



## 階層的画面はり合せ法によるモザイク画面の構成\*

田中 稔\*\* 田村 進一\*\* 田中 幸吉\*\*

### Abstract

If an object to be observed is much larger than the field of vision, we should observe it part-by-part as in ophthalmoscopic pictures, gastrocamera photographs etc. Pictures obtained through partial observation should be assembled into a mosaic picture which shows the whole object. A hierarchical picture-assembling method is introduced in order to speed up the picture-assembling process. The method deals with a set of pictures each of which is reduced to the pyramid structure introduced by Tanimoto and Pavlidis. Initially, the method determines spatial differences between every pair of pictures at the coarsest level. Spatial differences are then refined, step by step, by the processing of finer pictures, and false differences are corrected through a triangle check at each level. The computational savings of this method are demonstrated theoretically and practically, and the correction ability of the triangle check is presented in the appendix.

### 1. ま え が き

眼底写真, 顕微鏡写真, 航空・衛星写真等に例を採るまでもなく, 観測対象が観測視野に比べて大きい場合, 我々は観測対象を部分的に観測し得られた画面を総合することによって観測対象全体を把握する。この問題は部分観測で得られた多数の画面から観測対象全体を含むモザイク画面を構成する問題である。もし観測部位が正確に分かっている場合にはその位置情報を用いてモザイク画面が構成できるが, そうでない場合には画面の持つ画像情報を手掛りとして画面の位置を求めなければならない<sup>1)~3)</sup>。

本論文は観測部位が未知な多数の画面が与えられた場合の効率的なモザイク画面の構成法(「階層的画面はり合わせ」)について述べる。各画面は Tanimoto<sup>4)</sup>の提案したピラミッド構造で表現されるように圧縮されている。階層的画面はり合わせ法は最も画素数の圧縮された小さな画面間で粗く相対位置を決定した後,

逐次より大きな画面を用いて相対位置の精度を詳細に決定してゆくものである。

相対位置は2つの画面間で最大相関値を与える位置として決定されるが, 最大相関値を求めるには画素数の2乗に比例した計算コストを要する。しかし階層的画面はり合せ法はこのコストを原画面で相関値を計算し相対位置を決定する場合に比べて  $(N+1)$  階層の場合で  $(N+1)/16^N$  に圧縮する。

以下 2. では, 画面はり合せに関する定式化と画面の配置の様子を表わす配置グラフの性質が述べられる。3. では, 階層的画面はり合せ法と三角形検査が提案され, はり合せに要する計算コストの比較がなされる。4. では, 階層的手法による風景写真のはり合せの実験例と検討がなされる。三角形検査の性能については付録で述べる。

本論文では, 各画面は同一サイズであり, 回転や拡大・縮小は無く, 歪の少ないものを取扱い対象とする。各画面は  $s_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) で表し, 画面  $s_i$  を画像関数  $g_i(x, y)$  ( $x=0, 1, \dots, L_1-1; y=0, 1, \dots, L_2-1$ ) で表す。 $g_i(x, y)$  の値は黒を0, 白を  $L_3-1$  として  $L_3$  レベルに量子化されているものとする。

\* Picture-assembling by means of Hierarchical Matching Technique by Minoru TANAKA, Shinichi TAMURA and Kokichi TANAKA (Department of Information and Computer Sciences, Osaka University)

\*\* 大阪大学基礎工学部情報工学科

## 2. 画面はり合せ

与えられた画面の集合からモザイク画面を構成するには、各画面間の相対位置（以下、差異と呼ぶ）を決定する必要がある。差異の決定は2枚の画面をずらして重ね合せ、重なり領域の上で2枚の画面が同一パターンを持つ時のずれ量で決定される。もし同一パターンを持たないならば、それらは隣接しないものとされる<sup>1)</sup>。モザイク画面における各画面の配置の様子は配置グラフで表され、配置グラフを用いて隣接しない画面間の差異、観測もれの領域（空白領域）、冗長な観測（冗長画面）を知ることができる<sup>2)</sup>。

### 2.1 配置グラフ

点集合を  $\hat{V}$ 、有向線の集合を  $\hat{X}$  とするとき、配置グラフは次のように定められる：配置グラフ  $\hat{G}=(\hat{V}, \hat{X})$  は2次元ベクトルを有向線の重みとして持つ有向グラフである。ただし、各点  $s_i \in \hat{V}$  は画面  $s_i$  を表わし、有向線  $\overrightarrow{s_i s_j} \in \hat{X}$  は画面  $s_j$  が画面  $s_i$  と重なりを持つか互いに丁度接することを示す。有向線  $\overrightarrow{s_i s_j}$  の持つ値  $r(s_i, s_j)$  は画面  $s_i$  の原点（左下隅）から画面  $s_j$  の原点へ向う2次元ベクトルである。

