ハイブリッド位置/力制御を用いた 異なる把持対象物の搬送のための適応動作再現*

綱 島 昇** 桂 誠一郎**

Adjustable Motion Reproduction for Transferring Different Objects
Using Hybrid Position/Force Control

Noboru TSUNASHIMA and Seiichiro KATSURA

This paper proposes a method for recording and reproducing of human motions with a different target object. A bilateral control is known as one of the effective methods to achieve recording and reproducing human motions based on both position and force information. However, it is known that robustness for a different environment is decreased by adding the force information to the recorded motion information. In this paper, we focus an application of “peg-in-hole”, and our goal is to reproduce the recorded motion even if material of a target block is different. First, information of the actuators are transformed into motion-modal space to treat human motion as one system. Then, we propose a reproduction method which omits the effect of force information from a target object. In the focused application, the applied force during the target object and external environment is important. By the proposal, the contacting force is modified and force difference on the basis of material different is compensated. Validity of the proposal is verified by experiments. By the proposed method, the recorded motion is reproduced even if weight and friction of the target object is different.

Key words: acceleration control, bilateral control, hybrid control, motion reproduction

1. 序 論

近年、いくつかの先進国において人口の減少が問題視されており、産業分野など多くの分野において人間の作業の機械化が進んでいる。特に熟練技術者の減少に伴い、作業をいかにして情報化するかや次世代技術者に伝達するかは一つの課題となっている¹⁾²⁾。この課題に対するアプローチの一つとして、人間の動作を保存しロボットにより再現する研究が盛んに行われている。人間の動作の保存・再現が可能になることで、将来的には作業効率の向上だけではなく熟練技術の保存や非習得者に対する技術の教育システムの構築などが期待される。

人間の動作を保存し、再現する際には位置情報と力情報が重要な要素となる。位置情報を基に動作を扱うことで動作の軌道などを扱うことが可能となり、そのための手段としてモーションキャプチャを用いた研究が挙げられる^{3)~5)}。一方、力情報を基に動作を扱うことで動作の力加減を扱うことが可能となり、力センサを用いた接触力を再現する研究が行われている⁶⁾。これらの研究では動作の軌道あるいは力加減のみを扱うことが可能であるが、より汎用的な人間の動作を扱うためには両方を同時に満たすような手法が必要である。このような背景として位置/力ハイブリッド制御を用いた動作保存・再現システムが提案されており、動作の軌道だけではなく付随する力加減をも同時に表現することが可能となった⁷⁾⁸⁾。

位置/力情報に基づく動作保存・再現システムの概要を図1に示す。本システムは加速度制御に基づくバイラテラル制御⁹⁾に基づいている。バイラテラル制御^{10)~12)}とは人間が操作する

Fig.1 Motion-copying system

マスタシステムを用いて、実際に対象に対して作業が行われるスレーブシステムを操作する制御であり、その際、力覚フィードバックが実現されている。保存システムにおいては、マスタシステムを操作者が操作し、スレーブシステムを介して作業を行う。このときマスタシステムの位置/力情報を保存しておくことで操作者の作業動作の保存が可能となる。再現システムにおいては、位置/力ハイブリッド制御を構築し、保存された位置/力情報を基にスレーブシステムを制御することで、目的の動作を再現することが可能となる。

本手法では位置/力情報を同時に行うことで動作の軌道と力加減を同時に扱うことが可能であるが、厳密に位置と力が再現されるのは位置関係や対象物など動作を行う環境がすべて一致する場合のみである。ハイブリッド制御を導入することによる利点として微小な誤差に対する適応性の向上が挙げられるが、欠点として動作保存時と再現時で力加減が大きく影響を与

