

ロボットからの指令によるドローンの追従制御

Tracking control of drones using commands from moving robots

システム工学群

人工知能システム論研究室 西村 奎一郎

1. はじめに

昨今、様々な分野でドローンの導入が進められている。ドローンを用いることで、高所や危険区域での作業を無人で行うことが可能となり、事故防止や人手不足の解消につながる。また、ヘリコプターのような大型航空機と比べて、導入および運用コストが低く、利用可能な場面が多い。ドローンが活用される例として、農薬散布⁽¹⁾や橋梁点検⁽²⁾が挙げられる。

ここでは、図1のような、移動ロボットがドローンへ指令を送り、自身に追従させる状況を考える。ロボットがドローンの位置を制御し、ドローンが撮影などのタスクを遂行する。このような役割分担により、ドローンの位置制御に必要なセンサ、計算にかかるコストを削減できる。また、ロボットを併用することで、ロボットからドローンへの給電も可能となる。ドローンは飛行のために重量に関する制約を有し、さらにバッテリー消費が激しいため、これらの利点はとくに重要である。文献⁽³⁾⁽⁴⁾では、この方法を果樹園での自動撮影に応用することが検討されている。一方で、この方法による追従制御では、ロボットからドローンへの指令の伝達に時間遅れが生じる。時間遅れは制御性能を劣化させるだけでなく、フィードバック系を不安定化させる恐れがある。

そこで本研究では、この時間遅れを考慮したドローンの追従制御器の設計を目的とする。具体的には、等速で移動するロボットとそれに追従するドローンからなるシステムを考え、ドローンへの制御入力に時間遅れが含まれるという仮定のもとで、追従誤差を0にする制御器の設計問題を検討する。まず、設計問題の解として比例制御器(P制御器)を採用し、そのときのフィードバック系の安定条件および追従誤差の定常値を明らかにする。さらに、この結果を比例-積分制御器(PI制御器)を用いた場合に拡張し、PI制御器によって追従誤差の定常値を0にできることを示す。

記法：実数の集合と正の実数の集合をそれぞれ \mathbb{R} , \mathbb{R}_+ と表記する。ラプラス演算子を s で表す。

2. 問題設定

1次元空間上の移動ロボットとドローンからなるシステムを考える。ロボットとドローンのダイナミクスは

$$\begin{aligned}\dot{x}_r(t) &= v_r & (1) \\ \dot{x}_d(t) &= u_d(t - \ell) & (2)\end{aligned}$$

で記述される。ここで、 $x_r(t), x_d(t) \in \mathbb{R}$ はそれぞれロボットおよびドローンの位置、 $v_r \in \mathbb{R}$ はロボットの移動速度、 $u_d(t) \in \mathbb{R}$ はロボットからの指令に対応する制御入力、 $\ell \in \mathbb{R}_+$ は時間遅れを表す。

(1)式はロボットが一定の速度 v_r で移動していることを意味しており、本研究では、このロボットにドローンを追従させるための制御入力 $u_d(t)$ を設計する。ロボットに対するドローンの目標相対位置を $d \in \mathbb{R}$ とし、追従誤差を $e(t) := x_d(t) -$

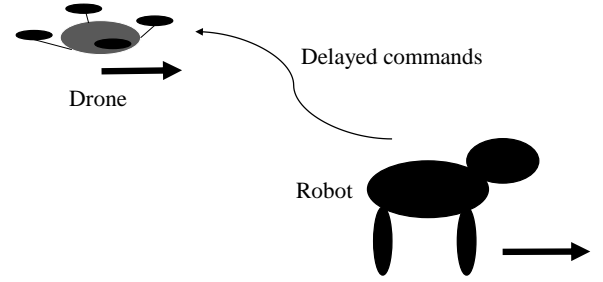


Fig. 1 Tracking control of a drone using commands from a moving robot

$x_r(t) - d$ と定義する。このとき、つぎの問題を考える。

問題1：(1), (2)式で記述されるシステムに対し、ロボットの移動速度 v_r と目標相対位置 d が与えられるとする。次式を満たす制御入力 $u_d(t)$ を求めよ。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (3)$$

