

分散マニピレーションの研究動向

Recent Development in "Distributed Manipulation"

堀研究室

電気工学専攻 D3 97112 及部七郎斎

Abstract:

Distributed manipulation effects motion on objects through a large number of points of contact. The term "distributed manipulation" is explicitly introduced at the workshop in the IEEE International Conference of Robotic and Automation (ICRA) 1999. - ICRA is one of the most famous conference about robotics. - Due to recent development of micro-machine technology, distributed manipulation becomes more important and more feasible. This system has the following advantages.

- Many small inexpensive mechanisms can move and transport large heavy objects.
- If one component breaks, the other components compensate for the failure.

System design approach of this distributed manipulation has two kinds, bottom-up and top-down.

Today, some papers are introduced with the viewpoint of this classification. As this result, "trade-off" relationship between system configuration and system design easiness is indicated.

1 はじめに

1.1 分散マニピレーションとは、

分散マニピレーション [1][†] は多数のアクチュエータにより多数の支点を通じて対象物に作用する方法である。この言葉は1999年のロボットの分野の最も権威ある国際会議のうちの一つである The IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) で分散マニピレーションのワークショップが開かれたことによりメジャーとなった。Fig.1のように多数の人がある人を胴上げをして搬送や回転操作をしているところはまさに分散マニピレーションである。この手法により物体搬送をはじめ物体を操作する試みが様々なところで考えられている。この方法は、

1. システムの耐故障性の増加（一人くらいがサボっていても物体の操作はできる。）
2. 個々の出力が小さいアクチュエータでも重い物体が搬送できる（たくさんの手で支えるから胴上げができる。）。

などのメリットがある。この分散マニピレーションのコンセプトは、言い換えれば、高出力のアクチュエータを一つ用意するのではなく、低出力でシンプルな構造のアクチュエータを複数用意しそれらを複合し高出力を得る方法である。一般的に考えれば、低出力なアクチュエータを複数用意する方が高出力のアクチュエータを一つ用意するよりコスト的には割高である。最近なぜこのようなコンセプトが注目されるようになったかといえば、マイクロマシン技術により多数のアクチュエータの集積が低コストで簡単に可能となった（なりそう）からである。

分散マニピレーションの研究は主にミクロスケールのマイクロマシン [2], [3], [9], [10], [13] で進められているが、大きいものは我々の住んでいるマクロスケール [6], [7], [8], [14], [15] で研究が進められている。

[†] Distributed manipulation effects motion on objects through a large number of points of contact.



Fig. 1: Conceptual picture of distributed manipulation

複数のアクチュエータが並列に動作し、対象物に作用するため、アクチュエータの協調、対象物の挙動などを考慮したアルゴリズムは複雑なもの予想されるが興味深い。

1.2 本資料の構成

本資料は、まだ研究が始まったばかりのこの分散マニピレーションの研究動向に関して説明を行う。まずはじめに著者が分散マニピレーションの最大の成功例と考えている、天体望遠鏡『すばる』について簡単に紹介し、その基本概念について理解して頂くこととする。その後、様々な仮定やアプローチで研究がされている分散マニピレーションを、ボトムアップ、トップダウン方式という2つの分類により紹介を行う。

本資料では、ボトムアップ方式、トップダウン方式という言葉を用いる。曖昧な言葉であるので、前もって本資料内での使い方について示しておく。

分散マニピレーションはアクチュエータセル単体とシステムを構成する多数のアクチュエータセルの二つのレベルがある。どのレベルでルールを決め、システムを起動するかでボトムアップ方式とトップダウン方式の2つの方式による分類が成り立つ。

- ボトムアップ方式
ボトムアップ方式は個々のアクチュエータセルであるルールを決めておく。そのルールが多数のアクチュエータセルで構成される全体に効果を及ぼす。例えば、この部屋にいる人は人に殴られたら必ず、誰かれ構わず周りの人を殴り八つ当たりをするというルールを持っているとしよう。その場合、何らかのきっかけで誰かがある人を殴ってしまったら、少しの時間の後、この部屋では大乱闘が繰り広げられることになる（ケンカはやめましょう！）
- トップダウン方式
トップダウン方式はボトムアップ方式の逆であり、多数のアクチュエータでの全体のタスクが何より先に決定される。

例 [4], [5]

ハワイのマウナ火山に日本の国立天文台ハワイ観測所がある。そこには『すばる』と名付けられた直径8[m]を超える超大型反射鏡を擁する光学望遠鏡がある。光学天体望遠鏡は遠くの天体を観測するために、天体から放射、反射される弱い光を高密度に集光する必要があり、大型の反射鏡が必要であった。集光している様子を Fig.2 に示す。しかし大型の反射鏡は自身の自重で歪んでしまい、集光が上手くできず、Fig.3 に示すようになってしまう。そのため、今までは10[m]を超える超大型反射鏡はその自重から構造上実現不可能と考えられていた。

しかしながらここで逆の発想で、むしろ反射鏡を薄く軽くひずみやすい構造にして、Fig.4 にあるような多数のアクチュエータで支え、積極的に各アクチュエータで歪みを補正すれば、大型で歪みのない反射鏡が作れる。個々のアクチュエータの構造は Fig.5 に示す。ここでポイントとなるのが多数のアクチュエータを用いて多数の支点を通じて反射鏡を面で支え、補正を行っている点である。まさに分散マニピュレーションである。

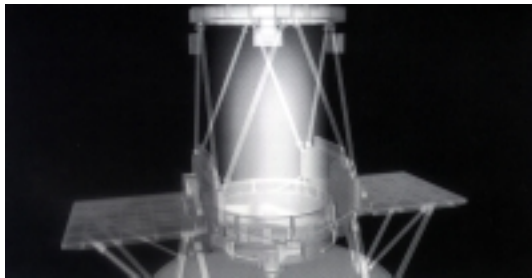


Fig. 2: Overview (1) of astronomical telescope "subaru". The ray of right is condensed by the large reflect mirror.



