

外乱オブザーバレイによる魔法のじゅうたん上の物体の重心位置、重量、慣性モーメントの推定

及部 七郎齋*, 堀 洋一 (東京大学)

Estimation of Gravity Center, Mass and Inertia Moment of an Object on the Magic Carpet by Disturbance Observer Array

Hichirousai Oyobe and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, estimation scheme of Gravity Center, Mass and Inertia Moment of an object by measured disturbance distribution with disturbance observer array is proposed.

An object is manipulated by a large number of contact points with many actuators, which differs from conventional manipulation. This is named "distributed manipulation". This distributed manipulation is characterized by meticulous manipulation, powerful manipulation and fault-tolerant manipulation. In addition to this meticulous manipulation, meticulous sensing is easy to realize by disturbance observer installed each actuator.

Gravity center, mass and inertia moment is estimated by disturbance distribution measured with this meticulous sensing and the proposed scheme is evaluated from both aspects of simulation and experiment.

キーワード: 分散マニピュレーション、外乱オブザーバレイ

(Keywords: distributed manipulation, disturbance observer array)

1 はじめに

分散マニピュレーションは多数の支点を通じて対象物に作用し操作する方法で、多数のアクチュエータで実現される。近年のマイクロマシン技術により多数のアクチュエータが簡単に低コストで実現できるようになり注目されてきた概念である。このマニピュレーション法は、

1. 多数のアクチュエータで作用するため、きめ細かな操作が可能である (きめ細かなマニピュレーション)。
2. 少数のアクチュエータの故障はマニピュレーションに問題を及ぼさない (耐故障性の高いマニピュレーション)。
3. 個々が低出力のアクチュエータであっても、多数の支点で支えるため、大型で重い物体のマニピュレーションが可能である (パワフルマニピュレーション)。

の特徴をもっている。この特徴を生かすため、マイクロマシンなどの小型アクチュエータだけでなく、大型のアクチュエータでも実現されつつある。

ハワイのマウナケア火山にある光学望遠鏡『すばる』は、世界最大級の反射鏡を持ち、その反射鏡は多数のアクチュエータにより、多数の支点を通じて支えられている。反射鏡に歪みが出たときはその多数のアクチュエータできめ細かな歪み補正を行っている [1], [2]。これは、分散マニピュレーションのきめ細かなマニピュレーションの利点を利用している。

文献 [3] では多数のアクチュエータによる物体搬送を考え、いくらかのアクチュエータが故障した場合でも物体搬送に影響を及ぼさないアルゴリズムを提案し、耐故障性の高いマニピュレーションを実現している。

文献 [4] は多数のアクチュエータで自らを支えるマイクロロボットの試作報告論文である。自重の 30 倍程度重さの物体の搬送が可能だと報告している。これはパワフルマニピュレーションの一例である。

我々は、

- つかむ
- 計る
- 運ぶ [5]

を分散マニピュレーションの基本 3 動作として考え、それぞれの実現により、分散マニピュレーションの一般的な知見を得ることを目指している。

分散マニピュレーションでは多数のアクチュエータで作用するため、きめ細かなマニピュレーションが可能であることは既に述べた通りである。外乱オブザーバの技術を使えば、容易にセンサレスで

きめ細かなマニピュレーション = きめ細かなセンシングが実現できる。本稿では外乱オブザーバの出力より得られる外乱分布を用いて、対象物の重さ、重心位置、慣性モーメントなどマニピュレーションに重要な情報の計測を行い、『計る』の実現を目指す。

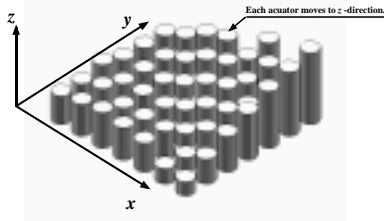


図 1: 分散マニピュレータの概念図

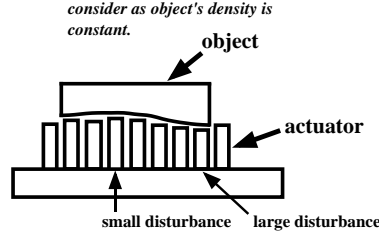


図 2: 負荷がかかっているときのアクチュエータ (1)

