人工知能入門
第6回

藤田 悟
黄 潤和

前回までの復習: 知識表現

- 宣言的知識
  - is-a 型
  - has-a 型
  - 論理式を用いた表現
    - 命題論理式
    - 述語論理式
  - 意味ネットワーク
  - フレーム
- 手続的知識
  - プロダクションルール(システム)
- 文脈知識
  - スクリプト

今回学ぶこと

- 推論とは
  - 3種類の推論
    - 知識表現との対比
- 前向き推論
- 後ろ向き推論

推論とは

推論

- 「持っている知識」から「結論」を導き出す
- 「持っている知識」から「新しいこと」を考える

- データベースそのものは、大量の知識を保管するが、推論能力を持たない
  - データマイニングと組み合わせると、大量のデータから、新しい事実を発見する
- 知識ベースは、大量の知識を持ち、推論能力を合わせ持つ

「食事をする」からの推論

空腹である

満腹である

食堂に行く

のどが渇く

朝起きる

食事をする

体が温まる

お昼になる

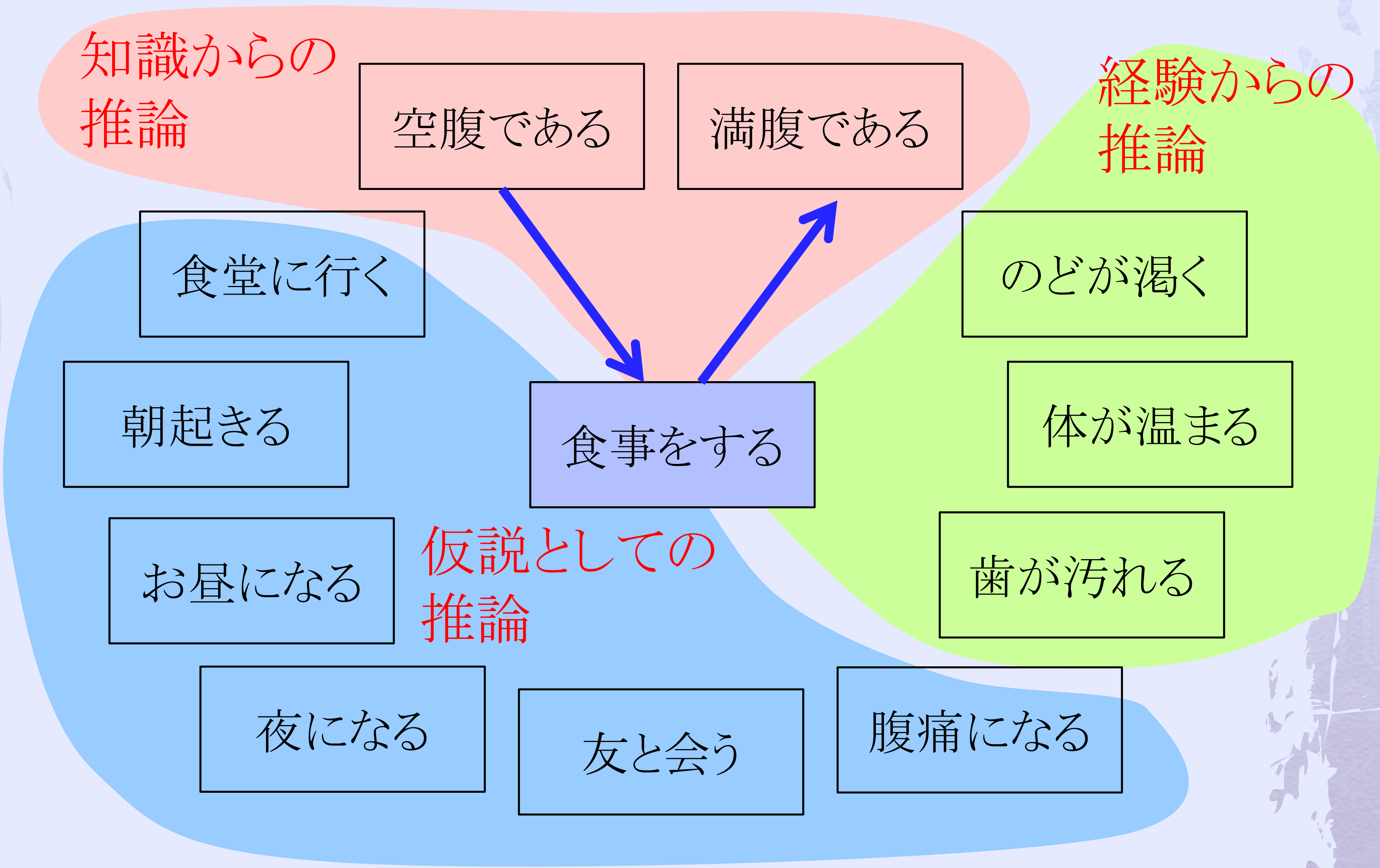
歯が汚れる

夜になる

友と会う

腹痛になる

「食事をする」からの推論


知識からの推論
空腹である
満腹である
経験からの推論
食堂に行く
のどが渇く
朝起きる
食事をする
体が温まる
仮説としての推論
お昼になる
歯が汚れる
夜になる
友と会う
腹痛になる

