



등검은말벌 위치 추정을 위한 UAV 기반 멀티안테나 시스템 설계와 시뮬레이션

김보성^{1,2}, 주찬영^{1,2}, 유성현³, 손형일^{1,2,*}

¹전남대학교 융합바이오시스템기계공학과, ²전남대학교 융합 IT 바이오시스템 학제간 프로그램

³조선대학교 전자공학부

Design of UAV-based Multi-Antenna System for Localization of Asian Hornet and Its Simulation Study

Bosung Kim^{1,2}, Chanyoung Ju^{1,2}, Sung Hyun You³ and Hyoung Il Son^{1,2,*}

¹Department of Convergence Biosystems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

²Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

³Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Republic of Korea

Abstract

Honeybees are losing their habitat due to invasive species such as Asian hornets. To prevent invasion, an autonomous robot system that can search for habitats while tracking Asian hornets is required. This study proposes a multi-antenna-based insect tracking system using an unmanned aerial vehicle (UAV). The proposed system measures received signal strength intensity (RSSI) using a radio telemetry method, and the measurement noise is reduced by the finite impulse response (FIR) filter. Based on the multiple radio sources extracted from the multi-antenna, the position of the tracking target is estimated using triangulation. To evaluate the performance of the developed system, localization simulations were conducted based on the dynamics simulator CoppeliaSim and robot operating system (ROS). The experiments were designed with two cases: 1) the static state and 2) the dynamic state of the Asian hornet. The performance of localization errors was compared with the Kalman filter-based single-antenna system developed in our previous study. Experiments results showed that the localization error of the proposed system was within about 10 m when the error in height was not considered, and tracking accuracy was improved by about 58.72%~58.87% compared with the previous system, and 77.14~78.98% considering the localization error for height.

Keywords

Asian hornet, Localization, Unmanned aerial vehicle, Multi-antenna, FIR filter

서론

꿀벌은 배, 참외, 고추, 수박 등 꽃을 피우는 대다수 식물의 화분 매개체 역할을 한다(Jung, 2008; Paudel *et al.*, 2015). 이러한 활동은 인류가 먹는 식량의 3분의 1가량을 차지한다(Klatt *et al.*, 2014). 유엔식량농업기구(FAO)에 따르면 세계 100대 농작물의 71%가 꿀벌에 의존하고 있으며, 미국의 경우 연간 140억 달러가량의 경제효과를 가

져오는 것으로 추정된다(이, 2008). 또한, 꿀벌이 생산한 제품은 미용(Han *et al.*, 2015), 제약(Castro, 2001) 등의 다양한 산업에 사용되고 있어 그 중요성이 더욱 주목받고 있다.

하지만 여러 요인에 의해 꿀벌의 개체 수가 점점 감소하고 있으며, 2016년 미국은 세계 최초로 멸종 위기종으로 지정했다. 꿀벌 감소 기록을 분석한 결과, 2006년에서 2015년 사이에 1990년대 이전보다 약 25% 감소했다는 결

과를 얻었다(Zattara and Aizen, 2021). 이는 지구 온난화로 인한 외래종의 침입이 하나의 주요 원인이다(Clavero and Garcia-Berthou, 2005; 박 등, 2016; Cornelissen *et al.*, 2019). 특히 국내에서는 외래종 등검은말벌이 가장 위협적이다. 등검은말벌은 꿀벌 전문 학살자로 생태계 교란을 주고, 높은 공격성을 띠어 사람에게 손해를 끼치고 있다(Rortais *et al.*, 2010; Requier *et al.*, 2019). 등검은말벌은 대한민국 남부 지방을 통해 유입되었으며, 점점 북서쪽으로 서식처를 확산하여 그 피해가 점점 증가하고 있다(Choi *et al.*, 2012). 따라서 꿀벌 및 생태계 보호를 위한 등검은말벌의 서식처 파악 및 제거에 관한 연구가 필요하다(Monceau *et al.*, 2014).

최근 인공지능 기술을 이용하여 등검은말벌과 같은 꿀벌의 포식자를 탐지하거나(Lee and Jeong, 2020), 센서 네트워크를 이용하여 곤충을 추적하는(Maggiore *et al.*, 2019) 연구가 진행되고 있다. 그러나 기존의 방식은 사람이 직접 추적 장비를 들고 이동하거나, 과도한 탐색 시간 소요와 같은 문제점이 있다. 따라서 모바일 로봇 기반 자율추적 시스템, 특히 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 이용한 추적 방법이 주목받고 있다(Christie *et al.*, 2016; Cliff *et al.*, 2018). 무인지상차량과 비교했을 때 UAV는 공중에서 이동하기 때문에 장애물로부터 비교적 움직임이 자유로우며, 지상 생물뿐 아니라 비행하는 생물을 대상으로도 추적이 용이하다.

본 연구 그룹의 사전 연구에서, 라디오 텔레메트리와 칼만 필터(Kalman Filter, KF)를 이용한 UAV 기반 추적 시스템을 개발하고 시뮬레이션 및 필드 테스트를 통해 성능을 평가했다(Ju and Son, 2020, 2022). 개발된 시스템은 지향성 단일안테나를 UAV에 장착하고, UAV의 4방향 회전을 통해 등검은말벌의 위치를 추정한다. 이때 불가피한 회전시간이 소요되며, 필드 실험 결과 20~50 m의 추적 오차를 확인했다(Kim *et al.*, 2022).

본 연구는 사전에 개발된 시스템의 불가피한 회전시간 감소와 추적 정확도 향상을 위해, 유한 임펄스 응답(Finite Impulse Response, FIR) 필터와 다중 무지향성 안테나를 이용한 위치 추정 알고리즘 및 추적 시스템을 제안한다(김 등, 2022). 성능 평가를 위해 등검은말벌의 정적인 상태와 동적인 상태에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 실험 결과를 통해 본 연구에서 제안한 시스템의 향상된 위치 추정 성능을 입증한다.

