

ブロックチェーンを用いたクラウドソーシングのワーカ評価システム

許斐 健太[†] 上山 憲昭^{††}

[†] 福岡大学 大学院 工学研究科 電子情報工学専攻 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

^{††} 福岡大学 工学部 電子情報工学科 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: [†]td192003@cis.fukuoka-u.ac.jp, ^{††}kamiyama@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 近年クラウドソーシングが新たなサービス提供方式として注目され、普及が広がっている。しかしクラウドソーシングではサービス事業者が単独の場合、ワーカに関するすべてのデータをサービス事業者が管理するため、集中管理サーバがサイバー攻撃をうけた場合、管理データや、ワーカのタスク依頼の指標として用いられるワーカ評価スコア値の書き換えや破損が懸念される。またサービス事業者の従業員や、サービス事業者自体によるワーカの評価スコアの故意の書き換えが懸念される。これらの問題を解決するため、本稿ではブロックチェーンを用いてクラウドソーシングのワーカの評価スコアを管理することを提案する。さらに複数の評価尺度からワーカを評価するために、各評価尺度の分散に応じて各評価尺度を重みづけられるようエントロピー重み付け法を用いた評価スコアの更新法を提案する。そして自転車に取り付けた加速度センサから測定した運転状況データを用いた計算機シミュレーションにより、提案方式をUber eats といった食品宅配サービスのワーカ評価に適用した場合を例に、その有効性を確認する。

キーワード クラウドソーシング, 評価スコア, ブロックチェーン

Managing Scores of Crowdsourcing Workers Using Blockchain

Kenta KONOMI[†] and Noriaki KAMIYAMA^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Fukuoka University
8-19-1, Nanakuma, Jounan, Fukuoka 814-0180

^{††} Department of Electronic and Information Technology, Faculty of Engineering, Fukuoka University
8-19-1, Nanakuma, Jounan, Fukuoka 814-0180

E-mail: [†]td192003@cis.fukuoka-u.ac.jp, ^{††}kamiyama@fukuoka-u.ac.jp

Abstract In recent years, services using crowdsourcing have attracted a wide attention. However, in the crowdsourcing, a single service provider manages all the data related to workers, so worker data will be destroyed or manipulated when the service provider is attacked by attackers. Moreover, employee of the service provider might manipulate the data of workers. To solve these issues, we propose to manage the evaluation scores of workers using the blockchain in this manuscript. Moreover, to weight each evaluation criterion based on the distribution of each criterion of workers, we propose to update the evaluation scores of workers using the entropy weight method. Through the computer simulation using the data of cycling conditions obtained by the motion sensor of smartphone attached to a bicycle, we evaluate the effectiveness of the proposed system when applied to worker evaluation of food delivery service, e.g., uber eats.

Key words crowdsourcing, rating score, blockchain

1. はじめに

近年、不特定多数のユーザが様々なサービスを提供することで、サービス事業者が様々なサービスを実現するクラウドソーシングが注目され普及が進んでいる。クラウドソーシングは依頼者、ワーカ、クラウドソーシングの3者で構成され、ワーカは

難易度が様々なタスクの中から自身が実行可能なタスクを選択し実行する。タスク完了後、結果データをクラウドソーシングに提出する。その後依頼者が依頼したタスク結果に合っていると判断されるとタスクの対価としてワーカは報酬を受け取ることができる。クラウドソーシングを使用したサービスとしては、アメリカではAmazon 社が行っている Amazon Mechanical

Turk [1], 最近ではアメリカだけでなく日本でも普及している Uber 社の Uber Taxi や Uber Eats, 日本のみで流行っている サービスとして単純作業からソフトウェア開発や web 開発まで 依頼できるランサーズ社のランサーズなどがある。

これらのサービスはサービス会社独自で行っているものがほとんどであるため、すべてのサービス利用者のデータを会社独自で集中管理している。そのため 2 点の問題が考えられる。1 つ目は集中管理されたサーバが攻撃されると管理されているデータの書き換えやワーカーのタスクを依頼する指標としての評価スコアの書き換えや破損などの可能性が考えられる。2 つ目はサービス利用者のデータを集中管理しているため、サービスを行っている会社の従業員によるワーカーの評価データの書き換えが起こる可能性が考えられる。これら 2 点の問題点を改善するためには、ブロックチェーンを活用することが有効である。

