

균형상실 검출 알고리즘에서 검출과 관련된 설계변수의 민감도 해석 및 최적화

고병규¹ · 김광훈² · 손권¹

¹부산대학교 기계공학부

²부산대학교 기계기술연구원

Sensitivity Analysis and Optimization of Design Variables Related to an Algorithm for Loss of Balance Detection

B. K. Ko¹, K. H. Kim² and K. Son¹

¹School of Mechanical Engineering, Pusan National University

²Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University

(Received September 20, 2010. Accepted December 15, 2010)

Abstract: This study suggested an optimized algorithm for detecting the loss of balance(LOB) in the seated position. And the sensitivity analysis was performed in order to identify the role of each design variable in the algorithm. The LOB algorithm consisted of data processing of measured signals, an internal model of the central nervous system and a control error anomaly(CEA) detector. This study optimized design variables of a CEA detector to obtain improved values of the success rate(SR) of detecting the LOB and the margin time(MT) provided for preventing the falling. Nine healthy adult volunteers were involved in the experiments. All the subjects were asked to balance their body in a predescribed seated posture with the rear legs of a four-legged wooden chair. The ground reaction force from the right leg was measured from the force plate while the accelerations of the chair and the head were measured from a couple of piezoelectric accelerometers. The measured data were processed to predict the LOB using a detection algorithm. Variables S2, h2 and hd are related to the detector: S2 represents a data selecting window, h2 a time shift and hd an operating period of the LOB detection algorithm. S2 was varied from 0.1 to 10 sec with an increment of 0.1 sec, and both h2 and hd were varied from 0.01 to 1.0 sec with an increment of 0.01 sec. It was found that the SR and MT were increased by up to 9.7% and 0.497 sec comparing with the previously published case when the values of S2, h2 and hd were set to 4.5, 0.3 and 0.2 sec, respectively. Also the results of sensitivity analysis showed that S2 and h2 had considerable influence on the SR while these variables were not so sensitive to the MT.

Key words: loss of balance, control error anomaly, detection algorithm, margin time, success rate, optimization

1. 서 론

낙상을 예방하거나 낙상으로 인한 상해를 감소시키기 위해 낙상을 예측하는 것은 중요한 문제이다. 누구나 살면서 한 번쯤 경험하게 되는 낙상은 질환이나 실족 등 여러 가지 이유로 다양한 계층에서 발생한다. 대부분의 낙상은 경미한

수준의 상해를 일으키지만, 낙상을 경험한 노인이나 질환이 있는 환자의 경우 30% 정도는 입원 치료를 요하는 상해가 발생된다[1]. 따라서 낙상에 의한 피해를 최소화하기 위하여 빠르고 정확하게 낙상을 예측하는 연구가 필요하다.

일반적으로 낙상은 인체가 이루고 있는 평형 상태가 내적 혹은 외적인 요인에 의하여 깨어졌을 때 발생한다[2]. 인체의 균형이 상실되면 넘어지기 시작하고, 균형을 회복하거나 상해를 최소화하기 위하여 인체는 팔을 휘두르든가 다리를 뻗는 등의 보상운동(compensatory motion)을 수행하게 된다. 즉 균형상실(loss of balance: LOB)이 발생되고 일정

Corresponding Author : 손권
부산광역시 금정구 장전2동 부산대학교 기계공학부
TEL: +82-51-510-2308 / FAX: +82-51-512-9835
E-mail: kson@pusan.ac.kr

시간 이후에 보상운동이 발생하게 되며, 이 보상운동이 외부에서 관찰할 수 있는 유일한 낙상의 징후가 된다[3]. 균형상실은 중추신경계에서 균형을 유지하기 위하여 각 근육에 보내는 제어신호의 오류로 인해 발생된다. 이러한 균형상실은 물리적, 생리적 그리고 감각적인 특성이 복합적으로 관련되어 있어 그 원인을 직접적으로 찾아내기 어렵다.

낙상 검출에 관한 연구는 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 대부분 연구는 보상운동 발생 여부로 낙상을 검출하는 방식이며, 이는 이미 진행 중인 낙상을 검출하는 것이므로 예측하는 것으로 보기 어렵고, 검출 성공률(success rate: SR)도 낮은 단점이 있다[4-5]. 최근에는 낙상의 발생 원인이 되는 균형상실에 대한 검출방법에 대한 연구도 발표되었다. Ahmed와 Ashton-Miller[3]는 균형상실 검출 기법을 제안하였으며, Kim 등[6-7]은 제안된 알고리즘의 검출 성능을 향상시키기 위한 방법을 제시하였다.

균형상실을 검출하기 위해서는 크게 세 가지 과정을 거치게 된다. 먼저 인체의 운동에 대한 데이터를 측정하고, 측정된 데이터와 중추신경계(central nervous system: CNS)를 수식화한 내부모델(internal model)을 이용하여 신체의 동작을 예측한다. 마지막으로 실제 동작과 예측된 동작의 차이를 통계적으로 분석하여 이례적으로 큰 오차(control error anomaly: CEA)의 발생을 검출함으로써 낙상을 예측하게 된다[3]. Kim 등[6-7]은 검출 알고리즘을 데이터 처리과정에 따라 정리하여 각 과정에 따른 설계변수를 제시하였다.

