解 説

作業移動型ロボットの協調制御

Control of Cooperative Work of Multiple Mobile Robots

木 村 浩* *電気通信大学情報システム学研究所

Hiroshi Kimura* *Graduate School of Information Systems, Univ. of Electro-Communications

1. は じ め に

移動ロボットが行う作業、もしくは、移動しながら行う作業は種々考えられるが、ここでは作業対象物がロボットと同程度、もしくは、対象物が大きい場合について考える。このとき、6軸のアーム1台で物体を操ることは不可能であり、3軸以下の力を発生する複数台の移動ロボットで作業を行う利点が発生する。これまで複数台の移動ロボットで搬送や組立て作業を行わせる研究はいくつかあるが、それらは以下の二つに大別される。

- (1) 自律分散システムの研究 [1]~[9]
- (2) 操りの力学と制御の研究 [10]~[13]

(1) の研究では、通信のある分散制御、通信のない分散制御、Behavior Based 分散制御などの手法の応用例として、主に複数台車輪型ロボットによる物体の搬送が取り上げられている。

(2) の研究では、対象物から見て移動ロボットは操るための指や手先に相当するので、多指・多腕の研究と共通な部分が多いが、移動ロボットによる操りという点で以下のような特徴がある。

- (a) 幾何学的拘束なく、自由に接触点を選択することができる。
- (b) 対象物からの作業反力だけでなく、床などからの支持反力も考慮する必要がある。

本稿では(2)の研究として、筆者が行った二つの研究の紹介を行う。最初は(a)の観点から操り作業に応じた接触点選択問題を扱ったもので、他方は(b)の観点から6足作業ロボットにおいて作業反力と支持脚安定性の関係を扱ったものである。

2章では、移動体ロボットによる宇宙構造物の操りの理論解析について述べ、接触点の選択が重要であることを示し、接触点を決定するために、目標加速度をどれだけ効率よく

発生できるかを表す「接触力の大きさ」だけでなく、制御性能も考慮して目標加速度まわりにどれだけ発生可能な加速度の余裕があるかを表す「動的可操作余裕 (DMM)」という指標を提案している。

3章では、作業腕を持った歩行ロボットの静的安定性について、支持反力を用いた新たな安定余裕 (NFM) を提案し、複数台の作業ロボットが、作業反力の増、すなわち内力の変化によって、より安定した状態で物体の保持および運搬などの協調作業が行えるよう、適切な支持脚接触力および作業腕接触力を計算する方法を示している。

2. 複数移動体ロボットによる宇宙構造物の操り

2.1 移動体型宇宙ロボット

筆者らは、スラスタ型のエンジンを搭載した複数の移動体によって、基本構造物の運搬、組立て、大型宇宙構造物の建設を行う方法(図1(上部))を提案している [11][12].

想定している移動体ロボットには、移動と姿勢を制御するため、スラスタエンジンとコントロールモーメントジャ

図1 複数移動体による太陽発電衛星建設の概念図

原稿受付 1995年8月30日

キーワード: Multiple Robot, Mobile Robot, Manipulation
Control of Cooperative Work

*〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1

*Chofu-shi, Tokyo

イロが搭載されている。実際には、連続長時間実験が可能なスラストエンジン型の推進方式を地上で模擬することは困難なので、実験装置では、スラストエンジン型の推進のかわりに、モータプロペラを移動体ロボットに実装した。

2.2 接触力最小接触点

N 個の移動体によって対象物を押すような作業を考える。 i 番目移動体から対象物に加わる力を ${}^0\mathbf{f}_i$ とする。対象物の加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ と接触点 i の位置が与えられたとき、系の運動方程式と静摩擦の条件を満たす接触力 $\hat{\mathbf{F}} = [{}^0\mathbf{f}_1^T, \dots, {}^0\mathbf{f}_N^T]^T$ のうち、自乗和が最小となるものを「最適接触力」と呼び、 $\hat{\mathbf{F}}^{ocf}$ で表す。