ブロックチェーンを使用することで保存したデータを分散管理でき、また一定期間ごとにデータからブロックを生成し、前ブロックのハッシュ値を次ブロック中に含めることで前後のブロックを関連づけることで、データの改変が非常に困難である。さらに利用者をアドレスで管理するため利用者のプライバシー情報を秘匿化することが可能である。また Ethereum と呼ばれるブロックチェーンを使用することでデータ以外にプログラムも保存可能である。

そこで本稿ではブロックチェーンを用いたクラウドソーシングでのワーカー評価システムを提案する。そして複数の評価尺度を考慮してワーカーを評価するため、各評価尺度を適切な重みで考慮できるエントロピー重み付け法を用いた評価スコアの更新法を提案する。そして自転車に取り付けた加速度センサから測定した運転状況データを用いた計算機シミュレーションにより、提案方式を Uber eats といった食品宅配サービスのワーカー評価に適用した場合を例に、その有効性を確認する。以下 2 節ではブロックチェーンについて説明し、3 節で既存研究について述べる。そして 4 節では本稿で提案するクラウドソーシングでのワーカー評価システムを説明し、5 節で提案システムの数値評価を行い、6 節で全体をまとめる。

2. ブロックチェーン

ブロックチェーンはデータやプログラムを分散管理できるシステムである。パブリックなブロックチェーンに参加したいユーザはブロックチェーンのアプリケーションを動作させることでだれでも参加が可能である。データはブロック単位で保存され、チェーン上に繋がっていく。これはあるブロックはひとつ前のブロックのハッシュ値を保持しているためである。

ビットコインに代表されるブロックチェーンでは主に PoW (Proof of Work) と呼ばれる方法でブロックが保存される。PoW とは暗号計算が行われ、ある値以下になると正解となり、正解を見つけたユーザが新たにブロックを保存する仕組みである。ブロックが生成される間隔は PoW では暗号計算が行われるユーザの計算能力の向上や暗号計算を行うユーザ数の増加に関係なく、一定の間隔になるように調整される。例えばビットコインでは 10 分に 1 回、Ethereum では 15 秒に 1 回、

一定間隔でブロックが生成される [2]。

またブロックチェーンにはブロックチェーンを管理できるユーザの種類に応じて、プライベートチェーン、コンソーシアムチェーン、パブリックチェーンと 3 種類のチェーンが存在する。プライベートチェーンは作成者のみが、コンソーシアムチェーンは承認されたユーザのみがブロックチェーンの管理を行い、パブリックチェーンは誰でもブロックチェーンを管理することができる。

今回提案するシステムでは Ethereum と呼ばれるブロックチェーンの使用を想定する。Ethereum を使用する理由は、1 つ目にブロックの生成間隔が 15 秒に 1 回とブロックチェーンの中でもブロック生成間隔が短いため迅速にデータが保存されることである。2 つ目にスマートコントラクトと呼ばれる契約情報のプログラムを、Ethereum のブロックチェーンを詳しく知らなくてもプログラミング可能であり、Ethereum 上の EVM (Ethereum Virtual Machine) と呼ばれる仮想マシンで動作可能であるため容易にプログラムの作成と動作を確認することが可能であることである [3]。

3. 既存研究

ブロックチェーンを使用した研究では様々なものがある。例えば IoT (Internet of Things) デバイスを Ethereum を用いて管理する方法が提案されている。使用するユーザや端末である SAMC (Subject Attribute Management Contract), 使用するデバイスである OAMC (Object Attribute Management Contract), SAMC が OAMC をどのように使用するかの情報である PMC (Policy Management Contract), SAMC や OAMC と PMC をつなぐための情報である ACC (Access Control Contract), の 4 種類のスマートコントラクトを作成し、IoT デバイスを管理する方式が提案されている [7]。

また文献 [8] では Ethereum を使用し、ブロックチェーン上で電子投票を行うことが可能であることが述べられている。これは選挙を管理する中央機関がなくなることによって投票する票を操作されることがなくなることと、投票者が地理的にどこにいても投票することが可能になると言う 2 つの点が Ethereum を使用する利点と位置付けられている。さらに文献 [9] はブロックチェーンを用いた分散交通システムを提案している。分散交通システムとは道路の交差点から交差点までをセグメントとし、その道路の脇にビーコンと呼ばれる IoT 機器を配置し、車が通るたびに車のデータをブロックチェーンに記録し、車の通行量を管理する。またブロックチェーンに記録されたデータから事故の発生などで通行不能箇所が発生したときはブロックチェーンが分離し、通行可能になるとブロックチェーンが合併する。

