数理解析研究所講究録
第556巻 1985年 71-80

条件式グラフの変形による分散データベースの質問処理

京都大学·工学部　吉川正俊 (Masatoshi YOSHIKAWA)
九州大学·工学部　上林弥彦 (Yahiko KAMBAYASHI)

1. まえがき

準結合は分散データベース等における質問処理コストを削減する上で有用であるが、その能力は限られている。関係間の不等号結合で表現される自然不等号質問の場合、一般に単数属性準結合のみで処理できない質問は以下のいずれかの条件を満たす[1][2]。(1)一対の関係間に複数個の結合条件が定義されている。(2)条件式グラフ内に、収束対を1個だけ含むか収束対を含まない閉路が存在する。本稿では、(1)の質問を扱うために複数属性準結合を導入する。また、文献[3]で導入した一般化準結合を不等号の場合へ拡張し、(2)の質問を含む巡回型質問の処理方法を示す。さらに、これらの処理方法を利用した分散データベースの質問処理について考察する。

2. 基本的事項

関係、関係スキーマをそれぞれR,$\underline{R}$で表すものとする。　条件式qに対し、$(\sigma_q(R_1\times R_2\times\ldots\times R_n))[\underline{R_i}]$ $(1\leqq i\leqq n)$を、R_iの部分解と呼ぶ。本稿では条件式と質問を同一視する。以下、3,4節では、qに対しすべての関係の部分解を求

める手法を与え、5節ではそれらをもとにより一般的な場合について考察する。A,Bをそれぞれ$R_i, R_j (i \neq j)$の属性とするとき、$(R_i.A\ \theta\ R_j.B)$の形の結合節の論理積で表現される質問を<u>不等号結合質問</u>と呼ぶ。ただし、θは$=,<,>,\leqq,\geqq$のいずれかである。不等号結合質問のうち、制約演算による前処理と属性名変更によって、結合節をすべて$(R_i.A\theta R_j.A)$の形に変換できるものを<u>自然不等号質問</u>と呼ぶ。以下、自然不等号質問を単に質問と呼ぶ。<u>条件式グラフ</u>は質問を表現するラベル付き無向グラフであり、各節点は関係に対応する。また、質問中にR_iとR_jの間で定義される結合節が存在するとき(それらを$c_{ij}^1, c_{ij}^2, \ldots, c_{ij}^k$とする)またそのときに限り、$R_i$と$R_j$に対応する節点間を枝で結ぶ。各結合節に対応してラベル$l_{ij}^1, l_{ij}^2, \ldots, l_{ij}^k$が枝$<Ri,Rj>$に付加される。$c_{ij}^h$ $(1 \leqq h \leqq k)$が$(R_i.A\ \theta\ R_j.B)$のとき、l_{ij}^hは$((A,B), \theta)$とする。また、$l_{ji}^h = (l_{ij}^h)^{-1} = ((B,A), \theta^{-1})$と定義する。ただし、$\theta^{-1}$は$\theta$の逆である("<","≦","="は、それぞれ">","≧","="の逆とする)。さらに、$at(c_{ij}^h, R_i) = A$, $at(c_{ij}^h, R_j) = B$, $C_{ij} \equiv c_{ij}^1 \wedge c_{ij}^2 \wedge \ldots \wedge c_{ij}^k$, $at(C_{ij}, R_i) = \{at(c_{ij}^1, R_i), at(c_{ij}^2, R_i), \ldots, at(c_{ij}^k, R_i)\}$, $L_{ij} = \{l_{ij}^1, l_{ij}^2, \ldots, l_{ij}^k\}$とし、$L_{ji} = (L_{ij})^{-1}$も同様に定義する。条件式グラフの枝$<Ri,Rj>$は、$|L_{ij}| > 1$ならば<u>多重枝</u>と言う。条件式グラフが木となる質問と等価な質問を<u>木型質問</u>、それ以外の質問を<u>巡回型質問</u>と言う。

