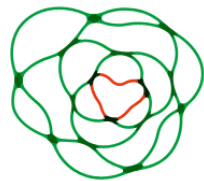


2021年3月4日

日本認知心理学会第18回大会WS「古典的な実験課題を用いた認知モデリング」

心的回転課題の認知モデリング

——傾いた文字の正像・鏡像判断における 混合プロセス仮説の検証



武藤 拓之 (Hiroyuki Muto)

京都大学こころの未来研究センター

Japanese
Psychological
Research

THE JAPANESE PSYCHOLOGICAL ASSOCIATION

Japanese Psychological Research
2020

doi: 10.1111/jpr.12306

**Evidence for Mixed Processes in Normal/Mirror
Discrimination of Rotated Letters: A Bayesian Model
Comparison Between Single- and Mixed-Distribution
Models¹**

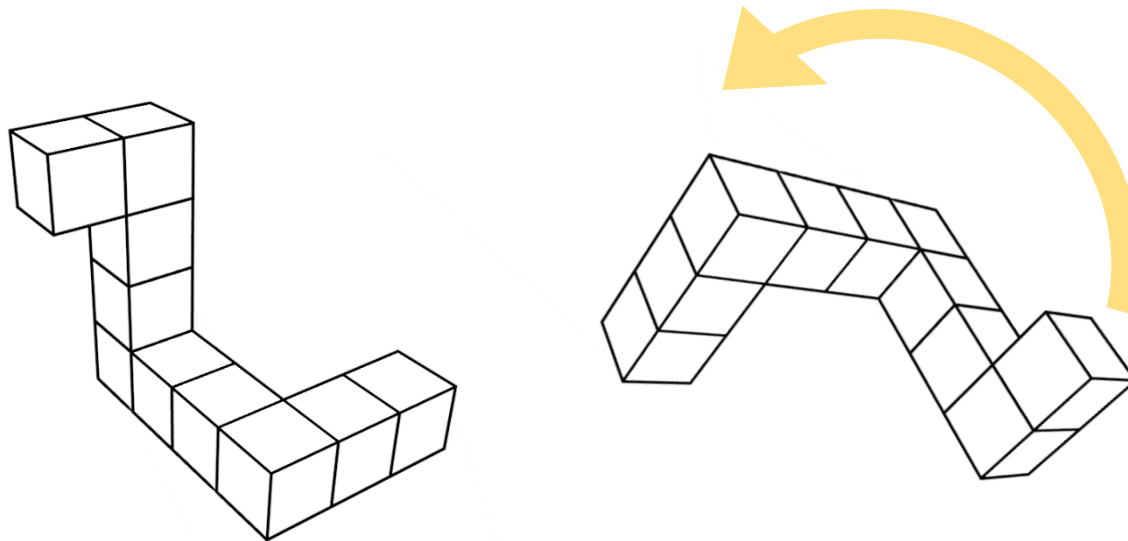
HIROYUKI MUTO*  Kyoto University

←この論文の話です。

背景

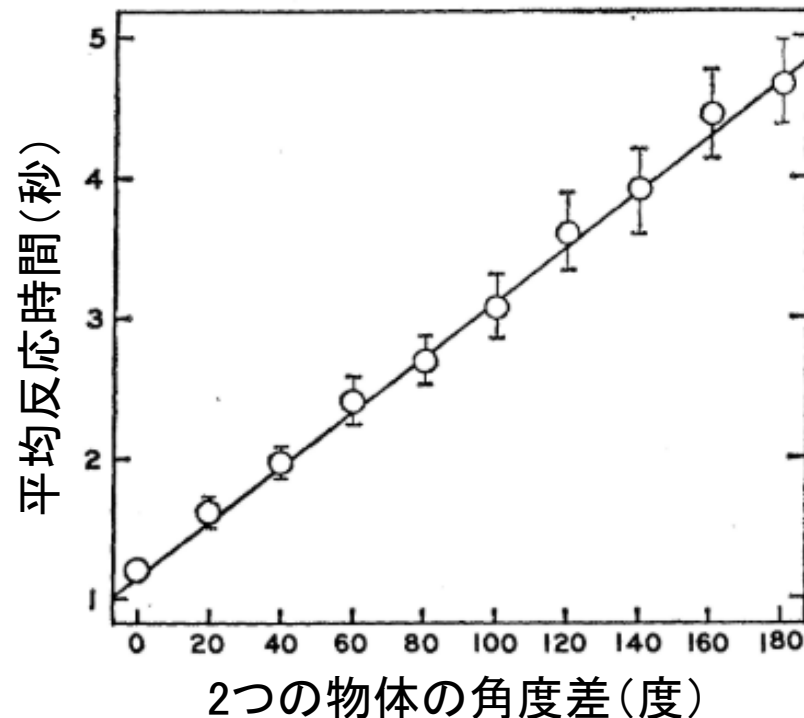
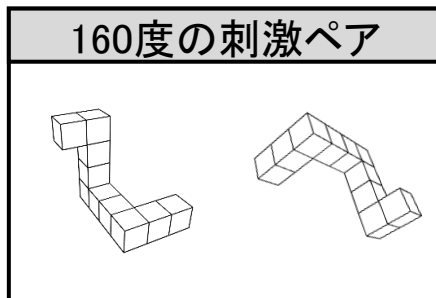
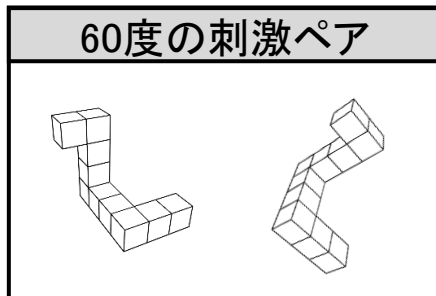
心的回転とは

