

# 계단 보행시 에너지 효율을 고려한 외골격 로봇의 보행패턴 생성방법 Energy-efficient Gait Pattern Generation for the Exoskeleton Robot on Stairway

\*김완수<sup>1</sup>, #한창수<sup>2</sup>, 이승훈<sup>1</sup>, 이희돈<sup>1</sup>, 유승남<sup>3</sup>, 한정수<sup>4</sup>

\*W. S. Kim<sup>1</sup>, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)<sup>2</sup>, S. H. Lee<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>1</sup>, S. N. Yu<sup>3</sup>, J. S. Han<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup> 한양대학교 기계공학과, <sup>3</sup> 한양대학교 기계공학과, <sup>4</sup> 한성대학교 기계시스템공학과

Key words : Exoskeleton robot, Energy-efficient, Gait pattern, DME(Dynamic Manipulability Ellipsoid), Stairway

## 1. 서론

노인, 장애인 즉, 신체적 약자에 대한 관심이 증대하면서 이들의 삶의 질을 향상시키기 위한 다양한 제품들이 생산되고 있다. 특히 보행이 어려운 신체적 약자의 이동성 향상을 위한 시스템에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으며 대표적인 예로 바퀴를 이용한 전동휠체어가 있으며 또 다른 연구로는 족형 시스템을 이용하여 다양한 지형에서도 이동이 가능한 시스템에 대한 연구 또한 이루어지고 있으며 앞서 나온 시스템 이외에 최근 가장 부각되고 있는 연구로는 신체적 약자가 외골격 로봇을 입고 로봇이 신체의 근력을 지원하며 보행하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

착용형 외골격 로봇은 현재 다양한 환경에서 인간의 근력을 지원하여 이동성을 증가시키거나 작업능률의 향상을 위하여 90년대부터 다양한 연구가 진행되어왔다. 특히 재활, 복지와 관련된 분야에 대한 연구는 보행이 불가능하거나 불편한 신체적 약자가 직접 보행 할 수 감성적인 이점으로 인하여 최근 관련 연구 및 시장이 상승하고 있으며, 또한 착용형 외골격 로봇의 적용은 인간의 두뇌, 판단능력은 그대로 차용하며 인간의 다리와 같은 우수한 접근성을 상당부분 활용하여 다양한 지형에 대한 극복능력을 향상시키거나 보조하기 위한 방향으로 활용할 수 있으며 군사적, 산업용 뿐 아니라 신체적 약자에 대한 적용을 통하여 보행의 보행 보조를 위한 측면에서 타당한 접근이라고 할 수 있다[1].

신체적 약자의 보행을 보조 하기 위해 개발된 착용형 외골격 로봇은 다양한 형태로 개발되고 있으며 일본에서 가장 활발히 연구가 진행되고 있다. 대표적인 예로 일본 츠쿠바대학에서 개발한 'Hybrid Assistive Robot(HAL)'의 경우 harmonic drive 를 사용한 모터 유닛을 허리, 무릎, 발목에 적용하였으며, 착용자의 근전도 신호에서 추출한 동작 의도신호 및 가속도 센서를 통한 동작의도신호를 분석하여 로봇을 구동한다[2]. 또한 Honda 에서 개발한 'Walking Assist Robot'은 고관절 부위에 모터 유닛을 사용하여 착용자가 평지, 계단 보행 시 움직임에 대한 의도 신호를 센서로 측정하여 정상 보행 패턴의 다양한 조합을 통하여 고관절 1자유도에 대한 움직임을 생성하여 보행 보조동작을 구현한다[3]. 국내의 경우 서강대학교에서 개발한 'SUBAR'가 있다. 이 시스템은 모바일 플랫폼과 결합하여 신체적 약자의 보행을 돕거나 재활훈련을 돕는 시스템으로 발바닥의 센서를 통하여 보행의 단계를 판별하여 동작을 구현한다[4]. 이와 같이 다양한 보행보조를 위한 착용형 외골격 로봇이 개발되고 있다. 하지만 계단보행과 같은 많은 에너지가 필요한 보행환경에서 로봇을 구동하기 위해서 에너지 소비를 고려하여 구동시간을 증가시키기 위한 에너지 효율적인 측면을 고려하지 않을 수 없지만 앞서 연구사례에서는 보행 보조만을 위한 연구가 진행되고 있다. 족형 로봇과 같은 경우 외부 환경구동을 위해 동역학적 접근을 통한 에너지 효율을 고려하는 방법에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 계단보행 시 로봇의 동역학적 접근방법인 Dynamic Manipulability Ellipsoid(DME)를 이용하여 에너지 효율을 고려한 착용형 외골격 로봇의 지면접촉

순간의 보행패턴 생성 알고리즘을 제안하고 인간의 계단보행분석을 통해 생성한 패턴과 에너지 효율을 고려한 알고리즘을 적용한 시뮬레이션을 통해 생성된 보행패턴을 결합하여 생성된 통합 보행패턴을 적용하여 계단보행 실험을 진행한다. 또한 센서를 통해 측정된 에너지 소비에 대한 분석 및 제안한 알고리즘에 대한 효용성을 증명할 것이다.

