Vol.2017-CVIM-205 No.43
2017/1/20

視温覚融合投影インタフェースにおける適切な温覚刺激呈示方法の検討

青木 芽衣 [*1]　　岩井 大輔 [*1]　　佐藤 宏介 [*1]

Abstract – 我々は，赤外光プロジェクタと可視光プロジェクタを組み合わせた視温覚融合投影インタフェースを構築した．このインタフェースは，ユーザの身体へ非接触で任意の場所に視覚情報と温覚情報を同時に呈示することができる．一方で，赤外光プロジェクタには呈示できる温覚刺激の形状や動きに関して制約が存在する．そこで本研究では，遠赤外光プロジェクタの持つ制約を調査し，温覚刺激の呈示方法を工夫することで，視覚刺激と温覚刺激の形状や動きにおける不整合性を解消できるかどうかを検証した．被験者実験により，提案インタフェースに設けるべき視覚刺激に関する制約と，呈示された視覚刺激に対する適切な温覚刺激の呈示方法が得られた．

Keywords : 温覚，視覚，視温覚融合投影インタフェース，マルチモーダルシステム

1　はじめに

複合現実感インタフェースにおいて，複数の感覚に対して情報を呈示するマルチモーダルシステムが注目されている．マルチモーダルシステムでは，単一の感覚器官に対して情報を呈示するよりもユーザに多くの情報を呈示することができるため，高い没入感が得られる．最近では，視覚と触覚に情報を呈示するシステムの研究が盛んに行なわれている．

従来研究より提案されている視触覚呈示方法には，ユーザが触覚呈示デバイスに触れたり，装着したりすることで触覚刺激を得る方法が多い．このような接触型の触覚呈示デバイスは，呈示したい触覚刺激を直接ユーザに伝えることができ，さらに刺激の種類・強度を高い精度で調節することが可能であるが，デバイスの把持や装着が必要となり，ユーザの動作が制限されてしまう．一方，ユーザが触覚呈示デバイスを把持したり装着したりすることなく，空気圧や超音波，熱放射を利用して触覚刺激を非接触で呈示する手法も提案されている [1, 2, 3]．我々は，触覚の中でも特に温覚に着目し，赤外光プロジェクタと可視光プロジェクタを組み合わせた，視温覚融合投影インタフェースの研究を進めている [4, 5]．視温覚融合投影インタフェースは，ユーザの身体へ非接触で任意の場所に視覚情報と温覚情報を同時に呈示することができる．

視温覚融合投影インタフェースは，熱を持つ仮想物体を，3 次元空間で視覚的および温覚的にユーザに知覚させるために使用することを想定している．可視光プロジェクタから仮想物体の映像をユーザの身体へ投影し，同時に赤外光プロジェクタから投影像の位置に合わせて熱を照射する．このとき，視覚刺激と温覚刺激が空間的に整合していれば，投影像があたかも熱を持っているかのようにユーザに知覚させることができる．しかし，赤外光プロジェクタは空間分解能が低いため，呈示する視覚刺激と温覚刺激は空間的に整合しない場合がある．すると，ユーザは知覚した投影像と熱を関連付けることができなくなり，視覚刺激と温覚刺激を別々に与えられたものとして認識する可能性が生じる．その場合，熱を持つ仮想物体をユーザに知覚させることができなくなる．

そこで本研究では，視温覚融合投影インタフェースにおいて，視覚刺激と温覚刺激の間に生じる空間的不整合を考慮した上で，ユーザに熱を持つ仮想物体を適切に知覚させることができるようにすることを目的とする．そのために，被験者実験では様々な形状や動きをする視覚刺激を用い，それぞれの視覚刺激に対して適切な温覚刺激の呈示方法を調べる．これにより，提案インタフェースを用いてアプリケーションを設計する際の指針を得ることを目指す．

