

双腕マニピュレータの環境学習制御

Learning Environment Control with Dual Armed Manipulator

安井 誠一郎¹⁾ 安藤 英由樹¹⁾ 宮田 郁子¹⁾

洪 性寛¹⁾ 平松 誠治²⁾ 加藤 厚生²⁾

Seiichiro YASUI¹⁾, Hideyuki ANDO¹⁾, Ikuko MIYATA¹⁾,
Sung-Kwan HONG¹⁾, Seiji HIRAMATSU²⁾, Atsuo KATO²⁾

Abstract: Positioning problem of solid object is happened at the last step of material handling when we let the object reach for goal point. In the material handling with grasping by position-controlled manipulator, the stiffness of grasping is reduced to avoid collision problem which is happened at the moment of grasping generally. However this makes the accuracy of positioning poor at the last step. In this paper, we make attention to sliding movement of an object on horizontal plane with non-linear friction which enable stable contact between the object and manipulator and report the way of positioning by sliding the object on horizontal plane with position-controlled manipulator which isn't made the end effector's stiffness lower as one of solutions for collision problem. Also, we establish the characteristics equation analyzing slide movement and compare with experimental results.

1. はじめに

現在、様々な方面においてロボットが活用されている。産業界、とりわけ自動車業界では、ロボットが早くから利用されてきた。それは移動可能な物体を、ある位置から別の位置へ運ぶマテリアルハンドリングロボットや、決まった位置で点付けの溶接をするスポット溶接ロボット、手先をあらかじめ指示された軌道に沿って移動しながら塗料を吹き付ける塗装作業ロボット、らせん状の軌道を描きながら溶接をするアーク溶接ロボット、など、第一世代と呼ばれる繰り返し作業ロボットであった。これらのロボットはいずれも位置制御と呼ばれる制御手法が施されており、対象物と接触しない自由空間では手先位置を繰り返し正確に再現する能力を持っている。すなわち、位置制御ロボットが得意とする作業は、上記したような作業対象物と接触しない非接触作業と呼ばれる作業であり、実行できる作業が限定される。

一方、対象物と接触しながら行う作業は接触作業と呼ばれ、人間が行う作業のほとんどは接触作業である。それは生産現場でも同様で、古来熟練工が行ってきた作業には例

外なく接触作業が伴う。位置制御ロボットは指令された位置を正確に再現する能力を持つ。すなわち、外部環境から力が加えられた場合も指令位置を再現する。言い換えれば、外力への適応性を持たない剛性の高いロボットである。したがって、作業対象との接触が無い自由空間を移動する場合は正確な作業ができ、これに高速性を加えると高い作業能率を持つ。

しかし、固定された、剛性の高い作業対象と接触しながら作業する場合は、互いの高い剛性によって接触の瞬間に衝突が起これ、双方にダメージを引き起こす。このとき、衝突を回避するために接近速度を低下すれば、作業能率が低下する。とりわけ、作業対象物表面をなぞるような接触作業では、運良くダメージ無く接触できたとしても、作業対象物表面位置と指令位置に関し避けがたく存在する誤差によって、対象物に引っかけ疵を残すはめになる。

接触作業は環境による拘束を受ける作業である。拘束空間で作業するロボットは環境から反力を受けるので、これを検出して反力の制御を行う。このようなロボットは第二世代のロボットである。第二世代ロボットは力の制御を目的として出発したが、やがて力と位置を個別に制御するハイブリッド制御¹⁾、力と位置の相互関係を制御するコンプライアンス制御²⁾、力と速度の関係を制御するダンピング制御³⁾、力と位置、速度、加速度の関係を制御するインピーダンス制御⁴⁾へと発達した。インピーダンス制御では

1) 愛知工業大学大学院 工学研究科

電気電子工学専攻 (豊田市)

2) 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

手先から見たロボットの剛性（言い換えれば柔軟性）や粘性抵抗は言うまでもなく、みかけの慣性までも制御しようとする。インピーダンス制御されたロボットは人間の四肢のように柔軟で、すばやく、安定に、正確に運動できるはずである。今のところ、人間の四肢のように優れた運動性能をもつロボットは実現していないが、部分的な開発は確実に進行しており、やがて人間と空間を共有できる安全なロボットによって、人間の生活がサポートされる日がくる。

