

# 보행시 전신 주요 관절의 카오스 지수 분석

박정홍<sup>†</sup> · 손권\* · 서국웅\*\* · 박영훈\*\*

## Chaos Analysis of Major Joint Motions for Young Males During Walking

Jung Hong Park, Kwon Son, Kuk Woong Seo, Young Hoon Park

**Key Words:** Nonlinear Dynamics(비선형 동역학), Correlation Dimension(상관차원), Largest Lyapunov Exponent(최대 리아프노프 지수), Joint Motion(관절 운동)

### Abstract

To quantify irregular body motions the time series analysis was applied to the gait study. The motions obtained from gait experiment are complex to exhibit nonlinear behaviors. The purpose of this study is to measure quantitatively the characteristics of the major six joints of the body during walking. The gait experiments were carried out for eighteen young males walking on a motor driven treadmill. Joint motions were captured using eight video cameras, and then three dimensional kinematics of the neck and the upper and lower extremities were computed by KWON 3D motion analysis software. The largest Lyapunov exponent was calculated from the time series to quantify stabilities of each joint. The results provides a data set of nonlinear dynamic characteristics for six joints engaged in normal walking.

### 1. 서 론

보행시 다리와 상체의 각 관절은 각기 서로 다른 운동을 하는 것처럼 보이지만 서로 협력하여 자연스러운 보행 패턴을 생성한다. 이들 각 관절의 운동은 주기적인 것 같으나 실제로는 매우 짧은 순간마다 변하는 비선형 동역학 특성을 가진다.<sup>(1)</sup> 노인은 갑작스런 물체를 피하거나 바닥면에 대해 적응하지 못함으로 인해서 균형이 무너져 낙상 사고가 일어나는 것으로 보고되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

보행은 이러한 불규성이 존재하지만 저차원의 카오스 성질을 가지는 결정론적 운동이다.<sup>(1)</sup> 이러한 보행의 카오스 해석은 주로 하지 운동에 대해 연구되었다. Stergiou 등<sup>(4)</sup>은 무릎의 인대 손상이 보행에 미치는 영향을 평가하였다. Dingwell 등<sup>(5)</sup>과 Dingwell과 Cusumano<sup>(1)</sup>는 트레드밀과 지면 보행의 차이점, 말초신경 장애환자의 보행특성을 분석하였다. 그리고 Buzzi 등<sup>(6)</sup>은 나이에 따른 하체 관절의 안정성을 카오스 해석법을 이용하여 평가하였다.

보행에서 하체의 역할이 가장 중요하지만 상체 역시 동적 안정성에 영향을 미치는 중요 인자이다. 이 때문에 Dingwell 등<sup>(5)</sup>과 Buzzi 등<sup>(6)</sup>은 하체의 관절각과 더불어 상체 중심의 운동을 측정하였다. 그러나 이들은 상체 중앙에 센서를 부착하여 상체 중심의 움직임만을 해석하였을 뿐 더 큰 운동범위를 가지는 팔의 움직임에 대해서는

<sup>†</sup> 책임저자, 학생회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : zhengh@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3066 FAX : (051)512-9835

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 체육교육과

연구하지 않았다. 또한 아직까지 보행시 상체 관절의 비선형성에 대해 정량적인 결과는 보고된 바가 없다.

따라서 본 연구의 목적은 보행시 목을 비롯한 상체와 하지의 주요 관절에 대한 안정성을 카오스 해석법에서 사용되는 최대 리아프노프 지수를 사용하여 정량적으로 분석 평가하고자 하였다.

## 2. 보행 실험

보행 실험은 젊은 성인 18명(평균 나이 23.6세, 키 175.9cm, 몸무게 73.0 kg)을 대상으로 하였다 (Table 1). 피실험자는 모두 무릎 관절에 이상이나 질병으로 치료를 받은 경험이 없는 사람이었다. 보행 측정에는 모두 8대의 비디오 카메라 (Sony DCR-VX2100, Japan)를 사용하였고 영상 샘플링 주기는 60 frame/sec였다. 협소한 장소에서 규칙적이고 반복적인 보행 운동을 재현하기 위해 트레드밀을 사용하였다.

상체와 하체의 운동을 기록하기 위해 인체 특징점에 반사 마커를 부착하였다. 선 자세에서 37개의 마커를 부착하여 어깨, 팔꿈치, 고관절, 무릎, 발목의 관절 중심을 계산하였다. 그 후 관절 중심을 찾기 위해 부착한 마커를 제거하고 실험자는 각자가 느끼는 안정한 속도로 보행하였다. 전체 피실험자의 평균 보행 속도는 1.10 m/s였다.

