상적이 ATO 경로로 비행이 가능하다. 또한 이때



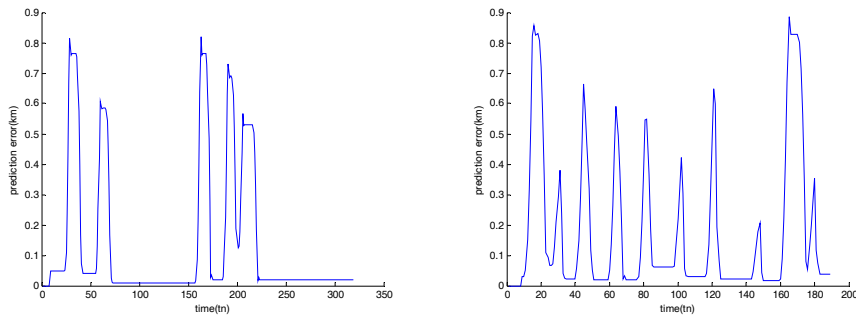
(a) original path (left: AWACS path, right: air combat path)



(b) predicted path



(c) prediction error



(d) mean prediction error

그림 10. 항공기 비행경로별 위치예측 결과도 (좌측: 관제비행, 우측: 전투기동비행)
 Fig. 10. Position prediction result diagram per aircraft flight path (Left: AWACS, Right: Aerial Combat)

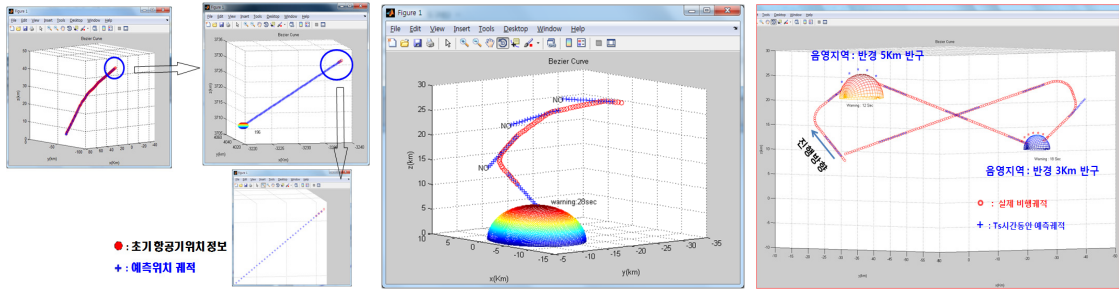
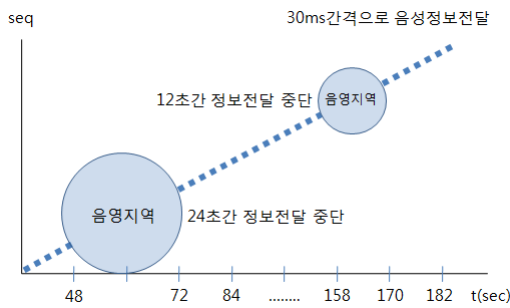
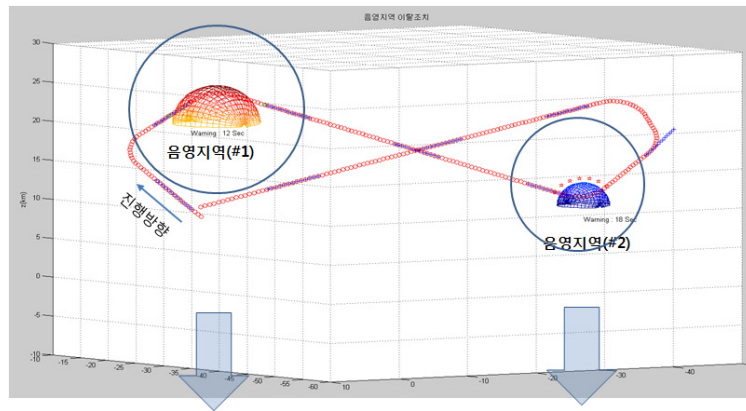


