

[研究助成 (A)]

シームレスに精密動作と安全動作が切り替わる
協働ロボットの運動制御研究

Seamless Switching of Precise and Safe Motion Controls for Collaborative Robots

2221030

研究代表者
(助成金受領者)広島大学
大学院先進理工系科学研究科

助教 村松久圭

[研究の目的]

福祉・介護・産業をはじめとして、ロボットを用いた人間による労働の自動化と人間支援が求められている。工場において産業用ロボットが精密作業のために活躍する一方で、ロボットは接触により人を傷つける危険性があり、ロボットは柵で囲われながら作業を行なっている。同様に、人間の生活空間へロボットは進出していない。本研究の目的は人間とロボットが同じ作業空間および生活空間を共有することである。本研究の意義は、精密作業が可能なロボットが人間による労働を代替することで、将来の高齢化社会を支えると共に、人間と不意な接触があった場合においても人間を傷つけることのない、人間と機械の調和を目指す。

[研究の内容, 成果]

背景

これまで、比例積分微分制御とスライディングモード制御の連立によって実現するプロクシベースドスライディングモード制御の研究が行われてきた。本制御は、非飽和時の精密な比例積分微分制御・リーチングモードでの飽和による安全な人との接触・飽和後のスライディングモードによる緩やかな位置指令への回帰をシームレスに切り替え可能な制御である。

本制御の問題点として、本制御では、比例積

分微分制御とスライディングモード制御の連立のため、プロクシと呼ばれる仮想物体を導入する。この際、アクチュエータのプロクシ追従精度がフィードフォワード制御の欠如により悪い問題があった。さらに、2階の切り替え関数を用いたプロクシベースドスライディングモード制御の安定性は証明されていなかった。

本研究は、上記の問題を解決する、プロクシ加速度フィードフォワードを有するプロクシベースドスライディングモード制御を提案し、これを用いたシステムの原点における漸近安定性を証明するとともに、実験を通して有用性を確認した。更なる応用として、本制御を移動型四腕ロボットへ適用した。

プロクシ加速度フィードフォワードを有するプロクシベースドスライディングモード制御

ロボットを制御するにあたり、以下の運動方程式で表される一自由度モータそれぞれに関節空間で制御することを考える。

$$M\ddot{x}=f+d \quad (1)$$

ここで、 M はモータ質量、 x は位置、 f はモータの力、 d は外力である。そして、力 f を以下の提案するプロクシベースドスライディングモード制御器によって決定する。

$$f=M\dot{p}-B\dot{\alpha}-K\alpha-L\alpha \quad (2a)$$

$$f \in \text{sgn}_F(\sigma) \quad (2b)$$

$$\sigma \triangleq -J\dot{\beta} - H\dot{\beta} - G\beta \quad (2c)$$

$$\dot{\alpha} \triangleq x - p, \beta \triangleq p - r, e \triangleq x - r \quad (2d)$$

ここで、 $\text{sgn}_F(\sigma)$ は以下のような集合値関数である。

$$\text{sgn}_F(\sigma) \triangleq \begin{cases} \{-F\} & \text{if } \chi < 0 \\ \{-F, F\} & \text{if } \chi = 0 \\ \{F\} & \text{if } \chi > 0 \end{cases} \quad (3)$$

そして、 B 、 K 、 L はそれぞれ微分・比例・積分ゲインであり、 J 、 H 、 G はスライディングモードゲインである。変位 $\dot{\alpha}$ および β は以下の図のように関係しており、目標位置 r とプロクシの位置 p の変位が β であり、仮想物体 p とアクチュエータ位置 x の変位が $\dot{\alpha}$ である。これらが(2a)の比例積分微分制御器と(2b)のスライディングモード制御によって以下のように結合されている。

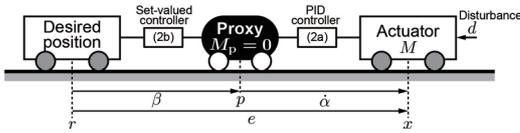


図1 式(1)および(2)の概念図

微分・比例・積分ゲインを以下のように決定する。

$$B = M(g_a + g_b), K = M(g_a g_b + g_c), L = M g_a g_c \quad (4)$$

すると、アクチュエータの位置 x およびプロクシからの変位 $\dot{\alpha}$ は以下ようになり、外力 d が零の場合においてはプロクシ加速度フィードフォワードによってアクチュエータの位置 x およびプロクシ位置 p が一致し、精度が向上している。

$$\mathcal{L}[x] = \mathcal{L}[p] + \frac{s}{M(s+g_a)(s^2+g_b s+g_c)} \mathcal{L}[d] \quad (5a)$$

$$L[\dot{\alpha}] = \frac{s}{M(s+g_a)(s^2+g_b s+g_c)} \mathcal{L}[d] \quad (5b)$$

