

# 인체 보행운동을 모사하는 운동모델 개발에 관한 연구 Development of Model describing human gait Motion

\*김재우<sup>1</sup>, #남윤수<sup>2</sup>, 이우은<sup>3</sup>, 박해균<sup>4</sup>, 이재감<sup>5</sup>

\*J. W. Kim<sup>1</sup>, #Y. S. Nam<sup>2</sup>([nys@mail.kangwon.ac.kr](mailto:nys@mail.kangwon.ac.kr)), W. E. Lee<sup>3</sup>, H. K. Park<sup>4</sup>, J. K. Lee<sup>5</sup>  
<sup>12345</sup> 강원대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Exoskeleton, Human gait motion, Lagrange equation of motion

## 1. 서론

의료서비스 및 과학 기술의 발달에 힘입어 인간의 삶의 질은 많이 향상되어왔다. 그 중에서도 특히, 인간의 평균수명은 예전과 비교해 봤을 때 많이 늘어났으며 앞으로 더욱 늘어날 전망이다. 이로 인하여 한국, 일본을 비롯한 일부 선진국에서는 국민전체비율에서의 노인층, 노년층이 차지하는 비율이 급속하게 늘어나고 있으며 출산율 저하문제와 더불어 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 우리나라의 경우 이미 2000 년도에 65 세 이상 인구 비율이 7%를 넘어서면서 고령화 사회에 진입을 시작했으며 이 같은 추세라면 2019년에는 고령사회(14.4%), 2026년에는 초고령사회(20%)에 진입할 것이라는 예측이 나오고 있다. 따라서 2025년 전후로 하여 실버산업이 사회주요산업 중의 하나로서 크게 성장할 것이라는 예측이 나오고 있다. 이처럼 노인들을 대상으로 하는 경제산업이 점차 활성화 될 전망이고 이와 더불어 이들의 삶의 질 향상을 위한 연구 또한 활발히 진행될 것이다. 이러한 연구들 중의 하나가 바로 외골격형(Exoskeleton) 보행보조기구개발과 관련된 것이다. 외골격형 보행보조기구라는 것은 노인이나 장애우들 같이 보행이 불편한 사람들을 보조해 줄 수 있는 장치를 이용 인체 외부에 부착하여 보행을 보완해주는 기구를 말한다. (참조 Fig. 1) 이러한 보조기구들은 인간과 기구가 결합되어 있는 복잡한 구조로 이루어져있으며 이를 제어할 수 있는 Control know-how가 무엇보다 필요하다. 또한, 이를 위해서는 인체의 보행을 모사할 수 있는 운동모델개발이 필수적이며 본 논문은 이와 관련된 것이다.



Fig. 1 Exoskeleton which can support human gait motion

## 2. 인체보행

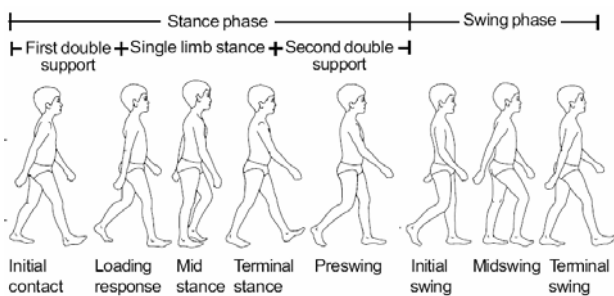


Fig. 2 A cycle of human gait motion (출처 Dynamics of human gait, 1999)

