

여유 자유도를 갖는 산업용 로봇의 역기구학 해석 및 최적 동작 계획

Inverse Kinematics Solution and Optimal Motion Planning for Industrial Robots with Redundancy

이 중 화¹, 김 자 영², 이 지 흥³, 김 동 혁⁴, 임 현 규⁵, 류 시 현⁶

Jonghwa Lee¹, Jayoung Kim², Jihong Lee³,
Dong-Hyeok Kim⁴, Hyun-Kyu Lim⁵, Si-Hyun Ryu⁶

Abstract This paper presents a method to optimize motion planning for industrial manipulators with redundancy. For optimal motion planning, first of all, particular inverse kinematic solution is needed to improve efficiency for manipulators with redundancy working in various environments. In this paper, we propose three kinds of methods for solving inverse kinematics problems; numerical and combined approach. Also, we introduce methods for optimal motion planning using potential function considering the order of priority. For efficient movement in industrial settings, this paper presents methods to plan motions by considering colliding obstacles, joint limits, and interference between whole arms. To confirm improved performance of robot applying the proposed algorithms, we use two kinds of robots with redundancy. One is a single arm robot with 7DOF and another is a dual arm robot with 15DOF which consists of left arm, right arm with each 7DOF, and a torso part with 1DOF. The proposed algorithms are verified through several numerical examples as well as by real implementation in robot controllers.

Keywords: Inverse kinematics, Dual arm robot, Redundancy, Manipulator, Industrial robot

1. 서론

현재 휴머노이드 로봇이나 산업용 로봇과 같이 대부분 인간의 외형을 기반으로 많은 연구가 진행되고 빠르게 발전하고 있다. 그 중 산업 현장에서는 매니플레이터라고 불리는 인간의 팔과 유사하게 개발된 로봇을 사용하고 있다. 인간의 팔은 흔히 어깨 3자유도, 팔꿈치 1자유도, 손목 3자유도로 총 7자유도로 인지되고 있다^[1]. 7축 로봇은 6축 로봇에 비해 하나의 여유 자유도가 있다. 여유 자유도를 활용하는 방법에 관한 많은 연구가 진행되고

있으며 많은 연구결과가 발표되었다^[2-4]. 7축 로봇은 여유 자유도를 활용하여 동일한 로봇 손 끝의 위치와 방위 각을 가지는 여러 가지 동작들을 구현 할 수 있다. 그 중 작업의 목적에 맞는 최적의 동작을 구현할 수 있다^[5]. 이를 통해 산업 현장에서 특정 환경에서 작업을 할 때, 그 작업에 용이한 동작을 계획하여 효율성을 높일 수 있다.

7축 외팔 로봇에 관한 연구를 바탕으로 몸통 회전축을 포함하는 15축 양팔 로봇에 관한 연구도 진행되고 있다. 양팔 로봇은 조립이나 운반 작업과 같이 외팔 로봇으로 할 수 없는 두 팔의 협조 작업이 필요한 현장에서 사용될 수 있다.

또한 몸통을 공유하는 양팔 로봇의 협조 작업은 몸통을 공유하지 않는 외팔 로봇 두 대의 협조 작업보다 협동 작업이 가능한 공간이 보다 넓고 전체 작업 공간은 좁힐 수 있다는 장점이 있다.

Received : Nov. 30. 2011; Reviewed : Jan. 25. 2012; Accepted : Feb. 23. 2012

¹ 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정

² 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사과정

³ 충남대학교 메카트로닉스공학 정교수

⁴ 현대중공업(주) 기계전기연구소 로보틱스 연구실 수석연구원

⁵ 현대중공업(주) 기계전기연구소 로보틱스 연구실 책임연구원

⁶ 현대중공업(주) 기계전기연구소

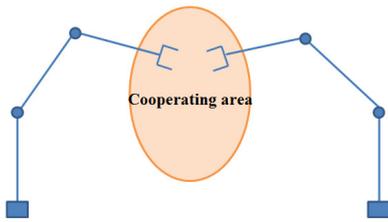


그림 1. 외팔 로봇 두 대의 협조 작업 공간

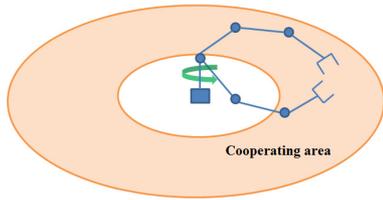


그림 2. 양팔 로봇의 협조 작업 공간

양팔 로봇의 자세를 결정하기 위해서는 역기구학을 풀어야 하는데, 본 논문에서 새롭게 제시한 역기구학 해법은 수치해석적 방법을 활용하고 자코비안의 크기를 확장시켜 동시에 15개의 해를 구하는 것이다. 또한 외팔 로봇의 수치해석적 방법과 기하학적 방법을 혼용한 역기구학 해법을 양팔 로봇의 역기구학 해법에 적용시켜 몸통과 각 팔 4개의 해는 수치해석적 방법으로, 각 팔의 3개의 해는 기하학적으로 푸는 방법을 제시한다. 즉, 양팔 로봇의 9개의 역기구학 해는 수치해석적 방법으로, 6개의 해는 기하학적 방법으로 풀어내는 것이다. 또 다른 방법은 몸통의 회전량을 먼저 결정한 후, 각 팔의 역기구학 해는 기존에 연구된 7축 로봇의 역기구학 해법을 적용하는 방법이다. 이 방법을 사용하는데 있어, 몸통의 회전량을 결정하기 위한 방법을 제안하고 새롭게 제시한 역기구학 해법과 비교한다.

