

木構造索引に基づく輸送車両のグルーピングと最適化

向 直人 渡邊 豊英

名古屋大学大学院 情報科学研究科 社会システム情報学専攻

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町

近年の情報技術の発展に伴い輸送業者は以前と比べより利便性の高いサービスを提供するようになった。しかし、現状のこれらのサービスの大部分は、人手に依る部分が多く、最適化されているとはいえない。この理由は、リアルタイムに発生する多くの要求をオンラインに処理し、常時移動している複数の車両に割り当てるのが困難であるからである。本稿では、走行している複数台の車両を効率良く管理するための索引構造を示し、それを利用した要求の割当最適化手法を提案する。車両位置は定期的にサーバに集約され、車両はその位置情報を基に木構造に索引付けられる。木構造におけるノードは、貨物輸送における車両のグループを意味し、グループ内で要求割当を最適化する。また、目的とする最適化の程度に合わせて、グループのメンバー構成を変化させる。本稿の最後で、シミュレーション実験の結果を示し、グループ構成と割当最適化が輸送効率に与える影響を明らかにする。

R-Tree Based Grouping and Optimization for Transport Vehicles

NAOTO MUKAI

TOYOHIDE WATANABE

DEPARTMENT OF SYSTEMS AND SOCIAL INFORMATICS,

GRADUATE SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE, NAGOYA UNIVERSITY

FURO-CHO, CHIKUSA-KU, NAGOYA, 464-8603, JAPAN

Recent advance of information technology enables transportation companies to improve their qualities of services. However, it seems that most of these services still depend on human-operations and are not fully optimized. There are two reasons of this skimpiness. One is difficulty of real-time management for demands of customers (e.g., a collection of goods) and positions of vehicles. The other is difficulty of assignment problem (i.e., which vehicle should be assigned to demands?). Therefore, in this paper we propose an optimization algorithm for transport demands on the basis of an indexing structure of vehicle positions. The positions of vehicles are collected to an indexing server at an interval, and the vehicles are indexed by a tree structure based on their positions. A node of the tree structure represents a group of vehicles for transportation, and assignments of demands are optimized in each group. The member of group (i.e., vehicle) is flexibly changed according to the level of optimization. In the last of this paper, we investigate the transport effects of both the groups and the optimization by simulation experiments.

1. はじめに

近年、GPS等の位置情報システムを搭載した携帯端末が普及することにより、以前に比べより利便性の高いサービスが実現されるようになった。特に、輸送事業において、位置情報を利用したサービスが多く見られる。例えば、輸送業者の多くは、WEBを利用した集荷依頼の時間指定サービスや、貨物輸送が完了したことをeメールで通知するサービスを提供している。また、デマンド・バスやデマンド・タクシーと呼ばれる、乗合車両を利用した戸別訪問型の輸送サービスの

運行も始まり、その利便性や採算性に関する研究が進められている^{6),7),10)}。しかし、現状のこれらのサービスの大部分は、人手に依る部分が多く、最適化されているとはいえない。例えば、貨物運送の時間指定は「午前中」、「12時～14時」のように時間幅が大きい。また、戸別輸送サービスにおいても、利用者数の少ない局所地域でのみ運行され、配備されている車両台数も2、3台と非常に少ない。この理由は、リアルタイムに発生する多くの要求をオンラインに処理し、常時移動している複数の車両に割り当てるのが困難だからである。従来、このような問題は、NP困難な組合せ

最適化問題の1つとみなされ、遺伝的アルゴリズムや Ant Colony Optimization 等のヒューリスティック・アルゴリズムを用いてその近似解を導出することが現実的な解法であった^{2),5)}。しかし、一般的なヒューリスティック・アルゴリズムは、探索空間が広い計算法コストも大きくなる。

