〈 논문 〉

이족 로봇의 위치 이동: 정보행 대 동보행

임 승 철† · 고 인 환*

(2005년 10월 14일 접수, 2006년 4월 5일 심사완료)

Locomotions of a Biped Robot: Static vs. Dynamic Gaits

Seungchul Lim and Inhwan Ko

Key Words: Walking Pattern Generation(보행패턴 발생), Inverse Kinematics(역기구학), Stability(안정성), ZMP(영 모멘트 점), Actuator Specification(작동기 사양), Humanoid(인간형 로봇)

Abstract

This paper is concerned with computer simulations of a biped robot walking in static and dynamic gaits. To this end, a three-dimensional robot is considered possessing a torso and two identical legs of a typical design. For such limbs, a set of inverse kinematic solutions is analytically derived between the torso and the feet. Specific walking patterns are off-line generated meeting stability based on the VPCG or ZMP condition. Subsequently, to verify whether the robot can walk as planned in the presence of mass and ground effects, a multi-body dynamics CAE code has been applied to the resulting joint motions determined by inverse kinematics. As a result, the key parameters to successful gaits could be identified including inherent characteristics as well. Upon comparisons between the two types of gaits, dynamic gaits are concluded more desirable for larger humaniods.

1. 서 론

최근 인간 위주로 설계된 환경에서 인간을 대신하거나 협동하기 위한 로봇으로서 이족 보행 로봇이 큰 관심을 모으고 있으며, 이족 로봇의 걸음새는 크게 정 보행과 동 보행으로 분류될 수 있다.[1,2] 정 보행은 그 개념이 비교적 단순하여 현재 소형 미니 로봇에 보편적으로 적용되고 있으나,[2] 동 보행은 특히 관성력의 존재로 인하여 동적 안정성 확보가 쉽지 않아 현재까지 개발 성공 사례는 손꼽을 정도이다.[3~5]

이에 본 논문에서는 인간의 관절과 유사하여 일반적으로 채택되고 있는 기계구조의 3차원 이족 로봇을 대상으로 그의 역기구학 모델을 구한 후, 다 물체 동력학 CAE 도구인 ADAMS[6]를 이용하여 질량 및 지면 효과를 확인한다. 이로써, 로봇 설계 단계에서 적용 가능한 정 및 동 보행 패턴을 탐색하고 그러한 운동의 실현에 필요한 작동기 사양 등을 구하며 로봇의 중대형화 관점에서 상기 두 가지 보행의 유형적 특징을 비교해 보고자 한다.

† 책임저자, 회원, 명지대학교 기계공학과
E-mail : slim@mju.ac.kr
TEL : (031)330-6428 FAX : (031)321-4959
* 명지대학교 대학원 기계공학과

2. 로봇의 구조

Fig. 1에서와 같이 모델링 된 로봇은 직육면체 상체와 두 다리의 하체로 구성되어 있다. 하체는 총 12개 자유도를 갖되, 힙에 요우 (M1/M7), 롤 (M2/M8), 피치 (M3/M9) 그리고 무릎에 피치 (M4/M10), 발목에 피치 (M5/M11), 롤 (M6/M12) 방향 순서로 회전축이 설치되어 있다.

그중 힙과 발목 관절은 사실상 타이밍 벨트를 이용하여 동력을 전달함으로써 각각에 관련된 3축과 2축이 동일 지점에서 직교하도록 고안되어 있다. 한편, 보행 중 안정성을 위하여 로봇의 VPCG

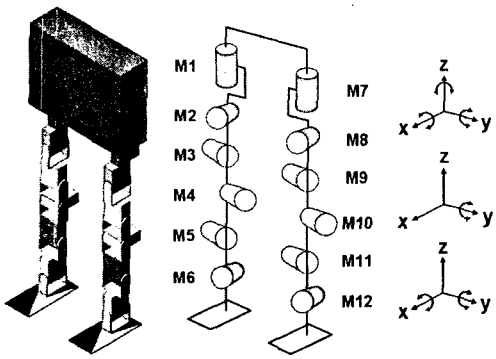

Fig. 1 Modeled robot

(무게중심의 수직 투영 점) 또는 ZMP(영 모멘트 점)[1,2]가 존재해야 할 발의 구조는 일반적인 직사각형 모양을 취하고 있다.

3. 역기구학

전신 humanoid의 경우 더욱 많은 자유도를 보유하지만, 일단 골반이나 상체의 공간상 위치와 방위가 지정되면 그에 대한 수족의 상대 위치와 방위는 일반적으로 6 자유도 문제로 축소된다. 이에 Fig. 2와 같이 X, Y, Z축이 각각 로봇의 진행, 횡, 수직 방향과 일치하는 직교 관성 좌표계 {0}와, 보행전 초기 직립상태에서 {0}와 평행하도록 각 링크에 고정시킨 좌표계 {1}~{4}를 정의한다.

그런 다음, 예로써 몸통에 대한 우측 발의 상대 변위 벡터 $\boldsymbol{r}_{rf/u}(=\boldsymbol{r}_{rf}-\boldsymbol{r}_{u})$를 골반 좌표계 {1}에 관하여 유도하면 아래식과 같은 기구학식이 구해진다.

$$ {}^{1}\boldsymbol{r}_{rf/u} = {}^{1}\boldsymbol{x}_{u} + {}^{1}_{2}R\,{}^{2}\boldsymbol{x}_{rt} + {}^{1}_{3}R\,{}^{3}\boldsymbol{x}_{rs} + {}^{1}_{4}R\,{}^{4}\boldsymbol{x}_{rf} \qquad (1) $$