また文献 [4] では個人の信用スコアをブロックチェーンで管理し、信用スコアのサービスを行っている企業などの一企業に依存することなく誰もが個人の信用スコアを評価できる仕組みが提案されている。この研究では個人の信用スコアを更新する方法にあるユーザの信用スコアの正しい値である真の信用スコアを定義している。また真の信用スコアと現在の信用スコアの値の差により信用スコアを更新する。そのため真の信用スコア

が与えられていない場合、ユーザの信用スコアが急に变化する可能性がある。

またクラウドソーシング分野ではワークに物理的に移動してもらい、実行するタスクを空間クラウドソーシングをプラットフォームとして、ワークが自分の位置情報をサーバに送信し、サーバがワークの近くのタスクを割り当て、その時に全体のタスク数の割り当てを最大化する最大タスク割り当て問題を定義している[5]。また文献[6]ではモバイルフォンセンシングと呼ばれるスマートフォンを利用したクラウドソーシングサービスが提案されている。クラウドソーシングサービスを行うプラットフォームはユーザに参加してもらうためのインセンティブを払うが、報酬をプラットフォーム側が決めるプラットフォーム中心モデルでのインセンティブメカニズムを設計している。

4. 提案システム

本節では本稿で提案するクラウドソーシングのワーク評価システムを説明する。便宜上、宅配サービスの配達者をワークとした場合を例に説明するが、本稿で提案するシステムは、他のクラウドソーシングサービスにも適用が可能である。

提案システムは図1に示すように、プラットフォーム層、ブロックチェーン層、配達者層の三層で構成される。プラットフォーム層はクラウドソーシングサービスを提供するサービス事業者が運用する層であり、サードパーティ製のソフトウェアまたは商用プラットフォームを用いて実現される。機能としては配達者の評価スコアを自転車の走行状態に基づき算出することである。ブロックチェーン層は既存のパブリックチェーンを使用し、現在動作しているEthereum上にシステムを保存する。機能としては配達者の識別子と評価スコア、システム利用者からの配達依頼情報の管理である。配達者層は配達を行うワークであり誰でも配達者になることができる。配達者はブロックチェーン層で管理されている配達依頼情報の中から、まだ配達が行われずかつ配達を行いたい配達を行う。

本システムではサービスを利用するための登録処理と、利用者の配達依頼から配達完了までの配達処理の2種類の処理を行う。また配達者はすべて自転車で配達を行うものとし、配達中は自転車に取り付けられたスマートフォンで加速度データを取得することを想定する。

プラットフォーム層と配達者層の間にブロックチェーン層を用いる目的は、ブロックチェーン層における配達者の匿名性の向上である。ブロックチェーン層ではすべての参加ユーザがブロック内のデータを閲覧できるため、配達人が誰かをブロックチェーン層で特定できないよう、配達人に関する情報はプラットフォーム層でのみ管理する。また配達処理では匿名で配達者が配達を行うことができ、評価スコアの更新も匿名で行うため登録処理以降はプラットフォーム層ではどの配達者がどの配達を行っているかを判断できないため、プラットフォーム層においては配達者の評価スコアの匿名性の向上が可能である。次に登録処理と配達処理について詳しく説明する。

4.1 登録処理

図2に登録処理の動作を示す。登録処理では配達者は配達

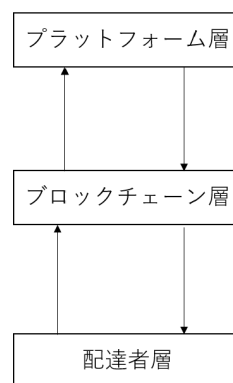


図1 提案システム構成

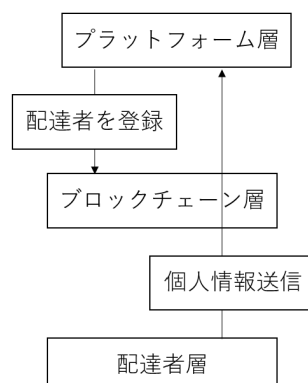


図2 登録処理の流れ

サービスを行うための登録をプラットフォーム層に個人情報を送信することで行う。プラットフォーム層は配達者から送られてきた個人情報を確認後、ブロックチェーン層に保存することで配達者がサービスを利用できるようになる。この時、ブロックチェーン層では配達者の識別子を匿名化して保存する。

