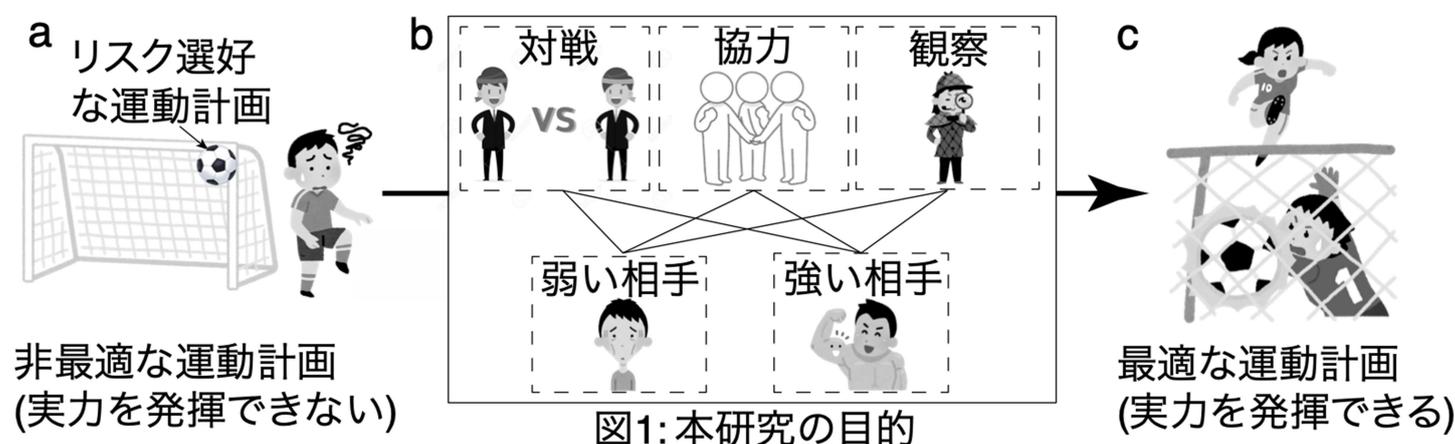


1. 緒言

1994年サッカーW杯決勝、イタリアの至宝ロベルトバジジョは、ゴールの隅を狙いすぎ、盛大にペナルティーキック(PK)に失敗した。このように、世界トップレベルのアスリートでさえ、本番で実力を発揮できないことが起こり得る。実力発揮の支援方法として、あがり(緊張)の克服が提案されてきた(Mesagno, 2017, Curr Opin Psychol)。しかしながら、あがりを克服した一流アスリートでさえ、非最適な行動を繰り返し、本番で失敗する(Neiman+, 2011, Nat Comm)。そして本番での失敗は、多くのプロや大学生アスリートにうつ病リスクをもたらす(Weigand+, 2013, Sports Health, Goutterbarger+, 2013, J Hum Kin)。うつ病リスク改善のために、実力を発揮して失敗リスクを軽減する方法の提案が急務である。

あがりを克服したプロでさえ本番に失敗する原因は、我々は利得が高く失敗確率も高いリスクな運動を計画する傾向にある、運動計画の非最適性に起因する可能性が指摘されている(図 1a、Wu+, 2009, PNAS)。しかしながら、利得の期待値を最大化するように運動計画を最適化し、実力発揮を支援する方法は未だ明らかでない(図 1c)。運動計画を最適化する方法として、本研究では他者とのインタラクションに着目する(図 1b)。他者の存在は我々の運動計画に大きな影響を与える。例えば、相手と対戦(Naber+, 2013, PNAS)、相手と協力(Peng+, 2012, Comp Hum Mov)、そして相手を観察(Richardson+, 2007, Hum Mov Sci)するとき、相手の運動パターンと無意識に同期する。例えば、最適な相手との対戦・協力・観察により、無意識に相手の運動計画と同期することで、運動計画が最適化される可能性が期待できる。



予備的な結果では、弱い相手との対戦により運動計画が最適化され、対戦終了後も最適性が持続する可能性を見出している(Ota, Tanae, Ishii, Takiyama, 2020, Sci Rep)。すなわち、弱い相手と対戦して運動計画を最適化した後に本番に挑むことで、実力を発揮できる可能性がある。

しかしながら、他者とのインタラクションは対戦、協力、観察など様々な種類があることに加え、相手の強さが与える影響もあり、どのようなインタラクション様式が最適であるかは未だ明らかでない。加えて、前述の先行研究では弱い相手との対戦により最適な運動計画が達成できる可能性を示唆したものの、なぜ最適化さ

れるかという最適化のメカニズムは明らかでない。

本研究では、他者とのインタラクションを利用した運動計画の最適化による、実力発揮の支援方法の提案とメカニズムの理解を目的とする。本研究の達成により、1) あがりの克服との相乗効果による更なる実力の発揮、2) 失敗リスクとうつ病リスクの軽減、が期待できる。

