

شناسایی مدل دینامیکی یک رونده زیرآبی خودگردان با تخمین ضرایب هیدرودینامیکی

ابراهیم علیزاده^۱، محمدتقی ثابت^۲، مصطفی زرینی لاریمی^۳، حسین نورمحمدی^۴

mohammadtaghi.sabet@gmail.com

- ۱-دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک
- ۲-دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
- ۳-کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه سهند تبریز
- ۴-دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

چکیده

محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، یکی از مهمترین مراحل طراحی مدل دینامیکی روندهای زیرآبی است. به دلیل خطاهای موجود در روش‌های محاسباتی، گاهی نتایج بدست آمده قابل اعتماد نیستند. همچنین محاسبه این ضرایب از طریق تست‌های آزمایشگاهی، کاری بس مشکل و پرهزینه است. این کار به دلیل خواص غیرخطی این گونه از سیستم‌ها همواره با مشکلاتی روبه‌رو بوده است. یک راه حل مناسب استفاده از تخمین‌گرها برای محاسبه و صحت‌سنجی ضرایب است که با کمک نتایج تست میدانی می‌توانند تخمین مناسبی از ضرایب را ارائه نمایند. همچنین در صورت انجام این کار می‌توان از خروجی تخمین‌زن برای کنترل تطبیقی رونده استفاده نمود. در این مقاله، معادلات غیرخطی شش درجه آزادی یک رونده زیرآبی برای تخمین پارامترها به شکل مناسبی مدل‌سازی شده، سپس با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته، و با استفاده از اندازه‌گیری‌های کمتر نسبت به روش‌های مشابه تمامی ضرایب هیدرودینامیکی میرا کننده بدنه تخمین زده شدند. الگوریتم مذکور بر روی مدل برگرفته از یک زیرآبی واقعی پیاده‌سازی شده و نتایج بدست آمده صحت روش معرفی شده را به اثبات رسانیده است.

واژگان کلیدی: رونده زیرآبی خودگردان، ضرایب هیدرودینامیکی، تخمین‌زن، فیلتر کالمن توسعه یافته.

تاریخ دریافت مقاله :	۹۷/۰۱/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله :	۹۷/۰۷/۰۹

۱- مقدمه

امروزه تکنیک‌های تخمین ضرایب و شناسایی سیستم به عنوان یک ابزار مفید برای مهندسان طراح در حوزه‌های مختلف است. محاسبه دقیق ضرایب هیدرودینامیکی رونده‌های زیرآبی خودگردان^۱ جهت شناسایی دینامیک این اجسام، همواره مورد توجه طراحان سیستم‌های دریایی و همچنین مورد توجه دانشگهیان بوده است [۱-۵]. به دلیل مشکلات موجود در روش‌های محاسباتی و نیز پرهزینه بودن انجام تست‌های آزمایشگاهی متعدد برای مدل‌سازی، استفاده از روش تخمین پارامتر مورد توجه قرار گرفته است [۳، ۶ و ۷]. با تخمین صحیح پارامترها می‌توان از آنها در کنترل تطبیقی و مقاوم سیستم نیز استفاده نمود [۲، ۸-۱۰]. در این مقاله، با مدل‌سازی شش درجه آزادی مناسب از یک جسم زیرآبی و با استفاده از الگوریتم کالمن توسعه یافته، ضرایب هیدرودینامیکی به درستی تخمین زده شدند. مجموعه فیلترهای کالمن، جزو تخمین‌گرهای بهینه هستند که کاربردهای مختلفی دارند [۱۱-۱۲]. معمولاً در علم کنترل از این تخمین‌گرها برای تخمین حالت سیستم با تعداد اندازه‌گیری کمتر از تعداد حالت استفاده می‌شود. فیلتر کالمن کلاسیک طوری طراحی شده که با در نظر گرفتن نویز سیستم و خروجی از مدل سیستم سعی بر تخمین متغیرهای حالت سیستم دارد. به طور کلی فیلتر کالمن دارای دو مرحله زمانی است [۱۳]: مرحله پیش‌بینی^۲ و یا به‌روزرسانی زمان و مرحله اصلاح یا به‌روزرسانی اندازه‌گیری^۳. فیلتر کالمن با توزیع گوسی برای عدم قطعیت‌های مدل و استفاده کردن از دو مفهوم میانگین و کواریانس بردار حالت در قوانین به‌روزرسانی، یک الگوریتم بازگشتی ترتیبی برای تخمین ارائه می‌دهد [۱۴]. یکی از کاربردهای فیلتر کالمن، تخمین همزمان پارامترهای مجهول و حالت‌های سیستم است. در این حالت، معادلات سیستم طوری مدل می‌شوند که پارامترهای مجهول به صورت معادلات حالت افزوده در نظر گرفته شده و الگوریتم تخمین برای مدل جدید ارائه می‌شود. به همین منظور

مدل‌سازی صحیح یکی از موارد کلیدی و مهم است. فیلتر کالمن توسعه یافته بر اساس خطی‌سازی تیلور مرتبه اول سیستم عمل نموده و برای سیستم‌های غیرخطی کارکرد خوبی از خود نشان می‌دهد [۱۵]. با توجه به ذات غیرخطی معادلات رونده زیرآبی خودگردان و تعداد زیاد پارامترهای آن، مدل‌سازی و تخمین کامل پارامترهای هیدرودینامیکی همواره با مشکلاتی همراه بوده است. از جمله این مشکلات می‌توان به دشواری بدست آوردن ژاکوبین مدل برای یافتن ماتریس گذر حالت و نیز غیرخطی شدن شدید مدل اشاره کرد. با وجود این مشکلات این روش یک روش پرکاربرد در مسائل تخمین در سیستم‌های زیرآبی است [۷]. در این مقاله نیز با روش فیلتر کالمن توسعه یافته نتایج خوبی حاصل شده است.

