

# 第10回 ロボティクスシンポジア

Robotics Symposia

2005.3.14-15 in HAKONE



# SICE

【共同主催】

日本ロボット学会

日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門

計測自動制御学会システムインテグレーション部門

RSJ JSME SICE

## 遠隔操作を利用したタスクスキル作成手法

(独)産業技術総合研究所 尹祐根, 末廣尚志, 北垣高成, 音田弘, 安藤慶昭,  
齋藤史倫, 中村晃

### Task Skill Transfer Method Using a Teleoperation

AIST Woo-Keun Yoon, Takashi Suehiro, Kosei Kitagaki, Hiromu Onda, Noriaki Ando,  
Fuminori Saito and Akira Nakamura

**Abstract:** In this paper, we propose a new task skill transfer method from a bilateral teleoperation system to a autonomous robot system. A operator makes a motion process of the task skill from a teleoperation process which is able to execute a target task. We assume the task skill motion is described by a hybrid control which is composed of a impedance and a force controls. Parameters of the hybrid control are obtained from the results of bilateral teleoperation experiments. For example, a nut attachment task skill is made by our skill transfer method.

**Key Words:** Skill, Task Skill Transfer, Bilateral Teleoperation, Hybrid Control, Force Control, Impedance Control

#### 1. 緒言

ロボットがある基本作業を実行できるだけでなく、上位のレベルから再利用可能なモジュールとして、タスクスキルという概念が提案され<sup>1)</sup>、多くのタスクスキル研究が実施されている<sup>2)-10)</sup>。

我々の研究室では、タスクスキルを、センサ系を用いた状態検出方式と、モータ系の制御方式の適切な組み合わせにより、作業対象レベルで規定された目標状態を達成する器用な基本動作で、上位のレベルからはその実現手段を意識することなしに利用可能なモジュールと定義した<sup>1)</sup>、さらに、本論文ではタスクスキルのモデルをタスクスキルのモデルを初期条件、タスクスキル動作、終了条件からなる一連の状態遷移の実現と定義し、タスクスキル動作はインピーダンスと力のハイブリッド制御で記述されるとする。ここで、初期条件および終了条件は、センサやモータなどにより検出される値で記述される。したがって、タスクスキルモデルに基づく動作手順を組立てることにより、具体的な動作プログラムとして記述可能となり、ロボットが自律的にタスクスキルを実現する。

接触遷移に着目した多面体の組立作業<sup>5)</sup>、ベグの挿入作業<sup>7)-9)</sup>、壁への押付け<sup>10)</sup>などのタスクスキル研究により、タスクスキルの作業実現への有効性については議論、確認されている。しかし、作業を実現するタスクスキルの動作手順の決定手法や、タスクスキルを構成する制御側のパラメータの設定方法については、明確に述べられていない。

そこで、本論文では、新たに遠隔操作を利用したタスクスキルの動作手順の決定手法およびインピーダンスと力のハイブリッド制御によるタスクスキルの実装手法を提案する。なお、タスクスキルの実装手法には、ハイブリッド制御で使用するパラメータの設定方法も含まれる。

#### 2. タスクスキル作成手法

これまでにタスクスキルの生成手法として、

- プログラマーによる直接記述<sup>5)</sup>、
- 人による対象作業実行時の動作情報(腕のインピーダンス情報など)からの記述<sup>7)</sup>、
- 人による対象作業実行時の動作情報(視覚情報などによる見まね)からの記述<sup>13)</sup>、
- 人がロボットの手先を把持し、対象作業を実行した結果からの記述<sup>2), 3)</sup>、

などが提案されている。

プログラマーによる直接記述では、プログラマーが頭の中にモデルを作成しそのモデルを基にタスクスキルを試行錯誤的に記述することとなり、モデルと実環境との間にモデル誤差が生じると試行錯誤が非常に困難となる。人の動作情報による記述では、人とロボット間には機構、剛性、制御方式など異なる要素が多く、人の動作からタスクスキルを生成することは困難となる。

そこで、人がロボットの手先を把持し、対象作業を実行した結果からの記述が有力となるが、本論文では、バイラテラル遠隔操作システムを利用して、オペレー

Table 1 Compliance gains of hybrid control.

	x axis	y axis	z axis	roll axis	pitch axis	yaw axis
$M_i$ (inertia gain) [kg]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$D_i$ (damping gain) [Ns/m][Nm/(rad/s)]	200.0	200.0	200.0	10.0	10.0	10.0
$K_i$ (stiffness gain) [N/m][Nm/rad]	500.0	500.0	500.0	5.0	5.0	5.0

Table 2 Force gains of hybrid control.

	x axis	y axis	z axis	roll axis	pitch axis	yaw axis
$K_f$ [m/N][rad/Nm]	0.0005	0.0005	0.0005	0.05	0.05	0.05

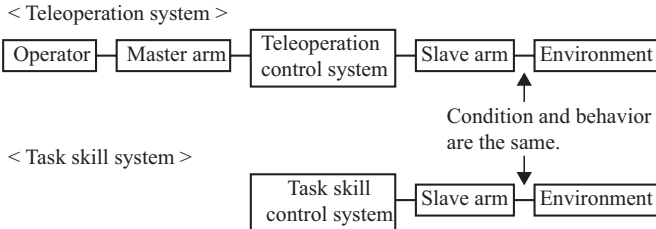


Fig.1 Concept of the task skill transfer method.

