

配達経路最適化の一方法

倉 田 是

1. はじめに

小売業界は、世界的な不況の影響を受けて、長期的な衰退の傾向にある。一方、個別（戸別）配達による生鮮食料品や日用品の販売は、ここ2、3年の間に急速に伸びつつある。ある生活協同組合では、個別配達の伸びが著しく、過去4年間に24倍の増加を見た。

利用する家庭は、共稼ぎや育児のために買い物に行かれないために利用することが多い。前者は女性の社会的進出と言えれば聞こえがよいが、不況下でやむを得ず勤めなくてはならない場合もあろう。後者は核家族化によって子育てに母親一人で対処し、家事全般の負担が掛かってくるからである。1週間の利用高は食料品を中心に1万円位である。平成10年度の総理府統計資料によれば、平均の食料費支出は78,156円であるから、約半分を配達によって賄っていることを示している。

これに加えて、高齢者で買い物に行けない世帯が増加する。これによって、個別配達の増加に拍車がかかることも予想される。

現在の個別配達では商品の代金に、配達料を上乗せしている。この配達料は、サービスの程度にもよるが、1回につき200円から500円程度である。この配達料でも、人件費と交通渋滞等による時間の浪費のために収支は苦しいと言われている。商品価格に転嫁もできないので、配達コストを低下させる必要がある。このために、配達ルートの見直しが行われている。

本報告は、このような配達コストを低下させる試みとして、配達時間を短縮するためのルート選択問題のアルゴリズムとC言語によるプログラム開発を行った。また、例題によるシミュレーションを行って、アルゴリズムの検証を行った結果を発表したものに、手を入れたものである。³⁾

2. 配達ルートについての従来の研究について

本報告に関連する研究として巡回セールスマン問題がある。¹⁾ 今までも数多くの研究がなされている。巡回セールスマン問題は、セールスマンが同一経路を通ることなく都市間を最短距離で巡回する経路を求めることである。物資の配達の場合に置き換えると、配達箇所が都市であり、最短距離（最短時間）で配達する問題となる。

配達する場合は、道路事情が加わる。すなわち、高速道、国道、県道、市町村道や私道の種別、道路幅、交差点の直進・左折・右折、優先道路、一方通行路、渋滞、片側2車線以上の道路で道路の反対側に届ける場合など様々な条件が加わる。これらを、都市間の経路のすべてに組み込むことができるならば、巡回セールスマン問題として解けると思われる。

巡回セールスマンで都市間の経路は最短経路であるとされている。しかし、配達経路の場合は、この間に複数交差点により分割できる経路がある。したがって、配達経路最適化問題はこの経路の選択により最短経路を求める問題であるとすることもできる。

配達経路の各交差点を巡回セールスマン問題の都市と見立てて、巡回セールスマン問題として扱うことも考えられる。しかし、交差点の右折や、一時停止など時間経過の違いの問題を含めると、交差点間の通過時間が、過去に通過した交差点によって変わる可能性が高い。したがって、交差点間の経路（通過時間）を一定とする巡回セールスマン問題では解きにくい。

経路探索問題として、公共交通機関を利用した、最短時間、最低運賃を求める問題がある。道路網の最短距離、最短時間を求める問題で、左折・直進・右折を考慮した場合、さらにカー・ナビゲーション・システムの経路探索問題などがある。²⁾

いずれにせよ、本報告で取り上げた町中を数箇所巡回配達する問題ではない。配送問題は、数多くの宅配業者が問題にしているとは思えるのであるが、報告はきわめて少ない。

3. 本報告の配達 of 諸条件

配達 of 道路や移動経路 of 条件は次の通りに定めた。

- (1) 配達に際しては、同一交差点や同一経路を何度でも通過してもよい。
- (2) 方向転換は交差点の直進・左折・右折のみが許され、交差点間の道路上のUターンは認めないものとする。この条件でも、配達先が袋小路の中にある場合があり、ここでUターンができるが、本報告では、まだ扱っていない。
- (3) 片側2車線以上の道路では、進行方向に向かって反対側 of 家への配達 is できない

