情報処理学会論文誌　数理モデル化と応用　Vol. 3　No. 1　87–97 (Jan. 2010)

天気変化を考慮した観光スケジュール群の探索アルゴリズム

武　兵[†1]　村田佳洋[†2]　柴田直樹[†3]
安本慶一[†1]　伊藤実[†1]

本論文では，天気が確率的にしか予測できない場合を想定した，任意の天気変化パターンに対応した観光スケジュール群を算出する問題を取り扱う．このスケジュール群は，出発地点を根として目的地ごとに分岐する木（スケジュール木と呼ぶ）で表現される．本問題の目的は，スケジュール木によって示された確率的なスケジュールの，ユーザ満足度の期待値の総和を最大化することである．本論文では，この問題を解くための欲張り法および局所探索法に基づいた近似アルゴリズムを提案する．このアルゴリズムは，まず欲張り法により初期のスケジュール木を作成し，部分木を単位とした目的地の置換を繰り返し行うことにより，期待ユーザ満足度が高いスケジュール木を生成する．提案手法を評価するため，20 の観光地を持つランダムに作成されたインスタンスを用いて実験を行った．その結果，提案手法は，欲張り法を用いた場合と比べて平均 1.23 倍の期待値を持つスケジュール木を得ることができた．

Algorithm for Composing Satisfactory Tour Schedules for Fickle Weather

Bing Wu,[†1] Yoshihiro Murata,[†2] Naoki Shibata,[†3]
Keiichi Yasumoto[†1] and Minoru Ito[†1]

In this paper, we consider the problem of constructing a schedule of a sightseeing tour under considering the probabilistic change of weather. In our proposing algorithm, the schedule is represented as a *scheduling tree* that consists of ordered sequences of visiting spots, where each spot is associated with user satisfaction degree which is determined by weather. Then our problem is to find the scheduling tree that maximizes the expected value of total user satisfaction degree. Since finding the optimum scheduling tree is computationally difficult, we propose an approximate algorithm based on the greedy search and the neighborhood search techniques. In order to evaluate our algorithm, we compare the algorithm with an existing method through randomly generated instances consisting of 20 spots. As a result, our algorithm constructed the scheduling tree whose expected value of total user satisfaction degree is 1.23 times higher than the existing method.

1. はじめに

近年，ユーザに対し目的地への経路案内や周辺情報の提供を行う様々なパーソナルナビゲーションシステムが提案されている．パーソナルナビゲーションシステムの主な用途として観光への利用があげられる．エンタテインメントを目的としたものに，ユーザのコンテキスト（位置，時間，周辺環境など）に応じて動的に適切なルートを案内するシステム[1)]や屋内施設でのルート案内[2)]，携帯端末に対し観光案内などの情報を提供するためのシステム[3)]がある．また，旅行中すべての期間において案内を行うことを目的に，多様な旅行計画や，交通機関乗り換えに関する情報の提供，屋内外の案内のための統合アプリケーションが提案されている[4)]．しかし，これらは基本的に現在位置から次の目的地を案内するものであり，巡回順序や観光時間，距離などを考慮して，複数目的地を巡回する満足度の高いスケジュールを立案する機能を持たない．観光では，通常，いくつかの目的地を巡回する．複数の目的地を巡回するような経路を求める問題として巡回セールスマン問題がある．この問題を効率良く解く近似アルゴリズムとして，Lin-Kernighan 法を利用した手法[5)]や大規模局所探索を利用した手法[6)]がある．一方，観光などを対象とした巡回経路算出問題としてはテーマパーク問題がある．この問題は，テーマパークに多数の来場者がいる状況において，人々を空いているアトラクションに誘導して全体の混雑度を下げ，客の満足度を上げることを目的とする．これらの既存の手法が持つ経路案内機能は，特定のアトラクションの混雑などコンテキストの変化に応じて臨機応変な案内を可能にする．

複数地点を巡回する経路を求める問題としてテーマパーク問題がある．文献 7) では，テーマパーク内施設の利用・予約のためのユーザへの情報提示や誘導をうまく調整することにより，全体の混雑度を下げて客の満足度を上げる手法が提案されている．また，我々の研究グ

†1 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology
†2 広島市立大学情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University
†3 滋賀大学経済学部情報管理学科
Department of Information Processing and Management, Shiga University

© 2010 Information Processing Society of Japan

ループでは，観光のためのパーソナルナビゲーションシステム P-Tour[8] を提案している．P-Tour は，ユーザの希望に応じた複数目的地の巡回スケジュールを立案し，また各目的地における案内機能を提供する．しかし，これらのシステムは，天気に応じて目的地の満足度が変化する問題を取り扱っていない．

観光における旅行者の満足度は，天気に大きく左右されるため，晴天時と雨天時とでは適したスケジュールは異なることが多い．単純な対応としては，雨天時におけるユーザの満足度を目的地ごとのデータとして与える方法が考えられる．これにより，雨天時のスケジュールの立案が可能となる．しかし，天気が観光ツアーの間に移り変わる可能性がある場合には，天気の変化パターンおよびそのタイミングによって，適したスケジュールも変化する．天気の変化パターンおよび変化タイミングの組合せは多数存在するため，すべての場合に対応するスケジュールの数は膨大になる．従来手法では，このような場合のスケジュール群の立案は困難であった．

本論文では，天気が確率的に予測できる場合を想定し，任意の天気予報データに対応したスケジュール群を立案する問題を定式化する[9]．このスケジュール群は，出発地点を根とし天気に応じて分岐する目的地の列からなる木（スケジュール木と呼ぶ）で表現される．この問題の目的は，スケジュール木における満足度の期待値の総和を最大化することである．本論文では，この問題を解くために，欲張り法と局所探索法に基づいた近似アルゴリズムを新たに提案する．局所探索法（n-swap 法と呼ぶ）は，スケジュール木の部分木内において目的地を交換するもので，同じ目的地を複数巡回するシーケンス（1 つのスケジュール）を生成することなく，スケジュール群の局所探索を行うことができる．

