

STUDIUL DE FUNDAMENTARE CONCEPTUALĂ ȘI FUNCȚIONALĂ A UNEI DRONE MULTIROTOR PENTRU APLICAȚII DE SECURIZARE PERIMETRALĂ

STAMATE Mihai-Alin¹

Conducător științific: Prof.dr.ing. Adrian NICOLESCU

REZUMAT: Lucrarea de față prezintă studiul de fundamentare conceptuală a prototipului unei drone multirotor (hexarotor) și ulterior de realizare efectivă a acesteia, drona urmând a fi utilizată în aplicații de securizare perimetrală a instalațiilor industriale de interes strategic, a instituțiilor guvernamentale, a centrelor de detenție, a frontierelor unui stat etc.

CUVINTE CHEIE: hexarotor, controller electronic de turaj, GPS, turaj, motor electric.

1. Introducere

În lucrarea de față voi prezenta soluția adoptată pentru proiectare și realizare practică, așa cum am prezentat în articolul precedent, în cadrul sesiunii de comunicări științifice din luna Mai 2016.

În urma breviarului de calcul elaborat și luând în considerare datele experimentale obținute, am hotărât să adopt pentru lucrarea mea, un hexarotor în X, având în vedere că această soluție prezintă o stabilitate în aer mult mai mare datorită forței portante rezultante, dată de rotația celor șase rotoare.

Un vehicul aerian fără pilot uman la bord (UAV) de tip multirotor, este un sistem dinamic instabil, cu șase grade de libertate care constau în mișcări de translație și rotație pe 3 axe (3 dimensiuni). Mișcarea de translație se obține prin modificarea direcției și mărimii forței de tracțiune vertical.

Pentru pale fixe ale rotorului (conform cu cele existente pe dronă) mișcarea de rotație pentru înclinarea dronei se realizează prin variații individuale ale vitezei rotoarelor, pentru a crea cupluri de rotație în jurul centrului de rotație. Din însumarea vitezelor rotoarelor rezultă mărimea vectorului forță de tracțiune.

Mișcarea vehiculului multirotor în două dimensiuni este ilustrată în fig. 2-4.

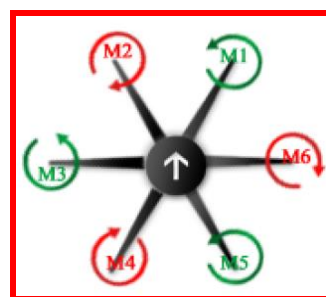


Fig. 1 Hexarotor în X, cu evidențierea sensului de rotație al motoarelor și al direcției de deplasare a dronei (săgeata albă)

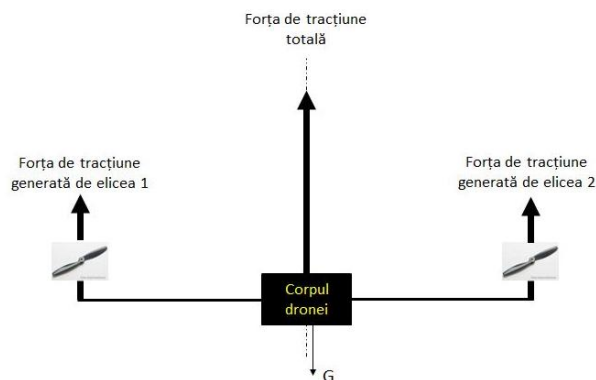


Fig. 2 Elicele se rotesc cu aceeași viteză unghiulară astfel încât vectorul forței de tracțiune totale are aceeași direcție cu vectorul forței de gravitație

