

모션캡처 데이터베이스를 이용한 인간형 로봇의 인간다운 팔 움직임 계획

Human-like Arm Movement Planning for Humanoid Robots Using Motion Capture Database

김 승 수¹ · 김 창 환² · 박 중 현³ · 유 범 재⁴

Seungsu Kim¹ · ChangHwan Kim² · Jong Hyeon Park³ · Bum-Jae You⁴

Abstract During the communication and interaction with a human using motions or gestures, a humanoid robot needs not only to look like a human but also to behave like a human to make sure the meanings of the motions or gestures. Among various human-like behaviors, arm motions of the humanoid robot are essential for the communication with people through motions. In this work, a mathematical representation for characterizing human arm motions is first proposed. The human arm motions are characterized by the elbow elevation angle which is determined using the position and orientation of human hands. That representation is mathematically obtained using an approximation tool, Response Surface Method (RSM). Then a method to generate human-like arm motions in real time using the proposed representation is presented. The proposed method was evaluated to generate human-like arm motions when the humanoid robot was asked to move its arms from a point to another point including the rotation of its hand. The example motion was performed using the KIST humanoid robot, MAHRU.

Keywords : Humanoid robot, Human-like, Motion capture, Arm motion

1. 서 론

최근 인간에게 유용한 서비스를 제공하고자 하는 인간형 로봇의 개발사례가 많아지고 있다. 인간에게 서비스를 제공할 때 인간형 로봇은 인간과의 의사 소통을 원활히 하여야 한다. 인간들 간의 의사 소통은 대부분 목소리나 행동을 통해서 서로에게 암묵적으로 정해진 틀에 따라 이루어 진다. 경험에 바탕을 둔 간단한 동작으로도 의사 소통이 가능할 정도이다. 이러한 의사 소통 방식에 익숙한 인간이 로봇과 의사 소통 도중, 사람 같지 않은 로봇의 동작에 대해 거부감을 느낄 것은 당연할 것이고, 그 의미를 이해하는데 혼란이 생겨 전혀 예상치 못한 행동을 할 수도 있을 것이다. 때문에 인간형 로봇의 행동은 인간이 보기에 자신들처럼 자연스럽게 예측 가능해야 하는 것이다.

※ 본 연구는 정통부 및 정보통신진흥원의 정보통신선도기반기술 개발사업의 연구 결과로 수행되었음.

¹ 한양대학교 기계공학과 석사과정(nicekim@hanyang.ac.kr)

² 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 선임연구원
(ckim@kist.re.kr)

³ 한양대학교 기계공학과 교수(jongpark@hanyang.ac.kr)

⁴ 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 책임연구원(ybj@kist.re.kr)

인간형 로봇이 인간의 움직임을 모방하고자 하는 연구들은 꾸준히 진행되어왔다. 이러한 연구들은 인간의 동작을 모션캡처 시스템을 사용하여 측정하고, 측정된 데이터를 인간형 로봇이나 컴퓨터 애니메이션의 캐릭터에 알맞게 조정하여 적용하였다. 여기에서는 광학식 모션캡처 시스템을 많이 사용한다. 광학식 모션캡처 시스템은 몸의 움직임을 잘 보여주는 부위-특히, 관절에 마커(marker)를 부착하게 하고 그 마커의 시간에 따른 궤적을 저장하여 인간의 동작을 측정한다. 이러한 접근 방법은 여러 연구자들에 의해 시도되었다. 김창환[1]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 위팔의 방향을 모방함으로써 인간 팔 전체 동작을 모방하였다. 제안된 방법은 인간형 로봇의 팔 관절 모터의 작동 범위 및 속도 한계를 고려 하였다. 그러나 이 방법은 임의의 인간다운 동작을 새롭게 생성시킬 수는 없었다. Pollard[2]는 캡처된 인간의 동작을 상체 위주로 구성된 인간형 로봇에 적용할 수 있게 하는 방법을 개발하였다. 캡처된 인

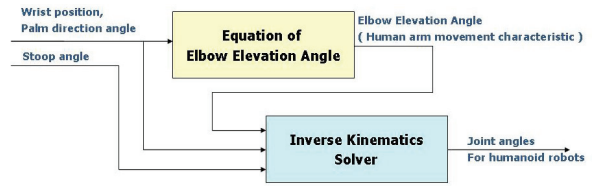
간의 상체 동작과 이를 모방하려는 인간형 로봇 동작 사이의 차를 최소화 함으로써 인간의 동작을 로봇이 모방하도록 하였다. Nakaoka[3]는 모션캡처 시스템으로 일본 전통 춤을 획득하고 이를 인간형 로봇 (모델 HRP-1S)이 모방할 수 있도록 하는 체계적인 절차와 모방 알고리즘을 제안하였다. 캡처된 전통 춤에서 주요한 동작들을 끄집어 내어 몇 가지의 대표 동작을 구성하였다. 전체 춤 동작을 이러한 대표 동작들의 연속으로 표현하였다. 먼저 각 대표 동작을 모방할 수 있는 인간형 로봇의 관절 변위를 구했다. 관절의 변위를 구하는 과정에서 로봇의 동적인 안정성을 만족하게 하기 위해 Zero Moment Point(ZMP)를 고려하여 몸통 동작을 수정하였다. 제안된 방법의 검증에 위해 OpenHRP 시뮬레이터와 실제 인간형 로봇 HRP-1S를 이용하여 일본 전통 춤을 모방하였다.

