

모바일 로봇의 목표물 추적을 위한 이미지 궤환 제어

A Image Feedback control of Mobile Robot for Target Tracking

황원준¹, 이우송²

Won-Jun Hwang¹, Woo-Song Lee²

〈Abstract〉

This research propose with image-based visual a new approach to design a feedback control of mobile robot. because mobile robot must be recharged periodically , it is necessary to detect and move to docking station. Generally, laser scanner is used for detect of position of docking station. CCD Camera is also used for this purpose. In case of using camera, the position-based visual servoing method is widely used. But position-based visual servoing method requires the accurate calibration and it is hard and complex work. Another method using cameras is inmage-based visual feedback. Recently, image based visual feedback is widely used for robotic application. But it has a problem that cannot have linear trajectory in the 3-dimensional space. Because of this weak point, image-based visual servoing has a limit for real application. in case of 2-dimensional movement on the plane, it has also similar problem. In order to solve this problem, we point out the main reason of the problem of the resolved rate control method that has been generally used in the image-based visual servoing and we propose an image-based visual feedback method that can reduce the curved trajectory of mobile robot in th cartesian space.

Keywords : image-based visual feedback, mobile robot, laser scanner, image plan

1 정회원, 경남 테크노파크
2 정회원, 교신저자 성산암테크

1 Dept. of Kyungnam ThecnoPark or., Ltd.
2 Corresponding Author, SungSanamdeco co., Ltd.

1. 서 론

지능형 로봇은 대부분 이동로봇의 형태를 가지며, 이러한 이동로봇을 이용한 응용분야는 점차 확대되어가고 있는 추세이다. 이동로봇은 제한된 에너지의 사용으로 주기적으로 에너지 공급이 필요로 한다. 에너지 공급을 받기 위하여 에너지 공급 장치의 위치를 파악하여 이동로봇을 이동시켜 충전장치에 이동로봇을 접촉시키는 제어가 필요하다. 이를 위해서 여러 가지 방식의 센서를 이용한 제어방식이 연구되어 왔다. 대다수의 방식이 레이저 스캐너를 이용한 방식으로 초음파 센서를 이용한 경우에 비하여 상대적으로 정밀한 제어가 가능하여 재충전을 시키기 위한 위치제어의 정밀도가 보장되기 때문인 것으로 알려져 있다[5].

그러나 레이저 스캐너는 고가의 센서이므로 경제적인 면에서는 부담을 안고 있다. 본 연구에서는 이동 로봇에 카메라를 부착하고 비주얼 서보잉 기술[1,2,6]을 이용하여 이동로봇의 에너지 자동주입을 시킬 수 있는 방법을 제안하였다.

이를 위하여 미리 목표위치에서의 획득한 영상 이미지를 이용하는 영상기반 비주얼 피드백 방식을 사용하였는데, 영상기반 비주얼 서보잉 방식을 적용할 경우, 이미지 상에서 목표위치와 현재 위치에서의 특징점들 사이의 오차를 정회하고 이 오차를 일정한 비율로 줄여나가는 기존의 제어방식을 실제 3차원 공간에서 이동로봇의 궤적을 휘어지게하는 문제점 [3,4]이 있으므로, 이를 보완하기 위하여 오차를 새로이 정의하고 제어하는 방식을 제안하였다.

2. 본 론

이동로봇의 재충전을 위하여 본 연구에서는 영상기반 비주얼 서보잉 방식을 사용하였다. 위치기

반 비주얼 서보잉 방식은 정확한 카메라 보정과 로봇과 카메라 사이의 상대적인 좌표계의 위치를 정확하게 측정하여야만 하는 부가적인 작업을 필요로 한다. 영상기반 비주얼 서보잉 방식은 카메라의 보정 값과 로봇과 카메라 좌표계 사이의 상대적인 위치 및 각도를 정확하게 모르더라도 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

최정 접촉 위치에서 획득한 영상 이미지를 로봇이 메모리에 저장하고 있으면서, 로봇의 현재 위치에서 획득한 영상 이미지와 비교하여 각각의 대응되는 특징점들 사이에 정의한 영상 오차를 일정한 비율로 줄여나가는 방식을 사용한다.

