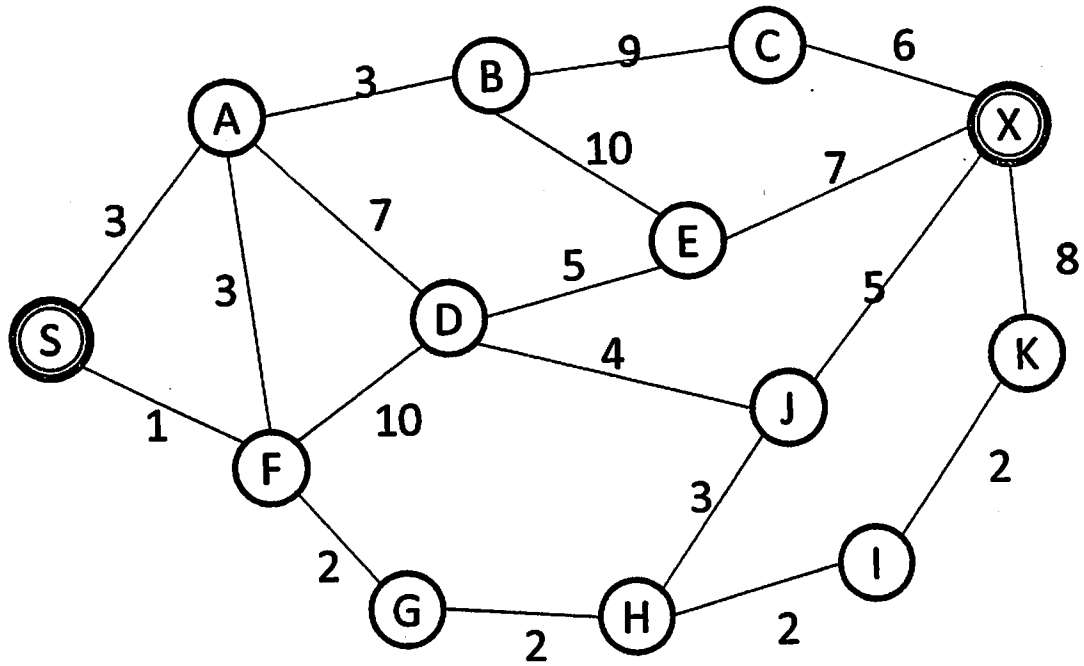
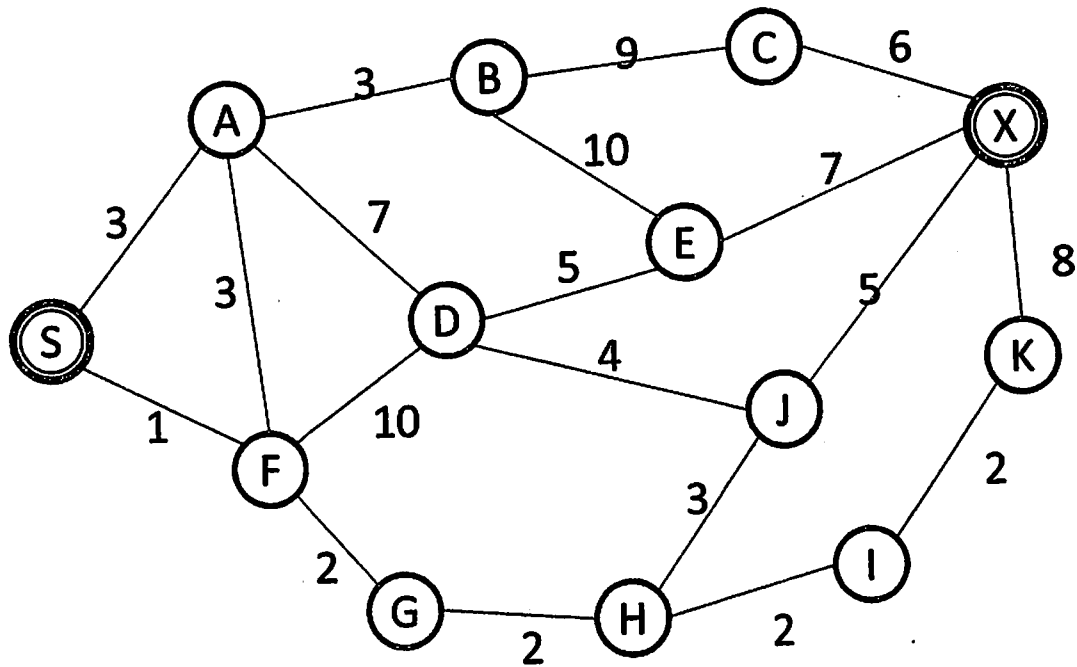


