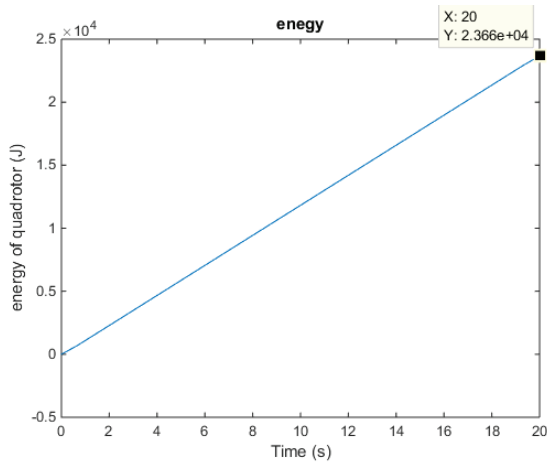
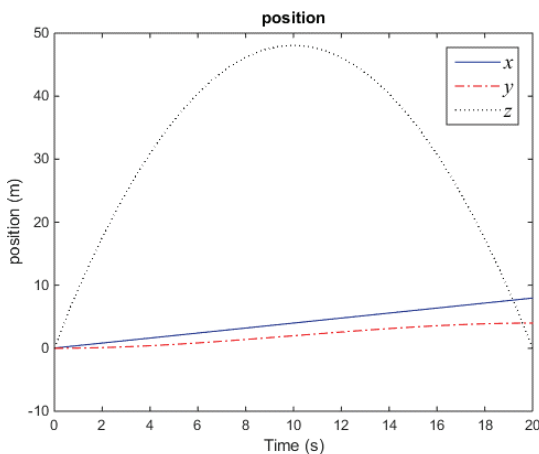


در شکل ۴ مسیر حرکت کوادروتور در حالت انفرادی از مختصات اولیه به مختصات نهایی نمایش داده شده است. مسیر تعیین شده به شکل خطی صاف در نظر گرفته شده است. در حالت عادی و بدون در نظر گرفتن مسئله کنترل بهینه کوادروتور همان مسیر صاف تعریف شده را طی خواهد کرد. اما در اینجا با توجه به اینکه مسیر تعیین شده با کمک مسئله کنترل بهینه، بهینه‌سازی شده است، حرکتی سهموی در محور Z یا همان ارتفاع مشاهده می‌شود که در آن کوادروتور برای رسیدن به مقصد کمترین انرژی را مصرف می‌کند.



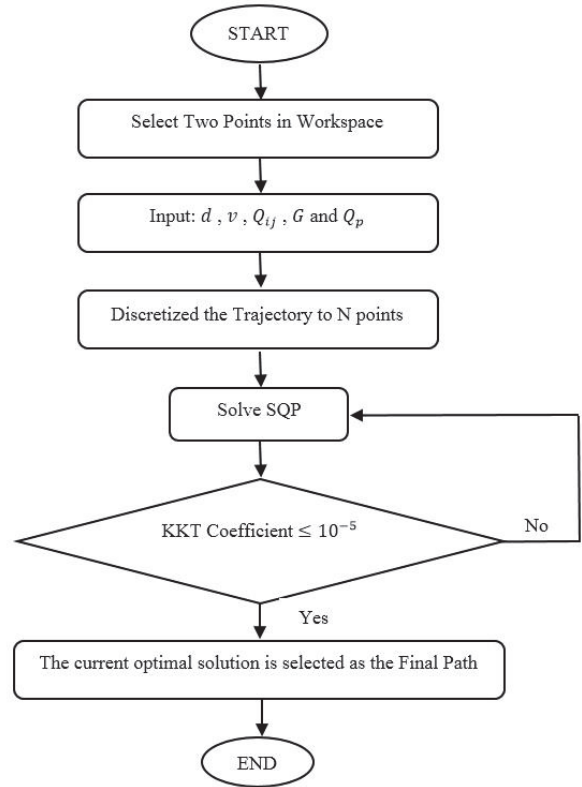
شکل ۳: انرژی مصرفی کوادروتور با بار معلق

