접촉점 표시를 통한 윤곽선 추적 및 돌기 형상 탐지

Haptic Contour Following and Feature Detection with a Contact Location Display

박 재 영¹, 윌리엄 프로판처², 데이비드 존슨³, 홍 탄[†]

Jaeyoung Park¹, William R. Provancher², David E. Johnson³, Hong Z. Tan[†]

Abstract We investigate the role of contact location information on the perception of local features during contour following in a virtual environment. An absolute identification experiment is conducted under force-alone and force-plus-contact-location conditions to investigate the effect of the contact location information. The results show that the participants identify the local features significantly better in terms of higher information transfer for the force-plus-contact-location condition, while no significant difference was found for measures of the efficacy of contour following between the two conditions. Further data analyses indicate that the improved identification of local features with contact location information is due to the improved identification of small surface features.

Keywords: contact location display, contour following, haptic feature detection

1. 서 론

최근까지 사용자가 가상의 물체를 촉각적으로 느끼기 위한 수단은 대부분 force-feedback 장치였다. 대부분의 force-feedback 장치는 사용자가 쥐고 사용하는 도구의 일 부분과 가상물체가 접촉하는 한 점에서의 작용력을 표현하기 위해서 설계되었다. 사용자에게 전달되는 촉각정보를 증가시키는 한 방법으로는 다수의 force-feedback 장치를 통해서 접촉점의 숫자를 늘리는 것이 있다. 하지만 Frisoli 등은 1개부터 3개까지 force-feedback 장치의 숫자를 늘렸을 때 가상물체의 인지가 유의할 정도로 향상되지 않는다는 것을 보인 바 있다^[1]. 또한 Jasson과 Monaci는 실제의 물체를 촉각적으로 인지하는 데 있어서도 접촉하는 피부 표면

에 직접 전달되는 촉각정보가 없이는 접촉점만 증가시켜서는 향상이 없다는 것을 보였다. 대신 손가락의 표면에 촉각 정보가 분산되어 전달되는 경우 사물을 인지하는 것이 유의할 정도로 향상되었다^[2]. 이와 같은 과거의 연구 결과들은 촉각을 통한 사물 인지 향상을 위해서는 접촉점에 힘을 전달하는 force-feedback 장치 뿐만 아니라 피부에 촉각 정보를 전달하는 것이 바람직하다는 것을 시사하고 있다. 이러한 목적으로 본 연구에 사용된 접촉점 표시 장치(Contact Location Display, CLD)^[9]를 포함하여 현재까지 수종의 fingertip display⁽¹³⁸⁾가 개발되었다.

접촉점 표시 장치는 접촉이 일어나는 위치를 사용자에게 전달하며 이를 통해 윤곽선 추적 등 촉각을 통한 사물을 보다 더 잘 인지할 수 있을 것이라고 예상할 수 있다. Lederman과 Klatzky는 촉각을 통해 물체를 탐색할 때 해당 물체로부터 얻고자 하는 정보에 따라 손의 움직임이 변화한다는 것을 보인 바 있다. 그 중 윤곽선 추적은 주로 물체의 정확한 세부적인 모양에 대한 정보가 필요할 때 사용된다^[10]. Kuchenbecker 등은 손가락 끝에서의 피부에 전달되는 촉각 정보가 윤곽선 추적에 있어서의 정확성을 높이

Received : Jun. 3, 2013; Reviewed : Jun. 25, 2013; Accepted : Jul. 25, 2013

※ This material is based upon work supported by NSF under Grand Nos. IIS-0904456 and IIS-0904423.

¹ Haptic Interface Research Laboratory, Purdue University (park183@purdue.edu)

² Department of Mechanical Engineering, University of Utah (wil@mech.utah.edu)

³ School of Computing, University of Utah (dejohnso@cs.utah.edu)

[†] Corresponding author: Haptic Interface Research Laboratory, Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.A. (hongtan@purdue.edu)

고 소요시간을 줄이는 것을 보인 바 있다^[11]. 따라서, 접촉점에 대한 정보는 촉각을 통해서 물체의 모양을 탐지하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

손가락 끝에서의 접촉 정보는 사물 표면의 크기가 작거나 자세한 형태적인 특징을 인지하는데 중요한 역할을 한다. 촉각으로 물체를 인지하기 위해서는 촉각 정보와 위치 및 운동 정보가 모두 필요한 것으로 알려졌으며 특히 SAI와 FAI 신경은 피부의 접촉점에서의 사물의 국소적인 기하학적인 형태나 질감에 대한 정보를 감지하고 전달하는 역할을 한다^[12,13]. 또한 손가락 끝의 피부에 운동 역학 수용기(mechanoreceptor)가 밀집되어 있음을 고려할 때, 촉각을 통해서 사물 표면의 세부적인 정보를 얻는데 있어서 손가락 끝에서 피부에 전달되는 정보의 중요성이 간과될 수는 없을 것이다^[14].

본 논문에서는 사용자의 손가락 끝에 피부를 통한 촉각 정보를 전달하기 위해서 접촉점 표시 장치 (CLD)가 사용되었다. 전체적인 햅틱 시스템은 CLD와 상용화된 force-feedback 장치의 결합으로 구성되었다. 해당 햅틱 시스템은 사용자에게 작용력 뿐만 아니라 가상 표면과 접촉이 일어날 경우 접촉점에서의 정보를 전달할 수 있다. 지금까지 촉각을 통한 사물의 조작과 인지에 있어서 접촉점 정보의 중요성은 CLD 햅틱 시스템을 통해서 여러 연구에서 조사되어왔다.

