Transactions of the KSNVE, 24(4) : 299~309, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.4.299

한국소음진동공학회논문집 제 24 권 제 4 호, pp. 299~309, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

회전효과를 고려한 이족 로봇의 정밀 원형 경로 보행

Precision Circular-path Walking of a Biped Robot with Consideration of Rotational Effects

임 승 철†·곽 병 문*·임 주 영**·손 영 익***

Seungchul Lim, Byungmoon Kwak, Jooyoung Lim and Youngik Son

(Received November 29, 2013 ; Revised March 18, 2014 ; Accepted March 28, 2014)

Key Words : Balance(균형), Centrifugal Force(원심력), Cylindrical Coordinate System(원통 좌표계), Inverted Pendulum(역진자), Vibration Suppression(진동 억제), ZMP(영 모멘트 점)

ABSTRACT

When biped robots make turns, the ability to walk stably and precisely along any circular path is crucial. In this context, inverse kinematics solutions are found for accurate gait realization, and new zero moment point(ZMP) equations are derived with respect to the cyclindrical coordinate system to facilitate generation of stable walking patterns. Then, appropriate steady and transitional walking patterns are both proposed in form of time functons. Subsequently, walking patterns for a path but of different speeds are generated using the functions and associated formulas, and preliminarily checked for stability based on the ZMP equations. Upon comparison of those cases, one can see how and when robots may fall down during circular walking. Finally, those patterns are put to test on the sample robot by ADAMS® along with the inverse kinematics solutions and a new balance control scheme compensating for insufficient stability particulary during the initial transition period. Test results show that the robot can walk along the circular path as predicted at a resonably high speed despite the distributed mass and ground contact effects, validating effectiveness of the suggested approach.

1. 서 론

모든 보행 경로는 사실상 곡률반경이 다른 여러 원호들의 연속이므로, 보행 중 이족 로봇은 때때로 선회할 필요가 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 임의의 반경을 갖는 원형 경로를 따라 안정하고 정밀하게 보행하는 능력은 특히 동적 보행 시 매우 중요한 기능이다. 그러나 오늘날 많은 로봇들은, 직선 보행 시의 관절 각에 단지 새로운 착지 다리의 요(yaw) 각만을 조정하는 방식을 포함하여 대개가 임시 방편적 방법으로 얻어진 패턴에 의존하고 있다. 그러나 원형 보행에 맞는 기구학이나 동역학을 반영하지 않은 종래의 방식은, 보폭이나 보행 속력이 증가할수록 보행의 안정성과 정밀성이 저하되어 적용이 더욱 어려워질 전망이다.

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Eng., Myongji University
E-mail : slim@mju.ac.kr
Tel : +82-31-330-6428, Fax:+82-31-321-4959
* TUR Inc.
** Hankook Academy of Foreign Studies
*** Department of Electrical Eng., Myongji University

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이와 관련된 기존의 연구들을 살펴보면, Kajita[1]는 보행의 궤도 에너지를 일정하게 유지하되 적절히 새 착지 발의 위치를 조정하고 그 발에 위치할 국부 기준 좌표계를 회전시킴으로써, 보행의 자유로운 가감속이나 방향 전환을 가능케 하는 방법을 제시하였다. 이 방법에 의하면 일정한 보폭 및 국부 좌표계의 회전을 통하여 임의의 원형 경로에 적용 가능한 선회 보행 패턴을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 몸통의 회전 운동에 따른 동역학적 효과가 고려되지 않아 보행 속도와 안정성의 관계를 파악하기 어렵다. 한편, 보다 최근의 연구[2]에서는 인간형 로봇의 보행 중 발생 가능한 다리 꼬임, 과도 보폭, 교착 상태 등의 문제없이 임의의 목표 위치와 방위를 실시간으로 추종할 수 있는 조향 알고리즘이 보고되었으나, 몸통의 회전 운동 효과는 역시 간과되었다. 그 밖에는, 이 논문에서와 같이 몸통의 회전 운동 효과가 고려되었으나 로봇의 질량이 작을 뿐만 아니라 초기 천이 상태의 불안정성 효과와 그 대책, 보행 속력과 안정성의 관계 분석 등이 결여된 연구 결과[3]가 발표된 바 있다.

이러한 맥락에서 이 논문에서는, 2와 3절에서 로봇의 원형 경로 보행에 적합한 역기구학 해와 함께 회전운동의 동역학적 효과가 명확히 표현되는 원통 좌표계에 대하여 ZMP 구속 방정식[4,5]을 새로이 유도한다. 그런 다음 원형 보행에 적합한 정상 보행 패턴과 그 패턴을 초기 정지 상태와 결합시키는 천이 보행 패턴을 시간 함수의 형태로 제안한다.

그 이후 4와 5절에서는, 상기 함수와 관련공식에 의하여 하나의 동일 경로에 대하여 속력이 다른 패턴들을 발생시키고 각각의 안정성 검토와 함께 그들의 비교를 통하여 속력과 불안정성의 관계를 분석한다. 또한 안정도 여유가 부족한 초기 천이 상태 동안에 적용 가능한 균형제어 방법도 제안하며, 최종적으로는 다물체 동역학 해석 소프트웨어인 ADAMS[6]를 이용하여 제안된 패턴과 수단을 적용한 샘플 로봇의 보행을 시뮬레이션 한 후 결론을 도출한다.

2. 샘플 로봇과 역기구학

샘플 로봇은 Fig. 1에서와 같이 단순한 상체와 동일 구조의 두 다리로 구성된다. 각 다리는 6 자유도를 가지며 그 중 골반의 3축과 발목의 2축은 각각 동일 지점에서 직교한다. 또한 각 회전축은 위에서부터 요(θ_1), 롤(θ_2), 피치(θ_3), 피치(θ_4), 피치(θ_5), 그리고 롤(θ_6)의 순서로 배열되었다.

