

近似経路に基づく配送車両の索引手法

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

近年の位置情報システムの進歩に伴い、デマンド・バスと呼ばれる新しい交通サービスが注目されている。顧客は配送車両を乗合いで利用し、戸口から戸口までの送迎サービスをオン・デマンドに受けることができる。このような実時間の配送サービスにおいては、配送車両の予定経路を効率よく管理し、位置の問合せに対して迅速に応答する必要がある。本稿は、配送車両の予定経路に基づいた R-Tree 型索引の形成手法について提案する。配送車両は予定経路に変更が発生すると、索引サーバーに自身の近似予定経路を送信する。この近似経路に基づいて配送車両を包含する矩形が形成され、配送車両が R-Tree 型に索引付けられる。最後に、従来手法と提案手法を計算機シミュレーションにより比較し、その結果を報告する。

Spatial Indexing of Transport Vehicles Using Approximate Routes

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

Dynamic transport services using the contemporary real-time location technologies which include fleet management, traffic assignment, and others are a broad domain with a variety of problems. In such the real-time problems, indexing of the current and anticipated future positions of vehicles is needed to allocate customers to vehicles effectively. Therefore, we propose an indexing based on R-Tree using the table of anticipated future routes of vehicles. The key problem to index moving vehicles is how to bound them by rectangles. The forming way of bounding rectangle in our approach, which is called Approximate Routing Rectangle (ARR), requires client-server transactions (i.e., transactions between vehicles and the indexing system) whenever the anticipated future routes are changed. Finally, our simulation results show that our approach outperforms traditional approach.

1. はじめに

近年、GPS(Global Positioning System) や無線通信に代表される位置情報システムが急速に発展し、移動オブジェクトの位置・速度等の定期的な取得が可能になった。これにより、デマンド・バスと呼ばれる新しい交通サービスの導入も実現可能になった。顧客は配送車両を乗合いで利用し、戸口から戸口までの送迎サービスをオン・デマンドに受けることができる。このような実時間の配送サービスにおいては、顧客の車両割当や配送順序に対する迅速な問題解決が必要である。

本稿は、配送車両の予定経路に基づいた R-Tree 型

索引³⁾の形成手法を提案する。また、車両を索引付けることにより、実時間での車両配送問題の近似解導出を試みる。一般的に、従来の R-Tree 型索引は車両の位置・速度を定期的取得するために高い通信・計算コストを必要とした。さらに、車両の予測位置は更新時から推測されたものであるため正確性に乏しい。そこで、提案手法は割り当てられた顧客の乗降車位置に基づき車両の予定経路を決定し、それを直線近似されたベクトル表現にコード化する。全車両の予定経路はサーバーに集められ一括管理される。この際、車両位置の問合せを高速に処理するために、車両を包含する矩形 Approximated Routing Rectangle (ARR) を予定経路に基づき形成し、車両を R-Tree 型に索引付

ける．

本稿の構成は以下である．2章で対象とする車両配送問題を形式化する．代表的な R-Tree 型の移動オブジェクト索引手法である Time Parameterized R-Tree (TPR-Tree) を3章で紹介する．4章で提案する索引手法の詳細を述べ，5章で TPR-Tree との比較実験の結果を報告する．最後に，まとめと今後の課題を述べる．

2. 形式化

複数台の車両が顧客を最短コストで訪問するという問題は Vehicle Routing Problem (VRP) と呼ばれる．また，配送要求のタイプに基づき，Static Vehicle Routing Problem (SVRP)^{1),4)~6),10),12)} と Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)^{2),8)} の2種類に分類できる．SVRP では，配送要求が予約の形であらかじめ与えられ，それらを一括処理して最適な解を導出する．一方，DVRP では，配送要求が発生した時点で，既に運行している車両からその配送要求を処理するために最も適したバスを決定する．このため，DVRP の解は実時間で導出されなくてはならない．我々の対象とする問題は後者であり，以下のように形式化する．

