

多関節冗長アームの重力下でのリーチング運動

Reaching Movement of a Multi-joints Redundant Manipulator in Gravity

○ 非 加藤 亮祐 (岡山県大) 正 井上 貴浩^{*1} 正 平井 慎一 (立命館大)^{*2}

Ryosuke KATOH, Takahiro INOUE^{*1}, and Shinichi HIRAI

^{*1}Okayama Pref. Univ., inoue@ss.oka-pu.ac.jp

^{*2}Ritsumeikan Univ., hirai@se.ritsumei.ac.jp

This paper proposes a new straightforward control method which is applicable to the reaching movement by a three degrees-of-freedom redundant manipulator in the two dimensional vertical plane with the gravitational force. This control law does not include any apparent compensator for the gravity, and not contain the Jacobian matrices. In the formulation of the arm, nonlinear springs and a wire-driven structure are implemented in the arm according to antagonistic mechanism like the upper limb structure of the human. The proposed controller is designed based on the joint space of the robot, as a result, the singular point on the motion pathway does not appear. Finally, in the simulation of precise positioning control of the end effector, we reveal that the desired trajectories of each joint are all virtual physical quantity, to which the joint is not required to converge through the reaching movement.

1 はじめに

本稿では上肢の拮抗筋構造に着目し、その構造を模倣したロボットアームのモデル化を行い、拮抗構造に最適な手先到達運動制御則を提案する。本稿ではまず次章において、拮抗型腱駆動機構を有する3リンク冗長ロボットアームのモデル化を行う。続けて、ヤコビ行列を用いずとも手先到達運動が実現できる制御手法を提案する。また、提案制御則には明白な形で重力補償は施していない。それにもかかわらず、重力の影響を受ける垂直2次元平面内でのアーム振り上げ到達運動において、先端位置決め制御が可能であることを示す。最後に、アーム手先への衝突を想定した外力を加えた数値シミュレーションを通して、提案制御手法の有効性を明らかにする。

2 拮抗腱駆動アームのモデリング

2.1 腱駆動機構

本研究で取り扱うロボットアームの概略図は Fig. 1(a) であり、以下のような力学的・機構学的特徴を持つ。

- 重力下での垂直2次元平面内運動
- 3リンク冗長アーム
- 拮抗腱駆動機構
- 腱への非線形ばねの挿入

本稿では、重力下での拮抗腱駆動ロボットアームのモデリングとリーチング運動を実現するための腱駆動機構に適した簡潔な制御則を提案する。したがって、ロボットに与えるタスクはアーム先端の位置制御となり、3リンクで冗長自由度となる。さらに本稿では Fig. 1(b) のように、拮抗的に配置した腱とアクチュエータ間に直列に非線形ばねを挿入している。これは腱のたわみを防ぎ、リンクへの衝突や衝撃を吸収できる働きをする。つまり、極めてシンプルな機構によるコンプライアンス性を獲得している。さらに、本機構ではアクチュエータが各関節に直接取り付けられておらず、代わりにアイドラ（ペアリングとプーリを組み合わせたもの）を用いることでアクチュエータに由来する減速機の機械的インピーダンスや摩擦トルクを無視することが可能になる。すなわち、制御性能において極めて有効なバックドライバビリティ性を有する構造になっている。

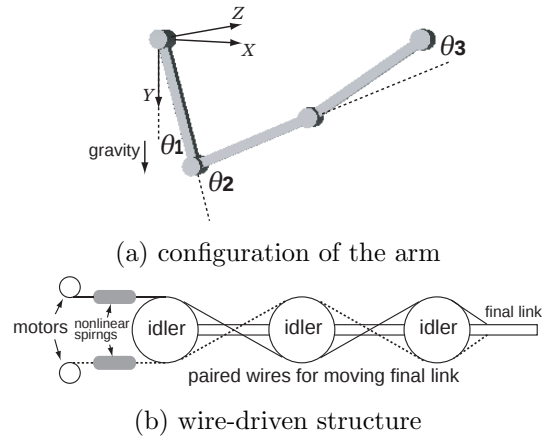


Fig.1 A three degrees-of-freedom redundant arm in the gravity.

