

## 이미지 센서를 이용한 영구자석 구형모터의 위치 추정

오예준\*, 이원국\*, 이호준\*, 강동우\*, 원성홍\*\*, 이 주\*  
한양대학교\*, 동양미래대학\*\*

### Position Estimation for the Permanent Magnet Spherical Motor using Optical Image Sensor

Ye-Jun Oh\*, Won-Kook Lee\*, Ho-Jun Lee\*, Dong-Woo Kang\*, Sung-Hong Won\*\*, Ju Lee\*  
HanYang University\*, DongYang Mirae University\*\*

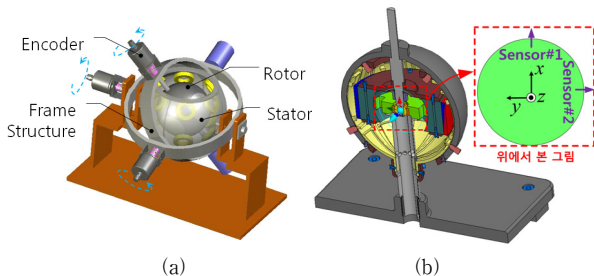
**Abstract** - The position of the rotor in a spherical motor is usually measured by encoders. When using a encoder, It is possible to measure the angle in a very high resolution. However it is limited to measure a single-DOF using one encoder. So it is required to use 3 encoders to measure a 3-DOF. In order to connect the encoder and the motor, an additional mechanic linkages. Because of these reasons, it is difficult to apply it in various systems. Where the friction and inertia is increased when operating the motor. It could cause a negative effect in dynamic characteristic.

In this paper present dual-image sensing system capable of measuring 3-DOF motions in real time eliminating the mechanical linkages. In addition we offer methods of converting sensors outputs to rotation angle which is used in the controller.

#### 1. 서 론

3자유도 구형모터는 회전자가 회전운동뿐만 아니라 기울임 운동으로 정의되는 포지셔닝 운동을 병행하는 특수한 타입의 모터이다. 다자유도 동작을 위해서는 일반적으로 여러 개의 모터와 액츄에이터와 이를 연결하기 위한 메커니즘이 필요하므로 전체 시스템을 복잡하게 만들며 중량과 부피를 증가시키는 문제점이 있다. 또한, 백래시와 마찰, 링크 자체의 탄성변형으로 인한 오차가 존재하기 때문에 이를 보정하기 위해서 제어 시스템도 복잡해진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1950년대 하나의 모터로 다자유도 운동을 할 수 있는 컨셉이 처음 제안되었으며 그 후 국내외적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 현재 다자유도 모터의 연구 방향은 넓은 동작 각도, 고토크, 위치정밀도 향상, 센싱기법 등으로 진행되고 있다. 그중에서도 다자유도 모터의 회전자 위치값은 제어 시 필요하며 시스템의 성능에도 중요한 역할을 한다. 기존 회전자 위치를 측정하는 센싱기법으로는 그림 1과 같이 3개의 절대형 엔코더를 이용하여 회전자 위치를 측정하는 방법이 연구되었다.[1]

엔코더를 이미지센서로 대체하면 비접촉 방식으로 위치를 센싱하기에 기계적인 연결부가 사라지며 이로 인해 모터의 동특성이 향상된다. 또한, 이미지센서의 출력은 움직이는 면의 상대적인 변위를  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  거리로 출력하기 때문에 제어기에서 필요로 하는  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  회전각으로의 변환과정이 필요하다. 본 논문에서는 이미지센서를 이용한 위치센싱 기법과 센서의 출력값을 회전각도로 변환하는 식을 제안하였다.