2.1 道路ネットワーク

道路ネットワークは，式(1)のように，ノード集合とエッジ集合から構成される無向グラフとして与える．ノードは交差点，エッジはノード間の道路セグメントを表す．また，エッジを図1のように単位距離 d で正規化する．この単位距離 d は単位時間で車両が移動する平均距離とする．つまり，車両は常にいずれかのノードに存在していると仮定する．

$$G = (N, E) \quad (1)$$

$$N = \{n_1, n_2, \dots\}$$

$$E = \{e_i = (n_i - n'_i) : n_i, n'_i \in N\}$$

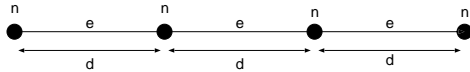


図1 エッジの正規化
Fig.1 Normalization for edges

2.2 顧客

N 人の顧客を式(2)で与える．また，顧客の時刻 t の位置を $c(t)$ ，顧客の歩行速度を $|c|$ と表す．配送要求 $D(c)$ は道路ネットワーク上の乗車ノード n_r と降車ノード n_d の組で与えられる．

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

$$c(t) = (c_x(t), c_y(t))$$

$$D(c) = (n_r, n_d)$$

2.3 車両

K 台の車両を式(3)で与える．また，車両の時刻 t の位置を $v(t)$ ，速度ベクトルを $\bar{v}(t)$ と表す．各車両の未来の予定位置は図2に示される待ち行列で表現される．行列の先頭要素は現在(時刻 t)の車両の位置・速度ベクトルを表している．新たな顧客が車両に割り当てられると待ち行列は更新される．以降は，車両の位置・速度ベクトルの組合せを単に車両ベクトルと呼び， $\bar{v}(t)$ と表記する．

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_K\} \quad (3)$$

$$v(t) = (v_x(t), v_y(t))$$

$$\bar{v}(t) = (\bar{v}_x(t), \bar{v}_y(t))$$

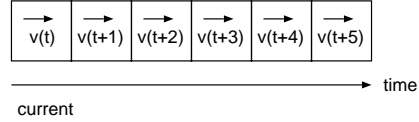


図2 予定車両位置を表す待ち行列
Fig.2 Queue for delivery order

3. 関連研究

これまでに，提案されている移動オブジェクトのための R-Tree 型の索引手法は以下の2種類に分類される．

- 過去・現在位置の索引手法
- 現在位置とそこから予測される未来位置の索引手法

より詳細な分類は文献¹¹⁾で述べられている．提案手法は後者に分類され，その代表的な手法である Time-Parameterized R-Tree (TPR-Tree) から拡張される．TPR-Tree は，定期的に移動オブジェクトから位置と速度ベクトルを取得し，そこから予測される線形の軌跡を包含する矩形を形成する．索引への問合せは特定領域内に存在する全ての移動オブジェクトを検索するものであり，以下の3種類に分類される．

Timeslice Query 時刻 t に矩形 R に重複する移動オブジェクトを探索する(式4)．

$$Q_{\text{timeslice}} = (R, t) \quad (4)$$

Window Query 時刻 t^+ から t^- の間に矩形 R に重複する移動オブジェクトを探索する(式5)．

$$Q_{\text{window}} = (R, t^+, t^-) \quad (5)$$

Moving Query 時刻 t^+ から t^- の間に速度ベクトル $\vec{R}(t)$ で変形する矩形 R に重複する移動オブジェクトを探索する (式 6) .

$$Q_{moving} = (R, \vec{R}(t), t^+, t^-) \quad (6)$$

また, TPR-Tree を拡張した以下の索引手法が提案されている. Star-Tree⁷⁾ は問合せのパフォーマンスを監視し, その精度が低下すると索引構造を自動的に再構成する. R^{EXP}-Tree⁹⁾ は移動オブジェクトの有効時間を考慮した .

4. ARR-Tree

配送サービスにおける車両の索引手法 ARR-Tree を提案する. 提案手法では, 割り当てられた顧客の乗降車位置から車両の予定経路を決定し, それを直線近似された車両ベクトル表現にコード化する. 全車両の予定経路はサーバーに集められ一括管理される. サーバーはクエリーを高速に処理するために車両の索引構造を形成する .

4.1 トランザクション

本節では, クライアント (車両)-サーバー間のトランザクションについて述べる .

