

大規模自律エージェントシステムにおける契約ネットプロトコルの 効率特性

Performance Characteristics of Contract Net Protocol in Massively Multi-Agent Systems

菅原 俊治† 福田 健介‡ 廣津 登志夫¶ 栗原 聡§
Toshiharu Sugawara, Kensuke Fukuda, Toshio Hirotsu and Satoshi Kurihara

1. まえがき

マルチエージェントシステムでは、交渉プロトコルによりタスクや資源を適切に割当てるのが重要である。交渉プロトコルについては、契約ネット[1]の研究が分散 AI 研究の初期からなされ、その改良[2,3]や、情報経済学の観点からもオークションの研究[4,5]などがある。

一方、近年のインターネットやセンサーの高機能化などにより、複数かつ大量のエージェントが相互に協調を行う場面が想定される。たとえば、インターネット上の電子商取引では、商品の提示、顧客管理、在庫管理、配送、決済処理などの異なるエージェントが協調して実現されている。特に、人気のある商品を扱うサーバでは、その負荷が問題となる。また、グリッド（特に PC グリッドやエージェントグリッド[6,7]など）では、適切なタスクを適切な計算機に割当て、全体として効率の高い処理を実現することが求められる。このような状況は今後とも進行し、より多数の PC（あるいは Web サーバ）が世界レベルで相互に競争あるいは協調しながら処理を進めると予想される。

しかし、資源やタスクを割当てる交渉プロトコルが大量のエージェント（たとえば数千規模以上）で実行され、相互に影響を及ぼす場合、その特性はよく分かっていない。そこで本発表では、古くからかつ広く使われている[8,9]契約ネットを取り上げ、大規模システム環境下における効率とその性質を解析する。

2. 契約ネットの概要と大規模システムでの課題

契約ネットでは、マネージャまたは契約者という役割を持つエージェントがインタラクティブに取引を行う。はじめに、割当てべきタスク（資源）を持つエージェントがマネージャとしてタスクを広報する。広報を受けたエージェント（契約者）は、そのタスクを受入れるかどうかを決め、もし受入れる場合には、何らかの指標（たとえば、コスト、所要時間、結果の質、処理の確実性など）を表した値（これを**入札値**と呼ぶ）とともに、マネージャに入札する。マネージャは一定時間待ち、入札されたものから最も適切と思われる契約者に落札する。この契約者を**落札者**(awarder)と呼ぶ。

エージェントが多量となり、広報するタスクも増えた場合の第一の課題は、その全体の効率である。契約者が入札し、その結果を知るまで次の入札をしないと最終的に並列

性が失われ、全体の効率が落ちる。このために、契約ネットでも複数入札が提案されている[1]。しかし複数入札では、同時に複数の落札の可能性もあり、契約した入札値を守れないこともある。ただ、実際にどの程度の複数落札があり、全体としてどの程度の効率低下が起こるかは分っていない。

第二の課題は、多量のメッセージによる負荷である。特に、近年のネットワーク技術の発展により、ボトルネックが回線からノード、つまりエージェントの処理能力に移った。多量のタスクの広報は、契約者側には、メッセージの解析、入札の如何の判断、入札値の計算を大量に発生させ、マネージャ側では、多数の入札メッセージの解析と落札者の決定をしなくてはならない。この課題の簡単な解決策は、広報の範囲を制限することである。しかし、範囲の制限は、適切なエージェント（たとえば低負荷状態や高処理能力を持つエージェントなど）にタスクが広報されないこともある。

そこで本研究では、10000 程度のエージェントがそれぞれ異なる処理能力を持つような環境において、それぞれで発生する多量のタスクを契約ネットにより割当てるとき、複数入札や広報範囲の制限により、全体の効率が如何に変動するかを調査する。本研究の成果は、大規模マルチエージェントシステムで、効率的な交渉プロトコルを設計するための基礎実験と位置づけられる。

