

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(4), 289-295(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.4.289

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

단안카메라를 이용한 항공기의 상대 위치 측정

김정호, 이창용, 이미현, 한동인, 이대우*

Monocular Vision based Relative Position
Measurement of an Aircraft

Jeong-ho Kim, Chang-yong Lee, Mi-hyun Lee, Dong-in Han and Dae-woo Lee*

Department of Aerospace Engineering in Pusan National University

ABSTRACT

This paper describes a ground monocular vision-based measurement algorithm measuring relative range and position of aircraft using the information of wingspan and optical parameters for the camera. A technique obtaining an aircraft image is also described in this paper. This technique can be used as external measurement for autonomous landing instead of ILS. To verify the performance of these algorithms, flight experiment is performed using light sport aircraft with GPS and monocular camera. Finally we obtained the reasonable RMSE of 1.85m is obtained.

초 록

본 논문은 지상에서 단안 영상센서를 이용하여 항공기의 상대 위치를 측정하는 방법에 대하여 기술하는데, 알고 있는 항공기의 날개전폭과 카메라의 광학 파라미터를 이용하여 상대 거리 및 상대 위치를 측정하는 방법을 제시하였다. 또한 항공기 영상을 추출하기 위하여 차영상 기법을 이용하는 방법을 제시하였다. 이러한 기술은 ILS를 대신할 영상기반 자동착륙 시스템으로 이용될 수 있다. 상대 위치 및 거리 측정 성능을 검증하기 위하여 경비행기와 GPS를 이용하여 성능을 검증하였으며 1.85m의 평균제곱근 오차가 발생함을 확인하였다.

Key Words : Vision Processing(영상처리), Monocular(단안), Relative range(상대거리)

1. 서 론

최근 경량항공기를 레저로서 활용하는 인구가 증가하고 있으며, 이에 따라 이착륙 사고율 역시 증가하고 있다. 이착륙 시 발생하는 사고율을 낮추기 위하여 별도의 계기착륙시스템[1]을 설치하는 것이 필요하지만, 높은 가격으로 보급에 어려

움을 겪고 있다. 탑재형 활주로 인식 기술[2]도 개발되었으나 역시 가격이 높아지게 된다. 이에 따라 저가형 카메라를 이용하여 항공기의 상대 위치를 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

영상 센서를 이용한 항공기의 상대 위치 측정 방법의 경우, 국내를 비롯하여 해외에서도 관련 연구가 수행된 적이 있으나 대부분은 무인 항공

† Received : September 16, 2014 Revised : March 18, 2015 Accepted : March 19, 2015

* Corresponding author, E-mail : baenggi@pusan.ac.kr



Fig. 1. image of the aircraft installed LEDs

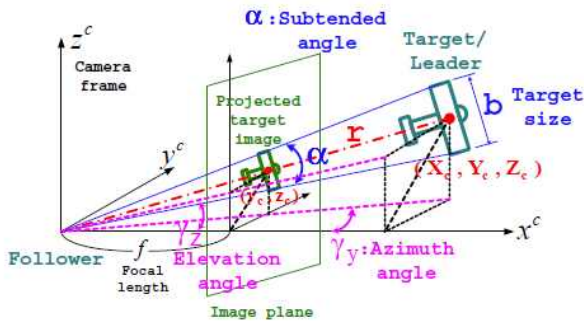


Fig. 2. relative position measurement

기의 편대 비행을 수행하기 위한 연구들이었다.

Stanford대학[3]에서는 무인 항공기의 주익의 끝단과 수평 미익의 끝단, 수직 미익 끝단에 LED를 장착하여 상대 위치를 측정하였다. 또한 Georgia Institute of Technology[4]에서는 상대 항공기가 항상 시선각에 정렬되어 있다는 가정하에 항공기의 상대 위치를 측정하는 연구를 수행하였다. GIT의 논문에서는 Uncented Kalman Filter(UKF)를 이용하여 보다 정확한 상대 위치를 추정하는 연구를 수행하였다. 이 때 항공기의 상대 위치를 날개 끝단을 잇는 두 벡터 사이의 내각으로 간략화하여 표현하였다. 또한 이와 유사한 관계식을 이용하여 Extended Kalman Filter(EKF) 형태로 추정하는 관련 연구가 본 연구자와 서울대학교에[5]서 공동으로 수행되었다.

