مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله کاربردی
جلد۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۶۰-۵۱

هدایت چند نقطه‌ای رونده زیرآبی خودگردان مبتنی بر قانون هدایت هدف‌بین و معادلات هاورسین

سید وحید ضیاء[۱]، حسین نورمحمدی[۲]

[۱] دستیار پژوهشی، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر،مازندران، ایران vahidzia@mut.ac.ir

[۲] استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مازندران، ایران Hnourmohammadi@mut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

چکیده: هدایت چند نقطه‌ای از رایج‌ترین روش‌های هدایت برای پیروی از یک مسیر از پیش تعیین شده در انواع ربات است. در این روش علاوه بر نقطه شروع و هدف، چندین نقطه میانی به عنوان نقطه راه تعیین می‌شود و ربات باید هر یک از نقاط راه میانی را به عنوان مقصد مجازی در نظر گرفته و خود را به آن نقطه برساند. سپس به نقطه راه بعدی سوئیچ کرده و با گذر از همه آنها خود را به نقطه هدف نهایی برساند. هدف این مقاله طراحی یک الگوریتم هدایت چندنقطه‌ای مبتنی بر معادلات هاورسین و مدل کروی زمین برای یک رونده زیرآبی خودگردان است. اجرای انواع طرح‌های تحقیقاتی، پژوهشی، عکس‌برداری سونارای از بستر دریا و آبراه‌ها و مانیتورینگ خطوط انتقال انرژی و مخابراتی از طریق طراحی مسیر متنوع با استفاده از روش پیشنهادی امکان‌پذیر خواهد بود. الگوریتم هدایت چندنقطه‌ای پیشنهادی، در تست‌های میدانی یک رونده زیرآبی خودکار تحقیقاتی پیاده‌سازی شده و کارایی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: هدایت چند نقطه‌ای، رونده زیرآبی خودگردان، معادلات هاورسین، دایره مقبولیت.

Waypoint Guidance of Autonomous Underwater Vehicle Based on Line of Sight Law and Haversine Equations

Seyed Vahid zia and Hossein Nourmohammadi

Abstract: Waypoint guidance is one of the most common guidance methods for following a predetermined path in all types of robots. In this method, in addition to the starting point and the goal, several intermediate points are determined as waypoints, and the robot must consider each of the intermediate waypoints as a virtual destination and reach that point. Then Switch to the next waypoint and reach the final destination by passing through all of them. The aim of this paper is to design a multi-point guidance algorithm based on Haversine equations and spherical earth model for an Autonomous Underwater Vehicle. It will be possible to implement all kinds of research projects, sonar photography of the seabed and waterways, and monitoring of energy and telecommunication transmission lines through the design of various routes using the proposed method. The proposed multi-point guidance algorithm has been implemented in the field of a research Autonomous Underwater Vehicle and its efficiency has been evaluated.

Keywords: Waypoint Guidance, Autonomous Underwater Vehicle, Haversine Equations, Circle of Acceptance.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]

۱- مقدمه

بطور کلی برای انجام فعالیت‌های مستقل در انواع ربات‌ها، پیروی مسیر[1] بر پایه سیستم هدایت، ناوبری و کنترل[2] استفاده می‌شود. واحد هدایت، مسیر مرجع موردنظر که شی باید دنبال کند، را براساس یک هدف از پیش تعریف شده تولید می‌کند. سیستم ناوبری با استفاده از حسگرهای مختلف و ترکیب اطلاعات آنها در فیلترهای مختلف، موقعیت جاری وسیله را تخمین می‌زند. با تعیین میزان خطا و انحراف از مسیر، واحد کنترل تلاش موردنیاز برای اصلاح و بازگشت به مسیر مرجع را تعیین و با استفاده از عملگرها به اجرا می‌گذارد. این حلقه از ابتدا تا انتهای ماموریت بطور مداوم اجرا می‌گردد. در شکل ۱ بلوک دیاگرام حلقه هدایت، ناوبری و کنترل به همراه ورودی‌ها و خروجی‌های مربوطه قابل مشاهده است.

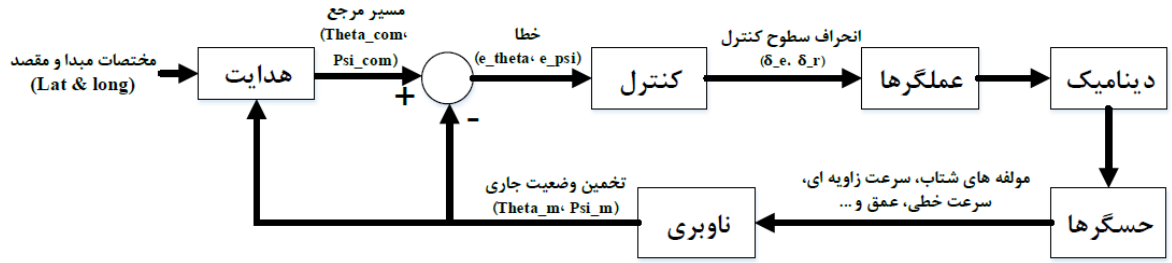
برای پیاده‌سازی عملی حلقه هدایت، ناوبری و کنترل بطور معمول سعی می‌شود از روش‌های ساده با بار محاسباتی پایین و با حداقل وابستگی به دینامیک وسیله استفاده شود. به عنوان مثال استفاده از روش PID در پیاده‌سازی سیستم کنترل ربات‌ها امری متداول است. در سیستم ناوبری نیز استفاده از انواع فیلتر کالمن یا فیلتر مکمل برای تخمین وضعیت و موقعیت وسیله بسیار مرسوم است. هدایت هدف‌بین (LOS)[3] پرکاربردترین روش برای پیاده‌سازی سیستم هدایت در حوزه روندهای بدون سرنشین زیرآبی (AUV)[4] است که برای طراحی ماموریت تعقیب مسیر کاربرد وسیعی دارد. هدف از اجرای قانون هدایت هدف‌بین، تعریف مسیر مرجع روی خط مستقیم بین دو نقطه ابتدا و پایان به عنوان کوتاه‌ترین مسیر ممکنه بین دو نقطه است. در مرجع [۱] برای پایش شرایط محیطی و توزیع آلودگی در مزرعه‌های زیرآبی با AUV از روش هدایت هدف‌بین چند نقطه‌ای استفاده شده است. انتقال بین نقاط راه مبتنی بر هدایت هدف‌بین ممکن است منجر به تولید فرامین هدایتی تند در صفحه افقی و کانال زاویه سمت و در نتیجه اشباع سطوح کنترلی گردد. برای پیشگیری از تغییر مسیر ناگهانی و تولید فرامین هدایتی نرم حین انتقال از یک نقطه به نقطه بعدی در فرآیند تعقیب مسیر، مجموعه‌ای از نقاط راه میانی روی یک کمان با شعاع مناسب تعریف شده است. تعریف کره مقبولیت[5] نیز رسیدن به نقاط مربوطه و اجرای مناسب فرآیند تعقیب را تضمین نموده است. در مرجع [۲] امکان‌پذیری اجرای فرآیند تعقیب مسیر برای USV[6] مورد بررسی قرار گرفته است. انحنای مسیر تولیدی ارتباط مستقیمی با دینامیک و محدودیت‌های وسیله دارد، به همین منظور کمترین شعاع چرخش وسیله به بیشترین انحنای مسیر نگاشت داده می‌شود. در الگوریتم‌های هدایتی تعقیب بدون تولید مسیر، از پارامترهای تطبیقی مانند تغییر سرعت وسیله یا تغییر شعاع دایره مقبولیت برای کاهش انحراف از مسیر مرجع بهره گرفته شده است. روش پیشنهادی در این مرجع، استفاده از روش سه گانه تغییر/ بازتعریف مسیر (جابجایی، حذف و افزودن نقطه راه) ذیل الگوریتم هدایتی تعقیب با قابلیت تولید مسیر در صورت عدم کارایی تطبیق سرعت وسیله است.

