修　士　学　位　論　文

題　目

タクシーの運転支援システム構築に関する研究

指 導 教 員

潮 俊光 教 授

報 告 者

広本 将基

平成 29 年 2 月 1 日

大阪大学基礎工学研究科
システム創成専攻社会システム数理領域
博士前期課程

概要

流しのタクシーが効率よく乗客を乗せるための運転支援システムの開発は，運転手の待遇改善につながる重要な課題である．本報告では，過去の乗車データと現在の流しのタクシーの分布から最適な進行方向を決定する方法を提案する．対象領域をいくつかの分割領域に分割し，各部分領域での需要予測をもとに部分領域ごとの流しのタクシーの変化を混合論理動的システムを使ってモデル化する．そして，モデル予測制御を応用して，各部分領域でのタクシーの最適移動分布を求める．実際に実装したアプリケーションを示す．

目次

第 1 章

緒論

1.1　研究背景と目的

現在のタクシー業界は，高年齢化，低賃金，劣悪な労働環境という問題を抱えている．流しのタクシーが空車で走行する距離を減らすことで，賃金の向上が達成出来るだけでなく，CO2 排出量の削減にもつながる．現状では，運転手の経験と勘から流し走行をしており，経験の浅い運転手への流し運転の支援は重要な課題である．最近では，すべてのタクシーに GPS が装着されており，乗客を乗せた位置，一定走行時間・距離ごとの位置情報が無線でリアルタイムに会社へ送信されて，管理できるようになった．また，名古屋ではタクシーの自動運転による実証実験が行われている．こうした状況では，ビッグデータを活用して，顧客の発生予測をして，走行方向の支援を行うシステムを考えることは重要である．

一方，インテリジェント交通システムでは，自動車の走行データをオンラインでセンシングできるプローブカーを用いた交通状況のモニタリング法が開発されてきた [1]．タクシーはプローブカートして重要な枠割を果たしているだけでなく，走行履歴から運転手の特性を推定することも可能となってきている [2]．さらに，携帯電話の位置情報や乗車履歴データから乗客の予測技術も急速に発達してきた [3,4].

タクシーの運行状況のモニタリング，乗客の予測技術の発展に伴い，最近，タクシーの最適配車の研究が注目されている．Seow 等は，乗客からの呼びに対して乗客の待ち時間が最小となるようなタクシーの配車法を提案している [5]．Qu 等は，空車で走行する距離の総和が最小になるような走行方法を提案している [6]．Miao 等は，モデル予測制御を用いた最適配車法を提案し，サンフランシスコの市街地を対象に実証実験を行っている [7–9].

本論文では，まず，タクシー乗務員の運行をサポートするシステムを提案する．そして，タクシーの移動モデルを混合論理動的システムでモデル化し，合理的な運行を行うための制御器

を提案する．提案モデルでは，個々のタクシーに対して個別の制御入力を行うのではなく，部分領域に分けられた中にいるタクシーに対しては同一の制御入力を行う．その点が文献[7–9]とは異なる点である．

1.2 論文の構成

本報告の構成について述べる．第 2 章では，私達が利用できるデータと提案するシステムについて述べる．第 3 章では， タクシーが営業を行う領域をいくつかの部分領域（セル）に分割し，セル間でのタクシーの移動モデルを混合論理動的システムでモデル化する．そして，そのモデルを用いたモデル予測制御法を提案しアプリケーションへの実装結果を示す．最後に，第 4 章では結論と今後の課題について述べる．

第 2 章

システム構成

2.1　緒言

本章では，我々が提案するシステムについて説明する．

2.2　結言

あ

第 3 章

システム制御

3.1 緒言

本章では，タクシーが営業を行う領域をいくつかの部分領域（以下セルと呼ぶ）に分割し，セル間でのタクシーの移動モデルを混合論理動的システムでモデル化する．そして，そのモデルを用いたモデル予測制御法を提案しアプリケーションへの実装結果を示す．

3.2 タクシー移動モデル

対象領域を N 個のセルに分割する．時刻 k のときのセル i（$i = 1, 2, \ldots, N$）での空車数を $x_i(k)$ とおき，対象領域内のタクシーの実車数を $r(k)$ とおく．時刻 k でのセル i で空車が実車に変化するタクシー数を $s_i(k)$ とおく．すなわち，時間区間 $[k,\ k+1)$ の間に，セル i で空車から実車になるタクシー数が $s_i(k)$ である．時刻 k でのセル i で実車が空車に変化するタクシー数を $e_i(k)$ とおく．さらに入力として，時刻 k でのセル i からセル j へ移動する空車数を $u_{i,j}(k)$ とおく．つまり，$x_i(k)$ と $r(k)$ が時刻 k におけるシステムの状態量を表し，$s_i(k)$ と $e_i(k)$ と $u_{i,j}(k)$ が時刻 $k+1$ の状態量を記述するための変動量を表している．このとき，各セルの空車数のダイナミクスは

$$x_i(k+1) = x_i(k) - s_i(k) + e_i(k) + \sum_{j=1}^{N} \Big(u_{j,i}(k) - u_{i,j}(k) \Big) \tag{3.1}$$

となる．また，実車数のダイナミクスは

$$r(k+1) = r(k) + \sum_{i=1}^{N} \Big(s_i(k) - e_i(k) \Big) \tag{3.2}$$

となる．

ここで，式 (3.1)，(3.2) から

$$
\begin{aligned}
& r(k+1)+\sum_{i=1}^{N} x_i(k+1) \\
&= \left(r(k)+\sum_{i=1}^{N}\Bigl(s_i(k)-e_i(k)\Bigr)\right)+\sum_{i=1}^{N}\left(x_i(k)-s_i(k)+e_i(k)+\sum_{j=1}^{N}\Bigl(u_{j,i}(k)-u_{i,j}(k)\Bigr)\right) \\
&= r(k)+\sum_{i=1}^{N} x_i(k)+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\Bigl(u_{j,i}(k)-u_{i,j}(k)\Bigr) \\
&= r(k)+\sum_{i=1}^{N} x_i(k)+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\Bigl(u_{i,j}(k)-u_{i,j}(k)\Bigr) \\
&= r(k)+\sum_{i=1}^{N} x_i(k)
\end{aligned}
$$

が示せる．すなわち，タクシーの総数は変化しない．タクシーの総数を L とおくと

$$
r(k) = L - \sum_{i=1}^{N} x_i(k) \tag{3.3}
$$

の関係が成り立つ．

実車に変化するタクシー数 $s_i(k)$ については以下のように考える．まず，時刻 k での制御入力に従って移動してから実車になりうるとする．このとき，時間区間 $[k,\ k+1)$ の間で実車から空車になるタクシーもすぐに実車になりうるので，時間区間 $[k,\ k+1)$ の間にセル i にいる実車になりうるタクシーの台数は $e_i(k)+\sum_{i=1}^{N} u_{j,i}(k)$ であり，実車になる台数はこの数を超えることはないので，

$$
h_i(k) = e_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) - \alpha_i d_i(k) \tag{3.4}
$$

とおくと，

$$
s_i(k) = \begin{cases} \alpha_i d_i(k) & \text{if } h_i(k) \geq 0 \\ h_i(k) + \alpha_i d_i(k) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.5}
$$

と表される．ただし，α_i はセル i においてタクシーに乗車できる乗客の割合である．つまり，領域内に乗客と空車のタクシーがいる状況でも，乗客を見つけることが出来ず，実車に変化で

きない場合を考慮したモデルになっている．この定数 α_i は過去のデータから推定することができる．$d_i(k)$ は時間区間 $[k,\ k+1)$ の間にセル i で乗車できなかった客数であり，

$$d_i(k+1) = d_i(k) - s_i(k) + p_i(k) \tag{3.6}$$

と表される．ただし，$p_i(k)$ は時間区間 $[k,\ k+1)$ の間で発生する新たな乗客数で，過去の乗車データから予測される．

空車に変化するタクシー数 $e_i(k)$ は

$$e_i(k) = \beta_i r(k) \tag{3.7}$$

とする．ただし，β_i は実車全体の中でセル i で空車になる割合である．この定数 β_i は過去のデータから推定することができる．

ここで，入力に関する制約として，各セル i について

$$x_i(k) = \sum_{j=1}^{N} u_{i,j}(k) \tag{3.8}$$

を与える．このことは，各セルにおいて時刻 k での空車をどこに移動させるかを決定し，それに沿って，空車が移動すると仮定していることになる．空車は制御入力に従って移動してから実車に変化できると仮定する．このように移動する空車数を定めると，式 (3.1)，(3.8) から，各空車数のダイナミクスは

$$x_i(k+1) = e_i(k) - s_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) \tag{3.9}$$

となる．さらに，自動車の移動速度の制約から必ず 0 になる $u_{i,j}(k)$ がある．例えば，時間単位で隣接するセルにしか移動できない場合には，セル i に隣接しないセル ℓ については

$$u_{i,\ell}(k) = 0 \qquad \forall k \tag{3.10}$$

とおく．

以上より，タクシー移動モデルは以下のようになる．

$$x_i(k+1) = e_i(k) - s_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) \tag{3.11}$$

$$r(k) = L - \sum_{i=1}^{N} x_i(k) \tag{3.12}$$

$$e_i(k) = \beta_i r(k) \tag{3.13}$$

$$s_i(k) = \begin{cases} \alpha_i d_i(k) & \text{if } h_i(k) \geq 0 \\ h_i(k) + \alpha_i d_i(k) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.14}$$

$$d_i(k+1) = d_i(k) - s_i(k) + p_i(k) \tag{3.15}$$

$$h_i(k) = e_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) - \alpha_i d_i(k) \tag{3.16}$$

$$x_i(k) = \sum_{j=1}^{N} u_{i,j}(k) \tag{3.17}$$

$$u_{i,\ell}(k) = 0 \qquad \text{if セル } i \text{ からセル } j \text{ に移動不可能} \tag{3.18}$$

ここで，式 (3.14) が条件付きの式になっている．この式は以下のように変形すれは，システム全体は混合論理動的システムになる [10,11]．

まず，以下の論理変数 $\delta_i(k) \in \{0,\ 1\}$ を導入する．

$$\delta_i(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } h_i(k) \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.19}$$

と定義する．このとき，制約条件式 (3.19) は次の不等式制約条件になる [10]．

$$h_i^{\inf}(k)(1-\delta_i(k)) \leq h_i(k) \leq h_i^{\sup}(k)\delta_i(k) + (\delta_i(k)-1)\epsilon_i(k) \tag{3.20}$$

ただし，$h_i^{\inf}(k)$，$h_i^{\sup}(k) \in \mathbb{R}$ は $h_i(k)$ の引数が取りうる任意の値に対して $h_i^{\inf}(k) \leq h_i(k) \leq h_i^{\sup}(k)$ であり，$\epsilon_i(k) \in \mathbb{R}_{++}$ は十分に小さな正の実数である．実際に，式 (3.20) は $\delta_i(k) = 1$ のときは

$$0 \leq h_i(k) \leq h_i^{\sup}(k)$$

となり，$\delta_i(k) = 0$ のときは

$$h_i^{\inf}(k) \leq h_i(k) \leq -\epsilon_i(k)\ (< 0)$$

となるので，$\epsilon_i(k)$ の値を十分に小さくすれば，任意の精度で制約条件式を不等式制約式に変換可能であることが確認できる．また，初期時刻を $k = t$ とおくと，式 (3.15) から $k > t$ の $h_i(k)$ について以下の不等式が成り立つ．

$$
\begin{aligned}
h_i(k) &= e_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) - \alpha_i d_i(k) \\
&\geq -\alpha_i d_i(k) \\
&= -\alpha_i \Big(d_i(k-1) - s_i(k-1) + p_i(k-1) \Big) \\
&\geq -\alpha_i \Big(d_i(k-1) + p_i(k-1) \Big) \\
&\geq -\alpha_i \Big(d_i(k-2) + p_i(k-2) + p_i(k-1) \Big) \\
&\geq \cdots \\
&\geq -\alpha_i \Big(d_i(t) + \sum_{c=t}^{k-1} p_i(c) \Big) \\
h_i(k) &\leq e_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) \\
&\leq L
\end{aligned}
$$

したがって，$h_i(k)$ の上界と下界を以下のように定める．

$$
h_i^{\sup}(k) = L \tag{3.21}
$$

$$
h_i^{\inf}(k) = -\alpha_i \Big(d_i(t) + \sum_{c=t}^{k-1} p_i(c) \Big) \tag{3.22}
$$

論理変数 $\delta_i(k)$ を用いることで式 (3.14) は以下のように変形できる．

$$
\begin{aligned}
s_i(k) &= \delta_i(k)\alpha_i d_i(k) + (1 - \delta_i(k))(h_i(k) + \alpha_i d_i(k)) \\
&= -\delta_i(k) h_i(k) + h_i(k) + \alpha_i d_i(k)
\end{aligned} \tag{3.23}
$$

ここで，

$$
z_i(k) = \delta_i(k) h_i(k) \tag{3.24}
$$

とおくと，式 (3.23) は

$$
s_i(k) = -z_i(k) + h_i(k) + \alpha_i d_i(k) \tag{3.25}
$$

となる．式 (3.24) は次の不等式制約条件になる [11]．

$$h_i^{\inf}(k)\delta_i(k) \le z_i(k) \le h_i^{\sup}(k)\delta_i(k) \tag{3.26}$$
$$h_i(k) - h_i^{\sup}(k)(1-\delta_i(k)) \le z_i(k) \le h_i(k) - h_i^{\inf}(k)(1-\delta_i(k)) \tag{3.27}$$

以上より，初期時刻を $k = t$ とおくと，タクシー移動モデルは以下の混合論理動的システムで記述される．

$$x_i(k+1) = e_i(k) - s_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) \tag{3.28}$$
$$r(k) = L - \sum_{i=1}^{N} x_i(k) \tag{3.29}$$
$$e_i(k) = \beta_i r(k) \tag{3.30}$$
$$h_i^{\inf}(k)(1-\delta_i(k)) \le h_i(k) \le h_i^{\sup}(k)\delta_i(k) + (\delta_i(k)-1)\epsilon_i(k) \tag{3.31}$$
$$s_i(k) = -z_i(k) + h_i(k) + \alpha_i d_i(k) \tag{3.32}$$
$$h_i^{\inf}(k)\delta_i(k) \le z_i(k) \le h_i^{\sup}(k)\delta_i(k) \tag{3.33}$$
$$h_i(k) - h_i^{\sup}(k)(1-\delta_i(k)) \le z_i(k) \le h_i(k) - h_i^{\inf}(k)(1-\delta_i(k)) \tag{3.34}$$
$$h_i^{\sup}(k) = L \tag{3.35}$$
$$h_i^{\inf}(k) = -\alpha_i\left(d_i(t) + \sum_{c=t}^{k-1} p_i(c)\right) \tag{3.36}$$
$$d_i(k+1) = d_i(k) - s_i(k) + p_i(k) \tag{3.37}$$
$$h_i(k) = e_i(k) + \sum_{j=1}^{N} u_{j,i}(k) - \alpha_i d_i(k) \tag{3.38}$$
$$x_i(k) = \sum_{j=1}^{N} u_{i,j}(k) \tag{3.39}$$
$$u_{i,\ell}(k) = 0 \qquad \text{if セル } i \text{ からセル } j \text{ に移動不可能} \tag{3.40}$$

3.3 モデル予測制御

3.3.1 定式化

節 3.2 で導出したタクシーモデルをもとに，時刻 t において以下の有限区間最適制御問題を考える．ただし，T は正の整数である．

3.3.2　実装結果

3.4　結言

あ

第 4 章

結論

あ

謝辞

本研究を行うにあたり，懇切丁寧なご指導，ご教授を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻 潮 俊光 教授に心より感謝の意を表します．

また，さまざまな面において励ましや助言をいただきました潮研究室の皆様に深く感謝いたします．

参考文献

[1] 山本俊行, K. Liu, 森川高行, “ タクシー配車データのプローブデータとしての活用に関する基礎的分析, ” 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 4, pp. 863-870, 2006.

[2] 金月寛彰, 服部宏充, “ プローブカーデータを利用したタクシードライバーの個人特性の分析とモデル化, ” 第 29 回人工知能学会全国大会, 演題番号 1N4-4, 2015.

[3] K. Zhao, S. Tarkoma, S. Liu, and H. Vo, “ Urban HumaMobility Data Mining: An Overview, ” in Proc. 2016 IEEE International Conference on Big Data, 2016.

[4] K. Zhao, D. Khryashchev, J. Freire, C. Silva, and H. Vo, “ Predicting Taxi Demand at High Spatial Resolution: Approaching the Limit of Predictability, ” in Proc. 2016 IEEE International Conference on Big Data, 2016.

[5] K. T. Seow, N. H. Dang, and D.-H. Lee, “ A Collaborativ Multiagent Taxi-Dispatch System, ” IEEE Trans. Automation Science and Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 607-616 ,2010.

[6] M. Qu, H. Zhu, J. Liu, G. Liu, and H. Xiong, “ A CostEffective Recommender System for Taxi Drivers, ” in Proc. 20th International Conference on KDD, pp. 45-54, 2014.

[7] F. Miao, S. Lin, S. Munir, J. A. Stankovic, H. Huang, D. Zhang, T. He, G. J. Pappas, “ Dispatch with Real-Time Sensing Data in Metropolitan Areas - A Receding Horizon Control Approach, ” in Proc. International Conference on Cyber-Physical Systems, pp. 100-109, 2015.

[8] F. Miao, S. Han S. Lin, and G. J. Pappas, “ Robust Tax Dispatch under Model Uncertainties, ” in Proc. 54th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2816-2821, 2015.

[9] F. MIao, S. Han, S. Lin, Q. Wang, J. Stankovic, A. Hendawi, D. Zhangm T. He, and G. Pappas, “ Data-Driven Robust Taxi Dispatch under Demand Uncertainties, ” arXiv:1603.06263, 2016.

[10] A. Bemporad and M. Morari, “ Control of Systems Integratin Logic, Dynamics, and Constraints, ” Automatica, Vol.35, No. 3, pp. 407-427, 1999.

[11] 井村順一，東俊一，増淵泉，ハイブリッドシステムの制御，コロナ社，2014.

付録 A

混合論理動的システム

付録 B

モデル予測制御

研究業績

国際会議発表

- A

国内会議発表

- A