

身体・空間定位における体性感覚の役割： リーチング方略の分析から

The role of somatic sensation in bodily and spatial localization: From an analysis of reaching strategies

宮崎 美智子[†], 浅井 智久[‡], 伴 智博[§], 麦谷 綾子[¶]

Michiko Miyazaki, Tomohisa Asai, Norihiro Ban, and Ryoko Mugitani

[†]大妻女子大学, [‡]ATR, [§]平明社, [¶]日本女子大学

Otsuma Women's University, ATR, HEIMEI Corporation, Japan Women's University
myzk@otsuma.ac.jp

概要

本研究では成人が身体部位や空間上の対象を定位する際の手の伸ばし方(リーチング方略)を系統的に調査した。動きを確認しつつ定位するフィードバック制御の出現頻度と体性感覚利用可能性との関係を明らかにし、幼児での検討の指標確立を目指す。身体・空間指し課題で、定位時間とリーチング方略を分析したところ、対象部位が身体を中心軸に近いほど予測的なフィードフォワード制御を使用し、距離や身体を中心軸から離れるほどフィードバック制御を使用する傾向がみられた。

キーワード：身体, 空間, フィードフォワード制御, フィードバック制御, リーチング, 拡張現実

1. はじめに

私たちは視覚だけでなく、体性感覚など複数の感覚を使って自分の身体を認識する。たとえば、目をつむっても鼻の位置が分かるのは、皮膚や深部で知覚する体性感覚があるためである。しかし、実は成人でも体性感覚のみに頼ると顔部位の定位に空間的な歪みが生じる

(Mora et al., 2018)。Mora らは実験参加者の眼前1 cmの位置にアクリル板を立て、目をつむった状態で11カ所の顔の部位(髪の毛の生え際、左右の目尻・目頭、鼻の先、左右の小鼻端、左右の口角、あご)の指差しをさせた。その結果、いずれの顔部位も位置や大きさが実際とは異なって知覚されることが分かった。位置については、垂直方向には1 cmほど下部に、水平方向には全体的に右寄りに知覚され、大きさについては、上半分より下半分が長め、水平方向の幅は、いずれの部位も2~3 cmほど長く知覚されていた。身体部位の定位には、成人でも視覚と体性感覚を上手く連携させる必要がある。

幼児の場合、身体部位の定位精度は成人より粗く、加齢とともに精度が向上すると考えられる。たとえば、Miyazaki ら (2021) は身体部位定位の発達における視覚情報の影響を探るため、拡張現実(AR)を用いた全身版の身体部位定位課題を開発し、2~3歳の幼児を対象

に定位精度の発達的变化を検討した。30か所の身体部位にARマークを表示し、それに対するタッチ(定位)の反応時間と正確さを分析した。その結果、身体部位ごとに難易度が変わるものの、全体のタッチエラー率には年齢による差は見られなかった。だが、定位対象への手の運動軌跡とエラーの関係を詳細に解析したところ、3種類のリーチング方略の存在が見出され、使用されたリーチング方略とエラーの間に年齢による予測関係が見出せることが分かった。

3種類のリーチング方略とは、バリスティックリーチング(Ballistic Reaching: BR)、フィードフォワード制御(FeedForward control: FF)、フィードバック制御(FeedBack control: FB)である。バリスティックリーチングは、狙いは不正確だが速い動きで対象周辺に到達する弾道的なリーチングである。フィードフォワード制御は、定位精度が高く、到達も速いリーチングで、視覚と体性感覚が連携した予測的な動きである。フィードバック制御は、定位精度は高いが、動きを確かめながら比較的ゆっくり対象に到達するリーチングで、視覚に頼りながら慎重に手を動かしていると考えられる。

先行研究において、2歳児のエラーは主にバリスティックリーチング由来で、3歳児のエラーはフィードバック制御由来である可能性がモデルベース解析によって示されている(Miyazaki et al., 2021)。特に3歳児に見られたフィードバック制御とエラーの関係は、当該身体部位において、体性感覚による定位精度が低い可能性を示唆している。もし、体性感覚を使用しづらい、単なる空間への定位の場合、フィードバック制御が増加することが予測される。

しかし、幼児の行動実験は、実施するコストも大きく、データの欠損も多いため、探索的に系統的・網羅的な検討をおこなうことが難しい。そのため、まず、成人を対象とした系統的・網羅的な検討をおこなうことで、フィードバック制御の出現の性質を明らかにし、幼児にも

適用できる行動指標の確立を目指したい。

そこで本研究では、成人が定位対象に対してリーチング方略をどのように使い分けるのかを系統的・網羅的に調査し、成人におけるリーチング方略と身体認識との関係を明らかにすることを目的とした。特に、身体を直接触るときと、身体近くの空間を指し示すときでは体性感覚の利用可能性が変化すると考えられる。そのため、体性感覚を利用しづらい空間指し課題のほう、フィードバック制御の増加が見られることが予測される。