2　視温覚融合投影インタフェース

2.1　システム構成

視温覚融合投影インタフェースのシステム構成を図 1 に示す．本システムは，視覚情報を呈示する可視光プロジェクタ (NEC 社，NP-L50WJD) と，温覚情報を呈示する赤外光プロジェクタから構成される．赤外光プロジェクタは，ハロゲンランプ (FINTECH 社，HSH-60f∞ /36v-450w)，可視光カットフィルタ (HOYA 社，IR-80)，パンチルト台 (サスティナブル・ロボティクス社，PTU-D46) に設置したパンチルトミラーから構成される．ハロゲンランプは，放物面鏡によって赤外光を平行光にして出力する．電流量の制御によって直流駆動のハロゲンランプから赤外光を出力し，可視光

[*1] 大阪大学 大学院基礎工学研究科

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

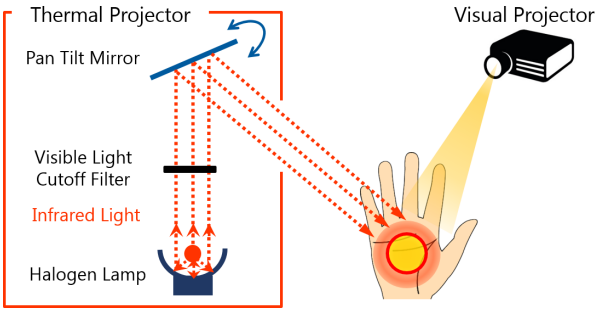

図 1　システム構成
Fig. 1　Configuration of system

の影響を除去するために可視光カットフィルタを透過させる．透過した赤外光を，パンチルトミラーを用いて任意の方向へと照射する．

本システムにより，仮想物体に応じて視覚刺激と，ある一定温度以下の温覚刺激を任意の位置へ同時に呈示することが可能となる．

2.2　視覚刺激と温覚刺激の空間的不整合

提案システムでは，可視光プロジェクタの投影範囲内であれば，呈示する仮想物体に応じて任意の形状や明るさの視覚刺激を呈示させることや，任意の軌跡上を移動させることができる．しかし，呈示される温覚刺激の形状は，ハロゲンランプから照射された赤外光の照射範囲の形状に依存するため，温覚刺激の形状や大きさは自由に変えることはできない (図 2(a), (b))．さらに，視温覚刺激が細かく複雑な移動をする場合，視温覚刺激の呈示位置を一致させても，赤外光の照射範囲が広いため，移動軌跡の複雑さを表現できない可能性もある (図 2(c))．そのため提案システムでは，呈示する仮想物体の形状や移動軌跡によっては視覚刺激と温覚刺激の形状に不整合が生じる．

また，提案システムでは視覚刺激と温覚刺激の呈示位置をそれぞれ自由に移動させることができる．そのため，視覚刺激と温覚刺激の呈示位置を一致させながら同時に呈示することが可能であり，基本的には不整合は生じないと考えられる．しかし，視温覚刺激がある一定以上の速さで移動する場合，ユーザの皮膚へ赤外光はごく僅かな時間しか照射されないため，ユーザが熱を知覚しにくくなる可能性がある (図 3)．すると，熱を持つ仮想物体が移動しているように感じられない可能性がある．

以上のように，提案システムにおいて，呈示する視覚刺激と温覚刺激の対応が整合しない場合，ユーザは呈示された視覚刺激と温覚刺激を関連付けることができなくなる可能性がある．すると，ユーザは呈示された視温覚刺激を，熱を持つ仮想物体であると知覚しなくなる可能性がある．一方で，視覚と温覚の脳内での相互作用において視覚が優位であることから，ユーザ

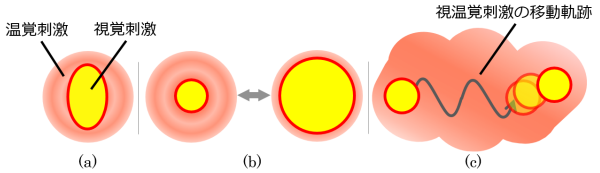

図 2　視覚刺激の形状の違い (a)，拡大縮小 (b)，移動軌跡の複雑さ (c) による温覚刺激との空間的不整合
Fig. 2　Shape and locus inconsistency between visual and thermal stimuli

