

원전시설용 이동로봇의 계단승하강에 관한 연구 (The Study on a Mobile Robot for going up and down Stairs in Nuclear Facilities)

* * * * *
김 병수, 김 창희, 황 석용, 김 승호, 이 중민

(B. S. Kim, C. H. Kim, S. Y. Hwang, S. H. Kim, and J. M. Lee)

*
한국원자력연구소 핵전자연구실 (KAERI, Nucl. Elec. Dept.)

The mobile robot, named as KAEROT, is designed to go up and down stairs in nuclear facilities.

To get a proper stable motion, kinematic modeling and analysis are seriously considered and new climbing algorithm is proposed focused on the stability. A couple of small wheels of one planetary wheel have to contact the surface of stairs all the time to give the gurantee for stability and safety.

To confirm the vativity of the proposed algorithm, simulation is carried out. The results make evident of feasibility for the algorithm.

I. 서론

원전시설용 이동로봇의 연구는 장애물이나 계단등이 존재하는 지역에서 이동이 가능한 크롤방식, 다리방식, 특수차륜방식등을 대상으로 하고있다. 그중에서 제어가 용이하고 소형경량화가 가능하며 평지에서의 주행성능이 우수한 특수차륜식을 채택한 로봇 시스템은 1980년대 부터 활발한 연구가 시작되어 TO-ROVER, AMOOTHY, AI-MARS 등이 개발되어 있다. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

그러나 이상의 로봇들은 이동중에 계단면이 감지 되면 단순히 유성차륜을 120° 회전하여 승월함으로써 크기가 일정하지 않은 실제계단의 적용시에는 안정성과 조작성에 많은 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 연구는 로봇의 전면에 부착된 계단 감지 센서를 이용하여 계단의 높이와 폭을 인식하면서 안정된 자세로 승월할 수 있는 알고리즘을 제안 하였다.

본 알고리즘은 인식된 계단의 형태에 따라서 후면 유성차륜의 전면 바퀴의 안정된 경로를 계획하고, 이에 따른 나머지 세 바퀴의 경로를 계획한다. 이때 계획된 네 바퀴의 경로와 측정된 경사각도로부터 각 유성차륜의 회전각도와 후면 소차륜의 회전각도를 구하여 계단 승월시의 기구학적인 해를 구하였다. [8, 9]

II. 기구학적 모델링

1. 유성차륜의 모델링

유성차륜은 그림 1에서 보여주는 것처럼 3개의 소차륜으로 구성되는데, (Py, Pz) 점을 중심으로 회전하고 소차륜이 회전하는 2 자유도 시스템이다.

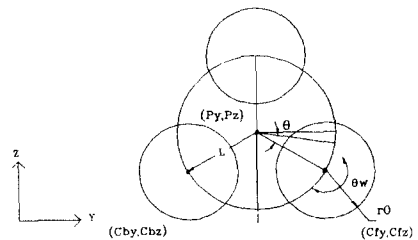


그림 1. 유성차륜의 구조

그림 1에서 차륜의 중심위치 (Cfy, C fz), (Cby, C bz)는 (Py, Pz) 을 기준으로 θ 와 θ_w 에 따라 변화되는데, 식 (1) - (4) 에 나타내었다.

$$Cfy = Py + L \cos (\Pi/6 - \theta) \quad (1)$$

$$Cfz = Pz - L \sin (\Pi/6 - \theta) \quad (2)$$

3. 계단의 모델링

로봇좌표계와 계단좌표계는 로봇의 계단 감지시스템이 계단이 감지되면 서로 연결될 수 있는데, 계단의 좌표계에서의 i 번째 계단의 위치 S_i 는 그림 3 에서와 같이 계단의 높이를 H_i , 폭을 W_i 라하면 식(13), (14) 로 표현된다.

$$S_{iy} = R_y + L_a \cos \theta_a + \frac{\sqrt{3} L}{2} + r_0 + \sum_{i=0}^n W_i \quad (13)$$

$$S_{iz} = \sum_{i=0}^n H_i \quad (14)$$

이 된다.

