

機関番号：32613

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760209

研究課題名（和文）仮想現実をもちいた、微小液的控制による顕微作業システムの操作性の向上に関する研究

研究課題名（英文）The study of the virtual reality for manipulation performance improvement of micro manipulation system using liquid bridging force

研究代表者

見崎 大悟（MISAKI DAIGO）

工学院大学・工学部・講師

研究者番号：00361832

研究成果の概要（和文）：

本研究では、液架橋力をもちいたマイクロマニピュレーションを支援するための仮想現実をもちいた支援システムについて提案をおこなった。液架橋力の特性と顕微鏡画像から取得された位置情報により生成された支援情報とを組み合わせ、マイクロパーツの組み立て作業をおこない、立体組み立て作業の作業時間を通常より30%程度減少させることで、支援システムの有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, micromanipulation system with manipulation tool using force of bridge formation by liquid and the support system using virtual reality proposed. An experiment involving the assembly of microparts was performed using the proposed micromanipulator using support information. The task was to assemble a pyramid, which consists of three lower microparts and one upper micropart. In this experiment, the average time required to create a pyramid by an unskilled operator was about 30% decreased by using the support information.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：ヒューマンインターフェース，マイクロマシン，画像認識

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：画像・文字・音声認識等，マイクロマシン，バイオテクテクノロジー

1. 研究開始当初の背景

昨今、遺伝子工学をはじめとしたバイオテクノロジーやマイクロパーツの組み立てなど多くの分野で顕微鏡下での微細作業技術が必要とされている。しかし従来の大型の機器による、顕微作業システムでは、導入運用に伴い振動・温度変化等への対策を含む多額の費用がかかる反面、可能な作業の種類や自

由度が少ない現状がある。我々の研究グループでは顕微鏡下に配置した複数台のマイクロロボットで微細な作業をおこなう顕微作業システムの構築を目指している。提案するシステムでは、マイクロロボットに搭載可能なマイクロマニピュレーションツールを開発することにより、目的とする作業を顕微鏡下で実現することが可能である。現在、産業界で利用されたり、研究で利用されたりする

ために開発されているマイクロマニピュレーションツールは、位置決め装置の先端に取り付けられたピンセットのようなグリッパ式が一般的であり、接近する際の姿勢制御や位置決めが困難である。この問題を、解決するための、真空ピンセットや、電磁力をもちいたものなど非接触式のマニピュレーションが提案されているが、吸引圧力の調整が困難であったり、対象物に影響を与えたりするなど、さらなる改良が要求されている。

2. 研究の目的

本研究では、柔軟性の高い顕微作業を実現するマイクロマニピュレーションシステムを実現するにあたり、操作の対象物に破損や性質の変化などの影響を与えることが少ないようにするために、微少流体制御によりマイクロロボットに搭載可能なサイズのマイクロマニピュレーションツールを開発する。さらに、実際にユーザが利用しやすいように、立体的なパーツのアセンブリが可能な微細物操作のための仮想現実などをもちいたインターフェースを開発し、ユーザの操作性を向上させより実用的な顕微作業システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

これまでの顕微作業システムの研究成果に基づいて、本研究では、顕微作業システムの操作性の向上の目的を達成するために下記のテーマについて主に研究を実施した。

(1) 液架橋力を利用したマイクロパーツハンドリング装置の設計・製作

はじめに、マイクロパーツのハンドリングをおこなう顕微作業システムの実験装置を製作する。本研究では、図1に示す100 μm 程度のマイクロパーツの立体的な顕微鏡下作業が可能な顕微作業支援システムの設計、制作をおこなった。本システムの基本構成は、パソコン (windows7, Intel Core i 7,) と微細物や作業空間を見るための顕微鏡 (Navitar 社 ズームレンズカメラ 1-60191 + 対物レンズ 5 \times : (焦点距離 : 40[mm], 視野範囲 1.15 - 0.17 [mm])), CMOS カメラ (マイクロビジョン社 VC-4303 : 画素数 640 \times 480, YUV422 8bit), 微少液滴ハンドリングツールを移動するためのXYZ位置決めテーブル (神津精機 YA07A-R1+ZA07A-X1 : 位置決め分解能 0.25 $\mu\text{m}/\text{step}$, 可動範囲 $\pm 10.0\text{mm}$, 最高速度 2.5mm/sec) および顕微鏡を移動するためのX位置決めテーブル (神津精機 XA10A-R1 : 位置決め分解能 0.25 $\mu\text{m}/\text{step}$, 可動範囲 $\pm 12.5\text{mm}$, 最高速度 2.5mm/sec) によって構成されている。USB 接続のジョイスティックと、PHANToM Omni をもちいた入力装置をもちいて、対象物の把持にもちいるキャピラリの位置決めをおこない、顕微作業を実施する。