ものとする。なお、本報告では、片側2車線の道路を扱っていない。

- (4) 優先道路を設ける。優先道路と交差する道路から交差点に侵入する車は、必ず一時停止しなければならない。
- (5) 一方通行道路を設ける。

4. データ構造

交差点と配達地点のデータ構造を決定するに当たって次のようにした。一定地域に固定されずに、道路事情などにも対応できるように、交差点のデータ構造に柔軟性を持たせた。

- (1) ある交差点から分岐する次の交差点に到達するまでの時間を示す。十字路であれば、分岐先の交差点は4箇所である。この間の道路の通過時間は、それぞれ道路長と道路幅や渋滞などの状況から設定される。図1に示すように、交差点番号を先頭にして、リストの終了を指示する-1を末尾とした線形リスト構造にした。したがって、交差点数×(最大分岐数×2+2)の2次元配列となる。これとは別に、配列構造として、各交差点とその分岐交差点の2次元配列で交差点間の通過時間を表すとする方法もある。交差点番号の最大数×分岐交差点の最大数の2次元配列を作り、その要素が通過時間を表すこともできる。このことにより、データ構造が簡単で配列の大きさが小さくなる。しかし、大きな地図から切り出した一部地域の配達問題を考えたときには、大きな地図の交差点番号をそのまま使った方が、間違える可能性が少ない。この場合には、交差点番号が0から始まらない

交差点 A	分岐交 差点1	通 過 時 間	分岐交 差点2	通 過 時 間	分岐交 差点3	通 過 時 間	分岐交 差点4	通 過 時 間	修了 -1
交差点 B	分岐交 差点1	通 過 時 間	分岐交 差点2	通 過 時 間	分岐交 差点3	通 過 時 間	修了 -1		
交差点 C	分岐交 差点1	通 過 時 間	分岐交 差点2	通 過 時 間	分岐交 差点3	通 過 時 間	分岐交 差点4	通 過 時 間	修了 -1
交差点 D	分岐交 差点1	通 過 時 間	分岐交 差点2	通 過 時 間	修了 -1				

図1 交差点間通過時間リスト構造

で、大きな値で始まるときもある。交差点番号を配列の添え字に使うと、大きな交差点番号を寸法とした配列を作ることになる。また、交差点番号が飛び飛びの値になることの可能性もある。したがって、この配列には使用しない部分もできる。これによって、プログラムの大きさが必要以上に大きくなる恐れがある。一方、本報告の配列では、交差点と分岐先交差点を指定し、通過時間を取り出すためには、アルゴリズムに工夫が必要であるが、配列の寸法が小さくなり、無駄が少ないので、このようなデータ構造とした。

- (2) ある方向から交差点に進入し、直進・右折・左折をする場合には、明らかに交差点通過時間が異なる。この交差点通過時間を表すために図2の配列構造を作った。進入してきた方角を表すために後方の交差点番号、進路変更する交差点番号、進路変更後向かう交差点番号とその通過時間を列にしたものである。この配列は、2次元配列である。この通過時間も道路の実状に合わせて変更可能である。

進入元 交差点	進路変更 交差点	進入先 交差点	交差点進路 変更時間

図2 交差点進路変更データ構造

- (3) 配達先の位置は次のようにしてデータ構造を定めた。配達先の面している道路の両方向の交差点を2種類の進行方向に合わせて、進入してくる交差点番号を前に、進出して行く交差点番号を後に、配達先から進出して行く交差点までの通過時間をデータとした2次元配列である。なお、本報告では、配達のための減速・停留（たとえば高層住宅など到着してから戸口に配達するまでの時間が掛かる場合もある）・加速時間を考慮していない。

なお、時間は分以下まで、つまり小数点以下の実数が必要であるが、(1)の配列では整数と実数の混合になるので、整数に統一するために、小数点以下1桁の時間単位を必要に応じて10倍して整数とすることもできる。

5. アルゴリズムの特徴

図1に示した図が本配達の架空の住宅街でこれをもとにアルゴリズムを検討する。配達箇所は図のA、B、C点である。配達には図のP点（配達出発点）より始まり、P点に戻るものとする。図の中には南北と東西に片側1車線の道路があり、図では太線で示し

ている。その交点には信号機がある。また、南北に一方通行路があつて、この道路は交差する狭い道に対して優先道路である。

簡単のため、道路は碁盤目のように整然としていて距離は同一である。走行速度は道路事情に合わせて変えた。片側1車線道路の交差点間の通過時間は2分間とし、狭い道路は同一距離の交差点間を5分掛かるものとした。

交差点では直進・左折・右折の通過時間を区別し、交差点種類や状況に合わせるようにしている。

処理上、交差点に番号を付けてある。図1の左の端から右に1, 2, …, 16とし、P点を17とした。

配達出発点から始まり、すべての配達箇所を巡って、配達出発点に戻るまでの最短時間を求める際には、配達出発点から経由する交差点までの通過時間を計算し、木構造の枝を伸ばして行く。同様に各配達箇所から木構造の枝を伸ばして行く。この各交差点までの通過時間木構造のデータから、最短時間で配達できるルートを捜す方法が考えられる。