CLD를 사용한 최초의 연구에서는 물리적 또는 가상의 곡률 모델을 사용하여 인간의 곡률 판별 역치를 측정하였다. 해당 연구에 따르면 CLD를 통한 곡률의 판별 역치는 물리적 모델과 유사한 것으로 나타났다^[15]. 다음 연구에서는 윤곽선 추적에 있어서 CLD의 역할이 평가되었다. 해당 연구의 결과에 따르면 CLD가 사용될 경우 force-feedback 장치만 사용할 경우보다 소요 시간이 단축되고 접촉 실패가 줄었다^[11]. 또한 CLD는 접촉점 정보가 force-feedback와 함께 사용자에게 제공될 경우 폴리곤이 아닌 커브로 표면을 렌더링을 하기 위한 햅틱 렌더링 알고리즘을 평가하는데도 사용되었다^[16].

CLD와 관련한 보다 최근의 연구에서는 촉각으로 가상의 모서리를 인지할 때 접촉점 정보와 작용력 정보의 상대적인 역할이 연구조사되었고 이를 위해 모서리의 날카로운 정도를 판별하기 위한 실험이 force-feedback만 주

어지는 경우와 force-feedback와 접촉점 정보가 사용자에게 주어지는 두 가지 경우에 대해서 실행되었다. 두 조건에 대해서 판별 역치가 가상 모서리의 기준 곡률이 증가함에 따라서 증가했지만 두 조건 간에 통계적으로 유의미한 차이는 발견되지 않았다. 후속 실험에서는 CLD에서 사용자의 손가락과 접촉하는 롤러의 크기가 모서리의 날카로움을 판별함에 미치는 영향이 평가되었다. 실험 결과에 따르면 롤러의 반경은 사용자가 모서리의 날카로움을 판별하는 능력에 유의미하게 영향을 미치지 않으며 이는 또한 사용자가 롤러의 움직임에 집중함으로써 물리적인 곡률의 영향을 극복할 수 있다는 것을 의미한다^[17].

CLD가 물체의 윤곽선 추적에 도움을 준다는 사실이 과거 연구에서 밝혀졌으나 향상된 윤곽선 추적으로 인해 물체의 표면의 자세한 형상을 인지하는데 실제로 도움을 주는지 그리고 어떻게 영향을 주는지는 밝혀진 바가 없다^[11]. 본 연구에서는 CLD가 윤곽선 추적 도중 가상 물체의 표면의 국지적인 형상을 인지하는데 있어서의 영향을 살펴보고자 한다. 연구의 목적은 i) 표면의 국지적인 형상을 탐지할 때와 ii) 윤곽선 추적에 있어서의 접촉점 정보의 역할을 평가하는데 있다. 첫번째 목적을 위해서 우리는 접촉점 정보를 추가하는 것이 물체 표면의 크기가 작은 형상을 식별하는데 있어서 향상을 가져올 것이라는 가설을 세웠다. 이는 작은 크기의 돌기 등의 형상은 피부를 통한 촉각 정보를 통해서 잘 감지되는 반면에 보다 큰 형상의 감지는 위치 및 운동 정보와 관련될 것으로 보았기 때문이다. 두번째 목적을 위해서 우리는 접촉점 정보가 윤곽선 추적을 보다 용이하게 할 것이며 이는 또한 표면 형상을 인지하는데 도움이 될 것이라는 가설을 세웠다. 또한 윤곽선 추적시의 속도가 느려질 경우 CLD의 장점이 덜 부각될 것이라 보았다. 실생활에서 윤곽선 추적이나 형상 감지를 해야 할 경우, 최대한 효율적인 움직임이 필요하다고 보고 본 연구에서는 참가자들이 실험 과제를 최대한 짧은 시간에 수행하도록 하였다.

본 논문의 2장에서는 실험 방법이 소개되며 3장에서는 결과, 마지막으로 4장에서는 실험결과에 대한 토의가 기술되었다.

2. 실험 방법

2.1 CLD 시스템

CLD 시스템은 특수제작한 접촉점 표시 장치 (CLD)와 force-feedback 장치인 PHANTOM으로 구성된다. CLD는 사용자의 전완부에 장착되는 1-DOF 리니어 액추에이터와 액추에이터와 롤러를 연결하는 푸시풀 와이어를 통해서 접촉점 정보를 전달한다 (Fig. 1). 사용자의 검지손가락 끝에는 하단부가 개방된 골무가 장착되며 개방된 하단부에 롤러가 장착되어 이동하면서 접촉점이 표시된다. 가상 공간에서 손가락의 위치와 회전각도는 PHANTOM의 포지션 인코더, CLD 짐벌에 장착되는 로터리 인코더, 롤러가 손가락에서 이동한 상대적 위치를 통해서 계산되었다.

접촉점은 사용자의 손가락 끝에 접촉되는 실린더 형태의 롤러의 위치를 이동함으로써 표시되었다. 롤러의 반경은 4.8 mm이며 손가락에 대한 롤러의 손가락 끝에 대한 상대적인 이동범위는 소프트웨어를 통해서 18 mm로 고정되었다. 접촉점은 한쌍의 푸시풀 와이어를 사용하여 해당 롤러를 손가락에 대해서 상대적으로 이동시킴으로써 표시된다. 롤러 위치 해상도는 0.17 μm 이며 롤러를 원하는 위치로 이동시키는데는 PID 컨트롤러가 사용되었다. CLD와 관련한 보다 상세한 하드웨어 및 제어 정보는 [15]에 기술되어있다.

Fig. 1. Experimental setup. The black curtain covers the left hand during the experiment.

2.2 자극

실험을 위해서 총 31개의 가상 자극 형상이 기본 형태 위에 복수의 돌기들을 덧붙이는 방법으로 만들어졌다. 본

연구에 사용된 CLD가 1-DOF인 관계로 모든 자극은 2차원 윤곽선 형태의 형태로 표현되었고 이를 위해서 복수의 싸인파 곡선의 합으로 이루어진 곡선 위의 점들을 샘플링하고 그에 돌기를 위한 점들이 추가되었다. 기본 형상은 20개의 싸인파의 합으로 만들어지는데 각 싸인파 형태의 진폭 (10 ~ 20 cm), 주파수 (3 ~ 6 싸이클/m), 위상 (0 ~ 2π), DC 오프셋 (-20 ~ 20 cm)는 팔호 안의 범위에서 무작위로 결정되었으며 다음의 수식으로 표현된다.:

$$base_shape(x) = \sum_{i=1}^{20} (A_i \sin(2\pi f_i x + \Theta_i) + offset_i) \quad (1)$$

모든 파라미터가 결정되고 난 뒤에 기본 형태는 연구에 사용된 PHANTOM 1.0A의 워크스페이스를 고려하여 수직 범위가 20cm가 되도록 조정되었다.

