
주관적 촉감 재현을 위한 Haptic System 의 Stiffness Model 에 관한 연구

Research on presentation of subjective tactile sensation by stiffness model of haptic system

이윤정, Yoonjung Lee*, 황민철, Mincheol Whang**, 현혜정, Hyejung Hyun***,
김영주, Youngjoo Kim*, 김종화, Jonghwa Kim*, 박준석, Junseok Park****
*상명대학교 대학원 컴퓨터학과, ** 상명대학교 디지털 미디어학부,
상명대학교 뇌정보통신 연구소, *ETRI 차세대 PC 연구그룹

요약 본 연구는 Haptic System 의 물리적 stiffness(N/mm)와 사용자의 주관적 촉감정보(단단하다, 무르다)의 상관성에 관한 것이다. tangible media 와 같은 콘텐츠의 촉감을 실감나게 표현하기 위해서는 사용자가 주관적으로 느끼는 힘의 강도가 haptic system 에 매핑이 되어야 한다. 따라서 사용자의 주관적인 힘의 강도와 haptic system 의 물리적 stiffness 간에 상관성 연구가 필요하다. 본 연구에서는 물리적 특성을 결정하고 하드웨어와 소프트웨어를 연동시켜 촉감을 모델링하는 haptic 렌더링을 통해 정량화된 외부의 자극(변화)에 대해 사람이 심리적으로 느끼고 있는 감각을 정량화하여 입력 자극과의 관계를 밝히고자 팬텀을 이용해 두 번의 실험을 실시하였다. 먼저 haptic system 에서 사용자가 힘의 차이를 느낄 수 있는 stiffness 의 해상도를 측정하고, 그에 따라 나뉘어진 해상도 별로 촉감에 대한 주관적인 평가를 하였다. ANOVA 결과에 따르면 haptic system 의 물리적 stiffness 와 사용자의 주관적 촉감정보간에 유의한 상관관계가 분석되었으며 회귀분석을 실시하여 유의한 정도를 회귀 방정식으로 도출하였다. 따라서 tangible media 를 이용한 실감적인 촉감 콘텐츠를 재현하는 기술에 본 연구결과가 유용하게 사용되리라 기대된다.

핵심어: *Tangible, Haptic system, phantom*

1. 서론

현대에는 음악, 동영상, 사진과 같은 다양한 형태의 디지털 미디어 콘텐츠들이 등장한 반면, 대부분의 사람들은 이러한 미디어 콘텐츠를 마우스 또는 키보드를 이용하여 컴퓨터라는 제한적 공간 내에서만 콘텐츠를 접하고 있다. 이러한 디지털 콘텐츠의 특성은 특히 컴퓨터 사용이 미숙한 유아나 고령자의 경우, 키보드를 이용하여 텍스트를 입력하거나 마우스를 사용하여 아이콘을 선택하는 등의 기존의 GUI(Graphical User Interface) 자체에 불편함을 느낀다. 그뿐만 아니라 기존의 인터페이스를 사용하는 데에 불편함을 느끼지 않는 사용자의 경우에도 더욱 다양한 형태의 콘텐츠를 경험하는 데에는 GUI(Graphical User Interface)가 다소 한계를 보이고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여, 가상 공간의 디지털 정보를 일상 생활의 오브젝트와 연결하거나 이를 이용하여 디지털 정보를 제어하는 새로운 형태의 인터페이스인 TUI(Tangible User Interface)[1]가 제안되었다. 이제까지의 멀티미디어 콘텐츠는 보고 듣는 것에 한정되었으나 현재의 콘텐츠

