

## 2-트로웰 방식 소형 미장로봇의 주행 알고리즘 개발

우광식\*, 이호길\*, 강민성\*, 송재복\*\*

\*로봇기술개발본부 (DART) 한국생산기술연구원 (KITECH)

\*\*고려대학교 지능로봇연구실

### Development of moving algorithm about concrete floor finishing robot with two trowels

K. S. Woo\*, H. G. Lee\*, M. S. Kang\* , J. B. Song\*\*

\*Division of Applied Robot Technology (DART) \*\*Intelligent Robotics Laboratory(KORU)

#### ABSTRACT

The construction industry is typical of the "job of 3D", the automated construction equipments are getting used in the domestic construction sites and the construction robots began to be sold in the abroad. The research developed the small sized robot which could be used at the apartments and the office buildings with the small floors. But the past finishing robot could not be operated easily, it had expensive controller which could not increase the production of robot. In this paper, user interface is made to operate easily the small concrete floor finishing robot with two trowel which has low cost controller, motion algorithm including modeling and mechanism about the concrete finishing robot is developed to control moving. Simulation and experiment figure out how the finishing robot moves and will contribute to realizing it.

**Key Words** : Concrete floor finishing robot (미장로봇), Trowel (트로웰), Controller (제어기)

#### 1. 서론

산업 사회가 고도화되어 감에 따라 자동화 기술은 공장의 테두리를 넘어 전 산업 분야에 영향을 미치기 시작하고 있다. 특히 건설 분야는 대표적인 3D 업종으로서 건설 자동화가 시급한 실정이다. 이러한 추세에 따라 국내의 건설 업계에서도 건설 자동화 설비 도입이 추진되기 시작하였고<sup>(1)</sup>, 선진국에서는 건설용 로봇이 시판되기 시작하였다<sup>(2)</sup>. 선진국에서 만들어진 미장로봇이 활용되는 곳은 항공기 격납고, 대형창고 등 대형 바닥면이 있는 공사에 적용 가능한 타입으로 면적과 크기가 크면서 무게가 많이 나가는 로봇으로 제작되었다.

그러나 우리가 개발한 소형 미장로봇은 아파트, 빌딩 등 바닥면이 소규모이면서 작업수요가 많은 미장작업을 대상으로 하고 있다<sup>(3)</sup>. 그러므로 우리는 미장의 자동화 및 고층건물 등의 미장작업에 필요한 요구 조건에 적합하게 작업을 할 수 있는 소형화 된 미장로봇을 제작하였다. 그러나 초기에 구성된 미장로봇은 사용자의 조작이

어려웠고 고가의 제어기를 탑재하여 대량생산의 어려움이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 미장로봇의 동역학적 해석을 통해 전방향 주행 알고리즘을 개발하였고 또한 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 그리고, 미장로봇의 대량생산을 위해 사용자 조작이 용이한 인터페이스 및 저가형의 제어기를 개발하였으며 개발된 제어기를 탑재하여 전방향 주행 실험을 수행하였다.

#### 2. 미장로봇의 동적 운동 해석 및 시뮬레이션

##### 2.1 동적 모델링

본 논문에서의 미장로봇은 2 개의 회전 트로웰을 가지고 있으며, 로봇은 트로웰의 마찰구동력에 의해 이동하며 미장작업을 하도록 설계되었다. 그리고, 각 트로웰의 회전에 의해 발생하는 회전모멘트를 서로 상쇄시키기 위해 트로웰의 회전속도를 같게 하고 회전 방향은 서로 반대가 되도록 구성하였다. Fig. 1(a)는 본 연구에서 개발된 미장로봇의 개

념도와 좌표계를 나타낸다.