본 연구는 차영상을 이용한 항공기의 영상을 추출하는 방법과 3차원 상대 위치를 측정하는 방법을 제시하였으며, 이를 검증하기 위하여 경비행기를 이용하여 실험을 수행하였다. 최대 3km 전방에서 접근하고 있는 항공기의 상대 거리와 위치를 측정하여 보았다. 기체에 탑재한 GPS를 이용하여 상대 위치를 계산하였으며, 실시간 위치 측정이 가능한 프로그램을 통해 상대 위치를 측정 및 저장하도록 하였다.

2장에서는 항공기 영상의 추출 방법과 상대 위치 측정 방법에 대하여 기술하였고, 3장에서는 비행 실험을 수행하기 위한 시스템 구성과 실험 방법 및 실제 위치 측정 결과에 대하여 기술하였다. 이러한 연구는 ILS를 대신할 수 있는 영상기

반 자동착륙 시스템에 사용될 수 있다.

II. 이론적 접근 방법

2.1 항공기 추출 기법

지상에 고정된 카메라를 이용하여 항공기의 영상을 추출하는 가장 효과적인 방법은 전후 영상의 차이를 탐지하는 것이다. 만일 새로운 물체가 존재하지 않는다면 현재의 픽셀의 밝기값에서 같은 밝기값을 빼게 되므로 0에 가까운 값만 존재하지만 새로운 물체가 등장하는 경우 배경 영상에서 현재 영상을 빼게 되어 Fig. 3과 같이 차영상에 항공기만이 남게 된다[6].

차영상은 256단계의 밝기 정보를 가지며, 항공기의 날개폭을 계산하기 위해서는 Fig. 4와 같이 1과 0의 두 가지 값을 가지는 이진 영상으로의 변환이 필요하다.

이후 영상에서 좌측 끝점과 우측 끝점을 잇는 대각선의 길이를 구함으로써 영상에 존재하는 항공기의 날개 길이를 계산할 수 있다.



Fig. 3. Input image(top left). background image(top right), difference(bottom)



Fig. 4. binary image of the aircraft

2.2 항공기의 상대 위치 측정

단안 카메라를 이용하여 항공기의 상대 거리를 측정하기 위해서는 Fig. 5와 같이 정의된 날개 끝과 끝을 향하는 내각(subtended angle) 정보가 필요하다. m단위의 항공기의 날개 길이 정보와 영상에서 측정 가능한 내각 정보를 이용하여 Fig. 5와 같이 항공기의 실제 상대 거리 측정이 가능하다.

이 때 카메라의 화각(Field of view) 및 초점 거리는 광학 보정 툴을 이용하여 사전에 측정되어야 한다. 화각은 일반적으로 도 단위로 표현되며, 초점거리는 pixel단위로 표현된다.

측정된 항공기의 상대 거리는 핀홀 카메라 모델[6]에 의해 Fig. 7과 같이 3차원 상대 위치로 변환될 수 있다.

목표물을 지향하는 단위벡터를 v 라고 정의할 때, 단위벡터 v 의 x축에 대한 성분을 v_x , y축에 대한 성분을 v_y , z축에 대한 성분을 v_z 라고 정의한다. 각각의 성분은 다음의 수식과 같이 정의할 수 있다. 이때 u 와 v 는 영상의 x와 y축 좌표들의 의미하며, f 는 카메라의 초점 거리를 의미한다.