본 논문에서 작업 시 로봇의 점유 공간에 따른 새로운 문제를 제시하고 이를 점유 공간 최소화 알고리즘을 통해 해결한다. 또한 양팔 로봇의 장애물 회피, 양팔간 간섭 회피를 통해 특정 작업 공간에서 보다 용이한 동작을 계획함으로써 작업의 효율성을 높일 수 있다. 본 논문에서 제시하는 여유 자유도를 활용하는 방법은 우선 순위를 고려한 역기구학 해법에서 확장한 자코비안을 활용하기 때문에 양팔 로봇의 특징인 몸통 관절의 회전을 활용할 수 있다. 이 방법은 몸통의 회전에 의해 몸통 관절을 고정시킨 후 각 팔의 여유 자유도를 활용하는 방법보다 다양한 자세를 취할 수 있어 유연성이 큰 결과를 얻을 수 있다.

2. 문제 설정

산업용 로봇은 작업에 따라 다양한 구조를 가지고 있다. 특정 단일 작업을 위해 제작된 로봇이 있고 두 가지 이상의 작업을 번갈아 가며 수행하도록 제작된 로봇이 있다. 후자의 경우에는 인간의 팔을 형상화하여 제작된 매니플레이터가 일반적이다. 본 장에서는 아래와 같이 산업용 양팔 로봇이 현장에서 사용되기 위해 풀어야 할 문제들과 특정 환경에서 최적의 동작을 계획해야 하는 문제들을 제시한다.

문제 1. 여유 자유도를 갖는 산업용 양팔 로봇의 역기구학 해법

문제 1.1 양팔 로봇의 구조에 따른 몸통 관절의 영향

문제 1.2 몸통 관절의 회전량 결정 방법

문제 2. 양팔 로봇의 여유 자유도를 활용한 동작 계획

문제 2.1 장애물 회피를 위한 동작 계획

문제 2.2 점유 공간 최소화를 위한 동작 계획

문제 2.3 양팔간 간섭 회피를 위한 동작 계획

2.1 여유 자유도를 갖는 산업용 양팔 로봇의 역기구학

2.1.2 산업용 외팔 로봇의 구조

그림 3의 왼쪽에 있는 그림은 현대중공업社에서 제작한 YH050이고 오른쪽에 있는 그림은 YH050의 자유도 구성이다. YH050은 7자유도 로봇으로 실제 산업 현장에서 사용하기 위한 목적으로 제작된 로봇이다. 이 로봇은 여유 자유도를 활용하여 6축 로봇으로는 작업할 수 없는 특정한 작업공간에서 사용될 수 있고 보다 효율적인 작업을 수행할 수 있다. 작업 현장에서 YH050을 사용하기

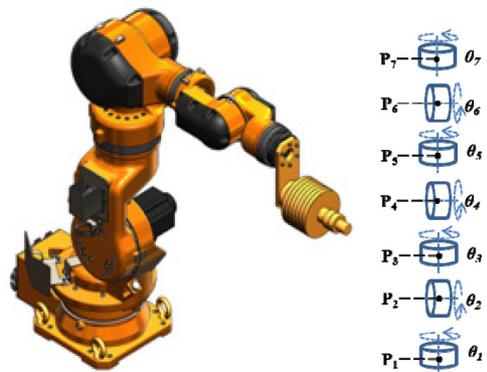


그림 3. 7축 외팔 로봇과 자유도 구성

위해서는 먼저 역기구학을 풀어야 한다. 6축 로봇은 방위 각 3개(r_x, r_y, r_z)와 손 끝의 위치 3개(P_x, P_y, P_z)가 주어지면 역기구학 해석을 통해 6개의 관절 변수($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$)를 구해낼 수 있다. 이 때 방정식이 6개이고 미지수(θ)가 6개이므로 단일 해가 계산된다. 관절 한 개가 더 추가된 7축 로봇의 경우 역기구학 해석을 할 때, 방정식이 6개이고 미지수(θ)가 7개가 되므로 무수한 해가 존재한다. 본 논문에서는 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 사용하는 역기구학 해법을 설명하고 활용한다.

