

研究論文

視触覚融合コンテンツにおける複数の視覚刺激と振動刺激によるクロスモーダル知覚に関する検討

新島 有信^{1,a)} 小川 剛史^{2,b)}

受付日 2016年1月15日, 採録日 2016年5月30日

概要: バーチャルリアリティ技術の発達およびウェアラブルデバイスの普及にともない、視覚刺激だけでなく触覚刺激も同時に提示する視触覚融合コンテンツが提案されている。視覚刺激と触覚刺激を同時に提示した場合、視覚刺激がユーザの触覚知覚に影響を与え、視覚と触覚のクロスモーダル知覚が生起される。これまで、視覚と触覚のクロスモーダル知覚に関する研究は数多く行われているが、その多くは視覚と触覚が1対1対応の場合を想定しており、視覚刺激と触覚刺激の刺激点の個数が異なる場合のクロスモーダル知覚による触覚位置の定位については十分に検討されてこなかった。本研究では、視覚刺激と触覚刺激の刺激点の個数が異なる場合において、クロスモーダル知覚がどのように生起されるかについて検証し、複数の視覚刺激と触覚刺激を連動させて提示するような視触覚融合コンテンツのための視触覚ディスプレイの設計指針の1つとなることを目指す。基礎検討として、視覚刺激としてLED、触覚刺激として振動モータを利用し、前腕に視覚刺激と触覚刺激を同時提示した場合における触覚位置の定位に関する検証実験を行った。実験結果より、点灯させるLEDの位置や個数を変化させることで、同一の振動刺激に対する触覚位置や触覚点の個数が変化することが示された。

キーワード: 視覚刺激, 触覚刺激, クロスモーダル知覚

A Study on Cross Modal Perception of Multiple Visual Stimuli and Vibration Stimuli for Visual Tactile Contents

ARINOBU NIJIMA^{1,a)} TAKEFUMI OGAWA^{2,b)}

Received: January 15, 2016, Accepted: May 30, 2016

Abstract: There are some visual tactile contents which present visual stimuli and tactile stimuli simultaneously because of development of virtual reality technology and spread of wearable devices. When visual stimuli and tactile stimuli are presented simultaneously, visual stimuli will influence user's perception. Then cross modal perception of visual sensation and tactile sensation will be caused. In previous works, there are many studies about cross modal perception of visual sensation and tactile sensation. However, they focused on the case in which visual stimuli and tactile stimuli are one to one correspondence, and there are few studies which focus on the case in which the number of visual stimuli and that of tactile stimuli are different. In this study, we investigate cross modal perception of visual stimuli and tactile stimuli under the condition. Our goal is to propose design of visual tactile display for visual tactile contents in which multi-stimuli are presented. We conducted basic studies about localization of tactile perception when visual stimuli and tactile stimuli are presented simultaneously on a forearm by utilizing LEDs as visual stimuli and vibration motors as tactile stimuli. The results showed that the localization of tactile perception and the number of areas of that was changed by changing the position of LED light and the number of that.

Keywords: visual stimuli, tactile stimuli, cross modal perception

¹ 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

² 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-8658, Japan

^{a)} a.nijima@ogawa-lab.org

^{b)} ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

現実世界に情報を付加する拡張現実感 (AR: Augmented Reality) [1] を利用したコンテンツは、スマートフォンやヘッドマウントディスプレイの普及により容易に実現可能となっている。ARで提示したバーチャル物体に対するイ

インタラクションのリアリティを向上させるために、ユーザに触覚フィードバックを与える研究もさかんに行われるようになってきており、たとえば、バーチャル物体の視覚的な動きに同期させて触覚を提示する研究がある [2], [3], [4]. 視覚刺激と触覚刺激を同時に提示した場合におけるユーザの触覚位置は、視覚刺激と触覚刺激の双方の影響を受け、クロスモーダル知覚が生起されることが予想される。クロスモーダル知覚とは複数の感覚を統合して1つの感覚を形成することであり、視覚と触覚においてもクロスモーダル知覚が生起されることが複数の研究結果から明らかになっている [5], [6], [7]. クロスモーダル知覚をARにおける触覚に応用した例として、物体の硬さ [8] や痛覚知覚 [9] を視覚刺激によって変化させる手法が提案されている。

本研究では、図 1 に示すようなバーチャル物体がユーザの体の上を動き回るアプリケーションにおいて、視覚と触覚のクロスモーダル知覚がどのように生起されるかを検証し、視触覚ディスプレイを設計するための指針を示すことを目指している。触覚刺激の提示には、振動刺激 [10] や電気刺激 [11] や超音波刺激 [12] を用いることが考えられるが、本研究では、小型で安価で痛みをとまなわないという利点からエンタテインメント分野で広く活用されることが予想される振動モータを利用した視触覚ディスプレイについて考える。振動刺激を利用した触覚ディスプレイにおいては、振動子が設置されている位置とは異なる位置に触覚を定位させる手法として仮現運動（振動子が移動しているように感じる錯覚現象）やファントムセンセーション（2個の振動子を同時に振動させると間の1点が振動しているように感じる錯覚現象）などの触錯覚を利用した触覚ディスプレイが提案されており、それらの触錯覚を含む触覚刺激の提示パターンと触覚位置の定位の関係については多数報告されている [10], [13], [14], [15], [16]. しかし、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に同時に提示した場合におけるクロスモーダル知覚による触覚位置の定位については

