クランクまわし作業のタスク理解

藤岡寛之^{*1} 前田浩一^{*2}

Task Understanding of the Crank Turning

Hiroyuki Fujioka^{*1} and Hirokazu Mayeda^{*2}

The task understanding is completely examined for a task of crank turning by a robot manipulator. A task model embedded uncertain factors as unknown parameters is constructed. Analyzing its task model, we propose a robust task strategy turning a crank under the uncertain task conditions and a motion/force/impedance control scheme to execute the task strategy. Moreover, a task strategy with the estimation of the pivot position is addressed to realize the smoother crank turning even if the initial estimation error of the pivot position is considerably large. These validities are experimentally investigated by a 6 D.O.F industrial manipulator.

Key Words: Task Understanding, Crank Turning, Motion/Force/Impedance Control, Experimental Study, 6 D.O.F Industrial Manipulator

1. はじめに

ロボットによるクランクまわし作業は運動拘束を伴う基本的作業であり、ドアの開閉や曲面削き作業などにも応用可能な有用性の高い作業でもある。そのため、これまでにロボットの位置と力のハイブリッド制御 [1]~[4] やインピーダンス制御 [5] [6] の格好の適用例としての多くの研究がある。これらの大半は Mason [1] の研究を基礎として作業戦略を幾何学的、静力学的見地から議論しており、作業の成否に大きく影響する動力学的要因を考慮したものは Luca ら [3] のようにハイブリッド制御を適用するためのモデリング手法の研究があるのみである。また、実際のクランクまわし作業においてはクランクの回転軸位置、レバー長、慣性モーメント、回転摩擦モーメント等は正確に分かっていないとするのが現実的であるが、上記の研究においてはこれらの不確定要因を定式化に入れて議論されていない。一方、人間のクランクまわし作業における運動機能解析を行い、人間の不確定要因に対する対処能力を利用しようとする研究もある [7] [8]。しかしながら、人間が無意識に行っている作業法をプログラム言語で表現することは難しく、かつ、人間の腕とロボットアームでは機構や動作の仕組みが異なるので、ロボットの作業法につなげることは極めて困難であると思われる。

不確定要因のある作業条件下で、ロボットが自律的に作業を

行うためには作業知能とも呼ぶべき知能が要求されるが、この知能を実現するための方法論としては「作業を数理的、力学的に解析し、想定される不確定要因まで含めた作業のモデリングを行い、不確定要因があっても目的の作業を遂行できる作業戦略と呼ばれるフィードバック策（センシング策と制御策）をロボットに実行可能な範囲でみつける」というタスク理解と呼ばれる方策が筆者の一人によって提唱されている [9] [10]。これは工学の極めて伝統的な考え方であり、従来のロボット研究の多くのものも概ねこの考え方に沿っていると考えられるが、不確定要因を明確に定式化に入れて扱ったものは少なく、あってもその結果が部分的、断片的なものに留まっている。明確にタスク理解を念頭においた、一貫性のある研究は極めて少ないのが現状である。

筆者らのグループはこれまでにタスク理解の一例として、現実的な不確定要因を考慮したクランクまわし作業のタスク理解の研究を行ってきた [11]~[13]。ここでは、作業戦略およびそれを実行するための運動・力・インピーダンス制御系設計法 [14] [15] が提案され、それらの有効性がシミュレーションにより検証されている。しかしながら、ロボットの制御性能は関節の摩擦トルク、関節角速度および外力の推定誤差、コントローラのサンプリングタイムの限界等に大きく影響されるが、このモデル化は極めて困難であるのでシミュレーションには組み込まれていない。また、実用上は作業モデルと作業戦略は可能な限り簡単なものが望ましい。その単純化に伴い考慮しなかった不確定要因も多くあるが、これらを見捨てることの妥当性は実験によってのみ確かめられるものである。タスク理解においては「作業戦略がロボットで実行可能である」こと、および「作業戦略の

原稿受付 2003 年 4 月 4 日

^{*1}東京電機大学情報科学科

^{*2}立命館大学ロボティクス学科

^{*1}Department of Information Sciences, Tokyo Denki University

^{*2}Department of Robotics, Ritsumeikan University

妥当性はロボットが実際の作業に成功することで確かめる」ことが肝要である [9] [10] ので、これまでの研究ではタスク理解の最後の重要なプロセスが抜けていることになる。

本研究は、クランクまわし作業に対して、これまでの研究の理論面での集大成を図るとともに 6 自由度産業用小型マニピュレータを用いた実験を行い、ロボットの現実の制御性能と不確定要因のもとでの提案された作業戦略の実現可能性について詳細に検証し、考察することによりタスク理解のプロセスを一貫して最後まで行うものである。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2 章で現実的な不確定要因を明確に含めたクランクまわし作業のモデリングと、マニピュレータの動特性のモデリングを示す。また、それらを解析することにより得られる簡潔な作業戦略を示す。3 章では得られた作業戦略を実行するために、運動・力・インピーダンス制御系設計法に基づいた制御系設計を行う。4 章では作業戦略の妥当性を実験的に検証する。ここでの実験では、マニピュレータがクランクをまわすだけであれば、回転軸位置の推定誤差がかなり大きくとも良好に実行できており、作業戦略の妥当性が確認される。しかしながら、このときの推定誤差はクランクを滑らかにまわそうとする際には、それを妨げる決定的な不確定要因となっており、さらには推定誤差がある一定値以上ではマニピュレータはクランクをまわすことができない。また、この現象はクランクをまわすことにより生じる動力学的要因、およびマニピュレータの制御性能限界の影響も複合して引き起こされるものであることが示される。これらの現象の原因を、不確定要因が作業に及ぼす影響を詳細に調べ考察することにより明らかにする。5 章では、回転軸位置の推定誤差が大きい場合に引き起こされる影響を最小限に抑える改善策として、回転軸位置の実時間推定法を用いた戦略を提案する。これらもまた、実験機を用いた実験により提案した作業戦略が非常に有効であることを示す。最後に本研究のまとめを述べる。

2. クランクまわし作業のモデリング・作業戦略

2.1 問題設定

本研究では、Fig. 1 に示すような回転軸に直交する平面上でのクランクまわしを扱い、マニピュレータを用いてクランクを一定の速度でまわすことを目的とする。O_P はクランクの回転軸位置であり、O_H をハンドルの位置とすると、O_H は O_P を中心としレバー長 L を半径とする円周上を運動する。このときの回転角度を ϕ とし、時計回り方向を正と定義する。マニピュレータの手先はハンドルを把持するわけであるが、ハンドルは平面に垂直な軸に摩擦なしで回転できると仮定する。これにより、マニピュレータはハンドルにモーメントをかけることなく、その平面上で O_H に力 f のみを加えることができる。また、マニピュレータとクランク間に作用する力はマニピュレータ手先部に装着した力センサで計測できるものとし、マニピュレータの手先位置・速度は各関節に装着されたエンコーダから得られる関節角度データから導出できるものとする。O_{EP} は推定回転軸位置を表し、O_P からの誤差を E とする。 α は $\overrightarrow{O_{EP}O_H}$ から力が加えられる方向への角度であり、 β は推定回転軸位置の誤差により生じる $\overrightarrow{O_{EP}O_H}$ から $\overrightarrow{O_P O_H}$ への角度を表す。