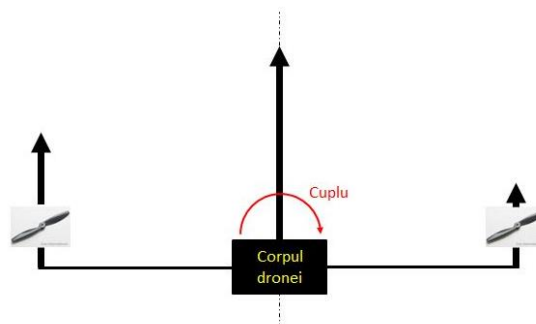


Fig. 3 Prin varierea vitezei de rotație a elicelor rezultă un cuplu de rotație

¹ Specializarea Robotică, Facultatea IMST;
E-mail: stamyhay@yahoo.com;

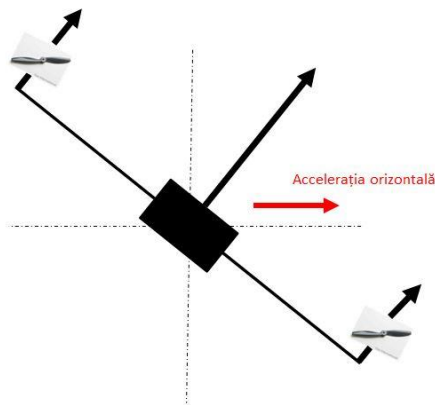


Fig. 4 Direcția vectorului forței de tracțiune totală nu mai coincide cu direcția forței de gravitație, rezultând astfel o accelerație orizontală

2. Sistemele de coordonate asociate dronei

Pentru a analiza comportarea dronei, se utilizează două sisteme de coordonate, pentru reprezentarea poziției și orientării hexacopterului pe cele 3 dimensiuni, și anume: sistemul de coordonate asociat solului și sistemul de coordonate asociat cadrului dronei.

Sistemul de coordonate asociat solului este un sistem de referință fixat, astfel încât, de exemplu, dacă se dorește definirea unui traseu pe care drona urmează să îl parcurgă, se va utiliza acest sistem de coordonate.

Sistemul de coordonate asociat cadrului dronei se alege ca fiind aliniat cu senzorii montați pe dronă, astfel că axa x va fi orientată pe direcția înainte (capetele roșii de montare a motoarelor), axa y orientată spre stânga și axa z orientată în sus, perpendiculară pe planul determinat de axele x și y. (a se vedea fig. 5)

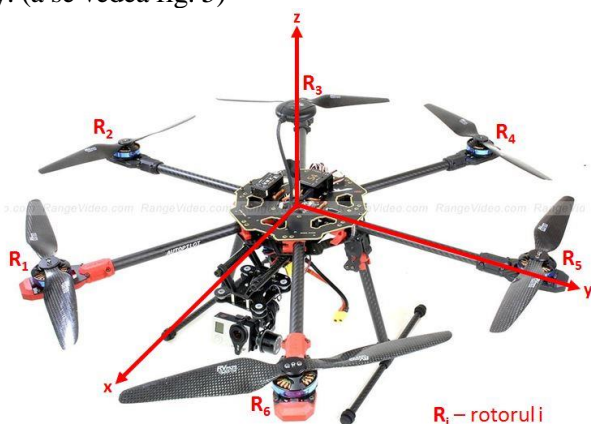


Fig. 5 Sistemul de coordonate asociat cadrului dronei și numerotarea rotoarelor

3. Axele de rotație

Atitudinea dronei se definește ca fiind orientarea sistemului de coordonate al dronei față de sistemul de coordonate al pământului. Aceasta reprezintă rotația dronei în jurul axelor sale x, y și z, în acest caz prin folosirea regulii mâinii drepte, și constă în trei mișcări: ruliul (rol), tangaj (pitch) și girație (yaw). (a se vedea fig. 6)

