双腕ロボットの物体引き込み動作生成

Object Retracting Motion Planning for Dual Arm Robots

室巻孝郎 [1]
Takao MUROMAKI

1. はじめに

重量物を運搬する機械は,産業ロボットや重機などとして実用化されているが,その運搬方法は,重量物を持ち上げるものである．一方で，大型ロボットを設置するための十分な作業スペースが確保できない場合,別の運搬方法を検討しなければならない．これに対し，本研究では，図 1 に示すように,双腕ロボットを用いて物体を移動させる運搬動作の生成について考える．

双腕ロボットに関して,双腕マニピュレータの協調制御についての研究が行われており [1)], 物体を把持する位置や物体に加える力の制御について検討されている．ただし，これらの研究では，物体をどのような経路で運搬すればよいかについては言及されていない．また，双腕マニピュレータを用いて物体を持ち上げて移動させることを前提としている．

本研究で対象とするのは,双腕ロボットを用いて物体を引きずるようにして動かすときの運搬動作である.床面を引きずるようにして動かすため,物体と床面の摩擦を考慮した運動方程式を求める．次に，事前に与えられた初期姿勢の下で,物体をロボット本体の位置まで移動させる際に必要となるトルクを最小化することを考える.必要なトルクが小さくなることにより,小型の双腕ロボットで物体の運搬を達成することが可能となる．

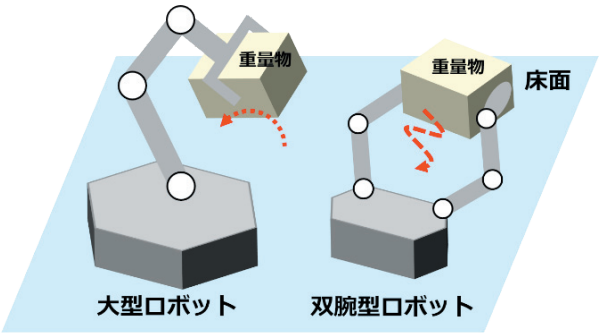

図 1　ロボットを用いた重量物の運搬

2. 双腕ロボットの動力学モデル

2.1 双腕ロボットの動作モデル

図 2 に示すように，水平面内を運動する双腕マニピュレータについて考える．片腕は 2 リンクで構成されており,関節①～④は回転ジョイントとし，アクチュエータによりトルクτ_j $(j = 1,2,3,4)$が与えられる．点⑤, ⑥は物体とマニピュレータ先端の接触部を表しており，物体とマニピュレータ先端は離れることなく自由に回転できる拘束がかけられているものとする．Σ_0は絶対座標系，$\Sigma_i (i = 1, \cdots, 7)$は各リンクや物体に設定されたボディ座標系である．以下では，リンクと物体をまとめてボディと表記する．Σ_0において,水平方向をx, 鉛直方向をyとする．l_iはボディiの長さ，s_iはボディi左端から重心までの距離を表している．物体を 3 つのブロックに分割して扱い,物体を移動させる際には床面との間に摩擦が発生する．また，次節の運動方程式の導出にあたり，以下の仮定を置くものとする．

(1) 各ボディは滑らかに動くものとし，床面との摩擦は考慮しない．

(2) ロボット本体は床面に固定されており，移動しない．

(3) ボディ同士の干渉は考慮しない．

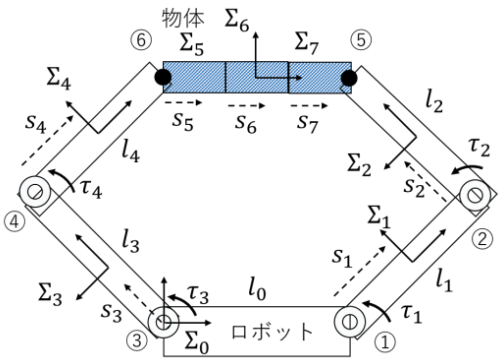

図 2　双腕ロボットの構成と座標系設定

2.2 運動方程式

ボディiの運動を$\boldsymbol{q}_i = [x_i \quad y_i \quad \phi_i]^T$で表し，全一般化座標を

$$\boldsymbol{q} = [x_1, y_1, \phi_1, \cdots, x_7, y_7, \phi_7]^T \tag{1}$$

と定義する．ここで，ボディiの姿勢ϕ_iは，絶対座標系Σ_0のx軸とボディ座標系Σ_iのx_i軸のなす角である．また，回転ジョイントに関する拘束や物体とマニピュレータ先端の接触に関する拘束をま

