

混雑緩和のための行動推薦モデル

中山 経太^{1,a)} 堀 磨伊也² 島田 敬士² 谷口 倫一郎²

概要 : 混雑緩和を目的として実世界に対して行動推薦情報を通知する場合, 混雑緩和に適切なタイミングや内容による情報提供が求められる. そのためには実世界の状況に応じた内容を適応的に選択する仕組みと情報提供に対して混雑がどのように変化するかという結果を踏まえてより適した行動推薦を選択する仕組みが必要となる. 本研究では, 特定の施設で観測された混雑情報と利用者の行動選択データ等の実データとをもとに行動推薦情報の提供が行われた際の実世界の混雑推移の変化を表す混雑推移モデルを構築し, それをもとに行動推薦を行う行動推薦モデルを提案する.

Recommendation Model for Congestion Mitigation

KEITA NAKAYAMA^{1,a)} MAIYA HORI² ATSUSHI SHIMADA² RIN-ICHIRO TANIGUCHI²

1. はじめに

実世界における特定の施設の混雑状況や人流情報に関するデータを, Wi-Fi や Bluetooth などの電波接触を用いてリアルタイムに取得する [1][2] ができるようになったことで, これらの実世界データを活用した混雑緩和への取り組みに注目が集まっている. 取得されたデータは混雑予測 [3] や人流解析 [4] などの様々な形で分析が行われ, 分析された情報は実世界に対して提供されている [5].

混雑情報を提供する方法として, Web サイトなどに常に情報を掲載する方法 (プル型) と防災情報などのように情報を通知する方法 (プッシュ型) の二通りが考えられる. 混雑緩和を目的として提供されている情報の多くは前者の方法により混雑状況を提供するものである. この方法は実装が容易であるが利用者が能動的に利用しなければ活用されない問題がある. 一方で, 後者の方法による情報提供や, 混雑状況だけでなく行動支援となるような推薦情報を提供するものはあまり行われていない. そこで本研究では, Wi-Fi の電波接触に基づくセンシングにより観測された混雑情報をもとに, 実世界の状況に応じた行動推薦情報を利用者全体に通知する形で提供することで利用者の行動支援を行い, これらを繰り返すことで特定の施設の混雑を緩和

するシステムの構築に取り組む.

プッシュ型によって行動推薦情報を提供する場合は, 情報提供を行うタイミングと情報の内容が重要となる. 過度の通知は利用者の不快感につながるため, 混雑緩和にとって不必要なタイミングでの情報提供は避けなければならない. また, 実世界の状況や情報提供の目的に即していないような推薦内容では提供される情報に対する信頼性を損なうなどの危険性がある. そのため, 混雑緩和を行う上で適切なタイミング・内容での情報提供を行うことが理想的であるかどうかや情報提供者が期待するような効果をもたらすかどうかを判断することは難しい. これは提供した情報のタイミング・内容によって混雑がどのように変化するかを踏まえないければ判断できないためである. そのため, プッシュ型による情報提供には実世界の状況に応じた内容を適応的に選択する仕組みと情報提供に対して混雑がどのように変化するかという結果を踏まえてより適した情報を選択する仕組みが必要となる. この仕組みを実現するためには, 情報を提供するタイミングやその内容によって実世界の混雑がどのように変化するかを把握したうえで行動推薦情報を提供する必要がある.

そこで本稿では, 図 1 に示すような Wi-Fi パケットセンサによって実世界から観測されるデータと情報提供時の施設利用者の行動選択データとをもとに, 情報提供により特定の施設の混雑がどのように変化するかを表す混雑推

¹ 九州大学大学院システム情報科学府

² 九州大学大学院システム情報科学研究院

^{a)} nakayama@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

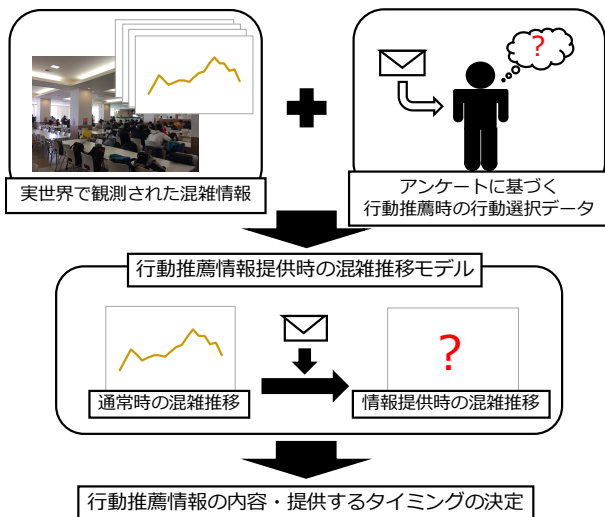


図 1 行動推薦モデルの概要

移モデルを構築し、それをもとに行動推薦を行う行動推薦モデルを提案する。

2. 情報提供による混雑緩和に関する研究

シミュレーションを用いた混雑情報の提供時における混雑緩和の検証は多くの研究でなされている。鈴木ら [6] は、遊園地などのイベント会場における混雑情報提示による混雑緩和を取り上げ、シミュレーションを行うことで情報提供の影響について議論している。一方で検証に用いられているシミュレーションはあくまで仮想的なものであり、設定次第では現実にそぐわない場合があることも考えられる。また聶ら [7]、清水ら [8] は、遊園地で実際に計測したデータを用いたシミュレーションによって、情報提示による混雑緩和に関する議論を行っている。しかし清水らも言及しているとおり特定の条件下における議論であり、利用者が実際にはどのように行動するのかについては考慮されていない。また、これらの研究は情報提供による混雑緩和に関して言及しているものの、情報提供者側が混雑を緩和するために提供する情報の内容や提供するタイミングをどのように決定すればよいのかについては具体的には言及されていない。実際に混雑緩和を行うために情報提供を行う場合は、提供する情報の内容や提供するタイミングをどのように決定するのかを考える必要がある。

