

팔 달린 이동로봇을 위한 비주얼 서보잉

이후철*, 김영중*, 홍대희**, 박신석**, 임요택*
*고려대학교 전기전자전파공학부, **고려대학교 기계공학과

Visual servoing for a mobile robot with an arm

Hoo-Cheol Lee*, Young-Joong Kim*, Dae-Hie Hong**, Sin-Suk Park**, Myo-Taeg Lim*

*School of Electrical Engineering, Korea University, **Department of Mechanical Engineering, Korea University

Abstract - 본 논문에서는 P3-DX 모바일 로봇과 영상처리 시스템을 이용하여 비주얼 서보잉 시스템을 개발하였다. P2Arm 다이내믹을 이용해서 비주얼 서보잉을 위한 로봇 팔 제어를 연구하였고, 로봇을 제어하는 데 있어 보다 효율성과 정확성을 높이기 위해 Kalman 필터 알고리즘을 제안하였다. 비주얼 서보잉에 필수적인 영상정보를 얻기 위해 5자유도 P2Arm에 CCD카메라를 부착하였으며 그 영상정보를 바탕으로 P2Arm을 비롯하여 전체 로봇의 구동을 제어하는 시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 P3-DX의 전체적인 구조와 P2Arm의 기구학적인 해석을 논하였고 물체 인식을 위한 영상처리 과정 및 제어알고리즘을 기술하였다. 또한 몇 가지 실험을 통해 본 시스템의 효율성을 검증하였다.

1. 서 론

현재 인간을 대신하여 작업을 하는 산업용 로봇은 인간의 생활이나 공장 자동화에 지대한 영향을 미치고 있다. 로봇은 단순반복적인 작업에서부터 자동차 조립과 같이 정밀하고 어려운 작업, 인간이 갈 수 없는 극한지역에서의 작업까지 다양한 분야에 적용되고 있다. 최근에 국내에서 추진되고 있는 초고층 건물 시공 자동화 프로젝트에서도 로봇을 활용한 자동화 시공 기술이 활발하게 연구되고 있는데, 로봇을 통해 절골의 볼트조립을 자동화하기 위한 비주얼 서보잉 기술이 그 중 하나이다. 본 논문은 그 초고층 건물 시공 자동화 프로젝트 연구의 일환으로 볼트 구멍 조립을 위한 비주얼 서보잉에 대한 연구내용을 담고 있다.

비주얼 서보잉이란 로봇의 엔드이펙터에 달려있는 카메라로부터 얻어지는 영상정보를 피드백 받아 로봇의 관절을 제어해서 로봇을 원하는 위치로 제어하는 것이다[1]. 그 응용분야가 점차 넓어져가는 추세에 있으며 현재까지 여러 다양한 로봇 및 매니퓰레이터에 적용한 비주얼 서보잉 연구가 진행되어 왔다.

본 논문에서는 ActiveMedia사의 Pioneer3-DX with P2Arm 모바일 로봇과 PointGrey사의 Dragonfly2를 이용하여 비주얼 서보잉 시스템을 개발하였다. P3-DX로봇은 바퀴로 구동되는 몸체 위에 5자유도 P2Arm이 달려있는데 그 팔에 대한 기구학적인 해석이 충분치 않아서 아직까지 국내외적으로 이 로봇을 활용한 비주얼 서보잉 연구사례는 많지 않았다. 하지만 최근에 ESSEX대학의 한 기술보고서에서 P3-DX로봇 팔의 dynamics가 발표되어서, 로봇의 제어연구를 위한 활용도가 높아졌다. 본 논문은 그 시스템 dynamics를 활용해서 비주얼 서보잉을 위한 로봇 팔 제어를 연구하였고, 로봇을 제어하는 데 있어 보다 효율성과 정확성을 높이기 위해 Kalman 필터 알고리즘을 제안하였다. 비주얼 서보잉에 필수적인 영상정보를 얻기 위해 5자유도 P2Arm에 CCD카메라를 부착하였으며, 그 영상정보를 바탕으로 P2Arm을 비롯하여 전체 로봇의 구동을 제어하는 시스템을 개발하였다. 통합된 로봇 제어 시뮬레이터는 Visual C++기반으로 GUI를 구성하였다. 본 논문에서P3-DX의 전체적인 구조와 P2Arm의 기구학적인 해석을 논하였고 물체 인식을 위한 영상처리 과정 및 제어알고리즘을 기술하였다. 또한 볼팅 작업을 위한 비주얼 서보잉 실험을 통해 본 시스템의 효율성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 P2Arm의 기구학

2.1.1 정기구학(Forward kinematics)

