

要 旨

突風によるロープウェイゴンドラの横揺れを防止するために、2つのジャイロロータで構成されるジャイロ装置を搭載したジャイロゴンドラを考え、ジャイロゴンドラ系の運動方程式を導出し、パルス状の突風が作用した場合のゴンドラの横揺れ特性を数値計算により検討した。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うることが明らかとなった。

1. 緒言

平成3年9月12日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人の乗客が負傷するという事故が起こった。このような懸垂体の揺れ防止の一方法としてジャイロモーメントの利用を考慮することができる⁽¹⁾。本研究では、ジャイロを搭載したゴンドラ(ジャイロゴンドラ:図1)を考え、その運動方程式を誘導、解析し、数値計算によりその挙動を調べ突風に対するジャイロ装置の効果、及び制御方法について検討する。

2. ジャイロゴンドラの運動解析

図3の概略図に示すように、ジャイロゴンドラが突風によって傾くと、ロータにはジャイロモーメント M_J が作用しロータの回転軸が傾くこととなる。この場合のロータの振り回る軸(歳差軸)周りの動きによりジャイロゴンドラには、ロータ回転軸と垂直な方向へのジャイロモーメント M_G が作用する。 M_G の水平方

向成分のモーメント $M_G \cdot \cos \phi$ がジャイロゴンドラの横揺れに対する抵抗モーメントとなり、垂直方向成分のモーメント $M_G \cdot \sin \phi$ はゴンドラをねじるモーメントとして作用する。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、大きさ、重さ、回転数の全く同じロータを2つ用いる。このようにして発生するジャイロモーメントは、ゴンドラが横揺れすることによりジャイロロータが振り回り、それによって横揺れに対する抵抗モーメントが発生するという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、ジャイロ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、ジャイロロータの運動を制御することを考える。

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)によって表わされる。

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

$$I_J \ddot{\phi}_1 = -m_J g L_J \cdot \sin \phi_1 + \{ I_S \omega \dot{\theta} + (I_S - I_P) \dot{\theta}^2 \cdot \sin \phi_1 \} \cdot \cos \phi_1 - m_J R L_J \dot{\theta}^2 \cdot \sin \phi_1 - \varepsilon \dot{\phi}_1 + K \theta \quad (2)$$

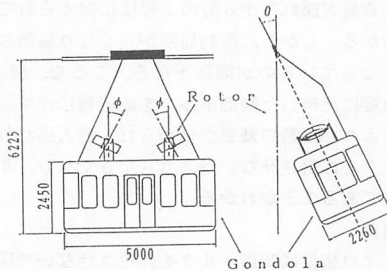


図1. ジャイロゴンドラ

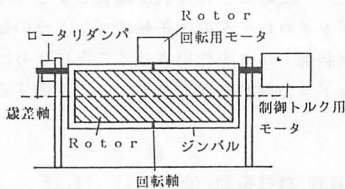


図2. ジャイロ装置

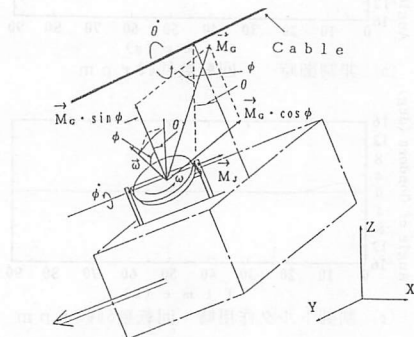


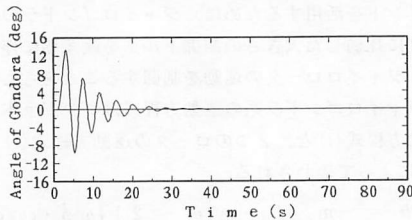
図3. ジャイロモーメント

$$I_J \ddot{\phi}_2 = -m_J g L_J \cdot \sin \phi_2 + (-I_S \omega \dot{\theta} + (I_S - I_P) \dot{\theta}^2 \cdot \sin \phi_2) \cdot \cos \phi_2 - m_J R L_J \dot{\theta}^2 \cdot \sin \phi_2 - \varepsilon \dot{\phi}_2 - K \theta \quad (3)$$

