

円筒曲面壁に対する3リンクアームの力と運動の制御シミュレーション

林 大祐*, 吉田 靖夫**

Simulation of Force and Motion Control of Cylindrical Curved Surface Wall
Using a Three-Link Arm

Daisuke HAYASHI* and Yasuo YOSHIDA**

(Received August 31, 2007)

In assembly operation, force control is necessary as well as position control. Rigidities of the arm, the contact body and the force sensor influence the position/force control, but there are many cases that rigidities are unknown. In this study, we have used a three-link whose end-effector has a spring for making position/force control easy. We present simulation results, in which the tip position of the arm is controlled to follow the desired trajectory along with the constraint cylindrical curved surface wall and the tip reaction force that is perpendicular to the curved wall is simultaneously controlled.

Keywords: force control, position control, three-link-arm, cylindrical curved surface wall

1. 緒 言

組立作業などにおいては位置だけではなく力の制御も必要とされる。力制御においてはアーム、接触物体、力センサの各剛性が影響するが、各剛性は未知の場合が多い。ここでは、対象とする壁面が剛体に近い場合を想定し、力制御を容易にするために手先にばねをもつ3リンクアームを使用し、平面壁の場合に引き続いて円筒曲面壁での位置と力を目標値に一致させる制御のシミュレーションを行った結果を報告する。

2. 実験モデル

図1は、リンク長さ l_1, l_2, l_3 ばね定数 K のばねを有する3リンクアームと円筒曲面壁である。関節角を $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ 、ばね圧縮前の手先 T の位置・姿勢を $r_T = [x_T \ y_T \ \phi_T]^T$ とする。手先と壁面の接点 T_w の位置・姿勢を $r_w = [x_w \ y_w \ \phi_w]^T$ とすると、 TT_w の長さ δ はばね圧縮変位を表し、ばね定数 K を掛けたものが第3リンク軸方向の力で、壁面に垂直な反力 F の成分である。目標の手先 T_d の位置・姿勢を $r_d = [x_d \ y_d \ \phi_d]^T$ 、第3関節 J_3 の位置を $r_3 = [x_3 \ y_3]^T$ 、円筒曲面壁の中心座標 O_r の位置を $r_o = [x_o \ y_o]^T$ とし、その半径を R とした。

3. 制御方法

圧縮前の手先 T の位置 x_T, y_T と第3関節 J_3 の位置 x_3, y_3 は次式で求められる。

$$x_T = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

$$y_T = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$x_3 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

$$y_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

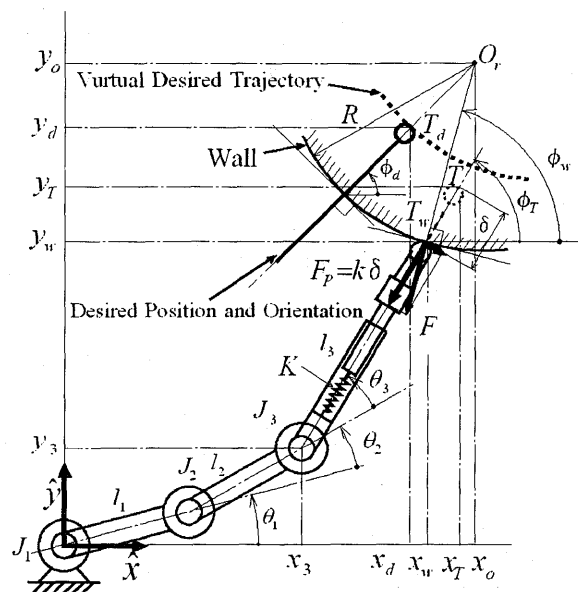


Fig.1 Three link arm and cylindrical curved wall

* 機械工学専攻大学院生 (Graduate student, Department of Mechanical Engineering)

**機械工学科(Department of Mechanical Engineering)

(1)式より第3リンク J_3T の直線式は次式となる.

$$y = ax + b \quad (3)$$

$$a = \tan(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), \quad b = y_3 - ax_3$$

曲面壁は中心座標 O_r の位置と, 半径 R の円より,

$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 = R^2 \quad (4)$$

手先が壁と接触する座標 T_w の位置は, (3)式と(4)式の交点となる.

