한 쌍의 푸쉬-풀 와이어를 이용한 로봇 안구의 팬-틸트 모션 생성

Pan-tilt Motion Generation of Robot Eye by Using a Pair of Push-pull Wires

정 찬 열*·오 경 균**·박 신 석*·김 승 종†

Chan-Yul Jung, Kyung-Geune Oh, Shin-Suk Park and Seung-Jong Kim

(2010년 4월 2일 접수 ; 2010년 12월 9일 심사완료)

Key Words : Robot Eyes(로봇 안구), Wire Driving(와이어 구동), Eyes Mechanism(안구 메커니즘), Pan-tilt Motion(팬-틸트 모션)

ABSTRACT

This paper introduces a robot eye module, of which two degree-of-freedom motions, i.e. panning and tilting, are driven by a pair of wires. The main feature of the module is that each wire can generate push-pull motion without buckling. It is thanks to a Teflon tube which guides the path of the moving wire. End points of the tube and wire have pivot elements so that a smooth push-pull motion is produced even when the end point of wire is moved by eye rotation. This mechanism helps the eye module to be very compact. In this paper, the structure of the robot eye module is introduced in detail, and the required motor angles for a certain direction of eye line are investigated analytically and experimentally.

1. 서 론

인간의 안구 움직임은 상하회전(tilting), 좌우회전(panning), 비틀림 등 세 가지의 회전 운동으로 완전하게 묘사될 수 있다고 알려져 있다⁽¹⁾. 안구가 움직이는 동안 안구의 회전 중심은 대체로 일정하게 유지되기 때문에 직선 운동은 무시할 만한 수준이다. 로봇에 있어서 안구의 3 자유도 회전을 구현하는 경우, 그 중 비틀림 구동은 기본적으로, 상·하 좌·우 회전에 의해 발생하는 안구 내부에 위치한 카

메라 영상의 기울어짐을 보상하기 위한 목적을 가지며, 그에 관한 대표적인 방법론이 ‘Listing’s Law’⁽²⁾이다. 그러나, 이 논문에서 소개하는 로봇과 같이, 카메라가 안구가 아닌 고정 프레임에 장착된 경우에는 안구의 비틀림 거동은 불필요하고, 안구 회전은 2 자유도 구동, 즉, 팬-틸트(pan-tilt) 구동만으로 구현이 가능해진다.

팬-틸트 구동을 위한 로봇의 안구는 짐벌(gimbal) 구조로 설계되는 것이 일반적인데, 그 구동을 위해서는 안구부 회전관성 저감 및 모터, 링크들의 공간적 간섭 회피를 위하여 와이어 구동 방식(또는 텐던(tendon) 방식)이 흔히 사용된다. 와이어 구동 방식은 특히, 안구뿐 아니라 눈꺼풀과 눈썹 등의 움직임이 필요한 표정을 짓는 로봇 얼굴과 같이 안구 주위에 모터 및 링크, 프레임, 케이블 등이 밀집되어 서로 간섭이 되거나 분해조립이 대단히 복잡한 경우에 유용하다. 게다가 많은 경우에 안구의 내부 공간에는 카메라가 위치한다. 대표적인 와이어 구동 방식의 안

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술연구원(KIST)

E-mail : sjongkim@kist.re.kr

Tel : (02)958-5610, Fax : (02)958-5659

* 고려대학교 기계공학과

** 한국과학기술연구원(KIST)

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

구의 사례로는 일본 와세다 대학의 WE-4R⁽³⁾이 있고, 이탈리아 제노바 대학의 'MAC-EYE'⁽⁴⁾는 획득된 영상의 안정화를 위하여 와이어의 병렬제어 메커니즘을 이용하였다. 하지만 기존의 와이어 구동 방식은 푸쉬-풀(push-pull) 모션을 구현하기 위해서, 두 개의 모터를 한 쌍으로 사용하거나, 한 개의 모터와 하나의 스프링이 조합된 구조로써 설계되는데, 여전히 공간 효율 개선과 구조 단순화의 필요성은 존재한다.

이에, 이 논문에서는 한 개의 모터와 와이어로써 푸쉬-풀 모션을 하는 가장 간단한 메커니즘을 제안한다. 그것은 와이어의 좌굴(buckling)을 막는 튜브와, 와이어와 튜브의 끝단 단순 지지용 피봇(pivot) 요소를 채용함으로써 가능하다. 그리고, 내부에 카메라 설치 공간이 확보된, 팬-틸트 구동이 가능한 콤팩트한 안구 모듈을 소개하고, 로봇의 시선 방향 제어 방법을 제시한다.