* 原稿受付 平成 29 年 4 月 12 日

掲載決定 平成 29 年 6 月 6 日

** 正 会 員 慶應義塾大学(横浜市港北区日吉 3-14-1)

Fig.2 Coordinate transformation

えるような条件においては位置も力も大きな誤差が発生し、保存動作を再現するのが困難な点が挙げられる。そこで本論文では対象物の材質の質量、摩擦係数の違いに加え、初期位置や環境の位置に誤差がわずかに含まれる条件に対し、位置と力のハイブリッド制御による動作の再現を目的とする。簡易的な搬送動作（ベグインホール）をアプリケーションとし、以下の2点の提案を行う。まず、操作を行うアクチュエータの座標と操作対象物の座標との間で座標変換を行い、一つの系として動作を扱うことを提案する。本アプリケーションにおいてはアクチュエータを用いて操作対象物を操作し、目的の動作を行う。アクチュエータ空間ではなく操作対象物を含めた系にすることで操作対象物の動作を扱うことが可能となる。次に、操作対象物が受ける外部環境からの影響を排除した系で動作を扱う手法を提案する。操作対象物が受ける外部環境からの影響を排除することで、操作対象物の違いに依存せず保存動作が再現される。本提案の有効性を確認するため実機による実験を実施した。本実験により、従来扱うことが困難であった保存時と異なる操作対象物に対して、保存された動作が達成可能となることを確認した。本提案により、少ない動作からより多くの対象物に対する動作を実行できるようになることが期待される。

2. 動作に着目した座標変換

本章では、操作を行うアクチュエータの座標から動作に着目とした系への座標変換について述べる。この座標変換により、例えば鉛筆で字を書く際に人間は道具をも自分の系として認識するように、対象操作物をも同じ系として扱うことが可能になる。そのために本章では、アクチュエータ空間から一度抽象化された空間である作業空間に座標変換し、その後作業空間から動作空間への座標変換を行う。最終的な変換ブロック図は図2で表される。ここでMCSは動作保存・再現システムを表し、DOBおよびRFOBは外乱オブザーバ¹³⁾¹⁴⁾および反力推定オブザーバ¹⁵⁾¹⁶⁾を表す。 P および F は位置行列および力行列を表し、下付き文字 $_{motor}$ および $_{work}$, $_{mode}$ はモータ空間および作業空間、動作空間を表し、上付き文字 ref および res , ext は参照値および応答値、外力を示す。

本研究において使用した実機の簡易図を図3に示す。1つの回転モータと2つのリニアモータによる構成単位をユニットと表すと、マスタシステム、スレーブシステムともに2つのユニットから構成される。回転モータは水平に設置され、回転モータに固定されているリニアモータも水平に設置されている。また、もう1つのリニアモータは垂直方向に設置されている。それぞれのモータには外乱オブザーバが実装されており、

Fig.3 Simplified figure of the experimental system

Fig.4 Modeling of the experimental system

加速度制御が適用されている。モータ空間に外乱オブザーバを実装することでモータ制御に対する外乱抑制性能が向上し、より追従性が高い制御が可能となる。マスタシステムでは操作者が親指と人差し指を輪に入れて動作を行い、スレーブシステムが対象物（ブロック）を操作する。

数式化のためのモデルを図4に示す。ここで、 L は回転モータの中心からエンドエフェクタまでの水平方向距離、 L_{base} は2つのユニットの回転モータ間の距離、 θ は回転モータの回転角度、 l は水平方向リニアモータの位置応答、 z は垂直方向の位置応答、下付き文字 $_1$ と $_2$ はユニット1と2を表す。ここで、 θ_1 は反時計回りを正とし、 θ_2 は時計回りを正としている。図4においては作業空間におけるエンドエフェクタ（≒指先位置）に関してモデル化を行っている。それぞれのユニットの水

平方方向リニアモータが直線になる状態を回転モータの初期値、水平方向リニアモータはそれぞれ回転モータの中心からの距離が最も短い状態を初期値、垂直方向リニアモータは最も地面に近い状態を初期値としている。

2.1 アクチュエータ空間から作業空間への座標変換

本章ではアクチュエータの空間から作業空間への座標変換の式を示す。一般的に座標変換はヤコビ行列によって表現される。位置の変換式を Eq. (1)、速度の変換式を, Eqs. (2)–(3), 力の変換式を Eq. (4) に示す。

$$\mathbf{P}_{\text{work}} = \begin{bmatrix} x_{\text{tmb}} \\ y_{\text{tmb}} \\ z_{\text{tmb}} \\ x_{\text{fst}} \\ y_{\text{fst}} \\ z_{\text{fst}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L+l_1)\cos\theta_1 \\ (L+l_1)\sin\theta_1 \\ z_1 \\ L_{\text{base}} - (L+l_2)\cos\theta_2 \\ (L+l_2)\sin\theta_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{P}}_{\text{work}} = \mathbf{J}_{\text{work}} \dot{\mathbf{P}}_{\text{motor}} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C & D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A = \cos\theta_1 \\ B = -(L+l_1)\sin\theta_1 \\ C = \sin\theta_1 \\ D = (L+l_1)\cos\theta_1 \\ E = -\cos\theta_2 \\ F = (L+l_2)\sin\theta_2 \\ G = \sin\theta_2 \\ H = (L+l_2)\cos\theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{\text{work}} = \mathbf{J}_{\text{work}}^{-T} \mathbf{F}_{\text{motor}} \quad (4)$$

