

# 拡張 R-Tree を用いたバスの分散管理方式

向 直人<sup>†</sup> 馮 鈞<sup>††</sup> 渡邊 豊英<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 名古屋大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

E-mail: †{naoto,feng,watanabe}@watanabe.nuie.nagoya-u.ac.jp

あらまし 赤字路線の増加により固定路線バス会社では経営が厳しく撤退が相継いでいる。しかし、高齢化時代を控え公共交通機関としてのバスの必要性はより高くなると予想される。本研究は、固定路線バスに対しより少ない台数で運営可能なデマンドバスに着目し、それを拡張した分散管理型の新たなバス方式を提案する。デマンドバスとは乗客の要求に応じて乗降車場所を自由に変更できる乗合バスのことである。本手法では、車両を木構造に索引付けすることにより、配送負荷が分散されるように顧客を割当てる。各索引木は顧客発生頻度に基づき担当エリアが決まっており、エリアを跨ぐ要求が発生した場合、複数の索引木を統合することにより割当て問題を解決する。

キーワード デマンドバス, 動的車両配送問題, VRTPR-Tree, 分散管理

## Distributed Bus Management Using Tree Structure

Naoto MUKAI<sup>†</sup>, Jun FENG<sup>††</sup>, and Toyohide WATANABE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Systems and Social Informatics, Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan

<sup>††</sup> Department of Information Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan

E-mail: †{naoto,feng,watanabe}@watanabe.nuie.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** The number of unprofitable bus routes is on the rise, so many bus companies get out of the business. However, the necessity for buses as public transportation system will increase in an impending aging society. Therefore, we focus on a demand-bus system, and propose a new distributed bus management system extended from the demand-bus system. The demand-bus system is a share-ride bus system in which the customers choose their riding and dropping positions freely. In our approach, the buses are spatially indexed by VRTPR-Tree extended from TPR-Tree, and the loads of demands are shared between the buses by the indexes. Each bus has his responsible area based on the frequency of occurrence of demands. If the demand which overlaps plural responsible areas occurs, the assignment of customers is solved by integration with the index trees of the areas temporarily.

**Key words** Demand-Bus, Dynamic Vehicle Routing Problem, VRTPR-Tree, Distributed Management

### 1. はじめに

近年、赤字路線の増加により固定路線バス会社の経営は厳しく撤退が相継いでいる。県・市町村は維持が困難となっているバス会社に対して補助金を交付し、生活交通路線として必要なバス路線を維持していることも少なくない。しかし、路線バスは自動車を運転できない、所有できない高齢者や学生にとってかけがえのない交通手段である。さらに、高齢化時代を控え公共交通手段としてのバスの必要性はより高くなると予想される。本研究は、従来の固定路線バスに対しより少ない台数で運営可能なデマンドバスに着目し、それを拡張した分散管理型の新

たなバス方式を提案する。

固定路線バスは一定の道筋に沿って時刻表に従って運転される乗合バスのことである。一方、デマンドバスとは乗客の要求に応じて乗降車場所を自由に変更できる乗合バスのことである。昨今まで、動的に発生する顧客要求の管理や、車両への割当問題の困難さからデマンドバスの実現は難しいとされてきた。しかし、近年の携帯端末や GPS の急速な発達により、顧客・車両の位置をリアルタイムに把握可能になり、デマンドバスの実現も夢ではなくなった。

デマンドバス問題は動的な巡回サラリーマン問題と言い替えることができる。これらは NP 困難であり、最適解を求め

ることは極めて難しい．そこで，精度の高い近似解を求めることが現実的な解法となる．これまでに，多くの研究者によって，計算機上におけるデマンドバス環境のモデルが提案されてきた．複数台の車両で地域内の全顧客の要求発生地点を回るためにどのような経路を走らせるかという問題は Vehicle Routing Problem (VRP) [1], [9] と呼ばれる．顧客の要求に乗降車の時間制約が付加された問題は Vehicle Routing Problem with TimeWindows (VRPTW) [3] ~ [5], [11] と呼ばれる．これらはいずれも静的な問題であるといえる．つまり，全ての顧客要求は車両の出立前に与えられており，車両は初期段階で決定された経路を走行すればよい．このため，多くの研究ではヒューリスティックな最適化アルゴリズムを用いて解を導出している．しかし，本研究が対象としているのは現実を想定した動的な問題であり，顧客の要求はリアルタイムに発生する．このような動的環境ではこれまで用いられてきたヒューリスティックな解の導出手法は計算負荷が高く，実用には向かない．そこで，我々は車両を木構造を用いて索引付けし，配送負荷が分散されるように顧客を割り当てることで，計算負荷を抑える．また，現実の都市において顧客要求は一様に発生することはなく，駅など要求が集中するエリアが存在する．そこで，我々は顧客の発生位置・頻度をモデル化し，車両に担当エリアを割り当てることによって索引木を分散管理する．分散管理により木の構築時間・顧客の割当時間が減少し，広域エリアでの効率的な運営が可能となる．

