Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:3 (2018) 271~277

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.271

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Special Issue : Seoul Tech Capstone Design

스테레오비전과 6축 매니퓰레이터를 이용한 양팔 서비스 로봇 개발

이강민[a], 나산마로[a], 박재훈[a], 안기원[a], 이치범[a*]

Development of a Dual-arm Service Robot Using Stereo Vision and 6-Axis Manipulators

Kang-Min Lee[a], San-Ma-Ro Na[a], Jae-Hoon Park[a], Ki-Won Ann[a], Chibum Lee[a*]

[a] *Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	1	April	2018
Revised	24	May	2018
Accepted	31	May	2018

Keywords:
Dual robot arm
Service robot
Stereo Vision
6 axis manipulator
Inverse Kinematics

ABSTRACT

Entering the 4th industrial revolution, demand for unmanned automation and robots is increasing every year. In many areas, the use of collaborative robots which can work with humans is tested to reduce labor costs. As a senior design class project, we have developed a low-cost service robot consisting of a stereo vision system and two 6-axis manipulators and grippers. The service task is set to serve beverages to humans, which can be used in unmanned coffee shops. The stereo vision system is used to identify coordinates x, y, z of objects. The detection algorithm was developed to detect the objects. The design and manufacturing of both arms and grippers as well as the control algorithm for motion and grasping objects is described. The precision performance of the stereo vision processing and of the robot arms was validated with experiments.

1. 서 론

최근 4차 산업혁명으로 인해 공장의 자동화가 가속되고 산업에 필요한 로봇들의 수요가 매년 증가하고 있다. 기업들은 로봇을 이용해 정밀도 및 생산성의 향상과 인건비 절감 효과를 얻을 수 있다. 이에 힘입어 세계 각국에서 리쇼어링(reshoring) 현상이 일어나고 있다. 전 세계 로봇시장의 60% 이상은 주로 크기가 크고 고비용, 고성능의 산업용 로봇이 차지하고 있으며 국내 로봇 시장의 경우 산업용 로봇이 80% 이상 차지하고 있다. 또한, 세계 곳곳에서는 산업용 로봇뿐만 아니라 다양한 서비스를 제공하는 로봇들이 등장하고 있는데, 가정용, 취미, 재활 및 교육 등에 사용되고 있다. 이들은 산업용 로봇보다는 비교적 작은 크기와 낮은 가격대를 형성하고 있다.

본 연구에서는 학부 캡스톤 디자인 프로젝트로 소형의, 저비용 서비스 로봇의 개발함으로써 설계 및 가공, 제어, 영상 처리 등 서비스 로봇의 개발에 필요한 전 과정에 대해 기본적인 학습을 수행한 과정에 대해 기술하였다. 현재 시중에 나와 있는 로봇 팔을 이용하는 제품들은 주로 교육 및 연구용, 취미용, 특정 서비스를 수행하는 로봇 등으로 구성되어있다. 주로 서보 모터(servo motor) 또는 스테퍼 모터(stepper moto)를 사용하였으며, 로봇 팔의 자유도와 작업 반경 또한 다양하다. 가반하중(payload)은 사용하는 모터의 출력과 작업 반경 및 자체 하중에 따라 결정된다. 각각의 로봇들은 목적에 맞추어 다양한 가반하중을 가지며 이것은 로봇의 가격과 밀접한 관계를 가진다. 자료조사를 토대로 경제적인 비용을 고려하여 구현할 로봇 팔의 성능은 작업반경 400 mm, 가반하중 800 g이다. 이를 위해 7bot[1]과 Dobot[2]을 구매하여 동작, 분해 및 조립,

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9667
Fax: +82-2-974-8270
E-mail address: chibum@seoultech.ac.kr (Chibum Lee).

분석을 수행하였다.

본 연구 개발의 최종 목표는 사람에게 서비스를 제공할 수 있는 양팔 로봇의 개발이다. 수행할 동작은 병에 담긴 음료를 컵에 따르고 사람에게 제공하는 것이다. 로봇 팔 개발 외에도 해당 동작을 수행하기 위해 필요한 것은 스테레오 비전 시스템과 역기구학 해석, 컴퓨터와 제어기 간의 통신이다. 스테레오 비전 시스템으로 음료병과 컵의 위치를 파악하며 역기구학 해석을 통해 해당 좌표들로 이동하기 위해 각 로봇 팔의 모터들을 어떻게 제어해야 할 지 계산한다. 그 뒤 컴퓨터와 제어기 간의 통신을 이용해 적절한 경로[3]로 로봇 팔과 그리퍼를 움직인다.

