

위치기반 비주얼 서보잉을 위한 견실한 위치 추적 및 양팔 로봇의 조작작업에의 응용

Robust Position Tracking for Position-Based Visual Servoing and Its Application to Dual-Arm Task

김 찬 오¹ · 최 성¹ · 정 주 노¹ · 양 광 웅² · 김 홍 석²

Chano Kim¹ · Sung Choi¹ · Joono Cheong¹ · Gwang Woong Yang² · Hong Seok Kim²

Abstract This paper introduces a position-based robust visual servoing method which is developed for operation of a human-like robot with two arms. The proposed visual servoing method utilizes SIFT algorithm for object detection and CAMSHIFT algorithm for object tracking. While the conventional CAMSHIFT has been used mainly for object tracking in a 2D image plane, we extend its usage for object tracking in 3D space, by combining the results of CAMSHIFT for two image plane of a stereo camera. This approach shows a robust and dependable result. Once the robot's task is defined based on the extracted 3D information, the robot is commanded to carry out the task. We conduct several position-based visual servoing tasks and compare performances under different conditions. The results show that the proposed visual tracking algorithm is simple but very effective for position-based visual servoing.

Keywords: Visual servoing, Object tracking, Service robot, Inverse kinematics

1. 서론

본 논문은 서비스 로봇에 필수적 기술인 비주얼 서보잉 (visual servoing)에 대한 시스템 연구를 소개한다. 시각기반 작업은 지능형 서비스로봇이 갖추어야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다^[1-5]. 로봇 스스로 대상 물체를 찾아 지정된 조작 작업을 수행하고 원하는 곳으로 옮기기 위해서는 물체 인식이 기본이 되며 스테레오 영상 정보를 통한 물체의 3차원 정보 (위치 및 오리엔테이션)도 정확히 구해져야 한다. 이와 함께 자유자재의 팔 동작도 필수적 요소이다. 비주얼 서보잉을 위한 첫 번째 과정으로서 물체인식이 요구되는데 물체의 특징을 나타내는 특징량을 가지고 인식하게 된다. 그동안 제안된 알고리즘으로는 PCA^[6]알고리즘, Monte Carlo^[7]알고리즘,

Model-Based Recognition^[8-9]알고리즘 등이 있는데 이들은 계산량이 많거나 조명, 이미지 스케일 등의 변화에 민감하였다. Lowe등에 의해 개발된 SIFT^[10]는 좀 더 강한 물체인식 성능을 보여 주고 있는데, 이것은 가우시안 스케일링과 오리엔테이션을 계산하여 디스크립터를 생성하는 과정을 거친 물체 고유의 특징점 벡터를 데이터베이스화하여 찾아낸다. 본 연구에서는 SIFT기법을 물체인식의 기본 방법으로 한다. 그러나 SIFT를 활용한 물체까지의 정확한 3차원 위치 정보는 신뢰하기 어려운 수준이며 많은 노이즈를 포함하고 있어 시각기반 로봇 조작에 부적하다. 이에 대한 보완으로, SIFT로 인식된 물체에 CAMSHIFT^[11] 알고리즘을 적용하여 찾아진 중심점을 주 특징점으로 좌우 이미지 모두에 동일 알고리즘을 적용하여 주 특징점들 사이의 disparity를 구하면 매우 정확하고 강인한 3차원 위치 정보를 확보할 수 있다. CAMSHIFT는 물체 blob의 면적을 활용하여 중심점을 확보하는 성질을 갖고 있으므로 빛이나 기타 노이즈에 덜 민감한 결과를 준다. 한편 물체의 회전 정보는 SIFT의 affine파라미터와 CAMSHIFT의 방향 벡터를 서로 상

※ 이 논문은 한국 생산기술 연구원의 퍼스널로봇을 위한 엔지니어링 기술 개발 지원으로 수행되었음.

¹ 고려대학교 제어계측공학과
(Email : kco1557@korea.ac.kr; cod13@korea.ac.kr; jncheong@korea.ac.kr)

² 한국 생산 기술 연구원 로봇 기술본부 지능 운동 연구팀
(Email : page365@gmail.com; hskim@kitech.re.kr)

보적으로 활용한다.

이렇게 구해진 물체의 3차원 정보는 로봇의 위치기반 비주얼 서보잉에 활용이 된다^[12-13]. 영상기반 비주얼 서보잉^[14]은 이미지 상의 오차를 바로 활용하기 때문에 조작 오차를 줄이며 카메라 등의 파라미터 오차가 있어도 성공적인 동작이 가능해 질 수 있다. 하지만 만면 불안정한 영상이 입력될 경우 로봇이 쉽게 불안정해 질 수 있는 단점도 있다^[15-16]. 이 방법에 따라서 로봇은 정지된 물체를 조작하고 집어서 다른 곳으로 옮기는 작업이 가능하며 또한 최초 인식된 물체가 동적인 환경에 있더라도 물체를 트래킹 할 수 있도록 한다. 이는 인식된 물체에 대해 다양한 작업을 가능케 하여 서비스로봇의 기능을 더욱 다양화 할 수 있다^[12-14,17].

