

7 자유도 휴머노이드 로봇 팔의 토크 및 에너지 성능 향상을 위한 어깨 관절 좌표계 각도 최적화

Optimization of Shoulder Joint Frame Angles for Torque and Energy Performance Improvement in 7-DOF Humanoid Arms

윤지원^{1,2} · 인용석^{1†}

Ji Won Yoon^{1,2}, Yong Seok Ihn^{1†}

Abstract: Optimizing kinematic design is essential to enhance the performance of humanoid robots. Nevertheless, most of the existing research focuses on a single performance metric to improve performance, while in real-world applications, individual performance metrics are related and require comprehensive optimization. This study investigates the performance of various shoulder joint base frame angle combinations using the Unitree G1 model in a virtual simulation environment. We assessed performance based on multiple criteria, including overall torque efficiency (factoring in joint importance), energy consumption per unit time, workspace volume, and the Yoshikawa Manipulability Index. By optimizing these multi-objective functions through the Differential-Evolution algorithm, we identified that a shoulder joint configuration of 14.4 degrees in x-axis rotation and -2.4 degrees in z-axis rotation maximizes overall system efficiency. This configuration showed improvements over the baseline design: 1.1% in torque efficiency, 3.3% in energy efficiency, and 2.3% in manipulability. The findings of this study provide a quantitative basis for selecting optimal shoulder base frame angles in 7-DOF humanoid robotic arm design and are expected to support future humanoid robot designs across various applications.

Keywords: Humanoid, differential-evolution optimization, null space control, energy efficiency

1. 서 론

휴머노이드 로봇의 작업 수행 능력은 관절 구성과 기구학적 설계에 크게 영향을 받으며, 이는 실제 응용 환경에서의 성능을 결정짓는 핵심 요소이다. 특히 인간과의 협업이 요구되는 환경에서는 작업의 효율성뿐만 아니라 안정성과 신뢰성도 중요한 고려사항이 된다. 휴머노이드 로봇의 초기 자세 구성은 전체 작업 수행 과정에서 에너지 효율성과 동작 안정성에 지속적인 영향을 미치는 것으로 나타났다^[1].

특히 어깨 관절의 기본 각도 설정은 전체 팔 동작의 성능을 좌우하는 핵심요소로 주목받고 있다^[2]. WALK-MAN의 연구^[3]를 통해 어깨 관절 구성이 작업공간과 조

작성 지표에 직접적인 영향을 미친다는 것을 입증되었다. 이는 단순한 기구학적 설계를 넘어, 작업 수행 시의 동역학적 성능과도 밀접한 연관이 있음을 시사한다.

그럼에도 불구하고 기존 연구들은 대부분 단일 성능 지표에 초점을 맞추어 성능 개선을 진행하는 수준이었다. 그러나 실제 응용 환경에서는 개별 성능 지표들이 상호 연관되어 있으며, 종합적인 최적화가 요구된다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 종합적 접근으로 실제 응용 가능한 최적 어깨 관절 각도를 도출하여 휴머노이드 로봇의 전반적인 작업 수행능력을 향상시키는 것을 목표로 한다.

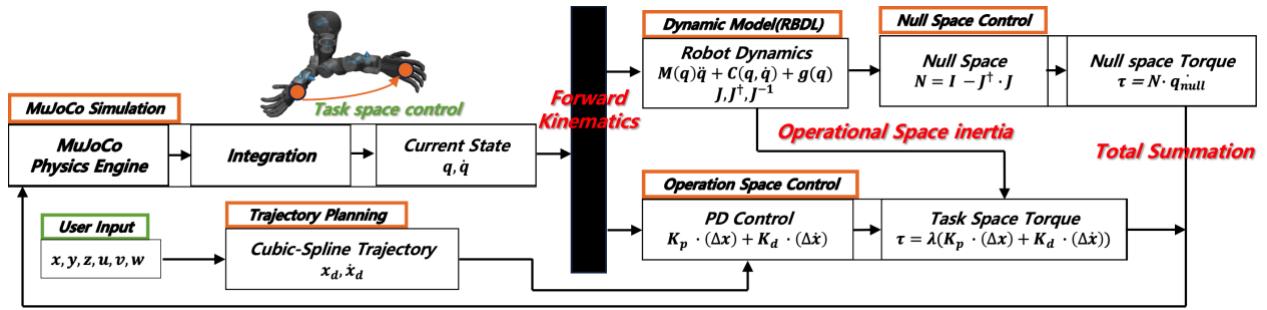
이를 위해 본 연구는 다음과 같은 접근을 시도한다. 토크 효율성, 에너지 소비, 작업 수행능력을 통합적으로 고려하는 비용 함수를 제안한다. 또한 각 지표 간의 상관관계를 고려하여 가중치를 선정하여 차분-진화(Differential-Evolution) 최적화를 진행하였다. 정격 토크 제한으로 안전한 동작 수준 및 모터의 수명과 신뢰성을 고려하여 최적화 제약조건을 도입하였다.

