مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۸۹، صفحه ۱۱-۱

پایدارسازی خط دید پریسکوپ‌های زیردریایی

علی کاظمی، محمد فرخی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، خیابان فرجام، کد پستی ۱۶۸۴۶-۱۳۱۱۴

تلفن: ۷۷۲۴۰۴۹۲-۰۲۱ نمابر: ۷۷۲۴۰۴۹۰-۰۲۱

farrokhi@iust.ac.ir , kazemy@ee.iust.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۸/۹/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۹/۲/۱۲)

چکیده: در این مقاله، روشی برای پایدارسازی تصویر در پریسکوپ زیردریایی با درنظر گرفتن اغتشاشات و نوسانات سطح دریا ارائه خواهدشد. این نوسانات می‌تواند تصویر دریافتی توسط پریسکوپ را ناپایدار کرده و اطلاعات دریافتی از اهداف دریایی، زمینی یا هوایی را تغییردهد. برای غلبه بر این مشکل نیاز به الگوریتم پایدارساز تصویری است که با تولید سیگنال‌های مرجع مناسب برای سروموتورها، حرکات نامطلوب تصویر را دفع‌کند. برای استخراج معادلات پایدارساز تصویر از تبدیلات دورانی و همگن استفاده خواهد شد. این معادلات برای دو حالت مختلف استخراج خواهند شد: ۱- فاصله تا هدف معلوم است و ۲- فاصله تا هدف معلوم نیست. در واقع، این معادلات فضای ورودی را به فضای سه بعدی خروجی نگاشت می‌کنند. فضای ورودی شامل زوایای انحراف سکوی پریسکوپ، فاصله تا هدف که می‌تواند اندازه‌گیری شده و یا توسط اپراتور مشخص شود (داده اختیاری)، و اطلاعات وضعیت مطلوب که توسط اپراتور تعیین می‌شود. فضای خروجی شامل سه سیگنال مرجع برای سه سروموتور پریسکوپ است. این روش برروی پریسکوپ زیردریایی آزمایشگاهی که برروی سکوی شبیه‌ساز امواج دریا نصب شده، اجرا شده است. نتایج آزمایشگاهی عملکرد خوب روش پیشنهادی در مقابله با نوسانات دریایی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خط دید، پایدارسازی تصویر، سکوی اینرسی، پریسکوپ زیردریایی

Line-of-sight stabilization for submarine periscopes

Ali Kazemy, Mohammad Farrokhi

Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology,
Phone: (+9821) 77240492, Fax: (+9821) 77240490
kazemy@ee.iust.ac.ir farrokhi@iust.ac.ir

Abstract: This paper presents a method for line-of-sight stabilization in submarine periscopes with respect to disturbances in the sea surface movements. These disturbances can cause unstable images taken by the periscope and give altered information from the targets that are located on the see surface, on the land, or in the air. To overcome this problem, an image stabilization method is required to generate reference signals for servomotors to remove the unwanted motions incurred on the image sequences. To drive the stabilization equations, basic rotation and homogeneous transformation matrices will be used. The stabilization equations will be derived for two different cases: 1) the range of target is known and 2) the range of target is unknown. In fact, these equations map the input space to the three-dimensional output space. The input space consists of the deviation angles of the periscope platform, the optional target range, which can be measured or given by the operator (optional data), and some desired operator information. The output space consists of three reference signals for three servomotors inside the persicope. The proposed method is implemented on an experimental periscope, mounted on a moving platform, which simulates the sea surface movements. The experimental results show good performance of the proposed method against sea surface movements.

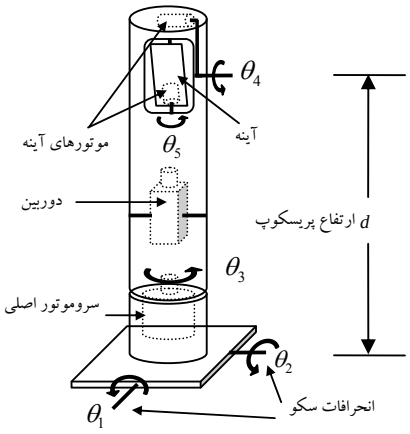
Keywords: Line of sight, Image stabilization, Inertial platform, Submarine periscope.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]

۱- مقدمه

محققان بسیاری از پایدارسازی خط دید در کاربردهای مختلفی بهره گرفته‌اند [۱]. این مساله را می‌توان به سه گروه طبقه‌بندی کرد [۲]. گروه اول شامل روش‌های نرم‌افزاری است که اغلب به‌منظور حذف نوسانات و اغتشاشات کوچک در تصویر از آنها استفاده می‌شود. ارتوک با استفاده از فیلتر کالمن تا حدودی نوسانات در تصویر را حذف کرده است [۳]. گروه دوم، روش‌هایی را شامل می‌شود که با حرکت دوربین به صورت مکانیکی سعی در حذف نوسانات در تصویر دارند[۴]. یو و لیو کنترل حرکت دوربین را توسط کنترل‌کننده مود لغزشی اجرا کرده‌اند [۵]. دمین و اوتنکوف روشی را برای پایدارسازی تصویر ارائه کرده‌اند که می‌تواند اغتشاشات بسیار شدید پایه متحرک را دفع کند [۶]. در گروه سوم، از یک یا چند آینه متحرک برای پایدارسازی تصویر استفاده می‌شود. در این روش با کنترل حرکات آینه، سعی می‌شود که تصویر منعکس‌شده از هدف برروی دوربین پایدار شود. یکی از روش‌های مرسوم برای این منظور، استفاده از سیستم ژیروسکوپ است که به صورت مکانیکی، نوسانات آینه را دفع می‌کند. سیو و همکاران‌اش از روش کنترل مقاوم H_∞ با فیدبک خروجی کاهش‌مرتبه‌یافته برای پایدارسازی سیستم آینه ژیروسکوپی استفاده کرده‌اند [۷]. ژانگ و همکاران پایدارسازی تصویر را در دو سطح انجام داده‌اند: پایدارسازی تصویر توسط ژیروسکوپ و حذف چرخش تصویر توسط GPS و اندازه‌گیری وضعیت کشتی [۸].

یکی از تجهیزات اپتیکی که مشاهده اطراف از محلی سرپوشیده و مخفی را فراهم می‌آورد، پریسکوپ می‌باشد که از آن در تجهیزاتی همچون تانک و زیردریایی استفاده می‌شود. الگوریتم پایدارسازی تصویر در پریسکوپ در گروه سوم روش‌های پایدارسازی تصویر که در بالا به آن اشاره شد، قرار می‌گیرد. محققان بسیاری در مورد موضوعاتی پیرامون پریسکوپ، مانند دوربین‌های مورد استفاده در آن [۹ و ۱۰] و کنترل عمق زیردریایی برای ثابت نگاه داشتن پریسکوپ روی سطح دریا کار کرده‌اند [۱۱]. با این حال، منابع بسیار محدودی در مورد روش‌های پایدارسازی تصویر در پریسکوپ زیردریایی منتشر شده است. لیائو و ژانگ برروی پایدارسازی تصویر در پریسکوپ با تنها یک درجه آزادی کارکرده و سعی در حذف حرکات ناخواسته در سکوی پریسکوپ و پایدارسازی تصویر نموده‌اند [۱۲]. در این مقاله، معادلات کامل پریسکوپ سه درجه آزادی استخراج‌شده و مسئله پایدارسازی تصویر به‌طور کامل حل‌شده است. در واقع، سیستم مورد نظر دارای دو ورودی (نوسانات امواج دریا) و سه خروجی با اثر زیاد زیر سیستم‌ها بر یکدیگر است که پایدارسازی تصویر را مشکل می‌کند. شکل ۱، ساختار یک پریسکوپ زیردریایی نوعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختار پریسکوپ نوعی زیردریایی

دوربین نصب شده در پریسکوپ، تصویر منعکس شده از هدف ثابت یا متحرک در آینه را دریافت می‌کند که به دلیل نوسانات سطح دریا، این تصویر ممکن است از میدان دید پریسکوپ خارج شود.