본 연구에서는 균형상실 검출에서 마지막 과정인 동작 오차의 통계적 처리에 관련된 변수에 대하여 분석하고자 한다. 먼저 관련 변수에 대한 민감도 해석을 통하여 검출 알고리즘에 끼치는 영향을 분석하고, 관련 변수의 변화에 따른 알고리즘의 검출성공률과 여유시간을 고려하여 검출성능을 평가함으로써 알고리즘의 검출성능에 대한 최적화 방법을 제시하

고자 한다.

II. 균형상실 검출 알고리즘

균형상실 검출 알고리즘은 그림 1과 같이 데이터 처리 순서에 따라 입력부, 내부모델 구성부, 검출부로 크게 세 부분으로 이루어져 있다. 입력부는 센서와 실험장비들을 통해 데이터를 획득하고, 필터링을 하는 1차 처리과정을 나타낸다. 내부모델 구성부는 실험 모델을 도립진자로 간략하게 수학적 근사화함으로써 중추신경계에서 균형유지를 위해 발생할 것으로 기대되는 신호를 예측하게 된다. 여기서 제어신호는 도립진자의 운동을 유발시키는 값이므로 실제 도립진자 운동과 비교하기 위하여 예측된 제어신호값으로 도립진자의 가속도값을 사용하였다. 마지막으로 검출부는 예측된 가속도와 실제 측정된 가속도의 차인 제어오차를 통계적 방법인 3-시그마법을 이용하여 균형상실의 발생을 검출하게 된다.

1. 입력부

입력부는 인체의 균형에 영향을 주는 발반력과 의자의 가속도 데이터를 처리한다. 얻어진 데이터는 필터링을 통해 잡음을 제거한 후 내부모델 구성부와 검출부에 각각 보내어진다. 그림 2와 같은 의자 균형모델을 도립진자로 가정하였다. 힘판(force plate, KISTLER 9285)에서 얻어진 발반력(ground reaction force, F)은 모멘트(torque, T)를 유발하므로, 이 모멘트가 내부모델 구성부로 입력된다.

2. 내부모델 구성부

중추신경계는 낙상의 위험을 감지하면 그것을 저지하거나 상해를 최소화하기 위해 관련된 근육으로 제어 신호를 보낸다. 중추신경계에서 낙상의 위험을 감지하고 판별하는 과정

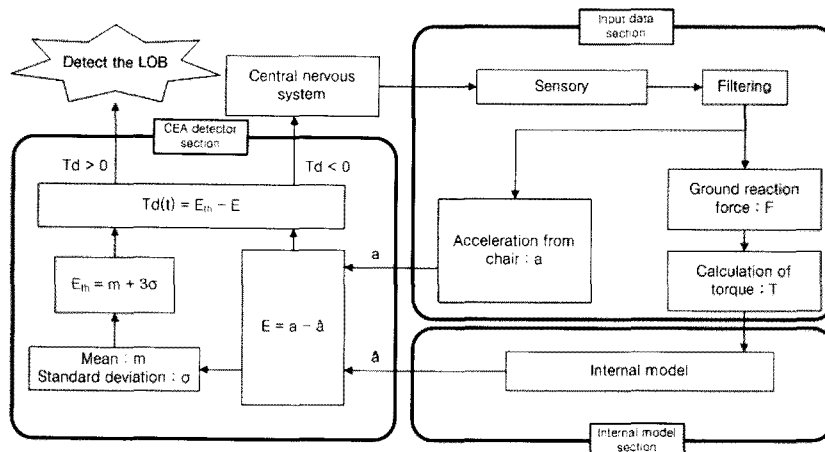


그림 1. 균형상실 검출 알고리즘의 블록선도

Fig. 1. Block diagram of the detection algorithm of LOB

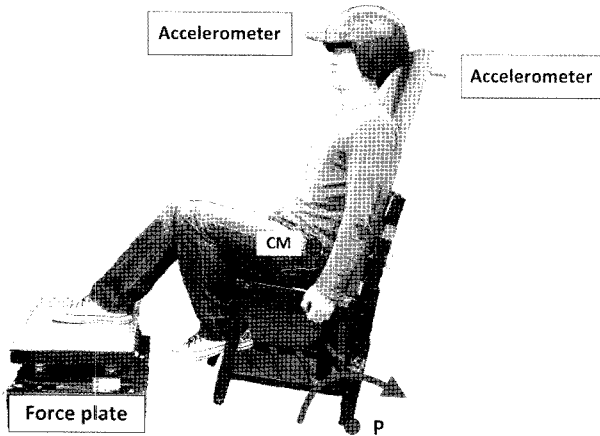


그림 2. 균형상실 검출 실험
Fig. 2. Balancing task in the seated position

이나, 이에 대해 적절히 대응할 제어 신호를 발생하는 것은 일반적으로 외부에서 확인하기 어렵다. 그러나 단일 입·출력 시스템으로 단순한 운동에 대해서 중추신경계 내부에서 진행되는 과정을 간략화하면 외부에서도 파악할 수 있다. 기존연구에서는 그림 2와 같이 의자 균형 모델을 도입진자로 가정하고 1자유도 운동을 통하여 중추신경계의 내부 과정을 간략히 나타내었다[8].

