

개인차 보상을 고려한 팔운동감의 정량화 방법

정웅철*, 송재복**, 김용일***

Quantification Method of Kinesthetic Sense of Arm with Compensation for Individual Difference

Woong-Chul Chung*, Jae-Bok Song**, and Yong-Yil Kim***

ABSTRACT

The human sensibility caused by the motion of an object grasped by a human operator is defined as kinesthetic sense of arm. Due to nonlinearity and ambiguity of human sense, there is no absolute standard for quantification of kinesthetic sense. In this research, a so-called 2-dimensional arm motion generator is developed to present various mechanical impedance (i.e., stiffness or damping) characteristics to a human arm. The kinesthetic words representing arm kinesthetic sense are selected and then the subject's satisfaction levels on these words for given impedance values are measured and processed by the SD method and factor analysis. In addition, the quantification method using neural network is proposed to take into account the individual difference between the mean sensibility and each subject's sensibility. Through this proposed algorithm, the sensibility of human motion described qualitatively can be converted into engineering data ensuring objectivity, reproducibility, and universality.

Key Words: arm kinesthetic sense (팔운동감), kinesthetic word (운동감 어휘), neural network (신경망), individual difference (개인차)

1. 서론

인간-기계 인터페이스 (man-machine interface: MMI) 시스템에 있어서, 과거에는 기계에 대한 연구가 주를 이루었으나, 근래에는 인간에 대한 연구가 차지하는 비중이 점차 증가하고 있다. 예를 들어, 원격 조종 시스템의 경우에는, 단순한 신체의 움직임을 전달하는 수준을 넘어서, 슬레이브와 환경 간의 상호 작용을 마스터에 시각 또는 힘 정보로 전달하여 주는 연구가 활발히 진행되고 있다 (1,2,3). 또한, 최근에 힘 피드백 기능을 갖춘 조이스틱, 마우스, 기타 오락 기구들이 개발되고 있으며, 일부는 상품화되고 있다. 이러한 시스템을 통

하여, 작업의 정확성, 효율성 및 현실감을 향상시킬 수 있다. 그러나 MMI 시스템에서 인간의 보다 사실적인 경험을 가능하게 하려면 인간의 감성에 대한 연구가 수반되어야 하는데, 아직은 이에 대한 연구가 미비한 형편이다.

기존의 연구에서는, 인간을 하나의 시스템으로 해석하고, 인간이 갖는 감성은 거의 고려하지 않았다. 그러나 탐승하고 있는 차나 손으로 잡고 있는 물체의 위치·속도·가속도의 변화뿐만 아니라, kinesthetic feedback 이 추가되었을 경우 애매한 인간의 감성이 유발되는데, MMI 시스템의 경우에는 조작자의 감성이 작업에 영향을 미치게 된다. 바

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과

*** KIST 영상미디어센터

이올린 연주에 국한하여, 감성이 동작에 미치는 영향에 대한 연구가 수행된 적이 있는데(4,5), 바이올린의 음색을 표현하는 감성 어휘에 대한 느낌의 정도와, 음색을 결정하는 인자인 활을 켜는 속도, 힘, 위치 간의 관계를 유추하였다.

본 연구에서는 인간이 손으로 잡고 있는 물체의 움직임으로 인하여 유발되는 감성을 팔운동감이라 정의하고, 이의 감성공학적 해석 및 정량화 기법에 대한 연구를 수행하였다. 실시간으로 다양한 기계적 임피던스 특성을 팔에 전달하기 위해서, 2개의 리니어모터로 구성되는 2차원 팔운동감 제시기를 개발하였다. 팔운동감을 표현하는 어휘를 선정하고, 다양한 강성과 감쇠 특성에 따라서 피험자가 이 어휘에 대하여 느끼는 만족도를 측정하는 데이터를 인자분석을 통하여 처리한다. 또한, 신경망을 이용하여 평균적인 감성과 피험자 개인의 감성의 차이인 개인차를 고려할 수 있도록 팔운동감의 데이터를 정량화하는 방식을 제안하였다. 이를 통하여 정성적으로 표현되는 인간의 동작에 대한 감성을 정량화하여, 객관성·재현성·보편성이 확보된 공학적인 데이터로 변환하는 것이 본 연구의 중요한 목적이다.

