交通機関の料金徴収の為のデータ移動方式

正員 田中 幹夫 (鉄道総研)

Data Re-allocation Method for Automatic Toll Collection Systems for Transportation Services
Mikio Tanaka (Railway Technical Research Institute)

For the purpose of an automatic toll collection system for transportation services, a method of data re-allocation according to related entity in distributed communication systems is discussed. A simple model to formulate the movement of users (passengers or vehicles) along a transportation network is proposed. Then the merits of user-ID based toll collection system is introduced. For the purpose of this user-ID based toll collection system, the re-allocation of data over a transportation network is required in order to reduce processing time at exit nodes. Some methods to implement this system and methods to evaluate their costs are studied.

キーワード：交通システム、自動料金徴収システム、通信ネットワーク、データベース

1. まえがき

交通機関(鉄道輸送、道路交通等)の料金徴収業務は、従来、紙製の切符類を使用して行われてきた。この自動化の為に各種のデータキャリア(内部に必要情報を登録し外部からの読取書込が可能で利用者側で携帯可能な小型装置)を用いた方式の開発、試行、実用化が進められている。現在、読取書込可能なデータキャリアを利用者側(乗客、自動車等)に携帯させ、処理に必要な情報をその中に書込んで保存する方式が主流である。当論文では、それらの方式とは異なり、利用者に関するID情報のみを用いるシステムに関して、その意義、利点を示し、単純な線形の交通ネットワークと利用者移動モデルを対象とした場合の実現方式としてのデータ移動方式を提案し、解析を行った結果を示す。

2. システムの対象と目的

〈2・1〉 交通機関の料金徴収自動化システム

交通機関(鉄道輸送、道路交通等)の自動料金徴収の為には、利用者の利用区間を特定しなければならない。利用区間を特定し、料金表等の情報から利用者に課すべき使用料金を計算し、それを利用者のストアードフェア(利用者が予め交通機関の提供者に対して払込んでおく金額)の残額情報や銀行口座等から差引く。又、定期券利用者であれば、その利用者の定期券情報(設定区間、設定期間)を参照して利用の可否や追加料金徴収の必要性有無を判断する。これらの一連の処理を利用区間が確定する時点、即ち利用終了地点(鉄道輸送ならば駅の改札出口、有料道路ならば出口側ゲート等)にて行い、その結果を利用者に示す事が必要である。駅の改札出口では、ストアードフェア残高不足等の場合に改札出口に設けられたドア(小扉)を閉めて利用者を物理的に停止させる必要が有るかもしれない。

このような自動料金徴収の為に近年では各種データキャリアを利用したシステムの開発、試行、実用化が進められている。現在は利用者側に携帯又は装着させる読取書込型のデータキャリアを使用したものが主流であり¹⁾、磁気カードが広く普及している。最近は情報処理能力に優れたICカードも使用され、更には電波等により非接触での読取/書込を行う事によって、利用者の利便性を向上させる試みも為されている^{2)~7)}。

〈2・2〉 自動料金徴収システムの各種方式

自動料金徴収の為に必要な情報を保持参照する方式は大きく分けて以下の2種類の形態が考えられる⁸⁾。

- ① 利用者自身が情報を携帯する方式(図1)
- ② 交通機関側が情報を保持する方式(図2)

図1 利用者自身が情報を携帯する方式
Fig. 1 Method of user carrying information

図2 交通機関の提供者が情報を保持する方式
Fig. 2 Method of transporter storing information

①の形態では図1に示すように、利用者に関する情報(定期券、ストアードフェアの情報等)が利用者の携帯又は装着するデータキャリア内部に蓄えられている。入口にて、交通機関側は利用開始に関する情報をシステム内部には特に取込まず、利用者の保持するデータキャリア内に書込を行う。出口では、そこに書かれた情報を読み出す事で利用開始箇所等の情報を知り、料金表等を参照して料金計算等の必要処理を行う。前節で述べたような現在多く試みられている方式は、利用者の携帯する磁気カードやICカードに利用開始に関する情報を書込むものであり、この①の形態に該当する。

②の形態は図2に示すように、前記のような必要情報を交通機関側にデータとして保存し参照するもので、利用者に関しては、そのID(ユーザーを特定する固定情報)だけを使用する。何等情報を利用者側に書込む必要はない。しかしシステム側に処理速度やデータベース容量等の面で大きな能力を要求するため、実用化されているケースは、スキー場のリフト輸送での料金徴収等、小規模な場合に限定されている。これらは利用終了点が1箇所、或は数箇所に限定されており、データベース参照が高速で容易な場合である。現時点で、一般的な交通機関で採用されている例は無い。

〈2.3〉 ユーザーIDベースの料金徴収方式

前節で述べた②の方式のように利用者のユーザーID、即ち読取情報のみで実現するシステムを、利用者側に負担させる情報がユーザーIDのみであることから、ここでは「ユーザーIDベースの料金徴収方式」と呼ぶ。

この方式は、従来試みられてきた①の方式と比較して以下のような利点を持っている。

- ・データキャリア、及び読取装置は利用者のIDを読取るのみで充分であり、技術的、構造的に単純化され、経済性、保全性が向上する。
- ・入出場(改札等)時点でのトランザクションが単純となり、処理が高速化される。(書込の場合、書込直後に再読出しを行ってチェックする等、一般に通信シーケンスが複雑である⁹⁾)
- ・データキャリアへの書込時のエラーによる情報不整合等のトラブルが無い。(無線等による非接触書込の際は、通信中断等に起因するエラーの対策が必須で、既存の方式では、この為を書込エリアの2重化等、複雑な対策を講じている場合が多い)
- ・バーコードのように、非常に安価ではあるが、光学