タが遠隔操作により対象作業を実行し、遠隔操作からタスクスキルを抽出する手法を提案する。遠隔操作環境として、オペレータは視覚情報を使用せず、マスターアームから提示される動作と力の情報のみ使用できる。本手法でも、タスクスキルを試行錯誤的に求めているが、実機を使った遠隔操作により求めているため、プログラマーによる試行錯誤に比べて、非常に簡単なものとなる。

### 2.1 タスクスキル作成手法

図 1 に本論文で提案するタスクスキル作成手法の概念図を示し、以下にその内容を述べる。

1. 応答性の良いバイラテラル遠隔操作システムを利用して、オペレータが対象作業を実行し、遠隔操作手順からタスクスキルの動作手順を抽出する。この手法によりロボットが実際に実現可能な手順を得ることができる。
2. 遠隔操作時のスレーブ側の実験結果から、タスクスキルの記述に必要なパラメータを抽出する。
3. 上記 1, 2 からタスクスキルの動作プログラムを作成、実行する。

### 2.2 タスクスキルのためのパラメータ抽出

タスクスキル動作は、インピーダンスと力のハイブリッド制御で記述されるため、ハイブリッド制御に必要なパラメータ抽出について議論する。

本論文では、ハイブリッド制御を表すハイブリッド制御関数を以下のように記述する。

```
state =
MoveHybrid(int Flag[6], double Target[6],
double TargetVel[6], double CurPos[6],
```

```
double CurFor[6]);
```

ここで、Flag[6] はそれぞれの軸 (x, y, z, roll, pitch, yaw) に適用する制御則 (インピーダンス制御と力制御) フラグ (0 がインピーダンス制御, 1 が力制御), Target[6] はインピーダンス制御における目標インピーダンス中心位置・姿勢, または力制御における目標力・トルク値, TargetVel[6] はインピーダンス制御におけるインピーダンス中心位置・姿勢の移動速度, または力制御における目標力・トルク値への遷移速度, CurPos[6] は現在手先位置・姿勢, CurFor[6] は現在力・トルク値, state は返り値であり MoveHybrid 関数内で Target[6] を達成時には 0 を未達成時には 1 を返す, である。

遠隔操作時のオペレータには、力制御したい軸のみ意識してもらい、その他の軸をインピーダンス制御に振り分ける前提で遠隔操作手順を作成してもらうため、この遠隔操作手順から、ハイブリッド制御でのインピーダンス制御軸と力制御軸 (Flag[6]) を決定する。

インピーダンス制御における Target[6], TargetVel[6], 力制御における Target[6], TargetVel[6] は、遠隔操作の結果から抽出して決定する。

なお、インピーダンス制御および力制御のゲインは、事前に決定しておく。表 1 にインピーダンス制御における慣性ゲイン ( $M_i$ ), ダンピングゲイン ( $D_i$ ), 剛性ゲイン ( $K_i$ ), 表 2 に力制御におけるゲイン ( $K_f$ ) を示す。

オペレータによる遠隔操作実験結果からは、スレーブアームの位置・姿勢および力・トルクのデータが取得できるため、剛性ゲイン ( $K_i$ ) と以下の式 (1) を利用して、遠隔操作でオペレータが実施しているインピーダンス制御のインピーダンス中心の位置・姿勢、移動速度を抽出することができる。

$$P_{ic} = P_s + K_i F_s \quad (1)$$

ここで、 $P_{ic}$  はインピーダンス中心の位置・姿勢,  $P_s$  は遠隔操作でのスレーブアームの位置・姿勢,  $F_s$  は遠隔操作でのスレーブアームに作用する力・トルクである。さらに、遠隔操作実験でのスレーブアームの力・ト

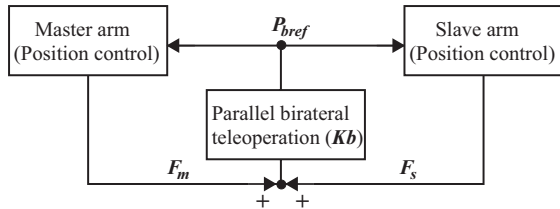


Fig.2 Control block diagram of the parallel bilateral teleoperation system.



Fig.3 Master arm.



Fig.4 Slave arm.