まず，提案手法における局所探索部分（n-swap 法）を評価するため，20 の観光地を含むようなランダムなインスタンスを用いて実験を行った．その結果，局所探索部分は，欲張り法により得られたスケジュール群の期待値を平均 1.23 倍改善することを示した．次に，提案手法により得られたスケジュール群を評価するため，シミュレーションにより従来手法との比較実験を行った．その結果，最も確率の高い天気と最も確率の低い天気を考慮して立てられたそれぞれのスケジュールに対し，天気が安定しない場合のインスタンスにおいて，7%から 10%上回る期待値を持つスケジュールを得ることができた．さらに，提案手法により得られた解の最適性を評価するため，6 観光地を含むような奈良市内観光インスタンスを用いて実験を行った．その結果，全探索で 18.3 時間かかるような問題に対して，4 秒以内で同一の解を発見することができた．

2. 問題定義

本章では，天気の変化に対応可能な観光スケジュール木算出問題の定式化について述べる．問題の概要を例を用いて説明した後に，問題の定式化を与え，最後に本問題の NP 困難性について説明する．

2.1 問題概要

観光に適したスケジュールは，天候に応じて往々にして変化する（例：**図 1**）．旅行者は，旅行前にあらかじめ天気予報 web サイト[10] などを通じて，**表 1** のような観光エリアの天気予報を入手できる．本問題では，事前に入手した天気予報情報に基づき，**図 2** に示すようなスケジュール木を求める．この図では，奈良ホテルを 9:00 に出発し，晴天であれば 10:00 に奈良公園を巡回することを示している．またその下に書かれた “(80 点，20%)” は，奈良公園の晴天時における重要度が 80 点で，このときの巡回確率が 20%であることを示している．スケジュールごとの満足度は，含まれる目的地の重要度と，観光経路の短さ，帰着時間遵守に関する修正値の和として与えられる．そして満足度に巡回確率をかけることにより，スケジュール中における満足度の期待値が計算できる．本問題の目的は，スケジュール木全

図 1　天気ごとのスケジュールの例
Fig. 1　Example of schedules on each weather.

表 1　天気予報の例
Table 1　Example of weather forecast information.

	晴	曇	雨
09:00–10:00	80%	10%	10%
10:00–11:00	80%	10%	10%
11:00–12:00	10%	30%	60%
12:00–13:00	10%	20%	70%

© 2010 Information Processing Society of Japan

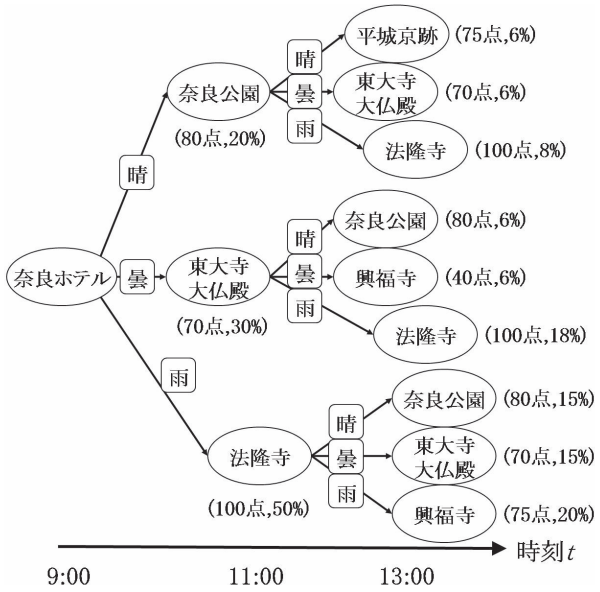

図 2　スケジュール木の例
Fig. 2　Example of schedule tree.

体の期待値の総和を最大化することである．

2.2　問題の定式化

2.2.1　入　　力

入力 I は，あらかじめ与えられたデータベース入力と，ユーザが探索時に与えるユーザ入力からなる．

<データベース入力> データベース入力として，道路地図および目的地のデータ，天気予報データが与えられる．データベース入力は以下の項から構成される．

- 道路地図データ：道路網を示す有向グラフ $G = (V, E)$．各エッジは以下の項目を持つ．
  - 頂点間距離：道路網グラフ G のエッジはそれぞれ距離を持つ．頂点 v_1，v_2 の間の距離は $dist(v_1, v_2)$ で与えられる．
- 目的地データ：観光スポットのデータであり，データベース上には次の項目を持つ．
  - $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_n\}$：観光スポットの集合（例：法隆寺，奈良公園など）を表す．
  - $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$：観光スポットの位置の集合を表す．位置は道路地図データのいずれかの頂点に対応付けられている．
- 天気予報データ：天気予報から導かれるデータであり，次の項目を持つ．
  - W：天気の種類の集合．$W = \{$ 晴，雨，曇 $\}$ など．ここでは，観光において影響を与えうる天気すべてをあらかじめ入力する（例：降雪地域ならば雪など）．この天気はすべて排反である．w_1 が強風，w_2 が雨としたとき，w_1 かつ w_2 であるというような表現は許されない．よって風雨という天気が必要ならば，別に w_3 などとしてあらかじめ入力しておく必要がある．
  - $pw(w_i, t)$：目的地が時刻 t において天気 w_i である確率を返す関数を表す．この値は天気予報により事前に入力として与える．気象庁などにより容易に手に入る天気予報の利用を想定し，「9:00–11:00 は晴天の確率が 80%，曇天の確率が 10%，雨天の確率が 10%」のように，観光が行われるすべての時間帯に対して与える（表 1）．

<ユーザ入力> ユーザ入力として，滞在日数や出発・帰着時間，観光スポットの重要度，観光スポットにおける時間制約を与える．重要度は，ユーザがその観光スポットを訪れたい希望の度合いを示す値である．基本的に，巡回する観光スポットの重要度の合計が大きい経路が望ましい経路となる．また，この値は天気によって変わるため，すべての天気に対してそれぞれ与えられる．本システム運用時には，各目的地に対しデフォルトの重要度を設定することで，ユーザには特に訪れたい/訪れたくない目的地や観光中の装備により天気の影響を大きく受ける目的地の値のみを入力させることもできる．