기존의 많은 비주얼 서보잉 연구 결과와 비교해 볼 때, 본 연구의 차별성은 강인하면서 정확한 물체의 위치 정보 획득과 이를 활용한 위치기반 비주얼 서보잉의 구현에 있다. 따라서 시각정보를 활용한 서비스로봇의 견실한 작업 구현에 기여할 수 있을 것이다.

논문의 2절에서는 SIFT와 CAMSHIFT 알고리즘을 활용한 물체인식과 인식한 물체의 추적에 대하여 설명하며, 3절에서는 조작 대상 물체의 3차원 정보를 이용한 위치기반 비주얼 서보잉 알고리즘을 설명한다. 그리고 4절과 5절에서는 각각 서비스로봇인 SRP-X1 (생산기술연구원 개발) 시뮬레이터와 비전시스템을 연동한 실험 결과를 설명하고, 결론과 향후 연구를 기술한다.

2. 비전 시스템

본 절에서는 로봇이 작업을 수행하기 위해 먼저, 물체를 인식하고, 인식한 후 물체를 추적하는 것에 대해 간략히 설명하고 비전 시스템에서 인식과 추적알고리즘을 어떻게 구성하는지 설명한다. 물체인식은 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 알고리즘을 적용하며, SIFT 알고리즘은 이미지에서 스케일에 불변하는 특징점들을 추출해서 그 점들을 매칭함으로써 물체를 인식하는 방법이다^[10]. 그리고 SIFT는 PCA나 Monte Carlo 알고리즘 등의 다른 알고리즘에 비해 계산량이 적어서 인식 속도가 빠르고 상용화 된 Library를 사용하기 때문에 시스템 통합에 용이하다. 물체의 추적은 CAMSHIFT (Continuously Adaptive Meanshift) 알고리즘을 사용하는데 물체의 색상 정보를 이용하여 물체를 추적하는 알고리즘으로서, 추적하는 대상 물체의 컬러히스토그램을 기준으로 유사한 색상을 나타내는 부분을 계속적으로 추

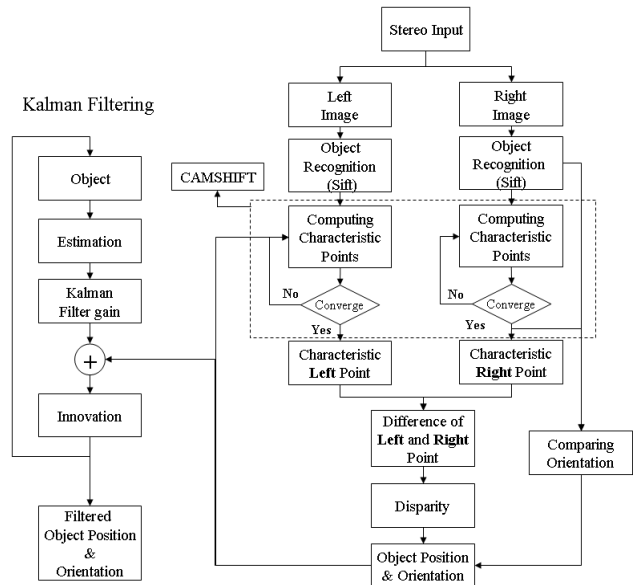


그림 1. 비전 시스템의 블록 다이어그램

적하는 알고리즘이다^[11]. 그러나 이 두 알고리즘만으로는 비주얼 서보잉을 하기 위한 3차원 위치와 오리엔테이션을 안정적으로 얻어내기 어렵다. 따라서 3차원 위치와 오리엔테이션을 안정적으로 얻기 위해 비전 시스템을 구성하였다.

