

拮抗腱駆動多関節アームにおける衝撃力緩和と復帰動作

Impact Force Absorption in Antagonistic Wire-driven Multi-joint Arm

○正 井上 貴浩 (岡山県大), 正 平井 慎一 (立命館大)

Takahiro INOUE and Shinichi HIRAI, Okayama Prefectural Univ., inoue@ss.oka-pu.ac.jp

This paper presents a new control method for absorbing impact forces exerted on the tip of a multi-joint robotic arm. In this method, integral controller for generating virtual desired trajectory is hold at the time of impact. We show that the impact force can be absorbed extremely by using the simple control algorithm. In addition, we show that the tip of the robot is forced to move against the applied force in case of lack of the hold operation of integral controller, and resulting in unexpected recoil due to antagonistic nonlinear springs.

Key Words: Impact force, Antagonistic wire driven, Multi-joint robot, Force absorption, Integral controller.

1 緒言

「近い将来ロボットが一家に一台導入される」と言われて久しいが、人とロボットが協調し共存できる社会は親和性の極めて高いロボットの開発の成否にかかっている。少子高齢化社会で起こり得る種々雑多な問題を解決できるロボットや、安心・安全な社会の実現に役立つロボット、便利でゆとりある社会の実現に役立つロボットなど、ロボットが活躍できる場面は極めて多い [1]。しかしながら、現状においては人の足元程度の低い位置で動作するお掃除ロボットが普及しているに過ぎない。各家庭への汎用ロボットの導入事例が皆無であることを考慮すると、共存社会の実現には未だハードルが高いことが示唆される。そのハードルとは共存環境においてロボットが人に危害を加えてしまうことであり、傷害を生じさせないための衝突回避問題が従来からの主流となっている。それらの試みは極論すれば、人とロボットが接触することのない環境を指向するものであり、共存社会を目指すものとは言えない。本研究の目指すところは、近年多発する大規模災害に関して防災から減災へとシフトする流れに類似する。ロボットのいる暮らしの中で起こり得る衝突やそれに起因する傷害を完全に抑え込むのではなく、傷害の程度を和らげる取り組みが必要だと考えられる。そのようなことから本稿では、多関節ロボットアームの手先に突発的な外力が加わったときの応答を観察し、衝撃力を緩和し吸収する簡易機構とそれに適合した一制御手法を提案する。ここでは、非線形バネを介した拮抗型のワイヤ駆動系を扱い、先行研究において提案している冗長関節機構においてもヤコビ行列を利用しない簡易な PID 制御を適用する。本稿で新たに提案する衝撃力緩和のための制御手法は、衝撃力印加時に積分コントローラを一旦停止するという極めてシンプルなオペレーションである。本手法により衝撃力を容易に緩和し、また、コントローラの停止を解除するだけでロボットを元の姿勢に容易に復元できることを明らかにする。

2 拮抗型腱駆動機構における 3 リンクアームの機構

本稿で取り扱う多関節ロボットは先行研究 [2] において定義した 2 次元平面内で動作する 3 リンクを有するロボットアームであり、図 1-(a) のように y 軸の負の方向に重力が加わるものとする。また、図 1-(b) のように駆動系の特徴として非線形バネとワイヤが直列につながり DC モー

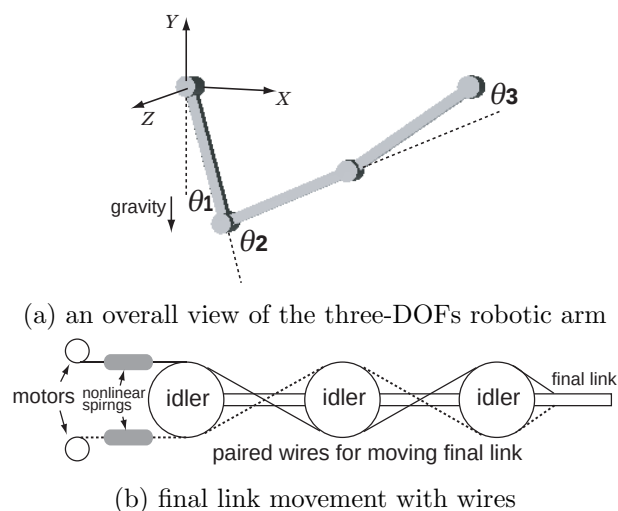


Fig.1 A serial link robotic manipulator having three rotational joints in two dimensional xy -plane.

