

# 보행로봇의 노면 분류를 위한 파라미터 분석 방법

## Parameter Analysis Method for Terrain Classification of the Legged Robots

고광진<sup>1</sup>, 김기성<sup>1</sup>, 김완수<sup>1</sup>, 한창수<sup>1,✉</sup>  
Kwang Jin Ko<sup>1</sup>, Ki Sung Kim<sup>1</sup>, Wan Soo Kim<sup>1</sup> and Chang Soo Han<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: cshan@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-5247

Manuscript received: 2010.5.7 / Accepted: 2010.10.31

*Terrain recognition ability is crucial to the performance of legged robots in an outdoor environment. For instance, a robot will not easily walk and it will tumble or deviate from its path if there is no information on whether the walking surface is flat, rugged, tough, and slippery. In this study, the ground surface recognition ability of robots is discussed, and to enable walking robots to recognize the surface state and changes, a central moment method was used. The values of the sensor signals (load cell) of robots while walking were detected in the supported section and were analyzed according to signal variance, skewness, and kurtosis. Based on the results of such analysis, the surface state was detected and classified.*

Key Words: Terrain Classification (지형 분류), Legged Robot (보행 로봇), Central Moment (센트럴 모멘트), Uneven Terrain (비 평지)

### 1. 서론

보행로봇은 차륜형 로봇에 비해서 자유도가 많아 매우 복잡한 연산의 어려움이 있다. 하지만 지면의 디딤점 선택, 여자유도로 인하여 보다 다양하고 능동적이며, 효율적인 보행이 가능하다. 또한 비평탄 지형에서 우수한 지형 극복 능력을 나타낸다. 이러한 보행로봇이 여러 지형에서 운용되기 위해서는 보행 시 지형의 지면 정보를 실시간으로 알 수 있어야 하며, 이런 정보는 로봇의 보행에 매우 중요한 데이터로 사용된다. 로봇이 운용되고 있는 지면이 평지인지 비 평지인지, 또는 지표면이 거친지 미끄러운지에 대한 지면정보가 없으면 로봇은 쉽게 보행할 수 없을 뿐만 아니라 넘어지거나 경로를 이탈할 수 있다. 예를 들어 평지의 경우에는 지면의 상태가 안정되어 있고, 지면의 함몰이나 간섭이 작기 때문에 로봇이 빠른 속도로

보행할 수 있지만 모래나 자갈 같은 경우에는 그럴 수 없다. 이는 지면의 함몰이나 슬립이 생기기 때문에 보행 속도를 줄여야 하며 로봇의 전체적인 균형을 유지할 수 있도록 지형 별 능동적인 대처 방안이 필요하다.

지면 분류에 관한 연구는 오래 전부터 다양한 방법으로 이루어져왔다. 대표적으로 Hirose의 경우에는 지면의 함몰을 감지하기 위하여 touch sensor를 사용하였다.<sup>1</sup> Lewis의 경우에는 압력센서를 이용하여 지면의 슬립 및 경향을 파악하여 로봇의 보행 패턴의 변화를 주어서 전체적인 균형을 유지하기 위한 방법으로 사용되었다.<sup>2,4</sup> 또한 로봇의 보행 시 지면 반력 신호를 FFT 분석을 통하여 지형 별로 비교/분석한 경우도 있다.<sup>5</sup>

관절형 로봇뿐만 아니라 차륜형 로봇에서도 상당히 많은 연구들이 이루어져왔으며, 지면 분류의 대표적인 방법은 Iagnemma의 비전 및 레이더

를 이용한 경우가 있다. 비전의 경우는 지면의 색상 및 모양과 같은 형태를 통하여 지면을 분류하였으며,<sup>6-8</sup> 레이더를 이용한 경우는 지면을 스캔하여 지형의 생김새를 알 수 있으며, 이러한 방법으로 지면들의 특징 값을 알 수 있다.<sup>9,10</sup>