3. シミュレーション

3.1 契約ネットのモデル

$A=\{a_1, \dots, a_n\}$ をエージェントの集合、 $M=\{m_i\} (C \subset A)$ をマネージャの集合、 $C=\{c_k\} (C \subset A)$ を契約者の集合とする。また実験に関連のあるエージェントのみとするため、 $M \cap C = \phi$ かつ $M \cup C = A$ とする。あるタスク T がシミュレーションで単位時間毎（この単位時間を 1 tick と呼ぶ）に tl 個生成され、任意に選んだ tl マネージャに与えられる。ここで tl は 0 以上の整数である。タスクを与えられたマネージャ m_i は、契約ネットプロトコルに基づき、最適と判断する契約者 c に T を割当てる。タスクの生成を確率的にすることで、 tl を自然に整数以外にも拡張できる。たとえば、 $tl=9.2$ であれば、1 tick あたり、80%の確率で 9 個、20%の確率で 10 個のタスクが生成されるとする。

タスクを与えられたマネージャ m_i は以下のように契約ネットを開始する。 m_i は契約者達にタスクの情報を広報する。受け取った契約者 c_j は入札に応じるかを決め、入札する場合には、適当な入札値とともに**入札メッセージ**を m_i に送る。入札しない場合には、マネージャが不要に長く返事を待たないように**非入札メッセージ**を返す。また本論文では、全体の効率に焦点を当てるため、入札値は効率の指標とする。このために、落札したタスクが割当てられた場合の完了所要時間の予想値を返す。この計算については、後で説明

† 早稲田大学, Waseda University

‡ 国立情報学研究所, National Institute of Informatics

¶ 豊橋技術科学大学, Toyohashi University of Technology

§ 大阪大学, Osaka University

する。入札メッセージを受け取った m_i は、その中から最適と判断した入札者 c_A を選択し、 c_A にはタスクとともに**落札メッセージ**を送り、その他の入札者には不要に長く待たせないように**落選メッセージ**を送る。非入札メッセージと落選メッセージは効率化のために導入したオブショナルメッセージであるが、[2,10]などでも利用されている。

次に本シミュレーションで調査する広報範囲を制限したタイプの契約ネット (Restricted Contract Net Protocol, RCNP) を定義する。仮定として、 $|A|$ は数千以上のオーダーで、十分に大きいとする。マネージャ m_i ($\in M$) に対し、 Km_i ($\subset C$) を m_i が知る契約者の集合とする。RCNP は、(1) 各 m_i がある広報戦略に基づいて Km_i から一定数の契約者を選択し、その範囲内だけにタスクを広報する、(2) 非入札と落選メッセージを導入する、ものとする。多数のエージェントが存在する場合には、そのすべてに広報する戦略は非効率であり現実的ではない。適切な指標 (たとえばネットワーク上の距離や「同じ国内にある」など) に基づいて広報範囲を制限するのは自然な拡張である。なお、広報範囲の制限は [9]でも提案されたが、これは回線がボトルネックの場合に、機能の面から入札する可能性のないエージェントへの広報を省いており、本研究のように多数の広報による相互作用の性質を調べるものではない。

3.2 シミュレーションの詳細なモデル

本論文のシミュレーションでは、 $|M|=500$, $|C|=10000$ とし、すべての契約者はタスク T を実行できるとする。距離を導入するために、エージェントを 150×150 のグリッドにランダムに配置し、距離 (Manhattan distance) を導入する。また境界の特殊性をなくすためにトーラス構造を導入する。エージェント a_i と a_j の距離を $dist(a_i, a_j)$ と表し、通信には距離に比例して遅延が伴うとした。ただし最大遅延は、14 ticks とした。この値は、1 tick を 5-10 ミリ秒と想定し、国レベルのネットワークを考慮した。 $\forall m_j \in M$ に対し、 Km_j の要素は m_j からの距離に基づき、 $|Km_j|$ が 50 を上回る最小半径内の契約者とした。具体的には、 $Km_j(n) = \{c \in C \mid dist(m_j, c) \leq n\}$ と定義したときに、 $Km_j = Km_j(n)$ ただし n は $|Km_j(n)| \geq 50$ となる最小の n とする。

1 tick 毎に tl 個のタスクが生成され、ランダムに選択された tl 個のマネージャに割り振られる。パラメータ tl を**負荷値**と呼び、 tl Task/tick (以下 tl T/t) と表す。タスクを割り振られたマネージャは、タスクを適切な契約者に割り当てるために直ちに RCNP を開始する。

