

交通機関利用時の心理状態を考慮した 三密を回避するための交通経路推薦手法の検討

田谷 瑛悟^{1,2} 平野 陽大¹ 松田 裕貴^{1,2,3} 諏訪 博彦^{1,2} 安本 慶一^{1,2}

概要：現在、COVID-19 の流行に伴って、三密を回避するための経路推薦システムが求められている。既存の研究において混雑を考慮した経路を推薦するシステムは存在するが、交通機関の利用人数を考慮し、接触リスクの低い経路を推薦できるシステムは我々の知る限り存在しない。本研究では、時間や費用などの移動に伴って消費するリソースを抑えつつ、ユーザが三密を回避できる経路推薦手法を提案する。我々は交通機関利用時に感じる心理状態に着目する。ユーザは交通機関を利用して移動したとき、他人との接触が多いと感染の恐れから不安に感じると考える。そこで、移動に伴う他人との接触回数と時間から接触リスクを定義し、リスクを最小化する経路を求める。一方で、追加の行動（乗換・徒歩など）が発生すると、ユーザは自身のリソースを消費するため不快に感じると考える。そこで、接触リスクに加えて、時間・費用・スタミナの3要因を消費リソースと定義し、接触リスクと消費リソースを最小化する多目的経路探索問題を解く。本稿では上記の問題を定式化し、遺伝的アルゴリズムの一つである NSGA-III に基づくアルゴリズムを提案する。また、奈良県奈良市地域を対象に、アルゴリズムの有用性を評価するための評価実験を設計する。

Proposal of a route recommendation method balancing reassurance index and coziness index to avoid the Three Cs in public transportation

EIGO TAYA^{1,2} YODAI HIRANO¹ YUKI MATSUDA^{1,2,3} HIROHIKO SUWA^{1,2}
KEIICHI YASUMOTO^{1,2}

1. はじめに

現代社会において、公共交通機関は人々の生活を支える移動手段としての役割を果たしており、公共交通機関の維持は社会的な課題となっている [1]。公共交通機関を維持するためにはユーザの満足度を向上させ、交通機関の利用を促進する必要がある [2]。ここでの満足度とは、交通機関利用前後におけるユーザのサービスに対する総合的な経験と定義されており、車内の清潔さや安全性、料金、定時運行性など、様々な要素から構成される。満足度向上のためには、清掃方法見直しによる車内の清潔さの向上やダイヤの見直しによる定時運行性の向上などのアプローチが考えられる。アプローチの1つとして、交通機関利用に必要

な経路情報を十分に提供することが挙げられる [3]。経路情報が不足すると、ユーザは目的地に移動するための適切な移動手段が判断できずに不安を抱き、利用を諦める場合がある。そのため、ユーザに対して適切な経路情報を提供し、利用の不安を取り除く必要がある。

2019 年 11 月に中国の武漢市で確認された COVID-19 はその後爆発的に感染拡大し、2021 年 5 月時点で人間社会に対して経済的・衛生的・社会的に深刻な問題を引き起こしている [4]。これを受け、世界中の人々が日常生活において他人と 2m 以上の物理的な距離を取る「ソーシャルディスタンス」を実施し、感染拡大の防止に努めている。しかし、電車やバスのような、大勢の人が1つの車両に乗車するような公共交通機関を利用する場合、乗客同士の物理的距離を保つことは難しく、感染のリスクがある。このような状況下において、ユーザは交通機関の利用に不安を抱き、利用を取りやめる可能性がある。今後も COVID-19 によ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 理化学研究所 革新知能統合研究センター (AIP)

³ 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ

る影響が継続すると見込まれ、交通機関のユーザ減少を防ぐための解決策を模索することが急務となっている。我々は、その解決策の1つとして交通経路推薦が有効だと考える。感染のリスクは、他人と一定の物理的な距離を確保できない状態（三密）が15分程度継続することで高まる。そのため、他人と接触回数を減らせるような交通経路を把握し、移動すれば感染リスクを抑えられる。これを実現するためには、他人と接触する回数と時間を考慮した経路推薦が必要となる。

これまでに様々な交通経路推薦法が提案されており、各ユーザの嗜好やコンテキストに適した経路を推薦する研究が存在する [5], [6], [7]。一部の研究では、車両の混雑度を基に経路を推薦する研究 [8], [9] が存在するものの、混雑度をカテゴリ（満車、空席わずか、空車など）として扱っており、人数は考慮していない。感染症が流行する状況下においては、交通機関の利用人数を考慮し、他人との接触リスクの低い経路を推薦する必要があるが、そのような経路推薦に関する研究は著者らの知る限り存在しない。

