

先行投機的行動におけるリスク管理手法： 会議室予約問題における事例研究

Risk management methods for speculative actions: A case study of meeting room reservation problem

| | |
|----------------------------|---|
| 村尾 拓哉 Takuya Murao | 大阪市立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka City University |
| 北村 泰彦 Yasuhiko Kitamura | 関西学院大学理工学部 School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University |
| 東尾 潔 Kiyoshi Higashio | (株)富士通サポートアンドサービス Fujitsu Support and Service Inc. |
| 辰巳 昭治 Shoji Tatsumi | 大阪市立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka City University |

keywords: multiagent systems, consensus formation, speculative actions, risk management

Summary

In multiagent systems, a collaborative action requires a mutual agreement among multiple agents and the agreement is reached by exchanging messages, but the delay of message may cause the delay of agreement, and the delay of agreement may reduce the effect of the collaborative action. A speculative action is an action that is taken before agreement not to reduce the effect, but it always has some risk. If the speculative action taken contradicts the later agreement, it should be cancelled paying some cost. In this paper, we propose two risk management methods for speculative actions and discuss the advantages using a case study of meeting room reservation problem.

1. はじめに

マルチエージェントシステムにおいて協調的な行動を行う場合には複数のエージェントの合意が必要である。エージェント間の合意には一般にメッセージ通信が用いられるが、あるエージェントからの問い合わせに対する返答が瞬時に行われるとは限らない。この理由には通信路の性質に起因するものと、エージェントの性質に起因するものが考えられる。

まず、通信路の性質に起因するものとは通信路の遅延や障害によりメッセージ伝達遅れである。ある問い合わせに対して、エージェントが即時に返答を送ったとしても、通信路が混雑していたり、物理的あるいは論理的に切断されている場合には、メッセージの到着が遅れる場合や再送が必要になる場合がある。

もう一つはエージェントの性質に起因するものである。マルチエージェントシステムではエージェントが自律的かつ合理的に動作することが前提となる場合が多い。特に問い合わせに対する返答

が自らの効用に影響するような場合には、即時に返答するのではなく、できるだけ多くの情報を集めた上で自らの効用が最大になるような返答をすることが考えられる。

以上より、マルチエージェントシステムにおいてはエージェント間のメッセージ遅れを考慮することが重要である。一方、エージェントが合意に基づいて何らかの行動を行う場合に、その行動の遅れが効果を損なう場合が考えられる。例えば、会議室予約の場合には、予約（行動）が遅いと予約が不可能になる場合がある。すなわち、時間をかけてエージェント間で合意を得たとしても、協調的行動の効果が失われてしまうことが考えられる。

このような問題に対処する一つの方法は先行投機的行動である。これはエージェント間の合意の可能であると予測できる場合には、前もって行動を起こすことである。したがって合意の可能性が高ければ先行投機的行動は有効であり、協調的行動の効果は失われない。一方、合意の可能性が低

い場合には先行投機的行動はペナルティが生じる場合がある。例えば、会議室予約において、先行投機的行動として会議室の予約を行ったが、後になってメンバーが不参加の返答を返してきたとする。もし会議室予約の取り消しにキャンセル料が必要になるとするならばペナルティが生じる。すなわち先行投機的行動はそれが成功した場合の報酬と失敗した場合のペナルティの間にトレードオフの関係があり、先行投機的行動のリスクをうまく管理することが重要になる。

本論文では先行投機的行動のリスク管理手法として、混合型合意手法と段階型合意手法を提案する。混合型合意手法はエージェントの合意可能性を推測し、それに応じて先行投機的行動を行うかどうかを切り替える手法である。これは単一エージェントの推論のみに依存しているため単一エージェントアプローチといえる。

段階型合意手法は、エージェント間で仮合意を行い、ペナルティを支払うならば仮合意の破棄も可能な手法である。これは複数のエージェントが関わるマルチエージェントアプローチであるといえる。