まだ十分に検討が進んでおらず、視触覚融合コンテンツにおいて、従来の触覚ディスプレイの知見がそのまま応用できるかは不明である。筆者らはこれまで、前腕上の特定の位置に振動刺激を提示し、前腕上の異なる位置にバーチャル物体を1個提示した場合における触覚位置の定位について検証してきた [17], [18], [19]. 検証結果より、触覚位置は視覚刺激の提示位置方向に誘導されることが分かったが、これまでの検証は視覚刺激と触覚刺激が1対1対応の場合のみを扱っていたため、それ以外の条件下でのクロスモーダル知覚については検証していない。

本論文では、新たに、視覚刺激と触覚刺激の刺激点数（同時に提示する刺激の個数）が異なる場合におけるクロスモーダル知覚について検証した。視覚刺激としてLED、触覚刺激として振動モータを利用した視触覚ディスプレイを作製し、前腕に視覚刺激と触覚刺激を様々なパターンで提示した場合における触覚位置の定位を実験により確かめた。本研究の貢献は、複数のバーチャル物体を同時に提示し、その動きを触覚刺激で提示するような視触覚コンテンツにおいて、視覚と触覚のクロスモーダル知覚による触覚定位をふまえた視触覚ディスプレイの設計指針に有用な知見を示すことである。

2. 実験

2.1 実験装置

本実験で用いる視触覚ディスプレイを図 2 に示す。視覚刺激提示用にLEDテープ (Adafruit 社製, NeoPixel Digital RGB LED Strip) を利用し、触覚刺激提示用に振動モータ (東京パーツ工業社製, FM34F) を利用した。図 3 に示すように、LEDテープを前腕内側に20mm間隔で3列設置し、1列につき5個のLEDと振動モータを設置した。設置部位を前腕とした理由は、触覚の空間分解能が低く [20], ファントムセンセーションが起りやすいからである [14], [15]. 各列の間隔を20mmとした理由は、筆者

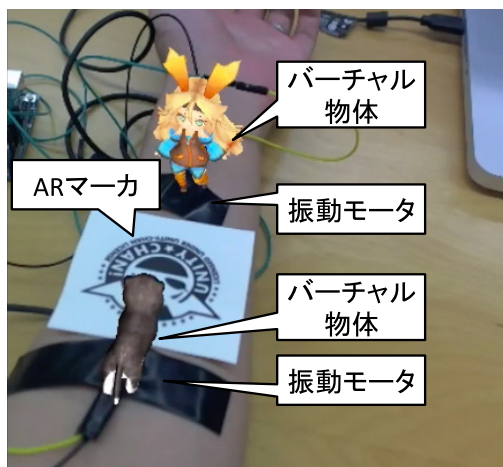


図 1 視触覚融合アプリケーション
Fig. 1 Visual-tactile application.

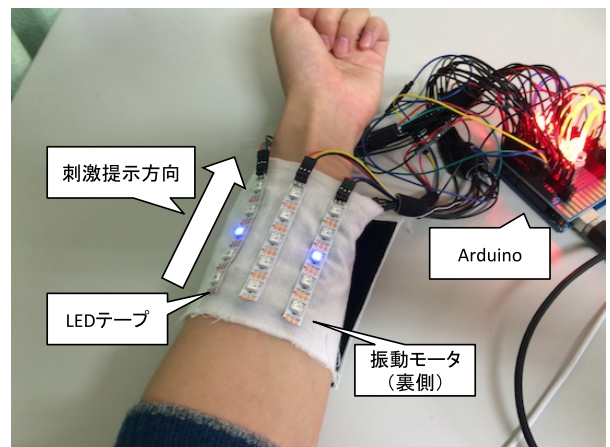


図 2 視触覚ディスプレイ
Fig. 2 Visual-tactile display.

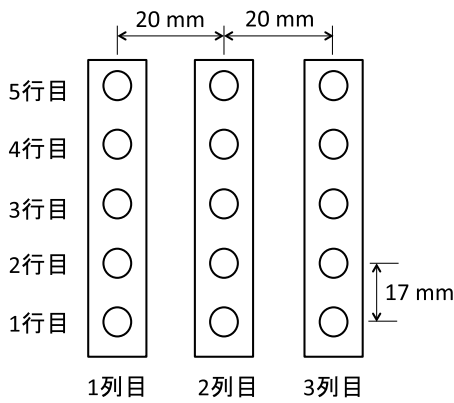


図 3 ディスプレイの配置図
Fig. 3 Layout of the display.

らのこれまでの研究成果から、視覚刺激と振動刺激を同時に提示した場合、視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が 20 mm 以内のときにクロスモーダル知覚が生じやすいからである [17], [18], [19]. それぞれの LED の中心と振動モータの中心が一致するように設置しており、各 LED 間および振動モータ間は約 17 mm である. LED および振動モータはマイコン (Arduino 社製, Arduino Uno) によって制御する. 振動モータのサイズは約 10 mm で、振動を知覚する皮膚の機械受容体のパチニ小体が発火しやすいといわれる 200 Hz の周波数で振動させる [13].

2.2 実験目的

視覚刺激と触覚刺激の提示位置や刺激点数が異なる場合における触覚位置の定位傾向について検証する. たとえば、図 3 において、1 行 1 列目の振動モータが震えている状態で 1 行 3 列目の LED が点灯している場合における触覚位置や、3 行 1 列目の振動モータが震えている状態で 3 行 2 列目と 3 行 3 列目の LED が点灯している場合における触覚位置を測定する.