비전 시스템은 기본적으로 물체인식의 SIFT와 물체 추적의 CAMSHIFT를 통합하여 구성된다. 위치기반의 비주얼 서보잉을 하기 위해서는 작업 대상의 위치정보인 공간상의 좌표 (X, Y, Z)가 필요한데 종래의 단일 이미지에 의해 CAMSHIFT에서 계산된 공간상의 좌표 중에 깊이를 나타내는 Z값은 이미지에 나타나는 물체의 스케일을 기반으로 하기 때문에 정확하지 않고 물체가 움직이는 경우 값이 불안정하다. 따라서 안정적인 Z값을 정하기 위해서는 스테레오 카메라의 disparity 값이 필요하며^[18], 우리가 사용한 방법은 CAMSHIFT를 통해 얻어진 좌우 이미지의 무게 중심점 (x_c, y_c)의 disparity만을 활용하는 것이다. 무게 중심은 일정한 물체 면적의 평균된 정보를 담고 있으므로 노이즈와 조명 변화에 적게 영향을 받는다. 또한 한 점의 disparity만을 구하게 되므로 아주 간단히 물체의 거리를 결정할 수 있다. 오리엔테이션은 CAMSHIFT와 SIFT에서 독립적으로 알 수 있기 때문에 이 두 알고리즘에서 생성되는 오리엔테이션의 값을 비교하여 사용한다. 기본적으로 CAMSHIFT에서 생성되는 2차원 오리엔테이션 값을 비주얼 서보잉에 사용하고 이 값을 프레임마다 계속해서 계산된다. SIFT에서 계산되는 오리엔테이션은 물체를 인식할 경

우에만 값이 계산되기 때문에 실시간으로 비주얼 서보잉에 사용될 수 없고 단지 CAMSHIFT에서 계산된 오리엔테이션과 비교해서 일정한 범위내의 오차를 가질 경우 안정적인 오리엔테이션으로 인식하고 CAMSHIFT의 오리엔테이션의 값이 맞는지 확인하는 과정으로만 사용된다.

한편 무게중심의 disparity를 활용한다 하더라도 필연적으로 발생할 수밖에 없는 약간의 노이즈는 칼만 필터를 사용하여 최소화하는 방법을 택하였다.(그림 1 참조) 스테레오 비전 시스템에서 제기되는 또 다른 문제는 좌우 이미지를 동시에 사용하기 때문에 양쪽 카메라에서 물체가 확보되는 시야(Field of View)가 넓지 않다는 점이다. 이것은 카메라의 액티브 팬틸트 동작을 사용하여 물체가 항상 이미지의 중앙에 있도록 조정함으로써 해결할 수 있다.

마지막으로 카메라 이미지 상에서 물체를 놓쳤을 경우도 생각할 수 있는데 환경 조건에 따라 다르지만 CAMSHIFT에서 물체가 가지는 색상 분포 면적이 0에 가까운 값이 되기 때문에 이때는 다시 물체 인식 알고리즘을 사용해서 추적하기 위한 물체의 초기 위치를 다시 잡아주기 때문에 계속해서 비주얼 서보잉이 가능하게 된다.

3. 로봇 기구학

비전 시스템으로부터 구해진 대상 물체의 3차원 위치 정보는 잡고 옮기기 등의 로봇이 수행해야 될 작업을 결정하는데 사용한다. 로봇 모델은 SRP-X1으로서, 바퀴로 구동하는 휴머노이드 타입의 로봇이다. (그림2(a) 참조) 본 논문에서는 로봇의 바퀴를 고정된 조건을 가정하며, 무릎에서부터 허리, 한쪽 팔까지 총 10자유도를 가지며 양팔을 전부 포함하면 16자유도를 고려한다.

로봇의 기구학 관련 해석을 위해 먼저 다음과 같은 변수를 정의한다.

- q_R : 현재의 각 관절의 각도
- q_{R0} : 이전의 각 관절의 각도
- V_R :오른팔 끝의 속도, V_{Rd} : 원하는 속도
- J_R : 자코비안 , J_R^+ :자코비안의 Pseudo inverse
- $e_R = \begin{bmatrix} e_{Rp} \\ e_{Ro} \end{bmatrix}$: 오차 벡터
- e_{Rp} : 작업위치와 로봇 말단부 사이의 상대 벡터
- e_{Ro} : 작업좌표계와 로봇 말단부 좌표계와의 각도오차

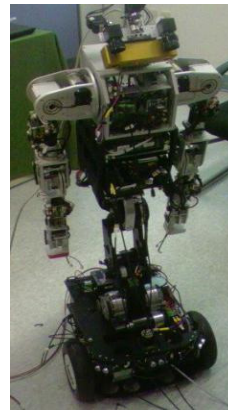


그림 2(a). SRP-X1

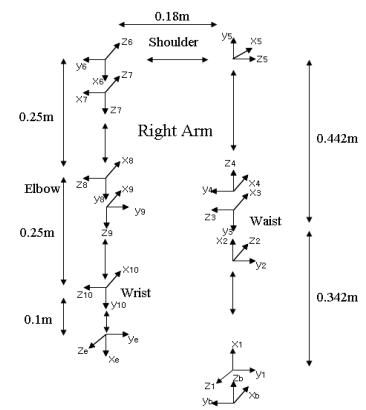


그림 2(b). 로봇 좌표계

$$K = \begin{bmatrix} K_p \\ K_o \end{bmatrix} \quad K_p : \text{위치 이득}, K_o : \text{각도 이득}$$

