

# 注視から認知過程へ： ベイズ統計による次元選択・潜在集団の推定

Eye Movements to Cognitive Processes: Bayesian Dimension  
Selection and Latent Group Estimation

---

日高 昇平 (北陸先端科学技術大学院大学: JAIST)

Daniel Yurovsky (Stanford University)

Rachel Wu (University of Rochester)

*JCSS2012@Sendai, Dec.14, 2012*



# Developmentalists Study Eye Movements



# 注視による実験パラダイム

Fantz (1964)

- **仮説**: 特定の認知過程(注意・学習・記憶・その他)の働き
- **実験・データ**: 画像等の刺激提示、注視対象・時間など
- **分析**: 注視時間等の群間・条件間比較から、認知過程を検討

# 注視パラダイムの性質・問題点

- 多数の潜在要因[1,2]
  - 眼球運動の複雑性・視覚属性・高次認知過程・課題の目的など
- 注視時間～認知過程の関係[3,4]
  - 線形(注視時間 $\propto$ 馴化) vs 非線形
- 発達の個人差・多様性[5,6]

[1] Sirois S, Mareschal D (2004) Journal of Cognitive Neuroscience 16: 1352–1362.

[2] Hayhoe M, Ballard D (2005) Trends in Cognitive Sciences 9: 188–194.

[3] Hunter MA, Ames EW (1988) Advances in Infancy Research 5: 69–95.

[4] Roder BJ, Bushnell EW, Sasseville AM (2000). Infancy 1: 491–507.

[5] Marchman Va, Fernald A (2008) Developmental Science 11: F9–16.

[6] Mather E, Plunkett K (2010) Journal of Experimental Child Psychology 105: 232–42.

# 注視パラダイムの新たな分析法

- 多数の潜在要因[1,2]  
→ データ～モデル(実験刺激・設定, 認知的パラメタ)
- 注視時間～認知過程の関係[3,4]  
→ 非線形近似+ 次元選択
- 発達の個人差・多様性[5,6]  
→ データに基づき乳児群を適応的に推定

[1] Sirois S, Mareschal D (2004) Journal of Cognitive Neuroscience 16: 1352–1362.

[2] Hayhoe M, Ballard D (2005) Trends in Cognitive Sciences 9: 188–194.

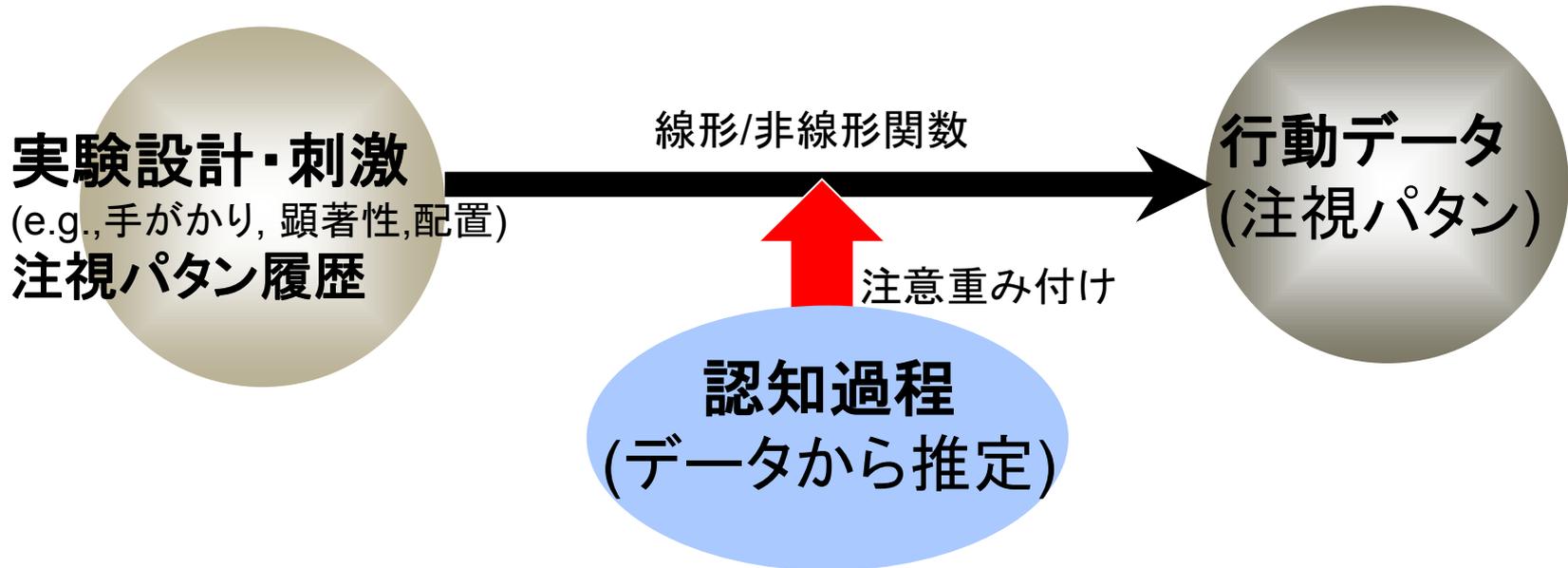
[3] Hunter MA, Ames EW (1988) Advances in Infancy Research 5: 69–95.

[4] Roder BJ, Bushnell EW, Sasseville AM (2000). Infancy 1: 491–507.

[5] Marchman Va, Fernald A (2008) Developmental Science 11: F9–16.

[6] Mather E, Plunkett K (2010) Journal of Experimental Child Psychology 105: 232–42.

# ベイズ統計のフレームワーク



$$P(\text{Model} | \text{Data}) \propto P(\text{Data} | \text{Model})P(\text{Model})$$

データ観測後の  
モデルの事後確率

モデルによる注視  
パタンの生成確率

モデルに関  
する事前確率

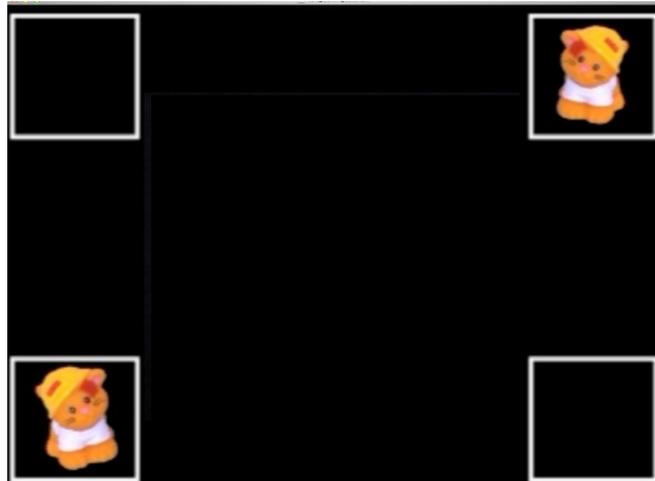
- ケーススタディ:

8ヶ月児の連想学習

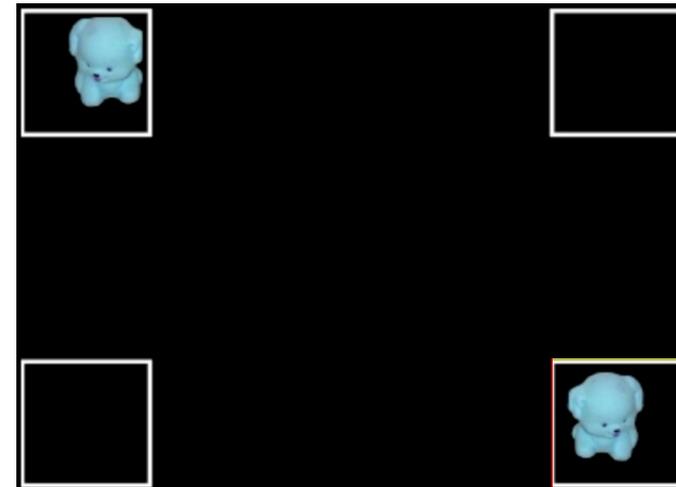
# 視聴覚刺激の連想学習実験

(Wu & Kirkham, 2010)

- 8ヶ月児(各30名 x 3条件)
- 視・聴覚刺激対を提示(計2対) ←
- 学習(6試行 x 4ブロック)後・音刺激のみでテスト  
4領域(□)への予測的注視時間を測定



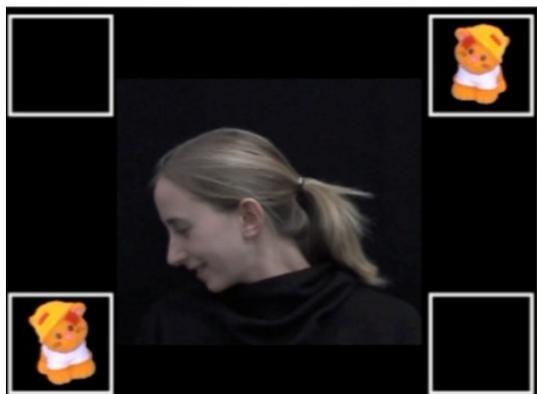
(A) 随伴音刺激: “bring”



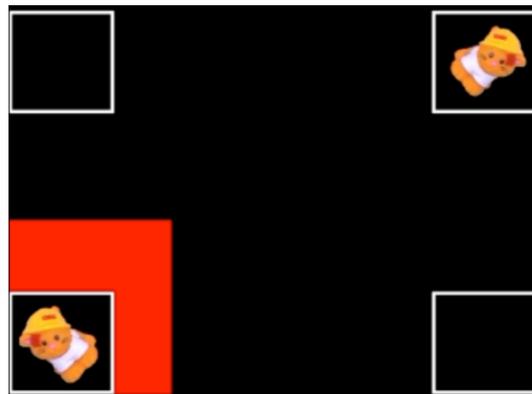
(B) 随伴音刺激: “boing”

# 注意手がかり条件 (学習試行時のみ)

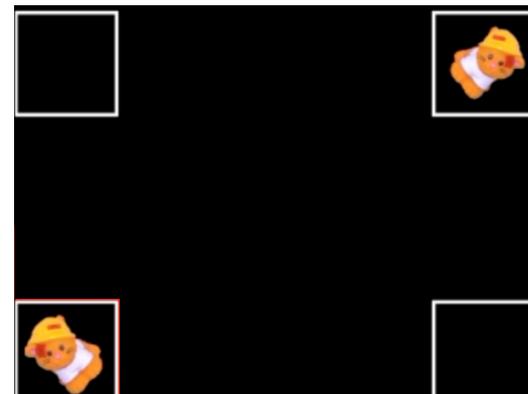
- どの注意手がかりが連想学習を促進するか?



顔  
(Face)



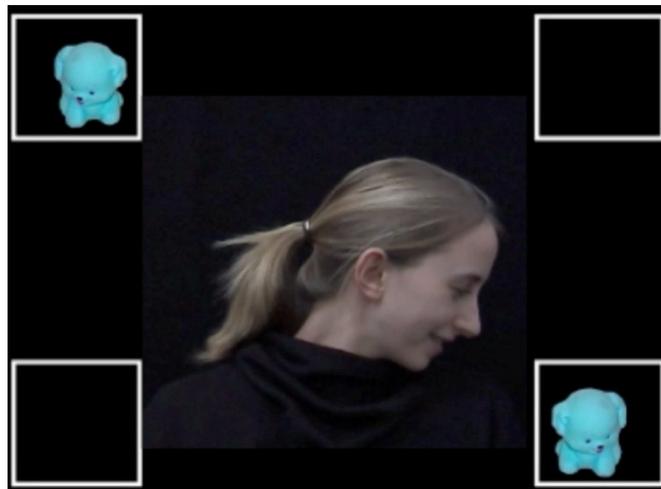
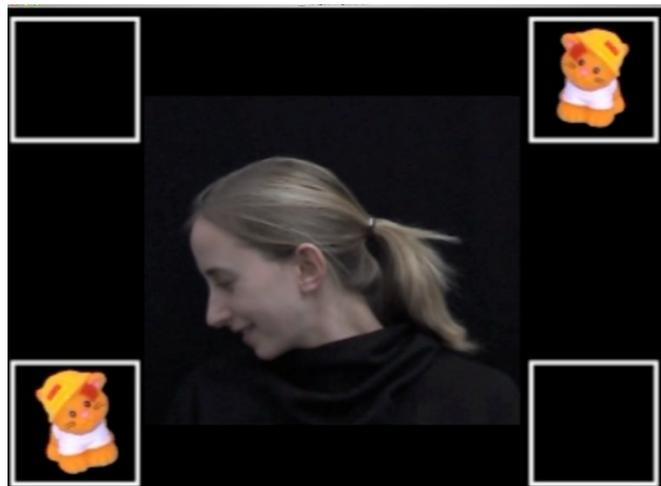
輪郭  
(Square)



