

구난로봇을 위한 전신 기구학 제어 연구

홍성일^{*,1)} · 이원석¹⁾ · 강신천¹⁾ · 강윤식¹⁾ · 박용운¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

A Study of Whole Body Kinematic Control for a Rescue Robot

Seongil Hong^{*,1)} · Won Suk Lee¹⁾ · Sin Cheon Kang¹⁾ · Youn Sik Kang¹⁾ · Yong Woon Park¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 20 March 2014 / Revised 29 August 2014 / Accepted 17 October 2014)

ABSTRACT

This paper introduces a Korean rescue robot and presents a whole body kinematic control strategy. The mission of the rescue robot is to move and lift patients or soldiers with impaired mobility in the battlefields, hospitals and hazardous environments. In order for a robot to rescue and assist humans, reliable mobility in various environments, large load carrying capacity, and dextrous manipulability are required. For these objects the robot has variable configuration mobile platform with tracks, dual arm manipulator, and two types of grippers. The electric actuators provide the strength to lift a wounded soldier up to 120 kg using whole body joints. To control the robot with multi degree of freedom, we need to synthesize complex whole-body behaviors, and to manage multiple task primitives systematically. We are to present a whole body kinematic control methodology, and demonstrate its effectiveness through numerical simulations.

Key Words : Rescue Robot(구난로봇), Task Primitive Priority(임무 요소 우선순위), Closed Loop Inverse Kinematics(폐루프 역기구학), Gradient Projection Method(구배투사법), Whole Body Kinematic Control(전신 기구학 제어)

1. 서론

본 논문에서 기술하는 구난로봇의 최종 목적은 Fig. 1에서와 같이 전장이나 위험 환경에서 부상을 당해 이동할 수 없는 병사 혹은 환자를 안전한 곳으로 구출하고, 또한 포탄과 같은 위험물을 이송 및 처리하는

것이다. 로봇의 이동성과 작업의 유연성을 동시에 확보하기 위해서 이동플랫폼과 양팔 매니퓰레이터가 결합된 형태의 휴머노이드 로봇은 현재 전 세계적으로 개발이 많이 진행되고 있지만 주로 저 하중의 가반 중량을 다루고 있다¹⁾. 하지만 본 논문의 구난로봇은 부상병의 무게를 기준으로 기중력 120 kg의 고 가반하중을 다루는 것을 목표로 설정하여 개발하고 있다. 그리고 실내외 환경에서 사용하기 위해서 유압식 구동장치 대신 유지 보수가 용이하고 소음이 적은 전기식 구

* Corresponding author, E-mail: hongsi@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

동장치를 적용하였다.

전기식 구동장치를 채택한 구난로봇의 형상은 Fig. 2와 같다. 거친 환경에서 주행할 수 있는 트랙과 다관절의 하체를 이용하여 Fig. 1에서와 같이 지형에 따라 플랫폼의 형상을 변경시킬 수 있는 가변형상 플랫폼을 적용하였다. 이로 인하여 2족 혹은 4족 보행을 하는 로봇에 비하여 다양한 지형에서 빠르고 안정적인 주행이 가능하며 결과적으로 로봇의 운용성을 극대화하였다. 그리고 양팔 매니플레이터(dual arm manipulator)와 두 가지 형태의 교체 가능한 말단장치를 탑재하여 구난 임무와 파지 임무를 각각 수행할 수 있도록 하였다. 몸체(torso) 부분에는 각종 제어컴퓨터와 항법장치를 탑재하였으며, 머리(head) 부분에는 원격지에서 획득한 영상 정보를 통해 운용자가 실제감을 느끼면서 로봇을 효과적으로 운용할 수 있도록 CCD, IR, LIDAR (Light Detection and Ranging) 센서를 장착하였다.