2.1.2 산업용 양팔 로봇의 구조

양팔 로봇은 외팔 로봇 두 대가 몸통에 결합되어 있고 몸통은 회전이 가능하다. 즉, 몸통이 회전하면 왼 팔의 손 끝 점과 오른 팔의 손 끝 점의 위치가 변하게 되기 때문에 역기구학 풀이에 있어 몸통 관절의 설정에 따른 문제가 발생한다. 본 논문에서는 회전하는 몸통에 그림 3의 YH050 두 대가 결합되어 있는 로봇을 가상으로 시뮬레이션 한다. 가상으로 시뮬레이션 하는 로봇은 그림 4의 위쪽에 위치한 로봇과 같다. 그림 4의 위쪽에 위치한 로봇은 Yaskawa 사에서 제작한 Motoman SDA10D이다. 이 로봇의 자유도 구성은 그림 2의 아래쪽과 같이 몸통 자유도 1개(θ_b)와 오른팔 자유도 7개($\theta_{R1} \sim \theta_{R7}$), 왼팔 자유도 7개($\theta_{L1} \sim \theta_{L7}$)로 구성되어 있다. 양팔 로봇은 몸통 관절의 움직임에 따라 오른팔과 왼팔 동시에 영향을 미치기 때문에 몸통 관절을 설정하는 것이 중요하다. 본 논문은 양팔 로봇의 몸통 관절 설정 방법을 두 가지로 나누어 제안한다. 첫 번째는 몸통 관절을 미리 설정하고 각 팔의 역

기구학 해석을 하는 방법이고 두 번째는 자코비안 행렬을 확장시켜 동시에 몸통과 양팔의 역기구학 해석을 하는 방법이다.

2.1.3 역기구학 연산 시간 단축

기하학적 접근법을 이용하면 단일해가 존재해야 하기 때문에 여유 자유도를 갖는 로봇에는 적용하기가 힘들다. 또한 로봇이 실시간으로 빠르고 부드럽게 동작하기 위해서는 역기구학을 풀어내는 시간이 짧을수록 유리한데, 수치해석 접근법을 이용하면 행렬간의 연산 시간에 따라 실시간성을 필요로 하는 로봇에 적용하기 힘들 수 있다. 본 논문에서는 MATLAB을 이용하여 알고리즘간 연산 시간을 비교한다. 기하학적 접근법과 수치해석적 접근법을 혼용한 역기구학 해법과 수치해석적 접근법을 이용한 역기구학 해법의 성능을 비교한다.

2.2 산업용 로봇의 여유 자유도를 활용한 동작 계획

여유 자유도를 갖는 산업용 로봇은 역기구학 해가 무수히 존재하기 때문에 그 중 특정 작업 공간에서 적합한 최적의 동작을 결정하여 효율적으로 작업을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 7축 로봇의 이론을 확장시켜 15축 로봇의 여유 자유도를 활용한 장애물 회피, 점유 공간 최소화, 양팔간 간섭 회피에 관한 연구 결과를 보여 준다.

3. 산업용 로봇의 역기구학

사용자가 원하는 로봇의 동작을 구현하기 위해서는 먼저 역기구학 해석을 해야 한다. 본 장에서는 수치해석 접근법을 이용한 역기구학 해법을 설명한다. 먼저 양팔 로봇의 역기구학 해법의 기초가 되는 외팔 로봇의 역기구학 해법을 설명하고, 양팔 로봇의 몸통 관절을 설정하는 방법을 제안하며, 자코비안 행렬의 크기를 확장시킨 양팔 로봇의 수치해석적 접근을 통한 역기구학 해법을 제안한다. 또한 역기구학 해석의 연산 시간을 줄이기 위해 수치해석적 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법을 설명한다.

3.1 여유 자유도를 갖는 외팔 로봇의 역기구학 해법

3.1.1 수치해석 접근법을 이용한 역기구학 해법

여유 자유도를 가지는 로봇은 자코비안의 의사 역행렬을 이용하여 수치해석적으로 역기구학 해석을 할 수 있다. 식 (1)은 직교 좌표계의 좌표와 조인트 공간에서의 회



출처 : www.motoman.com

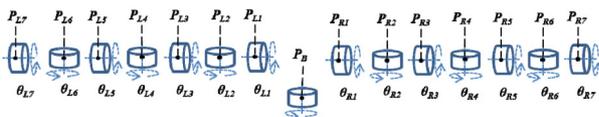


그림 4. 15축 양팔 로봇과 자유도 구성^[6]

전량의 관계를 자코비안을 이용하여 나타낸 식이다.

$$dX = Jd\theta \quad \Leftrightarrow \quad d\theta = J^\# dX \quad (1)$$

7축 로봇의 직교 좌표계 변수들은 식 (2)와 같고 회전 조인트의 변수들은 식 (3)과 같다. 식 (4)는 7축 로봇의 자코비안 행렬로써 크기는 6×7이다. 식 (1)을 통해 수치 해석적으로 역기구학 해를 구할 수 있다. 수치해석 접근법은 많은 연구가 되었으므로 자세한 설명은 생략하도록 한다⁷⁾.

$$dX = [r_x' \ r_y' \ r_z' \ r_\phi' \ r_\theta' \ r_\psi'] \quad (2)$$

$$d\theta = [d\theta_1 \ d\theta_2 \ d\theta_3 \ d\theta_4 \ d\theta_5 \ d\theta_6 \ d\theta_7]^T \quad (3)$$

$$J = \begin{bmatrix} z_0 \times (O_7 - O_0) & z_1 \times (O_7 - O_1) & \dots & z_6 \times (O_7 - O_6) \\ z_0 & z_1 & \dots & z_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.1.2 수치해석적 접근법과 기하학적 접근법의 혼용

