

拮抗型ばね駆動モデルによる不良設定問題の解消

A Solution of Ill-posed Problem of Antagonistic Redundant Robot Manipulators

正 井上 貴浩 (岡山県大)*¹ 非 加藤 亮祐 正 平井 慎一 (立命館大)*²Takahiro INOUE*¹, Ryosuke KATOH, and Shinichi HIRAI*¹Okayama Pref. Univ., inoue@ss.oka-pu.ac.jp*²Ritsumeikan Univ., hirai@se.ritsumei.ac.jp

This paper proposes a new control strategy for controlling redundant manipulators, which leads to a solution for the problem that a combination of multi-joint angles is not determined in redundant manipulators. The key for the possibility is a tendon-driven antagonistic structure of the robot and is linear/nonlinear springs to generate inartificial equilibrium of potential energy caused by the springs and gravity. First, we formulate the redundant manipulator with the antagonistic springs, and propose a straightforward controller that enables for the robotic arm to raise itself and to reach a target point under the circumstance with the gravity and without apparent compensator for the gravitational force. Finally, we show numerical simulations to validate the effectiveness of the proposed control method, and make clear the capability of finding the uniform solution of robotic joint in redundant manipulator.

1 はじめに

作業座標系でマニピュレータを位置制御する場合、ロボットの逆運動学により手先目標位置を関節目標角に変換し、フィードバックによる閉ループ系を構成し制御することが制御工学における基礎的な手法である。他には、静力学的関係 ($\tau = J^T f$) を用いた力制御系による手先位置制御があり、多種多様な手法が開発されている。以上の制御手法は、作業変数と関節変数が等しいシステムを前提としたものである。つまり、冗長関節を有するマニピュレータにおいては、上記の手法はそのまま適用できない。いわゆる、ロボット運動学における各関節角の組み合わせが一意に決まらない「不良設定問題」[1] が浮上する。これを回避するためのアルゴリズムが古くから数多く提案されており、指令タスクを満たす関節変位の組み合わせを関節変位集合から見つけ出す手法として、ヤコビ行列に基づいた評価関数を最適化するアプローチが主流である[2, 3]。しかしながら、ヤコビ行列に依存する従来手法では、作業空間と関節空間との速度（微小変位）関係の記述でしかないため平衡点周りにおける局所的な安定論に制限され、マニピュレータの位置レベルでの絶対精度が保証されないという根本的な問題を抱えることになる。加えて、ロボットの動作中の特異姿勢の問題に関しては、中村らによって冗長性の有無を問わない一般化逆行列計算による特異点回避手法が提案されているが、特異点近傍での関節角の顕著な不連続性や多自由度への拡張の面で有効性が示されておらず、冗長性に起因する不良設定問題に関する具体的な結果は得られていない[4]。

このような観察を基に本稿では、冗長7自由度のヒトの上肢が有する拮抗型筋骨格系の構造に着目し、本構造が不良設定問題を解く鍵を握ると考え、本稿ではまず簡単のために、冗長3自由度ロボットアームとしてモデル化しそれに適用した制御手法を提案する。ロボットには重力下での振り上げ運動を指令として与え、手先位置決め制御において筋の役割をする拮抗ばね要素が各関節角を一意に決定していることを定性的に明らかにする。つまり、ロボットの制御動作中、重力ポテンシャルとばねによる弾性ポテンシャルとを含んだシステム全体の平衡点に沿うような姿勢に各関節が収束することを示す。

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 であり、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、本機構ではモデルの設計段階において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（ベ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。

2.2 運動方程式

Fig. 1 に示すように、 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。

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

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

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

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。

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

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_{mj} を各モータの慣性モーメント、 ϕ_j を各モータ

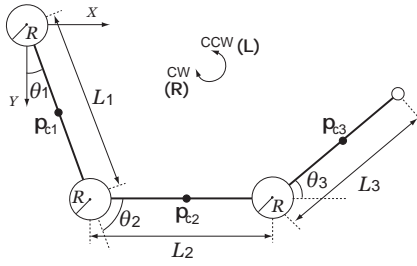


Fig.1 A model of the three-links arm

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．

$$\begin{aligned} P_g = & m_1g(L_1 - l_1C_1) \\ & + m_2g(L_1 + L_2 - L_1C_1 - l_2C_{12}) \\ & + m_3g(L_1 + L_2 + L_3 - L_1C_1 - L_2C_{12} - l_3C_{123}). \end{aligned} \quad (8)$$

