

## 動的作業環境におけるテレ-マニピュレーションの研究

### Tele-manipulation under a Dynamic Environment

梅沢将実\*, 羅 志偉\*\*\*, 加藤厚生\*\*, 伊藤正美\*\*\*

M.Umezawa, Z.W.Luo, A.kato, M.Ito

**Abstract** One of the most important problems in tele-manipulation is how to realize the human skill in performing the task by master-slave robot system. Experimental results show that, when human operator turns a crank directly, he/she actively uses the contact force along the normal direction of the crank. Although the normal contact force does not contribute to the rotation of the crank, it influences the arm-crank system's stability. In this research, we study on how to compensate the master-slave robot system to turn the crank skillfully.

#### 1. はじめに

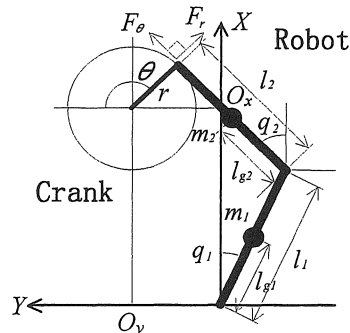
テレ-マニピュレーションは、人間が直接入れない環境、スケールの人間と整合しない環境、また、人間による直接操作が困難な動的な環境のもとで作業するための重要な技術である。また、明確に数式で記述することが困難な作業技能をロボットに教示するのにも有効な手法である。近年、ロボットによる人間の技能の実現が重要視されているが、現在のロボットはまだ簡単な作業しか行うことができず、人間のような優れた作業技能をロボットによって実現することは、とても難しい問題とされている。

テレ-マニピュレーションの実現手段の一つとして、マスタ-スレーブロボットを用いる方法がある。従来より、テレ-マニピュレーションの研究では、離れた場所にいる操作者が実際に作業を行っているかのような臨場感の実現に関する問題<sup>1)2)</sup>や、双方向時間遅れによるシステム全体の不安定性の問題<sup>3)</sup>、環境やオペレータの不確かさから生じるマスタ-スレーブロボット間のミスマッチングを吸収する制御設計法<sup>4)5)</sup>について議論されてきた。しかし、これらはシ

ステムが安定となるような設計をすることに重点がおかれていたため、オペレータの入力には制限があり、作業自体の効率を犠牲にしているといえる。また、具体的な作業の想定がされていなかった。

そこで、本研究ではクランク回転作業を例として、オペレータの能動性を最大限に発揮できるようにロボットシステムの制御補償を行うことを主要課題とした。

#### 2. クランク回転作業



図(1) A 2-D.O.F. arm turning a crank

ロボットアームによるクランクの回転作業を図(1)に示す。ここで、ロボットとクランクの基準座標を  $X = [X, Y]^T$ 、ロボットの関節座標を  $q = [q_1, q_2]^T$ 、クランクの半径  $r$  と回転角  $\theta$  による作業座標を  $r = [r, \theta]^T$

\* 愛知工業大学 大学院電気電子工学専攻 (豊田市)

\*\* 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

\*\*\* 理化学研究所 バイオミメティック

コントロール研究センター (名古屋市)

で表すものとする。

関節座標空間で表す 2 自由度ロボットの運動方程式は

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau - J^T F \quad (1)$$

与えられる。ここで、 $M$  はアームの慣性行列、 $h$  は遠心力、コリオリ力、 $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$  は関節トルク、そして  $J$  は関節座標から作業座標へのヤコビ行列を表す。また、クランクのハンドルにおける相互作用力を  $F = [F_r, rF_\theta]^T$  とする。

一方、クランクの接線方向のダイナミクスは

$$I\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = rF_\theta \quad (2)$$

と表される。ここで、 $I$  はクランクの慣性モーメント、 $B$  はクランクの粘性係数、 $r$  はクランクの回転半径である。また、クランクの幾何学的拘束により、

$$\dot{r} = \dot{r} = 0 \quad (3)$$

である。

人間は未知の作業環境との複雑な相互作用の中で、環境拘束に適応し、作業スキルを獲得することによって巧みな運動を実現する。太田ら<sup>7)</sup>は、人間によるクランク回転作業について、くり返しトレーニングによって人間がいかにクランクの幾何学的・動力学の拘束に適応し、回転作業をスムーズに実現するかについて実験的に計測を行い、作業技能の巧みさについて興味深い実験結果を得ている。彼らは、被験者をクランクに正対して座らせ、クランクのハンドルを握って方とひじ関節のみを使って水平面内でクランクを一回転させる作業を繰り返し行った。手先位置等の視覚情報を与えない場合と、与えた場合のトレーニング前後に

