

不整地移動マニピュレータの手先操作力を最大化する ベース位置・姿勢制御

幸村 貴臣^{*1}, 永谷 圭司^{*2}

Base-shape and position control of all-terrain mobile manipulators to maximize manipulating force

Takaomi KOUMURA^{*1} and Keiji NAGATANI^{*2}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Tohoku University
468-1 AramakiAoba, Aoba-ku, Sendai, 980-0845, Japan

^{*2} New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University
6-6-10, Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

All-terrain mobile manipulator, mobile manipulator with high-mobility on rough terrain, is expected to work in disaster area instead of the rescue crew. In some rescue missions, such robots are required to generate a large force, e.g. opening doors. However, it is difficult for them to mount a powerful manipulator because of keeping traversability on rough terrain. Therefore, in this research, we propose an optimal method of base shape and position control of all-terrain mobile manipulators to maximize manipulating force by changing its position and attitude. An advantage of the method is validated by our simulation results.

Key Words : mobile manipulator, manipulating force

1. 緒 言

災害が発生した場合、迅速な救助活動及び、現状把握は、人命救助や今後の救助活動計画の作成などの面から、非常に重要である。しかし、被災地に人間が直接足を運ぶことは、二次災害による人的被害の増加が懸念されるなど、望ましくない。そこで、人間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おり、これまでも様々な研究開発が行われてきた。⁽¹⁾

災害対応ロボットの中には、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る。これを不整地移動ロボットと呼ぶこととする。また、不整地移動ロボットをベースとし、その上部にマニピュレータが搭載されたものを、不整地移動マニピュレータと呼ぶ。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、iRobot社のPackbot⁽²⁾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、初めて建屋内部への進入に成功した。

著者らの研究室でも、不整地移動マニピュレータの

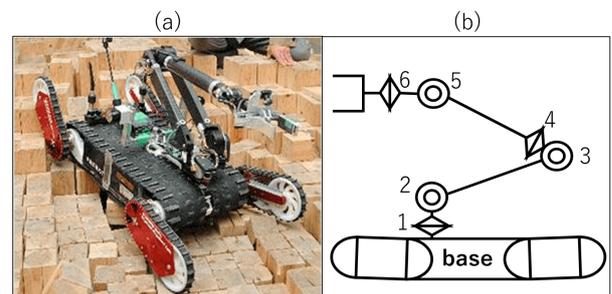


Fig. 1 (a)All-terrain mobile manipulator "Quince" and (b) a model of our target all-terrain mobile manipulator

研究開発を進めている。これまでに開発を行った、マニピュレータ搭載型 Quince⁽³⁾(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、被災した家屋や施設の内部などの屋内環境の調査がある。このような場合には、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、大きな操作力を必要とする作業を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、移動体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、発揮

^{*1} 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1) koumura@fml.mech.tohoku.ac.jp

^{*2} 東北大学 未来科学技術共同研究センター (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-10) keiji@iecee.org

できる手先操作力は制限される。この制限の中で手先操作力を大きくするには、機構やモータの改良といった機械的アプローチと、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、不整地移動マニピュレータのベース位置・姿勢の最適化による、手先操作力の最大化を研究目的とする。

移動マニピュレータに関する先行研究として、可操作度を保障する動作計画⁽⁴⁾や、姿勢安定性を考慮した動作計画⁽⁵⁾、手先に作用する力に対する脚マニピュレータの姿勢の最適化⁽⁶⁾などがあるが、手先が発揮できる力を大きくすることに注目したものは少ない。さらに、サブクローラを有するクローラ型移動体は、接地面から走行駆動力を得られる上、姿勢を能動的に変更できるという、脚機構とクローラ機構の特徴を併せ持つものであり、これを手先が発揮できる力の向上に応用する先行研究は、著者の調べた限り存在しない。そこで、本研究では、不整地移動マニピュレータの手先操作力最大化手法を提案する。