「旅行に行く」からの推論

時間がある

お金が減る

お金がある

気分が
変わる

夏休み

旅行に行く

楽しい

GW

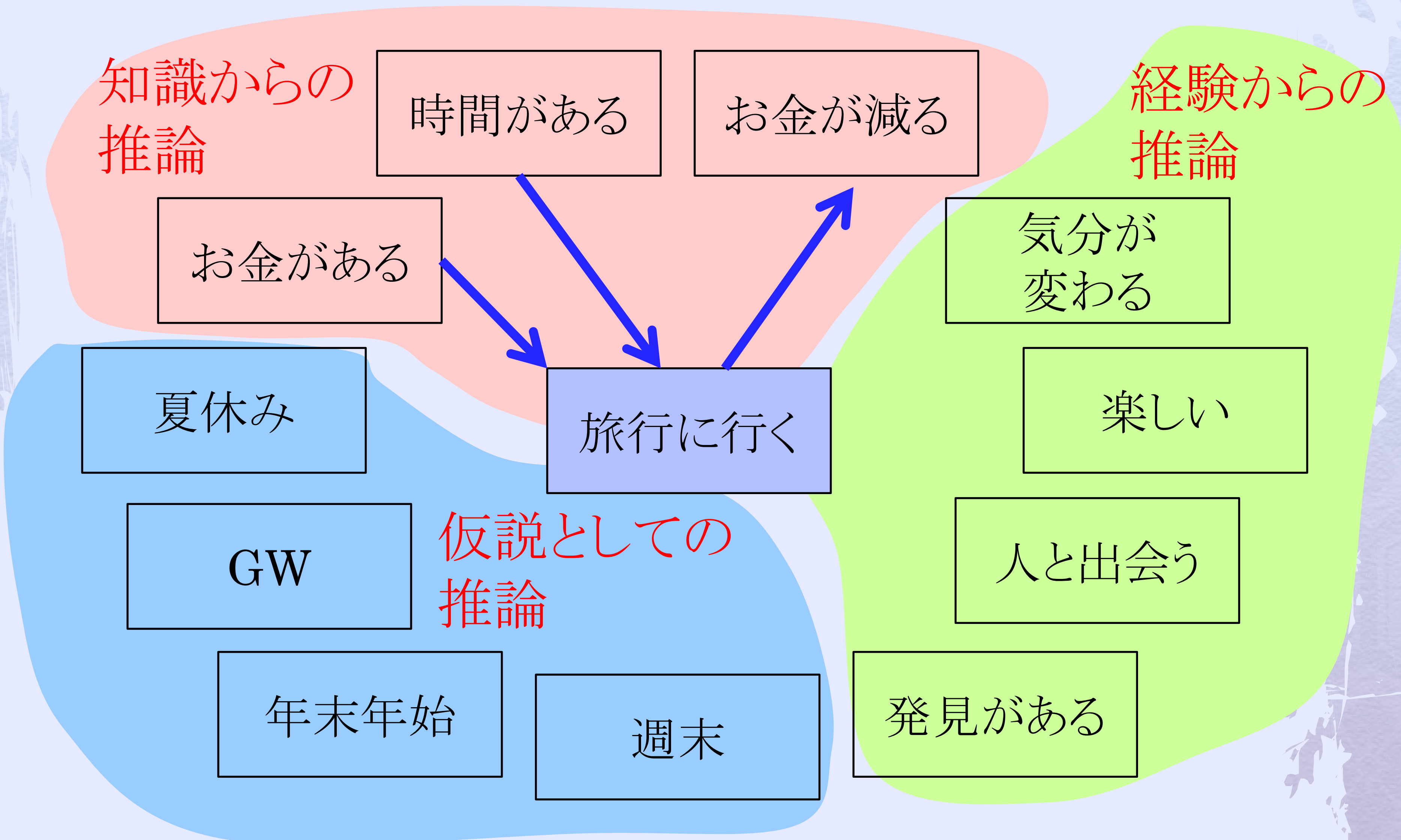
人と出会う

年末年始

週末

発見がある

「旅行に行く」からの推論


知識からの推論
時間がある
お金が減る
お金がある
経験からの推論
気分が変わる
夏休み
旅行に行く
楽しい
GW
仮説としての推論
人と出会う
年末年始
週末
発見がある

(演習1)

- 「PCが動かない」から推論されることを図示せよ。
  - 推論を、知識からの推論、経験からの推論、仮説としての推論に分類せよ。

「推論」という言葉

- 人間は、「推論」という言葉で、様々な異なるタイプの推論を表現している
- 人工知能を実現するには、これらの差異を十分に理解して、推論エンジンを作成する必要がある。
- 演繹推論: 知識から論理的に導く推論
- 帰納推論: 経験から学習的に導く推論
- 仮説推論(アブダクション): 知識から可能性として推定を行う推論

演繹推論

- 論理式表現された確実な知識から、確実な結論を導く推論方法
  - 第2回、第3回