3. 行動推薦モデルの構築

3.1 本研究の概要

本研究では、特定の施設の混雑状況をもとに適切な内容、タイミングで情報提供を行うことで施設の混雑を緩和する以下のシステムの構築を実現することを目指す。

- (1) Wi-Fi の電波接触に基づくセンシングにより特定の施設の混雑を測定する。
- (2) 取得した混雑情報をもとに、混雑緩和のために提供す

べき情報の内容やそのタイミングを決定する。

- (3) 決定された情報を施設利用者に通知する形で提供することで、利用者の行動変化を促す。(提供される情報は利用者全体に対して 1 種類)

- (4) 情報提供後の混雑を観測し、上記の手順を繰り返す。

1 節でも述べたように実世界に対して情報を提供する際には提供するタイミングとその内容の決定が重要となる。これらを考慮したうえで情報提供を行うためには、手順 (2) において情報提供によって実世界の混雑がどのように変化するかを表すモデルを用いた行動推薦情報の決定を行う必要がある。本稿ではセンシングした情報や利用者へのアンケートによる行動選択データ等をもとに、情報提供後の混雑推移を表す実世界の混雑推移モデルを構築しシミュレーションにより行動推薦情報を決定する。

3.2 Wi-Fi パケットセンサを用いた混雑測定

本研究では、図 2 に示す Wi-Fi パケットセンサ [9] を用いて周辺の混雑を測定する。この Wi-Fi パケットセンサは、Wi-Fi 機能を持つ端末が周辺の基地局を探索するために定期的に発信する Probe Request を収集することができる。また端末を検知すると、観測時間、MAC アドレスを元に生成された端末の Universal Unique Identifier (UUID)、電波強度 (RSSI)、Probe Request 発信時に MAC アドレスがランダム化されているかどうかなどがデータベースに保存される。観測した RSSI 値と Wi-Fi パケットセンサからユーザの端末までの距離には関係性があり、端末までの距離が近いほど RSSI 値は大きくなることが知られている [10]。そのため、本研究では観測対象となる施設に存在する端末として RSSI 値が -75dBm よりも大きい端末を対象としている。この条件をもとに、各時間に検知された UUID の異なる端末の合計数をもとに混雑を表現する。ただし、ランダム化が行われている端末に関しては 1 つの端末を複数の端末と認識してしまうため、検知された端末数の中からは除外する。加えて、対象とする施設の利用者全員が Wi-Fi 機能を持つ端末を所有しているわけではないため、測定される端末数は施設にいる正確な人数を表すものではない。しかし、ランダム化が行われていない端末数と実際の人数には相関が高いこと [11] から、検知された端末数の合計によって混雑を表現する。これらのデータをもとに各時間の端末数を計算し、図 3 に示すような特定の施設におけるある 1 日の混雑推移を表現する。

また、Wi-Fi パケットセンサによって観測されたデータからは各時刻 t における端末数 C_t を得るだけでなく、図 4 のように時刻 t と時刻 $t+1$ にそれぞれ検知された UUID を比較し、時刻 $t+1$ で新たに検知された場合を流入、時刻 $t+1$ で検知されなくなった場合を流出、時刻 t と $t+1$ の両方で検知された場合を滞留とすることで時刻 t から時刻 $t+1$ の間に施設に対して流入した端末数 V_t 、施設から

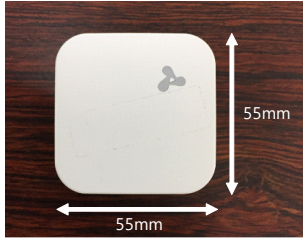


図 2 本研究で用いる Wi-Fi パケットセンサ

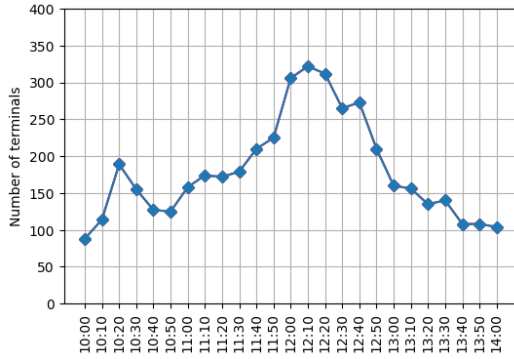


図 3 特定の施設におけるある 1 日の混雑推移

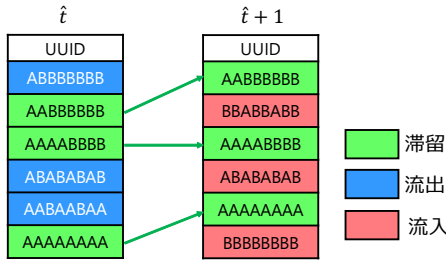


図 4 各時刻に検知された UUID の比較による流入, 流出, 滞留する端末数の推定

流出した端末数 L_t , 施設に滞留した端末数 S_t を推定することができる. さらに, 時刻 $t+1$ 以降に施設へ流入する端末数を U_t と定義し, 式 (1) によって表す.