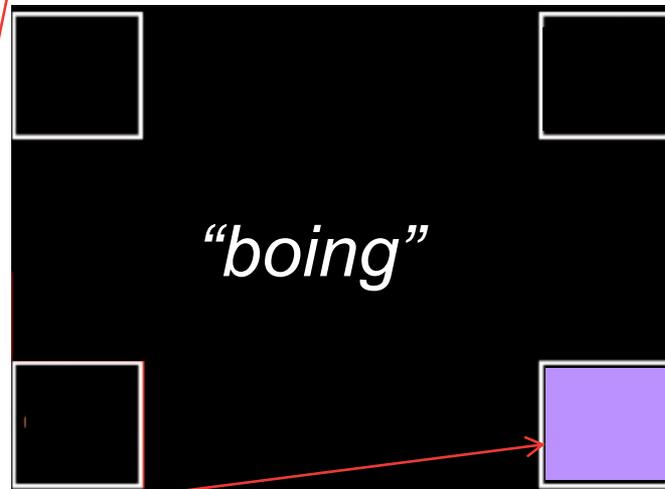
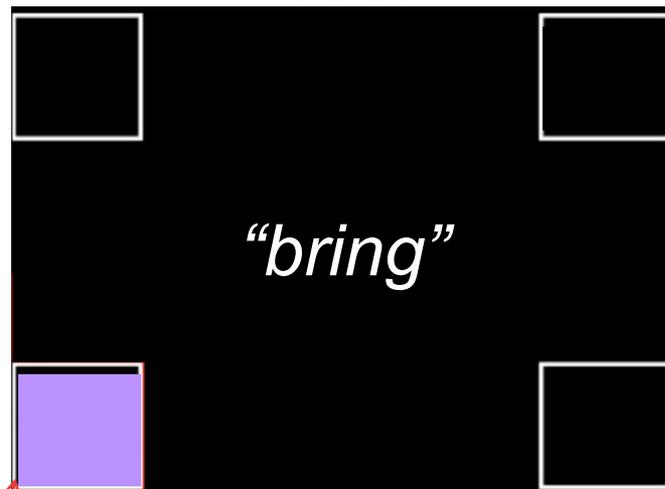
手がかりなし  
(No cue)

# 結果: 顔条件(Face)

## Familiarization



## Test

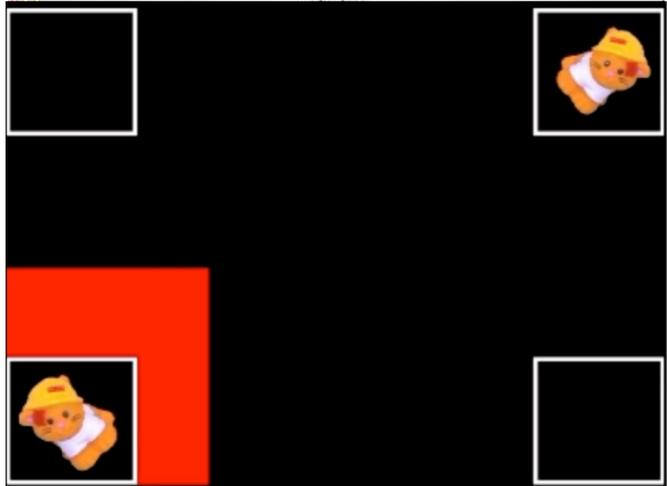


典型的な注視パターン

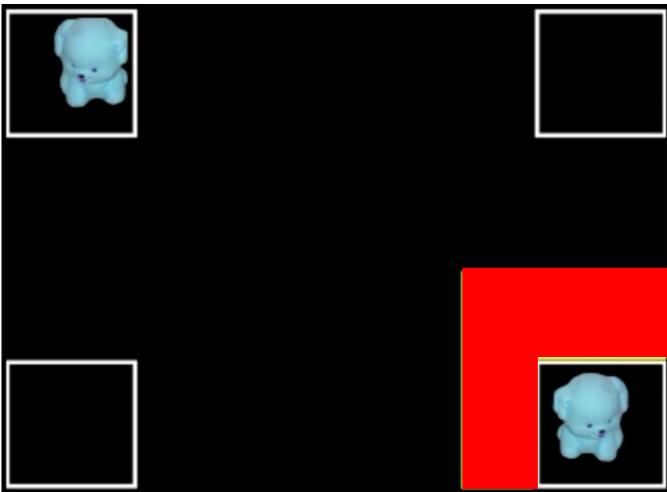
# 結果: 輪郭条件(Square)

## Familiarization

刺激A



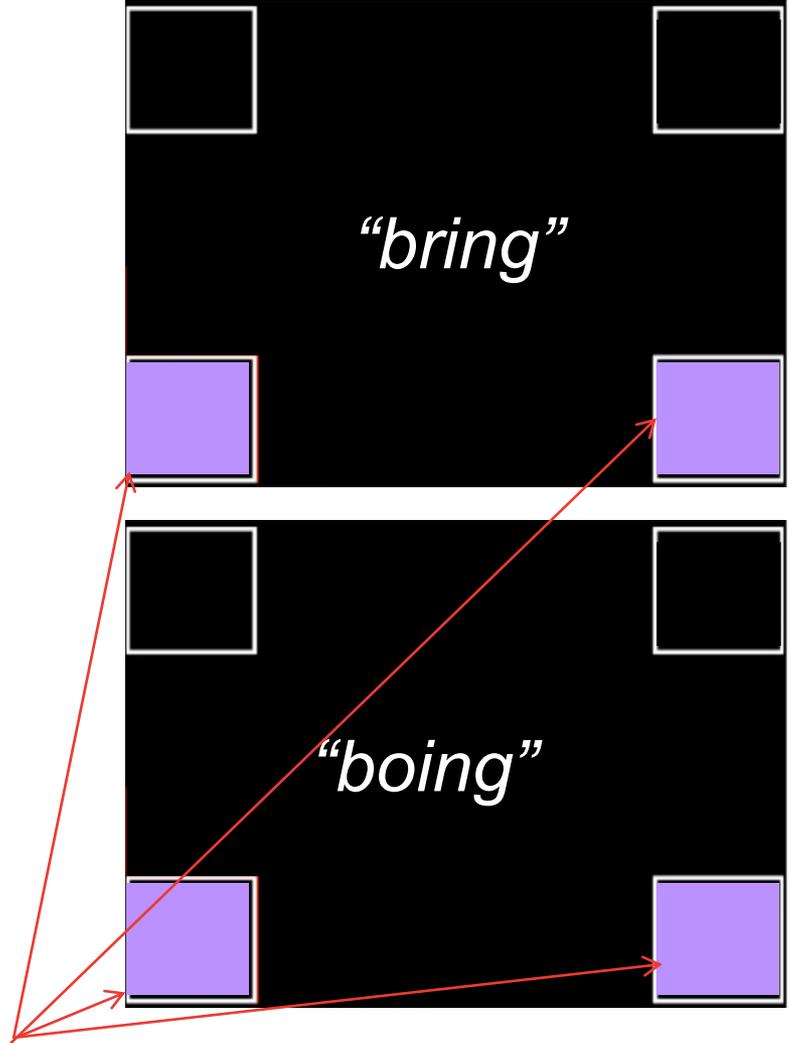
刺激B



## Test

“bring”

