دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

شناسایی مدل دینامیکی یک وسیله‌ی زیرآبی خودگردان به کمک فیلتر کالمن توسعه یافته

استاد راهنما

دکتر سید محمد بزرگ

استاد مشاور

دکتر سعید ابراهیمی

پژوهش و نگارش

مهدی زارع ارنانی

اسفند ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

شناسایی مدل دینامیکی یک وسیله زیرآبی خودگردان به کمک فیلتر کالمن توسعه‌یافته

استاد راهنما

دکتر سید محمد بزرگ

استاد مشاور

دکتر سعید ابراهیمی

پژوهش و نگارش

مهدی زارع ارنانی

اسفند ۱۳۸۸

تقدیم به:

حامی همیشگی‌ام، پدرم

امید زندگی‌ام، مادرم

خواهر و برادرانم

تقدیر و تشکر

با سپاس بی کران به درگاه خالق متعال، کمال تشکر و قدردانی خود را از استاد راهنمای محترم، جناب آقای دکتر سید محمد بزرگ که با راهنمایی های عالمانه و صبورانه خود در طول اجرای پروژه مرا یاری نمودند، ابراز می دارم. همچنین از استاد مشاورم جناب آقای دکتر سعید ابراهیمی که در تمام مراحل تهیه این پایان نامه از راهنمایی های ایشان بهره بردم، کمال سپاسگزاری را دارم.

نیز مراتب سپاس و تقدیر خود را به دوستان ارجمندم آقایان حسین غلامی، اکبر رضایی، خداکرم عظیمی، حمید بیگدلی و خلیل عباسی که در طول این دوره بنده را در تمامی لحظات همراهی کردند، ابراز می دارم.

همچنین از مساعدت های دوستان عزیزم آقایان مهندس امیر جسمانیان، مهندس احسان شایینفر و دکتر کی هون کیم در طول اجرای پروژه تقدیر و تشکر می شود.

چکیده

در فرآیند طراحی یک وسیله‌ی زیرآبی خودگردان[1] (AUV)، معمولاً لازم است فرمان‌پذیری و قابلیت کنترل آن بر اساس یک مدل ریاضی، شبیه‌سازی شود. از آنجا که نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی نقش تعیین کننده‌ای در دینامیک این وسایل دارند، مقادیر آنها باید با دقت مناسبی برآورد شود. برآورد دقیق ضرایب هیدرودینامیک وسیله در واقع به معنی یافتن مدل دینامیکی دقیقی از سیستم است. این ضرایب تخمین زده شده نه تنها برای آنالیز حرکت یک AUV، بلکه همچنین در طراحی کنترل کننده برای سیستم هدایت آن نیز به کار می‌روند.

در این مطالعه، ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیرآبی با به کارگیری داده‌های حسگرهای سرعت و موقعیت، با استفاده از مشاهده‌گر غیرخطی فیلتر کالمن توسعه یافته[2] (EKF) شناسایی شده‌اند. یک الگوریتم برای تخمین ضرایب یک وسیله زیرآبی نمونه استفاده شده است. مدلی غیرخطی با حرکت شش درجه آزادی که دارای نویز در اندازه‌گیری‌های حسگرها است به کار گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن شکلی مناسب برای ماتریس‌های کواریانس نویز مدل و نویز اندازه‌گیری، دقت و سرعت همگرایی نتایج به مقادیر واقعی بهبود یافته‌اند. ضرایب هیدرودینامیکی به عنوان متغیرهای حالت مکمل در نظر گرفته شده‌اند و مانند دیگر متغیرهای حالت مثل سرعت و جابجایی، در طول مسیر حرکت به صورتی بهینه تخمین زده شده‌اند. به منظور بررسی کارآیی روش پیشنهادی، ضرایب هیدرودینامیکی شناسایی شده توسط فیلتر کالمن توسعه یافته، برای شبیه‌سازی حرکت زیرآبی تحت ورودی‌های مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقایسه بین خروجی‌های مدل شناسایی شده و خروجی‌های مدل واقعی، تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که روش شناسایی ارائه شده با مرتفع نمودن محدودیت‌های روش‌های پیشین، می‌تواند به عنوان ابزاری کم هزینه برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی بر اساس آزمایشات عملی، به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: وسیله زیرآبی خودگردان، ضرایب هیدرودینامیکی، فیلتر کالمن توسعه یافته، شناسایی سیستم، تخمین پارامترها

