



전방향 이동장치가 결합된

교량검사를 위한 비행로봇 개발

김 덕 후*, 황 세 희**, 강 민 성**, 조 국**, 박 상 덕**, 손 웅 희**

(*한국생산기술연구원, 한양대학교, **한국생산기술연구원)

1. 머리말

교량 점검의 목적은 교량의 안정성을 확보하고 교량의 수명을 연장하는 데 있다. 일상점검은 육안검사 수준의 점검으로서 시설물의 기능적 상태를 판단하고 시설물이 현재 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인한다. 정기점검은 필요한 기초자료를 획득하는 초기점검과 전반적인 외관조사와 간단한 장비에 의한 조사를 하는 정기점검으로 나누어진다. 긴급점검은 재해가 발생하였거나, 사고가 발생한 경우 등에 대하여 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 조사하는 것이다. 정밀안전진단은 정기점검 과정을 통해서 쉽게 발견하지 못하는 결함부위를 발견하기 위하여 행해지는 정밀한 육안검사 및 검사측정장비에 의한 측정을 포함하는 근접점검으로서 특수장비 및 특수 기술자가 필요하다⁽¹⁾. 이러한 점검들을 할 때 가장 먼저, 그리고 가장 많이 사용되는 육안검사는 검사 부위가 넓고 검사자의 접근성 및 안전성이 떨어져 검사가 잘못되는 부분도 발생이 된다. 따라서 검사자의 안전과 검사의 신뢰도를 높이기 위해 자동화 등의 노력이 시도되고 있다.

자동화 검사에 대한 연구로는 Vanderbilt대학교의 IRL(intelligent robotics lab)에서 진공을 이용하여 벽을 오르내릴 수 있는 ROBIN(robotic inspector)을 개발해 교량 검사에 이용하려 하였고⁽²⁾, North Carolina대학교의 CARL(construction automation and robotics laboratory)에서는 peeper크레인에 끝 부분에 4자유도의 로봇을 장착하여 교량의 페인트를 제거하는 로봇을 개발하였다⁽³⁾. 그

리고 Moller International에서 ducted fan을 이용한 aerobot을 개발하였다⁽⁴⁾.

현재 개발 중인 교량검사용 비행로봇은 위와 같은 자동화 검사에 대한 연구의 하나이다. 비행로봇은 현재 정찰, 재난감시 등을 위한 무인비행기로서 연구가 진행되고 있다. 비행로봇이 다양한 분야에 응용가능하다는 것을 보일 수 있을 것이라고 예상된다. 이 글에서는 비행로봇에 전방향 이동장치가 합쳐진 형태로 천정에 붙어 있는 상태에서는 비행로봇은 추력만 발생 시킨 후에 전방향 이동장치만을 이용하여 이동하게 된다. 생산기술연구원에서 개발한 4개의 ducted fan을 이용한 플랫폼은 로봇이 천정에 붙은 상태에서 전방향 이동장치를 이용하여 움직이는 것을 확인 할 수 있었으나, 전력소모가 커서 독립전원을 사용하더라도 운용시간이 짧아지는 등의 문제가 있어 앞으로 소개할 형태로 플랫폼을 변경하게 되었다⁽⁵⁾.

이 글에서는 현재 개발된 플랫폼의 구성과 원리를 간단하게 2장에서 소개하고 3장에서 모델링에 대해서 설명하도록 하겠다.

2. 교량검사용 비행로봇의 구성

2.1 기구부 구성

교량검사용 비행로봇에서 비행플랫폼은 동축로터형으로 되어있다. 서로 반대 방향으로 회전하는 블레이드에 의해서 양력과 추력을 얻고, 반토크를 상쇄한다. 두 개의 로터가 사용되기 때문에 한 개의 로터를 사용할

* E-mail : dhblack@kitech.re.kr / (031) 8040-6344

표 1 교량검사용 비행로봇의 주요 부품 사양

	BLDC 모터	DC 모터	바퀴
제조사	APACHE	Swiss Amiet	Kornylak
크기	28Φ×39 mm	17Φ×51.7 mm	51Φ×12 mm
무게	84 g	51 g	23 g
특징	전압 : 11.1V (3 Li-poly) KV : 2500 전류 : 20 A (최대 : 30 A)	전압 : 12V 토크 : 300 mNm 감속비 : 66:1	Swedish Wheel (8 MiniWheel)

