

# 連続する複数図面の標定手法に関する検討

## A Study on Alignment Method of Sequential Multiple Drawings

布施孝志\*・落合修\*

By Takashi Fuse\* and Osamu Ochiai\*

**Abstract:** Large scale maps such as drawings attached to ledger have been utilized for road management. Recently, such kinds of drawings are being digitized to make geographic information. Since sequential road drawing pieces are constructed individually, the drawings have to be connected and aligned. Alignment of each drawing by using many control points are time and cost consuming. Efficient method for sequential multiple drawings alignment and connection will contribute to GIS data development. This study proposes a possible alignment and connection method with small control points. Drawing pieces are connected at match lines, and then errors are adjusted according to a linear regression model. Generalized least squares method is applied to error adjustment, because each drawing has different accuracy (heteroscedasticity). Through the application to drawings of maintenance and repair construction, the significance of the method is confirmed.

**Keywords:** sequential multiple drawings, alignment, feasible generalized least squares method

### 1. はじめに

道路管理図や道路台帳附図は、それらをベースに道路施設管理を行う等、道路管理業務において重要な役割を担っている。現在では、道路管理図や道路台帳附図の電子化が進められているところであり、効率的に電子化をするために既存図面の有効活用が重要視されている。

各種図面の電子化に関して、道路事業においては、計画・調査・設計・施工・維持管理において発生する地理空間情報を相互に活用すべく、CALS への取り組みが行われている。「国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2005」では、完成図を利用した管理図の蓄積・更新の迅速化・効率化、GIS 管理図に重ね合わせた施設情報管理の効率化などが挙げられている。また、「GIS アクションプログラム 2010」における施策としても、道路関係図面の電子化、工事図面等を活用した基盤地図情報の更新技術の開発などが挙げられている。さらに、「地理空間情報の活用推進に関する行動計画」でも、道路関係図面の電子化、工事図面等を活用した基盤地図情報の更新技術の開発が盛り込まれている。これらの施策に対し、直轄国道においては、「道路工事完成図等作成要領<sup>2)</sup>」に従って、道路工事の完成平面図を電子納品することが定められている。

上記の完成平面図はいずれも工事区間ごとに作成されているが、GIS 等で利用するためには、連続する個別の完成平面図を接合処理によりシームレス化し、位置座標を持ったデータとするため標定を行う必要がある。しかしながら、これらの完成平面図は、全てが位置正確度の高いものといえるわけではなく、完成平面図ごとに標定を行った上で各完成平面図を単純に接合した際には、本来連続するはずの地物（道路中心線等）にずれが生じる場合がある。完成平面図の位置合わせのために、再測量結果やオルソ画像などの位置精度が確実なものをベースにして幾何補正を行うことも考えられるが、時間・コストの観点から実施困難である場合も多い。そのため、可能な限り少ない既存基準点を用いて、接合・標定する手法が必要とされている<sup>1)</sup>。直轄国道における道路工事完成平面図を対象とした場合には、既存基準点として、道路基準点を利用することができる。道路基準点は、地形測量により地図情報レベル 250 の精度で整備されたものであるが、1km ほどの地点標であるキロポストに設置され、完成図の位置合わせに十分な設置間隔とはいえない。

\* 国土技術政策総合研究所

連続する工事完成平面図を接合し、少ない基準点による標定を行うことが可能になれば、管理図の蓄積・更新が効率的に行うことが可能となるだけでなく、既存図面を有効利用して、基盤となる GIS データ整備の促進にも寄与することが期待される。

以上の背景の下、本研究は、可能な限り少ない基準点により、連続する図面を接合・標定する手法を検討し、その精度評価を行うことを目的とする。

## 2. 複数の工事完成平面図の標定手法の要件

本研究において対象とする図面は、個別に作成された連続する道路工事完成平面図である。これらの完成平面図は、その接続性が重要となるため、単図面ごとに標定するのではなく、複数図面間の接合関係を考慮して標定することが望まれる。また、複数図面を同時に標定することを可能にするほど、既存基準点が十分にある状況とはいえない。そのため、少ない基準点により、複数図面間の接合関係を考慮した標定手法を検討する。標定手法の検討を行うに際して、一般的に行われる単図面ごとに標定した結果を見ることにより、手法の要件を整理する。

単図面ごとの標定結果を考察するために、石巻管内において舗装維持修繕工事によって作成された完成平面図（総延長約 2km）を対象とした。本完成平面図の元図となる発注図は、道路台帳附図（縮尺 1/500）である。特に維持修繕工事においては、道路台帳附図から発注図が作成されることが多い。

工事図面ごとに標定した場合の精度検証のために、検証点の計測を行った。主な検証点として、車道境界（歩道部、植栽、島、車道部）、道路端（歩道部）、構造物（距離標、橋梁、ボックスカルバート、横断歩道橋、地下横断歩道、擁壁）、路面標示（区画線、停止線、横断歩道）を採用し、96 点を現地にて計測した。なお、現地計測は、ネットワーク型 RTK-GPS（VRS 方式）による単点観測により行っている。

各完成平面図に対して、検証点を用いてヘルマート変換を適用した結果の平均残差を表 1 に示す。全ての完成平面図はほぼ 1m 以内の残差になっているが、完成平面図ごとにその精度が大きく異なる。なお、図面番号 5 の平均残差が大きい理由としては、検証点として用いた路面標示の位置精度が、完成平面図上で低いためであると考えられる。また、標定結果を図示すると、その接合部がずれていることを確認できる（図 1）。

表 1 ヘルマート変換による各図面の平均残差

図面番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平均残差 (m)	0.32	0.20	0.49	0.40	1.37	0.33	0.15	0.42	0.76	0.07

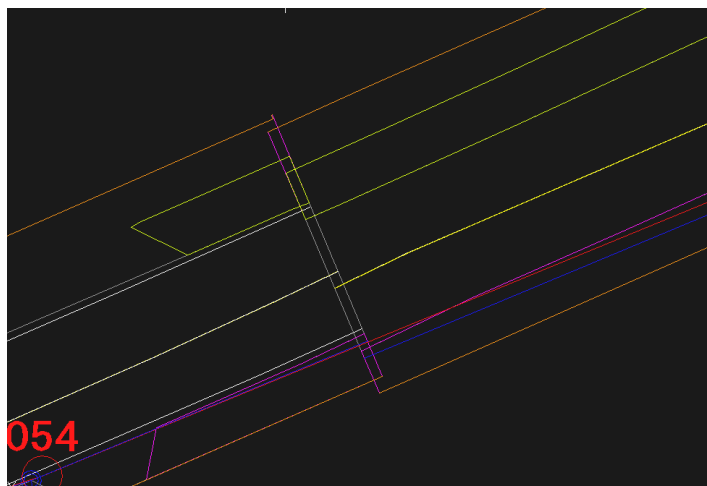


図 1 接合部のずれ

道路管理上においては、道路中心線等の図面間で連続する地物は、図上においても連続していることが望ましい。さらに、今回の検証においては、十分な数の現地計測結果を用いたが、一般には、それだけの測量を行うことは困難であるため、少ない基準点による標定手法が必要である。

以上の結果から、検討する標定手法においては、以下を要件とする。

- (1) 図面間において連続する地物は、標定後も連続性を保つようにする。
- (2) 可能な限り少ない基準点で標定を可能とする。
- (3) 各図面によって異なる精度（各図面が個別に作成されること）を考慮する。

### 3. 複数の工事完成平面図の標定手法の検討

#### (1) 基本的な流れ

これまでも、一つの路線において別々に作成された図面に対して、可能な限り少ない基準点から標定を行う手法が提案されている<sup>1)</sup>。その中で提案されている手法は、以下の手順である（図2）。

- ① 隣接する2図面間の縮尺を一定の縮尺にあわせる。
- ② 隣接する2図面を接合する。
- ③ 接合した2図面を1図面として考え、1枚目に存在する1点の基準点で固定して、2枚目のもう1点の基準点で回転する。
- ④ 回転した図面に対し、固定していない基準点を合わせるよう、2枚目の図面を平行移動する。
- ⑤ 逐次、上記の手順を適用する。

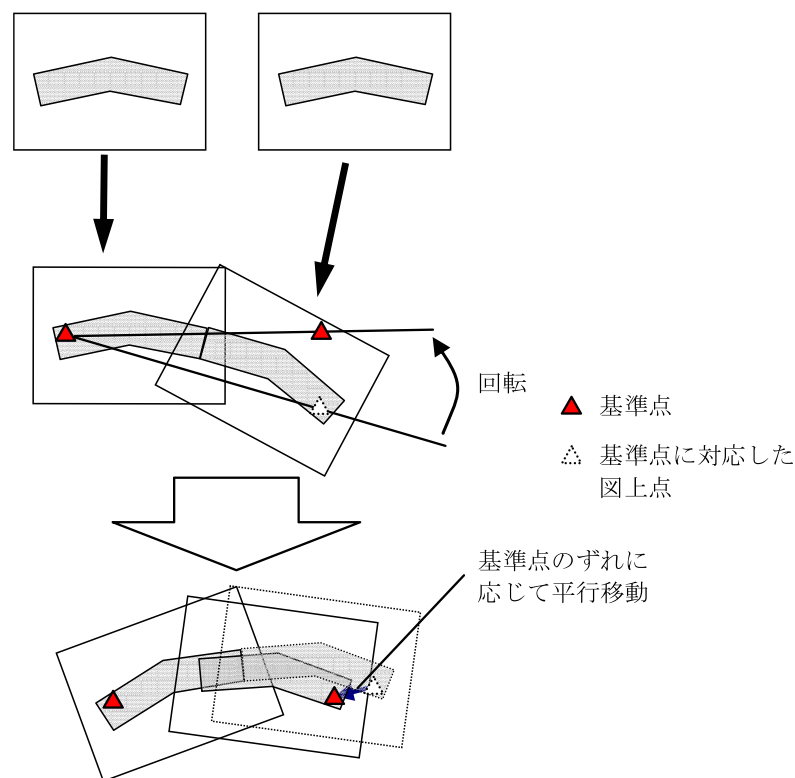


図2 2図面の接合・標定手法

本研究では、その基本的な流れを上記に従い、標定手法を検討する。ただし、上記の手法では2図面を対象としているが、各図面に基準点を設置できない場合も想定して、複数図面に拡張する。また、④の処理において、接合部の連続性が失われる可能性があるため、この問題への対処も必要になる。ここでは、下記の流れで連続する複数図面の標定を行う（図3）。

- ① 複数図面の縮尺を一定の縮尺にあわせる。
- ② 隣接する複数図面を接合する。
- ③ 接合した複数図面を1図面として考え、最初の図面に存在する1点の基準点で固定し、最後の図面に存在するもう1点の基準点で回転する。
- ④ 回転した図面に対し、各接合点座標を誤差調整法で推定することにより標定する。

なお、隣接図面同士の接合では、マッチライン（図面内で隣接する図面との区切りを示す線）およびマッチライン上の道路中心線位置を合わせるように接合することを想定している。

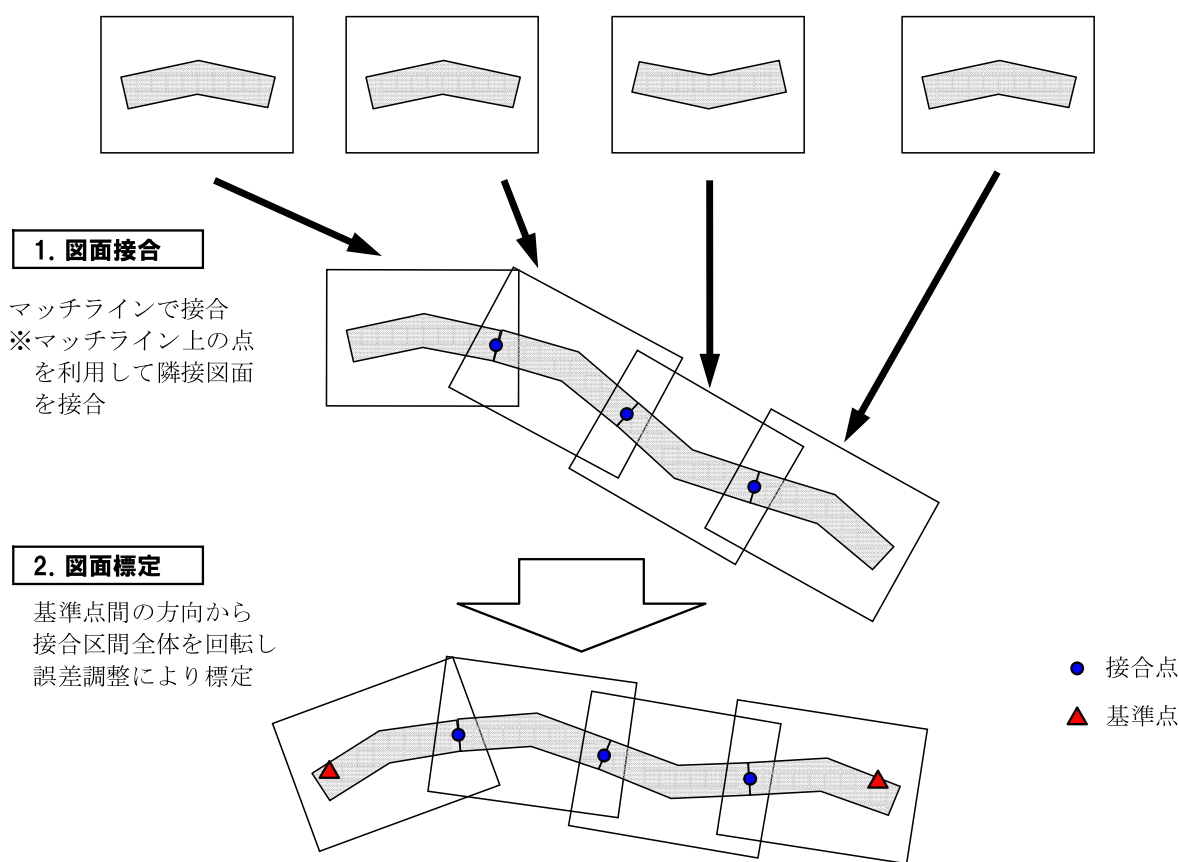


図3 接合・標定手法の基本的な流れ

## (2) 誤差調整の線形回帰モデル

完成平面図の接合・回転後に行う誤差調整の観測方程式は、単路線トラバースの調整計算との類推から、線形回帰モデルとして表現することができる<sup>4)</sup>。接合点座標の最確値を $(x_i, y_i)$ 、近似値を $(x'_i, y'_i)$ 、補正值を $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ として $(i = 1, \dots, n-1)$ 、補正值を推定するパラメータとする。すなわち、 $x_i = x'_i + \Delta x_i$ 、 $y_i = y'_i + \Delta y_i$ とすると、観測方程式を表す線形回帰モデルは下記の通りになる。

$$\begin{bmatrix} \frac{\rho''}{S'_1}(S'_1 - S_1) \\ \frac{\rho''}{S'_2}(S'_2 - S_2) \\ \vdots \\ \frac{\rho''}{S'_{n-1}}(S'_{n-1} - S_{n-1}) \\ \frac{\rho''}{S'_n}(S'_n - S_n) \\ \theta'_1 - \theta_1 \\ \theta'_2 - \theta_2 \\ \vdots \\ \theta'_{n-1} - \theta_{n-1} \\ \theta'_n - \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b_1 & -a_1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & a_2 & -b_2 & -a_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & b_{n-1} & a_{n-1} & -b_{n-1} & -a_{n-1} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & b_n & a_n \\ a_1 & -b_1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_2 & b_2 & a_2 & -b_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -a_{n-1} & b_{n-1} & a_{n-1} & -b_{n-1} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & -a_n & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{n-2} \\ \Delta y_{n-2} \\ \Delta x_{n-1} \\ \Delta y_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{S_1} \\ \varepsilon_{S_2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{S_{n-1}} \\ \varepsilon_{S_n} \\ \varepsilon_{\theta_1} \\ \varepsilon_{\theta_2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\theta_{n-1}} \\ \varepsilon_{\theta_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{y} = \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$

ここで、 $S'_i$ 、 $S_i$ は各点間距離（基準点と接合点間、および接合点間）の近似値と測定値、 $\theta'_i$ 、 $\theta_i$ は方向角の近似値と測定値、 $\rho''$ はラジアンから秒への変換係数とし、 $a_i = \frac{(y_i - y_{i-1})\rho''}{S_i^2}$ 、 $b_i = \frac{(x_i - x_{i-1})\rho''}{S_i^2}$ である（ただし、 $(x_0, y_0)$ 、 $(x_n, y_n)$ は座標既知の基準点座標を表す）。また、誤差項 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は正規分布 $\boldsymbol{\varepsilon} \sim N(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$ に従うものとする。パラメータ $\boldsymbol{\beta}$ の通常最小二乗推定量 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ （ordinary least squares estimator: OLSE）は、

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (2)$$

であり、OLSE $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ の分散共分散行列 $\mathbf{V}(\hat{\boldsymbol{\beta}})$ は

$$\mathbf{V}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = \sigma^2 (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \quad (3)$$

となる。残差 $\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}$ より、 $\sigma^2$ の不偏推定量 $s^2$ は、

$$s^2 = \frac{\mathbf{e}'\mathbf{e}}{n-p} = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}})'(\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}})}{n-p} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $n$ は観測方程式数、 $p$ は未知パラメータ数である。

### (3) 実行可能な一般化最小二乗法によるパラメータ推定

上記に示した通常最小二乗法においては、誤差項の分散が均一であることを仮定している。しかしながら、本研究の対象図面は、図面ごとに作成されているため、分散均一の仮定は当てはまらない。このように不均

一分散となるモデルの場合には、通常最小二乗推定量は、もはや有効性の統計的性質をもたない。誤差項の分散不均一の仮定の下では、一般化最小二乗法による推定を行わなくてはならない。一般化最小二乗法に関しては、主に計量経済学の分野で議論が行われているものである。ここで誤差項が次の分散共分散行列

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}') = \sigma^2 \boldsymbol{\Omega} \quad (5)$$

をもつとすれば、一般化最小二乗推定量 (generalized least squares estimator: GLSE) は

$$\tilde{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\boldsymbol{\Omega}^{-1}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\boldsymbol{\Omega}^{-1}\mathbf{y} \quad (6)$$

で得られる<sup>5)</sup>。GLSE  $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$  の分散共分散行列  $\mathbf{V}(\tilde{\boldsymbol{\beta}})$  は

$$\mathbf{V}(\tilde{\boldsymbol{\beta}}) = \sigma^2 (\mathbf{X}'\boldsymbol{\Omega}^{-1}\mathbf{X})^{-1} \quad (7)$$

であり、 $\sigma^2$  の不偏推定量  $\tilde{\sigma}^2$  は、残差  $\tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\tilde{\boldsymbol{\beta}}$  より

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{\tilde{\mathbf{e}}'\boldsymbol{\Omega}^{-1}\tilde{\mathbf{e}}}{n-p} = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{X}\tilde{\boldsymbol{\beta}})'\boldsymbol{\Omega}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{X}\tilde{\boldsymbol{\beta}})}{n-p} \quad (8)$$

で与えられる。

式(5)で仮定した誤差項に対する分散共分散行列は、一般には、事前には知ることはできないため、分散共分散行列は別に推定しなくてはならない。分散共分散行列  $\boldsymbol{\Omega}$  の推定量  $\hat{\boldsymbol{\Omega}}$  を用いて  $\boldsymbol{\beta}$  の一般化最小二乗推定量を求める。この方法を実行可能な一般化最小二乗法と呼ぶ<sup>5)</sup>。なお、分散共分散行列において、誤差項の自己相関を考慮することも可能であるが<sup>3)</sup>、本研究においては分散不均一の問題に絞り、分散共分散行列を構造化することにする。ここで誤差項の分散共分散行列が下記の通りであったとする。

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \sigma_{s_1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & & \\ & & \sigma_{s_n}^2 & \vdots \\ \vdots & & & \sigma_{\theta_1}^2 \\ & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_{\theta_n}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\sigma_{s_i}^2$ 、 $\sigma_{\theta_i}^2$  (以下、両者をまとめて  $\sigma_i^2$  と示す) を推定するために、以下の補助回帰モデルを考える<sup>6)</sup>。

$$\hat{\mathbf{e}}^2 = \exp(\mathbf{Z}\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\xi}), \quad E(\boldsymbol{\xi}) = 0 \quad (10)$$

$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}$  は通常最小二乗法における残差、 $\mathbf{Z}$  は  $\mathbf{X}$  の関数および定数項からなる説明変数行列、 $\boldsymbol{\gamma}$  はパラメータ、 $\xi$  は誤差項である。ここでは、 $\sigma_i^2$  の推定量が負にならないように、指数関数による補助回帰モデルとしている。この補助回帰モデルから  $\boldsymbol{\gamma}$  の通常最小二乗推定量

$$\hat{\boldsymbol{\gamma}} = (\mathbf{Z}'\mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}' \log(\hat{\mathbf{e}}^2) \quad (11)$$

が得られ、 $\sigma_i^2$  の推定量として以下のように定義する。

$$\hat{\sigma}_i^2 = \exp(\mathbf{Z}_i \hat{\boldsymbol{\gamma}}) \quad (12)$$

この推定量を用いて実行可能な一般化最小二乗推定量を次のように求めることができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\hat{\boldsymbol{\Omega}}^{-1}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\hat{\boldsymbol{\Omega}}^{-1}\mathbf{y} \quad (13)$$

今回は、 $\mathbf{Z}$  を  $\mathbf{X}$  の一次関数として計算を行う。すなわち、

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{X}_1 \\ 1 & \mathbf{X}_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \mathbf{X}_{2n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

とした。 $\mathbf{X}_i$  は行列  $\mathbf{X}$  の  $i$  行目を表している。

上記手法によれば、少なくとも必要となる基準点は両端の 2 点であり、接合部分の図面を個別に移動することがないため接合部の連続性が保たれ、図面ごとに異なる精度に対応することになり、前章において示した要件を満足する。

#### 4. 提案手法の精度評価

提案手法を、2 章で精度評価を行った石巻管内において舗装維持修繕工事によって作成された完成平面図（全 10 枚）に適用した。まず、各完成平面図をマッチラインと道路中心線により接合を行い（図 4）、基準点として両端図面に各 1 点の計 2 点を取り、マッチラインと道路中心線の交点である接合点 9 点を用いてパラメータを推定した。各点間の距離と方向角の測定値は、CAD ソフトウェアの計測機能により求め、初期値は手動により CAD 上から座標値を取得した。

もとの調整計算は非線形方程式であるが、式(1)の観測方程式は線形化した結果のものであるため、通常最小二乗法および一般化最小二乗法ともに繰り返し計算を必要とする。適用においては、両者とも 5 回の繰り返し計算で収束した。なお、今回は、マッチラインと道路中心線の交点を接合点としたが、道路縁等の別の地物を接合点としても、同様の計算でパラメータ推定は可能である。

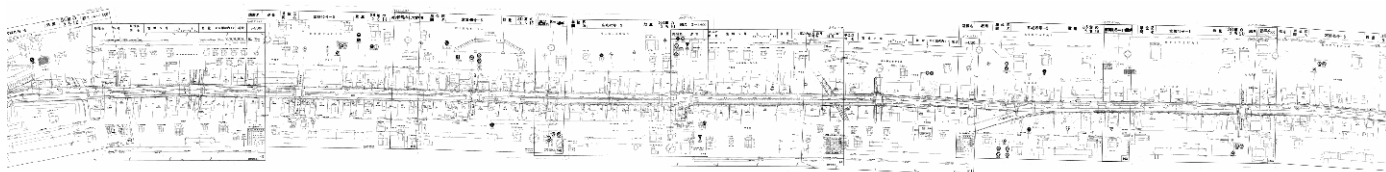


図4 接合後の完成平面図

通常最小二乗法と一般化最小二乗法によって推定したパラメータ ( $\Delta x_i, \Delta y_i$ ) ( $i = 1, \dots, 9$ ) の推定精度 (分散) を表2に示す。通常最小二乗法によるパラメータ推定精度と比較して、一般化最小二乗法によるパラメータ推定精度の結果が大きく向上していることが確認された。また、Y方向 (道路延長方向) がX方向 (道路延長の横断方向) と比較して、推定精度が高いことも確認できる。しかしながら、分散の値は接合点によっては大きな値をとることもあり、これは、地物の連続性を重視し、かつ少ない基準点によって標定を行うための限界であると考えられる。さらに、推定結果を用いてヘルマート変換を適用し、2章で用いた検証点との比較を行った結果、表3の通りとなった。最も検証点のずれが小さい図面で、その平均は1.31mであった。これは、図面ごとにヘルマート変換を適用した結果と比較して、地物の連続性を重視しているために、位置精度が低下したと考えられる。また、隣接する図面の接合が直線形状に近いほど、良い結果であるといえる。

表2 パラメータの推定精度 (分散 (m<sup>2</sup>))

	$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
OLS	$\Delta x_i$	2.36	24.21	42.85	61.93	67.07	64.03	54.01	32.18	3.65
	$\Delta y_i$	1.37	4.83	7.70	10.92	11.63	10.95	9.50	6.23	1.26
GLS	$\Delta x_i$	2.01	3.21	3.36	23.18	27.72	29.77	33.79	7.21	1.11
	$\Delta y_i$	1.15	1.25	1.27	3.67	4.12	4.31	5.88	1.48	0.37

表3 ヘルマート変換による検証点のずれの平均

図面番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ずれ (m)	5.65	7.19	7.96	6.99	5.05	4.58	2.27	2.61	1.31	4.84

## 5. おわりに

本研究では、連続する複数図面の連続性を重視し、可能な限り少ない基準点を用いて、接合・標定する手法の検討を行った。連続する図面が個別に作成されることに着目した結果、観測方程式の誤差項における不均一分散を考慮する必要があることを示した。この問題に対して、通常最小二乗法に比べ、より望ましい統計的性質をもつ一般化最小二乗法を導入した。一般化最小二乗法を適用するにあたっては、事前に誤差項の分散共分散行列を知ることができないため、実行可能な一般化最小二乗法によりパラメータ推定を行い、その精度評価を行なった。その結果、通常最小二乗法と比較して、推定精度が大きく向上したことを確認した。ただし、地物の連続性を重視しているため、図面全体の位置精度は犠牲にならざるを得ないことも確認した。

本研究では、図面10枚 (約2km) に2点という、極めて少ない基準点を用いた。より多くの図面を用いる場合には、基準点を追加できる可能性が高まるが、基準点数や基準点の配置と標定精度の関係を評価することも、今後重要となる。また、誤差項の分散が不均一であることを前提に議論を進めたが、より汎用性のある方法論とするためには、分散の均一性に関する統計学的検定が必要となる。今後の課題として、検定手



法も取り入れた枠組みへの拡張が挙げられる。一般的に、分散不均一である誤差項をモデル化することは容易ではない。本研究においては、一例として指数関数を用いているが、これが正しいという保証はない。このモデル化は、適用ケースによって異なるため、一般化最小二乗法が実装されている統計解析ソフトウェアにおいても、対応が十分ではない。今後は、幾つかのパターンによる評価が必要となる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、計量経済学における統計解析手法に関して、清水英範教授（東京大学）よりご教示いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 大崎喜久雄, 松村一保, 窪田諭, 下妻勇輔, 北川育夫, 柴原芳信: GIS 基盤データとしての道路台帳の有効活用と RTK-GPS 測量による図面作成手法, 土木情報システム論文集, Vol.10, pp.61-68, 2001.
- 2) 国土技術政策総合研究所: 道路工事完成図等作成要領 (第2版), 国土技術政策総合研究所, 2008.
- 3) 堤盛人, 清水英範, 福本潤也, 井出裕史: 誤差項に空間的自己相関が存在する回帰モデルのパラメータ推定手法に関する考察, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.49-56, 1998.
- 4) 中村英夫, 清水英範: 測量学, 技報堂出版, 2000.
- 5) 蓑谷千鳳彦: 計量経済学大全, 東洋経済新報社, 2007.
- 6) 蓑谷千鳳彦, 縄田和満, 和合肇 編: 計量経済学ハンドブック, 朝倉書店, 2007.