山登り法による探索



最良優先法による探索



A\*アルゴリズムによる探索

例題:

- (1) ハノイの塔の問題の状態空間において、問題の初期状態から最終状態にいたる経路を含む状態遷移図を描け
- (2) 縦型探索と横型探索の利害得失を述べよ
- (3) 例題のグラフにおいて、山登り法、A\*法による探索を行い、その解を比較せよ。
- (4) A\*法において評価関数 $h'$ がつかねにゼロとなる場合の探索動作を検討せよ。
- (5) 例題のゲーム木にミニマックス法とアルファベータ法を適用する場合の探索過程と結果を説明せよ。

# 命題論理

真偽値表

p	q	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \rightarrow q$	$p \leftrightarrow q$
T	T	T	T	T	T
T	F	F	T	F	F
F	T	F	T	T	F
F	F	F	F	T	T

## 公理系の例(ヒルベルト)

- (A1)  $P \rightarrow (Q \rightarrow P)$
- (A2)  $(P \rightarrow (Q \rightarrow R)) \rightarrow ((P \rightarrow Q) \rightarrow (P \rightarrow R))$
- (A3)  $(\neg P \rightarrow \neg Q) \rightarrow (Q \rightarrow P)$

## 推論規則

モーダスポネンス (Modus Ponens: MP)  
2つの論理式PとP→QからQを導く

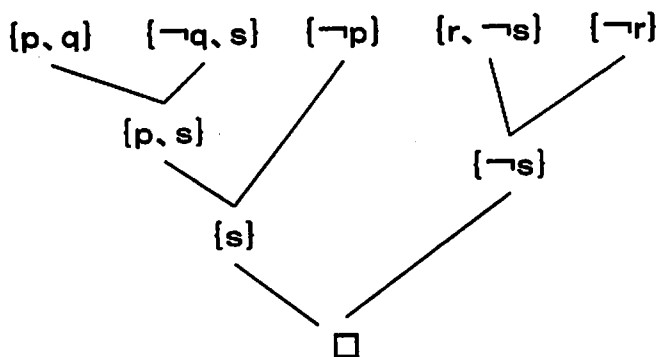
P
P→Q
Q

## 命題論理の証明

### 節形式への変換

$P \leftrightarrow Q$	$(P \rightarrow Q) \wedge (Q \rightarrow P)$
$P \rightarrow Q$	$\neg P \vee Q$
$\neg \neg P$	P
$\neg(P \wedge Q)$	$\neg P \vee \neg Q$
$\neg(P \vee Q)$	$\neg P \wedge \neg Q$
$(P \wedge Q) \vee R$	$(P \vee R) \wedge (Q \vee R)$

### 導出による証明



## 例題

- 節集合  $\{\neg p, q, r\}, \{\neg q, s\}, \{\neg r, s\}$  から節  $\{\neg p, s\}$  を導出せよ。
- 節集合  $\{\neg p, \neg q\}, \{\neg p, q\}, \{p, \neg q\}, \{p, q\}$  から空節を導出せよ。
- $((p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow r)) \wedge \neg(p \Rightarrow r)$  の節形式から空節を導出せよ。
- $(p \Rightarrow ((q \Rightarrow \neg r) \wedge \neg(r \Rightarrow \neg q))) \wedge p$  の節形式から空節を導出せよ。

変換手順

論理式
(Vx)P(x) => ((Vy) [P(y) => P(f(x,y))] ^ ~ (Vy) [Q(x,y) => P(y)])