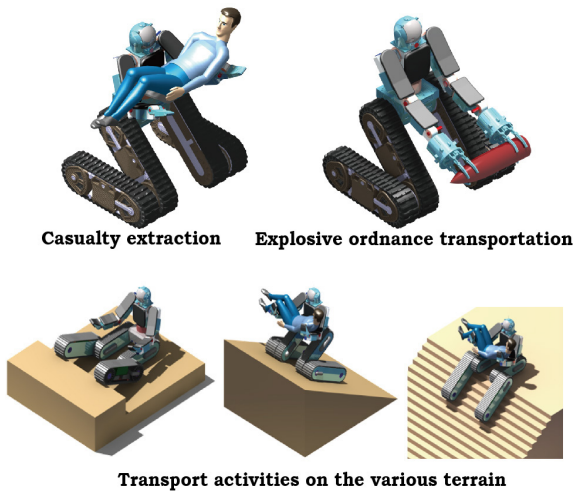


Fig. 1. Missions of the Korean rescue robot

구난로봇은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 눈 관절(eye joint)을 제외한 전체 19개의 자유도를 보유하고 있으며, 파지용 말단장치를 적용할 경우에는 총 21개의 자유도를 가진다. 매니플레이터의 경우 5 자유도를 보유하고 있으며, 고 하중의 부상을 들어 올릴 수 있도록 최적화 되어 있다. 또한 역구동(back drivability)이 발생하지 않는 사양의 웜기어를 적용함으로써 전원을 차단한 상태에서도 매니플레이터는 현재 위치를 유지할 수 있다. 따라서 로봇이 주행 임무를 주로 수행할 때는 양팔 매니플레이터의 전원을 통하여 소모

전력을 최소화하고 로봇의 운용시간을 증대시킬 수 있다.

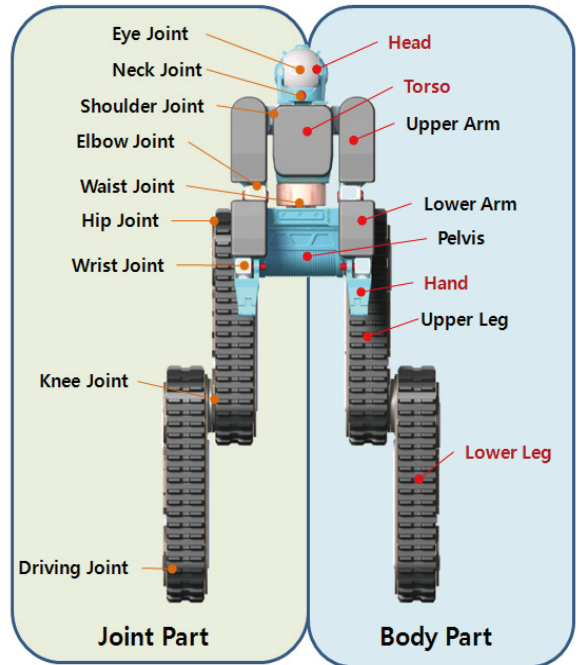


Fig. 2. Korean rescue robot configuration

이와 같이 로봇의 자유도가 엔드 이펙터의 위치와 자세제어를 이용하여 임무를 수행하는데 필요한 6 자유도 보다 많아 여유 자유도가 존재한다. 이러한 여유 자유도를 충분히 사용할 경우에 하나의 구난 임무에 대해 여러 가지 임무 요소(task primitives) 또는 구속 조건을 정의할 수 있기 때문에 로봇은 운용자가 부여한 여러 조건들을 만족시키면서 임무를 효율적으로 수행할 수 있다. 하지만 임무 요소들 사이에서 충돌이 발생할 수 있기 때문에 이를 체계적으로 관리하고 제어할 수 있는 기술이 필요하다^[1-3]. 본 논문에서는 각 임무 요소마다 우선순위를 설정하여 로봇의 전체 자유도를 효과적으로 제어할 수 있는 임무 요소 우선순위(task primitive priority) 기반의 제어 방법과 다자유도 로봇에 있어서 실시간 역기구학 문제의 해를 찾을 수 있는 페루프 역기구학 알고리즘을 통합한 전신 기구학 제어 방법에 대해 설명하고자 한다. 그리고 구난 임무를 수치모사를 통해 수행함으로써 전신 기구학 제어 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 기구학 제어

로봇의 순기구학(direct kinematics) 문제는 로봇 관절의 값이 주어졌을 때 엔드 이펙터의 자세를 구하는 것이며, 직렬형 매니플레이터(serial manipulator)의 경우 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{k}(\mathbf{q}) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{q} 는 $(n \times 1)$ 의 관절변수(joint variable) 벡터이며, \mathbf{x}_e 는 $(m \times 1)$ 차원을 가지는 엔드 이펙터의 작업 변수(operational variable) 벡터이다. 식 (1)에서 \mathbf{k} 는 비선형 벡터함수로써 작업변수와 관절변수의 관계를 나타내는데, 비선형 함수 \mathbf{k} 로 인하여 작업변수 \mathbf{x}_e 가 주어졌을 때 관절변수 \mathbf{q} 를 찾는 역기구학 문제의 해석적인 해를 찾기가 어렵다. 이를 극복하기 위해서 주로 식 (2)와 같이 선형의 속도관계를 이용하여 역기구학 문제에 접근한다.

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

여기서 자코비안(Jacobian) \mathbf{J} 는 $(m \times n)$ 차원의 행렬이며, 주로 $\partial\mathbf{k}/\partial\mathbf{q}$ 로 정의한다.