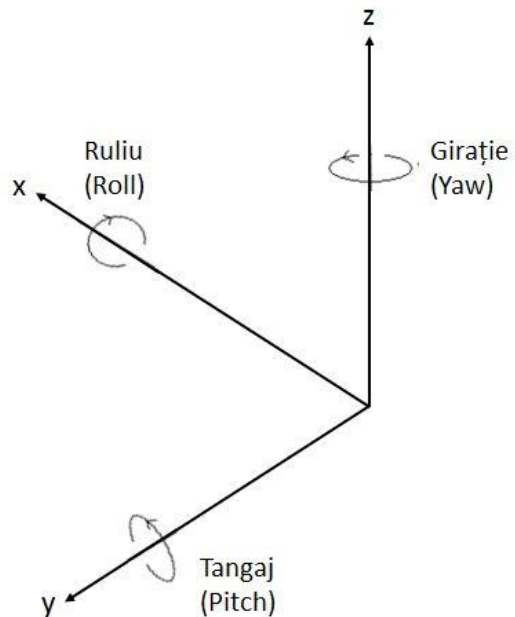


Fig. 6 Mișcările de rotație pe cele trei axe de coordonate: ruliul (rol – axa x), tangaj (pitch – axa y) și girație (yaw – axa z)

Atitudinea este controlată prin modificarea turației motoarelor, implicit a vitezei de rotației a elicelor, rotoarele fiind numerotate în sensul acelor de ceasornic, cu rotorul numărul 1 fiind în poziția față dreapta a hexacopterului. (a se vedea fig. 5)

Ruliul (roll) reprezintă mișcarea de rotație în jurul axei x, obținută prin creșterea/descreșterea turației 1, 2 și 3 și, concomitent, prin creșterea/descreșterea turației rotoarelor 4, 5 și 6. Pe timpul acestei manevre se creează un cuplu de rotație în jurul axei x și astfel apare o accelerație unghiulară. Unghiul de rotație pentru mișcarea de ruliul se notează cu φ și se măsoară în rad/s.

Tangajul (pitch) reprezintă mișcarea de rotație în jurul axei y și se obține prin creșterea/descreșterea turației rotoarelor 1 și 6 și, concomitent, prin creșterea/descreșterea turației rotoarelor 3 și 4. Deoarece direcția axei y coincide cu poziția rotoarelor 2 și 5, acestea nu afectează tangajul. Unghiul de tangaj se notează cu θ și se măsoară, de asemenea, în rad/s.

Girația (yaw) reprezintă mișcarea de rotație în jurul axei z. În cazul acestei mișcări fiecare elice creează un cuplu de rotație în jurul axei z atunci când se rotește. Astfel că acest cuplu este direcționat în sensul opus sensului de rotație al rotorului. Dacă elicea se rotește în sensul acelor de ceasornic, acesta va crea o rotație în sens trigonometric în jurul axei z.

Pentru a menține hexacopterul stabil este necesar ca rotoarele să fie rotite în direcții diferite, astfel încât trei rotoare să se rotească în sensul acelor de ceasornic iar celelalte trei în sens trigonometric. Mișcarea de girație este realizată prin descreșterea/ creșterea turației rotoarelor 1, 3 și 5 și, concomitent prin creșterea/descreșterea turației rotoarelor 2, 4 și 6. Unghiul de rotație pentru mișcarea de girație se notează cu ψ și se măsoară în rad/s.

4. Modelul virtual al hexarotorului ales

Modelul virtual 3D al hexarotorului a fost realizat cu ajutorul programului SolidWorks.

În fig. 7-9 este prezentat modelul 2D pentru a evidenția câteva cote de gabarit, iar în fig. 10-11 este prezentat modelul virtual al dronei, în vederi 3D.

