

関節ローカルフィードバックを持つロボットの動的姿勢制御

長谷川将臣 岡田昌史 (東京工業大学)

Dynamic Position Control of Robot Motion with Local Feedback Joint Controller

*Masaomi HASEGAWA and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— For dynamical robot motion control, a torque oriented controller that yields torque command will be required. However, robot control systems generally consist of a joint local feedback controller that requires the joint angle reference from the safety point of view. To connect the torque command and joint angle command, forward dynamics based on integral of state variable has been utilized. Though a high gain feedback is assumed for torque–joint angle connection, it is not satisfied in the real environment. This paper proposes a design method of a direct joint angle commanding controller based on the attractor design method. Because the proposed controller yields a reference joint angle considering robot dynamics with local joint PD controller, the dynamical position control is realized.

Key Words: attractor design, position control, joint PD control

1. はじめに

一般に、ロボットの動的制御は運動方程式に基き、そのモデルにおける入力関節トルク(または力)となるため、制御系は Fig.1 に表されるような構造を持つ。外

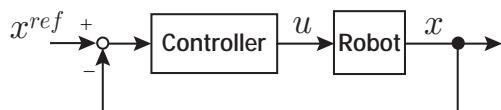


Fig.1 Feedback control system for robot motion generation

部からの目標値 x^{ref} と状態変数 x の差に基づいてコントローラが入力 u (関節トルク) を決定し、これをロボットに与える。この制御系において、以下の問題点が挙げられる。

1. コントローラはロボットを安定化しよう、ロボットの力学特性に基づいて設計されなければならない。さらに、参照目標値 x^{ref} はロボットの力学的な整合性を逸脱しないよう設計しなければならない。すなわち、制御系の設計には 2 つの段階が存在している。
 2. 一般に、ロボットの精密なトルク/力制御にはトルク/力センサが必要であるが、トルク/力センサは大きく精度もあまり良くない。また、制御のしやすさなどから、関節は各軸 PD 制御によって目標値制御される場合が多い。
1. に関して、岡田ら [1][2] は軌道アトラクタに基づきロボットを目標の運動に引き込ませることで目標値と安定化コントローラを同時に設計する方法を提案した。これにより、ロボットの制御系は Fig.2 に表される自律系となり、外部からの目標値を必要としない制御系が設計される。一方、2. に関して、サーボモータの出力トルクが電流に比例することを利用し、電流制御によって擬似的にトルク制御を実現する、あるいは、ヒューマノイドロボットの制御などでは Fig.3 にある制御系のよ

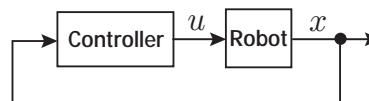


Fig.2 Feedback control system based on attractor design

うに、コントローラから得られた入力 u に基づいて順動力学計算によって積分を行い、その結果得られた関節角度を PD 制御された関節の制御系に目標値 \hat{x}^{ref} として与えるといった方法 [3]、また、体幹または重心の速度から各関節の速度指令を定め、各軸の速度制御を行う方法が提案されている [4, 5, 6]。各軸 PD 制御は一

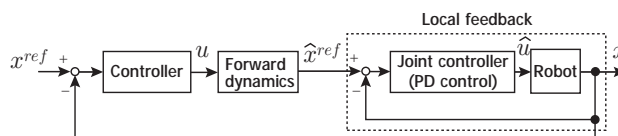


Fig.3 Feedback control system with forward dynamics

般にモータドライバの中で行われ、ハイゲインフィードバックを仮定することで、 x や \dot{x} は瞬時に \hat{x}^{ref} 、 $\dot{\hat{x}}^{ref}$ に追従するが、実際は \hat{x}^{ref} 、 $\dot{\hat{x}}^{ref}$ がサンプリングタイムごとのステップ目標値となり、順動力学計算の中のモデルの動きとロボットの動きは大きく異なったものとなる。