配置グラフ  $\hat{G}$  は以下のような性質を持つ<sup>3)</sup>。

- (i)  $\overrightarrow{s_i s_j} \in \hat{X}$  ならば  $\overrightarrow{s_j s_i} \in \hat{X}$ 。
- (ii)  $r(s_i, s_i) = -r(s_i, s_i)$ 。
- (iii)  $\overrightarrow{s_i s_j} \in \hat{X}$  ならば  $|r_x(s_i, s_j)| \leq L_1$  かつ  $|r_y(s_i, s_j)| \leq L_2$ 。またこの逆も成立する。ここで、 $r_x(s_i, s_j)$ 、 $r_y(s_i, s_j)$  はそれぞれベクトル  $r(s_i, s_j)$  の  $x, y$  成分を表わす。
- (iv)  $\hat{G}$  のあるパス列を  $\overrightarrow{s_{i_1} s_{i_2}}, \overrightarrow{s_{i_2} s_{i_3}}, \dots, \overrightarrow{s_{i_{k-1}} s_{i_k}}$  とすると、画面  $s_{i_1}$  と  $s_{i_k}$  の間の差異  $r(s_{i_1}, s_{i_k})$  は

$$r(s_{i_1}, s_{i_k}) = \sum_{l=1}^{k-1} r(s_{i_l}, s_{i_{l+1}}) \quad (1)$$

で求まる。

### 2.2 部分マッチング

画面  $s_j$  を画面  $s_i$  に対し  $(\Delta x, \Delta y)$  ずらして重ね合せた時の重なり領域を  $D_{ij}(\Delta x, \Delta y)$  で表わす。あるずれ  $(\Delta \xi, \Delta \eta)$  のとき、 $D_{ij}(\Delta \xi, \Delta \eta)$  上で  $s_i, s_j$  が同一パターンを持つならば、それらの間の差異を  $r(s_i, s_j) = (\Delta \xi, \Delta \eta)$  で定める。同一パターンを持つような重なり領域が存在しないならば、 $r(s_i, s_j)$  は決定しないしておく。

$D_{ij}(\Delta x, \Delta y)$  上で同一パターンを持つか否かを相関値を求めることで決定する。式(2)において  $\Sigma$  は  $D_{ij}(\Delta x, \Delta y)$  の要素  $(x, y)$  に対する総和を表わす。

$$\phi_{ij}(\Delta x, \Delta y)$$

$$= \frac{\sum g_i(x, y) \cdot g_j(x - \Delta x, y - \Delta y)}{\sqrt{\sum g_i^2(x, y)} \cdot \sqrt{\sum g_j^2(x - \Delta x, y - \Delta y)}} \quad (2)$$

画像関数は非負であり、 $0 \leq \phi_{ij}(\Delta x, \Delta y) \leq 1$  である。

理想的な画面では真のずれ量  $(\Delta \xi, \Delta \eta)$  に対して  $\phi_{ij}(\Delta \xi, \Delta \eta) = 1$  となる。しかし実際の画面では雑音・歪等によって相関値が揺らぐため、 $\phi_{ij}(\Delta x, \Delta y) \geq 1 - \varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$  の小さな数) でありかつ最大相関値を与えるずれ量  $(\Delta \xi, \Delta \eta)$  で差異  $r(s_i, s_j)$  を決定する。ここで  $D_{ij}(\Delta x, \Delta y)$  が余り小さい場合には誤って差異が決定されることが多いので、 $D_{ij}(\Delta x, \Delta y)$  は画面の10%以上の大きさの領域であるようにする。

### 2.3 三角形検査

部分マッチングで求められた差異の集合を  $R_M$  で表わす。 $R_M$  の中にはマッチングの誤りによる誤まった差異が含まれていたり、実際には重なり合う2枚の画面の重なりが少ないため差異が決定されず含まれるべき差異が含まれていないことがある。このような誤った差異を除去し、正しい差異を追加するため三角形検査を行う。三角形検査は配置グラフの性質(iv)を利用して以下の手順で行われる。

- (1) ある差異  $r(s_i, s_j) \in R_M$  が複数 ( $m_1$  以上) の  $s_{k_l}(r(s_j, s_{k_l}) \in R_M, r(s_{k_l}, s_i) \in R_M)$  に対し

$$r(s_i, s_j) + r(s_j, s_{k_l}) + r(s_{k_l}, s_i) = 0 \quad (3)$$

を満足するならば、 $r(s_i, s_j)$  は正しいものと判定する。ここで  $0$  は零ベクトルを示す。

- (2) (1) の操作を  $R_M$  に属する全ての差異について行い、正しいと判定された差異の集合を  $R_C$  で表わす。

- (3)  $r(s_i, s_j) \in R_C$  の値を以下の手順で求める。

- (i) 集合  $\{s_k | r(s_i, s_k) \in R_C \text{ かつ } r(s_k, s_j) \in R_C\}$  を  $\Gamma(s_i, s_j)$  で表わす。画面  $s_k \in \Gamma(s_i, s_j)$  を介して  $s_i$  から  $s_j$  への差異  $r(s_i, s_j; s_k)$  を式(4)で求める。

