

オンデマンドバスシステム設計へ向けたシミュレーション評価

Simulation Evaluation for Designing Dial-a-Ride System

小野 良太^{*1}
Ryota Ono川村 秀憲^{*1}
Hidenori Kawamura鈴木 恵二^{*1}
Keiji Suzuki^{*1} 北海道大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

This paper focuses Dial-a-ride System as an application of shared resources problem and draws a comparison between a fixed path bus and on-demand bus with average total time of traveling, average time of walking, average time of waiting and a rate of riding. As a result of a simulation, order relations between average total time of traveling and other parameters are not necessarily match in fixed path bus and on-demand bus. In conclusion, it is necessary to evaluate not only average total time of traveling but also average time of walking, average time of waiting and rate of riding in comparing between a fixed path bus and an on-demand bus.

1. はじめに

旧来の工業化社会,あるいはサプライチェーンマネジメントのようなモノ中心の社会からスマートグリッドや ICT のように情報技術を活用してより効率的な社会を目指そうという呼びかけが盛んになって久しい。今後人口増加等の影響により,モノそのものや人から直接提供されるサービスの希少価値が更に高まるものと考えられる。我々の暮らしを日常的に支える交通においてその影響は特に甚大であり,自家用車のような個人単位の交通手段より電車やバス等の公共交通機関の果たす役割が大きくなるであろう。

本論文では新たな公共交通システムとして注目が集まっているオンデマンドバスに焦点を当て,どのような人口密度で有効かを検証する。最適化問題である Dial-a-Ride 問題やオンデマンドバスシミュレーションの先行研究においては平均デマンド達成時間(出発から到着までかかった時間の平均)のみを単一の評価指標として用いることが多いが,社会的交通インフラとしてオンデマンドバスに求められる要件についての議論は未開拓の部分が多く,問題の定式化も含めオンデマンドバスのあり方について今後さらなる追求,検討が必要である。

本論文では多角的な視点からオンデマンドバスを分析し,どのような評価指標を用いてオンデマンドバス研究を行なっていくべきか知見を与えるために,平均デマンド達成時間に加えて平均徒歩移動時間,平均バス待ち時間,乗客率(バスを利用した人の割合)の4つの評価軸を用いて実験,考察を行った。また,オンデマンドバス実現の障壁となっている要素を明確化するために役立つと考え,固定路線バスでも同様の実験により比較検証を行った。

2. オンデマンドバスとは

本章ではオンデマンドバスの定義と概要,関連研究及び本論文の位置づけを述べる。

2.1 定義

オンデマンドバスとはオンデマンド交通,デマンドバスとも呼ばれる需要対応型の公共交通である。オンデマンドバスが固定路線バスと異なる点は,決まった時刻表や路線を持たず利用者の需要に応じて動的に経路を変える点である。

事前に運行経路をどの程度固定するかによって何種類かに分類されるが,本論文ではかつては非現実的とされてきたが IT の進歩により現実的なものとなってきており今後の伸び代が大きいと予想されるフルデマンドタイプを扱う。フルデマンドタイプとは,街中のあらゆる場所が乗降場所となり,動的に経路生成とスケジューリングを生成する最も柔軟性の高い乗り合いバスである。

2.2 関連研究

フルデマンドタイプのオンデマンドバスの研究は,古くは Dial-a-Ride 問題[Wilson 1967]として効率的な巡回路やスケジューリングのアルゴリズムが検討されている。これは巡回セールスマン問題(TSP)の拡張であり,単純な最適化問題としては TSP 同様数多くの研究がなされてきた。しかしながら実際にオンデマンドバスを走らせるとなるとデマンド(利用者の移動要求)の発生はそのときまでわからないこと,都市構造によってはデマンドの発生に偏りがあることを考慮して更にアルゴリズムを改善する余地はあるものと予想される。

また実現に向けたシステムの実装については実証実験[大和 2010]において行われている。それによると実装上の問題はないが採算が取れるかが疑問視されており,オンデマンドバスの効率的な運用アルゴリズムや運行形態をシミュレーションで精査する必要がある。