## 2. 研究方法

以下の実験は東京農工大学における倫理委員会の承認下、適切なインフォームド・コンセントの後行われた。下記の研究方法ならびに結果は、研究論文として採択・掲載されているものである (Tanae et al., 2021, *Frontiers in Sports and Active Living*)

### 2.1 実験装置

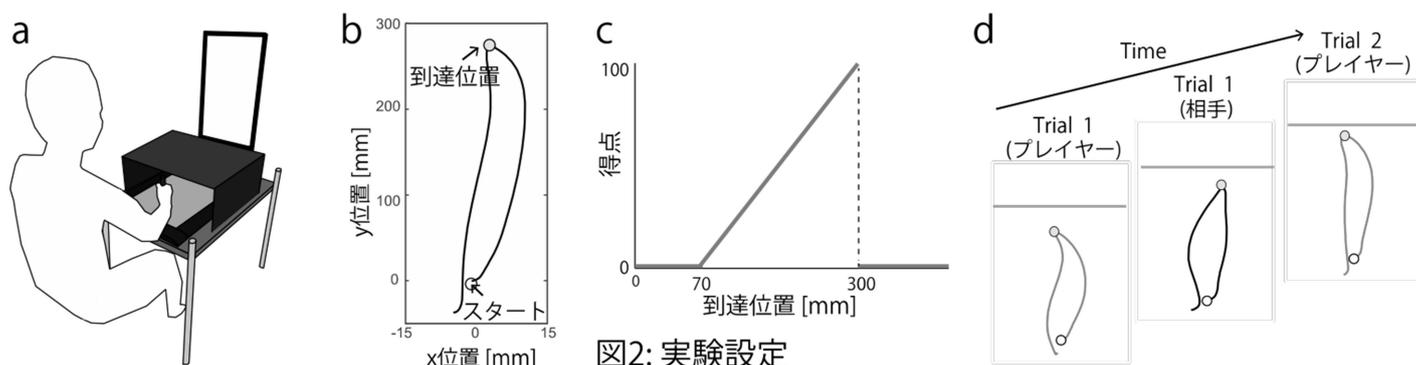


図2: 実験設定

図 2a のように、42 名 (28 名が男性、14 名が女性、年齢は 18-26 歳) の被験者が座位のままデジタルペンを動かす課題を行った。デジタルペンはペンタブレット上にて、被験者から見て奥行方向に可能な限り真っ直ぐ動かすこと、そしてデジタルペンは常にペンタブレットに垂直になるように持つよう支持した。加えて、被験者には奥行方向に真っ直ぐ動かした後、スタート位置よりも手前に戻るように腕を動かすよう支持した。これにより、例えば図 2b に示したようなデジタルペンのペン先の軌道データを得ることができる。これは運動適応過程を検証をするためにしばしば用いられる腕の到達運動を模擬したものであり、手先の軌道のみに着目することで様々な身体運動の特性が詳しく知られている (Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994, *JNS*, Takiyama+, 2015, *Nat Comm*)。

### 2.2 実験方法

本研究では、図 2c のように腕の到達運動の長さ (以下、終点位置と呼ぶ) により得点を与える課題を行った (O' Brien & Ahmed, 2013, *Jnp*)。すなわち、終点位置がスタート位置から 300mm のところであれば 100 点がもらえ、70mm であれば 0 点であり、そして 70-300mm は連続な線形関数で得点が決まる課題である。この課題を利用した理由は、すでに被験者がリスク選好的な行動を示すことが知られているためである (O' Brien &

Ahmed, 2013, Jnp, Nagengast+, 2011, Jnp)。リスク選好的な行動とは、得られる利得(ここでは得点のことを意味する)が高いものの、利得そのものが得られない可能性が高い行動を選ぶことを意味する。本研究におけるリスクの定義とは利得の分散であり、リスク選好的な行動とは分散が高い行動を好むことを意味する。図 2c の得点関数では、例えば 300mm の位置を狙うと、不可避の運動のばらつき(Faisal+, 2008, Nat Rev Neurosci)のために 50%の確率で 0 点になり、50%の確率で 100 点に近い得点が取れるであろう(ここではガウス分布のような左右対称の分布をばらつきの分布と想定している)。本研究では 10 回 1 セットとして実験を行ったため、このように 300mm の位置を狙うと期待値は 500 点を切るものの、分散は高い値になるであろう。したがって、300mm の位置を狙う行動は、極端にリスク選好的な行動の一例である。