는 가상의 환경에서 눈으로 보고 듣는 것 이외에 촉각각을 활용하여 콘텐츠를 실감나게 체험할 수 있도록 하는 tangible media로의 개발이 어느 때보다도 활발히 진행되고 있다. 이러한 tangible media의 콘텐츠는 기존의 미디어보다는 사용자에게 더욱더 콘텐츠를 실감나도록 전달할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 그러한 장점을 충분히 콘텐츠에 적절하게 활용하기 위해서는 사용자들이 현실세계에서 실제의 오브젝트와 상호작용 하는 것과 같은 실제적인 현실감을 가상 환경에서도 제공 받을 수 있어야 tangible media의 장점이 제대로 구현되었다고 할 것이다. 그래서 haptic system이 제공하는 촉각각을 사용자의 주관적인 느낌과 매핑할 수 있는 가의 여부는 현실감 있는 tangible media 구현에 중요한 요소라고 할 수 있다[3]. 이 논문에서는 촉각각을 제시해 줄 haptic system과 주관적인 촉각각 사이의 상관성을 연구하여 가상 환경에서의 오브젝트에서 촉각각을 느낄 수 있게 하는 콘텐츠를 구현할 때에 활용할 수 있는 모델을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 haptic system과 사용자의 주관적인 촉각각 사이의 상관성을 체계적으로 도출하기 위해서 두 번의 실

험을 실시하였다. 먼저 첫 번째 실험에서는 haptic system이 제공하는 stiffness구간 (0.000N/mm~ 0.500 N/mm)에서 피실험자들이 stiffness의 차이를 인지할 수 있는 주관적인 해상도를 측정하였다. 이 실험을 통해 stiffness를 인지할 수 있는 해상도의 한계를 알아보고, 두 번째 실험에서는 첫 번째 실험에서 측정된 각각의 해상도에서의 주관적인 촉각각을 측정하여 haptic system의 물리적 stiffness와 그에 대해 물리적으로 측정된 주관적인 촉각각정보간의 상관성을 분석하였다[4][5].

2. 실험방법 및 분석

haptic system과 사용자의 주관적인 촉각각 사이의 상관성을 체계적으로 도출하기 위해서 두 번의 실험을 실시하였다. 피실험자들은 평균나이 27.6세의 컴퓨터를 평소에 많이 접하는 오른손잡이 대학생 및 대학원생 남녀 각각 5명씩 10명으로 구성되었다. 실험 1에서는 피실험자들이 haptic system이 제시하는 stiffness안에서 stiffness의 차이를 감지할 수 있는 해상도를 측정하였으며, 실험 2에서는 실험 1에서 측정된 각각의 해상도에서 피실험자들의 주관적으로 느끼는 힘(단단하다, 무르다)을 측정하였다. 이 실험에는 haptic system으로 senSable사의 Phantom omni가 사용되었다. (그림1)

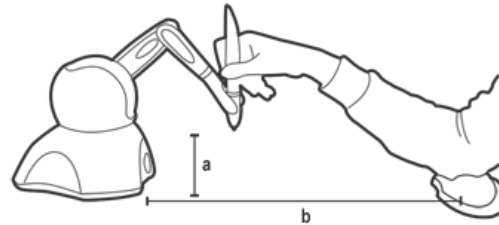
2.1 실험1

‘그림 1’과같이 피실험자는 고정된 의자에 앉아 책상 위에 오른 팔의 팔꿈치를 고정시킨 자세에서 팬텀 (sensAble, omni)을 붓을 잡듯이 수직으로 손가락을 이용해 가볍게 잡도록 하여 피실험자가 실험도중 피로감을 쉬 느끼지 않도록 하기 위해 실험 전에 피실험자마다 편하게 조작할 수 있는 시간을 주었다. 팬텀을 위 아래로 움직여서 제시된 힘감을 느끼도록 한다. 이 때 stiffness가 약한 상황에서는 팬텀이 아래로 내려와 책상에 부딪혀서 촉감에 영향을 미치지 않도록 하기 위해서 책상 위에서 10cm 정도의 높이 아래로는 내려오지 않게 조작하도록 피실험자들에게 설명을 사전에 해주었다.

