

SEM内におけるマイクロマニピュレータシステムの開発

- マニピュレータを用いた作業における視覚情報の役割について -

石川友彦*

1. はじめに

本研究において開発を進めているマイクロマニピュレータを装着する走査型電子顕微鏡 (SEM) は、数十倍から数十万倍という分子レベルまで、試料を三次元的に観察することができるという点で大きな特徴を持つ顕微鏡である。観察対象は様々な材料および、金属表面の観察から原子・分子構造まで、また無機物から生物組織の観察に至るまで行うことができる。特に生物組織の観察においては、光学顕微鏡や実体顕微鏡の範疇である 100 倍以下の範囲においても、高い解像度と深焦点深度を持つという優れた性能を持つため、大いに威力を発揮している。代表的な SEM の外観を図 1 に示す。

しかし、そのような特徴を持つ SEM ではあるが、観察対象に対して何等かの作業を行おうとした場合、実世界とは異なる感覚でマニピュレータなどの操作台を用いて作業を行うことが求められる。それら治具の操作は実スケールにおける操作性とは異なり、解決し難い問題に直面する。例えば、低倍率において視野内に納まっていたマニピュレータが、倍率を上げたときに視野外に逸脱してしまう場合や、微小移動かつもりが予想外の移動量のために試料自体やマニピュレータ自身を傷つけてしまう場合などである。

そこで、意図した観察・作業環境下において視野を平面内で移動させたり倍率を変化させたりする場合でも、観察から作業への移行をスムーズに行うことができるシステムの開発と、作業におけるマニピュレータの操作性が倍率が異なっても均一となる制御アルゴリズムの開発を進めており、実験によりアルゴリズムの有効性を確認したので報告する。

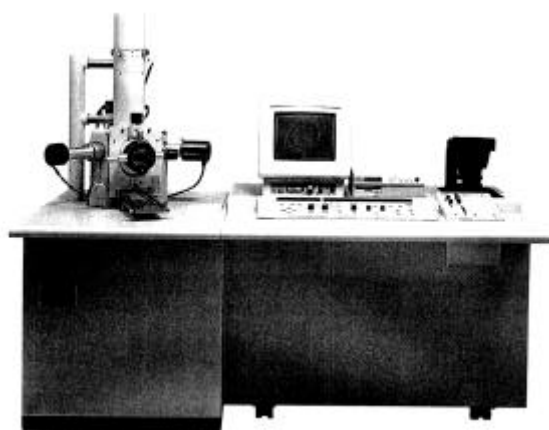


図1 代表的な走査型電子顕微鏡 (SEM)

2. 微小世界における作業

2-1. 顕微鏡下における作業と視野について

微小な世界において作業を行う場合、視野がそのまま作業空間となるため視覚情報というものが重要な役割を果たすことになる。顕微鏡などにおいて光学系の倍率が得られる場合には、作業者の操作量とマニピュレータの移動量との間に対応が可能な場合があるが、微小な世界においては光学的誤差や機構的誤差などの微小な誤差に対しても、その視野範囲やマニピュレータの移動量は大きく変化してしまう。作業対象物やマニピュレータ自身を見失うことが生じる。そのような際には、経験と勘によりマニピュレータを視野内に戻す操作が必要となる (図 2)。そのため視覚的な倍率の切り替えによる操作の連続性を行うために、作業点と注視点を機能的に一致させるシステム

などが開発されている。

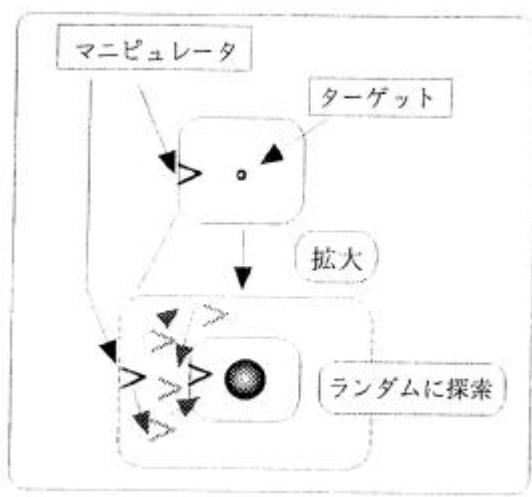


図2 視野からマニピュレータが逸脱した場合

2-2. 顕微鏡下における一般的な作業手順

顕微鏡下においてマニピュレータを用いて行われる作業の一般的な作業手順を図 3 に示す。SEM 内においては、空間内で試料テーブルやマニピュレータ・観察用カメラなどが集中して存在するため様々な制約のもとで操作を行う必要がある。ここで図 3 のフローに基づいて操作手順を説明する。