در این مقاله فرض شده است که θ_1 و θ_2 (نشان داده شده در شکل ۱) نوسانات سطح دریا بوده که در محیط آزمایشگاهی توسط سکوی شبیه‌ساز امواج تولید می‌شوند. همچنین فرض شده است که این زوایا به نحو مطلوبی اندازه‌گیری می‌شوند.

پریسکوپ نشان داده شده در شکل ۱ دارای سه درجه آزادی می‌باشد (یعنی θ_3، θ_4 و θ_5) که توسط سه سروموتور به منظور پایدارسازی تصویر به حرکت در می‌آیند. زاویه θ_3 علاوه بر تغییر میدان دید پریسکوپ که توسط اپراتور درخواست می‌شود، نقش مهمی در جبران چرخش تصویر دارد. زوایای θ_4 و θ_5 باعث چرخش آینه شده و در پایدارسازی تصویر نقش دارند. از آنجایی که اپراتور می‌تواند پریسکوپ را با هر زاویه دلخواهی به چرخش درآورده و میدان دید را تغییر دهد، θ_3 محدودیتی در چرخش ندارد. زوایای θ_4 و θ_5 نسبت به ساختار پریسکوپ دارای محدودیت‌هایی در چرخش هستند.

در این مقاله برای استخراج معادلات پایدارساز تصویر از تبدیلات دورانی و همگن استفاده شده است [۱۳ و ۱۴]. این معادلات برای دو حالت مختلف استخراج خواهند شد: ۱- فاصله تا هدف معلوم است و ۲- فاصله تا هدف معلوم نیست. این معادلات فضای ورودی را به فضای سه بعدی خروجی نگاشت می‌کنند. فضای ورودی شامل زوایای انحراف سکوی پریسکوپ (θ_1 و θ_2 در شکل ۱)، فاصله تا هدف که می‌تواند اندازه‌گیری‌شده و یا توسط اپراتور داده‌شود (داده اختیاری)، و اطلاعات وضعیت مطلوب که توسط اپراتور مشخص می‌شود. فضای خروجی شامل سه سیگنال مرجع است (θ_3، θ_4 و θ_5 در شکل ۱). روش پیشنهادی برروی پریسکوپ آزمایشگاهی که برروی سکوی شبیه‌ساز امواج دریا نصب شده، اجرا شده است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]

سازماندهی این مقاله بدین صورت است: بخش دوم مساله را با جزئیات بیشتری بیان خواهد کرد. بخش سوم سینماتیک مستقیم پریسکوپ را ارائه خواهدکرد. بخش چهارم استخراج معادلات پایدارساز تصویر با داشتن فاصله تا هدف و بخش پنجم، استخراج این معادلات را با فرض نامعلوم بودن فاصله تا هدف مورد بررسی قرار می‌دهد. بخش ششم نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی این الگوریتم را نشان می‌دهد. در انتها، فصل هفتم به نتیجه‌گیری از مقاله می‌پردازد.

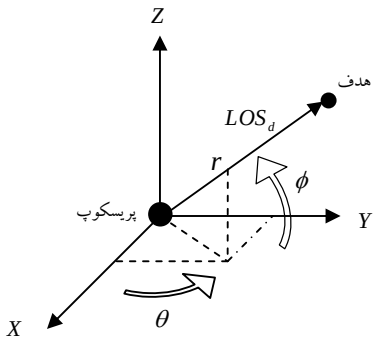
۲- تشریح مساله

هدف این مقاله، بدست‌آوردن معادلاتی است که به‌منظور پایدارسازی تصویر دریافتی از دوربین نصب شده در داخل پریسکوپ، فضای ورودی را به فضای خروجی نگاشت می‌کنند. فضای ورودی شامل زوایای انحراف سکوی پریسکوپ (θ_1 و θ_2 در شکل ۱)، فاصله تا هدف که می‌تواند اندازه‌گیری شده و یا توسط اپراتور مشخص شود، و اطلاعات زاویه دید مطلوب (θ و ϕ) که توسط اپراتور تعیین می‌شود (شکل ۲). فضای خروجی شامل سه سیگنال مرجع است (θ_3، θ_4 و θ_5 در شکل ۱) که به منظور پایدارسازی تصویر باید توسط سروموتورها تعقیب شود.

فاصله تا هدف یکی از فاکتورهای مهم برای اهداف بسیار نزدیک می‌باشد؛ این پارامتر توسط اپراتور و یا فاصله‌یاب لیزری مشخص می‌شود. معادلات پایدارساز تصویر با مشخص بودن این فاصله از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. با این وجود، ممکن است در شرایطی این فاصله موجود نباشد که در این صورت معادلات متفاوتی نیاز خواهد بود که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد. زمانی که هدف به پریسکوپ نزدیک باشد می‌توان از تبدیلات همگن 4×4 بهره گرفت. در این حالت، با توجه به فاصله کم هدف، ارتفاع پریسکوپ (d) نقش اساسی در پایدارسازی خط دید خواهد داشت. به بیانی دیگر، زمانی که فاصله تا هدف مشخص نباشد، ماتریس‌های دوران پایه برای یافتن خط دید کافی خواهند بود. این معادلات زمانی کارآیی دارند که هدف از پریسکوپ دور باشد که در این صورت می‌توان از ارتفاع پریسکوپ صرفنظر کرد. در این مقاله، معادلات برای هر دو حالت «هدف نزدیک» و «هدف دور» استخراج شده‌اند.

۳- سینماتیک مستقیم

در این مقاله، به‌منظور استخراج معادلات سینماتیک مستقیم پریسکوپ از ماتریس‌های تبدیل همگن و دوران پایه استفاده شده است. شکل ۳ دستگاه مختصات‌های پریسکوپ را نشان می‌دهد. روشن است که دستگاه مختصات سه دوران اول هم مرکز بوده و نیاز به انتقال ندارند. همچنین دستگاه مختصات چهارم و پنجم هم مرکز می‌باشند. درنتیجه ماتریس‌های همگن پریسکوپ به صورت زیر بیان می‌شوند:



شکل ۲: تعریف خط دید

$$\mathbf{T}_1^0=\mathrm{Rot}_{x,\theta_1}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&c_1&-s_1&0\\0&s_1&c_1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_2^1=\mathrm{Rot}_{y,\theta_2}=\begin{bmatrix}c_2&0&s_2&0\\0&1&0&0\\-s_2&0&c_2&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_3^2=\mathrm{Rot}_{z,\theta_3}=\begin{bmatrix}c_3&-s_3&0&0\\s_3&c_3&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_4^3=\mathrm{Trans}_{z,\mathrm{d}}.\mathrm{Rot}_{y,\theta_4}=\begin{bmatrix}c_4&0&s_4&0\\0&1&0&0\\-s_4&0&c_4&d\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

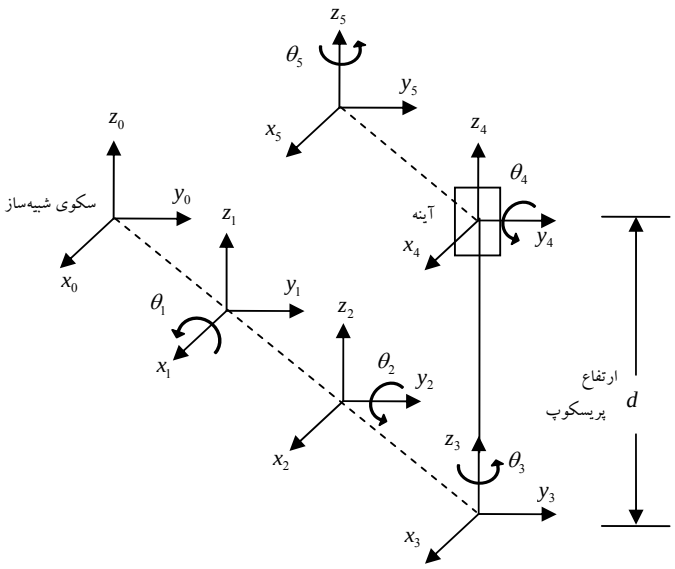
$$\mathbf{T}_5^4=\mathrm{Rot}_{z,\theta_5}=\begin{bmatrix}c_5&-s_5&0&0\\s_5&c_5&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \qquad (۱)$$

که در آن $\mathbf{T}_{i+1}^i\ (i=0,\ldots,5)$ ماتریس تبدیل همگن از مختصات $i+1$ به i، $\mathrm{Rot}_{k,\theta_i}\ (k=x,y,z;\ i=1,\ldots,5)$ ماتریس تبدیل همگنی است که دوران θ_i درجه را حول محور k بیان‌کرده، $\mathrm{Trans}_{z,\mathrm{d}}$ انتقال d واحد درطول محور z، و $c_i=\cos(\theta_i)$ و $s_i=\sin(\theta_i)$ برای $i=0,\ldots,5$ است.