그러나 기존의 영상기반 비주얼 서보잉 방식은 3차원 공간에서 이동로봇의 궤적을 휘어지게 하는 문제를 발생시켜, 이동로봇의 에너지 자동공급이 실패할 확률이 높아진다. Homography를 이용한 방식을 [7,8]으로 해결하려는 시도가 있으나, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 새로운 영상 오차를 정의하여 제어하는 영상기반 비주얼 서보잉 방식을 제안 하였다.

2.1 관계이론

영상기반 비주얼 서보잉 방식은 이미지 자코비안을 사용하여 이미지상에서의 오차를 줄여나가기 위한 3차원 공간상에서의 속도벡터를 계산하여 제어하는 것이다[1,2,6]. 그림 2는 3차원 공간상에서의 좌표값과 이미지상에서의 좌표값을 보여주는 그림으로 여기서 이미지 자코비안의 관계식을 유도할 수 있다.[1,2]

일반적으로 이동로봇이 평면상에서 움직이는 3 자유도를 가진다. 영상상의 2개의 특징점의 4개의 좌표값을 이용하여 이미지 자코비안 식을 구하면 (1)과 같이 유도된다[3,4].

이미지로부터 구한 영상특징치의 속도벡터성분을 이용하여 (2)에서 3차원 공간에서의 속도벡터

를 구할 수 있다. 이때 더 많은 특지이의 좌표값을 사용할 수도 있으며, 이러한 효과는 (1)에서 이미지 자코비안 $J_V(r)$ 의 행수를 증가시키며, (2)의 속도 벡터값은 결국 특징치들 사이의 오차를 최소화 시키는 값으로 계산되어 진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{v}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda/z_1 - u_1/z_1(\lambda^2 + u_1^2)/\lambda \\ 0 & -v_1/z_1 & i_1 v_1/\lambda \\ \lambda/z_2 - u_2/z_2(\lambda^2 + u_2^2)/\lambda \\ 0 & -v_2/z_2 & u_2 v_2 \end{bmatrix} T_3 \begin{bmatrix} T_x \\ T_z \\ \omega_y \end{bmatrix}$$

$$\dot{f} = J_V(r) \dot{r} \quad (1)$$

여기서 T_x 는 x축 방향 속도, T_y 는 y축 방향 속도, ω_y 는 회전속도, T_3 는 카메라와 로봇 좌표계의 상대좌표 변환식을 나타낸다.

(2)는 다음의 (3)을 최소화하는 3차원 공간에서의 속도벡터값을 구한 것으로 최소자승법의 해이다[7].

$$\dot{r}(J_V(r)^T J_V(r))^{-1} J_V(r)^T \dot{f} \quad (2)$$

$$\| \dot{f} - J_V(r) \dot{r} \| \quad (3)$$

이미지 상의 오차는 (4)와 같이 목표 특징치의 좌표값 f_d 와 현재 특징치의 좌표값 f 의 차이로 정의하여 이 오차를 (5)와 같이 일정 비율로 줄이기 위한 3차원 공간상에서의 속도벡터 값을 (6)과 같이 구한다.

$$e = f - f_d \quad (4)$$

$$\dot{e} = -Ke \quad (5)$$

$$\dot{r} = -K(J_V(r)^T J_V(r))^{-1} J_V(r)^T e \quad (6)$$

2.2 영상기반 비주얼 피드백의 오차보정

그림 3에서는 목표위치에서의 이미지에서의 4개의 특징치 $(u_3^k, v_3^k), (u_3^l, v_3^l), (u_3^m, v_3^m), (u_3^n, v_3^n)$

의 이미지 상에서의 특징치 $(u_1^k, v_1^k), (u_1^l, v_1^l), (u_1^m, v_1^m), (u_1^n, v_1^n)$ 를 보여주고 있다.

기존의 영상기반 비주얼 서보잉에서 오차의 정의는 일반적으로 목표위치에서의 특징치들의 좌표값과 현재 위치에서 획득한 이미지 상에서의 대응되는 각각의 특징치들의 좌표값의 차이로 정의를 한다[1,2].

그림 4는 이중 2개의 특징치들 사이에 정의된 오차를 벡터 성분으로 정의한 것이며, 이 오차들을 일정비율 k 로 감소시키는 위치에서의 좌표 $(u_2^m, v_2^m), (u_2^n, v_2^n)$ 로 이동하도록 3차원 공간상에서의 속도벡터를 이미지 자코비안식을 통해 계산하여 제어한다.