همان‌طور که بیان شد روش فیلتر کالمن توسعه یافته بر پایه تقریب یا خطی‌سازی استوار است [۱۶]. روش فیلتر کالمن توسعه یافته با استفاده از خطی‌سازی مدل دینامیکی، میانگین و کواریانس را تقریب زده و به این طریق متغیرهای حالات سیستم را با استفاده از اندازه‌گیری‌های موجود تخمین می‌زند. مرجع [۴] دو روش آفلاین که بر پایه روش حداقل مربعات بوده را برای شناسایی مدل سیستم مورد مقایسه قرار داده است. روش اول بر پایه کمینه کردن خطای شتاب پیش‌بینی شده بوده که معروف به روش مستقیم^۴ است. دومین روش بر پایه خطای سرعت پیش‌بینی شده در هر مرحله زمانی است که به روش انتگرالی^۵ معروف است. مرجع [۷] به تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی بدنه یک زیرآبی با استفاده از دو تخمین‌گر آنلاین بر پایه مد لغزشی و فیلتر کالمن توسعه یافته پرداخته است که از دو گروه اندازه‌گیر سرعت و شتاب استفاده کرده است. دقت تخمین ارائه شده در این مقاله کم بوده و تخمین برخی از ضرایب هیدرودینامیکی به خوبی صورت نگرفته است. همچنین تعداد اندازه‌گیرهای به کار رفته برای تخمین زیاد است.

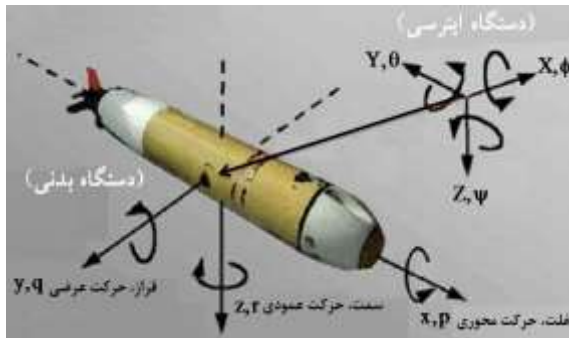
¹ Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

² Prediction

³ Measurement Update

⁴ Direct Method

⁵ Integral Method



شکل (۱) مولفه‌های حرکتی یک رونده زیرآبی خودگردان.

جدول (۱) نمادگذاری برای معادله حرکت رونده زیرآبی خودگردان.

موقعیت و زوایای اولر	سرعت خطی و زوایای	نیرو و گشتاور	مولفه حرکت
x	u	X	انتقال در جهت x (محوری)
y	v	Y	انتقالی در جهت y (عرضی)
z	w	Z	انتقالی در جهت z (عمودی)
ϕ	p	K	چرخش حول محور x (غلت)
θ	q	M	چرخش حول محور y (فراز)
ψ	r	N	چرخش حول محور z (سمت)

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= \sum X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= \sum Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(q^2 + p^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= \sum Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + qw)] &= \sum N \\
 \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

۲-۱- معادله حرکت رونده زیرآبی خودگردان

معادلات دینامیک و سینماتیک حرکت شش درجه آزادی حاکم بر بدنه یک زیرآبی را می‌توان به صورت رابطه (۱) نشان داد که معادلات دینامیک بر اساس قانون نیوتن-اولر

پژوهش‌های انجام شده در زمینه تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی یک رونده زیرآبی با روش‌های آنلاین محدود است. در تحقیقات انجام شده یا دقت تخمین کم است و یا تعداد اندازه‌گیری استفاده شده بهینه نیست.

در این مقاله با مدلسازی مناسب دینامیک حرکت یک رونده زیرآبی، از فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین ده پارامتر هیدرودینامیکی موجود در این مدل استفاده شده است. معادلات دینامیکی مربوط به زیرآبی به صورت شش درجه آزادی استخراج شده و مدل تخمین‌گر متناسب با این مدل طراحی شده است.

برای شبیه‌سازی مدل از ضرایب واقعی موجود در مرجع [۱۷] استفاده شده است. در الگوریتم مربوط به فیلتر کالمن توسعه یافته، مدل دینامیکی سیستم و همچنین مدل مربوط به اندازه‌گیر همراه با نویز هستند که این نویزها به صورت نویز سفید گوسی با میانگین صفر در نظر گرفته شدند. شبیه‌سازی‌های انجام شده، نشانگر دقت بالای روش پیشنهادی است.

در بخش دوم مقاله حاضر، معادلات حرکت رونده زیرآبی خودگردان و ضرایب هیدرودینامیکی مربوطه در این بخش معرفی شدند. بخش سوم که مربوط به مساله تخمین است، ابتدا معادلات مربوط به فیلتر کالمن و توضیحات مربوط به آن مطرح شده و سپس مدل‌سازی مناسب برای فیلتر کالمن توسعه‌یافته استخراج شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و منحنی‌های مربوط ارائه شده و الگوریتم تخمین صحت‌سنجی شده است.