この研究では、多岐にわたるロボット制御に関する研究課題の一つとして、位置制御された双腕ロボットによる作業対象物の位置決め作業を取り上げる。位置制御ロボットを用いて安定な接触作業を実現する最も簡単な方法は、ロボットの先端部に受動的な弾性特性を付加する方法である。多くは、手首もしくは手先に、バネやゴム材を取り付けている。こうすることによって、剛体との安定な接触を実現でき、対象物の形状や位置に多少の誤差があっても安定に作業ができるので、ロボットの汎用性を向上させる事ができる。

こうして、従来のマテリアルハンドリングでは、ロボットの先端に付けた緩衝材付きハンドにより対象物を挟み込んだり、掬い上げたりして持ち上げ、目標位置まで移動する方式や、吸盤で対象物を吸着させて移動させる方式、インピーダンス制御ロボットを二台つかって把持し移動する方式、などが提案されている。

このように従来の接触作業では、位置制御により高い作業能率を実現すると環境との安全な接触が犠牲にされ、力制御を行い安定な作業を重視すると位置決め精度や作業能率を諦めなければならないと言う問題が存在する。本研究では、この問題への解決策の一つとして、位置制御を行いながらも、対象物との安定な接触が行える非線形な摩擦がある場合の対象物の滑り移動に着目し、手先の剛性を低下してない位置制御ロボットを使って水平面上に置かれた作業対象物を押し滑らせるだけで位置決めを行う方法について報告する。

2. 滑り移動

本研究は、摩擦のある水平作業面上で回転の中心が不明な正方形の対象物の一边を点接触で押し、滑り移動をさせた時の運動について扱う。まず、最初に述べておきたい事は、ここで扱う操作は運動エネルギー保存の法則とはあまり関係が無い事である。当然、止まっている対象物を動かすわけであるから、マンピュレータ先のアタッチメントの接触部分から加速のエネルギーを与えるわけであるが、今回の実験では、マンピュレータを接触させたまま等速で押し続けるので、静摩擦から動摩擦に移ってからは、対象物

の動摩擦力とマンピュレータの押す力が釣り合っているだけなのである。よって、マンピュレータから供給されるエネルギーは摩擦熱となって失われ、対象物自体に運動エネルギーの増加は起こらず、ここで取り扱う問題は運動方程式ではなく、摩擦のある環境における対象物の滑り移動についての特性方程式なのである。

2.1 滑り移動の特性方程式

本研究で行う滑り移動について述べる。実験では水平作業面上に正方形の板状対象物が各辺はX軸、Y軸に沿って平行に置かれ、位置制御のマンピュレータにより対象物の側面に点接触で触れる。マンピュレータをY軸方向に沿って等速直線運動で動かし、対象物を押し滑らせる。このときエンドエフェクタは、微小時間内でY軸方向に距離 L だけ直進移動し、これに伴い対象物は角度変位 α の回転運動と、水平作業面内の移動ベクトル T_g の並進運動を行う。この時までに、対象物の回転中心の座標を測定して既知の値にして置き、ここからエンドエフェクタとの接触点へのベクトルを R として特性方程式を立てた。

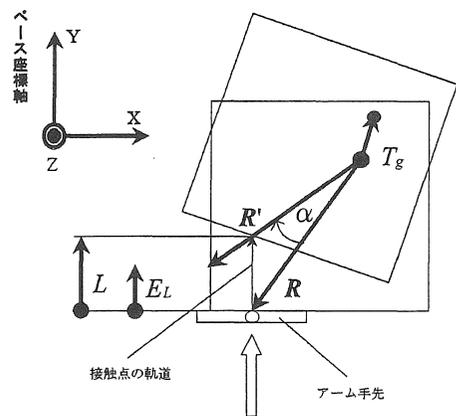


図1 滑り移動

図1は、水平作業面上を真上から見下ろしたものである。実験の条件は、水平作業面と対象物の間には、非線形な滑り摩擦が存在し、マンピュレータは理想的に位置制御され、等速直進運動をするのに必要なトルクは十分出力できるものとする。