여기서 상체, 허벅지, 장딴지 및 발의 크기에 해당하는 각각의 벡터 ${}^{1}\boldsymbol{x}_{u}=[a_1\ a_2\ a_3]^T$, ${}^{2}\boldsymbol{x}_{rt}=[l_{tx}\ l_{ty}\ l_{tz}]^T$, ${}^{3}\boldsymbol{x}_{rs}=[l_{sx}\ l_{sy}\ l_{sz}]^T$, ${}^{4}\boldsymbol{x}_{rf}=[l_{fx}\ l_{fy}\ l_{fz}]^T$이며 $s_i=\sin\theta_i$, $c_i=\cos\theta_i$, $s_{ij}=\sin(\theta_i+\theta_j)$, $c_{ij}=\cos(\theta_i+\theta_j)$라고 할 때 좌표계간의 회전행렬

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

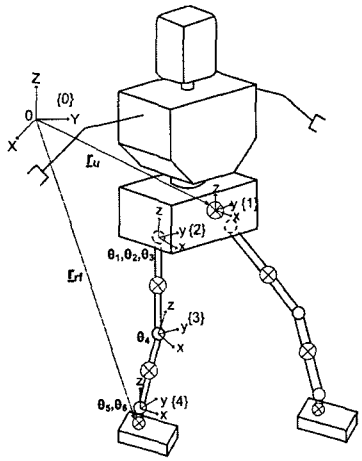

Fig. 2 Coordinate frames for kinematics

$$ {}^{1}_{3}R = {}^{1}_{2}R^{2}_{3}R $$

$$ = \begin{bmatrix} -s_1s_2s_{34}+c_1c_{34} & -s_1c_2 & s_1s_2c_{34}+c_1s_{34} \\ c_1s_2s_{34}+s_1c_{34} & c_1c_2 & -c_1s_2c_{34}+s_1s_{34} \\ -c_2s_{34} & s_2 & c_2c_{34} \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{1}_{4}R = {}^{1}_{3}R^{3}_{4}R $$

$$ = \begin{bmatrix} -s_1s_2s_{345}+c_1c_{345} & s_1s_2s_6c_{345}+s_6c_1s_{345}-s_1c_2c_6 \\ c_1s_2s_{345}+s_1c_{345} & -c_1s_2s_6c_{345}+s_1s_6s_{345}+c_1c_2c_6 \\ -c_2s_{345} & s_6c_2c_{345}+s_2c_6 \\ s_1s_2c_6c_{345}+c_1c_6s_{345}+s_1c_2s_6 \\ -c_1s_2c_6c_{345}+s_1c_6s_{345}-c_1c_2s_6 \\ c_2c_6c_{345}-s_2s_6 \end{bmatrix} $$

이다.

위에서 회전 행렬 ${}^{1}_{4}R$의 요소를 살펴보면 피치 각 θ_3, θ_4, θ_5가 연속해서 존재하도록 다리가 설계됨으로써 그들이 마치 하나의 피치 각처럼 취급될 수 있음을 알 수 있고, 이것은 결국 기구학 문제를 단순화시키는 장점이 있다.

한편, 보행은 진로를 기준으로 직선과 곡선 보행으로 나눌 수 있고 그들의 차이는 본 로봇의 경우 나머지 다리 축과 완전히 독립적인 골반 요우 축의 운동 여부에만 의존한다. 따라서 역 기구학 모델은 직선 보행의 경우만을 고려하여도 충분하다. 그 경우 대부분의 기존 로봇 보행에서와 같이 발과 골반 좌표축이 평행을 유지한다면(즉 ${}^{1}_{4}R=I$), 아래의 조건이 성립된다.

$$ \theta_1=0,\ \theta_2+\theta_6=0,\ \theta_3+\theta_4+\theta_5=0 \qquad (2a,b,c) $$

또한 다리의 구조상 $l_{tx}=l_{ty}=l_{sx}=l_{sy}=l_{fy}=0$이므로 우측 발의 상대 위치를 ${}^1\boldsymbol{r}_{rf/u}=[x\ y\ z]^T$라고 할 때 다음 식을 구할 수 있다.

$$\theta_2=Atan2(s_2,c_2),\ \theta_3=2Atan(u), \quad (3a,b)$$

$$\theta_4=Atan2(s_4,c_4), \quad (3c)$$

여기서 $s_2=\dfrac{-(y-a_2)}{l_{tz}c_3+l_{sz}c_{34}}$, $c_2=\pm\sqrt{1-s_2^2}$,

$$u=\frac{(l_{tz}+l_{sz}c_4)\pm\sqrt{(l_{tz}+l_{sz}c_4)^2-\{(x-a_1-l_{fx})^2-l_{sz}^2s_4^2\}}}{(x-a_1-l_{fx})+l_{sz}s_4},$$

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

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

이다.

한편 나머지 3개의 관절각은 식 (2)와 (3)에 의하여 구해질 수 있으며, 해의 연속성을 위하여 c_2, u, s_4의 복호 중 '+' 만을 일관되게 선택하는 것이 바람직하다.

4. 보행 패턴의 발생

인간이 보행할 때와 마찬가지로 로봇의 경우도 먼저 발의 착지 위치를 정하고 이에 대응하는 몸통의 위치를 정한다. 즉, 보행의 과정은 먼저 Fig. 3에서와 같이 직교 관성 좌표계를 기준으로 지면에 적응하기 위한 양 발 (R:우측, L:좌측)의 위치와 방위 궤적을 시간 함수로 발생시키고 동시에 SSP (한발 지지 상태)와 DSP (두발 지지 상태)를 구별하여 VPCG 또는 ZMP의 위치를 안정 영역 내에 지정하게 된다.

한편, 일반적으로 횡 방향에서의 발과 VPCG 위치 또한 측면의 경우와 동일하나, 직선보행의 경우는 Fig. 4에서도 보듯이 양발은 단순히 일정한 상수 값을 가지며 VPCG는 음영 표시된 안정영역을 통과하는 주기 함수 형태가 된다. 다만, 로봇의 무게중심 또는 몸통의 위치를 결정함에 있어 걸음새에 따라 다소간의 차이가 있을 수 있다.

