

# 自律分散型生産システムのための市場メカニズムの検討 —企業群全体の生産性と各企業の収益の改善を目指して—

A market mechanism for autonomous distributed manufacturing systems  
-Towards improvement of total productivity and individual profit-

小峰 賢太<sup>1\*</sup> 齋藤 美紀<sup>1</sup> 中藤 愛子<sup>1</sup> 佐々木 一晋<sup>1</sup> 林 久志<sup>1</sup>

Kenta Komine<sup>1\*</sup>, Miki Saito<sup>1</sup>, Aiko Nakato<sup>1</sup>, Isshin Sasaki<sup>1</sup>, and Hisashi Hayashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術大学院大学

<sup>1</sup> Advanced Institute of Industrial Technology

**Abstract:** Under direct negotiation between the orderer and the contractor in the procurement process in the manufacturing industry, competitive bidding based on price often causes dumping. In addition, orders are concentrated on some contractors, and the productivity of the entire group of companies declines. In this research, we propose a market mechanism based on automated negotiation which selects the contractors so that production amount of the whole market increases while securing the profit of each contractor. More specifically, while the bidders try to get high-profit tasks from the projects on the market, our reverse-auction algorithm for the market allocates tasks to bidders so that the production amount of the entire market increases.

## 1. はじめに

近年、製造業では AI や Internet of Things (IoT) 技術の進展により、製造管理システムや FA 機器をネットワークに接続し工場と経営の最適化を図るスマート・ファクトリー[1]やその実現を目指すドイツの国家プロジェクトであるインダストリー4.0[2]など、新たな製造の形態が国内外で盛んに議論されている。この新しい製造の形態の実現によって調達プロセスでは、製造ラインの状況がリアルタイムで確認できるようになり、発注者は設備が遊休状態にある企業や早期納品可能な企業との交渉が可能となる。

このような企業間での取引相手の発見や、受発注交渉などを支援する場の提供として、マーケットプレイスがある。海外では官民含め様々な特徴を持ったマーケットプレイスが展開されているが、いずれも主な受益者となる中小企業の参入が発展途上の段階にあり、またそれらの動的な探索方法、評価方法、選択方法、企業連合の形成なども課題として残っている[3]。また現在これらのマーケットプレイスを提供するプラットフォームは、人が能動的に情報を取り出し交渉を行っている。これによって限られた企

業との交渉しか望めず、リードタイムの短縮や生産性の向上を求めた交渉機会の拡大を期待するならば、人による交渉では限界がある。

一方、我が国ではドイツのインダストリー4.0に倣い Society 5.0[4]を立案している。但し、Society 5.0の応用先は工業に限らない。このコンセプトは人だけでなく、AI やモノがインターネットに接続され、自動・半自動的に交渉する。これはエージェントと呼ばれるこれまで人が行ってきた意図や戦略のルールに基づいて行動するプログラムが、人の代理となり、ネットワーク上で相互にインタラクションを繰り返すことで、適切な取引相手の選択と取引を実現させる仕組みである。

しかしながら発注者と複数の受注者の直接交渉の下では、価格を基準とした競争入札となるケースがあり、これを行うと低価格入札を引き起こし問題となる。また、一部の受注者に発注が集中し、企業群全体としての生産性が低下するという問題もある。

これらの問題に対し本研究ではこのようなリバースオークションを取りながら各受注者の利益を確保しつつ、市場全体の生産量が増えるように落札者を選ぶ自動交渉の市場制度を提案する。具体的には受

\* 連絡先: 産業技術大学院大学 産業技術研究科 創造技術専攻  
〒140-0011 東京都品川区 東大井 1-10-40  
E-mail: b1715kk@aait.ac.jp

注者は提示される案件の中から利益の高い納期に間に合う案件に順位付けし入札，発注者は入札してきた受注者の中から，市場全体の生産量が増えるように落札者の順位付けを行う．オークションでは双方の希望のマッチングを図り，落札者を決める仕組みとなっている．また本研究は自律性を有する複数の構成要素が相互に協調することによって，全体として機能を維持する自律分散型システム・マルチエージェントシステム(MAS)での運用を想定している．

本稿は以下のように構成される．2章で関連研究について議論する．3章で想定するMASと問題定義を行う．4章で2つの案件割り当てアルゴリズム，1つのオークションアルゴリズムを説明する．5章で評価シナリオを説明する．6章でシミュレーション結果及び考察を示す．7章で本稿をまとめる．

## 2. 関連研究

クラウドコンピューティングの技術を用いて生産情報を共有し，一製品を作る製造工程を複数の工場や企業に分散して生産効率を上げる Cloud manufacturing (CMfg)と呼ばれるサービスモデルがある[5]．これは発注者と受注者のマッチングや，スケジューリングを行うことができ，需要変動などによる生産量の変動分を社内外に分散させることで，市場全体での生産性の向上に期待できる．本研究の想定する仮想市場も同様のサービスモデルを想定している．文献[6]で指摘するようにクラウドマニュファクチュアリングは医薬や食品といった製造工程を途中で分割できないプロセス型モノづくりには適用出来ないが，機械加工等による部品製作と組立工程からなるディスクリート型のモノづくりに適用することで，効果を期待することができる．