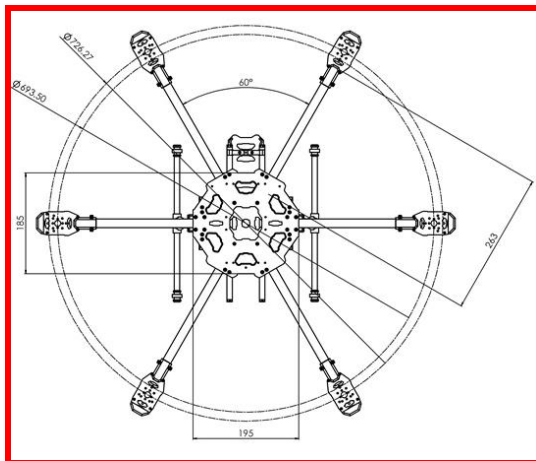


Fig. 7 Cote de gabarit

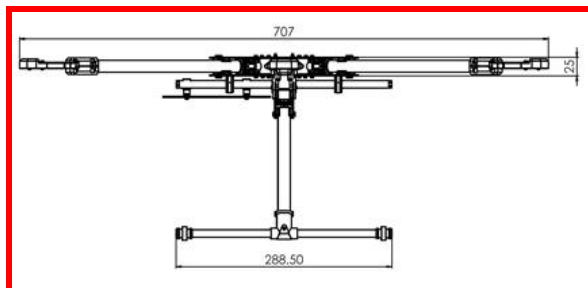


Fig. 8 Cote de gabarit
(continuare)

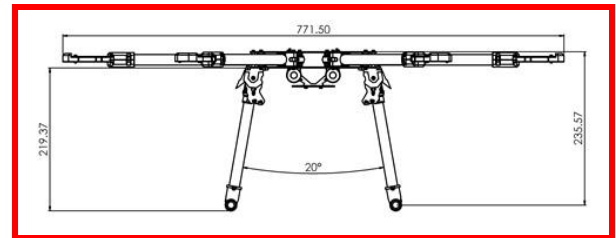


Fig. 9 Cote de gabarit
(continuare)

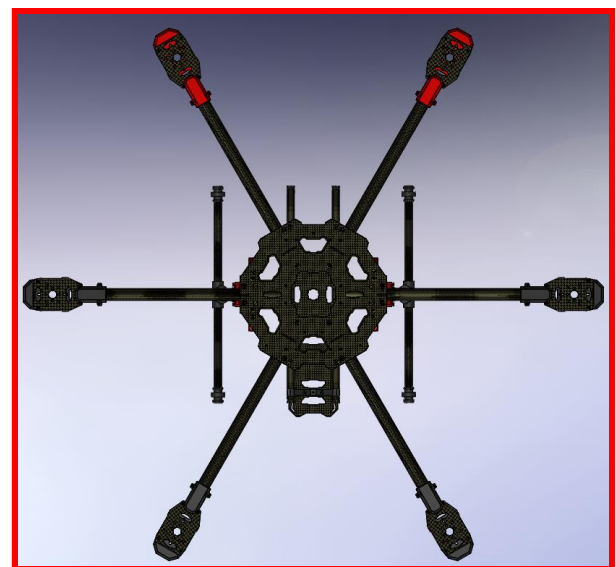


Fig. 10 Modelul CAD al hexarotorului
(vedere de deasupra)

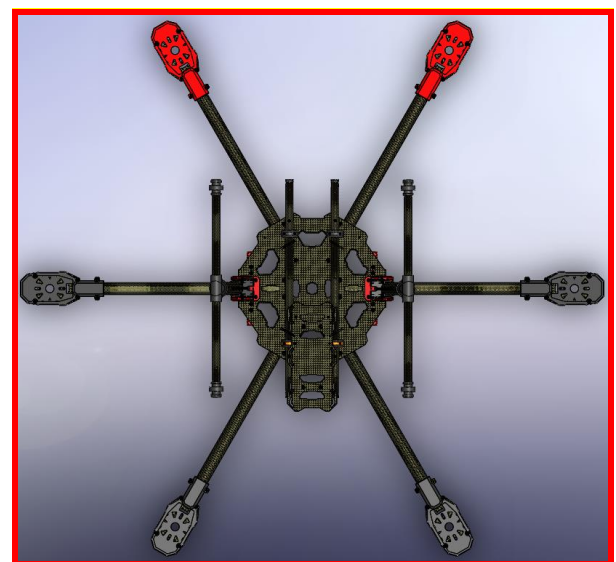


Fig. 11 Modelul CAD al hexarotorului
(vedere de dedesub)

În fig. 17-18 este prezentat modelul CAD 3D al hexarotorului, în varianta echipată cu motoare, elice, acumulator, gimbal și cameră, iar în fig. 19-21 am prezentat câteva imagini ale hexarotorului real echipat cu partea de avionică și motoare.



