情報・学習・理解：機械学習から機械理解へ

日高　昇平

北陸先端科学技術大学院大学

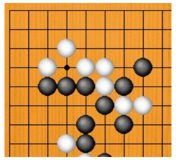
日高昇平

（ひだか　しょうへい HIDAKA, Shohei）

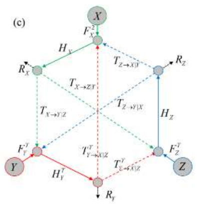
- 38歳, 宮崎県出身, 趣味 囲碁・将棋・ゲーム一般
- 九州大学で4年間、京都大学で5年間、インディアナ大学で2年間、JAIST9年目。

$$\frac{\Gamma\left(\sum_{j\in s}\theta_{ij}\right)\Gamma(1)}{\Gamma\left(\sum_{j\in s}\theta_{ij}+1\right)}=\int_0^1 \gamma_{is}^{\sum_{j\in s}\theta_{ij}-1}\left(1-\gamma_{is}\right)$$

- **学部　(理学部生物学科)**
  - 数理生物学、生態学、集団遺伝学などマクロな現象(行動)を好む
  - 特に、数理生物学(ゲーム理論, 非線形力学系)の考え方に強い影響。
- **大学院　(情報学研究科知能情報学専攻)**
  - コンピュータサイエンス・情報学系に興味を持ち、人の行動を情報論的に記述したいと思い始めた。（要は「脳を計算機上に作りたい」→機械学習)
  - 趣味の囲碁で、自分の考えを言語化できないのにも関わらず、良い手が打てるのが素朴に不思議だった。

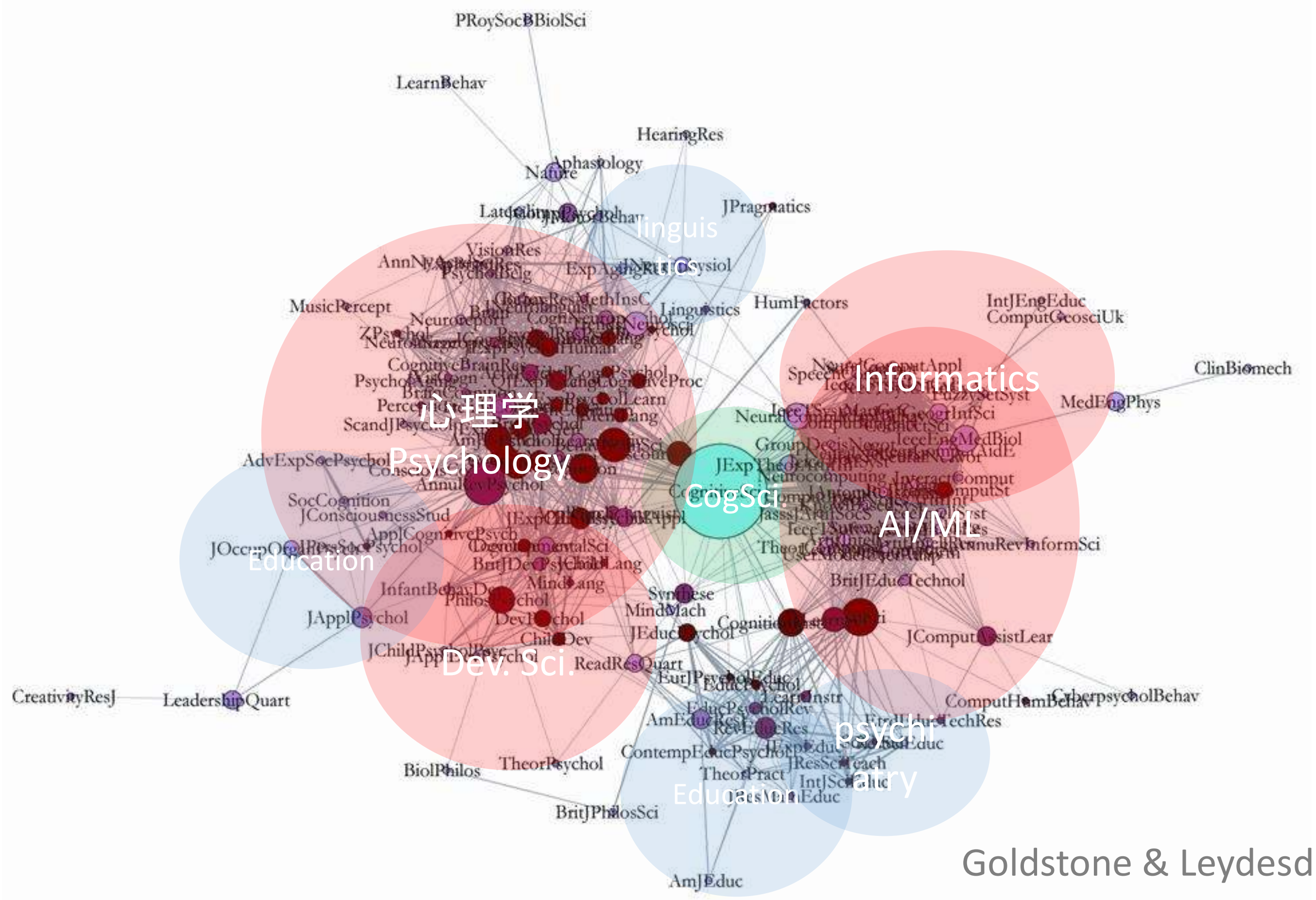


- **ポスドク　~　JAIST(現在)**
  - 紆余曲折を経て、古典的AI流の「”脳だけ”のモデルを作る」だけでは人の認知過程の全てを説明できない、と思い始めた。
  - “意味の計算論的な研究”　コミュニケーションにおける情報ネットワーク、知識形成の情報論的モデル、身体模倣の計算理論



認知科学 *Cognitive science*

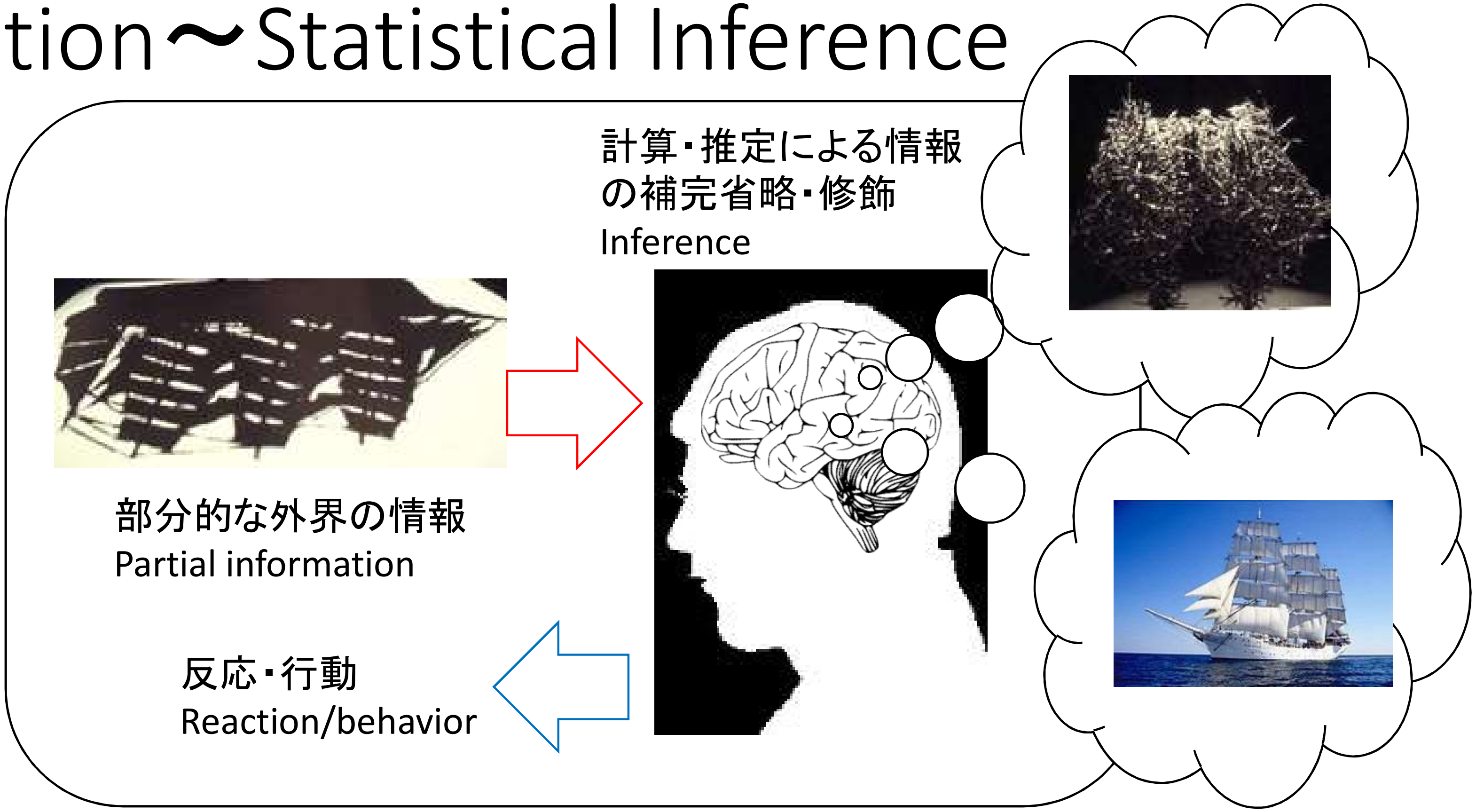
計算に喩えて認知を理解する



Goldstone & Leydesdorff (2006)

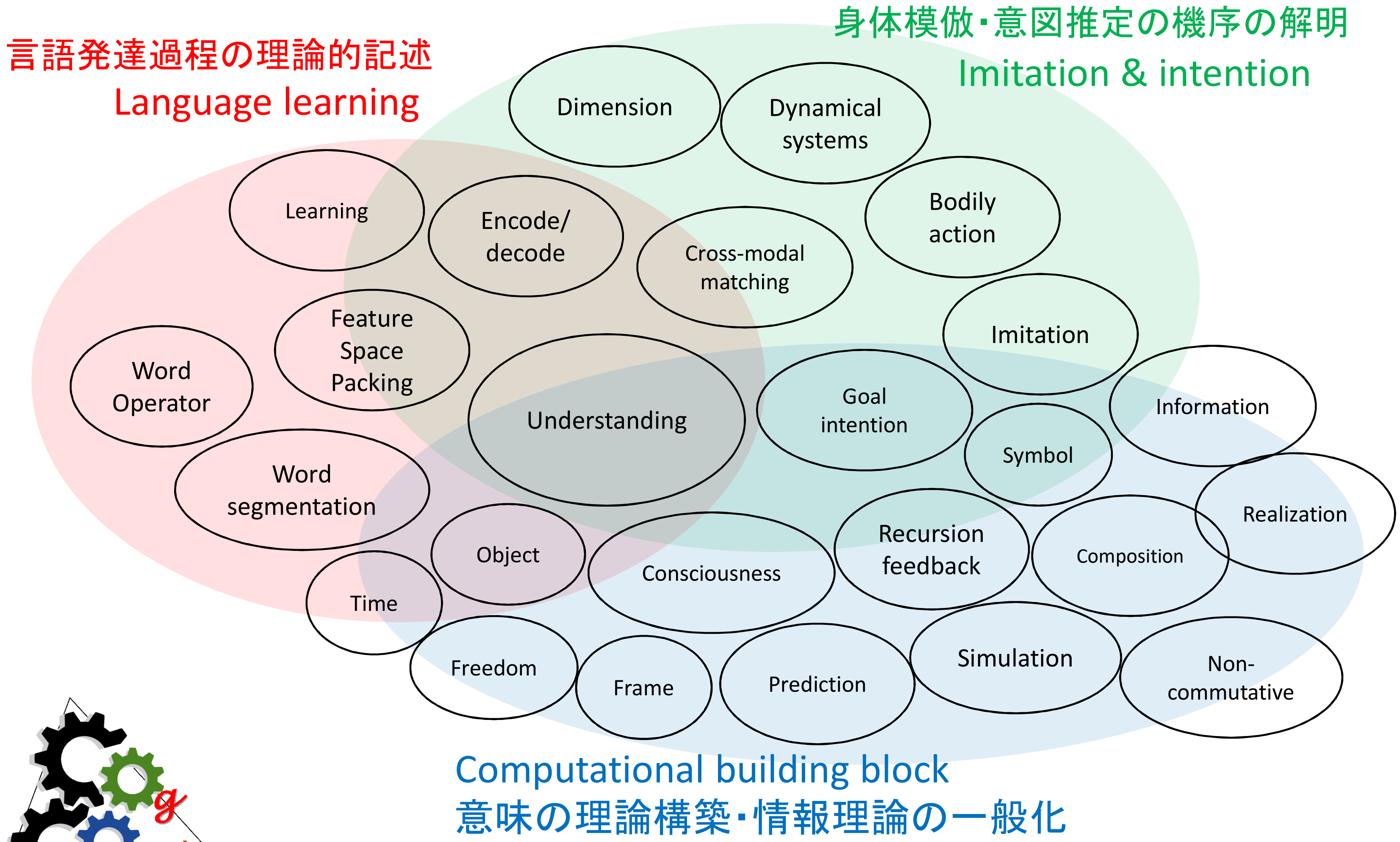
Betweenness centrality of 164 journals in the citation impact environment of *Cognitive Science* in 2004

認知～計算・推定 (Marr, 1982)
Cognition～Statistical Inference



Forward：　Stimulus→Inference→Action
Backward：　Build inference model from {Stimulus/ Action}

Research Topics



Outline

✔ • 概念分析: 情報・学習・理解
• 仮説:「理解とは関手の発見」
•「理解」の理論に求められる条件
• 関手～メンタルモデルとして
    • 物体認識の例
• まとめ: 理解と自律性