おける手先接触力のベクトル変化を図(2)に示す。ただし、クランクの回転軸には粘性抵抗  $B = 0.3$  [Nms/rad]を与えている。その結果、はじめ、またはクランクが見えない場合には、被験者はクランクを外側に引っ張りながら回転させていたが、熟練するにしたがって、動作開始時と停止時を除いて、逆にクランクを内側に押しながら回転するように変化した。半径方向の力はクランクの回転方向に直交し、一見回転作業には関係ないように思われるが、なぜ半径方向の力が必要であるのかということについて数理的な解析を行う。

アームの運動方程式(式(1))とクランクのダイナミクスの式(式(2))より、系全体の運動方程式は、

$$J^{-T} M J^{-1} (\ddot{r} - \dot{J} \dot{q}) + J^{-T} h(q, \dot{q}) + \begin{bmatrix} F_r \\ I\ddot{\theta} + B\dot{\theta} \end{bmatrix} = J^{-T} \tau \quad (4)$$

となる。ここで、クランクの拘束条件式(式(3))より、

$$J^{-T} M J^{-1} (\ddot{r} - \dot{J} \dot{q}) + J^{-T} h(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表すことができるので、式(4)に代入し、 $\dot{\theta}^2$  を消去すると、

$$I'\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + kF_r = [k \quad 1] J^{-T} \tau \quad (6)$$

となる。ただし、

$$I'(\theta) \equiv M_{21} - \frac{M_{11}M_{22}}{M_{12}} + I \quad (7)$$

$$k(\theta) \equiv -\frac{M_{22}}{M_{12}} \quad (8)$$

は回転方向  $\theta$  の関数であるので、半径方向の接触力  $F_r$  は回転方向における系全体の運動に影響を及ぼすことが分かる。式(6)で回転速度について微小摂動  $\Delta\theta$  を導入し、Taylor 展開により第一次近似を取ると、左辺の各項は、

$$(I'(\theta) + \frac{\partial I'}{\partial \theta} \Delta\theta)(\ddot{\theta} + \Delta\ddot{\theta}) + B(\dot{\theta} + \Delta\dot{\theta}) + (k(\theta) + \frac{\partial k}{\partial \theta} \Delta\theta)F_r \quad (9)$$

となる。さらに式(6)と比較して  $\Delta\theta$  について整理すると、

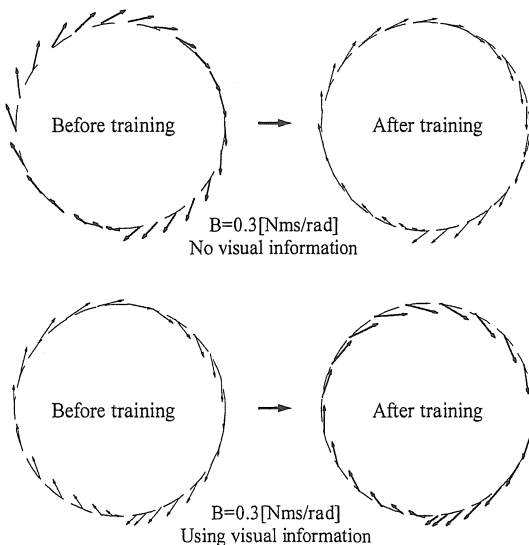
$$I'\Delta\ddot{\theta} + B\Delta\dot{\theta} + K\Delta\theta = \Delta\tau \quad (10)$$

が得られる。ただし、

$$K \equiv \frac{\partial I'}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial k}{\partial \theta} F_r \quad (11)$$