Fig. 12 Modelul CAD al hexarotorului
(vedere frontală)



Fig. 13 Modelul CAD al hexarotorului
(vedere din spate)

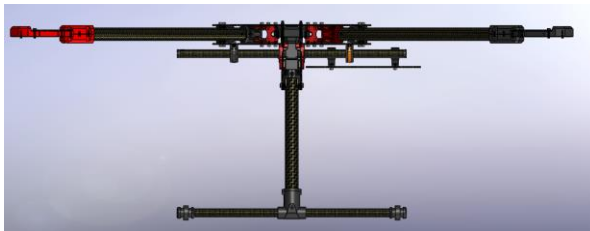


Fig. 14 Modelul CAD al hexarotorului
(vedere laterală-stânga)



Fig. 15 Modelul CAD al hexarotorului
(vedere laterală-dreapta)



Fig. 16 Modelul CAD al hexarotorului
varianta ne-echipată
(vedere izometrică)



Fig. 17 Modelul CAD al hexarotorului
(varianta echipată)



Fig. 18 Modelul CAD al hexarotorului
(varianta echipată - continuare)



Fig. 19 Hexarotorul realizat
(varianta echipată)



Fig. 20 Motoarele electrice fără perii montate pe
capetele suport

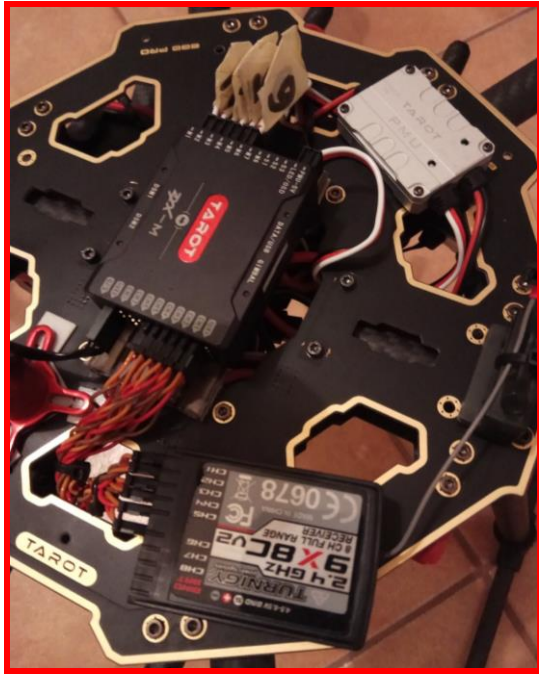


Fig. 21 Echipamentele de avionică

5. Aspecte constructiv-funcționale ale hexarotorului realizat

În cele ce urmează voi prezenta succint componentele utilizate la realizarea practică a acestei soluții de hexarotor.

Pentru partea de cadru am folosit, pentru brațele suport ale motoarelor, tuburi din fibră de carbon, similare cu brațele care alcătuiesc trenul de aterizare, datorită masei reduse a acestui material. Ca suport al brațelor mai sus menționate, al trenului de aterizare și al echipamentelor de avionică și cameră am utilizat două plăci din fibră de carbon (superioară și inferioară) ce se assemblează între ele cu șuruburi (vezi fig. 10-11, 17-19, 21).



