

時間地図作成問題の汎用解法

清水英範¹・井上 亮²

¹正会員 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: shimizu@civil.t.u-tokyo.ac.jp

²学生会員 修(工) 東京大学大学院博士課程 工学系研究科社会基盤学専攻

E-mail: inoue@trip.t.u-tokyo.ac.jp

時間地図とは、地点間の時間距離を地図上の距離によって表現する地図のことをいう。この作成手法に対する従来のアプローチは2つに分けられる。1つは、対象地点間全ての時間距離を再現しようとする方法である。一般に多次元尺度構成法(MDS)が適用される。もう1つは、対象地点を結ぶ連結ネットワークを考え、この辺に相当する地点間の時間距離のみを再現しようとする方法である。この方法に対しては、これまで数学的に明快な解法は提案されていない。

本論文では、時間地図作成問題を非線形最小二乗問題で表現し、これをベースに上記の2つのアプローチの双方に適用可能な数学的に明快かつ実用性の高い汎用解法を提案する。

Key Words: time-distance map , multidimensional scaling , Levenberg-Marquardt method

1. はじめに

時間地図とは、地点間の時間距離を地図上の実距離によって把握できるような地図、すなわち時間を縮尺にもつ地図のことをいう。時間地図と実地図との比較によって交通サービス水準の地域格差を、時間地図の時系列的な比較によって交通サービス水準の時代変遷を視覚的に示すことができる。

時間地図作成の基本的問題は、地点間に時間距離が与えられている幾つかの地点(対象地点)を平面上にいかに配置するかという問題である^{1),2),3)}。従来のアプローチは、大きく2つに分けられる。

1つは、対象地点のすべての2地点間に与えられた時間距離を再現しようとする方法である。本研究では、この方法を完全ネット型時間地図と呼ぶ。解法には多次元尺度構成法(MDS)⁴⁾が適用されるのが一般である。数学的に明快であり、また、適当な最適基準のもとに、時間地図の図形(地点配置)形状は一意に確定される。あとは、回転、平行移動の拘束によって、設定する座標系に時間地図を固定すればよい。しかし、すべての地点間の時間距離を再現しようとするため、対象地点数が多い場合には、局所的には再現精度が著しく低下し、違和感のある時間

地図が得られることがある。

もう1つの方法は、鉄道網や道路網などを参考に対象地点を結ぶ連結ネットワークを考え、このリンクに相当する地点間の時間距離のみを再現しようとする方法である。本研究では、この方法を部分ネット型時間地図と呼ぶ。大都市間の時間距離、地理的に近い都市間の時間距離といったように、多くの人が注目するであろう時間距離を精度よく再現する操作が容易である。もちろん、リンクが定義されない地点間の時間距離は一切無視されるため、全ての対象について効果的とは言いきれないが、一般的には、違和感の少ない時間地図を得やすい。

筆者らの理解では、部分ネット型時間地図は梶谷他(1995)⁵⁾、古藤(1997)⁶⁾がパイオニアであり、この分野でのわが国の貢献という意味においても注目される。しかし、四角形ネットワークの各リンクに与えられた時間距離を再現しようとする場合を考えれば明らかのように、部分ネット型時間地図は、時間距離だけでは必ずしも図形形状を確定することができない問題である。梶谷他、古藤による解法も、いろいろな状況に対して、それぞれ対応を用意するという、個別問題解決型の手順構成になっており、数学的に明快な解法とはなっていない。

さて、完全ネット型時間地図は、全ての対象地点間に時間距離を与えた部分ネット型時間地図の特殊形であるので、部分ネット型時間地図の数学的な解法を用意すれば、それは時間地図作成のための汎用解法になる。汎用解法があれば、完全ネット型時間地図と部分ネット型時間地図を適宜使い分けることができるばかりでなく、両者の利点を活かした折衷法的な応用も容易になる。

本論文では、時間地図作成問題を非線形最小二乗問題で表現し、これをベースに、この汎用解法を提示する。論点と論文の構成を整理しておく。

部分ネット型時間地図は、先に述べた通り、地点間の時間距離のみから図形形状を確定できない、解の一意性が保証されない不適切な問題である。そこで、不適切性を解消するための何らかの正則化条件を必要とする。このような非線形最小二乗問題の数値解法はいくつか提案されているので、これらを採用することにより、時間地図作成のための一つの汎用解法を提示することができる。

第2章では、解の一意性が保証されない非線形最小二乗問題の最も代表的な解法の一つであり、多くの数理計画用のプログラム・パッケージにも採用されているLevenberg-Marquardt法を用いて、時間地図作成のための一つの解法を提示する。しかし、このような一般的な数値解法が、時間地図作成という特定の目的に対して実効性の高い解法であるかどうかは議論を要する。

時間地図は、実地図との比較によって意味を持つ。地域間の交通整備水準の違いを実地図との比較によって分かりやすく表現する必要がある。そのためには、時間距離の再現とは無関係な、実地図と時間地図の相違を極力排除しなくてはならない。また、時間地図は、あくまで視覚化の方法であり、政策的な意思決定を直接支援するものではない。個人の思考や集団での議論の過程で適宜用いられるものである。個人的な興味や遊び感覚での利用も多いだろう。GISエンジンの拡張機能として装備し、ユーザーの関心、興味によって適宜利用するといった類のものである。そのため、時間地図作成の解法は、徹底してユーザー・フレンドリーなものである必要がある。初期値の与え方に試行錯誤的な苦勞を強いる解法や、長い計算時間を必要とする解法は、実際のところ役に立たない解法と言わざるをえない。

以上を踏まえ、第3章では、Levenberg-Marquardt解法をベースに、その数学的な明快さを保った上で、かつ時間地図作成に要請される特性を備えた実効性の高い汎用解法を提案する。すなわち、実地図との比較が容易で、かつ計算時間が非常に短い解法を提

示する。

第4章では、Levenberg-Marquardt 解法と筆者らによる提案解法を鉄道時間地図の実問題に適用し、両者の比較を通して、提案解法の有効性を検討する。また、完全ネット型、部分ネット型の時間地図が持つ必然的な限界について例示する。

