

초음파 센서를 이용한 트레드밀의 자동속도 제어시스템

An Automatic Speed Control System of a Treadmill with Ultrasonic Sensors

마누롱 오라리우스, 윤정원*
(Manurung Auralius¹ and JungWon Yoon¹)

¹Gyeongsang National University

Abstract: In this paper, we have developed an automatic velocity control system of a small-sized commercial treadmill (belt length of 1.2 m and width of 0.5 m) which is widely used at home and health centers. The control objective is to automatically adjust the treadmill velocity so that the subject's position is maintained within the track when the subject walks at a variable velocity. The subject's position with respect to a reference point is measured by a low-cost sonar sensor located on the back of the subject. Based on an encoder sensor measurement at the treadmill motor, a state feedback control algorithm with Kalman filter was implemented to determine the velocity of the treadmill. In order to reduce the unnatural inertia force felt by the subject, a predefined acceleration limit was applied, which generated smooth velocity trajectories. The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method in providing successful velocity changes in response to variable velocity walking without causing significant inertia force to the subject. In the pilot study with three subjects, users could change their walking velocity easily and naturally with small deviations during slow, medium, and fast walking. The proposed automatic velocity control algorithm can potentially be applied to any locomotion interface in an economical way without having to use sophisticated and expensive sensors and larger treadmills.

Keywords: treadmill, virtual reality, velocity adaptation, and ultrasonic sensors

I. 서론

최근 들어 식생활 변화로 비만 인구가 급증하고, 건강에 대한 관심도가 높아져 실내에서 간편하게 즐길 수 있는 실내 운동기구에 대한 수요가 늘어나고 있다. 이런 수요에 맞춰 운동기구에 자동화 및 첨단 IT기술이 접목되면서 헬스케어 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대중화에 성공한 대표적인 헬스케어 로봇으로 회전식 벨트 위를 달리거나 걷는 운동기구인 트레드밀(러닝머신)을 들 수 있고 가장 수요가 많은 실내운동기구라고 할 수 있다. 최근에는 운동하는 사람의 심박 수, 체온, 호흡, 칼로리 소비량 등을 파악해서 최적의 운동프로그램을 선택해주는 등 트레드밀에 IT 기능이 추가되고 있으며, 단일 품목으로 연간 30억 달러 규모의 세계시장을 형성하고 있다[1].

일반적으로, 사용자는 전동트레드밀을 이용하여 걷기 또는 러닝 운동을 하는 중에 운동의 지루함을 해소하기 위하여 속도를 취향에 따라 변화시키면서 걷기 또는 러닝 운동을 하게 된다. 하지만, 사용자가 걷거나 뛰는 동안에 제어판의 벨트 속도 조절 버튼을 일일이 조작하여야 하므로 번거로운 뿐만 아니라 운동 중에 균형이 흐트러져 위험을 야기할 수 있다. 또한, 트레드밀에서의 운동은 야외의 달리기만큼 환경의 다양성을 제공하지 않아 지속적이고 효과적인 운동을 수행하는 것을 방해하는 요소로 작용한다. 반면, 피드백에 의한 트

레드밀의 속도제어를 통해 사용자가 자연스럽게 이동속도를 변경할 수 있고, 이때의 이동 정보가 가상환경으로 전달되어 사용자의 몰입감을 증대시킬 경우 기존 트레드밀에서의 단조로운 운동에 대한 단점들을 극복할 수 있다.

트레드밀 관련 국내 연구 내용으로는 남상남 및 성민재[2]는 가상현실을 이용하여 10km/h속도의 트레드밀에서의 생리적인 영향을 연구하는 논문을 발표 하였으나, 트레드밀에서의 자율적인 속도 갱신 및 그 정보를 가상환경으로 전달하는 연구는 국내에서는 아직 제시되고 있지 않다. 윤정원 외[3,4]는 직·병렬 타입의 로봇 매니퓰레이터를 개발하여 다양한 가상지면에서 걸음을 통한 상호작용이 가능토록 로봇 장치들을 개발하고 가상현실과 연동시켜 보행재활에 적용하였지만 복잡성으로 인해 트레드밀에 비해 안전성 및 가격경쟁력이 떨어지는 단점이 있다.

국의 관련 연구로는 가상현실 이동훈련을 허락하고 가속 동안 발생하는 관성력을 보상하기 위해 전동트레드밀에 1자유도 기계적 장치(mechanical tether) [5-7]를 적용하여 중심위치에서 벗어난 정도를 측정하여 트레드밀 속도를 피드백 제어 하는 연구가 제시되었다. 그 외, 트레드밀의 자동속도갱신을 위한 사용자의 위치를 측정하기 위해 트레드밀에 삽입된 압력센서[8], 초음파센서[9] 및 광학식[10]등이 사용되었다.

현재까지 트레드밀 관련 국내외 연구현황은 사용자의도에 따른 트레드밀 속도갱신제어[5-10], 트레드밀과 속도갱신정보의 가상환경연동[11], 트레드밀에서 관성력을 기계시스템을 이용하여 보상하는 연구[5] 등이 진행되었으나 현재까지 정상인이 자연스럽게 속도를 변화시킬 수 있을 만큼 만족할 만한 제어시스템이 개발되고 있지 않다. 기존에 초음파 센서[9]를 사용하였을 경우에는 센스시스템의 잡음 및 낮은 정밀도

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 12. 17., 수정: 2011. 2. 22., 채택확정: 2011. 3. 27.

