触覚的角度判断における視覚手がかり効果¹

江良 中 横澤 一彦 東京大学

Visual cuing effect for haptic angle judgment

Ataru Era and Kazuhiko Yokosawa (University of Tokyo)

We investigated whether visual cues are useful for judging haptic angles. Participants explored three-dimensional angles with a virtual haptic feedback device. For visual cues, we use a location cue, which synchronizes haptic exploration, and a space cue, which specifies the haptic space. In Experiment 1, angles were judged more correctly with both cues, but were overestimated with a location cue only. In Experiment 2, the visual cues emphasized depth, and overestimation with location cues occurred, but space cues had no influence. The results showed that (a) when both cues are presented, haptic angles are judged more correctly. (b) Location cues facilitate only motion information, and not depth information. (c) Haptic angles are apt to be overestimated when there is both haptic and visual information.

Key words: visual cuing, haptic exploration, cross modal interaction, angle judgment.

The Japanese Journal of Psychology
2009, Vol. 80, No. 3, pp. 232-237

我々は、様々なオブジェクトの特徴を触覚的に捉える際に、視覚情報と一緒に利用することが多い。しかしながら、これらのモダリティは並列的に用いられるわけではない。一般に、触覚情報の入力に先立って視覚情報を得ている。これらのモダリティ間の影響の非対称性は実験的にも示されており、空間定位 (Hay, Pick, & Ikeda, 1965), 奥行き (Singer & Day, 1969), テクスチャ (Lederman & Abbot, 1981) などの判断において触覚よりも視覚からの情報が優先される、あるいは触覚に視覚が干渉することが知られている。これらの知見から、触覚単独では正確な空間表象が形成されていない可能性が示唆される。Kappers (1999, 2002) によれば、自己中心座標系に基づく座標軸と垂直・水平な成分に対する触覚は非常に精度が高い一方で、触覚においても斜め効果 (oblique effect) が知られており (Luyat, Gentaz, Corte, & Guerraz, 2001), 斜め方向の判断の精度が低下することが知られている。すなわち、触空間において単一の基本的な座標軸だけでは表象できない成分に関しては、触覚は不正確な表象しか持たないと考えられる。また、斜め方向の成分同士の位置関係を把握する必要がある角度の弁別課題

においては、平均して 6 度、最大で 15 度程度の角度の差は触覚的に弁別できず (Levy, Bourgeon, & Chapman, 2007), 触覚における角度表象の分散は大きいと考えられる。

このように不正確な触覚表象に対し、どのような視覚情報が寄与できるかを再検討する必要がある。従来の研究 (Hay et al., 1965) でも感覚間バイアス効果として感覚間の不正確な対応関係も検討されてきたが、最近ではさらに統制された環境での視触覚相互作用が研究されている。Ferrel, Leifflén, Orliaguet, & Coello (2000) は、マウスを始点から終点まで動かす課題において、その触行動を頭上から撮影し、ディスプレイ上に触行動と同期させて呈示した。その結果、ディスプレイに呈示した映像の縮尺を変化させ、触行動と視覚刺激の対応関係を操作することで、視覚刺激から触覚判断への干渉が生じた。また、Klatzky, Lederman, & Lengsath (2003) は、撮影した映像ではなく触行動と同期して運動する光点をディスプレイ上に呈示した場合にも、視覚から触覚への干渉が生じることを確かめた。この結果は、手やマウスのように視覚と触覚の情報源の同一性を示唆する手がかりがなくとも、運動の同期によって視覚情報と触覚情報の統合が生じたことを意味する。しかしながら、これらの研究では視覚情報の付加が触覚行動ないしは触覚判断を正確にしたわけではなく、むしろ視覚情報の存在によって触覚判断が困難になるという結果であった。これらの研究は、

Correspondence concerning this article should be sent to: Kazuhiko Yokosawa, Department of Psychology, Graduate School of Humanities and Sociology, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan (e-mail: yokosawa@L.u-tokyo.ac.jp)