であり、 $\Delta\tau$  は微小摂動  $\Delta\theta$  に関する制御入力とする。

ここで、 $\frac{\partial I'}{\partial \theta} \dot{\theta}$  は微小であるため、



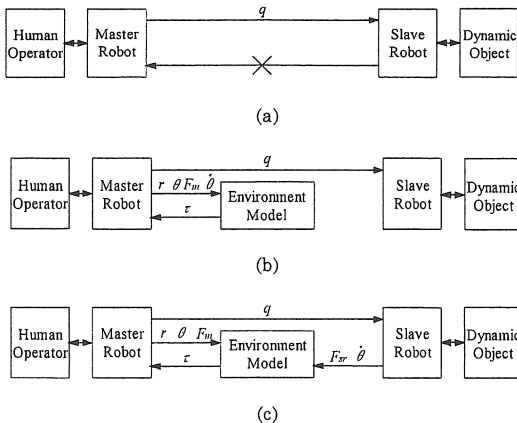
図(2) 1 回転まわりの手先の接触力ベクトル

$$K \approx \frac{\partial k}{\partial \theta} F_r \quad (12)$$

である。  
ここで、式(10)において、係数  $I'$ 、 $B$  は常に正であるので、 $F_r$  の符号が系全体の安定性に影響することがわかる。つまり、クランクを外側に引っ張ったとき、 $K > 0$  となり、系を安定させる効果がある。逆に、クランクを内側に押したときには  $K < 0$  となり、系の安定性を阻害する効果がある。

したがって、人間は作業を行うとき、はじめは確実に作業を遂行できるようにクランクを外側に引っ張って系の安定性を高めながら作業を行う。しかし、十分に練習した後は、クランクを押しながら回す。これは、むしろ系の不安定性を積極的に利用しているのではないかと推測される。つまり、クランクを巧みに押すことによって、より速く、効率よく作業を実現しようとしているのではないかと考えられる。

このような環境に接触するような作業をロボットに行わせるとき、制御方法として、望ましい運動を、環境の逆ダイナミクスまたは逆モデルを通すことによって作り上げるという方法も考えることができる。しかし、逆モデルだけでは環境に対してどうやって巧みに作業するかという操作性を表現することはできない。このことから、人間の巧みな技能をロボットによって実現することを考えたとき、環境のモデルが分かるだけでは不十分であり、人間の巧みな作業技能を実現する必要があるといえる。しかし、人間が系の不安定性を積極的に利用することによって、作業を巧みに実現しているとすると、従来のような、系の安定性を第一に考えた制御系の設計では人間のような巧みな作業技能は実現できないと考えられる。



図(3) マスタロボットの制御補償

### 3. マスタロボットの制御補償

オペレータがマスタ - スレーブロボットを操作することによって遠隔作業を行うとき、人間の作業技能を効果的に発揮させるためには、オペレータがマスタロボットからあたかもオペレータ自身が直接作業をしているかのように感じる事が重要であると考えられる。したがって、図(3)に示すような、作業対象のモデルや、スレーブロボットからの力や位置のフィードバックにより、マスタロボットが作業対象のダイナミクスを表現するような制御補償を施すべきである。

オペレータ、マスタおよびスレーブロボットの運動方程式は次のように表される。

$$I_o(q_o)\ddot{q}_o + h_o(q_o, \dot{q}_o) = \tau_o + J^T(q_m)F_m \quad (13)$$

$$I_m(q_m)\ddot{q}_m + h_m(q_m, \dot{q}_m) = \tau_m - J^T(q_m)F_m \quad (14)$$

$$I_s(q_s)\ddot{q}_s + h_s(q_s, \dot{q}_s) = \tau_s - J^T(q_s)F_c \quad (15)$$

ここで、添え字の  $o$ 、 $m$ 、 $s$  はそれぞれ、オペレータ、マスタロボット、スレーブロボットを表す。また、

$$F_c = [F_r, \tau_\theta]^T = [F_r, I\ddot{\theta} + B\dot{\theta}]^T \quad (16)$$

はスレーブロボットと作業対象の接触力ベクトルであり、 $F_m$  はオペレータとマスタロボットの力ベクトルである。

作業対象のダイナミクスを

$$-F_m = I_e \ddot{r}_m + B_e \dot{r}_m + K_e (r_m - r_{md}) \quad (17)$$

で表現されるインピーダンスとしてオペレータが感じるためには、マスタロボットに対して、

$$\tau_m = -I_m J^{-1} (I_e^{-1} (F_m + B_e \begin{bmatrix} \dot{r}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} + K_e \begin{bmatrix} r_m - r_{md} \\ 0 \end{bmatrix}) + J \dot{q}_m) + h_m + J^T F_m \quad (18)$$

