

اجتناب از برخورد با موانع به روش میدان پتانسیل مصنوعی برای بالگرد بی سرنشین

فاطمه قادری^{۱*}، علیرضا طلوعی^۲، رضا قاسمی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، f_ghaderi@sbu.ac.ir

۲- دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی، toloei@sbu.ac.ir

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی قم، reghasemi@gmail.com

*نویسنده مخاطب

چکیده

این مقاله با هدف کنترل بالگرد بدون سرنشین در محیط با موانع تدوین شده است. موانع مورد نظر به صورت استاتیکی و دینامیکی در نظر گرفته شده‌اند. کنترل وضعیت و موقعیت بالگرد با استفاده از کنترلر مد لغزشی ترمینال صورت گرفته است. برای عدم برخورد با موانع از برنامه‌ریزی مسیر به روش میدان پتانسیل مصنوعی استفاده شده است. برای جلوگیری از برخورد با موانع، از الگوریتم برنامه ریزی مسیر میدان پتانسیل استفاده شده است که در آن ربات نقطه‌ای در داخل میدان‌های پتانسیل فرض می‌شود. این روش ترکیبی از جاذبه به سمت هدف و دفع از موانع است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای کنترل موقعیت و وضعیت بالگرد به روش مد لغزشی ترمینال، بیانگر ردیابی مرجع و پایداری در زمان مناسب است. عبور از موانع نیز در قالب دو ماموریت ارائه شد. در سناریوی اول موانع به صورت استاتیک در نظر گرفته شدند. در سناریوی دوم، موانع دینامیکی اعمال شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عبور از موانع نشان داد که بالگرد به خوبی از هر دو نوع مانع عبور کرده و به هدف مورد نظر می‌رسد. نتایج حاصل شده کنترل بالگرد طی دو سناریو موفقیت و کارآمدی برنامه ریزی مسیر به روش میدان پتانسیل مصنوعی بکار رفته در محیط با موانع را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بالگرد بدون سرنشین - کنترل مد لغزشی - عدم برخورد با موانع - روش میدان پتانسیل مصنوعی

۱- مقدمه

ربات های پرنده بدون سرنشین به طور گسترده در زمینه های نظامی و غیرنظامی مانند عملیات ضد تروریستی، شناسایی، کشاورزی و غیره استفاده می شوند [۱]. از مهمترین روبات‌های پرنده بی سرنشین بالگردها هستند. در این پرنده‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فردی مانند برخاستن و فرود عمودی، هاور و پرواز با سرعت کم در ارتفاعات پایین بوده‌اند [۲]. بنابراین، بالگردهای بدون سرنشین می‌توانند در هر محیطی پرواز کنند، که باعث می‌شود کاربرد بالایی در زمینه های نظامی و غیرنظامی داشته باشند [۳].

۴. بالگرد بدون سرنشین یک سیستم معمولی غیرخطی، به شدت کوپل شده و ناپایدار است. دارای شش درجه آزادی و چهار کمیت کنترل مستقیم [۲]. [۵] است که تحقیق در حوزه آن را بسیار دشوار می‌کند.

در حال حاضر، روش کنترل PID به طور گسترده در الگوریتم های کنترل بالگردهای بدون سرنشین استفاده می‌شود [۶]، [۷]. روش سنتی کنترل PID دارای مزایایی همچون اجرای ساده، استحکام خوب و قابلیت اطمینان بالا است، اما تنظیم پارامتر آن دشوار است. به طور کلی بر اساس

تجربه و سعی و خطا شبیه سازی به دست می‌آید، و کنترل برای رسیدن به مقدار مورد انتظار مشکل است [۸]. مشکل کلیدی کنترلر PID تنظیم دقیق و موثر پارامترها است [۹].