¹ 本研究は平成 19 年度文部科学省科学研究費補助金 (萌芽研究, 課題番号 19653080) の助成を受けた。

長さの判断に対して触覚と視覚から得られる情報が異なっており、そのために視覚情報による干渉が生じたと考えられる。

以上を踏まえ、本論文では奥行き方向に布置した2辺を探索することによって角度を判断させる課題を行い、触覚による角度判断に視覚手がかりが与える影響を検討する。角度判断課題とは、1点で接する2辺を探索することで角度を判断する課題であり、頂点に対する単純な接触では判断の精度が低く、辺を含む空間的な探索行動が角度判断に重要であることが知られている (Levy et al., 2007)。一方, Wijntjes & Kappers (2007) によれば、頂点の欠けた2辺の探索では角度判断は困難である。以上の知見から、触覚による角度判断においては、頂点とそれを挟む2辺の相対位置情報が重要であると考えられる。すなわち、角度判断課題において、様々な視覚手がかりを与えることで、視覚情報が触覚判断へ与える影響を検討する必要があると考えられる。特に、正確な触覚判断を可能にする視覚手がかりの条件を明らかにすることができれば、視覚と触覚の補完関係への理解が進むことになる。

実験 1

方法

装置 触覚刺激の呈示装置には PHANToM Omni を用いた。PHANToM Omni とは、SensAble technologies 社製の6自由度の3次元仮想触覚デバイスであり、ペン型インターフェイス（以下、ペンとする）の3次元的な可動範囲に仮想触空間を作成し、仮想触空間内にオブジェクトを布置することができる装置である。ペンがオブジェクトの置かれている座標に到達すると、アームから反力が発生し、あたかもそのオブジェクトに触っているかのような感覚を得ることができる。この仮想触空間とモニタ上の視空間とを同期させ、ペンの軌跡もモニタ上に表示することで、モニタ上に描画されたオブジェクトに触っているような知覚を与えることができる。

視覚刺激の呈示には CRT ディスプレイ（三菱電気社製 22 インチディスプレイ）を用い、反応取得にはキーボードを用いた。

触覚刺激 CRT ディスプレイと実験参加者の間に仮想触空間を設定し、そこに1対の平面对を作成した (Figure 1)。視距離は約 70 cm で、視空間の大きさは視角で幅 32.5 度×高さ 22.8 度であった。視空間と触空間の幅は一致していた。平面はそれぞれ地面に対して垂直に呈示され、正中面上で接していた。平面对のなす角度を独立変数として操作し、角度は 45 度から 135 度までの 5 度刻みで 19 種類あった。全ての刺激は正中面に対称であった。

視覚手がかり CRT ディスプレイ上に2種類の視

覚手がかりを呈示する。一つは PHANToM Omni の操作に同期して CRT ディスプレイ上を2次元的に移動する光点（視角 0.16 度×0.16 度）であり、これを位置手がかりと呼称する。位置手がかりは大きさや輝度の変化はなく、前額平行面上の2次元の座標を呈示するのみであった。もう一つは触覚的な角度判断に有用とされる頂点位置及び刺激布置を視覚的に明示する手がかりで、これを空間手がかりと呼称する。位置手がかりと空間手がかりは、触覚手がかりではなく、それぞれ触位置と触空間に対する視覚手がかりであることを強調しておく。空間手がかりは触覚刺激の角度によらず一定の壁面の輪郭線として呈示した (Figure 2a)。したがって、触空間の変動によって視覚的には矛盾する手がかりが呈示されていたことにもなるが、空間手がかりの重要な役割は頂点位置の正確な情報であり、その点では課題に有用な手がかりである。視覚手がかりの有無によって、実験は4条件に分かれた。すなわち位置手がかりあり空間手がかりあり条件、位置手がかりあり空間手がかりなし条件、位置手がかりなし空間手がかりあり条件、位置手がかりなし空間手がかりなし条件であった。これらの条件は実験参加者内ブロック間要因で行われ、ブロックの順序は実験参加者間でカウンターバランスした。

なお、触覚判断に対する視覚情報の影響をみようとするとき、空間を一致させてしまうと、視覚情報のみでも角度判断ができるため、実質的に視覚判断課題になってしまう可能性がある。そこで、視空間と触空間

Figure 1. Schematic experimental setting.