の非線形制御補償、または、スレーブ側から得る情報によって

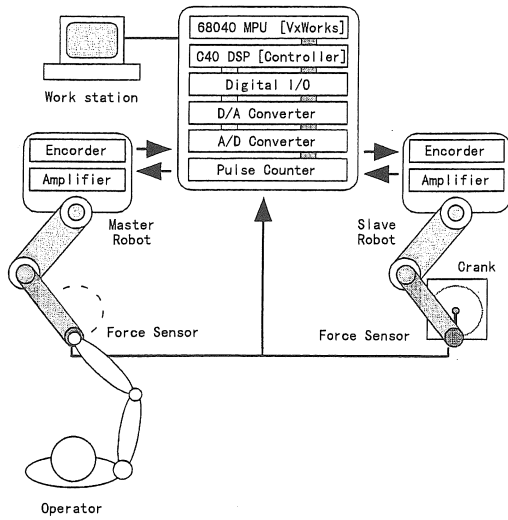
$$\tau_m = -I_m J^{-1} (I_e^{-1} (F_m + B_e \begin{bmatrix} \dot{r}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} + K_e \begin{bmatrix} F_{sr} \\ 0 \end{bmatrix}) + J \dot{q}_m) + h_m + J^T F_m \quad (19)$$

となるようなバイラテラル制御補償を施す必要がある。ここで、

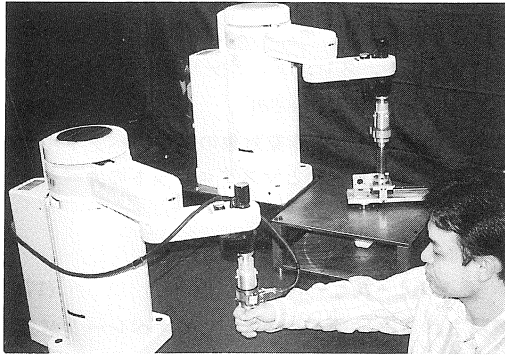
$$I_e = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B_r & 0 \\ 0 & B_\theta \end{bmatrix}, K_e = \begin{bmatrix} K_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

