

تشخیص همزمان عیب در مجموعه عملگرهای یک کوادکوپتر بر اساس فضای پریتی

امین نجفی^۱، دانیال بوستان*^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی قوچان

۲- استادیار، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی قوچان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴)

چکیده

در این مقاله، یک روش جدید برای تشخیص و جداسازی عیوب همزمان در عملگرهای یک کوادروتور معرفی شده است. مبنای این روش، استفاده از فضای پریتی بوده و به کمک آن امکان تشخیص چند عیب با دقت بالا فراهم شده است. با استفاده از این روش، علاوه بر تشخیص عیب و جداسازی عملگرهای آسیب دیده، نوع عیب موجود در عملگر نیز شناسایی می‌شود. عیب موجود در سیستم از نوع ضرب‌شونده فرض شده است و انواع عیب از نوع پله‌ای، پالسی و سینوسی مورد مطالعه قرار گرفته است. با هدف افزایش دقت سیستم تشخیص و جداسازی آسیب، تعداد ده مانده برای سیستم ایجاد شده و از ترکیب‌های مختلف این مانده‌ها اطلاعات مورد نیاز برای تشخیص عیوب همزمان عملگرها تولید شده است. با توجه به محدود بودن فضای پریتی به سیستم‌های خطی، دینامیک کوادروتور در حالت شناور در یک نقطه (هاور) خطی-سازی شده و در شبیه‌سازی‌ها بکار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، دقت بالای روش پیشنهادی را در تشخیص و جداسازی آسیب‌های موجود در عملگر و نیز شناسایی نوع آنها را اثبات می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تشخیص عیب، جداسازی عیب، فضای پریتی، مانده، عیب ضرب‌شونده، عیب عملگر

Multiple actuator fault diagnosis based on parity space for quadrotor system

Amin Najafi, Danyal Bustan*

Abstract

In this paper, a new approach to fault detection and isolation for multiple simultaneous faults for a quadrotor system is proposed. This method is based on parity space and high accuracy diagnosis of multiple faults can be achieved with the proposed method. Another advantage of this scheme is that in addition of its fault localization capability, types of faults could be identified as well. In this research only multiplicative actuator faults is considered and step, impulse and sinusoidal fault are studied. To achieve high accuracy, 10 residuals are generated and multiple combination of these residuals are studied for diagnosis purposes. As the parity space approach is used only for linear systems, linear dynamics of quad-rotor in hovering mode is selected for simulations. Simulation results show the effectiveness and high accuracy of the proposed method in both fault detection and diagnosis and type identification of actuator faults.

Key words: Fault Detection, Fault Isolation, Parity Space, Residual, Multiplicative fault, Actuator Fault,

مقدمه

کوادروتور یک وسیله پرنده با امکان حرکت با ۶ درجه آزادی است که قابلیت پرواز عمودی و انجام مانورهای پیچیده را داراست. این وسیله، دارای ساختاری شبه صلیبی می‌باشد که چهار ملخ در چهار گوشه آن قرار داشته و با تغییر سرعت ملخ‌ها، می‌تواند حرکات و مانورهای مختلف را انجام دهد. این وسیله در دسته عمود پروازها قرار داشته و از ویژگی‌های خاصی مانند ظرفیت حمل بار، قابلیت مانورپذیری بالا، وجود قیود اندک در حرکت و هزینه پایین تعمیر و نگهداری برخوردار است [۱].

با هدف بهبود عملکرد این سیستم، تحقیقات زیادی در زمینه‌های دینامیک پرواز، رباتیک، تشخیص و جداسازی عیب^۱ و طراحی کنترل کننده تحمل‌پذیر عیب^۲ صورت گرفته است [۲]. در سیستم‌هایی مانند کوادروتور، اغلب تغییرات غیرمنتظره‌ای، مانند عیب و خرابی، باعث کاهش عملکرد سیستم و حتی ناپایداری آن می‌شوند. تشخیص سریع این خرابی‌ها بسیار مهم بوده تا زمان کافی برای اتخاذ اقدامات اصلاحی و تنظیم مجدد کنترل کننده وجود فراهم شود [۳].

در این پژوهش هدف، تشخیص و جداسازی عیوب عملگرهای کوادروتور است. در رابطه با تشخیص و جداسازی عیب عملگر و حسگر، تحقیقات مختلفی انجام شده است. برای مثال در [۴]، با استفاده از الگوریتم تخمین غیرخطی، عیب وارد شده به عملگرهای کوادروتور تشخیص داده شده و جداسازی گردیده است. استفاده از مشاهده‌گر^۴ فیلتر کالمن به منظور تشخیص و جداسازی عیب در دستور کار مقاله [۵] قرار داشته است. در این پژوهش، پس از خطی سازی دینامیک کوادروتور در یک نقطه ثابت شناور در هوا، به کمک فیلتر کالمن مانده‌های^۵ مورد نیاز ایجاد شده و برای تشخیص عیب از آنها استفاده شده است. در مرجع [۶]، از روش فضای پربیتی^۶ و بهره‌گیری از بردار پربیتی^۷ به منظور یافتن مانده و تشخیص و جداسازی عیب حسگرها با استفاده از مانده‌ی حاصل استفاده شده است. در مرجع [۷]، تکنیک مشاهده‌گر تائو^۸ برای تشخیص و جداسازی عیب‌های وارد شده به حسگر انتخاب شده است. در مرجع [۸]، از مشاهده‌گر MPC که معمولا برای سیستم‌های خطی کاربرد دارد، استفاده شده است. با تعریف حد آستانه‌ی مناسب، برای جداسازی عیب‌ها، از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۹، استفاده شده است. استفاده از فیلتر تشخیص^{۱۰} روش مورد استفاده مرجع [۹] برای تشخیص عیب

بوده است. لازم به ذکر است این فیلتر تنها برای سیستم‌های خطی قابل استفاده است. در مرجع [۱۰]، از فیلتر کالمن توسعه‌یافته^{۱۱} برای تشخیص عیب‌های وارد شده به حسگرها استفاده شده است. مزیت عمده‌ی این روش نسبت به فیلتر کالمن معمولی، عدم نیاز آن به یافتن نقطه‌ی کار سیستم است. مشاهده‌گر فیلتر کالمن توسعه‌یافته منطقه‌ای^{۱۲} روش استفاده شده در مرجع [۱۱] با هدف تشخیص عیب در سیستم‌های غیرخطی، بوده است. یکی از مزیت‌های محاسبات منطقه‌ای، سادگی محاسبات بوده و حالت‌های نامشخص در این محاسبات، رفع شده است. در مرجع [۱۲]، به منظور تخمین آسیب از فضای پربیتی و الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی استفاده شده است. مشاهده‌گر LPV، وظیفه تشخیص عیب وارد شده به حسگرها را در مرجع [۱۳] بر عهده دارد.