마누롱 오라리우스, 윤정원: 경상대학교 기계항공공학부 항공기부품 기술연구센터(auralius@lavabit.com/jwyoona@gnu.ac.kr)

* LG연암재단의 해외연구교수사업의 지원 및 교육과학기술부 소속 한국연구재단 중점연구소 사업 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0094016).

로 인하여 안정성(safety)을 보장하기 힘들었고 광학식의 경우는 안정성 유지를 위해 넓은 (2m*6m) 트레드밀 사이즈[10]를 필요로 하였다. 또한, 사용자의 몸에 기계적인 장치[5-7]부착을 통한 힘 제어(force feedback)방식은 전신(whole body)에 작용하는 관성력을 집중하중으로 대처함으로 보상에 한계가 있고, 기계적인 장치의 부착으로 사용자 움직임을 부자연스럽게 하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 저가의 초음파 센서를 이용하여 정상 트레드밀 크기에서 자연스럽게 트레드밀 속도를 사용자가 능동적으로 변화시킬 수 있는 트레드밀 제어시스템을 제안하고자 한다. 제안된 시스템은 칼만 필터 이론을 적용하여 트레드밀 모터의 가속도기반 제어, 초음파 센서에 칼만 필터를 적용하여 안정적인 사용자 위치 및 속도예측, 사용자의 갑작스런 움직임을 제한하기 위한 비선형게인 및 가속도 레귤레이터(acceleration regulator)를 통하여 저가의 센서 시스템을 이용하여 안정적인 인간-기계 상호작용 시스템을 구현하였다.

II. 자동 속도제어 알고리즘

트레드밀 상호작용 제어기는 크게 두 부분으로 나뉜다. 트레드밀 모터 속도를 조절하기 위한 하위수준의 슬라이딩 모드 제어기(SMC) [12]와 사용자가 보행속도를 변화시킬 때 트레드밀의 자동속도 변화를 위한 상위수준의 자동속도 제어기로 나눌 수 있다.

1. 하위레벨 제어기(low level control)

1.1 트레드밀 모터 속도제어

본 실험에 사용된 트레드밀은 국내산 상용 운동용 운동기구장치(Healma, South Korea)로 AC모터 (Eul Ji Electrical Machinery Co., Ltd., Korea) 및 주파수 방식 모터 드라이버(LS iG5A, variable frequency drive)로 구성된다. 트레드밀에 부착된 기존 버튼 식 속도제어기는 분리되고 NI사의 CompactRIO가 실시간 제어기로 사용되었다. 트레드밀의 벨트 속도를 측정하기 위하여 추가적으로 회전엔코더(Mecapion Co., Ltd., Korea)가 벨트의 회전축에 장착되었다(그림 1). 하위수준 제어기의 주 목적은 트레드밀의 명령 궤적 속도를 정확히 추종하는 것이다. 트레드밀의 속도제어에 사용되는 AC서보모터는 사용자의 무게에 따라 모터와 벨트 사이의 마찰력 등이 변화되어 정밀 제어에 어려움이 있다. 따라서 외란에 대응하기 위해

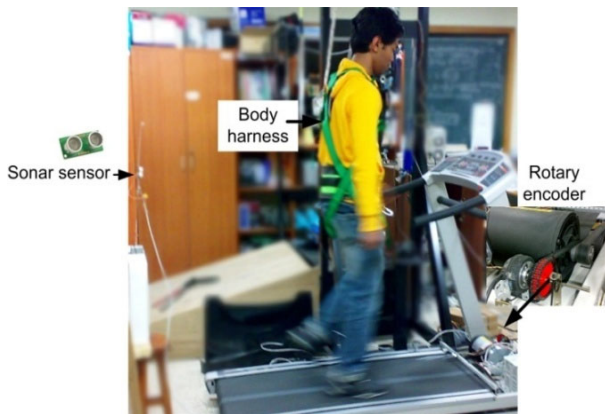


그림 1. 자동속도제어 구현을 위한 트레드밀 시스템.
Fig. 1. A treadmill system for automatic walking speed control.

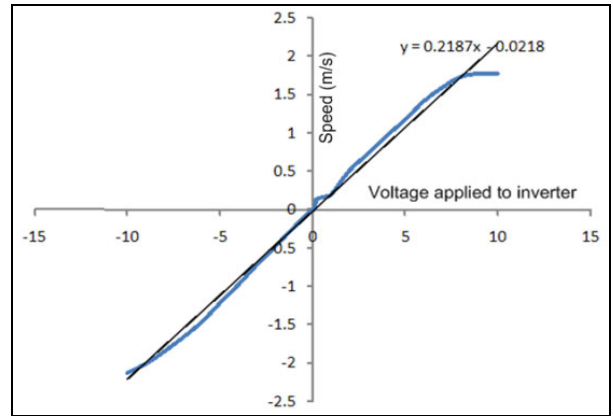


그림 2. 모터 압력 및 속도관계 유도를 통한 트레드밀 식별.
Fig. 2. Treadmill identification with motor speed and voltage relations.

