

스케이트 운동의 생성을 위한 구속조건의 고찰

Dynamic Consideration of Athletic Constraints on Skating Motion

황창순^{1,✉}

Chang-Soon Hwang^{1,✉}

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.)

✉ Corresponding author: robot@knu.ac.kr, Tel: 053-950-7516

Manuscript received: 2008.6.16 / Revised: 2008.11.20 / Accepted: 2008.12.16

This paper addresses the dynamic consideration of the athletic constraints on skating motion. In order to generate a human-like skating motion, the athletic constraints are distinctively analyzed into dynamic constraints and physical constraints. A close investigation of the athletic constraints evolved valid extent of dominant parameter for a leg muscle. During the human-like skating motion, the state of actuation was shifted from region of maximum force to region of maximum power. Simulation results were intuitively comprehensible, and the effectiveness of analytic algorithm was demonstrated for skating motion.

Key Words: Hybrid Mobile Robot (하이브리드 이동 로봇), Glide Locomotion (글라이드 추진), Skating Motion (스케이팅 운동), Friction Force (마찰력), Dynamic Constraint (역학적 구속조건), Athletic Constraint (신체적 구속조건)

1. 서론

로봇이 실제로 이동해야 하는 환경은 평탄지(平坦地), 경사지(傾斜地), 요철지(凹凸地) 등과 같이 변화가 대단히 많은 상황이다. 실제의 환경에서 로봇의 이동효율을 높이기 위해서, 부정지(不整地)에서는 다리를 이용한 보행운동을 하고 평탄지에서는 바퀴를 이용한 주행운동을 적극적으로 혼용하는 것이 효과적이다. 따라서 실제적인 환경의 조건과 상황에 맞게 이동방식을 자유롭게 선택할 수 있는 지능적인 하이브리드 이동 로봇이 필요로 하게 되었다. 이와 같은 이동 로봇을 실현하기 위해서 Hirose^{1,2} 등은 이동 로봇의 새로운 추진원리로서 글라이드 추진(glide locomotion)을 제안했고, 보행 로봇의 발끝에 수동 바퀴(passive wheel)를 장착한 롤러-워커(roller-walker)를 제작해서 보행과 주행이 가능한 하이브리드 이동 로봇을 개발했다.

글라이드 추진은 마찰력의 방향성을 이용해서 마찰력이 작은 방향으로 운동을 진행하는 것인데, 스케이팅 운동이 대표적인 예이다. 롤러-워커의 스케이팅 동작은 대단히 자연스럽지만, 액추에이터에 의한 작용력이 아니라 바퀴에서의 마찰력에 의한 반작용력으로 운동을 해석했기 때문에, 다양한 동작을 생성하는 제어방법이 정립되어 있지 않고, 사람에 의한 조종을 기본으로 하는 근본적인 한계가 있다. Ostrowski^{3,4} 등은 글라이드 추진을 이용하는 snakeboard 라는 이동로봇을 개발했고, 운동량(momentum)에 주목해서 일반적인 제어방법을 제시했다. Chitta^{5,6} 등은 Ostrowski의 결과를 활용해서 rollerblader 라는 인라인 스케이팅이 가능한 이동로봇을 개발했고, 전진과 회전을 포함한 기본적인 동작을 생성했다. Chitta의 연구는 스케이팅 운동을 제어이론의 관점에서 해석했다는 의의가 있지만, 운동량이라는 복합적인 물리량에 주목했기 때문에

시뮬레이션과 실험의 결과가 매우 다르고, 동작도 대단히 부자연스럽다는 문제점이 있다. 그리고 글라이드 추진의 다른 형태로서 자벌레,⁷ 짙신벌레⁸와 유사한 이동방식에 관한 연구도 있다.

자연계에서 자동차와 같이 바퀴로 이동하는 동물이 존재하지 않는 것과 같이, 글라이드 추진을 이동방식으로 사용하는 동물은 뱀을 제외하면 인간밖에 없다고 할 수 있다.⁹ 뱀은 복부(腹部)의 비늘에 마찰력의 방향성이 있는데, 글라이드 추진보다는 근육의 수축과 신장을 주로 이용해서 이동한다. 이러한 뱀의 이동방식에 대한 고찰로부터 뱀과 비슷한 이동로봇을 개발한 연구도 있다.^{10,11}

이와 같이 글라이드 추진을 이용하는 이동로봇의 액추에이션은 주기적이고 진동적인 형태를 기본으로 하는데,^{12,13} Brockett¹⁴은 이러한 입력에 대한 개념을 수학적으로 정리했다. 그러나 액추에이션의 결과로 발생하는 운동의 가시적인 형태는 제시할 수 있지만, 액추에이션의 본질적인 제어방법은 밝혀져 있지 않다. 따라서 인간의 스케이트 운동과 유사한 형태로 움직이는 이동 로봇은 아직 실현되지 않고 있다.

스케이트 운동의 경우에 동작의 핵심적인 내용을 이해하는데 필요한 동영상^{15,16} 등의 데이터가 있으므로, 이 연구에서는 간단한 역학적 모델을 이용해서 스케이트 운동을 공학적으로 활용할 수 있는 형태로 규명하고자 한다. 먼저 이 논문에서는 인간의 운동 메커니즘이 이동 능력과 에너지의 사용에서 가장 효율적이라고 가정하고, 글라이드 추진의 대표적인 예로서 인간의 스케이트 운동과 유사한 동작을 생성하기 위한 조건에 대해 고찰하기로 한다. 그리고 해석의 결과를 이용해서 글라이드 추진의 본질을 파악하고, 로봇의 혁신적이고 효율적인 이동방식으로 활용해서, 예를 들면 스케이트라는 도구를 활용해서 이동하는 휴머노이드의 형태로 구현하고자 한다.

2. 스케이트의 운동방정식

2.1 운동방정식의 도출

인간은 팔, 다리보다 머리, 몸통이 훨씬 무겁기 때문에 몸통에 집중질량이 있는 모델로 표현할 수 있다. 스케이트 운동은 직선구간과 곡선구간에서 동작의 패턴이 완전히 다른데, 이 논문에서는 직선구간을 대상으로 삼았다. 직선구간의 스케이트 운동에서 인간의 몸은 언제나 정면을 바라보기 때

문에 몸의 회전운동(관성 모멘트)을 고려하지 않기로 했다. 해석의 편의를 위해서 Fig. 1 과 같이 스케이트 운동의 2 차원 모델을 사용했고, 다리를 회전축(revolute joint)이 아닌 직선축(prismatic joint)의 결합으로 표현했다. Fig. 1 에서 스케이트 운동을 결정하는 변수는 다리의 길이 (l), 몸과 다리 사이의 각도 (θ), 다리와 스케이트 사이의 각도 (α)이며, 다리의 중간에는 근육의 역할을 하는 액추에이터(직선 구동기)가 있어서 스케이트 운동을 생성하게 된다. 여기서 운동은 y 축의 방향으로 진행된다. 그리고 Fig. 1 은 오른발에 대한 모델을 나타내지만, 왼발의 경우에도 적절하게 좌표를 변환하면 오른발과 동일하게 해석할 수 있다.