本研究では、時間や費用などの移動に伴って消費するリソースを抑えつつ、ユーザが三密を回避するための経路推薦手法を提案する。手法実現のために、我々は交通機関利用時に感じる心理状態に着目する。ユーザは交通機関を利用して移動したとき、他人との接触が多いと感染の恐れから不安に感じると考える。そこで、移動に伴う他人との接触度合い（接触回数と時間）から接触リスクを定義し、三密を回避する経路を推薦する。一方で、ユーザは移動するとき、自身のリソース（時間、費用、スタミナ）を消費する。そのため、三密を回避するために追加の移動（乗換、徒歩移動など）が発生すると、回避しない場合と比べて、到着時刻が遅くなる、歩くことで疲労するなど、リソースの消費が大きくなる。ユーザのリソースは限られているため、接触リスクの最小化により消費リソースが大きくなることは望ましくない。そこで、本研究では、接触リスクに加えて、時間・費用・スタミナの3要因を消費リソースと定義し、接触リスクと消費リソースを考慮した経路推薦を行う。これにより、ユーザに対して感染のリスクが低く、移動による負担が少ない経路を提示可能とする。

本稿では上記の問題に対し、接触リスク・時間・費用・スタミナを目的関数とする多目的経路最適化問題として定式化する。経由する地点の数を N とすると、この問題は少なくとも 2^N 以上の組み合わせ数が存在するため、現実的な時間で解を求めるためにはヒューリスティックアルゴリズムで解く必要がある。そこで、遺伝的アルゴリズムの一種である NSGA-III に基づいてアルゴリズムを設計する。また、提案手法の有効性を評価するため、奈良県奈良市の「ならまち」と呼ばれる地域を対象に評価する実験を設計する。

以降の章構成は以下の通りである。2章では、提案手法

に関連した既存研究の概要と課題について述べる。3章では、提案システムの実現に向けた問題設定と想定する環境を示す。4章で、適用するアルゴリズムについて述べ、5章で、評価実験の設計について述べる。最後に、6章で本稿についてまとめる。

2. 関連研究

2.1 経路推薦システム

一般に経路推薦システムでは、道路や交通網を基に作成されたグラフネットワークに対して、出発地から目的地に到達する際の総コスト（時間や距離など）が最適な経路を求める。これによりユーザの経路選択を支援することが可能になるが、ユーザの要求は必ずしも単一ではない。例えば、目的地に最も早く移動できる経路を知りたいユーザもいれば、最も安い料金で移動できる経路を知りたいユーザも存在する。このようなユーザの多様な要求に応えるために、様々な手法を用いた交通経路推薦システムが提案されている。

Rohit らは、インドの通勤者の嗜好に応じて快適なルートを推薦するためのシステムを提案している [5]。スマートフォンから収集される GPS 情報やクエリ情報を基に車両の移動速度や座席占有率を推定し、推定結果を基に快適なルートを選択している。Liu らは、各都市において、より個人に適した経路を推薦するためのシステムを提案している [6]。具体的には、ユーザからのクエリが発生した時点で、時間や料金などの単一の目的関数に基づき、移動手段ごとの最適な経路を探索する。その後、天候や地理などの都市特有データと検索クエリから構築された分類モデルを用いて、各ユーザの嗜好に即した経路を選択している。Handte らは、Wi-Fi を用いて各バス車内の混雑度を収集し、混雑を回避する経路推薦システムを提案している [9]。バスの運行本数が多く、代替できる経路が多く存在するエリアであることを前提に、同時刻帯の便の中から最も混雑しない経路を推薦している。Bajaj らは、車両の混雑度や遅延を用いて交通の不便さをモデル化し、ユーザの過去の検索クエリに基づいて経路を推薦している [8]。Wang らは、ユーザの移動状態や時々刻々と変化するコンテキストに適した経路を推薦するために、a*アルゴリズムのヒューリスティック関数をニューラルネットワークを用いて学習させる手法を提案している [7]。Hu らは、危険物の配送において、より配送リスクの少ない経路を推薦するために、都市の道路からリスクをモデル化し、より少ない経路を選択している [10]。

以上の研究では、多様なユーザの要求に対応するために、過去に収集した検索クエリなどを用いてユーザの嗜好に適した経路を推薦している。一部の研究では車両の混雑や、輸送のリスクを考慮しているが、交通機関の利用人数から感染リスクを考慮して経路を推薦する研究は、著者らの知

る限り存在しない。本研究では、移動時における他人との接触回数や時間から接触リスクを定義し、移動における感染のリスクを抑えることを目指す。一方で、移動に伴って発生するコスト（時間、金銭、スタミナ）を消費リソースと定義し、接触リスクと消費リソースのトレードオフを考慮する。すなわち、本研究では複数の目的関数におけるトレードオフを考慮した多目的経路探索問題を解くことが目的となる。

