

不整地移動マニピュレータによる本体自由度を用いた操作力最大化の提案

幸村貴臣 (東北大学) 永谷圭司 (東北大学)

1. 緒言

レスキュー隊員の代わりに災害現場で活動を行う、災害対応ロボットの活躍が期待されている。災害対応ロボットの中には、ロボットに搭載されたクローラ機構やサブクローラを用いて、小型ながら高い不整地走行性能を得るものがあり、不整地移動ロボットと呼ばれる。不整地移動ロボットにマニピュレータが搭載された不整地移動マニピュレータは、その応用性の高さから、大きな注目を集めてきた。例えば、不整地移動マニピュレータの pakbot[1] は、搭載したマニピュレータを用いて福島第一原子力発電所の二重扉を開け、初めて建屋の中に入れた [2]。著者らの研究室でも、不整地移動マニピュレータの研究開発を進めている。ここで開発された、Quince(図 1) は、クローラ機構による並進・旋回移動と、4つのサブクローラを用いた、ロボット本体の姿勢制御が可能であり、この走行系の上部に 6 自由度のマニピュレータが搭載されている。

不整地移動マニピュレータのミッションの一つに、崩壊した家屋や施設の内部などの屋内環境の調査がある。その場合、不整地移動マニピュレータには、ドアの開閉動作や、瓦礫の撤去など、大きな操作力を要求されるマニピュレーションが要求されることがある。しかし、屋内にて活動を行うためには、ロボット自身およびマニピュレータは十分に小型である必要があるため、必要とされる操作力が得られない可能性があり、ここにトレードオフが発生する。この課題への解決策として、モータの小型・高出力化といった機械的なアプローチと、マニピュレータの動作手法の改善といった、制御的なアプローチが考えられる。本研究では後者を扱うこととし、不整地移動ロボット本体の自由度を用いた、マニピュレータの手先操作力の最大化を研究目的とする。

ここで、不整地移動マニピュレータに期待される、ドアの開閉動作や瓦礫の撤去などの動作におけるマニピュレータの手先の移動軌跡に注目すると、この軌跡は、対象物の位置及び動作方向に応じて、比較的単純に定められるが、これらの作業には大きな力が必要である場合がある。そこで、本研究では、このようなマニピュレーションに対し、土台となる不整地移動ロボットの自由度を用いて、その位置・姿勢を最適化することで、搭載されたマニピュレータの操作力を最大化する手法を検討することとした。

本稿では、手先の移動方向を考慮した操作力の評価指標に関して論じた後、ロボットの本体姿勢と操作力の関係に関して解析し、操作力を最大化する手法について提案する。



図 1 不整地移動マニピュレータ「Quince」

2. 手先の移動方向を考慮した操作力の指標

まず、手先の移動方向を考慮した、操作力の評価指標に関して考える。これまでに、操作力の指標として、操作力楕円体 [3] や、インピーダンスマッチング楕円体 [4] などが提案されてきた。これらは手先の全自由度に対する操作力の指標であり、手先の移動方向には依存しない。

一方、手先の移動方向を考慮した、操作力と可操作度の指標として、compatibility index [5] がある。実際の不整地移動マニピュレータへの動作要求を考えると、ドアの開閉動作や瓦礫の撤去動作など、可操作度よりも操作力が重要である場合が多い。そこで、本研究においては、移動マニピュレータの操作力を向上させることを目的とし、compatibility index における操作力成分のみを、手先の移動方向を考慮した操作力の指標として用いることとした。以下に、その導出を示す。

まず、回転リンクから成り立つ、シリアルリンクマニピュレータを考える。手先の微小移動量を dP 、手先に働く力を F 、関節トルクを t 、関節微小変位を $d\theta$ とすると、仮想仕事の原理より以下の関係が成り立つ。

$$F^T dP = t^T d\theta \quad (1)$$

ここで、ヤコビアン行列 J と dP 、および dP の関係式

$$dP = Jd\theta \quad (2)$$

を用いると、以下の関係式が成り立つ。

$$t = J^T F \quad (3)$$

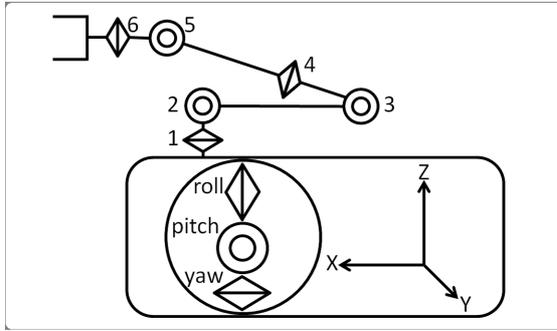


図2 不整地移動マニピュレータのモデル

ここで、各リンクのトルクを正規化するため、正規化行列 α を用いて、正規化トルク t' を以下のように表す。

$$t' = \alpha t \quad (4)$$

ここで、 $|t'| < 1$ を満たす t' を用いて実現可能な F の集合が操作力楕円体となり、以下のように表せる。

$$F^T J \alpha^T \alpha J^T F < 1 \quad (5)$$

ここで、操作力楕円体の、手先の移動方向への半径 R は、手先の移動方向への単位ベクトル e を用いて、以下のように表せる。

$$R = (e^T J \alpha^T \alpha J^T e)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

