

室蘭工大 ○西田公至, 日立製作所 松岡秀佳

要 旨

突風によるロープウェイゴンドラの横揺れを制御するために、2つのジャイロロータから成るジャイロ装置を搭載したジャイロゴンドラを考え、突風が作用した場合を想定し、ジャイロによるゴンドラの横揺れ制御効果を数値計算とモデル実験とにより検討した。その結果、ジャイロの歳差軸にゴンドラの横揺れ角に比例した制御トルクを加えることにより、ゴンドラの横揺れを効果的に制御し得ることが明らかとなった。

1. 緒言

平成3年9月12日に大雪山層雲峡ロープウェイで、ゴンドラが突風にあおられて鉄塔に衝突し、8人が負傷する事故が起こった。本研究では、このような突風や強風によるゴンドラの横揺れを制御する方法として、図1及び図2に示すように、2個のジャイロロータから成るジャイロ装置を搭載したジャイロゴンドラを考え、ジャイロモーメントによるゴンドラの横揺れ制御効果を数値解析とモデル実験とによって検討する。

2. ジャイロゴンドラの運動方程式

図3に示すように、ジャイロゴンドラが突風によって角度 θ 傾くと、ロータにはジャイロモーメント M_G が作用しロータの回転軸が角度 ϕ 傾く。このときのロータ振り回り軸（歳差軸）周りのロータの回転により、ゴンドラにはロータ回転軸と垂直な方向へジャイロモーメント M_G が作用する。この水平方向成分 $M_G \cos \phi$ がゴンドラの横揺れを抑える抵抗モーメントとなる。垂直方向成分 $M_G \sin \phi$ はゴンドラを支持軸周りにねじるよ

うに作用する。このねじりモーメントを相殺するために、ジャイロ装置には互いに逆回転する同じ大きさのロータを2個用いる。この場合、抵抗モーメントは2倍となる。このようにして発生する抵抗モーメントはゴンドラの横揺れによって発生する受動的なものである。より効果的にジャイロモーメントを活用するために、ゴンドラの揺れ角度に比例した大きさの制御トルクを歳差軸に作用させ、ロータの振り回り運動を制御することを考える。以上のようなジャイロ装置の作動原理を考慮すると、ジャイロゴンドラ系の運動方程式はゴンドラ本体の運動方程式(1)と2つのロータの運動方程式(2),(3)により表される。

$$I_G \ddot{\theta} = -m_G g l_G \sin \theta - 2 \cdot C \omega \dot{\phi}_1 \cdot \cos \phi_1 - 0.5 \rho S C_D l_G^3 |\dot{\theta}| \dot{\theta} - D_E \dot{\theta} + F \cdot l_G \quad (1)$$

$$I_1 \ddot{\phi}_1 = -m_1 g l_1 \sin \phi_1 + \dot{\theta} \cos \phi_1 \cdot (C \omega + (C - A) \dot{\theta} \sin \phi_1) - m_1 R \dot{\theta}^2 \sin \phi_1 \cdot l_1 - \varepsilon \dot{\phi}_1 + K \theta \quad (2)$$

$$I_2 \ddot{\phi}_2 = -m_2 g l_2 \sin \phi_2 + \dot{\theta} \cos \phi_2 \cdot (-C \omega + (C - A) \dot{\theta} \sin \phi_2) - m_2 R \dot{\theta}^2 \sin \phi_2 \cdot l_2 - \varepsilon \dot{\phi}_2 - K \theta \quad (3)$$

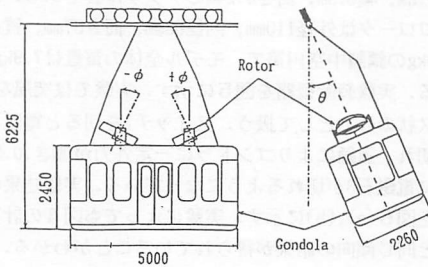


図1 ジャイロゴンドラ

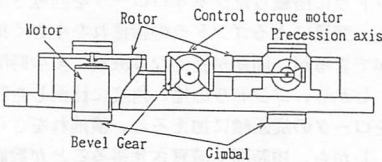


図2 ジャイロ装置の概略

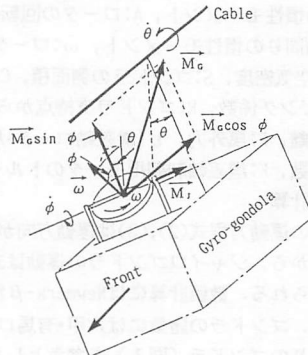
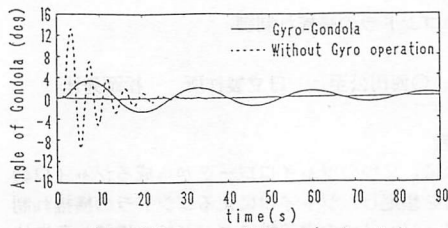
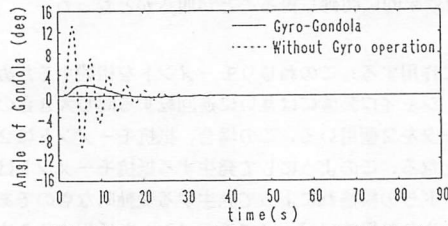


