衛星搭載全方位モニタカメラの開発*¹

Development of Omnidirectional Vision System for Spacecraft On-Orbit Monitoring

竹 家 章 仁*²・山 田 克 彦*³・松 岡 忍*⁴・伊地智 幸 一*⁵・中 村 修 治*⁵
Akito TAKEYA, Katsuhiko YAMADA, Shinobu MATSUOKA, Koichi IJICHI and Shuji NAKAMURA

Key Words: Omnidirectional Vision, 360 Degree Image, On-Orbit Monitoring, Spacecraft

Abstract: We have developed an OmniDirectional Vision system (ODV) using two reflecting mirrors to monitor a spacecraft on orbit. Recently, a spacecraft is loaded with many deployable structures. The ODV provides a panoramic image of 360 degree surroundings in real time and is possible to monitor two or more deployable structures at the same time. Moreover, the CCD and the lens are not exposed to cosmic rays, because these are covered with metallic mirrors. Therefore, a loss of the CCD element and a blur of the lens due to the cosmic rays are not occurred easily. We have designed the ODV for the Unmanned Space Experiment Recovery System (USERS) spacecraft which was launched on September 10, 2002. The optical characteristics of the ODV has been evaluated and the results show that the ODV can acquire a sharp image. Two ODVs were adopted as monitor cameras of the USERS. From the input images of the ODVs on orbit, the deployment of the paddles and the Capillary Pumped Deployable Radiator (CPDR) and the separation of the Re-entry Module (REM) were confirmed.

1. は じ め に

近年、衛星には、軌道上で展開される構造物として太陽電池パドルのみならずアンテナなど数多く搭載されている。これらの展開構造物が展開中などに故障した場合、従来搭載されている加速度センサや熱センサなどのセンサ情報だけでは、故障原因の究明に多くの時間を要していた。そこで、これら構造物を視覚的にモニタするためのカメラの搭載が要望されている。多くの展開構造物をモニタするためには、それぞれにカメラが必要となるが、搭載重量や電力の制限により、多くのカメラを搭載することは容易ではない。よって、複数の展開構造物を1台で同時にモニタするために、全方位を視野とする視覚システムが必要となった。

全方位を常時観測するために、1枚の回転対称な曲面鏡に映し出された全方位の映像をカメラで撮像する視覚システムが数多く提案されている。例えば、円錐鏡¹⁾、球面鏡²⁾、双曲面鏡^{3, 4)}、放物面鏡⁵⁾などのシステムがあげられる。これらのシステムには、非点収差と像面湾曲が生じるため、曲面鏡に映し出される像はボケてしまう。その状態で鮮明な画像を得るためには、カメラの絞りを絞ることなどにより被写界深度を深くする必要がある。しかし、光量の少ない環境下で絞ることができない場合、鮮明な画像を得ること

は難しくなる。また、得られる画像は1回反射された画像なので、左右反転してしまうという問題も生じる。

我々は、先に提案した主、副2枚の反射鏡からなる全方位視覚システム⁶⁾ (Omnidirectional Vision system: ODV) を応用して衛星搭載全方位モニタカメラを開発した。第1図に示すように、この全方位モニタカメラは反射鏡を2枚用いているので、1枚のみ使用しているシステムと比べて設計の自由度が高く、非点収差や像面湾曲を補正することが容易である。よって、絞ることなく鮮明な全方位画像を得ることができる。また、得られる画像は2回反射された画像で、左右反転することもない。

第2図、第3図に示すように、全方位モニタカメラは次世代型無人宇宙実験システム (Unmanned Space Experiment Recovery System: USERS)⁷⁾ に2台 (ODV1, 2) 搭載され、冗長系を構成している。そして、太陽電池パドルや展開ラジエーター (Capillary Pumped Deployable Radiator: CPDR) の展開、リエントリモジュール (Re-entry Module: REM) の分離をモニタするために使用された。

USERS は財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構が経済産業省及び新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託を受け、以下の目的で1995年より開発が進められた宇宙実験システムである。

- ・無人宇宙実験システムの開発
- ・高温超電導材料の結晶成長実験
- ・民生技術・部品の軌道上検証

サービスモジュール (Service Module: SEM) と REM から構成されており、2002年9月10日に H-IIA ロケットに

*¹ © 2007 日本航空宇宙学会

平成18年6月8日、26th ISTS において発表。平成19年4月23日原稿受理

*² 三菱電機(株)先端技術総合研究所

*³ 名古屋大学大学院工学研究科

*⁴ 三菱電機(株)鎌倉製作所

*⁵ (財)無人宇宙実験システム研究開発機構

第 1 図 衛星搭載全方位モニタカメラ

第 4 図 結像状態比較

第 2 図 次世代型無人宇宙実験システム (USERS) 宇宙機

第 3 図 USERS の構成

より打ち上げられ、軌道高度約 500 km の円軌道上で運用された。SEM は、REM や実験装置への電力や通信サービスを供給し、姿勢や軌道の制御を行う衛星バスシステムである。REM は、軌道離脱モータ等を搭載しているプロパルジョンモジュール (Propulsion Module: PM) と、実験終了後の超電導材料を搭載し地上に帰還して回収されるリカバリービークル (REcovery Vehicle: REV) から構成されている。

