

7자유도 인간형 로봇 팔의 직관적인 팔꿈치 위치 설정이 가능한 역기구학 알고리즘

Analytical Inverse Kinematics Algorithm for a 7 DOF Anthropomorphic Robot Arm Using Intuitive Elbow Direction

김 영 렬¹, 송 재 복²

Kim Young-Loul¹, Song Jae-Bok²

Abstract Control and trajectory generation of a 7 DOF anthropomorphic robot arm suffer from computational complexity and singularity problem because of numerical inverse kinematics. To deal with such problems, analytical methods for a redundant robot arm have been researched to enhance the performance of inverse kinematics. In this research, we propose an analytical inverse kinematics algorithm for a 7 DOF anthropomorphic robot arm. Using this algorithm, it is possible to generate a trajectory passing through the singular points and intuitively move the elbow without regard to the end-effector pose. Performance of the proposed algorithm was verified by various simulations. It is shown that the trajectory planning using this algorithm provides correct results near the singular points and can utilize redundancy intuitively.

Keywords: Inverse Kinematics, Redundant Manipulator, Singularity Problem

1. 서론

기존의 산업용 로봇에서 많이 사용하던 6자유도 머니풀레이터 대신에 서비스 로봇에서는 7자유도 인간형 로봇 팔이 많이 사용되고 있다^{1,3)}. 7자유도 인간형 로봇 팔은 기존의 6자유도 로봇 팔에 비하여 특이점 및 장애물 회피에 더욱 우수한 성능을 가지고 있으므로, 정해지지 않은 복잡한 환경에서 동작해야 하는 서비스 로봇에 적합하다. 이러한 7자유도 로봇 팔의 운용을 위하여 제어 및 경로생성 알고리즘도 많은 연구가 수행되어왔다. 그러나 여유 자유도 문제를 해결하기 위하여 대부분의 구동 알고리즘에서 수치해석적인 역기구학 해법을 사용하기 때문에 연산량이 증대되고 특이점 부근에서 성능이 악화되는 문제가 발생한

다. 이러한 문제를 해결하고 7자유도 로봇 팔의 제어 및 경로생성 알고리즘의 성능을 높이기 위해서는 해석적인 역기구학 해법이 필요하다.

로봇 팔의 역기구학 해법은 해석적인 방법과 수치해석적인 방법으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 해석적인 방법이 수치해석적인 방법에 비해 많은 장점을 가지고 있다⁴⁾. 그러나 회전관절로 구성된 직렬형 로봇의 경우 순기구학이 복잡한 비선형식으로 구성되어 있기 때문에 일반적인 방법으로는 해석적인 역기구학 해를 구할 수 없다. 또한, 여유 자유도에 의하여 역기구학의 해가 무한 개 존재하므로 해석적인 방법을 적용하기 어렵다. 따라서 여유 자유도 로봇 팔의 역기구학 문제는 주로 수치해석적인 기법을 적용하여 특정한 조건을 만족하는 단일 해를 구하는 방법이 사용되어 왔다^{4,7)}. 그러나 수치해석적인 방법은 해석적인 방법에 비해 연산량이 많고, 역기구학 해에 수치해석 오차가 포함되어 있기 때문에 해석적인 방법에 비해 오차가 크다. 따라서 여유 자유도 로봇의 해석적인 역기구학 해를 구하기 위한 노력이 계속되고 있다.

Received : Aug.18.2010; Reviewed : Sep.14.2010; Accepted: Nov.16.2010

※ 본 연구는 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업 및 인간-로봇 협업 매니플레이션 기술개발 사업을 통하여 수행되었음.

¹ 고려대학교 기계공학부 박사과정

² 고려대학교 기계공학부 교수

7자유도 인간형 로봇 팔의 해석적인 역기구학 해를 구하기 위하여 Tolani는 공간좌표 상에서 팔꿈치가 향하는 방향에 대한 변수를 추가하는 방법을 제안하였다^[7]. 인간형 로봇 팔은 손목 관절 3개의 회전축이 교차하는 손목점(wrist point)을 가지기 때문에 여유 자유도가 팔꿈치의 움직임으로 나타난다. 따라서 팔꿈치의 위치에 대한 변수를 추가하면 인간형 로봇 팔의 역기구학 해를 유한하게 한정할 수 있게 된다. 그러나 Tolani의 방법에서는 팔꿈치의 위치에 대한 변수가 기준 위치 및 로봇 팔의 자세에 따라 다른 의미를 가지게 되므로 직관적으로 적용하는 데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 중력 가속도 벡터를 기준으로 팔꿈치의 위치에 대한 변수를 정의하여 새로운 변수가 작업공간에서 물리적인 의미를 포함하는 방법을 제안한다.

