물류수송을 위한 이종 협업 무인 시스템 개발

Development of a Cooperative Heterogeneous Unmanned System for Delivery Services

조 성 욱, 이 다 솔, 정 연 득, 이 웅 희, 심 현 철*
(Sungwook Cho¹, Dasol Lee¹, Yeondeuk Jung², Unghui Lee¹, and David Hyunchul Shim^{1,*})

¹Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

²Flight Control and Avionics Team, Korea Aerospace Research Institute

Abstract: In this paper, we propose a novel concept for an unmanned delivery service using a cooperative heterogeneous unmanned system consisting of a self-driving car and an unmanned aerial vehicle (UAV). The proposed concept is suitable to deliver parcels in high-density and high-rise urban or residential areas. In order to achieve the proposed concept, we will develop a cooperative heterogeneous unmanned system. Customers can order goods using a smartphone application and the order information, including the position of the customer and the order time, and the package is transported automatically by the unmanned systems. The system assigns the tasks suitable for each unmanned vehicle by analyzing it based on map information. Performance is validated by experiments consisting of autonomous driving and flight tests in a real environment. For more evaluation, the landing position error analysis is performed using circular error probability (CEP).

Keywords: delivery service, heterogeneous unmanned system, self-driving car, unmanned aerial vehicle (UAV)

I. 서론

최근 무인항공기의 발전은 군사적 측면보다 민간분야에서 훨씬 가속화되고 있는 추세이다. 기존의 군사용, 연구용에 국한되어 있던 외부환경 측정용 탑재체 및 자기위치 추정에 사용하는 센서 등의 소형화, 프레임워크를 포함하는 비행체 개발용 기자재의 생산성 및 경제성 향상, 무인항공기의 활용을 전제로 하는 새로운 연구 및 산업분야 창출 등 다양한 사회 전반적인 현상들로 인하여 그 속도를 더욱 높이고 있다[1]. 특히 국제무인시스템협회(AUVSI: Association for Unmanned Vehicle Systems International)는 2015년에서 2025년까지 무인항공기를 활용한 산업이 미국에서만 약 10만 개 이상의 일자리 창출 및 약 820억 달러의 유, 무형의 경제적 효과를 가져올 것으로 예측함에 따라 모든 국가에서 무인항공기를 활용한 산업 발전에 대해 관심을 가지지 않을 수 없게 되었다[2]. 또한 최근에는 국가뿐만 아니라 국제기구에서도 무인항공기를 활용한 활동을 계획하여 실행하기 위한 초기 단계가 진행되고 있어서 민간분야에서의 활용도를 더욱 높이고 있다[3].

이러한 민간분야에서의 무인항공기 활용 중 가장 대표적인 사례는 무인항공기를 활용한 물류수송이라고 할 수 있다.

이미 Amazon, DHL, UPS, Fedex 등의 국제 물류수송업체에서는 무인항공기를 활용한 물류수송 시스템을 계획하고 있고 Amazon과 DHL은 각각 PrimeAir, Paketkopter 라는 이름의 시스템을 개발하여 운용개념소개를 위한 초기 시연 및 시스템 검증 단계를 수행함과 동시에 법적인 문제를 해결하고 있는 중이다[4-7]. 한편 국내에서는 아직 이러한 물류수송 시스템을 기업에서 직접 연구, 개발, 체계통합을 수행한 사례는 보고된 바 없으며 학계에서 연구 차원의 개별적 기능검증이 논문으로 보고되고 있는 수준이다. 이는 다른 나라에 비해 주거 및 생활환경 자체가 고도로 집적 및 고층화 되어있는 우리나라의 특수성을 맞추기 위한 물류수송 개념이 정립되지 않았기 때문이라고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 무인자율주행차량과 무인항공기를 동시에 활용하는 새로운 물류수송 개념을 제시하고 이를 위한 이종 협업 무인시스템을 제안한다. 이 개념은 주로 도심 및 아파트 밀집지역에 집적화된 생활과 기존의 물류수송 시스템이 차량에 집중된 경우 좀 더 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문의 본문에서는 앞서 제시한 개념을 보다 자세하게 서술하고 이를 달성하기 위하여 제시한 이종 협업 무인시스템개발 및 실험을 통한 검증결과에 대해 언급하고자 한다. II 장에서는 기존에 소개된 무인 물류수송 시스템에 대해 간략히 언급하고 본 논문에서 제시하는 새로운 무인 물류수송 개념에 대해 보다 자세하게 서술한다. III 장에서는 이종 무인시스템과 사용자 편의를 위한 시스템 개발결과에 대해 기술한다. IV, V 장에서는 무인자율주행차량 제어시스템과 무인항공기의 비행제어시스템에 대해 기술하고 VI 장에서는 전체 시스템을 활용한 실험결과 및 분석결과를 제시한다.

