보행에서 남성과 여성에 대한 주요 관절 운동의 통계학적 분석

김민경* · 박정홍* · 손권† · 서국웅**

Statistical Analysis of Major Joint Motions During Level Walking for Men and Women

Min Kyoung Kim, Jung Hong Park, Kwon Son, Kuk Woong Seo

Key Words: Statistical Analysis(통계학적 분석), Chaos Analysis(카오스 해석), Maximal Lyapunov Exponent(최대 리아프노프 지수), Joint Motion(관절 운동)

Abstract

Statistical differences between men and women are investigated for a total of eleven joint motions during level walking. Human locomotion which exhibits nonlinear dynamical behaviors is quantified by the chaos analysis. Time series of joint motions was obtained from gait experiments with ten young males and ten young females. Body motions were captured using eight video cameras, and the corresponding angular displacements of the neck and the upper body and lower extremity were computed by motion analysis software. The maximal Lyapunov exponents for eleven joints were calculated from attractors constructed and then were analyzed statistically by one-way ANOVA test to find any difference between the genders. This study shows that sexual differences in joint motions were statistically significant at the shoulder, knee and hip joints.

1. 서 론

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.

보행은 인간의 신경계와 근골격계 등이 총괄적으로 사용되는 복잡한 과정이다. 한쪽 하지가 입각기(stance phase)의 안정된 상태를 유지하는 동안에 다른쪽 하지는 연속적이고 반복적인 동작으로 몸을 앞으로 움직이게 한다. 즉 일정한 방향으로 필요한 속도를 유지하면서 신체를 단계적으로 움직이는 고도로 협응된(coordinative) 교대 운동이다. 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.[1-4] 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 보

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학과
E-mail : kson@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3066 FAX : (051)512-9835
* 부산대학교 기계기술연구소
** 부산대학교 체육교육과

행 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 등[5]은 보행시 무릎 굴곡각을 시계열(time series)로 하여 전방십자인대가 손상된 무릎의 상태를 리아프노프 지수를 구하여 무릎의 안정성을 평가하였다. Buzzi 등[6] 은 나이에 따른 무릎의 안정성을 카오스 이론을 이용하여 평가하였다. Dingwell 등[7-8] 은 말초신경장애환자의 보행특성과 트레드밀과 지면 보행의 차이점을 비선형 시계열 방법으로 분석하였다. 이러한 비선형 동역학 이론에 관한 많은 연구가 있었고 보행시 굴곡각을 이용한 시계열에 대한 새로운 연구 방법이 국외에서 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 보행시 전신의 주요 관절을 운동 분석 실험을 통해 각 관절의 굴곡각 시계열을 얻어 끌개(attractor), 리아프노프 지수, 그리고 상관차원을 구하여 이를 바탕으로 비선형적인 운동 특성을 확인하고 정량적으로 규명하였다.

2. 실험 대상 및 방법

2.1 실험 대상

실험은 정상인 남성 10명(나이 24±4.4 세, 키 175.3±5.5 cm, 몸무게 73.7±12.3 kg), 여성 10명(나이 23.4±4 세, 키 159.1±5.0 cm, 몸무게 52.3±5.7 kg)을 대상으로 하였다. 정상인은 과거에 수술을 받은 이력이 없고 관절의 변형이나 질환이 없는 사람을 대상으로 하였다.

Fig. 1 Maker positions of the body.

2.2 실험 장치 및 방법

보행 실험은 정상인에 대하여 평소대로 자연스럽게 걷도록 했다. 사람이 느끼는 가장 안정한 보행속도는 사람마다 다르며 기존의 연구에 의해 보행 속도는 안정성에 영향을 미치는 것으로 증명되어 속도는 각각의 실험자가 안정하다고 느끼는 속도에서 수행하였다.[5] 보행시 모든 신체의 주요 관절 굴곡각 자료를 얻기 위하여 3 차원 운동 측정 장치를 사용하였다. 실험 장치는 영상획득장치(DCR-VX2100) 8대, 3 차원 공간자, 트레이드밀, Kwon3D 동작분석 프로그램으로 구성하였다.

상하지의 운동을 기록하기 의해 Fig.1과 같이 인체의 특징점에 24개의 반사마커를 피부 표면에 부착하였다. 보행 실험시 데이터 측정 간격은 초당 60 프레임으로 설정하여 8대의 영상 장치를 이용하여 100초 동안 획득하였다. 사전에 기록해 놓은 3차원 공간자를 기준으로 Kwon3D 소프트웨어를 사용하여 직접 선형 변환(direct linear transformation)기법으로 표식의 3차원 좌표 데이터를 획득하고 인체의 굴곡 각을 얻어냈다. 이는 비선형 분석에 시계열 자료가 된다.