로봇 팔의 방위와 위치를 계산하는 것을 로봇의 정기구학 해석이라고 한다. 즉, 모든 로봇의 관절 변수가 알려지면 정기구학 방정식을 이용하여 임의의 순간의 로봇의 위치를 계산할 수 있다[2]. P2Arm은 <그림1>에서 보여지는 것처럼 그립퍼(gripper)를 포함하고 있는 5-dof의 로봇 팔이다. 모든 관절들은 6개의 서보모터에 의해 구동되며, 팔을 최대한 뻗었을 때 회전 중심으로부터 50cm까지 닿을 수 있다. Denavit-Hartenberg(DH) 표현법에 의해서 n번째 조인트부터 n+1번째 조인트 사이의 변환 행렬을 구할 수 있고,

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \gamma & \cos \phi \sin \gamma \sin \alpha - \sin \phi \cos \alpha & \cos \phi \sin \gamma \cos \alpha + \sin \phi \sin \alpha & p_x \\ \sin \phi \cos \gamma & \sin \phi \sin \gamma \sin \alpha + \cos \phi \cos \alpha & \sin \phi \sin \gamma \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha & p_y \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \sin \alpha & \cos \gamma \cos \alpha & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그 각각의 변환행렬을 곱함으로써 첫 번째 조인트와 마지막 조인트 사이의 변환행렬식을 구할 수 있다[3]. 반면에 글로벌 위치와 방향이 주어진다면, 식 (1)과 같은 일반적인 변환 행렬을 구할 수 있다. 여기서 p_x, p_y, p_z 는 엔드이펙터의 공간위치를 나타내는 글로벌 좌표이고, $[n_x, n_y, n_z], [o_x, o_y, o_z], [a_x, a_y, a_z]$ 는 DH 표현법에 의한 글로벌 좌표에서의 방향을 나타낸다. 위 과정으로부터 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$p_x = a_5 (c_1 c_{23} c_5 + s_1 s_4 s_5 - c_1 s_{23} c_4 s_5) + c_1 (d_4 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) \quad (2)$$

$$p_y = a_5 (s_1 c_{23} c_5 + c_1 s_4 s_5 - s_1 s_{23} c_4 s_5) + s_1 (d_4 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) \quad (3)$$

$$p_z = a_5 (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5) + d_4 s_{23} + a_2 s_2 \quad (4)$$

$$n_x = -s_1 c_4 - c_1 s_{23} s_4 \quad (5)$$

$$n_y = c_1 c_4 - s_1 s_{23} s_4 \quad (6)$$

$$o_x = -c_1 c_{23} s_5 + s_1 s_4 c_5 - c_1 s_{23} c_4 c_5 \quad (7)$$

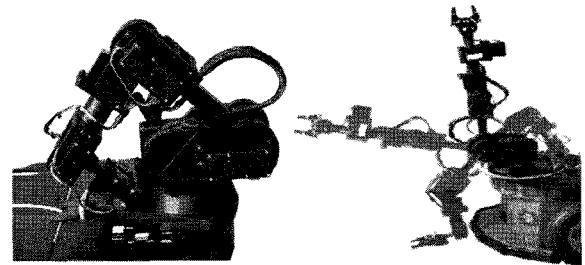
$$o_y = -s_1 c_{23} s_5 - c_1 s_4 c_5 - s_1 s_{23} c_4 c_5 \quad (8)$$

$$o_z = -s_{23} s_5 + c_{23} c_4 c_5 \quad (9)$$

$$a_x = c_1 c_{23} c_5 + s_1 s_4 s_5 - c_1 s_{23} c_4 s_5 \quad (10)$$

$$a_y = s_1 c_{23} c_5 + c_1 s_4 s_5 - s_1 s_{23} c_4 s_5 \quad (11)$$

$$a_z = s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5 \quad (12)$$



<그림 1> 5-dof P2Arm

2.1.2 역기구학(Inverse kinematics)

원하는 위치와 방위에 로봇 팔이 위치하기를 원하는 경우 로봇의 모든 링크길이와 관절각이 얼마인지 알아야 하며 그 값으로 로봇 팔을 원하는 위치와 방위에 위치시킬 수 있다. 이것을 로봇의 역기구학 해석이라고 한다. 앞에서 구한 정기구학 방정식들을 바탕으로 역기구학 방정식을 유도하였다. 즉, P2Arm 엔드이펙터의 위치와 방향이 결정되면 역기구학 솔루션은 다음과 같다[4].