4.1.1 クライアント

顧客が車両に割り当てられると, 顧客の乗降位置を経由するように車両の予定経路が決定される. ここでは, 車両は最短経路で顧客を配送するものと仮定する. 図 3 は, 乗車位置 n_r , 降車位置 n_d が割り当てられたときの車両の予定経路表現である .

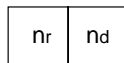


図 3 乗降位置による経路表現

Fig. 3 Route expression with ride-on and drop-off nodes

前述したように, 車両は常に一定の時間間隔で道路ネットワーク上のいずれかのノードに存在すると仮定する. そこで, 車両の予定経路は図 4 のように, 時刻 t をパラメータに持つ車両ベクトルの待ち行列で表現することができる. 本稿では, 待ち行列の各要素をトランザクションにおける転送パケットとみなす .

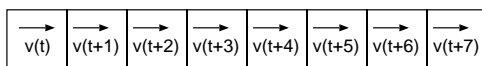


図 4 車両ベクトルによる経路表現

Fig. 4 Route expression with time-parameterized vector

ここで, 通信コスト (転送パケット数) と位置精度のトレード・オフ関係が生じる. つまり, エッジの正規化距離 d を短くすれば, より正確な車両の位置をより短い時間間隔で把握可能である. しかし, 転送パケット数は増大してしまい, サーバーの負荷は大きくなる. よって, このトレード・オフのバランスを決定するために, 経路の直線近似アルゴリズムを導入する. 直線近似アルゴリズムは, 経路の始点ノードと終点ノードを結ぶ直線の距離 L と, その直線から経路上の他のノードとの距離 l を計算し, その距離の比を求める. もし, その比が閾値 ω 以下であれば直線に近似する. このプロセスを部分経路に再帰的に適用し, 近似候補のノードがなくなるまで繰り返す. 図 5 は, 図 4 の経路表現における距離比 l/L を示している. 結果的に, 直線近似アルゴリズムを適用することで, 経路表現は図 6 のように圧縮することができる. 当然ながら, 近似の度合は閾値 ω に依存する. よって, 閾値 ω は, 配送車両の数, 通信帯域, 処理速度等の通信インフラを考慮して決定しなくてはならない. また, 予定経路が修正・更新されるタイミングは以下の二つのケースが存在する .

新規顧客の割当 もし, 新規の顧客が車両に割り当てられれば, 車両の予定経路は変更される .

経路誤差率の増加 予定経路はあくまで現在の状態から見込まれる経路であり, 必ずしも, その時刻にその位置に存在するとは限らない. 例えば, もし道路が混雑していれば, 車両の到着は遅くなると考えられる. そこで, 予定経路と現在位置との誤差を求め, その値が一定値を越えたら, 予定経路を再計算し, サーバーに送信する .

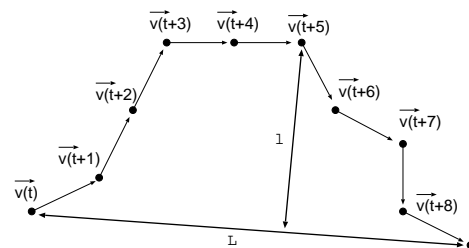


図 5 経路の直線近似

Fig. 5 Straight line approximation for route

4.1.2 サーバー

サーバーは車両から送信された予定経路を表形式で管理する (図 7) . 表中の各行は各車両の予定経路を表している .

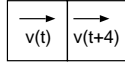


図 6 近似車両ベクトルによる経路表現

Fig. 6 Route expression with approximated time-parameterized vector

time \ id	t	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7
1	$\vec{v}_1(t)$	$\vec{v}_1(t+1)$	$\vec{v}_1(t+2)$	$\vec{v}_1(t+3)$	$\vec{v}_1(t+4)$	$\vec{v}_1(t+5)$	$\vec{v}_1(t+6)$	
2	$\vec{v}_2(t)$	$\vec{v}_2(t+1)$	$\vec{v}_2(t+2)$	$\vec{v}_2(t+3)$	$\vec{v}_2(t+4)$	$\vec{v}_2(t+5)$		
3	$\vec{v}_3(t)$	$\vec{v}_3(t+1)$	$\vec{v}_3(t+2)$	$\vec{v}_3(t+3)$	$\vec{v}_3(t+4)$	$\vec{v}_3(t+5)$	$\vec{v}_3(t+6)$	$\vec{v}_3(t+7)$
4	$\vec{v}_4(t)$	$\vec{v}_4(t+1)$	$\vec{v}_4(t+2)$					