2.3 実験方法

被験者は、20 代から 30 代の男性 6 名であった. 本実験では、肘 (1 行目) から手首 (5 行目) の方向へ刺激を 1 行ずつ順に提示した. 3 列の刺激提示のタイミングは同期しており、刺激提示時間は 500 ms とした. 5 行目まで刺激を提示した後は再び 1 行目から繰り返し、3 回繰り返したものを 1 回の試行とした. 被験者は、刺激提示中または提示後に、各行ごとに震えていると感じる列を回答し、その回答位置を触覚位置とする. 回答方法は、5×5 のマス目の回答用紙を用いて振動を感じた位置をチェックするものとし、1 列目と 2 列目の間 (1.5 列目とする) と 2 列目と 3 列目の間 (2.5 列目とする) も回答可能とした. また、1 行につき複数の列を回答することも可能とし、被験者が複数の列で振動を感じた場合には、そのすべての列を回答させた. 実験手順は以下のとおりである. まず、被験者の前腕内

表 1 視覚と触覚の刺激パターン (表中の数字は刺激パターン ID)

Table 1 Patterns of visual and tactile stimuli.

| | | 触覚刺激提示位置 | | |
|----------|--------|----------|------|--------|
| | | 1 列目 | 3 列目 | 1&3 列目 |
| 視覚刺激提示位置 | 1 列目 | 1 | 2 | 3 |
| | 2 列目 | 4 | 5 | 6 |
| | 3 列目 | 7 | 8 | 9 |
| | 1&2 列目 | 10 | 11 | 12 |
| | 1&3 列目 | 13 | 14 | 15 |
| | 2&3 列目 | 16 | 17 | 18 |

表 2 刺激点数変化時の視覚刺激パターン (触覚刺激は 1&3 列目)

Table 2 Visual stimuli patterns when the number of stimuli are changed (tactile stimuli are on 1 & 3 columns).

| 視覚刺激 | 刺激パターン ID |
|------------------------|-----------|
| 2 列目が 4 行, 1&3 列目が 1 行 | 19–23 |
| 2 列目が 3 行, 1&3 列目が 2 行 | 24–33 |
| 2 列目が 2 行, 1&3 列目が 3 行 | 34–43 |
| 2 列目が 1 行, 1&3 列目が 4 行 | 44–48 |

側に視覚ディスプレイを巻きつけた. このとき、触覚位置を回答する際にバイアスがかからないようにするために、振動モータの配置については被験者に見せず、また口頭でも伝えていない. 次に、デモンストレーションとして視覚刺激と触覚刺激を提示し、回答方法を説明した. ただし、被験者に視覚刺激と触覚刺激の関係は説明しなかった. 被験者が回答方法を理解した後、本実験を行う. 被験者が自身の前腕を見ている状態で刺激提示を行い、刺激提示後に被験者は震えていると知覚した場所を回答用紙に記入した. 前述のとおり、1 試行につき 3 回同じ刺激パターンが提示されるが、被験者が触覚位置の回答を終えられなかった場合は、さらに 3 回同じ刺激パターンを提示した. また、振動音による触覚への影響を除去するために、実験中は被験者にヘッドホンを装着させてホワイトノイズを聞かせた.

視覚刺激と触覚刺激の提示パターンは、被験者の実験中の疲労が出ない範囲で網羅性をなるべく高めるように、全 48 種類の刺激パターンを設定した. 表 1, 表 2 に刺激パターンを示す. 表 1 で示した刺激パターンでは、視覚刺激および触覚刺激は 5 行すべて同じ刺激パターンで提示した. たとえば、視覚刺激提示位置が 1 列目、触覚刺激提示列が 1&3 列目である刺激パターン 3 では、1 行目から 5 行目まですべて視覚刺激は 1 列目、触覚刺激は 1&3 列目に提示した. 表 2 で示した刺激パターンでは、触覚刺激を 1&3 列目で固定し、視覚刺激を 2 列目または 1&3 列目に提示し、その割合を変化させた. たとえば、視覚刺激の提示パターンとして、2 列目が 2 行, 1&3 列目が 3 行であった場合、1 行目から 5 行目のうちいずれか 2 行は 2 列目に視覚刺激を提示し、残りの 3 行では 1&3 列目に視覚刺激を提示した. 図 4 に上記条件下での刺激パターンの一例を示す. 図の左側で色がついている位置が LED およびモータが駆動する

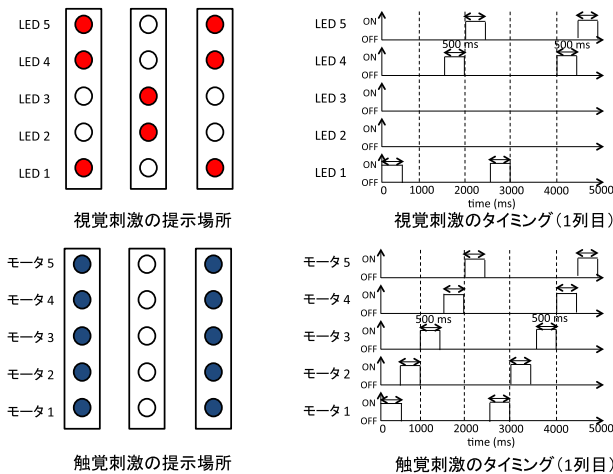


図 4 刺激提示パターン例
Fig. 4 An example of stimuli patterns.