Fig. 1 The force which accelerates clockwise crank revolution

2.2 静力学解析

クランクを回転させるには、回転軸位置 O_P が分かっているため、推定回転軸位置 O_{EP} から決まる $\overrightarrow{O_{EP}O_H}$ に対してある一定角度 α の方向に力 f を加えることにせざるを得ない。クランクを時計まわり方向に加速させるには

$$fL \sin(\alpha - \beta) > M_c \quad (1)$$

を満足する f が存在すればよいが、f は十分大きくできるものと考え、 $\sin(\alpha - \beta) > 0$ をすべての $\phi (-\pi \leq \phi \leq \pi)$ に対して満足させる α が存在すればよいことになる。ここで、 M_c はクランクの乾性摩擦モーメントを表す。このような α が存在するための必要十分条件は $E < L$ である。これは次のように証明できる。

証明 Fig. 1 より $E \geq L$ の場合は $\phi = \pi - 0$, $\phi = -\pi + 0$ においてそれぞれ $\beta \geq \pi/2$, $\beta \leq -\pi/2$ となることが明らかである。したがって、式 (1) を満足する α は存在しない。次に、 $E < L$ として ϕ の関数としての β の最大値と最小値を調べてみる。Fig. 1 において $L \sin \beta = E \sin(\phi - \beta)$ が成立しており、両辺を ϕ で微分することにより

$$\frac{d\beta}{d\phi} = \frac{E \cos(\phi - \beta)}{L \cos \beta + E \cos(\phi - \beta)} \quad (2)$$

が得られることおよび Fig. 1 より、 $\phi - \beta = \pi/2$ で最大値 $\beta = \sin^{-1}(E/L)$, $\phi - \beta = -\pi/2$ で最小値 $\beta = -\sin^{-1}(E/L)$ を持つことが容易に分かる。ただし、 $\sin^{-1}(E/L)$ は 0 と $\pi/2$ の間の値とする。したがって、 $\sin^{-1}(E/L) < \alpha < \pi - \sin^{-1}(E/L)$ と選ぶとすべての ϕ に対して式 (1) が成立することが分かる。

□

マニピュレータの制御性能の限界から、加える力 f の方向に誤差角度 δ が生じることを考慮すると、上の証明から $\alpha = \pi/2$ とするのが最も安全となる。また、このときの許される誤差角度は $|\delta| < \pi/2 - \sin^{-1}(E/L)$ となる。

$\alpha = \pi/2$ としたとき、クランクを回転させるために必要な力 f および、このときの許される誤差角度は式 (1) および β が最大あるいは最小となる最も条件が悪い場合を考えると、それ

$$f > M_c / \sqrt{L^2 - E^2}, \quad (3)$$

$$|\delta| < \cos^{-1}(M_c/fL) - \sin^{-1}(E/L), \quad (4)$$

となることも容易に導出できる [11].

2.3 動力学解析

クランクの運動拘束を容易に取り扱うために、マニピュレータの手先に装着した力センサの変形を考慮し、手先とハンドルの間に非常に硬いバネがあると仮定する。マニピュレータが手先で力 $\mathbf{f}$ を発生し、クランクを時計まわり方向に回転させようとする、**Fig. 2** に示すようにエンコーダ値から計算した手先位置 O_E はハンドル位置 O_H から微小ベクトル $\mathbf{d}$ だけ離れることとなる。ここでバネ定数を K とおくと

$$\mathbf{f} = K\mathbf{d} = K(\mathbf{x} - \mathbf{x}_H) \quad (5)$$

が成立することが分かる。ただし、 $\mathbf{x}$ および $\mathbf{x}_H$ はそれぞれ基準座標系 ($O; XY$) での手先の位置ベクトルおよびハンドルの位置ベクトルを表す。

次に、 $\overrightarrow{O_H O_P}$ 方向とこれに垂直な方向および $\overrightarrow{O_E P O_E}$ 方向とこれに垂直な方向に単位ベクトルを導入し、それぞれ $\mathbf{h}_n$, $\mathbf{h}_t$, $\mathbf{e}_n$, $\mathbf{e}_t$ と設定する。このとき、クランクの回転の動特性モデルは

$$I\ddot{\phi} + D\dot{\phi} = \langle \mathbf{f}, \mathbf{h}_t \rangle L - \text{sgn}(\dot{\phi}) M_c, \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_H = L\dot{\phi}\mathbf{h}_t \quad (7)$$

と表される。ただし、 I はクランクの慣性モーメント、 D は粘性摩擦係数、 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ は二つのベクトルの内積を表す。また、 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{h}_t \rangle$ は **Fig. 2** より

$$\langle \mathbf{f}, \mathbf{h}_t \rangle = \langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_t \rangle \langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle + \langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_n \rangle \langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle \quad (8)$$

と分解できることが分かる。マニピュレータがクランクを回転させると同時に座標系 ($O_E; \mathbf{e}_n, \mathbf{e}_t$) も回転する。このときの回転角速度を ω とおくと、単位ベクトル $\mathbf{e}_t$, $\mathbf{e}_n$ との関係は

Fig. 2 The relations between the end-point of manipulator and the handle

$$\dot{\mathbf{e}}_t = \omega \mathbf{e}_n, \quad \dot{\mathbf{e}}_n = -\omega \mathbf{e}_t \quad (9)$$

と表される。

ここでの目的はクランクを一定の回転速度 $L\dot{\phi}$ でまわすことであった。そこで、まず便宜的に動特性の線形部分を伝達関数で表現すると、式 (6) より

$$L\dot{\phi} = \frac{L^2}{Is + D} \left(\langle \mathbf{f}, \mathbf{h}_t \rangle - \text{sgn}(\dot{\phi}) \frac{M_c}{L} \right) \quad (10)$$

となる ($\dot{\phi}(0) = 0$ とする)。式 (10) の右辺第二項を外乱として考え、マニピュレータにより $\langle \mathbf{f}, \mathbf{h}_t \rangle$ を生じさせて $L\dot{\phi}$ を一定値に近づける。式 (8) より、 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{h}_t \rangle$ はマニピュレータが手先位置 O_E で生じさせる力 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ により生成されることが分かる。