次の2つの物体は、同じ物体か？異なる物体か？



頭の中で対象のイメージ（表象）を回転させること
= **心的回転** (mental rotation)

典型的な心的回転課題の結果

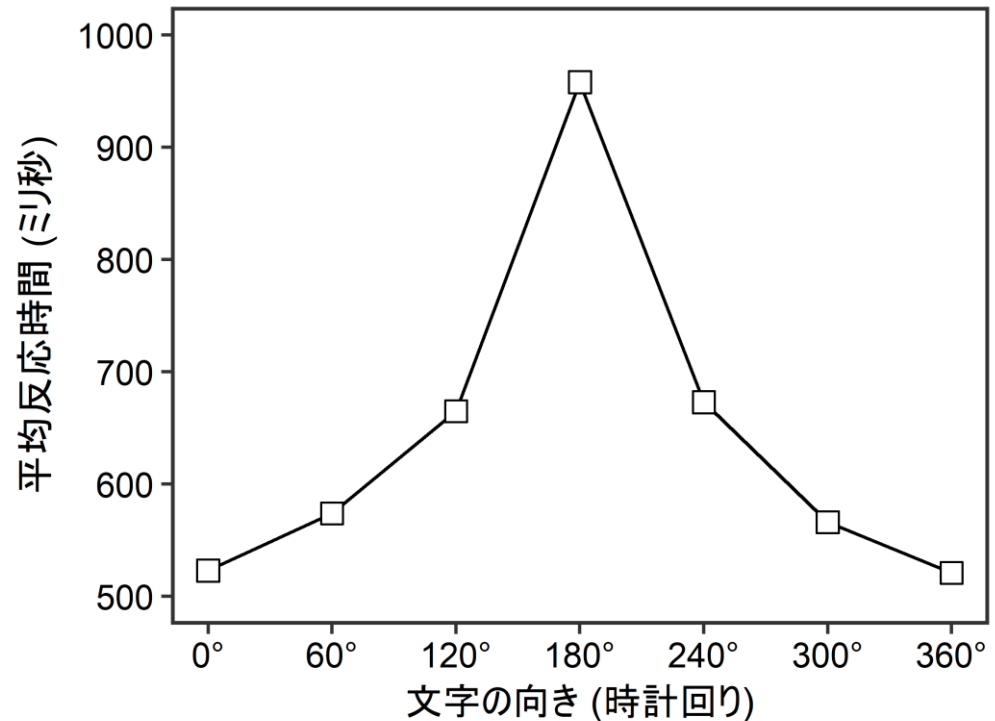
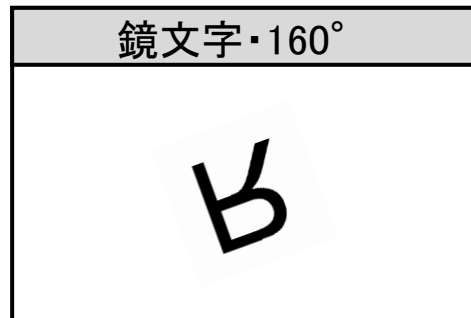
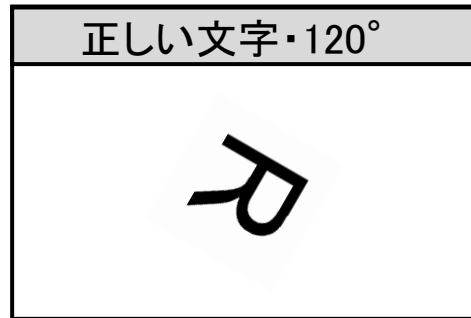


向きが異なる2物体の異同判断の平均反応時間は、
回転差が大きくなるにつれて**線形**に増加する。

(e.g., Shepard & Metzler, 1971; for a review, see Searle & Hamm, 2017)

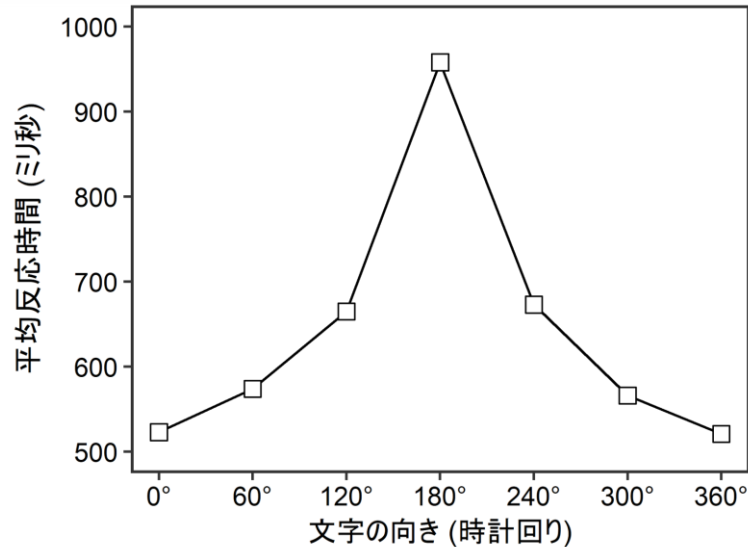
正像・鏡像判断の関数は線形にならない

(e.g., Cooper & Shepard, 1973)