図3 交通ネットワークと利用開始/終了
Fig.3 Transportation network and entrance/exit

的な方式で原理的に書込が困難なデータキャリアも使用できる可能性がある*。

- ・現時点では技術的に困難であるが、将来的にはデータキャリアを使用せずに、人間や自動車そのものの認識結果(指紋、掌紋、声紋、容姿等)をユーザーIDとして使用する方式が使える。この場合には利用者に携帯させるものは全く不要となり、いわゆるキップレスシステムが実現する。

この「ユーザーIDベースの料金徴収方式」は、上記のような優れた特徴を持っているが、前節で述べたように交通機関側のシステムに対して、処理速度や容量の面で大きな能力を要求する事が定性的に予想されてきたため、現状で実用化されているケースは殆ど無い。しかし、今後の情報関連技術の発展に伴って、その課題(システム実現側のコスト)は相対的に小さくなり、その優れた利点が発揮されると考えられる。これの実現に向けて定量的分析を行う為には、様々な交通ネットワークの形態に応じた、利用者移動に関する複雑な解析が必要となる。当論文では、単純線形の交通ネットワークと利用者移動モデルを対象とした場合の「ユーザーIDベースの料金徴収方式」実現の為のデータ移動方式の提案、解析を主題とする。

3. 対象の移動モデル

〈3.1〉 対象の移動モデル

定量的な解析を進めるためには、対象の移動のモデル化が必要である。基本的に、文献⁸⁾にて提案、使用したモデルと同一である。その概要を以下に示す。

各種の交通機関に於て、利用者は交通機関に沿って物理的な移動を行う。ここではその移動する領域を交通ネットワークと呼ぶ(図3)。交通ネットワーク内の離散的な点(ノードとする:駅、ゲート、乗降口等)にて、利用者は「利用開始」により交通ネットワーク内に入り、「利用終了」によって退出する。交通ネットワークの利用料金は「利用開始」、「利用終了」の事象が発生した場所(ノードID)で決定する。

交通ネットワーク内での利用者の移動速度は利用者の特性や行先によって異なる^{10), 11)}。例えば、鉄道での移動の場合、高齢者は一般に駅構内の移動や乗換えに要する時間が大きく、移動速度は相対的に低下するであろう¹²⁾。又、利用する駅が主要駅の場合には、急行や快速等の優等列車を利用できることから移動速度は相対的に高くなる。又、交通ネットワーク内で「利用開始」や「利用終了」が生ずるノードの分布は一般的には主要駅は他のノードに比べて高くなる。

これらの現実的な分布を、ここでは理想的な確率分布で代替する¹³⁾。以下のような前提をおく。

☆) 但しバーコードのようなデータキャリアを使ったシステムの場合、その捏造や複写による不正利用が容易、といった弱点に関する対策が重要である。

図4 交通ネットワーク上の利用者移動のモデル
Fig. 4 Model of movement of a user over a transportation network

- ・利用者の状態（ノード間の移動や「利用終了」事象の発生）はマルコフ過程に従って遷移する。（一定確率で状態推移し過去履歴には依存しない）
- ・あるノードに存在する利用者が、単位時間内に、
次ノードへ移る確率（移動率）： α
交通ネットワークから退出する確率（退出率）： β

このような前提で考えた交通ネットワーク上の利用者移動のモデルを図4に示す。同じノードに留まる確率は $1-\alpha-\beta$ となる。ここでは単位時間内に2ノード（2駅）進む確率は無視している。

また、交通ネットワークの形状は線状（1次元）、格子状、環状、さらにそれらの組み合わせ等、様々な形態が考えられるが、当論文の解析では以下とする。

- ・線区形状は線形（単純直線状）で、終端は無い。

このモデルは定性的に鉄道の例で表現すれば以下のように解釈できる。ある時点である駅の管内に存在する利用者が、次の単位時間内にその駅の改札出口を出る事象の確率が β である。また次の単位時間内に次駅の管内へ進む事象の確率は α である。次駅へ進んだり、改札出口へ進む移動速度は利用者によって差が有り一様ではない。それ故次の単位時間内に、どちらの事象にも進まない確率が存在し、それが $(1-\alpha-\beta)$ である。

〈3.2〉対象の移動モデルの性質

前節のモデルの場合、以下のような基本的性質が導かれる⁸⁾。以下、「利用者」を Entity、「利用開始」を Entry、「利用終了」を Exit とする。いま、時刻 $t=0$ に於て、ノード#0 に Entity が存在しているとす。

- ・Entityの時刻 t での交通ネットワーク内存在確率

$$E(\beta, t) = (1-\beta)^t \dots\dots\dots (1)$$

- ・Entityの平均システム滞在（Entry～Exit）時間

$$\sum_{i=1}^{\infty} [i\beta(1-\beta)^i] = (1-\beta)/\beta \dots\dots\dots (2)$$