本稿では、この最適化の過程をより効率化するために、車両の空間的特徴を考慮して、車両をグループ単位で管理することで探索空間を絞り、それに基づいた割当最適化手法を提案する。車両位置を管理するための索引構造は、2次元オブジェクトの索引構造である R-Tree¹⁾ に基づく。索引を管理するサーバは、定期的に車両位置を集約し、それに基づき木構造に車両を索引付ける。木構造におけるノードは、車両のグループを意味し、要求の割当はグループ内で最適化される。また、グループのメンバ構成は、常に一定ではなく、目的とする最適化の程度に合わせて変化する。これまで、本研究では、時系列に沿って複数の R-Tree を一定間隔で構築し、その間の索引を対象のオブジェクトの位置・速度ベクトルに基づき補間 (予測) する TPR-Tree^{3),4)} に注目し、それを拡張した索引手法^{8),9)} を提案してきた。本稿では、この索引の補間方法については注目せず、索引構造の特性であるオブジェクトのグループ化に注目し、それを割当最適化に応用することを目的とする。

本稿の構成は以下である。2章では、対象とする輸送サービスを貨物の収集・配送に限定し、輸送サービスの形式的な表現を試みる。車両位置に基づく車両のグループ最適化について3章で述べ、それを利用したグループにおける要求の割当最適化について4章で述べる。5章では、シミュレーション実験により、グループと割当最適化が輸送効率に与える影響について評価する。6章で、本研究をまとめ、今後の課題を述べる。

2. 形式化

本章では、対象とする輸送サービスを形式的に表現する。輸送サービスのモデルは、サービスの対象領域、領域内に発生する顧客 (要求)、要求を処理する車両で構成される。

2.1 サービス領域

サービス領域を、式 (1) に示すように、ノード N とエッジ E で構成されるネットワークで表現する。ノード n は家屋を意味し、要求が発生する位置を表す (バス停と考えることもできる)。エッジ e は家屋間を移動するための経路を意味し、各ノードからの移動制約

を表す。また、各ノードの x - y 平面における座標を $n(x)$, $n(y)$ と表記する。

$$\begin{cases} N &= \{n_1, n_2, \dots\} \\ E &= \{e(n, n') | n, n' \in N\} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 要求

輸送サービスにおける要求は2種類存在し、それぞれ One-to-Many 型と Many-to-Many 型と呼ぶことにする。One-to-Many 型は、貨物の収集や配送を表し、車両は各家屋を順に訪問する。Many-to-Many 型は、顧客の移動を表し、車両は顧客の乗降車位置のペアを考慮しながら各家屋を訪問する。本稿では、前者の One-to-Many 型の要求を対象とする。よって、式 (2) に示すように、要求の集合を R と表す。さらに、式 (3) に示すように、各要求の特徴を3つのパラメータ (n, t, q) で表現する。 n は発生位置 (ノード)、 t は発生時刻、 q は負荷量 (貨物の重さ) を意味する。また、サービス提供者側にとって、要求の発生位置 n と発生時刻 t は未知とする。つまり、サービス提供者は、要求発生と共に車両の訪問位置・時刻を設定する。

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots\} \quad (2)$$

$$r_i = (n_i, t_i, q_i) \quad (3)$$

2.3 車両

式 (4) に示すように、要求を処理するための車両の集合を V と表す。さらに、式 (5) に示すように、各車両の特徴を3つのパラメータ (n, c, p) で表現する。 n は位置 (ノード)、 c は収容可能量、 p は貨物を収集 (配送) するための予定走行経路を意味する。よって、各車両に割り当てられる貨物の総量 ($\sum q_i$) は、収容可能量 c を越えてはいけない。また、車両は常にサービス領域内を走行 (待機) していることを想定するため、予定走行経路 p は割り当てられた要求 (発生位置) に合わせて常に変化する。

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_K\} \quad (4)$$

$$v_j = (n_j, c_j, p_j) \quad (5)$$

3. グループング

本章では、車両の空間的特徴に基づき、 K 台の車両を複数のグループに分割する手法について述べる。式 (7) に示すように、時刻 t における車両グループの集合を $G(t)$ と表す。時刻 t におけるグループ $g(t)$ は、車両集合 V の部分集合であり、グループ・サイズ m (グループのメンバ数) は、 M 以下であるとする。

$$G(t) = \{g_1(t), g_2(t), \dots\} \quad (6)$$

$$g(t) = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m | m \leq M\} \quad (7)$$