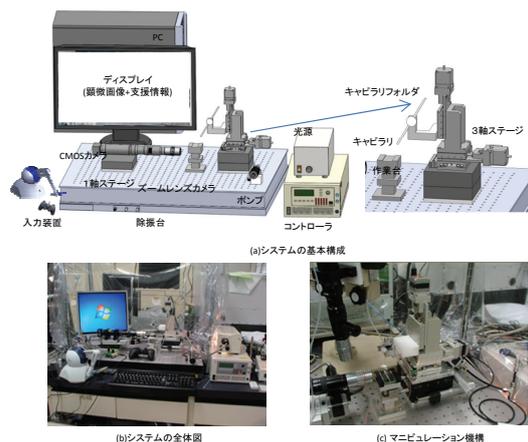


図1 マイクロマニピュレーションシステム

(2) マイクロパーツのピック&プレース

対象物の把持には、液架橋力をもちいたこれまで提案した手法をもちいる。外径100 μm 内径20 μm のキャピラリをもちいて、空圧インジェクタによりキャピラリ内の液圧を制御することで、キャピラリ先端部と操作対象物との間に、十数 μN の液架橋力を発生させることで100 μm 程度の対象物の把持を実施することができる。液架橋力をもちいてマイクロパーツのピックアップとプレースが可能である他、複数のマイクロパーツ間の液架橋力を利用してパーツの自己整列も可能である。

本研究で提案する液架橋力を利用したマイクロパーツのピックアップの方法を図2に示す。まず、キャピラリ内に液体を満たし、その先端穴より液体が漏れ出さない表面張力と内圧が均衡した状態で、対象物(マイクロパーツ)に接触させる。するとキャピラリとマイクロパーツの間に液架橋が形成される。次の瞬間に、キャピラリを上昇させると、液架橋力によりマイクロパーツをピックアップすることができる。

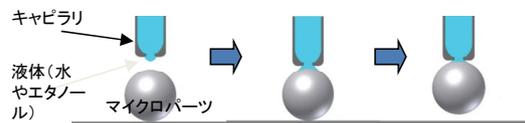


図2 マイクロパーツのピックアップ

次に、マイクロパーツのプレースの方法を図3に示す。まず、マイクロパーツを配置したい位置にキャピラリを移動した後、キャピラリを降下させる。マイクロパーツが設置面に接地したら、キャピラリを横方向にスライドさせる。するとキャピラリから液体が漏れ出て、マイクロパーツを伝って設置面との間

に濡れ広がる．この状態でキャピラリを上昇させると，設置面とマイクロパーツ間の液架橋力のほうが，マイクロパーツとキャピラリ間の液架橋力より大きいため，マイクロパーツのブレースが可能となる．

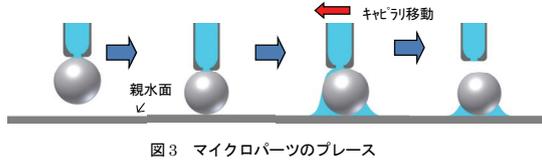


図3 マイクロパーツのブレース

(3) 顕微作業支援システムの構築

作業を支援するための内部処理を図4に示す．操作者は空圧インジェクタ，キーボード，ジョイスティック，ハプティクス・デバイスである PHANTOM Omni を操作し，組み立て作業をおこなう．コンピュータ内部では作業空間認識，画像処理，拡張現実感処理，仮想現実感処理，力覚フィードバック処理，移動ステージ制御がおこなわれる．移動ステージ制御により XYZ テーブルへ命令が送られ，ステージが移動，移動ステージ上にあるハンドリングツールが移動する．また，空圧インジェクタを操作することでキャピラリの先端の液滴を出し入れし，操作対象をハンドリングすることができる．作業スペースの映像は顕微鏡とカメラによりコンピュータに取り込まれ，画像処理を施した後，作業支援に必要な情報を付加しディスプレイに表示する．