실험에 사용된 국지적 형상은 두 가지 높이의 돌기 형태로 결정되었다. 작은 돌기의 높이는 3 mm로 고정되었고 폭은 15에서 30 mm 사이에서 무작위로 결정되었다. 큰 돌기의 높이는 18 mm로 고정되었고 폭은 역시 15에서 30 mm 사이에서 무작위로 결정되었다 (Fig. 2). 상기의 돌기들은 기본 형상 위에 더해졌으며 인접하는 돌기들의 간격은 15에서 57mm 사이에서 무작위로 결정되었으며 평균 간격은 28 mm 였다. 각각의 자극 형상을 위해서 총 0에서 4개의 돌기가 기본 형상에 더해졌다. 상기 절차로 형성된 총 31개의 자극 가운데, 1개는 돌기가 없고 2개는 1개의 돌기, 4개는 2개의 돌기, 8개는 3개의 돌기 그리고 16개는 4개의 돌기를 가졌다.

본 실험에서는 force-feedback 만 사용자에게 전달되는 조건 (이하 F 조건)와 force-feedback과 접촉점 정보가 있는 조건 (이하 F+CLD 조건)이 사용되었다. F 조건에서는 가상세계에서 손가락과 가상 물체가 접촉할 때마다 PHANTOM을

Fig. 2. An example of a stimulus profile consisting of one large and three small bumps on a slowly-varying base shape, and its scale relative to the virtual finger.

통해서 사용자에게 작용력 정보가 전달되었으며 해당 조건에서 물리는 사용자 손가락의 중앙에 위치가 고정되었다. F+CLD 조건에서는 작용력 정보와 더불어 CLD의 롤러 이동에 따른 접촉점 위치 정보도 사용자에게 전달되었다.

2.3 햅틱 렌더링

햅틱 렌더링 및 제어 알고리즘은 OpenGL 라이브러리와 OpenHaptics (www.sensable.com) 툴킷을 사용하여 비주얼 C++로 구현되었다. 사용자의 손가락 중에서 가상공간의 물체와 접촉이 일어나는 부분은 2D에서 2 mm반경을 가지는 원의 호로 표현되었다 (Fig. 2). 손가락의 위치는 PHANTOM의 위치 인코더와 CLD 집벌의 로터리 인코더를 통해 1 kHz 주기로 갱신되었다.

이전 섹션에서 설명한 기하학적으로 복잡한 형태의 자극 형태와 CLD 시스템의 특성은 햅틱 렌더링 알고리즘에 몇가지 제약을 가져왔다. 우선 자극 형태를 closed form의 수식으로 나타내기 어렵기 때문에 각각의 자극은 폴리곤 형태로 근사되었다. 이와 관련하여 Doxon 등은 가상물체가 이와 같이 폴리곤 형태로 표현될 경우 기존의 force shading 등의 방법을 사용해도 접촉점이 부드럽게 느껴지지 않는다는 것을 보인바 있다. 따라서, 본 연구에서의 폴리곤으로부터 유도된 곡선 형태의 윤곽선으로 표현되었다. 폴리곤은 수식 (1)의 기본 형상을 2 mm 간격으로 샘플링한 점들과 각각의 돌기를 구성하는 10개의 컨트롤 포인트들로 만들어졌다. 모든 자극이 2D 평면에서 표현된 점과 인접하는 2개의 커브들이 만날 때 위치와 기울기가 연속되게 만나야한다는 점을 감안해서 윤곽선은 2차 Bezier 곡선으로 표현되었다. Fig. 3에는 인접한 AB와 BC로부터 곡선이 형성되는 예가 나타나있다. 해당 곡선 위의 점 P는 다음의 수식과 같이 표현된다.

$$P = (1-t)^2 A' + 2t(1-t)B + t^2 B' \quad (2)$$

여기서 A'과 B'는 각각 AB와 BC의 중간점들이다 ($0 \leq t \leq 1$, Fig. 3). 각 Bezier 커브의 양끝에서의 기울기가 커브를 구성하는 직선의 기울기와 같기 때문에 인접하는 커브는 항상 같은 기울기로 만나게 된다. Fig. 3에는 적색과 청색으로 표현된 인접한 2개의 커브를 보여주는데 두 커브의

Fig. 3. An example of a bump formed with 10 curve segments (solid line) to fit polygonal envelopes (dashed line) with 10 control points. The red curve is formed from line segment A'B and B'B and the blue from B'C and CC'.

B'에서의 기울기(BC의 기울기)가 서로 같다는 것을 알 수 있다.

실험의 자극이 곡선 세그먼트들로 구성된다는 것을 고려할 때 본 연구의 햅틱 렌더링 알고리즘은 1) 곡선 간의 작용력을 나타낼 수 있어야 하며 2) 작용력의 연속성이 보장되어야 하며 3) 가상공간에서의 손가락이 자극형태의 오목한 부분, 예를 들면 돌기의 시작점과 접촉이 일어날 때와 같이 다수의 접촉점을 처리할 수 있어야 한다. 1) 을 위해서는 두 물체간의 최소거리로부터 작용력이 계산되었다. ($F = -kx$, x 는 충돌 깊이; $k = 1.3 \text{ N/mm}$). 최소 거리는 윤곽선 A, B상의 임의의 두 점 P_A 와 P_B 에 대해서 계산되었고 이는 $\min |P_A - P_B|$ 로 표현되었다. Piegel과 Tiller는 두 곡면 사이에서 거리가 최소가 되는 점들을 구하는 간단한 수식을 유도한 바 있다 [18]. 그에 따르면 u 와 v 를 파라미터로 하는 두 곡선 $A(u)$ 와 $B(v)$ 에 대해서 각 곡선상의 최소거리점 P_A 와 P_B 는 다음과 같은 수식을 만족시켜야 한다 ($0 \leq u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$).