式 (5) より $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle = K\langle \mathbf{x} - \mathbf{x}_H, \mathbf{e}_t \rangle$ となるが、初期状態をマニピュレータがクランクハンドルを把持し双方の間には力が働いていないとすると、式 (5) より $\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}_H(0) = 0$ となる。そこで、便宜的に $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle = \frac{K}{s} \frac{d}{dt} \langle \mathbf{x} - \mathbf{x}_H, \mathbf{e}_t \rangle$ と考えると式 (7), (9) を用いて

$$\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle = \frac{K}{s} \left(\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle - L\dot{\phi} \langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_t \rangle + \frac{\omega}{K} \langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle \right) \quad (11)$$

と表すことができる。また、同様にして

$$\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle = \frac{K}{s} \left(\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_n \rangle - L\dot{\phi} \langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_n \rangle - \frac{\omega}{K} \langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle \right) \quad (12)$$

が導出できる。ここでは、マニピュレータによる $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$, $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_n \rangle$ を入力、 $L\dot{\phi}$ を出力と考え、クランクの動特性は式 (10) ~ (12) で表現できるものとする。これらをブロック線図で表すと **Fig. 3** のようになる。

2.4 マニピュレータの動特性モデル

ここでは、後の実験で用いられる 6 自由度マニピュレータのモデリングについて述べる。マニピュレータの動特性モデルは

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{f} \quad (13)$$

と表される。ただし、 $\boldsymbol{\tau}$ は関節トルクベクトル、 $\boldsymbol{\theta}$ は関節角ベクトル、 $\mathbf{f}$ はマニピュレータがクランクに及ぼす力ベクトル、

Fig. 3 The block diagram of the crank dynamic model

$\mathbf{M}(\theta)$ は慣性行列, $\mathbf{h}(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力, コリオリ, 重力および摩擦によるトルクベクトルである. マニピュレータの手先位置は $\mathbf{x}_R = \mathbf{T}(\theta)$ で表されるとし, $\mathbf{J}(\theta)$ は $\mathbf{T}(\theta)$ のヤコビ行列を表す. ここでは, $\mathbf{x}_R$, θ , τ は六次元であるとし, 正方行列 $\mathbf{J}(\theta)$ は考察する作業領域で正則であるとする.

Fig. 3 に示されるように, クランクをまわすためには $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ および $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_n \rangle$ を制御することが求められる. そこで, まず $\mathbf{x}_R$ と同次元なベクトル $\dot{\mathbf{x}}_C$, 正方行列 $\mathbf{R}(\theta)$

$$\dot{\mathbf{x}}_C = \begin{bmatrix} \langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle \\ \langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_n \rangle \\ \dot{\mathbf{x}}_O \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_t^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{e}_n^T & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (14)$$

を定義する. ただし, $\dot{\mathbf{x}}_O$ は作業座標系でクランクまわしに関係する X, Y 軸を除いた残りの軸方向へのマニピュレータの手先速度ベクトル, つまり Z 軸方向への手先速度と手先姿勢の速度ベクトルを意味する. $\mathbf{I}$ は単位行列を表す. このとき,

$$\dot{\mathbf{x}}_C = \mathbf{R}(\theta)\dot{\mathbf{x}}_R = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{J}(\theta)\dot{\theta} \quad (15)$$

の関係式が成り立つ. ここで, $\dot{\mathbf{x}}_R$ の同次元の新たな入力ベクトル $\mathbf{u}$ を $\mathbf{u} = [u_t \ u_n \ u_O]^T$ とするとして,

$$\tau = \mathbf{M}(\theta)\mathbf{J}^{-1}(\theta) \left[\mathbf{R}^{-1}(\theta) (\mathbf{u} - \dot{\mathbf{R}}(\theta)\mathbf{J}(\theta)\dot{\theta}) - \dot{\mathbf{J}}(\theta)\dot{\theta} \right] + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) - \mathbf{J}^T(\theta)\mathbf{f} \quad (16)$$

のような前置補償を適用することを考える.

このとき, 式 (13), (15) および式 (16) より

$$\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle = \frac{1}{s}u_t, \quad \langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_n \rangle = \frac{1}{s}u_n, \quad \dot{\mathbf{x}}_O = \frac{1}{s}u_O \quad (17)$$

が導かれる. 式 (17) は, 制御したい望みの座標軸に対するマニピュレータの手先速度を, その軸方向に対応する一入力により独立に直接制御できることを意味している. 特に, 第 1 式, 第 2 式は作業実行中に座標系 ($O_E; \mathbf{e}_t, \mathbf{e}_n$) が時々刻々と回転するにもかかわらず, $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$, $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_n \rangle$ それぞれが入力 u_t, u_n により独立に制御できることを意味している [16]. これらを採用した制御系設計については 3 章で述べるが, $\dot{\mathbf{x}}_O$ については式 (17) の第 3 式を採用して常に一定値に保たれるように位置制御を行うことをあらかじめ断っておく. また, 式 (16) の計算は文献 [17]~[19] の方法を用いて $\mathbf{M}(\theta)$ および $\mathbf{h}(\theta, \dot{\theta})$ はあらかじめ正確に同定でき, $\mathbf{T}(\theta)$ は分かるので DSP 等で逆動力学問題の解法アルゴリズムを利用し実時間で実行可能である.

2.5 作業戦略

クランクハンドルの速度 $L\dot{\phi}$ を一定にする目的に対する作業戦略を考案するに当たり, ここでは以下のような作業条件を想定する. 回転軸位置 O_P , レバー長 L , バネ係数 K , 慣性モーメント I , 粘性摩擦係数 D , 乾性摩擦モーメント M_c はある程度推定できるが, 正確には分かっていない. 一方, マニピュレータは各関節に装着されたエンコーダにより, $\mathbf{x}, \mathbf{e}_t, \mathbf{e}_n$ および ω を計算できるが $\mathbf{x}_H, \mathbf{h}_t, \mathbf{h}_n$ は分からない.

このような条件下では $L\dot{\phi}$ は計測できないので, これを直接

フィードバックすることができない. そこで, 推定回転軸に対する計測可能な回転速度 $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ を用いて目標速度に制御することとする. これにより $\mathbf{d}$ が微小であるとしても $L\dot{\phi}$ が $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ と $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle \cos(E/L)$ の間を変動することとなるが, E が比較的小さい場合は妥当である. この $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ を加速し目標速度に制御すると, 2.2 節の静力学解析において $\alpha = \pi/2$ の方向に力 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$ を加えることになり, Fig. 3 から明らかのように $\mathbf{e}_n$ 方向に力 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ が生じる. また, マニピュレータの制御誤差からも $\mathbf{e}_n$ 方向に力が生じることも考えられる. そこで, マニピュレータが与える力は $\alpha = \pi/2$ 方向からずれることになる. 静力学解析によればある程度のずれは許されるが, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ が大きくなる場合や E が L に近い場合はこのずれがクランクの回転の滑らかさを損ない, ついには回転できなくなる原因となる. そこで, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ を u_n を用いて零となるように制御することとする.

