

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(7), 532-538(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.7.532>

## 영상기반 편대비행을 위한 선도기 자세예측 알고리즘

허진우\*, 김정호\*, 한동인\*, 이대우\*\*, 조겸래\*\*, 허기봉\*\*\*

## Pose Estimation of Leader Aircraft for Vision-based Formation Flight

Jin-Woo Heo\*, Jeong-Ho Kim\*, Dong-In Han\*, Dae-Woo Lee\*\*, Kyeum-Rae Cho\*\*  
and Gi-bong Hur\*\*\*

Pusan National University\*,\*\*

Agency for Defense Development\*\*\*

## ABSTRACT

This paper describes a vision-based only attitude estimation technique for the leader in the formation flight. The feature points in image obtained from the X-PLANE simulator are extracted by the SURF(Speed Up Robust Features) algorithm. We use POSIT(Pose from Orthography and Scaling with Iteration) algorithm to estimate attitude. Finally we verify that attitude estimation using vision only can yield small estimated error of 1.1~1.76°.

## 초 록

본 논문은 편대비행에서 영상만을 이용하여 선도기의 자세를 예측 하는 알고리즘 개발에 대해 논하고 있다. X-PLANE 시뮬레이터를 이용하여 획득한 영상에 SURF(Speed Up Robust Features)알고리즘을 이용하여 특징점을 추출 하였다. 그리고 자세예측 방법은 POSIT(Pose from Orthography and Scaling with Iteration) 알고리즘을 사용하였다. 결론적으로 우리는 영상만을 이용한 자세추정법이 1.1~1.76°의 작은 추정오차 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Vision(영상), Speed Up Robust Features(SURF), Pose from Orthography and Scaling with Iteration(POSIT), Attitude Estimation(자세예측), Formation flight(편대비행), X-plane

## 1. 서 론

최근 미국을 비롯한 선진국에서 무인항공기를 이용한 정찰 및 감시 임무가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 무인항공기산업은 1980년대 항공제어 및 전자통신 장비의 발달과 함께 미국과

이스라엘을 중심으로 비약적으로 발달하였다. 특히 미국의 무인항공기인 글로벌 호크의 경우 1999년에 최종 테스트를 마치고 2000년대에 들어서 실전배치를 통해 이라크전 등에서 뛰어난 성능을 입증하였다. 이렇게 무인항공기가 대두되는 핵심적인 이유는 조종사의 훈련의 편의성 및 유

† Received: March 27, 2013 Accepted: June 24, 2013

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

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

사시에 조종사의 생명이 보장된다는 점과 사람처럼 휴식이 필요 없이 장기간 지속적인 임무수행이 가능하다는 점이다. 이러한 장점들을 바탕으로 무인 항공기는 현대전에서 뛰어난 활약을 보이고 있고, 작전반경 또한 점차 확대되고 있다.

임무의 범위가 기존의 주변 정찰 위주에서 주요 시설 타격 및 요인 추적 등으로 확장됨에 따라 임무의 난이도가 높아지고 있다. 이렇게 임무의 난이도가 높아짐에 따라 1대의 무인기만으로는 임무를 수행하기 어렵고, 다수의 무인기가 동시에 임무를 수행하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 기존의 전투기들은 이런 편대임무를 수행함에 있어 조종사의 시각정보에 의한 판단으로 편대비행을 하지만 무인기의 경우 추종기에서 선도기의 위치를 파악하기 위한 방법이 별도로 필요하다.