Fig. 3. Quadrotor energy consumption with suspended load



شکل ۴: مسیر حرکت کوادروتور در حالت انفرادی از مختصات اولیه به مختصات نهایی

Fig. 4. The quadrotor movement in individual mode from the initial coordinates to the final coordinates



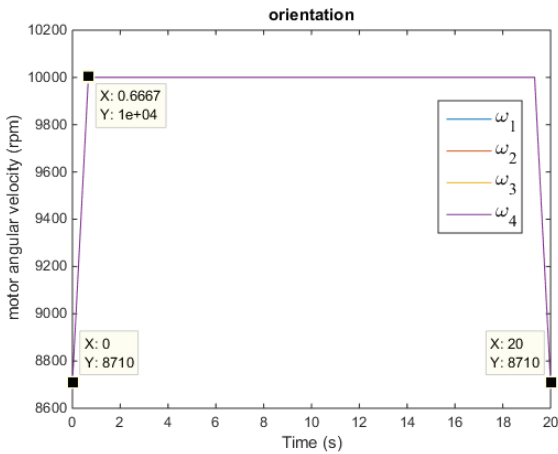
شکل ۲: فلوچارت محاسبه مسیر بهینه ربات

Fig. 2. Flowchart calculation for optimal path planning

Table 1. Quadrotor parameters used in simulation

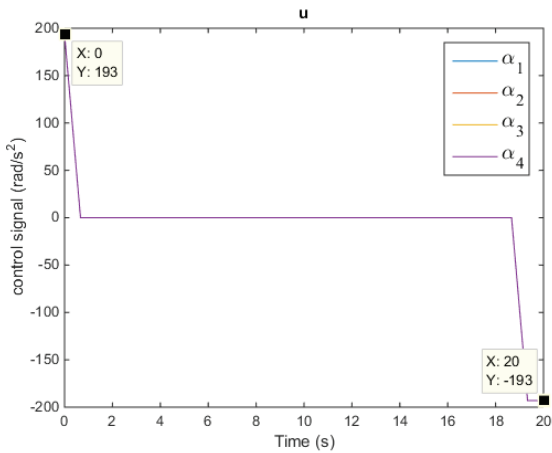
جدول ۱: پارامترهای کوادروتور استفاده شده در شبیه‌سازی

واحد	مقدار	کمیت
rpm/V	۹۲۰	K_V
V.s/rad	$۹/۵۴۹۲/K_V$	K_E
N.m	۴×10^{-2}	T_f
N.m.s/rad	۲×10^{-2}	D_f
Ω	$۰/۲$	R
kg/m ²	$۴/۹ \times 10^{-6}$	J_m
rad/s	$۱۰۴۷/۱۹۷$	ω_{max}
--	۲	n_B
kg	$۰/۰۰۵۵$	m_B
m	$۰/۱۲$	r
m	$۰/۰۰۴$	ϵ
--	$۰/۰۰۴۸$	C_T
--	$۲/۳۵۱۵ \times 10^{-4}$	C_Q
m	$۰/۰۱۴$	r_{rot}
kg/m ³	$۱/۲۲۵$	ρ
kg	$۱/۳$	m
m	$۰/۱۷۵$	l
kg.m ²	$۰/۰۸۱$	I_{xx}
kg.m ²	$۰/۰۸۱$	I_{yy}
kg.m ²	$۰/۱۴۲$	I_{zz}
kg	$۰/۰۲۵$	m_{rot}



شکل ۶: تغییرات سرعت زاویه‌ای روتورهای کوادروتور از مختصات اولیه به مختصات نهایی

Fig. 6. Angular velocity variations of the quadrotor propellers from the initial coordinates to the final coordinates



شکل ۷: تغییرات شتاب زاویه‌ای روتورهای کوادروتور از مختصات اولیه به مختصات نهایی

Fig. 7. Angular acceleration variations of the quadrotor propellers from the initial coordinates to the final coordinates

