4R－8

制約条件充足ネットワークの構造化に関する研究 －同期状態更新モジュールの階層的結合－

奥野　拓　　　嘉数侑昇

北海道大学工学部

1．はじめに

相互結合型のPDPモデルの認知科学的な応用として，スキーマのモデル化が試みられている[1]．このモデルは分散表現を採用しており，表現の柔軟性，汎化能力，変数・デフォールト値の自然な埋め込みなどの点で優れていると言われている．しかしながら，動作が単純で均質なネットワークを理論の基礎としているため，構造をもつ概念の表現に対しては不十分であることも同時に指摘されている．また，完全な分散表現の場合には，ネットワークの大規模化にともない，想起されたパターンの解釈などの問題が生じる．これらの点から，より高次の知識処理を実現するためには，ネットワークに構造を持たせる必要があると考えられる．それに対して筆者らは，部分概念としてのサブスキーマをシンボル化することによってスキーマ構造化する枠組みを提案しており，サブスキーマに基づく構造の単位としてのモジュールを構築し，その挙動を確認している[2]．ここではこのモジュールを階層的に結合して，さらに高次の概念を表現するネットワークの構築を試みる．

2．制約充足ネットワークによるスキーマモデル

スキーマとは概念に関する知識を具体的に表現する知識構造を示す言葉であり，この枠組みにおいて，概念は微細特徴と呼ばれる低次の記述要素とそれらの間に与えられる制約によって表現される．微細特徴および微細特徴間の制約をそれぞれ相互結合型ニューラルネットワークのユニットおよびユニット間のリンクの重みにそれぞれ対応させることにより，制約の全体を最もよく充足するような全ユニットの状態（出力値）のパターンとして概念を記憶，想起させることができる．このようにニューラルネットワークの自己想起過程を利用するモデルを制約条件充足ネットワーク(CSN)と呼ぶ[1]．

ここでは，以上で述べたような性質を持つ制約条件充足ネットワークN_Cを，ユニットの集合U_C，リンクの集合L_C，リンクの重みの集合W_C，状態遷移関数の集合F_Cの4項組によって以下のように表現する．

$$N_C = \langle U_C, L_C, W_C, F_C \rangle \tag{1}$$

where

$$U_C = \{u_{Ci} \mid i = 1, \cdots, n_{uC}\},$$
$$L_C = \{(i, j) \mid u_{Ci}, u_{Cj} \in U_C, i \neq j\} \subset U_C \times U_C,$$
$$W_C = \{w_{Cij} \mid (i, j) \in L_C\},$$
$$F_C = \{f_{Ci} \mid u_{Ci} \in U_C\}.$$

3．制約条件充足ネットワークの構造化

N_Cに対し，その各要素の部分集合U_S，L_S，W_S，F_Sで構成されるネットワークN_SをN_Cのサブネットワークと呼び，N_Sがサブスキーマの条件を満たすように縮約可能性の条件を定める[2]．N_Cの縮約可能な複数のサブネットワークN_{Si}を各々1個ずつのユニットで置換する操作を縮約[3]と呼び，縮約されたネットワークN_R，置換したユニットu_iをそれぞれを縮約ネットワーク，シンボルユニットと呼ぶ．縮約によって新たに生成されるリンクの重みは，次式で表される置換写像ϕ_{WB}，ϕ_{WS}によって与える．

$$\phi_{WB}(\{w_{jk} \mid u_j \in U_{Si}\}) = w_{ik}, \tag{2}$$

$$\phi_{WS}(\{w_{kl} \mid u_k \in U_{Si}, u_l \in U_{Sj}, i \neq j\}) = w_{ij}. \tag{3}$$

以上のように定義された縮約ネットワークにおいて，置換によって追加されたシンボルユニットにそれによって置換されたサブネットワークを結合することにより，2層構造のネットワークを生成する．この構造化操作によって生成されたネットワークを構造化ネットワークN_Dと呼び，以下のように定義する．

$$N_D = \langle U_D, L_D, W_D, F_D \rangle \tag{4}$$

where

$$U_D = U_R \cup (\bigcup_i U_{Si}),$$
$$L_D = L_R \cup (\bigcup_{i,j} \{(k, l) \mid u_k \in U_{Si}, u_l \in U_{Sj}\}) \cup (\bigcup_i \{(k, l) \mid u_k \in U_R, u_l \in U_{Si}\}),$$
$$W_D = W_R \cup (\bigcup_{i,j} \{w_{kl} \mid u_k \in U_{Si}, u_l \in U_{Sj}\} \cup (\bigcup_i \{w_{kl} \mid u_k \in U_R, u_l \in U_{Si}\}),$$
$$F_D = F_R \cup (\bigcup_i F_{Si}).$$

