

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 組合せダブルオークションに基づくリソース配分手法の提案

A proposal of Combinatorial Double 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, N. Fujii, (Kobe Univ.)

Abstract IoT 技術の発展により、個々の企業が持つリソースの情報を共有しその相互利用を可能とする“クラウドソースドマニュファクチャリング”と呼ばれる生産形態が注目されている。この生産形態の発展には、独立した企業群における合理的なリソース配分方法が重要となる。本稿では買い手、売り手の双方が入札を行う組合せダブルオークションを用いたリソース配分と取引価格の決定手法を提案し、計算機実験によりその有効性を検証する。

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こと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に注目が集まっており [1], 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と呼ばれる生産形態が提案された [2]。クラウドソースドマニュファクチャリングを形成することで、リソースが不足した処理や、自社にはないリソースを使用する処理を、つながる他企業に委託することで、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。[3] クラウドソースドマニュファクチャリングにおいて重要となるのがどの企業のリソースの要求に対して、どの企業の提供リソースを割当てるかを決定するリソース配分手法である [4]。その際に、考慮すべき点としてクラウドソースドマニュファクチャリングの構成企業がそれぞれ独立した企業であること、またこの生産形態が中長期的な連合を想定していることが挙げられる。そこで本稿では、分散された意思決定で、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に着目し、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2つの手法を提案し、計算機実験により比較、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 に示し、以下で説明する。

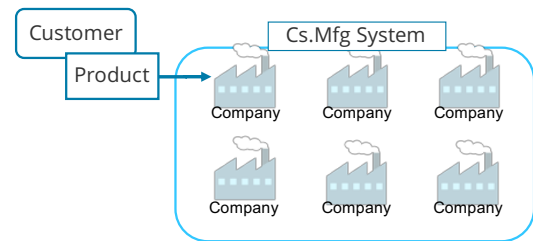


Fig. 1: Crowdsourced Manufacturing model

- 各企業のリソースの管理と配分を決める Cs.Mfg システムが存在する。
- 顧客からのオーダーは各企業に対して発生する。
- 各企業は出来ない処理がある場合に Cs.Mfg システムに対し、リソースを要求する。
- 各企業は空いているリソースがあれば Cs.Mfg システムに提示し、リソースを提供する。
- リソース要求企業はリソースが調達できれば、製品の生産を行う。
- 対象とする製品は、工程毎に分割可能とする。

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。

3 オークションに基づくリソース配分手法

3.1 概要

オークションを用いた提案手法の流れを以下に示す。

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、Cs.Mfg. システムに提出する。(入札作成)

STEP2. Cs.Mfg システムは、評価値の合計が最大 (最少) 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)

Cs.Mfg システム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 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について説明する。この手法において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。

3.2.1 入札作成:リソース提供企業

リソース提供企業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
 - 入札 r にリソース r が提供できる場合にリソース r のコストと提供時間を記述

- 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 で 150[Ts]、リソース 2 を提供単価 0.4 で 100[Ts] 提供できることを示す。

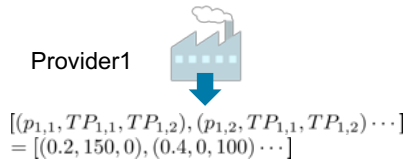


Fig. 2: Bid of provider in single auction

3.2.2 予算とリソース要求の提示:リソース要求企業

リソース要求側は予算と要求を提示する。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。

3.2.3 リソース要求企業

- 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 つの入札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 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。

$$[(v_{1,1}, TR_{1,1,1}, TR_{1,1,2}) \dots] = [(150, 150, 50) \dots]$$



Fig. 3: Request in single auction

3.2.4 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 (3) は、要求側の組合せ性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 (2) は提供企業 j のリソースの容量制約である。式 (13) 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。

3.2.5 取引価格

$PAY_{i,r,j,n}$ 以下のように定める。

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

取引価格を提要単価のみで決定している..

3.3 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。この手法は、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。

3.3.1 入札作成:リソース提供企業

リソース提供企業入札について以下で説明する。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。

- 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
 - 入札 r にリソース が提供できる場合にリソース のコストと提供時間を記述
- 提供時間の一部のみを提供することが可能である

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 で 150[Ts]、リソース 2 を提供単価 0.2 で 100[Ts] 提供できることを示す。

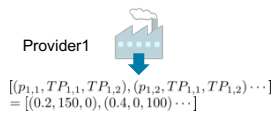


Fig. 4: Bid of provider in double auction

3.3.2 入札作成:リソース要求企業

リソース要求側の入札は、シングルオークション予算と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。

3.4 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定式化を式 (10) から式 (17) に示す。