Fig. 3: Overview (2) of astronomical telescope "subaru". It is difficult to condense the ray of right because of distortion of the mirror by self weight.

3 トップダウン方式

本章では、トップダウン方式による分散マニピュレーションへのアプローチとして、MDMS(Modular Distributed Manipulator System) と PVF(Programmable Vector Fields) を紹介する。MDMS では最終的に搬送物体の位置制御を実現している。また、PVF では力場中での搬送物体の安定状態を解析し、どのような力場が搬送に適しているか考察している。

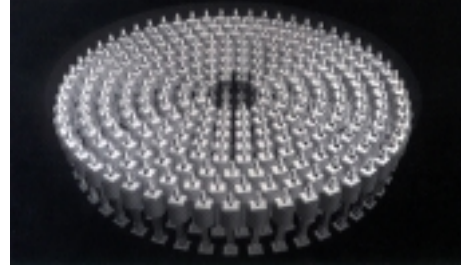


Fig. 4: Subaru system is composed of this actuator array.



Fig. 5-a: Subaru actuator (1)



Fig. 5-b: Subaru actuator (2)

Fig. 5: subaru actuator

3.1 MDMS - Modular Distributed Manipulator System - [6], [7], [8]

MDMS はカーネギーメロン大学の研究グループによって開発された分散マニピュレーション型の物体搬送システムである。各アクチュエータセルは x, y 方向にそれぞれ速度制御され回転するホイールがあり、そのアクチュエータセルを Fig.6 のように2次元平面に多数並べることに、Fig.7 のような自在な物体搬送を実現しようとしている。物体搬送といえば、ベルトコンベアやロボットマニピュレーションによる方法が思い浮かぶが、それらは幾つか問題点を抱えている。例えば、ベルトコンベアの場合は、搬送方向が一方だから間違えて搬送した物体を取り戻したりするのが難しい。またロボットマニピュレーションによる物体搬送は自由度はあるものの、重いものが運べない、長距離には向いていないなどの問題がある。それを解決する搬送システムの構築が MDMS の目的である。

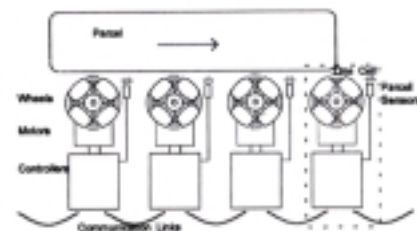


Fig. 6: MDMS (1). Actuator cell of MDMS.

3.1.1 基礎方程式群

MDMS 上で搬送物体が受ける力 f_x, f_y とトルク τ は、MDMS と対象物との間の干渉モデルを Hooke の法則で決まるようなバネを仮定すると、

$$\vec{f} = [f_x f_y]^T$$

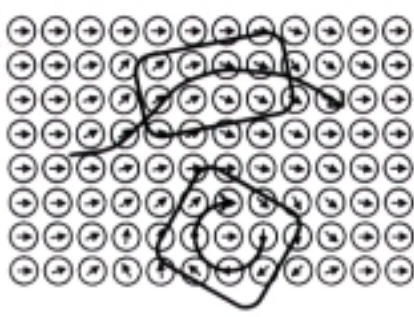


Fig. 7: MDMS (2). Action of MDMS.

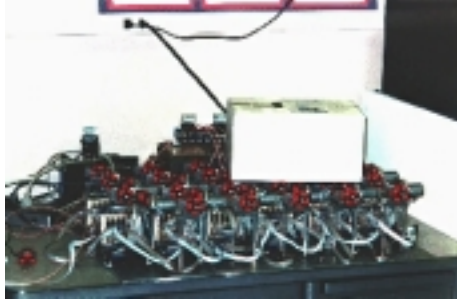


Fig. 8: MDMS (3). MDMS picture.

$$\begin{aligned}
 &= \mu \mathbf{V} \vec{N}^T - \mu \dot{\vec{X}}_{cm} W \\
 &= \mathbf{k}_s \vec{X}_{cm} + \vec{f}_0 - \mu W \dot{\vec{X}}_{cm} \quad (1)
 \end{aligned}$$

となる。式(1)はとてもシンプルな形をしているが、著者は論文中でこの関係式を求めたのが自分の大きな仕事の一つであるといっている通り、この関係式を導出するまでは大変な工夫と変形が施されている。

ただし、ここで \mathbf{k}_s は MDMS と搬送物体との間に仮定したバネのバネ定数行列であり、 \vec{X}_{cm} は搬送物体の重心位置、 \vec{f}_0 はオフセット力である。また、 μ, W はそれぞれ MDMS と搬送物体間の摩擦係数と搬送物体の重量である。

回転方向の力は、 i 番目のセルの出すトルクを τ_i とすると、

$$\begin{aligned}
 \tau_i &= \mu (\vec{X}_i - \vec{X}_{cm}) \times \left(\vec{V}_i - \dot{\vec{X}}_{cm} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} (\vec{X}_i - \vec{X}_{cm}) \right) N_i \quad (2) \\
 &= \mu (\vec{X}_i \times \vec{V}_i) N_i - \mu (\dot{\vec{X}}_{cm} \times \vec{V}_i) N_i + \mu \dot{\vec{X}}_{cm} \times (\vec{X}_i - \vec{X}_{cm}) N_i
 \end{aligned}$$

