

카메라 영상기반 전방향 이동 로봇의 제어

Control of an Omni-directional Mobile Robot Based on Camera Image

김봉규 · 류정래[†]

Bong Kyu Kim, and Jung Rae Ryoo[†]

서울과학기술대학교 전기정보공학과

[†] Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요 약

본 논문에서는 카메라를 탑재한 전방향 이동 로봇에서의 표적 추종을 위한 영상기반 시각 서보 제어를 다룬다. 기존 연구에서는 카메라 영상에서 추출한 표적의 영상 좌표로부터 표적 추종을 위한 바퀴의 회전 각속도를 구하기 위하여 카메라의 수학적 모델과 이동 로봇의 기구학 특성으로부터 구한 수학적 영상 자코비안을 널리 활용하였다. 본 논문에서는 표적의 영상 좌표 정보를 이용한 단순한 규칙기반 제어 방식과 영상에 포착된 표적의 크기 정보를 조합하여 바퀴의 회전 각속도를 생성하는 새로운 방식을 제안한다. 카메라 영상을 몇 개의 영역으로 분할하고, 표적이 포함된 영역에 따라 미리 정의한 규칙을 적용하는데, 복잡한 수학적 표현을 사용하지 않으면서도 비교적 적은 수의 규칙을 사용하므로 구현이 용이한 장점이 있다. 제안된 방식은 실제 시스템으로 구현하여 실험하고, 전체 실험 시스템에 대한 설명과 함께 실험 결과를 제시하여 제안하는 방식의 타당성을 입증한다.

키워드 : 전방향 이동 로봇, 메카넘휠, 영상 자코비안, 영상기반 시각 서보 제어

Abstract

In this paper, an image-based visual servo control strategy for tracking a target object is applied to a camera-mounted omni-directional mobile robot. In order to get target angular velocity of each wheel from image coordinates of the target object, in general, a mathematical image Jacobian matrix is built using a camera model and a mobile robot kinematics. Unlike to the well-known mathematical image Jacobian, a simple rule-based control strategy is proposed to generate target angular velocities of the wheels in conjunction with size of the target object captured in a camera image. A camera image is divided into several regions, and a pre-defined rule corresponding to the target-located image region is applied to generate target angular velocities of wheels. The proposed algorithm is easily implementable in that no mathematical description for image Jacobian is required and a small number of rules are sufficient for target tracking. Experimental results are presented with descriptions about the overall experimental system.

Key Words : Omni-directional Mobile Robot, Mecanum Wheel, Image Jacobian, Image-based Visual Servo Control

1. 서 론

접수일자: 2013년 9월 1일

심사(수정)일자: 2013년 9월 7일

게재확정일자: 2013년 11월 19일

[†] Corresponding author

본 논문은 본 학회 2013년도 추계학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부) 지원으로 수행되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근 들어 사람들의 일상생활에 활용할 수 있는 서비스 로봇 개발에 대한 산업 전반에 걸친 많은 관심이 집중되고 있다. 청소, 교육, 엔터테인먼트, 안내 등 일부 분야에서는 이미 상용 제품이 출시되기도 하였다. 이러한 서비스 로봇들의 활용을 위해서는 로봇의 기동성, 인간에 대한 안정성, 그리고 조정성 등의 요건을 만족하여야 하는데, 이를 위해서는 제어, 센서 계측, 그리고 지능 기술 등 여러 기술들의 적절한 활용이 필요하다[1]. 특히, 로봇의 주변 환경을 감지하기 위한 센서 활용 기술은 서비스 로봇에서 매우 중요한 역할을 담당하는데, 카메라 등의 영상 센서는 다른 어떠한 센서보다 많은 정보를 제공하는 장점으로 인하여 카메라 영상을 로봇 제어에 활용하는 다양한 연구가 진행되었다.