3. 카오스 분석

3.1 시계열 구성

본 연구에서는 보행시 신체의 전후를 지나는 수직면인 시상면(sagittal plane)에서 Fig. 2와 같이 목, 어깨, 팔꿈치 관절, 고관절, 무릎관절, 발목관절의 굴곡각을 이용하여 시계열을 구성하였다. 중요한 정보를 잃어버리지 않도록 얻어진 고유의 데이터를 시계열로 이용하였다. 비선형 해석법을 위한 각 관절 5000개 이상의 시계열의 수로 구성하였다.

3차원 운동측정 장치로부터 얻어진 시계열 데이터를 이용하여 지연시간 임베딩 차원을 계산하여 비선형 끌개를 구성하고 리아프노프 지수와 상관차원을 계산하였다. 카오스 분석을 통해 정상인의 보행시 각 관절의 운동의 안정성을 평가하여 보행 형태를 분석하였다.

3.2 지연시간의 설정

임베딩 차원을 계산하여 끌개의 특성을 결정짓는데 지연시간은 중요한 역할을 한다. 본 연구에

서는 최적의 지연시간을 결정하기 위하여 AMI(Average Mutual Information) 방법을 이용하였다. AMI를 구하는 방법은 지연시간을 반복적 순차적으로 넣어 시계열 데이터를 만든 후 첫 번째 최소가 되는 점을 지연시간으로 결정한다.

3.3 임베딩 차원의 설정

임베딩 차원은 위상궤적으로 그릴 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 FNN의 비율이 최초로 0이 되는 점이 최소 임베딩 차원이다. 실험자에 대한 각 관절의 최소 임베딩 차원이 다르게 나타났고, 각 관절에 대해 계산된 최소 임베딩 차원의 평균값은 Table 1과 같다.

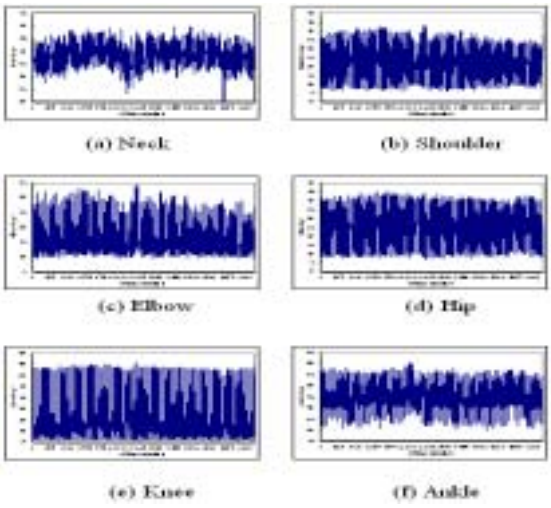

Fig. 2 Time series of joint angles.

Table 1 Embeddng dimensions.

Mean											
Subject	Upper extremity					Lower extremity					
	Neck	Shoulder		Elbow		Hip		Knee		Ankle	
		L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
Men	8.3	3.2	3.9	5.5	4.8	3.8	4.2	6.0	5.4	8.9	9.0
Women	8.5	3.6	5.5	5.9	5.6	4.4	5.0	5.0	5.7	9.0	9.0

3.4 위상공간의 구성

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. 임베이딩 차원을 고려하여 구성한 시계열 집합의 식은 다음과 같다.

$$y(t) = [x(t), x(t+T), ..., x(t+(d_e-1)T)]$$

여기서 x(t)는 1차원 굴곡각 시계열을 나타내며 지연시간과 임베이딩 차원을 고려하여 끌개를 구성하기 위한 시계열 집합을 구한다. 구성된 끌개는 한정된 위상 공간에서 겹쳐지지 않는 궤적을 무한한 상태를 그려 시스템의 카오스성을 알 수 있다.