リスク選好的とは対称に、得られる利得は低くとも利得の分散も低い行動を選ぶことをリスク回避的行動、そして分散を考慮した上で得られる期待利得が最も高くなる行動を選ぶことをリスク中立的行動と呼ぶ。本研究では第一に、リスク中立的行動をベイズ最適化の枠組みから定義を行い(2.3 を参照のこと)、そしてリスク中立的行動よりも期待利得が低く、利得の分散が小さい行動を選ぶことをリスク回避的行動、リスク中立的行動よりも期待利得が低く、利得の分散が高い行動を選ぶことをリスク選好的行動と呼ぶ。リスク選好的行動は得られる利得が高い行動を計画するものの、失敗する確率も高くなり、結果的には期待利得が低くなる。

本研究では第一に、42 名の被験者を 7 グループ(6 名/グループ)に分け、各被験者個別に、50 回の練習の後、上記の実験を 10 回 1 セットとして 17 セット、合計 170 試行を行った。そのうち、前半 50 試行はベースライン試行であり、被験者 1 人にて実験を行った。実験の教示は、グループ間に共通して「1 セットにおいて、10 回得られる得点の合計値が最大になるように動作を行ってください」というものである。先行研究の結果より(O' Brien & Ahmed, 2013, Jnp, Nagengast+, 2011, Jnp)、リスク選好的な行動が観測されることが予想される。

後半 120 試行はグループ毎に異なる実験環境を設定した。具体的には、1 グループは続けて 1 人にて実験を行い教示は「1 セットにおいて、10 回得られる得点の合計値が最大になるように動作を行ってください」であった。その他 6 グループには、1 人にて実験を行うのではなく、仮想の相手と交互に試行を行う設定とした。その内 2 グループは観察グループと呼び、「仮想の相手の行動を観察し、10 回得られる得点の合計値が最大になるように動作を行ってください」という教示を与えた。他 2 グループは協力グループと呼び、「仮想の相手と協力し、10 回得られる仮想の相手の合計得点と、あなたの合計得点を足した 2 人の合計得点が最大になるように動作を行ってください」という教示を与えた。最後の 2 グループは対戦グループと呼び、「仮想の相手よりも 10 回の合計得点が高くなるように動作を行ってください」と教示を与えた。図 3 に概念図を示す。さらに、観察・協力・対戦グループにおいて仮想の相手の強さを 2 種類設定した。1 種類は被験者のリスク中立的行動を算出した後、リスク中立的行動を計画する仮想の相手である。この仮想の相手は被験者の最大期待利得を達成するように動き、俗にいう強い相手である。残り 1 種類は被験者のリスク中立的行動を算出した後、リスク回避的行動を計画する仮想の相手である。この仮想の相手は被験者の最大期待利得よりも低い利得を得るため、俗にいう弱い相手となる。弱い相手の設定については、リスク中立的な終点位置  $\mu^*$  (後述、2.3 参照) を算出した後に、最初の 4 セットはリスク中立的な終点位置を狙い、最後の 4 セットでは  $0.925\mu^*$  を狙うように徐々に等間隔にセット毎に狙う終点位置の値を小さくした。

以上を要約すると、7 グループの被験者はそれぞれ、1 人で課題を行うグループ、(強い or 弱い)仮想の相手と(観察 or 協力 or 対戦)を行う 6 グループとで構成される。本研究では、仮想の相手とのインタラクションがどのような行動の変容を生じるかを検討する。