不整地移動マニピュレータに期待される、ドアの開閉や瓦礫の撤去などの作業における、マニピュレータの手先の移動軌跡に注目すると、これら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。このような作業を行う際に、作業を実現することができるベース位置・姿勢にはある程度の範囲が存在する。そこで、この範囲内において、ベース位置・姿勢を最適化することで、手先操作力を最大とすることができる。また、作業時に発揮できる手先操作力を最大化するためには、マニピュレータの手先操作力が大きいことに加え、ベースが転倒・スリップを起こさないことが必要となる。そこで、本研究では、転倒・スリップ・手先操作力の3点に注目することで、ベース位置・姿勢の最適化を行う。

本稿では、作業時に不整地移動マニピュレータが発揮できる手先操作力 F_{task} に関して述べた後、ベース位置・姿勢と F_{task} の関係に関して解析し、マニピュレータの駆動による作業とベースの駆動による作業の差異を述べる。最後に、シミュレーションによる提案手法の有用性の検証に関して報告する。

2. 作業時に発揮できる手先操作力

本研究で扱う不整地移動マニピュレータは、図1に示すような、サブクローラを有するクローラ型移動体をベースとし、その上部に6自由度のマニピュレータが搭載されたものとする。このような不整地移動マニピュレータは、クローラ機構による並進・旋回動作に加えて、サブクローラを利用することで、ベース位置・

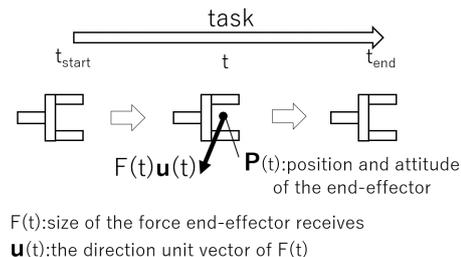


Fig. 2 Task definition

姿勢を制御することが可能である。

不整地移動マニピュレータが作業を行う際の動作の流れを以下に示す。

1. 目標作業を決定
2. 作業開始時のベースの位置・姿勢を決定・実現
3. マニピュレータの駆動もしくはベースの駆動にて目標作業を実現

不整地移動マニピュレータが作業を行う際、手先は作業対象から反力を受ける。この力が原因で、作業を完了できない現象は、以下の3種類に分類できる。

- 手先が作業対象から受ける力によりベース自体が転倒する
- 手先が作業対象から受ける力により地面とクローラとの間がスリップが生ずる
- 手先が作業対象から受ける力がマニピュレータの手先操作力を上回る

これらの発生を防ぐことで、不整地移動マニピュレータは大きな力を必要とする作業を行うことができると言える。そこで、本研究では、作業を行う際のベースの位置・姿勢の最適化による、手先が作業時に発揮できる手先操作力(以下、 F_{task} と呼ぶ)の最大化を提案する。以下に、本研究で対象とする作業の定義および、 F_{task} を決定する3つの要素について述べる。

2.1 作業時に発揮できる手先操作力 F_{task} の定義
 不整地移動マニピュレータが、手先のある軌跡に沿って移動することを、作業と呼ぶこととする。本研究における作業の定義を図2に示す。作業は、時刻 $t = t_{start}$ から $t = t_{end}$ において行われるものであり、手先の位置および姿勢 $\mathbf{p}_H(t)$ 、手先が受ける力の大きさ $F(t)$ およびその方向単位ベクトル $\mathbf{u}(t)$ によって成り立つ。

ここで、ベースが転倒を起こす場合に手先が $\mathbf{u}(t)$ の方向に受ける力を $F_{tip-over}$ と定義する。次に、ベースが地面に対してスリップを起こす場合に手先が $\mathbf{u}(t)$ の方向に受ける力を F_{slip} と定義する。さらに、マニピュレータが各関節の駆動力によって $\mathbf{u}(t)$ と逆向きの方向に発揮できる力を F_{manip} と定義する。不整地移動マニ

