顧客の在宅率を考慮した配送経路の構築
Delivery route construction considering the absence probability of customers

情報工学専攻 橋本 哲也
Information and System Engineering Tetsuya HASHIMOTO

要約 ： 現在，宅配業界ではインターネット通信販売の成長，普及による即日配達や時間指定配達による宅配便が増え，それに伴う宅配ドライバーの長時間労働と再配達が非常に深刻な問題となっている．そこで，本研究では顧客の在宅率に着目し，在宅率の増加と宅配ドライバーの移動距離削減を目的とした配送計画問題について考える．配送計画問題とは，集積所（デポ）と呼ばれる特定の地点を出発した運搬車が複数の顧客へ荷物を配送する際に発生するコストが最小となる配送経路を求める問題である．提案手法として，顧客の在宅率と宅配ドライバーの移動距離を用いて局所探索を行い，配送経路を構築する手法を提案する．提案手法を用いて数値実験を試行し，顧客の在不在と宅配ドライバーの総移動距離を元に評価を行った．本研究の応用先として，スマートメータや他の方法で顧客の在宅率を算出可能になれば，実際の配送経路の構築に応用可能と考える．

キーワード： 宅配便，再配達，在宅率，移動距離，配送計画問題

1 序論

現状の宅配業界は，近年のインターネット通信販売の成長，普及に伴い宅配便利用者数が増加しており，それにより事業者から受注した荷物も増加している．また，宅配便取扱数の増加に伴う再配達数の増加や労働環境などによる人手不足が深刻化しており，宅配ドライバーの負担が問題視されている．したがって，宅配業界では前述の問題を解決する必要性がある．

これまで，時間枠や容量に制約がついた配送計画問題（VRP）は多々研究されてきたが，顧客の在宅率に着目した配送計画問題はあまり扱われていない [1]．そこで，本研究では顧客の在宅率に着目した配送計画問題を取り扱う．

通常 VRP は複数の車両に顧客を割り当てるが，制約が厳しい場合には車両が1台の条件下で解くことも難しい．そこで本研究では，集積所（デポ）から，荷物を運ぶ１台の運搬車において，顧客の在宅率を用いて再配達の起きにくい配送経路の構築を目的とする．また，本研究の目標は二つあり，一つ目は在宅率の増加，二つ目は総移動距離の削減である．

2 顧客の在宅率を考慮した配送計画問題

２章では，入力データとして与える顧客のデータの詳細と顧客の在宅率を考慮した配送計画問題の概要について説明する．また，本研究で用いる変数および用語を表１に定義する．

表 1 用語と記号の定義

用語および記号	定義
枝	顧客から顧客およびデポへの経路
巡回路 C	運搬車が巡る経路
顧客数 n	顧客の数
二次元座標 (x_0, y_0)	集積所（デポ）の位置
二次元座標 (x_i, y_i)	顧客iの位置 $(i = 1,2, \ldots, n)$
移動距離 d_{ij}	顧客i, j間のユークリッド距離
総移動距離 D_C	巡回路 C における運搬車が移動する総移動距離
移動時間 dt_{ij}	顧客i, j間の移動時間
サービス時間 st_i	顧客 i に対するサービス時間
属性 g_i	顧客iの属性 $(i = 1,2 \ldots, n)$ （2.1 節参照）
在宅率 $p_{g_i}(t)$	時刻tにおける顧客iの在宅率(0~1.0)（2.1 節参照）
巡回路中の顧客 c_i	巡回路 C における i 番目の顧客$(i = 0,1, \ldots, n+2)$

2.1 顧客のデータ

本研究で入力として与えられる顧客のデータについて説明する．まず，顧客数は 100 とし顧客の位置は平面上の x 座標0 ~ 100，y 座標0 ~ 100の範囲に位置し，位置のばらつきが異なる3種類を使用する．

次に，顧客の属性について説明する．属性は大きく２つに分けられ届ける荷物が通常配送便か時間指定便かで分けられる．以下に通常配送便と時間指定便の属性の内訳を表す．

<通常配送便>
- Ⅰ. 単身または共働き
- Ⅱ. 専業主婦などの非就労者が一人以上
- Ⅲ. 高齢者のみ
- Ⅳ. 学生の一人暮らし
- Ⅴ. 宅配ロッカーやコンビニなど