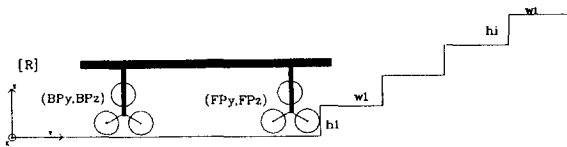


그림 3. 계단의 모델링

III. 계단 승월 알고리즘

1. 유성차륜과 계단면과의 접촉상태

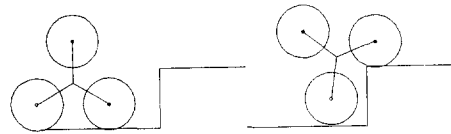
유성차륜의 2 개의 차륜이 계단면에 항상 접촉하면서 안정되게 계단을 승하강하기 위한 계단과 차륜의 접촉형태는 아래와 같이 3 가지 형태로 나눌 수 있다.

$$(1) \quad \sum_{i=0}^a W_i \leq C_{fy}(n) < \sum_{i=0}^{a+1} W_i$$

$$C_{fz}(n) = \sum_{i=0}^a H_i$$

$$\sum_{i=0}^b W_i \leq C_{by}(n) < \sum_{i=0}^{b+1} W_i$$

$$C_{bz}(n) = \sum_{i=0}^b H_i$$

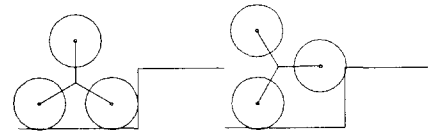


$$(2) \quad C_{fy}(n) = \sum_{i=0}^{a+1} W_i$$

$$\sum_{i=0}^a H_i \leq C_{fz}(n) < \sum_{i=0}^{a+1} H_i$$

$$\sum_{i=0}^b W_i \leq C_{by}(n) < \sum_{i=0}^{b+1} W_i$$

$$C_{bz}(n) = \sum_{i=0}^b H_i$$

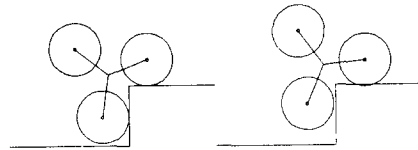


$$(3) \quad \sum_{i=0}^a W_i < C_{fy}(n) < \sum_{i=0}^{a+1} W_i$$

$$C_{fz}(n) = \sum_{i=0}^a H_i$$

$$C_{by}(n) < \sum_{i=0}^{b+1} W_i$$

$$\sum_{i=0}^b H_i \leq C_{bz}(n) < \sum_{i=0}^{b+1} H_i$$



2. 승월방법

계단 측정시스템에 의하여 계단의 높이와 폭이 결정되면 후면유성차륜의 앞쪽차륜 중심위치 (BCfy, Bcfz) 를 그림 4 와 같은 경로로 준다. 이때 나머지 3 개의 차륜 중심위치 (BCby, BCbz), (FCfy, FCfz), (FCby, FCbz) 들도 같은 경로상에 놓여야 하는데

$$C_{by} = P_y - L \sin(\Pi/3 - \theta) \quad (3)$$

$$C_{bz} = P_z - L \cos(\Pi/3 - \theta) \quad (4)$$

여기서 θ : 유성차륜의 회전각,

θ_w : 소차륜의 회전각이다.

2. 로봇의 모델링

3 개의 유성차륜이 삼륜구조로 부착된 이동로봇의 모델링시 이들 유성차륜들의 기구학적인 연결(Coupling) 과 유성차륜의 회전과 로봇 본체의 경사에 의해 발생하는 소차륜의 회전을 고려하여야 한다.

식 (5) 는 로봇의 경사각과 유성차륜의 회전에 의한 소차륜의 회전각의 상관관계를 보여준다.

$$\theta_w = 0.6 (\theta + \theta_a) \quad (5)$$

또한 경사각 센서를 이용함으로써 기구학적인 해를 구하기 위한 3 개의 수식에서 전면 유성차륜과 후면 유성차륜과의 심한 기구학적인 Coupling 을 포함한 요소를 경사각도로 대체하였다. 경사각도 θ_a 는 식 (6) 으로 주어진다.

$$\theta_a = \sin^{-1} \frac{L \cos(\Pi/3 - \theta_f) - L \cos(\Pi/3 - \theta_b)}{L_a} \quad (6)$$

여기서 θ_f , θ_b 는 각각 전후면 유성차륜의 회전 각도이다.