位置となっており、図の右側のグラフは LED およびモータの 1 列目の ON/OFF のパターンを示している。提示パターンは組合せの数だけ存在するため、各刺激パターンはそれぞれ 5 通り、または 10 通り存在する。

各刺激パターンの設定理由を以下に示す。

- (1) 視覚と触覚の刺激点数が異なる場合の検証。
 - (a) 視覚刺激 1 点, 触覚刺激 2 点 (ID : 3, 6, 9).
 - (b) 視覚刺激 2 点, 触覚刺激 1 点 (ID : 10, 11, 13, 14, 16, 17).
- (2) 視覚と触覚の刺激点数が同じだが位置が異なる場合の検証。
 - (a) 視覚刺激 1 点, 触覚刺激 1 点 (ID : 2, 4, 5, 7).
 - (b) 視覚刺激 2 点, 触覚刺激 2 点 (ID : 12, 18).
- (3) 視覚と触覚の刺激位置が同じ場合の検証。
 - (a) 視覚刺激 1 点, 触覚刺激 1 点 (ID : 1, 8).
 - (b) 視覚刺激 2 点, 触覚刺激 2 点 (ID : 15).
- (4) 各行間で視覚刺激点の個数が変化する場合の検証 (ID : 19-48).

なお、刺激の提示順序の影響を排除するために、刺激提示順序はランダムとした。

2.4 解析手法

表 1 の全 18 パターンの刺激を以下のように分類する。

- (i) 触覚刺激が 1 列目の場合 (ID : 1, 4, 7, 10, 13, 16).
- (ii) 触覚刺激が 3 列目の場合 (ID : 2, 5, 8, 11, 14, 17).
- (iii) 触覚刺激が 1&3 列目の場合 (ID : 3, 6, 9, 12, 15, 18).

各分類において、視覚刺激の提示位置や個数によってどのように触覚が定位するかを測定する。触覚定位の解析では、各列 (1 列目, 1.5 列目, 2 列目, 2.5 列目, 3 列目) の触覚定位の割合 P_c ($c = 1, 1.5, 2, 2.5, 3$) および各行での触覚点数 (1 個, 2 個, 3 個, 4 個, 5 個) の割合 P_r ($r = 1, 2, 3, 4, 5$) を求める。 P_c は刺激の提示回数を n ,

表 3 各刺激点数における回答分類

Table 3 Answers classification in each the number of stimuli.

| | | 視覚刺激点数 | |
|-------|-----|--------|-----|
| | | 1 個 | 2 個 |
| 触覚覚点数 | 1 個 | a | b |
| | 2 個 | c | d |

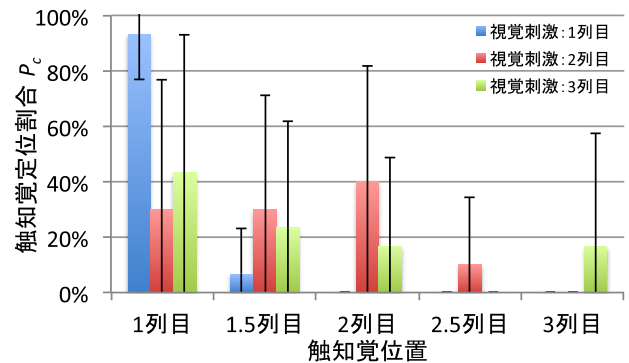


図 5 触覚定位割合 (触覚刺激 : 1 列目, 視覚刺激点数 : 1 個)
Fig. 5 The localization rate of tactile perception (tactile stimulus was on column 1, No. of visual stimuli was 1).

各列において震えていると回答された回数を k とおくと、 $P_c = k/n$ によって算出される。 P_r は刺激の提示回数を n , 各行において r 個震えていると回答された回数を m とおくと、 $P_r = m/n$ によって算出される。本解析により、同一の触覚刺激に対して異なる視覚刺激を提示した場合における各列の触覚定位の差や触覚点数の差を検証する。

また、各行間で視覚刺激点数を変化させた場合の触覚点数の検証として、表 2 の全 30 パターンを用いて、視覚刺激点数の変化にともなう触覚点数の変化を測定する。視覚刺激点数が触覚点数に与える影響を分析するため、視覚刺激点数と触覚点数の一致率を測定する。一致率は表 3 において、 $(a + d)/(a + b + c + d)$ によって算出する。

2.5 実験結果

2.5.1 触覚刺激が 1 列目の場合における触覚定位

視覚刺激が 1 個の場合 (ID : 1, 4, 7) における触覚定位割合 P_c の平均値および標準偏差 (エラーバーで表示) を図 5 に示す。各場合において、触覚刺激は同一 (1 列目) だが、視覚刺激提示位置における触覚定位割合が増加する傾向にあった。また、視覚刺激が 2 個の場合 (ID : 10, 13, 16) における触覚定位割合 P_c の平均値および標準偏差を図 6 に示す。図 5 の場合と同様に、視覚刺激提示位置における触覚定位割合が高くなる傾向にあった。回答傾向に違いがあるかを検証するために、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(20) = 44.8, p < .01$ となり、有意差が認められた。さらに、残差分析を行った結果を表 4 に示す。表中の + は有意に高い傾向を示し、- は有意に低い傾向を示す。表 4 より、視覚刺激を提示した

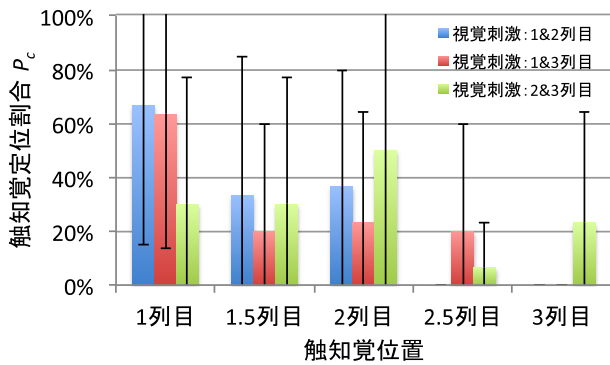


図 6 触知覚定位割合 (触覚刺激: 1 列目, 視覚刺激点数: 2 個)
 Fig. 6 The localization rate of tactile perception (tactile stimulus was on column 1, No. of visual stimuli was 2).

