カメラ搭載型多自由度マニピュレータの機械特性と ビジュアルフィードバック特性を考慮した 拘束力学系における協調ハンドリング制御法

Cooperative control of multi-DOF manipulator with cameras using visual feedback
and mechanical characteristics in constraint condition

○学 倉持勇喜(岩手大)^{*1} 非 大森達登(岩手大)^{*1} 非 長谷川駿(岩手大)^{*1} 正 湯川俊浩(岩手大)^{*1}

Yuki KURAMICHI, Tatsuto OMORI, Syun HASEGAWA, Toshihiro YUKAWA

^{*1}Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate, Japan

Key Words: Cooperative Control, Constraint Condition, Vision Sensor, Hough Transform, Serial Manipulator

1. 緒言

本研究では双腕マニピュレータのエンドエフェクタの部分にカメラを取り付け、未知の形状の長尺構造物に対するハンドリングをおこなうために、把持点の認識方法を考える。また、対象物をトラッキングする方法、および把持位置における位置的拘束条件を定めて、双腕マニピュレータを協調制御する方法をシミュレーションにより検証する。

2. 対象物の形状認識

未知形状の長尺構造物を対象物として認識するために、入力画像に対して、ハフ(Hough)変換を用いたライン検知をおこなうことで、対象物の形状を認識する。Hough変換は、角度 θ を変化させながら

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

により距離 ρ を求めるものである。(1)式より直角座標上の点 (x, y) を新しい二次元空間 (θ, ρ) 上に変換すると、直角座標上の一点は $\theta - \rho$ 空間上における一本の曲線に対応する。直角座標上の点が多数あると、 $\theta - \rho$ 空間上に多数の曲線が得られる。 $\theta - \rho$ 空間上でこれらの曲線が共有する点があれば、それは元の $x - y$ 直角座標上では一本の線上に並ぶことになる。一方、Hough逆変換は

$$y = -\left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)x + \frac{\rho}{\sin \theta} \quad (2)$$

$$x = -\left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta}\right)y + \frac{\rho}{\cos \theta} \quad (3)$$

により、 x と y を変化して入力画像上の長尺構造物の外形に直線を描くことである。Hough変換はノイズが大きいと正確な直線の検知ができなくなるため、入力画像に対してノイズ除去をおこない、エッジを検出するためのフィルタ処理をおこなう。本研究ではCannyフィルタを用いる。入力画像にHough変換を適応した画像を図1に示す。

3. 対象物との距離認識

対象物とマニピュレータとの距離を認識するためにステレオマッチングをおこなう。図2に想定する双腕マニピュレータの物理パラメータと姿勢パラメータを示し、図3にエンドエフェクタに取り付けたカメラによるステレオマッチングを示す。マニピュレータが移動するごとに、対象物との距離 l_0 を求めるために必要となるカメラ間の距離 l_c は、時変のパラメータ(図2)を用いて

$$l_c = \sqrt{(x_L - x_R)^2 + (y_L - y_R)^2} \quad (4)$$

と表すことができる。ただし、 x_L , x_R , y_L , y_R は左右のマニピュレータの手先位置の座標である。

4. 把持位置の認識

双腕マニピュレータで対象物を把持するためには、他方のアームの手先位置と対象物の把持位置との距離、および把持位置の位置座標を把握する必要がある。そこで、図2に示すように、マニピュレータを動かしながら、物

体の端点間の角度を二か所以上で測定し、角度の値と角度を測定した位置の関係をもとに計算する。結局、マニピュレータと把持位置との距離 l_A は

$$l_A = \sqrt{l_D^2 + l_A'^2 - 2l_D l_A' \cos \theta_A} \quad (5)$$

となり、把持位置の位置座標は O_L を原点として

$$x = l_0 + l_1 \cos \theta_{1R} + l_2 \cos(\theta_{1R} - \theta_{2R}) + l_A \cos(\theta_{1R} + \theta_{2R} + \theta_B + \theta_H - \theta_{3R}) \quad (6)$$

$$y = l_1 \sin \theta_{1R} + l_2 \sin(\theta_{1R} - \theta_{2R}) + l_A \sin(\theta_{1R} + \theta_{2R} + \theta_B + \theta_H - \theta_{3R}) \quad (7)$$

と得られる。

Fig. 1 The line extraction by Hough transform

Fig. 2 The coordinates of dual-arm manipulator

Fig. 3 The stereo matching

5. ニリンクマニピュレータの状態方程式

ニリンクマニピュレータの運動方程式は

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \quad (8)$$

で与えられる。ただし、 τ は各関節に加わるトルク入力、 $M(\theta)\ddot{\theta}$ は慣性力項、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力およびコリオリ力の項、 $g(\theta)$ は重力項である。簡略化のため、無重力場とする。(8)の系の状態方程式は $\theta = [\theta^T \quad \dot{\theta}^T]^T$ とよくと

$$\dot{\theta}(t) = A\theta(t) + B(t)\tau(t) + H(t) \quad (9)$$

となる。

6. 画像情報に基づく柔軟対象物のトラッキング制御

一方のアームで対象物を把持した後、他方のアームが対象物を把持するため、カメラで対象物の自由端を認識し、トラッキングしながら接近して、把持する問題を取扱う¹⁾。手先位置の座標を $y = [x \ y]^T = [f_x(\theta) \ f_y(\theta)]^T$ とする。 y を時間 t で微分すると $\dot{y} = \partial f / \partial \theta = J_y(\theta)$ である。ここで、 $J_y(\theta)$ はニリンクマニピュレータのヤコビ行列である。 $\dot{y}$ を時間 t で微分すると

$$\ddot{y} = \dot{J}_y(\theta)\dot{\theta} + J_y(\theta)\ddot{\theta} \quad (10)$$

