

یک روش جدید ترکیبی در مسیریابی سراسری وسایل نقلیه خودگردان زیر آبی

شبنم پسته^(۱) - احمدرضا نقش نیلچی^(۲) - فرید شیخ الاسلام^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۲) استادیار - گروه کامپیوتر، دانشگاه اصفهان

(۳) دانشیار - گروه برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۸۹

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۸۸

خلاصه: تاکنون روش‌های سراسری متعددی برای حل مسئله طراحی مسیر پیشنهاد شده است که از آن میان روش‌های گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج جایگاه ویژه‌ای دارند. در این مقاله با ترکیب این چهار روش در یک ساختار واحد، یک الگوریتم طراحی مسیر جدید به نام HYBRID-Visibility-QuadTree-Voronoi-WaveFront (HYBRID-VQVW) ارائه می‌شود. در این روش در هر فاصله نمونه‌برداری پس از ساخت چهار مسیر سراسری روی فضای پیکربندی، بهترین آن‌ها طبق چند ملاک رفتاری مشخص می‌شود. این ملاک‌ها شامل طول، امنیت و همواری مسیر می‌باشند. در حقیقت الگوریتم HYBRID-VQVW یک مبادله پارامتری میان کوتاه‌ترین، امن‌ترین و هموارترین مسیر برقرار می‌کند و در نهایت به مسیری می‌رسیم که از مسیر تولید شده با روش‌های دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج کوتاه‌تر و هموارتر بوده و نسبت به مسیر گراف پدیداری امن‌تر است.

کلمات کلیدی: طراحی مسیر، اجتناب از موانع، وسیله نقلیه خودگردان زیر آبی، روبات‌های متحرک.

۱- مقدمه

سریع‌تر از روش‌های سراسری هستند و بنابراین برای کاربردهای بهنگام مناسب‌ترند. اما از آنجا که تنها از اطلاعات محلی برای حرکت استفاده می‌کنند، امکان افتادن در مینیمم محلی برای آن‌ها وجود دارد. در کاربردهای عملی در صورتی که نقشه‌ای از محیط در دسترس باشد، با ترکیب این دو روش می‌توان نتیجه بهتری گرفت. بدین صورت که قبل از شروع حرکت، مسیر سراسری طراحی و به عنوان مسیر مبنا از آن استفاده می‌شود. در صورتی که در طول مسیر AUV با مانع جدید، ناشناخته و یا متحرکی مواجه شود، به کمک الگوریتم‌های طراحی مسیر محلی می‌تواند به راحتی از موانع اجتناب کند [۱]. ورودی طراح حرکت داده‌های سنسورها است. با استفاده از این داده‌ها، فضای پیکربندی^۵ تولید می‌شود [۲]. این فضا تمامی موقعیت‌های ممکن وسیله نقلیه را نشان می‌دهد و مزیت استفاده از آن امکان نمایش وسیله نقلیه با هر شکل هندسی به صورت نقطه‌ای واحد می‌باشد. استفاده از مفهوم فضای پیکربندی در طراحی حرکت، برای اولین بار توسط [۳] به کار گرفته شد. با استفاده از این تعریف، مسئله مسیریابی به یافتن یک نقطه تنها در فضای پیکربندی ساده می‌شود.

طی سالیان اخیر ROV^۱ها نقش غیرقابل انکاری در بازرسی‌های زیر آب و پشتیبانی عملیات زیر دریا ایفا کرده‌اند و اکنون با حذف کابل، AUV^۲ به عنوان یک فناوری پیشرفته جای خود را در این میان باز نموده است. از آنجا که هیچگونه ارتباط خارجی برای هدایت این وسیله نقلیه وجود ندارد و توان موجود آن نیز محدود است، طراحی خودکار حرکت از میان موانع برای رسیدن به هدف بسیار حیاتی و ضروری به نظر می‌رسد. تکنیک‌های طراحی مسیر به طور عمده به دو دسته روش‌های سراسری^۳ و محلی^۴ تقسیم بندی می‌شوند که تفاوت آن‌ها در چگونگی استفاده از اطلاعات محیط است. در روش‌های سراسری فرض بر این است که محیط شناخته شده است و موانع موجود در فضای کار نیز ثابت‌اند. این روش راه‌حلی قطعی برای رسیدن به هدف می‌باشد و امکان افتادن در مینیمم محلی در آن وجود ندارد. روش‌های محلی از آخرین اطلاعات سنسورها برای تولید یک مسیر محلی که تا حد رنج سنسورها معتبر است، استفاده می‌کنند. در نتیجه قادر به کار با موانع ناشناخته و متحرک نیز می‌باشند. روش‌های محلی از نظر محاسباتی