※ This work was supported in part by National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2024-00464386); and in part by the Korea Institute of Science and Technology(KIST) Institutional Program (No.2E33601).

1. Center for Humanoid Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, South Korea

2. Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 02841, South Korea

† Corresponding author's email: (yongseok.ihn@kist.re.kr)



[Fig. 1] PD Control system for task space with null-space in MuJoCo-RBDL combined system

2. 연구 방법

2.1 가상 시뮬레이션 환경 구축

본 연구에서는 7자유도 휴머노이드의 최적 어깨 각도 도출을 위해 물리 기반 시뮬레이터인 MuJoCo(Multi-Joint Dynamics with Contact)와 동역학 해석 라이브러리인 RBDL(Rigid-Body Dynamics Library)을 결합한 하이브리드 시뮬레이션 환경을 구축하였다. MuJoCo는 정확한 접촉 동역학과 효율적인 물리 연산을 제공하며, RBDL은 정밀한 역기구학 및 동역학 계산이 가능하다는 각각의 장점을 활용하였다.

2.1.1 기구학적 구성

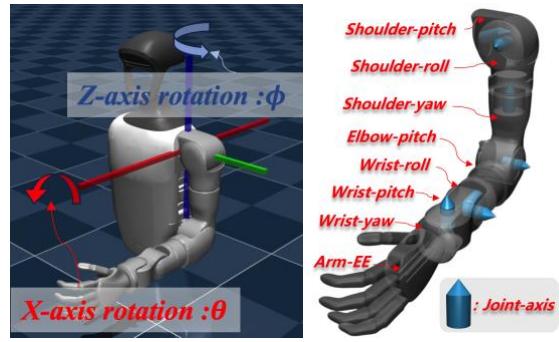
로봇의 기구학적 구성은 [Fig. 2]와 같이 7개의 회전 관절로 이루어져 있으며, 어깨 3자유도(관절 1-관절 3), 팔꿈치 1자유도(관절 4), 손목 3자유도(관절 5-관절 7)로 구성된다. 특히 어깨-피치-링크의 기본 자세 각도가 전체 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 해당 링크의 방향을 결정하는 두 회전각(θ, ϕ)을 설계 변수로 설정하였다.

2.1.2 모델 변환 및 생성

시스템의 완전한 동작 분석을 위해 MJCF와 URDF 두 가지 형식의 로봇 모델을 상호 보완적으로 활용하였다. 두 가지 파일 포맷의 오일러 각도 표현 방식 차이를 고려하여 X-축 회전과 Z-축 회전을 각각 -20도부터 20도 까지 5도 간격으로 총 81개의 서로 다른 어깨를 구성하여 모델을 생성하였다.

2.2 제어 시스템 설계

본연구에서는 7자유도 로봇 매니퓰레이터의 효과적인 제어를 위해 작업 공간 제어를 진행하였다. 제안된 시스템은 [Fig. 1]에서 확인할 수 있듯이 여유 자유도를 활용하여 주 작업을 수행하면서 부가적인 제어 목표를 달성하도록 설계되었다. 또한 문 열기 작업을 목표로



[Fig. 2] Robot configuration in simulation

설정하여 궤적을 형성한 뒤 작업을 진행하였다^[3]. 매끄러운 동작 구현을 위해 위치 방향에 대해 독립적으로 3차 스플라인 보간법을 적용한 궤적을 생성한다.