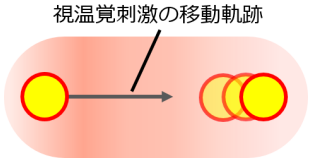

図 3　視温覚刺激の移動による温覚刺激の知覚のしにくさ
Fig. 3　Difficulty of perceiving heat caused by moving visual and thermal stimuli

の温覚が影響を受け，多少の空間的不整合は許容される可能性も考えられる．

そこで本研究では，提案システムにおける視温覚刺激の空間的不整合をできる限り小さくするため，次に示す視覚刺激に対して，熱を持つ仮想物体として適切であると知覚される温覚刺激の呈示方法について検証する．

- 異なる形状・大きさの視覚刺激 (4 章)
- 拡大縮小する視覚刺激 (5 章)
- 異なる速さで移動する視覚刺激 (6 章)
- 複雑な移動軌跡上を運動をする視覚刺激 (7 章)

3　適切さの評価方法

本研究では，提案インタフェースにおいて，ユーザに熱を持つ仮想物体を知覚させるために，視覚刺激に対して適切な温覚刺激の強度や呈示方法を調査する．そのために実験では，「適切さ」として，呈示された視覚刺激と温覚刺激の「調和度」，仮想物体の「実在感」，体験の「好ましさ」の 3 項目を被験者に評価させる．本稿では以降，調和度，実在感，好ましさの 3 項目の総称を「適切さ」と表記する．被験者には実験前に，可視光プロジェクタから投影された視覚刺激の図形を，熱源であると想定した上で回答するように伝える．

調和度に関する評価は，「呈示された温覚刺激は図形とどのくらい調和しているか」という問いに対し，1 から 7 の 7 段階の数値で回答する．このとき，全く調和していないと感じるときは「1」，完全に調和していると感じるときは「7」と回答させる．

実在感に関する評価は，「投影された図形が，熱を持つ仮想物体であるとすると，その仮想物体はどの程度実在しているように感じるか」という問いに対し，1

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

から 7 の 7 段階の数値で回答する．このとき，全く実在しているように感じないときは「1」，はっきりと実在しているように感じるときは「7」と回答させる．

好ましさに関する評価は，「視温覚刺激が呈示されている体験が (被験者自身にとって) どのくらい好きか」という問いに対し，1 から 7 の 7 段階の数値で回答する．このとき，全く好きでない (好ましくない) ときは「1」，とても好きである (好ましい) ときは「7」と回答させる．

なお，実験結果の具体的な数値データは紙幅の制約により省略する．

4 異なる形状・大きさの視覚刺激に対する温覚刺激呈示方法の検討

本章では，視覚刺激の形状や大きさに対し，どのような強度の温覚刺激がユーザにとって適切であるのかを，被験者実験により検証する．具体的には，4 種類の形状，2 種類の面積の視覚刺激と，3 種類の温覚刺激を組み合わせて被験者の掌に重畳呈示し，そのときの視温覚刺激の熱を持つ仮想物体としての適切さを，数値で被験者に回答させる．これにより，視覚刺激の面積が等しく形状が異なる場合や，形状が相似で面積が異なる場合の適切な温覚刺激の強度を検証する．

4.1 実験環境

実験を行なった部屋の温度は 25.0〜26.5 ℃であった．被験者は 21〜24 歳の男性 7 名，女性 2 名の計 9 名であり，全員右利きであった．実験前の被験者の右手の掌の温度は，29.0〜31.0 ℃であった．

実験の様子を図 4 に示す．実際に提案システムを用いてコンテンツを操作する状況を考慮し，実験は環境光の下で行なった．赤外光プロジェクタのハロゲンランプへ導入する電力を変化させる際に電源装置のファンの音が変化するため，その影響を除去するために，被験者はノイズキャンセル機能を持つヘッドフォンを着用した．ヘッドフォンからはホワイトノイズ音を流した．被験者は右手の掌を上に向けて台の上に置き，掌には次節で述べる視温覚刺激を呈示した．