[1] Autonomous Underwater Vehicle
[2] Extended Kalman Filter

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- معرفی وسایل زیرآبی خودگردان ۱

۱-۲- سابقه تحقیق ۲

فصل دوم: معادلات حرکت و شبیه‌سازی

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- معرفی معادلات حرکت ۸

۲-۲-۱- سیستم مختصات ۹

۲-۲-۲- موقعیت زاویه‌ای ۱۱

۲-۲-۳- سینماتیک ۱۱

۲-۲-۴- معادلات غیرخطی شش درجه آزادی حرکت برای یک وسیله‌ی دریایی ۱۲

۲-۲-۵- ضرایب هیدرودینامیکی ۱۷

۲-۲-۶- نیرو و گشتاورهای خارجی ۱۹

۲-۳- روش‌های تعیین ضرایب هیدرودینامیکی ۲۲

۲-۳-۱- روش‌های عملی تعیین ضرایب با استفاده از آزمایشات عددی ۲۶

۲-۴- گسسته‌سازی ۳۳

۲-۴-۱- گسسته‌سازی مدل فضای حالت خطی ۳۳

۲-۴-۲- گسسته‌سازی مدل فضای حالت غیرخطی ۳۵

۲-۵- جمع‌بندی ۳۶

فصل سوم: شناسایی سیستم

۳-۱- مقدمه ۳۷

۳-۱-۱- طراحی آزمایش ۳۸

۳-۱-۲- تحلیل و پیش‌پردازش داده‌ها ۳۸

۳-۱-۳- انتخاب یک مدل برای سیستم ۳۸

۳-۲- انتخاب ساختار مدل ۴۰

۳-۳- شناسایی مدل‌های غیرخطی ۴۲

۳-۳-۱- مدل غیرخطی جعبه خاکستری ۴۲

۳-۳-۲- مدل غیرخطی ARX ۴۳

۳-۳-۳- مدل ARMA ۴۵

۳-۳-۴- مدل همرشتین - وینر ۴۶

۳-۳-۵- مدل فضای حالت غیرخطی ۴۷

۳-۴- شناسایی وسایل دریایی ۴۸

۳-۴-۱- تخمین پیشین از پارامترهای مدل ۴۹

۳-۴-۲- تخمین از جرم اضافه‌شده هیدرودینامیکی ۵۰

۳-۴-۳- شناسایی ضرایب میرایی ۵۰

۳-۵- شناسایی به روش فیلتر کردن ۵۹

۳-۵-۱- فیلتر کالمن ۵۹

۳-۶- فیلترسازی غیرخطی ۶۰

۳-۶-۱- فیلتر کالمن توسعه یافته ۶۰

۳-۶-۲- خطی سازی ۶۲

۳-۶-۳- روند اجرای الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته ۶۲

۳-۷- شناسایی سیستم توسط فیلتر کالمن توسعه یافته..... ۶۶

۳-۸- جمع‌بندی..... ۶۹

فصل چهارم: الگوریتم شناسایی

۴-۱- مقدمه ۷۰

۴-۲- ورودی سیستم ۷۲

۴-۳- اجرای الگوریتم و ارائه نتایج ۷۳

۴-۴- جمع‌بندی..... ۹۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری وپیشنهادات

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری..... ۹۵

۵-۲- پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ۹۶

پیوست ۹۷

مراجع ۱۰۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱- معرفی وسایل زیرآبی خودگردان

منشأ پیدایش AUV را احتمالاً باید به وسیله اژدرمانند وایتهد[1] که در سال ۱۸۶۶ در اتریش توسط رابرت وایتهد[2] طراحی شد، مربوط دانست. این اژدر ماهی‌شکل می‌توانست فاصله‌ای در حدود ۷۰۰ m را با سرعت حداکثر ۳ m/s طی نماید [۱].

امروزه نیاز به داده‌های اقیانوس‌شناسی، جستجوهای نظامی مثل شناسایی مین‌های مخفی، تحقیقات در زمینه استخراج نفت و گاز، شناسایی معادن، گیاهان و جانداران دریایی باعث توسعه روزافزون وسایل حرکتی زیردریایی شده است.