2. 안구 모듈의 설계

2.1 실버 로봇 Silbot II와 안구 모듈 개발 환경

Fig. 1은 노인의 생활지원 서비스를 위해 '21C 프론티어 지능로봇 사업단'에서 개발된 바퀴 구동형 이동 로봇인 Silbot II이다. Silbot II는 노인과의 인지 게임, 일정 관리 등의 서비스와 함께 감성적 상호작용이 가능하며, 이를 위하여 다양한 센서를 바탕으로 음성인식, 사용자 인식, 자율 주행, 표정 구현, 립싱크 등의 기능을 수행한다. Silbot II의 머리부는 우리 연구팀에서 설계 및 제작되었고, Fig. 2는 그 내부 메커니즘이다. 머리부는 안구부, 입술부, 목

구동부로 나누어지고, 각 부분은 단일 모듈화되어 총 19자유도(안구: 2×2, 눈꺼풀: 2×2, 눈썹: 2, 입: 5, 목: 4)로 구성되어 있다. 또한, 머리 외관은 눈썹, 입술 등의 파손 방지를 위해 구형의 투명 아크릴 덮개가 씌워져 있는데, 이에 따라 팬-틸트 구동을 하는 로봇의 머리도 구형으로 디자인되었다. 하지만 이러한 형상은 내부 기구 배치 시, 모든 요소의 회전 중심이 머리 중심을 향하게 되므로 기구부의 상호 간섭을 회피하는 설계가 관건이 된다.

2.2 안구 구동 메커니즘

(1) 푸쉬-풀 와이어 메커니즘

이 논문에서 제안하는 안구 구동부 구조를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 양끝이 피봇으로 고정된 튜브의 안쪽을 따라 와이어가 구동하여 안구를 회전시키는 메커니즘을 보여주고 있으며, 안구의 회전축은

Fig. 2 Face element mechanism inside Silbot's head

Fig. 1 Silbot II capable of emotional expression

Fig. 3 Eyeball driving mechanism and pull-push wire structure

Fig. 4에 도시한 바와 같이 짐벌의 형태와 동일하다. 즉, 안구의 틸팅 회전축은 프레임에 고정되어 있고, 패닝 회전 축은 안구에 고정되어 안구와 함께 상하 방향 회전한다. 구동 모터는 안구의 회전 관성 모멘트 $0.253 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ 를 고려하여, 구동 속도 380 deg/sec , 구동 토크 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 의 모터를 선정하였다.

안구의 구동은, 안구의 중심 하단부에 두 가닥의 와이어를 나란히 대칭으로 연결하여 각각의 밀고 당기는 운동을 조합하는 병렬제어 방식으로 구현된다. 다시 말해서, 각각의 와이어에 연결된 두 개의 모터가 동일한 방향과 각도로 구동하면 안구는 상하 방향 회전을 하며, 모터가 서로 반대 방향으로 동일한 각도만큼 구동하면 안구는 좌우방향 회전을 한다.

즉, 두 개의 와이어가 독립적으로 밀고 당기는 힘을 전달하여 별도의 링크구조 없이 안구의 2자유도 회전을 구현한다. 이를 가능하게 하는 핵심 요소는 와이어의 좌굴을 방지하는 튜브와, 와이어와 튜브 끝단을 단순 지지하면서 회전을 허용하는 피봇 요소이다. 튜브의 양끝은 피봇을 통하여 공간 상에 고정되어 있어서 튜브는 와이어가 움직이는 경로를 제공하고 유지할 수 있다.

이 연구와 유사한 푸쉬-풀 구동이 가능한 튜브 와이어 방식을 사용한 연구로 2003년 스탠포드 대학에서 개발된 Gecko-Inspired climbing robot⁽⁵⁾이 있다. 이 로봇은 푸쉬-풀 와이어 방식을 사용하여 로봇의 발가락 움직임을 구현하였는데, 각각의 와이어가 독립적으로 작동하고, 구동방향이 일정하게 정해져 있어 상대적으로 와이어에 작용하는 굽힘 및 비틀림 하중이 작은 시스템이었다. 이에 비해, 이

논문의 안구 시스템은 한 쪽 와이어의 움직임이 다른 쪽에 영향을 주고 안구의 회전에 따라 와이어의 푸쉬-풀 방향이 달라지기 때문에, 와이어의 반복적인 비틀림과 굽힘에 의한 피로 파괴 가능성이 증가한다. 그래서 이 논문의 안구 모듈에서는 튜브 및 와이어의 양 끝단에 구형 또는 원통형 피봇을 적용하여 굽힘 및 비틀림 하중을 완화시켰으며, 안구 구동 시 와이어의 저항이 충분히 작도록 튜브 형상을 설계하였다.