실험자는 팬텀의 stiffness간격을 0.000 N/mm부터 0.500 N/mm까지 점차적으로 올려주었다. 간격은 피 실험자가 예측하지 못하도록 2~4초 이내에서 간격을 불규칙하게 하여 제시하였다. 또한, 실험자의 조작을 피실험자가 인식하지 못하도록 실험자와 피실험자 사이에 칸막이를 설치하였고, stiffness값을 올리는 과정에서 클릭소리를 듣지 못하도록 피실험자들에게 귀마개를 착용하도록 하였다. 피실험자는 팬텀을 수직 방향으로 움직이는 과정에서 그 전에 제시된 힘과의 차이가 느껴지면 왼손을 들어 표현해 주고 실험자는 이를 기록하였다. 본 실험에서는 팬텀이 단단함을 표현해 주는 데에 탄성이 이용되었으므로 N/mm라는 탄성계수를 이용해 stiffness를 표현하였으며 팬텀 내에서 표현 가능한 해상도인 0.001~0.500(N/mm)사이의 stiffness가 제공되었다.

팬텀의 stiffness전 구간에서 피실험자의 피로감을 경

감시키기 위해, 2분씩 실험하고 2분간 휴식하는 방식으로 0.000~0.500N/mm전 구간을 3번에 걸쳐 나누어 실험하였으며 남녀 각각 5명이 6번씩 반복적으로 실시하였다. 실험한 6번 중 첫 회의 결과는 피 실험자가 팬텀조작의 익숙함으로 인하여 나머지 실험들과 결과가 상이 하였으므로 제외되고 나머지 5회만 데이터로 활용되었다.



a: 내려올 수 있는 하한선 = 10cm
b: 팔꿈치에서 손 끝까지의 길이

그림 1, 팬텀을 조작할 때의 피실험자의 자세

2.2 실험2

실험 1의 결과로 얻어진 해상도를 팬텀에 무작위로 입력 하였다. ‘그림 2’는 실험자가 제시해주는 haptic system의 stiffness에 대해 피실험자로 하여금 그림 1과 같은 자세로 팬텀에 입력된 각 해상도에 대한 촉감을 경험하게 하였다. 촉각각에 대한 주관적인 느낌을 단단함과 무른 정도에 따라 스크린에 나타나 있는 슬라이딩 레버를 이용하여 표현하도록 하였다. 이 실험에서는 종속변수인 주관적 감각을 측정하는 방법으로 VAS(Visual Analogue Scales)인 슬라이딩 레버를 이용하였다. (그림 3) 수평방향으로 슬라이드 레버를 나타내 주었고 양 끝에 최저 값(0), 최고 값(10)을 나타내 주었다. 이 방법은 주관적인 평가의 물리적 측정을 할 때, LS (Likert Scales)보다 민감하고 섬세한 측정이 가능하기 때문에 이 실험에서 활용되었다.[7] 피실험자는 이 슬라이딩 레버를 마우스로 클릭하여 주관적으로 느껴진 stiffness에 해당하는 위치에 레버를 옮겨놓으면 화면에 그 측정값이 수치로도 나타나게 된다. 실험 전에 ‘min’버튼을 클릭하면 피실험자는 haptic system의 stiffness의 최저 값 (0.000 N/mm)을 경험할 수 있다. 그리고 ‘max’버튼을 클릭하면 최고 값 (0.500 N/mm)을 경험할 수 있다. 실험 전에 피실험자에게 최고, 최저 값을 제시해주고 충분히 경험하도록 해 줌으로써 각각의 피실험자들의 힘에 대한 주관적인 평가 데이터를 정규화해 주었다.

‘그림 3’의 피실험자에게 제시된 화면에서 보이는 바와 같이, 피실험자가 ‘start’ 버튼을 누르면 팬텀에 입력된 첫 번째 해상도에 해당하는 stiffness가 제시된다. 피실험자는 팬텀을 조작하면서 제시된 stiffness를 경험하게 되고 느껴지는 촉감에 따라 단단함의 정도에 따라 화면의 슬라이딩 레버를 커서로 움직여서 표시를 하게 된다. (그림 3) 표시된 주관적인 평가는 피실험자가 ‘answer’버튼을 누르

면 슬라이딩 레버의 값이 그 아래에 위치한 'result array'에 입력이 된다. 피실험자는 다음에 입력된 해상도를 경험하기 위해서는 'next'버튼을 클릭한다. 이 때, 슬라이딩 레버는 전 단계에서 표시한 위치에서 0 값에 위치하도록 하였다. 이와 같은 과정을 반복함으로써 22개의 값이 모두 'result array'에 입력이 되면 1회 분의 실험이 끝나게 된다.