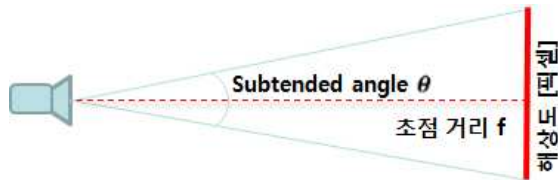


Fig. 5. Definition of the Subtended angle

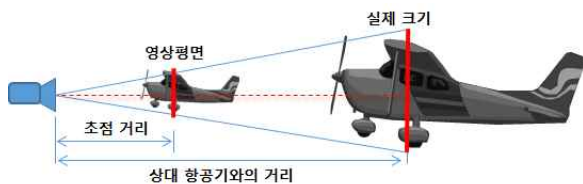


Fig. 6. Relative range measurement using pin-hole camera model

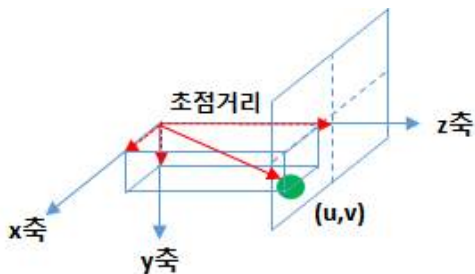


Fig. 7. Pin-hole camera model

$$v_x = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \tag{1}$$

$$v_y = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \tag{2}$$

$$v_z = \frac{f}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \tag{3}$$

이제 측정된 상대 거리를 각각의 방향 벡터에 곱함으로써 목표물의 x, y, z축에 대한 상대 위치로 변환할 수 있다.

III. 실험을 통한 검증

3.1 시스템 구성

항공기의 영상 및 위치를 측정하기 위하여 Fig. 8과 같이 GPS와 20도 화각에 1280 x 720 해상도를 가지는 렌즈와 카메라를 사용하였다. 지상에서는 비행 중인 항공기의 영상을 획득하고, 항공기에 탑재된 GPS를 이용하여 측정된 거리가 정확한 값인지 확인하였다. 이때 사용된 GPS는 single point L1을 사용하였으며, GPS의 위치 정확도는 RMS 1.5m 수준으로 제공되고 있다. 하지만 이 결과는 정적(static)한 자세에서의 측정결과이며, 비행 중에는 RMS 정확도가 달라질 수 있다.

항공기의 위치와 카메라를 통해 획득한 영상의 시간은 자체 시간을 기준으로 하였으며, GPS 데이터를 영상의 시간에 맞춰 동기화하였으며, 이때 1차원 선형 보간법을 이용하였다. 지상에서는 영상 저장 시의 시간을 함께 기록하였다.

3.2 항공기의 날개 길이 측정

앞서 2.1절에서 언급한 것과 같이 비행 중인 항공기의 날개 길이를 영상을 통해 지속적으로 측정하였다. 영상에서 측정된 전폭(wingspan)은 Fig. 9와 같으며, 측정된 날개의 위치는 Fig. 10에서 붉은 색 직선으로 표현하였다. 본 실험의 경우 항공기가 카메라의 후방에서 이륙하여 카메



