

1 9 車両走行軌跡の取得を目的とした光学式ビーコンの効率的な配置を求める手法と車載機高度化による効果

東京大学生産技術研究所 正会員 堀口良太
 東京大学生産技術研究所 正会員 桑原雅夫
 千葉工業大学 正会員 赤羽弘和

1. はじめに

VICS で利用されている光学式ビーコン(以下ビーコン)には情報提供メディアとしてだけでなく、情報収集メディアとしての役割も持っている。現仕様では、車載機からビーコンへ渡される(アップリンク)情報には、トリップ開始後最初に通過したビーコンの位置と時刻、直前に通過したビーコンの位置と時刻などが含まれるが、これらを収集して得た情報を交通計画・運用にフィードバックすることで、効率的な道路利用を可能にすることが期待されている。

ここでは、アップリンク情報から車両の走行軌跡を特定できるビーコンの効率的な配置を求める手法を提案する。走行軌跡は、集計することでリンク旅行速度や OD 交通量などが求められるだけでなく、経路選択モデルの導出に利用できるなど、利用価値の高い情報であるが、その特定にはビーコンをネットワーク上に密に配置しなければならないことが容易に想像される。整備費用の制約からも、より少ないビーコンで、より多くの走行軌跡を捕捉できるような効率的な配置を求める手法へのニーズは大きい。

以下では効率的な配置を求める手法を組み合わせ最適化問題として定式化し、実際のネットワークを用いたケーススタディを行う。また現在検討されている車載機の高度化、すなわちビーコンを通過する直前数リンクの走行履歴をアップリンクに含めることにより、より少ないビーコンで同様の情報が取得できると期待されるが、その効果についてもケーススタディで評価する。

2. 組み合わせ最適化問題としての定式化

ここでは図 1 に示す 1OD の簡単なネットワークを例として用いながら、走行軌跡を特定するビーコン配置を求める手法を説明する。

(1) 現行のアップリンク情報の場合

まず、起終点ペア rs を結ぶ k 番目の経路 R_k^{rs} を、次のようにリンク番号の順序付き集合として表記する。

$$R_k^{rs} = \{a_{ki}^{rs} \mid i = 1, 2, \dots, m_k^{rs}\}. \quad (1)$$

a_{ki}^{rs} : k 番目経路の i 番目リンク番号

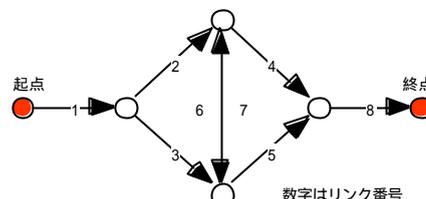


図 1 : 10D4 経路の単純なネットワーク

m_k^{rs} : k 番目経路に含まれるリンク数

図 1 では、次の 4 つの経路 $R_1 \sim R_4$ が定義される(起終点ペアの添え字は省略)。

$$R_1 = \{1, 2, 4, 8\},$$

$$R_2 = \{1, 3, 5, 8\},$$

$$R_3 = \{1, 2, 7, 5, 8\},$$

$$R_4 = \{1, 3, 6, 4, 8\}.$$

同時に、これらの経路をリンク番号をインデックスとする 2 値ベクトル Q_k^{rs} として表記する。

$$Q_k^{rs} = \{q_{kj}^{rs} \mid q_{kj}^{rs} = d_j, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

$$d_j = \begin{cases} 1 & (a_j \in R_k^{rs}), \text{ or} \\ 0 & (a_j \notin R_k^{rs}). \end{cases}$$

a_j : リンク j

N : リンク数

よって経路 $R_1 \sim R_4$ も次のようにベクトル表記される。

$$Q_1 = (1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1),$$

$$Q_2 = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1),$$

$$Q_3 = (1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1),$$

$$Q_4 = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1).$$

経路がループを形成しなければ、 R_k^{rs} と Q_k^{rs} は 1 対 1 で対応する。よって q_{kj}^{rs} が 1 のときに、リンク番号を意味する添え字 j から、 R_k^{rs} の対応する要素 a_{ki}^{rs} の添え字 i への 1 対 1 写像 f_k^{rs} が定義される。

$$\forall q_{kj}^{rs} \in Q_k^{rs} \cap q_{kj}^{rs} = 1,$$

$$\exists f_k^{rs} : j \rightarrow i \mid a_{ki}^{rs} \in R_k^{rs} \cap a_{ki}^{rs} = j. \quad (3)$$

さらに、あるビーコンの配置パターン B_p についても、次のように 2 値ベクトルで表記する。

$$B_p = \{b_{pl} \mid b_{pl} = d_l, l = 1, 2, \dots, N\}$$

(4)

$$d_l = 1 \text{ (リンク } l \text{ にビーコン設置), or}$$

= 0 (リンク l にビーコン未設置).