本論文では、まず、全方位モニタカメラの構造と特徴について述べる。続いて、全方位モニタカメラの開発に関して設計方法、搭載位置の検証、設計と製作、光学系の評価結果について述べる。最後に、軌道上での USERS における撮像結果について述べる。

2. 全方位モニタカメラの構造と特徴

今回我々が開発した全方位モニタカメラは常時全周のパノラマ画像を得ることができる視覚システムである。第 1 図に示すように、この全方位モニタカメラは、対向配置された 2 枚の回転対称な反射鏡、レンズ、CCD カメラから構成されている。全周の光景からの入射光が主鏡、副鏡の順にそれぞれの鏡面で反射され、主鏡の開口部を通過してカメラのレンズに入射するように構成され、副鏡により結ばれた像をカメラで撮像することにより全周のパノラマ像が得られる。この視覚システムを構成している反射鏡は屈折レンズと比べて非球面化が容易で、この特長により屈折光学系では実現困難な種々の視野、射影が比較的容易に実現できる。また、CCD とレンズは金属反射鏡によりカバーされていて、宇宙線による CCD 画素の損傷やレンズの変色が生じにくい構造となっている。

第 4 図に我々が開発した全方位モニタカメラと従来型である放物面鏡視覚システムの比較図を示す。従来システムの場合、反射鏡が 1 枚構成なので設計の自由度が低く、反射鏡により結ばれる虚像の像面は平坦にならない。一方、全方位モニタカメラの場合、反射鏡の 2 枚構成なので設計の自由度が高く、副鏡により結ばれる虚像の像面を従来システムより平坦にすることが可能である。像面が平坦であるほど CCD カメラの焦点が合わせやすいので、全方位モニタカメラのほうがより鮮明な画像を得ることが可能である。

3. 全方位モニタカメラの開発

3.1 設計方法 主鏡、副鏡ともに回転対称であるから断面形状を決定すれば形状が決定する。第 5 図に全方位モニタカメラ反射光学系の設計方法を説明するための図を示す。第 5 図において、視点 O を座標の原点とし、横軸を x 軸、縦軸を反射鏡の回転対称軸である z 軸とする。ここで、以下の条件を与えることにより、主鏡の断面形状が一意的に決まる。

- 条件 1 主鏡への入射光の入射範囲 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$,
視点 O への反射光の入射範囲 $\phi_{\min} \sim \phi_{\max}$,
 θ と ϕ の関係 (射影) $\theta = g(\phi)$
- 条件 2 副鏡の断面形状 $f_2(x)$
- 条件 3 主鏡の内周上の点 M_1 の位置

第5図 設計方法

上記の条件にそって主鏡の断面形状 $f_1(x)$ を求める．第5図で示すように，光線が点 P_1 ，点 P_2 で反射され，視点 O に入射する場合について考える．点 P_1 ，点 P_2 の座標をそれぞれ (x_1, z_1) ， (x_2, z_2) とし，入射光ベクトルを A ，点 P_1 での反射光ベクトルを B ，点 P_2 での反射光ベクトルを C とし，点 P_1 ，点 P_2 における反射面の法線ベクトルをそれぞれ N_1 ， N_2 とすると，これらの成分は次式のように表される．

$$A = (-\sin \theta, -\cos \theta) \quad (1)$$

$$B = (x_2 - x_1, z_2 - z_1) \quad (2)$$

$$C = (-x_2, -z_2) \quad (3)$$

$$N_1 = (-f'_1(x_1), 1) \quad (4)$$

$$N_2 = (f'_2(x_2), -1) \quad (5)$$

ここで， $f'_1(x_1)$ は $f_1(x)$ の $x = x_1$ における1階の導関数， $f'_2(x_2)$ は $f_2(x)$ の $x = x_2$ における1階の導関数である．これらのベクトルには反射の法則により以下の関係が成り立つ．

$$\left(A + \frac{B}{|B|}\right) \cdot N_1 = 0 \quad (6)$$

$$\left(\frac{B}{|B|} + \frac{C}{|C|}\right) \cdot N_2 = 0 \quad (7)$$

式(6)，(7)と条件1，2より， $f'_1(x_1)$ は (x_1, z_1) の関数により表されるので，この式を M_1 から数値積分することにより主鏡の断面形状 $f_1(x)$ を求めることができる．この詳細については，文献(6)を参照されたい．

