



相対奥行き知覚から絶対奥行き知覚への相互変換の検証

加藤 拓実¹⁾, 原 彰良¹⁾, 古川 正紘^{1,2)}, 横山 喜大¹⁾, 前田 太郎^{1,2)}

Takumi KATO, Akiyoshi HARA, Masahiro FURUKAWA, and Taro MAEDA

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 1-4,
{takumi.kato, akiyoshi-hara}@hiel.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, {m.furukawa, t.maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

概要: ヒトの身体行動スキルの正確な再現には奥行きの絶対量知覚が不可欠である。奥行きの絶対量知覚では、視覚と体性感覚のように知覚モーダル間に残る観測量の相互不定性を拘束して等価にするために変換係数を得るの必要があり、受動運動視の際には得られないこの係数を能動運動視では得ることが出来る。そこで本報告ではこの定数の条件間転移を上肢リーチングを用いた視覚運動協応課題として検証した。

キーワード: 感覚尺度構成, 視覚運動協応, モーダル間整合

1. はじめに

ヒトの身体行動スキルの再現には空間の定量的な把握が必須であり、視覚運動協応においては視覚と体性感覚の間で空間表象を物理空間で完全に一致させることが求められる。特に奥行き知覚を伴う 3 次元空間への定量的な応答として、能動運動視に伴う作業と受動運動視に伴う作業では、到達運動の位置の再現性に大きな隔たりが生まれる [1]。感覚モーダル間の空間表象の変換においては、測定尺の上限である比率尺度においてさえ残る定数の不定性が感覚モーダルごとに生じることになり、これらを 1 つの不定性に拘束しない限り感覚モーダル間の予測変換を一意に実現することはできない。そこで本報告では、空間表象は感覚モーダル間で相互変換される過程を観察するため、運動視を用いた視対象までのリーチング課題による回答位置の分布を観察することで妥当性を検討する。

2. 測定尺度

2.1 感覚モーダル間の空間表象整合問題

感覚は、物理現象に知覚尺度を割り当てる測定とみなすことができる [3]。ここで、単一の感覚モーダルにある知覚尺度が他の感覚モーダルと独立に成立するとする。視覚運動協応とは、「見たものに触れる」と形容されるように、視空間表象と体性感覚空間表象が整合することを意味し、多感覚モーダル間の知覚尺度が整合している状態を指す。本報告ではこの多感覚モーダル間の空間表象整合問題を感覚尺度構成の観点で論じ、2 つの感覚尺度間を相互に整合させる 1 つの定数を導出する。

2.2 単一感覚モーダル内の尺度上限

単一モーダル内において測定尺度の上限である比率尺度を満たすと仮定しても、物理現象を知覚表象に変換する上での不定性は 1 自由度残る。さらに、単一モーダルが 1 自由度の不定性をもっていたとしても、我々の知覚統合過程は複数

モーダル間の整合性を維持し続けなければ単一の知覚表象を生じえない。すなわち、複数モーダル間の感覚尺度間を相互に整合させる 1 つの定数関係を、我々は感覚統合過程で保持し続けなければならないことを意味する。

ここでリーチング課題を対象とし、視覚運動協応において感覚信号と知覚表象の関係を定式化する。被験者が知覚する現象そのものを事象 A 、観察者が事象 A を感覚することで体内に発生する感覚 (sensation) 信号を $S(A)$ 、このとき生じる知覚 (perception) 表象を $P(A)$ とそれぞれ表す。各モーダルにおける位置知覚は測定尺度として比率尺度 (ratio scale) を満たすことから、これらの関係は式 (1) の様に表せる。

$$P(A) = \alpha S(A) \quad (1)$$

式 (1) は、感覚信号 $S(A)$ と知覚表象 $P(A)$ とが単調な関数関係にあることを表している。定数 $\alpha (\neq 0)$ は観測時に比率尺度に残される不定定数である。