傾いた文字の正像・鏡像判断でも心的回転が行われるが、
文字の向きと平均反応時間の関係は**線形にならない**。
→ なぜ？

混合プロセス仮説



角度：小



角度：大

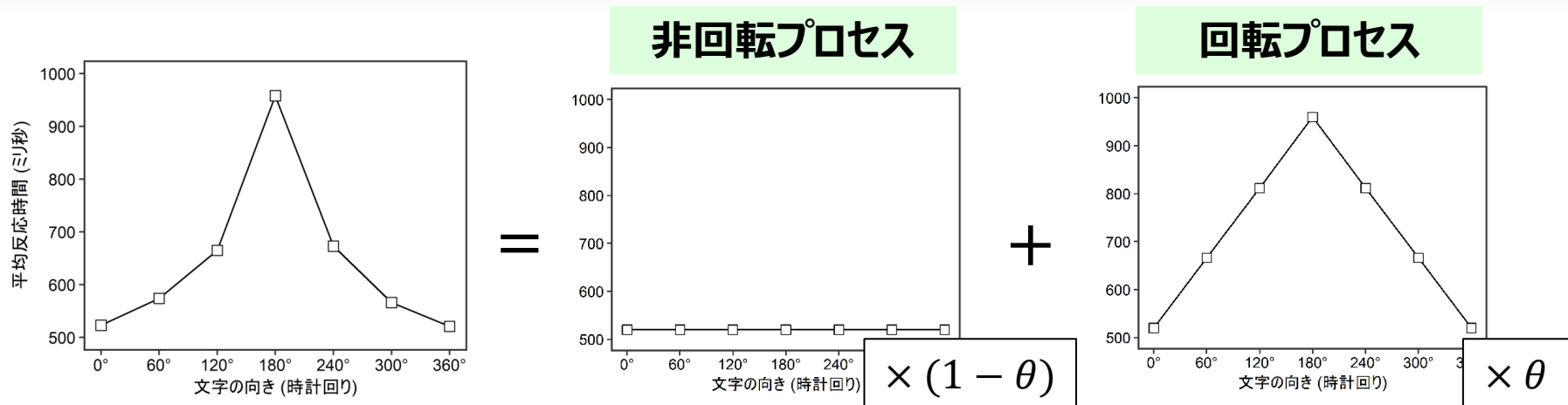


2つのプロセスが混合している可能性 (Cooper & Shepard, 1973)

- 角度が小さい時：心的回転しなくても分かる
- 角度が大きい時：心的回転が必要

→ Hammらによる数理モデル化
(Kung & Hamm, 2010; Searle & Hamm, 2012)

Hammらのモデルの仮定



1. 回転プロセスに要する時間は回転角度の一次関数となる。
2. 非回転プロセスに要する時間は文字の向きによらず一定。
3. 文字の向きが0°のときには心的回転は全く行われない。
4. 文字の向きが180°のときには常に心的回転が行われる。
5. ある試行で回転プロセスが用いられる確率（混合率）は、文字の向きが0°から180°に近づくにつれて単調に増加する。
6. 鏡像の場合はフリップに要する時間が加算される。 R Я

Hammらのモデル (1/2)

(Kung & Hamm, 2010)

【回転プロセス】

$$\mu_{rot} = \beta_{base} + \beta_{rate} \times \text{Angle} + \text{IsMir} \times \beta_{flip}$$

正像 = 0, 鏡像 = 1

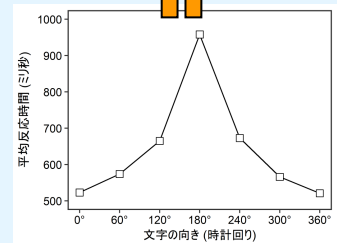
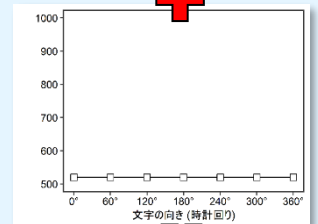
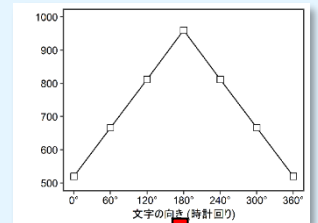
【非回転プロセス】

$$\mu_{nonrot} = \beta_{base} + \text{IsMir} \times \beta_{flip}$$

【平均反応時間の予測値】

$$\mu_{rt} = \theta \times \mu_{rot} + (1 - \theta) \times \mu_{nonrot}$$

混合率 θ : ある試行において回転プロセスが用いられる確率
仮定5より, θ は回転角度とともに単調増加する。



※観測変数を緑色, 大本のパラメータを青色で示している。

Hammらのモデル (2/2)

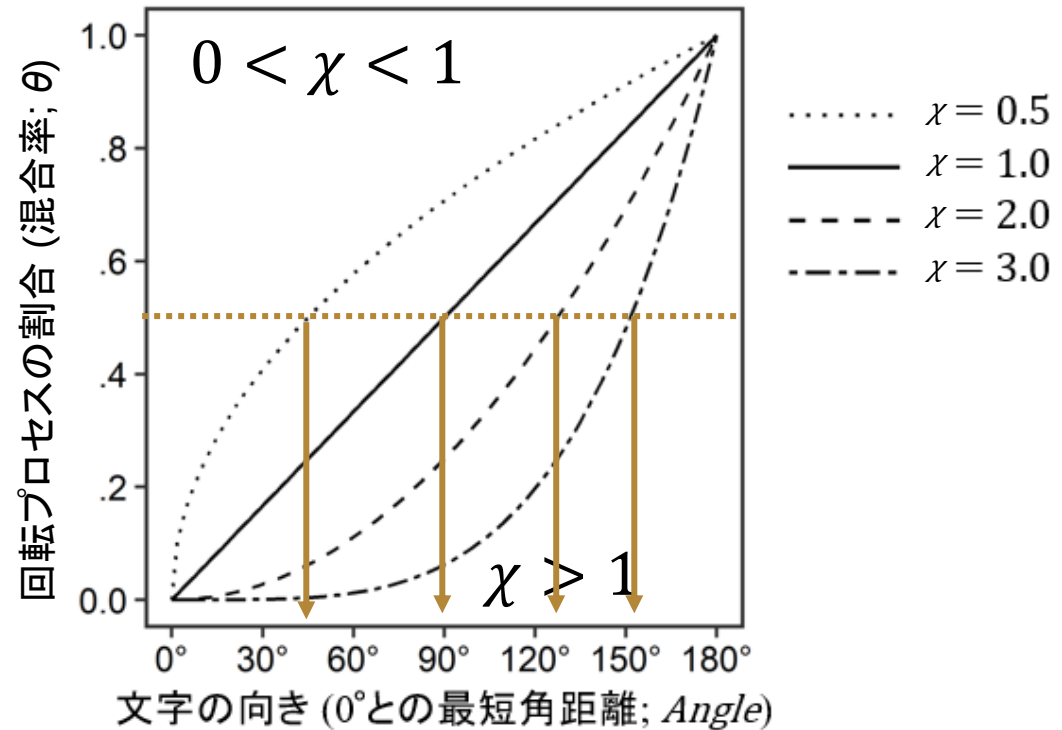
(Searle & Hamm, 2012)