기하학적 접근법은 수치해석 접근법에 비해 연산 시간이 빠르다는 장점을 가지지만 단일해가 존재할 경우에만 사용 가능하기 때문에 7축 로봇에 적용하기 위해서는 로봇에서는 하나의 관절 변수를 미리 설정하지 않으면 사용할 수 없다. 여유 자유도를 가지는 로봇의 연산 시간을 단축하기 위해 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법을 사용한다. 7축 로봇의 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법은 어깨와 팔꿈치의 관절 변수 4개($\theta_1 \sim \theta_4$)는 수치해석 접근법을 이용하여 연산하고, 손목 관절 변수 3개($\theta_5 \sim \theta_7$)는 기하학적 접근법의 closed form을 이용하여 계산한다⁸⁾.

3.1.3 역기구학 해법의 접근법 별 연산 시간 비교

표 1은 역기구학 해법의 접근법 별 연산 시간을 비교한 결과를 나타낸다. CPU는 2.9GHz Quad Core이고 RAM은 4GB인 고성능의 컴퓨터를 사용하였고 프로그램은 MATLAB을 사용하여 연산시간을 계산하였다. 연산 시간 비교 결과를 통해 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 혼용해서 사용한 역기구학 해법이 수치해석 접근법만을 사용한 역기구학 해법보다 더 빠른 것을 볼 수 있다. 표 1의 1회 연산 시간은 수치해석적 방법을 사용하였기 때문에 반복하여 해에 근접하는 과정이 필요한데 이

표 1. 접근법 별 연산 시간 비교

	수치해석	수치해석 + 기하학
의사 역행렬 크기	7 × 6	4 × 6
1회 연산시간 (초)	0.0026	0.0015
1회 연산시간 비교	1 (기준)	0.58
수렴에 필요한 반복 횟수	6	4

때의 1회 연산 시간을 말한다. 또한 수치해석적 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법이 수치해석적인 방법을 통해 구하는 해의 개수가 더 적기 때문에 혼용한 방법의 반복 횟수가 더 적은 것을 볼 수 있다. 이는 여러 번의 시뮬레이션을 통해 평균적으로 반복한 횟수를 나타낸다.

3.2 양팔 로봇의 역기구학 해법

양팔 로봇은 몸통 회전에 따라 각 팔의 손 끝 점의 위치가 변하기 때문에 본 논문에서는 몸통 관절 변수의 설정에 따른 역기구학 해법을 제안한다. 첫 번째 방법은 몸통 관절 변수를 작업 목적에 맞도록 미리 설정한 후 각각 7 자유도를 가진 팔의 역기구학 해를 풀이한다. 두 번째 방법은 몸통 관절 변수와 양팔의 14개 관절 변수를 동시에 풀이한다.

- 방법 1 : 몸통 관절 설정 후 7축 로봇의 역기구학 해석
- 방법 2 : 15개의 관절 변수를 동시에 역기구학 해석

3.2.1 수치해석 접근법을 이용한 역기구학 해법

3.2.1.1 방법 1

첫 번째 방법은 역기구학 해석을 하기 전에 몸통 관절 변수를 작업 목적에 맞도록 설정한다. 일반적으로 사람이 어떤 작업을 할 때 몸통의 앞 쪽이 작업하는 양팔 위치의

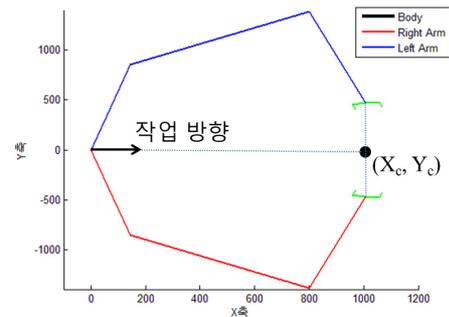


그림 5. 몸통 관절 변수 설정 방법

중심점을 바라보도록 한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 몸통 관절 변수의 설정 방법은 그림 5와 같이 몸통 방향 (작업 방향)이 양팔 손 끝 위치의 x축과 y축의 중심점을 바라보도록 설정한다.

몸통 관절 변수의 설정 방법을 수식적으로 표현하면 식 (5)와 같다. MATLAB에서는 atan2(Y_C, X_C)를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. X_C, Y_C 는 식 (6)과 같이 각 팔의 손 끝의 x축과 y축의 중점을 나타낸다.

$$\tan(\theta_B) = \frac{Y_C}{X_C} \Leftrightarrow \text{atan2}(Y_C, X_C) = \theta_B \quad (5)$$

$$X_C = \frac{P_{Rx} + P_{Lx}}{2}, \quad Y_C = \frac{P_{Ry} + P_{Ly}}{2} \quad (6)$$

몸통 관절 변수가 계산되어 고정되면 각 팔의 관절 변수는 3.1.1에서 설명한 7축 로봇의 역기구학 해석 방법을 적용하여 구해낼 수 있다.