2.2 多目的経路探索問題

一般に、多目的経路探索問題を解くアプローチは、スカラー法とパレート法に大別される [11]。スカラー法では複数の目的関数を単一の目的関数に変換することで多目的経路探索問題を解く。例えば、各目的関数に対して重みを設定し、重みの線形加重和を求めることで単一の目的関数に変換する手法などが存在する [12], [13]。この手法では1回の実行で1つの解しか求めることができず、パレートフロンティア（最適解の集合）を求めるためには繰り返し実行する必要がある。加えて、各目的関数に対する順位付けを事前に設定しておく必要がある。経路推薦においてユーザの要求（時間や料金など）は多様であり、事前に目的関数を順位付けることは難しい。従って、本研究で扱う問題に対し、スカラー法を適用することは最適であるとは言えない。

一方でパレート法は、解同士の優越関係を利用して探索することで多目的経路探索問題を解く。スカラー法と比較して厳密なパレートフロンティアは得られないものの、一度の探索で近似的なパレートフロンティアを得られる。また、多くのパレート法では遺伝的アルゴリズムが採用されている [14], [15], [16], [17]。これらのアルゴリズムは高い探索性能を持つことが知られているものの、目的関数が4つ以上存在する「多数目的最適化問題」において解の収束性に問題があることが指摘されている。そこで、解探索において方向性を与えることで多数目的最適化問題においても収束性が低下せず、多様なパレートフロンティアを求められる NSGA-III が提案されている [18]。本問題は接触リスク・時間・費用・スタミナの4つの目的関数を扱う多数目的最適化問題であり、通勤者や観光客など幅広いユーザを対象にするため、多様な経路を求める必要がある。従って、本研究で扱う問題に対し、パレート法の NSGA-III で解くことが適していると考えられる。

これまでに著者らが所属する研究グループでは、観光におけるリソース消費と満足度を最適化する問題に取り組んでいる。Hirano ら [19] は、NSGA-II と 2-opt を組み合わせたアルゴリズムを提案しており、現在は NSGA-III に拡張することでより多様な解を求めることに取り組んでいる。本稿ではこのアルゴリズムを交通経路推薦の問題に適用し、問題の定式化やアルゴリズムの設計方法について述

べる。

3. 問題設定

3.1 想定環境

本研究では、COVID-19 のような感染症が流行する社会情勢下で、人々が三密を回避することが求められている状況を想定する。このような状況下において、移動者の目的を他人との接触リスクの最小化と設定する。接触リスクを抑える一方で、移動者は乗り換えや迂回によって追加のリソースを消費する必要がある。ここでのリソースを所要時間、費用、スタミナの3要素と設定する。本問題は特定地域内の移動における PoI（駅・停留所を含む地点）の選択と移動方法を接触リスク・所要時間・費用・スタミナの4要因を目的関数として各関数のトレードオフを考慮する。

図 1 に扱う問題の概念図を示す。システムに入力される情報を出発地と目的地とし、移動方法（徒歩、バス、電車、タクシー）と PoI の選択・並び替えを探索の対象とする。そして探索の結果として、複数の経路情報、接触リスク、消費リソースを設定する。以上より、本問題は移動に伴う消費リソースの最小化と接触リスクの最小化を目指す多目的経路最適化問題である。

3.2 前提条件

本研究では、接触リスクを算出するために運行している交通機関の利用人数を収集する必要がある。従来の経路推薦システムでは、「空車」「空席多数」「満車」のように混雑情報をカテゴリとして扱っており [5], [8], [9]、個々の運行車両における利用人数を考慮して推薦するシステムは存在しない。しかし、近年では IoT デバイスの高機能化に伴い、リアルタイムに利用人数を計測可能になりつつある。現に、著者らが所属する研究グループでは、利用者の持つスマートフォンから発せられる BLE 信号を基に、リアルタイムに利用人数を収集するシステムの実現に取り組んでいる [20]。従って、本研究では交通機関の利用人数は計測できる情報として問題を設定する。