Figure 2. Space cues. (a : for Experiment 1, b : for Experiment 2)

を別空間に配置することにした。このような場合に、厳密に言えば触覚的に正確な視覚手がかりとならない可能性はあるが、実験参加者にとって可能な限り視覚手がかりの表す視空間と判断すべき触空間が一致していると体感できる位置に両空間を配置して実験を行った。

手続き CRT ディスプレイに呈示される視覚刺激をみながら、PHANToM Omni を用いて平面对上をなぞり、呈示された平面对のなす角度が 90 度より大きかった（鈍角）か小さかった（鋭角）かを 2 肢強制選択によって判断することが課題であった。実験参加者には、実験課題はあくまで触覚判断であることを説明し、その上で視覚刺激も無視してはいけないという教示をつけ加えた。PHANToM Omni は利き手によって操作した。探索回数や探索時間についての制限は設けず、反応はキー押しによって行われ、キー押しによる反応が行われると、引き続き次の試行へと移行した。一つの触覚刺激について 1 試行ずつの 19 試行が視覚条件の異なる計 4 ブロックで行われた。安定した角度判断を得るためには、各試行において時間制限を設けず、実験参加者に自由探索を行わせることが重要である。予備実験の結果、実験参加者によってはかなり長い時間をかけて探索を行うことが明らかとなったため、1 条件につき 1 回ずつの探索とした。実験参加者には、視覚手がかりの呈示の有無に関わらず CRT ディスプレイを注視することを教示した。

実験参加者 実験参加者は右利きの 20 名の成人で、視力、色覚ともに正常であった。

結 果

鈍角判断確率についてコクランの Q 検定を行った。対応がある場合の比率の差の検定にはコクランの Q 検定が一般的に用いられる。コクランの Q 検定に基づく、角度と手がかり条件の関係に関する統計的な検定結果によれば、触覚刺激の角度が 50 度の場合及び 60 から 105 度までの全ての場合に、四つの手がかり条件間に 5% 水準で有意差がみられた。下位検定として条件間でマクニマーの検定を行ったところ、位置手がかりあり空間手がかりあり条件と位置手がかりあり空間手がかりなし条件と位置手がかりがない 2 条件との間に 5% 水準で有意差がみられた。

位置手がかりあり空間手がかりあり条件の平均評定値と位置手がかりあり空間手がかりなし条件の平均評定値と位置手がかりなしの 2 条件の平均評定値に関して、0 度の場合に鈍角選択確率が 0.180 度の場合に鈍角選択確率が 1 を取るよう制約条件を加え、ロジスティック関数の当てはめを行った。当てはめたロジスティック関数から、鈍角判断の 50% 閾を算出したところ、位置手がかりあり空間手がかりありの場合には 86.6 度、位置手がかりあり空間手がかりなしの場合に

は 75.5 度、位置手がかりなしの場合には 104.3 度であった（四つの条件のうち、有意差のなかった条件間はデータを平均して閾値を算出したが、Figure 3 では条件ごとにロジスティック関数の当てはめを行った結果を示す）。