“boing”

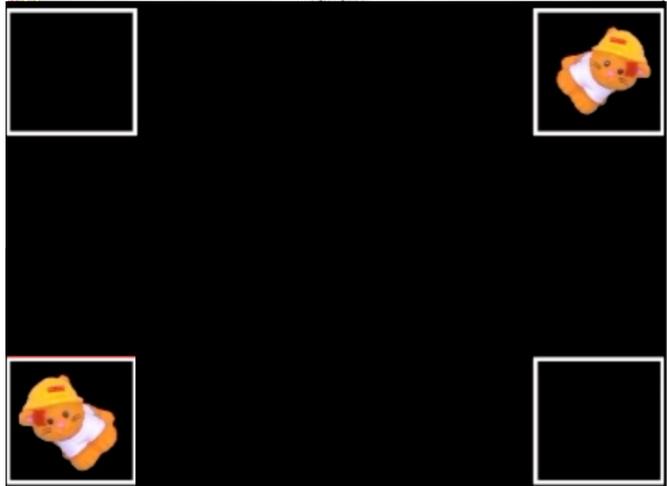


典型的な注視パターン

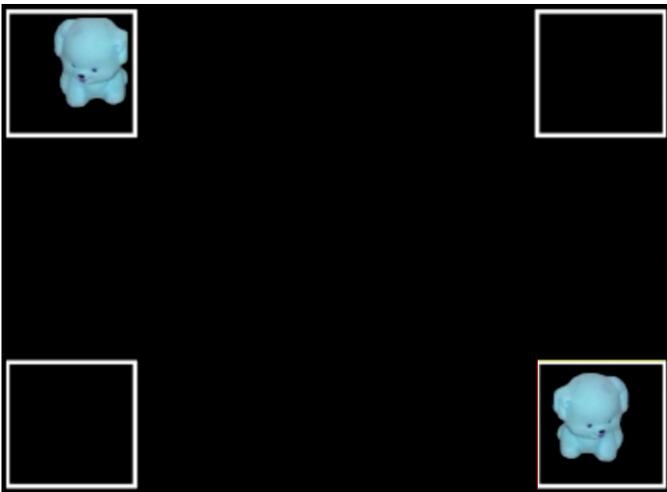
# 結果: 手がかりなし条件(No cue)

## Familiarization

刺激A

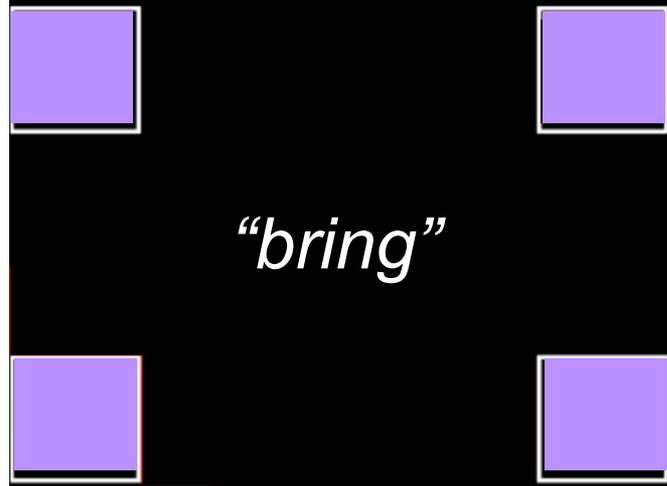


刺激B

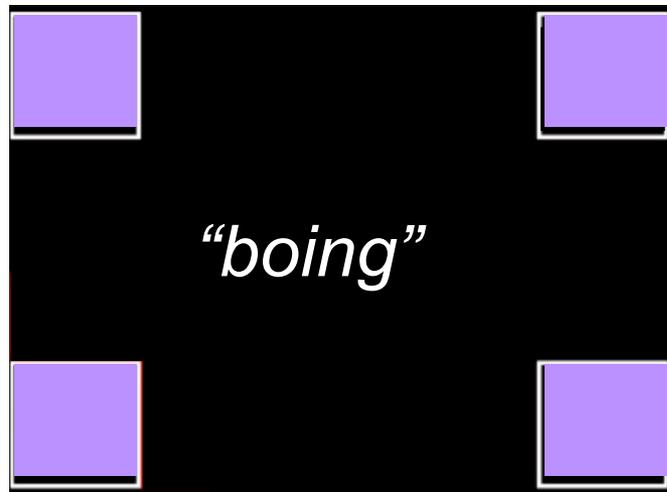


## Test

“bring”



“boing”