Fig. 8. Equipments for experiment

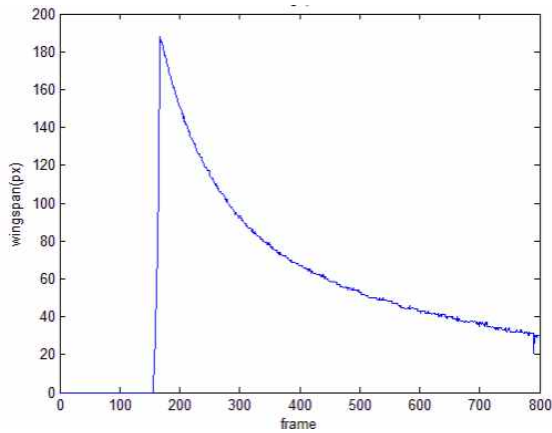


Fig. 9. Measured wingspan in image frame

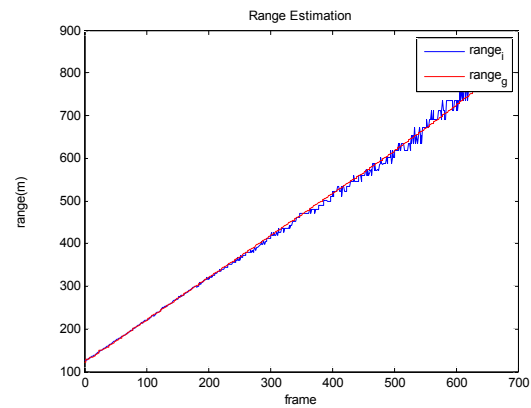


Fig. 11. Measured relative range of the aircraft

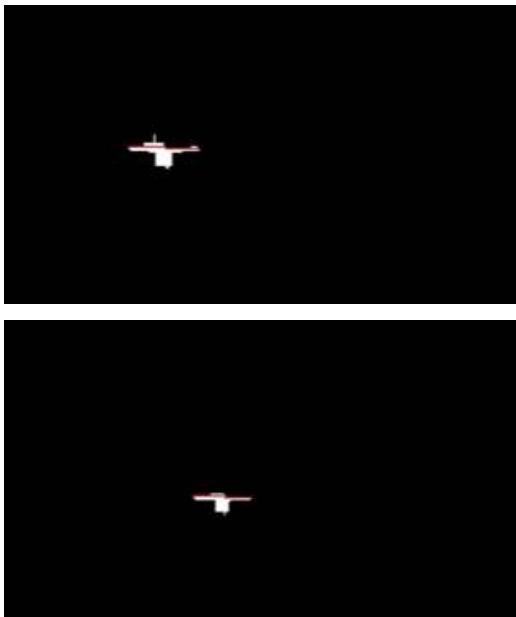


Fig. 10. Detected wing in the image (red line means wing)

라의 전방을 향해 비행하는 항공기를 촬영하였다. 약 150프레임부터 항공기가 감지되었다.

3.3 항공기의 상대 거리 측정

3.3.1 단거리 측정 실험

원거리 측정에 앞서 1km 이내로 접근 중인 항공기의 상대 거리 측정 실험을 수행하였다. 측정된 상대 거리는 Fig. 11에서 보는 것과 같이 GPS에서 측정된 상대 거리와 경향 및 측정치가 일치하는 것을 볼 수 있다.

하지만 해상도가 한정되어 있는 실험 카메라에서 목표물이 작아질수록, 다시 말해 항공기가 멀어질수록 측정값에 오차가 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 두 가지 요인에 의해 기인한다

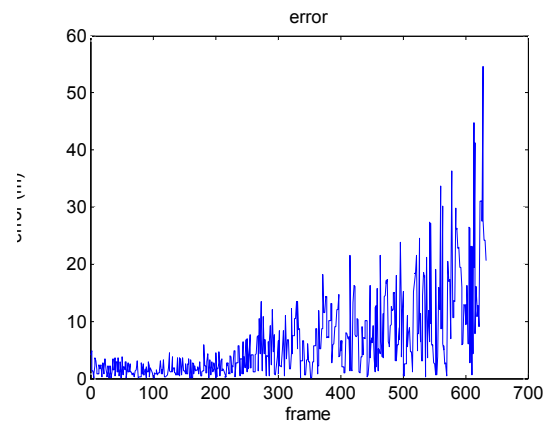


Fig. 12. Relative measurement error (m)

고 볼 수 있는데, 첫째는 거리가 멀어질수록 1픽셀의 날개 길이 측정 잡음이 큰 영향을 미치기 때문이다. 두 번째 요인은 항공기가 멀어짐에 따라 발생하는 가시성의 감소이며, 시정이 좋지 않은 경우에 이런 증상이 더 크게 발생할 수 있다.

