

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^{1) 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、コンプライアンス制御を能動型対地適応クローラロボットに導入する。制御系の設計手法はサブクローラの拘束角度を制約条件とし、ロボットに働くモーメントと仮想ねじれ剛性によってフィードバックゲインを導出する行う手法を提案し、実験にて提案手法の有効性を確認した。

2. ロボットと障害のインタラクション

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おり、ロボットの障害走破時に発生するモーメントは以下ようになる。

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_τ ：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。

外乱モーメント M_t ：ロボットが障害に接触した際に障害からロボットが受ける外乱モーメント。

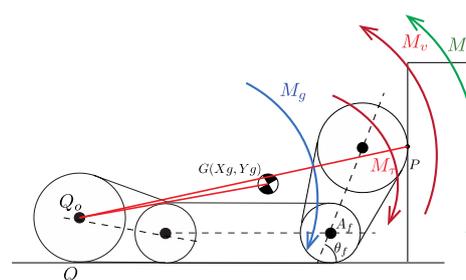


図1 ロボットに働くモーメント

ロボットの本体が持ち上がる直前は図1のような状態であり各モーメントは式(1)のような釣り合い状態となる。

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

2.2 自重モーメントと推進モーメント

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。

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

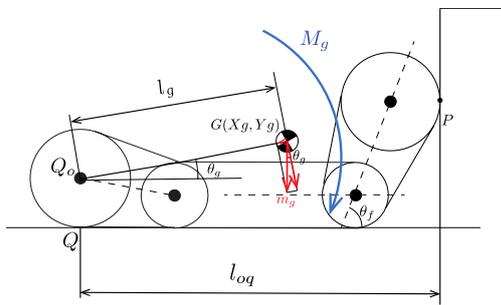


図2 自重モーメント

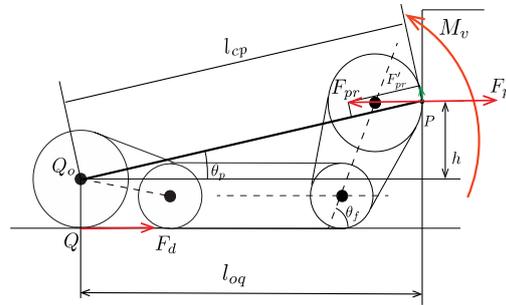


図3 推進モーメント

推進モーメント M_v は推進力 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る際の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 M_v は式(3)により算出される。

$$M_v = l_{cp} |F_d| \sin \theta_p \quad (3)$$

サブローラ角度が拘束角度 $\bar{\theta}_f$ で固定された瞬間、推進モーメントと自重モーメントの釣り合いが成り立つので式(4)に示すように推進力を求めることができる。

$$|F_d| = \frac{l_g m g \cos \theta_g}{l_{cp} \sin \theta_p} \quad (4)$$

2.3 サブローラ回転モーメント

サブ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、サブローラ駆動用モータによりサブローラ回転モーメント M_t を発生できる。サブローラの回転運動を式(5)のように示し、制御則を式(6)とするとコンプライアンス制御系の運動方程式は式(7)となる。

$$J\ddot{\theta}(t) + D\dot{\theta}(t) = \tau_u(t) + M_t(t) \quad (5)$$

$$\tau_u = -k_s\theta(t) - k_d\dot{\theta}(t) \quad (6)$$

$$J\ddot{\theta}(t) + (D + k_d)\dot{\theta}(t) + k_s\theta(t) = M_t(t) \quad (7)$$

式(7)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(8)のような関係となる。

$$[\omega_n, \zeta] = \left[\sqrt{\frac{k_s}{J_a}}, \frac{(D + k_d)}{2J_a\omega_n} \right] \quad (8)$$