である。ここで $\vec{X}_i, \vec{V}_i, N_i$ はそれぞれ i 番目のセルの位置、ホイール速度、垂直抗力である。全てのセルから対象物が受けるトルクは i について和を取れば、

$$\begin{aligned}
 \tau &= \sum_i \tau_i \\
 &= \tau_0 + \vec{k}_{s\tau} \vec{X}_{cm} - (\vec{f}_0 + \mathbf{k}_s \vec{X}_{cm}) \times \vec{X}_{cm} \\
 &\quad - \mu \omega (\vec{\chi} \vec{N}^T - W \vec{X}_{cm}^T \vec{X}_{cm}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\vec{\chi} = [\vec{X}_1^T \vec{X}_1 \dots \vec{X}_i^T \vec{X}_i \dots]^T \quad (4)$$

$$\vec{R} = [\vec{X}_1 \times \vec{V}_1 \dots \vec{X}_i \times \vec{V}_i \dots]^T \quad (5)$$

となる。

3.1.2 フィードフォワード

搬送物体を目標位置まで運ぶことが MDMS の仕事である。そのために MDMS は搬送物に働く希望の力とトルクを発生

は具体的には各セルの位置と \mathbf{k}_s, \vec{f}_0 が与えられたとき、各セルのホイール速度を与える問題に帰着される。 \mathbf{k}_s, \vec{f}_0 は、

$$\begin{bmatrix} f_{0x} & k_{sxx} & k_{sxy} \\ f_{0y} & k_{syy} & k_{syy} \end{bmatrix} = \mu W \mathbf{V} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ x_1 & \dots & x_n \\ y_1 & \dots & y_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

で書くことができ、 $\mathbf{V} = [\vec{V}_x^T \vec{V}_y^T]^T$ であるから、

$$\begin{bmatrix} f_{0x} \\ k_{sxx} \\ k_{syy} \\ f_{0y} \\ k_{syy} \\ k_{syy} \end{bmatrix} = \mu W \left[\begin{array}{c|c} (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \vec{V}_x^T \\ \vec{V}_y^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_x^T \\ \vec{V}_y^T \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu W} \left[\begin{array}{c|c} (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{B} \end{array} \right]^\dagger \begin{bmatrix} f_{0x} \\ k_{sxx} \\ \mathbf{0} \\ f_{0y} \\ \mathbf{0} \\ k_{syy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{\mu W} \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{B}^T & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{B}^T \end{array} \right] \begin{bmatrix} f_{0x} \\ k_{sxx} \\ \mathbf{0} \\ f_{0y} \\ \mathbf{0} \\ k_{syy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし、ここで非正方向列 A があつたときその Penrose pseudo-inverse $A^\dagger = A^T (A A^T)^{-1}$ である。式(10)は搬送物体の挙動を決める \vec{f}_0, \mathbf{k}_s から各セルのホイール速度が順方向で決定できる関係式となっている。これにより、望み通りの挙動を得るためのホイール速度が決定できる。ここで得られたホイール速度が各セルでのホイール速度指令値となる。

3.1.3 フィードバック

MDMS から搬送物体が得る力は式(1)で与えられた。式(1)の減衰項を無視すれば、

$$\vec{f} = \vec{f}_0 = \mu W \mathbf{V} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

で書ける。前節のフィードフォワード手法のときと同様の方法で Penrose pseudo の疑似逆行列を用いれば、式(11)は容易に、

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_x \\ \vec{V}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu W} \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{B}_T & \mathbf{0}_n \\ \hline \mathbf{0}_n & \mathbf{B}_T \end{array} \right] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{0x} \\ f_{0y} \end{bmatrix} \quad (12)$$

を計算できる。これにより、えられた力 f_x から、搬送物体の運動方程式は下記の (13) となる。

$$m\ddot{x}_{cm} = f_x - b\dot{x}_{cm} \quad (13)$$

さて、この運動方程式 (13) に対して、Fig.9 のように位置のフィードバックをかけることにより、搬送物体の運動方程式は、もともとの式 (13) から

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_{cm} &= K_{fx}(x_r - x_{cm}) - \mu W \dot{x}_{cm} \\ m\ddot{x}_{cm} + \mu W \dot{x}_{cm} + K_{fx}x_{cm} &= K_{fx}x_r \end{aligned} \quad (14)$$

上記の式 (14) となる。伝達関数表現では、式 (16) のようになる。式 (16) 中の K_{fx} の調節により、搬送物体の位置から目標位置までの特性を調整できる。

$$\frac{X_{cm}(s)}{X_r(s)} = \frac{K_{fx}}{ms^2 + \mu Ws + K_{fx}} \quad (15)$$

$$\frac{X_{cm}(s)}{F_{dx}(s)} = \frac{1}{ms^2 + \mu Ws + K_{fx}} \quad (16)$$

MDMS のフィードバックループのブロックダイアグラムは

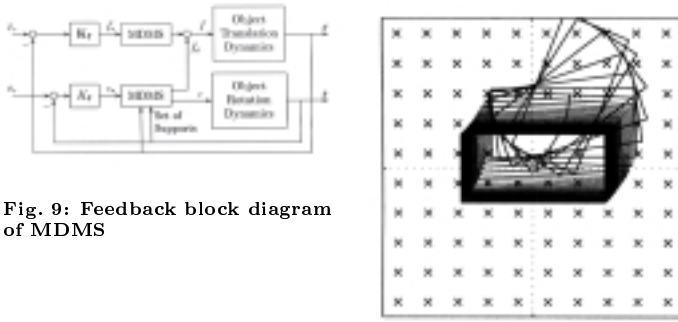


Fig. 9: Feedback block diagram of MDMS

Fig. 10: Simulation result with feedback position control

Fig.9 となる。また Fig.10 にフィードバックコントローラにより搬送物体の位置制御を施した場合の搬送物体の挙動を示す、シミュレーション結果を示す。論文には時間応答などやゲインとの関係などが書いていなかったのが残念である。