본 연구에서 제시하는 감성의 정량화 기법은, MMI 시스템에서 인간의 감성이라는 요소를 포함시키는 데 사용되어, 인간과 기계와의 보다 우수한 인터페이스를 구축하는 데 사용될 수 있다. 이 기법을 원격조종 시스템에 적용하면, 작업자의 감성에 부합하는 힘의 제시를 통해 보다 사실적으로 작업 상황을 제시할 수 있고, 이를 통해 작업의 효율성과 신속성의 향상이 가능해진다. 또한, 첨단 오락기구에 감성에 대한 연구 결과를 적용한다면, 보다 사실적인 감성을 재현할 수 있는 기술을 토대로 고부가가치의 창출이 예상된다.

2. 팔운동감 제시기

본 연구에서는 팔의 운동과 연관된 운동감을 조사하기 위해서 2축의 리니어모터로 구성되는 팔운동감 제시기를 개발하여 사용하였다(6). Fig. 1에 나타난 바와 같이 이 제시기에는 리니어모터가 수직으로 장착되어 있으므로, 2차원 운동(즉, x축과 y축)을 구현할 수 있다. 또한, 상단 리니어모터의 가동부에는 손으로 잡을 수 있도록 레버가 부착되어 있으며, 상단 리니어모터의 고정부는 하단

리니어모터의 가동부에 부착되어 있다.

Fig. 2는 전체적인 팔운동감 제시기 시스템의 구성도를 나타낸다. 리니어모터는 모터 드라이버와 제어기에 의해서 구동되며, 모터 제어기와 의 통신, 운동감의 측정 및 원하는 운동 패턴 입력 등의 임무는 PC에 의해서 수행된다. 운동감 제시기에 사용되는 모터를 제어하기 위한 마이크로 프로세서로 계산능력이 우수한 DSP인 TMS320C32를 사용하였다. 한편, 모터 드라이버는 산출된 제어입력을 증폭하여 실제 모터를 구동하기에 충분한 전력을 발생시켜 주는 데 사용된다.

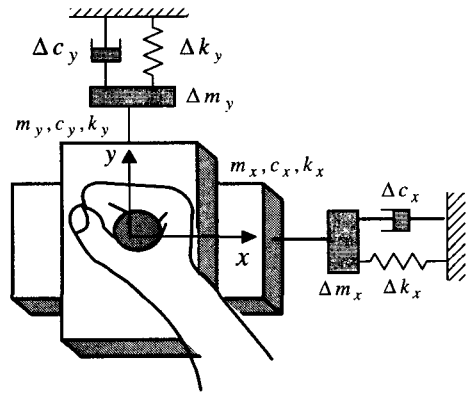


Fig. 1 2-dimensional motion generator and modeling.

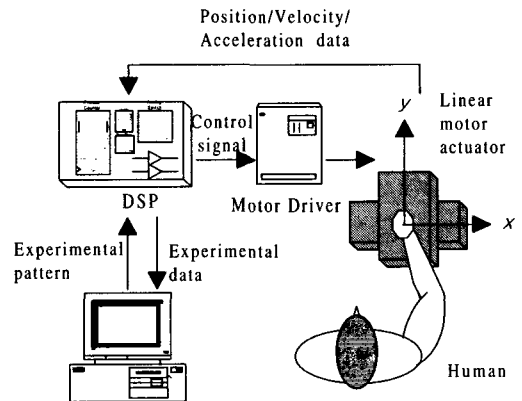


Fig. 2 Arm motion generator system.

다양한 강성 또는 감쇠를 갖는 물체를 팔로 조작할 때 느끼는 감성을 측정하고 해석하는 것이 본 연구의 중요 목적 중 하나이다. 대상 물체의 임피던스를 하드웨어적으로 변화시키는 것을 능동

임피던스 제어로 대체하여 시간과 경비의 소모를 감소시켰다. 이 때, 능동 임피던스란, 모터를 통해서 적절한 힘을 발생시킴으로써, 실제 하드웨어를 변화시키는 것과 거의 동일하게 원하는 강성이나 감쇠 값을 발생시키는 것을 의미한다.

피험자의 손이 팔운동감 제시기의 레버에 힘을 가해지면 운동감 제시기도 크기는 동일하며, 방향이 반대인 반력을 피험자의 손에 가해 준다. 따라서 피험자가 레버에 힘을 가해서 운동을 발생시키면, 피험자는 관성, 감쇠 및 강성에 의한 반력을 복합적으로 경험하게 된다.

$$F_{total} = F_{inertia} + F_{damping} + F_{stiffness} \quad (1)$$

여기서, $F_{inertia}$, $F_{damping}$, $F_{stiffness}$ 는 각각 운동감 제시기의 관성, 감쇠 및 강성, 즉 기계적 임피던스에 의해서 발생하는 반력을, F_{total} 은 이러한 힘을 모두 더한 합력을 나타낸다. 한편, 관성에 의한 반력은 가속도가 큰 경우에만 나타나게 되는데, 팔의 운동범위는 제한적이므로 큰 가속도를 받는 경우는 거의 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 임피던스 중 감쇠 및 강성 특성만을 고려하기로 한다.

