

／気球空撮装置による洞窟教会を含む周辺の空撮

宮下明珠*

Aerial Photo of the Cave Churches Using Balloon Aerial Shoot Instrument

Mitsumi Miyashita*

It is important to take a photo from sky for recording the environment around the cave church. The balloon aerial shoot instrument was used in this year's field research. There was a time lag from releasing the shutter to taking a photo, and difficulty to keep balance of balloon. However, we successfully could take photos from sky with this instrument. As a result, we found that the balloon aerial shoot instrument is very useful for our project.

Key Words: balloon, aerial photo, radio control

キーワード: 気球, 空撮, ラジコン

1. はじめに

1.1 空撮の必要性

南イタリアにおける本プロジェクトにおいて、調査対象である洞窟教会の天井部や床面を含む内壁や外壁の全面を写真撮影することは、各種の調査データを記録保存する上で最も基本的な作業である。それは各種の計測及び記録データを位置とともに記録する唯一の「場」だからである。しかし、教会の上部については上るのが困難な場合が多く、たとえ上ることができたとしても、それ以上に撮影位置を高くすることが難しいため、一度に狭い範囲しか撮影できず、ましてや教会上部の地表を真上から撮影することなどはほとんど不可能と言わざるを得ない。

たとえば、昨年度の調査地の一つであるサン・ヴィート・ヴェッキオ教会一帯は凝灰岩の石切場となり、数世紀にわたって大量の石が切り出され続けた結果、地表レベルが数メートルも下がり、結果として教会部分だけが新たな地上に取り残された形になっている。したがって、今は遠くに見える石切場の崖のポイントと教会上端のポイントが、かつては同じレベルで連続していたはずである[1]。このような場合、周囲の地形も調査して記録することが必要だが、地上に立った位置からでは教会周辺を広く見渡して記録することは容易ではない。そのため、教会建設当時の中世の地形をある程度の確かさで推測するには、まったく新たなタイプの情報なり資料なりが必要となるのである。とはいえ、このような情報は歴史的文献資料中には期待できないから、教会上部の撮影と教会周辺の地形等の情報収集については上空からの空撮という新たな調査項目を立てて補うことにした。

1.2 空撮装置の種類

これまで空撮といえば、専門業者に委託してのヘリコプターや小型飛行機による撮影が一般的であった。しかし、デジタルカメラの小型化及び高性能化、ラジコン装置の多様化などにより、私たち自身の手で直接に撮影を行うことができる安価な装置が登場してきた。空撮はまず、撮影する高度の違いによって撮影手段が異なるが、一般には大気圏外からの撮影、高度 300m 以上からの撮影、高度 300m 以下からの撮影の 3 つに大別できる。なお、この 300m という境界は航空法によるもので、決してラジコンなどにおけるテクニカルなポイントではない。言うまでもなく、大気圏外からの撮影には人工衛星が利用され、高度 300m 以上からの撮影には飛行機やヘリコプターが利用されることが多い。そして、300m 以下の撮影には凧、気球、小型のラジコンヘリやラジコン飛行機などが多く利用される。

上述のように、本プロジェクトにおいて空撮を実施する目的は、洞窟教会上部の現状記録と、その周囲約 200m 四方の地形や地理的環境を知るためである。そのため、高い高度から広範囲に撮影するよりは、ある程度低い位置からディテールのしっかりした撮影の方が望ましい。また、目的に応じて画角や俯瞰の角度を自由に変えて写真撮影できることも、必要不可欠な条件の一つである。このような諸条件を満たす 300m 以下の空撮装置について情報収集したところ、可能性のある選択肢は以下の 3 つに大別できた。

(1) 凧を使った空撮 (カイトフォト)

19 世紀後半からさまざまな空撮法が開発されたが、カイト・エアリアル・フォログラフイー (カイトフォト) と呼ばれる凧を使った空撮もその一つである。その後は飛行機の発明進化により、凧による空撮法はしだいに衰退していった。しかし、15 年ほど前からヨーロッパと日本で低空域の簡易空撮法として注目度が急上昇してきている。このカイトフォトは、凧によりカメ