تحقیقات بسیاری در رابطه با تشخیص و جداسازی عیب، بر روی سیستم‌های خطی و غیرخطی وجود دارد. مراجع [۱۴]، [۱۵] و [۱۶]، روش‌های متنوع تشخیص و جداسازی عیب را بر روی سیستم‌های خطی، اعمال کرده‌اند و اساس تمامی آن‌ها، استفاده از معادلات دینامیک خطی سیستم می‌باشد. پژوهش‌های [۱۷]، [۱۸] و [۱۹]، تشخیص و جداسازی عیب را بر روی سیستم غیرخطی در دستور کار خود داشته‌اند.

مرور مقالات فوق و سایر منابع نشان می‌دهد که تشخیص عیوب همزمان تاکنون چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین عموماً تنها یک نوع عیب در مراجع مورد مطالعه قرار گرفته است و شناسایی نوع عیب در مراجع مختلف به نوعی مغفول مانده است.

در این مقاله، به منظور تشخیص و جداسازی عیوب همزمان عملگرهای کوادروتور، از فضای پربیتی و بردار پربیتی استفاده شده است. سیستم مورد مطالعه، بصورت شناور در یک نقطه در هوا (هاور) فرض شده و عیب عملگرها نوع ضرب شونده^{۱۳} فرض شده است.

لازم به ذکر است که عیوبی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است از نظر ظاهری و مشاهدات چشمی قابل تشخیص نیست و نیاز است تا وجود این عیوب به کمک روش‌های تحلیلی تشخیص داده شود.

نوآوری روش پیشنهادی این مقاله، امکان تشخیص و جداسازی عیوب همزمان در یک سیستم کوادکوپتر به کمک فضای پربیتی است.

با استفاده از این نیروها معادلات دینامیکی سیستم، در چهارچوب اینرسی و معادلات زاویه‌ای، در چهارچوب متصل به جسم، به صورت رابطه (۱)، خواهد بود [۲۰]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m} \\ \ddot{y} &= (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m} \\ \ddot{z} &= -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m} \\ \ddot{\phi} &= \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_{TP}}{I_{xx}} \dot{\Omega} + \frac{u_2}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} &= \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\psi} \dot{\phi} - \frac{J_{TP}}{I_{yy}} \dot{\Omega} + \frac{u_3}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} &= \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{u_4}{I_{zz}} \end{aligned} \quad (1)$$

در معادله فوق، ϕ ، θ و ψ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی زوایای رول، پیچ و یاو می‌باشند. I_{xx} ، I_{yy} و I_{zz} نشان دهنده ممان‌های اینرسی حول محورهای اصلی و J_{TP} اینرسی چرخشی کل حول محور ملخ می‌باشد. g ، گرانش زمین و Ω ، مجموع سرعت زاویه‌ای روتورها می‌باشد.

ورودی‌های کنترلی تابع سرعت ملخ‌ها بوده به صورت

رابطه (۲) می‌باشند:

$$\begin{aligned} u_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ u_2 &= bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ u_3 &= bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ u_4 &= b(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ \Omega &= \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 \end{aligned} \quad (2)$$

در عبارت فوق، $u_i, i = 1, \dots, 4$ ، ورودی‌های کنترلی، Ω_1 ، سرعت ملخ جلو، Ω_2 ، سرعت ملخ راست، Ω_3 ، سرعت ملخ عقب و Ω_4 سرعت ملخ چپ می‌باشد. l ، فاصله بین مرکز کوادروتور و مرکز ملخ و b ، ضریب پیشران^{۱۷} می‌باشد. دینامیک کوادروتور و پارامترهای کنترلی آن، تابعی از گشتاورهای تولید شده توسط ملخ‌ها است. رابطه‌ی بین ورودی کنترلی و نیروی پیشران، به صورت رابطه (۳) است [۲۰]:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{4}u_1 - \frac{1}{2l}u_2 - \frac{b}{4d}u_4 \\ T_2 &= \frac{1}{4}u_1 - \frac{1}{2l}u_2 + \frac{b}{4d}u_4 \\ T_3 &= \frac{1}{4}u_1 + \frac{1}{2l}u_3 - \frac{b}{4d}u_4 \\ T_4 &= \frac{1}{4}u_1 + \frac{1}{2l}u_3 + \frac{b}{4d}u_4 \end{aligned} \quad (3)$$

همچنین دقت بالای این روش در شناسایی انواع عیوب (پله‌ای، پالسی و سینوسی) از دیگر مزایای این روش می‌باشد. لازم به ذکر است که انواع عیب ذکر شده از لحاظ رفتار زمانی و نیز تأثیری که در کاهش عملکرد سیستم می‌گذارند کاملاً با یکدیگر متفاوت بوده در نتیجه تشخیص و جداسازی عیب برای آنها به عنوان یک چالش مطرح است.

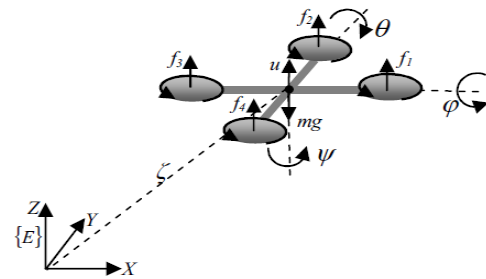
روش پیشنهادی این مقاله، با فرضیات زیر به تشخیص و جداسازی عیب پرداخته است:

- عیب به صورت ضرب‌شونده در سیستم وجود دارد.
- عیب به عملگرها وارد شده است.
- پرند در یک نقطه شناور در هوا (هاور^{۱۴}) قرار دارد.