本論文の構成は以下である．2章で対象とするデマンドバス問題を形式化する．車両を索引付けするための木構造を3章で定義する．4章では索引木を用いた顧客の車両への割当と，時間制約に基づいた顧客の配送順序について述べる．複数の索引木による広域エリアでの管理方法を5章で述べる．6章でシミュレーション実験の結果を示す．最後に，7章でまとめと今後の課題を述べる．

## 2. 形式化

我々は対象とするデマンドバス問題を Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP) と呼び，以下のように形式化する．

車両はノードとエッジから構成される道路ネットワーク  $G$  上を走行するものとする (式 (1))．ノードは交差点，エッジはノードを繋ぐ道路セグメントを表す．ノードの  $x$ - $y$  平面における位置を  $(px, py)$  と表す．また，顧客の乗降は道路ネットワーク上のいずれかのノードで行われるものとする．

$$G = (P, S) \quad (1)$$

$$P = \{p_1, p_2, \dots\}$$

$$S = \{[p - p'] : p, p' \in P\}$$

$N$  人の顧客は式 (2) で与えられる．顧客  $c_i$  の乗降要求は式 (3) で表され， $r_i$  は乗車ノード， $d_i$  は降車ノードをそれぞれ表す．図 1 は顧客の状態遷移を表しており，顧客は待ち状態 (WAIT)，乗車状態 (RIDE)，配送完了状態 (COMPLETE) の

順に状態を遷移する．また，車両が到着するまでの時間を  $tr_i$ ，目的地に到着するまでの時間を  $td_i$  とする．

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\} \quad (2)$$

$$D(c_i) = (r_i, d_i) \quad (3)$$

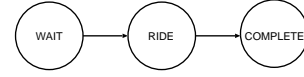


図 1 顧客の状態遷移

Fig. 1 State transition of customers

$K$  台の車両は式 (4) で与えられる．車両  $v_j$  の担当エリアは式 (5) のように  $x$ - $y$  平面上の矩形で表される．また，時刻  $t$  の車両  $v_j$  の位置を式 (6)，速度ベクトルを式 (7) で表す．車両の位置と速度ベクトルは一定間隔  $I$  で更新される．

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

$$R(v_j) = ((R_x^+, R_x^-), (R_y^+, R_y^-)) \quad (5)$$

$$\bar{v}_j(t) = (x_j(t), y_j(t)) \quad (6)$$

$$\vec{v}_j(t) = (vx_j(t), vy_j(t)) \quad (7)$$

各車両は，図 2 に示すような配列  $q(t)$  を持つ．この配列は時刻  $t$  の車両が配送する顧客の順番を表している．割り当てられた顧客要求の乗降位置  $(r_i, d_i)$  が配列に挿入され，配列の順に従って要求が満足されていく．顧客要求の挿入方法については4章で詳しく述べる．また，本論文では車両の最大乗車数を考慮しない，つまり配列  $q(t)$  の配列長  $L$  は無限に増加可能とする．

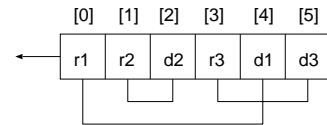


図 2 配送順序配列

Fig. 2 Queue for delivery orders

時刻  $t$  の車両の走行コストを式 (8) で表す． $d(p, p')$  はノード  $p, p'$  間の経路距離である．

$$|q_j(t)| = d(\bar{v}_j, q_j(t)[0]) + \sum_{l=0}^{L-1} d(q_j(t)[l], q_j(t)[l+1]) \quad (8)$$

図 3 は車両の状態遷移を表しており，車両は要求待ち状態 (WAIT)，配送状態 (DELIVER)，帰還状態 (RETURN) のいずれかの状態をとる．車両は，顧客要求が割り当てられるまでその場で静止して待機する (要求待ち状態)．一旦，要求が割り当てられると顧客の配送を開始する (配送状態)，割り当てられた全ての顧客の配送が完了すると各車両の担当エリアに帰還する (帰還状態)．担当エリアに到着すると待ち状態に遷移し，も

し、帰還途中で新たな要求が割り当てられれば配送状態に遷移する。

顧客要求の発生エリアの集合を式 (9) で与える。図 4 に示すように、発生エリア  $a_k$  の形状は円で近似され、中心  $(x_k, y_k)$ 、半径  $r_k$  で表される。また、要求発生確率は正規分布に基づく疑似乱数により決まる。 $z_k$  は要求発生の頻度を決定するパラメータであり、標準正規分布におけるパーセント点に等しい。例えば、 $z_k = 1.96$  のとき、顧客要求は  $95\%(I(z_k) \times 2 = 0.95)$  の確率で円内部で発生する (図 5)。