である。ただし、 $\dot{J}_y(\theta)$ は $J_y(\theta)$ を時間 t で微分したものである。各関節に加える制御入力 τ_u は

$$\tau_u = h(\theta, \dot{\theta}) + M(\theta)J_y^T(\theta)\{\ddot{y}_d - \dot{J}_y(\theta)\dot{\theta}\} \quad (11)$$

である。ここで $\ddot{y}_d$ を

$$\ddot{y}_d = \ddot{y}_d + K_v(\dot{y}_d - \dot{y}) + K_p(y_d - y) \quad (12)$$

とすると手先位置に基づくサーボ補償器が得られる。ただし、 $\ddot{y}_d$, $\dot{y}_d$, y_d は目標値、 K_v , K_p はフィードバックゲインである。ここで、対象物の質量や動特性は考慮していないことに注意する。図4で $P_{RS}P_{RF}$ 間はマニピュレータ(R)の目標軌道、 $P_{LS}P_{LF}$ 間に対象物の端の振動やたわみに相当するアーム(L)の目標軌道であり、今回は余弦曲線とした。初期条件を $\theta_{1L} = 0.75\pi$, $\theta_{2L} = -0.50\pi$, $\theta_{1R} = 0.50\pi$, $\theta_{2R} = 0.25\pi$ と置く。なお、アーム(R)の目標座標は $P_{RF}(0.4, 0.5)$ である。

7. 拘束条件に基づく双腕マニピュレータの協調制御法

物体を双腕マニピュレータで把持した状態でハンドリングさせるために、双腕マニピュレータの手先位置に位置的拘束条件を与えて協調制御する方法を考える²⁾。

双腕マニピュレータの系全体の状態方程式は(9)式を用い、 $\theta_H(t) = [\theta_L(t)^T \quad \theta_R(t)^T]^T$ とすると

$$\dot{\theta}_H(t) = A_H\theta_H(t) + B_H(t)u_H(t) + H_H(t) \quad (13)$$

と表すことができる。つぎに、系全体に対し、把持位置での拘束運動を実現するために、仮想ポテンシャル行列 $F = C^T N \lambda$ を定義する。ここで、 C は系が拘束運動するための条件変数行列、 N は非常に大きいポテンシャルに対応した任意の数からなる対角行列、 λ は未定定数ベクトルである。

Fig. 4 The tracking strategy of the end-effectors

Fig. 5 The cooperative position control

対象物の変形を考慮しない場合には、左右のアームを協調制御するためには、手先の位置と速度が対象物の把持位置の位置と速度に一致する条件を満たす必要がある。つまり、左右のアーム座標を

$$X = [X_L \ Y_L \ \dot{X}_L \ \dot{Y}_L \ X_R \ Y_R \ \dot{X}_R \ \dot{Y}_R]^T = [X_L^T \ X_R^T]^T$$

とすると、 $CX = 0$ が成り立つので

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

となる。 $CX = 0$ の左辺を時間 t で微分すると $d(CX)/dt = \dot{C}X + C\dot{X}$ となるが、 C は定数行列であるから $\dot{C} = 0$ となる。ここで $J_{yH} = \text{blockdiag}\{J_{yL}, J_{yR}\}$ と定義すると $\dot{X} = J_{yH}\dot{\theta}_H$ より $d(CX)/dt = C(J_{yH}\dot{\theta}_H) = 0$ で、 $\dot{\theta}_H$ のパラメータからなる拘束関係が導かれる。よって、拘束力学系の運動方程式は

$$\dot{\theta}_H(t) = A_H\theta_H(t) + B_H(t)u_H(t) + H_H(t) + C^T N \lambda \quad (14)$$

となる。 $C(J_{yH}\dot{\theta}_H) = 0$ であるから λ は、(14)より

$$\lambda = -(CJ_{yH}C^T N)^{-1}CJ_{yH}\{A_H\theta_H(t) + B_H(t)u_H(t) + H_H(t)\} \quad (15)$$

と求められる。よって、状態方程式は、(15)より

$$\dot{\theta}_H(t) = K_H\{A_H\theta_H(t) + B_H(t)u_H(t) + H_H(t)\} \quad (16)$$

となる。ただし、 $K_H = I - C^T N(CJ_{yH}C^T N)^{-1}CJ_{yH}$ である。

(16)式を離散化すると

$$\theta_H(t + \Delta t) = A_H^-\theta_H(t) + B_H^-(t)u_H(t) + H_H^-(t) \quad (17)$$

となる。ただし、 $A_H^- = I + \Delta t K_H A_H$, $B_H^-(t) = \Delta t K_H B_H(t)$, $H_H^- = \Delta t K_H H_H(t)$ である。双腕協調制御のシミュレーションを図5に示す。手先位置の初期条件は $P_s(0, 0.467)$ とする。 P_sP_{LF} が左側、 P_sP_{RF} が右側のマニピュレータに与えた目標軌道、 P_{6s} は六秒後の位置の座標である。

左右のマニピュレータに異なる目標軌道を与えても、拘束が保たれながら P_sP_{6s} と移動することがわかる。

8. 結言

未知の長尺構造物に対して、画像処理を用いて対象物の認識をおこない、対象物を把持するまでのトラッキング制御と、把持後のハンドリング制御法を構築してシミュレーションをおこない、長尺構造物のハンドリング方法の妥当性を検討した。

参考文献

- 1) Handling of a Constrained Flexible Object by a Robot, 1995. 5, "Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 324-329", Toshihiro Yukawa, Masaru Uchiyama and Hikaru Inooka.
- 2) Stability of Control System in Handling of a Flexible Object by Rigid Arm Robots. 1996. 5, "Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2332-2339", Toshihiro Yukawa, Masaru Uchiyama and Hikaru Inooka.