$$(A(u) - B(v)) \cdot \frac{\partial A(u)}{\partial u} = 0, (A(u) - B(v)) \cdot \frac{\partial B(v)}{\partial v} = 0 \quad (3)$$

기하학적으로 이 수식은 두 점을 잇는 벡터 $P_A - P_B$ 가 P_A 와 P_B 의 접선과 수직으로 만난다는 것을 의미한다. 벡터 $P_A - P_B$ 와 P_B 에서의 법선 벡터를 길이 1로 정규화한 내적을 d 로 표현할 때, 두 곡선 간에 접촉이 없을 경우에 d 는 양수가 될 것이고 두 곡선 간의 거리와 같을 것이다. 만약 두 곡선 간에 접촉이 있을 경우 작용력을 계산하기 위한 충

돌 깊이는 d 로부터 계산될 수 있고 힘의 방향은 $\mathbf{P}_A - \mathbf{P}_B$ 로부터 계산될 수 있다. 추가적으로 2)와 3)을 만족시키기 위해서 우리는 “접촉점 추적”이라는 방법을 사용하였다. 만약 수식 (3)을 만족시키고 d 가 0보다 작거나 큰 점들이 발견될 경우 (Fig. 4) 해당점들은 접촉이 발생할 수 있는 후보군으로 간주하고 추적이 시작된다. 만약 현재의 서보루프에서 해당 접촉점들이 발견될 경우 각 점들이 위치하는 곡선 세그먼트들이 기록된다. 햅틱 디바이스의 서보루프의 갱신주기가 충분히 빠르다고 가정할 때, 접촉점은 다음 서보루프에서 해당 곡선이나 인접한 곡선에서 벗어나지 않을 것이다. 다음 서보루프에서는 먼저 기록된 곡선과 인접한 곡선들이 수식 (3)을 만족시키는지 확인한다. 만약 그러한 곡선이 존재할 경우 수식을 계산해서 이번 서보루프에서의 접촉점 위치를 갱신하고 접촉점이 추적되었다고 간주한다. 만약 복수의 점에서 접촉이 일어날 경우 사용자의 손가락에 가해질 작용력은 각 접촉점에서의 작용력의 벡터합으로 계산된다. 이런 방법을 통해서 복수의 접촉점이 처리되며 작용력의 연속성이 보장되는데 이는 작용력이 접촉점들간의 거리가 양수일 때 (접촉이 일어나기 전)부터 추적을 했기 때문이다. 따라서 조건 2)와 3)이 접촉점 추적을 통해서 만족된다.

CLD의 기계적 구조의 한계로 인해 접촉점의 표시하는데 있어서 추가적인 제약조건이 생기는데 이는 사용자의 손가락과 접촉하는 롤러가 단 한 개이기 때문에 접촉점도 한 위치로 표현되어야 한다는 것이다. 만약 충돌이 한 곳에서만 일어난다면 롤러의 위치는 손가락의 접촉점에 매핑시켜서 결정할 수 있다. 하지만 이 방법은 복수의 접촉점이 생길 경우에는 유효하지 않다. 본 연구에서는 복수의 접촉점이 생길 경우, 해당 접촉점들 중 롤러는 이전 서보루프에서의 롤러 위치로부터의 거리가 최소인 점으로

Fig. 4. An example of valid and invalid contact point pair for starting contact point tracing

롤러를 위치시킨다 (즉, 새로운 접촉점이 추가되더라도 롤러가 그 위치로 점프하지 않는다.) 이와 같은 방법으로 손가락에서의 롤러의 움직임이 최소화되고 접촉점의 표현이 안정화될 수 있다.

2.4 Absolute Identification 실험

본 연구에서의 실험은 absolute identification 실험으로 설계되었고 실험참가자는 각 자극형태에서 총 돌기의 수를 세도록 하였다. 각 자극 형태가 0에서 4개의 돌기를 가지기 때문에 자극은 5가지로 분류되고 사용자는 이에 관한 응답을 보였다. 5행 5열의 오차행렬(confusion matrix)이 각 참석자에 대해서 2가지 실험조건에 대해서 만들어졌다. 또한 각 오차행렬에 대해서 information transfer (IT)가 자극과 반응에 대한 관련성에 대한 척도로써 계산되었다. 평균 IT는 아래와 같은 식

$$IT = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K P(S_i, R_j) \log_2 \left(\frac{P(S_i | R_j)}{P(S_i)} \right), \quad (4)$$

혹은

$$IT = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K P(S_i, R_j) \log_2 \left(\frac{P(S_i, R_j)}{P(S_i)P(R_j)} \right), \quad (5)$$

을 통해서 계산되었는데 $P(S_i, R_j)$ 는 자극 S_i 과 R_j 의 동시확률, $P(S_i | R_j)$ 는 R_j 에 대한 S_i 의 조건부 확률, $P(S_i)$ 는 S_i 의 선험적 확률, $P(R_j)$ 는 R_j 의 확률을 의미한다. IT의 최대공산추정(maximum likelihood estimate)은 각 확률을 발생사건의 빈도수로 근사함으로써 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$IT_{est} = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K \frac{n_{ij}}{n} \log_2 \left(\frac{n_{ij} \cdot n}{n_i \cdot n_j} \right), \quad (6)$$

여기서 n 은 실험의 트라이얼 수, n_i 는 자극 S_i 가 실험참석자에게 나타난 트라이얼의 수, n_j 는 사용자가 R_j 로 반응한 트라이얼의 수, n_{ij} 는 자극 S_i 가 실험참여자에게 나타났을 때 사용자가 R_j 로 반응한 트라이얼의 수이다. IT_{est} 의 값은 각 조건에서 각 사용자가 오류없이 구분할 수 있는 최대의 돌기의 수를 나타낸다. Identification 실험에 대한 보다 자세

한 설명은 [19]에 기술되어 있다.