본 연구에서 제안한 역기구학 해법은 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째, 완전히 해석적인 방법으로 역기구학 해를 구하기 때문에 연산량이 적고, 해의 오차도 작다. 둘째, 로봇 팔의 팔꿈치 방향에 대한 변수를 작업공간 상의 물리적인 의미를 갖도록 정의하여 작업자가 직관적으로 인식할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 인간형 로봇 팔의 여유 자유도를 분석하고, 3장에서는 인간형 로봇 팔의 역기구학 해법을 구체적으로 제시한다. 그리고 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 역기구학 알고리즘의 성능을 검증하며, 마지막으로 5장에서는 결론을 내린다.

2. 인간형 로봇 팔의 여유 자유도 분석

먼저 본 장에서는 7자유도 인간형 로봇 팔의 구조를 살펴보고, 여유 자유도를 분석한다. 그리고 여유 자유도를 구속하기 위한 팔꿈치 방향 변수를 정의한다.

2.1 인간형 로봇 팔의 구조

기존의 6자유도 로봇 팔은 특이점이 존재하고 장애물 회피에 한계가 있으므로, 최소한의 자유도를 추가하여 로봇 팔의 성능을 향상시키고자 하는 연구가 수행되었다^[9]. 이 연구에서는 6자유도 로봇 팔의 어깨와 팔꿈치 사이에 회전 축을 추가하는 형태의 7자유도 로봇 팔이 장애물 및 특이점 회피에 가장 우수함이 증명되었고, 이러한 구조의 로봇 팔은 사람의 팔과 유사한 관절 구조를 가지기 때문에 인간형 로봇 팔(anthropomorphic robot arm)이라는 명칭이 붙었다. 인간형 로봇 팔의 관절 구조는 그림 1(a)와 같이 어깨에 3자유도 구상관절(S), 팔꿈치에 1자유도 회전관절(R), 손목에 3자유도 구상관절(S)로 구성된 형태를 가진다. 그리고 일반적으로 회전관절만을 사용하여 구성할 때는

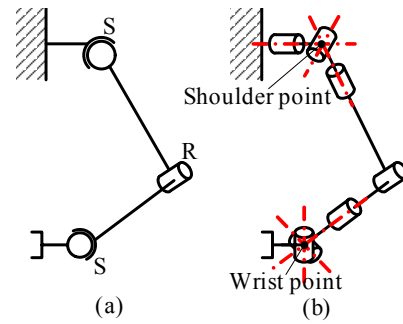


그림 1. 인간형 로봇 팔의 관절 구조

그림 1(b)와 같이 어깨와 손목에 3개의 회전축이 교차하는 점이 존재하도록 구성한다.

2.2 인간형 로봇 팔의 여유 자유도 분석

인간형 로봇 팔은 손목점을 가지므로 wrist-partitioning 알고리즘의 적용이 가능하다^[8]. 이 경우에 로봇 팔의 어깨 및 팔꿈치의 4자유도는 손목점의 위치에 의해 결정되며, 손목의 3자유도는 로봇 팔 말단의 방위에 의해 결정된다. 이 때 어깨 및 팔꿈치에서 손목점의 위치는 3자유도 구속 조건인데 비하여, 관절 자유도는 4자유도이므로 여유 자유도가 발생한다. 로봇 팔의 어깨 및 팔꿈치에서 발생하는 여유 자유도를 도식화하면 그림 2와 같다.

그림 2와 같이 손목점이 정해진 상태에서 어깨 및 팔꿈치 4축의 구동을 통해 로봇 팔의 자세를 결정하면, 로봇의 팔꿈치가 어깨점에서 손목점을 향하는 벡터를 중심으로 하는 팔꿈치 원상에 위치하게 된다. 역기구학 해를 구하면 로봇의 팔꿈치가 원상의 모든 점에 위치하는 경우에 대한 해가 구해지므로 무한하게 많은 해가 나오게 된다. 따라서 해석적인 해를 구하기 위해서는 팔꿈치의 위치를 원상의 한 점으로 특정할 수 있는 조건을 부가하여야 한다. 이를 위하여 중력가속도 벡터를 기준으로 팔꿈치 방향 변수를 정의하고, 역기구학 해에 사용한다.