2장에서는 로봇의 전체 시스템 구성에 대하여 논의한다. 3장에서는 스테레오 비전을 이용한 영상처리 방법에 대해, 4장에서는 로봇 팔과 그리퍼의 설계와 제작을 다룬다. 5장에서는 로봇의 제어부에 대해 설명하고, 6장에서 비전시스템과 로봇 팔 동작의 정밀도 실험에 대해 설명한다.

2. 전체시스템의 구성

스테레오 비전을 이용한 6자유도 양팔 서비스 로봇은 스테레오 비전을 이용해 물체의 위치를 파악하고 로봇 팔과 그리퍼를 움직여 사람에게 서비스를 제공하는 로봇이다. Fig. 1에서와 같이 비전과 로봇 팔, 그리퍼 그리고 전체 시스템을 연결시켜 주는 통신 및 제어 부분으로 구성 되어있다.

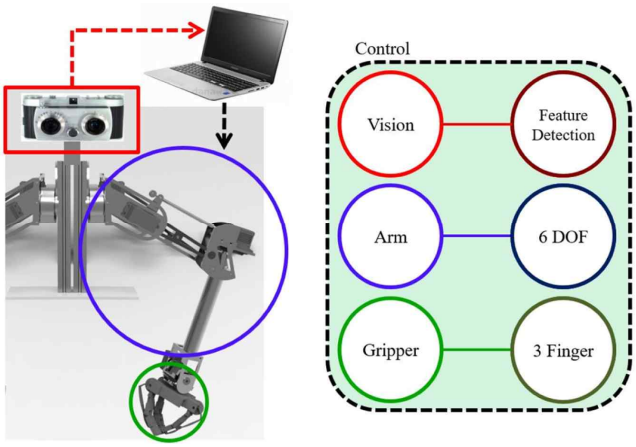


Fig. 1 System configuration

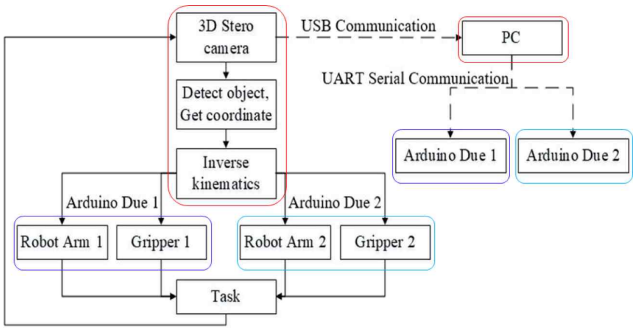


Fig. 2 Flow Chart of system operation

로봇은 Fig. 2과 같은 순서로 작동한다. 먼저 PC에서 스테레오 비전으로 물체의 위치를 파악한다. 영상처리를 통해 얻어낸 좌표로 로봇 팔을 이동시키기 위해 서보 모터의 각도 값을 계산해야 한다. 이를 위해서 역기구학 해석을 통해 로봇 팔의 위치와 자세제어를 위한 6개의 각도 값의 계산을 수행한다. 마지막으로 로봇 팔과 그리퍼를 제어하기 위한 데이터(data)를 좌, 우 각각의 아두이노(Arduino)로 송신하고 적절한 경로를 따라 로봇은 서비스를 수행한다. 모든 과정은 하나의 PC에서 진행되며 PC와 두 개의 아두이노 간에는 UART (universal asynchronous receiver/transmitter) 직렬 통신을 사용한다.

3. 영상 처리

양팔 서비스 로봇의 동작을 진행하기 전에 우선적으로 대상이 되는 물체의 위치를 파악하여야한다. 영상을 이용하여 동작의 대상이 되는 물체를 판단하고, 3차원 정보를 획득하기 위하여 스테레오 비전을 이용하였다. 본 연구에서는 저가의 광각 웹캠(USB100W07M-MHV100, ELP사) 2개를 이용하여 스테레오비전을 구성하였다.

영상 처리에서 처음 시도한 방법에서는 Fig. 3과 같은 좌우 이미지로부터 Fig. 4와 같은 깊이 지도(disparity map)를 생성한 뒤 이를 삼차원 공간상에 투영 시킨 포인트 클라우드(point cloud) 상에서 대상물체의 형상에 해당하는 부분만을 도출하는 것이었다. 하지

Fig. 3 Left and right raw image

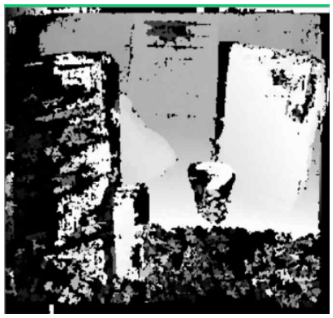


Fig. 4 Extracted disparity map

만 좌우 측정 이미지 전반에 대해 깊이지도를 구하는 방법은 대상 사물의 특징이 두드러지지 않거나 복잡한 이미지의 경우, 특징점을 매칭(matching)하는 과정에서 연산 시간이 오래 걸렸으며, 매칭 에러가 발생하는 문제가 있었다.