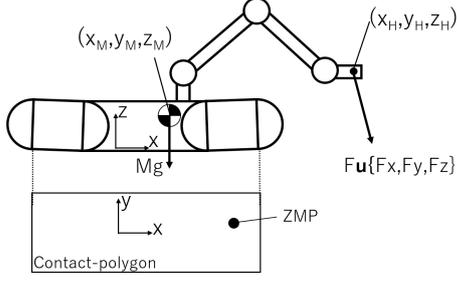


Fig. 3 A model of ZMP(zero moment point) and reaction force at the end-effector

ピュレータが作業を実現するためには、 $t_{start} \leq t \leq t_{end}$ において、 $F(t) < F_{tip-over}$, $F(t) < F_{slip}$, $F(t) < F_{manip}$ を常に満たす必要がある。すなわち、 $t_{start} \leq t \leq t_{end}$ における $F_{tip-over}$, F_{slip} , F_{manip} の最小値が F_{task} となり、以下のように表される。

$$F_{task} = \min(F_{tip-over}, F_{slip}, F_{manip}) \quad (1)$$

2.2 転倒発生時に手先が受ける力 $F_{tip-over}$ 手先が \mathbf{u} の方向に $F_{tip-over}$ の大きさの力を受けた際、ベースの転倒が生じる。図3に、手先が受ける力と、ベースの接地多角形およびZMP(zero moment point)⁽⁷⁾のモデルを示す。マニピュレータに発生する加速度を十分小さいものとする、ZMPの位置 x_{zmp} , y_{zmp} は、全体の質量 M 、重力加速度 g 、重心の位置 x_M, y_M および手先位置 x_H, y_H, z_H 、手先が受ける力 F_x, F_y, F_z を用いて、それぞれ以下のように表される。

$$x_{zmp} = \frac{x_M Mg - x_H F_z + z_H F_x}{Mg - F_z} \quad (2)$$

$$y_{zmp} = \frac{y_M Mg - y_H F_z + z_H F_y}{Mg - F_z} \quad (3)$$

ここで、ベースが転倒を起こす条件は、ZMPが接地多角形の外側に存在することである。すなわち、ZMPが接地多角形の辺上に存在する場合に、手先が受ける力の大きさが $F_{tip-over}$ となる。よって、式(2)(3)および接地多角形から、 $F_{tip-over}$ を算出することができる。

2.3 スリップ発生時に手先が受ける力 F_{slip} 手先が \mathbf{u} の方向に F_{slip} の大きさの力を受けた場合に、ベースは床面に対してスリップを起こす。床面が平面であり、クローラ表面を一様と仮定すると、手先が受ける力の延長線上に不整地移動マニピュレータの重心がある場合、ベースは床面に対し回転を伴わないスリップを起こす。それ以外の場合、ベースは床面に対して、回転を伴うスリップを起こす。以下に、それぞれの場合における F_{slip} の導出を示す。

まず、ベースが回転を伴わないスリップを起こす場合を考える。この場合、 F_{slip} は、ベースと床面との静

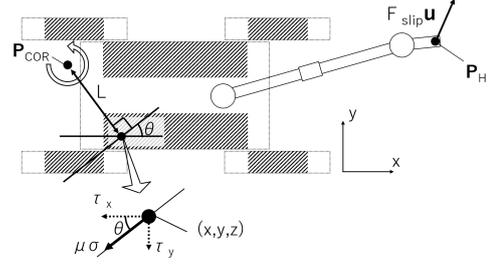


Fig. 4 A model of the force between the base robot and the ground, and the reaction force at the end-effector receive during the rotational slip

止静止摩擦係数 μ を用いて、以下のように表される。

$$F_{slip} = \mu Mg \quad (4)$$

次に、ベースが回転を伴うスリップを起こす場合を考える。ベースがスリップを起こす瞬間に接地面に働く力と、手先に働く力のモデルを図4に示す。図中斜線部は接地面を示し、回転中心の周りに反時計回りに滑り出すとする。なお、簡単のため、接地面に働く垂直応力は一様分布、クローラ表面は一様、手先に働く力は接地面に平行なものとする。このとき、 x 方向および y 方向の力のつり合いは、接地面 S 及び垂直応力 σ 、手先に働く力 F_{slip} とその方向ベクトル \mathbf{u} を用いて、以下のように表される。

$$\int^S \tau_x dS = F_{slip} u_x \quad (5)$$

$$\int^S \tau_y dS = F_{slip} u_y \quad (6)$$

モーメントのつり合いは、回転中心の座標 \mathbf{P}_{COR} および手先の座標 \mathbf{P}_H を用いて、以下のように表される。

$$\int^S \mu \sigma L dS = (\mathbf{P}_H - \mathbf{P}_{COR}) \times F_{slip} \mathbf{u} \quad (7)$$