시각 서보 제어(visual servo control)는 컴퓨터 비전과 로봇 제어 알고리즘을 하나의 시스템에 조합하여 적용하는 분야로서 위치기반과 영상기반 방식의 두 가지로 분류할 수

있다. 위치기반 시각 서보 제어(position-based visual servo control)는 영상 정보로부터 추출한 표적의 3차원 위치 정보를 로봇 제어에 활용하는 반면, 영상기반 시각 서보 제어(image-based visual servo control)에서는 표적의 영상 좌표로부터 로봇의 관절 각도를 직접 결정한다[2,3]. 이 때, 카메라 모델과 로봇의 기구학식을 결합한 영상 자코비안(image Jacobian)을 널리 활용한다.

본 논문에서는 카메라를 장착한 전방향 이동 로봇(omni-directional mobile robot)에서 표적을 추종하기 위한 영상기반 시각 서보 제어의 새로운 방법을 제시한다. 전방향 이동 로봇에서는 로봇의 2차원 위치와 방향을 독립적으로 제어할 수 있으므로 표적을 카메라의 시야각 범위에 유지하면서 로봇의 위치를 변경할 수 있다[4-8]. 기존에 널리 사용되는 복잡한 수학적 표현의 영상 자코비안을 대신하여 규칙 기반 제어 방식을 적용한다. 영상을 임의의 구간으로 분할하고, 감지된 표적이 포함된 영역에 따라 미리 정의한 제어 규칙을 적용한다. 또한, 한 대의 카메라를 사용하면 표적의 크기 정보를 활용하여 표적까지의 거리를 제어한다. 제안된 방식에서는 복잡한 수학적 표현을 사용하지 않고 몇 개의 단순한 규칙을 적용하여 표적을 추종하므로 손쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 제안된 방식은 실제 시스템으로 구현 및 실험하고, 그 결과를 구현된 시스템에 대한 설명과 함께 제시하여 타당성을 검증한다.

2. 영상기반 전방향 이동 로봇 시스템

2.1 전방향 이동 로봇

2차원 평면상에서 동작하는 이동 로봇은 평면상의 위치와 회전 각도의 3 자유도를 가진다. 일반적인 이동 로봇에서는 이 3개의 자유도를 독립적으로 제어하는 것이 불가능하다. 자동차 또는 휠체어의 경우 옆으로의 수평 이동이 불가능한 점이 대표적인 사례이다. 이와 달리 전방향 이동 로봇은 평면상의 2차원 위치와 회전 방향을 독립적으로 제어할 수 있는데, 메카넘휠(Mecanum wheel)은 전방향 바퀴(omni-directional wheel)와 더불어 전방향 이동 로봇에 사용되는 대표적인 바퀴이다.

그림 1에는 메카넘휠을 사용한 전방향 이동 로봇을 나타내었다. 4개의 바퀴 회전을 개별적으로 제어하여 로봇의 전후좌우 수평 이동 및 회전 운동을 독립적으로 제어하는데, 이와 관련된 역 기구학식(inverse kinematics equation)은 식 (1)과 같이 표현된다[6]. 여기서 V_{iW} ($i=1,2,3,4$)는 각 바퀴의 회전 각속도 ω_{iW} ($i=1,2,3,4$)와 바퀴 반지름 R 에 의하여 결정되는 선속도이며, v_x , v_y , 그리고 ω_z 는 각각 전후방향 속도, 좌우방향 속도, 그리고 로봇 중심에서의 회전 각속도이다.

$$\begin{bmatrix} V_{1W} \\ V_{2W} \\ V_{3W} \\ V_{4W} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \omega_{1W} \\ \omega_{2W} \\ \omega_{3W} \\ \omega_{4W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & (L+\ell) \\ 1 & -1 & -(L+\ell) \\ 1 & -1 & (L+\ell) \\ 1 & 1 & -(L+\ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 영상기반 시각 서보 제어

시각 서보 제어에서는 카메라 영상에서 감지된 표적을 추종할 목적으로 로봇에 장착된 모터의 동작을 제어하는데,

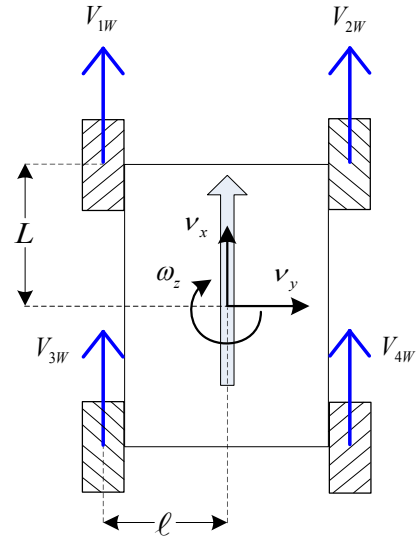


그림 1. 메카넘휠을 사용한 전방향 이동 로봇
Fig. 1. Omni-directional mobile robot using Mecanum wheels

