



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-10-010

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

金星縁を利用した画像歪の推定

神山 徹, 山崎 敦, 山田 学

2011年1月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

金星縁を利用した画像歪の推定

神山 徹*, 山崎 敦**, 山田 学**

Estimation of Image Distortions Using Venus limbs

By

Toru KOUYAMA*, Atsushi YAMAZAKI** and Manabu YAMADA**

Abstract

The Venus orbiter, Akatsuki, which will reach Venus in December 2010, will obtain cloud images to estimate wind speeds using a cloud tracking method. It is important for tracking cloud motions with high accuracy that the direction of line of sight from each pixel in an image and the positions of tracked clouds are well determined. Because Venus Monitoring Camera (VMC) onboard Venus Express (produced by European Space Agency) and Akatsuki's 1 μ m camera, 2 μ m camera, Ultraviolet Imager and Longwave infrared camera have wide field of view, optical distortions are tended to be significantly of those cameras' images. The purposes of this study are to develop a method to detect optical distortions of a camera using the position of Venus limbs, and to apply this method for cameras which can hardly calibrate image distortions in space. Applying this method to images taken by VMC, we could detect the existence of an optical distortion of the camera. From the statistical estimations, we also found that we can detect the optical distortion of a camera with enough accuracy using at least 100 Venus images.

概要

2010年12月に金星周回軌道に入ることが予定されている金星周回衛星あかつきでは、撮像観測により雲の動きを追跡することで風速を求める観測が計画されている。雲の追跡を精度良く行う前提として、画像各画素が指し示す視線ベクトルを正確に把握し、追跡の対象となる雲の位置を正しく認識する必要がある。しかし実際に金星撮像観測に用いられている欧州宇宙機構 Venus Express 搭載の Venus Monitoring Camera や、あかつき搭載の 1 μ m カメラ、2 μ m カメラ、紫外イメージャー、中間赤外カメラは視野が広い画像の歪曲収差の影響が顕著に現れやすく、空間構造を利用した解析にはその歪みの程度を知ることが観測の精度を向上させるために必要である。本研究の目的は宇宙空間で歪み校正データを得ることが困難なカメラを念頭に置き、人工衛星搭載カメラが取得した金星画像に写る惑星の縁を利用することで画像歪の程度を調べる手法を開発することである。この手法を十分な撮像データが蓄積されている欧州宇宙機構 Venus Express 搭載 Venus Monitoring Camera による紫外波長撮像画像に適応したところ、明確に画像歪が存在することを検出することが出来た。また統計的考察から将来の観測において、100枚の金星画像を得た時点で画像歪の程度を十分な精度で見積もることが出来ることを示した。

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 (Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

** 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science)

1 序論

現在金星周回軌道衛星から行われる光学撮像観測では、およそ 10 金星半径離れた位置から金星全球を撮像できるよう広い視野をもつ光学系が用いられている。欧州宇宙機構 (ESA) によって運用されている Venus Express 衛星 (VEX) 搭載、Venus Monitoring Camera (VMC) では 12 度¹⁾、日本の探査機であるあかつきで用いられている光学系のうち、紫外波長カメラ (UVI)、1 μm 波長カメラ、2 μm カメラ (IR2) は視野が 16 度、中間赤外カメラ (LIR) は視野が 12 度と設計されている²⁾。視野が広い光学系では視野端の像が歪曲収差による影響を受けやすく、特に小さな光学系を用いる VMC ではそれが顕著である。歪みがなければ像が光軸中心からの距離 r の位置に結像する場合、歪曲収差が存在する光学系では、 r^2 に比例して光軸中心から遠ざかる、あるいは近づいた位置に像が結像する³⁾と近似できる。そのため規則的な格子状の模様を写したとしても図 1 に示したように糸巻き型、あるいは樽型に格子が歪曲する。

この歪曲収差の影響をなるべく小さくするよう光学系の設計がなされるが、完全にすべての影響を取りきることは原理的には不可能に近い。衛星に搭載される光学系は光学設計からどの程度の歪曲収差が発生するかを評価し、さらにその確認および較正のために、地上で較正試験を行い較正パラメータが取得される。また打ち上げ後に光学系に変化が生じることを想定し、定期的に、あるいは観測期間に入る前に宇宙空間で較正データを取得し、より正確な補正を行えるようにする。

