

生活協同組合の共同購入の配達経路最適化システムについて

井川 信子[†] 倉田 是[‡]

[†]流通経済大学法学部 〒301-8555 茨城県龍ヶ崎市 120
[‡]千葉大学名誉教授

E-mail: [†] ikawa@rku.ac.jp, [‡] ta-kura@parkcity.ne.jp

あらまし 最適配達経路問題は近年急速にニーズが高まり、地理情報と連動した支援システムも充実している。特に、生活協同組合等の生鮮食品を含む多種商品の共同購入を例に小口配送を考える。この配送は従来、熟練配達員に依存していた。しかし要員不足などの理由で熟練配達員でないものが配達する場合、また、当日に配達個所の追加などの経路変更にさいして、熟達した職員でない配達員でも容易に配達経路の作成・変更できる支援システムの開発をめざしている。特に、住宅地域内の私道に至っても表示可能とする詳細地図情報を作成し、発見的手法を用いて最小木パスを決定する配達経路探索アルゴリズムに改良した。さらに支援システムの操作性も向上させた。キーワード 配送計画、支援システム、最適配送ルート、発見的解法、共同購入

A Supporting System about the Decision of Optimum Delivery Route Using Heuristic Algorithms in the case of Joint Purchasing

Nobuko IKAWA[†] and Tadashi KURATA[‡]

[†] Faculty of Law, Ryutsu Keizai University, 120 Ryugasaki Ibaraki 301-8555, Japan

[‡] Emeritus Professor, Chiba University, Chiba, Japan

E-mail: [†] ikawa@rku.ac.jp, [‡] ta-kura@parkcity.ne.jp

Abstract For high frequency small sum delivery and for delivery efficiency improvement due to driver shortage, recently, the solution of optimum delivery route problem (Vehicle Routing Planning: VRP) requires cooperated the support system of decision support system and the geographic information system. We develop a support system to decide easily the optimum delivery route even if the driver is not expert. In this paper, we have improved the route search algorithm by using a heuristic method in the case of joint purchasing and we made the detailed road information data. Furthermore, the support system is easy to operate and the function of support system has improved, too.

Keyword Vehicle Routing Planning, Supporting System, Optimum delivery route, heuristic algorithms, joint purchasing

1. はじめに

最適配達経路問題 (Vehicle Routing Planning: VRP) は、高頻度小口配送や運転手不足に伴う配送効率向上と配送コスト低減の要請や省資源対応に加えて、出庫の自動化に伴う配送順序の事前計画の必要性から、近年急速にそのニーズが高まっている。この問題の原問題は需要地間の配送コスト (距離) が与えられたもとで総配送コストを最小にするように配送順序を決める巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problems: TSP) であり、これに基づくヒューリスティック手法 (heuristic method: 発見的手法) を含めて多くの解法が提案されている [1],[2],[3]。さらに、配送計画支援システムに VRP データとして、地理情報システム

(Geographic Information System: GIS) を活用し、デジタル地図を効率よく処理するデータベースシステムを連動したパッケージソフトウェアも多数市販されている [4]。この配送計画支援システムとは、受注情報をもとにして、いつ、どこの個所に、何を、いくつ、どの車両で、どのようなルートで配送するかをさまざまな制約条件のもとで意思決定することを支援する情報システムである。製品化されている配送計画支援システムの主なものを調べ [4]、それらを管理する配送車両台数と配達個所数から、図 1 のように大きく 3 つに分類して考える。すなわち自動配送計画方式とは、オペレーションズリサーチ (Operations Research: OR)、や遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms: GA)、シミュ

レーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA) などの最適化手法,あるいは人工知能 (AI) をシステムに内蔵して自動的に配送計画を行う。シミュレーション方式 (半自動配送計画) は,パラメータ数が多く複雑な場合,自動計画にシミュレーションを加えて実施することで個々のケースに応じた,より実用的な配送計画を行うというものである。一方,管理車両台数が少ない場合については手作業で行うという考え方もある。