기구학 제어(kinematic control)란 임무(task space) 공간 혹은 작업 공간(operational space)에서 궤적 $\mathbf{x}_e(t)$ 가 주어졌을 때, 식 (1)과 (2)를 만족하는 관절공간에서의 궤적 $\mathbf{q}(t)$ 를 찾는 것이다. 로봇의 여유 자유도로 인하여 역기구학 문제의 해의 개수는 무한대까지 존재할 수 있기 때문에 추가의 다른 임무 요소 혹은 구속조건을 부가하여 문제를 풀 수 있다. 식 (3)과 같이 관절의 속도를 목적함수 $g(\mathbf{q})$ 로 두고 이를 최소화하는 해를 찾으면 식 (4)와 같다⁴⁾.

$$g(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{x}}_e \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{J}^\dagger = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ 는 \mathbf{J} 의 의사역행렬(pseudo inverse)이며, 역기구학의 해 (4)는 관절의 속도 노움을 최소화 한다.

식 (4)를 적분할 경우 초기 조건에 대한 오차가 존

재하면, 그 오차는 적분을 수행하는 과정에서 보정되지 않는다. 또한 수치 적분 수행 시 발생하는 수치적 오차가 누적되어 작업공간상에서 부과한 궤적을 따라 로봇의 엔드 이펙터(end effector)의 궤적이 형성되지 않는데, 이를 보정하기 위하여 작업 공간상의 오차를 이용하는 2차 폐루프 역기구학(CLİK : Closed Loop Inverse Kinematics)을 도입한다⁵⁾. 2차 CLİK은 위치의 2차 미분 값인 가속도를 사용하기 때문에 로봇의 제어를 위한 관절의 각도, 각속도, 각가속도 궤적을 모두 도출할 수 있고, 속도를 기반으로 하는 1차 CLİK에 비하여 좀 더 부드러운 관절 궤적을 만들 수 있는 장점이 있다. 위에서 언급한 두 가지 단점을 보완하기 위해 작업 공간상에서의 엔드 이펙터 오차를 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e \quad (5)$$

여기서 \mathbf{x}_d 는 엔드 이펙터의 기준 궤적이며 \mathbf{x}_e 는 순기구학식 (1)에서 계산되는 엔드 이펙터의 자세이다. 식 (2)와 (5)의 2차 미분식을 이용하면 최종적으로 오차에 대한 미분 방정식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

식 (6)은 관절속도 $\dot{\mathbf{q}}$ 와 가속도 $\ddot{\mathbf{q}}$, 그리고 오차 \mathbf{e} 의 관계를 나타내는데, 여기서 적절한 관절가속도 $\ddot{\mathbf{q}}$ 을 입력력으로 선정하여 오차 \mathbf{e} 를 시간에 따라 0으로 수렴하게 만드는 것이 2차 CLİK의 목적이다. 이를 위하여 관절의 가속도를 식 (7)과 같이 두고 식 (6)에 대입한다.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) (\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P \mathbf{e} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) \quad (7)$$

최종적으로 선형 오차 미분 방정식 (8)이 유도된다.

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P \mathbf{e} = 0 \quad (8)$$

여기서 \mathbf{K}_P 와 \mathbf{K}_D 는 양한정행렬(positive definite matrix)이며, 이때 선형 오차 미분 방정식 (8)은 점근적으로 안정한(asymptotically stable) 시스템이다. 게인 \mathbf{K}_P 와 \mathbf{K}_D 를 적절히 선정하면 시스템 극점들을 복소평면(complex plane)상에 임의로 배치할 수 있기 때문에 오차의 수렴 특성을 제어할 수 있다.

3. 여유자유도 로봇의 다중 임무 요소 제어

여유 자유도 로봇은 부과된 임무를 수행하면서 나머지 자유도를 이용하여 관절의 제한조건 만족, 특이점 회피(singularity avoidance), 장애물 회피 등을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 로봇이 120 kg의 하중을 안정적으로 들어 올릴 수 있어야하기 때문에 엔드 이펙터의 자세 제어와 로봇의 무게중심(CoM : Center of Mass) 제어가 중요하다. 따라서 이러한 사항들을 임무 요소로 정의하고 임무 요소들 사이에 우선순위를 부여하여 우선순위가 높은 임무 요소를 우선적으로 만족시키고, 우선순위가 낮은 임무 요소는 높은 우선순위의 임무 요소를 방해하지 않으면서 수행되도록 하는 임무 요소 우선순위(task primitive priority) 기반의 알고리즘을 적용한다^{2,3,6)}. 그리고 엔드 이펙터의 자세와 CoM 제어 외에 각 관절의 각도를 제한조건으로 정의하고 이를 구배투사법(gradient projection method)으로 처리한다. 이를 통하여 관절 운동을 최소화하여 불필요한 운동을 제거하며, 로봇 링크간 자체 충돌 가능성을 감소시키고 동시에 관절 구동기의 소요 에너지를 최소화 하도록 한다.