ここで、摩擦のある環境における対象物の滑り移動についての特性方程式をしめす。

・滑り移動の特性方程式

$$\begin{aligned} (\mathbf{R}' - \mathbf{R}) \cdot \mathbf{E}_L + \mathbf{T}_g \cdot \mathbf{E}_L &= |\mathbf{L}|, \\ \mathbf{R}' &= \begin{pmatrix} \cos(-\alpha) & -\sin(-\alpha) \\ \sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R} \end{aligned} \quad (3.1)$$

但し、

\mathbf{R} : 回転中心から手先位置までのトルクの腕ベクトル

α : 対象物の回転の変位角

\mathbf{L} : 手先の移動ベクトル

\mathbf{E}_L : 手先の移動ベクトル \mathbf{L} と同じ方向の

単位ベクトル $\mathbf{E}_L = (0, 1)$

\mathbf{T}_g : 回転中心の移動ベクトル

(3.1)式は、接触点の Y 軸方向への移動距離が、回転移動ベクトルの Y 軸方向成分と、並進移動ベクトルの Y 軸方向成分の和であるという幾何学的関係を示す式である。

(3.1)式により、回転の中心の並進移動の移動ベクトルを表す。また、実験ではこの式を利用して、対象物の四隅の座標の位置を求め、時々刻々の軌跡を計算する。

3. 滑り移動の運動学

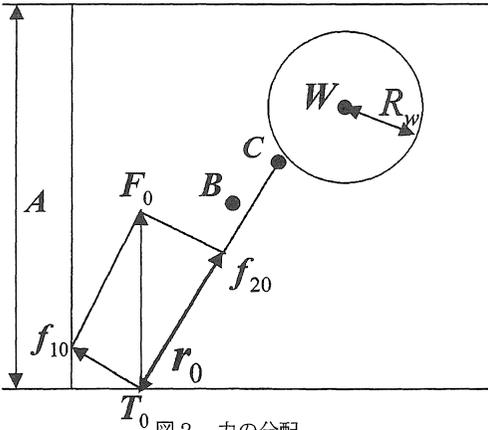


図2 力の分配

対象物のある辺を、辺に垂直な力 F_0 で押し滑らせた時、進行直線上に重心が無い場合、対象物には回転運動と並進運動が起こる。それぞれの運動は F_0 の並進方向への分力 f_{20} と、回転方向への分力 f_{10} により起こされる。

$\mathbf{W} = (w_x, w_y)$: 重りの重心座標

$\mathbf{C} = (c_x, c_y)$: 回転中心の座標

$\mathbf{B} = (b_x, b_y)$: 板の重心座標

\mathbf{T}_0 : 最初の接触点

\mathbf{F}_0 : 対象物に働く力

f_{10} : \mathbf{F}_0 の回転方向成分

f_{20} : \mathbf{F}_0 の並進方向成分

\mathbf{r}_0 : 回転中心から接触点へのベクトル

よって、以下のような運動方程式が立てられる

・対象物に与える力の分配

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{f}_{10} + \mathbf{f}_{20} \quad (3.2)$$

・並進方向の力の式

$$f_{20} = (m+M) a_0 + G_{10} \cdot \mu (m+M) g \quad (3.3)$$

・回転方向のトルクの式

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \cdot \mathbf{f}_{10} &= \left[\frac{mA^2}{6} + m \{ (b_x - c_x)^2 + (b_y - c_y)^2 \} \right. \\ &\quad \left. + \frac{MR_w^2}{2} + M \{ (w_x - c_x)^2 + (w_y - c_y)^2 \} \right] \cdot \ddot{\theta} \\ &+ G_2 \frac{\mu(m+M)g}{A^2} \int_{\frac{A}{2} - (b_x - c_x)}^{\frac{A}{2} - (b_x - c_x)} \int_{\frac{A}{2} - (b_y - c_y)}^{\frac{A}{2} - (b_y - c_y)} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy \end{aligned} \quad (3.4)$$

m : 板の質量、 M : 重りの質量

A : 正方形対象物の一片の長さ

R_w : 重り円盤の半径

$\ddot{\theta}$: 摩擦力の回転の角速度

G_1, G_2 : 摩擦力の並進方向・
回転方向の配分比

μ : 滑り摩擦係数

g : 重力加速度

3. 1 運動方程式からの回転中心の導出

対象物の回転中心は、摩擦力が系に発生していない場合、対象物全体の慣性モーメントが最小である重心に存在する。また、この実験では重りを乗せる正方形の板は剛体でたわまないと仮定した。このため、板の上面に偏らせて重りを分布させて乗せようとも、板が床を押す力は板の下面に一様に分布している。よって、板の回転の中心は摩擦力のモーメントが最小となる正方形の中央の点になる。