그림 2(b)에서 표시한 로봇의 무릎부터 오른팔까지의 좌표계의 설정에 따라 오른 팔의 속도와 관절 속도의 관계를 자코비안 (Jacobian)으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_R = J_R(q_R)\dot{q}_R \quad (1)$$

위 식에 대하여 pseudo inverse를 취하면

$$\dot{q}_R = J_R^+(q_R)V_R \quad (2), \quad J_R^+ = J_R^T(J_R J_R^T)^{-1} \quad (3)$$

와 같이 되는데 해당 시스템이 여유자유도를 갖고 있으므로 필요에 따라 여유자유도 운동을 포함시킬 수 있다. 운행할 경우가 발생하는데 이 때 불안정한 상황을 극복하기 위해 단순한 pseudo inverse가 아닌 damped least square 방법을 보완 사용할 수 있다^[19]. 여기서 식 (2)를 적분하면 계산상의 오차가 누적되어 정확한 역기구학 해를 얻을 수 없다. 따라서 참고문헌 [19]에서 처럼 에러기반 역기구학 방법을 사용한다. 즉

$$\dot{q}_R = J_R^+(q_R)(V_{Rd} + Ke_R) + (I - J_R^+ J_R)z \quad (4)$$

$$q_R = \dot{q}_R \Delta t + q_{R0} \quad (5)$$

을 얻는다. 여기서 z 는 임의의 관절 속도 벡터를 나타내는데 일반적으로 특정한 비용함수의 최적화의 결과로 얻어진다. 위 두식을 사용하면 오차벡터가 시간에 지남

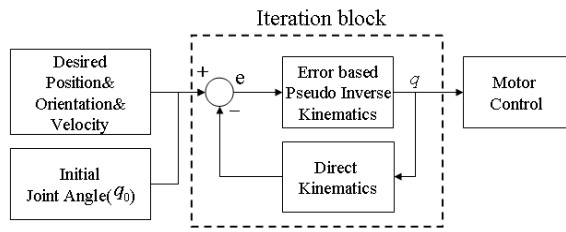


그림 3. 에러기반 역기구학 해석

에 따라 0으로 수렴하기 때문에 수렴된 관절 각도는 역기구학의 해를 만족하게 된다. 식 (4)와 (5)의 반복 계산에 의해 오차벡터가 허용범위 내로 진입하면 수렴된 것으로 결정한다. 그리고 식 (4)에서 $(I - J_R^+ J_R)z$ 부분은 여유자유도 활용에 따른 무효공간 값으로서 로봇의 자세 결정에 관여하며 작업에는 아무 영향을 주지 않는다. (여유자유도를 사용하지 않는다면 로봇의 최소에너지를 만족하는 기구학 해석이 된다.) 그림 3은 에러기반 역기구학해석의 전체적인 흐름을 나타낸다.

이렇게 역기구학 해석을 통해서 원하는 위치에 해당하는 관절 각도를 로봇에 출력함으로써 비주얼 서보잉 시스템을 완성할 수 있다. 왼쪽 팔의 작업을 위해서도 동일한 과정을 반복할 수 있다. 양쪽 팔의 작업을 동시에 정하는 것도 가능한데 이때는 두 개의 작업을 나타내는 높은 차수의 출력 벡터를 새로 정의하고 이에 따른 자코비안을 구하여 해결할 수 있다.

4. 실험 결과

본 절에서 제시하는 실험결과는 스테레오 카메라 (BumbleBee)의 실시간 영상에 CAMSHIFT에 적용하여 공간상의 거리를 계산하고 그 결과를 바탕으로 시뮬레이터에 적용하여 로봇 팔이 충분히 물체의 움직임을 따라 갈 수 있는지에 대한 결과를 나타낸다. 비주얼 서보잉은 그림 1과 그림 3에서 제시한 비전 시스템 알고리즘과 역기구학 알고리즘을 통합하여 구현하였다.

먼저 그림 4는 스테레오 카메라의 좌우 이미지를 이용하여 CAMSHIFT를 적용했을 경우의 거리가 조명 변화와 배경변화에 대한 영향을 나타낸다. 실험은 카메라에서 약 0.64m 정도 떨어져 있는 물체(캔)에 대해 약 20 초 정도부터 주위환경의 변화에 따라 스테레오 카메라의 좌, 우 특징점을 이용한 CAMSHIFT의 거리 값과 스테레오 카메라에서 채공되는 Bumblebee 카메라의 라이브리(Triclops)를 이용한 거리 값을 비교해서 얼마나

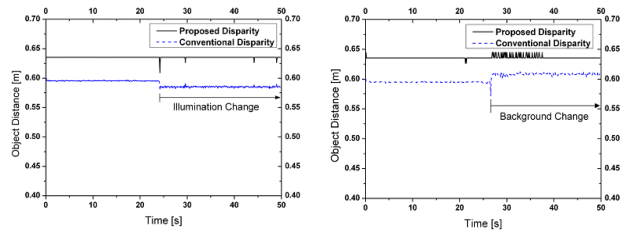


그림 4(a) 조명 변화에 따른 거리(캔)