グループ $g(t)$ の空間的特徴を、式 (8) に示すように、

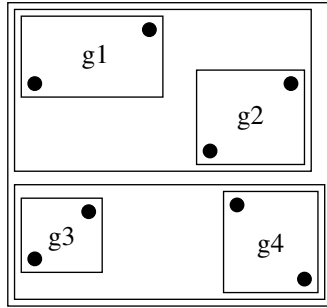


図1 輸送負荷の分担
Fig. 1 Share of traveling work

メンバを最小面積で包含する矩形 $B(g(t))$ (Minimum Bounding Rectangle) で表現する. x, y は矩形の左上の頂点, w, h は矩形の幅と高さを表す.

$$\begin{aligned} B(g(t)) &= (x, y, w, h) \\ &= (\min(n_j(x)), \min(n_j(y)), \\ &\quad \max(n_j(x)) - x, \max(n_j(y)) - y) \end{aligned} \quad (8)$$

前述したように, 要求の割当はグループ単位で最適化される. つまり, グループのメンバ構成は, 最適化の効率に大きく影響する. ここでは, 式 (9) に示すように, グループの空間的特徴である矩形 $B(g(t))$ の面積の和が小さいほど, 理想的なグループ分割であると考えられる. この理由は, 近傍の車両でグループを構成することで, 矩形内における各車両の輸送負荷を分散できるからである. また, 各グループの集合は, さらに上位のグループを表し, その面積の和が再帰的に小さくなるような階層構造で表現する. 本稿では, 簡単化のため, グループ構成の指標を空間的特徴だけで近似してしまう. しかし, 道路状況などの交通制約や, 収容可能数などの車両特徴といったより現実的な要素もグループ構成のための指標となりうる. これらの要素は今後の課題とする.

$$\min \left(\sum_{g(t) \in G(t)} A(B(g(t))) \right) \quad (9)$$

図1に例を示す. サービス領域には, 8台の車両と, 4つのグループが存在する. 各グループには, それぞれの矩形領域周辺に発生する要求が割り当てられる. さらに, グループに割り当てられた要求は, グループ内の各メンバに割り当てられる. ここで, 要求割当は最適化され, メンバの輸送負荷が分散されることになる. 結果的に, グループの矩形はさらに分割され, 各車両に担当領域として与えられることを意味する.

以上のようなグルーピングを実現するために, R-

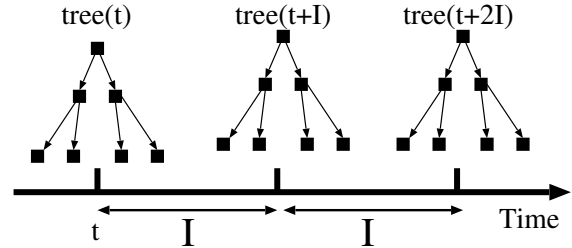


図2 グループの更新
Fig. 2 Update of groups

Tree¹⁾ と呼ばれる索引構造を導入する. R-Tree は, 2次元オブジェクトを Minimum Bounding Rectangle で近似し, 再帰的に階層構造で索引付ける手法である. この索引構造は, 前述した車両のグルーピングと等価である. そこで, 本稿では, 車両を2次元オブジェクトと捉え, R-Treeにより車両を索引付け, 各ノードに含まれる車両をグループとみなす. しかし, R-Treeは静的オブジェクトを索引付けるための手法であり, 本稿で対象とするような動的オブジェクトに対応できない. ここで, 静的オブジェクトとは, 建造物のように移動が伴わないオブジェクトを意味し, 動的オブジェクトとは, 車両のように時間軸に沿って位置を変更するオブジェクトを意味する. そこで, 図2のように, 更新間隔 I に従い定期的に索引木を再構成することで, 動的オブジェクトに対応する (時刻 t における車両索引を $tree(t)$ と表す). つまり, 車両は更新間隔 I 毎に, 自身の位置情報をサーバに送信し, サーバはその情報を基に車両の索引を形成する. 更新間隔 I が小さいと, 索引精度 (位置精度) は高くなるが, 更新コストは大きくなる. 逆に, 更新間隔 I が大きいと, 索引精度は低くなるが, 更新コストは小さくなる. このように, 時間軸に沿って一定間隔で R-Tree を構築する手法では, 更新間隔における動的オブジェクトの位置情報が得られない. この更新間隔の位置情報を, 動的オブジェクトの速度ベクトル情報を定期的に取得することにより, 推測し補間する手法が TPR-Tree^{3),4)} である. 本稿では, この補間については考慮せず, 定期的に取得した位置情報のみを用いる.