이러한 지체의 기구학 문제를 다루기 위하여 Fig. 1과 같이 직교 관성 좌표계 {0}를 비롯하여 그와 초기에 평행한 링크 고정 좌표계 {1}부터 {4}까지를 정의한다. 그 경우, 우측 발의 몸통에 대한 상대 위치 벡터 $\mathbf{r}_{rf/u}\,(=\mathbf{r}_{rf}-\mathbf{r}_u)$는 {1}의 성분으로 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$ {}^1\mathbf{r}_{rf/u} = {}^1\mathbf{x}_u + {}^1_2R\,{}^2\mathbf{x}_{rt} + {}^1_3R\,{}^3\mathbf{x}_{rs} + {}^1_4R\,{}^4\mathbf{x}_{rf} \tag{1} $$

여기에 포함된 위치 벡터들은 구체적으로 ${}^1\mathbf{r}_{rf/u} = [x\ y\ z]^T$, ${}^1\mathbf{x}_u = [a_1\ \ a_2\ \ a_3]^T$, ${}^2\mathbf{x}_{rt} = [l_{tx}\ \ l_{ty}\ \ l_{tz}]^T$, ${}^3\mathbf{x}_{rs} = [l_{sx}\ \ l_{sy}\ \ l_{sz}]^T$, ${}^4\mathbf{x}_{rf} = [l_{fx}\ \ l_{fy}\ \ l_{fz}]^T$ 이다. 그러나 사실상 샘플 로봇의 경우, 그 성분들 중 상체 크기에 비례하는 a_1, a_2, a_3, 허벅지 길이인 l_{tz}, 정강이 길이인 l_{sz}, 좌표계 {4}의 원점으로부터 발 도심까지의 종 방향 길이와 수직 거리인 l_{fx}와 l_{fz}를 제외한 상수 즉, l_{tx}, l_{ty}, l_{sx}, l_{sy}, l_{fy}는 모두 영이다.

또한, 식 (1)에 포함된 회전 행렬들은 $s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ 라고 정의할 때 다음과 같다.

$$ {}^1_2R = \begin{bmatrix} -s_1s_2s_3 + c_1c_3 & -s_1c_2 & s_1s_2c_3 + c_1s_3 \\ c_1s_2s_3 + s_1c_3 & c_1c_2 & -c_1s_2c_3 + s_1s_3 \\ -c_2s_3 & s_2 & c_2c_3 \end{bmatrix} \tag{2a} $$

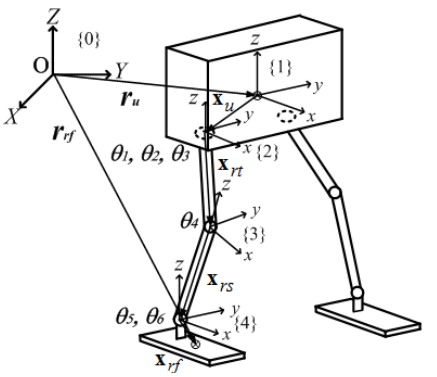

Fig. 1 Sample robot and coordinate systems in use

$$ {}^{1}_{3}R = \begin{bmatrix} -s_1s_2s_{34}+c_1c_{34} & -s_1c_2 & s_1s_2c_{34}+c_1s_{34} \\ c_1s_2s_{34}+s_1c_{34} & c_1c_2 & -c_1s_2c_{34}+s_1s_{34} \\ -c_2s_{34} & s_2 & c_2c_{34} \end{bmatrix} \tag{2b} $$

$$ {}^{1}_{4}R = \begin{bmatrix} -s_1s_2s_{345}+c_1c_{345} & s_1s_2s_6c_{345}+s_6c_1s_{345}-s_1c_2c_6 \\ c_1s_2s_{345}+s_1c_{345} & -c_1s_2s_6c_{345}+s_1s_6s_{345}+c_1c_2c_6 \\ -c_2s_{345} & s_6c_2c_{345}+s_2c_6 \\ s_1s_2s_6c_{345}+c_1c_6s_{345}+s_1c_2s_6 \\ -c_1s_2c_6c_{345}+s_1c_6s_{345}-c_1c_2s_6 \\ c_2c_6c_{345}-s_2s_6 \end{bmatrix} \tag{2c} $$

따라서 원형 경로 보행에서와 같이 몸통과 발사이의 상대 위치가 $[x\ y\ z]^T$, 상대 각이 +z방향으로 α인 경우 식 (1)과 (2)로부터 부록 A에 제시한 바와 같은 역기구학 해를 얻을 수 있으며, 그 해를 이용하면 선회 동작을 정확히 구현할 수 있다. 더불어 그로부터 $x=a_1$ & $y=a_2$인 제자리 회전의 경우만을 제외하곤, 몸통의 기울어짐 없이 로봇이 원형 보행하기 위하여는 골반의 요각 θ_1 뿐만 아니라 나머지 관절 각들도 α의 함수가 되어야 함을 알 수 있다. 이와 같은 관절 각과 요 각의 관계를 a_1=2.5, a_2=-68, a_3=-149, l_{tz}=-104.5, l_{sz}=-130, l_{fx}=16, l_{fz}= -27, z=-350 mm인 일례에 대하여 Fig. 2와 3에 보였다.

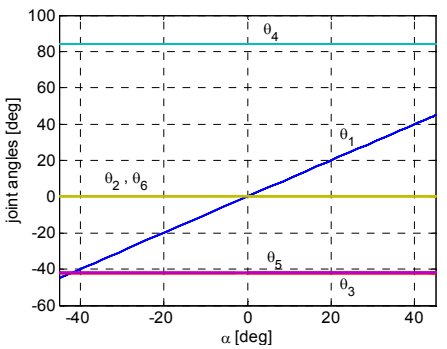

Fig. 2 Dependence of joint angles on the relative yaw angle during in-place turning

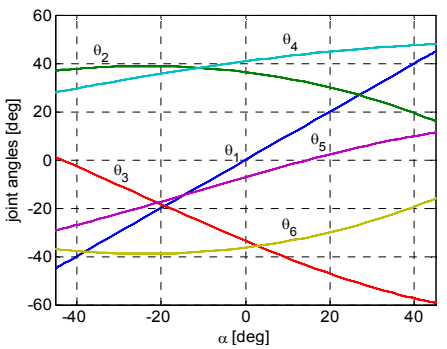

Fig. 3 Dependence of joint angles on the relative yaw angle during a turning when $x=y=60$ mm

3. ZMP 방정식과 보행 패턴

로봇이 보행 중 전도되지 않으려면 반드시 ZMP가, 발이 지면에 접촉하여 형성되는 지지 영역 내에 존재해야 하며 그러한 구속 조건의 식은 경우에 따라 다른 형태가 될 수 있다[4,5,7]. 그럼에도 불구하고 평면상에서 보행하는 로봇의 경우, 보행 패턴에 관계없이 직교 좌표계에 대하여 표현된 형태만이 알려져 있을 뿐이다. 따라서 이 논문에서는 원형 경로 보행 시 몸통의 회전 운동 효과가 명확히 표현될 수 있는 원통 좌표계에 대하여 ZMP 방정식을 새로이 유도한다.