نظر به دینامیک غیرخطی این پرنده‌ها، از کنترل غیرخطی نیز برای کنترل موقعیت و وضعیت استفاده شده است. در مطالعات انجام شده در مورد کنترل بالگردهای بدون سرنشین، کنترل به روش‌های پیش‌بین [۱۰]، مد لغزشی [۱۱]، H_{∞} [۱۲] و کنترل تطبیقی [۱۳] صورت گرفته است. در میان این روش‌ها کنترل مد لغزشی به علت توانایی غلبه بر غیرخطی‌های دینامیکی و حذف اغتشاشات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مشکل این روش بروز پدیده چترینگ در برخی مواقع است که برای حذف آن نیز روش‌های مختلفی اعمال شده است [۱۴]. از جمله این روش‌ها می‌توان به ایجاد لایه مرزی و استفاده از تابعی همچون \tanh اشاره کرد.

از مسائل مربوط به کنترل بالگردهای بی‌سرنشین عدم برخورد با موانع است. روش‌های زیادی برای برنامه‌ریزی مسیر برای اجتناب از موانع پیشنهاد شده‌اند، مانند استفاده از بینایی کامپیوتری [۱۵]، رادار موج میلی متری [۱۶]، سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) [۱۷] و برد یاب لیزری اسکن (SLRF) [۱۸]، روش نمودار [۱۹] و درختان تصادفی [۲۰]. در [۲۱] روش معادله Riccati وابسته به حالت برای طراحی حرکت ربات با عدم قطعیت بررسی شده است، همچنین اجتناب از موانع دینامیکی و کنترل ردیابی ربات با روش SDRE انجام شده است. در [۲۲] از منطق فازی برای پیش بینی حرکت موانع و افزایش سرعت ربات استفاده شده است. در [۲۳] یک پهپاد مجهز به مجموعه ای از حسگرهای کوچک برای عبور از موانع در نظر گرفته شده است. ربات سرعت خود را با استفاده از فیلتر کالمن تخمین می‌زند. در [۲۴] روش جدیدی برای تعریف مسیر در حضور موانع پیشنهاد شده است که منحنی را به عنوان یک تقاطع دو سطحی توصیف می‌کند. نتایج شبیه سازی نشان داد که این روش قادر است مسیری امن برای عبور از موانع ایجاد کند. [۲۵] به کنترل ردیابی مشکلات سیستم اولر-لاگرانژ در محیطی حاوی موانع پرداخته است. بر اساس روش مد لغزشی، یک کنترل کننده برای تعیین ردیابی پیشنهاد شده است و نتایج به دست آمده اجتناب از مانع را تضمین می‌کند. محبوب ترین الگوریتم برنامه ریزی مسیر، میدان پتانسیل مصنوعی (APF) است. در این روش، هدف نیروی کشش و موانع، نیروی دافعه مجازی از خود تابش می‌کنند و به ربات اجازه داده می‌شود تا در جهت گرادیان میدان مجازی کشیده شود، در نهایت ربات ضمن دوری از موانع به هدف می‌رسد [۲۶].

کنترل کننده مد لغزشی از دو بخش تشکیل شده است: کنترل معادل و کنترل ناپیوسته:

$$U_n = u_{eq} + u_{discn}, n = 1, 2, x, y, z \quad (3)$$

که u_{eq} با برابر صفر قرار دادن مشتق سطح لغزش و u_{discn} با برآوردن شرایط پایداری لیاپانوف سطح لغزش به دست می آید. با قرار دادن δ در قالب توابع فوق می توان کنترل ناپیوسته را یکی از توابع زیر در نظر گرفت:

$$u_{disc} = -k_1 s - k_2 \text{sign}(s) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن سیستم غیرخطی به صورت زیر:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) + d(t) \quad (5)$$

که در آن d بیانگر دینامیک مدل نشده سیستم و اغتشاشات است.

