

徒歩移動を考慮するバス経路探索システム

川村尚生[†] 楠神元輝^{††} 菅原一孔[†]

2点間の所要時間最短経路を出力するバス経路探索手法を開発し、鳥取市の実際のバス経路探索システムに適用した。システムへの入力は、出発時刻、出発地、目的地の3組で、出発地および目的地はランドマークで指定する。GPS機能付き携帯電話からシステムにアクセスした場合は、出発地はGPS機能で与えることもできる。経路探索においてはバス停間の徒歩移動を考慮している。バス停の設置間隔は狭い場合が多く、バス停間を徒歩移動した方が、より短い所要時間で目的地に到達する場合が考えられるからである。実験によって徒歩移動の有効性を確認した。

Path Planning System for Bus Network Including Walking Transfer

TAKAO KAWAMURA,[†] GENKI KUSUGAMI^{††} and KAZUNORI SUGAHARA[†]

We have developed a path planning system for the bus network in Tottori as Web service. This system finds appropriate paths using location information of the starting point and the destination obtained through GPS or landmark databases and the current time. Our path planning method can find paths including not only bus transfers but walking transfers. Experiments are examined to validate the system.

1. はじめに

いずれの地方も同様の状況であるが、鳥取県でも路線バスの利用者は年々減少の一途をたどっており、平成11年度には70%近い路線が赤字で、路線バス維持のための市町村の負担が大きなものになっている¹⁾。路線バスの利用者数を増やすためには、様々な視点から路線バスの利便性を高める必要がある。路線バスの不便な点の1つに、経路情報が得にくいということがあげられる。たとえば、鉄道では駅構内の路線図や運賃表等から、また駅員に質問することで経路情報を入手できるが、バス停はほとんどが無人であり、詳しい経路情報を掲示するスペースもないので、入手できる情報は限られている。また、鉄道の駅と異なり、場所を知らせる道路標識等もなく、特に観光客にとっては、どこにバス停があるのかを知ることさえ容易ではない。さらに、鉄道においては、出発駅と目的駅を指定することで経路情報を出力する経路探索システムが

普及しているが²⁾、バスを利用する本格的な経路探索システムはまだ存在していない。

そこで我々は、鳥取県のバス会社および鳥取県商工会議所と協力して、2点間の所要時間最短経路を出力するバス経路探索システムを開発した。バス利用者の便宜を図るために、同種システムを開発する必要性はバス会社としても認識していたが、大学との連携によりこれを理論的に取り扱うことが可能となった。また複数のバス会社との研究を進める際、商工会議所が間に入った産学連携が、システム開発を円滑に進めるうえで重要な働きを果たした。

基本的には、バス経路探索を単一始点最短路問題ととらえ、経路探索において一般的に使用される³⁾ダイクストラのアルゴリズムを適用したが、バス停間を徒歩で移動することが可能であるといったバス経路探索問題特有の性質のため、実用的なシステムを構築するためには、アルゴリズムやデータ構造を工夫する必要がある。本稿では、バス経路探索問題特有の性質を指摘した後、開発したシステムについて述べ、実験によってその有効性を確認する。

2. バス経路探索問題

バス経路探索問題は基本的にはネットワークの単一

[†] 鳥取大学工学部

Faculty of Engineering, Tottori University

^{††} 鳥取大学大学院工学研究科

The Graduate School of Engineering, Tottori University

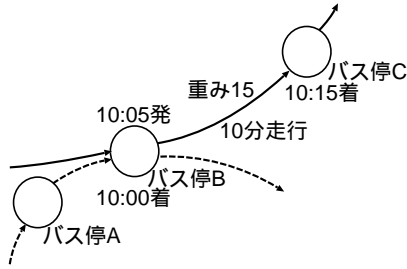


図1 待ち時間を含む辺の重み

Fig. 1 The Weight of an edge includes waiting time.

始点最短経路問題と考えることができる。

バス停を節、バスが運行する経路を辺、辺の重みをバス停間の所要時間とすることでネットワークを構築する。同じ路線を走るバスでも時刻や曜日によっては停まる停留所の数が少ない直行便になる場合があるが、これについては一般便が通る路線とは別の路線が存在するものとして扱う。たとえば、あるバス路線 α において、8 時台にはバス停 $A \rightarrow B \rightarrow C$ と停車するが、それ以外の時間帯にはバス停 $A \rightarrow C$ と停車する場合、2 つの分割路線 $\alpha - 1$ と $\alpha - 2$ が存在するものとしてネットワークを構築する。