$$\theta_1 = \text{atan2}((a_5 a_y - p_y) \cdot \text{sign}(a_5 p_x - a_x p_y), (a_5 a_x - p_x) \cdot \text{sign}(a_5 p_x - a_x p_y)) \quad (13)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}((a_5 c_5 + d_4)(n_x c_1 + n_y s_1) + p_z s_4 - a_5 n_z c_1 s_5, s_4(p_x c_1 + p_y s_1 - a_1) - n_z(a_5 c_5 + d_4) - a_5 c_1 s_5(n_x c_1 + n_y s_1)) \quad (14)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}((-n_x c_1 c_2 - n_y s_1 c_2 - n_z s_2) \cdot \text{sign}(s_4), (-n_x c_1 s_2 - n_y s_1 s_2 + n_z c_2) \cdot \text{sign}(s_4)) \quad (15)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}((o_x s_1 - o_y c_1) / c_5, n_y c_1 - n_x s_1) \quad (16)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(a_x s_1 - a_y c_1, o_x s_1 - o_y c_1) \quad (17)$$

2.2 제어알고리즘

본 논문에서는 앞에서 알아본 P2Arm의 역 기구학을 바탕으로 다음과 같은 P2Arm의 제어 알고리즘을 설계하였다.

- [step 1] CCD 카메라로부터 물체에 대한 영상을 받는다.
- [step 2] 입력받은 영상을 필터링을 통해 object만 추출한다.
본 논문에서는 볼트구멍에 대한 비주얼 서보잉 시스템 개발을 목표로 하였다. 여기서 object는 볼트구멍이므로 이것들만 따로 분리 추출하였다.
- [step 3] 추출된 볼트구멍과 엔드이펙터와의 위치관계를 계산한다.
- [step 4] P2Arm 메카니즘에 의해 로봇 팔을 제어해서 엔드이펙터를 볼트구멍의 중심에 위치시킨다.
- [step 5] Kalman 필터를 적용해서 볼트 구멍의 최적의 위치를 찾는다. 즉 직교좌표계(x,y,z)에서 목표물의 위치를 각각 독립적으로 측정하는 것으로 간주하면 그중 한 좌표에서의 근사 운동방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다[5].

$$X(k+1) = AX(k) + BU(k) + GW(k) \quad (18)$$

여기서 X(k)는 x방향에서의 오브젝트의 위치와 속도 성분을 갖는 상태벡터, U(k)는 미지의 입력, W(k)는 상태 노이즈이다. 목표물의 위치를 관측하는 방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Z(k+1) = HX(k+1) + V(k+1) \quad (19)$$

식 (18)과 (19)로 표시되는 방정식으로부터 최적 추정치 $\hat{X}(k|k)$ 와 공분산 행렬 $P(k|k)$ 는 다음과 같이 주어진다[7].

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[Z(k+1) - H\hat{X}(k+1|k)] \quad (20)$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H]P(k+1|k) \quad (21)$$

$$\text{여기서 } \hat{X}(k+1|k) = A\hat{X}(k|k) + BU(k) \quad (22)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)H^T[HP(k|k)H^T + R]^{-1} \quad (23)$$

$$P(k+1|k) = AP(k|k)A^T + GQG^T \quad (24)$$

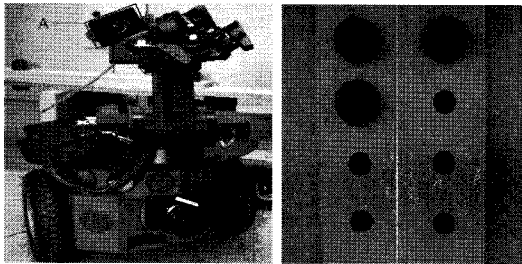
식(20)-(24)로 표시되는 Kalman 필터의 전 과정으로부터 최적추정치 $\hat{X}(k|k)$ 와 공분산행렬 $P(k|k)$ 값을 구하는 것은 디지털 컴퓨터를 통해 쉽게 실현될 수 있다. 식(20)과 (22)로부터

$$\begin{aligned} \hat{X}(k+1|k+1) &= A\hat{X}(k|k) + BU(k) + K(k+1)[Z(k+1) \\ &\quad - H\hat{X}(k|k) - HB(k|k)] \\ &= D(k+1)A\hat{X}(k|k) + K(k+1)Z(k+1) \\ &\quad + D(k+1)BU(k) \end{aligned} \quad (25)$$

[step 6] 이렇게 얻어진 볼트구멍의 좌표를 피드백 받아서 역기구학 방정식을 이용해서 P2Arm을 제어한다.