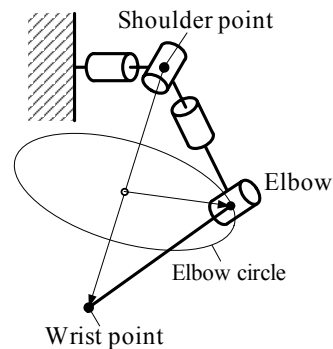


그림 2. 어깨 및 팔꿈치에서 나타나는 여유 자유도

2.3 팔꿈치 방향 변수

여유 자유도를 갖는 로봇 팔의 역기구학 해를 유한하게 한정 짓기 위해서, 팔꿈치의 위치를 팔꿈치 원상의 한 점으로 특정 지을 수 있는 팔꿈치 방향 변수를 정의한다. 이때 팔꿈치 방향 변수를 직관적으로 사용하기 위해서는 작업공간 상에서 물리적인 의미를 지니고 있어야만 한다. 따라서 중력가속도 벡터를 사용하여 팔꿈치 방향 변수를 정의한다.

그림 3은 중력가속도 벡터를 사용하여 팔꿈치 방향변수 ϕ 를 정의하는 방법을 나타낸다. 팔꿈치 원의 좌표축을 n, u, v 벡터로 나타내면, ϕ 는 n 을 기준으로 u 와 팔꿈치의 위치 E 사이의 각도를 의미한다. 이때 n 은 어깨점 S 에서 손목점 W 를 향하는 방향벡터, u 는 원 위의 기준 방향벡터, v 는 n, u 와 수직한 방향벡터이다. 이때 중력가속도 g 를 팔꿈치 원이 존재하는 평면에 사영하여 u 를 결정하면 ϕ 에 작업공간 상의 물리적인 의미가 부여된다. 즉, $\phi = 0$ 이면 팔꿈치의 방향이 작업공간 상에서 중력 방향을 향하게 되고, $\phi = \pi/2$ 이면, 팔꿈치의 방향이 작업공간상에서 중력과 수직한 방향을 향하게 된다.

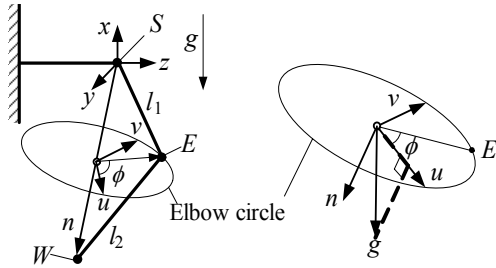


그림 3. 팔꿈치 원과 방향 변수

3. 해석적인 역기구학 해법

이 장에서는 앞 장에서 정의한 팔꿈치 방향 변수를 적용하여 7자유도 인간형 로봇 팔의 해석적인 역기구학 알고리즘을 구하는 과정을 나타낸다. 먼저 인간형 로봇 팔의 기구학 모델을 정의한다. 그리고 wrist partitioning 알고리즘을 적용하여 어깨 및 팔꿈치 4자유도와 손목 3자유도를 분리한 후, 손목점의 위치와 팔꿈치 방향 변수를 사용하여 어깨 및 팔꿈치 4자유도에 대한 역기구학을 구한다. 마지막으로, 로봇 팔 말단의 방위 정보를 사용하여 손목 3자유도에 대한 역기구학 해를 구한다.

3.1 인간형 로봇 팔의 기구학 모델

역기구학 해를 구하기 위하여 인간형 로봇 팔의 기구학 모델을 정의한다. 로봇 팔의 각 관절의 동작 방향을 고려

하여 회전축을 설정한 후 DH 표기법에 맞추어 기구학 파라미터 a, α, d, θ 를 결정한다. 그림 4는 로봇 팔의 각 관절의 회전축과 링크 길이를 나타낸 기구학 모델이며, 표 1은 기구학 파라미터의 값을 정리한 것이다.