【混合率の表現】

$$\theta = \left(\frac{\text{Angle}}{180} \right)^{\chi}$$

【閾値角】

$$\tau = 180 \times 2^{-\frac{1}{\chi}}$$



解釈・計算のために, $\theta = .5$ となる角度 (閾値角) の使用を提案する。

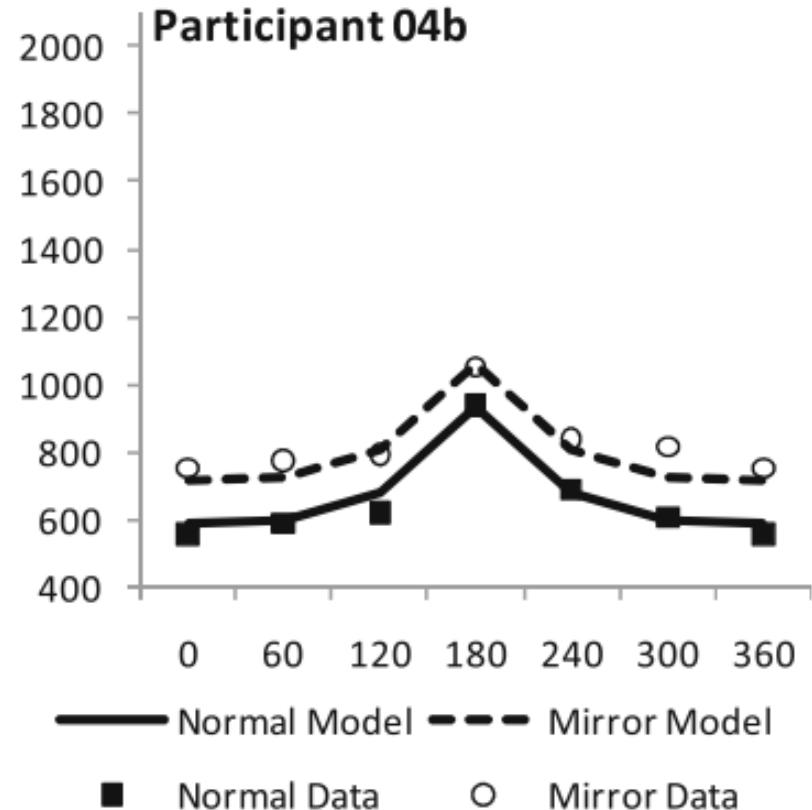
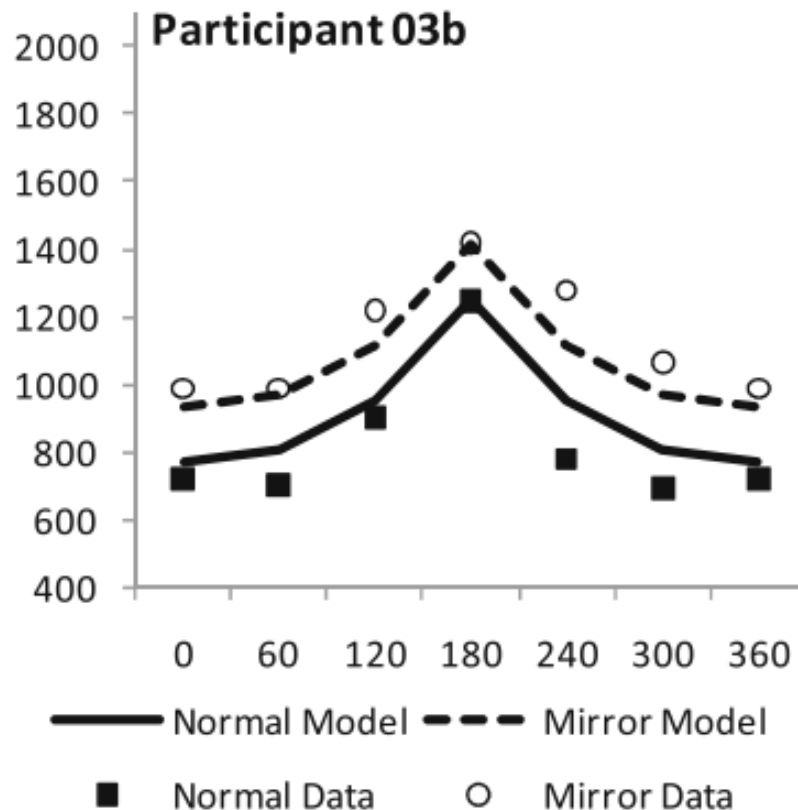
χ : 文字の傾きの増大に伴って,
混合率 θ がどのように増大するかを表現するパラメータ。

