

認知科学と人工知能の基礎を学ぶ

滋賀学習センター 客員教員
龍谷大学 理工学部 教授
小堀 聡

2016 年 5 月 7 日（土）～ 8 日（日）

授業項目（目次）

1 日目：

- (1) 認知科学と人工知能の歴史…………… 1
- (2) 感覚・知覚と運動…………… 3
- (3) 記憶と学習…………… 8
- (4) ニューラルネットワーク…………… 12

2 日目：

- (5) 知識表現…………… 18
- (6) 問題解決と探索…………… 24
- (7) 推論…………… 30
- (8) 認知科学と人工知能の応用…………… 33

講義概要

人工知能には、人間の知能を機械で実現しようとする工学的な立場と人間の知能のメカニズムを解明しようとする科学的な立場があります。前者が狭義の人工知能であり、後者は認知科学と呼ばれます。授業では、特に両者に共通する基礎的な事項について説明します。まず、人間の認知過程の基礎について解説し、次に、それらがどのように計算機で実現されるのかについて学習します。また、教育や医療への応用についても述べます。

参考図書

- 「心と脳—認知科学入門」(岩波新書), 安西 祐一郎, 岩波書店 (2011)
- 「言葉はなぜ生まれたのか」, 岡ノ谷 一夫, 文藝春秋社 (2010)
- 「赤ちゃんの不思議」(岩波新書), 開 一夫, 岩波書店 (2011)
- 「脳の情報を読み解く BMI が開く未来」(朝日選書), 川人 光男, 朝日新聞出版 (2010)

担当者

氏名：小堀 聡（こぼり さとし）

所属：龍谷大学工学部電子情報学科

主な担当科目：計算機基礎実習，デジタル論理，認知科学と人工知能，生体システム特論（大学院）

※滋賀学習センターでは勉強会「岩波新書で「脳科学」を読む」を担当。

（論文「消滅と遅延を伴うボタン押し課題による認知症高齢者の視覚運動機能の評価—CDR との比較—」，電子情報通信学会和文論文誌D，Vol. J94-D，No. 8，pp. 1450-1460（2011）より）



小堀 聡（正員）

昭 62 大阪大大学院医学研究科修士課程了．平 4 龍谷大学工学部電子情報学科助手，講師，助教授を経て平 20 同大学教授となり現在に至る．平 10 及び平 17 ロンドン大学認知神経科学研究所客員研究員．生体

情報処理と認知科学の立場から，知覚と運動，記憶と学習，問題解決などに関する研究に従事．情報処理学会，日本認知科学会，日本生体医工学会，日本人間工学会，バイオメカニズム学会等各会員．工博．

Webサイト <http://milan.elec.ryukoku.ac.jp>

電子メール kobori@rins.ryukoku.ac.jp

※担当科目の講義ノートなどもあり

(1) 認知科学と人工知能の歴史

1. 認知科学の定義

脳と心の働きを情報の概念や情報科学の方法論に基づいて明らかにし、もって生物、特に人間の理解を深めようとする知的営み（岩波講座「認知科学」まえがき）

領域：情報科学，神経科学，心理学

分野：知覚，運動，記憶，言語，思考，行動，情動，注意，意識

認知科学の考え方

情報処理アプローチとは

人間＝環境との相互作用を行う情報処理システム

感覚系（視覚や聴覚）からの入力（刺激）

脳などで情報処理

運動系（手や足）への出力（反応）

脳＝ハードウェア

心＝ソフトウェア

認知科学と認知心理学の違い

認知科学

情報科学，神経科学，生物学，心理学，言語学，人類学，動物行動学，哲学などを含んだ学際的領域

認知心理学

認知を扱う心理学

認知科学の心理学領域（情報処理アプローチを取る心理学）

2. 人工知能の定義と方法論

人間の知的な働きと同じ働きを、機械によって実現することを目的とする科学技術、あるいは、そのような科学技術によって実現される具体的なシステムである。

（人工知能学会編，人工知能ハンドブック）

↓

知的とは何か？

工学的な立場：人間の知能を機械で実現しようとするもの（狭義の人工知能）

科学的な立場：人間の知能のメカニズムを解明しようとするもの（認知科学）

↓

両者の協力関係が必要（広義の人工知能は両方を含んでいる）

記号処理の立場：記号計算，つまり対象の記号による表現とその形式的な操作によって知的機能を実現する

並列分散処理の立場：ネットワーク構造の上でのパターン変換を情報処理の基本として知的機能を実現する（PDP，コネクショニズム）

↓

記号処理モデルと並列分散処理モデルの統合

認知科学と人工知能の関係

人工知能から見た認知科学＝人工システムを作る際に応用できる知見を提供

認知科学から見た人工知能＝仮説を検証するのに必要なシミュレーション技法を提供

（両者の関係は密接）

3. 人工知能の歴史

1940 年代

計算機の誕生
計算理論についての研究

1950 年代

人工知能という言葉が誕生
ダートマス会議 (1956 年)
定理証明, 一般問題解決器, 機械翻訳

1960 年代

推論中心の時代
ゲームプログラム
自然言語処理
パーセプトロン (ニューラルネットワーク)

1970 年代

知識の時代
エキスパートシステム
知識工学の提唱
フレーム, スクリプトなどの知識表現

1980 年代

人工知能の実用化
計算機の高性能化
エキスパートシステムの発展
ニューラルネットワークの復活
不確実性の扱い (ファジィ推論)
遺伝的アルゴリズム

1990 年代以降

情報環境の変化
データマイニング
エージェント
自律ロボット

4. 人工知能の分野

基礎分野

探索, 知識表現, 学習

応用分野

自然言語処理, 音声理解, ビジョン
エキスパートシステム, ロボット



人工知能学会のサイトより引用

参考書

人工知能学会編: 人工知能学事典 (共立出版)
橋田浩一他著: 岩波講座・認知科学 1・認知科学の基礎 (岩波書店)

その他のキーワード

チューリングテスト, 中国語の部屋, 強いA I, 弱いA I

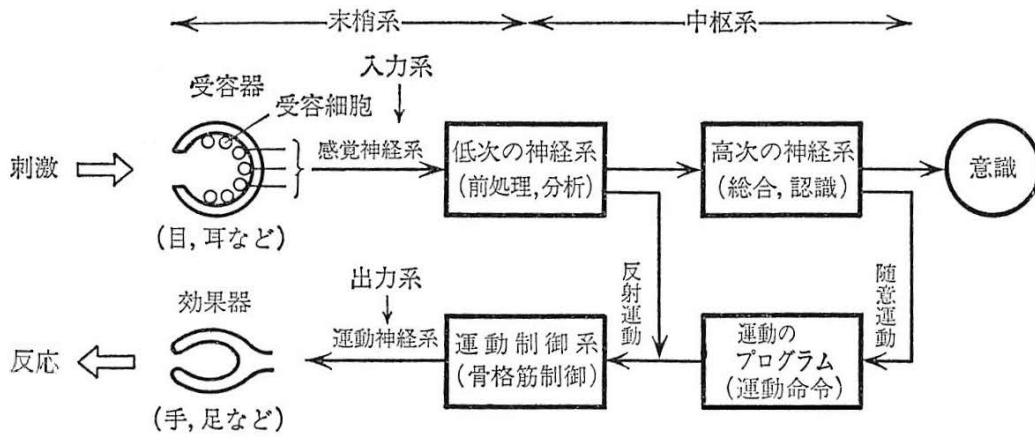
(2) 感覚・知覚と運動

1. 神経情報系

人間＝情報の処理を通じて環境との相互作用を行うシステム

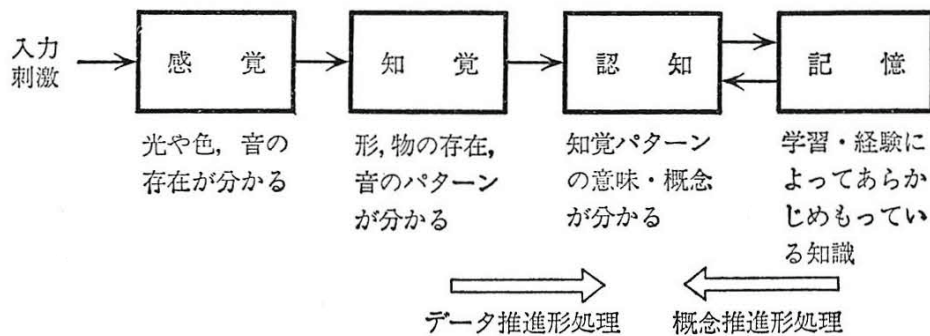
- 受容器 (感覚器) : 目や耳など
- 効果器 : 手や足など
- 刺激 : 入力情報
- 反応 : 出力行動

- 感覚神経系 : 感覚器からの情報の求心的経路
- 運動神経系 : 効果器に情報を送る遠心的経路
- 自律神経系 : 内臓諸器官をつかさどる, 意識には上がらない



刺激から反応への情報伝達の経路を示すモデル

- 感覚 : 刺激による反応で生じる意識, 初歩的, 要素的, 主観的
- 知覚 : 感覚より高次の働き, 総合的, 客観的
- 認知 : 意味や概念の理解, かなり高次の働き



パターン認識の心理学的階層構造

2. 感覚の種類

種：感覚の違い（視覚，聴覚など）

質：種の中での違い（明るさ，色など）

特殊感覚：固有の感覚器によるもの

受容細胞：刺激を受け入れる細胞

感覚の種類とその受容器

	種 modality	質 quality	受容器(受容細胞) receptor (数)	C. N. S. への数	ビット/sec
特殊 感覚	視覚	明暗・色・形・運動・奥行	網膜(視細胞) 10^8	10^6	$3 \cdot 10^6$
	聴覚	大きさ・高さ・音色・方向	蝸牛(有毛細胞) $3 \cdot 10^4$	10^4	$2 \sim 5 \cdot 10^4$
	嗅覚	各種	嗅粒膜(嗅細胞) 10^7	10^3	$10 \sim 100$
	味覚	酸・塩・甘・苦	味蕾(味細胞) 10^7	10^3	10
	平衡感覚		半規管(有毛細胞)		
体感 性覚	皮膚感覚	触・圧・温・冷・痛	皮膚(各種) 触・圧 $5 \cdot 10^5$ 温・冷 10^5	10^4	$2 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^3$
	深部感覚	運動・拳重	筋・腱・関節の受容細胞		
内感 臓覚	臓器感覚	飢・渴・吐・便・尿・性	組織内の受容細胞		
	内臓痛覚		同上		

