

7. サブクローラ回転軸剛性と走行路面がクローラロボットの対地適応性に与える影響の解明

渡邊彩夏・奥川雅之

1. はじめに

地震等の災害発生時に災害現場の調査点検を目的とした災害対応ロボットが求められている。特に、サブクローラを有するクローラロボットは、その機構および制御自由度の高さから不整地踏破能力が高いことが知られている²⁾。対地適応クローラロボットとも呼ばれ、それらの多くは、各サブクローラの回転軸にアクチュエータが搭載されており、各サブクローラを能動的に制御することが可能である。しかし、操縦が複雑なため操縦者の高度な操縦技術と経験が要求されるため、操縦支援を目的とし、環境認識センサにより段差高さなどの情報をもとにしたサブクローラ制御手法が提案されている^{4) 5) 6)}。筆者らは、クローラ型移動ロボットの機構特性を積極的に利用したサブクローラ制御手法を提案するとともに、外界センサ情報に依存せず、対地適応性の高い不整地走破の実現を目指している。その一環として、サブクローラの回転軸をフリージョイントとした受動機構による対地適応クローラロボットScottを開発し、サブクローラの回転角度を制限する拘束角度を与えることで重力と障害からの反力を利用することで不整地踏破を実現している⁷⁾。一方で、能動適応クローラロボットに対してサブクローラ回転軸駆動部に適切な回転剛性を付与することにより、受動適応クローラ同様、拘束角度を設定することができ、重力と障害からの反力を利用することが可能となり、回転剛性によりサブクローラの拘束角度が変化し対地適応性が変化することから、最適な拘束角度が存在することがわかっている³⁾。

本年度は、拘束角度を設計条件としたコンプライアンス制御系設計手法の検討を行った。ロボットと障害との間に生じる相互作用を利用するとともに、仮想的なねじり剛性を定義し、コンプライアンス制御系設計手法の導出を試みた。提案手法について、シミュレーションおよび実験により検証した結果について述べる。

2. ロボットと障害との相互作用とモーメント

2.1 推進力とモーメント

対地適応クローラロボットの障害走破シーケンスにおいて、推進力は障害との相互作用を発生させる上で重要であるが、推進力の影響を陽にモデル化している文献は少ない。受動適応クローラロボットScottは、推進力を利用した押し登り走破シーケンスにより障害を走破する。その際、拘束角度によりロボットの障害走破性能に影響を及ぼすことが分かっている¹⁾。このことは、サブクローラの回転角度とロボットと障害の間に発生する相互作用には関連があることを意味している。また、障害に接触した際に働くモーメントの解析をすることで障害走破性能とサブクローラ角度の関係を示すことができると考えている。また、サブクローラの回転軸にモータが搭載されているとし、その回転剛性を能動的に変更可能とすることで、サブクローラの拘束角度を再現することとし、ロボットに働くモーメントの関係を整理する。その際、水平な走破路面にある段差高さ h （転倒の危険性がない状態で乗り越えることが可能な高さ）の単純段差を踏破する状態を考える。ただし、ロボットと走行路面および障害壁面との摩擦は十分に得られているものとし、移動速度は障害を

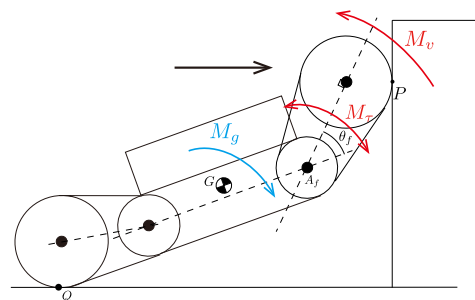


図1 ロボットに働くモーメント

踏破する際にロボット後方接地部が滑らない程度の大きさと一定とする。サブクローラ回転軸はモータにより制御可能であり、ある回転剛性（コンプライアンス）により、障害を押し付ける力が発生できるものとする。