考 察

視覚手がかりから得られる情報を全て有効に活用できるのであれば、空間手がかりによって頂点位置情報が、両手がかりから触位置と頂点位置の相対的な位置関係情報が得られる。また、位置手がかりからは、前額平行面上の正確な触位置情報のみならず、触覚行動の運動距離・運動速度と位置手がかりの見かけ上の運動距離・運動速度を比較することによって奥行き方向の距離が推定できる。そこで、視覚手がかりの利用によって触覚的な角度判断は正確になると考えられる。また、視覚手がかりから奥行きの推定ができなくても、視覚手がかりによって少なくとも前額平行面上の触位置や頂点との位置関係は正確に把握できるため、視覚情報が触覚的な角度判断を補強すると考えられる。一方で、先行研究（Klatzky et al., 2003）にみられるような単純な運動情報の加算のみが成立するのであれば、触覚的な運動情報は奥行きを含み、視覚的な運

Figure 3. Results of Experiment 1. (a : both cues, b : location cue only, c : space cue only, d : neither cue)

動情報は前額平行面上のみの平面的なものであるため、そのベクトル和としてより平面的な知覚が生じることになる。その結果、角度の過大評定が生じると考えられる。

結果としては、触覚のみによる判断では角度の過小評定が生じた。これは斜め方向に対して判断の精度が低下するという先行研究 (Luyat et al., 2001) と同様の結果である。Kappers & Koenderink (1999) によれば、触空間は非ユークリッド的で、左右の偏位が大きいほどその歪みが大きい。この空間的歪みが角度判断に影響するのであれば、触知覚のみでは実際の角度よりも過小に評定されると考えられる。先行研究における触覚的角度判断精度が低いことも、この触空間の歪みを反映している可能性がある。

また、視覚からの干渉効果が生じ、位置手がかりによって角度が過大評定された。この結果は、正確な前額平行面上の位置情報は触覚的な位置情報を補正するようには働かず、単純な運動情報同士の加算が生じたという仮説を支持するものである。一方で、位置手がかりがある場合にのみ空間手がかりの影響がみられ、空間手がかりによって角度判断が正確に行われた。位置手がかり単独では刺激布置に関する視覚情報が得られないため、単純な運動情報の加算が生じたが、空間手がかりが同時に呈示されることによって、刺激布置内での触位置や頂点位置といった情報が有効に利用された結果、触覚的な角度判断を正確にする干渉効果が生じたと考えられる。

しかしながら、本実験では視覚手がかりから奥行きを実感することが困難であった可能性が考えられる。それによって、触空間と位置手がかりから得られる視空間では奥行き方向への広がり異なったために、位置手がかりが触覚空間の補正を起こさなかった可能性がある。それでは、より容易に奥行きが実感できる手がかりが与えられた場合には、触覚判断の精度の向上に寄与するだろうか。また、空間手がかりのうち、頂点位置情報と刺激布置情報のどちらが利用されているのであろうか。これらの点について、実験2で検討する。

実験 2

方法

刺激 位置手がかりの大きさを、PHANToM Omniの奥行き方向の運動に同期して変化させることで位置手がかりから奥行き変化が容易に実感できるようにした。すなわち、触空間において遠い位置であるほど、その距離に比例して位置手がかり、すなわち光点の大きさを小さく呈示した。視距離が5 cmという極端な近距離で視覚から得られる奥行き情報と触覚刺激の奥行き情報が整合するような大きさの変化（大きさ比は

最大で5倍）を与えたため、実験環境において位置手がかりは常に触覚刺激よりも急峻な角度情報を持っていた。また、空間手がかりにはテクスチャ勾配を付加した。空間手がかりに関して、予備実験として視覚情報のみで角度評定を行った結果、実験1で用いた空間手がかり (Figure 2a) の鈍角選択確率が89%であったのに対し、実験2で用いた空間手がかり (Figure 2b) の鈍角選択確率は49%であり、実験2で用いる空間手がかりはより正確に90度を表していた。その他の手続きは実験1と同様であった。

