

항공 및 지상 동시 정찰이 가능한 융합형 정찰로봇 설계

장동휘^a, 고현준^b, 김종형^{a*}

Design of Fusion Platform Robot for Ground and Aerial Reconnaissance

Dong-Hwi Jang^a, Hyun-Jun Ko^b, Jong-Hyeong Kim^{a*}^a School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	9	September	2015
Revised	3	November	2015
Accepted	10	November	2015

Keywords:

Reconnaissance
Hubless wheel
Fusion
Dead-zone
Robot

ABSTRACT

This paper describes the conceptual platform design of a dual-capable robot for both driving on the ground and flying in the air. The dual-capable robot can move over all types of terrain for both ground and aerial reconnaissance. The main design problem of the robot is how to make a wheel for both driving and flying. The proposed key design concept is a hubless driving wheel that contains a propeller inside for flying in the air. The primary design parameters and initial specifications were confirmed through an examination of the conceptual design, and functional tests were then conducted using a real prototype robot for driving and flying modes. The test results show the feasibility of the proposed design concept.

1. 서론

전쟁이나 혹은 재난 상황에서 가장 중요시 되는 것은 정확한 정보수집이다. 때문에 각 형태 혹은 임무에 맞는 다양한 종류의 정찰로봇들이 개발되고 있다. 특히 소형 센서 들과 임베디드 시스템 기술의 발달로 비행체 제어는 기술적 진보가 이루어졌고^[1], 드론 혹은 쿼터 불리는 PAV방식의 수직 이착륙이 가능한 항공주행 정찰로봇들이 발달하는 추세이다. 하지만 기존의 지상 정찰 로봇들이 갖는 세밀한 정보 획득이나 지면 근처의 정찰기능 등의 장점을 가질 수 없는 제안사항이 존재한다.

지상과 항공 모두를 정찰하기 위해서는 지상 모바일 로봇과 드론과 같은 항공 로봇의 상호 협력을 통하여 업무를 수행하기도 한다.

하지만 지상 항공이 한 몸체에서 가능한 로봇이 있으면 보다 효율적 임무 수행이 가능하다.

우리나라와 같이 산지와 강, 평지가 함께 있는 지형에서는 다양한 지형을 극복 할 수 있는 정찰로봇이 필요하다. 평지와 산악지형에서는 지상구동을 이용한 정밀 정찰이 가능하고 극복하기 힘든 장애물 등은 지상 항공 구동 동시 운용을 통해 극복이 가능하여야 한다. 특히, 강과 같이 기존의 지상 정찰로봇 하나의 개체로만 극복하기 힘든 지형을 항공 구동을 동시에 이용하여 극복하여야 한다.

이러한 필요성으로 지상과 항공 모두 운행이 가능한 UGV와 UAV의 융합 방법에 관한 연구가 진행되고 있다^[2,3]. 융합 방법을 살펴보면, 1) 서로 독립된 개체로서 정보를 교환하면서 협동 작업

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6357

Fax: +82-2-971-6359

E-mail address: johnkim@seoultech.ac.kr (Jong-Hyeong Kim).

을 하는 형태⁴⁾, 2) 기구적으로 지상과 항공 구동 기능을 단일 몸체에 독립적으로 가진 경우, 3) 단일 몸체에서 기구 변형을 통하여 지상과 항공 기능을 선택하여 수행하는 경우이다.

캠퍼스와 같은 정해진 지역에서 신속한 정찰을 위해서는 2) 기구적으로 지상과 항공 구동 기능을 단일 몸체에 각기 독립 기능을 가진 경우가 보다 효율적이다. 또한, 전원을 충전 배터리를 사용하므로 로봇은 가능한 작은 소비전력과 경량화가 요구된다.

본 논문에서는, 정해진 지역의 정찰을 목적으로, 단일 로봇 개체에서 항공과 지상 구동이 동시에 가능한 융합 기구 설계 개념을 제안한다. 특히, 창의적 설계 기법을 활용하여 지상과 항공의 구동부 융합을 위한 요구조건을 분석하고, 또 그에 대한 이론적 배경을 바탕으로 상세설계를 진행하였다.