$$U_t = \sum_{i=t+1}^n V_i \quad (1)$$

これらの関係を図 5 に示す. 時刻 t の端末数 C_t は 1 時刻前から滞留した端末数 S_{t-1} と流入した端末数 V_{t-1} で構成されるため $C_t = S_{t-1} + V_{t-1}$ と表現できる. 施設外の端末数を O_t とすると, 図 5 より施設外の端末数は時刻 t から時刻 $t+1$ の間に施設に流入した端末数と時刻 $t+1$ 以降に流入する端末数によって構成されるため $O_t = V_t + U_t$ によって表現できる. これらから, 通常時 (情報提供が行われない場合) における行動選択確率 $P(X)$ を求めることができる. 事象 X は通常時において施設利用者が選択する行動を表し, 事象として,

- 施設に留まる: $A_{i,i}$
- 施設から出る: $A_{i,o}$

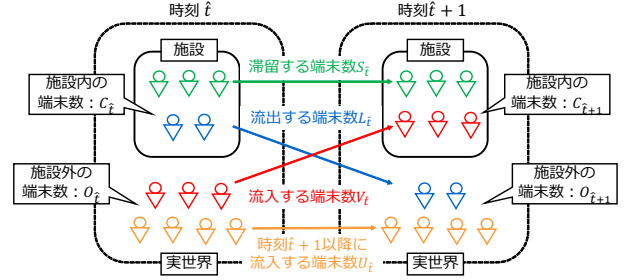


図 5 各時刻の施設の混雑を構成する要素

- 施設に訪問する: $A_{o,i}$
- 施設へは訪問しない: $A_{o,o}$

が考えられる. 通常時の各事象の行動選択確率 $P(X)$ は,

$$\begin{aligned} P(X = A_{i,i}) &= \frac{S_t}{C_t}, & P(X = A_{i,o}) &= \frac{L_t}{C_t} \\ P(X = A_{o,i}) &= \frac{V_t}{O_t}, & P(X = A_{o,o}) &= \frac{U_t}{O_t} \end{aligned} \quad (2)$$

によって求めることができる.

3.3 提供される情報の内容

本研究では, 個別ではなく対象者全員に同一の情報を提供することを想定しており, 提供する情報の内容は以下の 3 つの要素を中心に構成する.

- 現在の施設の混雑状況
- 施設の混雑予測
- 今後の行動を推薦するコメント

ここで表示される「現在の施設の混雑状況」とは, 観測された端末数とそれ以前に観測された端末数をもとに施設がどれくらい混雑しているのかを「少ない」「普通」「混雑」「大混雑」の 4 段階で表したものである. また、「施設の混雑予測」とは直前の混雑推移と最も似ている過去に観測された混雑推移を今後の混雑推移として当てはめることで予測を行い [3] 現在の混雑状況と同様に 4 段階で表したものである. 「今後の行動を推薦するコメント」はあらかじめ用意されている行動推薦コメントの中から混雑状況等に応じて選択されるものである. 提供する情報の例を図 6 に示す. これら 3 つの要素から構成されるある 1 つの情報が施設利用者全体に提供された際に, 施設の端末数がどのように変化するかを推定する.

3.4 情報提供による混雑変化の推定

Wi-Fi パケットセンサを用いて過去に測定された混雑情報をもとに, 情報提供を行った場合その後の施設の混雑推移がどのように変化していくのかをモデル化する. モデル化するにあたり, まず現在の時刻を t とし, 時刻 t で情報提供を行った際に次時刻 $t+1$ ではどのように施設の端末数が変化するかを推定する.

通常時における時刻 $t+1$ の施設の端末数は, 図 7 の状

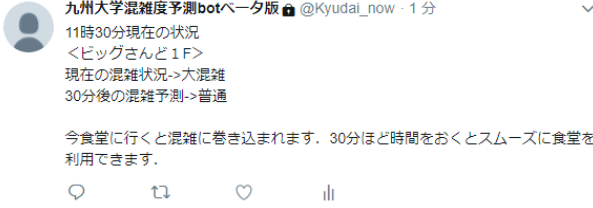


図 6 施設への流入を遅らせることを促す混雑情報の例

状態遷移図からわかるように、時刻 t において施設にいた人の中で、施設に留まる行動 $A_{i,i}$ を選択した人と、時刻 t において施設外部にいた人の中で施設に訪問するという行動 $A_{o,i}$ を選択した人によって構成される。そのため、通常時における時刻 $t+1$ の端末数は式 (3) によって表現される。

$$C_{t+1} = P(X = A_{i,i})C_t + P(X = A_{o,i})O_t \quad (3)$$

このとき、 $P(X = A_{i,i})$, $P(X = A_{o,i})$, O_t は 3.2 節において過去に観測された混雑情報をもとに予測されるものである。一方で、情報提供を行った際の時刻 $t+1$ の端末数 C'_{t+1} は式 (3) における行動選択確率 $P(X = A_{i,i})$ と $P(X = A_{o,i})$ が情報提供によってそれぞれ変化する。

情報提供後の行動選択確率を $P(X'|S, I)$ と定義する。各変数 X', S, I は、

- X' : 情報提供後に選択した行動
 $X' = \{A_{i,i}, A_{i,o}, A_{o,i}, A_{o,o}\}$
- S : 情報提供時における施設利用者群の状態
- I : 提供する情報
 $I \in \{I_k = \{N, F, R_k\} \mid k = 1, 2, \dots\}$

(N : 現在の混雑状況, F : 混雑予測, R_k : 行動推薦)

