

論文98-35S-11-9

# 휠체어 장착형 지능형 재활 로봇을 위한 칼라 비전 시스템

## (Color Vision System for Intelligent Rehabilitation Robot mounted on the Wheelchair)

宋原慶\*, 李熙暎\*, 金鍾成\*\*, 卞增男\*

(Won-Kyung Song, Heyoung Lee, Jong-Sung Kim, and Zeungnam Bien)

### 요 약

KARES(KAIST Rehabilitation Engineering System)는 보조자 없이 팔과 다리가 불편한 장애인과 노약자가 쉽게 이동하며 일상 생활을 하는 것을 돕기 위하여, 6 자유도의 로봇 팔을 휠체어에 장착한 형태의 재활 로봇 시스템이다. 재활 로봇 시스템에서 로봇 팔을 프로그래밍하고 제어할 수 있는 인터페이스 장치는 매우 중요하다. 특히 사용자가 로봇 팔을 직접 제어하는 경우, 사용자의 인지력의 부담이 심하고 조작의 어려움을 느낀다. 이에 대한 해결책으로 로봇이 자율적으로 작업을 수행하기 위한 칼라 비전 시스템을 제안하고 기본적으로 필요한 네 가지 작업을 정하였다. 로봇 팔에 아이-인-핸드 형태로 카메라를 장착하여 칼라 비전 시스템을 구축하고, 탁자 위에 있는 칼라 표시이 부착된 컵을 잡는 작업과 잡은 컵을 입 근처로 이동하는 작업을 구현하였다. 그 결과, 실내 환경에서 실시간에 성공적으로 수행되었다.

### Abstract

KARES (KAIST Rehabilitation Engineering System) is the rehabilitation robot system in the type of the 6 degrees of freedom robot arm mounted on the wheelchair, in order to assist the independent livelihood of the disabled and the elderly. The interface device for programming and controlling of the robot arm is essential in the rehabilitation robotic system. Specially, in the case of the manual operation of the robot arm, the user has the burden of cognition and the difficulty for the operation of the robot arm. As a remedy, color vision system for the autonomous performance of jobs is proposed, and four basic desired jobs are specified. By mounting the camera in eye-in-hand type, color vision system for KARES is set up. The desired jobs for picking up the target and moving it to the user's face for drinking are successfully performed in real-time at the indoor environment.

### I. 서 론

1960년 초에 산업용 로봇이 처음 사용된 이후 30여

\* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Department of Electrical Engineering, KAIST)

\*\* 正會員, 韓國電子通信研究院 컴퓨터-소프트웨어 技術研究所 立體情報研究팀

(Multi-dimensional Information Technology Team, ETRI)

接受日字: 1998年3月17日, 수정완료일: 1998年8月10日

년 간 용접, 조립 등 제조를 위한 산업용 로봇(industrial robot)에 대한 연구가 진행되어 왔다. 근래에 들어 로봇의 연구 방향은 산업 분야에서 서비스 분야로 변화되고 있다. 서비스 로봇은 주로 일상적인 인간의 활동과 관련이 있다. 서비스 로봇은 자유롭게 프로그래밍이 가능하고 센서 기반으로 되어 있으며, 수리, 이송, 청소 및 건강 간호 등의 인간의 활동을 유용하게 도울 수 있는 메카트로닉스 장치이다<sup>[1]</sup>. 이러한 서비스 로봇은 재활 로봇(rehabilitation robot), 수술 로봇, 집 지키는 로봇, 수리 로봇, 청소 로봇 등이 있다<sup>[2]</sup>.

서비스 로봇의 일부인 재활 로봇은 노년층 및 지체 장애인의 독립적인 생활을 돕거나 수술 후의 환자의 회복을 돕는 것을 목적으로 한다. 우리나라의 경우 인구의 노령화(65세 이상 노령 인구 : 전체 인구의 5.7%)로 인하여 독립 생활이 힘든 사람(장애인)이 상당히 증가하여 사회적 문제가 되고 있다(그림 1(a)). 또한 선천적인 장애인 외에도 최근에는 ‘산업 재해’ 및 ‘교통 사고’ 등으로 인한 후천적 장애 인구(전체 장애인의 88%)가 증가하고 있다(그림 1(b))<sup>[3]</sup>. 최근의 급격한 과학 기술의 발달에도 불구하고, 이와 같은 노약자와 장애인은 그 혜택을 누리기 힘든 실정이다. 따라서, 과학 기술을 이용하여 노약자와 장애인 등의 상실된 감각을 보충해 주거나 불완전한 활동을 도와주는 시스템의 개발이 필요하다.

연구되고 있다. 재활 로봇은 이동성에 따라 고정 작업장(fixed workstation), 자율 이동형 시스템(autonomously mobile system), 휠체어 부착형 매니플레이터(wheelchair mounted manipulator)로 나눌 수 있다<sup>[4]</sup>.

첫째, 고정 작업장은 사무 환경을 제공하며 테이블 부착형 매니플레이터, 서류용 보조 장치 등을 포함한다. 비교적 덜 복잡하고 저 가격으로 구현할 수 있고 구조화된 환경에서 미리 프로그램이 되어 제어가 용이하고 실행 속도를 증가시킬 수 있다. 또한 정교한 표시 장치 및 보조 장치의 이용이 편리하며 속도가 중요하고 작업의 수가 제한된 전문 작업에 용이하다. 예로 HANDY1, DeVAR(Desktop Vocational Assistant Robot), RAID(Robot for Assisting the Integration of the Disabled)등을 들 수 있다. 둘째, 자율 이동형 시스템은 상당히 자동화 된 시스템으로 사용자의 이동이 없고 조작이 없이 감지, 항해 등의 작업을 수행할 수 있어야 한다. 예로 WALKY가 있다. 셋째, 휠체어 부착형 매니플레이터의 경우 베이스가 움직이므로 비교적 짧은 팔을 사용하고 휠체어 부착 및 분리가 쉬워야하고 구조화된 공간과의 결합이 용이하여야 한다. 휠체어의 좁은 공간적 제한에 의해 표시 장치의 사용이 제한되기도 한다. 예로 MANUS, INVENTAID가 있다.

재활 로봇은 인간과 함께 작업을 수행하게 된다. 산업용 로봇과 비교하면 표 1과 같다. 즉, 작업의 내용에 있어서 산업용 로봇은 고정된 환경에서 반복적인 작업을 수행하는 반면에 재활 로봇은 재 프로그램이 필요한 작업을 수행하게 된다. 사용자의 경우, 산업용 로봇은 숙련된 작업자가 사용하게 되나 재활 로봇은 평범한 사람이 사용한다. 작업 지역의 경우, 산업용 로봇은 대개 사람이 없는 곳이며 재활 로봇은 사람과 로봇이 함께 있는 곳에서 상호 작용한다.