* Corresponding Author

Manuscript received August 30, 2014 / revised September 15, 2014 / accepted September 22, 2014

조성욱, 이다솔, 이웅희, 심현철: 한국과학기술원 항공우주공학전공 (swcho84@kaist.ac.kr/dasol@kaist.ac.kr/lamer0712@kaist.ac.kr/hcshim@kaist.ac.kr)

정연득: 한국항공우주연구원 항공제어전자팀(jyd28@kari.ac.kr)

※ 본 연구는 국방과학연구소 “이종 자율 무인기 협업체계 연구용역” (계약번호 UE124026JD)으로 지원된 연구결과이며, 지원에 감사 드립니다. 또한 본 논문을 통해 제시한 물류수송 개념과 이종협업 무인시스템은 다수 언론사를 통해 보도되었음[12-14]. 기사화해주신 많은 관계자 분들께 감사의 말씀 전합니다.

그림 1. 이종 무인시스템의 협업을 통한 물류수송 개념.

Fig. 1. The concept of the delivery service using the cooperative heterogeneous unmanned system.

II. 이종 무인시스템의 협업을 통한 물류수송 개념

대부분의 국가 중심, 지역거점 혹은 아파트 등이 밀집된 주거지역은 고밀도/집적화 및 고층화 환경을 이루고 있다. 이는 한정된 공간을 효율적으로 활용하는 측면에서 봤을 때 불가피한 선택이다. 하지만 이러한 환경에서 무인항공기의 자율비행은 GPS 등의 신호교란(multipath problem)과 고층 및 고밀도 집적화된 지역에서 발생하는 돌풍 등이 발생할 수 있으므로 매우 어려운 임무로 간주되고 있다[8]. 결과적으로, Amazon, DHL 에서 개발한 무인항공기를 활용한 물류배송시스템의 초기 기술시연을 밀집도가 낮은 지역에서 성공적으로 수행하여 그들이 제시한 개념을 성공적으로 검증한 사례는 국내 실정과 상당한 거리가 있다고 할 수 있다[4-7].

따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 무인자율주행차량과 무인항공기를 동시에 활용하는 새로운 개념의 물류수송 개념을 제안한다. 먼저 사용자가 본인이 위치한 지역에서 스마트폰 앱을 통해 송신한 임의의 물류배송 요구정보를 본 논문에서 제안하는 이종 협업 무인시스템이 수신하면 무인자율주행차량에 탑재한 컴퓨터가 사전에 해당 위치까지 도달하기 위해 필요한 지도정보를 이용하여 무인자율주행차량과 무인항공기에 필요한 임무(e.g. 각 시스템을 활용하여 최대한 갈 수 있는 위치)를 할당하고 무인자율주행차량부터 순차적으로 임무를 수행한다. 이 때, 무인 자율주행 시 GPS 등을 활용한 절대위치뿐만 아니라 상대거리 측정센서, 영상센서 등으로부터 확보되는 상대위치를 활용하여 지도정보와 매칭 및 보정과정을 거쳐 차량으로 도달할 수 있는 위치까지 정밀하게 이동한다. 무인 자율주행차량의 이동이 완료되면 무인항공기는 사전에 입력 받은 임무(e.g. 최종 목적지에서 무인자율주행차량이 최대한 이동할 수 있는 위치를 제외한 만큼의 이동거리 - 최단거리까지 도로가 없거나 고층 빌딩, 아파트 혹은 길의 폭이 좁아서 차량으로 최종 목적지 도달이 어

려운 난개발 지역 등)를 입력 받아 사용자가 지정한 최종 목적지까지 물류수송임무를 수행한다.