강건제어기의 일종인 슬라이드모드 제어기(SMC)가 하위수준 제어기로 사용되었다. SMC는 안정성 조건을 만족하도록 2개의 값 사이를 스위칭하는 고속의 스위칭 제어기로 시스템의 정확한 동적 모델링 정보 없이 강건성을 유지 할 수 있는 장점이 있다. SMC제어기는 500Hz의 샘플링 주기로 NI CompactRIO 하드웨어에서 실시간으로 구현되었다.

트레드밀 속도제어를 위한 SMC의 슬라이딩 표면 s 는 다음과 같이 정의된다.

$$s = \lambda e_1 + e_2 \tag{1}$$

$$e_1 = v_d - v, \quad e_2 = \frac{dx_1}{dt} = a_d - a \tag{2}$$

여기서 e_1 와 e_2 는 각각 속도 및 가속도 오차 값을 나타내고, v_d 와 a_d 는 명령 속도 및 가속도 값을, v 와 a 는 측정된 속도 및 가속도 값을 나타낸다. 변수 λ 는 슬라이딩 표면의 경사[13]를 나타내는 양의 정 부호(positive definite constant) 값을 나타낸다. 마지막으로 SMC를 위한 제어출력 u 값은 다음과 같이 표현된다.

$$u = \hat{u} + u_{eq} \tag{3}$$

여기서 \hat{u} 는 예측된 제어 신호, u_{eq} 는 스위칭 동작을 포함하는 동등 제어 신호를 나타낸다. 동등제어신호 u_{eq} 는 다음과 같이 정의된다.

$$u_{eq} = \begin{cases} -K \text{sign}(s), & \text{abs}(s) > \phi \\ -K \frac{s}{\phi}, & \text{abs}(s) < \phi \end{cases} \tag{4}$$

여기서 K 는 스위칭 게인, ϕ 는 스위칭 동작이 일어나는 경계층을 나타낸다. SMC는 스위칭 동작 때 채터링(chattering)을 발생시킬 수 있다. 채터링 현상을 감소시키기 위해서 스위칭 게인 K 을 작게 유지 해야 하고, 이를 위해 정확한 예측 제어 신호 \hat{u} 의 획득이 필요하다[14]. 따라서 예측 제어신호 \hat{u} 에 관해서 실험적으로 모터에 적용된 전압 및 그에 따른 트레드밀 속도의 입력력 선형관계식을 실험적으로 구하였고(그림 2) 그 관계식은 식 (5)와 같다.

$$\hat{u} = \frac{v_d + 0.0218}{0.2187} \quad (5)$$

제어기 변수 K , λ , and ϕ 는 실험적으로 선택되었고 사용자의 부자연스런 움직임을 유도하는 오버슈트(overshoot)를 피하기 위하여 선택 되었다.

1.2 칼만 필터(Kalman filter)

SMC제어의 경우 속도와 가속도의 측정값이 필요하다. 하지만, 제안된 트레드밀 시스템의 경우 모터 축에 장착된 엔코더 센서만을 가지고 있어 엔코더 센서로부터 속도와 가속도를 관측(observer)할 필요가 있다. 하지만 엔코더의 이산신호(discrete signal)로 인해 단순한 수치 미분으로 가속도를 관측할 경우 잡음 신호가 추가되어 신뢰성 있는 가속도 신호를 획득하기 어렵다.

본 논문에서는 칼만 필터(Kalman filter) 이론을 이용하여 잡음 신호가 포함될 때, 정확한 속도 및 가속도 값을 관측할 수 있도록 하였다. 칼만필터는 재귀적(recursive) 필터의 일종으로 측정 시 발생하는 잡음의 공분산(covariance)이 알려져 있을 경우 잡음의 최적 필터링을 제공하며, 좋은 동적 특성과 외란에의 강인성(resistance)을 가진다[15].

트레드밀 벨트의 위치, 속도, 가속도의 관계식을 잘 표현하는 kinematic model [16]은 다음과 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w \quad (6)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0]x + v \quad (7)$$

여기서 각 상태변수 x_1, x_2, x_3 은 각각 트레드밀 의 위치, 속도, 가속도이다. 변수 w 는 공분산 q 를 가지는 측정(measurement) 잡음이고, v 는 공분산 r 을 가지는 프로세스(process) 잡음이다. 트레드밀 벨트의 속도, 가속도를 예측하기 위해 스칼라 칼만 필터가 식 (6), (7)의 kinematic model로 구현될 수 있다. 관측을 위한 첫 번째 단계로 이전 값 $\hat{x}(k-1)$ 에서 현재 값 $\hat{x}(k)$ 을 예측할 수 있다.

$$\hat{\dot{x}}(k) = \hat{\dot{x}}(k-1) \quad (8)$$

관측값 $\hat{x}(k)$ 을 교정할 수 있도록 사용된 칼만 이득은 다음과 같이 표현된다.

$$G(k) = \frac{p(k-1)}{p(k-1) + q + r} \quad (9)$$

여기서 $p(k-1)$ 은 관측 오차 공분산으로 다음과 같이 갱신될 수 있다.

$$P(k) = (1 - G(k))P(k-1) + q \quad (10)$$

다음 단계는 식 (8)에서 예측 값 $\hat{x}(k)$ 을 식 (11)을 이용하여 교정하는 것이다.

