

# 분산 환경에서 휴머노이드 로봇의 비주얼 서보잉

## Visual Servoing for Humanoid Robot in a Distributed Environment

지민석\*, 홍승범\*, 이종재\*\*

Min-Seok Jie\*, Seung-Beom Hong\* and Joong-Jae Lee\*\*

### 요 약

본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 코바 기반 비주얼 서보잉 시스템에 대해 논하고자한다. 네트워크로 연결된 휴머노이드 로봇의 효율적인 제어를 위해서 비주얼 서보잉에 필요한 각 서비스를 분산객체로 정의하고, 이를 코바 미들웨어 상에서 구현한다. 필요한 서비스로는 각 서비스를 고유한 이름으로 탐색할 수 있는 네이밍 서비스, 스테레오 카메라로부터 획득되는 영상을 제공하는데 필요한 영상 서비스 그리고 목표물을 추적하면서 3차원 위치 정보를 추출하는 비주얼 서보잉 서비스 등이 있다. 실험에서는 실시간으로 목표물인 풍선을 추적하고 일정시간 정지해 있을 경우 풍선을 터뜨리는 결과를 보인다

### Abstract

This paper proposes CORBA-based visual servoing system of humanoid robot. To effectively control the humanoid robot which is connected to network, it needs to define necessary services for visual servoing as distribution object, and realize them in the middleware. For realizing it following services should be addressed. Naming service for searching a necessary service with unique name assigned to each object, image service for supplying image obtained from stereo camera. In the experiment, we show the result of balloon tracking and bursting that the robot tracks balloons as target objects in the real time, and if a balloon stop for a certain time, then the robot bursts the balloon.

Key words : Visual Servoing, Humanoid Robot, Middleware, CORBA

### I. 서 론

최근 다양한 형태의 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 로봇 팔을 장착한 산업용 로봇, 이동형 로봇, 그리고 인간형 로봇들에 카메라를 장착한 연구는 가장 각광받는 연구 분야 중 하나이다. 또한 한 대의 로봇보다는 여러 대의 로봇의 협조 제어에

관한 연구가 활발히 진행 중이다. 인간이 요구하는 다양한 요구를 수용하고 다수의 로봇을 제어하고 정보를 공유하기 위해서는 새로운 제어구조가 필요하다. 협조제어를 위한 구조는 로봇의 지능을 내부의 플랫폼과 외부의 독립된 서버를 네트워크로 연결하여 설계한다. 이러한 제어기의 구현은 각각의 서버에서 제공하는 공통된 정보를 다수의 로봇이 공유하고

\* 한서대학교 항공전자시뮬레이션학과(Dept. of Avionics and Computer Simulation, Hanseo University)

\*\* 한국과학기술연구원 인지로봇연구단(Center for Cognitive Robotics Research, Korea Institute of Science and Technology)

· 제1저자 (First Author) : 지민석

· 투고일자 : 2009년 9월 16일

· 심사(수정)일자 : 2009년 9월 17일 (수정일자 : 2009년 10월 16일)

· 게재일자 : 2009년 10월 30일

분산하여 처리함으로써 계산량의 부담을 줄일 수 있는 장점이 있다. 근래 로봇에 카메라를 장착하여 제어하는 분야에서 분산형 구조에 관한 연구가 시도되었다.[1][2]. JAVA와 CORBA 등을 적용하여 분산형 구조를 설계한다면 많은 장점이 있다. 특히, 미들웨어로 사용되는 CORBA는 하드웨어의 형태에 상관하지 않고, 확장성, 모듈성, 소프트웨어 위치투명성, 그리고 플러그인플레이 기능 등의 유리한 점을 제공한다.

또한 본 연구에서는 로봇 매니플레이터의 제어를 위해 인간 모사 모션제어 기법을 사용한다. 사람의 행동을 모방함으로써 인간형 로봇을 동작시키는 연구들은 꾸준히 진행되었다. 사람의 동작을 모션캡처 시스템을 사용하여 측정하고, 측정된 데이터를 인간형 로봇이나 컴퓨터 애니메이션의 캐릭터에 알맞게 조정하여 적용하였다. 이러한 연구에는 광학식 모션캡처 시스템을 많이 사용한다. 광학식 모션캡처 시스템은 몸의 움직임을 잘 보여주는 부위-특히, 관절-에 마커(marker)를 부착하게 하고 그 마커의 시간에 따른 궤적을 저장하여 사람의 동작을 측정한다. 김[8]은 인간의 팔에 부착된 마커 데이터를 최적화 기법을 이용하여 인간형 로봇의 팔에 적용할 수 있는 동작으로 변환시키는 방법을 제안하였다. 연구에서는 인간형 로봇이 인간의 손의 위치와 방향 그리고 팔의 방향을 모방함으로써 인간 팔 전체 동작을 모방하였다. 제안된 방법은 인간형 로봇의 팔 관절 모터의 작동 범위 및 속도 한계를 고려할 하였다. 그러나 이 방법은 임의의 인간다운 동작을 새롭게 생성시킬 수는 없었다.