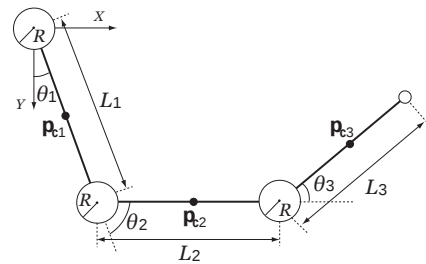


Fig.2 A model of the three-links arm

ここで、第1リンクや第2リンクの駆動機構も同様であり、それぞれのリンクを起始点として腱が拮抗的に張られている。したがって、例えば Fig. 1(b) の中間アイドラには合計4本の腱が通り、根元側のアイドラには合計6本の腱が通る構造になっている。

2.2 運動方程式の導出

本稿で取り扱う3リンク冗長アームの模式図を Fig. 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 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 $p_{c1} = [p_{c1x}, p_{c1y}]^T$ 、 $p_{c2} = [p_{c2x}, p_{c2y}]^T$ 、 $p_{c3} = [p_{c3x}, p_{c3y}]^T$ 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.

$$P_g = m_1 g (L_1 - l_1 C_1) \\ + m_2 g (L_1 + L_2 - L_1 C_1 - l_2 C_{12}) \\ + m_3 g (L_1 + L_2 + L_3 - L_1 C_1 - L_2 C_{12} - l_3 C_{123}). \quad (8)$$

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 振り上げ到達運動

前節までに導出した 3 リンク冗長アームモデルを用いて本稿では, アームを垂下姿勢から振り上げアーム先端位置 (x, y) が (x^d, y^d) に到達するような位置決め制御を行う. つまり, 作業空間においてはステップ入力に相当する.

3.1 制御則

前節で述べたように各関節を駆動するためのアクチュエータを拮抗的に 2 個ずつ配置しており, Fig. 2 の各関節において反時計回りに駆動するアクチュエータトルクを根元から先端にかけて (u_1, u_3, u_5) とし, 時計回りを同様に (u_2, u_4, u_6) とする. 本稿では, 振り上げ動作を実現するための制御則として, 関節角を操作量とする以下のような PD 制御を行う.

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

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

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

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

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.

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

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

$$\theta_3^d = \text{const.}.. \quad (17)$$

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. したがって, 上記 PD 制御則から分かるように, 関節空間においては外形上軌道追従制御に相当する. ここでの制御則には従来と異なる以下の特徴を有する.

- 目標関節角 θ_i^d は仮想目標
- 重力補償項がない
- ヤコビ行列がない

これらの点に関する詳細説明は後述する考察において示す.

3.2 シミュレーション

本節でロボットに与える振り上げタスクは, 垂下姿勢 $(x = 0, y = 0.3\text{m})$ から手先位置を $x = 0.2\text{m}, y = 0.0\text{m}$ まで持ち上げる動作である. この目標手先位置はステップ入力であり, 式 (15) と式 (16) のように制御系に入力される. なお, シミュレーションにおいては Table 1 のメカニカルパラメータを用いた. ここで, ζ は各関節プーリの粘性係数であり, ζ_m は各アクチュエータの粘性係数である.