이러한 연구 결과는 주어진 인간 동작을 직접적으로 모방하는 방법에 대한 것이었다. 이를 이용하면 인간의 동작을 인간형 로봇이 아주 유사하게 모방할 수 있다. 하지만 임의로 다양한 인간다운 동작을 실시간으로 생성해 낼 수는 없다.

Asfour와 Dillmann[4]은 인간다운 팔 동작을 생성하기 위한 다른 접근 방법을 시도하였다. 그들은 Soechting와 Flanders[5][6]이 제안한 인간 팔 동작의 특징을 수식화한 모델을 사용하였다. Soechting와 Flanders의 팔 동작 수학 모델은 인간의 어깨에 정의된 좌표계에서 본 손 좌표의 향으로 구성된 4개의 파라미터에 의해 구성되었다. 하지만 이 방법은 목표 팔 도작에 대한 근사화된 동작을 생성하여, 로봇의 손이 목표한 위치와 위상에 많은 오차를 생성하며 도달하였다. 또한, 정의된 4개의 파라미터들도 특별한 물리적인 의미를 갖지 않으므로 인간 동작을 이해하는 데는 큰 도움을 주지 못하였다.

앞서 언급된 타 연구 결과를 통해, 인간형 로봇의 팔이 정확한 위치에 도달하면서, 인간다운 동작을 생성시킬 수 있는 새로운 방법의 개발이 필요함을 알 수 있다. 본 연구는 먼저 인간 동작의 데이터베이스로부터 인간 팔의 움직임을 특징지을 수 있는 방안을 제시할 것이다. 이러한 팔 움직임의 특징을 “팔꿈치 들림각(Elbow Elevation Angle)”을 제안하여 설명할 것이다. “팔꿈치 들림각”은 손목 혹은 손의 지정된 점의 위치와 손 바닥의 방향으로 결정된다. 이 각을 이용하여 인간다운 팔 움직임을 생성할 것이다.

그림 1은 본 연구를 개괄적으로 설명해 주고 있다. 어떠한 작업을 하기 위하여 손목의 위치와 손바닥 방향



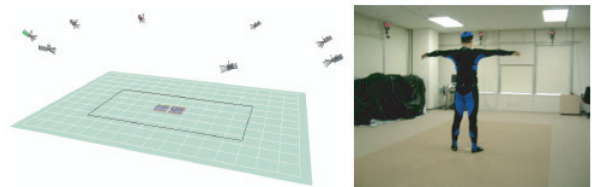
[그림 1] 인간다운 팔 움직임 생성 방법 개념도

각 궤적이 주어진다. 이 값에 가장 적절한 인간다운 팔꿈치 들림각을 팔꿈치 들림각 식(Equation of Elbow Elevation Angle)을 이용하여 획득한다. 입력값과 팔꿈치 들림각이 정해지면 역기구학을 풀어 인간형 로봇의 팔에 적합한 각 정보를 획득할 수 있다.

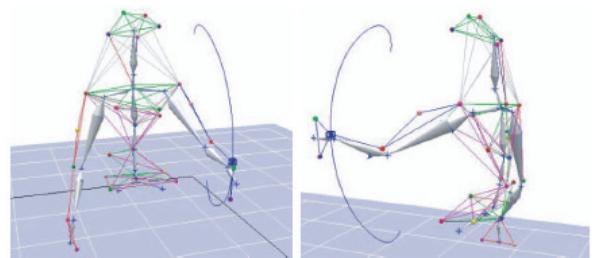
2. 팔꿈치 들림각(Elbow Elevation Angle): 인간 팔 움직임 분석

인간 동작 데이터베이스로부터 인간 팔의 움직임을 특징짓는 과정을 설명한다. 그림 2의 광학식 모션캡처 시스템을 이용하여 인간 동작 데이터베이스를 구축한다. 데이터베이스 구축에는 모션캡처 시스템에서 제공하는 그림 3과 같은 인간의 골격 모델을 사용한다.

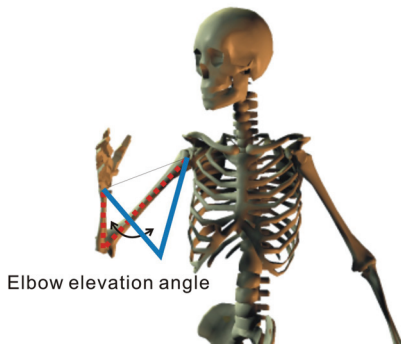
일상 생활에서 인간은 여러 목적에 따라 다양하게 손을 움직인다. 손으로 한 지점을 지시하기, 공간이나 책상 위의 물건을 잡기 위해 손 움직이기, 다른 사람과의 의사 소통을 위해 손짓하기 등의 다양한 손과 팔의 움



[그림 2] 모션캡처 시스템



[그림 3] 인간의 다양한 자세를 획득하기 위한 실험



[그림 4] 인간 팔꿈치 들림각의 정의

직임을 경험한다. 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 관계를 팔 동작의 모션캡처 데이터베이스를 통하여 관찰하도록 한다. 본 연구는 손의 위상을 손 바닥의 법선 방향을 이용하여 정의하도록 한다. 따라서 어느 순간의 팔의 자세는 손목의 공간 상의 위치와 손 바닥의 법선 방향으로 나타낼 수 있다.