4.2 呈示刺激

視覚刺激

視覚刺激は，図 5 に示す 8 種類の形状を使用した．説明のため，形状の名称を次のように定める．Shape 6L は円形であり，被験者の掌に重畳呈示したときに，直径の長さが約 6.0 cm であった．Shape 5L，Shape 4L，Shape 3L は，面積が Shape 6L と等しい楕円形であり，被験者の掌に呈示したときに，短軸の長さがそれぞれ約 5.0，4.0，3.0 cm であった．Shape 6S は，面積が Shape 6L の 2 分の 1 となる円形であり，被験者の掌に呈示したときに，直径の長さが約 4.2($\fallingdotseq 6.0/\sqrt{2}$) cm であった．Shape 5S，Shape 4S，Shape 3S は，面積が

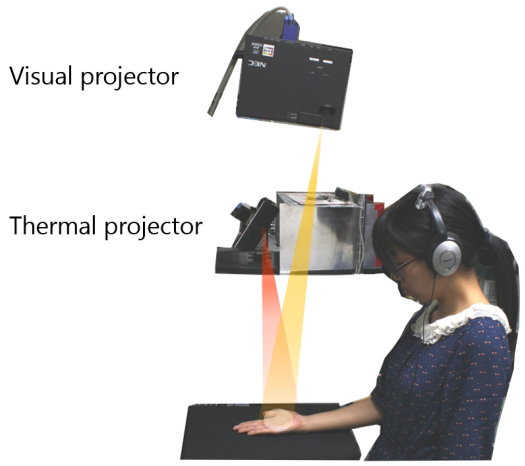

図 4 実験の様子
Fig. 4 Experiment

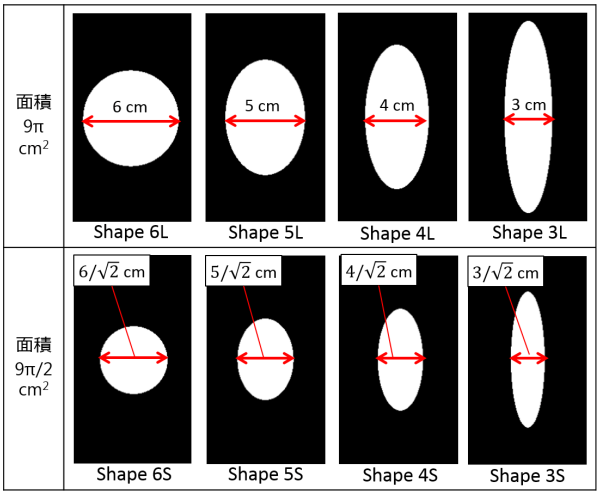

図 5 呈示した視覚刺激の形状
Fig. 5 Shape of visual stimuli in Experiment

Shape 6S と等しい楕円形であり，被験者の掌に呈示したときに，短軸の長さがそれぞれ約 3.5($\fallingdotseq 5.0/\sqrt{2}$)，2.8($\fallingdotseq 4.0/\sqrt{2}$)，2.1($\fallingdotseq 3.0/\sqrt{2}$) cm であった．また，視覚刺激の色は輝度値が最大となる白色光であり，環境光下での色は，CIE 色空間において ($Y = 4.10\times10^3$ lx，$x = 0.322$，$y = 0.331$) であった．

視覚刺激の呈示位置は，被験者の右手の掌の中心に固定し，1 試行につき 5 秒間呈示した．

温覚刺激

温覚刺激の強度は 3 種類用意し，ハロゲンランプに 120，240，360W の電力を導入したときに出力される赤外光を呈示した．以降，これらの温覚刺激の強度をそれぞれ Intensity 1，Intensity 2，Intensity 3 と表記する．温覚刺激の呈示位置は，被験者の右手の掌の中心に固定し，視覚刺激と同時に 5 秒間呈示した．

4.3 実験方法

実験では，4.2 節で述べた 8 種類の視覚刺激と，3 種類の強度の温覚刺激を 1 種類ずつ組み合わせて同時に呈示した．1 回の試行に対して 1 種類の視温覚刺激を呈示し，合計 24 回の試行を行なった．