* フレスコ壁画研究センター

* Research Center of Italian Mural Paintings

ラを上空に持ち上げて撮影するという非常にシンプルな方法なので、コスト面や運搬方法において利点がある。また、他の方法に比べて風に強いことも利点として挙げられる。実際にこの空撮方法は遺跡調査、生態調査、地質調査などで使用されており、過去には東京水産大学が南極オキアミ調査で、北海道大学がグリーンランドの地形調査で、京都平安博物館と古代学協会がイタリアのポンペイ遺跡発掘調査で使用したという実績がある[2]。

(2) ラジコン操作の飛行機・ヘリコプター

小型無人機による空撮方法として、最も広く利用されているものである。一般的には、操縦者を中心に半径 200m 以内では装置の方向や傾きを見て操縦することができるので、希望するアングルからの撮影が比較的可能であると言える。操縦者が装置を自在に上昇、下降させることができ、その装置能力に応じて重量のあるカメラを装備することができる。しかし、風に弱いため、強い風にあおられるとバランスを崩して落下する危険性がある。また、飛行時間は模型用で 10～15 分とやや短めである。近年では、飛行機より風に強いとされるヘリコプターで、プロペラ（ローター）を複数つけて機体の安定を維持しやすくなったマルチローターヘリが数多く開発されてきている。被災地域の記録のために早稲田大学が[3]、シラサギの生態調査に筑波大学[4]などがこれを利用している。

(3) 気球（バルーン）

ヘリウムガスを充填した気球は、取り扱いが簡単で騒音もなく、最も安全な空撮方法と言われている。しかし、ヘリウムガスの調達が困難なこと、気球にガスを充填するなどの準備に時間がかかること、風の強い時や場所では使用できないことなどが欠点として挙げられる。近年では、バルーンの素材を軽量化することで、必要なヘリウムガスの量を少なくする工夫もなされている。また、デジタルカメラと小型 CCD を気球に搭載することで、地上の液晶モニターに映る撮影画像をリアルタイムで見ながら気球に装備したカメラをラジコンで操作して撮影できるようになった。高度は数 m から 150m 程度まで自由に変えて撮影ができ、ヘリウムガスが抜けるまで長時間の撮影が可能である。関西大学ではセキュアライフ創出プロジェクトの一環として気球空撮システムを開発しており[5]、北海道工業大学は弘前市と共同で住宅密集地の除排雪状況の調査[6]に、東北農業研究センターでは作物の生育調査[7]に使用している。

以上のような空撮装置についての選択肢のうち、海外（南イタリアの各州）での調査においても絶対的安全性を保証し、当該の役所から使用許可を受けられるもので、かつ操作が容易であるという観点から、本プロジェクトでは気球による空撮を試みることにした。

1.3 気球空撮装置の概要とその特徴

今回使用することにしたのは、簡易型空撮気球「ひばりは見た！」（アイテック株式会社）のモニタリングパッケージで、撮影アングルを地上のパソコンでモニタリングしながら、カメラの角度調節や遠隔制御が可能なモデルである[8]。主な仕様は Table 1 の通り。

Table1 気球空撮装置の主な仕様

機体サイズ	300cm x 直径 70cm
機体体積	0.9m ³
機体重量	215g
空撮可能高度	150m
ゴンドラ重量	456g
電波方式	2.4GHz, 3ch
映像送受信電波方式	デジタル 2.4GHz 帯
撮影範囲	200m x 150m (高度 150m から広角 26mm レンズのカメラで撮影)

主な構成部品は次の 5 つ。

(1) 気球 (Fig.1) : ヘリウムガスを充填し、空撮を可能にする気球。気球の前後にハトメがついており、係留糸をつなげられるようになっている。後部には機体を安定させるための垂直尾翼がある。