2つの組$t_i (\in Ri)$と$t_j (\in Rj)$がC_{ij} (c_{ij}^h)を満足するとき、それを$t_i < C_{ij} > t_j$ $(t_i < c_{ij}^h > t_j)$で表す。$p = <R_i = R_{i0}, R_{i1}, \ldots, R_{i\ k-1}, R_{ik} = R_j>$を条件式グラフ中の経路、Xを $X \subseteq \underline{R_j}$ なる属性集合とする。$t_{i\ h-1} < C_{h-1\ h} > t_{ih}$ $(1 \leqq h \leqq k)$なる組$t_{ih} (\in R_{ih})$ $(1 \leqq h \leqq k-1)$が存在するときまたそのときに限り組$t_i (\in R_i)$はpに沿っ

て組$t_j[X]$(ただし$t_j \in Rj$)と結合可能であると言う。以後、2,3節では、CをRiとRjの間で定義された結合節の論理積とする。C上のRiとRjの結合は$Ri \underset{C}{\bowtie} Rj$で表現する。cをRiとRjの間で定義された結合節とするとき、c上のRjによるRiの単数属性準結合は$Ri \underset{c}{\ltimes} Rj$で表され$Ri \underset{c}{\ltimes} Rj = (Ri \underset{c}{\bowtie} Rj)[\underline{R}_i]$で定義される。

3.複数属性準結合

C上のRjによるRiの(複数属性)準結合$Ri \underset{C}{\ltimes} Rj$は単数属性準結合の自然な拡張として$Ri \underset{C}{\ltimes} Rj = (Ri \underset{c}{\bowtie} Rj)[\underline{R}_i]$のように定義される。複数属性準結合を用いれば、任意の木型質問及び多重閉路質問[4]は多重枝を含むものでも処理可能となる。

3.1 極小組集合 単数属性不等号準結合(たとえば$Ri \underset{A>B}{\ltimes} Rj$)を実行するためには、一個の値(即ち$\min(R_j[B])$)を知るだけでよい。一般の複数属性準結合$R_i \underset{C}{\ltimes} R_j$を実行するために必要十分な$R_j$の結合属性値集合を以下で定義する。

[定義3.1] Cを関係R_iとR_jの間で定義された結合条件式とし、XをCに現れるR_jの属性集合とするとき、

(i) for R_i; $R_i \underset{c}{\ltimes} R_j = R_i \underset{c}{\ltimes} R_j'$ かつ

(ii) for $R_i, R_j''(\subsetneq R_j')$; $R_i \underset{c}{\ltimes} R_j \neq R_i \underset{c}{\ltimes} R_j''$

が成立するような$R_j[X]$の部分集合R_j'をR_jのC-極小関係と言う。 ■

3.2不等号射影 結合条件式の比較演算子に"≠"を含まない場合は、以下に定義する不等号射影がC-極小関係を与える。

[定義3.2] $A_1,A_2,...,A_k$を属性の集まり、$\theta_1,\theta_2,...,\theta_k$を対応する比較演算子の集まり(ただし"≠"は含まない)とするとき、$(A_1\theta_1,A_2\theta_2,...,A_k\theta_k)$を射影条件式と言う。 ■

[定義3.3] t,t'を属性 $A_1,A_2,...,A_k$を含む関係の組、$(A_1\theta_1,A_2\theta_2,...,A_k\theta_k)$を射影条件式とするとき、

$$\bigwedge_{h=1}^{k} (t[A_h]\,\theta_h t'[A_h])$$

が成立するときまたそのときに限り、tはt'より$(A_1\theta_1,A_2\theta_2,...,A_k\theta_k)$-小と言う。 ■

[定義3.4] $(A_1\theta_1, A_2\theta_2, ..., A_k\theta_k)$を $A_h \in \underline{R}\ (h = 1,2,...,k)$ なる射影条件式とするとき、Rの $(A_1\theta_1, A_2\theta_2, ..., A_k\theta_k)$ 上の不等号射影 $R[A_1\theta_1,A_2\theta_2,...,A_k\theta_k]$ は{t | $\exists t'\,(R(t') \wedge t'[X] = t \wedge t'$は半順序 "$(A_1\theta_1', A_2\theta_2', ..., A_k\theta_k')$-小"において極小}で定義される。ただし、Xは $A_1,A_2,...,A_k$から重複を除去して得られる属性集合、またθ_h'は以下の規則に従ってθ_hを置き換えたものである。$(h = 1,2,...,k)$