이때 간략한 형태의 방정식을 얻기 위하여, 샘플 로봇의 동 특성을 역진자 모델[5]로 근사화한다. 여기에서는 Fig. 4에서와 같이 로봇의 초기 위치인 점 O로부터 위치벡터 **d**만큼 떨어진 곳에 중심 o'이 존재하고 반경이 r인 원호 상을 보행하는 로봇의 경우를 고찰한다. 관성력과 관성 모멘트를 구하기 위하여 점 O로부터 상체에 존재하는 무게중심 G까지의 위치 벡터를 원통형 회전 좌표계 {C}에 관하여 표현하면 식 (3a)와 같으며, 이를 시간에 대하여 미분하면 식 (3b)와 같은 몸통의 가속도를 구할 수 있다.

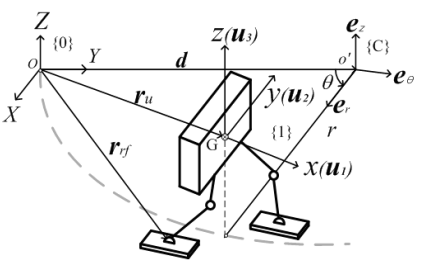

Fig. 4 The robot in circular walking

$$\mathbf{r}_u = \mathbf{d} + r\mathbf{e}_r + z\mathbf{k} \tag{3a}$$

$$\mathbf{a}_u = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\mathbf{e}_r + (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta})\mathbf{e}_\theta + \ddot{z}\mathbf{k} \tag{3b}$$

한편, 몸통 고정 좌표계 {1}이 주 관성축과 일치하며 로봇이 각 가속도 $\ddot{\theta}$으로 오직 요 방향으로만 회전하고 그 방향 질량 관성 모멘트를 I_z라고 하면, 좌표계 {1}은 {C}와 단지 요 각 90° 만큼만 차이가 나므로 {1}의 단위 벡터로 표현한 관성력과 관성 모멘트는 각각 식 (4a), (4b)와 같다.

$$\mathbf{F}_b = -m(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta})\mathbf{u}_1 - m(-\ddot{r} + r\dot{\theta}^2)\mathbf{u}_2 - m\ddot{z}\mathbf{u}_3 \tag{4a}$$

$$\mathbf{M}_b = -I_z\ddot{\theta}\mathbf{u}_3 \tag{4b}$$

이제 위의 관성력 및 관성모멘트 그리고 자중의 ZMP 점에 관한 모멘트 평형 조건을, 자유 물체도 Fig. 5를 참조하고 $\mathbf{r}_G = -x_{ZMP}\mathbf{u}_1 - y_{ZMP}\mathbf{u}_2 + z_b\mathbf{u}_3$, $\mathbf{g} = -g\mathbf{u}_3$라고 정의하여, 식 (5)와 같이 적용하면 새로운 형태의 ZMP 방정식을 식 (6)과 같이 얻을 수 있다. 이하 r, θ 등 몸통 운동 관련 변수에는 하첨자 b를 추가한다.

$$\mathbf{r}_G \times (m\mathbf{g} + \mathbf{F}_b) + \mathbf{M}_b = \mathbf{0} \tag{5}$$

$$x_{ZMP} = -\frac{(2\dot{r}_b\dot{\theta}_b + r_b\ddot{\theta}_b)}{a^2}, \quad y_{ZMP} = \frac{(\ddot{r}_b - r_b\dot{\theta}_b{}^2)}{a^2} \tag{6a, b}$$

여기서 $a = \sqrt{g/z_b}$는 보행 중 로봇의 높이 z_b가 변하지 않는다면 상수가 된다. 식 (6a)와 (6b)는, 식 (7)에 참고로 제시한 종래의 직교 좌표계에 기준한 ZMP 방정식과는 달리 상호 연성되었을 뿐만 아니라 극심한 비선형성을 갖는 미분 방정식이다. 따라서 ZMP 좌표 입력에 대하여 몸통의 운동을 닫힌 형태의 해로 구하기가 쉽지 않다.

$$x_{ZMP} = \frac{a^2 x_b - \ddot{x}_b}{a^2}, \quad y_{ZMP} = \frac{a^2 y_b - \ddot{y}_b}{a^2} \tag{7a, b}$$

이에 그 대안으로 이 연구에서는 역동역학적 방법을 선택한다. 즉, 적절한 몸통의 운동을 가정하여 해당 ZMP 좌표를 구하되 보다 동적이고 자연스러운 선회를 위하여 직선 동 보행시의 패턴을 응용한다[4]. 이에, Fig. 6 및 식 (8), (9)에서와 같이 지지 구간별로 지속시간이 t_4인 DSP(두발 지지 상태) 중에는 등속, 지속시간이 $t_1+t_2+t_3$인 SSP(한발 지지 상태)중에는 가감속을 하는 쌍곡선 함수형 패턴을 설정한다.

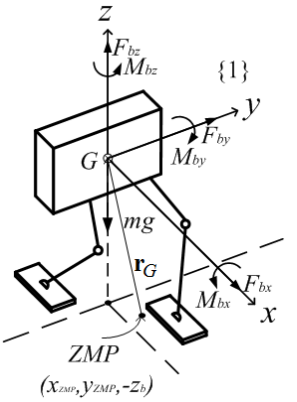

Fig. 5 Forces and moments acting on the robot & ZMP

$$r_b(\tau) = \begin{cases} (r_0 - r_{ZMP})\cosh a\tau + \dfrac{\dot{r}_0}{a}\sinh a\tau + r_{ZMP} & \text{for SSP} \\ -\dot{r}_0\tau + r_0 & \text{for DSP} \end{cases} \tag{8}$$

$$\theta_b(\tau) = \begin{cases} (\theta_0 - \theta_{ZMP1})\cosh a\tau + \dfrac{\dot{\theta}_{bD}}{a}\sinh a\tau + \theta_{ZMP1} & \text{for I} \\ \dot{\theta}_{bS}\tau + \theta_{ZMP1} & \text{for II} \\ \dfrac{\dot{\theta}_{bS}}{a}\sinh a\tau + \theta_{ZMP2} & \text{for III} \\ \dot{\theta}_{bD}\tau + (\theta_{ZMP1} + \theta_{ZMP2}) & \text{for DSP} \end{cases} \tag{9}$$

그런 다음, 위 식에 모든 구간에 걸쳐 위치와 속도가 연속일 조건과 반경과 회전각, 양 방향간의 동기화 조건을 적용하면, 부록 B에 정리한 일련의 공식들을 얻을 수 있다. 이 공식에 의하면 원하는 로봇의 높이, 경로의 반경, 보폭, ZMP 위치, 보행 속도 등에 알 맞는 각 구간별 지속 시간 등 보행 패턴 관련 나머지 매개변수들을 구할 수 있다.