- 手続表現された知識を用いて、最初に保有した知識から手続を用いて決定的に結論を導く推論方式
  - 第4回

第2回資料

命題論理を用いた推論

1. P: ニワトリは鳥である
2. Q: 鳥は空を飛ぶ
3. R: ニワトリは空を飛ぶ
4. P∧Q⇒R: ニワトリが鳥であり、かつ、鳥が空を飛ぶならば、ニワトリは空を飛ぶ

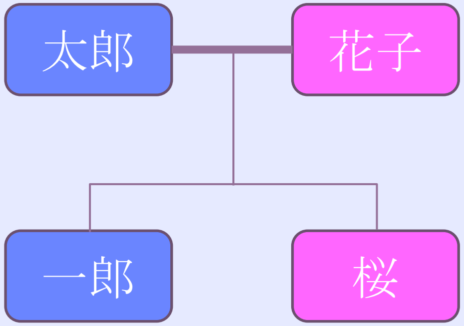
- ここで、1と2と4が真であることが知識として与えられているならば、Rは真になる。

P	Q	R	P∧Q	P∧Q ⇒R
T	T	T	T	T
T	T	F	T	F
T	F	T	F	T
T	F	F	F	T
F	T	T	F	T
F	T	F	F	T
F	F	T	F	T
F	F	F	F	T

述語論理を用いた推論

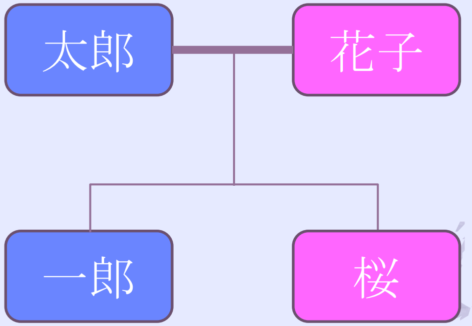
- 親(太郎, 一郎)
- 親(太郎, 桜)
- 親(花子, 一郎)
- 親(花子, 桜)
- 男(太郎)
- 男(一郎)
- 女(花子)
- 女(桜)
- 父(x, y) ⇒ 親(x, y) ∧ 男(x)
- 娘(y, x) ⇒ 親(x, y) ∧ 女(y)

