

# 논홀로노믹 구속을 고려한 스케이트 운동의 연속적인 생성방법

## Gaits Control for Skating Motion with Nonholonomic Constraint

황창순<sup>1,✉</sup>

Chang-Soon Hwang<sup>1,✉</sup>

1 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.)  
✉ Corresponding author: robot@knu.ac.kr, Tel: 053-950-7516

Manuscript received: 2008.7.1 / Revised: 2008.12.29 / Accepted: 2009.2.27

*This paper addresses the control method for skating motion with a nonholonomic constraint. In order to generate a human-like skating motion, the behaviors of motion are distinctively analyzed into transient state and steady state. A close investigation of the behaviors evolved the characteristic of successive motions with transient state and steady state. Simulation results were intuitively comprehensible, and the effectiveness of control method was demonstrated for skating motion.*

Key Words: Hybrid Mobile Robot (하이브리드 이동 로봇), Glide Locomotion (글라이드 추진), Skating Motion (스케이트 운동), Undulatory Locomotion (파동형 이동), Nonholonomic Constraint (논홀로노믹 구속)

### 1. 서론

일반적으로 인간의 경우에 걷거나 뛰는 것보다 스케이트, 자전거 등의 도구를 타고 이동하면 적은 에너지로 훨씬 빠르고 멀리 갈 수 있다. 이것은 인간이 가지고 있는 신체적인 능력이 도구에 의해 극복되는 것을 의미한다. 다리에 의한 보행 운동을 기본으로 하는 이동 로봇이 바퀴에 의한 주행운동의 능력을 겸비하게 되면, 요철이 있는 부정지(不整地)에서는 보행운동을, 그리고 정리된 평탄지(平坦地)에서는 주행운동을 효과적으로 자유롭게 선택할 수 있기 때문에 로봇의 이동능력을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 따라서 로봇이 이동해야 하는 실제의 복잡한 환경에서 조건과 상황에 맞게 보행과 주행의 이동방식을 적극적으로 혼용하는 것은 로봇의 이동효율을 높이는 혁신적인 대안이 될 수 있으며, 이러한 지능적인 하이브리드 이동 로봇이 그런 테크놀로지를 지향하는 상황에서 더욱 필요로 하게 되었다. 이와 같은 이동

로봇을 실현하기 위해서 Hirose<sup>1,2</sup> 등은 4 족의 보행 로봇을 개조한 롤러-워커(roller-walker)를 개발했다. 롤러-워커는 발끝에 모터가 없는 수동 바퀴(passive wheel)를 달고 있는데, 다리에 의한 보행과 수동 바퀴에 의한 주행을 구현한 최초의 하이브리드 이동 로봇이라고 할 수 있다. 그리고 인간의 스케이트 운동과 같이 마찰력의 방향성을 이용해서 마찰력이 작은 방향으로 이동하게 되는데, 이것을 글라이드 추진(glide locomotion)이라고 정의했다. 롤러-워커의 스케이트 동작은 대단히 자연스럽지만, 직접적으로 운동을 발생시키는 작용력의 관점에서 고찰하지 않았기 때문에 자율적인 제어방법이 없고, 사람의 조종으로 전진, 회전, 선회 등의 동작을 생성하는 수준이다. Ostrowski<sup>3,4</sup> 등은 글라이드 추진을 구현하기 위해서 운동량(momentum)이라는 복합적인 물리량에 주목한 제어방법을 제안했고, snakeboard 라는 이동 로봇으로 유효성을 검증했다. Ostrowski의 결과를 활용한 Chitta<sup>5,6</sup> 등은 인라인 스케이팅이 가능한 2 족의 rollerblader 를 개

발했다. Rollerblader 는 몸통에 붙은 수동 바퀴가 바닥과 접촉하는 주저앉은 자세에서 다리의 운동으로 움직이는데, 전진과 회전의 동작이 가능하다. Chitta 등은 인간과 같은 2 족 형태의 스케이트 운동을 이론적으로 해석했지만, 기본적으로 운동량에 주목했기 때문에 해석과 실험의 결과가 매우 다르고 공학적으로 활용할 수 있는 수준은 아니다.

이와 같이 글라이드 추진은 대단히 효율적인 이동방식이지만 동물 중에서는 뱀을 제외하면 인간밖에 사용하지 않는다고 할 수 있다.<sup>7</sup> 뱀은 배비늘에 마찰력의 방향성이 있는데, 글라이드 추진보다는 복부근육의 수축과 신장을 주로 이용한다. 그리고 뱀의 글라이드 추진에 대한 고찰로부터 뱀 형태의 이동 로봇도 개발되었다.<sup>8,9</sup>

글라이드 추진을 이용하는 이동 로봇의 구동은 파동적인 형태(undulatory locomotion)를 기본으로 하는데,<sup>10,11</sup> Brockett<sup>12</sup> 은 이러한 구동에 대한 개념을 공학적으로 이용할 수 있도록 정리했다. 그러나 입력(구동)에 의해 발생하는 출력(운동)의 단편적인 결과는 제시할 수 있지만, 구동의 본질적인 제어방법은 밝혀져 있지 않다. 따라서 인간의 스케이트 운동과 같이 2 족의 형태로 움직이는 이동 로봇은 아직 실현되지 않고 있다.