식 (1)은 운동감이라는 단일 감성을 속도에 비례하는 감쇠에 의한 감성과 변위에 비례하는 강성에 의한 감성으로 나누어 고려할 수 있는 근거가 된다. 본 연구에서 개발한 운동감 제시기에서는 원하는 감쇠 및 강성 값을 리니어모터에서 발생하는 힘을 실시간으로 제어함으로써, 힘의 임의의 변화에 의한 피험자의 운동감을 측정할 수 있다.

한편, 피험자가 위의 운동감 제시기의 레버를 잡고 운동을 발생시킬 때 운동감 제시기라는 기계적 시스템과 팔의 임피던스가 복합적으로 작용하여 운동감을 유발된다. 그러나 외부로부터의 힘이 제시되지 않은 상태에서 다양한 팔의 자세에 따라 요구되는 임피던스는 기계적 시스템의 임피던스보다 매우 작은 값이므로, 이를 무시할 수 있다. 특히, 감쇠의 경우 5~20Ns/m의 값이 2차원 공간상에서의 움직임에 요구가 되는데⁽⁷⁾, 본 연구에서 피험자에게 제시한 감쇠의 범위에 비해 매우 작은 값이므로 팔의 감쇠값은 고려하지 않도록 한다.

3. 감성 실험의 절차 및 방법

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 감성 실험

절차를 채택하였으며, 20-30 대 대학 및 대학원생 30 명을 대상으로 수행하였다.

가. 조사목표의 선정

보통 정량화의 대상이 되는 목표 감성을 0 차감성, 0 차감성을 이루는 감성을 1 차감성이라 한다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 단일 감성인 팔운동감(이하 단순히 운동감이라고 칭함)을 속도에 비례하는 감쇠에 의한 운동감과 변위에 비례하는 강성에 의한 운동감으로 나누어서 취급한다. 따라서 1 차 감성은, 강성에 의한 운동감과 감쇠에 의한 운동감으로 정의한다.

나. 1 차감성 어휘의 추출

팔운동감을 표현한다고 생각되는 어휘를 가능한 많이 확보한다. 1 차감성 어휘들은 운동감과 관련이 있는 어휘를 찾기 위한 예비후보로서의 성격을 갖게 된다. 이들 어휘는 어휘사전, 각종 카탈로그, 일상어 등을 통해서 얻게 되는데, 이 때 동일한 의미를 갖는 어휘들이 중복되는 것을 피하도록 주의하여야 한다. 수집된 운동감 어휘들 중에서, 피험자들을 대상으로 운동감을 잘 표현한다고 생각되는 대표적인 운동감 어휘를 여론조사 방식으로 조사하였다. Table 1 은 본 연구에서 사용한 10 개의 대표적인 1 차감성 어휘를 열거한 것이다.

Table 1 Kinesthetic words.

W1	가볍다 (light)	W6	묵직하다 (heavy)
W2	편하다 (comfortable)	W7	힘들다 (hard)
W3	뻣뻣하다 (stiff)	W8	부드럽다 (soft)
W4	격렬하다 (severe)	W9	거칠다 (rough)
W5	답답하다 (oppressive)	W10	강하다 (strong)

다. 1 차 SD 척도의 구성

SD(semantic differential: 의미구별법)란, 주어진 개념에 대해 내포적인 의미를 측정하는 방법으로 Osgood 등에 의해서 제안되었다⁽⁸⁾. 이는 어휘를 이용한 실험을 수행할 때 사용되는 심리학적 측정 방식으로, 반대 의미를 나타내는 형용사 쌍을 구성하고, 그 쌍의 사이를 7 단계로 나누어 양단의 각 어휘에 근접한 정도를 표시한다. 여기서는 다음 예와 같이 부정어를 포함하는 형용사 쌍을 이

용하여 SD 척도를 구성하였다.

강하다 00000000 강하지 않다

이 때, 피험자가 SD 척도를 통해서 나타내는 운동감어휘에 대한 자신의 감성의 정도를 만족도 (satisfaction level, SL)라 정의하는데, 만족도는 $0 \leq SL \leq 1$ 의 범위를 취하게 된다. 예를 들어, '강하다'라는 어휘가 제시되었을 때, 피험자는 팔 운동감 제시기에서 제시되는 강성을 경험한 다음, 자신의 만족도를 선택하게 된다. 이 때, 주어진 강성이 '강하다'라고 느낄수록 만족도가 높게 되며, 피험자는 '강하다'에 가까운 등급을 선택하게 된다.