$$x_w = \frac{x_o - a(b - y_o) \pm \sqrt{\{x_o - a(b - y_o)\}^2 - (1 + a^2)(b - y_o)^2 + x_o^2 - R^2}}{1 + a^2}$$

$$y_w = ax_w + b \quad (5)$$

なお, 根号の前に±が生じるが, 半円の左側のみを使用するためマイナスを使用する. (1)式と(5)式より圧縮変位 δ が得られ, 第3リンク軸方向に発生する圧縮力 F_p が求まる.

$$F_p = K\delta = K\sqrt{(x_T - x_w)^2 + (y_T - y_w)^2} \quad (6)$$

壁面法線方向に発生する壁反力 F は次式となる.

$$F = F_p / \cos(\phi_w - \phi) \quad (7)$$

$$\phi_w = \tan^{-1} \frac{y_o - y_w}{x_o - x_w}, \quad \phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

ここで, ϕ_w は T_w 点での壁法線の傾き, ϕ は第3リンクの傾きを表す. 壁面反力 F を目標力 F_d にて押し付けながら手先の位置・姿勢 r_T を目標軌道 r_d に追従するようなハイブリッド速度制御駆動方式による積分形コントローラを作成する. 目標軌道 r_d は円筒

曲面壁の目標位置と円筒壁法線方向の目標力 F_d による圧縮変位 ($= F_d / K$) から算出している. $\ddot{x} = u_x$, $\ddot{y} = u_y$ の線形化をもとにした積分型デジタルサーボコントローラを作成する. サンプルングタイム T , ステップ $k = 0, 1, 2, \dots$ である.

$$u_{xk} = u_{x,k-1} + {}^w\ddot{x}_{dk} - {}^w\ddot{x}_{dk-1} + k_{x0}e_{xk} + k_{x1}S_{xk} + k_{x2}\dot{S}_{xk} \quad (8)$$

$$u_{yk} = u_{y,k-1} + {}^w\ddot{y}_{dk} - {}^w\ddot{y}_{dk-1} + k_{y0}e_{yk} + k_{y1}S_{yk} + k_{y2}\dot{S}_{yk}$$

$k_{xi}, k_{yi} (i=0 \sim 2)$ は極指定によるデジタルゲインである. ここで,

$$e_{xk} = x_{dk} - x_k + x_{Fk}, \quad e_{yk} = y_{dk} - y_k + y_{Fk}$$

$$S_{xk} = e_{xk} - e_{xk-1}, \quad S_{yk} = e_{yk} - e_{yk-1}$$

x_{Fk}, y_{Fk} はフィードバック補正位置である.

$$x_{Fk} = (k_f e_{fk} / K) \cos \phi_w \quad (9)$$

$$y_{Fk} = (k_f e_{fk} / K) \sin \phi_w$$

$$e_{fk} = F_{dk} - F_k$$

k_f はアナログゲインである. ここで e_{fk} は目標力 F_{dk} と壁反力 F_k との力偏差である. 次に, 第3リンクが壁面に常に垂直な姿勢となるような制御を行う " $\ddot{\phi} = u_\phi$ " をもとにしたコントローラを作成する.

$${}^w u_{\phi k} = {}^w u_{\phi,k-1} + {}^w \ddot{\phi}_{dk} - {}^w \ddot{\phi}_{dk-1} + k_{\phi 0} e_{\phi k} + k_{\phi 1} S_{\phi k} + k_{\phi 2} \dot{S}_{\phi k} \quad (10)$$

ここで, $e_{\phi k} = \phi_{dk} - \phi_k$, $S_{\phi k} = e_{\phi k} - e_{\phi k-1}$ である. (8)式と(10)式より求められるコントローラ $u_k = [u_{xk} \ u_{yk} \ u_{\phi k}]^T$ を用いて, 関節角加速度 $u_q (= \ddot{q})$ を求める. ただし, $J(q)$ はヤコビアンである.