피실험자가 화면에 주관적 촉감을 물리적으로 표현할 수 있도록 해주는 프로그램은 랩뷰(labview)라는 소프트웨어를 사용하였으며, 소켓 프로그램을 통하여 팬텀이 제시해주는 해상도 데이터를 피실험자에게 실시간으로 제공하고, 각각의 제공된 해상도에 따른 피실험자의 주관적 평가를 실시간으로 저장되도록 하였다. (그림 2)

'그림 2' 를 보면 'Force Data' 안에 실험 1의 해상도 값들이 저장되어있다. 그 데이터 값들을 배열형식으로 'Set value' 로 배치된다. 'Tactile Control System'에서는 배열형식의 데이터를 팬텀이 받아오게 된다. 이를 소켓 프로그램을 통해서 넘겨진 데이터를 팬텀에서 stiffness로 피실험자에게 제시된다.

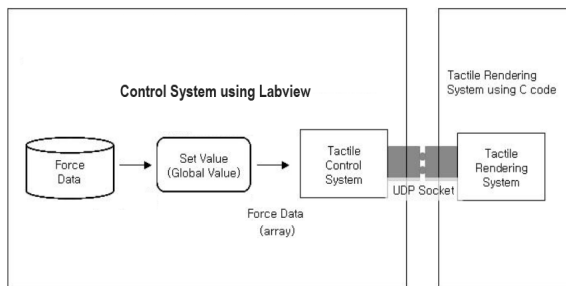


그림 2, haptic system(팬텀)에 실험 1의 해상도를 입력하여 제시할 수 있도록 해주는 프로그램 구조도

피실험자는 화면에서 바로 앞의 값이나 뒤의 값을 다시 경험해 보길 원하면 'pre'와'next' 버튼을 이용하여 이동하면서 현재의 stiffness값과 비교해 볼 수 있도록 하였다. 1회분의 제시된 해상도에 대한 평가가 모두 입력된 후 'save'버튼을 눌러 값을 엑셀 파일 형식으로 저장하였고, 피실험자들은 2분의 휴식을 취하게 하였다. 피실험자들은 5명씩 6반복으로 실험에 임하였으며, 2분 실험과 2분 휴식을 하는 방식으로 실험하였다.

실험 2는 피실험자가 시작 할 시간을 선택하고, 충분히 stiffness값을 경험하고, 입력하는 과정을 스스로 선택할 수 있다. 피실험자가 실험을 하는 동안 실험자는 '그림 4' 과 같은 화면을 통하여 피실험자에게 현재 제시된 stiffness값과 그에 따라 어떤 값이 입력되었는지를 관찰할 수 있다. '그림 4'의 'Force'라고 표시된 VAS(Visual Analogue Scales) 을 통해서, 또한 동시에 수치로도 현재 피실험자에게 제시되는 stiffness값이 나타나게 된다. 실험자는 또한 피실험자가 test 조작 중인지, 실험을 시작했는지, 실험을 끝냈는지를 화면의 불빛의 점멸로 인해 인지 가능하다. 실험 2의 피 실험자는 실험 1의 피 실험자

와 동일하였으나 실험 2에서 피실험자들은 첫 번째 실험에서는 팬텀의 조작이나 그에 따른 촉감각에 안정적인 반응을 보이지 못한 것으로 관찰되었다.