중추신경계에서 보내는 운동을 예측하기 선형으로 근사화한 모델을 사용하게 되는데 이를 균형상실 알고리즘의 내부 모델이라 한다. 내부모델 구성부에서는 데이터 처리부에서 모멘트를 입력받고, 인체가 균형을 유지하기 위해 필요로 되는 가속도를 예측하여 검출부로 보낸다. 여기서 예측된 가속도가 바로 외부적으로 보이지 않는 중추신경계에서 발생시킨 제어신호의 요소가 된다.

3. 제어오차

실험에서 얻어진 의자의 가속도와 내부모델을 통해 예측된 가속도 사이에 발생하는 오차를 제어오차라고 한다. 앞에서 언급한 것처럼 CEA는 제어오차들 중에 이례적으로 큰 값의 발생을 의미하며 특정 상한값을 넘는 경우 균형상실이 발생한 것으로 간주한다. 균형상실 검출 알고리즘에서 CEA 검출을 위해 정의한 제어오차(E)는 다음과 같이 표시된다.

$$E(t) = a - \hat{a} \tag{1}$$

여기서 a 는 발반력에 의해 발생하는 의자의 가속도를 의미하고, \hat{a} 은 현재의 발반력으로 인해 얻어질 것으로 예측되는 가속도이다. 본 연구에서는 CEA의 발생여부를 확인하는 시점에서 제어오차의 크기가 그 이전에 일정기간 동안 발생한 제어오차의 평균을 기준으로 표준편차의 3 배에 해당하는 범위를 벗어날 때 CEA가 발생하였다고 간주한다.

4. 검출부

검출부는 현시점에서의 제어오차를 계산하고, 현시점 이전의 일정기간 동안 발생한 제어오차에 대한 평균과 표준편차를 계산하게 된다. 계산된 평균과 표준편차를 이용하여 CEA를 검출하기 위한 오차의 상한값(E_{th})을 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{th,i} = m_i + 3\sigma_i \tag{2}$$

여기서 m 은 제어오차의 평균이고, σ 는 그 표준편차이다. 하첨자 i 는 균형상실 검출 알고리즘이 실행되는 현시점의 미한다.

$$Td_i = E_{th,i} - E_i \tag{3}$$

Equation [3]은 CEA를 검출하기 위하여 제어오차와 오차 상한값의 차 Td_i 를 계산한 것이다. 여기서 $E_{th,i}$ 는 오차 상한값, E_i 는 제어오차를 나타낸다. Td_i 가 양수이면 제어오차가 오차 상한값을 벗어나지 않았으므로 계속해서 검출 알고리즘을 수행하고, 음수이면 오차 상한값을 벗어났으므로 CEA의 검출을 의미한다.

III. 검출 성능 실험

1. 실험 방법

본 연구에서는 앉은 자세에서의 평형유지 실험을 수행하였다(그림 2 참조). 실험은 균형상실을 검출하기 위한 것으로 피실험자에게 의자의 뒷다리로 최대한 평형상태를 유지하도록 요구하였다. 이때 피실험자는 힘판에 올려진 오른쪽 다리의 근력만을 사용하였다. 이 과정에서 힘판에 의해 측정된 발반력과 의자의 가속도 데이터를 취득하였다. 피실험자의 불필요한 운동을 최소화하기 위하여 모든 신체는 앉아있는 의자에 접촉시켰으며, 보상운동을 위해서는 피실험자의 머리만 움직이도록 하였다. 실험에서 발생하는 최대가속도는 약 0.2 G(gravity) 내외이며, 이에 따른 위험을 방지하기 위해 충격흡수장치를 설치하였다. 또한 반복적인 실험에서 피로에 따른 문제가 발생하지 않도록 충분한 휴식(10분)을 취하였다.

실험에는 30 세 전후인 건강한 성인남녀 9 명이 실험에 참가하였으며, 표 1은 피실험자의 정보를 나타낸다. 실험은 예비실험과 본 실험으로 나뉘어 진행하였다. 본 연구에서 구현한 알고리즘에 의한 결과가 기존 연구[3]를 잘 따르는지 비교 검증을 위하여 예비실험을 수행하였고, 구현된 알고리즘의 내부 설계변수를 추출하기 위하여 본 실험을 수행하였다. 예비실험은 모든 피실험자들이 각각 10 회씩 실험을 수행하였고 본 실험은 이들 중 비슷한 체격을 가진 두 명의 피실험자(Males 5, 6)를 선택하여, 10 회 실험을 한 세트로 총 12 세트를 수행하였다. 각 실험은 2 분 정도의 시간이 소요

표 1. 피실험자의 정보

Table 1. Personal information of subjects

Subject	Age(year)	Height(cm)	Weight(kgf)
Male 1	31	174	86
Male 2	35	186	78
Male 3	30	172	85
Male 4	30	173	72
Male 5	25	171	65
Male 6	30	171	65
Female 1	36	163	54
Female 2	30	165	52
Female 3	31	160	53
Average	30.9	170.5	67.8

되었으며, 준비된 피실험자가 넘어지기까지 15 sec 정도 걸렸고, 일어나서 60 sec 이상 휴식을 취한 후에 다시 실시하였다. 또한 한 세트를 끝난 후에는 10분의 휴식시간을 가지도록 하였다.

