

# クラウドソースドマニュファクチャリング環境下における オークションに基づくリソース配分手法の提案

## A proposal of auction based resource allocation method under Crowdsourced Manufacturing environment

○原田 佳明, 貝原 俊也, 國領 大介, 藤井 信忠 (神戸大学)

\*Y. Harada, T. Kaihara, D. Kokuryo and N. Fujii (Kobe Univ.)

**Abstract** With the development of IoT technology, a production form called “Crowdsourced Manufacturing System” is attracting attention, which shares information on resources possessed by individual companies and enables their mutual use. In this paper, we propose an auction-based method that can determine resource allocation and trade prices under distributed decision-making in this paper, and verify its effectiveness by computer experiments.

### 1 はじめに

近年 IoT (Internet of Things) の発展に伴い、工場や製造機器をインターネット上に繋ぐことにより生産性を向上させるための動きが活発化している。また、企業や工場内だけでなく、企業の壁を超えたつながりを利用した生産形態に注目が集まっている [1]。我々は、その中で IoT 環境下において複数の工場や複数の企業をつなぎ設備・材料・労働力・工法を融通し合う生産形態であるクラウドソースドマニュファクチャリングシステムに着目する [2]。クラウドソースドマニュファクチャリングシステムを形成することで、例えば、需要過多となりリソースが不足した処理を他企業に委託することで、リソース不足への対応を行うことができる。また他企業に委託することで、近年多様化する顧客ニーズに合わせたカスタム生産を低コストで実現可能となる。1 企業で様々な機器等を揃えるのは高コストになってしまうが、必要なときに必要なリソースをクラウドソースドマニュファクチャリング上から借りることにより、低コストでの生産を可能とする。またリソースを提供する企業は、リソースの不稼働時間を有効活用し提供料金により利益を得ることができる [3]。そのためにはクラウドソースドマニュファクチャリング内の企業からの要求を、提供リソースを持つ企業に対して適切に割当てするリソース配分手法が重要となる [4]。そこで我々は、分散された意思決定下で、財の割り当てと取引価格を決めることのできるオークション方式に着目する。本稿では売り手と買い手の片方が入札を行い、それにより配分と取引価格を決めるシングルオークションに基づくリソース配分手法と、売り手と買い手の双方が入札を行い、それにより配分と取引価格を決めるダブルオークションに基づくリソース配分手法の 2 つの手法を提案し、計算機実験によ

りその特性の評価を行う。

### 2 対象モデル

本稿の対象とするクラウドソースドマニュファクチャリングモデルの概要を Fig.1 に示す。リソースを要求する企業をリソース要求側、リソースを提供する企業をリソース提供側とする。以下にその特徴を示す。

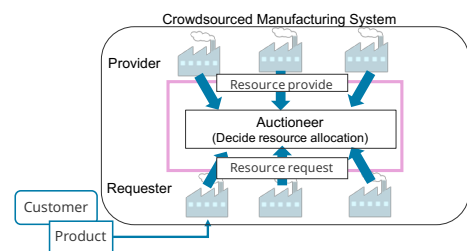


Fig. 1: Crowdsourced Manufacturing model

- 対象とする製品は、工程毎に分割可能とする。
- 各企業のリソースの管理と配分を決めるオークション主催者が存在する。
- 顧客からのオーダーは各企業に対して行われる。
- 各企業は出来ない処理がある場合に、必要なリソースとその量をオークション主催者に対し要求する。
- リソース要求企業はリソースが提供されれば、製品の生産を行う。
- 各企業は空いているリソースがあればオークション主催者に提示し、リソースを提供する。

### 3 オークションに基づくリソース配分手法

リソースの要求に対して、提供リソースを割当てするためのシングルオークションに基づく手法とダブルオークションに基づく提案手法について説明する。以下の [Ts] はタイムスロットを示す。

#### 3.1 シングルオークションに基づくリソース配分手法

シングルオークションに基づいたリソース配分手法はリソースの提供側が入札を行う。リソースの要求側は予算と要求を提示するが、こちらの予算は保障額としてのみ使用される。これは予算を超える取引を発生させない為のものである。

