躍度最小モデルを用いた動作予測に基づく 人間-ロボット協調作業*

前田 雄介^{*1}, 原 崇之^{*1}, 新井 民夫^{*2}

Human-Robot Cooperative Manipulation with Motion Estimation Using Minimum-Jerk Model

Yusuke MAEDA, Takayuki HARA and Tamio ARAI^{*3}

^{*3} Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In this paper, a control method of robots for human-robot cooperative manipulation is investigated. We propose estimating human motion using the minimum jerk model for smooth cooperation. Using nonlinear least-squares method, we identify two parameters of the minimum-jerk model in real-time. The estimated position of the human hand is used to determine the desired position of the end-effector of the manipulator in virtual compliance control. The motion estimation enables robots to coordinate actively even for unknown trajectories of handled objects that human partners intend. We implemented the proposed method on an industrial 6-degree-of-freedom manipulator with a force sensor. In experiments of cooperative manipulation of a rubber pipe, the motion estimation improved human feeling in coordination. The improvement was quantitatively evaluated from the viewpoint of "unnecessary energy transfer."

Key Words: Robot, Manipulator, Motion Control, Human-Robot Cooperation, Cooperative, Manipulation, Minimum-Jerk Model, Energy Transfer

1. は じ め に

人間とロボットの協調は、人の知能とロボットのパワーの組み合わせにより、多くの複雑な作業を実現する可能性を持っている。人間とロボットによる協調物体操作(図 1)はその 1 つの典型例であり、近年研究が活発に進められている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。

人間とロボットの協調物体操作では、ロボットを人間にとって扱いやすくするために、人間の動作特性を模倣してロボットの制御を行うことが有効であると考え

えられる。Ikeura ら⁽¹⁾や林原ら⁽⁸⁾は、人間同士の協調物体操作からインピーダンス制御のパラメータを決定し、ロボット制御に適用した。しかしこれらの手法はバネ係数をゼロとしているため、物体操作方向に対しては、ロボットは反力を発生しながら受動的に追従することになる。Rahman らは、対象物の基準位置を固定した上でバネ係数を可変に制御することで、より積極的にロボットを動かす手法を示している⁽⁴⁾が、インピーダンスパラメータの時間変化を事前に与える必要があるため、特定の軌道にしか有効でない。したがって、どのように対象物を動かすべきか事前に分かっている場合にしか適用できないという難点がある。

Rahman ら⁽⁴⁾, Tsumugiwa ら⁽⁹⁾は、人間とロボットの間の協調物体操作において、人間にとって扱いやすい特性をロボットに持たせた結果として、対象物の搬送軌道が躍度最小軌道⁽¹⁰⁾に近いものになったと報告している。これは、人間が物を動かす際の自然な動きのモデルが躍度最小軌道であることを考えると、妥当な結果であると言える。そこで、ここでは逆に、躍度最小モデルを利用して人間の動きをリアルタイムに予測することによりロボットの制御を行う手法を提案する。これにより、未知の搬送軌道に対しても、ロボットを

Fig. 1 Human-Robot Cooperative Manipulation

* 原稿受付 2001 年 12 月 6 日.

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1).

^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科.

E-mail: maeda@prince.pe.u-tokyo.ac.jp

積極的に人間に協調させることを目指す。

2. 仮想コンプライアンス制御

ここでは協調作業の実現に、通常の位置制御マニピュレータを使用することを想定する。ロボットの動作に柔らかさを持たせるため、力センサを利用した仮想コンプライアンス制御⁽¹¹⁾を行う。ただし、本論文では、並進の3自由度に関してのみコンプライアンスを与えることとする。

離散時間系の仮想コンプライアンス制御では、ロボットの動作は以下の式より決定できる。

$$M \frac{(x_{n+1} - x_n) - (x_n - x_{n-1})}{(\Delta t)^2} = f_n - D \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta t} - K(x_n - \hat{x}_n) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、 M , D , K は仮想質量・粘性・バネ係数であり、 x_n と $\hat{x}_n$ はそれぞれ第 n サンプル時間での手先位置の実際値および目標値である。また、 f_n は力センサによって測定される外力、 Δt がサンプリング周期である。

仮想コンプライアンス制御では、 $K \equiv 0$ (もしくは等価的に $\hat{x}_n \equiv x_n$) の「直接教示モード」を用いて、ロボットを外力によって受動的に動かすことも可能であるが、本論文では、人間の動作の予測に基づいて $\hat{x}_n$ をリアルタイムに変えることで、より積極的にロボットを動作させることを考える。