オンデマンドバスの諸条件と効率性をシミュレーションで確かめた論文である野田らの固定路線バスとオンデマンドバスの比較[野田 2008]があり,これは都市構造がグリッドのみではあるが,人口密度や偏りによって固定路線バスとオンデマンドバスの優位性が逆転するケースがあることを示したという点で意義が大きい。

本論文では野田らの研究をもとに更に精密にオンデマンドバスの性質を検証するために,平均デマンド達成時間に加え,平均徒歩移動時間,平均バス待ち時間,乗客率の4つの評価軸でグリッド都市によるシミュレーション実験を行った。

3. 実験

本章では今回行った実験の問題設定,調査対象,手法,そしてその結果と考察についての説明を行う。

3.1 都市の設定

シミュレーションに用いる都市の設定は以下の通りである。

連絡先:小野 良太,北海道大学大学院情報科学研究科,札幌市北 14 西 9 丁目,ono@complex.ist.hokudai.ac.jp

- 都市は 11×11 のグリッドである。
- ネットワークのエッジが道路をノードが交差点及びバス停を表現している。
- バスに定員は無く、乗降時間も掛からないものとする。
- バスの速度は交通状況によらず一定である。
- 交差点では直進、右左折、U ターン全て1ステップで行う。
- 乗客はバスより徒歩のほうが速い時は歩く。
- 出発地と目的地はランダムで生成する。
- 各交差点でバスの乗降が可能である。
- 乗り換えは無い。
- バスと徒歩の移動速度の比は 8:1 となっている。バスが 1 ステップで交差点から交差点へ移動すると考えると大体 1 ステップ 1 分程度という想定である。

3.2 検証するパラメータ

本論文では平均デマンド達成時間、平均徒歩移動時間、平均バス待ち時間、乗客率の4つのパラメータがバス台数を増減させた際にどう変化するかについて検証する。バス台数が増えると利用者にとっては乗るバスの選択肢が増えるためよりバスが利用しやすい状況になると考えられる。

バス台数が増えるとバス運営側のコストも増加することが予想されるが、今回は単純に利用者側のパラメータについて検証を行うため、バス台数あたりのデマンド発生件数を固定することで運営側のコストは一定になるものとした。

(1) 平均デマンド達成時間

デマンドの発生からゴール地点に到達するまでの平均時間。バスでの移動時間、徒歩移動時間、バス待ち時間の和である。

(2) 平均徒歩移動時間

徒歩で移動した時間の平均。徒歩の移動時間の総和を全利用者数で割ったものであり、歩いた人だけの平均でなく歩いていない人も含めた利用者全員の平均である。

(3) 平均バス待ち時間

バスに乗車するためにその場で待っていた時間の平均。平均徒歩移動時間と同様、バス待ちをしなかった人も含めた全利用者の平均である。

(4) 乗客率

バスを利用した利用者の割合。バス台数が増えるほど利用者のバスの選択肢が増えるため、乗客率もバス台数に応じて増減するものと予想される。

3.3 固定路線バス

固定路線バスは GA によって求めた準最適な路線を評価に用いた。一つの個体にバス台数分の路線を持ちその個体ごとに 50 人の乗客を発生させ、評価値を以下の式により決定する。

$$T_{\text{demand}} = \frac{L_{\text{start}} + L_{\text{end}}}{V_{\text{walk}}} + \text{rand}\left(0, 2\left(\frac{L_{\text{bus}}}{N_{\text{bus}} \cdot V_{\text{bus}}}\right)\right) + \frac{L_{\text{ride}}}{V_{\text{bus}}}$$

ここで右辺の第一項は徒歩による移動時間の合計を表しており、 L_{start} 及び L_{end} は出発地及び目的地から最寄りのバス停までの距離、 V_{walk} は徒歩の移動速度である。第二項はバス停についてからのバス待ち時間である。 L_{bus} は乗車するバスの路線の長さ、 N_{bus} はその路線を走るバスの台数(今回は常に 1 台)、 V_{bus} はバスの速度である。 $\text{rand}(0, N)$ は 0 から N までの間を取る乱数であり、バス待ち時間が最小 0、最大でバスが一往復するのにかかる時間であるということの意味している。第三項はバス