3.3 定式化

経路の制約

本研究で扱う問題は、公共交通機関を利用する移動者を対象に、移動に伴う接触リスクと消費リソースを最小化できる経路を求める問題である。特定地域内に存在する全ての PoI（観光地・駅・停留所）に対し、移動者の経由是非の集合を PoI とし、移動者がある PoI を経由するかどうかを p_i で表す。このとき、移動者が PoI の i を経由して目的地へ移動する場合、 p_i は 1 となり、移動しない場合は 0 となる。この制約を式 (1) で表す。

$$p_i \in \{0, 1\} \quad (1)$$

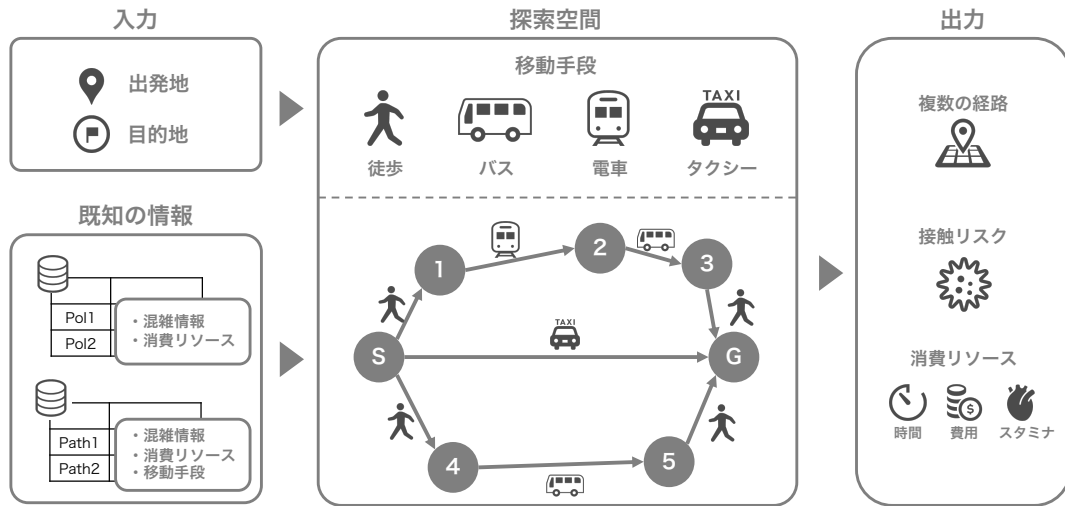


図 1 本問題の概要図

また、ある PoI の i から j へ移動できるかを x_{ijlm} で表す。移動者が到着時刻 l までに移動手段 m で p_i から p_j に移動する場合、 x_{ijlm} は 1 となり、移動しない場合は 0 となる。この制約を式 (2) で表す。また、出発地から目的地へ移動する移動者が経由する x_{ijlm} のリストを X と定義し、式 (3) で表す。

$$x_{ijlm} \in \{0, 1\} \quad (2)$$

$$X = (x_{i^1 j^1 l^1 m^1}, x_{i^2 j^2 l^2 m^2}, \dots, x_{i^n j^n l^n m^n}) \quad (3)$$

式 (3) において、 $n = k$ における到着地点 j^k と、次の経路 $n = k + 1$ の出発地点 i^{k+1} は等しくなければならない。また、 $n = k + 1$ における到着時刻 l は、 $n = l$ における到着時刻よりも大きい必要がある。これらの制約を下記の式で表す

$$i^{k+1} = j^k \quad (\forall k \in \{1, n-1\}) \quad (4)$$

$$l^{k+1} > l^k \quad (\forall k \in \{1, n-1\}) \quad (5)$$

PoI での行動（乗り換えや待機など）や PoI 間の移動で接触する人数を c 、所要時間を t 、費用を e 、スタミナを s で表す。特に、経由する p_i で接触する人数を c_i 、所要時間を t_i 、スタミナを s_i とし、経路 x_{ijlm} で移動するときに接触する人数を c_{ijlm} 、所要時間を t_{ijlm} 、費用を e_{ijlm} 、スタミナを s_{ijlm} と定義する。

接触リスクと消費リソース

はじめに接触リスクを定義する。 R で表される接触リスクは、PoI で行動、および PoI 間を移動したときに接触した人数と時間により決定する値と仮定した。従って接触リスク R は式 (6) のように定義される。ここで、式 (6) の第 1 項は PoI を移動するときの接触リスクを表し、第 2 項は PoI に滞在しているときの接触リスクを表す。

$$R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N c_{ijlm} t_{ijlm} x_{ijlm} + \sum_{i=1}^N c_i t_i p_i \quad (6)$$

移動に必要な費用 E は、PoI 間を移動するときを利用する交通手段の料金と設定する。従って費用 E は式 (7) のように定義される。

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N e_{ijlm} x_{ijlm} \quad (7)$$

移動の所要時間 T は、PoI 間の移動にかかる時間と PoI での乗り換えや待機にかかる時間と設定する。従って所要時間 T は式 (8) のように定義される。

$$T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N t_{ijlm} x_{ijlm} + \sum_{i=1}^N t_i p_i \quad (8)$$

次にスタミナを定義する。本研究では文献 [19] に従い、消費するスタミナを肉体的な疲労と定義し、疲労の指標であるカロリーからスタミナを求める。ここで、肉体的な疲労は PoI の移動と PoI での行動で求めるとし、式 (9) で定義される。