##### 3.1.1 全体の流れ

**STEP1.** リソース提供企業は入札, リソース要求企業はリソース要求を作成し、クラウドオークション主催者に提出する (リソース要求と入札作成)。

**STEP2.** オークション主催者は、評価値の合計が最大 (最小) となる入札を決定する (勝者決定)。

**STEP3.** 各企業はオークションの結果に応じ、定められた取引価格において取引を行う (取引価格決定)。

オークション主催者は利益を求めないとする。またオークションにかけられる財はリソース  $r (= 1, \dots, R)$  とする。

##### 3.1.2 入札とリソース要求の作成

リソース提供企業 ( $i = 1 \dots I$ ) の入札を以下で説明する。

- 提供するリソース  $r$  のコストに利益を上乗せした提供単価  $p_{i,r}$  と提供時間  $TP_{i,r}$  からなる入札を作成
- $R$  個の入札を作成
- 提供時間の一部のみを提供することが可能である

リソース提供側の入札の例を Fig.2 に示す。Fig.2 は企業 1 はリソース 1 を提供単価 0.2[円] で 150[Ts]、リソース 2 を提供単価 0.4[円] で 100[Ts] 提供できることを示す。

リソース要求側 ( $j = 1 \dots J$ ) のリソース要求について説明する。リソース要求側は予算とリソース要求を提示する。この予算は保証額にのみ使用され、取引価格や配分には使用されない。以下で作成される要求について説明する。

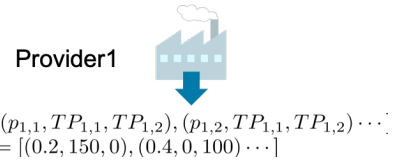


Fig. 2: Bid of provider in single auction

- リソース要求  $n$ , 予算  $v_{n,j}$  要求するリソース  $r$  の要求時間  $TR_{j,n,r}$  を提示する
- 各企業は  $N$  個のリソース要求を作成
  - ただし  $N$  個のリソース要求のうち勝者となる要求は 1 つ
- 必要なリソースの組合せに対してリソースの要求を作成する。全てのリソースが揃わないと製品の生産が出来ないからである。
  - 1 つの要求内のリソースはある 1 提供企業によって提供されるとする

作成されるリソース要求の例を Fig.3 に示す。Fig.3 はリソース要求企業 1 は予算 150[円] でリソース 1 を 150[Ts]、リソース 2 を 50[Ts] 要求することを示す。

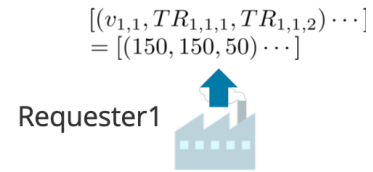


Fig. 3: Request in single auction

##### 3.1.3 勝者決定問題

シングルオークションに基づく手法の勝者決定問題の定式化を式 (1) から式 (8) に示す。

$$\min \sum_{j=1}^J \alpha \left( 1 - \sum_{n=1}^N y_{j,n} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N p_{i,r} \times TR_{j,n,r} \times x_{i,r,j,n} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N TR_{j,n,r} \times x_{i,r,j,n} \leq TP_{i,r} \quad (\forall i, \forall r) \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{i,r,j,n} = 0 & (\text{if } y_{j,n} = 0) \\ \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N TR_{j,n,r} \times x_{i,r,j,n} = TR_{j,n,r} & (\text{if } y_{j,n} = 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{i,r,j,n} \leq 1 \quad (\forall r, \forall j, \forall n) \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{i,r,j,n} \leq 1 \quad (\forall i, \forall r, \forall j) \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N y_{j,n} \leq 1 \quad (\forall j) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R PAY_{i,r,j,n} \leq v_{j,n} \quad (\forall j, \forall n) \quad (7)$$

$$x_{i,r,j,n}, y_{j,n} \in 0, 1 \quad (8)$$

式 (1) は目的関数であり、総提供単価最小化である。シングルオークションに基づく手法の目的関数は提要側の評価値、つまり提供単価のみで表現される。要求を制約にせずペナルティとすることで、要求が満たせない場合でも求解可能とした。このペナルティは満たせない要求の数に対して与える。式 (2) は提供企業  $j$  のリソースの容量制約である。式 (3) は要求側の組合せに関する制約である。リソース要求企業のある入札に関して、その入札が選ばれる場合はその全てのリソース要求が満たされる、またはその入札が選ばれない場合はどのリソース要求も満たされないとするための制約である。式 (4) は要求企業  $j$  の入札  $n$  のリソース  $r$  を提供するのは高々 1 企業とする制約である。式 (5) と式 (6) は要求企業  $j$  の入札のうち勝者となる入札は高々 1 つとする制約である。式 (7) は、企業  $j$  の予算制約である。