شکل ۸ میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور با بار معلق در حالت گروهی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین حداکثر انرژی مصرفی یک کوادروتور در حالت همکاری برابر $15/31$ kJ می‌باشد که در مقایسه با یک کوادروتور در حالت انفرادی $35/29\%$ کاهش در مصرف انرژی در پی دارد. با توجه به اینکه وزن بار تا سه برابر افزایش یافته، اما حرکت دادن کوادروتورها در حالت همکاری به‌منظور حمل بار $1/5$ کیلوگرمی کاهش چشمگیری در مصرف انرژی سیستم در پی داشته است. در واقع استفاده از سه ربات منجر به تعادل بیشتر کوادروتورها در حمل بار شده است و زوایای چرخش دماغه

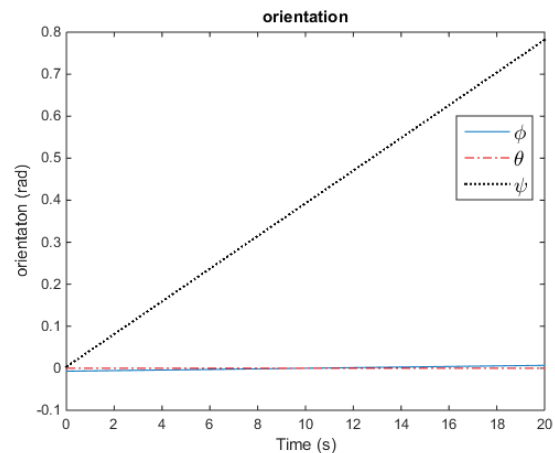
در شکل ۵ میزان دوران حول محورهای مختصات نشان داده شده است. این شکل بیان می‌کند که کوادروتور برای داشتن حرکتی با حداقل انرژی مصرفی، نیازمند حرکت دورانی حول محور Z یا تغییر در زاویه ψ می‌باشد که این تغییر زاویه تا رسیدن به مقصد ادامه خواهد داشت.

شکل ۶ بیانگر تغییرات سرعت زاویه‌ای روتورهای کوادروتور در مسیر مشخص شده می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که در هنگام شروع پرواز کوادروتور سرعت زاویه‌ای پروانه‌ها برابر 8710 rpm بوده که پس از شروع حرکت سرعت پروانه‌ها به 10000 rpm رسیده که برای حرکت در حالت بهینه تا اواخر مسیر این سرعت حفظ شده و در انتهای مسیر، سرعت پروانه‌ها به سرعتی برابر با سرعت اولیه رسیده است.

مقدار تغییرات شتاب زاویه‌ای روتورهای کوادروتور که همان سیگنال‌های کنترلی تعریف شده هستند نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.

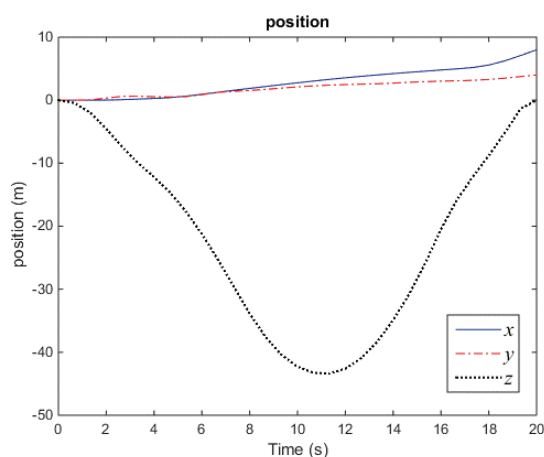
۴-۲- شبیه‌سازی حمل بار گروهی توسط کوادروتورهای همکار

در این بخش شرایط شبیه‌سازی یک کوادروتور با بار، با در نظر گرفتن معادلات همکاری، برای سه کوادروتور به‌منظور حمل بار تحت آرایش رهبر پیرو و حفظ آرایش در مسیر اعمال می‌شود. برای حمل بار گروهی برای کوادروتورها، باری برابر $m_L = 1/5$ kg در نظر گرفته شده است که این بار سه برابر وزن باری است که در حالت انفرادی برای کوادروتور تعیین شده است. هدف از این کار بررسی این موضوع است که یک کوادروتور در حالت گروهی چه مقدار انرژی در مقایسه با حالت انفرادی مصرف می‌کند. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در ادامه آورده شده است.