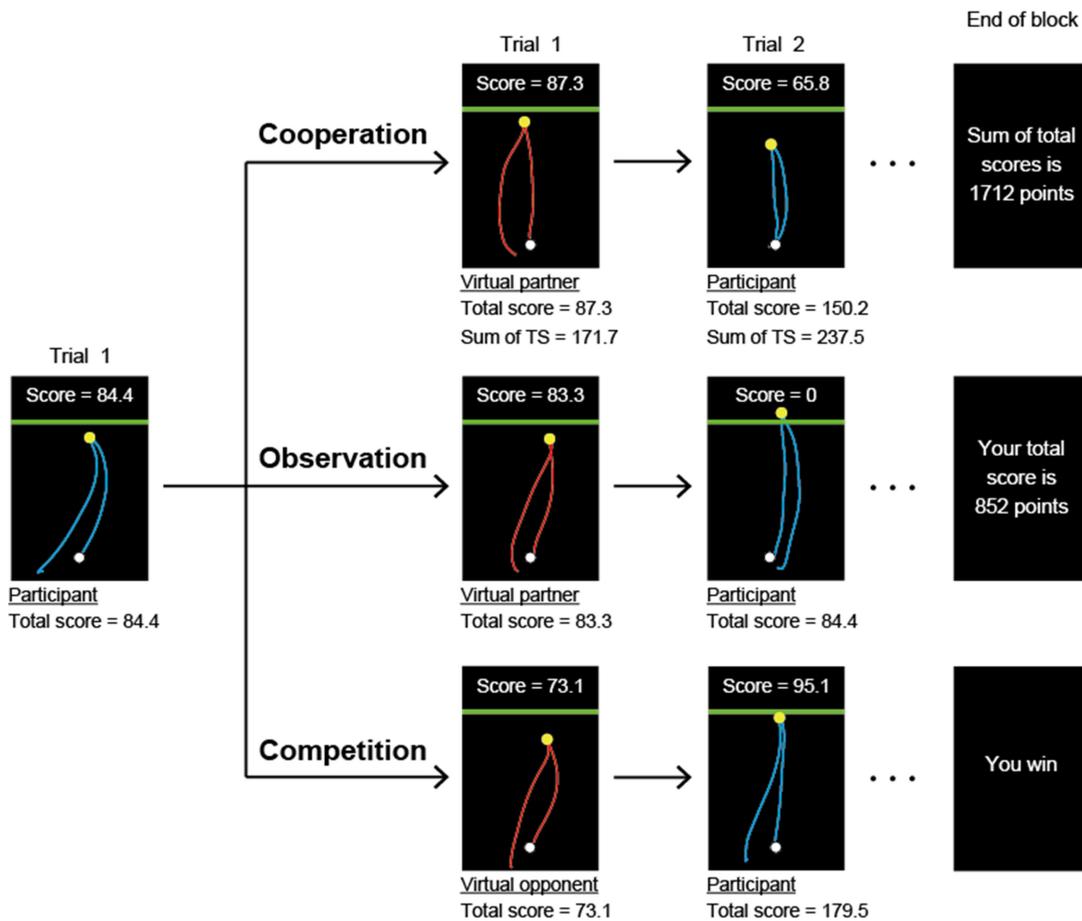


図 3: 協力(上部)、観察(中部)、対戦課題(下部)の概念図。赤色の軌道が被験者のペン先の軌道、青色の軌道が、実験者が生成した仮想の相手の軌道を示している。

### 2.3 リスク中立的行動の定義

リスク中立的行動を具体的に算出する。被験者が計画した真の動作の終点位置を  $\mu$  [mm]、不可避の運動のばらつきが加わり観測された終点位置を  $x$  [mm]、ある試行を考えたときに過去 40 試行分のデータから算出した被験者の動作の分散を  $\sigma^2$  [mm<sup>2</sup>]とする。このとき動作のばらつきがガウス分布に従うことを想定すると、 $x \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ と書き表すことができる。ここでの留意点は、真の計画した終点位置  $\mu$ を実際に観測することはできず、観測できるデータはばらつきが加わった  $x$ のみであるという点である。

加えて、本研究における利得は、図 2c のように  $x$  のみの関数に従う。したがって得られる利得は  $x$  の関

数  $f(x)$  として書き表すことができる。上記で定義した動作のばらつき、そして利得関数を用いて、終点位置  $\mu$  となる動作を計画した際の期待利得は、

$$EG(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) dx$$

となる。特に、本研究における利得関数は  $f(x) = a_1 x + a_0 (x \in [x_0, x_1])$ ,  $f(x) = 0, otherwise$  である。ただし、 $a_1 = 10/23, a_0 = 100 - 300a, x_0 = 70, x_1 = 300$  である。このような関数を一般的に piecewise linear 関数と呼び、piece wise linear 関数の元では、期待利得を解析的に解くことが可能であり、

$$EG(\mu) = (a_1 \mu + a_0) \left( Q\left(\frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right) - Q\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) \right) + \frac{a_1 \sigma}{\sqrt{2\pi}} \left( \exp\left(-\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \right)$$

を得る。ただし、 $Q(z) = \int_z^{\infty} dx \mathcal{N}(0, 1)$  である(このような関数のことを、一般に Q 関数と呼ぶ)。リスク中立的行動とは、期待利得が最大化する行動を意味するため、

$$\mu^* = \underset{\mu}{\operatorname{argmax}} EG(\mu)$$

を満たす  $\mu^*$  を狙うことがリスク中立的な運動計画となる。 $\mu^*$  を基準点として、より値の大きな終点位置を狙えばリスク選好的、より値の小さな終点位置を狙えばリスク回避的と定義する。

## 2.4 対戦の最適な方策の導出

2.2 における実験教示より、対戦グループのみ「合計得点を最大化せよ」と教示されていないことがわかる。すなわち、対戦グループのみ教示の意味がことなり、あくまで仮想の相手と勝つことが課題となる。仮想の相手に勝つ運動計画を議論するために、期待利得の分散を計算する。上記の動作のばらつきの分布、利得関数の元、

$$\operatorname{Var}[EG(\mu)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)^2 \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) dx - [EG(\mu)]^2$$