3. 人間の動作予測

躍度最小モデル⁽¹⁰⁾では、人間の腕の動作は、以下のような評価関数を最小化するような軌道として定式化される。

$$J = \int_0^{t_f} \|\ddot{x}\|^2 dt \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、 t_f は動作に要する時間である。 $\dot{x}(0) = \dot{x}(t_f) = 0$ および $\ddot{x}(0) = \ddot{x}(t_f) = 0$ の場合は、躍度最小軌道は以下のような5次関数の形で書くことができる。

$$x = g(t; t_f, x_f) \\ = x_0 + (15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3)(x_0 - x_f) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで x_0 と x_f はそれぞれ手先のスタート位置およびゴール位置である。また、 $\tau = t/t_f$ とする ($0 \leq \tau \leq 1$)。

躍度最小モデルは人間-ロボット協調作業にも適用可能である⁽⁴⁾ことから、ここではこのモデルを使って、人間の動作の予測を行うことを考える。協調物体操作においては、人間の手先とロボットの手先の間の位置

関係がほぼ一定なので、以降ではロボットの手先軌道に対して躍度最小モデルを用いた予測を行う。式(3.2)の未知パラメータは t_f と x_f であるので、これらが推定できれば良い。本論文では、下記の評価関数を最小にするように、重みつき非線形最小二乗法を用いて決定する。

$$\sum_{i=0}^n (\alpha^{n-i} \|x_i - g(i\Delta t; t_f, x_f)\|)^2 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ただし、 α は忘却係数 ($0 < \alpha < 1$) である。非線形最小二乗法として Levenberg-Marquardt 法⁽¹²⁾を利用し、 t_f と x_f を推定する。そして、次のサンプリング時間での仮想コンプライアンス制御の目標位置を、予測結果から

$$\hat{x}_{n+1} = g((n+1)\Delta t; t_f, x_f) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

と決める。このような動作予測に基づく制御により、「直接教示モード」より積極的にロボットを動かすことが可能となる。動作予測は毎サンプリング時間で行い、目標位置はリアルタイムに決定される。

ただし、物体操作の最初の段階では、対象物位置のデータが少ないため、それを用いたパラメータ推定は不安定になってしまう。また、協調動作の最終段階では、動作予測に基づく制御が人間の意図どおりの位置決めを妨げる危険がある。そこで、仮想バネ係数 K を次式のように台形状に変化させることによって、動作の初期段階および最終段階では直接教示モードで動かす。

$$K = \alpha K_0 \\ \alpha = \begin{cases} 0 & (0 \leq \tau \leq p) \\ (\tau - p)/(q - p) & (p \leq \tau \leq q) \\ 1 & (q \leq \tau \leq 1 - q) \\ (1 - p - \tau)/(q - p) & (1 - q \leq \tau \leq 1 - p) \\ 0 & (1 - p \leq \tau \leq 1) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

K_0 , p , q はすべて定数である ($0 \leq p \leq q \leq 0.5$)。なお、 t_f は未知であるため、このバネ係数の制御も動作予測に基づいて行われるということに注意されたい。

4. 協調物体操作の実験

4.1 実験システム 人間-ロボット間の協調物体操作のための実験システムを図2に示す。操作対象物としては、長さ 500mm・質量 1.6kg・曲げ剛性約 15Nm² のゴムパイプを用いた。一方の端を人間が、もう片方をロボットが把持することにより、協調してこの物体を動かす。ロボットとしては、16ms 間隔での位置制御が可能な6自由度マニピュレータを用いた。また、仮想コンプライアンス制御のため、手先に6軸

力センサを設けた。力センサの値は 2ms 間隔で取得できる。

また、人間が対象物に及ぼす力のデータを計測するために、人間が把持する側にも 6 軸力センサを設けている。さらに、人間の動作軌跡を得るため、2 台の CCD カメラを用いた三次元運動計測装置（応用計測研究所製 VideoTracker G280）を利用している。この運動計測装置では、人間の手先に取り付けられたマーカーを観測し、DLT (Direct Linear Transformation) 法⁽¹³⁾を用いることにより、手先の座標を 16ms 間隔で取得することができる。なお、これら人間側のセンサは実験結果の解析のために用いるものであり、ロボットの制御はあくまでロボット側のセンサのみに基づいて行われる。

4.2 協調物体操作 人間とロボットの間での協調物体操作の実験を行った。ここでは単純化のため、対象作業を 1 次元の水平な物体操作とする。具体的には、対象物の長手方向に垂直な水平方向（これを x 軸方向とする）の 1 次元に対してのみ動作予測に基づく目標軌道を設定し、それ以外の方向には固定の目標位置を与える。これによって、 x 軸方向以外には対象物が動きにくくなり、搬送軌道が実質的に 1 次元の並進運動と見なせるようになる。人間が対象物を初期位置から（ロボットにとって未知の）目標位置まで、任意の（ロボットにとって未知の）速度で搬送し、それにしたがってロボットが協調動作する。