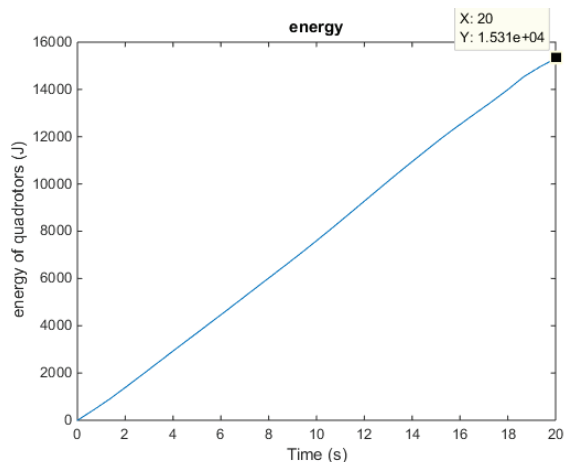


شکل ۵: زوایای کوادروتور حول محورهای مختصات از نقطه اولیه به نقطه نهایی

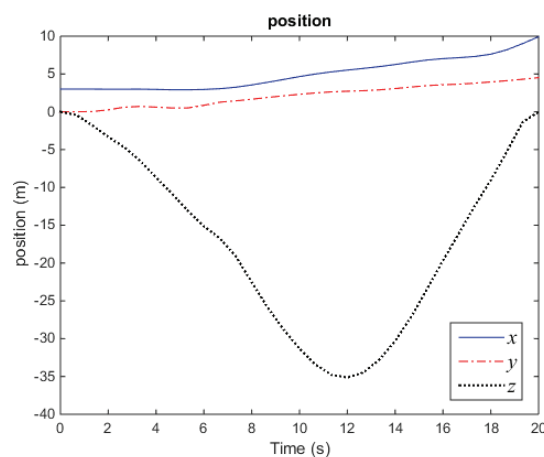
Fig. 5. Quadrotor angles around coordinate axes from the initial point to the final point



شکل ۹: مسیر حرکت کوادروتور رهبر از مختصات اولیه به مختصات نهایی
 Fig. 9. The quadrotor leader trajectory from the initial coordinates to the final coordinates



شکل ۸: میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور با بار معلق در حالت گروهی
 Fig. 8. Average energy consumption of a quadrotor with suspended load in a group mode



شکل ۱۰: مسیر حرکت کوادروتور دوم (پیرو اول)
 Fig. 10. Path of the second quadrotor (First Follower)

به چپ یا راست حول محور بالا و پایین^۱، چرخش دماغه به بالا یا پایین حول محور بال به بال^۲ و دوران حول محور دماغه تا دم^۳ با توجه به نمودارهای استخراج شده؛ تغییرات کمتری نسبت به تک کوادروتور داشته‌اند و همین امر منجر به کاهش مصرف انرژی آن‌ها شده است. این موضوع بیانگر این است که به‌وسیله حرکت گروهی کوادروتورها می‌توان بارهایی بیشتر از ظرفیت و توان یک کوادروتور جابه‌جا نمود. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌شود که برای انتقال محموله زمان کافی رفت و برگشت وسیله برای باربری در اختیار نبوده و یا اینکه حجم محموله و اندازه وسایل نقلیه به‌گونه‌ای باشد که نیازمند جابجایی به‌صورت گروهی است.

شکل ۹ مسیر حرکت کوادروتور رهبر، شکل ۱۰ مسیر حرکت کوادروتور دوم و شکل ۱۱ مسیر حرکت کوادروتور سوم را در مسیر بهینه‌سازی شده نشان می‌دهد.