2.5 실험참가자

총 10명 (여성 5명, 26 ~ 35세)이 실험에 참가했다. 촉각적인 문제가 있는 참석자는 없었으며 자가보고에 따르면 모두 오른손잡이였다. 실험 절차는 Purdue 대학 IRB의 승인을 받았다.

2.6 실험과정

실험참가자들은 섹션 2.2에서 설명된 F 와 F+CLD 두 가지 조건에서 각 자극의 윤곽선을 추적했으며 실험 과정에서 느낀 가상 돌기의 숫자를 썼다. 절반의 참여자들은 F 조건에서 실험을 먼저 수행했고 나머지 절반의 참여자들은 F+CLD 조건에서 실험을 먼저 수행하였다. 각각의 트라이얼에서 돌기의 숫자 k 는 0.2의 선형적 (a priori) 확률로 무작위로 선택되었다. k 가 결정되면 해당 갯수만큼의 돌기를 가진 자극 형상이 무작위로 선택되었다 ($k=0$ 에 대해서는 1개의 자극형태, $k=1$ 에 대해서는 2개의 자극형태, $k=2$ 에 대해서는 4개의 자극형태, $k=3$ 에 대해서는 8개의 자극형태, $k=4$ 에 대해서는 16개의 자극형태). 총 트라이얼의 숫자는 기본적으로 135개로 정해졌는데 이는 Miller가 absolute identification 실험에서 권장하는 최소 숫자인 125보다는 큰 것이다. 처음의 10개 트라이얼은 “워밍업” 트라이얼로 간주되어 데이터 분석에서 배제되었다. 한편 OpenHaptics API가 PHANTOM의 모터가 과열되는 것을 막기 위해 간헐적으로 힘의 작용을 중단하는 것이 발견되었는데 이와 같은 문제가 발생한 트라이얼은 본실험의 뒤에 반복되었다. 따라서, 총 트라이얼의 숫자는 반복되는 트라이얼의 숫자에 따라 증가하게 되는데 최종적으로는 125개의 유효한 트라이얼이 확보되었다.

실험 참가자들은 이어폰을 쓰고 그 위에 햅틱 장비에서 발생할 수 있는 소리가 힌트가 되거나 소음을 막기 위해서 방음용 헤드셋(Peltor, 30dB)을 착용하도록 했다. 각 참가자의 손과 CLD 장비는 시각적인 힌트를 막기 위해서 검은천으로 덮였다. 각 블록이 시작할 때는 자극에 대해서 익숙해지기 위한 훈련이 허용되었다. 훈련시 참가자는 본 실험에 사용된 자극과 같은 방법으로 구성된 3가지의 자극 형태를 보고 느낄 수 있었다. 참가자가 준비되었을 때

훈련은 끝나고 본실험으로 전환되었다.

본 실험 중 각 트라이얼의 시작시에는 촉각적인 자극은 제공되지 않았고 가상 공간에서의 손가락 위치만이 모니터에 표시되었다. 실험 참가자는 각 트라이얼의 자극 형태의 시작점에 위치한 녹색 점으로 손가락을 이동하여 손가락과 녹색 점의 거리가 2 mm 이하가 되면 손가락과 녹색 점이 모니터에서 더 이상 표시되지 않았고 오직 촉각적인 자극(F 나 F+CLD)만이 주어졌다. 즉 실험에 사용된 자극 형태는 본실험에서는 촉각정보를 통해서만 느낄 수 있었고 그에 관한 시각적 정보는 주어지지 않았다. 참가자는 이어폰에서 벨소리가 날 때까지 손가락을 몸의 앞에서부터 뒷쪽 방향으로 *최대한 빠른* 속도로 움직이도록 지시받았다. 또한 참석자는 손가락이 가상의 자극 형태와 *가능한 최대한 접촉*하도록 하도록 하며 손가락을 통해서 느낀 *돌기의 수를 세도록* 지시받았다. 각 트라이얼의 종료를 알리기 위해서 사용자의 손가락의 시작점으로부터 18.4 cm 떨어진 곳을 통과할 때 벨소리가 재생되었다. 여기서 18.4 cm는 실험에 사용된 PHANTOM premium 1.0A의 워크스페이스를 고려하여 결정되었다. 각 트라이얼의 끝에 참석자는 느낀 돌기의 수를 키보드로 입력하였다. 즉, 참석자의 실험에서의 임무는 자극의 윤곽선과 접촉을 최대한 유지하며 가능한 빠른 속도로 손가락을 움직이며 돌기의 수를 세는 것이었다.

각 트라이얼에서 기록된 파라미터는 다음과 같다. 참가자가 가상의 돌기를 인식하는 능력을 측정하기 위해서는 사용자가 느끼고 입력한 총 돌기의 숫자가 저장되었다. 윤곽선 추적 능력 평가를 위해서는 손가락이 가상의 윤곽선과 접촉이 일어난 횟수와 떨어진 횟수, 각 트라이얼의 소요시간 및 윤곽선 추적 시간 (손가락이 자극 형태와 접촉을 유지한 시간)이 기록되었다.

각 블록이 종료한 후에 참가자는 10분간의 휴식을 취했다. 각 참가자가 2가지 실험조건 블록의 실험을 모두 마치고 위해서는 대략 1시간이 소요되었다.

2.7 결과 분석

각 블록에서는 125개의 유효한 트라이얼의 결과가 생성되었다. 5행 5열의 자극-반응에 대한 오차행렬이 각 참가자, 각 실험조건에 대해서 1개씩 생성되었고 수식 (6)을 통해

서 ITest 및 정답률이 계산되었다.