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 4에서의 팔꿈치의 자세는 지면과 수직인 면(그림 4에서 실선으로 이루어진 면)과 손목, 팔꿈치 그리고 어깨를 잇는 면(그림 4에서 점선으로 이루어진 면)의 사이 각으로 표현된다. 이 사이 각을 “팔꿈치 들림각(Elbow Elevation Angle)”이라 정의한다. 동작 데이터베이스를 통해 관찰하면 팔꿈치 들림각은 손목의 위치와 손 바닥의 법선 방향에 의해 결정된다. 따라서 팔꿈치 들림각을 이용하여 인간답고 자연스러운 동작이 가능한 팔 자세를 얻을 수 있다. 팔 자세가 지면과 수직인 경우, 즉, 그림 4에서 푸른색 면과 붉은색 면이 평행할 경우에 팔꿈치 들림각을 “0”으로 정의한다.

인간의 다양한 팔 자세, 즉 팔꿈치 자세를 얻기 위하여 그림 2에서 보여지는 모션캡처 시스템을 이용한 동작 실험을 행하였다. 그림 3은 모션캡처 시스템에서 보여지는 실험 장면이다. 실험 중에 연기자는 자유롭게 팔의 자세를 취하도록 하였다. 연기자의 팔이 도달할 수 있는 영역을 지면과 수직인 6개의 면으로 가능한 동등하게 구분 하였다. 구분된 영역 내에서 그림 3에서와

같이 여러 횟수의 팔 동작 실험을 행하였다. 연기자는 5초 동안 5개의 서로 다른 지름을 갖는 원을 그리는 실험을 했다. 이와 같은 실험을 손 바닥의 방향을 변화 시키면서 3회 반복하였다.

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 구했다.

3. 팔꿈치 들림각의 수학적 모델링

이전 절의 인간 동작 데이터베이스 구축 실험으로부터 인간 팔의 자세가 손목 위치와 손 바닥의 방향에 지배 받는다는 것을 알 수 있었다. 그러한 현상을 표현하기 위해 팔꿈치 들림각을 정의했고 여기서는 그 각의 수학적 모델링에 대해 설명한다. Response Surface Methodology(RSM)[7]을 사용하여 수학적 모델링을 완성한다.

3.1 Response Surface Methodology

Response Surface Methodology(RSM) 은 어떤 시스템에 대해 조절 가능한 입력 값과 그 것의 출력 사이의 관계를 나타내는 하나의 기법이다[7]. 즉, 실험 결과를 근사화하는 반응 함수(response function)을 정의한다. RSM에 대해 간략하게 설명하면 다음과 같다.

그림 3에서 행한 실험의 반응 함수는 아래와 같다.

$$y(\mathbf{x}) = \hat{y}(\mathbf{x}) + e \tag{1}$$

여기서 y 는 실험 결과이고 \hat{y} 은 실험 결과 y 의 미지의 반응 함수이다. 그리고 e 은 실험 결과와 반응 함수간의 오차를 의미한다. \mathbf{x} 은 조절 가능한 입력 변수 벡터이다. 인간 팔 동작의 실험에 대한 반응 함수는 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{NB} b_i \xi_i(\mathbf{x}) \tag{2}$$

여기서 NB 는 반응 함수의 항의 수를 나타내고 ξ_i ($i = 1 \sim NB$)은 형상함수(혹은 기본함수)라고 부르는 근사화식의 형태를 결정 짓는 함수이다. b_i ($i = 1 \sim NB$)는 각 형상함수의 미지의 계수이다. 이들 계수를 주어진 실험

결과를 이용하여 결정하게 된다.

복수 실험의 결과가 주어졌을 때의 오차는 식 (1)과 (2)에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_j = y_j - \hat{y}_j(\mathbf{x}_j) = y_j - \sum_{i=1}^{NB} b_i \xi_i(\mathbf{x}_j) \quad (i=1 \sim N) \quad (3)$$

여기서 N 은 반응(혹은 실험) 횟수이다. y_j 와 e_j 은 j 번째 반응(혹은 실험)의 결과와 그에 대응하는 오차를 일컫는다. \mathbf{x}_j 는 j 번째 반응(혹은 실험)의 입력 변수 벡터이다. 식 (3)을 행렬 형식으로 다시 정리하면,

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (4)$$

을 얻는다. 여기서 \mathbf{X} 는 $\xi_i(\mathbf{x}_j)$ 를 요소로 갖는 $N \times NB$ 행렬이다. 미지 벡터 \mathbf{b} 는 오차 벡터 \mathbf{e} 에 대한 다음의 Root Mean Square를 최소화함으로써 결정된다.

$$\mathbf{e}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \mathbf{e}^T \mathbf{e}} \quad (5)$$

식 (5)를 최소화하는 것은 $\mathbf{e}^T \mathbf{e}$ 를 최소화하는 것과 동일하다. 식 (5)에 대해 최적화 조건을 적용하면 미지의 계수 벡터 \mathbf{b} 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

따라서, 식 (2)의 반응 함수를 결정한다. 이러한 과정은 이차근사법과 매우 유사하다.