上述の式(5)~(7)を同時に満たす \mathbf{P}_{COR} および F_{slip} を求めることで、ベースがスリップを起こす際に手先が受ける力 F_{slip} を算出することができる。

2.4 マニピュレータの操作力 F_{manip} マニピュレータの手先操作力は、各関節の最大駆動トルクと、マニピュレータの姿勢によって定まる。マニピュレータが発揮できる最大操作力の指標として、ForcePolytope⁽⁸⁾がある。また、ある方向へと発揮できる操作力の指標として、力伝達率⁽⁹⁾がある。本研究ではこれらの考え方を融合し、ForcePolytopeの作業方向径を F_{manip} と定義する。以下に、その導出を示す。

まず、関節駆動トルク \mathbf{T} と、手先に働く力 \mathbf{F} の関係は、マニピュレータのヤコビ行列 \mathbf{J} を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (8)$$

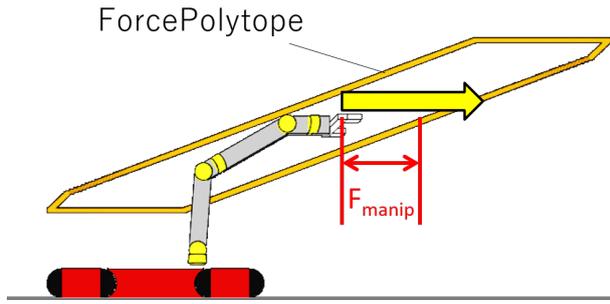


Fig. 5 Force polytope and the definition of F_{manip}

また、それぞれの関節駆動トルク T_i は、正方向および負方向に最大トルク T_{i-max} を持ち、以下のような制限で表される。

$$|T_i| \leq T_{i-max} \quad (9)$$

この制限内で実現可能な手先操作力によって表される多角形をユークリッド空間に図示したものを、ForcePolytope(図 5) という。この ForcePolytope の作業方向への径を F_{manip} とし、以下に導出を示す。

式 (8) より、作業方向単位ベクトルを \mathbf{u} とすると、手先に単位量の操作力が働く場合、以下の関係が成り立つ。

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}^T \mathbf{u} \quad (10)$$

この時、それぞれの関節駆動トルクの最大値に対する割合 T_{i-rate} を、以下のように定義する。

$$T_{i-rate} = \frac{T_i}{T_{i-max}} \quad (11)$$

このとき、 T_{i-rate} が最大となる関節が、手先が F_{manip} の力を発揮した際に、最初に最大トルクを向かえる関節となる。この関節を、ボトルネック関節と呼び、 $i = BN$ で表すこととする。ここで、 F_{manip} は以下の式で表すことができる。

$$F_{manip} = \frac{1}{T_{BN-rate}} \quad (12)$$

式 (10)~(12) から分かるように、この値はマニピュレータのヤコビ行列、作業方向、各関節の最大駆動トルクによって定まる。作業方向、各関節の最大駆動トルクは作業および機体にのみ依存するため、向上の余地はない。しかし、手先の位置が同一の場合でも、ベースの位置・姿勢の変化に伴いマニピュレータの姿勢は変化し、ヤコビ行列も変化する。そのため、同一の作業においても、ベースの位置・姿勢を変化させることで、 F_{manip} を大きくすることが可能である。

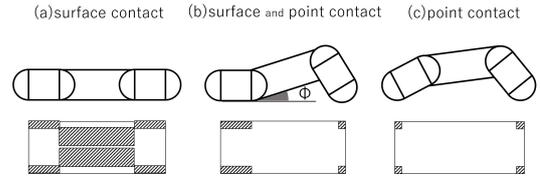


Fig. 6 Patterns of contact polygon of the base robot with various shape-configurations

