

テーマパーク問題の提案と調整アルゴリズムの検討 ～ユビキタス環境における群ユーザ支援の実現へ向けて～

川村 秀憲[†] 車谷 浩一[‡] 大内 東[†]

あらまし 本稿では、人々の生活を支える情報処理技術の新たなステージとしての群ユーザ支援を実現することを目的とし、数百～数万のオーダーの人々の大規模動的スケジューリングを扱うテーマパーク問題を提案する。更に、テーマパーク問題に対して二つの基本的なスケジューリングアルゴリズムを適用することで問題の一側面を明らかにし、マルチエージェントシミュレーションによって大規模群ユーザ支援のための調整アルゴリズムの可能性を示す。

A Study on Coordination Algorithm for Theme Park Problem

～ Toward Development of Mass User Support in Ubiquitous Environment ～

Hidenori Kawamura[†], Koichi Kurumatani[‡] and Azuma Ohuchi[†]

Abstract In this paper, we propose “theme park problem” as one of test bed problem with huge agents’ scheduling problem. Especially, we develop typical Mass-User support with coordination scheduling algorithm, and investigate the possibility of mass-user support based on multiagent computer simulations.

1 はじめに

近年の携帯型通信端末・携帯電話の発達、ならびに無線LANに代表される近接通信を用いたネットワーク環境の整備に伴い、多種多様な通信デバイス・センサー・プロセッサ群が社会基盤内に分散して配置されたユビキタス環境が実現されつつある [1]。ユビキタス環境においては、デジタルな情報空間と現実世界の両方に接点を持ったサービスの実現が可能であり [2]、例えば携帯電話を用いた様々なリアルタイム情報提示サービスや、移動体ナビゲーション、ホテルや各種サービスの予約などが実現されている。情報技術の更なる発展に伴って、このようなユビキタス環境におけるユーザ支援が重要性を増していくのは明らかである。

しかし、現在のところ、情報技術に基づいたユーザ支援は個人の利便性の向上の追求のみに着目しているように思われる。ユビキタス環境の整備に伴い、サービスを受ける多くの人々と情報技術との接点が出来つつある中で、単に個人の利便性を追求するだけではなく、個人からなる集団

としての社会の利便性を明示的に意識しながら個人の利便性を追求していくことも重要な課題であると考えられる。

そこで我々は、単なる個人の利便性のみを追求するユーザ支援を越えて、大多数の人々のより良い生活支援を追求するユーザ支援を目指していく次世代サービスの実現を目標とする。社会的な利益と個人の利益との関係を数理的に解析するゲーム理論の文脈でいうならば [5]、個人の利便性の追求によって実現されるナッシュ均衡としての社会を目指すのではなく、社会全体の利便性を考慮しながら個人の利便性の追求を考えることによって実現されるパレート最適な社会を実現するためのユーザ支援を目指すのである。我々はこのようなユーザ支援を群ユーザ支援と呼ぶ。

群ユーザ支援を実現するにあたり、それが社会のどのような問題領域に対して有効なのか、支援を行うためにどのようなインフラが必要なのか、そして情報技術に基づいてどのようなサービスが可能であるのか、様々な研究課題を探っていく必要がある。極端に単純化された状況においては、ゲーム理論などによる理論的な分析は古くから行われているが、現実の状況に即し、実際にサービスを実現するという観点からの群ユーザ支援に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

[†]北海道大学大学院工学研究科

[‡]産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター

そこで我々は、CONSORTSなどのユビキタス環境でのエージェントアーキテクチャ上に群ユーザ支援を行うためのシステムを開発することを前提として [3, 4], どのような問題領域で群ユーザ支援が可能であるのか, そのような問題領域はどのような特徴を持っているのか, そしてどのような群ユーザが効率的に社会・個人の利便性を追求しうるのかを理論的・解析的に探っていくための一例として, テーマパーク問題の提案と, 群ユーザの調整アルゴリズムの検討を行う。

2 テーマパーク問題

2.1 問題の概要

テーマパーク問題とは, 複数のサービス施設からなるテーマパークに数百~数万のオーダーの人々が訪れるときに, それぞれの人々の目的や選好を考慮しつつも, 全体の混雑度を減少させるためにはどうしたらよいかを課題とする問題である。言い換えると, 如何に分散的な情報から個人・全体の利益を追求しつつ, 多くの個人間のスケジュール調整を行うかといった動的なスケジューリング問題の一種であり, 様々な社会生活に現れる大規模動的なスケジューリングを単純化した問題であるとも捉えられる。

テーマパークを対象としたのは,

- 個人の行動・選好がモデル化しやすく, また群ユーザ支援の効用も議論しやすい。
- 基本的にはテーマパーク内の行動のみをモデル化すればよく, 問題の範囲がテーマパーク内に限定されている。
- 扱うユーザ数が数百~数万のオーダーで設定可能であり, 様々なスケールでの群ユーザ支援に関する議論・検証が可能である。
- 携帯端末を利用したアプリケーションの実用化の可能性があり, 現実のテーマパークへの適用と比較・議論が可能である。

などの理由に基づいている。

従来様々なスケジューリング問題と異なるのは, スケジューリングの単位となる各個々のユーザに及ぶ制約条件は比較的緩和か, または無いに等しいが, 扱うスケジューリングの規模が大きく, 動的に状況が変化していく中で個々のユーザのスケジュールを調整していく必要があるという点である。また, 評価に関しても全体で一つの評価関数があるわけではなく, 個人に分散された多目的な評価関数を考慮していく必要があるのも特徴の一つである。