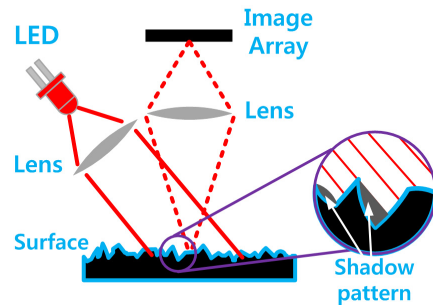


〈그림 1〉 (a) 기계적인 연결부와 3개의 엔코더를 사용한 구형모터 (b) 이중공극형 구형모터와 이미지 센서

#### 2. 본 론

##### 2.1 이미지센서 동작이론

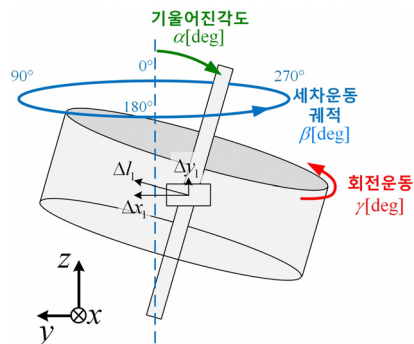
이미지 센서는 움직이는 면의 상대적인 변위를 측정하는데 사용되며 측정원리는 센서가 짧은 주기를 가지고 이미지를 촬영한 후, 밝고 어두운 이미지 패턴을 비교하여 변화된 거리를 출력한다. 그림 2는 전형적인 이미지 센서를 사용하는 광원(LED), 렌즈, photo-detector를 보여준다.



〈그림 2〉 이미지 센서의 측정원리 [3]

##### 2.2 구형모터에서의 회전각 정의

이중공극형 구형모터는 그림 1의 (b)와 같이 기계적인 연결부가 제거 되도록 설계되었으며 회전자 위치센싱을 위해 고정자 내부에 이미지 센서를 공간적으로 90° 차이를 가지도록 배치하여 회전자 위치를 측정하도록 했다. 여기에서 회전각도는 그림 3과 같이 정의할 수 있다.



〈그림 3〉 회전각도  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  의 정의와 센서의 측정값

##### 2.3 센서 출력값을 회전각 $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ 로 변환하는 식

Sensor#1의 출력값  $\Delta x_1$ ,  $\Delta y_1$ 와 Sensor#2의 출력값  $\Delta x_2$ ,  $\Delta y_2$ 를 제여기의 위치정보  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  회전각으로 변환하는 과정을 살펴보자.

그림 3은 배치된 2개의 센서 중 Sensor#1이 회전하는 면을 센싱할 때의 출력값을 나타낸다. 먼저 센서의 출력값을 이용해서 회전운동하는  $\gamma$  각을 구하면 변환 식 (1)과 같다.

$$\gamma = \frac{\sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}}{r} = \frac{\Delta l_1}{r} \quad (1)$$

여기서  $r$ 은 회전자의 중심에서부터 측정표면까지의 거리를 나타낸다. 회전각도  $\gamma$ 의 경우 센서 하나만 이용해도 측정할 수 있지만  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 회전각은 2개의 센서 출력값을 조합해야 구할 수 있다. 먼저  $\beta$ 의 경우 회전자축이 기울어지지 않았을 때 회전 방향이  $\gamma$ 와 동일한 회전운동을 수행하지만  $\alpha$ 만큼 기울어지게 되면  $\gamma$ (회전운동)와 달리  $\beta$ (세차운동-歲差運動)로 운동하기 때문에 센서의 출력값을 통해 각 자유도에 대한 독립적인 운동을 구분해야 한다. 이를 구하기 위해 2개의 센서 출력 중  $\beta$ 와 종속적인 관계에 있는 센서의 출력값을 찾고 이 값을 연산함으로써 회전각  $\beta$ 를 구할 수 있다.

$\beta$ 가 변화함에 따라 두 개의 이미지 센서 출력값의 변화 추이를 살펴

보기 위해 수학적 모델링을 수행하였다. 축이 일정각도  $\alpha$ 만큼 기울어진 상태에서  $\gamma$ 에 대한 회전운동과  $\beta$ 각( $0^\circ \sim 360^\circ$ )에 대한 세차운동을 하도록 모델링 하였다. 모델링에 사용된 변환 식은 식 (2),(3)과 같다.