4.1 정 보행

정 보행은 링크의 운동 가속도가 중력 가속도 g 보다 매우 작아서 식 (4)로 표현되는 VPCG가

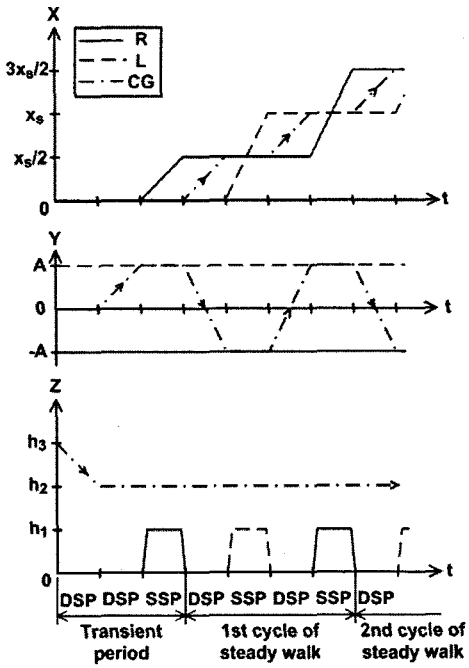

Fig. 3 Trajectories of feet and CG

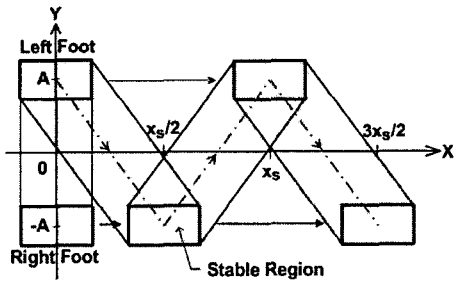

Fig. 4 Foot trajectory and stable region (XY plot)

로봇의 지지 점들을 연결한 볼록 다각형(convex hull) 형태의 안정 영역 내에 존재하는 것만으로도 로봇이 전도되지 않는 경우이다.

$$x_{VPCG}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n}m_ix_i(t), \quad (4a)$$

$$y_{VPCG}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n}m_iy_i(t) \quad (4b)$$

여기서 M은 로봇의 전체 질량, m_i는 n개중 i번째 링크의 질량이며, $(x_i,\ y_i)$는 동 링크의 VPCG이다.

즉, 정 보행은 Figs. 3, 4에서와 같이 대부분의 무게를 차지하는 몸통이 직립한 상태에서 그 위치가 SSP

중에는 해당 지지 발, DSP 중에는 양 발 중간에 오는 걸음새를 말한다.

4.2 동 보행

반면에 동 보행의 경우는 운동 가속도가 충분히 커서 VPCG 대신 다음 식 (5)로 정의되는 ZMP가 상기 안정 영역 내에 존재하는 걸음새로서, 인간의 평소 보행처럼 자중에 의한 모멘트와 가속 시 작용하는 관성에 의한 모멘트를 상쇄시키는 것이 핵심 관건이다.

$$x_{ZMP}=\frac{\sum_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)x_i-\sum_{i=1}^{n}m_i\ddot{x}_iz_i-\sum_{i=1}^{n}I_{iy}\dot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)}$$

$$y_{ZMP}=\frac{\sum_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)y_i-\sum_{i=1}^{n}m_i\ddot{y}_iz_i-\sum_{i=1}^{n}I_{ix}\dot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)} \quad (5a,b)$$

참고로, 병진 및 회전 운동 가속도가 중력 가속도보다 충분히 작거나 등속 운동의 경우 식 (5)는 식 (4)와 같아짐을 알 수 있으며 이는 정 보행이 동 보행의 극한적 경우임을 의미한다.

동 보행의 경우 동적 안정성을 위하여, 식 (5)의 ZMP 조건을 만족시키도록 각 링크의 운동 패턴을 역시 시간의 함수로 발생시켜야 한다. 이와 같이 직교 좌표계 내에서의 몸통과 각 발의 운동이 결정되면 역기구학 식 (2)와 (3)을 통하여 관절 공간내의 회전각이 구해지고 이들 정보는 하위 제어기로 보내져 위치제어를 통하여 보행 운동이 실현된다.

지금까지 동 보행 패턴의 발생 시점을 기준으로 크게 off-line[3~5] 과 on-line[7] 방식 연구가 수행된바 있으나, 현실적인 제약 때문에 전자의 방식만이 현재 실험적으로 구현되고 있다. 따라서 본 논문에서도 전자 방식에 속하는 쌍곡선 패턴을 채택하되,[3] 먼저 아직까지 비공개된 유도 과정을 구체화하고 이를 확장하여 양발이 나란하며 정지 상태인 보행 개시 단계부터도 적용할 수 있는 패턴을 발생시킨다.

4.3 쌍곡선 보행 패턴(정상 보행)

ZMP 조건식 (5)는 그대로 적용하기에 너무 복잡하나, 로봇 몸통에 비하여 다른 링크의 질량은 충분히 작고, 몸통의 롤 및 피치 방향 각속도가 영이며, 보행 중 로봇 몸통의 높이가 일정하다고 가정할 때, 아래와 같이 비제차 상계수 2차 미방으로 단순화 된다.

$$\ddot{x}_b-a^2x_b=-a^2x_{ZMP},\quad \ddot{y}_b-a^2y_b=-a^2y_{ZMP} \quad (6a,b)$$

여기서 하첨자 b는 로봇의 몸통을 의미하며, $a=\sqrt{g/z_b}$는 양의 상수이다.

만일 ZMP의 위치를 구간별로 일정 상수 값으로 설정하는 경우, 일반적인 초기 조건 $x_b(0)=x_0$, $\dot{x}_b(0)=\dot{x}_0$, $y_b(0)=y_0$, $\dot{y}_b(0)=\dot{y}_0$에 대하여 식 (6)의 해당 구간별 해를 양 방향 상호 독립적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_b=(x_0-x_{ZMP})\cosh at+\frac{\dot{x}_0}{a}\sinh at+x_{ZMP} \quad (7a)$$

$$y_b=(y_0-y_{ZMP})\cosh at+\frac{\dot{y}_0}{a}\sinh at+y_{ZMP} \quad (7b)$$

식 (7)의 우변 중 두 쌍곡선 함수의 합에 의한 단조 증가 현상을 방지하기 위하여 DSP 중에는 몸통을 등속으로 이동시키고, SSP 중에만 몸통의 위치 x_0 (또는 y_0) 보다 전방(또는 측방)이거나 동일한 위치에 ZMP를 설정하여 두 쌍곡선 함수 계수의 부호를 반대가 되게 조정하면, Fig. 5에서와 같은 몸통의 운동 패턴을 갖게 된다.

