로봇 조작도에 기반한 역도 들기 자세 해석

Analysis of Weightlifting Motion Based on Robotic Manipulability

원 경 태, 이 지 홍
(Kyoung-Tae Won, and Ji-Hong Lee)

Abstract : An athlete motion during weightlifting is analyzed based on robotic manipulability, which shows dexterities by changing the position and orientation of the end-effector of robot manipulators arbitrarily or along a specified direction. The athlete body is modeled as a highly redundant robot manipulator. The motion of weightlifting is analyzed based on the selected model with a power manipulability. Power manipulability and its geometric characteristics are derived by combining kinematic manipulability and dynamic manipulability. Also, manipulability-based optimal trajectory of weightlifter for given body structure of weightlifter is derived through genetic algorithms.

keywords : manipulability, optimization, human body, redundant manipulator

I. 서론

사람의 동작은 그 동작이 행해질 때마다 어떠한 기준에 의해 움직이게 된다고 알려져 있다. 우리주위에 있는 정상인의 걸음새가 대부분 같은 형태를 가지는 것이 이러한 주장에 대한 한 예가 될 수 있다. 이런 일정한 기준은 사람의 출생시부터 우리의 두뇌에 저장되어 점점 향상된다고 할 수 있다. 이런 동작의 기준에 대한 문제는 일반인의 정상적인 생활에서는 크게 비중을 가지지 않지만, 동작의 수행이 정량적인 측정을 통해 평가 받게 되는 운동선수들에게는 매우 중요한 비중을 가지며 보다 효율적인 기준을 찾기 위해 많은 노력들이 이루어져 왔다[1]-[3].

근래에 들어 이러한 효율적인 동작의 기준을 찾기 위한 노력은 로봇 공학적 측면에서도 이루어져 왔다[4][5]. 로봇공학에 사용되는 해석 도구들이 운동선수들의 동작 해석에 사용될 수 있다면 우리는 선수의 주어진 신체조건하에서 보다 효율적인 자세를 찾아내어 운동선수들에게 보다 빨리 뛸 수 있거나, 보다 많은 무게를 들 수 있다거나, 같은 동작 수행시 보다 적은 체력을 소모할 수 있는 기준을 제시할 수 있을 것이다. 현재 많은 분야에서 여유자유도 로봇에 대한 연구가 이루어져 왔으며[6][7] 인간의 신체를 매우 많은 여유 자유도를 가진 로봇으로 모델링한다면 이러한 연구결과를 인간의 동작 해석과 연결시킬 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 인체의 동작중 역도경기의 동작을 로봇공학의 해석도구를 이용하여 해석해 보고자 한다.

역도는 인상과 용상종목으로 구분되며 선수가 들어올린 역기의 무게에 의해 평가받게 되는 운동경기이다. 일반적으로 인상기록은 용상기록의 70%에 불과하며, 특히 국내 선수들의 인상 평균기록은 아시아 정상급 선수에 비해 뒤떨어진다[8]. 따라서 선수들의 경기력 향상을 위해서는 무엇보다도 인상 종목의 기술 체계에 대한 과학적 분석과 이해가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 인상종목에 관해 연구의 폭을 한정하도록 하겠다. 그리고 인상 동작은 끌기, 잡아채기, 앉아 받기, 일어서기의 4단계로 구성되어 있고, 이 중 특히 인상 동작의 성공 여부는 주로 끌기와 잡아채기 단계에서 결정되기[8] 때문에 이 두 단계의 최적 자세에 대한 연구를 수행하도록 하겠다.

작업공간상에서 여유자유도 로봇의 자세를 결정하기 위해서, 현존하는 다양한 방법중의 하나는 조작도 지수[4]이다. 조작도 지수 해석방법을 인체에 적용하기 위해 우선 선행되어야 할 과제는 인체를 여유자유도 로봇으로 모델링하는 것이다. 본 연구에서는 역도선수의 몸을 각 관절에 회전 구동기가 있는 형태로 근사화하고 기구학적, 동력학적 계수들을 설정하였다.그리고 여러 관찰에 의하여 역도라는 운동에서 가장 중요시되는 요소가 역기의 일률이라는 결론에 의해 힘과 속도를 조합하여 일률 조작도를 정의하였다. 역도 드는 동작의 최적해를 찾기 위해 이 일률을 성능 지수로 하고 여러 물리적 제약 조건이 추가된 최적화 문제를 수학적으로 정의하였다. 즉, 인체를 모델링한 여유 자유도 로봇이 주어진 제약조건하에서 주어진 작업을 최적으로 수행하는 문제로 역기 드는 문제를 재설정하였다. 최적화 문제의 비선형성을 극복하기 위해 본 연구에서는 수치 해석적 접근과 유전자 알고리즘[9]을 적용하여 최적해를 구하기로 한다.

또한 일반적으로 사용되는 조작도 타원의 해석방식[4][10]은 주어진 작업 속도에 대한 각 관절 속도해가 각 관절의 허용속도를 초과하는 문제가 발생할 수 있기 때문에[11] 본 연구에서는 작업공간상에서 유효범위를 규정할 수 있는 조작도 다각형해석 방식[12][13]을 수용하도록 하겠다.

기구학적 조작도와 동력학적 조작도 지수에 관한 기존의 연구 내용을 2장에서 간략히 재정리하고, 실제 역도선수의 동작에 대한 내용과 해석결과를 형상화하기 위한 그래픽 시뮬레이터에 관한 내용이 3장에서 언급되며,

접수일자 : 1998. 7. 22., 수정완료 : 1999. 4. 6.
원경태, 이지홍 : 충남대학교 메카트로닉스공학과
※ 본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 1자원하에 이루어졌습니다.