情報

- 情報（じょうほう、英語: information）とは、(Wikipediaより)
  - あるものごとの内容や事情についての知らせ[1]のこと。
  - 文字・数字などの記号やシンボルの媒体によって伝達され、受け手において、状況に対する知識をもたらしたり、適切な判断を助けたりするもの[1]のこと。
  - 生体が働くために用いられている指令や信号[1]のこと。
  - （情報理論（通信理論）での用法）価値判断を除いて、量的な存在としてとらえたそれ

学習

- 心理学・神経科学
  - 経験の繰り返しを通じて、ある課題の成績が向上する
  - 神経可塑性によりシナプス結合ができる。神経細胞の反応特性が変化
- 認知科学・機械学習
  - 特定の課題を解くための学習者内部の表現が最適化される
  - 漸進的な最適化・パラメタ探索

- 関連概念との経験的な区別
  - 「洞察(ひらめき)」「理解」と区別されることが多い
  - 「発達」は身体機構の変化を伴った長期的な変遷を言う場合が多い

「理解」とは

理解

理解（りかい）とは、

- 物事の道理を悟り、知ること[1]。また意味をのみこむこと

意味

意味（いみ）とは、次のような概念である。

1. 言葉（単語・用語など）が持っている概念のこと。例えば、「雨」は、音声としては「ア」と「メ」が組み合わさっただけの「空から水滴が落ちてくる現象」「空から落ちてくる水滴自体」というような意味が備わっている。
2. ある行動や発言が持つ必要性、もしくはそれが行われた理由のこと。
3. ある物（物体やシステムなど）が存在する必要性や理由のこと。

認知科学における理解研究

- “理解とは何か” (佐伯ら, 1985/2007)
  - 文脈依存性(村上)
  - 数学の学びにおける理解(銀林)
  - 理解の研究ができる!(佐伯)
  - 解題: 1985-2007年時点での研究の流れ
    個人の理解から社会的な理解(心の理論)へ

→例示、分類、知見を踏まえて計算理論的な定式化を行いたい

なぜAlphaGoZeroを理解・説明できない？

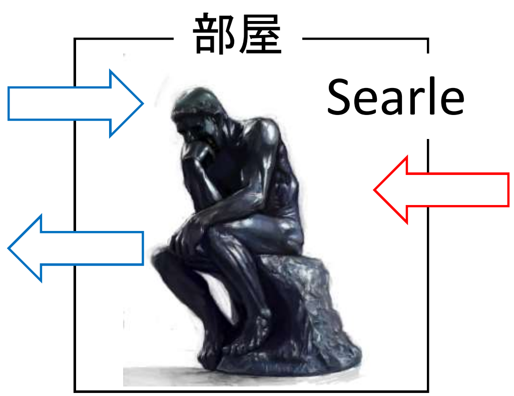
- 我々の操作できるモデル・体系に還元する必要がある
  - 逆に言えば、囲碁など一部クラスの問題の精度を上げるのに「理解は不要」
- “言語”にも理解は不要? (e.g., Google translation)
  - → 中国語の部屋論法

概念分析: Strong AI understands

- 中国語の部屋 (Searle, 1980)
  - “理解”なき処理は、”強い”知能とは呼べない
  - チューリングテスト(知能の操作的定義): AI (人工知能)の対話が、人間にとって、人間と区別がつかないならば、それを”知能”とする

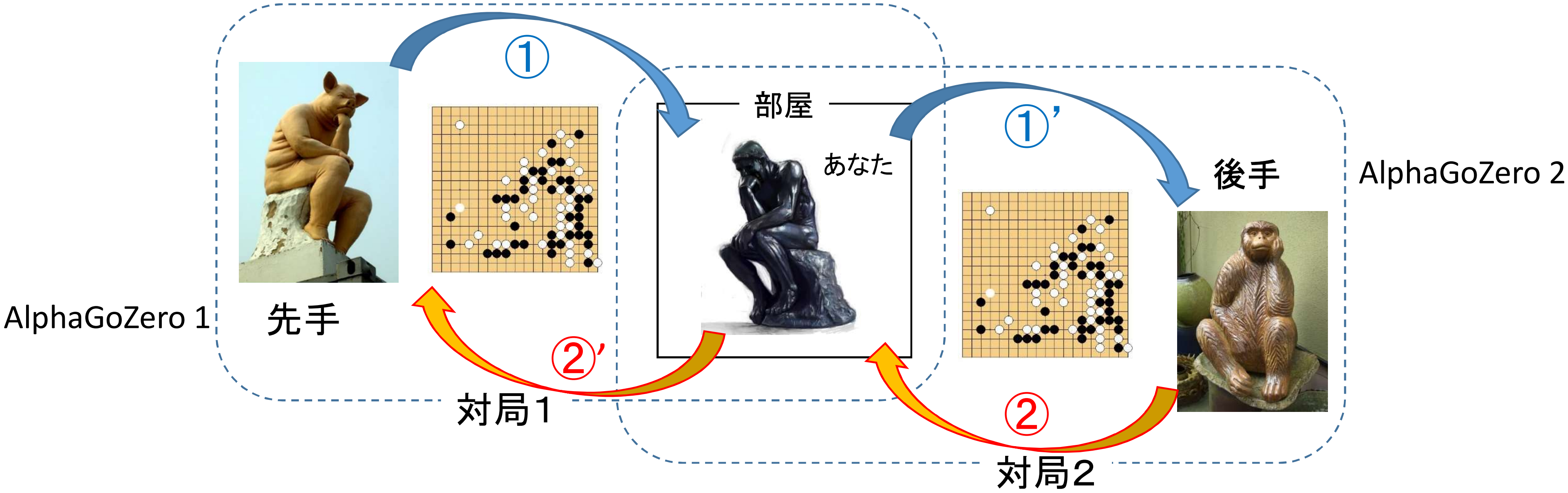
Searleによる"強いAI"への批判

- Searle 自身は、中国語を全く"理解"していないが、中国語のスクリプトに機械的に回答できる。
  - ゆえに「理解」する"強いAI"を試すのにチューリングテストは十分ではない。
- 弱いAI
  - 設計者の考えを忠実に実現・反映する機械・道具
- 強いAI
  - 自立的に物事を考え、理解する機械
    - つまり人のような存在



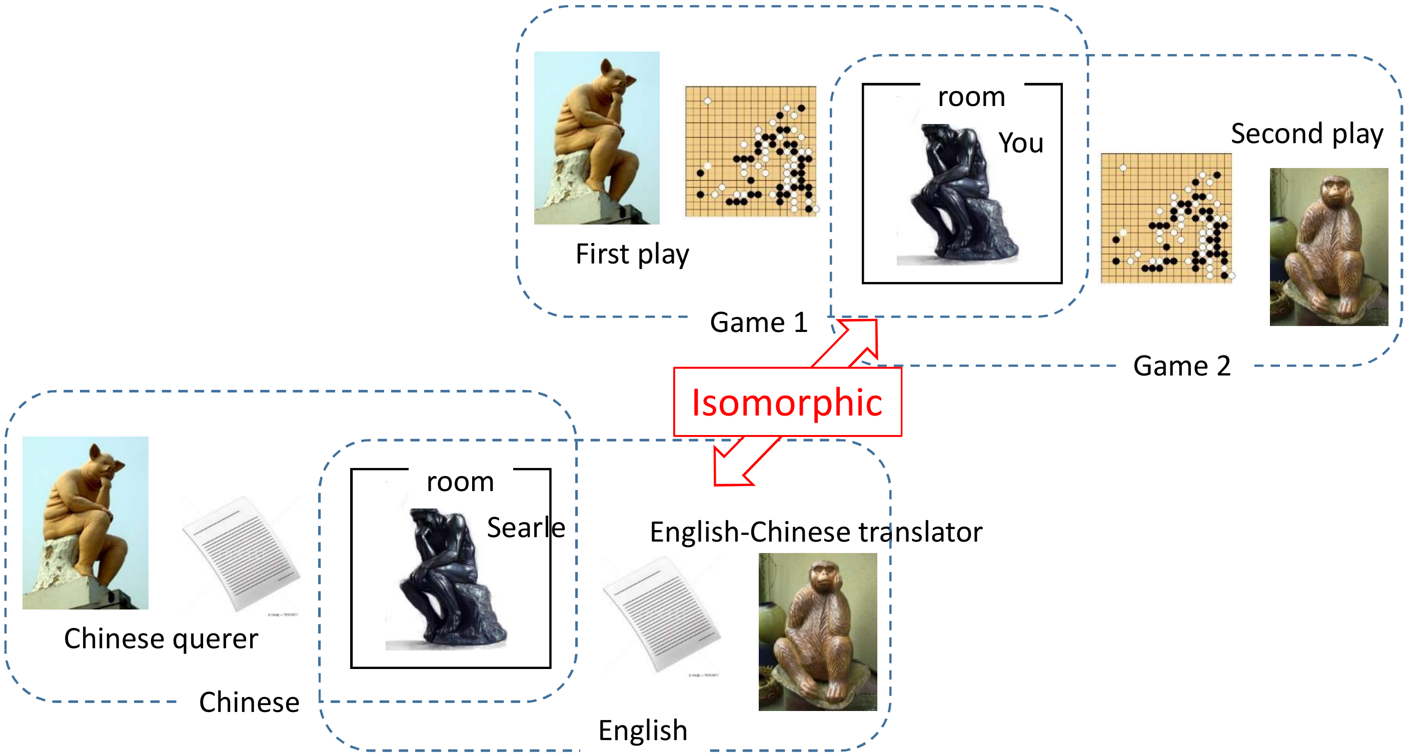
中国語の部屋論法とは何か？：
マネ碁 AI

Suppose you know NOTHING (but the rule) about Go (a 2-player full-information zero-sum game)



日高昇平 (2016).情報の伝達から理解へ. 人工知能学会論文誌. 31(6).

中国語の部屋とマネ碁AIの同型性



Searle論法の主張　～　情報の「理解」と「伝達」は異なる

“理解”の定式化へのヒント

1. Searleによれば“中国語の部屋”の例は、批判に値する。(わざわざ論文を出版した)
2. しかし“中国語の部屋”は、”理解”に一見似ているが、まったく異なる例である。
3. 実は、“中国語の部屋”は「通信」と同型である。
4. ゆえに、「通信」は”理解”によく似ているが、”理解”ではない、モデルである。
5. したがって、「通信」を基礎として、しかし通信としての本質的な仮定を取り除くことで”理解”が定式化できるであろう。

日高昇平 (2016).情報の伝達から理解へ. 人工知能学会論文誌. 31(6).

Outline

- 概念分析: 情報・学習・理解
- 仮説:「理解とは関手の発見」
- 「理解」の理論に求められる条件
- 関手～メンタルモデルとして
  - 物体認識の例
- まとめ: 理解と自律性

仮説

「理解」とは“関手”の発見である。

Shannon & Weaver (1948) (の超訳)

「情報」とは“射”(関数)である。

情報理論(rate distortion theory) (の超訳)

「学習」とは“射”(関数)の漸近的な構築である。

情報、学習、そして理解

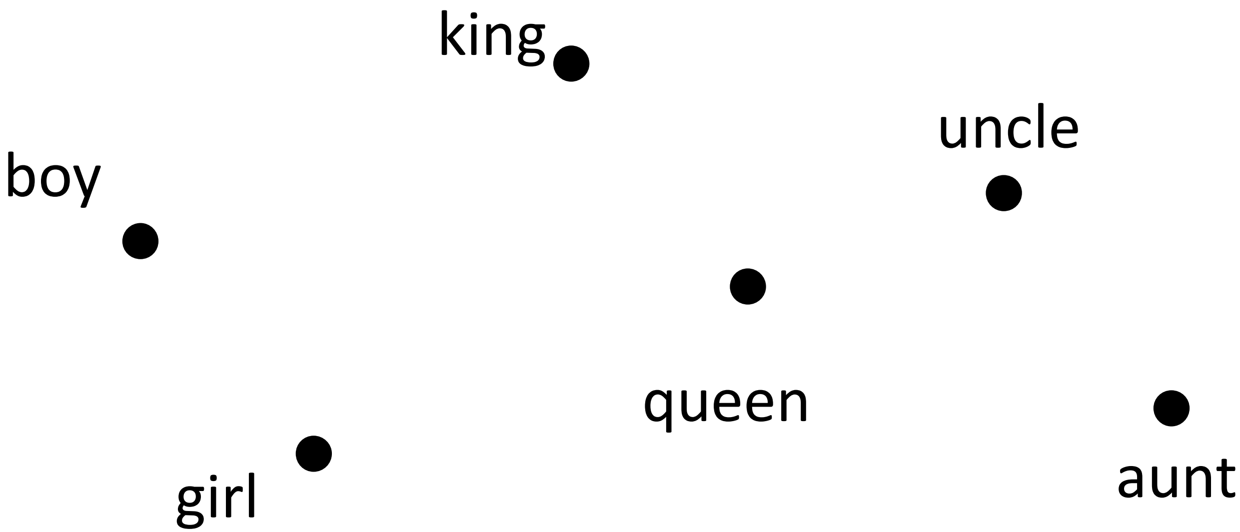
- 仮説:「理解」とは“関手”の発見である。
  - 「情報」とは“射”(関数)である。
  - 「学習」とは“射”(関数)の漸近的な構築である。
  - 「理解」とは可換な合成をもつ“射”の(漸近的な)構築である。

“理解”の満たすべき性質

- 現象学的な経験として
  - “わかった”と思う (Aha! experience)
  - “しっくりくる” (腑に落ちる)
  - “気づき”なくして理解なし (無意識に”うっかり”理解することはない)