実験参加者 実験参加者は右利きの16名の成人で、視力、色覚ともに正常であった。

結果

鈍角判断確率についてコ克兰のQ検定を行った。コ克兰のQ検定に基づく、角度と手がかり条件の関係に関する統計的な検定結果によれば、刺激の角度が60度の場合、70度から95度までの全ての場合、105度、115度、120度のそれぞれの場合に、四つの手がかり条件間に5%水準で有意差がみられた。下位検定として条件間でマクニマーの検定を行ったところ、位置手がかりがある2条件と位置手がかりがない2条件の間にのみ有意差がみられ、空間手がかりの有無は影響しなかった。

位置手がかりありの2条件の平均評定値と位置手がかりなしの2条件の平均評定値に関して、実験1と同様にロジスティック関数の当てはめを行い、50%閾を算出したところ、位置手がかりありの場合には75.6度、位置手がかりなしの場合には101.2度であった（四つの条件のうち、有意差のなかった条件間はデータを平均して閾値を算出したが、Figure 4では条件ごとにロジスティック関数の当てはめを行った結果を示す）。

考察

位置手がかりの奥行き情報が利用されるのであれば、実験1でみられた平面的な視覚運動情報と奥行きを含む触覚運動情報の加算ではなく、位置手がかりの触空間に対する補正が生じる可能性があり、角度判断の精度が向上すると考えられる。一方、奥行き情報の付加によらず視覚からは前額平行面上の運動情報のみが利用されるのであれば、実験1と同様の結果が得られると考えられる。また、実験2で用いた空間手がかりはより90度に近い刺激布置情報を持つため、刺激の布置を視覚的に明示することが角度判断の精度の向上に寄与するのであれば、空間手がかりの呈示によってより正確な角度判断ができると考えられる。一方、テクスチャを与えたことによって頂点位置の顕著性が低下し、頂点位置情報及び触位置と頂点の位置関係情報は利用しにくくなるかもしれない。なぜならば、頂

点位置付近の線集合（すなわち、テクスチャ）が密集しているために、どの縦線位置で正しい頂点位置に当たっているかが不明確になる可能性が高いからである。頂点位置情報を明示することが角度判断の精度の向上に寄与するのであれば、実験 2 では空間手がかりによる角度判断の精度の向上はみられないと考えられる。

本実験で用いた位置手がかりは、大きさの変化が実際に起こりうるものよりも極端に大きくなっており、視覚的な角度判断が正確に行われれば、角度をより急峻に判断することになる。すなわち、位置手がかりからの絵画的な奥行き情報の影響があれば、角度の過小評価が生じると考えられる。それに関わらず、本実験でも触覚情報のみによる角度の過小評価が生じた。これは実験 1 と同様の結果であり、位置手がかりの大きさ変化は視覚的にも角度判断に貢献しなかったと考えられる。逆に、位置手がかりによる角度の過大評価が生じた。このことから、位置手がかりに絵画的な奥行き情報を与えても前額平行面上の平面的な運動情報のみが加算されて知覚が生起すると考えられる。また、実験 2 において空間手がかりが有効に機能しなかったことから、触空間情報で有効なのはテクスチャ勾配ではなく、頂点位置の顕著性であると考えられる。テクスチャ勾配は絵画的な奥行き情報であるため、こ

れらの結果はいずれも、視覚手がかりからの奥行き情報は利用されないことを示唆する結果である。

総合考察

本論文では、触覚判断課題に対して、その判断の精度を向上させるような視覚手がかりを与えた場合の影響を検討した。まず、視覚情報を呈示しなかった場合、すなわち触覚のみによる角度判断においては、角度が過小評価される傾向が示された。この過小評価の程度は約 10 度であり、この差は角度弁別を行った先行研究（Levy et al., 2007）における弁別閾と一致する結果であり、平面的な角度判断においても奥行き方向を含む角度判断においても判断の精度が変わらないことを示唆する。また、この過小評価は触空間の歪みを反映していると考えられ、角度判断に限らず様々な空間的な触覚判断にこの触空間の歪みが反映しているとすれば、様々な実験における視覚から触覚への非対称の干渉効果を説明することができるかもしれない。