での移動時間を表しており、 L_{ride} は乗車バス停から降車バス停までの路線上の距離である。

この評価値で評価を行い上位 10 個体が生存個体としそれぞれ 8 個体ずつ自身のコピーを作る。残り 20 個体はランダムに生成し次の世代の 100 個体とする。上位の 10 個体がコピーを作る際に以下の突然変異及び交叉をランダムに行う。ただし、必ず 1 個体は完全なコピーを作るものとする。これを 1000 世代繰り返し最も評価値の良いものを準最適路線として採用した。なお、初期状態の遺伝子はランダムな 2 地点を選びそれを L 字に結ぶ路線とした。L 字の折れる向きもランダムに決定される。

(1) 突然変異

突然変異は Fig1 に示した4つのパターン A~D の中からランダムに1つ選択し行う。4つから 1 つが選ばれた後、自身の経路内で適応可能な部分をランダムに選択し変異させる。突然変異は1路線につき最大1箇所である。突然変異の確率は各遺伝子につき 0.5 とした。

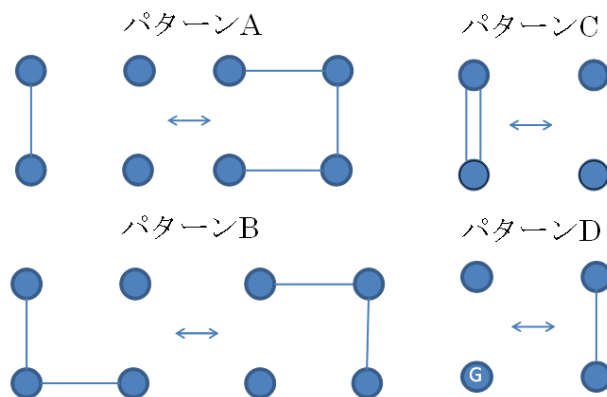


Fig.1 突然変異のパターン

(2) 交叉

交叉は Fig2 に示したように、他の生存した個体からランダムに 1 路線を持ってきて自身の 1 つと置き換える。交叉の確率は各遺伝子につき 0.25 とした。

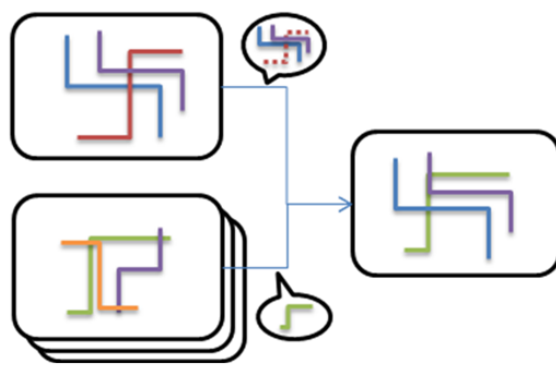


Fig.2 交叉

3.4 オンデマンドバス

今回のシミュレーションで用いるオンデマンドバスはリアルタイム方式のフルデマンドタイプであるとした。バスに定員が無いため固定路線のバスはデマンドの発生頻度に対して平均デマンド達成時間などのパラメータは一定となるが、フルデマンドのオンデマンドバスにおいてはそれぞれのデマンドに対して送迎を行うためデマンド発生頻度に応じて平均デマンド達成時間は大き

く変化する。そこで1ステップでのバス1台あたりのデマンド発生件数を 0.5,1,2,4 の4つで変化させ、実験を行った。なおシミュレーションは 1000 ステップで終了し、移動中の利用者はその時点での現在地までの各移動時間を評価値とした。

リアルタイムに発生するデマンドに対して最適なデマンドの割付およびそれぞれのバスの経路設計を行うことは動的 TSP を解くことと等価であり厳密解を求めることは計算量の観点から現実的でない。そこで今回は近似解法である逐次最適挿入法を用いて経路設計を行うこととした。