본 논문에서 제안된 개념은 기존의 물류시스템이 유인 차량 기반이면서 수송하는 최종 종착지가 고층, 고밀도 집적화된 국가 실정에 적합하며 수송 자체를 무인항공기에만 의존하지 않으므로 장거리, 장시간 비행성능 보장을 위한 노력 대신 수송 가능한 물품의 크기, 무게확장 등 산업화 측면의 연구개발에 더 많은 노력을 기울일 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존 물류수송기업에서 활용하는 배송용 지역정보시스템을 전반적인 부분에서 모두 활용함과 동시에 무인자율주행차량 및 무인항공기 활용을 위한 시스템 개조에만 비용을 투자하기 때문에 비용절감효과도 가져올 수 있으며 더 나아가서는 접근이 어려운 재해, 재난지역의 지속적인 원격 모니터링 혹은 구호활동 등의 새로운 임무를 위한 연구분야 및 사업 창출에도 기여할 수 있다.

III. 물류수송을 위한 이종 무인시스템

본 논문에서 제안하는 이종 무인시스템은 실제 상용차를 개조한 무인자율주행차량과 8개의 모터로 구성된 옥토펙터 기반의 수직이착륙 무인항공기로 구성하였다. 각각의 상세 사양 및 시스템 제원은 그림 2, 그림 3과 같다. 이 때, 무인자율주행차량은 기 개발된 시스템을 활용하였다[9,10].

본 논문에서는 위에서 제안한 물류수송 개념을 구현하기 위해 기 보유한 무인자율주행차량에 무인항공기를 탑재할 수 있도록 그림 4와 같이 알루미늄 프로파일을 이용한 이착륙페드를 제작하여 차량 상단의 후방부에 장착하였다. 이 때, 이동 시 무인항공기가 고정될 수 있도록 토크가 큰 서보모터를 활용하여 자동으로 동작 가능한 기체 고정장치(hooker)를 제작하였다.

또한 본 논문에서 제안하는 고도의 집적화, 고층화 환경

single GPS	U-blox EVK-6T (Autonomous Driving)
DGPS	Novatel OEMV-2 (Verification and Validation)
Laser Scanner	Velodyne HDL-32E
Nav. & Controller	NI CompactRio
Path Planner PC	Apple Mac mini
Vision PC	Apple Mac mini
Obs. Processing PC	CompuLab Intense PC
Autonomy	Path Tracking - single GPS + Vehicle ECU(Speed, Yaw rate) → Position, Heading Laser Scanner → Road Boundary Detection, Obstacles Camera → Road Detection

그림 2. 물류배송용 무인자율주행차량의 상세사양.

Fig. 2. System specification of the self-driving car for the delivery service.

Size	Diameter: 1.32 [m], Height: 0.38 [m]
Weight	Empty weight: 4.5 [kg] (with batt. and FCC system) Takeoff Gross Weight: 6.0 [kg] (with payload)
Powerplant	RCX Hobby D5012-360KV (1.43 [kg] per 1 ea)
Duration	Max. 15 [min] (Batt. - 9200mAh, 22.2V, 40C)
Flight Control System	Gumstix Verdex pro XL6P COM (600MHz, 128Mb) PWM generation board, Altitude Sensor (1D LIDAR) Ublox LEA-6H Small Custom board Microstrain 3DM-GX3-25, GPS-aided Navigation 2.4GHz Wi-Fi Access Point Network
Position Accuracy of the Single GPS	Horizontal: 2.0 [m] (with SBAS) [15] Vertical: about 3.0 ~ 5.0 [m]
Autonomy	Attitude, Altitude, Heading, Speed hold/command Waypoint/Path following/Hovering Automatic Takeoff/Landing and Unloading

그림 3. 물류배송용 무인항공기의 상세사양.

Fig. 3. System specification of the UAV for the delivery service.

하의 최종지점 물류배송을 위한 무인항공기는 프로펠러를 포함한 모터와 모터 사이의 거리를 1.32 [m]가 되도록 제작하였다. 이는 0.3302 [m]의 카본 프로펠러를 사용했을 때 적절

그림 4. 무인항공기 이착륙 공간(UAV deck) 설치.

Fig. 4. UAV deck on the self-driving car.

그림 5. 사용자 주문편의를 위한 스마트폰용 앱(App).

Fig. 5. Smartphone apps for ordering.