3.2 PVF - Programmable Vector Fields - [9], [10], [11], [12]

Programmable Vector Fields(PVF) の研究は Karl F. Böhringer らのグループによって行われている。Karl F. Böhringer らは MEMS デバイスの研究者でもあり、その立場から分散マニピレーションのアルゴリズム研究に貢献している。Karl F. Böhringer らは MEMS デバイスのアクチュエータセルは非常に脆く、またセンサをつけたり、自律するといった高度は判断を行うことができるようなものの製作は難しい、という立場をとっている。そんな MEMS のアクチュエータセルでも実現可能な分散マニピレーションのアルゴリズムが必要であると主張している。

PVF では、2次元平面内に高密度にアクチュエータセルを集積し、各アクチュエータセルは任意の力を出すことができる。そのときそれらアクチュエータセルにより生成される力場から搬送物はどのような影響を受けるかを解析している。

さて、アクチュエータセルにより生成される力場 $f = f(x, y)$ とし、搬送物体の形状を示す関数 $w(x, y)$ を定義する。ただし、搬送物体の大きさは有限であるから $W = \int_{\mathbb{R}^2} w(p)dp < 0$ である。搬送物体の受ける力 F は、

$$F = \int_{\mathbb{R}^2} w(p)f(A_\theta p + t)dp \quad (17)$$

$$M = \int_{\mathbb{R}^2} w(p)(A_\theta p) \times f(A_\theta p + t)dp \quad (18)$$

である。ただしここで、 A_θ は回転行列で、

$$A_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (19)$$

である。搬送物体の安定条件は、

$$F = 0 \quad (20)$$

$$M = 0 \quad (21)$$

$$(22)$$

である。 f として楕円型の力場 (23) を考える (Figs.11-a,11-b 参考)。

$$f(x, y) = [-\alpha x \quad -\beta y]^T \quad (23)$$

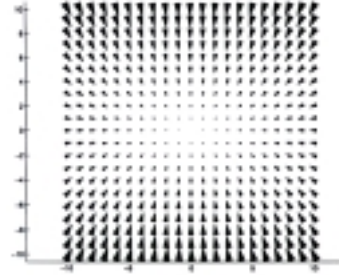


Fig. 11-a: PVF (1) force vector

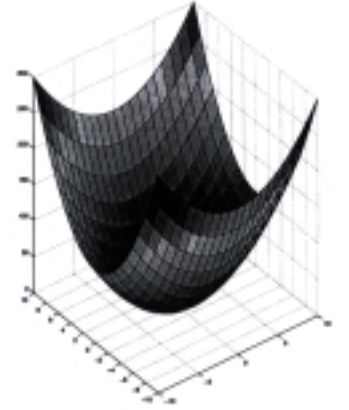


Fig. 11-b: PVF (2) potential

Fig. 11: Elliptic force field $f(x, y) = [-\alpha x \quad \beta y]^T$

このとき、力の平衡点 q は

$$F = \int_{\mathbb{R}^2} w(p)f(A_\theta p + t)dp \quad (24)$$

$$= [-\alpha Wx \quad -\alpha Wy] \quad (25)$$

$$= 0 \quad (26)$$

から $q = [0, 0, \theta]$ を得る。また、

$$M = \int_{\mathbb{R}^2} w(p)(A_\theta p)dp \quad (27)$$

$$= (\alpha - \beta) \left\{ \frac{\sin 2\theta}{2} \int (x^2 - y^2)w(x, y)dxdy \right\} \mathbf{k} \quad (28)$$

$$+ (\alpha - \beta) \left\{ \cos 2\theta \int xyw(x, y)dxdy \right\} \mathbf{k} \quad (29)$$

$$= 0 \quad (30)$$

$$\frac{s_{20} - s_{02}}{2} \sin 2\theta + s_{11} \cos 2\theta = 0 \quad (31)$$

ただしここで、

$$s_{mn} = s_{mn}(w) = \int_{\mathbb{R}^2} x_m y_n w(x, y)dxdy \quad (32)$$

であり、式 (31) が満たされるためには、 $[\frac{s_{20} - s_{02}}{2} \quad s_{11}]^T$ と $[\sin 2\theta \quad \cos 2\theta]^T$ が直交することが条件となる。

このとき任意の $\theta \in [0, 2\pi)$ で式 (31) が満たされる。これは物体の元の形状で安定位置が決まるので、もしこの状態に陥ってしまうと楕円型の力場では対象物を回したりといったことを不可能になる。

- **ASYMMETRY:** $\theta = \theta_0, \theta_0 + \pi$
 θ_0 は搬送物の形状と楕円型の力場のパラメータ α, β に依存し決まる。しかしながら $w(p)$ が与えられれば、任意の θ_0 を得る α, β を計算し容易に対象物を操作できる。

本節最初にも示したとおり、PVF ではアクチュエータセルは脆く、センサも持たず、高度な判断はできないという立場である。そんなアクチュエータセルにより発生される力場で分散マニピュレーションを行うときは搬送物はただ安定状態に向かい移動する。すなわち安定点がどこにある力場を生成するかが重要となり、それが搬送物体の操作法となる。ここでは、楕円型の力場のみの解析だけであったが、他の力場での解析や MEMS での搬送実験なども論文には盛り込まれていることを付記しておく。