한편, 식 (6), (8), (9)에 의하여 계산되는 좌표계 {1}에서의 ZMP 좌표는 식 (10)을 이용하여 언제든지 좌표계 {0}에서의 값으로 변환 가능하다.

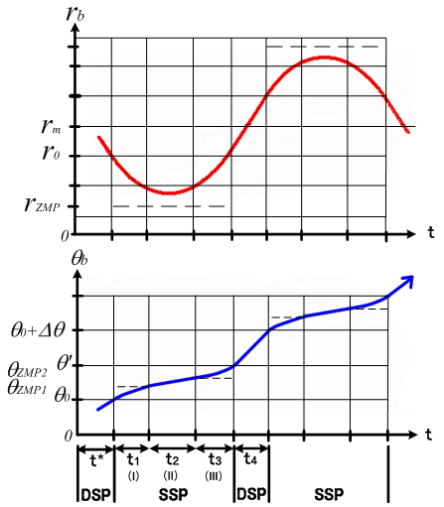

Fig. 6 Hyperbolic steady walking pattern

$$\begin{Bmatrix} X_{ZMP} \\ Y_{ZMP} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (r_b - y_{ZMP})s\theta_b + x_{ZMP}c\theta_b \\ r_m + (y_{ZMP} - r_b)c\theta_b + x_{ZMP}s\theta_b \end{Bmatrix} \quad (10)$$

또한 $\bar{\theta} = i\,\Delta\theta$ 라고 정의할 때, 좌표계 $\{0\}$에서의 i번째 착지 발의 중심 위치와 몸통의 위치는, 각각 식 (11), (12)와 같다.

$$X_c = r_{ZMP}\ s\bar{\theta},\ Y_c = r_m - r_{ZMP}\ c\bar{\theta} \quad (11a,\ b)$$

$$X_b = r_b\ s\theta_b,\ Y_b = r_m - r_b\ c\theta_b \quad (12a,\ b)$$

정상 선회 시 로봇은 전술한 보행 패턴을 반복하게 된다. 그러나 로봇은 통상 여러 종류의 보행을 해야 하므로 다양한 패턴을 매끄럽게 결합할 수 있는 천이 보행 역시 필요하다. 이에 이 논문에서는, 양 발이 평행한 초기 정지 상태로부터 상기 정상 보행의 SSP 개시 순간까지를 위치뿐만 아니라 속도까지 연속적으로 연결하는 천이 보행 패턴으로서 다음과 같은 3차 다항식을 제안한다.

$$r_b(\tau) = c_3\tau^3 + c_2\tau^2 + c_1\tau + c_0 \quad (13a)$$

$$\theta_b(\tau) = d_3\tau^3 + d_2\tau^2 + d_1\tau + d_0 \quad (13b)$$

위 식 (13)의 계수는 천이 DSP 구간의 초기 (τ=0)및 말기(τ=t^*)의 해당 방향 위치와 속도에 의존한다.

4. 균형 제어

보행 로봇의 균형 제어 기능은 보행 패턴이 불안정한 경우는 물론이고 안정한 경우라 하더라도, 외란이 존재하는 실제 보행 환경 내에서 보행속도 등의 성능을 제고하려면 반드시 필요하다. 따라서 이에 대한 연구들이 다방면으로 수행되어 왔으나[8,9], 아직 모든 상황에 적용 가능한 통합형 균형 제어 방법은 개발되지 못한 것으로 판단된다.

한편, 이 논문에서는 초기 정지 상태로부터 단번에 정상 보행 상태에 도달하는 천이 패턴으로 간단한 다항식을 사용하고 있어 적용성이 높은 장점은 있으나, 정상보행의 속도가 어느 이상이 되면 안정성을 보장하기 어려운 단점도 갖고 있다. 따라서 그 단점을 보완하기 위한 균형제어가 요구되며 그 방법 역시 간단할수록 좋다.

이에, 로봇도 인간처럼 능동형 발가락[10] 혹은 발근육만을 움직여 지면에 토크를 발생시킬 수 있다는 전제하에, 로봇을 Fig. 7에 도시한 바와 같은 역진자 진동계로 단순하게 모델링한 후 그 계의 진동억제[11]를 통한 균형제어 방안을 모색하고 그 결과를 샘플 로봇의 양 발에 적용하고자 한다. 이 그림에서 T_d는 샘플 로봇의 모델링 오차를 포함하는 외란 토크, T_c는 제어 입력 토크, k와 c는 각각 발과 지면 사이에 작용하는 등가 회전 스프링 상수와 감쇠 계수, l은 로봇 무게 중심의 높이, ϕ는 기울어진 몸통 즉, 발의 경사각을 나타낸다.

경사각이 크지 않은 경우 위 역진자 모델의 운동방정식을 유도하면 식 (14)와 같으며, 경사각 감지와 이득 k_p, k_I, k_D를 갖는 PID제어 법칙을 통하여 제어 토크 T_c를 식 (15)와 같이 조성하면, 폐루프 균형제어 시스템의 거동은 식 (16)에 의하여 지배된다. 따라서 식 (16)이 안정한 극점만을 갖도록 상기 제어 이득을 적절히 조정한다면, 외란 토크 T_d가 일정한 경우 경사각 ϕ는 영으로 수렴할 것이다.

$$ml^2\ddot{\phi} + c\dot{\phi} + (k - mgl)\phi = T_c + T_d \quad (14)$$

$$T_c = -k_P\phi - k_I\int\phi dt - k_D\dot{\phi} \quad (15)$$

$$ml^2\dddot{\phi} + (c + k_D)\ddot{\phi} + (k + k_P - mgl)\dot{\phi} + k_I\phi = \dot{T}_d \quad (16)$$

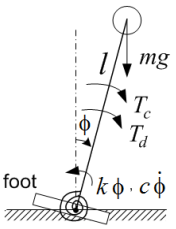

Fig. 7 Inverted pendulum model under a balance control

5. 동역학 시뮬레이션

여기서는 먼저, 3절에서 소개된 보행 패턴의 식 (8)과 (9)를 이용하여 두 가지 속력의 경우에 대하여 보행 패턴을 발생시키고 그 패턴의 안정성 여부 등을 ZMP 방정식에 기준하여 일차적으로 검토한다. 그런 다음, 상기 패턴들을 샘플 로봇에 적용하되 ADAMS를 이용하여 분포 질량과 지면과의 접촉 효과가 존재하는 환경하에서 유효성을 검증하고 성능을 비교한다. 이때 보행패턴을 정확히 구현하기 위하여 역기구학 해가 사용되며, 초기 천이 상태 동안 로봇의 전도를 방지하는 균형제어도 함께 실시된다.