しかしながらこれまで製造したことのない案件に対して，即座に対応し生産に移行できるとは考えにくく，現場と発注者間の認識のすり合わせや，CNC工作機のプログラミング等の比較的長い段取り換え時間が発生すると考えてよい．また，同工程あるいは類似工程を連続して処理したほうが，段取り換え時間が低減されることは知られており[7]，本研究ではこれらをスイッチングコスト(SC)とする．なお本研究では簡単のため前者を  $SC_{high}$  とし，後者を  $SC_{low}$  と2段階設定した．

## 3. 問題定義

MAS は図1のとおり発注者が市場に提示する案件である複数のタスクオブジェクト(以後タスクとする)と，取引を管理する一つの市場エージェント，受注し生産を行う受注者の状態を反映した複数の生産エージェントからなる．

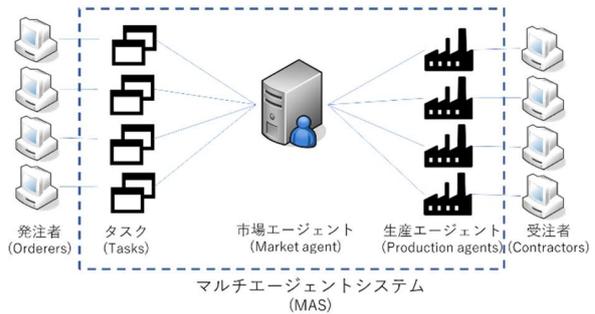


図1 エージェントの種類

このMASには大きく分けて3つのフェーズ(Phase)がある．Phase 1は市場エージェントがタスクの整理を行う．Phase 2は市場エージェントが取引市場を開き，生産エージェントにタスクを割り当てる．Phase 3は生産エージェントがタスクを生産する．

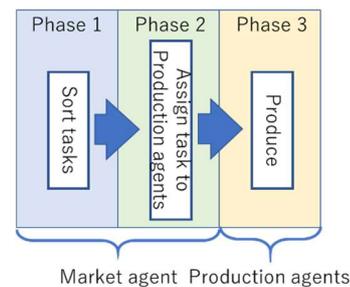


図2 フェーズ

このPhase 1の開始からPhase 3の終了までの期間を1系内時間(time in the system)とする．

このMASにおいて，Phase 2で市場エージェントが各タスクをどの生産エージェントに割り当てるか決定することが，本稿の問題である．このとき一部の生産エージェントにタスクが集中すると生産性が低下する．

## 4. アルゴリズム

本章ではPhase 1からPhase 3までのアルゴリズムを定義する．Phase 2において2つのタスクを割り当てるアルゴリズムと1つのオークションアルゴリズムを定義する．

【Phase 1】タスクの整理は以下のように行う：

タスク  $t_i$  は発注者より次の情報を与えられる．製造時間  $p_i (> 0)$ ，受注から納期までの時間  $d_i (> 0)$ ，利益  $v_i (> 0)$ ．発注者から与えられたタスク群(或いはタスク集合とする)  $T = \{t_1, t_2, \dots\}$  は市場エージェント

の下でリスト化される。これをタスクリスト  $T = [t_1, t_2, \dots]$  とする。また受注後、納期までの製造時間を除く余裕時間を  $s_i (\geq 0)$  とすると、以下のように関係を定義できる。このとき  $i$  はタスクを区別する添字である。

$$s_i = d_i - p_i$$

$s_i$  の小さいタスクほど優先順位が高いといえ、優先順位の高いタスクから順にタスクリストを並び替えることを、本稿では**優先度の高い順に並べる**という。

2章で説明したスイッチングコストの発生条件を次のように定める。例えば  $a$  という種類のタスク品目と  $b$  という  $a$  とは異なる種類のタスク品目(他にも  $c, d, \dots$ )、 $a'$  という  $a$  と類似したタスク品目(他にも  $a'', a''', \dots$ )があるとす。このとき  $a$  のタスク品目を加工している企業が、 $b$  のタスク品目を着手した場合  $SC_{\text{high}}$  を  $b$  の  $p_i$  に加算し  $P_b$  とする。

$$P_b = SC_{\text{high}} + p_b$$

また  $a$  の製造品目を加工している企業が、 $a'$  の製造品目を着手した場合  $SC_{\text{low}}$  を  $a'$  の  $p_i$  に加算し  $P_{a'}$  とする。

$$P_{a'} = SC_{\text{low}} + p_{a'}$$

スイッチングコストの関係を以下の式にまとめる。

$$SC_i(\delta_i) = \begin{cases} SC_{\text{high}} & \delta_i > w \\ SC_{\text{low}} & \delta_i \leq w \end{cases}$$

$$\delta_i \geq 0$$

但し、 $\delta_i$  はタスクの差異度、 $w$  は区別に用いる任意のしきい値(定数)とする。

このスイッチングコストの概念を導入すると、例えば現在  $a$  の製造品目を製造している企業は互いに競合関係となる。複数の取引を通し  $a$  或いは  $a'$  を連続して受注できなかった場合、スイッチングコスト  $SC_{\text{high}}$  が発生する。これが生産性低下の一因になることも考えられるため競合関係を解消すべく、できるだけ類似したタスク ( $0 \leq \delta_i \leq w$ ) を続けて受注できるようにしたい<sup>1</sup>。いくつか方法が考えられるが、本研究では次の(3)までの方法を行う。