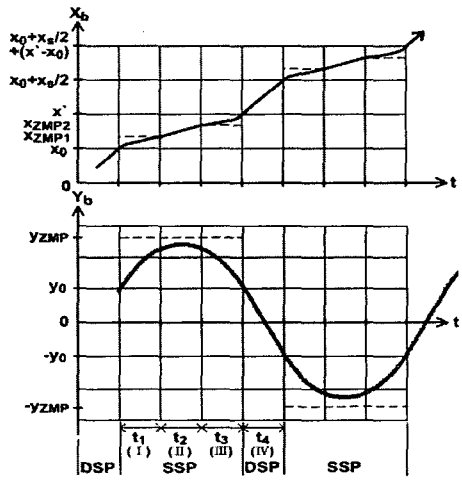

Fig. 5 Hyperbolic walking pattern

Fig. 5에서 t_1, t_2, t_3는 각각 SSP 중 로봇이 진행 방향으로 감속, 등속, 가속하는 구간의 지속시간이며, t_4는 등속 운동하는 DSP 구간의 지속 시간이다. 한편 횡 방향으로 로봇은 $t_5(=t_1+t_2+t_3)$ 즉, SSP 동안 감속만을 일으키며 DSP 중에는 진행방향에서와 같이 등속 운동한다. 또한 x_{ZMP1}과 x_{ZMP2}는 각각 구간 I, III 동안 지정된 진행 방향 ZMP 위치이며, x_s는 정상 보행시의 한주기 보폭, x'은 SSP 종료 시점의 진행 방향 위치를 의미한다. 참고로 SSP 중 구간 I, III에서의 이동 거리는 동일하도록 설계되어 있어 식 (8)이 성립한다.

$$x' - x_{ZMP2} = x_{ZMP1} - x_0 \tag{8}$$

그 밖에 SSP와 DSP 중 진행 방향의 등속도를 각각 v_{xS}와 v_{xD}, DSP 중 횡방향 등속도를 v_y 라고 할 때, 다음 식이 성립한다.

$$v_{xS} = \frac{x_{ZMP2} - x_{ZMP1}}{t_2}, \tag{9a}$$

$$v_{xD} = \frac{(x_0 + x_s/2) - x'}{t_4}, \quad v_y = \frac{2y_0}{t_4} \tag{9b,c}$$

이에 따라 구간 I($0 \le \tau \le t_1$)에서는 초기조건 고려시 다음과 같이 진행 방향 위치가 표현되고

$$x_b(\tau) = (x_0 - x_{ZMP1})\cosh a\tau + \frac{v_{xD}}{a}\sinh a\tau + x_{ZMP1} \tag{10a}$$

동 구간 말기 ($\tau = t_1$) 에서의 변위와 속도의 연속조건으로부터 다음 식이 성립된다.

$$x_b(t_1) = x_{ZMP1}, \quad \dot{x_b}(t_1) = v_{xS}. \tag{10b,c}$$

또한 구간 III($0 \le \tau \le t_3$)에서도 마찬가지로 식 (11)이 성립된다.

$$x_b(\tau) = \frac{v_{xS}}{a}\sinh a\tau + x_{ZMP2}, \tag{11a}$$

$$x_b(t_3) = x', \quad \dot{x_b}(t_3) = v_{xD} \tag{11b,c}$$

같은 방식으로 횡 방향에 대한 SSP 구간 ($0 \le \tau \le t_5$)에서도 아래의 결과를 얻을 수 있다.

$$y_b(\tau) = (y_0 - y_{ZMP})\cosh a\tau + \frac{v_y}{a}\sinh a\tau + y_{ZMP},$$

$$y_b(t_5) = y_0, \quad \dot{y_b}(t_5) = -v_y. \tag{12a,b,c}$$

따라서, 보행에 관련한 일련의 입력 데이터로서 a, x_0, x_s, x_{ZMP1}, x_{ZMP2}, v_{xD}, y_{ZMP}가 주어지는 경우 식 (8)~(12)로부터 구간별 지속시간을 포함한 나머지 미지의 매개변수들을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_1 = \frac{1}{2a}\ln\frac{v_{xD} - a(x_0 - x_{ZMP1})}{v_{xD} + a(x_0 - x_{ZMP1})}, \tag{13a}$$

$$t_2 = \frac{x_{ZMP2} - x_{ZMP1}}{v_{xS}}, \quad t_4 = \frac{(x_0 + x_s/2) - x'}{v_{xD}} \tag{13b,c}$$

$$v_{xS} = a(x_0 - x_{ZMP1})\sinh at_1 + v_{xD}\cosh at_1, \tag{13d}$$

$$y_0 = \frac{at_4 y_{ZMP}(1-q)}{(1-q)at_4 - 2(1+q)}, \quad v_y = \frac{2y_0}{t_4} \tag{13e,f}$$

여기서

$$q = exp\left(\frac{a(x_{ZMP2} - x_{ZMP1})}{v_{xS}}\right)\left\{\frac{a(x_{ZMP1} - x_0) + v_{xD}}{v_{xS}}\right\} \cdot\sqrt{\frac{v_{xD} - a(x_0 - x_{ZMP1})}{v_{xD} + a(x_0 - x_{ZMP1})}}$$ 이다.