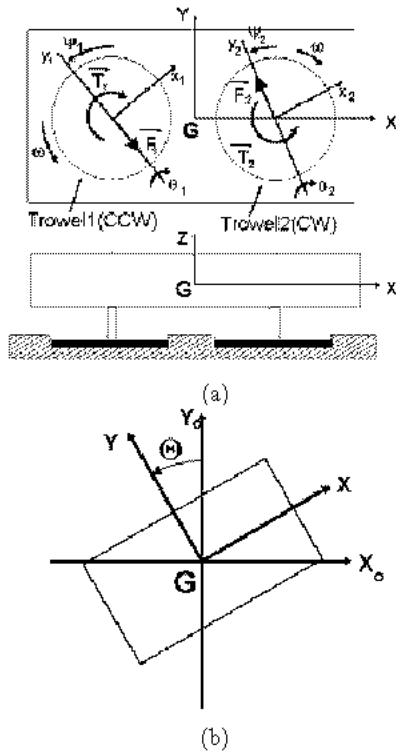


Fig.1 Self-propulsive trowelling robot

미장로봇을 트로웰의 회전 방향은 Fig.1(a)에서 보는 바와 같이 트로웰 1은 반시계 방향으로 트로웰 2는 시계 방향으로 회전한다. Fig.1(a)에서 X-Y 좌표계는 로봇의 body 좌표계이며,  $x_i - y_i$  좌표계는 각 트로웰의 좌표계이다. 본 논문에서는 로봇의 전진 방향을 Y 축 방향으로 가정하였으며, 제어변수로는  $z_c$  축을 중심으로 로봇의 body 좌표계 Y 축과 트로웰의  $y_i$  축이 이루는 각을  $\varphi_1, \varphi_2$ 로  $y_i$  축을 중심으로 트로웰의 회전면을 기울여 X-Y 평면과  $x_i$  축이 이루는 각을  $\theta_1, \theta_2$ 로 정의한다.  $F_1$ 과  $F_2$ 는 각각의 트로웰에 작용하는 마찰구동력이며,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 회전모멘트를 나타낸다. fig.1(b)에서의  $X_0 - Y_0$  좌표계는 고정 좌표계로서, 로봇 body 좌표계가 회전한 각도를  $\Theta$ 로 정의하였다.

이는 전체 마찰구동력은 각 트로웰에 작용하는  $F_1, F_2, T_1, T_2$ 로부터 구하여지며, 각각은  $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2$  네 가지 변수의 값을 조정함으로써,  $F$ 와  $T$ 의 크기와 방향을 조정하여, 미장로봇의 운동을 제어할 수 있다.

요컨대, 2 트로웰 방식으로 구성된 자기추진 미장로봇의 운동은  $F$ 와  $T$ 에 의해 이루어지고  $F_1, F_2$ 의 크기는  $\theta_1, \theta_2$ 의 함수이고  $F_1, F_2$ 의 방향은  $\varphi_1, \varphi_2$ 에 의해 결정된다. 이 같은 관계를 수

식으로 표현하면 다음과 같다. 먼저 각 트로웰에 작용하는 힘  $F_1$ 과  $F_2$ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$F_1 = K_1 \theta_1 \sqrt{\Delta_0^2 - K_1 \theta_1^2} (\sin \varphi_1 \mathbf{i} - \cos \varphi_1 \mathbf{j}) = K_1 \Gamma(\theta_1) (\sin \varphi_1 \mathbf{i} - \cos \varphi_1 \mathbf{j}) \quad (1)$$

$$F_2 = K_2 \theta_2 \sqrt{\Delta_0^2 - K_2 \theta_2^2} (-\sin \varphi_2 \mathbf{i} + \cos \varphi_2 \mathbf{j}) = K_2 \Gamma(\theta_2) (-\sin \varphi_2 \mathbf{i} + \cos \varphi_2 \mathbf{j})$$

$$\Delta_0 = \frac{\sqrt{M_{total} g}}{2AC}, A = \pi(R_2^2 - R_1^2)$$

$$K_1 = \frac{2}{3} \pi \mu C (R_2^3 - R_1^3)$$

여기서,  $M_{total}$ 은 미장로봇 전체의 질량이며, 2개의 트로웰에 미장로봇의 질량이 똑같이 배분되어 바닥면을 지지하였을 때, 즉  $\theta=0$ 의 경우에 바닥의 변형량  $\Delta_0$ 는 일정하며 이때의 마찰력 크기를 나타내는 새로운 함수  $\Gamma(\theta)$ 를 사용하기로 한다.  $K_1$ 은 상수이며  $R_1$ 은 트로웰의 중심에서 브레이드 시작까지의 거리이고  $R_2$ 는 브레이드 끝지점까지의 거리이다. 이에 따라 A는 회전에 따른 브레이드의 면적을 나타낸다. 식(1)을 다시 X, Y의 분력으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{1X} &= K_1 \Gamma(\theta_1) \sin \varphi_1, & F_{1Y} &= -K_1 \Gamma(\theta_1) \cos \varphi_1 \\ F_{2X} &= -K_2 \Gamma(\theta_2) \sin \varphi_2, & F_{2Y} &= K_2 \Gamma(\theta_2) \cos \varphi_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{robotX} = K_1 [\Gamma(\theta_1) \sin \varphi_1 - \Gamma(\theta_2) \sin \varphi_2]$$