그림 4(b) 배경변화에 따른 거리(캔)

안정적인 값을 나타내는지를 실험한 결과이다. 그림4(a)는 제안된 disparity를 사용한 경우 조명에 대해 상당히 안정적인 거리 값을 가짐을 알 수 있다. 그림4(b)는 배경 변화를 주었을 때의 결과로 물체 뒤의 배경색깔의 변화를 주었을 때에도 거리 값에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 다만 물체의 색깔과 배경색이 다른 경우에 해당된다.

그림 5는 비전 시스템에서 물체인식 후 해당 물체의 추적을 통해 구한 3차원 위치 데이터이다. (사용한 물체는 커피 캔임.) 계산량이 크지 않아 빠른 실시간 구현이 가능하며, 정지된 상황에서 실측값과 비교했을 때 결과가 매우 정확함을 확인하였다.

물체인식을 위한 SIFT알고리즘은 현재 상용화된 Evolution Robotics사의 함수를 사용하고 있다. 얻어진 3차원 데이터는 로봇의 작업을 결정하는데 사용되는데, 본 논문에서는 로봇 end-effector가 추적된 물체를 계속 따라가는 것을 기본 작업으로 고려하고 있다.

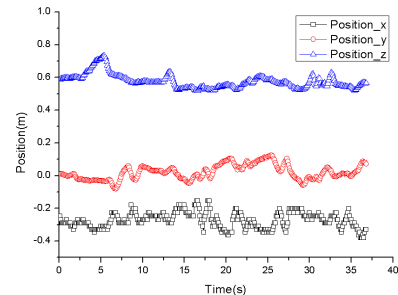


그림 5. 이미지에서 추출한 3차원 데이터

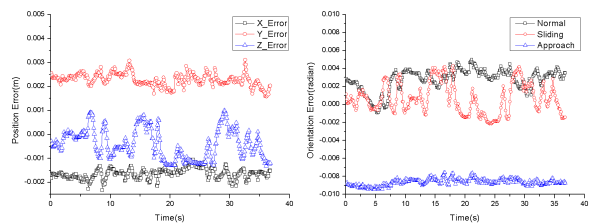


그림 6. 서보잉 위치 오차

그림 7. 서보잉 오리엔테이션 오차

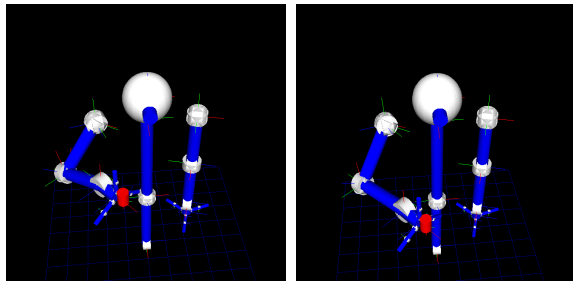


그림 8(a). t = 0일 때 그림 8(b). t = 10일 때

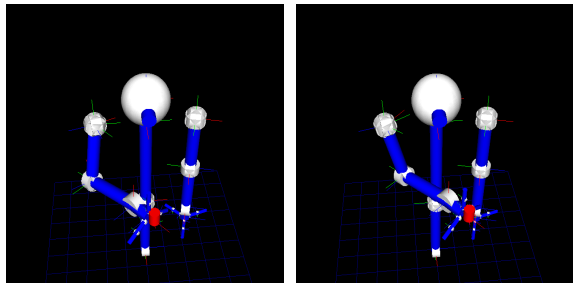


그림 8(c). t = 20일 때 그림 8(d). t = 37일 때

물체의 회전은 로봇의 카메라 방향에 수직인 평면의 회전 상황만을 고려하였다. 이렇게 정의된 작업은 에러 기반 역기구학 기법을 통해서 로봇의 관절 각도를 생성하여 수행된다. 그림 6과 7은 실제 비주얼 서보잉을 했을 때 로봇 end-effector에서 발생한 오차를 나타낸 것이다. 그림 5의 상황에서 로봇의 팔만을 사용한 서보잉 위치오차는 약 ±3mm 범위 이내이고 오리엔테이션 오차는 Normal, Sliding, Approach 세 개의 방향벡터로 표현했을 때 약 ±0.01 radian(0.6도) 범위 내로 발생된다. 6자유도 시스템에 사용된 위치이득 $K_P=5000$, $K_o=500$ 을 사용했다.