1 舞鶴工業高等専門学校　機械工学科　准教授

とめて，運動学的拘束$\boldsymbol{C}$として次式で表す．

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} x_1-l_0-s_1C_1 \\ y_1-s_1S_1 \\ x_1+(l_1-s_1)C_1-x_2+s_2C_2 \\ y_1+(l_1-s_1)S_1-y_2+s_2S_2 \\ x_2+(l_2-s_2)C_2-x_7-(l_7-s_7)C_7 \\ y_2+(l_2-s_2)S_2-y_7-(l_7-s_7)S_7 \\ x_3-s_3C_3 \\ y_3-s_3S_3 \\ x_3+(l_3-s_3)C_3-x_4+s_4C_4 \\ y_3+(l_3-s_3)S_3-y_4+s_4S_4 \\ x_4+(l_4-s_4)C_4-x_5+s_5C_5 \\ y_4+(l_4-s_4)S_4-y_5+s_5S_5 \\ x_5+(l_5-s_5)\,C_5-x_6+s_6C_6 \\ y_5+(l_5-s_5)S_5-y_6+s_6S_6 \\ \phi_5-\phi_6 \\ x_6+(l_6-s_6)\,C_6-x_7+s_7C_7 \\ y_6+(l_6-s_6)S_6-y_7+s_7S_7 \\ \phi_6-\phi_7 \end{bmatrix} \tag{2}$$

ここで，C_iは$\cos\phi_i$，S_iは$\sin\phi_i$を表している．拘束による未知反力を表すラグランジュ乗数ベクトル$\boldsymbol{\lambda}$を導入すると，運動方程式は次式で表される[2)]．

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}_q^T\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{C}_q\ddot{\boldsymbol{q}}=-(\boldsymbol{C}_q\dot{\boldsymbol{q}})_q\dot{\boldsymbol{q}}-2\boldsymbol{C}_{qt}\dot{\boldsymbol{q}}-\boldsymbol{C}_{tt} \end{cases} \tag{3}$$

ここで，$\boldsymbol{M}_i$は質量行列であり，対角成分に質量m_iと慣性モーメントI_iが並ぶ行列である．

$$\boldsymbol{M}_i=\begin{bmatrix} m_i & 0 & -m_is_iC_i \\ 0 & m_i & -m_is_iS_i \\ -m_is_iC_i & -m_is_iS_i & I_i+m_is_i^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

また，$\boldsymbol{Q}$は関節のトルクや摩擦による力に関する項であり，以下のように設定する．

$$\boldsymbol{Q}_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_1-\tau_2 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{Q}_2=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_2 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{Q}_3=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_3-\tau_4 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{Q}_4=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_4 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{Q}_i=\begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ 0 \end{bmatrix},\ (i=5,6,7) \tag{5}$$

ここで，F_{ix}，F_{iy}はx方向，y方向の摩擦に関する力である．摩擦に関する力の詳細は次節で述べる．

2.3　摩擦モデル

物体と床面の摩擦を表現するモデルとして単純化摩擦モデル[3)]を適用する．横軸にすべり速度，縦軸に摩擦係数を取った単純化摩擦モデルのグラフを図 3 に示す．図中のμ_sは最大静止摩擦係数，μ_cは動摩擦係数であり，v_s，v_cはしきい速度を表している．x方向の摩擦力F_xは，法線接線力をF_N，すべり速度を$\dot{x}$とすると，以下の３つの場合に分けて与えられる．