본 연구에서는 지상용 휠을 위하여 허브리스 휠의 개념을 도입하여 지상용 휠의 지름을 크게 하면서도 가볍게 하고, 내부에 비행용 프로펠러를 넣도록 설계하였다. 본 설계 개념을 통하여 융합 로봇이 요구하는 큰 사이즈의 바퀴, 가벼운 무게, 그리고 전체적으로 대칭성을 모두 만족하는 설계가 되도록 하였다. 설계 시뮬레이션의 결과로 프로토타입을 만들고 실제 환경에서의 구동 시험을 통하여 실현 가능성을 보여 주었다.

2. 지상 항공용 기구부 설계

기구적으로 지상과 항공 구동 기능을 단일 몸체에 각기 독립 기능을 가진 설계하기 위해서는 설계상의 모순이 발생하게 된다. 험지를 위한 지상 구동에 있어서 높이 차가 심한 험지를 극복할 때 필수적인 큰 사이즈의 바퀴를 지녀야 하는데, 반면에 큰 지상용 바퀴로 인하여 항공 구동부가 들어갈 공간이 없거나 항공 구동부를 동시에 배치하기 위해서는 큰 로봇의 공간이 필요하게 된다. 또한, 항공 구동을 위한 절대적 제한 조건으로는 가벼운 무게 및 대칭성이 강조되는데, 지상 구동부가 무게와 대칭에 방해가 하게 된다.

융합형 정찰로봇은 지상구동 과 항공구동이 동시에 수행할 수 있어야 하며 주행, 이륙, 착륙 과정에 있어서 안정성이 요구된다. 특히 지상구동부와 항공구동부의 효율적인 결합이 필요하다. 이에 있어서 요구되는 조건을 정리하면 다음과 같다.

- 크기의 효율성과 공간적 이점을 갖는 구조
- 항공구동을 위한 무게 배분의 효율성
- 두 가지 구동부 위치의 일치성

위와 같은 조건들을 바탕으로 하여 융합형 구동부를 설계하였을 때 기존 로봇과는 다른 바퀴의 구조적 변화가 필요하다고 판단된다. 따라서 앞서 제시된 다양한 조건을 만족하는 형태의 바퀴 설계를 진행하였다.

2.1 로봇 기구부의 개념 설계

요구도 분석을 통해 제시된 조건을 만족할 수 있는 형태의 바퀴는 허브리스 휠이다. 기존의 휠을 사용하게 될 경우 지상구동 및 항공구동의 구동부의 융합이 어렵고 크기의 제약으로 인한 장애물 극복 시 한계점이 발생하게 된다. 반면 허브리스 휠은 내부의 공간을 확보할 수 있어 항공 구동부를 휠 내부에 구성함으로써 크기의 제약이 없어지고 항공구동 시 영향을 끼치는 로봇 전체의 대칭을 만족시킬 수 있게 된다. 이러한 허브리스 휠은 기존의 모터사이클이나 자전거에서 이슈화 되고 연구되고 있는 허브가 비어있는 형태의 바퀴이다.

Fig. 1은 전체 형상을 나타낸 설계 개념도를 3D Pro-Engineering SW를 사용하여 도시하였다. 지상과 항공 주행을 동시 구현을 위해 프로펠러 추진을 위한 모터와 주행을 위한 휠을 동일 몸체에 융합 하였다. 기구적으로는 같은 공간을 사용하고 있으나, 지상 주행과 항공 주행 시 각각의 구동부가 서로 제한받지 않게 설계를 진행하였다. 또한 단순 체결 방식을 통하여 고장 시나 응급상황 시 신속하게 분해 조립이 가능하도록 하였다. 이로써 지상 및 항공 구동 기능을 독립적으로 구현할 수 있으며, 특히 큰 반경의 허브리스 휠을 이용하여 주행 안전성 향상을 및 수직 이착륙 기능이 가능하여 신속한 상황 대처가 가능하게 하였다⁶⁾.

2.2 허브리스 휠

기존의 허브리스 휠을 사용하기에는 그 구조가 복잡하여 본 연구에서는 기어를 이용한 단순설계를 하였고 그 형태는 Fig. 2와 같다.