샘플 로봇의 신장과 무게는 각각 478 mm, 5.9 kg 이며 질량 중 약 82 %는 상체에 속한다(Table 1 참조). 기존 연구[4]에서와 같이 지면 접촉에 의한 수직 반력은 비선형 강성 및 점성 감쇠력의 합으로, 또한 수평방향 추력은 쿨롱 마찰력의 형태로 모델링하되, 미끄럼 속도에 따라 정 및 동 마찰 계수를 각각 0.8과 0.7로 설정하였다.

보행 조건으로서 $z_b = 350$ mm, $r_m = 333$ mm, $\Delta\theta = \pi/15$, $\dot{\theta}_{bD} = 0.335$ rad/s, $t^* = 0.5$ s인 상수들과 보행 시 우측 발부터 이동한다고 할 때 i번째 스텝에 대한 $r_{ZMP} = r_m + 68\times(-1)^{i+1}$ mm, $\theta_0 = i\Delta\theta$, $\theta_{ZMP1} = \theta_0 + \Delta\theta/8$, $\theta_{ZMP2} = \theta_0 + \Delta\theta/4$ 인 변수들을 지정하여, 식 (B1)~(B8)로부터 일련의 보행 매개 변수들을 얻었다. 그 중 각 지속 시간(s)은 t_1=t_3= 0.0831, t_2=0.0858, t_4=0.3906로 나타나 정상 보행의 주기는 1.2852초가 됨을 알 수 있었다.

초기 천이 구간을 포함하여 총 4.35초에 이르는 전체 시뮬레이션 시간 동안 로봇은 6보 전진하였으며, 그 때의 반경 및 횡방향 각도의 위치와 속력의 시간 추이는 Figs. 8, 9 그리고 좌표계 {0}에서 관측한 몸통의 추이는 Fig. 10에서와 같다. 한편, 발의 위치 궤적은 상기 시간 타이밍과 식 (11)에 따라 좌표계 {0}내에서 매끈한 곡선으로 계획되었다. 이와 같은 패턴으로 연속하여 30보 보행한 결과가 Fig. 11로서, ZMP 궤적이 전체 보행 기간 동안 안정 영역 내에 항상 위치하는 것과, 몸통이 일정한 주기를 갖고 경로의 좌우로 요동하며 전진하여 정확히 일주하는 것을 확인할 수 있다.

보행 과정을 보다 자세히 분석하기 위하여, Fig. 12에 초기 4.35 s 동안의 데이터만을 재 도시하였으

Table 1 Robot specifications

Part	Size(mm)	Mass(kg)
Body	196(W)×150(H)×60(T)	4.833
Each leg	325(L)	4.860e-1
Each foot	50(W)×110(L)×3(T)	4.197e-2
Total	-	5.889

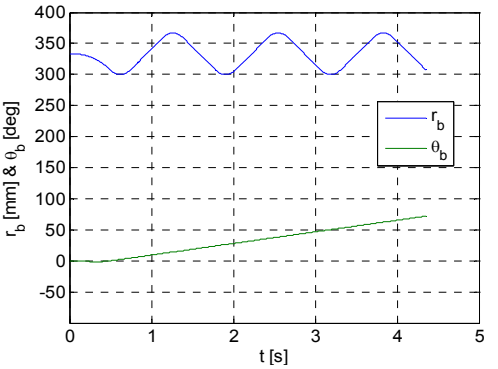

Fig. 8 Radial and angular body positions

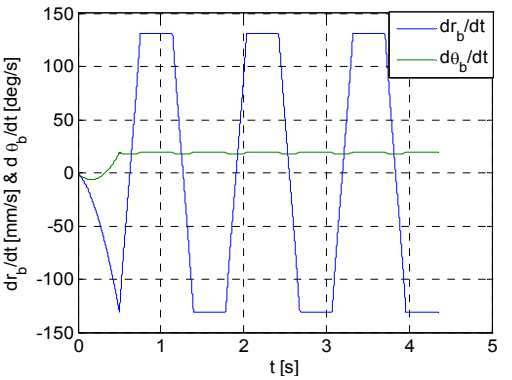

Fig. 9 Radial and angular body speeds

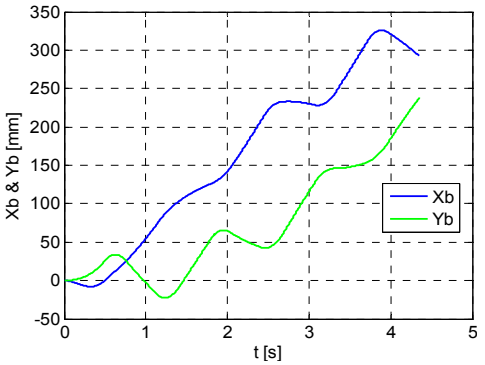

Fig. 10 Body positions in frame {0}

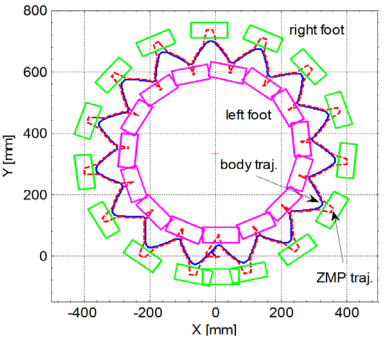

Fig. 11 Body & ZMP trajectories on the ground

며, 여기에는 $\dot{\theta}_{bD}$ 을 2배 증가시켜 정격 속도의 경우와 보폭은 동일하되 좌우 요동이 작고 보행 속력이 2배가 된 패턴의 경우를 함께 실었다. 두 경우 공히 정상보행 구간 동안의 안정성에는 문제가 없으나, 천이 보행 기간 동안 1배속의 경우는 안정도가 작으며, 2배속의 경우는 심지어 불안정성 문제가 대두함을 알 수 있다. Fig. 13은 그러한 2배속 경우의 좌표계 {0}에 대한 몸통의 시간적 추이를 보여준다.

