Position Controllers Having Biomimetic Response Characteristics

○ 安河内 哲 (九大) 正 菊植 亮 (九大) 正 山本 元司 (九大)

Satoshi YASUKOUCHI, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka

Ryo KIKUUWE, Kyushu University

Motoji YAMAMOTO, Kyushu University

Key Words : Position control, State space

1 緒言

ロボットの制御技術の発展とともに、様々な分野で新たなロボットの活躍が期待されるようになり、パワーアシスト装置や介護支援ロボットなどの人と接するロボットが開発されている。人と接触するロボットにはこれまで以上の安全性が要求されるため、予期していない事態に陥っても異常な動作をしない制御則が必要となる。また、人と接触する以上、ロボットはバイオミメティックな動きをするのが好ましい。この場合バイオミメティックな動きとは、動物のように、ベルシェイプを描く滑らかな速度変化で動くことを指す。

多くのロボットは関節摩擦などモデル化の難しい要素が多く含まれているため、高ゲインのPID位置制御器がよく用いられている。高ゲインのPID位置制御器を用いると関節摩擦や外乱などの影響をあまり受けずに正確な位置制御ができる。しかし、入力ミスや環境の干渉などによって制御対象の位置と目標位置の距離が大きくなると、急加速し過大な速度やオーバーシュートを生じることがある。そのため、異常時の危険回避が難しく、人と接触するロボットに用いるには安全性が不十分である。また、距離が大きいときに目標位置までの詳細な運動軌道を生成すれば滑らかな運動をさせることはできるが、詳細な軌道生成には大きな手間がかかるため実用的ではない。

ロボットの安全な制御法の一つとして、プロクシベースト・スライディングモード制御 (PSMC)⁽¹⁾ という制御則が提案されている。この制御則は、制御対象をプロクシと呼ばれる仮想物体を介して目標位置と接続することで、目標位置までの距離が大きい場合でもオーバーシュートを生じさせない。また、力に上限をつけたPID制御が暗黙に含まれているため、力が上限に達しない限りPID制御と同等に正確な位置制御が行える。さらに、既報⁽²⁾で状態空間内でのプロクシの挙動を漸化式として設計することで、様々な応答特性を表わすことが可能となった。従来のPSMC⁽¹⁾では加速の滑らかさは考慮されておらず急加速していたが、既報⁽²⁾によって加速を緩やかにすることができている。しかし、最大速度が制限されていないため、距離が遠い場合に高速で動いてしまい危険である。

本稿では、上述したプロクシの挙動を表わす漸化式を再設計することで、より滑らかで安全な制御則を提案する。

2 アルゴリズム

既報⁽²⁾で菊植が提案している制御則は下記の式(1)で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} p^*(k) &= p(k) + \frac{B(a(k-1) - a(k-2))}{T^2 K^*} - \frac{La(k-1)}{K^*} \\ u^*(k) &= U(p_d(k), q(k-1), q(k-2)) \\ q^*(k) &= q^*(k-1) + u^*(k)T \\ f^*(k) &= K^*(q^*(k) - p^*(k)) \\ f(k) &= Ff^*(k) / \max(|f^*(k)|, F) \\ q(k) &= q^*(k) + f(k)/K^* \\ a(k) &= a(k-1) + T(q(k) - p(k)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

p は制御対象の位置、 p_d は目標位置、 q は仮想物体 (プロクシ) の位置、 f はアクチュエータが発生する力、 K は比例ゲイン、 B は微分ゲイン、 L は積分ゲイン、 H は時定数、 T は制御周期である。 p^* 、 q^* 、 f^* は計算過程で用いる中間的な値、 a は制御器内部に記憶された状態変数である。各記号の後の k は離散時間のインデックスを表わす。また、 $K^* = K + B/T + LT$ である。

$p^*(k)$ は制御器に与えられる入力情報とみなすことが出来る。制御対象に加えられる外力は、 $p(k)$ を経由して $p^*(k)$ に反映される。また、 $q^*(k)$ は、時刻 kT において実現されるべき仮想物体 (プロクシ) の位置である。力 $f^*(k)$ は $q^*(k)$ を目標位置としてPID制御を行ったときに、アクチュエータから発生すべき力である。設定したアクチュエータが発生する力の最大値 F によって $f^*(k)$ を制限し、実際にアクチュエータが発生する力 $f(k)$ とする。そして、実際の力 $f(k)$ と矛盾が生じないように、実際のプロクシ位置 $q(k)$ を決定する。この制御則は力に上限をつけたPID制御を暗黙に含んでおり、力が上限に達しない限り関節摩擦などの影響を受けずPID制御と同等に正確な位置制御ができる。また、関数 U はプロクシの挙動を決定する漸化式であり、関数 U を適切に設計することで、様々な応答特性を表わすことができる。