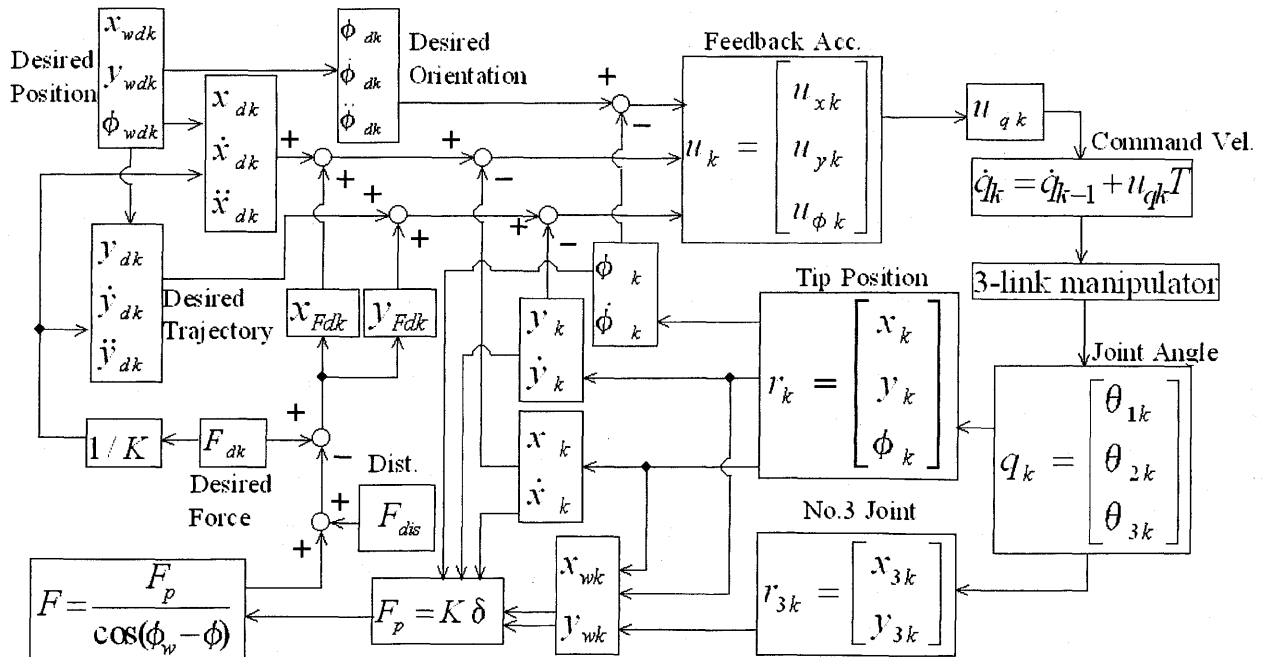


Fig.2 Block diagram

$$u_{qk} = J^{-1}(q_k) \{ \dot{q}_k - J(q_k) \dot{q}_k \} \quad (11)$$

(11) 式を積分して、指令角速度 $\dot{q}_k$ を得る。

$$\dot{q}_k = \dot{q}_{k-1} + u_{qk} T \quad (12)$$

図2にブロック線図を示す。

4. シミュレーション結果

図3は $l_1=0.32\text{m}$, $l_2=0.35\text{m}$, $l_3=0.20\text{m}$, ばね定数 $K=349\text{N/m}$, 円筒曲面壁の半径 $R=0.20\text{m}$ のシミュレーションモデルで、アームの初期と最終の姿勢を示す。マニピュレータの手先を初期位置姿勢 $S[x_s, y_s, \phi_s]^T$ から手先の姿勢を壁面に対して常に垂直を保った状態で一定目標力 $F_d=10\text{N}$ を発生させ最終位置まで移動させる。サンプリングタイムを 0.05s , 移動時間を 20s とした。