(2) 푸쉬-풀 와이어 및 튜브 직경 선정

먼저, 튜브와 와이어와의 마찰력은 내구성을 악화시키는 핵심요인이므로, 튜브의 재질로는 마찰계수가 낮은 테플론(Teflon)을 선정하였고 와이어의 재질은 강도와 부식성을 고려하여 스테인리스(stainless steel)로 하였다.

다음으로 와이어의 직경과 튜브의 내경 선정도 매우 중요하다. 와이어와 튜브 사이의 공극이 너무 작으면 마찰이 증가하여 모터의 구동 부하가 커지거나 튜브가 파손될 위험이 증가하고, 너무 크면 와이어가 튜브 안에서 휘어지는 현상이 발생하게 된다. 실제로 여러 가지 치수의 와이어와 튜브를 이용하여 내구성 테스트를 수행한 결과, 튜브에 변형이 일어나거나 와이어가 끊어지는 현상이 발생하였다. 내구성 테스트는 안구를 지그재그 방향으로 100시간 동안 연속으로 구동하는 방식으로 수행되었으며 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 여기서, 와이어의 굽기는 사전 테스트를 통해서 직경 0.5 mm 또는 0.6 mm 로 선정하였다. 직경이 0.5 mm 보다 작은 경우, 와이어가 튜브 내부 및 외부에서 쉽게 휘어지게

Fig. 4 Axes of rotation of the eyeball

Table 1 Durability test results of wire and tube

Wire external diameter (mm)	Tube inside diameter (mm)	Tube external diameter (mm)	Result
0.5	0.5	1	Wire broken after 100hour-driving
0.5	0.6	1.8	Succeed in 100hour-driving
0.5	0.7	1.5	Succeed in 100hour-driving
0.6	0.6	1.5	Motor broken after 5hour-driving
0.6	0.7	1.8	Wire broken after 10hour-driving

되고, 이것은 안구 제어의 정밀도를 감소시킬 뿐만 아니라, 반복 구동 시 피로 파괴의 가능성이 증가한다. 와이어의 직경이 0.6 mm보다 크면, 와이어의 굽힘 강성이 너무 커져서 모터의 부하가 커지는 현상이 발생한다. 결국 Table 1에서 보는 바와 같이, 100시간 구동에 성공한 경우는 두 가지뿐이었는데, 그 중에 와이어 직경 0.5 mm와 튜브 내경 0.7 mm의 경우는 급격한 구동 시에 튜브 내부에서 와이어가 휘어지는 현상이 발생하였기에, 최종적으로 0.5 mm 직경의 와이어와 내경 0.6 mm, 외경 1.8 mm의 튜브를 선택하였다.

한편, 와이어와 테플론 튜브의 곡률은 직선에 가까울수록 부하가 작아져서 유리하지만, 구동 모터가 안구의 상부에 놓여야 하는 안구 모듈의 구조적, 공간적 특성으로 인하여, 테플론 튜브 끝에 끼워진 두 피봇 사이의 거리를 50 mm, 각도를 50°로 설계하였고, 테플론 튜브의 곡률 반경은 60 mm로 하였다.

3. 시선 방향 구현

3.1 시선 방향과 모터 회전각의 관계

안구의 목표 시선 방향은 초기 기준 위치(예: 정면)로부터의 틸팅 각도와 패닝 각도로 표현이 가능하므로, 이들의 값을 각각 θ_y 와 θ_z 라 하면, 이 절에서는 θ_y 와 θ_z 만큼의 안구 회전각을 구현하기 위한 두 모터의 회전각을 구하고자 한다. 모터의 회전각은 와이어의 이동 거리를 모터 암(arm)의 길이로 나누어 구할 수 있다고 단순히 생각하면, θ_y 와 θ_z

만큼의 팬-틸트 회전을 위해 필요한 와이어의 이동 거리를 계산해야 한다.

Fig. 5는 안구 시스템의 3차원 직교 좌표계를 보여준다.