۲- روش‌های متداول

الف - گراف پدیداری^۶

این روش توسط نیلسون ابداع شد [۱]. گراف پدیداری یک نقشه راه است که گره‌های آن شامل موقعیت‌های نقاط شروع و هدف و تمامی رئوس موانع می‌باشند. اگر دو گره گراف در یک خط دید قرار داشته باشند، توسط یک لبه مستقیم به یکدیگر متصل می‌شوند. پس از اتصال گراف به نقاط شروع و هدف، الگوریتم جستجو کوتاهترین مسیر را از میان تمامی مسیرهای ممکن انتخاب می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان کوتاهترین مسیر را از نقطه شروع تا هدف طراحی کرد و در واقع مسیر تولید شده با این روش از نظر طول مسیر، مسیر بهینه است. عیب این روش این است که تا جایی که امکان دارد به موانع نزدیک می‌شود [۱۴]. همانطور که می‌دانیم با در نظر گرفتن حاشیه امنیتی به اندازه طول وسیله نقلیه در فضای پیکربندی می‌توان وسیله نقلیه را به صورت نقطه‌ای با موقعیت (x, y) در نظر گرفت. در این مقاله این حاشیه امنیتی به اندازه دو برابر طول وسیله در نظر گرفته شده است. بنابراین AUV با موانع برخورد نمی‌کند و امنیت آن حفظ می‌گردد. البته با این کار مسیر گراف پدیداری دیگر از لحاظ طول مسیر بهینه نیست، اما امنیت آن تضمین شده است. با این حال نتایج عددی به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهند که کوتاهترین مسیر از میان چهار روش فوق همچنان مسیر گراف پدیداری است. شکل (۱) نمونه‌ای از تولید مرحله به مرحله مسیر با استفاده از این روش را توسط ابزار MRIT^۷ [۱۵] نشان می‌دهد.

این روش در فضاهایی استفاده می‌شود که موانع به صورت چند وجهی باشند. با توجه به اینکه در هر چهار روش سراسری فوق موانع بایستی به صورت چندضلعی باشند، می‌توان موانع موجود در فضای کار را با چندضلعی‌هایی تقریب زد. اگرچه [۱۶] روشی را بیان می‌کند که برای موانع غیر چند وجهی نیز می‌توان از این روش استفاده کرد. در مورد فضای کارهای سه‌بعدی و بیش از آن مسئله قدری پیچیده‌تر می‌گردد. [۱۷] تدبیرهایی را برای این منظور پیشنهاد می‌کند و [۱۸] راه‌حلی کلی برای یک فضای n بعدی ارائه می‌دهد، که آن را به n فضای دوبعدی تبدیل و برای هر فضا یک گراف پدیداری تعریف می‌کند.

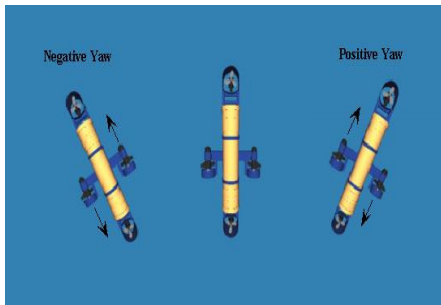
ب - دیاگرام ورونوی^۸

دیاگرام ورونوی از مجموعه نقاطی تشکیل می‌شود که به فاصله مساوی از موانع اطراف قرار گرفته‌اند. با مشخص شدن این نقاط و اتصال آن‌ها به یکدیگر، فضا به چند ناحیه تقسیم می‌شود که هر ناحیه شامل یک مانع است. فاصله نقاط داخل هر ناحیه تا مانع داخل همان ناحیه کمتر از فاصله آن تا موانع دیگر می‌باشد. پس از اتصال این نقاط به موقعیت‌های شروع و هدف و تشکیل دیاگرام ورونوی، الگوریتم جستجو کوتاهترین مسیر را از میان تمامی مسیرهای ممکن انتخاب می‌کند. شکل (۲) نمونه‌ای از تولید مرحله به مرحله مسیر با استفاده از این روش را نشان می‌دهد. [۱۹] با استفاده از این روش حرکت یک