- ・Entityの時刻 t でのノード# n での存在確率 ($t \geq n$)

$$P(\alpha, \beta, t, n) = {}_tC_n \alpha^n (1-\alpha-\beta)^{t-n} \dots\dots\dots (3)$$

- ・Entityの時刻 $t \sim (t+1)$ でのノード# n で Exit する確率 ($t \geq n$)

$$W(\alpha, \beta, t, n) = \beta P(\alpha, \beta, t, n) \dots\dots\dots (4)$$

4. システムの実現方式

〈4.1〉システムの基本構成

2章で述べたような「ユーザIDベースの方式」を実現するためには、EntityのExit処理の際に、関連データ（Entry時の情報）を高速に参照して処理を完了する事が必要となる。例えば、鉄道に於ける改札処理の場合、100ms以内に完了する事が望ましいとされている³⁾。大規模なデータベースを1ヵ所に集中して設置し、それに対して広範囲に散在する交通ネットワークの各ノードからアクセスを行う方法が基本的には考えられる。そのシステムの基本構成を図5に示す。

〈4.2〉データ移動方式

上記の基本構成では、Exit時の処理時間がある値以下に収めるという要求に対し、システムの性能や容量面から不利となる場合が多いと考えられる。データ参照の高速化を目的として、必要とされるデータを対象Entityの動きに合わせて移動する方式を検討する。

これは、Exit時の処理に必要なデータを極力Exit発生ノード、或は物理的に近接するノードのDBアクセスで得られるよう、Entityの予想される動きに合わせてExit事象の発生確率の高い箇所へデータを適切に移動する方式である。交通ネットワークに沿って、各ノード間で情報を相互に伝送可能な通信ネットワークが必要となるが、実際、交通事業者は、このような設備を既に設置運用している場合が一般的である^{14), 15)}。

図6に、このデータ移動方式の概念を示す。

又、この方式以外にも、必要なデータの複製（レプリカ）を複数作成し、Entityの動きに合わせてExit事象の発生確率の高い箇所に適切に配置する方式も考えられる。これに関しては別の文献⁸⁾にて詳説している。

図5 システムの基本構成
Fig. 5 Basic Outline of System

図6 データ移動方式
Fig. 6 Method of data re-allocation

〈4.3〉 システムの処理の流れ

データ移動方式を採用した場合のシステムの処理の流れは以下になる。

- ① EntityのEntry時点にシステム側にてEntryに関する情報（例えば鉄道なら乗車駅名等とユーザーIDとの組合せ情報、Entry時刻等）を、まずEntryのノードにて、内部データとして登録する。
- ② データ配置すべきノードを次節に後述する方法により決定し、その結果のノードに移動して配置する。この処理は各単位時間毎に行い、その結果に従って、データは交通ネットワークに沿って、Entityの移動方向と同じ向きで移動していく。
- ③ Entityの Exit事象発生時、そのノード（自ノード）は、その Entry時点のデータを参照しようとする。
- ④ そのデータが自ノードに配置してあれば、それをローカルに参照する事で、Exit処理は完結する。
- ⑤ 自ノードに存在しない場合、隣接ノードへデータアクセス要求パケットを発行する。要求は両方向へ発する方法も有るが、ここでは、Entity移動方向と、該当データの自ノード通過の有無で方向を判断できるものとする。
- ⑥ 上記要求パケットを受けた隣接ノードは、該当データの検索を行い、無ければ、更に隣接ノードへ要求パケットを再転送する。該当データが得られる迄、この処理を繰返し、得られた場合には要求元ノードへ、その応答パケットが返される。
- ⑦ Exit処理ノードは、その応答パケットの内容からEntityに関するEntry時のデータを得て、それを用いる事によってExit処理を完結する。
- ⑧ Exit処理に使用されたEntry時のデータは以降は不要になるので、データ要求アクセスを受けたノードは応答パケット返信後、速やかに消去する。

〈4.4〉 データ移動先ノードの決定方法

データ移動先ノード番号：Nの決定方法は幾つかが考えられ、例えば以下のようなものがある。ここで、リンクとは、データをアクセスする為に経由する隣接ノード間の通信路を指す。

- (A) 存在ノードの平均値(Entry以降、その時点迄の移動ノード数の平均値)に最も近い値のノード
- (B) 存在確率Pが、その時点で最大のノード
- (C) Exit処理時のデータアクセスの際、経由リンク数n(絶対値)の平均値が最低となるノード

何れの決定方法が最善かは、データアクセス時間の決まり方に依存する。しかし一般的にはデータアクセス時間は経由リンクの数に最も影響され、上記の中では、(C)が、今回の目的と照らし合せて妥当と考えられ、基本的にこれを採用する。

(C)の決定方法は1組の式では表現できない。候補となるノード各々に関して、そこにデータを配置した場合の、Exit時のデータアクセス経由リンク数の総和を計算した上で比較する必要がある。現実には(C)の結果は、(A)或は(B)の結果と一致する事が多い。

例として、 $\alpha=0.1, 0.4, 0.7, \beta=0.2$ の場合のデータ配置先ノード番号を経過時間tと共に図7に示す。図7から判るように、退出率 β を固定して比較した場合、対象の移動率： α が大きければ、Entityの速い動きに合わせてデータ配置先も速く移動する。