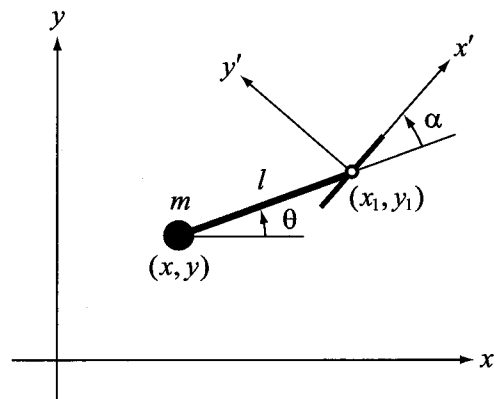


Fig. 1 Schematic diagram of skating motion

Fig. 2(a)와 같이 xy 좌표계에서 인간의 몸에 관한 운동방정식은 다음과 같다.

$$-f \cos \theta - c_x \dot{x} = m\ddot{x} \tag{1}$$

$$-f \sin \theta - c_y \dot{y} = m\ddot{y} \tag{2}$$

여기서 m 은 몸의 집중질량, θ 는 몸과 다리 사이의 각도, f 는 다리의 근육이 내는 힘이고 x , y 는 xy 좌표계에서 본 몸의 위치, \dot{x} , \dot{y} 는 xy 좌표계에서 본 몸의 속도, \ddot{x} , \ddot{y} 는 xy 좌표계에서 본 몸의 가속도, c_x , c_y 는 x 축, y 축 방향의 속도에 따른 공기의 점성 마찰계수로서 물체의 속도 및 크기에 의해 결정되는 값이다. 인간의 다리는 몸통에 비해 대단히 가벼우므로 무질량(massless)이라고 가정하면, Fig. 2(b)와 같이 xy 좌표계에서 다리에 관한 운동방정식은 다음과 같다.

$$f \cos \theta - f \cos \theta = 0 \tag{3}$$

$$f \sin \theta - f \sin \theta = 0 \tag{4}$$

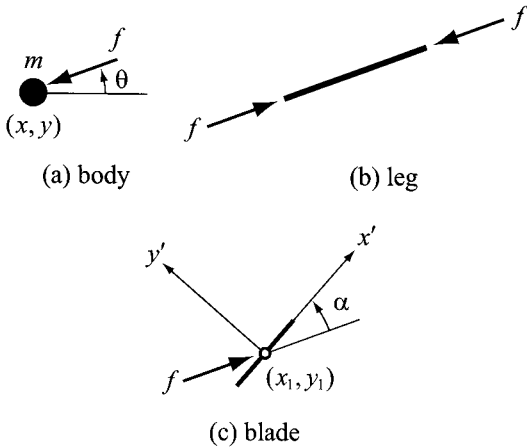


Fig. 2 Dynamic models of skating motion

식(3), (4)는 다리가 무질량이므로 힘의 평형상태만이 존재하는 것을 의미한다. 인간의 발과 스케이트는 몸통에 비해 대단히 가벼우므로 무질량이라고 가정할 수 있다. Fig. 2(c)와 같은 $x'y'$ 좌표계에서 $\dot{x}_1 \neq 0, \dot{y}_1 \neq 0$ 인 경우, 스케이트에 관한 운동방정식은 다음과 같다.

$$f \cos \alpha - \text{sgn}(\dot{x}_1) \mu_x mg = 0 \tag{5}$$

$$-f \sin \alpha - \text{sgn}(\dot{y}_1) \mu_y mg = 0 \tag{6}$$

여기서 α 는 다리와 스케이트 사이의 각도, g 는 중력 가속도이고 x_1, y_1 은 xy 좌표계에서 본 스케이트의 위치, x', y' 은 $x'y'$ 좌표계에서 본 스케이트의 위치, \dot{x}_1, \dot{y}_1 은 $x'y'$ 좌표계에서 본 스케이트의 속도, μ_x, μ_y 는 x' 축, y' 축 방향의 스케이트와 얼음 사이의 건성 마찰계수이다. 식 (5), (6)은 발과 스케이트가 무질량이므로 힘의 평형상태만이 존재하는 것을 의미하며, 해석의 편의를 위해서 몸의 집중질량(m)이 그대로 스케이트의 수직하중으로 작용한다고 가정했다. 그리고 스케이트의 운동으로부터 다음을 쉽게 유추할 수 있다.

$$\text{sgn}(\dot{x}_1) = +1 \quad (\dot{x}_1 > 0) \tag{7}$$

$$\text{sgn}(\dot{y}_1) = -1 \quad (\dot{y}_1 < 0) \tag{8}$$

액추에이터의 관점에서 인간의 근육을 고찰할 경우, 발생할 수 있는 힘보다 파워의 관점에서 근육의 특성을 해석하는 것이 더욱 적합할 경우가 있다. 로봇의 액추에이터로 많이 사용되고 있는 DC 모터의 경우에도 순간적으로 발생할 수 있는 최대의 파워, 지속적으로 발생할 수 있는 최대의 파워 등이 중요한 물리적 특성으로 취급되고 있다. 이 논문에서는 다리를 직선축으로 표현했고, 힘보다는 파워의 관점에서 운동을 해석하기로 한다. 그러므로 다음과 같이 다리의 근육에서 힘과 파워의 관계식을 구할 수 있다.

$$f = \frac{p}{l} \tag{9}$$

여기서 p 는 근육이 발생하는 파워, l 은 다리의 길이, \dot{l} 은 다리의 길이에 대한 시간적인 변화량을 나타낸다. 스케이트 운동에서 다리에 힘을 준 상태에서 다리를 뺀지 않으면 동작을 생성할 수 없으므로 다리의 길이 (l)가 증가해야 한다. 그리고 근육이 힘을 가하는 방향과 다리를 뺀 방향이 일치하므로 다리가 발생하는 파워(p)는 언제나 양의 값이다. 따라서 스케이트 운동을 생성하기 위해서는 다리의 길이가 증가하면서 근육에서 양의 파워가 발생해야 하는데, 이것은 $\dot{l} \neq 0$ 과 $0 < p \leq P_{max}$ 을 만족하는 것이 된다. 여기서 P_{max} 는 다리의 근육이 발생할 수 있는 최대의 파워로서 일정한 값이다.

스케이트는 마찰력에 방향성이 있으며, 진행방향의 마찰력이 그 수직방향의 값보다 대단히 작다. Fig. 1에서 $\mu_x \ll \mu_y$ 을 만족하기 때문에, 실제로 스케이트 운동을 관찰하면 $\dot{x}_1 \neq 0, \dot{y}_1 = 0$ 이 성립한다는 것을 알 수 있다. 이것은 옆으로 미끄러지지 않는 것을 의미하며, 운동에서는 적분이 되지 않는 논홀로노믹(nonholonomic) 구속으로 작용한다. 그리고 Fig. 1에서 몸의 위치(x, y)와 스케이트의 위치(x_1, y_1)는 다음과 같은 기하학적인 관계로 구해지므로

$$x_1 = x + l \cos \theta \tag{10}$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x} + \dot{l} \cos \theta - l \dot{\theta} \sin \theta \tag{11}$$

$$y_1 = y + l \sin \theta \quad (12)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y} + \dot{l} \sin \theta + l \dot{\theta} \cos \theta \quad (13)$$

\dot{x}_1, \dot{y}_1 은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x}_1 \cos(\theta + \alpha) + \dot{y}_1 \sin(\theta + \alpha) \\ &= \dot{x} \cos(\theta + \alpha) + \dot{y} \sin(\theta + \alpha) + \dot{l} \cos \alpha + l \dot{\theta} \sin \alpha \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= -\dot{x}_1 \sin(\theta + \alpha) + \dot{y}_1 \cos(\theta + \alpha) \\ &= -\dot{x} \sin(\theta + \alpha) + \dot{y} \cos(\theta + \alpha) - \dot{l} \sin \alpha + l \dot{\theta} \cos \alpha \end{aligned} \quad (15)$$

따라서 $\dot{y}_1 = 0$ 의 조건으로부터 다음을 구할 수 있다.

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{x} \sin(\theta + \alpha) - \dot{y} \cos(\theta + \alpha) + \dot{l} \sin \alpha}{l \cos \alpha} \quad (16)$$

여기서 $l \cos \alpha \neq 0$ 이어야 한다.

$\dot{x}_1 \neq 0, \dot{y}_1 = 0$ 인 경우에 운동방정식은 다음과 같으므로

$$-\frac{p}{i} \cos \theta - c_x \dot{x} = m \ddot{x} \quad (17)$$

$$-\frac{p}{i} \sin \theta - c_y \dot{y} = m \ddot{y} \quad (18)$$

$$\frac{p}{i} \cos \alpha = \mu_x mg \quad (19)$$

$$\frac{p}{i} \sin \alpha \leq \mu_y mg \quad (20)$$

p, i 가 주어지면 운동을 해석할 수 있다. 여기서 식(20)은 구동력이 마찰력보다 작으면 미끄러짐이 발생하지 않는다는 것을 의미하며, 식(19)로부터 α 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha = \arccos \left(\left(\frac{\mu_x mg}{p} \right) i \right) \quad (21)$$

그러므로 식(16)~(21)을 이용해서 스케이트 운동을 연속적으로 결정할 수 있다.

