



触空間における正中面後方の平行性判断

山崎駿¹⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 原彰良¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

1) 大阪大学大学院情報科学研究科 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5 ,
{shun.yamasaki, m.furukawa, akiyoshi-hara, t_maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

2) 脳情報通信融合研究センター (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4)

概要: 視空間と同様に触空間がユークリッド幾何に従わない現象は身体前方の水平面・正中面・前額平行面で確認されているものの, 身体上方・後方における再現性は不明であった. そこで本研究では, 身体上方・後方を含む正中面内で 2 本の棒を閉眼で平行にさせる課題を実施した. その結果, 平行判断の誤差は, 仰角で定められる回答位置および 2 本の仰角差との正の相関傾向を示し, 上方・後方における再現性が示された.

キーワード: 触覚, 空間知覚, 頭部後方, 平行性

1. はじめに

ヒトは外界をそのままではなく, 感覚器の特性や脳の情報処理過程によって再構成された主観的な世界を知覚する. この客観世界と主観世界との間の乖離は, 空間知覚の領域において顕著に表れる. その代表が, 視覚分野で古くから知られる Helmholtz のホロプタ (horopter) に見られる現象である [1]. これは, 主観的な前額平行線 (顔面と平行な線) が物理的に必ずしも直線にならず, 観察者からの距離に応じて凹型や凸型に湾曲するという現象のことである. この現象は視空間が平行線公準を満たさない, すなわちユークリッド幾何学に従わないことを示している.

Blumenfeld による古典的な研究では, 視空間と同様に触空間 (haptic space) における主観的な平行線が湾曲する現象が発見された [2]. 近年では, 2 本の棒を触覚 (haptics) のみを頼りに平行に配置させる課題において, 物理的な平行から系統的な誤差が生じることが, 水平面 [3], 正中面 [4], 前額平行面 [5] のいずれにおいても確認されている.

これらの研究は, 運動を直接視認でき, かつ肘から先の腕の振りで探索が可能な身体前方で行われていた. 本研究はこれらの条件が満たされない, 頭部の上方・後方の領域を対象とする. 普段から視覚フィードバックを得られず, かつ肩や肘の可動域限界に迫る運動を要求されるような領域においても触空間は同様の湾曲特性を示すのか, それとも異なる構造を持つのかを解明することを目的とする.

2. 先行研究

視空間の非ユークリッド性が Helmholtz によって示唆されて以来, 触覚 (haptics) によって知覚・構成される触空間においても同様の性質を明らかにする研究が進められてきた. なお, ここでの触知覚は, 皮膚感覚だけでなく固有感覚にも基づく知覚を指す.

触空間の非ユークリッド性を示した古典的研究として, Blumenfeld らの研究が挙げられる [2]. この研究では, 実

験参加者に正中面の両側に平行となるような直線 (アレイ, alley) を触覚のみを頼りに配置させた. その結果, 主観的に平行と判断された直線は物理的には平行にならず, 客観的な正しさ (veridicality) から乖離することが示された.

この現象は, Kappers, Hermans らによる一連の研究 [3, 4, 5] によって, より詳細かつ定量的に検証されてきた.

まず, 水平面上に配置した参照 (基準) 棒とテスト棒の方位角を平行に揃えさせる実験 (parallelity experiment) において, 参加者の回答に平行から最大で 40° の誤差 (以後「偏差」と呼ぶ) が見出された [3]. この偏差は, 参照棒とテスト棒間の左右方向の距離と強い正の相関を示したが, 前後方向の距離との相関はほぼなかった. 加えて, 方位角が水平・垂直方向のときよりも斜め方向のときの成績が低下する「斜め効果 (oblique effect)」も確認された. これらは, 触空間が非ユークリッド的であることを強く示している.

これらの系統的な偏差は, 空間に固定された「外部中心的 (allocentric)」参照棒と, 身体部位 (この場合は手) に固定された「自己中心的 (egocentric)」参照棒を重み付けして統合した, 中間 (intermediate) 参照棒に基づいて平行性判断が行われていると考えられた.