2. 実験方法

実験には 18 歳から 24 歳までの女子大学生 21 名が参加した(平均 20.52 歳)。実験では先行研究(Miyazaki et al, 2021) で開発された課題に加えて、空間の定位を検討できる課題を追加し、身体部位や空間を定位させる 3 種類の課題を設定した。使用した課題は以下のとおりである。

【身体指し課題 (図 1 (A))】 AR で表示されるマークに対して、直接自身の身体に触れながら指差しする課題である。範囲は肩から頭部に限定した 12 か所 (左肩、左耳、左頬、左目、頭、おでこ、口、あご、右目、右頬、右耳、右肩) で、いずれも鼻を起点として人差し指でリーチングさせ、映像と反応時間を記録した。

【空間指し課題 一近 (図 1(B))】 AR で表示されるマークに対して、近距離 (身体に重なる位置) の空間上を指差しさせる課題である。鼻と耳を結ぶ線分を基準の長さ n とし、鼻の座標から比率 1.0 倍の位置に 30°

ずつ回転して決めた 7 か所の位置にマークを表示した。近距離空間上のリーチング映像と反応時間を評価した。

【空間指し課題 一遠 (図 1(C))】 空間指し課題一近の 7 か所における基準の長さ n を 3 倍に伸ばすことで、遠距離 (身体に重ならない位置) の空間上でのリーチング映像と反応時間を評価した。

3. 結果

図 2 は、左側から身体指し課題、空間指し課題一近、空間指し課題一遠で分け、定位対象ごとに個々の実験参加者の反応時間をプロットした散布図である。各課題と部位ごとに取られたリーチング方略を明らかにするため、記録した映像を観察してリーチング方略を分類した。予備的な分析から、単純なリーチングの速さ (反応時間/距離) の違いでの分類が難しいことが分かったため、速さの変化率に着目した。フィードバック制御は動き始めの速度に比して、到着付近での速度が緩やかになる。すなわち、慎重な定位であると解釈できる。一方、フィードフォワード制御は到達までの速度に大きな変化がない。迷いなく定位点まで指を運んでいると解釈できる。ただ、これを定量的に定義するのは難しかったため、今回は判定者の主観的判断により、速度変化が大きいリーチングをフィードバック制御、速度変化が小さいリーチングをフィードフォワード制御と見なし、分類を行った。また、全体の傾向をつかむため、フィードフォワード/フィードバック制御の出現分岐点の抽出を主眼に置き、フィードフォワード制御優勢と解釈される反応を薄灰枠で囲った。