2.2 운동방정식의 해석

스케이트 운동을 제어하는 목적 중의 하나는 주어진 파워를 효율적으로 사용해서 단시간에 최고 속도의 상태에 도달하고자 하는 것이다. 따라서 주어진 상황에서 \dot{y} 를 최대로 만드는 것인데, 가해지는 힘이 최대인 경우에 가속도가 최대가 되므로 식(9)의 관계에서 속도 (i) 가 작을수록 힘이 커진다는 것을 알 수 있다. 이것을 다른 방법으로 해석하도록 하자. 식(18)에서 \ddot{y} 는 다음과 같고

$$\ddot{y} = -\frac{p}{mi} \sin \theta - \frac{c_y}{m} \dot{y} \quad (22)$$

후술하는 것과 같이 $m > 0, p > 0, c_y \geq 0, \dot{y} \geq 0$ (조건 II), $i > 0$ (조건 IX)을 만족하기 때문에, $\sin \theta$ 의 부호에 의해 \ddot{y} 를 최대로 하는 i 의 값이 정해진다. Fig. 3 과 같이 $i_{min} \leq i \leq i_{max}$ 인 경우에 다음과 같이 정리할 수 있다.

- $\sin \theta > 0$ ($0 < \theta < \pi/2$) 인 경우, \ddot{y} 를 최대하기 위해서 i 는 최대한 큰 값 (i_{max}) 이어야 한다.
- $\sin \theta < 0$ ($-\pi/2 \leq \theta < 0$) 인 경우, \ddot{y} 를 최대하기 위해서 i 는 최대한 작은 값 (i_{min}) 이어야 한다.

따라서 식(9)의 관계를 만족하면서 운동을 유지하기 위해서 다음을 만족해야 한다.

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta < 0 \quad (23)$$

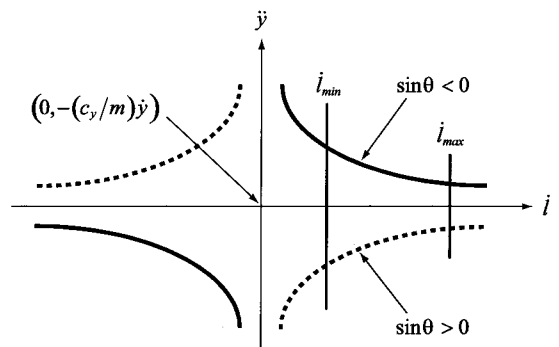


Fig. 3 Functional relation between i and \dot{y}

식(22)에서 알 수 있듯이 스케이트 운동을 결정하는 인자는 p, i 라고 할 수 있다. p 는 P_{max} 이하의 값을 가지면 되기 때문에, 더욱 범위가 넓

은 i 가 가장 결정적이다. 따라서 i 에 주목해서 운동의 구속조건을 고찰하도록 한다.

3. 스케이트 운동의 구속조건

스케이트 운동의 해석에서 고려해야 할 사항은 크게 역학적인 조건과 신체적인 조건으로 나눌 수 있다. 역학적인 조건은 스케이트 운동을 생성하고 유지하기 위한 내용이고, 신체적인 조건은 스케이트 운동에서 인간의 신체가 나타내는 메커니즘적인 범위에 관한 내용이다. 각각을 구분해서 고려하도록 한다.

3.1 역학적인 구속조건

스케이트 운동에서의 역학적인 구속조건은 다음과 같다.

- i) $y \geq 0$ 을 만족할 것(조건 I)
- ii) $\dot{y} \geq 0$ 을 만족할 것(조건 II)
- iii) f 의 범위가 $\mu_x mg \leq f \leq mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$ 을 만족할 것(조건 III)
- iv) $\frac{P}{l} \sin \alpha \leq \mu_y mg$ 을 만족할 것 (조건 IV)
- v) $\dot{x}' > 0$ 을 만족할 것(조건 V)
- vi) $\dot{y}' = 0$ 을 만족할 것(조건 VI)
- vii) $\ddot{x} \leq 0$ 을 만족할 것(조건 VIII)
- viii) 몸의 속도가 $\phi = \arctan 2(\dot{y}, \dot{x})$ 의 방향인 경우, $\phi - \pi/2 \leq (\theta + \alpha) \leq \phi$ 을 만족할 것(조건 VIII)

조건 I, II 는 앞으로 이동하기 위한 구속이다. 그리고 조건 III 은 $\dot{x}' \neq 0, \dot{y}' = 0$ 을 만족하기 위한 구동력과 마찰력 사이의 구속으로서 Fig. 4 와 같이 설명할 수 있다. 다리의 구동력 (f) 에 대한 x' 방향의 성분이 x' 방향의 최대 정지마찰력 ($\mu_x mg$) 과 같은 경우에 $\dot{x}' \neq 0$ 을 만족하고, f 에 대한 y' 방향의 성분이 y' 방향의 최대 정지마찰력 ($\mu_y mg$) 보다 작은 경우에 $\dot{y}' = 0$ 을 만족하게 된다. 따라서 구동력 (f) 는 Fig. 4(b)와 같이 $\alpha = 0$ 에서 $f_{\min} = \mu_x mg$ 이 되고, Fig. 4(c)와 같이 $\alpha = \arccos\left(\frac{\mu_x}{\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}\right)$ 에서 $f_{\max} = mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$ 이 된다. 식(9)로부터 조건 III 은 다음과 같은 i 의 관계식으로 바꿀 수 있다.

$$\frac{P}{mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}} \leq i \leq \frac{P}{\mu_x mg} \quad (24)$$

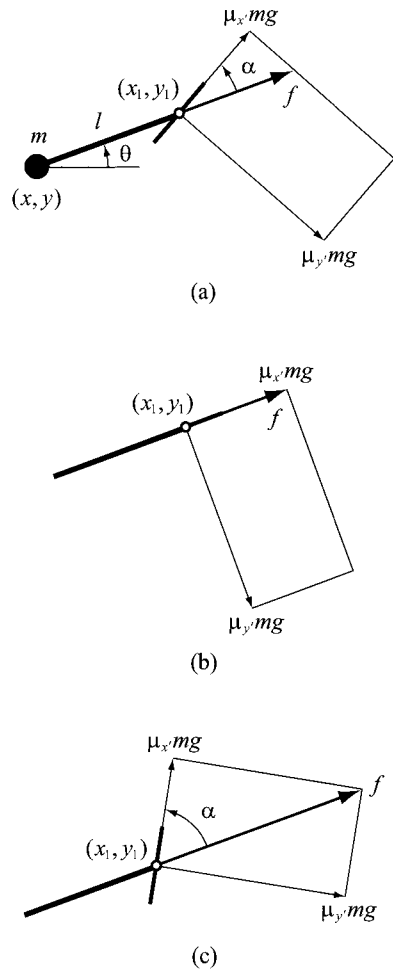


Fig. 4 Constraint on friction force in blade

식(21), (24)로부터 α 의 범위를 구하면 다음과 같다.

$$0 \leq \alpha \leq \arccos\left(\frac{\mu_x}{\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}\right) \quad (25)$$

그리고 식(25)로부터 $\sin \alpha \geq 0$ 인 것을 알게 되었다.

조건 IV 와 식(29)로부터 i 의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$i \geq \frac{P}{\mu_y mg} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_x mg}{P}\right)^2} \quad (26)$$

일반적으로 $a \geq 0, b \geq 0, a \geq b \Rightarrow a^2 \geq b^2$ 을 만족하므로, 식(26)의 양변을 제곱해서 i 에 관해 정리하면 다음과 같은 i 의 관계식을 얻을 수 있다.

$$i^2 \geq \frac{p^2}{(\mu_x mg)^2 + (\mu_y mg)^2} \quad (27)$$

후술하는 것과 같이 조건 IX ($i > 0$) 를 고려해서 식 (27)로부터 i 의 범위를 구하면 다음과 같고

$$i \geq \frac{p}{mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}$$

이것은 식(24)에 포함되어 있다.