従来このような不確実性を伴う多数の要素からなる現象を取り扱うためには確率・統計的なモデルとして扱うのが一般的であるが, 実際に個々のユーザのスケジュールを取り扱うという観点から確率・統計的なモデル表現は適切ではない。従って, ここではユーザの動きをエージェントとして定義し, 離散時間の進行に従って動的にシミュレーションが進行するマルチエージェントによってテーマパーク問題の定義を行う [6, 7, 8, 9]。

2.2 テーマパークの定義

より具体的にテーマパーク問題とは, 複数の施設とそれらを結ぶ道路などで構成されるテーマパーク内を多数のビジターエージェントが訪問するとき, どのようにエージェントの訪問スケジュールを調整すればエージェント全体の満足度の向上が図れるかという大規模動的なスケジューリング問題の一つである。テーマパークの規模や, 入場エージェントの総数の大小, 時間変化, 天候などの不確定要素によるエージェントの行動変化などの要素を加えることによって様々なバリエーションが考えられるが, ここではより基礎的な設定について述べる。

テーマパーク問題は, テーマパーク上でサービスを提供する空間セグメントの集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ と, テーマパークに入場しているビジターエージェントの集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ から構成され, 問題の設定に関する静的な要素と, 時刻の推移に従って変化するエージェントの行動に関する動的な要素を持つ。以下に静的な要素, 動的な要素の順に説明していく。

まず静的な要素として, 各空間セグメント s_i は3つの属性 t_i, c_i, st_i を持っている。 t_i はセグメントの種類を表し, A(Attraction, 施設), P(Plaza, 広場), R(Road, 道路), En(Entrance, 入口), Ex(Exit, 出口)のいずれかが割り当てられる。それぞれの属性を持った空間セグメントをA, P, R, En, Exセグメントと呼ぶ。 c_i は空間セグメント s_i のサービスキャパシティを表し, st_i はサービス時間を表す。具体的には, 空間セグメント s_i では最大 c_i 人のエージェントが同時にサービスを受けることができ, 各々サービスを受けているエージェントは, サービス開始から終了まで st_i の単位時間を消費するものとする。

テーマパーク問題では, これらの空間セグメントをノードとした有向グラフによってテーマパークを表現する。各エージェントは各施設に対する選好を持っており(後述), 有向辺で接続されたセグメントを遷移しながら各セグメントでサービスを受けていく。各エージェントの行動目的は, 出来るだけ高い満足度が得られる訪問を行うことである。テーマパーク問題はネットワーク上をエージェントが移動するという観点から, オペレーションズ・リサーチの分野での待ち行列ネットワークで用いられるモデルの一つとしても捉えられる [10]。図1は2つの施設と5つの道路, 各々1つの広場・入口・出口からなるテーマパークを想定し, 空間セグメントをノードとする有向グラフ表現で表した場合を示している。

次に, 動的な属性の説明を行う。離散時刻を t とする時, 時刻 t において, ビジターエージェント v_j は5つの属性 $bs_j(t), pt_j(t), vs_{ji}(t), wt_j(t), mt_j(t)$ を持っている。 $bs_j(t)$ はエージェント v_j が時刻 t において所属する空間セグメントを表し, エージェントは必ず唯一つの空間セグメントに属する。時刻 $t=0$ においてはいずれかのEnセグメントに所属するものとする。 $pt_j(t)$ は, エージェント v_j が現在所属するセグメントで経過した時間を表している。 $pt_j(t)$ は離散時間が進行する毎に1ずつ加えられる。 $vs_{ji}(t)$ は, 時刻 t までにエージェント v_j がセグメント s_i に一度以上訪れているときは1, まだ未訪問である場合は0が割り当てられる。 $wt_j(t), mt_j(t)$ はそれぞれ時刻 t までの総待ち時間と, 総移動時間である。

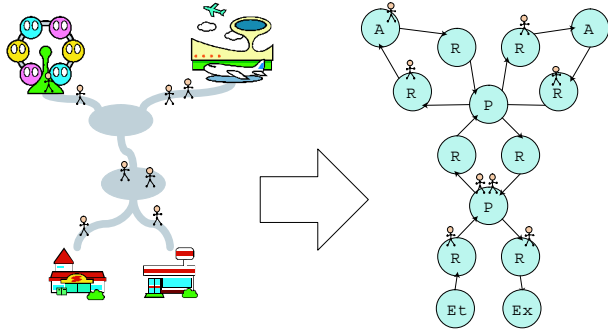


図 1: テーマパークの例 (左) と空間セグメントによるグラフ表現 (右).

空間セグメント s_i は動的な要素として、時刻 t における訪問エージェント集合 $v_i(t)$ と予約リスト $r_i(t)$ を持っている。予約リストには、セグメントのサービスキャパシティを越えてエージェントがセグメントに遷移しようとしている時に、そのエージェントが加えられる。予約リストでは、FIFO(First-In First-Out) によってエージェントに優先順位がつけられ、エージェントがセグメント s_i に遷移してきた場合、そのエージェントは予約リストより削除される。