가장 안정한 보행속도는 사람마다 자신이 가장 안정하다고 느끼는 속도이며 이는 피실험자마다 다르다.<sup>(4)</sup> 이를 근거로 각각의 실험자가 안정하다고 느끼는 속도를 기준으로 하여 실험을 수행하였다. 카메라에서 얻어진 영상자료로부터 각 마커의 3차원 좌표와 관절의 운동각은 상용 프로그램인 Kwon3D(Visol, Korea)를 사용하여 계산하였다.

## 3. 시계열 분석

시간에 따른 운동 변화에 대하여 카오스 해석을 하기 위해서 우선 최소한의 시계열 데이터를 만들어야 한다. 이전 연구를 통하여 적절한 시계열 데이터는 약 84초동안 5000개 이상이면 충분하므로 본 실험에는 약 90초동안 5343개의 영상 자료를 획득하였다.<sup>(7-8)</sup>

각 관절의 시상면(sagittal plane)상에서 일어나

**Table 1** Personal information

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Walking speed (m/s)
M1	20	176	62	1.25
M2	25	177	100	0.97
M3	32	185	85	1.25
M4	27	173	83	0.97
M5	25	170	75	0.83
M6	20	169	61	0.83
M7	19	173	65	0.97
M8	20	175	68	1.25
M9	29	171	70	0.97
M10	23	184	68	1.11
M11	24	176	73	1.11
M12	24	185	70	1.25
M13	20	176	74	1.25
M14	24	175	63	1.11
M15	21	182	80	1.25
M16	24	165	73	1.25
M17	24	178	71	0.97
M18	24	176	73	1.25
Avg±SD	23.6±3.4	175.9±5.5	73.0±9.5	1.10±0.16

는 굴곡/신전 각을 이용하여 시계열을 구성하였다. 카오스 해석을 위해 시계열을 구성한 후, 지연시간(delay time)과 매립 차원(embedding dimension)을 구하였다. 그리고 시계열을 지연시간과 매립 차원을 이용하여 그려지는 끌개로부터 시계열 데이터의 발산 정도와 형태를 수학적으로 계산하였다.

시계열 데이터로부터 얻어지는 지연시간 및 매립차원은 끌개(attractor)의 특성을 결정짓는데 중요한 역할을 한다.<sup>(7-8)</sup> 본 연구에서는 최적의 지연시간을 결정하기 위하여 AMI(Average Mutual Information) 방법을 이용하였다.<sup>(5,7,9)</sup> AMI 방법은 지연시간을 반복적, 순차적으로 넣어 시계열 데이터를 만든 후 첫 번째 최소가 되는 점으로 결정하는 것이다. 매립차원은 FNN(False Nearest Neighbor) 알고리즘을 이용하여 최소 차원을 선정하였다.<sup>(5,10)</sup> 시계열 벡터의 차원을 계속 증가시키면서 FNN의 비율이 최초로 0이 되는 점이 최소 매립차원이다.

지연시간과 매립차원을 이용하여 카오스 성질을 나타내는 대표적인 지수인 최대 리아프노프 지수를 구하였다. 최대 리아프노프 지수의 계산은 카오스 전문 프로그램인 CDA(Chaos Data

Analyzer, Physics Academy Software, Raleigh, U.S.A.)<sup>(11)</sup>를 사용하였다.

최대 리아프노프 지수(Lyapunov exponent)는 위상공간에서 시계열 점의 궤적이 시간에 따라 발산하는 정도를 나타내는 값이다.<sup>(12-13)</sup> 최대 리아프노프 지수는 조그마한 변동에 대해서 시스템의 동적 거동이 어떻게 변하고 있는가를 나타내므로 시스템의 안정성을 나타내는 지표로 사용되고 있다.<sup>(2-3,4-6)</sup> 최대 리아프노프 지수는 사인함수일 때 -0.003, 대표적 카오스 성질을 나타내는 로렌스 끌개는 0.100, 그리고 랜덤 신호는 0.469의 값을 가진다.<sup>(4)</sup>

지수를 계산한 후 관절의 평균값에 대하여 통계적 유의성을 알아보기 위해 일원분산분석을 수행하였다. 통계 해석을 위해 SPSS(ver 13.0, SPSS Inc., U.S.A.)를 사용하였고 유의수준은 0.05, 그리고 사후 분석법으로 Turkey법을 적용하였다.