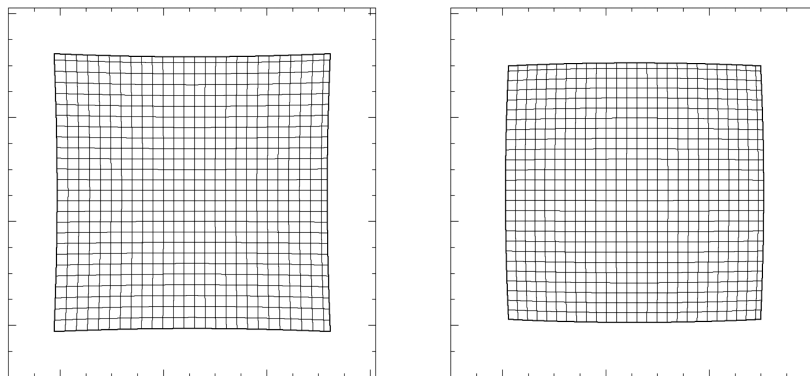


図 1: 糸巻き型歪みと樽型歪み

歪曲収差は像の結像する位置を変化させてしまうため、その変化を補正しないまま解析すると、CCD の各画素に対応する金星表面の緯度経度を誤って見積もることになる。またあかつきでの撮像観測は楕円軌道上から行われることから²⁾、撮像ごとにあかつきから金星までの距離が変化し画像に投影される金星の大きさも変化するため、画像ごとに程度の異なる影響が金星ディスクに生じ、結果として大きな風速の見積もり誤差につながる。10 金星半径の距離から 1 回目の撮像を、その 2 時間後に 2 回目の撮像を行い得られた画像組から風速を求める場合、仮に画像端で 1% の歪みを生じさせる歪曲収差が存在していたとすると、最大 5m s⁻¹ 以上の誤差が風速の見積もりに生じる。これは「あかつき」が観測する金星での風速擾乱や子午面循環と同程度の誤差となる。「あかつき」での観測計画では位置決定誤差を 1pixel 以下の精度で要求しており⁴⁾、歪曲収差の補正後の誤差も同様に 1pixel (0.1%) 以下に抑える必要があると考えられる。

「あかつき」では多くのカメラにおいて金星向かう際に恒星を撮像することで打ち上げ後に画像歪みの較正データが取得される。しかしながら中間赤外カメラ (LIR)^{2,4)} の観測波長帯には十分に明るい恒星が存在しないため、金星縁を使って歪みの較正データを取得することが計画されている。LIR での歪曲収差は設計値では 0.1% 程度と報告されており、観測に対する影響は少ないと予想されるが、歪みの変化がないことを打ち上げ後に確認することは重要である。そこで本研究では VMC, IR1, IR2, LIR のような視野が広くかつ軸対称な光学系を前提とし、歪曲収差によって生じる画像歪みに対して金星縁を利用して歪みの程度を検出し、補正する手法を検討した。

2 章では歪みの検出原理を示し、3 章ではテスト画像及び実際の金星撮像画像に提案手法を適用した結果を示した。

また4章では本研究の手法が歪曲収差に対してロバストであることを示す考察を行った。

2 金星画像を利用した画像歪の推定と補正

2.1 画像歪みによる見かけの金星半径の変化

金星は固体部分の自転速度が遅く、赤道半径と極半径に差がなく球体と見なせる。また金星を取り巻く大気や雲を考慮しても、紫外波長においては過去の観測から球と見なして差し支えないことがアメリカ宇宙航空局 (NASA), Galileo 探査機による紫外波長観測において確認されている⁵⁾。一方赤外波長においては、VEX 搭載可視赤外分光撮像装置 (VIRTIS) の分光観測により赤道域から極域にかけて雲頂の高さが変化することが報告されており、その変化量は 10km 程度⁶⁾と見積もられている。ただしこの差はあかつき/LIR において遠金点から行う金星撮像に当てはめると 0.1pixel に満たないことから、中間赤外波長においても近似的に金星を球体として扱うことが可能である。

一般にピンホールカメラで球体を撮像したとき CCD に投影される球体は楕円として投影されるが、被写体である球の中心が光学系の中心から伸びる視線ベクトル上に重なるときに限り円として投影される。以後、このベクトルが CCD 面に投影される点を光軸中心と呼ぶ。今、金星を撮像する際金星中心が光軸中心に重なっているものと仮定すると、画像歪の存在しない光学系の CCD に投影される金星の半径 r (pixel) は、金星視半径を θ_v として、

$$r = \frac{\tan \theta_v}{\theta_{fov}} \quad (1)$$

と表現される。ここで θ_{fov} は光軸中心におけるプレートスケール (radian/pixel) である ($\theta_{fov} = \tan^{-1}(\rho/f)$, f : 焦点距離, ρ : 1pixel の長さ)。このとき、プレートスケール θ_{fov} は設計値や地上較正試験で得られた値ではなく撮像時の実際の値とする。金星視半径 θ_v は、衛星金星間距離を D 、宇宙空間から観測される雲の高さを含めた金星半径を R_v とすると