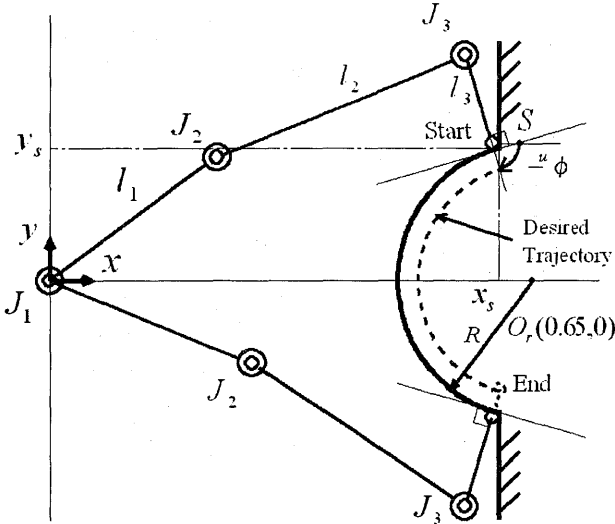
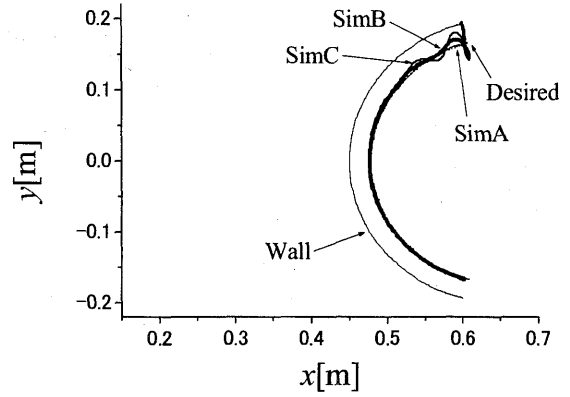


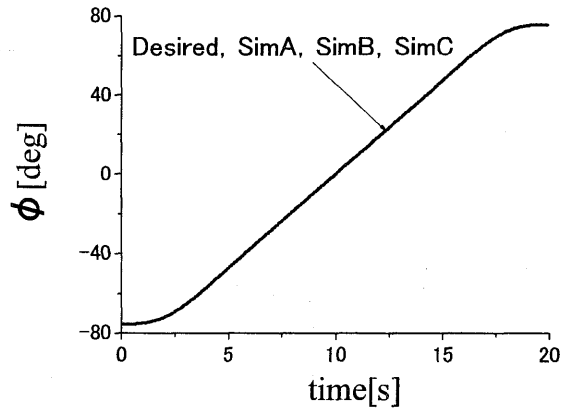
Fig.3 Simulation model

4.1 カフィードバック補償の有無

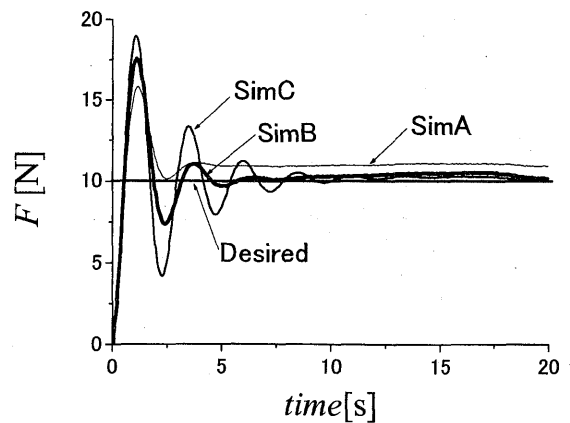
初期位置・姿勢は $S = [0.60, 0.19, 76^\circ]^T$ で壁面に接した状態とし、外乱として $F_{dis}=1\text{N}$ を与えた。カフィードバック補償なし ($k_f=0$) の場合を SimA とし, $k_i=0.5, 1.0$ のフィードバック補償ありの場合をそれぞれ SimB, SimC とし, カフィードバック補償の有無の結果を図4に示す。図4(a)は手先の軌道であり, 横軸が x 値, 縦軸が y 値を示す。壁の内側に目標軌道が存在する。SimA, SimB は目標軌道に速やかに収束しているが, SimC は波打ちながら辿りやや遅れて収束しているのがわかる。