- 一郎の父は? 父(x, 一郎)
- 太郎の娘は? 娘(x, 太郎)



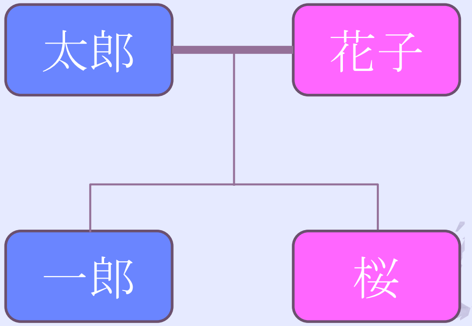
推論の過程1

- 父(x, 一郎)
  - 適用: 父(x, y) ⇒ 親(x, y) ∧ 男(x)
  - 父(x, 一郎) ⇒ 親(x, 一郎) ∧ 男(x)
  - 親(x, 一郎)∧男(x)
  - 親(x, 一郎) | x∈{太郎,花子}∧男(x)
  - 親(太郎, 一郎)∧男(太郎)
- 父(太郎, 一郎) … x = 太郎



推論の過程2

- 娘(x, 太郎)
  - 適用: 娘(y, x) ⇒ 親(x, y) ∧ 女(y)
  - 娘(y, 太郎) ⇒親(太郎, y) ∧ 女(y)
  - 親(太郎, x) ∧ 女(x)
  - 親(太郎, x) | x∈{一郎, 桜} ∧ 女(x)
  - 親(太郎, 桜) ∧ 女(桜)
- 娘(桜, 太郎) … x = 桜



第4回資料

プロダクションシステムの動作例2

初期状態

<Working Memory>
太郎は朝食を食べていない
太郎はラーメンが好きである

ルール検索

<ルール1>
IF (Xは朝食を食べていない)
THEN add (Xは空腹である))

<ルール2>
IF (Xは空腹である) ∧ (Xはラーメンが好きである)
THEN add (Xをラーメン屋に誘う)

ルール適用

<Working Memory>
太郎は朝食を食べていない
太郎はラーメンが好きである
太郎は空腹である

ルール検索

ルール適用

<Working Memory>
太郎は朝食を食べていない
太郎はラーメンが好きである
太郎は空腹である
太郎をラーメン屋に誘う

(演習2)

- 第3回資料を用いて、次の推論過程を説明せよ
  - 一郎の母は？　(既に第3回で演習済み)
  - 桜の兄弟は？

  - 追加する知識
    - 母$(x, y) \Rightarrow$ 親$(x, y) \land$ 女(x)
    - 兄弟$(x, y) \Rightarrow$ 親$(z, y) \land$ 親$(z, x) \land (x \neq y)$

帰納推論

- 観測されたケースから観測されていないケースを推測するための一般化 (学習)
  - スズメは鳥である。スズメは空を飛ぶ。
  - カラスは鳥である。カラスは空を飛ぶ。
  - カモメは鳥である。カモメは空を飛ぶ
    - 帰納推論: 鳥は空を飛ぶ
- しかし、
  - ダチョウは鳥である。ダチョウは空を飛ばない
    - 帰納推論の一般化しすぎ。あるいは、例外処理が必要

学習

- 魚を分類できる条件は何か？

	泳ぐ	ヒレを持つ	飛ぶ	肺を持つ	魚である
にしん	yes	yes	no	no	yes
猫	no	no	no	yes	no
鳩	no	no	yes	yes	no
トビウオ	yes	yes	yes	no	yes
カワウソ	yes	no	no	yes	no
たら	yes	yes	no	no	yes
くじら	yes	yes	no	yes	no