さらに Kappers は, これまでの水平面とは走査運動 (棒をなぞる動き) の向きの異なる正中面へと実験の場を移して同様の検証を行った [4]. その結果, 水平面内と同様に大きな偏差が生じ, 今度はその偏差が水平方向ではなく鉛直方向 (上下方向) の距離と強く相関することを確認した.

これらを受け Hermans らは, 前額平行面における追試を行った. それに加えて, 新たな視点から偏差の起源を探った [5]. 彼らは従来同様 (呼称のみ異なる) の「方向マッチング課題 (orientation matching task)」に加え, 「方向の口頭報告 (知覚課題)」および「指示された方向の生成 (運動課題)」を被験者に課した. その結果, 3 つの課題すべてで水平・鉛直方向距離に依存した偏差は生じたものの, 従来の方向マッチング課題における偏差のみが, 他の 2 課題に

比べて統計的に有意に大きいことを発見した。この発見は、触空間の歪みが、知覚過程や運動生成過程そのものよりも、両者を統合する過程に起因することを示唆した。

前述のとおり、これらの平行性に関する実験は身体前方でのみ検証されていた。本研究では、日常的な運動制御に視覚フィードバックが活用されることがなく、かつ関節の可動範囲が可動域限界に迫るほど大きくなる身体上方・後方空間においても、従来知見が再現するかを検証する。

3. 実験手法

従来研究と同様、2本の棒のうち一方（参照棒）に他方（テスト棒）の方位角を揃えさせる課題を実施した。

3.1 参加者

実験には4名（平均年齢 22.5 ± 1.5 歳、男性3名・女性1名、全員右利き）が参加した。参加者は全員同一の研究室に所属し、触覚に関する既知の異常はなかった。参加者には下記の実験手順やプライバシー保護に関するインフォームドコンセントを行った。なお、本実験の仮説、装置の詳細について参加者に事前に伝えなかった。

3.2 仮説

本実験では、棒の位置は仰角（参照棒 θ_r 、テスト棒 θ_t ）によって規定される（詳細は3.4にて後述）。棒の配置ごとに参照棒の方位角 ϕ_r に対する参加者が回答したテスト棒の方位角 ϕ_t の偏差 $\Delta\phi = \phi_t - \phi_r$ を算出する。はたして $|\Delta\phi| > 0$ となるのか、なるならば影響（斜め効果を除く）を与える要因は何か、以下の3つの仮説を立てて検証する。

仮説1：テスト棒の絶対的な仰角位置 θ_t にのみ依存する。

仮説2：参照棒（基準）とテスト棒の相対的な仰角差 $\Delta\theta = \theta_t - \theta_r$ にのみ依存する。

仮説3： θ_t と $\Delta\theta$ の両方に依存する。

Kappers の正中面内における研究では、偏差が棒間の鉛直距離と相関するとされている [4]。これは計測方法に依存した表現であり、本質的には仰角に起因すると仮定すれば、仮説2が支持されているとみなせる。

3.3 実験計画

本実験は、参照棒の方位角 ϕ_r と2本の棒の配置 (θ_t, θ_r) を要因とする、参加者内2要因計画である。

- 参照棒の方位角 ϕ_r ： 0° （水平）、 45° 、 90° （鉛直）、 135° の4水準。
- 棒の配置 (θ_t, θ_r) ：参照棒とテスト棒の配置の組合せ（位置は区別）であり、装置上の5つの仰角位置（後述）から2箇所を選ぶ順列 ${}_5P_2 = 20$ 水準。

以上を掛け合わせた全80条件（4方位角 $\times$ 20配置）について、各参加者は2回ずつ繰り返し試行を行った。

3.4 装置

参照用とテスト用に同一形状の木製棒（厚み10mm $\times$ 奥行10mm $\times$ 長さ200mm）を2本用いた。各棒の中央には直径3mmのネジを取り付けており、回転軸として機能した。参加者の正中面上にはスタイロフォーム製のボードを