ユーザ入力は以下の項から構成される．

- 旅程中の出発/到着データ：
  - pd_s，$pd_g \in D$：出発/帰着地点を表す．
  - pt_s，pt_g：出発時刻/帰着時刻，つまり出発/帰着地点における時間制約を表す．
  - $speed$：ユーザの移動速度を表す．
- 目的地データ：観光スポットのデータであり，ユーザ入力として次の項目を持つ．
  - rst_i：目的地 d_i の到着時刻に対する制約（例：“12:00 以前”）を表す．
  - dur_i：目的地 d_i の滞在時間に対する制約（例：“到着時刻から 30 分”，“12:00 から 30 分” など）を表す．
  - $pre(d_i, w_j, t_i)$：目的地 d_i において天気 w_j の場合に，時刻 t_i に到着した際の重要度を表す．
  - α，β，γ：満足度の計算に使われる係数．それぞれ，目的地の重要度，観光経路の短さ（無駄な経路の少なさ），帰着時間遵守（時間オーバのペナルティ）をどれだ

© 2010 Information Processing Society of Japan

け重視するかを示す．

2.2.2 設計変数

本問題の設計変数はスケジュール木 $T_s = (U_s, E_s)$ である．各ノードは目的地と天候を要素をとして持ち，ノード i の目的地と天候をそれぞれ d'_i，w'_i で示す．ここで，スケジュール木 T_s は根つき木である．

2.2.3 目的関数

本問題の目的は**期待値**を最大化するような根つき木 T_s を求めることである．期待値を求める目的関数は後述の式 (2)，(4) を用いて以下の式で与えられる．

$$exp(T_s) = \sum_{j \in L_s} pro(j) \cdot satt(j) \tag{1}$$

ここで，L_s はスケジュール木 T_s の葉ノードの集合である．

以降，式 (1) で用いる関数について述べる．実際にはこれら関数は引数としてスケジュール木 T_s を必要とするが，記述の簡単化のために省略する．本項で述べる以降すべての関数についても同様である．

$pro(i)$ はスケジュール木 T_s におけるノード i への到達確率を返す関数であり，以下の式で再帰的に与えられる．

$$pro(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = \text{root} \\ pro(par(i)) \cdot pw(w'_i, dep(par(i))) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

ここで，root はスケジュール木 T_s の根ノード，$par(i)$ はスケジュール木 T_s におけるノード i の親ノードを返す関数，w'_i は $par(i)$ から i に至るリンクに付与された天候である．

$dep(i)$ はノード i の出発時間を返す関数であり，以下の式で再帰的に与えられる．

$$dep(i) = \begin{cases} pt_s & \text{if } i = \text{root} \\ dep(par(i)) + dur'_i + dist(d'_i, d'_{par(i)})/speed & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

$satt(j)$ は，スケジュール木 T_s において根ノード $root$ から葉ノード j に到達するスケジュール（以降，これをスケジュール S_j と呼ぶ）の満足度を与える関数で，以下の式で与えられる．

$$satt(j) = \alpha \cdot desp(S_j) + \beta \cdot disp(S_j) + \gamma \cdot timp(S_j) \tag{4}$$

ここで α，β，γ は目的地の重要度，観光経路の短さ，帰着時間遵守のどれを重要視するかを調整する重み係数である..

$desp(S_j)$ は，スケジュール S_j において制約条件を満たした目的地における重要度の合計を返す関数で，以下の式で与えられる．

$$desp(S_j) = \sum_{i \in nod(S_j)} satd(i) \tag{5}$$

$$satd(i) = \begin{cases} pre(d'_i, w'_i, tima(i)) & \text{if } tima(i) \le rst_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

ここで，$nod(S_j)$ はスケジュール S_j 内のノードから根ノード root を除いたノード集合を返す関数である．$d'_i \in D$ はノード i における目的地，$w'_i \in W$ はノード i における天候である．

$tima(i)$ は，スケジュール木 T_s においてノード i の目的地に到着する時間を返す関数である．

$$tima(i) = \begin{cases} pt_s & \text{if } i = \text{root} \\ dep(par(i)) + dist(d'_i, d'_{par(i)})/speed & \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

$disp(S_j)$ は，スケジュール S_j の経路長さによるペナルティ値（負の数）を返す関数で，以下の式で与えられる．

$$disp(S_j) = \sum_{i \in nod(S_j)} dist(i, par(i)) \tag{8}$$

$timp(S_j)$ は，スケジュール S_j において帰着時間を超過したときのペナルティ値（負の数）を返す関数で，以下の式で与えられる．

$$timp(S_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } tima(j) \le pt_g \\ tima(j) - pt_g & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

2.2.4 制約条件

スケジュール木 T_s は以下の制約条件を満たしていなければならない．

- スケジュール木は $|W|$ 分木であること
  - つまり，各スケジュールは冒頭部分を必ず共有する．
  - 完全 $|W|$ 分木である必要はなく，根ノードから葉ノードまでの深さは一定でなくてよい．
- 葉ノードを除く各ノードは，W 内のすべての天候に対応する子ノードを持つこと．
- 根ノードの目的地 $d_{\text{root}} = pd_s$ であること．
- 葉ノードの目的地 $d_j = pd_g$，$j \in L_s$ であること．
- 各スケジュールの目的地集合は，同じ目的地を複数個含まないこと[⋆1]．

⋆1 スケジュール木内の異なるスケジュールにおいては，同じ目的地を複数個含んでいてよい．

© 2010 Information Processing Society of Japan

2.3　NP 困難性

提案する問題は，観光時間の間ずっと天気が同一である場合，天気を考慮しない場合の観光スケジュール立案問題[8] に帰着できる．この問題は NP 困難であるため，提案する問題もまた NP 困難である．

3.　近似アルゴリズム

提案する近似アルゴリズムは，(1) 欲張り法，(2) 帰着スケジュール生成，(3) 局所探索法の 3 つの部分からなる．

(1)　入力に欲張り法を適用し，初期のスケジュール木を生成する部分．ここでは帰着時刻を考慮せず，完全木を生成する．

(2)　帰着時刻を考慮しないスケジュール木から，帰着時刻までに帰着地点に帰るスケジュール木を生成する部分．

(3)　基となるスケジュール木に局所探索を適用し，改善する部分．

本章では，これらの部分について詳しく述べる．

3.1　欲 張 り 法

この部分では，欲張り法を用いて場当たり的にスケジュール木を構成する．スケジュール木の各ノードからの天気の分岐先のノードそれぞれに対し，最も満足度が高いと予測される目的地を割り当てる．提案する近似アルゴリズムでは，スケジュールにおける木構造をヒープ構造で表す．