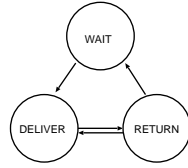


図 3 車両の状態遷移

Fig. 3 State transition of vehicles

$$A = \{a_1, a_2, \dots\} \quad (9)$$

$$a_k = ((x_k, y_k), r_k, z_k)$$

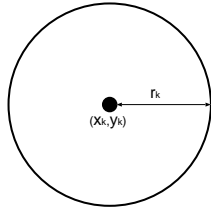


図 4 要求発生エリア

Fig. 4 Arising area of demands

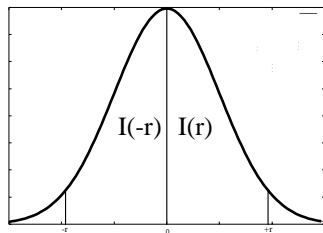


図 5 要求発生確率分布

Fig. 5 Probability distribution of demands

デマンドバスの優位性評価は利便性と採算性に帰着される。一般的に、これらの指標は主観的かつ経済的な要素が複雑に絡み合い、定量的な評価が困難である。そこで、本研究では、車両の走行コスト (採算性) と顧客の待ち時間・乗車時間 (利便性) を最小化することを目標とする。よって目的関数は式 (10) で与えられる。

$$\min \left( \sum_i^N (tw_i + tr_i) + \sum_j^K (|q_j(t)|) \right) \quad (10)$$

### 3. VRTPR-Tree

これまでに、空間オブジェクトの索引手法として R-Tree [2] や、それを移動オブジェクトに適応させた TPR-Tree [8] が提案されている。R-Tree によって、複数の移動オブジェクトを索引付けるには、頻繁な更新が必要になり、計算負荷が高く現実的ではない。そこで、TPR-Tree はオブジェクトの位置・速度を定期的を取得し、それをを用いることにより、時間変化と共に伸縮する移動オブジェクトの包含矩形を形成する。この包含矩形は Conservative Bounding Rectangle (CBR) と呼ばれ、更新間隔内の移動オブジェクトの予測位置を表し、更新頻度を抑えた管理を可能とする。また、TPR-Tree を拡張した様々な移動オブジェクトの索引手法 (Star-Tree [6],  $R^{EXP}$ -Tree [7], TPR\*-Tree [10]) が提案されている。本論文では、車両オブジェクトを索引付けるための Vehicle Routing TPR-Tree (VRTPR-Tree) を提案する。VRTPR-Tree は TPR-Tree の拡張型であり、道路ネットワークにおける車両の配送負荷を考慮する。VRTPR-Tree は次元数に依存することなく適用可能であるが、本論文では  $x$ - $y$  平面上を動く車両オブジェクトについてのみ考える。以下に VRTPR-Tree の構造を述べる。

#### 3.1 葉ノード

VRTPR-Tree は R-Tree と同じく平衡木の構造をしている。葉ノードの要素は、式 (11) に示すように、1 台の車両  $v_j$  と、それを包含する矩形  $BR(t)$  から構成される。矩形  $BR(t)$  は時間  $t$  をパラメータに持ち、時間経過と共に、その形状を膨張させる。膨張率は車両の道路ネットワークにおける到達可能領域、かつ、車両の位置・速度ベクトルに依存して決まる。

$$E = (v_j, BR(t)) \quad (11)$$

矩形  $BR(t)$  は式 (12) のように  $x$ - $y$  平面上の間隔として定義される。以下では、簡略化のため  $y$  次元については省略し  $x$  次元についてのみ言及するものとする。

$$BR(t) = ((BRx^\perp(t), BRx^\top(t)), (BRy^\perp(t), BRy^\top(t))) \quad (12)$$

ここで、更新間隔  $I$  における車両  $v_j$  の到達可能領域について考えてみる。前述したように、更新間隔  $I$  は車両の位置・速度ベクトルの取得にかかる時間間隔のことである。車両  $v_j$  が更新間隔  $I$  内に進行可能な距離は  $\max(v_j) = \vec{v}_j \times I$  である。道路ネットワーク上で車両が到達可能なノードの集合を  $P'$  とすると、 $P'$  は式 (13) で表された条件を満たす。 $P'$  を最小面積で包含するような矩形を到達可能矩形  $RR(v_j(t))$  とする (式 (14))。