### 3.1.4 取引価格

$PAY_{i,r,j,n}$  を式 (9) で定める。取引価格を提要単価のみで決定している。

$$PAY_{i,r,j,n} = p_{i,r} \times TR_{j,n,r} \quad (9)$$

## 3.2 ダブルオークションに基づくリソース配分手法

ダブルオークションに基づく手法について説明する。シングルオークションに基づく手法は提供側の評価値のみで配分と取引価格を決定するのに対し、ダブルオークションに基づく手法は、提供側、要求側の双方が入札を行い、双方の評価値に基づきリソースの配分、取引価格を決定する。

### 3.2.1 全体の流れ

**STEP1.** リソース提供企業とリソース要求企業は入札を作成し、オークション主催者に提出する。(入札作成)

**STEP2.** オークション主催者は、評価値の合計が最大(最小)となる入札を決定する。(勝者決定)

**STEP3.** 各企業はオークションの結果に応じ、定められた取引価格において取引を行う。(取引価格決定)

オークション主催者は利益を求めないとする。またオークションにかけられる財はリソース  $r (= 1, \dots, R)$  とする。

### 3.2.2 入札の作成

リソース提供企業 ( $i = 1 \dots I$ ) における入札について以下で説明する。

- 提供するリソース  $r$  のコスト  $c_{i,r}$  と提供時間  $TP_{i,r}$  からなる入札を作成
- $R$  個の入札を作成
- 提供時間の一部のみを提供することが可能である

シングルオークションに基づく手法と異なる点は提供単価ではなく、コスト  $c_{i,r}$  を提示する点である。Fig.4 にリソース提供企業の入札の例を示す。Fig.4 は企業 1 はリソース 1 を提供単価 0.1[円] で 150[Ts]、リソース 2 を提供単価 0.2[円] で 100[Ts] 提供できることを示す。

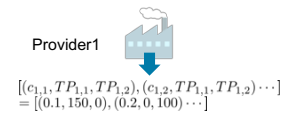


Fig. 4: Bid of provider in double auction

リソース要求側 ( $j = 1 \dots J$ ) の入札について説明する。

- 入札  $n$ , 予算  $v_{n,j}$  要求するリソース  $r$  の要求時間  $TR_{j,n,r}$  を提示する
- 各企業は  $N$  個の入札を作成
  - ただし勝者となる入札は 1 つ
- 必要なリソースの組合せに対して入札を作成する。これは全てのリソースが揃わないと製品の生産が出来ないからである
  - 1 つの要求内のリソースはある 1 提供企業によって提供されるとする

リソース要求側の入札 ( $i = 1 \dots r$ ) は、シングルオークションにおけるリソース要求と形式は同じである。しかし入札の予算が評価値として、配分と取引価格の決定に用いられる点で異なる。

### 3.2.3 勝者決定問題

ダブルオークションに基づく手法の勝者決定問題の目的関数を式 (10) に示す。制約式はシングルオークションの式 (2) から式 (8) と同様である。

$$\max \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N v_j \times y_{j,n} - \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N c_{i,r} \times TR_{i,n,r} \times x_{i,r,j,n} \quad (10)$$

式 (10) は目的関数であり、総利益最大化とする。ダブルオークションの目的関数は、提供側、要求側双方の評価値、つまりコストと予算により表現する。この定式化は予算が高い入札ほど選ばれ安く、またコストが低いリソースほど選ばれやすいものとなっている。

### 3.2.4 取引価格決定

取引価格  $PAY_{i,r,j,n}$  を、参考文献 [5] を参考に式 (11) のように定める。ダブルオークションに基づく手法は取引価格を提供側、要求側の双方の評価値、つまりコストと予算より決定する。式 (11) はお互いの希望の半分で取引することを示す。

$$PAY_{i,r,j,n} = \frac{c_{i,r} + v_{i,j} \times (\frac{TR_{j,n,r}}{\sum TR_{j,n,r}}) / TR_{j,n,r}}{2} \times TR_{j,n,r} \quad (11)$$