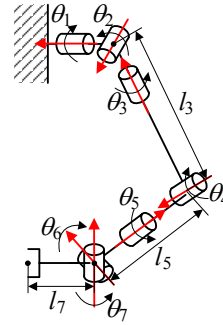


그림 4. 인간형 로봇 팔의 기구학 모델

표 1. 인간형 로봇 팔의 DH 파라미터.

Joint	a	α	d	θ
1	0	$\pi/2$	0	θ_1
2	0	$\pi/2$	0	θ_2
3	0	$\pi/2$	$-l_3$	θ_3
4	0	$-\pi/2$	0	θ_4
5	0	$\pi/2$	$-l_5$	θ_5
6	0	$\pi/2$	0	θ_6
7	$-l_7$	0	0	θ_7

3.2 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 해법

어깨와 팔꿈치의 관절각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 를 구하기 위해서는 wrist-partitioning 알고리즘을 적용하여 손목점의 위치 벡터 P_W 를 구해야 한다. 이를 위하여 주어진 로봇 팔 말단의 위치 및 방위 정보를 동차변환 행렬 0T_7 으로 나타낸다.

$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} {}^0R_7 & {}^0p_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 0R_7 은 말단점의 방위를 나타내는 3x3 회전행렬이며, 0p_7 은 말단점의 위치를 나타내는 3x1 위치벡터이다. 이 때 말단점과 손목점 사이의 거리 l_7 을 사용하여 P_W 를 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_W = {}^0p_7 - {}^0R_7 \cdot [l_7 \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

이제 위에서 구한 P_W 와 앞 장에서 정의한 팔꿈치의 방향 변수 ϕ 를 사용하면 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 를 구할 수 있다. 먼저 로봇 팔의 링크 길이 l_3, l_5 와 $|P_W|$ 를 사용하여 코사인 제 2

법칙을 적용하면 팔꿈치의 각도 θ_4 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\cos(\pi - \theta_4) = \frac{l_3^2 + l_5^2 - \|P_W\|^2}{2l_3l_5} \equiv c_E \quad (3)$$

$$\theta_4 = \pm \left(\pi - \text{atan2} \left(\sqrt{1 - c_E^2}, c_E \right) \right) \quad (4)$$

그리고 θ_1, θ_2 를 구하기 위해서 팔꿈치의 위치벡터 P_E 를 구해야 한다. P_E 를 위하여 팔꿈치 원의 좌표 벡터 n, u, v 를 구하면 다음과 같다.

$$n = \frac{P_w}{\|P_w\|}, \quad u = \frac{g - (g \cdot n)n}{\|g - (g \cdot n)n\|}, \quad v = n \times u \quad (5)$$

여기서 g 는 중력가속도 벡터이며, 기준좌표계에서 음의 x 방향을 향한다. 그러면 P_E 는 n, u, v 와 ϕ 를 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\cos(\alpha) = \frac{\|P_w\|^2 + l_1^2 - l_2^2}{2\|P_w\|l_1} \quad (0 < \alpha < \pi) \quad (6)$$

$$P_e(\phi) = l_3 \cos(\alpha)n + l_3 \sin(\alpha)(\cos(\phi)u + \sin(\phi)v) \quad (7)$$

이 때 P_E 의 각 원소를 $\{P_{Ex}, P_{Ey}, P_{Ez}\}$ 라고 하면 θ_1, θ_2 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \theta_1 = \text{atan2}(-P_{Ey}, -P_{Ex}) \\ \theta_2 = \text{atan2}(\sqrt{P_{Ex}^2 + P_{Ey}^2}, P_{Ez}) \end{cases} \text{ if } 0 < \theta_2 < \pi \quad (8)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \text{atan2}(P_{Ey}, P_{Ex}) \\ \theta_2 = \text{atan2}(-\sqrt{P_{Ex}^2 + P_{Ey}^2}, P_{Ez}) \end{cases} \text{ if } \pi < \theta_2 < 2\pi \quad (9)$$