3.2 搭載位置の検証 USERS では，全方位モニタカメラ2台により冗長構成をとるので，各全方位モニタカメラは，それぞれ同時にパドル，CPDR，REMすべてをモニタできる位置に搭載されなければならない．それゆえ，第6図に示すように，垂直視野角が50度 ($\theta = 90 \pm 25$ 度)，ODV1がSEM上のREMが結合されている面に，ODV2がその側面に搭載されることになった．各全方位モニタカメラの取り付け位置，角度が異なるのは，ODV1ではREM・SEM

第6図 全方位モニタカメラの搭載位置と視野

(a) キューブ環境マップ

(b) 模擬撮像画像

第7図 模擬撮像画像の生成

結合部が，ODV2では分離後に離れ行くREMが映るようになるためである．

全方位モニタカメラがこれら構造物すべてをモニタできることを確認するために，全方位モニタカメラの撮像画像を模擬作成するためのソフトウェアを開発した．まず，第7図に示すように，CGソフトによりUSERSのCADデータから全方位モニタカメラを視点とするキューブ環境マップを生成する．キューブ環境マップとは，全方位モニタカメラの周囲のシーンを全方位モニタカメラが立方体の中心にあるかのように表現した場合の，立方体内側各面に貼られるテクスチャ画像の集合であり，水平・垂直視野角が90度で，上下左右前後方向の6枚の画像からなる．続いて，我々が開発したソフトウェアにより，このキューブ環境マップから全方位モニタカメラの模擬撮像画像を生成する．第8図，第9図にODV1およびODV2の模擬撮像画像を示す．これらの画像から，各全方位モニタカメラで構造物すべてをモニタできることを確認した．

3.3 設計 「条件1」の入射光の入射範囲を $\theta = 65 \sim 115$ 度，反射光の入射範囲を $\phi = 2.759 \sim 7$ 度，射影を超広角光学系で最も採用されている等距離射影（光線の入射する角度 θ と画面中央からの距離が比例する射影）と設定した．「条件2」の副鏡断面形状を，

$$\left(\frac{x-p}{a}\right)^2 + \left(\frac{z-q}{b}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

で表される楕円の一部分とし，この形状は扁平率 $r_{\text{flat}} (= (a-b)/a)$ が与えられることで，主鏡の内，外周上の点 $M_{1,2}$ と副鏡の内外周上の点 $S_{1,2}$ の位置から一意に決まる．

第 8 図 ODV1 の模擬撮像画像

第 9 図 ODV2 の模擬撮像画像

よって, $\{r_{\text{flat}}, M_{1,2}, S_{1,2}\}$ のパラメータスタディーにより非点隔差 (像面の z 軸方向の厚み) が最も小さくなるように最適設計を行った。

最適設計の結果, $h = 0.525$, $M_1 = (7.799, 28.629)$, $M_2 = (39.979, 3.725)$, $S_1 = (2.948, 61.131)$, $S_2 = (7.576, 61.704)$ (単位はすべて mm) と設定したとき, 非点較差が $2.133(78.302 - 76.169)$ mm と最も小さく, つまり, 像面が最も平坦になった。第 10 図に設計結果を示す。

3.4 光学系の評価 前節で示した設計結果において 1/3 インチ CCD を使うとすると, 視点から見た副鏡の見込み角が約 14 度となるので, 垂直画角約 15.7 度が得られる焦点距離 $f = 12$ mm のレンズを使うこととした。このレンズを用いた場合の画像の評価を行う。この設計結果から求められた像面がこのレンズの被写界深度に含まれるならば, 全面で焦点の合った鮮明な画像が得られる。被写界深度の近点 P_{near} , 遠点 P_{far} は以下の式で求められる。

$$P_{\text{near}} = \frac{f^2 s}{f^2 + cF(s - f)} \quad (9)$$

$$P_{\text{far}} = \frac{f^2 s}{f^2 - cF(s - f)} \quad (10)$$

第 10 図 全方位モニタカメラの断面形状

第 1 表 全方位モニタカメラの仕様

水平画角	全周 360 度
垂直画角	50 度 ($\theta = 90 \pm 25$ 度)
撮像素子	1/3 インチカラー CCD
画素数	33 万画素
露光	自動及びマニュアル, AGC 付き
絞り	$F 4.2$ 固定
シャッタースピード	1/30 ~ 1/10000
外形	W170×H180×D170 mm
質量	1.7 kg