두 가지 실험 조건에 대해서 차이를 보기 위해서 ITest, 정답률, 손가락이 자극 윤곽선과 접촉이 일어난 횟수와 떨어진 횟수, 평균 트라이얼 소요시간, 평균 접촉 시간이 대응표본 t-검정(paired t-test)을 통해서 분석되었다.

3. 실험 결과

Fig. 5는 실험 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)는 실험 참가자들의 평균적으로 돌기 숫자를 인식하는 능력이 평균 정답률과 information transfer로 표시되었다. F와 F+CLD 조건에 대해서 평균 정답률은 64%와 75%로 나타났으며 F 및 F+CLD 조건에 대해서 평균 information transfer는 1.22 비트 (2.32 개) 와 1.42 비트 (2.68개)였다. 참고로 5개의 선택지에 대한 최대 information transfer는 2.32 비트이다. 대체적으로 돌기 인식 능력에 대한 두 가지 파라미터는 모드 F+CLD 조건에서 F 조건에 비해서 높다고 할 수 있다. F 및 F+CLD 조건에 적용된 대응표본 t-검정에 따르면 정답률 [$t(9) = 4.56, p < 0.01$]과 information transfer [$t(9) = 3.68, p < 0.01$]에서 모두 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 따라서 우리는 접촉점 정보가 force-feedback에 추가됨으로써 돌기를 인지하는 능력이 향상되었다는 결론을 내릴 수 있다. 이 결과는 접촉점 정보가 인간이 물체 표면의 특징을 인지하는데 향상을 가져올 것이라는 예상을 입증한다고 할 수 있다.

Fig. 5(b)는 평균 트라이얼 소요시간과 손가락이 자극 윤곽선과 접촉한 시간의 트라이얼 소요시간에 대한 평균 비율이 나타나있다. F와 F+CLD 조건에 대해서 평균적으로 각 트라이얼을 마치는데 4.1 초 및 4.7 초가 소요되었다. 또한 각 조건 하에서 손가락이 자극 윤곽선과 접촉을 유지한 시간의 비율은 평균적으로 91%와 94%였다. Fig. 5(b)에 나타난대로 대체적으로 F+CLD 조건에서 F조건보다 시간이 더 걸리는 경향이 나타난다. 하지만 그 차이는 트라이얼 소요시간 [$t(9) = 0.75, p = 0.48$]이나 접촉시간 대 트라이얼 소요시간에 대한 비율 [$t(9) = 1.83, p = 0.1$]에 대해서나 통계적으로 유의미한 차이는 없었다. 여기서 우리는 접촉점 정보가 force-feedback에 추가한 것은 총 이동 시간이나 손가락이 자극 윤곽선과 접촉하고 있던 시간에 유의

(a) Proportions of correct answers (left) and information transfer (right) for bump number identification

(b) Average trial time (left) and average ratio of contact time to trial time (right).

(c) Average number for breaking contact (left) between the virtual finger and a contour and average number for making contact (right) with a contour.

Fig. 5. Experimental results. Error bars indicate standard errors.

미하게 영향을 주지 않았다고 결론지었다.

Fig. 5(c)에는 참가자의 손가락이 자극 윤곽선과 접촉이 일어난 횟수와 떨어진 횟수의 평균이 나타나있다. 평균적으로 참가자의 손가락은 F 및 F+CLD 조건에서 접촉이 4.9 번 및 4.8 번 떨어졌고 5.9 번 및 5.7번 접촉이 일어났다. 이미 예상했던대로 Fig. 5(c)의 2개의 도표는 비슷한 경향을 보이는데 이는 실험과정에서 명시된대로 접촉이 떨어지더라도 다시 접촉을 해야하기 때문이다.

따라서 우리는 접촉점 정보가 force-feedback에 추가된다고 해도 접촉이 만들어지고 떨어진 평균 횟수, 평균 트라이얼 시간, 평균 접촉 시간으로 측정된 윤곽선 추적 능력에는 향상이 없었다고 결론지을 수 있다. 이는 접촉점 정보가 윤곽선 추적을 향상시킨다는 기존의 연구결과와 배

치되는 것이다^[11]. 다음 장에서는 이 의미가 더 고찰될 것이다.

본 연구에서는 표면의 돌기 형상을 인지가 향상된 실험 결과가 명확히 나타나고 있다. 우리는 처음에 접촉점 정보가 크기가 작은 표면 형상을 탐지하는데 특히 도움이 될 것이라는 가정을 했다. 이를 좀 더 심도있게 분석하기 위해 작은 돌기만 있거나 (총 4개의 자극 형상) 큰 돌기만 있는 (총 4개의 자극 형상) 자극 형상들에 대해서 인지한 총 돌기수에 대한 정답률이 계산되었다. (Fig. 6) 작은 돌기만 있는 자극 형상들에 대해서 정답률은 F와 F+CLD 조건에 대해서 각각 59 %와 76 %로 계산되었고 큰 돌기만 있는 경우 정답률은 F와 F+CLD 조건에 대해서 각각 87 %와 91 %로 나타났다. 평균을 볼 때 예상대로 작은 돌기를 세는 것이 큰 돌기를 세는 것이 참가자들에게 더 어려웠다는 것을 알 수 있다. F와 F+CLD 조건에 대해서 대응표본 t-검정을 실행했을 때 작은 돌기만 있는 자극 형상에 대해서는 유의한 차이 [$t(9) = 2.52, p = 0.03$]가 있는 반면 큰 돌기만 있는 자극 형상들에 대해서는 두 조건의 차이가 발견되지 않았다 [$t(9) = 0.89, p = 0.8$]. 즉, 이 결과에 따르면 참가자들은 접촉점 정보가 주어질 때 작은 돌기의 수를 더 잘 인지할 수 있었다고 할 수 있다. 반면 접촉점 정보는 큰 돌기를 세는 데는 영향을 미치지 않았다.