또 다른 연구 방법인 진동센서(가속도센서, 자이로 센서)의 경우는 DuPont 과 Iagnemma 가 차량에 진동센서를 장착한 이후에 각 지형에 대해서 센서 값을 분석하였다.<sup>11</sup> 또한 이러한 센서 값을 FFT 신호 분석한 이후에 특정 주파수 내에서 센서 값을 분류하였으며, 속도에 따라 신호를 분석하기도 하였다.<sup>12</sup> 또한 서로 다른 하드웨어에 적용하여 데이터를 비교/분석하기도 하였다.<sup>13</sup>

본 논문에서는 1-leg robot 에 로드셀을 장착하여 미리 정의한 지형(평지, 모래, 자갈, 잔디)에서의 지지구간별 센서 값(로드셀)을 검출한 후 각 신호에 대해서 분산, 비대칭도, 첨도를 이용하여 특정 신호를 분석 및 분류하였다.

## 2. 1-leg 플랫폼 개발

### 2.1 1-leg 플랫폼

본 연구에서는 지형에 대한 노면별 특성을 실험하기 위하여 Figure 1 과 같이 1-leg 로봇 플랫폼을 개발하였다. 본 시스템은 다족형 보행 로봇 중 한 개의 다리만을 모사한 것으로서 보행 패턴 알고리즘과 보행에 영향을 주는 속도, 지면 접촉 각도 등의 변화를 용이하도록 구성하였다. 또한 다족형 보행 로봇보다 정적, 동적인 안정성, 보다 간단한 보행 알고리즘 적용, 시간 및 비용 절감의 이점으로 인해 1-leg 시스템을 개발하였다. 시스템에 대한 자세한 사양은 Table 1 과 같으며 능동형 관절 3 자유도와 수동형 관절 2 자유도로 총 5 자유도로 구성되어 있다.

2 자유도로 이루어진 수동형 관절은 스프링과 리니어 가이드로 구현하였으며, 이 중 스프링은 로봇이 보행 시 로봇 몸체의 상하의 움직임을 표현하기 위하여 구성하였다. 뿐만 아니라, 외다리로 보행을 하기 위해서는 다음 발을 내딛기 위한 일정한 시간의 스윙 구간이 필요하다. 이를 위하여 스프링이 일정 시간 동안 로봇의 무게를 지탱해주는 역할을 담당한다. 또 다른 수동형 관절은 리니어 가이드가 부착되어 로봇이 보행 시 일정 거리의 보폭을 유지시켜 주는 역할을 한다.

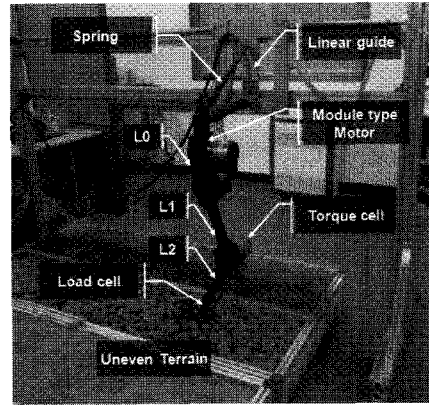


Fig. 1 Development of the 1-legged robot platform for terrain classification experiment

3 자유도로 이루어진 능동형 관절은 Figure 1 에 나타낸 바와 같이 L1, L2 가 전진 보행을 위한 모터이며, L0 에 위치해 있는 모터가 로봇의 힙 조인트의 좌우 회전을 담당하게 된다.

로봇의 구동을 위한 end-effectors 의 trajectory 는 타원의 형태를 나타내며, 이 궤적은 일반적인 동물의 보행에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서는 타원형 궤적을 이용하여 장축, 단축의 길이 변화를 통하여 보행이 가능하다. Figure 3 과 같이 보행 시 지면 반력은 1 축 로드셀에 의하여 측정되며 그림과 같다. 로봇의 구동을 위해서 각 관절의 command angle 은 end-effectors 의 위치 값을 이용하여 각 관절의 joint angle 을 산출하는 역기구학을 사용하여 산출하였다.