이에 따라, 본 연구에서는 좌, 우 2D 이미지에서 각각 대상 물체의 형상 특징을 이용하여 중점을 도출한 뒤 그 중점만을 삼각화 공식에 대입하여 공간 좌표를 도출하는 방향으로 연구를 진행하였다.

좌표추출 과정은 Fig. 5의 순서로 진행된다. 먼저 스테레오 켈리브레이션(calibration)을 통해 획득한 카메라 내, 외부 행렬을 이용하여 좌, 우 이미지를 스테레오 조정(rectification)시킨다. 이후 왜곡 보정(undistortion) 및 케니 엣지 검출(canny edge detection) 등의 전처리 과정을 거쳐 좌, 우 이미지에서 물체의 중점을 얻고 이를 삼각화 공식에 대입해 x, y, z 좌표를 추출한다.

켈리브레이션(calibration)[4]을 위해서 MATLAB의 스테레오 캘리브레이션 도구를 이용하여 내외부 변수를 찾았고, 다음과 같은 과정으로 진행하였다.

1) 입력되는 이미지 촬영에 20×20 체크보드(check board)를 사용한다.

2) 카메라로부터 워크스페이스(workspace) 상의 물체까지의 거리 범위 주변에서 촬영된 이미지를 입력한다.

3) 다양한 앵글(angle)의 체크보드 사진을 최소 60장 이상 입력하였다.

4) RMS (Root MeanSquare) 오차 값이 큰이미지를 선행적으로 제외하였다.

5) 광각카메라로 촬영된 이미지를 어안렌즈(fisheye)로 설정하여 입력하였다.

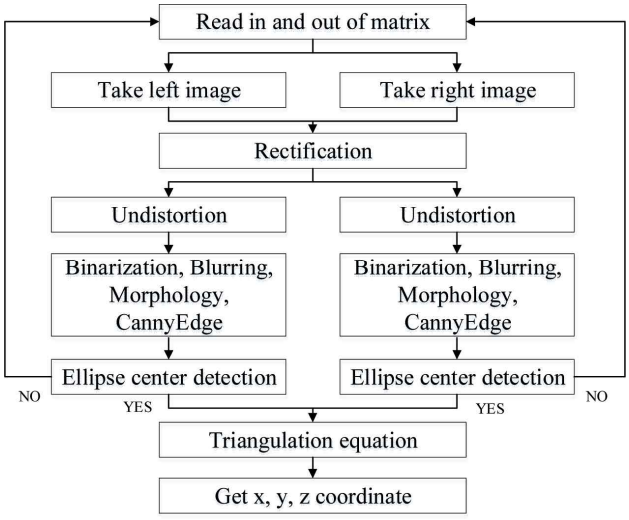
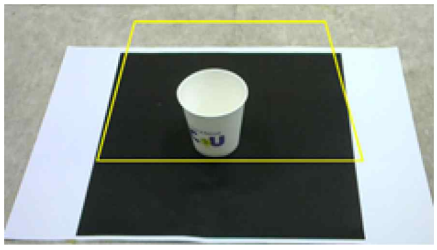


Fig. 5 Stereo vision processing algorithm

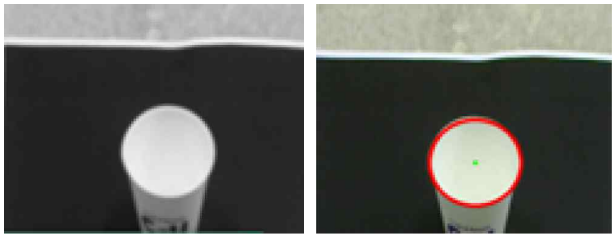
캘리브레이션 이외의 영상처리 과정은 C++을 이용하였다. 서비스 테스크로 음료를 서빙하는 것이므로, 영상 검출 대상 물체로 컵과 병을 설정하였다.