C. N. Sは中枢神経系のこと。

3. 感覚の性質

物理量：物理現象として考える（例：電磁波）

心理量（感覚量）：感覚そのものを一つの量として表す

心理物理量：感覚を基準とした物理量で表される（例：光）

適刺激：各感覚器は特定の刺激だけを受ける

刺激閾：刺激がやっと感じられる最低値

弁別閾：2つの刺激がやっと区別できる最低値

ウェーバーの法則

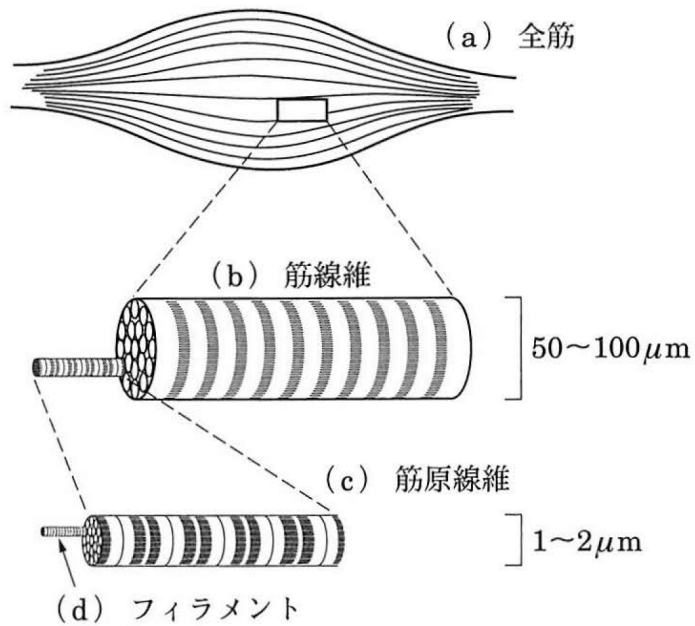
$\Delta S / S = \text{一定}$ （ S ：刺激量， ΔS ：弁別閾）

順応：刺激が長く続くと，感覚が弱くなる

感覚の投射：刺激は脳皮質の特定の感覚野に達して感覚となるが，感覚は，感覚野の部位ではなく，刺激の発生した場所に投射されて感じる。

4. 運動系

筋の構造と機能



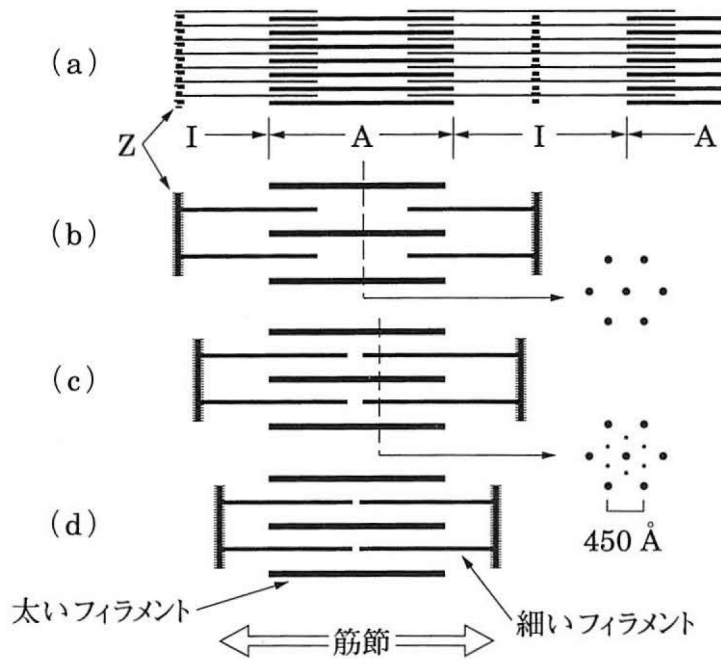
筋の構成

フィラメント

アクチン（細い線維）とミオシン（太い線維）

筋の収縮

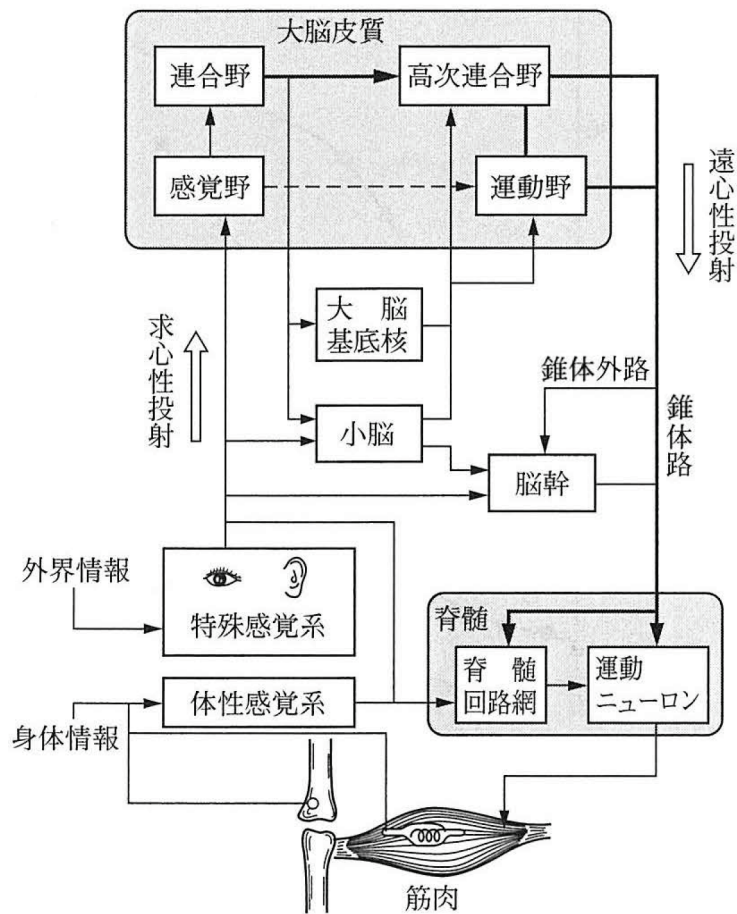
運動神経の命令により、（ATPのエネルギーを使って）アクチンがミオシンに沿って滑走する



(a) は筋節（Z膜からZ膜）の構造の横断面（模式図）
短縮時（(b) から (d) へ），A帯の長さは変化しない

フィラメントの滑走

屈筋：収縮すれば関節が屈曲する
 伸筋：収縮すれば関節が伸展する
 拮抗筋：互いに拮抗的に働く筋



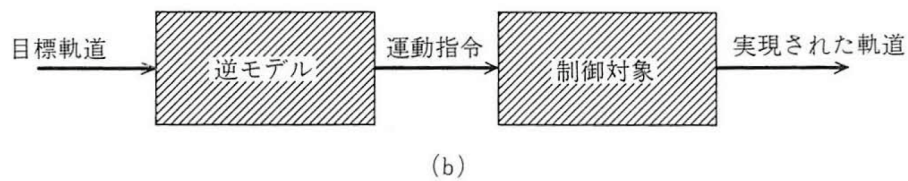
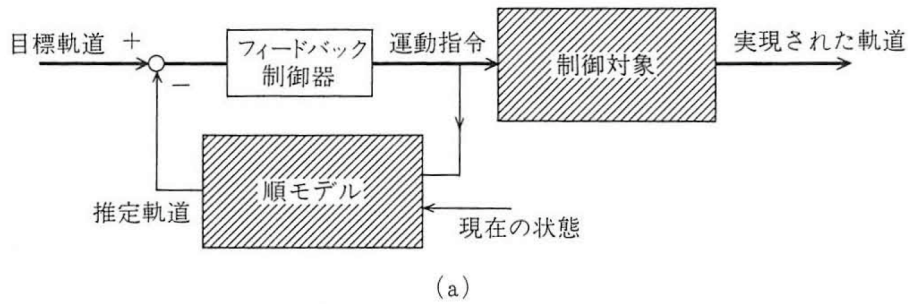
筋を中心としての神経信号の流れ

反射

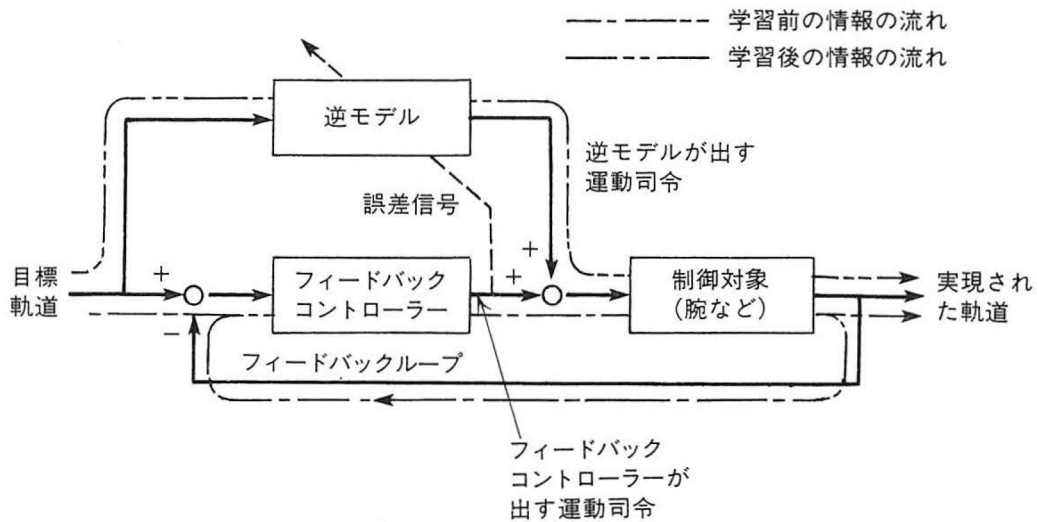
脊髄・延髄が中枢としてはたらく
 刺激に対して意識とは無関係に起こる反応

随意運動

大脳基底核：運動の意思を運動プログラムに変換
 小脳：運動プログラムを作成，フィードフォワード制御（予測）



(a)順モデルによる内部フィードバック制御, (b)逆モデルによる前向き制御.



運動制御

フィードバック制御 (修正運動): 状態を常に調べて, 誤った方向に動いたときには修正する
 フィードフォワード制御 (弾道運動): 運動途中での修正を行わない

運動学習

学習により, ぎこちない修正運動から, より正確な弾道運動に移行していく

人間の情報処理

知覚運動協応: 感覚・知覚系と運動系の対応関係や相互協調関係に関わる認知機能.