これらの要因から実際の回転中心は、この両方の影響を考慮した全モーメントが最小になる点に存在する。

ここで得られた回転中心の座標を C_0 とし、回転中心から接触点までのベクトル \mathbf{R} などを定める。

3. 2 等速直進運動による回転中心の導出

3.1より回転中心の座標は、慣性モーメントと摩擦力の2つの要因から成る全モーメントが、最小になる地点に存

在する。しかしながら、実際に非線型摩擦の存在する水平作業面上において、重りを乗せた正方形板状の対象物の一边を、片腕マニピュレータにより押し滑らせたところ、3.1で求めた回転中心では回転せず、ほぼ重りの重心を中心にして回転した。これは、3.1では正方形板状対象物を完全剛体として考え、たわまないと仮定したが、実際は対象物の底面が重りの重心を頂点としてたわんだためであると推察する事が出来る。このため、3.1の方法で求めた回転中心座標は実際の実験中心には使用できない事が判った。よってこれに代わる方法として、対象物の一边の両端を双腕マニピュレータでY軸方向に同時に等速直進運動で押す事によって、両腕のマニピュレータ先端に取り付けた力センサから反力のデータを得、この力の値から計算により実際の回転中心の座標を求めた。

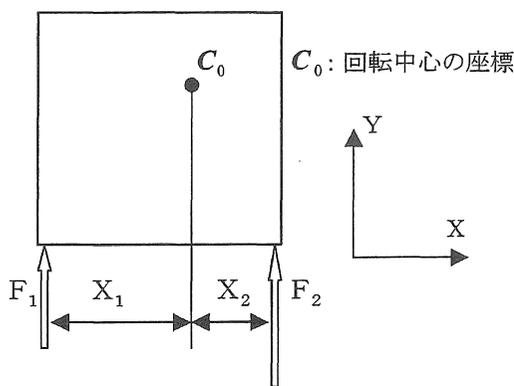


図3 回転中心の導出

対象物の回転中心を導出するために、対象物の一片の両端を等速直進運動させた時に、左右のエンドエフェクタに発生する異なった力 F_1, F_2 から、次式を用いて中心を走る軸を求める。

$$F_1 \cdot X_1 = F_2 \cdot X_2 \quad (3.5)$$

但し F_1, F_2 : 右手、左手に受ける対象物からの反力
 X_1, X_2 : 右手、左手のそれぞれの対象物との接触点から回転中心より接触している辺に下ろした垂線の交点との距離

物体が回転せず平行移動をするのは、その物体の回転中心にかかるトルクが釣り合っているためである。よって、両腕を位置制御で等速直進運動をさせている時には、マニピュレータが自動的に必要なトルクを発生していて、エンドエフェクタ先端の力センサでは上式を満たすような力が測定される。この作業をこの辺と直交する辺にも行ってやり、得た垂線の交点に回転の中心座標が同定される。

以上の方法により求めた中心点を実験で使用する事とした。

3.3 移動先の四隅の座標の導出

回転の中心点が判明した後に、各ベクトルを以下のように設定する。

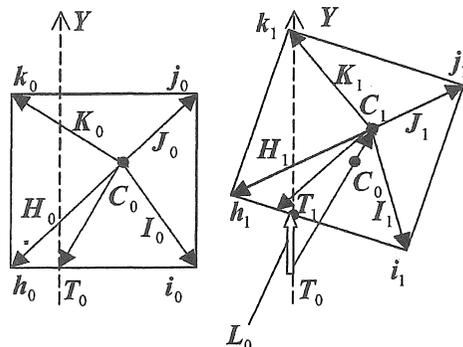


図4 移動後の四隅の座標

- T_0 : 接触点の位置ベクトル
- $C_0 = (C_{x0}, C_{y0})$: 回転中心の位置ベクトル
- $r_0 = T_0 - C_0$: 回転中心 → 接触点へのベクトル
- α : 対象物の回転の変位角
- L_0 : 接触点のY軸方向への移動距離
- T_{g0} : 回転中心の並進移動ベクトル