$$\sin \theta_v = \frac{R_v}{D} \quad (2)$$

と表現されるため、三角関数の公式より

$$R_v = \frac{Dr\theta_{fov}}{\sqrt{1+(r\theta_{fov})^2}} \quad (3)$$

となり、CCD 上に映る金星の半径と実際の画像解像度、また軌道情報から得られる衛星金星間距離から画像に写る金星の半径を求めることができる。

ここで1章で述べたように、想定する光学系に歪曲収差による画像歪みがあると仮定する。この歪曲収差は光軸を中心として軸対称に歪みを生じさせる。今、軸対称である光学系を仮定し、歪みが光軸からの距離の3乗に比例して生じるものとする、歪みによって変化した画像上の金星半径 r' (pixel) は、 k を歪みの程度を表す係数として

$$r' = r(1 + kr^2) \quad (4)$$

と表現される。この r' から見積もられる見かけの金星半径 R_v' は、それまでの較正で得られているプレートスケール値 θ_{fov} を用いて見積もりがなされることを考慮し

$$R_v' = \frac{Dr'\theta_{fov}}{\sqrt{1+(r'\theta_{fov})^2}} \quad (5)$$

となる。 R_v と R_v' を比較して

$$R_v' = R_v \frac{r'\theta_{fov}}{r\theta_{fov}} \sqrt{\frac{1+(r\theta_{fov})^2}{1+(r'\theta_{fov})^2}} \quad (6)$$

(4)を代入すると

$$R_v' = R_v (1 + kr^2) \frac{\Theta_{ifov}}{\theta_{ifov}} \sqrt{\frac{1 + (r\theta_{ifov})^2}{1 + (1 + kr^2)^2 (r\Theta_{ifov})^2}} \quad (7)$$

となり、歪み係数 k 、プレートスケールの変化により見かけの金星半径 R_v' が変化することが分かる。

VEX、あかつきによる観測では金星周回軌道上から多くの金星撮像画像を得る。1枚1枚の金星画像から、画像処理による円フィッティングから金星縁を利用して画像上での金星の見かけの半径 r' を求めることができる (Appendix)。また r' と軌道情報から得られる D を用いて (5) 式から R_v' が求まる。加えて r は (4) 式から r' と k に従属する変数である。よって (7) 式は R_v , θ_{ifov} , k を未知パラメータとする方程式と見なすことができる。ここで R_v に関して、紫外波長においては Galileo 探査機による観測から $6136 \pm 1.7\text{km}$ と見積もられている⁵⁾。他の波長においても近金点付近から金星縁をクローズアップして観測するリム観測を活用し、衛星からリムに向かう視線ベクトルと、衛星から金星中心へ向かうベクトルがなす角度から金星半径を求めることができる。以上の状況を鑑みて金星半径 R_v はあらかじめ決定されているものとし、その上で (7) 式を解く手法を検討する。

2.2 画像歪みの推定手法

2.1 章で述べたとおり、金星撮像画像に対して金星縁を円フィッティングすることにより金星の見かけの半径 r' を求めることができる。また r' と軌道情報から得られる D を用いて (5) 式から R_v' が求まる。これら r' , R_v' を画像ごとの観測値として用いることにより、 k , θ_{ifov} を最小二乗法とそのイテレーションによって求めることができる。

以下、その具体的な手法を述べる。

0. 撮像観測で得られた金星画像から、円フィッティングにより画像上での金星半径 r' とそこから計算される見かけの金星半径 R_v' を (5) 式により導出する。
1. まず r' が r からそれほど変化していないとして、 r' を r と見なして (7) 式を最小二乗法で解き k , θ_{ifov} を求める。この k , θ_{ifov} をそれぞれ $k^{(old)}$, $\theta_{ifov}^{(old)}$ とおく。
2. $k^{(old)}$ を入力として (4) 式を r について解き、 r' を r へ変換する。
3. 変換して得た r を使い、改めて (7) 式を最小二乗法により解き k , θ_{ifov} を求める。この k , θ_{ifov} を $k^{(new)}$, $\theta_{ifov}^{(new)}$ とする。
4. $k^{(new)}$, $\theta_{ifov}^{(new)}$ と $k^{(old)}$, $\theta_{ifov}^{(old)}$ を比較し、その差が大きければ $k^{(new)}$, $\theta_{ifov}^{(new)}$ を新たに $k^{(old)}$, $\theta_{ifov}^{(old)}$ として、差が十分小さくなるまで手順 2-4 を繰り返すイテレーション操作を行う。イテレーション前後で各パラメータ値の差が計算機上の丸め込み誤差程度に小さくなった時点でイテレーションを停止し、 k , θ_{ifov} を求める。