위 그림은 인간의 보행이 어떻게 이루어지는지 보여주

는 그림이다. 인간의 보행은 대칭성으로 인하여 한 주기 동안의 동작에 대한 근사적인 반복으로 이루어져있다. 따라서 본 연구에서는 한 주기 동안의 보행과정을 고려하였으며 그 과정은 크게 두 가지로 나뉘어져 있음을 알 수 있다. 오른발을 기준으로 했을 때 지면과 오른발이 닿아있는 구간을 직립구간(Stance phase)이라 하고 왼쪽 발이 지면에 닿은 후 전진보행을 위해 오른발에 대해서 회전이 발생하는 구간을 회전구간(Swing phase)라고 한다. 각 단계를 세분화하면 그림과 같이 총 8 단계로 나눌 수 있다. 여기서 오른발이 지면에 닿아있는 구간 즉, 직립구간만을 살펴보면 몸의 무게 중심이 지면으로부터 가장 멀리 떨어져있으며 수직방향으로 존재하는 단일 하지 지지(Single support)구간과 이를 전후로 해서 총 두 개의 양 하지 지지(Double support)구간이 존재하는 것을 알 수 있다. 단일 하지 지지구간은 보행과정 중에서 인체가 지면으로부터 가장 큰 반력을 받는 구간이고 양 하지 지지구간은 회전을 하면서 한쪽으로 치우쳐져 있던 몸의 무게 중심이 반대쪽으로 이동하는 구간이다. 그리고 인간의 보행은 이 두 구간에서의 지면으로부터의 support 즉, 구속력을 통해서 이루어질 수 있다.<sup>2</sup>

## 3. Lagrange equation of motion

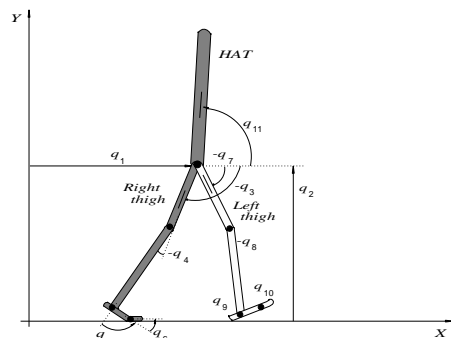


Fig. 3 The model for human gait motion

Table 1 Anthropometric data of a human subject

segment	segment	value	unit
thigh and leg	$m_3(m_7), m_4(m_8)$	5.67, 2.637	kg
	$l_3(l_7), l_4(l_8)$	0.136, 0.176	m
	$l_3(l_7), l_4(l_8)$	0.314, 0.407	m
	$\rho_3(\rho_7), \rho_4(\rho_8)$	0.101, 0.123	kgm <sup>2</sup>
foot except toe and toe	$m_5(m_9), m_6(m_{10})$	0.8, 0.022	kg
	$l_5(l_9), l_6(l_{10})$	0.098, 0.022	m
	$l_5(l_9), l_6(l_{10})$	0.195, 0.055	m
	$\rho_5(\rho_9), \rho_6(\rho_{10})$	0.046, 0.026	kgm <sup>2</sup>
. T. head, arm, trun	$m_{11}$	38.443	kg
	$l_{11}$	0.486	m
	$l_{11}$	0.777	m
	$\rho_{11}$	0.385	kgm <sup>2</sup>

Height=1.653 [m], Body mass=56.7[kg] of the model  
 $\rho$  = radius of gyration about center of mass for each segment  
 (distance of heel from the ankle project point on foot)=0.07[m]

인체보행을 모사하는 운동모델을 개발하기 위해 본 연구에서는 Lagrange equation of motion 을 사용하였고 위의 Fig. 3 과 Table 1 은 각각 대상이 되는 인체 보행모델과 측정을 통해 얻은 각 segment 에 대한 data 를 나타낸다. Fig. 3 에 표시된 것처럼 인체보행과정을 기술하기 위해서 1... 11 로 구성된 coordinate system 을 이용하였다. 또한, 아래의 수식들은 각 segment 에 대한 다음과 같은 정보를 나타낸다.