표적의 영상 좌표로부터 로봇 제어를 위한 모터 회전 각도를 생성하는 방식에 따라 위치기반 방식과 영상기반 방식으로 분류된다[3]. 위치기반 방식에서는 표적의 영상 좌표로부터 표적의 3차원 공간 좌표를 추출하고, 3차원 공간에서의 위치 오차를 줄이도록 로봇을 제어한다. 이를 위해서는 카메라의 수학적 모델과 로봇의 기구학 정보를 별도로 사용하여 하는데, 여기서 카메라 모델 또는 로봇 기구학식에 존재하는 오차로 인하여 표적 추종 성능이 저하되는 현상이 발생할 수 있다[2,9].

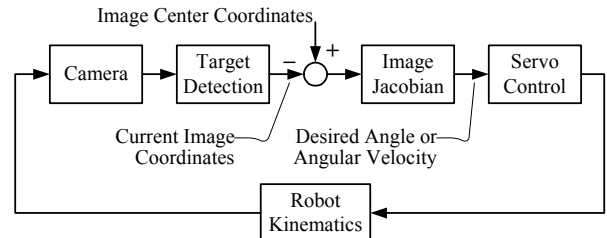


그림 2. 영상기반 시각 서보 제어 구조
Fig. 2. Image-based visual servo control

한편, 영상기반 제어에서는 표적의 영상 좌표를 사용하지 않고 표적의 3차원 공간 좌표를 추출하지 않고 영상 좌표 공간에서의 위치 오차를 연산하여 로봇 제어에 활용한다. 그림 2에는 영상기반 시각 서보 제어 구조를 나타내었다. 위치기반 방식과 달리 위치 오차를 영상 좌표 공간에서 연산하고, 영상 자코비안을 활용하여 모터의 기준 각도를 생성하는 특징이 있다. 여기서 영상 자코비안도 카메라의 수학적 모델과 로봇의 기구학식으로부터 구하는 공통점이 있지만, 표적의 현재 위치와 목표 위치 모두를 영상 좌표 공간에서 구하고, 그 차이를 줄이도록 제어하므로 카메라 모델 또는 로봇의 기구학식에 포함된 오차의 영향이 위치기반 방식에 비하여 상대적으로 적은 특징이 있다[2,3,10].

한편, 영상 자코비안의 경우 카메라 모델과 로봇의 기구

학식을 조합하여 선형화한 것으로 매우 복잡한 수학적 표현이 필요하므로 실제 시스템으로의 적용에 어려움이 있다. 본 논문에서는 복잡한 수식으로 표현되는 영상 자코비안을 대신하여 일련의 규칙에 기반하여 영상 자코비안의 기능을 대신하는 방식을 제안한다.

3. 표적 위치 검출 및 이동 로봇 제어

3.1 표적 감지를 위한 영상 처리

카메라가 탑재된 전방향 이동 로봇이 움직이는 표적을 추종하기 위해서는 표적의 영상 좌표를 확인하여야 하는데, 이를 위해서는 우선 카메라 영상에서 미리 정의된 표적을 감지하여야 한다. 본 논문에서는 표적 오인식을 방지하기 위하여 두 개의 크기가 다른 직사각형이 중첩된 형태를 표적으로 정의하였다. 그림 3에는 한 장의 영상에서 표적을 감지하기 위한 영상 처리 절차를 나타내었다.