۲- بیان مساله

سیستم مورد نظر یک رونده زیرآبی خودگردان بوده که برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی آن نیاز به مدل دینامیکی صحیح از آن است. در این بخش ابتدا مدل دینامیکی رونده زیرآبی با توجه به یک نمونه واقعی [۱۷] استخراج شده است و سپس در ادامه ضرایب هیدرودینامیکی معرفی می‌شوند. برای تحلیل حرکتی یک رونده زیرآبی در شش درجه آزادی، مولفه‌های حرکتی در شکل (۱) و جدول (۱) تعریف شده است.

بدست می‌آیند با خطای قابل توجهی همراه هستند. بنابراین ضرایب هیدرودینامیکی میرایی جدول (۲) توصیف شدند به عنوان پارامترهای مجهول به عنوان یک متغیر حالت به مدل سیستم افزوده شده و توسط تخمین‌زن، تخمین زده خواهند شد.

ضرایب ذکر شده در رابطه (۲) را می‌توان به دسته ضرایب جرم افزوده، لیفت بدنه و میرایی تقسیم‌بندی نمود که با استفاده از روابط تئوری و نیمه تجربی محاسبه شده‌اند [۱۷، ۱۸]. این ضرایب در جدول (۲) معرفی شدند.

جدول (۲) معرفی ضرایب موجود در معادله حرکت رونده زیرآبی خودگردان.

نوع ضرایب	نماد ضرایب	توضیح
	$X_{u u}$	درگ محوری
ضرایب	$Y_{v v}, Z_{w w}, M_{w w}$	
میرایی	$N_{v v}, Y_{r r}, Z_{q q}$	درگ جانبی
ویسکوزی	$M_{q q}, N_{r r}$	
	$K_{p p}$	درگ غلت
ضرایب لیفت	Y_{uv1}, Z_{uw1}	لیفت بدنه
	M_{uw1}, N_{uv1}	گشتاور لیفت بدنه
ضرایب جرم	$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Z_{\dot{w}}$	
افزوده	$Z_{\dot{q}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{w}}$	ضرایب جرم افزوده
	$M_{\dot{q}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$	

۳- تخمین ضرایب مجهول در مدل دینامیکی

برای مدل‌سازی یک سیستم، از مدل‌های مختلف استفاده می‌شود که ممکن است ماهیت متفاوتی داشته باشند. به عنوان نمونه مدل شبیه‌سازی، کنترل و تخمین‌زن ممکن است متفاوت از هم باشند [۱۸]. به دلیل افزایش دقت ممکن است مدل شبیه‌سازی از بالاترین درجه ممکن باشد. همچنین به دلیل ساده‌سازی، معمولاً سعی بر این است که مدل کنترل از پایین‌ترین درجه انتخاب گردد [۱۸]. در این مقاله، از یک مدل مناسب برای تخمین حالت‌ها و پارامترهای مجهول مدل استفاده شده است. به طوریکه، طول بردار متغیرهای حالت سیستم افزایش یافته و ضرایب مجهول به عنوان متغیرهای حالت افزایشی^۱ در مدل سیستم مطرح شدند. در بحث تخمین، خطی یا غیرخطی

در دستگاه مختصات چسبیده به بدنه رونده زیرآبی بدست آمده است.

$r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ و $r_B = [x_B \ y_B \ z_B]^T$ موقعیت مرکز جرم و شناوری در دستگاه بدنی نسبت به مرکز مختصات و m و I جرم و ممان اینرسی رونده هستند. شش معادله اول مربوط به دینامیک و سه معادله بعدی مربوط به سینماتیک رونده زیرآبی هستند. برای توضیحات بیشتر راجع به معادلات حرکت به [۱۷، ۱۸] مراجعه شود.

سمت راست معادلات دینامیکی بیانگر نیروهای خارجی وارد بر بدنه رونده است که شامل نیروها و گشتاورهای وزن و شناوری (هیدروستاتیک)، هیدرودینامیک (درگ و لیفت)، جرم افزوده، سطوح کنترل و پیشران‌ش است. نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه توسط ضرایب و بر حسب پارامترهای حالت سرعت و شتاب نوشته می‌شوند که میزان حساسیت هر کدام از نیروها و گشتاورها را نسبت به هر کدام از پارامترهای سرعت و شتاب نشان می‌دهند. اجزای هر کدام از این نیروها و گشتاورها با توجه به ساده‌سازی‌های انجام گرفته ناشی از تقارن بدنه به صورت رابطه (۲) ساده می‌شوند.

$$\begin{aligned} \sum X &= -(W-B)\sin\theta + X_{u|u}|u|u + X_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{w}}\dot{w}q + Z_{q|q}q - Y_{\dot{v}}v\dot{r} - \\ &\quad - Y_r r + X_T \\ \sum Y &= (W-B)\cos\theta\sin\phi + Y_{v|v}|v|v + Y_{r|r}|r|r + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_r \dot{r} + \\ &\quad + X_{ur} - Z_{\dot{w}}\dot{w}p + Y_{uv}uv + Y_{u\delta r}u^2\delta_r \\ \sum Z &= (W-B)\cos\theta\cos\phi + Z_{w|w}|w|w + Z_{q|q}|q|q + Z_{\dot{w}}\dot{w} + \\ &\quad + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{uq}uq + Y_{vp}vp + Y_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{u\delta e}u^2\delta_e \\ \sum K &= (y_G W - y_B B)\cos\theta\cos\phi + (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi + \\ &\quad + K_{p|p}|p|p + K_p \dot{p} + K_{prop} \\ \sum M &= -(z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi + \\ &\quad + M_{w|w}|w|w + M_{q|q}|q|q + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} - Z_{qu}uq - \\ &\quad - Y_{rp}rp + (K_p - N_r)rp + M_{uw}uw + M_{u\delta e}u^2\delta_e \\ \sum N &= (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi + (y_G W - y_B B)\sin\theta + \\ &\quad + N_{v|v}|v|v + N_{r|r}|r|r + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_r \dot{r} + Y_{ur} + Z_{\dot{w}}\dot{w}p + \\ &\quad + N_{uv}uv - (K_p - M_{\dot{q}})pq + N_{u\delta r}u^2\delta_r \end{aligned} \quad (2)$$