3. ベース位置・姿勢の最適化

本研究では、与えられた作業に対して、 F_{task} を最大化するベース位置・姿勢を算出し、その位置・姿勢において作業を行う手法を提案する。ここで、本研究で扱う不整地移動マニピュレータは、ベース位置・姿勢をクローラ機構およびサブクローラの動作により制御する。以下に、サブクローラと、接地点およびベース位置・姿勢の関係を述べる。

サブクローラと接地点及び接地多角形の関係を図 6 に示す。床面を平面と仮定すると、ベースの接地方法は三種類存在する。一つ目は、前後のサブクローラを本体と平行とする、面接地の状態 (a) である。この状態では、ベースのピッチ角 ϕ が路面と等しくなる。また、接地多角形の面積は最も大きくなる。二つ目は、サブクローラの面と点による接触が混在する状態 (b) である。面接触のみの場合と比較すると、接地多角形の面積が小さくなるが、 ϕ を最も大きく変化させることができる。三つ目は、4つのサブクローラのみで接地する状態 (c) である。この状態では、マニピュレータ搭載部を持ち上げることができるが、接地多角形が小さくなる上に重心が高くなり、転倒の危険性が高い姿勢だといえる。

上記の通りサブクローラを用いることでベースの接地状態と姿勢が変化する。これにより、 $F_{tip-over}$ および F_{manip} が変化する。なお、 F_{slip} は旋回を伴うスリップの場合には接地状態に依存するが、旋回を伴わないスリップにおいては接地状態に依存しない。

マニピュレータが行うべき作業によって、 $F_{tip-over}, F_{slip}, F_{manip}$ のどれがボトルネックとなり、 F_{task} が決定するかは異なる。そのため、対象とする作業に応じて、適切にサブクローラを制御し、ベースの位置・姿勢を制御することで、大きな手先操作力を発揮することが可能となる。

4. ベースの走行駆動力の利用

不整地移動マニピュレータは、作業時にベースの走行駆動力を利用することができる。ベースの駆動により作業を行う場合には、手先負荷によるマニピュレ

タの各関節駆動部への負荷は、バックドライブ摩擦により低減されるため、大きな手先負荷を受けることができる。また、マニピュレータを固定し、ベースの駆動により作業を行うことで、手先とベースの相対位置は常に一定となる。そのため、 $t_{start} \leq t \leq t_{end}$ において \mathbf{u} が一定であれば、 F_{task} も一定となる。マニピュレータを駆動する場合には、 F_{task} は $t_{start} \leq t \leq t_{end}$ における最小値となるので、ベースの駆動により作業を行うことで、より大きな手先操作力を発揮することができる。ただし、ベースの駆動には下記的前提が必要である。

- 自己位置推定が十分な精度を有する
- ベースが十分な駆動力を有する
- 作業軌跡がベースの移動により実現可能である

これらの前提を満たしており、マニピュレータの駆動と比較してベースの駆動による F_{task} が大きい場合には、ベースの駆動により作業を行うことは有効であると言える。

5. シミュレーション

5.1 内容 提案手法の有用性を検証するため、シミュレーションによる検証を行った。説明のため、事前にシミュレーションで得られた最適位置・姿勢における作業の様子を図7に示し、以下に内容を述べる。

不整地移動マニピュレータにある作業を与え、その作業を行う際のベース位置・姿勢と、 $F_{tip-over}$, F_{slip} , F_{manip} および F_{task} の関係を調べた。シミュレーションに利用する不整地移動マニピュレータの各パラメータは、Quince 実機体のものと同様とした。シミュレーションモデルと目標作業の主要なパラメータを表1に示す。

この表1及び図7に示す通り、マニピュレータに与える作業は、手先が $z=1.0$ [m] の高さにおいて、 x 軸正方向の力を受けながら、 x 軸負方向へ一定速度で引っ張る動作とした。そして、この作業を行う際の、ベースの x 座標とピッチ角 ϕ を変化させ、それぞれの場合における F_{task} の値を算出した。ベースの x 座標及び ϕ の定義域は作業を実現可能な範囲とし、それぞれ $-0.3 < x < 0.2, -20.0 < \phi < 20.0$ とした。また、作業