یک AUV وسیله‌ای است رباتیکی که توسط سیستم پیشرانش[3] در محیط آبی حرکت می‌کند، به وسیله یک سیستم کامپیوتری سوار بر وسیله[4] کنترل و هدایت می‌شود و می‌تواند در سه بعد پیمایش[5] کند. این سطح از کنترل، به وسیله اجازه می‌دهد تا در هر مکان و هر زمان که نیاز باشد یک مسیر برنامه‌ریزی شده را تحت شرایط محیطی مختلف به طور دقیق طی نماید.

---

[1] Whitehead
[2] Robert Whitehead
[3] Propulsion
4 Onboard
5 Manoeuvre

حسگرهای[1] به کار رفته در یک AUV، در حال حرکت در اقیانوس به نمونه‌برداری از محیط برای مقاصد گوناگون علمی، تحقیقاتی، نظامی، کشف معادن و غیره می‌پردازند.

یک سیستم AUV کاملاً اتوماتیک، برای کنترل و هدایت در طول مأموریت به هیچ کاربری نیاز ندارد. در بعضی انواع AUV، از قابلیت کنترل توسط امواج صوتی، فرکانس‌های رادیویی و سیستم‌های ارتباطی توسط ماهواره‌ها استفاده می‌شود تا بتوان یک AUV را در طی مأموریت آن هدایت و مشاهده کرده و از برخورد با سایر وسایل دریایی، کشتی‌ها و موانع حفظ کرد.

دوره زمانی عملکرد AUV ها از چند دقیقه تا مأموریت‌های ۵۰ ساعته متغیر است. سرعت بیشتر وسیله‌های زیرآبی می‌تواند بین $0/5\ m/s$ تا $3\ m/s$ تغییر کند [۱]. زیرآبی‌هایی که امروزه طراحی می‌شوند می‌توانند سرعت‌های بالاتری را نیز فراهم کنند. نیروی لازم برای حرکت وسیله معمولاً توسط سیستم پیشرانش ایجاد می‌شود. حرکت در جهات مختلف، با کنترل صفحات و بالک-هایی که به همین منظور روی سیستم نصب می‌شوند، صورت می‌گیرد.

۱-۲- سابقه تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای روی توسعه وسایل زیرآبی خودگردان صورت گرفته است و روش‌های کنترل پیشرفته برای بکارگیری در AUV با هدف بهبود قابلیت ردیابی موقعیت و مسیر مطلوب توسعه داده شده‌اند. در [۲] سرعت یک وسیله زیرآبی با بکار بردن یک مشاهده‌گر به دست آمده است و از آن به منظور کنترل مسیر وسیله استفاده شده است. در [۳] فاسن و همکارانش یک کنترل کننده سرعت برای شافت پیشران زیرآبی، با استفاده از تئوری کنترل غیرخطی و پسخور از سرعت جریان محوری که در طی روش تخمین زده می‌شود، طراحی کرده‌اند. در [۴]، از یک فیلتر کالمن توسعه یافته به عنوان تخمین‌گر پارامتر به کمک روش جایگزینی قطب[2] برای طراحی کنترل کننده یک زیرآبی استفاده شده است. به علت مقاوم بودن نسبت به نامعینی مدل حرکتی AUV در شرایط اقیانوسی، یعنی انحراف از شرایط عملکرد و وجود اغتشاش، یک

[1] Sensor
[2] Pole Placement

روش کنترل مقاوم که مقاوم بودن در برابر نامعینی پارامترهای خارجی را تضمین کند توسط مرجع [۵] طراحی شده است. در [۶] یک کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی برای AUV بر اساس یک مدل خطی و با محدودیت در اغتشاشات دینامیکی غیرخطی طراحی شده است. مرجع [۷] یک مدل شش درجه آزادی برای یک وسیله‌ی زیردریایی بیان کرده است و سپس یک سیستم خلبان خودکار[1] مود لغزشی[2] برای حرکت در مودهای فرمان و عمق و کنترل سرعت به صورت همزمان طراحی شده است. یک کنترل کننده مود لغزشی زمان گسسته برای یک AUV در حضور نامعینی پارامتر و با گام‌های نمونه‌برداری طولانی در [۸] طراحی شده است.