ここで, $\mathbf{J}$ はヤコビ行列, 下付き文字 tmb および fst は親指および人差し指を表す。

作業空間における運動方程式は Eq. (5) で表される等価質量行列を用いて Eq. (6) で表される。

$$\mathbf{M}_{\text{eq,work}} = \mathbf{J}_{\text{work}}^{-T} \mathbf{M}_{\text{motor}} \mathbf{J}_{\text{work}}^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\text{eq,work}} \ddot{\mathbf{P}}_{\text{work}} = \mathbf{F}_{\text{work}} \quad (6)$$

ここで, $\mathbf{M}$ は質量行列を表し, $\mathbf{M}_{\text{eq}}$ は等価質量行列を表す。等価質量行列とは機構自体の慣性モーメントをその空間の軸方向への慣性モーメントに変換された値であり, 姿勢によって変動する値となる。したがって, Eq. (5) のようにヤコビ行列を用いて表現される。

2.2 作業空間から動作モード空間への座標変換

本章では本研究における動作に関して, 作業対象物を含めた動作の系への変換を行う。本研究では図 5 に示す 6 つの座標を扱う。

move-x 軸: 操作対象物の x 軸に沿った水平直線動作軸
move-y 軸: 操作対象物の y 軸に沿った水平直線動作軸
rotation 軸: 操作対象物の z 軸を中心とした回転動作軸
grasp 軸: 操作対象物に対する把持動作軸
lifting 軸: 操作対象物の z 軸に沿った垂直直線動作軸

Fig.5 Motion mode

z-diff 軸: 2 ユニットのエンドエフェクタの位置差分軸

本研究では動作の簡略化のため $z\text{-diff}$ 軸に関しては 0 を指令とする位置制御を実装し, 2 つのユニットの高さが揃うようにしている。その結果, 本研究では残りの 5 軸を動作軸として扱う。

作業空間から動作空間への位置の変換式を Eq. (7) に示す。

$$\mathbf{P}_{\text{mode}} = \begin{bmatrix} p_{\text{mv-x}} \\ p_{\text{mv-y}} \\ p_{\text{rot}} \\ p_{\text{grsp}} \\ p_{\text{lift}} \\ p_{z\text{-dif}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{\text{tmb}} + x_{\text{fst}} - L_{\text{base}}}{2} \\ \frac{y_{\text{tmb}} + y_{\text{fst}}}{2} \\ \tan^{-1} \frac{y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}}}{x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}}} \\ \sqrt{(x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}})^2 + (y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}})^2} \\ \frac{z_{\text{tmb}} + z_{\text{fst}}}{2} \\ \frac{z_{\text{tmb}} - z_{\text{fst}}}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

move-x 軸および move-y 軸, liftingh 軸は 2 つのエンドエフェクタの中心が初期位置に対しどれだけ駆動したかを表すため, 2 つの値の和となる。rotation 軸に関しては 2 つのエンドエフェクタを結ぶ直線の傾きから算出され, grasp 軸はエンドエフェクタ間の距離を表す。z-diff 軸は 2 つのエンドエフェクタの高さの差となる。速度の変換式を, Eqs. (8)–(9), 力の変換式を Eq. (10) に示す。

$$\dot{\mathbf{P}}_{\text{mode}} = \mathbf{J}_{\text{mode}} \dot{\mathbf{P}}_{\text{work}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ A & B & 0 & -A & -B & 0 \\ C & D & 0 & -C & -D & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{\text{tmb}} \\ \dot{y}_{\text{tmb}} \\ \dot{z}_{\text{tmb}} \\ \dot{x}_{\text{fst}} \\ \dot{y}_{\text{fst}} \\ \dot{z}_{\text{fst}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A = \frac{y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}}}{(x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}})^2 - (y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}})^2} \\ B = -\frac{x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}}}{(x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}})^2 - (y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}})^2} \\ C = -\frac{x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}}}{\sqrt{(x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}})^2 + (y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}})^2}} \\ D = -\frac{y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}}}{\sqrt{(x_{\text{fst}} - x_{\text{tmb}})^2 + (y_{\text{fst}} - y_{\text{tmb}})^2}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{\text{mode}} = \mathbf{J}_{\text{mode}}^{-T} \mathbf{F}_{\text{work}} \quad (10)$$