4.2 配達処理

図3に配達処理の動作を示す。配達処理ではサービス利用者から配達依頼があるとプラットフォーム層に配達依頼が保存され、プラットフォーム層は配達を依頼する配達者を選択し、配達依頼を受けた配達者は配達を行う。配達終了後、配達中の走行データをブロックチェーン層に保存し、プラットフォーム層が配達中のデータを用いて評価スコアを更新する。最後にプラットフォーム層は更新した評価スコアをブロックチェーン層に保存する。

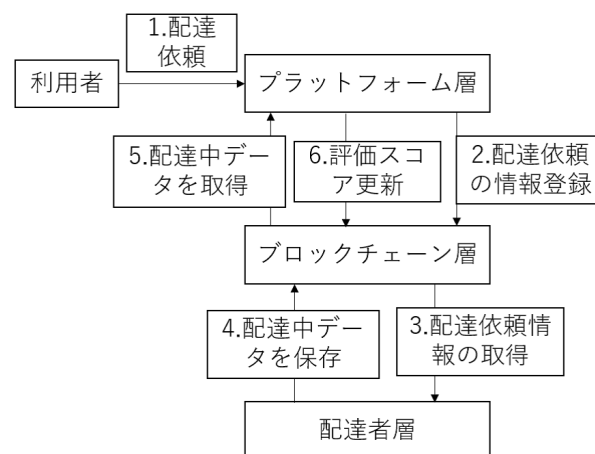


図3 配達処理の流れ

4.3 評価尺度

配達者の評価スコアを計算するための評価尺度としては、運転の安定性、平均速度、過去の評価値の3種類の尺度を使用する。運転の安定性は自転車の左右の加速度の標準偏差の逆数を使用し、値が大きほど運転が安定している状態であり、値が小さいほど運転が安定していない状態を意味する。平均速度は配達中の停止中以外の移動中の平均速度を使用する。過去の評

価スコアは1回目の更新では初期値を使用し、2回目以降の更新では前回の評価スコアを使用する。表1にこれら評価尺度をまとめる。運転の安定性、平均速度のデータについては主観的なデータは避け、客観的なデータを使用し、どの配達者が配達を行っても同じ基準で計測できるようなデータを使用する。

表1 配達者の評価スコアの評価尺度

評価尺度	使用したデータ	説明
運転の安定性	左右方向の標準偏差の逆数	値が大きいほど運転が安定
平均速度	停止中以外の平均速度	配達距離と配達時間から計算
過去の評価値	前回の評価スコア	初更新時は初期値を使用

4.4 エントロピー重み付け法

評価スコアの更新にはエントロピー重み付け法[11]を使用する。エントロピー重み付け法は複数の尺度からスコアを計算するときに、各々の尺度の分散に応じて各尺度を重みづけすることができる。分散が大きな尺度ほど、より重みを増すことで、複数の尺度の被評価者間のばらつきを考慮でき、尺度間の公平性が向上する。またエントロピー重み付け法は更新回数が少なくても評価スコアの値が安定するため、評価スコアの高い配達者と評価スコアの低い配達者の判別が容易である。エントロピー重み付け法を使用し更新する式を X とすると X は次式で定義される。

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

X_1 から X_n は各ワーカーの評価尺度を示す。 w_{11} から w_{nm} は各ワーカーの各評価尺度を示す。また w_{ij} の正規値 $\hat{w}_{ij}$ を次式で定義する。

$$\hat{w}_{ij} = \frac{\max w_{ij} - \min w_{ij}}{w_{ij} - \min w_{ij}} \quad (2)$$

次に各ワーカーの各評価尺度の重み v_{ij} を式(3)から以下のよう求める。

$$v_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_{ij}} \quad (3)$$

そして各評価尺度の情報エントロピー H_j を式(4)により算出する。

$$H_j = -\frac{\sum_{i=1}^n v_{ij} \ln v_{ij}}{\ln n} \quad (4)$$

情報エントロピーの値ごとに正規化処理した値 a_j を

$$a_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^4 (1 - H_j)} \quad (5)$$