조건 V 는 스케이트 운동의 전제조건으로서 식 (14)에 식(16)을 대입하면 $\dot{x}' > 0$ 는 다음과 같이 된다.

$$\dot{x} \cos(\theta + \alpha) + \dot{y} \sin(\theta + \alpha) + \dot{i} \cos \alpha + \dot{x} \sin(\theta + \alpha) \tan \alpha - \dot{y} \cos(\theta + \alpha) \tan \alpha + \dot{i} \sin \alpha \tan \alpha > 0$$

여기에

$$\cos \alpha = \left(\frac{\mu_x mg}{p} \right) i \quad (28)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_x mg}{p} \right)^2} i^2 \quad (29)$$

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (30)$$

을 대입해서 정리하면, $\dot{x}' > 0$ 은 다음과 같은 i 의 관계식으로 정리된다.

$$\dot{i} > -\dot{x} \cos \theta - \dot{y} \sin \theta \quad (31)$$

조건 VI 은 식(16)에서 이미 언급했다. 그리고 조건 VII 은 몸이 x 축 방향으로 원래의 위치로 돌아오는 진동적인 운동을 하기 위한 구속으로서,

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{p}{l} \cos \theta - c_x \dot{x} \leq 0 \quad (32)$$

후술하는 것과 같이 $p > 0, c_x \geq 0, \cos \theta \geq 0$ (식 (23)), $i > 0$ (조건 IX)을 만족하므로 식(32)는 $\dot{x} \geq 0$ 인 경우에 언제나 성립하지만, $\dot{x} < 0$ 인 경우에 다음과 같은 i 의 관계식을 추가로 고려해야 한다.

$$i \leq -\frac{p \cos \theta}{c_x \dot{x}} \quad (33)$$

조건 VIII 은 스케이트가 후술하는 조건 XI 를 만족하면서 운동을 방해하지 않는 각도로 있어야 한다는 구속인데, Fig. 5 와 같이 몸의 속도 (\dot{x}, \dot{y}) 가 $\phi = \arctan 2(\dot{y}, \dot{x})$ 의 방향인 경우에 다음을 만족하면 된다.

$$\phi - \frac{\pi}{2} \leq \theta + \alpha \leq \phi \quad (34)$$

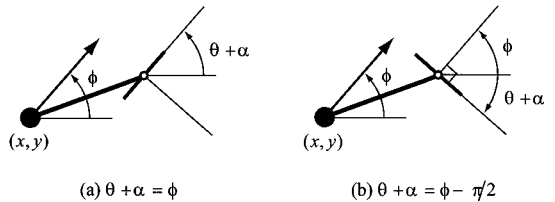


Fig. 5 Constraint on velocity direction in blade

역학적인 구속조건으로부터 $i_{min} \leq i \leq i_{max}$ 의 범위는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$i(f = f_{max}) = \frac{p}{mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}$$

$$\dot{i}(\dot{x}' > 0) = -\dot{x} \cos \theta - \dot{y} \sin \theta$$

$$i(f = f_{min}) = \frac{p}{\mu_x mg}$$

$$i(\ddot{x} \leq 0) = -\frac{p \cos \theta}{c_x \dot{x}}$$

$$i_{min} = \max(i(f = f_{max}), \dot{i}(\dot{x}' > 0)) \quad (35)$$

$$i_{max} = \min(i(f = f_{min}), i(\ddot{x} \leq 0)) \quad (36)$$

여기서 $\dot{i}(f=f_{max})$ 은 $f=f_{max}$ 에서 i 의 값, $\dot{i}(\dot{x}'>0)$ 은 $\dot{x}'>0$ 을 만족하는 i 의 경계값(식(31)), $\dot{i}(f=f_{min})$ 은 $f=f_{min}$ 에서 i 의 값, $\dot{i}(\dot{x}\leq 0)$ 은 $\dot{x}\leq 0$ 을 만족하는 i 의 경계값(식(33))이다. 전술한 것과 같이 $\dot{i}=i_{min}$ 에서 \dot{y} 가 최대가 되므로, i_{min} 에 주목해서 스케이트 운동을 해석하기로 한다.

3.2 신체적인 구속조건

스케이트 운동에서의 신체적인 구속조건은 다음과 같다.

- i) $\dot{i}>0$ 을 만족할 것(조건 IX)
- ii) $\dot{\theta}\leq 0$ 을 만족할 것(조건 X)
- iii) $x_1 - x$ 가 단순히 증가할 것(조건 XI)

조건 IX, X 은 다리를 몸의 바깥쪽과 뒷쪽으로 뺀기 위한 구속을 의미한다. 스케이트 운동에 대한 동영상¹⁵⁻²⁰ 을 분석한 결과로서 인간의 스케이트 운동과 유사한 글라이드 추진을 구현하기 위한 조건이라고 할 수 있다.

조건 IX 는 다리를 안쪽으로 오므리지 않는 것을 의미한다. 그리고 조건 X 을 i 의 관점에서 고찰하도록 하자. 조건 X 은 $l\cos\alpha > 0$ 이므로 식(16) 으로부터 다음과 같이 된다.

$$\dot{x}\sin(\theta+\alpha) - \dot{y}\cos(\theta+\alpha) + \dot{i}\sin\alpha \leq 0 \tag{37}$$

$\dot{\theta}\leq 0$ 을 풀기 위해서, 먼저 $\dot{\theta}=0$ 의 해를 구한 다음에 $\dot{\theta}\leq 0$ 의 범위를 구하도록 하자. 식(37)에 식(28), (29)를 대입해서 정리하면, $\dot{\theta}=0$ 은 다음과 같이 된다.

$$(A+D+z)\sqrt{1-w^2z^2} = -(B-C)wz \tag{38}$$

여기서 $z\equiv\dot{i}$, $w\equiv\mu_x mg/p$, $A\equiv\dot{x}\cos\theta$, $B\equiv\dot{x}\sin\theta$, $C\equiv\dot{y}\cos\theta$, $D\equiv\dot{y}\sin\theta$ 이다. 식(38)의 양변을 제곱해서 z 에 관해 정리하면 다음과 같은 4 차 방정식을 얻을 수 있다.

$$w^2z^4 + 2(A+D)w^2z^3 + (((A+D)^2 + (B-C)^2)w^2 - 1)z^2 - 2(A+D)z - (A+D)^2 = 0$$

z 에 관한 4 차 방정식의 실근을 구한 다음에

$$(B-C)wz + (A+D+z)\sqrt{1-w^2z^2} \leq 0 \tag{39}$$

을 성립하는 z 로부터 $\dot{\theta}\leq 0$ 을 만족하는 i 의 구간을 얻을 수 있다. 여기서 식(35), (36)을 만족해야 한다. 그리고 식(39)에서 $\dot{\theta}=0$ 을 만족하는 i 를 $\dot{i}(\dot{\theta}=0)$ 으로 표현하겠다.

조건 X 을 p 의 관점에서 다시 고찰하도록 하자. 식(35)에서 $i_{min}=\dot{i}(f=f_{max})=p/(mg\sqrt{\mu_x'^2 + \mu_y'^2})$ 이라고 가정하면, $\dot{i}=i_{min}$ 에서 $\dot{\theta}\leq 0$ 을 만족할 경우에 \dot{y} 가 최대가 된다. $l\cos\alpha > 0$ 이고 $\dot{i}=i_{min}$ 에서

$$\cos\alpha = \frac{\mu_x'}{\sqrt{\mu_x'^2 + \mu_y'^2}}, \quad \sin\alpha = \frac{\mu_y'}{\sqrt{\mu_x'^2 + \mu_y'^2}}$$

을 만족하므로, 식(16)에 $\dot{i}=i_{min}$, $\cos\alpha$, $\sin\alpha$ 를 대입해서 정리하면 다음과 같이 된다.

$$(B-C)\mu_x' + (A+D)\mu_y' + \frac{p}{mg}\frac{\mu_y'}{\sqrt{\mu_x'^2 + \mu_y'^2}} \leq 0 \tag{40}$$

식(40)을 p 에 대해 정리하면 다음과 같은 p 의 관계식을 구할 수 있다.

$$0 < p \leq -((B-C)\mu_x' + (A+D)\mu_y')\frac{mg\sqrt{\mu_x'^2 + \mu_y'^2}}{\mu_y'} \tag{41}$$

여기서

$$E \equiv -((B-C)\mu_x' + (A+D)\mu_y')\frac{mg\sqrt{\mu_x'^2 + \mu_y'^2}}{\mu_y'}$$

이라고 하면, $0 < p \leq P_{max}$ 이므로 $E \leq P_{max}$ 을 만족해야 한다.