3 金星画像を用いた検証

3.1 テスト画像を用いた性能評価

提案手法により歪曲収差が正しく検出されるかを確認するため、歪み係数 k 、プレートスケール θ_{ifov} をあらかじめ設定し作成した 1000 枚のテスト画像を用意し、2 章で述べた手法を適用し計算により改めて k , θ_{ifov} を求めた。また求めた値と元の値との比較を行い、その再現性を確認し実用に耐えうるかを評価した。金星半径 R_v は NASA による Galileo 探査機での観測値、 6136km とした⁴⁾。

まずテスト画像では実際のプレートスケール θ_{ifov} が 6.9×10^{-4} (radian/pixel)、一辺が 512pixel であるような CCD を想定した。また R_v' を求める再に必要な較正值のプレートスケール θ_{ifov} は VEX/VMC チームから報告されている値、 6.93×10^{-4} (radian/pixel) を用いた⁷⁾。2 章で述べた手法を適用するため、また実際の撮像では様々な距離から金星を撮像するため、1000 枚のテスト画像では画像中に金星半径が 100pixel から 300pixel の範囲でランダムに写るように金星衛星間距離を与えた。加えて画像に写る金星の中心は常に光軸中心と重なるものとしている。

最後に歪み係数 k によって CCD の各画素から放出される視線ベクトルを変化させテスト画像とした (図 2)。ここで実際の撮像を良く再現するために、テスト画像はまず想定する光学系の 100 倍の解像度をもつ元画像を作り、 $10 \times 10\text{pixel}$ を足し合わせひとまとめにするビニング操作を行った。元画像では実際の金星の代わりに金星が写る領域の値

を1, 宇宙空間の値0とするような2値化画像を用意した.

これらの条件の下, 歪み係数 k にVMC紫外波長画像で実際に見積もられる値, -3.1×10^{-7} を与え評価を行った. 評価を行うに当たり, まず各画像から円フィッティングにより見かけの半径を求めた. このとき, VMC紫外波長による金星撮像では常に画面左方向から太陽光が当たっていたため, テスト画像ではそれを模擬し円の左半周だけを用いてフィッティングを行った. 得られた結果は, 理論的に見積もられる画像半径に対して円フィッティングによる半径の見積もり誤差は 0.00 ± 0.02 pixel, 中心座標の誤差は x 方向に 0.00 ± 0.03 pixel, y 方向に 0.00000 ± 0.00002 pixel であった. 半周のみを用いたとしても誤差は非常に小さく, また系統的なズレも誤差の範囲で生じていないことを確認した. 半周のみを用いた効果は x, y の中心座標の推定精度の差に表れている.

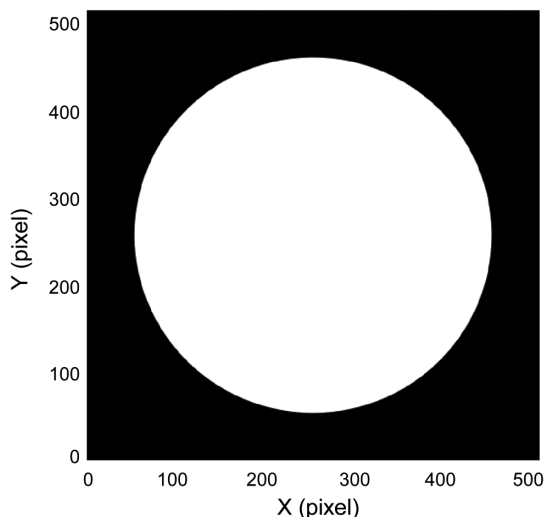


図2 テスト画像例. 画像解像度, 画素数は VEX/VMC 紫外波長画像と同じとした. また金星中心は光軸中心と一致するように設定した.

続いて2章で述べた手法を適用した結果, 図3に示したフィッティング結果が得られた. このとき得られたパラメータは $k = (-3.10 \pm 0.01) \times 10^{-7}$, $\theta_{fov} = (6.900 \pm 0.001) \times 10^{-4}$ であり, 与えた値を良く再現することを確認した. ここで誤差には最小二乗法から得られる各パラメータの 1σ を採用した. また歪み係数の真値からのズレ及び誤差から見積もられる歪み補正後の誤差は, 画像内であれば最大でも 0.01 pixel 以下であり, 理想的なデータに対しては実用上十分な性能を持つことを確認した.