라. 1차 평가 실험

1차 평가 실험은 위에서 추출된 1차 감성 어휘에 대하여 구성된 1차 SD 척도를 통해서, 강성 및 감쇠의 변화에 따른 피험자의 만족도를 조사하는 실험이다. 한편, 팔 운동감 제시기를 통해 실험적으로 조사해 본 결과, 일반 사람들은 강성의 경우 150N/m, 감쇠의 경우는 40Ns/m 이하의 변화는 쉽게 구별하지 못함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는, 강성의 경우 200N/m 단위로 1000N/m 까지 5 단계를 제시하고, 감쇠의 경우에는 60Ns/m 단위로 300Ns/m 까지 5 단계를 제시하여 만족도를 조사하였다. 강성과 감쇠의 순차적인 크기에 의한 영향을 없애기 위해, 일정하게 증감하는 값이 아닌 불규칙적인 값으로 강성 또는 감쇠를 피험자에게 제시하였다. 또한, 각각 제시된 값 사이에 무부하 상태를 삽입하여 피험자의 피로 누적을 피하고, 무부하 상태에서의 감성을 유지할 수 있도록 하였다.

마. 2차 감성 어휘의 추출

1차 평가 실험의 결과로부터 인자분석을 통하여 2차 감성 어휘를 추출한다. 인자분석 방법 및 결과에 대해서는 4장에서 자세히 설명하기로 한다. 이러한 인자분석을 통하여 Table 1의 운동감어휘를 강성으로 정량화가 적합한 어휘와 감쇠로 정량화가 적합한 어휘로 분류하며, 이들 중에서 강성이나 감쇠의 거의 모든 구간을 대표할 수 있는 어휘를 각각 추출하게 된다.

바. 2차 SD 척도의 구성

선정된 2차 감성 어휘의 SD 척도를 1차 SD 척도와 동일한 방법으로 구성한다.

사. 2차 평가 실험

1차 평가 실험과 동일한 방법으로, 2차 감성 어휘 추출에서 선정된 감성 어휘에 대한 피험자의 만족도를 조사한다. 2차 평가 실험의 결과를 본 연구의 실험 데이터로 채택하여 다음의 정량화를 수행하게 된다.

아. 정량화

정량화는 2차 평가 실험을 통해서 구한 데이터에 기초하여, 객관성, 보편성, 재현성을 가지며, 또한 개인의 감성을 고려할 수 있는 공학적인 데이터로 변환하는 작업을 의미한다. 운동감의 정량화를 수행하는 방법과 결과에 대해서는 5장에서 자세히 다루기로 한다.

4. 인자분석

4.1 인자분석의 방법

공학적인 관점에서 정량화를 수행하거나 팔 운동감 제시기를 통하여 재현하기에 적합한 운동감 어휘를 추출하기 위해서 통계적 해석기법 중 하나인 인자분석(factor analysis) 기법을 사용하였다. 이는 종속변수 및 독립변수의 구별 없이 단순히 변수들 간의 관계를 찾는 데 사용된다. 인자분석에서는 주어진 변수들을 가상적인 공통 인자들의 일차적인 결합으로 나타내고, 이들 인자 가운데 중요한 m 개의 인자만을 선택하여 전체의 변동을 설명하게 된다.

운동감은 손으로 잡고 있는 물체를 통해 경험하는 힘의 변화에 의해 유발되고, 그 힘의 변화는 능동 임피던스 제어를 통한 기계적 임피던스(즉, 강성 또는 감쇠)의 변화로 제시하였다. 따라서 본 논문에서는 운동감은 전적으로 임피던스의 변화에 기인한다고 가정한다. Table 1에서 열거한 운동감 어휘에 대해 제시된 임피던스에 해당하는 피험자의 만족도를 조사하였다 (1차 평가 실험). 강성 또는 감쇠를 각각 정량화에 적합한 물리적 변수로 취하는 운동감어휘를 인자분석을 통해 추출하였다.