(1) 逐次最適挿入法のアルゴリズム

1. 各バスは自分に割付けられたデマンドの出発点および到着点を經由順にリストとして保持している。目的地に到着した時点でその地点はリストから取り除かれる。またそれぞれのデマンドに対してその達成予定時刻が設定され、逐次更新される。
2. 新たなデマンドが発生した際に、各バスは自身のリストの中でそのデマンドを挿入した際の他のデマンドの達成予定時刻の増加量の総和と挿入するデマンドの達成予定時刻の和(コスト)が最小となる位置を候補とする。ただしそれぞれのデマンドは締め切り時刻を持っており、それを過ぎる場合は候補から除外する。(今回はバスを利用せず徒歩で移動した際の到着時刻を締め切り時刻とする)。
3. 全バスの候補のうちコストが最小のものにデマンドを割付けてリストに加える。候補が存在しない場合はデマンドが拒否されたとみなし徒歩で移動する。

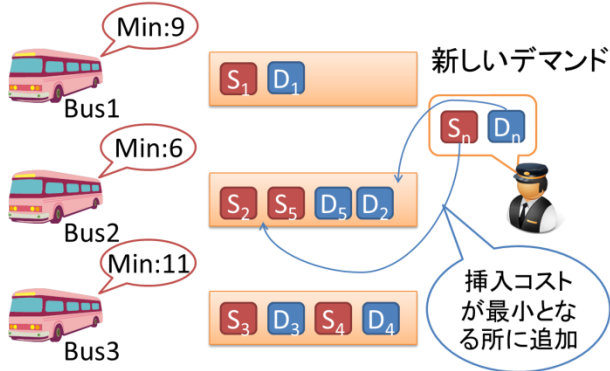


Fig.3 逐次最適挿入法のアルゴリズム

3.5 実験結果

以下で先述の固定路線バスとオンデマンドバスでバス台数を 1 から 128 台(固定路線バスは 64 台まで)で変化させた時のシミュレーションによる総移動時間、徒歩の移動時間、バス待ち時間、乗客率(デマンドが拒否されずバスに乗車した割合)の比較を行った結果を Fig4~8 に示す。横軸がバス台数、縦軸がそれぞれの評価値である。

まず Fig4 の平均デマンド達成時間の比較では1ステップあたりのバス1台ごとのデマンド発生件数(デマンド発生頻度)が 0.5 と 1 の場合は固定路線バスよりも達成時間が短くなっているがそれ以外の場合は長いことがわかった。

一方, Fig5 の平均徒歩移動時間では固定路線バスがどのオンデマンドバスの結果よりも長い徒歩移動時間となっていることがわかる。Fig6 の平均バス待ち時間のグラフにおいてはデマンド発生頻度が 2 と 4 の場合は固定路線バスよりも短いバス待ち時間であるが、それ以外にはバスの台数が増えると固定路線バスよりもバス待ち時間が長くなる。Fig7 の乗客率の比較において

はデマンド発生頻度が 4 の場合を除き概ね固定路線バスよりも乗客率が高い結果となった。

またバス台数が増えるほど平均デマンド達成時間と平均徒歩移動時間は短く乗客率は高く、平均バス待ち時間は固定路線バスの場合には短くなるがオンデマンドバスにおいては変わらないことがわかった。

また, Fig8 はバス1台での単位時間あたりの平均乗車人数であり、バス台数が多いほど、デマンド発生頻度が低いほど多くの利用者がバスに乗っており、乗客率と同じように推移していることがわかる。