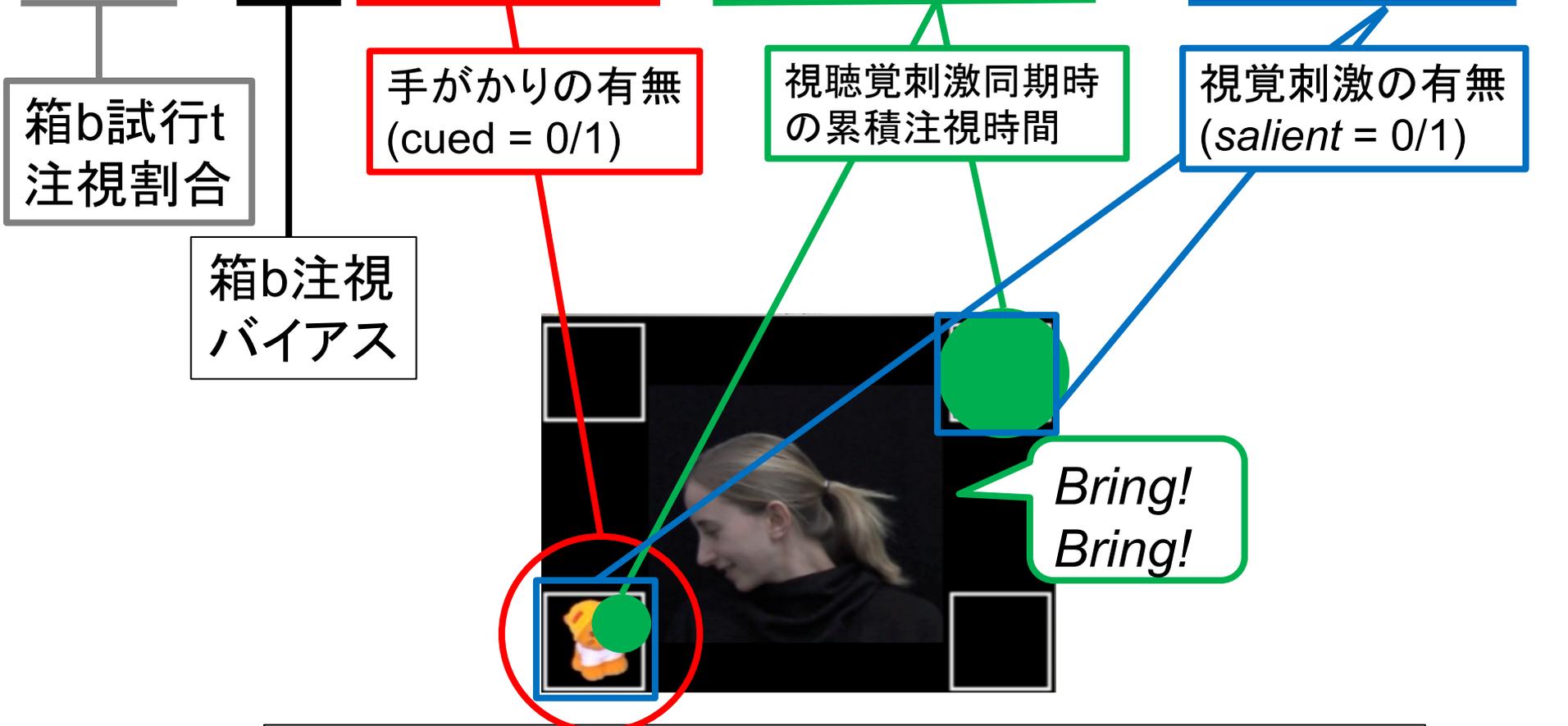
# Summary of Experiments

- 輪郭より顔は有意に連想学習を促進
  - 手がかりなしでは学習困難
- Follow-up questions
  - 手がかりの差(顔/輪郭)は質的/量的?
  - 1or多(発達)グループ?
- こういった疑問に対し多数の実験でなく、元データの再分析により答える

- モデリング

# 視聴覚刺激学習のモデル化 (1試行)

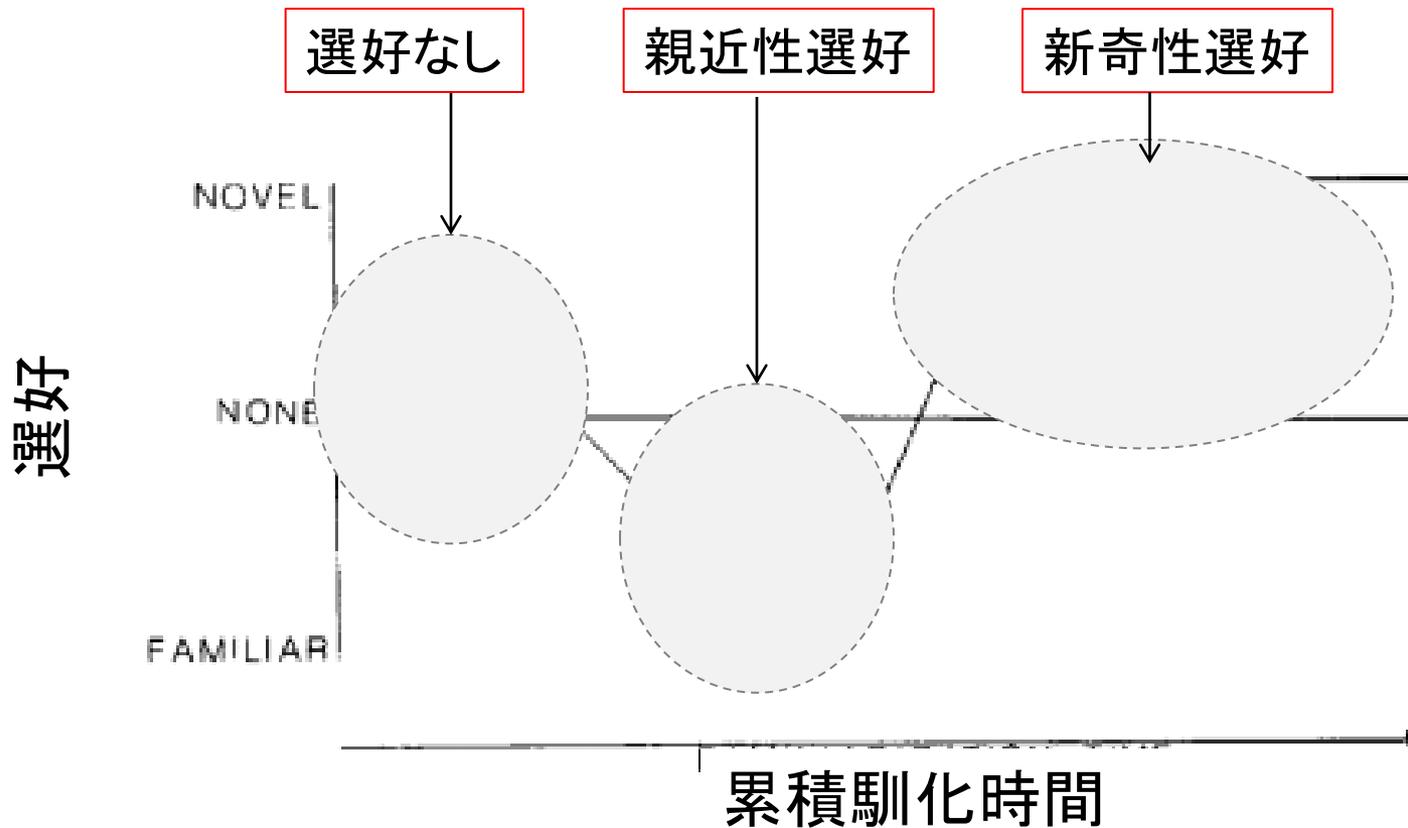
$$D(t,b) \sim f( W_b + C \times \text{cued}(t,b) + A \times \text{contingent}(t,b) + S \times \text{salient}(t,b) )$$