컵의 타원 중심 검출을 위하여 초기에는 Fig. 6(a)와 같이 관심영역을 Fig. 6(b)와 같이 투영변환(perspective transform)한 후 허프서클변환(hough circle transform)으로 Fig. 6(c)와 같이 원을 찾은 뒤 원본 이미지에 역 투영 변환 시켜 원의 중심을 도출하였다. 이 경우 전체 처리 과정에 0.5 초 이상의 시간이 소요되었고, 역 투영 변환 과정에서 오차가 빈번히 발생하였다. 알고리즘을 수정하여 블랍 검출(blob detection)를 시도하여 원본 이미지상의 타원을 검출하였는데 이때 면적(Area), 임계점(Thresholds), 원형도(circularity), 관성비(inertia), 볼록함(convexity) 등을 고려하였다. 카메라로 촬영한 전체 사진에서 물체를 파악할 때 Fig. 7과 같이 지면, 사람의 손과 같은 부분들을 제외하고, 추종하는 타원만을 검출하였다.

병의 경우 Fig. 8(a)와 같이 음료병에 빨간색 띠를 두르고, 촬영한 이미지를 HSV(hue-saturation-value)변환하였다. 이때 붉은색에 해당하는 부분만을 Fig. 8(b)와 같이 이진화 시켰고, 이를 레이블링(labeling)시켜 면적이 가장 큰 레이블의 중점을 도출하였다.

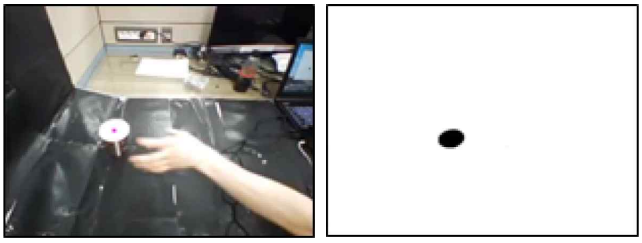


(a) Selected region of interest



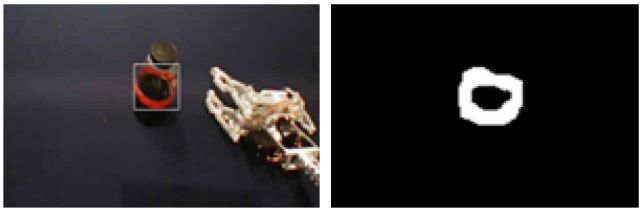
(b) Warped image (c) Detected circle

Fig. 6 Cup detection with circle detection algorithm



(a) Original image (b) Blob image

Fig. 7 Cup detection with blob transform



(a) Bottle with red ring (b) Binary image

Fig. 8 Bottle detection with HSV transform

상기의 알고리즘을 통하여 좌우 이미지에서 찾은 각각의 픽셀 좌표를 삼각화 공식에 입력하여 컵과 병의 3차원 좌표를 안정적으로 찾을 수 있었다.

4. 로봇 팔과 그리퍼의 설계 및 제작

4.1 로보팔의 설계 및 제작

로봇팔은 좌우측 각각 6축 매니퓰레이터를 수평으로 부착하는 것으로 하였다. 성인의 팔길이는 약 600 mm이나, 모터의 용량과 비용을 고려해서 아동의 팔길이에 해당하는 최대 신장 길이는 400 mm, 가반하중은 800 g을 목표로 하였다. 모터의 하중 부담을 줄이고 페이로드를 확보하기 위해 Fig. 9과 같이 ABB[5] 사의 수직다관절 산업용 로봇이 사용하는 관절 구성(롤-피치-피치-롤-피치-롤)을 이용하였으며, 4절 링크[6] 구조를 도입하였다. 해당 구조의 장점은 1, 2, 3번 모터를 기구 하부에 위치시켜 자유도는 그대로 유지하면서 모터의 하중이 발생시키는 토크를 줄일 수 있다는 것이다. 설계에 7bot[1]을 참조하였으며, 목표로 하는 페이로드를 확보하기 위해 로봇 팔 자체 하중을 최대한 줄이려고 노력하였다. 불필요한 프레임의 두께를 최소한으로 줄였으며, 기구상 필요하지 않거나 강도에 크게 영향을 미치지 않는 부분은 제거하였다. 설계 과정에 필요한 모터의 선정에 대해서는 다음절에서 자세히 기술하였다.