Table 1 Parameters of Simulation

M	38.4kg
μ	0.4
T_{i-max}	16.2,72.3,30.0,16.2,30.0,12.3[N · m]
t_{start}, t_{end}	0,20[s]
$\mathbf{u}(t)$	(1.0,0.0,0.0)
$\mathbf{p}(t)$	(1.0 - 0.01t, 0.0, 1.0)[m]

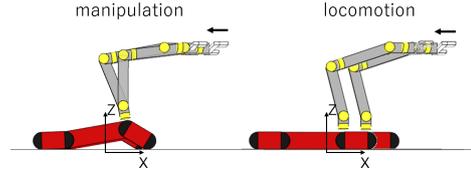


Fig. 7 Optimized configurations and motion of the mobile manipulator with its manipulator's motion (left figure) and the base robot locomotion (right figure)

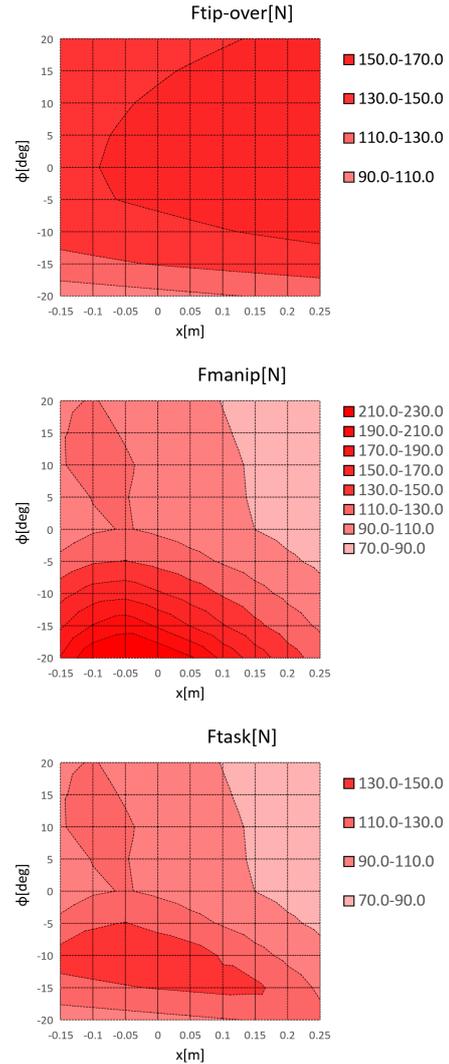


Fig. 8 Results of Simulation

- (a) Plot of $F_{tip-over}$ vs base position/attitude
 (b) Plot of F_{manip} vs base position/attitude
 (c) Plot of F_{task} vs base position/attitude

に利用する駆動力として、マニピュレータとベースの2通りを検証した。

5.2 結果と考察 シミュレーションの結果として得られた、マニピュレータの駆動により作業を行った

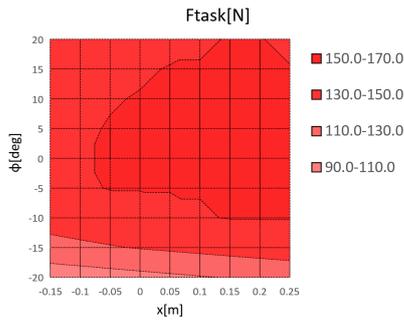


Fig. 9 Plot of F_{task} vs base position/attitude with base robot locomotion

場合の $F_{tip-over}, F_{manip}, F_{task}$ とベースの作業時の位置・姿勢 x, ϕ の関係を図 8 に、ベースの駆動により作業を行った場合の F_{task} と作業開始時のベースの位置 x および ϕ の関係を図 9 に示す。なお、 F_{slip} は式 (4) より、ベース位置・姿勢によらず常に 150.5N となった。

図 8 に注目すると、 $F_{tip-over}$ は ϕ の絶対値が小さいほど大きく、 F_{manip} は ϕ が小さいほど大きいという特徴が見られる。また、 F_{task} は $F_{tip-over}, F_{slip}, F_{manip}$ の最小値であるため、 F_{task} のグラフからは、 $F_{tip-over}$ ならびに F_{manip} のグラフを融合した特徴が見て取れる。 F_{task} のグラフは $(x, \phi) = (0.0, -10.0)$ に最大値を持ち、その時の F_{task} は 144.8N となった。これは、 $\phi = 0$ の場合と比較すると、130%以上の大きさとなる。