정량적인 성능 분석을 위하여 상대 거리 측정 오차 분석을 수행하였다. Fig. 12는 상대 거리 측정 오차의 절대값을 나타낸 그래프로써, 상대 거리 측정 오차의 절대적인 크기를 나타낸다. 앞서 언급한 것과 같이 상대 거리가 증가함에 따라 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

앞서 나타낸 측정 오차를 상대 거리에 대한 비율(%)로 Fig. 13과 같이 표현하여 보았다. Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 상대 거리에 대한 오차를 역시 유사한 경향을 가짐을 알 수 있었다. 이때 약 1.25%의 평균오차와 1.06%의 표준 편차가 발생함을 확인하였다. 이는 약 100m에 1.25m에 해당하는 수준의 거리 측정 오차로 볼 수 있으며, 오차가 상대적으로 작은 300m이내 거리에서는 평균 1.85m의 평균제곱근오차(RMSE)가 발생함을 확인하였다.

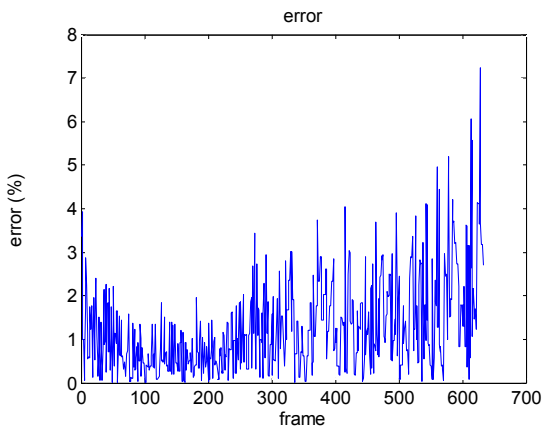


Fig. 13. Relative measurement error (%)

3.3.2 원거리 측정 실험

앞선 실험에서는 1km 이내에 접근해 있는 항공기에 대한 거리 측정을 수행하였다. 실제 항공기가 착륙을 위해 접근하는 거리는 1km 이상의 직선거리가 확보되어야 하므로 보다 원거리에 존재하는 항공기에 대한 상대 거리 측정 실험을 수행하였다. Fig. 14는 이 경우의 비행궤적을 보여준다.

이번 실험에서 항공기는 약 3km 전방에서 활주로를 향해 진입하고 있으며, 상대 거리가 일정한 속도로 감소하고 있음을 Fig. 15를 통해서 확인할 수 있다.

앞선 실험과 같이 단안 카메라를 이용하여 항공기의 상대거리를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 16과 같다. 앞선 실험 결과에 비해 오차가 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 약 2km 이내에 항공기가 접근한 경우 오차의 진동이 큰 폭으로 감소함을 확인할 수 있었다.

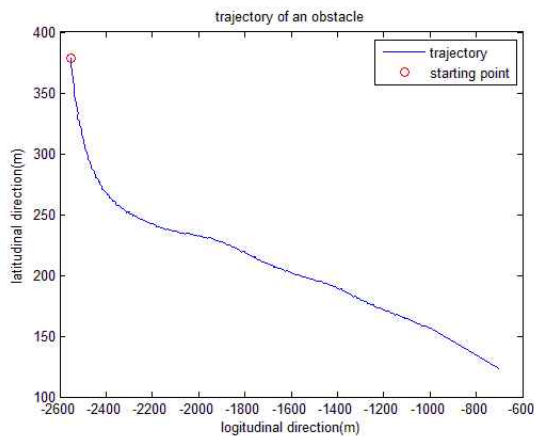


Fig. 14. Trajectory of the aircraft

2.2절에서 언급한 것과 같이 측정된 상대 거리와 목표물의 영상 내 좌표를 이용하여 목표물의 3차원 상대 위치를 측정하여 보았다. 이 때 측정된 평균 오차 평균제곱근오차 및 표준 편차는 다음 표와 같다. 여기서 평균오차(ME)는 bias 정도, 평균제곱근오차(RMSE)는 절대적인 오차의 크기, 표준편차(STD)는 오차의 분포도를 판단하는 기준으로 결과를 제시하였다.