図1: 実験装置

設置し、棒を配置する点を5箇所設定した。これらの点は、頭部正面方向を仰角 0° 、その反対の背面方向を仰角 180° と定義し、仰角が 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° となる位置（腕の可動域を考慮し、頭部中央からの半径を約25cmで固定）に対応する。すなわち 90° を中心に左右対称な配置となり、 45° と 135° 、 0° と 180° の鉛直位置は同一となる。各点には分度器を印刷した紙を貼り付けるとともに、穴をあけた。棒はこの5箇所いずれかの穴に棒のネジを挿入することで、回転可能な状態で設置した。参照棒は、参照棒およびスタイロフォームの両方に取り付けたネオジム磁石によって、磁力で指定の方位角に固定することができた。実験者は、テスト棒の端に取り付けられた指針と上記分度器によって、その方位角を最小 0.5° 単位で読み取り記録した。

3.5 手順

1. 参加者は目隠しをして所定の座席に着席する。
2. 実験者は参照棒とテスト棒を別々の所定の位置に配置し、参照棒の方位角を固定する。
3. 実験者は参加者の右手を取り、まず参照棒に、次いでテスト棒に触れさせる。
4. 実験者は参加者に、両方の棒に交互に何度でも触れながら、テスト棒が参照棒と平行になるように、右手のみを用いて回転させるよう指示する。
5. 参加者は、調整が完了したと判断した時点で手を下ろし、実験者はテスト棒の方位角 ϕ_t を記録する。
6. 参加者には、自身の回答の正確さに関するフィードバックは一切与えられない。

実験は全80条件を1ブロックとし、各参加者が2ブロック（合計160試行）を実施した。1ブロックは10試行からなるセクション8つで構成された。各セクション内には参照棒とテスト棒の10通りの位置の組合せ（ ${}_5C_2 = 10$ 通り、順不問）が1度ずつ提示されるようにした。参照棒とテスト棒の順（2通り）と参照棒の方位角（4通り）の割り当てについては、8セクションを通して全80条件が1度ずつ網羅されるよう設計されていた。実施順はセクションごとにランダム化されており、被験者によっても異なっていた。1セクションの所要時間は約10分で、セクション間には約1分の休憩を設け、ブロックの折り返しとなる8セクション目と9セクション目の間には約5分間の休憩を取った。

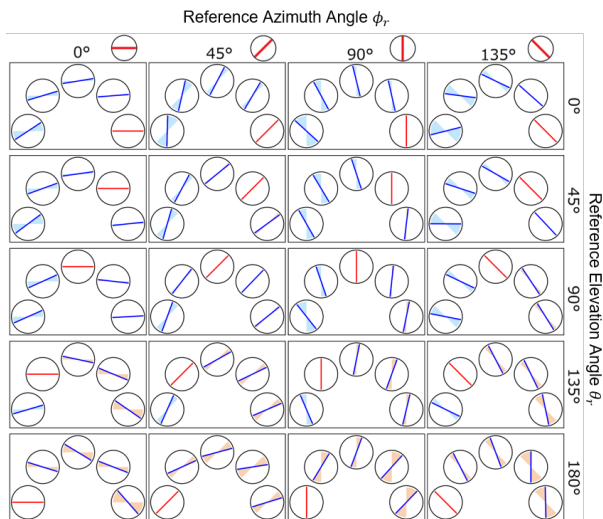


図 2: 参加者 B の回答 (赤: 参照棒 青: テスト棒)

4. 実験結果

図 2 は、参加者 A～D のうち典型的な傾向を示した代表例として参加者 B のテスト棒方位角 ϕ_t 回答結果を示したものである。行方向が参照棒の仰角 θ_r ($0^\circ \sim 180^\circ$)、列方向が参照棒の方位角 ϕ_r ($0^\circ \sim 135^\circ$) に対応している。各サブプロット内の円は仰角に対応し、右から順に $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ に対応する (図 1 も参照)。円内の赤線はそのサブプロットに対応する θ_r および ϕ_r を示し、青線は当該参照棒条件における θ_t と ϕ_t (2 試行平均) の対応を表している。この図からは、参照棒・テスト棒に関わらず、仰角の大きい方の棒の方位角がより大きくなるよう偏差が生じる傾向 (最大偏差 68°) が視覚的に理解できる。