ここで  $\sum TR_{j,n}$  はリソース要求企業  $j$  がリソースを要求する時間の合計であり、式 (12) で求まる。

$$\sum TR_{j,n} = \sum_{r=1}^R TR_{j,n,r} \quad (12)$$

## 4 計算機実験

シングルオークションに基づく手法と、ダブルオークションに基づく手法について、計算機実験を行い総利益について比較する。リソース提供側の提供時間を 7 段階で設定し特性の評価を行う。提供時間が長いほどリソース提供側の余裕時間が増加すること示す。勝者決定問題は最適化ソルバーである CPLEX で求解する。

### 4.1 実験条件

- リソースの種類  $R = 4$
- 各試行を 5 回行う
- 提供企業数  $I = 10$

- 各企業 2 種類のリソースを提供する
- $TP_{i,r}[\text{Ts}]$  は乱数で定める。以下のように乱数の範囲を変化させる  
[50,150],[100,200],[150,250],[200,300],  
[250,350],[300,400],[350,450]
- ダブルオークションのコストは  $c_{i,r} = [0.1, 0.5]$  とする
- シングルオークションの提供単価は提案手法のコストから利益率が (40%, 60%) となるような値を提示する
- ペナルティ  $\alpha = 10000$
- 要求企業数  $J = 10$ 
  - 各企業  $N = 3$  個の入札を作成
  - 要求時間は  $TR_{i,n,r} = [0, 200](\forall i, \forall n, \forall r)[\text{Ts}]$  とする
  - 予算は  $v_{j,n} = \sum TR_{j,n} \times [1.0, 1.5]$  とする

### 4.2 結果と考察

Table 1 から 4 に実験結果を示す。Table 1 は総利益を表し、Table 2 取引価格を表す。Table 3 は満たされた要求の割合を示し、Table 4 は提供率（実際に提供した時間を提供可能時間で割ったもの）を表す。各 Table の値はそれぞれ 5 試行の平均と分散を表している。

Table 1: Profit

Provide time		Double		Single	
				40%	60%
[50,150]	Ave.	626.3		610.6	621.0
	S.D.	271.4		181.7	202.3
[100,200]	Ave.	2475.9		2162.1	2068.0
	S.D.	194.4		194.6	105.7
[150,250]	Ave.	3544.9		2870.0	2819.7
	S.D.	472.7		46.3	110.0
[200,300]	Ave.	3885.8		2985.9	2987.8
	S.D.	606.1		200.0	199.7
[250,350]	Ave.	<b>4222.6</b>		<b>3175.4</b>	<b>3169.0</b>
	S.D.	398.9		276.9	230.5
[300,400]	Ave.	<b>4447.1</b>		<b>2957.7</b>	<b>2959.8</b>
	S.D.	1166.2		302.6	303.1
[350,450]	Ave.	<b>4881.8</b>		<b>3088.3</b>	<b>3097.9</b>
	S.D.	341.7		268.1	276.5

Table 1 よりダブルオークションの方がどの場合においても総利益は高くなった。また、提供時間が長くなるに連れ、シングルオークションは総利益が上昇しなかったが、ダブルオークションは提供時間が長くなっても総利益が上昇していることがわかる。ダブルオークションの総利益が伸び続けたのは、予算を考慮した配分を行い、予算が高い入札ほど選ばれやすくなったからである。これは Table 2 において、提供時間 [300,400] 辺りまで取引価格が上昇していることからわかる。

Table 2: Trade price

Provider time		Double	Single	
			40%	60%
[50,150]	Ave.	52.9	53.3	58.7
	S.D.	6.1	5.0	5.9
[100,200]	Ave.	68.0	60.4	69.5
	S.D.	6.1	3.9	5.2
[150,250]	Ave.	85.1	63.6	73.1
	S.D.	10.1	3.5	7.6
[200,300]	Ave.	81.3	62.9	70.9
	S.D.	4.1	3.9	4.6
[250,350]	Ave.	<b>92.5</b>	62.5	70.6
	S.D.	7.2	5.3	8.3
[300,400]	Ave.	<b>93.9</b>	58.9	65.7
	S.D.	12.5	5.2	5.7
[350,450]	Ave.	<b>91.8</b>	58.7	65.2
	S.D.	6.6	6.6	7.6