3.1 임무 요소 우선순위 방법

임무 요소 우선순위 기반의 접근 방법은 각 임무 요소에 우선순위를 부가하여 낮은 우선순위의 임무 요소가 높은 우선순위의 임무 요소의 수행을 방해하지 않는 범위에서 실행 되도록 한다. 일반적으로 (i)번째 우선순위를 가지는 임무 요소를 미분기구학 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}}^i = \mathbf{J}^i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

식 (9)에서 $\sum r_i \leq n$ 이기 때문에 자코비안 행렬의 행의 개수는 열의 개수보다 작거나 같다. 따라서 $\sum r_i = n$ 의 조건이 만족할 때까지 로봇에 임무 요소를 부여할 수 있고, 첫 번째 우선순위의 임무요소부터 (i)번째 우선순위를 가지는 임무요소의 자코비안을 통합하여 확장된 자코비안(augmented Jacobian)을 식 (10)과 같이 정의한다.

$$\mathbf{J}_A^i = [\mathbf{J}^1 \mathbf{J}^2 \dots \mathbf{J}^i]^T \quad (10)$$

확장된 자코비안의 영공간으로 투영시켜주는 연산자

행렬은 식 (11)과 같다.

$$\mathbf{P}_A^i = \mathbf{I} - \mathbf{J}_A^{i\dagger} \mathbf{J}_A^i \quad (11)$$

관절속도 해는 식 (12)와 같이 쓸 수 있다⁶⁾.

$$\dot{\mathbf{q}}^i = \dot{\mathbf{q}}^{i-1} + \bar{\mathbf{J}}^{i\dagger}(\dot{\mathbf{x}}_d^i - \mathbf{J}^i \dot{\mathbf{q}}^{i-1}), \quad \dot{\mathbf{q}}^1 = \mathbf{J}^{1\dagger} \dot{\mathbf{x}}_d^1 \quad (12)$$

여기서 $\bar{\mathbf{J}}^i = \mathbf{J}^i \mathbf{P}_A^{i-1}$ 이며, 이는 첫 번째 임무 우선 요소로부터 (i-1)번째 임무 우선 요소까지의 영공간(null space)으로 이 보다 우선순위가 낮은 (i)번째 임무 요소를 투영시키기 때문에 우선순위가 낮은 임무 요소는 우선순위가 높은 임무 요소를 방해하지 않는다. 관절속도에서의 해 (12)를 시간에 대하여 미분하면 최종적인 관절가속도의 해를 다음과 같이 얻을 수 있다⁶⁾.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}^i &= \ddot{\mathbf{q}}^{i-1} + \bar{\mathbf{J}}^{i\dagger}(\ddot{\mathbf{x}}_d^i - \dot{\mathbf{J}}^i \dot{\mathbf{q}}^{i-1} - \mathbf{J}^i \ddot{\mathbf{q}}^{i-1}) \\ &\quad + \dot{\bar{\mathbf{J}}}^{i\dagger}(\dot{\mathbf{x}}_d^i - \mathbf{J}^i \dot{\mathbf{q}}^{i-1}) \\ \ddot{\mathbf{q}}^1 &= \mathbf{J}^{1\dagger}(\ddot{\mathbf{x}}_d^1 + \dot{\mathbf{J}}^1 \dot{\mathbf{q}}^1) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\dot{\bar{\mathbf{J}}}^{i\dagger}$ 와 $\dot{\bar{\mathbf{J}}}^i$ 는 각각 식 (14)와 (15)와 같다.

$$\dot{\bar{\mathbf{J}}}^{i\dagger} = -\bar{\mathbf{J}}^{i\dagger} \dot{\bar{\mathbf{J}}}^i \bar{\mathbf{J}}^{i\dagger} + (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{J}}^{i\dagger} \bar{\mathbf{J}}^i) \dot{\bar{\mathbf{J}}}^{i\dagger} (\dot{\bar{\mathbf{J}}}^i \bar{\mathbf{J}}^{i\dagger})^{-1} \quad (14)$$

$$\dot{\bar{\mathbf{J}}}^i = -\mathbf{J}^i (\mathbf{Q}_A^{i-1} + \mathbf{Q}_A^{i-1T}) + \dot{\mathbf{J}}^i \mathbf{P}_A^{i-1} \quad (15)$$

여기서 $\mathbf{Q}_A^i = \mathbf{J}_A^{i\dagger} \dot{\bar{\mathbf{J}}}^i \mathbf{P}_A^i$ 이다.

