

ミラージンバルを伴う撮影装置の開発

Development of an imaging system with mirror gimbal

○佐藤 淳*, 中里 孝道*, 伊藤 祐二*, 近藤 宗輝**

○ Atsushi Satoh*, Takamichi Nakasato*, Yuuji Ito*, Takaaki Kondo**

*岩手大学, **東北大学

*Iwate University, **Tohoku University

キーワード : ジンバル (gimbal), パラレルリンク機構 (parallel link mechanism), 画像センシング (image sensing), 無人航空機 (unmanned aerial vehicle)

連絡先 : 〒 020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学理工学部システム創成工学科機械科学コース
佐藤 淳, Tel./Fax.: (019)621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

ジンバルとは物体を任意の姿勢角で支持するための回転機構であり, 直交する複数の回転軸を組み合わせたものが一般的である. 船の動揺に関係なく羅針盤を水平に保つ機構や, カメラを水平に保ったり, 任意の撮影方向を維持するための装置などに利用される (Fig. 1). また支持物体に作用する重力で駆動する受動的ジンバルと, アクチュエータにより駆動トルクを発生させる能動的ジンバルがある.

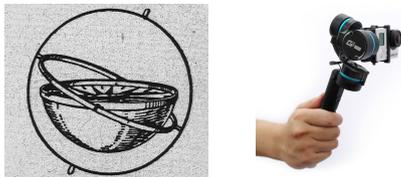


Fig. 1 羅針儀, 手持ちジンバル (Feiyu Tech)

ジンバルの駆動機構には, シリアルリンク機構とパラレルリンク機構がある (Fig. 2). シリアルリンク機構¹⁾は支持する物体の姿勢角の変

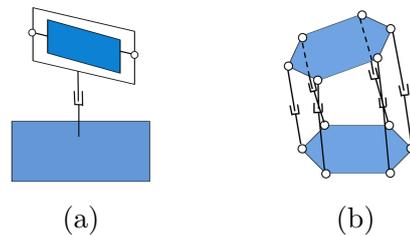


Fig. 2 (a) シリアルリンク機構, (b) パラレルリンク機構

化範囲を大きくとれる利点があるが, 各リンクは支持物体だけでなく中間リンクも支持する必要がある. そのためリンクの結合段数が増加するにつれ, 大きな駆動トルクを発生できるアクチュエータが必要となり, 重量増の原因となる.

一方パラレルリンク機構では複数のリンク機構を協調して動作させることにより駆動トルクを発生させる. シリアルリンクと比べ姿勢角の変化範囲は制限されるが, 比較的小出力のアクチュエータでも高速な動作が可能であり, 軽量化しやすい. 近年ロボットアームの駆動機構としても盛んに研究されている²⁾.

著者のうち佐藤は、(独) 農研機構・東北農業研究センターと共同で H22～24 年度に渡り農業リモートセンシング用小型無人機 GAV-3 (Fig. 3) の開発を行った。本機はデジタルカメラ型マル



Fig. 3 リモートセンシング用無人機 GAV-3

チスペクトラルセンサを胴体に下向きに固定して搭載しており、目標地点直上からの画像センシングを行うことを想定している。飛行中の高度と水平姿勢は自動制御により維持され、NDVI 計測のための画像データを地上解像度 10cm 程度で取得可能である。

本機の観測飛行中に、風外乱による機体姿勢角の変化や旋回終了後のダッチロールモードが十分減衰するまでの間、機体直下を確実に撮影できない時間が存在した。そのためカメラをジンバル機構に搭載すればこの制限が解消され、観測機としての有効性が高まることが考えられた。

そこで本研究ではパラレルリンク機構にもとづき、小型無人機に搭載可能な小型軽量のジンバル装置の駆動機構の開発および、運動学的関係の導出を行う。また本研究では新たな撮影機構として、ジンバル機構に支持されたミラーに映る像を機体に固定されたカメラで撮影する手法（ミラージンバル，Fig. 4）を提案する。ミラーは軽量で小さなトルクで駆動可能なため、カメラを支持する通常的手法³⁾と比べてアクチュエーターの小型軽量化や、ジンバルの動作の広帯域化に貢献することが期待される。