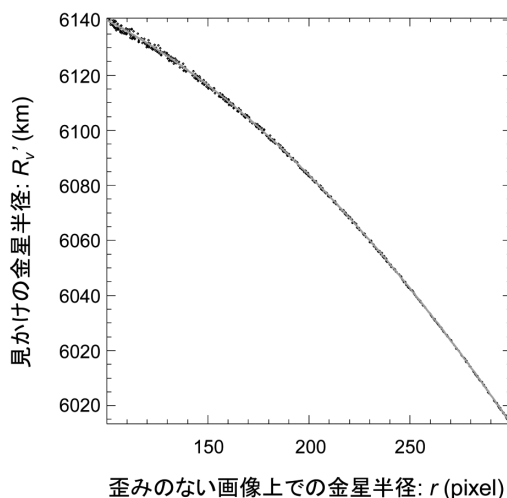


図3 テスト画像を用いたフィッティング結果. 横軸は歪みが無いとした時の画像上での金星半径, 縦軸は見かけの金星半径を表す. 点が各テスト画像から見積もられる見かけの金星半径を示し, 実線は最小二乗法で得られたフィッティング曲線を示す.

3.2 実データでの性能評価

本研究での提案手法が実際の観測に対応しうるかを検証するため、2006年4月に金星周回軌道へ投入され現在も観測を続けている VEX 搭載の VMC 紫外波長 (365 nm) 画像に対して適応した。VMC 取得画像については現在も ESA から画像歪に関する報告が公開されていないため、これらの画像を解析する上でも画像歪の程度を調査することは有用である。

まず現在公開されている 2010 年 1 月までの金星撮像画像のうち、金星縁が視野内に収まる 6124 画像を抽出し、各画像に対して Appendix で示した円フィッティングを施しその半径と中心座標を調査した。それぞれの画像においてフィッティングから見積もられる金星半径の推定誤差は最大で 15 km 程度であった。ここで画像ごとに太陽、金星、衛星がなす角が異なるため、リムがスチープに切り立つ画像がある一方、動径方向にやや緩やかな輝度変化のある画像が共に存在していた。そのため画像ごとに異なる金星半径の系統的な見積もりの差が含まれていることが予想されるが、太陽、金星、衛星のなす角は画像ごとに異なっていたため、この見積もり誤差は数千枚の画像全体としては偶然誤差に含まれるものとして扱い以後の議論を進めた。

続いて 2 章における議論では画像に写る金星中心が光軸中心にあることを仮定しているため、円フィッティングにより得られた画像上での金星中心の頻度分布 (図 4) から、仮定からの逸脱が小さい金星中心が光軸中心から 35pixel 以内にある 3175 画像を抽出した。ここで VMC においては光軸中心が CCD 画面の中心と設計されていることから CCD 画面の中心を光軸中心とし画像上での金星中心までの pixel 値を算出した。

これらの画像は以下の見積もりにより仮定を良く満たすことを確認した。一般に、光軸中心に金星中心が重なっていない場合金星は CCD 面上に楕円となって投影される。その楕円の長軸と短軸の比は、 ϕ を衛星から金星中心へ向かうベクトルと視線ベクトルのなす角、 θ_v を金星半径の視野角とすると

$$\left(\frac{\text{短軸長さ}}{\text{長軸長さ}} \right) = \sqrt{\cos^2 \phi - \sin^2 \phi \tan^2 \theta_v} \quad (14)$$

となる。 ϕ に $\tan^{-1}(35\theta_{fov})$ で計算される角度を代入し、検証で用いた画像の金星半径の視野角を代入したところ、短軸長さの長軸長さに対する比は 0.9997 以上でほぼ真円であった。実際の長さに換算しても約 2 km のみの違いであったため楕円を円として取り扱っても誤差は小さいものと考えられる。

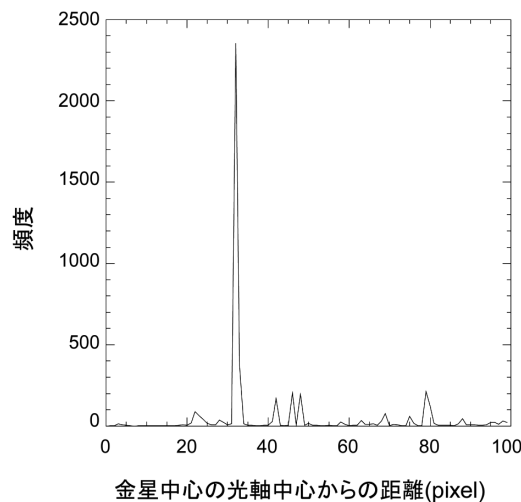


図 4 画像上における光軸中心からの金星中心距離の頻度分布。横軸は円フィッティングから見積もった金星中心の光軸中心からの距離を表し、縦軸は頻度を表す。各距離における頻度は 1pixel 刻みで算出した。