선도기의 위치를 파악 할 수 있는 대표적인 방법으로는 GPS(Global Positioning System)와 AHRS(Attitude/Heading Reference System)를 이용하여 자신의 위치와 자세를 알아낸 뒤 다른 무인기와 통신을 이용하여 편대비행을 하는 방법이 있다. 하지만 이 방법은 적진 깊숙이 침투하여 비행을 할 때 적들에게 비행정보가 담긴 통신이 노출되는 경우가 발생하거나, 적들의 통신방해를 당할 경우 편대비행 자체가 불가능 해진다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 편대비행에서 통신 없이 탑재 장비만으로 독립적인 선도기의 위치와 자세 파악이 가능하여야만 한다. 이를 위해 본 논문에서는 영상만을 이용하여 선도기의 자세를 예측하는 알고리즘을 연구하고, 시뮬레이션 비행영상을 통하여 알고리즘의 성능을 검증하고자 한다. 영상정보만을 이용하여 항법을 수행하는 연구는 외국에서만 진행되고 있는 상황이고, 이 또한 자세 예측 보다는 영상 상에 보이는 선도기의 상대적 차이를 이용하여 편대비행을 하는 방법을 연구하고 있다. 본 주제와 같이 영상만을 이용하여 선도기의 위치, 자세 추정을 하여 편대비행에 응용하는 연구는 처음 진행되는 것이다.

## II. 본 론

### 2.1 알고리즘 개요

#### 2.1.1 알고리즘 흐름

목표물의 위치 및 자세를 추정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 그 중 가장 보편적인 방법은 목표물의 특징점을 추출하여 이용하는 방법이다.

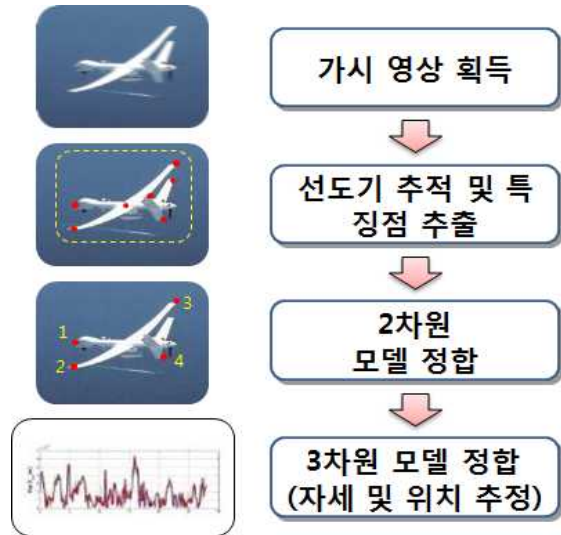


Fig. 1. Algorithm flowchart

일반적으로 선도기의 특징점을 추출할 때 주간 영상의 경우 가시광선영역의 영상을 이용하며, 야간에는 적외선 영상을 이용한다.

하지만 가시광선 영역의 영상은 목표하는 선도기의 특징점 이외의 수많은 정보를 함께 담고 있기에 원하는 정보를 추려내기 위해서는 별도의 알고리즘이 필요하다.

이와 유사한 연구로 Seung-Min Oh[1]의 연구에서는 추적기와 선도기의 상대위치를 시선각을 이용하여 추적하고 있다. 또 권지욱[8]의 연구에서 지상이동 로봇을 통해 지상에서의 자세연구를 하고 있다.

그러나 위의 시선각을 이용한 방법은 자세 추측은 불가능 하고, 상대위치만을 알아내는 방법 이기에 급격한 기동을 할 경우 추적이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 선도기의 자세를 예측하여 사전에 대비가 가능하도록 해야 한다.

본 연구에서는 아군의 2대의 비행기가 적지에서 1:1 편대비행 중 통신재밍 등에 의한 통신두 절상황에서도 지속적인 편대비행을 유지할 수 있도록 하기위하여, 자기기체의 정보와 영상카메라만을 이용하여 편대비행을 유지하려고 한다. 이를 위한 방법으로는 SURF 알고리즘을 이용하여 특징점을 추출하고, 사전에 입력된 비행기 모델의 데이터와 비교하여 영상상의 특징점의 2차원 위치를 획득한다. 이를 POSIT 알고리즘을 이용하여 선도기의 추종기에 대한 3차원의 자세를 추정하게 된다.