Fig. 22 Braț suport motor
(de formă tubulară, realizat din fibră de carbon)

În urma breviarului de calcul efectuat și corelat cu datele obținute și verificate cu ajutorul platformei de pe site-ul www.ecalc.ch, am ales o variantă de echipare a dronei, variantă pe care o voi prezenta în continuare.

În fig. 25-29 am ilustrat datele obținute, în urma simulărilor efectuate pe platforma www.ecalc.ch, în varianta aleasă de echipare a

dronei, pentru a identifica eventuale neconcordanțe sau erori ce pot apărea în timpul funcționării hexarotorului.



Fig. 23 Brațele care compun trenul de aterizare și placa inferioară
(realizate din fibră de carbon)



Fig. 24 Asamblarea celor două plăci, a trenului de aterizare și a brațelor suport motor

După verificarea datelor obținute am procedat la echiparea dronei, în varianta prezentată în cele ce urmează. Pentru propulsie am folosit motoare electrice fără perii, model **Tarot 4006/620KV** (vezi fig. 30). Controlul pornirii/oprii

motoarelor, reglarea turației și stabilirea sensului de rotație se realizează cu ajutorul unor echipamente ESC (Electronic Speed Controller) – Controllere Electronice de Turație. Pentru acestea am ales modelul **Hobbywing XRotor 40A-OPTO** (vezi fig. 31).

Fig. 25 Platforma www.ecalc.ch (alegerea elicelor și motoarelor)

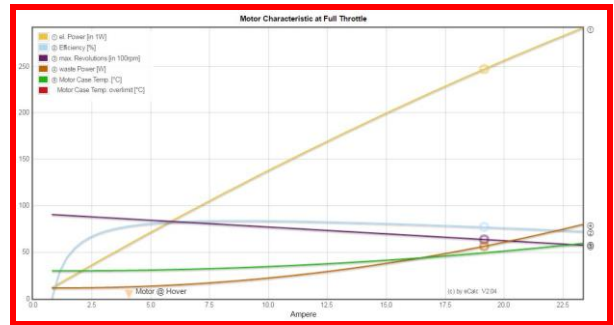


Fig. 29 Platforma www.ecalc.ch (caracteristicile motorului ales)



Fig. 30 Motor electric fără perii Tarot 4006/620KV

Fig. 26 Platforma www.ecalc.ch (selectarea componentelor și verificarea soluției adoptate)

Remarks	Motor @ Optimum Efficiency	Motor @ Maximum	Motor @ Hover	Total Drive	Multistar
Load	19.44 C	19.44 A	19.44 A	1400 g	2845 g
Voltage	13.05 V	13.05 V	13.05 V	704.0 V	100.4 ac
Rated Voltage	14.80 V	14.80 V	14.80 V	24.0 V	349.0 ac
Energy	88.9 Wh	7841 Wh	6201 Wh	24.5 Wh	122.9 Wh
Total Capacity	6000 mAh	7841 mAh	6201 mAh	24.5 mAh	122.9 mAh
Used Capacity	510 mAh	7841 mAh	6201 mAh	24.5 mAh	122.9 mAh
max Flight Time	2.6 min	7841 min	6201 min	24.5 min	122.9 min
Motor Flight Time	5.6 min	7841 min	6201 min	24.5 min	122.9 min
Hover Flight Time	12.5 min	7841 min	6201 min	24.5 min	122.9 min
Weight	959 g	7841 g	6201 g	24.5 g	122.9 g
	20 ac	7841 ac	6201 ac	24.5 ac	122.9 ac

Fig. 27 Platforma www.ecalc.ch (rularea simulării și identificarea rezultatului final – săgeata albă pe fundal verde indică corectitudinea soluției alese de echipare)



Fig. 31 Controller electronic de turație Hobbywing XRotor 40A-OPTO ESC

Elicele sunt model **Tarot 1355**, de dimensiune 13” (vezi fig. 32), iar ca sursă de alimentare am folosit un acumulator de 4 celule LiPo, capacitate 6600 mAh, model **Multistar 6600mAh Lipo** (vezi fig. 33).