※ 詳しくは、学習の単元で学びます

仮説推論(アブダクション)

- 知識が不完全な時に、原因や結果の可能性を推論する
  - PCが動かない時
    - たぶん、電源が入らないと仮説を立てる
      - しかし、電源ランプはついている
    - 次に、HDDが壊れたと仮説を立てる
      - HDDアクセスランプが消えている
    - そこで、仮説が正しそうだと考える

    - しかし、実際はキーボードケーブルが抜けたいただけかもしれない

命題論理を用いた推論

1. P: ニワトリは鳥である
2. Q: ニ
3. P⇒Q リは空を飛ぶ

◆ ここで、 与えられているi

P							¬P∨Q
T							T
T							F
F							T
F	F	T	T	F	F	T	T

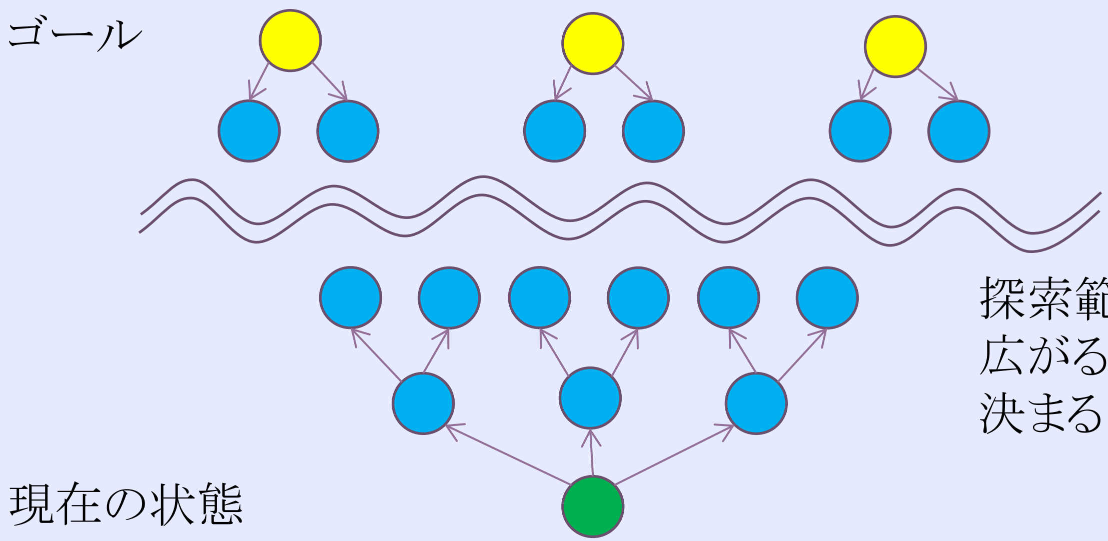
論理式からは、
「ニワトリは鳥である」
は証明できない

しかし、仮説推論では
仮説として取り上げる

前向き推論と後ろ向き推論

ボトムアップかトップダウン

- 現在の状態から、ゴール向けて様々な可能性を推論していくのがボトムアップ(データ駆動)
- ゴール状態が成立する条件を1歩ずつ現在の状態に向けてたどるのがトップダウン(ゴール駆動)



探索範囲がどのくらい広がるかで、良し悪しが決まる

札幌に行く

- 後ろ向き推論
  - 札幌に行く → 羽田に行く ∧ 羽田-千歳の飛行機 ∧ 千歳-札幌の移動
  - 羽田に行く → 浜松町に行く ∧ モノレールに乗る ∨ 蒲田に行く → 京急羽田線に乗る
  - … 探索範囲が絞られている