ضرایب جرم افزوده با توجه به آزمایشات تجربی همفرس و واتکینسون [۲۱] با دقت بیش از ۹۵ درصد با روش‌های نیمه تجربی و تحلیلی قابل تخمین هستند. اما ضرایب میرایی ویسکوزی که بر اساس روش تئوری نوار باریک

^۱ Augmented State Variables

درجه آزادی رونده زیرآبی خودگردان ریموس^۳ استخراج شده در [۱۷] برای مدل رونده استفاده شده است. بنابراین ضرایب هیدرودینامیکی مبتنی بر یک مدل واقعی شش درجه بوده و الگوریتم توسعه داده شده قابل پیاده‌سازی در هر سیستم مشابه دیگر خواهد بود. در مدل غیرخطی تخمین‌زن ضرایب هیدرودینامیکی به عنوان متغیرهای حالت افزایشی به حالت‌های دینامیکی مدل استخراج شده در بخش دوم افزوده می‌شوند. بنابراین معادله (۵) به عنوان معادله تخمین مطرح می‌شود. البته برای تبدیل معادلات بخش دوم به فرم فضای حالت معادلات بخش دوم به شکل ماتریسی زیر خلاصه شدند.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = [N]^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma X' \\ \Sigma Y' \\ \Sigma Z' \\ \Sigma K' \\ \Sigma M' \\ \Sigma N' \\ p + \sin \phi \tan \theta q + \cos \phi \tan \theta r \\ \cos \phi q - \sin \phi r \\ \left(\frac{\sin \phi}{\cos \theta} \right) q + \left(\frac{\cos \phi}{\cos \theta} \right) r \\ 0_{10 \times 1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که X', Y', Z', K', M', N' و ترکیبی از نیروها و گشتاورهای داخلی و خارجی و ماتریس $[N]$ ماتریس اینرسی بوده که در پیوست ارائه شدند. فیلتر کالمن توسعه یافته که بر طبق معادله اندازه‌گیر رابطه (۶) طراحی شده، ضرایب هیدرودینامیکی و حالت‌های سیستم را تخمین می‌زند.

$$y_k = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi]^T \Big|_k + \xi_k \quad (6)$$

۳-۱- فیلتر کالمن توسعه یافته

فیلتر کالمن یک تخمین‌زن بهینه برای سیستم‌های خطی با توضیح حالت گوسی و نویز سفید است [۱۴]. این فیلتر از جهت تقدم و تأخر زمانی دارای دو گام زمانی است. گام اول که گام پیش‌بینی بوده، با استفاده از تخمین متغیر حالت (X_{k-1}^+) و ماتریس کوواریانس (P_{k-1}^+) زمان قبل و بر اساس مدل دینامیکی ارائه شده یک پیش‌بینی از متغیرهای

بودن مدل مهم است، زیرا باید مطابق با این موضوع فیلتر انتخابی نیز خطی و یا غیرخطی باشد. برای نزدیک شدن به واقعیت نیاز به یک الگوریتم تخمین پیوسته با زمان^۱ است ولی از آنجا که اندازه‌گیرها همواره به صورت گسسته در زمان هستند، از الگوریتم گسسته با زمان^۲ برای تخمین استفاده می‌شود. مطابق رابطه (۳) معادلات دینامیکی مدل به صورت پیوسته با زمان و معادلات مربوط به اندازه‌گیر به صورت گسسته با زمان مطرح شده است.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), v(t), \Theta, \zeta(t)) \quad (3)$$

$$y_k = h(x_k, \xi_k)$$

که $x \in R^n$ بردار متغیرهای حالت دینامیک سیستم، v بردار ورودی، $y \in R^m$ بردار اندازه‌گیر یا خروجی سیستم، Θ بردار ضرایب مجهول، f تابع دینامیک غیر خطی مدل، k علامت گسستگی (گام زمانی)، $\zeta(t) \approx N(0, Q)$ نویز مدل و $\xi(k) \approx N(0, R)$ نویز اندازه‌گیر در مرحله زمانی k هستند. عبارت $N(m, P)$ توزیع حالت‌های سیستم بوده که در آن m و P (میانگین و کوواریانس) اطلاعاتی هستند که با مطالعه بر روی سیستم بدست خواهند آمد. نویزهای مدل و اندازه‌گیر به صورت نویز سفید گوسی با میانگین صفر در نظر گرفته می‌شوند. به طور کلی هر ضریب به عنوان یک متغیر حالت سیستم مطرح شده و مدل سیستم توسعه یافته به صورت رابطه (۴) ارائه می‌شود.

$$\dot{X}(t) = f(X(t), v(t), \zeta(t)) \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \Theta \end{bmatrix}$$

در این رابطه X بردار حالت افزوده بوده که ترکیبی از بردار حالت مدل دینامیکی $(x = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi]^T)$ و بردار $(X = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi, \Theta_{1 \times 10}]^T)$ ضرایب مجهول است.