3.2 구배투사법

식 (2)에서 만약 자코비안의 영공간이 공집합이 아니라면 임무 요소 우선순위 방법과 유사하게 자코비안의 영공간을 활용할 수 있다. 따라서 식 (2)를 만족시키는 또 다른 해를 식 (16)과 같이 얻을 수 있다⁴⁾.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{x}}_e + (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \dot{\mathbf{q}}_0 \quad (16)$$

식 (16)에서 첫 번째 항은 식 (4)에서 설명한 바와 같이 관절속도의 노움을 최소화하는 것이며, 두 번째 항

은 추가적인 구속조건을 부여시킬 수 있는 항이다. 행렬 $(\mathbf{I}_n - \mathbf{J}^T \mathbf{J})$ 는 자코비안 \mathbf{J} 의 영공간으로 투영시켜 주는 행렬이다. 일반적으로 스칼라 형태의 목적함수 $w(\mathbf{q})$ 를 식 (17)과 같이 사용한다.

$$\dot{\mathbf{q}}_0 = k_0 \left(\frac{\partial w(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \right) \quad (17)$$

여기서 $k_0 > 0$ 이며, 역기구학의 해 $\dot{\mathbf{q}}_0$ 는 목적함수 $w(\mathbf{q})$ 의 구배를 따라 움직이기 때문에 목적함수를 최소화 시키거나 최대화 시킨다. 최종적으로는 식 (17)의 $\dot{\mathbf{q}}_0$ 형태가 아닌 $\ddot{\mathbf{q}}_0$ 형태로 2차 CLIK과 통합되는데 그 이유는 2차 CLIK은 가속도 정보를 사용하기 때문이다. 본 논문에서의 추가적인 목적함수를 식 (18)과 같이 관절각도 제한 조건으로 설정하여 관절 운동이 최소화 되도록 한다.

$$w(\mathbf{q}) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{iM} - q_{im}} \right)^2 \quad (18)$$

여기서 q_{iM} 은 각 관절이 움직일 수 있는 최대 각도이며, q_{im} 은 최소 각도이다. 그리고 \bar{q}_i 는 두 각도의 평균 각도이다. 따라서 구배투사법을 적용하여 목적함수 (18)을 최소화하게 되면 로봇의 각 관절 구동이 최대한 관절제한 각도의 중심인 \bar{q}_i 를 기준으로 이루어지기 때문에 불필요한 관절 운동이 발생하는 것을 최소화할 수 있다.

4. 수치모사

수치모사를 수행하기 위해 Fig. 2의 구난로봇을 이용하여 2차원 기구학 모델로 표현하면 Fig. 3과 같다. 2차원 모델로 간략화한 이유는 구난임무의 경우 로봇 좌측과 우측의 구동기가 동일한 궤적을 가지고 수행되기 때문이다. Fig. 2에서 knee joint, pelvis joint, shoulder joint, elbow joint를 이용하여 Fig. 3과 같이 4자유도 시스템으로 근사화 할 수 있다. 또 각 링크들의 물리량을 이용하여 무게중심(CoM : Center of Mass)의 위치도 구할 수 있는데 이를 Fig. 3에 나타내었다. 따라서 Fig. 3에서 로봇의 총 자유도 n 은 4자유도이며, 엔드 이펙터의 위치와 자세를 기술하는데 2자유도를

사용하며, CoM 제어에 1자유도를 활용하고, 그리고 마지막으로 1자유도는 관절 제한조건으로 이용한다.

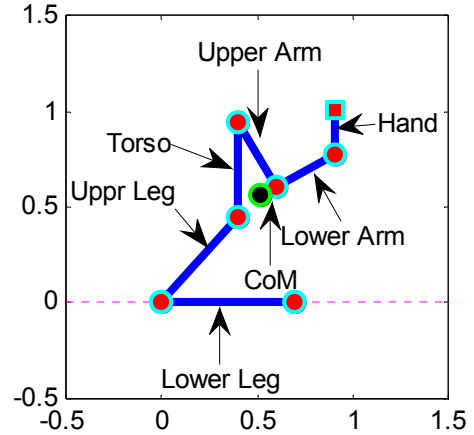


Fig. 3. Kinematic structure of the rescue robot

작업공간상에서 구난로봇의 기준 궤적은 엔드 이펙터를 기준으로 생성하고, 엔드 이펙터를 손목(wrist) 및 로봇의 무게중심으로 정의한다. 다음의 5차의 다항식을 이용하여 작업공간에서 엔드 이펙터의 기준 궤적을 생성한다.