Table 1 System specifications

Issue	Unit	Quantity
L0	m	0.14
L1		0.33
L2		0.37
Weight	kg	14.5
Gait period (1 cycle)	sec	1.5
Stride	m	0.66
Equipped sensors	Motor sensors : 3	
	Torque sensors : 3	
	Load cell : 1	
D.O.F	3+2(passive joint)	

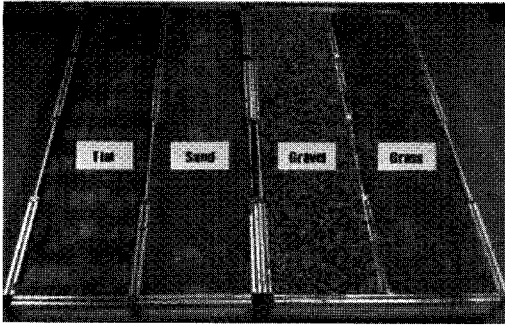


Fig. 2 Configuration of the 4-terrain environment

### 2.2 실험 환경 구축

지형 분류 실험을 위하여 인공적인 환경을 구축하였다. 지형으로는 주변에서 흔하게 접할 수 있는 평지, 모래, 자갈을 구축하였으며, 잔디의 경우에는 평지와 같은 양상을 나타낼 수 있으나, 본질적인 견고함이 평지와 다르고 풀밭에서 일어날 수 있는 지면에서의 양상을 관찰하기 위하여 구현하였다. 평지는 보드블록을 이용하여 구성하였으며, 모래는 고운 모래, 자갈은 평균 45mm 의 흑자갈로 구성하였다. 잔디의 경우는 한국형 잔디인 금잔디로 구성하였다. 각 지형의 길이는 200\*50(cm)이며, 총 200\*200(cm)이다.

## 3. 지형 별 특성인자 검출을 위한 central moment 접근 방법

### 3.1 지형 별 특징 신호 분석

보행 동물이 지형의 상태에 따라서 보행 속도 및 패턴을 바꾸는 것과 마찬가지로 로봇도 지형의 상태에 맞게 자세를 바꾸어 주어야 한다. 로봇이 보행 시 지형의 상태를 알기 위하여 지형 별 신호를 획득한 후 central moment 를 이용하여 분석하였다.

Figure 4 와 같이 평지의 경우에는 완만한 지형으로 인하여 좌우의 신호가 비슷하게 나타나며, Figure 7 과 같이 일정한 신호가 반복적으로 들어오는 것을 알 수 있었다. 모래의 경우에는 고운 입자로 인하여 보행 시 지면의 함몰 및 발의 슬립현상이 발생함을 알 수 있었고, 자갈의 경우에는 불규칙한 지형의 특징으로 인하여 일정하지 않은 신호가 많이 나타났다. 또한 신호의 굴곡이 발생하는 것으로 보아 자갈의 밀림 현상이 발생함을 알 수 있었다. 마지막으로 잔디의 경우에는 평지와

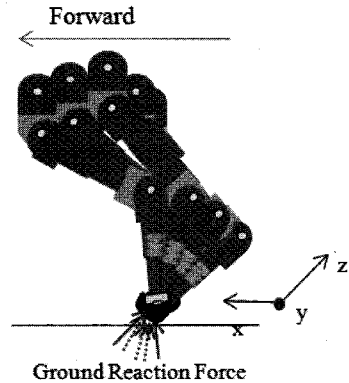


Fig. 3 Ground reaction force when touch the ground

다르게 센서 신호가 서서히 증가하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이는 지면이 단단하지 않아 지면 반력이 서서히 증가함을 나타내는 것으로 예측되었다. 이러한 현상은 항상 일정하게 나타나지는 않지만 Figure 7 과 같이 각 지형의 양상을 파악할 수 있는 특징 값으로 활용할 수 있으리라 예측된다.