در ادامه، ابتدا به معرفی معادلات دینامیکی سیستم پرداخته می‌شود. سپس مختصری در خصوص عیب و انواع آن توضیحاتی داده شده و پس از آن فضای پیریتی و بردار پیریتی معرفی شده و به کمک آن به تشخیص و جداسازی آسیب عیوب همزمان در سیستم پرداخته خواهد شد. در انتها نیز با هدف اثبات کارایی روش پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی‌های روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف ارائه شده است.

معادلات دینامیکی

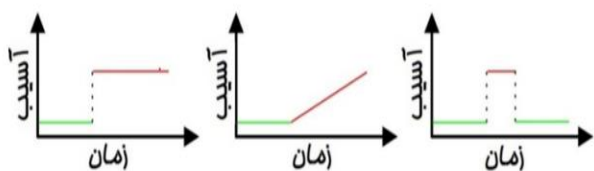
سیستم کوادروتور دارای شش درجه آزادی با چهار عدد روتور می‌باشد. سه درجه آزادی، مربوط به حرکت در راستای محورهای x ، y و z بوده و سه درجه آزادی دیگر مرتبط با سه زاویه حرکتی رول و پیچ و یاو می‌باشد. شکل ۱، هر ۶ درجه آزادی در حرکت کوادروتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - شش درجه آزادی حرکت در کوادروتور [۲۰]

نیروهای تعمیر یافته برای کوادروتور را می‌توان به چهار جزء تقسیم کرد: نیروی وزن، نیروی ناشی از اثرات ژيروسکوپی^{۱۵}، نیروی اصطکاک، نیروها و گشتاور^{۱۶}های کنترل.

برای بیان عیب موجود در اجزای سیستم و از عیب ضرب شونده برای بیان عیب موجود در حسگرها یا عملگرها استفاده می‌شود. همچنین می‌توان با توجه به خصوصیات زمانی وقوع یک عیب، دسته‌بندی شامل عیب ناگهانی، ابتدایی و متناوب نیز پیشنهاد شده است. عیب ناگهانی معمولا بلافاصله بعد از عیب سخت افزاری به وقوع می‌پیوندد. این نوع عیب معمولا شدید بوده و تاثیر سریع و زیادی بر عملکرد و حتی پایداری سیستم دارند. عیب ابتدایی معرف تغییرات آرام یک پارامتر در طول زمان است که عموما به دلیل فرسودگی سیستم ظاهر می‌شود. شناسایی این عیب به دلیل تغییرات کند آن دشوار است. این نوع عیب معمولا با شدت کمتری عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ظهور و ناپدید شدن عیب‌های متناوب در یک سیستم عموما به تناوب رخ می‌دهد. مثالی از این نوع عیب، وجود یک سیم در سیستم است که به خوبی به محل اتصال خود متصل نگردیده است. شکل ۳ انواع عیوب را با توجه به خصوصیات زمانی آنها نمایش می‌دهد.



شکل ۳ - عیب متناوب (راست)، عیب ابتدایی (وسط) و عیب ناگهانی (چپ) [۲۳]

مدل کلی سیستم مورد مطالعه با فرض در نظر گرفتن عیب ضرب شونده در سرعت زاویه‌ای عملگرها، به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-f_1) & (1-f_2) & (1-f_3) & (1-f_4) \\ 0 & -(1-f_2) & 0 & (1-f_4) \\ -(1-f_1) & 0 & (1-f_4) & 0 \\ -(1-f_1) & (1-f_2) & -(1-f_3) & (1-f_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

با فرض وجود عیب ضرب شونده در سیستم، ضریب عملگر را تغییر می‌دهد. $f_i, i=1;2;3;4$ در سیگنال کنترلی ضرب شده و تاثیرگذاری

در رابطه (۳)، $T_i, i=1, \dots, 4$ ، نیروهای پیش‌ران و d ضریب پسا می‌باشد.

شکل ماتریسی رابطه (۳)، به صورت رابطه (۴) است:

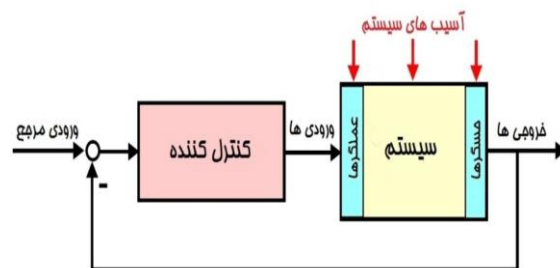
$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -l & 0 & l \\ -l & 0 & l & 0 \\ -\frac{b}{d} & \frac{b}{d} & -\frac{b}{d} & \frac{b}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

عیب و انواع آن

عیب به عنوان یک تغییر غیرمنتظره در سیستم شناخته می‌شود که منجر به کاهش عملکرد در سیستم می‌گردد. عیب، به معنای سوء عملکرد در سیستم است ولی خرابی کامل، باعث از کارافتادن سیستم می‌شود [۲۱].

تشخیص عیب، به معنای شناسایی عیب و محل رخداد آن می‌باشد. تشخیص و جداسازی عیب (FDI)، از دو فاز تشکیل شده است. فاز اول تشخیص وجود عیب در سیستم بوده و فاز دوم جداسازی عیب می‌باشد، که به معنای تعیین محل دقیق عیب در سیستم است. برای مثال تعیین دقیق حسگر یا عملگر معیوب همان جداسازی می‌باشد [۲۲].

عیب یا همان آسیب، به معنای از دست دادن بخشی از اثربخشی عملگر و یا حسگر می‌باشد. یکی از روش‌های دسته‌بندی عیب‌ها محل وقوع آنهاست. در شکل ۲، عیب‌ها به سه دسته عیب در عملگر، عیب در حسگر و عیب در اجزای سیستم دسته‌بندی شده است.



