

보행시 나타나는 카오스 특성 분석 Chaos Characteristics Analysis during Walking

*예성민¹, *손권², 박정홍³
*S. M. Ye¹, *K. Son(kson@pusan.ac.kr)², J. H. Park³
^{1,2,3} 부산대학교 기계공학부

Key words : Chaos, Lyapunov exponent, Surrogate method, Time series analysis

1. 서론

보행은 고관절이나 무릎뿐만 아니라 상체의 기울임과 팔의 움직임, 발목관절과 발가락까지 모든 신체의 부위가 하나의 유기적인 움직임으로 이루어지는 운동이다. 안정화된 보행을 위해서 다른 관절과 균형을 맞추어야 한다. 보행의 형태는 체형과 같은 신체적 특성, 성격과 같은 심리적 특성이나 생활 습관이나 의식 구조와 같은 문화적 특성에 의해 결정된다. 따라서 개개인의 보행동작은 다르게 나타난다.

지금까지 보행에 관해서는 다양한 연구들이 계속되어 왔다.¹⁻² 보행주기와 관련된 기본적인 기술연구에서 시작하여, 복잡하고 다양한 측정도구를 사용하거나, 다양한 수학적 모델링 기법을 사용한 연구까지 독특한 영역을 구축하여 꾸준히 발전해 왔다. 환자에서 나타나는 병적 보행에 있어서 이상부위를 나타내어 객관화 및 수치화하여 비교, 평가하는 것은 필수적이다. 뿐만 아니라 정상적인 보행분석 데이터를 수집하고 정상인의 보행 패턴을 분석하는 것이 필요하다. 최근 카오스 이론을 적용한 보행 분석 방법이 사용되고 있다.

푸앙카레의 의해 처음 발견된 카오스 이론은 결정론적 비선형 동역학 시스템을 다루는 학문이다. Stergiou 등³은 보행시 무릎 굴곡각을 시계열(time series)로 하여 전방십자인대가 손상된 무릎의 상태를 리아프노프 지수를 구하여 무릎의 안정성을 평가하였다. Buzzi 등⁴은 나이에 따른 무릎의 안정성을 카오스 이론을 이용하여 평가하였다. 이러한 비선형 동역학 이론에 관한 많은 연구가 있었고 보행시 굴곡각을 이용한 시계열에 대한 새로운 연구 방법이 국외에서 활발히 연구되고 있다.

그러나 이전의 대부분의 연구는 하지, 특별히 무릎관절의 카오스분석에 집중되어 있었다. 무릎의 카오스분석은 보행의 연구에 있어서 중요한 역할을 하지만 보행에 영향을 주는 모든 변수를 다 반영하지 못한 한계가 있다. 본 연구에서는 보행시 상지의 주요 관절을 운동 분석 실험을 통해 각 관절의 굴곡각 시계열을 얻어 대리법(surrogate method)을 통해 카오스성을 판별하였다. 끌개(attractor), 리아프노프 지수, 그리고 상관차원을 구하여 이를 바탕으로 비선형적인 운동 특성을 확인하고 정량적으로 규명하였다.



Fig. 1 Gait experiment

2. 보행 실험

실험은 정상인 남성 5 명(나이 23.7±2.2 세, 키 176.8±5.7 cm, 몸무게 71.6±4.2 kg)에게 각자 편하게 느끼는 보행 속도로 걷도록 하였다(4.15±0.4 km/h). 사람이 느끼는 가장 안정한 보행속도는 사람마다 다르며 이는 안정성에 영향을 미치지 않는다.³ 보행시 상지 관절의 굴곡각을 얻기 위해 3 차원 운동 측정 장치를 사용하였다. 실험장치는 영상 획득 장치(DCR-VX2100) 8 대, 3 차원 공간자, 트레드밀, kwon3D 동작분석 프로그램으로 구성하였다.

운동을 기록하기 위해 Fig. 1 과 같이 인체의 특징점에 24 개의 반사마커를 피부표면에 부착하였다. 시계열 데이터의 측정간격은 60Hz 이고 8 대의 영상장치를 이용하여 100 초동안 획득하였다. 사전에 기록해 놓은 3 차원 공간자를 기준으로 Kwon3D 소프트웨어를 사용하여 직접 선형 변환 기법으로 표식의 3 차원 좌표 데이터를 획득하고 관절의 굴곡각을 얻어냈다

3. 카오스 분석

본 연구에서는 보행시 신체의 전후를 지나는 수직면인 시상면(sagittal plane)에서 어깨, 팔꿈치 관절의 굴곡각을 이용하여 시계열을 구성하였다. 중요한 정보를 잃어버리지 않도록 얻어진 고유의 데이터를 시계열로 이용하였다. 비선형 해석법을 위한 각 관절 5000 개 이상의 시계열의 수로 구성하였다.