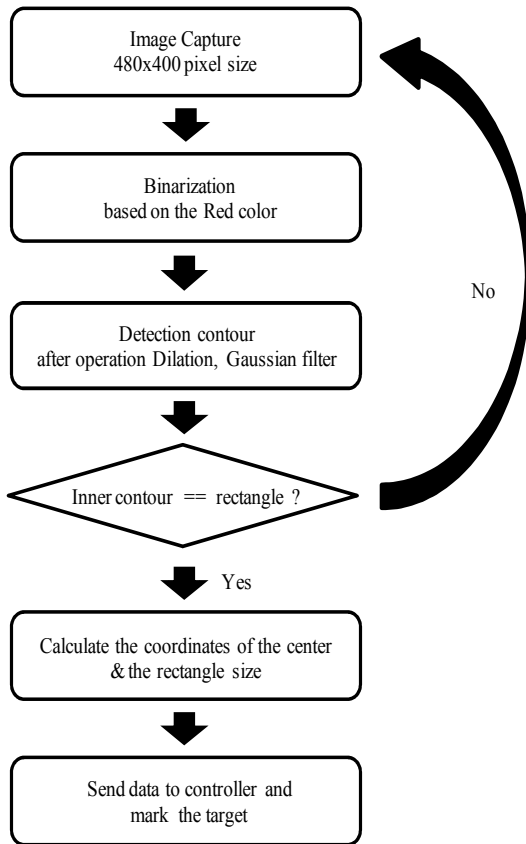


그림 3. 표적 감지를 위한 영상 처리
Fig. 3. Image processing for target detection

- 단계 1 : 카메라 영상을 메모리에 저장한다.
- 단계 2 : 영상의 빨간색 성분을 기준으로 이진화한다.
- 단계 3 : 배경의 잡음 제거와 객체의 크기 확장을 위한 팽창 연산과 가우시안 필터 연산을 적용한 후, 표적의 내부 외곽선 및 꼭짓점을 검출한다.
- 단계 4 : 검출된 꼭짓점을 이용하여 내부 외곽선으로 이어진 도형이 사각형인지 판단한다.

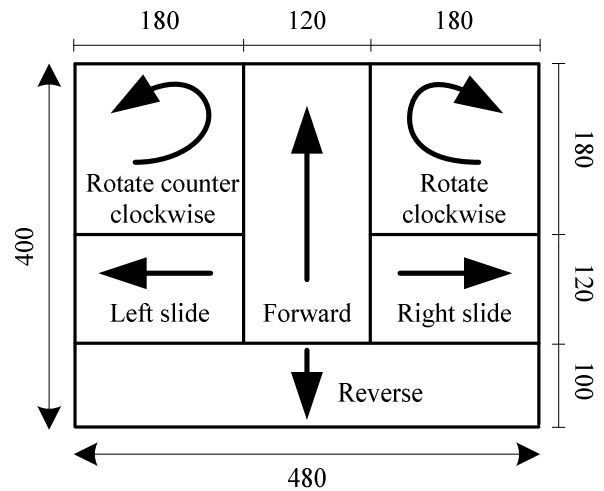


그림 4. 영상 분할 및 영역별 제어 규칙
Fig. 4. Control rules corresponding to image regions

단계 5 : 사각형의 넓이와 중심 좌표를 연산한다.

3.2 표적의 영상좌표를 이용한 이동 로봇 제어

본 논문에서는 복잡한 수식의 영상 자코비안 대신 일련의 단순한 규칙을 활용하여 영상 좌표로부터 이동 로봇의 동작을 제어하는 방식을 제안한다. 카메라 영상을 몇 개의 영역으로 분할하고, 표적이 포함된 영역에 따라 미리 정의한 로봇의 이동 규칙을 적용한다. 그림 4에는 분할된 영상 공간과 각 영역별로 적용할 로봇의 이동 방향을 표시하였다. 그림에 표시된 로봇의 이동 규칙은 식 (1)을 활용하여 바퀴의 회전 각속도 벡터로 변환되는데, 표적의 영상 공간 위치 정보만으로는 표적까지의 거리를 알 수 없으므로 단위 벡터 형태로 시스템에 저장된다.