時刻 t において、エージェントの添え字に従って順に行動の順番が巡ってくる。即ち、全てのエージェントが同時に行動を行うのではなく、非同期的に各エージェントが順番に行動を行っていく。行動を行う際、以下の条件が調べられ、条件を満たすときには現在所属するセグメント $bs_j(t)$ でのサービスが終了したとして、エージェント v_j は遷移先として有向辺でつながれた空間セグメントを一つ選択する行動を行うことができる。

$$pt_j(t) \geq st_{bs_j(t)} \quad (1)$$

ここで仮に、エージェント v_j が上記の条件を満たし、次の遷移先にセグメント s_k を選択したとする。その時、以下の条件を満たすならばエージェント v_j はセグメント s_k に遷移する。

$$|r_{s_k}(t)| = 0, \text{ かつ, } |v_{s_k}(t)| + 1 \leq c_{s_k} \quad (2)$$

または、

$$|r_{s_k}(t)| > 0, \text{ かつ, } |v_{s_k}(t)| + 1 \leq c_{s_k}, \text{ かつ, } r_{s_k}(t) \text{ において一番優先順位が高い} \quad (3)$$

ここで、 $|\cdot|$ はそれぞれの要素数を表す。式 2 は、訪問先セグメントにおいて予約エージェントがおらず、かつキャパシティに 1 名以上の余裕がある場合を表している。式 3 は、予約エージェントがあり、キャパシティに 1 名以上受け入れる余裕があり、かつ自分が予約の最優先順位にいる場合を表している。この二つの場合のみ、次の訪問先へ遷移が可能である。

遷移に伴って、エージェントの総待ち時間 $wt_j(t)$ が以下の式によって更新される。

$$wt_j(t) \leftarrow wt_j(t) + (pt_j(t) - st_{bs_j(t)}) \quad (4)$$

また、 $bs_j(t)$ が R セグメントだった場合は、総移動時間 $mt_j(t)$ が以下のように更新される。

$$mt_j(t) \leftarrow mt_j(t) + st_{bs_j(t)} \quad (5)$$

次のセグメントに遷移した後、 $pt_j(t)$ は 0 にリセットされ、 $bs_j(t)$ は k に設定される。先に説明したとおり、セグメント k の予約リストに登録されていた場合は、 $r_k(t)$ より削除される。また、条件 1 を満たしているにも関わらず、条件 2, 3 を満たさなかった場合は、エージェント v_j はセグメント k の予約リスト $r_k(t)$ に登録し、この時刻での行動を終える。

以上の設定に従ってシミュレーションが進行していき、終了時刻 t_{MAX} に達したらシミュレーションが終了する。

2.3 エージェントの定義

ビジターエージェントはテーマパークを訪れるユーザのモデルであるので、現実のユーザの行動心理に基づいたより自然なモデル化が望まれるが、詳細なユーザモデルを作り上げてシミュレーションを行うのは容易ではなく、またユーザモデルの精緻化はここでの趣旨から外れる。従って、ここでは A セグメントに対する選好関係に着目したシンプルなビジターエージェントのモデルを採用する。

社会的なエージェントの行動に関する満足度を半順序な選択枝の選好関係に基づいて表し、その選好関係から組み上げられる社会一般の満足度に関する研究はアロウの研究を発端として多数行われており、今後テーマパーク問題との関わりを論じていくのは重要であると思われる [11, 12, 13]。また、ユーザの行動原理を A セグメントの半順序な選好関係で表すというモデル化は、アプリケーションとして実際に群ユーザ支援を構築する上でも、ユーザのモデル化を行うための表現として制約が少なく、よりユーザに負担を強くないユーザインターフェースを実現する観点からも都合がよい。

以上の点を踏まえ、ここではエージェントの各 A セグメントに関する選好を、A セグメント間の選好関係に基づく半順序関係として定義し、この選好関係に基づいてテーマパークでのエージェントの行動の満足度を定義することとする。また、問題を単純化するため、各エージェントは A セグメントに関する選好関係は事前に定義されるが、テーマパーク内を遷移する際にどのような空間セグメントを通過しながら A セグメントを訪問するかに関しては、無条件に調整アルゴリズムに従うものとする。エージェントの選好関係と満足度に関する定義を以下に述べていく。

テーマパーク内の A セグメント集合を $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \subseteq S$ と表すとき、ある $a_x, a_y \in A$ に対するエージェント v_j の選好関係を以下のように表すものとする。

$a_x \succ_j a_y$: a_y より a_x を選好する。

$a_x \prec_j a_y$: a_x より a_y を選好する。

$a_x =_j a_y$: a_x と a_y は無差別 (同値) である。

このとき、エージェント v_j の A セグメントに関する選好関係は以下の反射性、推移性を満たす半順序構造として事前に与えられるものとする。

反射性： 任意の $a_x \in A$ に関して、 $a_x \succeq_j a_x$ が成立する。

推移性： ある $a_x, a_y, a_z \in A$ に関して、 $a_x \succeq_j a_y, a_x \succeq_j a_z$ ならば $a_y \succeq_j a_z$ が成立する。

次に、上記の各 A セグメントに対する選好関係から、各 A セグメントの訪問状態に関する選好関係へ展開する。まず、各 A セグメントの訪問状況に対応した訪問状態を表す集合 $O = \{o_i | 1 \leq i \leq 2^m\}$ を考える。A セグメントは m 個あり、それぞれに対して訪問/未訪問の状態があるので、 O は 2^m の要素を持つ状態集合である。シミュレーション終了時には、エージェント v_j の訪問状況に応じて、 O の要素より一つが決定する。