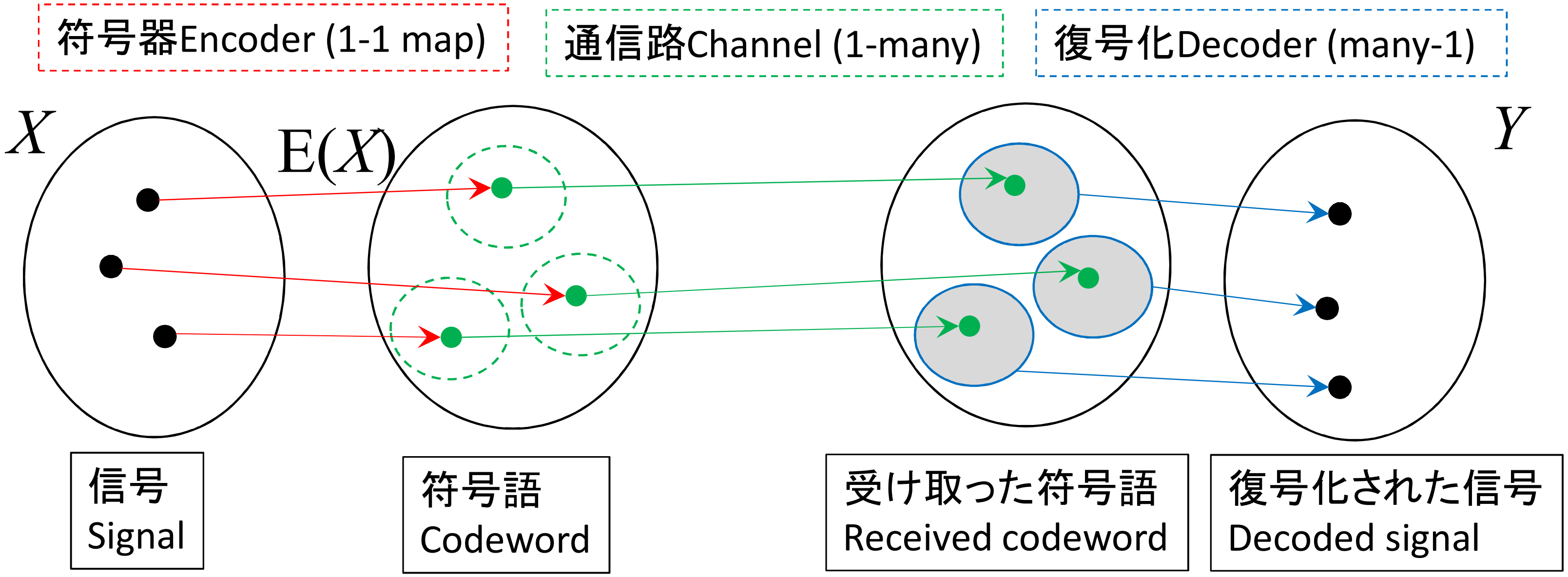
- 理解の満たすべき特徴・機能性 (学習と対比して)
  - 能動的: 自ら“理解する”しかない(他者が強制的に”理解”させられない)
  - 洞察的: “同じ現象”の見方(フレーミング・モデル)が変わる
  - 基礎的: 一度理解すれば、広い応用のある基礎となる

Data

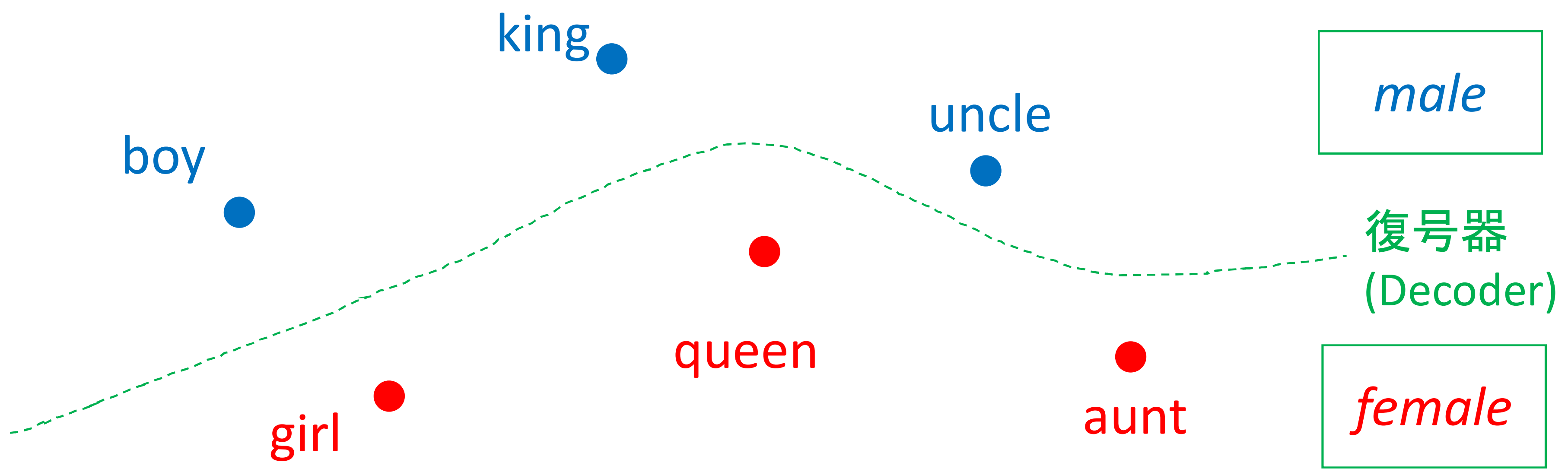


通信容量定理

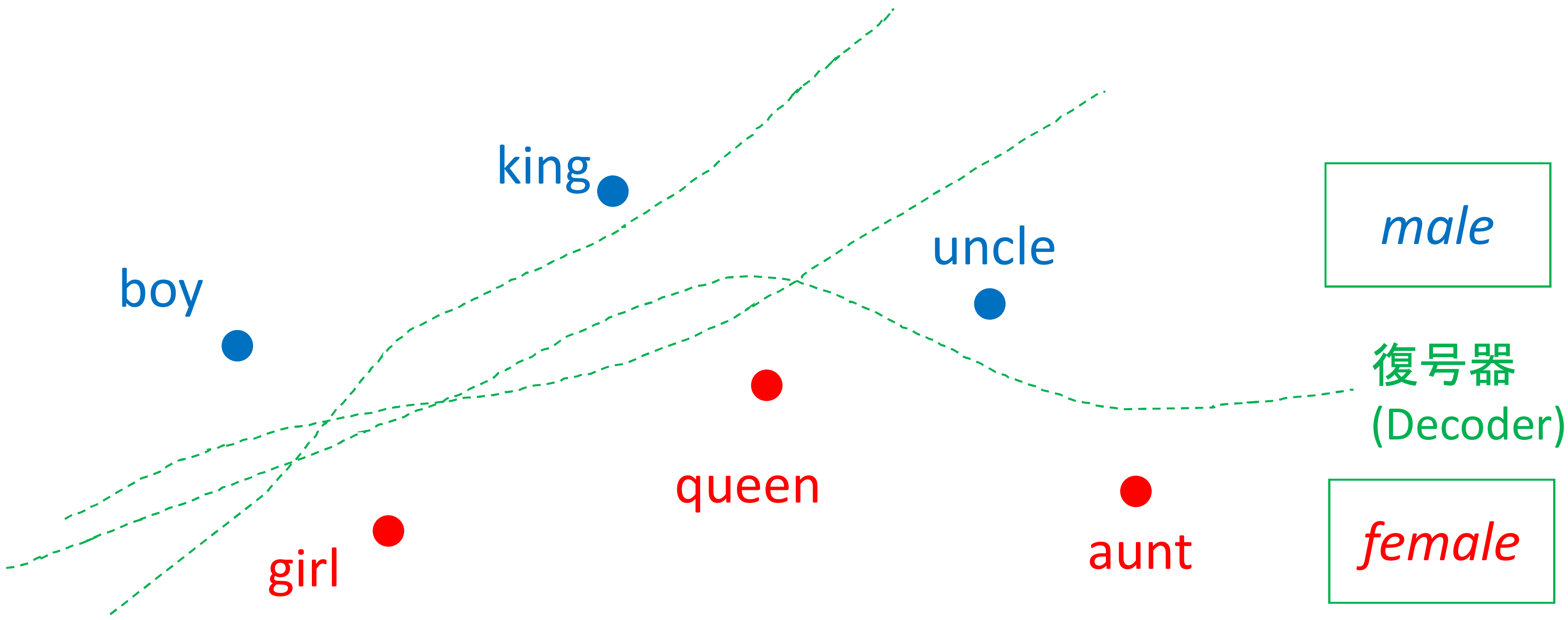
- 1-1 対応の”実現”～Shannonの情報伝達モデル



情報/通信: Design decoder (code to signal)



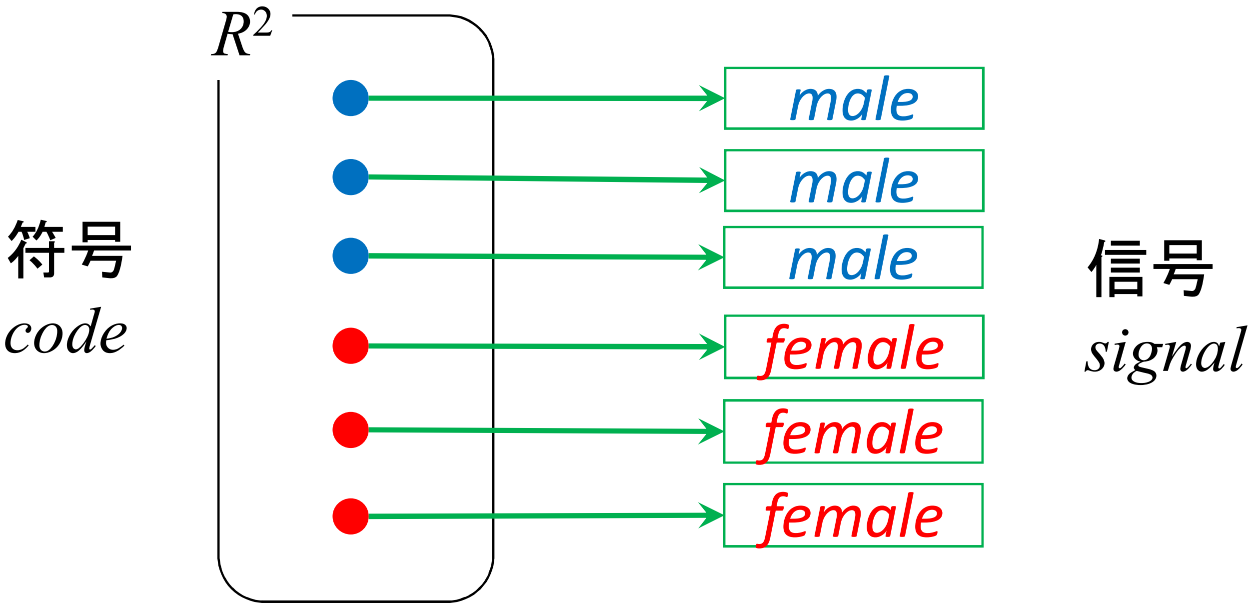
学習: Construct decoder (code to signal)



情報・学習はデータ(符号)の解釈(モデル・復号器)

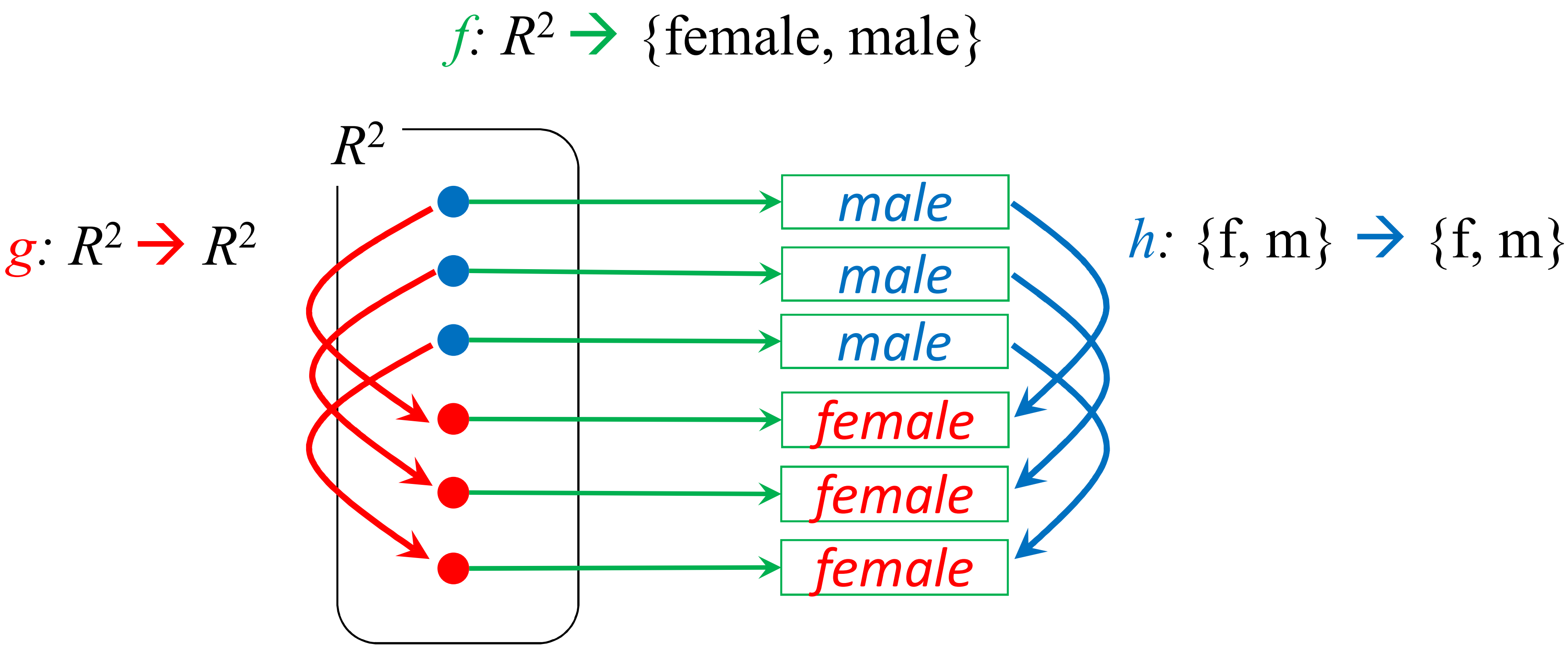
「情報」とは“射”(関数)である。
「学習」とは“射”(関数)の漸近的な構築である。

$$f: R^2 \rightarrow \{\text{female, male}\}$$



「理解」は操作可能な解釈(モデル・復号器)

