

가나데 특징점 추적기를 통한 실시간 이미지기반 비주얼 서보잉의 구현

홍현석, 정명진
한국과학기술원 전자전산학과

Study on a Real-time Image Based Visual Servoing System using Kanade Tracker

Hyun Seok Hong, Myung Jin Chung
Department of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST

Abstract - 비주얼 서보잉이란 로봇팔 등과 같은 제어기의 페루프에서 입력단에 영상을 이용하는 것이다. 영상에 나타난 정보는 특징점을 통해 얻을 수 있으며, 매 시간 이 특징점의 위치를 추적함으로써 제어기의 출력값을 결정한다. Optical flow를 이용하는 가나데 특징점 추적기는 특징점 추적기 중에서 성능이 우수하다고 알려져 있다. 본 논문에서는 가나데 특징점 추적기를 이용하여 실시간으로 로봇팔을 제어하고 결과를 분석하도록 한다. 실험에 이용되는 로봇팔은 전체 6축이며 기존의 5축 상용로봇의 end-effector에 ccd카메라를 좌우로 회전가능하도록 기구부를 추가하였다. 6DOF를 갖도록 변형된 로봇팔의 기구적으로 분석하고 자코비안을 획득한 후, 로봇팔의 end-effector에 설치된 카메라를 통하여 특정 영상이 얻어지도록 로봇의 end-effector의 속도를 생성해 내고, 자코비안의 역행렬을 통해 로봇의 각 관절을 제어하는 과정을 기술하고 분석한다.

1. 서 론

영상기반 비주얼 서보잉(Image Based Visual Servoing, IBVS)은 2차원 영상 특징점들의 목표위치와 현재위치사이의 오차를 제어입력으로 사용하는 제어기법이다. 영상기반 비주얼 서보잉은 영상정보만으로 동작한다[1]. 이는 영상특징점으로부터 3차원 정보를 추정하여 사용하는 위치기반 비주얼 서보잉(Position Based Visual Servoing, PBVS)에 대해 정확한 카메라 내부 파라미터를 얻어내기 위한 카메라 캘리브레이션이 필요없다는 장점을 가진다. 영상기반 비주얼 서보잉은 그 정확도가 카메라 내부 파라미터의 정확성에 크게 의존적이지 않다는 특징이 있다[2],[3].

비주얼 서보잉이 두 영상의 특징점들 사이의 관계로부터 이루어 진다는 점에서, 특징점을 추적하는 것은 이미지 기반의 비주얼 서보잉일 구현하는데 있어서 가장 중요한 부분이다. 여러 특징점 추적기들 중에서 가나데 특징점 추적기는 두 영상사이의 움직임이 비교적 적을 때 그 추적 성능이 우수하다고 알려져 있으며, 특히 특징점 영역이 평행이동뿐만 아니라 어파인 모션에 의한 특징점까지 추적할 수 있으며, 서브픽셀의 해상도를 가진다는 특징이 있다. 가나데 특징점 추적기의 동작원리는 두 영상사이에서 대응하는 특징점을 포함한 주변 영역의 유사도가 가장 크도록 하는 이동 벡터(translation vector) 및 어파인 변형 행렬(affine deformation matrix)을 계산함으로써 특징점을 추적한다[4]. 이는 수회 반복에 의한 계산방법을 통해 이루어 지게 되는데, 이 일정수의 반복 계산을 수행하는 동안 특징점사이의 유사도가 문턱값보다 커지지 않는 경우 특징점 추적에 실패한 것으로 간주하게 된다.

3차원 공간에서 임의의 위치에 임의의 자세로 로봇의 end-effector를 위치하기 위해서는 최소한 6개의 자유도를 가져야 한다. 그러나 특정 작업을 위해 설계된 로봇은 5개 이하의 자유도를 갖도록 만들어지기도 한다. 이 경우 3차원 공간상에서 움직임이 제한되는 단점을 가지

게 된다. 최근에는 6개 이상의 자유도를 갖는 여자유도 로봇팔에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 가나데 특징점 추적기를 이용하여 실시간으로 로봇팔을 제어하고 결과를 분석하도록 한다. 실험에 이용되는 로봇팔은 전체6축이며 기존의 5축 상용로봇의 end-effector에 ccd카메라를 좌우로 회전가능하도록 기구부를 추가하였다. 6DOF를 갖도록 변형된 로봇팔의 기구적으로 분석하고 자코비안을 획득한 후, 로봇팔의 end-effector에 설치된 카메라를 통하여 특정 영상이 얻어지도록 로봇의 end-effector의 속도를 생성해 내고, 자코비안의 역행렬을 통해 로봇의 각 관절을 제어하는 과정을 기술하고 분석한다.