ظهور یک عامل مزاحم بیرونی مانند جریان‌های آبی منجر به انحراف از مسیر مرجع در AUV خواهد شد، بطوریکه اعمال صرف زاویه مماسی مسیر در قانون LOS ساده به عنوان فرمان زاویه سمت، قادر به جبران خطای تعقیب نخواهد بود. برای دستیابی به مانورهای بسیار کارآمد، فراجهش کوچک، همگرایی سریع به مسیر و کاهش خطای تعقیب جانبی و طولی[7] در مرجع [۳و۴] از قانون LOS تناسبی استفاده شده است. ترم تناسبی در روش پیشنهادی در تطابق با مقدار خطا از مسیر مرجع بصورت لحظه‌ای و متغیر با زمان محاسبه می‌شود. در مراجع [۵]روش LOS تناسبی- انتگرالی برای جبران خطای مسیر ناشی از جریان‌های سطحی ارائه شده است و تضمین پایداری را به عنوان بخشی از فرآیند طراحی به انتخاب مناسب بهره‌ها وابسته دانسته است. در مراجع [۶-۸] مفاهیم مربوط به مثلثات کروی و روابط هاورسین ارائه شده است. در معادلات هاورسین با فرض کروی بودن زمین، کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه روی کره با خطای ۰.۵٪ قابل محاسبه است.

در اکثر موارد برای بکارگیری روش LOS، بین نقطه شروع و پایان چندین نقطه به عنوان نقاط راه مرجع[8] تعریف می‌شود و هدف عبور دادن وسیله طی این نقاط میانی برای رسیدن به مقصد پایانی است. بنابراین زاویه مسیر با توجه به خط مستقیم بین دو نقطه مرجع متوالی همواره در حال تغییر است. این روش به عنوان هدایت چند نقطه‌ای شناخته شده و موضوع اصلی مورد بحث در این مقاله است. با استفاده از این روش می‌توان طراحی مسیر متنوعی را برای دستیابی به اهداف مختلف تحقیقاتی و پژوهشی، نظارتی و نظامی در بستر دریا، آبراه‌ها، بنادر و سواحل اطراف جزایر اجرا نمود. هدف این تحقیق، ارائه روش هدایت هدف‌بین چند نقطه‌ای مبتنی بر قانون هاورسین[9] برای لحاظ کردن انحنای کره زمین در تخمین مسافت و پیاده‌سازی آن روی یک AUV تحقیقاتی است. ساختار مقاله بشرح زیر است: بخش ۲ بیانگر معادلات دینامیکی شش درجه آزادی حاکم بر جسم است. در بخش ۳ ساختار سیستم هدایت وسیله در دو کانال عمودی (عمق/زاویه فراز) و افقی (زاویه سمت) به تفکیک بیان و قانون مثلثات کروی و معادلات هاورسین برای استخراج فرمان زاویه سمت در قانون هدایت هدف‌بین ارائه شده است. در ادامه مفهوم دایره مقبولیت برای افزودن هدایت چند نقطه‌ای به هدایت هدف‌بین بیان شده است. در بخش ۴ سناریوی آزمون برای صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی برای یک رونده خودکار زیرآبی ارائه و به تحلیل نتایج آزمون میدانی در دریای مازندران پرداخته شده است. بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله است.

[1] Path Following
[2] Guidance, Navigation and Control System
[3] Line Of Sight
[4] Autonomous Underwater Vehicle
[5] Acceptance Sphere
[6] Unmanned Surface Vehicle
[7] Along & Cross Track Error
[8] Way-points
[9] Haversine

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]



شکل ۱- بلوک دیاگرام حلقه هدایت، ناوبری و کنترل [۱]

۲- دینامیک رونده زیرآبی خودگردان

مطابق با روش ارائه شـده در مرجع [۳]، معادلات حرکت شـش درجه آزادی یک AUV[1] با بردارهای زیر قابل تعریف است.

$$\eta=\begin{bmatrix}\eta_1\\ \eta_2\end{bmatrix}\quad \eta_1=\begin{bmatrix}x\\ y\\ z\end{bmatrix}\quad \eta_2=\begin{bmatrix}\phi\\ \theta\\ \psi\end{bmatrix}$$
$$v=\begin{bmatrix}v_1\\ v_2\end{bmatrix}\quad v_1=\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix}\quad v_2=\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \qquad (۱)$$
$$\tau=\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix}\quad \tau_1=\begin{bmatrix}X\\ Y\\ Z\end{bmatrix}\quad \tau_2=\begin{bmatrix}K\\ M\\ N\end{bmatrix}$$

در روابط (۱)، η_1 و η_2 بترتیب معرف موقعیت و زوایای اویلر در دستگاه مختصات اینرسی، v_1 و v_2 بترتیب سرعت خطی و زاویه‌ای در دستگاه بدنی و τ_1 و τ_2 بترتیب نیروها و گشتاورهای واردشونده به AUV است. این رابطه برای پارامترهای خطی و زاویه‌ای بطور جداگانه نوشته می‌شود [۳].

پارامترهای فوق طبق جدول (۱)، شش درجه آزادی حرکت یک جسم در زیر سطح را نشان می‌دهند.