위에서 로봇 팔만을 사용한 6자유도의 경우를 실험한 데 비해 총 10자유도를 사용하여 비주얼 서보잉을 비교 수행하였다. 이 경우 더 넓은 작업공간 확보가 가능하다. 10자유도의 시스템에 사용된 위치이득 $K_P=3000$, $K_o=300$ 을 사용했다. 그림 9에서 표시한 3차원 물체 추적 상황에 대해서 그림 10(a)와 그림 10(b)에서 보듯이 위치오차가 약 ±7mm 범위 내에서, 오리엔테이션 오차는 약 -0.02 radian(-1도)에서 +0.035 radian(2도) 범위 내에 존재하여 건설한 결과를 보여 준다. 이때 여자유도의 운동은 따로 지정하지 않고 있다. 팔만을 사용한 작업에 비하여 무릎과 허리를 사용할 수 있으므로 대상 작업공간이 훨씬 넓어지는 것을 알 수 있다.

(그림 5와 그림 9 참조.) 그림 11(a)-(d)는 물체를 잡기 위한 시뮬레이터 상의 로봇 동작을 보여준다. 물체가 점점 앞으로 다가 올수록 무릎관절과 허리관절을 앞으로 구부려짐을 확인 할 수 있다. 먼 거리에 있는 물체까지 도달할 수는 있지만 자세가 제한적이기 때문에 오차가 커지고 또한 무게중심이 앞에 있기 때문에 로봇이 안정한 자세를 유지하기 어렵다. 따라서 여자유도를 활용한 안정한 무게중심 위치를 유지할 필요가 있다. 이를 위해 식(6)같이 간단한 최적화 비용함수를 정의한다.

$$w = -k_w (q_{knee} - q_{knee}^*)^2 \quad - (6) , \quad k_w = 5.0$$

이것은 무게 중심 값을 확보하기 위한 무릎관절의 값에 제한을 두는 것이다. 여기서 q_{knee}^* 는 안정한 무게 중심을 확보할 수 있는 무릎관절 q_{knee} 의 목표값을 나타낸다. (좀더 완벽한 자세 안정화를 위해서는 로봇의 정확한 무게 중심을 고려해야 하며 현재 구현 중에 있다.)

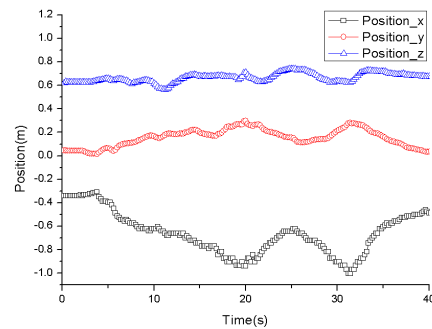


그림 9. 이미지에서 추출한 3차원 데이터(10자유도)

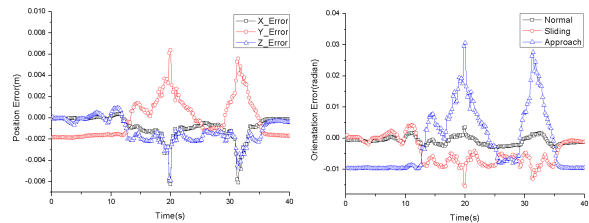


그림 10(a). 서보잉 위치오차 (10자유도)

그림 10(b). 서보잉 오리엔테이션 오차 (10자유도)

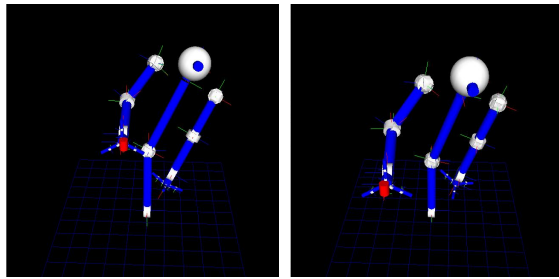


그림 11(a). t=0일 때 그림 11(b). t=10일 때

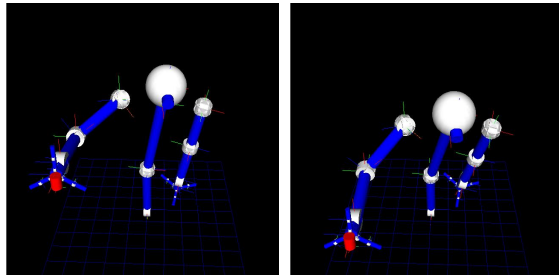


그림 11(c). t=20일 때 그림 11(d). t=30일 때

그림 12에서 보여지는 물체의 운동을 로봇이 추적해 나갈 수 있도록 식 (4)과 (6)을 써서 여유자유도를 생성하여 로봇을 서보잉을 하였다. 여유자유도를 사용하는 경우에도 10자유도 시스템과 동일하게 위치이득을 사용하였다. 이 경우 서보잉의 위치오차는 $-8\text{mm} \sim +6\text{mm}$ 의 범위에 있으며, 오리엔테이션 오차는 약 $-0.02 \text{ radian}(-1\text{도}) \sim +0.01 \text{ radian}(0.5\text{도})$ 범위에 있다. (그림 13(a)와 그림 13(b) 참조) 여유자유도를 사용하지 않을 때와 비교했을 때, 로봇이 안정적인 자세를 유지함을 알 수 있다.