そこで本研究では、Fig.2 の制御系を Fig.4 のように変形した制御系の設計法を提案する。この制御系は口

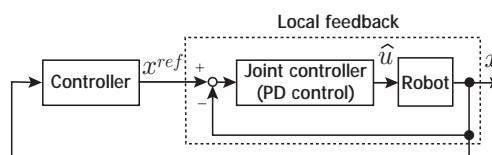


Fig.4 Proposed control system

ボットがローカルフィードバック制御されていることを前提として、コントローラが直接目標値を生成するものであり、コントローラは動力学に基づいて設計されることから動的姿勢制御（関節角度制御）をとらえることができる。特に軌道アトラクタを用いた制御系の設計手法はこのフィードバック系と相性が良く、これまでの手法の簡単な変形により Fig.4 のフィードバック系が実現できる。渡辺らは [7] 軌道アトラクタに基づいて仮想的な目標姿勢（擬似目標値）を提案した。これは Fig.2 の制御系から線形制御理論に基づいてコントローラを (a) ローカルフィードバックコントローラと (b) 目標値生成部に分離するものであるが、本研究の手法は (a) のフィードバックコントローラが各軸 PD 制御則であり、これを用いて (b) の目標値を生成するものである。

2. 目標値を生成するコントローラの設計法

2.1 力学的情報処理による軌道アトラクタの設計

本章では [2] で提案された軌道アトラクタの設計法を示す。この方法では、以下の仮定を設ける。

【仮定 1】ロボットの物理モデルが与えられている。

【仮定 2】ロボットの状態変数 $x \in R^n$ がアトラクタとすべき目標運動パターン Ξ

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \cdots & \xi_N \end{bmatrix} \in R^{n \times N} \quad (1)$$

が与えられている。ただし、 N はデータの数である。

【仮定 3】 Ξ は実現可能である。すなわち、 Ξ を実現する入力列 $u[k] (k = 1, \dots, N)$ が存在する。

ロボットの状態変数を $x[k]$ 、入力を $u[k]$ として離散時間領域におけるロボットの運動方程式を

$$x[k+1] = f(x[k]) + g(x[k], u[k]) \quad (2)$$

とする。これを各 ξ_i 周りでテイラー展開し、二次以上の微小項を無視した線形近似システムを

$$x[k+1] = A_i x[k] + B_i u[k] + C_i \quad (3)$$

とする。このとき、 x が Ξ をアトラクタとするための入力 u を x の ℓ 次多項式として

$$u[k] = \Theta \phi(x[k]) \quad (4)$$

によって設計する。ここで $\phi(x)$ は x を各要素のべき多項式に展開したベクトルであり、例えば $x \in R^2$, $\ell = 2$ であれば

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\phi(x) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_1 x_2 & x_2^2 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

と表される。 Θ は各べき乗項にかかる係数で構成される行列である。

以下では簡単のため

$$A_i = A, \quad B_i = B, \quad C_i = 0 \quad (7)$$

とし、式 (3) を

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k] \quad (8)$$

で表される線形系であるとする。このとき、 ξ_i の近傍の点 $x[i]$ が入力列 $u[i]$ によって移動する先は

$$x[i+j] = A^j x[i] + A^{j-1} B u[i] + \cdots + B u[i+j-1] \quad (9)$$

であり、これより以下の式が成り立つ。

$$X_{i+1}^{i+j} = Ax[i] + BU_i^{i+j-1} \quad (10)$$

$$X_{i+1}^{i+j} = \begin{bmatrix} x[i+1] \\ \vdots \\ x[i+j] \end{bmatrix}, \quad U_i^{i+j-1} = \begin{bmatrix} u[i] \\ \vdots \\ u[i+j-1] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^j \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B & 0 \\ \vdots & \ddots \\ A^{j-1}B & \cdots & B \end{bmatrix} \quad (12)$$

これより、 $x[i]$ が軌道 Ξ に沿って移動するための入力列は

$$U_i^{i+j-1} = B^\# \left(\Xi_{i+1}^{i+j} - Ax[i] \right) \quad (13)$$

$$\Xi_{i+1}^{i+j} = \begin{bmatrix} \xi_{i+1}^T & \xi_{i+2}^T & \cdots & \xi_{i+j}^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