مسیر حرکت آرایش رهبر پیرو ایجاد شده و حفظ آن تا انتهای حرکت در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

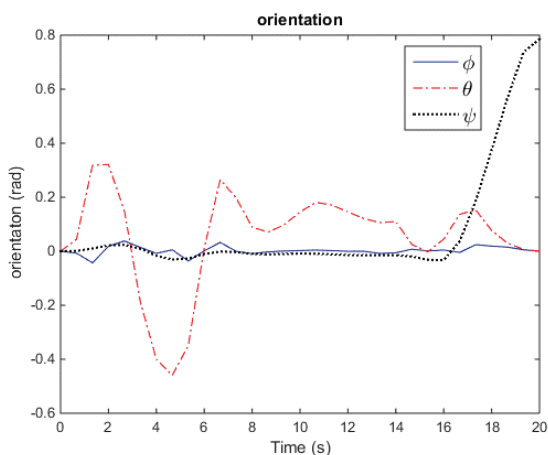
در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به ترتیب دوران کوادروتورهای اول، دوم و سوم حول محورهای مختصات نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که حرکت دورانی دائم کوادروتور در حالت انفرادی با وابسته شدن کوادروتورها به هم تحت آرایش رهبر پیرو تا حد بسیار زیادی از بین رفته و در اکثر مسیر به دلیل وجود بار و نوسان‌های آن، لرزش‌هایی به‌صورت رفت

و برگشتی مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

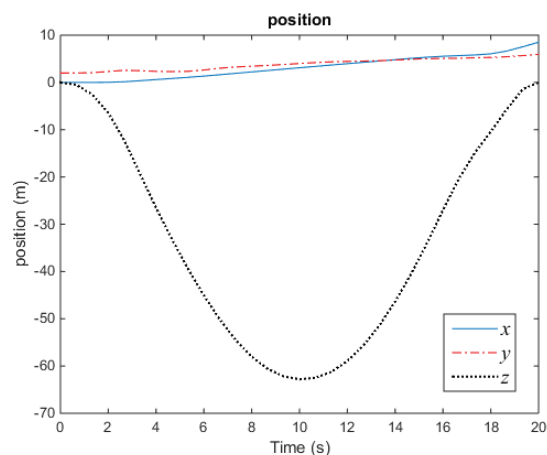
در این مقاله به بررسی موضوع طراحی مسیر کوادروتورهای همکار برای انتقال بار به‌صورت گروهی پرداخته شد. در ابتدا مسئله کوادروتورها، مسئله انتقال بار، آرایش ربات‌های همکار و مدل‌سازی و ارائه روابط دینامیکی آن‌ها بیان شد. پس از آن با معرفی روش کنترل بهینه به تعریف مسئله طراحی مسیر با توجه به شتاب زاویه‌ای چهار موتور الکتریکی برای یک کوادروتور به همراه بار معلق توسط کابل به‌منظور به حداقل رساندن انرژی مصرفی

-
- 1 Yaw
 - 2 Pitch
 - 3 Roll



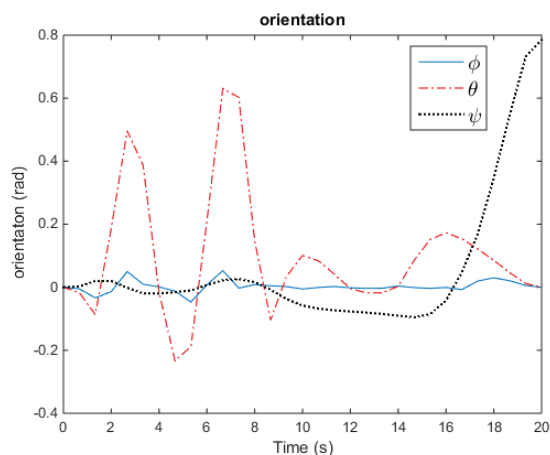
شکل ۱۳: دوران کوادروتور اول حول محورهای مختصات