1,000(N/m)의 강성에 대하여, Table 1에 열거된 운동감어휘에 대한 만족도를 대상으로 인자분석을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 때, 운동감어휘와 인자와의 상관관계를 의미하는 인자적재량(factor loading)의 절대값이 0.6 이상인 어휘를 선

택하였다. Fig. 4 에서 보듯이 인자 1 은 2.98, 인자 2 는 2.74 로, 인자 1 의 인자분산도가 더 높다. 이 때, 10 개의 운동감 어휘가 인자 적재량의 크기에 의해 2 개의 집합으로 분류되고, 그 집합의 특성을 나타내는 것이 인자 1 과 인자 2 로 표현된다. 즉, 상대적으로 분산도가 높은 인자 1 을 공통인자로 하는 집합의 소속 운동감어휘 W3 과 W10 의 경우, 정량화의 물리적 변수로 강성을 취하게 된다. 한편, 인자 2 에 해당하는 운동감어휘는 강성으로 정량화하기에 부적합하게 된다.

Orthogonal Transformation Matrix		
	1	2
1	0.75881	-0.65132
2	0.65132	0.75881
Rotated Factor Pattern		
	Factor 1	Factor 2
Q3	0.97112	-0.05792
Q10	0.87269	-0.12795
Q9	0.56345	-0.00905
Q5	0.56107	-0.21390
Q2	-0.13635	0.93767
Q8	0.41167	0.57036
Q1	-0.47859	0.54441
Q4	0.26416	-0.34597
Q7	0.39951	-0.64915
Q6	-0.01010	-0.79617
Variance explained by each factor		
	Factor 1	Factor 2
	2.983551	2.741472

Fig. 3 Results of factor analysis ($k = 1,000$ N/m)

감쇠의 경우도 강성과 동일한 절차로, 인자분석을 수행하여 감쇠를 운동감의 정량화에 적합한 물리적 변수로 하는 운동감어휘를 추출한다.

4.2 인자분석의 결과

전술한 인자분석의 방법에 근거하여 운동감어휘를 강성과 감쇠별로 인자에 대해 인자적재량이 큰 순서로 Table 2 와 Table 3 에 정리하였다. 강성의 경우, Table 2 에서 운동감어휘 W10 (강하다)은 강성의 모든 구간에서 운동감어휘로 적합함을 알 수 있다. 또한, 어휘 W3, W6 또는 W7 과 같이, 특정 구간에서만 강성이 지배적인 변수로 작용하는 운동감어휘들도 존재한다.

감쇠의 경우에는, Table 3 에서 운동감어휘 W5

(답답하다)가 감쇠의 모든 구간에 대해 운동감어휘로 적합함을 알 수 있다. 강성의 경우와 마찬가지로 어휘 W3, W6, W7, W9 는 특정 구간에서만 감쇠가 지배적인 변수로 작용하는 운동감어휘임을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 운동감어휘 W10 과 W5 의 정량화의 물리적 변수를 각각 강성과 감쇠로 지정하고, 정량화를 수행하였다.

Table 2 Results of factor analysis for stiffness.

Stiffness (N/m)	Factor 1	Factor 2
200	W2, W1, W10	W3, W6, W5, W8
400	W4, W9, W7, W10, W8	W5, W6
600	W7, W10, W5, W6	W8, W1, W3
800	W10, W6, W3	W1, W8, W4
1000	W3, W10	W2, W7, W6

Table 3 Results of factor analysis for damping.

Damping (Ns/m)	Factor 1	Factor 2
60	W5, W3, W1, W2	W9, W6, W10
120	W3, W10, W9, W5	W4, W2, W1, W6
180	W3, W7, W5, W9, W10, W1	W4, W2, W6, W5
240	W7, W6, W9, W5, W8	W4, W3, W1, W10
300	W10, W6, W5, W2	W1, W4, W7

5. 정량화 절차

본 연구에서 제시한 팔운동감의 정량화는, Fig. 4 의 흐름도에서와 같이 크게 2 단계로 나눌 수 있다. 첫째 단계는 2 차 평가 실험에 의해서 얻은 데이터를 바탕으로 강성 또는 감쇠의 모든 구간에 대한 만족도를 유추할 수 있도록 하는 1 차 정량화이다. 이러한 1 차 정량화를 통해서 평균 감성을 얻을 수는 있지만, 개인적인 감성을 반영하지는 못한다. 따라서 둘째 단계로 각 피험자의 개인차를 추출하고, 추출된 개인차와 평균 감성을 합하여 개인차가 보상된 2 차 정량화를 수행한다.

실험에 참가한 30 명의 피험자 중 3 명을 임의로 선정하여, 피험자 1, 2, 3 이라 칭하기로 한다. 이들 3 인에 대해서 운동감어휘 ‘강하다’를 대상으로

로 한 2차 평가 실험의 결과를 Table 4 에, 운동감 어휘 ‘답답하다’를 대상으로 한 2차 평가 실험의 결과를 Table 5 에 수록하였다.