또한 Fig. 12에서 두 경우의 SSP중 ZMP 궤적을 비교해 보면, 보행 속력이 증가할수록 궤적이 접선 방향으로 약간 길어지고 원심 방향으로 이동하면서 안정성 여유가 감소됨을 알 수 있다. 이는 4배속의 경우를 포함하여 상기 ZMP 궤적을 좌표계 {C}에 대한 반경과 회전각 방향으로 재 도시한 Figs. 14, 15로부터 보다 명확히 확인할 수 있다. 각 배속 패턴의 가속도 분석 결과, 그 크기에 별 차이가 없어 궤적의 변화 중 전자는 코리올리 관성력, 후자는 원심력에 주로 기인하는 것으로 판단된다. 그 중 특히 후자는 상대적으로 좁은 발의 형상 때문에 SSP중 로봇이 균형을 잃는 주요 원인이 될 것임을 예상할 수 있다. 실제로, 보행 속력이 정격의 약 4배 이상이 되면 원심력에 의하여 오른발 지지 SSP중 ZMP 궤적이 발의 우측으로 벗어남을 확인하였다.

이후 제시된 그림들은 ADAMS에 의한 시뮬레이션 결과이다. 그 중 Fig. 16은 초기 1초간의 쪼그리기 동작, 그 이후 0.5초간의 천이 보행, 그리고 정상 보행을 0.5초 간격으로 포착한 동영상 장면들로서, 1배속으로 정상 보행하는 동안의 평균 선속도가 0.4 km/h이며 1보당 12°씩 회전하는 것을 보여 주고 있다.

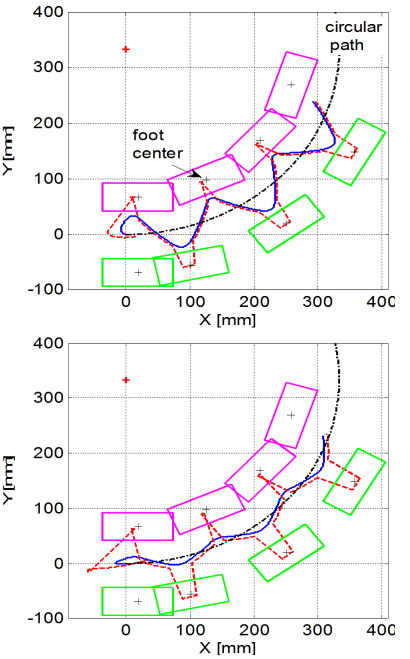

Fig. 12 Body & ZMP trajectories: (top) nominal speed case (bottom) double speed case

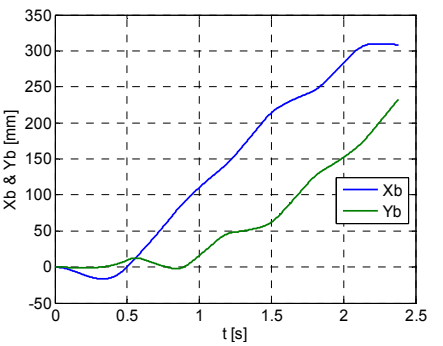

Fig. 13 Body positions in frame {0}: double speed case

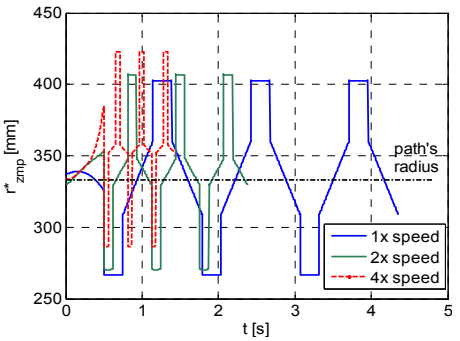

Fig. 14 Radial ZMP trajectory

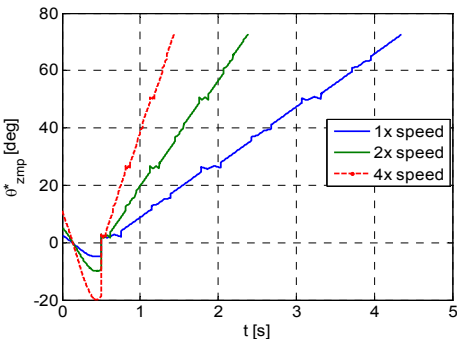

Fig. 15 Angular ZMP trajectory

Figs. 17, 18은 두 속력의 경우에 나타난 균형제어의 성능을 우측 발에 대하여 보인 것이다. 균형 제어가 없을 때, 1배속의 경우는 몸통과 발이 조금 뒤로 기울어진 채 보행하여 그 궤적이 계획된 패턴과 약간의 차이를 보였고, 2배속 경우에는 1.5초 순간에 이미 몸통이 지나치게 뒤로 기울어 그 이후의 보행은 완전히 불가능하였다. 그러나 천이구간 동안 식 (15)에 따라 피치방향 제어 토크를 양 발바닥에 발생시키는 균형제어가 실시되자, 외란 토크에 의하여 발생하던 피치 각이 거의 영으로 억제되어, 1배속은 물론이고 2배속의 경우도 무난히 나머지 보행을 완료할 수 있었다. 한편, 제어에 사용된 이득은 각각 k_P=10^4 N-mm/rad, k_I=10^7 N-mm/rad-s, k_D=10^2 N-mm-s/rad으로서 제어기의 적분 기능이 상대적으로 크게 기여하였다. 한편, 이때 우측 발에서 발생시킨 제어 입력 토크는 Fig. 19에 도시된 바와 같다.