2.2.1 작업 공간 제어

작업 공간에서의 주 작업은 식 (1)과 같은 비례-미분 제어 방식을 따른다.

$$\tau_{PD} = J^\dagger \cdot \lambda \cdot (K_p \cdot q + K_d \cdot \dot{q}) + g(q) \quad (1)$$

$$\tau_{null} = w \cdot (I - J^\dagger \lambda J M^{-1})(K_n \cdot \dot{q}) \quad (2)$$

$$\tau_{total} = \tau_{PD} + \tau_{null}$$

식 (1)과 식 (2)에 λ 는 작업공간 관성 행렬을 나타내고, M 은 로봇 관성 행렬을 의미한다. 제안된 제어 구조에서는 여유 자유도를 활용하여 부가적인 제어 목표가 식 (2)와 같이 영공간 제어^[3]를 통해 구현된다. 특히, 각 관절 모터의 토크 용량이 상이함을 고려하여 관절별 가중치 w 를 적용함으로써 제어의 우선순위를 두었다. 이러한 접근은 시스템의 전반적인 에너지 효율을 향상시키면서 상대적으로 높은 토크 출력이 가능한 어깨 관절의 부하 처리 능력을 효과적으로 사용할 수 있게 한다.

어깨 기준 좌표계 변경에 따른 자코비안 행렬의 변화를 고려하여, 제어기의 신뢰성 검증을 수행하였다. 모든 어깨 구성에서 말단부가 초기 목표지점을 도달함을 확

인한 후 분석에 필요한 데이터를 수집하였다.

2.3 최적화 방법론

위의 가상 시뮬레이션 환경과 설계된 제어 시스템으로 몇 가지 시나리오를 진행하였다. 그 과정에서 각 관절 모터의 토크 값, 위치 값, 속도 값, 말단부의 좌표 그리고 작업성 지수를 기록하였다. 저장된 데이터를 바탕으로 관절의 토크 값의 최소화, 관절의 과부하 시간 최소화 그리고 에너지 소비의 최소화를 위한 최적화를 진행하였다. 이를 고려한 비용 함수는 식 (3)에서 확인 할 수 있다.

$$f(\theta, \phi) = w_1 \cdot C_T + w_2 \cdot C_O + w_3 \cdot C_E \quad (3)$$

$$C_T = \sum_i (\mu_i \cdot \bar{\tau}_i), \quad C_O = \sum_i (\mu_i \cdot \frac{t_i}{t}),$$

$$C_E = \sum_i (\mu_i \cdot \int |\tau_i \cdot \omega_i| dt)$$

- $\theta \in [-20^\circ, 20^\circ] \cap \phi \in [-20^\circ, 20^\circ]$ (4)

- $\tau \leq 1.5 \cdot \tau_{rated}$ (5)

- μ_i : 관절 i에 해당되는 가중치

- $\bar{\tau}_i$: 관절 i의 평균 절대 토크

- $t_i : |\tau_i| > 0.9 |\tau_{rated}|$ 인 시간

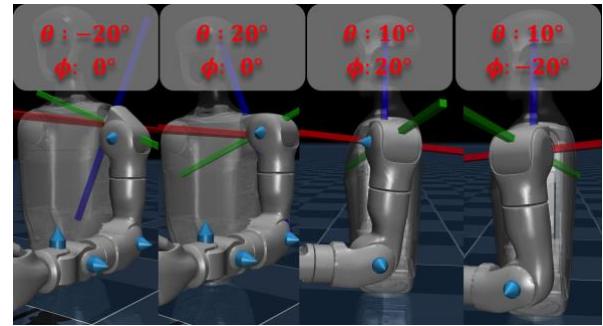
- ω_i : 관절 i의 각속도

여기서의 비용 함수 가중치는 실시간 작업 수행능력, 장기 운용 안정성 및 에너지 효율성을 고려하여 $w_1 = 0.35$, $w_2 = 0.35$, $w_3 = 0.3$ 로 선정하였다. [Table 1]은 정격 토크, 관절 가중치에 대해 나타낸 것이다. 여기서의 정격 토크는 5 kg 가반 하중(Payload)을 달성하기 위해 각 관절에 1.0rad/s의 속도로 작동시켰을 때 시뮬레이션에서 부가된 최고 토크 값이다.