タスクの処理時間を決定するために T のコスト $cost(T)$ とエージェント c_i の能力 $ab(c_i)$ を導入する。ともに正数であり、 c_i は T を完了するために $cost(T)/ab(c_i)$ ticks の所要時間がかかるとする。多様な能力を仮定するために、 $cost(T)=2500$ と定数とし、一方で $ab(c_i)$ を分散させ、 $cost(T)/ab(c_i)$ が区間 [20, 100] で一様に分布するように選択した。結果として $25 \leq ab(c_i) \leq 125$ となる。

落札者 c_i が T を受け取り、他に実行すべきタスクが無ければ、 T を直ちに実行する。もしすでに他のタスクを実行していれば、 T は c_i のキューに格納され、格納されたタスクは順に実行される。各 c_i は最大 20 タスクまで格納できるとし、それを超えるとドロップされる。この状態を過剰割当と呼ぶ。

入札値は、各入札者の処理完了予想値でなくてはならない。このため、キューに溜められたタスクの数を s とした

とき、入札値を $s \times (2500/ab(c_i)) + \alpha$ とする。なお、 α は現タスクの残りの処理時間である。当然小さい入札値の方がよい。複数入札を許すので、この値は必ずしも守れない。しかし、入札の結果が未定の段階でその分も含めるとより不正確になる可能性がある。実際、入札したものは落札したとして考慮する場合、過去の実績からの期待値分だけ反映させるなどの入札値も調べたが、次節で述べる結果に大きな差はなかった。一方、タスクの広報メッセージを受けた契約者は必ず落札することとした。この部分に関しても、ドロップの可能性がある場合には入札しないなどの制御を加えたが、この効果が出るのは負荷値が高いときだけであり、いずれにしても入札値は大きくなる。この場合にも、本論文で示す効率と信頼度の内容に関して大差はなかった。

本実験で全体の効率を表す値は、全マネージャが観測したタスクの**総実行時間** (completion time) の平均値である。この観測値は、広報・入札の部分は考慮せずに、落札メッセージ通信時間、落札者内のキューでの滞留時間とタスクの処理時間、結果の送信時間の和で構成される (がマネージャは内訳を観測できない)。また入札値の信頼度も測定した。この値は、各マネージャが、落札者が約束した入札値と実際の観測値を比較し、その差の平均値をもとめ、最後に全マネージャを対象に期待値 (加重平均) を求めたものである。ただし、信頼度については、ページ数の関係で詳細なデータの提示は割愛する。

本論文に示す実験値は、独立した 3 つの乱数を用いており、それぞれの実験値の平均を求めた。全契約者の理論的な処理能力は 9.7-10.2 T/t であり、その平均は 9.9 T/t であった。この結果から負荷値を変動させ、極度に空いた状態 (0.1 T/t)、空いた状態 (0.5-1 T/t)、適度に負荷がかかった状態 (3-6 T/t)、能力の臨界点 (9-10 T/t)、過負荷状態 (11 T/t) に分けて全体の効率を調べた。

4. 実験—ランダム選択の場合

4.1 広報数の影響

本実験では、広報数 (announcement number、定義は下記) と全体の効率の調査に主眼を置く。これはマネージャ側のみ戦略であり、商取引などでは、タスクを依頼する側に相当する。マネージャ側のみ対応で、全体の効率への影響を見る。以下の広報戦略を各マネージャに与える。

広報戦略 1: マネージャ m_i は、 Km_i の中からランダムに n エージェントを選択し、それらだけにタスクを広報する。エージェントの選択は、広報毎に行う。

この戦略を**ランダム選択戦略** (Random selection policy) と呼び $RSP(n)$ と記し、 n を広報数 (announcement number) と呼ぶ。また効率化のために、広報すべきエージェントを過去の実績から選択する手法も提案されている。これをベースに以下の戦略を定義する。

広報戦略 2: マネージャ m_i は、 Km_i から当初ランダムに広報するが、実績値に基づき契約者ごとに総実行時間の期待値を計算し、ある一定時間以降は、この期待値に基づき上位 n エージェントに広報する。

この選択を**実績ベース選択戦略** (History-based selection policy) と呼び、 $HBS(n)$ と表すこととする。

第一の実験として、広報数と全体効率の関係性を調べるために、 $n=5, 10, 20, 30, 50$ の場合について、 tl を変動させ、 $RSP(n)$ の下での全体の効率を調べた。本結果を図 1 に示す。