#### 가. 카메라 보정

광학카메라는 사용되는 센서와 렌즈의 특성에

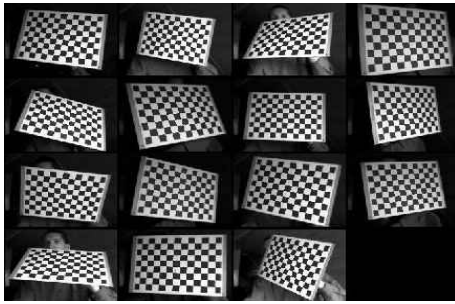


Fig. 2. Calibration images

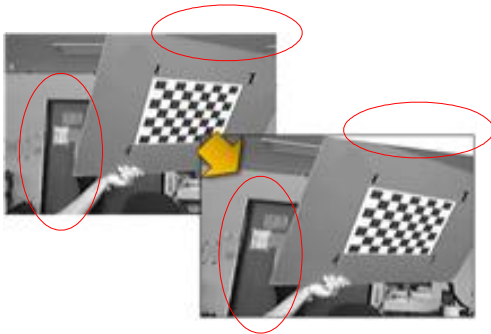


Fig. 3. Correction images using calibration images

따라 다양한 광학 특성을 나타내므로 사용하는 카메라를 사전에 보정하여야 정확한 위치 측정 결과를 얻을 수 있다. 가장 보편적으로 사용되는 방법은 아래 Fig. 2와 같이 정확한 크기를 알고 있는 보정판을 이용하는 방법으로서, 다수의 영상을 이용하여 거리와 회전등을 측정하여 카메라의 내부변수의 추정이 가능하다.

여러 장의 사진을 이용하여 추정된 매개 변수를 토대로 카메라 렌즈의 곡률에 의해 입력된 영상의 왜곡을 보정한다. 아래 Fig. 3에서 배경에 있는 문부분의 곡선이 직선으로 보정되고, 윗부분의 왜곡현상이 수정된 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 SURF 알고리즘

SURF 알고리즘은 Speed Up Robust Features의 약자로 많은 계산량으로 인하여 계산속도가 최대 단점이었던 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 알고리즘에 비하여 강인성은 유지하면서 계산 속도는 획기적으로 빠르게 개선한 정합(matching) 알고리즘이다.

SIFT 알고리즘과 SURF 알고리즘 모두 마스크 연산을 통해서 밝기 값의 차이를 알아낸다. 계산 범위를 변화 시켜가며 영상의 전 영역에서 계산을 하고, 지속적으로 밝기값 차이가 많이 나는 위치를 특징점으로 색출하게 된다.

다만 SIFT 알고리즘에서는 원본영상에 바로 마스크 연산을 수행하고, SURF 알고리즘에서는

10	12	3	13	15
15	15	8	6	14
9	26	20	17	9
5	10	12	16	7
13	5	18	11	19

Fig. 4. Original image

10	22	25	38	53
25	52	63	82	111
34	87	118	154	192
39	102	145	197	242
52	120	181	244	308

Fig. 5. Integral image

A			B	
C			D	

Fig. 6. Mask calculation of integral image

입력영상을 적분 영상(Integral Image)으로 만들어 마스크 연산을 적용한다는 차이가 존재한다. 원본 영상에는 Fig. 4처럼 각 지점에 픽셀의 밝기 값이 입력되어있다면, 적분 영상에는 Fig. 5와 같이 각 위치에는 최초 픽셀에서 각 위치 픽셀까지의 밝기의 합이 저장되어 있다.

이때 Fig. 4의 원본 영상에서의 마스크 안의 합을 구하기 위해서는 회색 사각형안의 모든 값을 더해줘야 하며 그 값은 130이 나온다.

적분영상에서 같은 영역의 합을 구하기 위해서는 Fig. 6에서 보이듯이 사각형 D에서 사각형 B와 C를 빼주고 두 번 빠진 사각형 A를 다시 더해 주면 되고, 그 결과 원본 영상과 같이 130이 나오게 된다.

합을 구하는 범위가 커짐에 따라 원본 영상의 경우 기하급수적으로 계산량이 증가하는데 반해 이 방법을 이용하면 적분영상은 지속적으로 사칙연산 네 번을 통해 합을 구 할 수 있게 된다. 이렇게 계산 결과는 동일하지만 계산시간이 획기적으로 줄어들게 되는 것이다.