プロクシ加速度フィードフォワードを有するプロクシベースドスライディングモード制御におけるスライディングモードゲイン J 、 H 、 G が与える β および $\dot{\beta}$ の収束への影響について紹介する。適当な β および $\dot{\beta}$ の初期値を与えたときの収束の様子を以下に示す。

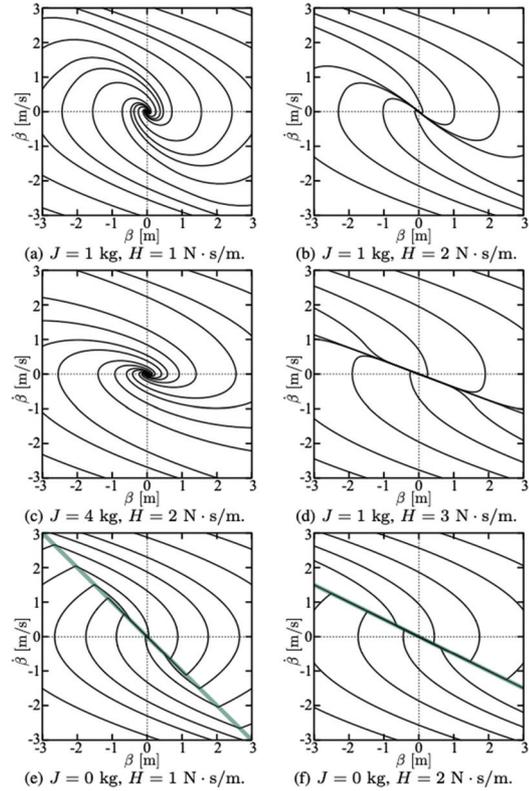


図2 状態空間におけるリーチングモードおよびスライディングモードの振る舞い ($G=1 \text{ N/m}$)

このとき式(2c)の切り替え関数が零の 때가スライディングモードであり、それ以外においてリーチングモードとなる。リーチングモードにおいてはアクチュエータの力が飽和するため安全な人間とのインタラクションを実現可能であり、スライディングモードにおいては設定した以下のダイナミクスに従って収束する。

$$\sigma = -J\dot{\beta} - H\dot{\beta} - G\beta = 0 \quad (6)$$

なお、切り替え関数 σ が加速度 $\dot{\beta}$ を含んでいることに起因し、状態空間においてスライディングモードを満たす集合は幅を持ちつつその他の状態にも依存しつつ決定する。ゲイン J が零

の時は、図 2(e) および (f) のように幅を持たず、 β および β の状態空間上に線型に現れる。また、式 (6) よりゲインを以下の不等式を満たすように設定することで臨界減衰および過減衰な振動のない収束を図 2(b) および (d) のようにスライディングモード中に実現できる。

$$H^2 \geq 4JG \quad (7)$$

リーチングモードにおいてもこれを満たすことによって振動（状態空間上での渦巻き）を抑えることが可能である。また、 J および H を小さく設定することで収束を高速化することが可能である。

安定性解析

式 (1) および (2) を以下のように状態空間表現する。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}f + \mathbf{E}\mathbf{v} \\ f &= \text{sat}_F(\mathbf{C}\mathbf{z}) \end{aligned} \quad (8)$$

本システムを対象に、以下の定理を証明した。
定理 1. 零入力 $\mathbf{v}=0$ のシステム (8) を考える。もし、行列 \mathbf{A}_α がフルビッツであり、ゲインが $J > 0$, $H > 0$, $G \geq 0$ を満たせば原点 $\mathbf{z}=0$ は大域的漸近安定である。

$$\mathbf{A}_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{L}{M} & -\frac{K}{M} & -\frac{B}{M} \end{bmatrix} \quad (9)$$