※間隔尺度水準では扱えない

平均値データへのあてはめの結果

Searle & Hamm (2012) の推定結果

- 各参加者の平均反応時間データにモデルを適用



問題点

■ このモデルの問題点

- このモデルは反応時間の平均値を
*Angle*の冪関数 + 定数で表しているだけ。

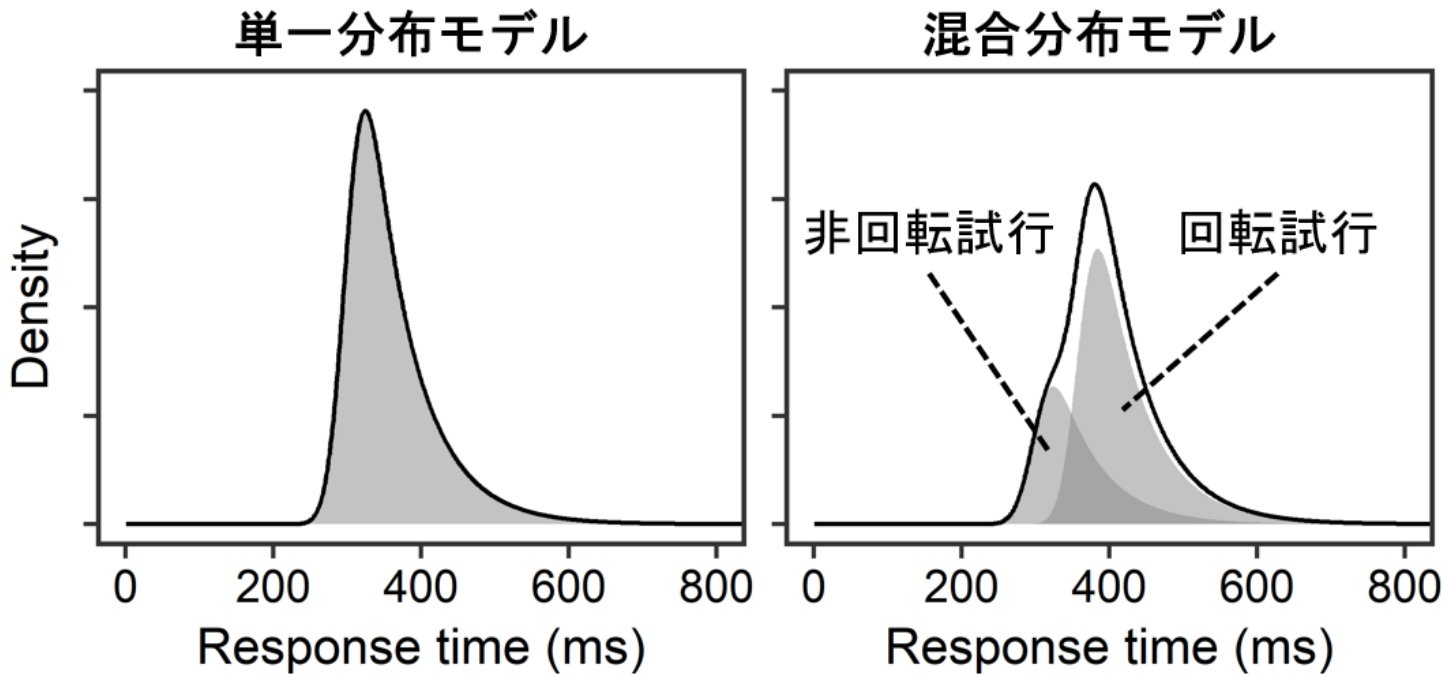
$$\mu_{rt} = \underbrace{(\beta_{base} + \beta_{flip} \times IsMir)}_{\text{定数}} + \underbrace{\frac{\beta_{rate}}{180} \times Angle^x}_{\text{冪関数}} + 1$$

- 「プロセスが試行ごとに切り替わる」以外の説明も可能
e.g., 心的回転は常に行われるが回転速度が一定ではない

→ 試行毎の反応時間データを用いてモデリングすることで、
2種類の試行が混在していることを直接検証可能

混合分布 vs. 単一分布

- 混合プロセス仮説が正しければ、
各角度条件の試行毎のRT分布は混合分布になるはず。



どちらもパラメータの値は同じ : $\text{Angle} = 120^\circ$ given $\beta_{\text{base}} = 300$, $\beta_{\text{rate}} = 0.5$, $\chi = 1$, $\sigma = 20$, $1/\lambda = 60$

本研究の主目的：

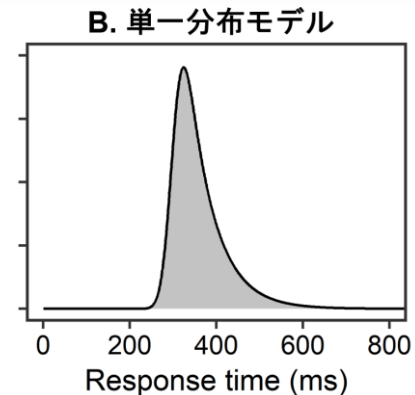
どちらのモデルがデータにより適合するかを明らかにする。

単一分布モデル vs. 混合分布モデル

【単一分布モデル】

$$\mu_{rt} = \theta \times \mu_{rot} + (1 - \theta) \times \mu_{nonrot}$$

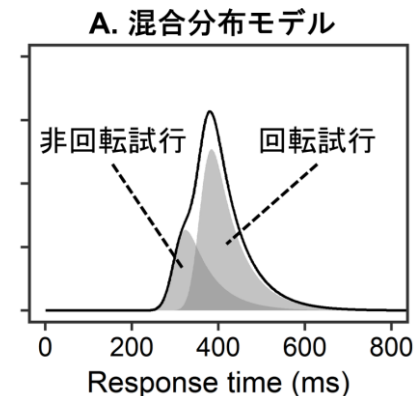
$$RT = \mu_{rt} + \varepsilon$$



【混合分布モデル】

$$\omega \sim \text{Bernoulli}(\theta)$$

$$RT = \begin{cases} \mu_{rot} + \varepsilon, & \text{if } \omega = 1 \\ \mu_{nonrot} + \varepsilon, & \text{if } \omega = 0 \end{cases}$$