힘판은 그림 2와 같이 의자 앞에 위치하였으며, 가속도계(accelerometer, WILCOXON 799LF)는 의자(의자 뒷면)와 머리(안전모)에 각각 부착하였다. 가속도계를 머리에 직접 부착하는 것은 어렵기 때문에 안전모의 앞부분에 부착하여 머리의 가속도를 측정하였다. 곧은 자세로 앉아있을 때 2 개의 가속도계가 동일한 선상에 위치하도록 하였다.

2. 실험데이터의 처리

본 실험에서는 내부모델에 입력될 발반력과 가속도 데이터의 취득과 동기화를 위한 신호처리 장치(Visol, Inc., Korea, VSAD-101)를 사용하였다. 그림 3과 4는 각각 평형 실험 시 측정된 발반력과 머리 및 의자의 가속도를 나타내는 그래프이다. 그림 3에서 발반력의 수직방향 성분 Fz의 변동폭이 가장 큼을 알 수 있으며, 그 다음에는 Fx와 Fy의 순서였다. 발반력 데이터 중 피실험자의 좌우방향에 해당하는 Fy는 균형을 제어하는데 크게 관여하지 않는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 실험 초기에는 피실험자가 의자와 함께 움직이기 때문에 머리와 의자 가속도가 거의 같은 값을 가진다. 그러나 약 13 sec 이후부터 큰 차이가 발생하여 가속도의 변화 양상이 달라진다. 이는 피실험자가 상체를 이용하여 낙상을 예방하기 위하여 보상운동한다는 것을 보여준다.

가속도와 발반력은 1 kHz의 샘플링 주기로 데이터를 취득하였고, 잡음 제거를 위하여 저역통과 필터(low-pass filter, 3 Hz)와 고역통과 필터(high-pass filter, 0.3 Hz)를 사용하여 순차적으로 데이터 처리작업을 수행하였다[3]. 이는 본 실험에서 발생하는 신체 움직임이 느리고, 낙상과 관계없는 저주파 성분을 제거하기 위함이다. 필터링 작업을 통한 위상지

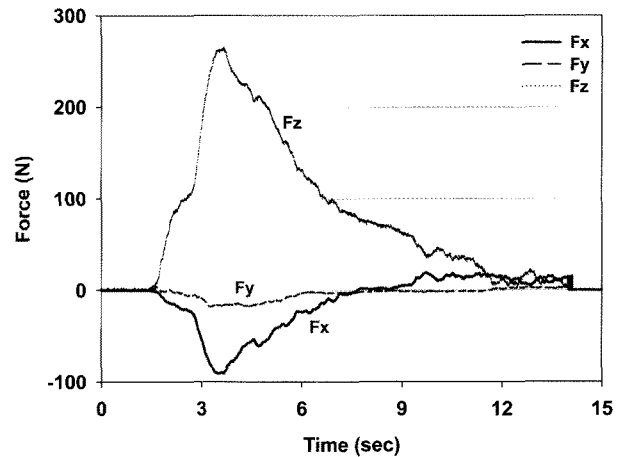


그림 3. 축 방향에 따른 발반력
Fig. 3. Ground reaction force components

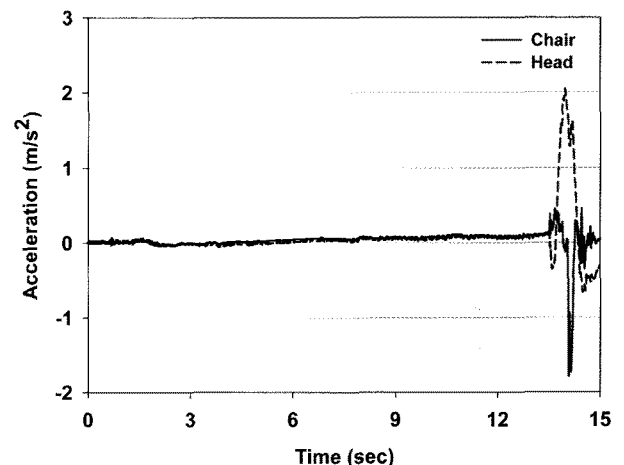


그림 4. 의자와 머리에서 측정된 가속도
Fig. 4. Accelerations measured from chair and head

연 예방을 위하여 정방향과 역방향으로 각 1 회씩 필터링하였다. 균형상실 검출 알고리즘 구현 및 모든 데이터 분석은 MATLAB V7(Mathworks, Inc., USA)을 사용하였다.