با در نظر گرفتن کنترل به صورت زیر داریم:

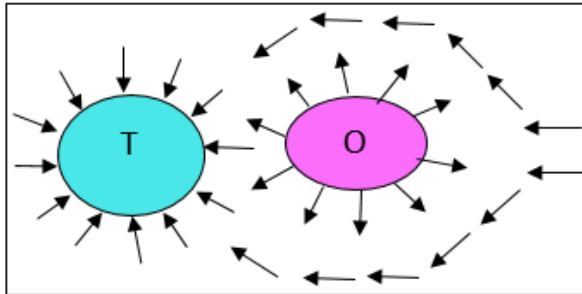
$$u = -b^{-1}(x) \left(f(x) + \lambda \frac{\beta}{\alpha} x^{\frac{\alpha}{\beta}} + \eta \text{sgn}(s) \right) \quad (6)$$

که $\eta > 0$ ، در نتیجه سطح لغزش (۲) در زمان محدود به دست

خواهد آمد. علاوه بر این، حالات x_1 و x_2 در زمان محدود به صفر همگرا خواهند شد.

۴- اجتناب از برخورد با موانع

مدل میدان پتانسیل مصنوعی برنامه ریزی مسیر (AFP) پیشنهاد شده توسط خطیب [۲۹] یک مدل میدانی متداول است (شکل ۱). در AFP، T نشان دهنده هدفی است که برای ربات جاذبه ایجاد می کند و O نشان دهنده موانعی است که دافعه ایجاد می کند.



شکل ۱- روش میدان پتانسیل مجازی

کنترل ربات با توجه به مانع O در میدان پتانسیل مجازی به صورت است:

$$U_{art}(x) = U_{att}(x) + U_{rep}(x) \quad (7)$$

که در آن، U_{art} ، U_{att} ، U_{rep} ، به ترتیب انرژی پتانسیل جاذبه، انرژی پتانسیل دافعه و میدان پتانسیل مجازی را نشان می دهند. سپس تابع گرادیان آن را می توان به صورت زیر نوشت:

$$F_{art} = F_{att} + F_{rep} \quad (8)$$

$$F_{att} = -\text{grad}[U_{att}(x)]$$

$$F_{rep} = -\text{grad}[U_{rep}(x)]$$

که در آن F_{att} جاذبه ایجاد شده روی ربات برای رسیدن به موقعیت هدف x و F_{rep} نشان دهنده نیروی ایجاد شده توسط U_{rep} است که با دفع از مانع ایجاد می شود. F_{rep} متناسب با فاصله بین ربات و هدف است. سپس ضریب جذب k_p نیز در نظر گرفته می شود و میدان پتانسیل جاذبه U_{att} به سادگی به صورت زیر بدست می آید:

در این مقاله، کنترل بالگرد در محیط با موانع دینامیکی و استاتیکی بررسی شده است. برای کنترل موقعیت و وضعیت بالگرد از روش مد لغزشی ترمینال استفاده شده است. اجتناب از برخورد با موانع نیز با برنامه ریزی مسیر به روش میدان پتانسیل مجازی صورت گرفته است.

در بخش اول به ارائه مدل دینامیکی بالگرد پرداخته شده است. بخش دوم کنترل مد لغزشی ارائه شده است. در بخش بعدی عدم برخورد با موانع به روش پتانسیل آمده است و در نهایت نتایج حاصل از شبیه سازی ارائه شده است.

۲- مدل سازی دینامیکی بالگرد

مدل غیر خطی بالگردهای بدون سرنشین در متون مختلفی ارائه شده است. مدل دینامیکی بالگرد از معادله غیر خطی نیوتن اویلر برای بدنه صلب شش درجه آزادی به دست آمده است. معادلات حرکت بالگرد بدون سرنشین به صورت زیر بیان شده است [۲۷]:

