

역도 드는 동작의 조작도 해석

Manipulability Analysis of the Weight Lift.

원경태, 하인수, 이지홍

충남대학교 메카트로닉스공학과 (Tel : +82-42-821-6873; Fax : +82-42-825-9225; E-mail :
jhlee@meca.chungnam.ac.kr)

Abstract

In this article, the configuration of weight lifter is analyzed using manipulability polytope. After modeling body as 7-link redundant robot, optimal joint angles during first stage are searched by dynamic programming technique and compared with standard reference data.

Keywords : Manipulability, Weight lifter, Dynamic programming

1. 서론

역도 경기는 인상 기록과 용상 기록의 합계에 의하여 결정되는데 일반적으로 인상 기록은 용상 기록의 약 70%에 불과하고, 특히 우리 나라 선수들은 용상 보다는 인상에서 세계 수준과는 많은 차이를 나타내고 있다[1]. 이러한 인상에서의 취약점을 보완하기 위해 여러 가지의 연구들이 이루어졌는데, 예를 들면 [1]에서는 국내 및 외국 우수 선수들이 인상을 할 때의 움직임을 비디오 카메라로 캡처하여 역기의 궤적 및 그 궤적에 따른 일반 선수들과 우수 선수들의 각 자세의 차이점들을 밝혀내었고, [2]에서는 인상 동작 수행시 역기 궤적에 따른 역도 선수의 각 관절에 걸리는 모멘트를 근사적으로나마 산출해 내었다. 그리고 [3]에서는 역도 인상 동작시 역기와 인체의 무게 중심 변화 및 인체 운동 특성들에 대한 변화들에 대해 연구하였다.

이러한 연구들에 힘입어 현재 역도 선수들은 인상 동작의 각 단계(끌기, 잡아채기, 앉아받기, 일어서기)에 따라 요한 특징적인 자세에 대한 지도를 어느 정도 받을 수 있게 되었다. 하지만 이러한 연구들은 어디까지나 우수한 선수들이 인상 동작을 할 때 일반 선수들과는 특징적으로 다르게 행동하는 면들의 고찰에 대한 것이고, 또 신체 조건이 서로 다른 선수들이 인상 동작시 필요한 정확한 자세에 대한 정보는 그다지 제공하고 있지 못하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 역도 선수를 2차원상에서 움직이는 로봇으로 모델링하여 인상 동작시 취하게 되는 각 자세에 대해서 여러 가지 조작도를 알아보고, 인상 동작의 각 단계에서 조작도의 다각형의 최대 길이 방향이 역기의 궤적과 일치하는 정도가 제일 많은 조작도를 찾아낼 것이다. 마지막으로 앞의 방법과는 반대로 찾아진 조작도의 최대 길이가 역기의 궤적에 일치하도록 하는 로봇의 자세를 찾도록 하는 최적화 문제를 해결함으로써 역도 선수가 좀 더 좋은 성과를 위해 취해야 할 여러 가지 자세들에 대해 제시하고자 한다.

2. 역도 드는 동작.

인상 동작에는 크게 4가지의 단계로 나누어 지는데, 그것은 끌기, 잡아채기, 앉아받기, 일어서기로 이루어져 있다. 끌기는 경기대에 놓여진 바를 대퇴까지 끌어 올리는 동작을 말하고, 잡아채기는 풀 익스텐션 또는 라스트 풀이라고 불리우며, 발 뒤꿈치가 들리고 양발 끝이 지면에서 떨어지기 직전까지의 동작이고, 앉아받기는 풀 동작이 완료된 후 인체가 스쿼트자세를 취하면서 바 밑으로 파고 들어가는 동작을 말하며, 마지막으로 일어서기는 앉아받기 자세에서 양팔로 바를 받쳐들면서 일어나는 동작을 말한다 [1], [4].

여기서 끌기와 잡아채기에서는 주로 무릎과 허리의 신전을 이용하고, 앉아받기에서는 바의 높이를 거의 변화시키지 않으면서 선수의 자세를 바꾸면서, 일어서기 단계에서는 오직 무릎의 힘만을 이용하여 바를 올리게 된다[2].

[1], [4]에서는 일반적으로 역기의 궤적이 바가 지면에서 들어 올려질 때의 수직선을 기준으로 할 때 인체의 몸쪽으로 당겨진 S 형태를 나타낸다고 보고하였다(그림 1 참조).