모터 이외에 주요 부품으로는 프레임, 중공 실린더(cylinder) 및 베어링(bearing)들이 있다. 프레임과 중공 실린더의 경우, 설계 후 알루미늄을 가공하여 제작하였고, 가공품에 맞추어 각 베어링들을 선정하였다. 프레임 설계 시에는 목표하는 작업공간과 기구의 전체적인 크기 그리고 모터와의 결합 등을 우선적으로 고려하였다. 절곡 가공이 어려우므로, 모든 부재는 판재를 이용하여 체결하는 구조로 설계하였으며, 직접 가공 제작하였다. 로봇 팔의 경우 경량화를 하는 과정에서 링크 부분에 비틀림이 발생하여 링크 양 끝과 중간 부분을 알루미늄 봉으로 보완하였다.

4.2 모터 선정

로봇 팔 모터의 페이로드를 계산하기 위해 동하중(dynamic load) 해석을 수행하였다. Fig. 10에는 로봇 팔을 이루고 있는 6개의 서보 모터와 각 번호가 표시되어 있다. 모터를 선정하려면 필요한 토크를 알아야하므로, 로봇 팔에 중력이 작용하고 엔드 이펙터(end effector)에 목표 가반하중인 800 g를 부착하고, 이를 이동하는 해석을 수행하였다. Autodesk사의 Inventor를 이용하여 로봇의 각 파트(part)를 설계하고, 조립(assembly) 모델을 구성하였고, 실제 가공에 사용된 재료인 알루미늄 6061의 물성치를 입력하였다. 모터로는 가볍고 저렴한 RC 서보 모터를 대상으로 검토하였으며, 이 과정에서 모터의 중량이 큰 영향을 미치므로, 모터의 선정을 가정하여 중량을 입력한 후에 필요 토크를 계산하여 확인하는 과정을 반복하였다. 최종적으로는 Hitec사의 HS-M7990TH (1, 2, 3, 4번)와 HS-4245MG(5, 6번) 두 종류를 선정하였다. HS-M7990TH의 스톨 토크(stall torque)는 44 kgf·cm, HS-4245MG의 스톨 토크는 5.5 kgf·cm이다.

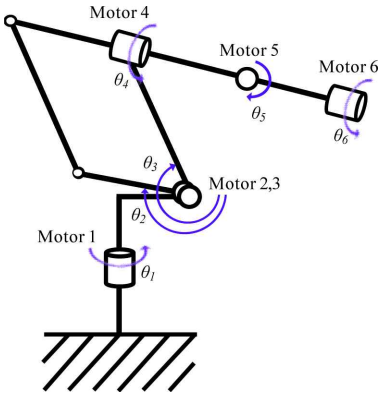


Fig. 9 6 axis manipulator structure with 4 bar linkage

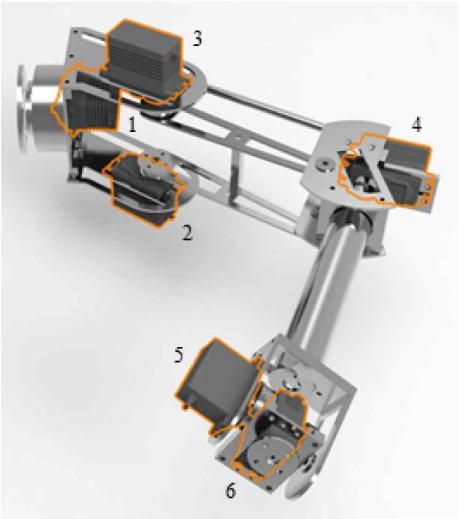
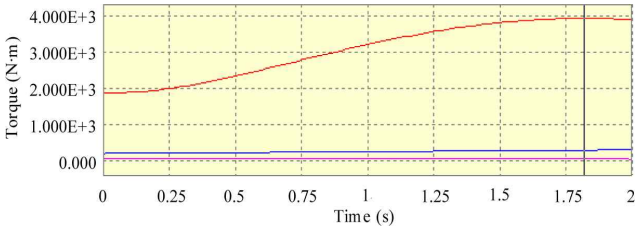
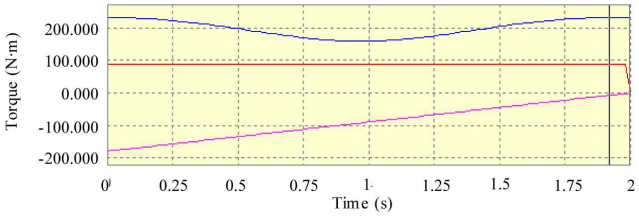


Fig. 10 Robot arm design with motor numbers

최종 선정한 조합에 대하여 동하중을 해석한 결과는 Fig. 11과 같다. 양팔 로봇의 수평 장착 위치에서 앞으로 팔을 펼친 자세에서 HS-M7990TH의 경우 1번 모터를, HS-4245MG의 경우 5번 모터에 가장 큰 모멘트(moment)가 작용하게 된다. 1번의 경우 50