(2) ゴンドラ (Fig.2) : デジタルカメラを搭載する骨組み。ラジコン操作によって、ゴンドラが水平あるいは垂直方向に回転する。また、カメラを取り付けるホルダーの後ろには映像送信機が取り付けられている。

(3) ラジコン (Fig.3) : 地上からカメラアングルを自由にコントロールし、シャッターを制御。左にあるスティックでカメラを垂直方向に傾け、右にあるスティックでカメラを水平方向に回転させ、左上にあるスイッチでシャッターを切る。

(4) ロッドとリール (Fig.4) : 気球の高度を制御する、いわゆる釣り竿。ヘリウムガスで上昇する気球の高度をコントロールし、回収時にはリールで係留糸を巻き上げる。

(5) 映像受信機 (Fig.5) : 映像送信機から送信されるデジタルカメラの画像を受信。AV 端子を USB に変換するコードを使用すれば、パソコンでリアルタイムのモニタリング撮影が可能となる。



Fig.1 気球



Fig.2 ゴンドラ



Fig.3 ラジコン



Fig.4 ロッドとリール

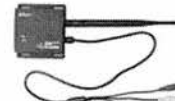


Fig.5 映像送受信機

2. 2回にわたって実施した学内実験から考えた工夫

9月の南イタリアにおけるフィールド調査を前に、5月22日と29日の両日、学内（金沢大学角間キャンパス）で空撮実験を行い、担当者の分担作業と操作全般にわたる確認をした。

2.1 機体の安定性を高める工夫

仕様書には、風速 2m/秒まで掲揚できると書かれているが、突然の強い風で係留糸が切れる可能性がある。気球に取り付けたカメラは地上のパソコンでそのファインダーをのぞくことができるとはいえ、同時にパソコンで映像を録画しているわけではない。ラジコンではカメラの向きやシャッターを操作するだけで、撮影画像はすべてカメラ内部に挿入されている SD カードに記録保存される仕組みになっているため、撮影した画像は機体を回収しないと得ることができない。せっかく撮影しても画像が回収できなければ何の意味もない。そこで、たとえ係留糸が切れても機体を確実に回収できるよう、係留糸を機体の前後 2 か所に取り付けた。1 本の係留糸では機体をつなぎ止めておくだけであったが、機体を 2 か所に固定した係留糸でつなぐことにより、機体は突風や乱気流の中でも比較的安定した姿勢を保つようになった。気球は前後に長く、後部に垂直尾翼があるため風に対して風上を向く。その機体の方向を見ながら、機体前部とつないだロッドを持つ人は風上に、もう一方の人は風下に立って、互いの係留糸が絡まないように注意した[Fig.6,7].



Fig. 6 係留糸を制御する人の位置を確認



Fig. 7 風によって向きを変える機体を見ながら機体を制御する人も位置を変える

2.2 役割分担

今回、係留糸を 2 本にしたことで、気球による空撮にはラジコンを操作する者が 1 人、係留糸で機体を安定させる者が 2 人

で最低でも計 3 人が必要となった。しかし、撮影を安全かつ迅速に行うにはさらに多くの人数が必要である。ラジコン操作は主にパソコンのモニターを見ながら行うため、機体の位置を確認することができない。風に流されて、撮影したい場所の上空から機体が遠く離れてしまった場合や、複雑な風の流れにより機体が回転しているときなど、シャッターチャンスがうかがってモニターから目を離すことのできないラジコン操縦者は刻々と変化する機体の様子を知ることができない。そこで、そばで機体の様子を操縦者に伝える者がいれば、操縦者はカメラの操縦に専念できることがわかった[Fig.8]。また、機体を回収する際、浮力を失って機体が突然に落下する前にゴンドラを受け取るが必要である[Fig.9]。リールで係留糸を巻きながら機体を回収するとき、風によっては機体が急降下する場合がある。機体に取り付けたゴンドラにはカメラのほか画像の送信機などの精密機械が搭載されているため、地上に落下させるわけにはいかないのである。