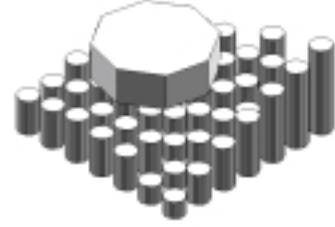


図 3: 負荷がかかっているときのアクチュエータ (2)

2 分散マニピュレータモデル

図 1 のような、 xy の 2 次元平面内に z 方向にリニアドライブできるアクチュエータが多数並べてある状況を想定する (本稿中ではこのシステムを魔法のじゅうたんと呼ぶ)。各アクチュエータは x, y のそれぞれの方向に $\Delta x, \Delta y$ の間隔で、 $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ 、 $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$ の領域に並べられている。 i, j 番目のアクチュエータは $(x_i, y_j) = ((i-1)\Delta x, (j-1)\Delta y)$ の位置にあり、 z 方向の変位は、 $z_{ij} = z(x_i, y_j) = z((i-1)\Delta x, (j-1)\Delta y)$ であるとする。図 2,3 のように魔法のじゅうたん上にマニピュレーション対象物があるとする。この対象物の密度を $\rho(x, y, z)$ とすれば、重量 M 、重心位置 $[x_g, y_g, z_g]^T$ 、 z 軸周りの慣性モーメント J_z はそれぞれ

$$M = \int \rho(x, y, z) dx dy dz \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \frac{1}{\int \rho(x, y, z) dx dy dz} \begin{bmatrix} \int x \rho(x, y, z) dx dy dz \\ \int y \rho(x, y, z) dx dy dz \\ \int z \rho(x, y, z) dx dy dz \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J_z = \int [(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2] \rho(x, y, z) dx dy dz \quad (3)$$

で定義される。

3 外乱の推定

マニピュレーション対象物が魔法のじゅうたん上に載っているとき、各アクチュエータ側から見れば、載っていない場合と比べ、負荷による外乱が大きくなっている。

i, j 番目のアクチュエータの負荷外乱 $d_{ij} = d(x_i, y_j)$ は図 4 のように、 i, j 番目のアクチュエータのすぐ上の対象物の重さとなり、式 (4) で計算できる。ただしここで g は重力加速度である。

$$\begin{aligned} d_{ij} &= g \int_{x_i - \frac{\Delta x}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x}{2}} dx \int_{y_j - \frac{\Delta y}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y}{2}} dy \int_{z_1}^{z_2} \rho(x, y, z) dz \\ &\simeq g \int_{x_i - \frac{\Delta x}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x}{2}} dx \int_{y_j - \frac{\Delta y}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y}{2}} dy \int_{z_1}^{z_2} \rho(x_i, y_j, z) dz \end{aligned}$$

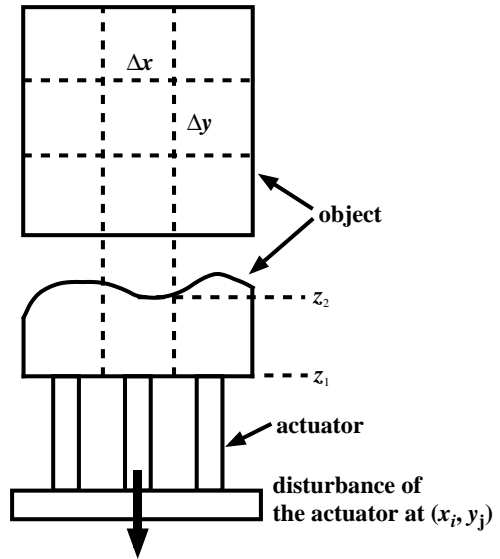


図 4: 外乱量の計算

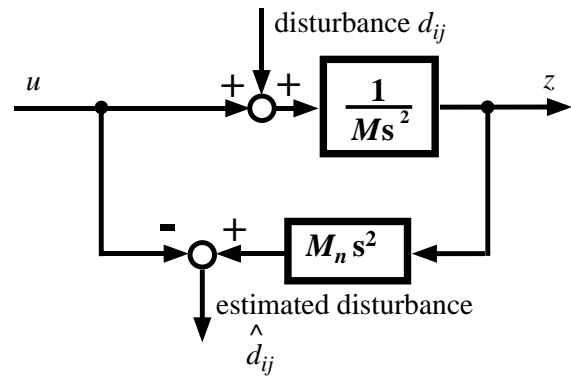


図 5: 外乱推定ブロック

$$\begin{aligned}
&= g\Delta x\Delta y \int_{z_1}^{z_2} \rho(x_i, y_j, z) dz \\
&\simeq \hat{d}_{ij} \tag{4}
\end{aligned}$$