Nakaoka[3]는 모션캡처 시스템으로 일본 전통 춤을 캡처하고 이를 인간형 로봇이 모방할 수 있도록 하는 체계적인 절차와 모방 알고리즘을 제안하였다. 캡처된 전통 춤에서 주요한 동작들을 끄집어 내어 몇 가지의 대표 동작을 구성하였다. 전체 춤 동작을 이러한 대표 동작들의 연속으로 표현하였다. 먼저 각 대표 동작을 모방할 수 있는 인간형 로봇의 관절 변위를 구했다. 관절의 변위를 구하는 과정에서 로봇의 동적인 안정성을 만족하게 하기 위해 Zero Moment Point(ZMP)를 고려하여 몸통 동작을 수정하였다. 제안된 방법의 검증을 위해 OpenHRP 시뮬레이터와 실

제 인간형 로봇 HRP-1S를 이용하여 일본 전통 춤을 모방하였다. 지금까지의 연구 결과는 주어진 인간 동작에 대한 직접적인 모방 방법에 대한 것이었다. 인간 동작 데이터베이스로부터 임의의 다양한 인간다운 동작들을 생성시키기에는 이러한 직접적인 모방 방법의 사용은 부적합할 수 있다.

앞서 언급된 타 연구 결과를 통해, 단지 하나의 인간 동작을 모방하는 것뿐만 아니라 어느 순간에서도 인간다운 동작을 인간형 로봇이 생성시킬 수 있는 새로운 방법의 개발이 필요하다는 것을 알 수 있다. 본 연구는 먼저 인간 동작의 데이터베이스로부터 인간 팔의 움직임을 특징지을 수 있는 방안을 제시할 것이다. 이러한 팔 움직임의 특징화는 팔꿈치 들림각(Elbow Elevation Angle)을 정의하여 설명한다. 팔꿈치 들림각은 손목 혹은 손의 지정된 점의 위치화 손바닥의 방향으로 결정된다. 이 각을 이용하여 인간다운 팔 움직임을 생성할 것이다.

그리고 2-1장에서는 네트워크 기반 비주얼 서보잉에 필요한 코바 서비스 프레임워크에 대해서 기술한다. 2-2장과 2-3장에서는 스테레오 영상을 이용한 목표물 추적과 로봇 구동방법에 대해서 소개한다. 3장에서는 제안된 알고리즘에 관한 실험결과를, 4장에서 결론을 맺는다.

## II. 제안된 시스템

### 2-1 코바 서비스 프레임워크

분산환경에서 클라이언트/서버 구조를 가진 서비스를 구현하려면 소프트웨어와 하드웨어의 이질성(heterogeneity)으로 인하여 발생하는 상호운용성(interoperability) 저하 문제를 해결해야 한다. 즉, 분산환경에서는 여러 저장장치로부터 정보를 획득할 수 있고 서로 다른 이질적인 시스템과 자료를 공유, 통신할 수 있어야 한다. 이러한 이종(heterogonous)의 분산환경에서 여러 종류의 응용 프로그램을 통합할 수 있는 표준의 결합 방식인 CORBA를 사용한다. OMG에서 제안한 CORBA는 이질적인 자원으로 구성된 분산 환경에서 위치의 투명성, 프로그래밍 언어의 투

명성, 하드웨어와 소프트웨어 및 네트워크 환경의 투명성 등의 상호운용성을 제공하는 분산 객체 미들웨어로 IONA 사의 Orbix, Microsoft 사의 DCOM 등 주요 소프트웨어 업체들에 의해서 개발되었다[3][4].

CORBA는 클라이언트 객체가 ORB라는 소프트웨어 버스를 활용하여 원격지 서버상의 메소드(method)를 호출하고 이의 수행결과를 돌려 받을 수 있게 해준다. 클라이언트는 필요한 서버 객체가 네트워크 어디에 있는지, 어느 플랫폼에 있는지에 대해 전혀 신경 쓰지 않고 오직 필요한 객체의 메소드를 자신의 머신(machine)에 있는 메소드를 호출하는 것과 동일한 방법으로 호출하면 되는 것이다. 따라서, CORBA는 네트워크 투명성 이외에 여러 플랫폼 상에 존재하는 다양한 객체들을 하나로 묶을 수 있는 기능을 제공해 준다. 또한 프로그래머에게 객체지향 기술(object-oriented technology)이 제공하는 상속 또는 다형성(polymorphism) 등의 다양한 장점들을 누릴 수 있게 한다.

그림 1은 비주얼 서보잉에서 사용하는 코바 서비스 프레임워크를 보여준다.