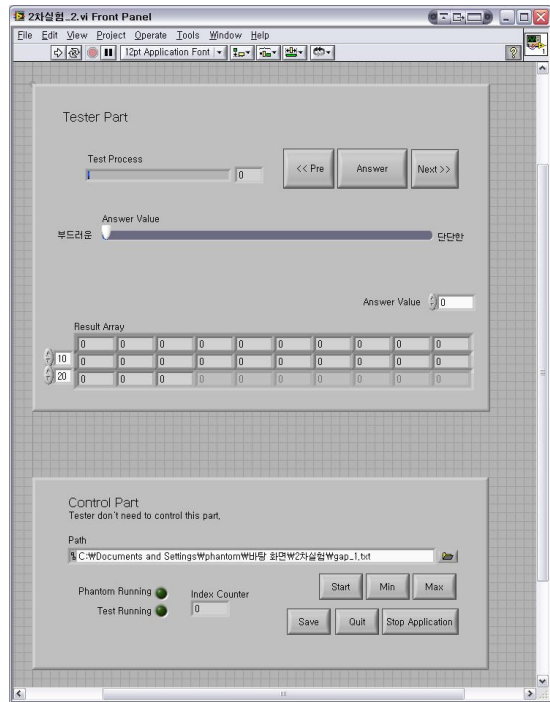


그림 3, 피실험자에게 제시된 화면

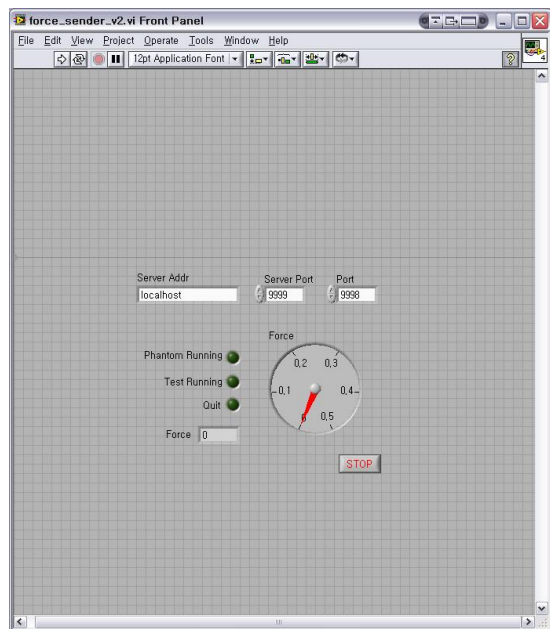


그림 4, 실험 중인 해상도와 피 실험자의 조작을 볼 수 있는 화면

이러한 과정은 '그림 4'에서 실험자가 피실험자의 실험을 관찰하면서 알 수 있었다. 그래서 실험 2 역시 실험 1에서와 마찬가지로 첫 회의 결과는 나머지 회의 실험 결과에 비해 결과 값이 일관되지 않음을 알 수 있었으며,

이에 따라 실험 2에서도 첫 회의 데이터는 분석대상에서 제외하였다.

2.3 분석

실험 1의 결과에서 측정된 haptic system의 stiffness 값들은 피실험자들이 stiffness의 변화를 인지할 수 있다고 느낀 값들이다. 이 결과 값들의 평균을 구하여 그것을 인지 가능한 해상도로 정의하였다.

앞의 실험 1에서 측정된 해상도를 실험2의 독립변수로 이용하였다. 그리고 그에 따른 피실험자들의 주관적인 촉각각을 종속변수로 하였다. SPSS (version.12)를 이용하여 haptic system의 물리적 stiffness와, 그에 따른 사용자의 주관적 촉각정보, 두 변수간의 상관성을 회귀분석 곡선추정을 하여 분석하였다. 먼저 ANOVA분석을 통하여 통계적인 유효성을 검증하였으며, 회귀식을 도출하였다.