- (1) =>記号の除去
(Vx) [~P(x) v ((Vy) [~P(y) v P(f(x,y))]) ^ ~ (Vy) [~Q(x,y) v P(y)]]
(2) 否定記号の繰り込み
(Vx) [~P(x) v ((Vy) [~P(y) v P(f(x,y))] ^ (exists y) [Q(x,y) ^ ~P(y)])]

図 3.5 論理式から節集合への変換

40 3 論理表現と問題解決
合への変換が完了する。

(2) 単一化
導出法のアルゴリズムで用いる単一化 (ユニファケーション) と呼ぶ処理を説明しておく。これは、与えられたリテラル集合の要素について、それらが同一の記述となるように、各要素に含まれる変数への値の代入を決定する。

Table with 4 columns: リテラル集合, mgu, mguによる代入形, and example substitutions like s1: {x/A}, s2: {y/B}.

図 3.6 単一化 (ユニファケーション) の例

こうした代入は、リテラル集合に含まれる変数に対する値の割当ての組として与えられ、単一化子 (unifier) と呼ばれる。なお、変数xに対する値Aの割当てではx/Aと表記している。一般に、単一化子には種々の組み合わせが考えられるが、そのうち最も一般的 (簡潔) な表現となる単一化子を mgu (most general unifier) と呼ぶ。本例は、mgu による代入形となっている。

(3) 導出法のアルゴリズム
節集合Cを対象とした導出法のアルゴリズムを図3.7に示す。すなわち、ステップ2において、Cから選択された2つの節集合{Cj}と{Ck}から、手続き Resolve によって新たな節集合 {Rj} を導出し、これをCに付加する処理

X => Y <=> ~X v Y, ~(X ^ Y) <=> ~X v ~Y, ~ (exists x) P(x) <=> (exists x) [~P(x)], (exists x) [P(x) ^ Q(x)] <=> (exists x) P(x) ^ (exists x) Q(x)

まず、ステップ(1)では、式中に含まれる含意記号 => 記号が除去される。ステップ(2)では、否定記号の繰り込みを行い、ステップ(3)で、束縛された変数のスコープを考慮して変数記号を付け替える。次に、ステップ(4)では、存在限定子が除去される。このとき、全称限定子のスコープ内で存在限定子によって束縛された変数は関数に置換される。すなわち、以下の例のように、(Vy) [(exists x) P(x,y)] <=> (Vy) P(g(y),y) 式中の束縛変数xが関数g(y)に変換される。g(y)をスコラム関数 (Skolem Function) と呼ぶ。なお、引数を伴わないスコラム関数の場合、たとえば、(exists x) P(x) の場合には、xを個体定数で置換したP(A)に変換される。ステップ(5)で、全称限定子を括り出した前置形式 (prenex form) への変換を行い、ステップ(6)で、式の本体部分を積標準形 (conjunctive normal form) に変換する。続いて、ステップ(7)で全称限定子を除去し、ステップ(8)で^記号を除去すると、節形式の記述の集合が得られる。そして、ステップ(9)で、各々の節形式に異なる変数を付与することにより、節集

木下哲也 「人工知能と知識処理」 昭晃堂

導出法

- (1) C ← 初期状態の節集合
(2) Cに空節が生成されるまで以下の処理を繰り返す (空節が生成された場合にアルゴリズムは停止)
- Cの中から2つの節集合{Cj}と{Ck}を選択
- {Rj} ← Resolve({Cj}, {Ck})
- C ← C union {Rj}

図 3.7 導出法のアルゴリズム

Resolve({Lj}, {Mk})
(1) リテラル集合 {Lj} union {~mk} に対する mgu {s} と表記) が存在し、リテラル集合 {Lj} と {mk} がそれぞれ {Lj} と {Mk} に含まれる場合、以下の処理によりリソルベントを求める。
(2) {Lj} から {Lk} を除去した式の代入形 {Lj - {Lk}}s および {Mk} から {mk} を除去した式の代入形 {Mk - {mk}}s により、{Rj} ← ({Lj} - {Lk})s union ({Mk} - {mk})s
(3) {Lj} と {Mk} のリソルベント {Rj} を戻り値として返す