SURF 알고리즘의 또 다른 알고리즘상의 차이

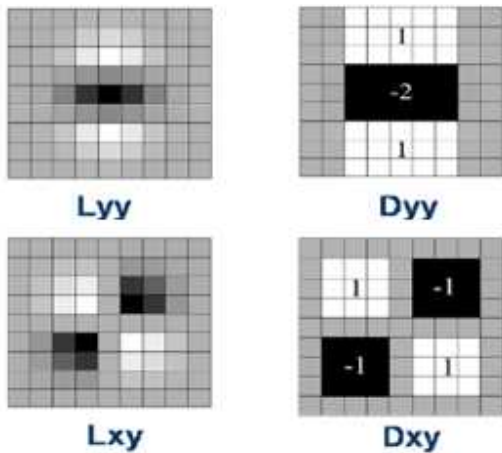


Fig. 7. Difference of gaussian mask

로는 영상이 아닌 마스크의 크기변화를 통해 크기에 불변하는 특징점을 찾는다는 점이다. SURF 알고리즘에서 밝기값의 차이를 알아내기 위해 사용하는 것이 Fig. 7과 같은 2차 미분 마스크이다.

원래의 복잡한 부동소수형태의 L마스크를 단순한 정수형의 D마스크로 바꾸어서 사용한다. 이는 비슷한 성능을 내지만 계산과정이 간편해지고 빨라지게 하기 위해서이다. 이러한 마스크를 영상에 곱해주면 Dyy방향의 마스크의 경우 세로방향으로 밝기 값이 차이가 많이 나는 지점에서 큰 값을 가지고 Dxy방향의 마스크는 대각선 방향의 밝기 값이 차이가 많이 나는 위치를 찾을 수 있다. 유사하게 Dyy를 90도 돌린 모양의 Dxx 마스크를 사용하여 가로 방향으로 밝기 값이 차이가 많은 지점을 찾게 된다. 그리고 유사마스크를 사용한 것에 대한 보정으로 가중치를 식 1과 같이 주게 된다.

$$\det(H_{\approx}) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2 \quad (1)$$

여기서  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$ ,  $D_{xy}$ 는 각각 마스크 연산을 통해서 나온 계산 값이고, 이때  $\det(H_{\approx})$ 의 값이 설정해준 임계값 이상일 경우 그 픽셀의 위치는 특징점 후보가 된다.

여기에 적분영상을 사용하는 장점을 최대한 살리기 위하여 Fig. 8에서와 같이 영상의 크기를 변화시키지 않고, 마스크의 크기를 변화시켜 주게 된다.

이 경우에도 영상의 크기를 변화시킨 것과 동일한 효과를 가지기에 SIFT 알고리즘과 똑같이 크기에 불변하는 특징점을 찾을 수 있게 된다.

위 와 같은 방법들을 통하여 물체의 크기 변화, 회전에 불변하다는 특징의 강인성은 유지하면서 계산 속도는 실시간 구현이 가능할 정도로

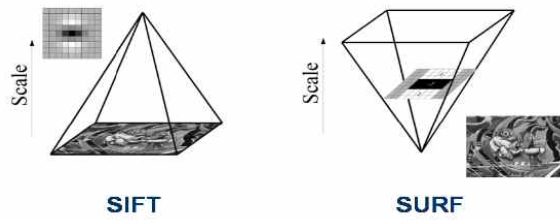


Fig. 8. Changing the size of the SIFT and SURF algorithm

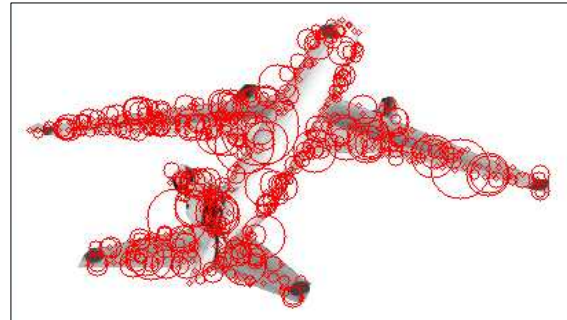


Fig. 9. Feature point extraction results

확기적으로 줄 일 수 있게 된다.