در این مقاله، ۱۰ پارامتر هیدرودینامیکی میرایی ارائه شده در جدول (۲) توسط یک مشاهده‌گر غیرخطی تخمین زده می‌شوند. این مشاهده‌گر غیرخطی فیلتر کالمن توسعه یافته است که برای معادله شش درجه آزادی رونده زیرآبی پیاده‌سازی می‌شود. سیگنال اندازه‌گیری شده توسط حسگرها، با الگوریتم کالمن برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی استفاده می‌شود. از مدل غیرخطی شش

^۱ Continuous Estimation

^۲ Discrete Time

^۳ REMUS

از ترم‌های مرتبه بالاتر در عملکرد فیلتر تاثیر دارد [۱۹]. هر چه درجه غیرخطی سیستم بیشتر باشد، تخمین حالت‌های سیستم مشکل‌تر است [۲۰].

۴- شبیه‌سازی

در شکل (۲) سناریو حرکت رونده زیرآبی نشان داده شده است. شرط اولیه، سرعت صفر و زاویه بالک ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. تمامی ضرایب هیدرودینامیکی با شرط اولیه صفر انتخاب شده‌اند که این بیان‌گر فرض عدم اطلاع از مقادیر آنها بوده که با این فرض اولیه، همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود به مقدار درست خود میل می‌کنند. ماتریس کوواریانس مطابق با عدم اطلاع اولیه از مقادیر تخمین به صورت یک ماتریس قطری با درایه‌های روی قطر بین ۱۰^۵ تا ۱۰^۸ انتخاب می‌شود. محاسبه کوواریانس نويز مدل مشکل بوده که معمولاً با سعی خطا و شناختی که از مدل داشته بدست می‌آید.

شکل‌های (۳)-(۵) تخمین ۱۰ ضریب هیدرودینامیکی با شرط اولیه صفر را ارائه می‌دهد. نتایج تخمین ضرایب در حرکت انتقالی محوری و عرضی (مطابق شکل (۳)) نشان می‌دهد که ضرایب هیدرودینامیکی با دقت خوبی توسط فیلتر کالمن توسعه‌یافته تخمین زده شدند. همان‌طور که در شکل (۳) مشهود است ضریب درگ جانبی $X_{u|u}$ با اینکه یک ضریب متغیر با زمان بوده [۱۷] ولی به درستی تخمین زده شده است.

مطابق شکل (۴) ضرایب هیدرودینامیکی در سمت و غلت نیز با دقت مناسب توسط فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده شدند. همان‌طور که از نتایج مشهود است سرعت تخمین ضرایب نیز مناسب است. با توجه به اینکه مقادیر اولیه ضرایب صفر فرض شدند ولی در نهایت به مقادیر درست خود میل می‌کنند.

در دو حرکت انتقالی عمودی و چرخشی فراز نیز ضرایب هیدرودینامیکی میرایی همانند ضرایب قبلی، با دقت مناسبی تخمین زده شدند. به طور کلی تمامی ضرایب هیدرودینامیکی با دقت خوبی تخمین زده شده و با وجود اینکه برخی ضرایب در ابتدا از مقدار واقعی خود فاصله زیادی داشته اما بعد از مدت زمانی اندک به مقدار واقعی همگرا شدند.

حالت (X_k^-) و ماتریس کوواریانس خطا (P_k^-) ارائه می‌کند. گام دوم که گام به‌روزرسانی بوده، با استفاده از خروجی اندازه‌گیر در همان زمان (y_k) متغیر حالت (X_k^+) و ماتریس کوواریانس خطا (P_k^+) را به‌روزرسانی می‌کند. چنانچه یکی از دو مدل دینامیکی و یا مدل اندازه‌گیر و یا هر دو غیرخطی باشند، نمی‌توان از فیلتر کالمن برای تخمین حالت‌ها استفاده نمود. در این حالت، فیلتر کالمن توسعه‌یافته با استفاده از روش خطی‌سازی تیلور برای مدل دینامیکی در گام پیش‌بینی و مدل اندازه‌گیر در گام به‌روزرسانی تخمینی از حالت‌های سیستم ارائه می‌کند [۱۵]. در مساله شناسایی پارامترهای هیدرودینامیک مدل دینامیکی یک مدل غیرخطی بوده اما مدل اندازه‌گیر مدلی خطی است. گام پیش‌بینی برای این مساله به صورت رابطه (۷) قابل ارائه است.

$$X_k^- = X_{k-1}^+ + \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(X_{k-1}^+, v_{k-1}, \zeta_{k-1}) dt \quad (7)$$

$$P_k^- \approx \Phi_{k-1} P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} dt$$

گام زمانی، مقدار میانگین و یا میانبایی شده ورودی بین زمان t_{k-1} و t_k و ماتریس گذر حالت گسسته با زمان سیستم حالت افزوده است که به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\Phi_k = e^{A dt} \approx I + A dt \quad (8)$$

A ماتریس گذر حالت سیستم پیوسته با زمان بوده که به صورت رابطه (۹) قابل محاسبه است.