$$p \in P' : d(\vec{v}_j, p) < \max(v_j) \quad (13)$$

$$RR(v_j(t))_x^\perp = \min_{p \in P'}(px) \quad (14)$$

$$RR(v_j(t))_x^\top = \max_{p \in P'}(px)$$

さらに、矩形  $BR(t)$  と同様に、 $x$ - $y$  平面上の矩形  $VRCBR(t)$

を定義する．到達可能矩形  $RR(v_j(t))$  を用いて，VRCBR の膨張速度を式 (15) のように定義する．車両の位置・速度ベクトルの更新時刻を  $t_u$  と表す．これにより，車両の進行と同方向の矩形面は車両と同速度で膨張する．一方，反対方向の矩形面は更新間隔  $I$  で到達可能矩形に達するように膨張する．

$$VRCBRvx^\perp = \min \left( vx_j(t_u), -\frac{|RR(v_j(t_u))x^\perp - x_j(t_u)|}{I} \right) \quad (15)$$

$$VRCBRvx^\top = \max \left( vx_j(t_u), \frac{|RR(v_j(t_u))x^\top - x_j(t_u)|}{I} \right)$$

膨張速度を用いて  $VRCBR(t)$  を式 (16) のように定義する．更新時刻  $t_u$  の矩形はオブジェクトと同位置の点に等しい．時間経過と共に，矩形はオブジェクトの予測位置を囲むように膨張し，到達可能矩形に到達すると，その膨張をやめる．

$$VRCBRx^\perp(t_u) = VRCBRx^\top(t_u) = x_j(t_u)$$

$$VRCBRx^\perp(t) = \max \left( RRx^\perp(t_u), VRCBRx^\perp(t_u) + VRCBRvx^\perp(t - t_u) \right) \quad (16)$$

$$VRCBRx^\top(t) = \min \left( RRx^\top(t_u), VRCBRx^\top(t_u) + VRCBRvx^\top(t - t_u) \right)$$

図 6 は葉ノードにおける VRCBR の膨張の様子を示している．一台の車両を常に囲むように矩形は膨張する．車両の到達可能領域と用いることで，たとえ車両が進行方向を変更したとしても，車両を矩形内から逸脱させることなく，常に留めておくことが可能である．つまり，高い信頼性での車両の位置予測が可能ということである．また，到達可能性のない領域には矩形は膨張しないことで，無意味な矩形面積の増加を抑えることができる．

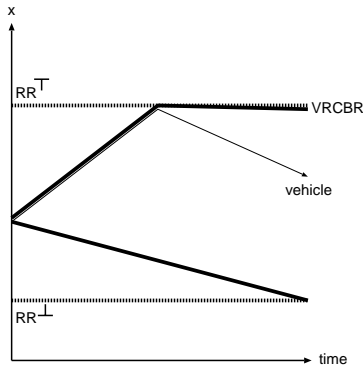


図 6 葉ノードの VRCBR

Fig. 6 VRCBR in a leaf node

次に，車両の配送負荷を矩形で表現することを考える．まず，式 (17) のように，顧客  $c_i$  の乗降車位置  $r_i, d_i$  を最小面積で囲む矩形を，要求矩形  $DR_i$  と定義する．

$$DR_{ix}^\perp = \min(rx_i, dx_i) \quad (17)$$

$$DR_{ix}^\top = \max(rx_i, dx_i)$$

最終的に，葉ノードにおける車両  $v_j$  を包含する矩形  $BR(t)$

は要求矩形  $DR_i$  を用いて式 (18) のように定義される．つまり，車両を包含するだけでなく，車両に割り当てられた顧客  $c_i$  の要求矩形  $DR_i$  も包含するように矩形  $BR(t)$  は定義されることとなる．これにより，顧客の配送を完了するために広域を走行しなければならない車両の矩形面積は大きくなる．つまり，車両の配送負荷が矩形面積として表現される．

$$BR_x^\perp(t) = \min_{i \in C'} (VRCBR_x^\perp(t), DR_{ix}) \quad (18)$$

$$BR_x^\top(t) = \min_{i \in C'} (VRCBR_x^\top(t), DR_{ix})$$

### 3.2 中間ノード

中間ノードの要素は，式 (19) で示すように，子ノードへのポイント集合と，子ノードの矩形を最小面積で包含する矩形で構成される．図 7 は二つの子ノードの矩形を包含する中間ノードの矩形を示している．葉ノードでは車両の位置・速度ベクトルと到達可能領域を用いてその形状が決まったのに対し，中間ノードでは子要素の矩形のそれらを用いてその形状が決まる．中間ノードが包含可能な子要素の最大数を  $M$  と表す．