3.2 입력변수의 정의와 정규화(normalization)

절 3.1의 RSM의 적용과정에 있어 입력변수(Input Variable)를 정규화하는 것이 효과적이다. 크기에 있어서 서로 간의 큰 차이를 가지므로 입력 변수의 영향을 최소화하여 반응 함수의 근사화에 따른 오차를 줄이는 것이 정규화의 목적이다.

먼저, 절 2에서 설명한 대로 인간 팔 움직임의 특징을 손목의 위치와 손 바닥의 방향을 이용하여 정의하였다. 손목의 부착한 마커 데이터를 이용하여 어깨의 구좌표계에서 본 손목 위치를 얻는다. 절 2에서 설명하였듯이 손 바닥의 방향은 손바닥의 법선 방향을 의미한다.

이 법선 벡터와 지면과의 사이각을 입력변수 중 하나로 정의한다. 구좌표계 값과 사이각을 입력변수로 정의

하고 아래와 같이 그 크기를 무차원 크기로 2를 가지게끔 정규화한다.

$$\begin{aligned} 0 \leq \bar{r} \leq 2; \quad -1 \leq \bar{\alpha} \leq 1 \\ -1 \leq \bar{\beta} \leq 1; \quad -1 \leq \bar{\theta} \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \bar{r} 는 구좌표계에서 어깨부터 손목까지의 거리이다. $\bar{\alpha}$ 와 $\bar{\beta}$ 는 구좌표계에서의 두 위상각을 나타낸다(그림 8 참조). $\bar{\theta}$ 는 손바닥 방향과 지면과 이루는 각을 말한다. 모든 입력변수의 머리 위의 ‘ $\bar{\cdot}$ ’는 정규화된 변수임을 나타낸다.

3.3 팔꿈치 들림각 함수

식 (2)의 형상함수(shape function)로 이차방정식을 사용하였고 이는 RSM의 사용에서 가장 많이 이용되는 함수이다. 앞 절에서 정의한 4개의 입력변수를 이용하여 팔꿈치 들림각에 대한 함수를 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\gamma} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + \dots \\ \dots + b_{13} x_3^2 + b_{14} x_4^2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\hat{\gamma}$ 은 정규화된 입력변수로 구성된 팔꿈치 들림각 함수이다. 입력변수 $x_1 \sim x_4$ 는 다음과 같다.

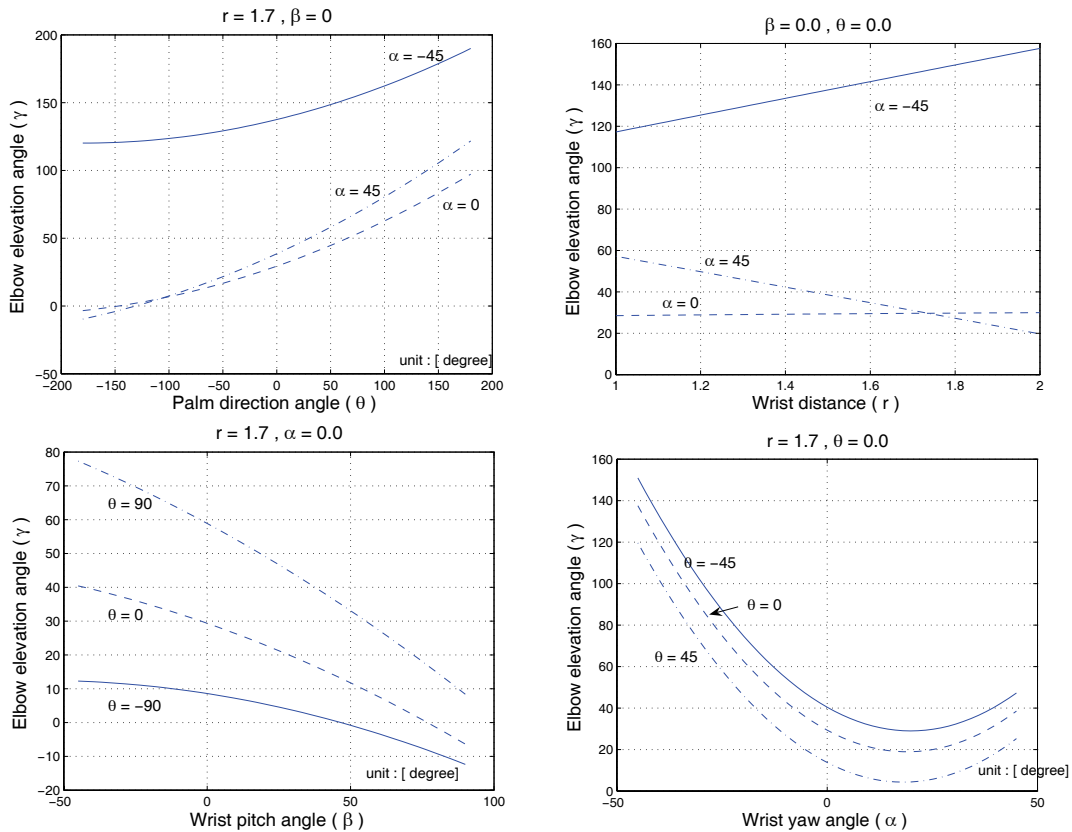
$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4] = [\bar{r} \quad \bar{\alpha} \quad \bar{\beta} \quad \bar{\theta}] \quad (9)$$