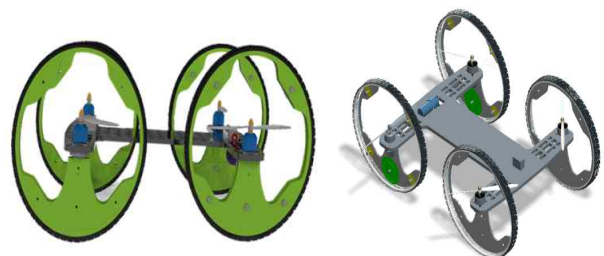


Fig. 1 3D Modeling of robot mechanism

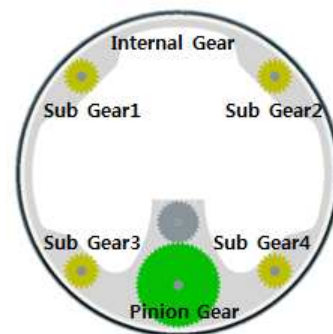


Fig. 2 Hubless wheel

큰 2개의 기어가 모터로부터 동력을 전달하고 외곽의 큰 내기어 형태의 휠이 도는 방식으로써 작은 4개의 기어를 배치시켜 작동시 안정성을 확보하였다.

휠을 구성하는 외곽 타이어나부터 내부의 피니언까지 모두 기어로 구성이 되어있다. 기어에 요구되는 조건은 속도비, 강성 등이 있으며, 험지 극복 시 모터의 직접적으로 가해지는 부하를 줄이고 험지를 극복하기 위한 토크를 주기 위해 피니언 기어와 동력전달기어의 비를 2:1 로 설정하고, 전반적인 기어 강성을 고려하여 두 기어의 모듈 값을 1.5로 선정하고 기어를 설계하였다.

기어의 설계는 KHK 표준 내기어 계산식을 이용하여 계산이 진행되었으며, 식 (1)~(6)과 같은 관계식을 따랐다⁵⁾. 계산된 기어의 설계 값은 Table 1과 같이 가진다.

$$p = \frac{\pi D}{Z} \tag{1}$$

$$h_f = m + c \times m \tag{2}$$

$$t_o = p \times m \tag{3}$$

$$t_e = p \times m \times \cos a_0 \tag{4}$$

$$h_k = m \tag{5}$$

$$a = (Z_2 - Z_1) * m/2 \tag{6}$$

여기서, Z =기어잇수, m =모듈, a_0 =압력각, c =틈새비율, h_k =치말 높이, h_f =치원높이, p =원주피치, a =중심거리, t_o =원주피치, t_e =범선피치이다.

허브리스 바퀴의 결합 방식은 매우 중요하다. 바퀴의 구동방식의 특성상 기존의 단순한 바퀴 결합 방식과 다르게 로봇 몸체에 바퀴를 감싸는 바퀴 케이스를 결합시키고 이어서 바퀴 케이스에 각 피

니언 기어들을 체결한 후 인터널 기어를 연결하는 방식으로 구성된다. 이에 대하여 Fig. 3에 도시하였다.

이러한 결합방식을 통해 기존 방식에 주로 사용되는 모터 체결방식보다는 탈부착 방식이 단순 구성되어지며, 지상정찰이나 항공 구동 시 동력 손실을 줄일 수 있다.

2.3 항공 추력의 계산

제안된 로봇의 크기는 기어설계를 통해 설계된 바퀴의 크기에 좌우된다. 재질의 선택을 무게가 가볍고 뛰어난 물리적 특성 및 가공성을 갖는 Cast nylon 소재를 사용한다는 가정 하에 전체 중량의 목표치를 4.5 kg 이내로 잡았다. 이는 연료에 해당하는 배터리의 중량을 포함하며, 최대 이륙중량 조건에서 비행과 주행모드 각각 5분 이상의 운용시간을 확보하도록 목표를 잡았다. 이를 토대로 각 모터에 요구되는 추력을 계산하였고 그 계산식은 다음과 같다.

$$T_s = \frac{C_t}{C_p} \times \frac{746b(h_p)}{nD} \tag{7}$$

$$C_p = \frac{\rho}{\rho^3 D^5} \tag{8}$$

여기서 C_t =추력계수, C_p =과워계수, ρ =공기밀도, n =초당회전수, D =프로펠러 직경, b : 마력이다.

4개의 허브리스 휠이 있으므로, 각 모터 당 요구 추력은 14.71 N, 약 1.5 kg이라는 값이 나왔다. 요구 추력을 갖는 BLDC모터의 종류는 다양하다. 하지만 모터 각각의 무게 및 크기를 고려하였을 때 작은 크기와 가벼운 무게를 갖는 모터가 요구된다고 판단한다. 이에 있어서 앞서 제시한 조건에 부합하는 모터를 선정하였으며 이는 Table 2와 같다.

