

静岡県富士市におけるバス路線計画

Bus Line Planning in Fuji City

情報工学専攻 関 海倫

Information and System Engineering MIN Hailun

あらまし：南アメリカにある大都市 Quito の路線計画に最適化を活用する研究が行われている。この既存研究では、路線ごとにおける各枝上の需要がカバーされる要求被覆モデルを用いて Quito 市のバス路線ネットワークにある程度のサービス品質を保証した上で、バスの運行コストを最小にする手法を提案している。

本研究では、Quito 市と同じような特徴を持つ富士市を対象としてバス路線を最適化する。推定された乗客の需要に基づいて、より市民の移動需要に合った最適な路線ネットワークを提案する。そして提案された路線ネットワークの有用性を評価する。

キーワード：バス路線、最適化、ネットワーク、要求被覆モデル

1.はじめに

1.1. 研究背景と目的

近年、マイカーの急激な普及により、富士市では路線バスの利用が減少している[2]。これに伴って交通事業者の経営状況が悪化し、サービス水準が低下、さらに利用者が減るといった悪循環になっている。富士市のバス路線は、31本路線で運行している。既存のバス路線と住民の住まい地域、施設、移動需要を地図上で重ね合わせてみると、概ね対応していると考えられる。しかし問題点もいくつかある。路線の長大化により、定時性が損なわれている。需要に見合った運行サービスとなっていない、バス需要の限界を超えた地域は多いなどである。

岳南都市圏パーソントリップ調査における現況交通分析の結果によって、富士市民の代表交通手段分担率は、一番高いのが自転車であり、約71%となっている。バスについては分担率が約1%となって、利用が非常に少ない。住民の移動をもっと便利になるために、路線バスの新たな経路を設計する必要があると考える。本研究では、富士市の路線ネットワークを新しく構築するために、現実的な視点から様々なパターンの路線を考え、最適化の観点から分析する。住民の需要に基づいて異

なる形のネットワークを構成し、要求被覆モデルに適用して結果を考察する。

2. 富士市バス路線の現状

2.1. 富士市バス路線の特徴

本研究では静岡県の富士市を実験の対象とする。[2]に掲載されている富士市のバス路線ネットワークは31本のバスであり、バス停数は286個である。また、路線バスのすき間を埋めるように、市の自主運行によるコミュニティバスやデマンドタクシーが運行されている。地域で区分すると「中心部」「南部」「北部」「東部」「西部」の五つである。「吉原中央駅」と「富士駅」をターミナル駅とする。バス路線の様子は図1で表す。

2.2. 乗客移動需要の推定

本研究では富士市に存在する全てのバス路線を対象とし、人の移動を推定する。人が出発バス停から到着バス停に移動することは施設間の移動だと考える。バス停の300メートル以内にある施設の種類の数と施設数を利用して移動の需要を推定する。異なる路線の間は乗り換えるための需要も発生するので、単一路線上に施設の種類の数で需要を計算した結果を路線ネットワーク全体に加える。人の移動を現実的に表現するために、施設の種類によってこの移動需要があるかどうかを判断する。起点と終点にある施設の種類の数は全て同じであれば、この移動はないと設定する。

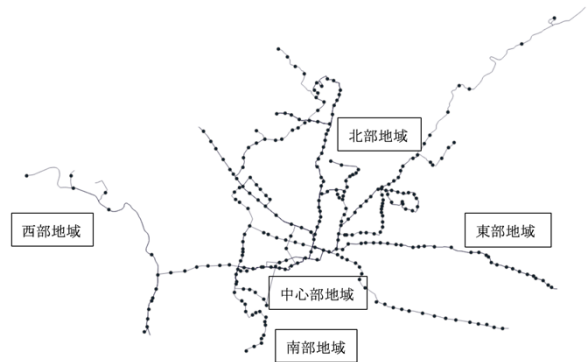


図1 富士市のバス路線ネットワーク

本研究では富士市にある日常生活に大切だと認められる公園、学校、郵便局、図書館、病院と福祉施設を対象施設として使用している。[2]に基づいて1日中に路線 n の利用人数は y_1, \dots, y_n を定める。路線 n における各ペアの需要は x_1^n, \dots, x_n^n で表す。乗り換えが発生した場合、需要は z_1, z_2, \dots, z_n で表す。表1は各ペアに対して計算した重みを示す。計算方法としては出発駅の近くにある施設数と到着駅の近くにある施設数の積で各ペアの重みを算出する。次に一日路線の利用人数のデータ y_1, y_2, \dots, y_n を使って、路線全体の需要を連立方程式で計算する。