표 2 교량검사용 비행로봇의 제원

로터 직경	로봇 무게	로봇 크기	추력
560 mm	1350 g	480×480×330 mm	1750 g

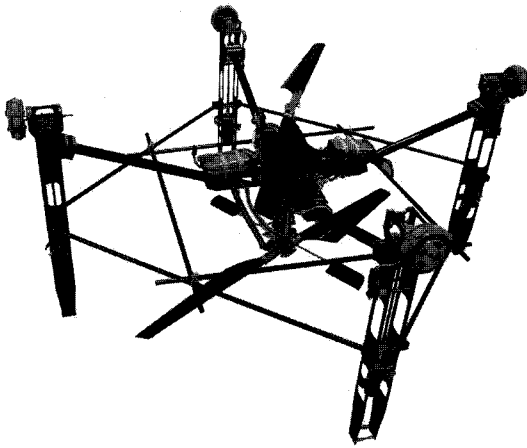


그림 1 교량검사용 비행로봇의 외형

때의 두배의 양력이 발생할 것 같지만 실제 로는 위쪽에 있는 로터를 통과하면서 흐트러진 공기가 다시 아래에 있는 로터로 들어가서 두 개의 로터를 따로따로 사용할 때보다 양력이 줄어든다⁽⁶⁾. 하지만 위, 아래 로터가 서로 반대방향으로 돌기 때문에 흔히 보는 헬기처럼 반토크 상쇄용 꼬리날개가 따로 존재할 필요가 없어 플랫폼의 전체 크기를 로터 직경에 의해 결정할 수 있다.

이 비행체에 합쳐져 있는 전방향 이동 장치는 전방향 바퀴(swedish wheel)를 사용함으로써, 2개의 바퀴를 사용할 때보다 로봇의 움직임을 자유롭게 하였다. 4개의 전방향 바퀴를 사용해서 3개를 사용할 때 생기는 마찰

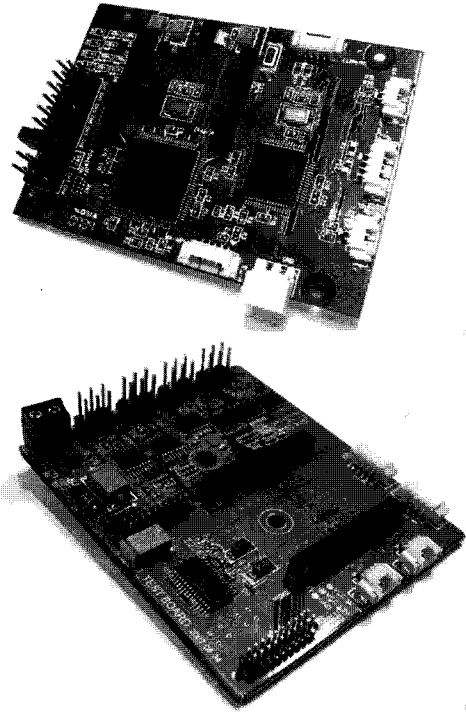


그림 2 제어보드(비행체(위), 전방향 이동장치(아래))

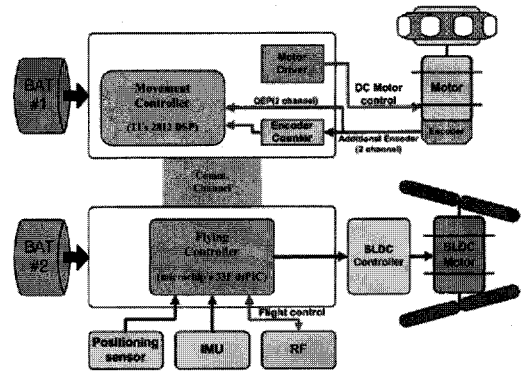


그림 3 제어기 구성

로 인한 손실을 줄이도록 하였다^(7,8).