θ_h	=	<	>	≦	≧
θ_h'	=	≦	≧	≦	≧

■

上記の定義は、我々が文献[4]で与えた定義とは、主にθ_hをθ_h'に置き換える点で異なり、改良された結果となっている。

Cを結合節$(R_i.A_h\ \theta_h R_j.B_h)$ $(1 \leqq h \leqq k)$の論理積結合とするとき、以下のように結合条件式を用いて射影条件式を表すものとする。

$R_j[C] = R_j[B_1(\theta_1)^{-1},B_2(\theta_2)^{-1},...,B_k(\theta_k)^{-1}]$

一般にR_jのC-極小関係は$Rj[C]$となる。したがって、$Ri \underset{c}{\ltimes} Rj = Ri \underset{c}{\ltimes} Rj[C]$が成立する。

4. 一般化準結合を用いた弱1重閉路質問の処理

Cを$at(C,R_j) \subseteq \underline{R_j}$なる結合条件式とするとき、C上の$R_j$による$R_i$の一般化準結合$Ri \underset{c}{\ltimes} Rj$は$Ri \underset{c}{\ltimes} Rj = Ri \underset{c}{\ltimes} Rj[C]$で定義される。ただし、ここでC'は、Cの結合節の中で$at(c_h,R_i) \subseteq \underline{R_i}$を満足するものの論理積とする。

一般に、条件式グラフの閉路の部分を処理するためには、閉路中の各関係Riの各組t_iに対し、t_iが閉路に沿ってt_i自身と結合可能か否かを調べる必要がある。閉路をR_1-R_2-...-R_{n-1}-R_n-R_1とすると、このための方法として以下の2つが考えられる。

(I) [2つの隣接した関係の結合属性の比較]

以下の3条件を満足する2つの組$t_1(\in R_1)$及び$t_n(\in R_n)$が存在するか否かを調べる(図1(a)参照)。

(i) t_iは経路$<R_i,R_{i-1},...,R_2,R_1>$に沿って$t_1$と結合可能である。

(ii) t_iは経路$<R_i,R_{i+1},...,R_{n-1},R_n>$に沿って$t_n$と結合可能である。

(iii) t_1とt_nはC_{1n}を満足する。

(II) [1つの関係の結合属性の2つの属性値集合の比較]

以下の2条件を満足するような組$t_j(\in R_j)$が存在するか否かを調べる(図1(b)参照)。

(i) t_iは経路$<R_i,R_{i\oplus 1},...,R_{j\oplus 1},R_j>$に沿って$t_j$と結合可能である。

(ii) t_iは経路$<R_i,R_{i\oplus 1},...,R_{j\ominus 1},R_j>$に沿って$t_j$と結合可能である。

ただし、ここで$\oplus$及び$\ominus$はそれぞれmodulo nの加算及び減算であるとする。

[方法(I)に基づく処理] 図2(a)に示される条件式グラフを考える。ある枝(たとえば$<R_1,R_5>$)を他のすべての枝に埋め込み、$L_{i-1\ i}$ (i=1,2,3,4)と$(L_{51})^{-1}$の和集合を求めることにより、同図(b)のように条件式グラフを木に変換することができ、変換後の木に沿って同図(c),(d)に示されるような順で一般化準結合を実行することにより、すべての関係の部分解が得られる。即ち、図2(c)に示される一般化準結合列を実行することにより、$R_1[C_{15}]$の部分集合で$t_i(\in R_i)$が経路$<R_i,R_{i-1},...,R_2,R_1>$に沿って結合可能なものを求めることができ、同じく図2(d)に示される一般化準結合列を実行することにより、$R_5[C_{15}]$の部分集合でt_iが経路$<R_i,R_{i+1},...,R_{n-1},R_n>$に沿って結合可能なものを求めることができる。これら2つの集合をC_{15}に基づいて比較することにより、t_iがR_iの部分解に含まれるか否かが判定できる。実際には、図2(c)及び(d)の一般化準結合列の任意のシャフルを実行すればよい。