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k-1) + G(k)[y(k) - \hat{y}(k-1)] \quad (11)$$

여기서 $y(k)$ 은 획득된 측정 값이다. 식 (8)에서 (11)까지의 프로세스는 반복적으로 오차 공분산 값에 수렴할 때까지 수

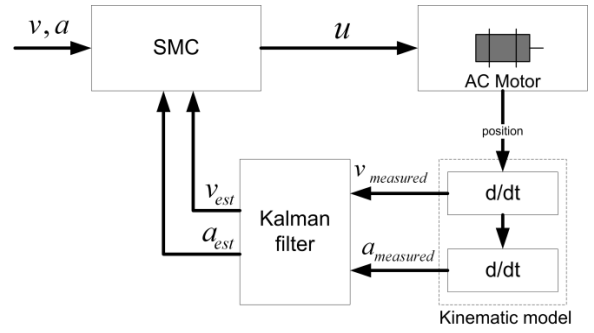


그림 3. 상태변수 관측을 위한 칼만필터를 가지는 슬라이딩 모드제어.

Fig. 3. Sliding mode control with Kalman filter for state estimation.

행된다. 초기 값이 P 에 관해서 필요하고, q 와 r 값은 실험적으로 획득된다. 최종적으로 칼만필터가 고려된 하위수준 제어기의 블록선도(block diagram)는 그림 3에 나타나 있다.

2. 상위레벨제어기(속도적응제어)

2.1 센싱 시스템

트레드밀에서 사용자의 위치를 측정하기 위해서 여러 센서들이 고려될 수 있지만 본 논문에서는 값싸고 사용자에게 부착할 필요가 없으면서 상대적으로 만족할 만한 성능을 제공하는 초음파 센서(Devantech SRF05 Ultrasonic Ranger, Devantech Ltd., England)를 사용하였다. 그림 1에 보여진 것 같이 초음파센서는 사용자 위치를 측정하기 위해서 트레드밀 뒤쪽에 설치되어40Hz의 샘플링주기로 측정되었다. 초음파센서는 초음파로 송파신호(sound of ping)를 전달장치(transmitter)를 통해서 보낼 때 카운터가 활성화(active)되고 에코가 되돌아와서 리시버(receiver)에 의해서 확인될 때까지 카운터 값을 증가시킨다. 그림 4는 개발된 트레드밀 시스템에 사용된 초음파 센서의 보정 결과(calibration result)값을 보여주고 있고, 이때 y축은 초음파의 카운트 값(microseconds)을 x축은 그에 대응하는 거리 값(cm)을 나타낸다.

2.2 상호작용제어기

초기에 사용자는 그림 5와 같이 트레드밀 후방에서 대략 40cm정도 떨어진 기준(reference) 위치(x_{ref})에서 있다. 사용자가 앞으로 이동함에 따라 ($x \geq x_{ref}$) 측정된 사용자 위치는 증가되고, 트레드밀은 자동적으로 속도를 증가 시켜 사용자를 기준 위치 뒤쪽으로 이동시켜 ($x \leq x_{ref}$) 속도를 자동으로

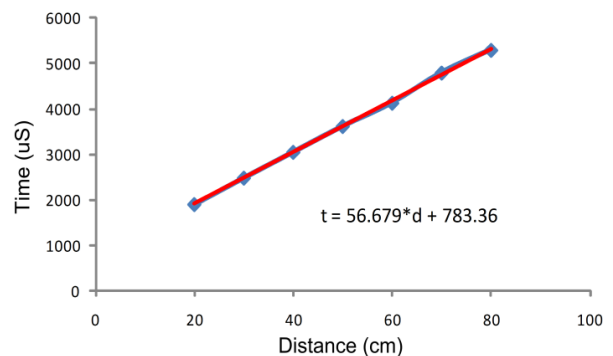


그림 4. 초음파센서 SRF05의 보정 결과.

Fig. 4. Calibration result of sonar sensor SRF05.

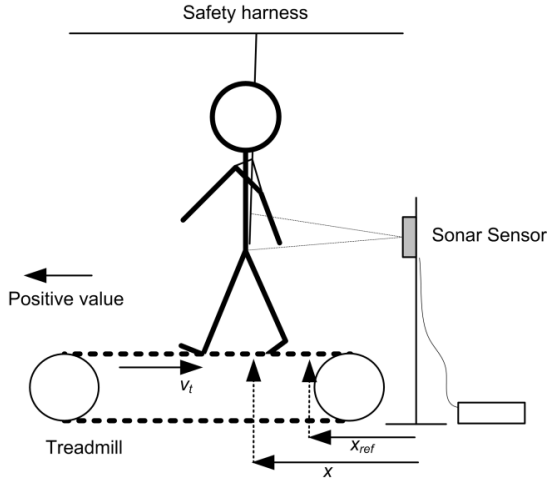


그림 5. 자동속도구현을 위한 트레드밀 셋업.

Fig. 5. Speed adaptation treadmill setup.