4 ボトムアップ方式

前節までは、主に分散マニピュレーションに対するアプローチとしてトップダウン的な方法によるアプローチのものを紹介した。本節では、前節までとは違い、ボトムアップ方式によるアプローチの論文を紹介する。

4.1 ADM - Autonomous Distributed Micromachines - [13]

Autonomous Distributed Micromachines (ADM) は LSI などの半導体加工技術を用いて、多数のマイクロアクチュエータを製作し、そのアクチュエータで相対的に巨視的なタスクを実現する装置で、小西らのグループで主に研究が行われている。個々のアクチュエータセルは自分でマイクロプロセッサなどを持っており、必要があれば自分で自分のフィードバック制御などが可能である。また、そのマイクロプロセッサで自律しており、隣接する他のアクチュエータセルと協力することにより分散マニピュレーションを可能とする。Figs.12-a,12-b にその概念図を示す。シリコンウェハ上にアクチュエータ、マイクロプロセッサ、センサを集積し、それらにより物体を搬送する。個々のアクチュエータは小型で非力でストロークも小さいけれども、多数を平面上に並べることにより比較的重いものや広範囲の移動も可能になる。

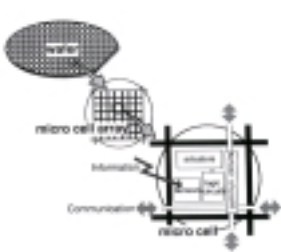


Fig. 12-a: ADM (1)

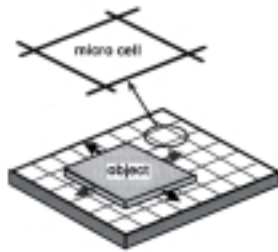


Fig. 12-b: ADM (2)

Fig. 12: Conceptual diagram of ADM

4.1.1 搬送アルゴリズム

ボトムアップ方式による、ADM の物体搬送アルゴリズムは、

1. まずはじめに搬送目標位置のアクチュエータセルを算出する。

3. あるセルが "TowardMe" シグナルを受信したら、そのセルはシグナルを受信した方向に物体を運ぶように外力を発生する。ただし、複数のセルから "TowardMe" シグナルを受信したら何もしない。
4. "隣接し、シグナルを送信してきたセルと反対側の 3 つのセルに対して "TowardMe" シグナルを送る。
5. 物体搬送中は 3, 4 のステップを繰り返す。

の通りである (Fig.13 参考)。

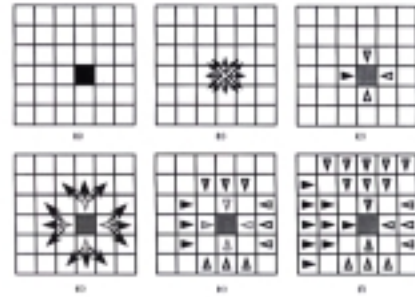


Fig. 13: Fundamental action of ADM

4.1.2 耐故障性ロジック

マイクロマシンアクチュエータは普通のアクチュエータに比べ壊れやすい。そのため耐故障のアルゴリズムを内包することが望ましい。故障を

- 2,3 個のアクチュエータが壊れた。
- アクチュエータが壊れただけ。ただし、その範囲は広範囲に及ぶ。
- アクチュエータとコントローラの両方が壊れる。

と分類する。これにより、故障から回復するアルゴリズムと故障を回避するアルゴリズムは、

1. 故障回復ロジック: (Fig.14 参照)

- "TowardMe" シグナルを受信していないアクチュエータセルは故障回復ロジックが動作している。
- 故障回復ロジックが動作しているとき、アクチュエータセルは右か左かのどちらかがアクティブであればそれと同じ方向でアクティブとなる。

2. 故障回避ロジック: (Fig.15 参照)

- "TowardMe" シグナルを受信していないアクチュエータセルは故障回避ロジックが動作している。
- 故障回避ロジックが動作しているとき、アクチュエータセルは自分に向かってアクティブとなっていないアクティブなアクチュエータセルの方向にアクティブとなる。

で得ることができる。Figs.16,17 に故障回復と故障回避のシミュレーション結果をそれぞれ示す。良好な結果を示しているのがわかる。

5 両方からのアプローチ - ボトムアップとトップダウンそれぞれから -

ここまではボトムアップ、トップダウンそれぞれの立場から分散マニピュレーションにアプローチしている研究例につ

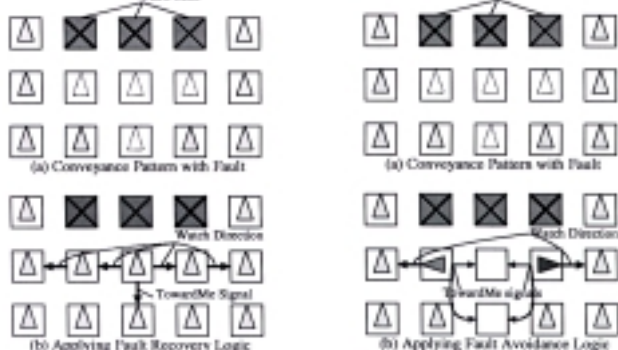


Fig. 14: Fault recover logic action

Fig. 15: Fault avoidance logic action

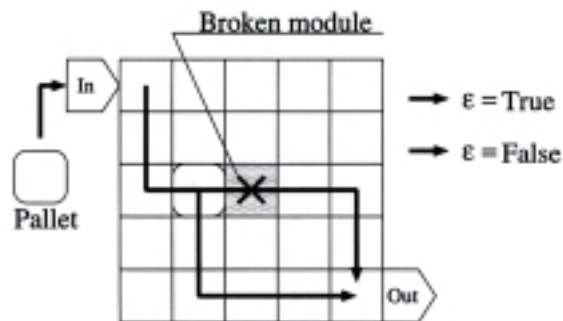


Fig. 19: FTS fundamental action

- 東西南北の方向に搬送物を運ぶことができる。

FTSの目的は、Fig.19のようにFTSに投入された搬送物体を最適なルートで目標位置まで搬送することにある。アクチュエータセルが故障した場合はそのアクチュエータセルを避けるルートを選択しなくてはならない。このFTSの問題はパスプランニングの問題である。