このネットワークに対してダイクストラのアルゴリズムを適用することで、任意の節から任意の節への所要時間最短経路を求めることができる。ただし、バスを乗り換える場合は、そのバスが到着するまでのバス停での待ち時間を考慮しなければならない。例を図1に示す。いま、バス停 A から乗り換えバス停 B を経由してバス停 C に移動するものとする。バス停 B に到着する時刻が 10 時 00 分で、次のバスが 10 時 05 分に出る場合、待ち時間は 5 分なので、バス停 B からバス停 C までの所要時間、すなわち辺の重みは $5 + 10 = 15$ 分となる。この待ち時間は到着時刻によって異なるので、辺の重みも一意に決めることができない。

このように、節に到着した時刻に応じて、次の節への辺の重みを動的に計算するアルゴリズムが必要になる。本研究では、ダイクストラのアルゴリズムを改良することで、バス経路探索問題を解くことを考える。

しかし、この改良アルゴリズムにより得られる経路は、実際の所要時間最短経路にはならないことがある。なぜなら、バス路線は、2 点間を最短距離で結ぶという発想ではなく、なるべく利用客が多い場所を通るように設計されているため、路線が複雑に入り組んでいるうちに、バス停の設置間隔は狭い場合が多いので、あるバス停で降りて、他の路線上のバス停まで徒歩で移動して乗り換えることが可能だからである。

図 2(a) に示す例において、バス停 A からバス停

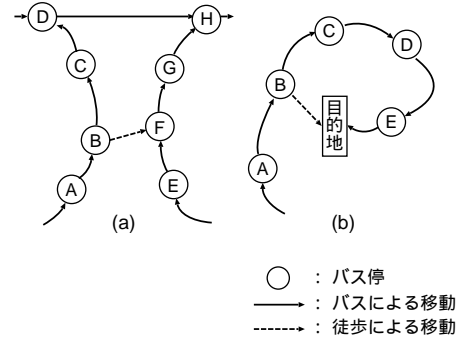


図2 徒歩移動を考慮した経路

Fig. 2 Bus routes including walking transfer.

H に移動する場合に、徒歩移動を考慮しなければ、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow H$ という経路しか得られないが、徒歩移動を考慮すると $A \rightarrow B \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H$ という経路も探索対象に含めることができる。鉄道の駅は設置間隔が広いので、このような徒歩移動は考慮する必要がなく、バス経路探索問題に特有のものといえる。乗り換えバス停以外での乗り換えに対処するために、ネットワークの各節から他のすべての節に対して徒歩移動による辺を加えるものとする。

また、目的地の最寄りバス停以外のバス停で降り、目的地まで歩いた方が早いこともありうる。図 2(b) はそのような例で、目的地の最寄りバス停を E とした場合、徒歩移動を考慮しなければ、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow$ 目的地という経路しか得られないが、徒歩移動を考慮すると $A \rightarrow B \rightarrow$ 目的地という経路も探索対象に含めることができる。同様に、出発地に対しても最寄りバス停以外のバス停まで徒歩移動してバスに乗ることを考慮しなければならない。すなわち、鉄道の経路探索では駅から駅までを経路とするのに対し、バスの経路探索においては、実際の出発地から目的地までを経路としなければならない。このために、出発地や目的地も節としてネットワークに加え、他のすべての節と徒歩移動による辺で結ぶものとする。

3. バス経路探索システム

バス経路探索システムを Web サーバを通じて利用できる CGI プログラムとして作成した。開発言語には Ruby を使用した。

システムで用いるデータとしては、日の丸自動車(株)と日本交通(株)によって実際に運行されている計 93 路線と 1,806 個のバス停を基に、(1) バス停データベース (2) 分割路線データベース (3) 接続データベース (4) 始発データベースを作成し、関係データベースサーバ MySQL によって管理している。

(1) は、各レコードがバス停ひとつに対応しており、バス停 ID、バス停名称、北緯、東経の 4 組からなる。(2) は、各レコードが分割路線ひとつに対応しており、分割路線 ID、始発バス停 ID、有効ビット列の 3 組からなる。有効ビット列は、その分割路線が平日、奇数週土曜日、偶数週土曜日、日曜日、学期間のいつ有効なのかを示すものである。ただし学期間とは、小学校等が開校されている期間のことである。(3) は、各レコードが分割路線上の停車バス停に対応しており、分割路線 ID、バス停 ID、次のバス停 ID、次のバス停までのバスの走行時間 [分] の 4 組からなる。(4) は、各レコードが分割路線の始発時刻に対応しており、分割路線 ID と発車時刻の 2 組からなる。