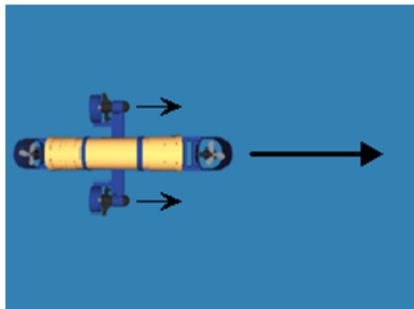
طراحی حرکت یک عبارت کلی است که می‌تواند به معنای Path Planning یا Trajectory Planning باشد. منظور از Path Planning، تعیین دنباله‌ای از موقعیت‌های AUV است که برای رسیدن به هدف بایستی از آن‌ها عبور کند. در Trajectory Planning تابع زمانی برای حرکت مشخص می‌شود [۴]. کلی‌ترین شکل حرکت، حرکت نقطه به نقطه است. در این مقاله طراحی مسیر نقطه به نقطه، برای یک وسیله نقلیه خودگردان زیرآبی انجام می‌گیرد. همچنین برای بازدهی بهتر، دنباله تعیین شده بایستی تمامی فاکتورهای مورد نیاز یک وسیله نقلیه خودگردان زیرآبی نظیر مسافت، همواری مسیر و امنیت را مد نظر قرار دهد.

مقاله‌های متعددی در زمینه طراحی مسیر وجود دارد اما تعداد کمی از آن‌ها مسئله طراحی path را با بهینه‌سازی مطرح می‌کنند [۵]. با استفاده از سه الگوریتم گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی و میدان پتانسیل یک الگوریتم طراحی مسیر ترکیبی جدید به نام VVP را ارائه می‌دهد [۶]. یک سیستم ناوبری به نام PL را معرفی می‌کند که وظیفه طراحی مسیر بهنگام و اجتناب از موانع را به عهده دارد. در این مقاله با توجه به نحوه قرارگیری موانع و فضای پیکربندی، چهار حالت مشخص می‌شود و از سه روش میدان نیروی مجازی [۷]، تعقیب دیوار [۸] و [۹]، و مانتیورینگ دو نیم دایره چرخش [۱۰] جهت طراحی مسیر و اجتناب از موانع استفاده می‌شود. در [۱۱] طراحی مسیر در مجاورت کف دریا به کمک الگوریتم‌های ژنتیک و B-Splines انجام می‌گیرد. در واقع قبل از شروع به کار AUV، مسیر بهینه توسط الگوریتم ژنتیک و بر اساس داده‌های کف دریا و قیود ماموریت محاسبه می‌شود. پس از محاسبه مسیر، وسیله نقلیه توسط مجموعه‌ای از کنترل کننده‌های فازی در طول مسیر مشخص شده شروع به حرکت می‌کند. سپس الگوریتم تکاملی دوم، توابع عضویت کنترل کننده‌های فازی را به گونه‌ای بهینه می‌کند که AUV در طول مسیرش کمترین خطا را داشته باشد. [۱۲] برای حل مسئله نمونه‌برداری وقتی، یک روش طراحی مسیر جدید بر اساس روش MILP ارائه می‌دهد. در [۱۳] تحقیقی روی طراحی مسیر سراسری بر اساس بهینه‌سازی تئوری مورچگان انجام می‌شود.

در این مقاله، بخش اول مقدمه‌ای بر طراحی مسیر و روش‌های به کار رفته تاکنون را طرح می‌کند. شرح مختصری از روش‌های سراسری متداول گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، تجزیه سلولی و جبهه موج در بخش دوم ارائه می‌شود. طرح کلی الگوریتم جدید ترکیبی که برای سادگی آن را الگوریتم HYBRID-VQVW می‌نامیم، در بخش (۳) ارائه می‌شود. در بخش (۴) تابعی‌های معیار مشخص شده و جزئیات یافتن مسیر HYBRID-VQVW مطرح می‌گردد. پیاده‌سازی روش ترکیبی جدید و مقایسه با روش‌های متداول و نتیجه‌گیری به ترتیب در بخش (۵) و (۶) و منابع استفاده شده در انتها ذکر می‌شوند.