جدول ۱- شش درجه آزادی حرکت یک جسم

درجه آزادی	حرکت	نیرو و گشتاور	سرعت خطی و زاویه‌ای	موقعیت و زوایای اولر
۱	انتقالی در جهت x	X	U	x
۲	انتقالی در جهت y	Y	V	y
۳	انتقالی در جهت z	Z	W	z
۴	چرخش حول محور x	K	P	φ
۵	چرخش حول محور y	M	Q	θ
۶	چرخش حول محور z	N	R	ψ

رابطه برای پارامترهای خطی و زاویه‌ای به طور جداگانه نوشـته خواهد شد که در رابطه ۲ ارائه شده است.

$$\dot{\eta}_1=J_1(\eta_2)v_1 \qquad \dot{\eta}_2=J_2(\eta_2)v_2 \qquad (۲)$$

ارتباط بین پارامترها در دسـتگاه‌های اینرسـی و بدنی از طریق ماتریس دوران ناشی از سه چرخش به اندازه زوایای اویلر حول محورهای سه‌گانه مطابق با روابط (۳ و ۴) تعریف می‌شود.

$$J_1(\eta_2)=\begin{bmatrix}\cos\theta\cos\psi & -\sin\psi\cos\phi+\cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi+\cos\psi\cos\phi\sin\theta\\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi+\sin\phi\sin\psi\sin\theta & -\cos\psi\sin\phi+\sin\theta\sin\psi\cos\phi\\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi\end{bmatrix} \qquad (۳)$$

$$J_2(\eta_2)=\begin{bmatrix}1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta\end{bmatrix} \qquad (۴)$$

روابط فوق جهت معرفی محورهای مختصـات و ارتباط بین آنها ارائه شـده اسـت. اما قبل از اسـتفاده از آنها لازم اسـت معادلات حاکم بر حرکت یک جسم صلب با پارامترهای فوق معرفی شوند. این معادلات بر طبق قانون بقای ممنتوم‌های خطی و زاویه‌ای بدسـت می‌آیند به گونه‌ای که موقعیت حرکت یک جسـم را به همراه بردارهای موقعیت آن نشـان دهد. تفکیک این معادلات برای گشـتاورهای خطی و زاویه‌ای در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$F_i=\frac{d}{dt}\left(m_i\frac{d\vec{r}_i}{dt}\right)\Big|_I=\left(m_i\cdot\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2}\right)\Big|_I$$
$$\sum\vec{M}_i=\frac{d}{dt}\left(\vec{H}_{Bi}\right)\Big|_I=\frac{d}{dt}\left(\vec{H}_{Bi}\right)\Big|_B+\vec{\omega}\times\vec{H}_{Bi} \qquad (۵)$$

با بسط و ساده‌سازی رابطه فوق، شش معادله حاکم بر یک جسم صلب شش درجه آزادی حاصل خواهد آمد که در رابطه (۶) ارائه شده است.

[1] Autonomous Underwater Vehicle

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]

$$
\begin{aligned}
&m[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})]=\sum X\\
&m[\dot{v}-wp+ur-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})]=\sum Y\\
&m[\dot{w}-uq+vp-z_G(q^2+p^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})]=\sum Z\\
&I_x\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr+m[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)]=\sum K\\
&I_y\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})rp+m[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)]=\sum M\\
&I_z\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq+m[x_G(\dot{v}-wp+ur)-y_G(\dot{u}-vr+qw)]=\sum N
\end{aligned}
\qquad (۶)
$$

در رابطه (۶) مولفه $r_G=[x_G\ \ y_G\ \ z_G]$ موقعیت مرکز جرم را نسبت به مبدأ مختصات بیان می‌کند. قسمت راست معادله (۶) بیانگر مکانیک حاکم بر کپسول می‌باشد که شامل نیروها و گشتاورهای وزن و شناوری (هیدروستاتیک)، هیدرودینامیک (پسا و برا)[1]، جرم افزوده، سطوح کنترل و سامانه رانش می‌باشد.

با توجه به اینکه اکثر رونده‌های دریایی بصورت ذاتی در کانال غلتش[2] پایدارند و نوسانات اندکی حول صفر دارند، می‌توان برای ساده‌سازی معادلات، زاویه رول را صفر فرض نمود. از سوی دیگر به منظور مستقل نمودن معادلات از یکدیگر به ترتیب زاویه $\theta=0$ و $\psi=0$ درنظر گرفته می‌شود. با اعمال این فرضیات، معادلات دینامیکی در صفحه افقی x-y نسبت به صفحه عمودی x-z مستقل خواهند شد و از پیچیدگی معادلات کاسته می‌شود. در نتیجه معادلات (۲) به تفکیک برای صفحه افقی و صفحه قائم به صورت روابط (۷) و (۸) قابل بازنویسی است.

$$
\dot{\eta}_1|_{\phi,\theta=0}=\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\psi & -\sin\psi & 0\\ \sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix}
\qquad (۷)
$$

$$
\dot{\eta}_2|_{\phi,\theta=0}=\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix}
$$

$$
\dot{\eta}_1|_{\phi,\psi=0}=\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0 & \sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix}
$$

$$
\dot{\eta}_2|_{\phi,\psi=0}=\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & \tan\theta\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{1}{\cos\theta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix}
\qquad (۸)
$$

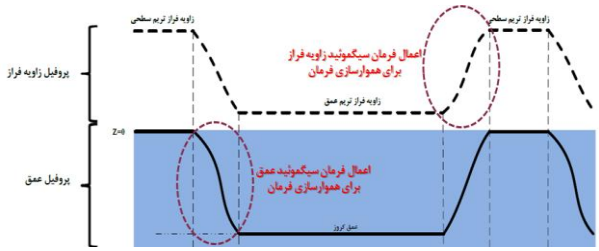
تفکیک معادلات به سهولت طراحی سیستم هدایت و کنترل[3] برای دو صفحه افقی و قائم کمک خواهد کرد [۳].

۳- ساختار سیستم هدایت رونده

با تفکیک معادلات دینامیکی رونده به دو صفحه افقی و قائم، طراحی و پیاده‌سازی سیستم هدایت و کنترل در دو کانال مجزا زاویه فراز/عمق و زاویه سمت براحتی امکان‌پذیر شده است.

۴-۲- سیستم هدایت کانال قائم

کانال قائم برای هدایت و کنترل زاویه فراز و عمق رونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. سناریوی هدایتی در کانال قائم در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- سناریوی هدایتی در کانال قائم برای اجرای حرکت دلفینی با ترکیب فازهای حرکت سطحی و زیرسطحی

اجرای حرکت دلفینی با ترکیب فازهای حرکت سطحی روی آب و زیرسطحی در عمق کروز براساس زمان‌بندی از پیش تعیین شده در بازه‌های زمانی معین از ابتدا تا پایان ماموریت اجرا خواهد شد.