この操作力楕円体の手先移動方向への半径 R を、手先移動方向を考慮した操作力の指標 (Task Compatibility of Manipulatability Force) とし、以降、TCoMF と表記する。

3. 本体の位置・姿勢と操作力 (TCoMF) の関係

3.1 不整地移動マニピュレータのモデル化

図1に示した、対象とする不整地移動マニピュレータを、図2のようにモデル化する。ロボット本体は、3つの並進自由度と、3つの回転自由度を持つ系とし、6自由度のシリアルリンクマニピュレータを搭載する。また、ロボット本体は、自身の位置・姿勢を、可動範囲内において変更できるものとする。

3.2 シミュレーションによる本体位置・姿勢と TCoMF の関係

手先の絶対位置および、移動方向を固定した際の、ロボットの本体自由度と TCoMF の関係を解析する。なお、簡略化のために、本体自由度のうち、ピッチ角と x 座標に注目し、それぞれの値を独立に変化した際の、TCoMF の値をシミュレーションによって解析した。なお、シミュレーションに使用するロボット固有のパラメータは、Quince の実機と同様とし、手先の位置を $[1,0,1][m]$ 、手先の移動方向を $[-1,0,0]$ 、本体の y 座標及び z 座標を $0[m]$ 、ロール角及びヨー角を $0[deg]$ とした。

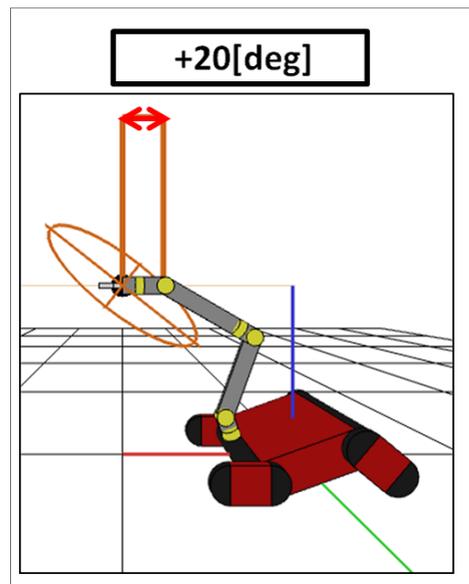
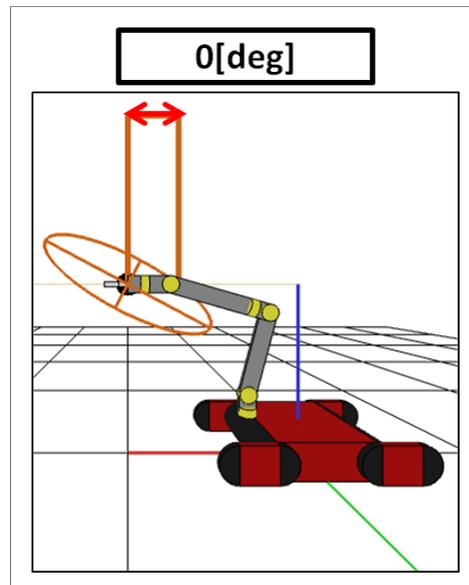
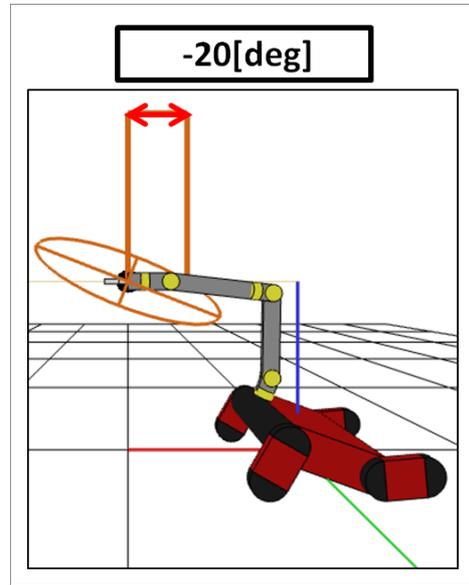


図3 ベースの姿勢に対応した手先の操作力楕円体

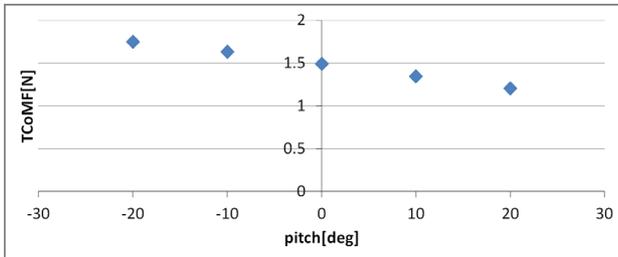


図4 シミュレーションによる比較 (TCoMF - pitch)