Figure 9는 원본 데이터의 특징점 추출을 위하여 흰 배경에 기체 영상만을 입력받아 SURF 알고리즘을 적용시켜 특징점을 추출한 영상이다. 그리고 Fig. 10은 추출된 특징점 데이터와 SURF 알고리즘의 특성상 별도의 배경분리 없이 자세추정을 위해 입력받은 영상에서 바로 특징점을 추출하여 유사도가 높은 점들을 연결한 것이다.

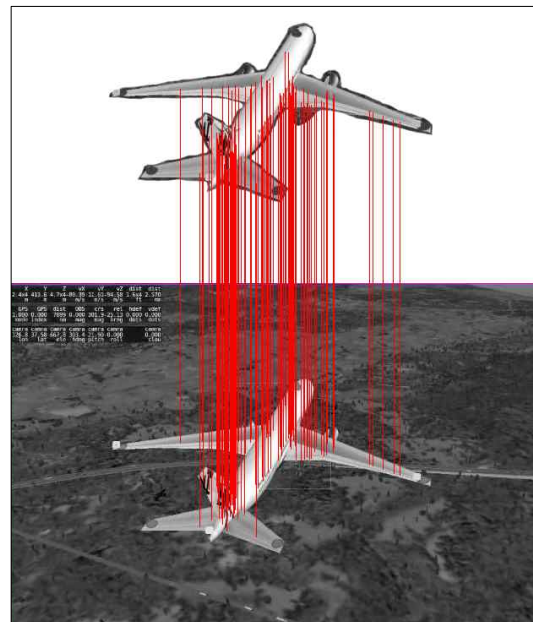


Fig. 10. Result of matching



### 2.3 POSIT 알고리즘

2차원 특징점을 이용하여 목표물의 3차원 자세정보를 계산하기 위한 여러 가지 알고리즘들이 개발되어있다. 대표적인 분류인 수학적 알고리즘은 반복적인 계산을 통해 추정하는 방법으로 속도가 빠르다는 장점이 있지만 오차가 그대로 계산에 적용되어 잡음에 취약하다. 또한 계산이 불가능한 영역이 존재해 추정에 실패할 가능성이 존재한다. 수학적 알고리즘과 반대되는 최적화 알고리즘의 경우 추정에 실패하는 경우가 없어 안전하나 초기 추측 값에 의존적이어서, 초기 값을 어떻게 추측하는지에 따라 발산 가능성이 존재하게 된다. 따라서 두 가지의 알고리즘을 적절히 조합하여 사용하는 복합알고리즘이 연구되어 있다. 복합알고리즘은 두 알고리즘을 통합함으로써 속도가 빠르면서도 계산이 안정적이고, 강인성을 가지게 된다.

이러한 복합 알고리즘의 대표적인 알고리즘이 POSIT(Pose from Orthography and Scaling with Iteration) 알고리즘이다. POSIT 알고리즘은 객체에서 추출한 특징점들과 원본의 특징점의 데이터를 비교하여 2차원의 특징점에 대응되는 3차원의 자세와 위치를 추정한다. 이러한 POSIT 알고리즘을 사용하기 위해서는 몇 가지의 가정이 필요하다. 첫 번째로 약한-투시 근사화(weak-perspective approximation)를 만족해야 한다. 이것은 객체상의 점들이 모두 동일한 깊이를 가진다는 것으로 즉 객체가 충분히 멀리 떨어져 있어서 동일한 평면상에 위치한다고 볼 수 있어야 한다는 것이다. 두 번째로는 객체의 크기 변화는 오로지 카메라와 객체사이의 거리에 의해서만 발생해야 한다는 것이다. 객체가 변형하는 물체일 경우 특징점을 원본 데이터로 줄 수가 없기에 비교 자체가 불가능하게 된다. 따라서 실제 특징점의 위치 차이가 크게 존재하는 변형 물체의 경우가 알고리즘을 사용할 수 없다. 마지막으로 3차원의 위치 및 자세를 계산하기 위해서는 최소한 4개 이상의 특징점이 영상에 존재해야 한다. 이와 같은 조건을 만족한 상태에서 카메라의 실제 중심점, 초점거리등과 같은 카메라 내부 파라미터를 이용하여 3차원 위치정보를 추정한다.