$$r(s_i, s_j; s_k) = r(s_i, s_k) + r(s_k, s_j) \quad (4)$$

- (ii) 求められた差異の集合  $R_A(s_i, s_j) \triangleq \{r(s_i, s_j; s_k) | s_k \in \Gamma(s_i, s_j)\}$  の中で多数を行う。即ち  $r(s_i, s_j; s_i) = r(s_i, s_j; s_k)(s_k, s_i \in \Gamma(s_i, s_j))$  である  $s_i$  の数を  $N(s_k)$  とするとき、ある  $m_2 \geq 2$  に対して

$$N(s_{k^*}) = \max\{N(s_k)\} \geq m_2 \quad (5)$$

を満たす  $s_{k^*}$  が存在するならば  $r(s_i, s_j)$  の値を  $r(s_i, s_j; s_{k^*})$  の値で決定する。式(5)を満たす  $s_{k^*}$  が存在しないならば  $r(s_i, s_j)$  の値を決定しないしておく。

- (4) (3) の操作を  $R_C$  に属さない全ての差異について行い、新たに決定された差異の集合を  $R_N$  とする。

(5) 差異の集合  $R_T \triangleq R_C \cup R_N$  を三角形検査の結果として得る。

三角形検査が有効であるのはすべての画面が複数の他の画面と重なりを持つ場合に限られることである。なお三角形検査の能力については付録を参照のこと。

得られた差異の集合  $R_T$  をもとにして配置グラフが得られる。

2.4 差異決定に要する計算コスト

$L_1 \times L_2$  画素の画面間で差異を求めるのに要する計算コストについて述べる。ある重なり領域  $D_{ij}(\Delta x, \Delta y)$  上で相関値を求めるには、乗算  $3(L_1 - \Delta x)(L_2 - \Delta y) + 1$  回、加算  $3\{(L_1 - \Delta x)(L_2 - \Delta y) - 1\}$  回、平方根 2 回、除算 1 回の演算が必要である。従って  $-\alpha L_1 \leq \Delta x \leq \alpha L_1$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),  $-\beta L_2 \leq \Delta y \leq \beta L_2$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) の範囲で差異を求めるには、乗算約  $3\alpha\beta(2-\alpha)(2-\beta)(L_1 L_2)^2$  回、加算も乗算もほぼ同様、平方根  $8\alpha\beta L_1 L_2$  回、除算  $4\alpha\beta L_1 L_2$  回、比較は除算とほぼ同様を要する。

このように計算コストはほぼ画素数の 2 乗に比例して増大する。次章では計算コストの圧縮を実現するための階層的画面はり合せ法を提案する。

3. 階層的画面はり合せ

3.1 画面の圧縮

原画面のサイズを  $L_1 \times L_2$  ( $L_1 = M_1 \cdot 2^N, L_2 = M_2 \cdot 2^N$ ) とする。各画面を Tanimoto のピラミッド構造<sup>4)</sup> にサイズを圧縮する。第  $n$  階層の画面を  $g_i^{(n)}(x_n, y_n)$  で表わす:

$$g_i^{(n)}(x_n, y_n) \begin{cases} i=1, 2, \dots, I, \\ n=0, 1, \dots, N, \\ x_n=0, 1, \dots, M_1 \cdot 2^{N-n} - 1, \\ y_n=0, 1, \dots, M_2 \cdot 2^{N-n} - 1. \end{cases}$$

第 0 階層の画面  $g_i^{(0)}(x_0, y_0)$  は原画面である。第  $n$  階層の画面は第  $n-1$  階層の画面から式 (6) に従って求められる。

$$g_i^{(n)}(x_n, y_n) = 0.25 \{ g_i^{(n-1)}(2x_n, 2y_n) + g_i^{(n-1)}(2x_n + 1, 2y_n) + g_i^{(n-1)}(2x_n, 2y_n + 1) + g_i^{(n-1)}(2x_n + 1, 2y_n + 1) \}. \quad (6)$$

$g_i^{(n-1)}$  から  $g_i^{(n)}$  を求めるのに要する計算コストは加算  $3 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot 4^{N-n}$  回、乗算  $M_1 \cdot M_2 \cdot 4^{N-n}$  回である。したがって第 1 階層から第  $N$  階層までの全ての画面を求めるには加算約  $L_1 \cdot L_2$  回、乗算約  $L_1 \cdot L_2 / 3$  回の計算コストを必要とする。

3.2 階層的画面はり合せ

階層的画面はり合せ法の目的はモザイク画面構成に要する計算コストの減少とスピードアップにある。それは第  $N$  階層で大まかにモザイクを構成し、その後第  $N-1$  階層, ..., 第 0 階層と逐次差異の精度を向上させてゆく手法である。