ルクのデータから、力制御における目標力・目標トルク、達成速度も抽出することができる。

### 2.3 タスクスキルの実行

タスクスキルは、タスクスキル座標系 ( $\Sigma_s$ ) で動作し、タスクスキル座標系はある瞬間のロボットの手先座標系を基準として空間の一点に固定される。したがって、ロボットの移動により手先座標系も移動するが、タスクスキル座標系は移動しない。また、タスクスキル座標系は、いつでも手先座標系を利用して再設定することができる。

MoveHybrid 関数が動作するタスクスキル座標系を設定する関数を以下のように記述する。

```
state = SetMoveHybridCoord(int CoordFlag);
```

ここで、CoordFlag は設定する座標系を決めるフラグ (0 は基準座標系, 1 は設定時の手先座標系), state は返り値であり設定完了時には 0 をエラーが生じた時には 1 を返す, である。

2.2 および 2.3 の結果と、MoveHybrid 関数と SetMoveHybridCoord 関数により、タスクスキルの動作プログラムが記述され、実行される。

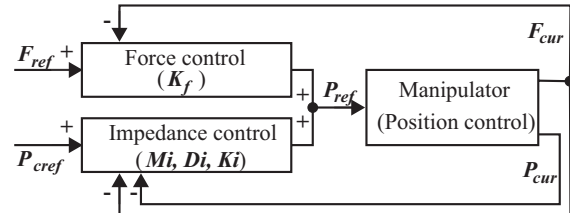


Fig.5 Control block diagram of the autonomous robot system.

## 3. システム構成

ここでは、オペレータの使用するバイラテラル遠隔操作システムと、タスクスキルを実装、実行する自律型ロボットシステムについて説明する。

### 3.1 バイラテラル遠隔操作システム

本論文では、バイラテラル遠隔操作システムの制御則に、安定性・応答性に優れた並列型遠隔操作システムを採用する<sup>15)</sup>。図 2 に並列型遠隔操作システムのブロック図を示す。マスタアーム、スレーブアームともに下位のレベルでは位置制御される。なお、マスタスレーブ間のスケーリングを 1 対 1 と設定する。並列型バイラテラル遠隔操作システムの制御則は、

$$P_{bref} = K_b(F_m + F_s) \quad (2)$$

となる。ここで、 $P_{bref}$  はマスタアーム、スレーブアームの目標位置、 $F_m$  はマスタアームの力・トルク情報、 $F_s$  はスレーブアームの力・トルク情報、 $K_b$  はゲインであり、 $K_b$  を 0.005 [m/N], 0.5 [rad/Nm] と設定する。

マスタアーム (図 3) には、これまで開発してきた 6 自由度小型ハプティックインタフェース<sup>11),12)</sup>を採用し、スレーブアーム (図 4) には、7 自由度マニピュレータ (PA-10) を採用する。PA-10 の手先には、6 軸力覚センサ、平行 2 指ハンドが設置される。

### 3.2 自律型ロボットシステム

図 5 に自律型ロボットシステムのブロック図を示す。ここで、 $P_{ref}$  は位置制御における目標手先位置・姿勢、 $P_{cref}$  はインピーダンス制御における目標インピーダンス中心位置・姿勢、 $F_{ref}$  は力制御における目標力・トルク値、 $P_{cur}$  は現在手先位置・姿勢、 $F_{cur}$  は現在力・トルク値, である。自律型ロボットシステムは、バイラテラル遠隔操作システムのスレーブ側と同じであり、PA-10, 6 軸力覚センサ, 平行 2 指ハンドから構成される。このシステムには、下位のレベルで位置制御、上位のレベルでインピーダンスと力のハイブリッド制御が実装される。

## 4. ナット組付けタスクスキルの作成

タスクスキルの例として図 6 に示すナットの組付け作業を取上げる。ナットは M20 を採用し、PA-10 の平

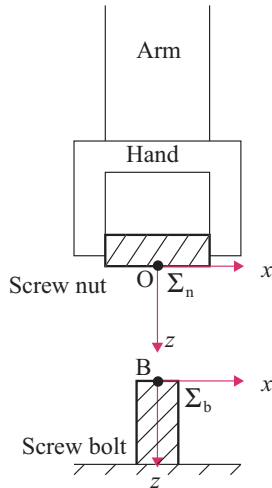


Fig.6 Nut attachment task.

行 2 指ハンドに把持される．ボルトは環境に固定されている． $\Sigma_n$  はナットに固定されたマニピュレータ手先座標系， $\Sigma_b$  はボルトに固定された基準座標系である．点 O は  $\Sigma_n$  の原点であり，マニピュレータ手先位置である．点 B はボルトの原点である．

前提条件として， $\Sigma_b$  が，事前にカメラやオペレータによる遠隔操作などによって求められており， $\Sigma_b$  と  $\Sigma_n$  に対する， $xy$  平面における許容位置誤差はナット穴の半径， $x$  軸回り (roll) および  $y$  軸回り (pitch) の許容姿勢誤差は  $0.3$  [rad] (約  $17$  [deg]) と設定する．

#### 4.1 遠隔操作によるナット組み付け作業

図 8 に遠隔操作によるナット組付け作業実験結果を示す．図はそれぞれ

- (a) 手先に作用する力，
- (b) 手先に作用するモーメント，
- (c) 手先位置，
- (d) 手先姿勢，
- (e) インピーダンス中心の位置，
- (f) インピーダンス中心の姿勢，

を示す．ここで，インピーダンス中心の位置と姿勢は，式 (1) から計算した．座標系は，実験開始時点の  $\Sigma_n$  を採用し，この座標系を  $\Sigma_0$  とする．