タで引っ張ることで各関節を駆動する。このアクチュエータが各関節に拮抗的に配置されており、3つの関節をすべて駆動しようとする合計6つのアクチュエータが必要となる。

本稿で取り扱う 3 リンク冗長アームの模式図を図 2 に示す。 xy 平面内において第 i リンク長を L_i 、各重心位置ベクトルを $\mathbf{p}_{ci}$ 、各リンクの関節角度を θ_i とし回転関節の半径を R とすると、各重心位置 $\mathbf{p}_{c1} = [p_{c1x}, p_{c1y}]^T$, $\mathbf{p}_{c2} = [p_{c2x}, p_{c2y}]^T$, $\mathbf{p}_{c3} = [p_{c3x}, p_{c3y}]^T$ は次式となる。

$$\mathbf{p}_{c1} = [l_1 S_1, l_1 C_1]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{p}_{c2} = [L_1 S_1 + l_2 S_{12}, L_1 C_1 + l_2 C_{12}]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_{c3} = [L_1 S_1 + L_2 S_{12} + l_3 S_{123}, L_1 C_1 + L_2 C_{12} + l_3 C_{123}]^T. \quad (3)$$

ここで、 $l_i = L_i/2$ とし、 S_{123}, C_{123} はそれぞれ $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$, $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ の略記とする。次に、システム全体の運動エネルギー K は、各リンクに拮抗配置された合計 6 個のアクチュエータ (DC モータ) のダイナミク

スまで含んだ以下の式となる。

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 m_i \dot{\mathbf{p}}_{ci}^2 + \frac{1}{2} I_{c1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} I_{c3} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 I_{mi} \dot{\phi}_j^2. \quad (4)$$

ここで、 m_i を各リンクの質量、 I_{ci} を各リンクの慣性モーメント、 I_{mi} を各モータの慣性モーメント、 ϕ_j を各モータ軸の回転角度と定義する。次に、アクチュエータと直列に接続された非線形ばねの伸びによる弾性エネルギーは、 r を腱を巻き取るために各モータに取り付けられたプーリの半径と定義すると、各リンクごとに以下の式となる。

$$P_{e1} = \frac{1}{2} k \sum_{j=1}^2 (\Delta x_o + r \phi_j + (-1)^j R \theta_1)^3, \quad (5)$$

$$P_{e2} = \frac{1}{2} k \sum_{j=3}^4 \left(\Delta x_o + r \phi_j + (-1)^j R \sum_{i=1}^2 \theta_i \right)^3, \quad (6)$$

$$P_{e3} = \frac{1}{2} k \sum_{j=5}^6 \left(\Delta x_o + r \phi_j + (-1)^j R \sum_{i=1}^3 \theta_i \right)^3. \quad (7)$$

ここでは、機構設計上リンク関節のプーリ半径はすべて等しく R である。本機構では、任意の腱はその腱の起始点より根元側にあるプーリをすべて介して非線形ばねに接続されている。最後に、重力によるポテンシャルエネルギーを定式化すると次式を得る。

$$P_g = -m_1 g l_1 C_1 - m_2 g (L_1 C_1 + l_2 C_{12}) - m_3 g (L_1 C_1 + L_2 C_{12} + l_3 C_{123}). \quad (8)$$

以上より、本稿での3リンクアームモデルにおけるラグランジアン $\mathcal{L}$ は次式となる。

$$\mathcal{L} = K - \sum_{i=1}^3 P_{ei} - P_g. \quad (9)$$

上式において、各関節とアクチュエータ軸の粘性項を加えることで、以下のような運動方程式を得ることができる。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{u}. \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{q}$ は各リンク関節とモータ回転角を含めた一般化座標ベクトルであり、 $\mathbf{u}$ は各アクチュエータへの制御入力である。また、 $\mathbf{D}$ は粘性対角行列を意味する。