として期待利得の分散が計算可能である。右辺第一項も解析的に計算可能であり、

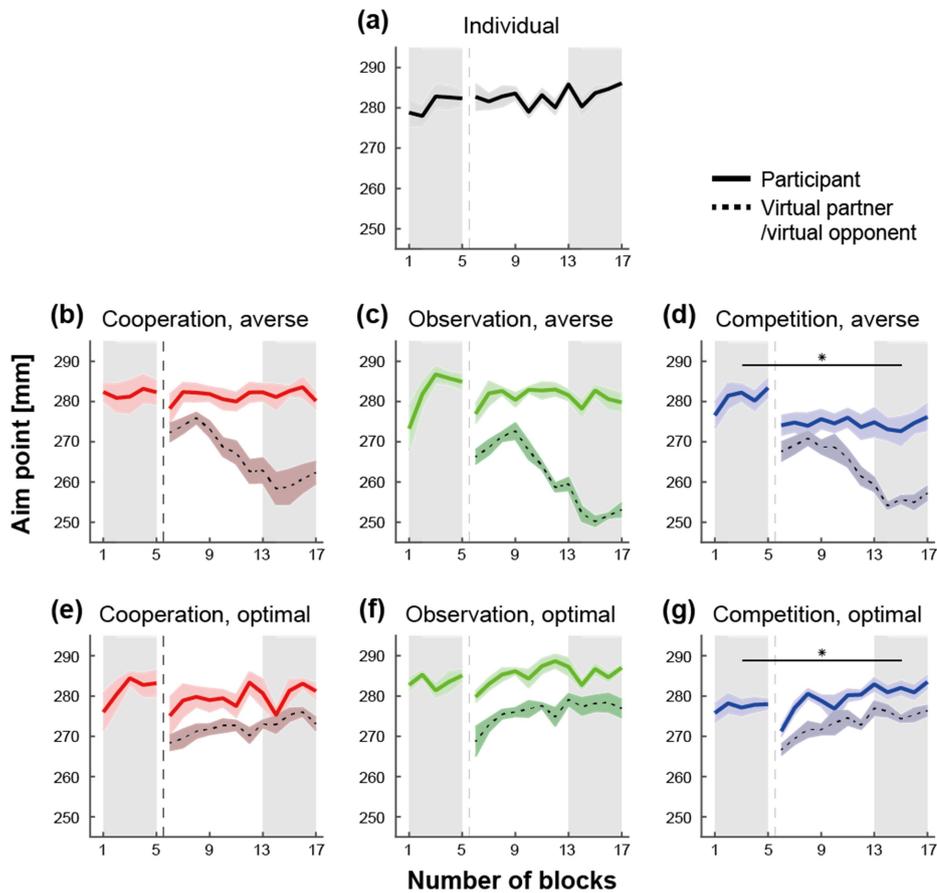
$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)^2 \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) dx = & (a_1^2(\sigma^2 + \mu^2) + 2a_1 a_0 \mu + a_0^2) \left( Q\left(\frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right) - \left( Q\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) \right) \right) \\ & + \frac{2a_1^2 \mu \sigma + 2a_1 a_0 \sigma}{\sqrt{2\pi}} \left( \exp\left(\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(\frac{(x_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \right) \\ & + \frac{a_1^2 \sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{x_0 - \mu}{\sigma} \exp\left(\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) - \frac{x_1 - \mu}{\sigma} \exp\left(\frac{(x_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \right) \end{aligned}$$

である。ここから期待利得の分散を計算可能である。

上記で計算した期待利得、そして期待利得の分散を利用して、ばらつきを考慮した上での被験者の真の狙う位置  $\mu_p$ 、仮想の相手が狙い位置  $\mu_o$  の差を下記のように算出可能である。

$$d' = \frac{G(\mu_p - \mu_o)}{\left(\text{Var}[G(\mu_p)]^{\frac{1}{2}} + \text{Var}[G(\mu_o)]^{\frac{1}{2}}\right)/2}$$

この  $d'$  は意思決定の分野においてしばしば利用される指標であり、本研究においてもばらつきを考慮した上での被験者と仮想の相手の得点差を表す指標として利用した。 $d'$  を利用することにより、対戦グループの課題は「 $d'$  を最大化すること」とみなすことが可能となる。



### 3. 結果

図 4: 各グループにおける、被験者間の終点位置の平均値(実線)と標準誤差(実線の周りにプロットされている透明度の高い領域)。パネル(b-g)における点線と周りの領域は、各々仮想の相手の終点位置とその標準誤差を表す。(a): 1人で課題を行ったグループ。(b): 弱い相手と協力課題を行ったグループ。(c): 弱い相手と観察課題を行ったグループ。(d): 弱い相手と対戦課題を行ったグループ。アスタリスクは、ベースライン 5 ブロックと対戦課題の最後 5 ブロックとの終点位置の平均を比較した際の有意差を表す(paired t-test,  $p = 0.018$ ,  $d = 1.42$ )。d は Cohen's  $d$  であり、効果量を表す。(e): 強い相手と協力課題を行ったグループ。

(f): 強い相手と観察課題を行ったグループ。(g): 強い相手と対戦課題を行ったグループ。アスタリスクは、ベースライン 5 ブロックと対戦課題の最後 5 ブロックとの終点位置の平均を比較した際の有意差を表す (paired t-test,  $p = 0.041$ ,  $d = -1.11$ )。