ここで Q_k^{rs} と B_p に関する次の二項演算子#を定義する.

$$\# : (Q_k^{rs}, B_p) \rightarrow S_{kp}^{rs} \quad (5)$$

$$S_{kp}^{rs} = \{s_{kpl}^{rs} \mid s_{kpl}^{rs} = \mathbf{j}_l, l = 1, 2, \dots, N\}$$

$$\mathbf{j}_l = 1 (q_{kl}^{rs} = 1 \cap b_{pl} = 1),$$

$$= 0 (q_{kl}^{rs} = 0 \cap b_{pl} = 1), \text{ or}$$

$$= * (b_{pl} = 0).$$

すなわち「 $s_{kpl}^{rs} = 1$ 」は車両軌跡がリンク l を通過していることを意味し、「 $s_{kpl}^{rs} = 0$ 」は車両軌跡がリンク l を通過していないことを意味している。「*」は未定義を意味するシンボルである. ここでは慣例的に S_{kp}^{rs} をビーコン配置 B_p で分類される経路 Q_k^{rs} のスキーマと呼ぶ.

このとき, ある車両の走行軌跡 t を経路と同様にベクトルで表記すると, そこに含まれる唯一のスキーマが存在する(ただしすべて未定義値のスキーマをのぞく). したがって, このスキーマに分類される経路がただ一つの場合, その経路を走行する車両軌跡を同定でき, 複数の経路がある場合, そのうちのいずれかを走行した車両経路を分離できることになる.

もう一度例に戻り, リンク4 と5 にビーコンを配置した場合を考える. ビーコン配置パターン B_1 は,

$$B_1 = (0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0)$$

と表記され, 経路 $R_1 \sim R_2$ はそれぞれ

$$Q_1 \# B_1 = S_{11} = (*, *, *, 1, 0, *, *, *),$$

$$Q_2 \# B_1 = S_{21} = (*, *, *, 0, 1, *, *, *),$$

$$Q_3 \# B_1 = S_{31} = (*, *, *, 0, 1, *, *, *) = S_{21},$$

$$Q_4 \# B_1 = S_{41} = (*, *, *, 1, 0, *, *, *) = S_{11}.$$

の2種類のスキーマに分類される. ネットワーク形状から, 車両の走行軌跡は必ずこの2つのスキーマのどちらか一方を持っているのだが, いずれのスキーマにも複数の経路が属しており, 経路を同定できないとわかる.

また, リンク2 と4 に配置した場合, パターン B_2 は,

$$B_2 = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$$

と表記され, 経路 $R_1 \sim R_2$ はそれぞれ

$$Q_1 \# B_2 = S_{12} = (*, 1, *, 1, *, *, *, *),$$

$$Q_2 \# B_2 = S_{22} = (*, 0, *, 0, *, *, *, *),$$

$$Q_3 \# B_2 = S_{32} = (*, 1, *, 0, *, *, *, *),$$

$$Q_4 \# B_2 = S_{42} = (*, 0, *, 1, *, *, *, *).$$

のように, 各経路独自のスキーマに分類される. この場合

はすべての走行軌跡が同定できるが, 現実には S_{22} のスキーマを持つ軌跡のアップリンク情報は収集されないことに留意されたい.

さて, 以上のようなスキーマの概念を取り入れたとき, ビーコンの最適配置を求める問題は, 次の評価関数 E を最大化するような組み合わせ最適化問題となる.

Find B_p such as $E(H_p, C_p) \rightarrow \text{maximum}$,

where $H_p = -\sum_{rs} \sum_k x_{kp}^{rs} \log(x_{kp}^{rs})$

$$x_{kp}^{rs} = \|S_{kp}^{rs}\| / K^{rs}$$

$$C_p = \|B_p\| / N \quad (6)$$

H_p : スキーマのエントロピー

C_p : ビーコン設置リンク率

K^{rs} : 起終点ペア rs 間の経路総数

$\|S_{kp}^{rs}\|$: スキーマ S_{kp}^{rs} に属する経路数

$\|B_p\|$: ビーコン設置リンク数

スキーマのエントロピーはその定義より, 一つのスキーマに属する経路数が少ないほど大きくなる. 具体的な E の記述は問題ごとに与える.

当然ながら, この問題は NP 完全であり, 多数の局所解を持つので, 遺伝的アルゴリズムや模擬徐冷法, TABU 探索などの効率的に準最適解を求める手法を利用することになる. また, この手法でははじめに経路を列挙しているが, これについては既存の研究成果を利用することになる. 本稿のケーススタディでは Dial の配分アルゴリズム^[1]における efficient path の概念を採用し, ループのない経路を列挙している.