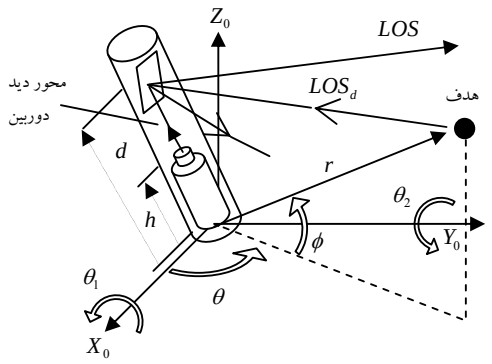
با استفاده از این تبدیلات می‌توان تبدیل از هر محور مختصات به مختصات دیگر را محاسبه کرد. از این رو، سینماتیک مستقیم پریسکوپ برابر است با

$$\mathbf{T}_5^0=\mathbf{T}_1^0\mathbf{T}_2^1\mathbf{T}_3^2\mathbf{T}_4^3\mathbf{T}_5^4 \qquad (۲)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]



شکل ۳: سیستم مختصات پریسکوپ متصل به سکوی شبیه ساز



شکل ۴: خط دید واقعی و مطلوب

۴- معادلات پایدارساز تصویر با فاصله هدف

در این قسمت فرض می‌شود که میدان دید (θ)، زاویه دید (ϕ)، فاصله تا هدف (r)، و نوسانات اندازه‌گیری شده دریا (θ_1 و θ_2) در دسترس می‌باشند (شکل‌های ۱ و ۲).

هدف آن است که خط دید پریسکوپ (LOS) علی‌رغم وجود نوسانات دریا (θ_1 و θ_2)، برروی هدف پایدار باقی بماند. درنتیجه، بدست آوردن خط دید پریسکوپ اولین قدم خواهد بود. در مرحله بعد، سعی می‌شود که این خط دید در امتداد خط دید مطلوب (LOS_d) که توسط اپراتور تعیین می‌گردد، قرار گیرد (شکل ۴).

بردار هدف در سیستم مختصات مرجع برابر است با

$$ {}^0\mathbf{v}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} r\,\mathrm{c}_\phi\mathrm{c}_\theta & r\,\mathrm{c}_\phi\mathrm{s}_\theta & r\,\mathrm{s}_\phi & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (۳) $$

که در آن r، θ و ϕ پیش‌تر تعریف شده و $\mathrm{c}_\phi = \cos(\phi)$ و $\mathrm{s}_\phi = \sin(\phi)$. توجه شود که زیرنویس T به مفهوم هدف و بالانویس T ترانهاده را نشان می‌دهد. دستگاه مختصات دوربین نسبت به مختصات مرجع به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$ {}^0\mathbf{v}_C = \mathbf{T}_3^0 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & h & 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} h\,\mathrm{s}_2 & -h\,\mathrm{s}_1\mathrm{c}_2 & h\,\mathrm{c}_1\mathrm{c}_2 & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (۴) $$

که درآن $\mathbf{T}_3^0 = \mathbf{T}_1^0\mathbf{T}_2^1\mathbf{T}_3^2$ و h فاصله بین دوربین و مرکز مختصات مرجع‌است (شکل ۴). اکنون دستگاه مختصات دوربین ${}^0\mathbf{v}_C$ به‌صورت زیر به مختصات پنجم که دستگاه مختصات آینه می‌باشد، انتقال می‌یابد:

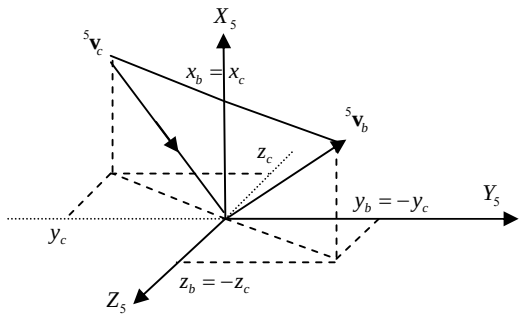
$$ {}^5\mathbf{v}_C = \left(\mathbf{T}_5^0\right)^T \cdot {}^0\mathbf{v}_C = \begin{bmatrix} w\,\mathrm{c}_5\mathrm{s}_4 & w\,\mathrm{s}_5\mathrm{s}_4 & w\,\mathrm{c}_4 & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (۵) $$

که درآن $w = (d-h)$ و d ارتفاع پریسکوپ است.

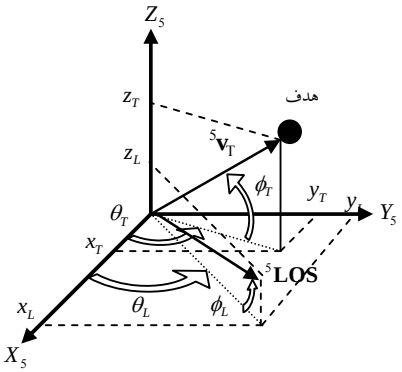
حال برای بدست آوردن خط دید واقعی، باید انعکاس محور نوری دوربین که به مختصات آینه انتقال یافته است، به‌صورت زیر محاسبه شود. یافتن بردار انعکاس آینه در مختصات دکارتی به‌سهولت امکان‌پذیر است. فرض کنید که آینه در صفحه $y-z$ قرار داشته و x بردار نرمال آن باشد (شکل ۵). با معکوس‌کردن درایه‌های y و z بردار، می‌توان معکوس آن را محاسبه کرد

$$ {}^5\mathbf{LOS} = {}^5\mathbf{v}_b = \begin{bmatrix} w\mathrm{c}_5\mathrm{s}_4 \\ -w\mathrm{s}_5\mathrm{s}_4 \\ -w\mathrm{c}_4 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (۶) $$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]



شکل ۵: انعکاس بردار در آینه



شکل ۶: خط دید واقعی و مطلوب

توجه شود که خط عمود بر آینه بردار x_5 است (شکل ۳)، و هر برداری که در آینه انعکاس می‌یابد، باید x مثبت داشته باشد. بر اساس (۵) و شرایط زیر، ${}^5\mathbf{v}_C$ دارای x مثبت خواهد بود:

$$\begin{cases} 0^\circ < \theta_4 < 90^\circ \\ -90^\circ < \theta_5 < 90^\circ \\ w > 0 \end{cases} \qquad (۷)$$

محدودیت‌های بیان شده در (۷) نتیجه خواهد داد که $wc_5s_4 > 0$. این محدودیت‌ها مفهوم فیزیکی داشته و اگر نقض شوند به‌منزله آن است که از پشت آینه برای بازتابش استفاده شده است که در این صورت تصویر از دست خواهد رفت. حال، بردار هدف که در (۳) بیان شد، باید برای مقایسه با خط دید واقعی به مختصات پنجم انتقال یابد. این انتقال در معادله (۸) نشان داده شده است.