を表し、行動選択確率 $P(X'|S, I)$ は状態 S である施設利用者群に対して情報 I が提供された場合、行動 X' を選択する施設利用者の割合を表す。

以上から、情報提供直後の状態遷移図は図 8 で表され、情報提供直後の端末数 C'_{t+1} は式 (4) で表現される。

$$\begin{aligned} C'_{t+1} &= f(C_t, O_t, S, I) \\ &= P(X' = A_{i,i}|S, I)C_t + P(X' = A_{o,i}|S, I)O_t \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、式 (4) は利用者全員が提供された情報を確認した場合のものになるが、実世界においては利用者全員が情報を見るわけではない。そのため、時刻 t で情報提供が行われた際の時刻 $t+1$ の端末数 C'_{t+1} は式 (3) と式 (4) の組み合わせによって表現でき、利用者全体に対する情報を閲覧する利用者の割合を $P(\alpha)$ とすると、式 (5) として表される。

$$\begin{aligned} C'_{t+1} &= f(C_t, O_t, S, I) \\ &= (1 - P(\alpha))(P(X = A_{i,i})C_t + P(X = A_{o,i})O_t) \\ &\quad + P(\alpha)(P(X' = A_{i,i}|S, I)C_t + P(X' = A_{o,i}|S, I)O_t) \end{aligned} \quad (5)$$

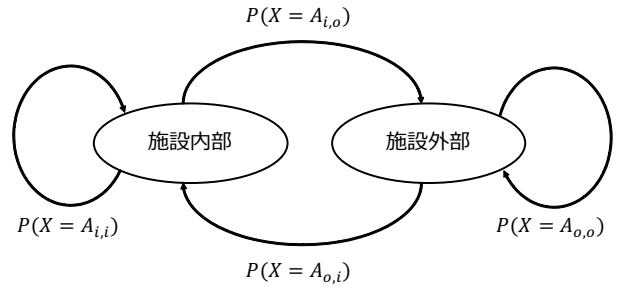


図 7 通常時における状態遷移図

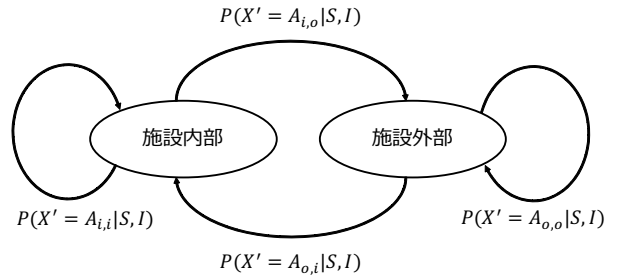


図 8 情報 I を提供した時における状態遷移図

式 (5) で用いた行動選択確率 $P(X' = A_{i,i}|S, I)$, $P(X' = A_{o,i}|S, I)$ に関しては、実世界において情報提供を行い実測して推定することが望ましいが様々なリスクが考えられ実測することは難しい。そこで本研究では、実世界で施設利用者の行動選択に近いものにするため、実際の施設利用者に対してアンケート調査を行うことによって推定する。

3.5 アンケート調査による行動選択確率の獲得

時刻 t での情報提供によって変化した時刻 $t+1$ の端末数 C'_{t+1} を求めるため、図 8 における情報提供後の各行動選択確率 $P(X'|S, I)$ を施設利用者に対するアンケート調査によって推定する。アンケート結果からこれらの行動選択確率 $P(X'|S, I)$ を直接求めることができることが理想的である。しかし、例えば行動選択確率 $P(X' = A_{i,i}|S, I)$ を直接求める場合のアンケート内容の例としては「施設にいるとして情報 I が提供された場合、あなたは施設に留まりますか」といったような非常にあいまいな設問になってしまう。これは設定があいまいなためアンケートの被験者が回答しにくく、アンケートとしては適さない。そのため、アンケートによって各行動選択確率 $P(X'|S, I)$ を直接求めることは難しいと考えられる。

そこで、情報提供後の行動選択確率 $P(X'|S, I)$ を細分化して考える。情報提供後に施設に留まる行動を選択する確率 $P(X' = A_{i,i}|S, I)$ の場合、情報 I の提供後に施設に留まる利用者の要素は以下の 2 つである。

- 情報提供前は施設に留まるつもりだった利用者の中で、情報 I の提供後も施設に留まる利用者
- 情報提供前は施設から出るつもりだった利用者の中で、情報 I の提供後は施設に留まる利用者

これより、行動選択確率 $P(X' = A_{i,i}|S, I)$ は式 (6) により求められる。

$$\begin{aligned} P(X' = A_{i,i}|S, I) \\ = P(X = A_{i,i})P(X' = A_{i,i}|X = A_{i,i}, S, I) \\ + P(X = A_{i,o})P(X' = A_{i,i}|X = A_{i,o}, S, I) \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) における $P(X = A_{i,i}), P(X = A_{i,o})$ は式 (2) により求めることができるため、式 (6) における $P(X' = A_{i,i}|X = A_{i,i}, S, I), P(X' = A_{i,i}|X = A_{i,o}, S, I)$ を求めることにより行動選択確率 $P(X' = A_{i,i}|S, I)$ を推定できる。

同様に、情報提供後に施設を訪問する行動を選択する確率 $P(X' = A_{o,i}|S, I)$ は $P(X' = A_{o,i}|X = A_{o,i}, S, I), P(X' = A_{o,i}|X = A_{o,o}, S, I)$ を求めることにより推定できる。

これらの条件付き確率 $P(X'|X, S, I)$ を求めるため、施設利用者群の状態 S としてすべての利用者には時間的制約がないという 1 つの状態 $S = S_1$ と仮定したうえで情報提供時の行動予定 X として以下の 4 通りのケースを設定し、