(1) $|\dot{x}|\le v_s$の場合

$$F_x=-\frac{\dot{x}}{v_s}\mu_s|F_N| \tag{6}$$

(2) $v_s<|\dot{x}|\le v_c$の場合

$$F_x=-\mathrm{sign}(\dot{x})\left\{\frac{\mu_s-\mu_c}{v_s-v_c}(|\dot{x}|-v_c)+\mu_c\right\}|F_N| \tag{7}$$

(3) $|\dot{x}|>v_c$の場合

$$F_x=-\mathrm{sign}(\dot{x})\mu_c|F_N| \tag{8}$$

y方向の摩擦力F_yについても，y方向のすべり速度$\dot{y}$を用いて同様に与える．

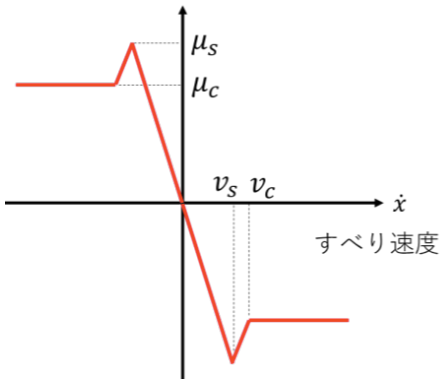

図 3　単純化摩擦モデル

3.　引き込み動作の数値最適化

3.1　最適化問題

双腕ロボットは，初期時刻$t=0$において静止しており，初期姿勢はあらかじめ与えられるものとする．物体を数値シミュレーション終了時刻$t=t_f$までに引き込む場合に，必要なトルクを最小化することを考える．最適化問題を以下で定める．

$$\begin{array}{lll} \text{Minimize} & \mathrm{Max}(\tau_j(t)), & j=1,2,3,4 \\ \text{w.r.t.} & \tau_j(t), & j=1,2,3,4 \\ \text{s.t.} & \mathrm{Min}(y_6(t))\le 0, & 0\le t\le t_f \end{array} \tag{9}$$

目的関数は，関節①～④のトルク$\tau_j(t)$の$[0,t_f]$における最大値であり，設計変数は各関節トルク$\tau_j(t)$とする．制約条件は，$[0,t_f]$において物体重心のy座標が 0 以下となることである．この条件を満たせば，物体がロボット本体の場所まで運ばれていることになる．

次に，設計変数$\tau_j(t)$の探索を行うにあたり，三角関数sinおよびチェビシェフ多項式$T(t)$を用いた級数表現を導入する．

$$\tau_j=\sum_{i=1}^{N_s}\alpha_{ji}\sin(it)\ ,j=1,2,3,4 \tag{10}$$

$$\tau_j = \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_{ji} T_{i-1}(t) \ , j = 1,2,3,4 \tag{11}$$

$$T_0(t) = 1, \quad T_1(t) = t, \\ T_{i+1}(t) = 2tT_i(t) - T_{i-1}(t) \tag{12}$$

この級数表現により，設計変数はトルク$\tau_j(t)$の係数$\alpha_{ji}(i = 1, \cdots, N_*)$となる．なお，$N_*$は，sin を用いる場合は$N_s$であり，チェビシェフ多項式を用いる場合は$N_c$を表すものとする．設計変数$\alpha_{ji}$を$i = 1$から順に並べたものを変数$\boldsymbol{X}$で表現する．

$$\boldsymbol{X} = [\alpha_{11}, \cdots, \alpha_{1N_*}, \cdots, \alpha_{41}, \cdots, \alpha_{4N_*}] \tag{13}$$

3.2　最適化アルゴリズム

式(9)の最適化問題を解くため，進化型計算手法の 1 つである差分進化(Differential Evolution, DE)[4]を使用する．解探索における個体を$\boldsymbol{X}_k(k = 1, \cdots, N_D)$で表し，最良個体$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$を探索する．ただし，物体重心の$y$座標に関する制約を考慮しなければならないため，標準的な差分進化の手順に，以下の修正手順を追加する．