なお本研究は JSPS 科研費 25450381 の助成を受けたので謝意を表す。

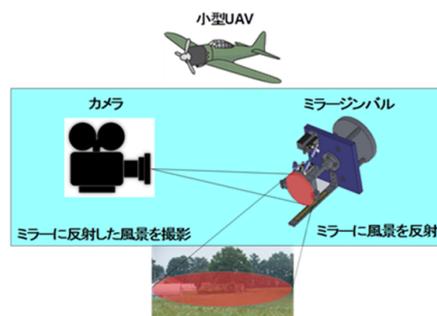


Fig. 4 ミラージンバルによる撮影

2. ミラージンバル装置

2.1 概要

開発したミラージンバルを Fig. 5 に示す。カメラと結合したものを Fig. 6 に示す。

小型無人機へ搭載することを考え、カメラ結合時の目標寸法は直径 100mm，長さ 200mm の円柱とし、目標重量は 100g とした。またミラー可動範囲の目標値は $\pm 15\text{deg}$ とした。これは GAV-3 の観測実験において、飛行中パイロット操舵時以外で機体のピッチ，ロール姿勢角が 15deg を越えることがなかったことを目安に決定した。

3D CAD により動作検証を行いながらリンク位置を決定することで、所望の性能を達成する機構を決定した。装置の諸元は Table 1 に示す通りである。当初作成したコンセプトモデルは主にアルミ合金製で約 360g の重量があったが、今回報告するフライトモデルでは CFRP，ベニヤ板等を用いて 124.3g まで軽量化された。

Table 1 ミラージンバル諸元

サイズ [mm]	$\phi 105 \times 160$ (187)*
重量 [g]	124.3 (243.3)*
ジンバル駆動モータ	Futaba RS304MD $\times 2$
カメラ	SONY DSC-QX10
カメラ操作モータ	Futaba S3154 $\times 2$

*カメラ結合時

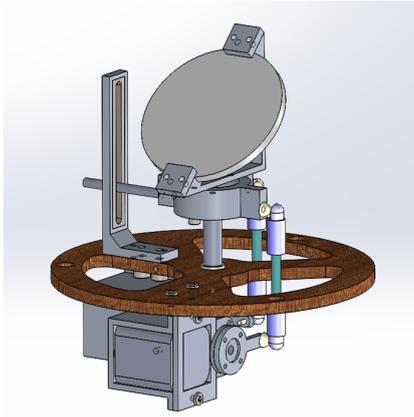


Fig. 5 ミラージンバル

3. 運動学的関係の導出

3.1 座標系の定義

座標系を Fig. 6 のように定義する. 2つのジンバル駆動用サーボモータのホーン回転軸は直交し, ベースフレーム (Fig. 6 の下側円環部分) と平行な平面をなす. フレーム座標系 (X, Y, Z) の X - Y 平面はこの平面に一致するようにとり, Z 軸はベースフレームの中心を通り X - Y 平面と垂直にとる. ミラー軸 X_g, Y_g, Z_g はミラーを載せたステージに固定された直行軸で, ステージを支持するベアリングの回転中心 O_g を原点とし, X_g, Y_g 軸はステージ上面と平行にとる.

またステージを X_g 軸まわりに回転させるサーボモータを「ロールサーボ」, Y_g 軸まわりに回転させるサーボモータを「ピッチサーボ」と呼ぶ.

3.2 サーボホーン先端の位置ベクトル

ピッチ, ロールサーボのホーン回転軸とホーン面とが交わる点をそれぞれ M_1, M_2 とおく. ホーン回転軸からリンク接続点までの長さを h とすると, Fig. 8 よりホーン先端 P_1, P_2 の位置ベクトルは以下のようなになる*.

$$\overrightarrow{OP_1} = \begin{bmatrix} -h(1 - c\theta_1) & -f & hs\theta_1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\overrightarrow{OP_2} = \begin{bmatrix} f & h(1 - c\theta_2) & hs\theta_2 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