参考資料

小堀 聡: 「人間の知覚と運動の相互作用」 (龍谷理工ジャーナル, No. 60, 2011)

参考書

樋渡 涓二編著: 視聴覚情報概論 (昭晃堂)
 星宮 望著: 生体工学 (昭晃堂)

(3) 記憶と学習

1. 記憶と学習の定義（心理学的立場）

記憶と学習

両者は非常に密接に関連、厳密に区別することは難しい場合もある

学習

経験がのちの行動に影響するようなかたちで「こころ」の中味に比較的永続的な変化を生じさせること
知識構造に比較的永続的な変化を生じさせること（認知科学的立場）
※学習が成立するためには記憶が必要

記憶

（広義）経験の効果を時間を越えて存続させるもの
（狭義）「情報を蓄える」（受動的）
「おぼえる」・「思い出す」（意図や意識を伴う）
3つの側面：記憶機能，記憶システム，記憶情報

2. 記憶

記憶の過程：記録（符号化），保持（貯蔵），想起（検索）

短期記憶（一次記憶）

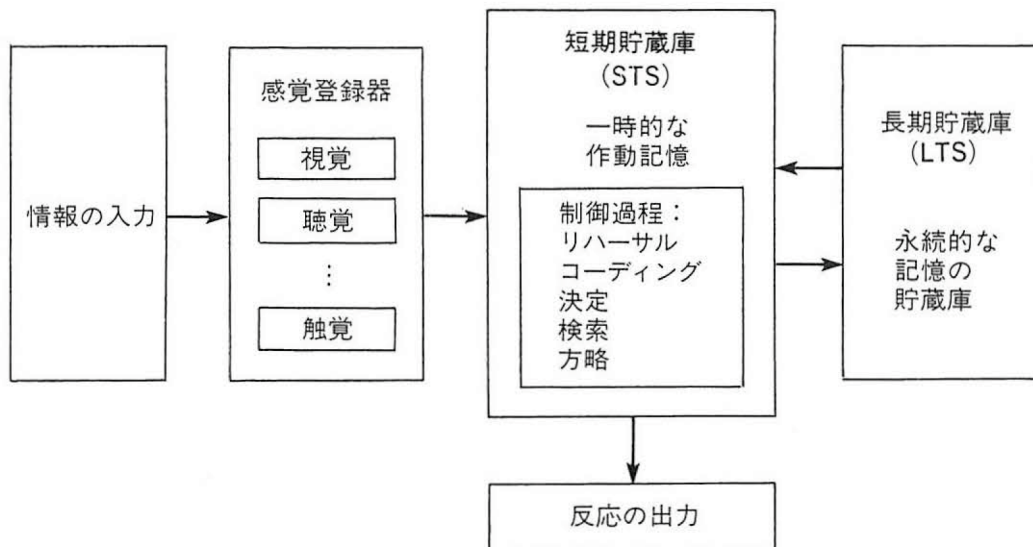
意識として心の中に留めている内容

長期記憶（二次記憶）

必要に応じて意識化されたり，無意識的な行動として現れたりする過去の膨大な記憶

2貯蔵庫モデル

短期貯蔵庫と長期貯蔵庫



二重貯蔵モデル

リハーサル

短期記憶の容量は小さく、リハーサルしていないと減衰する
しかし、リハーサルを繰り返した情報は長期記憶となる

維持リハーサル

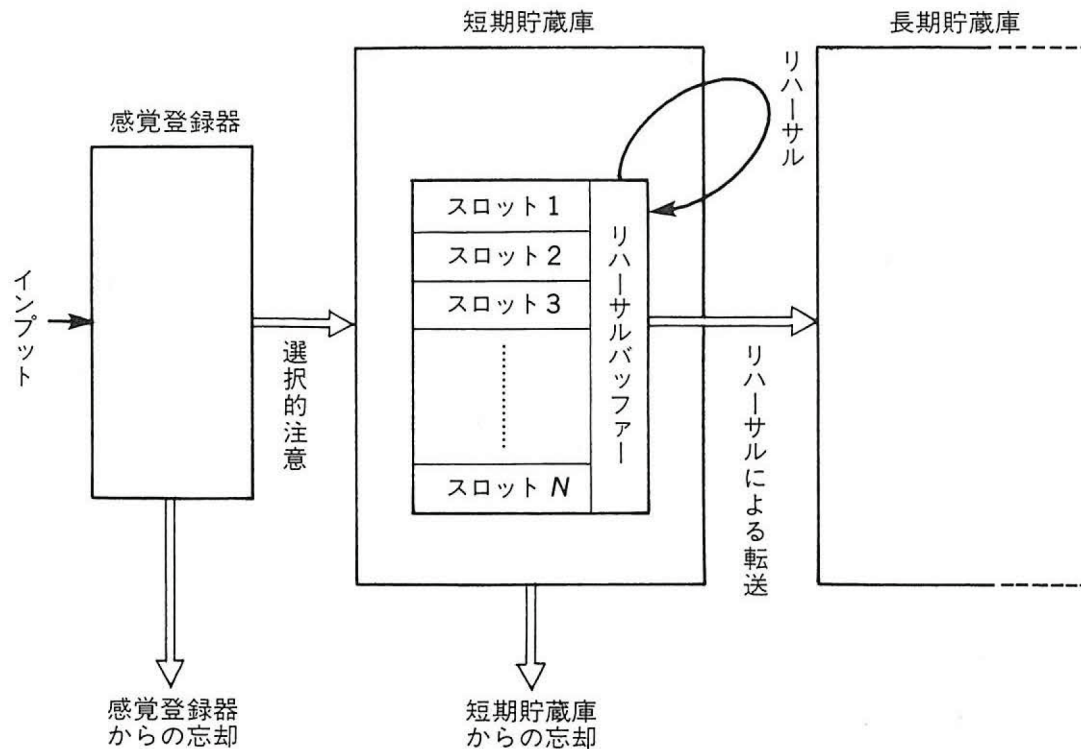
短期貯蔵庫にとどめておくリハーサル

精緻化リハーサル

長期貯蔵庫への転送の原因となるリハーサル（関連付けやイメージ化）

「マジカルナンバー7±2」

短期記憶の容量は、項目あたりの情報量によらず、7項目程度



アトキンソンとシフリンの二重貯蔵モデルの概略

宣言的記憶

さまざまな「事実」に関する記憶

手続き的記憶

作業を行うときに参照する「やり方」に関する記憶

意味記憶

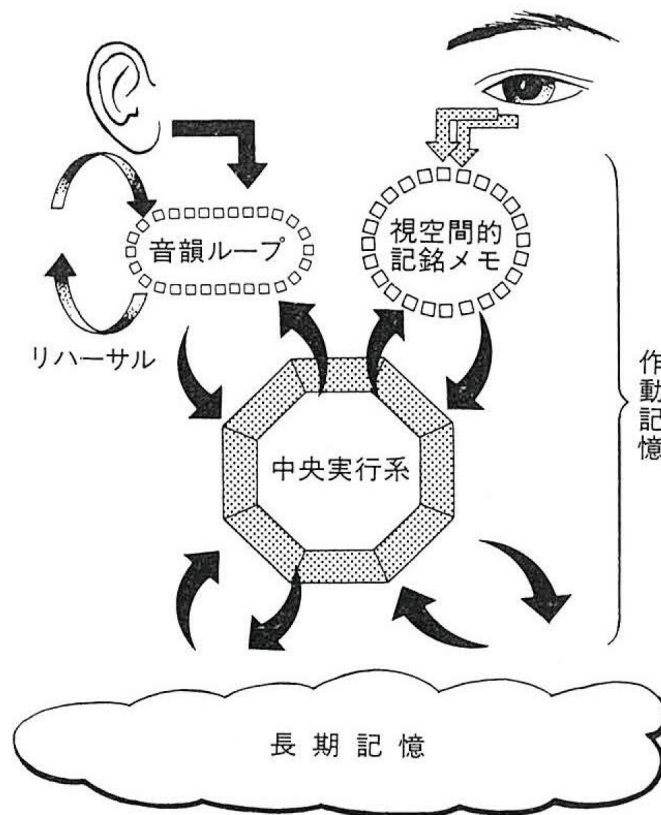
単語の意味や概念などに関する記憶、一般的な記憶

エピソード記憶

特定の時間や場所などの文脈情報を含む、個人が過去に経験した出来事に関する記憶

作動記憶（作業記憶）

短期記憶の概念を発展させたもの
認知過程での情報の処理機能を重視する
記憶以外の認知機能との関わりを捉えようとする



バドリーの作動記憶のモデルの概略図

3. 学習

例からの学習（帰納的学習）

解説よりも例そのものから学ぶ方が分かりやすいことがある

- ・ 例そのものを記憶し、類似事例に利用する場合
- ・ 例から一般的な法則を抜き出し記憶し、利用する場合

説明による学習（演繹的学習）

例だけで学習することはまれで、説明が伴うことが多い

- ・ 背景となる知識などについての説明を利用する場合
- ・ 関連する既存知識を利用する場合（自己説明）

4. 記憶と学習のモデル（情報処理的立場）

記憶情報の表現

記号表現

記号処理モデル：1つの対象を1個の記号に対応させる
思考や言語に関わる記憶・学習のモデルに適している

パターン表現

パターン情報処理モデル：多くの情報単位からなるパターンの集まりで表現する

局所表現

1個のニューロンによって1つの対象を記憶する
→認識細胞（おばあさん細胞）モデル

分散表現

多数のニューロンに分散して情報が保持される

スパース表現

一部のニューロン群にわたって表現される

神経回路網（ニューラルネットワーク）による記憶と学習のモデル化

ニューロンの可塑性が脳の記憶機能の根拠

参考書

市川 伸一他著：岩波講座・認知科学5・記憶と学習（岩波書店）

安西 祐一郎他著：岩波講座・認知科学2・脳と心のモデル（岩波書店）

(4) ニューラルネットワーク

1. ニューロン

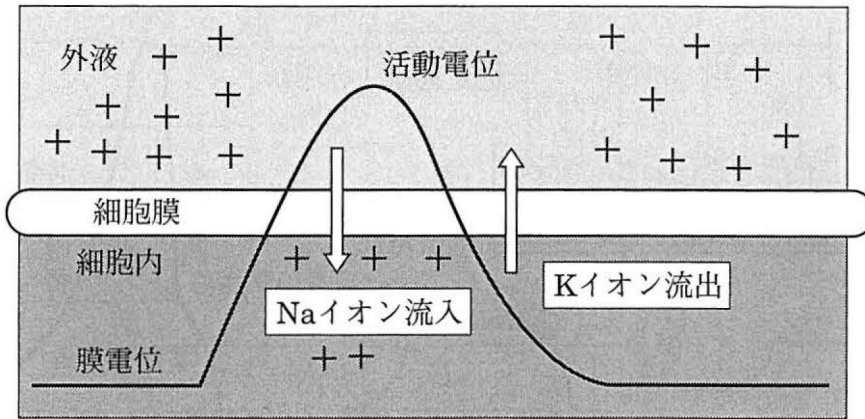
脳を構成する細胞：ニューロン（神経細胞）とグリア細胞

ニューロン：約 1000 億個，情報処理を行う

グリア細胞：ニューロンの 10 倍以上の個数，栄養供給などニューロンの活動を補助

静止電位：静止状態での膜電位，約 -70mV ~ -90mV

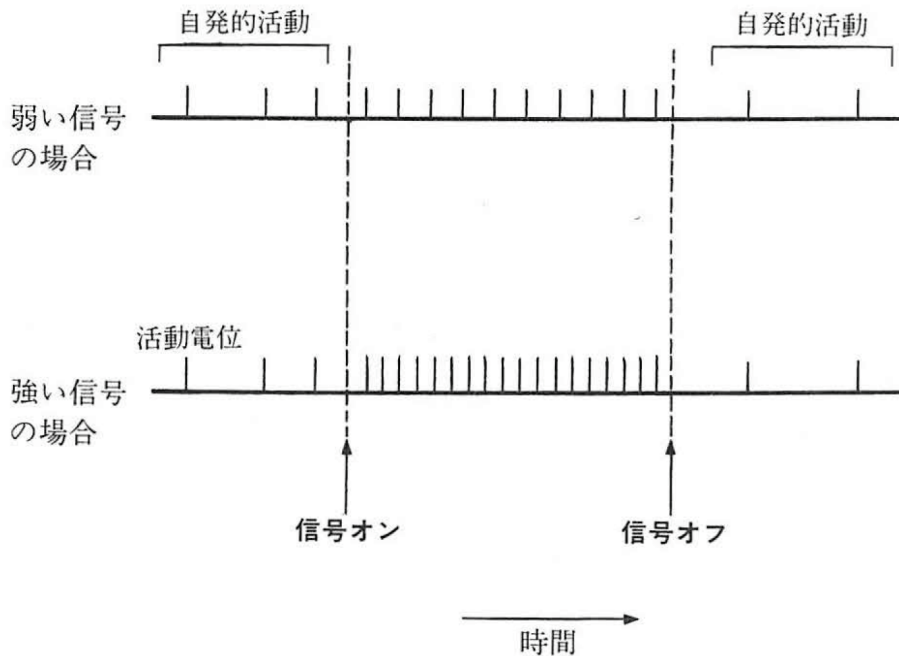
活動電位：興奮により発生する膜電位，約 $+40\text{mV}$ ，数 msec 程度（パルス）