### 3.2 지형 별 분류 방법

1-leg 플랫폼을 이용하여 지형 별 특성인자 검출을 위하여 미리 정의한 지형(평지, 모래, 자갈, 잔디)에 대해서 로봇의 지지구간에서의 데이터를 central moment 를 이용하여 분류하였다. 즉, 로봇이 보행 시 각각의 지형의 지지구간 신호가 들어왔을 경우 그 신호에는 지형의 특성신호가 나타난다. 이러한 신호에서 분산은 평균값을 기준으로 데이터가 얼마나 퍼져있는 정도를 나타내며, 비대칭도의 경우는 평균값을 기준으로 오른쪽으로 치우치면 positive 왼쪽으로 치우치면 negative 이다. 첨도는 신호의 기울기를 알 수 있으며 Figure 5 와 같이 평균값을 기준으로 뽀족한지 아닌지가 결정되고 이 값에 따라서 지표면의 단단함 정도를 알 수 있다. 이러한 central moment 을 이용하여 지형 별 데이터를 분석한 이후에 각각의 상관관계를 분석하여 지형 분류가 가능하다. 분산, 비대칭도, 첨도에 대한 식은 방정식 (1)-(3)에 나타내었으며, 식에서  $i$  는 한 스텝 내에서 들어오는 데이터의 개수를 나타내며,  $\bar{i}$  은  $i$  값의 평균을 나타낸다.  $x_i$  는  $i$  값에서의  $y$  축 값인 지면 데이터 값이다. 이와 같은 방법으로 지형의 특징 값들을 계산할 수 있다.

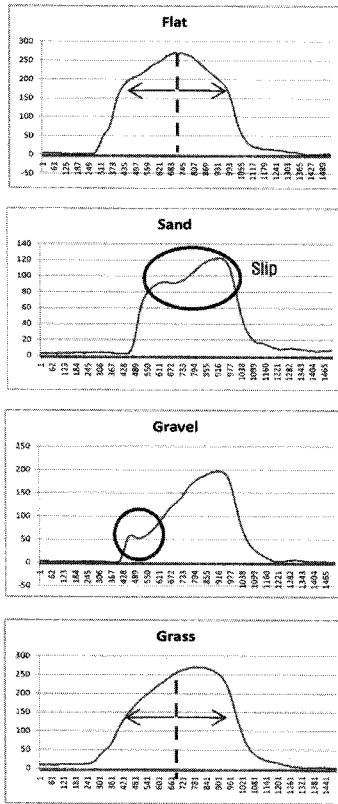


Fig. 4 Feature extraction of the terrain signals

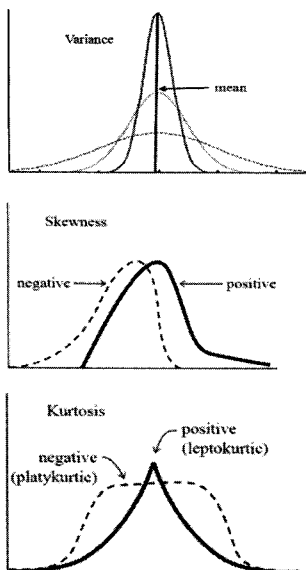


Fig. 5 Analysis method of the variance, skewness, and kurtosis

$$\mu_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2 x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (1)$$

$$\mu_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^3 x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

$$\mu_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^4 x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (3)$$

#### 4. 실험 및 결과

##### 4.1 노면 분류 실험

본 절에서는 2 절에서 제시한 1-leg 플랫폼을 이용하여 3 절에서 기술한 지형별 특징 신호 검출 방법을 통한 지형 분류 실험을 Figure 6 과 같이 평지, 모래, 자갈, 잔디 순으로 순차적으로 실시하였다. 본 실험은 노면의 구분을 위한 목적이므로 모든 환경에서 동일한 조건(보행 속도, 보행 궤적, 지형의 높이)으로 실시하였으며, 보행 시 지면에 접촉되는 순간에 지면 반력을 측정한다.