교량검사용 비행로봇은 APACHE 社의 APXL20-6T+CF(Kv2500) BLDC 모터, Swiss Amiet 社의 1724T 012SR DC 모터, Kornylak 社의 Transwheel을 사용하였다. 로봇의 전체 크기는 480 mm×480 mm×330 mm(L×W×H)이고, 로터 직경은 약 560 mm, 무게는 약 1350 g이다. 전체적으로 무게 중심이 아래쪽에 위치하도록 회전판(swash plate)와 이를 조종하는 서보모터들은 아

래쪽에 위치한 로터를 조종하도록 위치하였고, 전방향 이동장치의 DC모터 역시 아래쪽에 고정시키고 베벨기어를 이용하여 위쪽에 있는 전방향 바퀴를 구동하도록 하였다.

이 비행체가 날아다니다 교량하부 근처에 가면 천정 벽과 기압차가 생기게 되고, 이 기압차와 추력을 통해 교량하부에 부착된다. 부착 된 후에는 전방향 이동 장치를 이용해서 움직이며 검사를 하게 된다.

2.2 전장부 구성

제어 보드는 비행로봇과 전방향 이동 장치 각각 하나 씩 사용된다. 비행로봇 제어 보드는 Microchip 社의 dsPIC 두개가 사용되고, Zigbee무선 통신모듈을 포함하고 있으며 주변 관성장치등과 통신 할 수 있게 구성 되어 있다.

전방향 이동 장치 제어 보드는 TI 社의 TMS320F2812 와 모터드라이버로 Allegro MicroSystems 社의 A3950이 4개 사용된다.

3. 교량검사용 비행로봇의 모델

3.1 비행로봇의 동역학적 모델

그림 4는 교량검사용 비행로봇의 좌표계를 나타낸다. 상위로터와 하위로터는 서로 반대방향으로 회전하면서 반토크를 상쇄 시키고 각각의 추력벡터를 발생시킨다. 추력벡터는 로터의 회전각(β)에 의해서 발생되고, 상위로터(T_U)와 하위로터(T_L)의 추력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_U &= T_U^X X_R + T_U^Y Y_R - T_U^Z Z_R \\ T_L &= T_L^X X_R + T_L^Y Y_R - T_L^Z Z_R \end{aligned} \quad (1)$$

각 추력벡터는 그림 5와 같이 로터 TPP(tip-path-plan)의 길이방향 경사각 a , 가로방향 경사각 b 로 나누어 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다⁹⁾. $G(a, b)$ 를

$$G(a, b) = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 a \cdot \cos^2 b}} \begin{pmatrix} -\sin a \cdot \cos b \\ \sin b \cdot \cos a \\ -\cos a \cdot \sin b \end{pmatrix} \quad (2)$$

라 하면, 추력벡터는

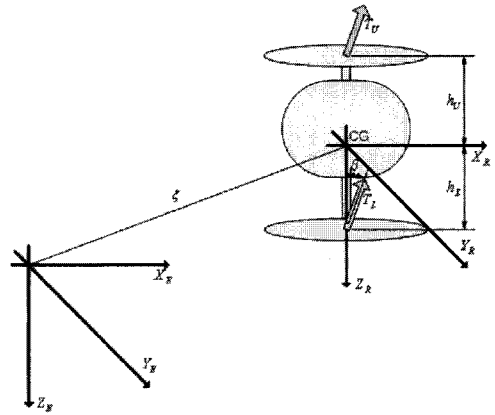


그림 4 좌표계

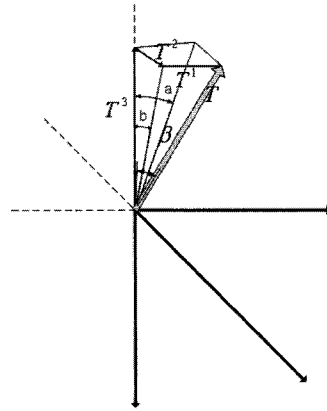


그림 5 추력벡터

$$\begin{aligned} T_U &= G(a, b) \cdot |T_U| \\ T_L &= G(a, b) \cdot |T_L| \end{aligned} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.