Table 1 Standard internal gear calculus

	Calculate	
	Pinion	Internal gear
Gear tooth	57	200
Module	1.5	
Pressure angle	14.5°	
Clearance ratio	0.25	
Addendum	1.5 mm	
Deddendum	1.875 mm	
Whole depth	3.375 mm	
Pitch circle	85.5 mm	300 mm
Deddendum circle	88.5 mm	297 mm
Addendum circle	93 mm	315 mm
Circular pitch	18.850 mm	
Normal pitch	18.249 mm	
Chordal thickness	9.413 mm	9.423 mm

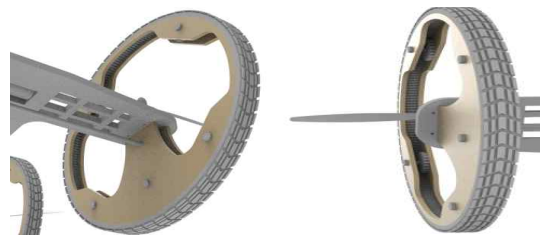


Fig. 3 Combination of wheel

Table 2 BLDC motor

Name	FLYCAM1000
Dimension	35×36 mm
Rating	1,000 kV
Battery config	3 Lipo cells
Weight	105 g
Max Current	35 A

3. 로봇 제어부

3.1 로봇 제어부

로봇의 제어부는 Fig. 4와 같이 구성되어 있다. 하나의 이두이노 기반의 제어기를 통하여 지상 구동부와 항공 구동부 모터를 구동시키며 블루투스를 통한 각 구동부의 컨트롤이 진행된다^[6].

조정은 무선 조정기와 핸드폰으로 조정이 가능하다. 또한, 자율 주행모드가 있어서 환경을 인식하여 자율 주행이 가능하다. 센서는 비행 시 수평을 잡을 수 있는 자이로 센서와 속도를 측정할 수 있는 가속도 센서가 로봇 몸체 중심에 설치되어 있다. 지상 주행 시 장애물 회피를 위하여 로봇 앞부분에 초음파 센서 한 쌍을 배치하였다. 로봇에는 항공 구동을 위한 4개의 모터와 지상 구동을 위한 2개의 모터가 있다. 각 모터는 PWM 구동을 방식으로 제어된다. 환경 인식 방법과 자율 주행 모드에 의한 경로 제어는 저자의 졸업 작품 보고서에 자세히 기술되어 있다^[7].

참고로 본 논문에서 사용된 Flight controller는 ArduCopter (APM 2.5)로써 타 제품과 비교하였을 때에 가격적인 부분과 다양한 오픈소스 및 사용 가능한 기능의 수가 월등하다. 특히, 호버링 기능과 네비게이션 기능이 있어서 드론과 같은 항공용 로봇에 사용

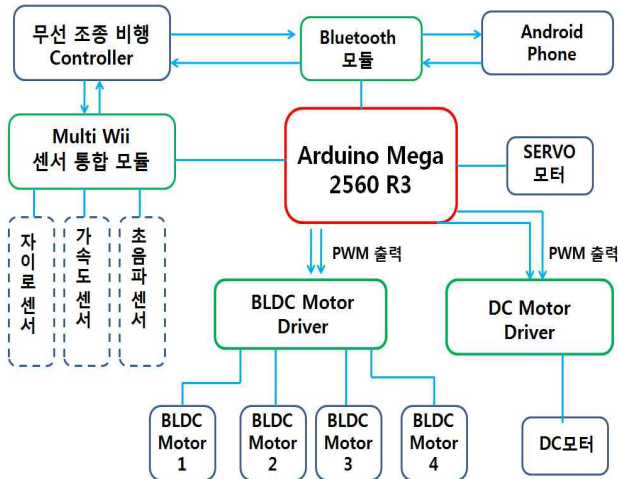


Fig. 4 Architecture of robot controller

Table 3 Flight controller

Board	Open source	Gyro	Self leveling	Position hold	Waypoint navigation	Pricing
APM 2.5	YES	YES	YES	YES	YES	Medium
DJI NAJA		YES	YES			Medium
FY-30A		YES	YES			Medium
Open-Pilot cc	YES	YES	YES			Low
Raabbit		YES	YES			Low

하기 적합하다. Flight controller용 CPU의 비교표는 Table 3에 도시하였다.