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．

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

ここで， 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， u は各アクチュエータへの制御入力である．また， D は粘性対角行列を意味する．

3 不良設定問題を解消する制御則

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．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. 1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^L, u_2^L, u_3^L) とし，時計回りを同様に (u_1^R, u_2^R, u_3^R) とする．本稿では，重力影響下での振り上げ動作を実現するための制御手法として，第1リンクと第2リンクに手先位置を操作量とする積分器と，関節角を操作量とする比例微分器の線形的な組み合わせとして以下のような制御則を提案する．

$$u_1^L = -K_{I1} \int e_x dt - K_{P1} e_{\theta_1} - K_{D1} \dot{\theta}_1 + \tau_{b1}, \quad (11)$$

$$u_2^L = -K_{I2} \int e_y dt - K_{P2} e_{\theta_2} - K_{D2} \dot{\theta}_2 + \tau_{b2}. \quad (12)$$

ここで， $e_x = (x - x^d)$ ， $e_y = (y - y^d)$ ， $e_{\theta_i} = (\theta_i - \theta_i^d)$ ， $(i = 1, 2)$ とし， τ_{bi} は安定した把持を実現するためのバイアストルクに相当する．他に，第3リンクへの制御入力は次式とする．

$$u_3^L = -K_{P3} e_{\theta_3} - K_{D3} \dot{\theta}_3 + \tau_{b3}. \quad (13)$$

上式において $e_{\theta_3} = (\theta_3 - \theta_3^d)$ とし，手先位置を操作量とする積分器は含んでいないことに注意する．ここまで各リンクを反時計回りに回転させる制御入力を記述したが，一方で時計回りに回転する制御入力は一律で以下の一定トルクを利用する．

$$u_i^R = \tau_c \text{ (const.)}, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (14)$$

前記したように，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(式(11)～式(13))における関節目標軌道を手先位置偏差から直接生成する形をとり，積分ゲイン K'_{Ii} を用いて次式のように与える．

$$\theta_1^d = -K'_{I1} \int e_x dt, \quad (15)$$

$$\theta_2^d = K'_{I2} \int e_y dt, \quad (16)$$

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

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．

4 シミュレーション

本節では，拮抗腱駆動冗長多関節アームにおける提案制御手法による手先位置決め制御の有効性をシミュレーションにより明らかにする．まず，3リンク冗長アームのメカニカルパラメータと制御における各ゲイン等を Table 1 に示す．なお，数値計算におけるルンゲクッタギル法による刻み幅(制御周期) T_c は 0.1 ms としている．

4.1 振り上げ到達運動

まず，初期状態でのロボットの姿勢は，重力方向に各リンクを真っすぐ降ろした垂下姿勢とする (Fig. 1 参照)．この状態から重力に逆らって反時計回りに振り上げ， $(x^d, y^d) = (0.2 \text{ m}, 0.0 \text{ m})$ の位置までの到達運動を行う．そのときの結果が Fig. 2(a), (b) である．

約 2.5 s でロボットの手先 (x, y) が目標位置にロバーストに収束していることが分かる．そのときの各関節角は Fig. 2(c) のように，ある一定の角度に安定的に収束してい

Table 1 Mechanical parameters and others

I_{ci}	1.0×10^{-4} [kgm ²]	k	2000 [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	0.02 [Ns/m]
ζ_m	0.003 [Ns/m]	τ_c	0.1 [Nm]
τ_{bi}	τ_c	K_{P1}	2.0
K_{D1}	0.5	K_{P2}	0.9
K_{D2}	0.2	K_{P3}	2.0
K_{D3}	0.3	K'_{Ii}	0.0007
K_{Ii}	0.00017	T_c	0.1 [ms]
x^d	0.2 [m]	y^d	0.0 [m]