절 2의 실험으로부터 절 3.1에서 설명한 입력변수 행렬 \mathbf{X} 와 그 응답 행렬 \mathbf{y} 를 획득할 수 있다.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 N 은 실험 횟수이고 γ_j ($j = 1 \sim N$)은 j 번째 실험에서 얻어진 인간의 팔꿈치 들림각이다.

팔꿈치 들림각 함수의 미지 계수 벡터 \mathbf{b} 즉, 식 (8)의 15개의 미지수는 식 (6)과 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다. 따라서 인간형 로봇의 손목 위치와 손바닥의 방향이 주어지면 이에 대응하는 인간다운 팔꿈치의 자세를 식 (8)로부터 얻을 수 있다. 그림 5는 입력변수에 대한 팔꿈치 들림각의 변화를 보여주고 있다.



[그림 5] r, α, β 와 θ 의 4 가지 파라미터가 팔꿈치 들림각에 미치는 영향

4. 역기구학 문제

절 3까지의 내용은 RSM과 팔동작 데이터베이스를 이용하여 인간의 팔꿈치 들림각의 반응함수를 구하는 것이었다. 이번 절에서는 역기구학 문제를 다루어 구한 팔꿈치 들림각을 이용하여 인간형 로봇이 인간다운 팔 움직임 생성할 수 있게끔 하는 것이다.

사용된 인간형 로봇은 한국과학기술연구원에서 개발한 마루(Mahru)이다(그림 6 참조). 마루는 각 팔에 6개의 자유도를 갖는다. 이 자유도에 대한 역기구학을 풀기 위해서는 6개의 holonomic 제한조건을 필요로 한다. 목표 자세에 대한 입력 값은 그림 1에서 보는 바와 같이 어깨의 좌표계에서 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 고정 시킨다. 따라서 팔꿈치 들림각 함수를 포함하여 모두 6개의 관계식을 얻을 수 있다. 여기서 시도하는 역기구학 문제는 기하학적인 접근방법에 기초한다.

그림 7은 인간형 로봇의 왼팔의 기본 자세를 보여준

다. 이 자세에서는 팔이 지면을 향하고 손바닥이 hip으로 향하는 자세이다.

일단 절 3에서 팔꿈치 들림각을 구하면 남은 일은 마루의 5개 관절 값(θ₀ ~ θ₄)을 계산하는 것이다. θ₃(손목 구부림각)은 이미 “0”으로 고정하였다. 먼저, θ₃은 단지 어깨와 손목까지의 거리에 대한 함수로 표현된다(그림 7, 8 참조). 따라서,

$$\theta_3 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{L_u^2 + L_l^2 - r^2}{2L_u L_l} \right) \quad (11)$$

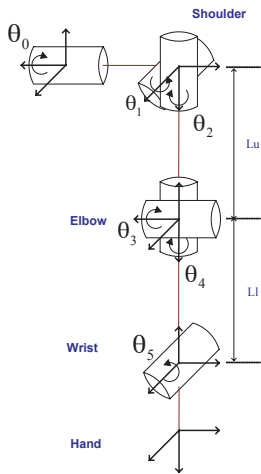
을 얻는다.

그림 8에서와 같이 관절 θ₀과 θ₁은 벡터 \vec{E} 에 의해 결정된다. 그림에서 좌표계의 위상각 α, β 그리고 \hat{j} 가 “0”의 값을 가지는 경우의 \vec{E} 를 벡터 \vec{E}_0 로 정의한다. 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.

$$\vec{E}_0 = \left[\frac{r^2 + L_u^2 - L_l^2}{2r} \quad 0 \quad -L_u \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + L_u^2 - L_l^2}{2rL_u} \right) \right\} \right]^T \quad (12)$$



[그림 6] KIST 인간형 로봇, 마루



[그림 7] 6자유도 팔을 가지는 일반적인 인간형 로봇의 팔 좌표계

벡터 \vec{E} 은 식 (8)의 팔꿈치 들림각 $\hat{\gamma}$ 과 손목의 구좌표계 값에 의해 얻어진다.

$$\vec{E} = \mathbf{R}_x(\hat{\gamma})\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_z(\alpha)\vec{E}_0 \quad (13)$$

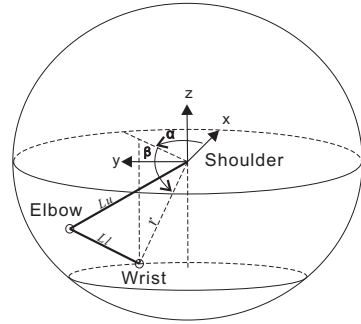
여기서 $\mathbf{R}_*(\#)$ 은 *축에 대한 각 # 만큼의 회전행렬을 나타낸다.