3. 검출 성능

균형상실의 검출 성능은 검출성공률(success ratio: SR)과 여유시간(margin time: MT)으로 평가할 수 있다[6]. SR이란 균형상실이 실제 낙상 이전에 효과적으로 검출되었는지의 여부를 판별하기 위한 것이고, MT는 낙상의 발생 이전에 검출된 균형상실에 대하여 낙상 방지 및 균형 유지를 위해 대처할 수 있는 시간적 여유를 의미한다.

그림 5는 균형상실 검출과 관련된 실험시작 시점(SE), 균형상실 검출 시점(DT), 보상운동 관측 시점(CT), 실험종료 시점(EF), 여유시간(MT = CT - DT) 등을 나타낸다. MT의 최대값은 Ahmed와 Ashton-Miller[3]의 연구를 바탕으로

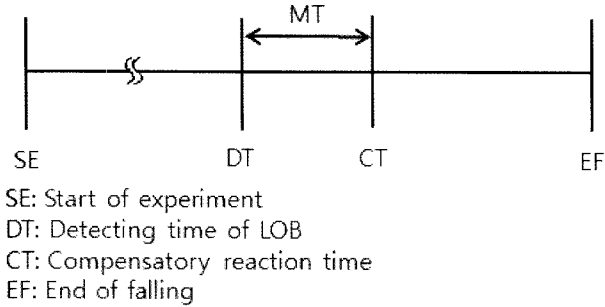


그림 5. 균형상실 검출에 관계된 여유시간
 Fig. 5. Definition of margin time in detecting LOB

2 sec로 잡았고, 최소값은 중추신경계에서 수의근까지 신호가 전달되는 시간인 100 ms로 잡았다[9].

IV. 설계변수 및 목적함수

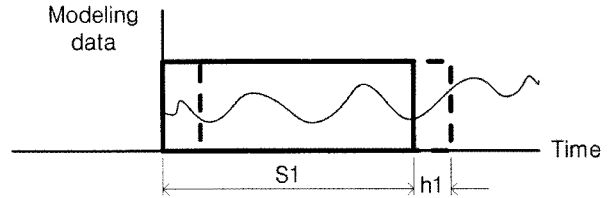
1. 검출 알고리즘의 설계변수

균형상실 검출 알고리즘은 크게 내부모델을 구성하는 부분과 제어오차의 감지를 통해 CEA를 검출하는 부분으로 나눌 수 있다. 내부모델 구성부와 CEA 검출부를 검출 알고리즘에 구현하기 위해 5 개의 변수를 선정할 수 있다. 표 2에는 균형상실 알고리즘에 사용된 설계변수와 각 설계변수의 기준값을 나타내었다.

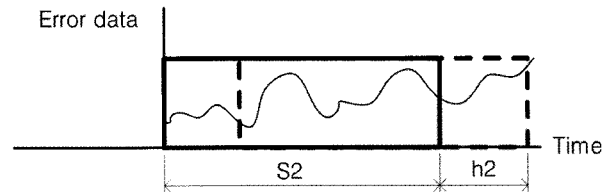
균형상실 알고리즘에 사용된 5개의 변수에 대해 그림 6과 같이 정리하였다. 그림 6(a)에서 S1은 시스템 규명을 통해 선형으로 근사화된 내부모델의 계수를 결정하기 위해 필요한 데이터를 선별하는 창(window)의 크기를 나타낸다. h1은 내부모델 구성을 위해 사용되는 데이터 창 S1이 이동하는 시간간격이다. 그림 6(b)에서 S2는 3-시그마법을 구현하기 위해 제어오차 데이터 중 통계처리할 데이터 창의 크기를 나타낸다. h2는 통계 처리에 필요한 데이터 창 S2가 이동하는 시간간격이다. 그림 6(c)에서 hd는 균형상실이 발생하였는지를 탐색하기 위해 검출 알고리즘을 실행시키는 주기이다. 현 시

표 2. 균형상실 알고리즘의 기준 설계변수 값
 Table 2. Design variables and conventional values of LOB detection algorithm

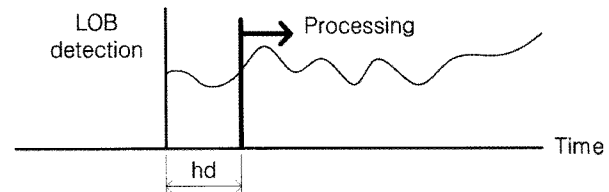
Variable	Meaning	Value(sec)
S1	Window breadth for identifying internal model	2
S2	Window breadth for applying 3-sigma method	2
h1	Time shift of data window S1	0.1
h2	Time shift of data window S2	0.1
hd	Operating period of the LOB algorithm	0.1



(a) 내부모델 구성에 관한 변수



(b) 3-시그마법 적용에 관한 변수



(c) 균형상실 검출 주기

그림 6. 균형상실 검출 알고리즘의 변수
 Fig. 6. Variables of the LOB algorithm

점에서 균형상실이 검출되지 않으면 hd만큼의 시간 후에 다시 균형상실의 발생여부를 확인한다. 본 연구에서는 3-시그마법 구성부에 관련된 변수 중 S2와 h2에 대해서만 민감도 해석을 하였고, 이미 Kim 등[6]에서 민감도 해석을 수행하였던 변수 hd는 제외하였다.