この部分では，高さ $height$ の完全木を生成する．ここで $height$ は生成する完全木の高さであり，スケジュール木の各パスが含みうる最大の目的地数とする．この値は，出発時刻と帰着時刻の差，および目的地における最小滞在時間から計算することができる．

(1)　帰着地点に到達していない葉ノードを格納しておく集合（以下，探索中節点集合）を表す変数 S を用意し，空集合で初期化する．

(2)　根の節点を考える．この節点に，目的地として出発地点 pd_s を，この節点を出発する時刻として，最初の出発時刻 pt_s を割り当てる．この節点を探索中節点集合に加える．

(3)　探索中節点集合 S が空であれば，アルゴリズムを終了する．そうでなければ，ここから任意の節点を 1 つ取り出す．この節点を注目節点とする．

(4)　注目節点に割り当てられた目的地から，満足度を最大にするような次の目的地を欲張り法を用いて選択する．満足度は天気によって異なるため，天気ごとに 1 つずつ選ぶ．注目節点の子節点にこれら目的地を割り当て，次の目的地における到着時間と出発時間を計算する．子節点の深さが $height$ よりも小さければ，これら子節点を探索中節点集合 S に加える．

(5)　ステップ (3) へ戻る．

3.2　帰着スケジュール生成

3.1 節で述べたアルゴリズムは，帰着地点に帰ってくるスケジュールを生成しない．そこで，本節で述べるアルゴリズムを用いて，これを帰着時刻までに帰着地点に帰ってくるようなスケジュールに変換する．以下に，修正アルゴリズムを示す．

(1)　探索中節点集合 S を空にする．スケジュール木の葉節点すべてを探索中節点集合 S に加える．

(2)　探索中節点集合 S が空であれば，アルゴリズムを終了する．そうでなければ，ここから任意の節点を 1 つ取り出す．この節点を注目節点とする．

(3)　注目節点に割り当てられた目的地から，直接帰着地点に帰った場合，帰着時刻までに帰ることができるかどうかを計算する．これは，目的地と帰着地点の間の距離，およびその節点の出発時刻から計算できる．帰ることができるなら，ステップ (2) に戻る．

(4)　注目節点に，目的地として帰着地点を割り当て直す．その親節点の出発時刻および割り当てられた目的地から，到着時刻を計算する．親節点を探索中節点集合 S に加え，ステップ (2) に戻る．

3.3　局所探索法

本節では，スケジュール木を改善する局所探索法について述べる．この手法では，まずスケジュール木内のランダムに選ばれた 2 つの節点に割り当てられた目的地を交換する．スケジュール木の各パスは同じ目的地を複数回巡回するパターンを含んではならないため，この交換は部分木を対象として行う．この交換を複数回行った後のスケジュール群の期待値を計算し，改善されていればそれを採用，悪化していれば破棄する．この繰返しの数を**交換回数** n とし，この局所探索法を n-swap 法と呼ぶ．この過程を規定回数繰り返し，アルゴリズムは終了する．

(1)　スケジュール木の中の節点をランダムに選択する．この節点を交換元節点とする．また，この節点に割り当てられている目的地を交換元目的地とする．**図 3** の例では，黒丸で囲んだ節点を選択しており，交換元目的地は D である．スケジュール木は天気ごとに分岐するため，同じ目的地が複数の節点に割り当てられている場合があることに注意が必要である．

© 2010 Information Processing Society of Japan

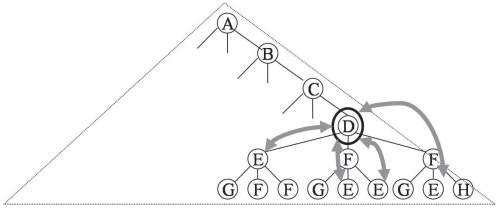

図 3　n-swap 法の例
Fig. 3　Example of n-swap search method.

(2)　すべての目的地の集合から交換元目的地（D）と交換元節点の先祖の目的地（A，B，C）以外の目的地をランダムに 1 つ選択する．選択した目的地を交換先目的地とする．図 3 の例では，目的地 E を選択している．

(3)　交換元節点を根とする部分木内において，交換先目的地を割り当てられているすべての節点の目的地に対して，交換元目的地（図 3 では目的地 D）を上書きする．その後で，交換元節点に交換先目的地（図 3 では目的地 E）を上書きする．部分木内に交換先目的地を持つ節点が 1 つもない場合もある．その場合，交換元節点にのみ目的地の上書きを行う．

(4)　交換回数が n 未満であれば，ステップ (1) に戻る．

(5)　得られたスケジュール木に 3.2 節のアルゴリズムを適用し，修正された木の期待値を計算する．期待値が悪化していた場合，元に戻す．

(6)　繰返しが繰り返す回数に達すれば終了する．そうでなければ，ステップ (1) に戻る．

4. 評 価 実 験

本章では，提案手法の有効性を評価するために行った実験について述べる．以下の 3 つの実験を行った．(1) 提案手法の n-swap 法の効果を評価するため，交換回数 n の値を変えて得られたスケジュール木の期待値を計測した．(2) 提案手法により得られた解の品質を評価するため，従来手法により得られた解と比較した．(3) 提案手法の有効性を評価するため，提案手法と全探索法と比較して解の最適性を評価した．

実験環境として，CPU Celeron 2.00 GHz，メモリ 2.00 GB，OS WindowsXP Professional の PC を用いた．プログラミング言語として Java のバージョン 2.3.2 を用いた．

