

2019 年 度 修 士 論 文

クラウドソースドマニファクチャリングに対する
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一提案

神戸大学大学院システム情報学研究科
システム科学専攻

原田佳明

指導教員 貝原俊也教授

審査教員 主査 藤井 進 教授

副査 副査

副査 副査

2019年2月5日

Title in English

Harada Yoshiaki

Abstract

abstract...

クラウドソースドマニファクチャリングに対する
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一提案

原田佳明

要旨

要旨...

目 次

第 1 章 諸論	1
1.1 従来の製造業	1
1.2 シェアリング・エコノミーの発展	2
1.3 共生型モノづくり	3
1.3.1 Cloud Based Design and Manufacturing	3
1.3.2 クラウドソースドマニュファクチャリング	4
1.4 研究目的	4
1.5 本論文の構成	4
第 2 章 クラウドソースドマニュファクチャリングに対するオークションの適用	5
2.1 諸言	5
2.2 対象モデル	5
2.3 オークション	6
2.3.1 オークションとは	6
2.3.2 オークションの財に関する分類	7
2.3.3 オークションの入札に関する分類	7
2.3.4 オークションの評価指標	7
2.3.5 代表的なオークションの例	8
2.4 組合せダブルオークション	10
2.5 共通の流れ	12
2.5.1 入札作成	13
2.5.2 評価指標	13
2.6 結言	13
第 3 章 手法 I:パレート効率性を満たす手法	14
3.1 アルゴリズム	14
3.1.1 概要	14
3.1.2 リソース配分の決定	15
3.1.3 取引価格決定	15
3.1.4 特徴	16

3.2	特性評価	16
3.2.1	1 提供企業の虚偽申告率の変更	16
3.2.2	1 要求企業の虚偽申告率の変更	18
3.2.3	虚偽申告を行う提供企業数の変更	18
3.2.4	虚偽申告を行う要求企業数の変更	18
3.2.5	提供側が申告するコストの幅の変更	18
3.2.6	要求企業が申告する予算の幅の変更	18
第4章	手法 II:耐戦略性を満たす手法	19
4.1	アルゴリズム	19
4.1.1	概要	19
4.1.2	入札作成	19
4.1.3	勝者決定	19
4.1.4	提供側の勝者と取引価格決定	19
4.1.5	要求側の勝者と取引価格決定	19
4.2	特性評価	19
4.2.1	提供企業数の変更	19
4.2.2	要求企業数の変更	19
4.2.3	提供企業数の変更	19
4.2.4	1 提供企業の虚偽申告率の変更	19
4.2.5	1 要求企業の虚偽申告率の変更	19
4.2.6	虚偽申告を行う提供企業数の変更	19
4.2.7	虚偽申告を行う要求企業数の変更	19
4.2.8	提供側が申告するコストの幅の変更	19
4.2.9	要求企業が申告する予算の幅の変更	19
第5章	現実を想定したケーススタディ	20
第6章	結論	21
6.1	まとめ	21
6.2	今後の展望	21

第1章 諸論

1.1 従来の製造業

従来のモノづくり企業は垂直型経営が主流であった [1]。垂直型経営とは設計，材料・部品の調達，製造，組立の一連のプロセスを自社でまかなう経営形態である。垂直型経営はノウハウを蓄積することが可能である，機密性を保てるなどのメリットがある。

-
- 垂直型経営についてもう少し述べる...
-

しかし，近年の製造業の顧客ニーズは多様化し，それにより製品品種の増加，製品ライフサイクルが短期化している。それによって，従来の垂直型経営における以下の課題点が浮き彫りになってきた。

-
- 顧客ニーズの多様化の背景を書く...
-

- 環境変化への対応

- 垂直型経営では自社で全ての固定ラインの生産システムを持っている。この生産システムでは近年の顧客ニーズの変化や需要変動に追従することができない。

- 設備稼働率の低下

- 従来の生産システムは自社で全ての作業を行うことが多く，ピーク需要に合わせて生産能力を決定している。その結果として，設備稼働率が低下してしまう。そうすると固定費である生産設備費用が高くなり，高コスト・高アセットな製品となってしまう。

上記の課題を解決する為に，クラウド技術の活用やIoT技術の活用に注目が集まっている。その中でも日本においてはシェアリング・エコノミーの考え方に基づいたモノづくりの分散化，製造リソースの共有に関する議論が盛んに行われている [2]。

1.2 シェアリング・エコノミーの発展

IoT 技術の発展を背景に、近年シェアリング・エコノミーが普及している。本節ではまず IoT について説明を行い、その後、シェアリング・エコノミーについて述べる。

IoT の発展

近年、電子デバイスの低価格化、インターネットの発展により IoT(Internet of Things) の活用が注目が集まっている。IoT とは、ありとあらゆるものインターネット上に繋いでいく技術や概念である [3]。IoT が普及すると、従来インターネットに接続されていなかったモノ (センサー機器、駆動装置 (アクチュエータ) 建物、車、電子機器などが) がインターネットを通じてサーバやクラウドサービスに接続され、相互に情報をやり取りすることができるようになる [4]。

製造業においても IoT を活用することで、製造業の効率化を狙う動きが活発化している。以下にその政策例を示す。

- Industrie 4.0[5]
 - *Industrie 4.0* について...
- Industrial Internet[6]
 - *IIC* について...
- 中国製造 2025
 - 中国製造 *2025* について書く...