실험 결과는 자극 형상들을 각 형상이 포함하고 있는 작은 돌기의 숫자에 따라 분류한 뒤에 추가적으로 분석되었다. 접촉점 정보 추가를 통해서 추가적으로 인지할 수 있는 돌기의 수에 대한 척도로써 F+CLD 조건의 평균 정답률로부터의 F조건의 평균 정답률의 차이가 계산되었다 (Fig. 7 참조). 예상대로, 참가자가 CLD가 forcefeedback에 추가될 때 작은 돌기를 더 잘 인지할 수 있었기 때문에 정답률의 차이는 작은 돌기의 수가 증가할 수록 커졌다.

Fig. 6. Average proportions of correct answers for bump number identification with small bumps only (left) and large bumps only

(right). Error bars indicate standard errors.

Fig. 7. The difference in average proportion of correct answers for the F+CLD and F conditions.

추가적으로 참가자의 반응의 오차율의 절대값의 평균이 작은 돌기의 숫자에 따라 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{평균오차}(k) = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{|\text{실제_돌기수}(i) - \text{참가자의_답}(i)|}{n_k} \quad (7)$$

수식에서 n_k 는 k 개의 작은 돌기를 포함하고 있는 자극 형상의 총 수를 의미한다. Fig. 8의 좌측도표에서 보듯, 오차율의 절대값은 작은 돌기의 수에 따라 단조증가하는 경향을 보였다. 따라서 접촉점 정보를 통해 참가자가 돌기를 더 잘 인지하게 된 것은 그 중에서도 작은 돌기를 더 잘 인지했기 때문인 것으로 보인다. F조건의 오차율에 대한 두 실험조건에서의 오차율의 차이의 비율을 계산하면 작은 돌기의 수에 상관없이 40% 정도 오차율이 감소하는 경향이 나타났다 (Fig. 8, 오른쪽 도표).

[Fig. 8] The difference in average error for the F and F+CLD conditions in (left) absolute and (right) relative terms.

3. 토 의

본 연구는 접촉점이 윤곽선 추적 및 표면 형상 탐지를 하는데 있어서의 역할을 연구하였고 특히 윤곽선 추적 능력이 향상될 경우에 표면 형상의 탐지 능력 향상에 주목하였다. 실험 결과는 가상 돌기의 수를 세는 데 있어서

information transfer와 정답률이 F+CLD 조건에서 F조건에 비해서 더 높은 값을 나타냈는데 이는 접촉점 정보의 추가에 따라 가상 물체를 인지하는 능력이 향상됨을 의미한다. 그러나 접촉시간과 접촉이 떨어진 횟수 등으로 측정한 윤곽선 추적에 있어서는 CLD의 추가로 인한 향상이 없었다.

본 연구 결과에서 접촉점 정보가 force-feedback에 추가됨에도 불구하고 윤곽선 추적의 향상이 없었다는 것은 기존에 Kuchenbecker 등의 연구결과와 상충되는 것이다^[11]. 이와 같은 차이를 설명하기 위해서 본 연구와 Kuchenbecker 등의 연구 간의 실험 방법과 가상 현실 환경의 차이를 볼 수 있다. 본 연구에서는 모든 돌기들이 윤곽선에 비해서 위쪽으로 돌출한 형태였는 반면에 [11]의 자극은 표면의 모서리 형태였다. 따라서 [11]에서는 본 연구에 비해서 실험 과정에서 접촉점이 떨어지기 쉬웠을 가능성이 있다. 또한 [11]에서 각 자극 형태는 아랫쪽을 향하는 단 하나의 모서리만 포함하고 있었고 실험 참가자가 윤곽선의 상면이나 측면에서 접촉을 유지하는데 실패하면 해당 트라이얼은 실패로 간주했다는 것을 주목할 만 하다. 이로 인해 각 참가자는 손가락을 표면에 접촉시키는데 집중했고 그로 인해 손가락이 이동속도가 느려졌을 가능성이 있다. 자극 형태의 너비가 18.4 cm인 본 연구에서는 평균 트라이얼 시간이 F 및 F+CLD 조건에 대해서 각 4.1초 4.5초였다. 반면에 [11]에서는 10 cm 너비의 자극 형태에 대해서 F 및 F+CLD 조건에 대해서 평균 트라이얼 완료시간은 10.4 초 및 4.9 초였다. 따라서 [11]의 실험참가자들은 손가락을 천천히 움직여가며 윤곽선 추적에 필요한 정보들을 이용했을 것이고 그 과정에서 접촉점 위치 정보가 두 실험 조건 사이에 유의미한 차이를 도출한 것으로 볼 수 있다.

본 실험에서 두 실험 조건에서 윤곽선 추적에 있어서 유의할만한 차이가 없었다는 것은 접촉시간으로도 설명할 수 있다. Fig. 5(b)에 나타나듯, 모든 참가자들에 대한 접촉 시간 대 트라이얼 시간의 평균 비율은 F 및 F+CLD 조건에 대해서 91 %와 94 %다. 또한 두 실험 조건에 대해서 평균 트라이얼 시간과 평균 접촉 시간의 차이는 0.3 초로 비교적 작은 편이라고 할 수 있다. 이와 같은 결과는 실험의 참가자들이 “최대한 접촉을 유지” (섹션 2.6 참고)하라는 지시를 잘 따랐다는 것을 의미하며 각 조건에 대해서 윤곽선 추적을 성공적으로 수행했다고 해석할 수 있다. 따라

서 우리는 본 연구의 실험 참가자들이 F 및 F+CLD 조건에서 모두 윤곽선 추적을 성공적으로 수행했으며 두 실험 조건에서 표면 형상의 탐지 능력에 차이가 나타난 것은 접촉점 정보 추가에 따라서 작은 형상을 더 잘 인지했기 때문이라고 결론을 내릴 수 있다.