定理 2. システム (8) および原点 $\mathbf{z}=0$ の近傍 \mathcal{D} を考える。もし、行列 \mathbf{A}_α がフルビッツであり、ゲインが $J > 0$, $H > 0$, $G \geq 0$ を満たし、入力 \mathbf{v} が以下のように上に有界であれば集合 \mathcal{P}_ν は有限時間安定である。

$$\frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\sqrt{\lambda_{\max}(\mathbf{E}^\top \mathbf{E})}}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})} \|\mathbf{v}\| < \nu \text{ s.t. } \mathcal{P}_\nu \subset \mathcal{D}. \quad (10)$$

なお、近傍 \mathcal{D} および集合 \mathcal{P}_ν は 2 次元で概念

的に描くと以下のような関係にある。

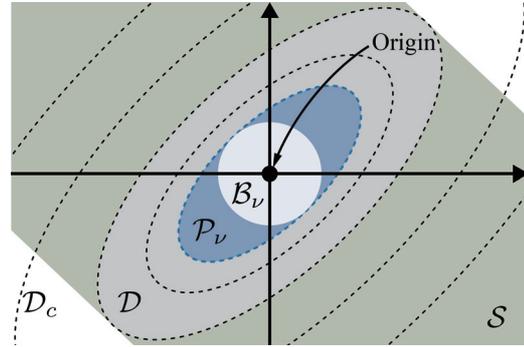


図 3 状態空間における部分集合の関係

命題 1. 微分・比例・積分ゲイン B , K , L が式 (4) を満たし、 g_a , g_b , および g_c が正であるとき、行列 \mathbf{A}_α はフルビッツである。

以上より、提案のプロクシ加速度フィードフォワードを有するプロクシベースドスライディングモード制御について以下のことが言える。外力が加わる場合、式 (10) に従い上に有界であれば、原点の近傍 \mathcal{D} においては集合 \mathcal{P}_ν へ有限時間収束する。そうでない場合、外力が零となればあらゆる状態は原点へ漸近収束する。

実装と実験

連続時間表現された式 (2) のプロクシ加速度フィードフォワードを有するプロクシベースドスライディングモード制御を離散時間に後退オイラー法で実現する。実現したアルゴリズムを次頁に示す。

なお、式 (2) の集合値付合関数は $f \in \text{sgn}_F(f^* - f) \Leftrightarrow f = \text{sat}_F(f^*)$ の等価変換により飽和関数へと変換されている。

本アルゴリズムを以下のような 6 軸平行ロボットに実装し、その精密制御と安全なインタラクションの実現を検証した。

本ロボットを用いて、2 つの実験を実施した。1 つ目として、図 4 中央上のように異なる硬さを持つ物体へ順番に接触する物体接触実験を実施した。2 つめとして、図 4 右下のようにロボットと人間が接触するヒューマンロボットイ

Algorithm 1

Proxy based control with proxy-acceleration feedforward.

Algorithm parameters: $M, B, K, L, J, H, G, F, T$

Algorithm coefficients:

$$\phi := \frac{M + BT + KT^2 + LT^3}{J + HT + GT^2}$$

$$D_1 := \frac{1}{T^2(J + HT + GT^2)} [MH - BJ + 2(GM - JK)T + (BG - HK - 3JL)T^2 - 2HLT^3 - GLT^4]$$

$$D_2 := \frac{1}{T^2(J + HT + GT^2)} [2(BJ - MH) + 3(JK - MG)T - (BG - HK - 3JL)T^2 + HLT^3]$$

$$D_3 := \frac{MH - BJ + (MG - JK)T - JLT^2}{T^2(J + HT + GT^2)}$$

$$C_0 := \frac{T^3}{M + BT + KT^2 + LT^3}, C_1 := \frac{3M + 2BT + KT^2}{M + BT + KT^2 + LT^3}$$

$$C_2 := -\frac{3M + BT}{M + BT + KT^2 + LT^3}, C_3 := \frac{M}{M + BT + KT^2 + LT^3}$$

Inputs: Desired position r_k , Position response x_k , Force command f_{ck} , Measured force f_{hk}