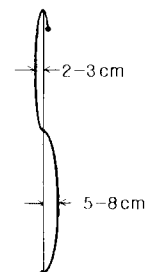


그림 1. 인상 동작시 옆에서 본 바의 궤적.

Fig. 1. The path of bar center during snatch.

그림 1은 역도선수가 오른쪽에 있다는 가정하에 인상 동작시 바의 궤적을 나타낸 것이고, 바가 선수 몸쪽으로 가장 가까워진 곳까지가 끌기 동작에 해당하고, 바가 선수 몸쪽에서 가장 멀어진 곳까지는 잡아채기, 그리고 나머지 부분

은 알아받기 단계에 해당한다.

3. 여러 종류의 조작도 해석

일반적으로 로봇의 어떤 작업 및 일에 대한 능력을 알아 보기 위한 방법으로 조작도 지수를 계산하거나 또는 조작도 그래프 즉, 조작도 타원이나 조작도 다각형을 이용하는 데 이 장에서는 현재 많이 알려져 있는 여러 조작도에 대해 간단히 설명하겠다.

3.1 속도 조작도.

속도 조작도는 로봇에게 주어진 각각의 최대 각속도를 가지고 현재의 자세로부터 작업공간상에서 얼마나 빠른 속도를 낼 수 있는가에 대한 척도를 나타낸 것이다. 우선 로봇의 각 관절 공간을 q 라 하고, 작업공간을 r 이라 하면 식 (1)과 같은 매핑이 이루어질수 있고, 각 공간의 속도를 위해 한 번 미분하면 식 (2)와 같이 됨을 쉽게 알 수 있다.

$$r = f(q) \quad (1)$$

$$\dot{r} = J_q \dot{q} \quad (2)$$

여기서 J_q 는 자코비안 매트릭스이다.

식 (2)를 보면 어떤 자세를 취한 로봇에게 주어진 각 관절의 최대 각속도를 이용하여 작업공간상에서 얼마나 빠른 속도로 움직일 수 있는가에 대한 것은 결국 자코비안 매트릭스에 영향을 받는다는 것을 알 수 있고, 따라서 속도 조작도 지수는 식 (3)과 같이 자코비안의 크기에 해당한다.

$$\omega_v = \sqrt{\det[J_q^T J_q]} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_m \quad (3)$$

여기서 σ_i 는 자코비안 매트릭스의 singlar 값이다.

3.2. 힘 조작도.

힘 조작도는 로봇에게 주어진 각 관절의 최대 토크를 이용하여 어떤 자세로부터 작업공간상에서 얼마나 많은 힘을 낼 수 있는가에 대한 척도라 할 수 있다.

각 관절 공간에서의 운동에너지와 작업공간상에서의 운동에너지는 서로 같으므로 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\dot{q}^T \tau = \dot{r}^T f = (\dot{q}^T J_q^T) f \quad (4)$$

여기서 f 는 로봇의 끝에 작용하는 힘을 작업공간상으로 표시한 벡터, τ 는 로봇의 각 관절에 걸리는 토크를 관절공간상에서 표시한 벡터이다.

식 (4)를 간단히 정리하면 각 관절의 토크와 로봇의 끝에 걸리는 힘에 대한 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = J_q^T f \quad (5)$$

그리고 힘 조작도 지수는 속도 조작도 지수와 비슷한 방법으로 정의된다.

$$\omega_f = \sqrt{\det[J_q J_q^T]} \quad (6)$$

3.3. 동적 조작도.

동적 조작도는 주어진 각 관절의 토크를 이용하여 어떤 자세에서 얼마나 큰 가속도를 낼 수 있는가에 대한 지표이다. 그리고 앞의 두 조작도는 로봇의 기구학적인 요소 즉 각 링크의 길이 및 현재의 각 관절의 회전각만을 이용하여 얻어내는 대신 이 조작도는 동력학적인 요소들(각 링크의 질량, 관성 모멘트, 각속도 등)도 필요하다. 식 (7)은 일반적인 로봇 동력학식으로 이 식을 조작하여 동적 조작도를 얻어낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) + J^T(q)h = \tau \quad (7)$$

여기서 $M(q)$ 는 관성 모멘트에 관한 항이고, $c(q, \dot{q})$ 는 구심력 및 전향력에 관한 항, $g(q)$ 는 중력에 관한 항 $J^T(q)h$ 는 로봇에 걸리는 외부 힘에 관한 항, 그리고 τ 는 각 관절에 걸리는 토크를 나타낸다.