향후 연구는 접촉점 정보가 작은 표면 형상을 향상시키는 메커니즘을 조사할 것이다. 이를 위해서 가상 공간에서의 손가락과 표면 윤곽선의 충돌 여부, 접촉시의 작용력과 손가락에 실제로 표현된 접촉점의 위치가 시간에 따라서 연속적으로 기록될 것이다. 실험 자료는 작은 돌기와 큰 돌기에 대해서 분석될 것이며 이를 통해서 힘과 접촉점 정보가 표면 형상, 특히 크기가 작은 형상에 어떤 역할을 하는지가 규명될 것이다. 또한 본 실험에서 사용된 큰 돌기와 작은 돌기의 중간 크기의 돌기 형태들을 실험에 사용함으로써 어느 정도 정도의 크기부터 접촉점 추가로 인해서 더 분명하게 인지되는지가 조사될 것이다.

References

- [1] A. Frisoli, M. Bergamasco, S. L. Wu, and E. Ruffaldi, "Evaluation of multipoint contact interfaces in haptic perception of shapes," *Multi-point Interaction with Real and Virtual Objects*, Springer Tracts in Advanced Robotics, 18, 177-188, 2005.
- [2] G. Jansson and L. Monaci, "Identification of real objects under conditions similar to those in haptic displays: providing spatially distributed information at the contact areas is more important than increasing the number of areas," *Virtual Reality*, 9(4), 243-249, 2006.
- [3] A. Frisoli, M. Solazzi, F. Salsedo, and M. Bergamasco, "A fingertip haptic display for improving curvature discrimination," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 17(6), 550-561, 2008.
- [4] E. P. Scilingo, M. Bianchi, G. Grioli, and A. Bicchi, "Rendering softness: Integration of kinesthetic and cutaneous information in a haptic device," *IEEE Transactions on Haptics*, 3(2), 109-118, 2010.
- [5] B. T. Gleeson, S. K. Horschel, and W. R. Provancher, "Design of a fingertip-mounted tactile display with tangential skin displacement Feedback," *IEEE Transactions on Haptics*, 3(4), 297-301, 2010.
- [6] J. Luk, J. Pasquero, S. Little, K. MacLean, V. Levesque, and V. Hayward, "A role for haptics in mobile interaction: Initial design using a handheld tactile display prototype," *Proceedings of CHI'06*, 10 pp., 2006.

- [7] L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate, and M. Peshkin, "T-PaD: Tactile pattern display through variable friction reduction," *Proceedings of the World Haptics Conference '07*, 421-426, 2007.
- [8] I. Sarakoglou, N. Garcia-Hernandez, N. G. Tsagarakis, and D. G. Caldwell, "A High Performance Tactile Feedback Display and Its Integration in Teleoperation," *IEEE Transactions on Haptics*, 5(3), 252-263, 2012.
- [9] W. R. Provancher, K. J. Kuchenbecker, G. Niemeyer, and M. R. Cutkosky, "Perception of curvature and object motion via contact location feedback," *Proceedings of the International Symposium on Robotics Research*, 456-465, 2003.
- [10] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, "Hand movements: A window into haptic object recognition," *Cognitive Psychology*, 19(3), 342-368, 1987.
- [11] K. J. Kuchenbecker, W. R. Provancher, G. Niemeyer, and M. R. Cutkosky, "Haptic display of contact location," *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium*, 40-47, 2004.
- [12] S. Hsiao, "Central mechanisms of tactile shape perception," *Current Opinion in Neurobiology*, 18(4), 418-424, 2008.
- [13] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte, "Encoding of shape in the responses of cutaneous mechanoreceptors," *Information Processing in the Somatosensory Systems*, O. Franzen and J. Westman, Eds.: MacMillan Press, 59-69, 1991.
- [14] A. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation," *Human Neurobiology*, 3(1), 3-14, 1984.
- [15] W. R. Provancher, M. R. Cutkosky, K. J. Kuchenbecker, and G. Niemeyer, "Contact location displays for haptic perception of curvature and object motion," *The International Journal of Robotics Research*, 24(9), 691-702, 2005.
- [16] A. J. Doxon, D. E. Johnson, H. Z. Tan, and W. R. Provancher, "Force and Contact Location Shading Thresholds for Smoothly Rendering Polygonal Models," *Proceedings of the Haptics Symposium*, 183-190, 2010.
- [17] J. Park, A. J. Doxon, W. R. Provancher, D. E. Johnson, and H. Z. Tan, "Edge sharpness perception with force and contact location information," *Proceedings of the World Haptics Conference*, 517-522, 2011.
- [18] L. Piegel and W. Tiller, *The NURBS book*. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [19] H.-Y. Chen, J. Park, S. Dai, and H. Z. Tan, "Design and evaluation of identifiable key-click signals for mobile devices," *IEEE Transactions on Haptics*, 4(4), 229-241, 2011.
- [20] G. A. Miller, "Note on the bias of information estimates," in *Information Theory in Psychophysics*, 95-100, 1954.

박재영

1996 서울대학교 전기공학부
(공학사)

2008 Purdue University Electrical
and Computer Engineering
(공학석사)

2008~현재 Purdue University Electrical and Computer
Engineering 박사 과정

관심분야 : haptic perception, haptic rendering

윌리엄 프로판처

1993 University of Michigan,
Ann Arbor, Mechanical
Engineering (B.S.)

1995 University of Michigan,
Ann Arbor, Material Science
& Engineering (M.S.)

2003 Stanford University, Mechanical Engineering(Ph. D.)

현재 : Associate Professor, Mechanical Engineering,
University of Utah

관심분야 : haptics, tactile feedback, design of novel climbing
robot

홍 탄

1986 Shanghai Jiao Tong
University, China,
Biomedical Engineering
and Instrumentation (B.S.)

1988 Massachusetts Institute of
Technology, EECS (S.M.)

1996 Massachusetts Institute of Technology, EECS (Ph. D.)

현재 : Professor, School of Electrical and Computer
Engineering, Purdue University

관심분야 : haptic perception, haptic rendering, multimodal
performance

데이비드 존슨

B.A. : Carleton College, Computer
Science and Physics

Ph. D. : University of Utah,
Computer Science

현재: Research Scientist, School
of Computing, University
of Utah

관심분야 : geometric computations on robotics