細胞膜の興奮とイオンの動きの説明図(時間は左から右に経過)

伝達された信号には関係なく，一定

ただし，信号が強い場合や持続する場合は，発生頻度が高くなる



神経細胞の電気的活動

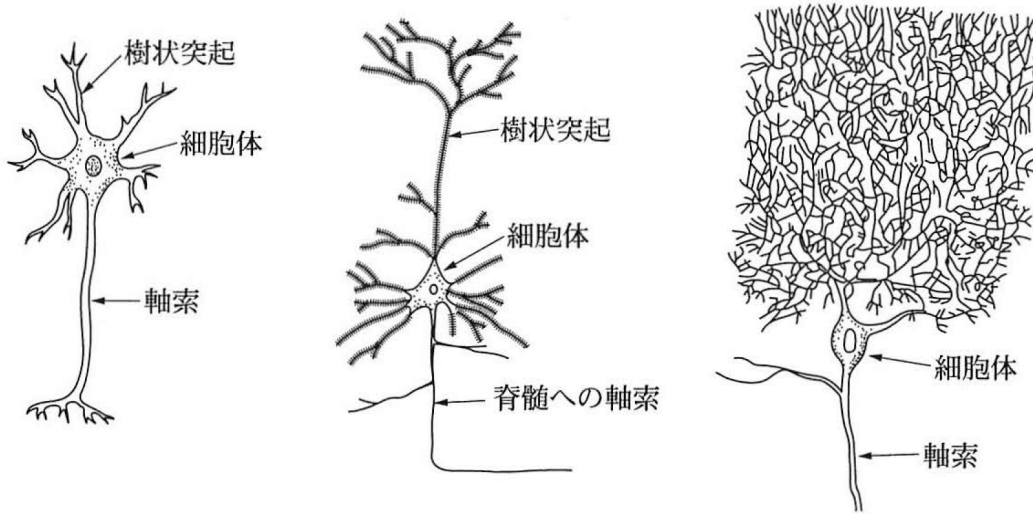
ニューロン

細胞体

軸索（神経線維）：他のニューロンへパルスを送る伝送路

樹状突起：他のニューロンからの信号を受信

軸索の終末部は樹状突起か細胞体にシナプスを介して接続



(a) 脊髄運動ニューロン (b) 大脳皮質の錐体細胞 (c) 小脳皮質のプルキンエ細胞
さまざまなニューロンの形態(模式図)

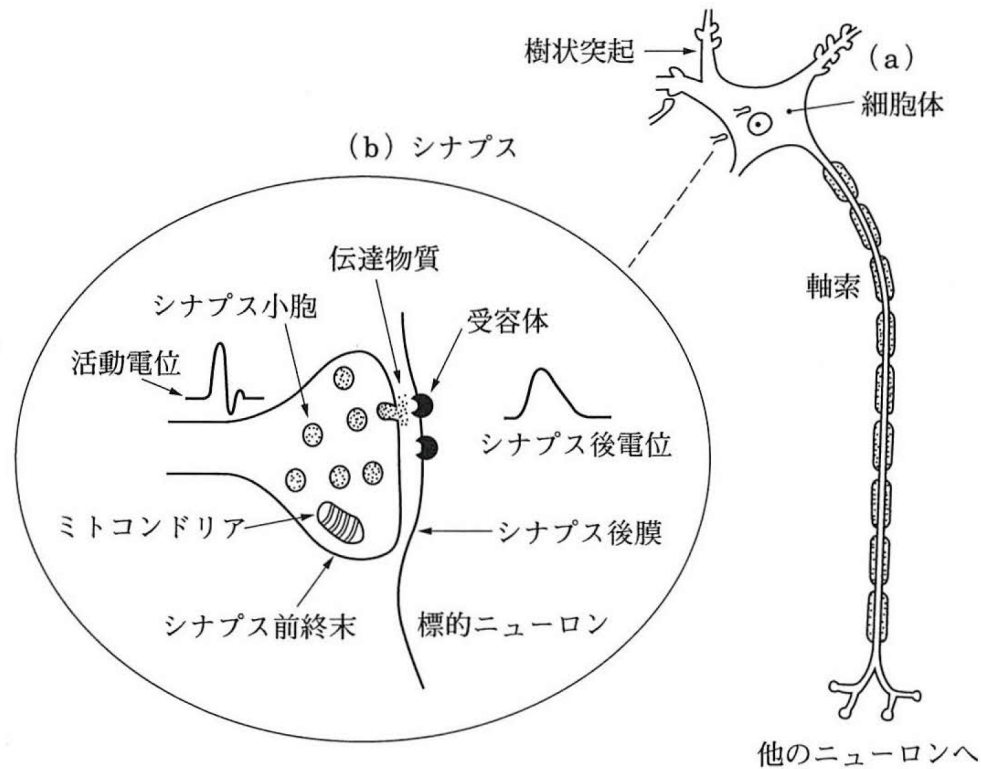
シナプス：ニューロン間の接続部位

シナプスの終末部はシナプス小頭となり、標的のニューロンに密着
しかし、直接は接触せず、電氣的に絶縁

神経伝達物質：活動電位の伝達により、シナプス小胞から放出（例：アドレナリン）

シナプス後電位：神経伝達物質により、膜電位が変化

伝達物質の種類によって興奮性と抑制性のものがある



シナプスの仕組み

信号の伝達：活動電位の場所の移動

神経細胞が持つ多数のシナプスの興奮性および抑制性の電位が時間的、空間的に加重されたものが、閾値を越えると、活動電位が発生、他に伝達される
神経細胞内では、信号は変化しない

以上をまとめると…

入力：他の多くのニューロンからシナプス結合を介して情報を受け取る

処理：入力の総和が、ある値を越えるとパルスが発生

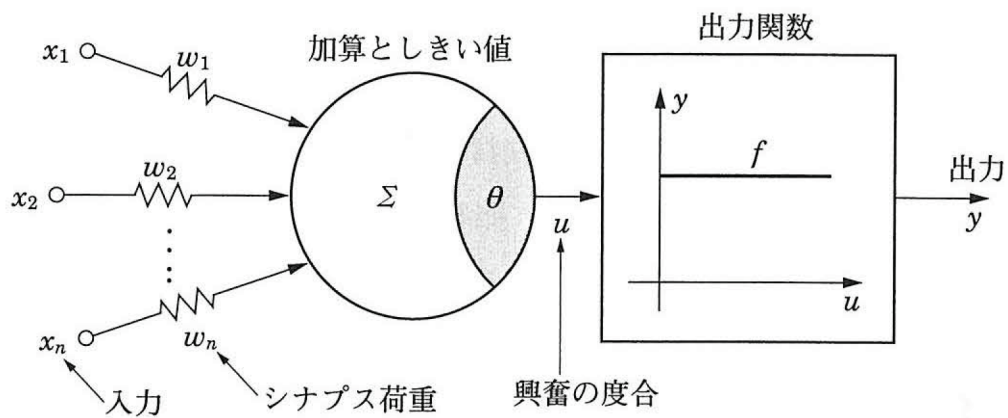
出力：シナプス結合を介して他のニューロンに情報を送る

シナプス結合には興奮性と抑制性のものがある

2. ニューロンのモデル

形式ニューロンモデル（マカローとピッツ）

空間的加算と閾値処理だけに単純化したもの
しかし、原理的な計算能力は汎用計算機と同等



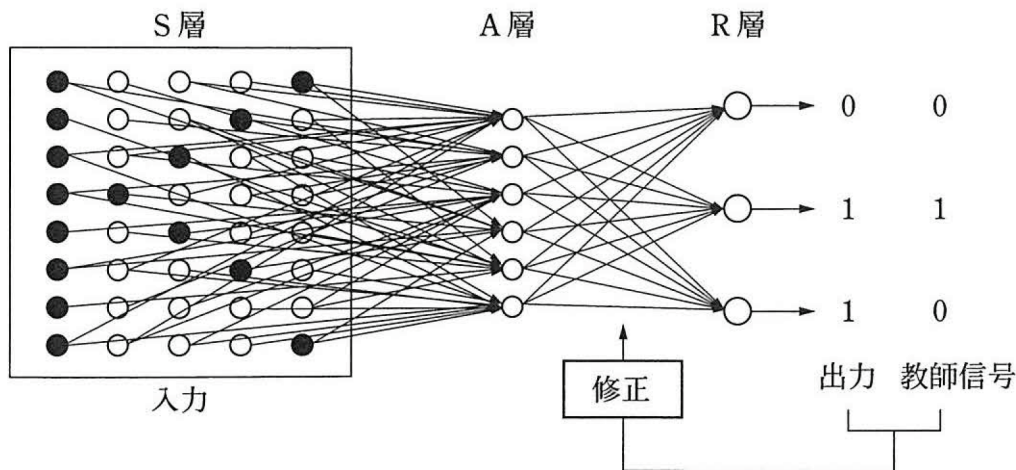
形式ニューロンモデル

$$y = 1 \left[\sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta \right]$$

ただし、

$$1[u] = \begin{cases} 1 & (u \geq 0) \\ 0 & (u < 0) \end{cases}$$

ニューラルネットワークの例：単純パーセプトロン



単純パーセプトロン

2つの観点

- ニューロン間をどのように結合するか (アーキテクチャ, 自己組織化)
- ニューロン間の結合の強さをどのように決定するか (学習)

4. シナプスの可塑性

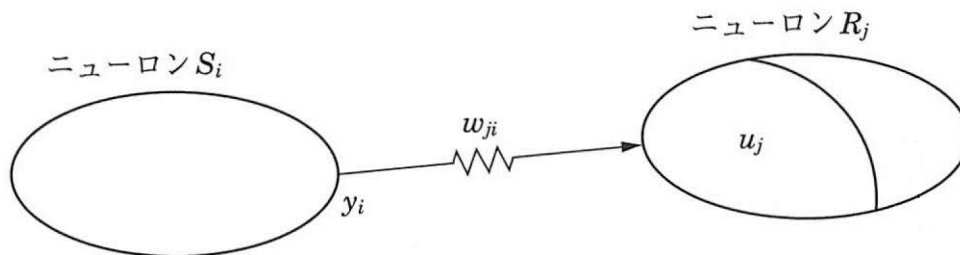
記憶・学習の本質：脳の可塑性

シナプス結合の可塑性：新しいシナプスの形成

シナプス伝達の可塑性：伝達効率の増加（長期増強）と減少（長期抑制）

ヘブの学習則

シナプス前細胞からシナプス後細胞へのシナプスが活性化され、同時にシナプス後細胞が興奮したときのみ、このシナプスが增強される、つまり、伝達効率（シナプス荷重）は増加する