(2) 車載機の高度化が実現された場合

現在, ビーコンが設置されていないリンクの交通状況を把握するために, 車載機側でリンク走行履歴を保存しておき, アップリンク情報にその履歴を付加して通信する, いわゆる車載機の高度化が検討されている. 履歴が保存されるリンクの数が多いほど, 同じ質の情報を収集するのに必要なビーコンは少なくなることは, 直感で理解できるが, 前節と同様の方式で, 最適なビーコン配置を求める問題を次のように定式化できる.

経路やビーコンの配置についての表記は前節の通りとする. ビーコンと通信する直前 n リンクの履歴を車載機側で保存しているとき, Q_k^{rs} と B_p に関する二項演算子#を次

のように $\#^n$ と拡張して定義する.

$$\begin{aligned} \#^n : (Q_{kp}^{rs}, B_p) &\rightarrow S_{kp}^{rs} & (7) \\ S_{kp}^{rs} &= \{s_{kpl}^{rs} \mid s_{kpl}^{rs} = j_l, l = 1, 2, \dots, N\} \\ j_l &= 1 \ (\cup(q_{ky}^{rs}=1 \cap b_{py}=1 \\ &\quad |(x=i-n, \dots, i), f_k^{rs}(l) = i, f_k^{rs}(y) = x)), \\ &= 0 \ (q_{kl}^{rs}=0 \cap b_{pl}=1), \text{ or} \\ &= * \ (\text{otherwise}). \end{aligned}$$

すなわち, 経路上のあるリンク l の走行履歴が, n 本先までのリンクのいずれかに設置されたビーコンでアップリンク情報として収集された場合は, 対応するスキーマの要素を 1 とし, リンク l にビーコンが設置されていてもアップリンク情報が収集されなかった場合は 0 とする. スキーマの要素がこのいずれにも当てはまらない場合は, 未定義を意味する「*」のままとする.

以上のような演算子の拡張定義を導入することで, 前節と同様のスキーマのエントロピーを目的関数の説明変数とした組み合わせ最適化問題に定式化ができる.

車載機が高度化された場合の手順を, 再び例題のネットワークで説明する. いま車載機は直前 1 リンクの履歴を保持しているとし, 車載機が高度化されていない場合は経路を同定できなかった, リンク4 と5 にビーコンを配置したパターン B_1 , すなわち,

$$B_1 = (0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0)$$

を考えると, この場合は経路 $R_1 \sim R_2$ はそれぞれ

$$Q_1 \#^1 B_1 = S_{11} = (*, 1, *, 1, 0, *, *, *),$$

$$Q_2 \#^1 B_1 = S_{21} = (*, *, 1, 0, 1, *, *, *),$$

$$Q_3 \#^1 B_1 = S_{31} = (*, *, *, 0, 1, *, 1, *),$$

$$Q_4 \#^1 B_1 = S_{41} = (*, *, *, 1, 0, 1, *, *).$$

の 4 種類の独立のスキーマに分類されることがわかる.

3. 実ネットワークを用いたケーススタディ

ケーススタディとして, 図 2 に示す浜松中心市街地ネットワークにおけるビーコン最適配置を考える. ネットワークは東西南北それぞれが約 1.5km の長さにわたり, 13 の端点セントロイドと 3 つのゾーンセントロイドを含む. 起終点ペア数は 240 となる. またリンクは細街路を省いた道路で構成され, その数は往復別に 78 本である. このネットワークに Dial の配分アルゴリズムを適用すると, efficient path を 729 本列挙できる.

今, 目的関数 E_1 を

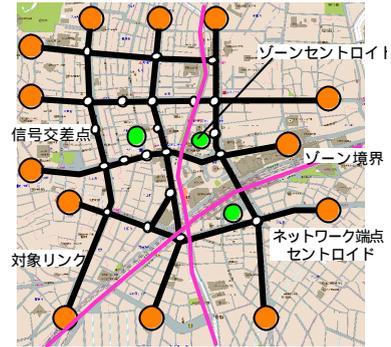


図 2: 浜松中心市街地のネットワーク

$$\begin{aligned} E_1 &= H_p + d(1 - C_p) & (8) \\ d &= 1 \ (\text{すべての経路が同定された}), \text{ or} \\ &= 0 \ (\text{それ以外}) \end{aligned}$$

と設定し, リンクの走行履歴を保存しない場合($E_1, n=0$), およびビーコン通過直前の 3 リンクまで履歴を保存する場合($E_1, n=3$)と 5 リンクまで保存する場合($E_1, n=5$)の 3 ケースについて, 最適組み合わせを探索した.

さらに別の目的関数 E_2

$$E_2 = H_p * (1 - C_p) \quad (9)$$

についても, 5 リンクまで履歴を保存する場合($E_2, n=5$)の最適配置を探索した.

各ケースの探索結果を表 1 に示す.