شکل ۲ - دسته‌بندی عیب‌ها [۲۳]

علاوه بر دسته‌بندی فوق، بر حسب نحوه‌ی مدل‌سازی عیب، می‌توان عیب‌ها را به دو دسته‌ی ضرب شونده^{۱۸} و جمع شونده^{۱۹} نیز تقسیم‌بندی نمود. عموما از عیب جمع شونده

$$\begin{aligned}
 y(k) &= CA(k-1)x(k-1) + CB(k-1)u(k-1) \\
 &\quad + CF(k-1)f(k-1) + CE(k-1)d(k-1) \\
 &= CA(k-1)A(k-2)x(k-2) + CA(k-1)B(k-2)u(k-2) \\
 &\quad + CB(k-1)u(k-1) + CA(k-1)F(k-2)f(k-2) \\
 &\quad + CF(k-1)f(k-1) + CA(k-1)E(k-2)d(k-2) \\
 &\quad + CE(k-1)d(k-1) \\
 &= CA(k-1)A(k-2)\cdots A(k-s)x(k-s) \\
 &\quad + CA(k-1)A(k-2)\cdots A(k-s+1) \\
 &\quad \times B(k-s)u(k-s) \\
 &\quad + CA(k-1)B(k-2)u(k-2) + CB(k-1)u(k-1) \\
 &\quad + CA(k-1)A(k-2)\cdots A(k-s+1) \\
 &\quad \times F(k-s)f(k-s) + \cdots \\
 &\quad + CA(k-1)F(k-2)f(k-2) + CF(k-1)f(k-1) \\
 &\quad + CA(k-1)A(k-2)\cdots A(k-s+1) \\
 &\quad \times E(k-s)d(k-s) + \cdots \\
 &\quad + CA(k-1)E(k-2)d(k-2) + CE(k-1)d(k-1)
 \end{aligned} \tag{۷}$$

در معادلات رابطه (۷)، $s > 0$ در نظر گرفته می‌شود. بعد از جمع‌بندی معادلات، رابطه (۸)، حاصل خواهد شد:

$$y(k) = H_o x(k-s) + H_u u(k) + H_f F_s(k) + H_d D_s(k) \tag{۸}$$

در روابط فوق

$$\begin{aligned}
 D_s(k) &= \begin{bmatrix} d(k-s) \\ d(k-s+1) \\ \vdots \\ d(k) \end{bmatrix}, Y(k) = \begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} \\
 F_s(k) &= \begin{bmatrix} f(k-s) \\ f(k-s+1) \\ \vdots \\ f(k) \end{bmatrix}, U(k) = \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix} \\
 H_o(k) &= \begin{bmatrix} C \\ CA(k-1) \\ CA(k-1)A(k-2) \\ \vdots \\ CA(k-1)\cdots A(k-s) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{۹}$$

$$H_u = [h_u(i, j)]_{(s+1) \times (s+1)}$$

$$\begin{cases} h_u(i, i-1) = CB(k-1) \\ h_u(i, j) \text{ if } j \geq i \\ h_u(i, j) = CA(k-1)\cdots A(k-s+j) \text{ if } j < i-1 \\ \quad \times B(k-s+j-1) \end{cases}$$

H_d و H_f نیز به ترتیب با جایگزینی $B(k)$ با $F(k)$ و $E(k)$

در H_u بدست خواهد آمد.

در رابطه فوق، $[f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]$ ، شدت عیب در سیستم بوده و $0 \leq f_i \leq 1$ فرض می‌گردد. به معنی از دست دادن کامل اثر بخشی عملگر یا خرابی کامل عملگر می‌باشد. $f_i = 0$ ، نیز به معنای نبود عیب در عملگر می‌باشد.

در این مقاله، سیستم کوادروتور به حالت شناور در یک نقطه ثابت فرض شده است و عیب‌های ضرب‌شونده در این حالت به سیستم وارد می‌شود. عیب ذکر شده باعث کاهش اثر بخشی عملگر شده و این موضوع باعث کاهش عملکرد سیستم و حتی ناپایداری آن می‌شود. به منظور تشخیص عیب و جداسازی آن، از فضای پیریتی و بردار پیریتی استفاده شده است.

فضای پیریتی و بردار پیریتی

با استفاده از روش اولیه، سیستم خطی زمان گسسته، رابطه (۶)، از سیستم غیرخطی معادله (۱)، اقتباس شده است:

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= A(k)x(k) + B(k)u(k) \\
 &\quad + F(k)f(k) + E(k)d(k)
 \end{aligned} \tag{۶}$$

$$y(k) = C(k)x(k)$$

در معادله (۶)، $x(k) \in R^n$ ، بردار حالت، $u(k) \in R^p$ ،

بردار ورودی، $d(k) \in R^d$ ، اغتشاشات نامعلوم، $y(k) \in R^m$ ، بردار خروجی و $f(k) \in R^q$ ، عیب‌های موجود می‌باشد. $A(k)$ ، $B(k)$ ، $C(k)$ و $E(k)$ ماتریس‌های معلوم و با ابعاد مناسب بوده و $F(k)$ ماتریس توزیع خطاست. همچنین p ، n ، d ، m و q به ترتیب تعداد متغیرهای حالت، تعداد ورودی‌ها، تعداد اغتشاشات، تعداد خروجی‌ها و تعداد عملگرهای سیستم را نشان می‌دهد.

فضای پیریتی، یک روش معمول و مناسب در مسئله تشخیص عیب می‌باشد که با تولید مانده و تحلیل آن می‌توان عیب‌های وارد شده به حسگرها یا عملگرها را شناسایی کرد. هدف از پیریتی، گسترش معادلات و یافتن رابطه‌ای میان خروجی و ورودی کنترلی می‌باشد که این رابطه در صورت وجود عیب در سیستم، تغییر خواهد کرد. بعد از گسترش معادلات و یافتن بردار پیریتی، کمک تحلیل مانده‌ها، عیب‌ها تشخیص داده شده و از هم جداسازی می‌شوند.

