

사람 보행시 발바닥 힘정보를 측정하기 위한 지능형 신발시스템 개발 Development of Intelligent shoe system to Measure applied Force Moment on the sole of a Foot in human walking

***김갑순¹, 신희준², 허덕찬³, 김현민⁴, 윤정원⁵

**G. S. Kim¹(gskim@gnu.kr), H. J. Shin², D. C. Hu³, H. M. Kim⁴, J. W. Yoon⁵
^{1,2,3,4}경상대학교 제어계측공학과, ⁵경상대학교 기계항공공학부

Key words : Intelligent shoe, 6-axis force/moment sensor, Interference error, Walking,

1. 서론

불규칙한 지면에서 인간형 로봇이 안전하게 걷기 위해서는 그의 지능형 발을 가져야 하고, 보행시 발에 부착된 센서들로부터 발바닥에 가해지는 힘정보를 얻어야 하며, 그들을 이용하여 몸체가 균형을 잃지 않도록 제어해야 한다. 인간형 로봇과 사람이 보행하는 것이 비슷하므로 사람이 보행할 때의 발바닥에 가해지는 힘정보를 측정하고 분석할 필요가 있다.

사람이 보행할 때, 발이 땅에 접지해 있는 기간 동안에는 뒤꿈치 접촉(heel contact) → 발바닥 접촉(foot flat) → 뒤꿈치 들림(heel rise) → 발가락 들림(toe off) 과정을 거치고, 무게중심이 발뒤꿈치로부터 앞꿈치로 이동하며, 발가락 들림(toe-off)에서 땅을 박찰 때 발바닥 앞과 뒤(metatarsophalageal joint)의 상대적인 운동이 발생하게 되어 보행이 자연스럽게 된다.¹

Takao²는 신발의 앞부분과 뒷부분을 발가락 조인트(toe joint)로 연결하여 발바닥에 압력센서를 삽입한 보행분석용 신발장치를 개발하였다. 이것은 보행분석장치를 평평한 지면에 고정해야 하고 한쪽 발만 측정하므로 정확한 측정이 불가능한 단점이 있다.

본 논문에서는 6 축 힘/모멘트센서가 부착된 사람 보행시 발바닥 힘정보를 측정하기 위한 착용용 지능형 신발을 개발하였다. 4 개의 6 축 힘/모멘트센서를 설계 및 제작하였고, DSP(digital signal processor)를 이용한 2 개의 고속측정장치를 설계 및 제작하였으며, 이들을 이용하여 착용용 지능형 신발을 개발하였다. 그리고 사람이 개발된 지능형 신발을 신고 보행실험을 실시하였다.



(a) intelligent right shoe (b) intelligent left shoe
Fig. 1 Photograph of developed intelligent shoes

2. 지능형 신발

Fig. 1 은 본 논문에서 개발한 지능형 신발의 사진을 나타내고 있으며, (a)는 오른쪽 지능형 신발, (b)는 왼쪽 지능형 신발을 나타내고 있다. 지능형 신발은 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 290cm 이하의 발을 가진 성인이 신을 수 있도록 본체를 샌들로 구매하여 사용하였고, 본체의 뒤꿈치와 앞꿈치 부분에 각각 6 축 힘/모멘트센서를 부착하였으며, 그 밑에 고무를 부착하여 일반적으로 신는 신발과 비슷하게 구성하였다.

본 논문에서는 착용용 지능형 신발시스템을 제작하기 위한 6 축 힘/모멘트센서를 제작하기 위하여 Kim³이 개발한 6 축 힘/모멘트센서의 구조를 그대로 사용하고 용량만 다르

게 설계하였다. 용량은 사람의 무게를 고려하여 힘 Fx, Fy 는 500N, Fz는 1000N이고, 모멘트는 Mx, My는 18Nm, Mz는 8Nm으로 결정하였다.

6 축 힘/모멘트센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중, 평행평판보 PPB1~4 를 구성하는 보들의 크기(평행평판보의 폭 b_1, b_2, b_3 , 두께 t_1, t_2, t_3 , 길이 l_1, l_2, l_3)이다.

6 축 힘/모멘트센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격 출력은 약 $0.5 m / s$, 센서의 사각형상의 크기와 높이가 각각 80mm×80mm×19mm, 힘/모멘트 전달블록의 사각크기가 20mm×20mm, 스트레인지이의 부착위치가 길이방향으로는 1mm, 폭방향으로는 1/2, 스트레인지이의 부착위치에서의 변형률은 약 $250 \mu m / m$, 정격하중은 힘 Fx, Fy 가 500N, Fz 센서가 1000N, 모멘트 Mx, My 가 18Nm, Mz 센서가 8Nm 로 결정하였다. 스트레인지이의 부착위치는 게이지의 크기 3×7.2mm 를 고려하였고, 정격하중은 보통 사람의 무게를 고려하여 결정하였다.