از طرفی، برای طراحی یک AUV باید قابلیت مانور و کنترل پذیری آن بر اساس یک مدل ریاضی از قبل آزمایش شود. مدل ریاضی شامل چند معادله دیفرانسیل حرکت حاکم بر سیستم است که در آن نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی می‌توانند برحسب ضرایب هیدرودینامیکی بیان شوند. بنابراین دانستن مقادیر دقیق این ضرایب که در واقع به معنی یافتن مدل دینامیکی دقیق وسیله است، مسأله‌ای مهم در میان مطالعات مربوط به AUV است. ضرایب هیدرودینامیکی را می-توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد: ضرایب میرایی خطی، ضرایب نیروی اینرسی خطی و ضرایب میرایی غیرخطی. در [۹]، تأثیر ضرایب هیدرودینامیکی مختلف بر مانورپذیری اجسام غوطه-ور بررسی شده و اثبات شده است که ضرایب میرایی خطی بیشترین تأثیر را در قابلیت مانورپذیری AUVدارند.

این ضرایب معمولاً از طریق آزمایش، آنالیز عددی، دینامیک سیالات محاسباتی[3] و یا فرمول-های تجربی مشخص می‌شوند. برای اکثر ضرایب هیدرودینامیکی، دقت روابط تجربی از روش‌های دیگر کمتر است. زیرا این روابط معمولاً برای اشکال هندسی معروف بیان شده‌اند و دور شدن از شکل هندسی زیرآبی، باعث کاهش دقت نتایج خواهد شد. از طرفی روش CFD با وجود قابلیت‌های زیادی که دارد نمی‌تواند اثرات تمامی فاکتورهای مؤثر بر سیستم مثل زبری سطح را در نظر بگیرد. اگر چه تست مکانیزم حرکت صفحه‌ای[4] در میان آزمایشات عملی رایج‌ترین آزمایش است [۱۰]، اما

[1] Autopilot
[2] Sliding Mode
[3] Computational Fluid Dynamics - CFD
[4] Planar Motion Mechanism

نتایج آن به علت مشکلات عملی آزمایش و عدم تطابق کامل شرایط آزمایش با شرایط واقعی، دارای دقت کافی نیست. همچنین علی‌رغم صرف زمان و هزینه بالا، در هر دور آزمایش تنها یک یا دو پارامتر از سیستم تعیین می‌شوند. این مسایل معرفی روش‌های جایگزینی را می‌طلبد که این نواقص را رفع کند.

استفاده از روش‌های شناسایی سیستم[1] به علت قابلیت استفاده از نتایج آزمایشات، در زمان بسیار محدود و با صرف هزینه‌های بسیار کمتری در مقایسه با سایر روش‌های تجربی و نیز دستیابی به نتایج نسبتاً دقیق، می‌تواند به عنوان روشی کارا در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بکار گرفته شود [۱۱]. شناسایی سیستم برای وسایل دریایی، به معنی تخمین تعدادی از پارامترها یا ضرایب هیدرودینامیکی است. این ضرایب دینامیک وسیله را مشخص می‌کنند [۱۲]. چنین اندازه‌گیری-هایی در طول آزمایشات تمام مقیاس با حسگرهایی که بر روی سیستم نصب می‌شوند فراهم گردیده و سپس توسط یک روش تخمین پارامتر پردازش و تحلیل می‌شوند.

در طول سالیان اخیر مطالعات بسیاری با کاربرد شناسایی سیستم برای تعیین دینامیک وسایل زیرآبی و یا کشتی‌ها، با در نظر گرفتن مود تفکیکی حرکت در جهتی خاص صورت گرفته است. در مراجع [۱۳و۱۴] به بررسی و مقایسه روش‌های شناسایی سیستم و تعیین تجربی رفتار وسایل دریایی برای یک مدل خاص زیرآبی پرداخته شده است. مرجع [۱۵] به محاسبه برخی از ضرایب هیدرودینامیکی از طریق روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته است. روش‌های تحلیلی و نیمه تجربی برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی یک وسیله‌ی زیرآبی خودگردان، در [۱۶] استفاده شده‌اند. برای ارزیابی روش مذکور نتایج حاصله با نتایج روش دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده‌اند. روش تخمین پیش از مدل‌سازی[2]، برای تخمین پارامترها در مدل هیدرودینامیکی توسط [۱۷] به کار برده شده است. در این روش نیروهای هیدرودینامیکی ابتدا توسط فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده شده و سپس ضرایب هیدرودینامیکی توسط تحلیل رگرسیون شناسایی می‌شوند. مرجع [۱۸] با استفاده از روش مدل‌سازی تطبیقی فازی- عصبی[3] به شناسایی یک مدل