با استفاده از رابطه (۶)، و استفاده از حالت افزونه ۲۰ مطابق رابطه (۷)، می‌توان معادله‌ی فضای پیریتی را به دست آورد [۱۲]:

عیب (پله‌ای، پالسی و سینوسی) نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

پس از ایجاد مانده‌ها، باید مقدار آنها در هر لحظه با حد آستانه‌ای که برای هر مانده بطور مجزا تعیین می‌گردد، مقایسه شود. در صورتیکه مانده مورد نظر از این حد آستانه بیشتر شد، وجود عیب در سیستم تشخیص داده می‌شود. تشخیص نوع و محل آسیب نیز با توجه به ترکیب مانده‌های مختلف انجام خواهد شد.

در این بخش از یک کوادکوپتر نمونه برای شبیه سازی استفاده شده است. پارامترهای فیزیکی مربوط به این سیستم در جدول ۱ آورده شده است [۲۴]:

جدول ۱ - پارامترهای فیزیکی کوادروتور [۲۴]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
I_{xx}	7.5×10^{-3}	d	7.5×10^{-7}
I_{yy}	7.5×10^{-3}	l	0.23
I_{zz}	1.3×10^{-2}	m	0.65
J_{TP}	6.5×10^{-5}	g	9.81
b	3.13×10^{-5}		

در این مقاله، زوایای (ϕ و θ و ψ)، به ترتیب معرف زوایای رول^{۲۱}، پیچ^{۲۲} و یاو^{۲۳} می‌باشند. با توجه به شناور بودن پرنده در یک نقطه در آسمان (هاور)، تولید مانده تنها بر اساس این سه زاویه و بردار z که معرف بردار ارتفاع است انجام شده است. در این پژوهش منظور از عیب، آسیب وارد شده به سرعت زاویه‌ای موتورها بوده که با نماد Ω_1^2 ، Ω_2^2 ، Ω_3^2 و Ω_4^2 نمایش داده شده است. عیوب همزمان نیز به چند سرعت زاویه‌ای، مقدار ۳۰ درصد عیب در زمان مشخص وارد شده است. عیوب همزمان از نوع پله‌ای به سیستم اعمال شده است.

لازم به ذکر است که در تمامی سناریوهای این بخش، عیب مورد نظر در ثانیه ۲۰ شبیه‌سازی به سیستم اعمال شده است. همچنین با هدف بررسی اثر اغتشاش بر سیستم، به زوایای رول، پیچ و یاو اغتشاش $d = \sin(5t)$ اعمال شده است.

تشخیص و جداسازی عیب

با استفاده از رابطه (۱۲) مانده‌های مورد نظر تولید می‌گردد. با استفاده از رابطه (۱۰) و محاسبه بردار پریتی $\eta(k)$ ، ماتریسی به ابعاد ۱۰ سطر و ۱۰ ستون حاصل شده که ابعاد این ماتریس نشان‌دهنده تعداد مانده‌های ایجاد شده می‌باشد.

$\eta(k)$ ، بردار پریتی می‌باشد که باید در رابطه (۱۰)، صدق کند [۱۲]. لازم به ذکر است که رابطه (۱۰) روابط مورد نیاز برای محاسبه فضای پوچی ماتریس $H_o(k)$ است.

$$\eta(k)H_o(k) = 0 \quad (10)$$

در حقیقت در روش پریتی، با محاسبه فضای پوچی ماتریس $H_o(k)$ که از روابط ورودی و خروجی سیستم در حالت بدون عیب محاسبه شده است، اقدام به ایجاد مانده کرده که این مانده‌ها در حالت بدون عیب سیستم نزدیک صفر بوده و در صورت بروز عیب، مقداری مخالف صفر خواهند داشت. در ادامه با به دست آوردن بردار پریتی $\eta(k)$ ، عمل تولید مانده انجام شده است. با تفسیر مانده تولید شده، عمل تشخیص و جداسازی آسیب انجام خواهد شد.

محاسبه مانده

با استفاده از روابط (۸)، (۹) و (۱۰)، می‌توان مانده‌ی حاصل را به صورت رابطه‌ی (۱۱)، محاسبه کرد. باید دقت شود که رابطه (۱۰)، شرط اصلی تولید مانده در فضای پریتی می‌باشد.

$$v(k)y(k) = \eta(k)H_o(k)x(k-s) + \eta(k)H_u(k) + \eta(k)H_f(k)F_s(k) + \eta(k)H_d(k)D_s(k) \quad (11)$$

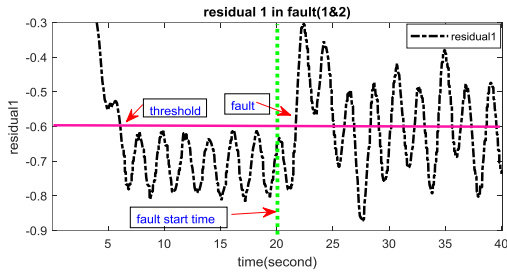
با استفاده از رابطه (۱۱)، رابطه (۱۲) حاصل می‌شود:

$$r(k) = \eta(k)y(k) - \eta(k)H_u(k)u(k) = \eta(k)H_f(k)F_s(k) + \eta(k)H_d(k)D_s(k) \quad (12)$$

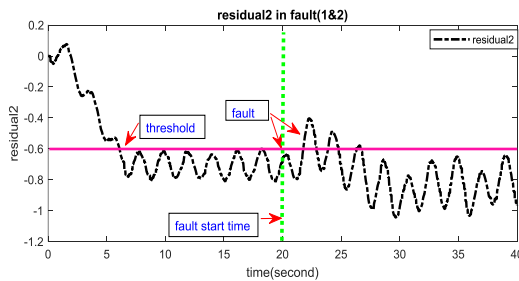
رابطه (۱۲)، مانده‌ی حاصل در فضای پریتی می‌باشد. با تحلیل مانده‌ی به دست آمده و تغییرات ناگهانی به وجود آمده در بردار مانده‌ها در مورد عیب و جداسازی عیب‌ها از یکدیگر می‌توان اظهار نظر نمود [۱۲].