5. 経由リンク数の解析

〈5.1〉 経由リンク数の基本的解析

Exit時のデータアクセス処理の際、経由リンク数がどの程度の値になるか、という事はデータアクセス時間やシステム構築コストを解析する際に重要になる。

Entityが、時間t~(t+1)間にノード#nで Exitした際、そのExit処理に伴うデータアクセスの経由リンク数は、〈4.4〉のように決定するNを用いて以下となる。理想的にデータアクセスが行われた場合、即ち対象データが自ノードに存在した場合、この値は0である。

$$|n - N(t, \alpha, \beta)| \cdots \cdots (5)$$

Entity が、時間t~(t+1)間にて Exit したと想定した場合、その経由リンク数の期待値：rは、時刻t、ノード#nでの存在率：Pを用いて以下となる。

$$r(\alpha, \beta, t) = \sum_{n=0}^t \{ P(\alpha, \beta, t, n) / (1 - \beta)^t \times |n - N(t, \alpha, \beta)| \} \cdots \cdots (6)$$

このrは、Entity が、時間t~(t+1)間にて Exit した前提でのリンク数の期待値であり、時間tの経過と共に増大するが、Entity が、時間t~(t+1)間にて Exitする確率は退出率： β に依存して逐次減少しており、その確率との積は以下となる。

$$r(\alpha, \beta, t) \times (1 - \beta)^t \times \beta = \beta \sum \{ P(\alpha, \beta, t, n) \times |n - N(t, \alpha, \beta)| \} \cdots \cdots (7)$$

この値が、時間t~(t+1)間での Exit 事象に対

図7 経過時間と移動先ノードの例
Fig. 7 Examples of data location & elapsed time

する実効的な経路リンク数と考えられる。

Entity が、(時間 0 ~ ∞ 間で) Exit した際の経路リンク数期待値 R は上記の値を総和した以下となる。

$$\begin{aligned} R(\alpha, \beta) &= (1-\beta)^t \times \beta \times \sum_{t=0}^{\infty} r(\alpha, \beta, t) \\ &= \sum_{t=0}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^t \{ W(\alpha, \beta, t, n) \times |n - N(t, \alpha, \beta)| \} \right] \\ &= \beta \sum_{t=0}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^t \{ C_n \alpha^n (1-\alpha-\beta)^{t-n} |n - N(t, \alpha, \beta)| \} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

上式を計算する事で、データ移動方式の際の経路リンク数の期待値が、 α 、 β の関数として求まる。

$\alpha=0.1$ 、 $\beta=0.2$ の場合の例を図 8 に示す。これから判るように、時間経過と共に、各時刻の Exit 処理の際の経路リンク数： r (図中の○) は平均的に増大し、その際のデータアクセス時間は大きくなっていく事が予想される。しかし、そのようなデータアクセス時間を実際に要するような Exit 事象の発生確率は、3 章の式(1)で示したように、指数関数に従って減少していく事から、時間 t での Exit 事象による経路リンク数の実効値(図中の▲)は基本的に、それらの積であり、時間経過と共に減少して行く。最終的な結果として、ある Entity に対して時間 0 ~ ∞ 間でこれらを総和した、経路リンク数の期待値： R (図中の▽) は、ある条件内で収束していくと考えられる。この場合で言えば、Entity の Exit 時の処理の際、平均経路リンク数 = 0.379 でデータアクセスが行われる事となる。

また、図 8 で判るように各時刻の経路リンク数： r (図中の○) の上昇は周期的な波状を示している。この理由は交通ネットワーク上で、配置位置がノード位置に対応した離散値を取らざるを得ないからと考えられる。波状の波頭の箇所 ($t=5, 13, 21, \dots$ の箇所) は、図 7 と照らし合せてみれば判るように、配置先ノードが変わる直前の時刻であり、配置先選定条件の比較では、2 つの候補ノードが拮抗している状態にある。その次の単位時間後には次ノードに配置先が移る。

次に経路リンク数に関する確率分布をみると、 $\alpha=0.1 \sim 0.4$ 、 $\beta=0.2$ の場合、図 9 のようになる。例えば $\alpha=0.1$ 、 $\beta=0.2$ の場合、リンク数=0、即ち Exit

図 8 経路リンク数の時間に伴う変化
Fig. 8 A variation of number of passing links

発生ノード内にてデータアクセス処理が可能な理想的状況の確率が 68%、リンク数=1、即ち隣接ノードからデータアクセスが行われる確率が 27%、リンク数 2 以上が 5%、リンク数の平均は 0.379 となる。

<5.2> 経路リンク数と拡散率

対象 Entity の特性(移動率 α 、退出率 β)の幾つかの組合せに対して、平均経路リンク数を式 8 に従って計算した結果を図 10 に示す。これから定性的に判るように、退出率 β の減少に伴いデータアクセスの経路リンク数は増大する。鉄道の自動料金徴収システムの例で考えれば、降車率が低い(平均乗車距離が長い)場合にはデータアクセス時間は大きくなるという事になる。移動率 α に関しては、ある最大値を挟んで対称的な変化を示している。この理由は以下のように考えられる。

Entity の存在確率： $P(\alpha, \beta, t, n)$ 、Exit 確率： W の交通ネットワーク上 (n 軸上) の分布の形状を考える。その式(3)(4)の形を観察すると、 $(1-\alpha-\beta)$ と α の値を入替えた場合、左右が逆の形状となる事が判る。