より算出する。最後に式(6)のように各評価尺度の重みづけ和を計算することで、各ワーカーの評価スコアを更新する。

$$S_i = \sum_{j=1}^4 \hat{w}_{ij} a_j \quad (6)$$

式(2)から式(6)を繰り返すことで各ワーカーの評価スコアが更新される。

5. 性能評価

Pythonを使用し性能評価のためのシミュレータを作成した。安全な運転を行う配達者を500人、乱暴な運転を行う配達者を500人とした。プラットフォーム層はランダムに選択した配達者に配達を依頼する。またエントロピー重み付け法で1回に評価スコアを更新する配達者の人数は10人、50人、100人の2パターンを評価する。評価スコアの更新は全ワーカーが10回更新されるまで反復した。

配達者の運転の丁寧さに関するデータは、安全が確保された広場でスマートフォンを取り付けた状態の自転車を使用し、安全運転と乱暴な運転を各々行い、スマートフォンの左右の加速度センサのデータを計測し使用した。そして安全運転と乱暴運転のそれぞれにおけるデータを複数回、計測して安全運転と乱暴運転の各データセットの平均と標準偏差の値を求めたところ、安全運転については平均が0.759、標準偏差が0.0051、乱暴運転については平均が1.271、標準偏差が0.113であった。そして安全運転と乱暴運転の加速度センサ値の分布として、各々の集合の平均と標準偏差を有する正規分布を想定し、正規分布に従う確率でランダムに各ワーカーの運転の安定性のデータを与えた。

平均速度は平均14.6km/h、標準偏差3.1km/hの[10]、安全運転、乱暴運転を区別せずに正規分布を想定し、各ワーカーに対し、本正規分布に従いランダムに平均速度を与えた。過去の評価スコアは全配達者に対し初期値を0.5とした。また各ワーカーの運転の安定性と平均速度の値はシミュレーション中、変更しないものとした。

5.1 各運転グループの評価スコアの分布

図4と5に、エントロピー重み付け法での更新人数を10人とし、更新回数が1回と10回の時の安全運転と乱暴運転の各運転グループの、評価スコアの各範囲に含まれるワーカー数の分布を示す。同様に、図6と7に更新人数を50人としたときの、図8と9に更新人数を100人としたときの結果を示す。

図4と9より、エントロピー重み付け法での1回当たりの更新人数が10人の時は、更新回数が1回のときは安全運転も乱暴運転も評価スコアは正規分布に近い分布になっているが、更新回数が10回のときは安全運転のワーカーの評価スコアは全体的に高い値に、乱暴運転のワーカーの評価スコアは全体的に低い値にシフトしている。一方、更新人数が50人と100人の場合は、更新回数が1回のときは安全運転ワーカーも乱暴運転ワーカーも評価スコアが狭い範囲に重なっており、更新回数が10回のときは両グループの重なりは低減するものの、依然として重なりがみられる。更新人数が50人や100人のように1回あたりの更新人数が多い場合、各ワーカーの正規化した値が反映されにくい。ため、評価スコアの値が同じような値に集まると考えられる。

5.2 運転の安定性と平均速度と評価スコアの関係

次に各配達者の運転の安定性、平均速度と、評価スコアの間関係を調べる。図10, 11, 12に、各配達者の運転の安定性を横軸に、平均速度を縦軸に、評価スコアの値を色で区別してプロットする。プロットした色が赤に近づくほど評価スコアが高い配

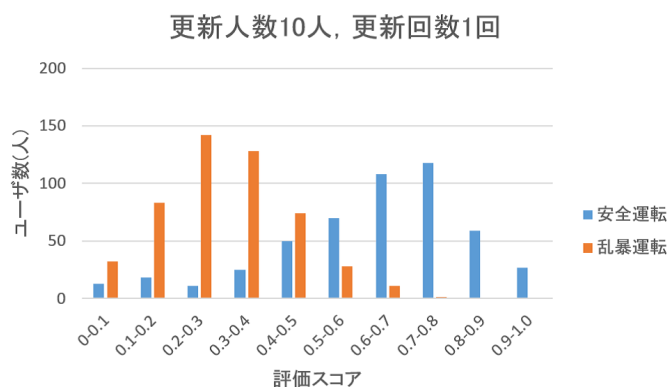


図 4 各運転グループのワーカーの評価スコアの分布 (更新人数 10 人, 更新回数 1 回時点)