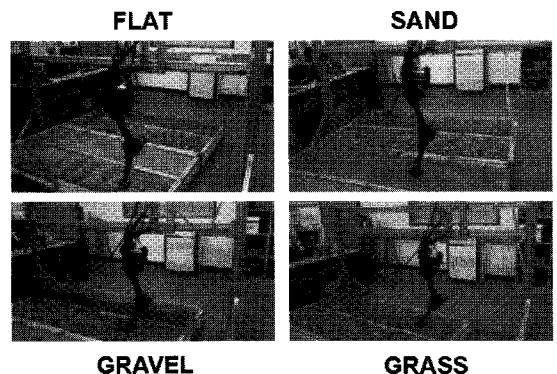


Fig. 6 Experiment of the terrain classification

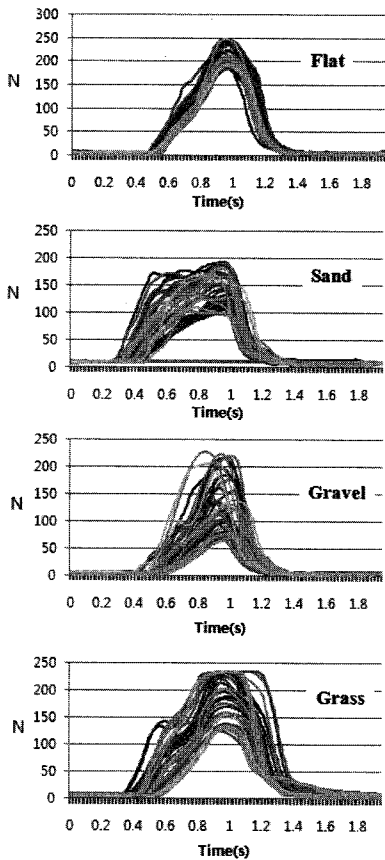


Fig. 7 Supported section signal in 4-terrains

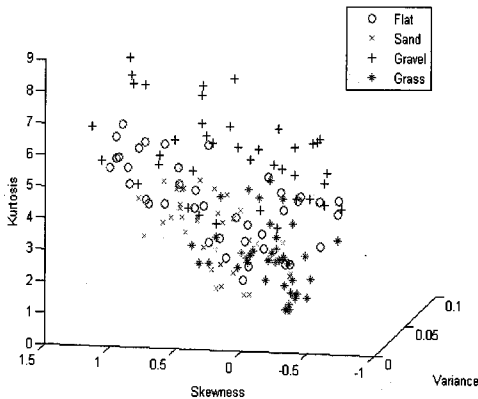


Fig. 8 Representation of the 4-terrain vector space point using variance, skewness, and kurtosis

Figure 7 은 보행 시 로드셀 데이터를 지지구간 별로 나타낸 그래프이며, 지형별 특징 신호를 검출하기 위하여 central moment 방법을 적용하였다.

Figure 8 은 분산, 비대칭도, 첨도의 데이터를 3 차원 공간상에서 상관 관계를 표시한 그래프이며 지형별로 군을 이루고 있는 것을 볼 수가 있다. 보다 더 구별하기 쉽게 2 차원 그래프에서 2 개의 인자 별로 데이터 값을 비교했다.

4.2 실험 결과

Figure 9 는 전 장에서 언급한 바와 같이 2 개의 인자별로 데이터값을 비교한 그래프이다. (a)~(c)에서는 평지를 기준으로 각 지형간의 구분 가능성을 나타내는 그래프 나타내었으며, 여러 가지 특성 인자에 대해서 비교하였다. 즉, (a)는 평지-모래에 대해서 분산과 비대칭도를 이용하여 나타내었으며, 분산값을 기준으로 2 개의 지형이 구분이 가능함을 알 수가 있다. (b)는 평지-자갈에서 비대칭도와 첨도를 이용하여 나타내었으며, (c)는 평지-잔디에 대해서 분산과 비대칭도에 대한 그래프이다. (d)의 경우에는 (c)와 같은 지형에 대해서 다른 인자를 사용하여 또 다른 인자를 이용하여서도 구분이 가능함을 나타내는 그래프이다. (e), (f)의 경우에는 동일한 인자에 대해서 모래-자갈, 자갈-잔디에 대해서 구별이 가능한지를 알아보기 위해 나타낸 그래프이다.