3 数値解析例

本章では、ロボットの手先に衝突や衝撃が生じた場合に、その外力を吸収する制御手法を提案し応答特性を検証する。まず、制御則を示すと次式となる。

$$u_1 = -K_{p1}(\theta_1 - \theta_1^d) - K_{d1}\dot{\theta}_1 + \tau_{b1}, \quad (11)$$

$$u_3 = -K_{p2}(\theta_2 - \theta_2^d) - K_{d2}\dot{\theta}_2 + \tau_{b2}, \quad (12)$$

$$u_5 = -K_{p3}(\theta_3 - \theta_3^d) - K_{d3}\dot{\theta}_3 + \tau_{b3}, \quad (13)$$

$$u_2 = u_4 = u_6 = \tau_c(\text{const.}). \quad (14)$$

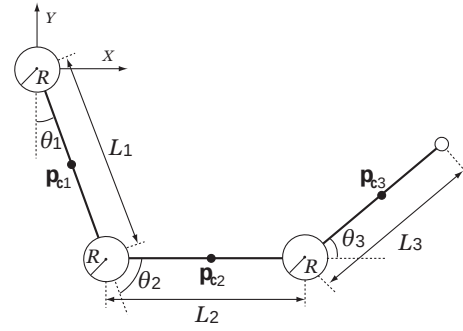


Fig.2 A model of three joints robotic arm.

Table 1 Mechanical parameters and others

I_{ci}	2.27×10^{-3} [kgm ²]	k	3000 [N/m ²]
I_{mi}	1.0×10^{-6} [kgm ²]	Δx_o	0.01 [m]
m_i	300 [g]	g	9.807 [m/s ²]
R	0.02 [m]	r	0.01 [m]
L_i	0.3 [m]	ζ	0.9 [Nms/rad]
ζ_m	0.01 [Nms/rad]	τ_c	0.5 [Nm]
τ_{b1}	$\tau_c + 1.0$ [Nm]	K_{p1}	3.0
τ_{b2}	$\tau_c + 1.0$ [Nm]	K_{p2}	2.0
τ_{b3}	τ_c [Nm]	K_{p3}	2.0
K_{d1}	0.5	K_{d2}	0.4
K_{d3}	0.8		

上式において、第 i リンクの比例・微分ゲインをそれぞれ K_{pi}, K_{di} とし、関節角目標を θ_i^d とする。また、制御入力に重畳するバイアストルクを τ_{bi} と定義する。上記したように、本稿での指令タスクは関節角度制御ではなくリンク先端の位置決め制御であるため、上記制御則内における目標関節角を積分ゲイン K_{ii} を用いて次式のように与える。

$$\theta_1^d = -K_{i1} \int (x - x^d) dt, \quad (15)$$

$$\theta_2^d = K_{i2} \int (y - y^d) dt, \quad (16)$$

$$\theta_3^d = \theta_3^d. \quad (17)$$

これは、ステップ状の指令タスク $(x, y) \rightarrow (x^d, y^d)$ における時間経過ごとの偏差の蓄積から関節角目標を生成していることを意味する。なお、ロボットのメカニカルパラメータと制御パラメータを表1に示す。ここで、 ζ, ζ_m はそれぞれロボット関節の粘性摩擦係数、DC モータ回転軸の粘性摩擦係数である。

本節では、ロボットを重力方向に真っ直ぐ伸ばした姿勢となる垂下姿勢から $(x^d, y^d) = (0.6\text{m}, 0\text{m})$ まで手先を移動した後、その手先に $-x$ 方向と $-y$ 方向にそれぞれ 40N の外力が加わった場合のロボットの応答を検証する。ただし、手先を移動したときの目標はステップ入力としている。各時間ごとに与えたタスクは、手先が目標値に収束した 2s の時点（振り上げ期）で上記の外力を加える（外力印加期）。次に、4s の時点で外力を解放し（外力解放期）、6s の時点で元の振り上げ姿勢になるように復帰動作を行う（復帰動作期）。