比較のため、動作予測に基づく我々の提案手法と、動作予測を行わない（ x 軸方向のみに限った）直接教示モードの場合での実験を行った。なお、仮想インピーダンスパラメータは、ロボット単体の安定条件内で、試行錯誤により

$$M = \begin{bmatrix} 1.79 & 0 & 0 \\ 0 & 1.79 & 0 \\ 0 & 0 & 1.79 \end{bmatrix} [\text{kg}] \dots\dots\dots(4.1)$$

$$D = \begin{bmatrix} 48.0 & 0 & 0 \\ 0 & 48.0 & 0 \\ 0 & 0 & 48.0 \end{bmatrix} [\text{Ns/m}] \dots\dots\dots(4.2)$$

$$K_0 = \begin{cases} \begin{bmatrix} 800 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 800 \end{bmatrix} [\text{N/m}] & \text{(動作予測ありの場合)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 800 \end{bmatrix} [\text{N/m}] & \text{(動作予測なしの場合)} \end{cases} \dots\dots(4.3)$$

と決定した。また、その他のパラメータは

$$\alpha = 0.91, p = 0.1, q = 0.2, \Delta t = 16[\text{ms}]$$

とした。

図 3、図 4 は、0.25m の協調搬送を行った場合の典型的な動作結果（ロボットおよび人間の手先の速度と位置）である。これらを含め、以降のグラフはすべて、 x 軸方向の成分を表したものである。なお、それ以外の速度成分は、ピーク値で比較して x 軸方向の 1/10 以下と無視できるレベルである。動作予測がある場合は、それに基づいてマニピュレータが積極的に動作するため、人間とロボットの速度プロファイルは躍度最小軌道と似た釣鐘型になっている。この場合、人間は対象物をほぼ自分の意図どおりに動かすことができおり、操作が「軽い」と感じている。なお、ロボットの動作に若干の遅れが生じているのは、主に対象物の弾性による。

一方、動作予測を行わない場合、人間の速度プロフ

(a) Schematic View of Experimental Setup

(b) A Scene of Cooperative Manipulation

Fig. 2 Experimental Setup for Cooperative Manipulation

(a) with estimation

(b) without estimation

Fig. 3 Motion in Cooperative Manipulation (Velocity)

ファイルは途中で頭打ちになっており、躍度最小軌道とはかなり異なったものになっている。これは、ロボットの反応が悪いために、対象物を思い通りに動かせていないことを意味しており、このとき操作者は、操作が「重い」と感じた。

図 5 は、図 3 (a) の場合よりゆっくり対象物を動かした場合のグラフである。操作の速度が遅い場合は対象物の弾性による影響が大きくなり、人間とロボットの速度プロファイルは少し異なったものになってしまうが、人間の動作は依然として躍度最小軌道に近い動作を実現できている。今回は弾性体を対象物として実験を行ったが、剛体の対象物を用いた場合は人間の力がよりダイレクトにロボットに伝わるため、ロボットの動作遅れが小さくなることが期待される（ただし、系全体の安定性のために、インピーダンスパラメータの修正が必要になる可能性がある）。

なおこの実験において、式(3.3)の評価関数を最小化するための Levenberg-Marquardt 法の反復回数を最大 6 回までとしたところ、実験に用いた PC (Pentium-200MHz) では制御周期の 16ms 以内で解を求めることができた。

4.3 実験結果の定量的評価 ここでは、提案手法による人間の操作感の改善を、定量的に評価するこ

(a) with estimation

(b) without estimation

Fig. 4 Motion in Cooperative Manipulation (Position)

とを考える。図 6 は協調搬送中のエネルギーの流れを示したものである。これらのエネルギー授受量は、ロボット側の手先位置および手先の力センサの値、また人間側の手先位置（運動計測装置で取得）および手先の力センサの値からそれぞれ計算した。人間から対象物へのエネルギー授受量 (E_h とする)、およびロボットから対象物へのエネルギー授受量 (E_r とする) に対し、その和 $E_h + E_r$ が最終的に対象物を加減速するために用いられたエネルギーとなる。操作の前半（加速段階）では、エネルギーは人間から対象物およびロボットへと流れる（図 7）。一方減速時には、人間および対象物からロボットへとエネルギーが流れる。そこで、本来の対象物の加減速に関係ないエネルギーの流れを「不要なエネルギーの授受」と考え、その量を以下の式で定義する。

$$E_{\text{unnecessary}} = \frac{1}{2} \int (|E_h| + |E_r| - |E_h + E_r|) dt \quad \cdots (4.4)$$

$E_{\text{unnecessary}}$ は図 8 中の斑点で表された領域の面積に相当する。なお、この斑点で表された部分とハッチングされた部分の面積は等しいことに注意されたい。