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

各試行では，被験者は視温覚刺激が呈示される前に，30℃に制御されたペルチェ素子 (ミスミ社，PELT 70) に毎回右手の掌を乗せ，掌の温度を 30℃に保った．次に，被験者に右手の掌を上に向けて台の上に置かせ，視温覚刺激を呈示した．その後，被験者は呈示された視温覚刺激に対して，3 章で述べた調和度・実在感・好ましさを口頭で回答した．なお，視温覚刺激の呈示順序はランダムとした．

4.4 結果

調和度・実在感・好ましさに関する被験者の評価値に対し，視覚刺激の面積，形状，温覚刺激の強度の 3 要因に関する三元配置分散分析し，多重比較を行なった．その結果，視覚刺激の面積が大きく，かつ形状が円形に近い場合，適切さが高くなる傾向が見られた．また，面積が大きく，かつ，熱強度が高い場合，適切さが高くなる傾向が見られた．しかし，面積が等しく形状が異なる視覚刺激で比較した場合，楕円形よりも円形の視覚刺激の方が適切であると評価される傾向にあった．さらに被験者の評価値の平均値に注目すると，温覚刺激が Intensity 1 のとき，どの視覚刺激に対しても適切さの評価値が 4 未満となった．

5 拡大縮小する視覚刺激に対する適切な温覚刺激呈示方法の検討

本章では，拡大縮小の変形をする視覚刺激に対して適切な温覚刺激の呈示方法を，被験者実験により検証する．

温覚刺激に関して，2 章で述べたように，提案システムでは赤外光の照射範囲を変更することはできないため，視覚刺激の拡大縮小に同期して温覚刺激の呈示範囲を変えることは不可能である．そこで，視覚刺激の拡大縮小に同期して温覚刺激の強度を変化させることで，視温覚刺激が熱を持つ仮想物体として適切であると知覚されるのではないかと予測し，検証を行なった．

5.1 実験環境

実験を行なった部屋の温度は 24.5〜26.0 ℃であった．被験者は 21〜24 歳の男性 8 名，女性 2 名の計 10 名であり，全員右利きであった．その他の実験環境は 4 章の実験と同じであった．

5.2 呈示刺激

視覚刺激

視覚刺激の形状は，正弦関数に従って直径の長さ $r(t)$ が時間的に変化する円形を可視光プロジェクタから呈示した．拡大縮小の図形が最大の大きさとなるときの直径の長さ $r(t)$ を R とすると，$r(t)$ は R から $R/4$ の間を変化させるようにした．すなわち，時刻 t における図形の直径の長さは，$r(t) = R/4 - 3R/8cos(2\pi t/T)$ で表される．呈示する視覚刺激の周期 T は，4s，2s，1s と変化させた．

視覚刺激の呈示位置は，被験者の右手の掌の中心に固定し，1 試行につき 5 周期繰り返し呈示した．

温覚刺激

温覚刺激の強度は，ハロゲンランプに導入する電力を，240 W で一定にしたときに出力される赤外光 1 種類 (以降，Scaling 0 と記す) と，視覚刺激の拡大縮小に合わせて変化させたときに出力される赤外光 2 種類 (以降，Scaling 1，Scaling 2 と記す) を呈示した．Scaling 1 は，視覚刺激の直径が最小のときハロゲンランプに導入する電力が 0 W，最大のときに 360 W とし，Scaling 2 は，最小のときに 90 W (つまり 360 W の 4 分の 1)，最大のときに 360 W とした．

温覚刺激の呈示位置は，被験者の右手の掌の中心に固定し，視覚刺激と同じ時間呈示した．

5.3 実験方法

実験では，5.2 節で述べた 3 種類の視覚刺激と，3 種類の強度の温覚刺激を 1 種類ずつ組み合わせて同時に呈示した．1 回の試行に対して 1 種類の視温覚刺激を呈示し，合計 9 回の試行を行なった．手順は 4.3 節と同じであった．