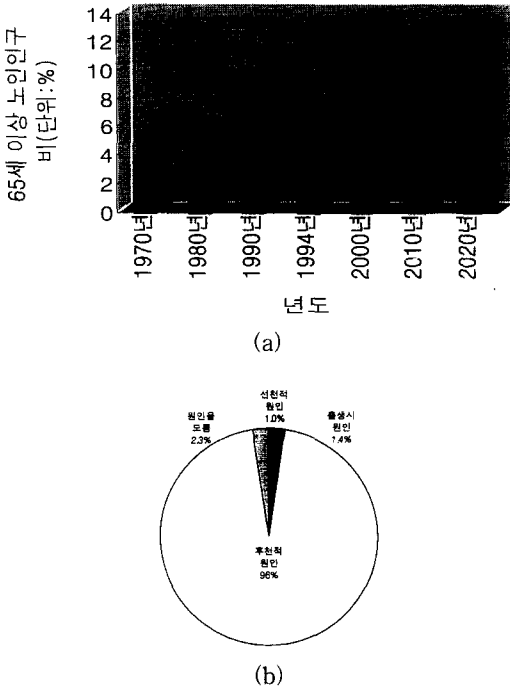


그림 1. 한국 장애인의 실태 (a) 한국의 65세 이상 노인 인구비(1994년부터 추계치) (b) 한국 지체 장애인의 장애 발생 원인

Fig. 1. The statistics of the Korean disabled. (a) The ratio of persons over 65 years (b) The occurrence cause of the Korean disabled

재활 로봇의 역사는 유럽의 경우 20여 년 정도이며 북미나 일본의 경우 10여 년 정도의 짧은 역사를 가지고 있으며 선진 각국에서는 여러 측면에서 매우 활발히

표 1. 산업용 로봇과 재활 로봇의 비교

Table 1. The comparison between industrial robots and rehabilitation robots.

비교 사항 \ 로봇	산업용 로봇	재활 로봇
작업 내용	미리 프로그램된 반복적 작업	재 프로그램이 필요한 작업
사용자	숙련된 기술자	평범한 사용자
작업 지역	대개 사람이 없는 지역	사람과 함께 상호 작용이 가능한 지역

휠체어 부착형 재활 로봇은 다음과 같은 사항들이 필요하다<sup>[5]</sup>. 첫째, 로봇에 대한 수동 또는 직접 제어가 가능해야 한다. 둘째, 다양한 센서를 사용함으로써 성능을 향상시키는 것이 필요하다. 셋째, 로봇을 프로그래밍하고 제어할 수 있는 인터페이스 장치들이 필요하다. 특히, 사용자가 로봇 팔을 직접 제어하는 경우, 사용자의 인지력의 부담이 심하고 계속적인 조이스틱이나 버튼의 사용에 어려움을 느낀다. 그러므로 사소한 로봇의 움직임에 대하여 로봇이 자율적으로 작업을 수행할 수 있는 지능적인 측면이 절대적으로 필요하다. 따라서 휠체어 부착형 재활 로봇의 경우 자동적으로 특정 물체의 자세(pose)를 추정하여 물체를 잡는 등의 능력이 필요하다. 이러한 지능적 시스템을 위해서 비전 시스템을 사용하고자 한다.

본 논문에서는 보조자 없이 노약자와 장애인이 쉽게 이동하며 일상 생활을 하는 것을 가능하게 하기 위하여 전동 휠체어를 근간으로 자체적으로 설계 및 제작된 로봇 팔을 휠체어에 장착한 재활 로봇의 비전 시스템을 중심으로 다루고자 한다. 본 논문의 목표는 KARES의 비전 시스템을 구축하고 가장 중요한 작업인 턱자 위에 놓인 컵을 잡아서 사용자의 입 근처로 이동시키는 작업을 구현하는 것이다. 제2장에서는 직접 개발 중인 휠체어 장착형 재활 로봇 시스템인 KARES에 대하여 소개하고 비전을 이용한 네 가지의 기본적 작업을 정의한다. 제3장에는 휠체어 장착형 재활 로봇을 위한 칼라 비전(color vision) 시스템에 대하여 다룬다. 제4장에서는 비전 시스템으로 작업을 수행하는 실험 및 결과에 대하여 다룬다. 마지막으로, 제5장에서는 결론 및 앞으로 계속 진행될 향후 연구 과제 및 전망에 대하여 기술한다.

## II. KARES(KAIST Rehabilitation Engineering System)

### 1. 개요

KARES는 한국과학기술원에서 개발되고 있는 휠체어 장착형 재활 로봇 시스템이며 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 첫째 전동 휠체어와 로봇 팔 등의 기구부, 둘째 지능적 환경 인식을 위한 비전부 및 제어부, 셋째 시스템에 대한 사용자의 훈련을 도울 수 있는 가상 현실부로 이루어져 있다<sup>[6]</sup>.

현재 전동 휠체어는 미국의 Everest & Jennings사의 "VORTEX"를 사용하고 있으며 이 휠체어에는 그

림 2와 같이 로봇 팔이 장착되어 있다. 자체적으로 설계 및 제작된 로봇 팔의 사양은 다음과 같다. 6 자유도를 가지고 있으며 가변 하중은 그리퍼(gripper)로 잡는 물체의 무게 0.5 kg과 카메라 등의 센서의 무게 0.5 kg을 고려하여 총 1 kg이다. 로봇 팔을 펼쳤을 때의 그리퍼에서 기저까지 최대 길이가 85cm이며 이는 한국표준과 학연연구원 국민 체위 조사 자료의 한국인 남자의 경우를 고려하여 결정되었다. 정확도는 약 3 mm이며 속력의 경우 0.5 m/sec이며 액츄에이터로는 경제성과 제어의 용이성을 고려하여 스텝핑(stepping) 모터를 사용하였다.

연구 및 개발 중인 시스템의 사용자로 팔, 다리의 사용이 불편하여 독립 생활이 힘든 노약자 및 경추 손상자(C4, C5 수준<sup>[7]</sup>) 등의 장애인이 선정되었다. 특히 C4, C5 수준의 경추 손상자의 경우 독립 생활이 곤란하며 공학적인 대책이 요구된다. 본 시스템은 기본적으로 팔과 다리가 부자연스러운 사람이 독립적인 생활을 하는데 도움을 주는 것을 목적으로 한다. 즉, 휠체어에 장착된 로봇 팔과 휠체어는 사용자의 팔과 다리의 역할을 수행하여야 한다.

KARES의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 전동 휠체어에 의한 이동이 가능하다. 둘째, 전동 휠체어에 장착된 로봇 팔을 이용한 독자적인 행동이 가능하다. 셋째, 칼라 비전 시스템 등에 의하여 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 도울 수 있다.



그림 2. KARES  
Fig. 2. KARES.

### 2. 비전을 이용한 기본적 작업

비전을 사용한 시스템에서 필요한 작업을 본 시스템

의 사용자를 대상으로 조사하여 기본적 작업을 그림 3과 같이 네 가지로 정하였다<sup>16)</sup>.

- ① 탁자 위에 있는 물체를 잡는 것
- ② 바닥에 있는 물체를 잡는 것
- ③ 잡은 물체를 입 근처로 이동시키는 것
- ④ 벽에 있는 스위치를 작동시키는 것

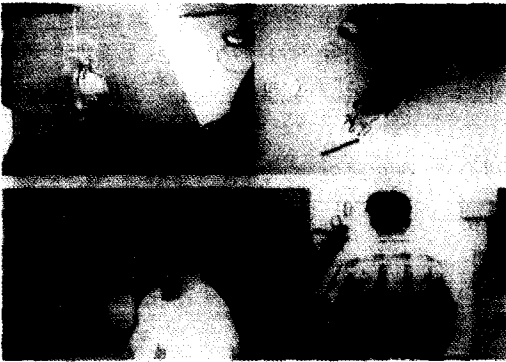


그림 3. KARES의 네 가지 기본적 작업 ① 탁자 위에 있는 물체를 잡기 ② 바닥에 있는 물체 잡기 ③ 잡은 물체를 입 근처로 이동시키기 ④ 벽에 있는 스위치 작동시키기

Fig. 3. Four fundamental jobs for KARES. ① Picking up small objects on the table ② Picking up small objects on the floor ③ Moving objects to the mouth ④ Operating wall switches

첫 번째 작업은 탁자 위에 있는 물체인 컵과 손가락을 로봇 팔의 그리퍼로 잡는 작업이다. 일반적으로 이 작업은 시스템의 사용자가 음식을 먹거나 음료를 마시기를 원할 때 많이 사용되는 작업이다.