第5章では、筆者らの提案解法によって、完全ネット型、部分ネット型時間地図の各々の利点を活かした折衷法的な応用が可能であることを示す。また、この折衷法的な応用が効果的であることを実証することにより、提案解法の意義を明確化する。

2. Levenberg-Marquardt 法による汎用解法

本章では、時間地図作成問題を非線形最小二乗問題で記述し、Levenberg-Marquardt法を用いた一つの解法を構築する。

(1) 非線形最小二乗問題による表現

時間距離が与えられた地点*i,j*間のリンク*ij*の集合を*L*と表す。時間地図作成問題とは、リンク*ij*の時間距離*t_{ij}*を再現するように、時間地図上の地点配置を定める問題である。すなわち、対象地点の時間地図上の*x, y*座標を用いて、以下のような非線形最小二乗問題で表現できる。

$$\min \sum_{ij \in L} \left(t_{ij} - \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \right)^2 \quad (1)$$

本研究では、式(1)を基本形として解法を構築する。

(2) Levenberg-Marquardt 法による汎用解法

ここではLevenberg-Marquardt法⁷⁾をベースに1つの汎用解法を提示する。

Levenberg-Marquardt 法とは、目的関数の変数に近似値を与えて線形化し、その近似値からの変化量のノルム最小化を正則条件として、非線形最小二乗問題を数値的に解く手法である。

まず、変数*x_i, y_i*に近似値*x'_i, y'_i*を与える。

$$x_i = x'_i + \Delta x_i, \quad y_i = y'_i + \Delta y_i \quad (2)$$

式(1)を近似値近傍で展開すると、式(3)となる。

$$\min \sum_{ij \in L} \left(t_{ij} - d'_{ij} - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}} (\Delta x_j - \Delta x_i) - \frac{y'_{ij}}{d'_{ij}} (\Delta y_j - \Delta y_i) \right)^2 \quad (3)$$

但し、 $x'_{ij} = x'_j - x'_i$, $y'_{ij} = y'_j - y'_i$, $d'_{ij} = \sqrt{x'^2_{ij} + y'^2_{ij}}$ である。

次に、正則化条件として、座標値変化量のノルム最小化を導入する。

$$\min \left[\sum_{ij \in L} \left(t_{ij} - d'_{ij} - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}} (\Delta x_j - \Delta x_i) - \frac{y'_{ij}}{d'_{ij}} (\Delta y_j - \Delta y_i) \right)^2 + \alpha \sum_{i \in N} ((\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2) \right] \quad (4)$$

ここで、 N は対象地点の集合、 α は正則化項に対する重みである。

更に、式(2)を用いて $\Delta x_i, \Delta y_i$ を消去すると、

$$\min \left[\sum_{ij \in L} \left(t_{ij} - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}} (x_j - x_i) - \frac{y'_{ij}}{d'_{ij}} (y_j - y_i) \right)^2 + \alpha \sum_{i \in N} ((x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2) \right] \quad (5)$$

となる。すなわち、式(5)の線形最小二乗問題を、対象地点の x, y 座標を更新しながら、繰り返し計算によって、地点配置を求めることになる(図-1)。

以後本研究では、この解法をL-M解法と呼ぶ。

(3) L-M解法の問題点

L-M解法は、時間地図作成のための解法としては種々の問題を抱えている。L-M解法は、解の一意性を保証するために、座標近似値からの変化量のノルムを最小化する項を与えて解く方法である。このため、近似値に対してきわめて依存性の高い方法となる。座標近似値が適切な事前情報であれば、この方法は十分に有効であろう。しかし、時間地図作成問題のように、距離の観測値から地点の配置を求める問題では、地点の初期座標の与え方は幾通りも考えられ、どれが適当な初期値であるかは、ユーザー側の試行錯誤の問題となる。

この試行錯誤を、時間距離の再現精度の最大化だけを目指に行うのであれば、大きな問題ではない。あらかじめ、近似座標を設定するための幾つかの方法を用意しておき、再現精度を最大化するものを出力すればよい。しかし、このようにして得られた時間地図が、実地図との比較対照に適した時間地図である保証は何一つない。L-M解法のように、初期座標に対して依存性の高い解法は、結局のところ、多くの試行錯誤をユーザーに強いことになる。

また、このような試行錯誤を実際上可能ならしめるためには、計算時間が十分に短い解法であることが必要である。長時間の計算を要する方法では、試行錯誤の実用性はない。

L-M解法では、(リンク数) + (対象地点数) × 2 の観測方程式を用いて、問題を解くことになる。線形最小二乗問題をLU分解で解く場合、観測方程式数を M とすると、計算量は $O(M^3)$ となる⁸⁾。従って、対象地点数やリンク数が多い場合、実用性に乏しい方法となる可能性がある。

なお、初期値依存性や計算時間に関しては、第4章にて検証を行う。

3. 本研究で提案する汎用解法

本章では、前章で述べたL-M解法の問題点を踏まえ、筆者らによる提案解法を示す。

まずは、初期値依存性の問題をどう解消するか、また、実地図との比較対照を容易にするにはどうすればよいかという観点から解法を導出する。そして、計算時間を短縮するべく、この解法をさらに簡便な解法へ改善し、これをもって提案解法とする。

(1) 基本的な考え方

L-M解法の初期値依存性の問題は、地点の座標に対して適切な事前情報を与えることが困難な点にある。換言すれば、時間地図作成問題における「適切な事前情報」とは何かを定め、この事前情報を用いた正則化を行えば、問題は大きく軽減する。

では、時間地図作成問題における、適切な事前情報とは何であろうか。時間地図は、地域間の交通整備水準の違いを実地図との比較により視覚化する手法である。そのためには、時間距離の再現とは無関係な、実地図と時間地図の相違を極力排除した方がよい。例えば、東京、大阪、金沢、和歌山の4地点からなる部分ネット型時間地図(図-2)を考えよう。図-2(b), (c)は、時間距離の再現精度は等しい。この時、実地図との比較が容易な時間地図は、言うま