4. 最適化

本章では, 車両への要求割当を最適化する手法について述べる. 最初に, グループ構造に基づいた初期割当について述べ, 次に, 車両間での要求交換に基づく最適化について述べる.

4.1 要求割当

時刻 t に要求が発生すると, その要求は即時に車両

索引を管理するサーバに送信される。サーバは、その要求を担当する1台の車両を索引 $tree(t_u)$ から探索する (t_u は最新の更新時刻)。探索とは、索引の根ノードから始まって、根ノードにぶら下がっている子ノードを選択し、葉ノードまで辿る過程を表す。このとき、式 (10) に示されるように、「矩形 (グループ) の中心」と「要求の発生位置」の距離が最短となる子ノードを選択する。図 3 は、索引木 (車両台数 $K = 8$, グループ・サイズ $M = 2$) から、上記の探索過程に従って、車両 v_6 が要求の担当として選択されたことを表している。この探索に必要なコストは $M \times \log_M K$ であるため、線形に車両を比較するよりも効率が良い。

$$\sqrt{\left(x + \frac{w}{2} - n(x)\right)^2 + \left(y + \frac{h}{2} - n(y)\right)^2} \quad (10)$$

4.2 要求交換

探索により初期割当が定めれば、グループ内で要求を交換することで、より良い要求割当を得る。ここで、最適化の程度を表す最適化レベル L を定義する。最適化レベル L は、全体最適と局所最適のバランスを調整する役割を担い、要求を交換する車両数 (グループのメンバ数) に依存する。つまり、グループのメンバ数が多ければ全体最適を発見できる可能性は高いが、その分だけ計算コストも増加してしまう。そこで、図 4 に示すように、索引における階層の高さを最適化レベル L と呼び、各階層に属する車両グループで要求を交換する。つまり、図 4 において、要求が v_6 に割り当てられたとき、最適化レベル $L = 1$ ならば、 v_5, v_6 で要求を交換し、最適化レベル $L = 2$ ならば、 v_5, v_6, v_7, v_8 で要求を交換する。要求交換は、グループ内の車両の全ての組合せに対して適用されるため、その計算コストは ${}_2C_{ML}$ となる。

次に、要求割当がどれだけ優れているかを表すための評価基準を定義する。本稿では、顧客優先または車両優先という基準で要求割当を評価する。顧客優先は、要求を処理するために必要な時間を最小化することを意味し、式 (11) で与えられる。この基準では、複数台の車両に均等に要求が割り当てられるため、要求発生から収集 (配送) までの時間は小さくなるが、車両全体の走行距離は大きくなる。車両優先は、要求を処理するために必要な走行距離を最小化することを意味し、式 (12) で与えられる。この基準では、一部の車両の負荷が大きくなるため、要求発生から収集 (配送) までの時間は大きくなるが、車両全体の走行距離は小さくなる。