Controller:

$$\bar{r}_k := \frac{r_k - r_{k-1}}{T}, \bar{\bar{r}}_k := \frac{r_k - 2r_{k-1} + r_{k-2}}{T^2}$$

$$\bar{x}_k := \frac{x_k - x_{k-1}}{T}, \bar{\bar{x}}_k := \frac{x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2}}{T^2}$$

$$\xi_k := J(\bar{\bar{r}}_k - \bar{\bar{x}}_k) + H(\bar{r}_k - \bar{x}_k) + G(r_k - x_k) + f_{ck} + f_{hk}$$

$$f_k^* := \phi \xi_k + M \bar{\bar{x}}_k + D_1 \alpha_{k-1} + D_2 \alpha_{k-2} + D_3 \alpha_{k-3}$$

$$f_k := \text{sat}_F(f_k^*)$$

$$\alpha_k := C_0(M \bar{\bar{x}}_k - f_k) + C_1 \alpha_{k-1} + C_2 \alpha_{k-2} + C_3 \alpha_{k-3}$$

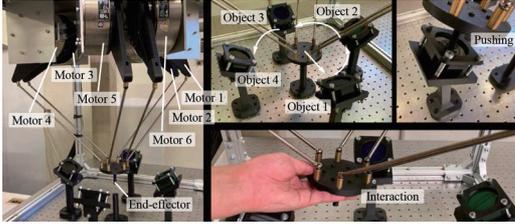
Output: Force f_k 

図4 6軸パラレルロボット

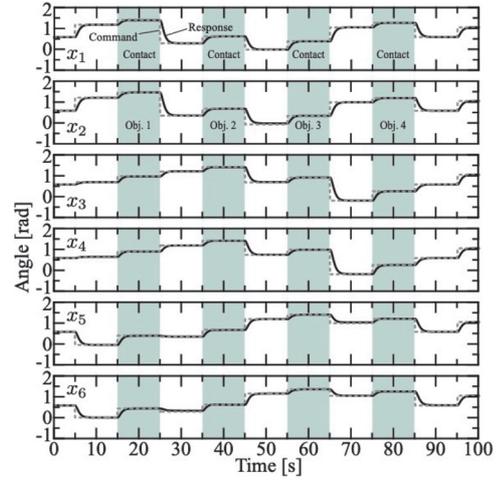
インタラクション実験を実施した。

まず、物体接触実験における各モータの結果を以下に示す。

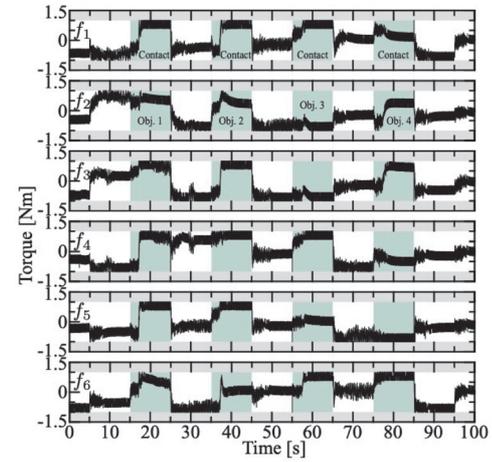
結果における緑のゾーンが物体と接触している機関であり、物体1から物体4へ徐々に柔らかくなっている。接触時に物体の硬さやエンドエフェクタの姿勢に応じてモータのトルクが飽和している。トルクが飽和したのちは、図5(c)のようにリーチングモードからスライディングモードへと移行し、位置指令へ緩やかに回帰している。また、非接触時は精密な指令追従を実現しており、シームレスな精密制御と飽和による安全制御の切り替えを実現した。

