

Original Article

Attitude Estimation of Agricultural Unmanned Helicopters using Inertial Measurement Sensors

Yeonghwan Bae¹, Minseok Oh², and Young Mo Koo^{3*}

¹Industrial Machinery Engineering Department, Sunchon National University, Jeonnam 540-742, Korea

²Hansung Well tech Co., Ltd, Busan 617-843, Korea

³Bio-industrial Machinery Department, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

관성센서를 이용한 농업 무인 헬리콥터의 자세 추정

배영환¹ · 오민석² · 구영모^{3*}

¹순천대학교 생명산업과학대학 산업기계공학과, ²한성웰텍(주), ³경북대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

Received: August 9 2014 / Revised: September 5 2014 / Accepted: September 5 2014

Abstract Agricultural unmanned helicopters have become a new paradigm for aerial application. Yet, such agricultural helicopters require easy and affordable attitude control systems. Therefore, this study presents an affordable attitude measurement system using a DCM (direction cosine matrix) algorithm that would be applied to agricultural unmanned helicopters. An IMU using a low-cost MEMS and an algorithm to estimate the attitude of the helicopter were applied in a gimbals structure to evaluate the accuracy of the attitude measurements. The estimation errors in the attitude were determined in comparison with the true angles determined by absolute position encoders. The DCM algorithm and sensors showed an accuracy of about 1.1% for the roll and pitch angle estimation. However, the accuracy of the yaw angle estimation at 3.7% was relatively larger. Such errors may be due to the magnetic field of the stepping motor and encoder system. Notwithstanding, since the intrinsic behavior of the agricultural helicopter remains steady, the determination of attitude would be reliable and practical.

Keywords: agricultural unmanned helicopter, motion attitude, gimbals, direct cosine matrix, fusion sensors

서론

농업 무인 헬리콥터를 이용한 항공방제 기술은 효율적인 농산물 생산과 종사자의 개선된 작업환경을 추구할 수 있다(Koo et al., 2006). 농업 무인 헬리콥터의 개발을 통한 항공방제의 연구에 있어서 기체의 동적 특성을 분석하고 이를 바탕으로 적절한 비행제어 시스템을 구성함으로써 작업의 능률과 안전성을 향상시키고 조종자의 부담을 덜어줄 것으로 기대한다(Koo, 2011).

최근 많은 시스템들의 무인화가 이루어지면서 항공기, 자동차, 인공위성 등의 자율비행에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 자율비행 물체의 가장 기본이 되는 것은 자세를 안정적으로 제어하는 것으로서, 자세를 제어하기 위해서 비행 물체의 자세를 추정하는 자세추정장치가 필요하다. MEMS 기술의 발달에 따라 저가의 관성 센서들을 이용하여 자세추정장치를 구현하는 연구들이 활발히 진행되고 있다(Bae et al., 2014). 관성 센서 및 지자기 센서로 이루어진 자세추정장치(AHRS, attitude and heading reference system)는 여러 오차 요인을 내포하고 있으며, 동일한 모델의 제품도 각각의 센서가 서로 다른 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 여러 개의 센서로 복합된 자세추정장치의 성능을 향상시키기 위하여 이러한 각 센서의 보정과 오차 제거가 선행되어야 한다(Park et al., 1997).

스트랩다운형 관성항법 시스템(SDINS)은 센서를 동체에 직

*Corresponding author: Young Mo Koo
Tel: 82-53-950-5788; Fax: 82-53-950-6780
E-mail: ymkoo@knu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2014 Institute of Agricultural Science and Technology, Kyungpook National University

접 부착시켜 그 출력을 이용하여 운동체의 자세를 계산하는 자세측정장치이다. 그러나 이러한 자세측정장치는 각 센서들의 자세값을 계산할 때 오차가 누적되어 센서의 성능이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 특히, 자이로 센서의 경우 값을 적분하는 과정에서 센서의 발산이 발생할 때 자세각이 발산하는 단점을 보완하기 위해 복합 센서를 결합한 알고리즘을 적용하며 칼만필터 등 다양한 보상필터들을 이용하여 보정해 주어야 한다(Park and Koo, 2012). 스트랩다운형 관성항법시스템은 또한 동체 좌표계와 지면 좌표계 사이의 알고리즘 연산을 위하여 방향 코사인 행렬(DCM, direction cosine matrix)을 사용한다. 이들 좌표 사이의 DCM에는 정렬 오차, 센서 오차 등이 포함되어 있다. 항법 모드 중에 발생하는 자세 오차는 알고리즘에서 최소화할 수 있지만, 초기 발생 오차가 시간이 지남에 따라 누적되어 항법 시스템의 성능을 저하시킨다(Kim, 2000).