路線全体で立てる連立方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_{n_1}^1 + z_1 \\ y_2 &= x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n_2}^2 + z_2 \\ &\dots \\ y_n &= x_1^n + x_2^n + \dots + x_{n_n}^n + z_n \end{aligned}$$

図2は一つの路線を例として各枝の人数を示す。赤の点は施設を表す。各折れ線は需要を表している。需要の大きさは太ければ太いほど、形成されたペアの需要が多いことを意味する。

表1 ペアの重み

ペア	出発駅の施設数		到着駅の施設数		重み
x_1	2	×	3	=	6
x_2	2	×	4	=	8
x_3	2	×	3	=	6
...		
x_n	1	×	3	=	3
z_1	2	×	4	=	8

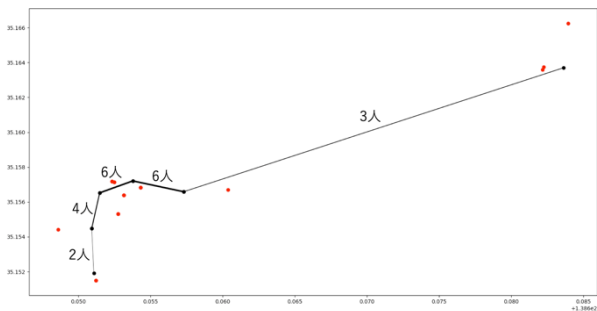


図2 路線全体の需要

3. 要求被覆モデル

本研究ではバス運送ネットワークを有向グラフ $D = (V, A)$ で考える。各駅はノード $v \in V$ で表す。バスの特定の種類を運送モードと呼び、路線ネットワーク内に全ての運送モードの集合を M と定義する。各運送モード $m \in M$ に対してバスの異なる単位容量 $k_m \in Z_+$ を定義する。さらに、特定の駅はモード m のバスがルートの起点または終点であれば、その駅はターミナルと定義する。 m に対するオープンラインは、 D 上の有向パスであり、起点と終点は異なるターミナル駅である。 m に対するクローズラインは、少なくとも一つのターミナル駅(ノードへの往復することは可能)を含む有向サイクルである。クローズラインは基本的に対称なパスで、反対に向くアークのペアを含むと仮定する。つまり、クローズラインはアーク $a = (u, v)$ を含む場合、逆方向に向くアーク $\bar{a} = (v, u)$ も含んでいる。各 $m \in M$ について、路線ネットワークは L^m で考える。全て可能な路線の集合は $L := \cup_{m \in M} L^m$ で表して、アーク a を用いてモード m の路線集合は L_a^m で表す。路線 $l \in L$ に対して、 $c_l \in R_+$ は片道 l のコストである。最後に、 $[n] := \{1, \dots, n\}$ は表示上の便利のため $n \in Z_+$ で表す。運送要求は、 OD 行列 $(d_{uv}) \in Z_+^{V \times V}$ で表され、ここで、各成分 d_{uv} は、特定の時間帯 T 内に駅 u から駅 v まで移動する乗客の数を示す。この無向バージョンでは、路線は G の単純な無向パスに対応し、有向グラフと同じコストを持つ。 L_e^m は辺 e を用いるモード m の路線集合とする。次の路線計画の要求被覆モデルを考える。

$$\begin{aligned} \min. \quad & \sum_{l \in L} c_l f_l \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{m \in M} \sum_{l \in L_e^m} k_m f_l \geq \tilde{g}_e \quad \forall e \in E \\ & 0 \leq f_l \leq f_l^{\max} \quad \forall l \in L \\ & f_l \in Z_+ \quad \forall l \in L \end{aligned}$$

ここで、 f_l は路線 $l \in L$ に割り当てられた一日中にバスの運行本数を表す整数変数である。路線 $l \in L$ の運送コスト $c_l f_l$ は運行本数に比率的に計算する。目的関数は運行コストの最小化を目的とする。制約は集約された輸送要求が各辺にカバーされたことを保証する。さらに、全ての路線 $l \in L$ の最大本数は f_l^{\max} で表す。本研究では富士市に走っている路線バスだけを対象として考える。全ての $m \in M$ に対する $k_m = k$ であり、バスの種類が異なっても単位容量は等しい、この場合は車