ここで、 p は位置，下付き文字 $_{mv-x}$ ， $_{mv-y}$ ， $_{rot}$ ， $_{grsp}$ ， $_{lift}$ ，および $_{z-dif}$ は前述の各動作座標軸を表す。

動作空間における運動方程式は Eq. (11) で表される等価質量行列を用いて Eq. (12) で表される。

$$M_{eq,mode} = J_{mode}^{-T} M_{work} J_{mode}^{-1} \quad (11)$$

$$M_{eq,mode} \ddot{P}_{mode} = F_{mode} \quad (12)$$

以上の式によりアクチュエータの位置，力は最終的に操作対象物の動きを含む動作モード軸の位置，力情報に変換される。なお，本研究においては各軸の干渉を抑えるため作業空間オブザーバ¹⁷⁾を適用する。等価質量行列を対角要素のみの構成にノミナル化を行い，作業空間オブザーバによって非対角要素がシステムに与える影響を外乱とみなして補償することで，干渉項である非対角成分を抑制することが可能となる。

3. 適応搬送のための制御

1 章にて述べたように位置/力ハイブリッド制御に基づく動作の保存/再現手法は操作対象物が異なる場合など，保存時と異なる環境条件において動作の再現が困難である。本章では，2 章で定義した動作空間において操作対象物の差異による差分を除去する手法を提案する。本アプリケーションでは操作対象物(ブロック)をつかみ，完全に持ち上げて移動し，その後床面に接触させ，その状態でブロックを移動させ，最終的に穴に挿入するという作業を実施する。操作者が手触りも用いて穴にブロックを挿入するというアプリケーションであり，床面に対する接触移動が重要な要素となる。接触移動の際にはハンドはブロックの重量の一部を支えている状態であり，なぞり動作を実施している。操作対象物によって外部環境から受ける力 f^{eff} と，それによらない共通的な操作力 f^{com} を分離して考え，操作対象物によって変わる力を補償することで目的動作を再現する。操作中の力の関係式を Eq. (13) に示す。

$$f^{com} = f^{cmd} - f^{eff} \quad (13)$$

ここで，上付き文字 cmd は保存時の力を示す。操作対象が異なる場合は f^{eff} が異なり，その結果 f^{com} が変わってしまう，所望の力を印加することができないため保存動作が失敗してしまう。 f^{com} を同一にするため，異なる環境時は補償値 f^{cmp} にて補正をかける必要がある。

$$f^{com} = f^{cmd} - (f^{eff} - f^{cmp}) \quad (14)$$

本アプリケーションにおいて，操作対象物が異なることによって影響を与える要素として床面への力加減および床水平方向の力加減が存在する。それぞれの軸について補償をすることで保存動作の再現が実行される。つまり環境の重さによらず床面に印加する力をそろえ，材質の違いを打ち消すように水平方向の力入力を補正するのである。補償値は本アプリケーションにおいては操作対象物の重さの差異に由来する重力項および素材の差異による摩擦項が該当する。

まず床面と垂直方向の補償値は Eq. (15) となる。

$$F_{lift}^{cmp} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (F_{lift,i}^{red} - F_{lift,i}^{rpd}) \quad (15)$$

ここで， n は持ち上げ動作を実施している最中のサンプリング数を表し，本研究においては保存データから時刻をあらかじめ算出している。また，上付き文字 red および rpd は保存時および再現時を示す。

Fig.6 Controller of the MCS

一方，水平方向の補償値は Eq. (16) にて求まる。

$$F_{mvx}^{cmp} = \mu_{mvx}^{est} N \quad (16)$$

ここで， N は垂直抗力を示し， μ_{mvx}^{est} は Eq. (17) から算出される摩擦係数差分を表す。

$$\mu_{mvx}^{est} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{(F_{mvx,i}^{red} - F_{mvx,i}^{rpd})}{N_i} \quad (17)$$