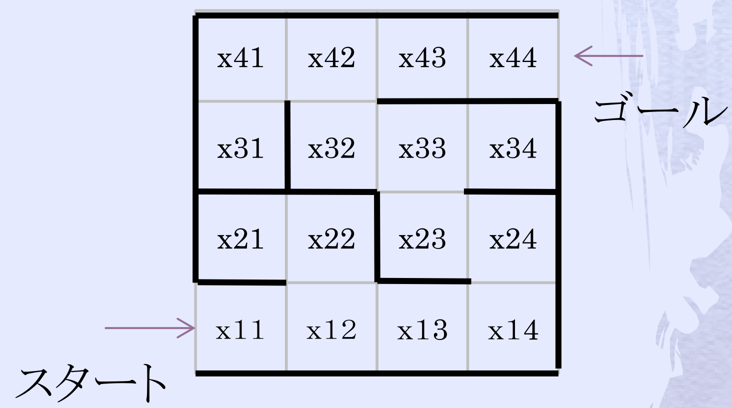
- 前向き推論
  - 東小金井 ∧ 中央線 → 新宿に行く
  - 東小金井 ∧ 中央線 → 立川に行く
  - 東小金井 ∧ 中央線 → 八王子に行く
  - … とてもゴールにたどり着かない

将棋プレイヤ

- 後向き推論
  - 将棋に勝つ → 盤面G0∨盤面G1∨…∨盤面G∞
  - … そもそもゴール状態が無数にあり、推論が始まらない
- 前向き推論
  - 現在 ∧ 歩1を動かす → 盤面A1
  - 現在 ∧ 歩2を動かす → 盤面A2
  - 現在 ∧ 飛車をX1に動かす → 盤面Ax1
  - … 状態数は多いが、有限の状態で推論できそう

迷路

- 後向き
  - x44 → x43 ∧ right
  - x43 → x42 ∧ right
  - x42 → x41 ∧ right
  - x42 → x32 ∧ up
  - …
- 前向き
  - x11 ∧ right → x12
  - x12 ∧ up → x22
  - x12 ∧ right → x13
  - x22 ∧ left → x21
  - x13 ∧ right → x14
  - …



前向き推論も後ろ向き推論も
難しさに変わりはない

(演習3)

- 3x3 の迷路を作って、前ページと同じ要領で、前向き推論と後ろ向き推論の論理式を完成させよ。
- 前向き推論、後ろ向き推論の推論手順を示せ

Seven inference rules for propositional Logic

- R(1) Modus Ponens $$\frac{\alpha \Rightarrow \beta,\ \alpha}{\beta}$$
- R(2) And-Elimination $$\frac{\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \ldots \wedge \alpha_n}{\alpha_i}$$
- R(3) And-Introduction $$\frac{\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n}{\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \ldots \wedge \alpha_n}$$
- R(4) Or-Introduction $$\frac{\alpha_i}{\alpha_1 \vee \alpha_2 \vee \ldots \vee \alpha_n}$$
- R(5) Double-Negation Elimination $$\frac{\neg \neg \alpha}{\alpha}$$
- R(6) Unit Resolution $$\frac{\alpha \vee \beta,\ \neg \beta}{\alpha}$$
- R(7) Unit Resolution $$\frac{\alpha \vee \beta,\ \neg \beta \vee \gamma}{\alpha \vee \gamma}$$

Inferring knowledge using propositional logic

Concerning with the 6 squares, [1,1], [2,1], [1,2], [3,1], [2,2], [1,3], there are 12 symbols,

$S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{1,2}$, $B_{1,1}$, $B_{2,1}$, $B_{1,2}$, $W_{1,1}$, $W_{1,2}$, $W_{2,1}$, $W_{2,2}$, $W_{3,1}$, $W_{1,3}$