[1] System Identification
[2] Estimation Before Modeling
[3] Neurofuzzy modeling

غیرخطی زیرآبی پرداخته است. محدودیت این روش این است که به طیف گسترده‌ای از داده‌های ورودی خروجی نیاز دارد بنابراین عدم امکان اندازه‌گیری بسیاری از متغیرها، استفاده از این روش را دشوار می‌سازد.

استفاده از فیلتر کالمن روشی است که در چند دهه گذشته به طور گسترده‌ای برای تخمین پارامترها و متغیرهای حالت در سیستم‌های دینامیکی به کار می‌رود. مشاهده‌گر کالمن با فرض یک مدل خطی از سیستم، به تخمین متغیرهای حالت می‌پردازد. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در استفاده از فیلتر کالمن در سیستم‌های زیرآبی صورت گرفته است. به طور مثال، [۱۹] با استفاده از مشاهده‌گر کالمن، به شناسایی مدل خطی زمان گسسته یک وسیله زیرآبی خودگردان پرداخته است. از طرفی فیلتر کالمن قادر به شناسایی پارامترهای هیدرودینامیکی با استفاده از یک مدل خطی از سیستم است که در نظر گرفتن یک مدل خطی از زیرآبی به معنی نادیده گرفتن ارتباط بین مودهای حرکتی و بررسی مودها به صورت تفکیک شده است. نیاز به اعمال دقیق شرایط در سطوح بالای کنترل، استفاده از مدل غیر خطی شامل حرکت کامل شش درجه آزادی در سه بعد را می‌طلبد. هدف این تحقیق شناسایی پارامترهای دینامیکی یک مدل زیرآبی خودگردان، تحت شرایط نویز در اندازه‌گیری سنسورها، توسط فیلتر کالمن توسعه‌یافته است.

در این مطالعه الگوریتم معرفی شده قادر به شناسایی مدلی غیرخطی از سیستم با شش درجه آزادی بوده و ارتباط حرکت[1] بین تمام مودهای حرکتی در نظر گرفته شده است. بسیاری از روش‌های شناسایی سیستم، ترکیبی از پارامترهای سیستم را به عنوان نتیجه ارائه می‌کنند اما در این روش، ضرایب هیدرودینامیکی مستقیماً به عنوان خروجی به دست می‌آیند. مشکل خطای یکنواخت[2] پارامتر در روند شناسایی سیستم که به علت پیچیدگی مدل ریاضی با تعداد فراوان پارامترهای غیر خطی و همچنین اندازه‌گیری‌های آغشته با نویز از متغیرهای حالت، ایجاد می‌شود با در نظر گرفتن ماتریس‌های کواریانس خطای فرآیند و کواریانس خطای اندازه‌گیری به فرمی زمان

[1] Coupling
[2] Bias

متغیر و مناسب مرتفع گردیده است. الگوریتم پیشنهادی در نهایت به بردار ضرایب هیدرودینامیکی سیستم همگرا می‌شود.

در فصل دوم این تحقیق، نخست با تعریف دستگاه‌های مختصات مورد استفاده در دینامیک وسایل دریایی، موقعیت زاویه‌ای و سینماتیک سیستم را مشخص می‌کنیم. سپس با استفاده از روش نیوتن اویلر، معادلات شش درجه آزادی حرکت زیرآبی توسعه داده می‌شود. در ادامه به تعریف ضرایب هیدرودینامیکی، مقایسه و بیان روش‌های تعیین ضرایب هیدرودینامیکی و روش‌های تعیین عملی این ضرایب پرداخته می‌شود. در نهایت برای استفاده از معادلات سیستم در فیلتر کالمن توسعه یافته به صورت دیجیتال، به بیان و مقایسه روش‌های عددی گسسته‌سازی مدل مورد مطالعه می‌پردازیم.