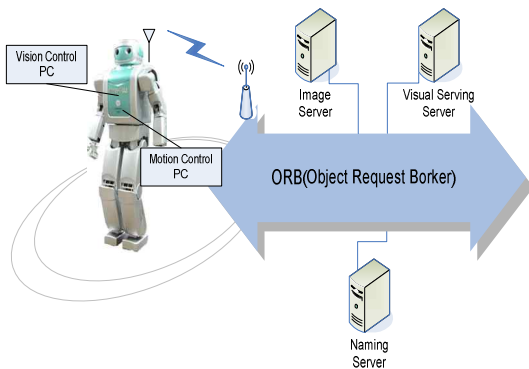


그림 1. 비주얼 서보잉을 위한 코바 서비스 프레임워크  
Fig. 2. CORBA service framework for visual servoing.

코바 서비스 프레임워크 시스템을 구성하는 요소는 다음과 같다.

■ Vision Control PC

운영체제로 Windows XP를 사용하며, 범블비(Bumblebee) 카메라로부터 영상을 캡처하여 Image Server에 제공한다. 그리고 비주얼 서보잉에 필요한 3차원 목표물 좌표, 목의 위치 정보를 Motion Control PC와 주고 받는다.

■ Motion Control PC

로봇 동작 제어를 담당한다. 실시간 제어를 위해서 Linux 기반 Xenomai를 사용한다.

■ Naming Server

모든 객체와 서비스를 이름(name)을 통해서 탐색할 수 있는 기능을 담당한다. 이때 각 서비스 객체는 실행 시 가장 먼저 register 함수로 자신의 이름을 등록(registration)해야 한다.

■ Image Server

Vision Control PC에 장착되어 있는 범블비 카메라로부터 캡처된 영상을 관리 배포하는 역할을 수행한다.

■ Visual Servoing Server

Image server에서 제공되는 영상을 입력으로 목표물을 추적하여 3차원 위치정보를 획득한다. 획득된 3차원 정보를 Motion Control PC에 제공하여 비주얼 서보잉을 수행한다. 이때 로봇의 목 좌표를 궤환(feedback) 받아 로봇 목의 회전에 대한 보상을 한다.

그림 2는 코바 기반 비주얼 서보잉 시스템을 구성하는 각 컴포넌트 간의 상호작용을 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 코바 기반 비주얼 서보잉 시스템은 컴포넌트들로 구성된다. 여기서 주목할 점은 각 컴포넌트는 네트워크로 연결된 서로 다른 컴퓨터 상에 존재한다는 것이며 사전에 정의된 메시지를 교환함으로써 서비스를 제공한다.

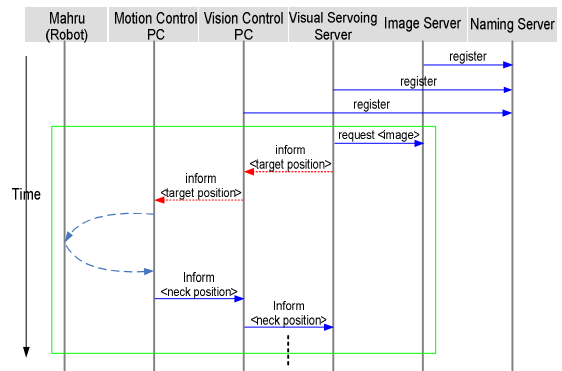


그림 2. 구성요소들 간의 동적 상호작용  
Fig. 2. Dynamic interaction among components

비주얼 서보잉을 수행하는 절차는 다음과 같다. 가장 먼저 등록함수를 이용하여 각 컴포넌트들을 네이밍 서버에 등록한다. 이것은 서로 다른 컴포넌트가 자신 이외의 컴포넌트에서 제공하는 서비스를 탐색/

요청할 수 있도록 해준다. 그림 2에서 네모 상자는 비주얼 서보잉의 단위 작업 싸이클을 나타내는데, 영상을 입력 받는 시점에서 목표물의 3차원 위치를 계산한 뒤 이 정보로부터 로봇의 동작을 제어하는 시점 까지를 말한다. 이 과정을 구체적으로 살펴보면 먼저 비주얼 서보잉용 서버는 영상 서버에 영상을 요청한다. 이때 전송되는 영상은 스테레오 카메라로부터 획득된 좌우 영상이다. 입력된 좌우 영상으로부터 목표물 영역을 검출한 뒤 각각의 중심점을 이용하여 3차원 목표물의 위치를 계산한다. 이 정보를 비전 제어 PC로 다시 운동 제어(Motion control) PC로 전달하여 최종적으로 로봇 동작을 제어한다. 로봇 동작이 수행된 뒤에는 카메라가 부착된 목의 좌표가 변경되기 때문에 다음 번 로봇 동작 제어를 위해서 궤환받는다. 이와 같은 단위 작업 싸이클 조건을 만족하거나 목표물 추적이 실패할 때까지 반복적으로 수행된다.