このFTSではあるアクチュエータセルの故障は隣のアクチュエータセルのみ知ることができる仮定している。すなわち、隣のアクチュエータが壊れていたら、今までと違ったパスに搬送物体を運ぶことを、各アクチュエータセルは判断しなくてはならない。また、各アクチュエータセルは25個の全体に対する情報は持っていない、搬送物体の搬送目標位置もわからない。そのため、全体を総括し最適なパスプランニングをするトップダウン方式のアルゴリズムの設計と、各アクチュエータセルは隣接するアクチュエータセルの故障を検知し、ローカルな判断でフレキシブルにパスプランニングを行う、ボトムアップ方式のアルゴリズムの設計の二つのアプローチが必要となる。

例えば、Fig.19で、はじめにトップダウン方式による方法で最適なパスプランニングを行っておく（Broken moduleの上を通過しているパス）。あるアクチュエータセルが壊れたら、そこを避ける判断をBroken moduleの隣の丸く印のついているアクチュエータセルがローカルな情報を基にしてボトムアップ方式により行う。FTSでは、このトップダウン方式とボトムアップ方式の双方からのパスプランニングの方法として、トップダウン方式は遺伝的アルゴリズム（GA）による方法を、ボトムアップ方式は学習オートマトン（LA）による方法を採用している。

5.1.1 LAによるボトムアップ方式によるパスプラン

LAによるパスプランを考えるに当たり、まずはじめに幾つかの関数などを定義する。アクチュエータセルは $p = (x, y)$ にあるとし、隣接するアクチュエータセルの集合を、

$$p(i) = \{(x + 1, y), (x, y - 1), (x - 1, y), (x, y + 1)\} \quad (33)$$

で定義する。 $p(1), p(2), p(3), p(4)$ がそれぞれ隣接アクチュエータセルとなる。次に、アクチュエータセル p の時刻 t での内部状態変数 $h_p(t)$ を以下で定義する。

$$h_p(t) = \left[b_{p(1)} \quad b_{p(2)} \quad b_{p(3)} \quad b_{p(4)} \right]^T \quad (34)$$

ただし、ここで $b_{p(1)}, b_{p(2)}, b_{p(3)}, b_{p(4)}$ は、それぞれ $p(1), p(2), p(3), p(4)$ 方向のアクチュエータセルへの搬送物体移送確率である。当然、必ずどこかに移動させるから、(35)のようにその和は1となる。

$$\|h_p(t)\| = \sum_{i=1}^4 |b_{p(i)}| = 1 \quad (35)$$

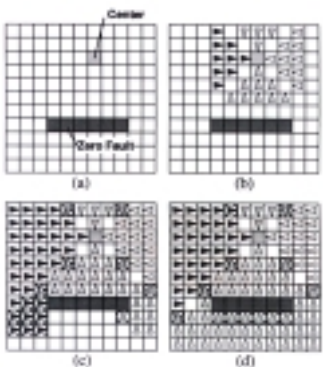


Fig. 16: Fault recovery (simulation result)

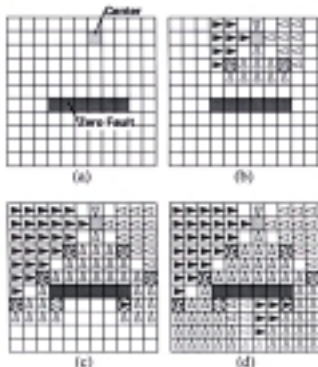


Fig. 17: Fault avoidance (simulation result)

いて紹介した。本節ではボトムアップ、トップダウンの双方から、それぞれの長所、短所を理解し、アプローチしている研究について紹介する。

5.1 FTS - Flexible Transfer System - [14], [15]

FTS(Flexible Transfer System)はFig.18のような25個の物体搬送ユニット（アクチュエータセル）を2次元平面内に 5×5 で並べた装置である。各アクチュエータセルは、

- 自分の上に搬送物があるかないか判断でき、

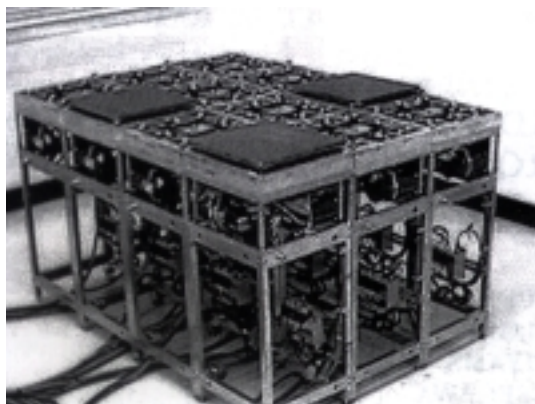


Fig. 18: FTS picture

が隣接するアクチュエータセル $p' \in p(i)$ に搬送物体を移動させたとき受け取る報酬である。

$$r_p(t+1) = (1 - \theta_r)r_p(t) + \theta_r r_{p' \in p(i)} \quad (\theta_r = const.) \quad (36)$$