شبیه‌سازی

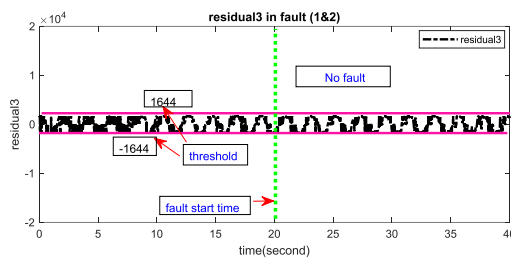
در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با عیوب مختلف بررسی خواهد شد. به همین منظور و با استفاده از روابط ذکر شده، تعداد ۱۰ رابطه برای ایجاد مانده با استفاده از فضای پریتی ایجاد شده و به کمک ترکیب‌ها مختلف این مانده‌ها به تشخیص و جداسازی آسیب‌های مختلف پرداخته شده است. همچنین عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با انواع



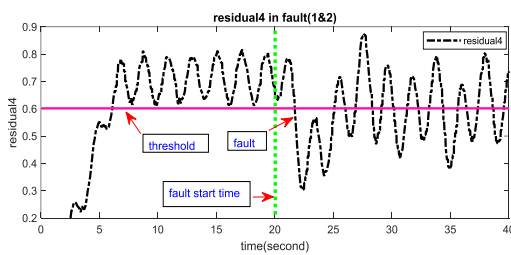
شکل ۴ - الف) مانده ۱



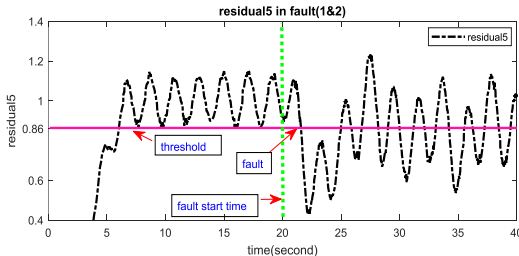
شکل ۴ - ب) مانده ۲



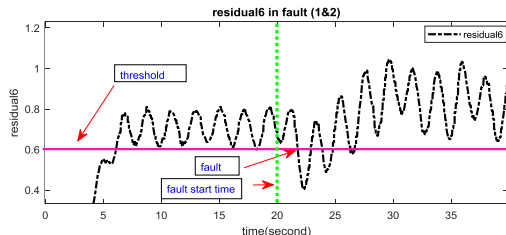
شکل ۴ - ج) مانده ۳



شکل ۴ - د) مانده ۴



شکل ۴ - ه) مانده ۵



شکل ۴ - و) مانده ۶

لازم به ذکر است که اگر ابعاد ماتریس فضای پوچی $(H_o(k))$ بیشتر شود می‌توان از تعداد مانده‌های بیشتری بهره برد. در روش پیشنهادی، با توجه به اینکه از ترکیب‌های مختلف مانده‌ها برای جداسازی آسیب استفاده می‌شود، هر چه تعداد مانده‌ها بیشتر باشد تشخیص و جداسازی مانده‌ها با دقت بیشتری انجام خواهد شد و حالت‌های بیشتری پوشش داده می‌شود.

یکی از مزیت‌های این روش نسبت به مشاهده‌گر فیلتر کالمن و دیگر مشاهده‌گرها نیز، استفاده از تعداد مانده‌های بیشتر و نیز دقت بالاتر در تشخیص عیب موجود در سیستم به دلیل استفاده از ترکیب‌های بیشتر مانده‌هاست. نمودارهای شکل ۴، نتایج مانده‌های به دست آمده در اثر وارد کردن عیب به سرعت زاویه‌ای های Ω_1^2 و Ω_2^2 را نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده به دو بخش تفکیک شده‌اند. در بخش اول نتایج تشخیص و جداسازی عیب و در قسمت دوم نتایج شناسایی نوع عیب وارد شده گزارش شده است.

تشخیص و جداسازی آسیب

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۴، مشخص است، پس از اعمال عیب به سیستم در ثانیه ۲۰، در اکثر نمودارهای مانده‌ها تغییرات قابل توجهی مشاهده می‌شود. با تعیین یک حد آستانه برای این تغییرات، تشخیص وجود عیب در سیستم به راحتی امکان‌پذیر است.

با تکرار این سناریو برای عملگرهای مختلف و نیز با وارد کردن عیب به چند عملگر دیگر به صورت هم‌زمان و مشاهده نتایج حاصل از مانده‌ها و مقایسه مانده‌ها با یکدیگر می‌توان مکان عیب موجود در عملگرها را نیز مشخص نمود (جداسازی عیب). جدول ۲، تاثیر عیوب مختلف بر مانده‌های ایجاد شده را نمایش می‌دهد. در این جدول، نماد * مشخص‌کننده تاثیر پذیری مانده از عیب مورد نظر و نماد -، عدم تاثیرپذیری مانده از عیب مورد مطالعه است.

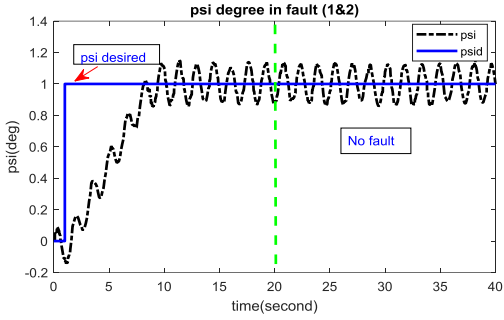
به عنوان مثال، برای عیب اعمالی به عملگرهای ۱ و ۲، مانده‌های شماره ۱، ۲، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ از وجود عیب اعمالی به سیستم در ثانیه ۲۰ تاثیر گرفته است. لازم به ذکر است که در خصوص مانده‌های شماره ۸ و ۱۰ (شکل‌های ۴ - ج و ۴ - ی) دامنه مانده بعد از ثانیه ۲۰ کاهش یافته است.

با توجه به شکل ۵، مشخص است که عیب موجود در عملگر ۱ و ۲ در خروجی زوایای ϕ و θ تاثیر گذاشته و تاثیری در زاویه سوم ندارد.