この方法には次のような問題点がある。交差点をたどる木構造は、すべての交差点が十字路とし、木構造の葉までの葉を含めた節の数を n 個とすると、 3^n 個の葉を持った木構造となる。本報告のように、交差点数が16箇所の場合には、まだ許されるが、交差点数が多い場合には、データ量と処理時間も問題となるであろう。一般に、広域地図上で道路探索を行う場合には、範囲を矩形領域に限定してその中の交差点について探索を行う方法が採られている。²⁾

図1の例によれば、ある配達箇所の両側の交差点から数えた他の配達箇所とのどちらか近い交差点間の道路区画数を数えると最大は3である(道路区画数をマッハタン距離ということもある)。配達箇所から出発する場合には、進行先の交差点から進出経路の先の2箇所までの交差点に枝を伸ばし、一方配達箇所に進入してくる場合には、進入してきた交差点から逆に辿って進入経路の先の交差点2箇所まで枝を伸ばす経路選択をすべて行い、木構造を作る。この木構造を、すべての配達箇所と配達出発点について作り上げると、必ず他の木構造の枝と交差する筈であり、この枝の交差から、配達経路の最小時間を求められることになる。このような手段を採用すると、べき乗の係数は2であるから、 $3^2=9$ の葉となり、データ量が遥かに少なくて済む。

この木構造は、ある配達箇所が面する道路の両側にある進入経路と進出経路の交差点の前者を根(root)、後者を第1のノードとすると、第2のノード、その先に葉(leaf)となる構造である。配達箇所から出発する場合の木構造を「進出木構造」とし、配達箇所に進入してくる場合の木構造を「進入木構造」名付ける。この一例として、C配達箇所の交差点番号15を根、14を第1のノードとした木構造を求めた結果を表1と図3に示した。この木構造の経路には、一方通行路があるので、出発と進入の木構造が異なる。

出発木構造		進入木構造	
交差点	通過時間	交差点	通過時間
15	0	15	0
14	3	14	3
13	8	13	8
9	13	9	13
		15	0
		14	3
		10	8
		9	13
		15	0
		14	3
		10	8
		11	13
		15	0
		14	3
		10	8
		6	13

表1 交差点14を根とし、14までを幹とした
出発木構造と進入木構造

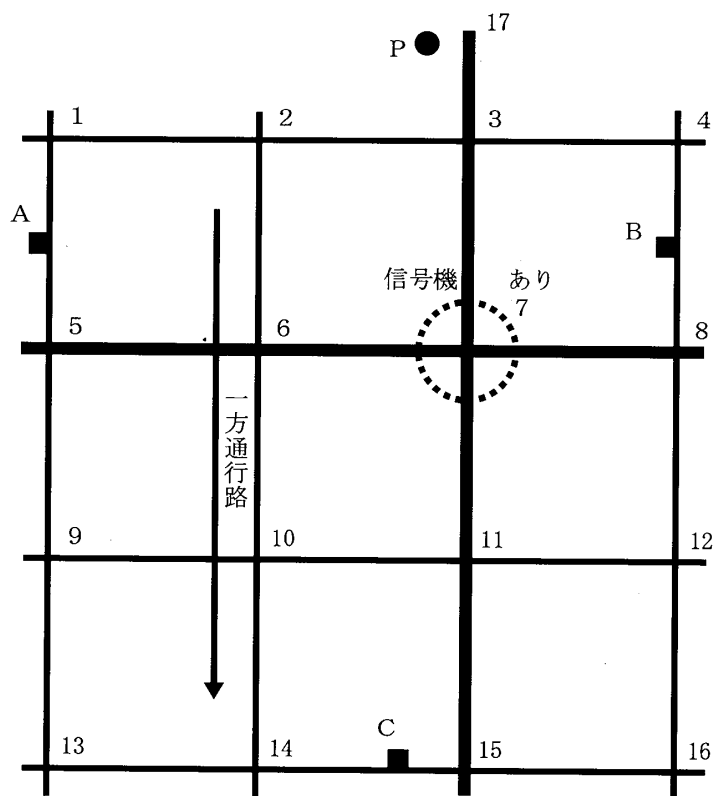


図3 配達モデル街路図

この木構造で通過経路ができたので、交差点の進路変更のデータを加える。この木構造の3交差点に図3の交差点進路変更通過時間データを利用して加算する。この結果表1のデータが表2となった。