IoT 技術を活用することで人やモノの位置、稼働状況などの情報を取得することができるようになる。さらにクラウドコンピューティング技術を活用することで、クラウド上にその情報を集約することが可能となる。そうすることで、様々な人が情報にアクセスすることが可能となり、実際の資源を共有し再利用をするシェアリング・エコノミーが促進されと考えられている [7]。

シェアリングエコノミーとは

シェアリング・エコノミーとは、典型的には個人が保有する遊休資産 (スキルのような無形のものも含む) の貸出しを仲介、再利用するサービスであり、貸主は遊休資産の活用による収入、借主は所有することなく利用できるというメリットがある [7]。前節の IoT 技術の発展、情報の集約により、誰もが簡単に情報にアクセスすることが可能となることでシェアリング・サービスが急速に普及している。そのサービス例を以下に示す。

- メルカリ

- メルカリについて...
- Airbnb
 - *Airbnb* について...

製造業への応用

製造業においてもシェアリング・エコノミーの考え方をとり入れることで、製造リソースをシェアリングすることで、従来の垂直統合の課題を克服し、企生産効率を高めることができる共生型モノづくりの実現を目指す動きが活発化している [2][8].

-
- *IVI* についてここで詳しく述べる...
-

1.3 共生型モノづくり

共生型モノづくりのコンセプトは, 2013 年に発表された Wu らの提言がした CBDM(Cloud Based Design and Manufacturing) が始めと考えられる [9].

1.3.1 Cloud Based Design and Manufacturing

クラウド技術を活用することで、製造業の活性化を図るのが CBDM の狙いである。具体的には以下のメリットが挙げられる。

- インターネットやクラウドサービスを活用することで、複数の人で製品を協調設計できる。
- クラウド上で製造リソースを管理することで、必要に応じて分散された製造リソースを利用することができるようになる。

また CBDM の実現においては以下のシステム要件が必要とされている [10].

- システム要件を 8 個箇条書きで書く...

上記の要件はいずれも現在の IoT 技術で実現が可能であり、共生型モノづくりに実現は現実味を帯びてきている。

以上の背景から Factory Of the Future においてリソースの相互融通に着目した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の概念が提案された [11].

1.3.2 クラウドソースドマニュファクチャリング

Factory Of the Future においてクラウドソースドマニュファクチャリングとは、企業間で設備・材料・労働力・工法を融通し合う、共生に着目した生産形態であると記されている [11]。以下にその概念図を示す。

- *Factory Of the Future* に載っている図を引用する...

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、従来のモノづくりの形態にはなかった以下のメリットがあると考え [12]。

- 垂直統合にはないメリットを 2 つほど箇条書きで説明する...

このようにクラウドソースドマニュファクチャリングにおいては様々な独立した企業が参加し、リソースを相互に融通することで、従来より効率的な生産システムが実現する。

-
- リソース融通方法に他にどんなものがあるかを述べる...
-

1.4 研究目的

前節で述べたクラウドソースドマニュファクチャリングの共生の実現には、独立した企業が参加する状況下でも成り立つ企業間のリソース配分の仕組みが必要であるとされている [13]。この問題に対して、目的の資源配分を自律的に実現する仕組みの設計を目標としたメカニズムデザインの観点、特に金銭取引を伴った資源配分を扱うオークションの知見が役立つと考える。実際に、メカニズムデザインの観点を考慮したリソース配分に関する研究は行われつつある [14][15]。しかし数は少なく、特に取引価格まで同時に決めることができるオークションに基づく研究は見当たらない。

そこで本研究では、クラウドソースドマニュファクチャリング実現に向けたリソース配分手法を提案する。特に買い手・売り手の双方が入札を行える組合せダブルオークションに基づくに着目し、オークションにおいて重要とされるパレート効率性を満たす手法、耐戦略性を満たす手法の 2 つ手法を提案する。そして計算機実験を行うことでそれぞれの手法の特性を解析を行うとともに、現実を想定したケーススタディを行い、両手法の位置付けを明らかにする。

1.5 本論文の構成

- 構成を書く...