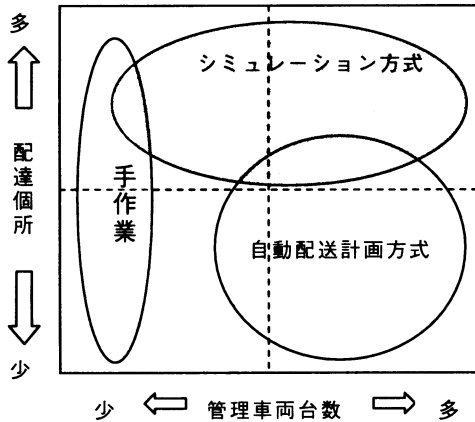


図1 適応領域による支援システムの分類

シミュレーション方式による支援システムの運用では,当日の配達個所の変更に応じて最適経路を,人が支援システムを対話的に操作して探索するケースが多い。したがって支援システムは短時間で容易かつ正確に操作できることが重要である。一方,これまで熟練者による手作業が可能であった配送計画も,熟練者の早期退職など人手不足や企業間競争によるより綿密な戦略が要求される現状,支援システムの導入を余儀なくされつつある。本論文で提案する支援システムは,従来配送計画を手作業で行う対象に対して,シミュレーション方式の,より安価な,そして小口配送のニーズに着目したものとして構築することを目的とする。

本稿では,生活協同組合などの共同購入を例にして最適配達経路を提示するシステムを開発した。生鮮食品を含む食料品から生活用品まで多品目に及ぶ商品を受注し,顧客まで配達するため,共同購入の形態が効率的であり,ほとんどが固定した顧客に定期的に通常,1週間に1回配達する。最近では,ネット販売における共同購入方式の利用が急増したこともあり,共同購入方式の需要が増えている。小口配送なので1台の車

両 (一人当たり) に平均 15~50 個所に配達する。共同購入においても当然効率よい配達,労務管理や時間的コスト低減の面で望まれる。また,システムにおける計算の高速化のためには,アルゴリズムの改良や地図データなどのデータ構造の工夫が不可欠である。

すでにこれまでも論じているが[5],[6],最適配達経路探索問題の原題は TSP である。しかし TSP において全経路についてコストを計算し最小値を見つけるような数え上げ法 (enumeration) を用いると,組合せの数の増大に比例して計算回数が増大してしまう。本論文における支援システムにこの方法を導入すると,一方通行,Uターン禁止,車両駐車場所などについて実用的な制約条件を設定しているが,これら複雑な制約条件に対して全経路対象にした莫大な計算が必要となってしまう。TSP に対して実用的な近似解を指向するという発見的解法を用いてこの問題を解くことが最近が多い。たとえば,小野らは[3],複数デポ (Depot: 配送センター) に対して各担当都市 (配送先) をクラスタとして扱い,ある都市に対していずれのクラスタに帰属させるかを *c-means* 法による帰属度値で判断するという方法を提案している。

本論文においても TSP において発見的な手法を用いる。各ノードにおけるコスト (所要時間) による近傍を求め,その範囲に SA を適用し,確率的選択による最適配達経路を算出するというものである。実際この方法で経路探索のアルゴリズムを高速処理可能に改良し,実験支援システムを構築し,検証した。特に,配達先変更すなわち,配達先削除あるいは新たな配達先が追加される場合の最適経路探索は,デポから配達先への距離ではなく,走行所要時間 (の最小化) を目的関数とし,ルートから探索木を再構築する手法だけではなく,GA 的手法により過去の履歴データ (遺伝情報) を活用し,ノードの最適挿入個所を探索して最適探索木を作成する方法も提案している。所要時間を目的関数とするのは,配達要員配置人数など実用面を考慮したものである。

2. 最適配達経路表示支援システム

2.1. システムの目的

共同購入は,ほぼ固定した顧客からの受注に対して1週間に1回配達する。業務の従事者は常勤職員あるいは,定時雇用者である。配達するものは食品が主である。したがって,欠勤者の受け持ち配達個所の代理配達の際にも配達の所要時間をできるだけ短縮すると同時に,特に代理配達者には判りやすい配達経路地図を携行させる必要がある。

これらの要件を満たすべく以下の目的によりシステムを構築している。

【システムの要件】

- (1) 車両割付の素人化。
- (2) 操作性を容易にする（エンドユーザによるメニュー方式，マウス選択とする）。
- (3) 処理時間の短縮。
- (4) 地図に配達経路を判りやすく印刷する。
- (5) 道路幅の狭い住宅密集地も配達対象地域であるので，安全性の面を考慮して，Uターンを行わない経路を作成する。
- (6) 配達員労務管理上の効率化として，道路横断による交通事故防止および荷物を車両から降ろした後の運搬負担軽減などのために，片側1車線の道路でも，交通量の多い幹線道路では，配達個所のある側に車両を停車するようにする。