Fig. 13. Angular rotations of the first quadrotor around coordinate axes



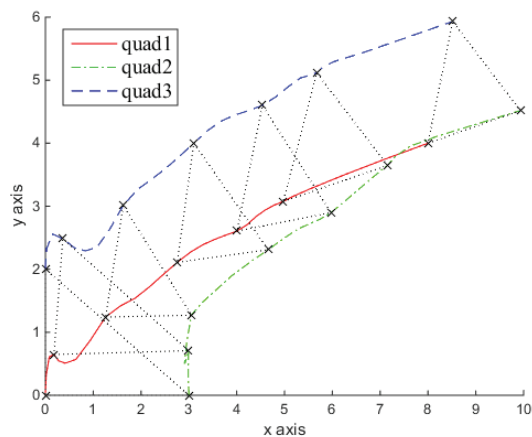
شکل ۱۱: مسیر حرکت کوادروتور سوم (پیرو دوم)

Fig. 11. Path of the third quadrotor (Second Follower)



شکل ۱۴: دوران کوادروتور دوم حول محورهای مختصات

Fig. 14. Angular rotations of the second quadrotor around coordinate axes



شکل ۱۲: مسیر حرکت آرایش کوادروتورها

Fig. 12. Path movement of quadrotors formation

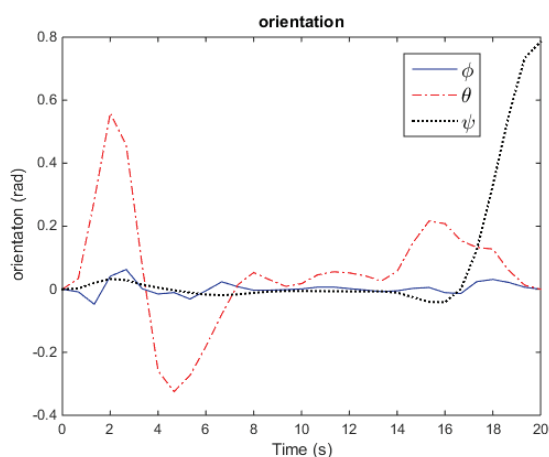
می‌رساند. از طرفی آرایش گروهی با وابسته کردن حرکت پیرو به رهبر از طریق روابط حفظ فاصله و زاویه تشکیل شد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده تحقق این امر بوده که در آن پس از آغاز حرکت اعضا سعی در تشکیل آرایش می‌کنند و پس از آن به حفظ آرایش تا انتهای مسیر می‌پردازند.

در مورد سیستم‌های چندعاملی مهم‌ترین بحث و هدف افزایش توانایی انجام کار است. در مورد این مسئله استفاده از چند عامل باعث می‌شود که کوادروتورها بتوانند بار بیشتری را حمل کنند. در اینجا که انرژی نیز مدنظر بوده است برای بار ثابت ۱/۵ کیلوگرم، کوادروتورها به‌طور میانگین انرژی کمتری نسبت به یک کوادروتور که یک بار ۰/۵ کیلوگرمی را جابه‌جا کرده

سیستم پرداخته شد. پس از آن همین مسئله برای گروهی از کوادروتورهای همکار تحت آرایش رهبر پیرو به‌منظور حمل بار گروهی و مینیموم سازی انرژی سیستم جدید، افزایش ظرفیت بار قابل حمل و حداقل‌سازی سرعت نسبی اعضا بیان شد. تئوری پیشنهادی با استفاده از آزمایش‌های عددی انجام‌شده توسط کوادروتور دی جی آی فانتوم دو نشان داده شده است.

نتایج بیانگر کاهش ۳۵/۲۹٪ میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور در حالت همکار نسبت به یک کوادروتور در حالت انفرادی بود که نشانگر افزایش ظرفیت حمل بار کوادروتورها در حالت گروهی بود. این موضوع بیانگر موفقیت‌آمیز بودن تابع هزینه پیشنهادی بوده و صحت آن را به اثبات