$$time(v, v') = \max(|p|, |p'|) \quad (11)$$

$$dist(v, v') = |p| + |p'| \quad (12)$$

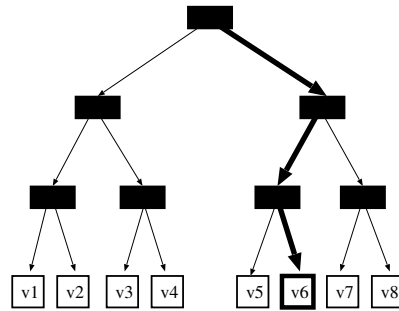


図 3 要求割当

Fig. 3 Assignment of Requests

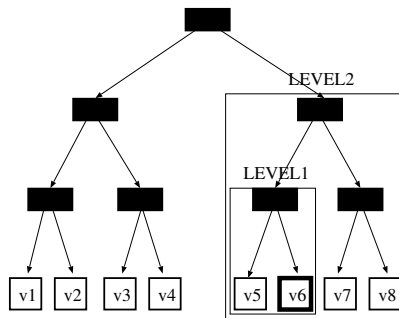


図 4 要求交換

Fig. 4 Exchange of Requests

5. 実験

本章では、提案したグループ構造と割当最適化が輸送効率に与える影響について評価する。

5.1 環境設定

本実験では3つの評価項目を設ける。走行距離は、全ての要求を処理するために車両が走行した距離の総和を表し、車両 (事業者) にとって優先すべき評価項目である。待機時間は、要求発生から車両が収集 (配送) するまでの時間を表し、顧客にとって優先すべき評価項目である。最適化コストは、顧客交換に必要な計算コストを表し、システム構成において考慮すべき評価項目である。また、本実験では、グループ・サイズ M , 更新間隔 I , 最適化レベル L を変化させ、評価項目に与える影響を調べた。サービス領域は、 40×40 の格子状のネットワークとした。車両数 K は30台とし、車両がエッジで連結されたノード間を移動するのに必要な時間を単位時間 ($1t$) とした。要求は、サービス領域において一様分布に $1/t$ の割合で発生させた。1回の運行プロセスを1000tとし、その10回の平均値を実験結果とした。各パラメータの既定値を表1にまとめる。

パラメータ	値
車両数 K	30
収容可能数 c	5
要求負荷量 q	1
グループ・サイズ M	3
更新間隔 I	1
最適化レベル L	2

5.2 実験結果

5.2.1 グループ・サイズ M

グループ・サイズ M を 2 から 5 に変化させた。図 5, 6, 7 は、走行距離、待機時間、最適化コストをそれぞれ表している。グループ・サイズは、最適化における問題空間の大きさに直接影響する。このため、グループ・サイズが大きいほど、走行距離と待機時間が減少した。しかし、最適化コストもそれに伴い増加している。また、走行距離を減少させるには、待機時間を減少させるのに比べ、多くの計算コストが必要なことがわかる。これは、車両優先にすると、一部の車両の負荷が他車両と比べ極端に大きくなり、要求交換の組合せが増加するためだと考えられる。

5.2.2 更新間隔 I

更新間隔 I を 1 から 9 に変化させた。図 8, 9, 10 は、走行距離、待機時間、最適化コストをそれぞれ表している。更新間隔は、索引精度 (位置精度) に直接影響する。このため、走行距離への影響は小さいのに対し、待機時間と最適化コストに対しての影響が顕著に現れた。このことは、初期割当の精度が低いことに起因していると考えられる。前述した TPR-Tree のように、更新間隔の車両位置を予測・補間することで、この精度低下を避けられる可能性がある。

5.2.3 最適化レベル L

最適化レベル L を 0 から 3 に変化させた。図 11, 12, 13 は、走行距離、待機時間、最適化コストをそれぞれ表している。最適化レベルが高いほど、走行距離、待機時間が改善されることがわかる。また、最適化レベルが 0 のとき、顧客優先と車両優先に大差はない。最適化レベルを 1, 2 に上げると、その差が明確になり、顧客優先は待機時間を減少させ、車両優先は走行距離を減少させる。しかし、最適化レベルが 3 になると、走行距離は差が小さくなるのに対し、待機時間は差が大きくなっている。これは、最適化レベルが高いとき、結果的に顧客優先でも走行距離を減少させることができることを意味している。

6. まとめ

本稿では、近年の情報技術の発展に伴う輸送サービ

スの変化に注目し、さらに利便性の高いサービスを提供するための要求処理手法について述べた。リアルタイムに発生する要求をオンラインに処理し、常時移動している車両に割り当てるために、車両の空間的特徴に基づき車両のグループを構成し、グループ内で要求割当を最適化することを試みた。実験結果から、提案手法が、計算コストを考慮しながら、顧客または車両 (事業者) にとって価値のある要求割当を導出できることを示した。