생물(生物)형 로봇은 기본적으로 표본이 되는 생물의 동작을 모방하면 된다. 그리고 생물의 동작을 어떻게 공학적으로 실현할 것인가를 고민하면 된다. 스케이트 운동의 경우에 동작의 핵심적인 내용을 이해하는데 필요한 동영상<sup>13,14</sup> 등의 데이터가 있으므로, 이 연구에서는 간단한 역학적 모델을 이용해서 스케이트 운동을 공학적으로 활용할 수 있는 형태로 규명하고자 한다. 저자<sup>19</sup> 는 글라이드 추진의 본질적인 원리를 설명하기 위해서, 인간의 스케이트 동작과 유사한 운동을 생성하기 위한 조건에 대해 고찰했다. 그리고 글라이드 추진을 해석하는 알고리즘을 개발해서 로봇의 이동방식으로 사용할 수 있도록 기본적인 개념을 정리했다. 이 논문에서는 인간의 운동 메커니즘이 이동 능력과 에너지의 사용에서 가장 효율적이라고 가정하고, 인간의 스케이트 동작과 유사한 연속적인 운동을 생성하는 방법을 제시하도록 한다. 그리고 글라이드 추진의 연속적인 제어방법을 로봇의 혁신적이고 효율적인 이동방식으로 활용해서, 예를 들면 스케이트라는 도구를 이용해서 이동하는 휴머노이드의 형태로 구현하고자 한다.

## 2. 스케이트 운동의 해석방법

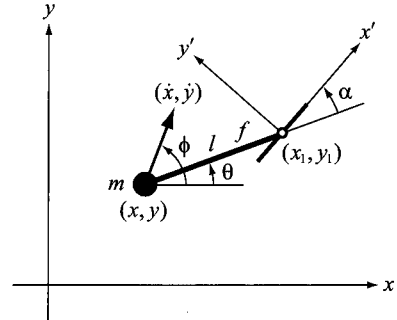


Fig. 1 Schematic diagram of skating motion

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 때문에 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. 다리의 중간에는 근육의 역할을 하는 액추에이터(직선 구동기)가 있어서 스케이트 운동을 생성하게 된다. 그리고 운동은  $y$  축의 방향으로 진행된다. 여기서  $m$  은 몸의 집중질량,  $f$  는 다리의 근육이 내는 힘,  $l$  은 다리의 길이,  $\theta$  는 몸과 다리 사이의 각도,  $\alpha$  는 다리와 스케이트 사이의 각도이고  $x, y$  는  $xy$  좌표계에서 본 몸의 위치,  $\dot{x}, \dot{y}$  는  $xy$  좌표계에서 본 몸의 속도,  $x_1, y_1$  은  $xy$  좌표계에서 본 스케이트의 위치,  $\phi$  는 몸에서 속도  $(\dot{x}, \dot{y})$  의 방향,  $x'y'$  좌표계는 스케이트에 부착된 상대적인 좌표계이다.

스케이트는 마찰력에 방향성이 있으며, 진행방향의 마찰력이 그 수직방향의 값보다 대단히 작다. Fig. 1 에서  $x'$  축 방향의 마찰력이  $y$  축 방향의 값보다 훨씬 작기 때문에, 실제로 스케이트 운동을 관찰하면  $y'$  축 방향으로 미끄러지지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 운동에서 적분이 되지 않는 논홀로노믹(nonholonomic) 구속으로 작용한다. 그리고 인간의 근육을 액추에이터의 관점에서 고찰할 경우, 발생할 수 있는 힘보다 파워의 관점에서 근육의 특성을 해석하는 것이 더욱 적합할 경

우가 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 스케이트가 옆으로 미끄러지지 않는 것으로 하고, 힘보다 파워의 관점에서 다리의 근육을 해석하기로 한다.

저자<sup>19</sup>는 전문한 논호로노믹 구속, 근육의 특성과 함께 스케이트 운동의 해석에서 고려해야 할 사항을 역학적인 조건(운동을 생성하고 유지하기 위한 내용)과 신체적인 조건(운동에서 인간의 신체가 나타내는 메커니즘적인 범위에 관한 내용)으로 정리했고, 이러한 고려사항이 포함된 스케이트의 운동방정식을 면밀하게 분석해서 운동의 생성과 유지에 효과적인 해석 알고리즘을 개발했다. 그리고 스케이트 운동의 해석 알고리즘을 이용해서 인간의 동작과 대단히 유사한 결과를 얻었다. 이 논문에서는 저자가 제안한 해석 알고리즘을 이용해서 스케이트 동작의 연속적인 생성방법을 개발하도록 한다.