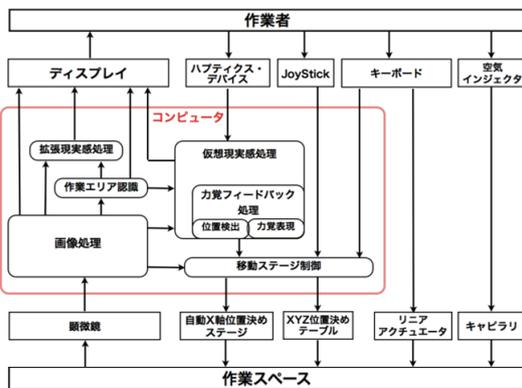


図4 支援システムの内部処理

(4) 顕微画像からの作業空間情報の抽出

本システムでは，図4に示すように単眼の顕微鏡画像の認識情報と，一軸ステージの位置情報をもちいてディスプレイに表示する顕微作業の支援情報生成に必要な微細物の位置を検出する．顕微鏡画像は，通常の画像と比べて光量が少なく，対象物を正確に認識することが困難である．そのため下記の画像処理の前処理をおこない対象物の認識精度を向上させる．

① 画像処理の前処理

ステージ側面から取得された顕微画像(図5(a))から背景差分法で，取得した背景画像の色情報と現在のフレームの色情報との差を画素ごとに計算し，外乱光の影響を除去した画像情報を抽出する．背景差分法では，あらかじめ対象物の映っていない顕微鏡画像50枚のデータの平均値と標準偏差から背景画像モデルを取得することにより，画像の認識に必要なデータと対象物のデータの切り分けをおこなうことが可能である(図5(b))．その後，膨張・伸縮，ラベリング処理(図5(c))をおこなうことで，図5(d)に示すように，対象物に焦点があったときに，適切な輪郭のみを抽出することが可能となる．

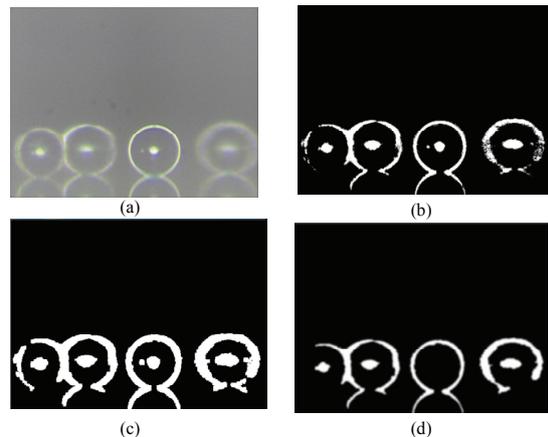


図5 顕微画像をもちいた対象物認のための前処理

② 対象物抽出

図6に示すように顕微作業の作業空間側面から，顕微鏡のステージを移動させて各位置での顕微画像を取得し，それらの画像に対して上記の前処理をもちいて下記手順で対象物の位置情報を検出する．作業空間の側面から撮影した場合の顕微画像内での対象物の位置関係が検出されるが，奥行き方向に関しては正確には測定することができない．そこで，物体の奥行き情報の取得方法は被写界深度を考慮して，カメラを移動させて距離の異なる場所で物体を検出する．本実験で利用した顕微鏡の焦点深度では実験的に $100\mu\text{m}$ 程度であり，作業空間に対象物がある場合，画像認識により対象物を検出をおこなったことにより，連続した複数枚の顕微画像から同じ対象物が検出されることとなる．そのため，対象物の位置情報は，画像処理とステージの位置情報から，連続して対象物が検出された奥行き方向の位置の中点を対象物の奥行き方向の位置として検出する．以上の手順により，作業空間にある，それぞれの対象物の中心位置と半径を抽出することが可能である．