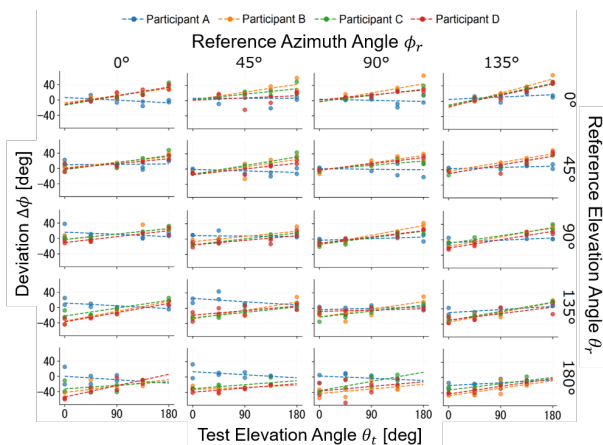


図 3: 各参照棒条件ごとのテスト棒仰角に対する偏差

図 3 に全参加者の実験結果を示す。この図は、図 2 と同様に参照棒の方位角 ϕ_r (列) と仰角 θ_r (行) を固定した各条件において、テスト棒の仰角 θ_t (横軸) と偏差 $\Delta\phi (= \phi_t - \phi_r)$ (縦軸) の関係をプロットしたものである。参加者 B～D は類似した傾向を示しており、大半の条件において θ_t との正の相関傾向が見られた。一方、参加者 A は他の 3 名と異なる傾向を示し、ほとんどの条件下で θ_t と $\Delta\phi$ 差の間に明確な相関は見られず、場合によっては弱い負の相関を示すこともあった。この参加者は、棒を指でつまんだりなぞった

りして触れることの多かった他の参加者と異なり、手全体で覆うように触れることが多かった。

反復測定二元配置分散分析 (Repeated-measures two-way ANOVA) を、偏差 $\Delta\phi$ を従属変数、4 水準の参照棒方位角 ϕ_r および 20 水準の仰角ペア (θ_r, θ_t) を要因として実施した。Mauchly の球面性検定において球面性の違反が示唆されたため、Greenhouse-Geisser 法による補正後の p 値を p_{GG} として併記することとした。その結果、(θ_r, θ_t) の主効果は有意 ($F(19, 57) = 9.51, p < 0.001, p_{GG} = 0.046$) であった。これは、2 本の棒の絶対位置・相対位置関係が、偏差に有意な影響を及ぼすことを強く示している。一方、 ϕ_r の主効果 ($F(3, 9) = 0.12, p = 0.945, p_{GG} = 0.794$) は非有意、交互作用 ($F(57, 171) = 2.24, p < 0.001, p_{GG} = 0.230$) は補正後は非有意であった。さらに、 ϕ_r ごとの $\Delta\phi$ の分散が等しいかを Levene 検定で確認した結果、等分散性の仮定は棄却されなかった ($W = 1.33, p = 0.265$)。これらの結果は、 ϕ_r (水平、垂直、斜め) が $\Delta\phi$ の平均や分散に影響を与える「斜め効果」は確認されなかったことを意味する。