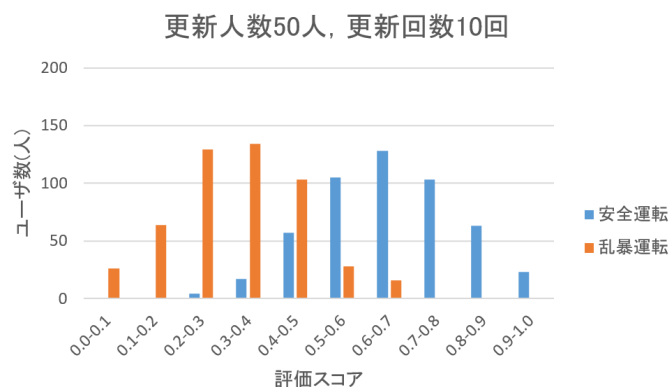


図 7 各運転グループのワーカーの評価スコアの分布 (更新人数 50 人, 更新回数 10 回時点)

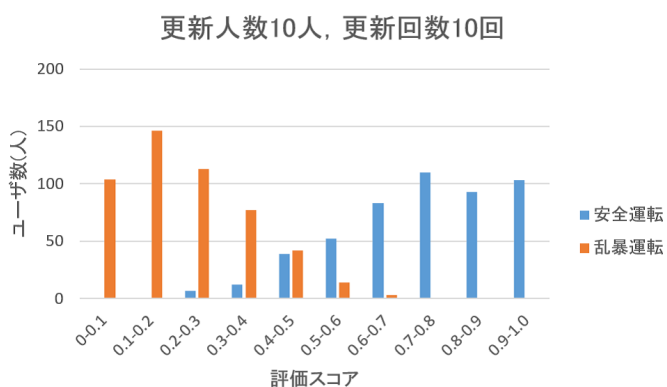


図 5 各運転グループのワーカーの評価スコアの分布 (更新人数 10 人, 更新回数 10 回時点)

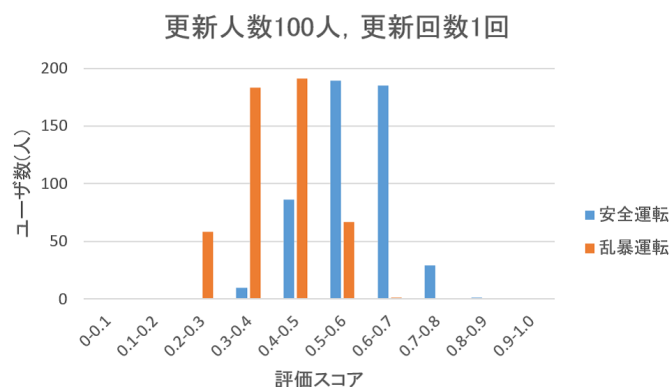


図 8 各運転グループのワーカーの評価スコアの分布 (更新人数 100 人, 更新回数 1 回時点)

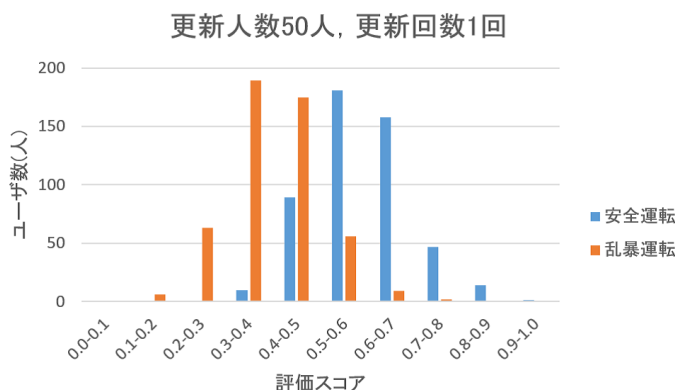


図 6 各運転グループのワーカーの評価スコアの分布 (更新人数 50 人, 更新回数 1 回時点)

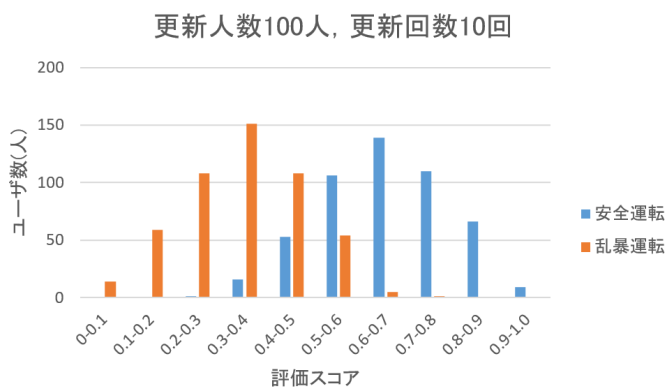


図 9 各運転グループのワーカーの評価スコアの分布 (更新人数 100 人, 更新回数 10 回時点)