「理解」とは<u>可換な合成をもつ</u>“射”の(漸近的な)構築である。



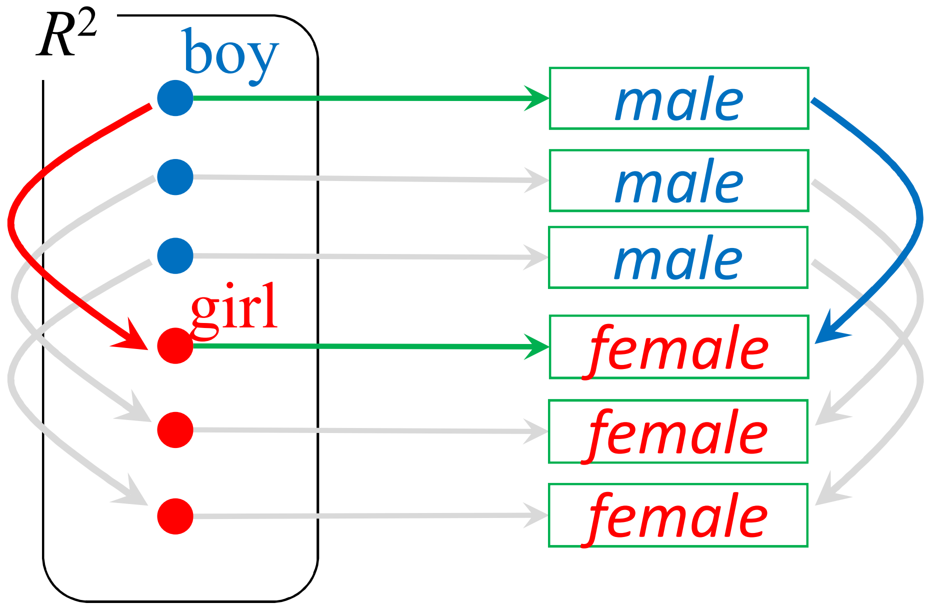
「理解」は操作可能な解釈(モデル・復号器)

「理解」とは可換な合成をもつ“射”の(漸近的な)構築である。

$f: R^2 \rightarrow \{\text{female, male}\}$

$g: R^2 \rightarrow R^2$

$h: \{\text{f, m}\} \rightarrow \{\text{f, m}\}$

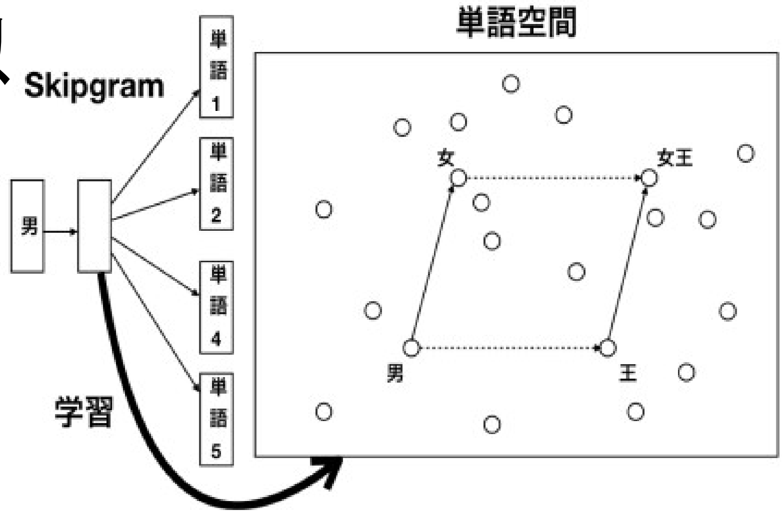


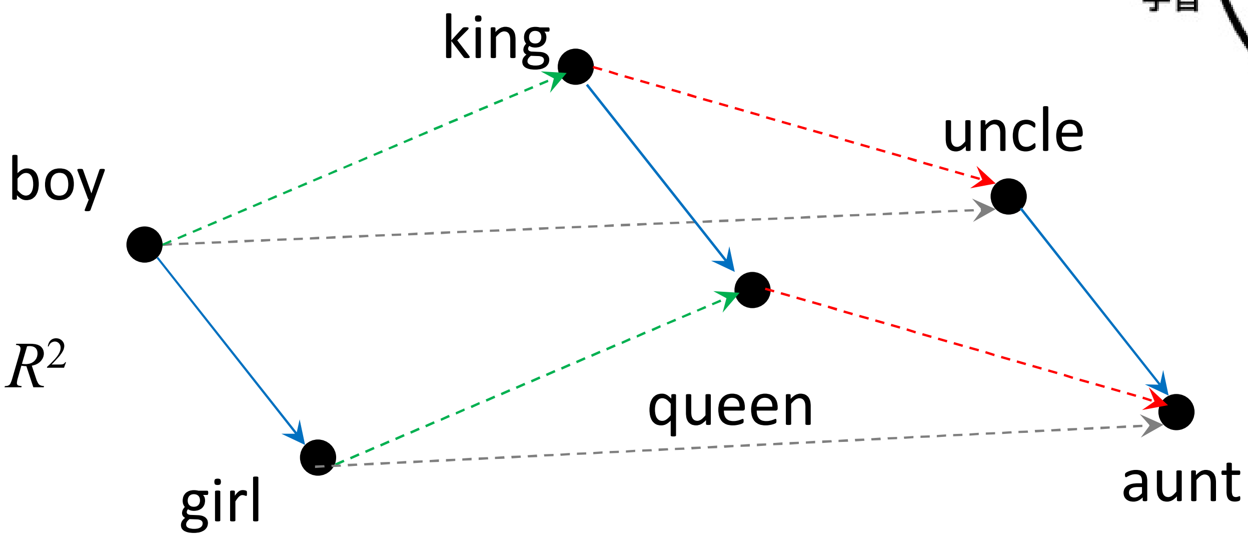
$f \circ g(\text{boy}) = f(\text{girl})$
$= female$

$h \circ f(\text{boy}) = h(male)$
$= female$

$f \circ g = h \circ f$

単語の共起関係のベクトル空間近似
Mikolov et al. (2013)





$g: R^2 \rightarrow R^2$

単語ベクトル空間による“類推”

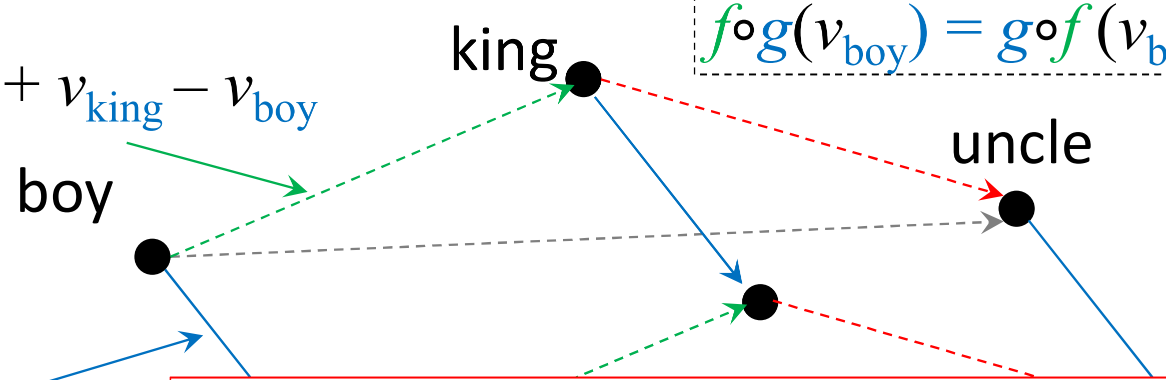
Mikolov et al. (2013)

類推問題: (boy と girl) → (king と ??) ～ベクトル演算による表現

$$\overbrace{v_{\mathrm{king}} - v_{\mathrm{boy}}}^{f} + \overbrace{v_{\mathrm{girl}} - v_{\mathrm{boy}}}^{g} + v_{\mathrm{boy}} = v_{\mathrm{queen}}$$

$$f \circ g(v_{\mathrm{boy}}) = g \circ f(v_{\mathrm{boy}}) = v_{\mathrm{queen}}$$

$f(x) = x + v_{\mathrm{king}} - v_{\mathrm{boy}}$

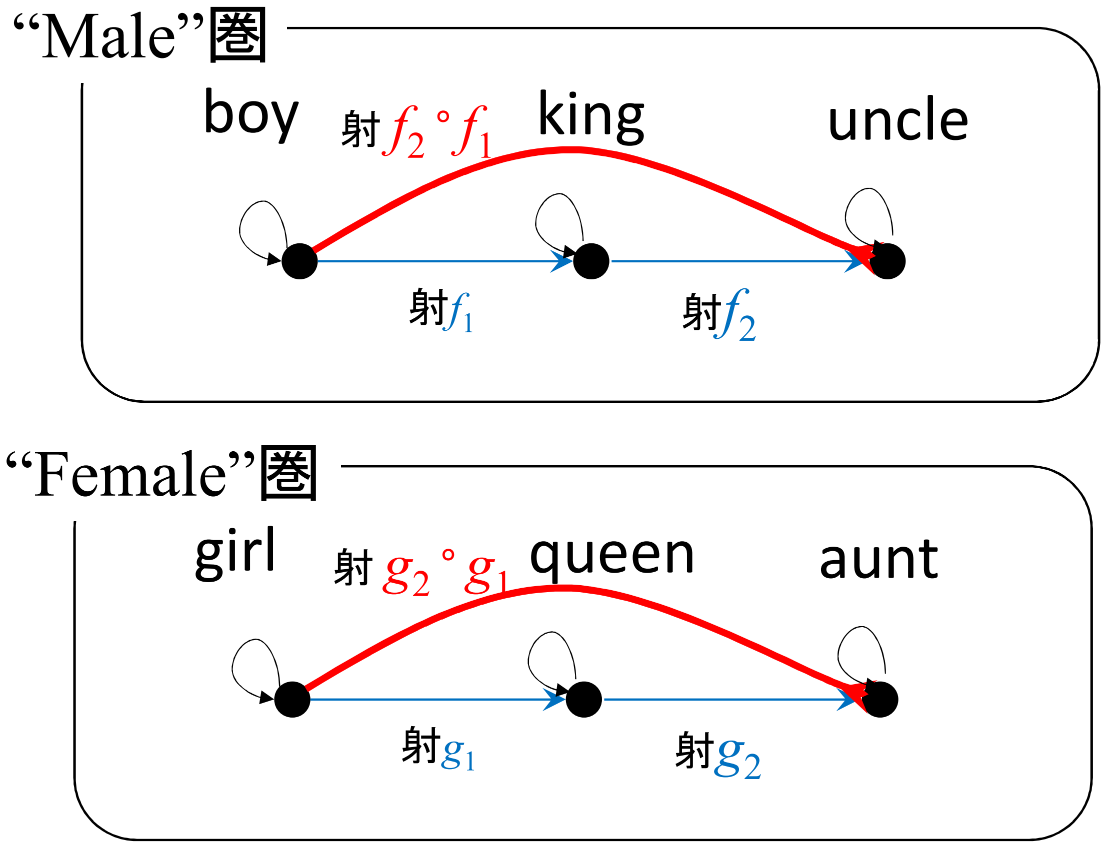


g: $R^2 \rightarrow R^2$

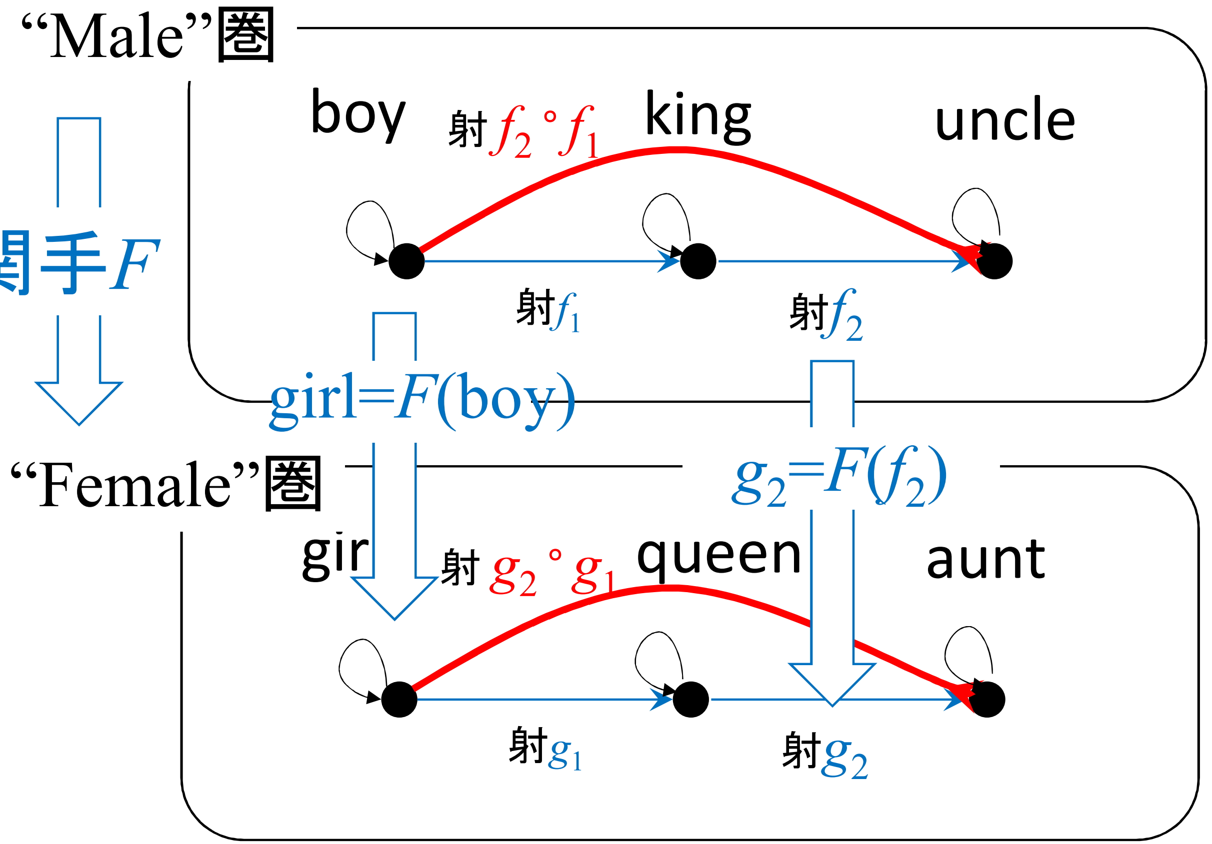
$g(x) = x + v_{\mathrm{girl}} - v_{\mathrm{boy}}$

洞察的: “同じ現象”の<u>見方(フレーミング・モデル)</u>が変わる
基礎的: 一度理解すれば、<u>広い応用</u>のある基礎となる

圏:　「対象」(objects)と「射」(arrows)を持つ.
(恒等射をもつ.)
「射」(arrows)は合成可能である.