$$F_{robotY} = -K_1 [\Gamma(\theta_1) \cos \varphi_1 - \Gamma(\theta_2) \cos \varphi_2]$$

로봇의 무게중심 G에 관한 회전모멘트  $T_{robot}$ 를 구하여 보자. Fig.1(a)에서 로봇의 무게중심 G에서 각 트로웰의 중심까지의 거리를  $s$ 라고 하면 회전모멘트는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T_{robot} &= T_1 + T_2 + (sF_{1Y} + sF_{2Y})\mathbf{k} \\ T_1 &= -(K_1 \Delta_0^2 + K_3 \theta_1^2) \mathbf{k}, & T_2 &= -(K_2 \Delta_0^2 + K_3 \theta_2^2) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3)$$

$$T_{robot} = [K_3 (-\theta_1^2 + \theta_2^2) + sK_1 (\Gamma(\theta_1) \cos \varphi_1 + \Gamma(\theta_2) \cos \varphi_2)] \mathbf{k}$$

$$K_1 = \frac{2}{3} \pi \mu C (R_2^3 - R_1^3), K_2 = \frac{R_2^2 + R_1^2}{4}$$

$$K_3 = \mu C \left[ \frac{\pi}{5} (R_2^5 - R_1^5) - \frac{\pi}{6} (R_2^2 + R_1^2) (R_2^3 - R_1^3) \right]$$

식(1)과 식(3)의 마찰구동력과 회전모멘트의 관계식으로부터 미장로봇에 작용하는 마찰구동력  $F_{robot}$ 와 무게중심 G에 관한 회전모멘트  $T_{robot}$ 는 아래의 식(4)와 같이 구할 수 있고 이러한 힘과 모멘트는 Fig.2에 나타내었다. 여기서,  $I_G$ 는 미장로봇의 회전모멘트를 의미한다.

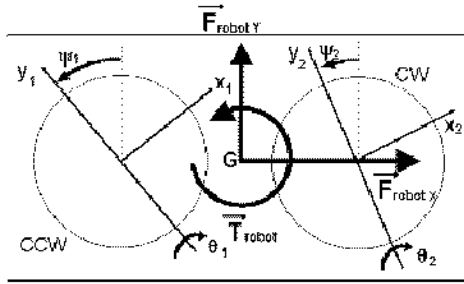


Fig.2 Driving force and moment

$$\begin{aligned}
 M_{total}\ddot{X} &= K_1(\Gamma(\theta)\sin\varphi_1 - \Gamma(\theta_2)\sin\varphi_2) \\
 M_{total}\ddot{Y} &= K_1(-\Gamma(\theta)\cos\varphi_1 + \Gamma(\theta_2)\cos\varphi_2) \\
 I_G\ddot{\Theta} &= [K_2(-\theta_1^2 + \theta_2^2) + sK_1(\Gamma(\theta)\cos\varphi_1 + \Gamma(\theta_2)\cos\varphi_2)]
 \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 보는 바와 같이 미장로봇의 마찰구동력과 회전모멘트는  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 함수로 표현되며, 이것이 곧 미장로봇의 제어변수가 된다. 따라서, 이러한 제어변수들을 이용하여 제어를 설계하여 마찰구동력의 방향과 크기를 변화시킴으로써, 임의의 원하는 방향으로 미장로봇을 움직일 수 있다. 그러나 식(4)에서 로봇의 운동은  $X$ ,  $Y$  및 회전의 3 자유도를 갖지만 제어변수는  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 4 개 이므로 구속조건이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 구속조건을 정의하도록 한다<sup>(6)</sup>.