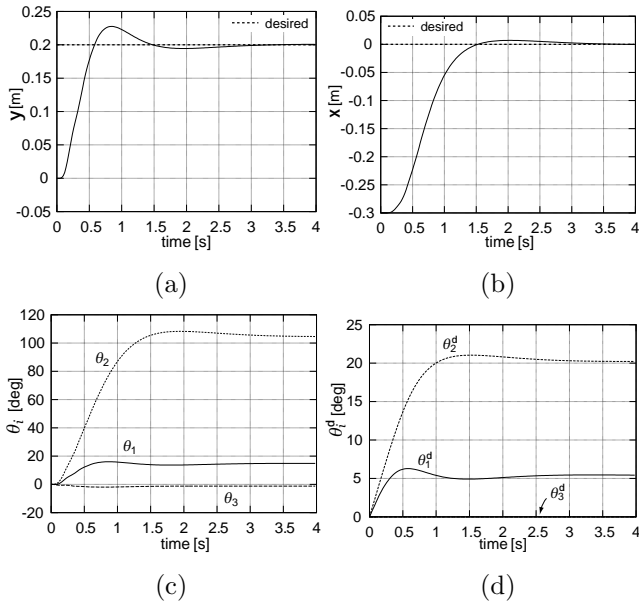


Fig.2 Result of raising and reaching movement.

る。ただし、Fig. 2(d) との比較で分かるように、各関節角はいずれも目標角に定常的に収束しているわけではない。以下にこのメカニズムを詳述する。

まず、式 (15) と式 (16) に示した積分器によって初期姿勢から第 1, 第 2 リンクの関節目標軌道 (θ_1^d, θ_2^d) が制御周期の速さで更新され生成される。同様の仕組みによって、式 (11) と式 (12) の積分器によるアクチュエータトルクが増大する。リアルタイムで変化する関節目標軌道に追従するように、式 (11), 式 (12) の比例微分制御 (以後 PD 制御器とする) によってトルクが重畳的に生成される。ここで注意を要することは、この PD 制御器の比例部分においてトルクが定常的に存在することである。つまり、 x が x^d に、 y が y^d に達する定常状態 ($e_x = e_y = 0$) においても $e_{\theta_i} = 0$ を満たさないことを意味する。これは重力やバイアストルク τ_{bi} に加えて、積分器が式 (11) と式 (12) に含まれていることに依存する。関節角度偏差を許容することは Fig. 2(c), (d) の結果比較によっても明らかである。すなわち、 θ_i^d は運動制御中仮想的に生成される目標軌道であるといえる。このようなことから、システム変数を目標値に収束させることが大前提となる従来の制御理論による安定性の証明手法は利用できない。また、ターゲットとしている手先位置が誤差なく収束していることから、制御系全体としてオンラインで重力項を推定する従来法のような明示的な重力補償を施す必要がない。最後に、当然のことな

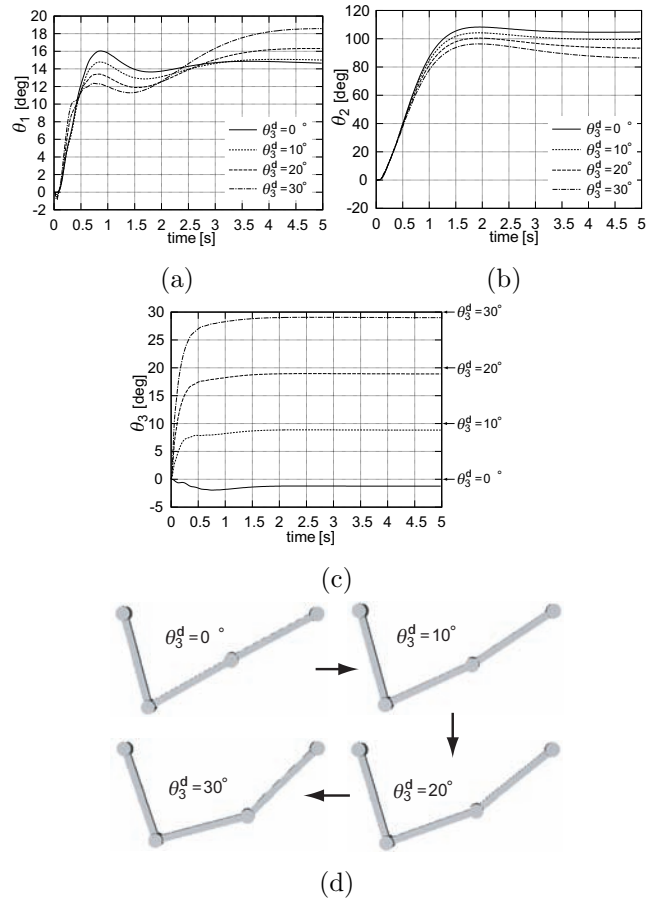


Fig.3 Adaptive compliance of multi-joint angles of the robot.