ヘブの学習則の説明図

5. ニューラルネットワークの学習

教師信号の有無で分類される

教師信号なし学習の例：

ヘブ型学習アルゴリズム＝ヘブの学習則に基づく学習

教師信号あり学習の例：

誤差逆伝搬法（バックプロパゲーション）学習アルゴリズム

教師信号と実際の出力の誤差を用い、この誤差が0になるように結合荷重を学習する

6. ニューラルネットワークの研究

理論的神経科学の立場

生理学的・解剖学的に厳密な脳神経系のモデルを構築する

コネクショニストモデルの立場

厳密な脳神経系なモデルは求めず、心のモデルを構築する

実用化の立場

情報処理分野で応用できればよい

ニューロコンピュータの立場

脳神経系のモデルをヒントにした新しいコンピュータを開発する

参考書

中村 隆一編：リハビリテーション医学講座・第4巻・神経生理学・臨床神経学（医歯薬出版）

御領 謙他著：新心理学ライブラリ7・認知心理学への招待（サインエス社）

橋田 浩一他著：岩波講座・認知科学2・脳と心のモデル（岩波書店）

麻生 英樹著：ニューラルネットワーク情報処理（産業図書）

(5) 知識表現

1. 知識の定義と分類

知識の定義 (広辞苑)

知られている内容. 認識によって得られた成果. 厳密な意味では, 原理的・統一的に組織づけられ, 客観的妥当性を要求しうる判断の体系

宣言的知識

ものごとについての知識

手続き的知識

やり方・方法についての知識

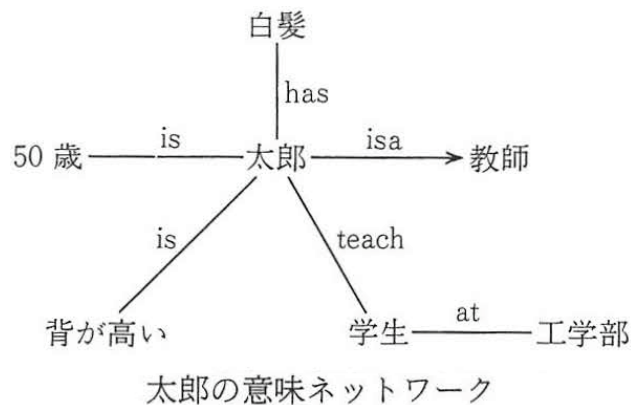
認識の問題: 知識をどのように獲得するか

知識表現の問題: 知識をどのように表現するか

2. 意味ネットワーク

由来

クイリアンの提案, 連想記憶の心理学的モデル



情報の状態: 対象あるいは概念がある関係によって結合

情報の表現: 節点 (ノード) と方向性をもった弧 (アーク, リンク)

関係の例

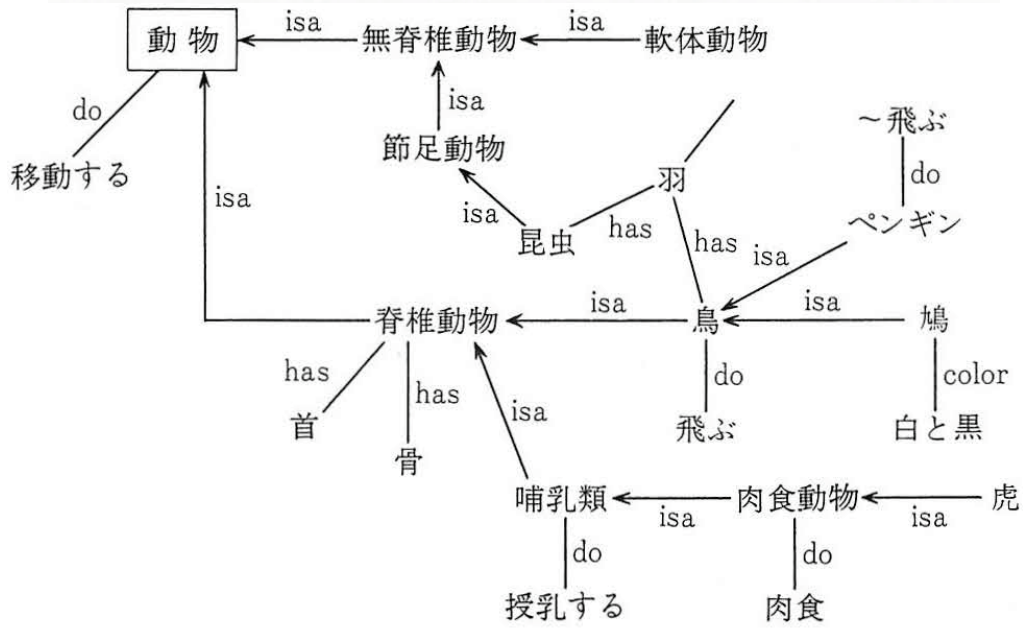
is	X is Y	(X は Y という性質をもつ.)
isa	X is a Y	(X は Y に属す.)
has	X has Y	(Y は X の部分概念である.)

性質 (属性) の継承

上位概念の対象について規定された性質はすべて下位概念の対象が引き継ぐ

例外の扱い

矛盾があれば, 下位の概念の性質を優先



動物分類の意味ネットワーク

特徴

計算機プログラムに近い表現形式
 時間の問題は表現できない

問題点

- どのような関係を導入するか
- is a 関係にも数種類ある
- 集合とその要素の関係
- 概念の上位・下位関係の性質の強いもの
- 同義関係としてとらえられるもの

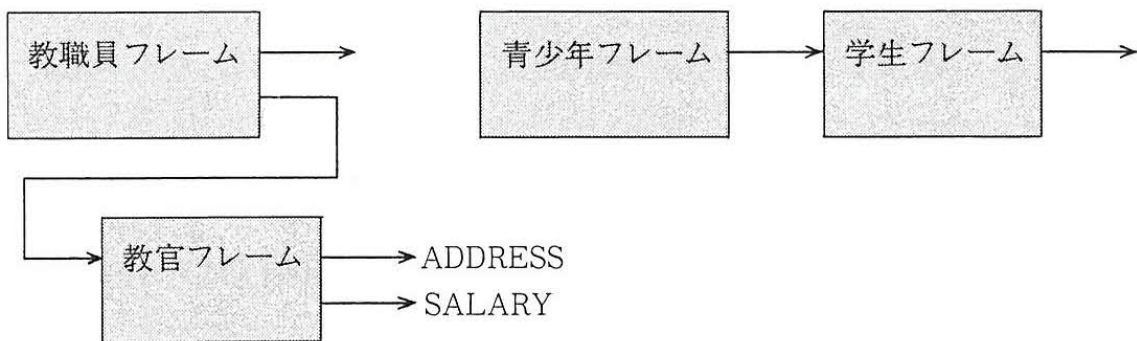
3. フレーム

由来

ミンスキーが提唱

概念に対応した構造を持った枠組

意味ネットワークを適当な単位に分割したもの
 空間配置の情報の表現に主として用いられる



フレーム間の結合関係

スロット：固有の性質（属性）を持ち，適当な情報が入れられる

フィルター：スロットに入れられる情報（属性値）

属性・属性値対：スロットとフィルターの対

階層構造により属性の継承が行われる

デフォルト値

スロットにあらかじめ書き込まれている情報

デーモンの起動

前もって定められた条件が満たされると起動

例：他のフレームを呼び出す

名称：教官

specialization of: 教職員

名前: unit(姓, 名)

年齢: unit(年)

住所: ADDRESS

所属学部: range(工, 理, 文, 法)

担当科目: range(情報科学, 計算機, ...)

月給: SALARY

採用年月: unit(年, 月)

名称: SALARY

月収: unit(円)

年収: unit(円)

平均月収: unit(円), compute(AVE-M)

税額: unit(円), compute(TAX)

名称: 学生

specialization of: 青少年

名前: unit(姓, 名)

年齢: unit(年)

住所: ADDRESS

帰省先: ADDRESS

所属学部: range(工, 理, 文, 法)

受講科目: range(情報科学, 計算機, ...)

入学年: unit(年, 月)

4. スクリプト

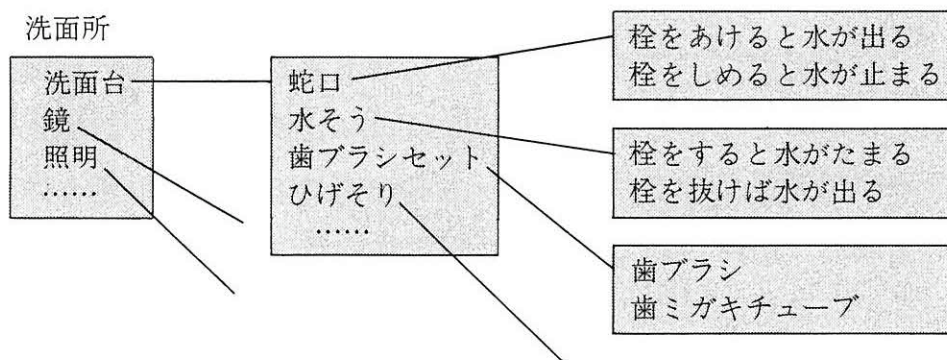
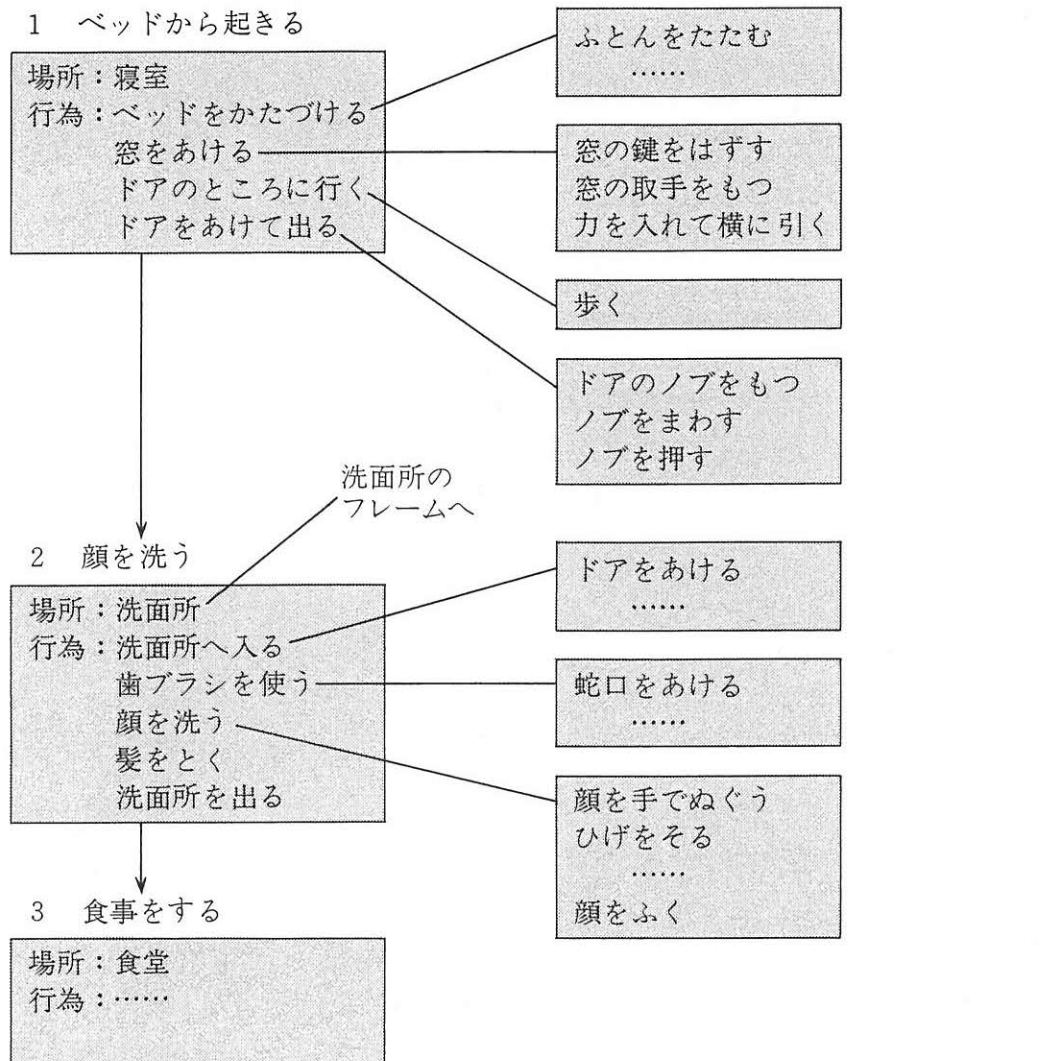
由来