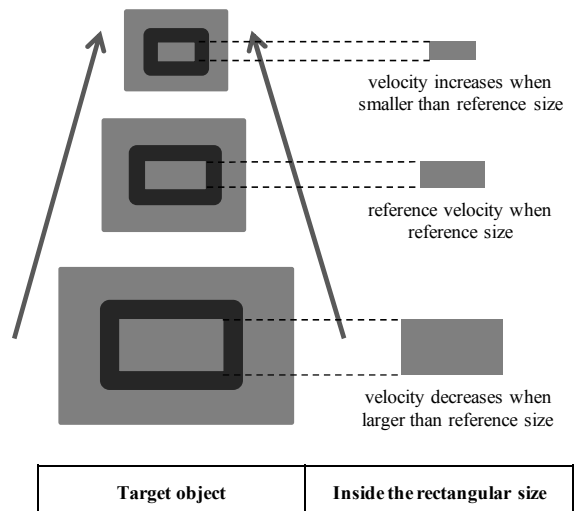


그림 5. 표적 크기에 의한 목표 각속도 설정
Fig. 5. Target angular velocity from target size

그림 5에는 감지된 표적의 크기에 따라 이동 로봇의 속도를 결정하는 방식을 나타내었다. 카메라 영상에 포착되는 표적의 크기는 표적까지의 거리에 따라 결정되는 특성이 있

다. 이 정보를 활용하여 한 장의 영상으로부터 표적까지의 거리를 추정하여 이동 로봇의 속도를 결정할 수 있다. 본 논문에서는 표적 내부 사각형의 크기 정보를 기준으로 하는데, 표적의 크기가 임의의 기준 크기보다 작으면 이동 로봇의 속도를 증가하고, 반대의 경우에는 속도를 감소한다. 이를 위하여 앞에서 단위 벡터로 설정한 이동 로봇 바퀴의 회전 각속도 벡터에 표적의 크기로부터 설정한 이동 속도를 이득 형태로 곱하여 바퀴의 목표 회전 각속도를 결정한다.

3.3 바퀴의 회전 속도 제어

전방향 이동 로봇에서는 각 바퀴의 회전 속도를 독립적으로 제어하기 위하여 4개의 DC 모터를 활용한다. 구동 전압에 대한 바퀴의 회전 속도는 식 (2)와 같이 적분기가 없는 1차 전달함수로 표현된다. 여기서 K 와 α 는 모터의 동특성, 기어비, 바퀴의 기계적 부하 등을 반영한 상수이다.

$$T_V(s) = \frac{K}{s + \alpha} \quad (2)$$

모터들의 특성 편차를 보상하고 마찰력 등 외란의 영향을 억제하기 위하여 속도 피드백 제어를 적용한다. 이를 위하여 모터의 회전 각속도를 측정하고, 현재 회전 각속도와 기준 각속도의 차이를 속도 PI 제어기로 보상한다. 그림 6에는 전방향 이동 로봇의 서보 제어 시스템 구조를 나타내었다. 각각의 모터를 개별적으로 제어하기 위하여 4개의 속도 PI 제어 루프를 독립적으로 구성한다.

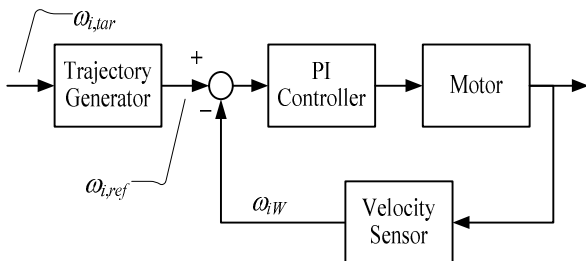


그림 6. 서보 제어 시스템 구조
Fig. 6. Structure of the servo control system

표적을 추종하기 위한 각 모터의 목표 각속도(target angular velocity)는 카메라 영상 처리의 결과로 생성되므로 서보 제어의 샘플링 주파수보다 느린 시간 간격으로 갱신되어 계단 입력(step input) 형태의 특성을 나타낸다. 이러한 입력을 서보 제어의 기준 입력으로 사용하는 경우 서보 시스템에 불필요한 진동이 발생하거나 PI 제어기의 적분 오차가 누적되어 와인드업(windup) 현상이 발생할 수 있다. 서보 제어 시스템에서의 이와 같은 문제를 방지하기 위하여 궤적 생성기(trajectory generator)에서는 표적의 영상 좌표로부터 구한 각 바퀴의 목표 각속도 $\omega_{i,tar}$ 로부터 속도 제어의 기준 각속도 궤적 $\omega_{i,ref}$ 을 생성한다. 본 논문에서는 일정한 각속도 a 를 적용한 기준 각속도 궤적을 식 (3)에 따라 생성한다. 여기서 $\omega_{i,0}$ 는 직전 영상에서 구한 목표 각속도로 초기조건에 해당한다.