構造化によって新たに生成されるリンクの重みは，次式で表される構造化写像ψによって与える（Fig. 1参照）．

$$\psi(\{w_{jk} \mid u_j, u_k \in U_{Si}\}) = w_{ij}. \tag{5}$$

構造化ネットワークにおいては，シンボルユニットとそれに結合するサブネットワークによって，サブスキーマをシンボルとそれを構成する微細特徴の両方のレベルで表現する．これにより，知識の抽象-具体関係を自然に表現することが可能となる．シンボルと微細特徴の間にはより強い制約が存在するものと仮定し，それらのユニットは同期的に状態遷移を行うものとする．したがってこの部分構造が同期状態更新モジュールとな

Structurization of the Constraint Satisfaction Network—Hierarchically Connected Synchro-state-transition Modules—

Taku OKUNO, Yukinori KAKAZU

Hokkaido Universitv

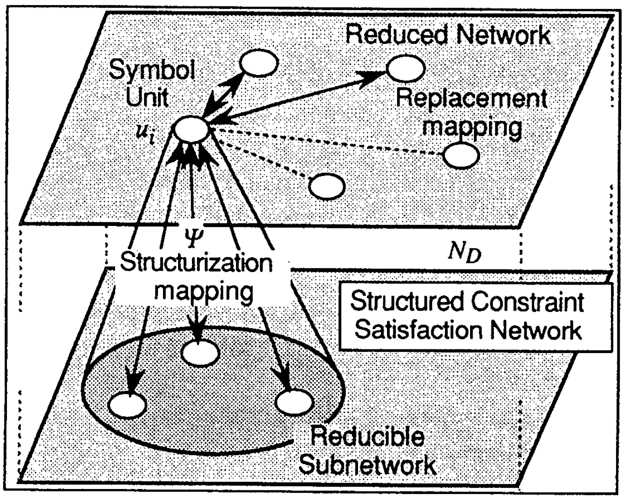

Fig. 1 Structurization of the Constraint Satisfaction Network.

る．

4．同期状態更新モジュールの階層的結合

上述の縮約・構造化の操作によって生成された構造化ネットワークの上層すなわちN_Rに対し，再帰的に縮約・構造化の操作を施すことにより，多層のネットワークが形成される（Fig.2参照）．(5)式を多層に拡張すると，i-層の構造化ネットワークN^i_Hは次式の様に書き換えることができる．

$$N^i_H = \left\langle U^i_H,\ L^i_H,\ W^i_H,\ F^i_H \right\rangle \tag{6}$$

where

$$U^i_H = U^i_R \cup \big(\bigcup_{j=1}^{i} \bigcup_k U^{j-1}_{Sk}\big),$$

$$L^i_H = L^i_R \cup \big(\bigcup_{j=1}^{i} \big(\bigcup_{m,n} \{(k, k') \mid u_k \in U^{j-1}_{Sm},\ u_{k'} \in U^{j-1}_{Sn}\}\big)$$
$$\cup \big(\bigcup_m \{(k, l) \mid u_k \in U^{j-1}_{Sm},\ u_l \in U^j_R\}\big)\big),$$

$$W^i_H = W^i_R \cup \big(\bigcup_{j=1}^{i} \big(\bigcup_{m,n} \{W_{kk'} \mid u_k \in U^{j-1}_{Sm},\ u_{k'} \in U^{j-1}_{Sn}\}\big)$$
$$\cup \big(\bigcup_m \{W_{kl} \mid u_k \in U^{j-1}_{Sm},\ u_l \in U^j_R\}\big)\big),$$