## 2. 계단 보행 분석

인간의 보행은 한 주기를 기준으로 stance phase, swing phase 로 구분할 수 있으며 swing phase 는 중력의 반대방향으로 움직이기 위한 동작이고, stance phase 는 발바닥이 지면에 접촉하여 무게를 지탱하는 순간부터 떨어지는 순간까지를 나타낸다. 평지, 계단보행은 stance phase 와 swing phase 의 반복적 동작으로 구현된다. 이 중 본 연구에서는 계단 보행 시 지면에 접촉하여 에너지 소비율이 가장 높은 stance 구간에 대한 패턴알고리즘에 대하여 고려할 것이다. 계단 오르기의 Stance phase 는 발바닥의 접촉지점의 변화를 통하여 WA(Weigh Acceptance), PU(Pull Up), FCN(Forward Contribuance)의 순서로 구분 지을 수 있으며, 계단 내려오기는 WA, FCN, CL(Controlled Lowering)으로 나눌 수 있다 (Fig.1). 이러한 구분 중 계단 오르기 구간의 WA, FCN 은 heel strike→toe off 의 순서로 진행되며, 계단 내려오기 구간의 WA, CL 은 toe-strike→toe-off 의 순서로 진행된다[6]. 본 연구에서는 앞서 정의 한 구간 중 몸체지지 구간(strike)→몸체 추진(off)의 순간 DME 분석 및 지면 디딤각의 정의를 통하여 에너지 효율을 고려한 stance phase 의 보행패턴 생성 알고리즘을 제안한다.

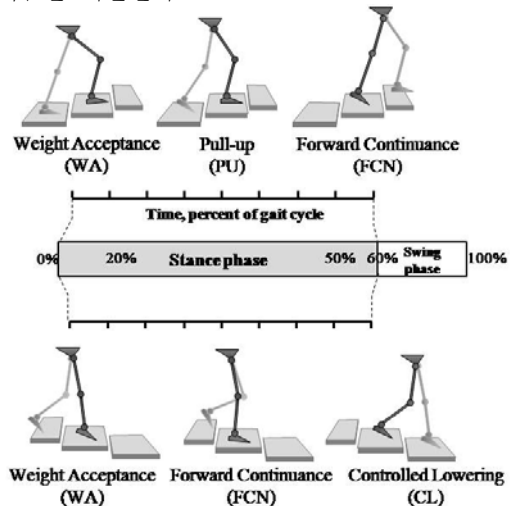


Fig. 1 Human gait cycle analysis based on leg function distribution in cases of stair way ambulation.

## 3. DME 를 이용한 디딤각 생성

착용형 외골격로봇이 에너지 효율을 고려하며 보행 하기 위해서는 디딤각의 역할이 중요하며 본 절에서는 일반적인 관성타원체와 속도 변화 방향을 이용하는 DME 이론을 사용하여 운동학적 에너지를 최소화하는 디딤각을 찾아내는 방법에 관하여 설명하고 해석하는 방법에 대하여 설

명한다. 한데, 보행 시 각 발의 디딤각에 따라 보행에 확연한 차이를 나타낸다. 따라서 보행 시 각 발의 디딤각을 고려하는 방법을 제시한다.

Manipulability Ellipsoid 는 각 관절에 대한 최대 각속도와 말단부의 공간 내 속도와 관계를 정량적으로 나타내는 지표이지만 링크계의 자세, 속도만을 고려하기 때문에 빠르게 운동하는 링크의 경우 동역학적인 요소를 고려해야 한다. 따라서 본 절에서는 manipulability ellipsoid 에 동역학적 요소를 고려한 DME 를 적용하여 본 연구의 검증에 위해 개발된 3 자유도의 외골격 링크에 대한 정량적인 해석을 수행한다. 시스템에 대한 상태 방정식은 (1)과 같이 표현된다

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) \quad (1)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \vdots \\ \theta_n(t) \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \vdots \\ \tau_n(t) \end{bmatrix}$$

말단부의 속도 방정식은 (4)와 같이 표현되며

$$v = J(\Theta)\dot{\Theta} \quad (2)$$

일반화된 관절 각속도와 토크는 관절 속도의 편미분을 통하여 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$\dot{v} = \hat{J}\hat{M}^{-1}(\Theta)\hat{\tau} \quad (3)$$

$$\hat{\tau} = \hat{M}(\Theta)\hat{J}^{-1}\dot{v} \quad (4)$$

위의 과정을 통하여 DME 는 (5)와 같이 표현된다.

$$\hat{\tau}^T \hat{\tau} = 1 \quad (5)$$

말단부의 속도 변화 방향에 따른 에너지 소비율은 말단부의 속도의 방향이 DME 의 단축을 따라 에너지의 손실이 최대가 되며, 속도 변화의 방향이 DME 의 장축을 따라 있으면 에너지 손실은 최소가 되는 이론을 이용하며, 본 연구에서는 에너지 손실을 최소화 하기 위하여 3 자유도 시스템의 동역학 파라미터 및 보행분석을 통한 제한조건을 산정하고 MATLAB 을 통하여 DME 를 작성한다. 작성된 3 자유도 DME 의 장축 방향과 속도 변화 방향이 일치하는 디딤각을 산출하여 보행에 적용한다[7]. 디딤각은 앞 절에서 정의한 stance 구간 중 계단 오르기 상황의 heel-strike 와 toe-off, 계단 내려오기 상황의 toe-strike, toe-off 상황에 대한 순간의 DME 를 분석하여 디딤각을 산출하고 stance 구간에 대한 보행 패턴을 생성한다.