일반적인 항공기에 사용되는 혼합 방법으로 가속도계를 보조로 자이로 센서를 혼합하는 비례-적분 방법이 있으며, 비례-적분 오차를 감소시키기 위해 받음각 및 편류각 센서를 이용한 보상과 칼만필터를 이용한 보상 방법 등이 있으며, 최근엔 퍼지 추정을 이용한 보상 방법에 대한 연구가 수행되었다(Lee, 2008).

본 연구에서는 관성 센서와 지자기 센서로 구성된 자세측정장치를 이용한 농용 헬리콥터의 자세를 추정하기 위하여 DCM 알고리즘을 적용하였으며, 추정 연산된 자세각의 정확도를 추정하기 위해서 3축 자유도 짐벌을 설계하여 검증하였다.

재료 및 방법

자세측정 시스템(AHRES)

본 연구에 사용된 센서는 9-dof Razor IMU-AHRES 모듈(SEN-09623, Sparkfun Co, Boulder, USA)로서 3축 가속도 센서(ADXL345, Analog Device Co., USA), roll 각과 pitch 각을 구하기 위한 2축 자이로 센서(LPR530, STMicroelectronics Co., France), yaw 각을 구하기 위한 1축 자이로 센서(LY530ALH, STMicroelectronics Co., France), 그리고 3축 지자기 센서(HMC5843, Honeywell, Co. Ltd., USA)가 포함되어 있다. 사용한 지자기 센서의 제원은 Table 1과 같으며 나머지 센서의 제원은 Bae et al.(2014)에서 소개하였다.

사용한 모듈은 센서 외에 DC 5V 전원 입력단자, UART 통신을 위한 직렬통신 단자, ON/OFF 스위치, Reset 버튼 등으로 구성되어 있다. 센서의 배치는 Figure 1과 같으며, 센서의 출력 데이터 수집을 위해 모듈과 컴퓨터 사이에 블루투스를 이용하여 57,600 bps의 RS232 시리얼 통신을 하도록 구성되었다. 사용한 관성 센서는 크기가 작고 가벼운 특징이 있으며, 그 정확도는 별도로 보고한 바 있다(Bae et al., 2014). 각 센서로부터 수집된 9 ch의 데이터를 출력할 수 있으며, 내장된 ATmega328 MCU를 이용하여 센서의 보정과 신호의 필터링을 위한 사용자 프로그램을 적용하였다.

짐벌(gimbals)

짐벌 실험은 자세(roll, pitch, yaw)의 변화에 대한 자이로 센서, 가속도 센서 및 지자기 센서의 출력값을 계산값과 비교하기 위하여 3개의 회전축에 설치된 geared stepping motor (A50K-M566W-G10, Autonics, Korea; gear ratio 10:1)를 독립적으로 구동하여 roll, pitch 및 yaw 움직임을 순차적으로 실현하였다.

짐벌 실험장치는 470 × 180 × 455 mm(H)의 크기로 제작하였으며, Figure 2와 같이 프레임 상부에 회전 장치를 설치하여 150 × 120 × 40 mm(t)의 사각형 철재 구조물이 회전함으로써 pitch 운동을 하도록 하였다. 그리고 이 사각형 구조물 내

Table 1. Specifications of 3-Axis Digital Compass (HMC5843, Honeywell Ltd., USA)

Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage	AVDD Referenced to AGND	2.5		3.3	V
	DVDD Referenced to DGND	1.6	1.8	2.0	V
Field Range	Full scale-total applied field	-4		+4	gauss
Measurement Period	Output Rate=50 Hz (10Ha typ.)		10		msec
Mag Dynamic Range	3-bit gain control	± 0.7	± 1.0	± 4.01	gauss
Bandwidth	-3dB point		10		kHz
Resolution	AVDD=3.0V, GN		7		m-gauss
Operating temperature	Ambient	-30		+85	°C