$$F^i_H = F^i_R \cup \big(\bigcup_{j=1}^{i} \bigcup_k F^{j-1}_{Sk}\big).$$

また，このネットワークの一つの階層のみを考えた場合は，外部入力を持つ均質なCSNと見ることができる．この場合，第i層のネットワークN^i_Lは次式の様になる．

$$N^i_L = \left\langle U^i_L,\ L^i_L,\ W^i_L,\ F^i_L \right\rangle \tag{7}$$

where

$$U^i_L = \bigcup_j U^{i+1}_{Sj} \subseteq U^i_R,$$

$$L^i_L = \{(j, k) \mid u_j,\ u_k \in U^i_L,\ j \neq k\} \subseteq L^i_R,$$

$$W^i_L = \{w_{jk} \mid u_j,\ u_k \in U^i_L,\ j \neq k\} \subseteq L^i_R,$$

$$F^i_L = \bigcup_j F^{i+1}_{Sj} \subseteq F^i_R.$$

このネットワークは，下層へ行くほど一般的な特徴を表現し，上層へ行くほど特殊な特徴を表現するような分類学的階層を形成しており，同期状態更新モジュールによって属性の継承を実現している．多層化された構造化ネットワーク全体の挙動は個々のモジュールと同様に，(2)，(3)式の置換写像と，(6)式の構造化写像によって特徴付けられると考えられる．すなわち，置換写像は層内の制約を，構造化写像は層間の制約をそれぞれ決定する．したがってこれらの写像を適当に与えることにより，概念の想起をある程度偏向させることが可能であると考えられる．これらの写像として，次の様な構造化以前のネットワークの重みの関数が考えられる．

$$\phi_{WB}\Big\{\frac{c_{RS}}{n_S}\sum_j w_{jk}\Big\} = w_{ik} \quad \text{where } j = 1, \cdots, n_S, \tag{8}$$

$$\phi_{WS}\Big\{\frac{c_{RM}}{n_M}\sum_{k,l} w_{kl}\Big\} = w_{ij} \quad \text{where } k, l = 1, \cdots, n_M, \tag{9}$$

$$\psi\Big\{\frac{c_{ST}}{2n_S}\sum_{k \neq l} w_{kl}\Big\} = w_{ij} \quad \text{where } k, l = 1, \cdots, n_S. \tag{10}$$

where c_{RS}, c_{RM}, c_{ST} : const.

これらの写像は，多くの異なった安定パターンの一部となり得るような，密接に結合しているユニットの安定な部分集合というサブスキーマの定義を考えた場合には妥当であると考えられる．

5．おわりに

以上において，均質なCSNにおいては不十分であるとされる構造を含む概念表現する枠組みとして，サブスキーマに基づくCSNの構造化を試みた．その手法として，内部では同期的に動作するネットワークをモジュールとして抽象-具体関係を表現し，それらを階層的に結合する方法を提案した．

【参考文献】

1) Rumelhart, D. E., et al.: "Parallel Distributed Processing," Vol. 1 & Vol. 2, The MIT Press (1986).

2) 奥野，嘉数: "サブスキーマに基づく制約条件充足ネットワークの構造化に関する研究," 第1回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, 日本機械学会 (1991).

3) Floriani, L. D., et al.:"Structured Graphs and SpanningTrees," Proc. of COMPSAC '83, Chicago, 320-327, (1983).

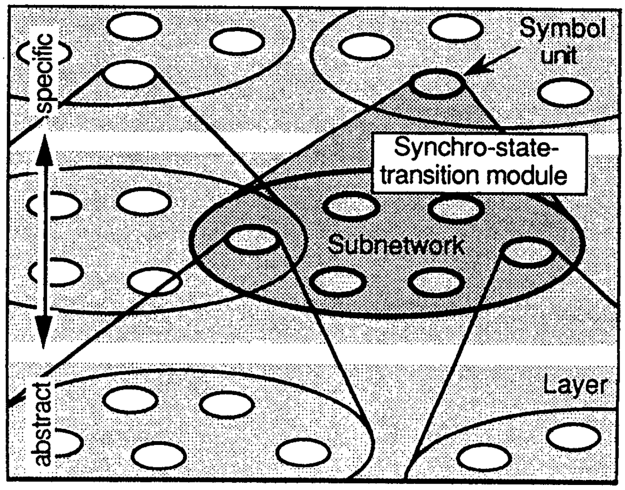

Fig. 2 Connected synchro-state-transition modules.