以下のように Entity 移動の拡散率： γ を定義する。

$$\gamma = \frac{\min(1-\alpha-\beta, \alpha)}{(1-\beta)/2} \quad (0 \leq \gamma \leq 1) \quad (9)$$

γ は存在分布 P 、或は Exit 分布 W の形状を決める値で、存在確率の拡散の大きさ、速さを表わす値と言う事ができる。 $\gamma=1$ の場合が最大の拡散を示し、デー

図 9 経路リンク数の確率分布
Fig. 9 Probability of number of passing links

図 10 経路リンク数の例
Fig. 10 An example of number of passing links

タ分散配置方式の場合には、同様のアクセス性能を得るための複製配置数が最大となり⁸⁾、データ移動方式の場合には経路リンク数が最大になる。

拡散率(γ)=1となる移動率(α)は以下となる。

$$1-\alpha-\beta=\alpha \quad \text{から} \quad \alpha = \frac{1-\beta}{2} \quad \dots\dots(10)$$

図10でも、この α にて経路リンク数が最大となっている事が判る。この場合、即ちデータアクセス応答時間上は、最も不利となるような状況(α 、 β の組合わせ)での経路リンク数を計算する。 α 、 β の上記の関係を前記の基本式に代入すると、

$$\begin{aligned} R(\alpha, \beta) &= \beta \sum_{t=0}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^t \{ {}_tC_n \alpha^n (1-\alpha-\beta)^{t-n} | n-N(t, \alpha, \beta) | \} \right] \\ &= (1-2\alpha) \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \left[\sum_{n=0}^t \{ {}_tC_n | n-N(t, \alpha, \beta) | \} \right] \dots\dots(11) \end{aligned}$$

この場合、Entity が、時間 $t \sim (t+1)$ 間に ノード# n で Exit する確率は

$$W(\alpha, \beta, t, n) = \beta \times \alpha^t \times {}_tC_n \quad \dots\dots\dots(12)$$

となり、交通ネットワーク上(n 軸上)では確率分布が左右対称となっている事から、

$$N(t, \alpha, \beta) = t/2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。この関係を前式に代入すると、

$$\begin{aligned} R(\alpha, \beta) &= (1-2\alpha) \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \left[\sum_{n=0}^{t/2} \{ {}_tC_n | n-t/2 | \} \right] \\ &= 2(1-2\alpha) \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \sum_{n=0}^{t/2} \{ {}_tC_n (t/2-n) \} \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

β の値に対して、経路リンク数が最大となる($\gamma=1$)場合の経路リンク数を図11に示す。これは、ある退出率(β)のもとで、データアクセス時間を抑える観点では最も不利な移動率(α)が選択された場合の経路リンク数を示したものと言える。この図からも判るように退出率 β が低減すると、経路リンク数は急激に増大する。即ち、データアクセス時間を抑える上では非常に不利となる。

図11 拡散率最大の場合の経路リンク数
Fig.11 Number of passing links in case of $\gamma=1$

〈5・3〉(経路リンク数)²に関する解析

経路リンク数の計算は基本的に〈5・1〉で示した方法を用いて可能であるが、経路リンク数の収束の有無は明らかとなっていない。「経路リンク数が収束しない」とは、データアクセスの距離、時間が増大発散し、データ移動方式の実現が不可能な事を意味する。その為、分布や収束の状況を掴む事は重要である。ここでは、その為に、(経路リンク数)²に関する解析を行う。この値は、二項分布の性質を用いて以下のように比較的簡単に求める事ができ、収束の状況の手掛かりになる。

Entity が、時間 $t \sim (t+1)$ 間に ノード# n で Exit する確率は、3章で述べたように、

$$W(\alpha, \beta, t, n) = \beta {}_tC_n \alpha^n (1-\alpha-\beta)^{t-n} \dots\dots(4)$$

である。ここでは、これを、以下のように変形する。

$$\begin{aligned} W(\alpha, \beta, t, n) &= \beta (1-\beta)^t {}_tC_n (\alpha/(1-\beta))^n (1-\alpha/(1-\beta))^{t-n} \\ &\dots\dots(15) \end{aligned}$$

これは、一般の二項分布の形であり扱いやすい。この場合、その分散: V は以下の式で表わされる。

$$V(\alpha, \beta, t) = \beta (1-\beta)^t t \frac{\alpha}{1-\beta} \left(1 - \frac{\alpha}{1-\beta}\right) \dots\dots(16)$$

これが、(経路リンク数)²の期待値となり、比較的簡単に計算でき、収束の状況が把握できる。ここで、更に前節と同様に、拡散率が最大($\gamma=1$)で、分散: V が最大となる場合を計算すると以下となる。

$$\begin{aligned} \alpha/(1-\beta) &= 1-\alpha/(1-\beta) = 0.5 \quad \text{から} \\ V(\alpha, \beta, t) &= \beta (1-\beta)^t t/4 \quad \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

Entity が、時刻 $0 \sim \infty$ 間で Exit した際の、(経路リンク数)²を総和した期待値は以下のように、かなり単純な式で計算される事になる。

$$Q(\alpha, \beta) = \sum_{t=0}^{\infty} V(\alpha, \beta, t) = (1-\beta)/4\beta \dots\dots(18)$$

この経過から判るように、 $1-\beta < 1$ 、 $\beta > 0$ であるならば、即ち退出確率がゼロでない通常の条件内では、(経路リンク数)²は収束する事がわかる。