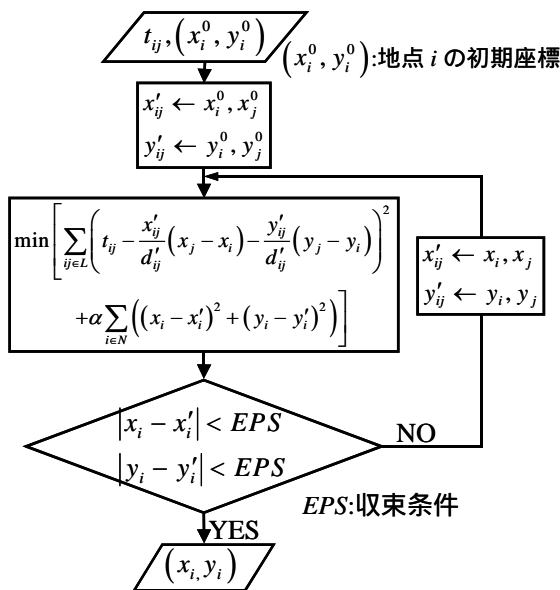


図-1 L-M解法のアルゴリズム

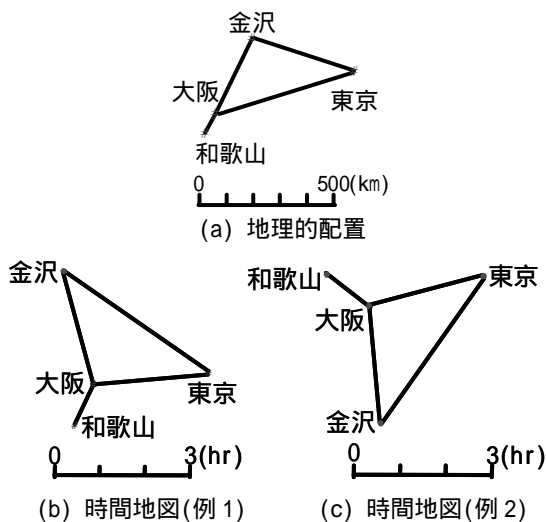


図-2 1995年鉄道部分ネット型時間地図(例)

でも無く図-2(b)であろう。多くの人は、各地点の地理的位置に対して、図-2(a)に近い先験的知識を有しているため、図-2(c)のような時間地図は非常に混乱を与える。時間距離の再現を目的としない、実地図のいたずらな変形を避けるということは、時間地図作成にとって重要な目標である。

この目標を、事前情報による正則化によって達成するため、本研究では、「時間地図上の地点間の方向に関する事前情報として、実地図上の地点間の方向を与える」という考え方をとる。これにより、時間地図作成問題を適切化し、かつ、時間地図と実地図の相違を視覚的に分かりやすくすることを目指す。

(2) 汎用解法の提案

時間地図上の地点間の方向に関する事前情報を与えるため、式(5)の正則化項を、地点座標値変化量のノルム最小化から、リンク方位角変化量のノルム最小化に変更する。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[\left(t_{ij} - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}}(x_j - x_i) - \frac{y'_{ij}}{d'_{ij}}(y_j - y_i) \right)^2 + \alpha \left(\frac{y'_{ij}}{d'_{ij}}(x_j - x_i) - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}}(y_j - y_i) \right)^2 \right] \quad (6)$$

なお、この解法では、地点間の方向を拘束するだけであるので、時間地図を座標系に固定するために、任意の1点の座標を固定する必要がある。

まず、式(6)で時間地図作成が可能であることを確認しておく。対象地点数が n のとき、 $n-1$ 地点の x, y 座標が未知変数となり、その数は $2(n-1)$ となる。一方、観測方程式数はネットワーク形状によって異なるが、例えば、図 3-(a)のような、リンク数が最小のネットワークにおいても、未知変数と同数の観測方程式が存在するため、完全ネット型、部分ネッ

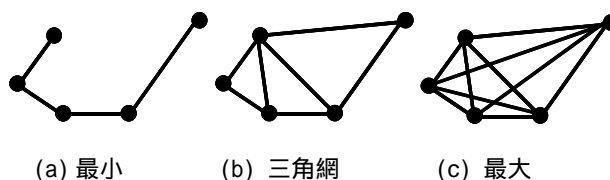


図-3 ネットワークの形状によるリンク数の違い

表-1 ネットワークの形状によるリンク数の違い

地点数 n	未知変数 $2(n-1)$	観測方程式数		
		(a)最小 $2(n-1)$	(b)三角網 $4n-6$	(c)最大 $n(n-1)$
5	8	8	14	20
10	18	18	34	90
50	98	98	194	2450

ト型に関わらず、常に解を一意に定めることができる(表-1)。

実は、式(6)による解法は非常に便利な特徴を有している。それは、式(6)の $x'_{ij}/d'_{ij}, y'_{ij}/d'_{ij}$ はそれぞれ、時間地図上のリンク ij の座北方位角の正弦、余弦の近似値であるということである。すなわち、時間地図上のリンクの方向を実地図上のそれと可能な限り合わせたいという正則化の方針を踏まえれば、実地図上の座北方位角をこれらの初期近似値として計算を開始すればよい。また、時間地図作成の第一の目的は、実地図との比較であることを考えると、実地図上の対象地点の座標は計算機に入力されていることを前提としてもよいだろう。このとき、式(6)による解法は、初期近似値の設定を自動化できることを意味している。

ここでは、時間地図上のリンク ij の座北方位角の近似値を θ'_{ij} として、式(6)を以下のように書き改める。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[\left\{ t_{ij} - (x_j - x_i) \sin \theta'_{ij} - (y_j - y_i) \cos \theta'_{ij} \right\}^2 + \alpha \left\{ (x_j - x_i) \cos \theta'_{ij} - (y_j - y_i) \sin \theta'_{ij} \right\}^2 \right] \quad (7)$$

