

学 位 論 文 題 名

Model of Money-Based Reward Distribution
for Division of Labor

(分業のための貨幣に基づく報酬分配のモデル)

学位論文内容の要旨

人間社会がもつ、顕著な特徴のひとつに、「分業」（役割分担）が挙げられる。多くの人々から構成される社会システムは、各人が様々な役割に分化することにより、全体としては1人の人間では達し得ないような能力をもつことができる。特に自由経済の社会では、各人の役割がトップダウン的に強制されなくても、各人が自分の収入をできるだけ大きくしようと努力することを通して、自然に分業体制が発生してくるという側面がある。本研究では、分業の発生に対する、貨幣の持つ役割の解明を目標に、数理モデルと計算機シミュレーションによる研究を行った。

今まで、分業は「マルチエージェントシステム」という概念的枠組みのもとで広く研究が行われてきた。「エージェント」とは環境を知覚し行動することによって、環境と相互作用を行う「自律的な主体」を表現する言葉である。「マルチエージェントシステム」は環境の中で複数のエージェントが相互作用を行うシステムを表す。

過去の研究には、学習するエージェントから構成されるマルチエージェントシステムにおける、分業の自然発生について調べたものも存在する。これらの研究では、各エージェントの学習の枠組みとして、「強化学習」が用いられている。強化学習は、エージェントが、環境との相互作用を通して得られる「報酬」というスカラー量を最大化することを目的に、自身の行動パターン（知覚した状態に対してどの行動を選択するのかという傾向）を改善するという学習理論の枠組みである。しかしながら、過去の研究では、報酬の分配に関して、マルチエージェントシステムがタスク（仕事）を達成した場合に、全てのエージェントに同じ量の報酬を与える、あるいは最終的にタスクを達成した1個のエージェントだけに報酬を与えるといった方法が採られてきた。

人間社会の経済システムでは、そのようにはなっていない。例えば、「パンを造る」というタスクについて考えると、これは「畑を耕して小麦を育てる」「小麦を挽いて粉を作る」「粉をこねてパンを焼く」という一連のサブタスク（部分的仕事）から構成されている。それぞれのサブタスクは、農家・粉屋・パン屋という各職業に対応し、分業がなされている。お金の流れの方向は、サブタスクの連鎖の方向とは逆になっている。パン屋は消費者から直接お金を受け取り、粉屋はパン屋から粉の代金を受け取り、農家は粉屋から小麦の

代金を受け取る。このような報酬の分配の行われ方は、過去の研究で調べられてきたような方法とは異なるものである。

本研究では、社会における分業の自然発生に対する貨幣の寄与に着目し、これのトイ・モデルを構成し、解析を行った。各エージェントの学習の枠組みとしては、強化学習のひとつである actor-critic という方法を用いた。マルチエージェントシステムに課すタスクとして、2次元格子世界の迷路における「餌集めタスク」(foraging) を扱った。これは、エージェント集団が「餌場」から「巣」に「餌」をできるだけ多く運ぶという課題である。例えば人間社会において、ある種の資源の採掘場から、その資源の大消費地に、資源を輸送するような状況も、この課題の枠組みで捉えることができる。

本研究では、具体的な迷路の形状として、客観的には異なる2つの場所が、エージェントの限られた知覚能力では同一に見えてしまうという問題 (perceptual aliasing problem と呼ばれる) が存在し、エージェント間の適切な分業無くして、効率の良いタスクの達成が困難であるものを扱った。

エージェントに対する報酬の与え方として、直接に餌を巣に運び込んだエージェントがシステムの外部から一定量の報酬を直接に獲得すると仮定した。さらに、エージェント間で、「餌」と「報酬」の交換を行う枠組みを導入した。これは、前述の「パンを造る」タスクの中で、小麦とお金の交換、粉とお金の交換が行われているように、人間社会において様々な「財」とお金の交換が行われていることを模倣したものである。

最初の実験では、エージェント間で餌と報酬の交換が行われる際に、支払われる報酬の量は予め決められているものとした。計算機実験による解析の結果、この枠組みにおいて、各エージェントの自律的な学習により、「場所的な分業」が自然発生することが明らかになった。即ち、迷路における餌場から巣までの餌の運搬を行うにあたって、道のりのある部分を一部のエージェントが担い、残りの部分を別のエージェントが担うという分業が形成された。