카메라 좌표계의 경우 일반적인 3차원 위치 좌표계에 카메라 보정 행렬을 추가하여 나타내며 그 식은 아래 식 (2)와 같다.

$$X_c = K \times R \times X_s + T \quad (2)$$

여기서  $X_c$ 는 카메라 좌표,  $K$ 는 카메라 보정 행렬,  $R$ 는 회전 행렬,  $X_s$ 는 원본 좌표,  $T$ 는 천이 행렬 이다. 그리고 카메라 보정 행렬의 구성은 아래 식 (3)과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\alpha_x, \alpha_y$ 는 초점거리,  $x_0, y_0$ 는 영상좌표계의 중심 픽셀,  $s$ 는 영상의 기울기를 나타낸다. 원본 좌표에 회전행렬을 곱하여 회전시키고, 카메라 보정 행렬을 곱하여 회전시킨 좌표를 카메라 평면상의 좌표로 나타낸다. 그 뒤 중심위치를 이동하게 된다. 이렇게 3차원 좌표를 영상평면에 정사영 시키는 것을 Fig. 11로 나타낼 수 있다.

POSIT 알고리즘에서는 3차원 좌표 계산을 역으로 하여 회전 행렬과, 천이 행렬을 구하게 되고 원본 데이터와의 오차가 일정 값 이하가 될 때 까지 반복수행을 통해 참값에 수렴해나가며 흐름도로 나타내면 아래 Fig. 12와 같다.

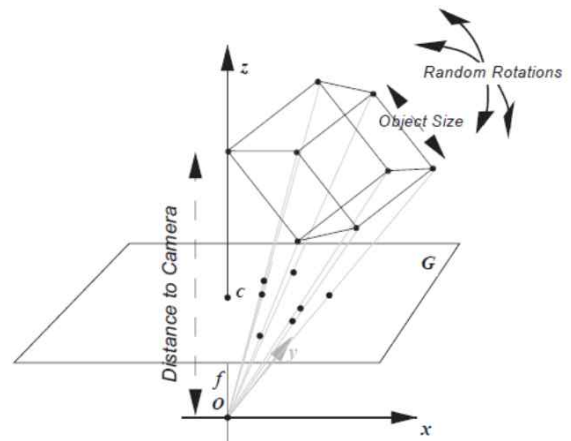


Fig. 11. 3D coordinates is an orthogonal projection

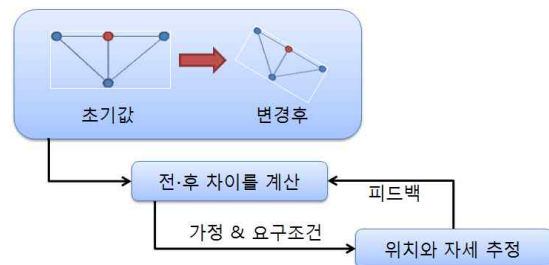


Fig. 12. POSIT algorithm flowchart

### 2.4 X-PLANE 시뮬레이션

특징점을 추출하고 검증하기 위하여 X-PLANE 시뮬레이터를 이용하여 편대비행과 유사한 상황을 만들어 재현을 하였다.

비행기의 기종은 보잉사의 777-200이며 제원은 전폭 60.93m, 길이 63.73m, 높이 18.51m, 최대순항속도 마하 0.87이다. 이 기체의 경우 날개 끝에 윙렛이 없어 끝부분이 명확하고, 제원이 공개되어 있기에 선정을 하였다. 여기에 목표가 일괄적인 색상 등을 가지고 있을 경우 밝기값의 차이가 없어 특징점 추출에 어려움이 있기에 기체에 임의의 마크를 하여 좀 더 특징점이 두드러지도록 하였다. 특징점은 최소 4점이 필요할 뿐 어느 위치에 두어도 상관없지만 본 논문에서는 관측성을 고려하여 비행기의 노즈부분, 주익의 양 끝부분, 미익의 가운데 부분으로 각 끝 4점에 특징점을 두도록 하였다. 카메라의 시점을 추종기에서 바라보는 것처럼 설정하고 일정한 거리를 두고 비행할 수 있도록 선도기를 조종하였다. 이 경우 외란 조건은 전혀 주지 않았으며, 순수한