誤差項 ε が従う分布として、正規分布 [$\varepsilon \sim \text{Normal}(0, \sigma)$] と
指数-正規分布 [$\varepsilon \sim \text{ExGaussian}(0, \sigma, \lambda)$] の2種類を仮定した。

周辺尤度 (ベイズファクター) とWAICを用いて両者を比較する。

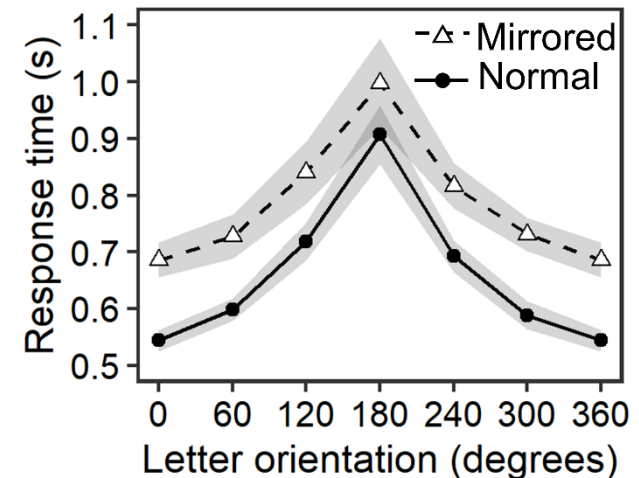
方法

実験方法

- 女性6名・男性6名が参加
(20—25歳, 全員右利き)
 - アルファベットのRとFとGを使用
 - 角度は0—359° (1°刻み) のランダム
 - 1人あたり合計1,000試行
 - 200—5000 msの範囲の正答データを分析
- ※ 武藤 (2018) のデータの再分析



正像？鏡像？



分析

- Stan (rstan 2.19.1) を使用し, 参加者ごとに各モデルを当てはめてパラメータをベイズ推定した。
- ほとんど無情報な確率分布を事前分布とした。
- 10万個のMCMCサンプルで事後分布を近似した。
(chains=4, warmup=500, thin=1)
- $\hat{R} < 1.01$, $n_{eff} \geq 17,919$ より収束したと判断した。



OSFHOME ▾

Data, analysis scripts, and materials use... Files Wiki Analytics Registrations C

Data, analysis scripts, and materials used in "Evidence for mixed processes in normal/mirror discrimination of rotated letters: A Bayesian model comparison between single- and mixed-distribution models"

Contributors: [Hiroyuki Muto](#)

Date created: 2019-11-03 06:08 PM | Last Updated: 2021-02-07 02:45 PM

Identifier: DOI 10.17605/OSF.IO/M5E7V

Category: Data

Description:

This page provides data, analysis scripts, and stimuli used by Muto (in press).

License: CC-BY Attribution 4.0 International

※データとスクリプトはOSFで公開している。

<https://doi.org/10.17605/osf.io/m5e7v>

結果

モデル比較の結果

対数周辺尤度
(データの得られやすさ)

WAIC
(予測の悪さ)