(a) 個体の評価値と最良個体$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$の選定

時刻t_fまでに$y_6 \leq 0$となり制約条件を満たす場合は，$\mathrm{Max}(\tau_j(t))$を個体$\boldsymbol{X}_k$の評価値とする．一方，制約条件を満たさない場合は，個体$\boldsymbol{X}_k$の評価値を∞とする．N_D個の個体の内，評価値が最小となる個体を最良個体$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$とする．ただし，$N_D$個の個体の中に，制約条件を満たす個体が存在しない場合は，$\mathrm{Min}(y_6(t))$が最も 0 に近い個体を$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$とする．

(b) 生存者選択

n世代目の変位ベクトルと個体$\boldsymbol{X}_k^{(n)}$から生成されるトライアルベクトルを$\boldsymbol{U}_k^{(n)}$とする．$\boldsymbol{X}_k^{(n)}$もしくは$\boldsymbol{U}_k^{(n)}$が制約条件を満たしている場合は，評価値の小さい方を次世代の個体$\boldsymbol{X}_k^{(n+1)}$として生存者を選択する．一方，$\boldsymbol{X}_k^{(n)}$と$\boldsymbol{U}_k^{(n)}$共に制約条件を満たしていない場合は，$\mathrm{Min}(y_6(t))$が 0 に近い方を，次世代の個体$\boldsymbol{X}_k^{(n+1)}$として選択する．これにより，世代が進むにつれて制約条件を満たす個体が見つかることが期待される．

4.　数値計算結果

4.1　パラメータ設定

数値計算で使用する物理パラメータおよび最適化のパラメータの設定値について表 1 に示す．長さに関する単位は[m]，質量に関する単位は[kg]で記載している．単純化摩擦モデルのパラメータv_s，v_c，μ_s，μ_cについては，x方向およびy方向で同じ値を使用する．なお，重心位置や慣性モーメントは，各ボディが一様な棒と仮定して計算する．

トルクの表現に関しては，sin の項数N_sおよびチェビシェフ多項式の項数N_cは 6 とした．解探索を行う初期個体を生成する一様乱数の範囲は，$[-10, 10]$とした．初期姿勢は，$\phi_1 = \pi/4$，$\phi_2 = 3\pi/4$，$\phi_3 = 3\pi/4$，$\phi_4 = \pi/4$，$\phi_5 = 0$，$\phi_6 = 0$，$\phi_7 = 0$とし，初期速度はすべて 0 とする．また，シミュレーション終了時刻$t_f = 5$とする．

表 1　各種パラメータの設定値

物理パラメータ			
パラメータ	値	パラメータ	値
$l_i\ (i = 0, \cdots, 4)$	1.0	$l_i\ (i = 5,6,7)$	0.3333
$s_i\ (i = 1, \cdots, 4)$	0.5	$s_i\ (i = 5,6,7)$	0.1667
$m_i\ (i = 1, \cdots, 4)$	2.0	$m_i\ (i = 5,6,7)$	0.6667
$I_i\ (i = 1, \cdots, 4)$	0.1667	$I_i\ (i = 5,6,7)$	0.0062
v_s	0.01	v_c	0.015
μ_s	0.2	μ_c	0.1
最適化のパラメータ			
パラメータ	値	パラメータ	値
N_s	6	N_c	6
N_D	300	世代数	400
交叉率	0.9	スケール係数	0.6

4.2　計算結果

各関節のトルクを sin で表現した場合に得られたトルクパターンを図 4 に示す．トルクの最大値は 0.9512 である．トルクパターンを見ると，τ_1，τ_2およびτ_3，τ_4がほぼ対称な形となっている．このため，双腕ロボットは左右対称の動作を行うと考えられる．$t = [0, t_f]$の区間で 1 秒毎に双腕ロボットと物体の姿勢を描いた図を図 5 に示す．物体の姿勢を水平に保ったまま，両腕を折りたたむようにして物体を移動させている．$t = 4$の時点で物体重心のy座標が 0 に達しており，その後は，物体は移動せず，折りたたまれた両腕が上方に移動している．