$${}^5\mathbf{v}_T = \left(\mathbf{T}_5^0\right)^T \cdot {}^0\mathbf{v}_T = \begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T & 1 \end{bmatrix}^T$$
$$= \begin{bmatrix} (-c_2s_3s_5 - c_5s_2s_4 + c_5c_2c_3c_4)rc_\phi c_\theta + (s_5c_1c_3 \\ -s_5s_2s_1s_3 + c_2c_5s_4s_1 + c_4c_5c_1s_3 + s_2c_4c_5s_1c_3)rc_\phi s_\theta \\ +(s_5s_1c_3 + s_5s_2c_1s_3 - c_2c_5s_4c_1 + c_4c_5s_1s_3 - s_2c_4c_5c_1c_3)rs_\phi \\ +dc_5s_4 \\ \\ (-s_5c_2c_3c_4 + s_5s_2s_4 - c_2s_3c_5)rc_\phi c_\theta + (-s_5c_4s_1s_2c_3 - s_5c_4c_1s_3 \\ -s_5s_1c_2s_4 - c_5s_1s_2s_3 + c_5c_1c_3)rc_\phi s_\theta + (s_5c_4c_1s_2c_3 - s_5c_4s_1s_3 \\ +s_5c_1c_2s_4 + c_5c_1s_2s_3 + c_5s_1c_3)rs_\phi - ds_5s_4 \\ \\ (c_2c_3s_4 + s_2c_4)rc_\phi c_\theta + (s_4s_1s_2c_3 + s_4c_1s_3 - s_1c_2c_4)rc_\phi s_\theta \\ +(-s_4c_1s_2c_3 + s_4s_1s_3 + c_1c_2c_4)rs_\phi - dc_4 \\ \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

مطابق شکل ۶، برای همراستا کردن ${}^5\mathbf{LOS}$ با ${}^5\mathbf{v}_T$، باید شرایط زیر محقق شود:

$$\begin{cases} \theta_L = \tan^{-1}(y_L / x_L) = \theta_T \\ \phi_L = \tan^{-1}\left(\dfrac{z_L}{\sqrt{x_L + y_L}}\right) = \phi_T \end{cases} \qquad (۹)$$

این شرایط، دو معادله پایدارسازی تصویر را فراهم می‌کنند. معادله سوم به صورت زیر محاسبه می‌شود.

یکی از مشکلاتی که در ابتدا خود را نشان نمی‌دهد، مساله چرخش تصویر است. این شرایط به صورتی است که وقتی ${}^5\mathbf{LOS}$ در راستای ${}^5\mathbf{v}_T$ قرار می‌گیرد، ممکن است که تصویر حول محور دوربین چرخیده باشد (شکل ۷). برای محاسبه میزان چرخش تصویر، نیاز به دو نقطه از تصویر است زیرا با داشتن یک نقطه نمی‌توان چرخش را محاسبه کرد. مرکز مختصات هدف به‌عنوان نقطه اول درنظر گرفته می‌شود و نقطه دوم به اندازه ε واحد انتقال در امتداد محور z در مختصات هدف (شکل ۷). این نقطه در مختصات مرجع به صورت زیر بیان می‌شود:

$${}^0\mathbf{v} = \begin{bmatrix} r\,c_\beta c_\theta & rc_\beta s_\theta & rs_\beta + \varepsilon & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (۱۰)$$

با تبدیل این بردار به سیستم مختصات پنجم (یعنی مختصات آینه) خواهیم داشت

$${}^5\mathbf{v} = \left(\mathbf{T}_5^0\right)^T \cdot {}^0\mathbf{v} \qquad (۱۱)$$

انعکاس این بردار برروی آینه برابر است با

$${}^5\mathbf{v}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^5\mathbf{v} = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (۱۲)$$

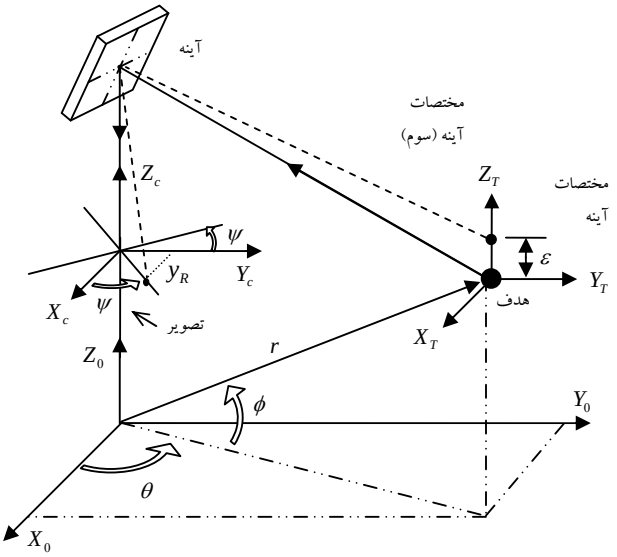
با انتقال ${}^5\mathbf{v}_R$ به مختصات سوم، میزان چرخش تصویر قابل محاسبه است.

$${}^3\mathbf{v}_R = \mathbf{T}_5^3 \cdot {}^5\mathbf{v}_R = \begin{bmatrix} x_R & y_R & z_R & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (۱۳)$$

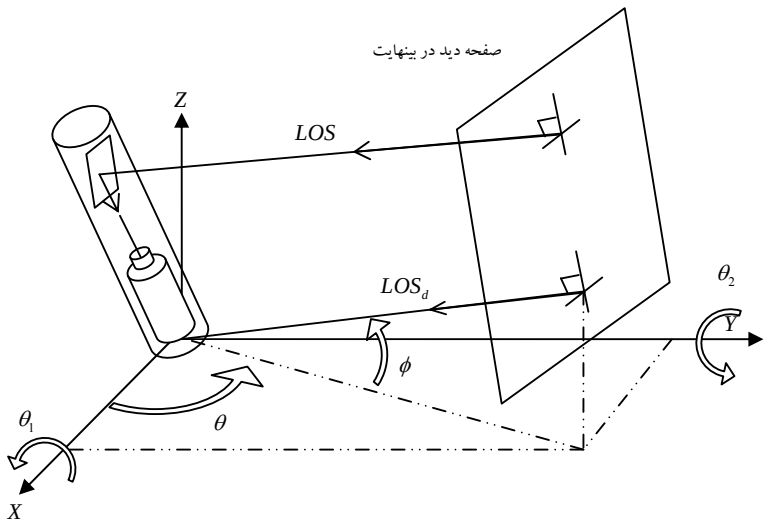
که در آن $\mathbf{T}_5^3 = \mathbf{T}_4^3\mathbf{T}_5^4$. برای حذف چرخش ψ از تصویر، مطابق شکل ۷، y_R باید صفر شود. از این رو، با استفاده از معادله (۹) و درنظر گرفتن $y_R = 0$، معادلات پایدارسازی تصویر را می‌توان به‌صورت دسته معادلات زیر بیان کرد. این معادلات را می‌توان با روش‌های عددی مانند روش نیوتن حل کرد:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]