در فصل سوم فرآیند شناسایی سیستم شامل مراحل: طراحی آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و پیش پردازش آنها و مدل‌های استفاده شده در فرآیند شناسایی سیستم، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شناسایی سیستم به طور خاص برای وسایل دریایی بیان می‌شود. در نهایت با توجه به مزیت‌هایی که برای شناسایی سیستم به روش فیلتر کردن، نسبت به سایر روش‌های معرفی شده در این فصل بیان می‌شود، به بررسی فیلتر کالمن توسعه یافته پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی سیستم زیرآبی اجرا می‌شود. ورودی‌های مختلف که در امر شناسایی مورد استفاده قرار گرفتند معرفی می‌شوند. تنظیمات فیلتر برای شناسایی دینامیک وسیله بیان می‌شود و درنهایت نتایج ارائه می‌شوند.

نتایج حاصل از این مطالعه در فصل پنجم جمع‌بندی شده‌اند. در پایان پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان شده است.

فصل دوم

معادلات حرکت و شبیه‌سازی

۲-۱- مقدمه

طراحی، ارزیابی و کنترل سیستم‌های مکانیکی در اکثر روش‌های علم کنترل، به یک مدل ریاضی نیاز دارد. کنترل وسایل زیرآبی نیز از این موضوع استثناء نیست. یک زیرآبی تحت تأثیر نیروهای مختلفی در محیط آبی قرار می‌گیرد. نیروی پیشران، نیروی هیدرودینامیکی و نیروی هیدرواستاتیکی ناشی از اثر محیط آبی، از جمله این نیروها بوده که دارای طبیعت پیچیده‌ای هستند. بنابراین مدل کردن دینامیک جسم صلب برای یک وسیله‌ی زیردریایی به علت ماهیت نیروهای به کار رفته برای تولید حرکت، متفاوت از مدل سیستم‌های رباتیکی دیگر است. بر هم کنش آب و بدنه وسیله باعث ایجاد نیروهای برآ[1] و پسا[2] می‌شود. ترکیبی از اثرات هر یک از نیروهایی که در بالا بیان شد، برآیند کلی نیروها را تعیین می‌کنند. نیروی برآیند به منظور تحلیل و توسعه معادلات کنترلی وسیله به کار می‌رود تا بتوان در نهایت سیستمی با قابلیت کنترل و حرکت در مانورهای مختلف ایجاد کرد.

[1] Lift
[2] Drag

۲-۲- معرفی معادلات حرکت

روش‌های مختلفی برای مدل کردن حرکت انواع وسایل زیرآبی معرفی شده‌اند. به عنوان مثال سیستم‌هایی که دارای اجزای بدنه پیچیده‌ای هستند می‌توانند به عنوان یک سیستم دینامیکی چندجسمی[1] در نظر گرفته شوند تا دقت بیشتری به دست آید [۲۰]. در این بخش مراحل بدست آوردن ساختار مدل دینامیکی مورد استفاده در شناسایی سیستم بیان می‌شود.

اگرچه اثرات هیدرودینامیکی حرکت در زیر آب برای یک جسم صلب، به صورت جامع به وسیله معادلات ناویر- استوکس بیان شده است، اما این معادلات یک سیستم غیرخطی از مشتقات جزئی را تشکیل می‌دهند که حل آن در حالت کلی دشوار است. موضوع دینامیک سیالات محاسباتی به حل چنین معادلاتی می‌پردازد. با این حال علی‌رغم ظهور کامپیوترهای پرسرعت و بسته‌های نرم‌افزاری، زمان محاسبه توسط یک کامپیوتر متوسط، حتی برای یک حرکت ساده، بسیار فراتر از زمان موجود برای کار کنترل، بخصوص کنترل بلادرنگ[2] است؛ هرچند جواب به دست آمده دارای دقت مناسبی باشد [۲۱].

مدل‌های متعددی برای دینامیک وسایل دریایی وجود دارند ولی هیچ یک از آنها مدل کاملی برای کاربرد در طراحی، کنترل، شبیه‌سازی و سایر مطالعات مربوط به زیرآبی‌ها نیستند. در حال حاضر مدل هیدرودینامیکی کاملی که به صورتی دقیق رفتار دینامیکی AUV را در یک دنیای مجازی پیشگویی کند وجود ندارد.