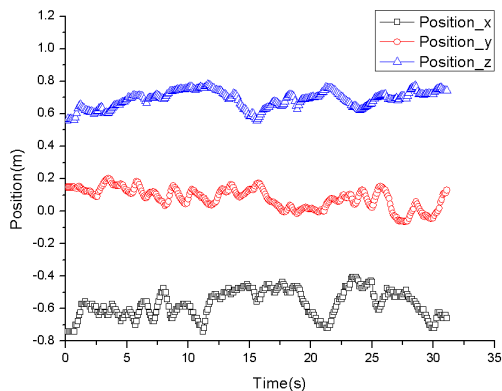


그림 12. 이미지에서 추출한 3차원 데이터 (여유자유도 활용)

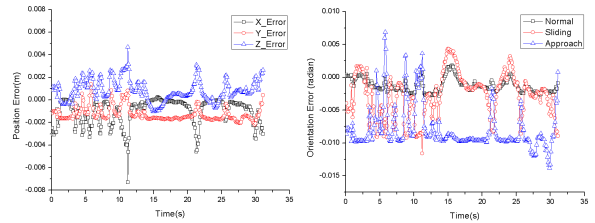


그림 13(a). 서보잉 위치오차 (여유자유도 활용)

그림 13(b). 서보잉 오리엔테이션오차 (여유자유도 활용)

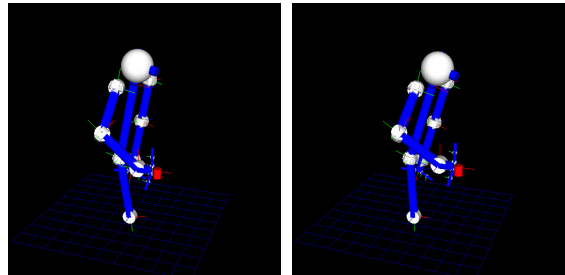


그림 14(a). t=10일 때 그림 14(b). t=16일 때

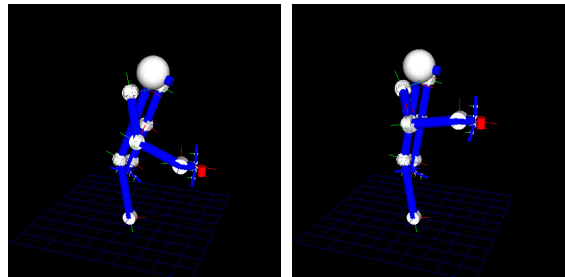


그림 14(c). t=19일 때 그림 14(d). t=30일 때

5. 요약 및 결론

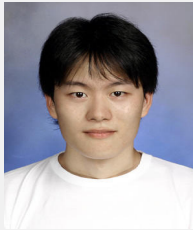
본 논문에서는 건설한 성능을 보여주는 위치 기반 비주얼 서보잉 기법을 제안하였고 서비스 로봇 소프트웨어 플랫폼에 적용하여 성능을 검증하였다. 비주얼 서보잉을 위해서 SIFT 기법과 CAMSHIFT 알고리즘을 활용해서 빠른 물체인식과 추적 성능을 얻을 수 있었다. 특히 기존의 CAMSHIFT 알고리즘을 스테레오 영상에 확장 활용함으로써 정확한 물체의 3차원 위치와 오리엔테이션을 얻어냈다. 얻어진 영상데이터를 이용하여 위치 기반 비주얼 서보잉을 적용하였으며, 로봇의 팔만 사용한 경우와 로봇 전체 자유도를 모두 사용한 경우의 결과를 비교하였다. 전체 자유도를 사용한 경우 작업 영역이 상당히 확대되었으나 무게 중심 이동에 의한 자세 안정 확