위상 공간은 시스템의 모든 정보를 나타내는 특징을 가지고 있다. 이는 특정 시점에서의 시스템의 상태가 위상 공간의 한 점으로 모두 표현되기 때문이다. 따라서 시간이 흐름에 따라 시스템의 상태는 위상공간에서 점들의 연결인 궤적의 형태로 표현된다. 위상공간은 한계적 기하학적 구조를 상태 공간에 나타낸 것을 의미하며 끌개라고 부르기도 한다. 구성된 끌개는 한정된 위상 공간에서 겹쳐지지 않는 궤적을 무한한 상태를 그려 시스템의 카오스성을 알 수 있다.

끌개의 특성을 결정짓는데 지연시간은 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 최적의 지연시간을 결정하기 위하여 AMI(Average Mutual Information) 방법을 이용하였다. AMI 를 구하는 방법은 지연시간을 반복적 순차적으로 넣어 시계열 데이터를 만든 후 첫 번째 최소가 되는 점을 지연시간으로 결정한다.

임베딩 차원은 위상궤적을 도시할 공간을 구성하는 축의 개수를 의미한다. 제대로 알려지지 않은 시스템에서 시계열을 위상공간에 왜곡시키지 않고 반영하기 위한 임베딩 차원 공간에 설정은 중요하다. 본 연구에서는 FNN(False Nearest Neighbor) 알고리즘을 이용하여 최소 임베딩 차원을 선정하였다. 시계열 벡터의 차원을 계속 증가시키면서 FNN 의 비율이 최초로 0 이 되는 점이 최소 임베딩 차원이다. 실험자에 대한 각 관절의 최소 임베딩 차원이 다르게 나타났고, 각 관절에 대해 계산된 최소 임베딩 차원의 평균값은 Table 1 과 같다.

리아프노프지수(Lyapunov exponent)는 위상 궤적 위에서 서로 가까이 있는 두 점(상태)이 시간이 지남에 따라 얼마나 많이 서로 멀어지는가를 정량화한 변수이다. 비선형 시

스텝인 경우, 비록 처음에 비슷한 상태로 출발하여도 시간이 지나면 완전히 다른 상태로 변할 수 있다. 서로 다른 상태로 변해가는 정도가 시간의 흐름에 따라 지수 함수적으로 증가하며 이때의 지수값을 추정함으로써 발산정도를 정량화할 수 있다. 이 수치가 음수이면 위상공간의 점은 한 점으로 수렴하는 계가 되며, 양수인 경우에는 인접한 점들이 서로 분리되어가는 계가 되고 카오스 계가 여기에 속한다. 본 연구에서는 데이터의 리아프노프지수를 Chaos Data Analyzer를 이용해 계산했다.⁵

대리법(surrogate method)은 시계열을 푸리에 변환시킨 후 위상을 랜덤하게 변화시키고 역 푸리에 변환을 수행한다. 이 과정은 파워스펙트럼과 상관 함수를 보존하지만 다른 확률분포를 생성한다.

4. 결과 및 고찰

피실험자에 대한 최소 임베딩 차원의 평균값은 5를 넘지 않는다. 이에 근거하여 본 연구에서는 모든 관절에 대해 최소 임베딩 차원을 5로 설정하였다.

Fig. 2는 정상인의 보행에서 추출한 어깨와 팔꿈치관절에 대한 끌개를 나타낸다. 끌개 사이의 간격이 일정한 규칙을 가지고 있으며, 이는 보행이 안정되어 있다는 것을 보여준다. 끌개의 형상만으로는 보행의 안정성을 정량적으로 나타내는 데는 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 리아프노프 지수를 구하여 정량적으로 분석하였다.