Pentru partea de avionică am utilizat un controller (componenta centrală a dronei, îndeplinește și funcția de pilot automat, controlează modurile de zbor ale dronei) model **Tarot ZXY-M**, antenă GPS, un modul de distribuție a tensiunii de la acumulator la consumatori, modul de programare a dronei, și, bineînțeles echipamentul de transmisie-recepție model **Turnigy TGY 9x** (vezi fig. 34-39).

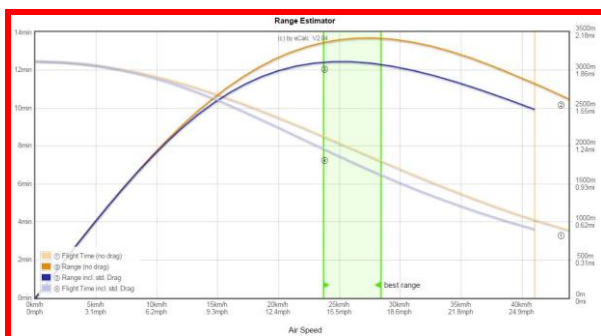


Fig.28 Platforma www.ecalc.ch (grafic pentru indicarea distanței de zbor)



Fig. 32 Elice din fibră de carbon Tarot 1355



Fig. 36 Unitate LED (stânga) pentru indicarea modului de funcționare și modul de programare (dreapta) prin USB



Fig. 33 Acumulator 4S LiPo 6600mAh Multistar

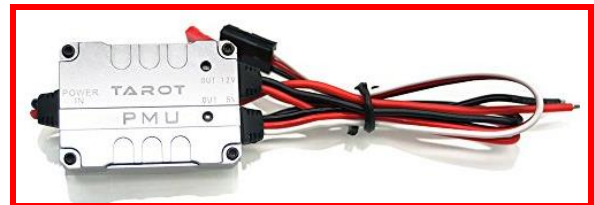


Fig. 37 Modul de distribuție a tensiunii



Fig. 34 Controller Tarot ZYX-M



Fig. 38 Cutie de comandă (Tx) Turnigy TGY 9x



Fig. 35 Antenă GPS



Fig. 39 Receptor pe 8 canale (Rx) Turnigy TGY 9x

În fig. 40 este prezentată diagrama de conexiuni pentru echipamentele de avionică și sistemul gimbal + cameră.

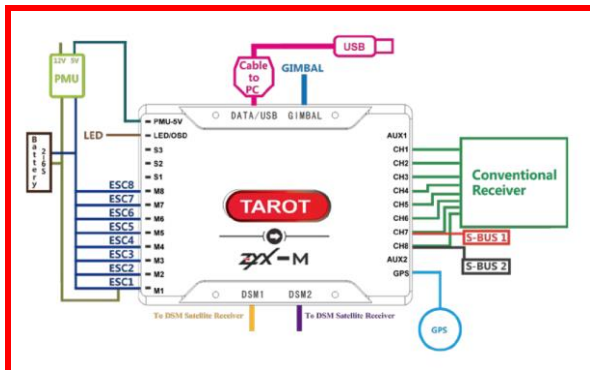


Fig. 40 Diagrama de conexiuni

Având în vedere scopul acestui hexarotor, și anume, supraveghere perimetrală, se impune, evident, și echiparea cu o cameră foto/video.

Pentru aceasta am folosit un sistem de poziționare și comandă a camerei (gimbal) cu rotire pe 3 axe comandate de la un controller integrat, model **Tarot T4-3D** (vezi fig. 41).



Fig. 41 Suport cameră (gimbal) **Tarot T4-3D**

Supravegherea este realizată cu ajutorul unei camere model **Turnigy Action Cam**, ce poate să filmeze la o rezoluție de 1080p, autonomia acestuia fiind asigurată cu ajutorul unui acumulator (vezi fig. 42).