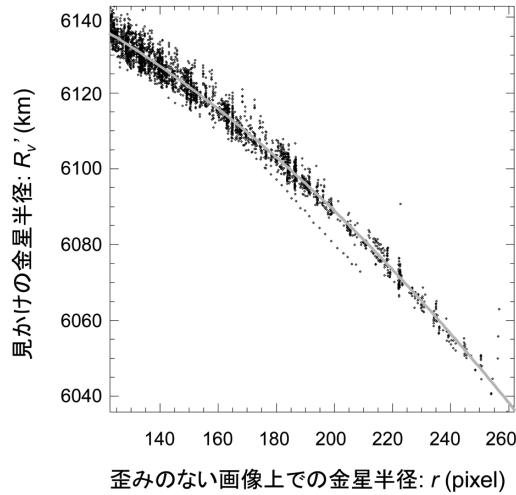


図5 歪みが無いとした時の画像上での金星半径と金星画像から見積もられた金星半径。横軸は画像上での金星半径、縦軸は見かけの金星半径を表す。点は各画像から得られた見かけの金星半径を示し、実線は最小二乗法で得られたフィッティング曲線を示す。

2章にて述べた手法を用いて最適解を求めた結果、 $k=(-3.10 \pm 0.01) \times 10^{-7}$ 、 $\theta_{fov}=(6.8940 \pm 0.0002) \times 10^{-4}$ と求めた。誤差には3.1章と同様に各パラメータの1 σ 範囲を採用した。このとき r と R_v' の散布図、また得られたパラメータを(7)式に代入して得られる曲線は図5のようになった。この曲線は χ^2 検定から99%以上の確率でもっともらしく当てはまっており、また各 R_v' から(7)式によって計算される値を引いた残差の分布は正規分布的分布を示したことから(図6)、仮定した関数は歪みによって変化する見かけの金星半径を良く再現していると言える。このとき残差分布の標準偏差は3kmであった。求めた歪み係数 k からVMC紫外波長画像の歪曲曲線を求めると図7のようになり、画像端では実に10pixel以上の歪みが見込まれることが分かった。一方歪み係数 k の誤差から見積もられる歪曲曲線の不確かさは画面端でも0.1pixel以下であり、1pixel以下の精度で歪みによる変化量を推定することができていることが見積もられた。実際に求めた k と θ_{fov} を使って、2006年11月15日に撮像された画像の上に衛星と金星の位置関係から装置カメラに写ると見積もられる金星縁を図示した(図8)。この金星の大きさの計算にはNASA提供のSPICE Toolkit⁸⁾を用いた。補正をかける前と比較してよく金星縁を再現できていることが分かる。