市場エージェントが  $a$  からなるタスク集合  $A_1 = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$  と、 $a$  と類似する  $a'$  からなるタスク集合  $A_2 = \{a'_1, a'_2, a'_3, \dots\}$  の和集合を取り、タスク集合  $A = A_1 \cup A_2$  但し ( $A \subset T$ ) を作る。この  $A$  からランダムに  $k$  個のタスク要素を取り出し、集合  $G = \{a_{b1}, a_{b2}, a_{b3}, \dots\}$  但し ( $G \subset A$ ) を作る。 $A$  の要素を優先度の高い順に並べた後のリストを  $[a_{c1}, a_{c2}, a_{c3}, \dots]$  とする。この操作を  $A$  から  $k$  個取りだせなくなるまで行う。

$$G_1, \dots, G_n = \{a_{c_1}, \dots, a_{c_k}\}, \dots, \{a_{c_{(q-1)k}}, \dots, a_{c_{qk}}\} \quad (1)$$

但し各集合  $G$  は互いに素(disjoint)とする。このとき(1)の各集合の各要素を優先度の高い順に並べ、

$$LG_1, \dots, LG_n = [a_{c_1}, \dots, a_{c_k}], \dots, [a_{c_{(q-1)k+1}}, \dots, a_{c_{qk}}]$$

というリストにする。この時これら各  $LG_j$  の  $i$  番目に出現する各タスクの製造時間  $p_{i,j}$  と  $SC_{i,j}(\delta_{i,j})$  を合計した製造時間  $\rho_j$  は以下である。

$$\rho_j = \sum_{i=0}^n p_{i,j} + \sum_{i=1}^{n-1} SC_{i,j}(\delta_{i,j})$$

$G_j$  の各タスクの受注から納期までの時間  $d_i$  を合計した製造時間  $\gamma_j$  は以下である。

$$\gamma_j = \sum_{i=0}^n d_{i,j}$$

但し、 $\gamma_i - \rho_i \geq 0$  となるように組み合わせる必要がある。

$G_j$  の各タスクの利益  $v_i$  を合計した総利益  $\varepsilon_j$  は以下である。

$$\varepsilon_j = \sum_{i=0}^n v_{i,j}$$

以上が  $G$  に与えられる情報である。

$A$  集合の要素のあまりは以下である。

$$A - \sum_{k=1}^n G_k = \{a_{c_{qk+1}}, \dots, a_{c_{qk+\alpha}}\} \quad (2)$$

但し、 $\beta$  は  $A$  の要素数、 $\alpha = \beta \bmod k$  とする。

(2)の要素1つにつき、1つの集合を(3)のように作る。

$$G_{n+1}, \dots, G_{n+\alpha} = \{a_{c_{qk+1}}\}, \dots, \{a_{c_{qk+\alpha}}\} \quad (3)$$

このとき(3)の各集合のリストは、

$$LG_{n+1}, \dots, LG_{n+\alpha} = [a_{c_{qk+1}}], \dots, [a_{c_{qk+\alpha}}]$$

となる。

種類の異なるタスク ( $b, c, d, \dots$ ) でも同様の操作を行う。一連のリストを作る操作を本稿では**グルーピング**といい、グルーピングされたタスク(各  $LG$ )を**グループ化タスク**という。また、このときタスクリスト  $T$  (つまり  $LG_{n+1}, \dots, LG_{n+\alpha}$ ) は複数のグループ化タスクからなるものであるので、**グループ化タスク群**

<sup>1</sup> この考え方はスケジューリング問題などでグループスケジューリング(group scheduling)として知られている。

のリストとなる。

以下に Phase 1 のアルゴリズムを定義する。

- 市場エージェント

(i) タスク集合  $T = \{t_1, t_2, \dots\}$  をグルーピングする。

【Phase 2】 グループ化タスクの割り当ては次のように行う：

すべてのグルーピングが終わると取引市場を開始することが出来る。このとき市場エージェントがグループ化タスクを、どの生産エージェントに割り当てるか決定することが Phase 2 の問題となる。そこで Phase 2 では 2 つのタスクを割り当てるアルゴリズムと 2 つのオークションアルゴリズムを定義する。