第 1 に、各グループの終点位置の変化を検証した。特に、1 人で課題を行うベースライン 5 ブロックと、各課題の最後の 5 ブロックにおける終点位置の平均の差を検証した。図 3 に示すように、弱い相手ないしは強い相手との対戦において、終点位置の有意差が確認できた(弱い相手との対戦は  $p = 0.018$ 、強い相手との対戦は  $p = 0.041$ 、効果量や検定方法を図 3 のキャプションを参照)。図 3d は弱い相手との対戦であり、仮想の相手が徐々に低い得点を狙い始め、最後 5 ブロックでは確実に勝てるほどに低い得点を取るようになる(図 3d の点線)。このとき、終点位置はベースラインと比較して小さくなるように、すなわち低めの得点を狙うように運動が変容している様子がわかる。一方、強い相手との対戦においては、仮想の相手が常に被験者の最適な終点位置を狙うため(図 3d の点線)、最後 5 ブロックにおいても勝つ確率は非常に低い。このとき、終点位置はベースラインと比較して大きくなるように、すなわち高めの得点を狙うように運動が変容している様子がわかる。その他のグループでは終点位置の有意な変化は確認できず、終点位置の変化を誘発するためのインタラクション様式は対戦のみであることが明らかになった。

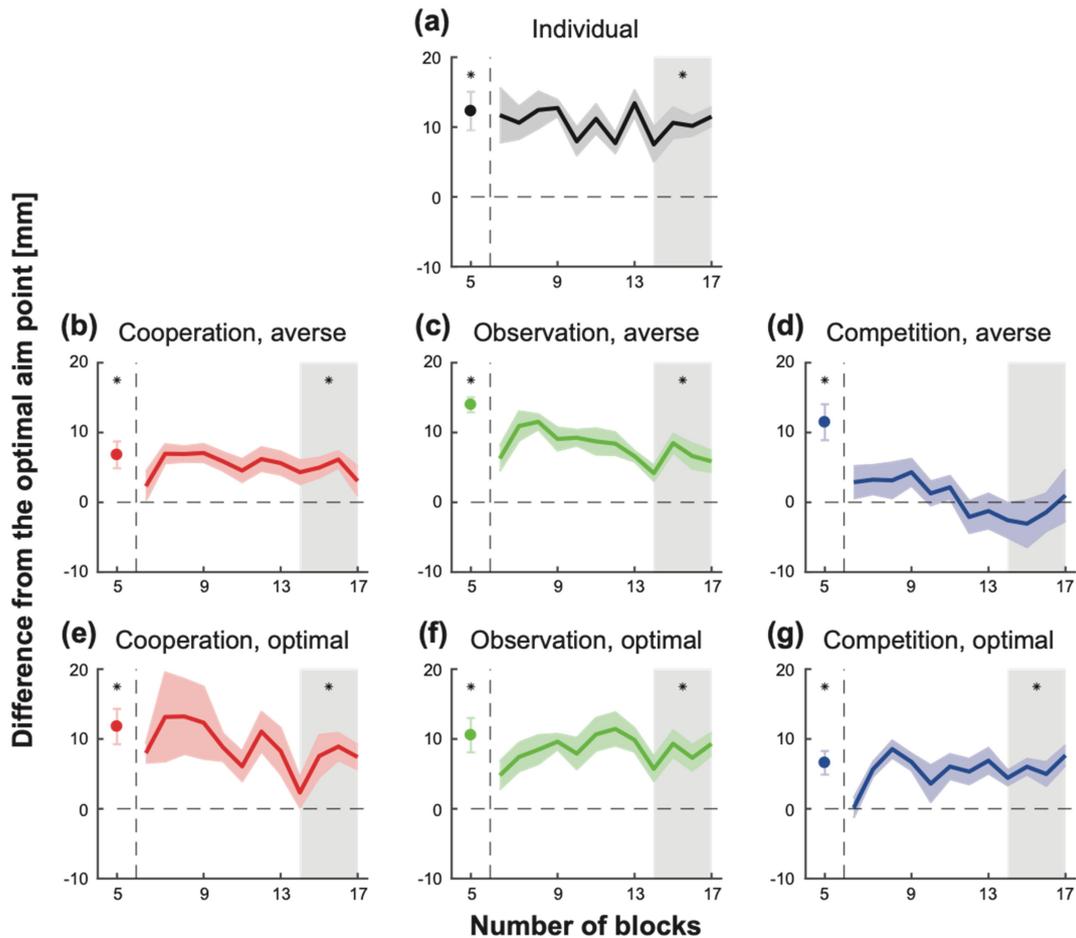


図 5: 各グループにおける、最適な狙い目からの誤差。正の値であればリスク選好的、負の値であればリスク回避的であることを表す。実線は被験者間の誤差の平均値、実線の周りにプロットされている透明度の高い領域は標準誤差を意味する。先行研究と同様に、ベースラインは全てのグループにて有意差が確認でき ( $p < 0.023$  [corrected])、最後 5 ブロックにおいてアスタリスクが示されている場合は  $p = 0.0023$  [corrected] にて最適から有意な差が見いだされ、リスク選好的な行動を示すことが示された。(b): 弱い相手と協力課題を行ったグループ。(a): 1人で課題を行ったグループ。(c): 弱い相手と観察課題を行ったグループ。(d): 弱い相手と対戦課題を行ったグループ。最後 5 ブロックにおいて、最適な狙い目からの有意な差は確認されなかった ( $p = 0.62$  [corrected])。 (e): 強い相手と協力課題を行ったグループ。(f): 強い相手と観察課題を行ったグループ。(g): 強い相手と対戦課題を行ったグループ。