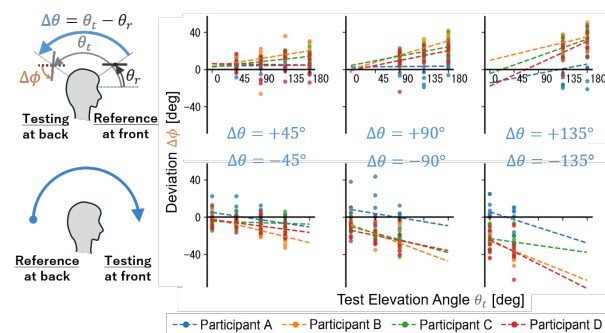


図 4: 同一仰角差条件ごとのテスト棒の仰角に対する偏差

図 4 は、棒間の相対的な仰角差 $\Delta\theta (= \theta_t - \theta_r)$ を固定した上で、テスト棒の絶対的な仰角位置 θ_t に対する偏差 $\Delta\phi$ をプロットし回帰直線と共に示したものである。上段はテスト棒が参照棒に対して後方にある ($\Delta\theta > 0$) 場合、下段はその逆であることが模式図としても示されている。2 本の棒が同一位置に来ることはないため、 $\Delta\theta = 0^\circ$ となることはない。また、 $\Delta\theta = \pm 180^\circ$ となるのはそれぞれ単一条件のみであり、複数 θ_t 間の比較ができないため今回は省略している。いずれのグラフでも回帰直線の傾きが 0 でない (最大で相関係数 0.754 (参加者 B, $\Delta\theta = -45^\circ$)) もが多く、 $\Delta\theta$ が同一条件下では $|\Delta\phi|$ は θ_t と正の相関傾向にあることがわかる。また同時に、 $\Delta\theta$ と回帰直線の傾き ($\Delta\phi$ の勾配に相当) も正の相関傾向にあり、 $\Delta\theta$ と傾きの正負が一致していることが見て取れる。加えて、 $\Delta\theta$ と $\Delta\phi$ との正の相関傾向も $\Delta\theta$ を跨いだ同一 θ_t 間の比較から観察され、 $\Delta\theta$ と $\Delta\phi$ の正負は一致することが多い。

$\theta_t, \Delta\theta$ それぞれが $\Delta\phi$ に与える影響の程度を調べるため、 θ_t をその平均値 90° で中心化した上での重回帰を試みる。

$$\Delta\phi = \beta_0 + \beta_1(\theta_t - 90) + \beta_2(\theta_t - 90)^2 + \beta_3\Delta\theta + \varepsilon \quad (1)$$

(1) 式を当てはめたところ、 $\theta_t^2, \Delta\theta$ が有意であった (全被験者: $\beta_2 = +0.00083, p < 0.001; \beta_3 = +0.169, p < 0.001$)

一方、 θ_t は非有意であった ($\beta_1 = -0.019, p = 0.197$)。これ以外の高次項や θ_r の項を追加しても、適合度はほとんど向上しなかった。この θ_t の非有意性および θ_t^2 の有意性を図 4 に示された θ_t の単純効果と対比すると、 $\Delta\theta$ 固定時の局所的な線形傾向 (傾きは $\Delta\theta$ 依存) を包含しつつも全 $\Delta\theta$ 条件統合時には相殺され、 $\theta_t = 0^\circ$ or 180° という端における正方向への増大傾向のみが残ると解釈可能である。

以上の結果から、参加者が行う平行判断の偏差 $\Delta\phi$ は、テスト棒の絶対的な仰角 θ_t と、参照棒との相対的な仰角差 $\Delta\theta$ の両方から影響を受け生じることが明らかになった。これは、本研究における仮説 3 を支持するものである。

5. 考察

5.1 従来研究との比較

Kappers らの正中面における研究 [4] では、偏差は鉛直方向の距離差と相関することが示されていた。しかし、本実験結果のうち鉛直位置が同一な 45° と 135° , 0° と 180° ペア間では異なる偏差パターンが観測された。これより、少なくとも頭部上方や後方においては鉛直方向の距離差よりも、相対的な仰角差が主要因である可能性が強く示唆された。関節の回旋運動によって身体姿勢が決定されることを考慮すると、空間関係を水平・鉛直距離 (ユークリッド座標) ではなく角度 (極座標) で捉える方が、身体運動の実態に即していると考えられる。また同時に、ヒトの空間表象が極座標的な特性を持つという既存の知見とも整合する。

先行研究で報告されている「斜め効果」は本実験では観察されなかった。その要因として 2 つの可能性が考えられる。第一に、水平や垂直といった方向概念は、重力や視覚的な風景といった外部環境の手がかりと結びついて意味を強く持つため、視覚情報が完全に遮断された視野外の領域では、その優位性が失われている可能性がある。第二に、実験装置の剛性が完全ではなく、水平・垂直方向の知覚にノイズが加わった可能性も否定できない。