3.5 상관차원

시계열 데이터는 그 데이터를 발생시킨 시스템에 대한 정보가 숨어있다. 보통 시스템의 동역학적 규칙에 대해서 아는 바가 없는 상태에서, 시스템에서 발생한 데이터를 이용하여 시스템에 관한 정보들은 엿보기 위한 방법 중의 하나가 상관차원(correlation dimension)을 구하는 것이다. 상관차원은 시계열로부터 위상공간을 구현한 후, 위상공간의 궤적이 차지하는 정도를 차원의 값으로 표시한다. 이러한 차원은 정수차원이 아닌 분수로 표현된다. 따라서 위상 궤적이 차지하는 공간의 정도를 정량화한 것이다.

상관차원 계산은 Grassberger와 Procaccia에 의해 제안된 방법을 사용하였다.[9] 임베딩 공간의 궤적을 구현하여 그 다음 궤적을 구성하는 모든 점들 사이의 거리를 구해서 그 거리가 r 보다 작은 쌍의 총 수를 대응시킨 상관적분 함수, C(r)를 구한다. C(r)을 수학적인 식으로 표현하면 다음과 같다 .

$$C(r) = \lim_{N\to\infty} [\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1, i\neq j}^{N} H(r - |\vec{y_i} - \vec{y_j}|)]$$

여기서 H(x)는 Heaviside 함수로 x가 0보다 작으면 0 값을 갖고 x가 0보다 크거나 같으면 1의 값

을 갖는다. r 값을 적은 값부터 서서히 증가시키면서 각 r에서의 C(r)을 계산한다. 이때 상관차원은 다음 식으로 계산된다.

$$D = \lim_{r \to 0} \frac{\log C(r)}{\log (r)}$$

3.6 최대 리아프노프지수

리아프노프지수(Lyapunov exponent)는 위상 궤적 위에서 서로 가까이 있는 두 점(상태)이 시간이 지남에 따라 얼마나 많이 서로 멀어지는가를 정량화한 변수이다. 비선형 시스템인 경우, 비록 처음에 비슷한 상태로 출발하여도 시간이 지나면 완전히 다른 상태로 변할 수 있다. 서로 다른 상태로 변해가는 정도가 시간의 흐름에 따라 지수함수적으로 증가하며 이때의 지수값을 추정함으로써 발산정도를 정량화할 수 있다. 이 수치가 음수이면 위상공간의 점은 한 점으로 수렴하는 계가 되며, 양수인 경우에는 인접한 점들이 서로 분리 되어가는 계가 되고 카오스 계가 여기에 속한다.

Wolf의 알고리즘을 사용하여 리아프노프 지수를 구하는 식은 다음과 같다.[10]

$$\lambda = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{n} \ln \frac{d_i(t)}{d_i(0)}$$

여기서 λ는 최대 리아프노프 지수, n은 전체 시간 간격의 수, t 는 시간 간격 d_i 는 기준 궤적에서 가장 근접한 궤도의 거리를 의미한다.

3.7 통계분석

일원배치 분산분석(ANOVA)는 하나의 독립변인에 의한 종속변인의 평균 차이를 알아보는 통계방법이다. 일원배치 분산분석의 결과를 가지고 각 집단의 차이를 검증하여 유의수준 0.05, 0.01 수준에서 유의미한 결과를 확인하였다.

4. 실험 결과

Fig. 3은 정상인의 정상보행에서 추출한 목, 어깨, 팔꿈치, 고관절, 무릎, 발목관절에 대한 끌개를 나타낸다. 끌개 사이의 간격이 일정한 규칙을 가지고 있으면 이는 보행이 안정되어 있다는 것을 의미한다. 끌개의 형상만으로는 보행의 안정성을 정량적으로 나타내는 데는 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 리아프노프 지수과 상관차원을 차례로 구하여 정량적으로 분석하였다.

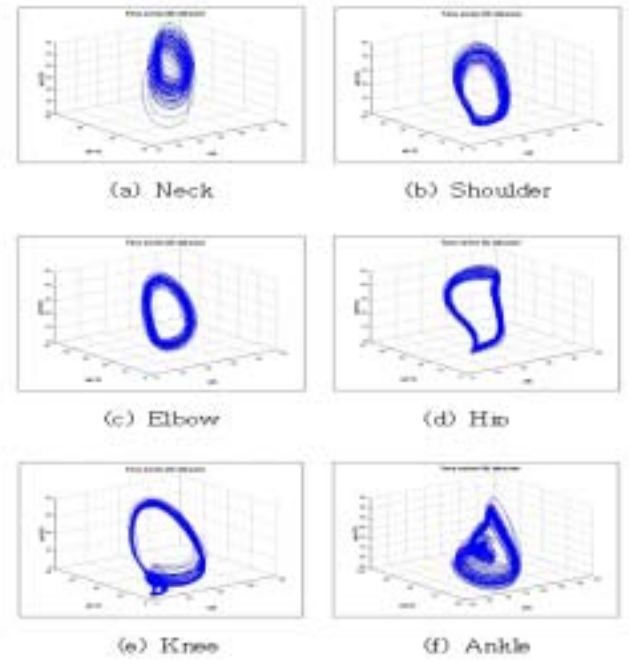

Fig. 3 Three-dimensional attractors of six joints.