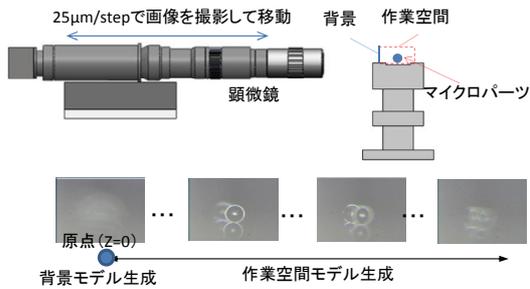


図6 顕微鏡画像をもちいた対象物の位置情報の取得

図7に顕微鏡画像から取得された作業空間情報を示す。図7(a)は、ある位置で取得された顕微鏡画像で、作業空間側面から見た時の奥行き方向の情報の取得が困難である。図7(b)は、図7(a)の状態を上面から撮影したものである。顕微鏡作業をおこなう際は、作業空間の対象物の上層部にマニピュレータが入るために、上面から見た画像をもちいて作業をおこなうことは困難であるため、今回は確認のためにのみ設置した顕微鏡により撮影している。図7(c)は、画像処理によって取得された作業空間の情報に基づいて OpenGL をもちいて生成した3次元モデルである。このモデルの生成には、ステージコントローラの制御命令の制約から、画像取得1枚あたりに1秒を必要とするために、100枚の画像をもちいた作業空間の3次元情報の取得には、原点復帰と画像処理の時間も含めて最大3分程度の時間を要する。図7(b)に100μmの格子状のマイクロスケールを配置して、実際の位置情報と生成された3次元モデルの奥行き位置を比較した。図7の例では、画面上右上部の対象物を基準とした検出誤差は、9μmであった。

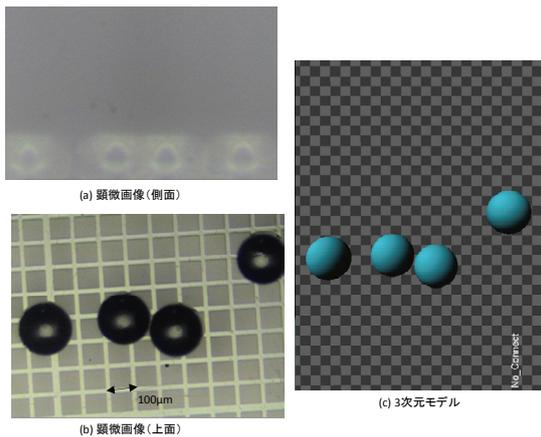


図7 顕微鏡画像から取得された作業空間情報

(5) 支援情報をもちいたマイクロパーツの組み立て

作業の支援をおこなう時は取得された顕微鏡画像に画像処理を施し顕微鏡下の対象物やキャピラリを認識する。図8に示すようにそれらの情報を用いて作業者に作業のしやすい情報を提示する。

顕微鏡下の作業では、対象物とマニピュレータとしてもちいるキャピラリ先端部分の3次元的位置決めを作業者がおこなう。単眼の顕微鏡画像をみながら作業をする場合、それぞれの位置は、焦点深度の範囲外の場合には、観察することができないため、作業者はマニピュレータの操作以外に顕微鏡の焦点位置合わせ作業を対象物の位置を推測しながらおこなう必要があり、それらの操作を同時に操作することが困難である。今回利用した顕微鏡をもちいた場合の焦点深度は100μm程度であるために、図8(a)に示すように、焦点深度内に複数の対象物がある場合、どちらの対象物がキャピラリの先端と位置が当たっているかを判断するのは熟練しないと困難であり、作業に時間を要する原因となっている。

作業支援方法としては、作業をおこなうキャピラリに対して適切な操作をより素早くおこなうために、下記のプログラムを実装して、作業支援をおこなっている。

- ① キャピラリに一度焦点を合わせるとキャピラリの1軸とカメラの1軸を同期させ常にキャピラリにピントが合う状態を維持するプログラム。
- ② 微小球体とキャピラリが同一画面にあるとき、微小球体の頂点とキャピラリの先端の点から水平方向の移動距離を求め、球体とキャピラリの水平方向の位置を自動で合わせるプログラム。
- ③ 立体組み立てをしている場所などのある1点の位置情報を記録し、記録した位置に回帰するプログラム。