6. データ移動方式の評価

〈6・1〉評価の基本的な考え方

システムの実現すべき重要な機能要件はExit時の処理時間である。データ移動方式の目的は3章で述べたように、その際の処理時間の短縮であり、方式の性能や効果は、その短縮の程度で評価できる。この処理時間は、大別すれば、Exit発生ノード中での処理時間と、他ノードへアクセスして必要なデータを得る為の時間とからなる。不確定な部分は後者であり、所要のデータを得る迄に必要な物理的距離、或は論理的距離(経由するノード数)を解析する事が重要となる。

処理時間と、利用者移動のパラメータ、通信ネット

ワークの容量等との関係が解析できれば、既存のシステムで達成できる性能の評価、又は、逆に、必要な機能要件を満たす為にシステム側、通信ネットワーク側に求められるコストが推定できる。その為に次節以下にて、前章のnを用いて、これらに関する解析を行う。

〈6・2〉通信ネットワークのモデル

各ノードの通信機能のモデルを図12のように考える。各ノードは、左右の隣接ノードに対してデータアクセスに係わるパケットを順次1つずつ伝送する機能を備えている。各ノードには、以下のいずれかの事由により、伝送すべきデータ(パケット)が存在する。

- 自ノードにてExit処理が必要になる際、参照すべきデータが当ノードには配置されておらず、他ノードへのアクセス要求が必要になる。
- 隣接ノードからデータアクセス要求が到着するが、その要求データは自ノードには存在しない為、更に隣接ノードへ再転送する必要が有る。
- 隣接ノードからデータアクセス応答が到着するが、宛先ノードは自ノードではない為、もう一方の隣接ノードに再転送する。

発生あるいは到着したパケットは伝送処理を、十分な容量の有る待行列にて待つ事ができる。この伝送の状況はM/M/1モデルで近似できるとする^{17), 18)}。

〈6・3〉データ移動方式のデータアクセス時間

ここで、データアクセスの際の処理の所要時間は以下のように計算されるものとする。

$$\text{アクセス所要時間} = A + (A + 2B) \times n \cdots (19)$$

A: ノード内にて、目的のデータを検索する為に要する処理時間。nと無関係とする。

B: 他ノードにアクセスする際、1リンクを経由するデータ伝送に要する処理時間。

Aは、自ノード内でExit処理が完結する際の処理時間と同一になりデータベースの構成や性能に依存する。

Bは伝送に要する処理時間で、一般に、伝送遅延時間、伝播遅延時間、処理待時間から構成される。伝送遅延時間は、経由する通信回線や各種制御装置(変復

図12 ノード間の通信伝送のモデル
Fig.12 A model of communication between nodes

調装置, 信号変換装置, 交換機等) の能力、数によって決まる。伝播遅延時間は物理的な伝送距離に比例する。一般に、衛星通信など特別長距離の場合以外は伝播遅延時間は無視する事が多い。次節の解析でも、これは無視できるとする。処理待時間は他のトラフィックとの競合による待時間であるが、一般的には前節で述べたようなM/M/1モデルで近似できると考えられる。

〈6・4〉伝送所要時間の解析

〈6・2〉に示したようなモデルで、1つのパケットを1リンク(隣接する2ノード間)伝送する為に要する時間、即ち前式でのBを考える。以下の値を使用する。

- 1リンクを1パケットが伝送される実時間(伝送処理の待時間を無視した正味の伝送時間)をT[s]とする。(例えば回線速度がYbpsでパケット長がZbitの場合、 $T = Z/Y$ となる)
- 交通ネットワーク内に、1ノード当たり、存在するEntityの数をMとする。(交通ネットワーク全体に同時に存在するEntity数÷ノード数=M)
- 5章で述べたように、EntityのExit時の処理のデータアクセスの平均経由リンク数をnとする。

単位時間当たり、発生するExit事象の数は(1ノード当たり)、以下となる。

$$\beta \times M \cdots (20)$$

この際のデータアクセスの為に発生するリンク上通信の数は(1ノード当たり)以下となる。

$$\beta \times M \times n \cdots (21)$$

データアクセス1回につきパケットは要求/応答の2つが発生する。また、ノード内には左右の方向別に1つずつの伝送装置を有している。これから、伝送装置一つ当たりの平均処理パケットの数は、以下となる。

$$\beta \times M \times n \times 2 \div 2 = \beta \times M \times n \cdots (22)$$

伝送処理装置の処理を待っている待行列数はM/M/1モデルの理論から、以下となる^{17), 18)}。

$$\frac{(\beta \times M \times n) T}{1 - (\beta \times M \times n) T}$$

平均システム滞在時間(パケットの発生或は到着から伝送終了までの時間)、即ち1リンクの伝送に必要な時間となる時間は以下となる。(これが式(19)のBとなる)

$$\frac{T}{1 - (\beta \times M \times n) T} \cdots (23)$$

Exit処理時の平均経由リンク数はnである事から、平均リンク時間は以下となる。

$$\frac{n T}{1 - (\beta \times M \times n) T} \cdots (24)$$

これが伝送所要時間を計算する式となるが、以下の様に、nの多項式として表わす事もできる。

$$\frac{n T}{1 - (\beta \times M \times n) T} = n T \sum_{i=0}^{\infty} (\beta M n T)^i$$