$\sim f(x)$ : リンク+誤差分布(Logit関数 + Dirichlet分布)  
{  $W_b$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $S$  }: 認知的パラメタ (データから推定)

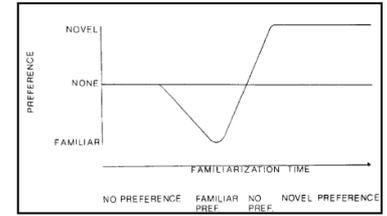
# “馴化～注視時間”は線形関数か？

(Hunter & Ames, 1988)



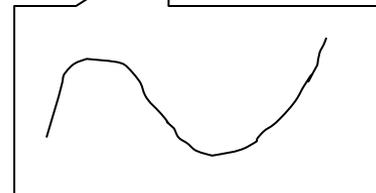
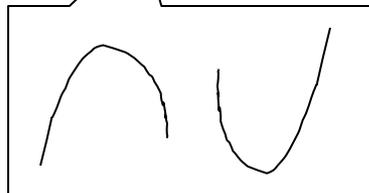
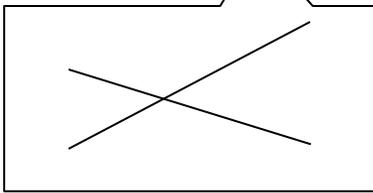
[Hunter MA, Ames EW (1988) Advances in Infancy Research 5: 69–95.]

# 馴化～注視時間の非線形性



$$D(t,b) \sim f( W_b + C \times cued(t,b) + \boxed{A \times contingent(t,b)} + S \times salient(t,b) )$$

$$= A_1 \times c(t,b) + A_2 \times c(t,b)^2 + A_3 \times c(t,b)^3 + \dots$$



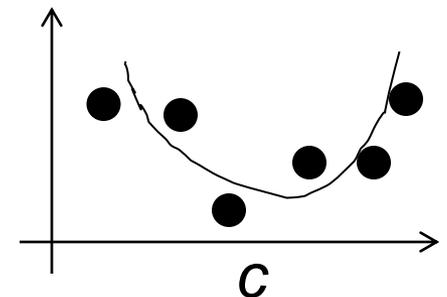
潜在的に  
可能な  
関数族

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i \sim \text{Normal}(0, \sigma_i) \\ \sigma_i \propto \sigma_i^{-1} \end{array} \right.$$

$\sigma_i$ は $A_i$ の重要さを表す

Sparseness prior  
による次元選択

contingent

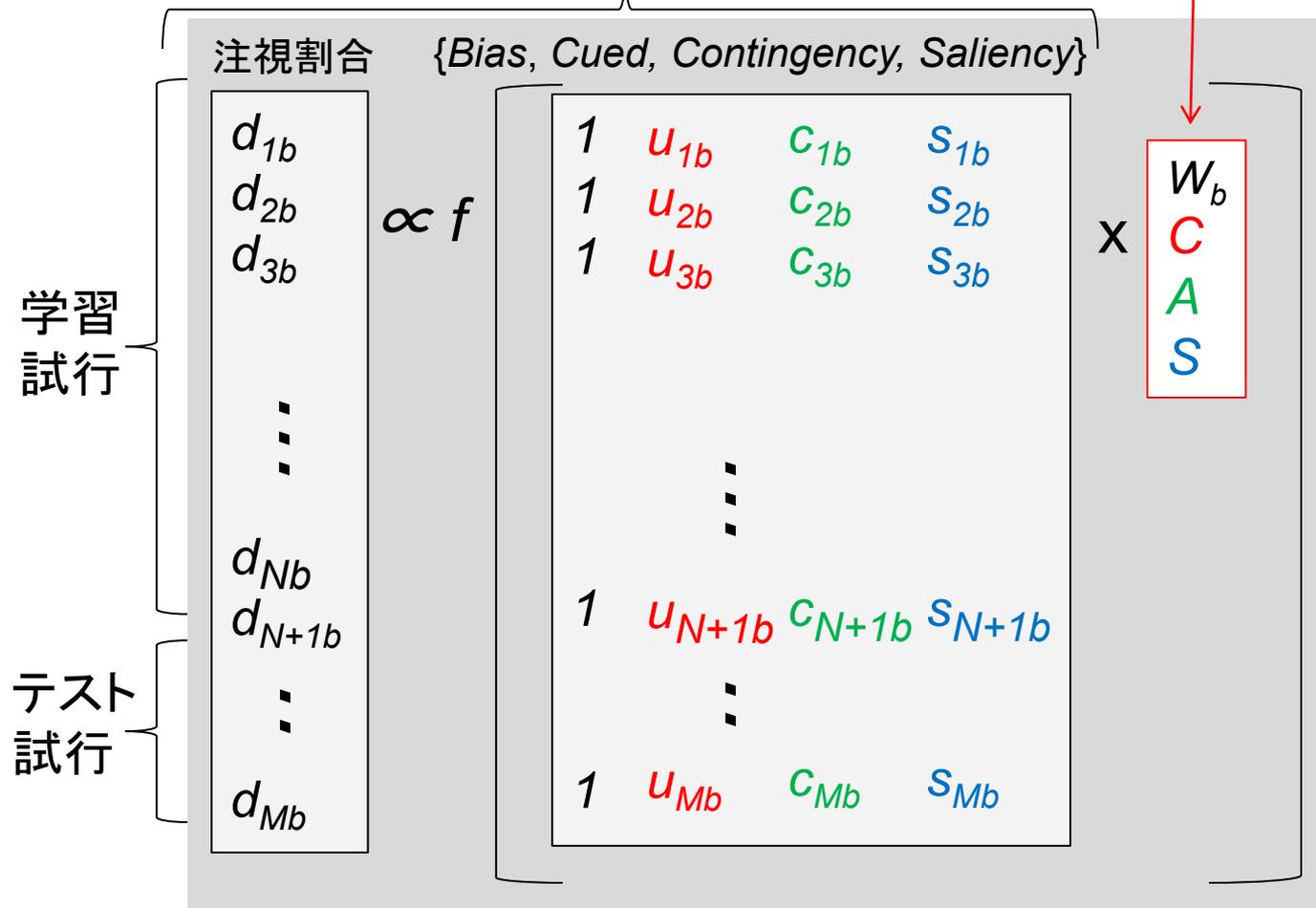


# 視聴覚刺激学習のモデル化 (1乳児)

$$D(t,b) \sim f( W_b + C \times cued(t,b) + A \times contingent(t,b) + S \times salient(t,b) )$$