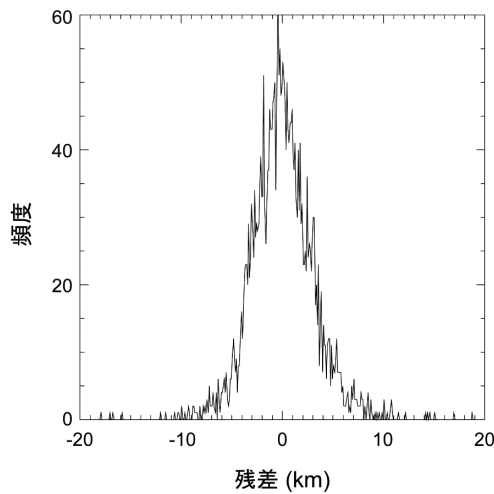


図6 見かけの金星半径からフィッティングから見積もられる値を引いた残差の頻度分布。横軸は残差、縦軸は頻度を表す。頻度は0.1km刻みで算出した。

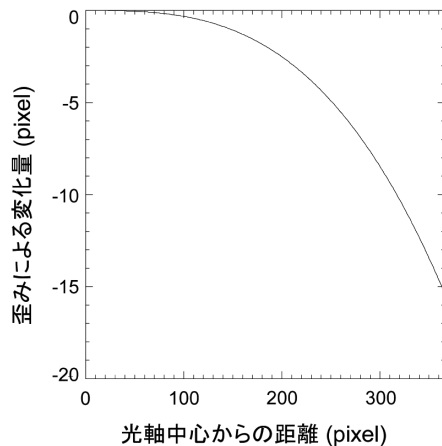


図7 VEX/VMC 紫外波長画像の歪曲曲線。横軸は光軸中心からの距離、縦軸は各距離における像の結像位置の変化量を表す。

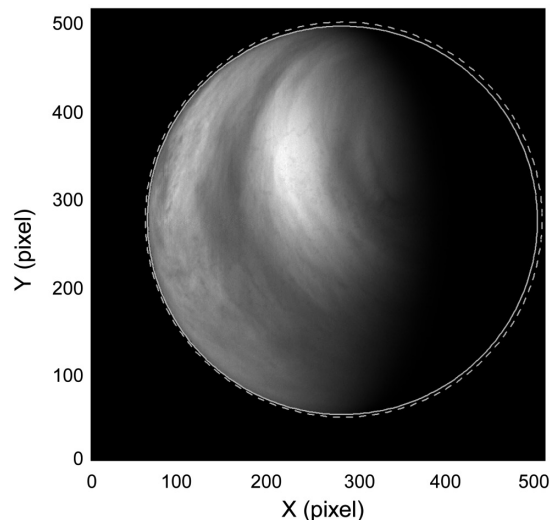


図8 画像歪みを考慮して算出した金星縁の位置（実線）と実際の画像との比較例。破線は補正をかけないときに想定される金星縁の位置。

3.3 限られた画像数での成立性

では、何枚程度の画像があれば、本手法で決めることができる歪みの不確かさが画面全体にわたって1ピクセル以下になるであろうか。これは将来の観測において本手法を適用する時期を計る目安になる。前項で使用した3175枚の画像から指定した枚数だけランダムに画像を選択し、画面端における画像歪みの不確かさを評価した（VMCの場合光軸中心からCCDの直線距離で361pixel離れた位置）。

実際に3175枚の画像から指定した枚数をランダムに抽出し、選んだ画像を基に3.1章と同様の手続きを行い、歪み係数 k とその誤差を導出する操作を各枚数10回ずつ試行した。ここで試行毎に画像の抽出を行った。その結果、図9のようになり、VMCにおいては100枚画像を用意すれば目標とする精度が得られることを確認した。

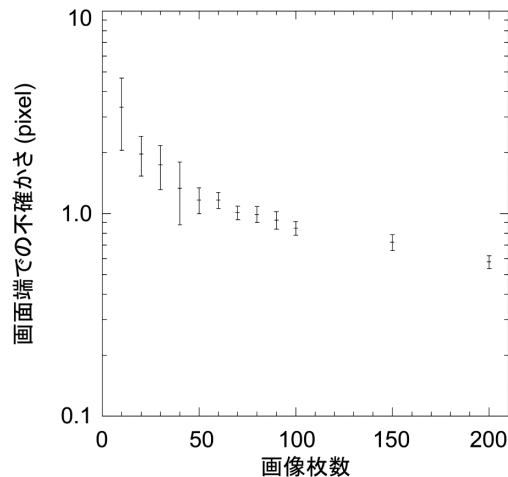


図9 用いた画像枚数と画面端での不確かさ。誤差範囲は各枚数10回の試行から算出した。

4 考察

本研究では2章で述べたとおり金星半径 R_v があらかじめ定まっていると仮定して歪み係数を求めた。しかし実際には金星が惑星全体を雲に覆われ、また粒子密度の濃い雲層の上空には10kmほどの厚さで薄い霞状の雲層が存在することが観測されている⁴⁾。一方でリム観測からも金星半径を見積もることができるが、近金点付近では周回衛星の姿勢決定精度、位置決定精度が共に悪く、リム観測から定まる金星半径はVMCでは10kmの誤差を持っていた。そこで本研究で提案した手法が仮定される金星半径によらずよく定まるかどうかを確認するため、仮定する金星半径を6136kmから上記誤差の 3σ に対応する30kmの幅で変化させ、歪み係数の値の変化を調べた。得られた結果は金星半径 R_v を6106kmと仮定した時、歪み係数 k は -3.08×10^{-7} であり、金星半径 R_v を6156kmと仮定した時、歪み係数 k は -3.12×10^{-7} であった。誤差と同程度の範囲で歪み係数の推定値がよく収まっていることを確認した。

5 まとめ

本研究では歪曲収差に由来する画像歪について、金星縁を用いることで画像歪みを検出しその歪みを補正する手法を提案した。また実際にVEX/VMC紫外波長に提案手法を適応し、得られた結果を実際の画像と比較することで画像歪みを検出できていることを確認した。見積もられた画像歪みの程度は画像端で10pixel、画像全体の2%に及んでおり、風速に換算して 10m s^{-1} もの見積もり誤差を生じさせうるものであることが分かった。

限られた画像枚数での成立性の結果から、100枚金星画像を得られた時点で本手法を適応することにより十分な精度で画像歪みを見積もることが出来ることが分かった。また較正パラメータが得られているカメラに提案手法を適応することもできるため、較正パラメータの有意性を確認することも可能であると考えている。