によって与えられる。ただし、 $[\cdot]^\#$ はムーアペンローズ型の擬似逆行列を表し、式 (13) は

$$J = \sum_{k=i+1}^{i+j} \|\xi_k - x[k]\| \quad (15)$$

を最小化する入力列を求めていることに相当する。また、実際の x の軌道は式 (13) を式 (10) に代入することで得られる。さらに、状態空間内に多くの $x[i]$ ($i = 1, 2, \dots, N$) を定義することで u と x の組み合わせが得られる。式 (4) の関係から、 (u, x) は

$$U = \Theta \Phi \quad (16)$$

$$U = \begin{bmatrix} u[1] & u[2] & \cdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi(x[1]) & \phi(x[2]) & \cdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

を満たすので、コントローラの係数行列 Θ は

$$\Theta = U \Phi^\# \quad (19)$$

によって得られる。これにより、式 (4) のコントローラが得られ、Fig.2 の制御系が設計される。これはロボットの動力学に基づいたコントローラである。

2.2 ローカルフィードバックを考慮した目標値生成

2.1 の方法はロボットの状態変数から入力トルクを求めるものであった。そこで、ローカルにフィードバックされたロボットの目標値を生成するコントローラへと変形する。いま、ロボットへの実際の入力 \hat{u} は

$$\hat{u}[k] = K_1 x^{ref}[k] - K_2 x[k] \quad (20)$$

のように目標値 x^{ref} と状態変数 x , フィードバックゲイン K_1, K_2 によって決定されているとする. 例えば各軸 PD 制御もこの形式で表せる. 式 (20) を式 (8) に代入し整理すると

$$x[k+1] = (A - BK_2)x[k] + BK_1x^{ref}[k] \quad (21)$$

となる. これを改めて

$$x[k+1] = \hat{A}x[k] + \hat{B}x^{ref}[k] \quad (22)$$

$$\hat{A} = A - BK_2, \quad \hat{B} = BK_1 \quad (23)$$

と書く. これより, 式 (8) と式 (22) を見比べ, 式 (13) と同様に, x が Ξ に沿って移動するための目標値 x^{ref} の列は

$$\left(X^{ref} \right)_i^{i+j-1} = \hat{B}^\# \left(\Xi_{i+1}^{i+j} - \hat{A}x[i] \right) \quad (24)$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \vdots \\ \hat{A}^j \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{B} & 0 \\ \vdots & \ddots \\ \hat{A}^{j-1}\hat{B} & \dots & \hat{B} \end{bmatrix} \quad (25)$$

となり, 同様に x^{ref} , x の組から目標値を生成するコントローラ

$$x^{ref}[k] = \hat{\Theta}\phi(x[k]) \quad (26)$$

を得ることができる. この方法では以下のことがいえる.

1. この方法によって設計される式 (26) のコントローラは目標姿勢を生成するが, ロボットの動特性を考慮した動的姿勢制御系を構成する.
2. ここでは式 (20) のローカルフィードバック系を仮定したが, モータの印加電圧 E をモータの回転角 θ とその目標値 θ^{ref} , ゲイン K_e を用いて

$$E = K_e(\theta^{ref}[k] - \theta[k]) \quad (27)$$

としたローカルフィードバックもよく用いられる. この場合, モータの内部抵抗 R , インダクタンス L , 逆起電力定数 K_v , 流れる電流 i の間におけるキルヒホッフの法則

$$E = Ri + L\frac{di}{dt} + K_v\dot{\theta} \quad (28)$$

から L は十分小さいことを仮定して

$$\hat{u} = K_a i = \frac{K_a}{R} \left\{ K_e(\theta^{ref} - \theta) - K_v\dot{\theta} \right\} \quad (29)$$

として, 式 (20) の形に書き換えられる. ただし, K_a はモータのトルク定数である.

3. 式 (24) では x^{ref} のひとつの解を与えているが, 式 (20) より, 目標値はひとつの候補 \bar{x}^{ref} を用いて

$$x^{ref} = \bar{x}^{ref} + K_1^\perp \alpha \quad (30)$$

で与えられる. ただし, K_1^\perp は K_1 の核 (kernel), すなわち, $K_1 K_1^\perp = 0$ を満たす空間の基底であり, α は任意の定数である. これは, ある運動を実現するための目標値は一意には定まらないことを意味している.