Table 2는 각 관절의 원 데이터와 대리법을 적용한 후의 데이터의 리아프노프 지수를 보여준다. 두 데이터간의 통계학적인 차이가 있어 어깨관절은 좌우 모두 99.9% 신뢰수준으로, 팔꿈치관절은 좌우 각각 99%, 95% 신뢰수준으로 있다는 것을 나타낸다. 이 결과는 원래의 시계열에서의 섭동이 랜덤 노이즈가 아닌 결정론적인 구조를 가지고 있음을 보여준다. 또한 팔꿈치의 리아프노프 지수(좌우 평균 0.104)가 어깨의 리아프노프 지수(좌우 평균 0.088)보다 큰 것으로 나타났다. 이는 팔꿈치는 보행시 균형을 잡기 위해 어깨보다 더 다양한 움직임을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

상지의 리아프노프 지수는 Stergiou의 연구³와 비교했을 때 팔꿈치는 하지의 값(무릎 0.108)보다 작은 것으로 나타나고 어깨는 비슷한 것으로 나타나는데, 이는 보행시 상지의 운동이 하지의 운동보다 더욱 규칙성을 띄고 안정적인 움직임을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 보행시 젊은 남성에게 대한 상지의 주요 관절의 운동 자료를 비선형 분석법을 통해 정량적으로 나타낼 수 있는지에 대한 판별을 하였다. 또한 각 관절에 대한 리아프노프 지수를 얻어서 카오스성을 확인하였다. 보행 분석을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1)대리법을 통해 상지의 각 관절들의 굴곡각의 시계열 데이터가 랜덤함수가 아님을 알 수 있었다.
- (2)어깨의 리아프노프 지수의 평균값이 팔꿈치보다 낮게 나옴을 알 수 있었다. 이는 보행 패턴 신호가 불규칙할수록 리아프노프 지수가 증가한다는 것을 보여준다.
- (3)양쪽 팔꿈치의 리아프노프 지수의 표준편차가 어깨보다 더 큰 것으로 나타났다. 표준편차가 크다는 것은 각 피실험자 마다 보행시 움직임이 불규칙하다는 것을 의미한다. 표준편차가 낮은 어깨의 운동을 기초로 정상보행에 대한 기준값으로 제시하는 것이 이상 보행 판별에 더 바람직할 것으로 판단된다.

Table 1 Embedding dimensions

Original data	Shoulder		Elbow	
	L	R	L	R
Mean	3.6	4.1	4.4	4.5

Table 2 Mean values of Lyapunov exponents

Original data	Shoulder		Elbow	
	L	R	L	R
Mean	0.090	0.086	0.102	0.106
(SD)	(0.026)	(0.015)	(0.010)	(0.012)

Surrogate data	Shoulder		Elbow	
	L	R	L	R
Mean	0.178	0.182	0.187	0.161
(SD)	(0.028)	(0.038)	(0.043)	(0.048)

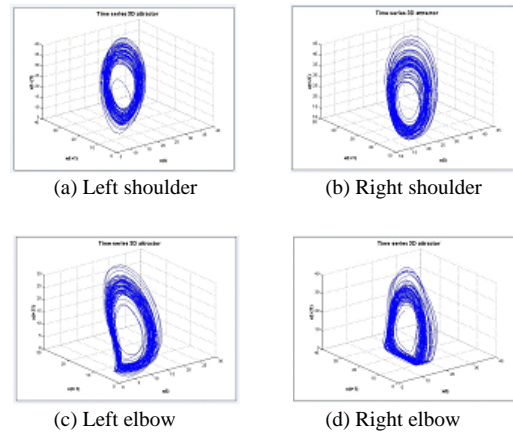


Fig. 2 Comparison of attractors

후기

본 연구는 한국학술진흥재단 2006년 기초연구지원(기초과학 I)사업(과제번호 00007)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Craik, R. L. and Oatis, C. A., Gait analysis theory and application, Mosby-Year Book Inc. 12-38, 1995.
2. Moon, B. Y., Son, K., Park, J. H. and Suh, J. T., "A method to describe and analyze human knee joint motion," J. of KSPE, Vol. 20, No. 10, 233-239, 2003.
3. Stergiou, N., Moraiti, C., Giakas, G., Ristanis, S. and Georgoulis, A. D., "The effect of the walking speed on the stability of the anterior cruciate ligament deficient knee," Clin. Biomech, Vol. 19, No. 9, 957-963, 2004.
4. Buzzi, U. H., Stergiou, N., Kurz, M. J., Hageman, P. A. and Heidel, J., "Nonlinear dynamics indicates aging affects variability during gait," Clin. Biomech, Vol. 18, No. 5, 435-443, 2003.
5. Sprott, J. C. and Rowlands, G.R., Chaos data analyzer, Physics Academic Software, 1995.