1　はじめに

天文学の分野では、太陽の活動を知るための手がかりとして、太陽観測衛星 「ようこう」[1] が撮影した 2 次元の X 線画像データから、太陽コロナなどの 3 次元的な情報を再現して観測することが望まれている。

3 次元化する方法として代表的なステレオ立体視法では異なる視角からの複数の画像が必要である。異なる視角を得る方法には複数の固定カメラを用いる方法と、単一のカメラを移動させる方法、あるいはカメラを固定して物体を回転させる方法がある。「ようこう」が撮影した画像は単一の固定カメラからの画像であり、太陽の自転によって異なる視角を得る。単一のカメラによるステレオ立体視には、複数のカメラによる場合と比べてキャリブレーションの必要がないという利点がある。しかし、対象となる天体が剛体の場合には、自転の間に表面のテクスチャが変化しないので正確なステレオ画像ペアが抽出できるが、太陽のように表面のテクスチャが変化すると、ステレオ画像ペア間に誤差が生じて立体感を損ねてしまう。

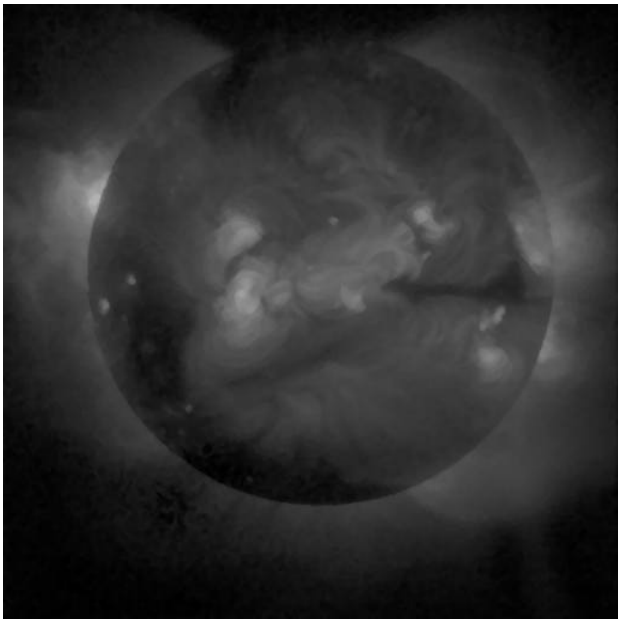
そこで本研究では、「ようこう」が撮影した X 線太陽画像から良好な立体画像を構成するため、モルフォロジー処理とアフィン変換を用いて太陽表面のテクスチャの変化を補正する手法を検討し、その有効性を検証するためコンピュータグラフィクス (CG) で作成したモデル画像に対して補正実験を行う。

2　太陽表面のテクスチャ変形のモデル化

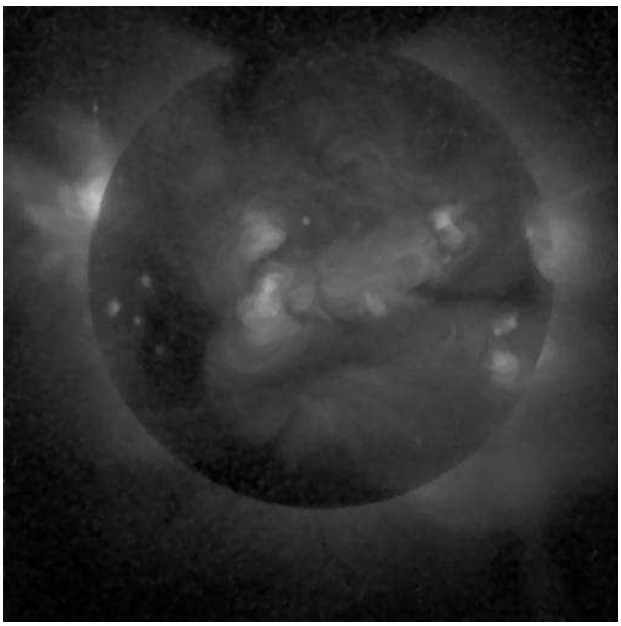
図 1 に見られるように、時間経過に伴って変形するテクスチャの正体は、コロナと呼ばれる太陽の外層大気より放射された X 線である。コロナの形状は太陽内部に存在する磁場の影響により大きく変化する。また太陽活動の活発な時期には 「フレア」と呼ばれる突発的な爆発現象が観測される。この現象はコロナの磁場に蓄えられたエネルギーが短時間のうちに解放される現象である。