図1から、広報数が多いと確率的に高能力の契約者にもタスクが広報され、効率が良くなるという予想は、負荷が極めて低い場合のみで観測されることが分かる。これは、これまでの契約ネットの枠組みのように逐次的か、事実上複数の広報が同時に起こらない程度に負荷が低い場合に予想通りになるだけであり、わずかでも複数落札があると全

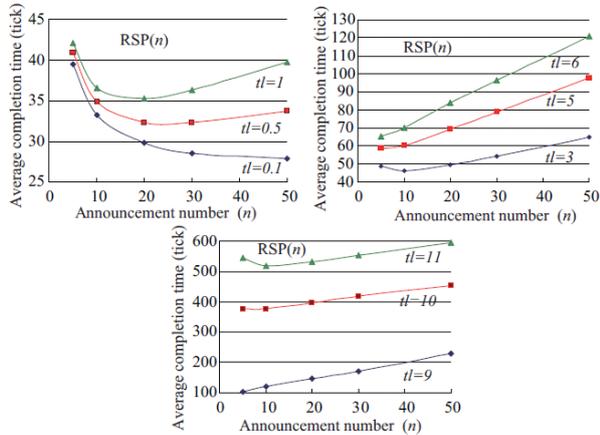


図1: $RSP(n)$ を利用したときの平均処理時間

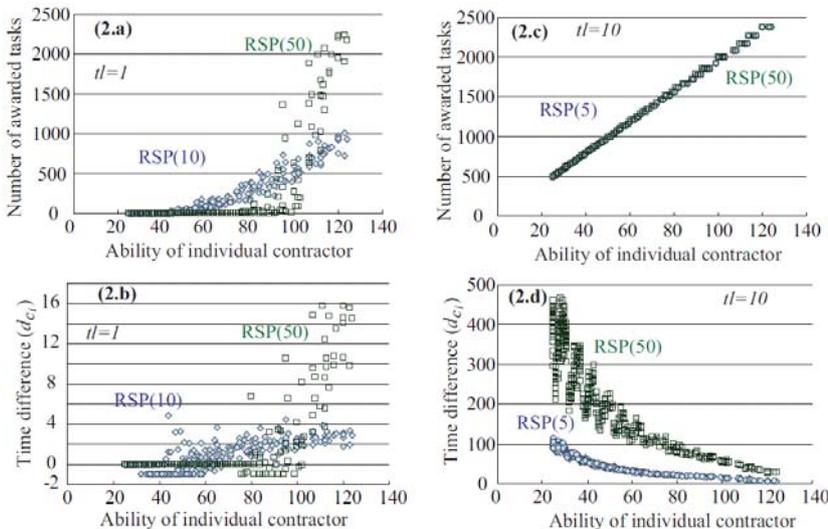


図2: $RSP(n)$ を利用したときの総処理時間と入札値との差

体の効率に影響がすることを示している。本実験からは、 n が大きくなると広い範囲の契約者に広報され、複数のマネージャが同じ契約者を最善と判断することによって考えられる。

図1からは、さらに、負荷値に依存してある適切な広報数が存在すると推測される。

4.2 タスクの集中の性質

上記の結果は、タスクの集中が高能力のエイジェントに発生し、いわゆる「共有地の悲劇」が発生していることを予想させる。これが実際に発生しているかを調べるために、契約者ごとの落札数(awarded task number)をとり、それを能力ごとにグラフにした。

この結果を図2の(2a)と(2c)に示す。なお本図では、一つの点は一契約者に対応する。(2a)から、負荷値が低い場合

には、広報数が多いと特定の能力の高い契約者のみに落札され、割当ての集中が発生するが、広報数が小さいと、マネージャの選択範囲が自然に制限されるため、より広くタスクが分散され、全体の効率が上昇していることが見て取れる。

しかし図2(2c)が示すように、負荷が高い場合には、広報数による落札数の変化は観測されない。実際に、個々の落札者の落札数を比較したところ、ほとんどが0.2%未満であり、最大で0.5%程度の差でしかなかった。これは、数の面からは、広報数を変えても落札数に変化がないことを意味している。