行を交差点、列をその交差点に移動する前の交差点とした交差点行列を作る。この行列の要素は、出発木構造の場合には当該配達箇所(A,B,C,P)からその交差点に到達する時間、進入木構造の場合にはその交差点から当該配達箇所(A,B,C,P)に到着するまでの時間とする。表2の場合について、この行列を表3に示した。

$$\text{出発木構造交差点行列 } F_A, F_B, F_C, F_P = \begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,17} \\ \cdots & & \\ f_{17,1} & \cdots & f_{17,17} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{進入木構造交差点行列 } B_A, B_B, B_C, B_P = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,17} \\ \cdots & & \\ b_{17,1} & \cdots & b_{17,17} \end{bmatrix} \quad (2)$$

この行列から、次のようにして最短経路を求める。P配達箇所からA配達箇所への経路は次のようにして求める。たとえば、P配達箇所からの出発木構造交差点行列 F_P の i, j の要素を $f_{P,i,j}$ とし、A配達箇所への進入木構造交差点行列 B_A の $b_{A,i,j}$ とすると、この行列の要素が共に零でない場合には木構造の枝または葉が重なったことになるので、Pか

出発木構造	
交差点	通過時間
15	0
14	3
13	9
9	15

進入木構造	
交差点	通過時間
15	0
14	3
13	9
9	15
15	0
14	3
10	8
9	14
15	0
14	3
10	8
11	14
15	0
14	3
10	8
6	13

表2 交差点15を根とし、15までを幹とした交差点通過時間を加えた出発木構造と進入木構造

出発木構造交差点通過時間

out in	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

進入木構造交差点通過時間

out in	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	15	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 交差点間通過時間行列の1列

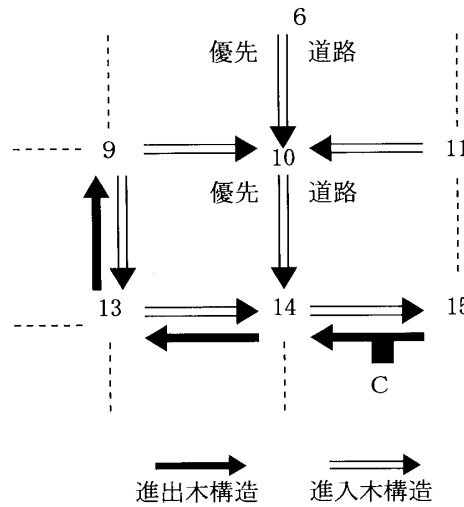


図4 交差点15を根とし、15までを幹とした
出発木構造と進入木構造

らAへの通過時間を次の式で求めることができる。

$$T = t_f + t_b - t_{i,j} \tag{3}$$

ただし

$$f_{P,i,j} \neq 0 \text{ かつ } b_{A,i,j} \neq 0$$

ここで、Tは求める通過時間であり、 t_f は出発木構造行列の行列要素の時間、 t_b は一致した進入木構造行列の行列要素の時間、 $t_{i,j}$ は交差点 i, j 間の通過時間である。 $t_{i,j}$ を減算した理由は、 $t_f + t_b$ の計算では、交差点の通過時間を2重に計算しているからである。

この結果を使って表4が出力される。このデータには、A,B,C及びP点間を交差点の進行方向区分されて表されている。たとえば、P(17-3)は出発点Pから交差点17から交差点3への進行方向を示す。

この問題では、いくつかの配達箇所同士を相互に結びつけない場合がある。表4から、この相互に結びつけない配達箇所を除いたものを表5に示す。これから、解は簡単に求められ、 $P \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow P$ となった。交差点を表示すると、

$$P \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow A \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 10 \rightarrow 14 \rightarrow C \rightarrow 15 \rightarrow 11 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow B \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow P$$