유전자 알고리즘으로 찾아낸 최적 궤적에 대한 시뮬레이션 결과 고찰이 4장에서 소개된다.

II. 조작도 다각형에 근거한 조작도 해석

1. 기구학 조작도

설명의 일관성을 위하여 [4]에서 제안한 기구학적 조작도와 [11]에서 제안한 동력학적 조작도를 기반으로 조작도 다각형에 대한 설명을 다음 두 절에서 간단히 기술한다. 이 두 조작도로부터 일률 조작도를 정의하고 뒤에서 이루어질 역도 드는 동작의 해석 및 최적 경로 찾기에 이용하기로 한다.

1.1 속도 조작도

m차원의 작업공간상에서 n개의 자유도를 가진 회전관절 로봇의 속도관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{q}} \tag{1}$$

여기서 $\dot{\boldsymbol{x}}$는 m차원 작업공간상의 속도에 대한 정보를 포함하는 벡터이고, $\boldsymbol{q}$, $\dot{\boldsymbol{q}}$는 각각 n차원 관절공간상의 각도와 각 속도 벡터이다. 본 연구에서 다루고 있는 인체는 기구학적으로 여유자유도를 가지고 있으므로 관절 수와 작업공간의 차원에 대해 다음과 같이 가정하도록 한다.

$$n \geq m \tag{2}$$

[15]에서처럼 수식을 간략화하여 해석하기 위해 i번째 관절의 최대 회전속도를 $\dot{q}_{i,\max}$라 하고 다음의 대각선 행렬을 도입한다.

$$\boldsymbol{R} = \mathrm{diag}\left(\dot{q}_{1,\max}^{-1},\ \dot{q}_{2,\max}^{-1}, \cdots,\ \dot{q}_{n,\max}^{-1} \right) \tag{3}$$

단, diag()는 대각선 행렬로 괄호안의 값들을 대각선 성분의 값으로 가지는 대각선 행렬이다. 그러면 (1)은 다음과 같이 재정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{q}} \\ &= \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{R}\,\hat{\dot{\boldsymbol{q}}} \\ &= \tilde{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{q})\,\hat{\dot{\boldsymbol{q}}} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{R}\,\hat{\dot{\boldsymbol{q}}}$이다.

위 수식에서 $\tilde{\boldsymbol{J}}$를 의사 자코비안 행렬, $\hat{\dot{\boldsymbol{q}}}$를 단위화된 관절 각속도라 부른다. 그러면 (4)의 $\hat{\dot{\boldsymbol{q}}}$의 각 성분은 다음 식을 만족하게된다.

$$|\hat{\dot{q}}_i| \leq 1, \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{5}$$

앞으로는 간단한 설명을 위해 모든 의사 자코비안 행렬을 자코비안 행렬, 단위화된 관절속도를 관절 각속도로 간단히 부르기로 하고 각각 $\boldsymbol{J}$, $\dot{\boldsymbol{q}}$로 기술하기로 한다. 그러면 (1)을 성분 별로 분리하여 쓰면 아래와 같이 전개시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{v} &= [\ \boldsymbol{J}_1\ \boldsymbol{J}_2\ \cdots\ \boldsymbol{J}_n\ ][\ \dot{q}_1\ \dot{q}_2\ \cdots\ \dot{q}_n\ ]^T \\ &= \dot{q}_1\boldsymbol{J}_1 + \dot{q}_2\boldsymbol{J}_2 + \cdots + \dot{q}_n\boldsymbol{J}_n \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\boldsymbol{J}_i$는 $\boldsymbol{J}$의 i번째 열벡터이다. 이렇게 기술하면 작업 공간에서의 속도 $\boldsymbol{v}$는 $\boldsymbol{J}$의 열벡터와 그 크기가 $|\dot{q}_i| \leq 1$로 주어지는 계수 $\dot{q}_i$의 곱의 합으로 나타낼 수 있다. 그러므로 자코비안 행렬이 주어져있는 경우에 최대 크기가 1인 계수들에 의해 자코비안 행렬의 각 열 벡터를 선형 조합하여 얻어진 영역이 작업속도 공간에서의 허용 영역이 된다. 이렇게 구해진 영역은 작업속도공간에서 다면체의 형상을 가지게 되고 이를 조작도 다면체(polytope)라 부르기로 한다[11]-[13].

이러한 조작도 도형은 두 가지 종류의 정보를 제공하는데 하나는 현재의 자세가 임의의 방향으로 얼마나 잘 움직일 수 있나 하는 정도이고, 또 하나는 어떤 방향이 주어지면 그 방향으로 얼마나 잘 움직일 수 있나 하는 정도이다. 전자는 그 도형의 체적에 비례하게 되고[5] 후자는 [11]의 방법에 의해 구할 수 있다.

1.2 힘 조작도

힘 조작도는 운동에너지 보존의 법칙으로부터 유도된다[14]. 작업공간상에서 발생한 에너지의 변화량인 일률과, 관절공간상에서 발생한 에너지의 변화량인 일률은 운동에너지의 변화가 없는 정적인 경우에는 아래와 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$P_i = P_e = 0 \tag{7}$$

여기서 P_i는 작업공간상의 일률을 나타내고, P_e는 관절공간상에서의 일률을 나타낸다.