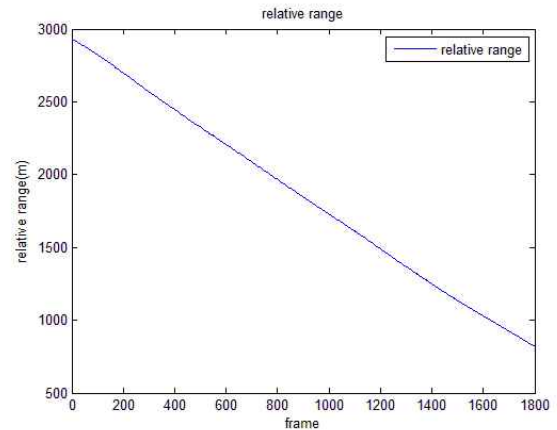


Fig. 15. Relative range of the aircraft

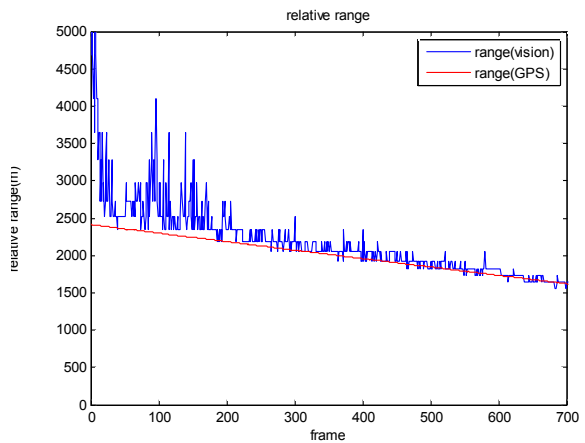


Fig. 16. Measured relative range of the aircraft

Table 1. Mean and RMSE, STD of 3-dimensional relative position

	Mean(m)	RMSE (m)	STD(m)
x축 (우측)	8.92	45.38	5.59
y축 (하방)	2.44	43.39	2.60
z축 (전방)	141.04	297.11	84.32

Table 2. Mean and RMSE, STD of 3-D relative position(less than 2km)

	Mean(m)	RMSE(m)	STD(m)
x축 (우측)	-4.94	5.26	1.83
y축 (하방)	-1.49	5.45	5.25
z축 (전방)	32.47	67.74	59.50