### 3. 스케이트 운동의 동작분석

스케이트 운동은 누구나 경험이 있기 때문에, 직관적으로 납득할 수 있는 운동상태가 지속되어야 한다. 인간의 스케이트 동작을 분석하기 위해서, 동영상<sup>13-18</sup>의 관찰과 함께 저자는 직접 스케이트 운동을 실시했고, Fig. 2 와 같은 스케이트의 궤적을 얻을 수 있었다. 전체적으로 시계의 추와 같이 중앙의 점선을 기준으로 상하로 진동하면서 오른쪽으로 나아가는 형태이다. 스케이트의 동작은 다리의 교대를 포함해서 다음과 같이 3 개의 구간으로 나눌 수 있다.

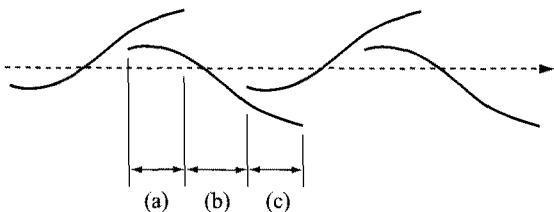


Fig. 2 Trajectory of blade with leg shifting

- 구간 (a): 몸이 중앙의 점선을 지나서 위쪽의 경계까지 가면, 왼발과 함께 오른발로 몸을 받치면서 오른발을 축으로 왼다리를

바깥쪽으로 뺀다. 왼다리로부터 힘이 가해지므로 몸은 점차 아래쪽으로 움직이게 된다. 이 구간은 두 발로 몸을 지탱하는 상태인데, 왼다리가 완전히 뺄 때까지 지속된다.

- 구간 (b): 왼다리가 완전히 뺄면 원래의 상태로 다시 오르려면 하므로 오직 오른발로 몸을 받쳐야 한다. 다리로부터 가해지는 힘이 없는 상태이고, 오른발은 몸의 바로 밑에 있게 된다. 이 구간은 짧은 휴식과 함께 운동의 상태를 조절하는 역할을 하는데, 몸이 아래쪽의 경계로 갈 때까지 지속된다.
- 구간 (c): 몸이 중앙의 점선을 지나서 아래쪽의 경계까지 가면, 오른발과 함께 왼발로 몸을 받치면서 왼발을 축으로 오른다리를 바깥쪽으로 뺀다. 오른다리로부터 힘이 가해지므로 몸은 점차 위쪽으로 움직이게 된다. 이 구간은 두 발로 몸을 지탱하는 상태인데, 오른다리가 완전히 뺄 때까지 지속된다. 그리고 이 구간은 구간 (a)와 대칭적인 형태를 나타낸다.

장거리의 스케이트 경기에서는 구간 (b)가 상대적으로 길지만, 단거리에서는 비교적 짧다. 구간 (a)(c)는 두 발로 스케이트를 타는 동작이므로, 중심 잡기가 쉽고 공학적으로 구현할 수 있다. 그러나 구간 (b)는 한 발로 스케이트를 타는 동작이므로, 중심 잡기가 어렵고 공학적으로 구현하기도 매우 힘들다. 그래서 이 논문에서는 공학적인 활용의 관점에서 구간 (b)를 고려하지 않고 스케이트 운동을 생성하도록 한다.

인간의 스케이트 운동을 속도의 관점에서 다시 고찰하도록 하자. 스케이트 운동을 스타트하면 진행방향의 속도가 지속적으로 증가하고, 충분히 가속이 된 다음에 구동력과 마찰력이 평형을 이루게 되면 몸의 속도가 일정하게 유지된다. 여기서 가속(加速)이 되는 상태를 과도상태(transient state), 정속(定速)인 상태를 정상상태(steady state)라고 부르겠다. 스케이트 운동은 과도상태와 정상상태에서 특징이 완전히 다른데, 각각을 구분해서 분석하도록 한다.

#### 3.1 과도상태의 동작

스케이트 운동의 과도상태에서 몸의 궤적을 Fig. 3 에 간략하게 나타냈는데, 운동을 이해하기 쉽도록 다리는 생략했다. 중앙의 점선을 중심으로

몸은  $y$  축 방향인 오른쪽으로 움직인다. 구간 (1)(2)는 오른발을 축으로 왼다리를 뺀어서 몸을  $+x$  축 방향으로 보내는 동작으로 Fig. 2 의 구간 (a)에 해당하고, 구간 (2)(3)은 왼다리를 원래대로 오므리는 동안에 오른발로 몸을 지탱하는 동작으로 Fig. 2 의 구간 (b)에 해당하고, 구간 (3)(4)는 왼발을 축으로 오른다리를 뺀어서 몸을  $-x$  축 방향으로 보내는 동작으로 Fig. 2 의 구간 (c)에 해당한다. 전술한 것과 같이 이 논문에서는 구간 (2)(3), 구간 (4)(5)의 특징은 고찰하지 않는다. 과도상태에서 몸의 궤적에 대한 특징을 정리하면 다음과 같다.