그림에서 F_1 과 F_2 는 안구 모듈의 고정 프레임에 튜브의 끝단과 함께 고정되어 있는 피봇의 위치이고, B_1 과 B_2 는 안구와 함께 회전하는 와이어의 끝단을 고정하고 있는 피봇의 위치이며, 점 O 는 안구의 회전 중심이다. θ_1 와 θ_2 만큼의 팬-틸트 회전에 의하여 B_1 과 B_2 가 각각 B_1' 과 B_2' 으로 이동한다면 각 와이어의 이동 거리는 각각

$$l_1 = |\overline{F_1 B'_1}| - |\overline{F_1 B_1}| = a' - a \quad (1)$$

$$l_2 = \left| \overline{F_2 B'_2} \right| - \left| \overline{F_2 B_2} \right| = a'' - a \quad (2)$$

와 같이 표현되는데, 초기 와이어의 길이 a 는 알고 있는 거리이고, 이동 후 두 와이어의 길이 a' 과 a'' 은 B_1 과 B_2 의 위치를 알아야 구할 수 있다. B_1 과 B_2 의 좌표는 아래 식과 같다.

$$\mathbf{B}_1' = \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{B}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_2' = \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{B}_2 \quad (4)$$

여기서, $B_1 = (0 \quad b \quad -h)^T$
 $B_2 = (0 \quad -b \quad -h)^T$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & 0 & \sin \theta_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_z & 0 & \cos \theta_z \end{pmatrix}$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & -\sin \theta_y & 0 \\ \sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이다. 이 회전 변환에 있어서 주의할 점은 패닝 회전의 중심축이 안구에 고정되어 함께 틸팅 회전을 하므로, 계산 시에 패닝 회전변환 행렬을 먼저 적용해야 한다는 점이다. 결과적으로 식 (3)과 (4)는 아래와 같이 정리된다.

$$B_1' = \begin{pmatrix} b \cos \theta_z \sin \theta_y - h \sin \theta_z \\ -b \cos \theta_y \\ -b \sin \theta_z \sin \theta_y - h \cos \theta_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Fig. 5 Eyeball system on 3 dimensional cartesian coordinates

$$B_2' = \begin{pmatrix} -b \cos \theta_z \sin \theta_y - h \sin \theta_z \\ b \cos \theta_y \\ b \sin \theta_z \sin \theta_y - h \cos \theta_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

공간 상에 고정된 두 점 F_1 과 F_2 의 좌표는

$$F_1 = (a \quad b \quad -h)^T \quad (7)$$

$$F_2 = (a \quad -b \quad -h)^T \quad (8)$$

이므로, 식 (5) 내지 (8)의 좌표들을 두 점 사이의 거리 공식에 대입하면 식 (1)과 (2)의 a' 과 a'' 을 계산할 수 있고 l_1 과 l_2 를 얻을 수 있다. 이 과정은 수식은 길지만 단순 계산이므로 이 논문에서는 생략한다.

3.2 시선 방향 구현 실험

3.1절에서 목표 시선 방향을 위한 두 모터의 입력각도를 계산하였다. 이 절에서는 앞서 해석적인 방법을 통하여 산출한 모터의 입력각도를 실험적인 방법을 통하여 검증하였다. 안구가 회전할 때, 안구가 바라보는 시선 방향의 측정은 카메라 촬영을 통한 간접적인 방법을 사용하였다. 먼저, 영상획득의 오차를 최소화하기 위하여 카메라와 안구 모듈의 위치를 고정하였다. 다음으로, 안구가 회전한 각도를 산출하기 위하여 안구의 중심에 특정 표식을 만들고, 안구를 상·하, 좌·우 대각선 방향으로 회전시킨 후 카메라로부터 각각의 영상을 획득하였다. 두 모터 조합으로 총 54개의 안구 위치에 대한 안구의 시선 방향 이미지를 획득하였으며, 카메라로부터 얻은

Fig. 6 Eyeball rotation angle measurement

54개의 이미지파일에서 Fig. 6과 같이 안구 중심에 표시한 점이 원점으로부터 이동한 위치를 측정하여 이미지상에서 표식이 이동한 x, y 좌표를 구하였고, 삼각함수를 이용하여 결과적으로 안구의 회전각 θ_z 와 θ_y 를 산출하였다.

실험적 방법을 통하여 얻어진 안구의 회전 각도와 앞 절에서 유도한 계산식을 이용하여 얻어진 해석적 방법을 이용한 안구의 회전 각도 중에 안구의 오른쪽 수평 운동의 시선 방향에 대한 결과값 6가지 경우를 Table 2에 정리하였다.