今後の課題は、グループ構成の評価基準や、車両位置の予測・補間の再考に加え、実社会のデータを用いた輸送サービスの運行シミュレーションを進めることである。

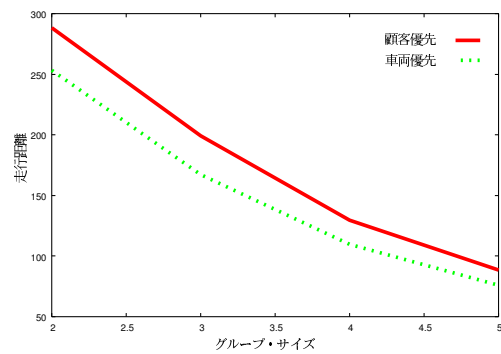


図 5 走行距離 (グループ・サイズ M)
Fig. 5 Traveling distance (Group size M)

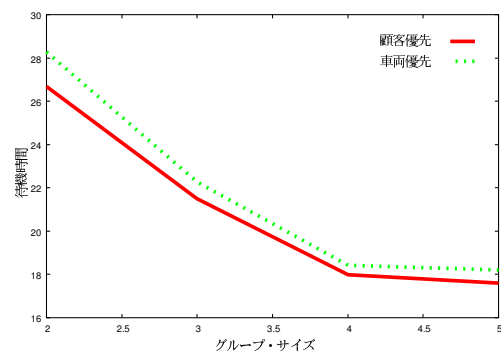


図 6 待機時間 (グループ・サイズ M)
Fig. 6 Elapsed time (Group size M)

謝 辞

御指導頂いた愛知工業大学・石井直宏教授に感謝致します。

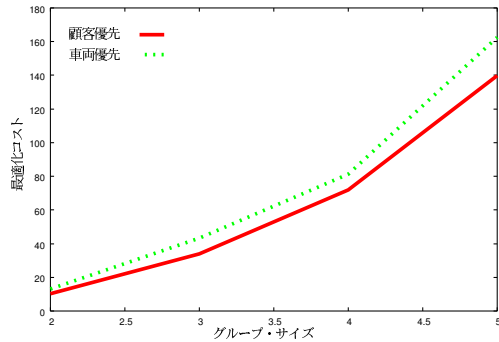


図 7 最適化コスト (グループ・サイズ M)
Fig. 7 Optimization cost (Group size M)

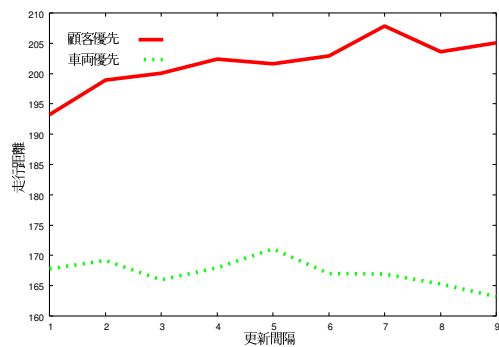


図 8 走行距離 (更新間隔 I)
Fig. 8 Traveling distance (Update interval I)

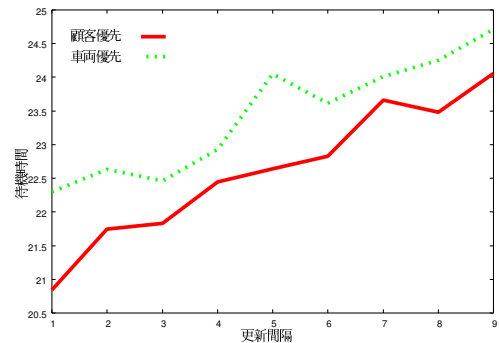


図 9 待機時間 (更新間隔 I)
Fig. 9 Elapsed time (Update interval I)

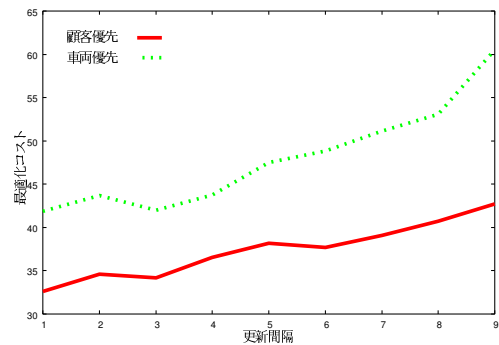


図 10 最適化コスト (更新間隔 I)
Fig. 10 Optimization cost (Update interval I)