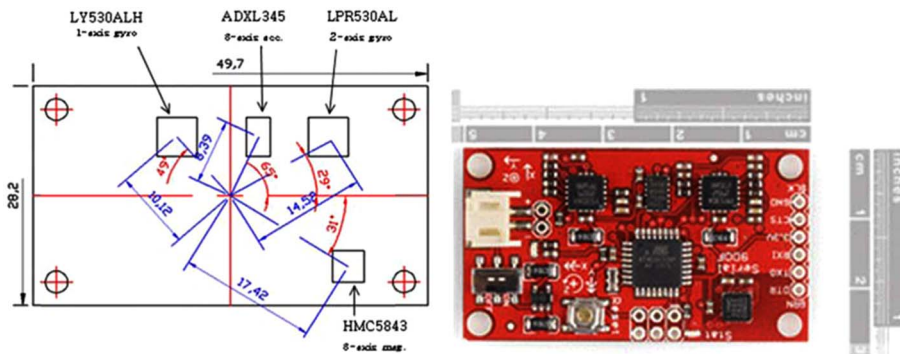


Figure 1. 9-DOF IMU-AHRES module (Sparkfun, SEN-09623, Boulder, CO. USA).

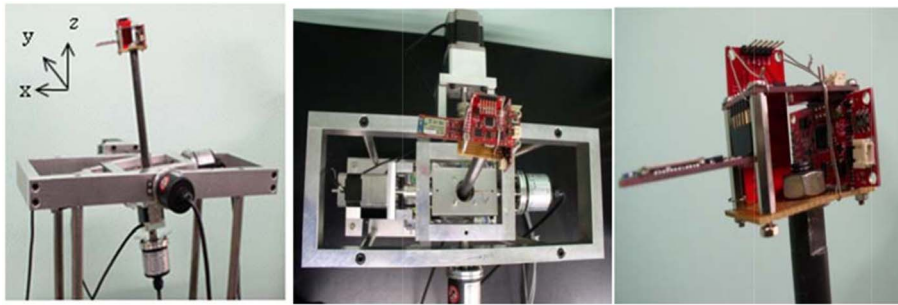


Figure 2. Gimbals structure and AHRES arrangement for measuring attitude.

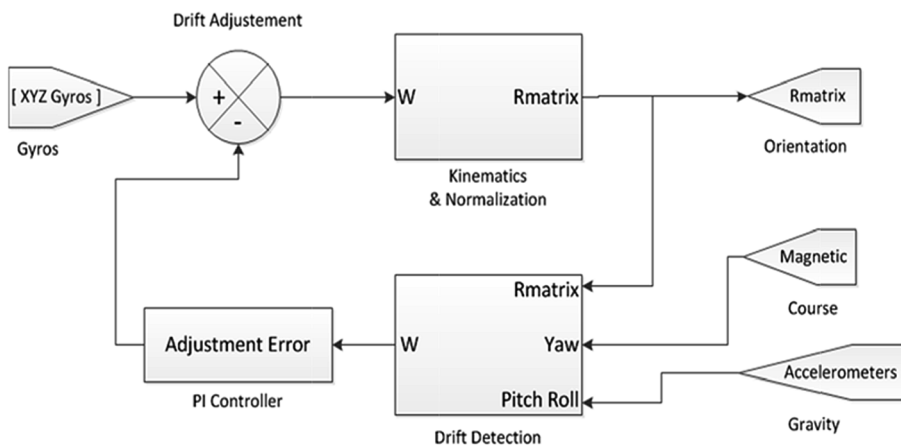


Figure 3. DCM block diagram (Premerlani and Bizard, 2009).

부에서 100 × 60 × 30 mm(t)의 사각형 철재 구조물이 외부의 사각형 구조물과 직교하여 roll 운동을 할 수 있도록 하였다. Yaw 운동을 위해서는 내부의 가장 작은 사각형 구조물의 중심에 직경 15 mm, 길이 230 mm의 철재 봉을 설치하여 봉을 축으로 하는 회전 운동을 할 수 있도록 제작하였다.

자세측정모듈은 Figure 2와 같이 yaw 움직임의 회전축이 되는 철재 봉의 끝부분에 센서 거치판을 고정하고 이 판 위에 센서가 장착된 보드를 설치하였다. 이와 같은 구조로 인하여 센서는 짐벌의 회전 중심에서 yaw 축 방향으로 220 mm 이격된 공간에 위치함으로써 센서의 변위를 확대하고자 하였다.