3 提案手法

プロクシの位置 q と速度 u によって張られる状態空間を考え、それを Fig.1 のように式 (2) で表わされる6つの領域に分割する。また、領域の境界 S を定義する。

$$\left. \begin{aligned} A &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu < 0 \wedge -V_l < u < V/2 \} \\ B &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu < 0 \wedge u \geq V/2 \} \\ C &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu > 0 \wedge u \geq V_l \} \\ D &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu > 0 \wedge -V/2 < u < V_l \} \\ E &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu > 0 \wedge u \leq -V/2 \} \\ F &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu < 0 \wedge u \leq -V_l \} \\ S &= \{ \{q, u\} | q - p_d + Hu = 0 \} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式 (1) 中の関数 U を式 (3) の $U_{\mathcal{X}}$ ($\mathcal{X} = A, \dots, F, S$) で表わす。 $\mathcal{X}$ はプロクシが状態空間上のどの領域に属しているかによって定まり、特にプロクシが境界 S を通過するとき、 $\mathcal{X} = S$ とする。

Fig.1 Regions of the controller

Fig.2 MOTOMAN-UPJ

Table 1 Initial position and target position

symbol	axis						unit
	0	1	2	3	4	5	
p_0	0	-87	53	0	0	0	deg
p_d	-30	-67	23	10	20	30	deg

Table 2 Parameters for the controller

symbol	axis					unit
	0	1	...	5		
K	100	200	...	10		Nm/rad
B	0.20	0.40	...	0.02		Nms/rad
L	1	1	...	10		Nm/(s·rad)
F	0.75	0.70	...	0.25		Nm
T			0.001			s
H			0.2			s
H_a			0.2			s
H_d			0.1			s
V			0.2			rad/s
V_l			0.005			rad/s

$$\left. \begin{aligned} U_A(p_d, q, u) &= H_a \max(u, V)/(H_a - T) \\ U_B(p_d, q, u) &= (H_a u + TV)/(H_a + T) \\ U_C(p_d, q, u) &= H_d u/(H_d + T) \\ U_D(p_d, q, u) &= H_a \min(u, -V)/(H_a - T) \\ U_E(p_d, q, u) &= (H_a u - TV)/(H_a + T) \\ U_F(p_d, q, u) &= H_d u/(H_d + T) \\ U_S(p_d, q, u) &= (p_d - q)/(H + T) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $H_a > 0$, $H > H_d > 0$ である。このときプロクシはそれぞれの領域において次のような挙動を示す。領域AおよびDでは、指数的な速度変化で加速する。 V_l は加速の計算に必要な最低速度である。領域BおよびEでは、速度が制限速度Vに収束するように減速を行う。領域CおよびFでは、指数的に減速する。境界S近傍にあるときは、境界に沿って動き、目標位置に収束する。

4 実験

実験には Fig.2 に示す安川電機社製の6軸マニピュレータ「MOTOMAN-UPJ」を用いる。マニピュレータの6軸それぞれに対して個別に制御則を適用する。各軸の初期角度を p_0 とし、目標角を開始から1秒後までは p_0 、1秒以降は p_d とする。 p_0 , p_d は Table 1 のように定める。制御器の各成分は Table 2 のように設定する。関節摩擦の大きさなど軸によって特性が異なるため、各成分の値は個別に設定する必要がある。このときの各軸の回転角、角速度、アクチュエータの発生する力を測定する。

Fig.3 は実験装置をPID制御で動かしたときの軸0に関する結果である。PID制御のゲイン(K , B , L)は Table 1 の50分の1にしてある。アクチュエータが発生する力の

Fig.3 Results: PID control

Fig.4 Results: proposed control law

限が定められていないため、目標位置が変わったとたんに高トルクを発生させて急加速をし、また、オーバーシュートが生じている。回転速度も大きくなるため、危険性が高い。

Fig.4 は今回提案した制御則で実験したときの軸0に関する結果である。角速度・発生力のスケールは Fig.3 の20分の1になっている。PID制御の時と異なり、目標位置の急激な変化を受けた場合でも、加速が滑らかとなっており、また、滑らかに目標位置に収束していることがわかる。速度に制限を付け、また、速度の変化を滑らかにしたため、PID制御の場合と比べると目標位置に到達するまでにかかる時間は長くなるが、安全性は増しているといえる。

5 結論

本稿では既報⁽²⁾で菊植が提案した制御則中の関数Uを適切に再設計することで加速時の速度変化を滑らかにする方法を提示した。

現状での問題点としては、(i) 制限速度付近で振動が発生する、(ii) 目標位置までの距離が近い場合に滑らかな速度変化を維持できない、(iii) 一部の速度変化が滑らかとなっていない、ということが挙げられる。(i)の問題はPID制御のゲインを適切にすることで解決できると考えられる。(ii)(iii)の問題を解決するためには、より詳細に領域を分割し、関数Uを設定する必要がある。

参考文献

- (1) R. Kikuuwe and H. Fujimoto, "Proxy-based sliding mode control for accurate and safe position control", Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2006), pp.26-31.
- (2) 菊植 亮, "プロキシベース・スライディングモード制御の再解釈と一般化", 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1M15, (2007年9月),