達者を意味し、青に近づくほど評価スコアが低い配達者を意味する。またこのグラフは各配達者の更新回数が 10 回の時点の結果であり、さらにエントロピー重み付け法での 1 回の更新人数を 10, 50, 100 人とした場合の結果を各々す。

図 10 より、更新人数が 10 人の場合、運転の安定性が高く、かつ平均速度が速い多くのワーカーの評価スコアが高く (赤色)、反対に運転の安定性が低く、かつ平均速度が低い多くのワーカーの評価スコアが低く (青色)、提案方式により適切に配達者を評価できることが確認できる。また図 11 と 12 に示すように、更新人数が 50 人や 100 人の場合、赤色のプロットと青色のプロッ

トが交わる境界領域における、配達人の色が全体的に薄く、配達人の分別精度の低下が確認できる。

このようにエントロピー重み付け法を用いた評価スコアの更新では、一度の更新人数を 10 人程度に抑えることが望ましい。提案方式を用いることで、評価スコアが高い配達者に優先的に配達を依頼することや、評価スコアに応じたインセンティブを与えるなどの方策を用いることが可能であり、その結果、配達者の質の向上や利用者とのトラブルの回避が期待できる。

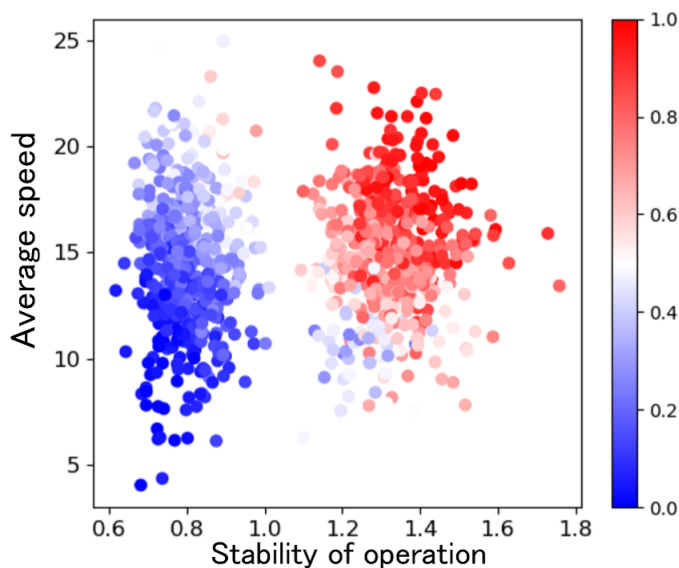


図 10 運転の安定性と平均速度に対する評価スコアの散布図 (更新人数 10 人)

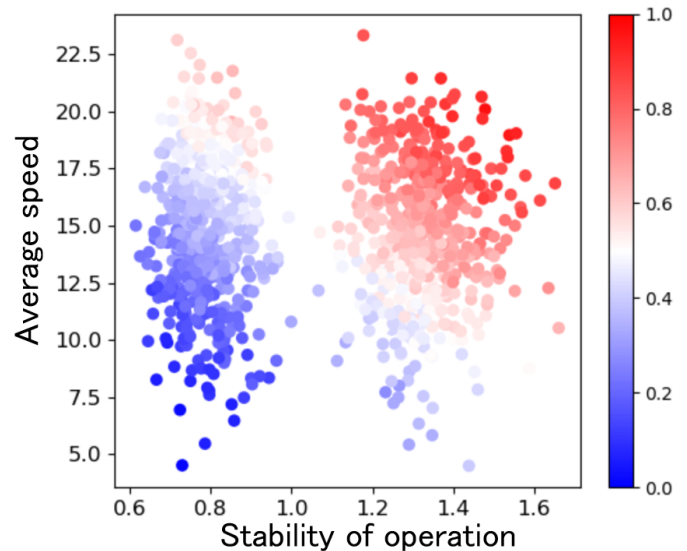


図 12 運転の安定性と平均速度に対する評価スコアの散布図 (更新人数 100 人)