- (A) 今から施設を訪問するつむりの場合 ($X = A_{o,i}$)
- (B) 施設に訪問しないつむり (今後施設に訪問する予定) の場合 ($X = A_{o,o}$)
- (C) 施設から出ていくつむりの場合 ($X = A_{i,o}$)
- (D) 施設に留まるつむりの場合 ($X = A_{i,i}$)

ケースごとに様々な情報 I の提示が行なわれた際に、利用者がどのような行動 X' を選択するのかをアンケートによって調査する。

このとき、ケース (A) におけるアンケート結果から $P(X' = A_{o,i}|X = A_{o,i}, S, I)$ 、ケース (B) から $P(X' = A_{o,i}|X = A_{o,o}, S, I)$ が、ケース (C) から $P(X' = A_{i,i}|X = A_{i,o}, S, I)$ が、ケース (D) から $P(X' = A_{i,i}|X = A_{i,i}, S, I)$ が得られることになるため、これらの結果と式 (6) から情報提供後の行動選択率 $P(X' = A_{i,i}|S, I), P(X' = A_{o,i}|S, I)$ を推定される。

3.6 行動推薦情報の決定

3.2 節から 3.5 節において時刻 t においてある行動推薦情報 I を提供した際の時刻 $t+1$ の端末数 C'_{t+1} を推定した。この推定値を用いて情報提供のタイミング及びその内容を決定していく。時刻 t において情報提供を行う際に情報提供者には混雑緩和を行うなどの意図があるため、情報提供者にとって理想となる時刻 $t+1$ における端末数 E_{t+1} が存在すると考えられる。そのため、時刻 t において選択される行動推薦情報集合 $\{I_1, I_2, \dots\}$ (情報を提供しない場合も含む) の中から情報提供後の端末数 C'_{t+1} が時刻 $t+1$ において理想となる端末数 E_{t+1} と最も近くなるような情報 I_k を式 (7) により選択することにより行動推薦情報の決定を行う。

$$k = \arg \min_{i \in \{1, 2, \dots\}} |E_{t+1} - f(C_t, O_t, S, I_i)| \quad (7)$$

3.7 情報提供後の混雑推移モデル

3.4 節及び 3.5 節から時刻 t において情報提供した場合の時刻 $t+1$ の施設の端末数 C'_{t+1} を式 (5) により求めることができる。一方で、その後の時刻 $t+2$ 以降の混雑推移に関しては、実世界において観測されている通常時のデータには存在せず、時刻 $t+2$ 以降での行動選択確率の変化をアンケートから推定できないため求めることは困難である。

そこで本研究では、構築するモデルが実世界の混雑推移を表す可能性が高いものにするため、情報を提供した後の混雑推移 $C'_d = [C'_{d,t+1}, C'_{d,t+2}, C'_{d,t+3}, \dots]$ に関しては、データベースに存在する m 日間の混雑推移 $\{C''_1, C''_2, \dots, C''_m\}$ の中で最も混雑推移が近い日 d の混雑推移 C''_d を参照する。参照する C''_d の選択に関しては、情報提示により混雑が変化した時刻 $t+1$ から 30 分前までの端末数 $C_j (j = t-1, t, t+1)$ と、データベースに存在する各日の混雑推移 $C''_i (i = 1, 2, \dots, m)$ の同時刻の 30 分間の端末数 $C''_{i,j} (j = t-1, t, t+1)$ を式 (8) に示す最小二乗法によりそれぞれ比較し、それらの結果が最も小さくなる日 d を式 (9) より選択する。

$$g(C''_i) = \sum_{j=t-1}^{t+1} (C_j - C''_{i,j})^2 \quad (8)$$

$$d = \arg \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} g(C''_i) \quad (9)$$

選択した日の混雑推移 $C''_d = [C''_{d,t+1}, C''_{d,t+2}, C''_{d,t+3}, \dots]$ と式 (5) によって求められる C'_{t+1} を用いて、式 (10) により情報提供後の混雑推移 C'_d とする。

$$C'_d = \frac{C'_{t+1}}{C''_{d,t+1}} C''_d \quad (10)$$

以上により、対象とする施設の混雑推移が情報提供によってどのように変化していくのかをモデル化する。

4. 実験

4.1 実験の概要

九州大学伊都キャンパス内の「ビッグさんど」と呼ばれる食堂を対象とし、施設に設置されている Wi-Fi パケットセンサによって 2017 年 4 月 10 日から 2017 年 7 月 28 日までの平日に観測されたデータ及び利用者に対するアンケート結果をもとに食堂の混雑推移モデルを第 3 章において提案した手法をもとに構築し、シミュレーションを行った。なお、3.4 節において情報提供を行う時刻 t は 2017 年 4 月 10 日から 2017 年 7 月 28 日までの平日に観測されているある日の時刻 t とし、予測値を用いた $P(X = A_{i,i}), P(X = A_{o,i}), O_t$ は実測値を当てはめてシミュレーションを行った。

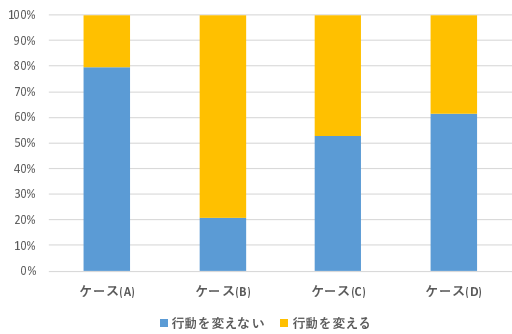


図 9 現在の混雑状況が「普通」、30 分後の混雑予測が「大混雑」、行動推薦として「今食堂に行けば快適に過ごせます。」という情報 I_4 が提供された場合の条件付き確率 $P(X'|X, S, I_4)$