(36) で定義した報酬変数を基にして、各アクチュエータセルの内部状態変数を (37) で更新する。ただし、ここで A はアクチュエータセル p が搬送物体を渡すセルで $A \in p(i)$ である。

$$h_p(t+1) = Lh_p(t) \quad (37)$$

ただし、ここで L は学習オートマトンで L_{R-I} メソッドで定義される方法で (38) で定義する。

これにより各アクチュエータセルは自己組織化し、搬送が可能となる。

$$L \equiv b_{p(i)}(t+1) = \begin{cases} (1 - \theta_v r_A)b_{p(i)}(t) + \theta_v r_A & (i = A) \\ (1 - \theta_v r_A)b_{p(i)}(t) & (i \neq A) \end{cases} \quad (\theta_v = const.) \quad (38)$$

5.1.2 GA によるトップダウン方式によるパスプラン

GA によるトップダウン方式によるパスプランは多数あるルートのうち最短のものを GA により探し出す問題である。トップダウン方式では仮定通り、各アクチュエータセルの故障は考慮されないため、一度最初にパスプランを行えばそのままである。GA によるルート検索の手続きは Fig.20 で、標準的な方法である。

```

begin
  i ← 0
  path initialization
  repeat
    evaluation
    selection
    mutation
  i ← i + 1
  until i = end of generation
end

```

Fig. 20: GA rules

5.1.3 FTS シミュレーション結果

FTS のシミュレーション結果全てで共通で、縦軸は搬送能力である (詳細は論文には書いてないが、単位時間当たりの搬送量と思われる)。横軸は時刻で、10000step までの時刻では全てのアクチュエータセルは故障することもなく、正常に動作している。10000step から 30000step までは 25 個のアクチュエータセルのうち 3 つが故障し、30000step から故障したアクチュエータセルは故障から回復し、全てのアクチュエータセルは正常な動作に戻る。Fig.21 に FTS に LA (ボトムアップ形式) だけを適用した場合の物体搬送のシミュレーション結果を示す。10000step を越えたところでアクチュエータセルの故障により、搬送能力が著しく低下している。しかしながら、その後、LA により搬送パスは変更され、搬送能力は若干低下しながらも復元されているのが Fig.21 から読みとることができる。30000step を越えたところでアクチュエータセルは故障から回復し、全てのアクチュエータセルは正常動作に戻るから、搬送能力も元に戻るはずであるが、LA だけの方法では元の状態に戻ることができないことがわかる。

Fig.21 の LA だけの搬送シミュレーション結果から、LA だけのボトムアップ方式のアルゴリズムだけではアクチュエータセルが故障から回復した際に問題があることがわかった。

トップダウン方式の双方からのアプローチによるシミュレーション結果を示す。Fig.22 は搬送能力を示し、Fig.23 は LA と GA のどちらのパスプランが最終的に採用されたかを示している。Fig.22 から 10000step を越えたところでは LA によるパスプランが支配的になり、故障を補償している。また、30000step を越えたところでは今まで LA によるパスプランが支配的だったのが、GA によるパスプランが支配的になり、LA だけアルゴリズムでは問題となったアクチュエータセルが故障から回復しても、搬送能力は回復しない問題が解決されている。Fig.23 からも同様の事情が容易に理解することができる。

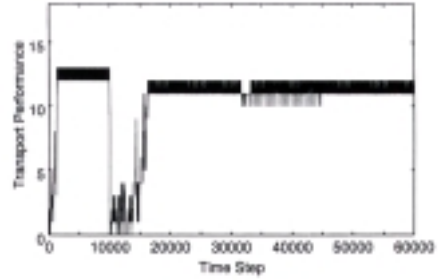


Fig. 21: Transportation performance(FTS only with LA)

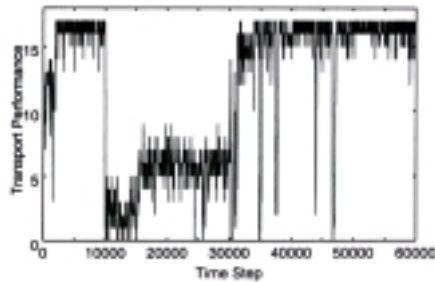


Fig. 22: Transportation performance(FTS with LA and GA co-evolution)

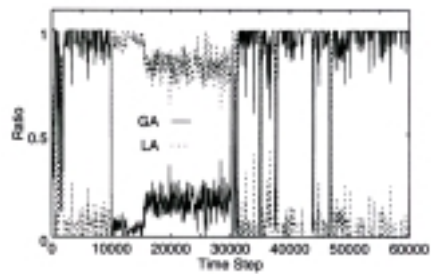


Fig. 23: Ratio of LA path and GA path(FTS with LA and GA co-evolution)

6 まとめ

本資料では分散マニピュレーションに着眼し幾つかの研究例を紹介した。分散マニピュレーションに対するアプローチとして、トップダウン方式とボトムアップ方式の2つの方式を考え、それぞれについて紹介を行った。また、最後にはトップダウン方式とボトムアップ方式の両方から分散マニピュレ