1 つ目のランダムタスク取得型アルゴリズムを説明する。このアルゴリズムの目的は以降のアルゴリズムの性能評価のためのベースラインとなるアルゴリズムである。

取引市場が開催されるごとに、市場エージェントはランダムにグループ化タスクを生産エージェントに割り当てる。生産エージェントは市場エージェントからグループ化タスクを受け取り、生産待ちリスト  $W_f$  の最後尾に並べる。このとき優先度の高い順(余裕時間  $s_i$  の少ない順)に並べる。

$$W_f = [t_1(s_1), t_2(s_2), \dots] \quad (s_1 \leq s_2)$$

但し、 $f$  は各生産エージェントを区別する添字である。

このアルゴリズムはタスク取得後  $s_i < 0$  となる場合がある。このとき発注者視点で見ると納期を超えて納品されるため、他の納期に間に合う取引相手を探す機会を失ったことになる。これは発注者にとって不都合であるため、本アルゴリズムは  $s_i < 0$  となったタスクは、納期に間に合わないものとしてはじめから取得しなかったことにして、グループ化タスク群のリスト  $T$  に戻す。Algorithm 1 を以下に定義する。

#### Algorithm 1 (ランダムタスク取得型アルゴリズム)

各エージェントは以下のように動作する：

- 市場エージェント

(i) 市場エージェントはランダムにグループ化タスクを生産エージェントに割り当てる。

- 生産エージェント

(i) 生産エージェントは市場エージェントからグループ化タスクを受け取り、生産待ちリストの最後尾に並べる。このとき優先度の高い順に並べる。

(ii) ( $s_i < 0$ ) ならば  $s_i$  値を元の値に戻しグループ化タスク群のリスト  $T$  に戻す。

2 つ目の納期考慮ランダムタスク取得型アルゴリズムを説明する。Algorithm 1 は納期に間に合わないグループ化タスク ( $s_i < 0$ ) も生産待ちリストに加える問題があった。Algorithm 2 の目的は納期に間に合うグループ化タスクを、生産エージェントが選択する。

ある生産エージェント  $F_1$  が、ある 1 つのグループ化タスクを生産するのに  $P$  単位時間かかるとする。このとき  $F_1$  の生産能力を  $c (> 0)$  とおき、残製造時間を表すと以下の式になる。

$$F_1 \text{ の製造時間} = \left\lceil \frac{P}{c} \right\rceil$$

但し、 $\lceil \cdot \rceil$  は天井関数とする。

$c$  を用いて  $F_1$  の生産待ちリストすべてのグループ化タスクの製造時間を以下の式で表す。

$$F_1 \text{ の総製造時間} = \left\lceil \frac{\sum_{i=0}^n p_i + \sum_{i=0}^{n-1} SCi(\delta_i)}{c} \right\rceil$$

Algorithm 2 の目的は納期に間に合うグループ化タスクを選ぶことであるため、市場エージェントから割り当てられたグループ化タスクが、その納期に間に合うか以下の式を用いて判定する。

$$R_f = d_j - \left\lceil \frac{\sum_{i=0}^n p_i + \sum_{i=0}^{n-1} SCi(\delta_i) + p_j + SC_j(\delta_j)}{c} \right\rceil \quad (4)$$

但し  $f$  は各生産エージェントを区別する添字、 $j$  は検討対象のグループ化タスクを区別する添字である。

市場エージェントは、ランダムに選んだ生産エージェント(総数  $r$  個とする)に対し、グループ化タスク群のリスト  $T$  (要素総数  $n$  個とする)の要素すべてを一つ一つ受注可能か提案する。このとき生産エージェントは(4)の計算を行い、この値が  $\geq 0$  であるとき、 $j$  は取得可能なグループ化タスクとして市場エージェントから受け取る。

Algorithm 2 を以下に定義する。

#### Algorithm 2 (納期考慮ランダムタスク取得型アルゴリズム)

各エージェントは以下のように動作する：

- 市場エージェント

(i) 市場エージェントはグループ化タスク群のリスト  $T$  の要素の順番をランダムに入れ替える。

(ii) 市場エージェントは  $n$  回(グループ化タスク群のリスト  $T$  の要素総数)(a)から(b1)または(b2)の動作を行う。

(a) ランダムに選んだ生産エージェントにグループ化タスク群のリスト  $T$  の最初の要素(グループ化タスク)を提案する。このとき次の分岐が発生する。

(b1) 生産エージェントに受け入れられたとき：グループ化タスク群のリスト  $T$  から最初の要素

を削除し、グループ化タスクを受け渡す。

(b2) 生産エージェントに受け入れられなかったとき:(a)に戻る。但し、すでに提案を行った生産エージェントには同じグループ化タスクを提案しない。

• 生産エージェント

(i) 市場エージェントから提案されたグループ化タスクを(4)式で検討する。このとき次の分岐が発生する。

(a) (4)式が $\geq 0$ ならば提案を受け入れ、グループ化タスクを受け取る。そして、生産待ちリストの最後尾に並べる。このとき優先度の高い順に並べる。

(b) (4)式が $< 0$ ならば提案を受け入れない。

3 つ目の納期考慮オークションアルゴリズムを説明する。Algorithm 2 では2つの問題がある。1つ目の問題は、市場エージェントはステップ1において、グループ化タスク群のリスト  $T$  の要素の順番をランダムに入れ替え、このリストの先頭から生産エージェントに提案を行っているため、(4)式が $\geq 0$ を満たせば、利益  $v_i$  が低くとも生産エージェントは受け入れてしまう点である。2つ目の問題は市場エージェントがランダムに生産エージェントを選ぶため、生産エージェントにとって希望のグループ化タスクを受け取れるかどうかは乱数分布に依存し、不公平感がある。Algorithm 3 の目的はこれらの問題を解決する。