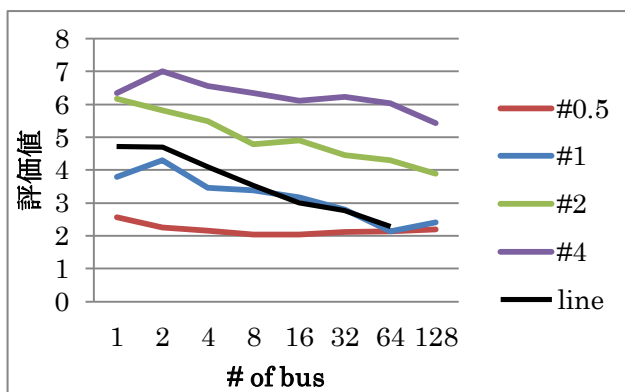


Fig.4 平均デマンド達成時間

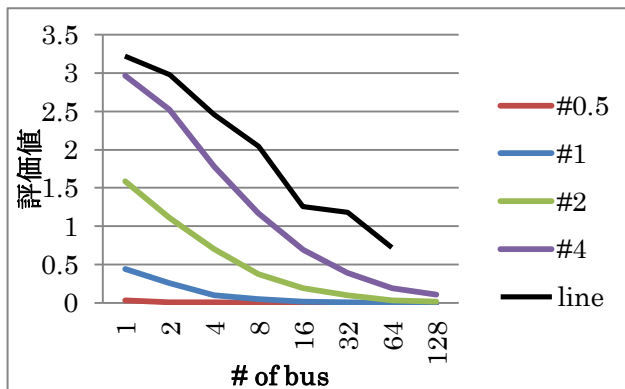


Fig.5 平均徒歩移動時間

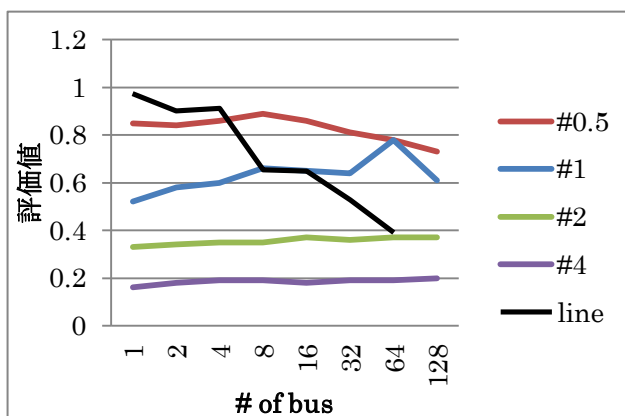


Fig.6 平均バス待ち時間

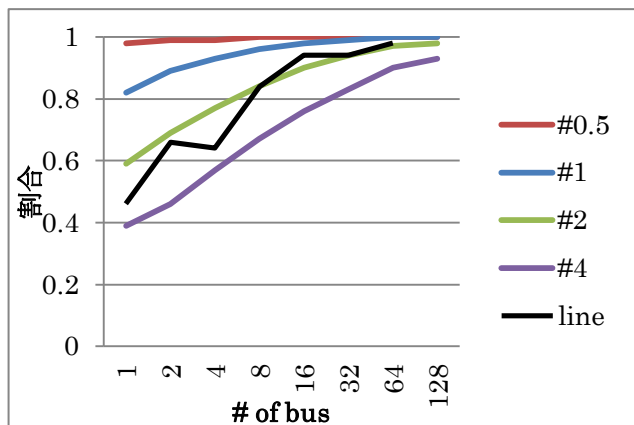


Fig.7 乗客率

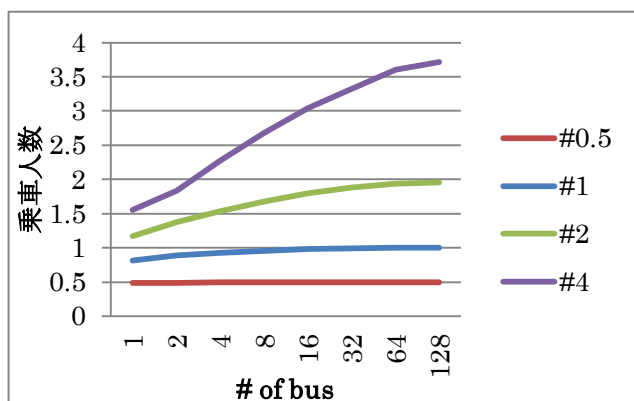


Fig.8 バス1台の単位時間あたりの平均乗車人数

3.6 考察

オンデマンドバスにおいて平均徒歩移動時間や平均バス待ち時間が固定路線バスよりも短いにも関わらず、平均デマンド達成時間が長くなっているケースがあることは、バス乗車での移動時間が長くなっていることを意味している。これは利用者が移動手段の選択をデマンド発生時の状況のみを考慮して行うため、乗車するバスを決定した後に他のデマンドが発生したことにより結果的に他の移動手段を用いたほうがデマンド達成時間を短くできる場合があったということが考えられる。