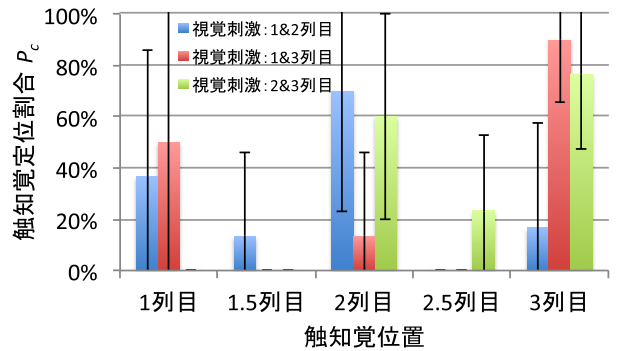


図 8 触知覚定位割合 (触覚刺激: 3 列目, 視覚刺激点数: 2 個)
 Fig. 8 The localization rate of tactile perception (tactile stimulus was on column 3, No. of visual stimuli was 2).

表 4 残差分析結果 1

Table 4 Residual analysis result 1.

| | | 触知覚位置 | | | | |
|----------|--------|-------|--------|------|--------|------|
| | | 1 列目 | 1.5 列目 | 2 列目 | 2.5 列目 | 3 列目 |
| 視覚刺激提示位置 | 1 列目 | +** | -* | -** | n.s. | n.s. |
| | 2 列目 | -* | n.s. | + | n.s. | n.s. |
| | 3 列目 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | +** |
| | 1&2 列目 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | -* |
| | 1&3 列目 | n.s. | n.s. | n.s. | +** | n.s. |
| | 2&3 列目 | -** | n.s. | + | n.s. | +** |

* : $p < .05$, ** : $p < .01$, n.s. : not significant

表 5 残差分析結果 2

Table 5 Residual analysis result 2.

| | | 触知覚位置 | | | | |
|----------|--------|-------|--------|------|--------|------|
| | | 1 列目 | 1.5 列目 | 2 列目 | 2.5 列目 | 3 列目 |
| 視覚刺激提示位置 | 1 列目 | +** | n.s. | -* | + | n.s. |
| | 2 列目 | -** | + | +** | n.s. | -** |
| | 3 列目 | -* | n.s. | -** | n.s. | +** |
| | 1&2 列目 | + | +** | +** | -* | -** |
| | 1&3 列目 | +** | n.s. | -** | -* | +** |
| | 2&3 列目 | -** | n.s. | n.s. | +** | n.s. |

* : $p < .05$, ** : $p < .01$, n.s. : not significant

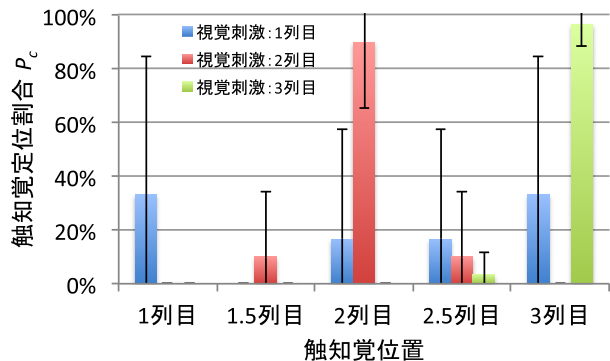


図 7 触知覚定位割合 (触覚刺激: 3 列目, 視覚刺激点数: 1 個)
 Fig. 7 The localization rate of tactile perception (tactile stimulus was on column 3, No. of visual stimuli was 1).

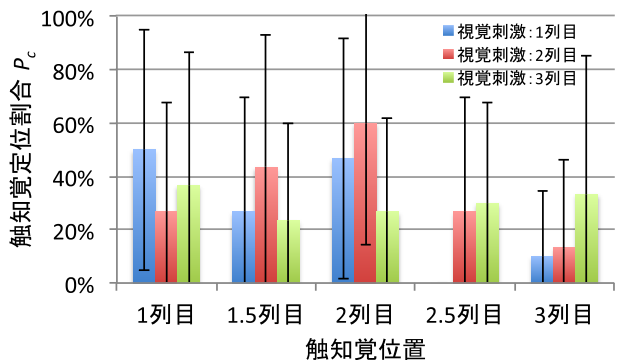


図 9 触知覚定位割合 (触覚刺激: 1&3 列目, 視覚刺激点数: 1 個)
 Fig. 9 The localization rate of tactile perception (tactile stimulus was on column 1 & 3, No. of visual stimuli was 1).