$$
\begin{cases}
-s_4 w\,(2dc_5s_5s_4+2rc_\varphi c_\theta c_2s_3c_5^2+2rc_5c_\varphi s_\theta s_5s_1c_2s_4-2rc_5s_\varphi s_5c_4c_1s_2c_3+2rc_5s_\varphi s_5c_4s_1s_3-2rs_\varphi c_5^2c_1s_2s_3+2rc_\varphi s_\theta c_5^2s_1s_2s_3 \\
-2rc_\varphi s_\theta c_5^2c_1c_3-2rs_\varphi c_5^2s_1c_3+2rc_5c_\varphi c_\theta s_5c_2c_3c_4+2rc_5c_\varphi s_\theta\, s_5c_4s_1s_2c_3-2rc_5s_\varphi s_5c_1c_2s_4-2r\,c_5c_\varphi c_\theta s_5s_2s_4 \\
+2rc_5c_\varphi s_\theta s_5c_4c_1s_3-rc_\varphi c_\theta c_2s_3+rc_\varphi s_\theta c_1c_3-rc_\varphi s_\theta s_2s_1s_3+r\,s_\varphi s_1c_3+r\,s_\varphi s_2c_1s_3)=0 \\
\\
c_4^2w^2\{[(-c_2s_3s_5-c_5s_2s_4+c_5c_3c_2c_4)rc_\varphi c_\theta+(s_5c_1c_3-s_5s_2s_1s_3+c_2c_5s_4s_1+s_3c_5c_1c_4+s_2c_4c_5s_1c_3)\,r\,c_\varphi s_\theta+(s_5s_1c_3+s_5s_2c_1s_3 \\
-c_2c_5s_4c_1+c_4c_5s_1s_3-s_2c_4c_5c_1c_3)rs_\varphi+dc_5s_4]^2+[(-s_5c_2c_3c_4+s_5s_2s_4-c_2s_3c_5)rc_\varphi c_\theta+(-s_5c_4s_1s_2c_3-s_5c_4c_1s_3-s_5s_1c_2s_4 \\
-c_5s_1s_2s_3+c_5c_1c_3)\,rc_\varphi s_\theta+(s_5c_4c_1s_2c_3-s_5c_4s_1s_3+s_5c_1c_2s_4+c_5c_1s_2s_3+c_5s_1c_3)rs_\varphi-ds_5s_4]^2\}-[(c_2c_3s_4+s_2c_4)rc_\varphi c_\theta \\
+(s_4s_1s_2c_3+s_4c_1s_3-s_1c_2c_4)rc_\varphi s_\theta+(-s_4c_1s_2c_3+s_4s_1s_3+c_1c_2c_4)rs_\varphi-dc_4]^2(c_5^2s_4^2w^2+s_5^2s_4^2w^2)=0 \\
\\
s_5[(-c_2s_3s_5-c_5s_2s_4+c_5c_2c_3c_4)rc_\varphi c_\theta+(-s_5s_2s_1s_3+c_2c_5s_4s_1+c_5c_1s_3c_4+c_5s_1c_3s_2c_4+s_5c_1c_3)rc_\varphi s_\theta+(s_5s_1c_3+s_5s_2c_1s_3 \\
-c_2c_5s_4c_1+c_5s_1s_3c_4-c_5c_1c_3s_2c_4)(rs_\varphi+\varepsilon)+dc_5s_4]+c_5[-(-s_5c_2c_3c_4+s_5s_2s_4-c_2s_3c_5)rc_\varphi c_\theta-(-s_5c_4s_1s_2c_3-s_5c_4c_1s_3 \\
-s_5s_1c_2s_4-c_5s_1s_2s_3+c_5c_1c_3)rc_\varphi s_\theta-(s_5c_4c_1s_2c_3-s_5c_4s_1s_3+s_5c_1c_2s_4+c_5c_1s_2s_3+c_5s_1c_3)(rs_\varphi+\varepsilon)+ds_5s_4]=0
\end{cases}
\qquad (۱۴)
$$



شکل ۷: چرخش تصویر در آینه و طریقه محاسبه آن



شکل ۸: صفحه دید، خط دید مطلوب و واقعی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]

۵- معادلات پایدارساز تصویر بدون فاصله هدف

در این حالت فرض می‌شود که میدان دید (θ)، زاویه دید (ϕ)، و انحراف پریسکوپ (θ_1 و θ_2) مشخص بوده ولی فاصله هدف (r) موجود نیست. درنتیجه، فضای ورودی نسبت به قبل دارای یک متغیر کمتر است. از این رو باید فرضیات بیشتری را در نظر گرفت. برای استخراج معادلات پایدارساز تصویر باید صفحه دیدی را در بینهایت متصور شد (شکل ۸). بردارنرمال این صفحه، خط دید مطلوب است (${}^0\mathbf{LOS}_d$). علاوه بر این، خط دید پریسکوپ علی رغم نوسانات سطح دریا نیز باید بر این صفحه عمود باشد. ماتریس‌های دوران پایه پریسکوپ را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\mathbf{R}_2^1=\begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & 0 & c_2 \end{bmatrix},\ \mathbf{R}_1^0=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & -s_1 \\ 0 & s_1 & c_1 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{R}_4^3=\begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_4 & 0 & c_4 \end{bmatrix},\ \mathbf{R}_3^2=\begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{R}_5^4=\begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

که در آن $\mathbf{R}_{i+1}^i$ $(i=0,\ldots,5)$ ماتریس دوران پایه از مختصات $i+1$ به مختصات i است. در این حالت، تمامی بردارها دارای طول واحد می‌باشند زیرا که تنها زوایای آنها در معادلات ظاهر می‌شود. خط دید مطلوب عبارت است از

$${}^0\mathbf{LOS}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & c_\phi s_\theta & s_\phi \end{bmatrix}^T \qquad (۱۶)$$

محور نوری دوربین، ستون سوم ماتریس $\mathbf{R}_3^0=\mathbf{R}_1^0\mathbf{R}_2^1\mathbf{R}_3^2$ بوده که برابر است با

$${}^0\mathbf{z}_c=\begin{bmatrix} s_2 & -s_1c_2 & c_1c_2 \end{bmatrix}^T \qquad (۱۷)$$

خط دید واقعی را می‌توان با محاسبه انعکاس محور نوری دوربین برروی آینه محاسبه کرد. به‌دلیل این‌که از ماتریس‌های دوران پایه (به جای ماتریس‌های انتقال) استفاده می‌شود، ابتدا نیاز است که محور نوری دوربین را معکوس کرده تا در موقع محاسبه انعکاس برروی آینه از پشت آن استفاده نشود. از این رو، محور نوری دوربین در مختصات آینه برابر است با

$${}^5\left(-\mathbf{z}_c\right)=\left(\mathbf{R}_5^0\right)^T{}^0\left(-\mathbf{z}_c\right)=\begin{bmatrix} s_4c_5 & -s_4s_5 & -c_4 \end{bmatrix}^T \qquad (۱۸)$$

که در آن $\mathbf{R}_5^0$ هر نقطه‌ای (یا برداری) را از مختصات پنجم به مختصات مرجع انتقال می‌دهد و برابر است با $\mathbf{R}_5^0=\mathbf{R}_1^0\mathbf{R}_2^1\mathbf{R}_3^2\mathbf{R}_4^3\mathbf{R}_5^4$. علاوه بر این، ${}^5\left(-\mathbf{z}_c\right)$ دارای x مثبت است اگر

$$\begin{cases} 0^\circ<\theta_4<90^\circ \\ -90^\circ<\theta_5<90^\circ \end{cases} \qquad (۱۹)$$

که در این‌صورت از انعکاس در پشت آینه جلوگیری می‌شود. بردار ${}^5\left(-\mathbf{z}_c\right)$ باید برروی آینه معکوس شود

$${}^5\mathbf{LOS}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.{}^5\left(-\mathbf{z}_c\right)=\begin{bmatrix} s_4c_5 \\ s_4s_5 \\ c_4 \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

تبدیل ${}^5\mathbf{LOS}$ از مختصات پنجم به مرجع به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$${}^0\mathbf{LOS}=\mathbf{R}_5^0\cdot{}^5\mathbf{LOS}=\begin{bmatrix} x_L & y_L & z_L \end{bmatrix}^T$$
$$=\begin{bmatrix} -2c_5s_4c_2s_3s_5-2c_5^2s_2+2c_5^2s_2c_4^2+s_2 \\ +2c_5^2s_4c_2c_3c_4 \\ \\ 2c_5s_4c_3s_5c_1-2c_5s_4s_5s_2s_1s_3-2c_5^2c_2s_1c_4^2 \\ +2c_5^2s_4c_4c_1s_3+2c_5^2s_4s_2c_4s_1c_3-s_1c_2+2c_5^2c_2s_1 \\ \\ 2c_5s_4c_3s_5s_1+2c_5s_4s_5s_2c_1s_3+2c_5^2c_2c_1c_4^2 \\ +2c_5^2s_4c_4s_1s_3-2c_5^2s_4s_2c_4c_1c_3+c_1c_2-2c_5^2c_2c_1 \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

همانند معادله (۹)، دو معادله اول را می‌توان به‌صورت زیر استخراج کرد:

$$\begin{cases} \theta_L=\tan^{-1}\left(\dfrac{y_L}{x_L}\right)=\theta \\ \phi_L=\tan^{-1}\left(\dfrac{z_L}{\sqrt{x_L+y_L}}\right)=\phi \end{cases} \qquad (۲۲)$$