3. タップダンスロボットによる設計法の検証

3.1 タップダンスロボット

Fig.5 にあるタップダンスロボットを用いて提案手法の有効性を検証する. この機構は頭部をモータトルク

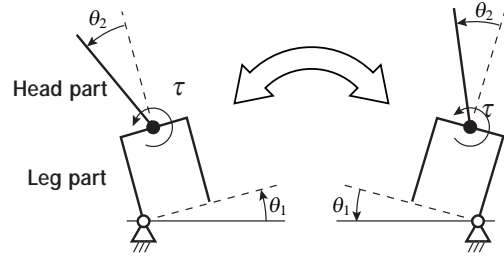


Fig.5 Model of tapping dance robot

τ によって降り, 足踏み動作 (タップダンス) を行うものである. 脚部の回転角を θ_1 , 頭部の回転角を θ_2 とし, 着地における衝突に非弾性衝突を仮定し, 状態変数 x を

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 & \dot{\theta}_1 & \theta_2 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \quad (31)$$

とすることで運動方程式が得られる.

3.2 アトラクタの設計

従来により Fig.2 の制御系を構成する. 頭部のトルクを比例ゲイン K_p , 微分ゲイン K_d を用いて

$$\begin{aligned} \tau &= K_p(\theta_2^{ref} - \theta_2) - K_d\dot{\theta}_2 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_p & 0 \end{bmatrix} x^{ref} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_p & K_d \end{bmatrix} x \end{aligned} \quad (32)$$

とし, θ_2^{ref} にある周波数の正弦関数を与えたところ, 数回のタップダンス動作が実現できた. このときの運動を式 (1) の Ξ とし, 式 (4) のコントローラによってアトラクタを設計した. この運動を Fig.6, 7 に示す. Fig.6 は状態変数の軌跡であり, 黒の実線が Ξ , 青の実線が x の軌跡である. ただし, 状態空間は 4 次元空間であるが, ここでは $\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2$ によって構成される 3 次元空間を示している. また, Fig.7 は Fig.6 における各番

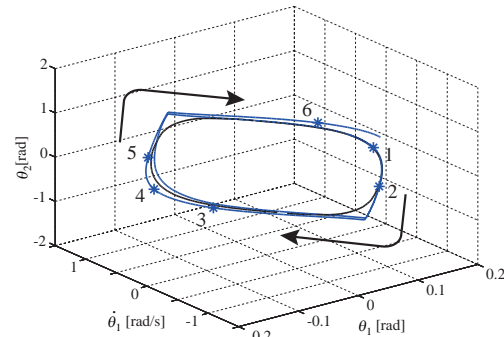


Fig.6 Locus of state variable on tapping dance motion

号の姿勢を表している. このように, 所望の運動を実現するアトラクタが設計されていることが分かる.

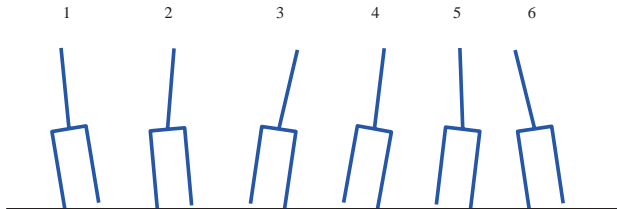


Fig.7 Motion of the tapping dance robot with attractor design

3.3 目標値によるアトラクタ設計

次に、3.2 で用いた Ξ を再び用い、式 (26) のコントローラを設計した。ここではローカルフィードバックとして式 (32) を用いた。また、式 (30) の α を以下の評価関数 J_θ を最小化するように定めた。

$$J_\theta = w_1 \left\| \theta_i^{ref}[k] - \left(\theta_i[k-1] + \dot{\theta}_i[k-1]T \right) \right\| + w_2 \left\| \dot{\theta}_i^{ref}[k] - \dot{\theta}_i[k-1] \right\| \quad (i = 1, 2) \quad (33)$$