- ・ 回転中心から四隅への相対位置ベクトル
 - H_0 : 回転中心 C_0 から h_0 への回転ベクトル
 - I_0 : 回転中心 C_0 から i_0 への回転ベクトル
 - J_0 : 回転中心 C_0 から j_0 への回転ベクトル
 - K_0 : 回転中心 C_0 から k_0 への回転ベクトル

- ・ 四隅の絶対位置ベクトル
 - $h_0 = C_0 + H_0$: h_0 の位置ベクトル
 - $i_0 = C_0 + I_0$: i_0 の位置ベクトル
 - $j_0 = C_0 + J_0$: j_0 の位置ベクトル
 - $k_0 = C_0 + K_0$: k_0 の位置ベクトル

これらのベクトルを用いて、マニピュレータを対象物の辺上にある点 T_0 に接触させ、Y軸方向に等速直線運動させた時の単位時間後の対象物の四隅の座標を記述する。

- ・ 回転中心の並進移動ベクトル T_{g0}
 回転中心の並進移動ベクトル T_{g0} は、特性方程式より以下のように示される。

$$T_{g0} = L_0 - (r_1 - r_0) \quad (3.6)$$

但し、 r_1 は r_0 を単位時間後の変位角 α だけ反時計周りに回転させたベクトルであり、次の様に示される。

$$r_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha) & -\sin(-\alpha) \\ \sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{pmatrix} \cdot r_0 \quad (3.7)$$

・ 単位時間後の回転中心 C_1 の導出

単位時間後の回転中心 C_1 は、最初の回転中心 C_0 が T_{g0} だけ並進移動した地点にあるので、次の様になる。

$$C_1 = C_0 + T_{g0} \quad (3.8)$$

・ 単位時間後の四隅の座標の導出

対象物に対して、回転中心と四隅の座標は対象物が剛体であり変形しないとしたため、その相対的位置関係は不変である。よって、移動後の四隅の位置ベクトルは、前述の回転中心から四隅への相対位置ベクトルを用いて、以下のように示される。

$$h_1 = C_1 + H_1 \quad (3.9)$$

$$i_1 = C_1 + I_1 \quad (3.10)$$

$$j_1 = C_1 + J_1 \quad (3.11)$$

$$k_1 = C_1 + K_1 \quad (3.12)$$

但し、

h_1 : 単位時間後の h_0 の移動先位置ベクトル

i_1 : 単位時間後の i_0 の移動先位置ベクトル

j_1 : 単位時間後の j_0 の移動先位置ベクトル

k_1 : 単位時間後の k_0 の移動先位置ベクトル

であり、

$$H_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_0) & -\sin(-\alpha_0) \\ \sin(-\alpha_0) & \cos(-\alpha_0) \end{pmatrix} \cdot H_0 \quad (3.13)$$

$$I_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_0) & -\sin(-\alpha_0) \\ \sin(-\alpha_0) & \cos(-\alpha_0) \end{pmatrix} \cdot I_0 \quad (3.14)$$

$$J_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_0) & -\sin(-\alpha_0) \\ \sin(-\alpha_0) & \cos(-\alpha_0) \end{pmatrix} \cdot J_0 \quad (3.15)$$

$$K_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_0) & -\sin(-\alpha_0) \\ \sin(-\alpha_0) & \cos(-\alpha_0) \end{pmatrix} \cdot K_0 \quad (3.16)$$