<時間指定便>
- ① 午前中（8 時から 12 時）
- ② 14 時から 16 時
- ③ 16 時から 18 時
- ④ 18 時から 20 時
- ⑤ 19 時から 21 時

また，属性 g_i の値は通常配送便Ⅰ~Ⅴに対して 0 ~ 4，時間指定便①~⑤に対して 5 ~ 9 とする．これらの 10 属性により顧客が分類される．なお，時間指定便の場合は，年齢等に関する情報はないものとする．

最後に，顧客の在宅率について説明する．本研究では，各顧客に個別の在宅率関数を設定するのではなく，顧客の属性に依存した在宅率関数を設定する．設定する在宅率関数は属性の特徴を考え，独自で設定した．確率は 0% ~ 100%とし値としては 0 ~ 1.0 とした．また，時間指定便に属する在宅率関数は指定時間内には必ず在宅していると考え，指定時間内の確率を 1.0 とし，それ以外は 0 とした．さらに，休憩地点に関しては 11:30 から 12:30 の間に必ず到着

しなければならないため在宅率をその時間だけ100.0 にし，それ以外の時間を 0 とすることで必ず決まった時間に休憩を取ることを実現した．以下の図 1 に縦軸を在宅確率[%]，横軸を時刻[t]とした在宅率関数の一例を載せる．

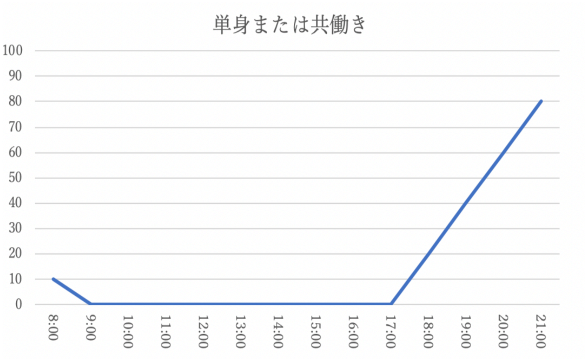

図 1 単身または共働きに対する在宅率関数

2.2 問題の概要

本研究で扱う顧客の在宅率を考慮した配送計画問題について述べる．頂点集合 $V = \{0,1,\ldots,n\}$ と頂点間の枝集合Eに対する完全無向グラフ $G = (V,E)$ を考える．ここで，頂点 0 はデポと呼ばれる集積所を表し，他の頂点はサービスを受ける顧客を表す．次に，顧客 i $(i = 0,1,\ldots,n)$には時刻 t に対する在宅率 $p_{g_i}(t)$ が与えられる．また，本研究で扱う問題では，次のような制約及び条件を持ち，これらをもとに顧客の総在宅率の増加と運搬車の総移動距離の削減した経路の構築を行う．

<制約>

- デポを出発した運搬車が，顧客を経由し，再びデポに戻る
- 運搬車は 1 台のみ
- 配達時間内に全ての荷物を一度は配達する（再配達は考慮しない）
- 休憩を 11:30 ~ 13:30 の間で 1 時間とる
- 休憩時にはデポに戻る

<条件>

- ■ 配達時間は 13 時間(8:00 ~ 21:00)
- ■ グラフは x 座標(0 ~ 100)，y 座標(0 ~ 100)の範囲とし，グラフ上の距離 1 を 50 m とする 5 km 四方の平面グラフ
- ■ 運搬車の速度は 20 km/h
- ■ 移動距離 [m] ＝グラフ上の距離 × 50
- ■ 移動時間 [s] ＝ 移動距離÷(20000÷3600)
- ■ サービス提供時間は，不在時は一律 120[s] 在宅時は顧客の属性に依存し，

A) 高齢者の場合
60（車の乗降や荷物の取り出し）
＋60（荷物の受け渡し）× 2.0 = 180 [s]

B) 学生の場合 60 + 60 × 0.8 = 108 [s]

C) その他の場合 60 + 60 = 120 [s]

3 提案手法

3 章では，提案手法について説明する．また，本章内で用いるサービス時間は属性に依存し，在宅時と不在時のうち大きい方とする．加えて，休憩地点も 1 つの顧客とみなしサービス時間は 1 時間とする．