オペレータが実施した遠隔操作手順は，

- (1) ボルトへの接近，接触動作 (図中 AB 間，IJ 間) (全軸インピーダンス制御)
- (2) ボルトへの押付け動作 (図中 BC 間，JK 間) ( $z$  軸力制御，その他の軸インピーダンス制御)
- (3) ボルトへの軸合せ動作 (図中 CG 間，KO 間) ( $z$  軸力制御，その他の軸インピーダンス制御)
- (4) ボルトへの軸合せ動作が失敗した場合の離脱 (図中 GH 間)，回転動作 (図中 HI 間) (全軸インピーダンス制御)
- (5) ボルトへの組付け動作 (図中 OP 間) ( $z$  軸力

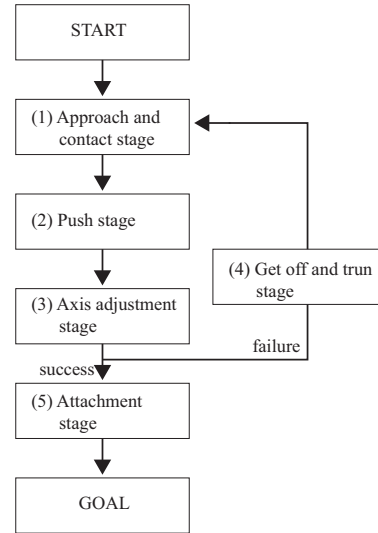


Fig.7 Flowchart of nut attachment task skill.

制御，その他の軸インピーダンス制御)

となり，これをタスクスキルの動作手順とする．図 7 に動作手順のフローチャートを示す．

以下，遠隔操作手順とナットの組付けタスクスキル手順に沿って，タスクスキルの記述に必要なパラメータを図 8 中の英字を利用してを抽出する．

##### 4.1.1 ボルトへの接近，接触動作

オペレータは，ナットをボルトへ接近，接触させるため，これらの動作に必要なパラメータを実験結果から抽出する．

図中 AB 間および IJ 間では，図 8 (e) からインピーダンス中心を約  $10$  [s] 間に  $z$  軸方向に  $0.04$  [m] (図中  $\alpha_1, \beta_1$  間) 移動させる．したがって，全軸 ( $x, y, z, \text{roll, pitch, yaw}$  軸) インピーダンス制御とし，インピーダンス中心を  $z$  軸方向に  $0.004$  [m/s] で移動させ，ボルトに接近，接触させる．接触後， $-6.0$  [N] (図 8 (a) 中  $\alpha_3$ ) の力を  $z$  軸方向に発生させ，接触動作を終了する．ここで，初期位置からの位置誤差が吸収されていることが，図 8 (c) から確認できる．

ボルトへの接近，接触動作をタスクスキルのモデルを使って以下のように記述する．

- 初期条件： $\Sigma_n$  の  $z$  軸と  $\Sigma_b$  の  $z$  軸軸がある程度一致しており，動作開始時の  $\Sigma_n$  を  $\Sigma_s$  と設定する． $z$  軸方向でのボルトとナットの距離は  $0.1$  [m] 以内とする．
- タスクスキル動作：全軸インピーダンス制御で，インピーダンス中心を  $z$  軸方向に  $0.004$  [m/s] で移動させる．目標位置はナットとボルトの距離よりも大きく設定し， $0.1$  [m] とする．
- 終了条件： $z$  軸方向に  $-6.0$  [N] 発生した時点で終了する．この時点での  $\Sigma_n$  を  $\Sigma_s$  と再設定する．実装するプログラムは以下のように記述される．