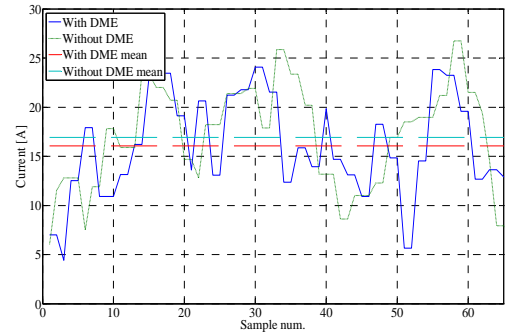
#### 4. 보행패턴 적용 실험 및 결과

앞 절에서 산출된 최적 디딤각을 이용한 에너지 효율이 고려된 보행패턴을 적용한 구동실험을 진행하였다. 본 실험을 위해 개발된 외골격 로봇은 총 6 자유도로 BLDC 모터를 사용하며 본 실험의 검증을 위하여 모터드라이버 센서를 이용하여 구동 시 전류 값을 측정, 전류 값의 변화량을 분석하여 본 연구에서 제안한 최적보행 패턴과 일반적인 패턴보행에 대한 계단보행의 에너지 소비량을 측정한다.

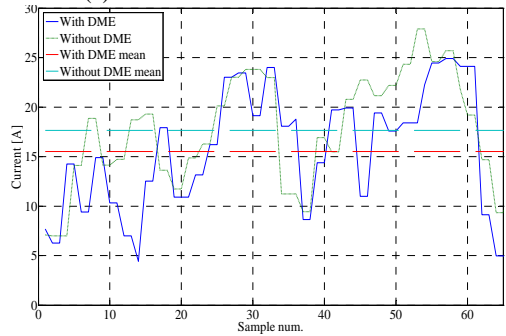
Fig. 2 는 보행실험을 통하여 측정된 전류를 나타낸다. 첫째 그래프는 계단 오르기 보행 시 측정된 전류이며 그림에 나타난 것과 같이 전체 전류의 평균 값이 약 5% 감소됨을 확인할 수 있다. 또한 계단 내려가기 보행 시 역시 평균 전류 값이 10% 감소됨을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결론

본 실험의 결과를 통하여 DME 를 적용한 보행패턴의 경우 전체 전류 값이 감소하는 경향을 보였다. 전류 값의 감소는 전체 에너지 소비량과 관련이 있으며 이를 통하여



(a) Current of stair ascent condition



(b) Current of stair descent condition

Fig. 2 Energy consumption of the exoskeleton

DME 알고리즘을 적용하여 생성된 보행 패턴의 경우 전체 에너지 소비율의 감소를 통하여 같은 용량의 에너지를 사용하는 경우 좀 더 오랜 시간 동안 로봇의 구동이 가능하다는 것을 알 수 있다. 향후 본 이론에 대한 실시간 연산과 말단부 속도변화 방향 측정을 통하여 에너지 효율을 고려한 실시간 구동이 가능한 착용형 외골격 로봇에 대한 연구를 진행할 것이다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부 민군겸용기술개발사업 "다족형 견마로봇 플랫폼 기술 개발", 한국산업기술진흥원 융복합형 로봇전문인력 양성사업 과제로 지원되었습니다. 이 논문은 국방과학기술연구소 민군겸용기술센터에서 허가된 내용입니다.

#### 참고문헌

1. W. S. Kim, S. H. Lee, H. D. Lee, S. N. Yu, J. S. Han and C. S. Han, "Development of the heavy load transferring task oriented exoskeleton adapted by lower extremity using quasi-active joints", ICROS-SICE Int. Conf.2009, pp.1353-1358.
2. Kawamoto, H. & Sankai, Y., "Power assist system HAL 3 for gait disorder person", Computers Helping People with Special Needs 8th International Conference, ICCHP 2002. Proceedings (Lecture Notes in Computer Science Vol. 2398) 196-203.
3. <http://corporate.honda.com/innovation/walk-assist/>
4. K. Kong and D. Jeon, "Design and Control of an Exoskeleton for the Elderly and Patients," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 11, no. 4, pp. 428-432, 2006.
5. Pasquale C., Mariano C., "The Dynamic Manipulability Ellipsoid for Redundant Manipulators", ICRA1998, Belgium May, pp.95-100, 1998.
6. Eng, J., Winter, D., "Kinematic Analysis of the Lower Limbs during Walking: What Information can be Gained from a Three-dimensional Model", *Journal of Biomechanics*, Vol. 28(6), pp. 753-758, 1995.
7. James P., "The Mechanics of and the Robotic Design for Quadrupedal Galloping", the Ohio State University, 2001.