따라서 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau}^T\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{f}^T\boldsymbol{v} = 0 \tag{8}$$

여기서 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n]$은 관절공간상에서 각관절에 발생하는 토크의 $n \times 1$ 벡터이고, $\dot{\boldsymbol{q}} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \cdots, \dot{q}_n]$은 관절공간상에서 각 관절에 발생하는 $n \times 1$각속도벡터이다. 또한 $\boldsymbol{f} = [F_1, F_2, \cdots, F_m]$은 작업공간상에서 작업기에 발생하는 $m \times 1$ 힘벡터이고, $\boldsymbol{v} = [V_1, V_2, \cdots, V_m]$은 작업공간상에서 작업기에 발생하는 $m \times 1$ 속도벡터이다. (8)에 II.1.1절의 (1)을 대입하면 다음과 같은 관계가 유도된다.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{f} \tag{9}$$

여기서 $\boldsymbol{J}^T$는 $n \times m$행렬로서 여유 자유도 로봇인 경우 행이 열보다 많게 된다. 따라서 조작도 다각형을 위의 방법 대신 다음과 같은 방식으로 얻을 수 있다.

작업공간상에서 얻고자 하는 힘 $\boldsymbol{f}$의 방향이 정해지면, 정해진 단위 방향 벡터를 위 식에 대입한다. 이때, 토크의 최대 허용치로 나누어 단위 화된 토크의 절대값 중에서 최대 값을 다음과 같이 정의하면,

$$a_\infty = \max\left(\left| \frac{\tau_i}{\tau_{i,\max}} \right| \right),\ 1 \leq i \leq n \tag{10}$$

작업공간에서의 알고자 하는 힘 $\boldsymbol{f}$방향으로의 허용 가능한 최대 힘의 크기는 다음과 같다.

$$f^* = a_\infty^{-1} f_n \tag{11}$$

여기서 f_n은 f방향으로의 단위 벡터이다.

따라서 작업공간을 임의의 작은 간격으로 나눈 후 각 벡터들을 대입하여 나온 점들을 이어 작업공간상에서의 조작도 다면체를 구할 수 있다.

2. 동력학 조작도

앞 절에서는 로봇의 기구학만을 고려하여 작업 속도에 관련된 조작도 및 조작도 도형과 정지 상태에서의 관절 토크와 작업 공간에서의 힘 사이의 관계에 대해 설명하였고, 여기서는 로봇의 동력학을 고려하고 힘과 에너지에 관련된 조작도에 대해 기술한다. 먼저 수식 전개에 사용되는 로봇의 동력학 식을 다음과 같이 표현한다.

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) = \tau \tag{12}$$

여기서 $M(q)$은 $n \times n$관성행렬이고, $c(q, \dot{q})$는 전향력과 원심력에 대한 정보를 가지고 있는 $n \times 1$ 벡터이고, $g(q)$는 중력 항을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이며 τ는 관절의 회전력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다. 앞 절에서의 기구학적 조작도에서와 마찬가지로 수식 전개를 간단하게 하기 위해 τ를 정규화 하기로 한다. 이를 위해 각 관절의 회전력의 최대 값을 $\tau_{i,\max}$로 나타내기로 하고 (13)의 행렬을 (12)의 양측에 곱해주어 결과적으로 (12) 오른편의 토크가 $|\tau_i| \le 1$로 되는 변형된 동력학식을 얻어낼 수 있고 앞으로의 모든 동력학식은 이렇게 변형되어 있음을 가정하고 설명하기로 한다.

$$N_\tau = \mathrm{diag}(1/\tau_{\max,1}, 1/\tau_{\max,2}, \cdots 1/\tau_{\max,n}) \tag{13}$$

단, 여기서 diag()는 기구학적 조작도인 경우와 마찬가지로 $n \times n$ 대각행렬이다.

(2)를 미분하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = J\dot{q} + \dot{J}\dot{q} \tag{14}$$

여기서 다음처럼 간략한 표기를 도입하면

$$a_x(q, \dot{q}) = \dot{J}\dot{q} \tag{15}$$

$$\tilde{\tau} = \tau - c(q, \dot{q}) - g(q) \tag{16}$$

(14)로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\ddot{x} = JM^{-1}\tilde{\tau} + \dot{J}\dot{q} \tag{17}$$

또 이식은 $\tilde{\ddot{x}} = \ddot{x} - \dot{J}\dot{q}$라는 표기를 이용하면

$$\tilde{\ddot{x}} = JM^{-1}\tilde{\tau} \tag{18}$$

가 된다. 이 식은 관절 토크와 작업 공간에서의 가속도와의 관계를 나타내는 것으로 관절 토크에 제약 조건이 주어지면 이를 작업공간에서의 가속도의 허용 영역으로 변환하는 매개 식이 된다. 또한 로봇의 자세와 각 관절 속도가 주어지면 (17)의 $J(q)$, $M(q)$ 및 (15)에서 $\dot{J}\dot{q}$의 각 요소 값은 결정되고 (18)은 τ와 $\ddot{x}$의 선형관계를 나타내므로 이 식에 의해 관절 토크에 주어진 구속조건을 작업공간에서의 가속도 허용영역으로 변환시키는 과정은 앞 절에서 기구학적 해석에서 사용되었던 방법과 마찬가지이다. 그림 1에 나타난 다각형은 본 연구에 사용된 역도선수의 여러 단계 자세중 임의의 한 단계에 관한 조작도 다각형의 예이다. 이 그림에서 보는바와 같이 중력항에 의해 조작도 다각형이 아래 방향으로 이동되었음을 보이는데, 이러한 사실이 나타내는 의미는 중력의 영향으로 인해 역도선수가 수직 상 방향으로 역기를 드는 것보다, 수직 하 방향으로 역기를 드는 것이 더 용이하다는 것을 의미한다.