*以後 $\sin \theta, \cos \theta$ を $s\theta, c\theta$ と略記する

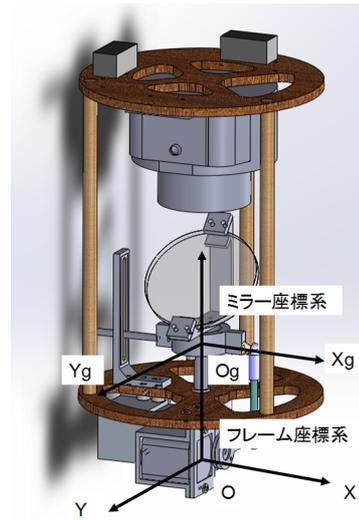


Fig. 6 座標系

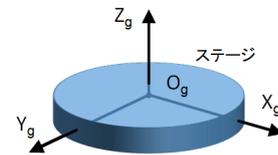


Fig. 7 ミラー軸

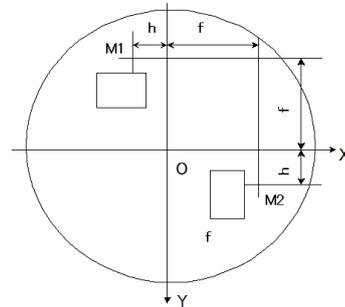


Fig. 8 X-Y 平面内サーボ位置

3.3 ミラー姿勢とモータ回転角の関係

ミラー姿勢を表現するために, フレーム座標系を基準姿勢として X - Y - X オイラー角 (α, β, γ) を導入する. Fig. 10 に示すように, リンクのステージ側接続点をそれぞれ Q_1, Q_2 とおく. また O と O_g との距離を m , O_g と Q_1, Q_2 との距離を l とする. Q_1, Q_2 の位置ベクトルを $\overrightarrow{OQ_i} = [Q_{ix}, Q_{iy}, Q_{iz}]^T, i = 1, 2$ とおけば,

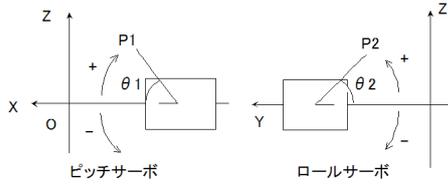


Fig. 9 X-Z, Y-Z 平面内サーボ位置

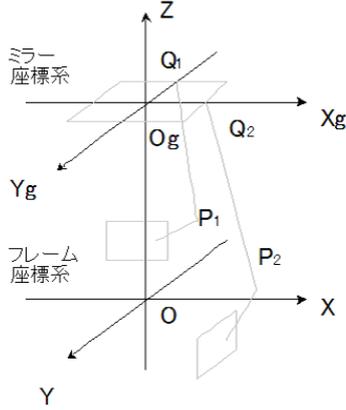


Fig. 10 サーボホーン，ステージ間リンク

$$\overrightarrow{OQ_1} = \begin{bmatrix} -ls\alpha s\beta \\ -l(c\alpha c\gamma - s\alpha c\beta s\gamma) \\ l(c\alpha s\gamma + s\alpha c\beta c\gamma) + m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{1x} \\ Q_{1y} \\ Q_{1z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\overrightarrow{OQ_2} = \begin{bmatrix} lc\beta \\ ls\beta s\gamma \\ ls\beta c\gamma + m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{2x} \\ Q_{2y} \\ Q_{2z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

とオイラー角を用いて表せる．リンク長を n とすると次式が成り立つ．

$$n^2 = (Q_{1x} - h(1 - c\theta_1))^2 + (Q_{1y} + f)^2 + (Q_{1z} - hs\theta_1)^2 \quad (5)$$

$$n^2 = (Q_{2x} - f)^2 + (Q_{2y} - h(1 - c\theta_2))^2 + (Q_{2z} - hs\theta_2)^2 \quad (6)$$

Fig. 6 からわかるように，今回開発したミラージンバル装置では X_g 軸は常に $X-Z$ 平面にあるよう機構的に拘束されている．そこで $\gamma = 0$ とすれば $Q_{2y} \equiv 0$ となり拘束を満たす．

これは，ミラーの Z_g 軸周りの姿勢はミラーに映る画像に影響しないので姿勢の自由度は 2

あれば十分であることに対応する．

(3)-(6) 式より次式が成立する．

$$a_i s\theta_i + b_i c\theta_i = d_i, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

ここで

$$a_1 = 2h(ls\alpha c\beta + m), \quad (8)$$

$$b_1 = 2h(ls\alpha s\beta + h), \quad (9)$$

$$d_1 = l^2 + f^2 + m^2 + 2h^2 - n^2 + 2l(hs\alpha s\beta + ms\alpha c\beta - fc\alpha), \quad (10)$$

$$a_2 = 2h(ls\beta + m), \quad (11)$$

$$b_2 = 2h^2, \quad (12)$$

$$d_2 = l^2 + f^2 + m^2 + 2h^2 - n^2 + 2l(ms\beta - fc\beta), \quad (13)$$

である．三角関数の合成より，

$$a_i s\theta_i + b_i c\theta_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} s(\theta_i + \omega_i), \quad (14)$$

$$\omega_i = \begin{cases} \arcs\left(\frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right) & (a_i \geq 0) \\ \pi - \arcs\left(\frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right) & (a_i < 0) \end{cases} \quad (15)$$