(a) Torque of 1st motor



(b) Torque of 5th motor

Fig. 11 Simulation result with Inventor

deg/sec로, 5번 모터의 경우 90 deg/sec로 아래에서 위로 구동할 때에 축에 걸리는 토크(torque)를 해석을 통해 계산하였다. Fig. 11(a)은 1번 모터 축에 걸리는 모멘트를 계산한 결과로, 최대 토크는 3,926.83 N·mm (40.04 kgf·cm)이다. 측정된 최대 토크가 선정한 모터의 스톨 토크를 넘어서지 않으므로, 해당 모터의 선정이 적절함을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 위와 동일한 조건과 방법으로 5번 모터 축에 걸리는 모멘트를 측정한 결과이다. 이 때 최대 토크는 2.37 kgf·cm이며, 선정된 모터의 스톨 토크보다 작으므로, 모터의 선정이 적절하였음을 확인할 수 있다.

4.3 역기구학

Fig. 12은 로봇 팔의 좌표계이고 Table 1은 해당 좌표계에 따른 D-H 파라미터이다. 기존 논문을 통해 도출된 D-H 파라미터 값들과 변환행렬식을 이용하여 최종 변환행렬인 T_H[7]를 구할 수 있다. 이를 이용해 영상처리로부터 얻어진 대상물의 위치 좌표로 로봇 팔을 이동하기 위해 각각의 모터의 요구 각도 θ_1~θ_6를 계산한다.

4.4 그리퍼의 설계 및 제작

그리퍼는 Robotiq사의 세 손가락 그리퍼(Three finger gripper[8]) 형상을 참고하였으며, 각 손가락을 구동하기 위해 소형 DC 감속기어 모터(geared DC motor) 3개를 사용함으로써 파지 시의 안정성을 확보 하였다. Fig. 13에서와 같이 모터와 축에 각각 베벨 기어(bevel gear)를 고정시켜 모터의 동력을 수직으로 전달하는 구조이다. 기어는 각 손가락 관절로 동력을 전달하여 손가락의 마디마디가 굽혀지게 한다. 손가락의 마찰력 확보를 위해 손가락 마디 부분에 실리콘 패드를 부착하였다. 이를 통해 물체가 미끄러져 떨어지는 것을 방지하였다. 그리퍼의 크기는 약 100×80×110 mm, 무게는 250 g이다.

Fig. 14는 완성된 양팔 서비스 로봇의 사진을 보여준다.

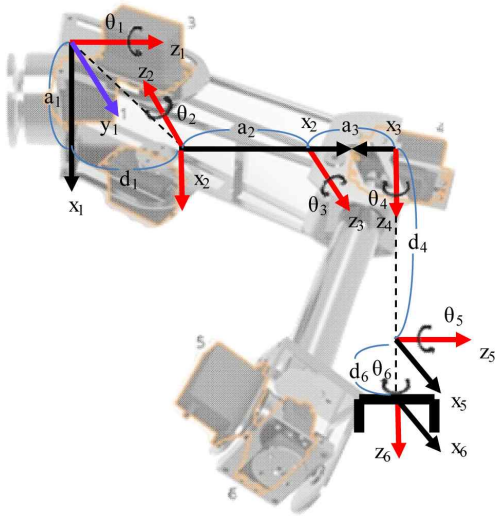


Fig. 12 Robot arm coordinate system

Table 1 D-H parameters of robot arm

Joints	θ	d	a	α
1	θ_1	d_1	a_1	$\pi/2$
2	$\theta_2+\pi/2$	0	a_2	π
3	$\theta_3+\pi$	0	a_3	$\pi/2$
4	$\theta_4+\pi/2$	d_4	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$\pi/2$
6	θ_6	d_6	0	0