(a) Trajectory of tip end

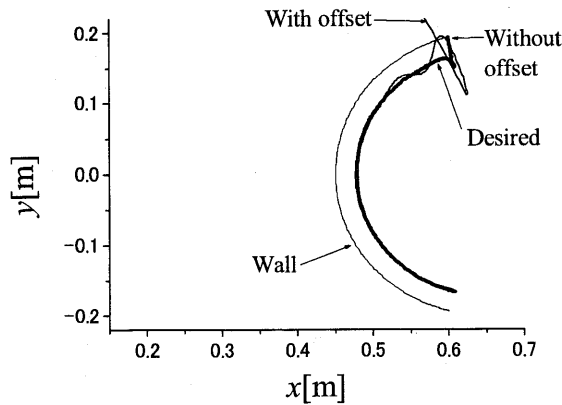


(b) Time response of orientation ϕ



(c) Time response of reaction force F

Fig.4 Simulation of with and without force control compensator



(a) Trajectory of tip end

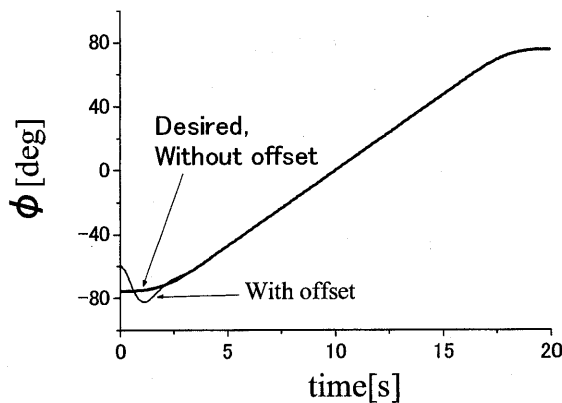
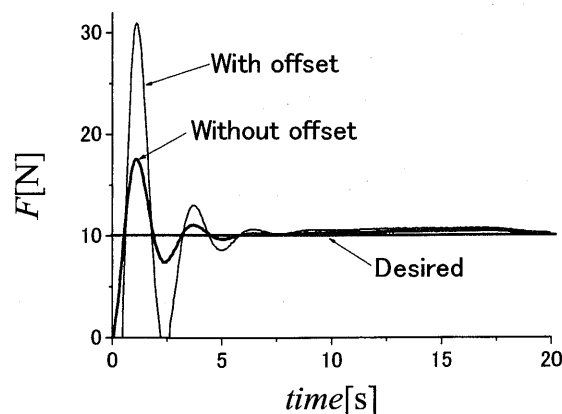
(b) Time response of orientation ϕ (c) Time response of reaction force F

Fig.5 Influence of initial position and orientation

図4(b)は手先の姿勢角 ϕ の応答を示し、すべて目標と完全に一致している。図4(c)は力の応答を示し、力フィードバック補償なしのSimAは外乱による力変化に対応しないため、目標力の10Nを超えた値で収束している。SimB, SimCは力補償により目標力へと近づき、最終的にほぼ一致している。ゲイン k_f の大きなSimCは変動が大きい。

4.2 初期位置・姿勢の影響

初期位置姿勢が前節と同様に手先が壁面に接した状態を Without offset, 手先が壁面より70mm程度離れた状態を With offset と称することにする。外乱を $F_{dis}=1\text{N}$ とし、力フィードバックゲインは $k_f=0.5$ とした。初期位置・姿勢の違うケースの結果を図5に示す。図5(a)は手先の軌道であり, Without offset は仮想目標軌道と近い座標から開始するため速やかに目標軌道を辿っている。With offset は目標軌道に接近する動作が大きいいため開始時の挙動が不安定であるがその後は目標と一致している。図5(b)は手先の姿勢角 ϕ の応答を示している。With offset は初期姿勢の乱れを修正するとそのまま目標軌道と一致する。Without offset は目標軌道と完全に一致している。図5(c)は発生する力の応答を示し, With offset は壁から離れた状態から開始するため強い力フィードバックによって開始2秒ほどで大きな力が発生しているが, 6秒後には目標力とほぼ一致している。

5. 結 言

剛体壁に対する力制御を確実に行うため、手先にばねを有する3リンクアームをとりあげ、ばね圧縮変位を考慮した目標軌道に追従するような位置と力のハイブリッド速度制御方式を開発し、円筒曲面壁でのシミュレーションを行った。力のフィードバック補償を用いることで外乱による力の偏差をなくし、目標力を発生させながら円筒曲面壁ならい動作が行えることがわかった。さらに大きな力が発生しないためには、初期位置を壁に近づけることが肝要であることを示した。今後、このシミュレーション結果をもとに実験を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 都築, 吉田: 3リンクマニピュレータの力制御シミュレーション, 中部大学工学部紀要, vol. 41, pp55-58, 2005