$\ddot{\mathbf{q}}$ に対する最適接触力の大きさは、接触点の位置によって大きく異なる。したがって、移動体の消費燃料を節約するためには、 $|\hat{\mathbf{F}}^{ocf}|$ を最小にする接触点の組を求める必要がある。ここでは、対象物の表面を n 分割し、可能な接触点の組み合わせすべてについて最適接触力 $\hat{\mathbf{F}}^{ocf}$ を計算し、 $|\hat{\mathbf{F}}^{ocf}|$ の最も小さいものを選ぶ。この方法は、 ${}_nC_N$ 個の組み合わせについて $|\hat{\mathbf{F}}^{ocf}|$ を計算する必要があるが、2.3 節で述べるような他の条件も考慮して、総合的に判断することを可能とする利点もある。

例えば、二次元平面内で対象物として楕円体を考え、全周を 20 等分した各点に番号 1~20 をつけ、接触点の候補とする。x 軸方向並進、y 軸方向並進、z 軸まわり回転という三つの加速度に対して、 ${}_{20}C_2$ 個の接触点の組み合わせ $cp(i, j)$ すべてについて $|\hat{\mathbf{F}}^{ocf}|$ を計算したうち、 $|\hat{\mathbf{F}}^{ocf}|$ の値の小さい接触点の組 3 個を図 2 に示す。図 2 において、

図 2 代表的な加速度と接触点組における $|\hat{\mathbf{F}}|$ と DMM の計算例

接触点での実線矢印は接触力を点線矢印は法線方向を表し、中心の矢印は加速度または角加速度を表す。この計算結果から分かるように、加速度によってはいくつかの接触点の組み合わせが等しいまたは同程度の $|\hat{\mathbf{F}}^{ocf}|$ の値をもつために、接触点の組を決定するためには、 $|\hat{\mathbf{F}}|$ 最小という条件以外の他の条件が必要となる。

2.3 動的可操作余裕

大きさと静摩擦の拘束条件もとに接触力 $\hat{\mathbf{F}}$ によって実現しうる加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ の集合は、接触点の各組み合わせにおいて発生可能な対象物の加速度を表しており、これを「動的可操作体 (Dynamic Manipulability Body, 以下 DMB)」と呼ぶ。ここで、DMB が大きいほど、発生可能な加速度の集合は大きく、制御性能が良いと考えられる。しかし、対象物に目標加速度を発生させる場合、制御についても考慮すると、目標加速度まわりに発生可能な加速度ができるだけ広く存在することが望ましい。したがって、ここでは、動的可操作性 [16] のように単純に DMB の大きさを操りの制御性能の指標とするのではなく、ある目標加速度 $\ddot{\mathbf{q}}_d$ から DMB 表面上の点までの最短距離を「動的可操作余裕 (DMM)」と呼び、「目標加速度まわりにどの程度広く加速度を発生できるか」の指標とする。

図 2 に、対象物の各加速度と各接触点の組み合わせにおける DMM の計算結果を示す。図 2 (b) において、 $|\hat{\mathbf{F}}|$ は等しいが、DMM は $cp(4, 16)$ がもっとも大きいので、接触点の組み合わせとしては $cp(4, 16)$ が望ましいと言える。このように、 $|\hat{\mathbf{F}}|$ の値が等しい場合には、DMM のより大きい接触点の組み合わせが望ましいと言うことができる。しかし、図 2 (a) のように、 $|\hat{\mathbf{F}}|$ が異なる場合、これと DMM をどのように組み合わせて「最適接触点」を定義するかが問題となる。

ここでは、特徴的な二つの接触点組と二つの加速度について、接触力の大きさと DMM を比較する (図 3)。拘束型

	$\ddot{\mathbf{q}} = (0.0, 0.125, 0.0)$	$\ddot{\mathbf{q}} = (0.0, 0.05, 0.0)$
(A)	 DMM = 0.074 F = 0.137	 DMM = 0.116 F = 0.055
(B)	 DMM = 0.125 F = 0.035	 DMM = 0.050 F = 0.014

図 3 実験に用いた接触点位置と目標加速度、および接触力の大きさと DMM の計算値

図4 The Concept of Cooperative Working

(A) では高加速度において接触力が大きく、低加速度において DMM が大きい。非拘束型 (B) では高加速度において接触力が小さく、低加速度において DMM が小さい。したがって、高加速度の軌道間輸送作業においては接触力の大きさの観点から非拘束型 (B) が、また、低加速度の組み立て作業においては制御性能の観点から拘束型 (A) がそれぞれ望ましいといえる。