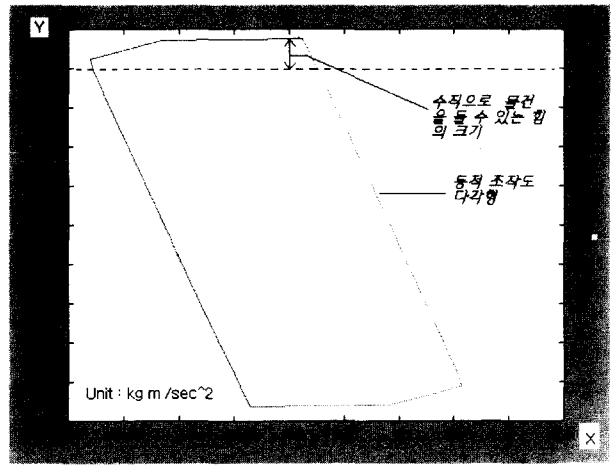

그림 1. 동력학 조작도의 예.
Fig. 1. Example of dynamic polytope.

3. 일률 조작도

이번에는 속도와 힘이 복합된 일률(power)에 관련된 조작도를 정의하여 보기로 한다. 먼저 M_{obj}를 로봇이 움직여야할 물체의 관성특성을 나타내는 행렬이라고 하자. 그러면 물체에 부여되는 힘은 작업 공간에서의 가속도를 이용하여 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$f_{obj} = M_{obj}\ddot{x} \tag{19}$$

여기서 f_{obj}는 물체에 부여되는 힘이고 $\ddot{x}$는 로봇 작업기가 들고 있는 물체에 작용하는 가속도이다. (19)와 일률에 대한 정의를 이용하여 일률 조작도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = f_{obj}^T \dot{x} = \dot{x}^T M_{obj}^T \dot{x} \tag{20}$$

앞서 설명한 여러 관계식으로부터 $\ddot{x}$는 τ로부터, $\dot{x}$는 $\dot{q}$로부터 유도가 가능하므로 (20)의 일률 p를 나타내는 허용 영역도 τ및 $\dot{q}$의 제약 조건으로부터 구해낼 수 있다. $\|\dot{q}\|_\infty \le 1$과 $\|\tau\|_\infty \le 1$이라는 관절 공간에서의 제약 조건하에서 구한 일률의 허용 범위가 그림 2에 나타나 있다.

III. 역도선수의 자세 해석

1. 역도

역도는 어떤 선수가 가장 무거운 무게를 들 수 있는가를 가늠하는 운동경기이다. 역도경기는 인상과 용상종

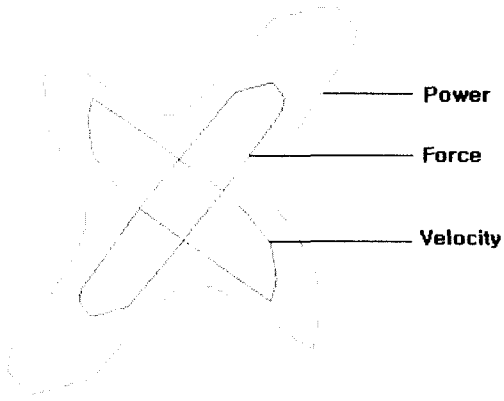

그림 2. 일률 조작도 다각형의 예.
Fig. 2. Example of power polytope.

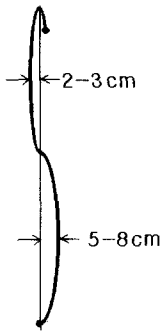

그림 3. 인상 동작중 바의 궤적.
Fig. 3. Path of babel during snatch.

목으로 구분되며 두 종목 기록 합계에 의하여 순위가 결정된다. 일반적으로 인상기록은 용상기록의 70%에 불과하다. 인상종목의 동작은 끌기(first pull), 잡아채기(second full), 앉아받기(lock up), 일어서기(stand up)의 4단계로 구분된다. 그 중에서 끌기와 잡아채기 동작은 바에 폭발적인 힘을 가하여 바벨을 충분한 높이 까지 상승시키는 단계로서, 끌기와 잡아채기의 성공적인 수행여부가 경기결과에 결정적인 영향을 미치게 된다[8].

선행되어온 대부분의 생체역학적 연구들은 고속도 카메라, 압력판, 근전도 등의 기자재를 사용하여, 우수선수들을 대상으로 역도경기 수행시 주로 사용되는 관절과 근육의 시각적 차이에 의한 기술 분석과 파워, 근 모멘트, 인체분절의 에너지 흐름등의 측정분석에 주된 관심을 나타내었다. 이러한 연구들의 결과에 의하면 우수 역도 선수들의 바벨의 수평변위는 그림 3과 같이 S자의 형태로 나타나게 됨을 알 수 있다. 이는 선수들이 끌기 동작시에 바를 인체 선에 가깝게 위치 시킴으로써 잡아채기 동작에서 보다 큰 힘을 바벨에 가하기 위함이다. 한편, 인상시에 바가 수직방향으로 곧바로 올라가지 않고 S자 형태의 궤적을 그리는 이유는 인체의 구조적 특징 때문이다[8]. 그리고 그림 4는 잡아채기 단계부터 인상 동작 끝까지의 인체 자세에 대한 그림을 보여준다.

그러나 이러한 선행연구결과는 우수선수들의 자세에 대한 일반적인 시각적이고, 정성적인 기준을 제시하기는

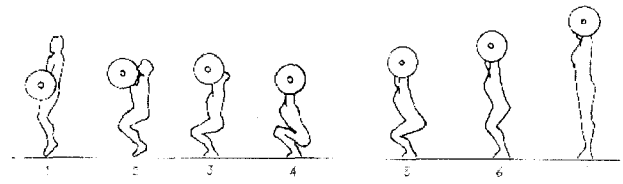

그림 4. 인상 동작중 일련의 인체의 자세.
Fig. 4. Sequential posture of an athlete during snatch.