한편, 식 (13)은 로봇의 정상 보행에 관한 결과로서 정지상태에서 출발하는 경우에는 그대로 적용할 수 없다. 따라서 초기 정지 상태에서 정상 보행으로의 전환 시 무한대 가속도의 발생을 방지하기 위하여 다음과 같은 비정상, 과도 보행 패턴이 필요하다.

4.4 쌍곡선 보행 패턴(비정상, 과도 보행)

먼저 DSP 구간($0 \le t \le t^*$)에서 무게 중심을 좌혹은 우측으로 이동시킨다. 이 때, ZMP의 위치를 영이 아닌 일정 좌표 값 (x_{ZMP0D}, y_{ZMP0D})으로 지정할 때, 진행 및 횡 방향의 초기 위치와 속도가 영인 점을 고려하면 그 때 몸통의 이동 궤적을 식 (7a)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$x_b(t) = -x_{ZMP0D}\cosh at + x_{ZMP0D} \tag{14}$$

시간이 경과하여 로봇의 무게중심이 어느 정도 이동하게 되면 반대편 발을 들어 보폭 $x_s/2$만큼 이동시킨다. 이러한 SSP 단계 $(0 \le \tau \le \tau^*)$에서의 ZMP 위치를 일정 좌표 값 (x_{ZMP0S}, y_{ZMP0S})으로 지정할 때, 연속성을 위하여 DSP 말기의 위치와 속도를 SSP의 초기 조건으로 취하는 경우 아래와 같은 몸통 운동의 식을 얻는다.

$$x_b(\tau) = (-x_{ZMP0D}\sinh at^*)\sinh a\tau + (-x_{ZMP0D}\cosh at^* + x_{ZMP0D} - x_{ZMP0S})\cosh a\tau + x_{ZMP0S}$$

$$\dot{x_b}(\tau) = (-ax_{ZMP0D}\sinh at^*)\cosh a\tau + a(-x_{ZMP0D}\cosh at^* + x_{ZMP0D} - x_{ZMP0S})\sinh a\tau \quad (15a,b)$$

또한 상기 SSP 말기에 다시 정상 보행의 등속 구간 위치 및 속도와 아래의 연속 조건을 적용한 후

$$x_b(\tau^*) = x_s,\ \dot{x_b}(\tau^*) = \dot{x_s} \quad (16a,b)$$

식 (16)에 포함된 미지수 4개 중 t^*와 τ^*를 입력으로 지정할 때 나머지 2개의 미지수인 ZMP 위치들은 다음과 같이 구해진다.

$$x_{ZMP0D} = \frac{-ax_s\sinh a\tau^* - \dot{x_s}(1-\cosh a\tau^*)}{a[-\sinh at^* + \sinh a(t^*+\tau^*) - \sinh a\tau^*]}$$

$$x_{ZMP0S} = \frac{-ax_s[\sinh a\tau^* - \sinh a(t^*+\tau^*)] + \dot{x_s}[\cosh a\tau^* - \cosh a(t^*+\tau^*)]}{a[-\sinh at^* + \sinh a(t^*+\tau^*) - \sinh a\tau^*]} \quad (17a,b)$$

한편, 과도 보행기의 DSP와 SSP 중 횡 방향 위치도 동일한 과정을 거치면 각각 식 (17)의 x를 y로 대체한 식으로 얻어진다. 여기서 주의할 것은, t^*와 τ^*의 입력 값에 대응하여 구하여진 ZMP의 좌표가 안정 영역 내에 위치하는지 보행전에 반드시 점검해 보아야 한다는 것이다.

5. 동력학 시뮬레이션

Fig. 1에 도시된 3차원 ADAMS 로봇 모델의 제원은 Table 1과 같으며 총 신장과 중량은 각각 478mm, 2.24kg, 몸통 대 로봇 전체의 질량비는 약 80%이다.

Table 1 Specifications of the designed robot

Part	Size [mm]	Mass [kg]
Body	196(W)x150(H)x60(T)	1.781
Right Leg	325(L)	2.150e-1
Left Leg	325(L)	2.150e-1
Right Foot	50(W)x110(L)x3(T)	1.546e-2
Left Foot	50(W)x110(L)x3(T)	1.546e-2
Total	-	2.242

로봇과 지면 사이의 접촉 시 법선 방향 반력은 비선형 강성과 점성 감쇠력의 합으로서 다음과 같이 침투 길이 d와 그 속도 $\dot{d}$의 함수로 모델링 되었다.

$$f_c = kd^e + c\dot{d} \quad (18)$$

여기서 $k = 10^2$ N/mm, $e = 1.5$, $c = 10$ Ns/mm이다. 한편, 지면과의 마찰력은 식 (19)와 같이 쿨롱 마찰로 가정하되 그 중 마찰 계수 μ의 크기로는 미끄럼 속도에 따라 정지 및 동 마찰 계수로서 각각 0.8과 0.7을 사용하였다.[8]

$$f_f = \mu f_c \quad (19)$$

5.1 정 보행

전술한 바와 같이 정보행의 경우 발의 착지 위치를 기준으로 VPCG 즉 몸통의 위치를 정한다. 이 때, 식 (4)에 의하여 각 순간에서의 로봇 자세는 결정되지만 안정성 확보를 위한 매 순간들 사이의 적절한 시간 간격은 알 수 없다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 로봇의 무게중심 즉 몸통의 위치를 안정영역이 상대적으로 작은 SSP 중에는 지지 발 위에 고정하고 DSP 상태에서만 이동시키되, 시행착오적 방법에 의하여 보행 패턴과 주기를 변경하면서 보행 중 관성력에 의한 몸통의 진동이 작게 발생하거나 충분히 소멸될 수 있는 걸음새를 파악하였다.