$$\mathbf{x}_d(t) = \mathbf{a}_5 t^5 + \mathbf{a}_4 t^4 + \mathbf{a}_3 t^3 + \mathbf{a}_2 t^2 + \mathbf{a}_1 t + \mathbf{a} \quad (19)$$

식 (19)의 미지수는 초기시각 $t = 0$ 과 종료시각 $t = t_f$ 에서 설정한 엔드 이펙터의 위치, 속도, 가속도 조건을 이용하면 구할 수 있다. 구난 임무 중 가장 중요한 것은 Lifting 임무인데, 그 이유는 120 kg의 부상자를 로봇의 안정성을 만족하면서 들어 올려야 하기 때문이다. 그리고 이 해석을 통하여 제어 알고리즘 검증에 포함하여 각종 모터, 감속기, 로봇 구조물 등의 하드웨어 설계가 가능하기 때문이다.

Lifting 임무에서 가장 우선순위가 높은 임무 요소로서 손목의 운동을 설정하였고, 이를 기준으로 로봇 전신에 존재하는 관절을 이용하여 부상자를 들어 올릴 수 있다. 그리고 120 kg의 큰 가반 하중으로 인하여 로봇이 전복될 가능성이 존재하기 때문에 안정성 확보를 위해 무게중심(CoM : Center of Mass)을 로봇의 지지 다각형(support polygon)의 중심 부분에 위치시키는 임무 요소를 두 번째 우선순위로 선정하였다. CoM의 위치 \mathbf{x}_C 는 식 (20)을 이용하여 계산하였다.

$$\mathbf{x}_C = \frac{\sum_{k=1}^n m_k \mathbf{r}_k}{\sum_{k=1}^n m_k} \quad (20)$$

임무 요소 우선순위 방법을 사용하기 위한 CoM의 속도 $\dot{\mathbf{x}}_C$ 는 CoM 자코비안을 이용하여 식 (21)과 같이 쓸 수 있다^[7].

$$\dot{\mathbf{x}}_C = \frac{\sum_{k=1}^n m_k \dot{\mathbf{r}}_k}{\sum_{k=1}^n m_k} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k \mathbf{J}_{Ck} \dot{\mathbf{q}}_k}{\sum_{k=1}^n m_k} = \mathbf{J}_C \dot{\mathbf{q}} \quad (21)$$

여기서 n 은 로봇의 자유도에 해당하며, m_k 는 각 링크의 질량을 나타내며, \mathbf{r}_k 는 각 링크의 무게중심의 위치를 표현한다. 마지막으로 세 번째 우선순위의 임무 요소로 식 (18)과 같이 관절의 제한 각도로 설정하여 불필요한 모션이 가급적 일어나지 않도록 구배투사법을 적용하였다.

2차 CLIK과 임무 요소 우선순위 알고리즘을 통합하여 최종적으로 전신 기구학 제어방법을 수학적으로 표현하면 아래와 같다.

$$\ddot{\mathbf{q}}^1 = \mathbf{J}^{1\dagger} (\ddot{\mathbf{x}}_d^1 + \mathbf{K}_{D1} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{P1} \mathbf{e} + \mathbf{J}^{1\dagger} \dot{\mathbf{q}}^1) \quad (22)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}^2 = \ddot{\mathbf{q}}^1 + \bar{\mathbf{J}}_d^2 (\ddot{\mathbf{q}}_d^2 + \mathbf{K}_{D2} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{P2} \mathbf{e} - \mathbf{J}^2 \dot{\mathbf{q}}^1 - \mathbf{J}^2 \ddot{\mathbf{q}}^1) + \bar{\mathbf{J}}^{2\dagger} (\dot{\mathbf{x}}_d^2 - \mathbf{J}^2 \dot{\mathbf{q}}^1 + (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_A^{2\dagger} \mathbf{J}_A^2) \ddot{\mathbf{q}}_0) \quad (23)$$

식 (22)에서 \mathbf{q}^1 은 부상자를 들어 올리기 위해 손목에 부여된 임무 요소를 만족하는 관절공간의 해이며, 식 (23)의 \mathbf{q}^2 는 무게중심 제어를 위한 해이다. 마지막으로 $\ddot{\mathbf{q}}_0$ 는 관절제한의 목적함수를 최소화하는 해를 나타낸다. 전신 기구학 제어 알고리즘 (22)와 (23)을 블록선도를 이용하여 표현하면 Fig. 4와 같고, 여기서 앤드 이펙터의 위치를 구하기 위해 순기구학 식 (1)을 이용하였다. 로봇의 관절제어기는 강인 PID 제어기를 사용하였으며, 동역학 모델은 Matlab의 SimMechanics와 Recurdyn 소프트웨어를 이용하여 구현하였다.