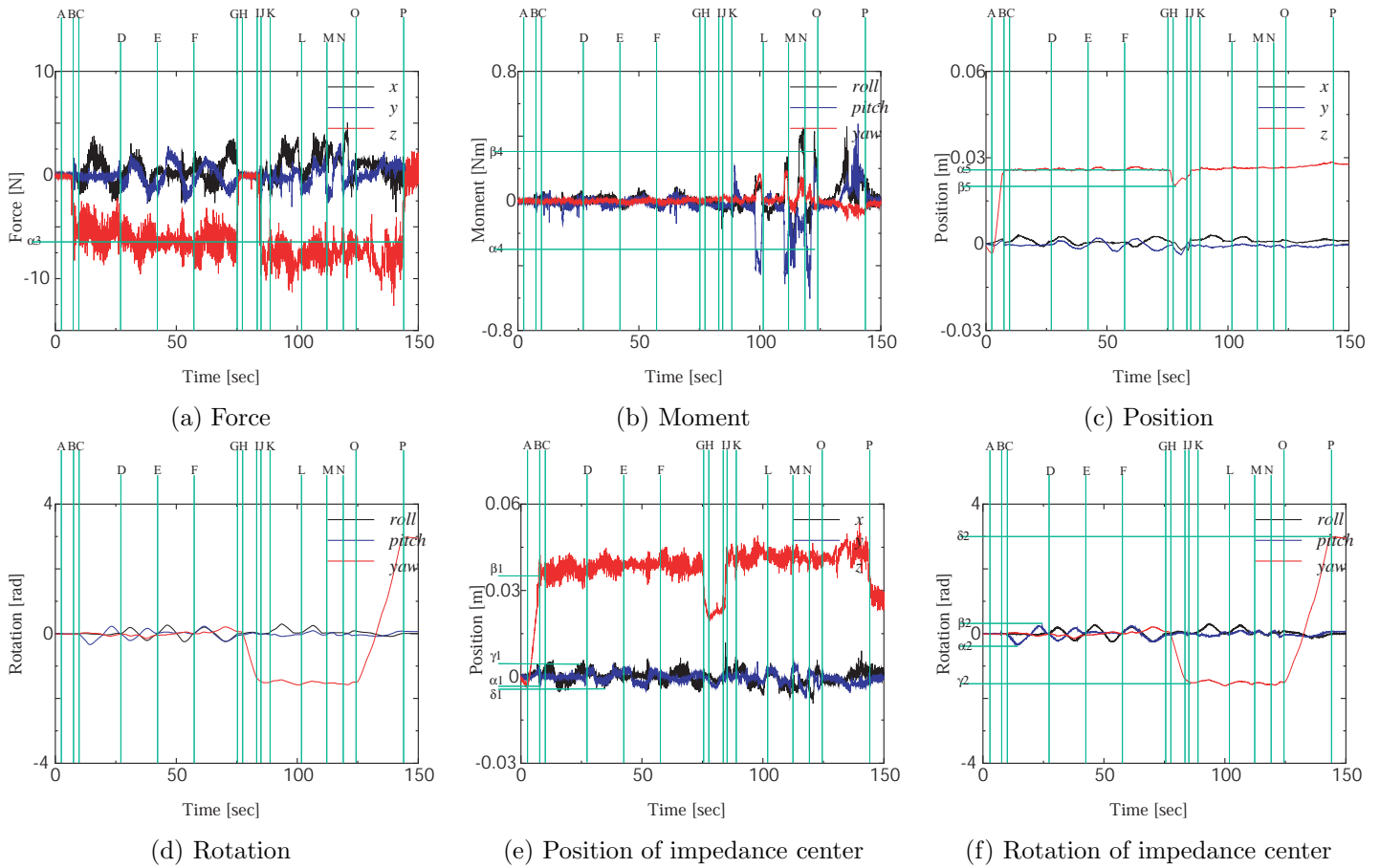


Fig.8 Experimental result of bilateral teleoperation.

```

// initial condition
SetMoveHybridCoord(1);

// setup
for(i=0;i<6;i++) Flag[i] = 0;
for(i=0;i<6;i++) Target[i] = 0.0;
for(i=0;i<6;i++) TargetVel[i] = 0.0;
// z axis target position
Target[2] = 0.1;
// z axis target velocity
TargetVel[2] = 0.004;

// hybrid motion
state = MoveHybrid(Flag, Target, TargetVel,
CurPos, CurFor);

// finish condition and initial condition
// for next stage
if(state==0){ // do not contact
printf('CONTACT ERROR');
exit(1);}
if(CurFor[2] > -6.0) SetMoveHybridCoord(1);

```

#### 4.1.2 ボルトへの押付け動作

オペレータは、ナットをボルトへ押付けるため、この動作に必要なパラメータを実験結果から抽出する。

図中 BC 間および JK 間では、約 7 [s] 間、z 軸方向に -6.0 [N] で押付ける。

ボルトへの押付け動作をタスクスキルのモデルを使っ

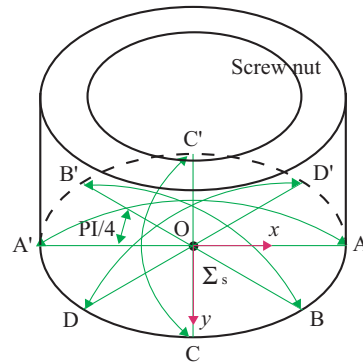


Fig.9 Overview of nut coordination system.

て以下のように記述する。

- 初期条件：z 軸方向に -6.0 [N] 発生状態とする。
- タスクスキル動作：z 軸力制御，その他の軸インピーダンス制御で，z 軸方向に -6.0 [N] で押付ける。
- 終了条件：7.0 [s] 間押付けた時点で終了する。

実装するプログラムは省略する。

#### 4.1.3 ボルトへの軸合せ動作

オペレータは、ボルトへの軸合せのため、ナットをボルトに押付けたまま、コンプライアンス中心の姿勢を変化させる。軸が一致した場合には、ナットに大きなモーメントが発生するため、モーメントに注意しな

がら、軸合せを実施する。したがって、遠隔操作実験結果から、コンプライアンス中心の移動と、軸合せの評価基準となるパラメータを抽出する。

図9にナットの面を $\Sigma_s$ に関してxy平面で8分割した図を示す。オペレータは、インピーダンス中心を図9に示されたAA', BB', CC', DD'方向に順次姿勢を変化させ軸合せを実施する。以下に詳しく手順を述べる。

図中CD間では、z軸方向に-6.0[N]で押付けたまま、約32[s]間、図9に示したピッチ軸周り(AA'方向)に0.0[rad]から-0.25[rad](図8(f)中 $\alpha_2$ )へと回転させ、次に-0.25[rad]から0.25[rad](図8(f)中 $\beta_2$ )へと回転させ、さらに0.25[rad]から0.0[rad]へと回転させる。ここで、回転速度は0.04[rad/s]となる。さらに、図中DE間、EF間、FG間と同様に図9に示したBB'方向、CC'方向、DD'方向で姿勢を変化させる。