4. 로봇 제작 및 시험

4.1 로봇 Prototype 제작

앞서 제안된 내용을 고려하여 제작된 시제품을 Fig. 5에 나타내었다. 폴리프로필렌과 MC나일론 소재를 이용하여 구성하였고 레이저 가공기를 이용한 가공을 실시하였다. 시제품의 전반적인 사양은 Table 4에 자세히 나와 있다. 초기 설계 값 중에서 무게는 항공 구동에서 매우 중요한 설계 요소이다. 실제 제작 후 오차는 +200g으로 매우 근사한 값을 얻을 수 있도록 하였다.

바퀴 제작을 위한 기어 가공 시 고려사항은 가공방식이다. 3D프린팅의 경우 기어 이 사이의 간격이 1.5 mm로 좁기 때문에 ABS 재질의 밀립현상으로 정밀한 결과물을 얻을 수 없었다. 따라서 광학계를 이용한 비접촉가공이며 수치제어, 그리고 가공 시 제어가 용이한 레이저 가공을 이용하였다. 가공을 통해 실제 제작한 기어의 잇 맞물림을 Fig. 6에 도시하였다.

바퀴 결합 방식은 위에서 언급한 바와 같이 바퀴 케이스를 바다에 고정시키는 방식으로 진행하였다. 이와 같은 체결 방식은 나사를 통한 간단한 체결이며 필요시 손쉽게 탈, 부착이 가능한 결합 방식이다. 실제 결합한 모습은 Fig. 7에 도시하였다. 모터와 프레임 을 볼트 직접 체결방식을 이용하여 진동 및 떨림 발생을 최소화 하였다.

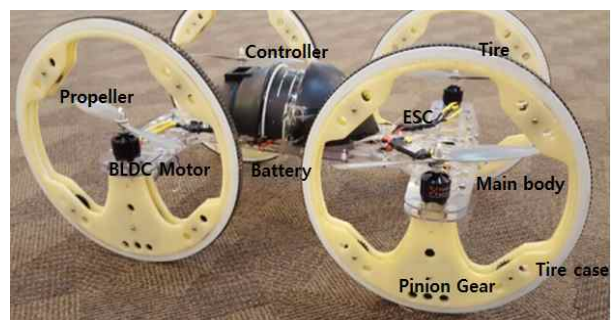


Fig. 5 Prototype robot

Table 4 Specification of prototype robot

Name	Reconnaissance Robot	
	Except propeller	Include propeller
Length	644 mm	450 mm
Width	512 mm	512 mm
Height	300 mm	
Weight	4 kg	
Actuation time	5~10 min	

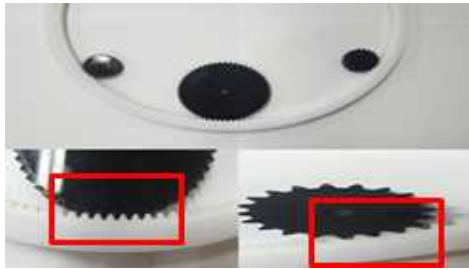


Fig. 6 Assembling internal gear and pinion

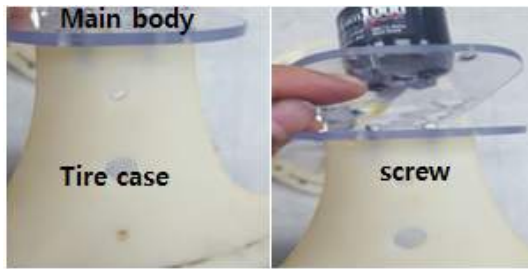


Fig. 7 Combination of wheel and body



Fig. 8 Slope overcoming

4.2 지상구동 시험

지상구동 환경시험은 총 2가지 시험을 실시하였다. 첫 번째는 경사도 극복 시험이다. 국내 도로 허용 경사도는 약 15°이므로 이 수치를 바탕으로 15°가 넘는 경사로는 험지라고 가정을 하여 Fig. 8과 같이 약 20°의 경사도 극복 시험을 실시하였다. 두 번째는 Fig. 9와 같은 바퀴 사이즈의 0.5배인 150 mm 이하의 소형 암석 장애물을 극복하는 시험을 실시하였다. 150 mm 이하의 장애물 극복 시 폴리프로필렌의 탄성을 이용하여 충격감소장치인 서스펜션 장치나 댐퍼를 장착하지 않아도 주행에 지장을 받지 않고 극복할 수 있다.