회전축의 회전 각도는 3축에 대하여 ±30°로 구동하였으며, 출력되는 각 축의 엔코더 데이터와 실시간 센서 데이터가 포함된 12 ch의 데이터를 수집하였다. Pitch, roll 및 yaw 움직임을 하는 각각의 회전축에는 회전각을 측정하기 위해서 분해능이 0.35°인 절대위치 엔코더(absolute rotary encoder; EP58HB8-1024-2R-N-5, Autonics, Korea)를 각 축에 부착하였다. 스텝핑 모터를 사용하여 0.072°/step의 분해능으로 pitch(x-Axis)와 roll(y-Axis) 운동을 구현하였으며, yaw축의 회전도 스텝핑 모터를 사용하여 구현하였다. 엔코더 데이터는 USB용 자료수집 장치(USB-6008 DAQ, NI, USA)를 이용하여 수집하였다.

자세추정 알고리즘

3차원 이동물체를 비롯한 동특성을 갖는 많은 시스템은 자신에 적합한 좌표계를 설정하여 시간에 따른 시스템의 자세를 표현할 수 있어야 한다. 또한, 하나의 좌표계를 사용하는 경

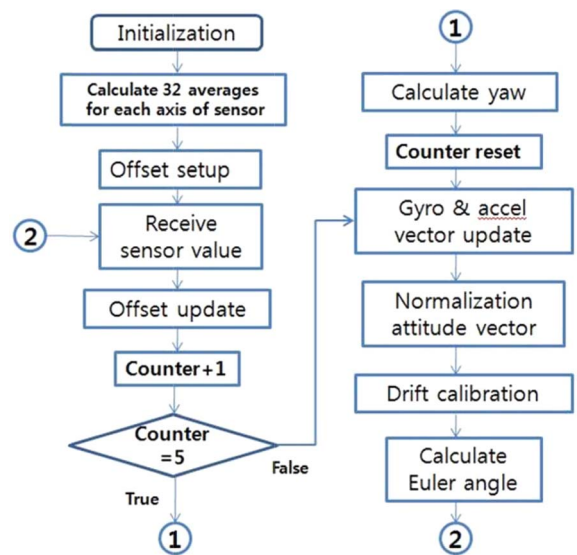


Figure 4. Flow chart of attitude estimation using DCM theory.

우보다는 움직이는 시스템의 자세를 고정된 좌표계로 변환하고 다시 그 값을 움직이는 시스템의 좌표계로 상호 변환함으로써 자세결정을 효율적으로 수행할 수 있다. 센서를 동체에 직접 부착하는 스트랩다운형 관성항법 시스템의 동체 좌표계와 지면 좌표계 사이의 알고리즘 연산을 위하여 방향 코사인 행렬을 사용하였다.

방향 코사인 행렬을 이용한 자세측정은 Premerlani and

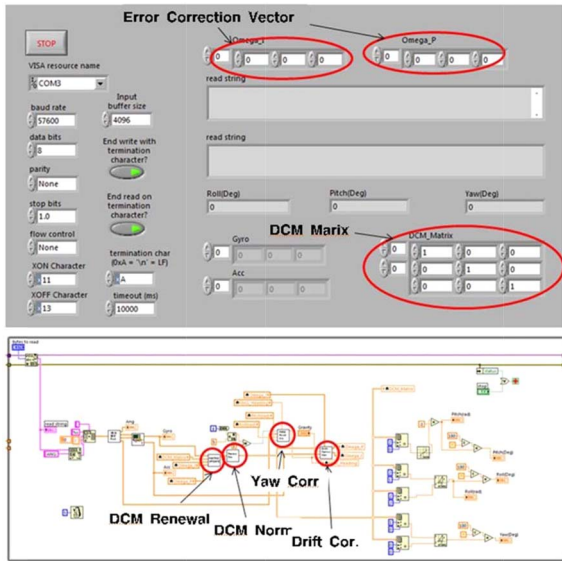


Figure 5. Attitude estimation program using LabView.

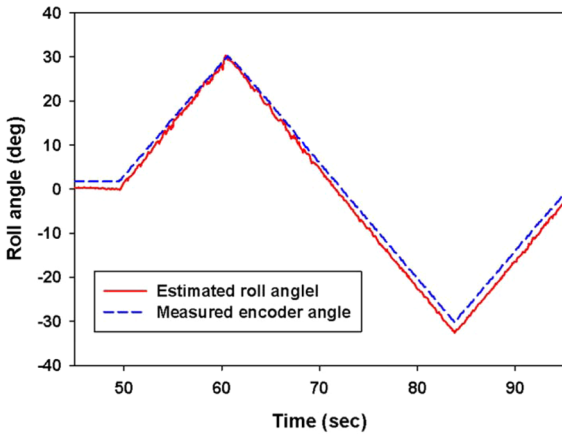


Figure 6. Comparison of roll angles measured by encoder and estimated by AHRES.