本論文では、会議室予約問題を例題として、通常型、先行投機型、混合型、段階型合意手法を議論し、その効果を議論する。

2. 会議室予約問題

会議室予約問題とは、ホストとメンバーの2つのエージェントによって行われる合意形成問題である。

二人のエージェントが合意できた場合には会議を行うが、会議を行う場合には会議室の予約が必要であるとする。ホストは会議を成功させると外部から何らかの報酬が得られる。またメンバーはホストと会議を行うとホストから何らかの報酬が得られるものとする。しかしメンバーにはホスト以外のエージェントからも誘いがあり、その外部報酬に応じてホストとの会議に合意するかどうかを決定する。すなわち自らの効用を最大化するように返答を行う。また、会議室の予約は時間の経過に伴い困難になっていくとする。

合意成立の条件はメンバーが合意し、ホストが会議室の予約に成功することである。

2.1 会議室予約問題の定式化

会議室予約問題を表すパラメータは次のようになる。

- \bar{a} : 合意が成立したときにホストが得る報酬
- ρ : 合意参加に関してホストがメンバーに支払う報酬
- c : 会議室予約のキャンセル料
- P_m : メンバーがホストの提案した会合に参加する確率
- P_r : メンバーからの返答後に会議室を予約できる確率

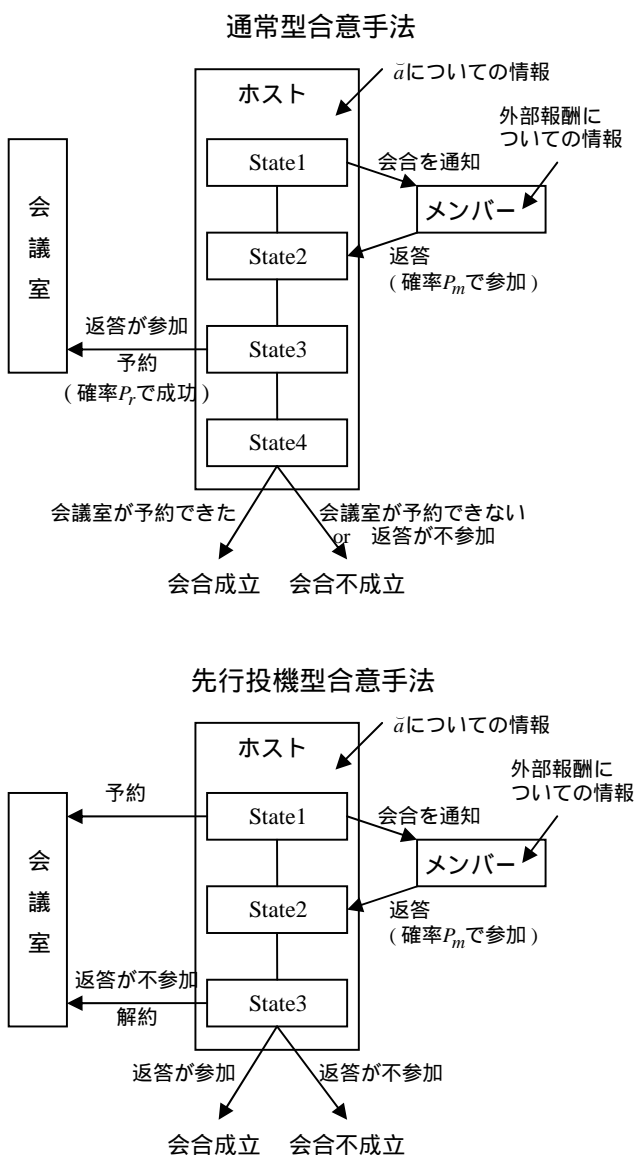


図1 通常型合意と先行投機型合意

会議室予約問題には、ホストが会議室を予約するタイミングの違いによって通常型と先行投機型の2つのタイプが存在する。

図1に示すように、通常型では、ホストはメンバーに会合を通知したあと、メンバーの返答を待ってから会議室の予約を行う。メンバーからの返答には遅延が生じるため、返答が参加であっても会議室の予約できる確率は P_r なので確実に会合が成立するとは限らない。