마지막으로, θ_3 는 앞에서 구한 $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ 와 P_W 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_5 s_4 \begin{bmatrix} c_1 c_2 & s_1 & c_1 s_2 \\ s_1 c_2 - c_1 & s_1 s_2 & s_3 \\ s_2 & 0 & -c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_3 \\ s_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Wx} + l_3 c_1 s_2 + l_5 c_1 s_2 c_4 \\ P_{Wy} + l_3 s_1 s_2 + l_5 s_1 s_2 c_4 \\ P_{Wz} - l_3 c_2 - l_5 c_2 c_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 c_i, s_i 는 $\cos(\theta_i), \sin(\theta_i)$ 를 각각 나타내고, $\{P_{Wx}, P_{Wy}, P_{Wz}\}$ 는 P_W 의 원소이다. 이 식의 우변의 벡터를 P_W' 로 치환하고 좌변의 직교행렬(orthogonal matrix)을 우변으로 넘기면 다음과 같이 c_3, s_3 에 대한 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} c_3 \\ s_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{l_5 s_4} \begin{bmatrix} c_1 c_2 & s_1 c_2 & s_2 \\ s_1 & -c_1 & 0 \\ c_1 s_2 & s_1 s_2 & -c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_{Wx} \\ P'_{Wy} \\ P'_{Wz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

위 식에서 θ_3 를 구하면 θ_4 의 범위에 따라 2가지로 구할 수 있다. 먼저 θ_4 가 $(0, \pi)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\theta_3 = \text{atan2}(P'_{Wx}s_1 - P'_{Wy}c_1, P'_{Wx}c_1c_2 + P'_{Wy}s_1c_2 + P'_{Wz}s_2) \quad (12)$$

그리고 θ_4 가 $(-\pi, 0)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\theta_3 = \text{atan2}(-P'_{Wx}s_1 + P'_{Wy}c_1, -P'_{Wx}c_1c_2 - P'_{Wy}s_1c_2 - P'_{Wz}s_2) \quad (13)$$

3.3 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 의 해법

앞에서 구한 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 와 말단점의 방위 정보로 구한 0R_7 을 사용하면 손목 3자유도로 인한 회전행렬인 4R_7 을 구할 수 있다. 그러면 4R_7 로부터 손목 3자유도의 관절각 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 를 구할 수 있다. 먼저 순기구학을 사용하여 4R_7 과 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 사이의 관계를 구하면 다음과 같다.

$${}^4R_7 = \begin{bmatrix} c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7 & -c_5 c_6 s_7 + s_5 c_7 & c_5 s_6 \\ s_5 c_6 c_7 - c_5 s_7 & -s_5 c_6 s_7 - c_5 c_7 & s_5 s_6 \\ s_6 c_7 & -s_6 s_7 & -c_6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

이 때 4R_7 행렬의 i 행, j 열의 요소를 r_{ij} 라 하면, 위의 식 (14)을 사용하여 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 의 값을 θ_6 의 범위에 따라 2가지로 구할 수 있다. 먼저 θ_6 가 $(0, \pi)$ 일 때는 다음과 같다 [10].

$$\begin{aligned} \theta_5 &= \text{atan2}(r_{23}, r_{13}) \\ \theta_6 &= \text{atan2} \left(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, -r_{33} \right) \\ \theta_7 &= \text{atan2}(-r_{32}, r_{31}) \end{aligned} \quad (15)$$

그리고 θ_6 이 $(\pi, 2\pi)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\theta_5 &= \text{atan2}(-r_{23}, -r_{13}) \\ \theta_6 &= \text{atan2}\left(-\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, -r_{33}\right) \\ \theta_7 &= \text{atan2}(r_{32}, -r_{31})\end{aligned}\quad (16)$$

위와 같이 7자유도 인간형 로봇 팔의 역기구학 해를 구할 수 있다.

4. 성능 검증 시뮬레이션

제안한 역기구학 알고리즘을 적용하여 특이점에서의 역기구학 해와 팔꿈치 방향 변수를 사용한 여유 자유도 구동 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 이를 통하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증한다.