2.3 不定 2 定数関係を拘束する視覚運動協応定数の導入

代表的なリーチング課題では、視対象の位置を視覚的に知覚し、その位置に手を伸ばすことが求められる。視空間、体性感覚空間ともに位置表象がそれぞれ独立に成立していることから、これらの 2 つの知覚表象はともに比率尺度を満たしている。つまり、この α は視覚モーダル (vision modal) で α_v が、体性感覚モーダル (somatosensory modal) で α_s がそれぞれ定義され、知覚表象として定常安定状態である限り、 α_v, α_s は各々不定性を残すが定常安定状態であると仮定できる。これらを用い、

$$\text{視知覚: } P_v(A) = \alpha_v S_v(A) \quad (2)$$

$$\text{体性知覚: } P_s(A) = \alpha_s S_s(A) \quad (3)$$

を得る。式 (2)(3) は心理学における刺激 (S)・反応 (R) 対応 (S - R 型) であり、本稿では視知覚 P_v が視空間表象を、体性知覚 P_s が体性感覚空間表象を意味する。このとき、その位置に手を伸ばすという運動を実現するためには、 P_v の P_s

への写像結果が、実空間で完全に一致することが求められる [3]。これを本稿では視覚運動協応と呼ぶ。

視知覚 P_v の体性知覚 P_s への写像が実空間で完全に一致することが求められるという要件は、感覚統合過程における写像関係の拘束条件である。この拘束条件は、視空間と体性感覚空間の両空間を相互変換する役割を持つため、定数 $\alpha_v (\neq 0), \alpha_s (\neq 0)$ がある定数関係として保持されなければならない。この定数を視覚運動協応 (vision-somatosensory concordance) 定数 $C_c (\neq 0)$ と呼び、視覚運動協応は、定数 C_c を獲得することで実現される。

2.4 視覚運動協応の獲得過程

ここで、感覚モジュール間の協応が獲得される過程を定式化していく。初期状態において、感覚モジュール間が協応しない場合、 $P_v(A) \neq P_s(A)$ であるから、各々の感覚モジュールを基準とした知覚誤差 ε がモジュール毎に知覚される。

$$\text{視知覚誤差: } \varepsilon_v(A) = P_s(A) - P_v(A) \quad (4)$$

$$\text{体性知覚誤差: } \varepsilon_s(A) = P_v(A) - P_s(A) \quad (5)$$

この誤差 ε は位置の差として知覚されるため、誤差の測定尺度は間隔尺度である。視覚運動協応の獲得過程は $\varepsilon_v \rightarrow 0$ かつ $\varepsilon_s \rightarrow 0$ として定式化でき、位置の差は正負の極性を与えるため、 $\varepsilon_v = 0$ かつ $\varepsilon_s = 0$ に収束する。その結果、視空間と体性感覚空間は物理空間上で完全に一致し、式 (6) を満たす視覚運動協応が成立する。

$$\text{視覚運動協応: } P_v(A) = P_s(A) \quad (6)$$

式 (1) の定義から、式 (6) の視覚運動協応は比率尺度を満たす。これは視覚運動協応という比率尺度が、知覚誤差という間隔尺度を介して獲得されなければならないことを意味する。

このことから、感覚モジュール間の不定定数 α 間の比が保持されると仮定し、式 (7) の通り視覚運動協応定数 C_c を不定定数の比として定義する。この定数は視覚運動協応の過程における誤差検出から随時修正される形で空間感覚統合の内部定数として獲得・保持されている。

$$\text{視覚運動協応定数: } C_c = \frac{\alpha_s}{\alpha_v} \quad (7)$$

2.5 視覚運動協応における感覚間相互写像

式 (2)(3)(6) より $\alpha_v S_v(A) = \alpha_s S_s(A)$ であるから、式 (7) を適用し、次式を得る。

$$S_v(A) = C_c S_s(A) \quad (8)$$

式 (8) は心理物理学における S - S 型 [4] であり、表象 P を直接観測せずに視空間を体性感覚空間として観測するという、リーチング課題の定式化に相当する。以上から、視覚 S_v 、体性感覚 S_s の感覚信号間の等比性を論拠に視覚運動協応定数 C_c が導出されると期待される。