5.1 1 차 정량화

인자분석의 결과로 강성에 대해서는 ‘강하다’, 감쇠에 대해서는 ‘답답하다’라는 어휘가 대표적인 감성 어휘로 선정되었으며, 이들 어휘에 대해서 2차 평가 실험을 통하여 각 피험자의 만족도를 조사하였다. Fig. 5 에서 $y_i(x_j)$ ($i = 1, \dots, n$ (피험자의 총수), $j = 1, \dots, m$ (제시되는 강성 또는 감쇠의 총수)) 는 j 번째 강성 또는 감쇠 값이 제시되었을 때 피험자 i 의 만족도를 나타낸다.

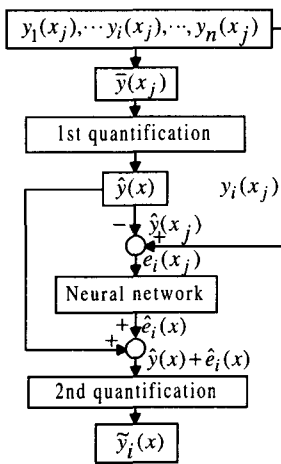


Fig. 4 Quantification of arm kinesthetic sense.

Table 4 Data of subjects about stiffness.

Stiffness (N/m)	200	400	600	800	1000	
SL	Subject 1	0.28	0.42	0.85	0.85	1.00
	Subject 2	0.71	0.57	0.85	0.85	1.00
	Subject 3	0.42	0.71	0.71	0.85	0.71

Table 5 Data of subjects about damping.

Damping (Ns/m)	60	120	180	240	300	
SL	Subject 1	0.57	0.71	0.85	1.00	1.00
	Subject 2	0.42	1.00	0.85	0.85	0.85
	Subject 3	0.57	0.28	1.00	1.00	1.00

그런데 이들 만족도는 단지 5 개의 강성 또는 감쇠 값에 대한 피험자의 응답에 해당하므로, 구간 내의 임의의 강성 또는 감쇠에 대한 만족도를 구하기 위해서는 보간이 필요하다. 이를 위하여 다음과 같은 시그모이드 함수를 선정하였다.

$$\hat{y}(x) = y_o + \frac{a}{1 + e^{-(x-x_o)/b}} \tag{2}$$

여기서, $\hat{y}(x)$ 는 임의의 강성 또는 감쇠 x 에 대한 평균 만족도를 나타낸다. 식 (2)의 파라미터 a, b, x_o, y_o 는 평균 만족도로부터 얻게 된다.

이 과정을 통해 얻게 되는 평균만족도, 즉 감성은 객관성·보편성·재현성을 확보한 데이터로서 운동감의 기준이 된다. 그러나 감성을 정량화하는데 있어서 가장 큰 문제는 절대적인 기준이 존재하지 않는다는 점이다. 즉, 제시된 동일한 값의 강성 또는 감쇠에 대해서, 모든 사람이 동일한 감성을 갖지는 않는다. 공학적으로 의미 있는 운동감 데이터가 되기 위해서, 운동감어휘의 각 만족도에 대해 추출된 강성 또는 감쇠가 팔운동감 제시기를 통해 피험자에게 제시되었을 때, 피험자는 그에 해당하는 운동감을 느껴야 한다. 따라서 여러 피험자들의 평균 만족도로 구성된 운동감 데이터에 각 피험자의 개인차를 보상할 필요성이 대두된다.

5.2 개인차가 보상된 운동감의 정량화

이번에는 신경망 기법을 사용하여 운동감의 개인차를 추출하고, 개인차를 보상하는 2차 정량화를 수행하게 된다. 먼저 신경망을 이용한 운동감의 개인차 추출에 대하여 살펴보자.

신경망은 입출력 간의 비선형적인 관계를 잘 표현할 수 있으며, 일반화 능력으로 입력 범위 내에서는 직접 입력 이외의 임의의 입력에 대하여도 강인한 결과를 보여준다. 또한, 입력, 가중치, 바이어스의 행렬 연산만으로 입력과 출력 간의 관계를 얻을 수 있으므로 빠른 연산이 가능하다. Fig. 5 는 본 연구에서 사용한 신경망 선도를 나타낸다.

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 강성과 감쇠의 제시에 따른 피험자의 만족도를 각각 나타내는 Table 4 와 Table 5 에 근거하여, 앞 절에서 설명한 평균 만족도와의 차이를 통해 운동감의 개인차를 산출하였다. 이 때, 각 강성 또는 감쇠와 개인차를 각각 신경망의 입력과 출력으로 정의하였다.