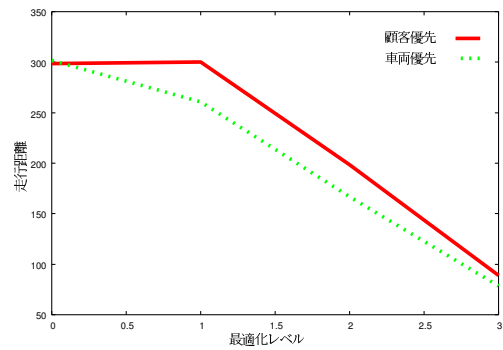


図 11 走行距離 (最適化レベル L)
Fig. 11 Traveling distance (Optimization level L)

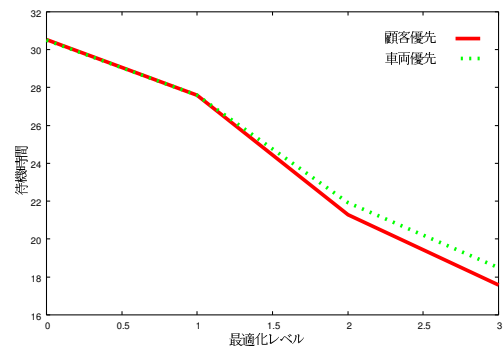


図 12 待機時間 (最適化レベル L)
Fig. 12 Elapsed time (Optimization level L)

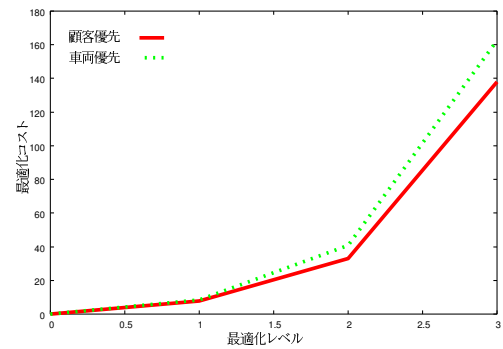


図 13 最適化コスト (最適化レベル L)
Fig. 13 Optimization cost (Optimization level L)

参考文献

- 1) Guttman, A.: R-trees: a Dynamic Index Structure for Spatial Searching, *Proc. of ACM SIGMOD 1984*, pp. 47-57 (1984).
- 2) Qili, K. and Ong, K.: A Reactive Method for Real Time Dynamic Vehicle Routing Problem,

- Proc. of ICTAI 2000*, pp. 176–181 (2000).
- 3) Saltenis, S. and Jensen, C.S.: Indexing of Moving Objects for Location-Based Services, *Proc. of ICDE 2002*, pp. 463–473 (2002).
 - 4) Saltenis, S., Jensen, C. S., Leutenegger, S. T. and Lopez, M. A.: Indexing the Positions of Continuously Moving Objects, *Proc. of ACM SIGMOD 2000*, pp. 331–342 (2000).
 - 5) Tian, Y., Song, J., Yao, D. and Hu, J.: Dynamic Vehicle Routing Problem using Hybrid Ant System, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 970–974 (2003).
 - 6) 境周平, 若林竜太, 内村圭一: デマンドバスの運用面積に関する考察, 技術報告 2000-ITS-002, 情報処理学会研究報告 (2000).
 - 7) 原野貴裕, 石川孝: 協調型デマンドバスの有効性について, 技術報告 2004-ITS-19, 情報処理学会研究報告 (2004).
 - 8) 向直人, 馮鈞, 渡邊豊英: 時間制約付き車両配送問題における顧客満足度に基づいた CVTPR-Tree 手法, データベース学会 Letters, Vol. 2, No. 3, pp. 5–8 (2003).
 - 9) 向直人, 馮鈞, 渡邊豊英: 近似経路による配送車両の時空間索引の形成, データベース学会 Letters, Vol. 3, No. 3, pp. 17–20 (2004).
 - 10) 野田五十樹, 太田正幸, 篠田孝祐, 熊田陽一郎, 中島秀之: デマンドバスはベイするか?, 技術報告 2003-ICS-131, 情報処理学会研究報告 (2003).