Fig. 8 機体の様子をラジコン操縦者に伝える



Fig. 9 ゴンドラが地上に落下しないように受け取る

2.3 ヘリウムガス

ヘリウムガスは無味・無臭・無毒のガスであるが、日本で購入したヘリウムガスのボンベ（缶）を海外に運搬することは難しい。そのため、南イタリアで使用する場合、日本からインタ

一ネットでイタリアの会社にヘリウム缶を注文しておき、現地のホテルでそれを受け取るという方法をとった。ヘリウム缶の使い方、捨て方などを考え、学内実験の時から現地で使用できるメーカーを選んだ。今回用いたヘリウム缶は、アメリカ SAG パルーン社のパルーンタイム (400L) を選んだ。SAG パルーン社のパルーンタイムは、ヘリウム缶のバルブを緩めて先端のノズルを曲げるとヘリウムガスが放出される仕組みで、気球のガス注入口にノズルを差し込めば、ガス注入の際にヘリウムガスが周囲に漏れることのないタイプである。また、ヘリウム缶上部にある小さなへこみにマイナスドライバーとハンマーで穴を開ければ中の気体は放出され、そのまま不燃物として一般ゴミに捨てられるという利点もある。

2.4 気球の輸送

9月実施のフィールド調査は2か所で、両調査地間の距離は2km。それは徒歩で30分という距離ではあるが、ヘリウムガスを充填した気球を抱えての移動は難しい。そこで、一度いっぱい充填して使用した気球のヘリウムガスを次の調査地に移動する際には少し抜いて、マイクロバスの入口から乗車させられるくらいの大きさにまで小さく萎(しぼ)ませる必要があった。と同時に、持ち運びや価格も考えてヘリウム缶の量を最小限にするよう工夫した。

学内で行った実験では、気球にガスをいっぱい充填するのにヘリウムを約2.5缶要した。これは合計すると約1000リットルになり、仕様書に示されている機体体積900リットルより少し多いが、その時の気温や気圧に影響されてのことと思われる。この経験から、実際のフィールド調査においても1度の充填に1000リットルを要すると考えるべきだと判断し、現実的仕様書の数値を書き換えた。本センターチームが移動するマイクロバスのトランクサイズを横180cm x 高さ40cm x 奥行き60cmとすると、約400リットルの気体体積の気球を入れることができる。そこで、1つ目の調査地で機体に1000リットルのヘリウムを充填して空撮した後、600リットル分のヘリウムを気球から抜いてマイクロバスのトランクに入れて移動する。そして、2つ目の調査地で600リットル分のヘリウムガスを再び充填して空撮を行うことにした。

ここで、機体体積が400リットルというのはどういう状態なのか考えてみた。空気は0℃、1気圧、1m³のとき1.293kgで、ヘリウムは0.178kgである。仮に気温が15℃とすると空気は1.226kg、ヘリウムは0.169kgとなり、1m³あたり1.06kgの浮力があると計算できる。つまり、400リットルのヘリウムが入った機体は424gの浮力があるということになる。ゴンドラの重量が456gなので、ゴンドラが地面に着くところまでヘリウムガスを抜いていけば、機体の体積を約400リットルにすることができる。実際には500mlのペットボトルに約8割の水を入れ、ゴンドラの代わりに吊り下げて目安とした。

3. 撮影高度の計測方法

自分たちで空撮をするにあたり、それぞれの写真に撮影高度も記録することにした。

3.1 目安

係留糸は、0-10mは青、10-20mは赤、20-30mは紫、30-40mは黄緑、40-50mは緑というように10mごとで色が変わるので、その色を記録することで、フィールドでの撮影高度の目安とした。