2-2 목표물 추적

본 논문에서는 초당 15프레임으로 입력되는 영상으로부터 풍선을 추적하기 위해 칼만필터(kalman filter)를 기반으로 하는 단순한 원 추적(circle tracking)을 사용한다. 이때 추적대상이 되는 풍선은 원형이고 단일색상(single color)으로 이루어졌다고 가정한다. 그런데 풍선이 단일색상일지라도 목표물 추적 시에 조명에 따라서 색상이 변하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 표준화된(Normalized) r-g 색차(chrominance)를 사용한다. 색차는 조명의 변화에 따라 분할(segmentation)의 감도를 저하시키기 때문에 RGB 공간의 표준화된 RG 평면이 칼라를 가진 비전의 응용 분야에 사용된다. 따라서 밝기 변화의 종속성을 제거하기 위해 R,G, 그리고 B요소를 표준화된 색좌표로 변환하면 다음과 같다.

$$NR = \frac{R}{R+G+B}, \quad NG = \frac{G}{R+G+B} \quad (1)$$

본 논문에서는 풍선영역을 검출하기 위해서 전체 영상을 가로 세로를 일정한 비율로 분할하고 각 교점을 시작점으로 해서 칼라에 대한 likelihood를 계산한다. 이때 민쉬프트(meanshift)를 사용하여 탐색영역의

대역폭(bandwidth)를 적응적으로 조절하면서 풍선영역 검출을 시도한다.

풍선영역이 검출되면 탐색공간을 줄이기 위해서 칼만필터를 사용한다. 먼저 검출된 풍선영역의 중심점을 이용하여 칼만필터를 초기화한다. 구체적인 칼만필터의 구성의 다음과 같다.

목표물의 좌표를 추정(estimation)하기 위해 필요한 상태벡터  $s_t$ 는 식 (2)와 같이 t시점의 풍선 중심좌표, 풍선영역의 MER(Minimum Enclosed Rectangle)에 대한 폭, 높이정보로 구성된다.

$$\begin{aligned} s_{t+1} &= \Phi s_t + w_t \\ m_t &= Hs_t + v_t \\ s_t &= [cx_t, cy_t, rx_t, ry_t]^T, \\ \Phi &= \mathbf{I}_{3 \times 3}, w_t = \mathbf{I}_{3 \times 3}, v_t = \mathbf{I}_{20 \times 20} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\Phi$ 는 state transition 행렬, H는 observation 행렬,  $w_t$ 는 state transition의 covariance 행렬,  $v_t$ 는 observation의 covariance 행렬이다

칼만필터의 Prediction 단계에서 예측된 값과 실제 값과의 오차를 필터링하기 위해서는 측정(measurement)값을 계산하는 과정이 따른다. 본 논문에서는 측정값을 통해 observation 행렬을 갱신하기 위해 중심점으로부터 풍선영역의 경계(boundary)에 존재하는 가장자리점(edge point)까지의 수직거리(Normal distance)를 이용한다.

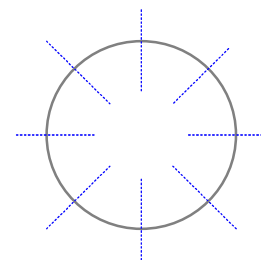


그림 3. 선형 스캐닝 (샘플링)  
Fig. 3. linear scanning(sampling)

그림 3은 풍선 boundary 상에 존재하는 edge의 위치를 찾기 위해서 boundary상의 점으로부터 중심을 향한 방향으로 샘플링을 수행한다. 그리고 일정간격 공간샘플점(regularly spaced sample points)를 얻기 위

해서 선형 스캐닝(linear scanning)을 이용한다[6].

필터링 단계에서는 표준 칼만 필터링(standard kalman filtering)을 적용한다. 본 논문에서는 칼만필터를 통해 예측된 ROI(Region Of Interest) 내에 풍선이 존재하는지를 검증(verification) 하기 위해서 color likelihood를 사용한다. 이때 실시간 처리를 위해서 ROI 내의 모든 픽셀을 고려하지 않고 그림 4와 같이 ROI의 크기를 고려하여 일정한 샘플링률(sampling rate)를 적용한다.