ここで O の各要素において、 a_x を訪問した状態を表す要素の集合を $O(a_x) \subset O$ 、未訪問の状態を表す要素の集合を $O(\bar{a}_x) \subset O$ と表すものとする。このとき、 $O(a_x) \cup O(\bar{a}_x) = O, O(a_x) \cap O(\bar{a}_x) = \emptyset$ である。また、複数の A セグメントの訪問状態を指定する場合は例えば $O(a_x, a_y, a_z) \subset O$ などと表現する事とする。

a_x, a_y において、 $a_x \succeq_j a_y$ が成立し、 a_x, a_y を除いた他の A セグメントに対するある訪問状態を w とするとき、エージェント v_j の選好関係は以下のような推移的な関係として定義されるものとする。

$$\begin{aligned} O(a_x, a_y, w) \succ_j O(a_x, \bar{a}_y, w) \succeq_j \\ O(\bar{a}_x, a_y, w) \succ_j O(\bar{a}_x, \bar{a}_y, w) \end{aligned} \quad (6)$$

これは、状態 w のもとでは、 a_x, a_y を両方訪問する状態が最も好ましく、どちらか一方しか訪問しない状態では a_y より選好される a_x を訪問する状態のほうがより好ましいことを表している。また、どちらも訪問しない状態が最も好ましくない。このように、A セグメントに関する選好関係から、セグメントの訪問状態を表す状態集合に関する選好関係へ拡張する。

$a_y \succeq_j a_z$ についても同様に以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} O(a_y, a_z, w) \succ_j O(a_y, \bar{a}_z, w) \succeq_j \\ O(\bar{a}_y, a_z, w) \succ_j O(\bar{a}_y, \bar{a}_z, w) \end{aligned} \quad (7)$$

証明は省略するが、このとき、式 6, 7 より以下の選好関係が導出され、 $a_x \succeq_j a_z$ から決定される訪問状態に関する選好関係に矛盾しない。

$$\begin{aligned} O(a_x, a_z, w) \succ_j O(a_x, \bar{a}_z, w) \succeq_j \\ O(\bar{a}_x, a_z, w) \succ_j O(\bar{a}_x, \bar{a}_z, w) \end{aligned} \quad (8)$$

このようにして、訪問状態に関するエージェント v_j の選好関係が半順序構造として表されることになる。

ここで、エージェント v_j がシミュレーションの結果として訪問状態 o_k を達成したとき、A セグメントの訪問状態に対するエージェント v_j の評価値を以下のように定義する。

$$p_j = |L_j| / (|U_j| + |L_j|) \quad (9)$$

ただし、

$$U_j = \{o_i | o_i \succ o_k, o_i \in O\} \quad (10)$$

$$L_j = \{o_i | o_i \prec o_k, o_i \in O\} \quad (11)$$

つまり、各 A セグメントに対する選好関係から A セグメントの訪問状態に関する選好関係へ展開し、さらにシミュレーションの結果得られた訪問状態が選好関係の中で相対的にどのくらい満足できるものかを表したのがこの評価値である。この値は 0 から 1 の間の実数値をとり、幾つかの A セグメントを訪問した場合はより選好関係が上位である A セグメントを多く訪問するほど 1 に近い値をとる。

この評価値を用いてシミュレーション終了時のエージェント v_j の満足度を以下のように定義する。

$$u_j = \alpha \cdot p_j + \beta \cdot p_j / (wt_j + mt_j) \quad (12)$$

第 1 項は A セグメントの訪問に関する評価値であり、第 2 項は評価値 1 単位を得るために必要な時間の逆数である。つまり、エージェントの満足度は単に好ましい A セグメントをより多く訪問するだけではなく、その際に必要な待ち時間・移動時間がより少ないほど大きいことになる。ここでは、ユーザの満足度を表現するために、好ましい A セグメントをどの程度訪問できたか、そのときの待ち時間ほどのくらいか、そして移動時間はどのくらいであったかを考慮すれば十分であるとする。この満足度の定義は様々な形が考えられるので、今後より詳細に議論していく必要がある。また、 α, β は重み付けを行うためのパラメータである。

2.4 目的関数

テーマパーク問題の目的は、ユーザ全体の満足度を上げることであり、最適化すべき目的関数はユーザの満足度に基づいて定義される必要がある。実際には各ユーザの満足度は別個のものであり、それぞれ全てを最適化することが望まれるが、各ユーザの待ち時間や訪問の可否は他の多数のユーザの行動に依存しており、複雑なトレードオフの関係を含んでいる多目的な問題であることからその取り扱いが困難である。そこで、ここでは単純にそれぞれの満足度の重み付き線形和として全体の満足度が与えられ、この値を最適化することがここでのテーマパーク問題の目的であるとする。

$$U = \sum_j w_j \cdot u_j \quad (13)$$

ただし、

$$w_j \geq 0, \sum_j w_j = 1 \quad (14)$$

個人ユーザからユーザ全体の満足度を定義する方法は今後議論の余地があるが、ここで重要なのはパレート最適な社会を実現するための群ユーザ支援を目指す立場から、ユーザ全体の満足度を最大化することが各ユーザの満足度

の Pareto 最適状態を実現することにつながることである。重み付き線形和を最適化することは少なくとも Pareto 最適解の一つを与えることが保証されており [14]、群ユーザー支援の概念に反するものではない。また、ここではユーザーの満足度のみを全体の評価関数に反映させたが、テーマパークを運営する側の満足度の概念を組み込む拡張なども考えられる。