[方法(II)に基づく処理] 図2(a)で示される質問において、a_m (a_M)を$t_i(\in R_i)$ (i=1,2,3,4) が経路 $<R_i, R_{i-1}, ..., R_1,R_5>$ ($<R_i, R_{i+1},...,R_5>$)に沿って結合可能な組$t_5[A_5]$のうち最小(最大)のものとする。枝$<R_1,R_5>$に対応する比較演算子は"<"であるため、$a_m \leqq a_M$が成立するときまたそのときに限り、組t_iはR_iの部分解に含まれる。よって、以下の一般化準結合列(G1),(G2)の任意のシャフルを実行することにより全関係の部分解を求め得る。ただし、質問処

理前にR_5はA_5と同じ値を持つ属性A_5^m,A_5^Mを含むように(仮想的に)拡張されているものとする。

$$R_1 \underset{C_5'}{\boxtimes} R_5,\quad R_2 \underset{C_1'}{\boxtimes} R_1,\quad R_3 \underset{C_2'}{\boxtimes} R_2,\quad R_4 \underset{C_3'}{\boxtimes} R_3,\quad R_5 \underset{C_4'}{\boxtimes} R_4 \qquad (G1)$$

$$R_4 \underset{C_4'}{\boxtimes} R_5,\quad R_3 \underset{C_3'}{\boxtimes} R_4,\quad R_2 \underset{C_2'}{\boxtimes} R_3,\quad R_1 \underset{C_1'}{\boxtimes} R_2 \qquad (G2)$$

ただし、 C_1': $(R_2.B_2=R_1.A_1) \wedge (R_2.A_5^M \geq R_1.A_5^m)$

C_2': $(R_3.B_3 \geq R_2.A_2) \wedge (R_3.A_5^M \geq R_2.A_5^m)$

C_3': $(R_4.B_4 > R_3.A_3) \wedge (R_4.A_5^M \geq R_3.A_5^m)$

C_4': $(R_5.B_5 \leq R_4.A_4) \wedge (R_5.A_5^M \geq R_4.A_5^m)$

C_5': $(R_1.B_1 < R_5.A_5) \wedge (R_1.A_5^M \geq R_5.A_5^m)$

一般の巡回型質問処理のためには、文献[3]のように条件式グラフG_qのspanning tree Tを求め、G_q-Tに属する枝をすべてTに埋め込んだ後、本節で示した一般化準結合列を適用すればよい。

5.分散データベースにおける質問処理への適用

本節では、4節までの結果をもとに、分散データベースの質問処理について基礎的な考察を行う。各関係は互いに異なる地点に存在するものとし、利用者はある属性集合$A_1, A_2, ..., A_k$と対応する比較演算子の集まり$\theta_1, \theta_2, ..., \theta_k$に対し

$$(\sigma_q(R_1 \times R_2 \times ... \times R_n))[A_1\theta_1, A_2\theta_2, ..., A_k\theta_k] \qquad (5.1)$$

を答として要求するものとする。例えば、2つの関係、学生(学生名,学生番号)と成績(学生番号,科目,点数)に対し、$(\sigma_{q1}$(学生×成績))[学生名＝,点数≧],ただし、q1:(学生.学生番号＝成績.学生番号)は、各学生ごとに(科目に無関係に)最高

点を求める質問である。これはSQLのGROUP-BY操作に対応するが、不等号射影を用いることによりこのような質問も簡潔に表現することが可能となる。

次に、(5.1)式の質問及び利用者が答を要求している地点(S_uとする)が与えられたときの処理法を示す。

(1)S_uに関係が存在する場合(それをR_uとする)は、$\{A_1, A_2, ..., A_k\}$ - $\underline{R_u}$を$\{A_1, A_2, ..., A_h\}$ $(h \leqq k)$とする。(一般性を失うことなくそのように属性の名前替えを行える。)S_uに関係が存在しない場合は$h=k$とする。

(2)R_uが存在する場合は、R_uを $R_u \times (dom(A_1) \times dom(A_2) \times ... \times dom(A_h))$で置き換え、$R_u$が存在しない場合は、仮想的に$R_u$として$(dom(A_1) \times dom(A_2) \times ... \times dom(A_k))$ が存在するものとする。

(3)各$A_i\theta_i$ $(i=1,2,...,h)$に対し、以下の(4)を実行する。

(4)条件式グラフG_qにおいてR_uとA_iを含む関係(Rとする)の間に枝を付加し、枝$<R_u,R>$のラベルを$((A_i,A_i), \theta_i^{-1})$とする。