3.1 初期解構築法

初期解の構築方法について説明する．まず，配達元 i（最後に配達した顧客または未配達の場合はデポ）からまだ訪れていない配達先 j への移動距離 d_{ij} と移動後の時刻 t における在宅率 $p_{g_j}(t)$ を求める．ここで，配達先候補の在宅率がすべて 0 の場合は時刻を1[s]進め，前述の計算に戻る．次に，前述で求めた移動距離と在宅率からそれぞれの平均 avg_d, avg_p，分散 μ_d, μ_p，標準偏差σ_d, σ_pを求め，配達先候補内での各配達先候補の移動距離と在宅率に対する偏差値$T_{d_{ij}}, T_{p_{g_j}(t)}$を算出する．また，偏差値は平均を 50，標準偏差を 10 で正規化したものとする．x_j を配達先候補の場合は 1 とし，それ以外は 0 とする決定変数とすると，それぞれ以下のように求められる．

$$avg_d = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j\, d_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} x_j},\ avg_p = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j\, p_{g_j}(t)}{\sum_{j=1}^{n} x_j}$$

$$\mu_d = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j (d_{ij} - avg_d)^2}{\sum_{j=1}^{n} x_j},\ \mu_p = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j\, (p_{g_j}(t) - avg_p)^2}{\sum_{j=1}^{n} x_j}$$

$$\sigma_d = \sqrt{\mu_d},\ \sigma_p = \sqrt{\mu_p}$$

$$T_{d_{ij}} = -\frac{\left(d_{ij} - avg_d\right)}{\sigma_d} \times 10 + 50$$

$$T_{p_{g_j(t)}} = \frac{\left(p_{g_j(t)} - avg_p\right)}{\sigma_d} \times 10 + 50$$

求めた偏差値に重みをつけ評価値とし，評価の一番高い配達先候補を次の配達先とする．重みの付け方により移動距離と在宅率どちらを優先して経路を構築するかを調整できる．また，重みの付け方は実行可能解が出力されるよう調整する．最後に終了条件として，すべての顧客の配達順序が決定したとき終了する．このようにして構築した解を初期解とする．

$$\textbf{評価値} = \boldsymbol{\alpha T_{d_{ij}} + \beta T_{p_{g_j}(t)}}$$
$$\boldsymbol{(0 \leq \alpha, \beta \leq 1.0, \alpha + \beta = 1.0)}$$

3.2 経路の総在宅率の求め方

まず，本研究で扱う問題では途中で意図的に待機を行うことによって，配送のコストが変化するため，適切な移動・待ち時間を決定する必要がある．初期解構築の段階では，ほぼ前詰めで移動（サービス提供）を行うこととし，解評価では，経路の順序が決まったうえでの，最良の移動・待ち時間を決定する方法に動的計画法(DP)を用いて求める．

次に，本研究で用いた DP について説明する．DP は橋本ら[2]を参考に構築した．以下に DP についての詳細を記す．

目的：顧客 c_i (デポと休憩込みで $n+2$ 箇所)に時刻 T 以前にサービス開始するときの顧客 c_i までの在宅率の総和の最大値を求める．

<方法>

1. 前の顧客c_{i-1}の DP の計算結果を移動時間$dt_{c_{i-1}c_i}$と前の顧客のサービス時間$st_{c_{i-1}}$分だけ正に平行移動させる.
2. 平行移動させたものに現在の顧客の在宅率関数$p_{g_{c_i}}(T)$を足し合わせる.
3. 時刻$ft_{c_i} \sim T$(ft_{c_i}については後述参照)に対して在宅率の総和がそれ以前の時刻の最大値よりも小さい場合は値を最大値にする.

上記を数式で書くと以下のようになる.

$$f_{c_0}(T) = 0$$

$$f_{c_i}(T) = \begin{cases} -\infty & (T < ft_{c_i}) \\ \max\limits_{ft_{c_i} \le t \le T} \left(f_{c_{i-1}}\left(t - \left(st_{c_{i-1}} + dt_{c_{i-1}c_i}\right)\right) + p_{g_{c_i}}(t) \right) & (T \ge ft_{c_i}) \end{cases} \quad , 1 \le i \le n+2$$

各顧客c_iに対して到着可能な最早時刻をft_{c_i}とする. ft_{c_i}は, 経路の総移動距離と各顧客にかかるサービス時間を利用し, 以下のように求められる.

$$ft_{c_0} = 0$$

$$ft_{c_i} = ft_{c_{i-1}} + \left(st_{c_{i-1}} + dt_{c_{i-1}c_i}\right) \quad , 1 \le i \le n+2$$

最後の顧客c_{n+2}の$f_{c_{n+2}}(46800)$の値が経路の総在宅率の値となる(46800 は 13 時間を秒にした値).