۴-۲- سیستم هدایت کانال افقی

هدایت هدف‌بین یا در خط دید[4] پرکاربردترین روش هدایتی برای طراحی مسیر[5] در AUVها است. اصل هدایت هدف‌بین بر رسم خط مستقیم بین دو نقطه و کنترل رونده برای قرارگیری روی این خط استوار است. زاویه مماسی مسیر (γ_p)، در صفحه افقی بین نقاط مبدا و مقصد از رابطه ۹ قابل محاسبه است[۹].

$$
\gamma_p=atan(\frac{Y_d-Y_0}{X_d-X_0}) \qquad (۹)
$$

در رابطه فوق (X_0,Y_0) و (X_d-Y_d) به ترتیب مختصات نقطه مبدا و مقصد هستند. در شکل ابتدایی، از زاویه مماسی مسیر می‌توان به عنوان فرمان زاویه سمت $(psi_{com}=\gamma_p)$ استفاده نمود. برای جبران خطای جانبی در صفحه افقی و همگرا نمودن مسیر حرکت وسیله به مسیر مرجع، روش هدایت هدف‌بین تناسبی با بهره ثابت و بهره تطبیقی پیشنهاد شده است[۹]. محاسبه زاویه مماسی مسیر مبتنی بر روش فوق تنها در صفحه دو بعدی دارای دقت بوده در حالیکه با لحاظ کردن کرویت زمین، در مسافت‌های طولانی با خطا همراه خواهد بود. برای جبران این خطای محاسباتی باید

[1] Drag & Lift
[2] Roll
[3] Guidance & Control System
[4] Line Of Sight
[5] Path planning

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]

بتوان مدل کروی زمین را به گونه‌ای در معادلات فوق وارد نمود تا فاصله خط مستقیم بین دو نقطه و زاویه راستای این خط نسبت به شمال جغرافیایی به درستی محاسبه گردد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۳-۲-۱- هدایت هدف‌بین مبتنی بر مثلثات کروی و معادلات هاورسین

از مجموعه معادلات هاورسین[1] برای محاسبه فاصله بین دو نقطه روی زمین استفاده می‌شود. در معادلات هاورسین که یکی از چهار مدل موجود برای اندازه‌گیری فاصله بین دو نقطه است، زمین با شعاع ثابت و کاملا کروی فرض شده است. البته شعاع زمین در قطبین و استوا با هم یکسان نبوده و زمین در حقیقت بیضی‌گون است. تفاوت مدل کروی یا بیضوی بودن زمین منجر به بروز یک خطای نیم درصدی در تخمین مسافت خواهد شد که در منابع مختلف به آن اشاره شده است[۷]. بنابراین برای دستیابی به دقت بیشتر در تخمین فاصله در بردهای بسیار بلند باید از مدل بیضوی استفاده نمود.

رابطه هاورسین یک رابطه مهم در ناوبری و نمونه ویژه از یک فرمول بسیار عمومی در مثلثات کروی است. ایده اصلی روش هاورسین برای محاسبه فاصله بین دو نقطه، رسم دایره بزرگ روی یک کره است که دو نقطه را دربربگیرد. در نتیجه نزدیکترین فاصله بین دو نقطه، کوتاه‌ترین قوس دایره بزرگ محصور بین دو نقطه است. در شکل ۳ تعیین فاصله براساس مفهوم دایره بزرگ در روش هاورسین و کوتاه‌ترین قوس محصور بین دو نقطه قابل مشاهده است.

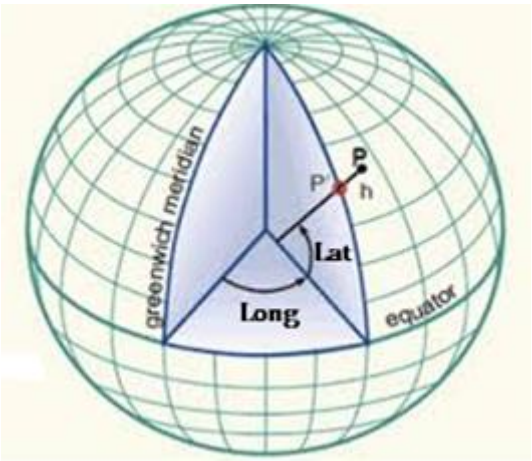


شکل ۳- مفهوم دایره بزرگ در هاورسین [۶و۸]

معادلات هاورسین از دستگاه مختصات کروی استفاده می‌کند که دارای ویژگی‌های زیر است:

- مبدا آن مرکز کره زمین است.
- محور x آن در راستای نصف النهار مبدا (گرینویچ) قرار دارد.
- صفحه xy در برگیرنده خط استوا بوده و جهت مثبت محور z به سمت قطب شمال است.

در دستگاه مختصات زمین مرکز، هر نقطه روی زمین با یک طول (Long) و عرض (Lat) جغرافیایی[2] بیان می‌شود که مفهوم آن در شکل ۴ آورده شده است. عرض جغرافیایی با مبدا خط استوا و جهت حرکت به قطبین بوده و با مولفه (θ) بیان می‌شود. طول جغرافیایی با مبدا نصف النهار گرینویچ و حرکت پادساعتگرد با مولفه (Ø) در معادلات هاورسین مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴- مفهوم طول و عرض جغرافیایی در دستگاه مختصات زمین مرکز [۶و۸]

معادلات هاورسین از مختصات طول و عرض برای محاسبه فاصله و زاویه دو نقطه روی زمین نسبت به راستای شمال جغرافیایی استفاده می‌نماید. زاویه خط واصل بین دو نقطه نسبت به محور شمال جغرافیایی با عنوان زاویه سمت یا راه[3] معرفی می‌شود. فاصله بین دو نقطه با مولفه‌های (x_2, y_2, z_2) و (x_1, y_1, z_1) در دستگاه مختصات کارتزین از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است:

$$d^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \qquad (۱۰)$$

اما با حرکت روی سطح زمین، مولفه‌ها باید در دستگاه مختصات کروی بیان شوند. روابط ۱۱ مولفه‌های موقعیتی را در دستگاه کروی نشان می‌دهد.

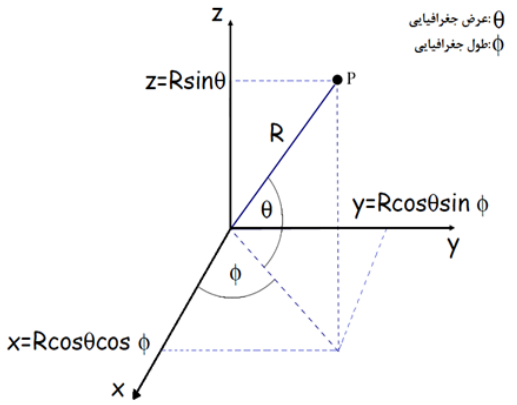
(۱

$$\begin{cases} X = R\,Cos\,(\theta)\,Cos(\emptyset) \\ Y = R\,Cos\,(\theta)\,Sin(\emptyset) \\ Z = R\,Sin(\theta) \end{cases} \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق R شعاع زمین است.