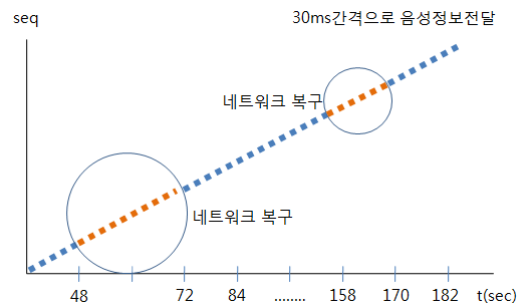
그림 11. 음영지역 진입점점 개념도
Fig. 11. Estimation concept for approaching into shadow zone

그림 12. 음영지역 진입 예측 결과
for Fig. 12. Estimation result for approaching into shadow zone

그림 13. 탐색 경로상 음영지역 이탈
for Fig. 13. Detour around the shadow zone through the path



(a) 기존 운용 방법
(a) Conventional Operation Mode



(b) 제안 방법 적용 운용 방법
(b) Operation Mode with Proposed Method

그림 14. 정보전달 성능 비교
Fig. 14. Performance comparison of information delivery

데이터의 계산량이 크게 증가하여 복원이 지연되는 상황을 예상할 수 있는데 이는 메시지에 크브를 이용하여 이탈 위치정보를 산출할 시 4~5개로 제한하면 계산량이 증가하는 문제는 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 14에서 항공기가 음영지역 #1에 진입하게 되면 통신네트워크가 두절되는 상황이 초래됨을 알 수 있다. 음영지역 #2에서는 전파가 차단되는 음영지역

을 이탈토록 조치하여 링크단절을 방지함으로써 그림 14(b)에서와 같이 정보전달 능력이 회복되는 것을 보여주고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 공중작전 시 항공기가 음영지역에 진입되지 않도록 하기 위해 비행경로를 사전에 예측

하고 위험지역에 진입이 예상될 시 이를 효율적으로 제어하는 방안을 제시하였다. 항공기 위치를 예측하고 음영지역 진입여부 진단은 베지에 곡선을 이용하여 수행하였으며 항공기가 음영지역에 진입이 예상될 시 이를 경고하고 효율적으로 이탈 조치함으로써 항공기가 임무 중 음영지역에 진입되는 것을 극복할 수 있었다. 항공기 위치예측 실험결과는 STK 툴 킷의 시뮬레이션 경로를 이용, 수행하였으며 항공기 위치 예측결과 정확도가 우수한 것으로 나타났다. 또한 항공기에서 수신한 4개의 위치정보를 이용하여 일정시간(T_s) 뒤에 음영지역에 진입되는지 여부를 사전에 진단하고 이를 제어하는 방안도 효율적인 것으로 나타났다. 본 논문에서 제안한 항공기 이동경로 실시간 예측방법은 현 공군방공관제센터(MCRC, Master Control & Reporting Center) 체계에 도입하여 항공기 관제업무 수행 시 운영하는 것도 가능할 것으로 판단된다. 항공기 초기 위치정보를 Bezier Curve에 적용하여 일정시간(T_s) 이후 음영지역 진입여부를 진단하고 조치하는 방안도 공군의 실 작전에 적용하여 운영할 경우 끊임 없는 네트워크 지원에 기여할 것으로 보인다. 본 제안은 청와대 (P-73) 및 비무장지대 (DMZ, Demilitarized Zone) 등 비행통제구역 진입을 감시하고 임무 중 실수로 인한 진입 또는 테러 등 불법 침투 상황에도 적용이 가능할 것으로 기대된다. 또한 무인 비행기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)의 경우도 전파차폐로 인한 링크 중단이 매우 치명적이기 때문에 음영지역을 사전에 진단하여 회피할 수 있도록 본 제안 적용을 추천한다. 향후 곡선구간에서의 예측 정확성을 증가시키기 위한 연구와 항공기가 편대를 형성하여 그룹 이동 간 불가피하게 음영지역에 진입하는 상황에서 정보단절을 방지할 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