結果を図3に示す。また、各時刻でのロボットの姿勢を図3-(e)に示す。図3-(a),(b)のように、振り上げ動作後の衝突時において x, y のいずれの方向についても外力を吸収していることが分かる。制御則は衝突の前後で変更はないが、衝突を検知した時点で式(15)、式(16)で表わされる誤差に対する積分計算を停止している。このような手法を採らない場合図4-(a),(b)に示したように、衝突後でも徐々

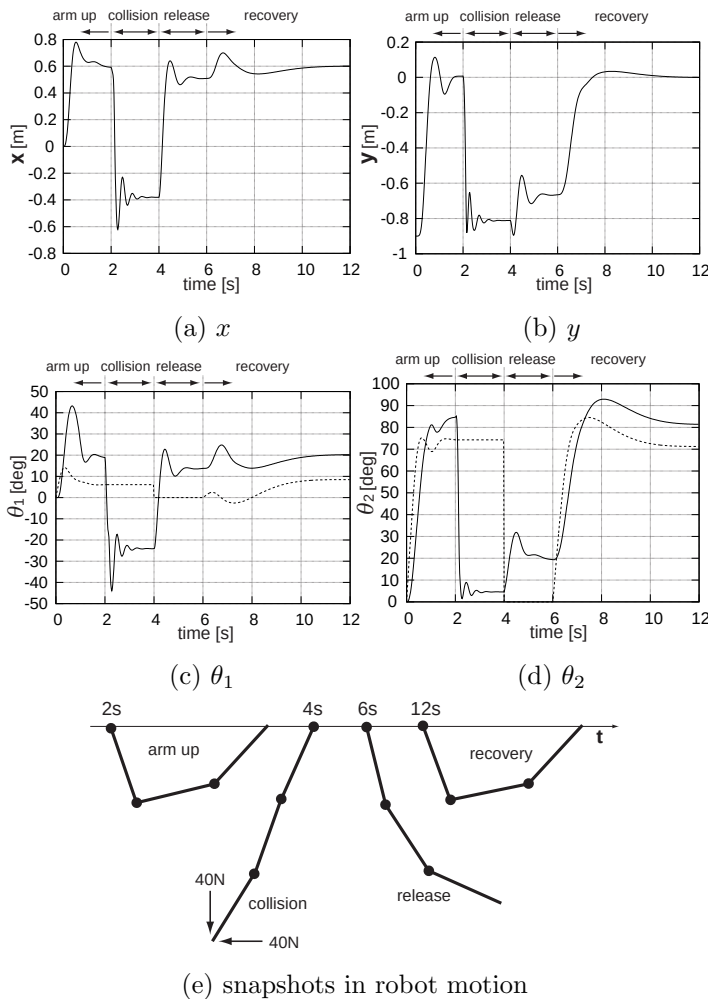


Fig.3 Successful results of integral controller(I.C.) hold method resulting in impact force absorption.

に目標値に向かって動き出すことになる。他方、PD制御部（式(11), 式(12)）を直接停止することはそれまでの生成トルクを制御をかけないまま維持することに相当するため、図4-(c),(d)のように反動的挙動が生じ外力が加わったまま大きな戻り動作を誘発し危険となり得る。また、非常停止の場合衝突時のロボットの姿勢を維持するようにブレーキをかけるか、すべての関節トルクをゼロにするなどの手法が考えられる。前者の場合衝撃力の緩和や吸収が困難となり、後者の場合ロボットに自由振動を生じさせることになり、ロボットの周囲への接触や衝突の危険が残る。このようなことから、「積分コントローラ停止」による衝撃力の緩和吸収が有効であると考えられる。