로봇의 관절 공간과 작업 공간상의 대응 관계를 표현한 식 (1)을 두 번 미분하면 다음과 같은 식 (8)을 얻을 수 있고, 식 (7)에서 h 항을 식 (9)와 같은 식을 얻어서 다시 식 (7)에 대입하면 식 (10)과 같이 정리할 수 있다. 여기서 현재 로봇은 가만히 있다는 조건이며 따라서 \dot{q} 과 관련된 항은 모두 0이다.

$$m_p \ddot{r} + g_p = h \quad (8)$$

여기서 m_p 는 작업기가 드는 물체의 질량, g_p 는 작업기가 드는 물체의 중력에 대한 힘이다.

$$\ddot{r} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (9)$$

$$\ddot{r} = JB^{-1}(f-p) \quad (10)$$

여기서 $B = M(q) + m_p J^T J$, $p = g + J^T g_p$ 이다.

식 (10)을 보면 속도 및 힘 조작도처럼 어떤 한 공간에서 다른 공간으로의 대응관계를 이루는 것을 알 수 있고, 따라서 동적 조작도는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\omega_d = \sqrt{\det[(JB^{-1})^T (JB^{-1})]} \quad (11)$$

3.4. 조작도 타원 및 다각형.

지금까지는 여러 종류의 조작도의 조작도 지수를 알아보는 것에 대해 소개하였는데 이 조작도 지수는 작업공간상에서 어떤 방향에 대한 조작도 크기의 정보를 주지 못한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 주로 조작도를 작업공간상에서 그래픽으로 표시하는 방법들이 개발되었는데 그것들 중 많이 사용되는 것으로 조작도 타원과 다각형이 있다.

속도 조작도를 예로 들어 설명하면, 우선 식 (2)에서 다음과 같은 식으로 변환 할 수 있다.

$$\dot{q} = J_q^{-1} \dot{r} \quad (12)$$

여기서 \dot{q} 을 다음과 같이 표준화하기 위한 벡터를 식 (12)의 양변에 곱하면,

$$\tilde{q} = R^{-1} \dot{q} = R^{-1} J_q^{-1} \dot{r} \quad (13)$$

여기서,

$$R^{-1} = \text{diag}[\dot{q}_1 / \dot{q}_{1,\max}, \dot{q}_2 / \dot{q}_{2,\max}, \dots, \dot{q}_n / \dot{q}_{n,\max}]^T$$

식 (13)과 같이 되는데, 표준화 된 \tilde{q} 는 다음과 같은 특징을 가지므로 식 (13)은 식 (15)로 표현될 수 있다.

$$\tilde{q}^T \tilde{q} \leq 1 \quad (14)$$

$$\tilde{r}^T J_q^{-1T} R^{-1T} R^{-1} J_q^{-1} \tilde{r} \leq 1 \quad (15)$$

위 식을 보면 결국 식 (15)은 타원의 식이 됨을 알 수 있고, 여기서 $J_q^{-1T} R^{-1T} R^{-1} J_q^{-1}$ 는 타원의 장·단축의 길이 및 방향을 결정하는 부분이 된다.

속도 조작도를 다각형으로 표시하기 위해서는 타원과 마찬가지로 각 관절의 각속도를 작업공간상의 속도로 매핑시켜주는 매트릭스 즉, 식 (2)의 자코비안 매트릭스를 이용하게 되는데 식 (16)과 같이 타원의 식을 얻어내는 것과는 다르다.

$$\dot{r} = \dot{q}_1 J_{q1} + \dot{q}_2 J_{q2} + \dots + \dot{q}_n J_{qn} \quad (16)$$

여기서 J_{qi} 는 자코비안 매트릭스의 i 번째 열, \dot{q}_i 는 로봇 i 번째 관절의 각속도를 나타낸다.

식 (16)에서 각 관절의 최대 속도의 조합으로 속도 조작도 다각형의 각 꼭지점을 찾으면 되는데, 그 점의 개수는 최대 2ⁿ개가 된다. 그리고 나서 다각형의 모서리를 이루는 꼭지점들을 찾아서 다각형을 완성하면 되는데 이에 대한 알고리즘은 [6]에서 자세히 다루고 있다.

보통 조작도를 타원으로 표시하면 계산시간이 빠르기 때문에 어떤 방향으로의 전반적인 조작도의 크기를 알아보기 위해서 타원이 많이 사용되지만 좀 더 정확한 방향성에 따른 조작도를 얻기 위해서는 계산시간이 다소 느린 다각형 표시방법을 사용한다.