$\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ を目標速度に, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ を零に制御する作業戦略は Mason [1] の研究に基づく従来の静力学見地からの作業戦略を適用したものとなっているが, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ を零に制御する妥当性が新しく示されている. 動力学解析やマニピュレータの制御性能を作業戦略に反映させることが考えられるが, それはあまり容易でないうえ, E や ω がさほど大きくなければこの戦略はこれらの要因があっても妥当であることが後の実験により示される. また, E が大きい場合は回転軸位置を実時間で推定する方法が非常に有効であることが示される.

3. 制御系設計

ここでは, 2.5 節で示した作業戦略を実行するマニピュレータの制御系の設計法について述べる. Fig. 3 のクランクの動特性モデルは非線形項を有し, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ が相互干渉する系である. 制御系設計を考えるには複雑すぎるので, E および ω が比較的小さいと仮定して $\langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_t \rangle = 1$, $\langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_n \rangle = 0$, $\omega/K = 0$ と見なして線形非干渉化を行う. このようにして得られたクランクの動特性のブロック線図は Fig. 4 のようになる. この単純化による誤差は, 外乱として設計の際に考慮することとする. この扱いは安定論の見地から厳密には正しくないが, 外乱が比較的小さければそれほど問題ではない.

3.1 速度・インピーダンス制御

Fig. 5 は, $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ に対して設計する速度・インピーダンス制御系を示す. v_{rt} は $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ の目標速度である. $V_{tt}(s)$ および $V_{tt}(s)$ は速度制御器であり簡単化して

Fig. 4 The block diagram of the crank dynamic model for the ideal case

Fig. 5 The block diagram of the velocity/impedance controller for $\langle \dot{x}, e_t \rangle$

$$V_{tf}(s) = V_{tt}(s) = C_t \quad (18)$$

と設計する。ただし、 C_t は速度フィードバックゲインであり、速度制御性能を上げるために $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ に対する観測ノイズや入力値制限等の影響が出ないところまで、できるだけ大きく選ぶのが望ましい。

$F_{tf}(s)$ および $F_{tt}(s)$ は力・インピーダンス制御器である。ここでは簡単化のために $F_{tt}(s) = F_{tf}(s)$ と設計する。 $f_{rt}(s)$ は $Dv_{rt}/L^2 + \text{sgn}(\dot{\phi})Mc/L$ の推定値であり、できるだけ $\langle \dot{x}, e_t \rangle = v_{rt}$ で定常状態とするために用いられる。

$\langle \dot{x}, e_t \rangle$ だけを制御するには $F_{tf}(s) = 0$ で十分だが、不確定性に対する推定誤差がある場合には $\langle f, e_t \rangle$ が非常に大きくなる。これをできるだけ緩和させるために、マニピュレータにインピーダンスを持たせるという意味で $F_{tf}(s)$ を

$$F_{tf}(s) = \frac{K_{tf}}{s + a_f} \quad (19)$$

と設計する。ただし、 $1/(s + a_f)$ は力センサ信号に対するフィルタ特性であり、 a_f はフィルタの遮断角周波数である。このときの正の実数 K_{tf} の選び方は、クランクの回転軸位置の推定誤差 E の大きさに左右される。推定誤差 E が小さい場合には、 K_{tf} の値をマニピュレータの性能限界まで大きく設定しなくとも $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ をうまく制御できる。ただし、実際には K_{tf} をあまりにも小さい値に設定すると、マニピュレータの関節部に装着されている減速器の静止摩擦トルクにより $\langle f, e_t \rangle$ を緩和することができない場合がある。一方、推定誤差 E が大きい場合、もしくはクランクが作業中に障害物と衝突するおそれのある作業環境では、 K_{tf} を大きく設定しておいたほうがよい。ただし、あまりにも大きく設定すると $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ をうまく制御できない。しかし、その反面、 $\langle f, e_t \rangle$ と $\langle f, e_n \rangle$ を十分に小さくする効果がある。 $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ の滑らかさか $\langle f, e_t \rangle, \langle f, e_n \rangle$ の大きさか、どちらを重視するかは設計者にまかされる。

3.2 力・インピーダンス制御

Fig. 6 に $\langle f, e_n \rangle$ を制御するために設計する力・インピーダンス制御系を示す。ここでは $\langle f, e_n \rangle$ の目標値は零なので、目標入力はなくともよい。 $V_{nf}(s)$ 、 $F_{nf}(s)$ はそれぞれ速度制御器、力制御器であり

$$V_{nf}(s) = C_n, \quad F_{nf}(s) = \frac{K_{nf}}{s + a_f} \quad (20)$$

と設計する。ただし、 C_n および K_{nf} は正の実数である。

Fig. 6 において、 $L\dot{\phi}(h_t, e_n)$ と $\omega/K\langle f, e_t \rangle$ を外乱とみなすと、

Fig. 6 The block diagram of the force/impedance controller for $\langle \dot{x}, e_n \rangle$

クランクを滑らかにまわすためにはこれらの外乱が $\langle f, e_n \rangle$ に与える影響を小さくしなければならない。ここで、フィルタ特性を無視したインピーダンス関数、つまり Fig. 6 で外乱 $L\dot{\phi}(h_t, e_n)$ および $\omega/K\langle f, e_t \rangle$ を入力として考え、それらが加えられるノードから $\langle f, e_n \rangle$ への閉ループ伝達関数 $I_{mm}(s)$ は

$$I_{mm}(s) = \frac{Ks + KC_n}{s^2 + C_ns + KK_{nf}} \quad (21)$$

となる。それゆえ、外乱が $\langle f, e_n \rangle$ に与える影響を小さくするには C_n/K_{nf} を小さく選ぶのが望ましい。しかしながら、系の安定性のためには $C_n/\sqrt{K_{nf}}$ が大きいほうがよい。したがって、推定誤差 E が大きい場合には $L\dot{\phi}(h_t, e_n)$ が大きくなるので安定性が多少悪くとも C_n/K_{nf} を小さくするのがよい。

4. クランクまわし作業実験

4.1 実験装置

4.1.1 マニピュレータシステム

Fig. 7 に、本実験で使用するマニピュレータシステムを示す。ここでは、6 自由度産業用小型マニピュレータを用いてクランクまわし作業実験を行う。マニピュレータの各関節内部には、フルアブソリュート型のエンコーダ (1 [rev]/8,192 [pulse]) およびブラシレス AC サーボモータが内蔵されている。コントローラはモデルベースド制御用のものであり、モータを電流指令で制御することができ、さらに出力電流を直接検出することができる。コントローラ内部には、デュアルプロセッサと非線形フィードバック補償計算を行うための DSP が搭載されている。また、マニピュレータの手先部には力センサが装着されており、ノイズに対する遮断角周波数は実験的に 62.8 [rad/s] を選定している。実時間補償計算を含めたサーボ補償計算のサンプリングタイムは 3 [ms] である。