3. 6足作業ロボットによる協調作業

3.1 6足作業ロボット

6足ロボットは、不整地移動時にも着地足の作る多角形上に重心をおいて静的に安定を保ちながら高速に移動が可能であり、掘り出し・持ち上げ・運搬などの作業時には4足支持または4足歩行を行いながら、2本の足をアームとして用いることが可能であり、このような作業に適している (図4)。

3.2 作業時の静的安定性

歩行ロボットにおいては、重心の射影から着地足の作る多角形の各辺に下ろした垂線の最小値を静的安定余裕 (Stability Margin) と呼び、静的安定性の指標として古くから用いられてきた。これは幾何学的な指標であり計算が簡単であるという利点がある。

作業を行う歩行ロボットにおいては、作業腕において発生する反力も考慮しなければならない。重心を計算するときに重力とともに作業腕反力も考慮することにより作業時の静的安定余裕 (Extended Stability Margin) を考えることができる。歩行ロボットが倒れないという意味での安定性を評価するためにはこれで十分であるが、作業腕でさらに発生できる力など、力学的な評価をするためには不十分である。

ここで、静的安定余裕が0になる場合を考えると、このときある支持脚での着地点法線方向反力が0になっており、歩行ロボットは倒れる寸前であることが分かる。このように、そもそも歩行ロボットの静的安定性は支持反力の大きさで評価されるべきであり、静的安定余裕は単に計算が簡単であるための代用に過ぎない。そこで、作業歩行

図5 対象物持ち上げ作業

ロボットでは基本に立ち戻り、支持反力法線方向成分の最小値で静的安定性を評価する。

着地点での正規化された反力安定余裕 (Normalized Force Margin: NFM) を以下のように定義する。

$$NFM = \min_i \frac{|n_i^T f_{li}|}{Mg/m}$$

ここで、 n_i : 着地点法線ベクトル, f_{li} : 支持脚反力, m : 支持脚数, Mg : 全重量。

作業腕反力を考慮した胴体座標系における力とモーメントの釣り合いの式から、安定余裕 (NFM) を計算することができ、作業計画時に安定性を評価することができる。

1台で作業を行うときは、作業反力は作業対象・作業内容によってほぼ一意に決まってしまうので作業中に NFM を制御することは難しいが、複数台で作業を行うときには対象物を通して作業反力を操作することにより NFM を制御することができる。

3.3 安定余裕を考慮した協調作業

NFM を考慮した協調作業の例として対象物の持ち上げ動作を考える。作業腕における z 方向の反力は NFM を小さくするように働くが、互いに押し合うような x 方向の内力を与えることにより NFM を大きくすることができる (図5)。

具体的な計算手順は、対象物と2台の作業ロボットのそれぞれについて力とモーメントの釣り合いの式をたて、以下の評価関数を最小にする解を2次計画により求める。

$$g = px + \frac{1}{2} x^T G x \rightarrow \min. \quad (1)$$

$$x = \begin{bmatrix} f_{l11} & f_{l12} & f_{l21} & f_{l22} & f_{a11} & f_{a21} \end{bmatrix}^T$$

$$p = \begin{bmatrix} 0 & -W_n \frac{m'}{Mg} n^T & 0 & -W_n \frac{m'}{Mg} n^T & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} W_{leg} E^{(8 \times 8)} & \\ & W_{arm} E^{(4 \times 4)} \end{bmatrix}$$

ここで、

f_{lri} : ロボット r の着地点 i での支持脚反力、

f_{ari} : ロボット r の接地点 i での作業腕反力

図6 W_{arm} に対する NFM と $1/|f_{armx}|$ の変化

評価関数 (1) 式の第一項においては, NFM の最大化を考慮して, 後脚 (図5においては NFM は後脚が対象となる) 反力法線方向成分 $n_i^T f_{li}$ に負の重み $-W_n$ をかけている. 評価関数の第二項においては, 支持脚・作業腕反力の最小化を考慮して, 各力のノルムにそれぞれ重み W_{leg} , W_{arm} をかけている. ここでは, 作業腕反力の大きさのみに着目しているので $W_{arm} \gg W_{leg}$ とする.