4. 조작도 해석을 위한 역도 선수 모델링

역도 선수가 인상 동작시의 시간에 따른 조작도를 분석하기 위해서는 역도 선수를 회전하는 관절로 이루어진 로봇으로 모델링할 필요가 있다. 그리고 실제 선수의 인상 동작시의 자세를 앞에서 보면 자세가 거의 변하지 않기 때문에 선수를 단지 앞에서 본 모습으로 2차원 상에서 움직이는 로봇으로 모델링 하였다(그림 2 참조).

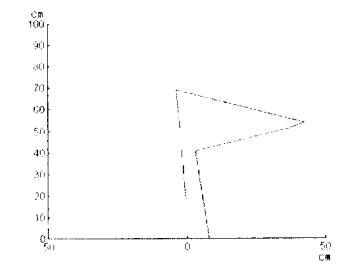


그림 2. 역도 선수를 옆에서 본 모습으로 모델링한 로봇 (인상 동작시 초기 자세)

Fig. 2. The sideview of modeled robot.

그림 2에서 보는 바와 같이 역도 선수를 모델링한 로봇은 7축으로 되어 있으며 각각의 관절은 아래서부터 선수의 발꿈치, 발뒤꿈치, 무릎, 힙, 허리, 어깨, 팔꿈치에 설정

되어 있다. 이것은 [9]에서 제시한 기준으로 설정되어 있으며 실제로 위에 나와 있는 것 이외의 인체 분절은 역기를 드는데 거의 영향을 미치지 못하고 있다.

로봇의 각 링크의 길이 및 무게는 160 cm의 키를 가진 역도 선수를 기준으로 하였고, 각 인체 분절에 대한 자료는 Yeadon-Kwon 모델을 사용하였다[9]. 이 모델의 특징은 기하학적 방법으로 특히 인체의 분절을 타원기동체로 모델링하여 그 부피를 측정하고 인체 밀도를 통하여 질량, 무게중심, 관성모멘트를 산출하는 방식을 취하고 있다.

식 (17)과 [그림 3]은 인체 분절에 대한 관성 모멘트를 구하는 방법에 대한 것이고, 각 분절의 밀도 및 스켈링 계수는 [9]에 잘 나타나 있다.

$$\begin{aligned} I_{1i} &= \lambda_{1i} \cdot m_i \cdot d_i^2, \\ I_{2i} &= \lambda_{2i} \cdot m_i \cdot d_i^2, \\ I_{3i} &= \lambda_{3i} \cdot m_i \cdot d_i^2. \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 I_1, I_2, I_3 : 3축의 관성 모멘트, d_i : 분절의 길이, c_i : 원주의 길이, $\lambda_{1i}, \lambda_{2i}, \lambda_{3i}$: 스켈링 계수이다.

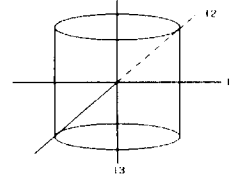


그림 3. 세 축의 관성 모멘트

Fig. 3 The moment of inertia of three axis

이렇게 해서 구한 로봇의 각 링크에 대한 길이 및 무게 그리고 관성 모멘트는 표 1과 같다.

표 1. 로봇의 각 링크에 대한 길이, 무게 및 관성 모멘트.
TABLE 1. The length, mass and moment of inertia of each link of robot

	길이(cm)	무게(kg)	관성모멘트(kgcm ²)	
			종 축	횡 축
발분절	8	1.49	10.1	33.7
하퇴	41	6.582	49.1	686.4
대퇴	35	12.994	194.4	456.1
몸통하위	7	4	200	2500
몸통상위	49	37.111	1827.6	23287.1
상완	26	3.498	45.4	126.2
하완	26	2.92	8.8	63.7

5. 첫 단계에 대한 조작도 해석

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 역도 종목 중 인상 경기시 선수가 각 단계에 따라 어떤 기준(힘, 속도, 가속도...)으로 바를 들게 되는지를 로봇 조작도 해석을 통해 알아보려고 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 여기서는 많이 알려져 있는 동적 프로그래밍(dynamic programming) 방법을 사용하였다.

동적 프로그래밍을 위한 공간은 로봇 관절 공간과 작업 공간이 있는데, 관절 공간은 7차원이므로 계산 시간상의 문제로 여기서는 2차원 작업공간을 선택하였다. 이 동적 프로그래밍을 인상 동작의 조작도 해석에 대해 다음과 같은 순서로 적용하였다.