単一分布 混合分布

単一分布 混合分布

 指数-正規分布

−6,943 < −6,935

13,523 > 13,515

 正規分布

−12,778 < −11,778

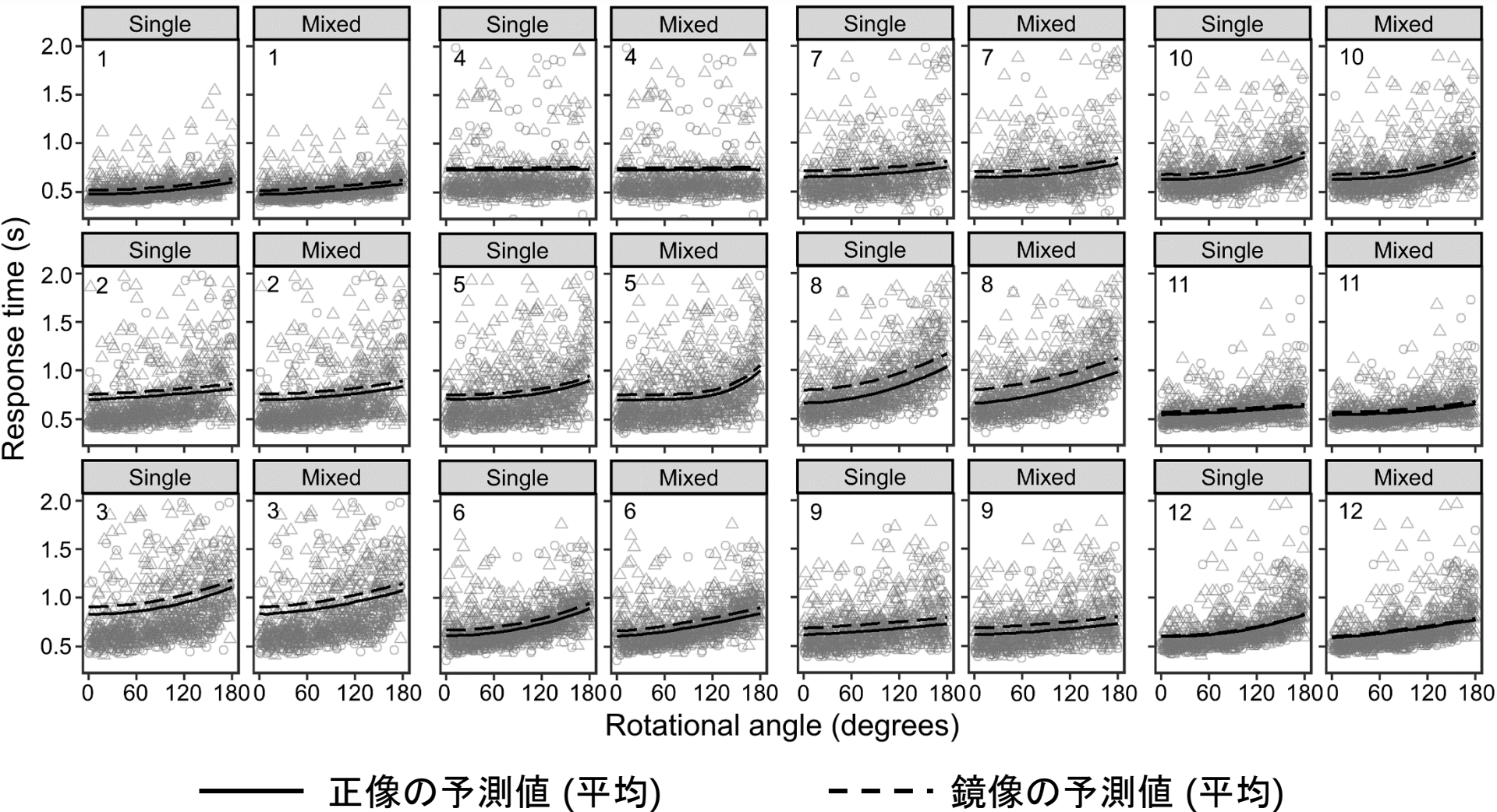
23,919 > 23,459

- 周辺尤度は単一分布よりも混合分布のほうが非常に高かった。
(指数-正規分布モデルで約2,800倍, 正規分布で約 1.9×10^{122} 倍)
- WAICも数値的には単一分布より混合分布のほうが低かった。
(少なくとも単一分布モデルに劣るとは言えない。)