본 논문에서는 결정한 설계변수들을 ANSYS 소프트웨어에 적용하여 6 축 힘/모멘트센서의 감지부를 설계하였다. 여러 번의 소프트웨어를 수행시켜 6 축 힘/모멘트센서의 각각의 정격하중인 힘들과 모멘트들을 가하여 센서들의 감지부 크기, 즉 평행평판보의 폭 b_1, b_2, b_3 , 두께 t_1, t_2, t_3 , 길이 l_1, l_2, l_3 를 결정하였다. 센서의 크기는 사각형상의 크기와 높이가 각각 80mm×80mm×19mm, 평행평판의 길이 l_1, l_2, l_3 를 모두 8mm, 폭 b_1, b_2, b_3 을 모두 12mm, 두께 t_1, t_2, t_3 를 각각 2.8mm, 1.5mm, 1.8mm 로 결정되었다.

6 축 힘/모멘트센서는 각 센서 감지부의 스트레인지이 부착위치에 스트레인지이 (N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3×7.2mm)를 부착하고 휘스톤브리지³를 구성하여 제작하였으며, Fig. 2 는 오른쪽 발을 위해 제작된 센서의 사진을 보이고 있다.



(a) Sensor for right rear (b) Sensor for right front
Fig. 2 Photograph of the developed two 6-axis force/moment sensor for intelligent right shoe

3. 고속측정장치

Fig. 3 은 오른쪽 발을 위해 제작된 6 축 힘/모멘트 센

서의 고속측정기를 나타내고 있다. 이 측정기는 DSP(digital signal processor), 외부 메모리(memory), 증폭기부(amplifier), 통신부, 전원부, 스위치부 등으로 구성되었다. DSP는 30MHz 크리스탈을 사용하여 발생된 클럭(clock)을 DSP 내부에서 5배 증폭시켜 150MHz로 동작되고, 내부 플래쉬롬에 프로그래밍된 동작 프로그램을 램에 임시로 저장한 상태에서 각각의 명령을 처리하며, A/D 컨버터, 병렬 인터페이스, 직렬 통신 인터페이스 등을 동작시킨다. A/D 컨버터는 6축 힘/모멘트 감지센서로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위하여 사용되고, 병렬 인터페이스는 LCD에 신호를 주기 위하여 사용되며, 직렬통신 인터페이스는 컴퓨터 혹은 다른 제어장치와 통신하기 위해 사용된다. 그리고 전원은 DSP와 다른 주변장치들에 전압 9V, 5V, 3.3V, 1.8V를 각각 공급한다.

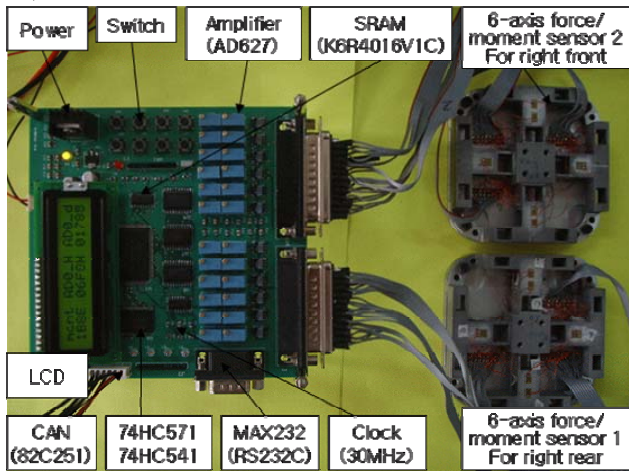
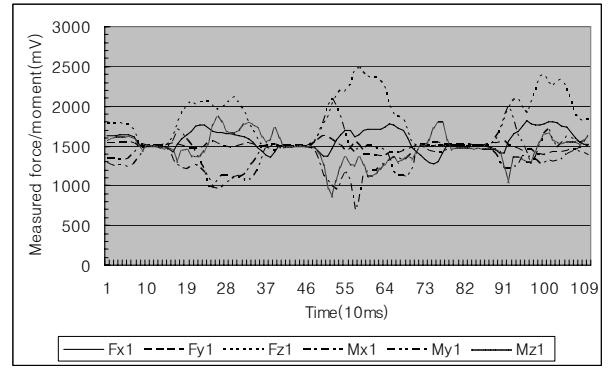


Fig. 3 Photograph of the developed measuring device for intelligent right shoe.