このようなテクスチャの変形を補正するために、変形は平行移動、拡大・縮小、回転の 3 種類が組合わさっていると考え、その補正は各変形に対する補正の組合せで行う。ただしテクスチャの発生、消滅についてはステレオ画像ペアを作れないので範囲に含めない。

以下、3 種類の変形のそれぞれについてモデル化を行う。本研究で扱うテクスチャの変形は、図 1、に見られるように、変形前と後でテクスチャを構成する画素が 1 対 1 に対応しないため、アフィン変換のように変形前と後で、点が 1 対 1 に対応するような処理では単純に記述できないが、集合演算で定義されるモルフォロジーを用いることで、構造要素を変えるだけで平行移動と拡大・縮小について記述することができる。しかし、回転についてはモルフォロジーで記述できないためアフィン変換で記述する。



(1) 1993 年 5 月 16 日 04:52:39 の画像データ



(2) 1993 年 5 月 16 日 10:50:09 の画像データ

図 1:　「ようこう」による X 線太陽画像

2.1 モルフォロジー演算による平行移動、拡大・縮小のモデル化

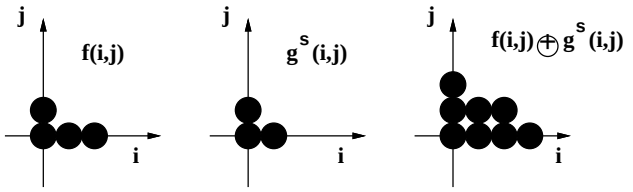


図 2: 2 値画像での dilation の例

平行移動と拡大・縮小はモルフォロジーの基本演算である dilation、erosion で記述する。その定義は、濃淡画像では以下のようになる。

$dilation$:

$$[f \oplus g^s](i,j) = \max_{\substack{i+u,j+v \in F \\ u,v \in G}} \{f(i+u, j+v) + g(u,v)\} \quad (1)$$

$erosion$:

$$[f \ominus g^s](i,j) = \min_{\substack{i+u,j+v \in F \\ u,v \in G}} \{f(i+u, j+v) - g(u,v)\} \quad (2)$$

ただし $f(i,j)$ は対象画像であり、$g^s(i,j)$ は、構造要素 $g(i,j)$ の対称関数 $(g^s(i,j) = g(-i,-j))$、F, G は f, g の定義域である。

さらに、構造要素がその定義域で 0 であるとき ($g(i,j) = 0, i,j \in G$) には、以下のような、単純な最大値演算と最小値演算になる。

$dilation$:

$$\begin{aligned} [f \oplus g^s](i,j) &= (f \oplus G^s)(i,j) \\ &= \max_{\substack{i+u,j+v \in F \\ u,v \in G}} \{f(i+u, j+v)\} \quad (3) \end{aligned}$$

$erosion$:

$$\begin{aligned} [f \ominus g^s](i,j) &= (f \ominus G^s)(i,j) \\ &= \min_{\substack{i+u,j+v \in F \\ u,v \in G}} \{f(i+u, j+v)\} \quad (4) \end{aligned}$$

式 (3)、(4) は集合による関数の dilation, erosion であり、定義域 G^s を構造要素とみなすような表記とする。この定義域 G^s を変化させることにより、式 (3)、(4) の演算結果は変化する。

図 3に本研究で使用した 12 種類の構造要素を示す。例えば、mask1 は定義域 $G = \{(0,1)\}$ の構造要素であることを示す。これらの構造要素を式 (3)、(4) に用いることにより $f(i,j)$ 中のオブジェクトに対して以下に定義する平行移動や拡大・縮小といった変形を行うことができる。

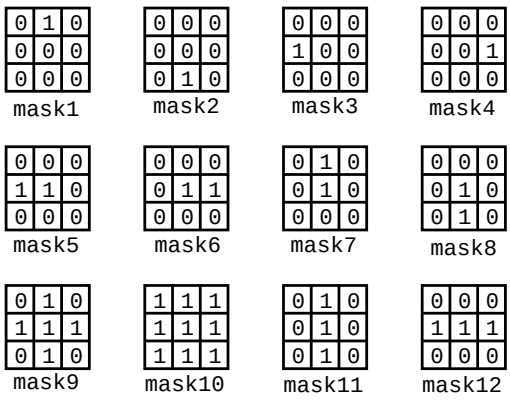


図 3: 本研究で使用した構造要素

また。以後 $i,j \in G$ では $g(i,j) = 0$ であるとする。

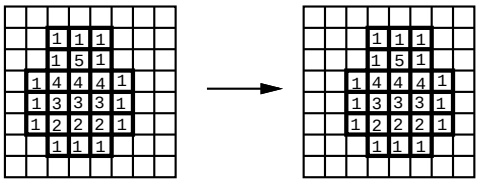
(a) 平行移動

mask1 ~ mask4 の定義域を持つ構造要素による dilation (erosion) を平行移動と呼ぶ。

例えば、mask3($G = \{(-1,0)\}$) による dilation (erosion) によって $f(i,j)$ 中のオブジェクトは右方向へ移動する。これを図 4 に示す。ただしで図中の数値はその画素における輝度値であり、数値のない画素は輝度が 0 であるとする。

$$[f \oplus G^s](i,j) = f(i+1, j) \quad (5)$$

$$[f \ominus G^s](i,j) = f(i+1, j) \quad (6)$$



(a) Original image (b) translation result

図 4: dilation(erosion) による移動

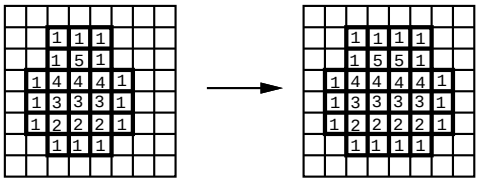
このように、平行移動では dilation と erosion の結果は等しい。また、それぞれ mask1、mask2、mask4 の定義域を持つ構造要素による dilation (erosion) によって、それぞれ下、上、左方向への平行移動を記述できる。

(b) 拡大

mask5 ~ mask12 の定義域を持つ構造要素による dilation を拡大と呼ぶ。

例えば、mask5($G = \{(-1,0),(0,0)\}$) のによる dilation によって $f(i,j)$ 中のオブジェクトは右方向へと非等方的に拡大する。これを図 5 に示す。

$$[f \oplus G^s](i,j) = \max\{f(i,j), f(i+1,j)\} \qquad (7)$$



(a) Original image (b) dilation result

図 5: dilation による拡大

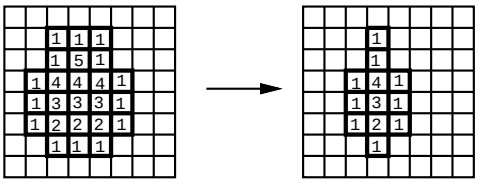
また、平行移動の場合と同様に構造要素を変更すれば、他方向への非等方的な拡大や、等方的な拡大も記述できる。

(c) 縮小

mask5 ~ mask12 の定義域を持つ構造要素による erosion を縮小と呼ぶ。

例えば、mask12($G = \{(-1,0),(0,0),(1,0)\}$) の構造要素による erosion によって $f(i,j)$ 中のオブジェクトは左右方向から非等方的に縮小する。これを図 6 に示す。

$$[f \ominus G^s](i,j) = \min\{f(i-1,j), f(i,j), f(i+1,j)\} \quad (8)$$



(a) Original image (b) erosion result

図 6: erosion による縮小

また、拡大と同様に構造要素の変更によって、各方向への非等方的な縮小、等方的な縮小が可能である。

2.2 アフィン変換による回転のモデル化

前節では、dilation、erosion の 2 つのモルフォロジー演算で構造要素を変えることにより、平行移動、拡大・縮小を記述したが、モルフォロジーでは、「回転」を記述することができないため、本研究ではアフィン変換によって回転を記述する。

点 (C_x, C_y) を中心とする反時計回りに θ の回転を、式 9 に示す。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - C_x \\ y - C_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix} \qquad (9)$$

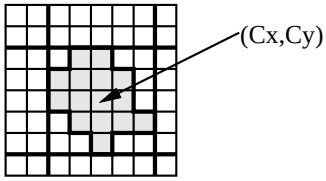


図 7: 回転の中心

3 変形の補正とステレオ画像ペアの推定方法

補正は複数のテクスチャに 1 度に行うのではなく、対応する 1 組のテクスチャごとに行う。そのため、まず前処理として、複数のテクスチャが存在するステレオ画像ペアから、対応するテクスチャごとに手動で左右画像を生成する必要がある。

具体的には、以下のような手順で行う。

(1) まず前処理として、ステレオ画像ペアに輝度値に対する閾値処理を行う。このとき閾値を調整して、立体視に影響が大きいと思われる輝度値の高いテクスチャ領域を残し、それ以外の領域の輝度値を 0 とする。さらに左右画像間で、残った複数のテクスチャの対応付けを手動で行い、対応する 1 組のテクスチャだけを残して、他のテクスチャの輝度値は 0 とし、左画像 $f_l(x,y)$ と右画像 $f_r(x,y)$ を生成する。

(2) 式 (10) で示す $f_l(x,y), f_r(x,y)$ 間の輝度値の残差の絶対値和 $D(d_x,d_y)$ を最小化するように d_x, d_y を変化させ、視差の推定値 $\hat{\mathrm{d}}\mathrm{x}$、$\hat{\mathrm{d}}\mathrm{y}$ を求める。ここで、W は画像サイズである。

$$D(d_x,d_y) = \sum_{(x,y)\epsilon W} \mid f_l(x,y) - f_r(x+d_x, y+d_y) \mid \qquad (10)$$

(3) (4) で f_r に最適な補正処理を探索するため、探索範囲を設定する。本研究では、補正処理の種類は前節で述べた平行移動、拡大・縮小、回転の 3 種類であり、平行移動、拡大・縮小の処理回数は最大 5 回まで、回転は時計回り、反時計回りそれぞれ 1 ~ 5 度までとする。また、これらの補正処理の組合せは 2 種類までとする。

(4) (3) で設定した探索範囲を全探索して f_r に最適な補正を求め、補正を行う。探索範囲内の全ての補正処理を f_r に行って $f_r{}'$ を次々と求め、そのうち式 (11) を最小化するものを最適な補正とする。

$$D(f_r{}') = \sum_{(x,y)\epsilon W} \left| f_l(x,y) - f_r{}'(x+\hat{\mathrm{d}}\mathrm{x}, y+\hat{\mathrm{d}}\mathrm{y}) \right| \qquad (11)$$

4　モデル画像に対する実験結果

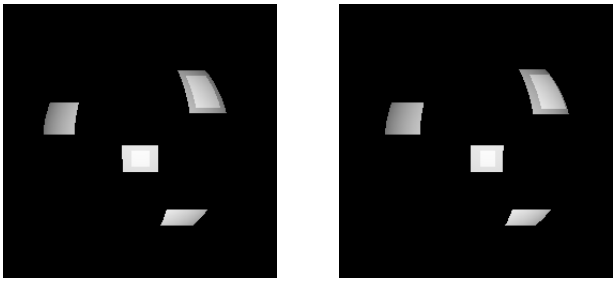
CG によりモデル画像を作成し、前節で説明した手順にしたがって補正実験を行う。モデル画像は512 × 512[pixels] の濃淡画像 (8bit/pixel) である。

4.1　平行移動、拡大・縮小に対する補正

作成したモデル画像を図 8 に示す。左右のモデル画像間で球体は 5 ° 自転し、4 つのテクスチャはそれぞれ以下のように変化する。

- 左のテクスチャ a :輝度が 1 増加
- 中央のテクスチャ b :上下 1 画素、左右 1 ° ずつ縮小
- 右上のテクスチャ c :上下 1 画素、左右 1 ° ずつ拡大
- 右下のテクスチャ d :左に 1 ° 移動

実験はそれぞれのテクスチャについてから抽出した 4 組の画像ペアに対して行った。



(1) 左側 f_l　　(2) 右側 f_r

図 8: CG により生成したモデル画像

それぞれのテクスチャに対して、選択した最適な補正処理と D_o (補正前の D) D_c (補正後の D) 式 12で示す補正率 R [%] を表 1 に示す。

$$R = \frac{D_o - D_c}{D_o} \times 100 \qquad (12)$$

c の補正率が低いが、各々、D_c が D_o よりも小さくなっていることから、テクスチャ自身の変形のあった b,c,d では、その変形を打ち消すような補正が正しく選択されていることが分かる。また a の縮小と d の拡大は、テクスチャ自身の変形がないので自転によるテクスチャの見かけの変化を補正したと考えられる。

次に、4 つのテクスチャの変化量を以下のように変えて、同様の実験を行った結果を表 2 に示す。

- 左のテクスチャ a :輝度が 2 増加
- 中央のテクスチャ b :上下 2 画素、左右 2 ° ずつ縮小
- 右上のテクスチャ c :上下 2 画素、左右 2 ° ずつ拡大
- 右下のテクスチャ d :左に 2 ° 移動

変化量が増加した分、補正処理の適用回数が増えているが、表 1 と同様に、各テクスチャの変形を打ち消すような補正を選択している。また、c の補正率が向上した。

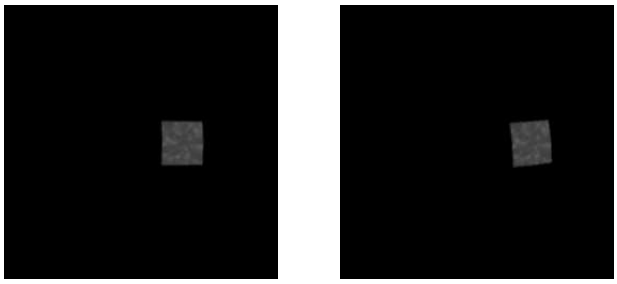
表 1: 4 つのテクスチャに対する実験結果

	選択した補正処理	D_o	D_c	R
a	移動 (mask3)2 回 縮小 (mask12)3 回	67247	18702	72
b	拡大 (mask7)2 回 拡大 (mask12)4 回	114920	14176	88
c	移動 (mask1)1 回 縮小 (mask11)1 回	78008	66480	15
d	移動 (mask3)1 回 拡大 (mask12)2 回	26168	11316	57

表 2: テクスチャの変化量を変えた場合の実験結果

	選択した補正処理	D_o	D_c	R
a	縮小 (mask5)3 回 縮小 (mask12)2 回	70667	15327	78
b	拡大 (mask9)2 回 拡大 (mask12)5 回	213653	41543	81
c	縮小 (mask5)1 回 縮小 (mask7)4 回	111072	54384	51
d	移動 (mask3)3 回 拡大 (mask6)3 回	21384	11919	44

4.2　回転に対する補正



(1) 左側 f_l　　(2) 右側 f_r

図 9: CG により生成したモデル画像 (回転成分)

作成したモデル画像を図 9 に示す。モデル画像 f_l と f_r の間に球体は 5 ° 自転し、テクスチャは反時計回りに 1 ~ 5 ° 回転する。 (f_rは回転角の違う 5 枚用意する) テクスチャの回転角 θ に対して、選択した最適な補正処理と D_o (補正前の D) D_c (補正後の D) 補正率 R [%] を表 3 に示す。

表 3: 回転に対する補正結果

θ	選択した補正処理	D_o	D_c	R
1	移動 (mask3)1 回 拡大 (mask12)2 回	39729	21907	49
2	移動 (mask3)1 回 拡大 (mask12)2 回	37392	24872	33
3	移動 (mask3)1 回 拡大 (mask12)2 回	43164	31665	27
4	移動 (mask4)1 回 回転 (時計回り)3 °	50528	38671	23
5	移動 (mask4)1 回 回転 (時計回り)5 °	60039	39255	35

表 4: 回転 + 平行移動に対する補正結果

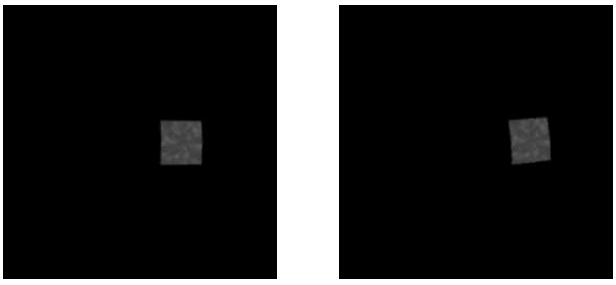
θ	選択した補正処理	D_o	D_c	R
1	移動 (mask3)1 回 拡大 (mask12)2 回	38433	21536	44
2	移動 (mask3)1 回 拡大 (mask12)2 回	37213	25092	33
3	移動 (mask3)2 回 拡大 (mask6)4 回	42777	33081	27
4	移動 (mask4)1 回 回転 (時計回り)3 °	49710	38030	23
5	移動 (mask4)1 回 回転 (時計回り)5 °	60394	39543	35

表 1、2 に示した平行移動、拡大・縮小に対する補正結果に比べて、補正率が全体的に低くなった。

また、回転角度が 1 ~ 3 ° と小さい場合には回転による補正を選択せず、拡大による補正を選択した。これは、テクスチャ自身の回転による変形より、自転による変形 (縮小) の方が影響が大きかったためと考えられる。

4.3 回転 + 平行移動に対する補正

作成したモデル画像を図 10 に示す。前節と同様に、モデル画像 f_l と f_r の間に球体は 5 ° 自転するが、テクスチャは反時計回りに 1 ~ 5 ° 回転し、さらに上方向に 4 画素分移動する。(f_r は回転角の違う 5 枚用意する)



(1) 左側 f_l (2) 右側 f_r

図 10: CG により生成したモデル画像 (回転 + 移動成分)

テクスチャの回転角 θ に対して、選択した最適な補正処理と D_o (補正前の D)、D_c (補正後の D)、補正率 R [%] を表 4 に示す。

上方向への平行移動分は、$\hat{\mathrm{dy}}$ によって補正され、表 3 に示した回転のみの場合の結果とほぼ同じ結果が得られた。回転分の補正について、回転角度が 1 ~ 3 ° と小さい場合に回転による補正を選択せず、拡大による補正を選択した原因も、回転のみの場合と同じだと考えられる。

5 まとめ

本稿では、「ようこう」が撮影した X 線太陽画像から立体画像を構成するため、モルフォロジー処理とアフィン変換を用いて太陽表面のテクスチャの変化を補正する手法を検討し、その有効性を評価するために CG で作成したモデル画像に対して補正実験を行った。

その結果、平行移動、拡大・縮小の変化については、その変形を打ち消すような補正を行うことができた。また補正率は、表 1 の c の結果を例外とすれば、それ以外では 44% 以上であった。回転については、回転による変形分が自転による変形分より大きいと思われる場合のみ、回転を打ち消す補正を行ったが、全ての場合で 20 ~ 50% 程度の補正率が得られた。

今後は、変形の種類、変形量をパラメータとして整理、モデル化して本手法の有効性を定量的に示し、最終的には実画像への適用を行う予定である。

参考文献

[1] 小杉健郎, “「ようこう」が見た太陽の X 線像”, パリティ, 7(2), pp.48-51, 1992.

[2] Suryono, 小谷, “表面が連続的に変化する自転球体のステレオ立体視化に関する研究”, 修士論文, 1997.

[3] 勝間, 小谷, “太陽の軟 X 線画像データ処理・解析システムの研究”, 修士論文, 1994.

[4] David F. McAllister, “Stereo Computer Graphics and Other True 3D Technologies”, Princeton University Press, 1993.

[5] 小畑秀文 :“モルフォロジー”、コロナ社、1996.