- $\Delta t(1 \rightarrow 2)$  를 상태 (1)부터 상태 (2)까지 이동하는 동안에 걸린 시간이라고 하면, 다음을 만족한다.

$$\Delta t(1 \rightarrow 2) < \Delta t(3 \rightarrow 4) < \Delta t(5 \rightarrow 6) \quad (1)$$

이것은 가속하는 과정에서 한번의 스트로크(stroke)에 걸리는 시간이 증가하는 것을 의미한다.

- $\Delta x(1 \rightarrow 2)$  를 상태 (1)부터 상태 (2)까지 이동하는 동안에 상태 (1)을 기준으로 몸이  $x$  축 방향으로 움직인 변위의 절대값이라고 하면, 다음을 만족한다.

$$\Delta x_{max}(1 \rightarrow 2) < \Delta x_{max}(3 \rightarrow 4) < \Delta x_{max}(5 \rightarrow 6) \quad (2)$$

여기서  $\Delta x_{max}(i \rightarrow j)$  는 Fig. 3과 같이  $\Delta x(i \rightarrow j)$  의 최대값을 의미한다. 이것은 가속하는 과정에서 몸이  $x$  축 방향으로 흔들리는 정도가 증가하는 것을 의미한다.

- $\Delta y(1 \rightarrow 2)$  를 상태 (1)부터 상태 (2)까지 이동하는 동안에 상태 (1)을 기준으로 몸이  $y$  축 방향으로 움직인 변위라고 하면, 다음을 만족한다.

$$\Delta y(1 \rightarrow 2) < \Delta y(3 \rightarrow 4) < \Delta y(5 \rightarrow 6) \quad (3)$$

이것은 가속하는 과정에서 몸이  $y$  축 방향으로 움직이는 정도가 증가하는 것을 의미한다.

- $v(1 \rightarrow 2)$  를 상태 (1)을 기준으로 상태 (2)에서 몸의 속도라고 하면, 다음을 만족한다.

$$v(1 \rightarrow 2) < v(1 \rightarrow 4) < v(1 \rightarrow 6) \quad (4)$$

여기서  $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$  이다. 이것은 몸이  $y$  축 방향으로 가속되는 것을 의미한다.

- $\phi'(2)$  를  $y$  축을 기준으로 상태 (2)에서 몸의 속도가 가리키는 방향의 절대값(Fig. 3)이라고 하면, 다음을 만족한다.

$$\phi'(2) > \phi'(4) > \phi'(6) \quad (5)$$

이것은 속도의 관점에서 몸이  $x$  축 방향으로 흔들리는 정도가 감소하는 것을 의미한다.

- $l(2)$  를 상태 (2)에서 다리의 길이라고 하면, 다음을 만족한다.

$$l(2) < l(4) < l(6) \quad (6)$$

이것은 가속하는 과정에서 한번의 스트로크에 걸리는 시간이 증가하면서 다리를 더욱 많이 뺀게 되는 것을 의미한다.

- $\theta(1)$  을 상태 (1)에서  $\theta$  의 절대값이라고 하면, 다음을 만족한다.

$$\theta(1) > \theta(3) > \theta(5) \quad (7)$$

이것은 몸을  $y$  축 방향으로 가속하기 위해서 몸의 뒤쪽에서 힘을 가하다가, 다리가 앞으로 오는 것을 의미한다.

과도상태에서 몸의 궤적이 나타내는 특징을 진동의 관점에서 해석하면, 진폭과 주기가 증가하는 것으로 요약할 수 있다. 그리고 이러한 식(1)~(7)의 특징은 인간의 스케이트 동작과 유사한가를 판단하는 기준이 되고, 시뮬레이션의 결과에도 나타나야 한다.

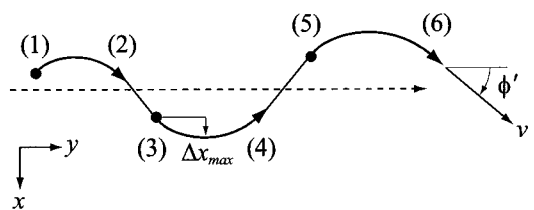


Fig. 3 Skating motion in transient state

### 3.2 정상상태의 동작

스케이트 운동의 정상상태에서 몸의 궤적을 Fig. 4 에 간략하게 나타냈다. 정상상태에서 몸의 궤적은 모든 것이 일정하게 반복된다고 생각하면 되는데, 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 한번의 스트로크에 걸리는 시간이 일정하다.

$$\Delta t(1 \rightarrow 2) = \Delta t(3 \rightarrow 4) \quad (8)$$

- 몸이 x 축 방향으로 흔들리는 정도가 일정하게 반복된다.

$$\Delta x_{max}(1 \rightarrow 2) = \Delta x_{max}(3 \rightarrow 4) \quad (9)$$

- 몸이 y 축 방향으로 움직이는 정도가 일정하다.