ここで, 各顧客c_iに対してそれより後に到着すると配達時間内に全ての顧客を訪れることができなくなる時刻(最遅時刻)をet_{c_i}とすることで計算範囲を$ft_{c_i} \le T \le et_{c_i}$とし計算の高速化を行う. et_{c_i}の求め方について説明する. まず, 配達時間 13 時間を秒に変換した 46800 秒から経路の総移動時間と各顧客のサービス時間の総和を引いた値をet_{c_0}とする. 次に, 始点以外のet_{c_i}は$et_{c_{i-1}}$から移動時間$dt_{c_{i-1}c_i}$とサービス時間$st_{c_{i-1}}$を足した値となる. 式で書くと以下のようになる.

$$et_{c_0} = 46800 - \sum_{i=0}^{n+1} \left(dt_{c_i c_{i+1}} + st_{c_i}\right)$$

$$et_{c_i} = et_{c_{i-1}} + \left(st_{c_{i-1}} + dt_{c_{i-1}c_i}\right) \quad , 1 \le i \le n+2$$

これにより, DP 計算の計算回数が減少する. また, 配送計画が密になるにつれて計算回数は減少する. これは, DP の計算区間が狭まるからである. 下記に, 高速化を施した後の DP 計算の式を記す.

$$f_{c_0}(T) = 0 \left(T \le et_{c_i}\right)$$

$$f_{c_i}(T) = \begin{cases} -\infty & (T < ft_{c_i}) \\ \max\limits_{ft_{c_i} \le t \le T} \left(f_{c_{i-1}}\left(t - \left(st_{c_{i-1}} + dt_{c_{i-1}c_i}\right)\right) + p_{g_{c_i}}(T) \right) & (ft_{c_i} \le T \le et_{c_i}) \end{cases} \quad , 1 \le i \le n+2$$

3.3 局所探索

まず, 局所探索法とは, ある解に少しの変更を加えて, 元の解よりも良くなったとき, 変更後の解に移動するという操作をそれ以上良い解が見つからなくなるまで繰り返す方法である.

次に, 本研究に用いた局所探索について説明する. 近傍には挿入近傍を用いた. 挿入近傍とは顧客を削除して挿入するという操作を行う近傍である. 本研究における, 挿入近傍のアルゴリズムは次のとおりである.

<手順>

1. 削除したことのない顧客の中から削除する顧客i(休憩込みで$n+1$箇所の中)を決定する. 候補がない場合は終了する.
2. 挿入したことのない挿入先の中から顧客iの挿入先j(休憩込みで$n+1$箇所の中から)を決定する.
3. 挿入後の経路に対して評価値の計算を行う.

すべての挿入先を試したら 4 へ進み, それ以外は 2 へ戻る.

4. 改善解が見つからなければ 1 へ戻る. 見つかった場合は改善解(改善経路)を構築し, 1へ戻る(削除候補と挿入先候補はリセット).

<評価値の計算について>

経路の評価値の計算は, 近傍操作前後での総在宅率の増加率と総移動距離の減少率にそれぞれ重みをつけ計算する. 評価値(> 0)で最大値をとったものを改善解とする.

$$\textbf{評価値} = \boldsymbol{\gamma} \times (\textbf{総在宅率の増加率}) + \boldsymbol{\delta} \times (\textbf{総移動距離の減少率})$$
$$(\mathbf{0} \le \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\delta} \le \mathbf{1.0}, \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\delta} = \mathbf{1.0})$$

ここで, 近傍解の類似性をいかした高速化について説明する. まず, 3.2 節で説明した DP は顧客を前から順に計算したものだが, それとは別に顧客を後ろから順に DP 計算したものを準備する. DP の詳細を以下に記す.

目的:顧客c_i(デポと休憩込みで$n+2$箇所)に時刻T以後にサービス開始するときの顧客c_iから終点までの在宅率の総和の最大値を求める.