● トップダウン方式

- MDMS(Modular Distributed Manipulator System)
MDMS は速度制御された回転するホイール (アクチュエータセル) を 2 次元平面内に並べ、それにのせられた搬送物体の位置制御を実現した。搬送物体とホイールとの間に摩擦モデルを考え、搬送物体が受ける力を導出している。この式の導出は一般性が高く、分散マニピレーションの視点から見て興味深い。MDMS のアクチュエータセルの数は比較的少ないと仮定され、一つの全てのアクチュエータセルを総括するシステムにより搬送物体の位置制御系が実現されていた。
- PVF(Programmable Vector Fields)
PVF は MEMS での実現を考えから高密度でのアクチュエータセルの集積を仮定し、MDMS とは異なった連続系近似のアプローチが採られている。各アクチュエータセルが任意の力が出せることを仮定し、その力場中で搬送物体がどのような挙動を示すか解析を行った。各アクチュエータセルは壊れやすく、センサも積載していない大変シンプルなものを仮定していた (マイクロマシンで作るとそれほど複雑なものとは作れないと筆者はいつている)。

● ボトムアップ方式

- ADM(Autonomous Distributed Micromachine)
ADM では各アクチュエータセルは比較的高度な判断をすることができ、センサなども持っていることを仮定している (同じ MEMS での実現でも PVF とは立場が違う)。各アクチュエータセルが各々判断することにより、システム全体として耐故障と故障回避を実現した。

● トップダウン方式とボトムアップ方式双方から

- FTS(Flexible Transfer System)
FTS は分散マニピレーションの定義から若干はずれるが、パスプランニングの方法としてトップダウン方式は GA を使いボトムアップ方式は LA を使い、それらを上手く組み合わせている。アクチュエータセルの故障に対してもフレキシブルに対応し、パフォーマンスもあまり下げることのないシステムが実現された。

であった。

各システムにより条件は異なるものの、システムの構成だけを考えれば、

- 各アクチュエータセルの自律の度合い
- システムを構成するアクチュエータセルの数

がトップダウン方式のアルゴリズムを考えるか、ボトムアップ方式のアルゴリズムを考えるかのキーとなっている。各アクチュエータセルの自律が高く、アクチュエータセルの数が多ければ、ボトムアップ方式のアルゴリズムがよく適している。逆に、各アクチュエータセルの自律の程度が低く、またアクチュエータセルの数が少なければ、ボトムアップ方式により全てのアクチュエータセルを统一的に管理するのがよい。アルゴリズムの設計のし易さをだけ考えれば、

- トップダウン方式は、システム的设计方法がわかりやすい。
- ボトムアップ方式は、各アクチュエータセルで決めるルールが全体にどんな影響を及ぼすか予測しにくく、設計が難しい。

であり、トップダウン方式が有利である。

これらはシステムの構成とアルゴリズム設計の難しさは、トレードオフの関係にあることを示している。多数のアクチュエータセルによりきめ細かな分散マニピレーションを実現しようとするれば、複雑なアルゴリズムを考えなくてはならないと思われる。アクチュエータセルが少なく、アルゴリズム

このトレードオフの関係を克服する方法として、トップダウン方式とボトムアップ方式の双方からのアプローチは第 3 の方法として大きな意味を持つと思われる。

参考文献

- [1] K. -F. Böhringer, H. Choset, "Distributed Manipulation", Kluwer Academic Publishers
- [2] Thorbjörn, Johan Ulfstedt Mattsson, Edvard Kälvesten, Göran Stemme, "A Walking Silicon Micro-Robot", Tech. Digest Transducers '99, vol.2, pp.1202-1205, 1999
- [3] Haruo Nakazawa et al., "Electromagnetic Micro-Parts Conveyor with Coil-Diode Modules", Tech. Digest Transducers '99, vol.2, pp.1192-1195, 1999
- [4] NHK 科学番組部編, "『すばる』が捉えた驚異の大宇宙", NHK 出版
- [5] http://SubaruTelescope.org/j_index.html
- [6] J. Luntz, W. Messner, H. Choset, "Stick-Slip Operation of the Modular Distributed Manipulator System", In Proc. American Control Conference, pp.3853-3857, 1998
- [7] J. Luntz, W. Messner, H. Choset, "Parcel Manipulation and Dynamics with a Distributed Actuator Array: The Virtual Vehicle", In Proc. the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.1541-1546, 1999
- [8] J. Luntz, W. Messner, H. Choset, "Discreteness Issues in Actuator Arrays", In Proc. Workshop on Distributed Manipulation at the International Conference on Robotics and Automation, 1999
- [9] K. -F. Böhringer, B. R. Donald, R. Mihailovich, N. C. MacDonald, "A Theory of Manipulation and Control for Microfabrication Actuator Arrays", In Proc. 7th IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System(MEMS), pp.102-107, 1994
- [10] J. W. Suh, R. B. Darling, K. -F. Böhringer, B. R. Donald, H. Bltes, T. A. Kovacs, "CMOS Integrated Ciliary Actuator Array as General-Purpose Micromanipulation Tool for Small Objects", Journal of Microelectromechanical Systems, vol.8, no.4, pp.483-496, 1999
- [11] K. -F. Böhringer, V. Bhatt, K. Y. Goldberg, "Sensorless Manipulation Using Transverse Vibrations of a Plate", In Proc. the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.1989-1996, 1995
- [12] K. -F. Böhringer, B. R. Donald, L. E. Kavraki, F. Lamiroux, "Part orientation with one or two stable equilibria using programmable vector fields", In Proc. Workshop on Distributed Manipulation at the International Conference on Robotics and Automation, 1999
- [13] S. Konishi, Y. Mita, H. Fujita, "Two-Dimensional Conveyance System Using Cooperative Motions of Many Fluidic Microactuators", Jour. Advanced Robotics, vol.12, no.2, pp.155-165, 1998
- [14] T. Fukuda, et al., "Distributed Control of Flexible Transfer system using Learning Automata", In Proc. the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.96-101, 1999
- [15] http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/activity/1999/FTS1_99J.html