재료 및 방법

1. 데이터 수집 및 위치 추정 알고리즘

1) 라디오 텔레메트리

라디오 텔레메트리는 목표물의 위치를 추정하고 움직임을 추적하기 위해 1960년대부터 사용되어 온 원격 측정 방법이다. 송신기가 부착된 대상으로부터 라디오 신호를 수신하여 위치를 추정한다. 따라서, 라디오 텔레메트리 시스템은 무선 신호를 송·수신하는 안테나가 연결된 수신기(receiver)와 송신기(transmitter)로 구성된다. 곤충 추적의 경우, 부착 가능한 무게의 글로벌 포지셔닝 시스템(Global Positioning System) 송신기가 없으므로 라디오 신호 기반의 접근법이 사용된다. 라디오 신호를 이용한 다른 방법으로는 주로 하모닉 레이더(Harmonic Radar)와 무선 주파수 식별(Radio Frequency Identification, RFID)을 사용한 방식이 있다. 하모닉 레이더의 특성은 넓은 탐지 거리를 갖지만, 수신기의 부피가 크며 무거운 단점이 있다. 또한, RFID 방식은 송신기가 매우 가볍지만 짧은 추적 거리를 갖는다. 따라서, 곤충 추적에 적합한 수신기의 무게와 탐지 범위를 갖는 라디오 텔레메트리 방식은 등검은말벌을 추적하는데 가장 유망한 방법으로 간주한다(Kim *et al.*, 2019).

라디오 텔레메트리는 목표물의 위치정보 대신 라디오 신호의 수신 신호 강도(Received Signal Strength Indicator, RSSI)를 측정한다. RSSI는 송신기와 수신기의 상대 거리에 따라 변하며, 일반적으로 상대 거리가 멀어질수록 RSSI가 감쇄하는 반비례 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 경향성을 고려한 전파 모델로 로그-거리 경로 손실(Log-Distance Path-Loss) 모델을 사용한다. 로그-거리 경로 손실 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$h(x, O) = P_{d_0} - 10n \text{Log} \frac{D(x, O)}{d_0} \quad (1)$$

$h(x, O)$ 는 추적 대상의 위치 $x = [x_x, x_y, x_z]$ 와 추적자의 위치 $O = [O_x, O_y, O_z]$ 사이의 RSSI를 나타낸다. P_{d_0} 는 기준 거리 d_0 에서의 수신 신호 강도를 뜻한다. n 은 환경적 요인으로 경로 손실 지수를 말하며, $D(x, O)$ 는 직선 과정을 통한 x 와 O 사이 거리다. 본 연구에서 경로 손실 지수는 $n=2$ 로 설계한다.

2) 무지향성 안테나

본 연구에서는 멀티안테나로부터 획득한 라디오 신호를 기반으로 대상의 위치를 추정하기 위해 삼각측량법을 사용한다. 삼각측량을 위해 수신기는 거리 및 방향에 따라 같은 RSSI 특성이 필요하므로, 본 연구에서는 무지향성 안테나를 사용한다. 무지향성 안테나는 모든 방향에서 같은 전력을 송·수신하는 방사 특성이 있다. 정확한 시뮬레이션을 위해, 보유하고 있는 무지향성 안테나를 Fig. 1과 같이 모델링하였다. 무지향성 안테나의 사양은 730 mm의 길이와 20 mm 넓이, 6 MHz의 대역폭을 갖는다. 모델링 된 안테나의 방사 패턴(Radiation Pattern)은 Fig. 2와 같으며, 토러스 형태를 보인다.

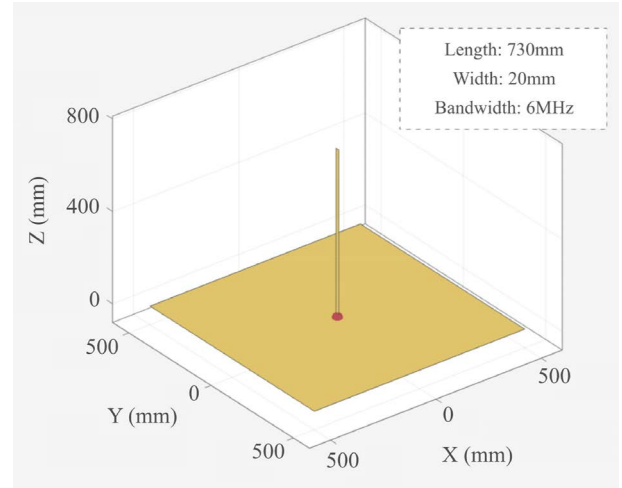


Fig. 1. Modeling of omni-directional antenna.

3) FIR filter 기반 위치 추정

FIR 필터는 출력이 입력에 대하여 가중치가 붙는, 유한한 개수의 표본의 합으로 나타낸 필터다. 비순환 필터 위주로 구현되어 오차에 강인하며, 항상 안정성이 보장된다. FIR 필터는 주로 입력과 출력의 파형의 형태 유지가 중요한 경우에 적용된다. 본 연구에서, 추적 대상의 위치나 움직임으로 인해 발생하는 RSSI 측정 노이즈를 줄이기 위해 FIR 필터를 적용했다. 창함수법(Window Design Technique)을 이용해 FIR 필터를 설계하였으며, 임펄스 응답법을 이용해 표현하면 다음과 같다.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x[n-k] \quad (2)$$

$$h_k = \sum_{k=0}^{N-1} b_k \delta[n-k] \\ = b_0 \delta[k] + b_1 \delta[k-1] \cdots b_{N-1} \delta[n-N+1] \quad (3)$$

x 를 입력으로 y 를 출력으로 하였을 때 b_k 는 필터 계수로 매시간 특정 값을 가지는 유한개의 상수 계수다. N 은 필터의 길이이며, $N-1$ 은 필터의 차수로 z 변환 시 최고차 다항식 차수다.

FIR 필터를 적용하기 위해 다음과 같은 상태공간 모델을 고려한다.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bw_k \quad (4)$$

$$z_k = Cx_k + v_k \quad (5)$$

A 와 C 는 각각 상태 벡터와 측정 벡터를 의미하여, w_k 와 v_k 는 평균이 0인 가우시안 잡음으로 각각 프로세스 잡음 벡

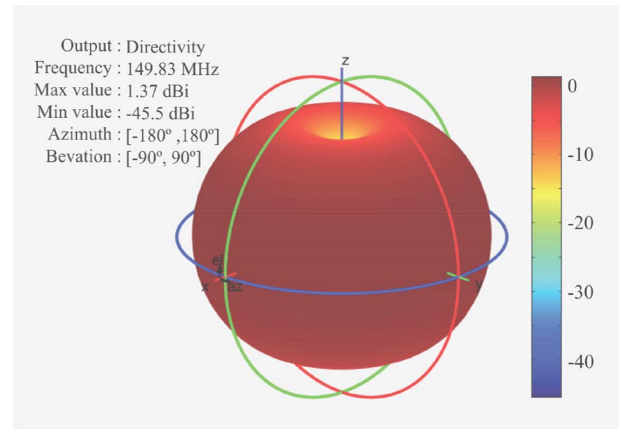


Fig. 2. Radiation pattern of omni-directional antenna.