한 간극을 가지기 위함이다. 배터리를 제외한 탑재체의 중량은 최대 2.5 [kg]이므로 무인항공기 크기와 탑재체의 중량을 감안했을 때 중형으로 구분하며 가로 17.5 [cm], 세로 약 15 ~ 40 [cm], 높이 약 15 [cm] 이하의 다양한 배송용 상자를 탑재하기 위해 기체 하단부에 하이토크 서보모터 2개를 활용하여 소형 그립퍼(gripper) 2개를 횡방향으로 마주보도록 장착하였다. 이 때, 배송용 상자에는 그립퍼를 위한 직사각형 모양 간극이 있어야 하며 이것이 기체의 중방향 움직임에 반응하여 기체에 부적절한 진동영향을 주지 않도록 그립퍼 및 상자 간극의 형태를 그림 3과 같이 구성하였다.

그리고 사용자의 편의성을 고려하기 위해 그림 5와 같이 물류배송시스템과 연동할 수 있는 안드로이드 기반 스마트폰에 적용 가능한 어플을 개발하였다. 이것을 통하여 주문자는 원하는 물품을 선택할 수 있고 선택된 물류정보와 스마트폰의 GPS 위치를 주문자 통합정보로 구성하여 본 논문에서 제안하는 이종 협업 무인시스템으로 송신하게 되며 최종적으로 무인시스템은 수신된 정보와 사전에 알고 있는 정보를 융합하여 경로계획을 작성하고 무인자율주행차량과 무인항공기의 임무를 분할한 다음 각 시스템이 임무를 수행한다.

IV. 무인자율주행차량 제어시스템

본 논문에서 활용하는 무인자율주행차량은 차량 상단에 장착한 3차원 레이저 스캐너를 통해 실시간 외부환경정보를 획득하고 차량에 장착된 single GPS와 electronic control unit (ECU)를 통해 차량의 위치, 속도, 방향각속도 정보를 받아서 절대/상대항법을 수행한다. 이 때, 실시간으로 획득한 외부환경정보에서 장애물 정보를 추출하고 이를 절대좌표계에 매핑한 다음 참고문헌에서 제시한 경로생성 알고리즘을 통해 실시간으로 경로를 변경함으로써 이루어진다[9,10].

차량의 외부제어를 위한 목표 지점까지의 경로생성 및 실시간 경로관리 알고리즘은 본 연구실에서 개발한 One-cell Voronoi-based Vector Field Histogram을 활용한다[9,10]. 즉, 기본적인 경로관리를 위해 주어진 경로를 그림 6(a)와 같이 3차 다항식 기반으로 재정의하고 차량의 최대 회전반경과 차량의 폭을 고려한 원호를 가상의 평면에 연속적으로 표현하여 장애물 판단여부를 수행한 다음 센서를 통해 획득한 외부환경정보와 경로관리 알고리즘을 통해 그림 6(b)와 같이 가장 안전하게 회피할 수 있는 경로를 확보하여 주행한다[9,10].

차량의 내부제어를 위해 사용하는 모델은 그림 7과 같이 기하학적 이륜차 모델(bicycle model)로 표현할 수 있고 수식으로 나타내면 (1)과 같다. 이 때, 경로를 추종하기 위한 입력을 산출하기 위해 (1)을 정리한 (2)을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \psi \\ V \sin \psi \\ (V/L) \tan \delta_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R = \frac{V}{\dot{\psi}} = \frac{L}{\tan \delta_f} \quad (2)$$

이 때, 횡방향 제어를 위하여 경로상의 한 점을 제어점으로 지정하고 (3)을 사용하여 회전반경을 구한 다음 (2)를 통해 조향각을 구한다. 또한 종방향 제어를 위해 필요한 속도 입력은 경험식으로 구성된 (4)를 통해 구한다.

$$\frac{1}{R} = \frac{-2(Y_p^b)}{\{(X_p^b)^2 + (Y_p^b)^2\}} \quad (3)$$

$$V_{ref} = V_{normal} - V_{obs}$$

$$V_{normal} = 2.94899 \left(\ln \frac{1}{R} \right) + 7.02300 \left(\ln \frac{1}{R} \right) + 14.52209 \quad (4)$$

$$V_{obs} = \sqrt{\frac{2(d_{obs} - d_{safe})}{|a_{decel}|}}$$

여기서 d_{obs} 는 장애물까지의 상대거리를 의미하고 d_{safe} 는 안전을 위해 확보해야 하는 거리를 의미한다. 이렇게 구성된 알고리즘은 목표 지점까지의 절대위치를 활용하여 경로를 생성하고 실제 주행을 통해 가장 안전한 상대위치를 확보하면서 주행한다. 결과적으로 복합 장애물뿐만 아니라 GPS를 활용할 수 없는 지역에서도 적절한 자율주행성능을 확보할 수 있다. 이 때, GPS 활용불가 지역에서는 차량 전자제어시스템에 탑재된 방향각센서와 오도미터를 융합한 칼만필터를 통해 방향각 정보를 추정한다[9,10].