問題解決のため、生産エージェントの希望がある程度反映されるようなオークション制度を導入する。また、生産エージェントの希望を反映させるだけでなく、発注者にとってもメリットがあるよう、Algorithm 1,2 よりもすべての生産エージェントの合計生産量が多くなるような制度設計を行う。そのために次のオークションプロトコルを設ける。

オークションプロトコル

【Phase 2】

- 生産エージェントは(4)式を満たすグループ化タスクに入札でき、その中での希望順位を記した希望リストを市場エージェントに提出する
- 市場エージェントが入札者情報をグループ化タスクに記録する
- 市場エージェントはグループ化タスクの入札者の希望順位を記した希望リストを作成する

このとき市場エージェントと生産エージェントがグループ化タスクの取引を行う場を**オークション市場**とする。

これを以下で詳しく説明する。

各生産エージェント(各受注者)はグループ化タス

クに対し様々な評価方法によって、グループ化タスクの順位を決めることが出来るが、本稿は各受注者の利益  $v_i$  を向上させるため以下の(5)の評価式を用いてグループ化タスクを評価する。

$$V_j = \frac{v_j}{p_j} \quad (5)$$

この評価式の計算された希望順位を記録するため、生産エージェントにエージェント変数である**希望リスト  $w$** を設ける。但し、希望リストは生産エージェントに限らず発注者の代理として機能しているグループ化タスクにも設ける。

まず各生産エージェントは、グループ化タスク群のリスト  $T$  のすべての要素(グループ化タスク)に対し、納期に間に合うグループ化タスクか判定する計算(4)を行う。このとき $\geq 0$ であるものは、生産エージェントの希望リストの先頭から順にグループ化タスクの固有番号を記録する。 $T$  のすべての要素を計算し終わると、(5)式によって評価値の高い順(製造時間  $p_i$  に対して利益  $v_i$  の高い順)に並べる。

$$w_f = [t_1(V_1), t_2(V_2), \dots] \quad (V_1 \geq V_2)$$

この希望リストを市場エージェントに提出する。

市場エージェントはグループ化タスクに入札した入札者(生産エージェント)に対し様々な評価方法によって、入札者の順位を決めることが出来るが、本稿は市場全体での生産量を向上させるため(4)の評価式を用いて入札者を評価する。(4)式は納期に間に合うか判定する式である。しかし、この値が大きい時生産エージェントの生産余力が大きいといえ、複数のグループ化タスクを取得できる可能性がある。したがって生産余力がより大きくなるグループ化タスクを取得すれば、Algorithm 1,2 に比べより多くのタスクが生産されると期待でき、これを基に入札者の希望順位を決定する。

まず市場エージェントは各グループ化タスクに対し、希望リストを設定する。次にグループ化タスクの希望リストの先頭から順に入札者の固有番号を記録する。すべての入札者を記録し終わると、(4)式によって評価値の高い順(各生産エージェントの生産余力が小さくなるように)に並べる。

$$w_t = [f_1(R_1), f_2(R_2), \dots] \quad (R_1 \leq R_2, R_1 \geq 0)$$

次に落札者を決めるアルゴリズムを説明する。本稿ではマッチングアルゴリズムである DA アルゴリズム(Deferred Acceptance Algorithm)を採用する。DA アルゴリズムとは、Gale と Shapley が文献[8]の中で提案したアルゴリズムである。例えば  $n$  個の集合  $A$  と  $n$  個の集合  $B$  から、どちらかの要素が余ることなく1対1のペアとなるように  $n$  組のペアを決める(これを**マッチング**という)。このときそれぞれの要素が相手の各要素に対し希望順位を持っているとする。

このような場合に DA アルゴリズムは双方の希望順位がある程度高くなるペアを決めることが出来る。以降本研究に合わせた形で、DA アルゴリズムを説明する。

本稿では集合  $A$  を生産エージェント群、集合  $B$  をグループ化タスク群とする。また、 $A$  のある生産エージェント  $f_i$  が  $B$  のあるグループ化タスク  $t_1$  とペアになることを希望することを、本稿では**提案交渉**という。このとき  $t_1$  の**合意**があれば、両者は**合意中**の状態をとる。合意は 1 対 1 マッチングにおいて常に 1 つの生産エージェントと 1 つのグループ化タスクの間で行われる。いずれの生産エージェントとの合意がない、あるいはいずれのグループ化タスクとの合意がない状態を**フリー**とする。アルゴリズムの動作中どちらの各要素もフリーまたは合意中のいずれかの状態をとる。また、生産エージェントのうち  $w_f = \emptyset$  (空集合)である生産エージェントは、このアルゴリズムに参加することが出来ない。