5.4 結果

調和度・実在感・好ましさに関する被験者の評価値に対し，視覚刺激の拡大縮小の周期と，温覚刺激の呈示方法の 2 要因に関する二元配置分散分析をし，多重比較を行なった．その結果，提案インタフェースにおいて視覚刺激を拡大縮小させる場合，その周期は長い方が調和度・実在感・好ましさが高くなる傾向が見られた．一方，温覚刺激の強度を一定にしても，変化させても，評価への影響は見られなかった．

6 視覚刺激の移動速度と温覚刺激の呈示方法の検討

本章では，被験者の前腕上を直線運動する視覚刺激に対し，その移動速度を変化させた際の適切な温覚刺激の呈示方法を被験者実験により検証する．本実験では，直線運動として等速直線運動を使用する．

6.1 実験環境

実験を行なった部屋の温度は 26.5〜28.0 ℃であった．その他の実験環境および参加した被験者は 5 章の実験と同じであった．

6.2 呈示刺激

視覚刺激

視覚刺激には円形を使用し，可視光プロジェクタから被験者の掌に重畳呈示したときに，直径の長さが約 3.6 cm であった．直線運動する視覚刺激は，被験者の右前腕上を，手首側から肘側へ 20 cm 移動する．移動速度は，2 cm/s 間隔で，2 cm/s から 20 cm/s までの 10 種類とした．

視覚刺激の呈示位置は被験者の右前腕の内側とし，視覚刺激が手首側から肘側までの移動を終えると視覚

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

刺激の呈示を終了した．

温覚刺激

温覚刺激の強度は，ハロゲンランプに導入する電力を，240 W で一定にしたときに出力される赤外光 1 種類 (以降，Heat 0 と記す) と，正弦関数に基づいて時間的に変化させたときに出力される赤外光 5 種類 (以降，Heat 1〜Heat 5 と記す) を，視覚刺激と同じ位置に呈示した．Heat 1〜Heat 5 のときにハロゲンランプに導入する電力は 0〜360 W とした．Heat 1〜Heat 5 は，視覚刺激が始点から終点に移動するまでの間に，温覚刺激の強度がそれぞれ 1〜5 回最大値をとるようにした．この回数を N とすると，ハロゲンランプへの導入電力 P は次式で表される．

$$\begin{cases} P = 180 - 180\cos\{2\pi(v/d)t\}, & (N=1) \\ P = 180 + 180\cos\{2\pi(N-1)(v/d)t\}, & (N=2,3,4,5) \end{cases} \quad (1)$$

ここで，v は視温覚刺激の腕方向の速さ，d は視温覚刺激の移動する始点と終点の間の距離，t は視温覚刺激の移動開始からの経過時刻である．式 (1) は，$N=1$ のとき，視温覚刺激が中点に到達したときに温覚刺激の強度が最大となることを表し，$N=2,3,4,5$ のとき，始点と終点を含む，移動軌跡を $N-1$ 等分した位置に視温覚刺激が到達したときに温覚刺激の強度が最大となることを表す．

温覚刺激の呈示位置は視覚刺激と同じ位置にし，視覚刺激の移動軌跡と重畳するように呈示した．

6.3 実験方法

実験では，6.2 節で述べた 10 種類の視覚刺激と，6 種類の温覚刺激を 1 種類ずつ組み合わせて同時に呈示した．1 回の試行に対して 1 種類の視温覚刺激を呈示し，合計 60 回の試行を行なった．

各試行では，被験者は視温覚刺激が呈示される前に，冷風器を用いて右前腕を毎回冷やした．次に，被験者に右前腕を上に向けて台の上に置かせ，視温覚刺激を呈示した．その後，被験者は呈示された視温覚刺激に対して，3 章で述べた調和度・実在感・好ましさを口頭で回答した．なお，視温覚刺激の呈示順序はランダムとした．

6.4 結果

調和度・実在感・好ましさに関する被験者の評価値に対し，視覚刺激の移動速度，温覚刺激の呈示方法の 2 要因に関する二元配置分散分析をし，多重比較を行なった．その結果，移動の速さが小さいほど調和度・実在感・好ましさが高くなる傾向が見られた．また，温覚刺激の強度は一定 (Heat 0) にさせる方が，強度を変化 (Heat 1〜Heat5) させるよりも調和度・実在感・好ましさが高くなる傾向が見られた．