(2)式からわかるように、対象のシステムでは、制御入力 $u_d(t)$ に時間遅れ ℓ が含まれており、この点に問題の難しさがある。

3. ロボットからの指令によるドローンの追従制御

3.1 P制御器による追従制御

問題1の解として、 $k_p \in \mathbb{R}_+$ を比例ゲインとしたP制御器

$$u_d(t) = -k_p e(t) \quad (4)$$

を用いることを考える。

この場合のフィードバック系を解析し、追従誤差 $e(t)$ の振舞いを調べる。(1), (2), (4)式より、 $e(t)$ の時間微分は、

$$\dot{e}(t) = -k_p e(t - \ell) - v_r \quad (5)$$

と表される。ここで、目標相対位置 d が定数であることに注意する。(5)式に対して、移動速度 v_r を時間 t の関数とみなし、入力 $v_r(s)$ から出力 $e(s)$ への伝達関数 $G_P(s)$ を求めると、

$$G_P(s) = -\frac{\ell s + 2}{\ell s^2 + (2 - k_p \ell)s + 2k_p} \quad (6)$$

となる。ここで、時間遅れ要素 $e^{-\ell s}$ はパデ近似

$$e^{-\ell s} \approx \frac{1 - \ell s/2}{1 + \ell s/2} \quad (7)$$

によって近似されている。

(6)式の伝達関数 $G_P(s)$ の安定性と定常特性を解析することで、つぎの結果が得られる。

定理 1 : 伝達関数 $G_P(s)$ に対し、以下の(i), (ii)が成立する。

(i) $G_P(s)$ が安定であるための必要十分条件は、比例ゲイン k_P がつぎの不等式を満たすことである。

$$0 < k_P < \frac{2}{\ell} \quad (8)$$

(ii) (8)式の条件が成り立つとき、ステップ状の入力 $v_r(t) \equiv v_r$ に対する出力 $e(t)$ の定常値は $e(\infty) = -v_r/k_P$ である。

定理 1 は、(7)式の近似のもとで、(4)式の P 制御器を用いたときのフィードバック系の安定条件と追従誤差の定常値 $e(\infty)$ を明らかにしている。(i)は時間遅れ ℓ が大きくなるほど、フィードバック系を安定化可能な比例ゲイン k_P の範囲は狭くなることを意味する。一方、(ii)は $e(\infty)$ が移動速度 v_r とゲイン k_P に依存することを示しており、(8)式の条件を満たす範囲で k_P を大きくすることで、 $|e(\infty)|$ を減らすことができる。

3.2 PI 制御器への拡張

定理 1 より、(4)式の P 制御器を用いることで一定の追従性能は実現できるものの、追従誤差 $e(t)$ の定常値は 0 にならないことが示された。そこで、PI 制御器

$$u_d(t) = -k_P e(t) - k_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (9)$$

を用いることを考える。ここで、 $k_I \in \mathbb{R}_+ \cup \{0\}$ は積分ゲインである。 $e(t)$ の積分値を制御入力 $u_d(t)$ に反映させることにより、定常状態での追従誤差を低減できると考えられる。

追従誤差 $e(t)$ の振舞いを調べるために、3.1 節と同様に、結果として得られるフィードバック系を解析する。(1), (2), (9)式から $e(t)$ のダイナミクスを導出し、入力 $v_r(s)$ から出力 $e(s)$ への伝達関数 $G_{PI}(s)$ を求めると、

$$G_{PI}(s) = -\frac{\ell s^2 + 2s}{\ell s^3 + (2 - k_P \ell) s^2 + (2k_P - k_I \ell) s + 2k_I} \quad (10)$$