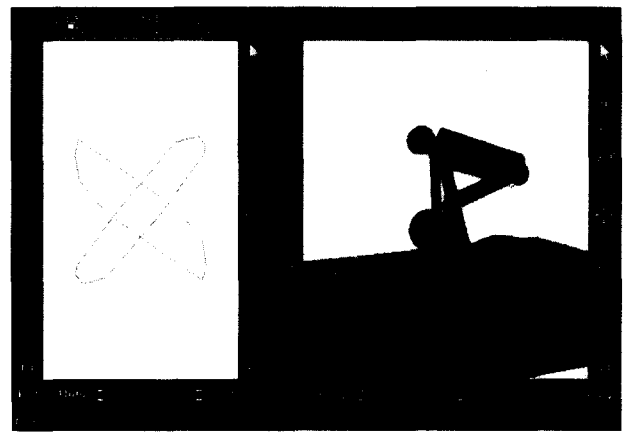

그림 5. 그래픽 시뮬레이터.
Fig. 5. Graphic simulator.

하였으나, 선수개개인의 자세에 대한 정량적이고, 개별적인 자세기준을 제시하지는 못하였다. 따라서 본 연구에서는 조작도 다각형이라는 보다 정밀하고, 정량적인 개념을 도입하여 역도 선수 개개인의 자세에 대한 기준을 제시하고, 주어진 신체조건하에서 보다 효율적인 자세를 찾아보고자 한다.

2. 자세 해석을 위한 그래픽 시뮬레이터

본 연구의 가시적인 입증을 위해 그래픽 시뮬레이터를 개발하게 되었다. 본 연구에서 개발한 그래픽 시뮬레이터는 3차원 그래픽 도구인 Open Inventor와 Visual C++을 사용하여 Window NT 4.0환경하에서 제작되었다.

그림 5에 보이는 바와 같이 전체 화면은 둘로 구분되어 한쪽은 인체의 자세를, 다른 한쪽은 자세에 따른 조작도 다각형의 모습을 보여주며, 인체분절들은 각각 원기둥, 구, 직육면체들로 표현 되어있다.

본 연구에서 사용된 시뮬레이터는 힘 조작도, 속도 조작도, 동력학 조작도, 일률 조작도의 총 4개의 조작도를 동시에 표시하거나, 그중 몇 개의 조작도를 선택하여 한 화면에 표시하여 각 단계별로 여러 조작도들을 비교 할 수 있게 하였다. 각 인체분절에 대한 특성값(길이, 무게, 관성모멘트, 무게중심)들은 사용자가 입력할 수 있게 하였다.

또한 본 연구에서 사용된 최적화 기법으로 찾은 각 세부단계에 대한 관절각도나, 여러 가지 측정을 통해 찾아낸 각 세부단계에 대한 관절각도를 데이터 파일의 형식으로 저장하여, 이를 순차적으로 적용하므로 각 단계별 인상 동작과, 그 동작에 해당되는 여러 가지의 조작

표 1. 각 인체 분절에 관한 특성값.
Table 1. Parameters of body segments.

link	length (cm)	mass (kg)	Moment of inertia(kg/cm^4)	
			longitudinal	transversal
1	8	1.49	10.1	33.7
2	41	6.582	49.1	686.4
3	35	12.994	194.4	456.1
4	7	4	200	2500
5	49	37.111	1827.6	23287.1
6	26	3.498	45.4	126.2
7	26	2.92	8.8	63.7

도다각형의 변화를 동영상으로 확인할 수 있고, 각 관절의 회전각을 임의로 지정하여 해당되는 조작도 다각형의 모습을 확인할 수 있다.

그림 5는 실제 제작된 그래픽 시뮬레이터 프로그램으로 초기에 실행을 하는 예이다. 초기 설정은 역도선수가 역기를 들기 시작하는 초기자세에 해당하는 정보를 입력하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

1. 역도선수의 기구학적 모델링

I 장에서 언급되었던 바와 같이 본 연구의 목적은 역도선수의 인상 동작시 가장 효율적인 일련의 자세를 찾아내는데 있다. 인상 동작시 역도 선수의 자세는 주로 옆모습이 중요하고 정면에서 관찰하였을 때 좌우 대칭을 이루며 움직이기 때문에 본 연구의 해석은 옆모습에 국한하도록 하였다. 따라서 인상 동작동안 역도선수의 최적자세를 찾기 위해 인체는 2차원 공간상 역기의 바에 수직인 평면에서 7관절을 가진 로봇으로 모델링하여 옆면을 관찰하도록 하였다. 7개의 각 인체 분절들은 각각 발, 종아리, 허벅지, 엉덩이, 몸통, 상박, 하박으로 각각 분리하였다. 본 연구에서 기준이 된 인체는 160cm, 60Kg의 남성으로 각 관절의 길이, 관성 모멘트, 무게는 표 1에 나타난 바와 같다[8].

2. 최적화 문제

인상 동작의 성패에 영향을 미치는 단계가 끌기, 잡아채기의 초기 두 단계 임은 이미 III 장에서 거론된바 있다. 따라서 역도선수가 좀더 무거운 무게의 역기를 들 수 있도록 하기 위해 초기 두 단계에서의 최적 자세를 찾는데 중점을 두기로 한다.

이런 문제를 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 초기 두 단계의 연속적인 자세를 초기 자세부터 마지막까지 9개의 세부 단계로 나누어 해석하기로 하였고, 각 세부 단계에 대한 초기 역기 궤적은 그림 6과 같이 설정하였다. 그리고 그림 3과 같은 우수 역도 선수들의 인상 동작시 역기의 궤적을 얻기 위해 다음과 같이 목적함수 및 구속조건을 설정하여 이를 제약 조건이 있는 최적화 문제로 만들었다.