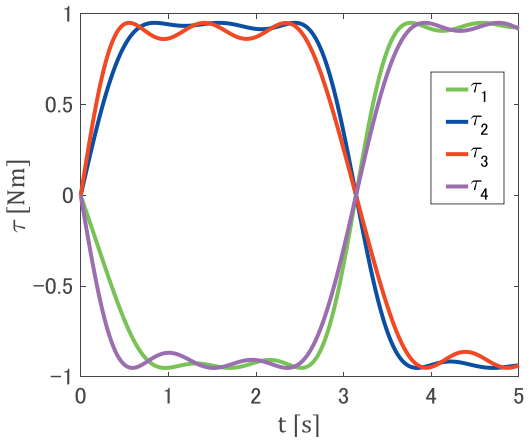

図 4　各関節のトルク(sin)

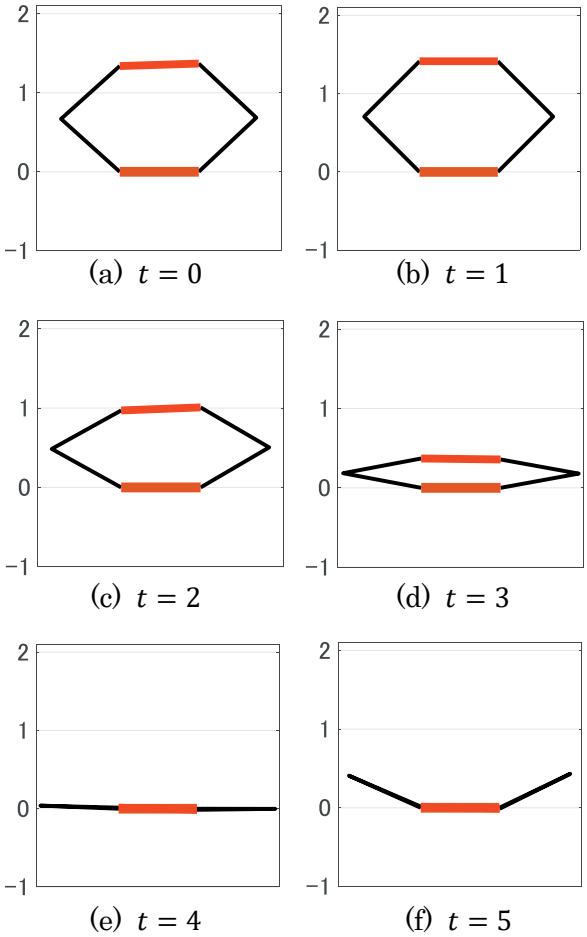

図 5　各時刻における姿勢(sin)

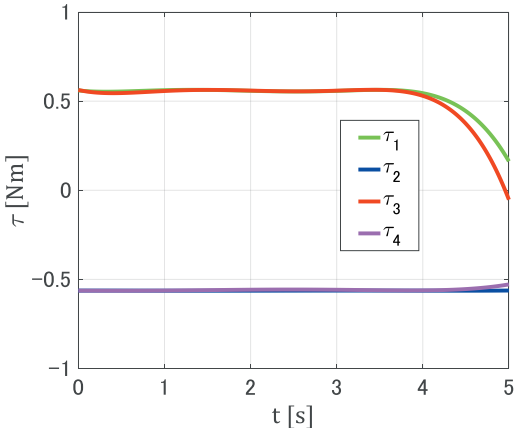

図 6　各関節のトルク(チェビシェフ多項式)

次に, 各関節のトルクをチェビシェフ多項式で表現した場合に得られたトルクパターンを図 6 に示す. トルクの最大値は 0.5637 である. sin の場合の様な対称性は見られないが, トルクの最大値は 60%程度となっている. $t = [0, t_f]$の区間で 1 秒毎に双腕ロボットと物体の姿勢を描いた図を図 7 に示す. 初めに物体を回転させて, 縦に近い状態にしてから, 腕をたたむようにして物体を移動させている. したがって, 物体を水平なまま移動させるよりも, 物体の姿勢を変えて移動させることで, トルクが小さくなることが分かる.