مجموع سرعت زاویه‌ای روتورها	Ω_R
سرعت زاویه‌ای شفت روتور	$\omega(t)$
شتاب گرانش	g
جرم کوادروتور	m_Q
تعداد کوادروتور	n_Q
نیروی اعمال شده در دستگاه اینرسی	F_I
ماتریس دوران	R
سیگنال کنترلی	u
فاصله موتور تا مرکز جرم کوادروتور	l
فاکتور تراست	κ_b
فاکتور مقاومت هوا (درگ)	κ_t
تعداد پرها	n_B
جرم پره	m_B
شعاع پره	r
مساحت حرکتی پره	A
فاصله بین ریشه پره و توبی موتور	ϵ
ضریب تراست پروانه	C_T
ضریب گشتاور	C_Q
گشتاور ثابت موتور	K_T
گشتاور اصطکاک موتور	T_f
سرعت وابسته به گشتاور اصطکاک بار	T_L
ضریب چسبندگی میرایی موتور	D_f
ممان اینرسی موتور	J_m
ممان اینرسی بار	J_L
مقاومت سیم‌پیچ	$R_i(t)$
ثابت سرعت موتور	K_V
ثابت ولتاژ موتور	K_E
ولتاژ موتور	$e(t)$
زمان اولیه	t_0
زمان انتهایی	t_f
ظرفیت باتری	C
ثابت ولتاژ موتور	K_E
شدت جریان موتور	$i(t)$
چگالی هوا	ρ
شعاع روتور	r_{rot}
انرژی مصرفی کوادروتور	E
جرم روتور	m_{rot}
جرم بار	m_L



شکل ۱۵: دوران کوادروتور سوم حول محورهای مختصات

Fig. 15. Angular rotations of the third quadrotor around coordinate axes

مصرف کرده‌اند. پس در نتیجه توانایی حمل بار آن‌ها افزایش می‌یابد. اگرچه مجموع انرژی مصرف شده سه کوادروتور باهم بیش از مصرف انرژی یک کوادروتور است که اتفاقی دور از انتظار نیست اما کاهش مصرف انرژی هر کوادروتور به ما کمک می‌کند که بتوان از چند کوادروتور برای مسیرهای طولانی‌تر و یا بار بیشتر بهره برد (مقایسه نمودار انرژی مصرفی میانگین یک کوادروتور در حالت گروهی و نمودار انرژی مصرفی یک کوادروتور). همچنین در حالت حمل بار توسط یک کوادروتور افزودن بار باعث ناپایداری در زاویه (حرکت حول محور z) شده و این بدین معنی است که کوادروتور باحالت دوران دائم حرکت می‌کند که مطلوب نیست اما در سه عامل، تنها با کنترل حرکت هماهنگ، از دوران کوادروتورها تا حد زیادی جلوگیری شده است (مقایسه نمودارهای دوران برای هر کدام از کوادروتورها). لازم به ذکر است در حالت اول برای مانع شدن از حرکت دورانی نیاز به اندازه‌گیری بار می‌باشد اما در این روش نیازی به سنسور اندازه‌گیری بار نیست.

۶- فهرست علائم

رول	ϕ
پیچ	θ
یاو	ψ
مختصات در دستگاه بدنی	$x y z$
گشتاور اعمالی بدنه	τ
سرعت زاویه‌ای بدنه	ω
ممان اینرسی حول محورهای مختصات	$I_{xx} I_{yy} I_{zz}$
ممان اینرسی هر روتور حول محور z	J_R

منابع

- [1] L. Yang, J. Qi, J. Xiao, X. Yong, A literature review of UAV 3D path planning, in Proceeding of 11th World Congress on Intelligent Control and Automation,

