



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Miguel Fernández Cortizas

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

KIT DE DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL DE ACTITUD PARA CUADRICÓPTEROS.

SEPTIEMBRE 2019

Miguel Fernández Cortizas

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:
Pascual Campoy Cervera



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



POLITÉCNICA

KIT DE DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE
ALGORITMOS DE CONTROL DE ACTITUD
PARA CUADRICÓPTEROS.

Miguel Fernández Cortizas

Tutor académico:
D. Pascual Campoy Cervera

Madrid - España
2020

*En memoria de mi padrino Juan,
seguiré trabajando hasta alcanzar las metas
que me hubiese gustado celebrar contigo.*

Agradecimientos

Resumen ejecutivo

Introducción

Alcance

Solución realizada

Experimentación y resultados.

Conclusiones y trabajo futuro

Palabras clave

UAV, cuadricóptero, control clásico, aprendizaje automático, inteligencia artificial, aprendizaje por refuerzo, redes neuronales.

Códigos UNESCO

120304 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

120326 SIMULACIÓN

330104 AERONAVES

330412 DISPOSITIVOS DE CONTROL

330703 DISEÑO DE CIRCUITOS

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Solución propuesta	1
1.3	Objetivos	1
2	Estado del arte	3
3	Fundamentos teóricos	5
4	Hardware	7
5	Software	9
6	Metodología	11
7	Experimentos	13
7.1	Experimentos en simulación	13
7.2	Experimentos en real	13
8	Conclusiones y trabajo futuro	15
8.1	Conclusiones	15
8.2	Trabajo futuro	15
A	Presupuesto y Planificación	17
A.1	Presupuesto	17
A.2	Planificación	18
B	Impacto social y medioambiental	19

Introducción

- 1.1. Motivación
- 1.2. Solución propuesta
- 1.3. Objetivos

1.3. Objetivos

Estado del arte

Fundamentos teóricos

Hardware

Software

Metodología

Experimentos

7.1. Experimentos en simulación

7.2. Experimentos en real

Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

8.2. Trabajo futuro

Presupuesto y Planificación

A.1. Presupuesto

El presupuesto del trabajo se puede separar en tres partes: recursos humanos, compra de material y amortización de los equipos utilizados.

En cuanto a los recursos humanos empleados, se ha tenido una dedicación por parte del alumno de unas 800 horas, esto es un número de horas mucho superior a las 360 horas (30h/ECTS) correspondientes a la carga temporal de los 12 ECTS del Trabajo fin de Grado (TFG). Esto se ha debido al gran alcance y a la complejidad del mismo. Un sueldo de investigador a media jornada en la universidad, sin estar graduado, es de unos 450 euros. Lo que se traduce en un salario de unos 5,625 euros la hora. Los salarios del tutor y el cotutor se han extraído del portal de transparencia de la UPM. La dedicación del tutor ha sido de unas 20 horas de implicación en el trabajo y la implicación del cotutor ha sido de unas 80 horas de implicación.

Recursos humanos	Horas	Coste Horario [EUR]	Total [EUR]
Alumno	800	5.625	4500
Cotutor	80	7.8	624
Tutor	20	33.72	674.4
Total			5798.4

Los costes de material del proyecto son debidos a la construcción del cuadricóptero y del autopiloto.

Material	Coste unitario [EUR]	Unidades	Total [EUR]
Cuadrcóptero			
Bobina PLA 1Kg	20	1.5	30
Perfiles aluminio	2	1	2
Pack 4 Motores MT2204 II	25	1	25
ESC BiHeli 4 in 1	50	1	50
Baterías LiPo	25	2	50
PCB autopiloto	20	1	20
Componentes PCB	50	1	50
Hélices HQ5040	2.5	4	10
Total			239

En cuanto a la amortización del equipo, se han empleado 2 ordenadores para el desarrollo del software y para el entrenamiento de los algoritmos. Se ha considerado una amortización lineal del 10 % de la vida útil (10 años).

Equipo	Precio	Coste Amortización(10 %)
Pc sobremesa	1980	198
Pc portátil	1300	130
Total		328

Añadiendo un coste de encuadernado de la memoria de unos 30 euros el presupuesto total del proyecto ha sido

Concepto	Total [EUR]
Recursos humanos	5798.4
Material	239
Amortización del equipo	328
Encuadernación	40
Total	6405,4

A.2. Planificación

La realización de este trabajo ha empleado un ritmo continuo de horas de trabajo desde su comienzo, siendo un poco menor en épocas de exámenes y un poco mayor al comienzo de los cuatrimestres y julio. La dedicación media diaria del trabajo ha sido de unas 4 horas semanales, durante un periodo de unos 10 meses (descontando agosto y septiembre), lo que da un total de unas 800 horas. La inmensa mayoría de estas horas se han dedicado en el Centro de Automática y Robótica (CAR) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), concretamente en el grupo de investigación de Visión por Computador y Robots Aéreos (CVAR).