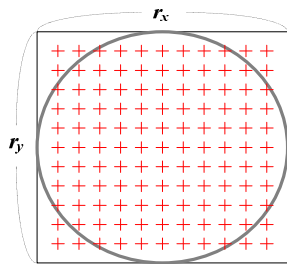


그림 4. ROI 내의 likelihood 계산을 위한 샘플링  
Fig. 4. Sampling for computing likelihood of ROI

검증에 사용되는 좌표 x에서의 칼라 유사도는 다음과 같으며 이 값이 임계값(threshold) 이상이면 풍선이 존재한다고 판단한다.

$$L(x) = \frac{1}{r_x \times r_y} \sum_{x=1}^{r_x} \sum_{y=1}^{r_y} p(x), \quad p(x) = \sum_{j=1}^k \alpha_j p(x|j) \quad (3)$$

$$p(x|j) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\sum j|^{1/2}} e^{-1/2(x-\mu_j)^T \sum j^{-1}(x-\mu_j)}$$

여기서 p(x)는 풍선영역에 대한 칼라 Gaussian mixture 이다.

앞서 설명한 바와 같이 스테레오 영상 즉 좌우 영상으로부터 풍선 영역을 추출하면 식 (4)에 의해 풍선에 대한 3차원 좌표 P를 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_w &= (rc_x - x) \times \frac{B}{rc_x - lc_x} \\ y_w &= (rc_y - y) \times \frac{B}{rc_x - lc_x} \end{aligned} \quad (4)$$

$$z_w = f \times \frac{B}{rc_x - lc_x}$$

여기서 B는 베이스라인, f는 초점 거리,  $lc_x$ ,  $rc_x$ 는 각각 주점(principal point)의 x좌표이다.

### 2-3 로봇 매니플레이션

인간의 여러 동작을 구성하는 손과 팔의 자세를 살펴보면 손목의 위치, 손의 위상, 팔꿈치의 자세 등에 의해서 팔의 전체적인 자세가 결정됨을 알 수 있다. 이들 중 팔꿈치 자세는 손의 위상과 밀접한 관계가 있다. 이러한 관계는 팔 동작의 모션캡처 데이터베이스를 통하여 관찰된다. 본 연구는 손의 위상을 손바닥의 법선 방향을 이용하여 정의하도록 한다. 따라서 어느 순간의 팔의 자세는 손목의 공간 상의 위치와 손바닥의 법선 방향으로 나타낼 수 있다.

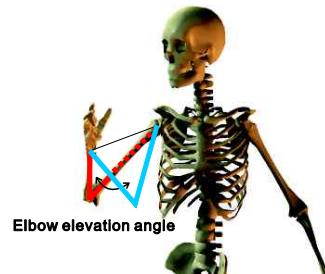


그림 5. 팔꿈치 들림각  
Fig. 5. Elbow elevation angle

손목의 공간 상의 위치 값은 인간의 손에 부착된 마커의 궤적을 이용하여 얻을 수 있다. 이러한 궤적은 모션캡처 시스템에서 정한 직교 좌표계에 대해 측정된 값들이다. 이 값을 어깨에 위치한 좌표계에서 측정된 값으로 전환시킨다. 그림 5에서의 팔꿈치의 자세는 지면과 수직인 면(그림 5에서 푸른색 선으로 이루어진 면)과 손목, 팔꿈치 그리고 어깨를 잇는 면(그림 5에서 붉은 색 선으로 이루어진 면)의 사이 각으로 표현된다. 이 사이 각을 “팔꿈치 들림각(Elbow Elevation Angle)”이라 정의한다. 동작 데이터베이스를 통해 관찰하면 팔꿈치 들림각은 손목의 위치와 손바닥의 법선 방향에 의해 결정된다. 따라서 팔꿈치 들림각을 이용하여 인간답고 자연스러운 동작이 가능한 팔 자세를 얻을 수 있다. 팔 자세가 지면과 수직

인 경우, 즉, 그림 5에서 푸른색 면과 붉은 색 면이 평행할 경우에 팔꿈치 들림각을 “0”으로 정의한다.

Motion Analysis사의 Hawk Digital System을 사용하여 인간 팔 동작 데이터베이스 구축을 위한 실험을 진행하였다. 29개의 마커를 연기자의 상체에 부착하였고 마커의 시간 궤적을 120Hz의 캡처링 속도로 저장하였다. 마커 궤적을 이용하여 어깨에 위치한 좌표계에 대해 매 시각마다 손의 위치 좌표와 손 바닥의 방향을 구한다.

인간 동작 데이터베이스 구축 실험으로부터 인간 팔의 자세가 손목 위치와 손 바닥의 방향에 지배 받는다는 것을 알 수 있다. 그러한 현상을 표현하기 위해 팔꿈치 들림각을 정의했고 여기서는 그 각의 수학적 모델링에 대해 설명한다. Response Surface Methodology(RSM)[10]을 사용하여 수학적 모델링을 완성한다.

본 연구에서는 형상함수(shape function)로 이차방정식을 사용하였고 이는 RSM의 사용에서 가장 많이 이용되는 함수이다. 앞 절에서 정의한 4개의 입력변수를 이용하여 팔꿈치 들림각에 대한 반응함수를 정의하면 다음과 같다.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \dots + b_{13}x_3^2 + b_{14}x_4^2 \quad (5)$$

여기서  $\hat{r}$ 은 정규화된 입력변수로 구성된 팔꿈치 들림각의 반응함수이고  $b_n$ 은 상수값이다.