列における触知覚定位割合が有意に増加し, 視覚刺激を提示していない列における触知覚定位割合が有意に減少する傾向にあった。

2.5.2 触覚刺激が 3 列目の場合における触知覚定位

視覚刺激が 1 個の場合 (ID : 2, 5, 8) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 7 に, 視覚刺激が 2 個の場合 (ID : 11, 14, 17) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 8 に示す。図 5, 図 6 と同様に, 視覚刺激提示位置における触知覚定位割合が増加する傾向にあった。回答傾向に違いがあるかを検証するために, それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ, $\chi^2(20) = 157.2, p < .01$ となり, 有

意差が認められた。さらに, 残差分析を行った結果を表 5 に示す。表 4 と同様に, 視覚刺激を提示した列における触知覚定位割合が有意に増加し, 視覚刺激を提示していない列における触知覚定位割合が有意に減少する傾向にあった。また, 図 5, 図 6 と図 7, 図 8 を比較すると, 触覚刺激が 1 列目の場合に比べて触覚刺激が 3 列目の場合は, 視覚刺激の提示位置に触知覚定位する割合が高いという傾向が見られた。

2.5.3 触覚刺激が 1&3 列目の場合における触知覚定位

視覚刺激が 1 個の場合 (ID : 3, 6, 9) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 9 に, 視覚刺激が 2 個の場合 (ID :

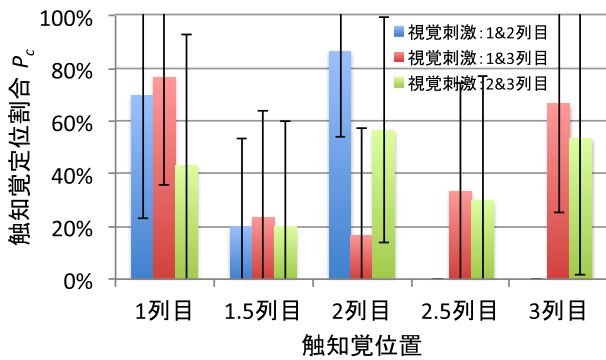


図 10 触知覚定位割合 (触覚刺激: 1&3 列目, 視覚刺激点数: 2 個)
 Fig. 10 The localization rate of tactile perception (tactile stimulus was on column 1 & 3, No. of visual stimuli was 2).

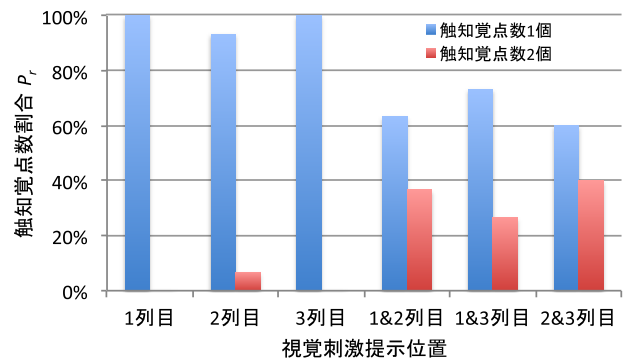


図 11 触知覚点数割合 (触覚刺激: 1 列目)
 Fig. 11 The rate of No. of tactile perception (tactile stimulus was on column 1).

表 6 残差分析結果 3
 Table 6 Residual analysis result 3.

| | | 触知覚位置 | | | | |
|----------|--------|-------|--------|------|--------|------|
| | | 1 列目 | 1.5 列目 | 2 列目 | 2.5 列目 | 3 列目 |
| 視覚刺激提示位置 | 1 列目 | n.s. | n.s. | n.s. | —* | n.s. |
| | 2 列目 | —* | +** | n.s. | n.s. | —* |
| | 3 列目 | n.s. | n.s. | n.s. | +* | n.s. |
| | 1&2 列目 | +* | n.s. | +** | —** | —** |
| | 1&3 列目 | n.s. | n.s. | —** | n.s. | +** |
| | 2&3 列目 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | +** |

* : $p < .05$, ** : $p < .01$, n.s. : not significant

12, 15, 18) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 10 に示す。触覚刺激が 1 列目の場合および触覚刺激が 3 列目の場合と同様に、視覚刺激提示位置における触知覚定位割合が高くなる傾向にあったが、各列どうしの触知覚定位割合の差は小さくなった。回答傾向に違いがあるかを検証するために、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(20) = 77.6$, $p < .01$ となり、有意差が認められた。さらに、残差分析を行った結果を表 6 に示す。触覚刺激点数が複数であっても、表 4 や表 5 と同様に、視覚刺激を提示した列における触知覚定位割合が有意に増加し、視覚刺激を提示していない列における触知覚定位割合が有意に減少する傾向にあった。

2.5.4 視覚刺激点数が固定の場合の触知覚点数

触覚刺激が 1 列目の場合における触知覚点数割合 P_r を図 11 に、触覚刺激が 3 列目の場合における触知覚点数割合 P_r を図 12 に示す。図より、複数の列に視覚刺激を提示した場合は、触知覚点数が 2 個であると回答する割合が増加する傾向が見られた。視覚刺激点数が 1 個の場合と 2 個の場合で、触知覚点数に違いがあるかを検証するため、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(1) = 126.8$, $p < .05$ となり、有意差が認められた。

触覚刺激が 1&3 列目の場合における触知覚点数割合 P_r を図 13 に示す。視覚刺激が 1 個の場合は触知覚点数が 1 個の割合が増加し、視覚刺激が 2 個の場合は触知覚点

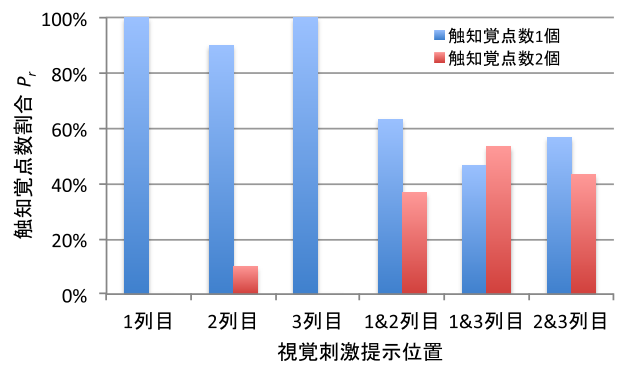


図 12 触知覚点数割合 (触覚刺激: 3 列目)
 Fig. 12 The rate of No. of tactile perception (tactile stimulus was on column 3).