따라서 그림 7과 8로부터 관절 각 θ_0 과 θ_1 을 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{(\vec{E})_y}{L_u}\right) \quad (14)$$

$$\theta_0 = \text{atan2}\left(\frac{(\vec{E})_x}{L_u \cos(\theta_1)}, \frac{(\vec{E})_z}{L_u \cos(\theta_1)}\right) \quad (15)$$

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



[그림 8] 인간 혹은 인간형 로봇의 팔 자세를 위한 파라미터

어깨의 직교좌표계에 대한 손목 위치는 아래와 같다.

$${}^0_1\mathbf{A} {}^1_2\mathbf{A} {}^2_3\mathbf{A} {}^3_4\mathbf{A} {}^4\vec{W} = \vec{W} \quad (16)$$

여기서 ${}^i_j\mathbf{A}$ 는 i 번째 좌표계에서 j 번째 좌표계로 변환시켜주는 homogeneous transformation 행렬이다. ${}^4\vec{W}$ 은 어깨로부터 4번째 좌표계에서 본 손목의 위치 벡터이다: 즉, ${}^4\vec{W} = [0 \quad -L_l \quad 0 \quad 0]^T$.

손목의 위치 벡터와 식 (11), (14) 그리고 (15)을 이용하여 θ_2 을 얻을 수 있다.

$$\theta_2 = \text{atan2}(g, h) \quad (17)$$

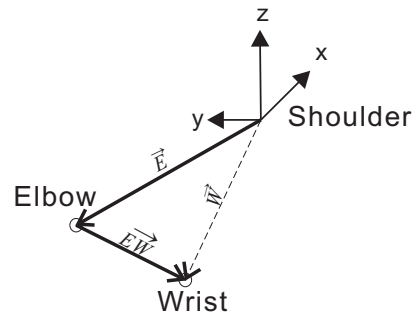
여기서,

$$g = \frac{(\vec{W})_z + (L_u + L_l c_3)s_1}{L_l c_1 s_3} \quad (18)$$

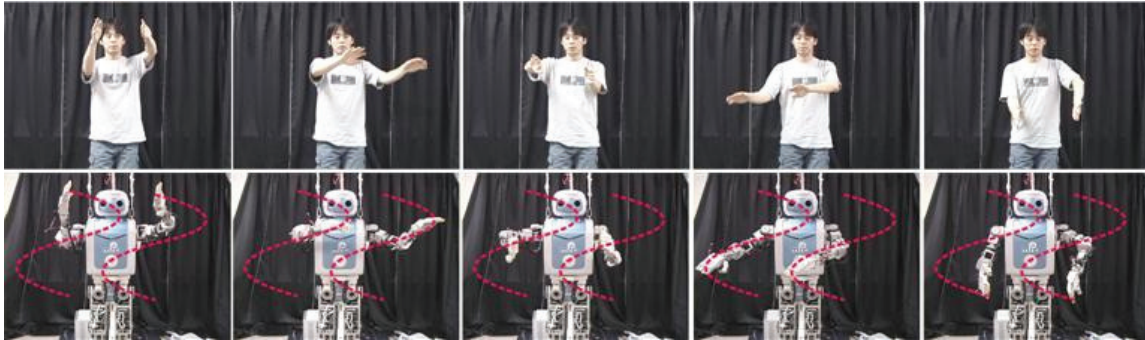
$$h = \frac{(\vec{W})_y + c_0\{c_1(L_u + L_l c_3) + L_l s_1 s_3\}}{L_l s_0 s_3} \quad (19)$$

식 (18)과 (19)에서 c_i 와 s_i 은 각각 $\cos(\theta_i)$ 와 $\sin(\theta_i)$ 을 의미한다.

그림 9를 참조하여 θ_4 를 구하기 위해서는 먼저 θ_{diff}



[그림 9] 왼팔 좌표계



[그림 10] 인간의 팔 움직임과 제안한 방법을 통한 휴모노이드 로봇의 인간다운 팔 움직임 비교

를 다음과 같이 계산한다.

$$\theta_{diff} = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{N}_c \cdot \vec{N}_v}{\|\vec{N}_c\| \|\vec{N}_v\|} \right) \quad (20)$$

여기서 \vec{N}_v 은 팔꿈치에서 손목으로의 위치 벡터와 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 θ 와 θ_{diff} 의 차이가 구하려는 θ_4 이다. 즉,

$$\theta_4 = \theta - \theta_{diff} \quad (21)$$

을 얻는다.

지금까지의 과정을 통해 사용자에게 의해 주어진 θ_3 를 포함하여 $\theta_0 \sim \theta_4$ 의 모든 6개 관절을 구하였다.

5. 인간다운 팔 움직임의 예

이전 절까지 팔꿈치 들림각 함수를 유도하여 이행하였다. 인간형 로봇 “마루”의 팔의 인간다운 움직임을 보여줌으로써 제안한 팔꿈치 들림각과 역기구학 풀이 과정을 검증하였다.