ロボットと障害に働く相互作用には図1に示す3つのモーメントが関係していると考えている。

自重モーメント M_g ：重力とロボットの自重により生じるモーメント。大きさは本体姿勢角に依存。

推進モーメント M_v ：推進力を起因とするモーメント。大きさは移動速度と本体姿勢角に依存。

サブクローラ回転モーメント M_t ：サブクローラ回転軸に取り付けられたアクチュエータにより制御可能なモーメント。

これら3つのモーメントに加え、推進モーメントの反力としてサブクローラに影響を及ぼす外乱モーメントを加えると、式（1）のような釣り合いの関係が成り立っている。

$$M_g - M_v + M_t = M_d \quad (1)$$

2.2 自重モーメント

図2に示すような状態においてロボットに働く自重モーメントについて考える。

地面接触点 Q とロボット全体の重心位置 $G(X_g, Y_g)$ との距離 l_g およびその角度 θ_g 、自重 m 、重力加速度 g を用いることで、自重モーメント M_g を示すことができる。

$$M_g = l_g m g \cos \theta_g \quad (2)$$

重心位置は、本体姿勢角とサブクローラ角度に依存して決まり、ロボットの本体が持ち上がる瞬間においては、前方サブクローラ角度のみによって決まる。自重モーメント M_g も同様である。自重モーメントは正の向き（下向き）のモーメントであることから、負の向きに自重モーメントより大きなモーメントを発生させることができれば、本体を持ち上げることが可能となる。

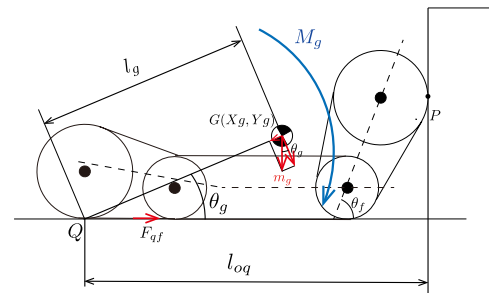


図2 自重モーメント

2.3 推進モーメント

前方サブクローラがある拘束角度で固定された棒モデルと仮定し本体が持ち上がる瞬間を考える。本体姿勢角を0度とし、後方サブクローラは0度で固定されているものとして前方サブクローラの角度と推進力について考える。

推進力 F_d により点 P において壁面を押し付け、それにより壁面からの反力 F_{pr} が発生し、この分力 F'_{pr} の影響を受けロボットが持ち上がろうとする負の向きに推進モーメントが発生する。以下に関係式を示す。本体が持ち上がる際の接触点の回転中心と壁面接触点の距離 l_{cp} と F'_{pr} から推進モーメント M_v は式（3）により算出される。

$$M_v = l_{cp} F_{pr} \sin \theta_p \quad (3)$$

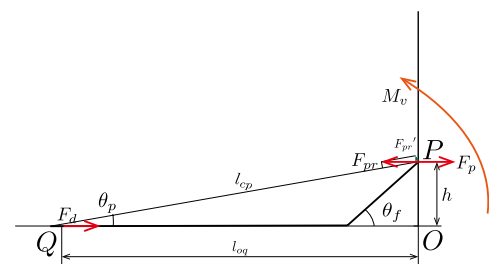


図3 推進モーメント

2.3 サブクローラ回転モーメント

サブクローラが障害壁面と接触した際、壁面から外乱 (M_t) をうけるが、サブクローラ駆動用モータによりサブクローラ回転モーメント M_t を発生できる。サブクローラの回転運動を式(4)のように示し、制御則を式(5)とするとコンプライアンス制御系の運動方程式は式(6)となる。

$$J_a \ddot{\theta}(t) + D_a \dot{\theta}(t) = \tau_u(t) + M_t \quad (4)$$

$$\tau_u = -k_s \theta(t) - k_d \dot{\theta}(t) \quad (5)$$

$$J_a \ddot{\theta}(t) + (D_a + k_d) \dot{\theta}(t) + k_s \theta(t) = M_t \quad (6)$$

式(6)を規範モデルとし2次遅れ系と仮定すると、各フィードバックゲインと固有角周波数および減衰係数は式(7)のような関係となる。

$$[\omega_n, \zeta] = \left[\sqrt{\frac{k_s}{J_a}}, \frac{(D_a + k_d)}{2J_a \omega_n} \right] \quad (7)$$