2. 목적함수

본 연구에서는 내부모델 구성부에 관련된 변수는 변화시키지 않고 3-시그마법을 구성하는데 직접적인 역할을 하는 변수들의 최적화를 실행하였다. 그 변수로는 3-시그마법 구성을 위해 필요한 데이터 창 S2와 그 창의 이동시간 h2, 그리고 검출주기 hd가 된다. 검출 성능 평가항목인 검출 성공률과 여유시간을 이용한 최적화의 목적함수는 아래와 같다.

$$OBJ(S_2, h_2, h_d) = \frac{SR(S_2, h_2, h_d)}{100} \times w_s + \frac{MT(S_2, h_2, h_d)}{2} \times w_m \quad (4)$$

여기서 w_s 와 w_m 은 각각 검출 성공률과 여유시간에 대한 가중값이며, w_s 와 w_m 를 합한 값은 1이 되어야 한다. SR과 MT는 검출부의 최적화에 의한 값이므로 검출부에 관계된

변수인 S2, h2, hd에 의한 함수가 되며, 알고리즘에서 얻은 검출 성공률과 여유시간 값을 사용하였다. 본 연구의 최적화에서는 정확성과 신속성을 동일하게 중요하다고 가정하여, 두 부분에 대한 가중값을 모두 0.5로 정하였다.

V. 민감도 해석 및 최적화

1. 3-시그마법 구현을 위한 데이터 창

S2는 3-시그마법 구현을 위해 필요한 데이터 창을 의미한다. 이례적으로 큰 제어오차(CEA)의 발생을 확인하기 위한 오차의 상한값으로 3-시그마값을 사용하는데, S2는 3-시그마값을 결정하는 평균과 표준편차를 계산하기 위하여 필요한 제어오차의 데이터 창 크기가 된다. 즉 현재 CEA의 발생여부를 확인하기 위하여 이전에 획득한 제어오차 데이터 중에서 현재 시점에서 가장 가까운 데이터 S2 만큼 선택하여 통계처리하게 된다.

오차의 상한값인 3-시그마값은 Eq. [2]에서처럼 창 S2에 해당하는 제어오차 데이터들의 평균과 표준편차의 세 배 값을 합하여서 계산된다. 창 S2의 크기가 너무 작거나 혹은 너무 크면 평균에 비해 편차의 비중이 높아지게 되므로 상한값이 지나치게 높아지게 되며, 이로 인하여 CEA가 검출될 확률이 낮아지게 된다. 따라서 그림 7에서도 확인할 수 있듯이 약 2 sec 이전과 약 8 sec 이후에는 성공률이 감소하는 경향을 보인다.

S2가 알고리즘의 검출성능에 끼치는 영향을 분석하기 위하여 표 2에서 제시한 설계변수들 중 S2 값만 변화시키면서 살펴보았다. S2값의 범위는 0.1~10.0 sec로 하여 0.1 sec씩 변화시키면서 검출 성공률과 여유시간을 확인하였다. 그림 7은 S2값의 변화에 따른 검출 성공률에 대한 그래프를 나타내며, 2.8~7.8 sec의 구간에서 95%를 넘는 성공률을 얻었다.

그림 8은 S2의 변화에 따라 여유시간을 나타내는 그래프이다. 그래프에서 MT의 최대값은 S2가 0.1~0.8 sec 일 때 약 0.65 sec이고, 최소값은 S2가 10 sec 일 때 약 0.62 sec

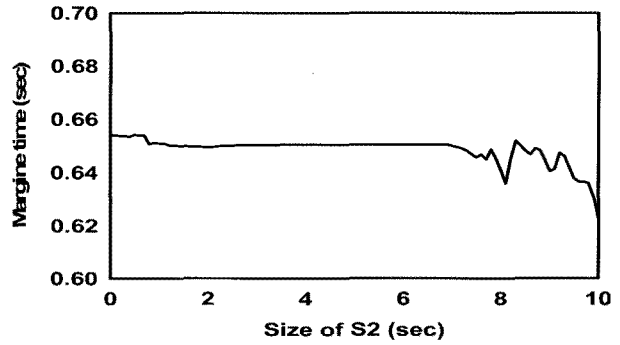


그림 8. S2의 변화에 따른 여유시간
Fig. 8. Margin time for various values of S2

이다. 따라서 MT의 최대값과 최소값의 차이는 0.03 sec이다. 중추신경계에서 수의근까지의 상호신호전달 시간이 약 0.1 sec임을 고려하면, S2의 변화에 따른 여유시간의 변화량이 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 S2의 변화는 여유시간보다 검출 성공률에 더 많은 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

2. 데이터 갱신 주기

3-시그마법을 구현하기 위해 필요한 데이터 창 S2가 움직이는 시간간격이 h2이다. 즉 오차의 상한값이 h2를 주기로 갱신된다. 그림 9와 10은 기존 설계변수 값에서 h2값만 0.01~1.00 sec까지 0.01 sec씩 변화될 때 검출 성공률과 여유시간을 각각 나타낸다.