2. 본 론

본 연구에서는 상용 5축 로봇팔인 미쯔비시(Mitsubishi)사의 Movemaster의 end-effector에 회전축을 추가함으로써 1개의 자유도를 추가한 6축 로봇팔을 사용하였다. 본 장에서는 이 6축 로봇팔의 기구적 분석을 다룬다.

2.1 로봇팔 및 카메라의 좌표계

그림1은 본 연구에서 사용한 6축 로봇팔을 보여준다. 6축의 end-effector의 z축을 카메라광축과 일치하도록 디자인하여 카메라를 장착하였다.

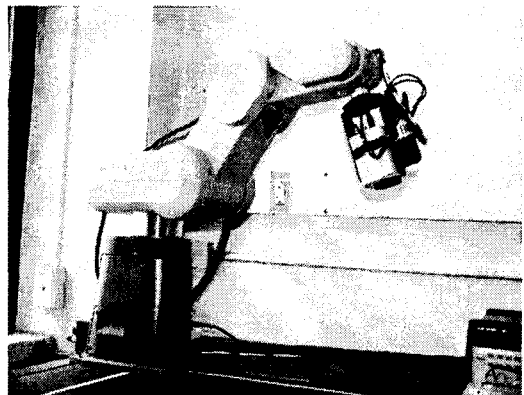


그림1. 사용한 Movemaster 로봇팔과 카메라 세팅

6축 로봇팔의 좌표축 및 로봇팔의 end-effector에 부착되어 있는 카메라의 좌표축은 그림2에 도시되어 있다.

표1은 수정 제작된 6축 로봇팔의 D-H 파라미터를 나타낸다. 이 파라미터로부터 각 축좌표들사이의 변환이 가능하며, 로봇의 자코비안을 얻어낼 수 있다[5]. 표2는 6축 로봇팔의 end-effector에 부착된 카메라와 end-effector사이의 관계를 보여준다.

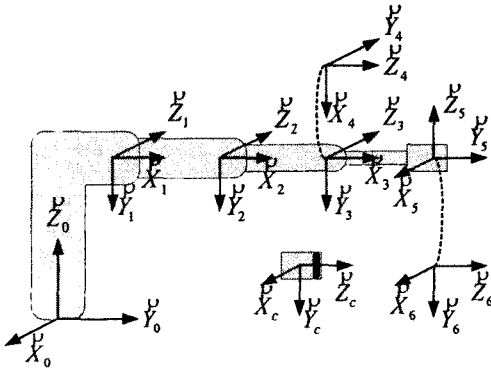


그림2. Movemaster 및 카메라의 좌표축

표1. D-H 파라미터

Joint	θ_i [rad]	d_i [m]	a_i [m]	α_i [rad]
1	θ_1	0.4	0.12	$-\pi/2$
2	θ_2	0	0.25	0
3	θ_3	0	0.2	0
4	$\theta_4 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
5	$\theta_5 - \pi/2$	0.203	0	$\pi/2$
6	θ_6	0	0	$-\pi/2$

표2. 카메라좌표계를 기준으로 6축 로봇팔의 end-effector의 좌표계와의 D-H 파라미터 관계

Joint	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	0.02	0	0

2.2 가나데 특징점 추적기

첫 번째 영상에서 특징점 위치 x 주변 영상을 $I(x)$ 라고 하고, 두 번째 영상에서 첫 번째 영상의 특징점 x 에 대응되는 위치 $Ax + d$ 주변 영상을 $J(Ax + d)$ 라고 하자. (단, $A = I_{2 \times 2} + D$, $D = [d_{xx}, d_{xy}; d_{yx}, d_{yy}]$, $d = [d_x; d_y]$ 이다.) 이때, 가나데 특징점 추적기는 첫 번째 영상의 특징점 x 주변의 영상이 두 번째 영상의 대응점에 위치하도록 하는 D 와 d 를 찾아내는 것이다. 이는 다음의 함수값을 최소로 만드는 D 와 d 를 찾음으로써 구할 수 있다.