第 2 に、各グループにおける最適性の変化を検証した。図 5 に示すように、ベースラインは全てのグループにて有意差が確認でき ( $p < 0.023$  [corrected])、最後 5 ブロックにおいてアスタリスクが示されている場合は  $p = 0.0023$  [corrected] にて最適から有意な差が見いだされ、リスク選好的な行動を示すことが示された。一方、弱い相手と対戦課題を行ったグループのみ、最後 5 ブロックにおいて最適からの有意な差が見いだされなかった ( $p = 0.62$  [corrected])。すなわち、被験者はベースラインにおいてリスク選好的な行動を示すのみならず、多くのインタラクション様式では経験した後も継続的にリスク選好的な行動を示し続ける。一方、弱い相手との対戦を行うことにより、最適なリスク中立的な終点位置へと運動するように運動計画が変容していることを意味する。

これまでの解析により、弱い相手との対戦により、リスク選好的な運動計画から期待利得が最大化するような最適な運動計画へと変容することがわかった。しかしながら、対戦課題における課題は相手に勝つことであり、得点を最大化することではない。したがって、被験者が利得最大化の観点からは最適な運動計画を行っているとはいえ、対戦課題における最適な運動計画を行っているとは限らない。したがって、以下では対戦課題における被験者の最適性を議論する。

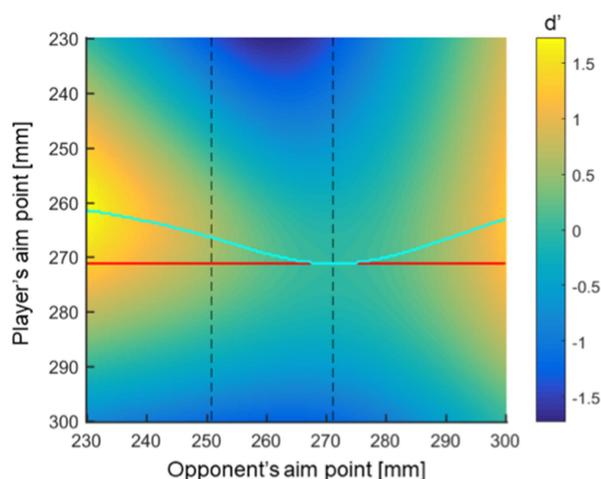


図 6:  $d'$  の概要と実際の結果。横軸は仮想の相手の狙い目を表し、縦軸は被験者の狙い目を表している。水色の実線は  $d'$  が各々の仮想の相手の狙い目に対して最も  $d'$  が大きくなる最適な戦略を意味する。赤線は、

計算に用いた運動のばらつきにおいて、期待利得が最大化する最適な狙い目を意味する。

図 6 は前述した  $d'$  を表している。運動のばらつきは被験者間の平均とし、仮想の相手のばらつきも同じ値であることを想定している。青色に近いほど  $d'$  が負の方向に大きくなり、勝てない戦略となる(例えば被験者が 230mm[70 点程]を狙い、仮想の相手が 265mm[80 点程]を狙う場合、被験者に勝ち目はない)。一方、黄色に近いほど  $d'$  が正の方向に大きくなり、勝てる戦略となる(先程の例において、被験者と仮想の相手の狙い目を逆転させると、同様に被験者はほぼ 100%勝つことができる)。したがって、横軸のとある値に対し、最も  $d'$  が高くなる線を描けば、被験者は最適な戦略を取り続けていることを意味する。図 6 中の水色の実線がこの最適な戦略を表している。加えて、赤い実線は計算に利用した運動のばらつきに基づき、期待利得が最大化する狙い目を表している。2つを比較すると、仮想の相手が最適な狙い目を狙うとき(270mm 周辺の縦に引いたドット線)、最適戦略と期待利得最大化は一致する。しかしながら、仮想が実験と同様に低い得点を狙うとき(250mm 周辺の縦に引いたドット線)、最適戦略は期待利得が最大化する狙い目よりも得点が低い箇所を狙うことになる。すなわち、弱い相手との対戦においては、リスク回避的行動が最適になる。