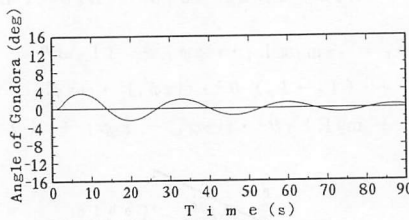
ここで、 I_G : ゴンドラの支持軸回りの慣性モーメント、 m_G : ジャイロ装置を含むゴンドラの質量、 L_G : ゴンドラ支持点からゴンドラ重心までの距離、 I_J : ジャイロロータの歳差軸周りの慣性モーメント、 m_J : ジャイロロータの質量、 L_J : 歳差軸からジャイロロータ重心までの距離、 g : 重力加速度、 I_S : ジャイロロータ回転軸回りの慣性モーメント、 I_P : ジャイロロータの回転軸に垂直な軸回りの慣性モーメント、 ω : ジャイロロータ回転角速度、 ρ : 空気密度、 S : ゴンドラ側面面積、 C_D : 抗力係数、 D_E : ダмпング係数、 R : ゴンドラ支持点からジャイロロータ重心までの距離、 F : 風外力、 ε : ローターダンパの減衰係数、 K : トルク係数

3. 数値計算

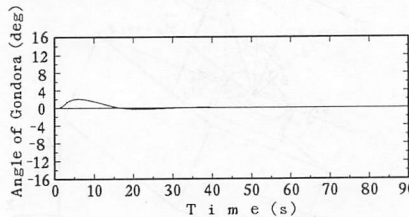
ジャイロゴンドラの運動を解析するにあたり、式(2)、(3)は2つのロータの運動方向が正負逆となるのみであるからジャイロゴンドラの運動を解析するに際し



(a) ジャイロロータ無回転時



(b) 非制御時 回転数5000 rpm



(c) 制御トルク作用時 回転数5000 rpm

図4. 突風によるジャイロゴンドラの横揺れ特性

ては、式(1)、(2)の連立運動方程式を解けばよいことになる。数値計算には、Newmark- β 法 ($\beta=1/6$)を用いた⁽²⁾。ゴンドラの諸量については、六甲一有馬ロープウェイの61人乗りゴンドラを参考にした。ジャイロロータの大きさに関しては、あらかじめ検討した結果、外半径0.45m、内半径0.35m、厚さ0.3mの鋼製中空円盤とする。以下に計算に用いた諸数値を示す。

$I_G=142227.5$ [kgm²], $I_J=66$ [kgm²], $m_G=7500$ [kg], $m_J=593.4$ [kg], $L_G=4.3$ [m], $L_J=0.15$ [m], $g=9.8$ [m/s²], $I_S=96.42$ [kgm²], $I_P=52.66$ [kgm²], $\rho=1.20442$ [kg/m³], $S=12.25$ [m²], $D_E=42000$ [Nms/rad], $C_D=1.5$, $R=3.0$ [m], $\varepsilon=500$ [Nms/rad]

数値計算の計算時間 t の刻み幅は0.001[s]とした。計算は、ゴンドラの側面に30m/sの突風が2秒間作用したと想定し、ジャイロロータを回転させない場合、ジャイロロータを5000rpmで回転させたのみの場合、ゴンドラの揺れ角度に比例した制御トルクを作用させた場合について行ないその効果、影響を検討する。

4. 結果及び考察

図4(a)は、ジャイロロータを回転させない場合のジャイロゴンドラの運動の計算結果、図4(b)は、ジャイロロータを5000rpmで回転させた場合のジャイロゴンドラの運動の計算結果を示している。更に、図4(c)は、5000rpmで回転しているジャイロロータの歳差軸に、ゴンドラの揺れ角度に比例した制御トルクを作用させた場合のジャイロゴンドラの運動の計算結果を示している。

この計算結果より、図4(a)と(b)を比較すると、突風による最大揺れ角が3分の1程度に抑えられているのがわかる。しかし、振動周期が長くなり振動の減衰が遅くなっているのが問題となる。ここで、図4(c)から角度に比例した制御トルクを歳差軸に作用させることにより、振動の減衰が早められ、最大揺れ角も制御トルクを作用させない時よりも小さくなり、非常に効果的であることがわかる。

5. 結言

ジャイロ装置に制御トルクを作用させないで稼働した場合、ゴンドラの揺れ角はかなり小さくすることができるが、一度起こった揺れは減衰しづらくなる。しかし、ジャイロロータの歳差軸にゴンドラの揺れ角に比例した制御トルクを作用させることにより、突風時にもゴンドラの揺れをかなり効果的に制御することができる。

文献

- (1) 亘理, 機械振動, (昭55), 177-178, 丸善
- (2) 戸川, マトリクスの数値計算, (昭46), 271-274, オーム社