このような評価関数を用いることにより, 作業反力のノルムを小さくし, NFM を大きくする作業腕反力と支持脚反力の最適値を計算することができる. W_n を一定として, W_{arm} を変化させたときの作業反力のノルムと NFM の関係を解析した結果を図6に示す. ここでは, W_{arm} の値に対する NFM, および作業腕反力水平方向成分の逆数 ($1/|f_{armx}|$) の変化が示されている. 反力増加に伴う NFM の向上が確認できる. 結果的に内力は増加するが, パラメータによる接触力調節が可能なので, 安定性との兼ね合いを考慮して W_{arm} を設定する.

4. おわりに

安定余裕 (NFM) は支持脚反力より計算されるので力センサにより計測することもできる. 今後, 計測された安定余裕 (NFM) から作業腕でさらに発生できる力を評価し, 作業の計画・制御に適用する予定である. また, 本稿では, 複数台移動ロボットによる操りという観点から対象物-ロボット系全体の力学を使ったが, 通信の問題や作業の高速化などのためには自律分散型の作業計画・制御 [2][10] を考えていく必要がある.

参考文献

- [1] H. Asama, A. Matsumoto and T. Ishida: "Design of an Autonomous and Distributed Robot System," Proc. 1989 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '89), pp.283-290, 1989.
- [2] G. Ogasawara, T. Omata and T. Sato: "Multiple Movers Using Decision-theoretic Control," Japan/USA Symp. on Flexible Automation, vol.1, pp.623-630, 1992.
- [3] C.R. Kube, H. Zhang and X. Wang: "Controlling Collective Tasks with an ALN," Proc. 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS '93, pp.289-293, 1993.
- [4] D.J. Stilwell and J.S. Bay: "Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots," Proc. 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, pp.766-771, 1993.
- [5] B.R. Donald, J. Jennings and D. Rus: "Analyzing Teams of Cooperating Mobile Robots," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1896-1903, 1994.
- [6] L.E. Parker: "An Architecture for Fault Tolerant, Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Robots," IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS '94, pp.776-783, 1994.
- [7] Z. Wang, E. Nakano and T. Matsukawa: "Cooperating Multiple Behavior-Based Robots for Object Manipulation," IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '94, vol.3, pp.1524-1531, 1994.
- [8] J. Sasaki, J. Ota, E. Yoshida, D. Kurabayashi and T. Arai: "Cooperating Grasping of a Large Object by Multiple Mobile Robots," Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1205-1210, 1995.
- [9] 長田編: "自律分散をめざすロボットシステム", オーム社, 1995.
- [10] 沢崎, 井上: "複数の自律ロボットによる協調物体操作", 日本機械学会論文集 C 編, vol.59, no.564, pp.54-61, 1993.
- [11] 木村, 王: "複数移動体ロボットによる宇宙構造物の操り (第1報, 操りの基礎理論)", 日本機械学会論文集 C 編, vol.59, no.559, pp.855-861, 1993.
- [12] 王, 木村: "複数移動体ロボットによる宇宙構造物の操り (第2報, 操りの基礎実験)", 日本機械学会論文集 C 編, vol.59, no.559, pp.862-867, 1993.
- [13] 田中, 木村: "マルチ足作業ロボットによる協調作業—作業腕反力を考慮した支持脚反力の計算法—", ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, vol.A, pp.232-234, 1995.
- [14] 中村他2名, "複数のロボット機構による協調あやつりの力学", 日本ロボット学会誌, vol.4, no.5, p.23, 1986.
- [15] 小俣: "多指ハンドによる三次元つりあい把持のための指先位置計算アルゴリズム", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.10, p.1152, 1991.
- [16] 吉川: "ロボットアームの動的可操作性", SICE 論文集, vol.21, no.9, pp.84-89, 1985.

木村 浩 (Hiroshi Kimura)

1961年2月5日生. 1983年東京大学工学部機械工学科卒業. 1988年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程修了. 工学博士. 東北大学工学部助手, 電気通信大学講師を経て, 現在, 電気通信大学情報システム学研究所科助教授. 歩行ロボット, 知能ロボットの研究に従事. 1989年度日本ロボット学会論文賞受賞. 日本機械学会, 情報処理学会, 計測自動制御学会の会員.

(日本ロボット学会正会員)