3. 결과

3.1 실험1

[표 1]은 실험 1의 결과로 얻어진 평균적으로 stiffness의 변화를 느낀 값들과 그 값들 사이의 평균적인 해상도이다. [표 1]에서 보여지는 바와 같이, 구간 별로 힘의 차이가 해상도에 따라 현저한 차이가 있음을 알 수 있었다. 0.000 N/mm에서부터는 미세한 stiffness의 변화를 인식하지 못하다가 0.032N/mm이상의 stiffness에서부터 피실험자들은 그 힘의 차이를 느꼈다고 표현하기 시작하였다. 그리고 0.431N/mm이상에서는 더 이상 증가된 stiffness에 대해 피 실험자들이 그 차이를 더 이상 느끼지 못하였다.

구간에 따른 해상도 역시 차이를 보였다. 비교적 낮은 수준의 stiffness에서 높은 수준에 비해 비교적 더 민감한 차이를 느끼는 것으로 실험 결과로 알 수 있었다. 0.032N/mm~0.134N/mm 구간에서는 0.017N/mm의 해상도가 평균적으로 나타났으며, 0.135N/mm~0.431N/mm의 구간에서는 0.027N/mm의 해상도를 보였다. 실험을 좀 더 세분화 하기 위해서 힘의 차이를 느끼지 못했다고 표현된 구간인 0.000 N/mm~0.032 N/mm와 0.431 N/mm~0.500 N/mm에도 [표 1]의 0.016 N/mm, 0.466 N/mm와 같이 stiffness값을 임의로 추가해주었다. 이렇게 얻어진 [표 1]의 해상도(22개)는 실험 2에 stiffness값으로 팬텀에 입력되어 활용되었다.

[표 1] stiffness에 따른 resolution

Stiffness	Resolution
0.000	
0.016	
0.032	
0.049	0.017
0.066	0.017
0.083	0.017
0.100	0.017
0.117	0.017
0.134	0.017
0.161	0.027
0.188	0.027
0.215	0.027
0.242	0.027
0.269	0.027
0.296	0.027
0.323	0.027
0.350	0.027
0.377	0.027
0.404	0.027
0.431	0.027
0.466	
0.500	

3.2 실험2

실험1에서 측정된 해상도를 이용하여 실시된 본 실험의 결과, haptic system에서의 stiffness와 주관적인 촉각정보간의 상관성은 아래의 [표 2]의 ANOVA분석 결과에서 보는 바와 같이 통계적으로 유의한 ($p < 0.05$) 것으로 나타났다.

[표 2]와 같이 ANOVA분석으로 회귀분석이 가능한 데이터임을 검증한 후 (Signif F = .0000), [표 3]의 변수들을 이용, 3차 회귀식을 도출하였다(1). ($R^2 = 0.57$)

[표 2] haptic system의 stiffness와 주관적인 촉각정보에 관한 ANOVA분석결과

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	4489.9556	1496.6519
Residuals	876	3351.1174	3.8255
F =	391.23279	Signif F =	.0000

[표 3] 회귀방정식에서의 변수

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig
힘	46.24	3.79	2.37	12.19	0
힘**2	-113.04	18.3	-2.87	-6.18	0
힘**3	101.93	24.42	1.22	4.18	0
(Constant)	0.51	.2		2.57	0