어깨의 관절 좌표계의 최적각을 제약 조건 내에서 도출하기 위해 차분-진화 알고리즘^[5]을 통해 최적화를 진행하였다. 최적화를 진행하기 위한 제약 조건은 식 (4), 식 (5)와 같다.

[Table 1] Rated torque, weight factors of joints and cost function

index	$\tau_{rated,i}$	μ_i
1	48 N·m	1.0
2	48 N·m	1.0
3	21 N·m	0.7
4	21 N·m	0.7
5	7 N·m	0.5
6	7 N·m	0.5
7	7 N·m	0.5



[Fig. 3] Robot configuration of multiple cases

초기의 모델을 구성하기 위해 X-축 회전과 Z-축 회전을 각각 -30도부터 30도까지 구성을 하였다. 하지만 도달 가능성(reachability)을 확인 하기 위하여 머리 높이 이상에서 작업을 진행할 때^[2], θ 의 값이 크면 2번 관절에 부과되는 토크의 값의 평균치가 정격 토크를 크게 상회하는 수준으로 나타났다. 그 결과 위와 같은 제약 조건을 도출하였다.

[Table 2] Parameters of differential evolution

집단크기	30	돌연변이 계수	0.8
최대 반복 횟수	2000	수렴 허용 오차	0.01
교차율	0.7	돌연변이 전략	Best1bin

$$V = x_{best} + F \cdot (x_{r1} - x_{r2}) \quad (6)$$

- F: 돌연변이 계수

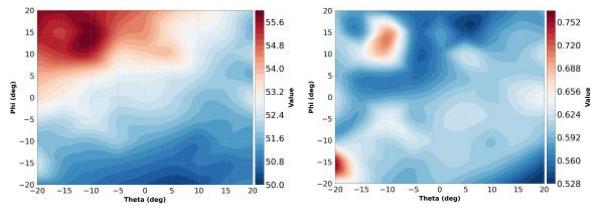
차분-진화^[4]의 최적화를 진행할 때, 식 (6)을 참고하면 효율적인 구현을 위해 최고 해를 활용하여 최적 해를 도출하였다. 문제의 정의가 명확하고 간단한 비용 함수의 구성이므로 [Table 2]와 같은 매개변수를 설정하였다. 이로써 빠르게 결과 해를 도출할 수 있었고 20회의 반복 최적화 결과에서 결론 값이 3% 오차율 내에 도출되는 결과를 확인할 수 있었다.

3. 연구 결과

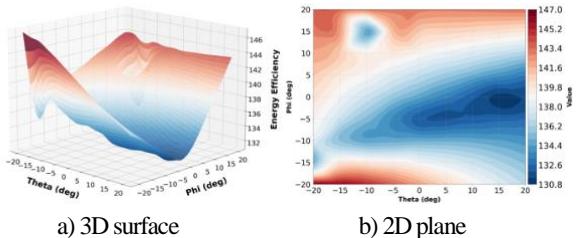
위의 실험 환경으로 최적화를 진행했을 때, 도출된 어깨의 최적 관절 좌표계 각도 해와 각각의 지표들은 다음과 같이 확인 할 수 있었다.