$$\Delta y(1 \rightarrow 2) = \Delta y(3 \rightarrow 4) \quad (10)$$

- 몸에서 속도가 변하는 추이가 일정하게 반복된다.

$$v(1 \rightarrow 2) = v(3 \rightarrow 4) \quad (11)$$

- 몸에서 속도의 방향이 변하는 추이가 일정하게 반복된다.

$$\phi'(2) = \phi'(4) \quad (12)$$

- 스트로크의 끝에서 다리를 뺄 정도가 일정하다.

$$l(2) = l(4) \quad (13)$$

- 다리의 각도가 변하는 추이가 일정하게 반복된다.

$$\theta(1) = \theta(3) \quad (14)$$

- 스케이트의 각도가 변하는 추이가 일정하게 반복된다.

$$\alpha'(1) = \alpha'(3) \quad (15)$$

여기서  $\alpha'(1)$  은 y 축을 기준으로 상태 (1)에서 스케이트의 각도에 대한 절대값이다.

정상상태에서 몸의 궤적이 나타내는 특징을 진동의 관점에서 해석하면, 진폭과 주기가 일정한 것으로 요약할 수 있다. 그리고 이러한 식(8)~(15)의 특징은 인간의 스케이트 동작과 유사한가를 판단하는 기준이 되고, 시뮬레이션의 결과에도 나타나야 한다.

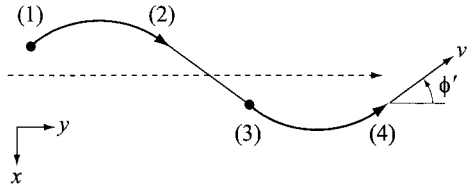


Fig. 4 Skating motion in steady state

### 4. 스케이트 운동의 시뮬레이션

#### 4.1 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. 스케이트 운동에서 앞으로 구부러진 몸을 방지름이  $R = 0.2$  [m], 높이가  $H = 1.2$  [m] 인 원기둥으로 표현했고, 몸에 대한 공기의 점성 마찰계수는 참고 문헌<sup>19,20</sup> 에서 계산했다. 스케이트와 얼음의 건성 마찰계수 ( $\mu_x, \mu_y$ ) 는  $x'$  방향의 값인  $\mu_x$  를 기준으로  $y'$  방향의 값인  $\mu_y$  가 충분히 크도록 정했다. 그리고  $L_{min}$  은 다리 길이의 최소값,  $L_{max}$  는 다리 길이의 최대값이다. 참고문헌<sup>21,22</sup> 과 전문가의 조언으로 현실성이 있는 값을 정할 수 있었다.

Table 1 Athletic data for skating motion

gravitational constant	$G = 9.8067$ [m/s <sup>2</sup> ]
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	$\mu_{x'} = 0.01, \mu_{y'} = 0.50$

### 4.2 스케이트 동작의 생성방법

3 장에서 스케이트 동작을 분석한 것과 같이 좌우의 다리가 교대로 사용되는데, 스트로크의 끝에서 다리의 길이를 기준으로 다리가 교대되는 시점을 결정했다. 다리의 교대시점을 정하기 위해 사용한 동영상<sup>13</sup>은 한국의 이강석 선수가 2007년 3월 9일에 미국 Salt Lake City에서 34초 25의 기록으로 남자 500미터에서 세계신기록을 갱신할 때의 영상이다. 동영상의 분석으로부터 다리의 길이는 한번의 스트로크가 시작되는 시점인 Fig. 3의 상태 (1), (3), (5)에서  $L_{min}$  이고, 스트로크가 끝나는 시점인 Fig. 3의 상태 (2), (4), (6)까지 증가했다. 그리고 다리의 교대가 15~20 회 정도 이루어진 다음에  $L_{max}$  에 도달하는 것을 알게 되었다. 다른 것을 기준으로 다리를 교대할 수 있지만, 동영상에서 다리의 길이가 가장 파악하기 쉬운 물리량이었다. 식(6)과 같이 스트로크가 끝나는 상태에서 교대의 기준이 되는 다리의 길이가 증가하는데, 구체적인 값은 다음과 같이 정했다.

$$L(n) = L_{max} - 2L_{min} \cdot 10^{-0.15(n-1)} \quad (16)$$

여기서  $L$ 은 스트로크의 끝에서 교대의 기준이 되는 다리의 길이,  $n$ 은 1 이상의 정수로 다리의 교대 횟수 또는 스트로크의 횟수를 의미한다. 동영상으로부터 다리의 길이는 지수함수의 형태로 증가하다가 일정해진다고 생각하는 것이 타당했다. 식(16)에서  $L_{min}$ ,  $L_{max}$ ,  $n$ 은 절대적인 값이 아니고, 신체조건에 맞게 임의로 정할 수 있다. 하지만 시뮬레이션의 결과가 인간의 동작과 유사하기 위해서 식(1)~(15)를 만족해야 하므로, 각각의 인자가 거동에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 일반적으로 동일한 스케이트 기술에서는 근육의 파워가 크고, 다리가 길며, 한 스트로크에 걸리는 시간이 짧은 사람이 가속에 유리하다. Table 1과 식(16)에서  $P_{max}$ 와  $L_{max}$ 의 값이 클수록,  $n$ 의 값이 작을수록, 정상상태의 최고 속도가 높으면서 최고 속도에 도달하는 시간이 짧아진다. 따라서 동영상의 분석으로부터 중요한 것은 다리의 길이가 지수함수의 형태로 증가하다가 일정해진다는 경향성이라고 판단된다.