となる。ただし、時間遅れ要素 $e^{-\ell s}$ は(7)式により近似される。

(10)式の伝達関数 $G_{PI}(s)$ の安定性と定常特性を解析した結果として、つぎの定理が得られる。

定理 2 : 伝達関数 $G_{PI}(s)$ に対し、以下の(i), (ii)が成立する。

(i) $G_{PI}(s)$ が安定であるための必要十分条件は、比例ゲイン k_P と積分ゲイン k_I が(8)式および

$$0 < k_I < \frac{2k_P(2 - k_P \ell)}{\ell(4 - k_P \ell)} \quad (11)$$

を満たすことである。

(ii) (8), (11)式の条件のもとで、ステップ状の入力 $v_r(t) \equiv v_r$ (ただし、 v_r は任意) に対し、(3)式が成り立つ。

定理 2 は、(7) 式の近似のもとで、比例ゲイン k_P と積分ゲイン k_I を適切に選べば、(9)式の PI 制御器によって追従誤差 $e(t)$ の定常値を 0 にできることを意味する。ここで、(11)式を満たす k_I は常に存在することに注意する。これは、(8)式の条件が成り立つとき $(2 - k_P \ell)/(4 - k_P \ell) > 0$ であることと、 $\ell, k_P \in \mathbb{R}_+$ であることから示される。

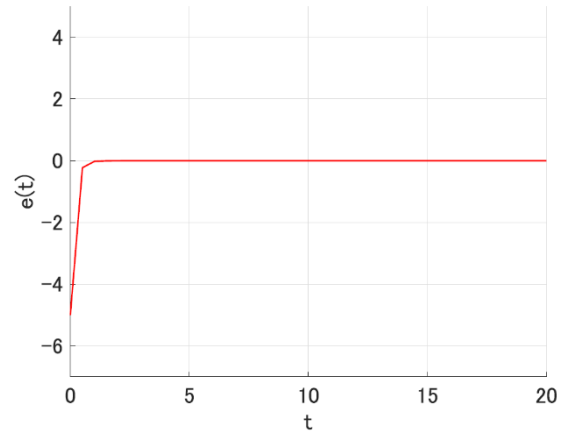


Fig. 2 Time evolution of the tracking error $e(t)$ when using the PI controller (9)

定理 2 を数値シミュレーションにより検証する。(1), (2), (9)式で与えられるフィードバック系を考える。ロボットの移動速度と時間遅れをそれぞれ $v_r := 1$, $\ell := 0.02$ と設定する。このとき、(8), (11)式より、安定条件は $k_P < 100$ と

$$0 < k_I < \frac{2k_P(2 - 0.02k_P)}{0.02(4 - 0.02k_P)} \quad (12)$$

となる。よって、これらの条件を満たすものとして、 $k_P := 65$, $k_I := 100$ を選ぶ。

目標相対位置 $d := -5$ に対する追従誤差 $e(t)$ の時間変化を図 2 に示す。 $e(t)$ は時間の経過とともに 0 に収束していることがわかる。この結果は定理 2 の妥当性を裏付けている。

4. おわりに

本研究では、移動するロボットとそれに追従するドローンからなるシステムを対象に、信号伝達の時間遅れを考慮したドローンの追従制御器の設計問題を検討した。時間遅れ要素をパゼ近似することにより、P 制御器と PI 制御器を用いた場合それぞれにおけるフィードバック系の安定条件と追従誤差の定常値を明らかにした。その結果、PI 制御器を用いることで、追従誤差の定常値を 0 にできることが示された。本研究の結果は、移動ロボットを介してドローンの位置を制御する際に有用であり、ドローンの活用範囲の拡大に貢献するものと期待される。

参考文献

- (1) 農林水産省：令和 6 年度農業分野におけるドローンの活用状況，<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/drone-184.pdf> (参照 2026-2-5)
- (2) 国土交通省：国土交通省のドローン活用事例，<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/gijyutu/content/001510876.pdf> (参照 2026-1-20)
- (3) 樋口，新谷，栗原：リアルタイム画像処理による地上視点からのドローン制御，令和 7 年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会講演論文集，p. 120 (2025)
- (4) 石田，栗原：地上 Web カメラ映像に基づく小型ドローン Tello の静止時姿勢推定，2025 年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集，pp. 122–127 (2025)