برای محاسبه چرخش تصویر، از آن‌جایی که فاصله تا هدف مشخص نیست، برداری در نظر گرفته‌می‌شود که در صفحه xy از ${}^0\mathbf{LOS}_d$ به میزان ε انحراف دارد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$${}^0\mathbf{v}=\begin{bmatrix} c_\beta c_\theta & c_\beta s_\theta & s_\beta \end{bmatrix}^T \qquad (۲۳)$$

که در آن $s_\beta=\sin\left(\phi+\varepsilon\right)$، $c_\beta=\cos\left(\phi+\varepsilon\right)$، و c_θ و s_θ پیش‌تر تعریف شده‌اند. با تبدیل این بردار به مختصات پنجم

$${}^5\mathbf{v}=\left(\mathbf{R}_5^0\right)^T\cdot{}^0\mathbf{v} \qquad (۲۴)$$

و انعکاس آن روی آینه خواهیم داشت:

$${}^5\mathbf{v}_b=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.{}^5\mathbf{v} \qquad (۲۵)$$

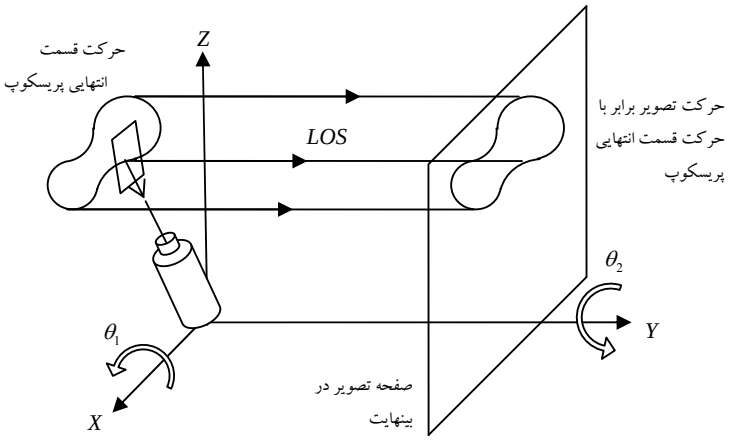
در انتها، ${}^5\mathbf{v}_b$ باید به مختصات سوم انتقال‌یابد تا میزان چرخش تصویر محاسبه شود

$${}^3\mathbf{v}_b=\left(\mathbf{R}_4^3\mathbf{R}_5^4\right){}^5\mathbf{v}_b=\begin{bmatrix} x_{bc} & y_{bc} & z_{bc} \end{bmatrix}^T \qquad (۲۶)$$

همانند توجیهی که در بخش قبل بیان شد، به‌منظور حذف چرخش تصویر، y_{bc} باید برابر صفر باشد. از این رو معادلات پایدارساز تصویر به صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]

$$\begin{cases}
-2s_\theta c_5^2 s_2 + s_\theta s_2 - 2c_\theta c_5^2 c_2 s_1 + 2c_\theta c_5^2 c_2 s_1 c_4^2 + c_\theta c_2 s_1 + 2s_\theta s_4 c_5^2 c_2 c_2 c_4 - 2s_\theta s_4 c_5 c_2 s_3 s_5 + 2s_\theta c_5^2 s_2 c_4^2 - 2c_\theta s_4 c_5^2 s_2 c_4 s_1 c_3 \\
-2c_\theta s_4 c_5^2 c_4 c_1 s_3 - 2c_\theta s_4 c_5 s_5 c_1 c_3 + 2c_\theta s_4 c_5 s_5 s_2 s_1 s_3 = 0 \\
\\
\{[(-c_1 s_2 c_3 c_4 + s_1 s_3 c_4 - c_1 c_2 s_4) c_5 + (c_1 s_2 s_3 + s_1 c_3) s_5] c_5 s_4 + [-(-c_1 s_2 c_3 c_4 + s_1 s_3 c_4 - c_1 c_2 s_4) s_5 + (c_1 s_2 s_3 + s_1 c_3) c_5] s_5 s_4 \\
+[(-c_1 s_2 c_3 + s_1 s_3) s_4 + c_1 c_2 c_4] c_4\}^2 c_\phi^2 - s_\phi^2 \{[(c_2 c_3 c_4 c_5 - s_2 s_4 c_5 - c_2 s_3 s_5) s_4 c_5 + (-c_2 c_3 c_4 s_5 - s_2 s_4 s_5 - c_2 s_3 c_5) s_4 s_5 \\
+(c_2 c_3 s_4 + s_2 c_4) c_4]^2 + [(s_1 s_2 c_3^2 c_5 + c_1 s_3 c_3 c_5 + s_1 c_2 s_4 c_5 - s_1 s_2 s_3 s_5 + c_1 c_3 s_5) s_4 c_5 + (-s_1 s_2 c_3 c_4 s_5 + c_1 s_3 c_4 s_5 + s_1 c_2 s_4 s_5 \\
-s_1 s_2 s_3 c_5 + c_1 c_3 c_5) s_4 s_5 + (s_1 s_2 c_3 s_4 + c_1 s_3 s_4 - s_1 c_2 c_4) c_4]^2\} = 0 \\
\\
2s_5 c_\beta s_\theta s_2 c_4 c_5 s_1 c_3 - 2s_5 s_\beta c_2 c_5 s_4 c_1 + 2s_5 s_\beta c_4 c_5 s_1 s_3 - 2s_5 s_\beta s_2 c_4 c_5 c_1 c_3 - 2s_\beta c_5^2 s_1 c_3 + s_\beta s_2 c_1 s_3 - 2s_\beta c_5^2 s_2 c_1 s_3 \\
-2s_5 c_\beta c_\theta c_5 s_2 s_4 + 2s_5 c_\beta c_\theta c_5 c_3 c_2 c_4 + 2s_5 c_\beta s_\theta c_2 c_5 s_4 s_1 + 2s_5 c_\beta s_\theta c_4 c_5 c_1 s_3 + s_\beta s_1 c_3 - c_\beta s_\theta s_2 s_1 s_3 + 2c_\beta s_\theta c_5^2 s_2 s_1 s_3 \\
-c_\beta c_\theta c_2 s_3 + 2c_\beta c_\theta c_2 s_3 c_5^2 + c_\beta s_\theta c_1 c_3 - 2c_\beta s_\theta c_5^2 c_1 c_3 = 0
\end{cases} \qquad (۲۷)$$



شکل ۹: تشریح نحوه حرکت تصویر

نکته مهمی که در این روش وجود دارد آن است که خط دید بر صفحه تصویر دربینهایت عمود است ولی تصویر به میزان حرکت پریسکوپ جابه‌جا خواهدشد (شکل ۹). این حرکت تصویر بسیار اندک است لیکن به‌هنگام بزرگ‌نمایی تصویر ممکن است مساله‌ساز باشد.

۶- نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

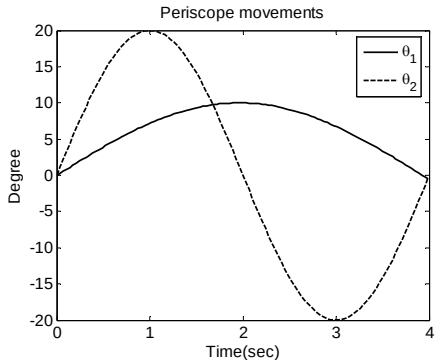
۶-۱- فاصله تا هدف معلوم است

برطبق معادلات (۲) و (۶)، خط دید واقعی در مختصات مرجع به صورت زیر بیان می‌شود:

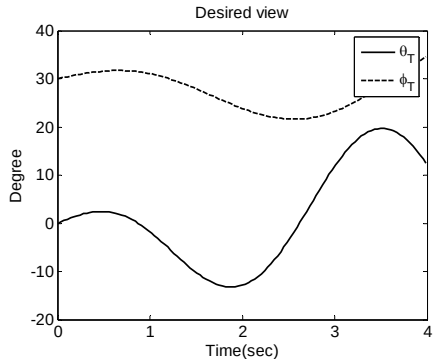
$$^0\mathbf{LOS} = \mathbf{T}_5^0 \cdot {}^5\mathbf{LOS} \qquad (۲۸)$$