シャンクが提唱

時間的な変化の中での情報を記述する

質問に対して応答するシステムに利用 (自然言語理解システム)

例：朝起きてから食事までのスクリプト



朝起きてから食事をするまでのスクリプト

5. プロダクションシステム

由来

1943年 E. L. Post が提唱

1972年 A. Newell と H. A. Simon が人間の問題解決のモデルとして採用

人間の問題解決過程

長期記憶

多くの知識を蓄えているところ

短期記憶

外部世界からの情報をいったん蓄えるところ

認識-行動サイクル

短期記憶と長期記憶の照合により、行動が決定され、短期記憶が変化

プロダクション記憶 (PM)

プロダクションルールの集合、長期記憶に相当

if A then B 形式のルール (もし~ならば~する)

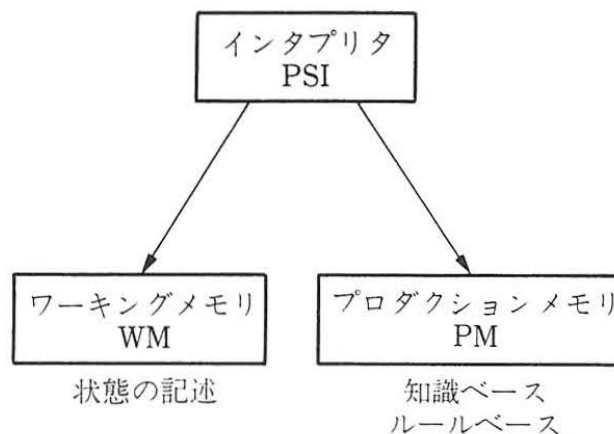
A : 条件部, B : 行動部

作業記憶 (WM)

記憶情報の列、短期記憶に相当

インタプリタ

WMとPMとを照合し、WMを書き換える、推論



プロダクションシステムの構成

競合

複数のルールが同時に実行可能になった場合、適当なルールを選択する必要がある

競合解消の方法の例

最初に適用されたルールを優先 (優先順位をつけて並べておく)

より厳密なルールを優先

最も新しく使われたルールを優先

プロダクションシステムの特徴

モジュラー性

他のルールと独立している

可読性

各ルールの意味の理解が比較的容易

自己説明性

結論に至る過程をシステムが説明できる

6. 黒板モデル

黒板

データベース, WMの一種
問題空間の状態, 中間仮説が記述される

知識源

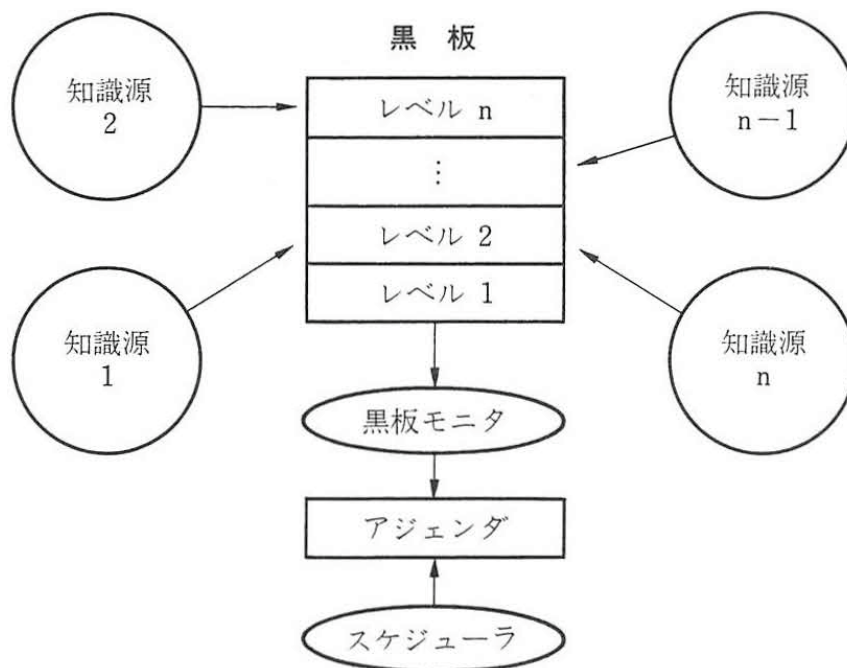
プロダクションルールの集合
特定のレベルの黒板を監視する

黒板モニタ

発火可能なルールをアジェンダ (競合集合) に格納

スケジューラ

最適なルールを選択し, 実行



黒板モデルのアーキテクチャ

黒板モデルの特徴

階層的なドメインのモデル
各階層ごとに整理された知識源
緩く結合した複数のエージェントによる協調問題解決

例: 音声理解システム

Hearsay-II: 7レベルの階層構造で表現

参考書

長尾 真著: 岩波講座・ソフトウェア科学 14・知識と推論 (岩波書店)
溝口 理一郎著: エキスパートシステム I・入門 (朝倉書店)

その他のキーワード

オントロジー

(6) 問題解決と探索

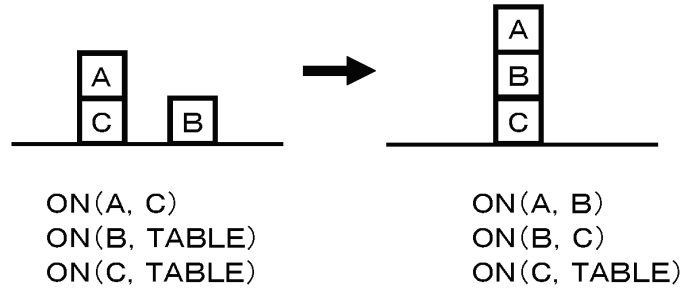
1. 問題の表現

状態空間による表現

状態記述

初期状態

目標状態

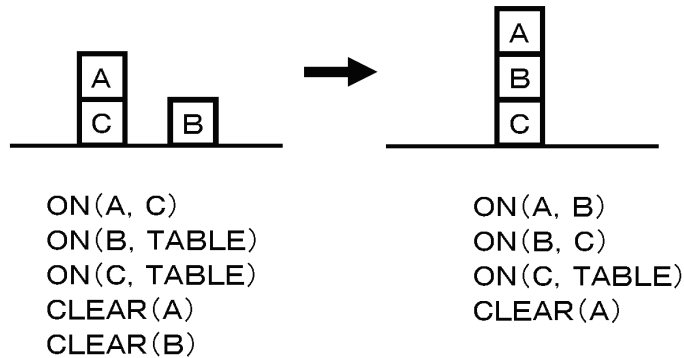


オペレータ (作用素)

前提条件：オペレータを適用するための条件

削除リスト：オペレータ適用後に削除された状態記述

追加リスト：オペレータ適用後に追加された状態記述



拘束条件

目標を達成する際に守らなければならない条件

問題解決

初期状態から出発して、適用可能なオペレータを次々に作用させて、拘束条件を守りながら目標状態に変換すること

グラフ表現

グラフ

節点, 枝, 道

有向グラフ, 無向グラフ

親, 子, 先祖, 子孫, 根

閉路

木 (ツリー) : 閉路のない連結グラフ

出発節点 : 初期状態に対応する節点

目標節点 : 目標状態に対応する節点

2. 基本的な探索

試行錯誤の探索 (シラミつぶし)

適当な節点を選ぶ

open リスト: 調べなければならない節点のリスト

procedure search

- 1 初期節点を *open* に入れる。
- 2 *LOOP*: if *open* = 空 then *exit* (*fail*) ; すべての節点を調べ終わったならば探索は失敗である。
- 3 *n* := *first* (*open*) ; *open* の最初の要素を *n* とする。
- 4 if *goal* (*n*) then *exit* (*n*) ; *n* が目標節点ならば *n* を返す。
- 5 *remove* (*n*, *open*) ; *open* から *n* を取り除く。
- 6 *open* の中味を更新する。
- 7 goto *LOOP* ; ステップ 2 の *LOOP* へ戻る。

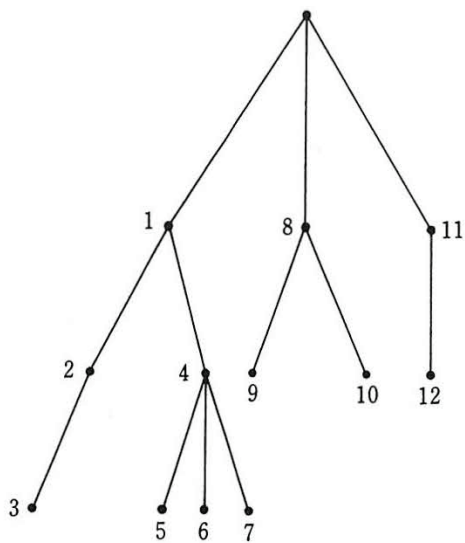
縦型探索 (深さ優先探索)

探索順序: 木の深い節点を先に調べる

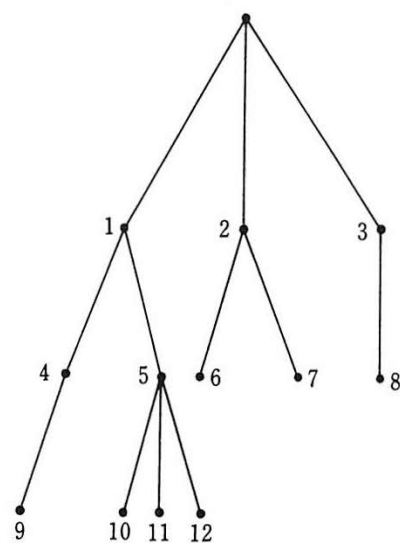
横型探索 (幅優先探索)

探索順序: 木の浅い節点を先に調べる

縦型探索と横型探索の比較



(a) 縦型探索



(b) 横型探索

縦型探索と横型探索の例

procedure *depth-first-search*

- 5 *remove* (*n*, *open*)
 add (*n*, *closed*) ; *n* を *closed* に入れる。
- 6 *n* を展開し、すべての子節点を生成する。子節点のうち、*open* あるいは *closed* の中に含まれない節点だけを *open* の先頭に入れ、そのおのおのから *n* へのポインタをつける。

procedure *breadth-first-search*

- 5 *remove* (*n*, *open*)
 add (*n*, *closed*)
- 6 *n* を展開し、すべての子節点を生成する。子節点のうち、*open* あるいは *closed* の中に含まれない節点だけを *open* の最後部に入れ、そのおのおのから *n* へのポインタをつける。