터와 측정 잡음 벡터를 의미한다.

유한 임펄스 응답의 상태 추정기는 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{x}_k = \sum_{i=k-N}^{k-1} H_{k-i} y_i = H Y_{k-1} \quad (6)$$

\hat{x}_k 는 상태 벡터의 추정치, H 는 상태 추정기의 이득, Y_{k-1} 은 측정값에 관한 벡터, N 은 window 크기이다. 즉, $k-N$ 번째부터 k 번째까지의 측정값을 포함한 벡터 Y_{k-1} 은 다음과 같다.

$$Y_{k-1} = \overline{C_N} x_k + B_N W_{k-1} + V_{k-1} \quad (7)$$

이때 각각의 행렬들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_{k-1} &= [y_{k-N}^T \ y_{k-N+1}^T \ \cdots \ y_{k-1}^T]^T \\
 \overline{C}_N &= \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} \\
 B_N &= - \begin{bmatrix} CA^{N-1}B \ CA^{N-2}B \ \cdots \ CB \\ 0 \ CA^{N-1}B \ \cdots \ CAB \\ \vdots \ \vdots \ \ddots \ \vdots \\ 0 \ 0 \ \cdots \ CA^{N-1}B \end{bmatrix} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$W_{k-1} = [w_{k-N}^T \ w_{k-N+1}^T \ \cdots \ w_{k-1}^T]^T$$

$$V_{k-1} = [v_{k-N}^T \ v_{k-N+1}^T \ \cdots \ v_{k-1}^T]^T$$

유한 임펄스 응답에서, 상태 추정기 기반의 상태 벡터 및 추정치는 다음과 같이 다시 표현되어, 측정 오차 e_k 의 공분산을 최소화한다.

$$x_k = A^N x_{k-N} + [A^{N-1}B \ A^{N-2}B \ \cdots \ B] W_{k-1} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_k &= (\overline{H} \overline{C}_N - A^N) x_{k-N} + x_k + H V_{k-1} \\
 &+ (H B_N - [A^N B \ \cdots \ B] W_{k-1}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e_k &= \hat{x}_k - x_k = (\overline{H} \overline{C}_N - A^N) x_{k-N} + H V_{k-1} \\
 &+ H G_N - [A^N G \ \cdots \ G] W_{k-1}) E [e_k^T \ e_k] \quad (11)
 \end{aligned}$$

2. 자율 추적 전략

UAV를 이용한 다중 무지향성 안테나 기반 위치 추정 및 추적 전략은 Algorithm 1에 나타내었다. 멀티안테나 시스템은 UAV 및 안테나의 회전 없이 대상의 위치를 추정할 수 있다. 즉, 불필요한 추적 속도를 줄일 수 있는 장점이 있다.

제안된 추적 시스템은 UAV가 정지한 상태에서 각각의 안테나로부터 RSSI를 획득하여, 계산된 위치 추정값을 기반으로 추적과정을 진행한다. 각각의 추적 단계에 대한 상세한 설명은 다음과 같다(Fig. 3).

- (1) 멀티안테나 기반 UAV는 초기 상태에서 호버링한다(Fig. 3(a)).
- (2) 지상의 안테나와 UAV에 장착된 안테나를 통해 FIR 필터 기반 RSSI를 수집하고, 원격 통신을 이용해 UAV의 컴패니언 컴퓨터(Companion Computer)로 전송한다(Fig. 3(b)).

Algorithm 1. Tracking strategy

Input: Antenna current position O_N , desired distance D_O , initial constant D_I , Number of antenna N
 UAV position input $O_d \leftarrow O_1$
 Target position $x \leftarrow D_I$
 procedure TRACKING (x, O)
 compute $D(x, O_1)$
 while $D(x, O) > D_O$ do
 for $i = 1$ to N
 compute $h(x, O_i), D_i(x, O_i)$
 compute estimation space
 $S(O_i, D_i(x, O_i))$
 end for
 compute intersection space of S
 if intersection space ≥ 0 then
 compute center position C
 else
 continue
 end if
 $O_d \leftarrow C$
 end while
end procedure

- (3) 컴패니언 컴퓨터에서 수집된 RSSI를 기반으로 추적 대상에 대한 위치 추정을 진행한다(Fig. 3(c)).
- (4) 계산된 위치 추정값을 기반으로 비행 제어기를 통해 UAV를 제어하여 추적을 진행한다(Fig. 3(d)).
- (5) UAV와 추적 대상의 상대 거리가 충분히 가까워질 때까지 위의 과정을 반복한다.

3. 멀티안테나 기반 추적 시스템

본 연구는 소형 곤충의 위치를 추정하고 자율 추적하기 위해 멀티안테나 기반 UAV 시스템을 제안한다. 개발된 시스템은 크게 라디오 텔레메트리 기반 센서 시스템과 UAV 기반 로봇 시스템으로 구성된다. 라디오 텔레메트리 기반 센서 시스템은 송신기, 수신기 및 무지향성 안테나로 구성되며, UAV 기반 로봇 시스템은 하위 레벨 제어를 위한 비행 제어기, 상위 레벨 제어 및 알고리즘 처리를 위한 마이크로 컨트롤러 유닛(Micro Controller Unit, MCU), 다양한 UAV 센서(예: 기압계, 자이로스코프, 가속도계)가 포함된다.