まず, xy 平面上での軌跡を Fig. 3(a) に示す. 結果から滑らかに目標位置に到達していることが分かる. Fig. 3(c),(d) が手先位置の時間軌道である. x 座標に関してはおよそ 3 s で, y 座標に関してはおよそ 2 s で目標位置に収束していることが見て取れる. 代表点における各リンク姿勢が Fig. 3(b) であり, 第 1 リンクに大きなオーバーシュートが発生していることが分かる. この傾向は Fig. 3(e),(f) から明らかである. また, Fig. 3(f) にはリアルタイムで変

Table 1 Mechanical parameters and others

I_{ci}	1.0×10^{-4} [kgm ²]	k	400 [N/m ²]
I_{mi}	1.0×10^{-6} [kgm ²]	Δx_o	0.01 [m]
m_i	200 [g]	g	9.807 [m/s ²]
R	0.02 [m]	r	0.01 [m]
L_i	0.1 [m]	ζ	0.4 [Ns/m]
ζ_m	0.01 [Ns/m]	τ_c	0.5 [Nm]
τ_{b1}	$\tau_c + 1.0$ [Nm]	K_{p1}	2.0
τ_{b2}	$\tau_c + 1.0$ [Nm]	K_{p2}	0.86
τ_{b3}	τ_c [Nm]	K_{p3}	2.0
K_{d1}	0.5	K_{d2}	0.5
K_{d3}	0.8		

化する第1, 第2リンクの目標軌道(式(15)と式(16))を示しており, 両図を比較すると各リンク角度がそれぞれの目標角に収束していないことが分かる. つまり, これらは仮想的な目標軌道であると言える.

3.3 考察

ロボット制御の従来理論においては, 各リンクへの重力をオンラインで推定可能であるとし, 重力補償(重力の影響を相殺)を施すことで仮想的な水平2次元面内でのP制御やPD制御により所望の挙動を獲得している[1, 2, 3]. 積分器を省くことで, アクチュエータの出力飽和時や予期しない外力印加時のウィンドアップ現象[4]で見られるような, 急な環境変化に対するシステムの不安定性を取り除くことが可能になる. しかしながら, 重力補償にはロボットの各リンクの正確な重心位置を必要とする. ところが, 実ロボットの設計においては機構的な制約やデザイン性により, 重心位置が正確に求まるとは限らない. このようなことから, 各リンクに加わる重力をリアルタイムで推定することはほとんど不可能であり, 産業用ロボットにおいては重力補償のための電流ループによる比例積分制御が主流である[5, 6]. 本稿での提案手法においては, 関節角目標軌道の生成過程に積分器が使われており, 式(11)から式(13)における定常的な角度偏差に起因する残存トルクとバイアストルクによって重力を補償している.

加えて, 提案制御則にはヤコビ行列が使われていない. ヤコビ行列に係わる従来からの問題点として, 特異姿勢における不安定問題が挙げられる[7]. この原因はヤコビ行列のランク落ちによる逆行列の計算不能($\det J = 0$)にあるが, その逆行列を利用する線形化補償や作業座標系における位置制御にしばしば起こり得る. これは関節構造を有するロボットの宿命であり古くから指摘されている[8]. この「制御不能」を回避するために, 特異点に近づかない軌道決定手法や特異点及びその近傍における軌道生成手法が提案されている[9, 10]. また, 近似ヤコビ行列を用いた転置行列によるロボット制御が試みられているが[11], 共通的な問題として特異点近傍の定義が難しい. 加えて, アクチュエータトルクの飽和特性に起因する特異点での停留や歩行ロボットで見受けられる関節の可動範囲の制限があり, 根本的な解決策は見当たらない. 一方で, 本稿で提案している制御則はセンサベースな制御手法であり, 冗長アームの手先位置決め制御にもかかわらず動力学補償や線形化補償を行っていないためヤコビ行列を必要としない. したがって, 上記の諸問題を考慮する必要がない.

謝 辞

本研究の一部は, 科研費基盤研究 A(23246046), ならびに科研費若手研究(B)(22760191)を受けて行われたものである.