$$E = ((E_1, E_2, \dots, E_m), BR(t)) \quad (19)$$

$$(m < M)$$

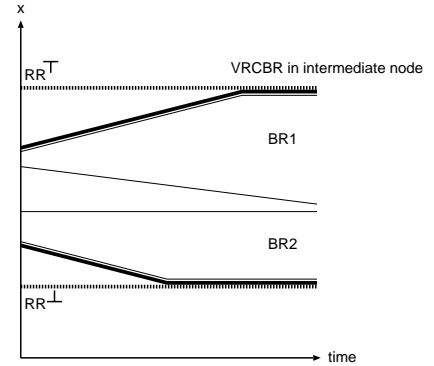


図 7 中間ノードの VRCBR

Fig. 7 VRCBR in an intermediate node

## 4. 顧客割当と配送順序

### 4.1 顧客割当

リアルタイムに発生する要求ごとに索引木への問合せが行われ，各顧客に対する割当車両が決定する．索引木の根から，新規に発生した要求矩形  $DR_{new}$  と矩形  $BR(t)$  が重複する子ノード，もし重複がなければ，式 (20) を用いて子ノードを評価し評価値が最小の子ノードが選択される．式 (20) は，顧客割当後の車両の矩形面積，つまり車両の配送負荷を表現している．最終的に到達した葉ノードの集合を割当車両の候補集合とする．

$$AREA(BR(t) \cup DR_{new}) \quad (20)$$

候補集合の中から，再び式 (20) を用いて，配送負荷の最も

小さい車両を選択する．このとき，図 8 のように，車両の矩形面積は最小ではないが，顧客の乗車ノードにより近い車両に割り当てられる方が好ましいケースが存在する．そこで，矩形面積の比が  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) 以下であれば，式 (21) のように，乗車ノードのみを包含する矩形の面積を用いて割り当て車両を決定する．

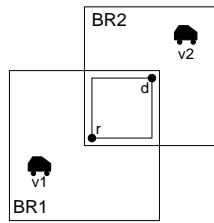


図 8 乗車位置に基づく割当

Fig. 8 Assignment based on riding node

$$AREA(BR(t) \cup r_{new}) \quad (21)$$

#### 4.2 配送順序

一旦，車両に顧客が割り当てられると，車両は顧客の配送順序，つまり走行経路を決めなくてはならない．本研究では，車両は走行コスト  $|q(t)|$  を最小とするように経路を決定する．例えば，顧客が  $c_1, c_2, c_3, c_4$  (乗降位置は  $(r_i, d_i)$  ( $i = 1..4$ )) の順で図 9 の位置に発生したとする．顧客  $c_1, c_2, c_3$  を最短コストで配送するには，図 10(a) に示すように，発生順序に従って車両の配送順序配列の後尾に挿入すればよい．一方，顧客  $c_4$  は顧客  $c_2$  の配送経路上に発生している．対象車両がタクシーであれば  $c_2, c_3$  と同様に配列の後尾に挿入すればよいが，本論文の対象は乗合バスであり，同時に複数人の乗車が可能である．よって，図 10(b) に示すように，顧客  $c_4$  の要求は配列の途中 ( $r_2$  と  $d_2$  の間) に挿入されることとなる．つまり， $c_2$  と  $c_4$  が同時に乗車する時間帯が生じる．前述したように，配送順序配列の最大配列長は規定しない，つまり，車両の最大乗員数は考慮されない．

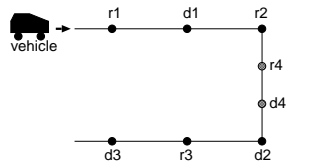


図 9 顧客要求の例

Fig. 9 An example of customer demands

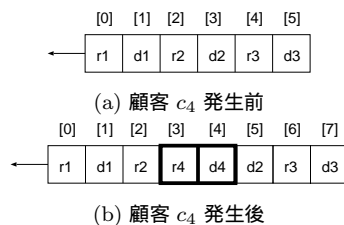


図 10 図 9 の顧客要求を処理する配送順序配列

Fig. 10 Queue for customer demands in Figure 9

## 5. 分散管理

提案した VRTPR-Tree は動的に位置・速度ベクトルを変化させる車両を管理しなければならない，集中管理するには計算負荷が高く現実的ではない．そこで，複数の VRTPR-Tree を設置することによって負荷を分散することを考える．まず，顧客要求の発生を以下のようにモデル化する．現実の都市において，顧客要求は一様分布で発生することはなく，駅など要求が集中するエリアが存在すると考えられる．そこで，市街地には複数の顧客発生エリア  $A = \{a_1, a_2, \dots\}$  が存在すると仮定できる．前述したように，発生エリアは円近似され，要求発生位置は正規分布に基づく疑似乱数に従い，エリアの中心が最も高く，中心から離れるに従って低くなる．各発生エリアによって，要求発生半径と要求発生確率は異なる．これにより，各エリアの要求発生の特徴に合わせて，適切な台数の車両を適切な位置に配備しなくてはならないことになる．そこで，我々はこの顧客要求発生モデルに基づき以下のように車両を分散管理する．