サブローラは、壁面からのモーメント M_t をうける一方で、アクチュエータによる回転トルク τ_u により回転モーメント M_τ を発生し、ロボットが持ち上がる瞬間に前方サブローラが θ_f となった時、 $M_t = M_\tau$ となる。このとき、 M_t の大きさは、推進力 F_d とコンプライアンス制御系に関する外乱応答の定常値である θ_f によって、式(9)から算出することができる。

$$M_t = l_p |F_d| \sin \bar{\theta}_f \quad (9)$$

2.4 自重モーメントと推進モーメント

サブローラ回転ジョイントを仮想的にねじれモーメント M_t をうけるシャフトとし、仮想最大ねじれ角 θ_{tol} 、仮想的な軸長さ l 、材料のせん断弾性係数 G とし、ねじれ剛性を k とする。この時、仮想最大ねじれ角は、サブローラの拘束角度と等しい。したがって、前方サブローラの拘束角度 θ_f と M_t の関係は、次式で記述することができる。

$$M_t = \frac{\pi G d^4}{32l} \theta_{tol} = k \bar{\theta}_f \quad (10)$$

さらにサブローラ回転ダイナミクスをねじれ剛性 k 及び固有角周波数 ω_n' の仮想ねじり振動系とすると式(11)を得る。

$$\omega_n' = \sqrt{\frac{M_t}{J \bar{\theta}_f}} \quad (11)$$

ここで M_t とねじれ剛性の関係からサブローラ回転角が拘束角度 $\bar{\theta}_f$ に至るとき、サブローラ回転ジョイントに対するコンプライアンス制御系の固有角振動数 ω_n と仮想的なねじり振動系 ω_n' は M_τ と M_t が釣り合っていることから式(8)と式(11)から式(12)が得られる。

$$\sqrt{\frac{M_t}{J \bar{\theta}_f}} = \sqrt{\frac{k_s}{J}} \quad (12)$$

式(12)と式(9)から式(13)の関係を得ることができる。以上より、サブローラ拘束角度 $\bar{\theta}_f$ を設計パラメータとしてロボットの幾何学的な情報のみでフィードバックゲイン k_s を決定できる。

$$k_s = \frac{M_t}{\bar{\theta}_f} = l_p |F_d| \frac{\sin \bar{\theta}_f}{\bar{\theta}_f} = \frac{l_p l_g m g \cos \theta_g \sin \bar{\theta}_f}{l_{cp} \cos \theta_p \bar{\theta}_f} \quad (13)$$

3. 提案手法の検証と考察

式(13)に示した手法でフィードバックゲインを決定し、検証用ロボットのサブクローラ回転ジョイント部にコンプライアンス制御系を実装した検証用クローラロボットを壁面に接触させ、本体が持ち上がる瞬間のサブクローラ角度を計測した結果を図4に示す。横軸は設定拘束角度 $\bar{\theta}_f$ 、縦軸は実験値である。実験は3回行った。

サブクローラ角度の実験値は概ね設定した拘束角度に近い値を得ることができた。一方で設定角度より小さい値で本体が持ち上がっているが、点Pで接触したとき、クローラベルトによる伝達により上向きの力が働いたため、全体的に拘束角度が減少したものと考えられる。また、与えた推進力とロボットの幾何学的な関係からサブクローラ角度が70度になると本体が持ち上がり始めることから、拘束角度を大きな角度で設定した場合は設定値と実験値の差異が大きくなることが分かった。以上より、本論文で示した仮説および制御系設計手法の妥当性を確認することができた。

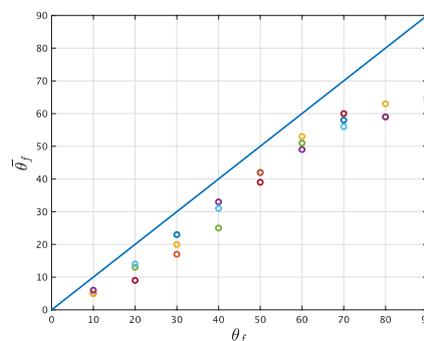


図4 固有角振動数とサブクローラ角度

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を設計する際の剛性の設定に利用し、様々な形状の障害走破実験を行い不整地走行に対する有用性を示す予定である。

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.