$$\epsilon = \iint_w [J(Ax + d) - I(x)]^2 w(x) dx$$

단 W 는 특징점 x 주변의 영역이며, $w(x)$ 는 가중치를 나타낸다. 위 식을 D 와 d 의 각 원소에 관해 미분한 결과가 0일 때 위 식은 최소값을 가지게 된다. 이때 테일러정리를 이용하면 다음의 선형화된 수식을 얻는다.

$$J(Ax + d) = J(x) + g^T(x) u$$

단 $g = (\partial J / \partial x, \partial J / \partial y)^T$, $u = Dx + d$

이 식으로부터 다음의 관계가 도출된다[4].

$$Tz = a$$

$$\text{단 } z = [d_{xx}, d_{xy}, d_{yx}, d_{yy}, d_x, d_y]^T$$

$$a = \iint_w [I(x) - J(x)] \begin{pmatrix} xg_x \\ xg_y \\ yg_x \\ yg_y \\ g_x \\ g_y \end{pmatrix}$$

$$T = \iint_w \begin{pmatrix} U & V \\ V^T & Z \end{pmatrix} w dx,$$

$$U = \begin{pmatrix} x^2 g_x^2 & x^2 g_x g_y & xy g_x^2 & xy g_x g_y \\ x^2 g_x g_y & x^2 g_y^2 & xy g_x g_y & xy g_y^2 \\ xy g_x^2 & xy g_x g_y & y^2 g_x^2 & y^2 g_x g_y \\ xy g_x g_y & xy g_y^2 & y^2 g_x g_y & y^2 g_y^2 \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} xg_x^2 & xg_x g_y \\ xg_x g_y & xg_y^2 \\ yg_x^2 & yg_x g_y \\ yg_x g_y & yg_y^2 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{pmatrix}$$

따라서 D 와 d 는 $z = T^{-1}a$ 로부터 계산할 수 있다.

2.3 이미지기반의 비주열 서보잉

이미지기반의 비주열 서보잉을 하기 위해서는 로봇팔의 자코비안과 영상 자코비안의 계산이 필요하며 이 두 개의 자코비안을 사용하여 제어법칙이 만들어진다.

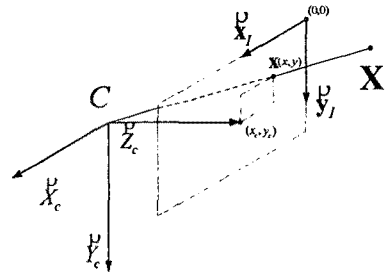


그림3. 카메라좌표계와 핀홀카메라 모델의 영상좌표

그림3은 핀홀카메라 모델을 이용하였을 때, 3차원 좌표 점 $X(X, Y, Z)$ 가 2차원 영상의 점 $x(x, y)$ 로 투영되는 관계를 보여준다. 이때 점 $X(X, Y, Z)$ 의 위치 및 속도의 원근투영 관계는 다음과 같다.

$$x = X/Z, \quad y = Y/Z$$

$$\dot{x} = (1/Z, 0, -X/Z^2)u(X)$$

$$\dot{y} = (0, 1/Z, -Y/Z^2)u(X)$$

이때 움직이는 카메라에 대한 고정점 X 의 속도는 다음과 같다.

$$u(X) = -u(C) - [\omega] \times \overline{CX}$$

이 관계를 카메라의 속도 $v (=v(C))$ 에 관해 정리하면 다음의 영상 자코비안(L_{xy})이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = L_{xy} v$$

$$L_{xy} = \begin{pmatrix} -1/Z & 0 & x/Z & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -1/Z & y/Z & 1+y^2 & -xy & -x \end{pmatrix}$$

여기서 $x(x, y)$ 는 미터단위의 영상에서의 위치이므로, 픽셀단위의 영상에서 위치를 $x_p(x_p, y_p)$ 라고 하면 다음의 관계가 성립한다.

$$x_p = x_c + f_x x, \quad y_p = y_c + f_y y$$

단 $x_c = (x_c, y_c)$ 는 principal point. f_x, f_y 는 초점거리와 픽셀크기의 비율이다.

전체 제어 알고리즘은 아래 그림4와 같다.