第2章 クラウドソースドマニュファクチャリング に対するオークションの適用

2.1 諸言

本章ではオークションを適用したクラウドソースドマニュファクチャリングモデルについて説明を行う。そしてオークションについての説明を行い、本研究で用いる組合せダブルオークションについて詳細な説明を行う。

2.2 対象モデル

本研究の対象であるクラウドソースドマニュファクチャリングに、オークションを適用したモデル図を Fig. 2.1 に示す。

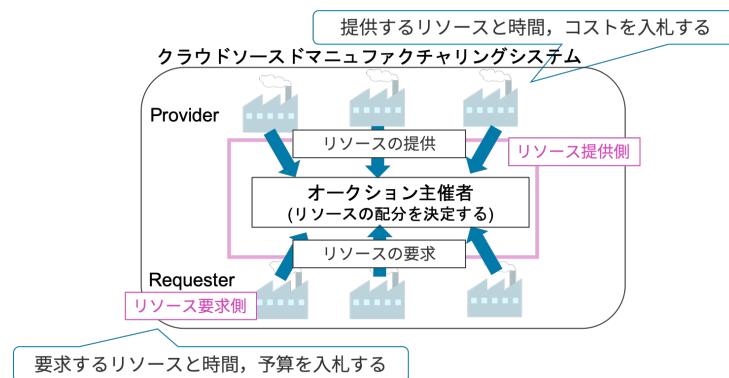


Fig. 2.1: Crowdsourced Manufacturing

リソースの提供側とリソースの要求側、そしてオークション主催者が存在する。それぞれの主体について説明する。

- リソース要求企業: 要求するリソースの時間, 予算を入札する。
 - ー 予算はこの価格でリソースを使用すると利益が出ない価格とする。
- リソース提供企業: 提供するリソースの時間, コストを入札する。
 - ー コストはこの価格でリソースの提供をしてしまうと利益が出ない値とする。

- オークション主催者:リソース提供・要求企業の入札を元にリソースの配分と、取引価格を決定する。
 - － 本研究においてはオークション主催者の利益は考慮しないものとする。

2.3 オークション

本節ではオークションに関する一般的な説明を行った上で、本研究で行う組合せダブルオークションについて説明する。

2.3.1 オークションとは

オークションは、分散化された意思決定下において、財の配分と取引価格を決めるルールのことを指す [16]。近年周波数帯オークション、ネット広告オークションでの成功から更に注目が集まっている [17]。

オークションの説明に使用される用語を以下に示す [16]。

- 財:オークションにおいて取引される資源のこと。
- 入札:財に対する評価値を表明すること。
 - － この値を入札値と呼ぶ。
- 準線形環境:金銭と効用 (利益) が交換可能な環境のこと。
 - － オークションではほとんどの場合で準線形環境を仮定する。
- 買い手:金銭を払って財を入手することで利益を得たい主体のこと。
 - － 買い手の利益は財を入手するのに必要だった価格と評価値の差である。
 - * 例. 評価値 1000 円の財を 500 円で買った買い手の利益は 500 円となる。
- 売り手:財を売って金銭を得ることで利益を得たい主体のこと。
 - － 売り手の利益は実際に受け取った報酬と評価値の差である。
 - * 例. 評価値 500 円の財を 1000 円で売った売り手の利益は 500 円となる。
- 真の評価値:その値で財の取引を行うと、利益が 0 となる値のこと。
- オークション主催者:ある目的を達成するために入札を元に財の配分と価格を決める主体のこと。
 - － オークションの目的は参加者の効用の合計 (社会的余剰) の最大、つまり総利益の最大となることが多い。

2.3.2 オークションの財に関する分類

まずオークションに掛けられる財の種類による分類を説明する。

単一財オークション

オークションにかけられる財が1つであるオークションのことを単一財オークションと言う。

複数財オークション

オークションにかけられる財が複数財であるオークションのことを複数財オークションと言う。その中でもさらに複数ユニットオークションと組合せオークションの2つに分類される。

複数ユニットオークション 同じ種類の財が複数単位かけられるオークションを複数ユニットオークションと言う。

組合せオークション 複数種類の財が複数単位オークションにかけられ、入手できる組合せによって財の価値が変わるオークションを組合せオークションと言う。組合せオークションでは財の組合せに対して入札が可能である。組合せオークションでは、財同士の価値の間に依存関係がある場合が存在する。例えば、メモリとパソコンのように、メモリだけでは無価値で、またメモリが少ないPCが使い勝手が悪いと言うように、同時に所有できると価値が高まるなどの関係である。

2.3.3 オークションの入札に関する分類

次にオークションの入札を誰が行うかに着目した分類の説明を行う [17]。

シングルオークション (シングルサイドオークション)

入札を行う主体が買い手または売り手の片方である場合をシングルサイドオークションと言う。シングルサイドオークションの場合、入札者がオークション主催者の役割を担うことが多い。また売り手のみが入札を行うオークションを特にリバースオークションと呼ぶ場合もある。