#### 4. 결 과

보행시 얻어진 운동 자료를 바탕으로 각 실험자 및 각 관절에 대한 지연시간을 구하고 이를 이용하여 FNN 알고리즘으로 매립차원을 구하였다. Fig. 1은 한 예로 피실험자 M1에 대한 매립차원 대 FNN 비율을 나타낸 것이다. 각 실험자의 모든 관절에 대하여 Fig. 1과 같이 매립차원이 5차가 되면 FNN 비율이 모두 0으로 떨어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 모든 관절에 대한 매립차원은 5차로 설정하였다.

상체와 하지 관절 운동의 최대 리아프노프 지수를 Table 2에 나타내었다. 상체 관절에서 목이 0.137로 가장 높았다. 그 다음은 팔꿈치, 어깨 관절 순으로 나타났다. 하체의 경우는 가장 높은 곳이 왼쪽 발목으로 0.182이었으며, 다음은 무릎과 고관절의 순서로 나타났다. 목은 가장 작은 운동각을 가질 뿐 아니라 불규칙하게 움직여 신호의 초기값에 대한 민감성이 높았다. 발목 역시 지면과 맞닿아 보행의 초기 안정성을 확보하기 위해 신호의 불규칙성이 높게 나타났다.

통계 해석 결과 목과 발목은 모두 다른 관절과 유의성이 있었다. 즉, 목과 발목의 신호는 평균값의 차이가 현저하여 신호 특성의 구별이 뚜렷하였다. 지수값에 대한 통계적 유의성이 나타나는 짝이 많아 Fig. 2에는 유의한 차이가 없는 관절을

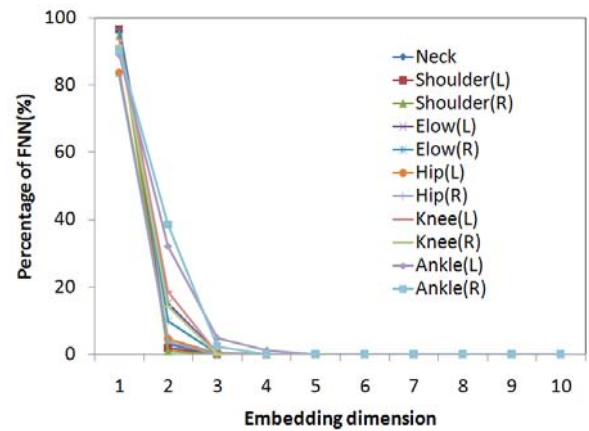


Fig. 1 Results of FNN analysis to determine appropriate embedding dimensions for eleven joints.

Table 2 The mean largest Lyapunov exponents of eleven joints for eighteen young male subjects.

Body	Joint	Mean largest Lyapunov exponent		
		Total	Left	Right
Upper body	Neck	0.137±0.039	-	-
	Shoulder	0.081±0.014	0.082±0.016	0.080±0.013
	Elbow	0.113±0.020	0.115±0.022	0.111±0.018
Lower body	Hip	0.090±0.023	0.090±0.028	0.090±0.017
	Knee	0.104±0.020	0.099±0.020	0.110±0.018
	Ankle	0.172±0.038	0.182±0.039	0.163±0.035

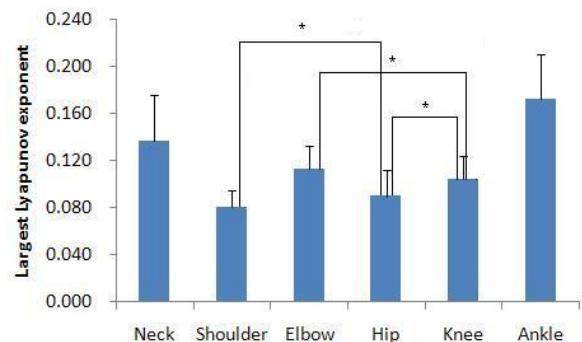


Fig. 2 Statistical results of the largest Lyapunov exponent for six joints. Asterisk represents no statistical difference ( $p < 0.05$ ).