図3 ゴンドラの揺れとジャイロモーメントの関係

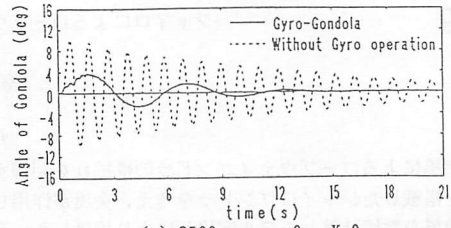


(a) 5000rpm, $\epsilon=500\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $K=0$

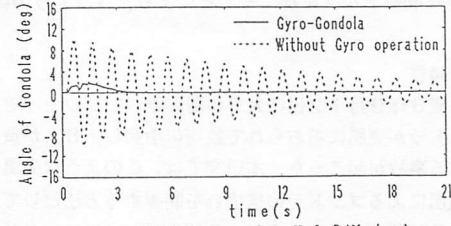


(b) 5000rpm, $\epsilon=500\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $K=10\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$

図4 突風下のジャイロゴンドラの揺れ(計算結果)



(a) 2500rpm, $\epsilon=0$, $K=0$



(b) 2500rpm, $\epsilon=0$, $K=0.24\text{Nm}/\text{rad}$

図6 モデル実験によるジャイロゴンドラの揺れ

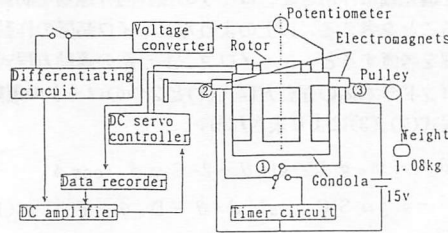


図5 実験装置概略

ここで、 I_G :ゴンドラの支持点周りの慣性モーメント、 m_G :ジャイロゴンドラの質量、 l_G :ゴンドラ支持点からその重心までの距離、 I_J :ロータの歳差軸周りの慣性モーメント、 m_J :ジャイロロータの質量、 l_J :歳差軸からロータ重心までの距離、 g :重力加速度、 C :ロータ回転軸周りの慣性モーメント、 A :ロータの回転軸に垂直な慣性主軸周りの慣性モーメント、 ω :ロータの回転角速度、 ρ :空気密度、 S :ゴンドラの側面積、 C_D :抗力係数、 D_E :ダンピング係数、 R :ゴンドラ支持点からロータ重心までの距離、 F :風外力、 ϵ :歳差軸ロータリーダンパーの減衰係数、 K :歳差軸制御用モータのトルク係数。

3. 数値計算

ロータの運動方程式(2),(3)は運動方向が逆となるのみであるから、ジャイロゴンドラの運動は式(1),(2)により求められる。数値計算にはNewmark- β 法($\beta=1/6$)を用いた。ゴンドラの諸量には六甲・有馬ロープウェイの61人乗りのゴンドラ(図1)を参考とした。ロータは外径0.9m, 内径0.7m, 高さ0.3mの鋼製中空円筒とし

た。ジャイロゴンドラの全質量は7500kgである。風速30mm/sの突風が2秒間ゴンドラ側面に作用した場合の計算結果の一例を図4(a),(b)に示す。この結果から、ロータの回転によりゴンドラの揺れは小さくなるが、減衰しにくくなることがわかる。しかし、制御トルクを作用させると(c)図のように、揺れをさらに小さく抑えることができ、しかも減衰が速くなることがわかる。

4. 実験方法及び結果

ジャイロゴンドラの実験モデルは、ゴンドラ部が長さ0.5m, 幅0.3m, 高さ0.24mの亚克力製である。ジャイロロータは外径110mm, 内径88mm, 高さ37mm, 質量1.0kgの鋼製中空円筒で、モデル全体の質量は7.9kgである。実験装置概略を図5に示す。実験では突風をパルス状の外力として扱う。スイッチ1を切ると電磁石2が切れ、重錘によりゴンドラに一定外力が働き、0.5秒後に電磁石3が切れるようになっている。実験結果の一例を図6(a),(b)に示す。実験によっても図4の計算結果と同じ傾向の結果が得られていることがわかる。

5. 結言

ゴンドラに搭載したジャイロロータを回転させるだけでも、突風によるゴンドラの横揺れを小さく抑えることができるが、周期が長くなり減衰に多少時間がかかる。しかし、ゴンドラの揺れ角度に比例した制御トルクをロータの歳差軸に加えると、横揺れをさらに小さく、しかも、短時間で減衰させ得ることが数値計算及び実験結果から明かとなった。