3.2.1.2 방법 2

두 번째 방법은 몸통 관절 변수와 양팔의 관절 변수 모두 총 15개의 관절 변수를 동시에 계산한다. 7축 로봇의 역기구학 해법을 확장시켜 양팔이 공유하고 있는 몸통 회전 관절 변수를 양팔의 관절 변수 각 7개의 해를 모두 만족시키도록 결정한다. 식 (7)은 식 (1)을 양팔 로봇에 적합하도록 확장시킨 것이다. 식 (7)의 좌변은 양팔의 직교 좌표계의 좌표를 나타내는 12×1 크기를 가지는 행렬이다. 우변은 12×15 크기를 갖는 자코비안 행렬과 15×1 크기를 갖는 조인트 관절 변수를 나타내는 행렬이다. 식 (8)은 자코비안 행렬을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} r_{Rx}' \\ r_{Ry}' \\ r_{Rz}' \\ r_{R\phi}' \\ r_{R\theta}' \\ r_{R\psi}' \\ r_{Lx}' \\ r_{Ly}' \\ r_{Lz}' \\ r_{L\phi}' \\ r_{LB}' \\ r_{L\psi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{RB} & J_{R2} & J_{R3} & \cdots & J_{R8} & 0_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} & \cdots & 0_{6 \times 1} \\ J_{LB} & 0_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} & \cdots & 0_{6 \times 1} & J_{L2} & J_{L3} & \cdots & J_{L8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_B \\ d\theta_{R2} \\ d\theta_{R3} \\ \vdots \\ d\theta_{R8} \\ d\theta_{L2} \\ d\theta_{L3} \\ \vdots \\ d\theta_{L8} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J_{Dk} = \begin{bmatrix} z_k \times (O_{D8} - O_k) \\ z_k \end{bmatrix} \quad (D = R, L; \quad k = 1, 2, \dots, 7) \quad (8)$$

식 (7)을 좀 더 살펴보면, 자코비안 행렬에 $0_{6 \times 1}$ 행렬을 추가함으로써 조인트 관절 변수와의 곱에서 몸통 회전 관절 변수는 기구학 해석에 영향을 미치지지만 각 팔의 관절 변수는 기구학 해석에 서로 영향을 미치지 않는다. 이 방법은 몸통 회전 관절 변수가 양팔의 관절 변수에 따라 상호작용하며 설정되기 때문에 방법 1에 비해 로봇의 자세가 유연하게 결정된다. 하지만 자코비안 행렬이 크기 때문에 방법 1에 비해 연산시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

3.2.2 두 가지 접근법을 혼용한 역기구학 해법

15축 양팔 로봇의 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법은 수치해석 접근법을 이용한 역기구학 해법과 동일하게 두 가지 방법으로 나누어 제안한다. 첫 번째 방법은 몸통 회전 관절 변수를 미리 설정한 후 7축 로봇의 기하학적 방법과 수치해석 방법을 혼용하여 역기구학 해석을 한다. 두 번째 방법은 양팔의 어깨와 팔꿈치 관절 8개, 몸통 회전 관절 1개 총 9개의 회전 관절 변수를 수치해석 접근법을 이용하여 구하고 각 팔 3개의 손목 관절 변수를 기하학적 접근법의 closed form을 이용하여 계산한다.

3.3.3.1 방법 1

첫 번째 방법의 몸통 관절 변수 설정 방법은 그림 5와 같이 수치해석 방법을 이용할 때와 동일하다. 몸통 관절 변수를 설정한 후 7축 로봇의 기하학적 방법과 수치해석 방법을 혼용한 역기구학 해법을 이용하여 각 팔의 관절 변수들을 풀어낸다.

3.3.3.2 방법 2

두 번째 방법은 몸통 관절 변수와 양팔의 어깨, 팔꿈치의 관절 변수 8개, 총 9개의 관절 변수를 동시에 계산한다. 식 (9)와 같이 수치해석 접근법을 이용하여 9개의 관절 변수를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r^*_{Rx'} \\ r^*_{Ry'} \\ r^*_{Rz'} \\ r^*_{Lx'} \\ r^*_{Ly'} \\ r^*_{Lz'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^*_{RB} & J^*_{RI} & \cdots & J^*_{RI} & 0_{3 \times 1} & \cdots & 0_{3 \times 1} \\ J^*_{LB} & 0_{3 \times 1} & \cdots & 0_{3 \times 1} & J^*_{LI} & \cdots & J^*_{LI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_B \\ d\theta_{RI} \\ \vdots \\ d\theta_{RI} \\ d\theta_{LI} \\ \vdots \\ d\theta_{LI} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J_{Dk} = \begin{bmatrix} z_k \times (O^*_{D5} - O_k) \\ z_k \end{bmatrix} \quad (D = R, L; \quad k = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

3.3.4 역기구학 해법의 접근법 별 비교

표 2는 역기구학 해법의 접근법 별 연산 시간을 비교한 결과를 나타낸다. CPU는 2.9GHz Quad Core이고 RAM은 4GB인 고성능 컴퓨터를 이용하였고 MATLAB을 통해 연산시간을 계산하였다.