[1] Haversine
[2] Longitude & Latitude Geographical
[3] Bearing

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]

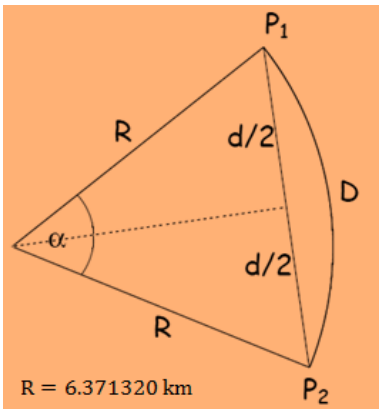


شکل ۵- مولفه‌های موقعیت در دستگاه کروی [۶و۸]

با انتقال رابطه فاصله از دستگاه کارتزین به دستگاه کروی، رابطه ۱۱ را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود:

$$d^2 = 2R^2[Cos(\theta_1)Cos(\theta_2)Cos(\varphi_1 - \varphi_2) - Sin(\theta_1)Sin(\theta_2)] \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق (θ_1, φ_1) و (θ_2, φ_2) بترتیب مختصات نقطه مبدا و مقصد در دستگاه کروی است. مقدار d در رابطه فوق، فاصله بین دو نقطه در صفحه تخت و بدون لحاظ نمودن انحنای زمین است. این مسئله در مسافت کوتاه خطای چندانی در محاسبات وارد نمی‌کند ولی در مسافت‌های بسیار طولانی منشا خطای قابل توجه در محاسبات خواهد بود. در مثلثات کروی با معلوم بودن دو ضلع ساق و زاویه بین آنها می‌توان اندازه ضلع روبرو را بدست آورد. در قانون دایره بزرگ، دو نقطه روی سطح زمین به همراه مرکز زمین تشکیل یک مثلث متساوی الساقین را می‌دهند. دو ساق مثلث همان شعاع زمین هستند بنابراین با محاسبه زاویه بین دو ساق مثلث و شعاع می‌توان اندازه قطاع را محاسبه نمود. در شکل ۶ مفهوم مثلث متساوی الساقین برای محاسبه مسافت بین دو نقطه روی سطح زمین قابل مشاهده است.



شکل ۶- محاسبه قطاع کره با استفاده از قانون کسینوس و مثلث متساوی‌الساقین [۶و۸]

با توجه به شکل فوق و استفاده از قانون مثلثات می‌توان رابطه زیر را استخراج نمود:

$$Sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d}{2R} \quad (۱۳)$$

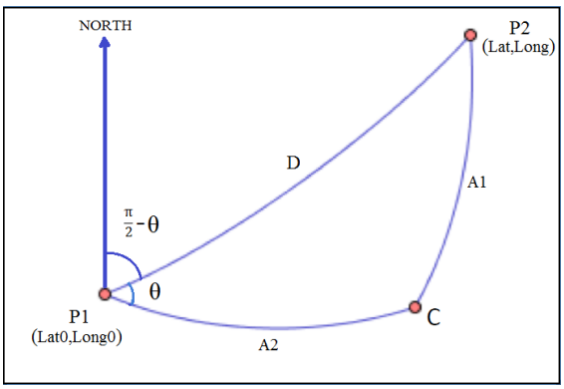
با استفاده از رابطه $haversin\,(\alpha) = sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1-\cos(\alpha)}{2}$ و جای‌گذاری رابطه ۱۳ می‌توان رابطه ۱۲ را بازنویسی نمود:

$$haversin\,(\alpha) = haversin\,(lat - lat0) + cos(lat)\,cos(lat0)\,haversin\,(long - long0) \quad (۱۴)$$

بنابراین با محاسبه زاویه α و در نظر گرفتن شعاع ۶.۳۷ کیلومتری زمین می‌توان فاصله بین دو نقطه روی کره زمین (قطاع کره) را با لحاظ کردن انحنای کره با دقت زیادی بدست آورد.

$$D = R\,\alpha = 2Rsin^{-1}\left(\sqrt{haversin\,(\alpha)}\right) \quad (۱۵)$$

برای استخراج زاویه مسیر حرکت (خط واصل بین دو نقطه) نسبت به شمال جغرافیایی ابتدا باید تصویر مسیر حرکت را روی کمان طول و عرض جغرافیایی بدست آورد. مولفه‌های A_1 و A_2 تصویر مسیر حرکت روی کمان‌های طول و عرض جغرافیایی است که در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۷- تصویر مسیر حرکت روی کمان‌های طول و عرض جغرافیایی [۶و۸]

$$A_1 = cos(lat_0)\,sin(lat) - sin(lat_0)\,cos(lat)\,cos\,(long - Long_0) \quad (۱۶)$$

$$A_2 = sin(long - long0)cos\,(lat) \quad (۱۷)$$

با رسم کمان‌ها، یک مثلث کروی روی سطح کره تشکیل می‌شود. زاویه مسیر حرکت نسبت به محور شمال با کسر زاویه قایم از زاویه θ بدست خواهد آمد. رابطه ۱۸ زاویه مسیر حرکت نسبت به شمال جغرافیایی را نشان می‌دهد.

$$bearing = \frac{\pi}{2} - atan2(A1, A2) \quad (۱۸)$$

با پیاده‌سازی معادلات هاورسین در الگوریتم هدایت و ناوبری می‌توان در هر سیکل کاری، فاصله بین دو نقطه و زاویه خط واصل آنها را نسبت به شمال جغرافیایی محاسبه نمود. استفاده از این زاویه به عنوان فرمان زاویه سمت (psi_{com} = bearing) می‌تواند رونده را از نقطه مبدا به نقطه مقصد برساند.

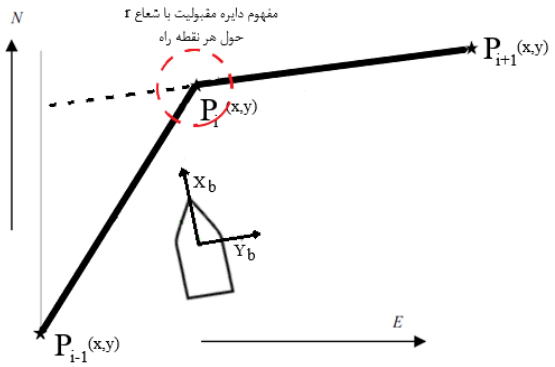
۳-۲-۲-دایره مقبولیت

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]

تاکنون اصـــول کلی الگوریتم هدایت هدف‌بین مبتنی بر معادلات هاورســـین ارائه گردید. در اکثر موارد برای بکارگیری روش LOS، بین نقطه شروع و پایان چندین نقطه به عنوان نقاط راه مرجع[1] تعریف می‌شود و هدف عبور دادن وسـیله روی خط سـیر برای رسـیدن به مقصـد پایانی است. بنابراین زاویه مسیر با توجه به خط مستقیم بین دو نقطه مرجع متوالی همواره در حال تغییر اسـت، در نتیجه زاویه مسـیر، منطبق بر خط مسـتقیم بین دو نقطه مرجع متوالی تعریف می‌گردد. به منظور تعمیم این روش به هدایت چندنقطه‌ای دو مسئله حائز اهمیت است. مسئله اول اینکه علاوه بر تعریف نقطه ابتدا و انتها، نقاط راه میانی نیز باید برای الگوریتم هدایت تعریف شـوند. این مسـئله هنگام بارگذاری پارامترهای اولیه در رایانه شـناوری رونده خودکار زیرآبی باید انجام گردد. مسـئله دوم و بسـیار حیاتی در هدایت چند نقطه‌ای، تعیین یک مکانیزم برای تایید رسـیدن رونده به یک نقطه راه میانی و سوئیچ به نقطه راه بعدی است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