式(4)の負荷外乱は力センサなどを用いれば計測可能であるが、 i, j 番目のアクチュエータに、良く知られている図5のような外乱オブザーバを取り付ければ、簡単に推定外乱 \hat{d}_{ij} を得ることができる。

4 外乱分布から重量、重心位置、慣性モーメントの推定

式(1)、(2)、(3)の重量 M 、重心位置 $[x_g \ y_g \ z_g]^T$ 、慣性モーメント J_z は、推定外乱 \hat{d} を用いて、式(5)、(6)、(7)と書き直すことができる。

これらの式を用いれば、推定された外乱分布より容易に対象物の重量、重心位置、慣性モーメントの推定ができる。ただし、 Ω_{ij} は (x_i, y_j) を中心に含み $x_i - \frac{\Delta x}{2} \leq x \leq x_i + \frac{\Delta x}{2}$ 、 $y_j - \frac{\Delta y}{2} \leq y \leq y_j + \frac{\Delta y}{2}$ の領域である。

$$\begin{aligned}
M &= \int \rho(x, y, z) dx dy dz \\
&= \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} \rho(x, y, z) dx dy dz \\
&\simeq \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} \left[\int \rho(x_i, y_j, z) dz \right] dx dy \\
&= \sum_{i,j} \Delta x \Delta y \int \rho(x_i, y_j, z) dz \\
&= \frac{1}{g} \sum_{i,j} d_{ij} \simeq \frac{1}{g} \sum_{i,j} \hat{d}_{ij} = \hat{M} \tag{5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{R} &= [x_g \ y_g \ z_g]^T \\
&= \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \int x \left[\int \rho(x, y, z) dz \right] dx dy \\ \int y \left[\int \rho(x, y, z) dz \right] dx dy \\ \int z \rho(x, y, z) dx dy dz \end{bmatrix} \\
&\simeq \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \sum_{i,j} x_i \Delta x \Delta y \int \rho(x_i, y_j, z) dz \\ \sum_{i,j} y_j \Delta x \Delta y \int \rho(x_i, y_j, z) dz \\ \int z \rho(x, y, z) dx dy dz \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \frac{1}{g} \sum_{i,j} x_i d_{ij} \\ \frac{1}{g} \sum_{i,j} y_j d_{ij} \\ \int z \rho(x, y, z) dx dy dz \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\simeq \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \frac{1}{g} \sum_{i,j} x_i \hat{d}_{ij} \\ \frac{1}{g} \sum_{i,j} y_j \hat{d}_{ij} \\ \int z \rho(x, y, z) dx dy dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_g \\ \hat{y}_g \\ \hat{z}_g \end{bmatrix} \tag{6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_z &= \int [(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2] \rho(x, y, z) dx dy dz \\
&\simeq \sum_{i,j} [(x_i - x_g)^2 + (y_j - y_g)^2] \left[\Delta x \Delta y \int \rho(x_i, y_j, z) dz \right] \\
&= \frac{1}{g} \sum_{i,j} [(x_i - x_g)^2 + (y_j - y_g)^2] d_{ij} \\
&\simeq \frac{1}{g} \sum_{i,j} [(x_i - x_g)^2 + (y_j - y_g)^2] \hat{d}_{ij} = \hat{J}_z \tag{7}
\end{aligned}$$