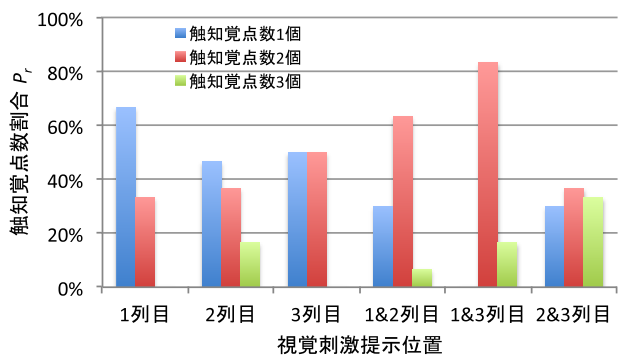


図 13 触知覚点数割合 (触覚刺激: 1&3 列目)
 Fig. 13 The rate of No. of tactile perception (tactile stimulus was on column 1 & 3).

数が 2 個の割合が増加した。視覚刺激点数が 1 個の場合と 2 個の場合で、触知覚点数に違いがあるかを検証するため、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(2) = 61.6$, $p < .05$ となり、有意差が認められた。したがって、触覚刺激点数が 1 個の場合と同様に、触覚刺激点数が 2 個の場合も、触知覚点数は視覚刺激点数によって変化するという。

2.5.5 視覚刺激点数を変化させた場合の触知覚点数

各行において視覚刺激点数を変化させた場合における視

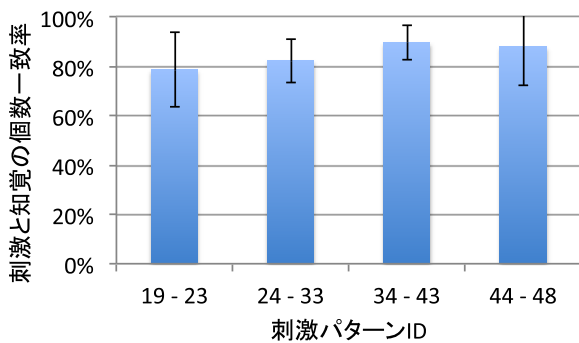


図 14 各刺激パターンにおける視覚刺激点数と触知覚点数の一致率
 Fig. 14 Concordance rate of No. of visual stimuli and that of tactile perception.

覚刺激点数と触知覚点数の一致率を図 14 に示す。どの刺激パターンにおいても、視覚刺激点数と触知覚点数の一致率が 80-90% となった。各刺激パターンにおいて、一致率に違いがあるかを検証するため、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(2) = 12.6$, $p = .054$ となり、有意差は認められなかった。したがって、視覚刺激の変化パターンによらず、触知覚点数は視覚刺激点数の影響を受けるといえる。

2.6 考察

触知覚定位に関する実験結果より、視覚刺激を提示している列は触知覚定位割合が増加する傾向があり、視覚刺激を提示していない列は触知覚定位割合が減少する傾向にあるといえる。これらは従来の研究結果 [17], [18], [19] とともに整合性がとれており、刺激点が複数となってもその傾向は保たれるという新たな知見といえる。ただし、被験者ごとのばらつきが大きいため、クロスモーダル知覚の生起の仕方は被験者ごとに大きく異なるといえる。また、一般的に触覚の空間分解能は高齢になるほど低下するといわれていることから、視触覚ディスプレイにおける触知覚の定位傾向は個人ごとに大きく異なると考えられる [20]。したがって、視触覚ディスプレイを用いて、すべてのユーザに対して意図した位置に触知覚を定位させるためには、個人ごとにキャリブレーションを行う必要があると考えられる。

また、図 5, 図 6 と図 7, 図 8 を比較して、触覚刺激が 3 列目の場合の方が視覚刺激の提示位置に触知覚定位する傾向が見られたことについて、実験後に被験者に感想を聞いたところ、「1 列目よりも 3 列目の方が振動の知覚位置がはっきりせず、結果として視覚刺激に誘導されたように感じた」との意見が複数被験者から寄せられた。このような触知覚の違いの原因としては、前腕部の筋肉や骨や神経の配置が影響していると考えている。今後、さらに原因を調査し、部位ごとに細分化したクロスモーダル知覚について検証を進めていく予定である。

触知覚点数の変化に関する実験結果より、1 個の振動刺

激に対して、2 個の視覚刺激を提示することにより、振動を感じる位置を 2 点にできる可能性が示唆された。一方で、2 個の振動刺激に対して、1 個の視覚刺激を提示することにより、振動を感じる位置を 1 点にできる可能性が示唆された。従来のファントムセンセーションのように触覚刺激の振動を制御するのではなく、視覚刺激を制御することによって触知覚点数を変化させることができる可能性があるという知見は、視触覚ディスプレイにおける触覚提示範囲の制御を簡易に行うための知見として有用であるといえる。また、各行間で視覚刺激点数を変化させた場合、触知覚点数もその変化に追従する傾向が見られたことより、視覚刺激により触知覚点数を動的に変化させることができるといえる。