本報告では、当該定数 C_c の実在性を示すことを目的に、運動視を用いた視覚運動協応手続きを用いて視覚運動協応定数を観測する。

2.6 運動視を用いた視覚運動協応

運動視は網膜像として運動を観察することを意味し、自己運動手がかりも得られる能動運動視と、網膜像のみを得る受動運動視に大別される。能動運動視は自己運動速度 V と網膜像の角速度 ω を感覚し、視対象の絶対奥行き距離 D を知覚する [2]。前述の議論から、能動運動視は絶対奥行き知覚表象を与え、測定尺度の上限である比率尺度を満たす。

一方で、受動運動視では網膜像の角速度 ω の運動のみが感覚され、奥行き距離 D は不定性をもつ。また、異なる奥行きにある視対象の運動視は、各視対象の奥行きに比例した角速度 ω の比として感覚され、各視対象間の相対奥行き距離を知覚する。すなわち、受動運動視は相対奥行き知覚表象を与え、測定尺度は比率尺度を満たさず間隔尺度を満たす。

受動運動視で成立する測定尺度上限は $P_v(A) = \alpha_v S_v(A) + \beta_v (\beta_v \neq 0)$ に示される 2 つの不定定数をもつ間隔尺度 (interval scale) であり、式 (1) に示した比率尺度を満たす能動運動視と測定尺度が異なる。

3. 運動視を用いた視覚運動協応定数の観察

3.1 実験の目的

文献 [1] では、受動運動視を用いると奥行き判断を必要とする建機作業シミュレーションにおいて、受動運動視を用いた場合は能動運動視を用いた場合にくらべ、作業特性が低下し、到達誤差が大きくなることが確認されている。これは、本報告の考察に基づくと、受動運動視では視覚運動協応が行えないことにより、視覚と体性感覚間の誤差検出ができず、その結果、視覚運動協応定数 C_c が不定となることにより生じたと考えられる。

そこで本報告では、能動運動視により獲得された視覚運動協応定数 C_c が、受動運動視における定数として転移が生じるかを明らかにすることが目的である。この転移が確認されることによって、視覚運動協応定数 C_c の共通性と唯一性が検証可能であると考えられる。

3.2 実験条件

本実験では、異なる奥行き方向に 2 つの光源 A と B を設定し、この 2 点へのリーチング応答を計測する視覚運動協応実験を行う。運動視要因として次に列挙する 4 条件を設定し、視距離要因として 300[mm], 400[mm] の 2 条件を設定し、2 要因全 8 条件の被験者内実験計画を立てた。各条件の提示と回答の手順を図 1 に示す。

能受 光源 A を点灯させ、光源 B は消灯した状態で、被験者に能動運動視を行わせる。その後、光源 B 点灯させ、2 つの光源が点灯している状態で受動運動視を行わせる。この際、被験者は静止している。最後に光源 A のみ消灯し、光源 B が点灯している状態で光源 B の位置にリーチングを行わせる。

受能 2 つの光源を点灯させた状態で被験者に受動運動視を行わせる。この際、被験者は静止している。その後、光源 B を消灯させ、光源 A のみを点灯させた状態で能動運動視を行わせる。最後に、光源 A を消灯させ、光

源 B を点灯させた状態で光源 B の位置にリーチングを行わせる。

能 1 点 2つの光源のいずれかを点灯させ、被験者に能動運動視を行わせる。その後、点灯させた光源が点灯している状態でその光源の位置にリーチングを行わせる。

受 1 点 2つの光源のいずれかを点灯させ、被験者に受動運動視を行わせる。その後、点灯させた光源が点灯している状態でその光源の位置にリーチングを行わせる。

リーチングは同一条件下で 5 回実施した。従って、同一運動視条件において計 10 回、リーチングを合計 40 回実施した。実験は回答の安定性を担保するため、運動視条件を**能受**、**受能**、**能 1 点**、**受 1 点**の順に実施した。同一運動視条件を継続して実施し、同一運動視条件内での順序効果を統制するため、被験者に視距離条件を予測させないため、視距離条件をランダム化した。