図 7 全車両の予定経路

Fig. 7 Anticipated future routes of all vehicles

4.2 Approximated Routing Rectangle (ARR)

R-Tree 型の索引木における，ノード E のエントリは，式 (7) で示されるように，車両集合へのポイント $V' \in V$ とその車両を包含する矩形 $BR(t)$ で与えられる．ここで， M は各ノードのエントリの最大数を表す．

$$E = (V', BR(t)) \quad (7)$$

$$|V'| \leq M$$

矩形は車両を包含するように，時間の経過と共にその形状を膨脹・縮小させる．しかし，包含矩形の面積の増加は矩形同士の重複の原因となり，探索効率の低下を引き起こす．このため，矩形はその面積を可能な限り小さく保ち，かつ，車両が逸脱することなく包含することが望ましい．

TPR-Tree で採用されている Conservative Bounding Rectangle $CBR(t)$ は，包含する車両の最高・最低速度でその形状を変化させる．図 9(a) は $CBR(t)$ の軌跡を表している．しかし，その面積は冗長に増加してしまうことが多く，さらに車両が進行方向を変えてしまうと矩形から逸脱する可能性がある．

一方，提案する Approximated Routing Rectangle $ARR(t)$ の形状は車両の近似予定経路に基づく．まず，表から索引木の更新間隔 I の列を選択する．もし，更新間隔の時刻のポケットが存在しなければ，車両は前時刻の位置に静止していると仮定して，欠損部分を保管する．例として，更新間隔 $I = 4$ とすると，図 8 のように，時刻 t から時刻 $t + I$ までのポケットが選択される．このとき， $v_4(t+2)$ のポケットは $v_4(t+3)$ ，

time \ id	t	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7
1	$\vec{v}_1(t)$	$\vec{v}_1(t+1)$	$\vec{v}_1(t+2)$	$\vec{v}_1(t+3)$	$\vec{v}_1(t+4)$	$\vec{v}_1(t+5)$	$\vec{v}_1(t+6)$	
2	$\vec{v}_2(t)$	$\vec{v}_2(t+1)$	$\vec{v}_2(t+2)$	$\vec{v}_2(t+3)$	$\vec{v}_2(t+4)$	$\vec{v}_2(t+5)$		
3	$\vec{v}_3(t)$	$\vec{v}_3(t+1)$	$\vec{v}_3(t+2)$	$\vec{v}_3(t+3)$	$\vec{v}_3(t+4)$	$\vec{v}_3(t+5)$	$\vec{v}_3(t+6)$	$\vec{v}_3(t+7)$
4	$\vec{v}_4(t)$	$\vec{v}_4(t+1)$	$\vec{v}_4(t+2)$	$\vec{v}_4(t+2)$	$\vec{v}_4(t+2)$			

図 8 ARR 構築のための列の選択

Fig. 8 Selection of rows for ARR

$v_4(t+4)$ にコピーされる．次に，式 (8) により，各時刻の車両の最大・最小位置を計算し，それを包含矩形 $ARR(t)$ とする．図 9(b) は $ARR(t)$ の軌跡を表している．面積は $CBR(t)$ に比べ冗長な部分がなく，さらに逸脱は近似幅内に抑えることができる．