Fig. 4는 멀티안테나 기반 UAV 시스템의 구조를 나타낸다. 파란색 실선은 유선통신, 점선은 무선통신을 나타내며, 빨간색 점선은 제어입력 신호를 나타낸다. 추적 대상에는 라디오 송신기가 부착되어 일정 주기마다 라디오 신호를 방출한다. 이 신호의 RSSI는 각각의 무지향성 안테나를 통해 수신되며, 수신기와 MCU를 통해 필터링 및 수

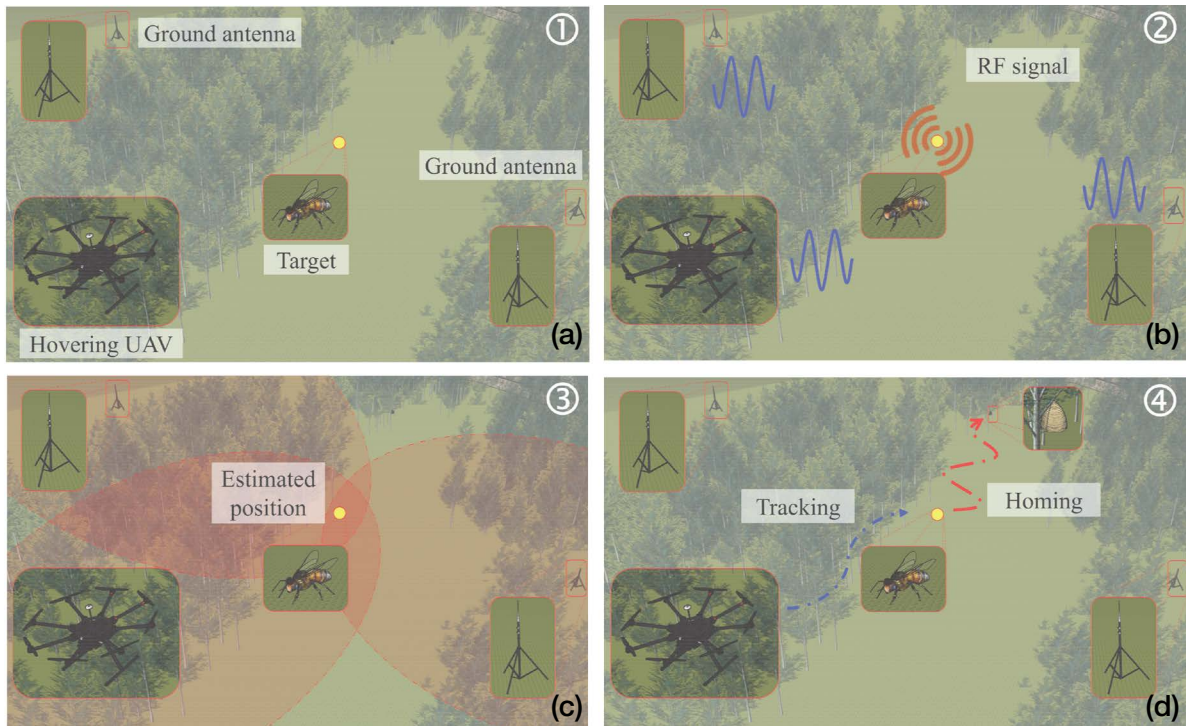


Fig. 3. Tracking strategy of multi-antenna system. (a) Initial states. (b) Collect RSSI through ground and aerial antennas. (c) Estimate the position of the moving target based on the RSSIs. (d) Move to the estimated position.

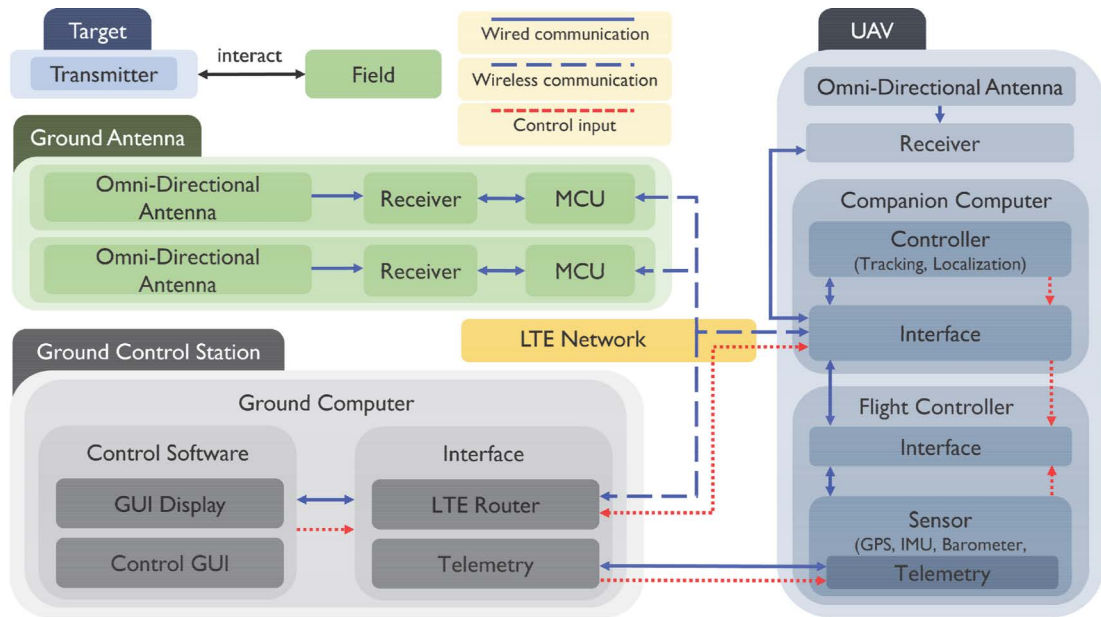


Fig. 4. Multi-antenna based UAV tracking system architecture.

집된다. 지상의 RSSI 데이터는 롱텀 에볼루션(Long-Term Evolution) 네트워크를 통해, UAV에 탑재된 라디오 텔레메트리 시스템의 RSSI는 직접적인 USB 통신을 통해서

MCU인 컴패니언 컴퓨터로 전송된다. 즉, 말벌에 부착된 라디오 송신기의 신호는 무지향성 안테나, 수신기, MCU, 컴패니언 컴퓨터 순서로 전송된다.