برای حصـول اطمینان از رسـیدن رونده به هر نقطه راه و سـوئیچ به نقطه راه بعدی روی مسـیر مرجع، مفهومی به عنوان دایره مقبولیت[2] ارائه می‌گردد. دایره مقبولیت یک دایره به مرکزیت نقطه راه (x_k, y_k) و با شعاع R است [۲]. بر پایه این روش، تنها در صورتی می‌توان از نقطه راه فعلی به نقطه راه بعدی سوئیچ انجام داد که وسیله در این دایره قرار بگیرد. بیان ریاضی این تعریف بصورت رابطه ۱۹ است:

$$[x_{pi}(i) - x_b(i)]^2 + [y_{pi}(i) - y_b(i)]^2 \le r^2 \qquad (۱۹)$$



شکل ۸- مفهوم دایره مقبولیت حول هر نقطه راه [۲]

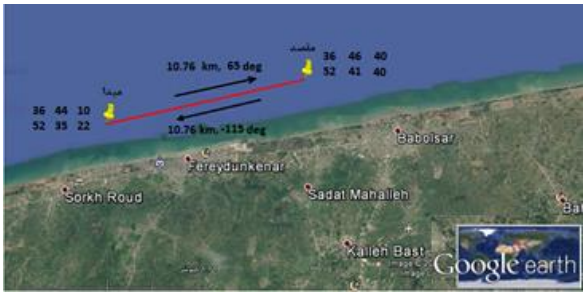
پس از برقراری شـرط، نقطه راه بعدی به عنوان نقطه مقصـد جدید برای سـیسـتم ناوبری تعریف شـده و فرمان لازم جهت هدایت وسـیله تولید خواهد شد. تعیین شعاع دایره مقبولیت به میزان دقت حسگرها و الگوریتم ناوبری وابسته است.

٤- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

هدایت چند نقطه‌ای پیشـنهادی در بسـتر سـخت‌افزاری مبتنی بر پردازنده ARM و با زبان برنامه‌نویسـی C++ پیاده‌سـازی شـده اسـت. این بخش شـامل سـناریوی آزمون میدانی برای ارزیابی صـحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی روی رونده زیرآبی خودگردان است.

٤-۲- سناریوی آزمون میدانی

برای ارزیابی صـحت کارایی الگوریتم پیشـنهادی، یک آزمون میدانی با رونده خودگردان زیرآبی در دریای مازندران تعریف گردید. فاصـله بین دو نقطه تقریبا ۱۱ کیلومتر بوده و رونده باید این مسـیر را بصورت رفت و برگشتی طی کند. به عبارت دیگر شروع حرکت رونده از نقطه مبدا بوده و پس از رسـیدن به نقطه مقصـد و قرار گرفتن در دایره مقبولیت، فرآیند تغییر نقطه راه آغاز و فرمان بازگشـت به نقطه مبدا از طریق سیستم هدایت برای رونده صادر می‌گردد. زاویه مسیر مرجع نسبت به شـمال جغرافیایی در مسیر رفت تقریبا ۶۵+ درجه و در مسیر برگشـت تقریبا ۱۱۵- درجه خواهد بود که به عنوان فرمان زاویه سـمت به رونده اعمال خواهد شد. طراحی مسیر به همراه مختصات جغرافیایی در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹- سناریوی آزمون میدانی

با توجه به سـاختار سـیسـتم ناوبری و الزامات آن، رونده مسـافت حدفاصل مبدا تا مقصد را با اجرای یک سناریوی دلفینی زمان‌بندی شده طی می‌کند. در شکل ۱۰ نمایی از رونده زیرآبی خودگردان هنگام تقرب به نقطه راه میانی (بویه قرمز رنگ) و آغاز فرآیند تغییر مسیر با قرارگیری در دایره مقبولیت حول نقطه راه قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- نمایی از آزمون میدانی رونده و لحظه رسیدن به نقطه راه میانی و تغییر مسیر به سمت نقطه راه بعدی

این نما از آزمون میدانی واقعی، بیانگر میزان دقت بالای سـیسـتم هدایت، ناوبری و کنترل پیاده‌سـازی شـده روی رونده واقعی برای طی مسـیر از پیش تعیین شـده و تقرب به نقطه راه میانی اسـت. در ادامه نتایج آزمون میدانی ارائه خواهد شد.

[1] Way-points
[2] Circle of Acceptance

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]

٤-۲- تحلیل نتایج

همانطور که بیان شد رونده زیرآبی باید حدفاصل مبدا تا مقصد را بصورت رفت و برگشت طی نماید. نتایج حاصل از آزمون میدانی در نمودارهای زیر ارائه شده است. فرمان زاویه سمت و زاویه سمت تخمین زده شده توسط سیستم ناوبری در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

دو پرش کوچک در مسیر رفت و برگشت، منتجه از سناریوی دلفینی با زمان‌بندی از پیش تعیین شده برای اصلاح مسیر توسط سیستم ناوبری و به منظور کاهش خطا برای تقرب به نقطه راه میانی و هدف نهایی است. برای پیشگیری از چرخش ناگهانی هنگام تغییر مسیرهای شدید و بروز اشباع در عملگرها، برای کانال سمت، سطح اشباع معینی در نظر گرفته شده است. تاثیر محدود کردن نرخ تغییرات فرمان زاویه سمت را می‌توان در نمودار بالا هنگام رسیدن به نقطه راه میانی و گردش ۱۸۰ درجه‌ای مشاهده نمود.

فاصله یا مسافت پیموده شده بین دو نقطه (۱۰/۵ کیلومتر) در مسیر رفت و برگشت در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. شکل ۱۲ بیانگر روند کاهشی فاصله رونده تا نقطه راه میانی یا نقطه هدف نهایی است. تصمیم‌گیری در خصوص قرارگیری در دایره مقبولیت یا رسیدن به نقطه هدف پایانی براساس همین فاصله انجام خواهد شد. برای این آزمون میدانی، شعاع دایره مقبولیت ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین هنگامی که فاصله رونده با نقطه راه میانی به کمتر از ۵۰ متر برسد، فرمان تغییر نقطه راه صادر و طراحی مسیر جدید توسط الگوریتم هدایت، ناوبری و کنترل اجرا خواهد شد. در شکل ۱۳ این مسئله به روشنی قابل مشاهده است.