$$ARR_1(t) = (\min_{v \in V}(v_x(t)), \min_{v \in V}(v_y(t))) \quad (8)$$

$$ARR_2(t) = (\max_{v \in V}(v_x(t)), \max_{v \in V}(v_y(t)))$$

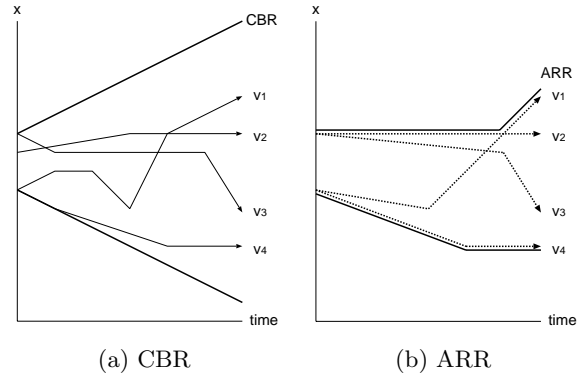


図 9 包含矩形
Fig. 9 Bounding rectangle

4.3 クエリー

顧客を割り当てる車両の決定は，式 (9) で表すように，Moving Query の拡張として与えることができる．顧客が速度 \bar{c} で移動したときに重複する車両の軌跡を探索する．もし，重複する軌跡が存在しなければ，最短で顧客に到達できる車両を探索する．図 10 は顧客と車両の移動軌跡を表している．しかし，この方法は索引木の更新間隔内に顧客と会うことが可能な車両を探索しているだけであり，現実的な解法としては不十分である．車両の負荷バランスや顧客の満足度などを考慮したヒューリスティックな探索が必要であると

思われる．割当手法の改善は今後の課題である．

$$Q_{allocation} = (c(t_r), |\bar{c}|, t_r, (I - t_r)) \quad (9)$$

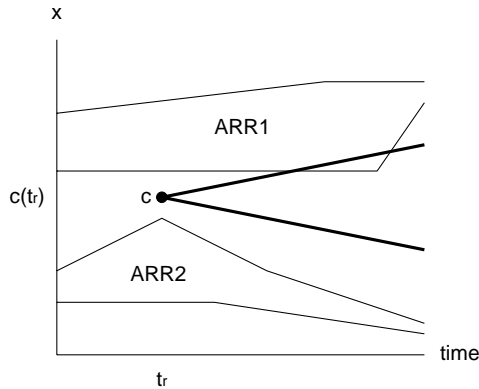


図 10 顧客割当クエリー
Fig.10 Allocation query

5. 実 験

提案手法 $ARR(t)$ と従来手法 $CBR(t)$ の比較実験を行い，探索コスト，通信コスト，位置精度の3項目を評価した．探索コストは問合せを処理するために辿ったノード数のことであり，矩形面積の増加は，探索候補ノード数の増加の原因となる．通信コストはトランザクションに発生したパケット数のことであり，頻繁なトランザクションは正確な位置把握を可能にするが，広い通信帯域や計算能力を必要とする．位置精度は車両の包含矩形からの逸脱距離のことであり，現実位置と予測位置のギャップを表す．

実験環境を以下に述べる．3台の車両を名古屋市の道路ネットワーク (1km × 1km) 上で遷移させた．ノード数は 986，エッジ数は 1165 である．各車両はランダムに目的地を決定し，最短経路を通り目的地まで向かう．このプロセスを最大時間 T_{max} まで繰り返した．他のパラメータの設定を表 1 に示す．

図 11, 12, 13 は索引木の更新間隔 I を変化させたときの結果である． CBR の面積は更新間隔 I に依存して増加していることがわかる．一方， ARR は更新間隔 I には依存せず小さい面積を保っていることがわかる．同様の傾向が通信パケット数においても見られるが， ARR の方がより多くの通信パケット数を必要とすることを示している．逸脱距離は CBR の方が ARR と比べて低い値を示した．しかし，その性質は大きく異なる．つまり， CBR においては，車両が進行方向を変化させたとき大きく矩形から逸脱してしまう可能性があるのに対して， ARR は逸脱距離を直線

近似幅内に抑えることができる．

図 14, 15, 16 は直線近似の閾値 ω を変化させたときの結果である．閾値 ω は包含矩形の面積には影響しないことがわかる． CBR の通信パケット数は常に一定であるのに対し， ARR は閾値 ω を大きくするほど，通信パケット数を減少させることができる．たとえば閾値 ω が小さい値でも，正規化されたエッジの直線近似が発生するためその効果は大きいことがわかる．また，近似率が高いほど，車両の逸脱距離は増加してしまう．

結果的に， ARR は CBR に比べてより柔軟な包含矩形であるということが言える．つまり，閾値 ω を環境に合わせて決定することにより， ARR は CBR と同じ，または，それ以上のパケット数で，精度の高い索引を形成することができる．