ただし、 w_1, w_2 は重み係数、 T はサンプリングタイムである。これは目標値が力学的な整合性を大きく逸脱しないようにするものである。得られたコントローラによって生成された運動を Fig.8, 9 に示す。Fig.8 で

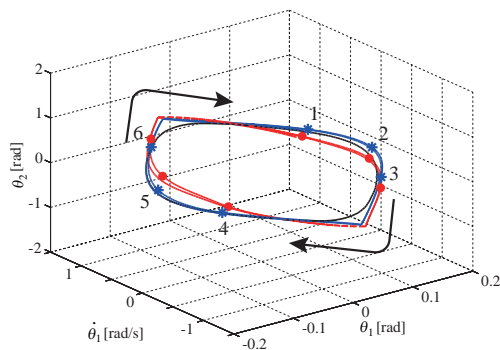


Fig.8 Locus of state variable on tapping dance motion with the proposed controller

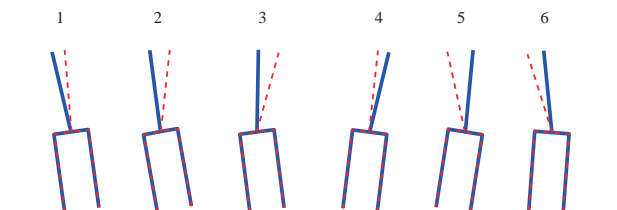


Fig.9 Motion of the tapping dance robot with the proposed controller

は Ξ を黒の実線、 x の軌跡を青の実線、 x^{ref} の軌跡を赤の実線で示している。また、Fig.9 は各番号におけるロボットの姿勢(青の実線)と得られた x^{ref} (赤の鎖線)を示している。この結果より、以下のことが言える。

1. 式 (32) のPD 制御則から $\theta_1, \dot{\theta}_1$ は任意の値を取りうる。そのため、式 (33) の評価関数を設定することで常に $\theta_1^{ref}[k] = \theta_1[k-1]$, $\dot{\theta}_1^{ref}[k] = \dot{\theta}_1[k-1]$, $\theta_2^{ref}[k] = \theta_2[k-1]$ となる。
2. 目標姿勢は運動を継続するための情報を提供している。例えば、Fig.9 では、運動を継続するために頭部を振り、エネルギーを加えるための姿勢を示している。
3. これらの結果から、提案する手法により動的制御を行うための適切な目標姿勢が得られることが分かる。

4. おわりに

本研究では、ロボットの動的姿勢制御を実現するために、従来のアトラクタ設計法を応用した目標値生成コントローラの設計法を提案した。以下に成果を示す。

1. 従来手法の簡単な変形により、各軸 PD 制御を用いたローカルフィードバックを持つ制御系に対し、目標姿勢を与えるコントローラの設計法を示した。
2. タップダンスロボットを用いたシミュレーションにより、提案手法の有効性を検証した。
3. 本研究で提案した手法は、力制御と位置制御をつなぐ手法であり、ロボットの制御のための実際的な方法である。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた。

参考文献

- [1] 岡田, 大里, 中村: 非線形力学系のアトラクタ設計によるヒューマノイドロボットの運動創発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 6, pp. 533-540, 2005.
- [2] 岡田, 村上: 軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御によるコミュニケーション原理の表現, 日本ロボット学会誌 Vol. 25 No. 4, pp.545-553, 2007
- [3] 西脇, 加賀美: ヒューマノイドのための短周期オンライン歩行軌道生成更新法, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.834-841, 2007.
- [4] 長阪, 稲葉, 井上: 体幹位置コンプライアンスを用いた人間型ロボットの歩行安定化, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1193-1194, 1999.
- [5] 杉原, 中村: 非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2, pp.222-231, 2006.
- [6] Y.Choi, D.Kim and B.J.You: On the Walking Control for Humanoid. Robot based on the Kinematic Resolution of CoM Jacobian with Embedded Motion Proc. of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2006), pp.2655-2660, 2006.
- [7] 渡辺, 岡田: 軌道アトラクタに基づく運動の分節化のための仮想目標値, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 1L3-03(CD-ROM), 2009.