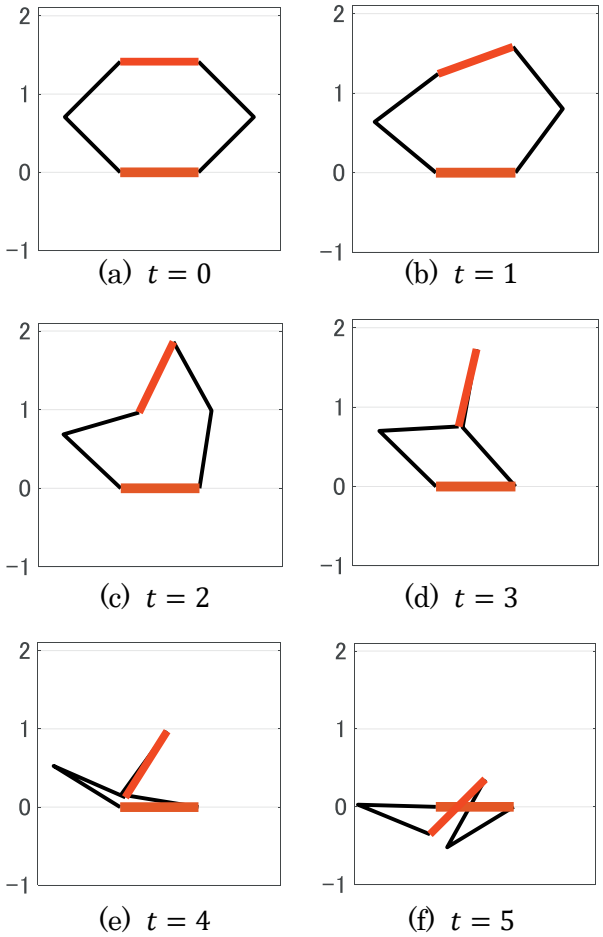

図 7　各時刻における姿勢(チェビシェフ多項式)

5.　おわりに

本研究では, 双腕ロボットが物体を引き込む動作を対象とし, 引き込み動作を数値最適化により生成した. 物体の姿勢を変えずに引き込むよりも, 物体を回してから引き込む方が, 最大トルクが小さくなることを確認した. 今後は, 初期姿勢の違いが動作に与える影響について検討する.

謝辞：本研究は, 公益財団法人津川モーター研究財団 2021 年度研究助成の助成を受けたものです. ここに謝意を示します.

参考文献

1) 山野, 金, 近野, 内山：3 次元双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御実験, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 66, No. 649, 3063-3068 (2000)
2) 岩村：マルチボディダイナミクス入門, 森北出版, (2018)
3) 大山, 杉山:マルチボディダイナミクスのスティック・スリップ摩擦モデルに関する研究, 日本機械学会 D&D2012 USB 論文集, 748 (2012)
4) R. Storn and K. Price：Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, Journal of Global Optimization, Vol. 11, 341-359 (1997)

(2022.12.9 受付)

Object Retracting Motion Planning for Dual Arm Robots

Takao MUROMAKI*
*Corresponding author: t.muromaki@maizuru-ct.ac.jp

Abstract: In this investigation, generation of object retracting motion for dual arm robot consisting of four links is discussed. In particular, a situation in which an object is moved over a frictional floor is considered. The objective is to find the retracting motion with the lowest required torque. First, the equation of motion for dual arm robot is derived. In the dynamic equation, the simplified linear friction model (classical model) is introduced. As a calculation of forward dynamics, the augmented formulation introducing Lagrange multipliers is applied. Then, an optimization problem is formulated to minimize the maximum torque at each joint. The design variables are the time history of joint torque. The time histories of torque are expressed in two ways: Fourier series and Chebyshev polynomial. The optimization problem is solved with an algorithm based on the Differential Evolution. As a result of the optimization, two torque patterns are obtained. One is the motion of pulling the object straight back in its initial position. The other is the motion of rotating the object to face vertically and then folding the arms while retracting the object. The latter motion reduces the maximum torque to about 60%.

Key words: Motion planning, Multibody dynamics, Friction, Differential Evolution