は、単位時間後に反時計周りに α だけ回転した四隅へ相対位置ベクトルを表している。

4 実験

4.1 システム構成

本実験では、非線形な摩擦のある水平作業面内の対象物を押し滑らせるのに、7自由度の「可搬式汎用知能アーム

PA-10」二台を自作の体幹に取り付け、双腕マニピュレータとして使用した。双腕マニピュレータは、平面二自由度・位置制御で動かし、実験を行った。エンドエフェクタの先端には、対象物からの反力を測定するための力センサと対象物の姿勢を得るための角度センサが取り付けられている。二台のPA-10は、それぞれPCからアークネット通信により、専用ドライバボックスへ位置制御命令を送る事によって動かされている。PCにはメインPCとサブPCがあり、重心算出や軌道計画はメインPCにより行われる。サブPCでは各センサの値と現在の手先位置をメインPCに渡し、メインPCからの制御命令をマニピュレータに伝えている。

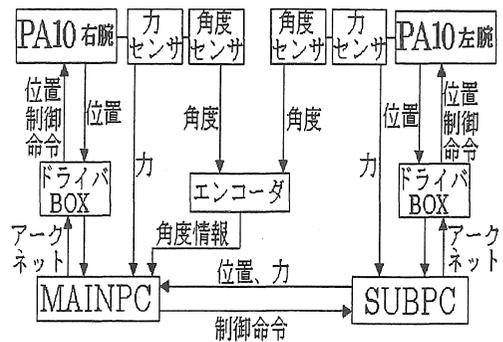


図5 システム構成

4.3 双腕マニピュレータ

本実験では、水平作業面内の正方形対象物を押し滑らせるのに、可搬式汎用知能マニピュレータ「PA-10」二台を自作の体幹に取り付け、双腕マニピュレータとして使用した。

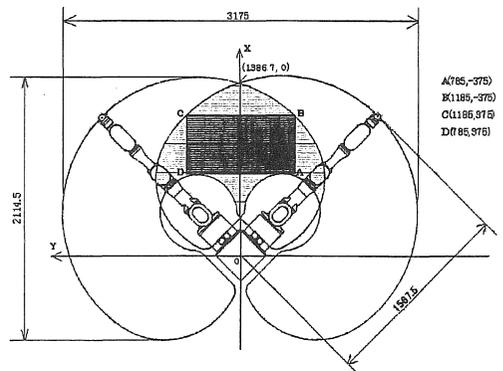


図6 双腕マニピュレータの協調作業可能領域図と、実験に使用した作業領域

双腕マニピュレータを作成した理由としては、対象物の回転中心を測定する時に両手で同時に対象物を押し滑らせる必要があったからである。双腕マニピュレータの取り付け角度を互いに90度にした事については、180度の

場合よりも協調作業範囲を広く採れるからである。だからといって0度にするとお互いのマニピュレータがとり得る目標位置までの軌道空間が近づき、マニピュレータ同士の衝突の危険性が大きくなることからこの角度に決定した。協調作業可能領域は図6に示す通りだが、実験では図中ABCDで囲まれた長方形内の作業領域を使用した。

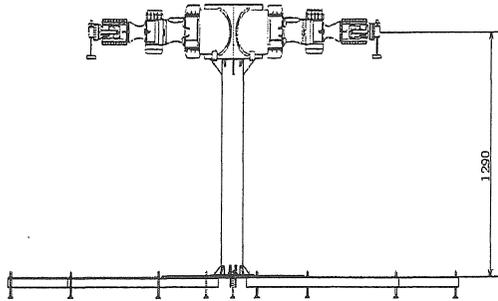


図7 双腕マニピュレータ正面図

4.2 実験内容

本実験では、非線形摩擦のある水平作業面上に置かれた、回転中心のわからない正方形の対象物を平面二自由度・位置制御された双腕マニピュレータで等速直線運動で押し、滑り移動させる事によって回転中心を同定し、その後、片腕で押し滑らせることにより、目標姿勢・位置に到達させる事を目標としている。

作業の手順は大きく3つにわかれている。まず対象物の回転中心導出を行い、次に目標姿勢を実現させ、最後に目標位置に到達させる。

・ 回転中心の導出

最初の回転中心の導出は、3.2に述べたように対象物の一辺の両端をそれぞれ双腕マニピュレータで等速直線運動で押しやる作業を、X軸、Y軸方向について行い、両腕マニピュレータの先端に取り付けた力センサの値から、計算により回転中心を求める。