はそれぞれ、作業対象の慣性行列、粘性行列、弾性行列を表す。

### 4. テレ - マニピュレーションの作業実験

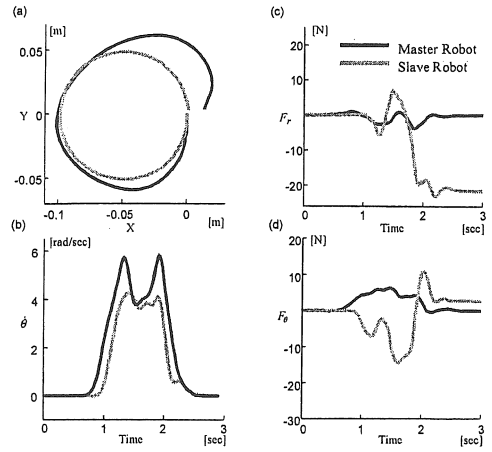


図(4) 実験システムの構成

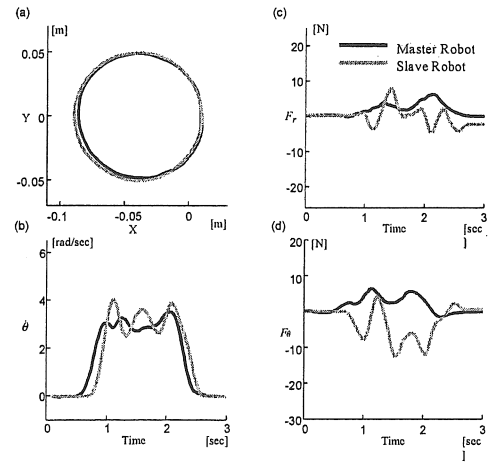


図(5) 実験システム

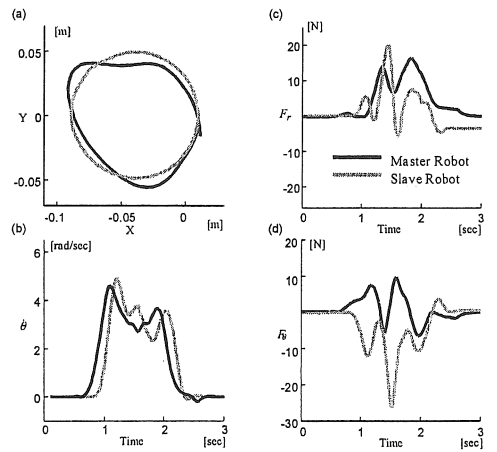
このようにして得られる制御補償の効果を調べるため、図(4)、(5)に示すマスタ-スレーブシステムを用いた。ここで、マスタおよびスレーブロボットには水平面内で動作する2台の同型のダイレクトドライブロボットを用いた。また、マスタおよびスレーブロボットの先端に力センサを取り付け、スレーブロボットの先にはクランクを取り付ける。2台のロボットの関節角度情報、および先端の接触力情報はパルスカウンタボードおよびA/D変換ボードを経由して計算機に入力され、実時間オペレーションシステムVxWorksとDSPによってそれぞれのロボットの関節駆動トルクを計算する。この駆動トルク情報をD/A変換ボードからロボットコントローラに送ることにより、ロボットを駆動する。ここで、スレーブロボットはマスタロボットとの関節角度偏差による位置運



図(6) 実験結果 (条件 A)



図(7) 実験結果 (条件 B)



図(8) 実験結果 (条件 C)

動制御を行うものとした。

実験結果を図(6)から図(8)に示す。ここで、図(6)はマスタロボットに対して何も制御補償を加えない場合(条件 A)、図(7)は作業対象であるクランクのモデルのみを用いた場合(条件 B)、図(8)は実際にスレーブロボットから得た情報によってマスタロボットに補償を施した場合(条件 C)を示す。また、各図(a)は基準座標における各ロボット手先軌道、各図(b)は時間-クランク回転角速度、各図(c)は半径方向の接触力、各図(d)は時間-接線方向の接触力を示す。

これらの結果を比較すると、マスタロボットを自由に動かすことができる場合は、オペレータは作業対象の拘束を感じることができないため、オペレータとマスタロボットの手先軌道はスレーブロボットの手先軌道、つまり実際のクランク軌道からずれを生じている。また、スレーブロボットは作業対象であるクランクによって拘束を受け、かつ、マスタロボットの位置との偏差によって制御されているため、スレーブロボット手先には大きな接触力が発生している。作業対象の拘束モデルのみを用いた場合には、図(7)に示すように、マスタロボットの手先軌道はスレーブロボットの実際の位置とほぼ一致しており、クランクから受ける接触力も望ましい値に制御できている。ただし、モデルの不確かさの影響を考慮するためには、直接スレーブロボットからフィードバック情報を得る方が望ましい。しかし、この場合には図(8)に示すように、手先軌道や手先の接触力は振動を起し、モデルのみを用いた場合と比較すると、あまり望ましくない結果となった。この主な原因は、マスタ-スレーブ間動作時間および位置の遅れや、作業環境との接触による反力を制御に用いたバイラテラル制御の不安定性から生じものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、動的作業環境における人間の作業技能の数理的な解析から、人間は拘束方向の力を利用することによって腕と作業対象を含めたシステムの不安定性を積極的に利用していることを示した。

また、テレマニピュレーションによって人間の巧みな作業技能を実現するためには、オペレータに対して、あたかも直接作業しているように感じさせるように環境を示すことが有効であり、作業対象のモデルを用いることによって、より効率よくクランクの回転を行うことが可能であることを示した。

## 参考文献

- 1) 横小路, 吉川: 理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.1, pp.56-63, 1991
- 2) 館, 柳: インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (I) (II) (III), 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.3, pp.241-264, 1990, Vol.10, No.3, pp.418-421, 1992
- 3) R.J.Anderson and M.W.Spong: Bilateral Control of Tele-operators with Time Delay, IEEE Trans. Auto-matic Control, AC-34-5, 494/501, 1989
- 4) Kazerooni, T. I. Tsay and K. Hollerbach: A Controller Design Framework for Telerobotic Systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.1, No.1, pp.50-62, 1993
- 5) M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian: Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via  $\mu$ -Synthesis, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.11, No.1, pp.105-116, 1995
- 6) 吉川, 横小路: 環境とオペレータ特性の不確かさを考慮したマスタ・スレーブシステムのロバスト制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.836-845, 1996
- 7) 太田, 羅, 伊藤: 作業環境との相互作用のもとの生体運動解析, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-2, No.7, 1997, ページ未定

(受理 平成10年3月20日)