7 複雑な移動軌跡上を運動する視覚刺激に対する適切な温覚刺激呈示方法の検討

本章では，被験者の前腕上を非直線的に移動する視覚刺激に対し，その移動速度を変化させた際の適切な温覚刺激の呈示方法を被験者実験により検証する．

7.1 実験環境

実験環境および被験者は 6 章の実験と同じであった．

7.2 呈示刺激

視覚刺激

視覚刺激には円形を使用し，可視光プロジェクタから被験者の掌に重畳呈示したときに，直径の長さが約 3.6 cm であった．非直線運動をする視覚刺激は，被験者の右前腕上を，手首側から肘側へ 20 cm 移動する．このときの移動軌跡は正弦波形となるようにし，被験者の腕に投影した際，その振幅は約 1.6 cm，波長は約 4.0 cm であった．視覚刺激の腕方向の移動の速さは，2 cm/s 間隔で，2 cm/s から 10 cm/s までの 5 種類を使用した．

視覚刺激の呈示位置は被験者の右前腕の内側とし，視覚刺激が手首側から肘側までの移動を終えると視覚刺激の呈示を終了した．

温覚刺激

温覚刺激の強度は，7.2 節で述べた刺激と同じ Heat 0〜Heat 5 を使用した．温覚刺激の呈示位置は視覚刺激と同じ位置にし，視覚刺激の移動軌跡と重畳するように呈示した．

7.3 実験方法

実験では，7.2 節で述べた 5 種類の視覚刺激と，6 種類の温覚刺激を 1 種類ずつ組み合わせて同時に呈示した．1 回の試行に対して 1 種類の視温覚刺激を呈示し，合計 30 回の試行を行なった．手順は 6 章の実験と同様である．

7.4 結果

調和度・実在感・好ましさに関する被験者の評価値に対し，視覚刺激の移動速度，温覚刺激の呈示方法の 2 要因に関する二元配置分散分析をし，多重比較を行なった．その結果，移動の速さが小さいほど調和度・実在感・好ましさが高くなる傾向が見られた．また，温覚刺激の強度は一定 (Heat 0) にさせる方が，強度を変化 (Heat 1〜Heat5) させるよりも調和度・実在感・好ましさが高くなる傾向が見られた．

8 考察

8.1 視覚刺激の形状・大きさと温覚刺激の強度

4 章の実験結果より，視覚刺激の形状が円形に近く，かつ面積が大きいほど，適切さが高くなる傾向が見られた．この結果は，温覚刺激として提示された赤外光の照射範囲が円形に近いため，視覚刺激の形状が円形に近いほど，視温覚刺激の形状が空間的に整合し，熱

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

を持つ仮想物体としてより適切であると知覚されたためであると考えられる．

温覚刺激に関して，強度が弱い場合，視覚刺激の形状や大きさに関係なく，適切でないと評価された．この結果から，視覚刺激の形状や大きさに関係なく，熱を強く知覚できる温覚刺激の方が，熱を持つ仮想物体として適切であると考えられる．

8.2 視覚刺激の変形と温覚刺激の強度変化

5 章の実験結果より，視覚刺激の拡大縮小の周期が大きいほど，熱を持つ仮想物体としての適切さが高くなる傾向が見られた．

一方，著者らの予測に反し，温覚刺激の呈示方法の違いによる適切さ評価への違いは確認されなかった．すなわち，温覚刺激の強度を視覚刺激の拡大縮小に同期させて変化させても，視温覚刺激が熱を持つ仮想物体として適切であると知覚されない傾向があることがわかった．これは，温覚刺激の強度が弱くなったときに，熱を感じにくくなることから，熱を持つ仮想物体としての適切さが減少したためであると考えられる．この結果から，視覚刺激の大きさと適切であると知覚される温覚刺激の強度との間には関連性がなく，温覚刺激の強弱で視覚刺激の大きさを表現することは困難であると考えられる．また，8.1 節でも述べたように，温覚刺激の強度は視覚刺激の大きさに関係なく，強い方が適切である，という 4 章の実験結果と一致している．あるいは，視覚刺激に誘導され，温覚刺激の強度が一定の場合であっても温覚の変化を感じている可能性も考えられる．