3.2 理論値の計算方法

Fig.10は、地上71cmの距離から画角を計測するための定規を撮影したものである。地上にかなり近い距離からの撮影でも、画像の幅に合わせて定規を撮影することは難しい。そこで、画像に写し込んだ定規の位置座標から写る距離を算出した。まず、画像をWindowsのペイントソフトで読み込み、定規の目盛りで20cmと80cmの位置を読み取ると、それぞれ(3790, 2389)、(1127, 2360)となった。このことから、三平方の定理を利用すると、60cmの距離が画像では2663.2ピクセルで表示されることがわかる。撮影された画像は高さ3240 x 幅4320ピクセルなので、横方向で97.3cmが写る計算になる。つまり、気球に搭載するデジタルカメラは、地上から71cmの高さから撮影すると97.3cmが写る画角であることがわかった。Fig.11は、学内実験で撮影した画像である。左上にある直方体の形をした人工池の長辺は15mであった。先述のようなピクセルによる位置座標から1033ピクセルが15mに相当し、画像の幅が4320ピクセルであることから幅62.7mが撮影されていると計算できる。そして、先ほど導き出した撮影高度と画角の関係比からこの画像は、地上から45.7mの位置で撮影したものと推定することができる。

この方法を用いれば、空撮後で、画像に写っている地上の2点間の距離を実際に測定することにより、撮影された写真の高度を算出することが可能となるわけである。

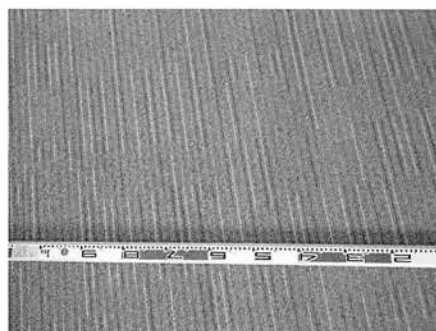


Fig. 10 地上82cmから撮影した定規



Fig. 11 学内実験で撮影した画像

4. 結果

今年度は、昨年度の調査地であるグラヴィーナ・イン・プーリアに戻って、サン・ヴィート・ヴェッキオ教会（元の場所）とパードレ・エテルノ教会の2か所で空撮を行った。もちろん、Google map でも上空からの画像を入手することができるが、その画像では撮影時期や高度を知ることができない。また、天候によって画像に雲がかかっている場合、Google map ではそのまま掲載されているので、雲の下となった地上の様子を知ることができない。

今年度の調査地であるグロッターリエでは、当該の文化担当官を介して気球空撮装置の安全性について説明したにもかかわらず、最終的に空撮許可を得ることができなかった。しかし、地元航空警備隊の協力を得て、有人ヘリコプターによる空撮写真を提供してもらうことができた。本センターが実施した気球空撮装置による撮影画像、Google map に掲載の画像、有人ヘリコプターによる空撮画像をそれぞれ比較し、本調査に対する気球空撮装置の適性を以下に示したいと思う。