となり、この配達時間の総計は58分である。

配達箇所から配達箇所へ			配達箇所から配達箇所へ			配達箇所から配達箇所へ		
通過 交差点	通過 交差点	配達 時間	通過 交差点	通過 交差点	配達 時間	通過 交差点	通過 交差点	配達 時間
A (1-5) to B (8-4)			B (4-8) to C (15-14)			C (14-15) to B (8-4)		
6	7	14	7	11	14	11	7	14
A (1-5) to B (4-8)			12	11	21	11	12	22
A (1-5) to C (14-15)			12	16	25	16	12	26
6	10	20	B (4-8) to P (3-17)			C (14-15) to B (4-8)		
9	10	25	7	3	10	C (14-15) to P (3-17)		
9	13	26	8	7	10	11	7	10
A (1-5) to C (15-14)			B (8-4) to A (5-1)			P (17-3) to A (5-1)		
A (1-5) to P (3-17)			B (8-4) to A (1-5)			2	6	19
6	7	11	3	2	24	7	6	12
A (5-1) to B (8-4)			B (8-4) to C (14-15)			P (17-3) to A (1-5)		
A (1-5) to B (4-8)			B (8-4) to C (15-14)			2	1	15
2	3	21	B (8-4) to P (3-17)			3	2	15
A (5-1) to C (14-15)			4	3	9	P (17-3) to B (8-4)		
A (5-1) to C (15-14)			C (15-14) to A (5-1)			3	7	8
A (5-1) to P (3-17)			13	9	26	7	8	8
1	2	15	C (15-14) to A (1-5)			P (17-3) to B (4-8)		
2	3	15	C (15-14) to B (8-4)			3	4	8
B (4-8) to A (5-1)			C (15-14) to B (4-8)			P (17-3) to C (14-15)		
7	6	15	C (15-14) to P (3-17)			P (17-3) to C (15-14)		
B (4-8) to A (1-5)			C (14-15) to A (5-1)			7	11	10
B (4-8) to C (14-15)			C (14-15) to A (1-5)					

表4 配達ルート決定のための出力結果

配達箇所から 配達箇所へ			配達箇所から 配達箇所へ			配達箇所から 配達箇所へ			配達箇所から 配達箇所へ		
通過 交差点	通過 交差点	配達 時間	通過 交差点	通過 交差点	配達 時間	通過 交差点	通過 交差点	配達 時間	通過 交差点	通過 交差点	配達 時間
P (17-3) to A (5-1)			A (1-5) to B (8-4)			B (4-8) to A (5-1)			C (15-14) to A (5-1)		
2	6	19	6	7	14	7	6	15	13	9	26
7	6	12	A (1-5) to C (14-15)			B (4-8) to C (15-14)			C (14-15) to B (8-4)		
P (17-3) to A (1-5)			6	10	20	7	11	14	11	7	14
2	1	15	9	10	25	12	11	21	11	12	22
3	2	15	9	13	26	12	16	25	16	12	26
P (17-3) to A (5-1)			A (1-5) to B (8-4)			B (4-8) to A (5-1)			C (14-15) to P (3-17)		
3	7	8	6	7	11	7	3	10	11	7	10
7	8	8	A (5-1) to B (4-8)			8	7	10			
P (17-3) to B (4-8)			2	3	21	B (8-4) to A (1-5)					
3	4	8	A (5-1) to P (3-17)			3	2	24			
P (17-3) to C (15-14)			1	2	15	B (8-4) to P (3-17)					
7	11	10	2	3	15	4	3	9			

表5 表4を配達箇所等で分類したデータ

4. むすび

本報告の1. に述べたように、個別配達の著しい伸びに伴い、生活協同組合をはじめとして、多数の業者が入り乱れて参入する傾向がみられる。この場合は、配達コストを下げ、いかにサービスを向上させるかが問題である。

コストを低下させるためには、配達経路の最適化も必要であろうと考え、プログラムを作成した。本報告の特徴は柔軟性のあるデータ構造とルート選択のための枝の長さを制限した木構造である。後者は街路間の距離（マンハッタン距離）を考慮して、進出木構造・進入木構造を構成したので、選択枝が短くなった。

今後の予定としては、

- (1) 道路地図データにより、実際の問題を解く。
- (2) 実際の通過時間に渋滞を考慮する設定とする。
- (3) 上記設定や変更と結果の表示には、利用者が利用しやすいGUI(Graphical User Interface)のプログラムを開発する。
- (4) 広域の領域で、複数の配達車両があった場合の問題を扱う。

参考文献

- 1) 玉木久夫“巡回セールスマン問題の近似アルゴリズム：天才アローラによる20年ぶりの急進展”, 情報処理, Vol.39, No. 6, pp.566-573(1998)
- 2) 加藤誠巳“経路探索問題とその応用”, 情報処理, Vol.39, No. 6, pp.552-557(1998)
- 3) 倉田“配達ルートの最適化問題”, 日本シミュレーション&ゲーミング学会大10回全国大会, 1998, 10月