$$= Tn + (\beta M)T^2n^2 + (\beta M)^2T^3n^3 \dots \dots (25)$$

この式の第1項は待時間を無視した処理時間という事ができ、第2項以降がトラフィック競合による処理待時間に該当する。 $(\beta \times M \times n)T$ は、各リンクの伝送回線の利用率(Utilization)に該当するものであり、一般の通信網では0.5~0.6程度以下に抑えるのが普通である。今回のシステムでも、この利用率は低く抑えられる事とし、上式の、ある項以降は無視できる場合が多いと考えられる。例えば、第3項以降が無視できれば、平均伝送時間は、以下となり、 n の1次項と2次項とで近似される事になる。

$$Tn + (\beta M)T^2n^2 \dots \dots \dots (26)$$

〈6.5〉データアクセス所要時間の計算

前節で導いた計算式と、5章で解析した、 n の値を使用して、幾つかの条件のもとでのデータアクセス所要時間を例として示す。ここでは仮に以下の値とする。

$$T(\text{正味の伝送時間}) = 0.004[s]$$

(例えば32Byteのパケットを64kbpsの回線で伝送する場合は、 $T = 32 \times 8 \div (64 \times 10^3) = 0.004$)

$$\alpha(\text{移動率}) = 0.4 \quad \beta(\text{退出率}) = 0.1$$

$$M(\text{Entity数}) = 1000$$

$$A(\text{データベース検索時間}) = 0.05[s]$$

この場合、平均経由リンク数： n は(式8より)

$$n = 1.011$$

回線の利用率は、

$$0.1 \times 1000 \times 1.011 \times 0.004 = 0.40$$

リンク上の伝送に要される平均時間： B は、

$$0.004 \div (1 - 0.40) = 0.0067[s]$$

データアクセス所要時間は以下となる。

$$0.05 + (0.05 + 0.0067 \times 2) \times 1.011 = 0.114[s]$$

この条件で、 $\alpha = 0.1 \sim 0.4$ 、 $\beta = 0.2$ の場合のデータアクセス所要時間の変化を、図13に示す。

図13 データアクセス所要時間の変化
Fig.13 Variation of data-access-time

〈6.6〉現実路線への適用例

次に鉄道の実路線データをもとに評価を試みた例を示す。ここでの対象は首都圏のある鉄道路線で、10数駅からなる単純1次元(棒状)の線区である。

始発駅にて乗車する旅客の総数、この旅客の各駅での下車数(下車割合)、駅間所要時間等の実データを適用する。但し、3章で示した基本モデルの性質上、各種の制約があり(例えば各駅の α 、 β は均一値を取らざるを得ない等)、その下での推定を行った。ここでは、平均的な α 、 β の推定値として、以下の値が得られた。

$$\alpha = 0.62, \quad \beta = 0.13$$

これから、平均経由リンク数(n)を計算すると

$$n = 0.775$$

1日の総旅客数：57万3千人、ピーク時旅客数：5万6千人/時、各旅客の平均乗車キロ数等からトランザクション量を推定する。前節で示した手順中の、1ノード当たり存在する平均 Entity数(M)は以下となる。

$$M = 1500$$

これらを用いて、前節のシステム条件(通信容量、データベース検索時間)のもとで、データアクセス所要時間を計算する。以下の値が得られる。

$$\text{データアクセス所要時間} : 95[ms]$$

4章でも触れたが、鉄道の Exit処理時間は100ms以下という要件が示されており³⁾、それを指標とすれば、この試算結果はそれを(平均値としては)満足している。即ち、今回の「データ移動方式」を上記のような旅客量(トランザクション数)の鉄道路線に適用する場合、〈6.5〉節で示したシステム能力(通信回線速度、データベース検索時間等)のもとで処理可能と考えられる。

次の例としてシステム側の通信回線能力が 9600bps の場合を仮定して同様に計算を行うと以下となる。

$$\text{データアクセス所要時間} : 130[ms]$$

即ち、上記路線では処理時間の指標を満たす為には 9600bps の通信回線能力では不充分という結果になる。

7. むすび

交通機関の自動料金徴収システムに関して、「ユーザーIDベースの料金徴収方式」は2章で述べたような利点を持っているが、定性的に処理時間や通信ネットワーク容量、データベース容量等の関係から困難と考えられてきた。この方式の実現の為には、様々な交通ネットワークの形態に応じて、利用者移動に関する複雑な解析が必要となる。当論文では単純なモデルを対象とした場合のデータ移動方式を提案し、その際の処理方法、対象の特性(移動率、退出率等)によって変化するシステムの性能の解析方法の一つを示した。

現段階での主な課題として以下を考えている。

・モデル上の課題

今回の解析に際し、利用者移動に関してはマルコフ過程に基づく単純確率モデル、交通ネットワーク形状に関しては単純線状、といった前提を置いている。6章でも触れたが、このモデルの下では現実の輸送状況に適合させるに当たっての制約が大きい。今回の基本モデルをベースとして、モデルの拡張等を行い、適用対象や解析結果の現実性を高める事が課題である。

・システム性能・負荷上の課題

適用対象の規模や、今後の情報通信技術の進展にも依存するが、今回の解析結果からもシステム側のネットワークやデータベース等にかかる負荷は大きくなる事が予想される。モデルの拡張と合わせて、性能向上、負荷の縮小、最適化の更なる検討が課題である。