صفر شدن فاصله رونده با نقطه مقصد نهایی به منزله رسیدن به نقطه نهایی و پایان ماموریت براساس الگوریتم هدایت است. خروجی موقعیت جغرافیایی ناوبری شده رونده زیرآبی در آزمون میدانی به صورت رفت و برگشتی در شکل ۱۴ ارائه شده است.

۵- نتیجه گیری

هدایت چند نقطه‌ای از رایج‌ترین روش‌های هدایت وسایل نقلیه زیرآبی است که با ساختار و اصول ساده ریاضی براحتی قابل پیاده‌سازی است. زاویه سمت منتجه از هدایت هدف‌بین و معادلات هاورسین مبتنی بر مدل کروی زمین می‌تواند بطور مستقیم به عنوان فرمان زاویه سمت برای جابجایی از یک نقطه به نقطه دیگر طی کوتاهترین مسیر ممکنه مورد استفاده قرار گیرد. این روش برای عبور از آبراه‌ها، بنادر و سواحل اطراف جزایر می‌تواند مناسب باشد. البته باید در نظر داشت که حصول نتیجه مناسب از الگوریتم هدایت چند نقطه‌ای و سوئیچ بین نقاط راه منوط به دقت سیستم ناوبری است. به عبارت دیگر میزان خطای استقرار ناوبری در هر نقطه باید کوچکتر از شعاع دایره مقبولیت باشد تا بتواند قرارگیری در محدوده نقطه موردنظر را تشخیص و فرآیند سوئیچ بین نقاط راه را به درستی انجام دهد. استفاده از مدل بیضی‌گون برای زمین می‌تواند به میزان نیم درصد بر افزایش دقت معادلات هاورسین و الگوریتم هدایت پیشنهادی بیفزاید.

مراجع

[1]. D. Karimanzira, M. Jacobi, T. Pfuetzenreuter, T. Rauschenbach, M. Eichhorn, R. Taubert b, C. Ament "First testing of an AUV mission planning and guidance system for water quality monitoring and fish behavior observation in net cage fish farming", Information Processing in Agriculture (2014).

[2]. Tor Marius Jensen "Waypoint-Following Guidance Based on Feasibility Algorithms" Master of Science in Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, June 2011.

[3]. Anastasios M. Lekkas and Thor I. Fossen "Integral LOS Path Following for Curved Paths Based on a Monotone Cubic Hermite Spline Parametrization" Ieee Transactions on Control systems Technology, 2014.

[4]. Thor I. Fossen, Kristin Y. Pettersen, Senior Members, IEEE, and Roberto Galeazzi, Member " Line-of-Sight Path Following for Dubins Paths with Adaptive Sideslip Compensation of Drift Forces" Ieee Transactions on Control systems Technology, Vol. XX, NO. Y, MONTH 2013.

[5]. Anastasios M. Lekkas "Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous Vehicles" Norwegian University of Science and Technology, Thesis for the degree of philosophiae doctor Trondheim, April 2014.

[6] Benny Dwi Kifana & Maman Abdurohman "Great Circle Distance Methode for Improving Operational Control System Based on GPS Tracking System" International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE), Vol. 4 No. 04 April 2012.

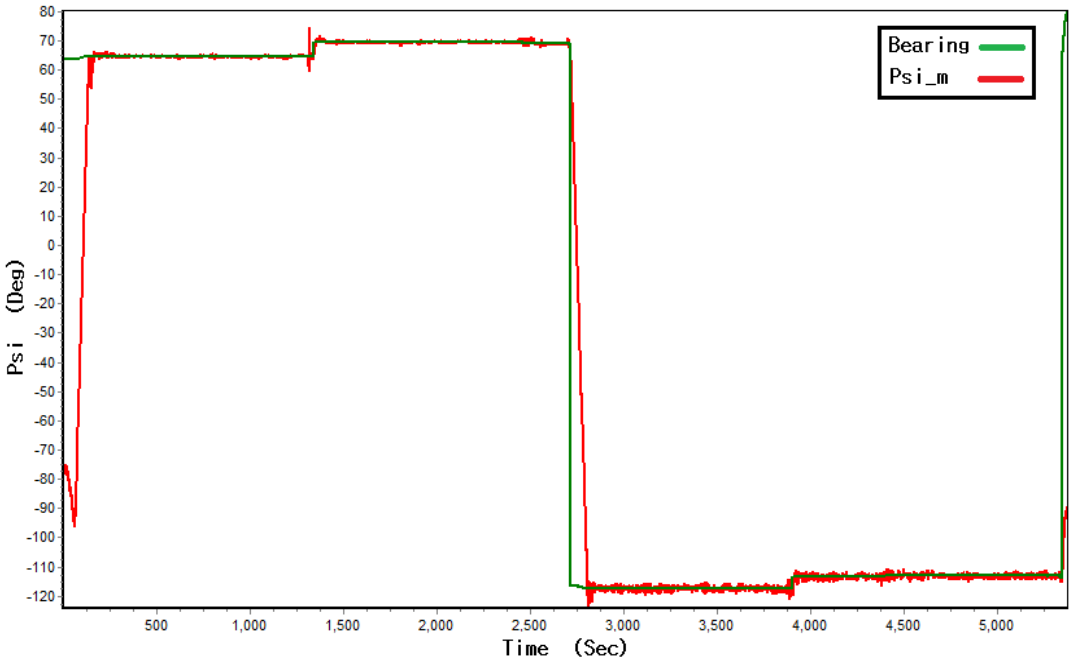
[7] Andrew James Cooper, Chelsea Anne Redman, David Mark Stoneham, Luis Felipe Gonzalez and Victor Kwesi Etse " A Dynamic Navigation Model for Unmanned Aircraft Systems and an Application to Autonomous Front-On Environmental Sensing and Photography Using Low-Cost Sensor Systems" Sensors 2015.

[8] Björn Bittins "Indoor Navigation Based on a Multimodal Positioning System" Master's Thesis to the Degree Program Applied Computer Science University of Applied Sciences Berlin (HTW), August 17, 2012.