最初ではどちらの各要素もフリーの状態をとる。ステップ 1 ではフリーの生産エージェント  $f_i$  が希望リスト  $w_{f_i}$  で最も順位の高いのグループ化タスク  $t_1$  と提案交渉する。このとき  $t_1$  がフリーならば両者 ( $f_i, t_1$ ) は合意中となる。 $t_1$  が他の生産エージェント  $f_j$  と合意中ならば、 $t_1$  の希望リスト  $w_{t_1}$  でより順位の高い方と合意する。このとき、合意から外された生産エージェントはフリーになり、自分の希望リスト  $t_1$  から削除する。以上の動作をフリーの生産エージェントがなくなるまで続ける。

合意中のペアの固有番号を記録するリストを  $M$  とする。アルゴリズム終了後  $M$  に記録されているペアが、落札者とそのグループ化タスクとなる。以上が 1 対 1 マッチングを行う場合の DA アルゴリズムである。また、入札できた生産エージェントの数を  $n$ 、グループ化タスクの数を  $m$  とするとき、 $n > m$ 、 $n < m$  となる場合を 1 対多マッチングという。1 対多マッチングにおける DA アルゴリズムについて文献[9]が知られている。1 対 1 マッチングにおいて合意は常に 1 つの提案交渉側と被提案交渉側の間で行われるが、文献[9]では、1 対多マッチングにおいて提案交渉をする側に複数の合意を許すアルゴリズムを提案している。この合意の数はアルゴリズムの実行前に決められるものであるが、本研究のように、交渉が成立する度に合意できる数が増え、また希望順位が変化する条件では、文献[9]のアルゴリズムを適用することができない。また、本研究ではグループ化タスクには最大 1 の生産エージェントしか割り当てることが出来ないという制約がある。したがって、1 対 1 マッチングを行う DA アルゴリズムを改良し、1 対多マッチングとしたものを用いる。

Algorithm 3 を以下に定義する。

### Algorithm 3 (納期考慮オークションアルゴリズム)

各エージェントは以下のように動作する：

- 市場エージェント

(i) 市場エージェントは以下の(a)から(c)を  $[m/n]$  回繰り返す。但し、生産エージェントの数を  $n$ 、グループ化タスクの数を  $m$ 、 $[\ ]$  を天井関数とする。

(a) 各エージェント(市場エージェント、生産エージェント)は希望リストを更新する

(b) DA アルゴリズム(1 対 1 マッチング)を行う

(c)  $M$  でペアになった生産エージェントにそのグループ化タスクを受け渡す。

<希望リストの更新>

(i) 市場エージェントは生産エージェントから生産エージェントの希望リストを受け取る。

(ii) 市場エージェントは生産エージェントの希望リストを基に入札者情報(生産エージェントの固有番号、(4)式の計算結果)をグループ化タスクに記録する。

(iii) 市場エージェントはグループ化タスクの入札者の希望順位  $[R_{f_1}, \dots, R_{f_n}]$  但し、 $R_{f_p} < R_{f_q}$  を記した希望リストを作成する。

- 生産エージェント

(i) グループ化タスクを受け取る。そして、生産待ちリストの最後尾に並べる。このとき優先度の高い順に並べる。

<希望リストの更新>

(i) 生産エージェントはグループ化タスク群のリスト  $T$  の先頭から順に(4)式を計算し、 $\geq 0$  ならば希望リストの先頭から順にグループ化タスクの固有番号を記録する。

(ii) すべての記録が終わると生産エージェントは希望リストの要素一つ一つに(5)式を計算し、希望リストをこの値の大きいものから順に並べる。

(iii) 希望リストを市場エージェント渡す。

### 【Phase 3】タスクの生産は次のように行う：

すべてのグループ化タスクの割り当て、或いはオークションが終わると、生産エージェントは生産を開始することが出来る。以下に生産のアルゴリズムを定義する。

各生産エージェントは生産待ちリスト  $W_f$  に仕掛品(後述)があれば生産待ちリストの先頭に並べる。生産待ちリストの先頭のタスク(グループ化タスクの各要素)から順に生産能力  $c$  ぶん生産することが出来る。生産待ちリストを前から順に生産したときの製造時間の合計値を  $\{p_1 + \dots + SC(\delta)_k + p_k + \dots +$

$p_n$ とする。このとき、 $\{p_1 + \dots + SC(\delta)_k + p_k\} \leq c$ となる最大の数を  $k$  とし、 $k$  番目のタスクまで生産する。残りの生産能力を  $c_{\text{remainder}} = c - \{p_1 + \dots + SC(\delta)_k + p_k\}$  とすると、 $k+1$  番目のタスクの製造時間は  $SC(\delta)_{k+1} + p_{k+1} - c_{\text{remainder}}$  の仕掛品となるため、 $k+1$  番目のタスクの製造時間  $p_{k+1}$  をこれに更新する。このとき、生産エージェントは生産できたタスクを生産待ちリストから消去し、各タスクの利益  $v_i$  を受け取る。以上を本稿の生産とする。