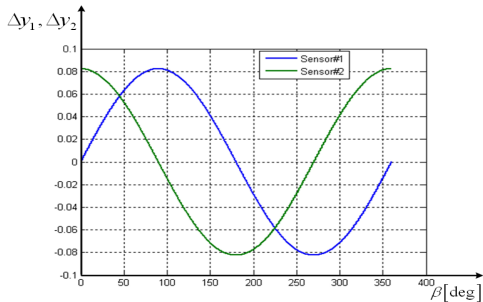
$\hat{K} = [k_x \ k_y \ k_z]^T$ 의 법선벡터를 이용해 축이  $\alpha$ 만큼 기울어짐을 나타내었으며 이때의 회전운동  $\gamma$ 와 세차운동  $\beta$ 는 아래 식을 이용해 표현할 수 있다.

$$R_K(\gamma) = \begin{bmatrix} k_x k_x v(\gamma) + c(\gamma) & k_x k_y v(\gamma) - k_z s(\gamma) & k_x k_z v(\gamma) + k_y s(\gamma) \\ k_x k_y v(\gamma) + k_z s(\gamma) & k_y k_y v(\gamma) + c(\gamma) & k_y k_z v(\gamma) - k_x s(\gamma) \\ k_x k_z v(\gamma) - k_y s(\gamma) & k_y k_z v(\gamma) + k_x s(\gamma) & k_z k_z v(\gamma) + c(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_Z(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)에서  $c(\gamma) = \cos(\gamma)$ ,  $s(\gamma) = \sin(\gamma)$ ,  $v(\gamma) = 1 - \cos(\gamma)$ 이다.

x축(1,0,0)상에 위치한 Sensor#1이 측정하는  $\Delta y_1$ 의 값은  $\beta$ 각( $0^\circ \sim 360^\circ$ )에 대한 세차운동 시 그림 4와 같이 1주기의 정현파형을 가진다. Sensor#2는 공간적으로  $90^\circ$  차이를 가지도록 배치되어 있기에  $\beta$ 에 따른  $\Delta y_2$ 는 변화는 여현파형을 가진다. 이를 수학적으로 계산한 결과는 그림 4와 같다.



<그림 4>  $\beta$ 각 회전에 따라 변화하는 센서의  $\Delta y_1, \Delta y_2$  출력값

이 같은 성질을 이용해서 두 개의 센서의 출력값  $\Delta y_1, \Delta y_2$  값을 회전 각  $\beta$ 로 변환시킬 수 있다.

$$\tan \beta = \frac{y_{\max}(\alpha) \sin \beta}{y_{\max}(\alpha) \cos \beta} = \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2} \quad (4)$$

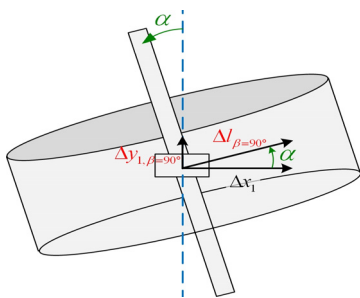
$$\beta = \arctan 2(\Delta y_1, \Delta y_2) \quad (5)$$

여기서  $y_{\max}(\alpha)$ 는  $\alpha$ 의 각도에 따라 그 크기가 달라지기에 이를  $\alpha$ 에 대한 함수형태로 고려하였다. 마지막으로 Sensor#1을 통해 기울어진 각도  $\alpha$ 를 구하기 위해서는 축이  $\beta = 90^\circ$  또는  $270^\circ$ 에 위치한 경우 각도  $\alpha$ 를 구할 수 있다.  $90^\circ$ 에서의  $y_{\max}(\alpha)$ 값은 식 (6),(7)을 통해 구할 수 있다. Sensor#1의 출력값인 대각길이  $\Delta l_1$ 와  $\Delta x_1$ 의 사잇각이  $\alpha$  각도를 나타낸다.  $\beta$ 의 실제 위치와 상관없이 앞서 구한  $\beta$ 와 정현파의 성질을 이용한다면  $\beta = 90^\circ$ 에서의 대각길이  $\Delta l_1$ 와  $\Delta y_1$ 로 알 수 있고  $\alpha$ 를 계산할 수 있다.