2.2. システムの機能概要

最適配達経路表示支援システムの機能は以下の通りである。

- (1) 共同購入組員（顧客マスタ）管理
共同購入組員データの新規登録，更新，削除を行う。

- (2) 道路情報マスタデータ管理
道路情報の基本データを作成，更新を行う。

- (3) 最適配達経路表示・印刷処理
配達コースの組員を組員リストから選択して，それぞれの基本データを抽出し，最短の配達経路を求めて，地図を印刷する。最短の配達経路を求める機能には図2に示すように，①新規コース作成，②配送先変更によるコースの更新，③代配コースの作成の3つがある。②では“新規作成”と“既存コースをできるだけ変更しない”のどちらかを選択することができる。また③の代配は②における“既存コースをできるだけ変更しない”方法を採用する。

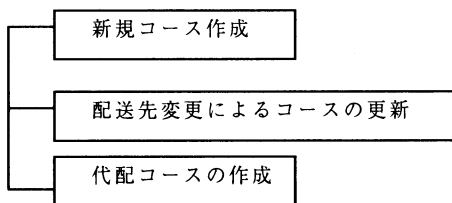


図2 最短経路を求める機能

(1)および(2)はマスタ管理すなわち，配達出発直前に実施しなくても良い。(3)の処理で，最短経路を地図上に表示し，印刷する。

3. システムの特徴

3.1. 走行安全性を重視した詳細地図データの作成

日本の道路では交通渋滞や右折禁止，一方通行さらに交通事故多発地帯，開かずの踏み切り，高さ制限のあるカーブなどいろいろな要素の組合せを考慮したうえで配車業務は成立する。これらの要素を地図データ構築に反映することは望ましいが，これらすべての要素を情報システム化するには莫大な費用と労力を要す。本システムでは特に，先に述べたように走行安全性を重視し，“Uターンを行わない”ということと“配達車の停車位置は道路の配達個所側”を考慮したきめ細やかな地図データを作成する。そこで本システムでは，住宅地域内の配達に利用する路地の道路までをデータ化するために，道路地図を作成する。

これまで報告した論文[5],[6]で利用している地図は，MapInfo に搭載されている電子地図であった。主要道路のみではあるが，電子地図のなかでは，道路専用の地図であり，われわれのニーズに近い。しかしながら，住宅街区を詳細に表示している道路地図と重ねて比較すると，主要道路にもずれが見受けられ，場所によっては明らかに間違っている道路もある。MapInfo の地図座標は，球面座標系で作られている。距離の計算には極めて都合がよくかつ上から他のラスターキャン形式の地図を貼り付けることができるので，これを活用して，MapInfo の地図に市販（ゼンリン）の道路地図を重ね，より精度の細かい地図データを作成した。MapInfo の地図上に，主要道路の緯度経度をあわせてゼンリンの地図を載せ，その後 MapInfo の道路を全て削除し，残ったゼンリンの地図の道路に合わせて MapInfo の座標系による道路地図データを再構築した。

次に，地図道路の座標値をもとにして処理に必要な情報をデータ化する。データ化の基本を交差点に注目する。すなわちそれぞれの道路区間を基本とする交差点の種類を図3のように3つに分類し，基本有向木で表現する。まず地図の道路区間と道路点データを作成し，道路番号，道路幅員，一方通行（路），信号機を順次付加する。表1にデータ項目を示す。

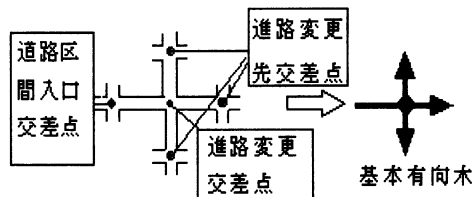


図3 交差点基本分類

表 1 交差点基本分類

データ項目		
入口	交差点	道路点ID
変更	交差点	道路点ID
距離		m
道路	番号	
道路	幅員	0~2
一方	通行	0,1
信号	機	0,1
分岐	数	0~5
分岐先	交差点	道路点ID
分岐先	交差点	道路点ID
分岐先	交差点	道路点ID
分岐先	交差点	道路点ID
分岐先	交差点	道路点ID

の場合には(4. で述べる適用例)表3を適応しないで、その代わりに表2の速度を()に示す速度で計算する。

表 2 道路分類と速度の設定

道路種別	速度(km)
幹線道路	40 (30)
一般道路	30 (20)
住宅内道路	20 (10)