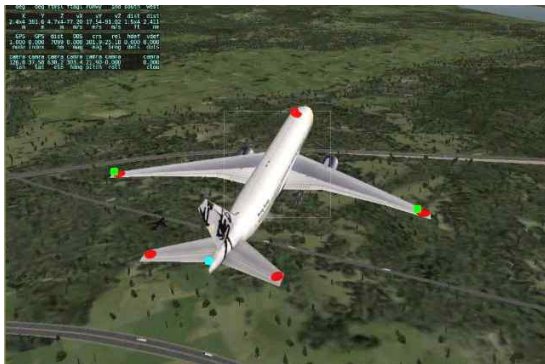


Fig. 13. Execution image of the algorithm

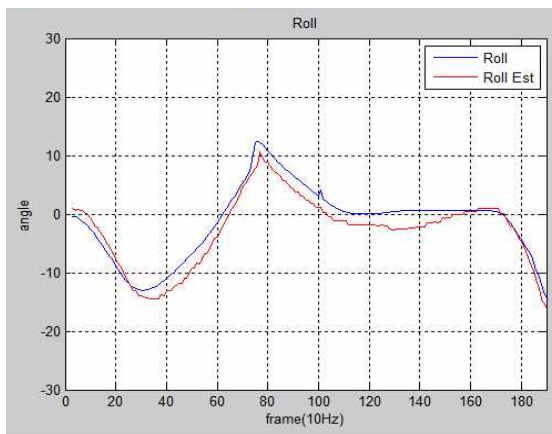


Fig. 14. Roll prediction result

비행데이터만을 도출 하였다. 시뮬레이션을 통해 입력받을 수 있는 데이터는 선도기의 회전각 (roll, pitch, heading)과 현재 위치, 카메라의 위치와 선도기와 카메라의 roll, pitch, heading 자세 차이 등의 데이터이다.

이와 동시에 비행기가 날아가는 영상을 출력하였고, 10Hz의 주기로 기록을 하였다.

이렇게 저장된 영상에 알고리즘을 적용하였고, 실행 영상은 Fig. 13과 같다.

추출된 4점을 이용하여 20초 동안 자세를 측정한 결과 다음 Fig. 14~16과 같이 나타났다.

각각의 평균오차는 아래 Table 1과 같다.