(a) Selection of the reference point for the collision avoidance (right) by using the graph search algorithm from the Voronoi edges (left).

(b) Result of the path generation for collision avoidance from the continuous selection of the reference point [9].

그림 6. One-cell Voronoi-based Vector Field Histogram을 활용한 경로계획.

Fig. 6. The path planning using the one-cell Voronoi-based vector filed histogram.

그림 7. 운동학적 표현을 위한 이륜차 모델.

Fig. 7. Bicycle model for kinematics of the self-driving car.

V. 무인항공기 비행제어 시스템

본 논문에서 활용하는 무인항공기는 사용자가 설정한 경로점을 사용하여 목표 궤적을 생성시키는 기준위치 생성기(position profile generator), 목표 궤적의 정밀추종을 위한 기체

그림 8. 무인항공기와 경로점 간의 기하학적 관계[11].
Fig. 8. Geometrical relationship between UAV and the waypoint [11].

축 방향 이동속도를 계산하는 기준속도 생성기(velocity profile generator), 주어진 동체축 방향 이동속도를 추종하기 위한 자세명령을 생성하는 속도 제어기, 자세 명령을 추종하는 자세 제어기로 구성되어 있으며 제어기 구성을 위해 도기한 기하학적 관계는 그림 8과 같다[11].

본 연구에서 설계한 속도명령 기반 궤적 추종 유도법칙은 멀티로터 형태의 회전익 무인항공기가 임의의 방향으로 자세를 기울여서 그 방향으로의 이동을 위해 필요한 속도를 생성하고 위치이동을 수행하는 것에 착안하였다. 이 때, 목표 궤적과 무인항공기의 현재위치 사이의 상대거리와 항법 좌표계 상의 속도성분을 활용한 상대거리 변화량을 사용한다. 즉, 비행체의 방향과 목표 궤적의 방향이 일치할 때의 좌표계를 각각 종방향, 횡방향, 고도축으로 정하면 목표 궤적과 무인항공기의 상대거리 및 상대거리 변화량은 (5), (6)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{lat} &= (X - X_d) \sin(\psi_{LOS}) - (Y - Y_d) \cos(\psi_{LOS}) \\ P_{long} &= -(X - X_d) \cos(\psi_{LOS}) + (Y - Y_d) \sin(\psi_{LOS}) \\ P_h &= Z_d - Z \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{lat} &= V_x \sin(\psi_{LOS}) - V_y \cos(\psi_{LOS}) \\ \dot{P}_{long} &= -V_x \cos(\psi_{LOS}) - V_y \sin(\psi_{LOS}) \\ \dot{P}_h &= -V_z \end{aligned} \quad (6)$$

이 때, 각 방향에 대한 속도 증분값 계산은 (7)을 통해 구할 수 있고 여기에 필요한 가속도 형태의 증분값을 구하기 위해 명령모델을 2차 시스템으로 가정하면 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_{lat}(t) &= \dot{P}_{lat}(t-1) + \Delta \dot{P}_{lat} \\ \dot{P}_{long}(t) &= \dot{P}_{long}(t-1) + \Delta \dot{P}_{long} \\ \dot{P}_h(t) &= \dot{P}_h(t-1) + \Delta \dot{P}_h \end{aligned} \quad (7)$$

그림 9. 무인항공기 제어시스템의 입, 출력단 구성[11].

Fig. 9. Input-output configuration of the control system for UAV [11].