2.1 목적함수

본 연구의 최적화 문제에 대한 목적함수 및 구속 조건은 다음과 같이 설정하였다. 인상 동작시 역도 선수가 가지는 최적 자세를 찾는 문제에 대한 목적함수로서 본 연구에서는 처음 세부단계에서 마지막 세부 단계까지 각 단계별 일률 조작도지수의 합이 최대가 되는 자세를 찾기 위해 (20)으로부터 다음과 같은 양으로 정하였다.

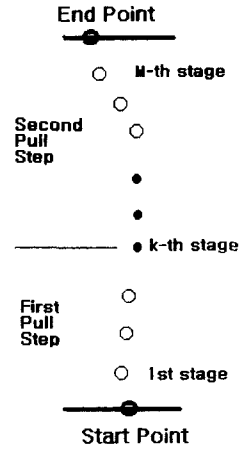

그림 6. 시뮬레이션에 사용된 각 단계.
Fig. 6. Discredited path of weightlifting.

$$P.I. = \sum_{i=0}^{k} P_{i,y} \tag{21}$$

여기서 k는 첫 번째 단계인 끌기 동작의 마지막 세부단계를 말하고 $P_{i,y}$는 i번째 세부단계에서 수직 상 방향으로의 일률, 즉 (20)의 $\dot{p}$의 y 성분을 나타낸다.

이러한 목적함수는 앞서 III장에서 언급한 바와 같이 인상 동작의 처음 두 단계에서 역도 선수는 역기를 좋은 자세로 받기 위해서는 앉아 받기 동작까지 역기의 속도를 최대로 만들 필요가 있다. 이렇게 함으로써, 그만큼 앉아 받기가 좀 더 쉬워지게 되며, 결국 인상 동작의 성공 확률이 높아지게 된다. 그러나 이러한 속도만 고려해서는 무거운 역기를 들 수 있는 동작 계획이 유도되지 않기 때문에 속도도 크게 하고 역기도 들 수 있도록 하기 위하여 속도와 힘을 모두 포함하고 있는 목적함수가 필요하게 되었다. 이러한 목적 함수로 본 연구에서는 (21)과 같은 일률을 목적함수로 선정하였다. 즉 선수의 근력이 제한되어 있고 따라서 역기에 가해지는 힘이 제한되어 있으므로 일률이 최대가 되면 결국 역기의 수직 방향 속도가 최대로 되게 된다. 이러한 내용은 역도 실험 연구 결과와도 일치하고있다.

2.2 구속조건

역도 선수들의 신체적 조건들을 고려하여 최적화 문제의 구속 조건은 다음과 같이 네 가지에 대해 설정하였다.

i) 각 관절의 각도 허용범위

ii) 선수의 무게 중심의 범위 (신체의 무게 + 역기의 무게); 인체의 무게 중심이 신체를 지탱하고 있는 발의 위치 밖으로 벗어나게 되면 몸의 중심을 잃어 불안정한 상태에 놓이게 된다. 역도경기는 신체의 중심이 매우 중요한 비중을 차지하게 되고 신체가 공중으로 떠 있는 경우는 극히 짧은 순간[8]이므로 무게 중심의 수평변위는

표 2. 각 관절에 대한 제약 조건.
Table 2. Constraints of each joint.

관절	관절각 허용 범위 (radian)	관절 최대 토크 범위(Nm)
1	$0 < q_1 < 60$	$-120 < \tau_1 < 120$
2	$40 \le q_2 \le 100$	$-150 \le \tau_2 \le 150$
3	$-170 \le q_3 \le 0$	$-170 \le \tau_3 \le 170$
4	$0 \le q_4 \le 170$	$-200 \le \tau_4 \le 200$
5	$-10 \le q_5 \le 150$	$-200 \le \tau_5 \le 200$
6	$0 \le q_6 \le 170$	$-60 \le \tau_6 \le 60$
7	$-170 \le q_7 \le 0$	$-40 \le \tau_7 \le 40$

표 2. 유전알고리즘에 사용된 변수.
Table 2. Parameters of genetic algorithm.

Number of variable per one stage	8
Number of trial	300,000
Number of generation	1500
Number of constraint per one stage	8

역도 동작 동안 지속적으로 신체의 구속조건으로 작용하게 된다.

iii) 각 관절의 최대 토크 범위

iv) 각 세부 단계에 대한 거리 제한; 이것은 역도 선수들의 신체적 조건과는 상관없고 단지 작업공간상에서 역기의 위치가 각 단계별로 일정하게 등분되어 구해지도록 하기 위해서 설정하였다.

위에서 설정한 목적함수와 구속 조건들을 이용하여 주어진 최적화 문제를 유전자 알고리즘을 통해 구하게 된다. 그리고 위 제약 조건들 중 i), iii)은 표 2에 정리하였다.

3. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

본 연구에서 분석하고자 하는 인체 자세의 수학적 모델링이 비선형적이기 때문에 일반적인 최적화 방법으로는 전체 최적 해를 보장할 수 없고 단지 국부 최적 해만을 얻을 수 있다. 전체 최적해(global optimization)를 구하기 위한 현존하는 방법들은 Boltzmann machine, 유전자 알고리즘등이 있다. 따라서 본 연구에서는 전체 최적해를(global optimization) 구하기 위해 유전자 알고리즘(GA : genetic algorithm), 특히 "Dept. of Computer Science University of North Carolina"에서 개발한 'GENOCOPIII'를 적용하도록 한다[16]. 'GENOCOPIII'는 다양한 최적화 문제들을 수용할 수 있으며, 특히 구속조건식을 포함하고 있는 최적화 문제에 대해서 좋은 성능을 가지고 있다. 사용자는 'GENOCOPIII'을 원하는 최적화 문제에 적용하기 위해서 단지 최적화 시스템에 맞는 목적함수와 구속조건들만을 규정해주면 된다. 시뮬레이션에 사용된 구속조건과 목적함수, 성능지수들은 IV.2에서 밝힌 바와 같다. 표 3은 본 모의 실험을 위해 사용된 'GENOCOPIII'의 주요 변수이다.