연산 시간과 반복 횟수의 비교를 통해 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법이 수치해석 접근법만을 이용한 역기구학 해법보다 더 빠르고, 방법 1이 방법 2보다 더 빠른 것을 알 수 있다. 하지만 방법 1은 몸통 관절의 회전 변수가 미리 설정되기 때문에 자유도가 방법 2에 비해 적어지게 되어 유연성이 방법 2보다 낮다.

표 2 양팔 로봇의 역기구학 해석 방법 별 비교

	방법 1		방법 2	
	수치해석	수치해석 + 기하학	수치해석	수치해석 + 기하학
의사 역행렬 크기	(7 × 6) * 2개	(4 × 6) * 2개	15 × 12	9 × 12
1회 연산시간 (초)	0.0026	0.0015	0.0045	0.0028
1회 연산시간 비교	1 (기준)	0.57	1.73	1.07
수렴에 필요한 반복 횟수	6	4	9	5
유연성	보통	낮음	높음	보통

4. 여유 자유도를 활용한 동작 계획

본 장에서는 여유 자유도를 활용하여 특정 환경이 주

어졌을 때 최적의 동작을 계획하는 연구에 대해 논한다. 여유 자유도를 가지는 로봇의 팔 끝 위치가 동일할 때, 관절 변수의 해는 무수하지만 그 중 목적에 맞는 최적의 동작을 계획할 수 있다. 최적의 자세를 결정하는 방법은 다양하지만 본 연구에서는 식 (11)을 이용한다. 식 (11)의 P(θ)에 목적에 맞는 함수를 삽입하여 장애물 회피와 점유 공간 최소화를 위한 동작 계획, 양팔 간 간섭 회피를 할 수 있다. P(θ)가 최소가 되었을 때 특정 목적에 맞는 동작을 계획할 수 있다.

$$\dot{\theta} = J^\#(\theta) \dot{X} + \{I_n - J^\#(\theta)J(\theta)\} \{-k \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta}\}^T \quad (11)$$

k는 임의의 상수이다. 상수 k에 따라 수렴하는 속도가 다르고 자세 결정에 영향을 미친다.

4.1 장애물 회피

장애물 회피를 위한 목적함수는 식 (12)와 같다. 식 (13)은 장애물의 크기와 위치를 나타낸다. x, y, z는 장애물의 중심 좌표를 나타내고 L_x, L_y, L_z는 장애물의 x, y, z 각 방향의 길이를, r은 장애물의 형상을 나타낸다. r이 2이면 구가 되고 커질수록 직육면체에 가까워진다. 식 (14)는 장애물을 회피하고자 하는 점들을 나타낸다.

그림 6과 같이 장애물을 회피하고자 하는 점의 좌표를 p_i에 저장한다. p_i의 수가 많아지면 연산시간이 오래 걸리기 때문에 최소한의 개수로 한다. 본 연구에서는 p_i의 개수를 최소화 하기 위해 조인트와 조인트간의 중심점을 설정하였다. 식 (12)에서 목적함수 P를 최소화하면 C(p_i)가 최대가 된다. 식 (13)에서 C(p_i)가 최대가 되면 장애물의 원점 좌표 x, y, z와 점 p_i가 멀어지게 되므로 장애물을 회피하게 된다.

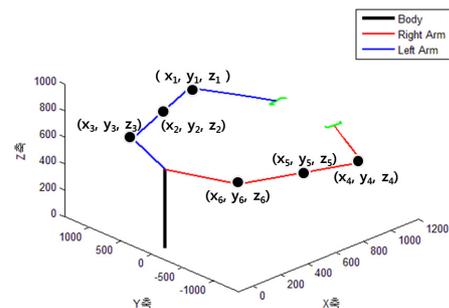


그림 6. 장애물 회피를 위한 점 설정

$$P = \sum_{i=1}^n \{C(p_i)\}^{-1} \quad (12)$$

$$C(p_i) = \sqrt{\left(\frac{x_i - x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{y_i - y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{z_i - z}{L_z}\right)^2} \quad (13)$$

$$p_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T \quad (14)$$

그림 7은 장애물 회피 알고리즘의 적용하기 전 결과로써 장애물과 충돌한 경우를 보여준다. 그림 8은 목표포하는 점은 같지만 알고리즘을 적용하여 장애물을 회피하는 결과를 보여준다.