能受、**受能**条件ではリーチングさせる視距離条件に応じて、の光源 A と光源 B の点灯条件を入れ替えて行う。また、リーチングは常に右手で行い、ペン先に親指の腹を押し当てることで、親指の爪先でリーチング地点を指せる状態で行う。

リーチングした結果として、被験者の目線の高さに用意した方眼紙にボールペンで点を打った跡が残る。本実験では、実験開始時の左目の初期位置を原点とし、頭部の水平移動する方向を左方向を正とした x 軸、奥行き方向を身体から光源への方向を正とした z 軸としてリーチング結果を測定した。

能動運動視の際の頭部移動と受動運動視の際の光源移動は共に移動幅の最大値を取る様に 5 回往復した。この際、1 往復するのにかかる時間は固定しなかった。**受 1 点**は能動運動視を行わないため、リーチングの際の左目の位置は初期位置に固定された状態であった。2つの光源を点灯、消灯させる瞬間は、2つの光源の内どちらの光源が点灯、消灯しているかを確認させるため、被験者がその瞬間を確認している状態で行った。被験者は 20 代男性で、視機能の既往がない晴眼者である 1 名で行った。

3.3 実験装置

実験装置の模式図を図 2 に示す。本実験では、奥行き方向に眼球から 300[mm],400[mm] の地点に 2つの光源 A と

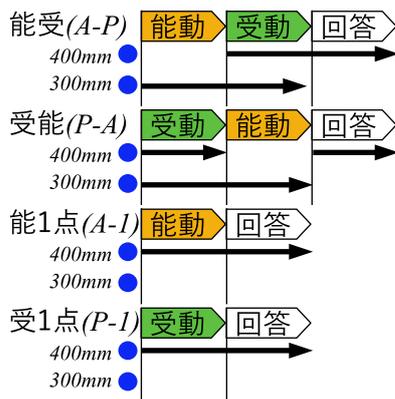


図 1: 実験手続き (回答時の視距離が 400[mm] の場合)

B を設置し、この 2 点へのリーチング応答を計測する視覚運動協応実験を行う。本実験は暗室内で行った。光源には表面実装用青色 LED の光量を被験者にとって視認可能な最小限に設定して用いることで、焦点ずれにより発生するにじみを知覚不能にした。この設定は、にじみを知覚することで行うアコモデーションを不可能にし、焦点ずれを奥行き知覚の手がかりとして与えないことで、本実験では奥行き知覚の手がかりを運動視差に限定するために行った。リーチング回答の際に光源に直接手が触れないようにするため、実光源を頭上に配置し、被験者は表面鏡を介し等价的に目線高さに光源が位置して見えるように配置した。本実験では左目のみの単眼で光源を視認するが、頭部移動により表面鏡を介して光源を視認不可能になることを防ぐため、使用した表面鏡 178[mm] に対し、頭部移動幅は原点を中心に片側 140[mm] とした。対して、受動運動視の際に 2つの光源が動く移動幅は 140[mm] とした。

また、2つの光源の内、どちらを消灯したかを判別可能にするため、被験者から見たとき、原点から z 軸方向に引いた中心線から左に 10[mm]、眼球から 300[mm] の地点と、中心線から右に 10[mm]、眼球から 400[mm] の地点の 2 点に光源を設置した。

3.4 実験結果

能受、**受能**、**能 1 点**の 3 実験では被験者に能動運動を行わせた後、被験者自身で左目を初期位置に戻るように移動させたため、リーチングは左目の位置が初期位置から x 軸方向へ最大 47[mm] の誤差が生じている状態で行った。統計検定を奥行き距離 z のみを対象として実施した。被験者 1 名の結果を図 3 に示す。