関手:「圏から圏へ」の射 (よって「関手」は合成可能である) .
「対象を対象へ」うつす.
「射を射へ」うつす.



Outline

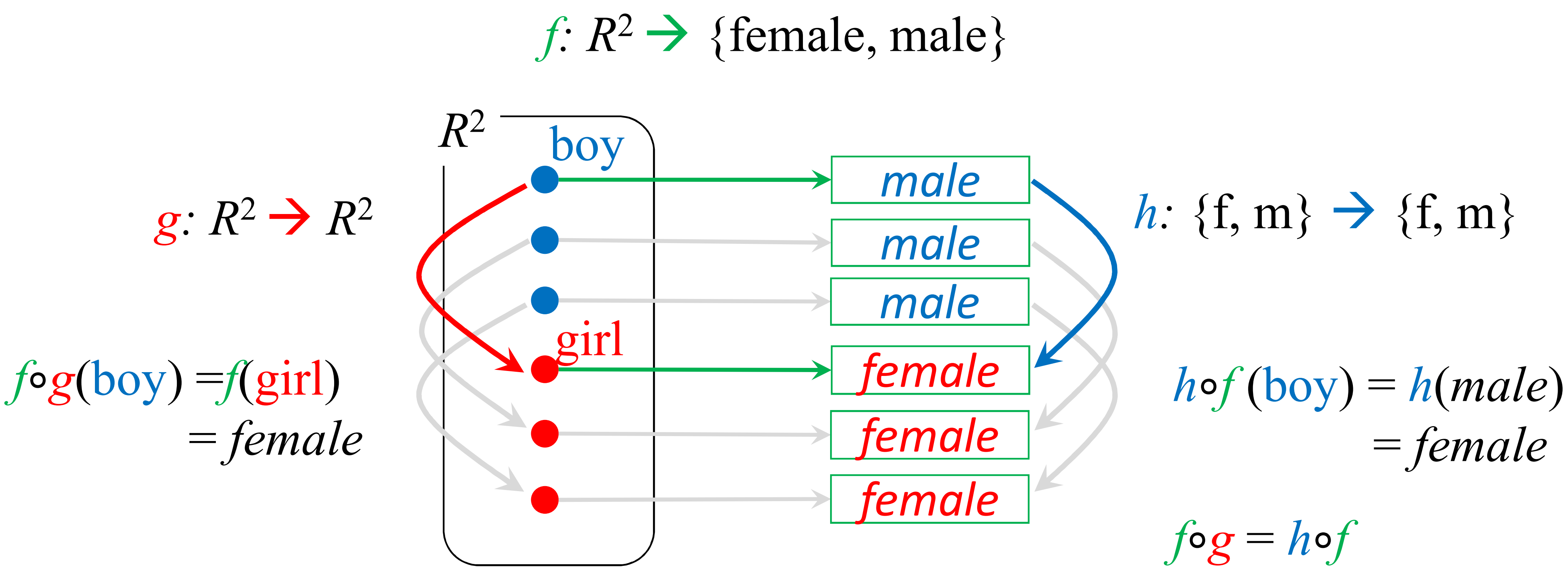
- 概念分析: 情報・学習・理解
- 仮説:「理解とは関手の発見」
- 「理解」の理論に求められる条件
- 関手～メンタルモデルとして
  - 物体認識の例
- まとめ: 理解と自律性

仮説

「理解」とは“関手”の発見である。

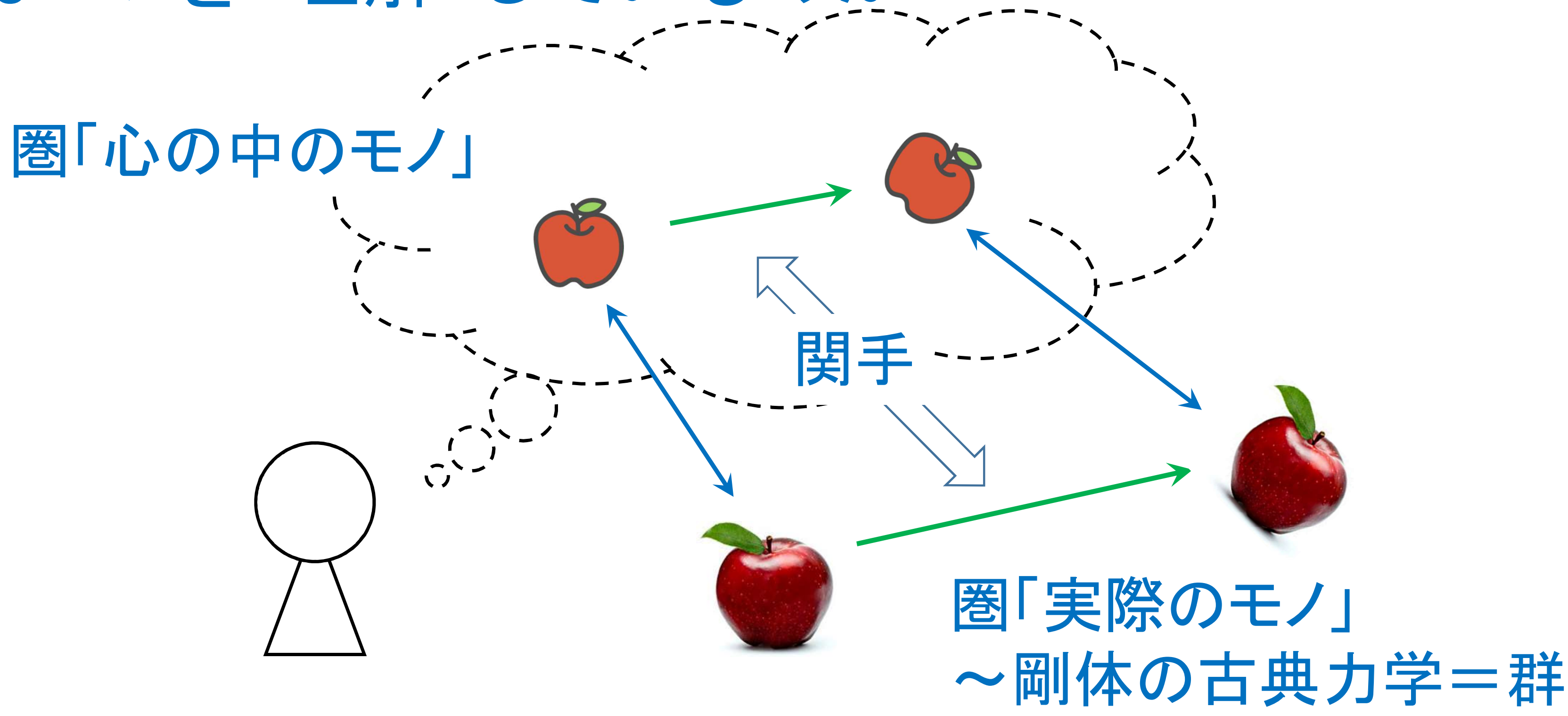
「理解」は操作可能な解釈(モデル・復号器)

「理解」とは可換な合成をもつ“射”の(漸近的な)構築である。



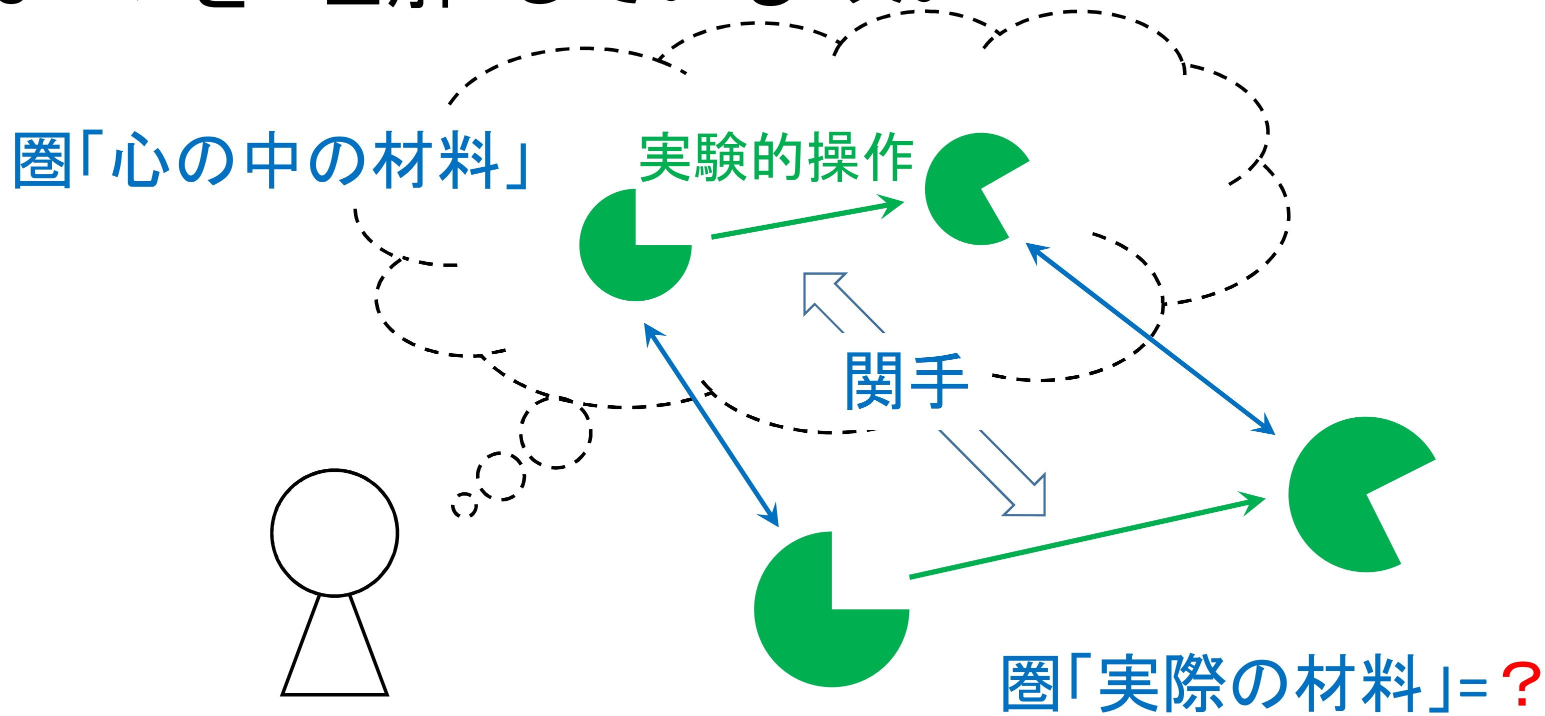
理解=メンタルシミュレーション：“操作可能な心的モデル”