두 번째 작업은 바닥에 떨어져 있는 물체를 잡는 작업이다. 전동 휠체어를 사용하는 사람(특히, 사지마비 환자)의 경우 팔과 다리의 대부분이 감각이 없고 운동 능력이 없기 때문에 바닥에 떨어진 물체를 잡는 작업에 상당히 어려움이 있다.

세 번째 작업으로 로봇 팔에 장착된 그리퍼로 물체를 잡은 뒤에 물체를 사용하기 위해서 필요한 작업이다. 예를 들어, 로봇 팔이 음료가 담겨 있고 빨대가 꽂혀 있는 컵을 잡았을 경우 마시기를 원하는 사용자를 위해서는 입 근처로 물체를 이동시키는 것이 필요하다. 다른 예로, 로봇 팔이 필기구를 바닥에서 주웠을 때, 팔이 불편한 사람은 입 근처로 가져가서 필기구를 입으로 물어서 다시 자기 손으로 쥐는 행동이 필요하며 이러한 경

우에 유용하게 사용될 수 있다.

네 번째 작업은 벽에 있는 조명 기구의 스위치 등을 작동시키는 것으로 사용자가 독립적인 생활을 하기 위해서 반드시 필요한 작업이다.

### III. KARES의 제어를 위한 칼라 비전 시스템

본 논문에서는 휠체어 장착형 로봇의 비전 시스템을 구축하고, 네 가지 기본적 작업 중에서 첫 번째 작업인 탁자 위의 컵을 잡는 작업을 자동적으로 수행하고자 한다. 로봇의 제어를 위해서 비전을 이용하여 필요한 정보를 얻어야 하며 실내의 형광등 조명 아래서 실시간으로 제어가 가능해야 한다.

#### 1. 비전 시스템의 구성

비전을 이용한 로봇 제어의 방식은 카메라의 장착 위치에 따라 고정 카메라(fixed camera) 방식과 로봇의 팔 끝(end-effector)에 카메라를 부착하는 아이-인-핸드(eye-in-hand) 방식으로 구분할 수 있다<sup>18)</sup>. 본 논문에서 고려하는 아이-인-핸드 로봇은 카메라와 로봇의 관계가 고정되어 카메라로부터 목표물(target)의 거리만을 측정하면 되고, 로봇의 움직임에 따라서 다양한 해상도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 작업 상황에 따라서 능동적인 영상을 얻을 수 있기 때문에 장애물에 의해서 가려지는 것에 대처할 수 있다. 특히 KARES와 같은 휠체어 장착형 매니플레이터의 경우, 휠체어 몸체에 카메라를 부착할 수 있는 장소가 협소하고, 휠체어가 움직이거나 로봇 팔이 움직임으로서 다양한 영상을 획득할 수 있으므로 아이-인-핸드 방식이 유리하다.

로봇 팔을 제어하기 위한 가장 기본적인 정보는 목표물의 자세이다. 기존의 대부분의 로봇 제어는 미리 입력된 정보를 이용한 단순한 반복 작업으로 이루어진다. 하지만, KARES와 같은 이동형 시스템의 경우 휠체어의 움직임에 따라 작업 환경이 계속하여 변화한다. 그러므로, 로봇을 제어하기 위해서는 목표물에 대한 자세 즉, 3차원(3D)의 위치(position)와 방위(orientation) 정보가 필요하다.

KARES의 비전 시스템은 로봇의 손목 부분에 장착되는 소형 칼라 카메라로부터 영상을 획득하고 이를 처리하는 영상 처리 장치로 구성된다. 즉, 카메라에서 칼라 영상을 입력받아 여러 가지 영상 처리를 수행하여

특정한 물체를 스스로 인식하여 3차원 자세를 추출하게 된다. 자동적으로 수행하고자 하는 작업인 탁자 위에 있는 컵을 잡는 경우는 로봇 팔의 움직임과 로봇 팔에 장착된 카메라의 영상 신호를 이용하여 컵의 자세 정보를 얻고 이를 이용하여 로봇 팔을 제어하게 된다.

## 2. 칼라 비전

기존의 산업 현장에서 사용되는 비전 시스템의 경우, 사용되는 시스템이 잘 동작될 수 있도록 특별한 조명을 사용하는 등의 조직화된 환경(structured environment)을 이용한다. 따라서 흑백 영상을 이용한 기법들이 많이 적용되어 지고 있다. 즉, 영상의 밝기 정보만을 이용하는 경우가 이러한 경우이다.

이와 달리, 본 논문에서는 칼라 영상을 이용하는 칼라 비전 시스템을 사용한다. 특정한 영역을 분리하기 위해 칼라 정보를 사용하는 것은 흑백 카메라에 의한 밝기 정보만을 사용하는 것에 비해 뛰어난 성능을 가진다. 즉, 칼라는 물체의 구성 성분에 의해 결정되어 지는 고유의 특성이므로 흑백 영상에서 얻을 수 있는 밝기 정보에 비해 주위의 조명 등의 영향을 비교적 덜 받게 된다. 칼라 비전 시스템을 사용하면 영상의 밝기 정보와 함께 다양한 칼라 정보를 이용할 수 있으며 영상으로부터 원하는 물체의 특징(feature)을 추출(extraction)할 때 칼라는 훌륭한 분류 요소가 된다. 따라서 본 논문에서는 인식하고자 하는 물체에 칼라 표식(color marker)을 부착한다.

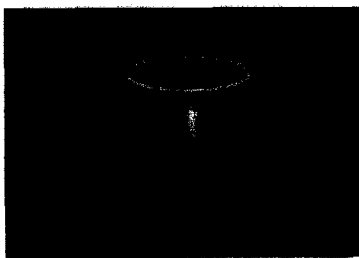


그림 4. 테이블 위에 있는 칼라 표식이 부착된 컵  
Fig. 4. The cup with the color marker on the table.

칼라 표식은 다양하게 구성될 수 있으며 물체에 따라 그 형태와 크기를 변화시켜 사용할 수 있다. 예를 들어, 본 논문에 사용된 일반적인 컵의 경우는 그림 4와 같다. 목표물인 컵의 주위에 적색 표식을 부착하고 손잡이는 녹색 표식을 부착하였다. 이와 같은 경우 적색 표식은 컵의 놓여진 방위에 영향을 적게 받으면서, 칼라 표식의

크기를 다른 형태의 표식에 비하여 크게 할 수 있다. 따라서, 카메라와 물체 사이의 거리를 측정할 때, 표식의 크기 변화를 이용할 경우에 크기가 클수록 변화량이 증가되므로 측정 오차를 줄일 수 있다.

## 3. 목표물의 자세 추정(pose estimation)

목표물의 유무를 감지한 후에, 목표물의 자세(3차원의 위치 및 방위)를 정하는 과정을 목표물의 자세 추정이라고 한다. 예를 들어, 탁자 위에 있는 컵을 잡기 위해서, 탁자 위에 컵이 있는지 유무를 인식하고 탁자 위에 있는 컵의 놓여진 위치와 손잡이의 방위를 추정할 수 있어야 한다.