$$\omega_{i,ref}(t) = \begin{cases} \omega_{i,0}(t) + at, & \omega_{i,0}(t) + at < \omega_{i,tar}(t) \\ \omega_{i,tar}(t), & \omega_{i,0}(t) + at \geq \omega_{i,tar}(t) \end{cases} \quad (3)$$

4. 실험 및 결과

4.1 실험 환경

그림 7에는 실험에 사용된 전방향 이동 로봇의 전체 시스템 구성을 나타내었다. 사람 가슴 높이 부분의 표적을 인식하기에 적합한 위치에 카메라 및 영상 처리용 ARM 프로세서 보드를 탑재하였다. 표적 감지를 위한 영상 처리를 위하여 오픈 소스 컴퓨터 비전 C 라이브러리(OpenCV)를 활용하고, 감지된 표적의 영상 좌표로부터 이동 로봇의 바퀴 회전 속도를 생성하여 서보 제어기로 전송한다.

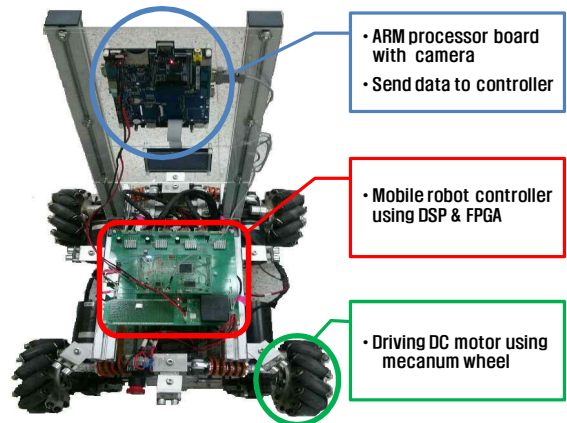


그림 7. 전체 시스템 구성
Fig. 7. Overall system organization

이동 로봇의 동작을 제어하는 서보 제어기는 DSP를 활용하며, 각 바퀴의 개별적인 속도 제어를 위하여 4개의 PI 제어기를 동시에 구동한다. 모터 구동을 위한 PWM 생성기 및 회전 속도 측정을 위한 엔코더 펄스 카운터 등은 FPGA를 이용하여 구현되었다. 그림 8에는 전체 시스템의 구조를 블록선도로 나타내었다.

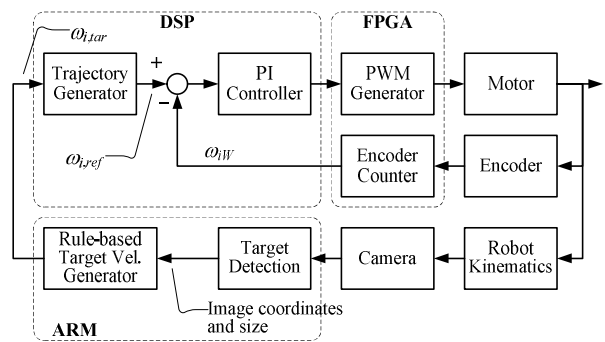


그림 8. 전체 시스템 블록선도
Fig. 8. Block diagram of the overall system

4.2 영상 처리 및 표적 감지

우선 표적 감지를 위한 영상 처리 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 그림 3에 설명한 영상 처리 알고리즘을 PC에서 구현하여 실험에 적용하고, 원본 영상과 영상 처리 후의 영상을 그림 9에 나타내었다. 알고리즘 검증에 사용된 영상은 480x480 픽셀 해상도를 사용하였다. 그림 9에서 확인할



그림 9. 표적 감지를 위한 영상 처리
(좌-원본 영상, 우-출력 영상)

Fig. 9. Image processing for target detection
(left-original image, right-target image)

수 있듯이 좌측의 원본 영상에서 표적 감지를 위한 영상 처리 후 우측의 영상과 같이 표적 부분이 구분됨을 확인할 수 있다.