(a)~(f)의 그래프에서 알 수 있듯이 3 가지의 인자(분산, 비대칭도, 첨도)를 이용하여 각각의 지형이 구별이 가능함을 알 수 있다. 물론, 이는 완벽하게 구별이 가능하지는 않다. 각 지형간에 중첩되는 부분이 발생하지만 이는 학습 훈련을 통하여 극복할 수 있으며, 각각의 지형간의 고유벡터를 통하여 구별이 가능할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 지형 분류 실험을 하기 위하여 3 자유도의 active joint 와 2 자유도의 passive joint 로 구성된 1-leg 플랫폼을 제작하였으며, 실제 야외 환경을 모사하기 위하여 평지, 모래, 자갈, 잔디의 인공 지형을 구성하였다. 또한 지면 반력 측정을 위하여 로봇의 링크 끝 단에 1 축 로드셀을 장착하였으며, 각 신호에 대해서 central moment 방법을 이용하여 지형별 특징 값을 검출하였다. 이러한 방법으로 평지, 모래, 자갈, 잔디에 대해서 분류가 가능함을 나타내었으며, 지형별 중첩 신호에 대해서는 추후 학습 알고리즘을 통하여 구분하도록 하겠다. 또한, 일정한 속도에서의 보행이 아닌 동적 보행에서의 실험도 함께 진행할 것이다.