最適解の探索

全コストを最小にする道を求める

例：巡回セールスマン問題（計算量は $N!$ になる）

open リスト内のすべての節点をコストの小さい順に並べる

組合せ的爆発

メモリと計算速度の限界

3. コストの予測を用いた探索（※参考）

ヒューリスティクスの利用

山登り法

最も目標に近づくと予測される節点を選びながら目標に達しようとする方法
各節点でのコストを計算し、コストが最小となる節点を次の節点として選ぶ
目標以外の小さな「山」がある場合に失敗する可能性がある

最良優先探索

その時点までに得られているすべての節点の中から、最も目標に近い
（コストが小さい）と思われる節点を選ぶ

A*アルゴリズム

すべての節点に対して、目標までのコストの推定値が与えられているとき、
節点 *n* を通る最適な道のコストの推定値を評価関数として用いる
n から目標までの推定値が真のコストを越えなければ最適解が得られる

4. AND/OR グラフの探索

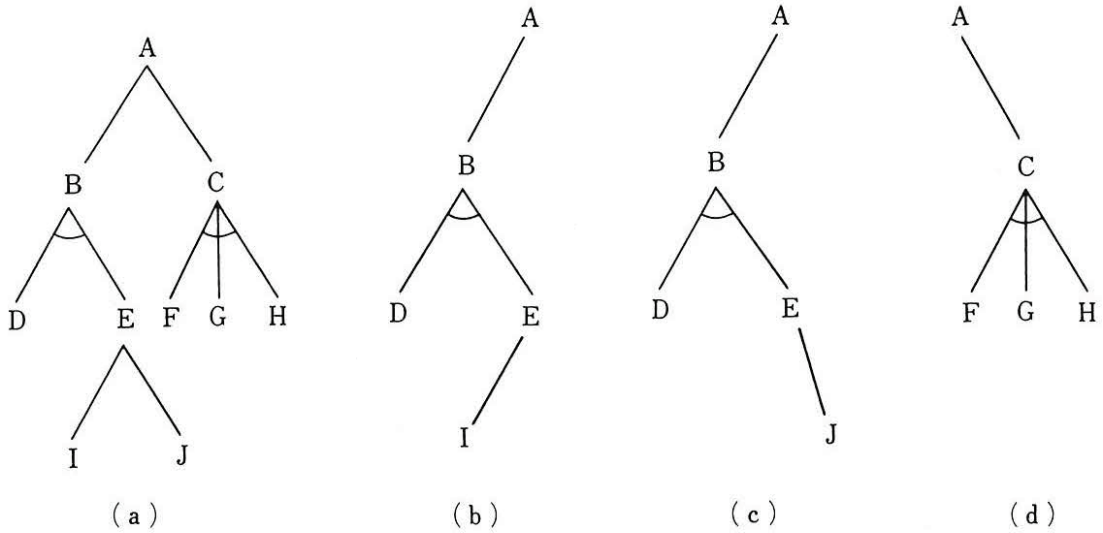
AND/OR グラフ

AND 節点：対応する問題のすべてを解決しなければならない

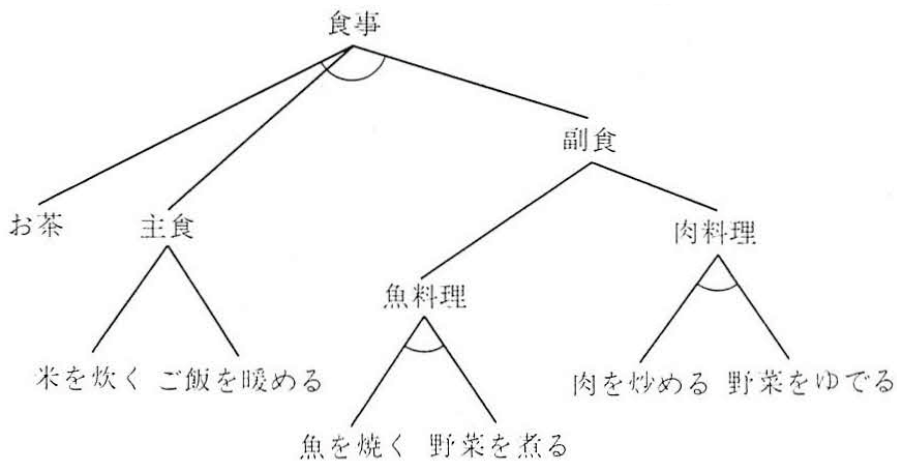
OR 節点：対応する問題のいずれかを解決すればよい

解グラフ：解を表す部分グラフ（解は複数ある場合もある）

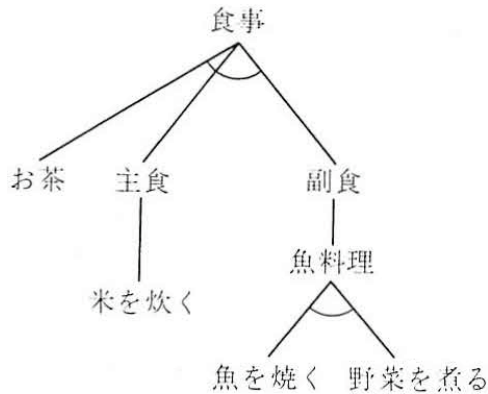
終端節点：解グラフの端点、解決した問題を表す



AND/OR 木の探索の説明図



食事の AND/OR グラフ



解グラフの例

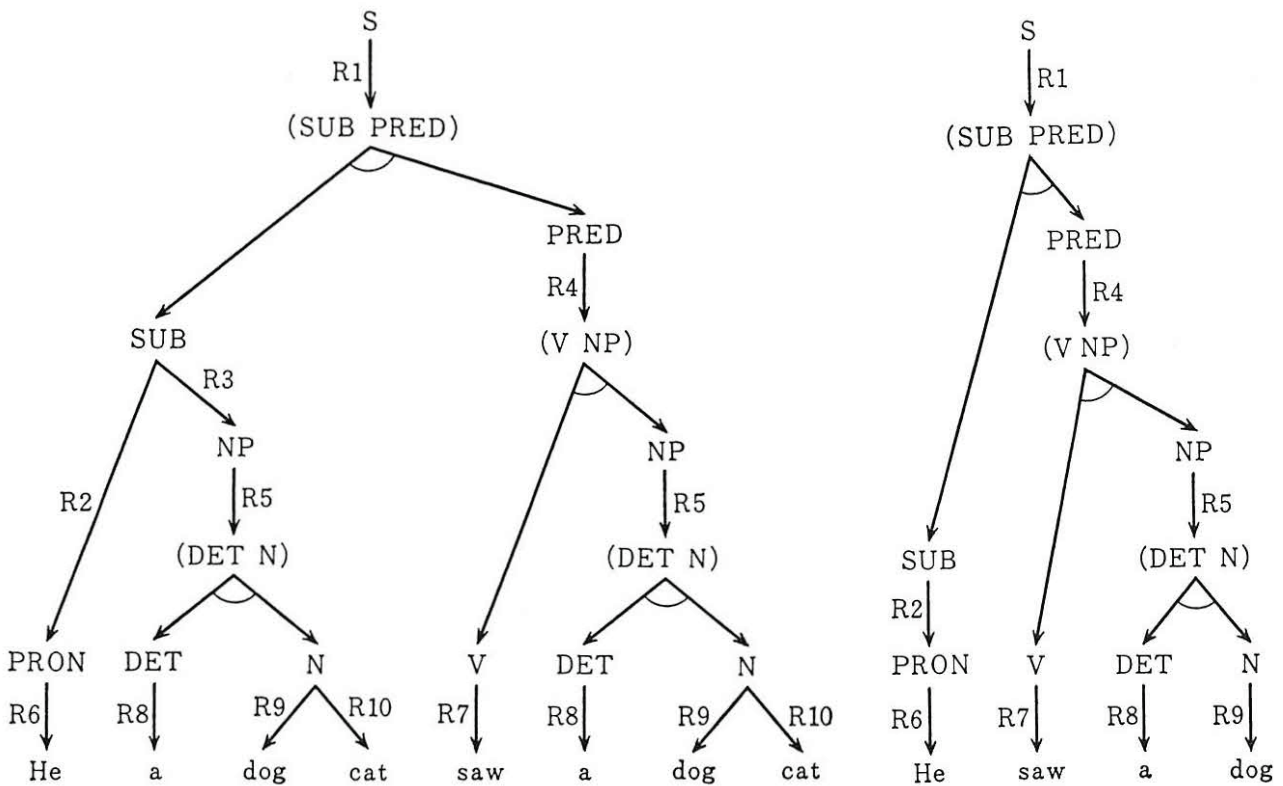
AND/OR グラフの性質

- ・ 終端節点は解決されている節点である。
- ・ ある節点の子節点が AND 節点の場合は、そのすべての AND 節点が解決されていれば、その節点も解決している。
- ・ ある節点の子節点が OR 節点の場合は、その OR 節点のいずれか一つでも解決されていれば、その節点も解決している。
- ・ 解グラフは、問題の AND/OR グラフの一部であり、出発節点を含み、どの節点も OR 節点への枝を 2 本以上持たず、すべての節点が解決されている AND/OR グラフである。

部分解グラフの評価と展開

- ・ 部分解グラフの節点が解決されているか、解決不可能か、それともいずれとも断定できないかを定める。必要があれば節点のコストを求める。
- ・ 部分解グラフを展開して成長させる。

通常のグラフ探索と同様、縦型探索、横型探索、最適探索などがある。



文章生成問題の AND/OR グラフ

文章生成問題の 1 例

5. ミニマックス法

MAX : 最初の手を指す人、(自分が) 最大の評価値を得ることを目標とする

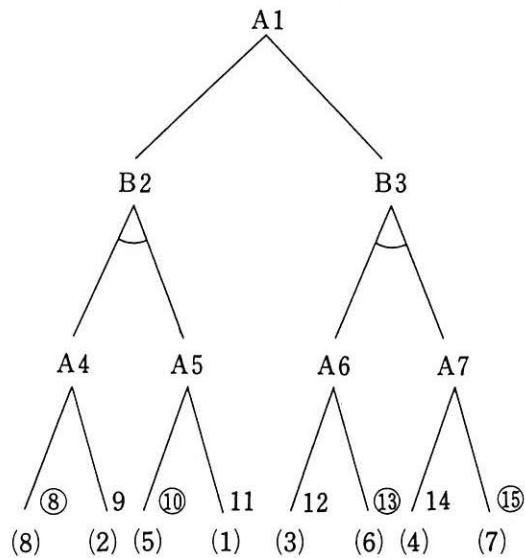
MIN : つぎの手を指す人、(相手が) 最小の評価値を得ることを目標とする

双方は最善をつくすものとする。

MAX は、MIN の節点にはその子節点の最小の評価値が与えられることを仮定して、自分の手を選ぶ。

木の深さが一定以上になると、調べなければならない節点の数は急激に増大する

→ 「枝刈り」が必要

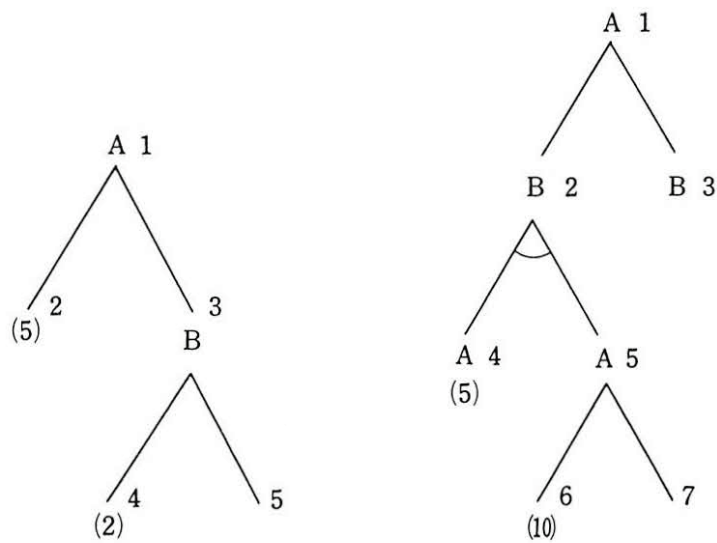


ゲーム木の探索におけるミニマックス法の説明図

6. アルファ・ベータ枝刈り

アルファカット : MIN のすべての子节点の評価を行わずに, その親节点である MAX の評価値を決める方法

ベータカット : MAX のすべての子节点の評価を行わずに, その親节点である MIN の評価値を決める方法



ゲーム木の探索におけるアルファ・ベータ法の説明図
(I) アルファカット (II) ベータカット

参考書

白井 良明, 辻井 潤一著 : 岩波講座・情報科学 22・人工知能 (岩波書店)
長田 正他著 : KE養成講座・AI入門 (オーム社)