表 1 パラメータ設定
Table 1 Parameter setting

d	20m
$ \bar{v} $	40 km/h
T_{unit}	2s
T_{max}	$1000 \times T_{unit}$
I	$5 \times T_{unit}, \dots, 15 \times T_{unit}$
ω	$0, \dots, 0.2$

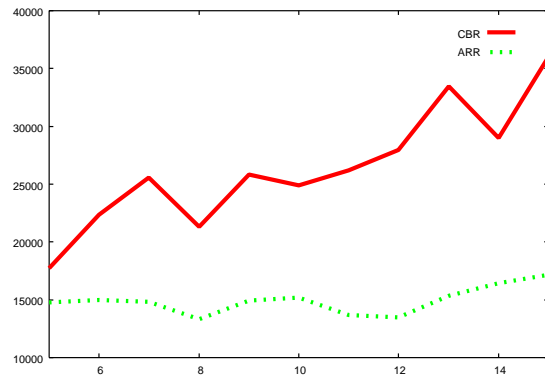


図 11 面積 (更新間隔 I)
Fig.11 Area (Interval I)

6. ま と め

本論文では，配送サービスにおける車両の予定経路に基づいた R-Tree 型の索引手法を提案した．車両は予定経路に変更が発生すると，索引サーバーに自身の近似予定経路を送信する．この近似経路に基づいて配送車両を包含する矩形 ARR を形成し，車両を R-Tree 型に索引付ける．最後に，提案手法 ARR と従来手法

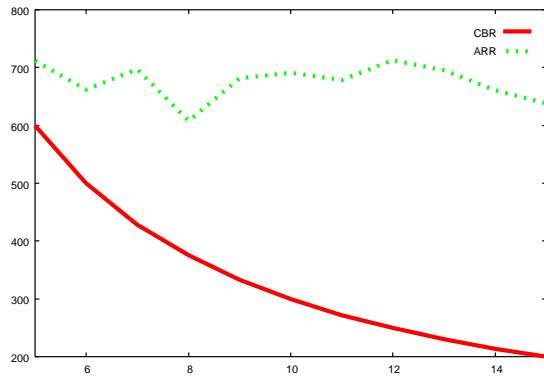


図 12 通信パケット数 (更新間隔 I)
Fig. 12 Number of packets (Interval I)

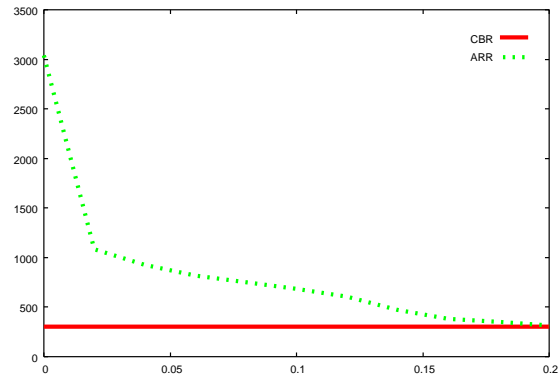


図 15 通信パケット数 (閾値 ω)
Fig. 15 Number of packets (Threshold ω)

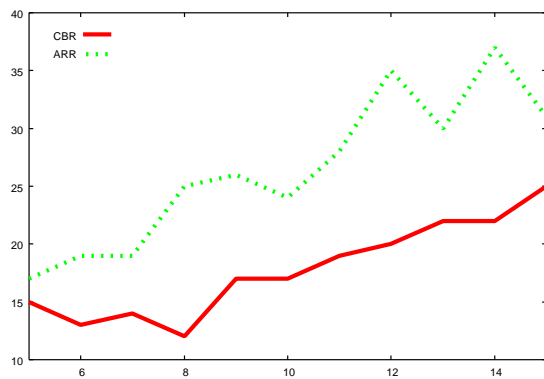


図 13 逸脱距離 (更新間隔 I)
Fig. 13 Deviation distance (Interval I)