・セキュリティ上の課題

「ユーザーIDベースの料金徴収方式」は将来的に利用者へのサービスを格段に向上させる可能性を持つものであるが、今回主題としたシステム技術上の課題の他に、利用者のプライバシー保護、履歴情報のセキュリティ確保等、別次元で重要な課題も存在する。これに関しては例えば文献^{7), 19)}等で暗号技術を利用してユーザーIDを隠し匿名性を保つ方式が提案されている。

当論文では「交通機関の料金徴収」を直接の適用対象としてきたが、この「データ移動方式」の考え方は、一般的な移動Entityを対象として、その行動に応じて関連データの準備/参照が必要な状況、例えば、モバイルコンピューティング環境での各種アプリケーションに適用できる可能性が有と考えている。但し、単純モデルを対象として、このようなデータ移動方式を適用した場合、アクセス距離、処理時間は時間経過と共に増大し最終的に発散する。今回の適用対象のように、システム内でのEntityの存在確率が逐次減少する場合に、処理時間の期待値が収束し得た事には注意が必要と考えている。

交通機関の利用者へのサービス向上を実現するシステムに関して、貴重なご意見や示唆を頂いております、東京大学曾根悟教授、高木亮助手に感謝いたします。

(平成8年11月21日受付、平成9年4月23日再受付)

文献

- 1) 日本国有鉄道規格「JRS76321-5B-15AR5M(自動改札装置)」日本国有鉄道車両局 (1985.10)
- 2) 三木彬生「非接触ICカードによる乗車券システムの基本構想」鉄道総研報告 第4巻 第12号 pp.53-60 (1990)
- 3) 後藤浩一、松原広、佐々木健一、永井昇「非接触ICカードによる自動改札システム」鉄道総研報告 第7巻 第12号 pp.1-8 (1993)
- 4) 曾根悟、井上照久「乗客用非接触ICカードによる鉄道利用システムの改善の可能性」電気学会交通・電気鉄道/道路交通合同研究会 TER91-4、

電気学会 (1991.4)

- 5) K. Goto, H. Matsubara and K. Sasaki 「New Railway Ticket System Using Contactless IC Cards」 Proceedings of IFAC-TS'94 International, Federation of Automatic Control (1994)
- 6) 矢野代二郎、鎌田譲治、駒田牧夫「ノルウェーの有料道路制と料金自動収受システムについて」交通工学 Vol.26 No.4 pp.29-35 交通工学研究会 (1991)
- 7) K. Tetsusaki 「High Security Electronic Toll & Traffic Management and Road Pricing System Using Encrypted Messages and Personal Identity Number」 Vehicle Navigation & Information Systems Conference pp.695-698 (1994.8)
- 8) 田中幹夫「交通機関の自動料金徴収のための分散データ配置方式」情報処理学会論文誌 Vol.37 No.11 pp.2127-2137 (1996)
- 9) 松川公一、竹下孝徳、青柳秀幸「非接触ICカードを使用した自動改札システム」日本信号技報 Vol.18 No.4 pp.1-12 (1994)
- 10) 柴田正雄他「シミュレーションによる年間平均旅行速度の推定」交通工学 Vol.24 No.6 pp.11-20 交通工学研究会 (1989)
- 11) 柴田正雄「旅行時間推定式の提案」交通工学 Vol.29 No.1 pp.35-37 交通工学研究会 (1994)
- 12) 清水浩志郎、木村一裕、吉岡靖弘「道路横断施設における高齢者の歩行特性に関する考察」交通工学 Vol.26 No.2 pp.29-38 交通工学研究会 (1991)
- 13) 西井和夫、古屋秀樹、坂井努「時間軸を考慮したマルコフ連鎖モデルによる観光周遊行動分析」交通工学 Vol.31 No.5 pp.21-30 交通工学研究会 (1996)
- 14) 宮地正和、松本憲二郎、松木孝仁「新幹線ATCの一方」鉄道と電気技術 Vol.6 No.7 pp.51-56 (1995)
- 15) 石塚幸治「新しい情報発信のあり方を提案する：京浜急行のインターラクティブなマルチメディアサービス」鉄道と電気技術 Vol.7 No.1 pp.41-45 (1996)
- 16) M. Fisher and D. Hochbaum 「Database Location in Computer Networks」 JACM, Vol.27, No.4, pp.718-735 (1980)
- 17) A. S. Tanenbaum 「Computer Networks Second Edition」 (邦訳「タンネバウム コンピュータネットワーク」丸善 1992 pp.737-747)
- 18) 吉岡良雄「ネットワークの基礎」pp.84-106 (オーム社 1991)
- 19) D. Chaum 「A New Paradigm for Individuals in the Information Age」, Proceedings of the Symposium on Security and Privacy, IEEE Computer Press (1984)

田中 幹夫 (正員) 1953年7月20日生まれ。1976年3月

東京大学工学部電気工学科卒業。同年日本国有鉄道入社。仙台電気工務局、盛岡鉄道管理局、鹿児島鉄道管理局等にて信号通信、情報関係設備の計画、技術開発、保守等に従事。1987年から(財)鉄道総合技術研究所に勤務し情報システム、ネットワーク等に関する研究開発、設計に従事。現在、輸送システム開発推進部 主幹技師(情報システム担当)。情報処理学会会員。IEEE会員。