$$\begin{aligned} X_{MR} + X_{TR} + X_{fus} &= m(\dot{u} + rv + qw) + mgsin\theta \\ Y_{MR} + Y_{TR} + Y_{fus} &= m(\dot{v} - pw + ru) + mgsin\theta\cos\theta \\ Z_{MR} + X_{TR} + X_{fus} &= m(-\dot{w} - qu + pv) - mg\cos\theta\cos\theta \\ L_{MR} + L_{TR} + L_{fus} &= I_{xx}\dot{p} - (I_{yy} - I_{zz})qr \\ M_{MR} + M_{TR} + M_{fus} &= I_{yy}\dot{q} - (I_{zz} - I_{xx})pr \\ N_{MR} + N_{TR} + N_{fus} &= I_{zz}\dot{r} - (I_{xx} - I_{yy})pq \\ \dot{\varphi} &= p + (q\sin\theta + r\cos\theta)\tan\theta \\ \dot{\theta} &= qc\cos\theta - r\sin\theta \\ \dot{\psi} &= (q\sin\theta + r\cos\theta)\sec\theta \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن (X, Y, Z) نیروها در جهات (x, y, z) هستند و (L, M, N) گشتاور رول، پیچ و یاو را نشان می دهد. زیروندهای MR, TR و fus به روتور اصلی، روتور دم و بدنه اشاره دارد. (φ, θ, ψ) زوایای اویلر و (p, q, r) نرخ این زوایا هستند.

۳- کنترل مد لغزشی

کنترل مد لغزشی به عنوان یکی از ابزارهای کارآمد برای طراحی کنترل کننده های قوی برای سیستم های دینامیکی غیرخطی مرتبه بالا که تحت شرایط نامشخص کار می کنند، شناخته می شود. مزیت اصلی حالت لغزشی حساسیت کم به تغییرات و اختلالات پارامترهای سیستم است که نیاز به مدل سازی دقیق را از بین می برد. کنترل مد لغزشی امکان جداسازی حرکت کلی سیستم را به اجزای جزئی مستقل با ابعاد پایین تر می دهد و در نتیجه پیچیدگی طراحی بازخورد را کاهش می دهد.

۳-۱- کنترل مد لغزشی ترمینال

تاکید کنترل مد لغزشی ترمینال بر کاهش سطح لغزشی زمان همگرایی به صفر است. برای این منظور سطح لغزش به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۲۸]:

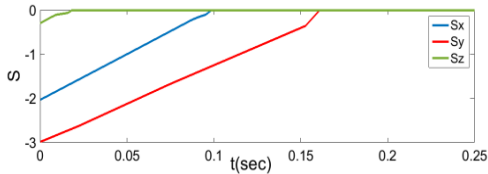
$$S = x_1 + \lambda x_1^{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (2)$$

که در آن:

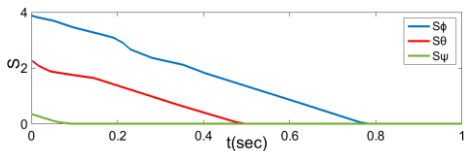
$$\frac{1}{\gamma} < \frac{\alpha}{\beta} < 1$$

و β اعداد ثابت مثبت هستند.

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل موقعیت و وضعیت بالگرد و همچنین عبور از موانع ارائه شده است. شکل‌های ۲ و ۳ سطوح لغزش موقعیت و وضعیت بالگرد را نشان می‌دهد که مطابق با آن، زمان همگرایی کمتر از ۰.۵ ثانیه است.

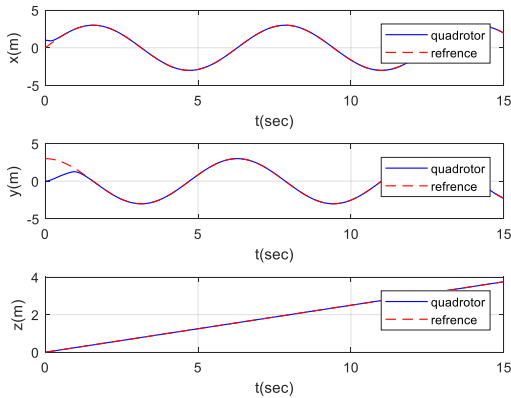


شکل ۲- سطوح لغزش موقعیت بالگرد با استفاده از روش مد لغزشی ترمینال



شکل ۳- سطوح لغزش وضعیت بالگرد با استفاده از روش مد لغزشی ترمینال

در شکل‌های ۴ و ۵ کنترل موقعیت و وضعیت بالگرد را با استفاده از کنترلر مد لغزشی ترمینال نشان می‌دهد که همانطور که مشخص است، بخوبی به مقادیر رفرنس در زمان کمتر از ۲ ثانیه همگرا می‌شوند.