さらに、図8(e)では、CD間にインピーダンス中心の移動が確認できる。インピーダンス中心の姿勢がAA'方向に0.0[rad]から-0.25[rad]に回転する際にはx軸方向に0.004[m]移動し、次に-0.25[rad]から0.25[rad]に回転する際にはx軸方向に-0.004[m]移動し、さらに0.25[rad]から0.0[rad]へと回転する際にはx軸方向に0.004[m]移動している。DE間、EF間、FG間も同様にインピーダンス中心の並進動作が確認できる。

軸合せの評価基準は、0.3[Nm]以上のモーメント(図8(b)中 $\alpha_4, \beta_4$ )が1.0[s]以上発生する状態と定義し、この時点での $\Sigma_n$ を $\Sigma_s$ として再設定する。さらに、この状態が図9のAA'方向の姿勢変化からDD'方向の姿勢変化間に一度でも発生すれば、その後この状態が4回発生するまで、軸合せ動作を繰り返すとする。ただし、その後、AA'方向の姿勢変化からDD'方向の姿勢変化間に一度も評価基準を満たさなければ、軸合せは失敗とする。

図8(b)において、CG間では、一度も軸合せの評価基準を満たしていなため、軸合せは失敗となり、GI間に示す離脱、回転動作へと移行する。KO間では、4回軸合せの評価基準を満たしたので、軸合せは成功となり、OP間に示す組付け動作へと移行する。

したがって、ボルトへの軸合せ動作をCD間およびKL間、DE間およびLM間、EF間およびMN間、FG間およびNO間に分けてタスクスキルモデルを使って以下のように記述する。

#### (3-1)CD間およびKL間

- 初期条件：z軸方向に-6.0[N]発生状態とする
- タスクスキル動作：z軸力制御、その他の軸インピー

ダンス制御とする。z軸方向の力は-6.0[N]を維持したまま、インピーダンス中心を図9中AA'方向に0.04[rad/s]で0.0[rad]から-0.25[rad]、-0.25[rad]から0.25[rad]、0.25[rad]から0.0[rad]へと回転させると同時に、x軸方向に0.004[m]、-0.004[m]、0.004[m]へと移動させる。

- 終了条件：タスクスキル動作が完了した時点で終了とし(3-2)へ移行する。ただし、0.3[Nm]以上のモーメントが1.0[s]以上発生(軸合せの評価基準を満た)した時点でも終了とし、この時点での $\Sigma_n$ を $\Sigma_s$ と再設定して(3-2)へ移行する。

#### (3-2)DE間およびLM間

- 初期条件：z軸方向に-6.0[N]発生状態とする
- タスクスキル動作：z軸力制御、その他の軸インピーダンス制御とする。z軸方向の力は-6.0[N]を維持したまま、インピーダンス中心を図9中BB'方向に0.04[rad/s]で0.0[rad]から-0.25[rad]、-0.25[rad]から0.25[rad]、0.25[rad]から0.0[rad]へと回転させると同時に、x軸方向に0.002[m]y軸方向に0.002[mm]、x軸方向に-0.002[m]y軸方向に-0.002[mm]、x軸方向に0.002[m]y軸方向に0.002[mm]へと移動させる。
- 終了条件：タスクスキル動作が完了した時点で終了とし(3-3)へ移行する。ただし、0.3[Nm]以上のモーメントが1.0[s]以上発生(軸合せの評価基準を満た)した時点でも終了とし、この時点での $\Sigma_n$ を $\Sigma_s$ と再設定して(3-3)へ移行する。

#### (3-3)EF間およびMN間

- 初期条件：z軸方向に-6.0[N]発生状態とする
- タスクスキル動作：z軸力制御、その他の軸インピーダンス制御とする。z軸方向の力は-6.0[N]を維持したまま、インピーダンス中心を図9中CC'方向に0.04[rad/s]で0.0[rad]から-0.25[rad]、-0.25[rad]から0.25[rad]、0.25[rad]から0.0[rad]へと回転させると同時に、y軸方向に0.004[m]、-0.004[m]、0.004[m]へと移動させる。
- 終了条件：タスクスキル動作が完了した時点で終了とし(3-4)へ移行する。ただし、0.3[Nm]以上のモーメントが1.0[s]以上発生(軸合せの評価基準を満た)した時点でも終了とし、この時点での $\Sigma_n$ を $\Sigma_s$ と再設定して(3-4)へ移行する。

#### (3-4)FG間およびNO間

- 初期条件：z軸方向に-6.0[N]発生状態とする
- タスクスキル動作：z軸力制御、その他の軸インピーダンス制御とする。z軸方向の力は-6.0[N]を維持したまま、インピーダンス中心を図9中DD'

方向に 0.04 [rad/s] で 0.0 [rad] から -0.25 [rad] ,  
-0.25 [rad] から 0.25 [rad] , 0.25 [rad] から 0.0  
[rad] へと回転させると同時に, x 軸方向に -0.002  
[m]y 軸方向に 0.002 [mm] , x 軸方向に 0.002 [m]y  
軸方向に -0.002 [mm] , x 軸方向に -0.002 [m]y 軸方  
向に 0.002 [mm] へと移動させる .