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_{lat} &= (\omega_{lat}^2 P_{lat} + 2\zeta_{lat} \omega_{lat} \dot{P}_{lat}) \Delta t \\ \Delta \dot{P}_{long} &= (\omega_{long}^2 P_{long} + 2\zeta_{long} \omega_{long} \dot{P}_{long}) \Delta t \\ \Delta \dot{P}_h &= (\omega_h^2 P_h + 2\zeta_h \omega_h \dot{P}_h) \Delta t \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 ω_{lat} , ω_{long} , ω_h 과 ζ_{lat} , ζ_{long} , ζ_h 는 각 축방향의 속도 동역학적 특성을 2차원 시스템으로 간주할 때 필요한 고유진동수와 댐핑 계수이며 이를 어떻게 설정하는가에 따라서 해당 축방향의 속도 동역학 특성이 변경된다.

결과적으로 (7)을 무인항공기의 동체축 좌표계로 변환하면 (9)과 같고 이를 이용하여 일반적인 PID 제어기 기반의 속도, 자세제어기를 통해 최종적인 제어가 이루어진다. 전체적인 제어시스템의 입력, 출력단 구성은 그림 9와 같다[11].

$$\begin{aligned} u_d &= \dot{P}_{long} \cos(\psi_{LOS} - \psi_{heading}) + \dot{P}_{lat} \sin(\psi_{LOS} - \psi_{heading}) \\ v_d &= \dot{P}_{long} \sin(\psi_{LOS} - \psi_{heading}) - \dot{P}_{lat} \cos(\psi_{LOS} - \psi_{heading}) \\ w_d &= \dot{P}_h \end{aligned} \quad (9)$$

VI. 실험 및 결과분석

본 논문에서 제시한 새로운 물류수송 개념과 이를 달성하기 위하여 개발한 이중 협업 무인시스템은 실험을 통해 전반적인 시스템 검증을 수행하였다. 실험에 사용한 시나리오는 실제 환경을 축소하여 그림 10과 같이 구성하였다. 이 때, 주문자의 위치는 차량으로 도달할 수 없는 잔디밭 위이며 주문용 앱을 이용할 때 결정되도록 하였다.

먼저, 무인자율주행차량과 무인항공기가 이동한 3차원 궤적은 그림 11과 같다. 무인자율주행차량에 탑재된 임무분석 소프트웨어는 기 확보된 지도정보를 통해 최종목적지까지 물류배송을 위한 임무를 분할하고 그 결과를 각 시스템에 전달한다. 이 때, 그림 10에서 제시한 시나리오와 같이 사용자가 중앙 잔디밭 한 가운데서 물류를 주문하였으므로 무인자율주행차량은 최소한의 움직임, 연료소모 및 무인항공기 이륙이 원활할 수 있는 지역에 대한 정보를 비용함수화 하여 이를 토대로 도달할 수 있는 거리까지만 이동하고 남은 거리를 무인항공기가 이동하도록 하는 임무가 산출되었다.

따라서 실험을 통해 획득한 그림 11에서 무인자율주행차량이 일정 거리까지만 이동하고 남은 거리를 목표 물류를 탑재한 무인항공기가 이동하여 내려놓은 다음, 이륙한 지점 부근의 안전한 위치에 복귀하도록 하는 궤적결과를 확인할 수 있다. 두 번째로 무인항공기의 비행제어시스템의 시간에 대

그림 10. 시스템 검증을 위한 실험 시나리오 구성.

Fig. 10. Scenario for small-scale experimental system validation.

한 제어결과는 그림 12를 통해 확인할 수 있다. 본 논문을 통해 개발한 유도제어법칙은 목표 위치와 현재 무인항공기의 위치 사이의 상대운동정보를 기반으로 동체축 상의 속도 명령을 산출하고 이를 추종하는 방식이다. 따라서 그림 12를 통해 자세(a), 동체축 속도(b), NED 프레임 상의 위치(c) 그래프 상에서 허용 가능한 정도의 작은 추정오차를 가지고 추종하고 있음을 알 수 있다. 또한 추종을 위해 산출된 정규화된 제어입력은 그림 13을 통해 확인 할 수 있다.

마지막으로 본 논문에서 제안하는 신개념 물류수송을 위해서는 사용자가 원하는 지점에 정밀한 물류수송이 이루어져야 한다. 이러한 목표를 달성하였는가에 대한 판단을 위하여 반복실험을 통해 착륙지점에 대한 데이터를 수집하고 원형 공분산 오차분석(CEP: Circular Error Probability analysis)을 수행하였다. 착륙지점 데이터 확보를 위한 반복실험횟수는 총 20번으로 수행공간과 시나리오는 같지만 실험시기를 다르게 하여 외부환경에 대한 불확실성이 모두 다르게 포함된 데이터를 확보하였다. 이 때, 실험시기라 함은 오전/오후/저녁을 구분하였을 뿐만 아니라 약 70일 동안 일주일에 약 2~3회, 최저풍속 3 [m/s]-최고풍속 8 [m/s] 사이의 불특정 날씨환경 하에서 실험했음을 의미한다.