Table 2 Maximal Lyapunov exponents and correlation dimensions in mean±SD.

Joint	Gender	Lyapunov exponent	Correlation dimension
Neck	Men	0.123±0.030	2.548±0.353
	Women	0.117±0.221	2.443±0.184
Shoulder	Men	0.087±0.013	1.968±0.144
	Women	0.100±0.016	2.042±0.125
Elbow	Men	0.114±0.018	2.144±0.168
	Women	0.127±0.027	2.228±0.268
Hip	Men	0.092±0.016	1.889±0.111
	Women	0.105±0.014	2.017±0.158
Knee	Men	0.094±0.022	2.151±0.206
	Women	0.112±0.017	2.233±0.163
Ankle	Men	0.137±0.020	2.690±0.152
	Women	0.144±0.024	2.587±0.149

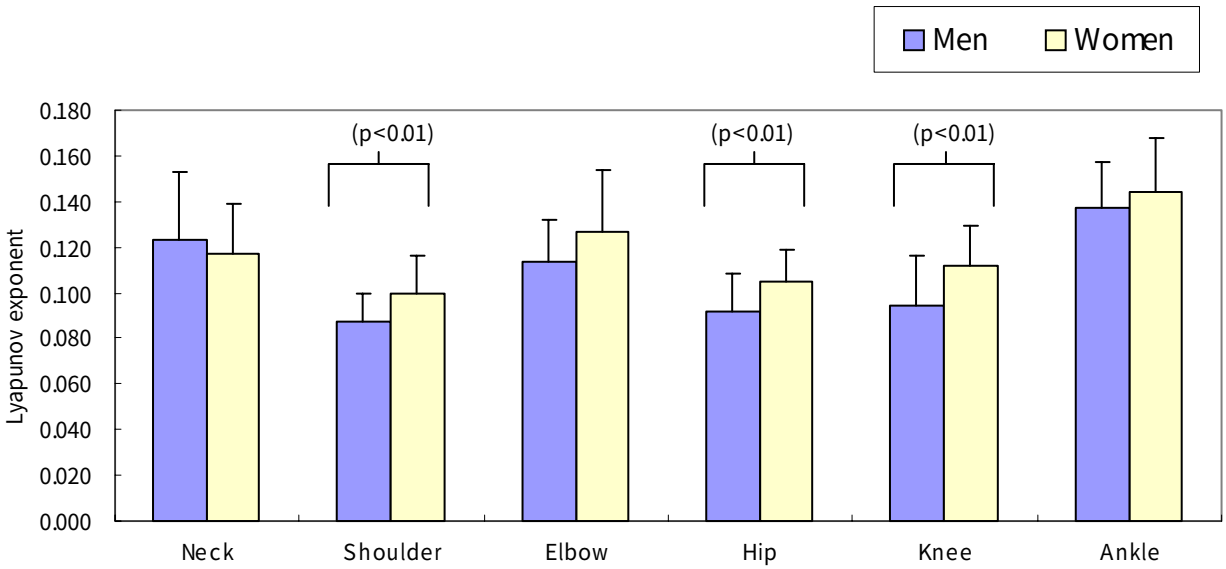

Fig. 4 Statistical difference in Lyapunov exponent.

Table 2는 보행실험에 참여한 남성과 여성에 대한 각 관절의 리아프노프 지수와 상관차원을 나타낸다. 리아프노프 지수가 모두 양의 값을 갖는 것을 통해 각 모든 관절의 시스템이 카오스적 성질을 가지고 있음을 알 수 있다. Stergiou 등[5]은 지수값이 주기함수는 0.000, 카오스 성질을 갖는 경우는 0.100, 랜덤함수는 0.487을 갖는다는 연구 결과를 통해 카오스 분석결과의 비교기준이 된다. 그리고 상관차원에서 정수 차원이 아닌 소수차원을 가져 카오스적 특징을 확인할 수 있었다. 상관차원 값이 높을수록 시계열은 복잡한 양상을 띄는 경향이 있다. 본 연구에서는 리아프노프 지수와 상관차원이 남성은 목과 발목 관절이 높게 나왔고, 여성은 목과 팔꿈치와 발목 관절값이 높았다. 이는 보행시 불규칙하게 움직여 굴곡값이 복잡하다는 것을 알 수 있다.