その後システムは系内時間を 1 進める。システムは各生産エージェントの生産待ちリストの各タスクの  $d_i$  から 1 ポイント引く ( $d_i - 1$ )。

以下に Phase 3 のアルゴリズムを定義する。

- 生産エージェント
  - (i) 生産エージェントは生産待ちリストのタスクを生産する。
- システム
  - (i) システムは系内時間を 1 進める。
  - (ii) システムは各生産エージェントの生産待ちリストの各タスクの  $d_i$  から 1 ポイント引く ( $d_i - 1$ )。

## 5. 評価シナリオ

3 章の関連研究で議論したようにディスクリート型ものづくりを行っている企業に適用した場合に効果を期待できるため、金属加工を行うマシニングセンタ、フライス盤、旋盤、ボール盤などを有する多品種少量生産企業を仮定する。3 章で問題定義したように複数の同じような生産能力を持った企業群を想定し、また本稿では  $c=1$  の生産能力を有する企業を対象とする。これらを基に以下に実験条件を定める。

$c=1$  の生産能力を持った企業をシミュレータに 5 社用意する。

疑似乱数のシードを 1 から 100 の間で各 1 回ずつ試行し検証する。

次に各パラメータ値を、想定する  $c=1$  程度の生産能力を持った企業の実態できるだけに近くなるよう値を仮定し実験を行う。以下に実験条件とその値を示す。

次のいずれのパラメータもその分布は次に指定した範囲の中で乱数分布に従って発生する。 $p_i$  は 1 ~ 4 の値、 $s_i$  は 10 ~ 15 の値、 $v_i$  は製造時間に比例するよう  $p_i$  値に -1 ~ 4 を足した値とした。

仕事を 5 種設定し大分類の発生比は(4:3:1.5:1:0.5)、小分類は 4 種でいずれも発生は乱数分布に従う。 $SC_{\text{low}}$  の値は 1、 $SC_{\text{high}}$  の値は 5 と仮定し検証する。

評価指標は 30 回取引を行った時の各生産の収入の平均値、全生産の生産数合計で評価を行う。

## 6. シミュレーション結果・考察

30 回の取引で 1500 件のタスクが取引市場にある時の全生産エージェントのタスク生産数によってグルーピングの効果を以下に示す。

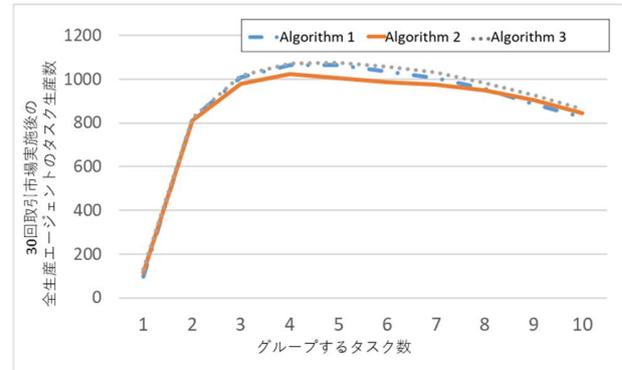


図 3 グルーピングの効果

本実験より、同条件では 4 つごとにタスクをグルーピングしたとき最も生産量が向上することを確認した。

次にグルーピングを行わない条件(1 つのグループ化タスクが 1 つのタスクからなる)でオークションの効果を確認する。評価シナリオに基づき 30 回取引を行った時の各生産エージェントの収入の平均値、全生産エージェントの生産数合計を 150, 600, 1050, 1500 件のタスクが取引市場にある条件で評価する。以下に結果を示す。