がら本提案制御手法にはロボットの逆運動学が含まれていないため、冗長自由度に起因する不良設定問題が生じる余地はない。

4.2 第 3 関節目標値の変化に対する各関節角の違い

本節では、式 (17) に示した第 3 リンクの目標軌道 (一定値) に關してシミュレーションと考察を加える。前節の結果は $\theta_3^d = 0^\circ$ としたときのものであるが、この値はある範囲で任意に決定することができる。ここでは、 θ_3^d を $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ としたときの、前節と同様の手先到達運動を行った。その結果が Fig. 3 である。

手先位置は目標値に誤差なく収束しているため、ここでは (x, y) の図示は省略している。Fig. 3(a), (b) から分かるように、 θ_3^d が異なることに起因する θ_3 の定常値の差異は当然であるが (Fig. 3(c) 参照)、それに加えて第 1, 第 2 リンクの定常値もそれぞれで異なっている。第 1 リンクは、 θ_3^d が大きくなるにつれて同様に大きくなる傾向にあり、第 2 リンクに関しては、逆に小さくなる傾向を示す。このときの概略図が Fig. 3(d) となる。このように、第 3 リンクの姿勢角は一定の範囲内で自由にとることができる。この θ_3 の決定則は今後の課題であり、ヒトの upper limb や手指が対象物との相対位置関係を変える場合、最も対象物に近い指 (手) の姿勢を意識の上で優先的に変え、他の関節はそれに従属的に変化することから、本稿での制御手法がヒトの運動機能の模倣という観点から有効であると期待される。

4.3 ロボットの初期姿勢による各関節角の違い

前節までは、ロボットの初期姿勢を垂下姿勢とした上で議論してきたが、本節では、第 1 関節での反時計回りへの

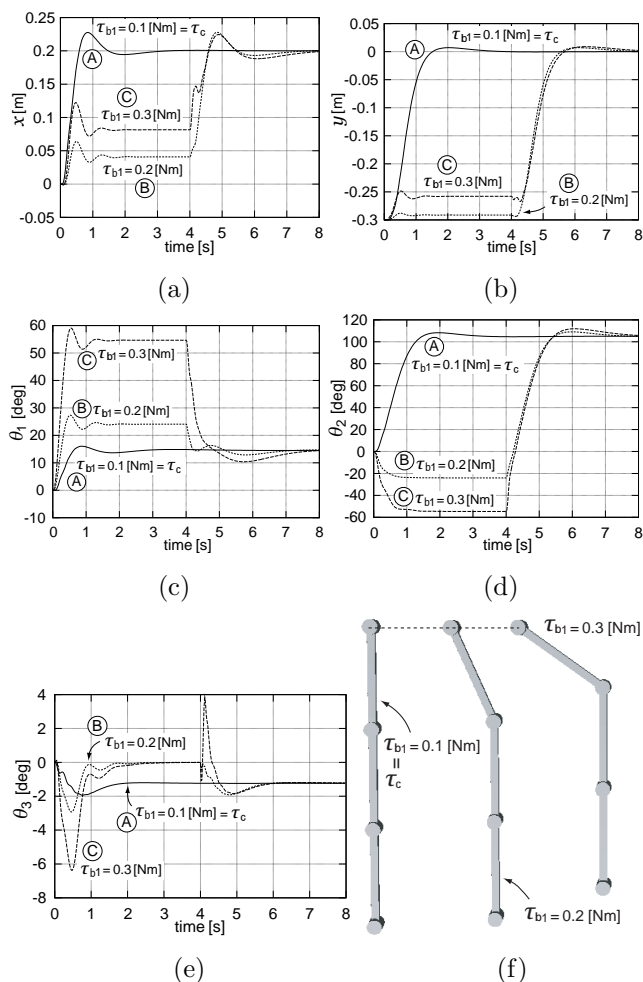


Fig.4 Influence of initial configuration of the robot.