表 1 図 9 の各値と条件付き確率 $P(X'|X, S, I_4)$ の関係

	行動を変えない	行動を変える
ケース (A)	$P(X' = A_{o,i} X = A_{o,i}, S, I_4)$	$P(X' = A_{o,o} X = A_{o,i}, S, I_4)$
ケース (B)	$P(X' = A_{o,o} X = A_{o,o}, S, I_4)$	$P(X' = A_{o,i} X = A_{o,o}, S, I_4)$
ケース (C)	$P(X' = A_{i,o} X = A_{i,o}, S, I_4)$	$P(X' = A_{i,i} X = A_{i,o}, S, I_4)$
ケース (D)	$P(X' = A_{i,i} X = A_{i,i}, S, I_4)$	$P(X' = A_{o,i} X = A_{i,i}, S, I_4)$

4.2 アンケート調査

混雑情報の提示後にどれくらいの割合の人が行動を変化させるのかに関するアンケート調査を、食堂を利用している九州大学の学生に対してそれぞれ実施した。

食堂に関するアンケートでは、現在の混雑状況 N 、混雑予測 F 、行動推薦 R から構成される情報 I が提示された場合、3.5 節で設定した各ケースにおいて利用者はそれぞれどのような行動選択を行うのかを調査した。実施したアンケートにおいて、提供する情報 I を構成する要素である混雑予測 F は 30 分後と設定し、行動推薦 R の内容として以下の 4 種類を用意した。

- 施設の混雑予測について言及し、早めに施設に行くことを推薦する内容 (R_1)
- 現在の施設の混雑状況について言及し、時間をおいて施設に行くことを推薦する内容 (R_2)
- 施設の混雑予測について言及し、早めに施設から出ていくように推薦する内容 (R_3)
- 混雑状況について言及せず、今行くことで快適に過ごせることを伝える内容 (R_4)

それぞれの行動推薦 R を含んだ情報を I_1, I_2, I_3, I_4 とする。アンケート結果の例を図 9 に示す。

図 9 は現在の混雑状況が「普通」、30 分後の混雑予測が「大混雑」、行動推薦として「今食堂に行けば快適に過ごせます。」という情報 I_4 が提供された際の行動変化のアンケート結果を表しており、図 9 の棒グラフの各値と条件付き確率 $P(X'|X, S, I_4)$ との対応関係を表 1 に示す。

図 9 の「ケース (A)」に着目すると、提供された情報を見た場合、今から食堂に行く予定であった多くの利用者はそのまま食堂に行くものの少数は今後の混雑を見越して食堂

を訪問することをやめる可能性があることが確認できる。また「ケース (B)」に着目すると、提供された情報によって食堂への訪問を早める利用者が多いことが分かる。「ケース (C)」の場合は食堂から出ていく予定であった者の中にはこの情報を見たことで滞在時間が増加する可能性があることや、「ケース (D)」の場合は、今後混雑することが情報から読み取れるため、この情報が提供された際に早めに食堂を出る利用者がいることが分かる。このように、各利用者の状況や解釈に応じて混雑への影響が異なるため、提供する情報の内容を決めることは単純ではなく、提供する情報の影響を把握することは重要なことであると言える。

4.3 シミュレーションによる行動推薦情報の決定

情報提供による食堂の混雑推移の変化をモデル化するにあたり、時刻間隔 Δt を 10 分とし、式 (1) の変数 n の値は情報提供から 30 分後である $t+2$ とした。この際 30 分以内の食堂への再訪問はないと仮定する。また、本研究では情報提供手段として Twitter を想定しており、Twitter の利用率 [12] や利用者のうち情報を提供するアカウントをフォローしているかどうかなどを考慮し、式 (5) における提供される情報を閲覧する人の割合 $P(\alpha) = 0.2$ として、情報提供による食堂の混雑推移の変化をモデル化し、以下の 2 つの状況を仮定しシミュレーションを行った。

4.3.1 混雑を減少させたい状況の場合

ある 1 日の 12 時 10 分に混雑が最大になるという予測があるとして、情報提供者はその時間の混雑を緩和したいとする。このような状況のとき、情報提供者が 12 時 10 分における食堂の端末数が $E_t = 300$ となることを理想とした場合に、12 時においてどのような行動推薦情報 I を提供すればいいかをシミュレーションによって求めた。

図 10 は、12 時に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測、行動推薦として「今のうちに食堂へ行かないと行列に並ばないといけなくなるでしょう。」という情報 I_1 が、図 11 は、12 時に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測、行動推薦として「今食堂に行くと混雑に巻き込まれます。30 分ほど時間をおくとスムーズに食堂を利用できます。」という情報 I_2 が、図 12 は、12 時に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測、行動推薦として「食堂の人が増えてくるので、用事を済ませた方は早めに出ることをお勧めします。」という情報 I_3 が、図 13 は、12 時に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測、行動推薦として「今食堂に行けば、快適に過ごせます。」という情報 I_4 が、それぞれ食堂利用者に対して提供された際の食堂の混雑推移を表している。青色の折れ線は情報提供が行われなかった際の混雑推移を示しており、赤色の折れ線は情報提供を行った際の混雑推移を表している。このとき、何も行動推薦しない場合の 12 時 10 分の端末数 C_t は $C_t = 359$ となっている。