まず,  $M_1 \times M_2$  画素の画面間で相関を計算し差異を決定するルーチン (ルーチン PM と呼ぶ) を用意する。それは 2.2 で述べたのと同様である。ルーチン PM で決定された差異を  $(\Delta \xi', \Delta \eta')$  で表わす。

3.2.1 第  $N$  階層における差異の決定

第  $N$  階層では各画面  $g_i^{(N)}(x_N, y_N)$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) は  $M_1 \times M_2$  画素より成る。したがってルーチン PM で決定された差異  $(\Delta \xi', \Delta \eta')$  は  $g_i^{(N)}$  と  $g_j^{(N)}$  の差異  $(\Delta \xi_{ij}^{(N)}, \Delta \eta_{ij}^{(N)})$  である。

決定された差異の集合に対し三角形検査を行い、第  $N$  階層での配置グラフ  $\hat{G}^{(N)} = (\hat{V}, \hat{X}^{(N)})$  を得る。

3.2.2 第  $n$  階層における差異の決定

第  $n+1$  階層 ( $n=N-1, N-2, \dots, 0$ ) で求まっている配置グラフを  $\hat{G}^{(n+1)} = (\hat{V}, \hat{X}^{(n+1)})$  とし,  $g_i^{(n+1)}$  と  $g_j^{(n+1)}$  の間の差異を  $(\Delta \xi_{ij}^{(n+1)}, \Delta \eta_{ij}^{(n+1)})$  とする。第  $n$  階層でのマッチングによる差異の決定は  $s_i s_j \in \hat{X}^{(n+1)}$  である画面の対  $g_i^{(n)}, g_j^{(n)}$  に対して行う (Fig. 1)。

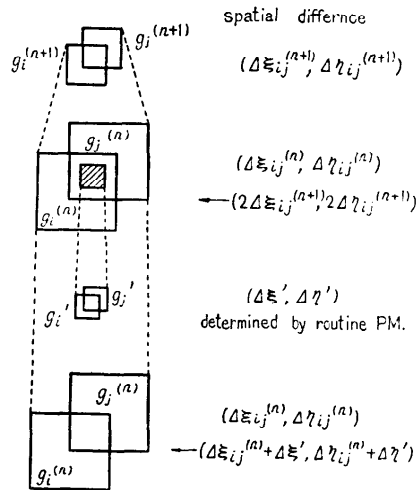


Fig. 1 Hierarchical partial-matching. The figure shows how the spatial difference between pictures  $g_i$  and  $g_j$  at level  $n$  is calculated in the case where  $|2\Delta \xi_{ij}^{(n+1)}| \leq M_1 \cdot 2^{N-n} - M_1$  and  $|2\Delta \eta_{ij}^{(n+1)}| \leq M_2 \cdot 2^{N-n} - M_2$ . The other cases are calculated in a similar way.

(1)  $q_i^{(n)}$  と  $q_j^{(n)}$  の差異 ( $\Delta\xi_{ij}^{(n)}, \Delta\eta_{ij}^{(n)}$ ) を次のように仮定する.

$$\Delta\xi_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 2\Delta\xi_{ij}^{(n+1)}, & |2\Delta\xi_{ij}^{(n+1)}| \leq M_1 \cdot 2^{N-n} - M_1 \text{ のとき} \\ M_1 \cdot 2^{N-n} - M_1, & 2\Delta\xi_{ij}^{(n+1)} > M_1 \cdot 2^{N-n} - M_1 \text{ のとき} \\ -(M_1 \cdot 2^{N-n} - M_1), & 2\Delta\xi_{ij}^{(n+1)} < -(M_1 \cdot 2^{N-n} - M_1) \text{ のとき} \end{cases} \quad (7a)$$

$$\Delta\eta_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 2\Delta\eta_{ij}^{(n+1)}, & |2\Delta\eta_{ij}^{(n+1)}| \leq M_2 \cdot 2^{N-n} - M_2 \text{ のとき} \\ M_2 \cdot 2^{N-n} - M_2, & 2\Delta\eta_{ij}^{(n+1)} > M_2 \cdot 2^{N-n} - M_2 \text{ のとき} \\ -(M_2 \cdot 2^{N-n} - M_2), & 2\Delta\eta_{ij}^{(n+1)} < -(M_2 \cdot 2^{N-n} - M_2) \text{ のとき} \end{cases} \quad (7b)$$

(2)  $q_j^{(n)}$  を  $q_i^{(n)}$  の上に ( $\Delta\xi_{ij}^{(n)}, \Delta\eta_{ij}^{(n)}$ ) だけずらせて重ね合せ, 重なり領域の中央からそれぞれ  $M_1 \times M_2$  の大きさで画面  $q_i', q_j'$  を切り出す.

(3)  $q_i', q_j'$  の間の差異 ( $\Delta\xi', \Delta\eta'$ ) をルーチン PM により決定する.

(4)  $q_i^{(n)}, q_j^{(n)}$  の間の差異を式 (8) で修正する.

$$\left. \begin{aligned} \Delta\xi_{ij}^{(n)} &\leftarrow \Delta\xi_{ij}^{(n)} + \Delta\xi', \\ \Delta\eta_{ij}^{(n)} &\leftarrow \Delta\eta_{ij}^{(n)} + \Delta\eta'. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(5) 決定された差異の集合に対し三角形検査を行い, 第  $n$  階層での配置グラフ  $G^{(n)} = (V, X^{(n)})$  を得る.

### 3.2.3 原画面間の差異の決定

第  $N$  階層の差異の決定から始めて,  $n = N - 1, N - 2, \dots, 0$  と各階層ごとに差異を求めモザイク画面を構成してゆくことにより, 原画面  $q_i^{(0)}$  ( $i = 1, 2, \dots, J$ ) 間の差異が求まり, 原画面によるモザイク画面が完成される.

### 3.3 階層的畫面はり合せ法の計算コスト

2つの原画面間の差異を求めるのに要する計算コストは, 階層的畫面はり合せ法では原画面間で直接的にマッチングにより差異を求めるのに要するコストの  $(N+1)/16^N$  に圧縮されている.

モザイク画面の完成に要するコストについて次に述べる. 階層的畫面はり合せ法では, 前階層で重なりを持つ画面間のみでマッチングが行なわれているので, 原画面から直接的にモザイク画面を完成するのに要するコストの  $(N+1)/16^N$  よりさらに少ないコストで済む. なお三角形検査に要するコストは  $2I^3$  回以下の加算と比較である. ☒

## 4. 実験例

### 4.1 説明

Fig. 2 (次頁参照) に示す 10 枚の画面から階層的畫面はり合せ法でモザイク画面の構成を行った. 各画面は Fig. 3 (次頁参照) に示すように,  $80 \times 80$  画素でサンプルされ, さらに  $40 \times 40, 10 \times 10, 5 \times 5$  画素と圧縮されている.

ルーチン PM は  $5 \times 5$  画素の画面の間で差異 ( $\Delta\xi', \Delta\eta'$ ) を求める. 差異は  $-2 \leq \Delta\xi' \leq 2, -2 \leq \Delta\eta' \leq 2$  の範囲で決定されている. ルーチン PM において, 相関係数  $\phi_{ij}(\Delta\xi', \Delta\eta') < 0.90$  の場合, 画面  $q_i'$  と  $q_j'$  はマッチングがとれないものと判定した.

三角形検査において, 2つ以上の三角形に対し式 (3) が成り立つならばその差異は正しいものと判定し, 式 (5) において  $N(s_k) \geq 2$  を満足するならば仮定された差異が正しいものと判定し追加している. また  $\pm 1$  画素の誤差は次の階層で回復しうるので  $\pm 1$  画素の誤差を許容した.

### 4.2 結果

Table 1 は第 0 階層で決定された差異  $\Delta(\xi_{ij}^{(0)}, \Delta\eta_{ij}^{(0)})$  を示す. Table 1 において各要素の上段は  $\Delta\xi_{ij}^{(0)}$  の値であり下段は  $\Delta\eta_{ij}^{(0)}$  の値である. 参考の

Table 1 Spatial differences as determined by the proposed method at level 0. The upper and the lower elements of each entry show the spatial differences in  $x$  and  $y$ -directions, respectively.

SPATIAL DIFFERENCE (DETERMINED)										
PICTURE	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
$S_1$	0 0	3 15	15 -10	47 8	53 -13	69 21	78 -12	86 6	104 20	112 0
$S_2$	-3 -15	0 0	11 -24	44 -6	47 -27	65 6	74 -27	82 -8	98 6	108 -16
$S_3$	-15 10	-11 24	0 0	33 17	38 -3	54 30	62 -3	72 14	88 30	96 8
$S_4$	-47 -8	-44 6	-33 -17	0 2	6 -20	21 13	32 -20	39 -2	54 14	62 -7
$S_5$	-53 13	-47 27	-38 3	-6 20	0 0	16 33	26 0	34 18	48 33	56 13
$S_6$	-69 -21	-65 -6	-54 -30	-21 -13	-16 -33	0 0	9 -33	18 -15	32 1	41 -20
$S_7$	-78 12	-74 27	-62 3	-32 20	-26 0	-9 33	0 0	9 18	23 34	31 13
$S_8$	-86 -6	-82 8	-72 -14	-39 -18	-34 -18	-18 15	-9 -18	0 0	14 16	23 -5
$S_9$	-104 -20	-98 -6	-88 -30	-54 -14	-48 -33	-32 -1	-23 -34	-14 -16	0 0	8 -21
$S_{10}$	-112 0	-106 16	-96 -8	-62 7	-56 -13	-41 20	-31 -13	-23 5	-8 21	0 0

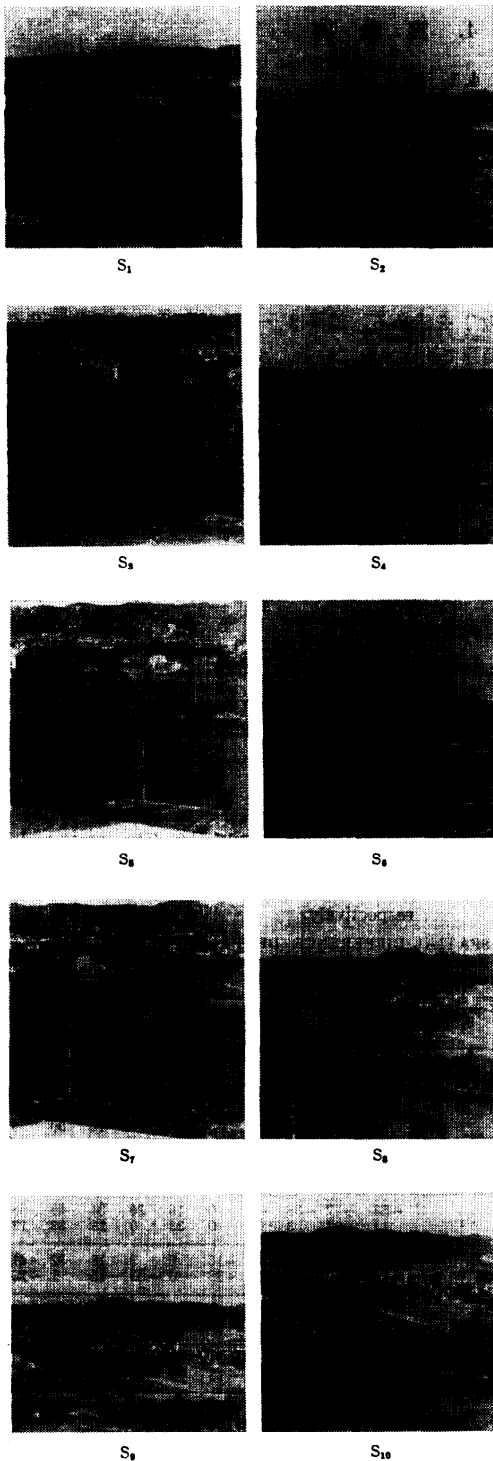


Fig. 2 A set of pictures.

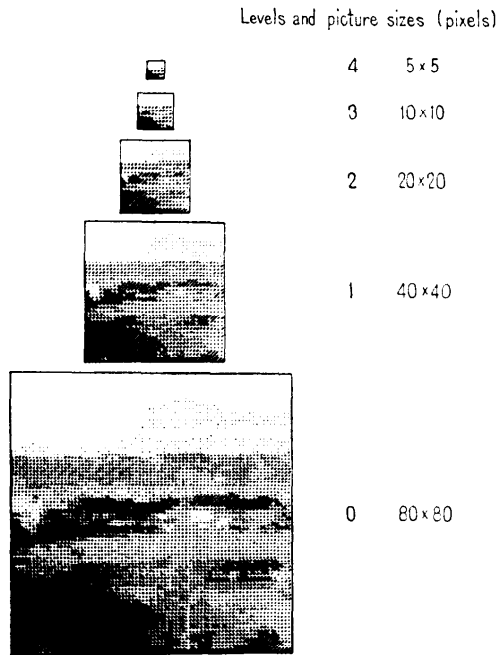


Fig. 3 Pyramid for a picture  $s_4$ . Levels 0 through 4 are shown.

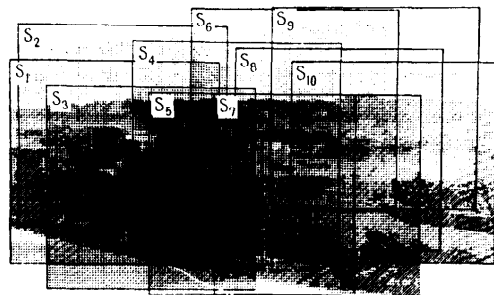


Fig. 4 A mosaic picture constructed by the hierarchical picture-assembling method from the pictures shown in Fig. 2.

Table 2 Spatial differences found manually.

PICTURE	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
SPATIAL DIFFERENCE	4	11	33	5	15	9	9	16	9	9
	14	-24	18	-19	32	-35	20	16	16	-21

ために、人手によって求めた差異を Table 2 に示す。完成したモザイク画面を Fig. 4 に示す。

4.3 検 討

各階層において決定された差異の正誤の数を Table 3 (次頁参照) に示す。Table 3 において、(i) 画面が重なりを持つ場合には、多くの差異が正しく決定され

**Table 3** Number of correct and incorrect spatial differences determined at each level.

階 層	画面が重なる場合		画面が重ならない場合	
	正	誤	正	誤
4	29	1	1	14
3	28	3	8	6
2	32	1	12	0
1	34	0	11	0
0	36	0	9	0

ている。この事実は  $5 \times 5$  という非常に小さな画面間のマッチングでも 1 に近い最大相関値を与える位置で差異を定めることは十分に意味あることを物語っている。一方、(ii) 重なりを持たない場合には粗い画面で多くの差異が誤って決定されている。これは相関係数の閾値がやや低く設定されており、実際には同一パターンでなくてもマッチしたと判断された。その誤りに加えて決定された差異の範囲が狭いことに起因して、偶然に 2 つ以上の三角形が成り立ち三角形検査を通ったものである。いずれの場合でも画素数の多くなる以降の階層では誤った差異は三角形検査で除去され修正されている。

はり合せの精度は人手ではり合せたものと比べて最大 2 画素の違いである。また  $S_4, S_5, S_7, S_8$  には電柱が存在するが、電柱は 1~2 画素の太さでありモザイク画面においてよく一致している。山の稜線は  $S_2$  と  $S_3$  の間で縦方向に 1 画素ずれている他はよく一致している。以上のことから、縦・横方向ともに 1~2 画素の誤差ではり合せられていることがわかる。

実験では濃淡レベルの正規化を行っていないが、モザイク画面を一層見易くするためには各画面の濃淡レベルを修正する必要がある。これは対応する同一画素の濃淡値が等しくなるよう操作を施すことで達成できる。

観測歪は一般に画面の周辺部ほど大きい。したがって階層的マッチングの重なり領域の中央部分から部分的画面を切り出して差異を決定する本論文の手法は、歪の少ない部分を処理対象とすることによって、歪の影響を極力避けた手法といえよう。

最後に計算時間の比較を行う。実験はミニコンピュータ (中央電子, CEC-555/H) を用いて行った。20×20 画素の 2 枚の画面間で直接的にマッチングにより差異を求めるのに約 35 分 (ディスクからの入力時間を含む) を要した。一方、階層的マッチング法では 80×80 画素の画面間で差異を求めるのに約 70 秒 (ディスクからの入力時間を含む) を要した。80×80 画素の

場合で理論上  $5/16^4 \approx 7.5 \times 10^{-5}$  に計算時間は圧縮されている。また、Fig. 4 のモザイク画面の完成には階層的画面はり合せ法で約 54 分 (ディスク入力時間を含む) を要した。なお 80×80 画素の画面を  $5 \times 5$  画素の画面まで圧縮し、1 つのピラミッド構造を得るのに約 35 秒 (ディスク入出力時間を含む) を要した。

## 5. む す び

本論文で、多数の画面が与えられた時、それから 1 枚のモザイク画面を効率よく構成するための階層的画面はり合せ法を提案するとともに、風景写真を用いた実験例を示した。その手法は、ピラミッド構造に圧縮された画面を処理対象とし、最も小さな画面で粗く差異を決定した後、逐次より大きな画面を用いて差異を詳細に決定してゆくものである。

階層的画面はり合せ法の特長は計算コストの圧縮と処理のスピードアップの上に主記憶が節約できることである。一般に画像処理は多くの主記憶を必要とするが、階層的画面はり合せ法は画面の一部分を切り出してマッチングを実行するので主記憶はその小部分のマッチングに必要な容量を要するだけである。その際、各画面は二次記憶上にあっても処理には全く差し支えない。

2 つの画面が同一パターンを持つか否かの判定に本論文では相関係数を求めたが、代りに 2 次元 FFT による相関の計算あるいは残差逐次検定法 (SSDA 法)<sup>6,7)</sup> 等を用いることも出来る。これらの場合でも階層的に行えば計算時間が圧縮できる。

画面はり合せは、画面の持つ情報を手掛りとして画面相互間の位置を決定するものである。この性質はワールド・モデル・シンセシスにおいて利用できる。即ち、各画面の内容を理解 (シーン・アナリシス) した後、画面間の差異を媒介としてそれらの内容を総合することによって、観測対象全体の理解を行うものである。この問題は画面はり合せの今後の発展方向の一つと考えられる。

最後に、日頃より有益なご討論をしてくださる当研究室の諸氏に深謝の意を記す。

## 参 考 文 献

- 1) 田中, 田村, 田中: 部分画面はり合せにおける隣接位置関係の決定, 信学論 (D), Vol. 58-D, No. 9, pp. 570~577 (1975)
- 2) 富岡, 田中, 田村, 田中: 血管構造に基づく眼底写真の貼合せ, 情報処理学会第 17 回全大予稿

集, pp. 165~166 (1976)

- 3) 田中, 田村, 田中: 観測対象の構造を利用した部分画面の大きな位置決め, 情報処理学会第16回全大予稿集, pp. 591~592 (1975)
- 4) S. Tanimoto and T. Pavlidis: A Hierarchical Data Structure for Picture Processing, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 4, pp. 104~119 (1975)
- 5) M. Tanaka, S. Tamura and K. Tanaka: On Assembling Subpictures into a Mosaic Picture, IEEE Trans. on S.M.C., Vol. 7, No. 1, pp. 42~48 (1977)
- 6) D.I. Barnea and H.F. Silverman: A Class of Algorithm for Fast Digital Image Registration, IEEE Trans. on Comp. Vol. 21, pp. 179~186 (1972)
- 7) 尾上, 前田, 斎藤: 残差逐次検定法による画像の重ね合わせ, 情報処理, Vol. 17, No. 7, pp. 634~640 (1976)

### 付 録

#### 三角形検査の能力

$I$ 枚の画面間の差異の集合 ( $I(I-1)$ 個の差異)で考える。これらの差異のうち正しく求まっているものの割合を  $p$  ( $0 \leq p \leq 1$ ) とする。三角形検査の手順は 2.3 の手順(1), (2)である。判定の結果は次の4つの場合に分けられる。

(i) ある差異が正しくてかつ正しいと判定される確率  $P_i$  は式(A.1)である。

$$P_i = p \left\{ 1 - \sum_{l=0}^{m_1-1} C_l \cdot P^l (1-P)^{I-2-l} \right\}, \quad (\text{A.1})$$

ただし  $P$  は1つの三角形が出来る確率で式(A.2)で与えられる。

$$P = p^2 + (1-p)^2 \cdot q. \quad (\text{A.2})$$

なお  $q$  は3つの差異のうち少なくとも2つが誤ったものである場合に、偶然に式(3)の成立する確率であり、決定された差異の大きさに依存する。

(ii) ある差異が正しくてかつ誤っていると判定される確率  $P_{ii}$  は式(A.3)である。

$$P_{ii} = p \cdot \sum_{l=0}^{m_1-1} C_l \cdot P^l (1-P)^{I-2-l} \quad (\text{A.3})$$

(iii) ある差異が誤っていてかつ正しいと判定される確率  $P_{iii}$  は式(A.4)である。

$$P_{iii} = (1-p) \left\{ 1 - \sum_{l=0}^{m_1-1} C_l \cdot Q^l (1-Q)^{I-2-l} \right\}. \quad (\text{A.4})$$

ただし,  $Q$  は誤った三角形が1つ出来る確率で式(A.

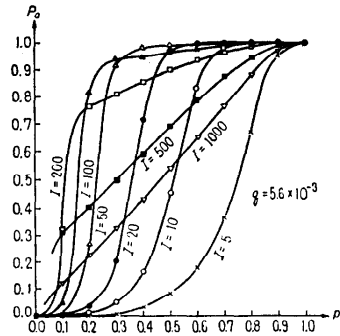


Fig. A.1 Correction ability of triangle check. The curves show correct rate of spatial differences before the triangle check ( $p$ ) vs. correct rate of those corrected through the check ( $P_0$ ). Parameters  $I$  and  $q$  denote number of pictures and probability of an erroneous triangle constructed from incorrect spatial differences, respectively.

5)で与えられる。

$$Q = (1-p^2) \cdot q. \quad (\text{A.5})$$

(iv) ある差異が誤っていてかつ誤っていると判定される確率  $P_{iv}$  は式(A.6)である。

$$P_{iv} = (1-p) \sum_{l=0}^{m_1-1} C_l \cdot Q^l (1-Q)^{I-2-l}. \quad (\text{A.6})$$

$n$ 重の三角形検査によって誤っていると判定されて((ii), (iv)の場合)除去された差異に対して、その後正しいと判定された差異を用いて新たに差異を仮定し追加する。その手順は 2.3 の手順(3), (4)である。

追加された差異でありかつ正しい確率  $P_v$  は

$$P_v = (P_{ii} + P_{iv}) \left\{ 1 - \sum_{l=0}^{m_2-1} C_l \cdot S^l (1-S)^{I-2-l} \right\}, \quad (\text{A.7})$$

ただし,

$$S = P_i^2 + P_{iii}^2 \cdot q \quad (\text{A.8})$$

である。

以上より最終的に決定された全ての差異のうち正しいものの割合  $P_0$  は式(A.9)である。

$$P_0 = P_i + P_v \quad (\text{A.9})$$

Fig. A.1 は  $m_1 = m_2 = 2$ ,  $q = 5.6 \times 10^{-3}$  の場合の,  $p$  に対する  $P_0$  の関係を示したものである (実験では第1階層での  $q$  の値に相当する)。図から明らかなように, マッチングによって差異が正しく決定される割合  $p$  がある値より大きければ, 三角形検査はきわめて有効に働くことが分る。

(昭和52年3月7日受付)

(昭和52年6月21日再受付)