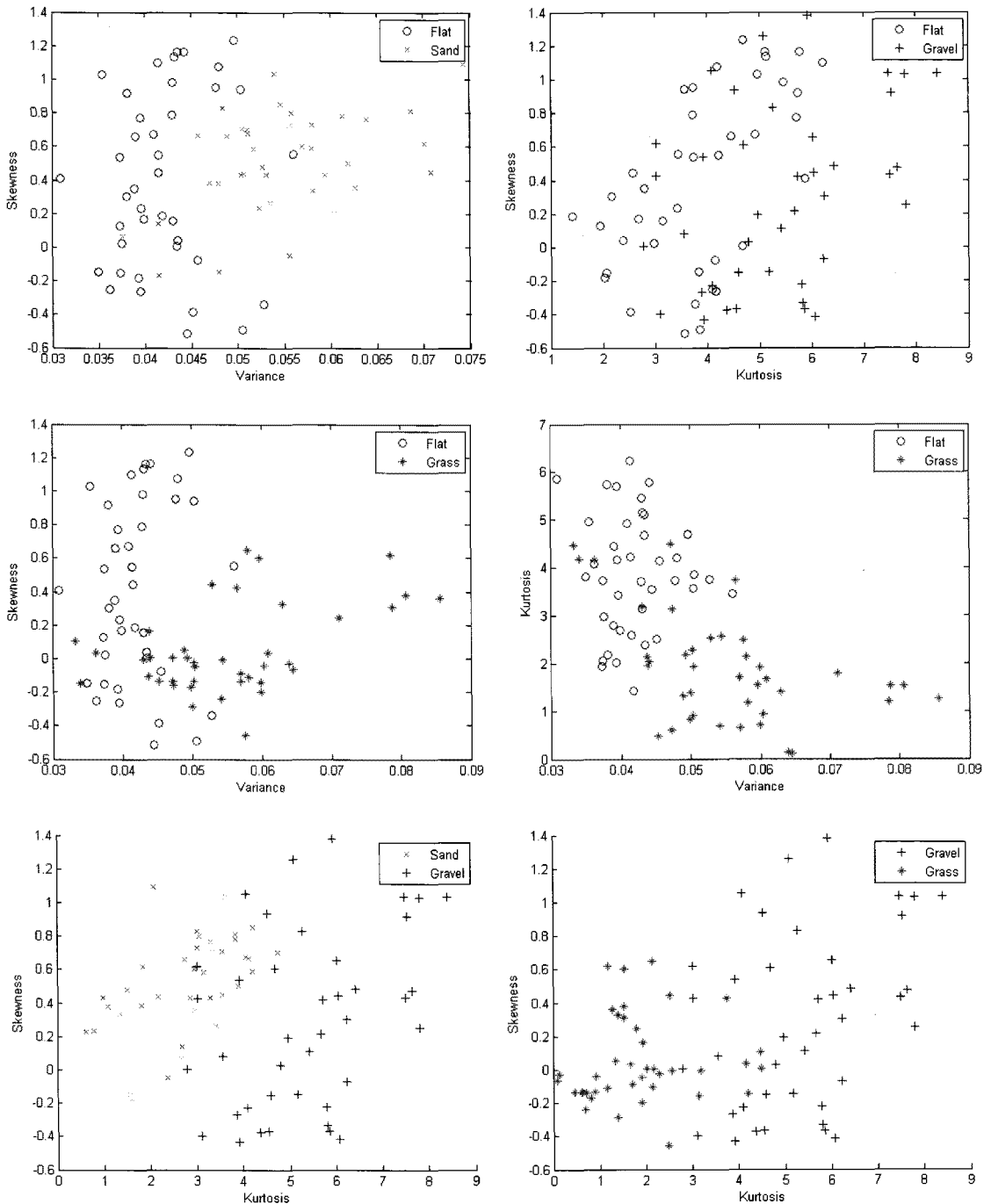


Fig. 9 Analysis method of the variance, skewness, and kurtosis

후 기

본 연구는 지식경제부 민군겸용기술개발사업

“다족형 견마로봇 플랫폼 기술 개발” 과제 및 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Hirose, S., "A study of design and control of a quadruped walking vehicle," *Int'l Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 113-133, 1984.
2. Lewis, M. and Bekey, G., "Gait adaptation in a quadruped robot," *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 3, pp. 301-312, 2002.
3. Kurazume, R., Yoneda, K. and Hirose, S., "Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle," *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 2, pp. 157-172, 2002.
4. Cham, J., Karpick, J. and Cutkosky, M., "Stride period adaptation for a biomimetic running hexapod," *Int'l Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 141-153, 2004.
5. Larson, A. C., Voyles, R. M., Bae, J. and Godzdzank, R., "Evolving Gaits for Increased Selectivity in Terrain Classification," *Proc. of the IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3691-3696, 2007.
6. Iagnemma, K., Shibly, H. and Dubowsky, S., "On-line terrain parameter estimation for planetary rovers," *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 142-3147, 2002.
7. Manduchi, R., Castano, A., Talukder, A. and Matthies, L., "Obstacle detection and terrain classification for autonomous off-road navigation," *Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 1, pp. 81-102, 2005.
8. Castano, R., Manduchi, R. and Fox, J., "Classification experiments on real-world textures," *Workshop on Empirical Evaluation in Computer Vision*, pp. 1-6, 2001.
9. Hebert, M. and Vandapel, N., "Terrain classification techniques from ladar data for autonomous navigation," *Collaborative Technology Alliances Conference*, 2003.
10. Vandapel, N., Huber, D., Kapuria, A. and Hebert, M., "Natural terrain classification using 3-d ladar data," *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 5117-5122, 2004.
11. Brooks, C. and Iagnemma, K., "Vibration-based terrain classification for planetary rovers," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1185-1191, 2005.
12. DuPont, E. M., Moore, C. A., Collins, E. G. Jr. and Coyle, E., "Frequency response method for terrain classification in autonomous ground vehicles," *Autonomous Robots*, Vol. 24, No. 4, pp. 337-347, 2008.
13. DuPont, E. M., Roberts, R. G. and Moore, C. A., "Speed independent terrain classification," *Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 240-244, 2006.