References

- [1] T. G. Lee, *NCW Theory and Application*, Hongleung Science Publications, 2008.
- [2] P. K. Gupta and V. K. Gupta, "Radar visibility diagram for site selection," *Int. Radar Symp. India 2011*, Dec. 2011.
- [3] Air Force Operation Center, *Radar Coverage Display System*, Dec. 2012
- [4] C. Park, S. Kim, D. Kang, E. Cha, and S. Lee, "A Localization Method using Similarity of RSSI in WSN," in *Proc. KIIS Spring Conf.*, May 2006.
- [5] K. Ahn, J. Lee, J. Cho, and H. Oh, "A node management scheme in tactical data link network," *J. KICS*, vol. 36, no. 4, pp. 386-390, Apr. 2011.
- [6] S. Rho, H. J. Park, J. K. Jung, and B. H. Roh, "Communication survivability enhancement based on mobility prediction in tactical network OTM(On-The-Move)," *J. KICS*, vol. 35, no. 10, pp. 1526-1534, Oct. 2010.
- [7] Z. R. Zaidi and B. L. Mark, "Mobility estimation for wireless networks based on an autoregressive Model," *IEEE Globecom'2004*, Dec. 2004.
- [8] Y. S. Park and Jaeil Jung, "Performance analysis of position based routing protocol for UAV networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 2, pp. 188-196, Feb. 2012.
- [9] J. B. Shin, G. K. Choi, B. H. Roh, and J. S. Kang, "Routing performance improvement based on link state prediction of trajectory in airborne backbone network," *J. Korea Inst. Military Sci. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 492-500, Jun. 2011.
- [10] C. Kasper, "Using bezier curves for geometric transformations," MSM Creative Component, Iowa State University, available at <http://www.math.iastate.edu/thesisarchive/FMSM/KasparC/CF09.pdf>, Sept. 2009.
- [11] J. Li and J. B. Song, "A searching technique of the weak connectivity boundary using small unmanned aerial vehicle in wireless tactical data networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 1, pp. 89-96, Jan. 2012.
- [12] G. Farin, *Curves and surfaces for computer aided geometric design*, 2nd Ed., MA: Academic Press, 1990.
- [13] A. J. Pettofrezzo, *Matrices and Transformations*, NY: Dover Publications, Inc., 1966.
- [14] Z. Liang and G. Zheng, "Automatic parking path optimization based on bezier curve fitting," *IEEE ICAL'2012*, Aug. 2012.
- [15] Analytical Graphics, Inc, "Getting started with the STK software suite," Version 5.0,

available at <ftp://ftp.sciops.esa.int/pub/herranz/Stk4.3/STKGetStart50.pdf>

정 재 순 (Jae-soon Jeong)



1981년 3월 : 공군사관학교 기계공학 학사
1998년 12월 : 미 해군대학원 통신공학 석사
2008년 11월~2009년 11월 : 공군교육사령부 정보통신학교장
2010년 11월~2011년 11월 : 공군 제7항로통신전대 전대장

2011년 9월~현재 : 아주대학교 NCW학과 박사과정
<관심분야> 전술통신 네트워크, 공중노드 네트워크, 무선통신, 레이더

노 병 희 (Byeong-hee Roh)



1987년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1989년 3월~1994년 2월 : 한국통신 통신망연구소

1998년 2월~2000년 3월 : 삼성전자
2000년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어융합학과/대학원 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 유/무선 인터넷 멀티미디어 통신 및 응용, 네트워크 제어 및 관리, 미래 인터넷, 네트워크 보안, 국방전술통신 네트워크