2-2-1. 観察のみの場合

最初に試料テーブルをマニピュレータやカメラが集中して存在する観察・作業空間から、試料をセットする位置に移動する。試料を試料テーブルにセットした後、種々の条件を設定し、観察・作業を行う標準位置で試料テーブルを移動する。試料は焦点合わせを行うとともにターゲットの探索および目的とする観察範囲が視野内に納まるように倍率を調整する。

観察のみの場合はこの段階で準備は終了する。

2-2-2. 観察+作業の場合

試料に対して何等かの作業を行おうとした場合、前段で説明した操作の他に、さらに次のような操作が必要となる。試料テーブルを再び最低まで退避し、作業用マニピュレータを先ほど設定した観察・作業位置に移動する。マニピュレータ先端の焦点合わせを行った後、マニピュレータをわずかに上昇させる。マニピュレータの上昇確認後、試料テーブルを再び設定した観察・作業位置まで干渉を確認しつつ徐々に上昇させる。上昇後、焦点が合っていることを確認するとともに、視野内にターゲットとマニピュレータが存在していることを確認する。作業を行うターゲットの微調整を行った後、マニピュレータをわずかに下降させ、試料面に接触させる目的とする作業に移る。

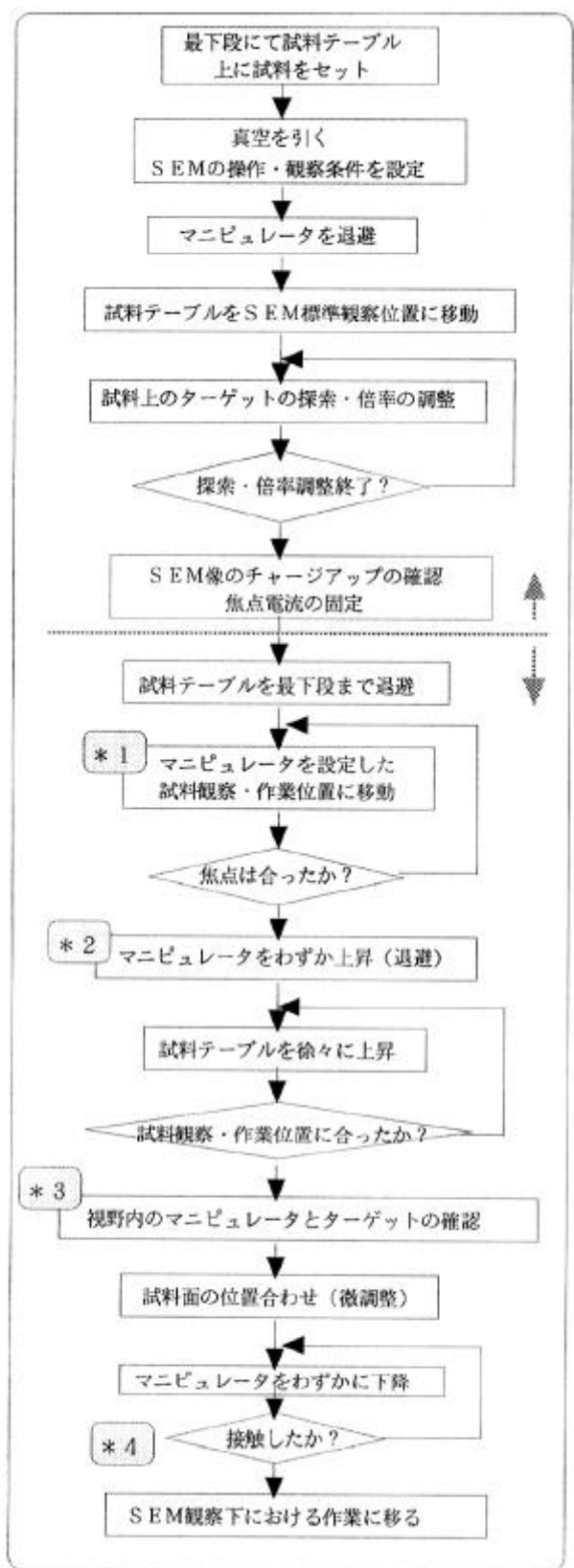


図3 マニピュレータを用いた操作手順の例

2.3. 作業準備段階における問題点

以上のような手順を踏んだ後、意図する作業に移るのであるが、この一連の操作において多くの部分(*印)に解決しなければならない問題を含んでいる。

例えば*1においては、試料テーブルの観察・作業位置をもとにマニピュレータの移動を行うわけであるが、倍率によっては幾何的誤差などのために、

試料テーブル位置合わせにより得られている観察・作業位置情報と実際の空間的位置との間に誤差が生じている時などがあり、視野内に移動後のマニピュレータが存在しない場合が生じることがある。そのような場合には、図2に示した場合は、経験と勘によりランダムに探索する必要が生じる。また*2においては倍率による上昇量の問題が、*3においては被写界深度の問題が、*4においては顕微鏡の確認問題など様々な問題が含まれているが、現時点ではすべて作業者の経験と勘により操作が行われているのが現状である。

2.4. 観察倍率と作業への移行について

そこで、経験と勘に頼ること無く作業者が意図する作業へ容易に移行することができるように、視覚情報とマニピュレータの操作性との関係に着目し、一連の操作手順を大きく二つに分けて扱うこととした。

