

公立図書館の図書返却ボックスの配置に関する研究

—埼玉県新座市の図書館を例として—

永久保 彩花 (沼田 一道 教授, 松浦 隆文 助教)

1. はじめに

図書館は、文字や図表で記載された資料（以下、図書）を収集し、それを提供することで人々の学術研究や文化的生活を支えている。古く紀元前7世紀には粘土板の図書館があったとされ、人類はその頃から図書の収集・保存を行ってきた[2]。図書館の図書は、図書館内で閲覧するか、貸出し手続きを行い借りることで閲覧する。借りた図書はいつまでも所持できるのではなく、返却期日までに図書館へ返さなければならない。図書を借りるときには図書館が遠かったとしても足を運ぶものだが、読み終わると図書館へ行くことが面倒になり返却が遅くなる。その結果、次にその図書を読みたいと思っている人が返却期日を過ぎて借りられないという状況が発生する。この問題を解決する1つの方法として、利用者の自宅の近くに返却ボックスを設置することが考えられる。しかし、返却ボックスを導入すると、図書館の職員は返却された図書を回収する業務をおこなわなければならない。返却ボックスを継続的に運用するためには、回収のコストはできるだけ小さいことが望ましい。

本研究では、利用者の自宅から返却ボックスまでの距離をできるだけ短く抑え、かつ返却ボックスを最短で巡回した時の巡回経路長を最小化するようにボックスを配置する問題を考える。この問題は巡回被覆問題[1]と似ているが、巡回訪問の対象（ボックス）と被覆対象（利用者）が異なる点で、文献[1]の問題とは異なる。この問題を数理計画問題として定式化し、その解法を提案する。

2. 本研究で取り扱う問題

2.1 前提とする図書館のシステム

市町村等が運営している公立図書館を考える。当該市町村の区域内には、(一般に複数ある)図書館の場所を表す「所在点」、利用者である住民が住んでいる場所を表す多数の「居住点」、返却ボックスの設置可能な場所を表す複数の「設置候補点」が存在するものとする。利用者は、任意の図書館で図書を借り、最寄りの図書館または返却ボックスへ図書を返却する。ただし、ボックスは十分な大きさを持ち、複数の利用者で共用することができるものとする。

返却図書の回収は1台の回収車が1巡回で行うものとする。回収車は巡回の出発点となる図書館（以下、中央図書館）を出発後、全返却ボックスをちょうど1度ずつ訪問し（中央図書館以外の図書館は訪問しない）、中央図書館へ戻ってくる。

2.2 返却距離と巡回経路

利用者の居住点から最も近い図書館またはボックスが設置された設置候補点までの距離を返却距離と呼ぶものとする。

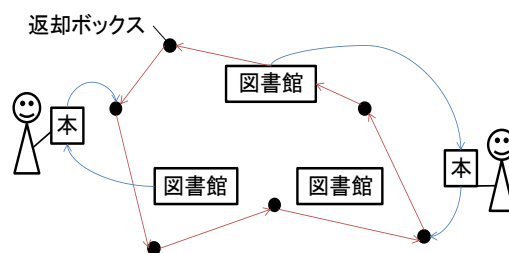


図1 図書返却ボックスの利用例

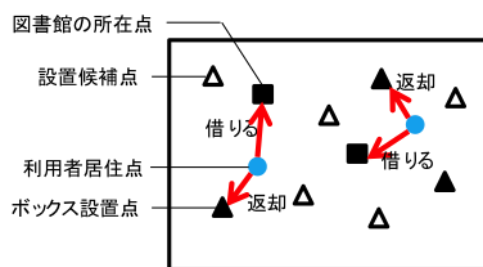


図2 図書館システムの説明

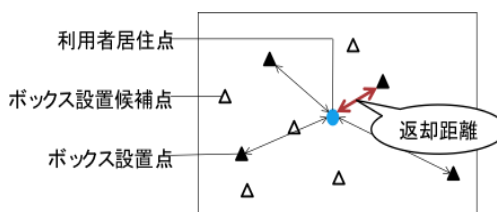


図3 返却距離の説明

る(図 3). 全利用者の返却距離が制限値 α (パラメタ)以下となるようにボックスを設置することで、返却のしやすさを確保する. 全利用者の返却距離が制限距離 α 以下となるような返却ボックスの設置の仕方は複数ある. 本研究では、制限値を満たすように設置された返却ボックス (と中央図書館) を最短で巡回したときの巡回経路長が最小となるようなボックスの設置場所を求めることが目的である.

3. 定式化

図書館と図書返却ボックスの設置候補点を $V = \{v_0, v_1, \dots, v_l, v_{l+1}, \dots, v_{l+m}\}$ とする. 中央図書館を v_0 とし、図書館の所在点の集合を $V_{lib} = \{v_0\} \cup \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$ とする. 図書返却ボックスの設置候補点集合を $V_{box} = \{v_l, v_{l+1}, \dots, v_{l+m}\}$ とする. 中央図書館とボックスの設置候補点の集合を $V' = \{v_0\} \cup V_{box}$ とする. そして、利用者の居住点集合を $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ とする. 点 v_i と点 v_j の距離を d_{ij} とする. σ_{jk} は居住点 w_k と図書の返却場所である設置候補点または図書館の所在点 $v_j \in V$ の距離が制限距離 α 以下のとき 1, それ以外のとき 0 をとる定数とする.

次に、決定変数の定義を行う. x_{ij} は点 v_i から点 v_j へ回収車が直接移動する場合は 1, 移動しない場合は 0 をとる 0-1 変数である. y_j は設置候補点 v_j に返却ボックスを設置する場合は 1, 設置しない場合は 0 をとる 0-1 変数である.

以上の記号を用いると、本研究で扱うボックス配置/巡回問題は以下のように定式化される.

$$\begin{array}{ll}
 \min \sum_{i,j \in V'} d_{ij} x_{ij} & (1) \\
 \text{s.t. } \sum_{j \in V} \sigma_{jk} y_j \geq 1 \quad (\forall w_k \in W) & (2) \\
 \sum_{h \in V'} x_{hi} = y_i \quad (\forall v_i \in V') & (3) \\
 \sum_{j \in V'} x_{ij} = y_i \quad (\forall v_i \in V') & (4)
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{ll}
 y_j = 1 \quad (\forall v_j \in V_{lib}) & (5) \\
 x_{ij} \in \{0,1\} \quad (\forall v_i, v_j \in V') & (6) \\
 y_j \in \{0,1\} \quad (\forall v_j \in V) & (7) \\
 \text{部分巡回路除去制約 (省略)} &
 \end{array}
 \right.$$

(1)式は、中央図書館から出発した回収車の巡回経路長を最小化するという目的関数である.(2)式は、全利用者が少なくとも 1 つの返却ボックス又は図書館を返却距離 α 以内で利用可能であることを表す.(3),(4)式は、設置候補点 v_i にボックス設置するとき、設置候補点 v_i は 1 つの設置候補点から訪問され、1 つの候補点へ向かうということを表す.(5)式は、図書館の所在点では必ず図書の返却が可能であるということを表している.(6),(7)式は、変数 x_{ij} , y_j が 0-1 変数であることを表す.

4. 提案解法

本研究で扱う問題では、利用者居住点やボックスの設置候補点の数が多くなると厳密解を求めることが困難である. そこで、問題の規模が大きくなったときにも解を得られるような発見的解法を構築する.

提案する解法は、訪問点数に注目した解法である. まず、全利用者の返却距離が制限値 α を満たすのに必要な設置ボックスの最小数を求める. この値から始めて設置個数を (1 ずつ増やしながら) 固定して、最短巡回経路長が最小となるボックス配置を求める. 設置点数を固定することで探索し易くする.

4.1 初期解の構築

すべての利用者が返却距離の制限値 α 以下で返却可能な最小のボックス設置個数 k_0 とボックス設置点集合 (C_{k_0}) を汎用ソルバで求め、 C_{k_0} に対する最短巡回経路長 $len(C_{k_0})$ を計算する. $len(C_{k_0})$ は、 C_{k_0} の

点を最近傍法でつなぎ、2-opt法で改善して求める(図4(a)).

4.2 解の改善法

解の改善法を説明するために用いる記号を定義する. 探索中のボックス設置点数を k , ボックス設置点数 k のときのボックス設置点集合を C_k とする. 設置点集合 C_k に対する最短巡回経路長を $len(C_k)$, 設置点数 k における最小の最短巡回経路長を l_k とする.

Step 0: $C_k \leftarrow C_{k_0}$, $k \leftarrow k_0$ とする.

Step 1: $len(C_k)$ を計算し, $l_k \leftarrow len(C_k)$ とする.

Step 2: すべての利用者が返却距離 α 以内で返却可能となるように, ボックス設置点 u と未設置点 v を入れ替える $C' = C_k - \{u\} + \{v\}$ (図4(b)).

Step 3: $len(C')$ を計算し, $l_k > len(C')$ ならば $l_k \leftarrow len(C')$, $C_k \leftarrow C'$ とする.

Step 4: l_k が更新できなくなるまで, step2~3を繰り返す.

Step 5: $k \leftarrow k + 1$ として, 巡回経路長の増加が最小となるようなボックス未設置点 v を巡回路の枝間に挿入する $C_{k+1} \leftarrow C_k + \{v\}$ (図4(c)).

Step 1~5を繰り返し, 3回連続して k の値を1増やしても l_k の更新がなければ終了する. 最小の l_k をとるときのボックス設置点と巡回経路(長)を解とする.

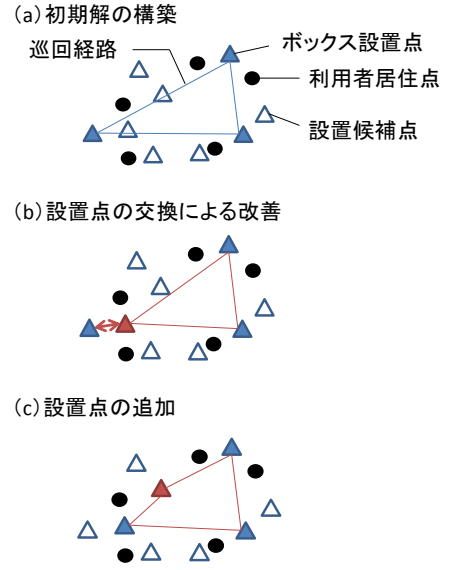


図4 提案解法の説明

5. 数値実験

埼玉県新座市をもとに問題例を作成し, 提案解法で得られる解と厳密解を比較する. なお, 提案解法は Boland 社の Delphi6.0 で実装し, 厳密解は 3.2 節で示した定式化をもとに汎用 MIP ソルバ gurobi[4]を用いて求める.

5.1 設定

埼玉県新座市をもとに問題例を作成する(図5). 東西7km×南北8kmの新座市の長径を10, 15, 20等分した800m, 533m, 400m間隔の格子で新座市をマス目状に分割する. マスの中心点を利用者の居住点, 辺の交点をボックスの設置候補点および図書館の所在点とする. ただし利用者の居住点は, 人口密度を考慮しないものとする.

返却距離の制限値 α を様々な値に設定し, 数値実験を行った. α は図6に示すように, 利用者居住点から(i)最も近い設置候補点, (ii)2番目に近い設置候補点, (iii)3



図5 埼玉県新座市の問題例

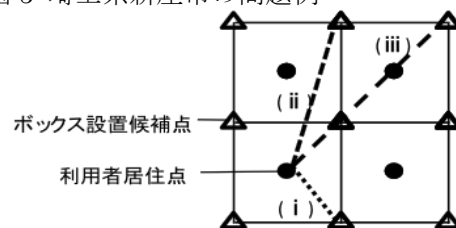


図6 返却距離の制限値 α の説明

番目に近い設置候補点までの距離の3段階で設定する。

5.2 結果と考察

表1に提案解法で得られた解と厳密解を示す。長径を15, 20等分に分割したときには、厳密解を求める際の計算時間が長く、途中で計算を打ち切ったため厳密解が得られなかった。

表1 提案解法で得られた解と厳密解の結果

長径の分割数	返却距離の制限値 α (m)	巡回経路長(m)		ボックス設置点数	
		提案解法	厳密解	提案解法	厳密解
10 [居住点数:39 設置候補点数:59 格子の間隔:800m]	(i) 566	17280	16160	14	12
	(ii) 1265	10160	8720	5	5
	(iii) 1697	9280	7200	4	4
15 [居住点数:87 設置候補点数:117 格子の間隔:533m]	(i) 377	27183	-	27	-
	(ii) 843	16949	-	15	-
	(iii) 1131	15191	-	9	-
20 [居住点数:152 設置候補点数:198 格子の間隔:400m]	(i) 283	36000	-	45	-
	(ii) 632	20600	-	22	-
	(iii) 849	18320	-	17	-

まず、提案解法で得られた近似解と厳密解を比較する。返却距離の制限値 α の値が最も小さいとき、近似解ではボックスの設置点数が厳密解より多いものの、巡回経路長の差は10%以下である。一方、 α の値を大きくすると、ボックスの設置点数は厳密解と一致しているが、巡回経路長の差が大きくなり、最大で29%長くなってしまふ。これは、返却距離の制限値が大きくなると、設置点数が少なくなり、その結果、解の更新が十分に行えないためであると考えられる。

次に、近似解に注目すると、返却距離の制限値 α の値が小さいほどボックスの設置点数が増え、巡回経路長も長くなることが分かる。また、長径の分割数が15で α の値が(ii)843mのときと、長径の分割数が20で α の値が(iii)849mのときでは、 α の値の差は6mであるが、ボックスの設置点数では2点、巡回経路長では1371mの差が生じている。返却距離の制限値 α の設定により、ボックスの導入コスト（巡回経路長、設置点数）が変化することから、返却ボックスを導入する際には、ボックスの利用のしやすさと運用コストが共に妥当となる制限値 α を選択する必要があるといえる。

6. まとめ

本研究では、すべての利用者の返却距離が一定以下になるように返却ボックスを設置し、設置した返却ボックスを巡る最短経路長を最小化するボックス配置／巡回問題を定式化し、発見的解法の提案を行った。住民の居住点、返却ボックスの設置候補点が少ない小規模な問題については、汎用MIPソルバで厳密解を求めることができた。一方、汎用MIPソルバでは現実的な時間内で求解できなかった大規模な問題に対して、提案解法は高速に解を求めることができた。しかし、提案解法は単純な改善操作であるため改善の余地がある。さらによい初期解の生成方法、局所探索法を工夫することは今後の課題である。

参考文献

- [1] 浪川大輔 「巡回型被覆問題についての発見的解法の研究」 平成23年度東京理科大学大学院工学研究科経営工学専攻修士論文。
- [2] 日本図書館協会, <http://www.jla.or.jp/> (2013/12/24)。
- [3] 新座市立図書館, <https://www.lib.niiza.saitama.jp/index.shtml> (2013/12/24)。
- [4] Gurobi Optimizer, <http://www.gurobi.com/> (2013/12/24)。