또한 Fig. 20은 정격 속도로 보행한 경우의 좌표계 {0} 내 몸통의 시간 궤적으로서, 초기 1초 이후의 X_b와 Y_b의 궤적을 Fig. 10과 비교해 볼 때 오차가 거의 없으므로 예측한 바대로 보행이 실현되었다고

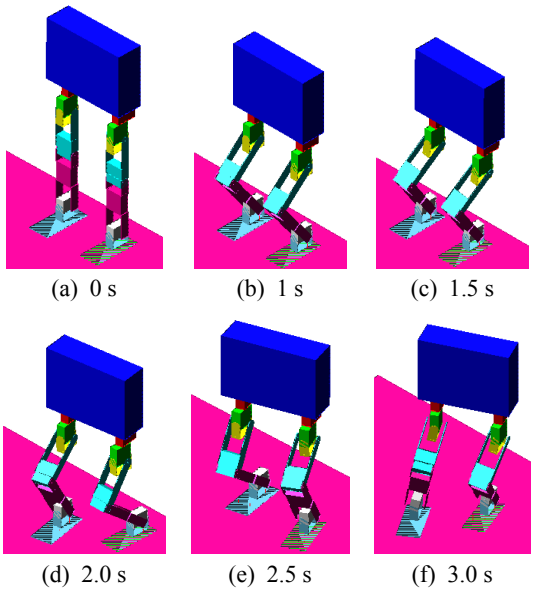

Fig. 16 Snapshots of the robot in circular walking

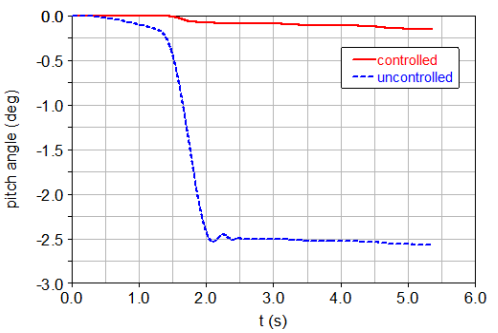

Fig. 17 Balance control effect: nominal speed case

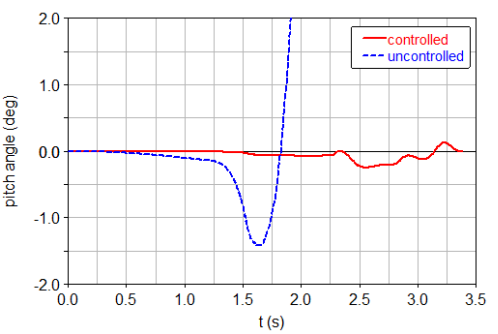

Fig. 18 Balance control effect: double speed case

볼 수 있다. 반면에 Fig. 21을 살펴보면, 2배속의 경우 제3보인 우측 발의 착지 순간(t=2.25 s일 때) 지면

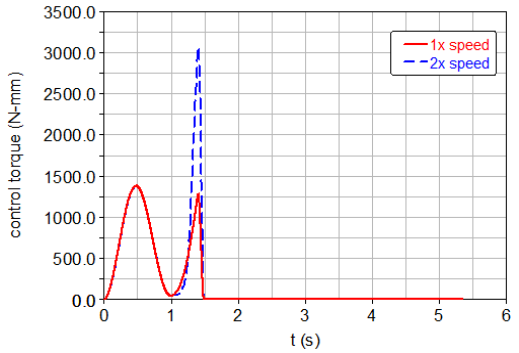

Fig. 19 Control input torque generated by right foot

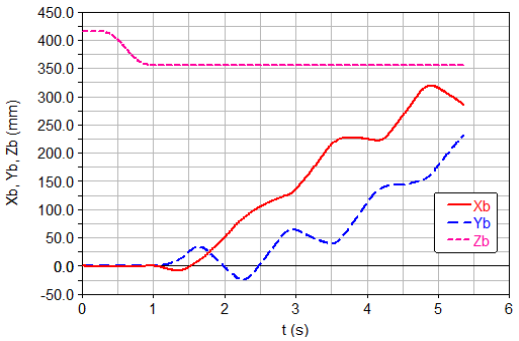

Fig. 20 Global body positions: nominal speed case

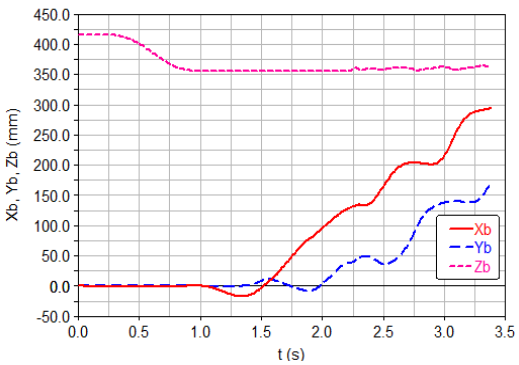

Fig. 21 Global body positions: double speed case

과의 충돌에 의한 튐(bounce)이 발생하여 보행이 흐트러지기 시작하였고 결국은 Fig. 13의 예측 치와 특히 Y_b의 값에서 무시할 수 없는 차이가 존재함을 알 수 있다. 상기 튐 현상은 상대적으로 빠른 보행 속력으로 인하여 요 방향 미끄럼뿐만 아니라 큰 보폭으로 이동한 우측 다리의 질량 효과인 원심력의 발생에 기인하는 것으로 파악된다.

6. 결 론

이 논문에서는 이족 로봇이 안정하면서도 정밀하게 원형 경로를 동적 보행하기 위하여 만족시켜야 할 역기구학 해와 몸통의 회전 효과가 잘 나타나는 새로운 형태의 ZMP 방정식을 유도하였다. 또한, 선회 보행에 적합한 정상 및 천이 보행 패턴의 시간 함수와 함께 발 근육만을 움직여 부족한 안정성을 보상하는 균형 제어 방법도 새로이 제안하였다.

위의 ZMP 방정식에 의거하여 일차적으로 안정성을 검토한 보행 패턴들을 최종적으로는 ADAMS를 이용한 동역학 시뮬레이션으로 시험한 결과, 신장 478 mm인 로봇이 0.4와 0.8 km/h사이의 속력 이하에서 성공적으로 보행함을 알 수 있었다. 따라서, 이 논문에서 제안한 역기구학 해, ZMP 방정식, 보행 패턴, 균형 제어기 등은 적정한 속력 이하의 정밀 원형 경로 보행에 적용 가능한 효과적인 접근 방식이며 수단으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2013년도 명지대학교 교내연구비 지원 사업에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

(1) Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H., 2003, Biped Walking Pattern Generation by a Simple Three-dimensional Inverted Pendulum Model, Advanced Robotics, Vol. 17, No. 2, pp. 131~147.

(2) Kobayashi, H. and Sugihara, T., 2009, Self-consistent Automatic Navigation of COM and Feet for Realtime Humanoid Robot Steering, IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3525~3530.

(3) Muecke, K. J., Hong, D. W. and Lim, S., 2008, Precision Circular Walking of Biped Robots, ASME IDETC/CIE Conference.

(4) Lim, S. and Ko, I., 2006, Locomotions of a Biped Robot: Static vs. Dynamic Gaits, Journal of KSME, Vol. 30, No. 6, pp. 643~652.