人間社会では、様々な財とお金が交換される際に支払われるお金の量、即ち商品の価格は、予め固定的に決められているわけではない。取引に関わる人々の相互作用によって、さらには各人が売り手の立場であれ買い手の立場であれ、妥当な価格を「学習」していくことによって、決定されていく。そこで本研究では、エージェント間で餌と報酬を交換する際に、支払われる報酬の量を、エージェント間の相互作用および、各エージェントの学習によって決定するというモデルに関しても解析を行った。エージェント間の相互作用のルールを複数試みた結果、エージェント間に「交渉」のような枠組みが存在することが、妥当な価格の実現、およびそれによる社会システム全体の高いタスク達成度のために重要であることが明らかになった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 西 浦 廉 政
副 査 教 授 津 田 一 郎
副 査 教 授 神 保 秀 一
副 査 助 教 授 利 根 川 吉 廣

学 位 論 文 題 名

Model of Money-Based Reward Distribution for Division of Labor

(分業のための貨幣に基づく報酬分配のモデル)

人間社会がもつ、顕著な特徴のひとつに、「分業」(役割分担)が挙げられる。多くの人々から構成される社会システムは、各人が様々な役割に分化することにより、全体としては1人の人間では達し得ないような能力をもつことができる。特に自由経済の社会では、各人の役割がトップダウン的に強制されなくても、各人が自分の収入をできるだけ大きくしようと努力することを通して、自然に分業体制が発生してくるという側面がある。本論文は、分業の発生に対する、貨幣の持つ役割を明かにし、それを数理モデルと計算機シミュレーションによる実証を行った点に大きな価値がある。

モデルは、「マルチエージェントシステム」の概念的枠組みのもとで構成し、エージェントが学習によって自ら役割を獲得する場合について考えている。学習の枠組みとしては、強化学習を採用した。エージェントの報酬獲得の枠組みとして、人間社会における貨幣のやりとりを模倣したものを構成している。

今までに、より単純な報酬分配の枠組みのもとでの、エージェントの学習による分業の発生について解析した研究は存在している。一方で分業というテーマを考慮せずに、エージェント間の取引のモデルを構成して解析した研究も存在している。しかし、現実社会において、人々が各自の役割・職業を長期的な学習によって選び取っていくときに、少なくとも動機の一部として、より多くの収入を得ようという意図が存在していることを考えれば、本来、「貨幣のシステム」と「分業の発生」は互いに深く関連しているものである。しかし、これに関する構成論的な研究は、今まであまりなされてこなかった。

本論文では、社会における分業の自然発生に対する貨幣の寄与に着目し、これの数理モデルを構成し、解析を行っている。各エージェントの学習の枠組みとしては、強化学習のひとつである actor-critic という方法を用い、マルチエージェントシステムに課すタスクとして、2次元格子世界の迷路における「餌集めタスク」(foraging)を扱っている。これは、エージェント集団が「餌場」から「巣」に「餌」をできるだけ多く運ぶという課題である。

さらに本論文では、具体的な迷路の形状として、客観的には異なる2つの場所が、エージェントの限られた知覚能力では同一に見えてしまうという問題 (perceptual aliasing problem) が存在しており、これはエージェント間の適切な分業無くして、効率の良いタスクの達成が困難であるものを扱っていることになる。エージェントに対する報酬の与え方として、直接に餌を巣に運び込んだエージェントがシステムの外部から一定量の報酬を直接に獲得すると仮定している。さらに、エージェント間で、「餌」と「報酬」の交換を行う枠組みを導入した。これは、人間社

会において様々な「財」とお金の交換が行われていることを模倣したものとなっている。

最初に、エージェント間で餌と報酬の交換が行われる際に、支払われる報酬の量は予め決められているもの扱い、その計算機実験による解析の結果、この枠組みにおいて、各エージェントの自律的な学習により、「場所的な分業」が自然発生することが明らかにしている。即ち、迷路における餌場から巣までの餌の運搬を行うにあたって、道のある部分を一部のエージェントが担い、残りの部分を別のエージェントが担うという分業が形成されることを具体的に示した。

人間社会では、様々な財とお金が交換される際に支払われるお金の量、即ち商品の価格は、予め固定的に決められているわけではない。取引に関わる人々の相互作用によって、さらには各人が売り手の立場であれ買い手の立場であれ、妥当な価格を「学習」していくことによって、決定されていく。本論文では、これを受けてエージェント間で餌と報酬を交換する際に、支払われる報酬の量を、エージェント間の相互作用および、各エージェントの学習によって決定するというモデルに関しても解析を行っている。エージェント間の相互作用のルールを複数試みた結果、エージェント間に「交渉」のような枠組みが存在することが、妥当な価格の実現、およびそれによる社会システム全体の高いタスク達成度のために重要であることが明らかになった。

以上より著者は、「貨幣のシステム」と「分業の発生」の両方を含んだマルチエージェントモデルを構成し、とりわけ報酬分配と分業の発生に関係について新知見を得たものであり、人間社会の数理的理解を深める意味においてもその貢献するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。