まず，図 11 のように，円近似された発生エリアを最小面積で包含する要求発生矩形  $AR(A) = \{AR(a_1), AR(a_2), \dots\}$  を考える．この矩形は，VRCBR のように動的に形状を変化させる必要はなく，一定の形状を維持する．よって，静的オブジェクトの索引手法である R-Tree を用いて索引付けする．一方，車両を索引付けする VRTPR-Tree は 1 箇所以上の要求発生矩形に対して設置される．図 12 においては，Tree1 は  $A(a_1)$ ，Tree2 は  $A(a_2)$  と  $A(a_3)$  に属している車両を索引付けしている．また，車両の担当するエリア  $R(v_j)$  は要求発生矩形に置き換えられる．車両は顧客配送のため担当矩形から一時的に逸脱しても，配送が完了すれば担当矩形内に帰還する．

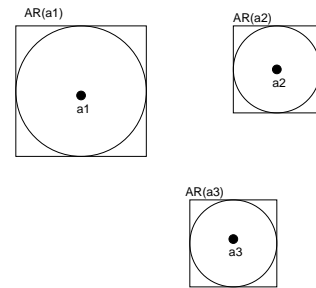


図 11 要求発生エリアを包含する矩形

Fig. 11 Rectangles which bound the demand circles

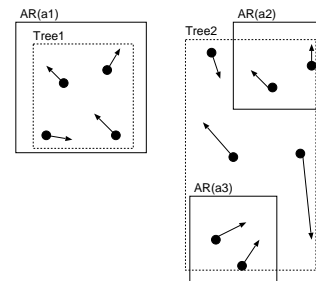


図 12 VRTPR-Tree の分散管理

Fig. 12 Distributed Management of VRTPR-Trees

顧客要求が発生すると、要求発生矩形を索引付けした R-Tree の根から葉に向かって要求矩形を最小面積で包含する矩形を選択することによって、要求を担当する VRTPR-Tree が決定される。もし、図 13 のように、顧客要求が複数の矩形と重複していた場合、VRTPR-Tree は 1 つに定まらず、複数の候補が得られることになる。そこで、候補によって索引付けされている全ての車両を 1 つの索引木に再挿入することによって新たな統合木を形成する。一旦、担当の VRTPR-Tree(もしくは、統合した VRTPR-Tree) が定まれば、前述した顧客割当手法によって、顧客が割り当てられる車両が決まる。このように、要求発生矩形と車両を別けて複数の索引木で管理することによって、車両管理の負荷が分散され、広域の車両割当が可能になる。また、あるエリアの車両管理に障害が生じたとしても、他の索引木の担当矩形を広げることによって、運営を継続することが可能である。しかしながら、要求発生分布の偏りが少ないと、索引木の統合が頻繁に発生することになり、負荷が増大してしまう可能性がある。

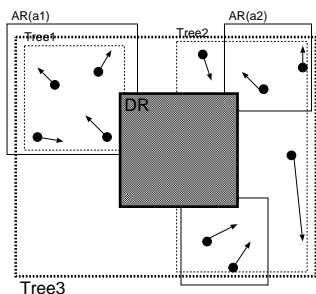


図 13 索引木の統合

Fig. 13 Integration with VRTPR-Trees

## 6. 実験

### 6.1 環境設定

提案手法の評価実験を行った。デマンド・バスを運行する環境として、河川等によって分断された地域を想定した。図 14 のように、4 つの  $20 \times 20$  のグリッド状のネットワークを分断された地域とみなした。さらに、隣接するネットワーク同士は 1 つのエッジで繋がれているものとし、全てのエッジ長は 25 ピクセルとした。要求発生エリアは分断地域それぞれに 1 箇所ずつ存在し、全ての半径は 200 ピクセルとした。顧客の発生確率を決定するパラメータ  $z$  の値を 1.0 ~ 2.0 (発生確率は約 68% ~ 95%) と変化させたときの、索引木の設置数  $T = 1, 2, 4$  の違いによる影響を評価した。また、終了時刻は  $t = 10000$  とし、各時刻に 20% の確率で要求を発生させた。他の環境パラメータを表 1 に示す。

### 6.2 実験結果

図 15 は VRTPR-Tree の平均構築時間 ( $ms$ ) を示している。索引木の管理する車両数に比例して構築時間は増加している。また、要素の挿入において、中間ノードの維持できる子要素最大数  $M$  を越えるとノードの分割が発生する。このため、円内部での発生確率が高いほど、車両の矩形の面積・重なりが小さ