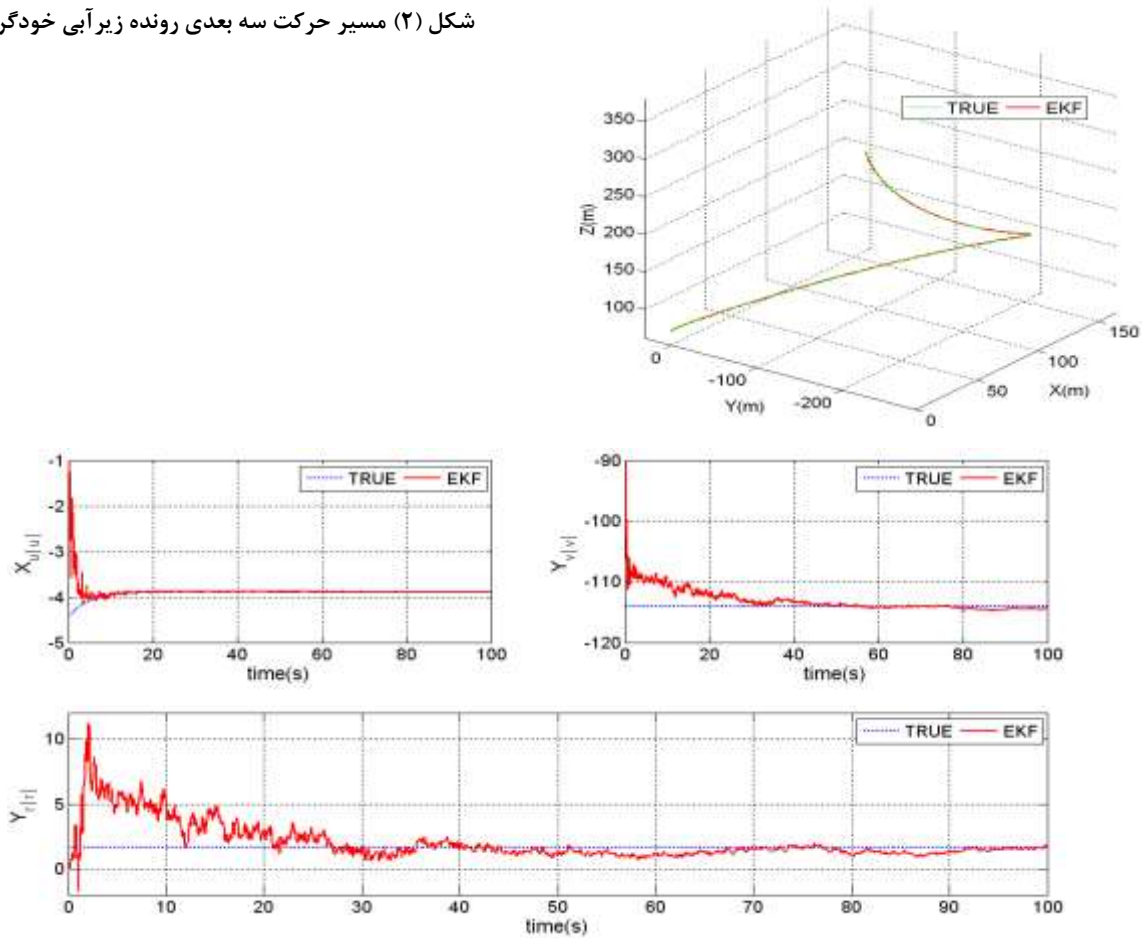
$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{X=X_{k-1}^+} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \Theta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Big|_{X=X_{k-1}^+} \quad (9)$$

در رابطه (۹) فرایند خطی‌سازی مدل نشان داده شده است. مطابق رابطه (۶) مدل اندازه‌گیر یک مدل خطی است. بنابراین گام به‌روزرسانی همانند فیلتر کالمن خطی بوده و به صورت رابطه (۱۰) قابل ارائه است.

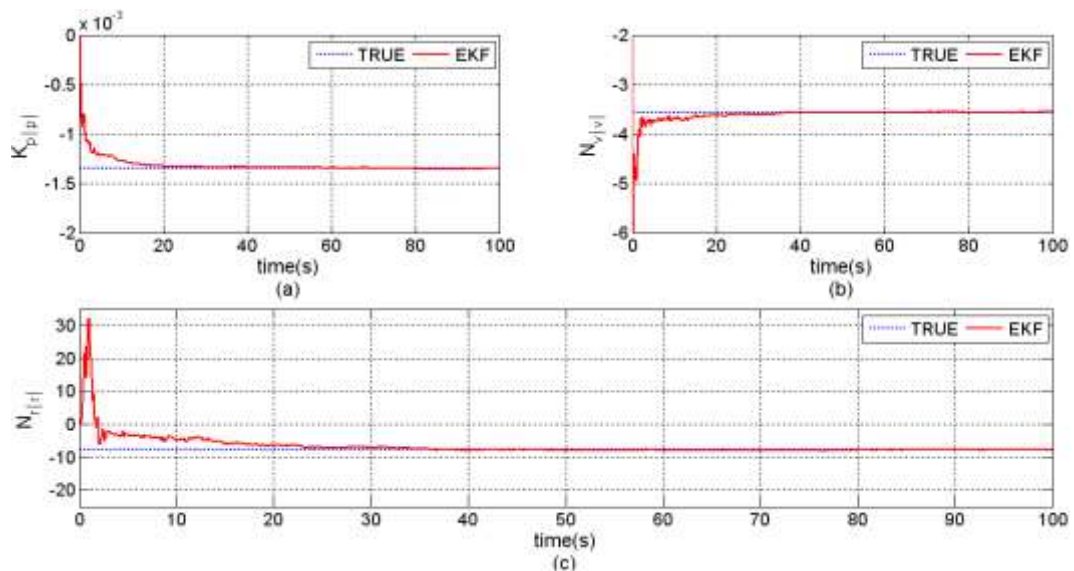
$$\begin{aligned} K_k &= P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \\ x_k^+ &= x_k^- + K_k (y_k - H x_k^-) \\ P_k^+ &= (I - K_k H) P_k^- \end{aligned} \quad (10)$$