입력변수  $x$ 는 다음과 같다.

$$x = [\bar{r} \quad \bar{\alpha} \quad \bar{\beta} \quad \bar{\theta}]^T \quad (6)$$

여기서  $\bar{r}$ 은 구좌표계에서 어깨부터 손목까지의 거리이다.  $\bar{\alpha}$ 와  $\bar{\beta}$ 는 구좌표계에서의 두 위상각을 나타낸다.  $\bar{\theta}$ 는 손바닥 방향과 지면과 이루는 각을 말한다. 모든 입력변수 위의 ‘-’는 정규화된 변수임을 나타낸다.

### 2-3 역기구학

본 연구에 사용된 인간형 로봇은 한국과학기술연

구원에서 개발한 마루(Mahru)이다. 마루는 각 팔에 6개의 자유도를 갖는다. 이 자유도에 대한 역기구학을 풀기 위해서는 6개의 holonomic 제한조건을 필요로 한다. 목표 자세에 대한 입력 값은 앞서 설명한 대로 어깨의 구좌표계에서 본 손목 위치와 손바닥의 방향과 지면이 이루는 각이다. 손목을 구부리는 각 또한 입력 값이 될 수 있으나 인간다운 팔 자세에는 큰 영향을 미치지 않아 본 연구에서는 “0”값으로 고정시킨다. 따라서 팔꿈치 들림각 방정식을 포함하여 모두 6개의 관계식을 얻을 수 있다. 여기서 시도하는 역기구학 문제는 기하학적인 접근방법에 기초한다.

그림 6는 인간형 로봇의 왼팔의 기본 자세를 보여준다. 이 자세에서는 팔이 지면을 향하고 손바닥이 hip으로 향하는 자세이다.

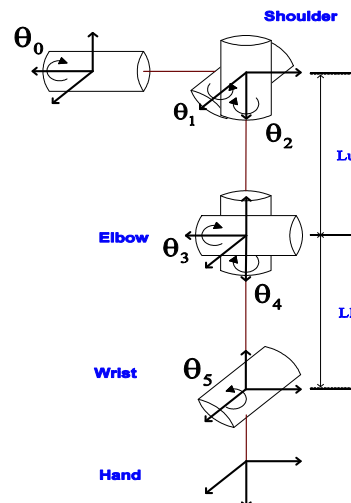


그림 6. 왼쪽팔의 좌표계  
Fig. 6. Coordinates of left arm

여기서,  $\theta_3$ 은 어깨와 손목까지의 거리에 대한 함수로 표현된다.

따라서,

$$\theta_3 = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{L_u^2 + L_l^2 - r^2}{2L_u L_l} \right) \quad (7)$$

을 얻는다.

그림 7, 8에서와 같이 관절  $\theta_0$ 와  $\theta_1$ 은 벡터  $\vec{E}$ 에 의해 결정된다. 구좌표계의 위상각  $\alpha$ ,  $\beta$  그리고  $\hat{\gamma}$ 가 0의 값을 가지는 경우의  $\vec{E}$ 를 벡터  $\vec{E}_0$ 로 정의한

다. 벡터  $\vec{E}_0$ 와 어깨에서 손목으로의 위치 벡터에 의해 구성되는 면은 어깨에 위치한 좌표계의 x-z면과 평행이다. 따라서 벡터  $\vec{E}_0$ 을 아래와 같이 얻는다.

$$\vec{E}_0 = \left[ \frac{r^2 + L_u^2 - L_l^2}{2r} \quad 0 \quad -L_u \sin \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{r^2 + L_u^2 - L_l^2}{2rL_u} \right) \right\} \right]^T \quad (8)$$

벡터  $\vec{E}$ 는 식 (5)의 팔꿈치 들림각  $\hat{\gamma}$ 과 손목의 좌표계 값에 의해 얻어진다.

$$\vec{E} = \mathbf{R}_x(\hat{\gamma})\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_z(\alpha)\vec{E}_0 \quad (9)$$

여기서  $R_x(\hat{\gamma})$ ,  $R_y(\beta)$  그리고  $R_z(\alpha)$ 는  $\alpha$ ,  $\beta$  그리고  $\hat{\gamma}$ 에 의해 정의되는 Euler각의 회전행렬을 나타낸다.