$$-\theta_1 = \theta_2 = \theta \quad (5)$$

식(4)는 다시 식(5)에 의해서 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_{total}\ddot{X} &= -K_1\Gamma(\theta)[\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2] \\
 M_{total}\ddot{Y} &= K_1\Gamma(\theta)[\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2] \\
 I_G\ddot{\Theta} &= -sK_1\Gamma(\theta)[\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2]
 \end{aligned} \quad (6)$$

본 논문에서는 제어 변수  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 는 각 트로웰의  $x$ ,  $y$  축에 부착된 모터의 회전 변화량에 의해 결정되는데 그 관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 l_{1x} &= R_2 \tan\theta_1 \cdot \cos\varphi_1, & l_{1y} &= R_2 \tan\theta_1 \cdot \sin\varphi_1 \\
 l_{2x} &= R_2 \tan\theta_2 \cdot \cos\varphi_2, & l_{2y} &= R_2 \tan\theta_2 \cdot \sin\varphi_2
 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 변화량은 미소하므로  $\tan\theta \approx \theta$ 로 가정하고, 식(5)의 구속조건을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 l_{1x} &= -R_2\theta \cdot \cos\varphi_1, & l_{1y} &= -R_2\theta \cdot \sin\varphi_1 \\
 l_{2x} &= R_2\theta \cdot \cos\varphi_2, & l_{2y} &= R_2\theta \cdot \sin\varphi_2
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 식(2)의 분력과 모터 변화량과의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 l_{1x} &= -HF_{1y}, & l_{1y} &= HF_{1x} \\
 l_{2x} &= HF_{2y}, & l_{2y} &= -HF_{2x} \\
 H &= \frac{R_2\theta}{K_1\Gamma(\theta)}
 \end{aligned} \quad (9)$$

식(4)와 (9)를 다시 정리하면 각축에 대해 표현되는 다음 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_{total}\ddot{X} &= \frac{1}{H}(l_{1y} - l_{2y}) \\
 M_{total}\ddot{Y} &= \frac{1}{H}(l_{1x} - l_{2x}) \\
 I_G\ddot{\Theta} &= -s\frac{1}{H}(l_{1x} + l_{2x})
 \end{aligned} \quad (10)$$

식(9)와 식(10)은 제어 입력 변수  $l_x$ ,  $l_y$ 와  $F$ ,  $T$  관계를 나타내고 있다.

위의 동적운동의 해석에서 보는 바와 같이 2 트로웰 방식의 자기추진 미장로봇은 바퀴와 같은 별도의 이동 메커니즘 없이도 이동하며 미장작업을 동시에 수행할 수 있는 특징을 가지고 있다.

## 2.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 앞에서 제시한 미장로봇의 동역학 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 구성하였다. 두개의 조종기를 사용하여 조종기 1은 미장로봇의 직진운동을 제어하는 조이스틱이며 조종기 2는 미장로봇의 순수회전을 제어하는 조이스틱으로 구성하였다. 디스플레이 부분은 조종에 따른 미장로봇의 움직임을 예측할 수 있으며 실제 미장로봇을 움직이기 전 시뮬레이션을 통한 조종기 조종을 통하여 사전에 조종방법을 습득할 수 있다.(Fig.3)

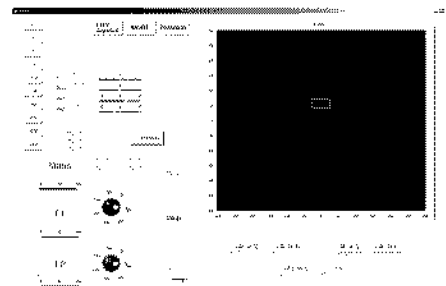


Fig.3 Simulation

## 3. 미장로봇의 구성

### 3.1 미장로봇의 기구부

미장로봇의 기구부는 로봇이동과 미장작업을 동시에 수행할 수 있도록 구성되어진 부분으로, 미장 표면의 평탄화를 수행하는 트로웰과 트로웰을 임의의 방향으로 기울여 미장로봇을 전 방향으로 이동할 수 있도록 자세를 제어하는 트로웰 자세제어부로 구성되어 있다. 트로웰의 자세를 제어하기 위해 본 논문에서는 스텝모터를 사용하였으며 기구부는 그림 4 와 같다. (Fig.4)