### 가. 목표물의 감지

로봇이 목표물을 찾기 위해 영상에서 목표물의 유무를 판단하는 것이 가장 먼저 필요하다. 여러 가지 시각적 단서(visual cue)중에 목표물의 형태와 칼라를 이용하였다. 먼저 목표물의 형태 정보를 이용하여 영상을 검색한 뒤에, 다시 칼라 정보를 이용하여 칼라가 일치하는 경우에 목표물을 감지하는 것으로 한다. 순서도는 그림 5와 같으며, 구체적인 방법은 다음과 같다.

먼저, 목표물의 형태 정보를 이용한다. 전체 영상에 대하여 상호관계(correlation)를 통한 매칭(matching)을 이용하여 모델과 실제 영상을 비교하는 방법으로 찾는다. 예를 들어, 목표물이 컵이면, 모델은 컵의 놓여진 방위에 영향을 덜 받기 위해서 컵의 전체 모습을 사용하는 대신에 컵의 바닥 쪽만을 사용하였다. 이와 같은 경우 목표물의 손잡이의 방위에 의한 영향과 크기의 변화의 영향이 상당히 작아져서 적은 수의 모델만으로도 목표물을 찾을 수 있다. 목표물의 형태의 경우 식(1)과 같이 칼라 영상의 휘도(luminance)  $L$ 를 이용하였다.

$$L = (R + G + B) / 3 \quad (1)$$

여기서,  $R$ ,  $G$ ,  $B$  는 RGB 칼라 모델의 적색, 녹색, 청색 성분으로 0~255사이의 값을 가짐.

다음으로, 목표물의 모델과의 상호관계를 통한 매칭 방법에 의해서 전체 영상을 탐색한 뒤에 해당 영역만 윈도우를 취한다. 이 영역에 대하여 칼라 표식이 있는지 확인한다. 칼라 카메라로부터 들어오는 칼라 신호는 RGB 모델로 되어 있거나, 다른 칼라 모델이라도 쉽게 RGB 모델로 변환 할 수 있다. RGB 모델은 목표물을 감지하는 작업을 위한 좋은 모델이 아니다. 왜냐하면 RGB 모델에서 세 신호인  $R$ ,  $G$ ,  $B$ 는 칼라 성분뿐만 아

나라 밝기(brightness)성분을 가지기 때문이다. 따라서 RGB 모델을 그대로 이용할 경우 다른 밝기를 가진 동일한 칼라 성분을 구분하는 것은 상당히 어렵다. 반면에, 인간은 시각 시스템은 다른 밝기에서 다양한 조명에 상관없이 동일한 칼라를 구분할 수 있다. 그러므로, 주위의 조명에 민감하지 않게 칼라 정보를 이용하기 위해서는 밝기 성분을 제거하는 것은 필요하다. 이러한 방법 중에 빠르면서 간단한 방법이 정규화된 칼라(normalized color)를 이용하여 칼라 표식의 칼라 성분을 확인하는 것이다<sup>[9]</sup>.

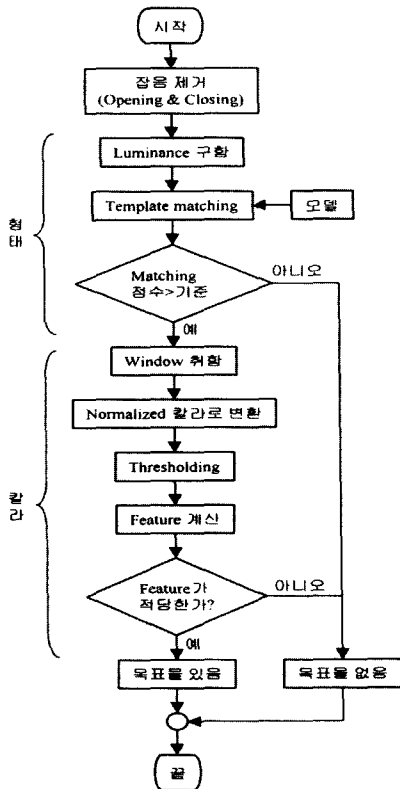


그림 5. 목표물 감지를 위한 순서도  
Fig. 5. Flowchart for target detection.

밝기 성분을 제거하여 조명의 영향에 민감하지 않도록 칼라 성분을 얻기 위해서 식(2), (3)과 같이 정규화하였다.

$$r = \frac{R}{R+G+B} \tag{2}$$

$$g = \frac{G}{R+G+B} \tag{3}$$

이것은 3차원의 공간에서 2차원의 공간으로 매핑되는

효과를 가진다.  $r+g+b=1$  과 같은 관계를 가지므로  $b$ 는 잉여(redundant) 성분이 된다. 이와 같은 방법은 간단하지만 실내 환경에서 비교적 빠른 시간에 주위의 영향을 덜 받으면서 처리가 가능하다.

나. 목표물의 위치 측정

로봇을 이용하여 실시간으로 목표물을 잡기 위해서, 잡고자 하는 목표물과 카메라 사이의 거리(depth) 측정은 상당히 중요하다. 핀 홀(pin hole) 카메라의 투시(perspective) 모델을 이용할 경우에 영상 평면에 임의의 점  $(u, v)$ 에서 거리  $(Z)$ 를 알고 있다면 식(4), (5)와 같이 카메라를 기준으로 한 3차원 위치  $(X, Y, Z)$ 를 구할 수 있다.

$$X = \frac{Zu}{f} \tag{4}$$

$$Y = \frac{Zv}{f} \tag{5}$$

여기서,  $f$  는 카메라의 초점 거리

거리 정보 추출의 대표적인 방법 가운데 하나인 스테레오 광학에는 두 대의 카메라를 이용한 정적 스테레오(static stereo)와 카메라와 움직임을 이용한 스테레오 광학 형태를 이루는 동적 스테레오(motion stereo)가 있다. 동적 스테레오의 경우 한 개의 카메라와 로봇의 움직임을 이용하는 경우로, 카메라를 두 개 이상 사용하지 않으므로 카메라를 로봇 팔의 손목 부에 쉽게 장착할 수 있으므로 편리하다.

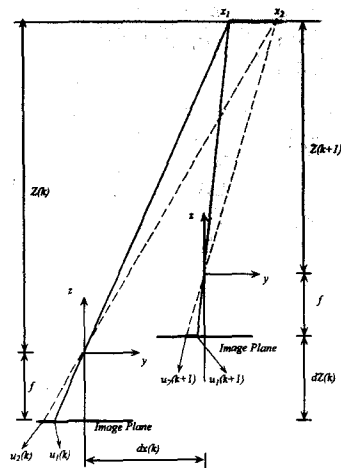


그림 6. 움직임을 이용한 거리의 측정  
Fig. 6. The measurement of depth from motion.