또한, 그림 7과 8로부터 관절 각  $\theta_0$ 와  $\theta_1$ 을 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{(\vec{E})_y}{L_u} \right) \quad (10)$$

$$\theta_0 = \text{atan2} \left( \frac{(\vec{E})_x}{L_u \cos(\theta_1)}, \frac{(\vec{E})_z}{L_u \cos(\theta_1)} \right) \quad (11)$$

여기서  $(\vec{E})_x$ ,  $(\vec{E})_y$ , 그리고  $(\vec{E})_z$ 는  $\vec{E}$ 의 x, y, z 좌표값을 나타낸다.

어깨의 직교좌표계에 대한 손목 위치는 아래와 같다.

$${}^0_1\mathbf{A} \quad {}^1_2\mathbf{A} \quad {}^2_3\mathbf{A} \quad {}^3_4\mathbf{A} \quad {}^4\vec{W} = \vec{W} \quad (12)$$

여기서  ${}^i_j\mathbf{A}$ 는 I번째 좌표계에서 j번째 좌표계로 변환시켜주는 homogeneous transformation 행렬이다.

${}^4\vec{W}$ 는 어깨로부터 4번째 좌표계에서 본 손목의 위치 벡터이다. 즉,  ${}^4\vec{W} = [0 \quad -L_l \quad 0 \quad 0]^T$ .

손목의 위치 벡터와 식 (7), (10) 그리고 (11)을 이용하여  $\theta_2$ 를 얻을 수 있다.

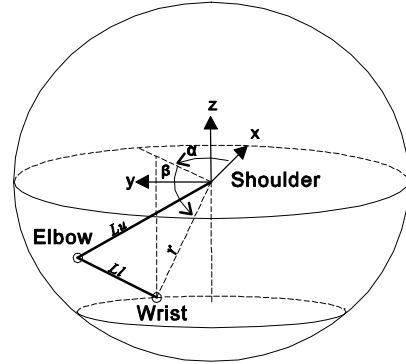


그림 7. 인간 팔 자세의 파라미터  
Fig. 7. Parameters for human arm posture

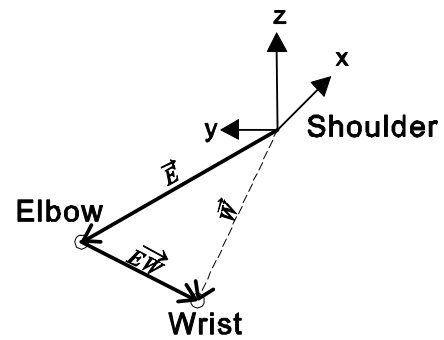


그림 8. 왼팔의 좌표계  
Fig. 8. Coordinates of left arm

$$\theta_2 = \text{atan2}(g, h) \quad (13)$$

여기서,

$$g = \frac{(\vec{W})_z + (L_u + L_l c_3) s_1}{L_l c_1 s_3} \quad (14)$$

$$h = \frac{(\vec{W})_y + c_0 \{ c_1 (L_u + L_l c_3) + L_l s_1 s_3 \}}{L_l s_0 s_3} \quad (15)$$

식 (14)과 (15)에서  $c_i$ 와  $s_i$ 는 각각  $\cos(\theta_i)$ 와  $\sin(\theta_i)$ 를 의미한다.

그림 8을 참조하여  $\theta_4$ 를 구하기 위해서는 우선  $\theta_{diff}$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\theta_{diff} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{N}_c \cdot \vec{N}_v}{\|\vec{N}_c\| \|\vec{N}_v\|} \right) \quad (16)$$

여기서  $\vec{N}_v$ 는 팔꿈치에서 손목으로의 위치 벡터

와 지면으로부터 위로 향하는 벡터에 의해 형성되는 면의 법선 벡터이다.  $\vec{N}_c$ 은 어깨, 손목 그리고 팔꿈치로 이루어진 면의 법선 벡터이다. 따라서 주어진 손바닥과 지면과의 사이각  $\theta$  와  $\theta_{diff}$ 의 차이가 구하고자 하는  $\theta_4$ 이다. 즉,  $\theta_4 = \theta - \theta_{diff}$ 을 얻는다.

### III. 실험

2장에서 논한 알고리즘의 검증을 위해 스테레오 카메라를 이용하여 영상정보를 취득한다. 취득된 데이터는 비전 PC로 전송이 되고, 목표물의 중심점 좌표가 추출된다. 또한 목표물의 중심점 좌표와 로봇의 기준좌표계를 이용하여 목표물과의 거리를 계산할 수 있다. 계산된 데이터가 LAN을 통해 실시간 처리가 가능한 모션제어 PC에 전송되어 로봇 역기구학 연산을 통해 로봇의 목과 팔이 움직여야할 원하는 궤적이 생성된다. 이를 통해 목표물의 위치로 로봇 매니플레이터를 움직일 수 있다.

그림 9는 목표물이 움직인 궤적을 나타내는 그래프이고, 그림 10은 실험결과를 나타내는 정지영상이다.

홀수 라인은 로봇에서 바라 본 목표물에 대한 영상이고 짝수 라인은 외부 카메라로 찍은 화면이다.