The process of finding a wumpus in [1,3] as follows:

$$\frac{\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \ldots \wedge \alpha_n}{\alpha_i}$$

$$\frac{\alpha \vee \beta, \neg \beta}{\alpha}$$

R_4: $S_{1,2} \Rightarrow W_{1,3} \vee W_{1,2} \vee W_{2,2} \vee W_{1,1}$

1. Apply R_1 to $\neg S_{1,1}$, we obtain

   $\neg W_{1,1} \wedge \neg W_{1,2} \wedge \neg W_{2,1}$

2. Apply And-Elimination, we obtain

   $\neg W_{1,1}$ $\neg W_{1,2}$ $\neg W_{2,1}$

3. Apply R_2 and And-Elimination to $\neg S_{2,1}$, we obtain

   $\neg W_{1,1}$ $\neg W_{2,2}$ $\neg W_{2,1}$ $\neg W_{3,1}$

4. Apply R_4 and the unit resolution to $S_{1,2}$, we obtain (α is $W_{1,3} \vee W_{1,2} \vee W_{2,2}$ and β is $W_{1,1}$)

   $W_{1,3} \vee W_{1,2} \vee W_{2,2}$

5. Apply the unit resolution again, we obtain (α is $W_{1,3} \vee W_{1,2}$ and β is $W_{2,2}$)

   $W_{1,3} \vee W_{1,2}$

6. Apply the unit resolution again, we obtain (α is $W_{1,3}$ and β is $W_{1,2}$)

   $W_{1,3}$

Here is the answer: the wumpus is in [1,3].

The three new inference rules

- R (8) Universal Elimination: For any sentence α, variable *v*, and ground term g:

$$\frac{\forall v \;\; \alpha}{\text{SUBST}(\{v/g\}, \alpha)}$$

Ground term is a term that contains no variables.

key	value
x	rose
y	Murderer
…	…
x	…

e. g., *∀ x Likes(x, IceCream)*, we can use the substitute *{x/Rose}* and infer *Like(Rose, IceCream)*.

- R (9) Existential Elimination: For any sentence α, variable *v*, and constant s *k* that does not appear elsewhere in the knowledge base:

$$\frac{\exists v \;\; \alpha}{\text{SUBST}(\{v/k\}, \alpha)}$$

e. g., *∃ x Kill(y, Victim)*, we can infer *Kill(Murderer, Victim)*, as long as *Murderer* does not appear elsewhere in the knowledge base.

- R (10) Existential Introduction: For any sentence α, variable *v* that does not occur in α, and ground term g that does occur in α:

e. g., from *Likes(Rose, IceCream)* we can infer *∃ x Likes(x, IceCream)*.

$$\frac{\alpha}{\exists v \; \text{SUBST}(\{g/v\}, \alpha)}$$

Example of proof (証明)

Bob is a buffalo	1. *Buffalo(Bob)*	--*f1*
Pat is a pig	2. *Pig(Pat)*	--*f2*
Buffaloes run faster than pigs	3. $\forall$ *x, y Buffalo(x)* $\wedge$ *Pig(y)* $\Rightarrow$ *Faster(x,y)*	--*r1*

To proof:

Bob runs faster than Pat

Apply R(3) to *f1* And *f2* (And-Introduction)	4. *Buffalo(Bob)* $\wedge$ *Pig(Pat)*	--*f3*
Apply R(8) to *r1* {x/Bob, y/Pat} (Universal-Elimination)	5. *Buffalo(Bob)* $\wedge$ *Pig(Pat)* $\Rightarrow$ *Faster(Bob,Pat)*	--*f4*
Apply R(1) to *f3* And *f4* (Inplication-Elimination)	**6**. *Faster(Bob,Pat)*	--*f5*

$\forall\, x, y\ Buffalo(x) \wedge Pig(y) \Rightarrow Faster(x,y)$

(Universal-Elimination)

$Buffalo(Bob) \wedge Pig(Pat) \Rightarrow Faster(Bob,Pat)$

$Buffalo(Bob)$

$Pig(Pat)$

(And-Introduction)