움직임을 이용한 거리 측정 방법은 목표물에 대하여

가까워지면 목표물의 크기가 커지고, 멀어지면 크기가 작아지는 현상을 이용한 것이다. 구체적인 방법은 다음과 같다<sup>[10]</sup>. 그림 6과 같이 핀 홀 카메라 모델을 이용하여,  $k$  순간에서 목표물과의 거리를  $Z(k)$ 라하고,  $k+1$  순간에 목표물과의 거리를  $Z(k+1)$ 이라고 한다. 그 동안 로봇의 움직임을  $dZ(k)$ ,  $dX(k)$ 이라고 하자. 3차원 좌표에서 카메라로부터 거리가 같고, 목표물 내에 위치한 특징 점(feature point)  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$  은 핀 홀 카메라 모델을 이용하면 영상 평면상의 위치에 식(6)~(9)와 같이 투영된다.

$$u_1(k) = \frac{f}{Z(k)} x_1(k) \quad (6)$$

$$u_1(k+1) = \frac{f}{Z(k) - dZ(k)} \{x_1(k) - dx_1(k)\} \quad (7)$$

$$u_2(k) = \frac{f}{Z(k)} x_2(k) \quad (8)$$

$$u_2(k+1) = \frac{f}{Z(k) - dZ(k)} \{x_2(k) - dx_2(k)\} \quad (9)$$

그러면 두 특징 점  $u_1(k)$  및  $u_2(k)$  와  $u_1(k+1)$  및  $u_2(k+1)$  사이의 거리는 식(10)과 (11)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} K(k) &= u_1(k) - u_2(k) \\ &= \frac{f \cdot \{x_1(k) - x_2(k)\}}{Z(k)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K(k+1) &= u_1(k+1) - u_2(k+1) \\ &= \frac{f \cdot \{x_1(k+1) - x_2(k+1)\}}{Z(k+1)} \end{aligned} \quad (11)$$

식(10), (11)에서  $K(k)$ ,  $K(k+1)$ 은 영상으로부터 측정할 수 있는 변수이다. 다음과 가정을 통해서 사전 정보 없이 영상의 변화에서부터 거리를 측정할 수 있다.

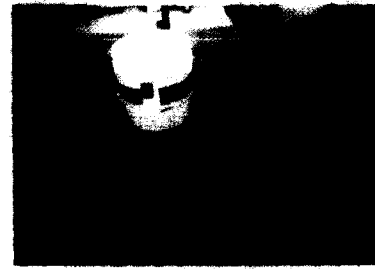
**가정 1** 동일한 목표물 내에 있는 영상 특징이 병진 (translational) 운동이 주를 이룬다고 하면  $dx_1(k) \cong dx_2(k)$ 로 쓸 수 있다.

**가정 2** 두 영상 특징은 거의 같은 거리 상에 존재한다.

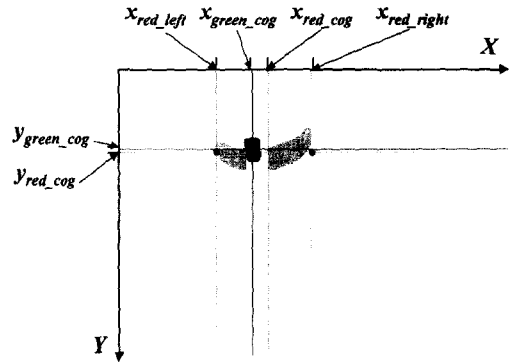
위의 가정으로부터 다음과 같은 거리  $Z(k)$ 를 얻을 수 있다.

$$Z(k) = \frac{K(k+1)}{K(k+1) - K(k)} dZ(k) \quad (12)$$

식(12)를 이용하면 쉽게 목표물과의 거리를 측정할 수 있다. 목표물에 부착된 칼라 표시의 크기에 대한 정확한 모델이 없는 경우에도 목표물에 대해서 로봇 제어에 따라 변화하는 영상 특징들을 이용하여 거리를 측정할 수 있다.



(a) 윈도우가 취해진 영상



(b) 추출된 특징

그림 7. 컵에서의 특징  
Fig. 7. Features on the cup.

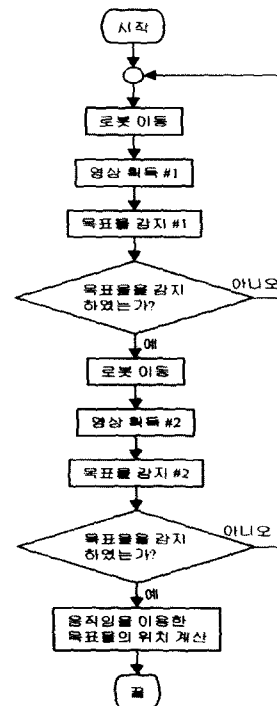


그림 8. 목표물의 위치 추정을 위한 순서도  
Fig. 8. Flowchart for position estimation of the target.

실제 측정을 위해서는 감지된 목표물의 칼라 표식을 특징으로 사용하였다. 즉, 목표물이 컵인 경우 감지된 컵 근처에 원도우를 취하여 적색 및 녹색 표식을 추출하면 그림 7과 같다. 수평 방향의 위치로 붉은 색의 칼라 표식의 가장 왼쪽의 위치 ( $x_{redleft}$ )와 가장 오른쪽의 위치 ( $x_{redright}$ )를 이용한다. 수직 방향의 위치로 붉은 색의 칼라 표식의 수직 방향의 무게 중심 ( $y_{redcog}$ )을 이용하였다. 목표물의 위치 측정을 위한 순서도는 그림 8과 같다.

다. 목표물의 방위 측정

로봇을 이용하여 원하는 목표물을 잡기 위해서는 목표물의 놓여진 방위를 알아야 한다. 조명의 변화에 영향을 덜 받기 위해서 적색과 녹색 칼라 표식의 상대적인 위치 정보를 이용하였다. 영상 평면상에서 수평 방향으로 적색과 녹색 표식을 추출한 뒤에 투영시키고, 적색 표식에 대한 녹색 표식의 무게 중심의 상대적인 위치를 이용하여 방위를 구한다.

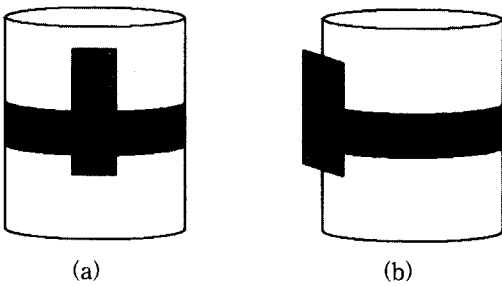


그림 9. 컵의 방위의 분류  
Fig. 9. The classification of the orientation of the cup.

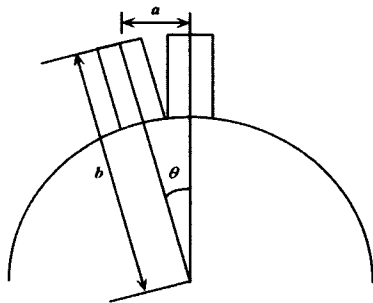


그림 10. 컵의 방위의 측정(컵의 위쪽에서 본 모습)  
Fig. 10. The orientation of the cup.(Top view)

컵이 놓여진 방위에 따라 그림 9와 같이 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 손잡이의 녹색 표식이 컵 둘레에

있는 적색 표식의 사이에 있는 경우이다. 둘째, 손잡이의 녹색 표식이 적색 표식의 사이에 있지 않은 경우이다. 적색과 녹색 표식의 상대적인 위치와 컵의 기하학적 정보를 이용하여 목표물의 방위를 구하였다. 즉, 첫 번째 경우는 그림 10과 같이 컵의 방위  $\theta$ 는  $\sin^{-1}(a/b)$ 가 된다. (단,  $a$ 는 수평방향으로 녹색과 적색 표식의 무게 중심 사이의 거리이며,  $b$ 는 손잡이로부터 컵 중심까지의 거리로서 모델로부터 얻을 수 있다.) 두 번째 경우는  $a$ 와  $b$ 의 크기의 비율에 따라 20, 30, 45, 60도의 네 가지 값 중에 하나로 결정된다. 이는 컵의 방위(컵의 중심으로부터 손잡이 방향)가 카메라의 광 축(optical axis)과 같은 방위일수록 즉, 손잡이의 녹색 표식이 컵 둘레의 적색 표식의 가운데에 있을수록 정확도가 높아지며, 멀어질수록 정확도가 떨어지는 특성을 가진다. 실제 로봇이 컵을 잡을 때 로봇 팔의 구조에 의하여 첫 번째의 경우에 대하여 잡을 수 있는 경우가 많으며, 더 높은 정확도가 필요한 것과 일치한다. 목표물의 방위 추정을 위한 순서도는 그림 11과 같다.

