

立命館大学 学生員 ○高倉 功
立命館大学 正会員 塩見康博

1. はじめに

東南アジアの新興国では、近年の経済成長に伴い、深刻な交通渋滞が社会問題化している。その一方、道路の交通状況をモニタリングするセンサーインフラが未整備であるため、適切な交通計画の策定や効率的な交通制御ができず、さらなる交通渋滞や、人身事故の悪化が懸念される。

そこで本研究では、近年世界的に普及しているスマートフォンやカーナビ等に備わっている Bluetooth に着目し、単一の Bluetooth スキャナにより取得される MAC アドレスのデータから密度、速度、交通量を推定する手法を構築する。

2. Bluetooth の検知特性

北澤ら¹⁾は、Bluetooth スキャナの検知特性について室内実験を通して明らかにしている。図 1 に示すように、MAC アドレスの取得率は、API を発行してから経過秒に応じて増えていくことが示されている。つまり、Bluetooth スキャナの検知エリアに滞在する時間が長くなれば、MAC アドレスの検知確率はほぼ線形に高くなると解釈される。この結果に基づき、

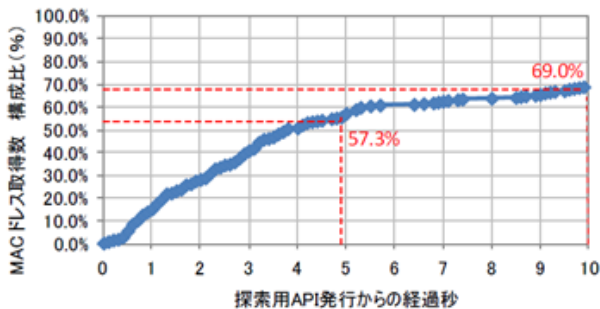


図 1. API 発行からの経過秒と取得数の関係¹⁾

本研究では Bluetooth スキャナの検知特性について、以下の仮定を設ける。

仮定 1

Bluetooth スキャナは、一定の検知範囲 L 内に存在する Bluetooth デバイスを等しく検知することができる。

仮定 2

Bluetooth デバイスが検知される確率は、検知範囲内に存在した時間 t に対して線形に増加する。

3. MAC アドレスデータと交通状態の理論関係の定式化

以下では、簡単のため、検知範囲を L とタイムアウトまでの時間 Δt で定義される時空間内ではすべての車両は一樣の挙動をするとの仮定の下、交通状態と MAC アドレスデータとの関係性を導く。

3.1 交通密度との関係

ある車両 i が $L/\Delta t$ の時空間内に存在する時間を t_i とすると、この車両が検知される確率 p_i は、 $P_i = \pi \alpha t_i$ と表される。ただし、 π は、車両 i が Bluetooth 機器を持つ確率を、 α は定数を表す。

ある瞬間に、検知エリア L 内に存在する車両台数を $StNt$ とし、その瞬間から Δt 秒間以内に下流側の検知限界から新たに流入してくる車両台数を $SxNx$ とする。すなわち、検知範囲内に存在する総走行車両台数は $StNt + SxNx$ と表される。このとき、 Δt 秒間内に検知される MAC アドレス数の期待値 $E[N]$ は、

$$E[N] = \sum_{i=1}^{StNt+SxNx} p_i = \pi \alpha \sum_{i=1}^{StNt+SxNx} t_i \quad (1)$$

と表すことが出来る。一方、時空間平面における交通密度 K は、 $E[N]$ の定義より、

$$K = \sum_{i=1}^{StNt+SxNx} t_i / L \Delta t \quad (2)$$

であることから、式(1)は式(2)の通り書き換えられる。

$$E[N] = (\pi \alpha L \Delta t) \cdot K \quad (3)$$

これより、以下の定理が導かれる。

定理 1

タイムインターバルあたりに観測される総 MAC アドレス数は密度 (K) と相関をもつ。

3.2 走行速度との関係

図 2 に示す通り走行速度の高い車両 A は速度の低い車両 B との比較で、Bluetooth スキャナに検知され得る回数が少なくなることが考えられる。すなわち、交通流の走行速度 V と同一の MAC アドレスが検知される回数との間に何らかの相関が生じることが予想される。

まず、走行速度が十分に高く、たかだか2回しか検知されない速度域の状況、すなわち $\frac{L}{\Delta t} < V$ が成立する状況を考える（図3参照）．図中、 t_1 の時間帯に検知エリアに流入してくる車両は最大でも1回しか検知されず、 t_2 の時間帯に流入してくる車両は最大で2回検知され得ることが分かる．

t_1 の時間帯に流入する車両について考えると、当該車両が検知される回数の期待値 $E[U_1]$ は、

$$E[U_1] = \sum_{i=0}^1 i \left(\frac{\alpha L}{V}\right)^i \left(1 - \frac{\alpha L}{V}\right)^{1-i} = \alpha L/V \quad (4)$$