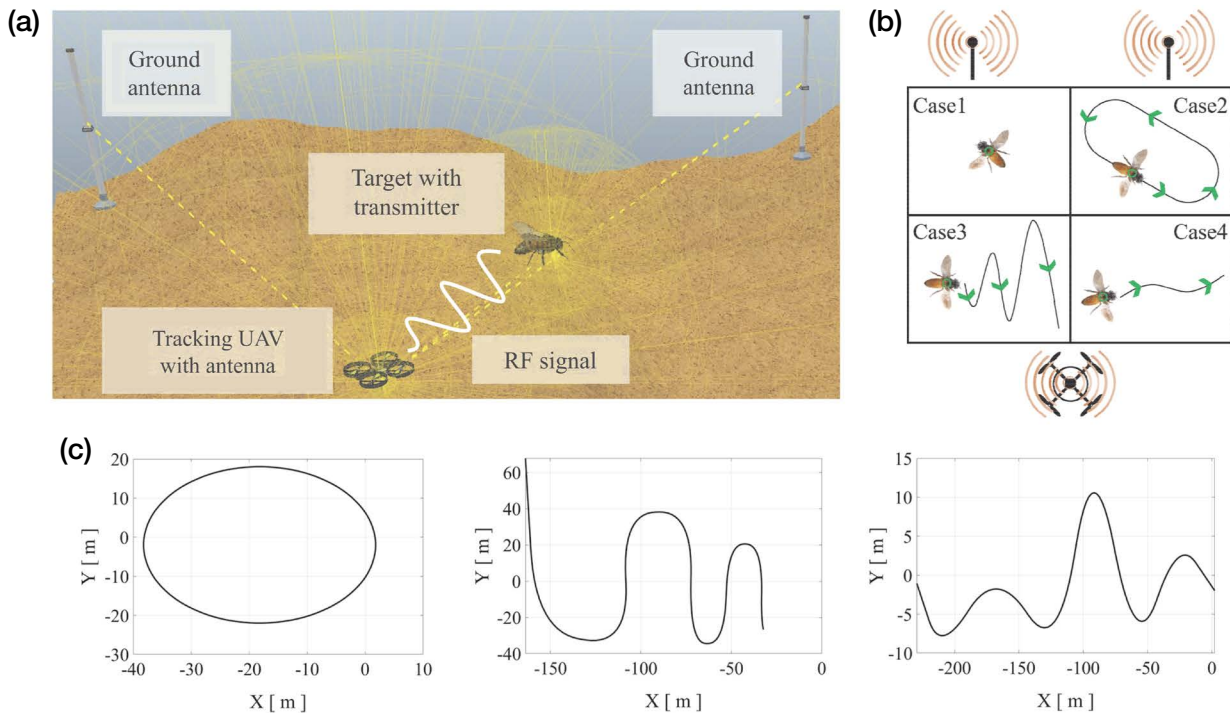


Fig. 5. Experimental setup and design. (a) Coppeliasim based simulation environment. (b) Localization scenarios including two experimental cases. (c) Planned flight path of target.

수집된 RSSI는 삼각측량법(Algorithm 1)을 통해 추적 대상의 위치를 추정한다. 추정된 위치와 UAV의 위치를 기반으로 목표 위치를 계산한다. 목표 위치로 UAV를 제어하기 위해서, 컴패니언 컴퓨터에서 비행 제어기로 제어 신호를 보내며, 비행 제어기는 UAV의 모터를 직접적으로 제어한다. 따라서, 위 과정을 통해 UAV가 추적 대상을 추적하게 되며, 이를 지상에서 관측 및 통제하기 위해 지상 제어 스테이션(Ground Control Station)이 구축된다. 지상 제어 스테이션에는 UAV의 상태 관측과 지도 작성을 위한 제어 소프트웨어가 있다. 본 연구에서는 제어 프로세스 처리, 센서 및 신호 처리, 통신 네트워크 구현 등의 소프트웨어 프레임워크를 위해 로봇 미들웨어인 로봇 운영 체제(Robot Operating System, ROS)를 사용하였다.

4. 시뮬레이션 구성

개발된 멀티안테나 기반 등검은말벌 추적 시스템의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 통한 성능 평가를 진행하였다. 시뮬레이션 환경은 ROS, 코펠리아심(Coppeliasim), 매트랩(Matlab)을 사용해 구성하였다. 코펠리아심은 물리 기반 시뮬레이터로 open dynamic

engine, Bullet, Newton 등의 물리엔진을 사용하며 C/C++, 파이썬(Python), 매트랩을 포함한 6가지 프로그램 언어를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 코펠리아심을 통해 추적 대상의 경로를 지정하고 ROS와 매트랩을 통해 신호 처리 및 위치 추정 알고리즘을 구현했다. 완성된 시뮬레이션 환경은 Fig. 5(a)와 같다. 2대의 무지향성 지상안테나(Ground Antenna), 1대의 안테나가 탑재된 추적 UAV, 라디오 송신기가 부착된 추적 대상으로 구성된다. 시뮬레이션의 시인성과 본 시스템의 목적을 고려하여 추적 대상은 3차원 점으로 구현되어 등검은말벌로 시각화하였다.

실험은 추적 대상인 등검은말벌의 네 가지 상태에 대해 위치를 추정하도록 설계되었다(Fig. 5(b)). 등검은말벌의 움직임이 없을 때 시스템의 위치 추정 성능을 파악하기 위해, 첫 번째 실험은 정적 상태에 대한 시나리오를 고려하였다. 나머지 실험은 등검은말벌이 비행하는 동적 상태를 반영한 다양한 시나리오가 고려되었다(Fig. 5(c)). 두 번째 시나리오에서는 등검은말벌이 타원형 궤도처럼 닫힌 경로를 추종하도록 설계된다. 세 번째 및 네 번째 시나리오는 곡선 형태의 열린 경로가 고려되었다. 등검은말벌의 비행경로는 주로 네 번째 시나리오처럼 직선 형태로 보고되었지만(Maggiora *et al.*, 2019; Lioy *et al.*, 2021), 다