また Table 2 の提供時間 [350,450] において取引価格が下がったのは、よりコストの安いリソースの提供時間が増えたからであると考えられる。ダブルオークションの目的関数が双方の評価値であるコストと予算を考慮した総利益最大化の配分、そして双方の希望価格の半分が取引価格となっているのでこのような結果となった。それに対し、シングルオークションの総利益が伸びなくなった理由は 2 つ考えられる。1 つ目が Table 3 より、全ての要求が満たされたからである。2 つ目が提供側の評価値、提供単価のみで配分を決定するシングルオークションでは予算を考慮できないため、より予算が高い要求を満たそうとしなかったからである。また Table 4 より、提供時間が長くなるに連れてシングルオークションは提供率が大幅に減少するが、ダブルオークションの提供率の減少はシングルオークションより緩やかであることから、ダブルオークションがより予算の高い入札を勝者とする配分となっていることがわかる。

Table 3: Rate of Satisfied request

Provider time		Double	Single	
			40%	60%
[50,150]	Ave.	30.1%	31.2%	31.9%
	S.D.	11.4%	10.4%	11.5%
[100,200]	Ave.	79.0%	75.4%	72.4%
	S.D.	6.4%	8.5%	6.3%
[150,250]	Ave.	82.3%	73.2%	71.8%
	S.D.	10.0%	3.0%	3.4%
[200,300]	Ave.	71.4%	57.6%	57.5%
	S.D.	9.8%	4.3%	4.3%
[250,350]	Ave.	<b>68.5%</b>	<b>50.6%</b>	<b>50.2%</b>
	S.D.	9.0%	5.8%	5.7%
[300,400]	Ave.	<b>60.5%</b>	<b>42.8%</b>	<b>42.8%</b>
	S.D.	15.4%	4.7%	4.7%
[350,450]	Ave.	<b>59.6%</b>	<b>37.1%</b>	<b>37.2%</b>
	S.D.	4.6%	2.9%	2.9%

Table 4: Rate of resource provided

Provider time		Double	Single	
			40%	60%
[50,150]	Ave.	30.1%	31.2%	31.9%
	S.D.	11.4%	10.4%	11.5%
[100,200]	Ave.	79.0%	75.4%	72.4%
	S.D.	6.4%	8.5%	6.3%
[150,250]	Ave.	82.3%	73.2%	71.8%
	S.D.	10.0%	3.0%	3.4%
[200,300]	Ave.	71.4%	57.6%	57.5%
	S.D.	9.8%	4.3%	4.3%
[250,350]	Ave.	68.5%	50.6%	50.2%
	S.D.	9.0%	5.8%	5.7%
[300,400]	Ave.	60.5%	42.8%	42.8%
	S.D.	15.4%	4.7%	4.7%
[350,450]	Ave.	59.6%	37.1%	37.2%
	S.D.	4.6%	2.9%	2.9%

## 5 まとめ

本稿では、クラウドソースドマニュファクチャリングに対し、シングルオークションに基づくリソース配分手法とダブルオークションに基づくリソース配分手法の提案、比較し、特性の評価を行った。得られた結果より、総利益は提供時間を変化させたどの場合においてもダブルオークションに基づく手法の方が高くなった。構成する企業がそれぞれ独立した企業であるクラウドソースドマニュファクチャリングにおいては、総利益が高いダブルオークションに基づく手法の方が有効であると考えられる。

今後は、本稿が考慮していない各企業の稼働率の考慮と、オークションにおいて重要とされる耐戦略性を考慮した取引価格決定方法の提案を行う。

## 参考文献

- [1] IVI. つながるものづくり. <https://iv-i.org/wp/ja/>. (Accessed on 03/05/2019).
- [2] Factory of the future. <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-futurefactory-LR-en.pdf>. (Accessed on 03/10/2019).
- [3] 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.
- [4] Dazhong Wu, Matthew John Greer, David W. Rosen, and Dirk Schaefer. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, No. 835, 2013.
- [5] Parnia Samimi, Youness Teimourib, and Muriati Mukhtara. A combinatorial double auction resource allocation model in cloud computing. *Information Sciences*, No. 357, 2016.