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N s_{ijlm} x_{ijlm} + \sum_{i=1}^N s_i p_i \quad (9)$$

本問題は、出発地から目的地に向かうときの接触リスク、所要時間、費用、スタミナの最小化を目的とする。従って、目的関数を以下の式 (10) で定義する。

$$\text{Minimize } R, E, T, S \quad (10)$$

$$\text{subject to (1)(2)(3)(4)(5)}$$

3.4 問題の困難性

本問題は、出発地の PoI から目的地の PoI に移動する経路のうち、接触リスク・時間・費用・スタミナが最小となる経路を求める問題である。この問題を移動手段を徒歩のみに限定し、各 PoI の経由有無を考える問題に単純化した場合において、経由 PoI の組み合わせ数は 2^N 通り存在

する。本問題では、徒歩以外の移動手段（電車・バス・タクシー）や各 PoI での待機を考慮に入れるため、組み合わせ数は少なくとも 2^N 通りよりも大きい。そのため、全ての経路に対して接触リスク・時間・費用・スタミナを考慮して探索する場合、現実時間内で解くことは困難である。従って、ヒューリスティックアルゴリズムを適用して問題を解く必要がある。

4. 提案手法

4.1 アルゴリズム概要

本研究の目的は、経路のコストを多目的化した探索により複数の多様な経路を提示し、移動者の意思決定を支援することである。そのため、移動者に提示する経路は必ずしもパレート最適解である必要はないものの、移動者が納得できる質を持つ解（準パレート最適解）が必要となる。そこで解の多様性を担保するように設計された NSGA-III[18]に基づいて、アルゴリズムを設計する。

なお、提案アルゴリズムでは一般的な遺伝的操作である「交叉」を含んでいない。本問題で求める経路（解個体）は、制約 (4),(5) の通り、前後の経路に対して時間の順序関係を考慮している。そのため、交叉によって前後の経路を入れ替えると致死個体となる可能性が極めて高い。従って、提案アルゴリズムでは交叉は行わず、変異のみで解を探索する。

4.2 解の表現方法

本問題では、出発地から目的地に移動するための移動手段と経由する PoI の順番を移動者に提示する必要がある。従って、本アルゴリズムで扱う解個体は図 2（左）のように、2つの PoI とその間を移動するための移動手段の列として扱う。この解個体の移動手段列（左）は PoI と移動手段の分割表現（右）に相互的に変換可能である。解個体の移動手段列（左）は、遺伝的アルゴリズムの解個体の保存のために使用し、PoI と移動手段の分割表現（右）は突然変異のために使用する。

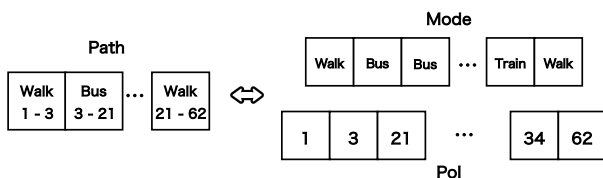


図 2 解個体の経路表現（左）と個体の分割表現（右）

4.3 遺伝的アルゴリズムの詳細

図 3 にアルゴリズムのフローチャートを示す。提案アルゴリズムは初期化処理、変異、非優越ソート、トーナメント選択、ニッチ保存操作のステップより構成されている。

本節では表 1 の変数を用いて、アルゴリズムの各ステップについて説明する。

初期化

アルゴリズムの探索世代数を T 、母集団の数を N 、初期アーカイブ母集団 $Q_0 = \emptyset$ に設定する。その後、 N 個の経路データを生成し、初期の探索母集団 P_0 を設定する。

トーナメント選択

探索母集団 P_t からランダムに個体を選択し、各個体の接触リスク・費用・時間・スタミナを用いてトーナメントを適用する。そしてトーナメントにおいて優れた $N/2$ 個の個体を Q_t に追加する。

変異

Q_t の中からランダムに $\alpha * N/2$ の個体を選択（ α は変異確率）し、選択個体に対して増加変異を実行する。また一方の $\alpha * N/2$ の個体に対して、減少変異を実行する。

非優越ソート

各世代 t ($1 \leq t \leq T$) において、母集団とアーカイブ母集団を組み合わせ、 $A_t = P_t \cup Q_t$ を生成する。この A_t に対して非優越ソートを実行し、全個体をランク i 毎に分類する。ランク i は、ある解を完全に優越する解の数として算出される。全ての解のランクを決定するために、式 (6)(7)(8)(9) で算出される各要素に関して比較する。そして、 A_t に従って各ランクごとに F_i ($i = 1, 2, \dots$) に解を追加する。