- 終了条件 : タスクスキル動作が完了した時点で終  
了とし (3-1) へ移行する . ただし, 0.3 [Nm] 以上  
のモーメントが 1.0 [s] 以上発生 (軸合せの評価基  
準を満た) した時点でも終了とし, この時点での  
 $\Sigma_n$  を  $\Sigma_s$  と再設定して (3-1) へ移行する .

ここで, ボルトの軸合せ動作の終了条件は, 軸合せ  
の評価基準を 4 回満たすまで軸合せ動作を繰り返し, 4  
回発生した時点と設定する .

実装するプログラムは省略する .

#### 4.1.4 ボルトへの軸合せ動作が失敗した場合の離脱, 回転動作

オペレータは, ナットをボルトから離脱させた後回  
転させるため, これらの動作に必要なパラメータを実  
験結果から抽出する .

図中 GH 間では約 7 [s] 間でインピーダンス中心を  
z 軸方向に -0.02 [m] 移動させているため, 移動速度は  
0.003 [m/s] となる . 図中 HI 間では約 14 [s] 間でイン  
ピーダンス中心を z 軸周りに 3.14/2 [rad] 回転させる  
ため, 回転速度は 0.1 [rad/s] となる .

ボルトへの軸合せ動作が失敗した場合の離脱, 回転  
動作をタスクスキルのモデルを使って以下のように記  
述する .

- 初期条件 : z 軸方向に -6.0 [N] 発生状態とする .
- タスクスキル動作 : 全軸インピーダンス制御で, イン  
ピーダンス中心を z 軸方向に 0.003 [m/s] で -  
0.02 [m] まで移動させる . その後, インピーダン  
ス中心を z 軸周りに 0.1 [rad/s] で 3.14/2 [rad] ま  
で回転させる .
- 終了条件 : タスクスキル動作が完了した時点で終  
了とする .

実装するプログラムは省略する .

#### 4.1.5 ボルトへの組付け動作

オペレータは, ナットをボルトへ組付けるため, こ  
の動作に必要なパラメータを実験結果から抽出する .

図中 OP 間では約 35 [s] 間でインピーダンス中心を  
z 軸周りに 3.14 [rad] 回転させているため, 回転速度は  
0.1 [rad/s] となる .

ボルトへの組付け動作をタスクスキルモデルを使っ  
て以下のように記述する .

- 初期条件 : z 軸方向に -6.0 [N] 発生状態とする .
- 作業スキル動作 : z 軸力制御, その他の軸インピー  
ダンス制御で, インピーダンス中心を z 軸周りに  
0.1 [rad/s] で 3.14 [rad] 回転させる .
- 終了条件 : タスクスキル動作が完了した時点で終  
了とする .

実装するプログラムは省略する .

## 5. 自律型ロボットシステムへのタスクスキ ルの実装および実行

第 4 章で記述されたナットの組付けタスクスキルを  
自律型ロボットシステムに実装し, ナットの組付け作  
業を実行する .

ナットの組付けタスクスキルの作成には M20 のナッ  
トを使用した, 作成したナットの組付けタスクスキ  
ルの汎用性を検証するために, M8, M10, M12, M16,  
M20 で実行する . さらに, 位置・姿勢誤差への有効性  
を検証するために, 並進・姿勢に誤差無しの組合わせ  
と, 並進に数ミリ程度の誤差, 姿勢に 0.07 [rad] の誤  
差の組合わせを設定する . したがって, 実験は合計 10  
回となるが, 全ての実験でナットの組付けは成功した .

代表として, 図 10 に M12 でナットの組付けタスク  
スキルを実行した結果を示す . 実験は, 図 7 に示す手  
順 (1), (2), (3), (5) で実行された . 図からは数ミリ程度  
の位置誤差と, 姿勢誤差が確認できる .