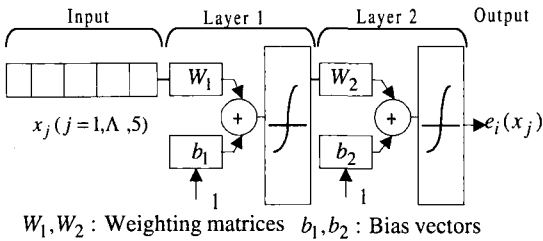


Fig. 5 Configuration of neural network.

그림에서 강성 또는 감쇠의 5 개의 값을 입력 x_j 로, 개인차를 출력 $e_i(x_j)$ 로 지정한 후, 입출력 관계에 대한 학습의 결과로 가중 행렬(W_1, W_2)과 바이어스 벡터(b_1, b_2)를 구해낸다. 이에 기초하여 Fig. 4.에서와 같이 구간 내의 모든 강성 또는 감쇠 x 에 대한 피험자 i 의 개인차 $\hat{e}_i(x)$ 를 산출할 수 있다. 즉, 실험에 직접 포함되지 않은 강성 또는 감쇠에 대해서도 보간을 통해서 개인차를 얻을 수 있게 된다. 이 때, 신경회로망의 학습에서는 모멘텀을 포함하고, 매 학습시기마다 학습율이 갱신되는 등의 학습능력이 개선된 역전파 알고리즘을 이용하였다. 또한, 활성화함수로 식 (3)과 같이 연속성, 미분가능성 그리고 선형성 등의 특성을 모두 가지고 있는 비선형 함수인 단극성 시그모이드 함수를 사용하였다.

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (3)$$

이번에는 각 피험자의 개인차를 보상하는 2차 정량화에 대하여 살펴보자. 각 피험자의 데이터를 평균만족도와 비교하면 개인적인 체력의 차이와 감성적 성향을 유추할 수 있다. 그러나 이러한 개인차는 실험의 수행 중 주변환경의 영향이나 신체적 컨디션 등에 좌우되는 경우가 많다. 또한, 강성 또는 감쇠의 각 구간별 만족도의 불규칙적인 변동이 존재하기도 한다. 이러한 불확실성이 여과되지 않은 데이터가 피험자에게 그대로 제시될 경우, 오히려 감성의 일관성을 유지하는 데 장애가 된다.

따라서 개인차를 보다 사실적으로 보상하기 위해 개인차와 평균적인 운동감을 합한 값에 1차 정량화에서의 함수를 사용한 보간을 통해 2차 정량화를 수행하였다. 이러한 2차 정량화 과정을 통해 구간별로 무의미한 만족도의 변동을 상쇄시키고, 피험자의 개인별 운동감의 경향을 보다 객관적으로 파악할 수 있게 되어, 개인차가 보상된 운

동감 $\tilde{y}_i(x)$ 을 추출해낼 수 있다.

5.2.1 강성에 대한 개인차 보상

개인차가 보상된 운동감 $\tilde{y}_i(x)$ 를 Fig. 6에 도시하였다. 점선은 평균 만족도를, 실선은 개인차가 보상된 만족도를 나타낸다. 앞 절에서 설명한 정량화 절차를 통해 산출된 각 피험자의 정량화 곡선으로써, 강성값에 대하여 피험자가 느끼는 ‘강하다’라는 어휘에 대한 감성은 선형적인 관계를 나타내기 보다 각 피험자에 따라 다른 양상을 보인다. 즉, 만족도가 0.5인 강성의 크기가 500N/m라는 선형적인 관계를 갖기 보다는, 피험자마다 자신의 감성과 그에 해당하는 강성의 크기가 독특하게 관계한다고 볼 수 있다.

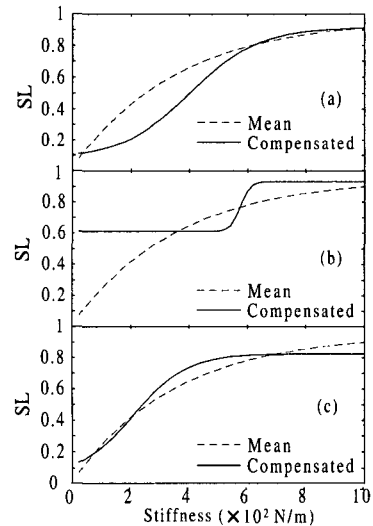


Fig. 6 Quantification with compensation for stiffness: (a) subject 1, (b) subject 2, (c) subject 3.