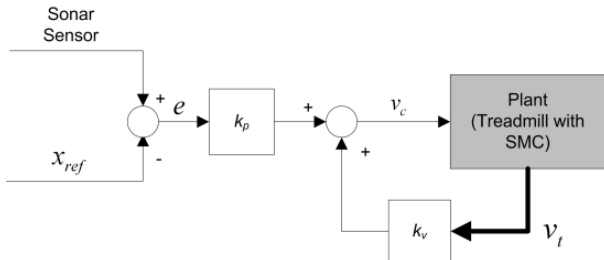


그림 6. 트레드밀 자동속도제어를 위한 블록선도.

Fig. 6. Basic control diagram for treadmill automatic speed control.

멈추게 한다. 자동속도제어 알고리즘에 대한 제어출력 값 v_c 은 다음과 같이 정의 된다.

$$v_c(t) = k_p(x_{ref} - x(t)) + k_v v_t(t) \quad (12)$$

여기서 k_p 와 k_v 는 조절 가능한 양의 이득이고 트레드밀은 사용자 보행방향 반대쪽으로 움직이기 때문에 음의 속도 ($v_t \leq 0$) 를 나타낸다. 사용자가 앞쪽 방향으로 이동함에 따라 트레드밀은 사용자를 기준위치(x_{ref})에 가까이 위치하도록 속도를 변화시킨다. 정확한 트레드밀 속도 제어를 구현하기 위해 상위제어기는 상태방정식 피드백(state feedback)에 기반한 제어기가 구현되었다.

그림 6은 제안된 제어기설계 기법의 개요를 나타내고 있다. 제안된 제어기는 정상상태(steady state)에서의 오차 및 제어기 반응속도를 향상시키도록 게인 값이 설정되었다.

III. 제어기 강화기법

1. 비선형게인(nonlinear gain)

기존의 일반 트레드밀은 상대적으로 벨트 길이(1.2m)가 작아 사용자가 보행속도를 변화시킬 경우 트레드밀 밖으로 쉽게 이탈할 수 있다. 따라서 보행속도 변화 동안에도 사용자가 트레드밀 벨트 안에서 지속적이고 안정적으로 보행 할 수 있도록 자동속도제어기가 정교하게 구현 되어야 한다. 속도 변경 동안 사용자의 벨트 이탈 방지를 위해 제안된 제어알고리즘은 사용자의 위치 제어 이득을 비선형 이득으로 변형되

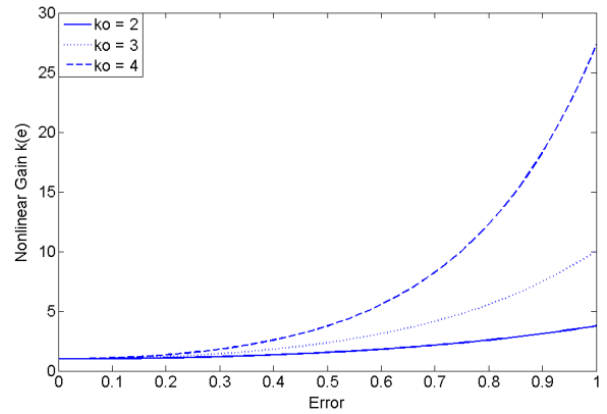


그림 7. 오차 함수로의 비선형 게인 $k(e)$.

Fig. 7. Nonlinear gain $k(e)$ as a function of error e .

게 하였다. 비선형 이득을 이용하여 위치 오차 값이 증가할 경우 높은 이득 값으로 트레드밀 속도를 증가시켜 사용자 위치를 기준 위치에 가능한 가깝게 유지하도록 하였다. 반면, 사용자가 기준 위치 근처에 위치할 경우에는 이득이 자동으로 적어져 사용자가 자유롭게 속도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 비선형 이득을 추가한 제어기 출력 v_c 은 다음 식 (13)과 같이 표현된다.

$$v_c(t) = k_p(k(e(t))) + k_v v_t \quad (13)$$

여기서 $e(t) = x_{ref} - x(t)$ 은 위치 오차, $k(e)$ 는 오차 함수로 비선형 이득 이다. 본 논문에서 사용된 비선형 이득 $k(e)$ 는 다음의 함수 $k(e)$ [17]로 표현된다.

$$k(e(t)) = \frac{\exp(k_o e(t)) + \exp(-k_o e(t))}{2} \quad (14)$$

여기서 k_o 는 사용자 정의된 양의 상수이고, 그림 7은 비선형 이득의 입력 및 출력 관계 $k(e(t))$ 를 나타내고 있다.

2. 가속도 레귤레이터(acceleration regulator)

식 (12) 및 (13)에 표현된 상호작용 제어기는 가속도에 관련된 직접적인 제어를 포함하고 있지 않지만, 사용자의 안전을 위해 트레드밀의 큰 가속을 피하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 트레드밀의 최대 허용가능 가속도를 제한하기 위해 가속도 레귤레이터를 사용하였고 다음과 같이 표현된다.

$$v_d(t) = sat(a_d, a_{max}) \quad (16)$$

여기서

$$a_d(t) = \frac{v_c(t) - v_c(t-1)}{\Delta t} \quad (17)$$

$$sat(a_d, a_{max}) = \begin{cases} v_c(t-1) + (a_{max} \Delta t), & a_d \geq a_{max} \\ v_c(t), & a_d \leq -a_{max} \end{cases} \quad (18)$$

변수 a_{max} 는 사용자 정의된 최대 허용 가속도를 나타낸다. 허용가능 가속도 a 는 트레드밀 모터제어기 SMC로 보내져서 트레드밀의 가속도 제어 입력 값으로 사용된다. 따라서 트레드밀에서 자율보행 동안 자동속도제어를 위한 최종 제어기 구조는 그림 8과 같이 구현되었다.