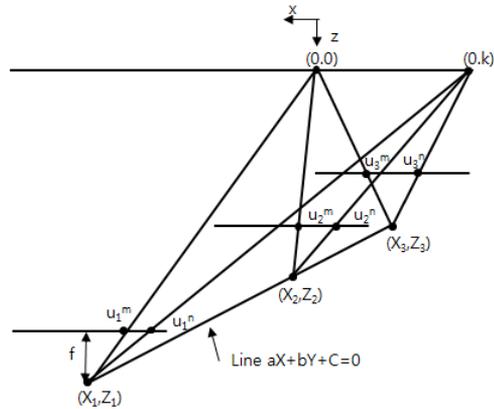


Fig. 1. The coordinates frame of image plane

그림 1는 모바일 로봇이 이동시 3차원 공간의 좌표 값과 모바일 로봇에 부착한 카메라의 이미지 평면의 좌표 값의 관계를 보여준다. 3차원 공간상의 핸드 마크의 두 점이 카메라의 z축 방향으로 동일한 값을 가질 경우에는 영상 상에서 특징치들의 오차를 일정 비율 k 로 줄여나가도록 (4),(5),(6)과 같이 제어할 경우 영상 상에서는 오차가 최소

자승법에 의하여 최소화 되어지나, 영상상의 각각의 측정치에 대응하는 3차원 공간상의 점들이 카메라좌표계 중심으로부터의 z축 방향 거리가 서로 다를 경우에는 3차원 공간상에서는 이동경로가 휘어지는 현상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 제어방식이 적용될수 있는 경우는 카메라의 재충진을 하기위한 초기 위치에서의 카메라 방향과 3차원 공간상에서의 랜드마크의 표시점들이 위치한 평면이 수직인 경우로 제한된다. 즉 3차원 공간상의 랜드 마크의 각 특징점이 카메라로부터의 거리(z축 좌표값)가 동일하여야 한다는 것이다. 이를 증명하면 다음과 같다. 그림 1에서 3차원 공간상의 랜드 마크 상의 표시점들과 이미지 상에서의 특징치의 좌표와의 관계식을 유도하면 다음의(7)과 같다.

$$\frac{X_1}{Z_1} = \frac{u_1^m - u_0}{f}, \frac{X_1 + k}{Z_1 + l} = \frac{u_1^n - u_0}{f}$$

$$\frac{X_2}{Z_2} = \frac{u_2^m - u_0}{f}, \frac{X_1 + k}{Z_1 + l} = \frac{u_2^n - u_0}{f}$$

$$\frac{X_3}{Z_3} = \frac{u_3^m - u_0}{f}, \frac{X_1 + k}{Z_1 + l} = \frac{u_3^n - u_0}{f}$$

여기서 u_0, v_0 는 카메라의 이미지상의 중심점 좌표, f 는 카메라의 초점거리, l 은 카메라 중심에서 이미지 평면의 수직 방향으로 랜드 마크 2점의 거리차이다. 카메라가 직선운동을 한다고 가정하면 카메라좌표계의 중심점은 다음과 같은 직선 방정식(8)을 만족시켜야 한다.

$$aX_1 + bZ_1 + c = 0$$

$$aX_2 + bZ_2 + c = 0$$

$$aX_3 + bZ_3 + c = 0$$

한편 이미지 상에서의 오차벡터를 이용하여 동일한 비율로 오차를 줄여나가기 위하여(9)를 이미지상의 특징점들의 좌표값들이 만족시켜야 한다. (9)는 u값만을 고려한 것이고 v값에 대하여도 동일한 형태의 식이 만들어진다.

$$\frac{u_2^m - u_1^m}{u_3^m - u_1^m} = \frac{u_2^n - u_1^n}{u_3^n - u_1^n}$$

(9)에 위의 (7), (8)을 대입하면 각각 (9)의 좌변과 우변은 (10), (11)로 된다. (9)가 성립하려면 (9)의 양변에 해당하는 (10)과 (11)의 두 개의 식이 같아야 하고, 이렇게 되기 위하여 l 값이 0이어야 한다는 것을 알 수 있다.