4.1. サン・ヴィート・ヴェッキオ教会（元の場所）



Fig. 12 上空 34.9m から撮影



Fig. 13 Google map の画像

4.2. パードレ・エテルノ教会



Fig. 14 上空 24.3m から撮影

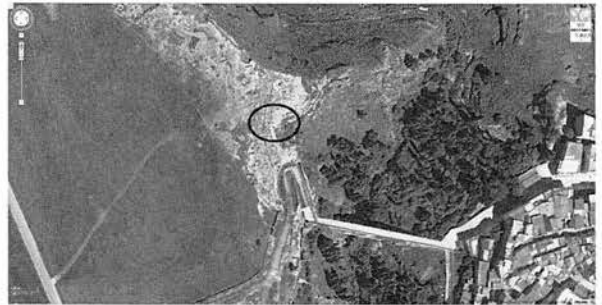


Fig. 15 Google map の画像

4.3. グラヴィーナ・ディ・リッジョ東教会



Fig. 16 有人ヘリコプターによる空撮画像



Fig. 17 Google map の画像

4.4. 近年発見された教会

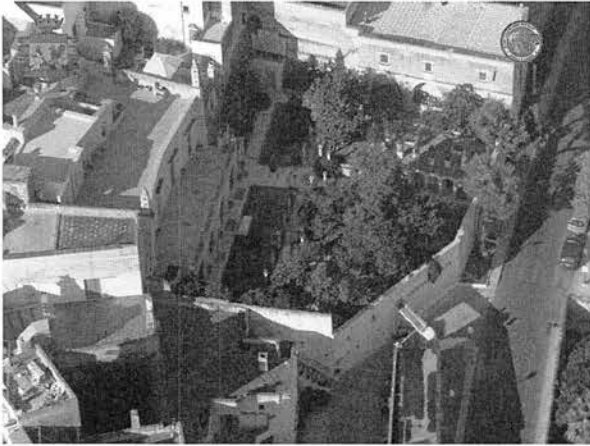


Fig. 18 有人ヘリコプターによる空撮画像

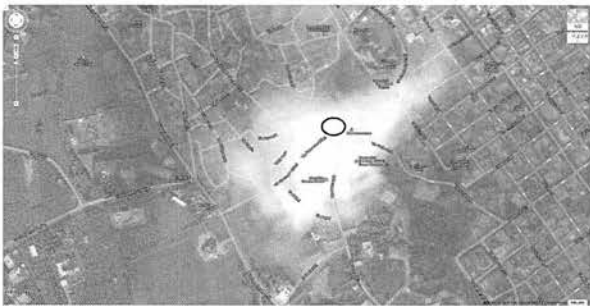


Fig. 19 Google map の画像

5. 今後の課題

今年度の調査地であるグロッターリエでは空撮許可を得ることができなかった。これはガスボンベと言えれば危険と思ひ込み、ヘリウムガスの安全性について理解してもらえなかったこと、近くに航空警備隊基地があるため気球を上げる高度がかなり制限されていること、調査地の1か所は旧市街地にあつて密集した家屋や電線が問題で気球を上げるには危険だと判断された。今回の経験から、安全で簡便な気球による空撮でも、調査地の立地条件によっては空撮許可が下りなかったり、実施に大きな制限を受けたりする場合もあるということがわかった。

無人の機器を無線操作して空撮する場合、カメラの回転やシャッター操作の指令はラジコン無線で上空のゴンドラに送られる。そのため、ラジコン自体のスペック、ラジコンからゴンドラまでの距離、周囲の電波状況によって操作から実行までに数秒のタイムラグが生じ、的確なシャッターチャンスを捉えることは難しい。今回の実施では、そのタイムラグがシャッターチャンスを失する致命的要因であることを痛感させられた。モニターを見ながらシャッターチャンスをうかがう操縦者が、この数秒のタイムラグを予測して操作することはほとんど不可能である。今後は、操縦者のそばにいる者が機体の動きを目視で予測し、操縦者に早めの指示を与えることで、シャッターチャン