ニッチ保存

次世代の探索母集団 $P_{t+1} = \emptyset$ を生成し、変数 $i = 1$ を設定する。そして、非優越ソートで与えたランク上位の個体から探索母集団 P_{t+1} に対して、 $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$ である限り、要素を加える。すなわち、 $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ と $i = i + 1$ を実行する。このとき、 $|P_{t+1}| + |F_i| = N$ となる場合は、ニッチ保存操作を終了して次ステップに移行する。一方で $|P_{t+1}| + |F_i| > N$ となる場合は、 F_i に対してリファレンスラインと解の垂直距離を算出し、より多様性の高い解を $N - |P_{t+1}|$ 個選択し、 P_{t+1} に追加する。

表 1 アルゴリズムで用いる変数とその説明

記号	説明
T	GA の最終世代
N	母集団数 ($ P_t = Q_t = N$)
P_t	t 世代目の探索母集団 (遺伝子操作により更新)
Q_t	t 世代目のアーカイブ母集団
A_t	P_t と Q_t の和集合
i	非優越ソートで各個体に与えられる評価値
t	アルゴリズムの現在の世代
α	変異確率

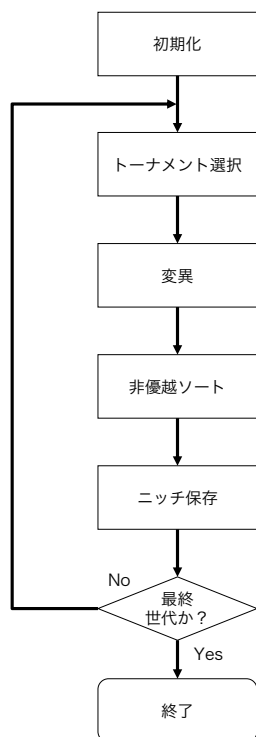


図 3 遺伝的アルゴリズムのフローチャート

4.4 初期解の生成

初期解の生成は遺伝的アルゴリズムの 1 処理であり，初期探索母集団 P_0 に追加する N 個の個体を作成する．本アルゴリズムでは遺伝子操作の交叉を行わないため，経由する PoI や交通手段をランダムに選択すると，解が収束しない可能性が高い．そこで，本アルゴリズムでは出発地から目的地に比較的短い時間で移動できる経路を初期解に設定する．

図 4 に初期解生成の例を示す．はじめに，出発地及び目的地から徒歩 15 分範囲内の PoI から集合 PoI_s と PoI_g を作成する．そして PoI_s , PoI_g からランダムに PoI を選択し， N 組の sd ペア (図中では $\{1, 10\}$, $\{1, 12\}$, $\{2, 11\}$, $\{3, 11\}$ の 4 組) を作成する．この N 組の sd ペアに対して，ダイクストラ法を用いて移動時間が最小となる経路を探索する．求めた N 組の経路に対して，出発地と目的地に移動する経路情報を付与した解を初期解として設定する．

4.5 変異

変異は，解個体が持つ遺伝子の一部を変更することで，新しい解を生成する遺伝的アルゴリズムの処理である．本アルゴリズムでは，PoI (遺伝子) をランダムに 1 つ追加する増加変異と，PoI をランダムに 1 つ削除する減少変異を用いる．これは，解の多様性を表す指標である PoI の数が，多い解あるいは少ない解ばかりに収束しないように考慮するためである．PoI の数がどちらかに収束すると，遺伝的アルゴリズムの探索が局所的になり，解の多様性が期

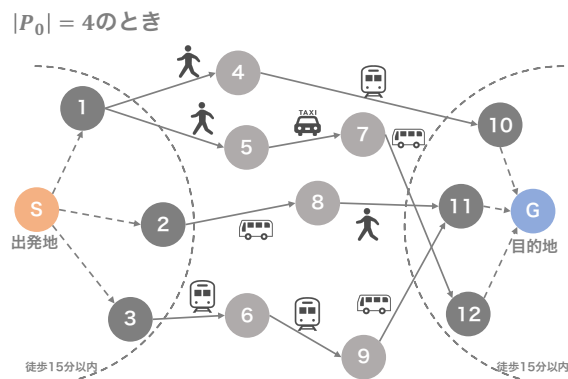


図 4 初期解の生成例

待できない．そこで，PoI の数が偏らないように，増加変異と減少変異をそれぞれ変異確率 α に対して $1/2$ の確率で実行する．

増加変異

図 5 に増加変異の例を示す．はじめに，既に遺伝子に含まれている PoI を除く全ての PoIの中から追加する PoI をランダムに 1 つ選択する (図中では PoI の 23)．また，移動手段についてもランダムに選択する (Taxi)．次に，新たに PoI を追加する位置をランダムに決定し，決定された PoI の位置から出る方向に対して移動手段を追加する．