図 1. 3 種類の定位課題

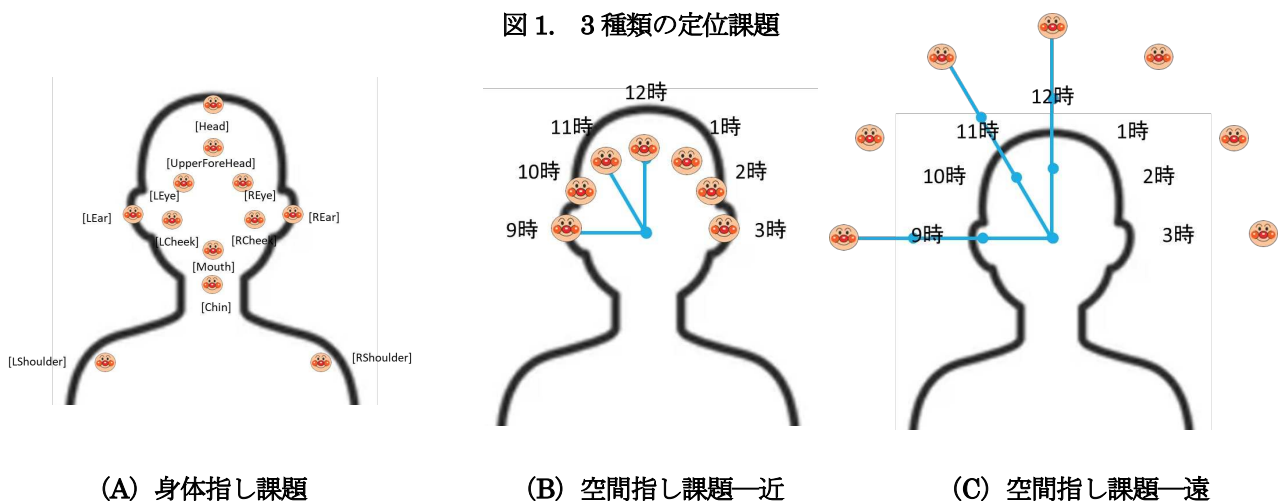
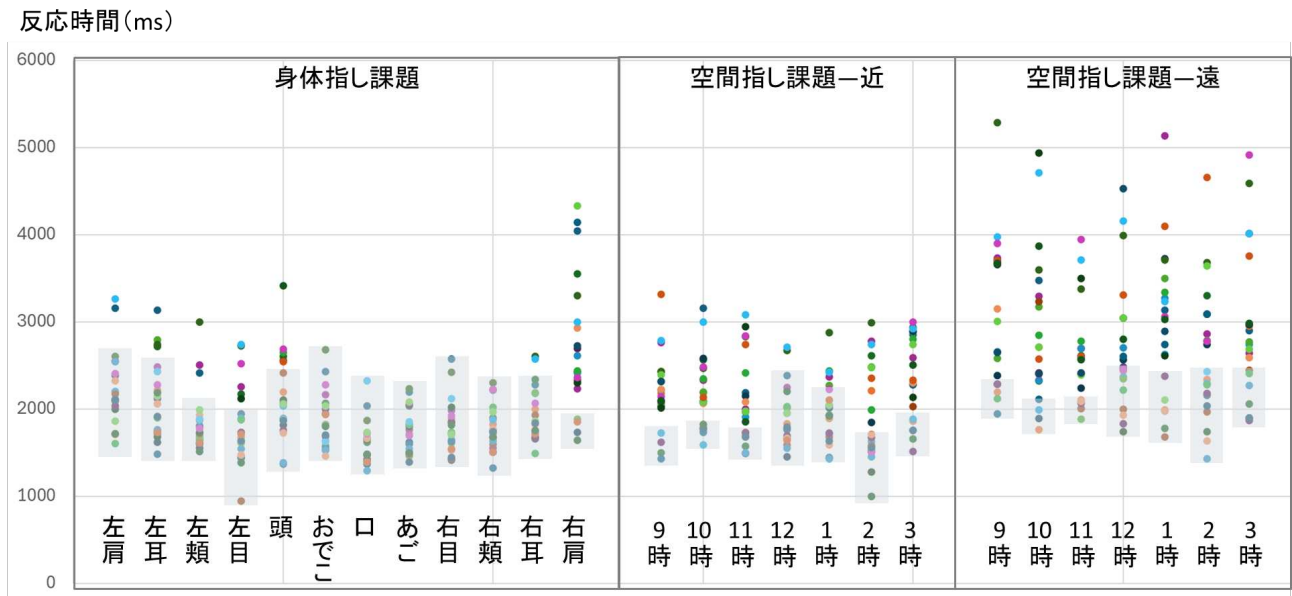


図 2. 課題ごとの反応時間プロット 薄灰はフィードフォワード制御選択が優勢



その結果、どの課題においてもバリスティックリーチングは観測されなかった。フィードフォワード制御は、身体指し課題において多く観察され、空間指し課題では減少傾向にあった。身体指し課題の中でも、起点とした鼻から近い部位は特にフィードフォワード制御が顕著であり、一方で肩や利き手と反対の左側の部位ではフィードバック制御が多く確認された。

全体的な反応時間の違いとしては、身体指し課題の平均反応時間が 1972.2 ms、空間指し課題—近の平均反応時間が 2106.6 ms、空間指し課題—遠の平均反応時間が 2828.7 ms となった。課題内の水準数が異なるため、直接比較は難しいが、空間指し課題—遠における反応時間が長くなっていることはうかがえる。

次に、直接身体に触れる定位と空間上の定位の違いを検討するため、各課題において類似の位置にある部位を 3 か所抽出し、選択されたリーチング方略の生起頻度を比較した（表 1）。対象になったのは、身体指し課題のおでこ・左耳・右耳、空間指し課題近／遠の

12 時、9 時、3 時方向であった。この 3 か所は身体に触れるか、空間を指すかの違いはあるが、定位位置は類似した部位となる。

各課題において抽出した 3 か所の対象部位とリーチング方略の生起頻度を従属変数とし、ポアソン分布を用いた一般化線形モデリングを実施した。ステップワイズ増減法と情報量規準 BIC によるモデル選択の結果、度数＝課題+部位+方略+課題×方略+部位×方略が選出された。尤度比検定によると、一次の交互作用、課題と方略 ($\chi^2(2) = 50.62$, 調整された p 値 = 0)、部位と方略の交互作用が有意となった ($\chi^2(2) = 20.99$, 調整された p 値 = 0)。