表 3 交差点通過時間の設定 (通過時間 m sec)

進入道路	住宅内道路					
進出道路	住宅内道路		一般道路		幹線道路	
信号機	無	有	無	有	無	有
通過時間	200	400	400	600	600	500
進入道路	一般道路					
進出道路	住宅内道路		一般道路		幹線道路	
信号機	無	有	無	有	無	有
通過時間	100	400	50	400	600	800
進入道路	幹線道路					
進出道路	住宅内道路		一般道路		幹線道路	
信号機	無	有	無	有	無	有
通過時間	0	400	0	400	0	400

3.2. 最適経路探索アルゴリズム

まずデポと配達個所相互間の距離を算出し、次に道路走行速度、信号機による待ち時間等を考慮した予想所要時間を算出する。先に述べたように、最適配達経路を決定するための目的関数を走行距離ではなく、走行所要時間(の最小化)とする。

(1) デポと配達個所間の距離の算出

デポと配達個所相互間の距離を求める。まず、道路区間の距離を求める2地点の一方は前方に他方は後方にそれぞれ木を作成し、枝が重なったところで距離を求め、配達個所への進入経路と配達個所からの進出経路の両方を表現する木構造のデータを作成する(図4)。すなわちこのデータは、基本交差点有向木を組み合わせて作成する。

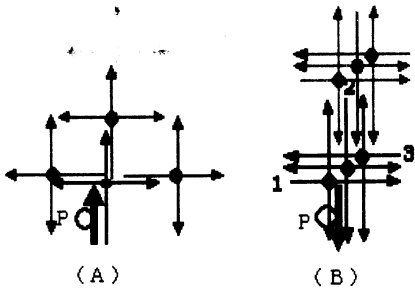


図 4 進出木構造 (A) と 進入木構造 (B)

(2) デポと配達個所間の予想走行所要時間の算出

デポと配達個所間の予想走行所要時間を算出するためにまず、走行する道路の種類を3種類に分類し、予想走行速度を設定する(表2)。さらに、交差点の予想通過時間を表3のように設定する。表3では、表2に示した道路分類の組合せに対して、信号機の有無ごとに経験的に得られた交差点通過時間を設定する。ただし、中央分離帯のある道路を含む地域

(3) 候補点の確率的選択による最適経路探索

木のルートである各地域センターから枝の深さの最大値は24としている。また、ノードである各配達個所からの最大値は12としている。区分道路区間を表すデータ構造を表4に示す。2個の道路点IDは道路区間の両側のノードを示す。累積走行所要時間は、デポまたは配達個所から、あるいは個所までの時間を示す。道路区間の走行所要時間の和である。枝の深さは、各枝の幹(=0)から数えたもので、最大は24または12である。道路区間長は物理的距離であるが、参考のために付加している。

表 4 進出木及び進入木による区分道路区間のデータ構造

道路点 1ID
道路点 2ID
累積走行所要時間
道路区間走行所要時間
枝の深さ
道路区間 ID
道路区間長

最適経路（走行時間の最小値）の探索処理は次の順に行う：

【Step1】

基本データから進出木と進入木の枝が相互に重なったもののうち、最短時間のものを相互間の最短走行時間として新たに表5に示すデータリストを作成する。

【Step2】

表5に示したデータリストをもとにして、最適経路を探索する。探索のアルゴリズムは、以下のとおりである：

- [1] ノード間走行時間 $s(i)$ を設定する。十分小さい $s_e \geq 0$ 、ノード (n) に対して、 $s_e \leq |s(n-i)|$ を満たすノード (i) のうち、 $|s(n-i)|$ の値の小さいものから3個のノードを選び近傍を構成する。ここで $s(n-i)$ はノード (n) とノード (i) の走行時間の差分である。
- [2] 現在ノードから次の最適パスを見つけるために、並列的 SA を用いる。すなわち、3つの近傍点に対して、次式で示される確率を計算して最適解を決める：

$$p_i(\delta E_i) = \exp\left(-\frac{\delta E_i}{T_i}\right), \quad i = 1, 2, 3$$

ただし、 δE_i は（所要時間の差分）、 T_i は仮想温度で、近いところほど高い温度を設定する。図5に示す例では、ノード(A)の3近傍点が(B),(C),(D)となっている。このとき確率的に (B), (C), (D) の順で選ばれる。