なお、L-M解法も式(6)による解法も、事前情報との折衷による適切化である。このような場合、一般的には、 α 値は、 $\alpha > 0$ の領域で解の安定性を損なわない範囲で小さく設定し、収束速度の高速化を図る。しかし、ここでは簡便化のため、 $\alpha = 1$ とし、式(7)を以下のように展開する。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[\left(t_{ij} \sin \theta'_{ij} - (x_j - x_i) \right)^2 + \left(t_{ij} \cos \theta'_{ij} - (y_j - y_i) \right)^2 \right] \quad (8)$$

これにより、 x, y 軸方向に独立させた線形最小二乗問題に帰着させることができる。式(8)では、独立

に求めた対象地点の x, y 座標を用いて θ_{ij} の近似値 θ'_{ij} を更新しながら、繰り返し計算にて時間地図上の地点配置を求めることになる(図-4)。

なお、 $\alpha = 1$ としても、L-M 解法と比較して十分な計算速度を確保できることを下記(3)に記す。

本研究では、式(8)に基づく解法を筆者らの提案解法とする。第5章では式(8)による解法を重み付け最小二乗法に拡張する方法を示すが、これは提案解法の応用と位置づけられる。

(3) 提案解法の特徴

提案解法は以下のような利点を有する。

まず、提案解法では、初期値は各リンクの実地図上の座北方位角を用いて与えられる。座北方位角は、対象地点の実地図座標から計算でき、初期値設定を自動化できる。また、時間地図上のリンクの方向が、実地図上のそれに近い方向で表現されるため、実地図形状からのいたずらな変形を排除することが可能であり、L-M 解法と比較して実地図との比較が行いやすい時間地図を作成することができる。

また、提案解法は計算時間の点においてもL-M解法と比較して優れている。先に述べた通り、LU分解を用いる場合、線形最小二乗問題は、観測方程式数を M とすると $O(M^3)$ の計算量を要する。収束計算1回当たり、L-M解法では、(リンク数) $+2 \times$ (対象地点数)の観測方程式の問題を解くのに対して、提案解法では、(リンク数)の観測方程式の問題を x 軸方向、 y 軸方向で2度解くことになる。したがって、対象地点数が多い場合には、提案解法が圧倒的に有利な解法となる。加えて、線形最小二乗問題をLU分解で解く場合、説明変数行列は同じで被説明変数ベクトルのみを変更して再計算を行うのであれば、

その計算量は $O(M^2)$ しか要しない⁸⁾。式(5)と式(8)を比較すれば明らかなように、提案解法はL-M解法とは異なって、この利点を享受できる解法である。提案解法がL-M解法と比べて、計算時間の面でいかに優れた解法であるかが分かる。

このように、提案解法は、初期値設定を自動化でき、計算時間が短く、かつ、実地図との比較が容易な地図作成が可能であり、実用性が高い。これらの特徴について、第4章、第5章で確認する。

4. L-M 解法と提案解法の適用

L-M解法および提案解法を用いて、完全ネット型時間地図と部分ネット型時間地図を作成し、これらの解法の適用可能性を検討する。

国土交通省整備のデータベースTRANETから1965・75・85・95年の都市間(生活圈間)鉄道所要時間データ(以後、時間距離)を用いた。

対象地点は81都市とし、完全ネット型時間地図では3240リンク、部分ネット型時間地図では図-5上に示される109リンクの時間距離を表現する。

(1) 適用と評価

初期値については、L-M解法では、対象とするリンクの距離の総和が時間距離の総和と等しくなるように、実地図のスケールを合わせて対象地点の座標値を与えた。提案解法では、各リンクの実座北方位角を与えた。収束計算では、L-M解法では、全対象地点の x, y 座標値の変化が0.01時間以下を、提案解法では全リンクの角度変化が0.01rad以下をそれぞれ収束判定条件とした。

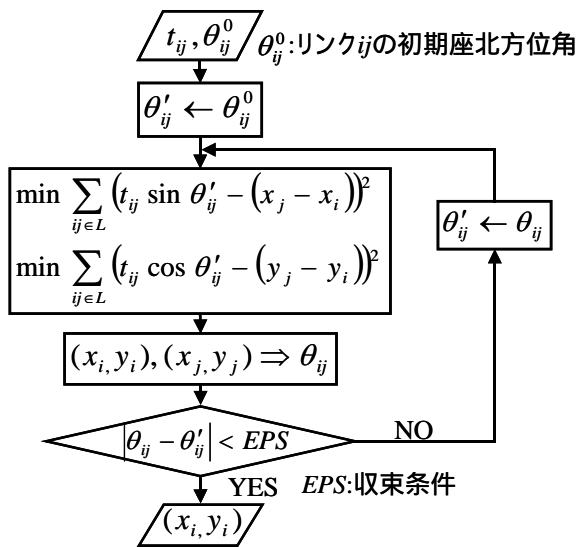


図-4 提案解法のアルゴリズム

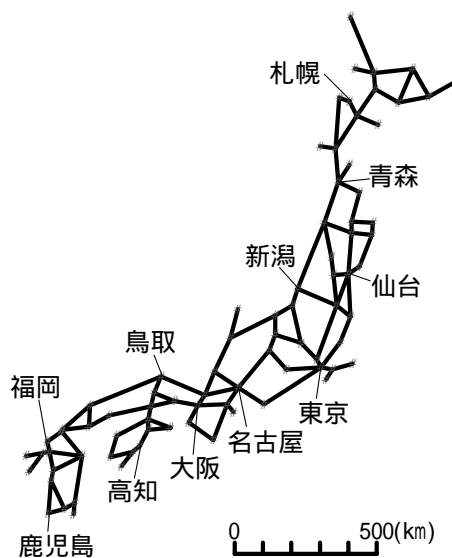


図-5 時間地図作成対象

両解法による1965年の完全ネット型・部分ネット型時間地図の作成結果を図-7～10に示し、その適合度指標として時間距離と時間地図上の距離の相関係数・KruskalのSTRESS2⁴⁾を記載する。但し、部分ネット型時間地図では図-5に示すリンクの時間距離・時間地図上の距離間の適合度を表す。また、1965・75・85・95年データによる時間地図作成に要する収束計算回数と計算時間を表-2・3に示す。

まず、両解法により、完全ネット型、部分ネット型時間地図の双方を作成できることを確認した。

次に、L-M解法と提案解法による完全ネット型時間地図(図-7・8)の比較を行うと、結果に顕著な違いは見られない。どちらも、時間距離と時間地図上の距離の相関係数は0.995、STRESS2は0.101であり、時間距離を十分に再現している。収束計算回数の比較(表-2)では、提案解法の方が多くなる。これは、観測方程式数が、L-M解法(式(5))は主問題3240・正則化項160となるのに対し、提案解法(式(6))では主問題3240・正則化項3240となるため、提案解法では、正則化項が相対的に大きくなり、収束速度が低下するためである。しかし、計算時間の比較では、提案解法が明らかに優れている(表-2)。

一方、部分ネット型時間地図(図-9・10)では、両解法とも相関係数は1.000、STRESS2も小さく、時間距離をほぼ正確に再現している。しかし、L-M解法による結果は提案解法に比べて形状の崩れが大きい。L-M解法による時間地図は、折りたたまれて複雑にリンクが重なり合っており、視認性に劣る。例えば、釧路・根室間のリンクは、実地図上の方向と大きく異なり、とても違和感を覚える。これは、初期値として与えた座標近似値の近傍の解が求められたことに原因がある。L-M解法の初期値設定の困難さが顕在化した例である。

一方、提案解法では、時間地図上のリンクの方向を実地図上の方向の近傍で表現しているため、実地図に比較的近い形状を持った時間地図を作成できた。提案解法は、初期値設定に調整を要さず、簡潔に作図が可能である。また、収束計算回数・計算時間双方で、提案解法が優れていることが確認できる(表-3)。

(2)時間地図の限界

完全ネット型、部分ネット型時間地図の作成例を示したが、これらは決して分かりやすいとは言えない部分がある。ここでは、2種類の時間地図が必然的に持つ限界について述べる。

完全ネット型時間地図では、全ての地点間の時間距離を高い精度で表現しているものの、局所的に見

表-2 完全ネット型時間地図作成計算の比較

西暦	L-M解法		提案解法	
	収束計算回数	計算時間(秒)	収束計算回数	計算時間(秒)
1965	22	13.11	97	0.89
1975	22	13.11	144	1.17
1985	48	28.51	81	0.82
1995	17	10.14	69	0.74

(但し、CPU 1.8GHz 使用)

表-3 部分ネット型時間地図作成計算の比較

西暦	L-M解法		提案解法	
	収束計算回数	計算時間(秒)	収束計算回数	計算時間(秒)
1965	64	2.81	41	0.14
1975	96	4.17	42	0.15
1985	108	4.66	53	0.15
1995	95	4.14	51	0.15

(但し、CPU 1.8GHz 使用)

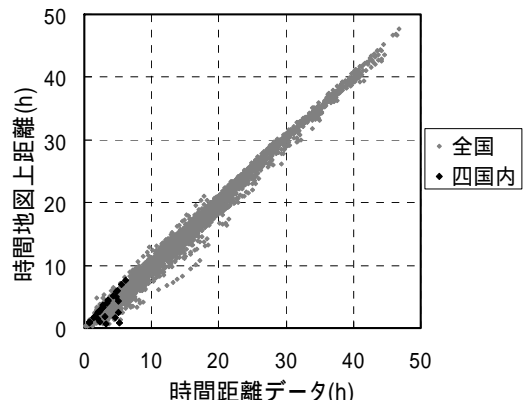


図-6 提案解法による1965年鉄道完全ネット型時間地図 データ表現精度

ると分かりにくいところが多い。北海道・四国・九州等の周辺部では、大きく変形し、見づらい地図になってしまう。特に、四国は、本州・九州などの東西両方向からの時間距離を表現しようとするために、ほとんど一直線上に配置されてしまう。この結果、四国内の時間距離の表現精度は低下している(図-6)。四国内の時間距離と時間地図上の距離の相関係数は0.666であり、全体(相関係数 0.995)に比べて極端に低い。このように、完全ネット型時間地図では、全体の傾向を示すことは可能だが、局所的には時間距離を十分に再現できない場合がある。

一方、部分ネット型時間地図は、実地図上の形状を大まかに維持しており、全体としては視覚的に理解しやすい。また、時間距離を正確に再現している。しかし、直接リンクが設定されていない地点間の時間距離が無視されるため、これに伴う問題が生じている。例えば、四国・九州間は時間距離が長いにも

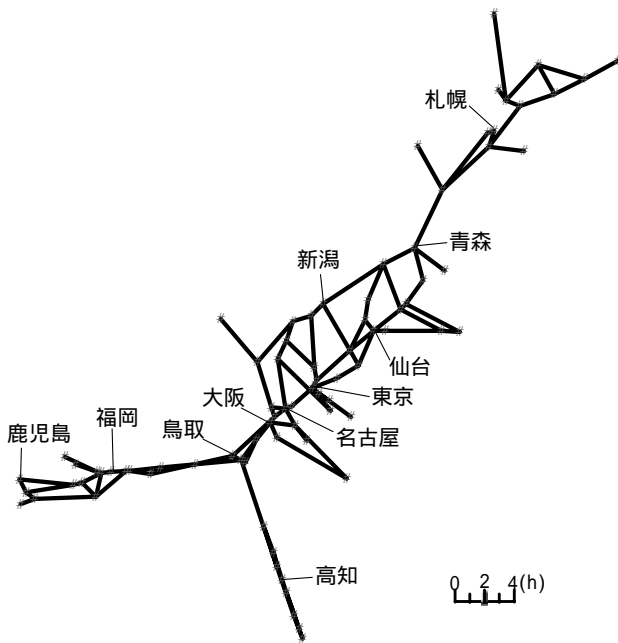


図-7 L-M 解法による 1965 年鉄道完全ネット型
時間地図 (相関係数: 0.995, STRESS2: 0.101)

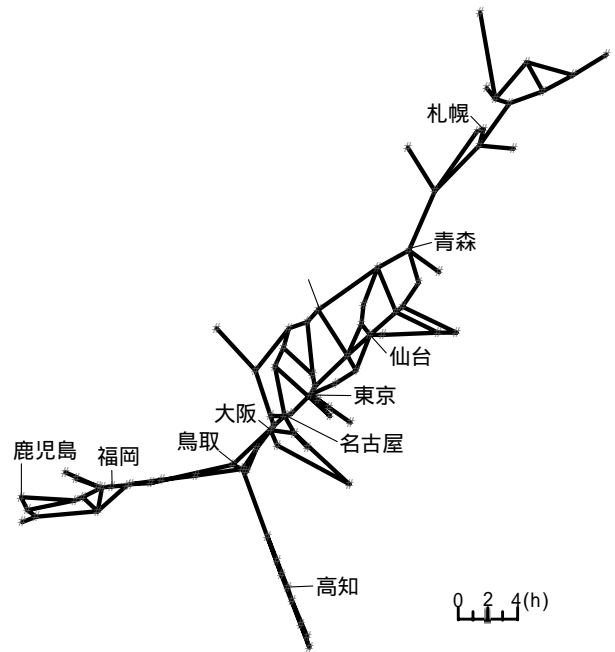


図-8 提案解法による 1965 年鉄道完全ネット型
時間地図 (相関係数: 0.995, STRESS2: 0.101)

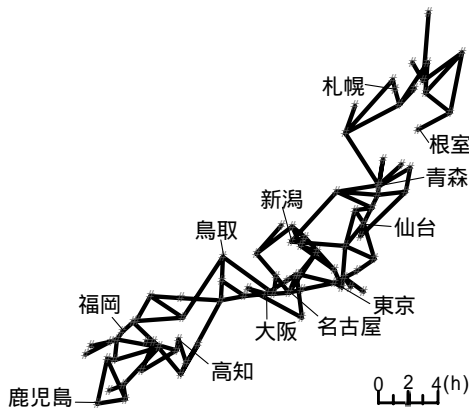


図-9 L-M 解法による 1965 年鉄道部分ネット型
時間地図 (相関係数: 1.000, STRESS2: 0.026)

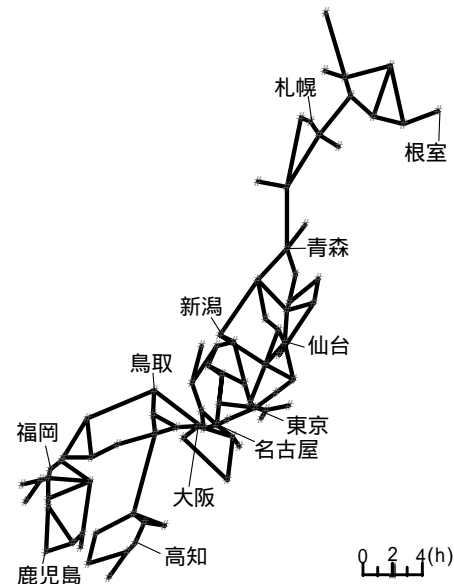


図-10 提案解法による 1965 年鉄道部分ネット型
時間地図 (相関係数: 1.000, STRESS2: 0.007)

関わらず，L-M解法の結果(図-9)では四国と九州が重なって配置され，提案解法の結果(図-10)においても四国と九州は非常に近接して描かれている．このように，部分ネット型時間地図は，交通整備がなされていない海峡部や広域の閉鎖湾域が対象地域に含まれる場合には，適用に十分な注意を要する．

なお，ここで述べた問題点は，完全ネット型時間地図，部分ネット時間地図が一般的に持つ限界であって，提案解法の限界ではないことに留意されたい．提案解法は，日本列島の鉄道時間地図の作成，首都圏における道路時間地図の作成といった個別問題に

対して柔軟に対応できる方法である．このことについて，次章で具体的に述べる．

5. 提案解法の個別問題への応用

(1) 基本的な考え方

筆者らによる提案解法は，完全ネット型・部分ネット型の双方に適用可能な解法であり，両者の折衷法的な応用を可能にする．

前章における完全ネット型時間地図への適用では，

四国に見られるように局所的に再現精度が極端に低下するという問題が生じた。このような場合、時間距離が極端に大きなリンクを削除し、完全ネット型時間地図の問題を、リンク数が多いながらも部分ネット型時間地図の問題に置き換えて再計算するといった対応が可能である。また、部分ネット型時間地図への適用では、四国と九州が時間地図上で極端に近く配置されてしまうという問題が生じた。このような場合には、四国・九州間に仮想的なリンクを設定し、そのリンクに完全ネット型の時間距離(宇高連絡船、関門トンネルを経由する時間距離)を与え、よりリンク数の多い部分ネット型時間地図の問題に置き換えるといった対応が可能である。

また、提案解法は、線形最小二乗問題の繰り返し計算による解法であるため、重み付き線形最小二乗問題による解法に拡張することが容易である。これにより、地点間の時間距離の再現精度に重みを与えることができ、上記のような折衷法的な対応をさらに柔軟に適用することが可能になる。なお、言うまでも無く、完全ネット型時間地図を重み付き最小二乗問題で解く場合、重みをゼロとするリンクを設定することにより、完全ネット型時間地図を部分ネット型時間地図に変更することができる。

以下では、提案解法の個別問題への応用例を提示し、その有効性を確認することにより、筆者らによる提案解法の意義をより明確に示すこととする。

(2) 個別問題への応用例

完全ネット型、部分ネット型時間地図の限界を踏まえ、以下に示すような折衷法的な応用により、1965年の鉄道時間地図の作成を再実行した。

完全ネット型時間地図を重み付き最小二乗法で解くことにした。時間距離が20時間を超えるリンクの時間距離再現の重みをゼロとした。すなわち、これらのリンクを削除し、部分ネット型時間地図の問題に変更した。なお、東京起点では、終点が札幌から鹿児島までのリンクが時間距離20時間以下である。完全ネット型の3240リンクのうち、20時間を超える955リンクが削除されたが、主要リンクの大半が計算対象に含まれている。残されたリンクのうち、図-5のネットワークに示される各リンクの時間距離の重みを1に、それ以外のリンクの時間距離の重みを0.02として計算を実行した。なお、重みの大きさは、視覚的に分かりやすい時間地図となるよう試行錯誤の上、決定した。

簡単に言えば、基本的には図-5のリンクの時間距離を精度良く再現することを目指すのが、これらのリンク以外の地点間時間距離についても、極端に大き

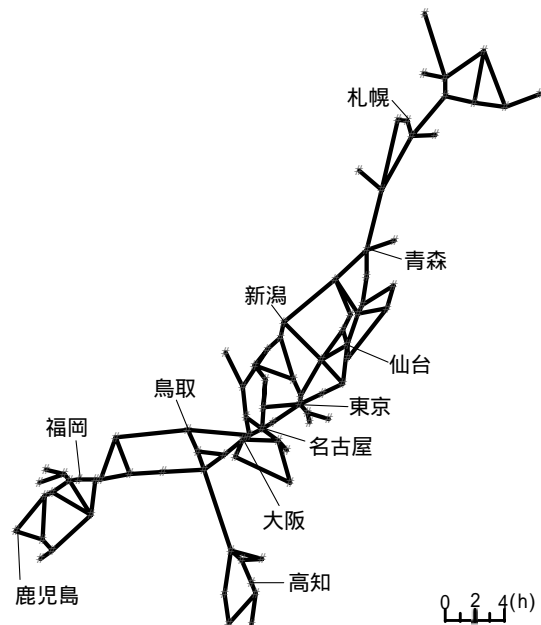


図-11 折衷法による1965年鉄道時間地図

くない限り、少しは考慮するという方針をとったということである。これにより、局所的な(例えば、四国内の)再現精度と広域的な(例えば、四国・九州間の)再現精度をバランスさせることを目指した。

以上の折衷法的応用による計算結果を示したのが図-11である。図-10で示した部分ネット型時間地図との比較のため、これと同じネットワーク(すなわち図-5)だけを表示している。重みを1とした図-5のネットワーク上のリンクは、時間距離と時間地図上の距離の相関係数が0.999とほぼ正確に表現されている。また、全ての地点間では、相関係数0.964と全体の傾向を示している。また、局所的に時間距離再現精度が著しく低い地域も見られず、視覚的にも理解しやすい地図が得られた。

このように、筆者らの提案解法は、リンクの削除や重視するリンクの指定が自由に行えるため、ユーザーの時間地図作成の目的に応じて、柔軟に対応が可能な視覚化手法である。

(3) 交通整備水準の経年変化の視覚化

時間地図により、交通整備水準の経年変化を効果的に視覚化することが可能であることを示す。

時系列比較を行う場合には、前後の(t 期と $t+1$ 期の)時間地図との比較を容易にする必要がある。そこで、 $t+1$ 期の時間地図の作成にあたっては、 t 期の時間地図上での対象地点間の座北方位角を初期値として与えるのが適当である。これにより、交通条件の変化以外の時間地図間の歪みを抑え、時系列的な比較が容易になる。

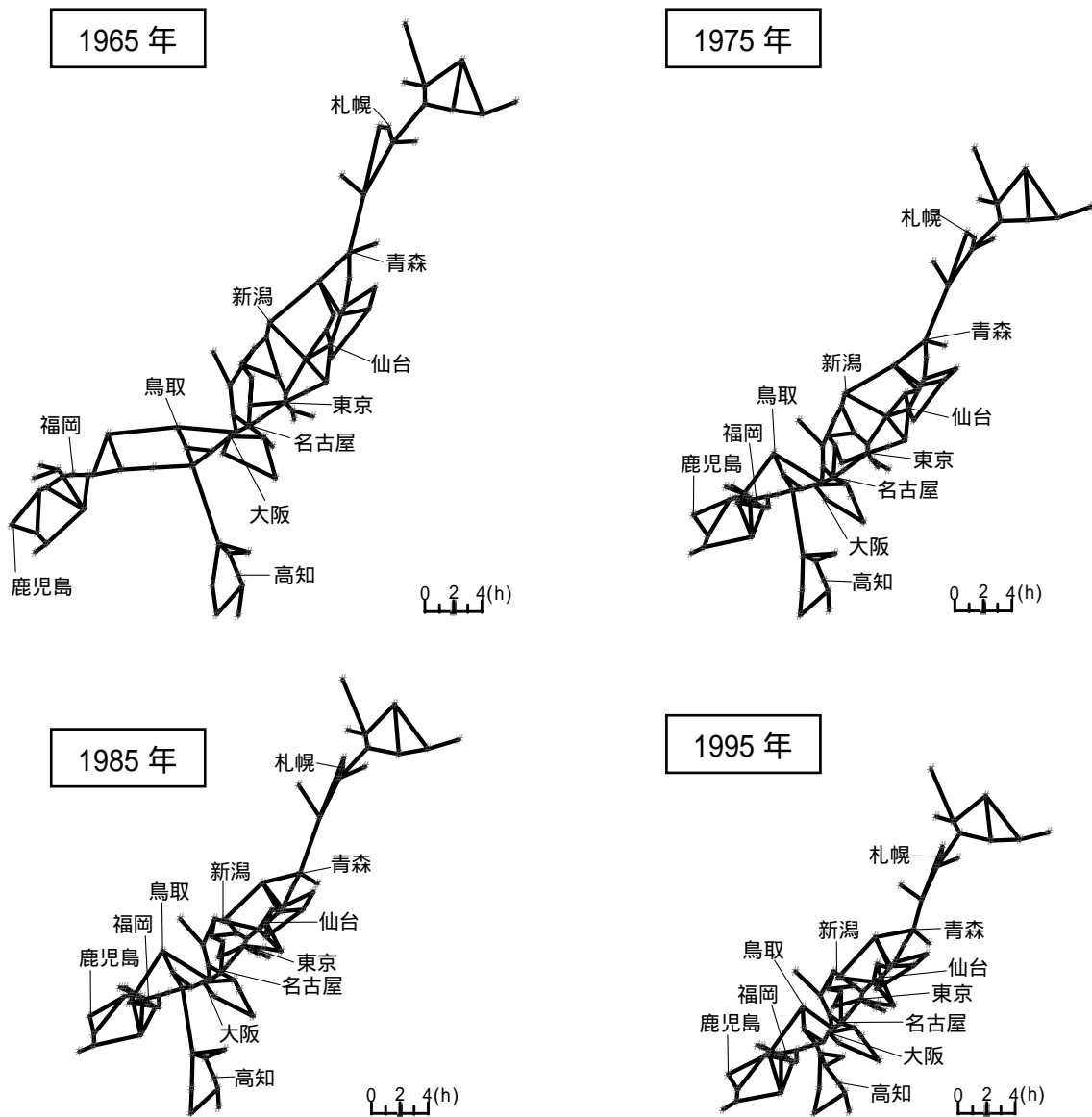


図-12 時間地図による鉄道整備水準変遷の視覚化例

表-4 時間地図作成計算時間の比較

西暦	収束計算回数	計算時間(秒)
1965	78	0.94
1975	210	2.02
1985	49	0.80
1995	91	1.11

(但し、CPU 1.8GHz 使用)

表-5 時間距離表現精度(相関係数)

西暦	全体	ネットワーク (図-5)
1965	0.964	0.999
1975	0.954	0.999
1985	0.944	0.999
1995	0.932	1.000

1965・75・85・95年の鉄道時間距離データを使用し、(2)の手法で作成した結果を図-12に示す。但し、1965年時点で時間距離が20時間以下の2285リンクを計算対象にしている。初期値には、1965年は実座北方位角を、1975年以降は、前期の時間地図上の座北方位角を与えた。計算時間を表-4に、時間距離と時間地図上の距離の相関係数を表-5に示す。

図-12では、鉄道網整備が進むにつれて、日本列島全体の時間距離が縮んだ様子が表現されている。時間地図間のリンクの角度変化が小さいため、各リンクの時間距離変化が見やすく、時間地図間の比較が容易である。また、いずれの時間地図も、図-5のネットワークのリンクでは、ほぼ完全に時間距離を再現しており、また計算の対象とした地点間全体においても高い再現性を得た(表-5)。

6. おわりに

本研究で提案した，時間地図作成問題の汎用解法の特徴をまとめ，結論とする．

完全ネット型時間地図，部分ネット型時間地図の双方に適用可能な汎用解法である．時間地図作成問題を適切化するために，時間地図上の地点間の方向に関する事前情報として，その地点間の実地図上の方向を与える解法である．時間距離の再現を目的としない，実地図から時間地図への無意味な変形を極力排除することができ，結果として，実地図との比較対照が容易になる．簡単な線形最小二乗問題の繰り返し計算によって，きわめて高速に解を得ることができる．繰り返し計算に必要な初期値は，実地図上の地点座標から自動的に計算される座北方位角だけであり，実質的には初期値を必要としない方法である．重み付き最小二乗問題への拡張により，完全ネット型，部分ネット型の折衷法的な応用が可能であり，ユーザーが対象とする個々の時間地図作成問題に柔軟に対応することができる．

本研究は，時間地図作成の汎用解法が必要ではないかという問題意識から取り組んだものであるが，提案した解法は，地点の配置を目的としたDistance Cartogramの問題全てに適用可能な汎用解法である．時間地図のみならず，地点間の認知距離指標に基づく認知空間の視覚化，統計データ等から定義される都市間の非類似度指標に基づく都市類型の視覚化など，多様な分野への応用を可能にする．

なお，本論文は，筆者らの先行論文⁹⁾に対して，提案解法のL-M解法に対する理論的な比較検討を補強し，さらに，実証的な比較分析と提案解法の折衷法的応用の事例を追加することにより，先行論文を全面的に拡張，再構成したものである．

謝辞：東京大学の森地茂教授には数多くの貴重な意見を頂いた．また，大学院生の米澤明男氏には計算処理等に協力を頂いた．実証に用いたデータに関しては，国土交通省の吉田忠司氏，(財)計量計画研究所の毛利雄一氏をはじめ，関係者の皆様にご協力頂いた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 清水英範：時間地図の作成手法と応用可能性，土木計画学研究・論文集，No.10，pp.15-29，1992.
- 2) 古藤浩：いくつかの新しい時間地図とその特徴，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会，pp.72-73，2000.
- 3) 伊藤悟：金沢都市圏の時空間構造分析 - 時間距離に基づく各種分析測度の適用と比較 - ，金沢大学教育学部紀要(人文・社会科学編)，No.50，pp.55-68，2001.
- 4) Cox, T.F. and Cox, M.A.A. : *Multidimensional Scaling*, 2nd ed., Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2001.
- 5) 梶谷有三，田村亨，斉藤和夫：道路網を対象とした時間距離行列の視覚化，土木計画学研究・論文集，No.12，pp.567-574，1995.
- 6) 古藤浩：地域構造と視覚化時間距離網，GIS - 理論と応用，Vol.5，No.2，pp.1-10，1997.
- 7) 藤田宏，今野浩，田邊國士：最適化法，岩波講座 応用数学，岩波書店，1994.
- 8) Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. : *Numerical Recipes in C* [日本語版]，丹慶勝市，奥村晴彦，佐藤俊郎，小林誠共訳，技術評論社，1993.
- 9) Shimizu, E. and Inoue, R. : A Generalized Solution of Time-Space Mapping, *Proceedings of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CD-ROM)*, 2003.

(2003.6.11 受付)

A GENERALIZED SOLUTION OF TIME-DISTANCE MAPPING

Eihan SHIMIZU and Ryo INOUE

Time-distance mapping is a method to obtain a spatial configuration of points, so that the Euclidean distances between points consist with the given time-distances. The approaches are divided broadly into two categories. One deals with the time-distances between all pairs of points. Multidimensional scaling (MDS) is generally applied to the solution. Another deals with the limited number of time-distances given to some of point-pairs such as links of a transportation network. However, no mathematical solution has been proposed for this type of time-distance mapping.

This paper proposes the generalized solution of the two types of time-distance mapping based on the non-linear least squares, which is mathematically clear and of practical use.