最初にターゲットを探索する操作においては、常にマニピュレータの先端をその視野の一部に存在させるように制御することとした(図4)。これによりターゲットの位置や倍率を確定した後、改めて視野内へマニピュレータを移動するという操作と、それに伴う問題を解決することができる。この操作においては、

- ・平面内(XY軸方向)を視野内移動することとする直進の場合
- ・倍率の変化(Z軸方向)による視野範囲の変化に対する直進の場合

の2つの問題がある。一般的には、平面内の視野の移動に対しては試料テーブルの移動量を補正値としてフィードバックを行い、倍率の変化に対しては、顕微鏡側の倍率設定ダイヤルにおける倍率値を常にモニタリングしながらマニピュレータ移動量への補正値としてフィードバックを行えば良い。しかし、高音率の世界では、低音率ではあまり影響のなかった光学的誤差や機構的誤差などの微妙な誤差が直接補正値に反映するため、簡単にマニピュレータ自身を見失ってしまうことが生じる。

そこで、今回は平面内の視野の移動においてはパターンマッチング用の基本探索パターンと視覚情報から得られた探索パターンとの相対変化量を計算し、補正値とすることとした。また、倍率方向の変化に対しては、パターンマッチング用に保存している基本パターンと基本パターンと同サイズの

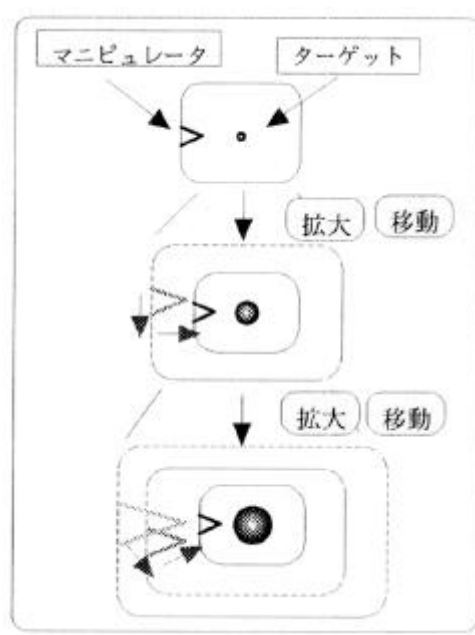


図4 視野内にマニピュレータを存在させる場合

パターンを視野内に存在させるようにマニピュレータを移動させる際の変

位置から、その倍率における補正値を得る方法を採用した。

次に、実際に与えられる制御作業は直接人間が行うことを考慮し、前述で得られた変位量を作業者の操作量とマンピュレータの移動量との間の補正値とすることにより、作業倍率を左右されず、操作者の均一化を図ることとした。これにより、一連の操作において、

- ・最初の段階として作業者はターゲットの探索に集中することができる
- ・探索終了後、作業を行うためのマンピュレータの操作が滑らかに移行できる
- ・直接与えられる作業において、倍率を意識すること無く作業を行うことができる
- ・倍率を意識すること無く作業を行うことができることにより、不用意に試料やマンピュレータを損傷することがなくなるなどのメリットを期待することができる。

3. 追跡制御実験システムおよび実験

3-1. 実験システムの構成

ターゲットを探索する操作において、視野の変化に対するマンピュレータの追従性を評価するためには構築した実験システムを図5に示す。試料を固定するテーブルは、XY平面内においてX軸方向に移動可能であり、マンピュレータはXY平面内においてX軸方向に、鉛直面方向においてはZ軸方向に制御可能である。また、ズーム機能を持ったカメラ (Sony 社製: Handycam SC9) は鉛直面であるZ軸方向に移動可能である。