회귀식

$$Y = 0.51 + 46.24X - 113X^2 + 101.93X^3 \quad (1)$$

X : haptic system에서의 stiffness

Y : 주관적인 촉감

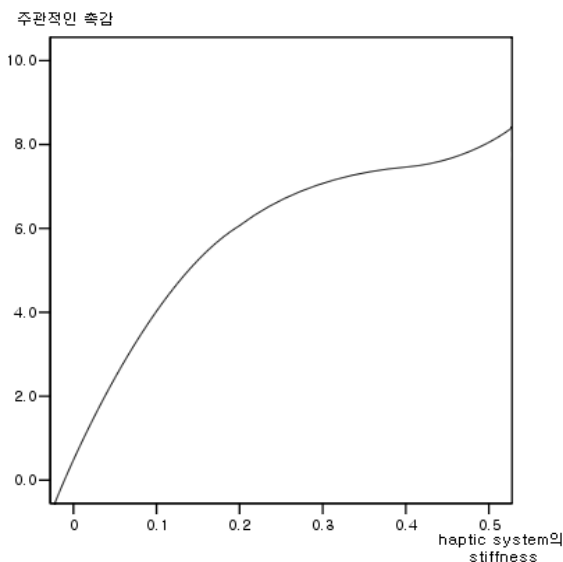


그림 5, 도출된 회귀곡선

4. 결론 및 토론

본 연구는 haptic system의 물리적 stiffness와 사용자의 주관적 촉감정보간의 상관성을 분석하였다. 이를 위하여 단계적으로 두 번의 실험이 이루어졌다. 두 번의 실험의 결과, 실험 1에서는 stiffness의 변화를 0.032N/mm부터 인식할 수 있으며, 0.431N/mm 이상의 stiffness에서는 그 변화를 거의 인식하지 못하였다는 것을 알 수 있었다. 또한, 구간에 따라 stiffness의 변화를 느낄 수 있는 해상도가 다르게 측정되었다.

0.032N/mm~0.134N/mm의 비교적 낮은 수준의 구간에서는 0.017N/mm의 낮은 해상도를 보였으며, 0.135N/mm~0.431N/mm의 비교적 높은 수준의 구간에서는 0.027N/mm의 비교적 높은 해상도를 보였다. (그림 5)

실험 1의 해상도를 이용하여 실행된 실험 2에서는 haptic system이 제시하는 각각의 stiffness에서 사용자의 주관적인 촉감을 정량적으로 측정하였다. 그 결과 두 변수에 대한 비선형 상관모델을 구현하였다. 본 연구는 만질 수 있는 콘텐츠를 구현할 때, haptic system을 이용하여 사용자에게 현실감 있는 주관적 촉감을 제시할 수 있는 기초적 모델을 제시하였다. 이 모델은 가상 현실 상에서 사용자가 직접적으로 콘텐츠를 만지고 그 촉감을 실제와 같이 느낄 수 있도록 하는 감각적인 인터페이스를 구현하는 데에 필요한 기초적인 연구자료가 될 것이다.[7] 추후 본 연구는 주관적 실감을 향상시키기 위한 haptic system의 물리적 촉감각 변수를 이용한 다변량 모델을 지속적으로 개발하고자 한다.

5. 감사의 글

본 연구는 정보통신 선도기반 기술개발 사업의 네트워크 기반 실감형 서비스를 위한 오감정보처리 기술 개발과제의 지원을 받았다.

참고문헌

- [1] 감각형 미디어 제어 시스템, 오세진 외 2 명, 정보과학회논문지 : 소프트웨어 및 응용, 제 31 권 제 10 호, 한국정보과학회, pp. 1356~1363, 2004.
- [2] N. Montfort, from PlayStation to PC, Technology Review, MIT, Vol.105, 2002, pp.68-73.
- [3] 류제하, "실감형미디어: 촉감기술", 정보처리학회지, 제 10 권 제 1 호, 한국정보처리학회, pp. 40-43, 2003.
- [4] Massimiliano Zampini et al., "Tactile perception of the roughness of the end of a tool: What role does tool handle roughness play? ", Neuroscience Letters, 400(3), pp. 235-239, 2006.

- [5] Steven A. Wall et al., "Sensory substitution using tactile pin arrays: Human factors, technology and applications", Signal Processing, 2006.
- [6] Stan Grant, PhD; Tom Aitchison, BSc; Esther Henderson, BSc; Jim Christie, BSc; Sharam Zare, PhD; John McMurray, MD and Henry Dargie, MD, "A Comparison of the Reproducibility and the Sensitivity to Change of Visual Analogue Scales, Borg Scales, and Likert Scales in Normal Subjects During Submaximal Exercise" American College of Chest Physicians, 1999. pp.1208-1217
- [7] M.A. Srinivasan and C. Basdogan, "Haptics in Virtual Environments: Taxonomy, Research Status and Challenges," Comp. Graphics, Vol.21, pp.393-404.