創発的計算のためのモデル CCM による 制約充足問題などの独立並列処理法*

金田　泰
新情報処理開発機構 (RWCP) つくば研究センタ

1. はじめに

CCM [Kan 94a] は，創発的計算にもとづく問題解決法の確立をめざして開発した，非決定的 (ランダム) な計算のモデルである．この研究では ,局所的・部分的な情報だけをつかった，たえず変化する環境のもとでのひらかれた計算をめざしている．

この研究はまだ初期段階にあるため，これまで CCM によって古典的な制約充足問題や最適化問題などをあつかってきた [Kan 94c] が，動的な問題への適用も検討してきた [Kan 94b]．この報告では，CCM にもとづく制約充足問題などのひとつの並列処理法についてのべる．

2. 計算モデル CCM

CCM (Chemical Casting Model, 詳細は [Kan 94a] などを参照) はプロダクション・システムにもとづくモデルであり，化学反応系とのアナロジーにもとづいている．プログラムは反応規則と局所秩序度とで構成される．反応規則は前向き推論によるプロダクション規則であり，局所秩序度は一種の評価関数である．いずれも局所的な情報をつかって計算される．局所秩序度は各原子または 2 個の原子間に定義されるが，これは負号をつけた原子間の結合エネルギーのようなものだとかんがえられる．反応 (反応規則の適用) は，それに関係するすべての原子の局所秩序度の和が反応によって減少しないときにだけおこる．いずれかの反応規則と原子のくみあわせが反応条件をみたすかぎり反応は連続しておこり，条件をみたすくみあわせが存在しなくなると反応は停止する．反応規則とデータは乱数をつかって選択される．

3. CCM による計算のマルコフ連鎖モデル

局所秩序度の平均値を平均秩序度とよぶ [Kan 94c]．システムは平均秩序度を計算するわけではないが，それが増加する方向に揺動的 (stochastic) に動作する．

平均秩序度 (大域秩序度) の変化はマルコフ連鎖によって近似できることが実験的にわかっている [Kan 93b]．ここでは平均秩序度が離散値をとると仮定する (連続値をとるときのあつかいは [Kan 93a])．反応がおこるたびに時刻が 1 ずつすすむとし，時刻 t における平均秩序度 $O(t)$ を確率変数とする．$O(t)$ が i という値をとる確率をつぎのようにあらわす．

$$p(O(t)=i)\ \left(\sum_{i=0}^{\mathrm{I}} p(O(t)=i)\ =1 \text{ がなりたつ}\right)$$

$p(O(t)=i)\ (i=0,1,\ldots,\mathrm{I})$ を要素とするベクトルを $\boldsymbol{p}_t$ とすると，つぎの関係がほぼなりたつ．

$$\boldsymbol{p}_{t+1} = T\boldsymbol{p}_t\ .$$

遷移行列 T は I 行 I 列の行列であり，その値は時刻によらない．このように平均秩序度の時系列をマルコフ連鎖によって近似できる理由はわかっていない．

T の固有値を $\lambda_0, \lambda_1, \ldots, \lambda_{\mathrm{I}}\ (|\lambda_0| \geq |\lambda_1| \geq \ldots \geq |\lambda_{\mathrm{I}}|)$ とすると，$\lambda_0 = 1$ がなりたつ [Mor 79]．また，T^n はつぎのように表現できる [Mor 79]．

$$T^n = T_0 + \lambda_1{}^n T_1 + \lambda_2{}^n T_2 + \ldots + \lambda_{\mathrm{I}}{}^n T_{\mathrm{I}}\ .$$

おおくのばあい $|\lambda_1|$ は 1 に十分にちかいが $|\lambda_2|, \ldots, |\lambda_{\mathrm{I}}| << 1$ がなりたつ ．そこで $\lambda_2 = \lambda_3 = \ldots = 0$ と近似すると，解以外の状態 (非吸収状態) にいる確率が時間がたつにつれて指数的に減少するので，停止するまでの計算時間は指数分布にしたがう．これが近似的になりたつ例を図 1 にしめす．

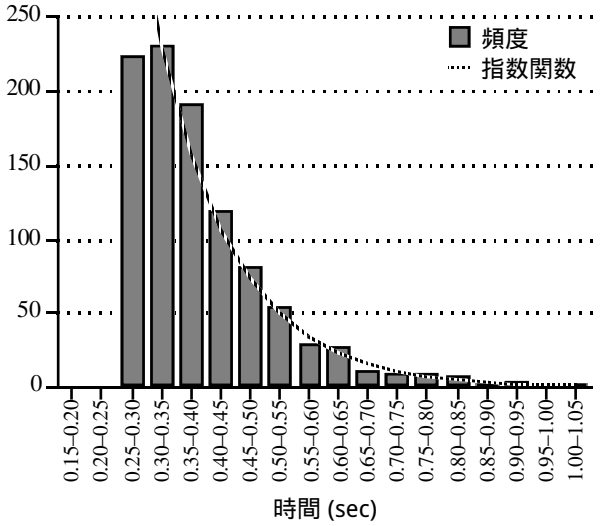

図 1 エイト・クウィーン問題の計算時間分布例

* A Method of Independent Parallel Processing of Constraint Satisfaction and Other Problems using CCM: A Model for Emergent Computation, by Yasusi Kanada, Real-World Computing Partnership. E-mail: kanada@trc.rwcp.or.jp.