그림 2 는 모델링된 로봇의 구조로써 전면 유성차륜의 바퀴의 중심위치는 (FC_f, FC_fz) , (FC_b, FC_bz) 이고, 후면 유성차륜의 바퀴의 중심위치는 (BC_f, BC_fz) , (BC_b, BC_bz) 이다.

여기서 (BC_f, BC_fz) 이 입력으로 주어질경우 각각 바퀴의 중심위치는 식 (7) - (12) 로 주어진다.

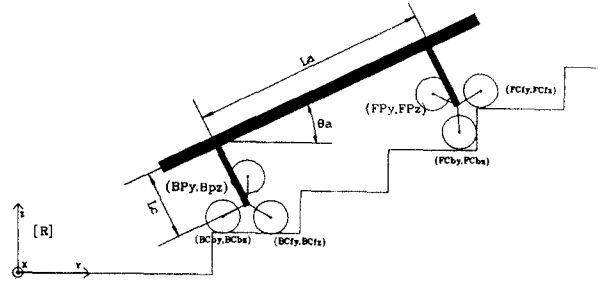


그림 2. 로봇의 구조

$$BC_{by}(n) = BC_{fy}(n) - \sqrt{3}L \cos[\theta_b(n-1) + \Delta\theta b'] \quad (7)$$

$$BC_{bz}(n) = BC_{fz}(n) - \sqrt{3}L \sin[\theta_b(n-1) + \Delta\theta b'] \quad (8)$$

$$FC_{fy}(n) = BC_{fy}(n) + L_a \cos \theta_a + L \cos[\Pi/6 - \{\theta_f(n-1) + \Delta\theta f'\}] - L \cos[\Pi/6 - \{\theta_b(n-1) + \Delta\theta b'\}] - r_0 (\Delta\theta_w + 0.6 \Delta\theta b') \quad (9)$$

$$FC_{fz}(n) = BC_{fz}(n) + L_a \sin \theta_a - L \sin[\Pi/6 - \{\theta_f(n-1) + \Delta\theta f'\}] + L \sin[\Pi/6 - \{\theta_b(n-1) + \Delta\theta b'\}] \quad (10)$$

$$FC_{by}(n) = BC_{fy}(n) + L_a \cos \theta_a - L \sin[\Pi/3 - \{\theta_f(n-1) + \Delta\theta f'\}] - L \cos[\Pi/6 - \{\theta_b(n-1) + \Delta\theta b'\}] - r_0 (\Delta\theta_w + 0.6 \Delta\theta b') \quad (11)$$

$$FC_{bz}(n) = BC_{fz}(n) + L_a \sin \theta_a - L \cos[\Pi/3 - \{\theta_f(n-1) + \Delta\theta f'\}] + L \sin[\Pi/6 - \{\theta_b(n-1) + \Delta\theta b'\}] \quad (12)$$

$$\Delta\theta f' = \Delta\theta f + \Delta\theta a, \Delta\theta b' = \Delta\theta b + \Delta\theta a,$$

$$\theta_f(n-1) = \sum_{i=0}^{n-1} \theta_f(i),$$

$$\theta_b(n-1) = \sum_{i=0}^{n-1} \theta_b(i) \quad \text{이다.}$$

앞절의 상태 판별법을 이용하여 6개의 위치식중에서 3개를 선택하게 된다.