ダブルオークション (ダブルサイドオークション)

入札を行う主体が買い手、売り手の双方である場合をダブルサイドオークションと言う。

2.3.4 オークションの評価指標

本節ではオークションが満たすべきとされる性質を説明する。

個人合理性

オークションに参加することで損をする者がいない性質を個人合理性と言う。個人合理性を満たさないオークションはオークションに参加することで損をしてしまう可能性があるため、参加者を集めることが極めて困難になる。

パレート効率性

誰かの効用を下げることに、他の誰かの効用を高めることができない状態をパレート効率的であると言う。そのような状態を導くオークションのことをパレート効率性を満たすオークションと言う。例えば、総利益が最大化されている状態はパレート効率な状態であり、ある誰かの利益を下げない限り他の誰かの利益を上げることはできない。

耐戦略性

正直に真の評価値を申告することが支配戦略であるオークションを耐戦略性を満たすオークションと言う。つまり耐戦略性を満たすオークションでは、財に対する真の評価値をそのまま申告することが自分の利益を最大化する為の支配戦略となる。この性質を満たさないオークションは以下2点の欠点がある。

- オークション主催者が目指したい結果を正しく導くことができない
 - － オークション主催者は入札者の評価値を元に財の配分を決める。しかし耐戦略性を満たさないオークションはその評価値が真の値とは限らず、導いた結果が本来の目的を達成できているかがわからない。
- 入札者にとって使いづらいオークションになる
 - － 耐戦略性を満たさないオークションの場合正直な評価値の申告が支配戦略でないため、どのような評価値で入札するべきかを考える必要がある。

2.3.5 代表的なオークションの例

本節では代表的なオークションについて説明する。

ファーストプライスオークション

ファーストプライスオークションは、勝者となった入札者の入札値で取引を行うオークションである。オークション主催者に対して利益を考慮した値を入札値として提出する。ファーストプライスオークションを以下に示す。

- ルール

- － 財に対する入札を一度だけ行う。
 - * 入札値はオークション主催者にしか公開されない
- － 一番入札値が高い入札者がその入札値でその財を得ることができる (リバースオークションの場合は一番低い入札値の入札者が売ることができる)

- 分類

- － 単一財オークション
- － シングルサイドオークション

- 性質

- － 個人合理性○
- － パレート効率性×
- － 耐戦略性×

ファーストプライスオークションはオークションはルールがシンプルであり, また自分の入札値で取引が行われることから透明性が求められるネット広告オークションに使用される [18]. しかし耐戦略性を満たせず, 支配戦略が存在しないので, 入札戦略が複雑になるなどのデメリットが存在する.

セカンドプライスオークション

セカンドプライスオークションは, 単一財オークションであり, 耐戦略性を満たすオークションである. 勝者の取引価格は, このオークションで勝者として留まれる最小 (最大) の価格となっている. またこの価格を critical price と呼ばれる. セカンドプライスオークションは以下の特徴を持つ.

- ルール

- － 財に対する入札を一度だけ行う
 - * 入札値はオークション主催者にしか公開されない
- － 一番入札値が高い入札者が勝者となり, その次に高い入札者の入札値 (二位の価格) でその財を得ることができる (リバースオークションの場合は一番低い入札値の入札者が, その次に低い入札値で売ることができる)

- 分類

- － 単一財オークション

- シングルサイドオークション

- 性質

- 個人合理性○
- パレート効率性○
- 耐戦略性○

セカンドプライスオークションは、二位の価格と財に対する真の評価値との差がオークションの勝者となった入札者の利益となる。このオークションは個人合理性・パレート効率性・耐戦略性を満たすことができる。現実の適用例としては、Yahoo オークションなどが挙げられる [19]。

ザラバ方式

- ダブルオークションの例として証券取引のザラバ方式を取り上げる...

2.4 組合せダブルオークション

本節では提案する 2 種類の組合せダブルオークションに基づいたリソース配分手法の共通部分について説明をする。

その準備としてまず、シングルサイド組合せオークションの代表的なオークションである VCG (Vickrey–Clarke–Groves Auction) オークション [20] について説明をする。

VCG オークション (Vickrey–Clarke–Groves Auction)

VCG オークションはセカンドプライスオークションを一般化し、財の組合せに対する入札に対応したものである。理論的に優れた性質 (個人合理性・パレート効率性・耐戦略性) を持つことから King of Mechanisms とも呼ばれる。VCG オークションは以下の特徴を持つ。

- ルール

- 財に対する入札を一度だけ行う。
 - * 入札値はオークション主催者にしか公開されない。
- 財の配分 (オークションの勝者) は目的が総利益最大である組合せ最適化問題を解くことで決定される。
 - * この問題を勝者決定問題と呼ぶ。
- オークションの勝者は勝者として留まれる最小の価格を支払う。
 - * 価格を決める式は後述する。