また、仰角差は最大 180° に及ぶにも関わらず、偏差の大きさは最大でも 68° に留まった。これは、自己中心的な感覚情報がそのまま出力されているわけではなく、従来同様に外部中心的参照棒と自己中心的参照棒の統合による中間参照棒に基づいていることを支持するものであった。

5.2 偏差発生メカニズムに関する考察

本研究で明らかになった身体後方ほど偏差が増大する傾向について、その根本的なメカニズムとして以下の 2 点が考えられる。

1 つ目は、触空間の較正の有無である。従来研究の対象領域である身体前方においては、脳は触覚に基づく身体部位や触対象物の表象を、物理世界をより正確に反映する視覚情報と照合し、そのズレをリアルタイムで較正している。この較正プロセスにより、身体前方での触知覚の歪みは普段から比較的小さく抑えられていると考えられる。一方、身体上方や後方といった領域では、身体構造上このような視覚情報を利用することはできない。この視覚フィードバック

による較正機会の損失が、前方に比べて大きな偏差として表出した可能性が示唆される。

2 つ目は、関節の運動連鎖に伴う関節角知覚の限界である。頭部前方にある手の姿勢を保ったまま腕を後方へ移動させるような運動は、肩や肘、手首の関節が複雑に連動する運動連鎖によって実現される。特に身体後方では、肩や肘、手首が可動域の限界近くまで動くことを要求される。このとき、自身の関節角度の知覚に誤差が生じやすくなると考えられる。例えば、実際には手首が可動域限界に達していても、本人は「まだ動かせる」と過大評価している場合、肩や肘の回転を相殺するための手首の逆回転が不十分であることに気づけない。このような、運動指令と実際の身体状態、そしてそれをモニターする触覚との間の乖離が、意図した姿勢と実現された姿勢の間の系統的な誤差、すなわち本研究で測定された「偏差」として現れたと推察される。この仮説が正しければ、たとえ手先の空間的な位置・姿勢が同一でも、それを実現する身体全体のポーズ (特に肩や肘の関節角度) が異なれば、手先の触覚的な表象も変化する可能性がある。これは、触空間の構造が、純粋な空間座標だけでなく、身体の運動学的状態にも強く依存することを示唆しており、今後の検証対象となりうる。

6. おわりに

本研究では、身体前方では確認されていた触空間の湾曲が、身体上方・後方においても再現されるか調査するため、正中面内で 2 本の棒を平行にさせる課題を実施した。その結果、2 本の平行性判断において誤差が生じ、その値は仰角で規定される対象物の絶対的な位置と、棒間の相対的な位置関係 (仰角差) の両方に依存していることが明らかになった。このことから身体上方・後方の触空間は、視覚による補正がなされないことや、身体姿勢の運動学的制約によっても複雑に歪んでいると考えられた。姿勢と触知覚の関係をより詳しく調べることは今後の課題である。

参考文献

- [1] Hermann Von Helmholtz: Handbuch der physiologischen Optik, Leipzig : Leopold Voss, 1867.
- [2] Walter Blumenfeld: The Relationship between the Optical and Haptic Construction of Space, Acta Psychologica, Vol. 2, pp. 125–174, 1937.
- [3] Astrid M. L. Kappers, Jan J Koenderink: Haptic Perception of Spatial Relations, Perception, Vol. 28, No. 6, pp. 781–795, 1999.
- [4] Astrid M. L. Kappers: Haptic Perception of Parallelity in the Midsagittal Plane, Acta Psychologica, Vol. 109, No. 1, pp. 25–40, 2002.
- [5] Frouke Hermens, Astrid M. L. Kappers, Stan C. A. M. Gielen: The Structure of Frontoparallel Haptic Space Is Task Dependent, Perception & Psychophysics, Vol. 68, No. 1, pp. 62–75, 2006.