목표물 정지시 오차는 0.5픽셀 이하이며, 움직이는 목표물에도 제안된 알고리즘이 분산제어 환경에서 효과적임을 알 수 있다.



그림 10. 실험 결과  
Fig. 10. Experimental results

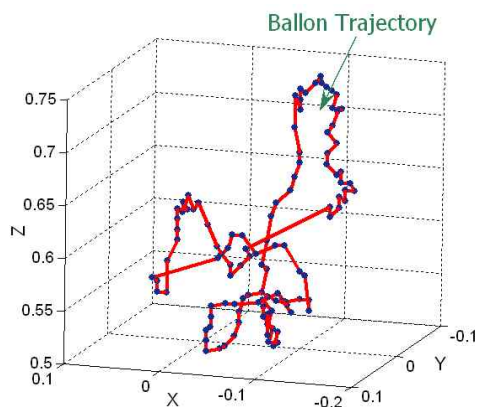


그림 9. 목표물의 움직임 궤적  
Fig. 9. Trajectory of target object

### IV. 결 론

본 논문은 분산 환경하에서의 휴머노이드 로봇의 비주얼 서보잉 제어 시스템을 제안하였다. 미들웨어 CORBA는 분산환경 하에서 로봇제어시스템을 구성하는데 유용함을 보였다. 또한 인간의 팔 움직임 분석하여 휴머노이드 로봇이 인간과 유사하게 움직일 수 있다는 것을 수학적으로 증명하였다. 그리고 실험 결과를 통해 본 연구에서 제안된 로봇제어 시스템의 실시간 목표물 추적 성능을 검증하였다.



참 고 문 헌

[1] E. Cervera, "Distributed Visual Servoing : A Cross-Platform Agent-based Implementation", *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3676-3681, 2005.

[2] K. Nordberg, P. Doherty, P. Forssén, J. Wiklund and P. Andersson, "A flexible runtime system for image processing in a distributed computational environment for an unmanned aerial vehicle", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol.20, No.5, pp.763-780, 2006.

[3] IONA Technologies PLC, *Orbix Programmer's Guide*, IONA Technologies Ltd, 1997.

[4] N. Brown and C. Kindel, *Distributed Component Object Model Protocol DCOM/1.0*, Microsoft Corp, 1996.

[5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Xenomai>.

[6] A. Blake and M. Isard, *Active Contours: The Application of Techniques from Graphics, Vision, Control Theory and Statistics*, Springer-Verlag, 1998.

[7] W. Skarbek and A. Koschan, "Colour image segmentation - A survey", *Institute for Technical Informatics, Technical University of Berlin*, 1994.

[8] C. H. Kim, D. I. Kim and Y. H. Oh, "Solving an inverse kinematics problem for a humanoid robots imitation of human motions using optimization", *Second International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp.85-92 September 2005.

[9] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, H. Hirukawa, and K. Ikeuchi, "Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances", *International Conference on Robotics and Automation*, pp.3905-3910, September 2003.

[10] R. T. Haftka, *Experimental Optimum Engineering Design Course Notes*, Department of Aerospace Engineering Mechanics and Engineering Science, University of Florida, Gainesville, Florida, U.S.A., 2000.

지 민 석 (池旻錫)



1995년 2월 : 한국항공대학교 항공 전자공학과(공학사)  
 1997년 2월 : 한국항공대학교 항공 전자공학과(공학석사)  
 2006년 8월 : 한국항공대학교 항공 전자공학과(공학박사)  
 2006년 8월 ~ 2007년 11월 : 한국 과학기술연구원 인지로봇연구단 Post Doc.  
 2008년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자시물레이션 학과 교수  
 관심분야 : 로봇비전, 강인제어, 무인항공기

홍 승 범 (洪承範)



1995년 2월 : 한국항공대학교 항공 공통신정보공학과(공학사)  
 1997년 2월 : 한국항공대학교 항공 공통신정보공학과(공학석사)  
 2003년 8월 : 한국항공대학교 항공 공통신정보공학과 (공학박사)  
 2004년 2월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자시물레이션학과 교수  
 관심분야 : 내용기반 영상검색, 멀티미디어

이 증 재 (李仲宰)



1999년 2월 : 숭실대학교 컴퓨터 학부(공학사)  
 2001년 2월 : 숭실대학교 대학원 컴퓨터학과(공학석사)  
 2005년 2월 : 숭실대학교 대학원 컴퓨터학과(공학박사)  
 2005년 9월 ~ 2006년 5월 : 숭실 대학교 정보미디어기술연구소(연구교수)  
 2006년 6월 ~ 현재 : 한국과학기술연구원 인지로봇연구단 PostDoc.  
 관심분야 : 로봇비전, 증강현실, 비주얼서보잉