$$\frac{u_2^m - u_1^m}{u_3^m - u_1^m} = \frac{\left(f \frac{X_2}{Z_2} - u_0\right) - \left(f \frac{X_1}{Z_1} - u_0\right)}{\left(f \frac{X_3}{Z_3} - u_0\right) - \left(f \frac{X_1}{Z_1} - u_0\right)} = \frac{\frac{X_2}{Z_2} - \frac{X_1}{Z_1}}{\frac{X_3}{Z_3} - \frac{X_1}{Z_1}}$$

$$\frac{u_2^m - u_1^m}{u_3^m - u_1^m} = \frac{\left(f \frac{X_2 + k}{Z_2 + l} - u_0\right) - \left(f \frac{X_1 + k}{Z_1 + l} - u_0\right)}{\left(f \frac{X_3 + k}{Z_3 + l} - u_0\right) - \left(f \frac{X_1 + k}{Z_1 + l} - u_0\right)}$$

즉 2개 이상의 랜드 마크를 사용할 경우 랜드 마크들이 카메라로부터의 z축 방향으로 거리가 다르면, 이미지 상에서 일정 비율로 각각의 측정치들의 오차를 줄여나가는 제어방식은 3차원 공간상에서 직선운동이 보장되지 않는다는 것이다.

그림 2과 3은 랜드 마크의 2점이 카메라의 중심에서의 거리차를 가지는 경우에 기존의 영상기반 비주얼 서보잉 제어방식을 적용하였을 경우에 이미지 평면상에서의 특징 점들의 이동궤적을 보여주는 시뮬레이션 결과이다.

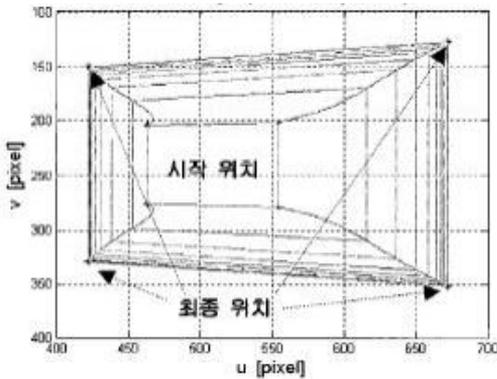


Fig. 2. The trajectory on left image plane

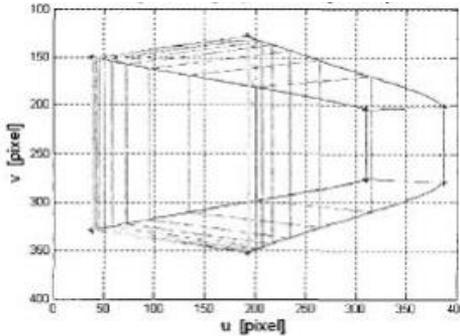


Fig 3. The trajectory of robot in the right image plane

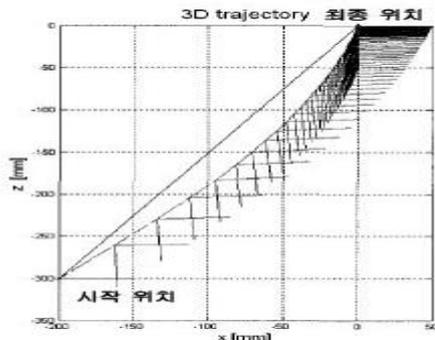


Fig. 4. The trajectory of robot in 3D space

그림4 은 카메라의 3차원 공간상에서의 이동궤적의 휘어짐을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에 사용한 랜드 마크는 평면에 있는 4개의 점을 사용하였고, 랜드 마크의 평면이 카메라의 이미지 평면과 평행한 것을 기준할 때 15도가 틀어진 경우이다. 카메라는 보딩이 되었다고 가정하였다. 이동로봇의 위치가 최종 목표위치에서 X축으로 200mm, y축으로 300mm의 거리에서 영상기반 비주얼 서보잉을 적용한 결과이다. 그림 7의 시뮬레이션 결과로부터 직선경로를 이탈하는 오차가 최대 30mm정도의 값을 가짐을 알 수 있다. 오차는 카메라 내부 및 외부 파라미터 값에 오차가 있을 경우에는 더욱 커질 수 있다.

2.3 제안한 영상기반 비주얼 서보잉 방식

기존의 영상기반 비주얼 서보잉 방식에서의 문제점을 해결하기 위하여 이미지 평면상에서 직선 경로를 벗어나는 오를 추가로 정의하여 제어에 이용하였다.