カメラから得られた視覚情報は画像処理ボード (CTC 社製: MVC 150/40) にて様々な処理を行った後、パソコン (Gateway 社製: P5-166) に送られる。パソコンでは、マンピュレータ (今回は専用テーブルに固定) の先端を常に視野内に存在させるための位置制御量を算出し、テーブルコントローラ (シグマ社製: SPC2NH) に制御情報として渡す。テーブルコントローラはその情報に基づきマンピュレータの位置制御を行う。パソコンとテーブルコントローラとの間はRS232Cにて結ばれている。構築した実験システムの全景を図6に示す。

3-2. マンピュレータの追跡実験

今回は、平面内 (XY軸方向) の移動に対する追従性に関しては、X軸方向に試料を固定しているテーブルを動かすことにより実験を行った。また、倍率の変化 (Z軸方向) に対する追従性に関しては、鉛直面であるZ軸方向に対してカメラ (視野) を非恒定的に動かした場合およびズーム機能を用いた倍率の変化を行った場合に対して実験を行った。倍率を伴った視野の変化の場合には、被写界深度の影響による焦点問題を考慮しなければならないが、今回は追従性の評価に絞ったため被写界深度の問題は省いて実験を行った。実験で用いた制御フローを図7に示す。

図5 追跡制御実験システム構成図

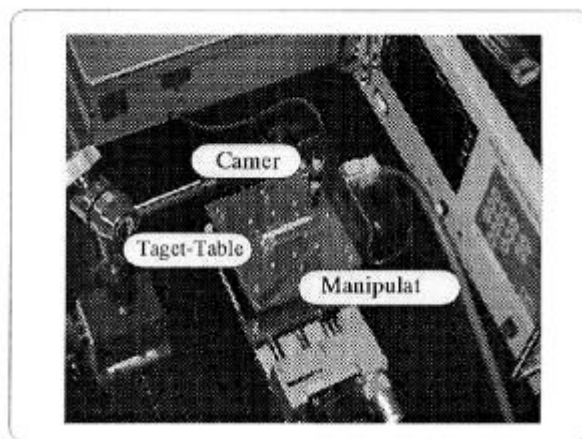
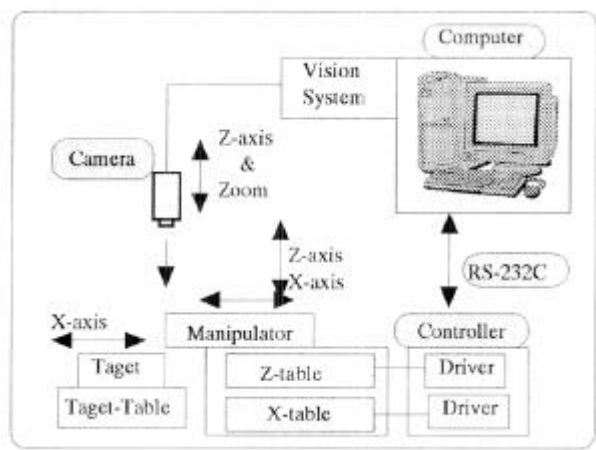


図6 実験システム全景

3-3. 追跡制御実験による問題点

この操作においても、様々な問題点内在することが判明した。例えば、低倍率においてはあまり問題とはならないが、高倍率の世界では一連のフィードバックループにおける処理よりも早い速度で倍率が変化することにより、視野からマンピュレータが逸脱する場合 (*1) が生じた。その場合には、マンピュレータをランダムに移動し視野内に戻す方法や、視野内に存在していた過去の状態の履歴を記憶しておき、その履歴に基づき移動方向の推測を行い視野内に戻すなどの処理を行う必要があることがわかった。また、被写界深度の影響により焦点が合わなくなった場合 (*2) には、被写界深度内にマンピュレータとターゲットをともに存在させる必要があるため、Z軸方向にもテーブルを制御することが重要であることがわかった。