Fig. 7 Manipulator system

4.1.2 クランクまわし装置

クランク軸にトルク指令型 DC サーボモータを用いて、それをトルク制御することによりクランクの動特性モデルにおける慣性モーメント I 、粘性摩擦係数 D および乾性摩擦モーメント M_c のそれぞれのパラメータを変化させることができるクランクまわし装置を開発した。ただし、慣性モーメント I はクランクのレバー長を変えることで変化させる。

4.2 実験設定

Fig. 8 は実験システムの概観を示している。以下の実験結果では一例として、不確定要因であるクランクのレバー長 L 、粘性摩擦係数 D 、乾性摩擦モーメント M_c の推定値をそれぞれ $E = 0$ [m]、 $L = 0.08$ [m]、 $D = 0$ [N·m/(rad/s)]、 $M_c = 0$ [N·m] と設定した場合についてのみ述べる。ただし、これらの実際の値は

$$\begin{aligned} 0.06 \leq L \leq 0.08 \text{ [m]} \\ 0 \leq D \leq 2 \text{ [N·m/(rad/s)]} \\ 0 \leq M_c \leq 0.5 \text{ [N·m]} \end{aligned}$$

の範囲にあると仮定し、実際の値は 4.1.2 項のクランクまわし装置で作り出す。また、Fig. 8 に示すように回転軸位置の推定誤差 E は一般性を失わず、マニピュレータの作業座標系 ($o; xyz$) において $+y$ 方向のみに生じるとする。

3 章で設計した、制御系でのおおののフィードバックゲインは、 $C_t = 35$ 、 $K_{tf} = 1$ 、 $C_n = 35$ 、 $K_{nf} = 14$ と調整した。この調整は $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ 、 $\langle f, e_n \rangle$ をそれぞれ目標速度、零にできる限り近づけることを重視している。実験においては、目標速度 v_{rt} は 0.12 [m/s]、 0.24 [m/s]、 0.48 [m/s] の 3 種類とする。 $v_{rt} = 0.6$ [m/s] 以上では、 $E = 0$ [m] の場合でさえ $\langle f, e_n \rangle$ の最大値が力センサの定格荷重を超えるので実験不可能であった。また、クランクまわしの初期状態は、Fig. 8 における $\phi(0) = 0$ および $\dot{\phi}(0) = 0$ とする。ただし、 $\phi(0) \neq 0$ の初期状態でも実験を行ったが、決定的な相違が見られないことを確認している。

4.3 実験結果とそれに対する考察

ここでは、提案された作業戦略とそれを実行する制御法が不確定要因と現実の産業用マニピュレータの制御性能の下でどの程度有効であるかを見る実験を行い、その結果に対して考察を加える。

不確定要因 L 、 D 、 M_c の作業に対する影響は、後の 4.3.3 項で述べるようにごく軽微であったので、以下ではこれらの値を推定値と一致させて実験を行った結果について述べる。

Fig. 8 The experiment of the crank turning

Table 1 The limit of the estimation error of pivot position for v_{rt}

v_{rt} [m/s]	0.12	0.24	0.48
Limit of E [m]	0.725L	0.6L	0.55L

まず、クランクをまわすことができる回転軸位置の推定誤差 E の限界について調べたところ、Table 1 に示すような結果となった。クランクがまわればよいという観点からは、実用上 E の許容範囲はかなり大きいと判断される。静力学解析の結果と一致しないことおよび、目標速度の増大に伴い E の限界値が小さくなるのは、制御モデルの簡単化やマニピュレータの制御性能の影響によるものである。

次に、 E のクランクのまわり方に対する影響を調べるために、目標速度を $v_{rt} = 0.12$ [m/s] と低速に固定し E を変えて実験した結果を Fig. 9～11 に示す。回転の滑らかさを $\langle f, e_n \rangle = 0$ 、 $\langle \dot{x}, e_t \rangle = v_{rt}$ に近く制御できることであるとすると、 $E = 0$ [m] のときは回転は滑らかであるが、 E が大きくなるとともに回転の滑らかさが失われていくことが分かる。これは E の増大に伴い $\langle h_t, e_t \rangle = 1$ 、 $\langle h_t, e_n \rangle = 0$ とみなしたことおよび、マニピュレータの力制御における力の方向誤差と制御遅れによる、 $\langle f, e_n \rangle$ の誤差のためクランクハンドルに加える力 f に方向誤差 δ が生じるためである。この δ のため $\langle f, e_t \rangle$ も影響を受け、 $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ を v_{rt} に追従させることができなくなると解釈できる。

上と同じ実験を、目標速度を変えて行った結果をまとめると Table 2 のようになった。表中の $\langle f, e_t \rangle$ 、 $\langle f, e_n \rangle$ の数値はそれぞれ回転中の $\langle f, e_t \rangle$ 、 $\langle f, e_n \rangle$ の最大値であり、×印はマニピュレータがクランクを回転させることができないことを示す。目標速度が変わっても E の増大に伴って回転が滑らかでなくなり、ついには回転させられなくなる傾向は同じであるが、目標速度が大きくなるとより小さな E で回転が滑らかでなくなる。これは制御モデルにおいて、 $\omega/K = 0$ とみなした影響である。ただし、 $E = 0$ [m] の場合は目標速度の増大に伴い、 $\langle f, e_t \rangle$ に比べ $\langle f, e_n \rangle$ はかなり大きくなるものの、 $\langle \dot{x}, e_t \rangle$ の定常速度偏差はこの三つの目標速度に対して 1% 以内に収まることが観察されている。

以上のように、クランクを滑らかに回転させる上で最も大きな影響を及ぼす不確定要因は E であるが、 ω/K および力制御系の制御遅れも力 f の方向誤差を引き起こし、かなり影響を与える。このような複合された要因により回転の滑らかさが失わ

Fig. 9 The experimental results for $E = 0$ [m] Fig. 10 The experimental results for $E = 0.4L$ [m] Fig. 11 The experimental results for $E = 0.725L$ [m]Table 2 The relation between E and $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$, $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$

E [m]		Reference velocity v_{rt}		
		0.12 [m/s]	0.24 [m/s]	0.48 [m/s]
0.0L	①	2.0	3.5	4.5
	②	7.5	13.0	27.0
0.2L	①	6.0	6.0	8.0
	②	20.0	25.0	45.0
0.4L	①	13.0	20.0	40.0
	②	28.0	30.0	60.0
0.6L	①	40.0	90.0	×
	②	40.0	70.0	×
0.8L	①	×	×	×
	②	×	×	×