그림 5의 기하학적 관계를 식으로 정리하면 식(6),(7)과 같다.

$$y_{\max}(\alpha) = \frac{\Delta y_{1, \beta=90^\circ}}{\sin(\beta=90^\circ)} \quad (6)$$

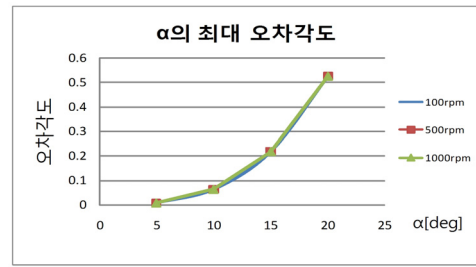
$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta y_{1, \beta=90^\circ}}{\Delta l_{\beta=90^\circ}}\right) \quad (7)$$



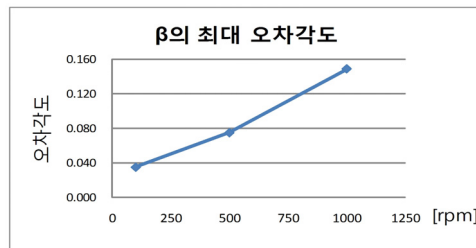
<그림 5>  $\alpha$ 각을 보여주는 공간적 구조

## 2.4 제안된 변환 식을 이용한 회전각도 변환 결과

식 (2),(3)을 이용하여 구형모터의 회전운동을 수학적으로 모델링 하였다. 앞서 제안한 변환식의 타당성을 증명하기 위해 수학적 모델링한 센서 출력값  $\Delta x, \Delta y$ 를 (1), (4)~(7)식을 이용해 회전각도로 변환하였으며 그 결과는 그림 6, 그림 7과 같다.



<그림 6> 실제값과 변환식으로 계산한  $\alpha$ 값 사이의 오차크기



<그림 7> 실제값과 변환식으로 계산한  $\beta$ 값 사이의 오차크기

그림 6은  $\alpha$ 가 기울어짐에 따라 실제 값과 계산된  $\alpha$ 값과 오차를 나타낸다. 제안된 변환 식을 이용해 센서의 출력값을 회전각도로 변환할 때 그림 6과 같이  $\alpha$ 각이 커질수록 오차가 커지는 것을 확인할 수 있으며 이 같은 오차는 이미징센서가 측정하는 곡면을 미소구간의  $\Delta x, \Delta y, \Delta l$ 로 선형화 과정에서 발생하게 된다. 기울임 각도  $\alpha$ 가 커질수록 비선형 특성이 커지기에 변환식으로 계산된 회전각도  $\alpha$ 의 오차가 커진다. 하지만 설계된 구형모터는 기계적 구조 때문에 기울어지는 각도  $\alpha$ 가  $20^\circ$ 로 제한되기에 계산 오차 또한 제한된다. 반면에  $\beta$ 의 경우는 삼각함수의 성질을 이용해 구했기에  $\alpha$ 각에 따른 비선형적인 특성과 회전속도에 대한 영향이 미비하여 변환식이 그림 7과 같이 높은 정확도를 가진다.

## 3. 결 론

다자유도 모터의 위치센싱에 대한 연구는 엔코더와 같은 접촉성 부품을 이용하여 수행되어 왔으며 이는 구조적인 문제와 동특성에 부정적인 영향을 주었다. 본 논문에서는 비접촉식 센서인 이미지 센서를 이용한 센싱기법과 이미지 센서의 출력값을 회전각도로 변환하는 식을 제안하였다. 또한, 제안한 식을 이용하여 센서의 출력값을 회전각도로 계산한 경우와 실제 회전각과의 비교를 통해 변환식의 높은 정확도를 검증할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0060145).

### [참 고 문 헌]

- [1] Sung-Chul Go, "A Study on Vector Control of 3-D.O.F. spherical PM motor", Ph.D. thesis, Hanyang University, Seoul, 2010
- [2] Sung-Hong Won, "A Study on the Analysis and the Control characteristics of a 3 D.O.F Spherical Motor for Robotic joints", Ph.D. thesis, Hanyang University, Seoul, 2007
- [3] Avago Technologies, Bluetooth Optical Mouse Concept Design, Technical Data.
- [4] Kok-Meng Lee, Debao Zhou, "A Spherical Encoder for Real-time Measurements of Three-DOF Wrist Orientations", Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada, pp1596-1601, October 2003