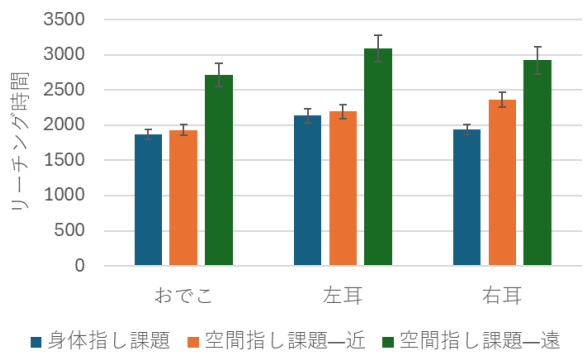
偏回帰係数の Wald 検定の結果、課題と方略の交互作用において、部位にかかわらず、身体指し課題のフィードバック制御の比率に対して、空間指し課題—近($b = 2.61$, $z = 4.92$, 調整された p 値 = 0)、空間指し課題—遠($b = 2.94$, $z = 5.51$, 調整された p 値 = 0)のフィードバック制御の比率が有意に大きいことが示された。部位と方略の交互作用においては、課題にかかわらず、おでこのフィードフォワード制御に比して、左耳($b = 1.67$, $z = 4.08$, 調整された p 値 = 0)、右耳($b = 1.42$, $z = 3.47$, 調整された p 値 = 0)の比率が相対的に小さいことが示された。

各課題におけるリーチング反応時間を図 3 にまとめた。近接部位（おでこ、左耳、右耳）のみを抜き出して、2 要因の分散分析（被験者内要因）によって検討したところ、課題の主効果 ($F(2,40) = 50.41$, $p < .01$) ならびに部位の主効果 ($F(2,40) = 7.12$, $p < .01$) が有意とな

表 1 近接部位 3 か所の FF/FB 生起頻度

課題	方略	おでこ 12 時	左耳 9 時	右耳 3 時
身体	FF	21	18	19
	FB	0	3	2
空間 近	FF	19	4	6
	FB	2	17	15
空間 遠	FF	11	6	7
	FB	10	15	14

図 3. 近接部位の平均リーチング反応時間



った。課題と部位の交互作用は有意ではなかった ($F(4,80) = 1.50, n.s.$)。その後の多重比較により、身体指し課題と空間指し課題—近のリーチング時間には有意差はなく、空間指し課題—遠のリーチング時間に対して、身体指し課題と空間指し課題—近のリーチング時間が短いことが示唆された ($ps < .05$)。また、部位の主効果について多重比較をおこなったところ、左耳と右耳のリーチング時間に差はなく、おでこにおけるリーチング時間が左耳、右耳におけるリーチング時間よりも有意に短いことが分かった ($ps < .05$)。

これらのことから、身体を直接指す場合にはフィードフォワード制御がよく選択されるが、身体の中心部から離れるほどフィードバック制御が選択されやすくなることが分かった。

4. 考察

全体として、成人ではバリスティックリーチングは観察されず、定位部位対象が身体の中心軸に近いほどフィードフォワード制御を使用し、距離や身体の中心軸から離れるほどフィードバック制御を使用する傾向が見出された。バリスティックリーチングは、狙いは不正確だが速い動きで対象周辺に到達する弾道的なリーチングである。成人では運動制御の発達が成熟していることから、観察されなかったものと考えられる。しかし、フィードバック／フィードフォワード制御については、身体や距離との関係で使い分けられていることが示唆された。

身体指し課題でフィードフォワード制御が多く見られたのは、体性感覚の関与が考えられる。フィードフォワード制御を実現するには、体性感覚と視覚の双方を予測的に連携させることが求められる。幼児に比べて身体認識が成熟している成人では、身体指し課題で

は特に、体性感覚を用いた身体認識に基づいて、対象を確認したら迷わず予測的に定位置に手を伸ばすことが容易だったものと考えられる。一方、空間指し課題の定位対象は、直接的に体性感覚からの情報を利用することはできず、視覚に頼らざるを得ない。しかしながら、空間指し課題—近では、物理的距離の近さを利用して身体で受け取った体性感覚を加味したフィードフォワード制御ができていた。

このように、体性感覚の利用可能性の違いによって、フィードバック制御の生起頻度に有意な違いが現れたことは、リーチング方略によって、使用される感覚モダリティの重みが異なっていることを示唆している。

今後は幼児を対象とし、リーチング方略の違いを指標とすることで、各身体部位に対する定位精度の発達を検討していきたい。

5. 謝辞

本研究は大妻女子大学社会情報学部情報デザイン専攻の 2024 年度卒業論文として執筆された加藤怜子氏による「空間的定位における身体役割」を元に構成されている。加藤氏には実験計画、データ収集、分析、考察すべてにわたり大きな貢献を受けた。ここに大きな感謝を申し上げたい。また、この実験に参加してくれた参加者にも感謝申し上げる。

文献

Miyazaki, M., Asai, T., Ban, N., & Mugitani, R. (2021). Tracking Action in XR Mark Test Reveals Developing Body Representation Among Toddlers. *bioRxiv*.
Mora, L., Cowie, D., Banissy, M. J., & Cocchini, G. (2018). My true face: Unmasking one's own face representation. *Acta psychologica*, 191, 63-68.