- 我々はモノを“理解”しているのか？



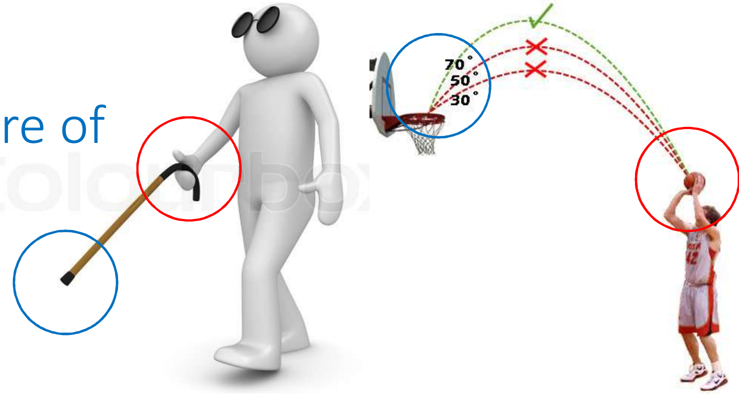
Mi^2iでの理解: 材料のある側面に関する操作可能な心的モデル

- 我々はモノを“理解”しているのか？



M. Polanyi’s tacit knowing

Attending from the tacit proximal term to the distal term aware of

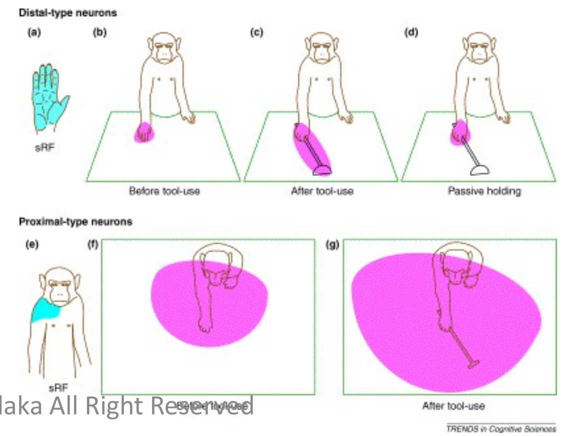


- 暗黙的な近位項から遠位項への注意
  - 電気ショック前の無意味シラブル(?)
  - 複雑な身体演技中の筋肉
  - 盲人の杖を持つ手触り

M. Polanyi (1966). The Tacit Dimension. The University of Chicago Press

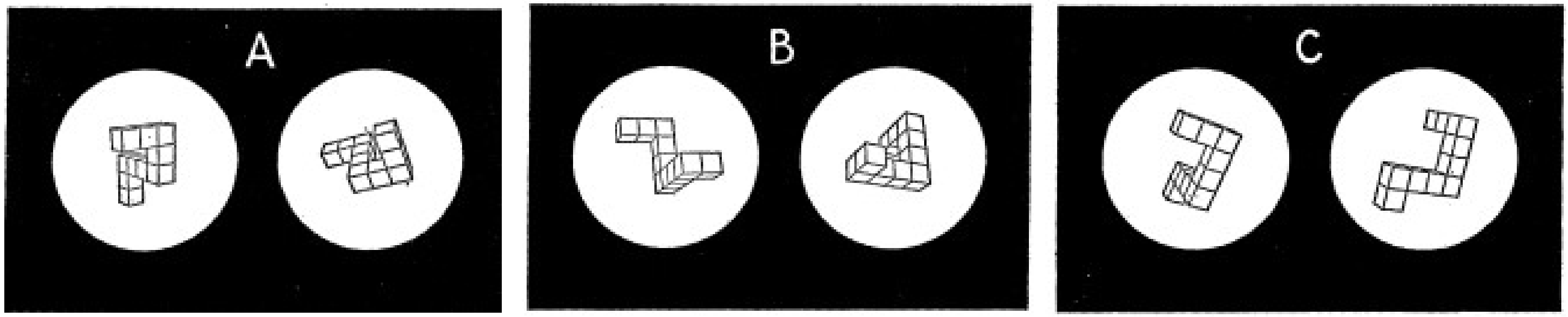
- (p.13): “Since tacit knowing establishes a meaningful relation between two terms, we may identify it with the *understanding* of the comprehensive entity which these two terms jointly constitute.”
- (p. 14): “In other words we are *attending from* these internal processes *to* the qualities of things outside. These qualities are what those internal processes mean to us. “

- Tool use expands the body schema
  - (Maravita & Iriki; 2004)



心的回転 Mental rotation
“心の中の物体”へのアプローチ

- 回転した物体対をマッチングする課題
  - できるだけ速く正確に”same” or “different”を回答



(A) “same” pair
(different by 80 deg)

(B) “same” pair
(different by 80 deg in depth)

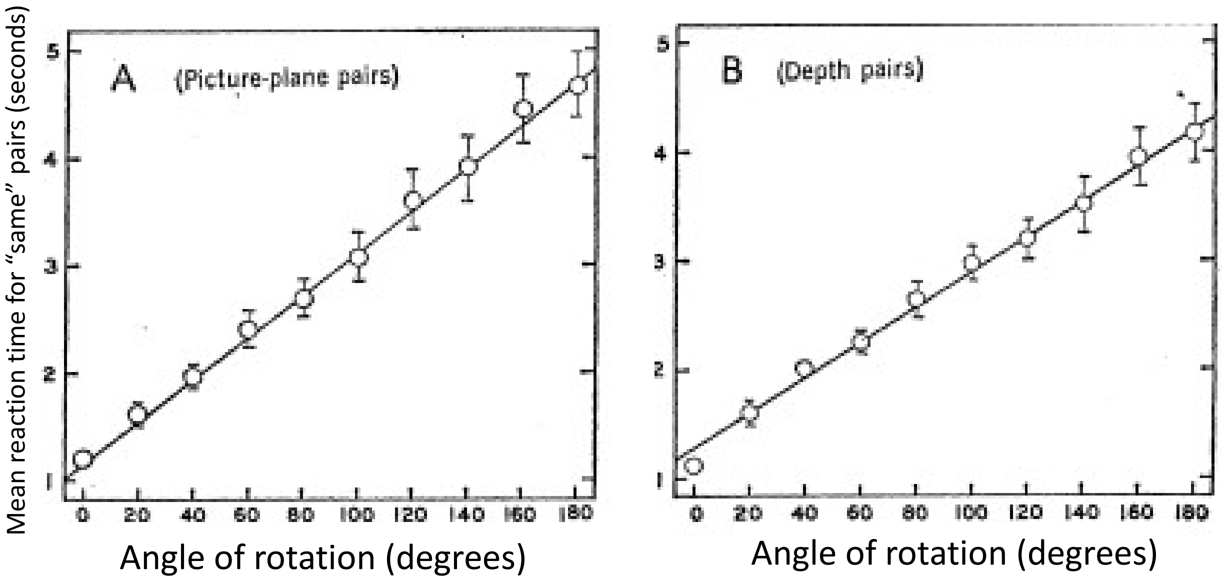
(C) “different” pair
(no angle to match)

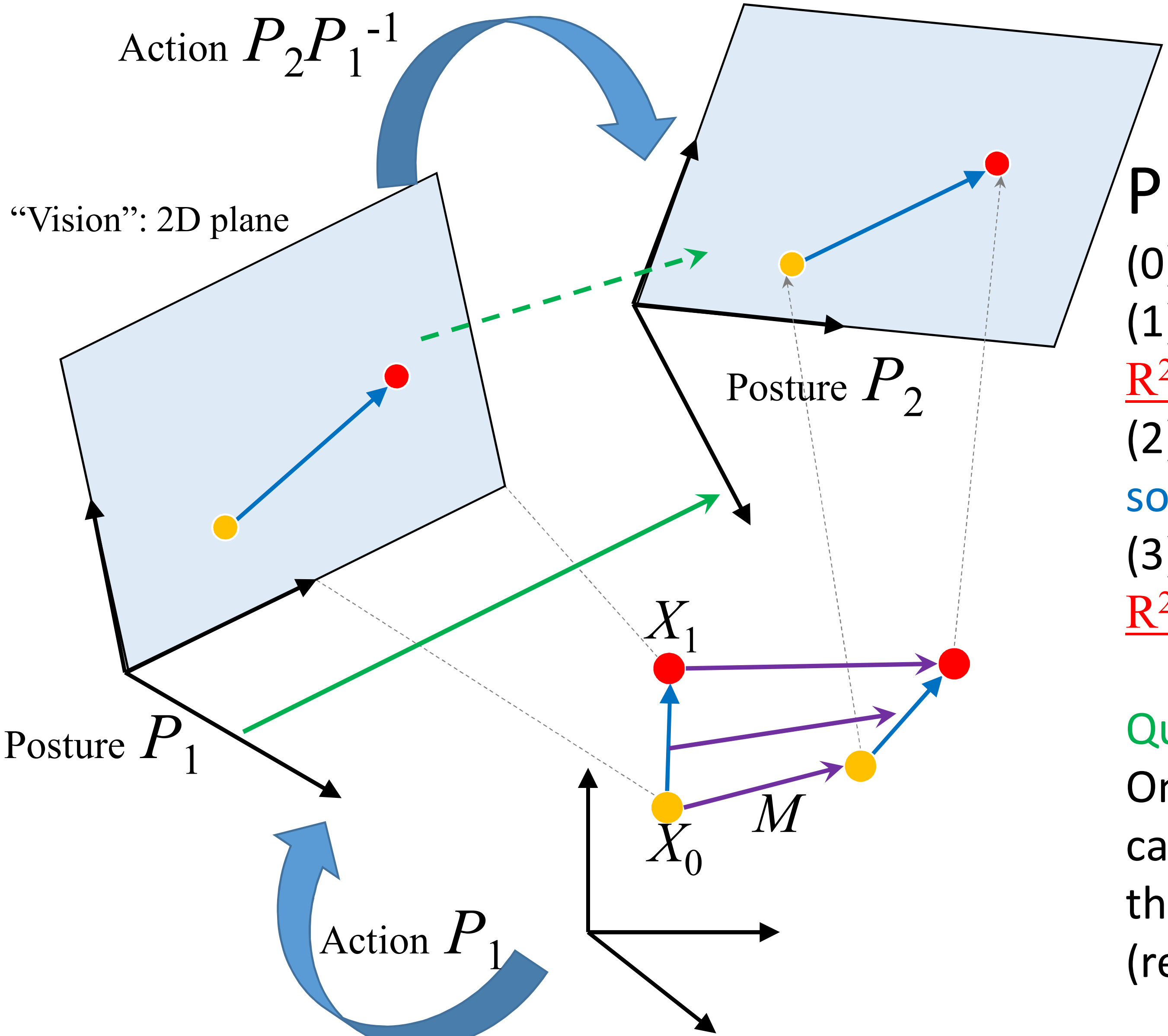
Shepard & Metzler (1971)

心的回転 Mental rotation

"心の中の物体"へのアプローチ

- 結果: 回転角∝反応時間
  - 2物体の回転角の差に比例した反応時間
  - 2D回転(画像に水平)より3D回転(奥行き方向)でも反応時間は長くならない(i.e., 単に難易度ではない)





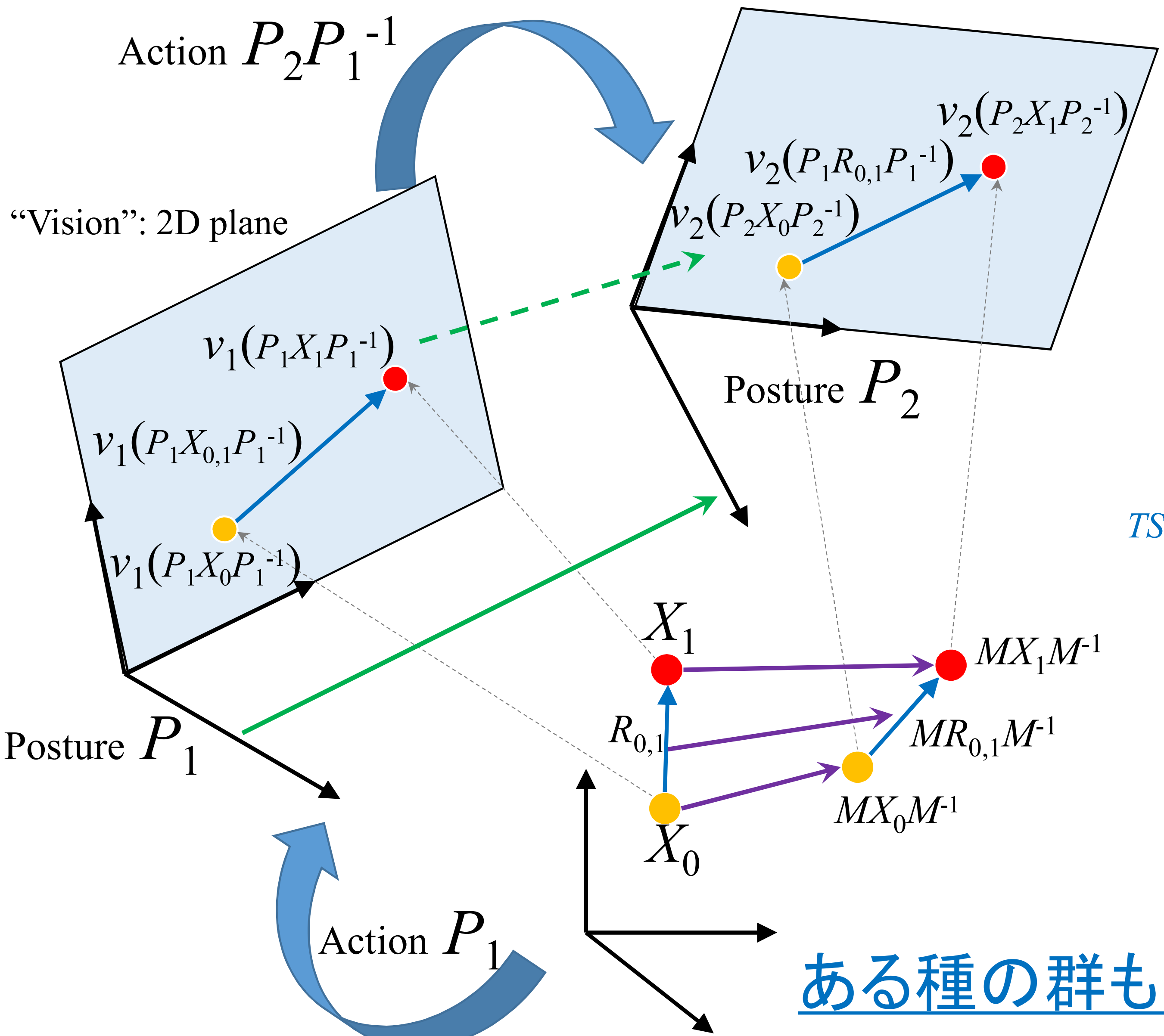
Problem:

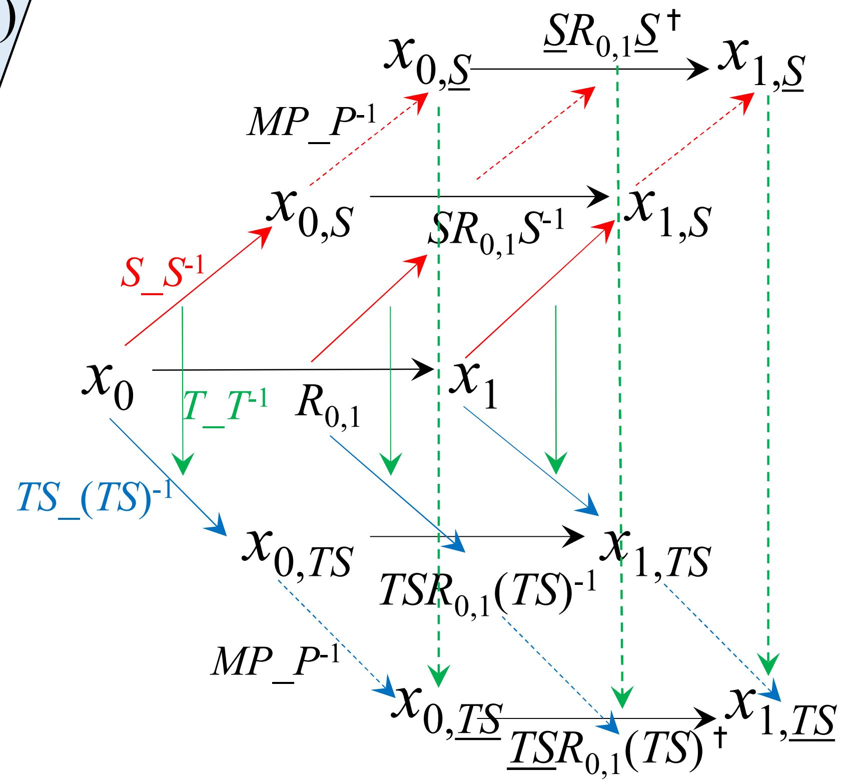
(0) There is the set of N points in R^3.
(1) Observe them on the visual plane 1 R^2 at the Posture 1.
(2) The set of N points "moved" by some transform M.
(3) Observe them on the visual plane 2 R^2 at the Posture 2.

"Distal term" "Proximal term"

Question:

On what condition & to what extent can this observer recognize the original 3D structure (relative coordinate & motion)?





$$S^{\dagger} = (S^t S)^{-1} S^t$$

ある種の群もしくはモノイド準同型をなす

Notation

there is a set X of n points $X := \{x_0, x_1, \ldots, x_n\}$ in the three-dimensio[n]
Euclidean space $\mathbb{R}^3$. To represent translation in the same form, let us int[ro]-
duce the 4×4 matrix notion:

$$(A, b) := \begin{pmatrix} A & b \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{pmatrix}$$

- Affine transform:
  - (任意の線形変換*A*と平行移動*b*からなる行列)

- 射 (群/モノイド):

$$f_A(X) = AXA^{-1}$$

The set C_3 and the matrix multiplication $\times : C_3 \times C_3 \mapsto C_3$ forms a (mathematical) group with the identity I_4 and the inverse of the matrix $()^{-1} : C_3 \mapsto C_3$. For a transform $A \in C_3$, the group $(C_3, \times, I_3, ()^{-1})$ is mapped (group isomorphism) to another group $(C_3, \times, I_3, ()^{-1})$ by $f_A : C_3 \mapsto C_3$ of

ある1点X_0の姿勢変換(f_A)後の3D座標$X_{0,\mathrm{A}}$

座標Aにおけるある1点$X_{0,\mathrm{A}}$の網膜像(v)後の2D座標V_{A}

$$\begin{tikzcd}
X_0 \arrow[r, "f_A"] \arrow[d, "M"'] & X_{0,A} \arrow[r, "v"] \arrow[d, "\theta_{A,MB}"'] & V_A \arrow[d, "\theta_{v,A,MB}"'] \\
X_{0,M} \arrow[r, "f_B"'] & X_{0,MB} \arrow[r, "v"'] & V_B
\end{tikzcd}$$

実線:群

破線:モノイド

ある1点X_0の"動き" (M)後の3D座標$X_{0,M}$

図式の可換性(群/モノイド準同型)

- 可換性：赤と緑の射(合成)が一致する性質(準同型)

$$
\begin{tikzcd}
X_0 \arrow[r, "f_A"] \arrow[d, "M"'] & X_{0,A} \arrow[r, "v"] \arrow[d, "\theta_{A,MB}"'] & V_A \arrow[d, "\theta_{v,A,MB}"'] \\
X_{0,M} \arrow[r, "f_B"'] & X_{0,MB} \arrow[r, "v"'] & V_B
\end{tikzcd}
$$

- 仮にvが単位射(=単位行列I)ならば、$\vec{v}_B = BMA^{-1}\vec{v}_A.$
- 視覚像A, B上の3点を $U_A = (\vec{v}_{0,A}, \vec{v}_{1,A}, \vec{v}_{2,A})$ と $U_B = (\vec{v}_{0,B}, \vec{v}_{1,B}, \vec{v}_{2,B})$ とすれば、
  動きMが一意に定まる：$M = B^{-1}U_B U_A^{-1} A.$

  視覚像A, B上に4点以上あれば、$M = B^{-1}U_B U_A^{\dagger} A,$

  ただし、$A^{\dagger} = A^T\left(AA^T\right)^{-1}$ はMoore-Penrose疑似逆行列

外部情報依存から内的整合性(近位項)へ

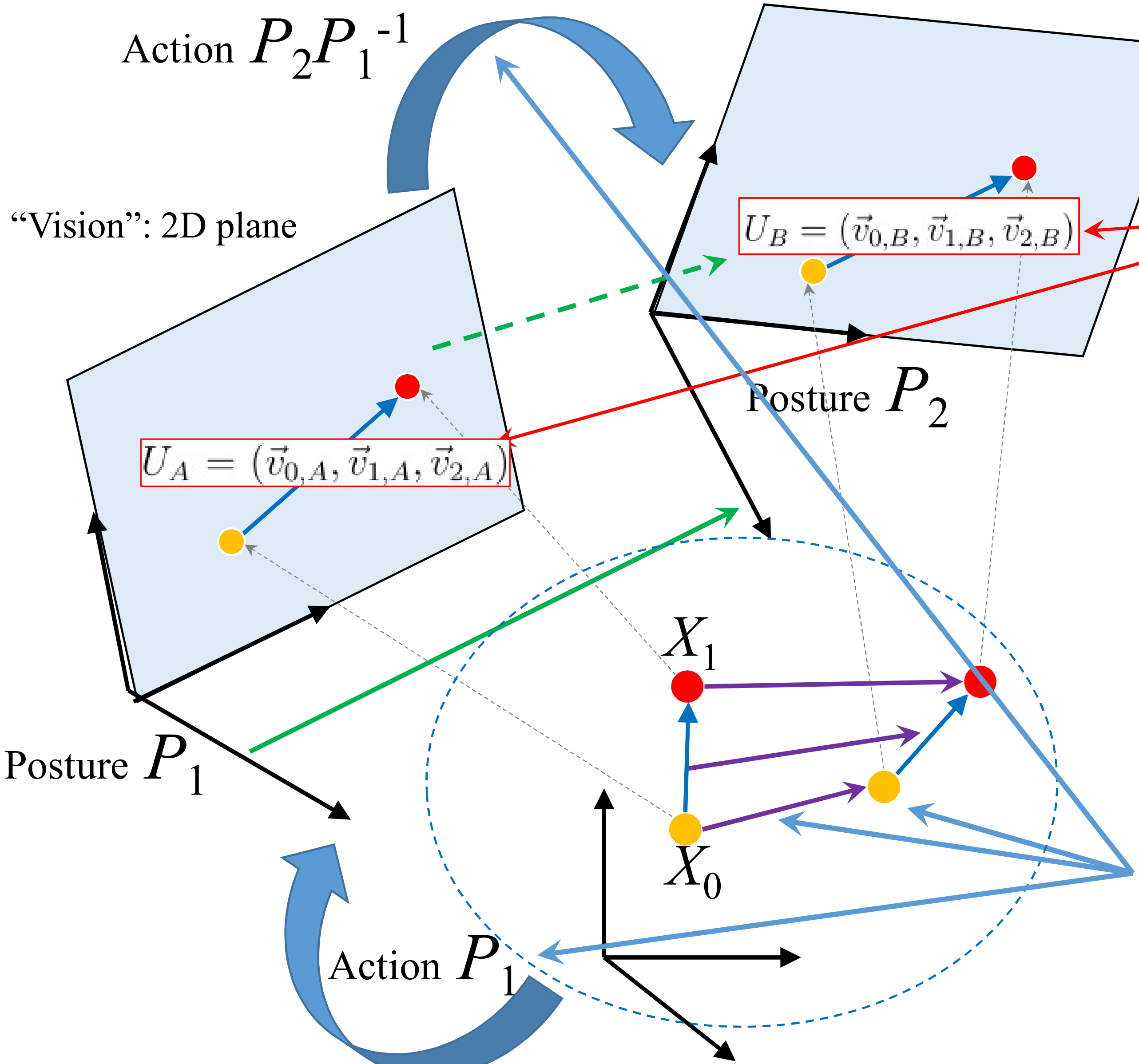
- 仮定：姿勢A, B, 動きMは未知であるが、一意に存在するとする。

視覚像A, B上に4点以上あれば、 $M = B^{-1} U_B U_A^{\dagger} A,$

⇔ $U_B U_A^{\dagger} = BMA^{-1}$ は一意に定まる。

- 以下の式は姿勢A, B, 動きMに関する情報を直接要求しない。しかし、視覚像U_A, U_Bの満たすべき制約(視覚像内の整合性)を与える(N>3)。
- 任意の3つ組の対 $I = (i_1, i_2, i_3)$ $J = (j_1, j_2, j_3)$ について $U_{A,I} := (\vec{u}_{i_1}, \vec{u}_{i_2}, \vec{u}_{i_3})$ $U_{B,J} := (\vec{v}_{j_1}, \vec{v}_{j_2}, \vec{v}_{j_3}).$
- すべての3つ組の対I,Jに関する制約を内的整合性方程式と呼ぶ：

$$U_{B,I} U_{A,I}^{-1} = U_{B,J} U_{A,J}^{-1}$$



"Proximal terms": 視覚像

Uniqueness hypothesis
("integration/ coherence")

$$\boxed{U_{B,I}U_{A,I}^{-1} = U_{B,J}U_{A,J}^{-1}}$$

内的整合性方程式

"Distal terms"
原座標/ 運動/ 姿勢

内的整合性方程式の基本構造

- 一般に、d次元上のN点に関して${}_N C_d d(N-d)/2$の方程式が存在。
- “直接”視覚(縮退のない/逆元のある)の場合
  - 内的整合性を満たす解は一意
- 不完全な視覚(縮退した/逆元のない)の場合
  - 内的整合性を満たす解は一意ではない。しかし概ね構造が決まる。
  - d=3: 3D→2Dの1次元縮退(視覚)の場合
    - 未知数は2Nで、内的整合性方程式のランクは$(N-2)^2$なので十分な制約を与える($N>3$).
    - しかし、内的整合性方程式はランク＝2(N-2)の行列積の関数であるため、それぞれの視覚像に対してRank=2の分だけ不定となる。(この原理的な不定性を除いて一致する解を同値類(同値解)と呼ぶ)

A bit of math (linear algebra)

- The general one-dim-missing intrinsic consistency equation:

$$W_{\mathcal{N}}(a_{\mathcal{N}} \otimes b_{\mathcal{N}}) = \mathbf{0}$$

$$\boxed{\mathrm{Rank}\, W_{\mathcal{N}} = (N\text{-}(d\text{-}d'))^2}$$

- Unobservables: $a_{\mathcal{N}},\ b_{\mathcal{N}} \in \mathbb{R}^n$

- Matrix

$$W_{\mathcal{N}} := \left\{\left(\left(E_{\widehat{N}_d} \otimes \mathbf{1}_{\hat{d}_m \widehat{(N-d)}_m}\right) \boxed{W_{\mathcal{N},d}\left(u_{\mathcal{N}}\right)}\right) \otimes \mathbf{1}_N^T\right\} \circ \left\{\mathbf{1}_N^T \otimes \left(\mathcal{E}_{\mathcal{N},d} \boxed{W_{\mathcal{N},d}\left(v_{\mathcal{N}}\right)}\right)\right\}$$
$$- \left\{\left(\mathcal{E}_{\mathcal{N},d} \boxed{W_{\mathcal{N},d}\left(u_{\mathcal{N}}\right)}\right) \otimes \mathbf{1}_N^T\right\} \circ \left\{\mathbf{1}_N^T \otimes \left(\left(E_{\widehat{N}_d} \otimes \mathbf{1}_{\hat{d}_m \widehat{(N-d)}_m}\right) \boxed{W_{\mathcal{N},d}\left(v_{\mathcal{N}}\right)}\right)\right\}.$$

$$\boxed{W_{\mathcal{N},d}\left(u_{\mathcal{N}}\right)} := \sum_{I \in C_d(\mathcal{N})} e_{\widehat{|\mathcal{N}|}_d, \sigma_{\mathcal{N},d}(I)} \left(E_{|\mathcal{N}|,I} \delta\left(u_I\right)\right)^T \in \mathbb{R}^{\widehat{N}_d \times |\mathcal{N}|} \quad \text{where } \widehat{N}_k := \binom{N}{k}$$

$$\mathcal{E}_{\mathcal{N},d} = \sum_{I \in C_d(\mathcal{N})} \sum_{J \in I_{d-1}} \left(e_{\bar{N}_d, \sigma(I)} \otimes e_{\hat{d}_1(N-d), \sigma_{I_{d-1}}(J)} \otimes e^T_{\hat{N}_d, \sigma(J)}\right) \qquad \delta\left(u_I\right) := \left(\left|u_{i_2} \quad u_{i_3}\right|, \left|u_{i_3} \quad u_{i_1}\right|, \left|u_{i_1} \quad u_{i_2}\right|\right)^T \in \mathbb{R}^3$$

- Indeterminancy : $W_{\mathcal{N},3}\left(u_{\mathcal{N}}\right) a = W_{\mathcal{N},3}\left(u_{\mathcal{N}}\right) a'$ and $W_{\mathcal{N},3}\left(v_{\mathcal{N}}\right) b = W_{\mathcal{N},3}\left(v_{\mathcal{N}}\right) b'$

$$\boxed{\mathrm{Rank}\, W_{\mathcal{N},d}\left(u_{\mathcal{N}}\right) = N\text{-}(d\text{-}d')}$$

Algorithm

- Iterative power method for nonlinear eigenvalue-like equation:

$$W_{\mathcal{N}}(a_{\mathcal{N}} \otimes b_{\mathcal{N}}) = \mathbf{0}$$

⇔Minimize $f(a,b) := \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}^T W_{a,b} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ where $W_{a,b} := \begin{pmatrix} b \otimes I_n & I_n \otimes a \end{pmatrix}^T W^T W \begin{pmatrix} b \otimes I_n & I_n \otimes a \end{pmatrix}$

subject to $a^T a + b^T b = c$

Converted to the eigenvalue-like problem: $\left(W_{\hat{a},\hat{b}} - \lambda I_n\right) x = \mathbf{0}_n$

The root of the original equation is a eigenvectors *x* of the zero eigenvalue.