$m_i, I_i, l_i$  : mass, MOI, and length of the i-th segment  
 $d_i$  : distance of CofM(center of mass) from the proximal end

다음은 그 중에서 오른쪽 다리에 대한 displacement vector 와 velocity vector 를 정의한 예이다.

$$r_{4k} = \begin{pmatrix} l_1 + l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos(\theta_3 + \theta_4) \\ l_2 + l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin(\theta_3 + \theta_4) \end{pmatrix}, \text{ displacement vector}$$

$$\dot{r}_{4k} = \begin{pmatrix} \dot{l}_1 - \dot{l}_3 \sin \theta_3 - \dot{l}_4 (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta_3 + \theta_4) \\ \dot{l}_2 + \dot{l}_3 \cos \theta_3 + \dot{l}_4 (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_3 + \theta_4) \end{pmatrix}, \text{ velocity vector}$$

지배 방정식으로 사용된 Lagrange equation of motion 은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k + \sum_{i=1}^m \lambda_i a_{ki}, \quad k=1,2,\dots, \quad (1)$$

where,  $q_k$  = number of generalized coordinate  
 $m$  = number of constraints  
 여기서 Lagrangian L 은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$L = T - V = \frac{1}{2} \dot{M}(q) \dot{q}^T - V(q), \quad M = (m_1 \dots m_{11})^T$$

또한,  $Q_k$  는 시스템 내부에서 발생된 external force 로부터 유도된 generalized non-conservative force 로서 다음의 관계식을 통해 유도될 수 있다.

$$Q_k = \sum_{i=1}^m \frac{\partial V}{\partial q_k}$$

where,  
 $F_i (i=1,2,\dots,6)$  : external force on the mechanical system  
 $r_i (i=1,2,\dots,6)$  : position vector of the point where Force is acting

#### 4. 구속조건

2 절에서 언급한 것과 같이 인체의 보행은 직립구간 동안 지면으로부터의 지지를 통해서 유지 가능하다. 따라서 지면으로부터의 반력은 보행운동을 분석하는데 있어서 중요한 요소지만 정밀한 측정을 하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 Lagrange multiplier( $\lambda$ )를 이용하여 이러한 반력을 고려하는 대신 holonomic constraints 를 이용하여 보행운동을 분석하였다. 1 구속조건에는 크게 single support 와 double support 가 존재하고 각각 2 개와 4 개의  $\lambda$  가 x 축과 y 축을 따라 존재한다. 다음은 이중 single support 에 대한 것으로서 =1 인 경우 식(1)에서의  $\lambda$  와  $a_k$  의 유도과정 예를 나타낸다.

$$l_{13} \cos \theta_1 + l_{23} \cos \theta_2 + l_{33} \cos \theta_3 + l_{34} \cos(\theta_3 + \theta_4) + l_{35} \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + l_{36} \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) = 0 \rightarrow \lambda_1$$

$$\zeta(\theta_1, \dots, \theta_6) = 0, \quad \dot{\zeta} = 1, 2, \dots, m$$

$$\rightarrow \delta \zeta_1 = \left( \frac{\partial \zeta_1}{\partial \theta_1} \right) \delta \theta_1 + \dots + \left( \frac{\partial \zeta_1}{\partial \theta_6} \right) \delta \theta_6 = 0$$

$$= a_{11} \delta \theta_1 + \dots + a_{16} \delta \theta_6 = 0$$

$$\therefore a_{11} = 1, a_{13} = -l_{33} \sin \theta_3 - l_{34} \sin(\theta_3 + \theta_4) - l_{35} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - l_{36} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$a_{14} = -l_{34} \sin(\theta_3 + \theta_4) - l_{35} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - l_{36} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$a_{15} = -l_{35} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - l_{36} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$a_{16} = -l_{36} \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

#### . Mathematical model for human gait motion

지금까지의 과정을 통해서 인체보행을 모사하기 위해 사용된 식(1)의 Lagrange equation of motion 은 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$M_k(q) \ddot{q}_k + \left\{ \frac{\partial M_k(q)}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \dots + \frac{\partial M_k(q)}{\partial q_{11}} \dot{q}_{11} \right\} \dot{q}_k - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_k} \left( \frac{\partial M_k(q)}{\partial \dot{q}_k} \right) \dot{q}_k^2 + \frac{\partial V}{\partial q_k}$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{\partial V}{\partial q_k} + \sum_{i=1}^m \lambda_i a_{ki}$$