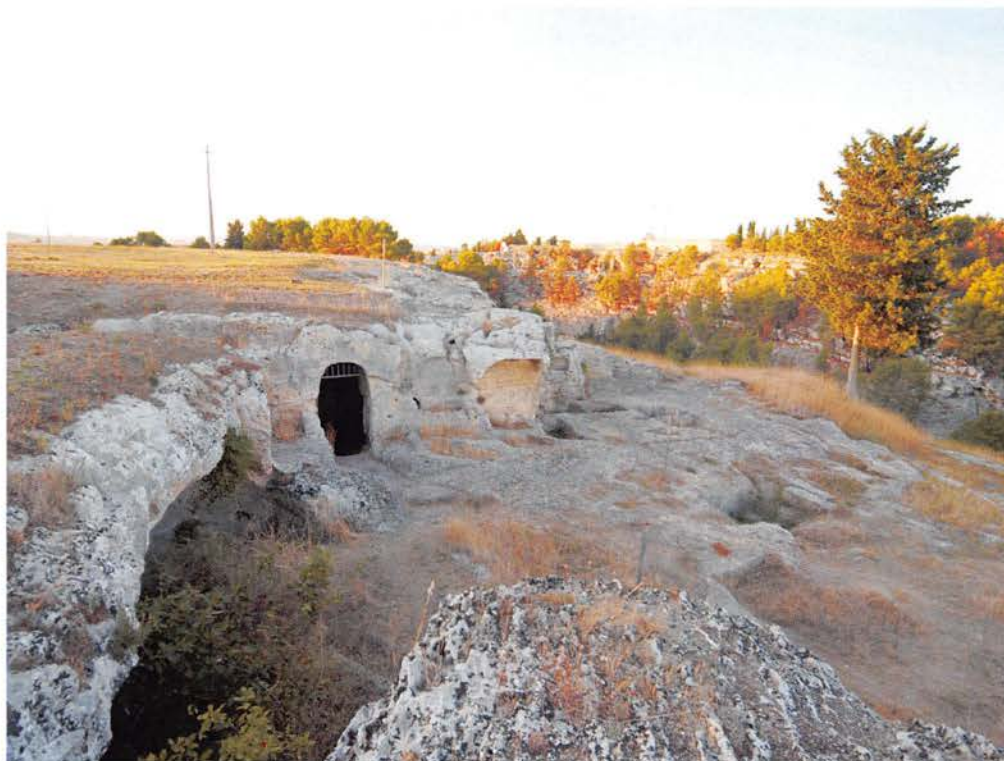
スのタイミングをもう少しうまくはかれるようになるかもしれないと考えている。

また、学内での実験では風が弱い日を選んで空撮を行ったが、実際に洞窟教会のあるフィールドは峡谷の近くであるため、下から吹き上げてくる複雑な気流に気球が何度もバランスを崩し、急降下したり、回転したりした。そのような不安定な状況が続いても撮影が行えるように、気球のバランスに左右されないよう、もう少しカメラを安定させる必要がある。船舶や航空機にあるジャイロスコープや羅針盤などは、地平線に対して常に垂直を向くようになっている。これは、ジンバルと呼ばれる軸を中心として物体を回転させる回転台を利用したもので、軸が直交するように2つの回転台を設置すると、内側の回転台に載せられた物体の向きを常に一定に保つことができる仕組みである。この仕組みを利用してカメラを安定設置するために設計されたジンバルが数多く作られており、空撮用ヘリコプターにも多く搭載されている。ヘリウムガスで上昇させる気球空撮装置はヘリウムガスの浮力によって搭載できる重量が制限されるため、もし気球による空撮に利用しようとするれば、相当に軽量のジンバルが必要になってくる。今後は、カメラを安定させる一つの方法として、ジンバルの利用も視野に入れて考えていきたい。

参考文献

- [1]宮下孝晴・宮下睦代：洞窟教会壁画の現状と美術史的考察 2011 年度調査研究報告書。金沢大学フレスコ壁画研究センター。p.31-62. 2012 年
- [2] <http://kitephoto.web.fc2.com/jkpa/outline/outline.html>
- [3] <http://ringring-keirin.jp/shinsei/document/list/koueki/h23/pdf/23-4-009.pdf>
- [4] <http://www.biol.tsukuba.ac.jp/tjb/Vol2No2/TJB200302199900788.pdf>
- [5] http://www.kansai-u.ac.jp/Fc_inf/news/2011/11/post_53.html
- [6] http://www.toonippo.co.jp/news_too/nto2013/20130307083854.asp?fsn=eb33f76037153e93cde084f7e7644d6f
- [7] <http://www.naro.affrc.go.jp/tarc/contents/hibari/index.html>
- [8] <http://ひばりは見た.jp/index.html>

パードゥレ・エテルノ教会 (グラヴィーナ・イン・プーリア)



地上からの撮影



上空 24.3m からの撮影

サン・ヴィート・ヴェッキオ教会 (グラヴィーナ・イン・プーリア)



地上からの撮影



上空 34.9m からの撮影