能受 (*active-passive*) 条件：同一条件における回答 z 座標分布に正規性が認められ (Shapiro-Wilk 検定, $p_{s3} = 0.49$, $p_{s4} = 0.50$)、等分散性が認められたため (ルービン検定, $p_l = 0.46$)、 t 検定の結果、回答奥行きの条件間平均値に有意差が認められなかった ($p = 0.76$)。¹

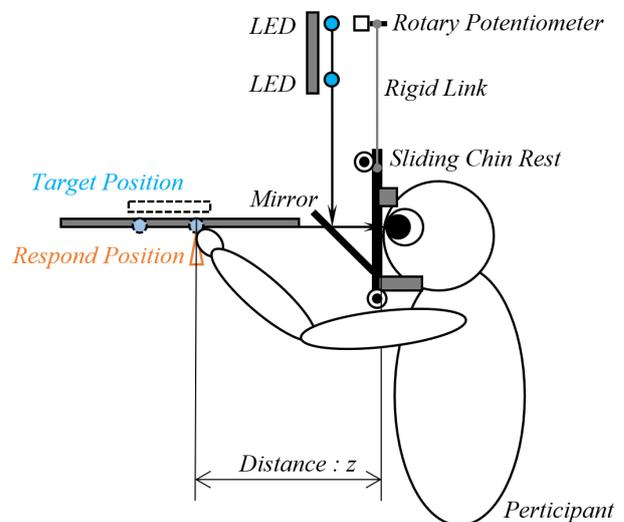


図 2: 運動視実験装置

¹ p_{s3} , p_{s4} はそれぞれ視距離 300, 400[mm] 条件それぞれに対する

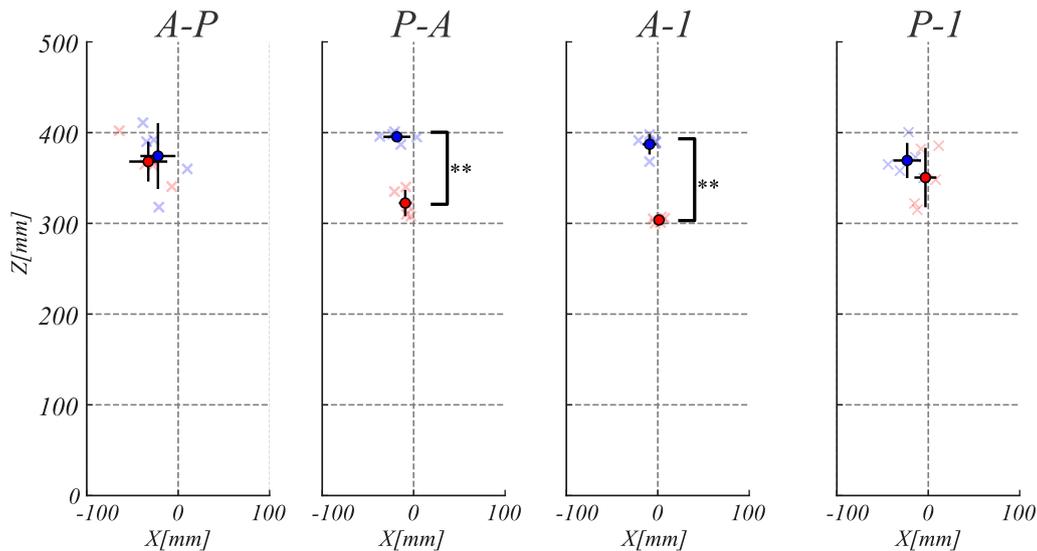


図 3: 実験結果 (n=1). 能受 (A-P) 条件, 受能 (P-A) 条件, 能 1 点 (A-1) 条件, 受 1 点 (P-1) 条件ごとにそれぞれ示す. グラフの原点は眼球瞳位置を表す. 赤プロットは視距離 300[mm], 青プロットは視距離 400[mm] 条件の結果を示す.