شکل (۵): نمایش گرافیکی yaw
Fig. (5): The graphical symbol of yaw



شکل (۶): نمایش گرافیکی surge مثبت
Fig. (6): The graphical symbol of positive surge

همانطور که در فلوجارت تولید مسیر در شکل (۷) دیده می‌شود، پس از تولید چهار مسیر سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت چهار وجهی و جبهه موج، هزینه رسیدن به هدف به روشی که در ادامه شرح داده خواهد شد برای هر مسیر محاسبه شده و مسیر با کمترین هزینه انتخاب می‌گردد. سپس با احتساب 100 متر از طول مسیر، نقطه نمونه برداری بر روی آن تعیین می‌شود. نقطه نمونه برداری X_d به عنوان نقطه شروع جدید در نظر گرفته می‌شود و دو مرتبه چهار مسیر مذکور تولید شده و این فرآیند تا رسیدن به نقطه هدف ادامه می‌یابد. علت در نظر گرفتن فاصله نمونه برداری به اندازه 100 متر، ابعاد موانع ساکنی است که AUV با آن‌ها مواجه می‌شود مانند عوارض زمین، صخره‌های داخل دریا و پایه‌های اسکله‌های دریایی.

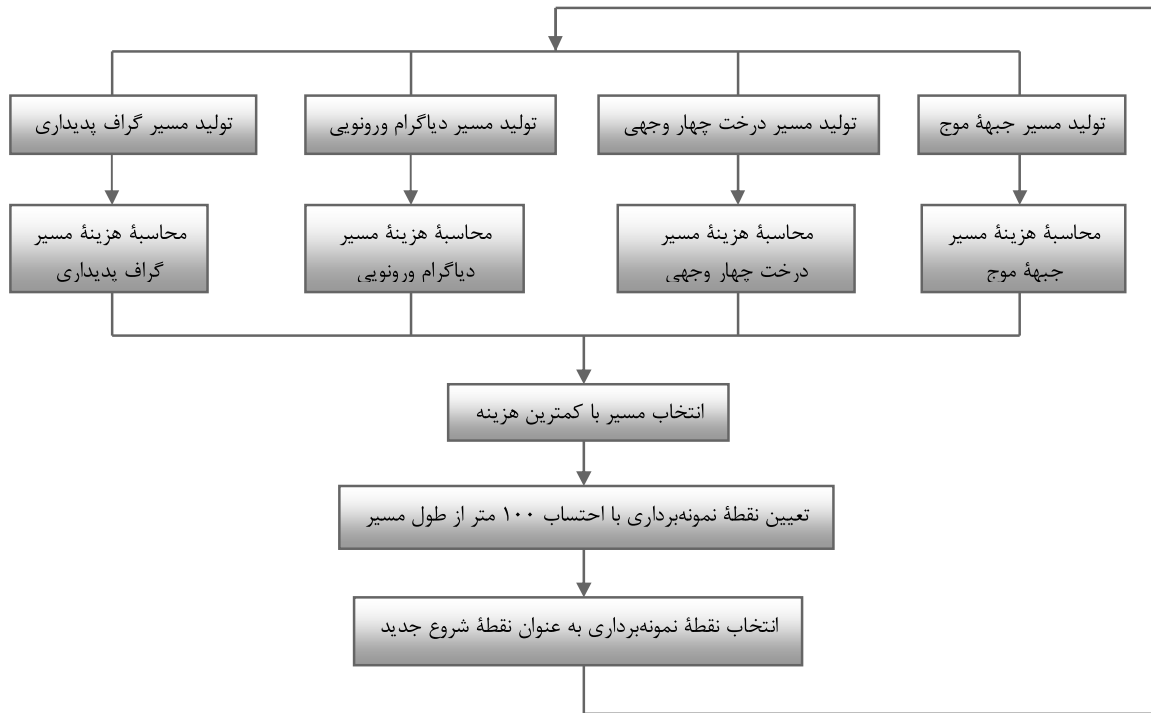
کامپیوتر کنترل اجرا می‌شوند. کامپیوتر کنترل مستقیماً با یک واسط به موتور و تراسترها متصل است. طرح مسیر در کنترلر سطح بالا قرار گرفته است. در حقیقت خروجی‌های کنترلر سطح بالا نقاط نمونه برداری شده یک مسیر هموار و سرعت تعقیب مسیر می‌باشند. این خروجی‌ها برای اجرا به کنترلر سطح پایین فرستاده می‌شوند. وظیفه کنترلر سطح پایین اجرای دقیق دستورات کنترلر سطح بالاست. در نظر گرفتن معادلات حرکت مربوط به کنترلر سطح پایین می‌باشد. کنترلر سطح پایین قادر به اجرای مجموعه دستوراتی از قبیل کنترل طولی و عرضی وسیله نقلیه، مانورهای رباتیکی، ایست دقیق وسیله نقلیه در یک موقعیت به خصوص و همچنین ایست اضطراری می‌باشد. در این الگوریتم فرض می‌شود که AUV با سرعت ثابت و در عمق ثابت آب‌های آرام حرکت می‌کند و همچنین نقشه اولیه مناسبی از محیط نیز در دسترس است. اولین مرحله از مسیریابی تبدیل نقشه به یک نقشه گسسته است [۱۴]. بدین منظور می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. در این تحقیق از چهار روش گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت چهاروجهی و جبهه موج بدین منظور استفاده می‌شود. با وجود مزیت‌هایی که هر یک از این چهار روش دارند، با ترکیب آن‌ها می‌توان از مزایای هر یک از آن‌ها بهره جست و معایبشان را به حداقل رساند. در اینجا تنها بایستی قیود مکانیکی که زاویه حرکت را محدود می‌کنند به عنوان قیود داخلی بررسی شوند. به طور کلی داریم:

$$-\pi < x \leq \pi \text{ چرخش حول محور } x \quad (1)$$

$$-\frac{\pi}{2} < y < \frac{\pi}{2} \text{ چرخش حول محور } y \quad (2)$$

$$0 \leq z < 2\pi \text{ چرخش حول محور } z \quad (3)$$

به طور کلی مانورهایی که برای کنترل وسیله نقلیه استفاده می‌شوند عبارتند از: حرکت به سمت جلو (surge مثبت)، حرکت به سمت عقب (surge منفی)، چرخش به سمت راست (yaw مثبت)، چرخش به سمت چپ (yaw منفی)، حرکت به سمت پایین (heave مثبت)، حرکت به سمت بالا (heave منفی) و فرمان ایست (صفر کردن تمامی موتورها). AUV حتی در ماکزیمم سرعت خود در حرکت‌های دورانی حول محورهای x و y بسیار پایدار است. بر این اساس حرکت‌های دورانی حول محورهای x و y قابل صرف نظرند [۲۲]. در این تحقیق عمق ثابت است و وسیله به عقب نیز حرکت نمی‌کند، در نتیجه طراحی مسیر تنها در دو بعد یعنی چرخش حول محور Z (۵) و حرکت در راستای محور X (۶) صورت می‌گیرد. پس تنها محدودیت حرکت قید رابطه (۳) است که در تمام این چهار روش برقرار می‌باشد. برای مطالعه بیشتر در مورد معادلات حرکت AUV مرجع [۲۳] پیشنهاد می‌گردد.



شکل (۷): فلوجارت تولید مسیر توسط الگوریتم HYBRID-VQVW
 Fig. (7): The generation of trajectory by HYBRID-VQVW

$$J_{\text{energy}}(G_i) = \rho_1 \times \text{normalize} \left(\int_0^{t_{fi}} [A + Bu^3] dt \right) \quad (7)$$

$$\xrightarrow{N=u=\text{cte}} J_{\text{energy}}(G_i) \propto J_{\text{time}}(G_i)$$

$J_{\text{energy}}(G_i)$ و $J_{\text{time}}(G_i)$ به ترتیب تابعی‌های معیار حداقل انرژی و حداقل زمان سفر می‌باشند. توجه کنید که مفهوم فیزیکی تابعی معیار نیز عاملی است که باید مورد توجه قرار بگیرد. حداقل مقدار تابعی معیار همچون سوخت مصرف شده و یا زمان پروسه دارای معنی خواهد بود، لیکن در مواردی که تابعی معیار ترکیبی از کمیت‌های متفاوت با ضریب ارزش‌گذاری مختلف باشد، مقدار عددی تابعی معیار نمی‌تواند یک مفهوم خاصی را عرضه نماید. بنابراین در این مقاله از مقادیر نرمالیزه بدین منظور استفاده می‌شود.