先行投機型では、ホストはメンバーに会合を通知したあと、メンバーの返答を待たずに会議室の予約を行う。メンバーの返答が参加のときは会合成立となるが、不参加のときホストは会議室の予約を取り消してキャンセル料 c を支払わなければならない。

2.2 会議室予約における利得

図2は会議室予約においてホストが得られる利得をツリー状に場合わけしたものである。通常型手法におけるホストの期待利得は次の通りである。

$$profit_{NORMAL}^h = P_m \cdot P_r \cdot (\bar{a} - \rho) + P_m \cdot (1 - P_r) \cdot (-\rho)$$

例えばホストが先行投機型手法を用いメンバーの応答が参加だった場合には、ホストが $\bar{a} - \rho$ の利得を得ることを表している。よって先行投機型手法におけるホストの期待利得は次の通りである。

$$profit_{SC}^h = P_m \cdot (\bar{a} - \rho) + (1 - P_m) \cdot (-c)$$

図4は $\bar{a} = 50$ 、 $\rho = 35$ 、 $c = 10$ 、メンバーの参加確率 P_m を0~1の一様分布としたときのホストの期待利得をグラフにしたものである。

通常型手法では、会議室を予約できる確率 P_r が高くなればなるほど期待利得も高くなっていることが分かる。

先行投機型手法では、会議室が必ず予約できるのでホストの期待利得は常に一定の値となる。

3. 先行投機的行動のためのリスク管理手法

先行投機的行動の問題点は先行投機的に行った行動が後で誤りであったと判明する場合である。このリスクを軽減する手段として混合型手法と段階的手法を提案する。

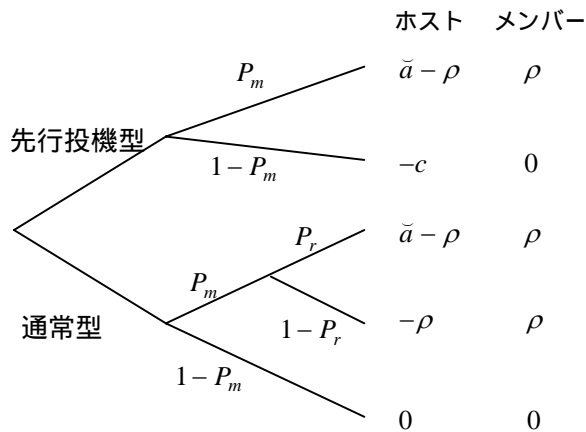


図2 ホストとメンバーの利得木

3.1 混合型手法

一般にメンバーが合意する確率が大きければ先行投機型手法を用いればよく、合意する確率が小さければ通常型手法を用いればよい。このようにメンバーの合意確率の推測に応じて先行投機型手法と通常型手法を切り替える手法が混合型手法である。

先行投機型手法が通常型手法よりも望ましい条件は

$$\begin{aligned} & \text{先行投機型手法で得られるホストの期待利得} \\ & \geq \text{通常型手法で得られるホストの期待利得} \end{aligned}$$

で与えられ、

$$\begin{aligned} & P_m \cdot (\bar{a} - \rho) + (1 - P_m) \cdot (-c) \\ & \geq P_m \cdot P_r \cdot (\bar{a} - \rho) + P_m \cdot (1 - P_r) \cdot (-\rho) \end{aligned}$$

となる。メンバーの参加確率に注目すれば、先行投機型手法が望ましい条件は次のように表せる。

$$P_m \geq \frac{c}{(1 - P_r) \cdot \bar{a} + c}$$

つまり、混合型手法を行うにはメンバーの会合への参加確率 P_m によって交渉の方法を切り替えれば良い。

混合型手法におけるホストの期待利得は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & profit_{MIX}^h \\
 &= \int_0^1 \frac{c}{(1-P_r)\bar{a}+c} (P_m \cdot (\bar{a} - \rho) + (1-P_m) \cdot (-c)) dP_m \\
 &+ \int_0^{\frac{c}{(1-P_r)\bar{a}+c}} \frac{c}{(1-P_r)\bar{a}+c} (P_m \cdot P_r \cdot (\bar{a} - \rho) + P_m \cdot (1-P_r) \cdot (-\rho)) dP_m
 \end{aligned}$$