2.5 調整アルゴリズム

調整アルゴリズムの目的は、目的関数の値が大きくなるように各ユーザーの遷移に関して指示を提示することである。

具体的に調整アルゴリズムは、各時刻 t においてエージェント v_j が現在のノードでのサービスを終えて次の遷移先を選択する際、

- 各セグメントの属性: $a_i(t), r_i(t)$
- エージェント v_j の属性: $bs_j(t), pt_j(t), vs_{ji}(t)$
- エージェント v_j の A セグメントに関する選好関係を

を参考にしながら、現在エージェント v_j が訪問しているノードから接続された遷移先ノードを一つ指定するものとする。

ここでは情報の取得に関して特に制約をもうけてはいないが、情報の取得に関して制約があり、より分散的にしか状況が判断できないような問題設定も考えられる。

3 具体例

ここでは実験に用いた問題設定の具体例と調整アルゴリズムについて述べる。実験に用いた設定では、各 1 個の En・Ex セグメント、9 個の A セグメントと 3 個の P セグメント、そしてそれらを結ぶ計 26 個の R セグメントを図 2 のように配置した。この配置では、三角形の各頂点に広場があり、各広場の周辺に 3 つの施設があることになり、更に底辺の両端の頂点に入口と出口が接続されている。

また、各セグメントの設定については表 1, 2 に示した。特に表 2 で示されるように、A セグメントについてはサービス時間の偏りが大きい場合から偏りが無い場合まで、段階的に st103050, st153045, st203040, st253035, st303030 の 5 つの設定を用意した。それぞれの設定でサービス時間の合計は一定である。これは、サービス時間の偏りによって A セグメントの待ち時間発生傾向が異なり、問題の性質が変わってくるのが予想されるので、その違いを含めた分析を行うための設定である。また、各 A セグメントでのキャパシティ c_i はそれぞれ 1 に設定している。

エージェント数は、 $n = 400$ とした。この設定では、時間内に各エージェントは平均 4~6 程度の A セグメントを訪問できる設定であり、テーマパーク内が適度に混雑している状況を表している。テーマパーク内の混雑度が極端に低い場合や大きい場合では、調整アルゴリズムによって評価値を改善できる見込みが薄く、研究の最初の段階として

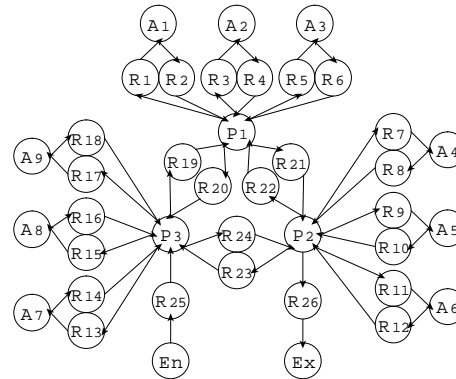


図 2: 実験で使用する空間セグメントの有向グラフ表現。

問題の特徴が捉えにくいので、ここでは適度に混雑している状況を想定してエージェント数を決定した。

各エージェントの A セグメントに対する選好関係は、単純にランダムな全順序関係として与えられるものとした。A セグメントに関する選好が全順序で与えられるということは、訪問状態に対しても全順序が与えられることを意味する。そのとき、全ての A セグメントを訪問する状態が最も選好され、全ての A セグメントが未訪問である状態が最も選好されない。より複雑な選好関係が与えられるケースについては、今後考えていくものとする。

また、全体の満足度を計算する際の重み w_j に関しては、全て $w_j = 1/n$ とした。つまり、全体の評価関数において各エージェントの満足度は平均的に反映され、特に優遇されるユーザーは存在しない。重みに偏りがあり、優遇されるユーザーが存在するケースについても今後の課題とする。

そのほかの設定として、 $t_{MAX} = 7200, \alpha = 1, \beta = 5400$ とした。各実験は乱数のシードを変更して 100 回行い、その平均によって評価するものとした。

実験にあたり、以下の 3 種類の調整アルゴリズムを用意した。

- **Greedy アルゴリズム (以下、G アルゴリズム)** : エージェントが En セグメントにいるか、もしくは各 A セグメントでサービスを受けた後、未訪問の A セグメントの中で最も選好度が高いものを選択し、目的地に設定する。もし選好度が高いもので比較の出来ない幾つかの候補がある場合は、その中より一つランダムに選択する。そして、その A セグメントまで最短経路時間でたどり着ける経路を選択していくよう R, P セグメントを提示していく。また、全ての A セグメントを訪問した際には最短経路時間で Ex セグメントまでたどり着けるような経路を提示する。このアルゴリズムは、混雑の状況などを利用することなく、単にエージェントの A セグメントの選好関係に従って次の目的地を選択するのみなので、実際には特別な調整のないユーザー任せの行動の場合に対応すると考えられる。
- **Congestion-Avoidance アルゴリズム (以下、CA**

表 1: 実験における R, P, En, Ex セグメントの設定.

セグメント名	st_i	c_i
$R_{1\sim6}$	60	∞
$R_{7\sim12}$	50	∞
$R_{13\sim18}$	40	∞
$R_{19\sim24}$	300	∞
$R_{25\sim26}$	40	∞
$P_{1\sim3}$	0	∞
En	0	∞
Ex	0	∞

表 2: 実験における A セグメントのサービス時間の設定.