・ 目標姿勢の実現

次に目標姿勢の実現であるが、対象物回転中心が同定された後に、双腕マニピュレータの片腕で対象物の一辺を等速直線運動で押し滑らせて、対象物に並進・回転運動を行わせる。目標姿勢=目標角度まで回転したことを、マニピュレータのエンドエフェクタに取り付けられた角度センサによって検知する。この時、並進運動も同時におこるので、目標位置達成時の回転中心の座標は、滑り移動の特性方程式によって推定する。

・ 目標位置への到達

最後に、目標姿勢を実現できた後、特性方程式により現在いる座標が既知になるので、この座標から目標座標への相対位置を知る事が出来る。正方形対象物に直交した座標系を設定し、この各座標軸に沿って等速直線運動をX軸方向、Y軸方向について行い、終地点である目標座標まで対象物を移動させる。この時、回転中心から押している辺に下ろした垂線との交点を押すので、片手で対象物を押し手も、回転を起こさずに並進移動させる事が出来る。

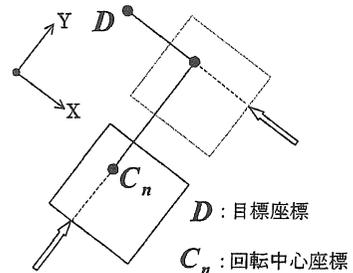


図8 目標位置への並進移動

こうして回転中心の不明な対象物に対して目標姿勢、目標位置を実現し、位置決め作業を行う事ができる。

実験では、刻一刻の単位時間ごとの四隅の座標を、透明な水平作業面の下面に貼り付けた一ミリ方眼紙のメモリを目視により読み取り、実際の軌跡と特性方程式による計算からの軌跡を比較し、特性方程式の妥当性を検証する。

4.3 実験結果

実験結果として、マニピュレータで対象物を押したときの時々刻々の対象物の四隅の位置座標を読み取り得た。これと、特性方程式の入力として角度変位 α と、Y軸方向に直進した移動変位距離Lを与えて計算した回転中心の移動量 Tg と、3.3の方法で算出した各四隅の座標の数値データと移動の軌跡を表したグラフを実測値と計算値の両方について得た。このグラフを以下に示す。

角度	手先のY軸 方向座標	角度変位 α	Y軸方向移動 距離変位L	
-3.8	-0.153	-3.8	0.47	
-6.3	-0.152	-2.5	0.001	
-9.9	-0.145	-3.6	0.007	
-13.5	-0.136	-3.6	0.009	
-17.1	-0.127	-3.6	0.009	
-18.9	-0.123	-1.8	0.004	
-19.8	-0.121	-0.9	0.002	
-21.6	-0.116	-2.7	0.005	
-24.3	-0.109	-2.7	0.007	

角度の単位は (deg.)、座標の単位は (m)

表1 特性方程式の入力になる角度変位 α とY軸方向移動距離変位L

hの x座標	hの y座標	iの x座標	iの y座標	jの x座標	jの y座標	kの x座標	kの y座標
0.848	-0.14	1.046	-0.148	1.057	0.05	0.858	0.058
0.849	-0.13	1.047	-0.147	1.067	0.049	0.868	0.068
0.85	-0.123	1.047	-0.148	1.076	0.048	0.878	0.077
0.851	-0.111	1.046	-0.149	1.087	0.046	0.891	0.085
0.853	-0.101	1.046	-0.149	1.096	0.043	0.903	0.093
0.854	-0.098	1.046	-0.149	1.1	0.043	0.907	0.096
0.855	-0.095	1.046	-0.149	1.102	0.041	0.91	0.097
0.858	-0.084	1.045	-0.149	1.113	0.038	0.925	0.105
0.86	-0.087	1.045	-0.149	1.12	0.036	0.934	0.109

座標の単位は (m)