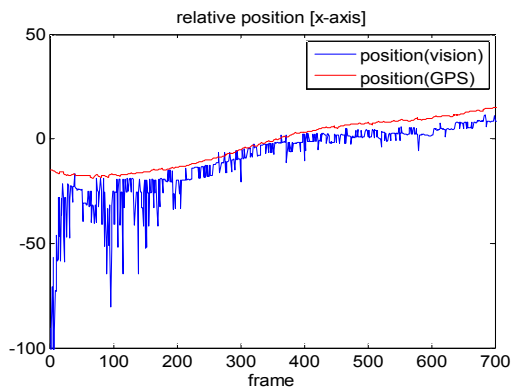


Fig. 17. relative position of x-axis

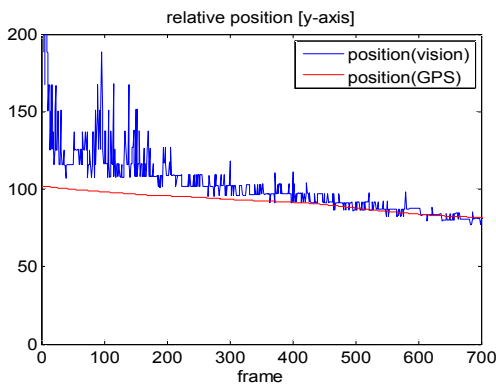


Fig. 18. relative position of y-axis

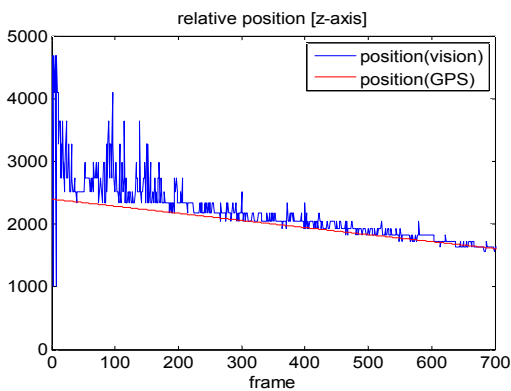


Fig. 19. relative position of z-axis

3.4 항공기의 자세 변화의 영향성 분석

본 논문에서는 Oh[3]의 논문에서와 같이 항공기는 항상 Fig. 5 또는 6과 같이 시선 벡터에 정렬되어 있다고 가정하였다. 하지만 만약 이러한 가정을 만족하지 못하는 경우에 대한 영향성 분석을 3.3.1절의 단거리 실험 데이터를 이용하여 수행하여 보았다.

만약 항공기의 방위각이 활주로의 끝단에 설치되어 있는 카메라를 향하지 않거나, 바람의 영향으로 크랩(crab) 기동을 하는 경우를 가정할 경우, Fig. 20과 같이 영상에서의 주익의 길이는 실제 주익의 길이보다 짧게 측정된다. 따라서 상대적으로 물체가 더 먼 거리에 있는 것으로 인식될 수 있다.

항공기의 방위각 오차를 θ 라고 할 때, 앞서 3.3.1절에 사용한 데이터에서 측정된 픽셀 단위의 주익의 길이에 $\cos\theta$ 를 곱하여 거리를 재측정하여 보았다. 이 때 착륙 상황을 가정한 만큼 최대 $\pm 20^\circ$ 를 방위각 오차로 가정하였다.

Figure 21은 20도의 방위각의 오차가 발생하였을 때의 상대 거리 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 앞서 Fig. 11에 비해 상대적으로 멀리 있는 것과 같이 측정된 것을 알 수 있다.

10도 단위로 방위각 오차를 적용한 뒤 계산한 평균제곱근오차는 다음 Table 2와 같으며, 300m

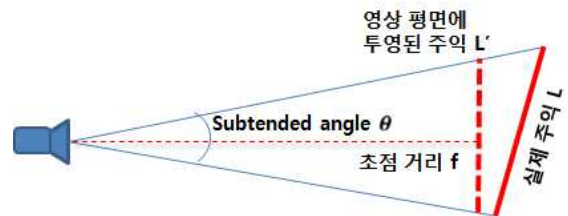


Fig. 20. measurement error of an wingspan by heading error

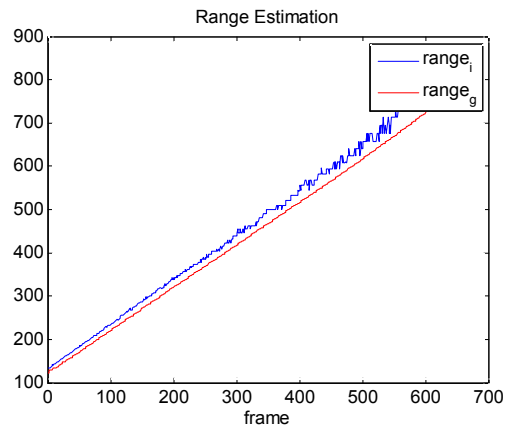


Fig. 21. Relative range of the aircraft

Table 3. range measurements varying heading angle error

방위각 오차	RMSE (m)	STD (m)
-20 °	14.78	3.43
-10 °	4.37	1.74
0 °	1.85	1.70
10 °	4.37	1.74
20 °	14.78	3.43

이내로 접근한 경우의 측정오차의 평균제곱근오차와 표준편차를 Table 3에 정리하였다.