4.1 특이점에서의 성능 검증

특이점에서는 로봇 팔의 자유도가 구속되는 현상이 발생하고, 이는 자코비안 행렬의 역행렬이 발산하는 문제를 일으킨다. 따라서 자코비안 행렬을 사용하는 수치해석적인 역기구학 알고리즘은 특이점 근방에서 계산오차가 증폭되는 문제가 발생한다. 그러나 이 논문에서 제안한 역기구학 알고리즘은 완전히 해석적인 방법을 사용하기 때문에 특이점 부근에서도 정확한 역기구학 해를 구할 수 있다. 이러한 성질을 검증하기 위하여 작업공간상에서 특이점을 통과하는 경로를 생성하고, 역기구학 알고리즘을 통하여 관절공간으로 변경하는 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5는 작업공간 상에서 특이점을 통과하는 경로를 생성한 모습을 나타낸다. 시뮬레이션을 단순화하기 위하여 xy 평면상의 경로를 생성하였으며, 부드러운 곡선을 그리며 특이점을 통과하는 경로를 생성하기 위하여 포물선 경

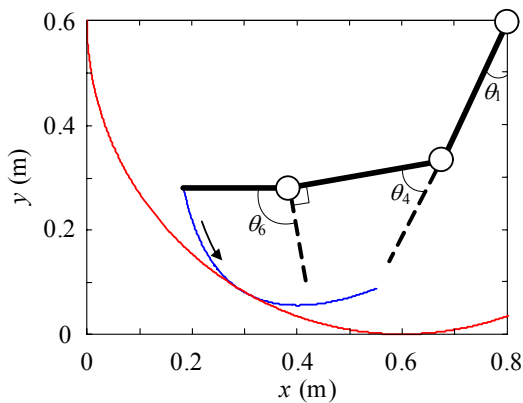


그림 5. 작업공간 상의 특이점 경로

로를 사용하였다. 그리고 그림에서 붉은 선은 로봇 팔의 경계 특이점의 궤적을 나타내며, 포물선 경로와 접하는 점이 로봇 팔이 특이점을 지나는 위치가 된다.

그림 6은 작업공간에서 생성한 경로를 제안한 역기구학을 통해서 관절공간으로 변환한 결과를 나타낸다. 이 그래프에서 특이점($t = 0.95s$)의 부근에서 $\theta_1, \theta_4, \theta_6$ 가 연속적인 경로를 그리는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 제안한 역기구학 알고리즘이 수치해석적인 역기구학 알고리즘과는 달리 특이점 부근에서도 안정적으로 계산이 가능함을 알 수 있다.

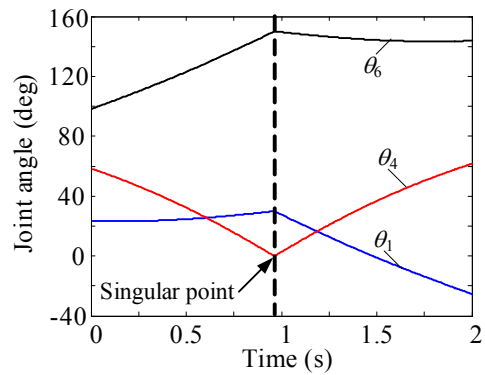


그림 6. 관절공간 상의 특이점 경로

4.2 여유 자유도 구동 시뮬레이션

제안한 역기구학 알고리즘에서는 로봇 팔의 여유 자유도를 위하여 팔꿈치 방향 변수 ϕ 를 정의하였다. 따라서 제안한 역기구학 알고리즘에서 ϕ 를 사용하면 로봇 팔의 말단점의 경로에 독립적으로 로봇 팔의 여유 자유도를 활용할 수 있다. 이러한 성능을 검증하기 위하여 ϕ 를 사용한 여유 자유도 구동 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 ϕ 가 작업공간 상에서 지니고 있는 물리적인 의미를 나타낸다. 로봇 팔의 말단점이 동일한 자세를 가지는 상황에서 $\phi=0^\circ$ 일 때는 로봇 팔의 팔꿈치가 중력 방향을 향하고, $\phi=90^\circ$ 일 때는 팔꿈치가 중력에 수직한 방향을 향하는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 로봇 팔의 말단점을 고정된 상태로 ϕ 를 0° 에서 90° 로 변경하는 경로를 생성하여, 제안한 역기구학을 통해 관절공간으로 변경한 결과를 그래프로 그림 8에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 로봇 팔의 말단점을 고정된 상태로 여유 자유도를 활용하기 위해서는 로봇 팔의 모든 관절을 유기적으로 구동해야 한다. 그러나 제안한 알고리즘에서는 ϕ 를 사용하면 직접적으로 여유 자유도를 활용할 수 있기 때문에 경로 생성 알고리즘에 적용할 경우에 여유 자유도 활용이 용이하다.