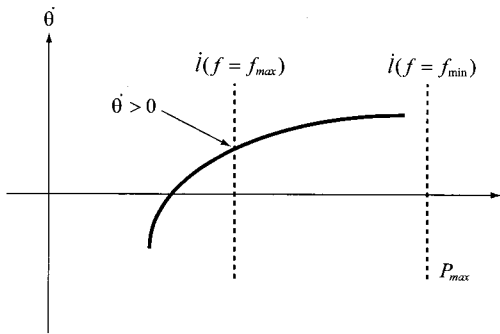
조건 XI 은 몸에서 본 스케이트의 상대적인 위치가 x 축 방향으로 단순히 증가하면서 바깥쪽으로 뺀어 나가는 것을 의미한다. 스케이트 운동의 동영상¹⁵⁻²⁰ 을 분석한 결과로서 상대적으로 안쪽에 들어오는 경우는 없었다.

4. 스케이트 운동의 해석방법

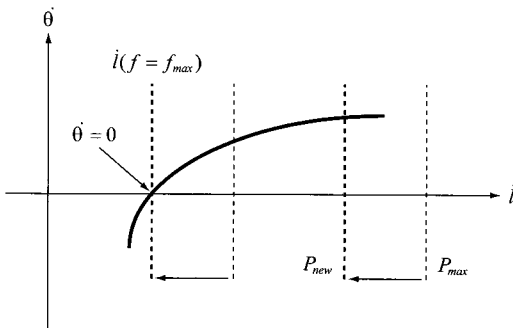
지금까지 고찰한 역학적인 구속조건과 신체적인 구속조건으로부터 스케이트 운동을 결정하는 인자인 p , \dot{i} 는 기본적으로 식(35), (39), (41)과 같이 구할 수 있다. 그러나 다양한 구속조건이 서로

영향을 주고 받기 때문에 쉽게 이해할 수 있는 형태는 아니다. 그래서 다양한 초기조건에서 스케이트 운동을 해석한 결과로부터 다음과 같은 효과적인 계산 알고리즘을 정립하게 되었다.

- 1) 초기조건으로 $x(0)$, $y(0)$, $\dot{x}(0)$, $\dot{y}(0)$, $l(0)$, $\theta(0)$ 를 정한다. 여기서 $x(0)$ 는 시간 $t=0$ 에서 x 의 값을 의미한다.
- 2) 초기조건을 식(41)에 대입해서 E 를 구하면 (i) $E > P_{max}$, (ii) $E \leq P_{max}$ 의 두가지 경우로 나눌 수 있다.
- 3) (i) $E > P_{max}$ 는 주어진 조건에서 다리의 근육이 P_{max} 를 발생할 수 없는 경우를 말하는데, Fig. 6(a)와 같이 $p = P_{max}$ 와 $\dot{i} = \dot{i}(f = f_{max})$ 에서 $\dot{\theta} > 0$ 의 영역에 속한다. 이 경우는 $p = P_{max}$ 를 만족하지 않으므로 p 를 낮추어서 $\dot{\theta} \leq 0$ 이 되도록 해야 한다. p 를 낮춘다는 것은 주어진 조건에서 근육이 최대로 사용할 수 있는 파워를 $P_{new} (< P_{max})$ 로 낮춘다는 것을 의미한다. 식(24)와 같이 i 의 범위는 p 에 의존하기 때문에, Fig. 6(b)와 같이



(a) $\dot{\theta} > 0$ at $\dot{i}(f = f_{max})$ of P_{max}



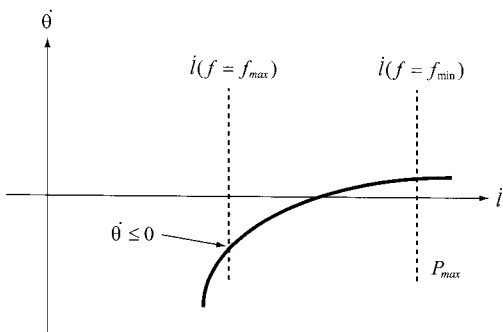
(b) $\dot{\theta} = 0$ at $\dot{i}(f = f_{max})$ of P_{new}

Fig. 6 Region of maximum force

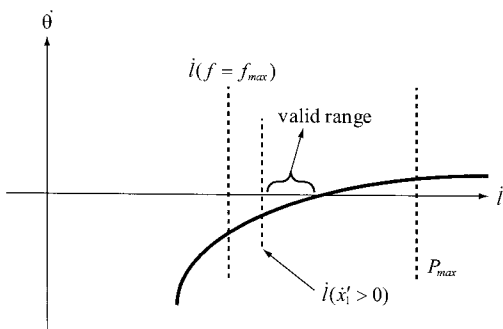
낮아진 P_{new} 에 대응하는 새로운 i 의 범위가 정해진다. 그리고 P_{new} 의 값은 $i = \dot{i}(f = f_{max}) = P_{new} / (mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2})$ 에서 $\dot{\theta} = 0$ 이 되도록 조절하는 것이 좋은데, 이것은 $\dot{i}(f = f_{max})$ 에서 $f = f_{max} = mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$ 가 성립하므로 가속도 (\ddot{y}) 를 최대로 만들 수 있기 때문이다. 식(40), (41)로부터 $P_{new} = E$ 인 경우에 $\dot{\theta} = 0$ 을 만족하게 된다. 따라서 $f = f_{max}$ 는 그대로 두고 i 를 느리게 해서 p 를 P_{new} 로 낮추는 것이 되고, $\alpha = \arccos(\mu_x / \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2})$ 로 변환이 없다. 식(31)에서 $\dot{i}(f = f_{max}) > \dot{i}(\dot{x}' > 0)$ 이, 식(33)에서 $\dot{i}(f = f_{max}) < \dot{i}(\dot{x} \leq 0)$ 이 언제나 성립했다. 그러므로 $\dot{i}_{min} = \dot{i}(f = f_{max})$ 이 된다. 그리고 $E > P_{max}$ 의 경우에는 $f = f_{max}$ 가 언제나 성립하도록 p 를 조절하므로 힘이 최대인 구간(region of maximum force)이라고 할 수 있다.

- 4) (ii) $E \leq P_{max}$ 는 주어진 조건에서 다리의 근육이 P_{max} 를 발생할 수 있는 경우를 말하는데, Fig. 7(a)와 같이 $p = P_{max}$ 와 $\dot{i} = \dot{i}(f = f_{max})$ 에서 $\dot{\theta} \leq 0$ 의 영역에 속한다. 이 경우는 $p = P_{max}$ 를 만족하므로 p 를 낮출 필요가 없다. 식(24)와 같이 i 의 범위는 p 에 의존하기 때문에, Fig. 7(a)와 같이 P_{max} 에 대응하는 i 의 범위가 정해진다. 그리고 i 의 값으로 $\dot{i}(f = f_{max})$ 를 선택하는 것이 좋은데, 이것은 $i = \dot{i}(f = f_{max}) = P_{max} / (mg\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2})$ 에서 $f = f_{max}$ 가 성립하므로 가속도 (\ddot{y}) 를 최대로 만들 수 있기 때문이다. 그러나 $\dot{i}(f = f_{max})$ 에서 지나치게 작은 $\dot{\theta} (< 0)$ 가 $\dot{x}' \leq 0$ 을 유발할 수 있으므로, Fig. 7(b)와 같이 i 를 $\dot{x}' > 0$ 을 만족하는 값과 $\dot{\theta} = 0$ 을 만족하는 값 사이에서 적절하게 선택해야 한다. 식(31)에서 $\dot{x}' > 0$ 을 만족하는 i 를, 그리고 식(39)에서 $\dot{\theta} = 0$ 을 만족하는 i 를 구할 수 있는데, $\dot{i}(\dot{\theta} = 0) > \dot{i}(\dot{x}' > 0)$ 가 언제나 성립했다. i 를 $\dot{i}(\dot{x}' > 0)$ 과 $\dot{i}(\dot{\theta} = 0)$ 사이의 값으로 선택하면 되지만, 이 범위의 값이면 무엇이든 상관없는 것이 아니므로 주의가 필요하다. $\dot{i}(\dot{x}' > 0) \geq \dot{i}(f = f_{max})$ 가 언제나 성립하는 것은 아니기 때문에, $\dot{i}(\dot{x}' > 0) \geq \dot{i}(f = f_{max})$ 인 경우 (Fig. 7(b))에는 $\dot{i}(\dot{x}' > 0) < \dot{i}(\dot{\theta} = 0)$ 이어야 하지만, $\dot{i}(\dot{x}' > 0) < \dot{i}(f = f_{max})$ 인 경우 (Fig. 7(c))에는 $\dot{i}(f = f_{max}) \leq \dot{i}(\dot{\theta} = 0)$ 이어야 한다. 따라서 $\dot{i}(\dot{x}' > 0) \geq \dot{i}(f = f_{max})$ 인 경우에는 $\dot{i}_{min} = \dot{i}(\dot{x}' > 0)$, $\dot{i}_{max} = \dot{i}(\dot{\theta} = 0)$ 이 되고,