8.3 視覚刺激の移動速度と温覚刺激の強度変化

6 章の実験結果から，腕方向の移動速度が小さいほど，熱を持つ仮想物体としての適切さが高くなる傾向が見られた．これは，赤外光がユーザの身体に照射されてから熱を知覚するまでに時間がかかるため，移動速度が大きくなると，ユーザが熱を知覚する前に視温覚刺激の位置が変わってしまい，適切さが小さくなったと考えられる．また，温覚刺激の呈示方法は，強度を変化 (Heat 1〜Heat 5) させず，一定 (Heat 0) にして呈示すべきであることが確認された．

さらに，温覚刺激の強度が一定 (Heat 0) のときの適切さの評価値に注目すると，視温覚刺激の移動速度が 10 cm/s 以下であれば，適切さの評価値が 4 以上となった．この結果から，視温覚刺激が前腕上を直線運動する場合，その速さは 10 cm/s 以下にし，温覚刺激の強度は一定にして呈示すべきであることが確認された．

8.4 複雑な運動をする視覚刺激と温覚刺激の強度変化

7 章の実験結果から，腕方向の移動の速さが小さいほど，熱を持つ仮想物体としての適切さが高くなる傾向が見られた．これは 6 章の実験の場合と同様，赤外光がユーザの身体に照射されてから熱を知覚するまでに時間がかかることが関係していると考えられる．また，温覚刺激の呈示方法に関して，強度を一定にして視覚刺激に追従させて呈示する方 (Heat 0) が，Heat 1 のような移動軌跡の中央で強度が最大となる温覚刺激よりも適切さが高くなる傾向が見られた．この結果から，提案インタフェースによる視温覚刺激の非直線運動は，2 節で述べたように，基本的には正確に表現ができていなかったと考えられる．しかし，温覚刺激の強度が一定 (Heat 0) のときの評価値の平均に注目すると，視温覚刺激の腕方向の移動速度が 4 cm/s 以下であれば評価値が 4 以上となった．従って，温覚刺激の複雑な移動を正確に表現することが困難であっても，視覚刺激を所望の軌跡上を移動させれば，あたかも温覚刺激も視覚刺激と同じ軌跡上を移動しているように知覚される，クロスモーダル錯覚が生じたと考えられる．

9 おわりに

本稿では，視温覚融合投影インタフェースにおいて，視覚刺激と温覚刺激の間に生じる空間的不整合を考慮した上で，ユーザに熱を持つ仮想物体を適切に知覚させることができるようにすることを目的とした．被験者実験では，視覚刺激の形状や移動軌跡に対する適切な温覚刺激の呈示方法，および視覚刺激の移動速度と適切な温覚刺激の呈示方法を検討し，提案インタフェースに設けるべき視覚刺激に関する制約と，呈示された視覚刺激に対する適切な温覚刺激の呈示方法を得ることができた．

参考文献

[1] R Sodhi, et al. “AIREAL: interactive tactile experiences in free air.” ACM Transactions on Graphics. Vol. 32, No.4, Article 134, 2013.
[2] Y Monnai, et al. “HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen.” Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology. ACM, pp. 663-667, 2014.
[3] 嵯峨. “熱放射を利用した力覚ディスプレイシステムの設計.” 日本 VR 学会大会論文集, Vol. 19, pp. 525-528, 2014.
[4] 吉川ら. “視温覚融合投影インターフェースにおける視覚が温覚に与える作用の基礎検討.” 日本 VR 学会論文誌, Vol. 18, No. 4, pp. 527-530, 2013.
[5] 武内ら. “視温覚融合投影インタフェースにおける視覚情報の動的変化が温覚に与える影響の基礎検討.” 日本 VR 学会大会論文集, Vol. 19, pp.29-32, 2014.

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan