

バイクシェアリングシステムにおける 自転車回収・再配置問題に関する研究

和田 聡美（沼田 一道 教授，松浦 隆文 助教）

1 はじめに

1.1 研究背景

近年，都市における交通渋滞の緩和や，排気ガスの抑制に繋がる乗り物として自転車が注目されている．様々な実験を経て，現在ではバイクシェアリングシステム（Bike Sharing System, 以下 BSS）に関心が高まりつつある．BSS は主として市街地域における新しい公共交通の仕組みである．駅，デパート，公園など，街の様々な地点に無人の駐輪場を設置し，利用者は簡単な手続きで自転車を借りることができる（図 1）．自転車は借りた駐輪場と異なる駐輪場に返却することが可能である．海外では既に広く普及しており [1]，日本でも BSS を実施する自治体が徐々に増えている [2]．

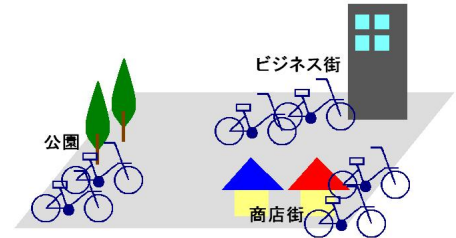


図 1: BSS の概要

1.2 研究目的

新しいシステムである BSS には，いくつかの課題が挙げられる．例えば，持続的な運営システムの構築である．自転車が一方のみに利用されることによって，駐輪場の自転車台数に偏りが生じてしまう．そのため，自転車の回収と再配置を行う自転車回収車が街を巡回し，各駐輪場の自転車台数を元に戻す．

本研究ではこの自転車回収車の効率的な移動経路を求める問題を数理計画問題として提起し，その解法を提案することを目的とする．

2 問題と前提条件

2.1 問題設定

本研究で扱う BSS の運営エリアは，一つの中央ステーションと複数の駐輪場で構成される．中央ステーションは，自転車回収車が出発（到着）する地点である．駐輪場は，自転車が不足している駐輪場，自転車が余っている駐輪場，自転車の過不足がない駐輪場の 3 種類に分けられる．そして，以下，中央ステーションのことをデポ，自転車が余っている駐輪場を積込み点，自転車が足りない駐輪場を積降ろし点と呼ぶ．問題で対象とするのは積込み / 積降ろし点である．

まず，自転車回収車は空の状態デポを出発し，積込み点で自転車を回収する．以下，積込み作業と積降ろし作業を繰り返す．最後に積降ろし点で自転車を補充し，空の状態デポに戻ってくる（図 2）．このとき回収車の容量制約を考慮する必要がある．例えば，積込み点に移動しても回収車の残余容量が不足していれば自転車を積み込めないし，積降ろし点に移動しても積載自転車が足りなければ補充することはできない．

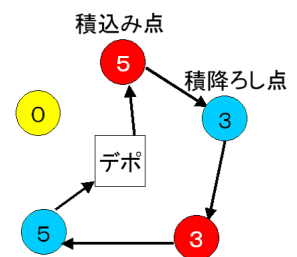


図 2: 回収の流れ

本問題は文献 [3] が扱った回収と配送を同時に行う配送計画問題（Vehicle Routing Problem, 以下 VRP）とよく似ている．しかし，VRP では配達品が既に積込んであるのでどの積降ろし点へも常に移動可能であり，両者は本質的に異なる配送計画問題である．

2.2 前提条件

前提として，自転車の積込み台数と積降ろし台数の和は等しい，自転車回収車の容量は各点の積込み / 積降ろし台数よりも大きい，自転車の回収・再配置中に各点の自転車台数は変わらない，と仮定する．

これらの前提条件のもと，回収車は容量制約を守りながら各駐輪場を1度ずつ訪問して自転車台数を整える．また，その際の最短巡回経路と経路長を求める問題を提起する．この問題を BSSRP (Bike Sharing System Routing Problem) と呼ぶ．

3 記号の定義と定式化

BSSRP の目的は「自転車回収・再配置経路の最短化」である． P を積込み点の集合， D を積降ろし点の集合， N を積込み/積降ろし点全体の集合， $\{0\}$ をデポとする．点 i における積込み/積降ろし台数を b_i で表す． $b_i > 0$ の場合，積込み台数が b_i 台， $b_i < 0$ の場合，積降ろし台数が b_i 台とする．また， $b_0 = 0$ である． c_{ij} を点 i, j 間の距離， q を自転車回収車の積載容量とする．回収車が点 i から点 j へ移動中に積んでいる自転車の台数を y_{ij} ，回収車が点 i から点 j へ移動する (1) か，移動しない (0) かを x_{ij} で表す．以上の記号を用い，BSSRP は文献 [3] を参考にして以下のように定式化される．

(1) 式は目的関数であり，回収車の総移動距離の最短化が目的である．(2)(3) 式は必ず各点を一度ずつ訪問することを示している．(4) 式は回収車に積込まれている自転車はどの時点でも 0 台以上 q 台以下という制約である．(5)(6) 式はデポにおける制約であり，出発時と到着時に回収車が何も積んでいない状態であることを示している．最後に，(7) 式は点 i を通過前後で，自転車積載台数が b_i 台増加(減少)するという制約である．尚，上の定式化は部分巡回路除去制約を含んでいない．ソルバーに入力して解を求める際には条件を追加する必要がある．

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} && x \in i, j && (1) \\ & \text{subject to} && \sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 && j = 0, \dots, n && (2) \\ & && \sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 && i = 0, \dots, n && (3) \\ & && y_{ij} \leq qx_{ij} && y_{ij} \geq 0 && i, j = 0, \dots, n && (4) \\ & && y_{0j} = 0 && j = 0, \dots, n && (5) \\ & && y_{i0} = 0 && i = 0, \dots, n && (6) \\ & && \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{k=0}^n y_{ki} = b_i && i = 0, \dots, n && (7) \end{aligned}$$

4 解法

4.1 厳密解法

前節で示した定式化において，データ q, b_i に摂動を加えると部分巡回路を禁止することができる [4]．この性質を利用し，摂動を加えたデータを汎用ソルバーである gurobi[5] に入力して厳密最適解を求めた．すると，点数の小さい場合は数秒から数十秒で最適解を求めることができたが，点数が多いものでは非常に長い時間を要した(表 1)．さらに，自転車の過不足台数が 10 台を超えると解が求まらないこともあった．実際の問題を考えると厳密解法では対応しきれないので以下のような発見的解法を提案する．この際，厳密解法により求めた解は発見的解法の評価や設計の指針を得るために用いる．

表 1: 厳密解法の計算時間 ($q = 20, |b_i| \leq 10$)

点数	計算時間(秒)
25	904.14
30	995.28
35	1561.98
40	5685.25
45	46745.66
50	63555.45

4.2 提案法

巡回セールスマン問題に対する 2-opt 法と挿入法をベースとした発見的解法を提案する(以下，提案法)．以下に求解手順を示す．

4.2.1 初期解の求め方

構築法を用いて初期巡回路を生成する．

step1: 積込み点の中からランダムに一つを選択し，始点とする．

step2: 訪問可能な積込み点または積降ろし点の中で、始点から最も近い点に移動する。

step3: step2 を繰り返して全ての点を訪問し、実行可能な巡回路が得られれば終了する。得られない場合は step1 に戻る。

step3 における実行可能性とは、全ての点が巡回路に網羅されるだけでなく、回収車の積載容量以上となる自転車の積み込みや、積載量が負になるような自転車の補充を行わないことである。

4.2.2 解の改善方法

先に求めた初期巡回路を改善していく。以下に改善手順を示す。前半3つは制約付きの2-opt法、後半3つは制約付き挿入法である(図3)。

step1: 巡回路中の適当な2本の枝 (\vec{ab}, \vec{cd}) を選択する。

step2: 実行可能で且つ、 $l(\vec{ac}) + l(\vec{bd}) < l(\vec{ab}) + l(\vec{cd})$ ならば枝 (\vec{ac}, \vec{bd}) を結合する。

step3: step2 を満たす枝がなくなったら、step4 に移る。

step4: 巡回路中の適当な点 v に接続している2本の枝を取り除く。

step5: 点 v を巡回路中の別の枝の間に挿入し、実行可能で且つ、巡回路長が短くなったら解を更新する。

step6: step5 を満たす点なくなったら終了。

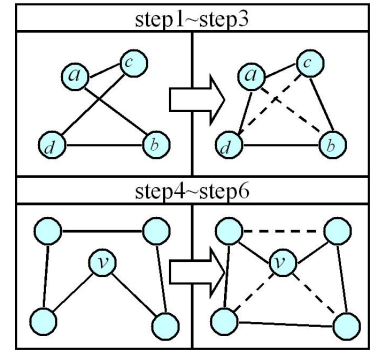


図3: 解の流れ

この step1 から step6 までの操作を解の改善が見られなくなるまで続ける。

5 実験と考察

点の個数や自転車の過不足台数を変化させた問題例を作成して、厳密解法と提案法の両方で解き、結果を比較した。データは TSPLIB[6] の berlin52 から点を抜粋し、提案法のプログラムは Borland 社の Delphi6 を用いて実装した。また、図4~図6、表2~表4のキャプション中の (\cdot, \cdot, \cdot) は(点数(n), 最大過不足台数($\max|b_i|$), 積載容量(q))を示す。「誤差率」= (提案法の経路長 - 最適解の経路長) / 最適解の経路長 $\times 100$ とする。

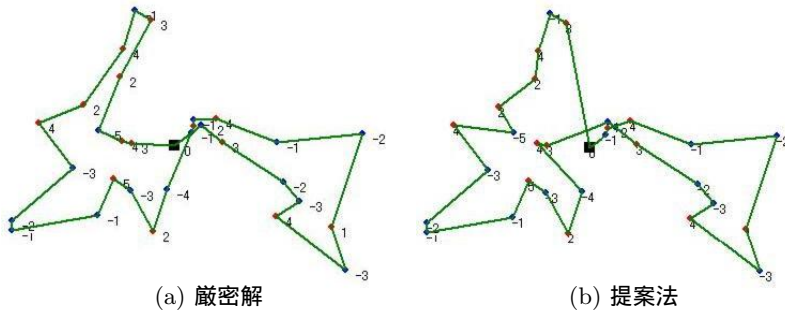


図4: (30,5,10) の実行結果

表2: (30,5,q) の経路長比較

q	厳密解	提案法	誤差率
10	6433	6488	0.86%
20	6399	6435	0.57%
30	6399	6435	0.57%
40	6399	6435	0.57%
50	6399	6435	0.57%
60	6399	6435	0.57%
70	6399	6435	0.57%

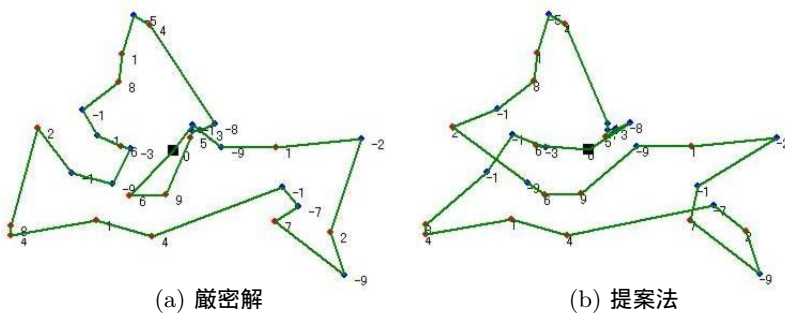


図5: (30,10,20) の実行結果

表3: (30,10,q) の経路長比較

q	厳密解	提案法	誤差率
20	6910	7094	2.66%
30	6638	6665	0.41%
40	6325	6385	0.96%
50	6325	6385	0.96%
60	6325	6385	0.96%
70	6325	6385	0.96%
80	6325	6371	0.73%

表 2, 表 3 に着目すると, q が小さく $\max|b_i|$ が大きい時に最も誤差率が高くなった. これは解の改善時に回収車の容量制約が厳しいために, 一度初期巡回路を作成してしまうと実行可能な巡回路が限られてしまうためである. 図 4, 図 5 から分かるように, 厳密解と提案法から得られた巡回路の大まかな形は似ているものの, 一度厳密解と異なる経路を辿ってしまうと, 厳密解と同じ経路に戻りにくくなるために誤差率が高くなってしまう.

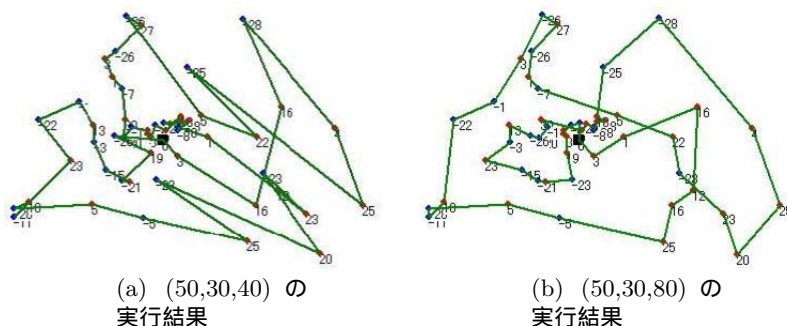


図 6: 提案法の実行結果

厳密解法では解けなかった問題に対して, 提案法で解を求めた結果を図 6, 表 4 に示す. 提案法を用いた場合, どの問題も 1 秒かからずに問題を解くことができた. また, q が大きくなるにつれて点間移動の自由度が増すため, 経路長が大幅に短縮されることが分かる.

図 7 は $n = 30$ における $\max|b_i|/q$ ごとの平均誤差率を示したものである. $\max|b_i|/q$ が大きい時には誤差率が高く, 小さい時には所々で誤差率が高くなった. 前者の原因は制約条件の厳しさ, 後者の原因は扱う巡回路の自由度に十分追随しきれず局所最適解に陥ってしまうからだと思われる. 今後はこの 2 つの誤差を抑えられるような, 精度の良い解法を設計することが目標である.

表 4: (50,30, q) の経路長

q	提案法
40	12902
50	11631
60	10946
70	9948
80	9508
90	9241
100	8965

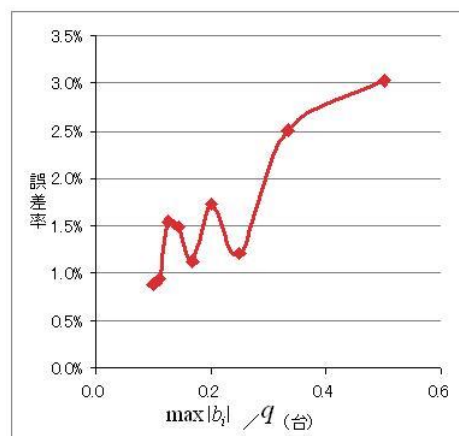


図 7: $\max|b_i|/q$ ごとの平均誤差率

6 まとめ

本研究では BSS における自転車回収・再配置問題を循環型 VRP として提起し, 厳密解法と発見的解法の両方で解いた. 問題規模の小さい場合, 厳密解法は十分に実用的である. しかし, 自転車過不足台数が多い場合や, 回収車の積載容量が小さい場合には求解に膨大な時間がかかってしまう. 一方で, 発見的解法は問題規模が大きくなって高速に解を求められるという点で優れており, 現実的であるが精度は劣る. また, 提案法は一般的な解法を組み合わせただけで, 改善の余地がある.

本研究で提起した循環型 VRP(BSSRP) は自転車輸送システム以外にも扱える可能性がある. そこでは複数の回収車や複数のデポに対応した問題の解決が求められると予想されるが, それらに対する取組みは今後の課題である.

参考文献

- [1] velib(<http://www.velib.paris.fr/>) 最終閲覧日:2010/12/22
- [2] 世田谷区ホームページ (<http://www.city.setagaya.tokyo.jp/030/d00005236.html>) 最終閲覧日:2010/12/22
- [3] Gur Mosheiov, The Traveling Salesman Problem with pick-up and delivery, *European Journal of Operational Research*, Vol.79, No.2, pp.229-310(1994)
- [4] 沼田, 摂動法による部分巡回路の除去について, 研究メモ, (2010,12)
- [5] gurobi(<http://www.gurobi.com/>) 最終閲覧日:2010/12/22
- [6] TSPLIB(<http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>) 最終閲覧日:2010/12/22