그림 5에서 이동로봇이 재충전을 위해 최종적으로 도달하여야 하는 위치에서 미리 획득한 이미지와 시작위치에서 획득한 이미지를 상용하여 이미지 상에서의 특징점이 직선경로를 벗어날 경우에 다음과 같이 오차를 새로이 정의한다.

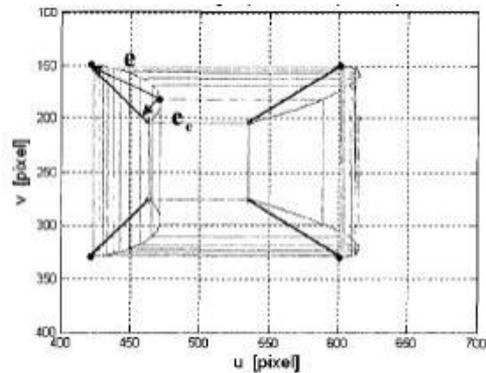


Fig. 5. The analysis of error on the image plane. 현재위치에서의 특정점과 최종 위치의 특정점과

의 오차 벡터를 e , 현재위치에서의 특정

점과 직선궤적에서 벗어난 방향으로의 오차벡터를 e_c 로 정의하고 이 오차를 동시에 줄여나가는 방법을 상용하였다. 먼저 4개의 특정점을 이용하였을 때의 이미지 자코비안을 (17)을 통하여 구한다.

$$\dot{f} = J_V(r)\dot{r}$$

정의된 오차로부터 현재위치에서 최종위치로 이동시키려는 3차원 공간상에 속도벡터를 (18)에서 구한다. 또한 현재위치에서 이미지상의 직선궤적을 벗어난 양을 보정해주는 방향으로 이동시키려는 3차원 공간상에 속도벡터를 (19)에서 구한다.

$$\dot{r} = (J_v(r)^T J_v(r))^{-1} j_v(r)^T \dot{e}$$

$$\dot{r}_c = (J_v(r)^T J_v(r))^{-1} j_v(r)^T \dot{e}_c$$

계산된 속도벡터성분들을 더하여 최종속도 벡터 값을 (20)과 같이 계산하여 이동로봇을 제어한다. 여기서 k_1 과 k_2 는 각각 각 방향의 제어량의 비를 조정하는 이득을 나타낸다.

3. 성능실험 및 결과 분석

제안한 영상기반 비주얼 서보잉 방법의 효용성을 입증하기 위하여 이동로봇을 이용한 실험을 하였다. 실험 장치로는 3자우도를 가지는 nomad XR4000 이동로봇을 사용하였으며, 이동로봇의 상단에 2대의 칼라 카메라(stereo cameras)를 부착하여 랜드 마크의 이미지를 획득할 수 있도록 구성하였다. 2대의 카메라는 이동로봇의 전방을 향하도록 방향을 일치시켜 정렬하도록 부착하였다. 카메라좌표계와 로봇 기준좌표와의 관계인 외부 파라미터는 일반 자를 이용하여 측정하여 대략적인 수치를 사용하였다. 카메라의 내부 파라미터인 초점거리 및 이미지평면의 특성치들은 카메라의

스펙으로부터 얻어진 값을 사용하였다. 일반적으로 영상기반 비주얼 서보잉 방식에서는 이러한 외부 파라미터와 카메라의 내부 파라미터의 오차에 강인한 특성이 있으므로 자세한 보정정보(calibration information)를 측정하지 않아도 되는 장점이 있다.

랜드마크는 평면위의 4색의 정사각형 배열을 사용하여 각각의 색의 무게중심점을 구하여 4개의 특징점을 사용할 수 있도록 구성하였다. 이론적으로는 2개의 특징점만 있어도 제어가 가능하나, 그보다 많은 4개의 특징치를 사용함으로써 잡음과 다른 외란에 대하여 강인한 동작을 할 수 있도록 하였다.