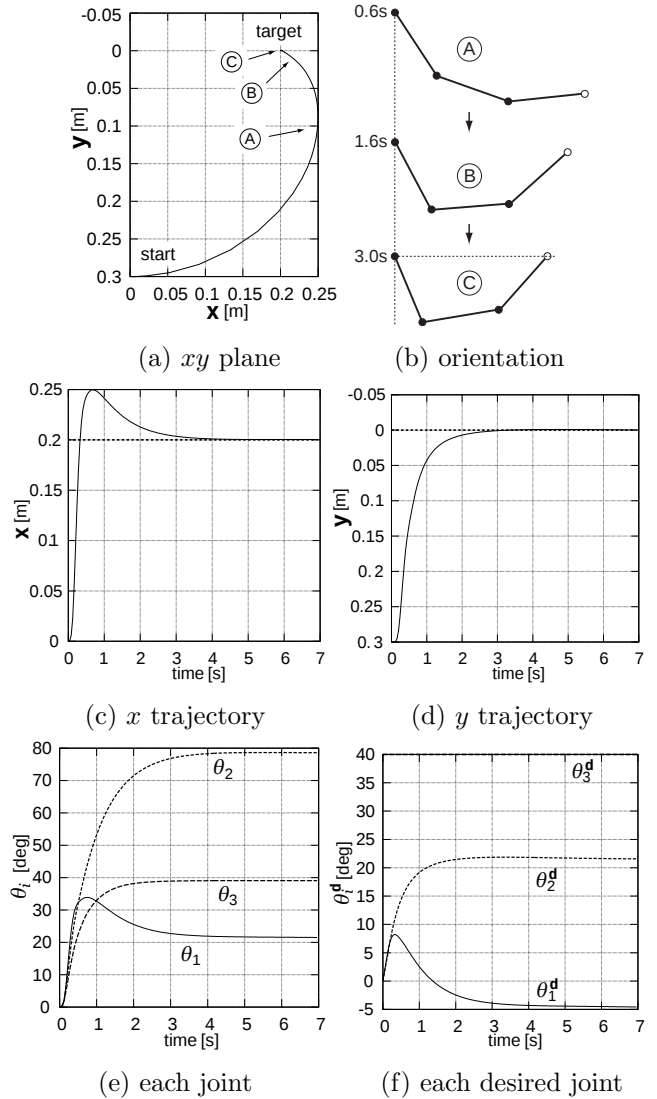


Fig.3 Simulation results of a successful reaching movement of the arm.

文献

- [1] 有本, "新版 ロボットの力学と制御," 朝倉書店, 2002.
- [2] 計測自動制御学会 編, "ロボット制御の実際," コロナ社, 1997.
- [3] M.Takegaki, S.Arimoto, "A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol.102, pp.119-125, 1981.
- [4] I.Horowitz, "A synthesis theory for a class of saturating systems," *Int. Journal of Control*, Vol.38, pp.169-178, 1980.
- [5] 大石, 関下, "操作量飽和を考慮したデジタルロボ速度サーボ系の一構成法," *電気学会論文誌 D*, Vol.119, No.1, pp.88-96, 1999.
- [6] 後藤, 松山, 中村, 久良, "産業用多関節ロボットアームの慣性と摩擦と重力の独立補償を図ったフォースフリー制御," *精密工学会誌*, Vol.70, No.11, pp.1381-1386, 2004.
- [7] 杉本, "ロボットの機構と制御理論-力・モーメント, 特異点-, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.4, pp.378-383, 2009.
- [8] 中村, 花房, "関節形ロボットアームの特異点低感度運動分解," *計測自動制御学会論文集*, Vol.20, No.5, pp.453-459, 1984.
- [9] Y.Nakamura, H.Hanafusa, T.Yoshikawa, "Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol.6, No.2, pp.3-15, 1987.
- [10] 杉本, 若狭, "シリアルロボットのリー代数を張る特異点の通過アルゴリズム," *日本ロボット学会誌*, Vol.25, No.7, pp.1118-1124, 2007.
- [11] C.C.Cheah, "Approximate Jacobian Control for Robots With Uncertain Kinematics and Dynamics," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.19, No.4, pp.692-702, 2003.