보에 어려움이 있었다. 이를 극복하고자 잉여의 자유도를 활용하여 로봇의 자세 안정화를 꾀하였고 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 수행한 실험은 실시간 영상과 로봇 시물레이터를 활용한 것이며, 실제 로봇하드웨어를 사용하여 구현하는 연구가 현재 진행 중이다. 사용중인 로봇의 하드웨어플래폼이 소프트웨어 플래폼과 동일한 구현 방식을 취하기 때문에 유사한 결과를 얻을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] S. Thrun, M. Bennewitz, W. Burgard, A. B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, D. Hahnel, C. Rosenberg, N. Roy, J. Schulte, and D. Schulz, "MINERVA: A Second-Generation Museum Tour-Guide Robot", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1999-2005, May, 1999.
- [2] R. Simmons, J. Fernandez, R. Goodwin, S. Koenig, and J. O'Sullivan, *Beyond Webcams: An Introduction to Online Robots*, MIT Press, Cambridge MA, 2001.
- [3] B. Graf, M. Hans, and R. Schraft, "Care-O-bot II-Development of a Next Generation Robotic Home Assistant", *Autonomous Robots*, vol. 16, issue 2, pp. 193-205, 2004.
- [4] D. Kragic, and H. I. Christensen, "Robust Visual Servoing", *International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 10-11, pp. 923-939, 2003.
- [5] Changhyun Cho, Sungchul Kang, Munsang Kim, and Jae-Bok Song, "Macro-Micro Manipulation with Visual Tracking and its Application to Wheel Assembly", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 3, no. 3, pp.461-468, 2005.
- [6] H. Murase and S. K. Nayar, "Visual Learning and Recognition of 3-D Objects from Appearance", *International Journal of Computer Vision*, vol. 14, issue 1, pp5-24, 1995.
- [7] A. Doucet, S. Godsill, and C. Andrieu, "On Sequential Monte Carlo Sampling Methods for Bayesian Filtering", *Statist. Comp.*, vol. 10, pp. 197-208, 2000.
- [8] I. Weiss, "Model-Based Recognition of 3D Objects from Single Images", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 23, no. 2, pp. 116-128, February, 2001.
- [9] 김성호, 김인철, 권인소, "지역 Zernike 모멘트를 이용한 모델 기반 확률적 물체 인식", *영상처리 및 이해에 관한 워크샵*, 2002.
- [10] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-100, November, 2004.
- [11] G. R. Bradski, "Computer Vision Face Tracking For Use in a Perceptual User Interface", *Intel Technology Journal*, vol.2, issue.2, pp. 12-26, 1998.
- [12] V. Lippiello, B. Siciliano, and L. Vilani, "Position-Based Visual Servoing in Industrial Multirobot Cells Using a Hybrid Camera Configuration", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 1, pp. 73-86, 2007.
- [13] A. Namiki, K. Hashimoto, and M. Ishikawa, "A Hierarchical Control Architecture for High-Speed", *International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 10, pp. 873-888, 2003.
- [14] R. Horaud, F. Dornaika, and B. Espiau, "Visually Guided Object Grasping", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 4, 1998.
- [15] J. B. Burns, R. S. Weiss, and E. M. Riseman, "View Variation of Point-Set and Line-Segment Features", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, issue 1, pp. 51-68, January, 1993.
- [16] Y. Moses, and S. Ullman, "Generalization to Novel Views: Universal, Class-based, and Model-based Processing", *International Journal of Computer Vision*, vol. 29, pp. 233-253, 1998.
- [17] P. I. Corke, *Visual Control of Robots: high-performance visual servoing*, Wiley, 1996.
- [18] E. Trucco, and A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, 1998.
- [19] L. Sciavicco, and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2nd ed. Springer, 2000.



김 찬 오

2006 고려대학교 제어계측공학과(공학사)
2006~현재 고려대학교 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : Robot Manipulation, 제어기 설계, 로봇틱스



양 광 응

1996 인하대학교 자동화공학과(공학사)
1998 인하대학교 자동화공학과(공학석사)
1998~2002 (주)두산메카텍 근무

2002~현재 한국생산기술연구원 근무
관심분야 : Robot Software Architecture, Distributed Computing, Software Engineering



최 성

2006 고려대학교 제어계측공학과(공학사)
2006~현재 고려대학교 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : Robot Vision, Mobile Robot, 로봇틱스



김 흥 석

1980 서울대학교 전기공학과(공학사)
1983 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사)
1990 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학박사)
1983~1987 한국과학기술연구원 응용전자연구실 연구원
1990~1991 한국과학기술연구원 응용전자연구실 연수연구원
1991~현재 한국생산기술연구원 로봇기술개발본부 제어 지능연구팀 수석연구원/팀장

관심분야 : 제어이론, 제어기 설계 및 평가, 시뮬레이션(simulation), 전자회로, 마이크로프로세서/DSP 응용, 로봇틱스 및 S/W 개발 환경



정 주 노

1995 포항공대 기계공학사
1997 동 대학원 석사
2003 동 대학원 박사
2003 서울대학교 정밀기계설계연구소 박사후 연구원

2003~2005 MIT 전자 통신 연구소 박사후 연구원
2005~현재 고려대학교 서창캠퍼스 제어계측공학과 조교수

관심분야 : 로봇 조작 및 경로계획, 네트워크기반 로봇 시스템, 햅틱 시뮬레이션