Ca și variante auxiliare de echipare, pentru supravegherea în condiții dificile de vizibilitate (noaptea sau în condiții de ceață densă) drona se poate echipa cu cameră de supraveghere în

infraroșu (FLIR – Forward Looking Infrared) sau camera cu termoviziune (vezi fig. 43-44).



Fig. 42 Cameră foto/video **Turnigy Action Cam**



Fig. 43 Cameră FLIR



Fig. 44 Cameră cu termoviziune

6. Concluzii

Hexarotorul realizat constituie o soluție eficientă și relativ ieftină pentru utilizarea în aplicații de securizare perimetrală, pentru supravegherea instalațiilor industriale de interes strategic, a clădirilor guvernamentale, a centrelor de detenție, a frontierelor, pentru identificarea trecerii ilegale a acestora etc.

7. Bibliografie

- [1]. www.ecalc.ch
- [2] R. W. Beard, "Quadrotor dynamics and control," Brigham Young University, 2008.
- [3] R. C. Leishman, J. Macdonald, R. W. Beard, and T. W. McLain, "Quadrotors & Accelerometers," 2013.
- [4] S. Bouabdallah, "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying," Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2007.
- [5] J. Gordon Leishman. Principles of Helicopter Aerodynamics. Cambridge University Press, 2000
- [6] P. Martin and E. Salaun, "The true role of accelerometer feedback in quadrotor control," in Robotics and Automation (ICRA)
- [7] V. Martínez. Modelling of the Flight Dynamics of a Quadrotor Helicopter. Department of Aerospace Sciences, Cranfield University, Cranfield, Bedfordshire, United Kingdom, 2007.
- [8] Gabriel M. Hoffmann, Haomiao Huang, Steven L. Waslander, and Claire J. Tomlin. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2007.
- [9] Niță M. M., Avioane și Rachete, concepte de proiectare, Ed. Militara, Bucuresti, 1985;
- [10] E. V. Laitone. Wind tunnel tests of wings at reynolds numbers below 70 000. Experiments in Fluids 23, pages 405–409, 1997.
- [11] Filipe M. S. Pedro. Projecto preliminar de um quadrirotor. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2009.
- [12] Jim Cox, Electric Motors (Workshop Practice), 1988.
- [13] Christian Månsson, Daniel Stenberg, Model-based Design Development and Control of a Wind Resistant Multirotor UAV, Department of Automatic Control, Lund University, 2014.
- [14] V. Artale, C.L.R. Milazzo and A. Ricciardello, Mathematical Modeling of Hexacopter, Kore University of Enna Faculty of Engineering and Architecture, 2013.
- [15] J.M. Rico-Martinez, J. Gallardo-Alvarado (2000) A simple method for the determination of angular velocity and acceleration of a spherical motion through quaternions, Meccanica 35 111{118.
- [16] Wikipedia: Unmanned Aerial Vehicle. [Online]. Site: <http://en.wikipedia.org/wiki/UAV>
- [17] DIY Drones. [Online]. Site: <http://diydrones.com/>
- [18] Aeroquad: The open source quadcopter / multicopter. [Online]. Site: <http://aeroquad.com/>
- [19] R. W. Beard, "Quadrotor dynamics and control," Brigham Young University, 2008.
- [20] J. Macdonald, R. Leishman, R. Beard, and T. McLain, "Analysis of an Improved IMU-Based Observer for Multirotor Helicopters," Journal of Intelligent & Robotic Systems, pp. 1-13, 2013.
- [21] N. Guenard, T. Hamel, and R. Mahony, "A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle," Robotics, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 2, pp. 331-340, 2008.
- [22] R. Leishman, J. Macdonald, T. McLain, and R. Beard, "Relative navigation and control of a hexacopter," in Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, year = 2012, pages = 4937–4942, organization = IEEE.