PC에서 검증된 영상 처리 및 표적 감지 알고리즘을 실제 로봇에 탑재할 ARM 기반 임베디드 비전 시스템에 적용하고 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 감지된 표적과 표적을 영상의 중앙으로 이동하기 위한 영상 좌표 공간에서의 방향도 원본 영상에 같이 표시하였으며, PC에서와 동일한 OpenCV 라이브러리를 활용하였으므로 결과도 거의 일치한다. 다만, 임베디드 시스템에 사용되는 프로세서는 연산 능력이 최신의 PC보다 낮은 한계가 있다. 임베디드 비전 시스템에 사용된 카메라는 초당 15 프레임의 영상을 출력하지만 임베디드 비전 시스템의 연산 능력 한계로 인하여 초당 5 프레임을 처리할 수 있다. 그 결과 이동 로봇 바퀴의 목표 회전 각속도는 약 200 msec 주기로 갱신된다.

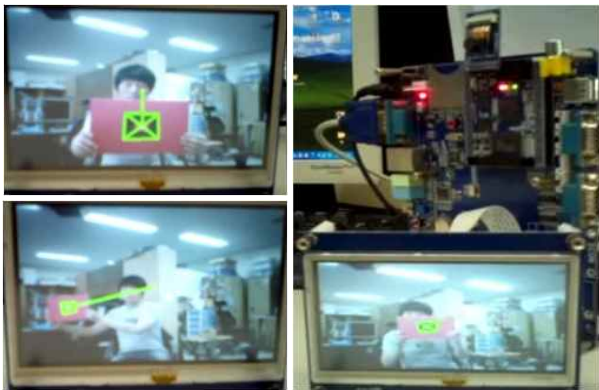


그림 10. 임베디드 비전 보드에서의 표적 감지

Fig. 10. Target detection on an embedded vision board

4.3 전방향 이동 로봇 속도 제어

그림 11에는 이동 방향 변화에 따른 각 모터의 지령 속도와 실제 모터의 목표 회전 각속도를 나타내었다. 영상 좌표 공간에서의 표적 위치에 따라 모터의 목표 각속도가 결정되고, 적절한 가속도를 적용한 기준 각속도를 시간에 대한 제적으로 적용하였다. 그림 11에 나타난 결과는 이동 로봇이 전진, 우회전, 후진, 좌회전 후 정지하는 동작에 대응하는 각속도 제적으로서 설정한 가속도에 따라 등가속도 운동과 등속 운동으로 구성됨을 확인할 수 있다. 약간의 시간

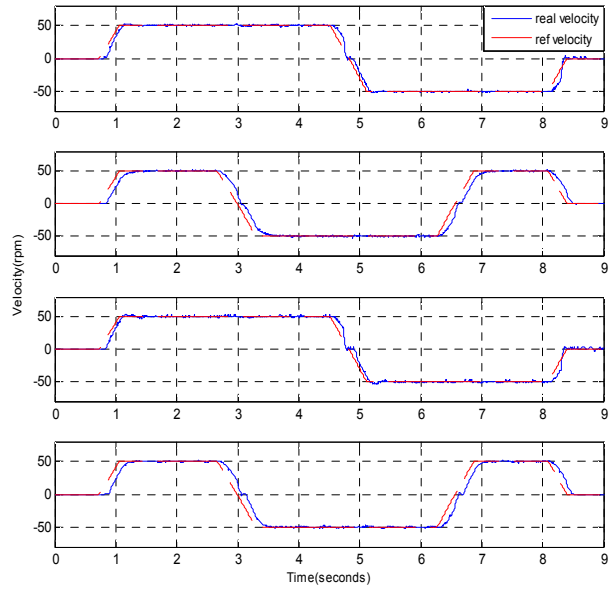


그림 11. 이동 방향 변화에 따른 모터의 회전 속도

Fig. 11. Rotational velocities of 4 motors corresponding to moving direction change

지연이 존재하지만 이동 로봇의 이동 속력에 비하여 무시할 수 있는 수준으로 분석된다. 또한, 바퀴 회전 속도의 극성이 반전되는 시점은 바퀴의 회전 방향이 바뀌는 시점으로 정지 마찰력의 영향이 발생하는 것을 확인할 수 있지만 이 역시 전체 시스템 관점에서는 무시할 수 있는 수준이다.