شکل ۴- کنترل موقعیت بالگرد با استفاده از روش مد لغزشی ترمینال

$$U_{att} = \frac{1}{\sqrt{3}} k_p R_{at}^T \quad (9)$$

علاوه بر این، U_{rep} یک تابع پیوسته غیر منفی است و تأثیر این پتانسیل باید به منطقه خاصی در اطراف مانع بدون نیروهای مزاحم نامطلوب محدود شود. بنابراین، معادله U_{rep} به صورت زیر است:

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} m \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{\rho} \right)^2 & R_{rep} \leq \rho \\ 0 & R_{rep} > \rho \end{cases} \quad (10)$$

که ρ فاصله ایمن از موانع است.

$R_{at} = \|X_d - X\| = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2 + (z - z_d)^2}$
 $R_{rep} = \|X_{ob} - X\| = \sqrt{(x - x_{ob})^2 + (y - y_{ob})^2 + (z - z_{ob})^2}$
 کوتاهترین فاصله بین روبات و مانع است. $X = (x, y, z)$ موقعیت روبات، $X_{ob} = (x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$ موقعیت مانع، $X_d = (x_d, y_d, z_d)$ موقعیت هدف است. طبق نظریه جنبشی، توابع جاذبه و دافعه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F_{att} = -\nabla \left(\frac{1}{\sqrt{3}} k_p R_{at}^T \right) = k_p R_{at} \quad (11)$$

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} m \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{\rho} \right)^2 \frac{1}{R_{rep}} & R_{rep} \leq \rho \\ 0 & R_{rep} > \rho \end{cases} \quad (12)$$

الگوریتم پیتانسیل برای عبور از موانع در دو ماموریت بررسی شده است. در ماموریت اول ۶ مانع در نظر گرفته شده است که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. در این مرحله موانع استاتیکی در نظر گرفته شده اند.

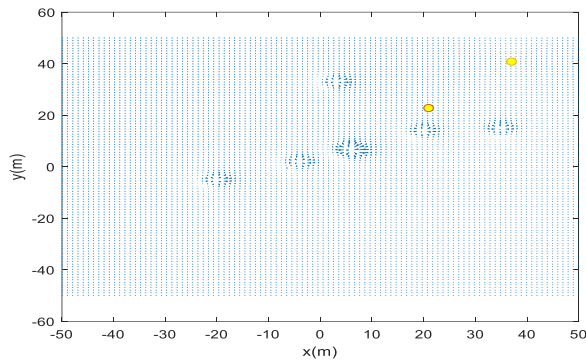
جدول ۱- موقعیت موانع

مانع	X(m)	Y(m)	Z(m)
۱	۱۲	۳۰	۱۵
۲	۳۵	۳۵	۱۲
۳	۱	۲۷	۱۲
۴	۰	۱۰	۱۲
۵	۰	۰	۱۲
۶	-۲۰	-۸	۱۲

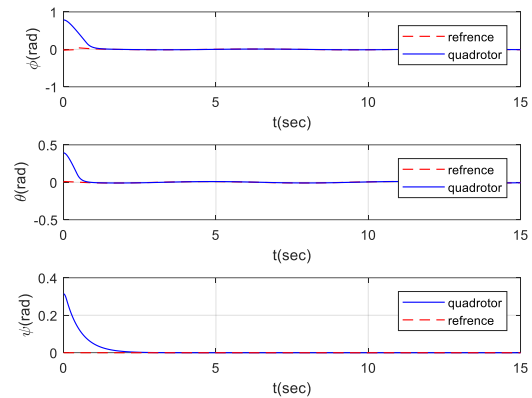
در ماموریت دوم، موانع با مشخصات مندرج در جدول ۲، به صورت دینامیک لحاظ شده‌اند.