シミュレーションの結果、12 時に情報 I を提供した

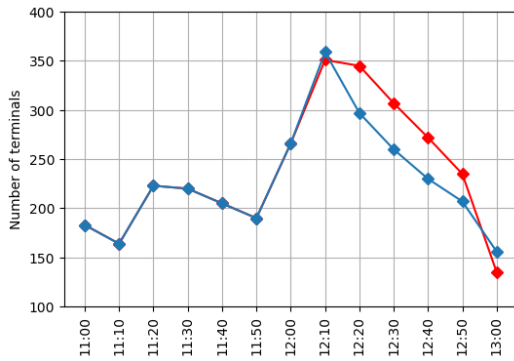


図 10 12 時 00 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今のうちに食堂へ行かないと行列に並ばないといけなくなるでしょう。」という情報 I_1 が提示された際の混雑推移 (青線：行動推薦が行われない場合の推移，赤線：行動推薦が行われた場合の推移)

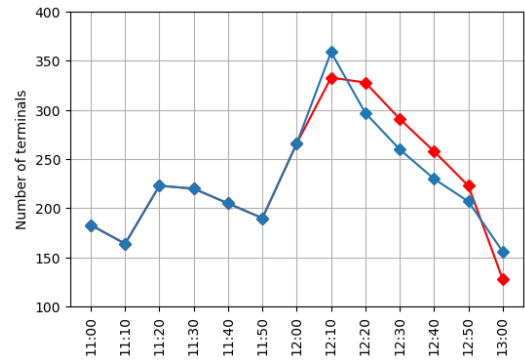


図 12 12 時 00 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「食堂の人が増えてくるので，用事を済ませた方は早めに出ることをお勧めします。」という情報 I_3 が提示された際の混雑推移 (青線：行動推薦が行われない場合の推移，赤線：行動推薦が行われた場合の推移)

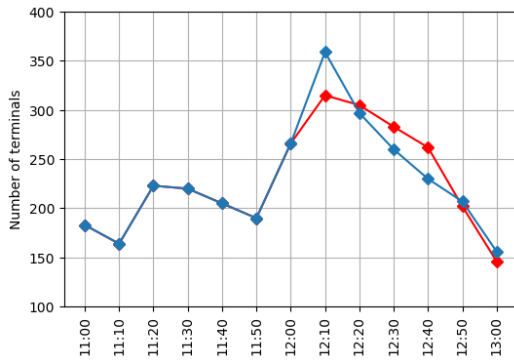


図 11 12 時 00 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今食堂に行くと混雑に巻き込まれます。30 分ほど時間をおくとスムーズに食堂を利用できます。」という情報 I_2 が提示された際の混雑推移 (青線：行動推薦が行われない場合の推移，赤線：行動推薦が行われた場合の推移)

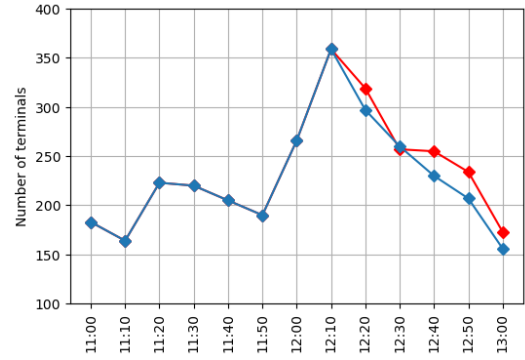


図 13 12 時 00 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今食堂に行けば，快適に過ごせます。」という情報 I_4 が提示された際の混雑推移 (青線：行動推薦が行われない場合の推移，赤線：行動推薦が行われた場合の推移)

際の 12 時 10 分における端末数 C'_t は，情報 I_1 の場合は $C'_t = 351$ ，情報 I_2 の場合は $C'_t = 315$ ，情報 I_3 の場合は $C'_t = 333$ ，情報 I_4 の場合は $C'_t = 359$ と推定された。このとき，式 (7) より 12 時 10 分における端末数があらかじめ理想としていた端末数 $E_t = 300$ に近くなる情報 I_2 を選択することにより，情報提供者の目的にあった情報提供を行うことができる。

4.3.2 混雑を増加させたい状況の場合

4.3.2 節と同様にして，先ほどとは別の日の 11 時 40 分において今後の混雑を考えて 11 時 50 分の混雑が増加するような行動推薦を情報提供者が行いたいとする。この状況の場合に，行動推薦情報 I_1, I_2 のどちらを提供すれば情報提供者にとってより良い情報提供となるのかをシミュレーションによって求めた。このとき，情報提供を行わない場合の 11 時 50 分における食堂の端末数は $C_t = 191$ となっており，情報提供者は 11 時 50 分における食堂の端末数が $E_t = 250$ になることを理想として行動推薦情報を提供するとした。

図 14 は，11 時 40 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今のうちに食堂へ行かないと行列に並ばないといけなくなるでしょう。」という情報 I_1 が，図 15 は，11 時 40 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今食堂に行くと混雑に巻き込まれます。30 分ほど時間をおくとスムーズに食堂を利用できます。」という情報 I_2 がそれぞれ食堂利用者に対して提供された際の食堂の混雑推移を表している。

シミュレーションの結果，11 時 40 分に情報 I を提供した際の 11 時 50 分における端末数 C'_t は，情報 I_1 の場合は $C'_t = 231$ ，情報 I_2 の場合は $C'_t = 197$ と推定された。このとき，情報提供者は 11 時 50 分において理想とした端末数 $E_t = 250$ に最も近くなる情報 I_1 を選択して情報提供を行うこととなる。