両の種類が同じである以下の要求被覆モデルを考える。

$$\begin{aligned} \min. & \sum_{l \in L} c_l f_l \\ \text{s.t.} & \sum_{l \in L_e} k f_l \geq \tilde{g}_e & \forall e \in E \\ & 0 \leq f_l \leq f_l^{\max} & \forall l \in L \\ & f_l \in \mathbb{Z}_+ & \forall l \in L \end{aligned}$$

4. 要求被覆モデルの富士市への適用

4.1. 既存路線の適用結果

要求被覆モデルの目的関数と制約式の中で、各路線のコスト c_l 、1日中に各路線に走っているバスの最大本数 f_l^{\max} と各車両の容量 k の三つのパラメーターの値がデータとして先に現実に近い定義をしなければならない。

以下は計算の手法について述べる。コストは現実のバスと同じ方法、ガソリンのかかる費用で計算する。それはトリップメーターの走行距離(km)を給油量(L)で割る。車両の容量は20と設定する。最後に車両の最大本数は35と定義する。図3は実際に富士市に走っているバス路線のネットワークを示す。表2は要求被覆モデルに適用した結果の一部を示す。

4.2. 新たなバス路線の設計

設定1は[2]のバス路線再編計画の観点から路線ネットワーク全体的に調整する。要求被覆モデルの最適化問題を解いた結果を図4で表す。バス停の追加や

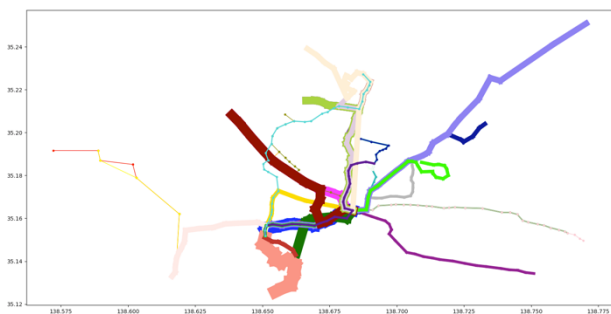


図3 富士市バス路線ネットワーク

表2 各路線の運行本数の一部

路線名	実験結果	文献[2]
吉原中央駅～富士駅_01	25本	28本
吉原中央駅～富士見台団地	25本	21本
根方線_01	5本	3本
根方線_02	3本	2本
富士宮駅～蒲原中学校	12本	12.5本

一部分の路線の廃止など局所的に詳しく調整した。設定2は路線ネットワークの幹線しか残さない。要求被覆モデルの最適化問題を解いた結果を図5で表す。富士駅と吉原中央駅を中心とする地域や吉原地区、伝法地区、鷹岡地区などの地域は人口密度が高く、人口集中地域は図6で表す。設定3は人口集中地域だけ路線を残す。要求被覆モデルの最適化問題を解いた結果を図7で表す。人口集中地域の現状を考慮した上で、路線ネットワーク設計は人口集中地域によりネットワークを設計した。設定4は観光地を無理やりにしても経由する。設定5はバス停の周辺に施設がなければそのバス停を廃止する。