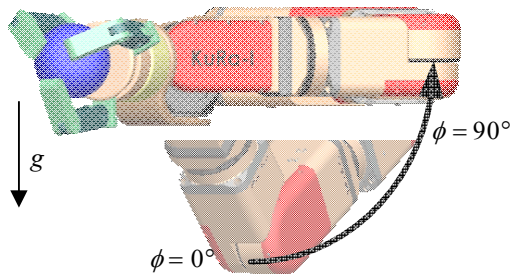


그림 7. 여유 자유도 구동 시뮬레이션

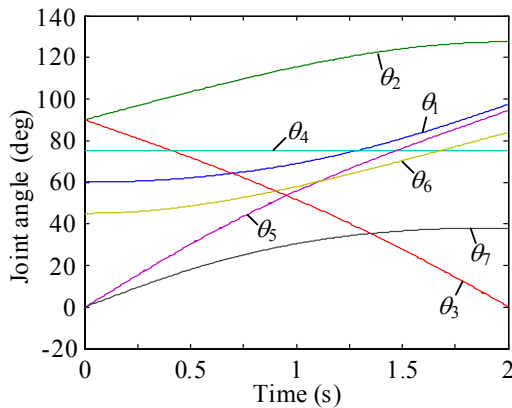


그림 8 여유 자유도 구동 경로

5. 결론

본 연구에서는 7자유도 인간형 로봇 팔의 해석적인 역기구학 알고리즘을 제시하였다. 그리고 여유 자유도 문제를 해결하기 위하여 팔꿈치 방향 변수를 정의하였고, 이를 사용하여 로봇 팔의 말단점의 경로와 독립적으로 여유 자유도를 활용할 수 있음을 보였다. 그리고 제안한 알고리즘이 완전히 해석적이기 때문에 특이점 부근에서도 오차 없이 역기구학 연산이 가능함을 시뮬레이션으로 보였다. 개발한 역기구학 알고리즘을 인간형 로봇 팔의 제어 및 경로 생성 알고리즘에 적용하면, 실시간 연산 성능과 특이점에서의 안정성을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

[1] Hirzinger, G., Sporer, N., Albu-Schäffer, A. Hähle, M., Krenn, R., Pascucci, A., and Schedl, M., "DLR's torque-controlled light weight robot III - are we reaching the technological limits now," IEEE International Conference on Robotics and

Automation, Vol.2, pp.1710~1716, 2002.
 [2] Iwata H., Kobashi S., Aono T., and Sugano S., "Design of Anthropomorphic 4-DOF Tactile Interaction Manipulator with Passive Joints," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1785-1790, 2005.,
 [3] H. Y. K. Lau and L. C. C. Wai, "A Jacobian-based Redundant Control Strategy for the 7-DOF WAM," International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Vol.2, pp.1060-1065, 2002.
 [4] B. Siciliano, "Kinematic Control of Redundant Robot manipulators: A Tutorial," Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.3, pp.201-212 1990.
 [5] C. Klein and C. Huang, "Review of Pseudoinverse Control for Use with Kinematically Redundant Manipulators," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.13, No.3, pp.245-250, 1983.
 [6] J. M. Hollerbach and K. C. Suh, "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.3, No.4, pp.308-316, 1987.
 [7] D. Tolani, A. Goswami, and N. Badler, "Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropometric Limbs," Graphical models, Vol.62, pp.353-388, 2000.
 [8] J. M. Hollerbach and G. Sahar, "Wrist-Partitioned Inverse Kinematic Accelerations and Manipulator Dynamics," Massachusetts Institute of Technology, 1983.
 [9] J. M. Hollerbach, "Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom Manipulator", *Robotics Research: The Second International Symposium*. pp. 349-356, 1985.
 [10] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Vilani, G. Oriolo, Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer, 2008.



김 영 렬

2009 고려대학교 기계공학부
(공학사)
2009~ 현재 고려대학교 기계공
학부 박사과정 재학중
관심분야 : Robotic Assembly



송 재 복

1983 서울대학교 기계공학과
(공학사)
1985 서울대학교 기계설계학
과(공학석사)
1992 MIT 기계공학과(공학박사)
1993~현재 고려대학교 기계

공학부 교수

관심분야 : Design and Control of Safe Manipulators,
Mobile Robotics, Haptics