実験 (1) と (2) には，ランダムに生成された 10 個のインスタンスを用いた．これらインスタンスは，13,500 m × 9,000 m のフィールドの中にランダムに配置された 20 個の観光スポットを含んでいる．各観光スポットの重要度は天気ごとに 50–100 の間の値の一様乱数で与えた．また滞在時間は，1，1.5，2，2.5，3 時間のいずれかの値をランダムに与えた．また実験 (3) に対しては，奈良をモデルとした 15 個の観光スポットを含むインスタンスを用いた．実験 (3) の各観光スポットの重要度は，**表 2** に示す重要度係数を掛けることにより，天気に応じた重要度としている．たとえば，国立国会図書館（基本重要度 50，室内型）において曇（室内では係数 0.5）であれば重要度は $50 \times 0.5 = 25$ 点となる．自動車での移動を想定し，すべての実験において，目的地間の移動速度を 40 km/h とした．満足度の係数として，$\alpha = 1$，$\beta = 1$，$\gamma = 0.5$ とした．つまり，移動距離 1 km ごとに満足度は 1 点減点され，1 分遅延するごとに 0.5 点減点される．

表 2　目的地属性による重要度係数
Table 2　Satisfaction factor for attribute of destination.

天気	屋外型	室内型	その他
晴	1.0	0.4	0.8
曇	0.6	0.5	0.8
雨	0.2	1.0	0.8

4.1　交換回数 n の評価

天気の変化に対応可能な観光スケジュール木算出問題は NP 困難であり，多くの局所解を持っている．提案手法は局所探索法を用いているが，良い解を求めるには，どれだけ局所解から脱出できるかが重要となる．n-swap 法の n の値は局所探索時における解空間上の移動距離であり，n の値が大きければ局所解からの脱出能力は向上するが，収束し難くなると考えられる．また，n-swap 自体を繰り返す回数が多いほど良い解は求められるが，計算時間は増加する．そのため，適切な n の値と繰返し回数を求めることが重要である．．そこで，適切な n の値と繰返し回数を評価するため，欲張り法により得られたスケジュール木の期待値と，さらに n-swap 法を適用した後の期待値を計測し，これらを比較した．この値を改善率（n-swap 法後期待値/欲張り法後期待値）とする．

ランダムに生成された地図データ 10 個を用いて，**表 3** に示す 5 つの天気予報データ（晴 → 晴，晴 → 雨，雨 → 晴，雨 → 雨，安定しない）を用いた．n の値を変えて得られたスケジュール群の期待値の改善率と計算時間を，一定の繰返し回数ごとに計測し，これらを評価した．観光時間が違うと，解の収束するために必要な繰返し回数時間が違うと考えられる．そこで観光時間が 5 時間の場合（出発時間 9 時，帰着時間 14 時）と，8 時間の場合（出発時間 9 時，帰着時間 17 時）について実験を行った．n の値は 1 から 4 とした．表 3 に示す

© 2010 Information Processing Society of Japan

表 3　天気予報データのリスト
Table 3　List of weather forecast information.

天気変化	5 時間観光	8 時間観光	晴れ	曇り	雨
晴れ－晴れ	09:00–12:00	09:00–13:00	80%	10%	10%
	12:00–15:00	13:00–18:00	80%	10%	10%
雨－雨	09:00–12:00	19:00–13:00	15%	15%	70%
	12:00–15:00	13:00–18:00	15%	15%	70%
晴れ－雨	09:00–12:00	09:00–13:00	80%	10%	10%
	12:00–15:00	13:00–18:00	10%	10%	80%
雨－晴れ	09:00–12:00	09:00–13:00	15%	15%	70%
	12:00–15:00	13:00–18:00	70%	15%	15%
安定しない	09:00–12:00	09:00–13:00	33%	33%	33%
	12:00–15:00	13:00–18:00	33%	33%	33%

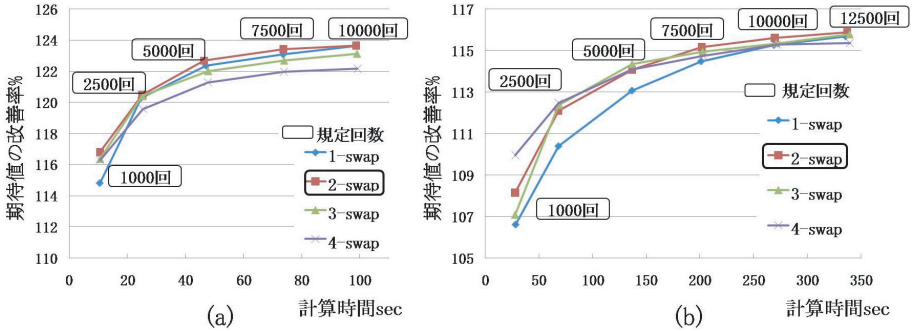

図 4　n-swap 法の機能評価-5 時間 (a) と 8 時間 (b)
Fig. 4　Investigation of function for n-swap method-5 hours (a) and 8 hours (b).

5 つの天気予報データ，各種類の繰返し回数に対して，各 n-swap 法の改善率と計算時間を 5 試行の平均として計算した．

観光時間が 5 時間で，異なる地図データ 5 個（地図 1，2，3，4，5）を用いた場合の結果を**図 4** (a) に示す．この場合，繰返し回数が 5,000 回を超えたあたりで解は収束した．また，計算時間はいずれの場合においても繰返し回数が 125 回に対し 1 秒程度であり，n の値による変化はあまり見られなかった．一方，観光時間が 8 時間で，異なる地図データ 5 個（地図 6，7，8，9，10）を用いた場合の結果を図 4 (b) に示す．この場合，繰返し回数が 7,500 回を超えたあたりで解は収束した．また，計算時間はいずれの場合においても繰返し回数が 35 回に対し 1 秒程度であり，n の値による変化もあまり見られなかった．図 4 より，観光時間が 5 時間，8 時間のいずれの場合でも，n の値にかかわらず，欲張り法のみを用いた場合と比較して n-swap 法を用いた場合は期待値を改善することができた．このことから，欲張り法に加えて n-swap 法を適用する手法は有効であると考えられる．また，$n = 2$ の場合が良い性能を示していることが分かる．しかし，観光時間が 5 時間から 8 時間になると，収束するまでの平均計算時間は 3.5 倍程度に増加した．これは，スケジュール木の高さが増加するにつれ，木の節点数が大きく増加するためである．