5.1 인간다운 팔 움직임의 예

로봇에게 목표 손목 위치와 손바닥 방향의 경로를 주고 이를 만족 시키는 팔 움직임을 생성시켰다. 손목에 대한 목표위치 궤적은 어깨로부터 전방 0.44mm 떨어진 지면과 수직인 평면 위에 sine 곡선을 정의했다(그림 10 참조). 손바닥의 방향에 대한 목표 궤적은 이 곡선의

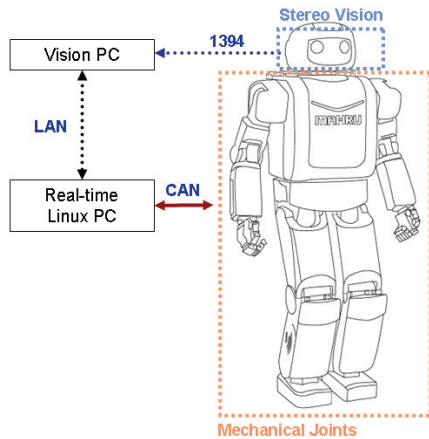
접선 방향으로 정의하였다. 주어진 목표 궤적을 “마루”에 적용시켜 인간다운 팔 움직임을 생성하였다. 그림 10은 생성된 팔의 움직임과 동일한 동작을 수행하는 인간의 사진을 비교하여 보여준다. 그림에서와 같이 목표 궤적을 왼손과 오른손에 평행하게 주었다. 따라서 손바닥 방향의 궤적은 좌우가 동일하다. 인간에게 동일한 동작을 일러주고 이행한 사진과 로봇에서 생성된 사진을 비교해보면 거의 일치함을 알 수 있다. 특히 그림의 첫번째, 세번째 그리고 여섯 번째 사진에서는 인간과 같은 현상인 한 쪽 팔꿈치가 다른 쪽보다 많이 들려지는 것을 볼 수 있다. 이것이 팔꿈치 들림각을 이용하여 인간의 움직임을 응용한 결과이다.

5.2 물체 추적을 위한 팔 동작 생성

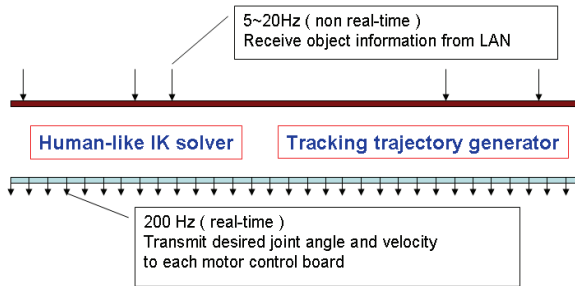
제안된 방법은 인간형 로봇이 책상 등에 놓여진 물건을 집기 위해 물건 주위로 손을 이동시키는 경우에도 활용될 수 있다. 이번 절에서는 카메라를 통해 인식된 물체를 잡기 위해서 인간다운 팔 움직임으로 물체 근처까지 로봇 손을 이동시킬 수 있음을 보여주는 실험에 대한 것이다.

인간형 로봇이 카메라로 물체의 움직임을 감지하여 머리와 손을 움직여 그 물체를 잡기 위해 추적하는 시스템의 구성에 대해 먼저 설명하고자 한다.

그림 11에서 보여지는 바와 같이 2개의 카메라에서 들어온 영상 정보는 Vision PC로 전송되고, 두 영상으로부터 추적 하고자 하는 물체의 중심의 좌표를 각각 추출한다. 이 두 물체중심 점의 위치로부터 물체까지의 거리를 계산할 수 있다. 계산된 데이터는 LAN으로 연결되어있는 Real-time Linux 제어 컴퓨터로 전송되고, 물체를 추종하기 위한 목표 팔의 궤적을 생성하여 인간형 로봇을 움직이게 된다.



[그림 11] 물체 추적 시스템



[그림 12] 물체 추적을 위한 실시간 제어시스템의 데이터 흐름도

이러한 시스템에서 인간형 로봇을 제어하기 위해, 일단 앞서 설명한 인간형 로봇이 인간다운 팔 자세를 할 수 있게 하는 “인간모방 역기구학 알고리즘 (Human-like Inverse Kinematics Solver)”이 있어야 한다. 또한 그림 12에서 보는 바와 같이 불규칙적으로 들어오는 목표물 정보를 부드러운 움직임으로 추종하기 위해서 “추적 궤적생성 알고리즘 (Tracking Trajectory generator)”이 필요하다.

인간형 로봇의 부드러운 팔 움직임을 생성하기 위해서는 인간형 로봇 관절의 각 궤적과 각속도 궤적이 연

속적이어야 하며 미분 가능 해야 한다. 또한 그러한 궤적은 on-line으로 생성 가능하여야 한다. 하지만 목표 자세는 시시각각 변하며, 변하는 주기도 일정하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 mass, spring and damper 모델을 이용하였다.