로봇의 좌표계에서 관성좌표계로의 변환행렬 $R(\xi)$ 는 다음과 같다.

$$R(\xi) = \begin{pmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi C\phi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi - C_\psi C\phi & S_\psi S_\theta C_\phi + C_\psi S\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (4)에서 ϕ , θ , ψ 는 각각 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 각이고, $C_\phi = \cos \phi$, $S_\phi = \sin \phi$ 이다. 따라서 병진운동의 힘(F)은 다음과 같다.

$$F = RG(a, b)(|T_U| + |T_L|) + mgZ_E \quad (5)$$

를, 피치에 대한 토크 τ_ϕ , τ_θ 는 시스템 무게 중심과 각 상·하위 로터 허브 사이 거리 h_U, h_L 에 작용하는 추력벡터 T_U, T_L 에 의해 발생하고, 요에 대한 토크 τ_ψ 는 상·하위 로터의 회전속도 차이에 의해 발생한다.

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} (h_U)|T_U| + (h_L)|T_L| \cdot \frac{\sin b \cdot \cos a}{\sqrt{1 - \sin^2 a \cdot \cos^2 b}} \\ (h_U)|T_U| + (h_L)|T_L| \cdot \frac{-\sin a \cdot \cos b}{\sqrt{1 - \sin^2 a \cdot \cos^2 b}} \\ I_R^L \dot{\Omega}_R^L + b_R^L \Omega_R^L - I_R^U \dot{\Omega}_R^U + b_R^U \Omega_R^U \end{pmatrix}$$

식 (6)에서 I_R^U 와 I_R^L 은 각 상·하위 로터의 Z축에 대한 질량관성모멘트 이고 Ω_R^U 와 Ω_R^L 은 각 상·하위 로터의 회전속도이다.

지금까지의 식으로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ m\ddot{z} \\ I_x \ddot{\phi} + b\dot{\phi} \\ I_y \ddot{\theta} + b\dot{\theta} \\ I_z \ddot{\psi} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} G^X(a, b)(|T_U| + |T_L|) \\ G^Y(a, b)(|T_U| + |T_L|) \\ G^Z(a, b)(|T_U| + |T_L|) + mgZ_R \\ (h_U|T_U| + h_L|T_L|) \cdot G^Y(a, b) \\ (h_U|T_U| + h_L|T_L|) \cdot G^X(a, b) \\ I_R^L \dot{\Omega}_R^L + b_R^L \Omega_R^L - I_R^U \dot{\Omega}_R^U + b_R^U \Omega_R^U \end{pmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 $b\dot{\phi}$ 과 $b\dot{\theta}$ 의 b 는 블레이드 및 스테빌라이저(stabilizer)의 기계적인 자이로 역할에 의한 감쇠계수(damping ratio)이다.

3.2 전방향 이동장치의 동역학적 모델

전방향 이동장치의 움직임을 모델링하기 위해 바퀴와 지면사이에 미끄러짐이 없고 움직이는 방향에 수직인 바퀴에서의 마찰력은 없다고 가정한다. 그리고 실린더 모양과 비슷하다고 가정하고 관성모멘트는 αMR^2 ($0 < \alpha < 1$)라고 가정한다. M 은 로봇의 질량, R 은 로

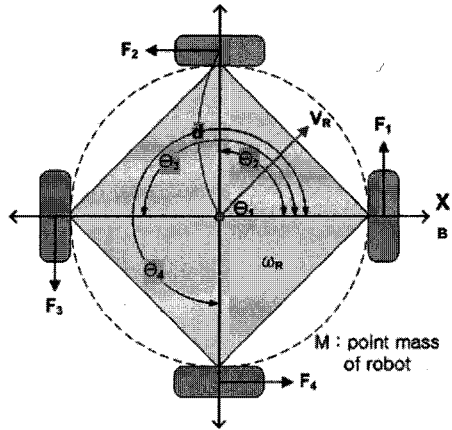


그림 6 전방향 이동장치의 파라미터

봇의 반지름이다.

v_r, v_m 은 각각 로봇의 속도, 바퀴의 속도이고, a 는 로봇의 가속도, $\dot{\omega}$ 은 로봇의 각가속도를 의미하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_r &= (v_x \ v_y \ R\omega)^T \\ v_m &= (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_f)^T \\ a &= \frac{1}{M}(F_1 + F_2 + \dots + F_n) \\ \dot{\omega} &= \frac{d}{I}(f_1 + f_2 + \dots + f_n) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 F_n 은 각 바퀴의 힘 벡터를, f_n 은 F_n 에서 힘의 크기만을 의미한다.