그 결과 초기 3초 이후 정상 보행주기 T_s=6s, $h_2(=z_b)$=395mm, x_s=100mm, 발의 이동 고도 h_1=10mm이며 DSP 대 SSP의 시간 비율=2:1인 안정

한 보행 패턴을 찾았고 그 때의 몸통에 대한 각 발의 상대 위치는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 접미사 r과 l은 각각 우측 및 좌측 발을 의미하며, 특기할 것은 보행 패턴을 단순히 동 그림에서와 같이 속도와 가속도가 불연속 함수 형태로 지정한다 하더라도 실제 로봇에서는 모터 시상수의 유한성과 링크의 질량 관성에 의하여 어느 정도 매끄러운 함수로 구현될 것이라는 점이다. 이러한 현상을 시뮬레이션에 반영하기 위하여 그림 상의 모든 신호들을 차단 주파수가 1Hz인 저통과 (LP) 필터를 거쳐 적용하였다.

상기 보행 조건을, 몸통은 직립하되 다리가 약간 굽혀진 초기 상태에 적용하여 Figs. 7~11와 같은 시뮬레이션 결과를 얻었다. 그 중 Fig. 7은 정면에서 관찰한 동영상중 2초 간격으로 포착한 자세들을, Fig. 8는 몸통의 3축 방향 거동 궤적을 보여준다. 초기 0.5초 동안은 지면상에 보폭을 확보하기 위하여 무릎을 충분히 구부리는 과정이고 다음 0.5초 동안 몸통을 좌측 발 위로 옮기는 과정이다. 다시 그 이후 1초 동안은 요동이 어느 정도 사라질 때까지 대기하고 2초부터 0.5초 동안 우측 발을 이동함으로써 두발이 전후로 $x_s/2$만큼 벌어진 정상 보행 자세가 형성된다. 이후 2.5초부터 8.5초 순간까지 3초 간격으로 좌측과 우측 발을 한번씩 교대로 전진시킴으로써 첫 보행주기가 완성되며, 말기의 상기 필터링 효과를 제외하면 이러한 몸통의 운동은 계속 반복됨을 알 수 있다.

위와 같은 방식으로 로봇은 주기적 보행에 성공하였으나, Figs. 3과 8의 비교로부터 로봇 몸통이 계획과는 달리 약간씩 전후, 좌우로 흔들림을 알 수 있다. 이는 작지만 로봇에 작용하는 관성력과 이에 대응하는 지면의 탄성 및 점성효과에 의한 안정성 회복 작용의 결과로서 보행 속도를 현재보다 증가시킬 때, 전자의 효과가 커져 로봇이 전복됨도 알 수 있었다. 한편 Fig. 7의 2초, 8초 순간의 자세로부터 몸통의 중심이 완전히 좌측 발위에 위치함을 알 수 있다.

Fig. 9는 보행 중 우측 관절각의 시간적 추이를 보여 주며, 그 중 무릎 관절이 가장 최대(직립 상태로부터 약 45°)로 변화함을 알 수 있다. 또한 Fig. 10은 해당 관절의 토크 값으로서, 무게 중심이 위치하는 지지 다리의 관절 토크가 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그 외에 완전히 영이 아닌 초기각 조건에 의하여 로봇 모델이 자유 낙하하는 0초 순간과 전술한 필터링 관련 신호 왜곡에 의하여 9.5초 근처에서 지면 반발력에 의한 토크들이 크게 나타났으나 이들은 사실상 무시 가능하다. 정상 보행 중 요구 토크는 힙의 롤과 피치 축, 무릎 축에서 크게 나타났다.

한편, Fig. 11을 보면, 무게 중심을 옮기는 과정 중에 동력이 최대로 요구됨을 알 수 있으며 상대적으로는 역시 힙의 롤 및 피치 축과 무릎 축 등이 큼을 알 수 있다.

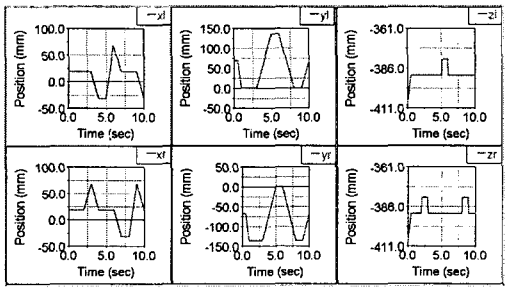

Fig. 6 Planned, relative foot motions (static gait)

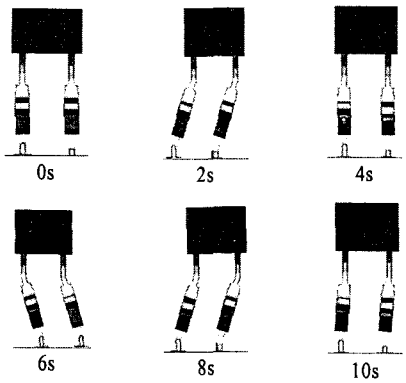

Fig. 7 Snapshots of the robot (static gait)

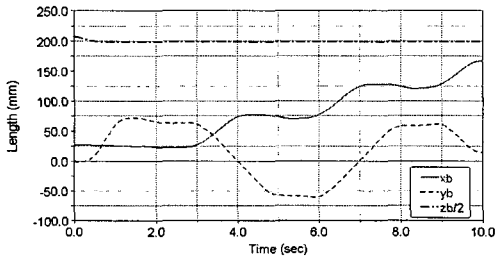

Fig. 8 Torso motions (static gait)

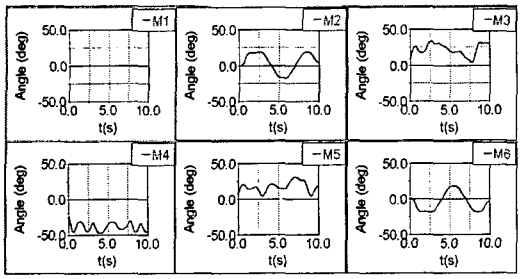

Fig. 9 Joint angles at the right leg (static gait)

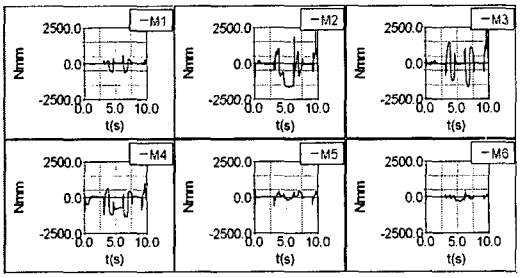

Fig. 10 Joint torques at the right leg (static gait)