	$a_{1,4,7}$	$a_{2,5,8}$	$a_{3,6,9}$
st103050	10	30	50
st153045	15	30	45
st203040	20	30	40
st253035	25	30	35
st303030	30	30	30

アルゴリズム: エージェントが En セグメントにいるか、もしくは各 A セグメントでサービスを受けた後、各未訪問の A セグメントにおける (予約リストの人数) × (そのセグメントのサービス時間) ÷ (サービスキャパシティ) の値を予想待ち時間として計算し、その値が最も小さい A セグメントを目的地に設定する。もし同じ最小値を持つセグメントがある場合にはより選好の高いものを目的地に設定する。目的地の設定以外は G アルゴリズムと同様である。

- **Stochastic CA アルゴリズム (以下, SCA アルゴリズム)**: エージェントが En セグメントにいるか、もしくは各 A セグメントでサービスを受けた後に次の目的地となる A セグメントを選択する際、G アルゴリズムに基づく選択か CA アルゴリズムに基づく選択をランダムに行う。目的地の設定以外は他のアルゴリズムと同様である。

4 実験結果

前述の設定に基づいてシミュレーションを行った結果を図 3 から 8 に示す。各図において、 x 軸は設定 st103050~st303030 における A セグメントのサービス時間分布の標準偏差を表している。ここでは、シミュレーションの状態や調整アルゴリズムの内容に影響されず、問題の特徴を表現する一つの指標としてサービス時間の標準偏差を採用した。 x 軸の各値はそれぞれ左より問題設定 st303030, st253035, st203040, st153045, st103050 に対応する。図 3 から 7 において、 y 軸はそれぞれシミュレーション終了時における各エージェントの待ち時間 $wt_j(t)$, 移動時間 $mt_j(t)$, 待ち時間と移動時間の合計 $wt_j(t) + mt(t)$, 訪問した

A セグメント数、満足度 p_j の平均値を表している。また、図 8 の y 軸は各アルゴリズムの評価値の平均を表している。

まず、図 3 の結果を見る。G アルゴリズムは、サービス時間の標準偏差が小さい場合から大きくなるに従って待ち時間が増加している。G アルゴリズムは未訪問の A セグメントのうち、選好が一番高いものを次々と目的地にして訪問を行う。このことにより、サービス時間の偏りが少ない場合は各 A セグメントに平均的にエージェントが訪問することになり、エージェントの分散化が行われるので、結果的に待ち時間を減少させることにつながる。しかし、サービス時間が偏っているときは、各 A セグメントに平均的にエージェントが訪れるとどうしても相対的にサービス時間が大きい A セグメントにエージェントが集中してしまい、効果的な負荷分散が行えないことが結果に反映している。

CA アルゴリズムでは、逆にサービス時間の偏りが大きくなるに従って待ち時間が減少している。サービス時間の偏りが少ないときには、ある時刻において他の A セグメントよりも僅かに予想待ち時間が少ない A セグメントが多くのエージェントの目的地に設定されてしまうため、ある一定の時刻が経過した後はそのセグメントに負荷が集中してしまう。またそこから他の A セグメントに対して同様の現象が生じるため、混雑の振動・伝搬が生じ、結果的に幾つかの A セグメントでの待ち時間が大きくなってしまふことが影響して総待ち時間の値が大きくなる。サービス時間の偏りが大きい場合は、待ち時間の大きい A セグメントは一定であるので、各エージェントが待ち時間の大きいセグメントを後回しにすることによって負荷を分散させ、G アルゴリズムに比べて大幅に総待ち時間を減少させることに成功している。SCA アルゴリズムは G アルゴリズムと CA アルゴリズムの目的地選択をランダムに行うため、それぞれの待ち時間の平均当たりの値を示している。

図 4 において、それぞれのアルゴリズムの平均移動時間の値は、ほぼ図 3 の傾向の逆の傾向を示している。テーマパーク内でのエージェントの行動時間において、A セグメントでサービスを受けている時間の占める割合は小さく、待ち時間以外はほぼ移動時間に費やされることから、このことは自然な結果と受け止めることが出来る。今回の設定はテーマパークのトポロジーが単純であり、目的地までの経路選択の自由度がほとんどなく、また各セグメントでのサービス時間は混雑状況などの影響を受けないため、移動時間の値はあまりアルゴリズムの影響を受けない。しかし、ある目的地まで複数の経路の選択肢があるような複雑なトポロジーの設定の場合、混雑回避に加えて経路選択も重要になり、更に問題が複雑になると思われる。

図 5 における待ち時間と移動時間の合計値では、各アルゴリズムとも同様の傾向を示しており、サービス時間の偏りが大きくなるに従って値も大きくなっている。どのアルゴリズムの調整方法でも、サービス時間の偏りが無い場合に比べて偏りがある場合では、待ち時間と移動時間の両方を減少させることが困難であることを示している。

図 6 の平均 A セグメント訪問回数を見てみると、G アルゴリズムではサービス時間の偏りが大きくなるに従って待ち時間が多くなるので、訪問回数も減少している。同様に CA アルゴリズムではサービス時間の偏りが大きくなるに従って、訪問回数が増加している。SCA アルゴリズムでは、サービス時間の偏りが大きくなるに従って、訪問回数が一旦増加し、また減少している。これは、二つのアルゴリズムの特徴をあわせたものとして理解できるが、ここで注目すべきは、他の二つのアルゴリズムよりも SCA アルゴリズムの訪問回数が増えている領域が存在するという点である。テーマパーク問題のシミュレーションにおいて、全体のエージェントの振る舞いによって、エージェントが集中している A セグメントやあまりエージェントが訪問していない A セグメントが発生するが、ある A セグメントにおいてエージェントが全く訪問していない時間帯があることは全体のパフォーマンスを下げることは明らかである。この図の結果は、SCA アルゴリズムが効果的にそのような状態を発生させないようエージェントの行動を調整し、訪問回数の増加に寄与している結果と考えら