① : $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$ [N]   ② : $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ [N]

れ、ついには力 $\mathbf{f}$ の方向誤差 δ が式 (4) を満たさなくなり、 $E < L$ であるにもかかわらず回転できなくなるものと結論できる。

以下では、この結論をさらに詳しく検証し考察を加えるため、まず $E = 0$ [m] の条件下で目標速度に関する ω/K および力制御系の制御遅れが回転に及ぼす影響について調べる。次に、マニピュレータがクランクに加える力 $\mathbf{f}$ の方向誤差について考察し、上の要因と複合してクランクをまわすことができなくなる理由を検討する。最後に、その他の不確定要因の影響について述べる。

4.3.1 クランクまわし速度の影響

ここでは、 $E = 0$ [m] の条件下で目標速度に関する ω/K および力制御系の制御遅れがクランクまわしに及ぼす影響について述べる。

まず、Fig. 3 において ω/K が力制御系に直接影響を与える力 $-(\omega/s)\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$ の値域を調べたところ、Table 3 に示す結果が得られた。目標速度の増大に伴い ω が大きくなる場合には、 ω/K が力制御系に与える影響はかなり大きくなることが分か

Fig. 12 The experimental results for $v_{rt} = 0.42$ [m/s] ($E = 0.0$ [m])

Table 3 The influence of $(\omega/K)\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$ for ω

ω [rad/s] (v_{rt} [m/s])	1.5 (0.12)	3.0 (0.24)	6.0 (0.48)
$-\frac{\omega}{s} \langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_t \rangle$ [N]	-1.3~0.0	-1.5~0.0	-6.0~1.0

る。力制御系の制御遅れがある以上はこれらの影響を打ち消すことができないので、Table 2 に示されるように $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ は目標速度の増大に伴い大きくなっている。

次に、上で述べた力制御系の制御遅れの原因を述べるために、 $v_{rt} = 0.48$ [m/s] と設定した場合の実験結果を Fig. 12 に示す。 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ が最大となる箇所が第一関節軸の応答性能のみが直接影響する箇所、つまりマニピュレータの手先位置の y 成分が最大値または最小値となる箇所に一致している。3 章で設計した制御系では、マニピュレータのすべての関節軸の応答性能を考慮に入れて、 $\mathbf{e}_t$, $\mathbf{e}_n$ の各方向に対してフィードバックゲインの調整を行うことになる。そのため、必然的に応答性能が劣る関節軸に合わせて調整を行うことになり、特に力制御系でのフィードバックゲイン K_{nf} を大きく設定できない。したがって、第一関節軸の応答性能を十分に上げることができず、その軸まわりの摩擦トルクが起因となり力制御系の制御遅れが生じている。

以上のように、たとえ回転軸位置を正確に推定できた場合でも、 ω が大きくなる場合には ω/K , およびその影響を打ち消すことができない力制御系の制御遅れにより力 $\mathbf{f}$ の方向誤差が引き起こされ、クランクまわしにかなりの影響を与えることになる。

4.3.2 推定回転位置誤差 E の限界の考察

ここでは、マニピュレータがクランクに加える力 $\mathbf{f}$ の方向誤差を実験により詳細に調べそれを考察し、クランクをまわすことができる E の限界値が静力学解析の結果と一致しないこと、および目標速度の増大に伴い E の限界値が小さくなるのが制御モデルの単純化やマニピュレータの制御性能の影響によるものであることを述べる。

まず、実験結果の一例として $v_{rt} = 0.24$ [m/s] と設定して $\mathbf{f}$ の方向誤差とクランクの回転角度 ϕ の関係を調べた結果を Fig. 13 に示す。ただし、Fig. 13(a), (b) はそれぞれマニピュレータがクランクをまわすことができた $E = 0.6L$ [m] での結果、まわすことができなかった $E = 0.8L$ [m] での結果である。ここでは、 $\mathbf{f}$ の方向誤差の結果を比較しやすくするために、単

(a) $E = 0.6L$ [m] (Crank can be revolved)

(b) $E = 0.8L$ [m] (Crank cannot be revolved)

Fig. 13 The force direction deviation for $v_{rt} = 0.24$ [m/s]

位ベクトル $\mathbf{h}_t$ からの $\mathbf{f}$ の方向誤差を $\hat{\delta}$ と新たに定義し用いる。また、ハンドル位置 O_H は正確に分からないため、マニピュレータの手先位置 O_E のデータを用いて $\mathbf{h}_t$ を計算した。そのため Fig. 13(a) に示されるように、 $|\hat{\delta}|$ が $\pi/2$ [rad] をわずかに超えても実際にはクランクをまわすことができている。

$\hat{\delta}$ が最大となるクランクの回転角度 ϕ を $\max \phi$ とすると、静力学的見地からは Fig. 13(a) の場合は $\max \phi = \{2(n-1)\pi + 0.64\}$ [rad] もしくは $\max \phi = \{(2n-1)\pi - 0.64\}$ [rad] (n はクランクの回転回数を表す) と得られる。一方、Fig. 13(b) の場合は静力学的解析での必要十分条件 $E < L$ を満たしているが、仮にまわすことができないとすると $\phi = 0$ [rad] から回転させ始め、最初に $\phi = 0.93$ [rad] の箇所が $\max \phi$ となるので、この箇所でもわすることができなくなっている可能性が高い。しかしながら、Fig. 13 に示されるように、実験結果は Fig. 13(a), (b) 共に静力学解析の結果から得られる理論値とは異なり、特にクランクを回転させることができなくなる原因は $\langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_t \rangle = 1$,

Fig. 14 The experimental results in the case of estimated error of frictional moment

$\langle \mathbf{h}_t, \mathbf{e}_n \rangle = 0$ とみなしたことで、およびマニピュレータの力制御における力の方向誤差と制御遅れの影響だけではないことが分かる。4.2 節の実験設定の下では、E がある場合には、 ω/K は $\phi = \pi/2$ [rad] で最も大きくなる。それゆえ、 $\phi = \pi/2$ [rad] 付近で Table 1 に示した値より E が大きくなる場合には、 ω/K による影響と上述の E と力制御系の制御遅れによる影響が複合して、力 $\mathbf{f}$ の方向誤差 δ が式 (4) を満たさなくなり $E < L$ であるにもかかわらず回転できなくなる。このことは Fig. 13 (b) に示されるように、 $\phi = \pi/2$ [rad] 付近で δ が $\pi/2$ [rad] を大幅に超え、クランクをまわすことができなくなっている結果により裏付けられている。また、マニピュレータはクランクをまわすことができなくなる箇所 ϕ からは、反時計まわりにクランクをある程度回転させ、 δ がクランクを時計まわりに回転させることができる条件を満たした時点で再度時計まわりにまわし始め、以後、これらの一連の運動を繰り返す。