앞에서 언급한 것과 같이 생물형 로봇은 기본적으로 표본이 되는 생물의 동작을 어떻게 공학적으로 모방할 것인가를 고민하면 된다. 스케이트의 경우에 운동학적으로 정립된 교습법<sup>15-18</sup>이 있으

로, 이 논문에서는 교습법의 핵심적인 내용을 공학적으로 해석하고 인간의 동작과 유사한 거동을 생성하는데 초점을 맞추고자 한다. 같은 신체조건에서도 스케이트를 잘 타는 사람과 못 타는 사람이 있으며, 남보다 높은 최고 속도에 남보다 빨리 도달하는 것이 하나의 목표이기도 하다. 이것은 효율적인 스케이트 기술과 관련된 내용인데, 서론에서 언급한 것과 같이 인간의 운동 메커니즘이 이동 능력과 에너지의 사용에서 가장 효율적이고 가정했으므로, 스케이트 기술의 효율성에 관한 심층적인 고민은 앞으로의 과제로 남겨두고자 한다.

스케이트 운동의 교습법에서 공학적으로 활용할 수 있는 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 스타트에서 스케이트의 각도는  $60^\circ$ 가 적당하다.
- 추진하기 위해서 무게 중심의 바로 밑에서 옆으로 스케이트를 밀며, 뒤로는 밀지 않는다.

이러한 교습법의 내용을 공학적으로 다음과 같이 이용했다.

- 스타트의 스트로크에서 스케이트의 절대각도  $(\theta + \alpha)$ 를  $60^\circ$ 로 하고, 정면을 향해 시작한다. 따라서  $\theta(t=0) + \alpha(t=0) = 60^\circ$ 와  $\phi(t=0) = 90^\circ$ 를 만족하도록 한다.
- 스케이트를 최대한 몸의 옆쪽에 놔두고 옆으로 밀기 위해서, 스케이트의 절대각도  $(\theta + \alpha)$ 가 가장 큰 값에서 스트로크를 시작하고, 스트로크의 도중에 다리의 각도  $(\theta)$ 를 일정하게 유지한다. Fig. 1에서 스케이트의 절대각도  $(\theta + \alpha)$ 가 속도의 방향  $(\phi)$ 보다 커지면 브레이크를 거는 것이 되므로,  $\theta + \alpha \leq \phi$ 가 언제나 만족해야 한다. 따라서 다리를 교대하는 연속적인 스트로크의 시작에서 속도의 방향  $(\phi)$ 은 운동방정식으로 정해지므로, 스케이트의 절대각도  $(\theta + \alpha)$ 가 가장 큰 값  $(\phi)$ 에서 시작하고, 스트로크의 도중에  $\dot{\theta} = 0$ 을 만족하도록 한다.

### 4.3 시뮬레이션의 해석 결과

$t = 0$  [s]에서  $x(0) = 0$  [m],  $y(0) = 0$  [m],  $\dot{x}(0) = 0$  [m/s],  $\dot{y}(0) = 2$  [m/s],  $l(0) = L_{min} = 0.3$  [m],  $\theta(0) + \alpha(0) = 60^\circ$ 의 조건에서 스케이트를 스타트했고, 진행하는 도중에 다리를 50회 교대하는 동작을 시뮬레이션했다.

Fig. 5 는  $(t, \dot{x})$  의 결과를 나타낸 것이다. 초기의 과도상태에서 식(4)와 같이  $\dot{x}$  의 값이 상하로 서서히 증가하지만, 시간이 지남에 따라 식(11)과 같이 정상상태에서 상하의 값이 일정해졌다.

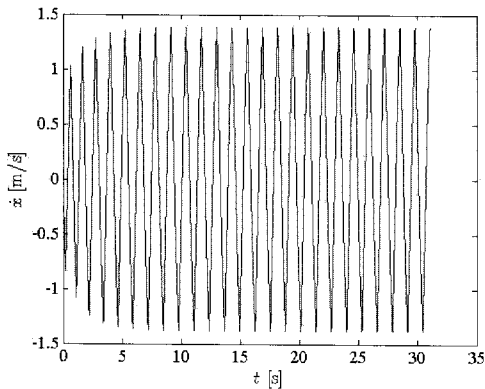


Fig. 5 Simulation result of  $(t, \dot{x})$

Fig. 6 은  $(t, \dot{y})$  의 결과를 나타낸 것이다. 초기의 과도상태에서 식(4)와 같이 속도가 급격히 증가하지만, 시간이 지남에 따라 식(11)과 같이 정상상태에서 일정한 값이 되었다.