次に、ヒューマンロボットインタラクション実験の角モータにおける結果を以下に示す。

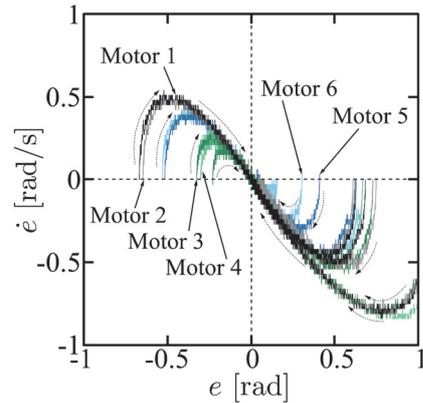
位置指令は一定の位置を保つように指令を与



(a) 6軸角度結果



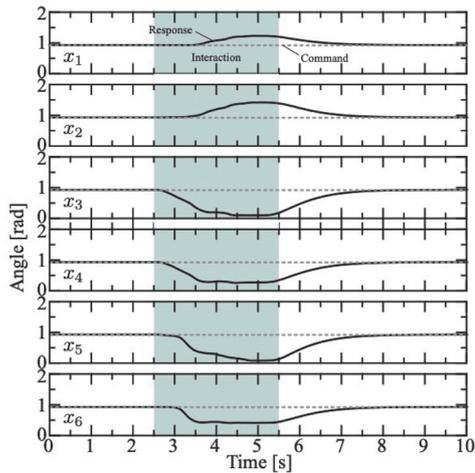
(b) 6軸トルク結果



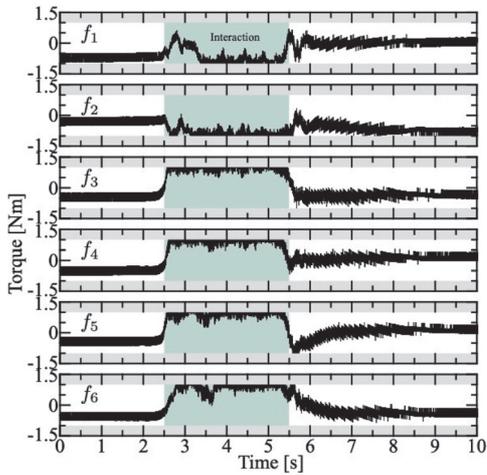
(c) 状態空間結果

図5 物体接触実験結果

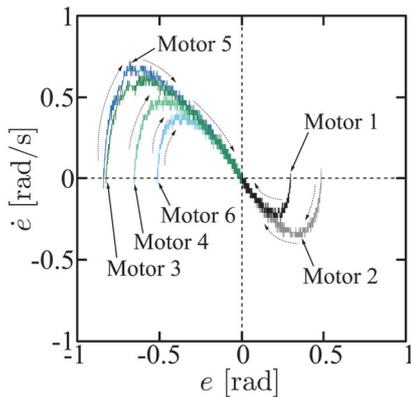
え、緑色の期間において実験者がロボットのエンドエフェクタに接触した。接触中はトルクが飽和し、ロボットは実験者と安全な接触を実現し、適切に応答値は指令値から乖離した。そし



(a) 6軸角度結果



(b) 6軸トルク結果



(c) 状態空間結果

図6 ヒューマンロボットインタラクション実験

てトルク飽和後（接触後）は図6(c)のように緩やかに指令値へと回帰した。

プロクシ加速度フィードフォワードを有するプロクシベースドスライディングモード制御を以下のようなトルク限界まで駆動しつつ動作す

る移動型四腕ロボットへと適用した。

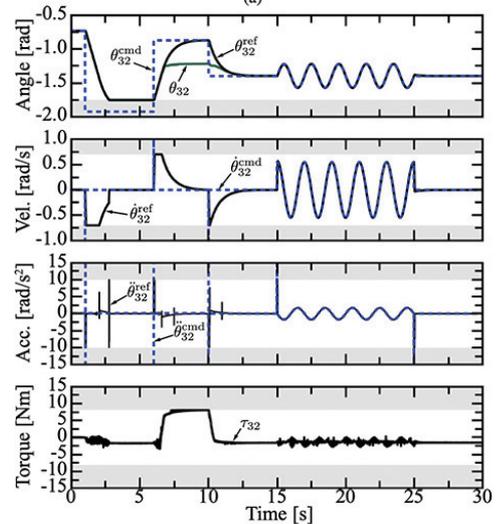


図7 移動型四腕ロボット

検証にあたり、単関節のみを動かした結果を以下に示す。



(a)



(b)

図8 関節空間検証結果

ここでは、角度・角速度・角加速度指令値らへも制約を与える軌跡修正アルゴリズムも付与されており、角度制約およびトルク制約は検証のため実際より厳しく設定した。

結果より、軌跡修正アルゴリズムによって角度・角速度・角加速度指令値がグレーゾーンで示される制約を適切に満たし、6から10秒の期間において図8(a)のように地面との接触到

よりトルクが飽和した。そして、その後、提案手法によって緩やかに指令値へと回帰した。

[成果の発表, 論文など]

提案制御手法およびそれを用いた移動型四腕ロボットの双方において論文執筆中であり、投稿予定である。