수치 적분은 Euler 적분방법을 사용하였으며, 적분 간격은 $\Delta t = 1$ ms로 설정하였다. 구난로봇은 120 kg의 큰 하중을 들기 위해서 Fig. 2의 Lower Arm을 주로 사용하기 때문에 Fig. 3에서 Lower Arm의 중심부에 부상병의 하중이 작용한다고 가정하였다.

Matlab SimMechanics를 이용한 Lifting 임무의 해석 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 이를 살펴보면 최초 시각에서는 CoM의 위치가 지지 다각형의 최외곽에 존재하여 로봇의 안정성에 여유가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 구난 로봇은 구동기를 사용하여 부상자를 들어 올리는 동시에 여유 자유도를 이용하여 두 번째 우선순위로 정의된 CoM의 위치를 로봇의 지지

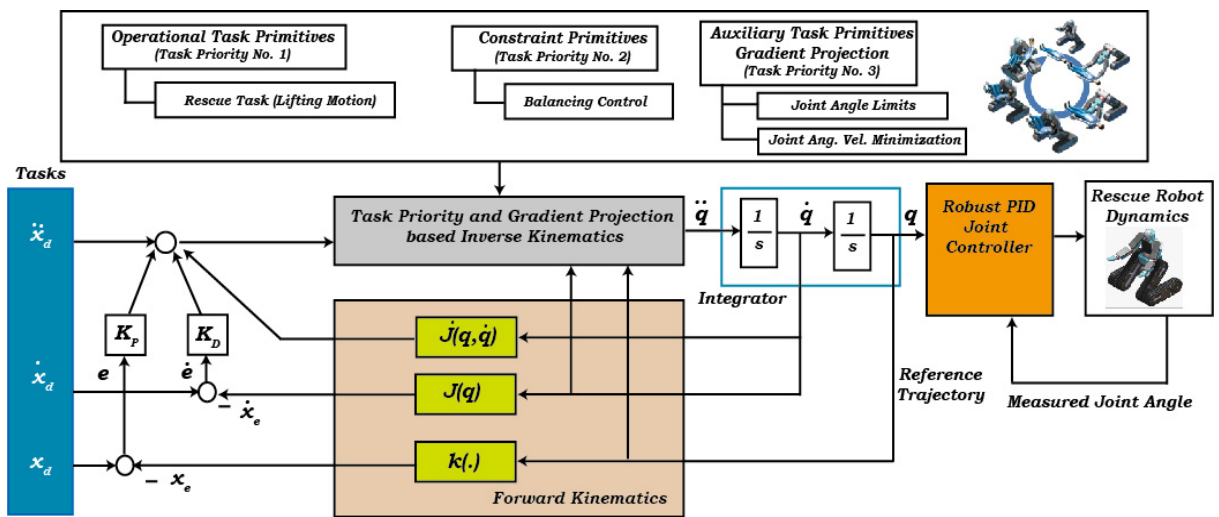


Fig. 4. Block diagram of kinematic control

다각형 중심 방향으로 끌어 당겨야 한다.

Fig. 5를 살펴보면 CoM의 위치가 시간이 흐름에 따라 제어를 통해 지지 다각형의 중심 부분으로 옮겨지는 것을 확인할 수 있다. 세 번째 우선순위로 관절구동을 최소화하는 목적함수를 설정하였기 때문에 제한된 관절의 구동 범위 내에서 Lifting 임무를 수행하는 것을 알 수 있다. 그리고 Lifting 임무의 완료 시점에서는 로봇의 상체를 뒤로 젖혀서 로봇 몸체와 양팔 매니플레이터를 모두 이용하여 부상자가 안전하게 로봇에 안착될 수 있도록 하였다. 또, 이를 통해 몸체와 양팔 매니플레이터로 부상자의 하중이 분산될 수 있도록 하여 매니플레이터에 작용하는 하중을 최소화할 수 있도록 하였다.