Fig. 7 은 한번의 스트로크에 소요되는 시간을 나타낸 것이다. 초기의 과도상태에서 식(1)과 같이 소요시간이 증가하지만, 시간이 지남에 따라 식(8)과 같이 정상상태에서 일정한 값이 되었다.

Fig. 8 은  $(n, \phi)$  의 결과를 나타낸 것이다. 여기서  $\phi$  는 식(5)(12)와 같이 스트로크의 끝에서의 값이다. 초기의 과도상태에서 식(5)와 같이  $\phi$  의 값이 상하로 서서히 감소하지만, 스트로크의 횟수  $(n)$  가 증가함에 따라 식(12)와 같이 정상상태에서 상하의 값이 일정해졌다.

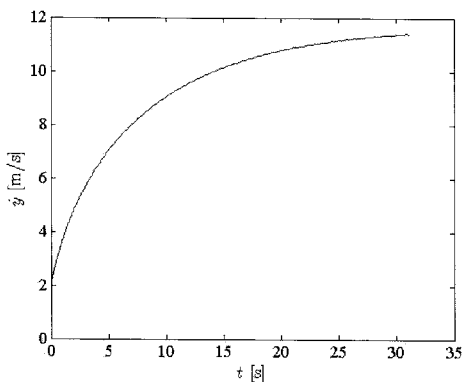


Fig. 6 Simulation result of  $(t, \dot{y})$

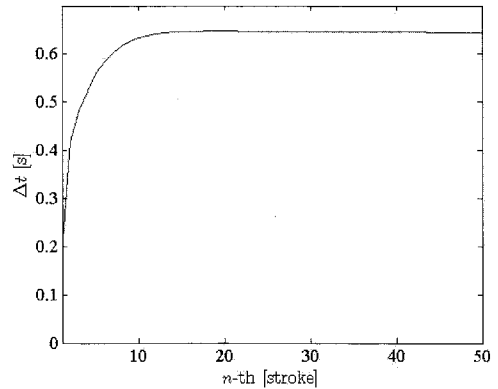


Fig. 7 Simulation result of  $(n, \Delta t)$

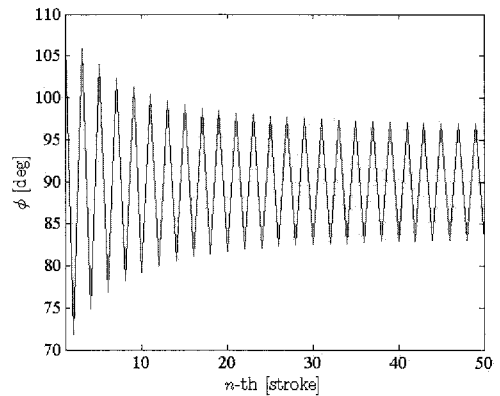


Fig. 8 Simulation result of  $(n, \phi)$

Fig. 9 는 오른다리의  $(l, \theta)$  를 나타낸 것인데,  $n$  이 증가함에 따라 직선은 위로 이동한다. 스트로크의 끝에서 다리의 길이  $(l)$  는 식(16)과 같이 변하는데, 초기의 과도상태에서 식(6)과 같이 증가하지만,  $n$  이 증가함에 따라 식(13)과 같이 정상상태에

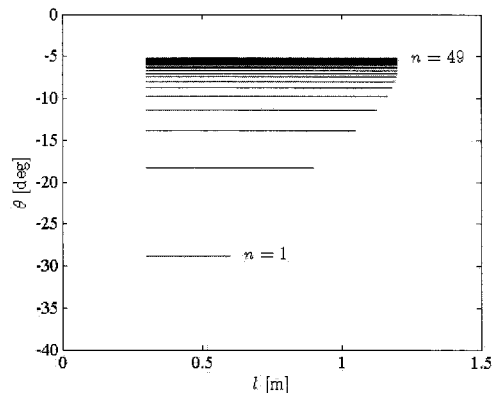


Fig. 9 Simulation result of  $(l, \theta)$  in right leg

서 일정한 값이 되었다. 다리의 각도( $\theta$ )는 과도상태에서 식(7)과 같이 증가하지만, 정상상태에서 식(14)와 같이 일정한 값이 되었다. 그리고 각각의 스트로크에서 다리의 각도는 변하지 않았다.

Fig. 10 은 몸에서 본 오른쪽 스케이트의 상대적인 위치인  $(x_1 - x, y_1 - y)$  을 나타낸 것인데, 인간의 몸은  $(0, 0)$  에 있다. 초기의 과도상태에서 상대적으로 몸의 뒤쪽에서 스트로크가 진행되다가,  $n$  이 증가함에 따라 정상상태에서 일정한 패턴이 반복되었다.