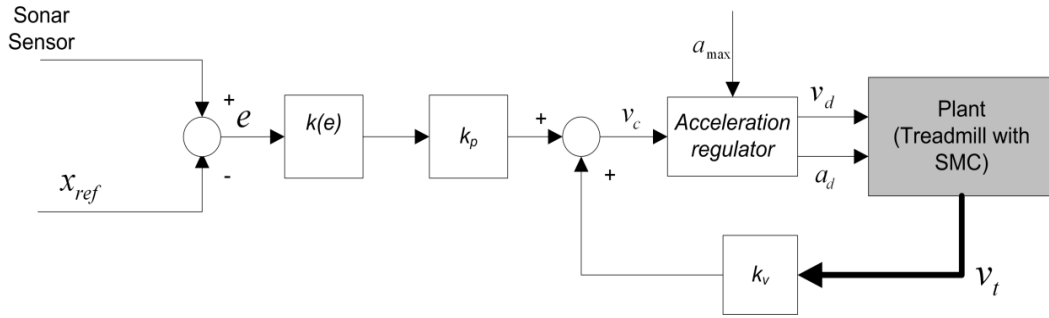


그림 8. 비선형 게인 및 가속도 레귤레이터를 가지는 트레드밀 자동속도조절 제어 알고리즘.

Fig. 8. Control algorithm for automatic speed control of a treadmill with a nonlinear gain and acceleration regulator.

IV. 실험 결과

본 장에서는 제안된 제어기의 성능을 실험을 통한 평가 및 사용자 평가를 통해 검증하고자 한다. 상위제어기인 속도 적응제어기의 설계 변수는 $k_p = 1.5$, $k_v = 0.1$, $k_o = 4$, $e_{max} = 1$ 로 지정되었고, 트레드밀 모터제어를 위한 슬라이딩 모드제어기 변수는 $\lambda = 10$, $\phi = 2$, $K = 2$ 로 각각 지정 되었다. 엔코더 측정으로부터 속도 및 가속도를 측정하기 위해 사용된 칼만필터 관측기의 경우 에 사용된 공분산 값은 속도의 경우 $q = 15$, $r = 0.01$ 가속도의 경우 $q = 500$, $r = 0.001$ 로 지정되었다. 또한, 최대 트레드밀 속도는 사용자 안전을 위해서 1.5m/s로 제한 되었다. 이 때 상위제어기는 40Hz로 하위제어기는 500Hz의 샘플링 주기로 제어기가 각각 갱신 되었다. 또한 2개의 추가적인 초음파 센서가 트레드밀 끝 단에 삽입되어 위급상황을

탐지하기 위해 사용되었다. 사용자의 위치가 트레드밀 끝 단 에 너무 가깝게 위치하게 되면 초음파 센서들이 긴급 정지 신호를 발생시킨다. 그 외, 추가적인 안전장치로 정지스위치가 트레드밀 정면 프론트 패널에 설치되었고, 사용자는 천장에 설치되어 있는 하니스(harness)를 착용하도록 하였다.

첫 번째 실험 목적은 사용자가 짧은 시간 동안 갑자기 속도를 변화시켰을 때 제안된 알고리즘의 영향을 살펴보는 것이다. 이때, 최대 허용가능 가속도는 1 m/s²로 설정되었다. 그림 9는 사용자 실험 동안 제안된 제어기가 허용가능 가속도 크기 안에서 속도를 변화 시키고 있는 것을 볼 수 있다.

다음으로 제안된 시스템의 사용자 평가를 통해 전반적인 시스템의 성능을 살펴보고자 하였다. 3명의 건강한 남자가 (나이 24-28, 키 165-175) 피험자로 트레드밀 자동속도제어 실험에 참여하였다. 1-2분 동안의 짧은 훈련 후에 피험자들은 바로 트레드밀에서 자연스럽게 보행 및 속도를 변화시킬 수 있었다.