IV. 결 론

본 논문은 영상 센서를 이용하여 항공기의 3차원 위치 측정 방법에 대하여 다루고 있으며, 경량항공기를 이용하여 실제 비행 실험을 통해 얻은 결과를 제시하였다.

800미터 이내 거리에 존재하는 항공기의 상대 거리를 영상 센서를 통해 측정한 결과 약 1.25%의 평균 위치 오차가 발생하였으며, 1.06%의 표준 편차가 발생함을 확인할 수 있었으며, 300m 이내 거리에서는 1.85m의 평균 제곱근 오차가 발생함을 확인하였다. GPS의 RMSE 정확도가 1.5m인 점을 감안하면 근거리의 경우 비교적 정확한 수준의 항공기 외부 측위가 가능하다는 것을 확인하였다.

두 번째 실험에서 카메라를 기준으로 1.5km이상 2.5km이내의 원거리 비행을 하는 경우 X/Y/Z축 방향에 대해 8.92m, 2.44m, 141.03m의 평균 오차가 발생함을 확인할 수 있었으며, 5.59m, 2.59m, 84.31m의 표준 편차가 발생함을 확인하였다. 약 2km 이내에 근접하는 경우 오차가 -4.94m, -1.49m 32.47m로 큰 폭으로 감소하였으며, 상대 거리의 경우 68.29m의 평균 제곱근 오차가 발생하였다. 특히 착륙단계에서는 고도 정보가 가장 중요한데, 100m 고도의 경우 5.45m의 고도 오차가 발생하였으므로 2km 이내에 근접하는 경우 충분히 착륙 유도 정보로서 활용할 수 있을 것을 보인다. 또한 현재 사용한 1280×720의 해상도 카메라를 FHD급의 해상도 혹은 그 이상의 해상도로 향상시킬 경우 보다 높은 정확도를 기대해볼 수 있다.

결론적으로 본 연구의 결과는 ILS를 대신할 자동 착륙 외부측위 시스템으로 단안영상을 기반

으로 한 시스템이 가능하다는 것을 증명하였다.

마지막으로 항공기의 방위각이 카메라를 향하지 않는 경우 영상 평면상에서 정확한 날개 길이의 측정이 어렵고, 이로 인해 상대거리 측정 오차가 발생함을 확인하였으며, 보다 정확한 착륙 유도 시스템으로 활용하기 위해서는 항공기와 카메라 사이의 방위각 오차 측정 방법이 필요하다.

후 기

이 과제는 부산대학교 교수 국외장기파견지원비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) Myeong-Sook Jeong, Joongwon Bae, Hyang-Sig Jun and Young Jae Le, "GBAS Flight Testing and Performance Assessment using Flight Inspection Aircraft at Gimpo International Airport," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 1, pp-19-61, 2015.
- 2) Minjeong Jeong, Han-seok Ryu and Sanghyuk Park, "Design and Flight Test of Autonomous Landing Approach Algorithm for UAV," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 6, pp.458-464, 2013.
- 3) Zouhair Mahboubi, Zico Kolter, Tao Wang, Geoffrery Bower, "Camera Based Localization for Autonomous UAV Formation Flight," INFOTECH, 2011.
- 4) Seung-min Oh, Eric N. Johnson, "Relative Motion Estimation for Vision-based Formation Flight using Unscented Kalman Filter," *AIAA GNC conference*, South Carolina, 2007.
- 5) Jun Kyu Lim, Dae woo Lee, Chan Gook Park, "An Adaptive Extended Kalman Filter for UAV Formation Flight Using Single Camera," *Conference of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, pp.455-461, November, 2012.
- 6) Jonh hun Kim, Kyeum-rae Cho, Dae-woo Lee, "Design of the Vision Based Head Tracker Using Area of Artificial Mark," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 34, No. 7, pp. 63-70, 2006.