乳児個人のデータ(+実験デザイン)

認知パラメタ



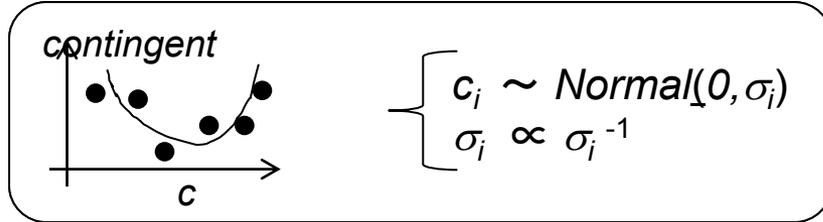


# 視聴覚刺激学習のモデル化 (まとめ&シミュレーション)

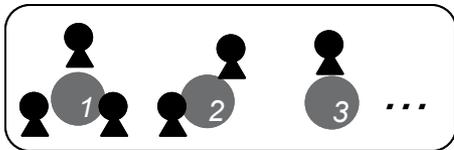
## 1. 多要因 → 一般化線形モデル

$$D(t,b) \sim f( W_b + C \times \text{cued}(t,b) + A \times \text{conting}(t,b) + S \times \text{salient}(t,b) )$$

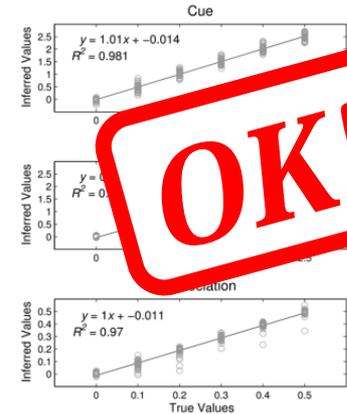
## 2. 非線形性 → k次多項式 + 次元選択



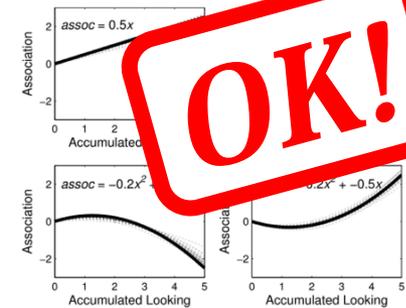
## 3. 発達の個人差 → 階層モデル(可変数群推定)



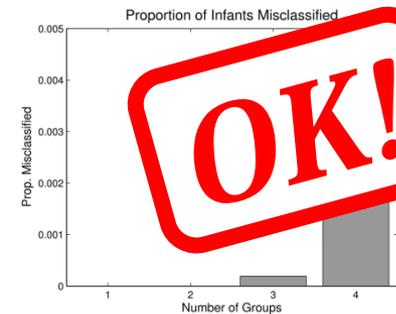
## シミュレーション1 複数要因の推定 ( $R^2 > 0.97$ )



## シミュレーション2 非線形効果検出 (誤差=2.5%)



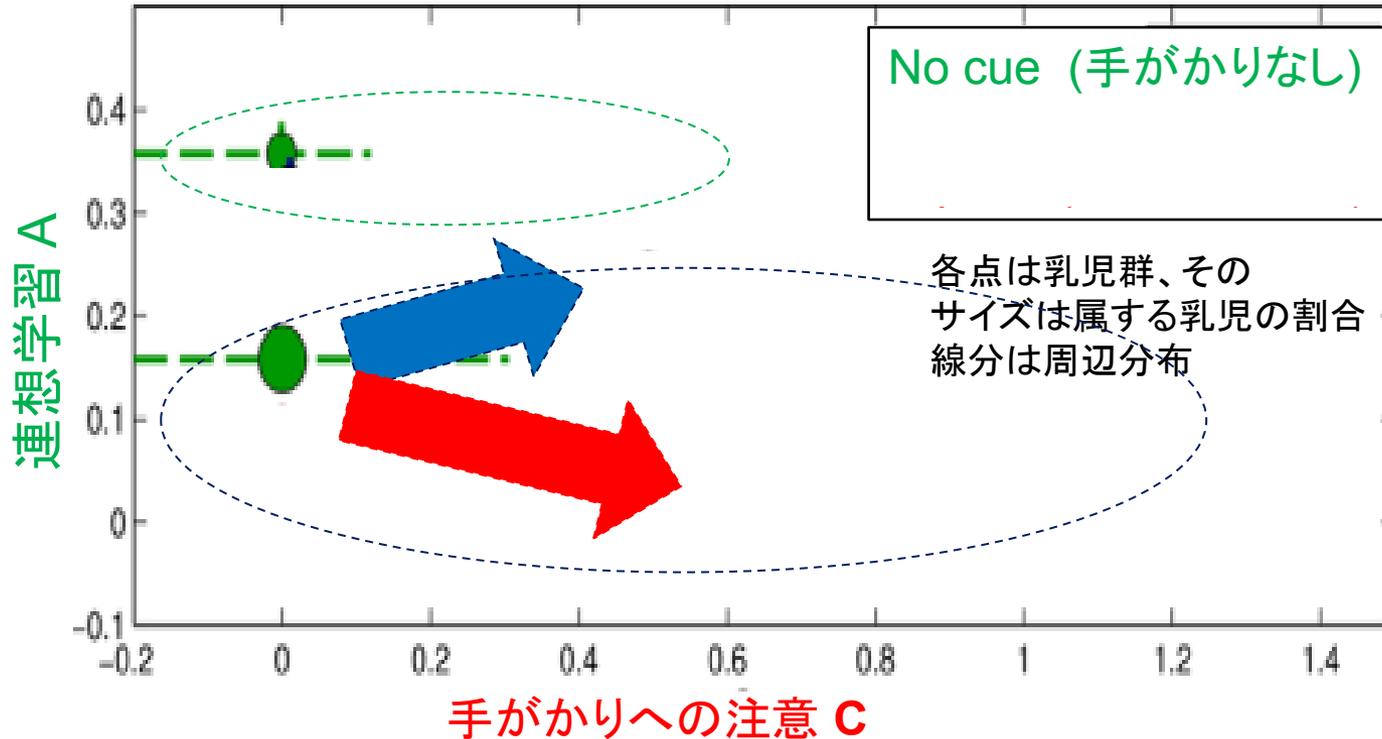
## シミュレーション3 個人差クラスタリング (誤差 < 1%)