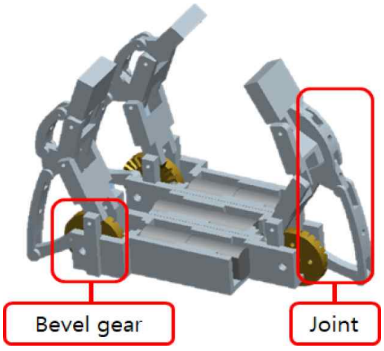


Fig. 13 Model for gripper

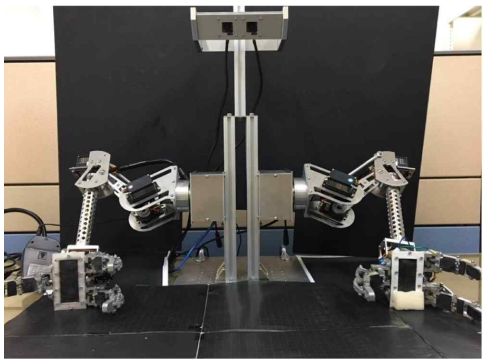


Fig. 14 Dual arm service robot

5. 제어시스템

로봇의 제어는 아두이노 듀(Arduino Due)와 전용 모터 쉴드(motor shield)를 사용한다. 로봇 팔과 그리퍼 한 쌍에는 6개의 RC 서보 모터와 3개의 DC 모터가 있으며, 그리퍼의 DC 모터 3개는 동시에 같은 방향으로 동작하도록 제어하면 된다. 따라서 아두이노 듀 2개를 사용하여, 각각이 왼쪽과 오른쪽의 로봇 팔 및 그리퍼 두 쌍을 제어한다. 이를 위해 2개의 DC모터와 16채널(channel)의 서보 모터를 한 번에 제어할 수 있는 아두이노 전용 모터 쉴드(shield)를 사용하였다.

PC 통신 제어 시스템은 C++ 라이브러리인 MFC (Microsoft Foundation Class)를 이용해 개발한 통신 프로그램에 의해 구동된다.[9] 해당 프로그램은 영상처리로부터 받은 위치를 역기구학으로 풀어서 좌/우측 6개의 서보 모터에 필요한 각도를 각각의 아두이노에 전달한다. 이를 위해 6개의 숫자를 구분해서 송신하는 것, 두 개의 팔을 동시에 움직이기 위해 두 개의 통신 포트(port)를 동시에 열고 각각 데이터를 송신 할 수 있어야 하는 것, 송신하는 데이터를 수신하는 아두이노 펌웨어(firmware)에서 인식하기 수월하도록 프로토콜을 설정하는 것을 중점적으로 고려하였다. PC 프로그램에서는 6개의 각도를 한 번에 입력 및 송신하기 위해 ‘,’를 기준으로 문자열을 분리 후 배열에 저장하는 함수를 이용해 숫자들을 송신하는 구조로 프로그램을 작성하였다. 두 개의 아두이노와 데이터를 송수신하기 위해 통신 클래스(class)와 통신 쓰레드(thread)를 두 개 만들어서 두 개의 포트와 개별적으로 데이터 송수신이 가능하도록 프로그램을 작성하였다.

아두이노 펌웨어(firmware)에서는 데이터가 수신되는 시점을 정하기 위해 ‘254’ 즉, 16진수로 0×FE를 시작 비트(start bit)로 정하고 시작 비트 이후에 6개의 각도가 차례로 수신되어 배열에 저장되는 구조로 작성하였다. 배열에 저장된 각도 값들을 6개 모터의 목표 각도로 선언하고 프로그램 내부에서 현재 각도와 목표 각도를 비교하면서 모터를 단계별로 조금씩 이동할 수 있도록 하였다.

6. 실험 검증

6.1 영상 처리 정밀도 측정

스테레오 비전의 정밀도를 측정하기 위해 Fig. 15와 같이 카메라를 눕혀 직각 좌표계를 구성한 후 실험하였다. 좌표계의 x, y 원점은 좌측 카메라 렌즈의 중심이며, z는 측정되는 평면으로부터 카메라까지의 높이이다. 카메라의 높이인 z 값을 일정하게 유지하며 컵의 위치를 이동 및 측정하였다. 이 때 원점으로부터 컵 중심까지의 실제 거리와 스테레오 비전을 이용해 측정한 거리의 오차를 구하였다. 결과는 Fig. 16과 같다. 카메라로부터 Z 축 기준 400~700 mm 구간의 점들을 측정하여 실제거리와 비교해 보았을 때 400~500 mm의 구간에서 가장 낮은 오차인 2 mm의 평균 오차가 측정되었다. 이는 로봇 팔의 워크스페이스 내에서 물체를 잡기에 충분히 작은 오차이다.