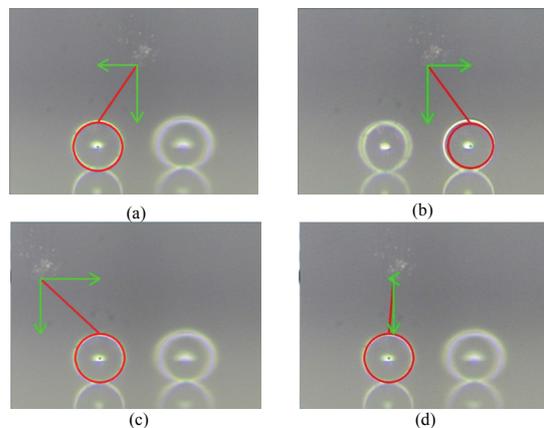


図8 組み立て作業のため顕微鏡作業支援情報の表示

(6) 仮想現実をもちいた顕微作業の支援

取得した位置情報をもちい仮想現実感を生成する。仮想現実感を生成することで、拡張現実感だけでは表現しにくい奥行情報を作業者に提示できるようになる。

提示する仮想現実感は、画像処理で得られた顕微鏡下物体の位置、形状情報を元にした、顕微鏡下環境の擬似的な再現モデルである。この顕微鏡下環境モデルを作業者に提示することで、顕微鏡画像からは認識しにくい奥行き情報を、より具体的に、より現実環境に近い状態で作業者に認識させることが可能である。また、再現モデル内では、実際の顕微鏡下では非常に困難な作業者視野の移動、変更が容易であり、作業者は任意の位置からの視野で、顕微鏡下環境全体の認識が可能となる。

画像処理により得られた作業スペース面積、対象物形状、対象物数、対象物それぞれの位置座標、対象物形状構成要素を元に、以下の手順で図9に示す仮想環境での作業領域を定義する空間、床、微小対象物の擬似的な仮想モデルを作成する。

① 仮想作業空間の作成

画像処理から得られた作業スペース情報を元に仮想空間と床面モデルを作成する。今回画像処理から提供される作業スペース情報は、画像取得のため移動する顕微鏡カメラの移動距離であり、その移動距離を一辺とする立法空間、正方形床面を作成する。また、床面は色違いの正方形タイルを敷き詰めることで、仮想空間内での移動距離把握を補助する。OpenGLをもちいて生成する仮想空間の原点は、画像処理を施す顕微鏡画像のサイズ $W \times H$ 、デバイス座標系と同様の座標系として、 $(W/2, H)$ の位置となっている。また、奥行き方向の原点は、図6に示すカメラ移動の中の画像取得開始点とする。

② 対象物モデルの作成

画像処理から得られた対象物の位置座標、径、個数の情報を元に、球の仮想モデルを仮想空間内に作成、配置する。

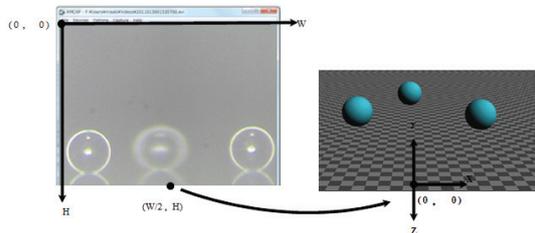


図9 顕微鏡画像と仮想作業環境原点の関係

作業中の3次元モデルの変化に関しては、キャピラリの位置と、対象物の把持状態を判定することにより、組み立て作業の状態をリアルタイムに観察することが可能である。

(7) 有効性の評価

システムの評価をおこなうには様々なパラメータをそれぞれ検証する必要があるが、今回の実験では顕微作業支援システムが作業の難易度を下げたかという項目について評価をおこなった。評価方法は同じ作業を顕微作業支援システムが導入されていない場合に実行した結果と、導入されている場合それぞれの作業し易さの評価をおこなうこととする。今回の実験でおこなう作業は微小球体をピラミッドに組み立てる立体組み立て作業である。液架橋力を用いたハンドリングツールを用い、直径 $200 \mu\text{m}$ のガラス球SPL-200（(株)ユニオン社製、材質：ソーダ石灰ガラス、粒径規格：(平均粒径 $200 \pm 10 \mu\text{m}$ 、標準偏差6.0以下))を下段3つ、上段1つの球体で構成されるピラミッドを作成する。顕微作業支援システムの導入されていない状態でおこなうとき、作業者はXYZテーブルモータコントローラ本体を直接操作してキャピラリを移動させる。顕微画像についてはパソコンを経由させ、何も画像処理を施していない画面を見て作業することとする。顕微作業支援システムを導入していないときには、複数のズームレンズカメラをもちいた観測や同じ程度の時間の作業をおこなうのに数十回の練習が必要であった。