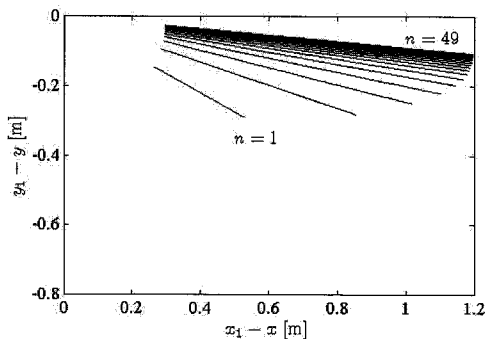


Fig. 10 Simulation result of  $(x_1 - x, y_1 - y)$  in right leg

Fig. 11 은 다리를 6 회 교대할 때까지의 결과를  $xy$  좌표계로 나타낸 것이다. 인간의 몸은  $t = 2.808$  [s] 동안에  $y = 11.277$  [m] 를 이동했다. 등근 점으로 표시된 몸이 좌우로 부드러운 곡선을 그리면서 앞으로 나아가고, 스케이트가 옆으로 미끄러지지 않으면서 운동방정식에 따라 움직이고, 다리가 몸과 스케이트를 연결하는 모습을 나타낸다. 스트로크마다 시작과 끝을 포함해서 0.1 [s] 의 간격으로 운동의 추이를 표시했다. 초기의 과도상

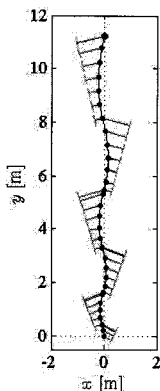


Fig. 11 Simulation result of  $(x, y)$

태에서 식(2)(3)과 같이 좌우로 흔들리면서 앞으로 움직이는 정도가 증가하지만, 시간이 지남에 따라 식(9)(10)과 같이 정상상태에서 일정한 패턴이 반복되었다. 시뮬레이션의 결과는 과도상태와 정상상태의 스케이트 운동에 대한 특징인 식(1)~(15)의 내용을 정확하게 반영하고 있다.

### 5. 결론

지금까지 스케이트 동작을 연속적으로 생성하기 위한 방법에 대해 고찰했다. 이 논문의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 스케이트 운동의 2 차원 모델을 대상으로 논홀로노믹 구속을 고려한 일반적인 해석방법을 제안했다.
- 인간의 스케이트 동작을 속도의 관점에서 분석했다. 동작의 유형은 크게 과도상태의 것과 정상상태의 것으로 구분할 수 있는데, 각각의 유형에 대한 특징을 면밀하게 정리했다.
- 스케이트 운동에서 연속적인 동작을 생성하는 방법을 제시했다. 동영상의 고찰로부터 직관적인 방법을 제시할 수 있었다.
- 스케이트 운동의 연속적인 생성방법을 이용해서, 인간의 동작과 대단히 유사한 결과를 획득했다.

운동량의 제어나 주기적인 입력에 주목한 기존의 연구보다 직관적으로 납득할 수 있는 연속적인 스케이트 동작의 결과를 얻게 되었다. 앞으로의 과제로는 스케이트 운동에서 직진, 선회 등의 다양한 동작을 정확하게 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. Hirose, S., "Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators," Oxford University Press, 1993.
  8. 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.
  9. 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.
  10. 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.
  11. Sfakiotakis, M. and Tsakiris, D., "Biomimetic Centering for Undulatory Robots," Intl. J. of Robotics Research, Vol. 26, No. 11-12, pp. 1267-1282, 2007.
  12. Brockett, R., "On the Rectification of Vibratory Motion," Proc. IEEE Conf. Micro Electro Mechanical Systems, pp. 49-52, 1989.
  13. [http://kr.youtube.com/watch?v=0LBXH5LS\\_Eg](http://kr.youtube.com/watch?v=0LBXH5LS_Eg)
  14. [http://kr.youtube.com/watch?v=J\\_rzsaT2Wak](http://kr.youtube.com/watch?v=J_rzsaT2Wak)
  15. <http://kr.youtube.com/watch?v=aTr5CZ3PEGc>
  16. <http://kr.youtube.com/watch?v=W27Wk2NsJVU>
  17. <http://kr.youtube.com/watch?v=Hnx9ZPhR5tY>
  18. <http://kr.youtube.com/watch?v=DOZdmXVIohY>
  19. Hwang, C., "Dynamic Consideration of Athletic Constraints on Skating Motion," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 55-67, 2009.
  20. The Japan Society of Mechanical Engineers, "JSME Mechanical Engineers' Handbook," The Japan Society of Mechanical Engineers Press, pp. (A5-97)-(A5-106), 1987.
  21. Mashima, H. and Ikar, M., "Biological Mechanics of Muscle," Kyorin-Shoin Publishers, pp. 95-116, 1972.
  22. Nagata, A., "The Science of Muscle and Muscular Strength," Humaido Publishing Co. Ltd., pp. 93-100, 1984.