Fig. 15 Experimental setup of stereo vision

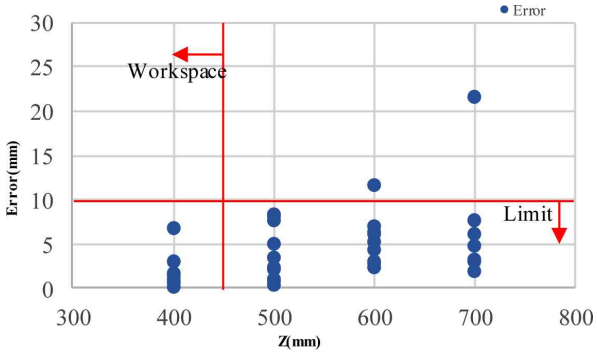


Fig. 16 Measured vision error

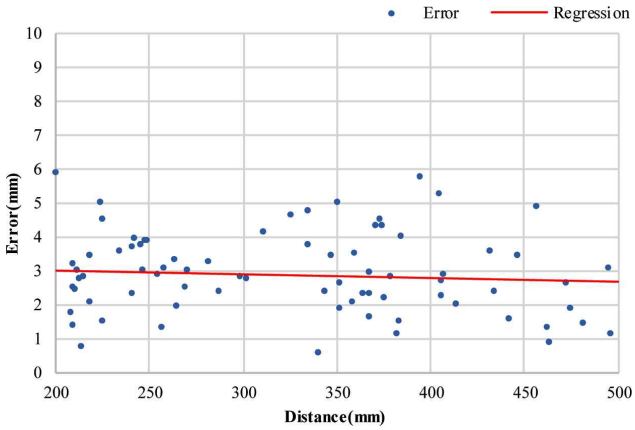


Fig. 17 Measured motion error

6.2 로봇 팔 동작 정밀도 측정

로봇 팔 동작의 정밀도를 측정하기 위해 다음과 같은 실험을 수행했다. 로봇 기준 좌표계의 원점은 양팔의 첫 번째 모터축의 중앙이다. 먼저 로봇 팔을 특정 좌표로 이동 시킨 후 원점으로부터 도달한 팔까지의 거리를 측정하고, 원점으로부터 해당 좌표까지의 이론값과 비교하였다. 오차는 Fig. 17과 같이 측정 되었으며 전 구간에

걸쳐서 2.8 mm 평균 오차가 측정되었다. 예상되는 원인으로는 로봇 팔의 처짐, 조립 오차, 측정 오차 등이 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 스테레오 비전과 6축 매니퓰레이터를 이용한 양팔 서비스 로봇을 개발하였고 목표한 서비스를 제공하였다. 로봇을 크게 비전, 로봇 팔, 그리퍼, 통신 및 제어로 나누어 개발하였으며 모터의 동하중 계산을 통해 가반하중을 확보하였다. 스테레오 비전의 영상 처리를 통하여 음료병과 종이컵의 x, y, z 좌표를 파악하고, 역기구학 해석을 통해 해당 물체로 로봇 팔을 이동한 후 그리퍼로 파지하여 음료를 따르는 동작을 수행했다[10].

본 연구에서는 저가의 양팔 서비스 로봇을 개발하며 일련의 과정을 학습하는 것이 목적이었으나, 향후 정밀도를 높이기 위하여 영상 처리 방식의 변경이나 3D 깊이 카메라(depth camera)의 사용이 필요할 것으로 판단된다. 또한 실용성을 가지려면, 가반하중의 증가가 필요하며 이에 따라, 구동 모터를 스테퍼 모터 또는 서보 모터로 변경이 필요할 것으로 판단된다. 향후 과제로, 위치 센서를 이용한 피드백 정밀 제어 구현 및 예상치 못한 오류를 보정하는 제어에 관한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] 7bot, Viewed 10 January 2017, <http://www.7bot.cc/>.

[2] Dobot, Viewed 10 January 2017, <https://www.dobot.cc/>.

[3] Choi, J., Amir, E., 2007, Factor-Guided Motion Planning for a Robot Arm, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, 27-32.

[4] Sourishghosh Viewed 5 March 2017, <http://sourishghosh.com/2016/stereo-calibration-cpp-opencv>.

[5] ABB Viewed 15 January 2017, <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots>.

[6] Kim, J. 2017, Optimal Design Method of a Four-Bar Linkage Considering Shape and Velocity Distribution of Trajectory, Doctorate Thesis, Seoul National University Republic of Korea.

[7] Khatamian, A. 2015, Solving Kinematics Problems of a 6-DOF Robot Manipulator, Int'l Conf. Scientific Computing, 228-233.

[8] Robotiq, Viewed 27 January 2017, <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>.

[9] Creating a Serial Communication Program Using VS2008 MFC, Viewed 26 March 2017, <http://blog.daum.net/chowood/8039404> .

[10] NSCL Seoultech Viewed 20 December 2017, <https://youtu.be/ZrxCvXYa5Po>.