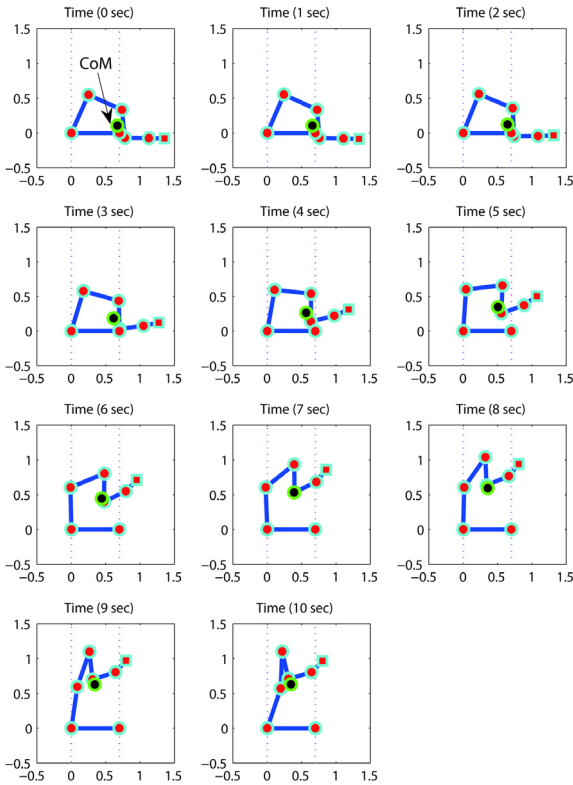


Fig. 5. Lifting task simulation result using Matlab

Lifting 임무를 이용하여 설계된 로봇의 각 링크들 사이에 자체 충돌이 일어나는지 확인하고, 더 나아가 *Matlab SimMechanics*의 결과를 추가로 확인하기 위해서 로봇의 3차원 형상을 모델링하고 *Recurdyn*을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나

타내었는데 Fig. 5의 *Matlab* 결과와 유사함을 알 수 있다. 관절구속 조건을 부과하여 각 관절의 움직임을 최소화하였기 때문에 링크간 자체 충돌은 일어나지 않는 것을 확인하였으며, 동시에 구난로봇이 중심을 유지하면서 120 kg의 부상병을 들어 올리는 것을 검증할 수 있었다.

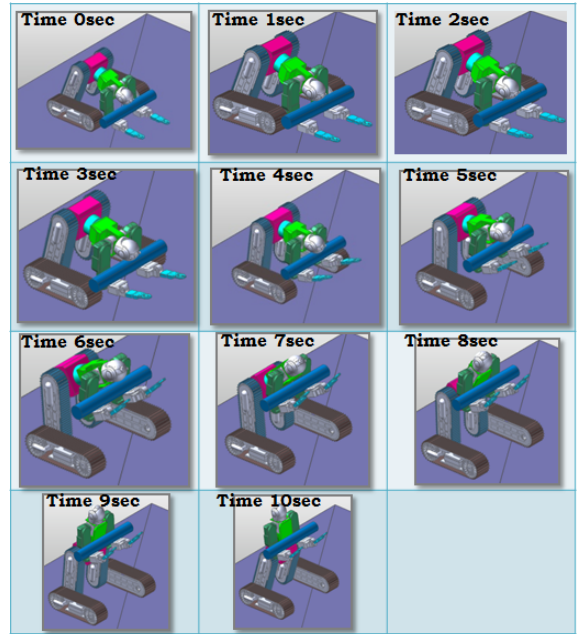


Fig. 6. Lifting task simulation result using Recurdyn

5. 결론

본 논문에서는 현재 개발 중인 구난로봇에 대해 설명하였으며, 구난로봇을 제어하기 위해 2차 페루프 역기구학과 임무 요소 우선순위 알고리즘을 통합한 전신 기구학 제어 방법을 사용하였다. 그리고 동역학 모델을 기반으로 수치모사를 수행하여 전신 기구학 제어 방법의 타당성을 입증하였다.

References

[1] Dietrich A., Wimböock T., Schäffer A., and Hirzinger G., "Reactive Whole-Body Control," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 20-

- 33, 2012.
- [2] Kim I. and Oh J., "Inverse Kinematic Control of Humanoids Under Joint Constraints," *Int. J. of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, No. 74, pp. 1-12, 2013.
- [3] Sentis L. and Khatib O., "A Whole-Body Control Framework for Humanoids Operating in Human Environments," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, May, pp. 2641-2648, 2006.
- [4] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., and Oriolo, G., *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer, 2009.
- [5] Siciliano B., "A Closed-Loop Inverse Kinematic Scheme for On-Line Joint-Based Robot Control," *Robotica*, Vol. 8, pp. 231-243, 1990.
- [6] Siciliano B. and Slotine J., "A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly Redundant Robotic Systems," *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, Pisa, Italy, pp. 1211-1216, 1991.
- [7] Sugihara T. and Nakamura Y., "Whole-body Cooperative Balancing of Humanoid Robot Using COG Jacobian," *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, pp. 2575-2580, 2002.