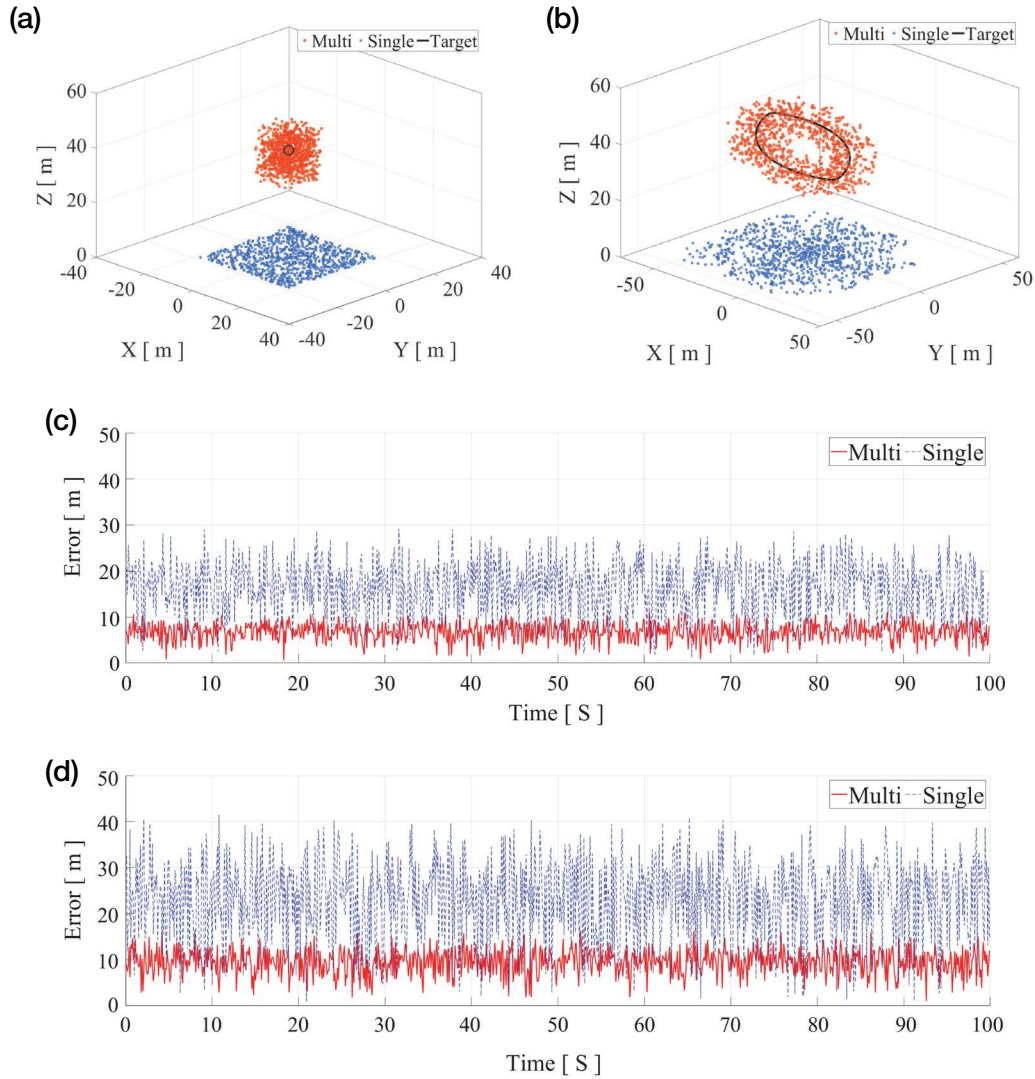


Fig. 6. Experimental results of cases 1 and 2. (a) Localization for the static target. (b) Localization for the dynamic target in case 2. (c) Estimation errors for the static target. (d) Estimation errors for the dynamic target in case 2.

양한 경우를 고려하여 시나리오를 구성하였다. 따라서, 네 가지의 실험 케이스가 고려된 시뮬레이션을 통해 개발된 시스템의 위치 추정 성능을 평가하고자 한다. 성능 비교를 위해, 본 연구에서 제안한 FIR 필터 기반의 멀티안테나 시스템과 사전 연구에서 개발되었던 KF 기반의 단일안테나 시스템의 실험 결과를 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 정적 상태 위치 추정

정적 상태 및 동적 상태에 대한 위치 추정 실험 결과는

Fig. 6에 나타내었다. 정적인 등검은말벌은(0, 0, 40) m에 위치하도록 설계하였으며, 검은색 마크로 해당 위치에 표기되었다. 빨간색 마크는 FIR 필터 기반의 멀티안테나 시스템, 파란색 마크는 KF 기반 단일안테나 시스템의 위치 추정 결과를 나타낸다(Fig. 6(a)). 실험 결과를 통해, 본 연구에서 개발된 멀티안테나 기반 추적 시스템은 추적 대상의 3차원 위치를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

위치 추정의 성능을 비교하기 위해, FIR 필터 기반의 멀티안테나 및 KF 기반의 단일안테나 시스템의 위치 추정 오차는 Fig. 6(c)에 나타내었다. 각 시스템이 추정한 위치와 등검은말벌의 위치의 오차를 계산하였으며, 평면상의 위치 오차를 계산하기 위해 높이에 대한 오차는 고