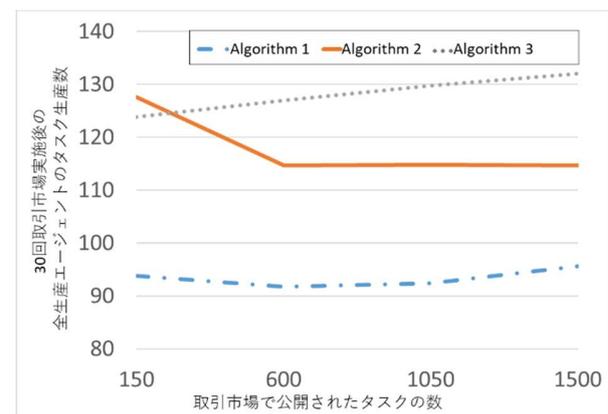


図 4 30 回取引市場実施後の全生産エージェントのタスク生産数

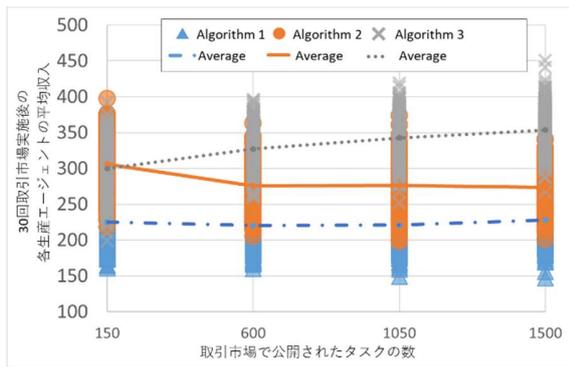


図 5 30 回取引市場実施後の各生産エージェントの平均収入

Algorithm 3 は図 4, 5 いずれでも他のアルゴリズムに比べ結果が良好であった。

最後に評価シナリオに基づき、4 つごとにタスクをグルーピングし、30 回取引を行った時の各生産エージェントの収入の平均値、全生産エージェントの生産数合計を 150, 600, 1050, 1500 件のタスクが取引市場にある条件で評価する。以下に結果を示す。

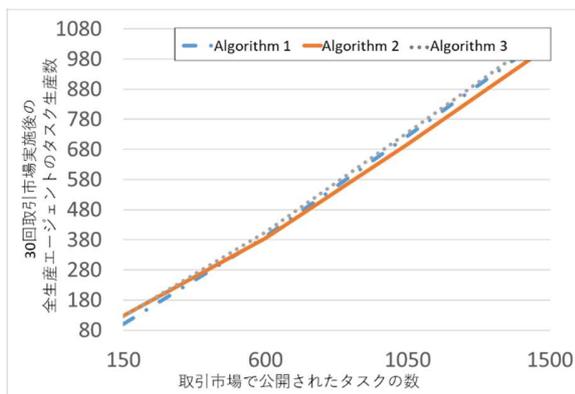


図 6 30 回取引市場実施後の全生産エージェントのタスク生産数(グループするタスク数 4)

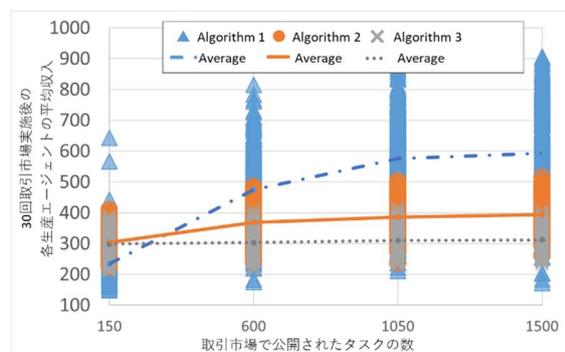


図 7 30 回取引市場実施後の各生産エージェントの平均収入(グループするタスク数 4)

図 6 ではわずかながら Algorithm 3 が他のアルゴリズムに対して優位である。一方、図 7 では各生産エージェントの収入の平均値は他のアルゴリズムを下回る。これは Algorithm 3 の希望リストの作成(i), (ii)において(4)式を基に希望順位を決め、そのようなグループ化タスクは  $p_i$  値が小さく、評価シナリオで  $v_i$  値を  $p_i$  値に比例させていることから、その影響を受けているためと考えられる。しかしながら、Algorithm 3 の分散が最も小さいことから、他のアルゴリズムに対して公平な分配方法と言える。

## 7. まとめ

本稿ではリバースオークションを取りながら各受注者の利益を確保し、市場全体の生産量が増えるように落札者を選ぶ自動交渉の市場制度を提案し、シミュレーションで評価した。また市場エージェントによるタスクのグルーピングが、最も効果が高いことを確認した。

## 参考文献

- [1] 清 威人: スマート・ファクトリー 戦略的「工場マネジメント」の処方箋, 英治出版, pp. 76-93, (2010)
- [2] Jay Lee, Behrad Bagheri, and Hung-AnKao: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing Letters*, Vol.3, pp. 18-23, (2015)
- [3] Sonia Cisneros-Cabrera, Asia Ramzan, Pedro Sampaio, Nikolay Mehandjiev: Digital Marketplaces for Industry 4.0: A Survey and Gap Analysis, *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol.506, No. 1, pp. 18-27, (2017)
- [4] 内閣府,: 第 5 期科学技術基本計画, <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>, (visited on 2019)
- [5] F Tao, L Zhang, V C Venkatesh, Y Luo, and Y Cheng: Cloud manufacturing: a computing and serviceoriented manufacturing model, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, Vol.225, pp.1969-1976, (2011)
- [6] 勝村 義輝, 杉西 優一, 貝原 俊也: クラウドマニュファクチャリングの生産効率性に関する研究, *日本機械学会論文集*, Vol.82, No.835, (2016)
- [7] Shaheen Fatima, Sarit Kraus, and Michael Wooldridge: Principles of Automated Negotiation, pp.69-72, (2014)
- [8] D. Gale and L. S. Shapley, College Admissions and the Stability of Marriage, *Vol.69, No.1*, pp. 9-15, (1962)
- [9] Alvin E. Roth, The Evolution of the Labor Market for Medical Interns and Residents: A Case Study in Game Theory, *Journal of Political Economy*, Vol.92, No.6, (1984)