식 (8)의 정의를 이용하여 로봇의 가속도와 힘의 관계, 바퀴와 로봇의 속도관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ R\dot{\omega} \end{pmatrix} = \frac{1}{M} \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 & -\sin\theta_2 & L & -\sin\theta_n \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 & L & \cos\theta_n \\ \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & L & \frac{1}{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ M \\ f \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ M \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 1 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 1 \\ M & M & M \\ -\sin\theta_n & \cos\theta_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ R\omega \end{pmatrix} = Dv_r \quad (10)$$

여기서 C_α 는 force coupling matrix이고, D 는 velocity

특집: 재난극복 로봇 기술

coupling matrix이다. 두 식을 벡터화 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.


$$\mathbf{a} = \mathbf{C}_\alpha \mathbf{f}, \quad \mathbf{v}_m = \mathbf{D} \mathbf{v}_r \quad (11)$$

식 (11)을 이산 시간 도메인에서 속도와 가속도의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \mathbf{v}_r = \Delta t \mathbf{a}, \quad \Delta \mathbf{v}_m = \Delta t \mathbf{D} \mathbf{C}_\alpha \mathbf{f} \quad (12)$$

4. 맺음말

교량점검에서의 육안 검사는 가장 많이, 먼저 시행되는 검사지만 검사자의 접근성 및 안전성이 떨어지고 넓은 부분을 하기 때문에 검사부분을 놓치거나 신뢰도가 떨어진다. 따라서 자동화를 이용하여 신뢰도를 높이고 자 하는 연구가 많이 진행되고 있다.

이 연구를 수행함으로써, 검사자가 직접 검사부분에 접근하지 않고도 교량 위에서 비행체를 이용하여 교량 하부를 검사할 수 있어 안전성을 확보할 수 있는 로봇을 개발하였다. 현재 추력과 기압차를 이용하여 천정면에 붙어 있는 상태로 전방향 이동장치가 움직일 수 있음을 확인하였고, 구조 안정화와 제어 안정성 향상에 대해 연구가 진행 중이다. 앞으로 위치 인식 및 이동, 그리고 검사자가 쉽게 사용할 수 있도록 개발하는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 

후기

이 연구는 교량 조사 로봇 개발 연구단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 조효남, 2001, 교량공학, 구미서관, 서울.
- (2) Robert, T. P., Joe, L. Christopher. J. and Kazuhiko, K., 1997, "A Rubbertuator-based Structure-climbing Inspection Robot", Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1869~1874.
- (3) Steven, J. L., Brian, E. H., Leonhard, E. B., 2000, "Development of a Robotic Bridge Maintenance System", Proceeding of Automation in Construction, pp. 251~258.
- (4) <http://www.moller.com>
- (5) 김덕후, 황세희, 강민성, 조국, 박상덕, 2007, 교량검사를 위한 비행로봇 개발, Proceeding of Control, Automation, and System Symposium, pp. 310~314
- (6) 지상기, 강민성, 신진옥, 박상덕, 황세희, 조국, 김덕후, 2007, "감시용 동축로터 비행로봇의 개발", Proceeding of Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, pp. 101~107.
- (7) Keigo, W., 1998, "Control of an omnidirectional Mobile Robot", Proceeding of International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, pp. 51-60.
- (8) Rojas, R. and Förster, A. G., 2006, "Holonomic Control of a Robot with an Omnidirectional Drive", Proceeding of Kunstliche Intelligenz.
- (9) Castilo, P., Lozano, R. and DZul, A. E., 2005, Modeling and Control of Mini-Flying Machines, Springer., London.