5 シミュレーションと実験

重さ $M = 1.35[\text{kg}]$ 、長辺の長さ $a = 25.5[\text{cm}]$ 、短辺の長さ $b = 18[\text{cm}]$ 、厚さ $c = 5.5[\text{cm}]$ の直方体の疑似負荷(雑誌)を用意し、その疑似負荷の重量、重心位置、慣性モーメントを計測するシミュレーションと実験を行う(実験装置の詳細は付録を参照)。各アクチュエータはそれぞれ位置制御が施されており、適当な位置指令を入力し(5mm)、そのとき重量、重心位置、慣性モーメントが既知な負荷に対して、得られた外乱分布から提案手法により重量、重心位置、慣性モーメントを推定する。疑似負荷のパラメータ、シミュレーション、実験で用いるパラメータを表1に示す。

実験風景を図6に、シミュレーション、実験結果を表2に示す。また、シミュレーションにおける外乱分布を図7に、実験における外乱分布を図8に示す。また表2のシミュレーション、実験結果には併せて推定誤差 Δ_e も示す。

シミュレーション、実験結果より、必ずしも正確な推定はできないものの、おおざっぱな計測は可能なことがわかる。また、外乱分布から物体の形状もほぼステイ可能なことも読みとることができる。

6 結論と今後の課題

本稿では、分散マニピレーションの一般的な知見を得るために、基本三動作の一つ『計る』の実現を目指した。多数あるアクチュエータに外乱オブザーバを組み込むことで、容易な形で外乱の推定が可能となり、外乱分布の計測ができるようになった。得られた外乱分布より、マニピレーション対象物の、

1. 重量
2. 重心位置
3. 重心周りの慣性モーメント

表 1: シミュレーションと実験で用いたパラメータ

weight M	1.35 [kg]
long side a	25.5 [cm]
short side b	18 [cm]
thickness c	5.5 [cm]

Δx	0.065[m]
Δy	0.065[m]
x_{\min}	0
y_{\min}	0
x_{\max}	$7\Delta x = 0.455$ [m]
y_{\max}	$7\Delta y = 0.455$ [m]
x_g	$4.5\Delta x = 0.2925$ [m]
y_g	$3.0\Delta y = 0.1950$ [m]
J_z	1.09603×10^{-2} [kgm ²]

表 2: シミュレーションと実験結果

\hat{M}^{sim}	1.2887[kg]
$\Delta_e M^{sim}$	0.0613[kg]
$(\hat{x}_g^{sim}, \hat{y}_g^{sim})$	$(0.29179, 0.19536)$ [m] = $(4.489\Delta x, 3.006\Delta y)$
$(\Delta_e x_g^{sim}, \Delta_e y_g^{sim})$	$(7.1 \times 10^{-4}, -3.6 \times 10^{-4})$ [m]
\hat{J}_z^{sim}	1.1032×10^{-2} [kgm ²]
$\Delta_e J_z^{sim}$	-7.17×10^{-3} [kgm ²]

\hat{M}^{ex}	1.05289[kg]
$\Delta_e M^{ex}$	0.29711[kg]
$(\hat{x}_g^{ex}, \hat{y}_g^{ex})$	$(0.29682, 0.14926)$ [m] = $(4.566\Delta x, 2.296\Delta y)$
$(\Delta_e x_g^{ex}, \Delta_e y_g^{ex})$	$(-4.32 \times 10^{-3}, 4.574 \times 10^{-2})$ [m]
\hat{J}_z^{ex}	1.5963×10^{-2} [kgm ²]
$\Delta_e J_z^{ex}$	-5.0027×10^{-3} [kgm ²]

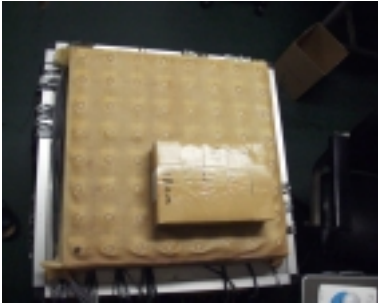


図 6: 実験風景

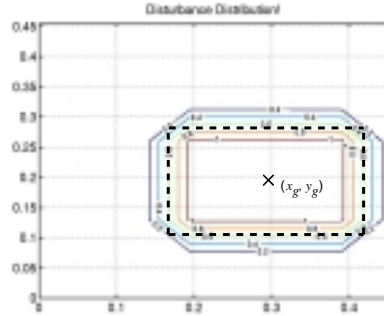


図 7: 外乱分布 (シミュレーション): [N]