나타내었다. 어깨와 고관절은 평균이 0.081과 0.090으로 통계적 유의성이 나타나지 않았다. 그

리고 팔꿈치와 무릎, 무릎과 고관절 사이에도 통계적인 유의성이 발견되지 않았다. 공통적으로 상체의 첫 번째 연결 관절인 어깨와 하체의 고관절의 운동에 대한 지수 차이가 없고, 두 번째로 연결된 팔꿈치와 무릎 관절 사이에서도 지수 차이가 두드러지게 나타나지 않았다. 하지만 상체에서 어깨와 팔꿈치는 유의한 차이가 있었으나, 하체의 무릎과 고관절은 차이가 나타나지 않았다. 좌우차이에 대해 통계적 유의성을 살펴본 결과 모든 관절에서 좌우 차이는 없었다.

본 연구에서 무릎의 굴곡각에 대한 최대 리아프노프 지수는 Ko 등<sup>(7)</sup>이 구한 평균 0.109와 Stergiou 등<sup>(4)</sup>의 1.108과 유사한 0.104의 값을 얻었다. 무릎 이외의 다른 관절에 대한 굴곡각에 대한 리아프노프 지수는 아직 발표된 바가 없으며 모든 관절에 대한 지수 값들을 직접적으로 비교할 수 없었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 보행시 젊은 남성 18명에 대한 보행에서 얻어지는 각 관절에 대한 동역학적 비선형성을 최대 리아프노프 지수로 정량화하였다. 전신 주요 관절의 카오스 지수를 사용하여 각 관절의 지수값 차이에 대한 통계적 유의성을 조사하였다. 본 연구 결과는 상체와 하체의 주요 관절 대한 카오스 지수를 제시하여, 향후 보행연구에서 인체 보행의 비선형 특성을 보여주는 기초 자료로 활용될 수 있다. 또한, 이를 바탕으로 보행시 상체와 하체 관절 운동의 연관성에 대한 규명이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 2006년 기초연구 지원(기초과학 I) 사업(과제번호 D00007)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

(1) 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.

(2) Dingwell, J. B., and Marin, L. C., 2006, "Kinematic Variability and Local Dynamic Stability of Upper Body Motions When Walking at Different Speeds," *Journal of Biomechanics*, Vol. 39, pp. 444~452.

(3) Dingwell, J. B., and Cavanagh, P. R., 2001, "Increased Variability of Continuous Overground Walking in Neuropathic Patients is Only Indirectly Related to Sensory Loss," *Gait and Posture*, Vol. 14, pp. 1~10.

(4) 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," *Clinical Biomechanics*, Vol. 19, No. 9, pp. 957~963.

(5) Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Sernad, D. and Cavanagh, P. R., 2000, "Slower Speeds in Patients with Diabetic Neuropathy Lead to Improved Local Dynamic Stability of Continuous Overground Walking," *Journal of Biomechanics*, Vol. 33, No. 10, pp. 1269~1277.

(6) Buzzi, U. H., Stergiou, N., Kurz, M. J., Hageman, P. A. and Heidel, J., 2003, "Nonlinear Dynamics Indicates Aging Affects Variability During Gait," *Clinical Biomechanics*, Vol. 18, No. 5, pp. 435~443.

(7) Ko, J. H., Son, K., Moon, B. Y. and Suh, J. T., 2006, "Gait Study on the Normal and ACL Deficient Patients after Ligament Reconstruction Surgery Using Chaos Analysis," *Journal of KSPE*, Vol. 30, No. 4, pp. 435~441.

(8) Park, K. B., Ko, J. H., Son, K., Moon, B. Y. and Suh, J. T., 2006, "Application of Chaos Theory to Gait Analysis," *Transaction of KSME (A)*, Vol. 30, No. 2, pp. 194~201.

(9) Jeong, J., Gore, J. C. and Peterson, B. S., 2001, "Mutual Information Analysis of the EEG in Patients with Alzheimer's Disease," *Clinical Neurophysiology*, Vol. 114, No. 5, pp. 827~835.

(10) Rhodes, C. and Morari, M., 1997, "The False Nearest Neighbors Algorithm: An Overview," *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 1149~1154.

(11) Sprott, J. C., and Rowlands, G., *Chaos Data Analyzer: The Professional Version User's Manual*, Physics Academic Software, Raleigh, North Carolina, pp. 20~23.

(12) Grassberger P. and Procaccia I., 1983, "Characterization of Strange Attractors," *Physical Review Letters*, Vol. 50, pp. 346~349.

(13) 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.