4.3 항공구동 시험

항공구동 시험환경은 Fig. 10과 같이 3~10 m 높이에서의 호버링 기능과 Fig. 11과 같이 높은 계단과 같은 험지 극복을 실시하였다⁸⁾. 첫 번째는 항공 정찰시 정확한 영상정보를 얻기 위한 3~10 m에서의 호버링 기능이다. 두 번째는 지상구동으로 극복하기 어려



Fig. 9 Obstacle overcoming



Fig. 10 3 m and 10 m Hovering



Fig. 11 Overcoming high hurdle

운 150 mm 이상의 장애물로 이루어진 험지에 관한 실험이다. 실험에 사용된 장소는 계단 각각의 높이가 250 mm, 총 개수는 20개 지상구동으로 극복하기 어려운 지형이고, 이를 Fig. 11과 같이 항공구동을 이용하여 극복하는 실험이다.

첫 번째 실험으로 항공구동 시 호버링 기능을 통해 안정성 있는 영상정보 획득이 가능함을 확인하였고, 두 번째 실험에서, 계단과 같이 지상구동으로 극복하기 어려운 지형에 대하여 항공구동을 통해 극복하고 정찰할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 다양한 지형에서 단일 개체로 정찰할 수 있는 융합형 정찰로봇을 제안하고 개념설계 및 시험을 수행하였다. 기존의

단순한 구동부의 단순한 융합이 아닌 허브리스 휠을 응용한 새로운 바퀴설계를 실시하여 각 구동부 메카니즘의 장점을 활용할 수 있는 설계를 실시하였다. 이를 통하여 지상 항공 정찰을 위한 융합 로봇이 요구하는 큰 사이즈의 바퀴, 전체적으로 대칭성을 만족하는 설계를 할 수 있었다.

프로토타입의 모델을 제작하여 지상 및 항공 구동의 기능에 대해 시험을 실시하였다. 지상구동의 경우 15°가 넘는 기울기의 험지에 대해 극복 테스트, 150 mm 이하의 소형 장애물 극복 테스트를 실시하였고 이를 통해 험지 극복 및 장애물 극복 기능이 만족됨을 확인하였다. 또 항공 구동의 경우 3~10 m 호버링 기능과 150 mm 이상의 지상구동으로 극복하기 힘든 장애물에 대해 극복하는 시험을 실시하였고, 안정성 있는 항공구동 기능을 확인하였다.

본 논문은 기존의 정찰 로봇의 단점인 정찰 시 사각지대 발생과 관련하여 구동부의 융합을 통해 보완함으로써, 향후 개발될 정찰 로봇의 활용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Kim, J. N., Roh, M. S., Song, J. B., Song, W. J., Kang, B. S., Kim, J.,

- 2012, An Experimental Study of a Single Axis Seesaw Attitude, Control Consisting of Motor and Propeller, The Journal of Korea navigation institute, 16:1 1-7.
- [2] Moore, M. D., 2003, Personal Air Vehicle : A Rural/Regional and Intra-urban On-demand Transportation System, The American Institute of Aeronautics and Astronautics , paper# 2003-2646.
- [3] Lee, J. H., Cho, G. H., Lee, J. W., 2006, Development and Prospect of Personal Air Vehicle as Next Generation Transportation, KSAS Journal, 34:3 101-108.
- [4] Jung, Y. S., Kwon, I. S., 2013, An Intergrated UGV and UAV Robot System for Effective Surveillance, Proceedings of ICROS , 16-25.
- [5] Yoon, J. C., 2004, Study on the Process and Die Design of Net-shape Cold Forging Processes for a Spur Gear with Inner Cam Profile, Journal of Aircraft, 47:4 1069-1343.
- [6] Liebmenn, E. K., Meder, K., Schuh, J., Nenninger, G., 2004, Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP), SAE Conference Proceedings, 387 421-428.
- [7] Jang, D. H., 2015, New Concept Design of Fusion Robot for Ground & Aerial Reconnaissance, Capstone Design Report, Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea.
- [8] Lee, B. E., Seo, J. W., Byun, Y. S., Kim, J., Yee, K. J., Kang, B. S., 2009, Development and Verification of Small-scale Rotor Hover Performance Test-stand, KSAS Journal, 37:10 975-983.