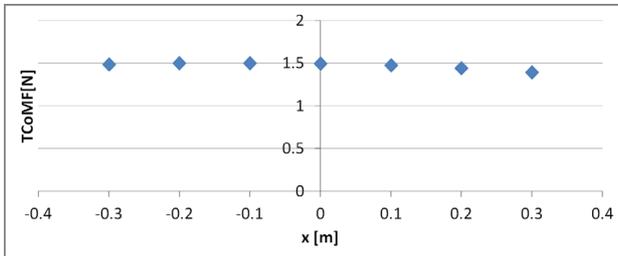


図5 シミュレーションによる比較 (TCoMF - x)

3.2.1 ピッチ角と TCoMF の関係

x 座標を $0[m]$ とし、ベースのピッチ角を変化させた場合の、手先の操作力楕円体のシミュレーションの様子を図3に示す。また、そこで得られた角度に対する TCoMF を図4に示す。図4より、本体ピッチ角が $0[deg]$ の場合と比較して、本体ピッチ角が $-20[deg]$ の場合の TCoMF は、約 1.2 倍となったことが分かる。ここで、操作力は、リンクから見た手先の方向へ最も大きな値を持つことを考慮すると、図3における、マニピュレータの各リンクと手先の z 座標の差より、ピッチ角が $-20[deg]$ の場合に、全てのリンクにおいて、手先とリンクの z 座標の差が小さくなったため、最も大きな TCoMF となったことが分かる。

3.2.2 x 座標と TCoMF の関係

ピッチ角を $0[deg]$ とし、 x 座標を変化させた場合の、シミュレーション結果を図5に示す。本体ピッチ角を変化させた場合と比較すると、TCoMF の変化が少ないことが分かる。これは、3.2.1 と同様の理由であると考えられる。

4. マニピュレーションタスクに対するロボット本体の位置・姿勢の最適化

ドアの開閉動作などの不整地移動マニピュレータに要求される動作は、手先の移動軌跡だけでなく、手先の移動時に発揮する必要がある力を考慮する必要がある。そこで、マニピュレーションタスクを、移動軌跡の各点において、動作の実現に必要な力をパラメータとして持つ、移動軌跡と定義する。ここで、移動軌跡の各点において、手先が発揮することのできる TCoMF と、動作の実現に必要な力の差を、TCoMF 余裕と定義する。TCoMF 余裕が常に正、かつ、TCoMF 余裕のタスク全体での積分値が最大となるように、ロボットの本体位置・姿勢を最適化することで、ロボットの

位置・姿勢だけでなく、マニピュレーション動作に関しても最適化することが可能となると期待できる。具体的には、以下の手順となる。

1. u_i 、 u_{i+1} を単位移動量にて分割し、操作経由点 $u_{i,1} \dots u_{i,j}$ とする。
2. 全ての操作経由点にて、目標とする TCoMF を満たす、ロボットの本体位置・姿勢を算出する。
3. ロボットが算出された本体位置・姿勢をとった後、タスクに基づきマニピュレーションを行う。

上記で提案した動作シーケンスに基づき、ロボット本体およびマニピュレータが動作することで、目標タスクにおける全ての操作経由点において、目標とする TCoMF を保証することが可能となる。今後、アルゴリズムのさらなる詳細を設計し、シミュレーションと実機での実験を通して、提案手法の有用性を示す予定である。

5. 結言

本稿では、不整地移動マニピュレータの本体自由度と操作力に関して、手先の移動方向に対する操作力の評価指標を述べ、シミュレーションによって本体自由度と操作力の関係性を示した。また、手先がだせる力を最大化する、ロボット本体の位置・姿勢の最適化の概念に関して述べた。今後は、提案した最適化手法をシミュレーションにて検証したのち、実ロボットに実装し、実機を用いた有用性の検証を行う予定である。

参考文献

- [1] B.Yamauchi. Packbot: A versatile platform for military robotics. In *In Proceedings of SPIE 5422*, 2004.
- [2] Tim Trainer. Deployment of Unmanned Systems after March 2011 Incident. In *日本ロボット学会誌 Vol.32, No.2, pp.133-136*, 2014.
- [3] 吉川恒夫. *ロボット制御基礎論*. コロナ社, 1988.
- [4] Kuratsume Ryo and Tsutomu Hasegawa. Impedance matching for a serial link manipulator. In *International Conference on Robotics and Automation*, 2004.
- [5] Stephen L. Task compatibility of manipulator postures. In *The International Journal of robotics Research*, 1988.