(5) Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D. and Stokic, D., 1990, Scientific Fundamentals of Robotics 7: Biped Locomotion, Springer-Verlag.

(6) Mechanical Dynamics Inc., 2001, Basic ADAMS Full Simulation Training Guide.

(7) Lim, S., 2006, Dynamic Stair Walking of Biped Robots, 8th International Conference on Motion and Vibration Control.

(8) Kim, J. H. and Oh, J. H, 2004, Walking Control of the Humanoid Platform KHR-1 Based on Torque Feedback Control, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 623~628.

(9) Lim, S., Oh, S. N. and Kim, K. I., 2012, Balance Control for Biped Walking Robots Using Only the Zero-moment-point Position Signal, IET Electronics Letters, Vol. 48, No. 1, pp. 19~20.

(10) Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa, M., Tusji, T., Miura, K., Nakaoka, S., Kajita, S. and Yokoi, K., 2011, Hardware Improvement of Cybernetic Human HRP-4C for Entertainment Use, IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4392~4399.

(11) Kwag, D., Bae, J., Hwang, J. and Kim, H., 2011, A Study on the Vibration Damping of a Barrel Using Vibration Absorber, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 408~415.

부록 A. 역기구학 해

$$\theta_1 = \alpha\,,\quad \theta_2 = -\sin^{-1}(v/\sqrt{w}) \qquad \text{(A1, 2)}$$

$$\theta_3 = A\tan 2(s_3, c_3)\,,\ \theta_4 = A\tan 2(s_4, c_4) \qquad \text{(A3, 4)}$$

$$\theta_5 = -\theta_3 - \theta_4\,,\ \theta_6 = -\theta_2 \qquad \text{(A5, 6)}$$

여기서

$$v = \{(a_2 - y)c\alpha + (x - a_1)s\alpha\} l_{sz} s_4\,,$$

$$\begin{aligned} w = {} & l_{sz}{}^2(c_4{}^2 - 1)(-2l_{tz}l_{sz}c_4 - xa_2 s2\alpha - ya_1 s2\alpha - 2xa_1 c^2\alpha \\ & + y^2 + xys2\alpha + a_2{}^2 - l_{tz}{}^2 + a_1 a_2 s2\alpha + 2l_{fx}a_2 s\alpha + l_{fx}{}^2 \\ & - 2ya_2 + x^2 c^2\alpha + 2a_1 l_{fx} c\alpha - l_{sz}{}^2 - 2l_{fx} ys\alpha - 2l_{fx} xc\alpha \\ & + 2ya_2 c^2\alpha + a_1{}^2 c^2\alpha - a_2{}^2 c^2\alpha - y^2 c^2\alpha), \end{aligned}$$

$$s_3 = \sqrt{1 - c_3^2}\,,$$

$$c_3 = \frac{p - \sqrt{q}}{l_{sz}{}^2 + 2l_{tz}l_{sz}c_4 + l_{tz}{}^2}\,,$$

$$\begin{aligned} p = {} & l_{tz}(x - a_1)c\alpha + l_{sz}(y - a_2)c_4 s\alpha + l_{sz}(x - a_1)c_4 c\alpha \\ & + l_{tz}(y - a_2)s\alpha - l_{tz}l_{fx} - l_{sz}l_{fx}c_4, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q = {} & l_{sz}{}^2(c_4{}^2 - 1)\{-2l_{tz}l_{sz}c_4 + (x - a_1)^2 c^2\alpha - l_{sz}{}^2 \\ & - (y - a_2)^2 c^2\alpha + (y - a_2)^2 - l_{tz}{}^2 + xys2\alpha \\ & - xa_2 s2\alpha - 2l_{fx} ys\alpha - ya_1 s2\alpha + l_{fx}{}^2 - 2xl_{fx} c\alpha \\ & + a_1 a_2 s2\alpha + 2l_{fx} a_2 s\alpha + 2l_{fx} a_1 c\alpha\}, \end{aligned}$$

$$s_4 = \sqrt{1 - c_4^2}\,,$$

$$c_4 = \frac{(x - a_1 - l_{fx}c\alpha)^2 + (y - a_2 - l_{fx}s\alpha)^2 + (z - a_3 - l_{fz})^2 - l_{sz}^2 - l_{tz}^2}{2l_{sz}l_{tz}}.$$

부록 B. 정상 보행 패턴 매개변수 산출 공식

$$t_1 = \frac{1}{2a}\ln\frac{\dot{\theta}_{bD} - a(\theta_0 - \theta_{ZMP1})}{\dot{\theta}_{bD} + a(\theta_0 - \theta_{ZMP1})}\,, \qquad \text{(B1)}$$

$$t_2 = \frac{\theta_{ZMP2} - \theta_{ZMP1}}{\dot{\theta}_{bS}}\,, \qquad \text{(B2)}$$

$$t_3 = t_1\,, \qquad \text{(B3)}$$

$$t_4 = \frac{(\theta_0 + \Delta\theta) - \theta'}{\dot{\theta}_{bD}}\,, \qquad \text{(B4)}$$

$$\dot{\theta}_{bS} = a(\theta_0 - \theta_{ZMP1})\sinh at_1 + \dot{\theta}_{bD}\cosh at_1\,, \qquad \text{(B5)}$$

$$\theta' = \theta_{ZMP1} + \theta_{ZMP2} - \theta_0\,, \qquad \text{(B6)}$$

$$r_0 = r_m - \frac{at_4(r_m - r_{ZMP})(1 - h)}{(1 - h)at_4 - 2(1 + h)}\,, \qquad \text{(B7)}$$

여기서

$$h = \exp\{\frac{2a(\theta_{ZMP2} - \theta_{ZMP1})}{\dot{\theta}_{bS}}\}\{\frac{a(\theta_{ZMP1} - \theta_0) + \dot{\theta}_{bD}}{\dot{\theta}_{bS}}\}^2 \cdot\sqrt{\frac{\dot{\theta}_{bD} - a(\theta_0 - \theta_{ZMP1})}{\dot{\theta}_{bD} + a(\theta_0 - \theta_{ZMP1})}}\,,$$

$$\dot{r}_0 = -\frac{2r_0}{t_4} \tag{B8}$$

Seungchul Lim received a B.S. degree in mechanical engineering from Seoul National University in 1981, M.S. degree from KAIST, and Ph.D. degree from Virginia Tech in 1983 and 1992 respectively. He is currently with ME department of Myongji University as a professor. His research interests include design of advanced dynamic systems, vibration control, and robotics.