以上 4 種のデータベースから、ネットワークの静的な部分を構築する。そして、探索を行うごとに、出発地と目的地を加えることで経路探索に用いるネットワークを完成させ、辺の重みを動的に計算するように改良したダイクストラのアルゴリズムで経路探索を行う。

ここで、バス停 A からバス停 B までの徒歩による移動時間 [分] $T_{A:B}$ を次式で与える。

$$T_{A:B} = \lceil N \times d(A, B) \rceil \quad (1)$$

$d(A, B)$ はバス停 A からバス停 B までの直線距離 [m]、 N は定数である。

原理的には全バス停間を徒歩移動による辺で結ぶ必要があるが、徒歩による移動時間が一定以上の辺が経路に加わることは考えられないので、適当なしきい値 T_1 を定め、徒歩による移動時間が T_1 以下のバス停間のみを結ぶこととする。

また、原理的には、出発地から全バス停への徒歩移動による辺と、全バス停から目的地への徒歩移動による辺が張られるべきであるが、同様に、適当な T_2 を定め、出発地、目的地とも徒歩による移動時間がしきい値 T_2 以下のバス停のみと結ぶこととする。

ダイクストラのアルゴリズムでは、ある節に後続する節のうち最小の最短路推定値を持つものを選ぶ(以後、Extract-Min 操作と呼ぶ)際の計算量がアルゴリズム全体の計算量を支配する。このとき用いられるデータ構造のうち、現在理論的に最も計算時間が短くなるものは、フィボナッチヒープを用いた優先順位付き待ち行列であり、Extract-Min 操作 1 回の計算量は節が n 個のとき $O(\log n)$ となる。しかし、本システムでは、フィボナッチヒープではなく、バケット法と呼ばれるデータ構造を用いた⁴⁾。これは、最短路推定値がとりうる値ごとに待ち行列を用意する方法で、Extract-Min 操作 1 回の計算量は $O(1)$ であるが、メモリ使用量の問題から、最短路推定値がとりうる値が

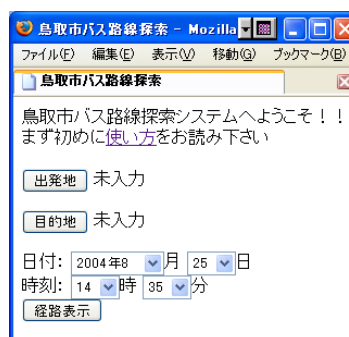


図 3 入力画面例

Fig. 3 Input screen of the system.

限られている場合にしか使用できない。バス経路探索問題においては、最短路推定値は分単位で与えられ、その値もバスで移動する最長の時間で抑えられることから、バケット法に適した問題であるといえる。

図 3 に示すように、システムへの入力には、出発時刻、出発地、目的地の 3 組である。出発地および目的地はランドマークで指定する。ランドマークとしては鳥取市内の主要な施設 2,085 個を MySQL で管理している。なお、GPS 機能付携帯電話を用いた場合は出発地は GPS 機能で与えることもできる。

4. 実 験

徒歩による移動を考慮することで出発地から目的地までの移動時間が短縮できるか確認するための実験を行った。前節の N は $1/50$ 、 T_1 および T_2 は 20 とした。ただし、 T_2 は、バス停が見つからない場合、見つかるまで 10 ずつ増やしてゆく。

出発地が『湖山』、目的地が『鳥取砂丘』、出発時刻が 12 時 00 分のときの、バス停間の徒歩移動を考慮しない場合と考慮する場合の経路を図 4 に示す。この例は図 2(a) に対応しており、「城北団地」「丸山」間で徒歩移動して乗り換えることにより、複数路線が乗り入れるバス停だけで乗り換える場合に比べて所要時間が 26 分短くなっている。

次に、出発地が『市立東中学校』、目的地が『JR鳥取駅』、出発時刻が 10 時 07 分のときの、最寄りバス停以外から目的地までの徒歩移動を考慮しない場合と考慮する場合の経路を図 5 に示す。この例は図 2(b) に対応している。目的地『JR鳥取駅』の最寄りバス停は「鳥取駅」であるが、日ノ丸中河原線は、大通りを巡回してから鳥取駅に向かうため、「農協会館前」で下車して歩いた方が所要時間が 7 分短くなっている。