本状況をさらに詳しく調べるために、各マネージャが観測した総処理時間と約束した入札値の差を契約者 c_i ことに集め、その平均の変化を調べた。この値を d_{c_i} と書き、本結果を図2(2b)と(2d)に示す。図2(2b)から、負荷値が低いときには、より多くのタスクが割当てられた契約者がその差を大きくしていることが分かる。そのため、広報範囲が狭いと分散の効果により、全体の効率の向上だけでなく、約束した入札値との差も下がることが確認できる。

しかし、負荷が高い場合(図2(2b))には逆の傾向、つまり多くのタスクが割当てられたほうが差分は小さい。さらに、広報数が小さいときに比べ大きくなると、能力の低い契約者ほど大きな差分が生じる。この結果は、広報数による契約者ごとの割当て数は変わらないが、広報数が大きくなるとタスクが同時に割当てられる傾向があり、そのため大きな差が生じる。これが全体の効率を著しく下げたことが分かる。

5. 実験—実績活用の効果

5.1 期待値による選択の影響

上記の実験と同じ条件で、広報選択戦略を $HBS(n)$ に変え、同じ実験を行った。この結果を $RSP(n)$ の場合と比較したグラフを図3に示す。なお注意として、各マネージャが知っている契約者数はほぼ50であり、 $n=50$ の場合には実験値に大きな差は出ない。

本実験から、過去の実績値を活用した場合に効率が上がるのは、やはり負荷が極めて低く、事実上逐次的に処理される場合だけである。また、広報数

を低くすることは、学習した結果の適用範囲を狭めることになり、結果として選択肢の数が減り全体の効率が下がる傾向がある。しかし、負荷が上がると、実績値を活用しても効果があまり無いことが分かる。

5.2 入札値の信頼性

図2と同様に、契約者ごとの落札数と能力の関係、総処理時間と約束した入札値の差 d_{c_i} と能力の関係を図4に示す。図2と比較して、これらのグラフから分かることは、負荷値が低い場合、 $HBS(n)$ で広報数が少なくても広報数が大きな $RSP(n)$ と似た傾向を示すことである。負荷が低い場合には、広報数が多いほうが有利だが、メッセージ数を減らせるという意味で実績値の利用は価値がある。

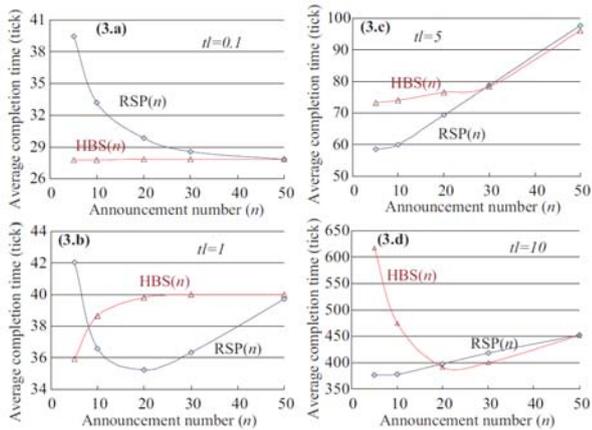


図 3: $HBS(n)$ を利用したときの平均処理時間($RSP(n)$)との比較

一方負荷が高い場合には、全体の効率は落ちるが、図 4(4c)から分かるように、より能力の高い契約者に落札する傾向があるのが原因と考えられる。一方で、信頼度を示す入札値と実際の総処理時間の差は図 4(4d)から分かるように、 $RSP(n)$ で能力の低い契約者で大きくなったが、 $HBS(5)$