물체 추적을 위한 목표 관절값(q^{dest})과 현재 자세의 관절값(q^{actual})과의 차이를 $e(t_i) = q^{dest}(t_j) - q^{actual}(t_i)$ 라고 하고, e를 mass, spring dam damper 모델을 적용시키면 아래 식과 같다.

$$m\ddot{e} + c\dot{e} + ke = 0 \tag{22}$$

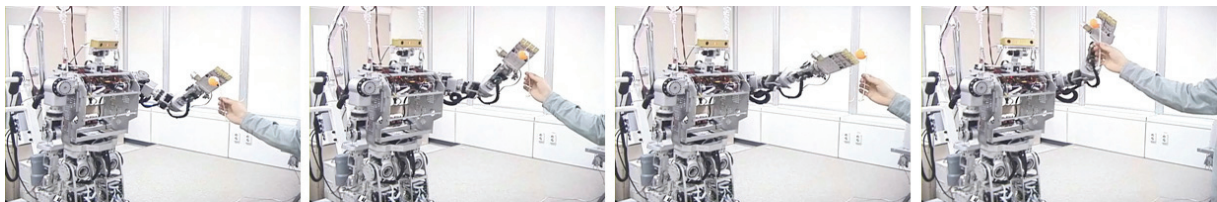
여기서 m 은 무게, c 는 damping 계수, k 는 spring 상수이다. 이 상수값은 응답 형태를 critical damped로 하고 추종속도를 정함으로써 구할 수 있다.

따라서 위 모델을 이용하면, 목표물의 위치가 정해지고 다음 목표값이 정해지기 전까지 ($t_j < t_i \leq t_{j+1}$) 목표값에 도달하기 위한 궤적을 생성 해 낼 수 있다.

그림 13은 주황색 탁구공을 추종하며 목과 왼팔이 인간처럼 움직임을 보여주고 있다.

6. 결 론

인간의 동작 데이터베이스를 이용하여 인간의 팔 움직임을 특징지을 수 있는 수학 모델을 제안했다. 제안한 모델을 한국과학기술연구원 인간형 로봇, “마루”를 통하여 검정했다. 모델의 적용은 매우 간단하고 임의의 어떠한 팔 움직임이라도 실시간으로 생성시킬 수 있었다. 팔꿈치 들림각이 손목의 목표 위치를 재생하는데 영향을 주지 않으므로 역기구학 문제에서의 오차는 없었다. Visual tracking 실험을 통해 제안된 방법이 일상적인 인간다운 팔 움직임 생성에 효과적으로 활용 될 수 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 13] 인간형 로봇의 머리와 팔이 물체를 추적하는 장면

감사의 글

본 논문은 정통부 및 정보통신연구진흥원의 정보통신 선도기반기술개발사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] ChangHwan Kim, Doik Kim, and Yonghwan Oh, "Solving an inverse kinematics problem for a humanoid robots imitation of human motions using optimization," in *Second International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp. 85-92, Barcelona, Spain, September 2005.
- [2] Nancy S. Pollard, Jessica K. Hodgins, Marcia J. Riley, and Christopher G. Atkeson, "Adapting human motion for the control of a humanoid robot," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1390-1397, Washington, DC, U.S.A., May 2002.
- [3] Shinichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Kazuhito Yokoi, Hirohisa Hirukawa, and Katsushi Ikeuchi, "Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances," in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3905-3910, Taipei, Taiwan, September 2003.
- [4] T. Asfour and R. Dillmann, "Human-like motion of a humanoid robot arm based on a closed-form solution of the inverse kinematics problem," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1407-1412, October 2003.
- [5] J. F. Soechting and M. Flanders, "Errors in pointing are due to approximations in targets in sensorimotor transformations," in *Journal of Neurophysiology*, vol. 62, pp. 595-608, October 1989.
- [6] J. F. Soechting and M. Flanders, "Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space," in *Journal of Neurophysiology*, vol. 62, pp. 582-594, October 1989.
- [7] Raphael 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.



김 승 수

2005 한양대학교 기계공학부 (학사)
 2005~현재 한양대학교 기계공학과 석사과정
 2005~현재 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 학생연구원

관심분야: 인간형 로봇의 인간동작 모방



김 창 환

1993 한양대학교 기계공학부(학사)
 1995 한양대학교 기계설계학과(석사)
 2002 아이오와주립대학교 기계공학과(박사)

2004~현재 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 선임연구원

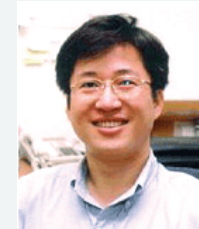
관심분야: 인간형 로봇의 동작생성 및 인간 동작 모방, 인간동작 및 움직임 해석



박 중 현

1981 서울대학교 기계공학과 (학사)
 1983 MIT 기계공학과(석사)
 1991 MIT 기계공학과(박사)
 1992~현재 한양대학교 기계공학부 교수

관심분야: 휴머노이드, 보행로봇의 제어, 바이오메틱스



유 범 재

1985 서울대학교 제어계측공학과(학사)
 1987 KAIST 전기 및 제어공학과(석사)
 1991 KAIST 전기 및 제어공학과(박사)

1994~현재 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 책임연구원

관심분야: 시각기반 로봇틱스, 지능로봇, 디지털신호처리/마이크로프로세서 응용