جدول ۲- سرعت‌های موانع

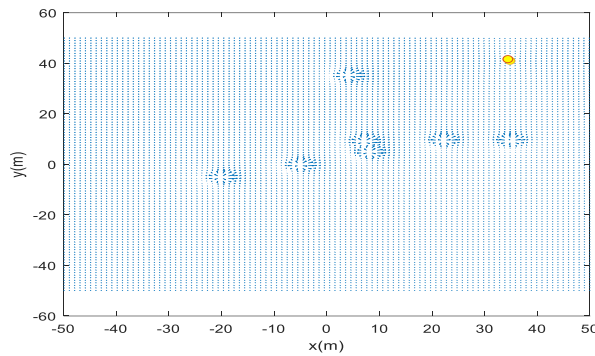
مانع	v_x	v_y	v_z
۱	$\sqrt{t}(i)$	$^6t(i)$	$^3t(i)$
۲	۰	$-2.5t(i)$	$^4t(i)$
۳	$1.0t(i)$	$-2.0t(i)$	$5t(i)$
۴	$^8t(i)$	$-5t(i)$	$4t(i)$
۵	$5t(i)$	$-1.0t(i)$	$^4t(i)$
۶	$4t(i)$	$1.0t(i)$	$^3t(i)$



شکل ۸- عبور بالگرد از موانع دینامیکی در اواسط پرواز

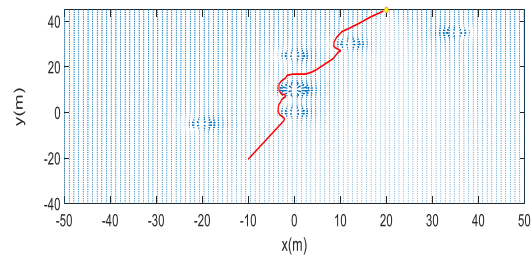


شکل ۵- کنترل وضعیت بالگرد با استفاده از روش مد لغزشی ترمینال



شکل ۹- عبور بالگرد از موانع دینامیکی در لحظه رسیدن به هدف

در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی عبور از موانع آمده است. شکل ۶ عبور بالگرد از موانع استاتیک را نشان می دهد.



شکل ۶- عبور از موانع استاتیک

شکل های ۷، ۸ و ۹ عبور بالگرد را در آغاز، اواسط و پایان پرواز و رسیدن به هدف مورد نظر نشان می دهد. مطابق اشکال ارائه شده در این بخش، بالگرد به خوبی توانسته است از موانع استاتیک و دینامیک عبور کرده و به هدف مورد نظر برسد که نشان از موفقیت روش اعمال شده دارد.

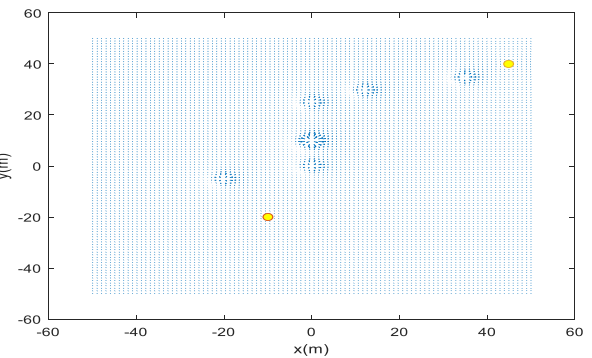
۶- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل بالگرد بدون سرنشین در محیط با موانع استاتیکی و دینامیک ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی موقعیت و وضعیت بالگرد به روش مد لغزشی ترمینال، نشان داد که این روش به خوبی توانسته است مقدار مرجع را ردیابی کند. نتایج استفاده از روش پتانسیل مجازی برای اجتناب از برخورد با موانع نیز بیانگر عبور مناسب بالگرد از موانع استاتیکی و دینامیکی و رسیدن به هدف مورد نظر است. در نتیجه نتایج به دست آمده بیانگر موفقیت روش بکار رفته برای کنترل وضعیت و موقعیت و همچنین برنامه ریزی مسیر به روش پتانسیل مجازی برای اجتناب از برخورد با موانع است.