En cuanto a la distribución del trabajo en este tiempo, el trabajo comenzó a realizarse en septiembre de 2018, durante los primeros meses se realizó el curso sobre redes neuronales y aprendizaje profundo, en la plataforma online Coursera. La duración del curso se extendió hasta finales de diciembre. Paralelamente, a partir de octubre se comenzó con el diseño de la aeronave, y en noviembre con el del autopiloto. A principios de febrero se finalizó con el diseño y construcción del cuadricóptero y con el diseño y montaje de la PCB del autopiloto. A partir de este punto, el resto del tiempo se ha dedicado al software, tanto el del autopiloto, como el de la estación de tierra, al diseño de los algoritmos de control y a la experimentación real. Se ha realizado un diagrama GANTT (??) en el que se ha detallado más en profundidad la distribución temporal de las tareas. Asimismo, se ha esquematizado la organización del proyecto en un diagrama EDP

Impacto social y medioambiental

El impacto social que tiene este trabajo se ve reflejado en su posible empleo en la educación y la investigación. Actualmente las metodologías docentes están tendiendo hacia el aprendizaje práctico, hacia aprender haciendo. Esta plataforma podría emplearse en centros docentes debido a su montaje mecánico hecho casi en su totalidad con impresión 3D.

Desde el punto de vista de la investigación, tener la posibilidad de desarrollar y probar nuevos algoritmos para el control de cuadricópteros puede mejorar la efectividad del uso de estas aeronaves en múltiples aplicaciones. Cuanto mejor sea el controlador, más fácil será utilizar estas aeronaves para tareas de inspección, seguridad y búsqueda y rescate, entre otras.

El impacto medioambiental de la plataforma es reducido, ya que, el PLA es un plástico biodegradable y las baterías de Litio, una vez descargadas, son sencillas de desechar. EL proceso de fabricación de los componentes requiere de recursos materiales y energéticos, cuyo proceso de obtención puede provenir de fuentes no renovables. Sin embargo, los beneficios sociales que se pueden extraer de los resultados del proyecto hacen asumible este impacto medioambiental.

Índice de figuras

Bibliografia

- [1] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press, 2018.
- [2] “Esp32 technical reference manual,” Espressif Systems, 2018. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- [3] “Esp32 datasheet,” Espressif Systems, 2019. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [4] W. Koch, R. Mancuso, R. West, and A. Bestavros, “Reinforcement learning for uav attitude control,” *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, vol. 3, no. 2, p. 22, 2019.
- [5] P. Dhariwal, C. Hesse, O. Klimov, A. Nichol, M. Plappert, A. Radford, J. Schulman, S. Sidor, Y. Wu, and P. Zhokhov, “Openai baselines,” <https://github.com/openai/baselines>, 2017.
- [6] T. Dierks and S. Jagannathan, “Output feedback control of a quadrotor uav using neural networks,” *IEEE transactions on neural networks*, vol. 21, no. 1, pp. 50–66, 2010.
- [7] A. Y. Ng, A. Coates, M. Diel, V. Ganapathi, J. Schulte, B. Tse, E. Berger, and E. Liang, “Autonomous inverted helicopter flight via reinforcement learning,” in *Experimental robotics IX*. Springer, 2006, pp. 363–372.
- [8] H. J. Kim, M. I. Jordan, S. Sastry, and A. Y. Ng, “Autonomous helicopter flight via reinforcement learning,” in *Advances in neural information processing systems*, 2004, pp. 799–806.
- [9] J. Hwangbo, I. Sa, R. Siegwart, and M. Hutter, “Control of a quadrotor with reinforcement learning,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 2096–2103, 2017.
- [10] A. Hill, A. Raffin, M. Ernestus, A. Gleave, R. Traore, P. Dhariwal, C. Hesse, O. Klimov, A. Nichol, M. Plappert, A. Radford, J. Schulman, S. Sidor, and Y. Wu, “Stable baselines,” <https://github.com/hill-a/stable-baselines>, 2018.
- [11] M. Andrychowicz, B. Baker, M. Chociej, R. Jozefowicz, B. McGrew, J. Pachocki, A. Petron, M. Plappert, G. Powell, A. Ray *et al.*, “Learning dexterous in-hand manipulation,” *arXiv preprint arXiv:1808.00177*, 2018.

- [12] A. Y. Ng and M. Jordan, “Pegasus: A policy search method for large mdps and pomdps,” in *Proceedings of the Sixteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2000, pp. 406–415.
- [13] W. Koch, R. Mancuso, and A. Bestavros, “Neuroflight: Next generation flight control firmware,” *arXiv preprint arXiv:1901.06553*, 2019.
- [14] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. A. Rusu, J. Veness, M. G. Bellemare, A. Graves, M. Riedmiller, A. K. Fidjeland, G. Ostrovski *et al.*, “Human-level control through deep reinforcement learning,” *Nature*, vol. 518, no. 7540, p. 529, 2015.
- [15] T. P. Lillicrap, J. J. Hunt, A. Pritzel, N. Heess, T. Erez, Y. Tassa, D. Silver, and D. Wierstra, “Continuous control with deep reinforcement learning,” *arXiv preprint arXiv:1509.02971*, 2015.
- [16] D. Silver, G. Lever, N. Heess, T. Degris, D. Wierstra, and M. Riedmiller, “Deterministic policy gradient algorithms,” 2014.
- [17] G. E. Uhlenbeck and L. S. Ornstein, “On the theory of the brownian motion,” *Physical review*, vol. 36, no. 5, p. 823, 1930.
- [18] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, “Proximal policy optimization algorithms,” *arXiv preprint arXiv:1707.06347*, 2017.
- [19] G. Brockman, V. Cheung, L. Pettersson, J. Schneider, J. Schulman, J. Tang, and W. Zaremba, “Openai gym,” *arXiv preprint arXiv:1606.01540*, 2016.