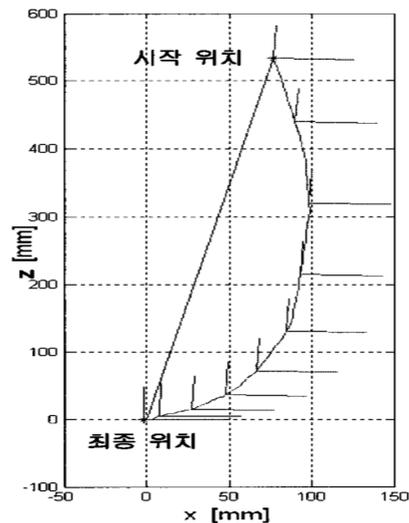
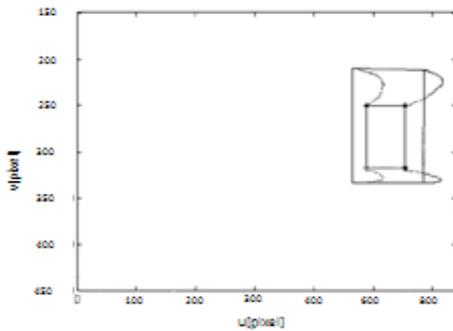


Fig. 6. The trajectory of robot in 3D space(conventional method).

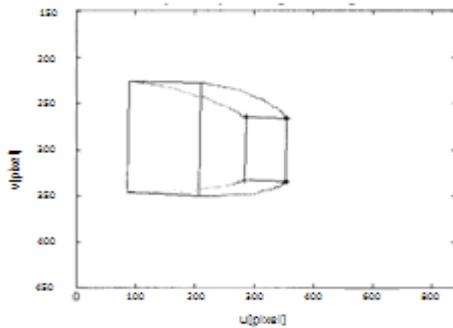
그림 6는 기존의 영상기반 비주얼 서보잉 방식을 적용 하였을 때의 3차원 공간에서의 이동로봇의 이동궤적이다.

직선경로로부터 벗어난 최대오차가 60mm 이상의 값을 가짐을 보여준다. 또한 로봇의 이동방향은 최종위치로 접근하면서 직선경로 방향에서 크게 벗어나 접근하는 것을 보여주며, 이러한 경우 재충전 장치와의 접촉 실패할 확률이 높아지게 된

다. 그림 7은 이 경우에 좌우측 이미지상에서도 특정점의 궤적을 보여준다. 역시 이미지상에서도 특정점의 궤적이 휘어짐을 관찰할 수 있다.



(a) The trajectory in Left image Plane



(b) The trajectory in Right image Plane

Fig. 7. The trajectory if feature points on the image planes(conventional method).

그림 8는 제안한 방식의 영상기반 비주얼 서보잉 방식을 적용하였을 때의 3차원 공간상에서의 이동로봇의 이동궤적이다. 직선경로로부터 벗어난 최대오차가 20mm 정도의 값을 가진다. 특히 초기단계에서 이동경로의 궤적의 오차가 크나 제어가 진행됨에 따라서 빠르게 직선경로로 이동로봇이 복귀하는 결과를 관찰할 수 있다.

그림 9는 이 경우에 좌우측 이미지상의 특징점의 이동궤적으로 직선 형태를 유지하고 있다는 것

을 관찰할 수 있다. 결국 본 실험과 결과를 보면 제안한 방식의 영상기반 비주얼 서보잉은 카메라의 내부파라미터와 외부 파라미터를 정확하게 알지 못하는 경우에도 재충전을 시키기 위한 이동로봇의 이동경로를 기존의 방식보다 직선에 가깝게 제어가 가능하다는 것을 보여준다.

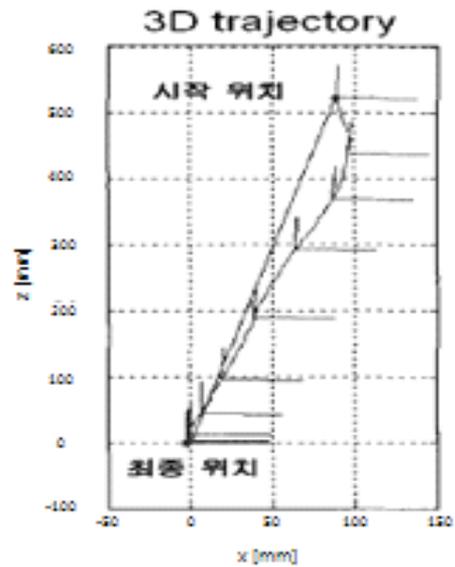
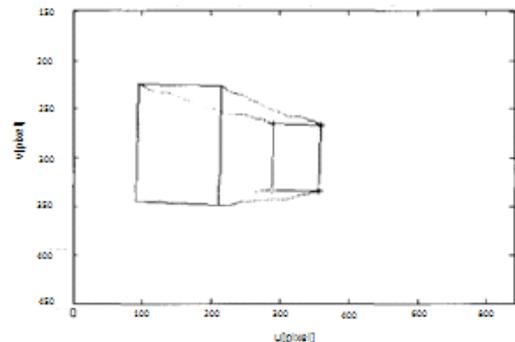
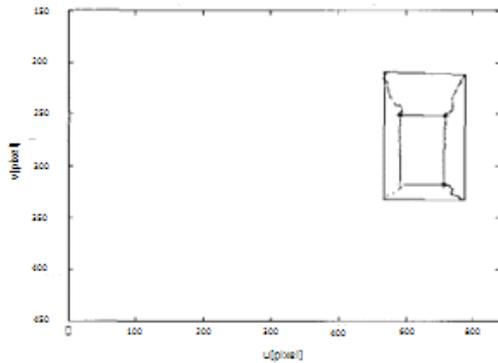