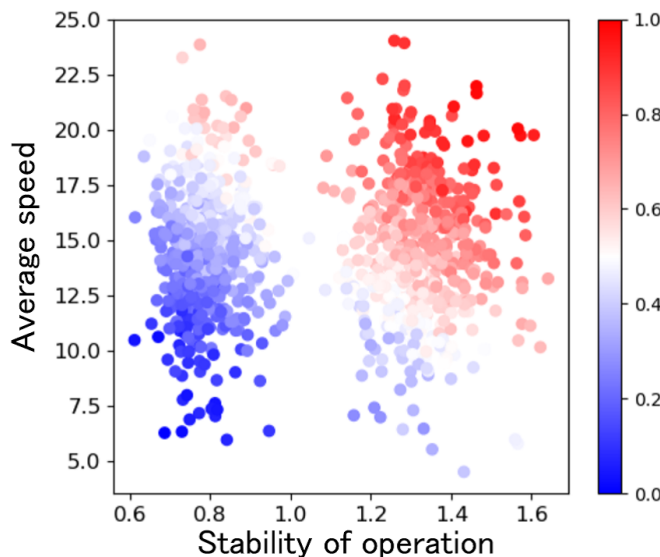


図 11 運転の安定性と平均速度に対する評価スコアの散布図 (更新人数 50 人)

6. ま と め

本稿ではクラウドソーシングにおけるワークの評価スコアを、特定のサービス事業者がブラックボックス的に管理するのではなく、ブロックチェーンを用いることで改ざん困難な形式で分散管理することを提案し、クラウドソーシングの例として食品の配達サービスに適用した場合のシステム構成を提案した。提案する配達者の評価システムはプラットフォーム層、ブロックチェーン層、配達者層から構成することで、ブロックチェーン層に対して配達人の秘匿化を、プラットフォーム層に対して評価スコアの秘匿化を実現する。また評価スコアの更新に、評価尺度ごとに正規化したものに情報エントロピーを掛け合わせるエントロピー重み付け法を用いることを提案した。また数値評価により、エントロピー重み付け法での 1 回の更新人数は更新

人数が少ないほど安全運転と乱暴運転の判別がしやすく、更新人数が多いほど判別しにくいことを明らかにした。さらにワークの運転の安定性が高く、平均速度が高いほど評価スコアが高く、提案システムは適切にワークを評価できることを確認した。今後は Ethereum を実装した評価環境でスループットを測定し、提案システムのスケール性を評価する予定である。

謝辞 本研究成果は KDDI 財団研究助成寄付金 190051 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Amazon mechanical turk. <http://www.mturk.com>
- [2] S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," 2008.[Online]. Available: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [3] V. Buterin, "A next-generation smart contract and decentralized application platform," white paper, 2014
- [4] 許斐健太, 上山憲昭, "ブロックチェーンを用いた個人信用スコア評価方式" 信学技法, NS2019-205, 2020 年 3 月
- [5] L. Kazemi & C. Shahabi, "GeoCrowd: enabling query answering with spatial crowdsourcing," Proceedings of the 20th International Conference on advances in Geographic Information System (ACM SIGSPATIAL 2020), 2020
- [6] D. Yang, G. Xue, X. Fang & J. Tang, "Crowdsourcing to Smartphones: Incentive Mechanism Design for Mobile Phone Sensing" Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom 2012), 2012
- [7] 豊 美玲, 張 元玉, 笹部 昌弘, 笠原 正治, "IoT のための柔軟な分散型属性ベース・アクセス制御の実現" 信学技法, NS2018-251, 2019 年 3 月
- [8] E. Yavuz et. al., "Towards secure e-voting using ethereum blockchain," 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS 2018), 2018
- [9] 藤原 明広, "ブロックチェーン技術を用いた分散型交通情報システムの提案" 信学技法, IN2017-138, 2018 年 3 月
- [10] 諸田 恵仕, 大脇 哲也, 上坂 克巳. 我が国の自転車利用の実態把握. http://www.pwrc.or.jp/thesis/shouroku/thesis/pdf/0904-P006-009_morota.pdf (参照日 2020 年 12 月 28 日)
- [11] Y. Yu, S. Liu, L. Guo, P. L. Yeoh, B. Vucetic, and Y. Li, "Crowd-FBC: A Distributed Fog-Blockchains for Mobile Crowdsourcing Reputation Management". IEEE Internet of Things Journal, 7(9), pp.8722-8735, 2020