く、ノードの分割発生数が抑えられ、索引木の構築時間が減少していることがわかる。図 16 と図 17 は、索引木の統合発生回数とその統合平均時間 ( $ms$ ) を示している。言うまでもなく、索引木の設置数が  $T = 1$  のとき統合は発生しない。 $T = 2$  のときは全車両の索引木を構築することになり、 $T = 1$  のときの構築時間とほぼ等しい。一方、 $T = 4$  のときは要求矩形に応じて統合する車両数が変化する。また、統合発生回数と統合時間はトレード・オフ関係にあるが、円内部での発生確率が高いほど設置数を増やした方が効率的であることがわかる。図 18 は顧客の配送完了率を示している。索引木の設置数に依存することなく、いずれもほぼ同じ値を示した。図 19 は車両の平均走行距離 ( $pixel$ ) を示している。索引木の設置数が多いほど若干ながら走行距離を抑えている。これは、設置数が多いほど車両が発生確率の高い地域に待機している可能性が高いからであると考えられる。この傾向は円内部での発生確率が高いほど顕著に現れている。図 20 と図 21 は、それぞれ顧客の平均待ち時間と平均乗車時間を示している。顧客の待ち時間は車両の走行距離と同様の傾向を示している、つまり、走行距離が少なければ、顧客に辿り着く時間も短くなるということが言える。一方、平均乗車時間に関しては、走行コストを最小とるように配送順序を選択したため、設置数による差はみられなかった。