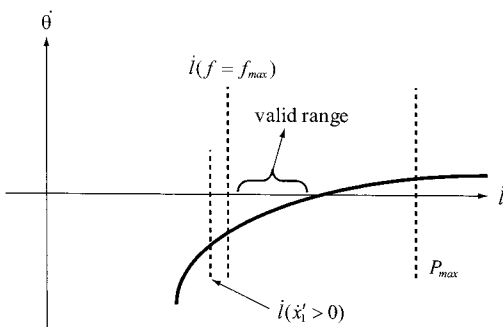
$\dot{i}(\dot{x}'_1 > 0) < \dot{i}(f = f_{max})$ 인 경우에는 $\dot{i}_{min} = \dot{i}(f = f_{max})$, $\dot{i}_{max} = \dot{i}(\dot{\theta} = 0)$ 이 된다. 결과적으로 f 는 줄이고 \dot{i} 를 빠르게 해서 p 를 P_{max} 로 유지하는 것이 되고, \dot{i} 가 커지게 되면 α 는 작아진다. 식(33)에서 $\dot{i}(\dot{\theta} = 0) < \dot{i}(\dot{x} \leq 0)$ 이 언제나 성립했다. 그리고 $E \leq P_{max}$ 의 경우에는 $p = P_{max}$ 가 언제나 성립하므로 파워가 최대인 구간(region of maximum power)이라고 할 수 있다.



(a) $\dot{\theta} \leq 0$ at $\dot{i}(f = f_{max})$ of P_{max}



(b) $\dot{i}(\dot{x}'_1 > 0) \geq \dot{i}(f = f_{max})$



(c) $\dot{i}(\dot{x}'_1 > 0) < \dot{i}(f = f_{max})$

Fig. 7 Region of maximum power

5) 위에서 구한 p , \dot{i} 를 식(21)에 대입하면 α 를, 식(17), (18)에 대입하면 \ddot{x} , \ddot{y} 를, 그리고 식(16)에 대입하면 $\dot{\theta}$ 를 구할 수 있다. 미소한 시간에 대한 증분을 구했으므로 각각을 적분하면 시간에 따른 변화를 알 수 있게 된다. 스케이트 운동의 경우에 몸이 x 축 방향으로 초기의 위치인 $x(0)$ 으로 돌아오면 움직이는 다리를 바꾸게 되므로, 원래의 위치에 돌아올 때까지 계산을 반복적으로 계속한다. 그리고 계산의 도중에 조건 I, II, VIII, XI 을 만족해야 한다.

스케이트 운동은 누구나 경험이 있기 때문에, 직관적으로 납득할 수 있는 운동상태가 지속되어야 한다. 그리고 Fig. 6 및 Fig. 7 과 같이 \dot{i} 와 $\dot{\theta}$ 사이의 관계가 스케이트 운동을 이해하는데 결정적인 단서를 제공했다. 지금까지의 해석방법을 Fig. 8 에 간략하게 정리했다.

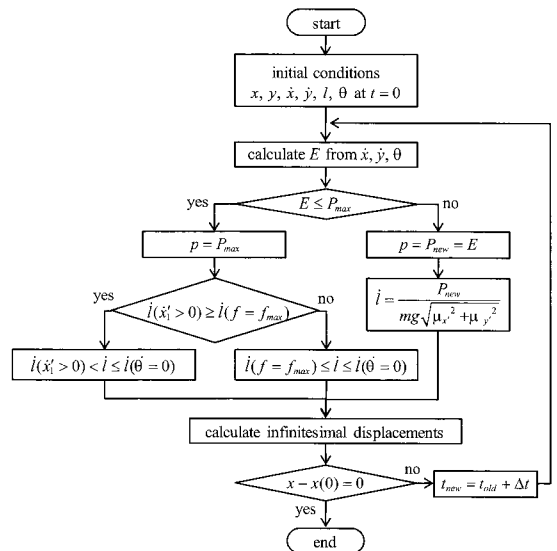


Fig. 8 Analytic algorithm for skating motion

5. 스케이트 운동의 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션의 조건 결정

해석의 편의를 위해서 스케이트 운동의 2 차원 모델(Fig. 1)을 사용했지만, 결과의 현실성을 높이기 위해서 성인 남자의 운동선수에 관한 데이터를 사용했다. 시뮬레이션의 구체적인 조건을 Table 1 에 정리했다. 여기서 다리의 근육이 낼 수 있는 최대의 파워 (P_{max}) 를 600 [N·m/s] 으로 정했다. 몸

에 대한 공기의 점성 마찰계수(c_x, c_y)를 계산하기 위해서, 스케이트 운동에서 앞으로 구부러진 몸을 반지름이 $R=0.2$ [m], 높이가 $H=1.2$ [m] 인 원기둥으로 표현했다. 점성 마찰계수의 구체적인 계산방법은 부록에 설명했다. 스케이트와 얼음의 건성 마찰계수(μ_x, μ_y)는 μ_x 를 기준으로 μ_y 가 충분히 크도록 정했다. 그리고 L_{min} 은 다리 길이의 최소값, L_{max} 는 다리 길이의 최대값이다. 참고문헌^{21,22} 과 전문가의 조언으로 현실성이 있는 값을 정할 수 있었다.

Table 1 Athletic data for skating motion

gravitational constant	$G = 9.8067$ [m/s ²]
mass of body	$M = 75.0$ [kg]
weight of body	$W = M \times G$
force of leg	$F = 1000.0$ [N]
velocity of leg	$V = 0.6$ [m/s]
maximum power of leg	$P_{max} = F \times V$
length of blade	0.35 [m]
length of leg	$L_{min} = 0.3$ [m], $L_{max} = 1.2$ [m]
cylinder for body	$R = 0.2$ [m], $H = 1.2$ [m]
dry-friction coefficient	$\mu_x = 0.01, \mu_y = 0.50$

5.2 시뮬레이션의 해석 결과

스케이트 운동을 결정하는 인자인 p, i 는 Fig. 8 과 같은 방법으로 구할 수 있는데, i 의 경계값인 i_{min} 과 i_{max} 는 계산하는 도중에 계속 변하게 된다. 과학적인 일관성을 가지고 시뮬레이션의 결과를 분석하기 위해서 i 를 경계값 사이의 내분점으로 정하기로 했다. 식(41)에서 $E > P_{max}$ 인 경우는 i 가 $i(f = f_{max})$ 으로 값이 정해지지만, $E \leq P_{max}$ 인 경우는 i 가 $i(x'_i > 0) < i \leq i(\theta = 0)$ 또는 $i(f = f_{max}) \leq i \leq i(\theta = 0)$ 으로 값에 범위가 생기게 된다. 따라서 $i(x'_i > 0)$ 과 $i(\theta = 0)$ 사이의 일정한 비율로 내분점을 먼저 구하고, 내분점이 $i(f = f_{max})$ 보다 작으면 i 를 $i(f = f_{max})$ 으로 정하고, 그렇지 않으면 i 를 내분점으로 정한다. 그리고 내분점은 다음과 같이 구해진다.

$$i(q = d) = d \cdot i(\theta = 0) + (1 - d) \cdot i(x'_i > 0)$$

여기서 $0 < d \leq 1$, q 는 내분하는 비율, $i(q = d)$ 는 $q = d$ 에서 i 의 값을 나타낸다. 그리고 미시적인

관점에서 i 와 θ 사이의 관계로부터 스케이트 운동을 계산할 수 있었듯이, 거시적인 관점에서 스케이트 운동을 이해하기 위해서 그 적분값인 l 과 θ 사이의 관계를 중심으로 고찰했고, 인간의 동작과 매우 유사한 스케이트 운동을 생성할 수 있었다.