평균만족도와 비교하여 볼 때, 피험자 1과 피험자 3의 경우에는 각 강성의 구간별로 개인별 만족도가 높고 낮음이 반복된다. 특히, 피험자 3의 경우 약 500N/m 이상의 강성 구간에 대해서는 감성의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 피험자 2의 경우에는 약 500~630N/m 정도의 강성 구간에서는 급격한 감성의 변화를 보이고, 그 외의 구간에서는 강성의 변화에 둔감함을 알 수 있다. 결과적으로, 개인차를 보상한 정량화함수는 Table 4의 강성의 증가에 따른 만족도의 변화 추이와 전체적

으로 유사한 경향을 보임과 동시에, 구간별로 비정상적으로 발생한 만족도의 변동을 완화시켜 주는 기능도 하였음을 알 수 있다.

5.2.2 감쇠에 대한 개인차 보상

강성의 경우와 동일한 방법으로 개인차를 보정한 운동감 $\tilde{y}_i(x)$ 를 Fig. 7에 도시하였다. 평균만족도와 비교하여 볼 때, 피험자 1의 경우에는 개인별 만족도가 전체적으로 상승되어 있음을 알 수 있다. 즉, 피험자 1이 평균 만족도에 해당하는 '답답하다'의 감성을 느끼기 위해서는, 평균만족도를 유발시키는 감쇠보다 작은 값이 요구된다. 피험자 2의 경우는 약 130 Ns/m 이상에서 감쇠값의 변화에 대해서 둔감한 감성의 변화를 보임을 확인할 수 있다. 피험자 3은 구간별로 만족도의 높고 낮음이 반복되는데, 약 250Ns/m 이상에서는 완전히 만족함을 알 수 있다.

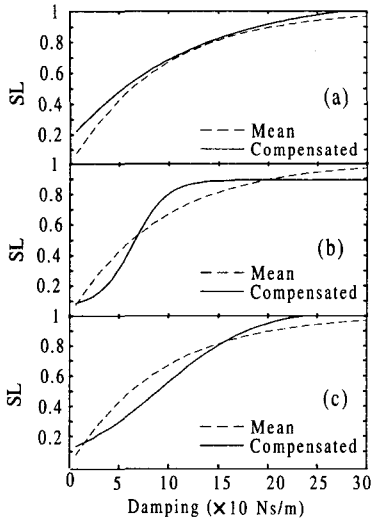


Fig. 7 Quantification with compensation for damping: (a) subject 1, (b) subject 2, (c) subject 3.

6. 결론

본 논문에서는 팔운동감 제시기의 강성 또는 감쇠의 변화에 반응하는 사람의 감성을 정량화하는 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 알고리즘을 이용하여, 정성적으로 기술되는 운동감을 객관성, 재현성 및 보편성을 갖는 공학 데이터로 변환할 수 있다. 이러한 정량화된 데이터는

팔 운동과 연관된 제품의 개발에 사용되거나, 개인별 운동감의 경향을 유추하는 데 사용할 수 있다. 차후의 연구에서는, 팔운동을 2 차원에서 3 차원으로 확장시켜 이러한 알고리즘을 보다 복잡하고 사실적인 팔운동에 적용할 수 있도록 확장하고자 한다. 그리고 팔운동과 시각적으로 연계된 시스템을 구축하여 보다 사실적인 운동감을 재현할 수 있는 연구가 요구된다.

참고 문헌

1. Merhav, S.J., Yacov, O.B., "Control augmentation and work load reduction by kinesthetic information from the manipulator," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 6, No. 12, pp. 825-835, 1976.
2. Hannaford, B., "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 4, pp. 426-434, 1989.
3. Yokokohji, Y., Yoshikawa, T., "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 10, No. 5, pp. 605-620, 1994.
4. Shibuya, K., Sugano, S., "Human motion planning in violin playing using Kansei," Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 2638-2643, 1997.
5. Shibuya, K., Asada, T., Sugano, S., "An algorithm to convert kansei data into human motion," Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. 1190-1194, 1998.
6. 이세한, 송재복, 김용일, "능동 임피던스의 구현에 기초한 운동 발생기의 개발," 한국정밀공학회지, 15 권, 7 호, pp. 160-166, 1998.
7. Tsuji, T., Morasso, P. G., Goto, K., Ito, K., "Human hand impedance characteristics during maintained posture," Biological Cybernetics, Vol. 72, No. 6, pp.475-485, 1995.
8. Osgood, C.E., Suci, G.J., Tannenbaum, P.H., The Measurement of Meaning, University of Illinois Press, 1957.