減少変異

図 6 に減少変異の例を示す．削除する PoI をランダムに選択し，PoI と同じ位置にある移動手段を削除する．なお，減少変異は解個体の PoI 数が 2 よりも大きい場合にのみ実行する．

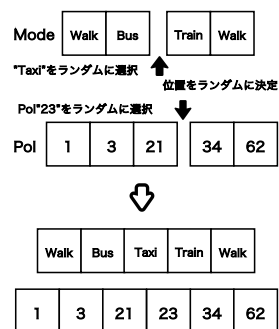


図 5 増加変異の例

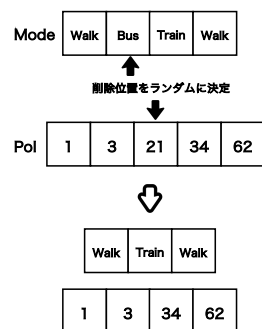


図 6 減少変異の例

5. 評価実験の設計

5.1 実験目的

本研究で扱う問題は，実際の交通機関を利用するユーザ (移動者) を対象とするため，どれくらいの時間で，ユーザが納得できる解を求められるか明らかにする必要がある．そこで，実在する地域を対象にアルゴリズムを適用し，計

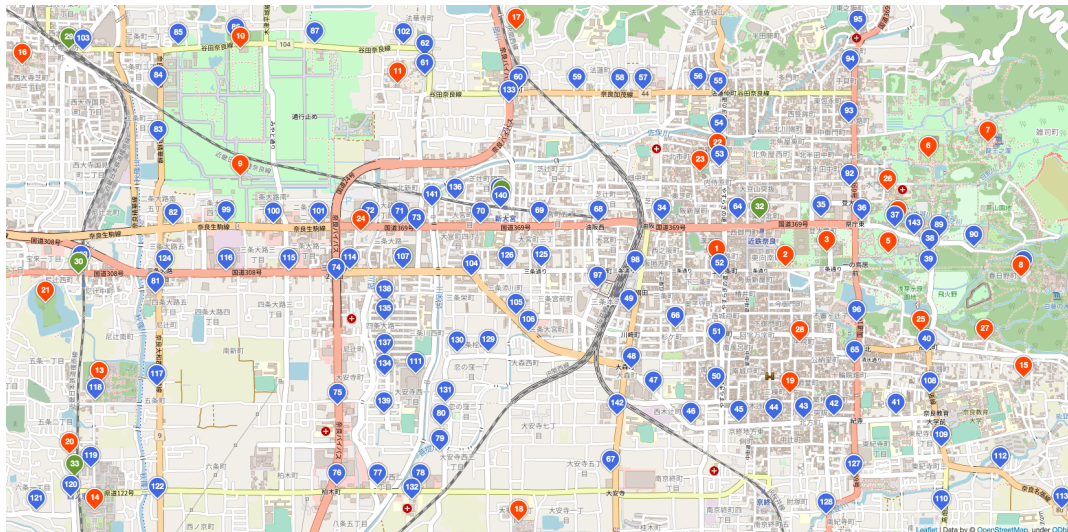


図 7 ならまちのポイントプロット (緑：駅, 赤：観光地, 青：バス停留所)

算時間と解の多様性を評価することを目的 1 とする。また、実際に利用者に解を提示し、解に対する満足度を評価することを目的 2 とする。

5.2 評価アプローチ

目的 1 に対しては、シミュレーション実験を行う。評価の観点として、(1) 出力解がそれぞれが優劣していないか、(2) 求めた経路は現実的なルートか、(3) 解の多様性はあるか、(4) 現実的な時間内に終了するかを設定する。そして、遺伝的アルゴリズムの世代数などのパラメータを変化させて複数回実行し、解に対して (1)~(4) の観点で評価する。

目的 2 に対しては、実証実験を行う。本実験を行うためには、提案アルゴリズムに加え、UI を含む経路推薦システムとして構築する必要がある。評価の観点としては、(1) 推薦経路に対する満足度に加え、(2) 経路推薦するまでの時間、(3) ユーザビリティなどを設定する。実験参加者に経路推薦システムを使用した移動を実際に行ってもらい、探索時や移動後の主観的評価をアンケートにより収集する。

5.3 実験対象エリア

本実験では、アルゴリズムを奈良県奈良市を対象に 33 箇所の観光地が存在する地域 (図 7) に対して適用することで提案手法を評価する。図の地域は通称「ならまち」と呼ばれ、日本でも有数の観光地であり、観光客が多く訪れる。一方で、ならまち付近にはオフィス街や学校も多数存在し、通勤・通学する人も多く存在する。そのため、ならまちでは電車、バス、タクシーの交通網が発達しており、図中内に駅は 5 箇所、停留所は 104 箇所存在する。本研究では、これらの観光地、駅、停留所、合計 143 箇所の PoI を含む地域を対象とする。今後、当該エリアを対象に、シミュレーション実験および実証実験を行う。