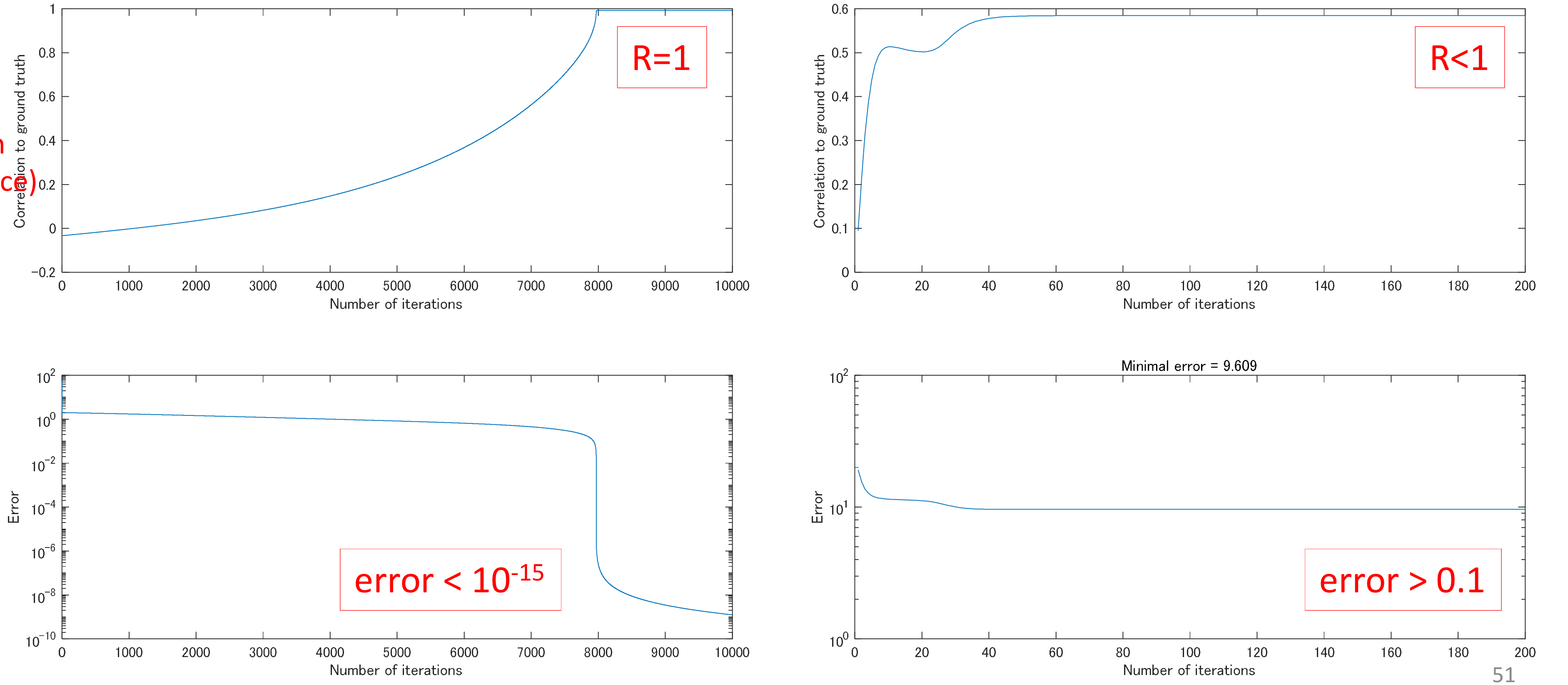
推定(数値計算): N=20, d=3, d'=1
Estimating a, b for a given W.

With ***consistent*** visual vectors

With ***random*** visual vectors

Correlation to the ground truth (up to equivalence)

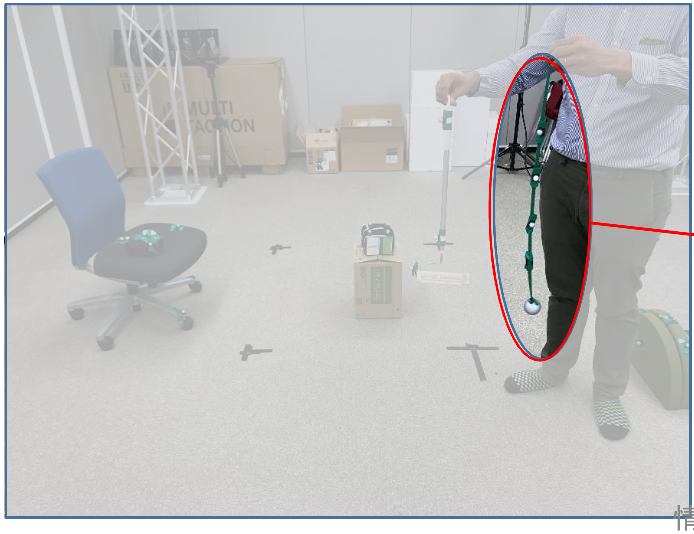
Error in the intrinsic equation

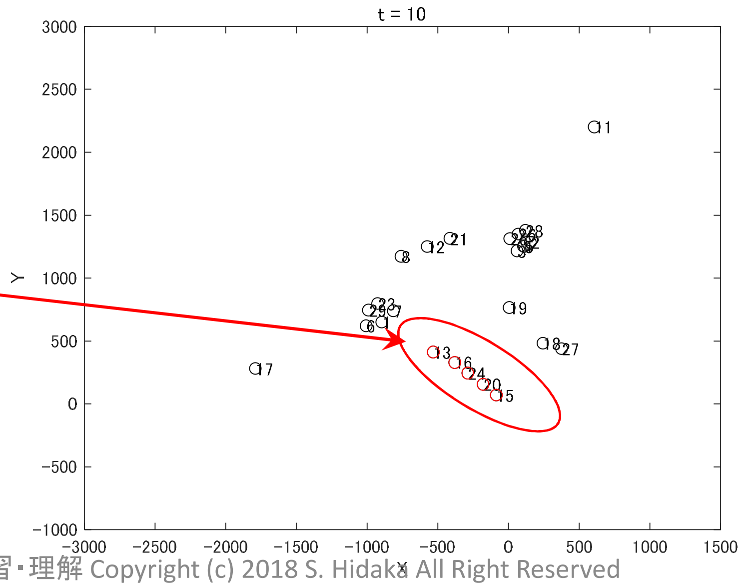


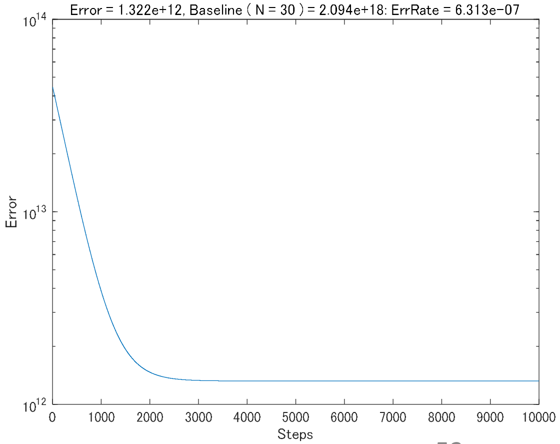
実世界でのテスト: 物体 vs 非物体

The 5 line-connected points: Error ～ 1.32×10^{12}

Min of 30 sets of 5 random points: Error ～ 2.10×10^{18}







ここまでのまとめ

- 理解の一様式として物体認識の問題
  - Polanyi's “the blind man with a probe” problem
  - 動き(変換)のある3次元点群の同一性を視覚像から求める問題として定式化

- 線形変換群/モノイド上の構造(原像)を、縮退した像から推定
  - 図式の可換性(群/モノイド準同型)を利用して整合性方程式を導出
  - 整合性方程式の性質
    - 像ベクトルの組からなる行列群がすべて正則ならば、一定の冗長性(無数の同値類)を除いて、解が一意に定まる。
    - つまり、原理的な不定性と、しかしそれ以外の性質が十分に定まる可能性を示した
  - 整合性方程式の数値解
    - 非線形固有値問題のゼロ固有値に対する固有ベクトルとして求まる
  - ひらたくいえば:“最も手元”の情報(近位項)だけで、その原型がもつ全体性(遠位項)を再構成可能

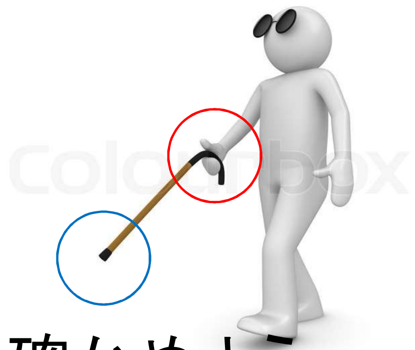
なぜ“理解”は”意識/きづき”と関わるのか?

- 現象学的な経験として
  - “わかった”と思う (Aha! experience)
  - “しっくりくる” (腑に落ちる)
  - “気づき”なくして理解なし (無意識に”うっかり”理解することはない)

- 特徴・機能性 (学習と対比して)
  - ? 能動的: 自ら“理解する”しかない(他者が強制的に”理解”させられない)
  - ✔ 洞察的: “同じ現象”の見方(フレーミング・モデル)が変わる
  - ✔ 基礎的: 一度理解すれば、広い応用のある基礎となる

オブジェクト性～自律性

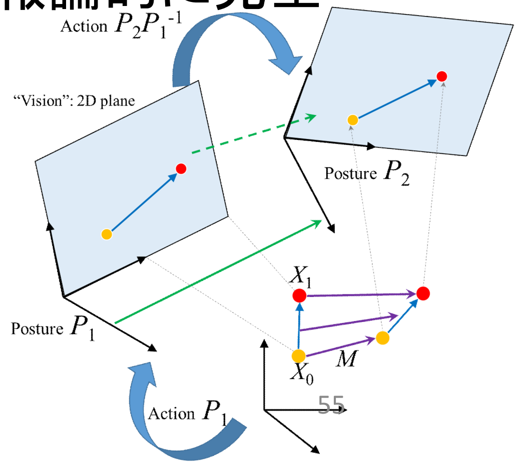
なぜ"網膜に像が見えない"か?



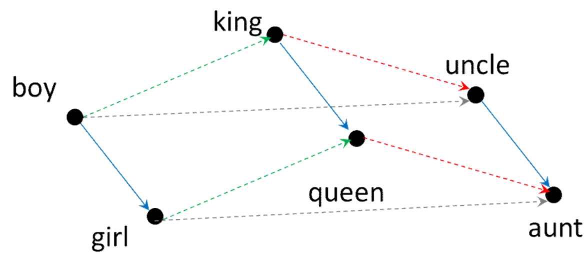
- 自らの探索と環境の変化の"一致"をもってしか"自己"を確かめようがない

  → メンタルシミュレーションには意識的な過程が介入する?

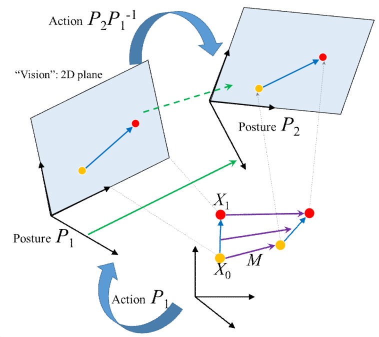
- "自律性"/ "モジュール"/ "認知的閉じ"
  - ある意味で"独立"している主体/システムを前提とするが、情報論的に完全に独立ではありえない(情報論的な入・出力がある)。
  - 本研究はこれらの概念に対して数理的基礎を与える可能性
    - 未知なる3D構造を要求せずに、視覚像に閉じた情報だけで認識可能



Message: “機械理解”に向けて



- 情報・学習を射の構築、理解を関手(可換な合成をもつ射)の構築
- 関手～操作可能なモデル・シミュレーション
  - 類推
  - 視覚的オブジェクトの認識/ Polanyiの杖



- 関手としての制約
  - 関手であるために満たすべき制約が方程式を与え、逆にオブジェクト認識可
- 理解と意識
  - 可換制約の計算で逆に「自己」を認識可能と考えれば、「気づきなくして理解なし」の説明にも？ ~ machine consciousness

Thank you for your attention!

- This work is supported by JSPS KAKENHI
  - Grant-in-Aid for Young Scientists JP 16H05860
  - Scientific Research on Innovative Areas JP 16H01609
  - Scientific Research B (Generative Research Fields) JP 15KT0013