次に、図 9 に注目すると、 $(x, \phi) = (0.1, 0.0)$ を含む広域に最大値を持ち、その時の F_{task} の値は 150.5N であった。また、グラフの形状は、図 8 における $F_{tip-over}$ に近いことが分かる。これは、ベースの駆動力を利用することにより、 F_{manip} が増加し、 F_{task} が $F_{tip-over}$ と F_{slip} により決定されたためである。この結果から、マンピュレータの駆動により作業を行った場合と比較して、約 4% 大きな力を発揮することができることが分かる。

以上の結果から、ベース位置・姿勢の最適化による手先操作力の最大化が可能であることが確認できた。また、前提条件を満たす状況であれば、ベースの駆動力を用いて作業を行うことで、より大きな力を発揮することが可能であることが確認できた。ただし、ベースと路面の静止摩擦係数などのパラメータや、作業内容によって結果は大きく異なるため、状況に応じて適切な動作を行う必要がある。

6. 結言および今後の展望

本稿では、不整地移動マンピュレータが作業時に発揮できる手先操作力を最大化するための、ベース位置・姿勢の最適化を提案した。第 2 章では、提案手法の概念と、作業を考慮した不整地移動マンピュレータの手

先操作力 F_{task} および、その要素であるベース転倒を起こす際に手先が受ける力 $F_{tip-over}$ 、ベースがスリップを起こす際に手先が受ける力 F_{slip} 、マンピュレータが発揮できる力 F_{manip} に関して定義した。第 3 章では、サブローラを有するクローラ型移動体の、サブローラが本体となす角とベース位置・姿勢および接地点の関係に関して解析した。第 4 章では、作業時のベース駆動力の利用による操作力の向上について述べた。第 5 章では、シミュレーションによる検証の結果から、ベースの位置・姿勢の最適化による手先操作力の増加を確認した。また、ベースの駆動力を用いて作業を行うことにより、手先が発揮できる手先操作力を向上させることが可能であることを確認した。

今後の展望としては、実機体を用いた提案手法の有用性の検証や、ドアの開閉などのより実践的な作業への拡張などが考えられる。また、今回は接地面とクローラの間働く力を一応分布として簡易的にモデル化した。その妥当性は検証していない。不整地等への拡張を考える上でも、接地面とクローラの間働く力の正確な推定が重要であると考えている。

参考文献

- (1) S.Tadokoro, et al., "Special Issues on Rescue Robotics", *Advanced Robotics* Vol.19(2004), No.3, No.8.
- (2) B.Yamauchi, "Packbot: A versatile platform for military robotics" *SPIE 5422*, (2004), pp.228-237.
- (3) E.Rohmer, et al., "Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development", *Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics*, (2010), pp.225-230.
- (4) K.Nagatani, et al., "Motion planning for mobile manipulator with keeping manipulability" *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*. Vol. 2 (2002), pp.1663-1668.
- (5) 古野誠治, 山本元司, 毛利彰, "安定性を考慮した移動マンピュレータの軌道計画", *日本機械学会論文集 (C 編)* 69 巻 681 号 (2003-5).
- (6) 大野健一郎, 大隅久, 相山康道, 岡部仁, "力センサデータを利用した脚型移動マンピュレータの姿勢の最適化", *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004 講演論文集*, 2A1-L1-51, 2004.
- (7) Vukobratović M. and Borovac B., "Zero-moment point-thirty five years of its life", *International Journal of Humanoid Robotics*, 1.01(2004), pp.157-173.
- (8) Chiacchio, P. et.al, "Force polytope and force ellipsoid for redundant manipulators", *Journal of Robotic Systems*, 14(8), 613-620.
- (9) Chiu, Stephen L., "Task compatibility of manipulator postures", *The International Journal of Robotics Research*, (1988), pp.13-21.