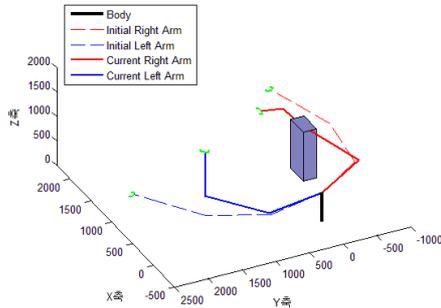


그림 7 장애물 회피 알고리즘 적용 전 결과

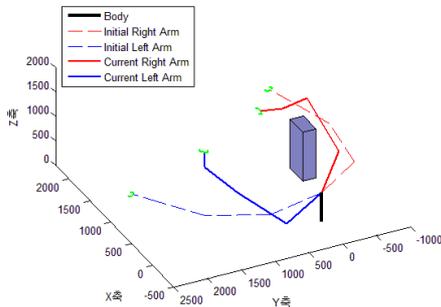


그림 8. 장애물 회피 알고리즘 적용 후 결과

4.2 점유 공간 최소화를 위한 동작 계획

동일한 넓이의 작업 공간이 주어졌을 때, 로봇 한 대의 작업 공간이 좁을수록 여러 대의 로봇을 배치시켜 작업량을 늘릴 수 있다. 이를 위해 로봇이 작업하는 공간을 최소화 하기 위한 알고리즘을 본 연구에서 제안한다. 작업 공간을 최소화하는 알고리즘은 장애물 회피 알고리즘

을 변환해서 만든 것이다. 장애물 회피 알고리즘은 장애물을 생성하여 로봇 팔에 지정한 점들을 장애물의 원점으로부터 최대한 멀어지게 하는 알고리즘이라면, 최소 공간 동작 계획 알고리즘은 장애물을 가상으로 존재한다고 가정하고 로봇 팔에 지정한 점들을 장애물의 내부에 위치하도록 한다. 작업공간은 장애물을 생성하는 식 (13)과 같다. 생성한 작업공간의 내부에서 로봇이 동작하기 위한 목적함수 P 는 식 (15)와 같다. $C(p_i)$ 가 최소가 되면 작업공간의 원점과 가까워지게 되므로 작업 공간 내에서 자세를 결정할 수 있다.

$$P = \sum_{i=1}^n C(p_i) \quad (15)$$

그림 9는 점유 공간 최소화 알고리즘을 적용하기 전의 결과로써 작업 공간을 벗어난 것을 볼 수 있다. 이를 방지하기 위하여 점유 공간 최소화 알고리즘을 적용하여 작업공간 내에서 동작을 하도록 할 수 있다. 그 결과는 그림 10과 같고 이 알고리즘을 적용하여 동일한 공간에 여러 대의 로봇을 작업 현장에 투입함으로써 작업의 효율성을 높일 수 있다.

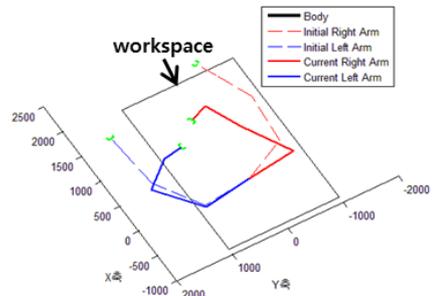


그림 9. 최소공간점유 알고리즘 적용 전 결과

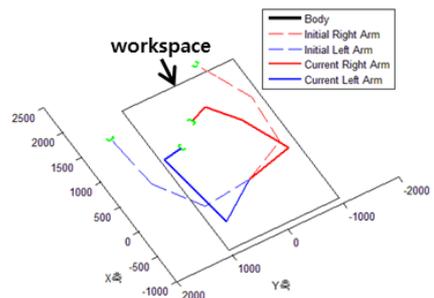


그림 10. 최소공간점유 알고리즘 적용 후 결과

4.3 양팔간 간섭 회피

장애물 회피 알고리즘을 응용하여 양팔간 간섭 회피를 할 수 있다. 목적함수 P 를 식 (16)과 같이 정의하고 $C(p_{ij})$ 를 식 (17)과 같이 설정한다. 식 (16)의 i 와 j 는 오른팔, 왼팔의 몇 번째 점인지를 나타내며, n 과 m 은 각 팔에 설정해 놓은 점의 개수이다. 이 때의 점 설정 방법은 위에서 설명한 바와 같이 연산 시간을 줄이기 위해 개수를 최소화 해야 한다. 본 연구에서 설정한 점은 그림 6과 같이 충돌이 일어날 수 있을 가능성이 있는 위치에 점을 설정하였다. 오른팔에 설정한 점과 왼팔에 설정한 점의 거리를 멀어지게 하는 원리이다.

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{C(p_{ij})\}^{-1} \quad (16)$$

$$C(p_{ij}) = \text{norm} \left(\begin{bmatrix} (x_R)_i \\ (y_R)_i \\ (z_R)_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (x_L)_j \\ (y_L)_j \\ (z_L)_j \end{bmatrix} \right) \quad (17)$$