۷- مراجع

[۱] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, & M. H. Alsharif, "Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs)", A comprehensive review. *Drones*, 6(6), ۱۴۷, ۲۰۲۲.

[۲] Z. Zheng, R. Li and G. Wang, "Trajectory tracking control



شکل ۷- عبور بالگرد از موانع دینامیکی در آغاز پرواز

of a small unmanned helicopter based on fuzzy CMAC-PID," ۲۴th Chinese Control Conference (CCC), Hangzhou, ۲۰۱۵, pp. ۵۷۱۳-۵۷۱۷, ۲۰۱۵.

[۳] J. a. Zheng, Y. Guo, Y. Zhou and Z. Meng, "Unmanned helicopter trajectory tracking control based on L"

- adaptive and backstepping method," ۲۰۱۸ Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Shenyang, pp. ۲۹۴۰-۲۹۴۶, ۲۰۱۸.
- [۴] G. Zhang, D. Bian, W. Zhang, X. Wu, Z. Zhang and H. Yu, "The research and independent on autonomous safe landing for unmanned helicopter," ۲۰۱۷ IEEE International Conference on Unmanned Systems ۲(ICUS). ۴۳۴-۴۳۷, ۲۰۱۷.
- [۵] J. Alvarenga, N. I. Vitzilaios, K. Valavanis, et al, "Survey of Unmanned Helicopter Model-Based Navigation and Control Techniques[J]", Journal of Intelligent & Robotic Systems, ۲۰۱۵, ۸۰(۱):۸۷-۱۳۸.
- [۶] Yibo Li, Shuxi Song, Helicopter Based on Fuzzy Self-tuning PID Algorithm[J], Control Engineering of China, ۲۰(۵):۹۱۰-۹۱۴, ۲۰۱۳.
- [۷] Z. Tianyi, Z. Qingzhan, L. Wei, "Quad-Rotor Aircraft Hovering Mode ITAE Optimal PID Control[J]", Electronics Optics & Control, ۲۳(۸):۴۸-۵۲, ۲۰۱۶.
- [۸] X. Lu, X. Zhang, S. Jia and J. Shan, "Design of Quadrotor Hovering Controller Based on Improved Particle Swarm Optimization[C]", International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), Hangzhou, ۴۱۴-۴۱۷, ۲۰۱۷.
- [۹] Y. Mingfeng, J. Quanyong, G. Feng, "Design and Application of PID Controller Based on Particle Swarm Optimization[J]", Computer Simulation, ۲۸(۱۱):۲۸۲-۲۸۷, ۲۰۱۱.
- [۱۰] M. Saffarian, F. Fahimi, "A novel leader-follower framework for control of helicopter formation", in ۲۰۰۷ IEEE Aerospace Conference, IEEE, ۲۰۰۷.
- [۱۱] F. Fahimi, "Full formation control for autonomous helicopter groups. Robotica", ۲۰۰۸, ۲۶(۲): p. ۱۴۳, ۲۰۰۸.
- [۱۲] Z. Wang, Y. He, and J. Han, "Multi-unmanned helicopter formation control on relative dynamics", in ۲۰۰۹ International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, ۲۰۰۹.
- [۱۳] D. Wang, Q. Zong, and B. Zhang, "Distributed adaptive finite-time formation control of multiple UAV helicopter system" in ۳۷ ۲۰۱۸th Chinese Control Conference (CCC), IEEE, ۲۰۱۸.
- [۱۴] T. Jiang, D. Lin, & T. Song, "Novel integral sliding mode control for small-scale unmanned helicopters", Journal of the Franklin Institute, 356(۵), ۲۶۶۸-۲۶۸۹, ۲۰۱۹.