また，このとき仮に情報提供者が 11 時 50 分の混雑を減らしたいと考え，11 時 40 分に情報提供を行う際に情報提供者が 11 時 50 分の理想とする端末数を $E_t = 150$ としたとする。この場合は，情報提供を行わなかった場合の端末数 $C_t = 191$ が最も近い値を取るため，情報提供は不必要

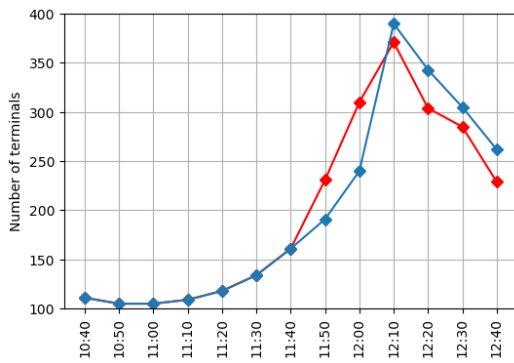


図 14 11 時 40 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今のうちに食堂へ行かないと行列に並ばないといけなくなるでしょう。」という情報 I_1 が提示された際の混雑推移 (青線：行動推薦が行われない場合の推移，赤線：行動推薦が行われた場合の推移)

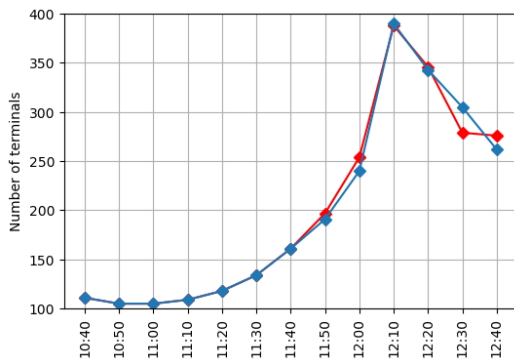


図 15 11 時 40 分に現在の混雑状況と 30 分後の混雑予測，行動推薦として「今食堂に行くと混雑に巻き込まれます。30 分ほど時間をおくとスムーズに食堂を利用できます。」という情報 I_2 が提示された際の混雑推移 (青線：行動推薦が行われない場合の推移，赤線：行動推薦が行われた場合の推移)

であると考えられ情報提供は行わないという選択をすることになる。

このようにシミュレーションによって推薦情報を決定することにより，情報提供後の影響を踏まえ情報提供者側にとって望ましい結果となるような情報提供が行えるようになると考えられる。

5. まとめ

本稿では，Wi-Fi パケットセンサを活用した実世界観測による混雑情報や利用者の行動選択データ等の実データに基づいて行動推薦情報を提供した際にどのように混雑が変化するかを表す混雑推移モデルの構築，及びそれを用いて提供する行動推薦情報を決定する行動推薦モデルを提案した。また，様々な状況におけるシミュレーションを行い，情報提供者にとって望ましいと考えられる効果をもたらす行動推薦情報を提供できることを確認した。

一方で，施設利用者の行動選択には隣接する施設の存在や利用者の行動選択に対する同伴者の影響など利用者の

様々な不確定要素が影響するため，アンケートによって得られた利用者の行動選択データと実世界における実際の行動選択との間には差があり，シミュレーションによる混雑推移の変化と実世界において情報提供を実際に行った場合の混雑推移の変化には違いがあることが考えられる。そのため，今後は提案した行動推薦モデルに従って実世界に対して情報提供を行い，その結果を踏まえて混雑推移モデルを更新していく予定である。

謝辞 本研究の一部は，株式会社アドインテとの共同研究により実施されました。ご協力いただいた皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] iBeacon. <https://developer.apple.com/ibeacon/>.
- [2] 高柳健司, 村尾和哉, 望月祐洋, 西尾信彦. 間欠的人流センシングにおける回遊状況推定. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 234–241, 2016.
- [3] Masaki Igarashi, Atsushi Shimada, Kaito Oka, and Rin-ichiro Taniguchi. Analysis of Wi-Fi-based and perceptual congestion. In *the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, pp. 225–232, 2017.
- [4] Yuki Fukuzaki, Masahiro Mochizuki, Kazuya Mura, and Nobuhiko Nishio. A pedestrian flow analysis system using Wi-Fi packet sensors to a real environment. In *proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, pp. 721–730. ACM, 2014.
- [5] K-know. <http://crw-analytics.net/>.
- [6] 鈴木麗瑩, 有田隆也. 行動多様性に対する情報共有の影響とその適応性-イベント会場における混雑情報提供に関するマルチエージェントシミュレーション. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 86, No. 11, pp. 830–837, 2003.
- [7] 聶耳, 鈴木麗瑩, 有田隆也. 東山動植物園遊園地への巡回ガイド端末の導入による混雑緩和のシミュレーション評価. 第 77 回全国大会講演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 317–318, 2015.
- [8] 清水仁, 松林達史, 納谷太. 混雑飽和状態の遊園地における待ち時間削減手法のシミュレーション評価. 人工知能学会論文誌, Vol. 32, No. 5, pp. AG16–F.1, 2017.
- [9] AIBeacon. <https://aibeacon.jp>.
- [10] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇. Placeengine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤. インターネットコンファレンス, Vol. 2006, pp. 95–104, 2006.
- [11] Jeanne Faurie, 島田敬士, 堀磨伊也, 尾ノ上晃, 中山経太, 谷口倫一郎. Wi-Fi スポット周辺の人の行動分析. 第 15 回 ITS シンポジウム 2017, 2017.
- [12] 総務省. 平成 29 年版情報通信白書. <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc111130.html>.