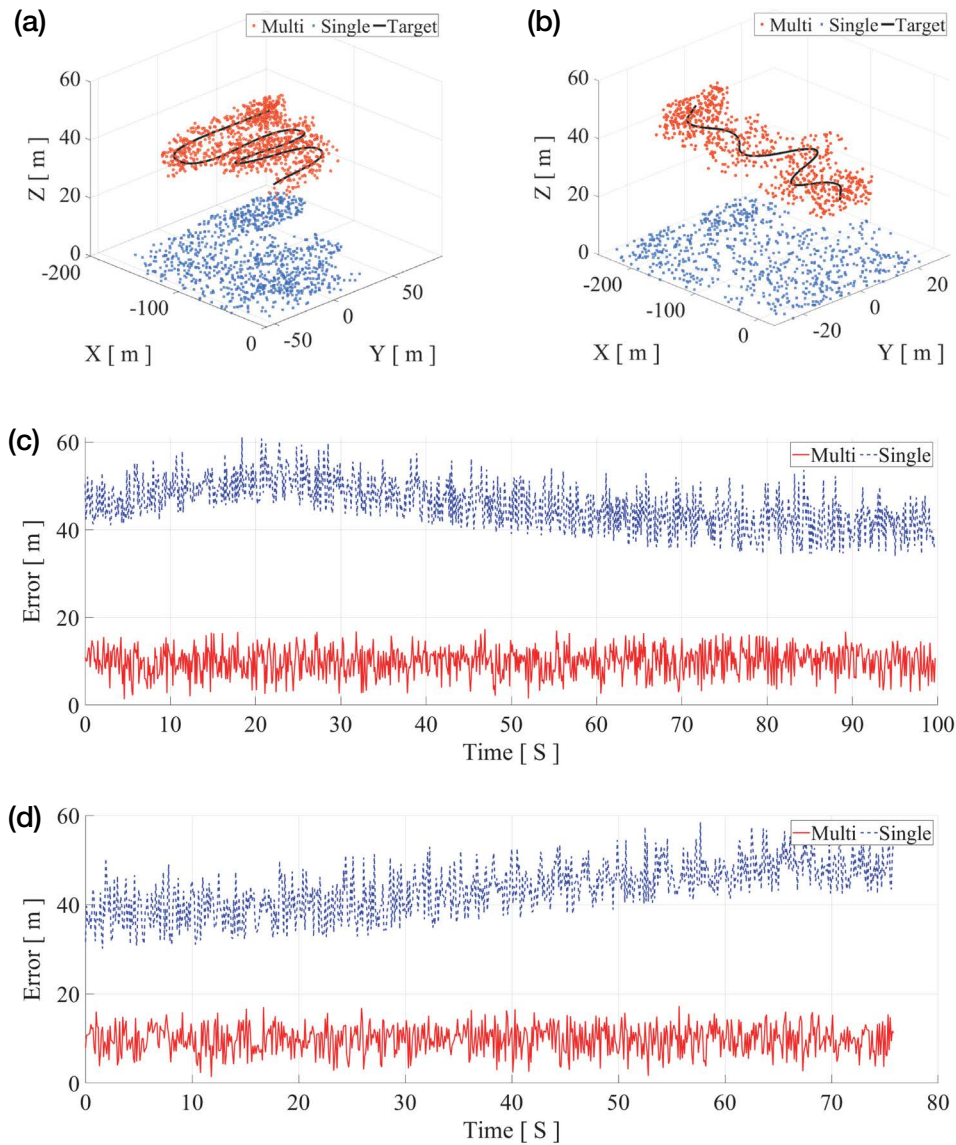


Fig. 7. Experimental results of cases 3 and 4. (a) Localization for the dynamic target in case 3. (b) Localization for the dynamic target in case 4. (c) Estimation errors for case 3 (d) Estimation errors for case 4.

려되지 않았다. 높이에 대한 오차를 고려한 위치 추정 성능은 실험 시나리오 3과 4의 실험 결과를 통해 분석하였다. 정적 대상의 실험 결과, KF 기반 단일안테나 시스템은 약 16.4812 m의 위치 추정 오차를 보였으며, FIR 필터 기반 멀티안테나 시스템은 약 6.8039 m의 위치 추정 오차를 나타내었다. KF 기반 단일안테나 시스템의 성능을 기준으로 위치 추정 오차가 약 9.6773 m가 감소하였으며, 약 58.72%의 위치 추정 성능 향상을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 FIR 필터 기반의 멀티안테나 시스템은 추적 대상을 더욱 정밀하게 추정할 수 있을 뿐만 아니라 3차원의 추적이 가능하다.

2. 동적 상태 위치 추정

동적 상태인 등검은말벌은 닫힌 경로와 열린 경로를 추종하도록 설계되었다. Fig. 6(b)의 검은색 실선은 추적 대상의 비행경로에 대한 지상 실측 정보를 나타낸다. 동적 대상이 비행하는 동안 FIR 필터 기반의 멀티안테나 및 KF 기반의 단일안테나 위치 추정 결과는 각각 빨간색 마크와 파란색 마크로 표기된다(Fig. 6(b)). 정적 대상의 위치 추정 결과와 동일하게, 본 연구에서 개발된 시스템은 동적인 대상에 대해서도 3차원 위치 추정이 가능함을 알 수 있다.

성능 비교를 위한 실험의 결과는 Fig. 6(d)에 나타내었으며, 두 번째 시나리오에서도 평면상의 위치 오차만을 계산하기 위해 높이에 대한 위치 오차는 고려되지 않았다. 실험 결과, KF 기반 단일안테나 시스템은 약 23.0852 m의 위치 추정 오차를 나타냈으며, FIR 필터 기반 멀티안테나 시스템은 약 9.4955 m의 위치 추정 오차를 보였다. 따라서, FIR 필터 기반의 멀티안테나 시스템을 이용하여 동적 대상을 추적하였을 때, 위치 추정 오차가 약 13.5897 m 감소하였으며 약 58.87%의 위치 추정 성능 향상을 확인하였다.

실험 시나리오 3과 4에 관한 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 높이에 대한 오차를 고려하였을 때, 시나리오 3에서는 KF 기반 단일안테나 시스템은 평균적으로 약 46.0313 m의 위치 추정 오차를 가지며, FIR 기반 멀티안테나 시스템은 약 9.6760 m의 오차를 보였다. 유사하게, 시나리오 4에서는 KF 시스템의 평균적인 위치 추정 오차는 43.4444 m이며 FIR 시스템의 오차는 9.9315 m인 결과를 얻었다. 멀티안테나 시스템은 3차원으로 추적할 수 있어 높이에 대한 오차를 고려하였을 때는 더욱 높은 추정 정확도를 갖는다.

즉, 본 연구에서 제안하는 FIR 필터 기반의 멀티안테나 시스템은 사전 연구와 비교해 2개의 지상 안테나가 추가로 필요하지만, 더욱 정밀한 3차원 위치 추정이 가능함을 알 수 있다. 실제 시스템을 이용한 필드 테스트가 수행되지는 않았지만, 실험 결과를 통해 개발하고자 하는 시스템을 체계적으로 검증하고 시스템의 성능을 정량적으로 평가하여 그 우수성을 입증했다.