طبق رابطه (۷) مسئله حداقل انرژی در اینجا به یک مسئله حداقل زمان ساده می‌گردد. از آنجا که سرعت ثابت است پس زمان سفر با مسافت رابطه مستقیم دارد. چون در محاسبه هزینه کل، مقادیر نرمالیزه شده استفاده می‌شوند، می‌توان به طور مستقیم از رابطه (۸) محاسبات را انجام داد.

$$J_{\text{distance}}(G_i) = \mu_1 \times \text{normalize}(L_i), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

که در اینجا $J_{\text{distance}}(G_i)$ تابعی معیار حداقل طول مسیر G_i ، L_i طول مسیر از نقطه شروع x_{init} تا موقعیت هدف x_{goal} و μ_1 ضریب ارزش‌گذاری مربوط به مسافت پیموده شده توسط AUV است. برای محاسبه L_i ، اگر P تعداد گره‌های گراف حرکت باشد، آنگاه هر مسیر را می‌توان به صورت رابطه (۹) نشان داد.

۴- ملاک‌های یافتن مسیر جدید ترکیبی

الف - حل مسئله حداقل انرژی و حداقل طول مسیر

از آنجا که سوختی که AUV با خود حمل می‌کند محدود است، هر گونه صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌تواند به معنای مدت سفر طولانی‌تر باشد. طبق [۲۴] تابع هزینه انرژی، انتگرال توان روی زمان می‌باشد. که توان P در واحد وات (W) به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$P = A + BN^3 \quad (4)$$

پارامتر A بار هتل^{۱۱} به وات، B ضریب توان رانش و N دستور سرعت تراستر است که تحت عنوان سرعت حالت ماندگار وسیله نقلیه در واحد متر بر ثانیه تعریف می‌شود. توان در حالت ماندگار از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$P = A + BN^3 = A + Bu^3 \quad (5)$$

که پارامتر u سرعت وسیله نقلیه است. برای تعیین تابعی معیار، مقادیر A و B بایستی مشخص شوند. از آنجا که وسیله نقلیه مطرح شده در اینجا یک AUV فرضی است در رابطه (۶) از مقادیر وسیله نقلیه ARIES بدین منظور استفاده می‌شود [۲۴].

$$P = 147 + 179.1N^3 = 147 + 179.1u^3 \quad (6)$$

همانگونه که در بالا ذکر شد، اگر که t_{fi} زمان رسیدن به هدف در مسیر G_i که همان مسیر نام است و ρ_1 ضریب ارزش‌گذاری مربوط به مصرف انرژی باشد، تابعی معیار انرژی به صورت رابطه (۷) به دست می‌آید.

ج - حل مسئله حداقل تغییر زاویه حرکت

به منظور داشتن مسیری هموار سعی می‌شود تا جایی که امکان دارد از تغییرات بزرگ در دستورات حرکتی اجتناب گردد. یکی از راه‌های موثر در کاهش نوسان در فرمان‌های حرکتی، کنترل تغییر جهت حرکت در طول مسیر می‌باشد. بنابراین بهترین مسیر به گونه‌ای انتخاب می‌شود که تغییر در زوایای حرکت به کمترین مقدار ممکن برسد. همانگونه که قبلاً گفته شد، اگر P تعداد گره‌های گراف هر یک از چهار مسیر حرکت باشد، آنگاه هر مسیر را می‌توان به صورت رابطه (۹) نشان داد. پس از محاسبه مسافت نمونه‌برداری x_d روی هر مسیر، الگوریتم تعداد گره‌های گراف قبل از آن نقطه را محاسبه کرده و تغییر جهت‌هایی را که وسیله نقلیه بایستی متحمل شود تا در مسیر موردنظر قرار گرفته و به نقطه نمونه‌برداری برسد را به دست می‌آورد. اگر با احتساب نقطه شروع، h_i گره قبل از نقطه نمونه‌برداری X_d در مسیر λ وجود داشته باشد، بنابراین h_i بار تغییر زاویه برای وسیله نقلیه وجود دارد. اگر طبق رابطه (۱۵)، φ_i برداری شامل زوایای مسیر λ نسبت به محور X ها تا نقطه X_d باشد، آنگاه مجموع تغییر زوایایی که وسیله نقلیه متحمل می‌شود تا به نقطه X_d برسد به عنوان تابعی معیار حداقل تغییر زاویه حرکت از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$\varphi_i(j) = \text{angle}(X_{ji} X_{j+1}), \quad j = 1, 2, \dots, h_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