## 6. 結言

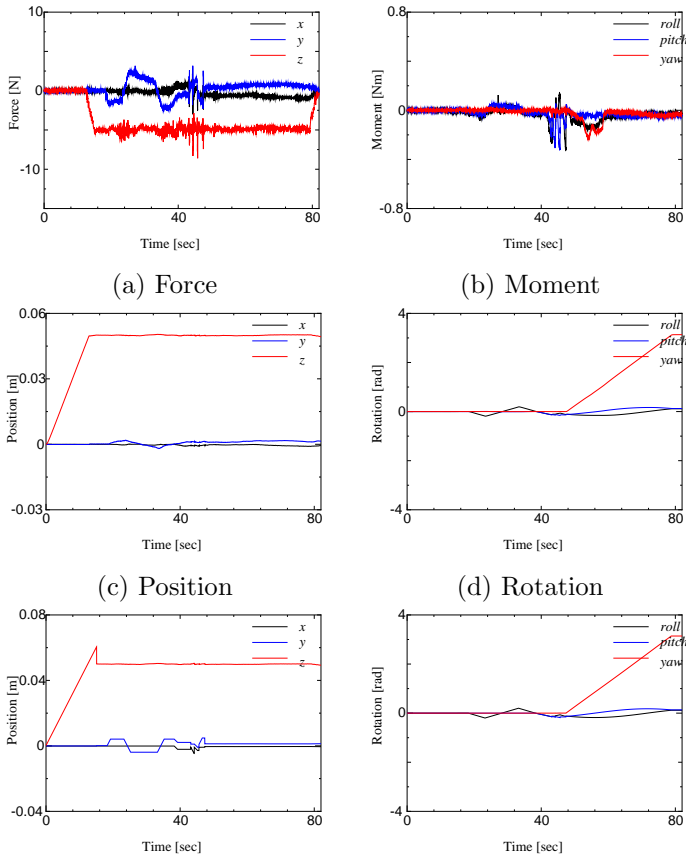
本論文では, これまでの研究であまり議論されてこ  
なかつた, タスクスキルの動作手順の決定手法および  
タスクスキルを構成する制御則のパラメータ設定方法  
を含むタスクスキルの実装手法を提案した .

タスクスキルの動作手順は, 対象作業をオペレータ  
がバイラテラル遠隔操作システムを利用して遠隔操作  
により実施した手順を基に記述される . タスクスキル  
の実装には, 制御則としてインピーダンスと力のハイ  
ブリッド制御を採用し, インピーダンス制御における  
インピーダンス中心位置・姿勢および移動速度, 力制  
御における目標力・トルク値, 遷移速度を, 遠隔操作  
実験結果から抽出し決定した .

本論文で提案する手法の具体的な適用方法および有  
効性を検証するために, ナットの組付け作業を対象作  
業として採用した . 遠隔操作によりタスクスキルの動  
作手順, タスクスキル動作のパラメータなどを抽出し,  
ナットの組付けタスクスキルを作成した . このナット  
の組付けタスクスキルを実装した自律型ロボットア  
ームにより, 異なるサイズや位置・姿勢誤差を含んだ環  
境下でナット組付け作業をすべて実現することができた .

今後は, さらに多くのタスクスキルを作成し, 複数





(e) Position of compliance center (f) Rotation of compliance center  
**Fig.10** Experimental results of autonomous robot.

のタスクスキルを利用した複雑な作業を実行するタスクスキルシーケンスを実現していく予定である。

### 謝辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

### 参考文献

- 1) 比留川博久, 末広尚士, 池内克史: “作業スキルの体系化に向けて - 接触状態の定性的分類”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 747-745, 1996.
- 2) 浅田春比古, 出海晴生: “作業者の動作計測によるハイブリッド制御のための作業教示とプログラム生成”, 日本ロボット学会誌, vol. 5, no. 6, pp. 24-31, 1987.
- 3) k. Kosuge, T. Fukuda and H. Asada, “Acquisition of human skills for robotic systems,” Proceedings of the 1991 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Arlington, VA, pp. 469-474, 1991.
- 4) S. Hirai and H. Asada: “Kinematics and Statics of Manipulation Using the Theory of Polyhedral

- Convex Cones,” *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 12, no. 5, pp. 434-447, 1993.
- 5) 末広尚士, 高瀬國克: “スキルに基づくマニピュレーションシステム”, 日本ロボット学会誌, vol. 8, no. 5, pp. 551-562, 1990.
- 6) 高瀬國克: “ロボットスキルと知能”, 日本ロボット学会誌, vol. 8, no. 1, pp. 101-562, 1990.
- 7) R. Koeppe, A. Breidenbach and G. Hirzinger: “Skill Representation and Acquisition of Compliant Motions Using a Teach Device,” *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, pp. 897-904, 1996.
- 8) R. Cortesão, R. Koeppe, U. Nunes and G. Hirzinger: “Data Fusion for Compliant Motion Tasks Based on Human Skills,” *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp.1529-1533, 2002.
- 9) Rui Cortesão and Ralf Koeppe: “Sensor Fusion for Skill Transfer Systems,” *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Kyonjyu, Korea, pp.1014-1019, 1999.
- 10) M. Skubic and R. A. Volz: “Learning Force-Based Assembly Skills from Human Demonstration for Execution in Unstructured Environments,” *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 1281-1288, 1998.
- 11) Y. Tsumaki, H. Naruse, D. N. Nenchev and M. Uchiyama: “Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface,” *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 2580-2585, 1998.
- 12) W.K. Yoon, T. Suehiro, Y. Tsumaki and M. Uchiyama: “Stiffness Analysis and Design of a Compact Modified Delta Parallel Mechanism,” *ROBOTICA*, vol. 22, issue 04, pp. 463-475, 2004.
- 13) Y. Sato, K. Bernardin, H. Kimura and K. Ikeuchi: “Task analysis based on observing hands and objects by vision,” *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp.1208-1213, 2002.
- 14) M. T. Mason: “Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulator,” *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-11, no. 6, pp. 418-432, 1981.
- 15) 宮崎友宏, 萩原史朗: “バイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式”, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 5, pp. 46-52, 1990.