شناسایی نوع عیب

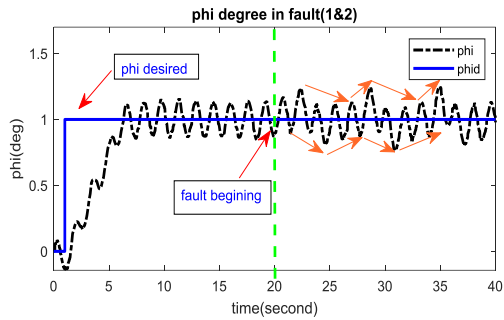
در این قسمت به عملگرهای سیستم سه نوع عیب پالسی، پله‌ای و سینوسی وارد می‌شود. شناسایی نوع عیب وارد شده به کمک رفتار نتایج حاصل از مانده‌ها و خروجی زوایا مشخص می‌شود. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، و نمودار حاصل شده بعد از ورود آمدن عیب مشخص است که عیب موجود در یک محدوده مشخص می‌باشد و از محدوده مشخصی خارج نمی‌شود. لذا می‌توان این رفتار را به عنوان رفتار عیب پله‌ای در نظر گرفت.

با اعمال سایر عیوب، می‌توان رفتار مانده‌ها را با توجه به عیب وارد شده بررسی نمود. شکل ۶، خروجی یک نمونه از زوایای سیستم بعد از اعمال عیب پالسی به عملگر ۱ و ۲ می‌باشد.

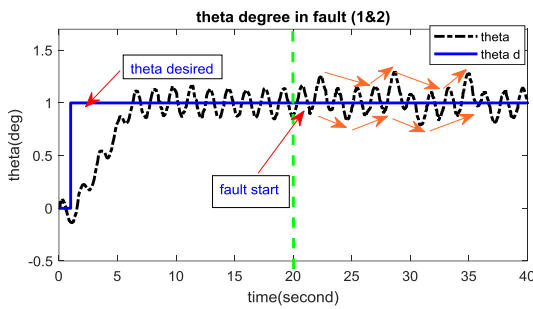


شکل ۶-ج) تغییر زاویه ψ

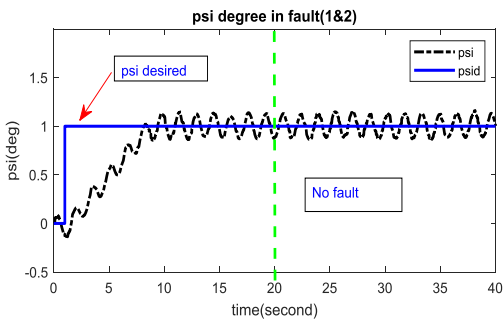
شکل ۷ - تغییرات خروجی زوایا بعد از عیب پالسی در عملگر ۱ و ۲ با توجه به شکل ۶، می‌توان دریافت که بعد از ثانیه ۲۰، عیب به سیستم وارد شده و بعد از مدت کوتاهی از بین رفته است. لذا چنین رفتاری را می‌توان با توجه به ماهیت عیب پالسی، مختص این نوع عیب دانست. دقت در نتایج سایر مانده‌ها نیز نتیجه مشابهی را حاصل خواهد کرد. در انتها نیز نتایج زوایای خروجی بعد از رخداد عیب سینوسی در شکل ۷، نشان داده شده است.



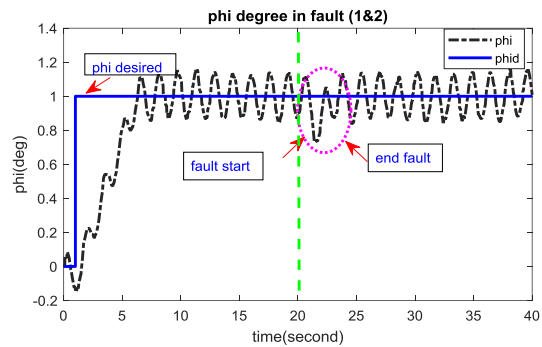
شکل ۷-الف) تغییر زاویه ϕ



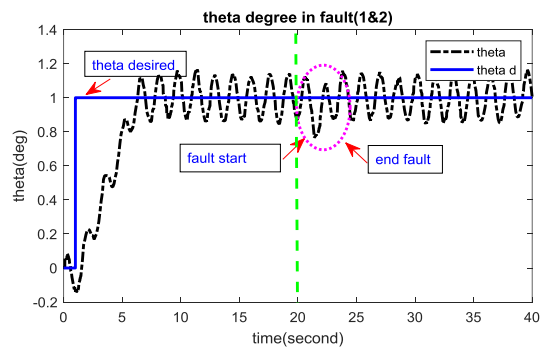
شکل ۷-ب) تغییر زاویه θ



شکل ۷-ج) تغییر زاویه ψ



شکل ۶-الف) تغییر زاویه ϕ



شکل ۶-ب) تغییر زاویه θ

با توجه و دقت در شکل ۷ و مشاهده رفتار موج خروجی زوایای ϕ و θ مشخص می‌کند که بعد از ورود عیب، نمودار به صورت سینوسی و موجی نوسان می‌کند. لذا می‌توان این رفتار به بصورت منحصر به فرد به نوع عیب سینوسی نسبت داد.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تشخیص، جداسازی و نیز شناسایی نوع عیب وارد شده به سیستم پرداخته شده است. عیب وارد شده به سرعت زاویه‌ای عملگر از نوع ضرب‌شونده و نیز از نوع پله می‌باشد و به دو، سه و چهار عملگر سرعت زاویه-ای به صورت هم‌زمان اعمال شد. با استفاده از فضای پرتی و مانده حاصل، عمل تشخیص و جداسازی عیب‌ها از یکدیگر انجام شد. با بررسی رفتار مانده‌ها، عملگرهای معیوب مشخص شده است. لازم به ذکر است که تشخیص عیب با استفاده از تعیین حد آستانه برای هر کدام از مانده‌ها و نیز مشاهده رفتار آنها قبل و بعد از اعمال عیب قابل انجام است.