- 分類

- 組合せオークション
- シングルサイドオークション
- 性質
 - 個人合理性○
 - パレート効率性○
 - 耐戦略性○

以下 VCG オークション勝者決定問題、価格の決定方法について詳しく説明し、その後で性質について詳しく説明する。ただし、買い手が入札の場合について説明する。

勝者決定問題の定式化 VCG オークションの勝者を決める勝者決定問題は、組合せ最適化問題として定式化される。

定式化に用いる記号の定義は以下の通りである。

- j : 買い手 $j \in \mathbf{J}$
- n : 買い手 j の入札 $n \in \mathbf{N}$
- $f_{j,n}$: 買い手 j の n 番目の入札の評価値
- $a_{j,n,r}$: 買い手 j の入札 n に財 r が含まれるとき 1, 含まれないとき 0 となる定数
- r : オークションにかけられる財 $r \in \mathbf{R}$
- $V(\mathbf{J})$: 提供企業の集合が \mathbf{J} であるときの勝者決定問題の目的関数値

上記の記号を用いて勝者決定問題を定式化する。

$$\max \quad V(\mathbf{J}) = \sum_{j \in \mathbf{J}} \sum_{n \in \mathbf{N}} f_{j,n} \times x_{j,n} \quad (2.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in \mathbf{J}} \sum_{n \in \mathbf{N}} a_{j,n,r} \times x_{j,n} \leq 1 \quad (\forall r) \quad (2.2)$$

$$\sum_{n \in \mathbf{N}} x_{j,n} \leq 1 \quad (\forall j) \quad (2.3)$$

$$x_{j,n} \in \{0, 1\} \quad (\forall j, \forall n) \quad (2.4)$$

決定変数は $x_{j,n}$ であり、この値が 1 のとき入札者 j の入札 n が勝者となり入札に含まれる財が落札され、この値が 0 のときに入札者 j の入札 n は敗者となる。式 (2.1) は目的関数であり、入札値の合計の最大化を表す。式 (2.2) は財を落札できるのは高々 1 入札者であることを表す制約である。これは財の容量制約を表す。

価格の式 VCG オークションにおいて勝者となった j の入札 n の支払い価格 pay_j は以下のよう
に定まる。

$$pay_j = -\{-f_{j,n} + V(\mathbf{J})\} + V(\mathbf{J} \setminus j) \quad (2.5)$$

$V(J \setminus j)$ は j を除いたオークションの勝者決定問題の目的関数値を表す．また， $\{-f_{j,n} + V(J)\}$ は目的関数値から，支払いを決めようとする入札の入札値を除いた値である．よって pay_j は j の評価値に関わらず決定されている．

性質の証明

- **VCG が耐戦略性や個人合理性を示すことを説明する**

従来の製造業における組合せオークションを応用した研究では，シングルサイドオークションが多く扱われてきた [21]．しかし本研究のクラウドソースドマニュファクチャリングにおいては，リソース提供企業・リソース要求企業の双方の意思を反映させる為に，ダブルオークションを適用する．そうすることで，提供企業と要求企業の総利益が最大化される配分を求めることを可能とした．本研究で行う組合せダブルオークションは以下の特徴を持つ．

- 入札者

- 提供側

- ＊ 複数ユニットオークション

- ・ リソース複数単位 (複数時間) 提供することが可能である．

- 要求側

- ＊ 組合せオークション

- ・ 全てのリソースが揃わないと製品を作るが出来ず，利益を得ることが出来ないからである．

- オークションの目的

- 提供企業，要求企業の総利益の最大化とする．

2.5 共通の流れ

提案するリソース配分手法は，大きく分けて入札作成部分と，オークション主催者のリソース配分と取引価格決定部分の 2 つからなる．

1. 入札作成

- リソース提供企業はオークション主催者に入札を行う．
 - 文字を使ってどのような入札を作成するかを説明する...
- リソース提供企業はオークション主催者に入札を行う．
 - 文字を使ってどのような入札を作成するかを説明する...

2. オークション主催者はリソースの配分と，取引価格の決定する．

2.5.1 入札作成

2の部分の具体的なアルゴリズムは次章以降で説明する．ここでは1の入札作成について例を用いて説明する．

- 図を使い入札の例を示す...