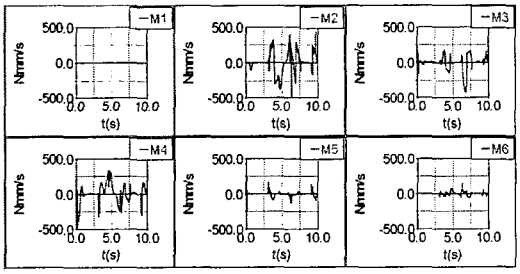

Fig. 11 Joint powers at the right leg (static gait)

5.2 동 보행

보행 입력 데이터로서 z_b=395mm, x_0=0mm, x_s =100mm, $x_{ZMP1} = x_s/8$, $x_{ZMP2} = x_s/4$, y_{ZMP}=68mm, v_{xD}=100mm/s, t^* =0.2s, τ^*=0.3s일 때, 식 (13)에 의하여 구간별 지속 시간 t_1=t_3=0.1464s, t_2=0.1597s, t_4=0.1250s, t_5=0.4526s, 정상상태 보행 주기 T_s=1.152s가 구해지며, 초기 과도기적 비정상 보행을 포함하여 3보 전진 동안의 몸통의 변위, 속도 추이는 Figs. 12, 13과 같다.

또한 식 (17)에 의하여 계산된 초기 과도기의 DSP 및 SSP 동안의 ZMP 위치 좌표는 각각 (-19.3276, -32.4849), (25.9193, 80.3014) [mm]로서 공히 안정 영역 내에 존재함을 알 수 있었다.

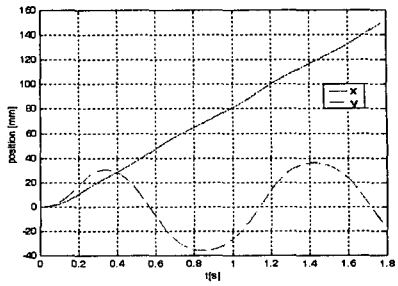

Fig. 12 Body positions

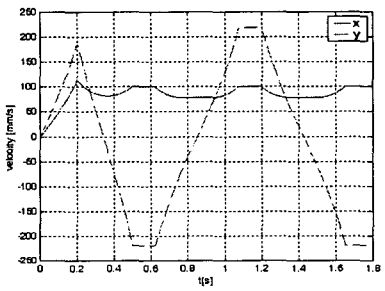

Fig. 13 Body velocities

한편, 이 때 Z축 방향 몸통과 발의 정상 보행 궤적은 속도 차이를 제외하고는 정보행과 같이 Fig. 3의 형상으로 계획되었다.[9]

동력학 시뮬레이션 결과 Figs. 14~18과 같은 결과를 얻었다. Fig. 14는 몸통은 직립하되 측면 상에서 다리가 굽혀진 초기 상태로 인하여 로봇이 자유 낙하하는 구간(t=0.05s)을 거쳐 3보 전진하는 동안의 동영상을 일정 시간 간격으로 포착한 자세들이다. Fig. 15는 그 때의 몸통의 궤적으로서 흔들림이 없는 완벽한 보행을 보인다. 여기서 또한 과도 보행하는 0.5초 순간 이후부터는 T_s/2 시간 간격으로 몸통의 좌우 대칭 운동이 교대로 반복됨을 알 수 있다.

또한 동 보행 중의 우측 관절의 회전각과 구동 토크, 그리고 구동 동력 등을 Figs. 16~18에서 확인 할 수 있다. 무릎 관절각이 약 50°까지 가장 많이 굽혀지며, 토크의 경우 정 보행의 경우와 유사한 경향을 보이나 그 크기에 있어서는 정 보행보다 확실히 작음을 알 수 있다. 한편, Fig. 18에서 보듯이 동력의 경우는 빠른 보행 속도 때문에 작은 요구 토크에도 불구하고, 정 보행의 경우보다 오히려 크게 필요함을 알 수 있다.

5.3 정 및 동 걸음새의 비교

이상의 시뮬레이션 결과를 토대로 정상상태 정 및 동 보행의 차이점을 정리하면 Table 2와 같다. 동보행의 경우 정보행보다 5배 이상 빠르며, 신장 대비 보행 속도로 환산하면 $0.18s^{-1}$로서 기존의 humanoid들과 비견된다. 참고로 KHR-1,[5] Johnnie,[3] Asimo의 경우 해당 값은 각각 $(22cm/s)/(120cm)=0.18s^{-1}$, $(33cm/s)/(180cm)=0.18s^{-1}$, $(44cm/s)/(120cm)=0.36s^{-1}$ 등이다.

한편 정성적 특성으로서 질량 변화가 보행 속도에 미치는 영향을 보면, 동 보행과는 달리 관성력을 보상할 대안이 없는 정 보행의 경우 보행 속도는 질량과 반비례한다. 즉, 질량이 작을수록 보행 속도가 현재보다 제고될 수 있다. 실제로 로봇의 질량을 현재의 1%로 감소시켰을 때, 약간의 흔들림 현상은 있었지만 속도가 2배까지 증가될 수 있었다. 반면에 동 보행의 경우는 질량과 관계없이 일정한 보행속도를 구현할 수 있었다.

또한 질량이 증가되는 경우 정 및 동 보행 모두 토크가 비례하여 증가되어야 하지만, 전자의 경우 보행 속도를 그 만큼 낮추어야 하기에 실제적인 요구 동력의 크기에는 거의 변화가 없다.

이는 로봇이 중·대형화 될 때 토크 조건을 만족시키는 큰 감속기를 설치함으로써 정 보행을 시도할 수는 있지만 보행 속도가 너무 느려 거의 무용할 것임을 시사한다. 따라서 보통 수준의 감속기와 동력 조건을 만족시키는 작동기를 사용함으로써 정 보행보다는 동 보행하는 것이 바람직하다.