= 混合プロセス仮説を支持する結果

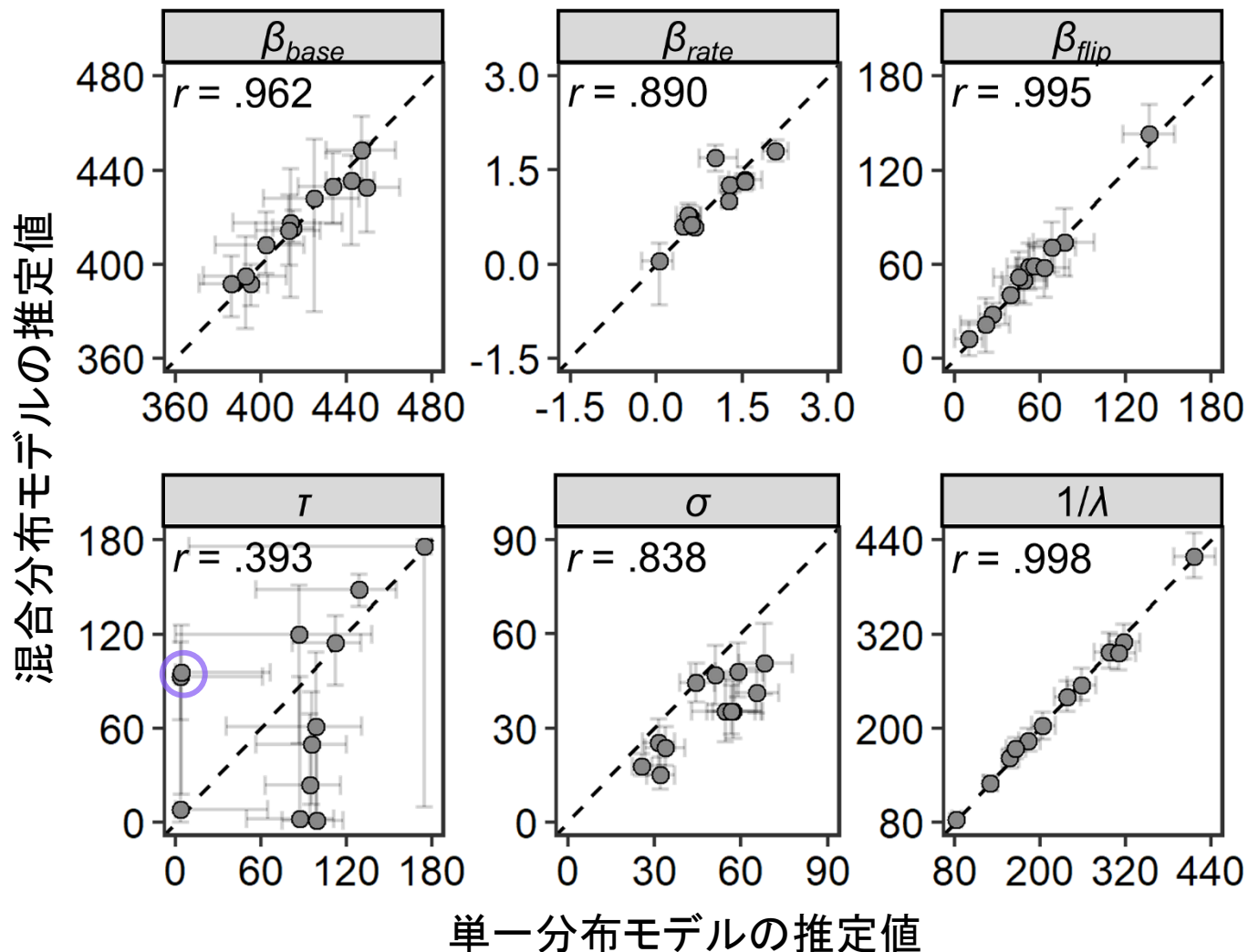
- 正規分布よりも指数正規分布のほうが当てはまりが良かった。

ローデータ & 指数正規分布モデルの事後予測



両モデルで非線形な関数を表現できることが確認された

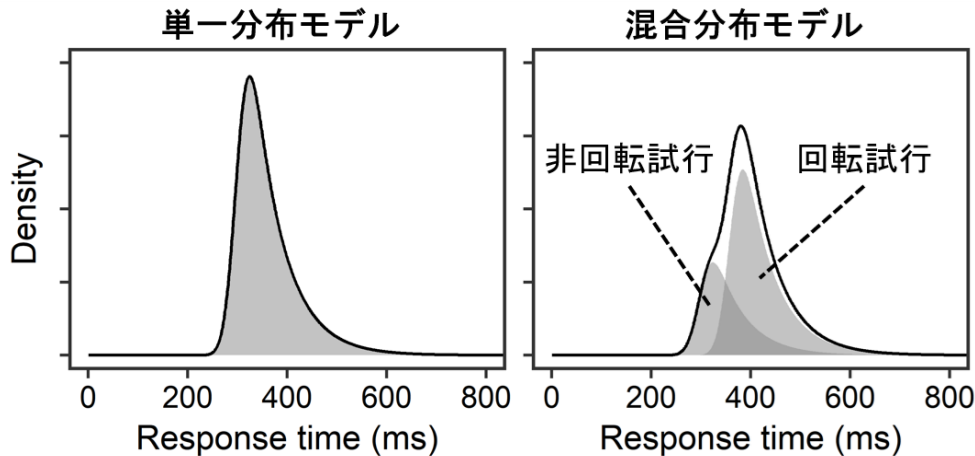
パラメータの推定値 (MAP・95%HDI) のモデル間比較



採用するモデルによって推定値が変わる場合がある

考察

結果のまとめ



- RTの試行間変動に注目して試行毎のデータを分析した。
- 傾いた文字の正像・鏡像判断データは、単一分布モデルよりも混合分布モデルでよく説明できる。
→ **混合プロセス仮説をより直接的に支持する証拠を提供**
- 似たモデルでもパラメータの推定結果が一致しない例を示した。
= パラメータの安易な解釈の危険性&モデル選択の重要性

混合プロセス以外の説明のみでは不十分

湾曲した関数形に対する他の説明 (Cooper & Shepard, 1973)

1. 心的回転の速度が文字の向きによって異なる

- 混合分布よりも単一分布と整合

2. 心的回転以外に要する時間が文字の向きの非線形関数

- 混合分布よりも単一分布と整合
- 文字の種類や方位を回答するだけの条件では必ずしも単調増加関数にならない (Corballis, Zbrodoff, Shetzer, & Butler, 1978)

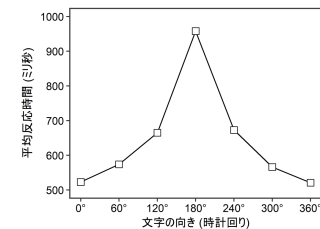
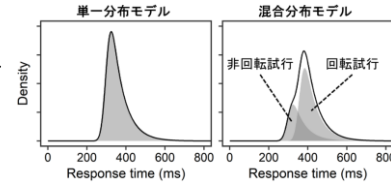
3. 文字が完全に倒立しているとき (180°)のみ、水平軸に対する心的回転が実行される。

- 180° 条件が稀な課題であっても湾曲パターンが得られた。

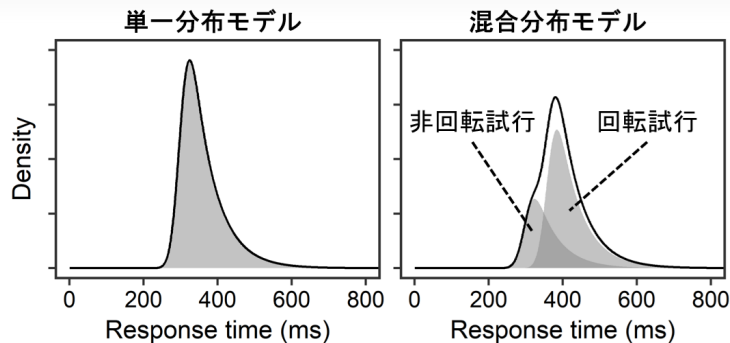
少なくとも混合プロセスを仮定しないと湾曲を説明できない

この研究のポイント

- データの取り方の工夫 (i.e., 実験操作) ではなく統計モデリングによって仮説検証を試みた。
 - 実験そのものは典型的な心的回転課題。
 - この後の発表者の話も基本的には典型的な課題に基づく。
 - 既にあるデータを使ってモデリング研究をすることも可能
 - もちろん, 実験操作と組み合わせることもできる
- 反応時間の関数形を量的に表現しようと試みた。
 - 単に適当な曲線を当てはめただけではない。
 - 「強い理論」を目指す第一歩？ (e.g., 竹澤, 2018)



まとめ



- RTの試行間変動に注目して試行毎のデータを分析した。
- 傾いた文字の正像・鏡像判断データは、
単一分布モデルよりも混合分布モデルでよく説明できる。
→ **混合プロセス仮説をより直接的に支持する証拠を提供**
- 似たモデルでもパラメータの推定結果が一致しない例を示した。
＝ パラメータの安易な解釈の危険性&モデル選択の重要性

本論文はオープンアクセスであり、

<https://doi.org/10.1111/jpr.12306>

ローデータ・分析スクリプト・刺激も全て公開済み。

<https://doi.org/10.17605/osf.io/m5e7v>