5. 결 론

본 논문에서는 카메라를 탑재한 전방향 이동 로봇에서의 표적 추종을 위한 새로운 영상기반 시각 서보 제어 방식을 제안하였다. 복잡한 수학적 표현의 영상 자코비안을 활용하는 기존 방식과 달리 제안하는 방식에서는 표적이 위치한 영상 좌표 공간에 따라 미리 설정된 간단한 규칙을 적용한다. 영상 좌표 공간을 몇 개의 영역으로 분할하고, 표적이 위치한 영상 좌표 공간 영역에 따라 미리 정의한 바퀴 회전 각속도 벡터를 단위 벡터 형태로 생성하고, 표적의 크기 정보를 이득으로 이용하여 모터 회전 각속도 벡터의 크기를 변경함으로써 이동 속도를 제어하였다. 제안한 방식은 기존 영상 자코비안 방식과 달리 단순하여 구현이 용이하며, 현대의 카메라를 활용하여 표적까지의 깊이 정보를 활용하는 장점이 있다. 제안하는 방식은 실제 전방향 이동 로봇에 적용하여 타당성을 검증하였다.

References

- [1] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S. G. Tzafestas, J. Tang, and T. Fukuda, "Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service robots," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 22, no. 3-4, pp. 315-330, July 1998.
- [2] J. R. Ryoo, D.-Y. Kim, H. K. Park, and M. J.

- Chung, "Position-based visual servo control of active head-eye system without camera calibration," *Proceedings of International Conference on Automation, Robotics, and Computer Vision*, 2000.
- [3] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, Oct. 1996.
- [4] J. E. M. Salih, M. Rizon, and S. Yaacob, "Designing omni-directional mobile robot with Mecanum wheel," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 3, no. 5, pp. 1831-1835, May 2006.
- [5] Dickerson SL and Lapin BD, "Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels," *Proceedings of National Telesystems Conference*, vol. 1, pp. 323-328, 1991.
- [6] P. Viboonchaicheep, A. Shimada, and Y. Kosaka, "Position rectification control for Mecanum wheeled omni-directional vehicles," *The 29th Annual Conference of the IEEE*, vol. 1, pp. 854-859, 2003.
- [7] N. Tlale and M. Villiers, "Kinematics and dynamics modelling of a Mecanum wheeled mobile platform," *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 657-662, 2008.
- [8] K. Nagatani, S. Tachibana, M. Sofue, and Y. Tanaka, "Improvement of odometry for omnidirectional vehicle using optical flow information," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 468-473, 2000.
- [9] J. S. Park and M. J. Chung, "Path planning with uncalibrated stereo rig for image-based visual servoing under large pose discrepancy," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 2, pp. 250-258, April 2003.
- [10] E. Malis, F. Chauette, and S. Boudet, "2-1/2-D visual servoing," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 2, pp. 238-250, April 1999.

저 자 소 개



김봉규(Bong Kyu Kim)

2013년 : 서울과학기술대학교 제어계측공학과 공학사

2013년~현재 : 서울과학기술대학교 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : 서보 제어, 디지털 제어 시스템

Phone : +82-2-970-6538

E-mail : bkkim88@seoultech.ac.kr



류정래(Jung Rae Ryoo)

1996년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사

1998년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사

2004년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사

2004년~2005년 : 삼성전자 책임연구원

2005년~현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수

관심분야 : 강인 동작 제어, 서보 제어, 디지털 제어 시스템

Phone : +82-2-970-6546

E-mail : jrroyo@seoultech.ac.kr