以上の実験から、徒歩移動を考慮することでより所要時間の短い経路を発見できる場合があることが分

12:00 出発地『湖山』 12:13 「湖山」発 ↓日ノ丸 賀露線 12:48 「東秋里」着 12:48 「東秋里」発 ↓日交 梶川中病線 12:55 「血液センター前」着 13:00 「血液センター前」発 ↓日交 岩井線 13:00 「寛寺口」着 13:01 「寛寺口」発 ↓日ノ丸 麒麟砂丘線 13:03 「子供の国入口」着 ↓徒歩 13:20 目的地『鳥取砂丘』着	12:00 出発地『湖山』 12:13 「湖山」発 ↓日ノ丸 賀露線 12:24 「城北団地」着 ↓徒歩 12:31 「丸山」着 12:32 「丸山」発 ↓日ノ丸 砂丘線 12:37 「子供の国入口」着 ↓徒歩 12:54 目的地『鳥取砂丘』着
--	--

(a)バス停間の徒歩移動なし (b)バス停間の徒歩移動あり

図4 バス停間の徒歩移動を考慮しない場合と考慮する場合の経路の比較

Fig. 4 Path planning results including or not including walking transfers between bus stops.

10:07 出発地『市立東中学校』発 ↓徒歩 10:18 「立川五丁目」着 10:21 「立川五丁目」発 ↓日ノ丸 中河原線 10:40 「鳥取駅」着 ↓徒歩 10:43 目的地『JR 鳥取駅』着	10:07 出発地『市立東中学校』発 ↓徒歩 10:18 「立川五丁目」着 10:21 「立川五丁目」発 ↓日ノ丸 中河原線 10:28 「農協会館前」着 ↓徒歩 10:36 目的地『JR 鳥取駅』着
---	---

(a)最寄り以外のバス停からの徒歩移動なし (b)最寄り以外のバス停からの徒歩移動あり

図5 最寄り以外のバス停からの徒歩移動を考慮しない場合と考慮する場合の経路の比較

Fig. 5 Path planning results including or not including a walking transfer between the destination and the non-nearest bus stop.

かった。なお、図4(b)と図5(b)の経路探索時間は、Pentium3 550MHzの計算機上でそれぞれ約1.5秒と約0.8秒であり、実用的な速度といえる。なお、バケット法ではなくフィボナッチヒープによる優先順位付き待ち行列を使用した場合、経路探索時間はそれぞれ約22.9秒と約9.2秒であった。

5. おわりに

節に到着した時刻に応じて辺の重みを動的に計算し、最短路推定値を持つ後続節を高速に選ぶようにダイクストラのアルゴリズムを改良することで、実用的な速度のバス経路探索が可能になった。また、探索アルゴリズムにバス停間等の徒歩移動を組み込むことにより、所要時間がより短く、かつ実用的な経路が出力できることが分かった。開発したアルゴリズムを基に、鳥取県のバス会社と協力することで、実際に鳥取市で利用可能なバス経路探索システムを構築した。

本システムは現在試験的に運用中であり、利用者の意見も参考にして改良し、2005年度から鳥取県商工会議所によって本格運用する予定である。

謝辞 鳥取大学工学部の増山博教授、三好力助教授、藤原好章氏、鳥取商工会議所の伊藤寿之氏、日本交通株式会社および日ノ丸自動車株式会社の関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 中村理人: 21世紀の鳥取県の公共交通のあり方に関する研究, 財団法人とっとり政策総合研究センター ニュースレター, No. 17 (2001).
- 2) 駅前探険倶楽部: <http://ekitan.com/>.
- 3) 上川哲生, 梅津正春: 車載ナビゲーションの経路探索技術, 計測と制御, Vol. 36, No. 11, pp. 790-792 (1997).
- 4) Goldberg, A. V. and Silverstein, C.: Implementations of Dijkstra's Algorithm Based on Multi-Level Buckets, Technical Report 95-187, NEC Research Institute, Inc. (1995).

(平成16年8月30日受付)

(平成16年11月1日採録)

川村 尚生 (正会員)

昭和40年生・平成6年神戸大学大学院自然科学研究科知能科学専攻博士課程単位取得退学。同年鳥取大学工学部知能情報工学科助手、現在、同学科助教授。エージェントシステムに関する研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会、ソフトウェア科学会、人工知能学会各会員。

楠神 元輝

昭和55年生・平成15年鳥取大学工学部知能情報工学科卒業。現在、鳥取大学大学院工学研究科博士前期課程在学中。

菅原 一孔 (正会員)

昭和31年生・昭和56年東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻修士課程了。同年神戸市立工業高等専門学校電気工学科講師。同校助教授を経て平成6年鳥取大学工学部電気電子工学科助教授、現在同学部知能情報工学科教授。計算機工学に関する研究に従事。工学博士。IEEE, 電子情報通信学会各会員。