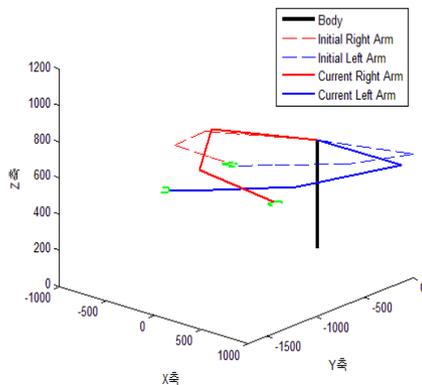


그림 11. 양팔간 간섭 회피 알고리즘 적용 전 결과

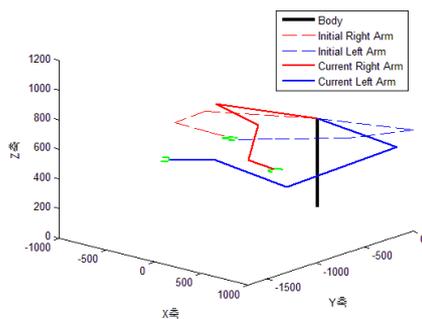


그림 12. 양팔간 간섭 회피 알고리즘 적용 후 결과

그림 11은 작업도중 양팔의 충돌이 일어난 경우를 가정하여 보여준다. 이를 방지하기 위해 양팔간 간섭회피 알고리즘을 적용하여 로봇 팔 끝의 목표하는 점은 같지만 그림 12와 같이 양팔의 충돌을 회피할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 두 가지의 연구 내용을 다루었다. 첫 번째는 7축 로봇과 양팔 로봇의 여러 가지 역기구학 해법들을 제시하고 서로 비교하였고, 두 번째는 여유 자유도를 활용하여 특정 작업 환경에서의 최적의 작업 계획을 하는 방법을 제시하였다.

첫 번째 연구 내용에서 제안한 15축 양팔 로봇의 역기구학 해법은 몸통 관절 변수의 설정에 따라 두 가지로 나뉘는데, 몸통 관절 변수를 미리 설정한 후 각 팔의 역기구학 해석을 하는 방법 1과 몸통 관절 변수와 각 팔의 관절 변수를 동시에 역기구학 해석을 하는 방법 2가 있다. 방법 1은 연산 시간이 방법 2에 비해 짧다는 장점이 있지만 몸통 관절을 미리 설정하기 때문에 방법 2의 자세보다 유연하지 못하다. 또한 연산 시간을 향상시키기 위해 수치해석 접근법과 기하학적 접근법을 혼용한 역기구학 해법을 제시하고 각 접근법의 연산시간을 비교하였는데, 그 결과는 두 가지 접근법을 혼용한 결과가 훨씬 빠르게 해에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

두 번째 연구 내용에서는 장애물이 있는 특정한 작업 공간에서 여유 자유도를 활용하여 최적의 동작을 계획하고 이를 검증하였다. 또한 장애물 회피 알고리즘을 응용하여 최소 공간 동작 계획과 양팔 간 충돌이 일어날 경우를 가정하여 양팔간 간섭 회피를 하는 알고리즘을 제안하고 MATLAB을 이용하여 검증하였다.

참고문헌

- [1] Maria Zanchettin A, Rocco P and Bascetta L, "Kinematic analysis and synthesis of the human arm motion during a manipulation task, IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 2011.
- [2] Masanori Hayakawa, Keiko Hara, Daisuke Sato, "Singularity Avoidance by Inputting Angular Velocity to a Redundant Axis During Cooperative Control of a Teleoperated Dual-Arm Robot",

IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 2008.

[3] Zeng-Guang Hou, Long Cheng and Min Tan, "Multicriteria Optimization for Coordination of Redundant Robots Using a Dual Neural Network", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, vol.40, no.2, pp.1075-1087, August, 2010.

[4] Ji Xiang, Congwei Zhong and Wei Wei, "General-Weighted Least-Norm Control for Redundant Manipulators", IEEE Transactions on Robotics, vol.26, no.4, pp.660-669, August, 2010.

[5] Nakamura Y, Advanced Robotics Redundancy and Optimization, Addison-Wesley, 1991.

[6] www.motoman.com (YASKAWA)

[7] Andrew A, "A Complete Generalized Solution to the Inverse Kinematics of Robots", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.RA-1, no.1, pp.14-20, March, 1985.

[8] Gonzalez, Rafael C, Robotics: Control, Sensing, Vision, And Intelligence, McGraw-Hill Book, 1987.



김 자 영

2008 충북대학교 기계공학과 (공학사)
 2011 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학석사)
 2011~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 (박사과정)

관심분야: 로봇틱스, 지능 제어, 로봇 제어



이 지 홍

1983 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1985 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1991 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1994 ~현재 충남대학교 메카트로닉스공학 정교수
 관심분야: 로봇틱스, 위치 추정, 경로 계획



이 종 화

2011 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)
 2011~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 (석사과정)
 관심분야: 로봇틱스, 로봇 제어



김 동 혁

1989 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1991 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
 1991~현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 로봇틱스 연구실 수석연구원

관심분야: 산업용 로봇의 제어 및 응용



임 현 규

1998 고려대학교 기계공학과
(공학사)
2000 고려대학교 기계공학과
(공학석사)
2007 Michigan State
University (방문연구원)

2000~현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 로보틱스 연구실 책임연구원.

관심분야: 산업용 로봇 제어, 로봇 캘리브레이션



류 시 현

2008 경북대학교 기계공학과
(공학사)
2010 경북대학교 기계공학과
(공학석사)
2010~현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 로보틱스 연구실 연구원

관심분야: 산업용 로봇 경로계획, 로봇 협조제어