図3より混合型手法を行った場合のホストの期待利得は先行投機型手法だけしか用いなかった場合に比べて全体的に期待利得が増加していることが分かる。このことから、混合型手法を行うことで先行投機計算におけるリスクが軽減されたといえる。

3.2 段階型手法

これまでの合意手法ではメンバーからの返答は一度だけ行われ、それに応じてホストとメンバーの合意内容が確定した。それに対して段階的手法は仮合意が可能であり、ペナルティを支払えば、仮合意を破棄することが可能な合意手法である(図3)。

これより、先行投機型行動におけるリスクの軽減を図ることができる。

段階的コミットメントを用いた手法を議論するに当たって新たなパラメータを与える。

b : 仮合意破棄時にメンバーがホストに支払うペナルティ

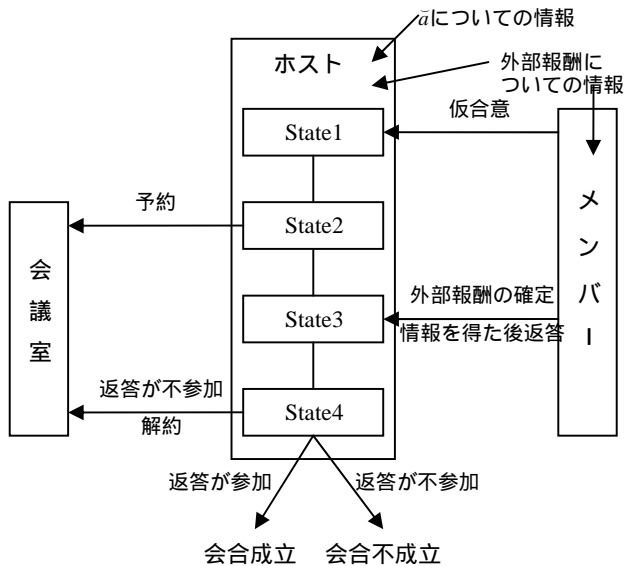


図3 段階型合意

段階型手法におけるホストの期待利得は

$$profit_{leveledSC}^h = P_m \cdot (\bar{a} - \rho) + (1 - P_m) \cdot (b - c)$$

となり先行投機型手法に比べて $(1 - P_m) \cdot b$ だけ期待利得が増加する。よって段階型と混合型を併用する場合(段階混合型)において、先行投機型の方が望ましい条件は

$$P_m \geq \frac{c - b}{(1 - P_r) \cdot \bar{a} + c - b}$$

となるので、段階混合型のホストの期待利得は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & profit_{leveledMIX}^h \\
 &= \int_0^1 \frac{c-b}{(1-P_r)\bar{a}+c-b} (P_m \cdot (\bar{a} - \rho) + (1-P_m) \cdot (b - c)) dP_m \\
 &+ \int_0^{\frac{c-b}{(1-P_r)\bar{a}+c-b}} \frac{c-b}{(1-P_r)\bar{a}+c-b} (P_m \cdot P_r \cdot (\bar{a} - \rho) + P_m \cdot (1-P_r) \cdot (-\rho)) dP_m
 \end{aligned}$$

図4より段階混合型は混合型よりも大きな期待利得を得ることができていることが分かる。これはペナルティ b を導入することによって、メンバーは会合に参加するという仮合意を破棄することが困難になるからである。こうしてホストは先行投機的に会議室を予約した際に、メンバーが仮合意を破棄して会合が不成立になった場合には、会議室解約に関するキャンセル料が軽減できるのである。