また、触覚行動に同期する位置手がかりは前額平行面上の正確な位置情報を与えているにも関わらず、この正確な位置情報は有効に利用されず、奥行きを含む触覚運動情報と平面的な視覚運動情報の加算によって、むしろ角度の過大評価が生じた。この結果は、触覚的な長さの判断に対して整合しない視覚情報が干渉した先行研究と同様の結果である。一方で、頂点位置情報と触位置情報を同時に呈示することで角度判断が正確になったことから、触覚的な角度判断課題において有用である頂点位置情報や頂点と触位置の相対的な位置関係情報は視覚的にも有効に利用された。すなわち、位置手がかりのみを呈示した場合には、位置手がかりからは運動情報しか利用することができず、運動情報同士の加算によって角度の過大評価が生じたが、空間手がかりを同時に呈示することによって、位置手がかりの頂点に対する相対的な位置情報を有効に利用することができるようになり、角度の判断が正確になったと考えられる。視覚と触覚の運動加算の普遍性を確認するためには、さらに実験を積み重ねる必要があると考えられるが、このような可能性を考慮することが、視触覚相互作用の新たな研究展開につながると考えている。

一方で、位置手がかり・空間手がかりともに奥行き情報は利用されなかった。このことから、相対的な位置関係の把握が重要視され、奥行きそのものの情報は軽視されたと考えられる。触空間は左右方向に偏位がみられることを指摘した Kappers & Koenderink (1999) の研究によれば、触空間は奥行き方向に関しては歪んでおらず、非常に正確な表象を有する。そのため、奥行き方向に関しては触覚からの情報のみで判断され、視覚からの奥行き情報が利用されなかった可能性がある。一方で、位置手がかりのみを呈示した場

Figure 4. Results of Experiment 2. (a : both cues, b : location cue only, c : space cue only, d : neither cue)

合には運動情報が加算されたことから、奥行き方向への運動を視覚的に明示することで視覚からも奥行き情報を利用するようになる可能性もある。このような可能性を検討することが今後の課題である。

引用文献

- Ferrel, C., Leifflén, D., Orliaguet, J. -P., & Coello, Y. (2000). Pointing movement visually controlled through a video display: Adaptation to scale change. *Ergonomics*, **43**, 461-473.
- Hay, J. C., Pick, H. L., & Ikeda, K. (1965). Visual capture produced by prism spectacles. *Psychonomic Science*, **2**, 215-216.
- Kappers, A. M. L. (1999). Large systematic deviations in the haptic perception of parallelity. *Perception*, **28**, 1001-1012.
- Kappers, A. M. L. (2002). Haptic perception of parallelity in the midsagittal plane. *Acta Psychologica*, **109**, 25-40.
- Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (1999). Haptic perception of spatial relations. *Perception*, **28**, 781-795.
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Lengseth, S. (2003). Watching a cursor distorts haptically guided reproduction of mouse movement. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **9**, 228-235.
- Lederman, S. J., & Abbot, S. G. (1981). Texture perception: Studies of intersensory organization using a discrepancy paradigm and visual versus tactile psychophysics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **7**, 902-915.
- Levy, M., Bourgeon, S., & Chapman, C. E. (2007). Haptic discrimination of two-dimensional angles: Influence of exploratory strategy. *Experimental Brain Research*, **178**, 240-251.
- Luyat, M., Gentaz, E., Corte, T. R., & Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation: Body and head tilt effects on the oblique effect. *Perception and Psychophysics*, **63**, 541-554.
- Singer, G., & Day, R. N. (1969). Visual capture of haptically judged depth. *Perception and Psychophysics*, **5**, 315-316.
- Wijntjes, M. W. A., & Kappers, A. M. L. (2007). Angle discrimination in raised-line drawing. *Perception*, **36**, 865-879.

— 2008. 3. 24 受稿, 2009. 1. 24 受理 —