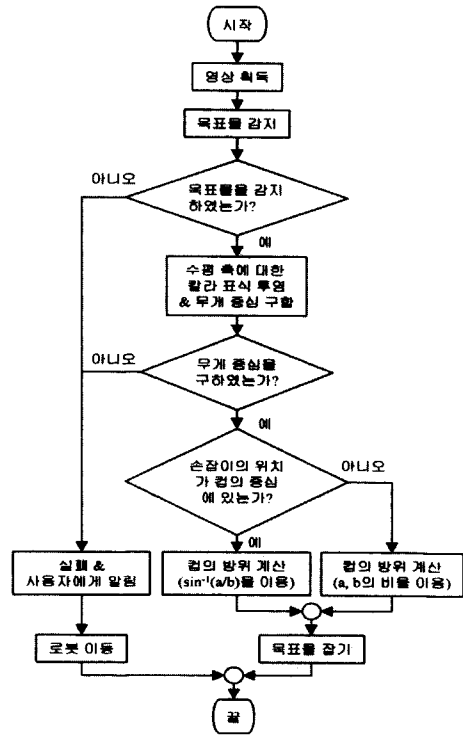


그림 11. 목표물의 방위 추정을 위한 순서도  
Fig. 11. Flowchart for orientation estimation of the target.



IV. 실험

1. 실험 환경

KARES의 전체 블록도는 그림 12와 같다. 사용된 칼라 카메라는 JAI의 M1050 카메라(렌즈: 초점거리 6.5mm, F 5.6)로서 RGB 출력을 가지고 있다. 이 카메라의 크기는 지름이 12mm이며 길이가 90mm의 원통형으로 상당히 소형이며 그림 13과 같이 로봇의 팔 끝에 장착된다. 사용된 프레임 그래버(frame grabber)는 매트록스(Matrox)사의 Genesis보드이며 다음과 같은 특징을 가진다. 4개의 흑백 CCD 카메라 또는 한 개의 RGB CCD 카메라를 연결할 수 있으며 C80 DSP를 장착하고 있어 소프트웨어적으로 원하는 기능을 구현할 수 있다. 카메라로부터의 영상 신호는 640×480크기의 영상이다. 제어용 PC와 비전용 PC는 네트워크를 통하여 연결된다. 따라서, 제어용 PC의 요구가 있을 때마다 비전용 PC는 원하는 결과를 제어용 PC쪽으로 보내게 된다.

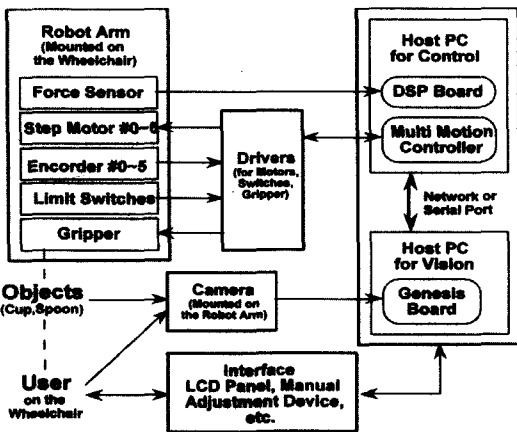


그림 12. KARES의 블록도  
Fig. 12. The overall block diagram of KARES.

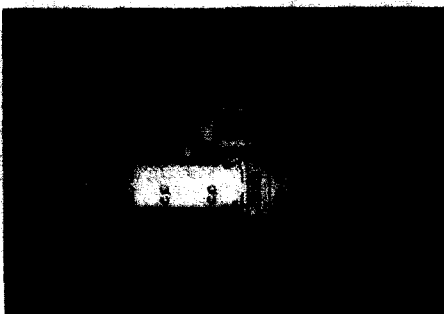


그림 13. 로봇 팔의 말단부에 장착된 칼라 카메라  
Fig. 13. The color camera on the end-effector of the robot arm.

2. 실험

실험은 앞에서 기술한 바와 같이 형광등 조명의 실험실 안에서 이루어 졌다. 실험 순서는 다음과 같다.

- ① 카메라의 보정
  - ② 목표물의 감지
  - ③ 목표물의 자세의 추정
  - ④ 목표물을 획득
  - ⑤ 목표물을 사용자의 입 근처로 이동
- 가. 카메라 보정

먼저 카메라를 통하여 목표물의 위치 정보를 얻기 위해서는 카메라의 보정(Calibration)이 필요하다. 내부 파라미터의 보정을 위해서 일반적으로 널리 사용되는 Tsai의 모델을 이용하였다<sup>[11]</sup>. 보정 패턴을 이용하여 카메라의 내부 변수 중에서 유효 초점 거리  $f$ , 방사 렌즈 왜곡의 중심 좌표  $C_x, C_y$  등을 구하였다. 그 결과는 표 2와 같다. 그 외에 로봇과 카메라 사이의 보정은 측정을 통하여 하였다. 이 과정들은 시스템의 변화가 없을 경우에는 최초로 단 한번만 수행하면 된다.

표 2. 카메라 보정 결과  
Table 2. The result of camera calibration.

$f$	6.080[mm]
$C_x$	311[pixels]
$C_y$	214[pixels]

나. 목표물의 감지 및 자세의 추정

목표물의 감지를 위하여 상호관계(correlation)를 통한 매칭(matching)에 사용된 모델은 그림 14와 같이 목표물인 컵의 바닥 부분으로 128×48의 크기를 가진다. 이 모델을 이용하여 640×480크기의 영상을 탐색한 후 매칭 정도가 제일 높은 곳의 주위로 200×160크기의 윈도우를 취한다. 이 영역에 대하여 정규화된 칼라를 취하여 칼라의 성분이 일정한 문턱 값(threshold level) 이상일 경우 목표물을 탐지한 것으로 여긴다. 문턱 값은 히스토그램(histogram)을 이용하여 자동적으로 정하여진다. 만약 원하는 목표물을 발견하지 못하는 경우는 로봇의 자세를 조금씩 바꾸어서 다시 목표물의 감지하기 위해서 시도한다.



그림 14. 상호관계를 통한 매칭에 사용된 모델  
Fig. 14. The used model for the matching through the correlation.

칼라 표식을 이용하여 거리를 측정하기 전에는 목표물이 영상 평면의 중심에 오도록 로봇 팔을 조정하였다. 이것은 다음과 같은 이유 때문이다. 첫째, 카메라가 로봇 팔의 그리퍼 근처에 부착되어 있으므로 목표물을 잡기 위해서 목표물이 영상의 중심에 가까울수록 유리하다. 둘째, 카메라의 렌즈의 왜곡의 영향을 줄일 수 있다. 실제 사용된 렌즈는 작업 내용을 고려하여 비교적 짧은 초점 거리(6.5 mm)를 가지는 것이다. 일반적인 CCD 카메라의 렌즈는 초점 거리가 짧을수록 시야(field of view)가 넓어지는 특성을 가지는 대신 영상의 가장자리에서의 왜곡이 심해진다. 따라서, 카메라를 사용하여 2D의 영상 정보로부터 3D의 정보를 알아 낼 경우, 렌즈의 중심부의 가까운 곳의 영상 정보를 이용함으로써 짧은 초점 거리를 가지는 렌즈에 의한 영상 왜곡의 영향을 감소시켰다.

감지된 목표물에 대하여 로봇 팔의 움직임을 이용하여 두 장 이상의 영상을 획득하여 목표물의 자세(3차원 위치와 방위)를 추정하였다. 즉 목표물을 감지하였을 때는 목표물을 추적하면서 첫 번째 영상을 획득하고 목표물 쪽으로 접근한 후 두 번째 영상을 획득하여 목표물의 자세를 추정하였다. 만약 탁자가 바다에 거의 수평으로 놓여 있고 탁자의 높이를 대략적으로 알고 있다면, 핵심적인 정보는 그림 15와 같이 기저 축인 {Base Frame}을 중심으로 탁자 위의 컵의 위치 ( $x, y$ )와 탁자 면에 대하여 놓여진 방위 ( $\theta$ )가 된다.

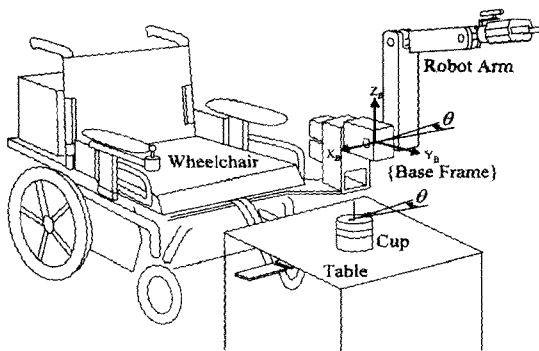


그림 15. 실험환경에서의 좌표계

Fig. 15. The coordination in the experimental environment.

### 3. 실험 결과

그림 16과 같은 조명 등이 변화하지 않는 동일한 환경에서 비전 시스템의 반복 정도(repeatability)를 측정하기 위해, 로봇의 기저를 기준으로 컵의 자세의 추정을

50회 수행하였다. 구체적인 결과는 그림 17과 표 3과 같다. 그림 17은 50번 수행했을 때 컵의 위치를 나타낸 것이다. 표 3에서  $x$ 축과  $y$ 축이 이루는 면은 탁자의 표면에 해당되며, 방위는 컵을 중심을 기준으로 탁자의 수직 방향에 대한 컵의 손잡이의 방향을 나타낸다. 방위 및  $y$ 축 위치에 대하여는 상당히 정확한 결과가 나왔으나  $x$ 축 위치는 약 5 cm 가량의 최대-최소값의 차를 보였다. 이러한 반복 측정 오차는  $y$ 축 위치에 대해서는 목표물이 영상 평면의 중앙에 가까워지도록 로봇 팔을 조정하였기 때문에 그 오차가 작았다. 그러나 카메라와 컵 사이의 거리 방향 쪽인  $x$ 축 위치의 오차는 원래 카메라가 영상 평면에 비하여 광 축 쪽이 거리에 대한 민감도가 낮다<sup>[12]</sup>는 점과 로봇 팔 자체의 기구적인 백래시(backlash)의 영향에 의하여 좀 더 큰 값을 보였다. 그 외에도 고정되어 있는 목표물에 대한 고무 바퀴를 가지고 있는 휠체어에 의한 로봇 팔의 기저의 상대적인 움직임과 조명의 영향에 의한 특징 점의 위치의 미세한 변화 등에도 관련된다.

추가로, 다양한 목표물의 자세에서 휠체어에 사람이 실제 탑승하여 실험을 수행하였다. 그 결과는 표 4와 같으며 앞의 실험 결과인 표 3과 비슷하였다. 그러나, 로봇 팔이 고무 바퀴를 가지고 있는 휠체어에 장착되어 있으므로 인하여 사람이 실제 탑승하는 경우에는 목표물의 위치의 표준 편차가 더 크게 나오는 경우가 있었다.



그림 16. 탁자 위의 컵 잡기에 대한 실험 환경

Fig. 16. The experimental setup about picking the cup on the table.

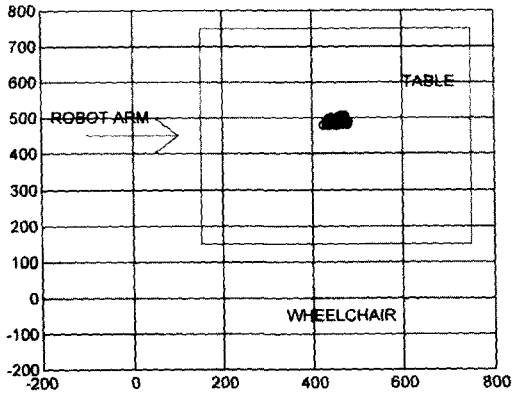


그림 17. 동일한 환경에서 목표물의 위치 측정의 실험 결과 (단위:mm, (0,0)은 로봇의 기저의 위치)  
 Fig. 17. The experimental result of position measurement of the target in the same environment.

표 3. 동일한 환경에서 목표물의 자세 추정의 실험 결과(50회 수행)

Table 3. The experimental result of pose estimation of the target in the same environment.

위치	x축 위치의 평균값 (mm)	453.5
	x축 위치의 표준 편차	12.7
	x축 위치의 최대-최소값	53.1
	y축 위치의 평균값 (mm)	492.3
	y축 위치의 표준 편차	8.2
	y축 위치의 최대-최소값	26.8
방위	방위의 평균값 (deg)	2.7
	방위의 표준 편차	1.3
	방위의 최대-최소값	4.0

표 4. 목표물의 자세 추정에 대한 실험 결과 (25회 수행)

Table 4. The experimental result of pose estimation.

항목	실험	실험#1	실험#2	실험#3	실험#4
위치	x축 위치의 평균값 (mm)	445.2	445.6	453.8	456.5
	x축 위치의 표준 편차	24.7	7.0	6.2	20.6
	x축 위치의 최대-최소값	123.8	25.1	22.4	111.3
	y축 위치의 평균값(mm)	486.2	519.1	611.6	388.1
	y축 위치의 표준 편차	4.5	10.4	3.3	15.0
	y축 위치의 최대-최소값	11.7	56.8	17.5	77.0
방위	방위의 평균값(deg)	1.3	12.3	22.1	-16.5
	방위의 표준 편차	0.5	1.1	0.4	0.8
	방위의 최대-최소값	1.0	5.0	2.0	3.0

로봇 팔이 실제로 컵을 잡는 작업에 대한 실험에서는 형광등 조명이어서 그림 18과 같이 로봇이 탁자 위의 컵을 잡을 수 있는 작업 공간 내에서 무작위로 위치를 바꾸어 가면서 실험하였다. 비교적 빠른 시간(약 10초) 내에 96%의 성공률(50회 수행하여 48회 성공)을 가지며 수행되었다. 실패하는 경우는 실제 로봇 팔이 컵을 잡는 과정에서 비전 시스템의 정보가 정확히 들어오지 않는 경우로서 로봇 팔의 백래시와 조명의 변화 등의 잡음 성분에 의한 것으로 사료된다.

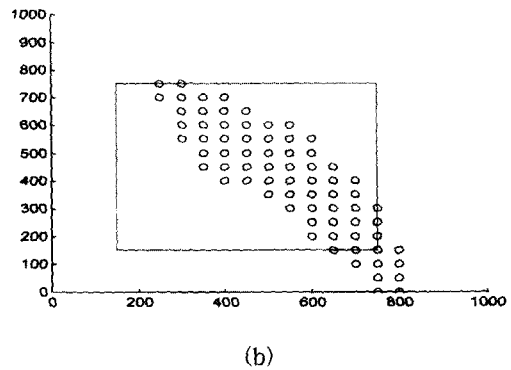
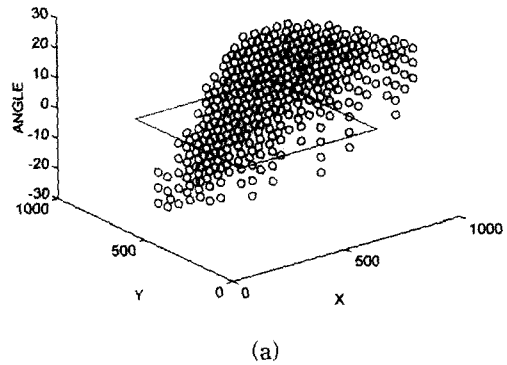


그림 18. 로봇이 탁자 위의 컵을 잡을 수 있는 작업 공간 (단위:mm, 각도는 컵의 손잡이가 로봇을 향할 때가 0도임. 사각형은 탁자의 위치)  
 Fig. 18. The workspace of robot to grasp the cup on the table.

4. 목표물의 사용자의 입 근처로 이동

비전을 사용하여 얻은 정보로 로봇 팔을 제어하여 컵을 잡은 뒤에 컵에 꽂힌 빨대를 이용하여 마실 수 있도록 사용자의 입 근처로 이동시키는 것이 필요하다. 현재는 사용자의 입의 앞쪽으로 컵의 위치를 미리 정하고 그 위치로 로봇 팔이 컵을 이동시키도록 되어 있다. 따라서, 탁자 위의 컵을 로봇이 자동적으로 잡아서 사용자의 입 쪽으로 이동시키는 작업을 수행할 수 있다.

## V. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 로봇의 새로운 분야로 떠오르고 있는 재활 로봇 시스템을 소개하고, KARES에서 가장 핵심적인 부분 중의 하나인 비전 시스템에 대하여 다루었다. KARES는 보조자 없이 팔과 다리가 불편한 장애인과 노약자가 쉽게 이동하며 일상 생활을 하는 것을 가능하게 하기 위하여 자체적으로 설계 및 제작된 로봇 팔을 휠체어에 장착하였다. 재활 로봇 시스템에서 프로그램하고 제어할 수 있는 인터페이스 장치는 매우 중요하다. 특히, 사용자가 로봇 팔을 직접 제어하는 경우, 사용자의 인지력의 부담이 심하고 지속적인 조이스틱이나 버튼의 사용에 어려움을 느낀다. 이에 대한 해결책으로 로봇이 자율적으로 작업을 수행할 수 있도록 칼라 비전 시스템을 제안하고 이를 구축하였다. 로봇이 비전을 이용한 기본적 작업으로 탁자 위에 있는 목표물을 잡는 것을 포함하여 4가지를 정의하였다. 이 작업 중에서 탁자 위에 있는 컵을 잡은 후에 사용자의 입으로 가져가는 것에 대하여 실내 환경에서 실시간에 동작할 수 있도록 실제 구현을 하였다. 특히, 칼라 비전을 사용함으로써 조명의 영향을 덜 받으면서 성공적으로 수행하였다.

추후과제로 비전 시스템이 갑작스러운 조명의 변화나 목표물과 휠체어 사이의 예상치 못한 위치 변화 등에 영향을 받는 문제를 해결하기 위해서, 비전 센서와 함께 힘 센서 등의 다른 센서를 융합(fusion)하는 것이 필요하다. 이를 이용할 경우, 다양한 목표물에 대하여 성공률을 더 향상시킬 수 있으며, 벽과 바닥에 대한 작업으로 쉽게 확장시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 휠체어에 앉아 있는 사용자가 로봇 팔을 쉽고 편리하게 사용할 수 있도록 장애 정도에 따른 음성 인식을 포함한 다양한 사용자 인터페이스 기능(multi-modal user interface)을 추가할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] K. Kawamura, R. Pack, M. Bishay, M. Iskarous, "Design Philosophy for Service Robots", *Robotics and Autonomous Systems*, vol.18, no.1~2, pp.109~116, July, 1996.
- [2] Z. Bien, W. Zhu, "Service Robotics with Special Attention to Surgical Robots and Rehabilitation Robotics", *KITE Journal of Electronics Engineering*, vol.7, no.1, pp.13~24, 1996.
- [3] 정기원, 권선진, 제훈방, "1995년도 장애인 실태 조사", *한국보건사회연구원 연구보고서 95-15*, 1995.
- [4] H. Kwee, "Rehabilitation Robotics-Softening the Hardware", *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol.14, no.3, pp.330~335, 1995.
- [5] G. Bolmsjo, H. Neveryd, and H. Efrting, "Robotics in Rehabilitation", *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol.3, no.1, pp.77~83, 1995.
- [6] 송원경, 김종명, 이희영, 김종성, 윤용산, 변증남, "KARES : 장애인과 노약자를 위한 지능형 재활 로봇 시스템", *제12차 한국자동제어학술회의 논문집*, pp.1541~1544, Oct. 1997.
- [7] 소희영, 김봉욱, "재활 간호", 현문사, pp. 229~237, 1995.
- [8] S. Hutchinson, G. D. Hager, P. I. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. RA-12, no.5, pp.651~670, Oct. 1996.
- [9] J. Yang and A. Waibel, "A Real-Time Face Tracker," *Proceedings of WACV'96*, pp.142~147 (Sarasota, Florida, USA) <http://www.cs.cmu.edu/~yang/papers/wacv96.ps.gz>.
- [10] 박종철, "아이 인 핸드 로봇에서 영상 추적을 위한 3D위치 인식에 관한 연구", *한국과학기술원 박사학위논문*, 1996.
- [11] Roger Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. RA-3, no.4, pp.323~344, August 1987.
- [12] A. Azarbajegani, A. P. Pentland, "Recursive Estimation of Motion, Structure, and Focal Length", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.17, no.6, pp.562~575, June 1995.

## 저 자 소 개

宋 原 慶(正會員) 第 35卷 S編 第 3號 參照

1996년 3월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학 중. 주 관심분야는 로봇 시각 제어, 재활 공학 시스템, 서비스 로봇, 실시간 비전 등임.



李 熙 暎(正會員)

1989년~1992년 한국전기통신공사 연구개발단 연구원. 1998년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사. 주 관심분야는 재활 공학 (Rehabilitation Engineering), EEG, EMG 신호를 통한 인체신호 처리 및 해석, 로봇 비전, Time-Frequency 해석, 순시주파수 동정화 이론 등임.

金 鍾 成(正會員) 第 34卷 C編 第 2號 參照

1997년 2월~현재 한국 전자통신연구원 컴퓨터-소프트웨어 기술연구소 입체정보 연구팀 선임 연구원. 주 관심분야는 재활 공학(Rehabilitation Engineering), 패턴 인식, Machine Vision, Intelligent System (Fuzzy, 인공 신경망), 가상현실 등임.

卞 增 男(正會員) 第 30卷 B編 第 10號 參照

현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수.