- [3] カレントノード (n) と候補から次のパスを引くノード $(n+1)$ が確定したら、表6のデータリストをノード $(n+1)$ について作成する。
- [4] [1], [2], [3]の処理をすべてのノード（配達個所）に対して行い、データリストを作成する。繰り返し回数の上限を 20,000 回に設定する。

【Step3】

表6のデータリストで表されたすべてのノードに対して、進出木と進入木の該当番地の枝を調べ、その枝の番号を0まで遡ることによって、デポあるいは配達個所まで達し、最適なパスを求め、そのデータリストを作成する。その際、走行所要時間と同時にその最適パスの累積道路区間長も表示する。データリスト項目は表7の項目で構成する。

(4) 配達個所更新による最適経路の再構築

次に、配達個所変更が発生して最適経路を再表示する場合である。この場合は、ルート（デポ）からの探索木の再構築の方法と、GA的手法を用いる。

表5 最短走行所要時間表のデータ構造

0	出発するデポまたは配達個所番号
1	出発時の道路の進行方向
2	到着するデポまたは配達個所番号
3	到着時の道路の進行方向
4	走行時間
5	道路点 1ID
6	道路点 2ID
7	進出木構造の該当する枝の番地
8	進入木構造の該当する枝の番地
9	道路区間走行時間
10	道路区間 ID

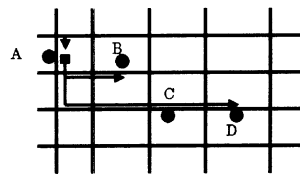


図5 次の配達個所決定のイメージ

表6 N番目の配達個所のデータリスト

N番 目の配達個所	
到着するデポまたは配達個所番号	
到着時の道路の進行方向	
走行所要時間	
道路点 1ID	
道路点 2ID	
進出木構造の該当する枝の番地	
進入木構造の該当する枝の番地	
道路区間走行所要時間	
道路区間 ID	

表7 最適経路表示データリスト

道路点 ID
配達個所（無ければ0を表示）
道路区間 ID
配達個所があれば、走行所要時間
累積道路区間長

適応度の比較的良好な経路（前回の探索履歴データ）を選択（適応度に基づき次の交叉対象固体であるノードを選ぶ）して、その木に対して最適な挿入個所（最小バス）を見つけて挿入するアルゴリズムを適用する。探索の際に生成したデータリストの第 n 番目表示は同様に表6である。挿入個所を見つけ挿入

後、最適パスを求めた結果データも表7の形式である。

(5) 地図表示

表7のデータを地図に自動表示する。選択メニューによって、配達個所と配達個所ごとの走行所要時間の表示も可能である。同一道路を往復する場合には、行きと帰りを区別するために、進行方向に向かって、道路の左側にずらしてかつ方向性を矢印で持った線を表示している。また、配達個所を一定のシンボルで表示することも可能である。

4. 適用例と評価

(1) 地図データの作成

まず地図データの作成であるが、生活協同組合ちばコープの松戸地域センターが担当する配達地域の一部を利用した。JR「新松戸」駅から武蔵野線の線路に沿って西南の東西1.3 km、南北1.8 kmの地域である。地図の作成は基本的には手作業である。各道路点（交差点）及び道路点と道路点間の道路区間に、それぞれ唯一の番号を付与する。MapInfoの地図システムを使って、自動的に緯度経度で道路点と道路区間距離が生成される。MapInfoの地図システムは、本システムの地図作成に極めて有用である。

(2) 探索結果表示例

構築した支援システムの主要画面遷移を図6に示す。まず配達先19個所に対してシミュレーションを行う。結果得られた最短経路を地図上に自動表示した画面を図7に示す。予想最適走行所要時間および配達個所順の表も出力する。この場合約24分で配達完了する予定である。

さらに、図8は配達先を2個所追加する際、既存コースをなるべく変えない（GA的にいうと適合度の良いものを選択）手法と追加点もあわせても新規に再構築する手法でシミュレーションを実施した結果である。

(3) 評価

支援システムを使い、配達個所の入力開始から地図の印刷までを平均5分以内で処理することができる。この時間内ならば実用に対応できると考える。

一方、近傍を対象にSAを適用して近似的最短経路を求めるという発見的アルゴリズムを用いたが具体的に最適解を与えるのに3近傍が最も妥当か、あるいは妥当な仮想温度の設定などの検証はこれからの課題として残されている。

また、過去の配達個所をできるだけ変更しない場合

と再構築の場合、図9に示した例では再構築のほうが遅い結果（予想走行時間が長い場合）であるが、予想走行時間だけからではどちらが良いとも確定できない。しかしながら配達要員の熟練度を考慮すると、通常の個所をできるだけ変更しない方が効率良いように感じる。

5. むすび

本稿では、生活協同組合等における共同購入で利用する実用可能なシステム構築を目指してきた。そのためまず、配達区域の道路地図データ化は、住宅内地図データを作成し、これまでにわれわれの提案したものよりも実用に耐えられる精度の良いものに更新できた。また、熟練者でなくても操作が困難でないエンドユーザ向けの操作インタフェースを開発した。さらに、最適配送経路探索アルゴリズムには経験則から得られた道路区間走行速度や交差点における走行および所要時間を設定し、経路探索における制約条件の精度を向上した。最適経路探索においては近傍を設定し確率的選択(SA)により次の経路を決める方法を用いた。さらに、配達個所更新においては木の再構築をルートから実施せずに、前回の最適木を用いて、パスを最小にするノード挿入個所を探索するというGA的手法も示唆した。しかし、細かなパラメータ設定の検証を行うことによって最適な近似解を評価することを今後実施しなければならない。また交差点通過時間などを地域の実情に合わせることも今後の課題である。

一方、試運用を行うことによって、実際に支援システムを使用する配達員にアンケート調査を実施し、その結果を分析することによって、さらなる操作性の向上、経験則データの更新などを行うことも今後の課題である。

文 献

- [1] 谷口栄一、根本敏則、シティロジスティクス、森北出版、2001。
- [2] 増井忠幸、百合本茂、片山直登、ロジスティクスのOR、横書店、1998。
- [3] 小野勉、金川明弘、高橋浩光、“c-meansクラスタリングを用いた複数デポ巡回セールスマン問題の発見的解法”、信学論(A), vol.J87-A, no.7, pp.938-948, Jul. 2004。
- [4] 運輸新聞、ロジスティクス総合システムガイド、運輸新聞株式会社、2004。
- [5] 倉田是、“配達経路最適化のアルゴリズムについて”、情処研報、2002-ITS-10, vol.2002, no.83, pp.29-36, Sept. 2002。
- [6] 倉田是、谷島康蔵“配達経路探索の統合環境への試み”、信学技法、ITS2002-125, vol.102, no.695, pp.49-52, Mar. 2003。

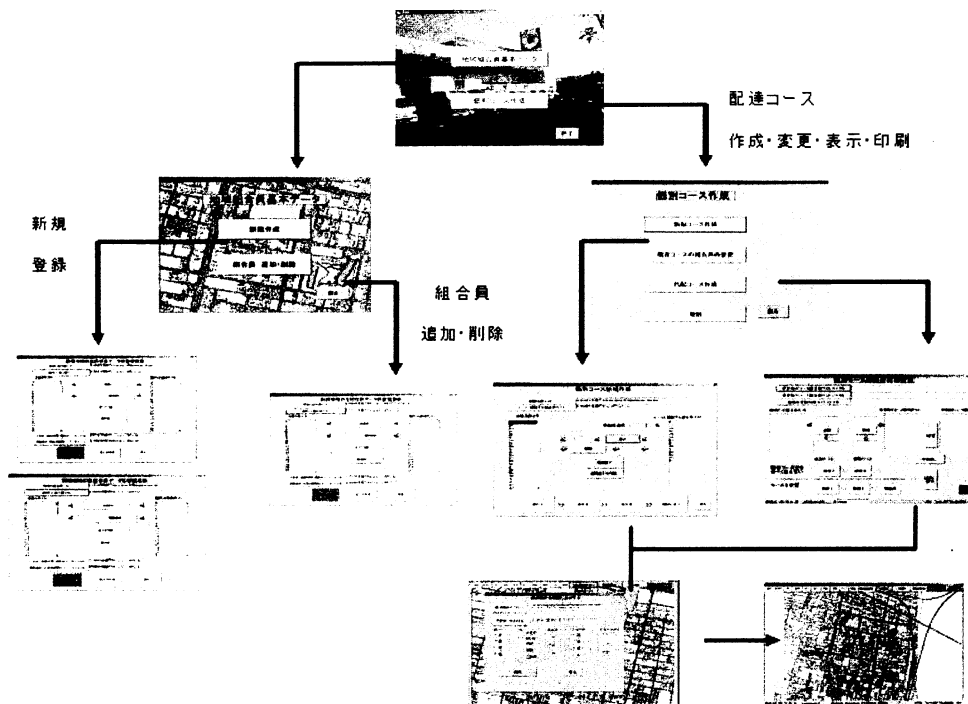


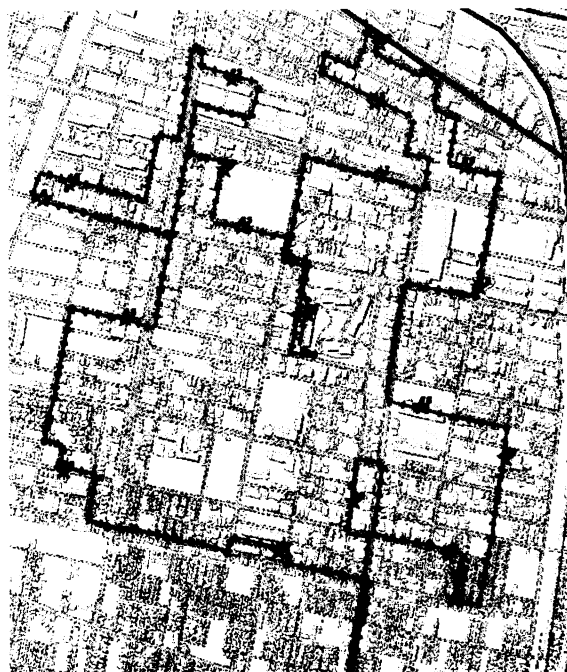
図 6 最適配達経路表示支援システムの主要画面遷移



デポ:1 配達個所:19			
順序	組合員番号	走行時間(分)	走行距離(m)
1	60	2.4	1,490
2	85	3.41	1,933
3	90	3.64	2,004
4	95	3.93	2,053
5	80	5.28	2,435
6	75	6.45	2,869
7	70	7.29	3,186
8	40	8.55	3,595
9	45	9.47	3,974
10	55	11.19	4,782
11	50	11.98	5,036
12	35	13.09	5,353
13	30	13.47	5,519
14	5	14.53	6,087
15	10	15.11	6,213
16	25	16.63	6,882
17	15	18.49	7,660
18	20	20.33	8,165
19	65	21.68	8,783
20	センター	23.98	10,294

図 7 最短経路の新規作成結果表示例

デポは1つ(図の下方)、配達個所は19個所である。左図は最短経路表示、右図はノードの経路順と各個所までの走行時間および走行距離である。



経路履歴活用 デポ:1, 配達個所:19, 追加:2=>21			
順序	組員番号	走行時間(分)	走行距離(m)
1	60	2.40	1,490
2	85	3.41	1,933
3	90	3.64	2,004
4	95	3.93	2,053
5	80	5.28	2,435
6	78	6.33	2,698
7	75	7.44	3,183
8	70	8.28	3,500
9	40	9.54	3,909
10	45	10.46	4,288
11	47	11.54	4,659
12	55	12.82	5,202
13	50	13.61	5,456
14	35	14.72	5,773
15	30	15.10	5,939
16	5	16.17	6,507
17	10	16.75	6,633
18	25	18.26	7,302
19	15	20.12	8,080
20	20	21.96	8,585
21	65	23.31	9,203
22	センター	25.61	10,714



再構築 デポ:1, 配達個所:19, 追加:2=>21			
順序	組員番号	走行時間(分)	走行距離(m)
1	85	2.37	1,546
2	95	2.89	1,666
3	90	3.77	1,617
4	80	4.36	2,083
5	78	5.41	2,346
6	75	6.51	2,831
7	70	7.36	3,148
8	40	8.59	3,649
9	45	9.38	3,999
10	47	10.45	4,370
11	35	11.31	4,813
12	30	11.69	4,979
13	15	12.78	5,514
14	5	13.76	5,932
15	10	14.34	6,058
16	25	15.86	6,727
17	50	18.45	7,406
18	55	19.24	7,660
19	20	21.18	8,728
20	65	23.14	9,403
21	60	24.14	9,740
22	センター	26.15	11,230

図8 追加2個所に対して既存コースを変更しない場合(上)と再構築の場合(下)の表示結果例
それぞれ右の表は、配達順と各個所への所要時間と走行距離を表す。