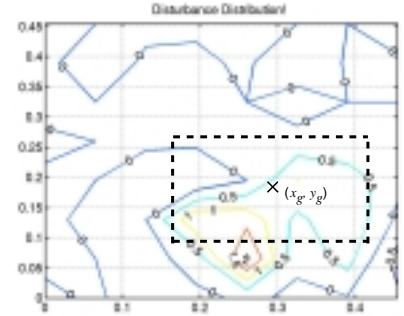


図 8: 外乱分布 (実験): [N]

を得る方法を提案し、シミュレーション、実験結果の両側面から提案手法の有効性を確認した。

結果より、必ずしも正確な値の計測は可能ではないが、おおざっぱな計測であれば十分効果を発揮する手法であるといえる。正確な計測が出来ない理由は、

1. アクチュエータ間隔が有限なことによる誤差 (付録で考察)
2. 外乱オブザーバの推定誤差

のためである。しかしながら、外乱オブザーバさえあれば適用できる手法であるため、簡単でおおざっぱな計測が必要なときは効果を発揮できる。また、外乱オブザーバの代わりにセンサを用いれば、外乱オブザーバによる推定誤差がなくなり、本手法でも正確な計測ができる。

今後の課題としては、残った基本三動作の一つである『つかむ』の実現を目指す。外乱オブザーバにより推定された外乱情報を用いて、各アクチュエータにインピーダンス制御を行うことにより、面に堅い面や柔らかい面といったインピーダンスを持たせることができる。これにより、対象物が複雑形状であったとしても、積極的に荷重分散

を行い、対象物を傷つけない『つかむ』の実現を目指す。

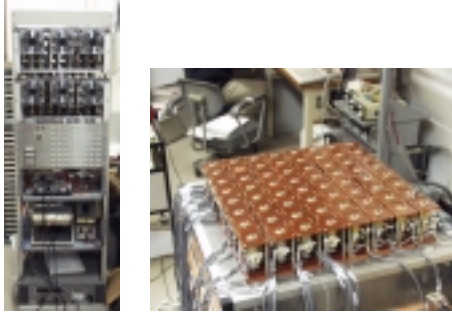
A アクチュエータ間隔が有限に伴う誤差

外乱オブザーバレイにより計測された外乱分布を用いて、重量、重心位置、慣性モーメントの推定を行う場合、推定外乱の誤差と、有限アクチュエータ間隔による誤差があった。本付録では、アクチュエータ間隔が有限による誤差を定量的に評価する。

分散マニピュレーションを行う場合、多数の支点を通じてマニピュレーション対象物を操作するといっても、無限のアクチュエータで支えることは不可能である。そのためアクチュエータ間隔は有限の値で、 $\Delta x \neq 0, \Delta y \neq 0$ である。

アクチュエータ間隔が有限のために生じる質量誤差 $\Delta_e M$ 、重心位置誤差 $\Delta_e R$ 、 z 軸周りの慣性モーメントの誤差 $\Delta_e J_z$ はそれぞれ式 (8),(9),(11) で与えられる。

$$\Delta_e M = \int \rho(x, y, z) dx dy dz - \sum_{i,j} \Delta x \Delta y \int \rho(x_i, y_j, z) dz$$



64 drivers

64 actuators

図 9: 実験装置の外観

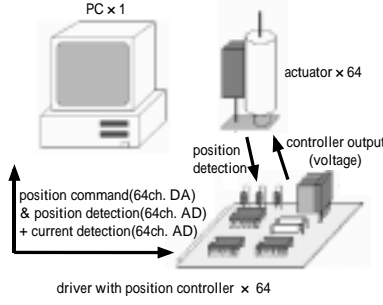


図 10: 実験装置の構成概要

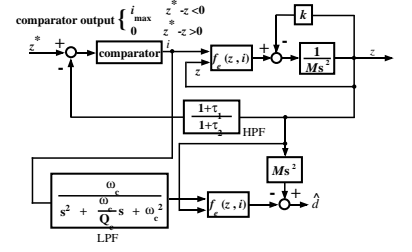


図 11: 実験装置のアクチュエータの位置コントローラと外乱オブザーバ

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} [\rho(x, y, z) - \rho(x_i, y_j, z)] dx dy dz \\
 &\simeq \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} \left[\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \rho}{\partial y} \delta y - \rho \right] dx dy dz \\
 &= \sum_{i,j} \int_{-\frac{1}{2}\Delta x}^{\frac{1}{2}\Delta x} d\delta x \int_{-\frac{1}{2}\Delta y}^{\frac{1}{2}\Delta y} d\delta y \int dz \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \rho}{\partial y} \delta y \right] \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