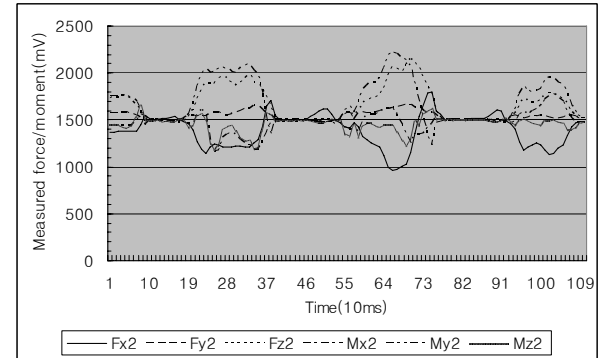
4. 보행특성실험 결과 및 고찰

지능형 신발시스템의 교정은 4개의 6축 힘/모멘트센서를 각각 6축 힘/모멘트센서 교정장치⁴에 고정하고, 정격하중 $F_x=F_y=50\text{kg}$, $F_z=100\text{kg}$ 과 모멘트 $M_x=M_y=1.8\text{kg}\cdot\text{m}$, $M_z=0.8\text{kg}\cdot\text{m}$ 를 각각 가하였다. 개발한 고속측정기의 아날로그/디지털 컨버터(ADC: analog/digital converter)가 0~3300mV 범위로 변환이 가능하므로 4개의 6축 힘/모멘트센서의 각 센서의 무부하에서의 출력을 1500mV로 증폭기의 가변저항을 가변시켜 조정하였고, 각 센서의 정격하중에서 +방향으로는 1200mV, 즉 2700mV가 되도록 조정하였으며, -방향으로는 -1200mV, 즉 300mV가 되도록 조정하였다. 따라서 지능형 신발시스템에 각각의 센서의 +정격하중을 가하였을 때 최대는 2700mV가 출력되고 -정격하중을 가하였을 때에는 300mV가 출력된다. 출력값(mV)을 하중(kg)으로 환산하면, F_x 와 F_y 센서는 $1\text{mV}=0.04167\text{kg}(41.67\text{g})$, F_z 센서는 $1\text{mV}=0.08333\text{kg}(83.33\text{g})$, M_x 와 M_y 센서는 $1\text{mV}=0.0015\text{kg}\cdot\text{m}$, M_z 센서는 $1\text{mV}=0.00067\text{kg}\cdot\text{m}$ 이다.

Fig. 4의 (a)는 평지를 천천히 걸을 때의 오른쪽 발의 뒤꿈치 센서로부터 출력된 값들을 나타낸 그래프, (b)는 앞꿈치 센서로부터 출력된 값들을 나타낸 그래프이다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 사람의 체중을 감지하는 F_z 센서의 출력값은 센서가 지면과 접촉할 때 크게 나타났고, M_y 센서의 출력값은 발의 뒤꿈치로부터 앞꿈치로 이동할 때 +와 -값으로 증가와 감소를 반복하며, M_x 센서의 출력값은 보행시 좌우측으로의 무게중심이 이동함에 따라 출력값이 크게 나타난다. 그리고 F_x , F_y , M_z 센서는 보행시 각 방향으로 가해지는 그들의 값을 나타내고 있다. 측정결과를 분석하면 사람이 보행할 때 예상하였던 것과 같이 힘과 모멘트들이 출력됨을 확인할 수 있었다.



(a) heel of right shoe



(b) toe of right shoe

Fig. 4 Walking characteristic test on flat surface of land under taking the intelligent shoe system

· 결론

본 논문에서는 4개의 6축 힘/모멘트센서, 2개의 고속측정장치로 구성되는 지능형 신발시스템을 개발하였다. 제작한 6축 힘/모멘트센서는 상호간섭오차가 3%이내로 상용화된 센서의 그것과 비슷하며, 고속측정장치는 안정도실험결과 $\pm 3\text{mV}$ 이내(0.5%)이내의 오차를 보였다. 그리고 지능형 신발시스템을 신고 걷는 특성실험결과 사람의 보행시 예상했던 힘과 모멘트의 출력이 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 개발한 지능형 신발시스템은 사람의 보행특성실험에 사용될 수 있을 뿐만 아니라 인간형 로봇의 지능형 발에 기초실험 데이터로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

후기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10468-0).

참고문헌

1. Nishiwaki, K. and S. Kagami, "Toe Joint that Enhance Bipedal and Full Body Motion", IEEE Int. Conf. on Rob. and Auto., pp. 3105-3110, 2002.
2. Takao, S., and Ohta, H., Yokokohji, Y., Yoshikawa, T., "Function Analysis of Human-like Mechanical Foot, using Mechanically Constrained Shoes", Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3847-3852, 2004.
3. Kim, G. S. and Yoon, J. W., "Development of 6-axis force/moment sensor for robot's intelligent foot," KSPE, Vol. 24, No. 7, pp. 90-97, 2007.
4. Kim, G. S., Shin, H. J. and Kim, H. M., "Development of multi-axis force/moment sensor calibration system and its uncertainty evaluation," The Korean Society of Mechanical Engineers Proceedings, pp.1025-1030, 2006.