その他のキーワード

グラフ理論, 巡回セールスマン問題, 水平線効果

(7) 推論

1. 命題論理

命題：文（世界について述べている文）

命題変数： P, Q など

結合記号：否定 \neg ，連言 \wedge ，選言 \vee ，含意 \Rightarrow ，同値 \Leftrightarrow

真理値：真 (T)，偽 (F)

真理値表

P	$\neg P$	P	Q	$P \wedge Q$	$P \vee Q$	$P \Rightarrow Q$	$P \Leftrightarrow Q$
T	F	T	T	T	T	T	T
F	T	T	F	F	T	F	F
		F	T	F	T	T	F
		F	F	F	F	T	T

妥当命題：常に真となる命題

充足不能命題：常に偽となる命題

2. 述語論理

定数記号： a, b, c など，

変数記号： x, y, z など

関数記号： f, g など，

述語記号： P, Q など

限量記号： \forall, \exists

\forall ：全称記号と呼ばれ、「すべての個体について～である」という概念を表す。

\exists ：存在記号と呼ばれ、「～であるような個体が少なくとも1つ存在する」という概念を表す。

論理式の例：

$$\forall x [H(x) \Rightarrow \exists y [F(y) \wedge L(x, y)]]$$

3. 推論

演繹：一般的な規則から個別的な事実を導く推論（厳密な意味での推論）

帰納：個別的な事実の集まりから一般法則を導く推論

アブダクション：物事の原因を探る場合に適している推論

導出の方法

$$P, P \Rightarrow Q \vdash Q$$

$$P \Rightarrow Q, Q \Rightarrow R \vdash P \Rightarrow R$$

導出の一般的な表現

$$P \vee Q_1 \vee Q_2 \cdots \vee Q_m, \neg P \vee R_1 \vee R_2 \cdots \vee R_n \vdash Q_1 \vee Q_2 \cdots \vee Q_m \vee R_1 \vee R_2 \cdots \vee R_n$$

（ P と $\neg P$ を除いた節の選言）

前向き推論

前提から導出を始めて結論を導く

後向き推論

結論から導出を始めて前提にたどりつく

背理法：証明すべき目標の否定が充足不能であることを示す

推論→探索の問題

4. ファジィ論理

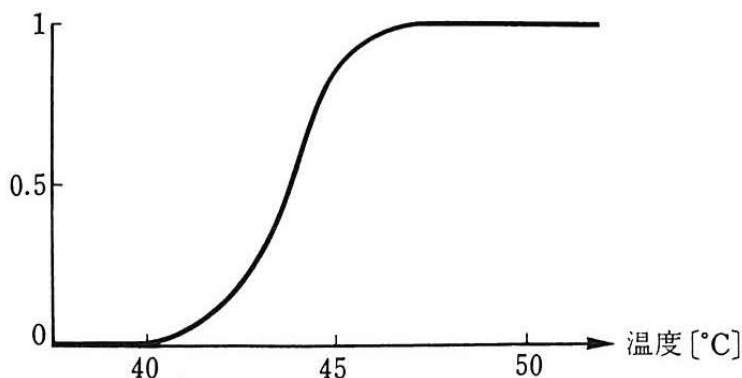
ファジィ集合：

ファジィ集合は、クリスプ集合の特性関数の値域を $[0, 1]$ へと拡張した関数によって定義される。この関数をメンバーシップ関数という。

ファジィ命題：

ファジィ集合を用いて表される命題

ファジィ命題「 x is A 」の真理値は、ファジィ集合 A のメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ で表されると考える。



「熱い」という言葉の意味を表すファジィ集合

述語修飾

	age(John) is not YOUNG
age(John) is YOUNG →	age(John) is very YOUNG
	age(John) is more or less YOUNG

修飾語 m によって述語 A が修飾されたファジィ命題「 x is mA 」の真理値 $\mu_{mA}(x)$ は、

$1 - \mu_A(x)$	：	$m = \text{not}$ の場合
$\mu_A(x)^2$	：	$m = \text{very}$ の場合
$\mu_A(x)^{0.5}$	：	$m = \text{more or less}$ の場合

となる。

ファジィ推論：

R を X から Y へのファジィ関係、 A を X におけるファジィ集合としたとき、

$$B = A \circ R$$

によって Y におけるファジィ集合 B が導かれるとする。

例：

$X = Y = \{1, 2, 3\}$ とし

$A = \text{LARGE} = 0.1/1 + 0.4/2 + 1/3$

$R = \text{APPROXIMATELY-EQUAL} = 1/(1, 1) + 1/(2, 2) + 1/(3, 3)$

$+ 0.5/(1, 2) + 0.5/(2, 1) + 0.5/(2, 3) + 0.5/(3, 2)$

とすれば

$$B = A \circ R = [0.1 \quad 0.4 \quad 1] \circ \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= [0.4 \quad 0.5 \quad 1]$$

が得られる.

more or less LARGE = $0.1^{0.5}/1 + 0.4^{0.5}/2 + 1^{0.5}/3 = 0.32/1 + 0.63/2 + 1/3$
 であるから、Bは近似的に more or less LARGE であると考えられる。
 したがって、次のような推論が得られる.

x is large

x and y is approximately equal

y is more or less large

5. 非単調論理

論理体系の単調性

公理の集合Aから証明される定理の集合 $\text{Th}(A)$

集合Aにいくつかの公理をつけ加えた集合Bから証明される集合 $\text{Th}(B)$

とすると、 $\text{Th}(A)$ は $\text{Th}(B)$ に必ず含まれる

$A \subset B$ ならば $\text{Th}(A) \subseteq \text{Th}(B)$

単調性が成り立たない場合を非単調性という

例外が含まれる公理が存在する場合は、非単調性となる

閉世界：

与えられた情報が世界のすべてであり、それ以上の情報が後で得られない
 Prolog の論理体系は閉世界仮説を採用している

推論： 証明されないものが偽であるとみなす

「 $P(x)$ が証明できなければ、 $\neg P(x)$ とする」

例： BLOCK(a) \wedge BLOCK(b) \wedge BLOCK(c) という事実

これから BLOCK(d) は証明できないから

\neg BLOCK(d) と仮定する

参考書

長尾 真著：岩波講座・ソフトウェア科学 14・知識と推論 (岩波書店)

白井 良明著：人工知能の理論 (コロナ社)

安西 祐一郎著：認知科学と人工知能 (共立出版)

太原 育夫著：認知情報処理 (オーム社)

(8) 認知科学と人工知能の応用

1. 様々な分野・領域への広がり

ロボット工学 (ロボティクス)
動物との比較
赤ちゃん学
臨床の現場にて
インタフェースやコミュニケーションへの応用
教育・福祉への応用

2. 認知モデルとは？

被験者実験の結果から得られた知見をモデル化する
モデル化したものを元に、コンピュータプログラムを作成し、シミュレーションする
シミュレーションした結果と実験結果を比較し、問題があれば、モデルを修正する
これらの繰り返しにより認知モデルがより適切なものになる
そして、シミュレーションプログラムは結果的に人工知能となる → ロボットの例

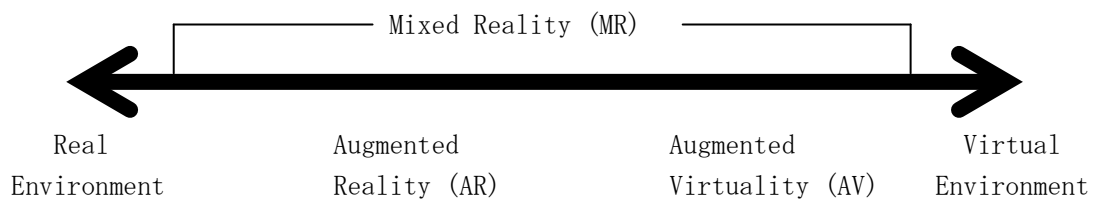
3. 複合現実感 (MR)

人工現実感：コンピュータ内に人工的に構築された世界を体験 (仮想現実感ともいう※)

複合現実感：現実世界と人工世界を融合し活用

MRではARとAVを包含

※ virtual は、実質上のという意味であり、仮想的とはニュアンスが異なる。



AR：現実世界を電子的に増強・拡張

例：シースルーHMDに人工データを表示し、現実世界を眺める

AV：人工世界を現実世界の生データで強化

例：CGに実写映像を加える



4. ブレイン・マシン・インタフェース (brain-machine interface: BMI)

人間の脳の神経細胞の活動（微弱な電流）を測定し、解析することで、人間の意思を読み取り、電気信号に変換することで、情報伝達の仲介をする。

出力型BMI：脳の情報を読み出して機械に出力

入力型BMI：脳に入力される感覚情報を機械で生成

非侵襲式：頭皮に電極を配置した網を被せる

侵襲式：頭部を切開して電極を埋め込む

応用例

機能代償

人工内耳：聴覚機能の代償（入力型）

人工網膜：視覚機能の代償（入力型）

脊髄損傷：運動、コミュニケーション機能の代償（出力型）

リハビリ訓練・治療 ※倫理面の問題もある

ロボットの制御

スポーツ

エンターテインメント

軍事

5. 教育への応用

能動的な学習：協働学習やプロジェクト学習

コミュニケーションの力を向上させること、

他人が理解できるように書くことによって思考の内容をはっきりさせること

大勢の前で話すことによってことばの力を向上させること

受け身の教育 → 自律的な学習

参考書

大須賀 節雄編：知識工学講座 10・ヒューマンインタフェース（オーム社）

淵 一博監修：インタフェースの科学（共立出版）

吉田 真編：ヒューマンマシンインタフェースのデザイン（共立出版）

川人 光男：脳の情報を読み解く BMI が開く未来（朝日新聞出版）

その他のキーワード

ヒューマンインタフェース, GUI, WYSIWYG