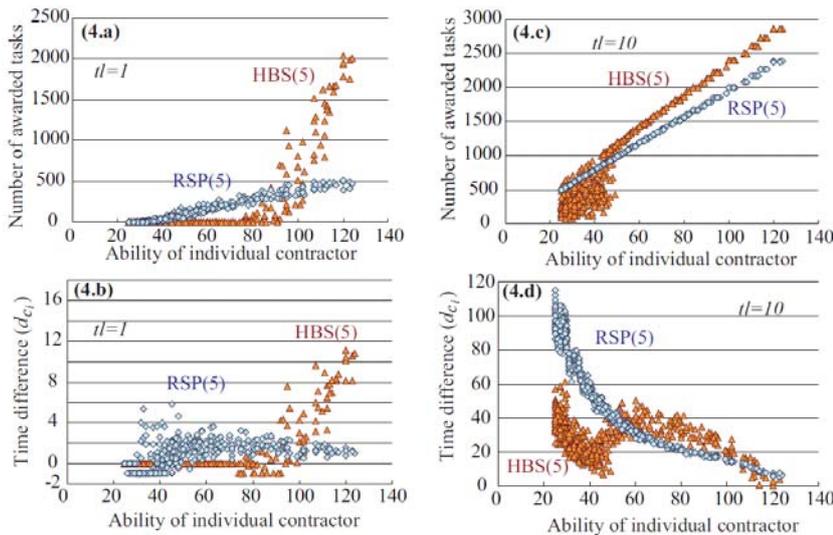


図 4: $HBS(5)$ を利用したときの総処理時間と入札値との差 ($RSP(5)$ との比較)

では低くなり全体的に平均化されることが分かる。 HBS では全体の能力は下がるが、信頼性は逆に上がることが分かる。

5. おわりに

本論文では、代表的な交渉プロトコルである契約ネットを大規模マルチエージェントシステムに適用した場合の全体の効率とその性質について報告した。負荷値や広報数の変動が全体の効率に影響し、また広報戦略により効率だけでなく入札値の信頼性（入札値と実際の総処理時間との差）に影響を及ぼすことが分かった。

実際の全体の効率や性質は、マネージャ側、契約者側双方の適切な協調戦略が必要である。本論文では、このうち、マネージャ側の制御のみに着目し、その性質を調べた。本実験から分かることは、マネージャ側のみの制御で、効率や信頼性に大きな変動があることが分かった。

本実験はまだ開始段階にあるが、通常の契約ネットが想定している逐次的な場合とかなり異なる性質があることが分かる。したがって、大規模マルチエージェントシステムでは、全体の効率の観点からマネージャ側、契約者側の新たな戦略を調べる必要があり、その基礎実験として本報告を位置づけている。今後は、より詳細な実験を行い、大規模環境でも効率的に動作する広報・入札戦略を解明したい。

参考文献

- [1] R. G. Smith, "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver," *IEEE Transaction on Computers*, vol. C-29, no. 12, pp. 1104–1113, 1980.
- [2] T. Sandholm, "An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost Calculations," *Proceedings of AAAI 93*, 1993, pp. 256–262.
- [3] S. E. Conry, K. Kuwabara, V. R. Lesser, and R. A. Meyer, "Multistage Negotiation for Distributed Constraint Satisfaction," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 21, no. 6, pp. 1462–1477, 1991.
- [4] M. Yokoo and S. Fujita, "The Effect of False-name Bids in Combinatorial Auctions: New Fraud in Internet Auctions," *New Generation Computing*, vol. 19, no. 4, pp. 369–388, 2001.
- [5] T. Sandholm, "Automated Contracting in Distributed Manufacturing among Independent Companies," *Intelligent Manufacturing*, vol. 11, no. 3, pp. 273–286, 2000.
- [6] J. Cao, D. J. Kerbyson, and G. R. Nudd, "Performance evaluation of an agent-based resource management infrastructure for grid computing," *Proc. of the First IEEE/ACM Int. Symp. on Cluster Computing and the Grid (CCGrid2001)*, pages 311–318, 2001.
- [7] J. Cao, D. P. Spooner, S. A. Jarvis, and G. R. Nudd, "Grid load balancing using intelligent agents," *Future Generation. Computer Systems*, 21(1):135–149, 2005.
- [8] D. Weyns, N. Bouck'e, and T. Holvoet, "Gradient Field-Based Task Assignment in an AGV Transportation System," *Proc. of 5th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2006)*, 2006, pp. 842 – 849.
- [9] H. V. D. Parunak, "Manufacturing experience with the contract net," in *Distributed Artificial Intelligence*, M. Huhns, Ed. Pitman Publishing, pp. 285–310, 1987.
- [10] L. Xu and H. Weigand, "The Evolution of the Contract Net Protocol," *Proceedings of WAIM 2001*, vol. LNCS 2118, pp. 257–264, 2001.