در مدل‌هایی که امروزه برای AUV تعریف می‌شوند بیش از یکصد ضریب و متغیر مربوط به حرکت خطی و غیرخطی وابسته به اثرات کوپل برآ، پسا، جرم اضافه شده[3] و نیروی پیشرانش تعریف شده است. اگر چه تعدادی از این ضرایب دارای نقش کمتری در دینامیک سیستم هستند، اما به طور کلی تعیین مقدار ضرایب اصلی، مسأله‌ای مهم و در عین حال کاری پرهزینه و دشوار است [۲۲].

[1] Multibody
[2] Real-Time
[3] Added Mass

رایج‌ترین مدل در تئوری کنترل سیستم، استفاده از معادلات دیفرانسیل کلاسیک، به فرم فضای حالت به صورت زیر است:

$$\dot{x} = f(x,u) \qquad (۱-۲)$$

که در آن x و u به ترتیب معرف بردار حالت و بردار ورودی هستند. با داشتن این چارچوب از مدل، به بیان دینامیکی از سیستم می‌پردازیم.

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل کردن حرکت AUV مورد مطالعه به شرح زیر است:

- وسیله زیرآبی صلب در نظر گرفته می‌شود.
- اثر حرکت چرخشی زمین روی مؤلفه‌های شتاب مرکز جرم وسیله قابل صرف نظر است.
- نیروهای اصلی عمل کننده روی وسیله دارای منشأ اینرسی و گرانشی هستند و از هیدرواستاتیک، پیشرانش، نیروی پروانه‌ها و نیروهای هیدرودینامیکی برآ و پسا ناشی می‌شوند.

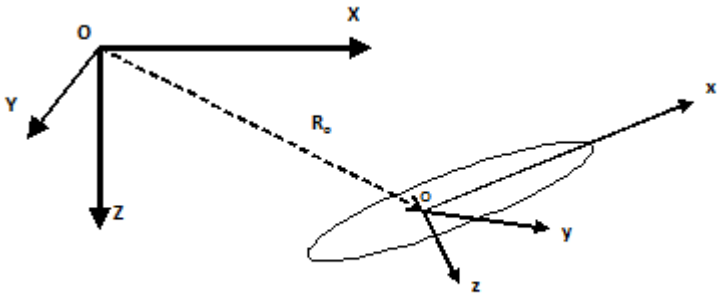
در ادامه با استفاده از روش نیوتن اویلر، معادلات دیفرانسیل حرکت را برای مدل دینامیکی زیرآبی مورد مطالعه به دست آورده تا در نهایت با استخراج مدل فضای حالت از این معادلات، مدل مورد استفاده در شناسایی سیستم را به دست آوریم.

۲-۲-۱- سیستم مختصات

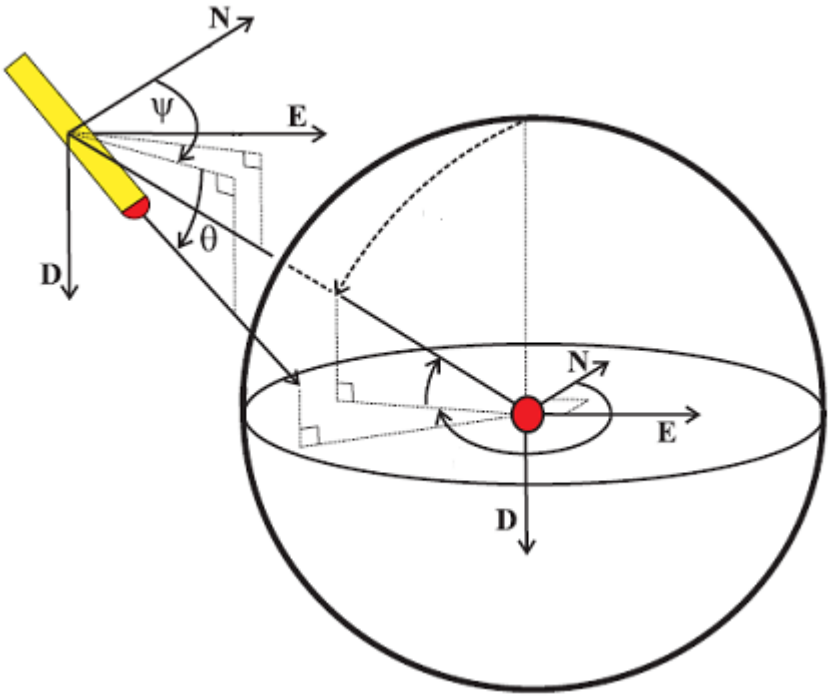
انتخاب سیستم مختصات در وسایل دریایی با انتخاب دو نوع دستگاه انجام می‌گیرد. یکی دستگاه مختصات کلی یا جهانی که محیط اقیانوسی را پوشش می‌دهد و دیگری دستگاه مختصات بدنی یا محلی که روی جسم صلب متصل می‌شود و با آن حرکت می‌کند. دستگاه مختصات کلی OXYZ دارای مبدأ O و جهت رو به شمال (X)، جهت رو به شرق (Y) و به سمت پایین (Z)، به عنوان دستگاهی راستگرد با بردارهای یکه I، J و K تعریف می‌شود. بنابراین دارای بردار موقعیت R_o به صورت زیر خواهد بود:

$$R_o = [X_oI + Y_oJ + Z_oK] \qquad (۲-۲)$$

دستگاه مختصات محلی oxyz با مبدأ o، موقعیت رو به جلو (x)، به سمت راست (y) و به طرف پایین (z)، به صورت راستگرد با بردارهای یکه i، j و k تعریف می‌شود. نمونه‌ای از سیستم مختصات کلی و بدنی در شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲ دیده می‌شود.



شکل ۲-۱ بیان سیستم مختصات کلی و بدنی



شکل ۲-۲ نحوه بیان متغیرهای حرکتی موقعیت زاویه‌ای به صورت سه بعدی برای یک AUV

باید توجه کرد که بهتر است مبدأ دستگاه مختصات محلی، بر نقطه مرکز جرم یا مرکز شناوری وسیله قرار داده شود.

۲-۲-۲- موقعیت زاویه‌ای

پس از بیان موقعیت هر نقطه از وسیله، نیاز است که جهت‌گیری آن نیز نسبت به دستگاه مرجع کلی بیان شود. این جهت‌گیری به خصوص در هنگام کنترل جهت وسیله موقع مواجهه با اشیاء دیگر مهم است. نرخ تغییر جهت وسیله به عنوان نتیجه‌ای از تغییر سرعت مرکز جرم، در معادلات دینامیکی سیستم مهم است. بدین منظور زوایای اویلر φ، θ و ψ برای بیان جهت‌گیری زاویه‌ای وسیله به کار می‌روند. در [۲۳] نشان داده شده است که چگونه می‌توان با استفاده از ماتریس تبدیل $T(\varphi,\theta,\psi)_1$، مختصات‌ها را میان دستگاه‌های محلی و کلی تبدیل کرد. در حقیقت ارتباط بین هر دو دستگاه مختصات مثل $o_1x_1y_1z_1$ و $o_2x_2y_2z_2$ به این صورت است که ابتدا دستگاه $o_1x_1y_1z_1$ به اندازه φ حول محور x_1 دوران پیدا می‌کند و دستگاه جدیدی حاصل می‌شود. سپس یک چرخش به اندازه زاویه θ حول محور y دستگاه جدید صورت می‌گیرد. در نهایت دوران سوم به اندازه ψ حول محور z آخرین دستگاهی که حاصل شده انجام می‌شود و نتیجه بر دستگاه $o_2x_2y_2z_2$ منطبق است. ماتریس تبدیل انجام دهنده این ارتباط، به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$T(\varphi,\theta,\psi)=\begin{bmatrix}\cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi-\sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi+\sin\psi\sin\phi\\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi+\cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi-\cos\psi\sin\phi\\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi\end{bmatrix}$$

(۳-۲)

۲-۲-۳- سینماتیک

در این قسمت بردار سرعت وسیله در هر دو دستگاه کلی و بدنی بیان می‌شود. هر جسم می‌تواند با سرعتی مشخص در دستگاه مرجع کلی OXYZ حرکت کند. این سرعتی است که مثلاً با استفاده از یک رادار یا یک ردیاب صوتی[1] اندازه‌گیری می‌شود. این سرعت‌ها با $\dot{X}$، $\dot{Y}$ و $\dot{Z}$ نشان داده می‌شوند. از طرفی یک وسیله‌ی زیرآبی دارای حسگرهایی روی خود است که سرعت آن را به صورت محلی اندازه می‌گیرند. بردار سرعت محلی $[u,v,w]^T$ شامل سرعت در جهت x به اندازه u،

[1] Sonar