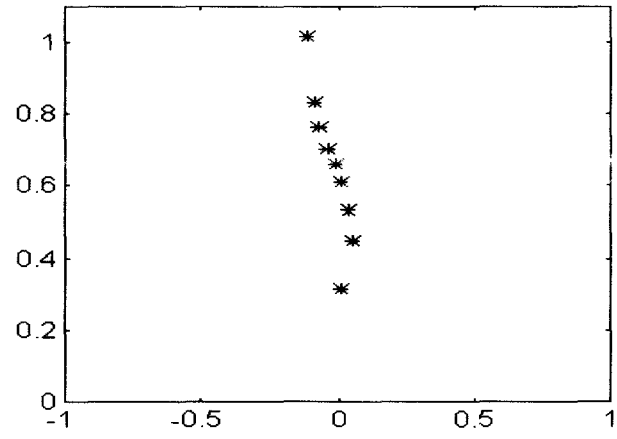

그림 7. Genetic algorithm을 통하여 찾아낸 바의 궤적.
Fig. 7. Path of the bar obtained by genetic algorithm.

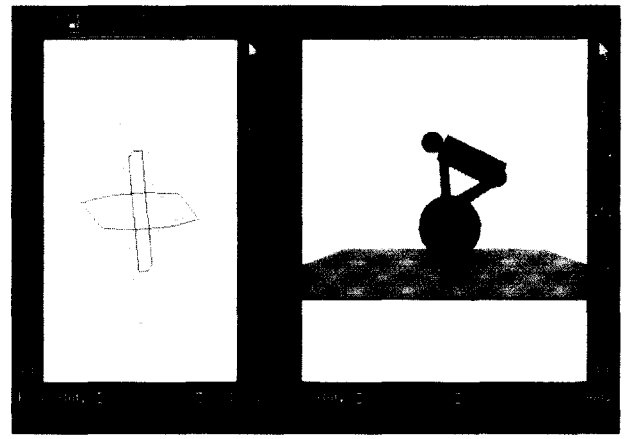

그림 8. 첫 번째 단계의 자세.
Fig. 8. Posture of weightlifter at the first stage.

표 2에서 'Number of variable'은 본 연구의 최적화 문제에서 각 세부단계에 필요한 변수의 개수, 'Number of trial'은 구속 조건을 만족하는 변수들을 임의로 생성하는 시도 횟수, 'Number of generation'은 구속 조건을 만족하는 변수들을 유전자 세대 교체 횟수, 그리고 'Number of constraint'는 본 연구의 최적화 문제의 각 세부단계에 포함하고 있는 구속 조건식의 개수이다.

4. 결과 및 분석

그림 7은 GENOCOPIII를 통하여 찾아낸 인상 동작시 바(120kg)의 중심 궤적이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 모의실험을 통하여 찾아낸 궤적이 우수선수의 궤적과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

결과에서 찾아낸 궤적의 각점들의 거리가 조금씩 차이를 보이고는 있지만 전체적으로 생성하는 궤적의 모양은 기존연구에서 밝혀낸 우수선수들의 궤적과 별다른 차이점을 나타내고 있지 않다.

그러나 그림 8에서 11까지에서 나타낸 역도선수의 세부적인 자세를 보면 그림 3에 나타난 것과 정확하게 일치하지는 않는다. 이러한 차이점의 요인은 여러 가지가

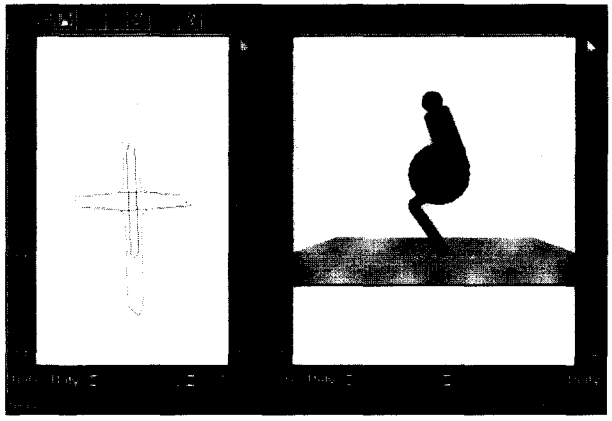

그림 9. 세 번째 단계의 자세.
Fig. 9. Posture of weightlifter at the third stage.

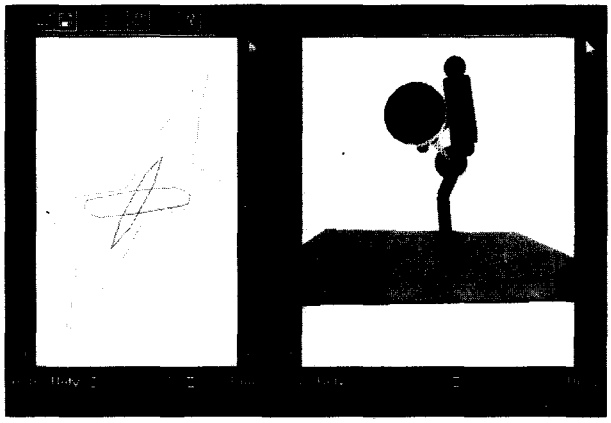

그림 10. 여섯 번째 단계의 자세.
Fig. 10. Posture of weightlifter at the sixth stage.