که $H = [I_{9 \times 9} \quad 0_{9 \times 22}]$ ماتریس خروجی یا اندازه‌گیر، R ماتریس کوواریانس اندازه‌گیری و K_k ماتریس بهره فیلتر کالمن هستند. در فیلتر کالمن توسعه‌یافته برای ساده‌سازی از تقریب‌های مرتبه بالا صرف‌نظر می‌شود. صرف‌نظر کردن

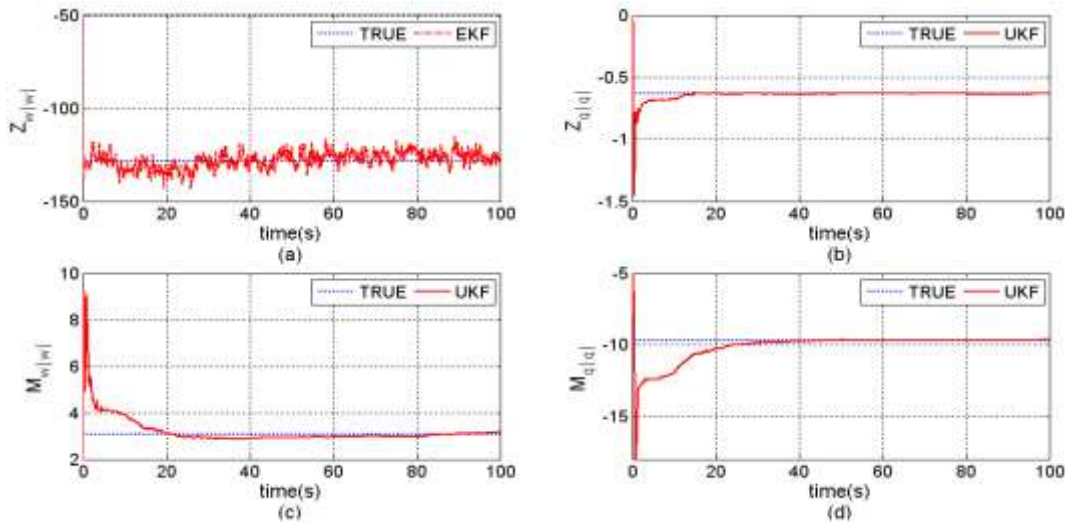
شکل (۲) مسیر حرکت سه بعدی رونده زیرآبی خودگردان.



شکل (۳) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در حرکت انتقالی محوری و عرضی.



شکل (۴) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در حرکت چرخشی غلت و سمت.



شکل (۵) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در حرکت انتقالی عمودی و چرخشی فراز.

مناسبی به مقدار درست همگرا شدند. مدل دینامیکی شش درجه آزادی بر مبنای مدل واقعی ریموس شبیه‌سازی شده و ضرایب هیدرودینامیکی بر این مبنای تخمین زده شدند. در این تخمین تنها از نتایج شبیه‌سازی استفاده شده که صرفاً صحت‌سنجی مناسبی از الگوریتم تخمین را نشان می‌دهد و در صورت وجود اطلاعات تست میدانی می‌توان از این روش به عنوان یک روش مناسب برای تخمین ضرایب استفاده نمود. همچنین می‌توان خروجی این تخمین‌زن را برای مقاصد مختلفی مانند کنترل تطبیقی، تشخیص خطا و ... استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله کاربرد الگوریتم تخمین بازگشتی فیلتر کالمن توسعه‌یافته، برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک رونده زیرآبی خودگردان مورد بحث قرار گرفته است. ضرایب هیدرودینامیکی را به عنوان یک متغیر حالت افزوده در مدل دینامیکی سیستم در نظر گرفته و با استفاده از الگوریتم ارائه شده، ضرایب مذکور به صورت آنلاین تخمین زده شدند. با توجه به نتایج بدست آمده، این تخمین از دقت مناسبی برخوردار است. سرعت همگرایی تخمین ارائه شده مناسب بوده و ضرایب تخمین زده شده با دقت

۶- پیوست

$$\sum X' = -(W - B) \sin \theta + X_{u|u}|u|u + (X_{wq} - m)wq + (X_{qq} + mx_G)q^2 + (X_{vr} + m)vr + (X_{rr} + mx_G)r^2 - my_Gpq - mz_Gpr + X_T$$

$$\sum Y' = (W - B) \cos \theta \sin \phi + Y_{v|v}|v|v + Y_{r|r}|r|r + my_Gr^2 + (Y_{ur} - m)ur + (Y_{wp} + m)wp + (Y_{pq} - mx_G)pq + Y_{uv}uv + my_{u|u}|p|^2 - mz_Gqr + Y_{u\delta r}u^2\delta_r$$

$$\sum Z' = (W - B) \cos \theta \cos \phi + Z_{w|w}|w|w + Z_{q|q}|q|q + (Z_{uq} + m)uq + (Z_{vp} - m)vp + (Z_{rp} - mx_G)rp + Z_{uw}uw + mz_G(q^2 + p^2) - my_Grq + Z_{u\delta e}u^2\delta_e$$

$$\sum K' = (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi + K_{p|p}|p|p - (I_{zz} - I_{yy})qr + my_G(uq - vp) - mz_G(wp - ur) + K_{prop}$$

$$\sum M' = -(z_G W - z_B B) \sin \theta - (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi + M_{w|w}|w|w + M_{q|q}|q|q + (M_{uq} - mx_G)uq + [M_{rp} - (I_{xx} - I_{zz})]rp + mz_G(vr - wq) + M_{uw}uw + M_{u\delta e}u^2\delta_e$$