また、本来オンデマンドバスは路線が固定されず柔軟に運行できるため固定路線バスと同様の運行も可能であることを考えると少なくとも固定路線バスよりも平均デマンド達成時間が長くなるということは起こり得ないはずであるが、今回はそのケースがいくつか見られる。これは今回の設定においてはオンデマンドバスではその場でバスを待つか歩くかの二択しかできなかったということが原因の一つであると考えられ、少し歩いてバスに乗るということを許可することによって更にオンデマンドバスの平均デマンド達成時間を短くすることができる可能性がある。その場合、平均徒歩移動時間は今回より長く、平均デマンド達成時間と平均バス待ち時間は今回より短くなるのが予想される。

オンデマンドバスにおいてデマンド発生頻度の増加に伴い平均デマンド達成時間及び平均徒歩移動時間が増加、平均バス待ち時間及び乗客率が低下しているのは、バスに対するデマンドの件数が多くなりすぎたため、バスを利用せず徒歩で移動する利用者が増加したためであると考えられる。これは更にデマンド発生頻度を増加させた場合は更に顕著になるものと考えられ、

フルデマンドタイプのオンデマンドバスは人口密度が高くなるほど不利になる性質を持つということを示唆しているとも考えられる。しかし、今回は先述した少し歩いてバスに乗るという選択肢を許可していないこと、バス側のデマンド割付アルゴリズムにまだ検討の余地があることから、これより更にオンデマンドバスの平均デマンド達成時間を短くする伸び代はあるかもしれない。特に乗客率や平均乗車人数を見ると多くの場合半数以上の利用者がバスを利用しておりバス運行を少し効率化するだけでも平均デマンド達成不時間をかなり短縮可能であることが予想される。

オンデマンドバスではバス台数に応じて平均バス待ち時間のみ変化が無い理由としては、今回は1ステップあたりのバス台数に対してデマンド発生件数を変化させているため、バス台数が増えるほどデマンド発生も増加して乗客率も上がり、結果的にバス待ち時間が代わっていないものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、次世代の公共交通システムとして注目されているオンデマンドバスについて、従来の平均デマンド達成時間に加えて平均徒歩移動時間、平均バス待ち時間、乗客率という観点から分析しオンデマンドバス設計において必要とされる検証項目について多角的な知見を与えるためシミュレーション実験を行った。その結果デマンドの発生頻度が低い、すなわち人口密度が小さい場合はオンデマンドバスのほうが固定路線バスよりも平均デマンド達成時間が短くなるのがわかった。また、平均デマンド達成時間が固定路線バスより長いケースでもオンデマンドバスのほうが平均徒歩移動時間、平均バス待ち時間が短くなった。

これにより今回の実験において、オンデマンドバスではバス乗車時間が長いことが主なボトルネックとなっており、デマンド割付のアルゴリズムを改善することによりオンデマンドバスの効率性を更に向上させることができる可能性が示唆された。

参考文献

- [Wilson 1967] Wilson, H. and Weissberg, H: Advanced dial-a-ride algorithms research project: Final report, Technical Report R76-20, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, MA, 1967
- [大和 2010] 大和裕幸, 坪内孝太:オンデマンドバスシステム: 利用者の需要に対応した新しい公共交通機関(<特集>高度化する交通システム-利用者のニーズに即した交通サービスを目指して), システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, 54(9), pp.342-347, 2010-09-15
- [野田 2008] 野田五十樹, 篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之:シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.242-252, 2008.