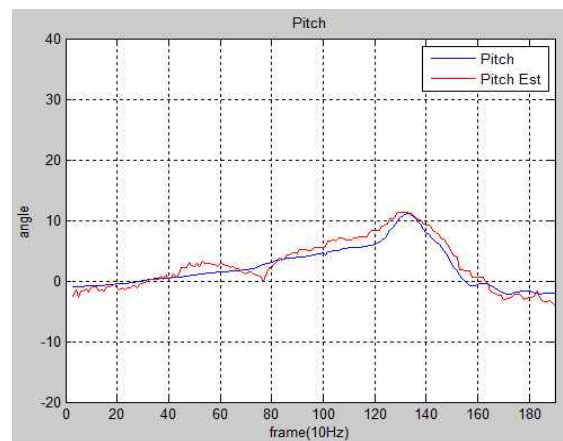


Fig. 15. Pitch prediction result

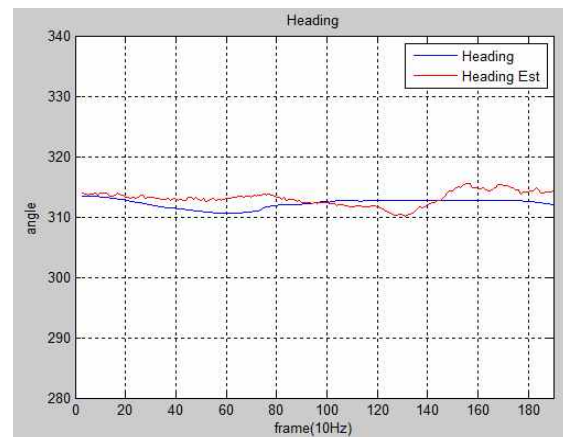


Fig. 16. Heading prediction result

Table 1. Average error of pose estimation

	Roll(°)	Pitch(°)	Heading(°)
평균오차	1.7610	1.0451	1.4389
표준편차	0.8943	0.6323	0.7977

### III. 결 론

본 논문에서는 통신이 이루어지지 않는 상황을 가정하고 편대비행을 위한 방법으로 영상만을 사용하여 선도기의 자세를 예측하는 알고리즘에 대해 연구하였다. 영상으로 물체의 자세를 예측하는 방법으로는 SURF 알고리즘을 사용하였다. 이는 크기와 회전에 강인한 알고리즘으로 편대비행 중 선도기와 추적기의 상태에 따라 크기와 회전이 많이 발생하기 때문이다. 또한 계산속도 부분도 이전의 SIFT 알고리즘 보다 크게 개선되어 실시간으로 적용이 가능하다. 자세예측 방법으로는 POSIT 알고리즘을 사용하였는데, 이는 보통의 수학적 알고리즘들과 달리 반복수행을 통해 오차를 줄여나가며 강인성을 가지고, 계산속도 또한 수학적 알고리즘들과 크게 차이가 나지 않는다. 이렇게 사용된 SURF 알고리즘과 POSIT 알고리즘을 연계하였고, X-PLANE이라는 시뮬레이터 프로그램에서 편대비행상황과 동일하게 맞추고 영상과 데이터를 획득하여 특징점을 추출한 뒤 3차원 자세를 예측 하였다.

그 결과 평균적으로 1.1~1.76°의 오차가 발생을 하였다. Roll 예측 값의 경우 오차가 제일 크게 발생을 하였는데 이는 영상을 저장하는 과정에서 코덱과 X-PLANE 프로그램의 수치 데이터 저장이 완벽하게 동기화가 이루어지지 않아서 더욱 가중된 것으로 판단된다.

앞으로 오차를 줄이기 위한 연구와 시뮬레이터의 영상이 아닌 실제 비행 영상을 이용한 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

### 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 '비전센서를 이용한 무인비행체자율편대 비행유도제어 시스템'의 해 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### Reference

- 1) Seung-Min Oh and Eric N. Johnson., " Relative Motion Estimation for Vision-based Formation Flight using Unscented Kalman Filter," *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 20 - 23. Aug. 2007
- 2) Zouhair Mahboubi , Zico Kolter , Tao Wang , Geoffrey Bower., "Camera Based Localization for Autonomous UAV Formation Flight." *AIAA Infotech@Aerospace 2011*, 29 - 31. Mar. 2011
- 3) D. Dementhon, L. Davis "Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code." *International Journal of Computer Vision*, Vol.15, 1995, pp.123~141.
- 4) Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool, "SURF: Speeded Up Robust Features", *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Vol. 110, No. 3, 2008 pp. 346~359.
- 5) Yeong-Ju Kim, Jun-Yong Lee, Hyun-Joo Park, Dongjin Lee, and Hyochoong Bang "Real-time Implementation of Vision-based Pose Estimation for UAV Aerial Refueling" *KSAS Spring Symposium*, 2011, pp. 633~637
- 6) Minku Kang, Wonkook Choo and Seungbin Moon, "Face Recognition based on SURF Interest Point Extraction Algorithm." *IEEK*, Vol. 48, No. 3, 2011, pp.323~330
- 7) Deok-Jae Seo, Hyun-Woo Kim, Young-Mo Kim, Doo-Hyun Choi, and Re-Mi Do, "Vehicle detection using SURF." *CICS*, 2010, pp.107~108
- 8) Ji-Wook Kwon, Mun-Soo Park, Dongkyoung Chwa, and Suk-Kyo Hong, "Three-Dimensional Pose Estimaion of Neighbor Mobile Robots in Formation System Based on the Vision System", *ICROS*, Vol. 15, No. 12, 2009, pp.1223~1231