Fig. 8. The trajectory of robot in 3D space(The proposed method).



(a) The trajectory in Right image Plane



(b) The trajectory in Left image Plane

Fig. 9 The trajectory of feature points on the image planes(Proposed method)

4. 결 론

본 연구에서는 이동로봇에 카메라를 부착하고 비주얼 서보잉 기술을 이용하여 이동로봇의 자동충전을 시키는 방법을 제안하였다. 기존의 영상기반 비주얼 서보잉을 사용할 경우 3차원 공간에서 이동로봇의 이동이 주어진 직선궤적을 벗어나는 문제점을 지적하였으며, 직선궤적을 유지하기 위한 조건을 이론적으로 찾아내었다. 즉 랜드 마크의 방향이 이동로봇의 카메라의 이미지 면과 평행인 경우가 이에 해당한다. 그러나 실제의 제어 시에는 이러한 조건에 오차가 존재하므로 이를 개선하기 위한 새로운 방식을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 영상기반 비주얼 서보잉 방식은 이동로봇을 재충전하기 위한 충전장치로부터 일정거리를 떨어진 시작위치와 최종위치에서의 미리 획득한 2쌍의 이미지를 이용하였다. 이 두 이미지 상에서의 특징점 사이의 오차와 이미지 상에서의 이동궤적에서의 벗어나는 오차를 동시에 정의하고 줄여나가는 방식을 사용하여 새로운 방법을 제안하였다. 실험을 통하여 제안한 방식이 기존의 방식보다 3

차원 공간상에서 이동궤적을 벗어나는 오차의 양을 줄일 수 있다는 것을 보였으며, 이 결과로 재충전을 위한 이동로봇의 경로제어를 개선하여 재충전장치에 성공적으로 접촉하도록 하였다.

참고문헌

- 1) J.Chen, E. Dixon, D.M.Dawson, and M. Mcltire, "Homography-based visual tracking control of a wheeled mobile robot," proc. 2003 IEEE Conference on Intelligent Robot and System, pp. 1814_1819, Oct.,2003.
- 2) G. D. Hager, "A modular system for robust positioning using feedback from stereo vision," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 13, no. 4, pp. 582-595, Aug, 1997.
- 3) K. Kouzoubov and D. Austin, "Autonomous recharging for mobile robotivs," Proc. 2002 Australian Conference on Robotics and Automation, pp. 27-29, Nov., 2002.
- 4) F. Chaumette,"Potential problems of stability and convergence in image-based and position-basedvisual servoing," in The Confluence of Vision and Control, LNCIS Series, D. Kriegman, G. Hager and A. Morse, Eds. Springer Verlag, vol. 237, pp. 66-78, 1998.

- 5) E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet, "2-1/2-D Visual servoing." IEEE Trans Robotics and Automation, vol. 15, on. 2, pp. 238-250, Apr, 1999.
- 6) Tongchun Fang, Warren E. Dixon, Darren M. Dawson, and Prakash Chawda, "Homography-based visual servo regulation of mobile robots," IEEE Trans. System Man and Cybernetics, PART B:CYBERNETICS, vol. 35, no.5, pp. 1041-1050, Oct., 2005
- 7) R. Horaud, F. Domaika, and B. Espiau, "Visually guided object grasping," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 14, on. 4, pp. 525-532, Aug., 1998.
- 8) S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 12, on. 5, pp. 651-670, Oct, 1996