무릎의 굴곡각에 대한 리아프노프 지수는 Stergiou 등[5] 에서 정상무릎에는 0.108을 얻었고 본 연구에서도 남녀 평균값이 0.103으로 유사한 값을 얻었다. 그리고 남성의 0.092 보다 여성이 0.105로 높게 나왔다. 무릎을 제외한 다른 관절에 대한 리아프노프 지수는 기존에 연구된 바가 없어 비교할 수 없었다.

Fig. 4는 보행시 남녀의 각 관절에 따른 리아프노프 지수에 대한 일원 분산 분석을 수행한 결과를 나타낸다. 남녀간의 리아프노프 지수값의 유의한 차이를 보인 것은 상지에서는 어깨관절, 하지에서는 고관절과 무릎관절이며 모두 유의수준 $p<0.01$를 만족하는 값이다. 상지에 비해 하지관절의 움직임에서 남녀간의 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 특히 이 세 가지 항목을 통해 확인할 수 있는 것은 남성의 경우가 여성에 비해 비선형성이 낮아 더 규칙적인 운동을 하고 있다는 것이다. 따라서 여성에 비해 전반적으로 남성의 보행이 안정적이라고 할 수 있다. 목과 어깨와 팔꿈치 관절의 평균값을 상체 관절로 정의할 때 남성과 여성 사이에 통계학적인 차이가 나타나지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 정상인에 대한 보행시 전신의 주요 관절의 운동 자료를 비선형 분석법을 통해 상관차원과 리아프노프 지수로 정량화하였다. 통계분석을 통하여 어깨와 고관절과 무릎관절에 대해 남성과 여성의 차이를 확인할 수 있었다. 그리고 하지관절과 좌우 관절에 대한 남성과 여성의 리아프노프 지수 차이도 확인할 수 있었다. 비정상 보행 분석에 대한 연구와 임상 진단 시스템의 개발이 요망된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 2006년 기초연구

지원(기초과학 I) 사업(과제번호 D00007)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Craik, R. L. and Oatis, C. A., 1995, *Gait analysis theory and application*, Mosby-Year Book Inc. pp. 12～38.

(2) Moon, B. Y., Son, K., Park, J. H. and Suh, J. T., 2003, "A method to describe and analyze human knee joint motion," *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 10, pp. 233～239.

(3) Chung, C. Y., Lee, M. C., Moon, Y. W., Kim, T. G., Lim, S. T. and Seong, S. C., 1997, "Gait analysis after total knee arthroplasty," *J. of Korean Orthop. Assoc*, Vol. 32, No. 5, pp. 1290～1301.

(4) Hausdorff, J. M., Edelberg, H. K., Mitchell, S. L. and Goldberger, A. L., 1997, "Incresed gait unsteadiness in community-dwelling elderly fallers," *J. Arch. Phys. Med. Rehab.*, Vol. 78, No. 3, pp. 278～283.

(5) Stergiou, N., Moraiti, C., Giakas, G., Ristanis, S. and Georgoulis, A. D., 2004, "The effect of the walking speed on the stability of the anterior cruciate ligament deficient knee," *Clin. Biomech*, Vol. 19, No. 9, pp. 957～963.

(6) Buzzi, U. H., Stergiou, N., Kurz, M. J., Hageman, P. A. and Heidel, J., 2003, "Nonlinear dynamics indicates aging affects variability during gait," *Clin. Biomech*, Vol. 18, No. 5, pp. 435～443.

(7) Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Srernad, D. and Cavanagh, P. R., 2000, "Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking," *J. of Biomech*, Vol. 33, No. 10, pp. 1269～1277.

(8) Dingwell, J. B. and Cusumano, J. P., 2000, "Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking," *Chaos*, Vol. 10, No. 4, pp. 848～863.

(9) Grassberger, P. and Procaccia, I., 1983, "Characterization of strange attractors," *Physical Review Letters*, Vol. 50, pp. 346~349.

(10) Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. and Vastano, J. A., 1985, "Determining Lyapunov exponents from a time series," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 16, No. 3, pp. 285～317.