착륙지점은 LCC (Local Cartesian Coordination) 좌표계를 적용하여 north, east, down (NED)로 표현하였고 전체 데이터는 그림 14를 통해 확인할 수 있다.

그림 11. 이종 무인시스템의 3차원 이동궤적.

Fig. 11. Three dimensional trajectory of the heterogeneous unmanned system.

그림 12. 시간에 대한 무인항공기의 상태변수 변화, (a) 자세, (b) 동체축 속도, (c) NED 좌표계 상의 위치.

Fig. 12. Time histories of the flight states, (a) attitude, (b) body-axis velocity, (c) position in the NED frame.

그림 13. 정규화된 무인항공기의 각 방향 제어입력.

Fig. 13. Normalized control input of each axis.

그림 14. 착륙지점 분석결과 (CEP: 1.7601 [m]).

Fig. 14. Landin position analysis (CEP: 1.7601 [m]).

이 때, 반경 2, 4, 6 [m]의 원을 추가로 도시하여 착륙 지점에 대한 정보를 한 눈에 알 수 있도록 하였고 약 50%의 데이터는 반경 2 [m] 원 안에 들어오는 것을 알 수 있다. 이것은 본 실험에 사용한 소형 저가형 GPS (single GPS)의 위치 표준 편차가 수평 방향으로 평균 약 2~6 [m] 이고 이 값이 항상 위치오차로 실험에 영향을 주고 있기 때문이다. 또한 착륙지점 데이터들의 분포가 우측방향으로 편향되어 있음을 알 수 있는데 이러한 현상의 원인은 1차원 상대고도계 시스템이 무게중심에 있지 않고 기체 우측에 편향되어 장착되어 있기 때문이다. 즉, 택배물품 배송을 위해 무게중심 근방에 센서를 장착하지 못하였고 이로 인하여 착륙 시 상대적으로 추력이 약한 시점에서 지면효과(ground effect)가 발생하게 되면 기체의 트림이 1차원 상대고도계 시스템이 장착된 방향으로 기울게 되기 때문이다. 본 논문에서는 GPS 신호교란이 수평방향보다 수직방향에 더 큰 영향을 주는 것으로 가정하고 수직방향으로의 GPS 신호교란 발생 시 1차원 상대고도계 시스템을 활용하여 상대고도 및 속도를 추정하도록 하였다.

무인항공기의 평균 착륙위치는 (N -7.0950, E -8.2184) [m]이고 공분산은 (N 0.6667, E 0.6365) [m]이며 목표 착륙지점과 (N 0.0950, E 0.7816) [m]의 편향(bias)오차를 갖고 있다. 따라서

CEP의 정의에 따르면 본 논문에서 사용한 무인항공기는 50%의 확률로 목표지점과 반경 1.7601 [m] 범위 내에서 착륙이 가능하며 이는 소형, 저가의 single GPS를 사용하는 것을 감안하면 상당히 정확한 지점에 물류수송을 수행하고 있다고 할 수 있다.

VII. 결론

본 논문은 무인자율주행차량과 무인항공기를 동시에 활용하는 새로운 물류수송 개념을 제시하고 이를 위한 이중 협업 무인시스템을 제안하였다. 또한 해당 시스템의 타당성 및 활용성을 검증하기 위해 축소된 시나리오를 선정하고 실제 주행 및 비행실험을 수행하였으며 소형 저가의 single GPS를 사용했을 때의 착륙지점 정밀도 분석을 통해 실제 환경에서의 활용 시 안전성에 대한 점검을 수행하였다.