Fig. 9 는 $t = 0$ [s] 에서 $x(0) = y(0) = 0$ [m], $\dot{x}(0) = 4.5 \cos(79^\circ)$ [m/s], $\dot{y}(0) = 4.5 \sin(79^\circ)$ [m/s], $l(0) = L_{min} = 0.3$ [m], $\theta(0) = -20^\circ$ 와 q 가 일정한 조건에서 계산한 결과를 (l, θ) 의 관계로 나타낸 것이다. 다리 길이의 최대값(L_{max}) 과 조건 XI 에 대한 제한을 없애고 계산했으며, 0.1 [s] 의 간격으로 x 를 표시했다. q 가 작을수록 스케이트가 x' 축 방향으로 덜 움직이게 되므로, 몸이 x 축 방향으로 초기의 위치인 $x(0)$ 으로 돌아오는데 필요한 시간 t 와 다리의 길이 l 이 증가하게 된다. 이것은 스케이트가 몸보다 상대적으로 덜 움직이게 되므로 다리가 몸의 뒤쪽에 위치하게 되고, 다리로부터 몸에 작용되는 힘의 많은 부분이 y 축 방향으로 가해지므로 몸을 $x(0)$ 로 보내기 위한 $-x$ 축 방향의 힘이 상대적으로 부족하기 때문에 시간이 많이 걸리는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 10 은 Fig. 9 의 (l, θ) 를 몸에서 본 스케이트의 상대적인 위치인 $(x_1 - x, y_1 - y)$ 으로 변환한 것인데, 인간의 몸은 $(0, 0)$ 에 있다. q 가 일정한 경우에 전체적으로 직선적인 궤적을 나타냈다. 하지만 인간의 스케이트 운동을 관찰하면 스케이트의 상대적인 위치가 Fig. 12 와 같이 직선과 부드러운 곡선을 그리면서 자연스럽게 이동하는 것을 알 수 있다. 경험적으로 이해할 수 있는 스케이트 운동을 생성하기 위해서 Fig. 12 와 같이 자연스러운 $(x_1 - x, y_1 - y)$ 의 궤적을 만드는 것이 대단히 중요

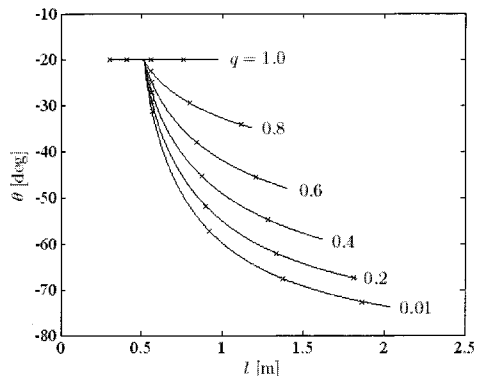


Fig. 9 Simulation result (l, θ) with constant q

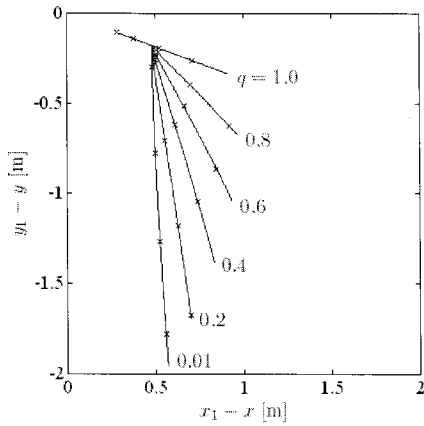


Fig. 10 Simulation result $(x_1 - x, y_1 - y)$ from Fig. 9

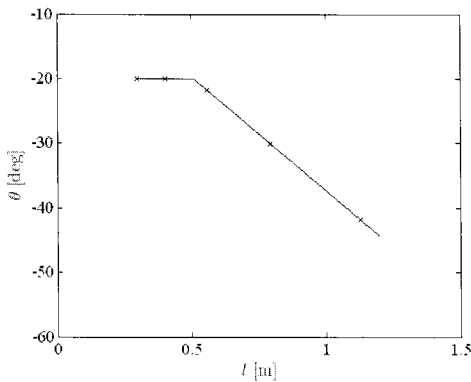


Fig. 11 Simulation result (t, θ) with variable q

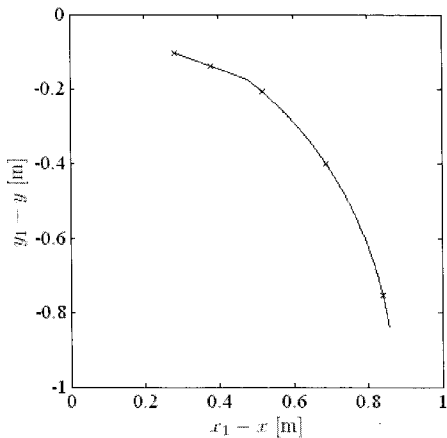


Fig. 12 Simulation result $(x_1 - x, y_1 - y)$ from Fig. 11

하다. 다양한 시뮬레이션의 결과로부터 Fig. 11 과 같은 직선적인 (t, θ) 의 관계가 직관적인 운동의

형태를 생성한다는 것을 알게 되었다. Fig. 11 과 Fig. 12 의 초기조건은 Fig. 9 와 같으며, $t = L_{max} = 1.2$ [m] 에서 $x = x(0)$ 이 되면서 운동이 끝나도록 해석했다.

Fig. 13 은 Fig. 11 의 결과를 xy 좌표계로 변환한 것이다. 등근 점으로 표시된 몸이 부드러운 곡선을 그리면서 $x(0)$ 으로 돌아오고, 스케이트가 옆으로 미끄러지지 않으면서 운동방정식에 따라 움직이고, 다리가 몸과 스케이트를 연결하는 모습을 나타낸다. $t = 0.419$ [s] 에서 $x = x(0)$ 이 되었고, 시작과 끝을 포함해서 0.05 [s] 의 간격으로 운동의 추이를 표시했다. 그리고 Fig. 13 의 결과로부터 Fig. 14 에는 x 축 방향에 대한 몸의 위치와 속도를 나타냈고, Fig. 15 에는 y 축 방향에 대한 몸의 위치와 속도를 나타냈고, Fig. 16 에는 α 를 나타냈다. 전반적으로 인간의 스케이트 운동과 대단히 유사한 형태를 보여주고 있다.