表 1: 最適組み合わせ探索の結果

ケース	同定された経路数	ビーコン設置リンク数
$E_1, n=0$	729 (100%)	50 (64%)
$E_1, n=3$	729 (100%)	37 (47%)
$E_1, n=5$	729 (100%)	33 (42%)
$E_2, n=5$	501 (69%)	18 (23%)

図 3 に各ケースにおけるビーコン設置リンクの配置を示す. 評価関数が E_1 の場合, すべての経路が同定されており, かつビーコンの数が少ないほど高い評価値となるので, 得られたビーコン配置で全経路が同定されている. また評価関数が E_2 の場合, 車載機の高度化により 18 個のビーコンで 69%の経路を同定しているが, 目的地となるセントロイドにもっとも近いリンクに設置される傾向が見取れる. なお, 探索戦略はランダム探索と山登り法を組み合わせた手法を初期値を変えて十数回繰り返すという簡便なもので, 結果は準最適解であることに留意されたい.

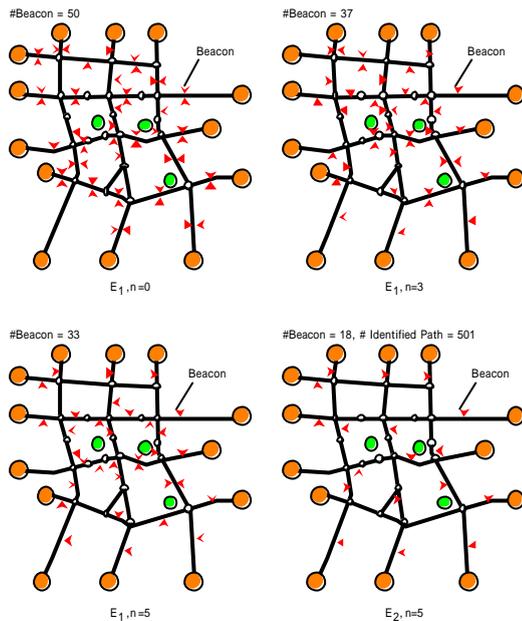


図 3：ビーコン設置リンクの最適配置

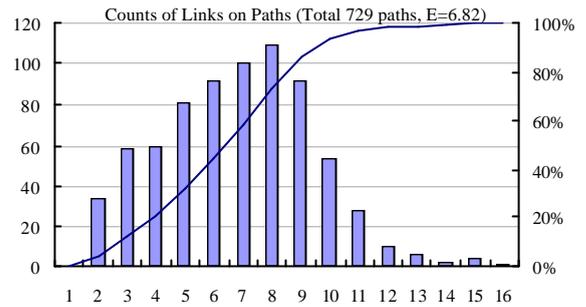


図 4：経路上のリンク数頻度分布(曲線は累積)

と予想され、このような空間的な指標と n の一般的な関係についても考察をすすめていく必要がある。

今回は最適配置を求めるに当たり、単純な評価関数を定義してケーススタディを行った。より現実的な評価のためには、たとえば計画経路交通量で重み付けした評価関数や、ビーコン数の上限を制約条件とした最適化、あるいは既存ビーコンにくわえて新規にビーコンを設置する場合の最適化など、さまざまな手法を検討するとともに、最適化の手法についても、より効率的な手法を探る必要がある。

【参考文献】

[1] Dial, R.B.: *A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration*, Transportation Research 5, pp.83-111, 1971

4 . 考察と今後の課題

直感的には n 本直前のリンク走行履歴をアップリンクに含めれば、全経路を同定するために必要なビーコン数は $n=0$ の時と比べて $1/n$ 程度になるように思われるが、ケーススタディからはそれほどの効果は確認されない。これはネットワークの範囲内にセントロイドが比較的均一に分布していると、あるセントロイドへの直近アクセスリンクに配置されたビーコンが、別のはなれば場所にあるセントロイドへ向かう経路を同定する場合に、必ずしもその役目を兼ねないため、車載機の高度化によって期待するほどの効果が得られなかったものと考えられる。

また、ネットワーク形状とセントロイドの分布パターンによって、列挙される経路を構成しているリンク数の分布が変わってくる。仮に全セントロイドへの直近アクセスリンクにビーコンが設置された場合 n 本直前のリンク走行履歴をアップリンクに含めると、そこを目的地とする経路のうちリンク数が n 本以下のものは、当然ながらすべて同定可能となる。図 4 は今回のケーススタディで列挙された経路のリンク数頻度分布であるが、 $n=10$ 程度までは同定できる経路数も順調に増加するが、それ以上は余り増加しない。したがってネットワーク形状とセントロイド分布によって、ある効率的な履歴保存数 n が決まるように思われる。逆に言えば n の大小により、経路が同定可能なセントロイド分布の空間的詳細度が変わってくる