4.2　従来手法との比較評価

提案手法によりスケジュール群を立案することの有効性を調べるため，スケジュールを 1 つだけ立案するような従来手法との比較実験を行った．従来手法として P-Tour [8] を用いた．これは天気変化に対応するスケジュールを立案するために開発されたものではない．しかし，スケジュールの満足度を計算する際に，各時刻における天気に応じた重要度を用いることにより，時刻ごとの天気が明確である場合（つまり，100%予測できる場合）のスケジュールを立案することができる．実験では，それぞれの時刻において，最大の確率を持つ天気を与えた．

一方，巡回路を求める問題として Vehicle Routing Problem（以下，VRP）が広く研究されている．VRP は，配送センタから，複数の配送車を用いて複数の需要者へと効率的に配送する経路を求める問題である．そこで，sweep 法と呼ぶ比較手法を作成した．sweep 法では，まず出発地点を配送センタ，目的地を需要者と見なし，観光スケジュール木算出問題を VRP 問題と見立てて配送経路を決定する．この部分に文献 11) の手法を用いる．そして 1 台の車の経路を 1 つのスケジュールと見なし，2.2.3 項で述べた目的関数を用いてそれぞれのスケジュールの満足度を計算する．最大の満足度を持つスケジュールを文献 11) の 2-opt 法で改善し，最終的なスケジュールを得ることとした．

4.2.1　比 較 方 法

P-Tour や sweep 法で得られたスケジュールは木構造を持っていないため，そのままでは提案手法により得られたスケジュール群と比較することができない．そこで従来手法により得られたスケジュールを，どの天気においても巡回する目的地を変更しないようなスケジュール木に変換する．**図 5** では．A → D → G と目的地を巡回するスケジュールは，どの天気予報データにおいても A → D → G と目的地を巡回するようなスケジュール群に変換される．この変換により得られたスケジュール木と，提案手法により得られたそれを以下の項目において比較した．

© 2010 Information Processing Society of Japan

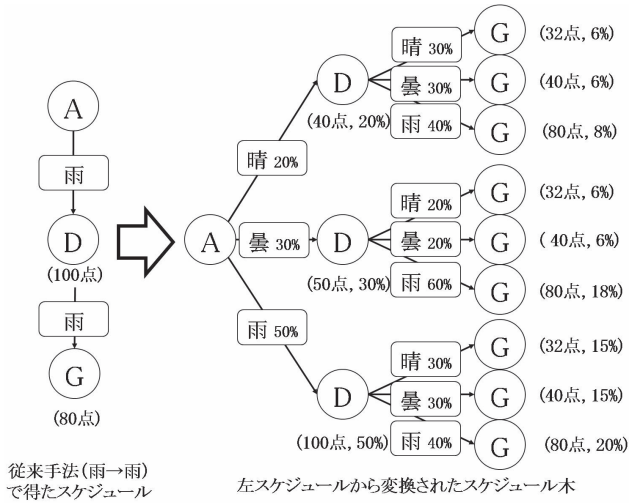

図 5　スケジュールからスケジュール木への変換
Fig. 5　The translation from a schedule to schedule tree.

- **期待値：**式 (1) により計算される期待値．これは，問題の目的関数値そのものである．
- **満足度：**式 (4) により得られるそれぞれのスケジュールの満足度．生起確率が最大であるスケジュールの満足度（**満足度（最大天候）**）と生起確率が最小であるスケジュールの満足度（**満足度（最小天候）**）を用いて比較した．

図 5 では，満足度（最大天候）に対応するスケジュールは雨 → 雨のものであり，そのときの生起確率は 20%である．一方，生起確率が最小であるスケジュールは，図 5 において複数ある．このような場合は，集合 W における並び順（ここでは晴 → 曇 → 雨の順）の早いほうに優先的に分岐する．よって，満足度（最小天候）に対応するスケジュールは晴 → 晴のときのスケジュール（生起確率 6%）である．

4.2.2　比 較 結 果

実験には，ランダムに生成された地図データと重要度の組合せ 10 個を用いた．ここではそれぞれの地図データに対して，天気予報データを 1 つずつだけ与えている．出発時間を 9 時，帰着時間を 17 時とした．これら地図データに対して P-Tour，sweep 法，提案手法を適用して期待値を計測した．実験結果を**表 4** に示す．これらは 10 試行の平均である．提案手法は，P-Tour に対して平均 104.06%，sweep 法に対して平均 104.09%，の改善率を示した．また，天候が安定しない場合においては，106.87%から 110.26%という高い改善率を示した．天気が確定的に分かっている場合でなければ，提案手法によりそれぞれの天気に対するスケジュールを用意しておくことが有効であり，特に天候が不安定なときにそれが顕著であることを示している．

表 4　期待値の比較結果
Table 4　Comparison result (expected value).

改善率=提案手法の値/P-Tour，sweep 法の値 × 100%			
実験データ		P-Tour からの改善率	sweep 法からの改善率
地図	天気変化	期待値	期待値
地図データ 1	晴れ−晴れ	102.97%	102.97%
地図データ 2		109.11%	109.11%
地図データ 3	雨−雨	100.77%	100.45%
地図データ 4		100.21%	103.45%
地図データ 5	晴れ−雨	102.58%	100.75%
地図データ 6		100.97%	100.97%
地図データ 7	雨−晴れ	101.13%	101.13%
地図データ 8		105.06%	105.06%
地図データ 9	安定しない	107.62%	106.82%
地図データ 10		110.26%	110.26%
平均値		104.06%	104.09%

スケジュールの満足度に関する比較結果を**表 5** に示す．満足度（最大天候）で比較した場合，提案手法はいずれの場合においても 100%未満の数値を示している．しかし，満足度（最小天候）で比較した場合，最低で 110%，多ければ 562%と，非常に大きい改善率を示している．これらのことから，提案手法では生起確率が比較的低いスケジュールにおいての満足度の改善が顕著であり，このことがスケジュール木全体の期待値の改善につながっていると考えられる．

4.3　奈良県地図を用いた最適性評価

本節では，ランダム生成でなく，実際の奈良市内における観光地図をインスタンスとして用いた 3 つの実験について述べる．(1) 奈良市内の観光スポットを対象とし，アンケートを用いて観光スポットの重要度を設定した．(2) 設定された重要度および国土地理院発行の数値地図 50000 を用いて，提案手法を全探索法と比較して解の最適性を評価した．(3) 同様の重要度および地図を用いて，提案手法を欲張り法と比較して解の質を評価した．

4.3.1　アンケートによる重要度設定

観光スポットの重要度は，旅行者から見た主観的な値である．その主観的な値がどのよう

© 2010 Information Processing Society of Japan

表 5　満足度の比較結果
Table 5　Comparison result (satisfaction degree).