- [۱۵] E. Frew, and R. Sengupta, "Obstacle avoidance with sensor uncertainty for small unmanned aircraft," ۲۰۰۴ ۴۳rd IEEE Conf. Decis. Control (IEEE Cat. No. ۰۴CH3۷۶۰۱), pp. ۶۱۴-۶۱۹ Vol. ۱, ۲۰۰۴.
- [۱۶] Y. K. Kwag, M. Choi, C. Jung, and K. Hwang, "Collision Avoidance Radar for UAV," ۲۰۰۶ CIE Int. Conf. Radar, pp. ۱-۴, Oct. ۲۰۰۶.
- [۱۷] L. Jian, L. Xiao-min, "Vision-based navigation and obstacle detection for UAV," ۲۰۱۱ Int. Conf. Electron. Commun. Control, pp. ۱۷۷۱-۱۷۷۴, Sep, ۲۰۱۱.
- [۱۸] D. Luo, F. Wang, B. Wang, and B. Chen, "Implementation of Obstacle Avoidance Technique for Indoor Coaxial Rotorcraft with Scanning Laser Range Finder," pp. ۴-۹, ۲۰۱۲.
- [۱۹] S. LaValle, S.M., Planning Algorithms. ۲۰۰۶.
- [۲۰] J. Borenstein, H. Everett, L. Feng, and D. Wehe, "Mobile robot positioning: Sensors and techniques," J. Robot. Syst., vol. ۱۴, no. ۴, pp. ۲۳۱-۲۴۹, ۱۹۹۷.
- [۲۱] A. Behboodi, and S. Salehi, "SDRE controller for motion design of cablesuspended robot with uncertainties and moving obstacles". Mater. Sci. Eng. ۲۴۸, ۱-۶, ۲۰۱۷.
- [۲۲] Y. Liu, D. Chen, and S. Zhang, "Obstacle Avoidance Method Based on the Movement Trend of Dynamic Obstacles", in ۳rd International Conference on Control and Robotics Engineering, pp. ۴۵-۵۰, ۲۰۱۸.
- [۲۳] M. Odelga, P. Stegagno, N. Kochanek, and H. Bühlhoff, "A Self-contained Teleoperated Quadrotor: On-board State-Estimation and Indoor Obstacle Avoidance", in IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. ۷۸۴۰-۷۸۴۷, ۲۰۱۸.
- [۲۴] H. Nguyen, C. Recchiuto, and A. Sgorbissa, "Real-time path generation and obstacle avoidance for multirotors: a novel approach". J. Intell. Robot. Syst. ۸۹, ۲۷-۴۹, ۲۰۱۷.
- [۲۵] X. Li, S. Song, and Y. Guo, Y., "Robust finite-time tracking control for Euler-Lagrange systems with obstacle avoidance". Nonlinear Dyn. ۹۳, ۱-۹, ۲۰۱۸.
- [۲۶] S. Ge, Y. Cui, "Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method," Autonomous robots, Vol. ۱۲, No. ۳, pp. ۲۰۷-۲۲۲, ۲۰۰۲.
- [۲۷] E. Joelianto, E. Sumarjono, A. Budiyo, & D. Penggalih, "Model predictive control for autonomous unmanned helicopters. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, ۲۰۱۱.
- [۲۸] O. Mechali, J. Iqbal, A. Mechali, X. Xie, and L. Xu, "Finite-time attitude control of uncertain quadrotor aircraft via continuous terminal sliding-mode-based active anti-disturbance approach," In ۲۰۲۱ IEEE international conference on mechatronics and automation (icma) (pp. ۱۱۷۰-۱۱۷۵), IEEE, ۲۰۲۱.
- [۲۹] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", The International Journal of Robotics Research, pp: ۹۰-۹۸, ۱۹۸۶.