以上の補償値を用いて保存動作を補正することで同じ力加減での動作が可能となる。将来的には補償値算出はより精度の高い推定方法を用いる必要があるが，本研究では最も単純な方法で算出している。 F^{cmp} に関しては動作を再現させながら算出を行い，算出後に補償値を反映させている。本手法においてはあらかじめ保存動作を基にどの時間帯にそれぞれの補償値を計算するかを決定している。今後，動作中にどのような動作が行われているかをシステム側が自動認識し，位置，速度，あるいはトルク等の微分値などのトリガをもって補償量の算出/適用を決定できるのが望ましい。

最終的に図 2 における「MCS Controller」部は図 6 で表される。ここで K_p ， K_d ， K_f は位置ゲイン行列，速度ゲイン行列，力ゲイン行列を表し，いずれも対角行列である。また， F^{cmp} は力補償行列を表し，Eq. (15) および Eq. (16) を要素とする対角行列となる。ここで，補償を行わない動作軸に関しては 0 としている。上付き文字 cmd が保存されている動作データを表す。本提案では位置制御側は従来手法通りの構成とし，力加減を表す力制御側に補償を入れる構造となる。対象物に応じて保存時の動作の力情報を修正することで，位置および修正された外部環境への力加減を意図した値へと追従させる。

4. 実験

本章では提案の有用性を示すための実験に関して述べる。

4.1 実験システム

本研究で用いた実験システムを図 7 に示す。実験システムの概要は 2 章にて述べた通りである。1 つのユニットは 1 つの回転モータおよび 2 つのリニアモータから構成されている。回転モータは水平に設置されており，その中心を通るように水平方向にリニアモータが設置されている。水平方向リニアモータに対し垂直にもう一機のリニアモータが設置されており，その先にエンドエフェクタ(マスタの場合は指を入れるリング，スレーブの場合は直径約 10 mm の硬質ゴム半球)が取り付けられている。各々のモータの推力定数および慣性，図 3 に相当する各定数を表 1 に示す。それぞれのアクチュエータの移動量はエンコーダ(リニアエンコーダは分解能 50×10^{-9} m，ロータリーエンコーダは分解能 6.0×10^{-6} rad)により計測され，力応答は

反力推定オブザーバにより算出した。実験では保存時においてマスタ、スレーブシステムを使用してアクリルブロックを持ち運び、穴に入れる動作を行った。具体的には 1) ブロックをつかむ、2) ブロックを完全に持ち上げる、3) ブロックを穴付近に移動して降ろし床面に接触させる、4) 床面に接触した状態でブロックを移動させ穴の位置に移動する、5) ブロックを穴に挿入する、6) ブロックからエンドエフェクタを離す、という動作を行った。このとき 4)~5) はブロックの質量の一部を支えている状態となっている。本タスクでは、開始時は穴の外にあるブロックをタスク後には穴の中に納まっている状態にすることをゴールとしている。このときに操作者の動作における位置および力を保存した。使用したブロックは穴の大きさとはほぼ等しい一辺 0.06 m の立方体である。次に、再現時ではコルクブロックを用い、提案手法のあり/なしでの保存動作の再現を行った。本実験においてはブロックの寸法や穴との位置関係はほぼ同じにしているものの、厳密な意味で完全に一致させてはいない点に留意頂きたい。実験機に関する制御パラメータは表 1 に示される。本実験において、補償値を算出する期間は保存された動作を基に決定している。lifting 軸の補償量算出はブロックを持ち上げている状態の時間を確認して決定し、水平方向の補償量算出はなぞり動作を開始した直後の時間を確認して決定した。

4.2 実験結果

動作保存時の実験結果を図 8 に示す。ここではモード空間での軸のうち move-*x* 軸、move-*y* 軸、grasp 軸、lifting 軸について位置と力がプロットされている。それぞれの図にはマスタシステムおよびスレーブシステムの結果が一つのグラフに表され、マスタシステムの応答値が保存されている。開始約 5 s でアクリルブロックを把持しその後 7~12 s あたりで持ち上げ、約 18 s まで床面接触状態で移動し、最終的に約 19.5 s で穴にアクリルブロックを挿入した。最後に約 23 s で完全にブロックから指を離し、24 s の時点では完全なるフリーモーションとなっている。今回の実験では穴に挿入するまでの動作が達成されることを目標とした。