一方、目標速度を大きく設定するに伴い E が同じであっても、4.3.1 項で述べたように目標速度の増大に伴い ω/K の影響はより大きくなるので、それにより力 $\mathbf{f}$ の方向誤差 δ はさらに大きくなる。その結果、Table 1 に示すように目標速度の増大に伴い E の限界値は減少することになる。

以上のことから、初期の回転軸位置の誤差が大きい場合にクランクを滑らかにまわすためには、 ω/K による影響およびマニピュレータの制御性能の限界による影響は少々仕方がないとしても、5 章で述べるような方策を用いて回転軸位置の推定を正確に行うことが適切であるといえる。

4.3.3 その他の不確定要因の影響

ここでは、レバー長 L 、粘性摩擦係数 D および乾性摩擦モーメント M_c の作業に対する影響は軽微であることが示される。

まず、レバー長以外の不確定要因 D 、 M_c の実際の数値はクランクまわし装置を用いて推定値と一致させ、レバー長 L を $L = 0.06$ [m] に変化させて実験を行った。しかしながら、 $L = 0.08$ [m] の場合との決定的な相違点は見つからなかった。本実験で使ったクランク装置では、レバー長 L を変化させることにより慣性モーメント I を変化させている。したがって、慣性モーメント I の変化による作業への影響は軽微であるといえる。

次に、粘性摩擦係数 D 、乾性摩擦モーメント M_c の摩擦モーメントに関する不確定要因に推定誤差がある場合について調べた。実験結果の一例として粘性摩擦係数 D だけに推定

Fig. 15 The real-time estimating method of the pivot position

誤差があるとし、推定値を 0 [N·m/(rad/sec)]、実際の数値を 0.5 [N·m/(rad/sec)] としたときの結果を Fig. 14 に示す。ただし、その他の不確定要因 E 、 L 、 M_c の推定値と実際の数値は一致させている。この場合にはクランクの回転に関する摩擦モーメントの推定誤差により目標速度 v_{rt} に対する速度 $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{e}_t \rangle$ の定常偏差は大きくなる。しかしながら、回転軸位置の推定誤差がある場合についても調べたが、E と $\langle \mathbf{f}, \mathbf{e}_n \rangle$ の関係は粘性摩擦係数 D 、乾性摩擦モーメント M_c の推定誤差がない場合での関係と変化しない結果となった。したがって、クランクの回転による摩擦モーメントによる影響も軽微であるといえる。

5. 回転軸位置の推定を用いた作業戦略

ここでは初期の推定誤差 E がかなり大きくても、マニピュレータが滑らかなクランクまわしを実現できる戦略を提案しその有効性を実証する。ここでの提案する戦略は後に述べるように回転軸位置を実時間で推定し行うものであり、それを適用した結果はかなり良いものである。ただし、これがうまく機能するのは、初期段階での E がある状態から回転軸位置を推定し始める段階で、クランクが初期位置から少し動けば推定を用いない場合にうまくまわすことができる E の範囲に入るという前章の実験結果に基づいていることを強調しておく。また、ここでは取り扱わないがこの戦略は本研究で扱うクランクまわし作業だけでなく、作業中にレバー長 L が変化したり、クランクのハンドル位置 O_H が描く軌跡が楕円であったりするクランクの回転軸位置が常に変化するような作業にも有効であると思われる。

Fig. 15 に回転軸位置の実時間推定法を示す。OE0 はマニピュレータの手先初期位置である。手先が微小距離 γ 移動したとき

の手先位置を点 O_{E1} とし、この点と初期位置 O_{E0} の垂直二等分線 l_1 を引く。次に、手先が O_{E1} から γ 移動したときの手先位置を点 O_{E3} とし、この点と初期位置 O_{E0} の垂直二等分線 l_2 をひく。このとき、これらの二つの垂直二等分線 l_1, l_2 の交点を新しい推定回転軸位置 O_{EP1} とする。さらに、手先位置が γ 移動したときの手先位置を点 O_{E3} とする。このとき点 O_{E3} と点 O_{E0} の垂直二等分線を l_3 とし、 l_2 と l_3 の交点を次の推定回転軸位置 O_{EP2} とする。手先が 2γ 移動した際に作業中による初めての推定を行い、次回以降はクランの回転軸は変化しないと仮定し、 $|\vec{O_{EP0}O_{EPn}}|$ が $2L$ 付近まで γ だけ移動するごとに推定を行うのが妥当である。

推定法で使用する推定距離 γ をあまりに小さく設定すると、マニピュレータの手先位置とハンドルの位置との間に微小な変位が生じるため正しい推定が行うことができない。一方、 γ をあまりにも大きく設定すると、初期推定位置までに時間がかかる。その結果、初期推定誤差 E が大きいと非常に大きな $\langle f, e_t \rangle$, $\langle f, e_n \rangle$ が生じることになりクランは滑らかにまわらない。そこで、回転軸の初期推定誤差 E がたとえレバー長 L ほど大きくとも、マニピュレータが滑らかなクラックまわしを実現できる適当な推定距離 γ を実機を用いた実験により調べる。ただし、クラックまわし装置を用いてレバー長 L を 0.06 [m], 0.08 [m] の2種類を設定し、不確定要因 L, D, M_c の実際の数値は推定値と一致させている。

ここで行った実験からはクラックの回転角度 $7 \sim 15$ [deg] に一致する推定距離 γ を選ぶことが適当であることが判明した。これは一般の場合でも L がある程度分かっているならば γ を選ぶ際の目安となると思われる。また、このときマニピュレータがクラックを時計まわり方向にうまく回転させることができる推定誤差 E は設定した3種類のすべての目標速度 v_{rt} (0.12 [m/s], 0.24 [m/s], 0.48 [m/s]) に対して $E = L$ [m] となることが確認された。一例として、目標速度 $v_{rt}(s) = 0.12$ [cm/sec], $L = 0.08$ [m], 初期推定誤差 $E = 0.6L$ [m], 14.4 [deg] に一致する推定距離 γ を設定した場合の実験結果を Fig. 16 に示す。

Fig. 16 (a) に示されるように、初回の推定により推定誤差 E はかなり減少し、推定が行われる度に E は零に近づく様子が分かる。ただし、図中の数字は推定回数を表している。その結果、Fig. 16 (b), (c) より最初の回転軸位置が推定されるまでは推定を行わない場合と同等の力を生じるが、推定が行われると $\langle f, e_n \rangle$ は零近傍に制御されていることが分かる。そのため、力 f の方向誤差は最小限に抑えられ、マニピュレータがクラックをまわすために必要とされる力も小さくなり滑らかなクラックまわしを実現できており、ここで提案した戦略が非常に有効であることが確認された。