2.5.2 評価指標

本研究で提案するリソース配分手法の評価指標について述べる．オークションの観点の評価指標は以下の2つである．

- パレート効率性
 - － 総利益の値を評価する．
- 耐戦略性
 - － 虚偽申告を行ったある1企業の利益を評価する．

クラウドソースドマニファクチャリングの観点の評価指標は以下の6つとする．

- 総提供企業利益
 - － 提供企業の利益の合計を評価する．
- 総要求企業利益
 - － 要求企業の利益の合計を評価する．
- 1 提供企業利益
- 1 要求企業利益
- 提供企業の稼働率の変化
 - － リソースを提供する前と提供した後での稼働率の増加分について評価する．
- 勝者となった要求の割合
 - － 全要求企業の内，勝者となった要求の割合について評価する．

次章以降では，以上の評価指標を用いて手法I:パレート効率性を満たす手法・手法II:耐戦略性を満たす手法の特性を評価する．

2.6 結言

- 結言を述べる...

第3章 手法I:パレート効率性を満たす手法

3.1 アルゴリズム

手法I:パレート効率性を満たす手法のアルゴリズムについて説明する.

3.1.1 概要

以下に本手法のアルゴリズムの流れを示す.

1. 入札作成

- リソース提供企業はオークション主催者に対して, 入札を作成する.
- リソース要求企業はオークション主催者に対して, 入札を作成する.

2. オークション主催者は, 入札を元に勝者決定問題を解くことでリソース配分を決定する.

3. オークション主催者は, リソースの取引価格を決定する.

1 に関しては, 前節の入札を作成をし, 2, 3 について次節以降で説明する. 説明に使用する記号の定義を以下に示す.

- i : リソース提供企業 ($i \in I$)
- j : リソース要求企業 ($j \in J$)
- r : オークションにかけられるリソース ($r \in R$)
- $c_{i,r}$: 提供企業 i が提供するリソース r のコスト
- $TP_{i,r}$: 提供企業 i がリソース r を提供する時間
- n : 要求企業 j の入札 ($n \in N$)
- $v_{j,n}$: 要求企業 j の n 番目の入札の評価値
- $TR_{j,n,r}$: 要求企業 j の n 番目の入札においてリソース r を要求する時間
- $P(I, J)$: 提供企業の集合が I , 要求企業の集合 J であるときの勝者決定問題
- $V(I, J)$: 問題 $P(I, J)$ の目的関数値
- $trade_{i,r,j,n}$: 提供企業 i が要求企業 j の勝者となった入札 n に対してリソース r を $x_{i,r,j,n}$ [Ts] 提供するときの取引価格
- $sumTR_{j,n,r}$: 要求企業 j が入札 n におけるリソース要求時間の合計

3.1.2 リソース配分の決定

リソースの配分を決める勝者決定問題 $P(I, J)$ は組合せ最適化問題として定式化される．以下にその定式化を示す．

$$\max \quad V(I, J) = \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} v_j \times y_{j,n} - \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} c_{i,r} \times x_{i,r,j,n} \quad (3.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} x_{i,r,j,n} \leq TP_{i,r} \quad (\forall i, \forall r) \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} x_{i,r,j,n} = 0 & (\forall i, \forall r) & (\text{if } y_{j,n} = 0) \\ \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} TR_{j,n,r} \times x_{i,r,j,n} = TR_{j,n,r} & (\forall i, \forall r) & (\text{if } y_{j,n} = 1) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\sum_{n \in N} y_{j,n} \leq 1 \quad (\forall j) \quad (3.4)$$

$$x_{i,r,j,n} \in \mathbf{Z} \quad (3.5)$$

$$y_{j,n} \in 0, 1 \quad (3.6)$$

決定変数は $x_{i,r,j,n}$ と $y_{j,n}$ である． $x_{i,r,j,n}$ は企業 i と企業 j がリソース r を取引する量を表す整数変数であり， $y_{j,n}$ は企業 j の入札 n が選ばれるとき 1，選ばれない時 0 となる変数である．式 (3.1) は目的関数であり，総利益最大化を表す．式 (3.2) は提供企業のリソースの容量制約を表す．式 (3.3) は組合せ入札に関する制約であり，要求企業 j の入札 n が選ばれないときは，どのリソース要求も満たさないための制約，要求企業 j の入札 n が選ばれるときは，その入札のリソース要求を全て満たすための制約である．式 (3.4) は勝者となる要求企業の入札は高々 1 つとする制約である．この組合せ最適化問題を解くことで勝者となる要求企業の入札と，それに対する提供リソースの配分を決定する．また，問題 $P(I, J)$ の最適解は総利益が最大化されているので，パレート効率な状態となっている．