図 3.8 手続き Resolve

を繰り返す。この {Rj} を導出節 (リソルベント) と呼ぶ。そして、Cに空節 (リテラルを持たない節) が導出されたとき、このアルゴリズムは停止する。一方、手続き Resolve は、節集合 {Lj} と {Mk} を引数として受け取り、それらの論理的帰結として得られる導出節を戻り値として返す。そのアルゴリズムを図3.8に示す。
ステップ(1)では、{Lj} と {Mk} から2つのリテラル集合 {Lk} と {mk} を選択する。その判定条件は、{mk} の否定形 {~mk} と {Lj} を統一化する mgu {s} と表記) が見つかることである。次に、ステップ(2)の処理で新たな節集合 {Rj} が得られる。これを導出

○講義で参考にしたテキスト

Artificial intelligence : a modern approach  
Stuart J. Russell and Peter Norvig  
(Prentice Hall series in artificial intelligence)  
Prentice Hall, c2010  
3rd ed

知識と推論  
新田克己著  
(Information science & engineering, T1)  
サイエンス社, 2002. 6

人工知能と知識処理  
木下哲男著  
昭晃堂, 2009. 10

人工知能の基礎  
小林一郎著  
(Computer science library, 13)  
サイエンス社, 2008. 11  
ソフトコンピューティング  
岩田彰編著  
(インターユニバーシティ)  
オーム社, 2000. 10

知識と推論  
森下真一著  
(情報数学講座, 10)  
共立出版, 1994. 1

人工知能  
白井良明, 辻井潤一 [著]  
(岩波講座情報科学, 22)  
岩波書店, 1982. 4

人工知能概論 : コンピュータ知能から Web 知能まで  
荒屋真二著  
共立出版, 2004. 10  
第 2 版

人工知能の基礎

馬場口登, 山田誠二共著

(情報系教科書シリーズ, 第15巻)

昭晃堂, 1999.3

ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム

萩原将文著

(エレクトロニクス実践シリーズ / 白井克彦監修)

産業図書, 1994.9

遺伝的アルゴリズム

坂和正敏, 田中雅博著

(ソフトコンピューティングシリーズ / 日本ファジィ学会編, 1)

朝倉書店, 1995.9

最適化アルゴリズム

長尾智晴著

昭晃堂, 2000.5

など

## 後半の予定

- 12/8 休講
- 不確実性の下での推論
- データからの学習
- 自然言語処理
  
- 教科書
  - Russell & Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach.
  - Manning & Schütze: Foundations of Statistical Natural Language Processing.

## 知能システム 第8回

- 不確実性
- 確率, Kolmogorov の公理
- 事前確率, 結合確率, 事後確率
- 確率的推論, 周辺化, 独立性
- ベイズの定理
- ナイーブベイズ分類器
- 言語モデル, Nグラムモデル
- Zipfの法則, ロングテール
- スムージング

## 今後の予定

- 講義: 12/15, 12/22, 1/5, 1/12, 1/19
- 試験: 1/26
- 連絡先
  - [aizawa@nii.ac.jp](mailto:aizawa@nii.ac.jp), [yusuke@nii.ac.jp](mailto:yusuke@nii.ac.jp)

## 知能システム論 第9回

- ナイーブベイズ分類器
- ベイジアンネットワーク
- 言語モデル, Nグラムモデル
- Zipfの法則, ロングテール
- スムージング



## 知能システム論 第10回

- 言語モデル, スムージング
- 統計的機械学習
- 特徴ベクトル
- 線形分類器
- パーセプトロン
- 特徴空間, 決定境界
- ログ線形モデル
- サポートベクトルマシン

## 知能システム論 第11回

- 隠れマルコフモデル
- ビタビアルゴリズム
- 教師あり学習, 教師なし学習
- EMアルゴリズム
- 前向き・後向き確率

## 知能システム論 第12回

- 自然言語処理
- 構文解析
- 文脈自由文法
- CKY法
- 確率文脈自由文法
- ビタビアルゴリズム

## 知能システム論 第13回

- ビタビアルゴリズム
- 情報検索
- 転置インデックス、接尾辞配列
- ベクトル空間モデル、tf-idf
- リンク解析
- ランク学習
- クラスタリング