Bizard(2009)의 알고리즘을 적용하였으며(Figure 3), 자이로 신호로부터 방향 코사인인 계산, 재정규화(renormalization), 드리프트 제거(drift cancelation), 오일러각 계산 등의 과정을 Figure 4의 순서도에 따라 수행하였다. 자세측정 알고리즘에 따라 LabVIEW(National Instruments, USA, version 2010)를 이용하여 시뮬레이션 프로그램(Figure 5)을 구현함으로써 roll, pitch 및 yaw 각을 추정하였다.

결과 및 고찰

집벌 실험을 통해 추정한 roll, pitch 및 yaw 각과 엔코더를 이용하여 측정된 값들을 Figures 6, 7 및 8에 각각 나타내었다. 엔코더 각도를 기준으로 하여 센서의 roll, pitch, yaw각의 편차 및 정확도에 대한 분석 결과를 Table 2에 나타내었다.

관성 센서에 의한 roll 각 추정치는 엔코더로 측정된 각도보다 전체적으로 1.0° 정도 작은 값을 나타내었다. Pitch 각 추

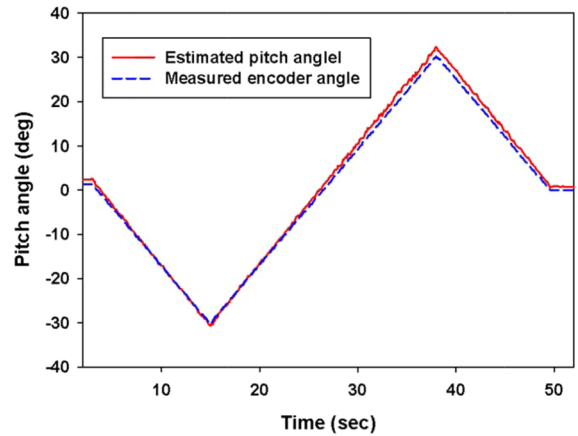


Figure 7. Comparison of pitch angles measured by encoder and estimated by AHRES.

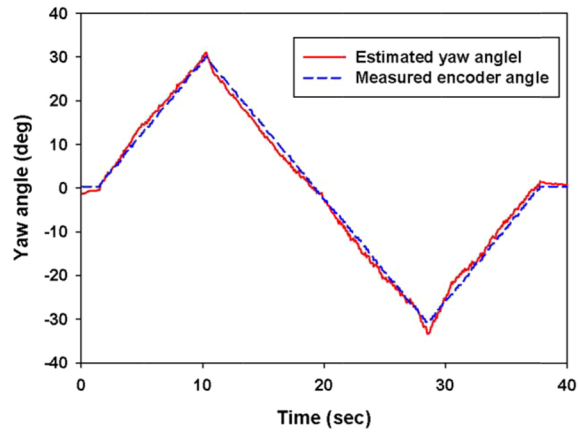


Figure 8. Comparison of yaw azimuths measured by encoder and estimated by AHRES.

Table 2. Deviation of determined attitude from encoder data

Motion	Average (deg)	RMS (deg)	Accuracy (%)
Roll	0.51	0.83	1.08
Pitch	0.47	0.82	1.11
Yaw	7.32	10.9	3.65

정치와 엔코더로 측정된 각도를 비교하면 pitch 각 추정치가 전체적으로 1.1° 정도 작은 값을 나타내었다. 엔코더로 측정된 값과 알고리즘을 통한 추정치의 편차에 대한 분석에서 roll 각도는 평균 0.51°의 편차를 보였고, pitch 각도는 평균 0.47° 편차를 보였다. 편차를 RMS(root mean square)값으로 계산하면 roll과 pitch 각에 대하여 각각 0.83° 및 0.82°의 편차를 보였으며, 정확도는 roll과 pitch각도에 대하여 각각 1.08% 및 1.11%로 나타났다.