3.1.3 取引価格決定

前節のリソース配分を元に取引価格 $trade_{i,r,j,n}$ を決定する．手法 I の取引価格はお互いの評価値の平均の価格から決定され，以下の式で表される．

$$trade_{i,r,j,n} = \frac{c_{i,r} + \{v_{j,n} \times \frac{TR_{j,n,r}}{\sum TR_{j,n}} / TR_{j,n,r}\}}{2} \times x_{i,r,j,n} \quad (3.7)$$

$$\sum TR_{j,n} = \sum_{r \in R} TR_{j,n,r} \quad (3.8)$$

$\sum TR_{j,n,r}$ は要求企業 j が入札 n におけるリソース要求時間の合計である．よって式 (3.7) の $v_{j,n} \times \frac{TR_{j,n,r}}{\sum TR_{j,n}} / TR_{j,n,r}$ はリソース r の 1[Ts] 分の予算を表す．従って式 (3.7) はお互いの評価値の平均で取引を行っていることとなる．

3.1.4 特徴

手法 I は問題 $P(\mathbf{I}, \mathbf{J})$ の最適解に従いリソースの配分を決めるので、パレート効率な配分が実現される。しかし取引価格は、お互いの評価値の平均をとるので、この価格は提供企業、要求企業ともに critical price となっておらず耐戦略性を満たすことはできない。

3.2 特性評価

本節では計算機実験により手法 I の特性を評価する。問題 $P(\mathbf{I}, \mathbf{J})$ の求解には数理計画ソルバー CPLEX を用いる。共通の実験条件を以下に示す。ただし $[\min, \max]$ は \min から \max の一様乱数とする。

- 提供企業 $|\mathbf{J}| = 25$
 - 各企業 2 種類のリソースを遊休時間に提供する
 - 遊休時間 $TP_{i,r}$ [Ts] を $[100, 200]$ で決定する
 - コスト $c_{i,r}$ は $[2.0, 4.0]$ [円] とする
- 要求企業 $|\mathbf{I}| = 10$
 - 各企業 $|\mathbf{N}|=3$ 個の入札を作成
 - R 種類のリソースを各 $[0, 200]$ [Ts] 要求する
 - 予算 $v_{j,n}$ は合計要求時間と重み $[3.0, 5.0]$ の積 [円] とする

3.2.1 1 提供企業の虚偽申告率の変更

本節では 1 提供企業の虚偽申告率を変更する実験を行う。主に手法 I は耐戦略性を満たせず、真の評価値の申告が支配戦略でないことを確認する。虚偽申告率とは、コストにある割合分上乘して入札値として申告するとした際の、その割合のことを指す。例えば、コストが 10 円、虚偽申告率が 10% の場合は 11 円と入札する。

以下に本実験における実験条件を示す。

- 1 提供企業の虚偽申告率: 0%, 10%, 20%, 30%
 - 虚偽申告が 0% のときは正直にコストを申告する。
- 試行回数: 1 回

実験結果

tbl. 3.1~tbl. 3.4 はそれぞれ総利益、総提供企業利益、総要求企業利益、虚偽申告を行った 1 企業の利益を示す。

Table 3.1: Total Profit in Method 1: A provider report false cost

False reporting rate	0%	10%	20%	30%
Total Profit	9175.28	9175.22	9175.22	9049.41

Table 3.2: Providers Total Profit: in Method 1: A provider report false cost

False reporting rate	0%	10%	20%	30%
Providers Total Profit	4587.64	4613.49	4639.38	4524.70

Table 3.3: Requesters Total Profit in Method 1:A provider report false cost

False reporting rate	0%	10%	20%	30%
Requesters Total Profit	4587.64	4561.72	4535.84	4524.70

Table 3.4: False reporting Requester Profit in Method 1: A provider report false cost

False reporting rate	0%	10%	20%	30%
Requester Profit	112.47	139.30	227.77	0

考察

tbl. 3.4において、虚偽申告率が20%まで利益が増加している。20%から30%にかけて利益が下がったのは、申告したコストが高くなり、リソースの配分が変わり、オークションにおいて勝者となることができなくなってしまったからだと考える。よってオークションの敗者になるまで、虚偽申告を行うことで利益を上げることが可能なことがわかる。tbl. 3.1の虚偽申告率0から20%総利益があまり変化がないにも関わらず、tbl. 3.2において総提供企業利益が増加し、tbl. 3.3において総提供企業総要求企業利益が減少している。従って虚偽申告により、利益が提供企業に移転していることが確認できる。

- 3.2.2 1 要求企業の虚偽申告率の変更
- 3.2.3 虚偽申告を行う提供企業数の変更
- 3.2.4 虚偽申告を行う要求企業数の変更
- 3.2.5 提供側が申告するコストの幅の変更
- 3.2.6 要求企業が申告する予算の幅の変更