図10(a)に支援システムをもちいた組み立て作業の様子と図10(b)に作業支援システムの表示画面を示す。ピラミッド作成時の土台部分の位置関係とピラミッド完成時の画像を図10(c),(d)に示す。図10(c)のピラミッドの土台は、各微小球が精密に密接しあっているが、微小球の位置決めの際には、最大数十 μm 離れた位置にプレースした場合でも、微小球同士の液架橋力による自己整列機能により、最終的に精密な位置決めが可能となっている。

このシステムを作業に利用した結果、6人の被験者中5人がピラミッドを完成させ完成させた場合の導入前の平均作業時間の差を検定したところ導入前が39分2秒で、支援導入時には平均で24分45秒かかった。導入前と導入後で40%の改善がみられた(t検定値： $t=5.59, df=4, p<0.05$)。ピラミッドの組み立て作業では、ピラミッドの上部のプレースに時間を要し、これには、操作対象のプレースの難しさが影響している。そのために、支援システムの有効性を確認するために、ピラミッドの土台のみを生成する時間を検定したところ、導入前が18分43秒、導入後が8分1秒であり、60%の作業時間の短縮が可能であった($t=4.72, df=5, p<0.05$)。支援システムを導入する時には、サンプリングおよびデータ生成の時間として約3分の準備時間が必要となるが、その時間を考慮しても土台作成に40%、ピラミッド作成時に30%の短縮

が可能であり、本システムには大幅な作業支援の能力があることが確認できた。三次元表示をおこなうことで球体とキャピラリとの位置関係が把握しやすくなり、画像処理により得られる位置情報を基に作成した支援情報により操作の簡略化を図れた。

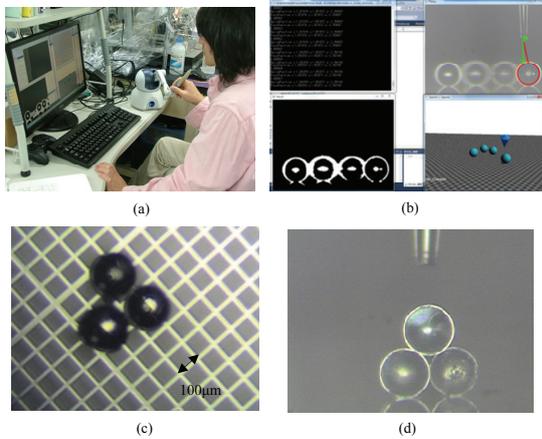


図 10 支援システムもちいた立体組み立て作業

4. 研究成果

本研究では、液架橋力をもちいたマイクロマニピュレーションのための仮想現実システムをもちいた支援システムについて提案をおこなった。液架橋力の特徴と単眼の顕微画像から取得された位置情報により生成された支援情報とを組み合わせ、マイクロパーツの組み立て作業をおこない、立体組み立て作業の作業時間を30%程度減少させることで、支援システムの有効性を確認した。仮想現実をもちいた顕微作業の支援システムがいくつか提案されているが、液架橋力と画像処理の組み合わせで構築することにより、他の研究提案手法と比較して簡易の方法でシステムが構築できた。

今後は、より複雑な形状のマイクロパーツの認識の検討や、力覚情報などを付加した作業支援システム、ピック&プレース方法の改良などについて検討をおこなっていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Daigo Misaki, Ryuhei Kurokawa, Satoshi Nakajima and Shigeomi Koshimizu, AR/VR for the micro manipulation system using single microscopic image recognition, International Journal of Automation Technology, Vol.5, No.6, 2011, accepted

〔学会発表〕(計2件)

- ① D.Misaki, A.Kudo, S.Koshimizu, H.Aoyama, Development of micromanipulation system using liquid bridging force for micro parts assembly, 12th International Conference on New Actuators, 2010, pp.1063-1066
- ② S.Nakajima, D.Misaki, S. Koshimizu, and H.AOYAMA, Augmented reality for micromanipulation system, the 4th International Conference on Positioning Technology, 2010, pp.198-199

6. 研究組織

(1) 研究代表者

見崎 大悟 (MISAKI DAIGO)

工学院大学・工学部・講師

研究者番号：00361832