집벌 실험 장치에서 물 및 피치의 움직임은 스텝핑 모터에 의한 저속의 등속도 운동 때문에 각각의 움직임에 대한 가속도 값은 운동 가속도 성분을 나타내지 않아서 센서의 자세에 따른 중력가속도 성분에 상응하였다

Yaw 각은 엔코더로 측정된 각도에 비하여 49.49°의 오프셋을 가지고 있었으며, 이는 북쪽을 0°로 yaw각을 추정하였기 때

문이다. 따라서 이 오프셋을 보정하여 Figure 8에 표현하였다. 엔코더로 측정된 각도를 기준으로 한 yaw각 추정치 편차의 평균은 7.32°였고 RMS 값은 10.9°였다. 따라서 yaw각의 정확도는 3.65%로 roll 및 pitch 각도에 비하여 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 지자기 센서가 스텝핑 모터에 가까이 접근할수록 자기장의 영향을 받아 yaw각의 보정이 제대로 이루어지지 못한 것으로 판단되었다.

본 자세측정 센서 및 추정 알고리즘은 농업 헬리콥터에 적용될 것으로 농업 회전익기에는 비행의 난이도가 단순하여서 전형적인 제어 기술로서 충분히 자세 유지를 할 수 있을 것으로 판단된다. Yaw 각(방위각)을 추정하는 지자기 센서에 있어서는 필요에 따라 수시로 보정을 할 수 있는 알고리즘의 개발과 정확도를 높일 수 있는 하드웨어적인 방법도 고려해야 할 것으로 생각된다.

요 약

본 논문에서는 저가의 MEMS 관성 센서와 지자기 센서를 이용하여 자세 정보를 제공받는 자세측정장치(ARHS)를 구현하였다. 저가형 IMU센서와 MCU를 이용하여 운동 자세각을 계산하는 DCM 알고리즘을 설계하고, 3축짐벌에 장착하여 연산 결과의 정확도를 측정하였다.

DCM 알고리즘을 이용 연산된 자세각의 정확도는 roll 및 pitch에 대하여 약 1.1%로 나타났으며, yaw각의 경우는 3.7%로 나타났다. Yaw 각의 경우에는 스텝핑 모터를 구동하는 실험환경에 따른 교란의 영향으로 그 오차가 상대적으로 크게 나타난 것으로 평가되었다.

짐벌 실험장치를 이용한 센서의 검증에서 더욱 정밀한 실험을 위해서는 주변 환경 요인에 대한 제어가 요구될 것으로 보이며, 실험장치의 스텝핑 모터 구동 시 발생하는 진동 및 자기장의 영향과 실험 장치의 금속성 구조물의 영향으로 생각되는 센서 데이터의 오차 및 불안정 상태를 차단할 수 있

는 장치의 보완이 필요할 것으로 보인다. 그리고 지자기 센서의 경우 좁은 범위의 측정에 추가하여 넓은 범위의 측정도 보완되어야 할 것으로 생각된다.

주요 추가어: 농업무인헬리콥터, 운동자세, 짐벌, 방향코사인행렬, 혼합센서

사 사

This research was supported by a fund from the IPET, MAFRA(2012).

References

- Bae Y, Oh M, Koo YM (2014) Evaluation of inertial measurement sensors for attitude estimation of agricultural unmanned helicopter. *Curr Res Agric Life Sci* 32: 79-84.
- Kim SY (2000) Initial alignment algorithm implementation for strap-down inertial navigation system. Unpublished Master Thesis. Inha University, Aeronautical Engineering Department, Incheon, Korea.
- Koo YM, Lee CS, Seok TS, Shin SK, Kang TG, Kim SH, Choi TY (2006) Aerial application using a small RF controlled helicopter (I)-status and cost analysis-. *J Biosyst Eng* 31: 95-101.
- Koo YM (2011) Development of a pilot friendly control system with a roll-balancing unmanned agricultural helicopter, Report for IPET, MAFRA, Korea.
- Lee JH (2008) Vehicle posture recognition navigation system with MEMS inertia sensor. Unpublished Master Thesis, Dept. of Electronics and Communication, Kangwon University.
- Park HJ, Koo YM (2012) Evaluation of spray flight attitude for agricultural roll-balanced helicopter using kalman filter. *J Biosyst Eng* 37: 342-351.
- Park CG, Lee JG, Park HW (1997) Inertial navigation system technology. *Journal of Institute of Control Automation and System Engineers* 3: 51-57.
- Premerlani W, Bizard P (2009) Direction cosine matrix IMU: theory. <http://gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf>.