と表される．次に、 t_2 の時間帯に流入する車両について考える．当該車両の検知エリア流入時刻を $T+x$ とおくと、 $T < t \leq T + \Delta t$ のスキャンインターバル（インターバル1とする）中に検知エリア内に存在する時間は、 $\Delta t - x$ 、インターバル2中に検知エリア内に存在する時間は $\frac{L}{V} - (\Delta t - x)$ となる．当該車両が検知される回数は、インターバル1,2共に検知されない場合は0回、インターバル1,2のどちらかで検知される場合は1回、どちらのインターバルでも検知される場合は2回となる．これより、検知される回数の期待値 $E[U_2]$ は以下の通り表される．

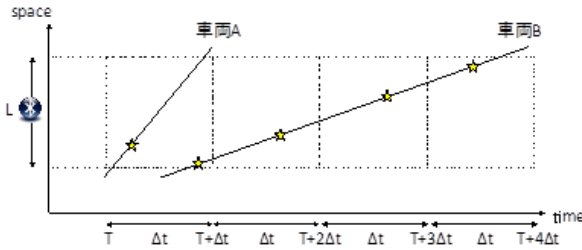


図2 走行車両軌跡とMACアドレス検知回数

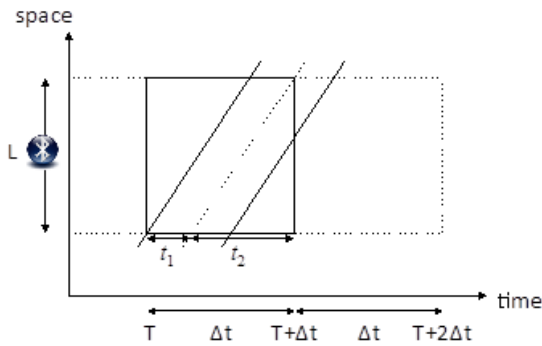


図3 検知回数と速度の関係

$$E[U_2] = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (i+j) q_1^i q_2^j (1-q_1)^{1-i} (1-q_2)^{1-j} = \alpha L/V \quad (5)$$

ただし、 q_1 はインターバル1で検知される確率、 q_2 はインターバル2で検知される確率を表す．

これより、 $L/\Delta t < V$ の条件下において、同一のMACアドレスが検知される回数の期待値は $E[U]$ は、

$$E[U] = \frac{t_1 E[U_1] + t_2 E[U_2]}{\Delta t} = \alpha L/V \quad (6)$$

と求められる．以降、同一のMACアドレスが最大で n 回

検知されうる速度レベル $\frac{L}{\{(n-1)\Delta t\}} < V \leq L/\{(n-2)\Delta t\}$ に

において、 $E[U] = \alpha L/V$ の成立を仮定すると、帰納的に、同一のMACアドレスが最大で $n+1$ 回検知され得る速度レベル $L/\{n\Delta t\} < V \leq L/\{(n-1)\Delta t\}$ でも $E[U] = \alpha L/V$ が成立することが証明できる．すなわち、数学的帰納法により、すべての速度レベルにおいて、

$$E[U] = \alpha L/V \quad (7)$$

の成立が証明される．これより、以下の定理が成立する．
定理2

同一のMACアドレスが検知される回数の平均値は、交通流速度の逆数($1/V$)と線形の関係を持つ．

3.3 交通量との関係

一般的に交通量(Q)、密度(K)、速度(V)の間には、

$Q = KV$ の関係が成立する．

そこで、式(3)と式(7)に基づくと、交通量の期待値 $E[Q]$ は式(8)として表される．

$$E[Q] = \frac{1}{\pi \Delta t} \frac{E[N]}{E[U]} \quad (8)$$

これより、定理3が成立する．

定理3

単位時間あたりに観測される総MACアドレス数を同一車両が同じBluetoothスキャナで検知される回数の期待値で除した値は交通量と線形の関係を持つ．

4. おわりに

本稿では、単独のBluetoothスキャナにより取得されたMACアドレスデータの特性と交通流の関係性を理論的に明らかとし、密度・速度・交通量を推定する可能性を示した．今後、本手法を実フィールドに適用し、提案手法の妥当性について検討を行う．

5. 参考文献

- 1) 北澤，塩見，田名部，管，萩原：Bluetooth通信を用いた旅行時間計測に関する基礎的分析，土木学会論文集 D3 Vol.70 No.5, pp.501-508,014.