第 11 図 全方位モニタカメラの外観

ここで, f はレンズの焦点距離, s は焦点をあわせた距離, c は許容錯乱円径, F は絞り値である。 f を 12 mm, s を 77.236 mm, c を 1/3 インチ CCD の画素サイズである $7.4 \mu\text{m}$ として被写界深度を計算すると, $F = 4.2$ の場合, (9) 式, (10) 式より $(P_{\text{near}}, P_{\text{far}}) = (76.164, 78.339)$ mm と求められ, $(76.169 \sim 78.302)$ mm に存在する像面はすべて被写界深度 $(76.164 \sim 78.339)$ mm 内に含まれる。絞るほど被写界深度は深く (広く) なるので, $F > 4.2$ のとき得

第12図 ODV1の撮像画像

第14図 ODV2の撮像画像

第13図 ODV1の補正画像

第15図 ODV2の補正画像

られる全方位画像は全面で焦点のあった鮮明な画像となることがわかる．よって、絞りを $F = 4.2$ と設定することとした．

3.5 製作 製作した全方位モニタカメラの仕様を第1表に、外観を第11図に示す．2枚のミラーは超精密旋盤により製作したアルミの削り出しで、反射面の酸化防止や保護のため MgF_2 コーティングされている．CCDとレンズには、反射鏡などの金属にカバーされて直接宇宙線にさらされることはないで、防犯カメラ用に市販されている民生品を放射線試験や熱試験等を経た上で使用した．また、副鏡の支持には、従来、透明なプラスチックカバーを用いていたが、打ち上げ時の振動等を考慮し、3本のチタン製のステイを用いることとし、反射防止のために表面をつや消し仕上げとしている．ステイは視野の一部を遮るが、パドル、CPDR、REMを遮らない位置に配置されている．

4. 軌道上での撮像結果

衛星搭載全方位モニタカメラは、衛星の運用が終了した2005年2月25日までの約2年半、宇宙線による画素の損傷などのトラブルもなく、すべてのミッションを終えることができた．撮像例を第12～16図に示す．第12図はODV1

の撮像画像である．撮像画像は中心から外周に向かって仰角が大きくなる円環状画像で表示されるので、歪が大きく目視による被写体の認識が難しい．我々は、この円環画像の視認性を向上させるため、円筒面に投影することで歪の少ないパノラマ画像に補正するためのソフトも開発した．第13図にこのソフトによる第12図の補正画像を示す．この画像からは、展開したパドルや分離前のREMを比較的容易に確認することができる．第14図、第15図にはODV2の撮像画像および補正画像を示す．この図からも、展開しているパドルやCPDR、分離前のREMが確認できる．また、第16図は、REM分離後にODV2により撮影された補正画像を時系列に並べたものであり、これら図からREM分離を確認することができる．

5. ま と め

我々は衛星搭載全方位モニタカメラを開発した．この全方位モニタカメラは、2枚の回転対称の反射鏡、CCDカメラ、レンズから構成されている．常に周囲360度のパノラマ画像を得ることができるので、複数の展開構造物を同時にモニタすることが可能である．今回、全周360度×垂直50度の視野角を持つUSERS用の全方位モニタカメラを設

第 16 図 ODV2 の補正画像 (REM 分離)

計し、光学系の評価結果からは鮮明な画像が得られることを確認した。また、全方位モニタカメラは冗長系を構成するため USERS に 2 台搭載されることとなり、それぞれの搭載位置からパドル、CPDR、REM すべてがモニタできることをシミュレーション検証により確認した。これらの全方位モニタカメラが搭載された USERS は 2002 年 9 月 10 日に打ち上げられた。ミッション終了となる 2005 年 2 月 25 日までの間、全方位モニタカメラはトラブルを起こすことなく軌道上で機能し続け、パドルやラジエタの展開、REM の分離のモニタに利用されることで、すべての目的を達成した。

参 考 文 献

- 1) Yagi, Y. and Kawato, S.: Panorama Scene Analysis with Conic Projection, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '90, 1990, pp. 181-187.
- 2) Hong, J., Tan, X., Pinette, B., Weiss, R. and Reisman, E. M.: Image-Based Homing, Proc. of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 620-625.
- 3) Yamazawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection, Proc. of the IEEE/RSJ Conf. on Intelligent Robotics and Systems, Yokohama, 1993, pp. 1029-1034.
- 4) Nayar, S. K.: Catadioptrics Omnidirectional Camera, IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, pp. 482-488.
- 5) Ishiguro, H.: Development of Low-Cost Omnidirectional Vision Sensors and Their Applications, Int. Conf. Information Systems, Analysis and Synthesis, 1998, pp. 433-439.
- 6) Takeya, A., Kuroda, T., Nishiguchi, K. and Ichikawa, A.: Omnidirectional Vision System Using Two Reflecting Mirrors, Proc. SPIE, Vol. 3430, San Diego, California, 1998, pp. 50-60.
- 7) Ijichi, K. and Kanai, H.: Unmanned Space Experiment Recovery System (USERS), Proceedings of 24th International Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, 2002, pp. 732-736.