ペナルティ b を大きくすることによってホストの期待利得も増加することが分かった。しかしながら、 b を際限なく大きくできるわけではない。契約を成立させるためには、ホストとメンバーの両方の個人合理性が満たされなければならないからである。個人合理性とは、仮合意により各エージェントの期待利得が仮合意を行わない場合よりも増加しなければならないということである。適切なペナルティ b が選ばなければメンバーは仮合意をおこなわず、ホストの期待利得も増加しない。次節では仮合意可能な個人合理的なペナルティの設定に関して議論する。

3.3 段階型手法における個人合理性

交渉を成立させるためには、各エージェントの個人合理性を満足させる仮合意でなければならないことを前節で述べた。そこで本節では、会議室

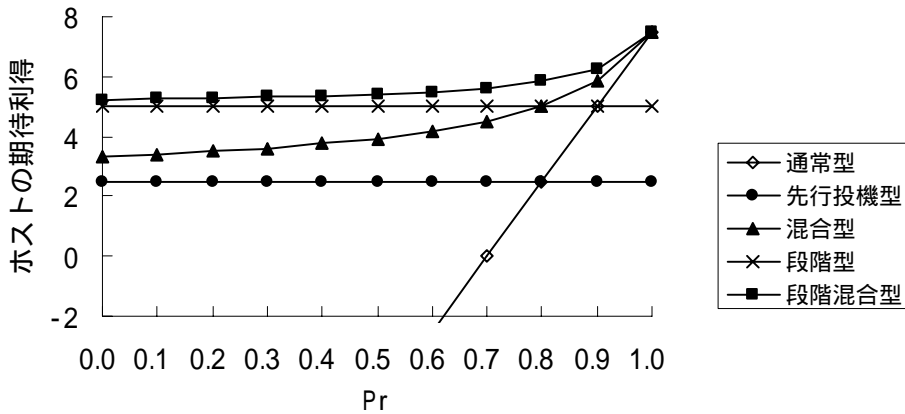


図4 各手法の期待利得

予約問題における仮合意の条件を議論する。また段階型手法においてペナルティ b を変化させたときのホストとメンバーの期待利得の変化を検証する。

3.3.1 仮合意の成立条件

会議室予約問題における交渉成立条件を議論するにあたり、新たにパラメータを与える。

\tilde{b} : ホストが開催する会合以外の会合からメンバーに提示される報酬

$f(\tilde{b})$: \tilde{b} に関する事前確率密度関数

会議室予約問題においてホストが会合通知するための条件は

$$\tilde{a} \geq \rho$$

である。またメンバーが仮合意するための条件は

$$\rho \geq E[\tilde{b}]$$

である。したがって仮合意が成立するためには

$$E[\tilde{b}] \leq \rho \leq \tilde{a}$$

であることが必要である。

ここで、

$$\tilde{a} = 50, \rho = 35, c = 10, b = 5,$$

$$f(\tilde{b}) = \begin{cases} 0.01 & (0 \leq \tilde{b} \leq 100) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

としたときの会議室予約問題を考える。このときの仮合意成立条件は

$$50 = E[\tilde{b}] \leq \rho = 35$$

となり両エージェントが個人合理性を満足しないので先行投機型手法は利用できず、通常型手法を用いることになる。

メンバーの参加確率は

$$P_m = \int_0^\rho f(\tilde{b}) d\tilde{b}$$

で表せるので、通常型手法におけるホストの期待利得は次式のようになる。

$$\begin{aligned} profit_{NORMAL}^h &= \int_0^{35} f(\tilde{b}) \cdot P_r \cdot (50 - 35) d\tilde{b} \\ &= 5.25 P_r \quad (0 \leq P_r \leq 1) \end{aligned}$$

一方、段階型手法のホストの期待利得は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} profit_{leveledSC}^h &= P_m \cdot (\tilde{a} - \rho) + (1 - P_m) \cdot (b - c) \\ &= 0.35 \cdot (50 - 35) + 0.65 \cdot (5 - 10) \\ &= 2 > 0 \end{aligned}$$