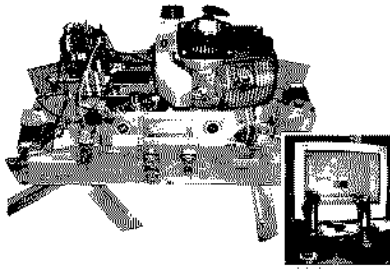


Fig.4 Photograph of Concrete Floor Finishing Robot

### 3.2 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스는 미장로봇의 움직임에 대한 명령과 로봇상태를 표시해 주는 부분으로 구성되어 있다. 미장로봇의 운동에 대한 명령은 사용자에게 의해 조종기로부터 직진 및 회전운동에 대한 명령을 입력받고, 이를 앞서 제시한 모델링식에 의해 각각의 트로웰의 자세를 제어하기 위한 스텝모터의 회전 값으로 변환하여 블루투스 무선 모듈에 의해 로봇의 제어부로 전달할 수 있도록 하였다. 그리고, 로봇의 자세, 스텝모터의 회전량, 엔진의 스피드와 같은 로봇의 운동상태를 원격 모니터링 할 수 있도록 구성하였다.

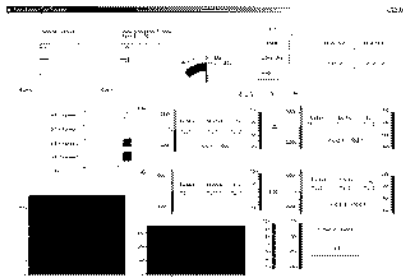


Fig.5 User Interface

### 3.3 미장로봇의 전장부

미장로봇의 전장부는 조종기에서 보내는 명령을 블루투스 무선통신모듈을 통해 마이크로컨트롤러에 (PIC16F876) 입력되어 트로웰의 자세제어를 위한

모터를 구동 시키는 역할을 하는 부분이다. 또한 각각의 모터 회전수를 측정하기 위해 포토센서미터를 사용하여 컨트롤러에 입력시켜 사용자 인터페이스를 통해 확인할 수 있게 구성하였다. 이 부분은 저렴한 마이크로컨트롤러를 사용하여 기존 컨트롤러를 대체 할 수 있는 역할을 하였다.

## 4. 실험

미장로봇의 성능실험을 위해 실질적 콘크리트 바닥을 구현하여 실험을 해야 하지만 제작환경의 어려움으로 인해 미장로봇의 동작에 중심점을 맞추고 콘크리트와 비슷한 환경을 조성하여 실험을 하였다. 여러 바닥의 조건에 따라 미장로봇의 정지상태를 기준으로 하여 움직임을 실험하였다. 실험 과정에서 로봇의 움직임에 따라 회전 현상이 일어나 미장로봇이 정확한 목표 위치로 이동을 하진 않았다. 그러나 자이로센서를 이용한 미장로봇의 회전을 측정할 수 있게 되어 제어를 통해 원하는 위치에 도달할 수 있는 실험이 진행중이다. 이 실험을 통해 바닥면 차이가 로봇의 움직임에 많은 영향을 주지만 자이로센서를 통하여 여러 조건의 바닥에서도 이를 보정할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

## 5. 결론

차후 건설현장의 미장작업에 투입하여 환경적응력, 내구성, 조작성, 미장면의 평가 등 지속적인 모니터링 및 현장수집데이터에 의거한 보완이 수행될 예정이다.

### 참고문헌

1. 건설 공사 자동화 연구 방안, 건설기술연구원, 1992.
2. 건설용 로봇, 일본 로봇학회지, 제 8 권 2 호, 1990.
3. 이호길 외, *Construction Robot 개발을 위한 기획 사업*, 통상산업부, 1997.
4. Hiroshi Furiya, Noriaki Kiyohiro, "Floor Polishing Robot Driven by Self Propulsive Force," *JRSJ*, Vol.13, No.6, pp.854 ~ 859, 1995.
5. 6. Dong Hun Shin, Ho Joong Kim, "Self-propulsive Floor Polishing Robot," *Proceedings of IASTED Int. Conf. on Applied Modeling and Simulation*, pp.284 ~ 290, July, 1997.
6. 7. 이호길 외, *고기능 콘크리트 바닥 미장로봇의 개발(I)(II)*, 건설교통기술 연구개발사업 보고서, 1996~1997.