#### 4. 考察

以上を要約すると、被験者は一貫してリスク選好的な行動を計画するものの(図 5a-c, 図 5e-g)、被験者は弱い相手と対戦することにより、期待利得が最大化するよう運動計画を変容させる(図 5d)。一方、弱い相手との対戦において、勝つための最適な戦略は、期待利得が最大化するよりも低い利得が得られるような運動計画を行うことである(図 6)。すなわち、被験者は弱い相手と対戦する際の最適戦略であるリスク回避的な行動よりもリスク選好的な行動を計画しており、リスク回避とリスク選好が互いにキャンセルされ、結果として利得最大化の観点からすると最適なリスク中立的行動を計画するようになっていることを意味する。

本研究により、他者とのインタラクション様式が運動計画に与える影響を明らかにした。ヒトとヒトとでインタラクションする課題ではまた異なる影響が確認できる可能性は否定できないものの、本研究では仮想の相手とのインタラクションを利用した。ヒトとヒトとでインタラクションを利用しなかった理由は下記の通りである。図 4、図 5 のように、被験者は通常リスク選好的な行動を示す。すなわち、リスク選好的な行動をとるヒトとリスク選好的な行動をとるヒトとが対戦をする状況のみしか考えることができない。本研究では協力、観察、対戦と 3 種類のインタラクション様式において、2 種類の相手の特性を用いてその影響を検証することが目的であった。ヒトとヒトの対戦とでは弱い相手との対戦が実現不可能である。したがって、仮想の相手とのインタラクションを研究対象とした。

#### 5. 結言

1. 緒言で述べたように、本研究の目的は、1) どのようなインタラクション様式が運動計画を最適なものへと変容できるか、2) 弱い相手との対戦により最適な運動計画が達成できるメカニズムはなにか、という問いに答えることである。1) については、図 5 より弱い相手との対戦のみが最適な運動計画へと変容できることを示した。2) については、図 6 より、弱い相手との対戦に勝つためにはリスク回避的行動が最適であるものの、我々の内在するリスク選好的な傾向と組み合わせることで、最終的には最適な運動計画となることを示した。

以上の結果より本研究では、弱い相手との対戦、特に仮想の弱い相手との対戦により運動計画の最適化が可能になり、1) あがりの克服との相乗効果による更なる実力の発揮、2) 失敗リスクとうつ病リスクの軽減、へ

の応用可能性が示された。

参考文献:

- Mesagno C, Beckmann J. (2017). Choking under pressure: theoretical models and interventions. *Curr Opin Psychol.* Aug;16:170-175
- Neiman, T., Loewenstein, Y. (2011). Reinforcement learning in professional basketball players. *Nat Commun* 2, 569
- Weigand S, Cohen J, Merenstein D. (2013). Susceptibility for Depression in Current and Retired Student Athletes. *Sports Health.* 5(3):263-266.
- Gouttebauge V, Aoki H, Kerkhoffs G. (2015). Symptoms of Common Mental Disorders and Adverse Health Behaviours in Male Professional Soccer Players. *J Hum Kinet.* 49:277-286.
- Wu, S.-W., Delgado, M. R., and Maloney, L. T. (2009). Economic decision-making compared with an equivalent motor task. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 6088-6093.
- Naber, M., Pashkam, M. V., and Nakayama, K. (2013). Unintended imitation affects success in a competitive game. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 20046-20050.
- Peng, W., and Hsieh, G. (2012). The influence of competition, cooperation, and player relationship in a motor performance centered computer game. *Comput. Hum. Behav.* 28, 2100-2106.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L., and Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Hum. Movement Sci.* 26, 867-891.
- Ota, K., Tanae, M., Ishii, K., and Takiyama, K. (2020). Optimizing motor decision-making through competition with opponents. *Sci. Rep.* 10:950.
- Tanae, M., Ota, K., Takiyama, K. (2021). Competition Rather Than Observation and Cooperation Facilitates Optimal Motor Planning
- Shadmehr, R., and Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *J. Neurosci.* 14, 3208-3224.
- Takiyama, K., Hirashima, M., and Nozaki, D. (2015). Prospective errors determine motor learning. *Nat. Commun.* 6:5925.
- O' Brien, M. K., and Ahmed, A. A. (2013). Does risk-sensitivity transfer across movements? *J. Neurophysiol.* 109, 1866-1875.
- Nagengast, A. J., Braun, D. A., and Wolpert, D. M. (2011b). Risk sensitivity in a motor task with speed-accuracy trade-off. *J. Neurophysiol.* 105, 2668-2674.
- Faisal AA, Selen LP, Wolpert DM. Noise in the nervous system. *Nat Rev Neurosci.* 2008 Apr;9(4):292-303.