적 요

본 연구에서는 다중 무지향성 안테나와 UAV를 기반으로 추적 대상의 위치를 추정 및 추적하는 알고리즘과 시스템을 제안하였고, 시스템의 성능을 사전 연구와 정량적으로 비교 및 분석하였다. 성능 평가를 위해, 추적 대상의 정적 상태와 동적 상태를 고려한 네 가지 시나리오를 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다. 높이에 대한 오차를 제외하고 정적 대상에 대한 위치 추정 결과, KF 기반 단일안테나 시스템은 16.4812 m, FIR 필터 기반 멀티안테나 시스템은 6.8039 m의 위치 추정 오차를 보였으며 약 58.72%의 향상된 성능을 확인했다. 동적 대상에 대한 위치 추정

결과, 사전 연구에서 개발된 시스템은 23.0852 m, 본 연구에서 개발된 시스템은 9.4955 m의 위치 추정 오차를 보이며 약 58.87%의 향상된 성능을 확인했다. 정적 대상과 동적 대상에 위치 추정 실험 결과를 통해 개발된 시스템은 약 10 m 이내의 위치 추정 오차를 확인했다. 높이에 대한 위치 추정 오차를 고려했을 때, FIR 필터 기반 멀티안테나 시스템의 추적 성능은 KF 기반 단일안테나 시스템에 비해 약 77.14~78.98% 향상됐다. 따라서, 멀티안테나 시스템은 대상의 3차원 위치정보를 추정할 수 있어, 더욱 정밀한 추적이 가능하다.

향후 연구에서는 시스템 검증 및 성능 평가를 위해 FIR 필터 기반의 멀티안테나 및 UAV 시스템을 구현하고, 실제 야외 환경에서 등검은말벌에 대한 필드 테스트를 진행할 예정이다. 또한, 멀티안테나로 인한 시스템의 복잡성, 위치 추정 시간의 단축, 추적 범위 및 정확도 향상을 위해 단일 회전 안테나 기반 UAV 시스템을 연구할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ0147612022)과 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2020-3761)의 지원에 의해 연구되었음.

인용 문헌

- 김보성, 주찬영, 손형일. 2022. 다중 안테나를 이용한 무인항공기 기반 말벌류 추적 시스템 개발: 시뮬레이션 연구. 한국양봉학회지 학술대회 발표집. p. 30.
- 박용하, 김재욱, 정휘철. 2016. 기후변화와 침입외래종의 생태계 기반관리 전략. 환경정책 24(4): 149-176.
- 이승환. 2008. 꿀벌의 실종. 양봉협회보 329: 28-29.
- Castro, S. L. 2001. Propolis: biological and pharmacological activities. Therapeutic uses of this bee-product. Ann. Rev. Biomed. Sci. 3: 49-83.
- Choi, M. B., S. J. Martin and J. W. Lee. 2012. Distribution, spread, and impact of the invasive hornet *Vespa velutina* in South Korea. Journal of Asia-Pacific Entomology 15(3): 473-477.
- Christie, K. S., S. L. Gilbert, C. L. Brown, M. Hatfield and L. Hanson. 2016. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. Front. Ecol. Environ. 14(5): 241-251.
- Clavero, M. and E. Garcia-Berthou. 2005. Invasive species

- are a leading cause of animal extinctions. *Trends Ecol. Evol.* 20(3): 110.
- Cliff, O. M., D. L. Saunders and R. Fitch. 2018. Robotic ecology: Tracking small dynamic animals with an autonomous aerial vehicle. *Sci. Robot.* 3(23): eaat8409.
- Cornelissen, B., P. Neumann and O. Schweiger. 2019. Global warming promotes biological invasion of a honey bee pest. *Glob. Change Biol.* 25(11): 3642-3655.
- Han, S. M., I. P. Hong, S. O. Woo, S. N. Chun, K. K. Park, Y. M. Nicholls and S. C. Pak. 2015. The beneficial effects of honeybee-venom serum on facial wrinkles in humans. *Clin. Interv. Aging* 10: 1587.
- Ju, C. and H. I. Son. 2020. Autonomous Tracking of Micro-Sized Flying Insects Using UAV: A Preliminary Results. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence* 23(2_1): 125-137.
- Ju, C. and H. I. Son. 2022. Investigation of an Autonomous Tracking System for Localization of Radio-Tagged Flying Insects. *IEEE Access* 10: 4048-4062.
- Jung, C. 2008. Economic Value of Honeybee Pollination on Some Fruit and Vegetable Crops in Korea. *J. Apic.* 23(2): 147-152.
- Kim, B., C. Ju and H. I. Son. 2022. Field Evaluation of UAV-Based Tracking Method for Localization of Small Insects. *Entomological Research*, to be published.
- Kim, S., C. Ju, J. Kim and H. I. Son. 2019. A tracking method for the invasive asian hornet: A brief review and experiments. *IEEE Access* 7: 176998-177008.
- Klatt, B. K., A. Holzschuh, C. Westphal, Y. Clough, I. Smit, E. Pawelzik and T. Tschardt. 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281(1775): 20132440.
- Lee, C. and Y. Jeong. 2020. Performance Evaluation of YOLO according to Based Feature Extraction Network in Vespa Detection. *J. Apic.* 35(3): 149-159.
- Lioy, S., D. Laurino, R. Maggiora, D. Milanesio, M. Saccani, P. J. Mazzoglio, A. Manino and M. Porporato. 2021. Tracking the invasive hornet *Vespa velutina* in complex environments by means of a harmonic radar. *Sci. Rep.* 11(1): 1-10.
- Maggiora, R., M. Saccani, D. Milanesio and M. Porporato. 2019. An innovative harmonic radar to track flying insects: The case of *Vespa velutina*. *Sci. Rep.* 9(1): 1-10.
- Monceau, K., O. Bonnard and D. Thiery. 2014. *Vespa velutina*: a new invasive predator of honeybees in Europe. *J. Pest Sci.* 87(1): 1-16.
- Paudel, Y. P., R. Mackereth, R. Hanley and W. Qin. 2015. Honey bees (*Apis mellifera* L.) and pollination issues: Current status, impacts, and potential drivers of decline. *J. Agric. Sci.* 7(6): 93.
- Requier, F., Q. Rome, G. Chiron, D. Decante, S. Marion, M. Menard and M. Henry. 2019. Predation of the invasive Asian hornet affects foraging activity and survival probability of honey bees in Western Europe. *J. Pest Sci.* 92(2): 567-578.
- Rortais, A., C. Villemant, O. Gargominy, Q. Rome, J. Haxaire, A. Papachristoforou and G. Arnold. 2010. Atlas of Biodiversity Risks-from Europe to the Globe, From Stories to Maps. 181p. Pensoft, Sofia & Moscow.
- Zattara, E. E. and M. A. Aizen. 2021. Worldwide occurrence records suggest a global decline in bee species richness. *One Earth* 4(1): 114-123.