

フィードバック制御による客到着率の取得

05001269 法政大学 坂本 憲昭 SAKAMOTO Noriaki

1. はじめに

待ち行列を再現したい場合、シミュレーションは多くの研究で使われている有効な手法である。研究の際に待ち時間を再現したい場合、客の到着率とサービス率を設定して待ち時間を得るが、ともに確率による生成、現実の変動があり、調整は以下に示すPDCAサイクルのような作業であろう。

- Step 1 客到着率とサービス率の初期値設定
Step 2 シミュレーション実行
Step 3 待ち時間の履歴を確認
Step 4 希望する結果？

Yes なら終了

No なら客到着率を調整して Step 2 に戻る

著者の提案手法[1][2]は、希望する待ち時間に追従する客の到着分布を、待ち行列システムのフィードバック制御から求める。システムのブロック線図を図1に示す。実システム（制御対象）をシミュレーションで再現するために必要なデータはサービス率のみであり、そのデータに不確かさや変動を許容する。入力が待ち行列、出力が待ち時間（状態量）であり、制御ロジックは待ち時間が目標値と一致するように到着客の人数を調整する（操作量）。この手法は[1]にて提案し、制御ロジックはサービス率が不確かさを有することからロバストな制御が必要であり、比較検討により Fuzzy 制御の適用を提案した[2]。本稿は改めて安定条件から導く Fuzzy 制御を示す。表1に用いる記号を示し、シミュレーションおよび制御ロジックは線形離散システムである。

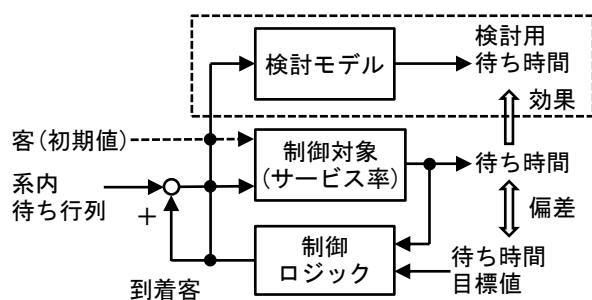


図1 制御システム

2. 制御ロジックの構築

待ち行列システムを1水槽システム(図2)に置き換えて、待ち時間 W を目標値 S_v に追従させる操作量(客到着率 λ)を導く。水(客)は水槽上部から流入し(λ に相当)、水槽下部から流出する(μ に相当)。入出水量の関係次第で水槽内に水がたまり、その高さを L (待ち行列)とすると、式(1)(2)で表現される(排出抵抗は無視でき、線形システムである)。

表1 各状態をあらわす記号

記号	単位	内容
λ	[人/min]	客到着率 (操作量)
μ	[人/min]	サービス率
W	[min]	待ち時間 (状態量)
L	[人]	待ち行列
k	[min]	(単位時間の刻みステップ)
S_v	[min]	(待ち時間の目標値)
e	[min]	(偏差 = $S_v - W$)

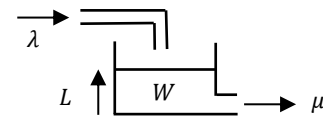


図2 1水槽による待ち行列システムの表現

$$L_{k+1} = \lambda_k + L_k - \mu_k \quad (1)$$

$$W_k = (\lambda_k + L_k) / \mu_k \quad (2)$$

式(1)(2)より、

$$W_{k+1} = (\mu_k / \mu_{k+1}) W_k + (\lambda_{k+1} / \mu_{k+1}) - (\mu_k / \mu_{k+1}) \quad (3)$$

次の時刻 $k+1$ のサービス率は不定であるから β を導入し、

$$\mu_{k+1} \triangleq (1/\beta)\mu_k \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入し、

$$W_{k+1} = \beta(W_k - 1) + (\beta/\mu_k)\lambda_{k+1} \quad (5)$$

次に、目標値と待ち時間の偏差 e を定義する。

$$e_k \triangleq S_v - W_k \quad (6)$$

$$e_{k+1} = S_v - W_{k+1} \quad (7)$$

λ_{k+1} が操作量(次の時刻までの到着客)であり $e_k = 0$ ならば $\lambda_{k+1} = \lambda_k$ として、 $e_k \neq 0$ 時の安定条件を考えて以下の①②を満足する λ_{k+1} を導出する。

$$\textcircled{1} e_k > 0 \text{ の時, } e_k > e_{k+1} \geq 0$$

$$\textcircled{2} e_k < 0 \text{ の時, } e_k < e_{k+1} \leq 0$$

①を考えると、

$$e_{k+1} - e_k = (1 - W_k)\beta - (\beta/\mu_k)\lambda_{k+1} + W_k < 0 \quad (8)$$

より、

$$\lambda_{k+1} > (W_k/\beta - W_k + 1)\mu_k \quad (9)$$

であればよい。 $e_{k+1} \geq 0$ については、式(5),(7)から

$$e_{k+1} = S_v - \beta(W_k - 1) - (\beta/\mu_k)\lambda_{k+1} \geq 0 \quad (10)$$

となる。まとめると、

$$(W_k/\beta - W_k + 1)\mu_k < \lambda_{k+1} \leq (S_v/\beta - W_k + 1)\mu_k \quad (11)$$

となり、式(11)は $\beta > 0$ について成立する。 $e_k > 0$ の目標値より待ち時間が短い状況であるから、偏差を減らすためには待ち時間を増やすために β を1より大きくする、または λ_{k+1} を増やす(② $e_k < 0$ のときはその逆)。前者は運営側による内部要因であり検討または考察対象、後者は観測したい外部要因である。

[2]では Fuzzy ルールの後件部(操作量の上限値)を試行錯誤により定めたが、操作量の上限は $e_k > 0$ から $e = 0$ を行き過ぎて $e_{k+1} < 0$ にならない条件であり、式(11)の右边である。その最大値は、

$$(S_v/\beta_{min} - W_k + 1)\mu_{max} \quad (12)$$

目的はシミュレーションのために λ を把握してから、 β の変化または変更による待ち行列の影響を知ることであり、 β, μ の不確かさはロバスト性を有する Fuzzy 制御により補償する。式(12)において $\beta_{min} = 1$ として、さらに β の不確かさと不定な μ_{max} を新たに導入する調整係数($\gamma > 1$)で吸収して、

$$(e_k + 1)\gamma \quad (13)$$

を Fuzzy 制御による出力最大値 (λ_{k+1}^{max}) とする。

同様に②を考えると $e_{k+1} - e_k > 0$ については、

$$\lambda_{k+1} < (W_k/\beta - W_k + 1)\mu_k \quad (14)$$

$e_{k+1} \leq 0$ については、

$$\lambda_{k+1} \geq (S_v/\beta - W_k + 1)\mu_k \quad (15)$$

であればよい。まとめると、

$$(S_v/\beta - W_k + 1)\mu_k \leq \lambda_{k+1} < (W_k/\beta - W_k + 1)\mu_k \quad (16)$$

$e_k < 0$ のときであり到着客を減らす操作量となる。①と同様にその下限は式(16)の左辺であるが、 λ_{k+1} は β の値によらずマイナスの値をとらないため、その最小値は $\lambda_{k+1}^{min} = 0$ である。

本稿の結果による Fuzzy ルールの後件部(操作量の上下限值)を図3に示す。記号を含め詳細は[2]を参照されたい。

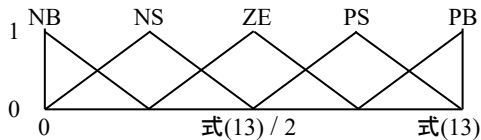


図3 Fuzzy ルール後件部(操作量の上下限值)

3. シミュレーション事例

[2]では郵便局に適用した。同適用結果を図4に示す(以下、横軸はすべて経過時間[min])。本稿と[2]の違いは安定条件に基づく図3の設定であり、過剰な操作量を抑えることで振動を低減している。次に、著者が取得した観測データ[3][4]があるディズニーリゾートテーマパーク例に適用する。COVID-19によりレストランの料理提供窓口の減少、アトラクシ

ョンの新しい入場方法(スタンバイパス)や消毒のための一時停止があり、状況によっては従来以上の待ち行列が発生している。混雑時はキャスト増員により待ち行列を緩和できることはあきらかであるが、現在の状況では人員確保も容易ではない。そこで、一時停止の影響や必要最低限なサービス率向上の指針を示せることが提案手法の有用性である。結果の一部を図5,6に示す。

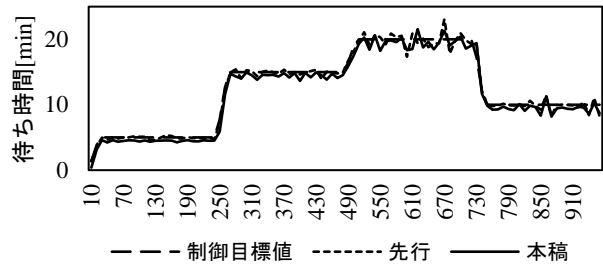


図4 先行研究との比較結果

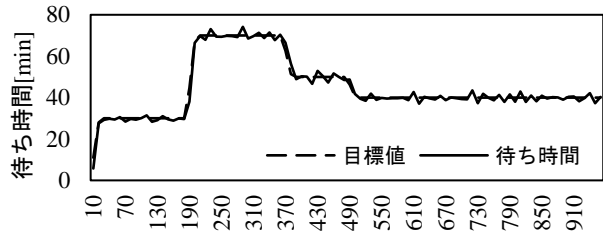


図5 目標値追従結果

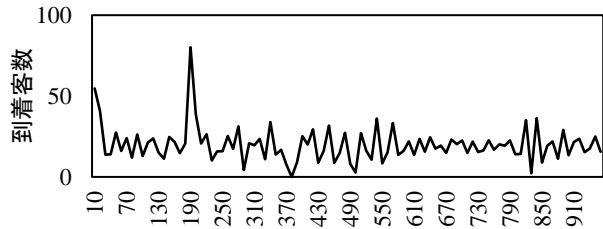


図6 図5の到着客数(10[min]ごとの平均値)

4. おわりに

提案手法の有用性をA~Cにまとめる。A 目標値となる希望する待ち時間を時系列変化で与えられる、B 目標値に追従する客の到着分布を偏差のデータのみを用いて見積もることができる、C 制御結果の前述Bの時系列データを利用して、サービス率の変化や調整による影響または効果を予測できる。

文献

- [1] 坂本, 東京湾岸豊洲地域の郵便局難民について, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 2021年春季研究発表会
- [2] 坂本, フィードバック制御による待ち行列のシミュレーション, 法政大学経済志林, Vol.89, No.1, pp.33-52, 2021
- [3] N. Sakamoto, Examination of the congestion situation of a restaurant in a theme park using feedback control, Journal of Hospitality and Tourism Technology, Emerald Publishing Limited, Volume 10, Issue 1, 2019
- [4] N. Sakamoto, Reducing nonpriority queues at theme parks, Journal of Hospitality and Tourism Insights, Emerald Publishing Limited, Volume 4, Issue 4, 2020