3. おわりに

本論文では、視触覚融合コンテンツにおける視触覚ディスプレイの設計指針とすべく、LED と振動モータからなる視触覚ディスプレイを用いて、視覚刺激と触覚刺激に対するクロスモーダル知覚について検証した実験について述べた。従来研究では十分に検討されてこなかった視覚刺激と触覚刺激の刺激点の個数が異なる場合について検証し、触知覚位置が視覚刺激の影響を受けて変化することや、視覚刺激の刺激点数を増減させることにより触知覚点数が増減されることなど、視触覚融合コンテンツの制作や視触覚ディスプレイの設計で有用となる実験結果が得られた。本実験結果より、視触覚ディスプレイの設計においては、視覚刺激と触覚刺激の提示位置関係に注目し、それぞれの刺激提示位置が十分に近い場合は、視覚刺激を制御することで触知覚位置を制御することが可能であるといえる。

ただし、本論文の知見は、前腕の 1 方向のみにおける刺激提示に限った知見であるため、多様な視触覚コンテンツに対応するためには、刺激部位や刺激強度や刺激提示パターンのバリエーションをさらに増やして検証する必要がある。また、視触覚融合コンテンツに応用するためには、クロスモーダル知覚における個人差の吸収方法や聴覚刺激などの他感覚刺激からの影響などについても検討していかなければならない。今後の方針として、上記の課題を解決するための検証を行うとともに、本知見を応用して、前腕部に視覚刺激と触覚刺激を提示する視触覚融合コンテンツの制作を進めていく予定である。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) (16K00266) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Azuma, R.T.: A survey of augmented reality, *Presence*, Vol.6, No.4, pp.355-385 (1997).
- [2] Aoki, T., Mitake, H., Keoki, D., Hasegawa, S. and Sato,

M.: Wearable haptic device to present contact sensation based on cutaneous sensation using thin wire, *Proc. International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp.115–122, ACM (2009).

[3] Seo, B.-K., Choi, J., Han, J.-H., Park, H. and Park, J.-I.: One-handed interaction with augmented virtual objects on mobile devices, *Proc. 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, pp.8:1–8:6, ACM (2008).

[4] Sawada, H., Jiang, C. and Takase, H.: TactoGlove: Displaying tactile sensations in tacto-gestural interaction, *2011 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering (ICBAKE)*, pp.216–221, IEEE (2011).

[5] Biocca, F., Kim, J. and Choi, Y.: Visual touch in virtual environments: An exploratory study of presence, multimodal interfaces, and cross-modal sensory illusions, *Presence*, Vol.10, No.3, pp.247–265 (2001).

[6] Craig, J.C.: Visual motion interferes with tactile motion perception, *PERCEPTION-LONDON-*, Vol.35, No.3, p.351 (2006).

[7] Ernst, M.O. and Banks, M.S.: Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion, *Nature*, Vol.415, No.6870, pp.429–433 (2002).

[8] Hirano, Y., Kimura, A., Shibata, F. and Tamura, H.: Psychophysical influence of mixed-reality visual stimulation on sense of hardness, *2011 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp.51–54, IEEE (2011).

[9] 片岡佑太, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: 複合現実型視覚提示が痛覚刺激の知覚に及ぼす影響, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.19, No.2, pp.275–283 (2014).

[10] Israr, A. and Poupyrev, I.: Tactile brush: Drawing on skin with a tactile grid display, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2019–2028, ACM (2011).

[11] Kajimoto, H.: Electrotactile display with real-time impedance feedback using pulse width modulation, *IEEE Trans. Haptics*, Vol.5, No.2, pp.184–188 (2012).

[12] 星 貴之: 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, *計測自動制御学会論文集*, Vol.50, No.7, pp.543–552 (2014).

[13] Alles, D.: Information transmission by phantom sensations, *IEEE Trans. Man-Machine Systems*, Vol.1, No.11, pp.85–91 (1970).

[14] Barghout, A., Cha, J., Saddik, A.E., Kammerl, J. and Steinbach, E.: Spatial resolution of vibrotactile perception on the human forearm when exploiting funneling illusion, *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games, 2009, HAVE 2009*, pp.19–23, IEEE (2009).

[15] Rahal, L., Cha, J., Saddik, A.E., Kammerl, J. and Steinbach, E.: Investigating the influence of temporal intensity changes on apparent movement phenomenon, *IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, 2009, VECIMS '09*, pp.310–313, IEEE (2009).

[16] Seo, J. and Choi, S.: Initial study for creating linearly moving vibrotactile sensation on mobile device, *2010 IEEE Haptics Symposium*, pp.67–70, IEEE (2010).

[17] 新島有信, 小川剛史: 拡張現実感における視覚刺激位置が触覚位置に与える影響の分析, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.17, No.2, pp.73–78 (2012).

[18] Nijjima, A. and Ogawa, T.: A study of changing locations of vibrotactile perception on a forearm by visual stimulation, *Collaboration Technologies and Social Computing*, pp.86–95, Springer (2014).

[19] Nijjima, A. and Ogawa, T.: Visual stimulation influences on the position of vibrotactile perception, *Haptic Interaction*, pp.29–36, Springer (2015).

[20] Lederman, S.J. and Klatzky, R.L.: Haptic perception: A tutorial, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.71, No.7, pp.1439–1459 (2009).



新島 有信 (学生会員)

2012年東京大学大学院工学系研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2014年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程に入学し、現在に至る。拡張現実感における触覚提示に関する研究に従事。



小川 剛史 (正会員)

1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同研究科博士後期課程中退後、同大学サイバーメディアセンター助手。2007年東京大学情報基盤センター講師、2010年同准教授となり、現在に至る。拡張現実感、ヒューマンインタフェース、グループウェア等に関する研究に従事。博士(情報科学)。