次に、外力を解放した後の動作を検証する。本稿では外力解放後も積分コントローラの停止を続けており、図3-(a),(b),(e)から分かるように、解放後6sの時点である一定の姿勢に安定している。これは、積分コントローラの「再動作」が行われない限り、ロボットは元の姿勢に戻らないことを意味する。実環境においては衝突による接触状態が解消され外力が解放されたとしても次の接触や衝突の危険が完全に取り除かれたとは言えない。そのため、元の姿勢に復帰するためには安全を確認した後のロボットの能動的な動作が必要となる。そのようなことから、最後の復帰動作期において積分コントローラの停止を解除することで、

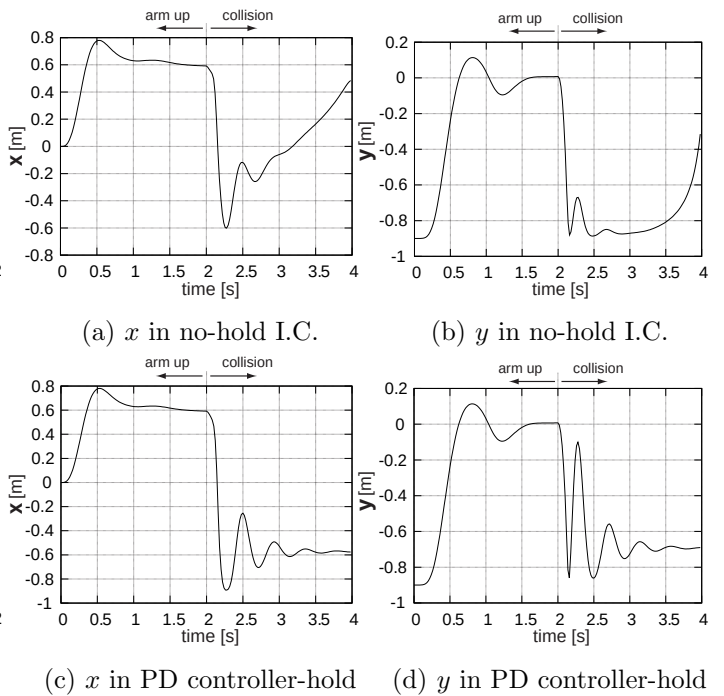


Fig.4 (a) and (b) present cases of failure obtained when integral controller(I.C.) is not hold. (c) and (d) present cases of failure obtained when PD controllers are hold.

ロボットを元の姿勢（振り上げ姿勢）に復元している。なお、すべての動作期において制御ゲインなど、積分コントローラの停止と解除以外のパラメータ変更は行っていない。

次に、図3-(c),(d)には、振り上げ期から復帰動作期までの第1関節と第2関節の時間軌道（実線）を示している。また、図内の点線は式(15), 式(16)で生成される仮想目標軌道を意味する[2]。衝突時の積分コントローラを停止していることから、2s~4sの目標軌道が振り上げ期の値のまま変化していないことが確認できる。また、全区間を通して目標軌道に関節角度が追従していないことが分かる。これは、関節変数に偏差が残ったとしても式(11), 式(12)から分かるように、比例制御部で残ったトルク成分が重力とつり合うために起こる。結果的に、手先位置が目標値に収束すれば良く、関節空間における収束性は要求されない。

4 結言

本稿では、多関節ロボットの手先に衝突が生じた場合に、衝撃力を効率良く緩和し吸収できる駆動機構とそれに適した制御手法を提案した。本制御手法はバネ要素を介して張られるワイヤを関節周りに拮抗的に配置した多関節ロボットの制御に適しており、関節角の仮想目標を生成する積分コントローラを一時的に停止するという新たな手法である。今後は、撃力や繰り返し衝突が発生した場合の応答や、重力の有無での応答特性の検証を行う予定である。

文献

- [1] "2025年の人間とロボットが共存する社会に向けて 次世代ロボットビジョン懇談会報告書", 経済産業省製造産業局, 2004.
- [2] 井上, 加藤, 平井, "バックドライバビリティを有する拮抗腱駆動冗長関節ロボットの重力下での振り上げ到達運動", 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.1, pp.83-88, 2013.