그림 10은 피험자의 속도 적응 실험 동안에 트레드밀 벨트의 자동속도 궤적을 나타내고 있다. 실험 동안 피험자는 보

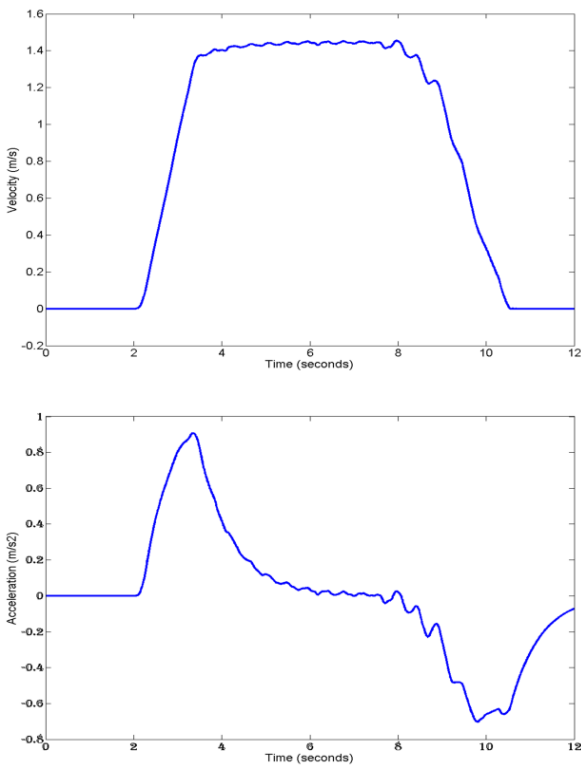


그림 9. 사용자가 보행속도를 갑자기 변화시켰을 때의 벨트 속도 및 가속도.

Fig. 9. Belt speed and acceleration when subjects increased and decreased their walking speed significantly.

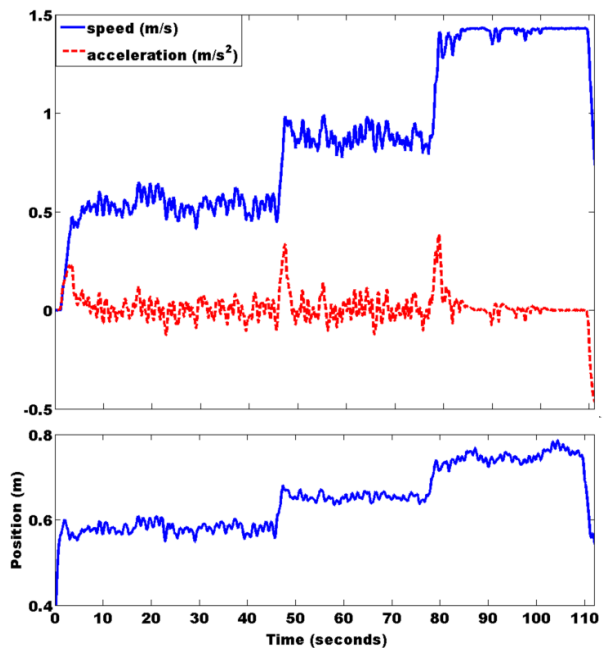


그림 10. 보행 속도 조절 결과.

Fig. 10. Gait speed adaptation results.

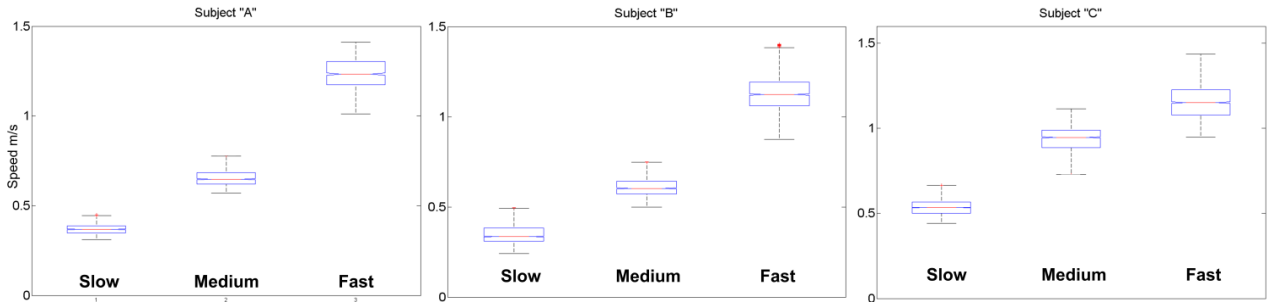


그림 11. 각 피험자들의 자동 선택된 보행조건들의 비교.
 Fig. 11. Comparisons of self-selected walking conditions of each subject.

표 1. 사용자평가 결과.
 Table 1. User study result.

Subject	Height (cm)	Walking speed (average/standard deviation)		
		Slow	Medium	Fast
A	175	0.37 / 0.03	0.65 / 0.05	1.23 / 0.09
B	174	0.35 / 0.07	0.61 / 0.06	1.13 / 0.10
C	165	0.53 / 0.04	0.94 / 0.07	1.16 / 0.10

행 속도를 점차적으로 증가시키도록 요청 받았고, 트레드밀 벨트속도가 자동으로 증가되었다.