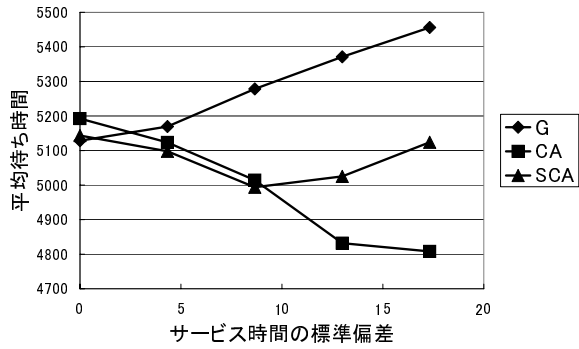


図 3: 待ち時間 mt_j の平均値.

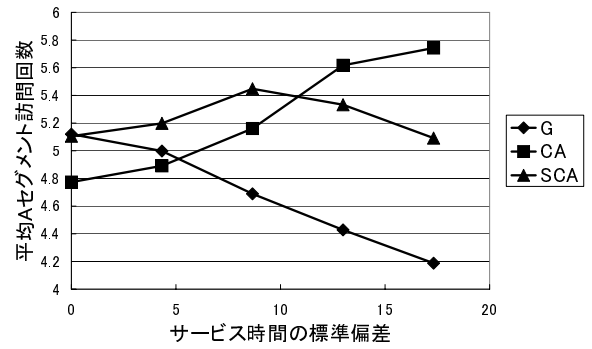


図 6: 訪問した A セグメント数の平均値.

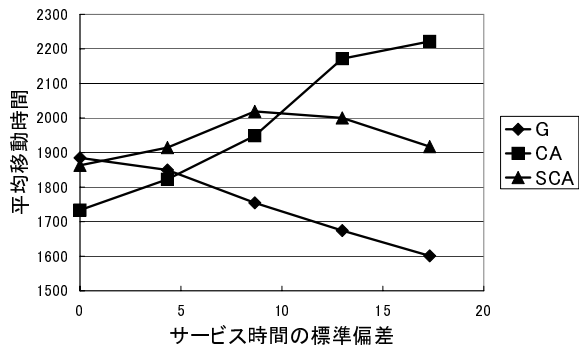


図 4: 移動時間 mt_j の平均値.

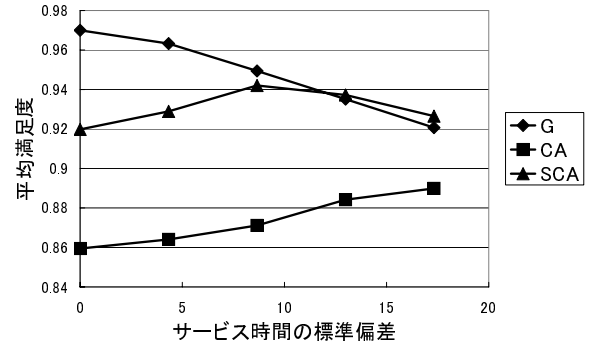


図 7: 満足度 p_j の平均値.

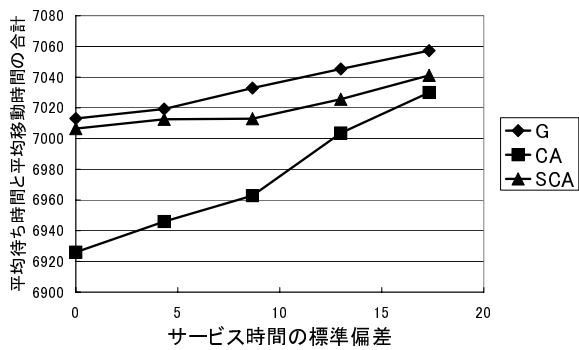


図 5: 待ち時間 mt_j と移動時間 mt_j の合計の平均値.

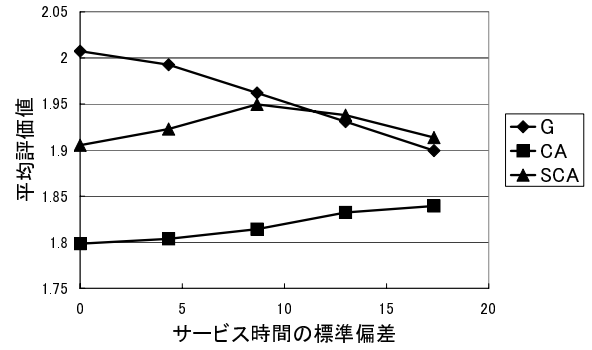


図 8: 評価値 U の平均値.