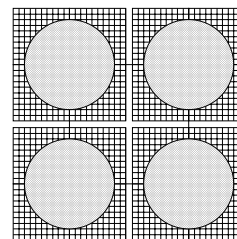


図 14 道路ネットワークと顧客発生エリア

Fig. 14 Road network and demand circles

表 1 環境パラメーター

$K$	32
$ \vec{v} $	$5 \text{ pixel}/t$
$I$	30
$M$	3

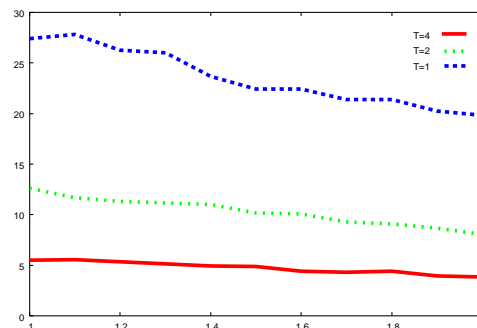


図 15 平均構築時間

Fig. 15 Average of building time

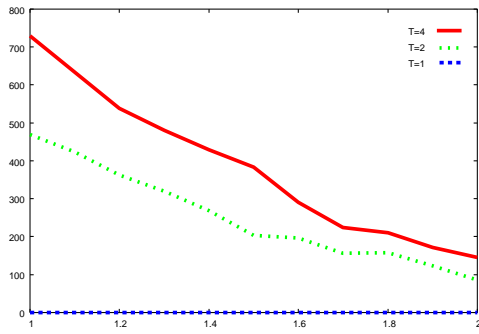


図 16 統合発生回数  
Fig. 16 Number of integration

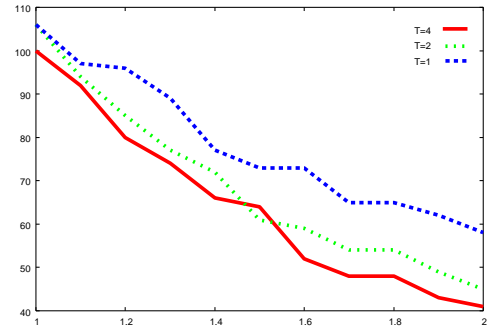


図 20 平均待ち時間  
Fig. 20 Average of waiting time

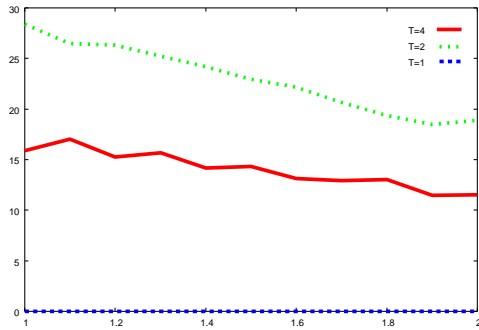


図 17 平均統合時間  
Fig. 17 Average time of integration

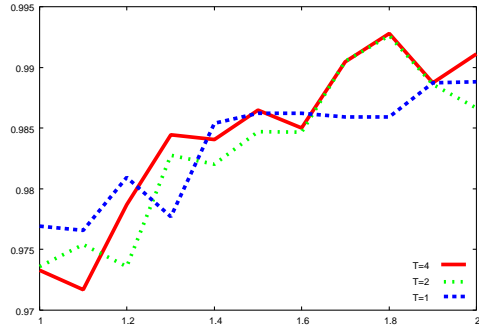


図 18 配送完了率  
Fig. 18 Transportable rate

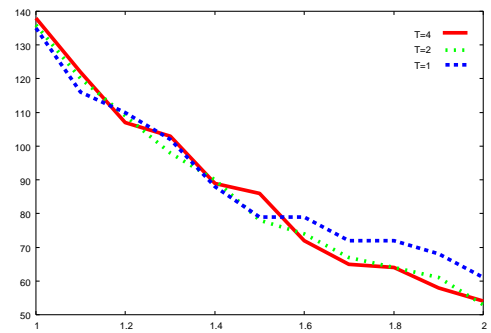


図 21 平均乗車時間  
Fig. 21 Average of riding time

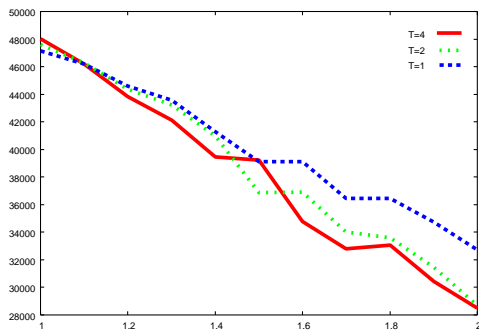


図 19 平均走行距離  
Fig. 19 Average of traveling distance

## 7. ま と め

本論文は、現在多くの都市で運行されている固定路線バスに対し、より少ない車両数で運行可能なデマンドバスに着目し、それを拡張した分散管理型の新たなバス・システムを提案した。計算機上でのシミュレーションを行うために、デマンドバス問題を形式化し、顧客要求の発生モデルの定義を行った。VRTPR-Tree は、車両の位置・速度ベクトルと到達可能領域を基に VRCBR を形成することにより、空間的に車両を索引付ける。索引は顧客の車両への割当に用いられる。また、計算負荷を削減するために、顧客発生モデルに基づいた VRTPR-Tree の分散管理方法を示した。最後に、提案手法の評価実験を行い本手法の有効性を示した。

今後の課題は、顧客の要求発生モデルに時間の概念を導入することである。つまり、通勤時間帯には駅から周辺のオフィスへの要求が増えると考えられる。逆に、帰宅時間帯にはオフィスから駅への要求が増える。これらを考慮して、車両の待機位置や配備数を動的に変化させることが必要であると思われる。

## 謝 辞

本研究の一部は、名古屋大学情報系 COE:「社会情報基盤のための音声・映像の知的統合」の支援による。ここに記して感謝の意を表す。また、日頃から御指導頂いた愛知工業大学・石井直宏教授に感謝します。

## 文 献

- [1] M. Desrochers, J.K. Lenstra, M.W.P. Savelsbergh, and F.Soumis. Vehicle routing with time windows: Optimizatin and approximation. *Vehicle Routing: Methods and Studies*, pages 65–84, 1988.
- [2] A. Guttman. R-trees: a dynamic index structure for spatial searching. In *Proc. of ACM SIGMOD 1984*, pages 47–57, 1984.
- [3] T. Ibaraki, M. Kubo, T. Masuda, T. Uno, and M. Yagiura. Effective local search algorithms for the vehicle routing problem with general time window constraints. In *Proc. of MIC'2001*, pages 293–297, 2001.
- [4] Sushil J. Louis, Xiangying Yin, and Zhen Ya Yuan. Multiple vehicle routing with time windows using genetic algorithms. In Peter J. Angeline, Zbyszek Michalewicz, Marc Schoenauer, Xin Yao, and Ali Zalzala, editors, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, volume 3, pages 1804–1808, Mayflower Hotel, Washington D.C., USA, 6-9 1999. IEEE Press.
- [5] J.-Y. Potvin and S. Bengio. The vehicle routing problem with time windows — part II: Genetic search. *INFORMS Journal on Computing*, 8:165–172, 1996.
- [6] C.M. Procopiuc, P.K. Agarwal, and S. Har-Peled. Star-tree: An efficient self-adjusting index for moving objects. In *Proc. of ALLENEX*, pages 178–193, 2002.
- [7] Simonas Saltenis and Christian S. Jensen. Indexing of moving objects for location-based services. In *Proc. of ICDE 2002*, pages 463–473, 2002.
- [8] Simonas Saltenis, Christian S. Jensen, Scott T. Leutenegger, and Mario A. Lopez. Indexing the positions of continuously moving objects. In *Proc. of ACM SIGMOD 2000*, pages 331–342, 2000.
- [9] M.M. Solomon and J. Desrosiers. Time window constrained routing and scheduling problems. *Transportations Science*, 22:1–13, 1988.
- [10] Yufei Tao, Dimitris Papadias, and Jimeng Sun. The TPR\*-tree: An optimized spatio-temporal access method for predictive queries. In *Proc. of Very large data bases*, pages 9–12, 2003.
- [11] S. Thangiah. Vehicle routing with time windows using genetic algorithms. *Application Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, Volume II*. Lance Chambers (Ed.), CRC Press, pages 253–277, 1995.