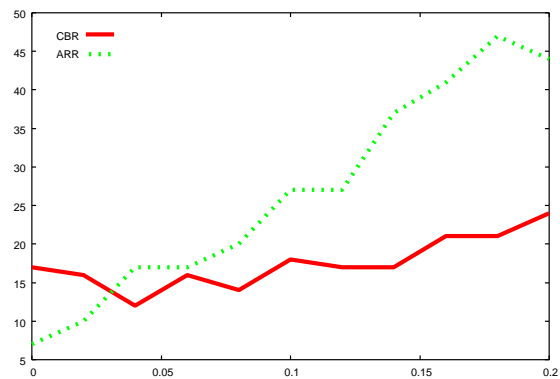


図 16 逸脱距離 (閾値 ω)
Fig. 16 Deviation distance (Threshold ω)

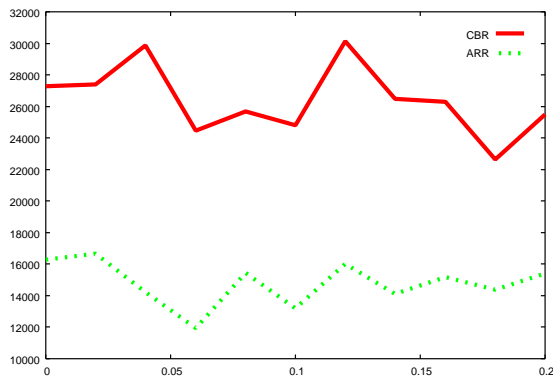


図 14 面積 (閾値 ω)
Fig. 14 Area (Threshold ω)

CBR の比較実験を行い、提案手法がより柔軟で効果的な索引を構成できることを示した。

今後の課題は、提案手法を現実社会における車両配送問題に適用し評価することである。

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。

参考文献

- 1) Desrochers, M., Lenstra, J., Savelsbergh, M. and F.Soumis: Vehicle Routing With Time Windows: Optimizatin and Approximation, *Vehicle Routing: Methods and Studies*, pp. 65–84 (1988).
- 2) Gendreau, M. and Potvin, J.: Dynamic Vehicle Routing and Dispatching, *Fleet Management and Logistics*, pp. 115–126 (1998).
- 3) Guttman, A.: R-trees: a Dynamic Index Structure for Spatial Searching, *Proc. of ACM SIGMOD 1984*, pp. 47–57 (1984).
- 4) Ibaraki, T., Kubo, M., Masuda, T., Uno, T. and Yagiura, M.: Effective local search algorithms for the vehicle routing problem with general time window constraints, *Proc. of MIC'2001*, pp. 293–297 (2001).
- 5) Louis, S. J., Yin, X. and Yuan, Z. Y.: Multiple Vehicle Routing with Time Windows Using Genetic Algorithms, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation* (Angeline, P. J.,

- Michalewicz, Z., Schoenauer, M., Yao, X. and Zalzala, A.(eds.)), Vol. 3, Mayflower Hotel, Washington D.C., USA, IEEE Press, pp. 1804–1808 (1999).
- 6) Potvin, J.-Y. and Bengio, S.: The vehicle routing problem with time windows — Part II: Genetic search, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8, pp. 165–172 (1996).
 - 7) Procopiuc, C., Agarwal, P. and Har-Peled, S.: STAR-Tree: An Efficient Self-Adjusting Index for Moving Objects, *Proc. of ALLENEX*, pp. 178–193 (2002).
 - 8) Qili, K. and Ong, K.: A Reactive Method for Real Time Dynamic Vehicle Routing Problem, *Proc. of ICTAI 2000*, pp. 176–181 (2000).
 - 9) Saltenis, S. and Jensen, C.S.: Indexing of Moving Objects for Location-Based Services, *Proc. of ICDE 2002*, pp. 463–473 (2002).
 - 10) Solomon, M. and Desrosiers, J.: Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems, *Transportations Science*, Vol. 22, pp. 1–13 (1988).
 - 11) Tao, Y. and Papadias, D.: Spatial Queries in Dynamic Environments, *Data & Knowledge Engineering*, pp. 75–101 (2004).
 - 12) Thangiah, S.: Vehicle Routing with Time Windows using Genetic Algorithms, *Application Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, Volume II. Lance Chambers (Ed.)*, CRC Press, pp. 253–277 (1995).