Table1 Experimental parameters		
Parameter	Description	Value
T_s	Sampling time	200 μ s
L	length between center of the rotary motor and the end-effector	0.16 m
L_{base}	length between rotary motors of two device units	0.41 m
K_{fn}	Force coefficient of linear motor	40.0 N/A
M_n	Mass of linear motor	0.3 kg
$g_{pd,l}$	Cut-off frequency of pseudo-derivation of linear motor	600 rad/s
$g_{dis,l}$	Cut-off frequency of disturbance observer of linear motor	600 rad/s
K_{tn}	Torque coefficient of rotary motor	1.18 Nm/A
I_n	Inertia around rotary motor	0.00288 kgm ²
$g_{pd,r}$	Cut-off frequency of pseudo-derivation of rotary motor	250 rad/s
$g_{dis,r}$	Cut-off frequency of disturbance observer of rotary motor	250 rad/s
$K_{p,move}$	Position gain for move- <i>x</i> and move- <i>y</i> axes	3600
$K_{d,move}$	Velocity gain for move- <i>x</i> and move- <i>y</i> axes	120
$K_{f,move}$	Force gain for move- <i>x</i> and move- <i>y</i> axes	5
$K_{p,rot}$	Position gain for rotation axis	1600
$K_{d,rot}$	Velocity gain for rotation axis	80
$K_{f,rot}$	Force gain for rotation axis	2
$K_{p,grsp}$	Position gain for grasp axis	3600
$K_{d,grsp}$	Velocity gain for grasp axis	120
$K_{f,grsp}$	Force gain for grasp axis	5
$K_{p,lift}$	Position gain for lifting and z-diff axis	3600
$K_{d,lift}$	Velocity gain for lifting and z-diff axis	120
$K_{f,lift}$	Force gain for lifting axis	0.8
g_{wob}	Cut-off frequency of work space observer	500 rad/s
m_{obj1}	Weight of acrylic block	0.45 kg
m_{obj2}	Weight of cork block	0.05 kg

次に、コルクブロックを用いた提案手法なしの場合の再現結果を図 9 に示し、その時の保存時との誤差を図 10 に示す。図 9 では一つの図の中に指令値と応答値をプロットしている。ここでは本タスクで実験結果に差分が表れる水平方向の移動軸 (move-*x* 軸、move-*y* 軸) および垂直方向軸 (lifting 軸) のみを記載している。lifting 軸の力応答を見ると、保存時に穴に挿入を行った時間である約 19.5 s から大きく床面からの力を受けていることがわかる、これは、穴に押し込むという動作に失敗し、ブロックを床面に押し続けていることを表している。操作対象物が異なった結果、力応答および位置応答がともに指令値から外れてしまい、結果として穴にブロックを挿入するというタスクが達成できなかった。

最後に、コルクブロックを用いた提案手法ありの場合の再現結果を図 11 に示し、その時の保存時との誤差を図 12 に示す。図中の phase 1 は Eq. (15) で推定している区間 (8.0 s–11.5 s) を示し、phase 2 は Eq. (17) で推定している区間 (13.2 s–14.1 s) を示す。これらの算出期間は、本手法においては図 8 に表される保存動作の応答値を基に決定した。phase 1 に関しては操作対象物の重さの差分を算出する期間であるため、完全にブロックを持ち上げた状態を lifting 軸の位置応答から決定した。phase 2 に関しては操作対象物が床面に接地直後を選択しており、こちらは lifting 軸の位置応答が操作対象物をつかんだ時と同程度まで減少した状態かつ力応答が安定し始めたことをもって決定した。将来的には、動作の内容をシステム側が自動で認識し、補償量を自動的に決定することで、より一般的な用途への適用

Fig.8 Experimental results of motion-recording

が期待される。重力項の推定差分、摩擦項の推定差分結果を図13に示す。それぞれの推定区間後から補償が開始されている。図10と図12を比較すると、補償が開始された後の接触移動(約18sまで)における力誤差が小さくなっていることおよびそれに伴い位置誤差が小さくなっていることがわかる。また挿入動作である約19.5s~23sのlifting軸の結果を見ると偏差が小さいことがわかる。これは、ブロックの穴への挿入が達成されたことを示している。以上より、提案手法によって操作対象物が異なっても保存動作が再現されることが確認された。