受能 (passive-active) 条件: 正規性および等分散性が認められたため ($p_{s3} = 0.39$, $p_{s4} = 0.53$, $p_l = 0.07$), t 検定を実施した結果, 回答奥行き条件間平均値に有意差が認められた ($p < 0.05$).

能 1 点 (active 1 point) 条件: 正規性および等分散性が認められたため ($p_{s3} = 0.38$, $p_{s4} = 0.12$, $p_l = 0.34$), t 検定を実施した結果, 回答奥行き条件間平均値に有意差が認められた ($p < 0.05$).

受 1 点 (passive 1 point) 条件: 正規性および等分散性が認められたため ($p_{s3} = 0.29$, $p_{s4} = 0.52$, $p_l = 0.19$), t 検定を実施した結果, 回答奥行き条件間平均値に有意差が認められなかった ($p = 0.30$).

3.5 考察

能動運動視覚である能 1 点 (A-1) 条件では, 2つの視距離条件において奥行き方向へのリーチング応答に有意差が認められ, 受 1 点 (P-1) 条件では認められなかった. この事実は文献 [1] で確認された作業特性の低下に対応するものと考えられる.

2つの光源の位置関係を獲得可能な受動運動視プロセスの後, 一方の光源に対してのみ視覚運動協応定数 C_c を獲得可能な能動運動視プロセスを経由し, 受動運動視のみで観察した光源へのリーチング応答を求められる受能条件では奥行き方向へのリーチング応答に有意差がみられた. 一方, 1つの光源に対し視覚運動協応定数 C_c を獲得可能な能動運動視プロセス後, 2つの光源の位置関係獲得可能な受動運動視プロセスを経由し, 受動運動視のみで観察した光源へのリーチング応答を求められる能受条件では奥行き方向へのリーチング応答に有意差がみられなかった.

受能条件にて, 能 1 点条件同様に 2つの奥行き距離の回答に差が生じたことは, 視知覚誤差と体性知覚誤差の最小化が可能である能動運動視でしか獲得不可能な C_c を受動運

動視へ転移可能であることを示す. この C_c の転移が可能であることは獲得した空間感覚統合の内部定数としての視覚運動協応定数 C_c を唯一のものとして獲得・保持し, 利用したことを意味する. よって, 受能条件における転移の存在は, 視覚運動協応定数 C_c の共通性と唯一性を支持するものである. 一方で能受条件において同様の転移が成立しなかったことは, 条件間の転移の方向性を示唆するものであり, これは事象の対称性の崩れにも思われる. 同定数の獲得と忘却過程における発生条件にこの非対称を説明する余地が存在するかを検討するべきであろう.

4. おわりに

知覚運動協応に必要なマルチモーダルでの空間統合においては, 視覚と体性感覚のように知覚モーダル間に残る観測量の相互不定性を拘束して等価にするために変換係数を得る必要があり, 受動運動視の際には得られないこの係数を能動運動視では得ることが出来る. そこで本報告ではこの定数の条件間転移を上肢リーチングを用いた視覚運動協応課題として検証した.

参考文献

- [1] Masataka Kurokawa, Masahiro Furukawa, Taro Maeda: Can changing brightness with head movement deliver depth perception like as motion parallax?, The 15th Asia-Pacific Conference on Vision, 2019.
- [2] 松岡哲平, 黒川正崇, 宮本拓, 中谷内優人, 古川正紘, 前田太郎: 能動運動視による絶対奥行き知覚-拡張テレグジスタンスへの挑戦第 1 報-, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2021.
- [3] 前田太郎: 空間位置知覚のための感覚統合過程に関する研究, 博士論文, pp.17-22, 1994. DOI:10.11501/3115687
- [4] 大山正: 刺激-反応関係より見た知覚測定, 心理学評論, 4, pp.215-230, 1960.

Shapiro-Wilk 検定結果の p 値を示す.