6. ま と め

本論文では、明確にタスク理解を念頭におき、ロボット作業の基本作業の一つであるクラックまわし作業に対して妥当かつ簡潔な作業戦略の提案と実機を用いた実験により実現可能性を詳細に検証することにより一つのタスク理解のすべてのプロセスを実行した。

ここでは、まず、クラックの現実的な不確定要因まで含めた

(a) The transition of estimated pivot position

(b) The trajectory of $\langle f, e_t \rangle$

(c) The trajectory of $\langle f, e_n \rangle$

(d) The trajectory of $\langle x, e_t \rangle$

Fig. 16 The experimental results for an example with the estimation of the pivot position

モデルを考え、そのモデルを数理的、力学的に解析することによりロバストな作業戦略を考案した。また、その戦略を実行する運動・力・インピーダンス制御系に基づいた制御系設計法について述べ、実際に6自由度産業用小型マニピュレータを用いた実験にて検討した。ここでは、シミュレーション上では通常考慮することが難しいロボット自体の性能限界、および動力学要因の影響も含めてクランクまわし作業における不確定要因による影響について詳細に調べた。実験では、マニピュレータがクランクをまわすだけであれば、回転軸位置の推定誤差がかなり大きくとも本実験で用いた程度の制御性能をもつマニピュレータで十分に実行可能であることが確認でき、作業モデルに基づいた作業戦略の妥当性が示された。しかしながら、回転軸位置の推定誤差が大きく、クランクをまわす目標速度を大きく設定する場合には、制御モデルの単純化やマニピュレータの制御性能限界による影響がかなり大きくなる。その結果、推定誤差がさらに大きくなる場合には、ついにはクランクを回転させることができなくなることが分かった。ここでは詳細な実験により、クランクを滑らかにまわすためには、回転軸位置をできるだけ正確に推定する必要がある裏づけを得た。さらに、初期の回転軸位置の推定誤差が大きい場合に生じる影響を最小限に抑え、滑らかなクランクをまわしを実現する改善策として実時間における回転軸位置の推定を用いた戦略を考案し、実機を用いた実験によりかなり有効であることが示された。

本研究ではクランクまわし作業という一つの基本的作業のタスク理解を行ったが、タスク理解の研究は作業によって様相が異なることも多く、個別的にモデリングや作業戦略を考案していくものであるが、本研究はこれをいかに行うかを示す好例となっている。今後、いろいろな有用な作業についてもタスク理解研究がなされ、これらが蓄積することでロボットが汎用機械として役立つものとなることが期待される。

参考文献

- [1] M.T. Mason: "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-11, vol.6, pp.418-432, 1981.
- [2] Raibert, M.H. and J.J. Craig: "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulator," Trans. ASME, J. of Dynamic of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.102, pp.126-133, 1981.
- [3] A.D. Luca and C. Manes: "Modeling of Robots in Contact with a Dynamic Environment," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.10, no.4, pp.542-548, 1994.
- [4] V. Perdereau and M. Drouin: "Hybrid External Control for Crank Turning," Proc. of the third ICARCV'94, pp.726-730, 1994.
- [5] Hogan, N: "Impedance Control: An Approach to Manipulator, Part 1-3," Trans. ASME, J. of Dynamic of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985.
- [6] M.P. Hennessey and M. Donath: "Generalized Impedance Control: Experiments on Constrained Motion in the Presence of Obstacles," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.10, no.4, pp.55-60, 1993.
- [7] 辻敏夫, 伊藤宏司: "クランク回転作業における人間の位置/力制御方策", 人間工学, vol.28, no.3, pp.209-218, 1992.
- [8] 太田憲, 羅志偉, 伊藤正美: "作業環境との相互作用のもとでの生体運動解析-クランク回転作業における環境適応-", 電子情報通信学会論文誌, D-2, vol.J81-D-2, no.6, pp.1392-1401, 1998.
- [9] 前田浩一: "マニピュレーションの知能", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.2, pp.172-177, 1993.
- [10] 前田浩一: "タスク理解とロボティクス", システム制御情報学会, vol.37, no.10, pp.576-579, 1993.
- [11] H. Mayeda and K. Miyaji: "Task Understanding of The Crank Turning," Proc. of IROS'94, vol.2, pp.958-965, 1994.
- [12] 浦敏彰, 前田浩一: "ロボットによるクランクまわし作業のための運動・力・インピーダンス制御系設計", 第1回ロボティクスシンポジア予稿集, pp.185-190, 1996.
- [13] T. Ura and H. Mayeda: "Crank Turning with Estimating The Pivot Position," 998 Japan-USA Sympo. on FA, pp.465-468, 1998.
- [14] H. Mayeda, N. Ikeda and K. Miyaji: "Position/Force/Impedance Control for Robot Tasks," Proc. of 2nd Int. Sympo. on Measurement and Control in Robotics, vol.3, pp.581-588, 1993.
- [15] H. Mayeda and N. Ikeda: "Motion/Force/Impedance Control for Robot Tasks," Proc. of IROS'93, vol.3, pp.1522-1529, 1993.
- [16] H. Fujioka and H. Mayeda: "Experimental Study of Crank Turning," Proc. of ISRA'2000, pp.263-268, 2000.
- [17] 前田浩一: "ロボットアームの動的モデルと同定", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.203-208, 1989.
- [18] H. Mayeda, K. Yoshida and K. Osuka: "Base Parameters of Manipulator Dynamics Models," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.6, no.3, 1990.
- [19] T. Yasuho, Y. Omaki, T. Nampo and H. Mayeda: "Identification and Model Based Control of A 6 D.O.F. Industrial Manipulator," Proc. of IFAC SYROCO'97, vol.1, pp.117-123, 1997.
- [20] K. Sugiyama, R. Matsuura and H. Mayeda: "Experimental Study of The Force/Impedance Control For a 6 D.O.F. Industrial Manipulator," Proc. of 2000 Japan-USA Sympo. on FA, CDROM, 2000.

藤岡寛之 (Hiroiyuki Fujioka)

1975年1月17日生。1997年立命館大学理工学部情報工学科卒業。2002年同大学大学院理工学研究科博士後期課程単位取得退学。同年東京電機大学理工学部情報科学科助手。現在に至る。2004年度システム制御情報学会奨励賞および砂原賞。ロボット作業のタスク理解およびスプライン関数の理論と応用の研究に従事。システム制御情報学会、日本機械学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)

前田浩一 (Hirokazu Mayeda)

1943年10月5日生。1966年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1971年同大学大学院基礎工学研究科博士課程単位取得退学。同年同大学基礎工学部制御工学科助手。助教授を経て、1992年立命館大学理工学部情報工学科教授。1996年同大学理工学部ロボティクス学科教授。この間(1978~1979)トロン大学電気工学科客員研究員。現在、ロボットのモデルベース制御および運動、作業知能等の研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、システム制御情報学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)