$$\sum N' = (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_B B) \sin \theta + N_{v|v}|v|v + N_{r|r}|r|r + (N_{ur} - mx_G)ur + (N_{wp} + mx_G)wp + [N_{pq} - (I_{xx} - I_{yy})]pq - my_G(vr - qw) + N_{uv}uv + N_{u\delta r}u^2\delta_r$$

$$[N] = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & m z_G & -m y_G & \vdots \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -m z_G & 0 & m x_G - Y_r & \vdots \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & m y_G & -m x_G - Z_q & 0 & \vdots \\ 0 & -m z_G & m y_G & I_x - K_p & 0 & 0 & \vdots \\ m z_G & 0 & -m x_G - M_{\dot{w}} & 0 & I_y - M_q & 0 & \vdots \\ -m y_G & m x_G - N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & I_z - N_r & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & 0_{13 \times 6} & & & \vdots \\ & & & & & & I_{13 \times 13} \end{bmatrix}$$

SAND”, Journal of Marine Science and Technology, Vol.14, pp.373-386, 2009.

- [10] Song, Y., Campa, G., Napolitano, M., Seanor, B., and Perhinschi, M.G., “On-line Parameter Estimation Techniques Comparison within a Fault Tolerantflight Control System”, J. Guid. Control Dyn, Vol.25, No.3, pp.528–537, 2002.
- [11] Simon, D., “Optimal State Estimaion Kalman, H ∞ and Nonlinear Approaches. Wiley & Sons Publishing”, New Jersey, 2006.
- [12] Hartikainen, J., Solin, A., and Särkkä, S., Optimal Filtering, Department of Biomedical Engineering and Computational Science, Aalto University School of Science, Finland, 2011.
- [13] Hartikainen, J., Solin, A., and Särkkä, S., Optimal Filtering with Kalman Filters and Smoothers a Manual for the Matlab toolbox EKF/UKF, Department of Biomedical Engineering and Computational Science, Aalto University School of Science, 2011.
- [14] Kalman, R.E., A New Approach to Linearfiltering and Prediction Problems”, Trans. ASME—J. Basic Eng., Ser. D, Vol.82, pp.35–45, 1960.
- [15] Chowdhary, G., and Jategaonkar, R., “Aerodynamic Parameter Estimation from Flight Data Applying Extended and Unscented Kalman Filter”, Aersp. Sci. Technol, pp.106–117, 2010.
- [16] Uhlmann, J., Julier, S., and Durrant-Whyte, H., “A New Method for the Non-Linear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimations”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.45, 2000.
- [17] Presterio, T., Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, MS thesis in Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [18] Fossen, T. I., Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 1st Ed. John Willy & Sons, Ltd publication, West Sussex, United Kingdom, 2011.
- [19] Chang, K. Li, L., and Hu, B., “Unscented Attitude Estimator Based on Dual Attitude Representations”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 64, pp. 3564-3576, 2015.

۷- منابع

- [1] Feng, X., jian, Z.Z., chuan, Y.J., Jian, C., “Parametric Identification and Sensitivity Analysis for Autonomous Underwater Vehicles in Diving Plane”. J. Hydrodyn. Vol.24, pp.744–751, 2012.
- [2] Valeriano-Medina, Y., Martinez, A., Hernandez, L., Sahli, H., Rodríguez, Y., and Cañizares, J. R., “Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data”, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol.19, pp.175-200, 2013.
- [3] Martin, S.C. and Whitcomb, L.L., “Experimental Identification of Six-Degree-of-Freedom Coupled Dynamic Plant Models for Underwater Robot Vehicles”, Oceanic Engineering, IEEE Journal of, Vol.39, pp.662-671, 2014.
- [4] Pelevin, A., “Identification of Vehicle Model Parameters under External Disturbances”, Gyroscopy and Navigation, Vol.6, pp.143-148, 2015.
- [5] Geng, T. and Zhao, J., “Modeling and Identification of Autonomous underwater Vehicle for Advanced Control, in Modelling, Identification & Control (ICMIC)”, Proceedings of International Conference, pp.624-630, 2012.
- [6] Taubert, R., Eichhorn, M., Ament, C., Jacobi, M., Karimanzira, D., and Pfuetszenreuter, T., “Model Identification and Controller Parameter Optimization for an Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicles”, OCEANS-TAIPEI, pp.1-9, 2014.
- [7] Pinheiro, A.R.M. and Apolonio De Barros, E., Identification of Hydrodynamic Derivatives from AUV Pirajuba Using Extended Kalman Filter, in Computing and Automation for Offshore Shipbuilding (NAVCOMP), Symposium on, pp.11-16, 2013.
- [8] Yan, Z., Wu, D., Zhou, J., and Hao, L., “Recursive Subspace Identification of AUV Dynamic Model under General Noise Assumption”, Mathematical Problems in Engineering, Vol.2, 2014.
- [9] Tang, S., Ura, T., Nakatani, T., Thornton, B., and Jiang, T., Estimation of the Hydrodynamic Coefficients of the Complex-Shaped Autonomous Underwater Vehicle TUNA-

-
- [20] Girish, C. and Ravindra, J., "Aerodynamic Parameter Estimation from Flight Data Applying Extended and Unscented Kalman Filter", AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, ed: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [21] Humphreys, D. and Watkinson, K., Prediction of Acceleration Hydrodynamic Coefficients for underwater Vehicles from Geometric Parameters, DTIC Document, 1978.