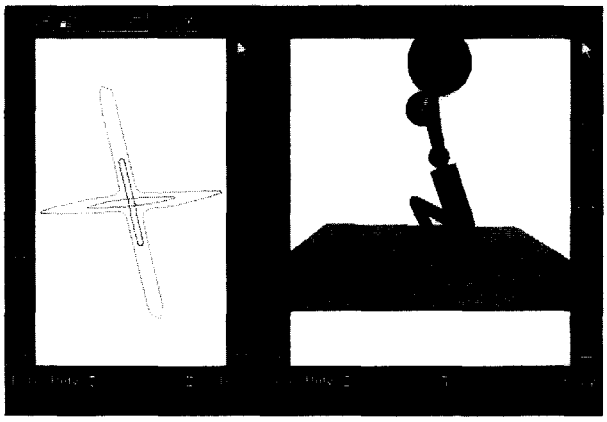

그림 11. 아홉 번째 단계의 자세.
Fig. 11. Posture of weightlifter at the ninth stage.

있을 수 있는데 우선 첫째로 일반적으로 인체는 하나의 관절을 여러 개의 근육이 구동시키는 여유구동기구로 볼 수 있는데, 본 연구에서는 하나의 인체관절이 하나의 회전 구동기에 의해 구동되는 기구로 모델링하였기 때문에 오차가 발생하였다고 볼 수 있고, 둘째로는 인체는 자세에 따라서 각 관절에서 낼 수 있는 최대 토크가 변하는 반면 본 연구의 모의 실험에서 사용한 각 관절의 최대 토크는 로봇의 자세와 상관없이 일정하게 설정되어 있어서 모의 실험에서의 일률 조작도와 실제의 일률 조작도의 모습이 달라지기 때문에 생긴 오차도 고려될 수 있다. 마지막으로 본 연구의 모의 실험에서 설정한 인체의 기구학 및 동력학적특성들에 대한 오차 때문에 발생한 것으로 추정된다.

V. 결론

본 연구는 운동 선수들의 주어진 신체조건에서 보다 나은 자세의 기준을 찾고자 로봇 공학의 해석도구들을 운동선수의 신체에 적용하려는 시도를 하였고, 특히 역도라는 운동에 대해 실제로 적용해 보았다. 이를 위해 본 연구는 우선 역도 선수의 신체를 여유자유도 로봇으로 모델링 하였고, 역도 선수가 인상 동작 시 취해야 할 자세를 성능 지수 및 제약 조건으로 수식화 하여 최적화 문제로 만들었고. 마지막으로 유전자 알고리즘으로 주어진 신체 조건하에서 인상 동작의 최적 자세를 찾아내었다.

하지만 IV에서 언급한 바와 같이 인체의 복잡한 근육들의 조합으로 이루어진 관절 구동 구조를 단순한 회전 모터로 모델링하고, 실제 역도 선수의 신체적 데이터의 부정확성 그리고 신체의 움직임에 따른 적용 가능한 힘의 변화에 대한 고려에 대한 문제로 실제 우수한 역도 선수의 자세와 본 연구에서 구한 자세에 대한 오차가 발생하였다. 따라서 이후의 연구에서는 보다 정확한 해를 구하기 위해서 인체의 기구학 및 동력학적 특성들에 대한 보다 정확한 자료를 적용하고 인체 관절을 실제 모델과 가까운 여유 구동 관절 형태로 모델링하여 최적 자세를 구하고자 한다.

참고문헌

[1] W. Baumann, V. Gross, K. Quanda, P. Galbierz, and A. Schwizz, "The snatch technique of world class weightlifters at the 1995 world championships." *International Journal of Sport Biomechanics*, vol. 4, pp. 68-89, 1988.

[2] R. C. Brudett, "Biomechanics of the snatch technique of highly skilled and skilled weightlifters," *Research Quartery for Exercise and Sport*, 53(3), pp. 193-197, 1982.

[3] J. J. Garhammer, "Biomechanical profiles of Olympic weightlifters," *International Journal of Sports Biomechanics*, vol. I, pp. 122-130, 1985.

[4] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy," *Robotics Research, The First International Symposium*, pp. 735-747, 1984.

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

[6] R. L. Williams II, "Local performance optimization for a class of redundant eight-degree-of-freedom manipulators," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ICRA'94, pp. 992-997, 1994.

[7] R. L. Williams II, "Kinematic equations for control of the redundant eight-degree-of-freedom advanced research manipulator II," *Technical Memorandum, NASA*, TM-4377, 1992.
[8] 주명덕, "역도경기의 인상 동작에 대한 생체 역학적 연구", 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1991. 8.
[9] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley 15767, pp. 1-88, 1989.
[10] T. Yoshikawa, "Dynamic Manipulability of Robot Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 2, no1. pp. 113-124., 1985.
[11] J. Lee, "A Study on the manipulability measures for robot manipulators," *IEEE/RSJ Int' Conf. Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1458-1465.
[12] G. M. Ziegler, *Lectures on Polytopes*, Springer-Verlag, 1995.
[13] D. R. Chand and S. S. Kapur, "An algorithm for convex polytopes," *Journal of Association for Computing Machinery*, vol. 17, no. 1, pp. 78-86, 1970.
[14] P. Chiacchio, Y. Bouffard-Vercelli, and F. Pierrot, "Evaluation of force capabilities for redundant manipulators," *Proc. of 1996 IEEE Conf. Robotics Automat.*, pp. 3620-3525. 1996.
[15] 이 영일, 이 지홍, "로봇의 조작도 지수에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제1호, 1998. 2.
[16] "http://www.coe.uncc.edu/~gnazhiya/gchome.html"

원 경 태
제어·자동화·시스템공학 논문지 제5권, 제3호, 참조.

이 지 홍
제어·자동화·시스템공학 논문지 제5권, 제3호, 참조.