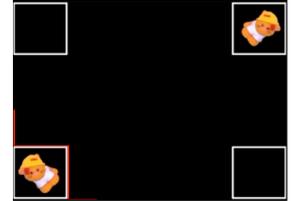
# Results: 連想(A)/Cue(C)の事後分布

高学習率  
(馴化→注視)

$$D(t,b) \sim f( W_b + \mathbf{C} \times \text{cued}(t,b) + \mathbf{A} \times \text{contingent}(t,b) + S \times \text{salient}(t,b) )$$



No cue



1. 各条件ごとに2以上の乳児群の推定: 高(30%)/低学習群(70%)
2. 高学習群は条件間で類似、低学習群に顔手がかりの促進効果
3. 輪郭(Square)条件は、手がかりの妨害効果の可能性

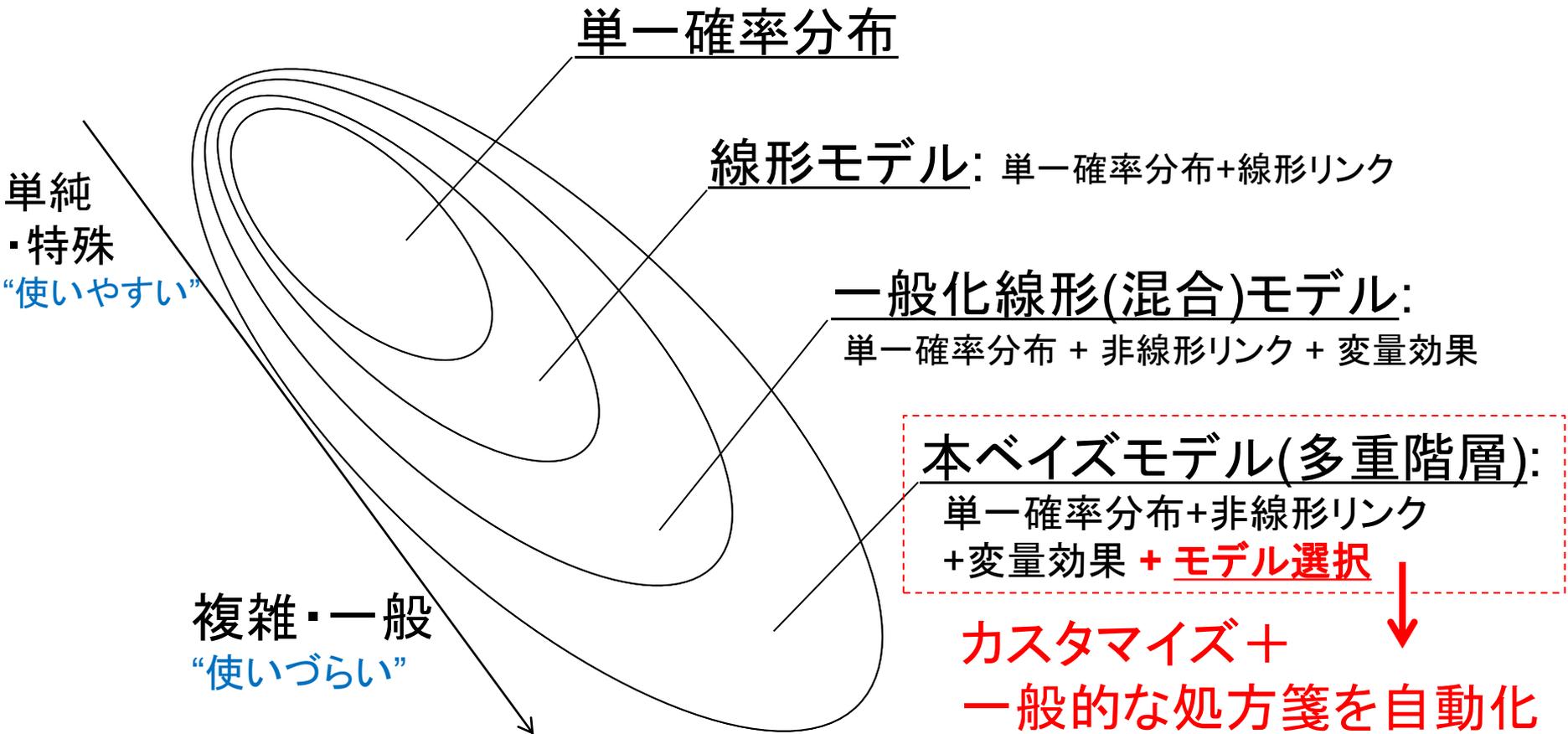
# まとめ: 分析の特性と結果

- 多要因混合: 手がかりと連想効果を分離
- 効果の非線形性: 多項式+次元選択→1次
- 個人差: 推定された群ごとの効果に条件間差

# 従来の分析法との比較

- 分散分析(Wu & Kirkham, 2010)
  - テストの注視時間の条件間差を分析
  - 条件間の平均差を検出(質的差)
- **スパース階層ベイズモデル(本研究)**
  - 馴化・テスト両方の注視時間
  - 複数群を回帰と同時に推定
  - 異なる手がかりの定性・定量的差を示した

# 提案手法の一般性→使いやすさ



OPEN ACCESS Freely available online

PLOS ONE

## Quantitative Linking Hypotheses for Infant Eye Movements

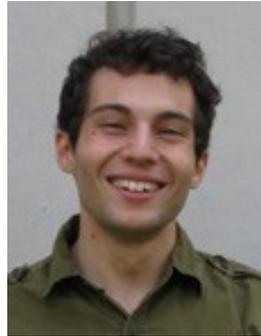
Daniel Yurovsky<sup>1\*</sup>, Shohei Hidaka<sup>2</sup>, Rachel Wu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Psychology, Stanford University, Stanford, California, United States of America, <sup>2</sup> School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa, Japan, <sup>3</sup> Department of Brain and Cognitive Sciences, University of Rochester, Rochester, New York, United States of America

MATLAB  
コード公開

# Thank you for your attention

- Collaborator: Dan Yurovsky and Rachel Wu



- This work was supported by a NSF GRF and NSF EAPSI to DY, a BPS Postgraduate Study Visits Award to RW, and Grant-in-Aid for Scientific Research to SH. We thank Natasha Kirkham, and the Smith, Yu, and Shiffrin labs in Indiana University.

OPEN ACCESS Freely available online

PLOS ONE

## Quantitative Linking Hypotheses for Infant Eye Movements

Daniel Yurovsky<sup>1\*</sup>, Shohei Hidaka<sup>2</sup>, Rachel Wu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Psychology, Stanford University, Stanford, California, United States of America, <sup>2</sup> School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa, Japan, <sup>3</sup> Department of Brain and Cognitive Sciences, University of Rochester, Rochester, New York, United States of America