표 2. 승월시의 차륜의 중심위치

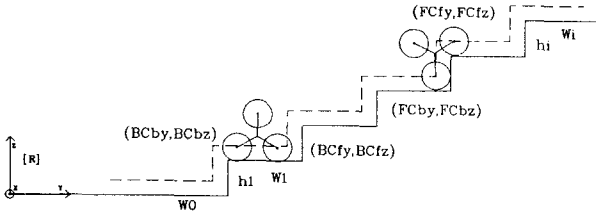


그림 4. 차륜의 이동경로

| Y,Z | FCf | FCb | BCf | BCb | 상태 |
|--------|--------------|--------------|--------------|----------------|-----|
| Y Z | 60 7.5 | 49.41 7.5 | 0 7.5 | - 20.78 7.5 | f-1 |
| Y Z | 92.5 7.5 | 71.72 7.5 | 32.5 7.5 | 11.72 7.5 | f-2 |
| Y Z | 92.5 25 | 80.9 7.5 | 32.59 7.5 | 11.78 7.5 | f-3 |
| Y Z | 113.18 25 | 92.5 25 | 55.89 7.5 | 35.11 7.5 | f-1 |
| Y Z | 121.8 25 | 101.2 25 | 64.59 7.5 | 43.81 7.5 | f-2 |
| Y Z | 121.8 43 | 110.61 25 | 67.02 7.5 | 46.24 7.5 | f-3 |
| Y Z | 132.99 43 | 121.8 25 | 78.21 7.5 | 57.43 7.5 | f-1 |

IV. 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 승월 알고리즘과 기구학적 모델링의 유용성을 검토하기 위하여 가상적인 계단에서 시뮬레이션을 수행 하였다. 표 1은 제작된 로봇과 시뮬레이션에 사용된 계단의 재원을 보여 준다.

표 1. 로봇과 계단의 재원

| 분 류 | 재 원 |
|----------------|--------------|
| 로봇 몸체길이, La | 60 cm |
| 유성차륜 암길이, L | 12 cm |
| 차륜의 반경, r0 | 7.5 cm |
| 계단의 높이, h1, h2 | 17.5 , 18 |
| h3 | 18.5 cm |
| 계단의 폭, W0, W1 | 100 , 30.3 |
| W2, W3 | 31.2 , 32 cm |

상기 계단에서 로봇이 승월 알고리즘에 의하여 제어될 경우 각 차륜과 계단면 사이의 접촉 상태가 변화될 때의 4개의 차륜의 중심위치와 접촉상태의 일부를 표 2에 나타내었다.

VI. 결론

본 연구에서는 원자력시설내에서 계단을 승하강하며 자유롭게 점검과 보수작업을 수행할 수 있는 극한작업용 로봇 개발의 일환으로 제작된 이동 로봇 KAEROT의 주행 성능향상을 위한 기구학적 해석을 수행하였다. 계단감지 센서를 이용하여 안정되게 임의의 경로를 통과할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이때 경사각 센서 데이터를 이용하여 전후 유성차륜들 사이의 연결(Coupling)요소를 제거함으로써 로봇의 기구학적 해를 용이하게 구할 수 있었다.

본 알고리즘을 가상 계단에서 시뮬레이션한 결과 주어진 경로를 잘 추종함이 확인되어 모델링과 제안된 알고리즘의 적합성이 입증되었다.

참고 문헌

- [1] 竹原, 他, " 原子力에 있어서의 로봇 개발,
" 原子力工業, vol.30, no.1, 1984, pp.51-60.

- [2] 宮尺童雄, 他, " 原子力 發電所向로보트技術,
" Toshiba Review 89(11), 1984, pp.953.
- [3] Takano, M. and et. al., " Development of
new type of mobile robot TO-ROVER , " 13th
ISIR, 1984, pp.20.81-20.89.
- [4] T.Arai, and et. al., " A stair-climbing ro-
bot for maintenance: AMOOTY, " Conf. on
robotics and remote handling in nuclear
industry, 1984.
- [5] 연구보고서, 로보트 제어용 멀티프로세서 개발
(III), 한국원자력연구소, KAERI/RR-832/89.
- [6] 中山良一, 佐藤彦 ; " 原子力發電所 自律知能
로보트의 개발, " 日本로보트學會誌 5 권 5 호
1987, pp.81-86.
- [7] 김병수, 김창희, 김승호, 이종민, " 계단 승하강용
이동로보트 설계, " 전자공학회 추계종합학술
대회논문집, 1988, pp.136-138.
- [8] 김병수, 김창희, 김승호, 이종민. " 원전시설용
이동로보트의 장애물 승월에 관한 연구, " 한국
자동제어학술회의 논문집, 1989, pp.166 - 171.
- [9] P.F.Muir and C.P.Neuman, " Kinematic Modeling
of Wheeled Mobile Robots, " Technical Report
NO. CMU-RI-TR-86-12, The Robot Institute,
Carnegie Mellon University, July , 1986,