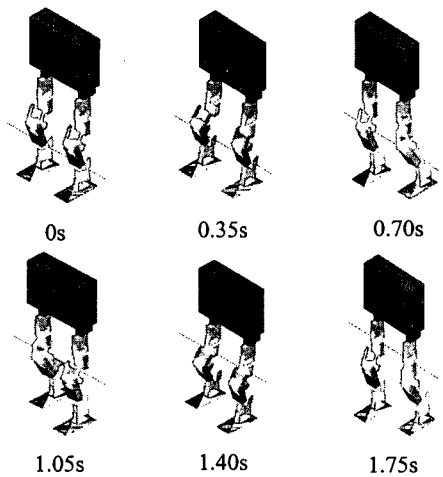

Fig. 14 Snapshots of the robot (dynamic gait)

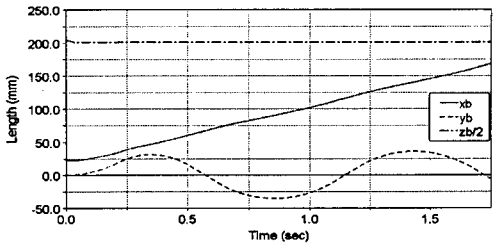

Fig. 15 Torso motions (dynamic gait)

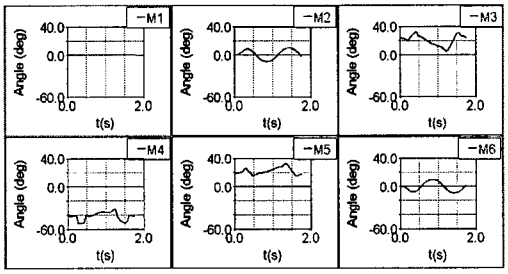

Fig. 16 Joint angles at the right leg (dynamic gait)

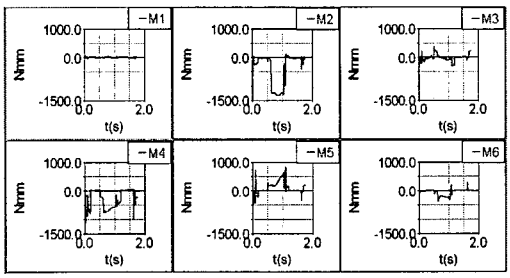

Fig. 17 Joint torques at the right leg (dynamic gait)

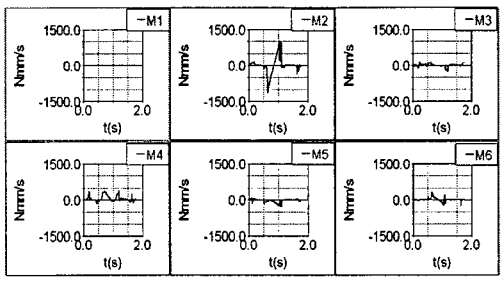

Fig. 18 Joint powers at the right leg (dynamic gait)

Table 2 Comparisons between static & dynamic gaits

		static gait	dynamic gait
average speed [mm/s]		16	86
maximum required torque [Nmm]		Abt. 1660 at M2/M8, M3/M9, or M4/M10	Abt. 1300 at M2/M8
maximum required power [W]		Abt. 0.45 at M2/M8, M3/M9, or M4/M10	Abt. 1 at M2/M8
mass effect on	walking speed	large	negligible
	required torque	linear	linear
	required power	negligible	linear
gear reduction		favorable	less favorable

6. 결 론

본 논문에서는 하나의 전형적인 이족 보행 로봇에 대하여 그의 역기구학 해를 유도하였으며, 공간적으로 동일하게 설계된 발의 궤적에 대하여 정 및 동 보행 패턴을 제안하였다.

제안한 보행 패턴을 동력학 해석을 통하여 검증하였고, 그 결과 성공적 보행을 위한 보행 주기, 작동기 용량 등의 주요 변수와 두 가지 걸음새 각각의 특징을 파악하고 비교할 수 있었다.

일반적으로 정 보행은 큰 토크를 소모하나 질량에 반비례하여 속도가 느려지고, 동 보행은 상대적으로 작은 토크를 필요로 하되 몸통의 질량이 사지에 비하여 충분히 큰 경우 질량에 관계없이 빠른 속도를 제공한다. 따라서 로봇이 중·대형화되는 경우 정 보행 보다는, 보통 수준의 감속기와 충분한 동력의 작동기를 사용하여 동 보행을 실시하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 (R-01-2003-000-10014-0) 지원사업 (3차년도)으로 수행되었으며 이에 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

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

(2) Oh, S.N., Kim, K.I. and Lim, S., 2003, "Motion Control of Biped Robots Using a Single-Chip Drive," *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*

(3) Loffler, K., Gienger, M. and Pfeiffer, F., 2003, "Sensor and Control Design of a Dynamically Stable Biped Robot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*

(4) Kuffner, J.J. Jr., Kagami. S., Nishiwaki, K., Inaba, M. and Inoue, H., 2002, "Dynamically-Stable Motion Planning for Humanoid Robots," *Autonomous Robots*, Vol. 12, pp.105~118.

(5) Kim, J.H., Park, S.W., Park, I.W. and Oh, J.H., 2002, "Development of a Humanoid Biped Walking Robot Platform KHR-1 - Initial Design and Its Performance Evaluation," *The 3rd IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics.*

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

(7) Sugihara, T., Nakamura, Y. and Inoue, H., 2002, "Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation Based on Inverted Pendulum Control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*

(8) Lim, S. and Ko, I., 2005, "Gait Simulations of a Biped Robot: (I) Static Gaits," *KSME Spring Conference.* (in Korean)

(9) Lim, S. and Ko, I., 2005, "Gait Simulations of a Biped Robot: (II) Dynamic Gaits," *KSME Spring Conference.* (in Korean)