مزیت این روش نسبت به دیگر مشاهده‌گرها و نیز دیگر مقالاتی که از فضای پرتی استفاده شده است، تعداد زیاد مانده‌ها و نیز حساسیت بالای این روش برای تشخیص و جداسازی عیب می‌باشد. دومین مزیت نیز تشخیص و جداسازی عیب‌هایی است که به طور هم‌زمان به چند عملگر وارد شده است. بعد از عمل تشخیص و جداسازی، دو نوع عیب دیگر از نوع پالس و سینوسی نیز در همان لحظه قبلی به سیستم اعمال شد. با بررسی نتایج حاصل از خروجی زوایا و نحوه تاثیر این نوع عیب‌ها بر خروجی، نوع شناسایی شده است. البته با بررسی نتایج مانده‌ها نیز شناسایی نوع عیب میسر می‌باشد. به منظور پیشنهاد پیشنهاداتی برای ادامه کار می‌توان عمل تشخیص و جداسازی را با استفاده از فضای پرتی یا هر مشاهده‌گر دیگر در یک مسیر طراحی شده به سیستم انجام داد. همچنین یکی از موثرترین کارها در آینده، طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب با استفاده از روش پیشنهادی است.

پی نوشت

^۱ Fault Detection and Isolation

^۲ Fault Tolerant Control

مراجع:

- [1]. Mazre, M., Davoodi, E., Taghizadeh, M., Pourgholi, M., "Optimal control based on minimum-energy trajectory planning of a quadrotor". Amirkabir Journal of Science & Research Mechanical Engineering, (2019).
- [2]. Jing, C.S., Pebrian, D., "Fault detection in Quadrotor MAV". 7th IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), pp. 65-70, 2017.
- [3]. Willisky, A., "Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems", Automatica, 12, pp. 601-611, 1976
- [4]. Avram, R.C., Zhang, X., Muse, J., "Quadrotor actuator fault diagnosis and accommodation using nonlinear adaptive estimators". IEEE Transactions on Control Systems Technology, 25, pp. 2219-2226, 2017.
- [5]. Jing, C.S., Pebrian, D., "Fault detection and identification in Quadrotor system (Quadrotor robot)". 7th IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), pp.11-16, 2017.

- ^۳ Actuator
- ^۴ Observer
- ^۵ Residual
- ^۶ Parity Space
- ^۷ Parity Vector
- ^۸ Thau Observer
- ^۹ Artificial Neural Network
- ^{۱۰} Detection Filter
- ^{۱۱} Extended Kalman Filter
- ^{۱۲} Zonotopic
- ^{۱۳} Multiplicative
- ^{۱۴} Hover
- ^{۱۵} Gyroscope
- ^{۱۶} Torque
- ^{۱۷} Thrust
- ^{۱۸} Multiplicative
- ^{۱۹} Additive
- ^{۲۰} Redundancy
- ^{۲۱} Roll
- ^{۲۲} Pitch
- ^{۲۳} Yaw

- Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, pp. 446–451, 2012.
- [15]. Patton, R. J., Chen, J., “Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 17, pp. 278–285, 1994.
- [16]. Edwards, C., Alwi, H., Menon, P. P., “Applications of sliding observers for FDI in aerospace systems”, *Advances in Sliding Mode Control*, pp. 341–360, 2013.
- [17]. Zolghadri, A., Henry, D., Cieslak, J., Efimov, D., Goupil, P., “Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control and Guidance for Aerospace Vehicles From Theory to Application”, Series: *Advances in Industrial Control*, Springer, XVI, 2014.
- [18]. Halder, B., Sarkar, N., “Robust nonlinear analytic redundancy for fault detection and isolation in mobile robot”, *International Journal of Automation and Computing*, 4, pp. 177–182, 2007.
- [19]. Isermann, R., “Fault-diagnosis systems, An introduction from fault detection to fault tolerance”, Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [20]. Davoodi, E., Rezaei, M., “Dynamic modeling, simulation and control of a quadrotor using MEMS sensors”, experimental data. *Modares Mechanical Engineering*, 141, pp 76-84. (in persian), 2014.
- [21]. Patton, R.J., Clark, P., “Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application”, Control Engineering Series, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [22]. Patton, R.J., “Fault Detection and Diagnosis in Aerospace Systems using Analytical Redundancy”, *IEEE Computing and Control Engineering Journal*, 2 pp. 459-474. 1991.
- [23]. D. Bustan, Ph.D. thesis, “Satellite fault tolerant control design in the presence of actuator faults”, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, (in persian), 2014.
- [24]. Yu, B., Zhang, Y., Yi, Y., Qu, Y., Lu., P., “Fault detection for partial loss of effectiveness faults of actuators in a quadrotor unmanned helicopter”. In *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 3204-3209, 2014.
- [6]. Mouhssine, N., Kabbaj, MN., Benbrahim, M., El Bekkali, C., “Sensor fault detection of quadrotor using nonlinear parity space relations”. *International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, pp. 1-6, 2017.
- [7]. Chelly, N., Mekki, H., Bacha, A., “FDI and FTC technique based on Thau observer and flatness theory for a quadrotor”, 13th *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 223-228, 2016.
- [8]. Cândido, A.S., Galvão, R.K., Yoneyama, T., “Actuator fault diagnosis and control of a quadrotor”, 12th *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 310-315, 2014.
- [9]. Herdjunto, S., “Actuator fault signal isolation of an unmanned aerial vehicle (UAV) quadrotor based on detection filter”, 8th *International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, pp. 1-6, 2016.
- [10]. Zhong, Y., Zhang, W., Zhang, Y., “Sensor fault diagnosis for unmanned quadrotor helicopter via adaptive two-stage extended Kalman filter”, In 2017 *International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, pp. 493-498, 2017.
- [11]. Wang, Y., Puig, V., “Zonotopic extended Kalman filter and fault detection of discrete-time nonlinear systems applied to a quadrotor helicopter”. In 2016 *3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, pp. 367-372, 2016.
- [12]. Han, W., Wang, Z., Shen, Y., “Fault estimation for a quadrotor unmanned aerial vehicle by integrating the parity space approach with recursive least squares”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 232, pp. 783-96, 2018.
- [13]. López-Estrada, F., Ponsart, J., Theilliol, D., Zhang, Y., Astorga-Zaragoza, C., “LPV model-based tracking control and robust sensor fault diagnosis for a quadrotor UAV”. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84(1-4), pp.163-177, 2016.
- [14]. Adouni, A., Ben Hamed, M., Sbita, L., “Application of parity space approach in fault detection of DC motors”, 1st *international*