第4章 手法II:耐戦略性を満たす手法

4.1 アルゴリズム

4.1.1 概要

4.1.2 入札作成

4.1.3 勝者決定

4.1.4 提供側の勝者と取引価格決定

4.1.5 要求側の勝者と取引価格決定

4.2 特性評価

4.2.1 提供企業数の変更

4.2.2 要求企業数の変更

4.2.3 提供企業数の変更

4.2.4 1 提供企業の虚偽申告率の変更

4.2.5 1 要求企業の虚偽申告率の変更

4.2.6 虚偽申告を行う提供企業数の変更

4.2.7 虚偽申告を行う要求企業数の変更

4.2.8 提供側が申告するコストの幅の変更

4.2.9 要求企業が申告する予算の幅の変更

第5章 現実を想定したケーススタディ

第6章 結論

6.1 まとめ

6.2 今後の展望

参考文献

- [1] 水平分業と垂直統合、どちらのビジネスモデル手法が優れているのか？ — クラウド *ERP* 実践ポータル. <https://www.clouderp.jp/blog/best-business-model.html>. (Accessed on 12/20/2019).
- [2] *Industrial Valuechain Initiative* – つながるものづくり. <https://iv-i.org/wp/ja/>. (Accessed on 12/20/2019).
- [3] K. Ashton. “That’Internet of Thing.,” in: *RFiD Journal* 22 (2009).
- [4] *IoT とは？ (Internet of Things)* — AWS. <https://aws.amazon.com/jp/iot/what-is-the-internet-of-things/>. (Accessed on 12/20/2019).
- [5] Kagermann, Wolfgang Wahlster, and Johannes Helbig. “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0”. In: *Final report of the Industrie 4.0 WG* April (2013).
- [6] Peter C Evans and Marco Annunziata. “Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines”. In: *General Electric* January 2012 (2012), p. 37.
- [7] 総務省 | 平成 27 年版 情報通信白書 | シェアリング・エコノミーとは. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc242110.html>. (Accessed on 12/20/2019).
- [8] ものづくり : *Factories on Demand* : 研究開発 : 日立. https://www.hitachi.co.jp/rd/portal/highlight/vision_design/future/manufacturing/index.html. (Accessed on 12/20/2019).
- [9] Dazhong Wu et al. “Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art”. In: *Journal of Manufacturing Systems* 32.4 (2013), pp. 564–579. ISSN: 0278-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.008>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612513000411>.
- [10] Dazhong Wu et al. “Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation”. In: *Computer-Aided Design* 59 (2015), pp. 1–14. ISSN: 0010-4485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.07.006>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448514001560>.
- [11] IEC. *Factory of the future*. [Online]. Available : <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-futurefactory-LR-en.pdf>. [Accessed 22 12 2017]. 2105.
- [12] Yoshiteru KATSUMURA, Yuuichi SUGINISHI, and Toshiya KAIHARA. “A study of manufacturing effectiveness on cloud-based manufacturing system”. In: *Transactions of the JSME (in Japanese)* 82.835 (2016), pp. 15–00430–15–00430. ISSN: 2187-9761. DOI: 10.1299/transjsme.15-00430.

- [13] Einollah Jafarnejad Ghomi, Amir Masoud Rahmani, and Nooruldeen Nasih Qader. “Cloud manufacturing: challenges, recent advances, open research issues, and future trends”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.9-12 (2019), pp. 3613–3639. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-03398-7.
- [14] Joseph Thekinen and Jitesh H. Panchal. “Resource allocation in cloud-based design and manufacturing: A mechanism design approach”. In: *Journal of Manufacturing Systems* 43 (2017). High Performance Computing and Data Analytics for Cyber Manufacturing, pp. 327–338. ISSN: 0278-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.08.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612516300528>.
- [15] Takafumi CHIDA et al. “Stability analysis on resource matching in crowdsourced manufacturing クラウドマニユファクチャリングにおけるリソースマッチングの安定性に関する考察”. In: *Transactions of the JSME (in Japanese)* 85.870 (2019), pp. 18–00293–18–00293. DOI: 10.1299/transjsme.18-00293.
- [16] ”川越 敏司”. ”マーケット・デザイン オークションとマッチングの経済学”. ”講談社”, 2015.
- [17] ”横尾 真”. ”オークション理論の基礎: ゲーム理論と情報科学の先端領域”. ”東京電機大学出版局”, 2006.
- [18] Google. ファーストプライス オークションへの移行スケジュール - Google アド マネージャーヘルプ. <https://support.google.com/admanager/answer/9298211?hl=ja>. (Accessed on 12/26/2019).
- [19] Yahoo!JAPAN. ヤフオク!ヘルプ-入札のしくみ (自動入札と最高入札額). https://www.yahoo-help.jp/app/answers/detail/p/353/a_id/40662/~. (Accessed on 12/26/2019).
- [20] William Vickrey. “Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders”. In: *The Journal of finance* 16.1 (1961), pp. 8–37.
- [21] 杉之内将大 et al. “組合せオークションとフェロモンを用いた顧客と企業の交渉・協調による日程計画および部品選定の同時最適化手法に関する研究”. In: システム制御情報学会論文誌 31.2 (2018), pp. 49–57.