ホストが会議室予約を行った場合に得られる期待利得は2、会議室予約を行わない場合には0なのでホストは個人合理性を満足する。

同様にメンバーの期待利得は

$$\begin{aligned} profit_{leveledSC}^m &= \int_{-\infty}^{\rho} \rho \cdot f(\tilde{b}) d\tilde{b} + \int_{\rho}^{\infty} (\tilde{b} - \rho) \cdot f(\tilde{b}) d\tilde{b} \\ &= \int_0^{35} 35 \cdot f(\tilde{b}) d\tilde{b} + \int_{35}^{100} (\tilde{b} - 35) \cdot f(\tilde{b}) d\tilde{b} \\ &= 12.25 + 40.625 = 52.875 \geq E[\tilde{b}] \end{aligned}$$

となり、仮合意することで期待利得が増加しているので個人合理性を満足している。

よって同条件下で先行投機型手法では個人合理性が満足できない合意でも、段階型手法では個人合理性を満足し交渉を行うことができることが示された。

3.3.2 ペナルティを変化させたとき

仮合意を破棄するときに支払うペナルティ b の値によっては、段階型手法が利用不可能な場合がある。例えば先ほどと同じ条件でペナルティだけを $b=15$ とした場合に先行投機型手法におけるホストの期待利得は

$$\begin{aligned} profit_{leveledSC}^h &= P_m \cdot (50 - 35) + (1 - P_m) \cdot (15 - 10) \\ &= 10 \geq 0 \end{aligned}$$

となり期待利得は増加し、また個人合理性を満たしているが、逆にメンバーの期待利得は

$$\begin{aligned} profit_{leveledSC}^m &= \int_0^{35} 35 \cdot f(\tilde{b}) d\tilde{b} + \int_{35}^{100} (\tilde{b} - 15) \cdot f(\tilde{b}) d\tilde{b} \\ &= 12.25 + 34.125 = 46.375 \leq E[\tilde{b}] \end{aligned}$$

となり個人合理性は満たされないこととなる。

そこで両者が仮合意するための適切なペナルティ b を検証するために、 $\tilde{a}=50$ 、 $\rho=35$ 、 $c=10$ の条件の下で b を変化させ、先行投機型手法を用いた際のホストとメンバーの両エージェントの期待利得の変化を示したものが図 5 である。実際には、メンバーは期待利得が $E[\tilde{b}]=50$ よりも大きくなれば個人合理性を満たすが、ここでは簡単化のため 0 よりも大きくなれば個人合理性を満たすものとする。

メンバーの期待利得はペナルティ b の増加に比例して減少していく。そして $b=10$ になると期待利得は 0 以下にまで低下し、その後は常に 0 以下となる。つまり $b \geq 10$ という条件下ではメンバーは個人合理性を満足できず、このホストの主催する会議室予約における先行投機型手法に応じようとはしないことを意味する。

また、ホストの期待利得はペナルティ b の増加に比例して増加していく。これは b が大きくなればなるほどホストにとっては有利な合意となることを示している。しかしながらメンバーが合意に応じない状況下、つまり $b \geq 10$ のときにはホストはメンバーと会議室予約を行うことができないので得られる利得は 0 となってしまふ。よってホストの期待利得は際限なく増加できるものではなく、両エージェントの個人合理性の関係でペナルティ b の値には限界が存在する。