그림 9에서 h2의 변화에 따른 검출 성공률을 살펴보면 0.01~0.3 sec의 구간에서 95% 로 가장 좋은 결과를 보였다. 그림 10에서 나타난 것과 같이 여유시간의 경우 최대값은 h2가 0.9~1 sec일 때 약 0.66 sec이고, 최소값은 0.01~0.1 sec 일 때 약 0.65 sec로 나타났다. 따라서 MT의 최대값과 최소값의 차이는 0.01 sec이다. h2도 중추신경계와 수의근의 상호신호전달 시간을 고려할 때, 주어진 h2의 변화 구간에서는 S2에서처럼 여유시간에 거의 영향을 끼치지 않는다고 판단된다.

12

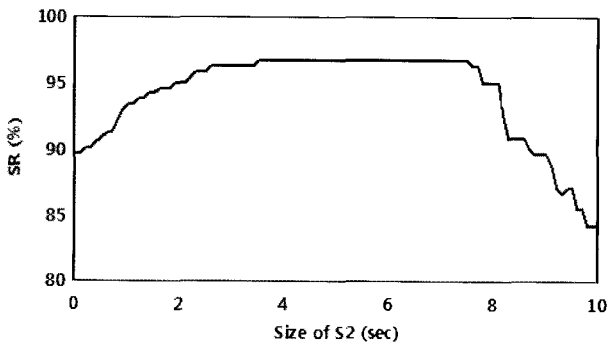


그림 7. S2의 변화에 따른 검출성공률
Fig. 7. Success rates for various values of S2

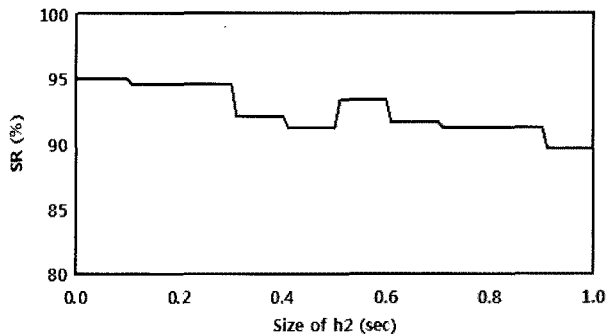


그림 9. h2의 변화에 따른 검출 성공률
Fig. 9. Success rates for various values of h2

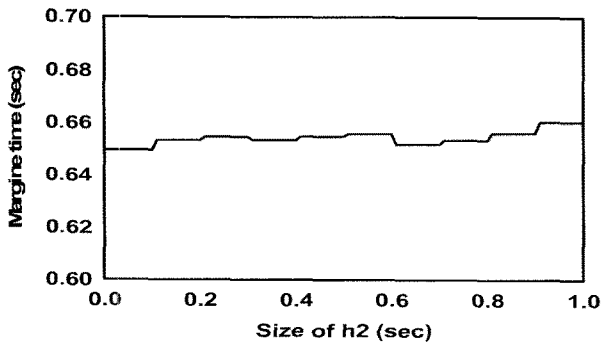


그림 10. h2의 변화에 따른 여유시간

Fig. 10. Margin time for various values of h2

그림 9와 10의 그래프가 성공률이나 여유시간이 계단형태로 0.1 sec 간격으로 변하고 있음을 볼 수 있다. 이는 h2에 의한 결과가 검출주기인 hd값의 영향을 받고 있음을 의미하는데, hd가 S2와 h2처럼 3-시그마법을 구성하기 위한 설계변수이기 때문이다. 앞에서 S2의 결과 그래프에서는 계단형태가 없는데 이는 S2가 변하는 간격이 0.1 sec로 hd와 같기 때문이다.

3. 검출부 최적화 결과

균형상실 검출 알고리즘의 검출 성능을 향상시키기 위해 3-시그마법에 관련된 변수인 S2, h2, hd에 대해 최적화를 수행하였다. 3-시그마법 구성에 관련된 변수의 범위와 최적 설계된 변수의 결과값을 기존값과 비교하여 표 3에 나타내었다.

최적화를 수행한 결과 3-시그마법을 구성하기 위한 데이터 창 크기인 S2가 4.5 sec, 그 창의 이동시간인 h2가 0.3 sec, 그리고 균형상실을 검출하는 주기인 hd가 0.2 sec일 때 가장 좋은 결과 값이 나왔다. S2와 h2의 경우 최적화를 통하여 얻어진 값이 모두 민감도 해석 결과에서 얻어진 범위인 2.8~7.8 sec(S2)와 0.01~0.3 sec(h2) 안에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 최적화된 각 변수들의 정량적인 수치만 보게 되면 h2와 hd가 S2에 비해 기존값과의 차이가 크지 않다. 하지만 각 변수에 따라 최적화 수행에 필요한 변화간격이 S2는 0.1 sec로 크고, h2와 hd는 0.01 sec로 작다. 따라서 0.01 sec의 변화간격을 기준으로 볼 때, h2의 변화량 0.2 sec와 hd의 변화량 0.1 sec은 기존값에 비해 충분한 차이를 보였다고 간주할 수 있다.