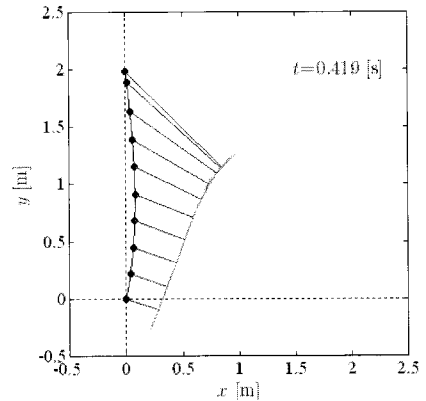


Fig. 13 Simulation result (x, y) from Fig. 11

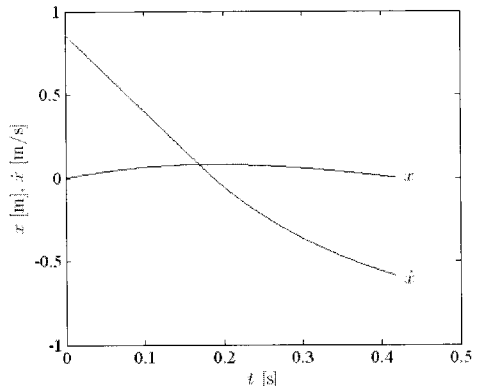


Fig. 14 Simulation result x, \dot{x} from Fig. 13

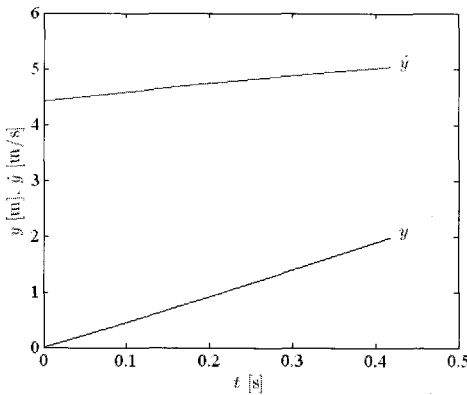


Fig. 15 Simulation result y, \dot{y} from Fig. 13

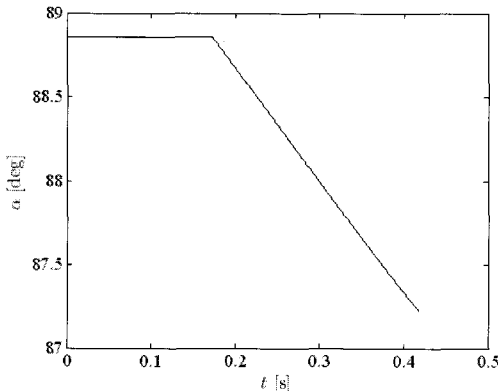


Fig. 16 Simulation result α from Fig. 13

6. 결론

지금까지 스케이트 운동을 생성하기 위한 구속 조건에 대해 고찰했다. 이 논문의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 스케이트 운동의 2 차원 모델을 대상으로 논홀로노믹 구속을 포함하는 운동방정식을 도출했다.
- 스케이트 운동을 생성하기 위한 구속조건을 정리했다. 구속조건은 크게 역학적인 것과 신체적인 것으로 구분할 수 있다.
- 스케이트 운동의 구속조건이 가지는 물리적인 의미를 면밀하게 고찰해서, 운동의 생성에 효과적인 해석 알고리즘을 정립했다.
- 스케이트 운동의 해석 알고리즘을 이용해서, 인간의 동작과 유사한 결과를 획득했다.

운동량의 제어나 주기적인 입력에 주목한 기존의 연구보다 직관적으로 납득할 수 있는 스케이트 운

동의 결과를 얻게 되었다. 앞으로의 과제로는 스케이트 운동의 연속동작을 생성하기 위한 알고리즘의 정립, 가속도를 최대로 만들기 위한 최적 제어기법의 개발 등이 있다. 그리고 실제로 스케이트 운동이 가능한 로봇을 제작해서, 로봇의 이동능력을 획기적으로 높이는 것이 최종적인 목표라고 할 수 있다.

참고문헌

1. Hirose, S. and Takeuchi, H., "Study on Roller-walk (Basic Characteristics and its Control)," Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3265-3270, 1996.
2. Endo, G. and Hirose, S., "Study on Roller-walker: Multi-mode Steering Control and Self-contained Locomotion," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 12, No. 5, pp. 559-566, 2000.
3. Ostrowski, J. and Burdick, J., "The Geometric Mechanics of Undulatory Robot Locomotion," Intl. J. of Robotics Research, Vol. 17, No. 7, pp. 683-701, 1998.
4. Ostrowski, J., Desai, J. and Kumar, V., "Optimal Gait Selection for Nonholonomic Locomotion Systems," Intl. J. of Robotics Research, Vol. 19, No. 3, pp. 225-237, 2000.
5. Chitta, S. and Kumar, V., "Dynamics and Generation of Gaits for a Planar Rollerblader," Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, pp. 860-865, 2003.
6. Chitta, S., Heger, F. and Kumar, V., "Design and Gait Control of a Rollerblading Robot," Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3944-3949, 2004.
7. Kelly, S. and Murray, R., "Geometric Phases and Locomotion," J. of Robotic Systems, Vol. 12, No. 6, pp. 417-431, 1995.
8. Kelly, S. and Murray, R., "The Geometry and Control of Dissipative Systems," Proc. IEEE Conf. Decision and Control, Vol. 1, pp. 981-986, 1996.
9. Hirose, S., Cave, P. and Goulden, C., "Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators," Oxford University Press, 1993.
10. Hirose, S. and Fukushima, E., "Snakes and Strings: New Robotic Components for Rescue Operations,"

Intl. J. of Robotics Research, Vol. 23, No. 4-5, pp. 341-349, 2004.

11. Mori, M. and Hirose, S., "Locomotion of 3D Snake-like Robots: Shifting and Rolling Control of Active Cord Mechanism ACM-R3," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 5, pp. 521-528, 2006.
12. McIsaac, K. and Ostrowski, J., "A Framework for Steering Dynamic Robotic Locomotion Systems," Intl. J. of Robotics Research, Vol. 22, No. 2, pp. 83-97, 2003.
13. Sfakiotakis, M. and Tsakiris, D., "Biomimetic Centering for Undulatory Robots," Intl. J. of Robotics Research, Vol. 26, No. 11-12, pp. 1267-1282, 2007.
14. Brockett, R., "On the Rectification of Vibratory Motion," Proc. IEEE Conf. Micro Electro Mechanical Systems, pp. 49-52, 1989.
15. http://kr.youtube.com/watch?v=0LBXH5LS_Eg
16. http://kr.youtube.com/watch?v=J_rzsaT2Wak
17. <http://kr.youtube.com/watch?v=aTr5CZ3PEGc>
18. <http://kr.youtube.com/watch?v=W27Wk2NsJVU>
19. <http://kr.youtube.com/watch?v=Hnx9ZPhR5tY>
20. <http://kr.youtube.com/watch?v=DOZdmXVIohY>
21. Mashima, H. and Ikai, M., "Biological Mechanics of Muscle," Kyorin-Shoin Publishers, pp. 95-116, 1972.
22. Nagata, A., "The Science of Muscle and Musclar Strength," Humaido Publishing, pp. 93-100, 1984.
23. The Japan Society of Mechanical Engineers, "JSME Mechanical Engineers' Handbook," The Japan Society of Mechanical Engineers Press, pp. (A5-97)-(A5-106), 1987.

부 록

A1. 공기의 점성 마찰계수

공기의 흐름에 수직으로 놓여진 2 차원의 원기둥에 대한 저항계수(drag coefficient) C_D 는 레이놀즈 수(Re)의 범위에 따라 다음과 같이 근사적으로 계산할 수 있다.²³

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \tag{A1}$$

$$C_D = \frac{8\pi}{Re(2.002 - \ln(Re))} \quad (0 < Re \leq 1) \tag{A2}$$

$$C_D = \left(0.707 + \frac{3.42}{\sqrt{Re}} \right)^2 \quad (1 < Re \leq 40) \tag{A3}$$

$$C_D = \frac{5.93}{\sqrt{Re}} + 1.17 \quad (40 < Re < 380,000) \tag{A4}$$

여기서 $\rho = 1.23 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 은 15°C 에서 공기의 밀도, $\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{ [N}\cdot\text{s/m}^2\text{]}$ 은 15°C 에서 공기의 동점성계수(dynamic viscosity), $\nu = 1.46 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$ 은 15°C 에서 공기의 동점도(kinematic viscosity)이다. 공기의 흐름에 수직으로 놓여진 3 차원의 원기둥에서는 높이 (H) 와 반지름 (R) 의 비 (H/R) 가 C_D 에 영향을 준다. 따라서 Table 1 과 같이 $H/R = 6$ 의 영향을 고려한 공기의 저항력(drag force) F_D 는 다음과 같이 구해진다.

$$F_D = \frac{0.7067}{1.2} C_D \rho V^2 R H \tag{A5}$$

여기서 V 는 공기와 물체의 상대속도를 의미한다.