$Buffalo(Bob) \wedge Pig(Pat)$

$\boxed{\alpha \Rightarrow \beta}$

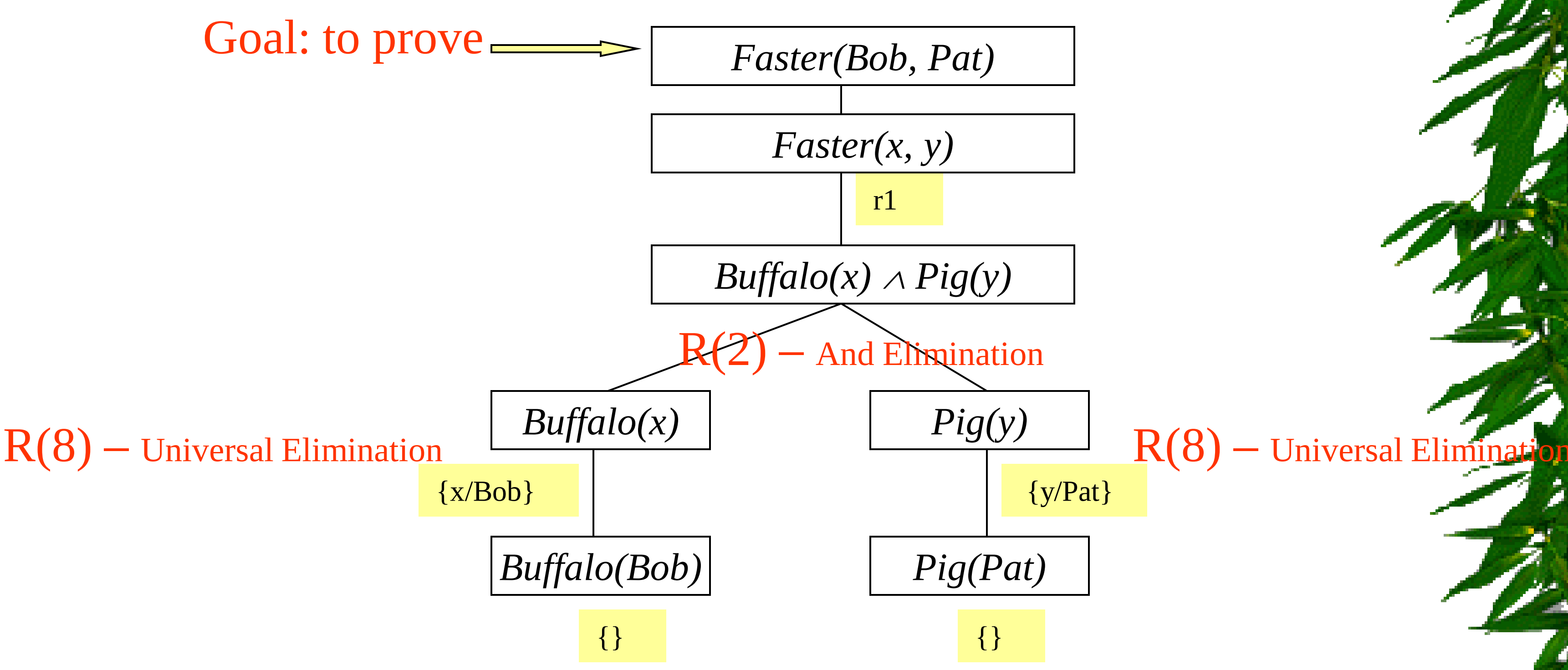
$$\frac{\alpha \Rightarrow \beta,\ \alpha}{\beta}$$

$\boxed{\alpha}$

$Faster(Bob, Pat)$

Backward chaining example

Bob is a buffalo	1. *Buffalo(Bob)*	--*f1*
Pat is a pig	2. *Pig(Pat)*	--*f2*
Buffaloes run faster than pigs	3. $\forall\, x, y\ Buffalo(x) \wedge Pig(y) \Rightarrow Faster(x,y)$	--*r1*



(課題)

- 教科書 p54 演習1に回答せよ
  - ヒント (必ずしも、下記の例にこだわらない)
    - 演繹推論は、祖父を推論する
    - 帰納推論は、魚が泳ぐ動物であることを推論する
    - アブダクションは、電子機器は「電池が切れたら、立ち上がらない」ことを使って、立ち上がらない原因を推論する