トルク u_1^L を、初期姿勢において u_1^R を上回る値としたとき (非対称トルク) の、前節と同様の解析を行う。垂下姿勢の解析においては $u_1^L = u_1^R = \tau_c = 0.1 \text{ Nm}$ であったために、ここでは u_1^L を 0.2 Nm (結果 B)、 0.3 Nm (結果 C) とした場合のそれぞれの初期姿勢から到達運動シミュレーションを行う。それぞれのロボットの初期姿勢を Fig. 4(f) に示す。このときの (x, y, θ_i) の各軌道を Fig. 4(a)–(e) に図示している。

まず、手先軌道は Fig. 4(a),(b) に示す通りである。図内の記号 A は、前節で比較のために行った垂下姿勢からの制御に関する結果を意味する。設定 B,C において最初の 4 秒間は、非対称トルクを発生させたときにシステムが安定するまでの待ち時間である。よって、4 s よりロボットの振り上げ運動制御を始める。また、上記したように、設定 A は垂下姿勢からの運動に相当するから 0 s から制御が行われていることになるので比較には注意を要する。(a),(b) 図から分かるように、どの設定条件においても手先位置は誤差なく目標値に到達している。注目すべき点は Fig. 4(c),(d),(e) に示した関節角の軌道である。結果から、十分時間が経過した定常状態においてはロボットの初期姿勢に係わらず各関節角は同じ値に収束していることが明確に示されている。このことから、提案制御則では θ_3^d を変更しない限り各関節角は一意に決まるが示された。ただし、各種ゲインやバイアストルク、ばね剛性等のパラメータを変更した場合の検証は今後の課題とする。

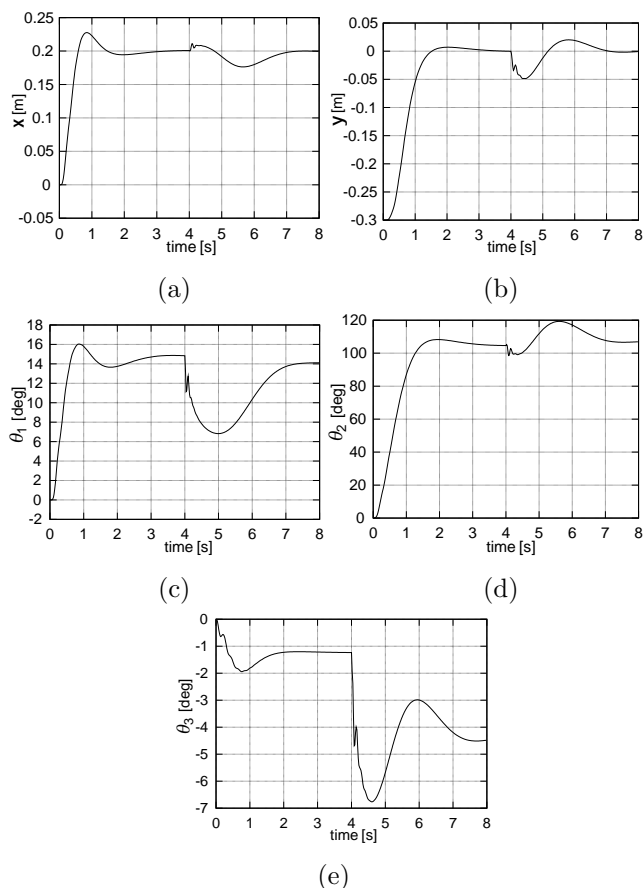


Fig.5 Influence of external forces to the robot.

4.4 手先に外力が加わったときの各関節角の違い

最後に、ロボットの手先に外力が印加された場合の解析を行う。ここでは $\theta_3^d = 0^\circ$ とし、振り上げ運動後の手先位置が安定した時点から外力を加えるものとする。印加する外力は $(f_x, f_y) = (-5\text{N}, 5\text{N})$ であり、正負は Fig. 1 の座標系での向きとする。

Fig. 5(a),(b) から分かるように、手先位置は今までと同様に誤差なく収束している。関節角については、4 s 時の安定姿勢 (θ_i) と 8 s 時の安定姿勢とはわずかに異なっていることが見て取れる (Fig. 5(c),(d),(e) 参照)。このように、外力が入力されたとしても振り上げ到達運動という指令タスクは実現しつつ、手先外力に応じて適応的に各関節角が安定的な姿勢で維持されている。

文献

- [1] 田原, 羅, 有本, "筋肉の非線形特性を考慮した冗長多関節筋骨格システムのリーチング運動," システム制御情報学会論文誌, Vol.19, No.8, pp.301–308, 2006.
- [2] 清水, 角谷, 尹, 北垣, 小菅, "関節の可動範囲を考慮に入れた 7 自由度冗長マニピュレータの解析的逆運動学解法," 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4, pp.606–617, 2007.
- [3] J.M.Hollerbach, K.Suh, "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.3, No.4, pp.308–316, 1987.
- [4] 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.