<方法>

1. 後の顧客c_{i+1}の DP の計算結果を移動時間$dt_{c_i c_{i+1}}$と現在の顧客のサービス時間st_{c_i}分だけ負に平行移動させる.
2. 平行移動させたものに現在の顧客の在宅率関数$p_{g_{c_i}}(T)$を足し合わせる.
3. 時刻$ft_{c_i} \sim et_{c_i}$に対して在宅率の総和がそれ以後の時刻の最大値よりも小さい場合は値を最大値にする.

ここで, 3.2 節の DP を"前からの DP", 本節で説明した DP を"後ろからの DP"と定義する.

続いて, 前からの DP と後ろからの DP を用いて近傍解の総在宅率計算を高速化する. 具体的な高速化の手順は, 手順 1.の段階すなわち顧客が 1 人削除された状態の経路Cに対して, 前からの DP と後ろからの DP を計算する. その際, 削除前の DP 結果を利用すると計算時間がおおよそ半分程度になる. その後, 顧客iをj番目に挿入したとすると, 近傍解C'(経路)の総在宅率は削除後の顧客c_{j-1}に対する前からの DP 結果$f_{c_{j-1}}(T)$を移動時間$dt_{c_{j-1}\,i}$とサービ

ス時間$st_{c_{j-1}}$だけ正に平行移動し，在宅率$p_{g_i}(t)$を足し合わせた結果$f_{c'_j}(T)$をさらに移動時間$dt_{i\,c_j}$とサービス時間st_iだけ正に平行移動し，削除後の顧客c_jに対する後ろからの DP 結果$bf_{c_j}(T)$を足し合わせた結果$F_{c'_{j+1}}(T)$の中で$ft_{c'_{j+1}} \leq T \leq et_{c'_{j+1}}$での最大値が挿入後の経路の総在宅率となる. この方法により，削除した顧客 i を挿入した新しい解に対して，経路の初めから DP 計算を行うことなく，効率的に総在宅率の最大値を求めることができる. 計算の速さとしては“おおよそ顧客数の半分の値”倍だけはやくなる. 総在宅率計算を式で書くと以下のようになる.

$$f_{c'_j}(T) = \begin{cases} -\infty & \left(T < ft_{c'_j}\right) \\ \max\limits_{ft_{c'_j} \leq t \leq T} \left(f_{c_{j-1}}\left(t - \left(st_{c_{j-1}} + dt_{c_{j-1}c'_j}\right)\right) + p_{g_{c'_j}}(t) \right) & \left(ft_{c'_j} \leq T \leq et_{c'_j}\right) \end{cases}$$

$$F_{c'_{j+1}}(T) = \begin{cases} -\infty & \left(T < ft_{c'_{j+1}}\right) \\ f_{c'_j}\left(T - \left(st_{c'_j} + dt_{c'_j c'_{j+1}}\right)\right) + bf_{c_j}(T) & \left(ft_{c'_{j+1}} \leq T \leq et_{c'_{j+1}}\right) \end{cases}$$

$$\text{総在宅率} = \max_{ft_{c'_{j+1}} \leq T \leq et_{c'_{j+1}}} F_{c'_{j+1}}(T)$$

3.4 顧客への到着時刻の求め方

解評価の段階では顧客への到着時刻は決定していないため，顧客の到着時刻を算出する必要がある. まず，DP の計算が全ての顧客に対して終了した状況を考える. 各顧客 c_i $(i = 0,1,\dots,n+2)$の計算結果(在宅率の総和)は，時刻に対して単調非減少なものになる. そこで，最後の顧客 c_{n+2} (デポ)は，計算結果の中で最大値をとる時刻に到着時刻を決定できる. 最大値をとる時刻が複数ある場合は一番早い時刻を顧客への到着時刻とする. すると，一つ前の顧客 c_{n+1} にいつまでにサービスを提供すれば良いかが決まる. よって，一つ前の顧客 c_{n+1}の到着時刻は c_{n+2} の到着時刻から移動時間$dt_{c_{n+1}c_{n+2}}$とサービス時間$st_{c_{n+1}}$を引いた時間以前で，c_{n+1}の DP の結果の中で最大値を取る最も早い時刻に決定できる. これを，経路の最後の顧客から順に最初の顧客まで計算する. すると，全ての顧客に対しての到着時刻が決定できる.

4　数値実験

提案手法により求めた解に対して数値実験を行った. 実験の概要について次に記す.