れる。

図7のエージェントの満足度の平均値を見てみると、各アルゴリズムはほぼAセグメントの訪問回数と同様の変化を示している。ここでは、選好度の高いAセグメントを優先的に訪れるGアルゴリズムがほとんどのケースにおいて大きな値を示している。今回の設定では、各エージェントのAセグメントに対する選好関係に全順序を割り当てたので、とにかく優先度の高い順にAセグメントを訪問することでより大きな満足度がえられる。従って、Gセグメントに有利な結果となったと考えられる。選好関係として比較することの出来ないAセグメントの数が多くなるにつれてこの結果は変わってくるのが予想される。サービス時間の偏りが最も大きいケースでは僅かにSCAアルゴリズムの値がGアルゴリズムの値を上回っている。この領域では、Aセグメントの選好関係にある程度考慮しつつも訪問回数を増加させるSCAアルゴリズムの良さが満足度に反映した場合であると考えられる。

図8の評価値を見てみると、今回のパラメータ設定ではほぼ図7の傾向と変わらないことがわかる。今回の設定では各エージェントの満足度が全体の評価値に大きく影響を与えたが、他のパラメータ設定では図5と図7の両方の傾向が反映されるため、傾向が変わることが予想される。今回の実験では、サービス時間の標準偏差が10より小さい領域ではGアルゴリズムがよく、10より大きい領域ではSCAアルゴリズムが良い結果を示した。

この結果が示すことは、問題の設定や特徴によって有効な調整方法が変わるということである。今回の設定はサービス時間の変化やエージェント数などが全て一定であり、各設定についてテーマパークのトポロジーなどの変更も行わなかったが、それでも各ケースにおいて有効な調整アルゴリズムが異なるということは、どんなケースでも有効に働くアルゴリズムを構築するのは容易ではないということを示している。動的な変化によらない何らかの特徴量によって事前に問題の特徴を十分捉えることが出来るならば、それに併せて有効なアルゴリズムを選択するという方法も考えられるが、入場するエージェント数などが未知な状態で有効な指標を作るのは困難であろう。従って、エージェントの行動や待ち時間などの動的な情報に基づいて適応的に有効なアルゴリズムを選択する方法が重要になってくると考えられる。

5 終わりに

本研究ではテーマパーク問題を提案し、幾つかのアルゴリズムを用いて調整アルゴリズムによる群ユーザ支援の可能性について検討した。テーマパークという限られた問題設定ではあるが、アルゴリズムの工夫次第で多くのエージェントの平均待ち時間や満足度の値を改善できることが確かめられたと同時に、問題設定によって調整アルゴリズムのパフォーマンスや全体の振る舞いは大きく変化することがわかった。どのような状態でもよい結果を出すアルゴリズムを開発するためには、問題の特徴などを十分に理解する必要がある。そのためには、問題の特性を表す何らかのマクロな指標を用いて問題の分析を行っていく必要があると考えている。また、本稿での問題設定は単純化された不確定要素の少ない簡単なケースであったが、現実社会で想定しうる状況を反映しながら様々な角度からテーマパーク問題を検証し、群ユーザ支援としての有効な調整アルゴリズムを探っていく必要があると考えられる。

ここでの結論がすぐに現実の問題に適用できるわけではないが、数百～数万のオーダーのエージェントに対して群ユーザ支援という観点からスケジューリングを行うことの有用性は示唆できたと考えられる。ここでの提案が、ゲーム理論などの単純化された状況ではなく、ユビキタスな環境でのユーザ支援のアプリケーションの一つとして実現することを前提としていることが重要である。

今後、分散協調スケジューリング [15] やマクロな情報に基づ

くマーケットメカニズム [16][17] 等を導入しつつ、より効率的なアルゴリズムの開発を行っていく予定である。

参考文献

- [1] A. Sashima, K. Kurumatani, and N. Izumi: Physically-Grounding Agents in Ubiquitous Computing, Proceedings of Joint Agent Workshop, JAWS2002, pp. 196-203 (2002).
- [2] 中島秀之, 橋本政朋: 日常生活のための知的都市情報基盤. 情報処理, Vol. 43, No. 5, pp. 573-578 (2002).
- [3] K. Kurumatani: Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS, Proceedings of IAWTIC2003, in printing (2003).
- [4] 車谷浩一: ユビキタスエージェントのためのアーキテクチャ CONSORTS ~群ユーザ支援に向けて, 人工知能学会知識ベースシステム研究会予稿集, in printing (SIG-KBS) (2003).
- [5] 鈴木光男: 新ゲーム理論, 勁草書房 (1999).
- [6] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲: マルチエージェントシステムの基礎と応用, コロナ社 (2002).
- [7] 生天目章: マルチエージェントと複雑性, 森北出版 (1998).
- [8] 谷本潤, 藤井晴行, 片山忠久, 萩島理: 情報理論を適用した離散型シミュレーションによるテーマパーク解析に関する一考察, 日本建築学会計画系論文集, No. 542 (2001).
- [9] 山影進, 服部正太: コンピュータの中の人工社会 マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑性, 共立出版 (2002).
- [10] 高橋幸雄, 森村英典: 混雑と待ち, 朝倉書店 (2001).
- [11] 佐伯胖: 「決め方」の論理 社会的決定理論への招待, 東京大学出版会 (1980).
- [12] 生天目章: 戦略的意志決定, 朝倉書店 (2001).
- [13] 松原望: 意志決定の基礎, 朝倉書店 (2001).
- [14] 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム2, 産業図書 (1995).
- [15] 宮下和雄: 分散強調スケジューリング, システム/制御/情報, Vol. 42, No. 2, pp. 74-79 (1998).
- [16] M. P. Wellman, and W. E. Walsh: Auction Protocols for Decentralized Scheduling, Games and Economic Behavior 35, pp. 271-303 (2001).
- [17] K. Kurumatani: User Intention Market for Multi-Agent Navigation - An Artificial Intelligent Problem in Engineering and Economic Context, Proceedings of the AAAI-02 Workshop on MAMSES-02, Technical Report WS-02-10, pp. 1-4, AAAI Press (2002).