表 2 対象物の四隅の座標の実測値

hの x座標	hの y座標	iの x座標	iの y座標	jの x座標	jの y座標	kの x座標	kの y座標
0.85	-0.15	1.05	-0.15	1.05	0.05	0.85	0.05
0.85	-0.148	1.05	-0.157	1.059	0.042	0.859	0.051
0.851	-0.142	1.05	-0.16	1.07	0.038	0.869	0.057
0.851	-0.134	1.049	-0.162	1.077	0.036	0.879	0.064
0.851	-0.125	1.048	-0.163	1.085	0.034	0.889	0.071
0.851	-0.117	1.046	-0.164	1.092	0.031	0.898	0.077
0.851	-0.11	1.043	-0.165	1.099	0.027	0.907	0.083
0.851	-0.1	1.041	-0.165	1.105	0.024	0.916	0.089

座標の単位は (m)

表 3 対象物の四隅の座標の計算値

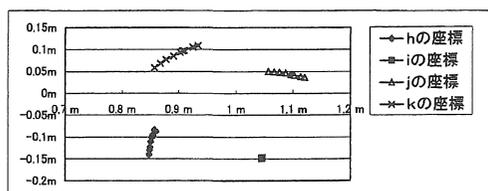


図 9 対象物の四隅の座標の実際の軌跡

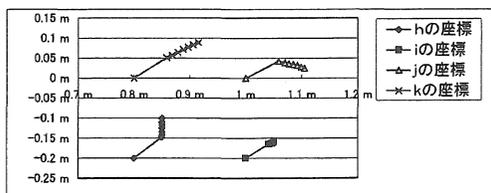


図 10 対象物の四隅の計算値の座標軌跡

上図は、実験で行った回転・並進運動の、四隅の座標の移動の軌跡である。

正方形対象物は、X 軸、Y 軸に沿って平行である初期位置から、右斜め上方へ回転運動をしながら、並進運動をして移動している。

図 9 は実際に対象物の四隅の座標を、透明な水平作業面の裏に貼り付けた 1 ミリ方眼紙のメモリを目視により読み取った値である。値を時々刻々に採りグラフ化した。

図 10 は実験中の測定値として、時々刻々の角度センサからの角度変位 α と Y 軸方向移動距離 L を取り出し、それを特性方程式への入力として計算した結果から求めた、四隅の座標の移動の軌跡である。

特性方程式は、回転中心の移動ベクトル T_g しか示さないが、これを用いて 3.3 より四隅の座標も求められる。

実測値からの軌跡は曲線を描いているが、計算値から導いた軌跡は、直線的で突然折れ曲がったりしている。これは、特性方程式に入力した測定データが、離散的にしか取れなかったことが原因と思われる。

5 まとめ

結果のグラフから振る舞いについては、計算結果と実測結果がかなり似通っている事がわかる。これは本論文で立てた特性方程式にある程度の妥当性がある事を示すとと思われる。

測定値と実測値のずれの原因としては、実際には対象物の側面とエンドエフェクタとの摩擦が存在するが、特性方程式では力は対象物に直角の成分しか働かず、摩擦による対象物の辺に平行方向の引っかかりが無視されているためだと思われる。その他にも、実験で使用した角度センサの分解能が一周 400 パルスで最小単位が 0.9 度しか感知できなかったことや、回転中心位置を求めるときに、力センサの値にノイズが発生し、時間的に安定しておらず、正確な値が取れなかったことが理由として挙げられる。角度センサも 0.9 度以下の変位角度は検出されないの、値の変化が段階的にしか得られず正確な回転中心の移動が得られない。また力センサの値にノイズが発生した原因は、マニピュレータの位置制御の速度が等速には設定してあっても、微小時間ではマニピュレータが移動と停止を繰り返しているために、速度が連続しておらず、対象物からの反力が一定していないためだと思われる。

参考文献

- 1) M.H. Raibert et. al: Hybrid Position/Force Control of Manipulators, ASME, J. of DSCMC, 102, 126/133 (1981)
- 2) D.E. Whitney: Historical Perspective and States of the Art in Robot Force Control, The International Journal of Robotics Research, 6, 1, Spring (1987)
- 3) J.K. Salisbury: Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates., Proc. 19th IEEE Conf. Decision Control, 284 (1980)
- 4) N. Hogan: Impedance Control : An approach to manipulation : Part 1-3, ASME, Journal of DSCMC, 1/7 (1985)

(受理 平成12年 3月18日)