(5)R_uを根とする条件式グラフの根付き全域木Tを求め、G_q - Tの枝をすべてTに埋め込む[4]。

(6)Tに沿って4節の一般化準結合を実行し、R_uの部分解を求める。

上記のような条件式グラフの変形後、R_uの部分解を求めることにより、それが(5.1)式の答となることがわかる。

6. あとがき

不等号を含む質問では、収束対[1],[2]の概念が重要であり、収束対を用いた効率的な処理法の開発が課題である。

謝辞 日頃御指導頂く京都大学工学部矢島脩三教授に感謝します。

参考文献

[1] Bernstein,P.A. and Goodman,N., "Inequality Semi-Joins", CCA Report, No.CCA-79-28, Dec.1979.

[2] Bernstein,P.A. and Goodman,N., "The Power of Inequality Semijoins", Information Systems, Vol.6, No.4, pp.751-771, Nov. 1981.

[3] Kambayashi,Y., Yoshikawa,M. and Yajima,S., "Query Processing for Distributed Databases Using Generalized Semi-Joins", Proc. ACM-SIGMOD ICMOD, pp.151-160, June 1982.

[4] Yoshikawa,M. and Kambayashi,Y., "Processing Inequality Queries Based on Generalized Semi-Joins", Proc. 10th International Conference on VLDB, pp.416-428 Aug. 1984.

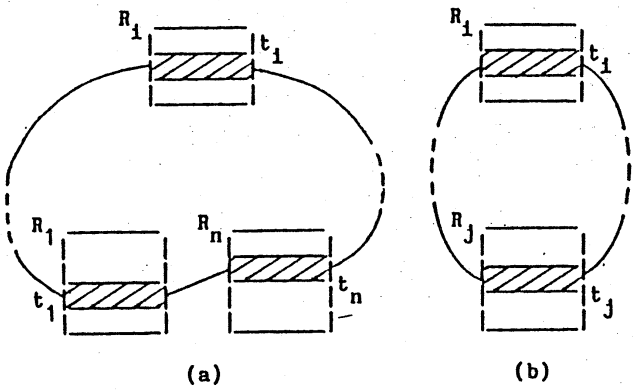
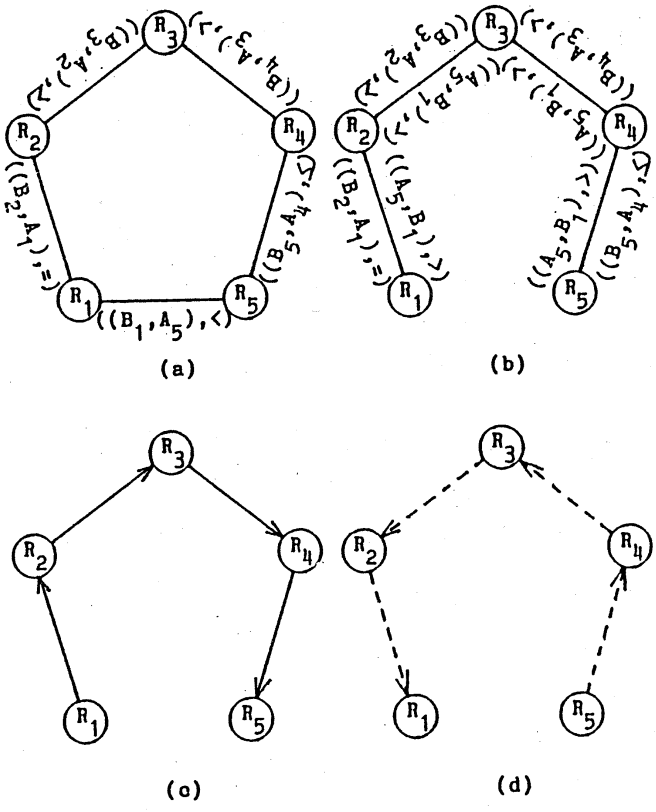


図1. 閉路の処理



注: (c), (d)のラベルは(b)と同じであるため省略されている。

図2. 一般化準結合の適用