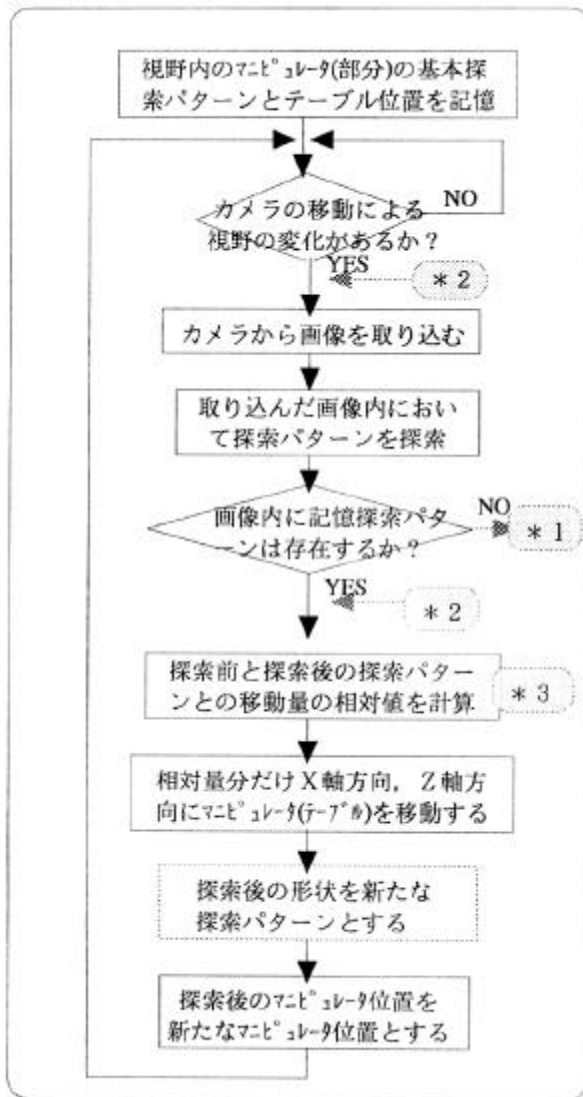


図7 システム制御フロー

4. 実作業における操作量とマニピュレータの動作量との関係

次の操作段階として、観察が終了し視野内のマニピュレータを用いた実作業へ移行する際の問題点として、微小移動かつもりが予想外の移動量のために障害自体やマニピュレータ自身を損傷してしまう場合が考えられる。これは、観察・作業倍率が大きければ大きいほど影響を受けるものであり、作業者が神経を遣う場面でもある。

この場合、正確な倍率が得られていれば、作業者の操作量とマニピュレータの動作量の間に対応関係が成り立つため、任意の作業倍率下においても作業者は均一な操作性を得ることができるが、実際は光学倍率誤差や機構倍率誤差のために正確な倍率を得ることが難しく、これは高倍率になるほど大きな問題となる。

そこで、図7に示した*3の処理における視覚情報上の相対量をフィードバックすることにより、機構的な設定倍率ではなく、実際の視覚情報から得られた移動量に基づいた相対倍率を得ることができる。これにより作業者は、どのような倍率においてもキャリブレーションを行うことなく、均一な操作性のもとで作業を行うことが可能となる。

5. むすび

今回構築した実験システムにおいて、開発した制御フローを用いて、視野の変化が起きてもマニピュレータが視野内において追従可能であることを確認することができた。また、視覚情報から得られる相対移動量から相対倍率を導くことにより、観察・作業倍率によらないマニピュレータの均一な操作性を得ることが可能であることがわかった。

今後は、

- ・倍率の急激な変化に対する追従性の問題の解決
- ・高速応答性を考慮した制御インターフェースの問題
- ・画像のボケを考慮した被写界深度の問題の解決
- ・均一な操作性を実現した実験システムの構築と実証実験などを行う予定である。

謝辞

なお、この研究は「(財) 茨城県中小企業振興公社・産学官共同研究事業」の補助を受け、(株) 三友製作所・茨城大学工学部と共同研究を進めているものである。また、さまざまなアドバイスをいただきました三友製作所・勝田禎二氏、茨城県工業支援センター・高島滋館長(現：茨城県工業支援課)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 古谷野・佐藤・宮崎：集視マニピュレーションシステムによる微細作業：日本機械学会ROBOMECS95 論文集, pp.1386-1389, 1995.
- 2) 谷川・新井・橋本：二本指マイクロハンド用自動焦点システムの開発：第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1125-1126, 1996.
- 3) 石川・川上：微小世界の作業における視覚情報の役割に関する一考察：第15回日本ロボット学会学術講演会, pp.1071-1072, 1997.
- 4) 田中敬一編：医学・生物学領域の走査電子顕微鏡技術：講談社, 1992.