改善率=提案手法の値/P-Tour，sweep 法の値 × 100%					
実験データ		P-Tour からの改善率		sweep 法からの改善率	
地図	天気変化	満足度		満足度	
		最大天候	最小天候	最大天候	最小天候
地図データ 1	晴れ−晴れ	97.27%	196.65%	97.27%	196.65%
地図データ 2		92.57%	562.24%	92.57%	562.24%
地図データ 3	雨−雨	94.93%	119.04%	94.63%	118.53%
地図データ 4		95.79%	110.69%	95.54%	114.84%
地図データ 5	晴れ−雨	99.09%	233.03%	97.69%	224.26%
地図データ 6		94.67%	160.09%	94.67%	160.09%
地図データ 7	雨−晴れ	99.52%	137.03%	99.52%	137.03%
地図データ 8		98.72%	157.28%	98.72%	157.28%
地図データ 9	安定しない	82.17%	184.74%	81.75%	182.29%
地図データ 10		90.16%	181.29%	90.16%	181.29%
平均値		94.48%	204.21%	94.25%	203.45%

な値となり，どのように分布するかによって，観光地図の性質は異なってくる．また，観光スポットの数が多いため，旅行者が旅行のたびにそれらの値をすべて入力することは繁雑である．そこで，奈良市内の地図を用い，奈良在住の観光経験者 10 名にアンケートをとることにより，各観光スポットの重要度，滞在時間を決定した．観光スポットの数は 15 である．結果を**表 6** に示す．重要度は 10 名の与えた値の平均値，滞在時間は最も長かった時間を用いている．

4.3.2　最適性の評価

提案手法により得られた解の最適性を評価するため，全探索により得られた解との比較実験を行った．また，欲張り法部分だけで求めた解とも比較した．提案手法の局所探索部分には，2-swap 法を用いた．インスタンスとして，表 6 のいくつかの観光スポットを訪問するインスタンスを用いた．表 1 に示した天気予報データを用いて，出発時間を 9 時，帰着時間を 12 時とした．

実験結果を**表 7** に示す．これは 10 試行の平均値である．2-swap 法は，全探索により 18.3 時間かかるようなインスタンスに対して 3,756 msec で最適解を求めることができた．一方，欲張り法部分のみを用いた場合は，18 msec で解を求めた．しかし，欲張り法ではこの小さいインスタンスに対しても最適解を求めることができなかった．これらのことから，提案手法は十分高速で効果的であることが分かった．

表 6　観光スポットリスト
Table 6　List of destinations.

NO	観光スポット名	基本重要度	滞在時間	属性
1	東大寺大仏殿	91	2 h	その他
2	スカイランドいこま	39	2.5 h	屋外型
3	平城京跡	78	1.5 h	屋外型
4	春日大社	74	1.5 h	屋外型
5	猿沢池	41	1.5 h	屋外型
6	国立国会図書館	50	2.5 h	室内型
7	奈良国立博物館	66	2 h	室内型
8	郡山城跡	40	1.5 h	屋外型
9	興福寺	79	1.5 h	室内型
10	奈良公園	83	2 h	屋外型
11	法起寺	53	1 h	室内型
12	帯解寺	33	1 h	室内型
13	法隆寺	100	2 h	室内型
14	石上神宮	51	1 h	その他
15	弘仁寺	34	1 h	室内型

表 7　全探索法との比較結果
Table 7　Comparison result with the Brute force method.

方法	計算時間	期待値
全探索法	18.3 hours	131.61
欲張り法	18 msec	123.09
2-swap 法	3,756 msec	131.61

4.3.3　2-swap 法部分の評価

提案手法の局所探索法部分を評価するため，欲張り法部分のみを用いた場合と，提案手法全体を用いた場合において得られたスケジュール木の期待値を比較した．インスタンスとして，観光スポット数 15 を持つ（表 6 に示す）奈良県の地図を用いた．出発時間を 9 時，帰着時間を 17 時とした．2-swap 法を適用した．天気変化パターンとしては晴 → 晴，晴 → 雨，終日安定しない（図 3 に示す）場合の 3 つのパターンを用いた．実験結果を**表 8** に示す．これらは 10 試行の平均値である．

提案手法は，欲張り法部分のみを用いた場合と比較し，(晴れ−雨）の場合に約 1.15 倍の期待値を持つようなスケジュール木を得ることができた．このことから，提案手法における局所探索法部分は，天気変化パターンがどのような場合にもうまく働くと考えられる．しかし，提案手法は計算に 2 分程度の時間を消費している．今回は観光スポット数を 15 とした

© 2010 Information Processing Society of Japan

表 8　欲張り法との比較結果
Table 8　Comparison result with the Greedy method.