4. 関連研究

先行投機的行動の考えは先行投機的計算[3,4]に

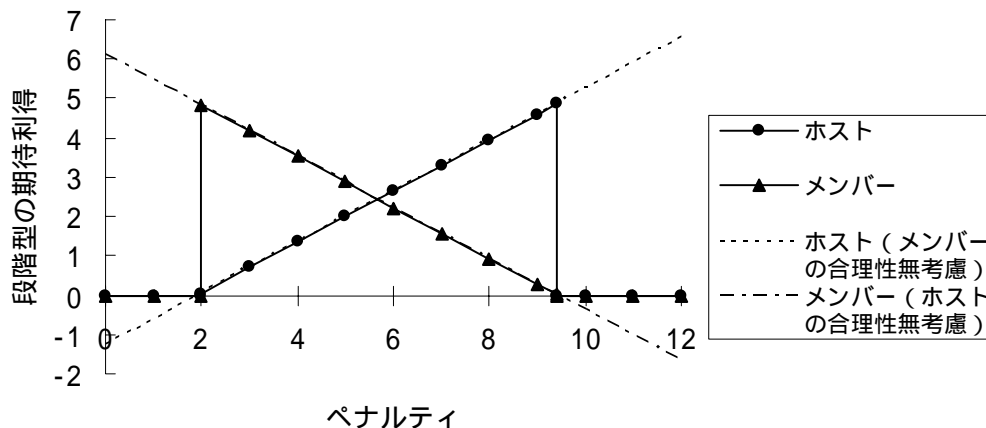


図5 ペナルティの増加による期待利得の変化

基づいている。先行投機的計算はパイプライン型並列計算による高速化の一手法として提案されたものである。パイプライン型並列計算では、プロセッサの数だけ命令を先読み実行することで計算の高速化を図ることができる。しかしながら、計算の中に分岐命令が存在する場合には、分岐の条件に応じて実行される命令が異なってくる。先行投機的計算はその中でもっともらしい命令を選択して投機的に実行する手法である。この計算は文字通り投機的にあるので、誤った選択を行うことになり、その実行の取り消しが必要になる。

先行投機的計算の考えをマルチエージェントシステムの領域に導入した研究としては佐藤らによるもの[2]がある。ここでは複数エージェント間の合意形成問題において、メッセージ通信に遅延がある場合に、先行投機的計算としてデフォルト値を利用することで推論の高速化を図る試みについて議論している。

しかしながら従来の研究では先行投機的計算の失敗は単なる計算の取り消しを引き起こすだけであり、高速化の効果は薄れるものの、それ以上の副作用を引き起こすものではなかった。

それに対して本論文では、先行投機的計算の結果に基づく（先行投機的）行動は外部環境への変化をもたらす、その取り消しには何らかのコストが伴う場合を議論している。このようなりリスク軽減の手法としてエージェントが他のエージェントの返答を推測して先行投機型行動に反映させる混合型手法と、エージェント間で仮合意をおこなう段階型手法を提案している。後者の段階型手法はToumas Sandholmらによる段階的コミットメント手法[1]に基づくものである。

5. まとめ

先行投機的行動の問題点は、先行投機的に行った行動が後で誤りであったと判明する場合であった。そこで、本論文では会議室予約問題を事例として、先行投機的行動を行った際に発生するリスクを軽減する手法として、エージェントの合意可能性を推測し、合意する確率に応じて先行投機型手法と通常型手法を切り替える混合手法と、エージェント間で仮合意を行い、仮合意破棄時にはペナルティを支払う義務を負わせることでリスクを軽減する段階型手法を提案し、その効果を示した。また個人合理性の立場から段階型手法が可能な条件を議論した。

本論文では先行投機型行動の事例研究として会議室予約問題を用いて、その手法を議論したが、今後はより一般的な合意形成問題として定式化を行い、その議論を進める必要がある。

謝辞

本研究の一部は文部科学省特定領域研究基盤研究（課題番号13358004）の援助によるものである。

参考文献

- [1] Sandholm, T. and Lesser, V.: Leveled Commitment Contracting: A Backtracking Instrument for Multiagent Systems, *AI Magazine*, Vol.23, No.3, pp.89-100 (2002)
- [2] 佐藤健, 井上克己, 岩沼宏治, 坂間千秋: エージェント間通信におけるアブダクションによる投機的計算, *コンピュータソフトウェア*, Vol.20, No.1, pp.27-35 (2003)
- [3] Halstead, R.H.Jr.: Parallel Symbolic Computing, *IEEE Computer*, Vol.19, No.8, pp.35-43 (1986)
- [4] Burton, F.W.: Speculative Computation, Parallelism, and Functional Programming, *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-34, pp.1190-1193 (1985).