コンプライアンス制御を導入することでサブクローラのモータは外乱と釣り合うようにトルクを発生させることができることから、ロボットが持ち上がる瞬間において、式(8)の関係式を得る。ここで、サブクローラ回転角 θ_f 、サブクローラ長さ l_f とする。

$$M_t = F_{pr} \sin \theta_f = M_t \quad (8)$$

2.4 自重モーメントと推進モーメント

自重モーメントより推進モーメントが大きくなった時にロボットは上向きに持ち上がり始め障害を走破ことができ、ロボットが持ち上がり始める瞬間は推進モーメントと自重モーメントには釣り合いの関係 ($M_g = M_v$) が成り立つことから式(9)が得られる。

$$F_{pr} = \frac{l_g m_g \cos \theta_f}{l_{cp} \sin \theta_p} \quad (9)$$

サブクローラ回転軸が障害物との接触によりねじりトルクを受けた際の仮想的な回転剛性を定義し、ロボット推進力とサブクローラ回転角度及びサブクローラ回転運動に関する固有角振動数との関係式は、式(10)にて示される。ここで、 l は仮想的な軸長さとする。

$$M_t = \frac{\pi G_d^4}{32l} \theta_f \quad (10)$$

また、固有角振動数は式(11)によって示される。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{M_t}{J \theta_f}} \quad (11)$$

式(11)より、理想のねじれ角として拘束角度を設定すると固有角振動数を定めることができる。

3. シミュレーションおよび実験結果

サブクローラ回転制御系固有角周波数に対して、検証用ロボットが壁面に接触し本体が持ち上がる瞬間のサブクローラ角度を計測した時の結果と式(11)の関係を数値シミュレーションの結果として図4に示す。シミュレーション値と実験結果が、おおよそ一致していることがわかることから式(11)のねじり剛性の考え方を利用することで任意の拘束角度を設定することができ、理想のコンプライアンス制御が実現できる。

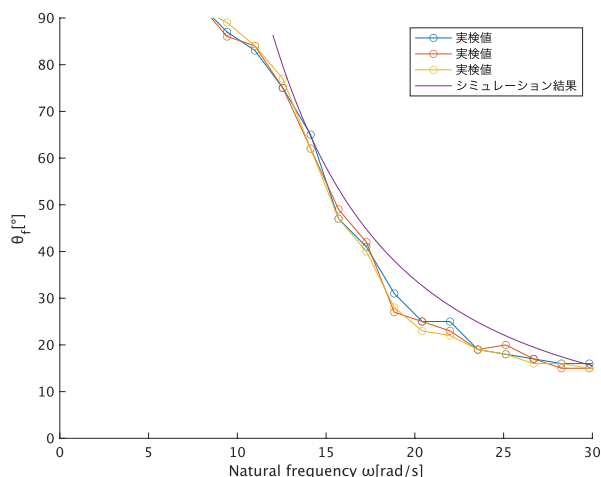


図4 固有角振動数とサブクローラ角度

4. まとめ

対地適応クローラロボットと障害の間に発生するモーメントの定式化を行い、モーメントとロボットの幾何学的な関係をねじり剛性の考え方をを用いて整理したことで任意の拘束角度を設定することが可能であることが分かった。今回の考え方をコンプライアンス制御系の設計する際の剛性の設定に利用し、今後はより対地適応性の高いクローラロボットの実現を目指したい。

参考文献

- 1) 浅井, 鈴木, 奥川, 受動適応クローラロボットのサブクローラ角度における段差踏破性能, SI2015講演論文集, pp.750-755, 2015.
- 2) 小柳栄次, サブクローラを持つレスキューロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.147-150, 2010.
- 3) A. Watanabe, et al., Effect of Compliance on Ground Adaptability of Crawler Mobile Robots with Sub-Crawlers, Proc. SII2020, pp.1348-1353, 2020.
- 4) E. Rohmer, et al., Integration of a Sub-Crawler's Autonomous Control in Quince Highly Mobile Rescue Robot, Proc. SII2010, pp.78-83, 2010.
- 5) K. Nagatani, et al., Semi-autonomous Traversal on Uneven Terrain for a Tracked Vehicle using Autonomous Control of Active Flippers, Proc.IROS2008, pp.2667-2672, 2008.
- 6) K. Zimmermann, et al., Adaptive traversability of unknown complex terrain with obstacles for mobile robots, Proc. ICRA2014, pp.5177-5182, 2014.
- 7) S. Suzuki, et al., Remote Control System of Disaster Response Robot with Passive Subcrawlers Considering Falling Down Avoidance, ROBOMECH Journal, Vol.1, No.20, 2014.