天気変化	方法	計算時間	期待値
晴れ－晴れ	欲張り法	253 msec.	301.62
	2-swap 法	55.16 sec.	316.33
晴れ－雨	欲張り法	258 msec.	289.71
	2-swap 法	53.79 sec.	332.25
安定しない	欲張り法	261 msec.	264.69
	2-swap 法	55.49 sec.	286.89

が，奈良市内だけでもさらに多くの観光スポットが存在する．インスタンスが大規模になるとより多くの計算時間が必要となるため，実用化のためには，アルゴリズムのさらなる高速化が必要である．

5. ま と め

本論文では，天気の変化に対応可能な観光スケジュール木算出問題に対して，欲張り法と局所探索法（n-swap 法）に基づいた近似アルゴリズムを提案した．この局所探索法は，部分木を単位とした目的地の置換を行うもので，同じ目的地を複数巡回するスケジュールを含まないスケジュール群を生成する点に特色がある．まず，提案手法を評価するため，20 の観光スポットを持つランダムに作成されたインスタンスを用いて実験を行った．その結果，提案手法は，欲張り法を用いた場合と比べて平均 1.23 倍の期待値を持つスケジュール木を得ること，また交換回数 n は 2 回が適切であることが分かった．次に，提案手法により得られた解の最適性を評価するため，6 つの観光スポットを持つような奈良県内観光インスタンスを用いて，全探索法と比較した．その結果，全探索で 18.3 時間かかるような問題に対して，4 秒以内で同一の解を発見することができた．

今後の課題として，本実験では，アンケートをとった対象が奈良県在住者のみ，しかも 10 名のみであった．観光に対する知識の深さ，年齢や性別による傾向について分析するため，アンケートの対象を広げて実施することが必要である．また，移動中あるいは観光スポットを訪問中のリアルタイムな天気の変化を取り扱うことがあげられる．さらに，徒歩や自転車で観光する際には，天気によって経路ごとの移動しやすさや，移動のために必要な時間が変化する可能性がある．そのため，観光スポットだけでなく移動経路に対する天候の影響を考慮する必要があると考えられる．さらに，局所探索法の改善があげられる．現在，交換するための目的地をランダムに選定している．しかし，有望な目的地を優先的に選ぶ，過去に交換したことのある目的地をタブーリストに載せる，様々な状況が確率的に決定されるときの VRP 問題を解くための手法[12),13)] を導入するなど，探索効率を上げる手法の開発が必要であると考えられる．

参 考 文 献

1) Baus, J., Krüger, A. and Wahlster, W.: A Resource Adaptive Mobile Navigation System, *Proc. 2002 Int'l. Conf. on Intelligent User Interfaces 2002* (*IUI-02*), pp.15–22 (2002).
2) Butz, A., Baus, J., Krüger, A. and Lohse, M.: A Hybrid Indoor Navigation System, *Proc. 2001 Int'l. Conf. on Intelligent User Interfaces 2001* (*IUI2001*), pp.25–33 (2001).
3) Cheverst, K., Davies, N., Mitchell, K., Friday, A. and Efstratiou, C.: Developing a context-aware electronic tourist guide: some issues and experiences, *Proc. 2000 ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction* (*SIGCHI-00*), pp.17–24 (2000).
4) Rehrl, K., Leitinger, S., Bruntsch, S. and Mentz, H.J.: Assisting orientation and guidance for multimodal travelers in situations of modal change, *Proc. 2005 IEEE Int'l. Conf. on Intelligent Transportation Systems* (*ITSC-05*), pp.407–412 (2005).
5) Helsgaun, K.: An Effective Implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic, *European Journal of Operational Research*, Vol.126, No.1, pp.106–130 (2000).
6) Ahuja, R.K., Ergun, O., Orlin, J.B. and Punnen, A.P.: A survey of very large-scale neighborhood search techniques, *Discrete Applied Mathematics 123*, pp.75–102 (2002).
7) Kawamura, H., Kurumatani, K. and Ohuchi, A.: Modeling of Theme Park Problem with Multiagent for Mass User Support, *Multiagent for Mass User Support*, Vol.3012, No.2004, pp.48–69 (2003).
8) Maruyama, A., Shibata, N., Murata, Y., Yasumoto, K. and Ito, M.: P-Tour: A Personal Navigation System for Tourism, *Proc. World Congress on ITS*, pp.18–21 (2004).
9) Wu, B., Murata, Y., Shibata, N., Yasumoto, K. and Ito, M.: A Method for Composing Tour Schedules Adaptive to Weather Change, *Proc. 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (*IV'09*), pp.1407–1412 (2009).
10) Yahoo Japan: Yahoo! the weather information. http://weather.yahoo.co.jp/weather
11) Suthikarnnarunai, N.: A Sweep Algorithm for the Mix Fleet Vehicle Routing Problem, *Proc. Int'l. MultiConf. of Engineers and Computer Scientists* (*IMECS 2008*),

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.II, pp.1914–1919 (2008).
12) Guo, Z.G. and Mak, K.L.: A Heuristic Algorithm for The Stochastic Vehicle Routing Problems with Soft Time Windows, *Proc. Congress on Evolutionary Computation*, Vol.2, No.5, pp.1449–1456 (2004).
13) Ismail, Z. and Irhamah: Solving the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands via Hybrid Genetic Algorithm-Tabu Search, *Journal of Mathematics and Statistics*, Vol.4, issue 3, pp.161–167 (2008).

(平成 21 年 8 月 13 日受付)
(平成 21 年 10 月 31 日再受付)
(平成 21 年 11 月 6 日採録)

武　　兵

2004 年中国山東理工大学計算機学部卒業．2007 年 4 月より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科研究生．2008 年 4 月より，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科大学院生．観光用パーソナルナビゲーションシステムに関する研究に従事．

村田　佳洋（正会員）

2003 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了．同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手．現在，広島市立大学情報科学研究科准教授．遺伝的アルゴリズム，エージェント技術等の研究に従事．

柴田　直樹（正会員）

1996 年，1998 年，2001 年にそれぞれ大阪大学基礎工学部中退，基礎工学研究科博士前期課程修了，基礎工学研究科博士後期課程修了．2001 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手．2004 年 1 月より滋賀大学経済学部情報管理学科講師．2004 年 4 月より，滋賀大学経済学部情報管理学科助教授．分散システム，ITS，遺伝的アルゴリズム等の研究に従事．ACM，IEEE 各会員．

安本　慶一（正会員）

1991 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．1995 年同大学大学院博士後期課程退学後，滋賀大学経済学部助手．2002 年より，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事．ACM，IEEE/CS 各会員．

伊藤　　実（正会員）

1977 年大阪大学基礎工学部卒業，1979 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．1979 年より大阪大学基礎工学部助手．1986 年より大阪大学基礎工学部講師．1989 年より大阪大学基礎工学部助教授．1993 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授．現在に至る．工学博士．関係データベース，オブジェクト指向データベースの理論等の研究に従事．ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員．

© 2010 Information Processing Society of Japan