- (2002) 813-825.
- [11] W. Guanghua, L. Deyi, G. Wenyan, J. Peng, Study on formation control of multi-robot systems, in Proceeding of Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA), IEEE, (2013) 1335-1339.
- [12] J. Fredslund, M.J. Mataric, A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication, IEEE transactions on robotics and automation, 18(5) (2002) 837-846.
- [13] I.H. Pizetta, A.S. Brandão, M. Sarcinelli-Filho, Modelling and control of a pvtol quadrotor carrying a suspended load, in Proceeding of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Denver, CO, USA: IEEE, (2015) 444-450.
- [14] I. Palunko, P. Cruz, R. Fierro, Agile load transportation: safe and efficient load manipulation with aerial robots, IEEE robotics & automation magazine, 19(3) (2012) 69-79.
- [15] A. Faust, I. Palunko, P. Cruz, R. Fierro, L. Tapia, Automated aerial suspended cargo delivery through reinforcement learning, Artificial Intelligence, 247(1) (2017) 381-398.
- [16] K. Sreenath, N. Michael, V. Kumar, Trajectory generation and control of a quadrotor with a cable suspended load a differentially flat hybrid system, in Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany: IEEE, (2013) 4888-4895.
- [17] S. Tang, V. Kumar, Mixed integer quadratic program trajectory generation for a quadrotor with a cable-suspended payload, in Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, Seattle, Washington, D.C: IEEE, (2015) 2216-2222.
- [18] F.A. Goodarzi, T. Lee, Dynamics and control of Shenyang, China: IEEE, (2014) 2376-2381.
- [2] A. Atyabi, D. M. Powers, Review of classical and heuristic-based navigation and path planning approaches, International Journal of Advancements in Computing Technology, 5(14) (2013) 1-14.
- [3] S. Ghazbi, Y. Aghli, M. Alimohammadi, and A. Akbari, Quadrotors unmanned aerial vehicles: a review, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 9(1) (2016) 309-333.
- [4] M. Hehn, R. Ritz and R. D'Andrea, Performance benchmarking of quadrotor systems using time-optimal control, Autonomous Robots, 33(1) (2012) 69-88.
- [5] O. Cetin, G. Yilmaz, Real-time autonomous uav formation flight with collision and obstacle avoidance in unknown environment, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 84(4) (2016) 415-433.
- [6] V. Jeaneau, A. Kotenkoff, Path planner methods for UAVs in real environment, 12th IFAC Symposium on Robot Control, Budapest, Hungary, 51(22) (2018) 292-297.
- [7] Z. Fu, J. Yu and Y. Mao, A heuristic evolutionary algorithm of UAV path planning, Wireless Communications and Mobile Computing, 28(5) (2018) 1-11.
- [8] L. Cai, J. Jia and J. Lei, Research on path optimization with PSO for unmanned vehicle, International Journal of Online and Biomedical Engineering, 11(8) (2015) 21-24.
- [9] L. Kahina, P. Spiteri and F. Demim, Application optimal control for a problem aircraft flight, Journal of Engineering Science and Technology, 11(1) (2016) 156-164.
- [10] A.K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, C.J. Taylor, A vision-based formation control framework, IEEE transactions on robotics and automation, 18(5)

- systems, Berlin, Germany: IEEE, (2013) 1-8.
- [22] K.K. Dhiman, A. Abhishek, M. Kothari, Cooperative load control and transportation, in: AIAA Information Systems, Aerospace, Eds., (2018) 0895.
- [23] F. Morbidi, R. Cano, D. Lara, Minimum-energy path generation for a quadrotor UAV, in Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden: IEEE, (2016) 1492-1498.
- [24] B. Shirani, N. Majdeddin, I. Izadi, Cooperative load transport using multiple quadrotors, Distributed Autonomous Robotic Systems, Series Springer Tracts in Advanced Robotics, (2013).
- [25] D. Motors, Speed controls, Servo systems: an engineering handbook, Electro-Craft Corporation, (1977).
- [26] J.F. Gieras, Permanent magnet motor technology: design and applications: CRC press, (2002).
- quadrotor UAVs transporting a rigid body connected via flexible cables, in Proceeding of American Control Conference, IEEE, (2015) 4677-4682.
- [19] T. Lee, K. Sreenath, V. Kumar, Geometric control of cooperating multiple quadrotor UAVs with a suspended payload, in Proceeding of 52nd Annual Conference on Decision and Control, Florence, Italy: IEEE, (2013) 5510-5515.
- [20] I.H. Pizetta, A.S. Brandão, M. Sarcinelli-Filho, Cooperative quadrotors carrying a suspended load, in Proceeding of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Arlington, VA, USA: IEEE, (2016) 1049-1055.
- [21] K. Sreenath, V. Kumar, Dynamics, control and planning for cooperative manipulation of payloads suspended by cables from multiple quadrotor robots, in Proceeding of International Conference on Robotics: Science and