از این بردار برای اعتباردادن به‌نتایج شبیه‌سازی استفاده می‌شود. از دو شکل موج سینوسی که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برای شبیه‌سازی زوایای انحراف سکوی پریسکوپ (θ_1 و θ_2) استفاده شده است. این موج‌های سینوسی به ترتیب دارای فرکانس‌های ۰٫۱۲ و ۰٫۲۵ هرتز می‌باشند (شکل ۱۰). این اغتشاشات می‌توانند باعث حرکات ناخواسته در تصویر شوند. علاوه بر این، فاصله هدف r از یک تا ۲۰۰ متر تغییر می‌کند. به‌منظور پایدارسازی تصویر، سه معادله غیرخطی بیان شده در (۱۴) به‌صورت عددی حل می‌شوند. در این مقاله برای حل این معادلات از روش نیوتن استفاده شده است [۱۵ و ۱۶]. از آن‌جایی که این مجموعه معادلات باید به‌صورت همزمان در هر گام از شبیه‌سازی به روش نیوتن حل شوند نیاز به شرایط اولیه است. مقادیر عددی $[\theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5] = [0 \quad 45^\circ \quad 0]$ به‌عنوان حدس اولیه برای حل بازگشتی معادلات در نظر گرفته شده است. الگوریتم بعد از دو تا پنج مرحله همگرا می‌شود. هر پنج مرحله نیاز به زمان 1ms در نرم افزار MATLAB و زمان کمتری در C++ دارد (رایانه‌ای با پردازنده Pentium 4). ارتفاع پریسکوپ یک متر و $r = 200$ m می‌باشد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به‌ترتیب زوایای θ_T و ϕ_T و مسیر حرکت هدف را نشان می‌دهند. شکل ۱۳ نتایج حل معادلات (۱۴) را نشان می‌دهد که

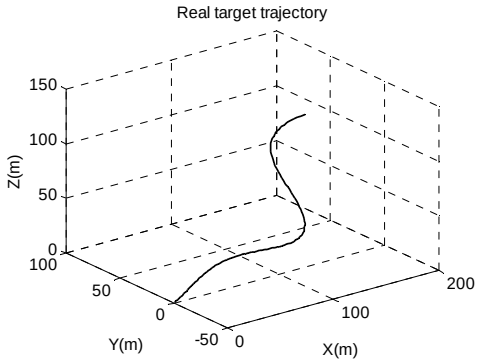
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]



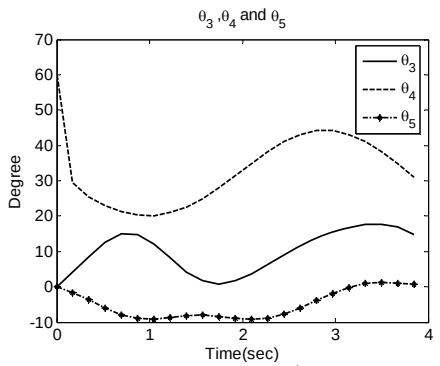
شکل ۱۰: اغتشاشات ورودی θ_1 و θ_2



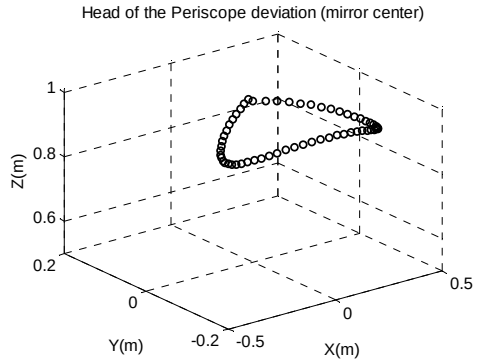
شکل ۱۱: موقعیت هدف θ_T و ϕ_T



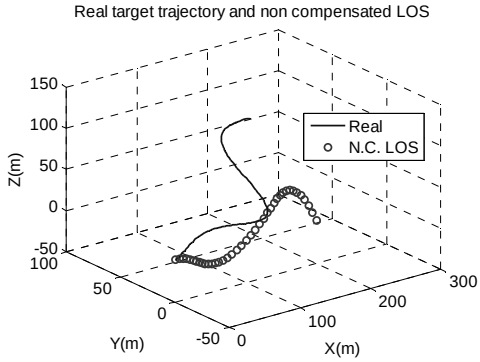
شکل ۱۲: مسیر حرکت هدف



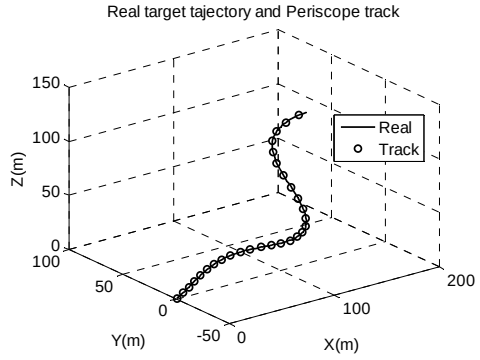
شکل ۱۳: سه سیگنال مرجع محاسبه شده برای سروموتورها



شکل ۱۴: حرکت قسمت انتهایی پریسکوپ در مختصات دکارتی



شکل ۱۵: بدون پایدارسازی



شکل ۱۶: با پایدارسازی

۶-۲- فاصله با هدف معلوم نیست

در این حالت، به‌منظور تعیین خط دید مطلوب، فرض شده است که هدف در موقعیت $\theta = 30^\circ$ و $\phi = 0$ قرار دارد. انحرافات سکو نیز به‌صورت زیر درنظرگرفته شده است (شکل ۱۷):

$$\theta_1 = 20e^{-0.1t}\sin(2.8t)\cos(1.8t)$$
$$\theta_2 = 20e^{-0.1t}\sin(2.8t+\frac{\pi}{3})\cos(0.8t) \quad (۲۹)$$

شکل ۱۸ نتایج حل معادلات (۲۷) را نشان‌می‌دهد که سه سیگنال مرجع برای ردیابی توسط سروموتورهاست. شکل ۱۹ و ۲۰ میزان ^{0}**LOS** (θ_L و ϕ_L) را به ترتیب در دو حالت جبران‌شده و جبران‌نشده نشان‌می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهند، روش ارائه شده از دقت خوبی برخوردار است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]

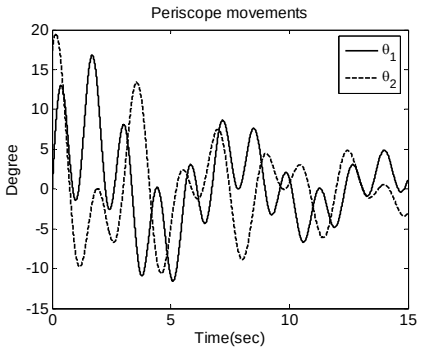
برای نشان‌دادن کارآیی روش‌های بیان شده در عمل، الگوریتم‌های آن به صورت بی‌درنگ برروی پریسکوپ آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۲۱ پیاده‌سازی شده‌اند. زمان نمونه برداری در سیستم آزمایشگاهی برابر 1.5ms است.

برای کنترل سروموتورها از کنترل‌کننده مرسوم PID استفاده شده است. شکل ۲۲ بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترلی را نشان می‌دهد که در آن θ_{ir} ($i = 3,4,5$) نتایج حل معادلات پایدارساز تصویر، e خطای ردیابی، و u سیگنال کنترلی است. برای هر کدام از درجات آزادی (θ_3، θ_4 و θ_5) یک کنترل‌کننده PID برای بهترین ردیابی طراحی و تنظیم شده‌اند. مشخصات هر کدام از سروموتورها و ضرایب PIDها به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ بیان شده‌اند که در آن R_a و L_a به‌ترتیب مقاومت و اندوکتانس آرمیچر، k_b و k_a ثابت گشتاور و ثابت emf موتور می‌باشند. نتایج پیاده‌سازی نشان‌می‌دهد که روش پایدارسازی ارائه‌شده در این مقاله به‌صورت بی‌درنگ قابل اعمال است.