또한 피험자가 보행을 중단함에 따라 트레드밀 벨트 속도가 자연스럽게 바로 감소되었다. 위 실험 동안 속도변화는 허용가능 가속도 범위에서 발생하는 것을 확인하였다. 모든 피험자가 트레드밀의 자동속도제어 알고리즘으로 익숙해진 이후에 느림, 중간, 빠름의 3가지의 편안한 보행 조건으로 보행하도록 요청 받았다. 피험자는 각 조건에서 20초 동안 자율 보행을 수행하였고, 이때 각 보행 조건에서의 평균값 및 표준편차 값이 계산되었다. 그림 11 및 표 1에 나타난 것 같이, 모든 피험자는 그들의 자율 보행 속도를 안정적으로 유지할 수 있었다. 일원분산분석(one-way analysis of variance)을 이용한 각 피험자 데이터의 신뢰수준(confidence level, $p < 0.05$) 분석 결과 적은 표준편차로 각 조건에서 명확한 차이를 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 일반 가정, 헬스센터 및 병원에서 널리 사용되는 범용 트레드밀을 이용하여 사용자의 보행 속도를 자율적으로 조절할 수 있도록 하는 자동속도 제어 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 저가의 초음파 센서를 이용하여 사용자에게 별도의 센서를 부착할 필요가 없어 경제적이고 사용하기 간편한 장점이 있다. 또한, 칼만 필터를 사용하여 초음파 센서 및 엔코더에서 획득된 센서신호에서 사용자 위치, 속도, 가속도를 안정적으로 관측할 수 있었다. 슬라이딩 모드 강건제어기를 이용하여 트레드밀 속도 가속도 제어를 사용자 무게에 의한 비선형 마찰력에 대응할 수 있도록 하였다. 상위 수준의 제어기의 경우 사용자의 보행 속도 의도를 파악하여 트레드밀 속도를 자동으로 변경 하는 역할을 담당하고, 이때 급격한 속도 변경 시 트레드밀 벨트 밖으로 나가는 경우를 방지하고 사용자에게 급격한 관성력이 발생하는 것을 감소시키기 위하여 비선형 게인 및 가속도 레귤레이터를 적용하였다. 사용자 평가 결과, 피험자는 최소한의 훈련시간으로 개발된 트레드밀 시스템을 이용하여 자연스럽게 보

행 속도를 자동으로 변경할 수 있었다. 개발된 트레드밀의 자동속도제어기를 이용할 경우 사용자의 향상된 운동 인지(perception) 기능으로 다양한 가상현실 시스템에 적용할 수 있고, 환자의 바이오피드백을 통한 효과적인 재활훈련에도 적용할 수 있다. 추후연구로, 개발된 트레드밀 시스템에서의 보행 분석(gait analysis)을 통한 보다 객관적 성능 검증 및 실제 보행재활에의 효율성을 검증하기 위한 환자의 임상 실험을 수행하고자 한다.

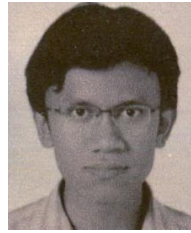
참고문헌

- [1] 전자신문 2007년 2월23일자, 헬스케어로봇.
- [2] S. Nam and M. Sung, "The study for treadmill exercise using virtual reality simulation program view of the physiology," *The Korean Journal of Physical Education*, vol. 44, no. 5, pp. 391-399, 2005.
- [3] B. Novandy and J. Yoon, "Control and VR navigation of a gait rehabilitation robot with upper and lower limbs connections," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 15, no. 3, pp. 315-322, Mar. 2009.
- [4] J. Yoon, J. Ryu, and J. Park, "Intelligent control of a virtual walking machine for virtual reality interface," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering(in Korean)*, vol. 12, no. 9, pp. 926-934, Sep. 2006.
- [5] R. R. Christensen, J. M. Hollerbach, Y. Xu, and S. G. Meek, "Inertial-force feedback for the treadport locomotion interface," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 9, pp. 1-14, 2000.
- [6] J. Zitzewitz, M. Michael Bernhardt, and R. Riener, "A novel method for automatic treadmill speed adaptation," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15, no. 3, 2007.
- [7] A. Koenig, C. Binder, J. von Zitzewitz, X. Omlin, M. Bolliger, and R. Riener, "Voluntary gait speed adaptation for robot-assisted treadmill training," *IEEE 11th Int. Conf. on Rehabilitation Robotics*, Japan, Jun. 2009.
- [8] M. G. Farnet, "Treadmill having an automatic speed control system," U.S. Patent 5 368 532, Nov. 1994.
- [9] L. Lichtenstein, J. Barabas, R. L. Woods, and E. Peli, "A feedback-controlled interface for treadmill locomotion in virtual environments," *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 4, no. 1, 2007.
- [10] J. L. Souman, P. R. Giordano, I. Frissen, A. D. Luca, and M. O. Ernst, "Making virtual reality real: perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm," *ACM Transaction on Applied*

- Perception*, vol.7, Feb. 2010.
- [11] F. H. Durgin, K. Gigone, and R. Scott, "Perception of visual speed while moving," *J. Exp. Psychol. Hum Percept. Perform.*, vol. 31, pp. 339-353, 2005.
- [12] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and application to electric drives," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, pp. 41-49, 1993.
- [13] J. E. Slotline and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [14] H. Lee and V. I. Utkin, "Chattering suppression methods in sliding mode control systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 31, pp. 179-188, 2007.
- [15] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong, and S. L. Ho, "Speed estimation of an induction motor drive using an optimized extended Kalman filter," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, Feb. 2002.
- [16] P. R. Belanger, "Estimation of angular velocity and acceleration

from shaft encoder measurement," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, France, 1992.

- [17] Y. X. Shu, D. Sun, and B. Y. Duan, "Design of an enhanced nonlinear PID controller," *Mechatronics*, vol. 15, pp. 1005-1024, 2005.



마누홍오리우스

2007년 인도국립대 전자전기공학과(공학사). 2009년~현재 경상대학교 기계항공공학부 대학원. 관심분야는 가상현실, 재활로봇.

윤정원

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제16권 제9호 참조.