(8)

$$\begin{aligned}
 \Delta_e \mathbf{R} &= \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{R}_e} \Delta_e \mathbf{R}_e + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial M} \Delta_e M \\
 &= \frac{1}{M} \Delta_e \mathbf{R}_e - \frac{\mathbf{R}}{M^3} \Delta_e M \\
 &= \frac{\Delta_e \mathbf{R}_e}{M}
 \end{aligned}$$

(9)

ただし、

$$\Delta_e \mathbf{R}_e \equiv \begin{bmatrix} \int x \rho(x, y, z) dx dy dz - \sum \Delta x \Delta y \int x_i \rho(x_i, y_j, z) dz \\ \int y \rho(x, y, z) dx dy dz - \sum \Delta x \Delta y \int y_i \rho(x_i, y_j, z) dz \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。

$$\begin{aligned}
 M \Delta_e x_g &= \int x \rho(x, y, z) dx dy dz - \sum_{i,j} \Delta x \Delta y \int x_i \rho(x_i, y_j, z) dz \\
 &\simeq \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} (x_i + \delta x) \left[\rho(x_i, y_j, z) + \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \rho}{\partial y} \delta y \right] dx dy dz \\
 &\quad - \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} x_i \rho(x_i, y_j, z) dx dy dz \\
 &= \frac{1}{12} \Delta x^3 \Delta y \sum_{i,j} \int \frac{\partial \rho}{\partial x} dz
 \end{aligned}$$

(10)

$$\begin{aligned}
 \Delta_e J_z &= \frac{\partial J_z}{\partial x_g} \Delta x_g + \frac{\partial J_z}{\partial y_g} \Delta y_g \\
 &+ \int [(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2] \rho(x, y, z) dx dy dz \\
 &- \Delta x \Delta y \sum_{i,j} \int [(x_i - x_g)^2 + (y_j - y_g)^2] \rho(x_i, y_j, z) dz \\
 &\simeq \frac{\Delta x \Delta y}{6} \sum_{i,j} \int \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \Delta x^2 + \frac{\partial \rho}{\partial y} \Delta y^2 \right) dz \\
 &+ \frac{\Delta x \Delta y}{6} \sum_{i,j} \int (\Delta x^2 + \Delta y^2) \rho(x_i, y_j, z) dz \\
 &= 2M(\Delta_e x_g + \Delta_e y_g) + \frac{1}{6} M(\Delta x^2 + \Delta y^2)
 \end{aligned}$$

(11)

B 実験装置の構成

本付録では、実験装置の構成を示す。図 9 には実験装置の外観を示す。また図 10 には制作した実験装置の基本構成図を示す。実験装置は 64 個のモジュールにより構成される。具体的には 64 個のアクチュエータ、センサ、可変構造を持つ位置制御系、そして 1 台の PC である。

参考文献

- [1] NHK 科学番組部編, 『『すばる』が捉えた驚異の宇宙』, NHK 出版
- [2] http://SubaruTelescope.org/j_index.html
- [3] Satoshi Konishi, Yoshio Mita, Hiroyuki Fujita, "Autonomous Distributed System for Cooperative Micromanipulation", Distributed Manipulation, pp.87-102, Kluwer Academic Publishers
- [4] Thorbjörn, Johan Ulfstedt Mattsson, Edvard Kälvesten, Göran Stemme, "A Walking Silicon Micro-Robot", Tech. Digest Transducers '99, vol.2, pp.1202-1205, 1999
- [5] 及部七郎斎, 堀洋一, "リニアアクチュエータアレイによる物体搬送の試み - 魔法のじゅうたんを目指して - ", 電学論 D, vol.121, no.12, pp.1250-1255, 2001