2.3 실험결과

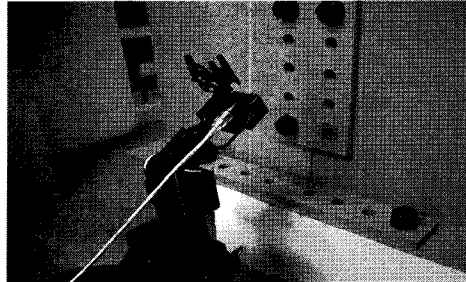
<그림 2>에서는 실험에 사용된 카메라 장비와 오브젝트가 될 볼트구멍 모형 사진을 보여주고 있다. 영상정보를 얻기 위해 P2Arm 엔드이펙터 부근에 Dragonfly2 카메라(그림에서 A로 표기)를 부착하였으며, 정면부 물체와의 거리정보를 얻기 위해 P3DX 물체 정면부에 Dragonfly2카메라(그림에서 B로 표기)를 부착하였다.



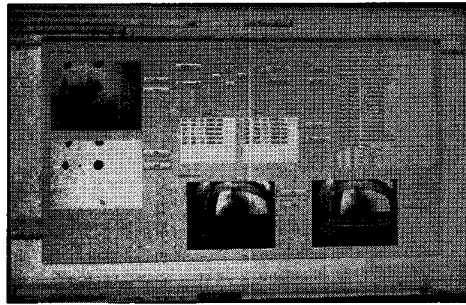
<그림 2> 실험장치

위에서 설계한 제어 알고리즘을 바탕으로 볼트구멍 모형을 가지고 시뮬레이션을 해보았다. 보여지는 것처럼 P2Arm <그림 3>은 그 실험화면을 보여주고 있다. 먼저 로봇 팔은 카메라 및 엔드이펙터가 정면을 향하도록 각 조인트의 초기값이 지정되어 있는 상태에서 시작한다. 엔드이펙터에 부착된 CCD카메라를 통해 볼트구멍 영상을 받게 되고 그 영상에서 shape detecting 알고리즘으로 볼트구멍만 추출하게 된다. <그림 4>에서 GUI를 통해 카메라 영상정보(좌측상단)와 추출된 볼트구멍 영상(좌측하단)이 출력되고 있고 오른쪽 하단은 물체 정면부에 설치된 어안렌즈를 통해 보여지는

거리정보를 나타내고 있다. 여기서 사용자가 추출된 볼트구멍 영상에서 임의의 볼트구멍을 클릭하게 되면 그 볼트구멍으로 엔드이펙터가 움직임을 확인할 수 있었다.



<그림 3> 볼트구멍 모형에 대한 비주얼 서보잉 시뮬레이션



<그림 4> GUI 로봇제어 시뮬레이터

3. 결 론

본 논문에서는 P2Arm의 기구학을 이용하여 볼트 조립을 위한 비주얼 서보잉 시스템을 개발하였다. 하나의 CCD카메라에서 얻어지는 영상정보를 바탕으로 함으로써 야기될 수 있는 에러를 줄이기 위하여 물체와 엔드이펙터의 위치정보를 결정하는 데 Kalman 필터를 적용하였다. 하지만 최종적으로 우리가 목표로 하는 것은 건설현장에서 실제 볼트조립을 위한 비주얼 서보잉 시스템의 개발이다. 실제 시스템은 2개 이상의 카메라와 다양한 센서들을 활용해서 최대한 정확한 볼트구멍 인식을 목표로 해야 할 것이다. 따라서 앞으로의 연구방향도 2개 이상의 멀티뷰를 활용하거나 레이저 센서를 활용해서 물체의 3차원적 정보를 활용할 수 있는 시스템 개발이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 지원한 "로봇 크레인 기반 고층 건물 구조체 시공 자동화 시스템 개발(과제번호:06 첨단융합 D01)"사업의 지원으로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] S. Hutchinson, G.D. Hager, and P.I. Corke, "A tutorial on visual servo control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, pp. 651-670, Oct. 1996.
- [2] Saeed B. Niku, "Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications", Prentice Hall, pp. 61, 2001.
- [3] John Q. Gan, Eimei Oyama, Eric M. Rosales and Huosheng Hu, "A complete analytical solution to the inverse kinematics of the Pioneer 2 robotic arm", Robotica, volume 23, pp. 123-29, May. 2005
- [4] Eric M. Rosales, John Q. Gan, Huosheng Hu, Eimei Oyama, "A Hybrid Approach to Inverse Kinematics Modeling and Control of Pioneer 2 Robotic Arms" Technical Report No CSM-414. 2004
- [5] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problem," Trans. ASME, J. Basic Engrg., Vol.82 pp. 34-45, 1960
- [6] 심귀보, "동적 물체에 대한 로봇 매니퓰레이터의 Visual Servoing", 대한 전자공학회 논문지, Vol. 4, No. 2, pp. 15-24, 1996
- [7] I.B. Rhodes, "A tutorial introduction to estimation and filtering," IEEE Trans. Automat. Contr. Vol. AC-16, No.6, pp.688-706, 1971.