전체 54개 데이터에 대해서 두 결과의 차이를 분석한 결과, 평균 오차는 θ_z 는 0.545° , θ_y 는 0.433° 로 나타났다. 이와 같은 차이는 푸쉬-풀 와이어 구동방식의 특성상, 테플론 튜브의 내·외부에서 작지만 와이어가 휘어지는 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만, 이 논문에서 제안하는 안구는 영상 추적 등을 위한 안구의 정확한 위치 제어보다는

Table 2 Example of experiment and analysis result

	Angle(θ_z) experiment(deg)	Angle(θ_y) experiment(deg)	Angle(θ_z) calculation(deg)
23	3.720	0.674	4
24	6.842	0.913	7
25	9.764	0.978	10
26	12.980	1.130	13
27	16.577	1.609	17
28	19.297	1.674	19

Fig. 7 Input command angles of motor1 and motor2 for each eyeball position(pan and tilt = $-30 \sim 30$). : symbol ‘*’ and ‘▽’ is the experiment results

로봇의 감정 표현을 목적으로 하고 있으므로 위의 오차 범위는 충분히 무시 가능한 수준이라 할 수 있다.

Fig. 7은 안구의 회전 각도인 θ_z , θ_y 와 함께 그 각도를 구현하기 위한 모터 암의 회전각을 도시한 그림이다. 격자로 보여지며 서로 교차하고 있는 두 평면은 해석적 방법을 통한 두 모터의 입력 각도를 나타내며, 격자평면 내의 ‘△’와 ‘*’로 나타낸 점은 실험을 통하여 얻어진 두 모터의 입력 각도를 각각 나타낸다. Fig. 7에서 목표 시선방향에 대한 두 모터의 입력각도는 안구의 패닝 각도와 틸팅 각도가 만나는 지점의 수직 방향으로 두 매쉬 평면과 각각 만나는 곳의 데이터가 두 모터의 입력 각도가 된다.

두 개의 모터와 와이어는 이론적으로 완전 대칭이라 가정하였으므로, 두 격자평면이 대칭으로 교차하는 모양을 가지며, 그 교선은 두 모터 암의 회전 각이 동일한 경우로서 패닝 각도가 0° 를 유지하면서 틸팅이 이루어지는 경우를 의미한다. 안구 구동 각도가 커질 경우에는 와이어의 구부러짐 등에 의하여 평면이 약간 휘어짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 와이어를 튜브에 넣어 구동함으로써 좌굴을 피하면서 하나의 액추에이터로 푸쉬-풀 모션을 구현하는 방식과 아울러, 피봇을 적절히 이용하여 2 자유도 회전 시에도 부드러운 와이어 구동이 가능하도록 한, 간단한 안구 구동 메커니즘을 제시하였다. 와이어와 테플론 튜브의 유연한 성질을 이용한 이러한 메커니즘은 동력 및 모션 전달에 있어서 방향 변화에 따른 대응이 비교적 용이하다. 이것은 링크나 기어는 물론 기존의 텐던 방식보다도 기구부의 메커니즘이 단순하여 설계 공간의 효율성을 높이는 데 있어서 탁월한 장점이 있다. 또한, 안구의 크기나 성능의 향상을 위한 안구 모듈의 개선이 요구될 시에 튜브의 길이 및 직경에 적절한 와이어의 굵기를 선정한다면 신뢰할 만한 수준의 안

구제어가 될 수 있을 것으로 판단된다. 안구의 구동 각과 모터 암의 회전각 사이의 관계식을 이용하면 허용할 만한 오차 범위 내에서 안구의 시선방향 제어가 가능함을 실험적으로 검증하였다. 물론 안구의 크기, 무게, 그리고 사용 모터의 성능에 따라 제한은 있을 수 있으나, 표정 구현을 위한 얼굴로봇의 안구 메커니즘으로 활용한다면 허용범위 안에서의 로봇 안구 제어가 가능하다는 결론을 얻었다.

후 기

이 연구는 지식경제부의 21C프론티어 지능로봇 사업의 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Shin, B. H., 2007, Development of Spherical 3-DOF Eyeball Mechanism for Humanoid Robot, Ph.D. Dissertation, Dept. Mechanical And Aerospace Eng., Seoul National University.
- (2) Tweed, D. and Vilis, T., 1987, Implications of Rotational Kinematics for the Oculomotor System in Three Dimensions, The Journal of Neurophysiology, Vol. 58, No. 4, pp. 832~849.
- (3) Hiroyasu, M., 2002, Development of a New Human-like Head Robot WE-4, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, pp. 2443~2448.
- (4) Dario, B., 2006, MAC-EYE: a Tendon Driven Fully Embedded Robot Eye, 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 62~67.
- (5) Daniel, S., 2008, Gecko-inspired Climbing Behaviors on Vertical and Overhanging Surfaces, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA).