JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	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
Author(s)	SURYONO
Citation	
Issue Date	1997-09
Туре	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1106
Rights	
Description	Supervisor:小谷 一孔, 情報科学研究科, 修士



Japan Advanced Institute of Science and Technology

修士論文

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

指導教官 小谷一孔 助教授

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科情報処理学専攻

SURYONO

1997年8月14日

Copyright © 1997 by SURYONO

要旨

物体の3次元情報(奥行き)を得たいと考える者が一つの方法を思い付くのは、左眼の像 と右眼の像との違いを利用して奥行きを判断しているというものである。普通には、この 方法をステレオ立体視と呼ぶ。2台のカメラ、もしくは1台のカメラを平行に保ちつつ距 離(基線長)を離し、異なる視点の2枚画像ペアを作成する。この2枚の画像上における座 標の視差(ディスパリティ)を計算し、画像の3次元奥行きの情報を得ることが出来る。し かし、最も難しいのは2枚の画像中の対応点の決定である。複数の基線長を利用したステ レオマッチング法[1]、動的計画法を用いたステレオマッチング法[8]、回転によるステレオ 視[7]方法などが提案されていた。従来のステレオ立体視に関する研究は、大部分が画像間 のディスパリティを求めるためのステレオマッチング法やカメラの動きによるステレオ画 像ペアの推定に関するものである。これらの方法は複数のカメラを利用した立体視化であ り、観測衛星のように必要な視差が得られるよう複数カメラを設置するのが困難な場合に は、これらの方法は無効になる。

立体画像を入力する方法には複数の固定カメラにより異なる視角を得る方法と単一の カメラを移動あるいはカメラを固定して物体を回転させる方法などがある。ステレオ立体 視による方法では、観測衛星のように必要な視差が得られるよう複数カメラを設置するの が困難な場合には単一のカメラを軌道上で移動させるか、静止しておいて対象物体が自転 するのを利用するなどの方法がとられる。この場合、対象物体が剛体であれば、カメラ を移動している間、または物体が自転している間に形状が変形しないので正確な立体画像 が表示できるが、変形する物体では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。ディスプレイ上に立体画像観察するための液晶シャッタメガネで画像を見るときに、 画像の変形した部分の立体感を損なう。 そこで本論文では、時間空間的に物体の表面が滑らかに変化するための画像ペアの誤 差を補正について提案する。また補正された画像ペアを用いて立体画像表示を行う。本手 法は、まず表面が滑らかに変化する自転球体をコンピュータグラフィックス(CG)でモデル 化を行い、異なる時刻あるいは異なる回転角度において撮影された2枚のステレオ画像ペ アを構成する。本研究で扱う対象物体としては自転する球体を制限し、画像ペアの入力方 法は単一の固定カメラを利用する仮定である。また扱う実画像は*X*線太陽観測衛星「よう こう」から撮影された*X*線画像データである。

本研究の具体的な内容は以下の通りである。

- 物体表面の変形と自転球体のモデル化を行う
- 実動物体の中では剛体と非剛体という物体が存在する。単一固定カメラで画像ペアを 作成するときに、異なる時刻で左右画像を取る込むので、自転球体は非剛体球体の場 合、変形する球体の部分を立体表示することが出来なくなる。そこで上記で述べた時 間空間的に滑らかな非剛体球体の動き・変形をモデル化する。具体的には、X 線太陽 観測衛星「ようこう」の X 線太陽画像に基づき、モデル化して研究を行う。太陽のコ ロナの動き・変形を中心にして、移動・拡大縮小という2つの変形がある球体の表面 をモデル化に反映させる。また球体モデルの表面の変形は時間空間的に滑らかに変形 し、時間空間的に不連続な変形が含まないと仮定する。消滅・発生、複雑な変形と照 明の影響がないと仮定する。モデル化については2. に詳しく述べる。
- 画像ペア間の立体感誤差を補正するためのモルフォロジー処理法を提案する 上記で述べたように、自転非剛体球体の場合、異なる時刻で左右画像を撮影するので 球体の表面の変化部分にはミスマッチングが生じる。また、立体画像表示する時にも 変形する部分のところには立体感を失ってしまう。この問題を解決するために、いく つのモルフォロジー処理 (erosion、di lati on)の構造化要素(マスク)を用いて画像ペ アの補正を行う。表面変化によって、適当な構造化要素を選んでフィルタリングを行 う。この di l ati on, erosi の処理の回数と構造化要素間の組合せの決定方法は、SSSD の値によるパターンマッチング法を使用する。Erosi onと di l ati oの構造化要素につ いては 4 に詳しく述べる。
- 画像ペア間の対応付けを決定するためにパターンマッチングを行う
 画像ペアの誤差を補正するために、数回の dilation, erosiの処理を行い、表面の変

1

化によって適当な構造化要素間の組み合わせる。その処理回数と構造化要素の類を決 定方法は、残差逐次検定法(SSDA、Sequential SimilaytDetectionAlgorithm)によ るパターンマッチング法を行い、各画素に対するSSSDの値を最小化する処理が、回 数とマスクの種類と決定される。マッチング法は、通常適当なサイズのテンプレート を選び、異なる時刻の画像ペアでの対応付けを行う。本研究で扱うテンプレートサイ ズは3×1 画素である。SSDA については 5. に詳しく述べる。

 X線太陽観測衛星「ようこう」から撮影された実画像に対する本手法を適用する 最後にX線太陽観測衛星「ようこう」から撮影された実画像に対して本手法の適用 する。モルフォロジー処理で補正した2枚のX線太陽画像を使用してディスプレー上 に立体画像を表示し、液晶シャッタメガネで観察して、本手法の有効性を評価する。

本研究の今後の課題として、より高精度の画像ペアの補正方法の検討が必要となる。

目 次

1	はじめに	1
	1.1 研究の背景	1
	1.2 研究の目的	1
2	ステレオ立体視	3
	2.1 用語の定義	3
	2.2 両眼立体視	5
	2.2.1 2 枚の画像間の視差 (Dispari ty)	5
	2.2.2 回転によるステレオ立体視	6
	2.3 単眼立体視	8
3	対象物体モデル	11
	3.1 モデル化の背景	11
	3.2 対象物体の範囲の定義	12
	3.3 自転球体モデルの作成	13
4	パターンマッチングによる画像ペアの対応付けの決定法	16
	4.1 モルフォロジー処理による画像ペアの補正	16
	4.1.1 dilation \leq erosion	17
	4.1.2 dilationerosionの構造化要素	19
	4.2 残差逐次検定法	28
	4.3 観測者の距離を用いた奥行きの調整	29
5	実画像データ	31

	5.1	太陽	31
	5.2	YOHKOH のX線画像データ	34
		5.2.1 太陽画像	34
		5.2.2 太陽の回転角度の計算仕方	37
6	実験	結果	38
	6.1	システム構成	38
	6.2	自転球体モデルの実験結果	39
		6.2.1 モルフォロジー処理による画像ペアの補正結果	39
	6.3	実画像での実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
7	まと	ළු ග	70

第1章

はじめに

1.1 研究の背景

立体画像を視覚的に再現する方法には、視差を利用した両眼立体視(ステレオ立体視) と大きさやきめの勾配、動き速度の違いなどを利用した単眼立体視とがある。また、立 体画像を入力する方法にも複数の固定カメラにより異なる視角を得る方法と単一のカメラ を移動あるいはカメラを固定して物体を回転させる方法などがある。

ステレオ立体視による方法では、 観測衛星のように必要な視差が得られるよう複数カ メラを設置するのが困難な場合には単一のカメラを軌道上で移動させるか、静止しておい て対象物体が自転するのを利用するなどの方法がとられる。この場合、対象物体が剛体で あれば、 カメラを移動している間、 または物体が自転している間に形状が変形しないの で正確な立体画像が再現できるが、 変形する非剛体物体ではステレオ画像ペア間に誤差が 生じ、立体感を損ねてしまう。異なる視角の画像の変形した部分からモルフォロジー処理 により正確なステレオ画像ペアを補正し、視覚的な立体感を良好に再現することが必要と なっている。

1.2 研究の目的

本研究では、自転する非剛体物体(変形・動きが緩やかで滑らかな物体)を単一の固定 カメラで撮影したディジタル画像から正確なステレオ画像ペアを補正し、 液晶シャッタ付 き眼鏡を使用し、 コンピュータのディスプレー上で立体画像を表示する。 検討の手法として、まず、対象物体をコンピュータグラフィックス (CG) でモデル化 し、物体の表面を変化させることによって、ディスパリティ誤差を補正する。また、物 体の回転角度を 5°を決め、回転角度 (時刻)の異なる 2 枚の画像ペア (左右画像)を生成す る。次にモルフォロジー処理を用いてステレオ画像ペアを補正し、誤差のために失った立 体感を復元する。左右の画像中の、対応する点同士の位置の差である視差) ディスパリティ (disparity)を計算することによって、モルフォロジー処理の回数と構造化要素を決定する。 補正画像とパターンマッチングによる求めたディスパリティ値を用いてステレオ左右画像 を再構成する。最後の処理は、液晶シャッた付けメガネを用いたディスプレイ上の立体表 示と解析的な立体表示を行う。X 線太陽観測衛星「ようこう」で得られた X 線実画像に適 用して本手法の有効性を評価する。

第2章

ステレオ立体視

2.1 用語の定義

- ・両眼視差 (binocular paral l ax)両眼非対応 (bi nœul ardi spariț)
 同じ対象を見ている際にも、観察位置が異なれば、やや違った映像が網膜に投影される。
 る。人間の両眼は 6cm はど左右にずれているから、同じ対象でも両眼に投影される
 網膜像は異なっている。両眼視差を数量的にしめすには、2 対象間の視角が左右眼で
 どれだけ違うかを示せばよい。
- 基線(baseline)エピポーラ線(epi polarline)
 2つのカメラのレンズ中心を結ぶ線を基線(baselineと呼ぶ。左画像の特定の1点に対応する右画像の1点はある特別な直線上になければならない。なぜならば、2点は同じ y座標をもつからである。この線がエピポーラ線(epi polarline)である。
- 画像スケーリング(Image Scaling)
 図 2.1に示すように、ステレオ画像を表示するときに画像の奥行きはディスプレー画 面から観測者までの距離に依存する。観測点の位置を固定して、ディスプレー画面か ら観測者の位置が離れば離れるほど画像上の視差が減少する。逆に、観測者はディス プレー画面の方へ近付くれば、画像上の視差が増加する。図 2.2の場合は画像上の視 差を固定して、観測者の位置を変化する。観測者の位置はディスプレー画面から立ち 去ると、画像の奥行きが引き延ばし、逆にディスプレー画面へ近付けると、画像の奥 行きが引き締める。







図 2.2: 観測者の位置による奥行きの変化(視差の固定)

2.2 両眼立体視

基本的な両眼画像の撮像の幾何学を図 2.3に示す。2 つの視点を平行に保ちつつ距離 e だけ離して、z方向の無限遠点を向いている。2 つの視点中心を結ぶ線を基線 (baseline) とよぶ。ある点についての奥行き情報は、2 つの撮像面上でのその点に対応する画像点の位置の差、すなわち両眼視差によってのみ符号化されている。



図 2.3: 両眼立体視

2.2.1 2 枚の画像間の視差 (Dispari ty)

図 2. 3に示すように、空間中の点 (x, y, z) の座標を 2 つ視点の中心の中点を原点として 定めることが出来る。左右の画像上の座標をそれぞれ $(x_l, y_l), (x_r, y_r)$ とし、また視点から 画像面までの距離 h とする。このとき、

$$x_l = \frac{h(x + \frac{e}{2})}{z} - \frac{e}{2}$$

および

$$x_r = \frac{h(x - \frac{e}{2})}{z} + \frac{e}{2}$$

が成立し、一方、

$$y_l = y_r = \frac{ys}{z}$$

である。これらの式を用いて以下のように成り立つ。まず、

$$(x_l - x_r) + e = \frac{eh}{z}$$

であることに注目する。画像上における座標のずれ $(x_l - x_r)$ を視差(dispariy)と呼ぶ。最終的に、

$$z = \frac{eh}{d+e}$$

を得る。ここで、 $d = x_l - x_r$ 、zは普通に画像の奥行きと呼ぶ。

2.2.2 回転によるステレオ立体視



図 2.4:回転による立体視

ステレオ立体視では、2次元画像から3次元画像を構成するために、2枚の画像(左右の 画像)が必要である. 図1より)単一カメラを利用するステレオ立体視の場合では、シーン 中の点 Pを回転角度 $\theta/2$ で左右方向へ回転することによて、ステレオの左画像の点 p_l と右画像の点 p_r を得られる. また、観測者と対象物体の中心との距離 Rと、観測者とモニタとの距離 (h)を与えて、最も良い回転角度値の範囲の計算については David によって提案されて いる $(h = 50cm, 4^\circ \le \theta/2 \le 7^\circ)$ [6].

本研究では、利用する対象物体としては自転している球体である. ここでは, $R \ge h$ の 値は同じく設定する。つまり球体の奥行きのちょうど真中にはモニタの表面となる. また 観測可能である奥行きの値はモニタの表面 (z = 0) より小さい. 図 24 より、空間中の点 P(x, y, z)、画像上の P点の座標 (x', y')、左右の画像上の座標をそれぞれ (x_l, y_l), (x_r, y_r) と する。回転後の P_l, P_r 点の座標は次式のように示す。

$$P_{l} = (x\cos(\theta/2) + (R-z)\sin(\theta/2), y, R - (R-z)\cos(\theta/2) + x\sin(\theta/2))$$
(1)

$$P_r = (x \cos(\theta/2) - (R-z)\sin(\theta/2), y, R - (R-z)\cos(\theta/2) - x\sin(\theta/2))$$
(2)

このとき、

$$x_{l} = \frac{R(x\cos(\theta/2) + (R-z)\sin(\theta/2))}{R - (R-z)\cos(\theta/2) + x\sin(\theta/2)}$$
(3)

$$x_r = \frac{R(x\cos(-\theta/2) - (R-z)\sin(-\theta/2))}{R - (R-z)\cos(-\theta/2) - x\sin(-\theta/2)}$$
(4)

画像上における座標のずれ $(x' - x_r)$ を視差 d(disparity) とすると

$$z = \frac{R^2((x'-d)(1-\cos(-\theta/2)) + R\sin(-\theta/2))}{x'(R\cos(-\theta/2) + (x'-d)\sin(-\theta/2)) + R(R\sin(-\theta/2) - (x'-d)\cos(-\theta/2))}$$
(5)

 $x_r = x' - d$

が成立する (付録 A. の参照)。この zは画像の奥行き (depth) と呼ぶ。画像の奥行きを求め るためには画像上のディスパリティの情報が必要となる。ディスパリティの推定について は次の節に述べる。

2.3 単眼立体視

単眼画像の形式 (monocular imagi ng)
 点投影 (point projection)は人間の眼球、カメラ、あるいは他の多くの撮像装置によって行われる変換の基本となるモデルである。画像は情景中の各点を、単一の点をとおして画像面 (image plane)へ投影することによって得られる。数学的には同じことだが、この場合は視点は z軸上の+h の点にあり、z = 0 が画像の投影される画像面となる。(h はこのような状況では、焦点距離 (focallength)と呼ばれることがある。図2.5で、(x', y') は物体の画像面上の座標点で、これは空間の座標点 (x, y, z) と次式で関係づけられる。ここに、h は焦点距離である。



図 2.5:透視投影

 単眼運動視差 (monocular mo vement paral ax)
 単眼であっても、観察者か、あるいは観察対象が運動すると、時間とともに視点が移動し、継時的に視差が生じる。図 2.6(a) のように、ある対象が観察者から Dの距離で 視線に対して直角の方向に vの速度で移動している際に、その対象からΔDだけ遠方 を同じ速度で平行移動する第二の対象との間には次の式ような運動視差ωが生じる。
 ここで、図 2.6(a) に示されるように、Δθはθ1とθ2の差である。



図 2.6:(a)単眼運動視差(b)網膜像の大きさ(視角)(c)きめ勾配

$$\omega = \frac{d(\Delta\theta)}{dt} = \frac{v \cdot \Delta D}{D^2} (ra d)$$

ここで、vは、観察者と対象の相対運動を示すものであるから、対象が静止し、観察 者が動いている場合も、まったく同様である。

網膜像の大きさ(視角)(retinalsize)
 図 2.6(b)に示すように、各客的に一定の大きさでも、眼から遠くにあるものの網膜像は小さい。網膜像の大きさは視角によって表すことができる。眼から Dの距離にあり、視線に垂直方向に lの長さをもつ対象の視角θは、近似的に、

$$\theta = \frac{l}{D}(ra d)$$

となる。すなわち、網膜像の大きさは観察距離に反比例する。したがって、物理的な 大きさが分かっていれば、視角θは距離 Dに依存する。また、物理的な大きさがとも にlで、距離が ΔD だけ違う二つの対象の視角の差 $\Delta \theta$ は、

$$\Delta \theta = \frac{l}{D} - \frac{l}{D + \Delta D} = \frac{l \Delta D}{D^2} (rad)$$

となる。つまり、網膜像の大きさ(視角)の差を手がかりにして奥行き距離を弁別する場合にも、その精度は、距離 Dの2 乗に反比例することになる。

奥行き感は、対象の大きさの知覚にも影響を与える。10mの距離にいる人の網膜像の 大きさは、5mの距離にいる同じ身長の人の網膜像の半分のはずである。それにもか かわらず、われわれは、ほぼ同じ身長の人と感じる。このように、われわれが知覚す る大きさが一定の場合は、遠くにあるものは大きく、近くあるものは小さく感じる。 物理的大きさが一定のものは、その位置の変化により網膜像の大きさが変化しても、 ほぼ一定の大きさに知覚される傾向がある。これを大きさの恒常性とよぶ。

きめ勾配(text urgr adietn)
 直線や直角からなる人工的建造物でなくても、線遠近法(li n eper sepct e)に類似した奥行きのてがかりがある。たとえば草原や砂利の川原でも図2.6(c)のような、きめ(t e x t の密度が距離とともに変化する勾配が形成される。この場合も模様が平面上に均等に分布しているのであれば、その網膜像の密度は視線と平行な方向成分に関しては(2式に従い、Dの2乗に反比例し、視線に直角な方向成分に関して(3)式に従い、はDに単純に反比例する。

第3章

対象物体モデル

対象物体モデルについては、X線太陽画像がモデル化の背景として、自転非剛体球体の モデル化を行う。一般的な非剛体物体とは物体の形が滑らかに変形するものからブラウン 運動のようなランダム変形するものまで幅広く存在する。本研究で扱った自転非剛体球体 の範囲は表面が時間空間的に滑らかに変化する自転球体と仮定する。このような対象物体 を以下のようにモデル化を行う。

3.1 モデル化の背景

1991年に太陽活動のX線観測を目的として科学衛星「ようこう」が打ち上げられた。 様々な太陽のアクティビティを2次元画像上に撮影することができた。専門家らは目視観 測によって、太陽のアクティビティの解析方法を行っている。目視観測では、X線画像を 観測するときに太陽の立体感を見ることができない。そこで、太陽フレアやコロナをより 視覚的に観測できるように立体視化が必要となる。専門家の目視観測における着目点は太 陽のフレアやコロナの形状、強度変化と移動方向であった。しかし、太陽のフレアは時間 的に変化が激しいので、フレアの形状を立体視化するのは困難である。コロナの場合は太 陽の回転に対する時間空間的な変形が滑らかなので、コロナの形状を立体視化するのは可 能である。ただし、コロナにある発生・消滅の変化はないと仮定する。

本節では、太陽のような自転非剛体球体を以下のようなモデル化の範囲を述べる。

3.2 対象物体の範囲の定義

本研究で扱う対象物体としては自転 (y軸中心にして連続を的回転) する球体である。こ こでは、球体が自転する間に球体の表面が滑らかに変化すると仮定する。球体の表面につ いては以下のようにモデル化を行う。

・球体の表面の変化球体の表面は時間空間的に滑らかに変化する。表面には y方向、z
 方向の移動、伸縮、拡大・縮小という変化がある。(図 3.1に示す)



図 3.1: 立体画像の入力システム

• 球体の表面の輝度値は空間的に滑らかに変化し、不連続な変化が含まない。

- 球体には発生・消滅する表面がない。また球体の半径は変化しない。
- 表面の動きは以下のような式に表すことが出来る。

$$p' = R(\theta)p + T \tag{6}$$

*R*は *y*軸を中心する回転 (自転) と*T*は拡大・縮小・移動変化を表す。 つまり、表面の動きは

表面の(動き) = 球体の自転 + 表面の(拡大・縮小・移動)変化

本研究は、この表面の変化 Tをパラメタとして、x, y, z方向へ $1 \sim 5$ 画素までに変化させ、 $1 \sim 5$ 画素までの表面変化量と呼ぶ。

3.3 自転球体モデルの作成

図 3.2に示すように、コンピュータグラフィックス (CG) で自転非剛体球体モデルを作成 する。以下のよう自転非剛体球体のモデルを作成した。

- ステレオ画像の表示は左画像と右画像の間に対応しない部分があると、立体画像を正確に表示することが出来ない。単一カメラでステレオ画像ペアを入力する時に異なる時刻に左画像と右画像を撮影するので、自転対象球体が時間空間的に変化するとその問題が起こる。図3.2に示すように、対象球体が自転している間に、球体の表面が拡大・縮小、移動する物体モデルを行った。球体の表面の動きは回転するだけではなく、拡大・縮小、移動する。
- David らは単一カメラ固定して、対象物体を回転させるステレオ画像入力方法はカメ ラと画像面の距離 h と回転角度 θ を決めることによって立体画像を表示する手法を提 案している。 $(h = 50 \, cm, 4^\circ \le \theta/2 \le 7^\circ)[6]$ 。本研究でも、時間 Δt (frames)が増加す る供に回転角度を 1°ごとに増加させる。図 3.3に示すのは画像モデル t = 0 (frame) と画像モデル t = 5 (frame) である。 $t = 0 \sim t = 5$ (frame) は球体を 5°回転角度で回 転させる。
- 画像モデルのサイズは 512 × 512 画素、濃淡画像である。



図 3.2: 画像モデル (t=0)



(a)



(b)

図 3.3: (a) 画像モデル (t=0)、(b) 画像モデル (t=5)

第4章

パターンマッチングによる画像ペアの対応 付けの決定法

コンピュータビジョンでは、2次元画像から3次元情報を求める方法が重要である。3次 元奥行き分布解析や物体形状もしくはカメラの運動の解析などの3次元情報を復元する研究 [1][3]が多く提案されている。本研究では、残差逐次検定法(SSDA、Sequential Similariyt Detection Agorithm)を用いて、時刻の異なる2枚の画像でのマッチングを行う。上記に 述べたように、自転する間に球体の表面が変形するために、ステレオ画像ペアの対応しな い部分にステレオマッチングが取れなくなる。このとき、誤差が生じる部分をモルフォロ ジー処理で補正を行って、正確なステレオ画像ペアを作成する。液晶シャッタメガネを用 いた立体画像表示では、画像の立体感を観察することは出来るが、誤差の定量的な情報あ るいは補正した立体画像の正確さが分からない。このために、補正画像ペア間のマッチン グを行い、ウィンドウ内の画素値の残差の2乗和(SSD)を計算し、SSSD(Sum of SSD)の 値が最小になるような画像ペアを求め、最適な dilation,erosi @処理の回数と構造化要素 の種類を決定する。画像の奥行きは観測者の位置により調整が可能である。

4.1 モルフォロジー処理による画像ペアの補正

モルフォロジー画像処理は画像にある対象の構造あるいは空間的な形を修正する。dilation, erosionと skeletonizatioの3つの基本的なモルフォロジーの操作がある。dilation は画像にある対象を拡大・成長させるオペレータである。一方、erosionは画像にある対象 を縮ませるオペレータである。

本研究は、dilation オペレータと erosion オペレータを用いて、ステレオの右画像と左 画像に対応しない部分を補正する。dlation オペレータと erosion オペレータについて、次 に述べる。

4.1.1 dilation \succeq erosion

dlation は画像にある対象の輪郭に画素を追加して拡大するオペレータである。逆に、 erosion は画像にある対象の輪郭に画素をそこなう (removing or erodog) 。dlation と ero sion の処理方法はマスク (構造化要素と呼ぶ、付録 C. の参照) を利用する方法 (making technique) と閾値を利用する方法 (threshid techniqe) とがある。本研究はマスクを用い て、dlation と erosion フィルタリングを行う。濃淡画像は F(j,k) として、dlation が行 われた濃淡画像 H(j,k) はを (7) 式に示す。

(a)

(b)

🗷 4.1: (a)Oniginal

(b)Dilation result

$$H_{dilate}(j,k) = \max[F(j-1,k-1), F(j-1,k), F(j-1,k+1), \dots, F(j+1,k+1)]$$
(7)

Inage,

ここで、max[*S*1,...,*S*9] は 3 × 3 画素の近傍値の 9 点にある画素の最大値を生成する。図
 4.1に示すのは dilati onを行う前の画像と行った後の画像である。マスクによって、等方的な拡大を行うことが出来る。

一方、erosi onを行われた濃淡画像 H(j,k) は次のような式に表す。

 $H_{erode}(j,k) = \min\left[F(j-1,k-1), F(j-1,k), F(j-1,k+1), ..., F(j+1,k+1)\right]$ (8)

ここで、min[*S*1,...,*S*9] は 3 × 3 画素の近傍値の 9 点にある画素の最小値を生成する。図
 4. 2に示すのは erosi onを行う前の画像と行った後の画像である。マスクによって、等方的な縮小と非等方的な縮小を行うことが出来る。

		 	<u> </u>			



(a)



🛛 4.2: (a) Ori gi nalmage, (b) Erosi om esul t

4.1.2 dilation、erosion の構造化要素

dilation, erosion 処理方法は閾値を用いた処理方法 (threshd tec hique) と構造化要素 を用いた処理方法 (masking tec hiqe) がある [9]。本研究では、後者の処理方法を用いて、 画像ペアにある誤差を補正を行う。マスクを用いた処理方法は、dlation と erosion の方向 をコントロールすることも出来る。

マスクを用いた処理方法は

- 3 × 3 のマスクを画像に置き、3 × 3 の要素の中心を画像の輪郭と対応する
- 画像をマスクによって動かす

本研究では以下のような dlation erosion のマスクを用いた。

 移動マスク球体の表面が移動したために、左画像にある対象と右画像にある対象は上 下に外れて、誤差が生じる。このために、以下のような移動マスクを用いて誤差の補 正を行う。

- 水平移動

	(1)	, ,		(2)
0	0	0		0	1	0
0	0	0		0	0	0
0	1	0		0	0	0

0

0

(1): 下への移動のマスク (msk 1)

(2): 上への移動のマスク (msk 2) * Mask 1

$$H(j,k) = F(j-1,k)$$
 (9)



 \boxtimes 4.3: (a) Original greyscale image, (b) Down translation result

$$H(j,k) = F(j+1,k)$$
 (10)



🖾 4.4: (a) Original greyscale image, (b) Up translation result

- 垂直移動



(3): 右への移動のマスク (mask 3)

(4): 左への移動のマスク (mask 4)

$$H(j,k) = F(j,k-1)$$
(11)



🗷 4.5: (a) Origi nalgreys cal ei mage, (b) Rightranslationes ul t

* Mask 4

$$H(j,k) = F(j,k+1)$$
 (12)



🛛 4.6: (a)Original greyscale image, (b)Left translation result

● 拡大・縮小マスク

球体の表面が拡大・縮小したために、左画像にある対象と右画像にある対象は対応し なくなって、誤差が生じる。このために、以下のような拡大・縮小マスクを用いて誤 差の補正を行う。拡大・縮小の変形には等方的な拡大・縮小の変形と非等方的な拡大・ 縮小の変形がある。

- 非等方的な拡大・縮小

マスクを変えることによって、dilation と erosion の方向が変わる。例えば、画像を左の部分だけを浸食 (erode) したい。あるいは画像を右の部分だけを拡大 (dilate) することもできる。以下には非等方的な拡大・縮小マスクを示す。

0	0	0	0	0	
1	1	0	0	1	
0	0	0	0	0	
	(5)		(6)

- (5): 右の部分を拡大・侵食のマスク (mask 5)
- (6): 左の部分を拡大・侵食のマスク (mask 6)

* Mask 5

$$H_{dilate}(j,k) = \max[F(j,k-1), F(j,k)]$$
(13)

$$H_{erode}(j,k) = \min[F(j,k-1),F(j,k)]$$
(14)



🗵 4.7: (a) Ori gi nagreyscal ei mage, (b) di l ati ones ul t(c) erosi on es ul t

$$H_{di\,lat\,e}(j,k) = \max[F(j,k+1),F(j,k)]$$
(15)

$$H_{erode}(j,k) = \mathbf{m} \,\mathbf{n}[F(j,k+1),F(j,k)] \tag{16}$$



🗵 4.8: (a) Ori gi nalgreyscal é mage, (b) di l ati ones ul t (c) erosi on es ul t

0 1
0 1
0 1

(7): 下の部分を拡大・侵食のマスク (mask 7)

(8): 上の部分を拡大・侵食のマスク (mask 8)

* Mask7

$$H_{dilate}(j,k) = \max[F(j-1,k), F(j,k)]$$
(17)

$$H_{erode}(j,k) = \min[F(j-1,k), F(j,k)]$$
(18)



🗷 4.9: (a) Ori gi nagreyscal e mage, (b) di l ati onesul t(c) erosi onesul t

$$H_{di\,lat\,e}(j,k) = \max[\ F(j+1,k), F(j,k)] \tag{19}$$

$$H_{erode}(j,k) = \min \left[F(j+1,k), F(j,k) \right]$$
(20)



🖾 4.10: (a)Original greyscale image, (b)dilation result, (c)erosion result

– 等方的な拡大・縮小
 画像にある対象が全体的に拡大・縮小するために、以下のようなマスクを用い
 て、ステレオ画像ペアに生じる誤差を補正する。



1

1

1

(9) : 水平・垂直からの等方的な拡大・侵食のマスク (msk 9)

(10): 全方向からの拡大・侵食のマスク (mask 10)

$$H_{dilate}(j,k) = \max[F(j-1,k), F(j,k), F(j+1,k), F(j,k-1), F(j,k+1)]$$
(21)
$$H_{erode}(j,k) = \inf[F(j-1,k), F(j,k), F(j+1,k), F(j,k-1), F(j,k+1)]$$
(22)



🛛 4.11: (a)Origi nalgreyscal ei mage,(b)dil ati ones ul t(c)erosi ones ul t

* Mask 10

$$\begin{aligned} &H_{dilate}(j,k) = \min\left[F(j-1,k), F(j,k), F(j+1,k), F(j,k-1), F(j,k+1), F(j-1,k-1), F(j-1,k+1), F(j+1,k-1), F(j+1,k+1)\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{erode}(j,k) &= \min\left[F(j-1,k),F(j,k),F(j+1,k),F(j,k-1),F(j,k+1),\right.\\ &\left.F(j-1,k-1),F(j-1,k+1),F(j+1,k-1),F(j+1,k+1)\right] \end{aligned}$$



🗵 4. 12: (a) Ori gi nalgreyscal ė mage, (b) di lationesul t(c) erosionesul t

• 伸縮のマスク

画像にある対象が伸びたり縮んだりするために、ステレオ画像ペアに誤差が生じる。 これを補正するためのマスクを次に示す。



- (11): 垂直への伸縮のマスク(mask 11)
- (12) : 水平への伸縮のマスク (mask 12)

- Mask 11

$$H_{dilate}(j,k) = \max[F(j,k), F(j-1,k), F(j+1,k)]$$
(25)

$$H_{erode}(j,k) = \min[F(j,k), F(j-1,k), F(j+1,k)]$$
(26)



🖾 4.13: (a) Ori gi nagreys cal ei mage, (b) di l ati ones ul t (c) erosi ones ul t

– Mask 12

$$H_{di \, lat \, e}(j,k) = \max[F(j,k), F(j,k-1), F(j,k+1)]$$
(27)

$$H_{erode}(j,k) = \min \left[F(j,k), F(j,k-1), F(j,k+1) \right]$$
(28)



🛛 4.14: (a)Origi nalgreyscal ei mage, (b) di l ati ones ul t (c) erosi ones ul t

4.2 残差逐次検定法

パターンマッチングは、画像内である特定の対象を認識したり、複数枚の画像を対象に 部分画像が入力画像のどの部分に対応し、一致するかを調べる。探索する画像領域の対象 部分との類似度を調べることによって一致する位置を求める手法がテンプレートマッチン グである。このテンプレートマッチングの代表的な手法の一つに残差逐次検定法 (SSD A) がある。本研究では、以下のような手順で処理を行う.異なる時刻で得る2枚の画像を用い てパターンマッチングを行う。最適なサイズ1×3 画素テンプレートの*x*方向に小領域を 選び、ステレオマッチングを行う。ステレオマッチング法は、異なる時刻で撮られたステ レオ画像ペアに対して、まずウィンドウ内の画素値の残差の2乗和 (SSD) が計算される。 SSSD(Sum of SSD) の値が最小になるような画像ペアを求め、最適な dlation, erosion の処 理の回数と構造化要素の種類を決定することが出来る。マッチング処理は次のように行う。

- ・最初の球体の画像(t=0)I₀と回転角度 5°で撮られた自転球体の画像(t=5)の補正画像
 H₅とのマッチングをとることで画像上のディスパリティを計算する。
- 球体の表面の変形がある画像フレームに対するマッチングを取れないので、モルフォロジー処理を用いた画像補正し、マッチングを行う。

パターンマッチング法について、画像点 (x, y) における、ディスパリティの候補 d に
 対する、ウィンドウ内の画素値の残差の絶対値 D_dの値は次式で与える。

$$D_n(x, y, d) = \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} |I_0(x+j, y+i) - H_5(x+j+d, y+i)|$$
(29)

ここで、各画素 (x, y) に対して, Dの値を最小化する d が, (x, y) 画素でのディスパリティの推定値と決定される。

$$d(x,y) = \min(D(x,y,d)) \tag{30}$$

また、SSSD(Sum of SSD) の値が最小になるような H(x,y) を求め、最適な dilation, erosion の処理の回数と構造化要素の種類と決定される。ここで、H(x,y) は次の ように表される (付録 C.)。

$$H_{d \ iatle}(x, y) = f \oplus g = (\dots ((f \oplus g_1) \oplus g_2) \oplus \dots \oplus g_k)$$
$$H_{e \ od}(x, y) = f \oplus g = (\dots ((f \oplus g_1) \oplus g_2) \oplus \dots \oplus g_k)$$

4.3 観測者の距離を用いた奥行きの調整



🛛 4.15: Disparity change with head no venen t

画像の奥行きは観測者の位置からディスプレーまでの距離や画像上のディスパリティに 依存する。図2に示すように、画像の奥行きを固定して、観測者の位置に変化することに
よって画像上のディスパリティが変わる。逆に、画像上のディスパリティを固定して、観 測者の位置を変えることによって画像の奥行きが変化する。本研究では観測者の位置を変 えることによって画像の奥行きを推定する。

画像上のディスパリティを d とし、観測者からディスプレーまでの距離 R、観測者の両眼の間の距離は e とすると、画像の奥行き zは

$$z = \frac{eh}{d+e} \tag{31}$$

第5章

実画像データ

5.1 太陽

• 太陽コロナ

毎日東の空から登り、西の空へ降りていく星「太陽」。我々にとって一番馴染み深 く、一番近い星でもある。しかし、この「太陽」、実はまだまだ謎に満ちた星なので ある。

図 5.1のように太陽の外層大気 (コロナ) からの光を観測することができる。この



図 5.1:「ようこう」が見た (7-MAY-9320:54:31)のコロナ

コロナの温度はいろいろな観測から 100 万度以上であると測定されている。ところ が、太陽表面の温度は 6000 度であることがわかっている。ここで不思議なことであ る。冷たいものの回りに熱いものが取り囲んでいるのである。その温度の分布をより 詳しく書くと、上のグラフに示しているように、太陽では高度 500km あたりから温 度が上昇し始め、高度 2000km を境に 1 万度から 100 万度まで急激に上昇する。この 温度上昇の原因は、太陽表面の運動がひき起こした波が衝撃波になって温度を上げて いる、コロナ中の小さな爆発現象が温度を上げている、などの説があるがいまだ解か れていない問題なのである。 ちなみに、太陽表面から温度が最低になるところまで を光球、温度最低点から急激に温度が上がるところまでを彩層、温度が急激に上がっ ている層を遷移層、温度が 100 万度以上の所をコロナとそれぞれ呼んでいる。

それではどうやってコロナを観測したら良いでしょうか。一番上の写真のように皆 既日食の時に観測したり、望遠鏡の前に円盤を置いて人工的に日食を起こしコロナを 観測するコロナグラフという観測装置を使う方法がある。しかし、写真のように太陽 の縁より外のコロナしか見ることができず、太陽表面で発生している現象とコロナの 関係を知ることができない。実は、太陽全面のコロナを観測したい場合は宇宙に出な ければならない。100万度のガス(コロナ)はX線を放射するが、6000度のガス(光 球)はX線を放射しないので、X線だけを観測すればコロナだけを観測することがで きない。しかし、地球上ではX線は大気によって吸収されてしまうので、X線観測用 の望遠鏡を宇宙へ持って行かなければならない。

太陽フレア

太陽には黒点のあたりで、突然、輝きをまし、大量の高エネルギー粒子が、惑星 間空間にふりまかれる現象がある。これが太陽大気中の最大の爆発、太陽フレアであ る。太陽フレアは、黒点上空の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と理解されている。しかし、なぜ、短時間に急激な爆発が 起こるのか、まだわかっていない。フレアの爆発過程の中で、特に急激な現象が、フ レア発生初期の時間帯に観測される「粒子加速」現象である。この時解放されるエネ ルギーの大部分が粒子の加速に費やされ、大量の太陽宇宙線が数秒から数十秒で作り 出される。光速度近くまで、加速された電子が密度の高い彩層に飛込むと硬×線が放 射される。「ようこう」の硬×線望遠鏡ではこれを狙っています。

図 5.2の右下に 1991 年 11 月 5 日に硬 X 線望遠鏡が観測したフレアを示している。



図 5.2: 「ようこう」が見た 1991 年 11 月 15 日のフレア

青いのが、硬X線で見たフレア。白の等高線で示しているのは、白色光フレアといっ て、加速された電子が、光球面まで達して光ったものである。両者とも、二つ目玉に なっているのが特徴である。これは、フレアが、コロナ中の時期ループの中で生じ、 硬X線で見たフレアや白色光フレアが、ループの根元部分を見ているためだと言われ ている。このフレアが太陽のどこで起こったか、その日の太陽全面像の中に示してい る。フレアは、軟X線望遠鏡でも観測されている。軟X線望遠鏡では、フレアの際に 生じた高温プラズマの部分を見ている。ここでは、フレアが起こったあとによく見ら れるフレアループを示す。

5.2 YOHKOH の X 線画像データ

5.2.1 太陽画像

文部省宇宙科学研究所は、太陽の X 線観測を目的として X 線太陽観測衛星「ようこう」¹。
を、太陽活動極大期にあたる 199 1年 8 月 30 日に鹿児島宇宙空間観測所から、M-3 SI 型
ロケット 6 号機によって打ち上げた。この衛星で様々な太陽の活動を X 線画像に撮ることが出来る。I DLソフトを利用して、太陽画像の情報を見ることが出来る。撮影された画像
サイズは 51 2× 51 2と 25 6× 25 (画素である。25 6× 25 (画素のサイズは時間的には撮られた画像の数が多かった。時間的な連続性は 51 2× 51 2回素のサイズのより良い。以下には
I DLソフトで出した「ようこう」データの配列情報 (informati on r ry)である。

015 - MXX-9317:23:0QT/H Open / AlMg Hal NormC 25 5338.0512x512 115 - MXX-9317:40:0029T/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. **6**12x512 215 - MXA-9318:36:20 T/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338.012x512 315 - MXX-9319:02: QCT/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. 012x512415 - MXA-9319:23:20 T/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338.012x512 515-MXA-9320:17:2077/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. 012x512615 - MXX-9320:42:20 T/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. **6**12x512 715 - MXX-9320:50:50: SQAT/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. 612x512815 - MXA-9320:59:20 T/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. 612x512915 - MXX-9321:52: SQST/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338. **6**12x512 1015 - MXA-9323:54: QTT/H Open/Al Mg Hal NormC 25 5338.612x512

5517 - MX - 9311: 53: QT / H Open / Al Mg Hal NormC 25 5338. 612x512 5617 - MX - 9313: 13: QT / H Open / Al Mg Hal NormC 25 5338. 612x512 5717 - MX - 9313: 21: QT / H Open / Al Mg Hal NormC 25 5338. 612x5125817 - MX - 9313: 34: QT / H Open / Al Mg Hal NormC 25 5338. 612x512

^{1[10][1]} は「ようこう」について詳しく述べている

上記のリストのように、「ようこう」は24時間に太陽活動を連続的に撮ることが出来ない(完全なリストは付録 A. に示す)。この中から2枚の画像を用いて立体画像を作成する。 画像の真中にある太陽のコロナを立体画像表示システムを作る。4章に述べたモルフォロ ジー処理を用いて、ステレオ画像ペアを補正する。

図 5.4に示すのは 7-MAY-9320:54:31から 10-MAY-93 19:26:28までに「ようこう」に撮ら れた太陽画像である。図 5.3に示すのは 空間的に太陽のコロナの変化である。



図 5.3:太陽のコロナの変形





(9-MAY-93 10:05:58) (10-MAY-93 07:11:02) (10-MAY-93 19:26:28)

図 5.4: YOHKOH に撮影された太陽画像

5.2.2 太陽の回転角度の計算仕方

3章に述べたように、画像の奥行きは観測者の位置と物体の回転角度に依存する。本研 究は左画像と右画像を撮れるために、球体モデルを回転角度4°~5°で回転させる。そのた めに、本手法を実画像へ適用するときに実物体の回転角度も分からなければならない。本 節には太陽の回転角度について説明する。

太陽は約一ヶ月で一周する。つまり約28日(太陽は軸付近では回転周期30日、赤道付 近は約26日くらいであり、中をとって28日くらいとする。)くらいで360度回転する。一 日当たりの回転角度は360度/28である。更に、1時間当たりの回転角度は(360度/28)/24 時間(= 0.5357°)である。

例:

 33 17-MAY-93
 01:21:51
 QT/H
 Open / AlMg
 Half Norm C
 25
 5338.0
 512x512

 54 17-MAY-93
 11:36:49
 QT/H
 Open / Al Mg
 Half Norm C
 25
 5338.0
 512x512

この場合、(01:21:51)(11:36:49の間の時間差は10時間である。この間に太陽は回転角度(10×0.5357)=5.357°で自転したことが分かる。

第6章

実験結果

本章では、前章で提案したマスクを用いたモルフォロジー処理で画像ペア上の誤差を補 正を行う。SSSD の値による dilati on/erosi o処理の回数を決定する。補正ステレオ画像ペ アを用いて、パターンマッチング法による画像上のディスパリティの計算を行う。本研究 で扱った画像モデルのサイズは 512 × 512 画素、256 階調の濃淡画像で、マッチングで利用 したテンプレートサイズは 1 × 3 画素である。また dilation/eros処理で利用したマスク は mask1,msk 2,...,msk2 である。また、本研究のシステム構成について述べる。

6.1 システム構成

実験に利用したシステム構成を図 6. に示している。本研究の構築した実験システムは 三つのステップからなる。

1. 画像入力システム

2. 補正・再構成処理システム

3. 立体画像表示システム

である。画像入力システムは、X線太陽観測衛星「ようこう」である。「ようこう」のデー タから raw 画像形式へ変化するために IDL ソフトウェアを使用する。補正・構成処理シス テムは、モルフォロジー処理とパターンマッチング法を使う。 立体画像表示システムは、Onyx シリコングラフィックス・ワークステーション、24 インチのディスプレイと液晶シャッタメガネシステムを利用する。



図 6.1: システム構成

6.2 自転球体モデルの実験結果

6.2.1 モルフォロジー処理による画像ペアの補正結果

4 章で述べたように、ステレオ画像ペア間の誤差を補正するために、12 種類の dilati on/erosi onのマスクを利用した。本節では各表面の変化に対して、以下のような補正結果 を示す。

- 移動の変化に対する誤差の補正球体の表面は移動したために、左画像と右画像は対応しない部分が生じた。この部分が立体感の誤差である。正確な立体画像を表示するために、誤差の補正を行った。図 6.2は扱った画像モデル、(a) t = 0の画像、t = 5の画像と(c)移動した表面を示している。
 - 図 6.3に示した画像について、(a)は球体が静止している時の a-表面の状態を示し、

(b) は球体が自転して自転角度 5°の時の a-表面の状態を示している。(c) は (b) に示 した画像の補正画像であり、補正処理で利用したマスクは mask 1 と mask 7 で、2 回の translation(mask 1) と 1回の dilation(mask 7)の処理を行った。



図 6.2: 画像モデル、(a) t = 0 の画像、(b) t = 5 の画像



(a)





図 6.3: (a) t = 0 の a 表面、(b) t = 5 の a 表面、(c) 補正 a 表面

- 拡大・縮小の変化に対する誤差の補正
 - 等方的拡大・縮小マスクによる誤差の補正球体の表面は拡大したために、左画像と右画像は対応しない部分が生じ、画像の立体感が損なってしまう。正確な立体画像を表示するために、誤差の補正を行った。図 6.4に示した画像について、(a)は球体が静止している時の b-表面の状態を示し、(b)は球体が自転して自転角度 5°の時の b 表面の状態を示している。(c)は(b)に示した画像の補正画像であり、補正処理で利用したマスクは mask 9 で、2 回の erosion(mask 7)の処理を行った。





(b)



(C)

図 6.4 (a) t = 0 の b 表面、(b) t = 5 の b 表面、(c) 補正 b 表面

- 伸縮と移動の変化に対する誤差の補正

球体の表面は移動しながら拡大したために、左画像と右画像は対応しない部分 が生じ、画像の立体感が損なってしまう。正確な立体画像を表示するために、誤 差の補正を行った。図 6.5に示した画像について、(a) は球体が静止している時の c-表面の状態を示し、(b) は球体が自転して自転角度 5°の時の c-表面の状態を示 している。(c) は (b) に示した画像の補正画像であり、補正処理で利用したマス クは mask 12 と mask 2で、2回の erosion(mask 12) と4回の translation(mask 2) の処理を行った。





(b)



(C)

図 6.5: (a) t = 0 の c 表面、(b) t = 5 の c 表面、(c) 補正 c 表面

 - 画像の奥行き方向へ移動の変化に対する誤差の補正
 図 6.6に示した画像について、(a) は球体が静止している時の d-表面の状態を示し、(b) は球体が自転して自転角度 5°の時の d-表面の状態を示している。(c) は
 (b) に示した画像の補正画像であり、補正処理で利用したマスクは mask 4 で、2
 回の translation(mask 4) の処理を行った。





(C)

図 6.6: (a) t = 0 の d-表面、(b) t = 5 の d-表面、(c) 補正 d-表面

非等方的拡大の変化に対する誤差の補正
 図 6.7に示した画像について、(a) は球体が静止している時の e-表面の状態を示し、(b)
 は球体が自転して自転角度 5°の時の e-表面の状態を示している。(c) は(b) に示した
 画像の補正画像であり、補正処理で利用したマスクは mask 8 と mask 6 で、2 回の
 erosion(mask 8) と2 回の erosion(mask 6) の処理を行った。









(C)

図 6.7: (a) t = 0 の e 表面、(b) t = 5 の e 表面、(c) 補正 e 表面

・ 伸縮マスクによる誤差の補正
 図 6.8に示した画像について、(a) は球体が静止している時の f-表面の状態を示し、(b)
 は球体が自転して自転角度 5°の時の f-表面の状態を示している。(c) は(b) に示した画
 像の補正画像であり、補正処理で利用したマスクは mask 11 で、2 回の erosion(mask
 11)の処理を行った。









(C)

図 6.8: (a) t = 0 の f-表面、(b) t = 5 の f-表面、(c) 補正 f-表面

・球体モデルに対する立体画像の復元結果
 前節に述べた補正表面を用いてステレオの補正右画像を構成する。図 6.9は補正した
 後の t=5(自転角度 5°)の球体モデル画像を示している。



図 6.9: 補正画像 (t =5、変化量:3 画素)

• 変化量と補正誤差との関係

4.1節に述べたように、dilationとerosionの回数が多ければ多いほど、補正対象の構造要素は、原対象の構造要素とだんだん違って来、形状的に原対象と同じであるが、構造要素的には少しく変わっているので、ステレオマッチング処理に誤差が生じる。 また、この誤差は定量的に増加すると、立体画像表示に影響し、正確な立体感を損なってしまう。変化量と補正の効果について、定量的な評価を以下のように行った。



(c-1)誤差の分布(変化量:1画素)

(c-2)誤差の分布(変化量:2画素)





(a-5)補正する前の誤差(変化量:5 画素)



(b-5)補正した後の誤差(変化量:5画素)



(c-5)誤差の分布(変化量: 5 画素)

図 6.10: 表面-aの補正結果 ((a 1,b-1,c-1) ~ (a 5, b 5, c-5))



(c-1)誤差の分布(変化量:1画素)

(c-2)誤差の分布(変化量: 2 画素)





(a-4)補正する前の誤差(変化量:4画素)



(b-3)補正した後の誤差(変化量:3画素)



167 177 187 197 207 217 380 X-coordinate[pixel] Y-coordinate[pixel]

(b-4)補正した後の誤差(変化量:4 画素)



⁽c-4)誤差の分布(変化量:4画素)



(a-5)補正する前の誤差(変化量:5 画素)



(b-5)補正した後の誤差(変化量:5画素)



(c-5)誤差の分布(変化量:5 画素)

図 6.11: 表面-bの補正結果 ((a-1,b-1, c-1)(a-5, b-5, c-5))



(c-1)誤差の分布(変化量:1画素)

(c-2)誤差の分布(変化量:2画素)





(a-5)補正する前の誤差(変化量:5画素)



(b-5)補正した後の誤差(変化量:5画素)



図 6.12: 表面-cの補正結果 ((a-1,b-1,c-1) ~ (a-5,b-5,c-5))



(c-2)誤差の分布(変化量:2画素)





(a-5)補正する前の誤差(変化量:5画素)



(b-5)補正した後の誤差(変化量:5画素)



(c-5)誤差の分布(変化量:5画素)

図 6.13: 表面-d の補正結果 ((a-1,b-1,c-1) ~ (a-5, b-5, c-5))



(a)変化量:5 画素

図 6.14: ステレオ画像ペアの再構成誤差の分布

- ・ 自転球体表面の変化量による実験結果
 - 移動変化量と補正の効果
 - 図 6.10に示すのは、自転球体表面を定量的に移動変化することによって補正効 率が変わる。まず、図 6.10の (a-1)、(b-1) (c-1)について、それぞれは補正を 行う前の奥行き誤差、補正を行った後の奥行き誤差とその奥行き誤差の分布の 図を示している。 移動変化量は、1 画素である。同様に、6.11の (a-2) (b-2) (c-2)~(a-5) (b-5) (c-5)は、移動変化量は、1 ~ 5 画素である。
 - 拡大・縮小変化量と補正の効果
 - 図 6.11に示すのは、自転球体表面を定量的に拡大変化することによって補正効 率が変わる。まず、図 6.11の (a-1) (b-1) (c-1)について、それぞれは補正を行 う前の奥行き誤差、補正を行った後の奥行き誤差とその奥行き誤差の分布の図 を示している。拡大変化量は、1 画素である。同様に、図 6.11の (a-2) (b-2) (c-2)~(a-5) (b-5) (c-5)は、拡大変化量は、1 ~ 5 画素である。
 - 移動・伸縮変化量と補正の効果
 - 図 6.11に示すのは、自転球体表面を定量的に移動・伸縮変化することによって 補正効率が変わる。まず、図 6.11の (a-1) (b-1) (c-1)について、それぞれは 補正を行う前の奥行き誤差、補正を行った後の奥行き誤差とその奥行き誤差の 分布の図を示している。移動・伸縮変化量は、1 画素である。同様に、図 6.11 の (a-2) (b-2) (c-2)~(a-5) (b-5) (c-5)は、移動・伸縮変化量は、1 ~ 5 画 素である。
 - z-方向移動変化量と補正の効果
 - 図 6.11に示すのは、自転球体表面を定量的に奥行き方向へ移動変化することに よって補正効率が変わる。まず、図 6.11の (a-1) (b-1) (c-1)について、それ ぞれは補正を行う前の奥行き誤差、補正を行った後の奥行き誤差とその奥行き 誤差の分布の図を示している。 奥行き方向への変化量は、1 画素である。同様 に、図 6.11の (a-2) (b-2) (c-2)~(a-5) (b-5) (c-5)は、奥行き方向への変化 量は、1 ~ 5 画素である。
- ステレオ画像ペアの再構成
 補正処理の画像結果を用いてステレオ画像ペアの再構成を行う。ステレオ左右モデル

画像の構成は、まず、2枚の補正画像(左右画像)のディスパリティ値をSSDAパター ンマッチング法で計算し、補正右画像と計算したディスパリティ値を用いて新左画像 を作成する(2章に参照)。この補正した後の再構成左画像と補正する前の再構成左画 像は、剛体物体モデルの再構成左画像に比較する。その結果は図 6.14に示している。

考察

上記で示した4種類の定量的な表面変化の実験結果から本手法の有効性を検討する。

- まず、自転球体表面の移動変化に対する補正結果の場合、移動マスクでモルフォロジー処理しか行わないので、対象表面は、構造的に変わらず、対象表面の位置だけを場所的に変えることができるので、自転角度 5°での変化量を5 画素までに増加させても 誤差が少なく、図6.10に示しているような補正結果が得られる。この補正画像を用いてステレオ画像ペアの再構成を行う。解析的な立体画像の再現結果は表6.1に示している。
- 次に、表面の拡大・縮小変化に対する補正結果の場合、4.1.2節で述べたように、 拡大・侵食マスクでモルフォロジー処理を行うので、対象表面は、構造的に少 しずつ変わって、自転角度5°での変化量を3画素以上に増加させると、図6.10 に示すように誤差補正結果が悪くなり、解析的な立体画像の表示率も落ちて来 る。(表 6.4に参照)
- 表面の移動・伸縮変化に対する補正結果の場合、横拡大変化と移動変化の組み 合わせであるので、移動マスクと拡大・侵食マスクでモルフォロジー処理を行 う。対象表面は、構造と位置的に少しずつ変わるために、自転角度 5°での変化 量を3画素以上に増加させると、図6.10に示すように誤差補正結果が悪くなり、 解析的な立体画像の表示率も落ちて来る。(表 6.1に参照)
- 表面の奥行き方向への移動変化に対する補正結果の場合、表面の自転速度が早くなるので、横侵食マスクでモルフォロジー処理を行う。対象表面は、位置的に少しく外れるだけで、 誤差もより少ない。解析的な立体画像の再現結果は表
 6. 1に示している。

上記で述べたように、ステレオ画像ペアの再構成誤差分布の図を見ると、変化量の3 画素までには、良いステレオ画像ペアを再構成することが出来る。補正左右画像は剛 体物体モデルの左右画像に比較し、表 6.1のような結果が得られた。本研究で定義し た滑らかに変化する自転球体表面の変化量は 1~3 画素であれば、本手法の解析的な 有効性は 78%以上であることを確認した。表 6.1に示しているのは、(再構成した補正 左右画像 (非剛体)の奥行き / 正確な左右画像 (剛体)の奥行き) × 100% の立体表示 率である。

変化種類	変化量 (画素)	立体表示率
移動变化	1	96%
	2	95%
	3	92%
	4	90%
	5	88%
拡大・縮小変化	1	80%
	2	78%
	3	76%
	4	68%
	5	60%
移動・伸縮変化	1	91%
	2	84%
	3	78%
	4	72%
	5	64%
奥行き方向への移動変化	1	92%
	2	90%
	3	88%
	4	84%
	5	80%

表 6.1: 立体画像の再現結果

6.3 実画像での実験結果

5 節に述べたように、本研究では X 線観測衛星「ようこう」で得られた X 線太陽画像 へ本手法の適用し、その有効性を検討する。前節では、自転球体のモデルに対する実験を 行った。自転球体のモデルでの実験では、各表面に対する補正を行い、正確なステレオ画 像ペアを構成する。液晶シャッタメガネを使い、コンピュータディスプレイ上に立体画像 表示を行う。本節では実画像に対する実験を次のような補正結果を示す。



図 6.15: 17-MAY-9301:21:51に「ようこう」で撮影された太陽の表面

• 補正処理実験

まず、図 6.15に示すように、それぞれの太陽表面が別々な変形を持っている。この ような表面を表面1~表面7に分けられる。5節に述べたように、扱う「ようこう」 データは 17-MAY-93 01:21:51(左画像) と 17-MA Y93 11:36:49(右画像)のデータであ り、自転角度 5.357 °である。以下には、各表面に対する補正を行った。

- 表面1に対する誤差の補正
 表面1は太陽が自転する間に移動と拡大する太陽表面である。正確な立体画像を
 表示するために、左右画像の補正を行った。補正処理で利用したマスクは mask
 2と mask 10 であり、3 回の translation(mask 2) と 1 回の dilation(mask 0) で
 左画像の補正処理を行った。
- 表面2に対する誤差の補正
 表面2は太陽が自転する間に移動と拡大する太陽表面である。正確な立体画像を
 表示するために、左右画像の補正を行った。補正処理で利用したマスクは mask
 7とmasl2で、左画像を3回のtranslatidnでの処理と5回のero-sion(mā)での補正処理を行った。
- 表面3に対する誤差の補正
 表面3は太陽が自転する間に移動と拡大する太陽表面である。正確な立体画像を
 表示するために、左右画像の補正を行った。補正処理で利用したマスクは mask
 8 と mas l2 で、左画像を1回のtranslati d2n)での処理 と5回のero-sion(m8a)の補正処理を行った。
- 表面4に対する誤差の補正 表面4は太陽が自転する間に拡大する太陽表面である。正確な立体画像を表示 するために、左右画像の補正を行った。補正処理で利用したマスクは mas & で あり、左画像を2回のerosion(8m)での補正処理を行った。
- 表面5に対する誤差の補正
 表面5は太陽が自転する間に移動と拡大する太陽表面である。正確な立体画像を
 表示するために、左右画像の補正を行った。補正処理で利用したマスクは mas &、
 mas & であり、左画像を2回のerosion(5)での処理 と2回のerosion(mas k
 8)での補正処理を行った。
- 表面6に対する誤差の補正
 変化が少ないので、1回のclosi処理しか行わなかった。
- 表面7に対する誤差の補正
 変化が少ないので、1回の closing 処理しか行わなかった。
- ステレオ画像ペアの再構成
 次のステップは、補正処理の画像結果を用いてステレオ画像ペアの再構成を行う。ステレオ左右画像の構成について、次のような処理を行う。
 - まず、2 枚の補正画像 (左右画像) のディスパリティ値を SSDA パターンマッチ ング法で計算する。
 - 補正右画像と計算したディスパリティ値を用いて新左画像を作成する。
 - 補正左画像と計算したディスパリティ値を用いて新右画像を作成する(2章に 参照)。

再構成処理を行ったステレオ画像ペア結果は図 6.17に示している。

実画像への本手法の有効性の評価

実画像での実験は、自転球体のモデルでの実験と同様に、X線太陽画像をいくつか の表面部分に分ける。X線画像を明るさによって閾値処理を行い、図6.1に示すよ うに7つの表面に分割する。図6.1を見て分かるように、太陽の表面の変化が自転す る間に各表面が別々な変化を持っている。表面1と表面4はそれぞれ移動・拡大と移 動の変化する表面である。図6.1元ですように正確に補正することが出来た。表面6 と表面7は変化量が少ないために closin処理を行っただけである。表面2、表面3 と表面5の変化は激しくて、また発生・消滅する部分が多いので、正確に補正するこ とが困難である。表面2に関しては、左画像の表面2の上部分と表面の位置の補正を 行った。表面3に関しては、左画像の表面3の下部分と表面の位置の補正を行った。 右画像の表面5には発生する部分が多いので、縮小補正を行った。

上記で述べた補正処理の画像結果を用いてステレオ画像ペアの再構成を行った。ス テレオ左右画像結果は図 6.17に示している。図 6.16と図 6.17のそれぞれ処理前のステ レオ画像ペアと処理後のステレオ画像ペアを用いて本手法の有効性を検討する。まず、 人間の視覚的な検討は、液晶メガネシャッタを利用し、2枚の左右画像をコンピュー タディスプレイ上で 1/60 秒に切替えて表示する。解析的な検討は、再構成した左右 画像と原左右画像の誤差を計算し、処理前の 誤差と処理後の 誤差を比較する。この

誤差の分布は図 6.18に示している。解析的な数値データでは、補正処理後の立体画像 表示は、補正処理前に比べて良い結果が得られた。また、処理後の(再構成した左右 画像/原左右画像)×100%の計算は、75%以上に立体表示することが出来た。



(a)

(b)

図 6.16: (a) 17-MAY-93(01:21:51の「ようこう」データ、(b) 17-MAY-93(11:36:49の「よ うこう」データ



図 6.17: 補正ステレオ画像ペア (a) 左画像 、(b) 右画像



(a)

(b)



図 6.18: (a)(b) 処理前と処理後の視差値、(c) 左画像の再構成誤差(d) 右画像の再構成誤差

第7章

まとめ

単一の固定カメラを利用するステレオ立体視の場合では、対象物体が滑らかで緩やかな 変形・動くときに、どの程度までに正確な立体画像を表示することが出来るかを本研究の 目的である。液晶シャッタ付き眼鏡などを使用し、コンピュータのディスプレー上で立体 画像の表示を行った。まず、対象物体をコンピュータグラフィックス (CG) でモデル化し、 物体の表面を変化させることによって、ディスパリティ誤差を補正する。また、物体の回 転角度を 5°を決め、回転角度 (時刻)の異なる 2 枚の画像ペア (左右画像)を生成する。単 ーカメラで撮影した球体の左右画像の誤差 (表面が変化するための誤差)を補正と正確な立 体画像を表示するために、次のような 3 つの処理システムを新しく考えた。

- モルフォロジー処理を用いて左右画像の誤差を補正する。
- 補正した左右画像のディスパリティ値を SSDA パターンマッチングによる新左右画像を再構成する。
- 新左右画像を用いて液晶シャッタ付けメガネを利用する立体画像表示と数値データ的な立体表示を行う。

最後に X 線太陽観測衛星「ようこう」で得られた X 線太陽画像に適用して本手法の補正成 功率を評価する。

物体のモデルと実画像での実験では、物体の表面が滑らかに変形するときに正確な画 像ペアを補正することが出来たが、物体の表面が激しく変形して発生・消滅する部分が生 じるときに補正処理が困難になった。本研究で定義した滑らかに変化する自転球体表面モ デルの変化量は1~3 画素であれば、本手法の解析的な結果は78%以上の補正成功率が得られた。

実画像での実験では、「ようこう」で撮影した太陽の活動を視覚的な立体表示と解析的 な立体表示が行った。液晶シャッタ付けメガネで観測するときに、処理前の立体感と処理 後の立体感の違いも良く感じた。また、解析的な表示にも、良い結果が得られた。実画像 へ本手法の適用では、補正処理後の立体画像表示は、補正処理前に比べ、良い誤差補正結 果が得られた.また、本手法の解析的な結果は75%以上の補正成功率が得られた。

今後の課題としては、発生・消滅変化を持っている自転球体に対するステレオ左右誤差 の補正が必要となる。また、より正確な立体画像表示システムと本手法の精度率を上げる ことが必要となる。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、指導教官の小谷一孔助教授には、熱心に御指導して頂き、 深く感謝します。また、日頃から貴重な御意見、励ましを頂いた本講座の宮原誠教授に感 謝します。国立特殊教育総合研究所の勝間豊研究員には、遠距離にも関わらず貴重な御意 見、励ましを頂き、感謝します。

最後に日頃から昼夜をとわず討論して下さった宮原・小谷研究室のメンバーに感謝し ます。そして、「ようこう」の開発・打ち上げた全ての方々に感謝します。

参考文献

- [1] 奥富正敏, 金出武雄: "複数の基線長を利用したステレオマッチング", 電子情報通信
 学会論文誌, D-II Vol.J75-DI I No8 pp1317127 1992 年 8 月
- [2] 三池秀敏,古賀和利: "パソコンによる動画像処理", 森北出版株式会社, 1998
- [3] Muhamed Abdel M, R.Chellappa, Ariel Resenfeld : Binocular Motion Stereo using MAP EstimationInt.JCompter Vision 1993
- [4] John Ens and Ze-Nan Li: Real-time Motion Stereo, Int. J. Compter Vision 1998
- [5] Ferdmand van der Heijden : Image Based Measurement Systems, (object recognition and parameter estimation) 1994 by Jdm Wiley and Sons Itd
- [6] La vid FMAAlister : Stereo Computer Graphics and Other True 3D Technologies
 Primeton University Press, 1998
- [7] J.ARo ese and LEMCDeary ,"Stereoscopic Computer Graphics for Sm dation and M. deling", Computer Graphics (Fro c. Siggraph), V d. 13, No 2, Arg 1979, pp.41-47.
- [8] 藤井実,松山秦男: "動的計画法を利用したステレオマッチングにおける順序逆転問題 の一解法",電子情報通信学会論文誌,DII Vol. J79-DII No. 5 pp. 775-7841996 年 5 月
- [9] Dw ayne Phillips Image Processing: "Analyzing and Enhancing DigitalImages", R D TechnicalBooks.
- [10] 勝間豊: "太陽の軟 X 線画像データ処理・解析システムの開発に関する研究", 北陸先端科学技術大学院大学, 情報処理専攻, 修士論文 1994 年 2 月 15 日

[11] 佐藤圭: "硬 X 線太陽フレアの画像解析に関する研究", 北陸先端科学技術大学院大学, 情報処理専攻, 修士論文 1994 年 2 月 15 日

[12] Ioannis Pitas: "Di gital mage Processi ngAl gorithms", PretriceHall, 1993

付録

A.「ようこう」データの配列情報

Compiled mod ul eHIS-EXI S T.

0 15- MA-93 17: 23: Q5T/H Ope n/ Al MgHal NormC 2 5 5 3 3 8. **ð** 1 2 x5 1 2 115 - MAA 9317: 40: QOF/H Open/Al MgHal MornC $2\ 5\ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 215 - MXA 9318 : 36: Q2T / H Open / Al MgHal MornC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ $2\ 5\ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 315 - MXA 9319:02:Q0T1/H Open/Al MgHal NormC 415 - MXA 9319:23:Q2TI/H Open/Al MgHal MornC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 515 - MXA 9320: 17: Q2T7/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 615 - MXA 9320: 42: Q2T1 / H Open / Al MgHal MornC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 715 - MAA 9320: 50: COTB/H Open/Al MgHal NormC 255338.5012x512815 - MXA 9320: 59: Q2T5/H Open/Al MgHal NormC 25 5338. 5012×512 915 - MAA 9321: 52: QAT5/H Open/Al MgHal MormC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1015 - MAA 9323 : 54 : Q5T1/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ $2\ 5\ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1116 - MXA 9300: 03:QT7/H Open/Al MgHal NormC 1216 - MXA 9300 : 19 : Q3T9/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1316 - MAA 9303 : 13 : QOTI/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1416 - MXA 9303 : 30 : Q011 / H Open / Al MgHal NormC 25 5338. 5012×512 1516 - MXA 9304 : 52 : QCT9/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1616 - MAA 9305 : 01 : QT1/H Open/Al MgHal MormC 25 5338. 5012×512 1716 - MXA 9305 : 09 : QATB/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1816 - MAA 9306 : 05 : QT9/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ \ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$ 1916 - MAA 9306 : 22 : QATB/H Open/Al MgHal NormC $2\ 5\ 5\ 3\ 3\ 8\ .\ 501\ 2\ x\ 5\ 1\ 2$

20	16-MA	4Y-93	06:30:55	$\rm QT/H$	Open /AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
21	16-MA	¥93	06:39.27	C]/ H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
22	16-MA	¥93	08:01:39	C] /H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
23	16-MA	Y93	08: 17: 57	C¶∕H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
24	16 MA	¥93	08:26:29	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
25	16-MA	Y93	09:10:17	C¶∕H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
26	16-MA	¥93	09:40:09	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
27	16 MA	¥93	09:48:45	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
28	16-MA	Y93	09:57:13	C¶∕H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
29	16-MA	Y93	10:05:45	C¶∕H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
30	16 MA	¥93	10:50:09	C]∕H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
31	16 MA	¥93	11:28:33	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
32	16-MA	Y93	11:37:05	C¶∕H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
33	17-MA	Y93	01:21:51	C¶/H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
34	17-MA	Y93	01:59.23	C¶/H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
35	17-MA	Y93	02:07:59	C¶/H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
36	17-MA	¥93	02:16:27	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
37	17-MA	¥93	03:00:17	C]/ H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
38	17-MA	¥93	08:33:43	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
39	17-MA	Y93	03:50:47	C¶/H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
40	17-MA	Y93	05:09:17	C¶/H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
41	17-MA	¥93	05:17:49	CJ∕H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
42	17- MA	¥93	05:26:21	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
43	17-MA	Y93	06:45:17	C¶/H	op en ∕ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
44	17-MA	¥93	06:53:49	C]/ H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
45	17-MA	¥93	07:52 51	C]/ H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
46	17-MA	¥93	08:31:15	C]/ H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
47	17-MA	¥93	08:39:47	C¶/H	op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
48	17- MA	¥93	08:48:19	C¶∕H	Op en /ANg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
49	17-MA	¥93	09:30:59	C¶∕H	Op en ∕AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512

Ę	60	17-MA	Y-93	10:00:51	$\rm QT/H$	Ope	n /AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
Ę	61	17-MA	¥93	10:09:23	Q / H	Op)e	n /A.Ngt	Half	Nørm	С	25	5338.0	512x512
Ę	62	17-MA	¥93	10: 17: 55	Q / H	Op)e	n /A.Ngt	Half	Nørm	С	25	5338.0	512x512
Ę	3	17- MA	¥93	10:26:27	Q ∏ H	Op)e	n /A.Ngt	Half	Nørm	С	25	5338.0	512x512
Ę	64	17- MA	¥93	11:36:49	Q ∏ H	Qo e	n /A.Ngt	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
Ę	5	17- MA	¥93	11:53:53	Q ∏ H	Qo e	n /A.Ngt	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
Ę	6	17- MA	¥93	13:13:21	Q ∏ H	Qo e	n /A.Ngt	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
Ę	57	17-MA	¥93	13:21:53	Q ∕ H	Qo e	n /A.Ng	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
5	8	17-MA	¥93	13: 34: 41	C¶/H	Op e	n /AMg	Half	Norm	С	25	5338.0	512x512
Total Number of Images $= 59$													

B. 式の導出

(5) 式の導出

$$\begin{split} P_l &= \left(x\cos(\theta/2) + (R-z)\sin(\theta/2), y, \right. \\ & \left. R - (R-z)\cos(\theta/2) + x\sin(\theta/2) \right) \end{split}$$

$$P_r = (x \cos(\theta/2) - (R - z) \sin(\theta/2), y,$$
$$R - (R - z) \cos(\theta/2) - x \sin(\theta/2))$$

$$x_r = \frac{R(x\cos(\theta/2) - (R-z)\sin(\theta/2))}{R - (R-z)\cos(\theta/2) - x\sin(\theta/2)}$$
$$x_r = x' - d$$

$$x_r(R - (R - z)\cos(\theta/2) - x\sin(\theta/2)) = R(x\cos(\theta/2) - (R - z)\sin(\theta/2))$$

 $x_r R - x_r R \cos(\theta/2) + x_r z \cos(\theta/2) - x_r x \sin(\theta/2) = R x_0 \cos(\theta/2) - R^2 \sin(\theta/2) + R z_0 \sin(\theta/2)$

x' = (x/z)R

y' = (y/z)R

 $[x_r R(1 - \cos(\theta/2)) + R^2 \sin(\theta/2)] = x(R\cos(\theta/2) - x_r \sin(\theta/2) + z(R\sin(\theta/2) - x_r\cos(\theta/2))] \times R/z$

 $\frac{R}{z}(x_r R(1 - \cos(\theta/2)) + R^2 \sin(\theta/2)) = x'(R\cos(\theta/2) - x_r \sin(\theta/2) + R(R\sin(\theta/2) - x_r\cos(\theta/2)))$

$$z = \frac{R^2((x'-d)(1-\cos(\theta/2)) + R\sin(\theta/2))}{x'(R\cos(\theta/2) + (x'-d)\sin(\theta/2)) + R(R\sin(\theta/2) - (x'-d)\cos(\theta/2))}$$
(5)

C. モルフォロジーの式の導出

• Greyscale Morphology

Morphological operations can be extended to function and, therefore, to greyscale images. The tools for greyscale norphological operations are simple function g(x)having domain G. They are called structuring functions. Their symmetric counterparts are given by:

$$g^s(x) = g(-x)$$

The greyscale dilationand erosion of a function f(x) by g(x) are defined by:

$$[f \oplus g^s](x) = \max_{z \in D, z - x \in G} f(z) + g(z - x)$$
$$[f \oplus g^s](x) = \min_{z \in D, z - x \in G} f(z) - g(z - x)$$

where D is the domain of f(x). An important property is greyscale morphological pipelining that used for the implement tation of morphological operations. Let us suppose that the structuring function g(x) can be decomposed as follows:

$$g = g_1 \oplus g_2 \oplus \ldots \oplus g_k$$

In this case, greyscale dilationand erosion can be implemented in pipeline:

$$f \oplus g = (\dots ((f \oplus g_1) \oplus g_2) \oplus \dots \oplus g_k)$$
$$f \oplus g = (\dots ((f \oplus g_1) \oplus g_2) \oplus \dots \oplus g_k)$$

Let us suppose that the structuring function g(x) is zero and that its domain is given by $G = [-m, \ldots, 0, \ldots, m]$. In this case, greyscale dilation and erosion are called *dilation* and *erosion of function by a set*:

$$[f \oplus G^s](x) = [f \oplus g^s](x) = \max f(i-m), \dots f(i), \dots f(i+m)$$
(7)

$$[f \ominus G^s](x) = [f \ominus g^s](x) = \min f(i-m), \dots f(i), \dots f(i+m)$$
(8)

Dilation and erosion of a function by a set are essentially local max and min filtering operations respectively.