「不要なエネルギーの授受量」は、人間とロボットの間での不要な相互作用の量を表しており、これを減らすことは、物体の運搬方向の内力を減らすことに対応する。不要な相互作用量は、部分系間の不適応を表

Fig. 5 Slower Manipulation with Estimation

(a) with estimation

(b) without estimation

Fig. 6 Energy Transfer in Cooperative Manipulation

す指標としても利用されており⁽¹⁴⁾、これを協調作業の評価に用いるのは多くの場合で妥当であると考えられる。ただし、作業の目的や制約条件から、単純に「不要なエネルギーの授受量」を減らすことが不適切になる場合もある。例えば、片側拘束によって対象物を把持するような場合⁽¹⁵⁾（対象物の安定性を維持するために、一定の内力をかけざるを得ない）や、ロボットの直接教示における微小位置決め⁽¹⁶⁾（人間の動きに逆らう力を加えて位置決めをやすくする）などである。

3人の操作者について協調搬送の実験を行い、そのときの $E_{\text{unnecessary}}$ （5回の平均）を表したのが（図9）である。人間の動作予測を行うことで、不要なエネルギー

Fig. 7 Energy Transfer in Acceleration

Fig. 8 Schematic View of Energy Transfer by Human and Robot

Fig. 9 Average Unnecessary Energy Transfer with/without Motion Estimation

ギー授受量が減少していることが見て取れる。なお、操作者間の不要なエネルギー授受量の違いは、主に操作のスピードの違いによるものである。

5. おわりに

本論文では、人間-ロボット協調作業において、人間の動作のリアルタイム予測に基づくロボットの制御手法を提案した。動作予測に躍度最小モデルを用いることで、未知の搬送軌道にも対応可能なロボットの制御を実現した。

この制御手法を6自由度のマニピュレータ上に実装して協調物体操作の実験を行った結果、人間の操作感の改善が見られた。また、この改善は、「不要なエネルギー授受量」の減少として、定量的に評価できることが分かった。

今後の課題としては、より複雑な物体操作への応用

が挙げられる。躍度最小モデルでの予測誤差に応じて仮想バネ定数の制御や過去の履歴の破棄を行うことで、ある程度複雑な搬送軌道にも対応が可能であると考えられる。

謝 辞

本研究は IMS/HMS (Holonc Manufacturing Systems) プロジェクトの一環として行われた。

文 献

- (1) R. Ikeura and H. Inooka: "Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human," Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1995), pp. 3097~3102.
- (2) M. Al-Jarrah and Y. F. Zheng: "Arm-Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control," Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1997), pp. 895~901.
- (3) J. Y. S. Luh and S. Hu: "Interactions and Motions in Human-Robot Coordination," Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1999), pp. 3171~3176.
- (4) M. M. Rahman et al.: "Investigating the Impedance Characteristic of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Human Operators," Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, (1999), pp. 676~681.
- (5) K. Kosuge et al.: "Mobile Robot Helper," Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2000), pp. 583~588.
- (6) 田窪, 荒井, 谷江, 林原: "人とロボットによる長尺物の協調運搬 (仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法)," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 66, No. 648, (2000), pp. 2677~2684.
- (7) 山田, 大東, 酒井, 梅谷: "人間/ロボット共同搬送作業において作業者の意向を反映させるためのヒューマンインターフェイスの提案," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 67, No. 656, (2001), pp. 1069~1076.
- (8) 林原, 園田, 田窪, 荒井, 谷江: "人とロボットによる長尺物の協調運搬 (人との協調挙動に基づく鉛直平面内の制御方法の検討)," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 67, No. 653, (2001), pp. 162~169.
- (9) T. Tsumugiwa et al.: "Variable Impedance Control with Regard to Working Process for Man-Machine Cooperation-Work System," Proc. of 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (2001), pp. 1564~1569.
- (10) T. Flash and N. Hogan: "The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model," J. of Neuroscience, Vol. 5, No. 7, (1985), pp. 1688~1703.
- (11) 平林, 杉本, 荒井, 坂上: "多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御," 計測自動制御学会論文誌, Vol. 22, No. 3, (1986), pp. 343~348.
- (12) W. H. Press et al.: "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing," Cambridge University Press, (1992).
- (13) R. Shapiro: "Direct Linear Transformation Method for Three-Dimensional Cinematography," Research Quarterly, Vol. 49, No. 2, (1978), pp. 197~205.
- (14) 伊藤, 湯浅, 伊藤: "自律分散システムの適応理論," 計測自動制御学会論文誌, Vol. 35, No. 5, (1999), pp. 684~692.
- (15) 中村, 永井, 吉川: "複数のロボット機構による協調的あやつりの力学," 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 5, (1986), pp. 489~498.
- (16) 酒井: "ロボットの直接教示," 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, (1995), pp. 627~628.