5. 結 論

人間の動作を軌道および力加減をもって保存し、再現する手法として位置/力ハイブリッド制御を用いた動作保存・再現システムが提案されているが、動作保存時と再現時で環境が異なる場合に保存動作を再現するのが困難であった。そこで本論文では簡易的な搬送動作(ペグインホール)をアプリケーションとし、対象操作物が異なる場合でも保存された動作が再現されることを目的とし、以下の2点の提案を行った。まず、操作を

行うアクチュエータの座標と操作対象物の座標との間で座標変換を行うことで操作対象物も含めて動作情報を扱うことが可能となった。次に、操作対象物が影響する力情報を除外することで、外部環境への力加減のみを保存時と同じにする手法を提案した。これらの提案の有効性を実機実験によって確かめた。本提案により、搬送動作をアプリケーションとして従来扱うことが困難であった保存時と異なる操作対象物に対して、保存された動作が達成された。本研究により将来的に少ない動作からより多くの対象物に対する動作を再現できるようになることが期待される。

今後、他のアプリケーションへの応用や、より高度な動作推定手法を取り入れていく必要がある。特に、将来的にはタスクごとにそれぞれの動作軸において位置と力のどちらが重要かといったような特徴を定量的に抽出し、その特徴に応じて最適な制御を各軸に適用することが望まれる。また、現在の動作内容を再現中に解析し、動作内容に応じて処理を選択するといった動作認識技術を導入することで、より一般的なタスクに対して本手法が適用されることが期待される。

Fig.9 Experimental results of motion-reproduction without proposed method

Fig.10 Error between responses of recorded data and reproduced data without proposed method

謝 辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)(受付番号: 151203009) によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) R. Watanabe and M. Hashimoto : Automatic Description System of the Motion Procedure and Trajectories of Hands and Eye-gaze for Analysis of Assembly Work, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **82**, 5, (2016) 473.
- 2) X. Liang, H. Kato, N. Hashimoto, and K. Okawa : High Efficiency Skill Training for Manual Welding Using Virtual Reality, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **80**, 10, (2014) 933.
- 3) Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue : Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **10**, 6, (1994) 799.
- 4) K. Ogawa, J. Takamatsu, H. Kimura, and K. Ikeuchi : Extraction of Essential Interactions Through Multiple Observations of Human Demonstrations, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **50**, 4, (2003) 667.
- 5) Y. Endo, M. Tada, and M. Mochimaru : Reconstruction of Digital Hand Models for Individuals by Using Motion Capture System, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **79**, 9, (2013) 860.
- 6) M. Skubic and R.A. Volz : Acquiring robust, force-based assembly skills from human demonstration, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **16**, 6, (2000) 772.
- 7) Y. Yokokura, S. Katsura, and K. Ohishi : Stability Analysis and Experimental Validation of a Motion-Copying System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 10, (2009) 3906.
- 8) N. Tsunashima and S. Katsura : Spatiotemporal Coupler: Storage and Reproduction of Human Finger Motions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 2, (2012) 1074.
- 9) W. Iida, and K. Ohnishi : Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, **29**, 2, (2004) 217.
- 10) D.A. Lawrence : Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9**, 5, (1993) 624.
- 11) K. Hashtrudi-Zaad and S.E. Salcudean : On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **3**, (1999) 1863.
- 12) A. Sabanovic : SMC Framework in Motion Control Systems, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **21**, 8, (2007) 731.
- 13) K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami : Motion Control for Advanced Mechatronics, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **1**, 1, (1996) 56.
- 14) W.S. Huang, C.W. Liu, P.L. Hsu, and S.S. Yeh : Precision Control and Compensation of Servomotors and Machine Tools via the Disturbance Observer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **57**, 1, (2010) 420.
- 15) T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi : Torque Sensorless Control in

Fig.11 Experimental results of motion-reproduction with proposed method

Fig.12 Error between responses of recorded data and reproduced data with proposed method

Fig.13 Compensation force

- Multidegree-of-Freedom Manipulator, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **40**, 2, (1993) 259.
- 16) T. Miyagi and S. Katsura : Design of Friction Compensation Filter in Frequency Domain by Spectral Envelope for Sensor-less Force Control, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **80**, 8, (2014) 792.
- 17) T. Murakami and K. Ohnishi : A study of Stability and Workspace Decoupling Control Based on Robust Control in Multi-degrees-of-freedom Robot, IEEE Transactions on Industry Applications, **113**, 5, (1993) 639.