6. おわりに

本稿では、交通機関利用に伴って消費するリソースを抑えつつ、三密を回避するための経路推薦手法について検討した。そして、扱う問題の定式化をするとともに、NSGA-III を用いたアルゴリズムを設計した。今後は設計したアルゴリズムに基づいてシステムを構築して評価実験を行い、提案手法の有効性について検討する。また、本研究で扱う問題の組み合わせ数は多く、NSGA-III による解探索でも実行時間が大きくなることが予想される。そのため、システムの実装に並行して有効な局所探索法などの手法を検討し、実行時間の短縮を目指す。

参考文献

- [1] 国土交通省. 令和 2 年版国土交通白書. <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdf/kokudo.pdf>. Accessed: 2020-07-07.
- [2] Dea van Lierop, Madhav G. Badami, and Ahmed M. El-Geneidy. What influences satisfaction and loyalty in public transport? a review of the literature. *Transport Reviews*, Vol. 38, No. 1, pp. 52–72, 2018.
- [3] T. D. Camacho, M. Foth, and A. Rakotonirainy. Pervasive technology and public transport: Opportunities beyond telematics. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 12, No. 1, pp. 18–25, 2013.
- [4] World Health Organization. Coronavirus disease (covid-19) pandemic. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>. Accessed: 2021-05-01.
- [5] Rohit Verma, Surjya Ghosh, Mahankali Saketh, Niloy Ganguly, Bivas Mitra, and Sandip Chakraborty. Comfride: A smartphone based system for comfortable public transport recommendation. 2018.
- [6] Hao Liu, Yongxin Tong, Panpan Zhang, Xinjiang Lu, Jianguo Duan, and Hui Xiong. Hydra: A personalized and context-aware multi-modal transportation recommendation system. Association for Computing Machinery, 2019.

- [7] Jingyuan Wang, Ning Wu, Wayne Xin Zhao, Fanzhang Peng, and Xin Lin. Empowering a* search algorithms with neural networks for personalized route recommendation. In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, KDD'19, pp. 539–547, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [8] G. Bajaj, G. Bouloukakis, A. Pathak, P. Singh, N. Georgantas, and V. Issarny. Toward enabling convenient urban transit through mobile crowdsensing. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 290–295, 2015.
- [9] M. Handte, S. Foell, S. Wagner, G. Kortuem, and P. J. Marrón. An internet-of-things enabled connected navigation system for urban bus riders. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3, No. 5, pp. 735–744, 2016.
- [10] Hao Hu, Xiang Li, Yuanyuan Zhang, Changjing Shang, and Sicheng Zhang. Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 128, pp. 861–876, 2019.
- [11] Sandra Zajac and Sandra Huber. Objectives and methods in multi-objective routing problems: a survey and classification scheme. *European Journal of Operational Research*, Vol. 290, No. 1, pp. 1–25, 2021.
- [12] Diclehan Tezcaner and Murat Köksalan. An interactive algorithm for multi-objective route planning. *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 150, No. 2, pp. 379–394, Aug 2011.
- [13] Luciano Costa, Thibaut Lust, Raphael Kramer, and Anand Subramanian. A two-phase pareto local search heuristic for the bi-objective pollution-routing problem. *Networks*, Vol. 72, No. 3, pp. 311–336, 2018.
- [14] Carlos Fonseca and Peter Fleming. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization. *the fifth Intl conference on Genetic Algorithms*, Vol. 93, , 02 1999.
- [15] J. Horn, N. Nafpliotis, and D.E. Goldberg. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 82–87 vol.1, 1994.
- [16] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197, 2002.
- [17] Eckart Zitzler, Marco Laumanns, and Lothar Thiele. Spea2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization. Vol. 3242, 01 2001.
- [18] Zhihua Cui, Yu Chang, Jiangjiang Zhang, Xingjuan Cai, and Wensheng Zhang. Improved nsga-iii with selection-and-elimination operator. *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 49, pp. 23–33, 2019.
- [19] Yodai Hirano, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. A method for generating multiple tour routes balancing user satisfaction and resource consumption. In *Proceedings of the International Workshop on Smart Sensing Systems*, IWSSS'19, 2019.
- [20] 金光勇慈, 立花巧樹, 松田裕貴, 中村優吾, 諏訪博彦, 安本慶一. ナッジを用いたコロナウイルス接触確認アプリのインストール促進. 第 39 回社会における AI 研究会, pp. 1–6, 2020.