실험 결과 본 논문에서 제안한 물류수송 개념은 주로 도심 및 아파트 밀집지역에 집적화된 생활과 기존의 물류수송 시스템이 차량에 집중된 경우 적합하며 현 시점에서의 기술 실현성이 높다고 판단된다. 제안된 개념과 시스템의 활용 및 정밀도를 더욱 높이기 위해서는 외부환경을 인지할 수 있는 영상센서 등의 활용하여 지형지물 판단, 지역적 충돌회피경로 생성 및 추종, 좀 더 정밀한 자동이착륙 및 자율적 물류장/탈착 수행 등의 기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] N. Seong, "Can make the mass market by commercializing the drone?," *Weekly Focus, LG Economic Research Institute*, pp. 23-28, Feb. 2014.
- [2] D. Jenkins and B. Vasigh, "The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the united states," *Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI)*, Mar. 2013.
- [3] R. Kent, J. Armstrong, and A. Obrecht, "The future of non-governmental organisations in the humanitarian sector: Global transformations and their consequences," *Humanitarian Futures Programme, King's College London*, Aug. 2013.
- [4] Amazon PrimeAir, <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>
- [5] DHL Packetcopter, <http://www.dw.de/deutsche-post-dhl-tests-delivery-drone/a-17281339>
- [6] UPS Delivery drones, <http://www.theverge.com/2013/12/3/5169878/ups-is-researching-its-own-delivery-drones-to-compete-with-amazons>
- [7] Fedex Delivery Drone, http://www.huffingtonpost.com/2013/12/19/fedex-ceo-drones_n_4468218.html
- [8] S. Pullen, P. Enge, and J. Lee, "High-integrity local-area differential GNSS architectures optimized to support UAVs (Unmanned Aerial Vehicles)," *Proc. of ION ITM 2013*, San Diego, CA, USA, Jan. 2013.
- [9] U. Lee, S. Yoon, H. Shim, P. Vasseur, and C. Demonceaux, "Local path planning in a complex environment for self-driving car," *The 4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems*, Honkong, pp. 445-450, Jun. 2014.
- [10] U. Lee, J. Oh, S. Shin, I. Shim, J. Choi, Y. Jung, K. Park, M. Kim, J. Jung, H. Shim, I. Kweon, and S. Choi, "EureCar, KAIST Self-Driving Car," *NI Global Student Design*

Competition (NI Korea Finalist), National Instruments, <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-37101>

- [11] Y. Jung, S. Cho, and H. Shim, "Trajectory tracking controller design using L1 adaptive control for multirotor UAV," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space* (reviewing since Mar. 2014).
- [12] KBS News-Strawberry Drone, http://news.kbs.co.kr/news/NewsView.do?SEARCH_NEWS_CODE=2844144&ref=A
- [13] YTN TV-Delivery Drone, http://www.ytn.co.kr/_ln/0115_201405110859315353
- [14] Channel A, Delivery Drone, <http://news.ichannela.com/society/3/03/20140411/62472156/1>
- [15] U-Blox 6 GPS Modules Data Sheet. LEA-6 series, LEA-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09004), [http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09004\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09004).pdf)

심 현 철

1991년 서울대학교 기계설계학과 학사. 1993년 동 대학원 석사. 2000년 University of California, Berkeley Mechanical Engineering 공학박사. 2007년~현재 한국과학기술원 항공우주공학과 부교수 및 KI Field Robotics Center 센터장. 관심분

야는 무인 비행제어 시스템, 필드 로보틱스 시스템.

조 성 욱

2010년 한국항공대학교 항공우주공학과 학사. 2012년 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 항공우주공학전공 석사. 2012년~현재 동 대학원 박사과정 재학 중. 관심분야는 영상처리, 표적검출/추적, 영상기반 무인 제어 시스템.

이 다 술

2013년 한국항공대학교 항공우주공학과 학사. 2013년~현재 한국과학기술원 기계항공시스템학부 항공우주공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 무인항공기 유도 및 제어, 무인항공기 경로계획법, 임베디드 시스템.

정 연 득

2008년 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 항공우주공학전공 학사. 2010년 동 대학원 석사. 2014년 동 대학원 공학박사. 2014년~현재 한국항공우주연구원 항공기술연구소 항공기반기술실 항공제어전자팀 선임연구원 재직 중. 관심분

야는 다중 비행모드 제어시스템, 적응제어기법, 무인 비행제어시스템 개발.

이 웅 희

2009년 한국항공대학교 항공우주공학과 학사. 2011년 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 항공우주공학전공 석사. 2011년~현재 동 대학원 박사과정 재학 중. 관심분야는 무인자율주행차량시스템 및 경로계획법.