図4 設定1に基づいて設計した路線ネットワーク

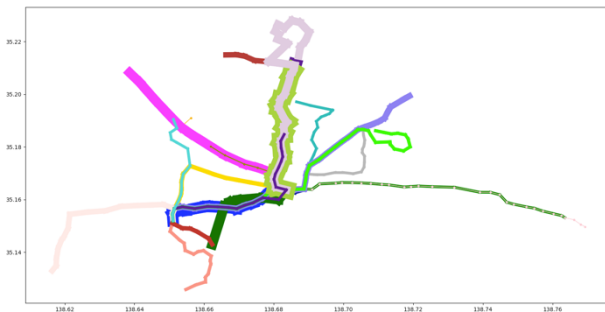


図5 設定2に基づいて設計した路線ネットワーク

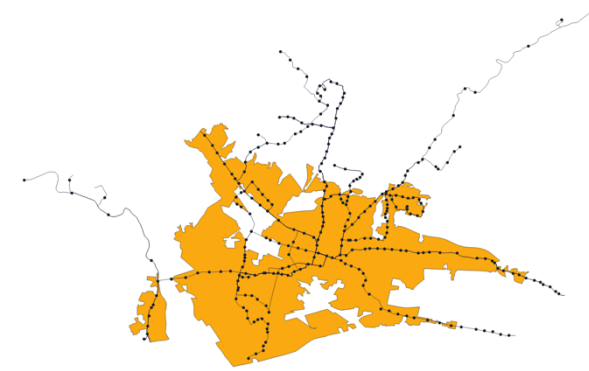


図6 人口集中地域の分布

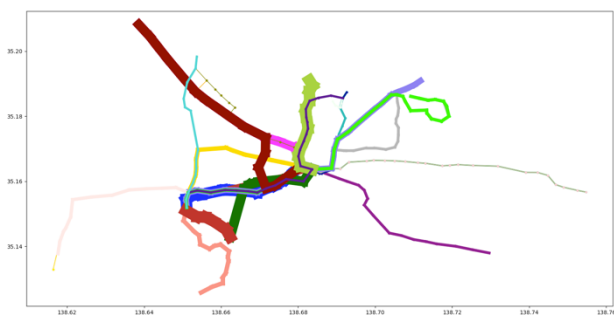


図7 設定3に基づいて設計した路線ネットワーク

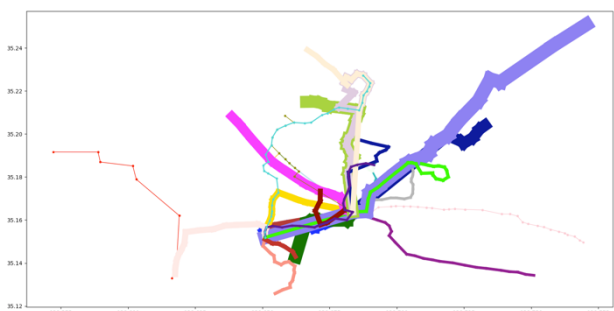


図8 設定6に基づいて設計した路線ネットワーク

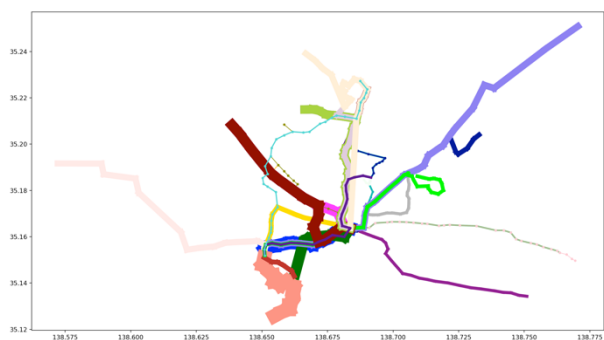


図9 設定7に基づいて設計した路線ネットワーク

設定6は異なる路線の重なっている部分を消す。要求被覆モデルの最適化問題を解いた結果を図8で表す。異なる系統の路線バスは同じルートに走っていることはよくあると考えられる。どちらのバスに乗っても目的地に到着できる状況になっている。異なる起点から出発して終点も違うようなバスはルート内の一部分が重なっていて、運行コストの観点から重複していた部分が一系統のバスだけに頼まれる。バス路線のネットワークは移動の利便性を向上させると考えて設定7は乗り換え回数を減らすために考慮する。表3は各設定の路線ネットワークを要求被覆モデルに適用した結果に関する総本数と目的関数の考察を示す。

表3 総本数と目的関数値

路線	総本数	目的関数値
既存ネットワーク	241	25609.73
設定1	183	19216.20
設定2	212	15733.99
設定3	217	15619.23
設定4	241	29625.62
設定5	241	18758.50
設定6	252	24514.83
設定7	261	30505.16

4.3 実験結果に関する考察

各設定に得られた結果は現実に近い。設定1と設定6の実験結果について考察する。設定1に関しては新富士駅を經由する路線は現状より本数は少ない。実際の新富士駅では新幹線が經由するので乗客の移動需要を計算した時、新幹線が經由される駅は施設の種別として統計されていないため、ギャップが発生した。設定6は重複を避けて、総本数は既存路線より10本多くなったが目的関数値を約1000減らすことができた。

5. 結論

本研究は富士市を対象として、既存の要求被覆モデルの手法を富士市に適用した。要求被覆モデルを用いて様々な視点から新たな路線ネットワークを設計し、結果を考察した。

参考文献

- [1] L. M. Torres, R. Torres, R. Borndörfer, and M. E. Pfetsch: Line planning on tree network with application to the Quite Trolebus System, *8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, ATMOS(2008)*, ZIB-Report (08-35), 2008.
- [2] 富士市, 都市整備部, 都市計画課: 富士市バス路線再編計画(オンライン), 入手先 <<http://www.city.fuji.shizuoka.jp/machi/c1305/fmervo000000a8jt.html>>参照(2018-11-19)
- [3] 静岡県, 交通基盤部, 都市局, 都市計画課: 岳南都市圏パーソントリップ調査(オンライン), 入手先 <<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-510a/documents/gakunan30.pdf>>参照(2019-01)