표 4에서는 최적화된 설계변수 값에 대한 SR과 MT를 Ahmed와 Ashton-Miller의 연구 결과[3]와 비교하였다. 최적화된 변수 값을 사용한 경우 검출 성공률이 87.4%에서 97.1%로 9.7%만큼 상승하는 효과를 가져왔으며, 여유시간은 0.479 sec에서 0.976 sec로 0.497 sec만큼 증가되는 것을 알 수 있었다. 특히 여유시간의 경우 기존 연구의 모델보다 104 % 정도 향상된 결과를 보였다.

표 3. 설계변수의 변화 구간과 최적 값

Table 3. Ranges and optimized values of variables

Variables	Design range	Interval of change	Optimized value	Published value
S2	0.1 ~ 10	0.1	4.5	2.0
h2	0.01 ~ 1	0.01	0.3	0.1
hd	0.01 ~ 1	0.01	0.2	0.1

표 4. 최적화된 결과 값과 기존연구 결과 값과의 비교

Table 4. Comparison of the optimized and published values

	Objective function value	SR(%)	MT(sec)
Optimized design	0.730	97.1	0.976
Published design	0.557	87.4	0.479

검출 성공률의 향상은 낙상 예측에 대하여 실제 발생할 확률이 높은 것을 의미한다. 또한 여유시간이 긴 것은 예측된 낙상에 대하여 상해를 최소화하기 위하여 대처할 수 있는 시간이 길어진 것을 뜻한다. 따라서 최적화를 통하여 기존 알고리즘에 비해 검출 성공률과 여유시간이 향상된 것보다 보다 정확하고 빠르게 낙상을 예측할 수 있으며, 그로 인하여 더욱 효과적인 대처 방안을 모색할 수 있음을 나타낸다.

VI. 결 론

본 연구에서는 균형상실 검출 알고리즘에 이용되는 설계변수들 중 검출부에 관계된 변수들의 검출성능에 대한 민감도 해석과 검출성능에 대하여 최적화를 실시하였다. 민감도 해석을 통해 검출부의 설계변수가 검출 성능을 향상시키는 변수값의 범위가 S2는 2.8~7.8 sec와 h2는 0.01~0.3 sec임을 확인하였다. 또한 검출부의 3-시그마법을 구성하기 위해 필요한 설계변수인 S2와 h2가 검출 알고리즘의 설계변수로서 의미가 있음을 확인하였다. 3-시그마법 구성부의 최적화를 수행하여 낙상을 예방하기 위한 균형상실 검출성공률을 기존 87.4%에서 97.1% 향상된 결과를 얻었다. 낙상을 예방할 수 있는 시간인 여유시간을 기존 연구보다 0.497 sec만큼 증대시켜서, 낙상에 대비할 수 있는 충분한 시간적 여유를 확보하였다.

낙상방지를 위한 향후 연구에서 검출성공률이나 여유시간에 대한 적절한 가중값을 결정하여 알고리즘에 적용한다면 효과적인 균형상실 검출 시스템의 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] S. Sadigh, A. Reimers, R. Andersson, and L. Laflamme,

- “Falls and fall-related injuries among the elderly: A survey of residential-care facilities in a swedish municipality,” *Journal of Community Health*, vol. 29, no. 2, pp. 129-140, 2004.
- [2] N. Noury, P. Rumeau, A.K. Bourke, G. O’laighin, and J.E. Lundy, “A proposal for the classification and evaluation of fall detectors,” *Elsevier Masson France IRBM*, vol. 29, no. 6, pp. 340-349, 2008.
- [3] A.A. Ahmed, and J.A. Ashton-Miller, “Is a loss of balance a control error signal anomaly? evidence for three-sigma failure detection in young adults,” *Gait and Posture*, vol. 19, no. 3, pp. 252-262, 2004.
- [4] M.J. Gibson, R.O. Andres, B. Isaacs, T. Radebaugh, and J. Worm-Petersen, “The prevention of falls in later life,” *Danish Medical Bulletin*, vol. 34, pp.1-24, 1987.
- [5] G. Wu, “Distinguishing fall activities from normal activities by velocity characteristics,” *Journal of Biomechanics*, vol. 33, no. 11, pp. 1497-1500, 2000.
- [6] K.H. Kim, I.S. Kim, and K. Son, “Design variable optimization of detecting algorithm of a loss of balance with a linear internal model,” *Journal of the KSME*, vol. 34, no. 9, pp. 1153-1160, 2010.
- [7] K.H. Kim, J.H. Park, and K. Son, “Improvement of the detection of LOB through reconstruction of an internal model,” *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, vol. 19, no. 9, pp. 827-832, 2010.
- [8] A.A. Ahmed, and J.A. Ashton-Miller, “On use of a nominal internal model to detect a loss of balance in a maximal forward reach,” *Journal of Neurophysiol.*, vol. 97, no. 3, pp. 2439-2447, 2007.
- [9] Y.S. Oh, W.Y. Park, K.H. Kim, K.O. An, and S.H. Song, “The research of balance strategy and latency between old and adolescent by dynamic posturography,” *Korean Journal of Sports Science*, vol. 17, no. 2, pp. 595-568, 2008.