- 求めた経路に対して 1000 回実験を行う
- 求めた顧客の到着時刻前に到着可能である場合，最早の到着可能時刻から求めた到着時刻の間で最も在宅率が高い時刻を新たな到着時刻とする
- 顧客 i の在不在は，0 ~ 1 の一様乱数 pr が時刻 t における顧客の在宅率 $p_{g_i}(t)$を上回った場合($p_{g_i}(t) < pr$)は不在とし，$p_{g_i}(t)$以下の場合($pr \leq p_{g_i}(t)$)は在宅とする

次に，高速化の有無や初期解の違いさらに近傍の評価値の違いについての結果を表 2 ~ 4 に載せる. また，用いたデータの内訳は通常と時間指定が 6:4 で各内訳は Ⅰ:Ⅱ:Ⅲ:Ⅳ:Ⅴ＝ 0.4: 0.3: 0.15: 0.1: 0.05，①:②:③:④:⑤ ＝ 0.3: 0.15: 0.15: 0.2: 0.2である.

表 2 高速化の有無による違い

高速化	計算時間 [s]	予測在宅率 [%]	平均在宅率 [%]	平均実働時間 [h]	移動距離 [km]
初期解	-	73.6	73.7	9.05	112
なし	16100	86.1	86.1	9.07	111
あり	188	86.1	86.2	9.07	111

※初期解は実行可能解のうち最もβが大きい値，近傍の評価値に対する重みは$\gamma = 1.0, \delta = 0$

表 3 初期解の評価値による違い

α	β	局所探索	計算時間 [s]	予測在宅率 [%]	平均在宅率 [%]	平均実働時間 [h]	移動距離 [km]
0.5	0.5	なし	-	73.7	73.7	9.05	112
0.6	0.4	なし	-	76.1	76.1	8.36	98.3
1.0	0	なし	-	73.5	73.5	7.93	89.6
0.5	0.5	あり	188	86.1	86.2	9.07	111
0.6	0.4	あり	128	86.6	86.7	8.35	97.6
1.0	0	あり	123	86.5	86.5	8.81	107

※最上行は実行可能解のうち最もβが大きい値，近傍の評価値に対する重みは$\gamma = 1.0, \delta = 0$

表 4 挿入近傍の評価値による違い

γ	δ	計算時間 [s]	予測在宅率 [%]	平均在宅率 [%]	平均実働時間 [h]	移動距離 [km]
1.0	0	188	86.1	86.2	9.07	111
0.95	0.05	304	86.0	86.0	7.18	74.2
0.9	0.1	328	84.7	84.7	6.92	69.0
0.85	0.15	324	84.6	84.6	6.80	66.7

※これ以上移動距離に重みをつけると時間指定便を時間内に配達できなくなる

表 2 より，85 倍程度計算時間が短縮されていることがわかる. これは，高速化が上手く機能していると考えられる. 表 3 より，初期解では基本的にα, βの大きい項目(移動距離または在宅率)に影響を受けているが，局所最適解では初期解に依存した結果とは考えにくいことがわかる. 表 4 より，近傍の評価値の重みを移動距離につけることで，計算時間は増えるが移動距離が短くなることがわかる. これは，在宅率が同程度の場合に移動距離においての改善解への移動が行われるため解の移動回数は増えるが，移動距離を考慮した解も求めることができたと考えられる.

5　結論

本研究では，顧客の在宅率を考慮した配送計画問題をモデル化し，提案手法として初期解構築法や局所探索法を用いて解を構築した. 結果として，顧客の在宅率は上昇したが，他の近傍やメタ戦略などを用いることでまだ上昇する見込みはあると言える. また，実験途中に荷物が追加されることを考慮していないが，実際の配達では配達中に再配達の依頼が入ることはたびたび起こると考えられる. 今後の課題として再配達の依頼に対応することや，異なる近傍，メタ戦略を用いて解を求め，解の比較を行うことなどが課題として挙げられる.

参考文献

[1] Toth P, Vigo D editors. The vehicle routing problem. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, SIAM, 2002.

[2] 橋本英樹，今堀慎治，柳浦睦憲，茨木俊秀，移動時間コスト関数を考慮した時間枠つき配送計画問題に対する局所探索法，数理解析研究所講究録 1349 pp. 94-112 (2004).