[Table 3] Optimal angle for shoulder base frame angle

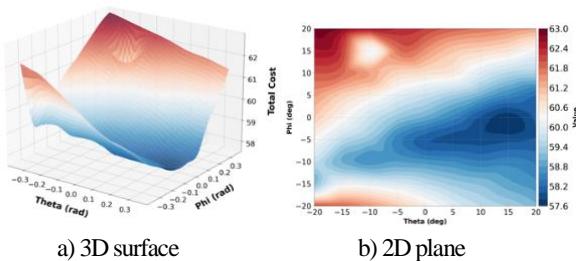
θ (X-axis Rot)	ϕ (Z-axis Rot)
14.4°	-2.4°



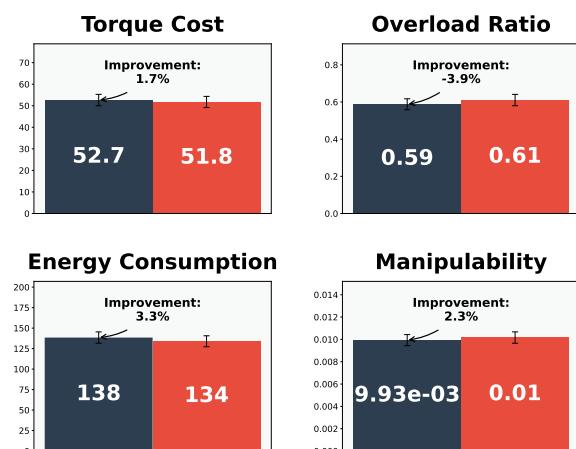
[Fig. 4] Total torque and time ratio of over-rated torque



[Fig. 5] 3D surface and 2D plane of energy efficiency



[Fig. 6] 3D surface and 2D plane of total cost



[Fig. 7] Improvements of optimization

위의 지표들을 확인하면 어깨 각도에 따른 성능 변화의 뚜렷한 경향성을 확인할 수 있었다. [Fig. 4]에서 보면 어깨의 전방 경사가 관절 토크의 총량을 감소시키며, [Fig. 5]에서는 에너지 소비 감소 경향을 볼 수 있었다.

또한 차분 진화 알고리즘을 사용해 다양한 어깨 각도 조합을 시뮬레이션으로 최적화 한 결과 X축 14.4도 회전, Z축 -2.4도 회전이 최적임을 확인하였다. [Fig. 7]을 확

인하면, 기존 대비 토크 효율성에서 1.1%의 향상, 에너지 효율에서 3.3%의 향상, 작업성 지수에서 2.3%의 향상이 이루어졌다. 다만 과부하 비율 측면에서는 3.9%가 악화되는 결과를 보였으나, 전체적인 비용에선 4.1%의 향상이 이루어졌다.

4. 결 론

본 연구는 7자유도 휴머노이드 로봇 팔의 최적 어깨 관절 각도를 도출하여 전반적인 작업수행 능력을 향상시키는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 토크 효율성, 에너지 소비, 작업성 지수 등을 통합적으로 고려하는 다중 비용 함수 기반 최적화를 진행하였다. 또한 휴머노이드 로봇 설계에서 단일 성능 지표가 아닌 통합적 접근의 중요성을 확인할 수 있었고, 특히 실제 작업 환경에서 발생할 수 있는 상충 관계(Trade-off)를 효과적으로 해결하여 최적의 어깨 각도를 도출하였다. 이는 향후 다양한 응용 환경에서 휴머노이드 로봇 설계에 유용한 참고 자료가 될 것이다.

하지만 본 연구는 단일 작업 수행에 대하여 최적화를 진행하여 일반화하기에는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 강화학습 기반 최적화를 통해 최적 작업 궤적과 어깨 각도를 동시에 최적화하는 방향으로 발전시킬 계획이다.

References

- [1] Sung, Young-Whee, and Dong-Kwon Cho. "An optimal initial configuration of a humanoid robot." *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* 56.1 (2007): 167-173.
- [2] Ayusawa, Ko, and Eiichi Yoshida. "Motion retargeting for humanoid robots based on simultaneous morphing parameter identification and motion optimization." *IEEE Transactions on Robotics* 33.6 (2017): 1343-1357.
- [3] Bagheri, Mostafa, et al. "Kinematic analysis and design considerations for optimal base frame arrangement of humanoid shoulders." *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2015.
- [4] Zhu, Xinghao, et al. "Allowing safe contact in robotic goal-reaching: Planning and tracking in operational and null spaces." *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2023.
- [5] Pant, Millie, et al. "Differential Evolution: A review of more than two decades of research." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 90 (2020): 103479.