今回の装置では $l \leq m$ なので $a_1, a_2 \geq 0$ ．よってステージが所望のオイラー角 $(\alpha, \beta, 0)$ をとるためのサーボ回転角は次のように求まる．

$$\theta_i = \arcs\left(\frac{d_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right) - \arcs\left(\frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right), \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

4. 実機による動作検証

完成したミラージンバル装置を制御用マイコンに接続し，ステージ姿勢角を与えられた目標値 (α_r, β_r) にするようなサーボモータ回転角 θ_{r1}, θ_{r2} を §3.3 の結果から求め，ジンバルを傾斜させて装置の動作精度を検証した (Fig.11)．

なお実際のサーボモータ回転角はモータに内蔵された回転角センサにより計測し，実際のジンバル姿勢はステージ上に傾斜計を置き求めた．



Fig. 11 ミラージンバル (実機)

動作結果を Table 2-4 に示す. ステージの姿勢角誤差は平均 0.5deg. 以下の精度を達成した. 最大誤差, 平均誤差ともに β 側が劣るが, 2つのサーボモータ回転角の誤差に大きな差が無いことから, リンク機構の精度が原因と思われる.

また Table 5 に CAD モデルと実機から計測したステージ可動範囲を示す. 設計目標の可動範囲 $\pm 15\text{deg.}$ は満足されている.

5. おわりに

本研究ではミラージンバルを用いた撮影装置を提案し, その運動学的関係を導出した. ミラージンバルとはジンバル機構にミラーを載せたものであり, 通常のカメラジンバルとは異なりカメラは固定されており, ミラーに映る対象物を撮影する. またジンバルの駆動方式には平行リンク機構を用い, シリアルリンクと比べ小さなトルクで駆動可能である. ミラーの慣性モーメントはカメラより小さいため, 動作の広帯域化が期待される. さらに小型 UAV への搭載を考えた小型ジンバル装置を作成し, ミラーステージの指向精度と可動範囲を検証した.

参考文献

- 1) 安田仁彦: 改訂 機構学, コロナ社 (2005)
- 2) 舟橋宏明: ロボット機構としての平行リンク機構, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 699-704 (1992)
- 3) W.H. Semke et al.: Active Gimbal Control for Surveillance using Small Unmanned Aircraft Systems, Proc. of SEM IMAC-XXVI: Conference and Exposition on Structural Dynamics (2008)

Table 2 目標角度 [deg]

(α_r, β_r)	$(\theta_{r1}, \theta_{r2})$
(0, 0)	(0.0, 0.0)
(10, 0)	(11.3, 0.0)
(0, 10)	(0.0, 11.4)
(-10, 0)	(-11.3, 0.0)
(0, -10)	(0.0, -11.4)
(10, -10)	(11.3, -11.4)
(-10, 10)	(-11.3, 11.4)
(-10, -10)	(-11.3, -11.4)
(15, 15)	(17.2, 17.2)

Table 3 実際の回転角 [deg]

(α, β)	(θ_1, θ_2)
(0.0, 0.0)	(0.3, -0.4)
(10.4, -1.0)	(11.6, 0.3)
(0.0, 9.3)	(0.5, 11.3)
(-9.8, -0.2)	(11.6, 0.4)
(0.0, -10.6)	(0.5, 11.4)
(10.2, -10.6)	(11.7, -11.3)
(-10.1, 9.7)	(11.7, -11.8)
(-10.8, -9.5)	(-11.6, -11.4)
(15.4, 14.7)	(17.2, 17.3)

Table 4 回転角誤差 [deg]

	平均	最大
$ \alpha_r - \alpha $	0.23	0.80
$ \beta_r - \beta $	0.46	1.00
$ \theta_{r1} - \theta_1 $	0.33	0.50
$ \theta_{r2} - \theta_2 $	0.20	0.40

Table 5 ステージ可動範囲 [deg]

	CAD	実機
α_{max}	17.6	17.9
α_{min}	-20.1	-23.0
β_{max}	21.1	20.9
β_{min}	-20.1	-23.0