여기서 k 는 k-th equation 을 뜻하며 총 11 개의 비선형 미분 방정식을 사용하여 인체보행 운동모델을 구할 수 있다. 다음은 그 중에서 k=3 에서의 운동 방정식을 나타낸다. [single support]

$$m_{13} \ddot{\theta}_1 + m_{23} \ddot{\theta}_2 + m_{33} \ddot{\theta}_3 + m_{34} \ddot{\theta}_4 + m_{35} \ddot{\theta}_5 + m_{36} \ddot{\theta}_6$$

$$+ \left( \frac{\partial m_{13}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \left( \frac{\partial m_{13}}{\partial \theta_4} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \left( \frac{\partial m_{13}}{\partial \theta_5} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5 + \left( \frac{\partial m_{13}}{\partial \theta_6} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_6 + \left( \frac{\partial m_{23}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3$$

$$+ \left( \frac{\partial m_{23}}{\partial \theta_4} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + \left( \frac{\partial m_{23}}{\partial \theta_5} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 + \left( \frac{\partial m_{23}}{\partial \theta_6} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_6 + \left( \frac{\partial m_{33}}{\partial \theta_4} \right) \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + \left( \frac{\partial m_{33}}{\partial \theta_5} \right) \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_5$$

$$+ \left( \frac{\partial m_{33}}{\partial \theta_6} \right) \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_6 + \left( \frac{\partial m_{34}}{\partial \theta_4} \right) \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_4 + \left( \frac{\partial m_{35}}{\partial \theta_4} + \frac{\partial m_{34}}{\partial \theta_5} \right) \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5$$

$$+ \left( \frac{\partial m_{36}}{\partial \theta_4} + \frac{\partial m_{34}}{\partial \theta_6} \right) \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_6 + \left( \frac{\partial m_{35}}{\partial \theta_5} \right) \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_5 + \left( \frac{\partial m_{36}}{\partial \theta_5} + \frac{\partial m_{35}}{\partial \theta_6} \right) \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_6$$

$$+ \left( \frac{\partial m_{36}}{\partial \theta_6} \right) \dot{\theta}_6 \dot{\theta}_6 - \left( \frac{\partial m_{13}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - \left( \frac{\partial m_{14}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 - \left( \frac{\partial m_{15}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5$$

$$- \left( \frac{\partial m_{16}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_6 - \left( \frac{\partial m_{23}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - \left( \frac{\partial m_{24}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 - \left( \frac{\partial m_{25}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 - \left( \frac{\partial m_{26}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_6$$

$$+ (m_{33} + m_{43} + m_{53} + m_{63}) g \cos \theta_3 + (m_{44} + m_{54} + m_{64}) g \cos(\theta_3 + \theta_4)$$

$$+ (m_{55} + m_{65}) g \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + m_{66} g \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$= T_3 + \lambda_1 a_{13} + \lambda_2 a_{23}$$

#### 후기

본 연구는 BK21 의료산업 첨단화를 위한 스마트 메카트로닉스 시스템 전문인력 양성 사업팀 지원 연구비로 수행되었으며 이에 관련된 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Yoonsu Nam, Woeeun Lee, Jaewoo Kim, Taejoon Yoon, Minoru Sasaki, "Gait motion dynamics analysis", ICMIT, 2007
2. David A. Winter, "Biomechanics and Human Motion", John Wiley & Sons, Inc. 2005
3. Christopher L. Vaughan, Brian L. Davis and Jeremy C. O'Connor, "Gait Analysis: Normal and Pathological", Kiboho Publishers, 1999