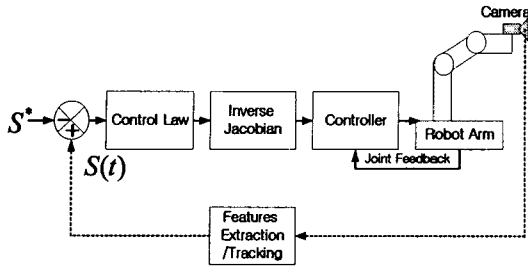


그림4. 이미지기반 비주얼 서보잉 알고리즘

로봇팔의 end-effector에서 로봇팔 자코비안이 ${}^n J_n(q)$ 이고, 특징점의 속도가 \dot{s} 일때 로봇팔 관절은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{s} = L_s {}^c T_n {}^n J_n(q) \dot{q} + \frac{\partial s}{\partial t}$$

단, ${}^c T_n = \begin{pmatrix} {}^c R_n & [{}^c P_n] \times {}^c R_n \\ 0_3 & {}^c R_n \end{pmatrix}$ 로 로봇팔의 end-effector 좌표계에서 표현되는 속도를 카메라 좌표계에서 속도로 변환하는 역할을 한다.

이 식에서 자코비안들의 역행렬을 이용하여 \dot{q} 를 통해 로봇팔의 속도제어를 하면 된다.

$$\dot{q} = [L_s {}^c T_n {}^n J_n(q)]^{-1} (\dot{s} - \frac{\partial s}{\partial t})$$

4. 실험 결과

다음 그림5는 로봇팔의 목표위치를 각 6개의 관절위치를 $q=[80, -50, 40, 80, 0, 0]$ [deg]로 두고 초기위치를 $q=[80, -50, 40, 80, 20, 0]$ [deg]로 세팅한 후 실험한 결과를 보여준다.

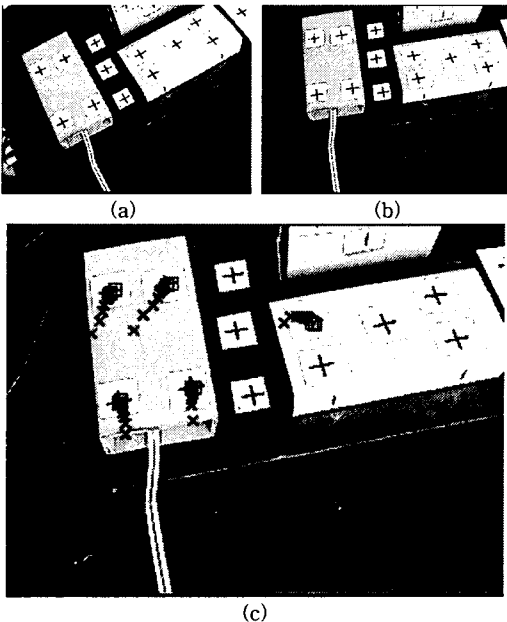


그림5. (a)초기영상, (b)목표영상, (c) 이미지기반 비주얼 서보잉 결과

선택된 특징점들은 가나데 특징점 추적기를 통해 매순간 업데이트되고, 이미지기반 비주얼 서보잉 제어기에 의해 로봇을 제어한다. 그림5(c)에서 'x'로 표시된 부분은 비주얼 서보잉을 통해 움직여진 특징점의 궤적을 나타낸다. 각 특징점들은 목표위치로 잘 수렴하는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 이미지기반의 비주얼 서보잉을 실시간으로 구현하였으며, 이미지기반의 비주얼 서보잉이 성공적으로 동작할 수 있도록 가나데 특징점 추적기를 사용하였다.

추후 진행해야 할 연구는 로봇팔 제어에 있어서 필수적인 관절한계값회피(joint limit avoidance), 특이점회피(singularity avoidance)등의 알고리즘에 관한 연구가 필요하다.

[참고 문헌]

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control", IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pp.651-670, Oct. 1996.
- [2] B. Espiau, F. Chaumette and P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics", IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 8, no. 3, pp. 313-326, 1992.
- [3] J. S. Park and M. J. Chung, "Path planning with uncalibrated stereo rig for image-based visual servoing under large pose discrepancy," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 19, no. 2, April, 2003
- [4] J. Shi, and C. Tomasi, "Good Features to Track", TR93-1399, Cornell U., 1993.
- [5] R. P. Paul, B. Shimano and G. E. Mayer, "Differential Kinematic Control Equations for Simple Manipulators", IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, MC-11, 6, pp.456-460.