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

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N TR_{j,n,r} \times x_{i,r,j,n} \leq TP_{i,r} \quad (\forall i, \forall r) \quad (11)$$

$$\begin{cases} x_{i,r,j,n} = 0 & (\text{if } y_{j,n} = 0) \\ \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N TR_{j,n,r} \times x_{i,r,j,n} = TR_{j,n,r} & (\text{if } y_{j,n} = 1) \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{i,r,j,n} \leq 1 \quad (\forall r, \forall j, \forall n) \quad (13)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{i,r,j,n} \leq 1 \quad (\forall i, \forall r, \forall j) \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^N y_{j,n} \leq 1 \quad (\forall j) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R PAY_{i,r,j,n} \leq v_j \quad (\forall j, \forall n) \quad (16)$$

$$x_{i,r,j,n}, y_{j,n} \in 0, 1 \quad (17)$$

式 (10) は目的関数で、総利益最大化である。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される。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。制約式である式 (12) から式 (17) は、シングルオークションの勝者決定問題の定式化と同様である。

3.5 取引価格決定

本稿では取引価格 $PAY_{i,r,j,n}$ を、参考文献 [5] を参考に、以下のように定める。

$$PAY_{i,r,j,n} = \frac{c_{i,r} + v_{i,j} \times (\frac{TR_{j,n,r}}{\sum TR_{j,n}})}{2} \times TR_{j,n,r} \quad (18)$$

ここで $sumTR_{j,n}$ 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、以下のように定まる。

$$sumTR_{j,n} = \sum_{r=1}^R TR_{j,n,r} \quad (19)$$

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 (18) は、お互いの希望の半分で取引することを示す。

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、計算機実験を行い比較する。リソース提供側の提供時間を7段階で変化させ実験を行うことで、需要と供給の割合の変化による特性の違いを検証する。提供時間が多いほどリソース提供側の余裕時間が増加すること示す。各試行を5回行う。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 $R = 4$
- 提供企業数 $I = 10$
 - 各企業2種類のリソースを提供する
 - $TP_{i,r}[Ts]$ 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 $TR_{i,n,r} = [0, 200](\forall i, \forall n, \forall r)[Ts]$ とする
 - 予算は $v_{j,n} = sumTR_{j,n} \times [1.0, 1.5]$ とする

4.2 結果と考察

Table 1, 2, 3, 4 に実験結果を示す。Table1 は総利益を表し、Table2 取引価格を表す。Table3 は満たされた要求の割合を示し、Table4 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。

Table1 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くなったが、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。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Table3より、全ての要求が満たされたからである。2つ目が予算を考慮した配分になっていないので、提供時間が長くなってもより予算が高い要求（リソース要求時間が長い要求）を満たそうしなかったからであると考えられる。それに対し、ダブルオークションの総利益は伸び続けたのは、予算を考慮した配分を行ったからである。これはTable2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。またTable2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。また、Table4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予算を考慮した配分になっていることが確認できる。

		Double	Single	
Provide time			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.	4222.6	3175.4	3169.0
	S.D.	398.9	276.9	230.5
[300,400]	Ave.	4447.1	2957.7	2959.8
	S.D.	1166.2	302.6	303.1
[350,450]	Ave.	4881.8	3088.3	3097.9
	S.D.	341.7	268.1	276.5

Table 1: Profit

		Double	Single	
Provider time			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.	92.5	62.5	70.6
	S.D.	7.2	5.3	8.3
[300,400]	Ave.	93.9	58.9	65.7
	S.D.	12.5	5.2	5.7
[350,450]	Ave.	91.8	58.7	65.2
	S.D.	6.6	6.6	7.6

Table 2: Trade price

		Double	Single	
Provider time			40%	60%
[50,150]	Ave.	26.0%	28.0%	28.0%
	S.D.	10.2%	11.7%	11.7%
[100,200]	Ave.	72.0%	80.0%	80.0%
	S.D.	11.7%	11.0%	11.0%
[150,250]	Ave.	84.0%	94.0%	94.0%
	S.D.	8.0%	4.9%	4.9%
[200,300]	Ave.	100.0%	100.0%	100.0%
	S.D.	0.0%	0.0%	0.0%
[250,350]	Ave.	98.0%	100.0%	100.0%
	S.D.	4.0%	0.0%	0.0%
[300,400]	Ave.	100.0%	100.0%	100.0%
	S.D.	0.0%	0.0%	0.0%
[350,450]	Ave.	100.0%	100.0%	100.0%
	S.D.	0.0%	0.0%	0.0%

Table 3: Rate of Satisfied request

		Double	Single	
Provider time			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%

Table 4: Rate of resource provided

5 まとめ

本稿では、クラウドソースドマニ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、比較を行い、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える。

今後の方針としては、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. Industrial valuechain initiative – 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, pp. 15–00430–15–00430, 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, pp. 564–579, 2013.
- [5] Parnia Samimi, Youness Teimourib, and Muriati Mukhtara. A combinatorial double auction resource allocation model in cloud computing. *Information Sciences*, No. 357, pp. 201–216, 2016.