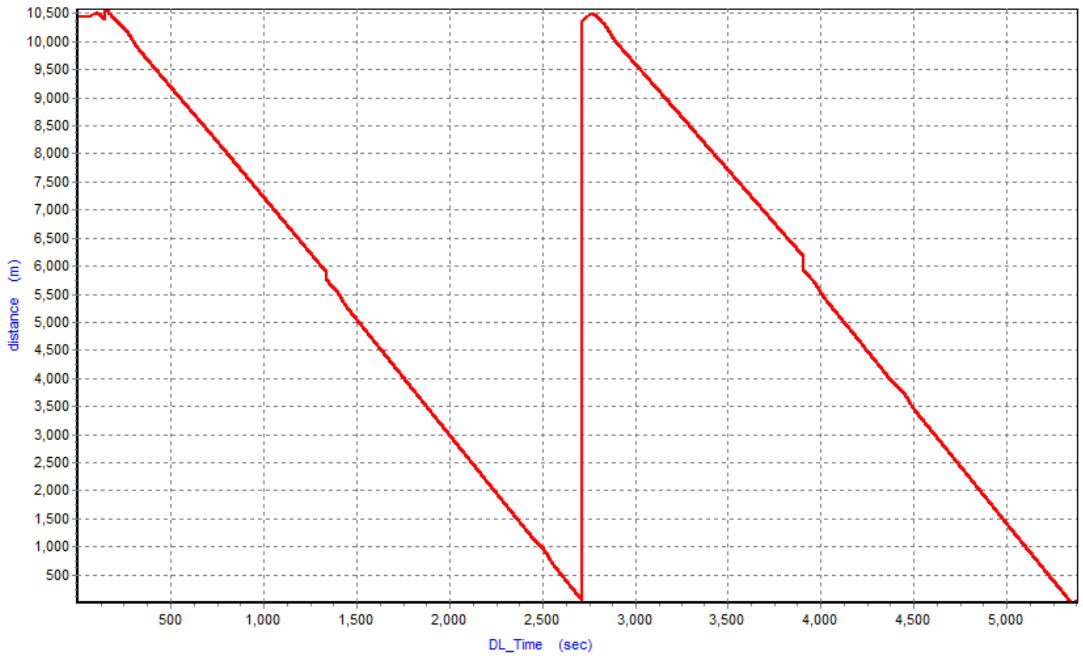
[9] Seyed Vahid zia, Seyed Hamid Mosavi & Pouria Sarhadi "Comparison Simple, Proportional and Proportional-Integral Line of Sight Guidance for Path Following in Autonomous Underwater Vehicle" 3rd National and First International Conference in applied research on Electric, Mechanical and Mechatronics Engineering, 2015.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]



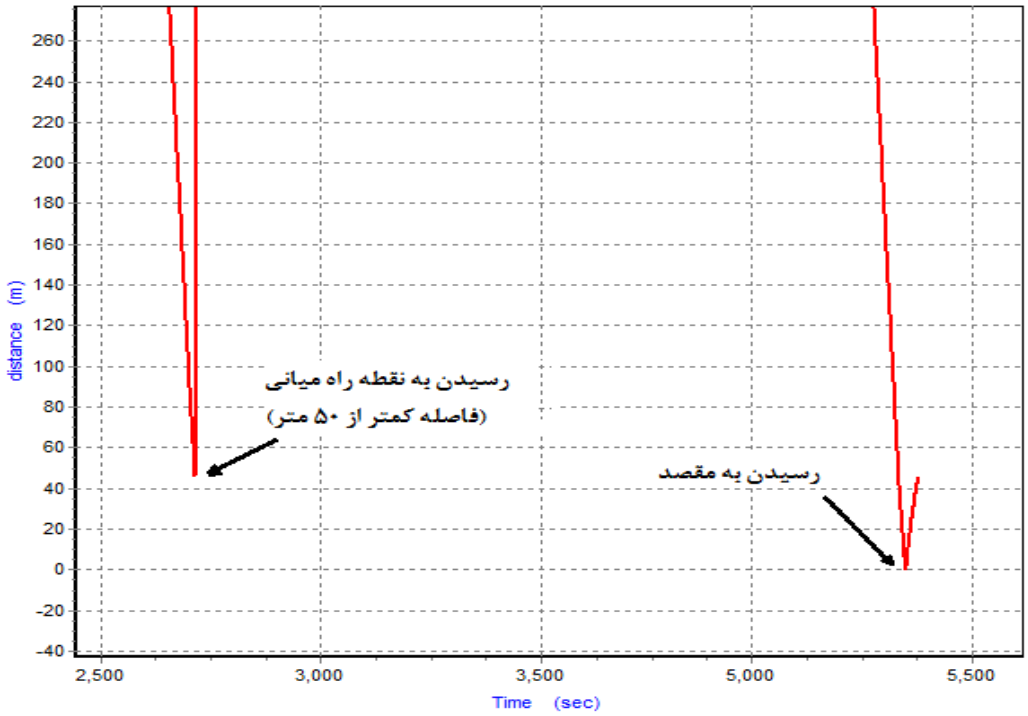
شکل ۱۱- فرمان زاویه سمت و زاویه سمت تخمین زده شده



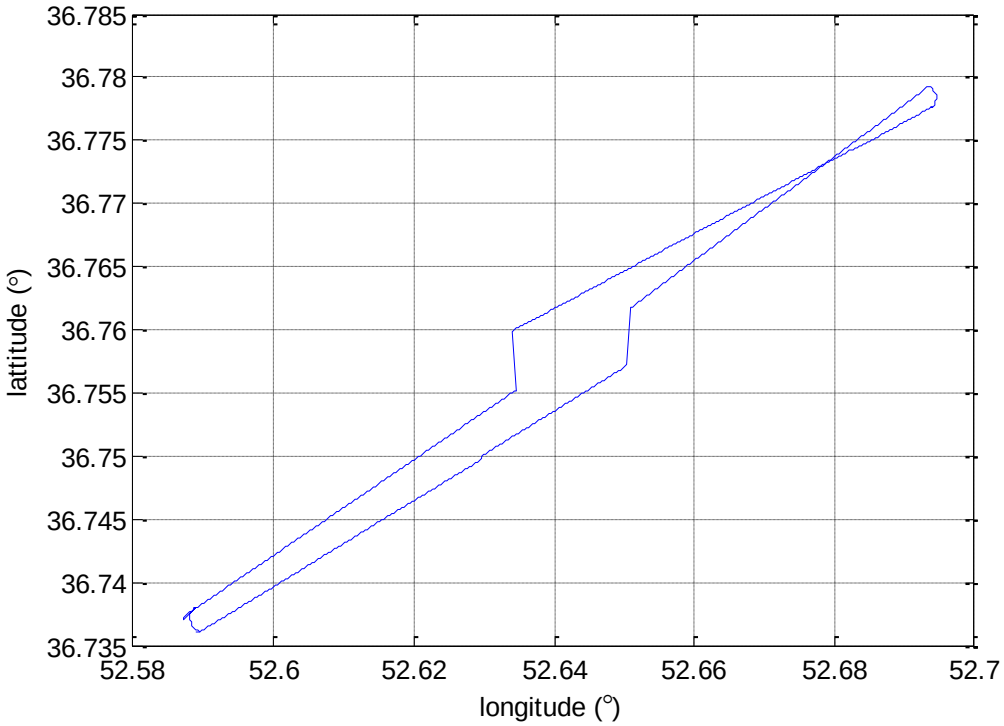
شکل ۱۲- مسافت پیموده شده بین نقاط راه تعیین شده

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]



شکل ۱۳- محدوده دایره مقبولیت برای تغییر مسیر



شکل ۱۴- منحنی طول و عرض جغرافیایی ناوبری شده رونده زیرآبی در آزمون میدانی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/joc.17.1.51]