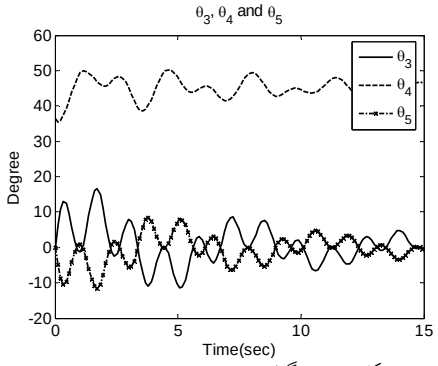
سه سیگنال مرجع برای ردیابی توسط سروموتورهاست. شکل ۱۴ حرکت قسمت انتهایی پریسکوپ در مختصات دکارتی را نشان می‌دهد که ناشی از انحرافات سکو است. شکل ۱۵ و ۱۶ به‌ترتیب مسیر حرکت واقعی هدف و $\mathbf{LOS}^0$ (مشخص شده در (۲۸)) را برای دو حالت بدون پایدارسازی و با پایدارسازی نشان می‌دهد. همانطور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، روش ارائه شده تصویر را با دقت خوبی پایدار می‌کند. توجه شود که بدون پایدارسازی ممکن است در مواقعی که هدف نزدیک به پریسکوپ است، از میدان دید آن خارج شود.

۷- نتیجه‌گیری

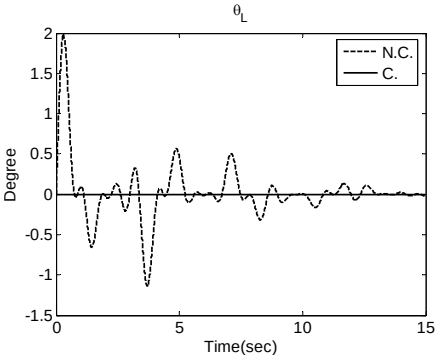
در این مقاله، روشی جدید برای پایدارسازی خط دید پریسکوپ زیردریایی در مقابله با امواج دریا ارائه شد. معادلات پایدارساز تصویر در دو حالت مختلف: ۱- فاصله تا هدف معلوم و ۲- فاصله تا هدف نامعلوم استخراج شدند. این مجموعه معادلات توسط روش نیوتن به صورت عددی و بی‌درنگ حل شد. نتایج شبیه‌سازی دقت بسیار خوب این معادلات را نشان دادند. علاوه بر این، به‌منظور نشان‌دادن کارآیی روش پیشنهادی، الگوریتم ارایه‌شده برروی سیستم آزمایشگاهی (با نرخ نمونه برداری 1.5ms) به صورت بی‌درنگ پیاده‌سازی شد



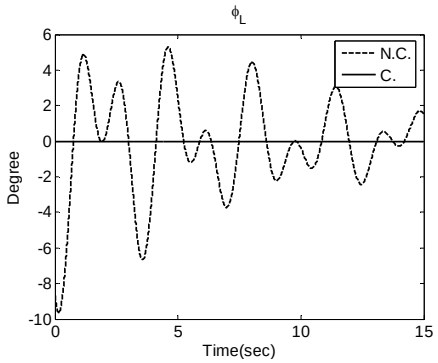
شکل ۱۷: اغتشاشات ورودی θ_1 و θ_2



شکل ۱۸: سه سیگنال مرجع محاسبه شده برای سروموتورها



شکل ۱۹: θ_L در حالت جبران شده و جبران نشده



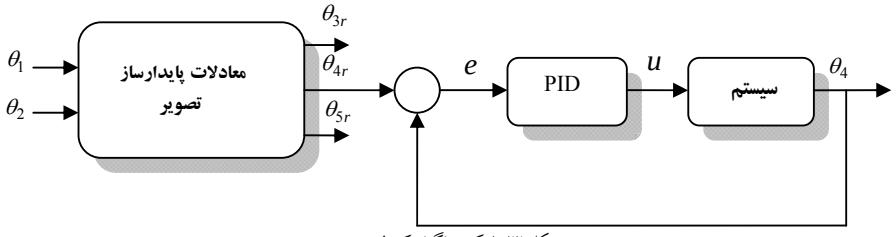
شکل ۲۰: ϕ_L در حالت جبران شده و جبران نشده


شکل ۲۱: پریسکوپ آزمایشگاهی نصب شده برروی سکوی شبیه ساز

جدول ۱: ضرایب کنترل کننده PID برای سه سروموتور

	K_p	K_D	K_I
θ_3	۵۰	۲٫۲	۰
θ_4	۷۰	۱٫۵	۰٫۷
θ_5	۱۱۰	۰	۰

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]



شکل ۲۲: بلوک دیاگرام کنترل

جدول ۲: مشخصات سروموتورها در پریسکوپ آزمایشگاهی

	$R_a\ (\Omega)$	$L_a\ (\text{mH})$	$K_b\ (\text{mV/rpm})$	$K_a\ (\text{mNm/A})$
θ_3	۱۵٫۷	۱۰٫۳	۳۳٫۳	۳۱۶٫۵
θ_4	۳۶٫۳	۰٫۸	۳٫۰۴	۲۹٫۱
θ_5	۵۲٫۹	۱٫۱	۲٫۲۸	۲۱٫۸

مراجع

[1] Liang Y.M., Tyan H.R., Liao H.Y.M. and Chen S.W., 2003, "Stabilizing image sequence taken by the camcorder mounted on a moving vehicle," *Proc. 6th IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation Sys.,* Shanghai, China, pp 90-95.

[2] Bar-Shalom Y., 1999, *Multitarget-Multisensor Tracking: Application and Advances,* Artech House Pub. Co., Boston, Massachusetts.

[3] Erturk S., 2002, "Real-time digital image stabilization using Kalman filters," *Real-Time Imaging*, **8**, 317-328.

[4] Yau W.G., Fu L.C. and Liu D., 2001, "Design and implementation of visual servoing system for realistic air target tracking," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation,* **1,** 229-234.

[5] Yu H.-C. and Liu T.S., 2008, "Sliding mode control using virtual eigenvalue method for compact optical image stabilization actuators," *IEEE Transactions on Magnetics*, **44**(11), 4074-4077.

[6] Demin A. V. and Utenkov B. I., 2001, "Enhancing the image quality in optical systems with line-of-sight stabilization," *Journal of Optical Technology*, **68**(8), 556-564.

[7] Siew B.C., Chen B.M. and Lee T.H., 1998, "Design and implementation of a robust controller for a free Gyro-stabilized mirror system," *Proc. American Control Conf.,* Phialadelphia, pp 2231-2235.

[8] Zhang W.-P., Wang B., Yang D., and Wang L. Y., 2007, "Application of image stabilization technology for carrier-based electro-optical tracking equipment", *OME Information*, DOI: CNKI:SUN:GJDX.0.2007-11-005.

[9] Lidwell M.O., 1995, "Steerable zoom periscope," *Proc. SPIE Zoom Lenses,* **2539,** 25-36.

[10] Kuerbitz G., Fritze J., Hoefft J.R. and Ruf B., 2001, "ATTICA family of thermal cameras in submarine applications", *Proc. SPIE Infrared Technology and Applications,* **4369,** 185-193.

[11] Liceaga-Castro E. and van der Molen G.M., 1995, "Submarine H^{∞} depth control under wave disturbances", *IEEE Trans. on Control System Technology*, **3**(3), 338–346.

[12] Liao J.-F. and Zhang K.-S., 2004, "Characteristics analysis of the image tilt in LOS stabilization action of periscope instrument on moving platform", *Optics and Optoelectronic Technology,* DOI: CNKI:ISSN:1672-3392.0.2004-02-003.

[13] Craig J.J., 1989, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control,* Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

[14] Lewis F.L., Abdallah C.T. and Dawson D.N., 1993, *Control of Robot Manipulators,* MacMillan Pub. Co., New York.

[15] Mathews J.H., 1992, *Numerical Methods for Mathematics,* 2nd Edition, Prentice-Hall, New Jercy.

[16] Johnson L.W. and Riess R.D., 1982, *Numerical Analysis,* 2nd Edition, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.1.9]