謝辞

本研究に際してLIR開発チームの立教大学田口教授・北海道大学福原博士研究員から有益なコメント、情報をいただきましたことをここで感謝いたします。

参考文献

- 1) Markiewicz, W. J., Titov, D. V., Ignatiev, N., Keller, H. U., Crisp, D., Limaye, S. S., Jaumann, R., Moissl, R., Thomas, N., Esposito, L., Watanabe, S., Fiethe, B., Behnke, T., Szemerey, I., Michalik, H., Perplies, H., Wedemeier, M., Sebastian, I., Boogaerts, W., Hviid, S.F., Dierker, C., Osterloh, B., Böker, W., Koch, M., Michaelis, H., Belyaev, D., Dannenberg, A., Tschimmel, M., Russo, P., Roatsch, T., Matz, K. D., Venus monitoring camera for Venus express. *Planet Space Sci.* **55**, 2007. 1701-1711.
- 2) Nakamura, M., Imamura, T., Ueno, M., Iwagami, N., Satoh, T., Watanabe, S., Taguchi, M., Takahashi, Y., Suzuki, Makoto., Abe, T., Hashimoto, G. L., Sakanoi, T., Okano, S., Kasaba, Y., Yoshida, J., Yamada, M., Ishii, N., Yamada, T., Uemizu, K., Fukuhara, T., Oyama, K., Planet-C: Venus Climate Orbiter mission of Japan. *Planet Space Sci.* **55**, 2007. 1831-1842.
- 3) 河合滋: 「光学設計のための基礎知識」 オプトロニクス社, 2006年3月, pp83-84,
- 4) JAXA 宇宙科学研究本部 SES データセンター編: 「PLANET-C 飛翔実験計画書(第一分冊)」宇宙航空研究開発機構, 2010年2月, pp223-352,
- 5) Belton, M. J. S., Klaasen, K. P., Clary, M. C., Anderson, J. L., Anger, C. D., Carr, M. H., Chapman, C. R., Davies, M. E., Greeley, R., Anderson, D., Bolef, L. K., Townsend, T. E., Greenberg, R., Head III, J. W., Neukum, G., Pilcher, C. B., Veverka, J., Gierasch, P. J., Fanale, F. P., Ingersoll, A. P., Masursky, H., Morrison, D., Pollack, J. B., The Galileo solid-state imaging experiment. *Space Sci. Rev.* **60**, 1992. 413-455,
- 6) Ignatiev, N. I., Titov, D. V., Piccioni, G., Drossart, P., Markiewicz, W. J., Cottini, V., Roatsch, Th., Almeida, M., Manoel, N., Altimetry of the Venus cloud tops from the Venus Express observations. *J. Geophys. Res.* **114**, 2009, E00B43,
- 7) Jose L. V., VMC Instrumental kernel, <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=SPICE>
- 8) Acton, C.H., Ancillary Data Services of NASA's Navigation and Ancillary Information Facility. *Planet. Space Sci.* **44**, 1996. 65-70.

Appendix 金星縁を用いた円フィッティング

本研究で用いた円フィッティングの手続きについて述べる。円フィッティングではまず用意した画像の各画素に以下に示す Sobel フィルター

$$G_{jk} = |G_x| + |G_y| \quad (18)$$

$$G_x = F_{j+1,k+1} + 2F_{j+1,k} + F_{j+1,k-1} - (F_{j-1,k+1} + 2F_{j-1,k} + F_{j-1,k-1}) \quad (19)$$

$$G_y = F_{j-1,k-1} + 2F_{j,k-1} + F_{j+1,k-1} - (F_{j-1,k+1} + 2F_{j,k+1} + F_{j+1,k+1}) \quad (20)$$

を作用させ、各画素において G の値を求めた。ここで j, k は画素の位置をあらわし F_{jk} は画像の座標 (j, k) における輝度値を表す。Sobel フィルターは近似的に x 方向, y 方向微分に対応する。輝度値変化が大きいところほど Sobel フィルターをかけた画像(以後 Sobel 画像と呼ぶ)では大きな値を示すため、輪郭が強調された画像となる。

本研究では輝度値変化が最大の点、すなわち輝度値の微分値が最大となる点を円の輪郭と定義した。ここで Sobel 画像中に現れた輪郭の各 y 座標において、

$$g(x) = A \exp\left\{-\frac{(x-C)^2}{2B^2}\right\} + D \quad (21)$$

で表現されるガウシアン関数によるフィッティングを x 方向に行い、 $g(x)$ が最大値を取る x 座標を調べることによりサブピクセル単位で輪郭の座標を決定した。ここで A, B, C, D はそれぞれフィッティングパラメータである。

次に得られた輪郭の各座標 (x_i, y_i) ($i=1,2,\dots,n$) を使って円をフィッティングすることを考える。フィッティングすべき円は、 C_x, C_y をそれぞれ円の中心座標、 r を円の半径とすると

$$(x - C_x)^2 + (y - C_y)^2 = r^2 \quad (22)$$

であり, x が C_x よりも小さい領域にある弧に限定すれば

$$x = C_x - \sqrt{r^2 - (y - C_y)^2} \quad (23)$$

と表記される. 上記式から

$$L = \sum_i \left\{ x_i - \left(C_x - \sqrt{r^2 - (y_i - C_y)^2} \right) \right\}^2 \quad (24)$$

で表現される L を最小にするような条件を探索することで C_x, C_y, r を求めることができる.