$$J_{\text{Traj-var}}(G_i) = \mu_3 \times \text{normalize} \left(\sum_{j=1}^{h_i-1} \text{angle}(\varphi_i(j), \varphi_i(j+1)) \right) \quad (16)$$

$j = 1, 2, 3, \dots, h_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$

در روابط بالا $\text{angle}(X_{ji} X_{j+1})$ حداقل اختلاف زاویه بین دو گره گراف که در واقع همان زاویه مسیر حرکت نسبت به محور X ها می‌باشد، ضریب μ_3 ضریب ارزش‌گذاری مربوط به نوسانات در فرمان‌های حرکتی و $\text{angle}(\varphi_i(j), \varphi_i(j-1))$ حداقل اختلاف زاویه بین دو جهت حرکتی $\varphi_i(j)$ و $\varphi_i(j+1)$ است.

د - هزینه کل سیستم

با در نظر گرفتن سه فاکتور مذکور یعنی مسئله حداقل مسافت، امنیت و همواری مسیر، هزینه کل سیستم به صورت رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$J(G_i) = J_{\text{distance}}(G_i) + J_{\text{safety}}(G_i) + J_{\text{Traj-var}}(G_i) \quad (17)$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad (18)$$

$$G = \arg \min_{G_i} \{J(G_i)\}, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

طبق رابطه (۱۸) بهترین مسیر، مسیر G است که تابع هزینه فوق را حداقل می‌سازد.

۵- پیاده‌سازی روش جدید ترکیبی و مقایسه آن با روش‌های متداول

از میان چهار روش فوق‌الذکر، الگوریتم گراف پدیداری کوتاهترین و هموارترین مسیر، الگوریتم دیاگرام ورونوی بلندترین و ناهموارترین مسیر و همچنین از لحاظ امنیت، الگوریتم‌های دیاگرام ورونوی و جبهه موج بهترین نتایج را به ما می‌دهند [۱۵].

$$X_{\text{method}} = [X_1, \dots, X_p] \quad (9)$$

X_1 مختصات (x, y) نقطه شروع، X_p موقعیت هدف و X_2, X_3, \dots, X_{p-1} مختصات گره‌ها در دستگاه مختصات مرجع می‌باشند. اگر X_{ji} مختصات گره λ ام مسیر λ ام باشد، طول مسیر از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است.

$$L_i = \sum_{j=1}^{p-1} \text{dist}(X_{ji}, X_{j+1}), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

که در آن:

$$\text{dist}(X_{ji}, X_{j+1}) \triangleq \left| |X_{ji}| - |X_{j+1}| \right| \quad (11)$$

حداقل فاصله دو گره λ ام و $(j+1)$ ام مسیر λ ام می‌باشد.

ب - حل مسئله حداکثر فاصله تا موانع

به منظور حفظ امنیت بیشتر، در هر بار توزیع مسیر برای انتخاب مسیر بهینه، فاصله هر یک از چهار مسیر تا موانع محاسبه می‌شود. مسیری که بیشترین فاصله را از موانع داشته باشد، امن‌ترین مسیر است. موانع در نظر گرفته شده در اینجا به صورت اجسام چندضلعی می‌باشند. هر مانع با یک ماتریس $2 \times N_M$ مشخص می‌شود که M تعداد موانع و N_M تعداد رئوس هر مانع در فضای پیکربندی می‌باشد. مختصات رئوس تمامی موانع را می‌توان با $X_{\text{obstacles}}$ که یک ماتریس $2 \times (N_1 + N_2 + \dots + N_M)$ است، نشان داد. همانطور که گفته شد اگر موانع چندضلعی نباشند، با چندضلعی‌های تقریبی جایگزین می‌شوند.

$$X_{\text{obstacles}} = [X_{\text{obstacle1}} \quad \dots \quad X_{\text{obstacleM}}] \quad (12)$$

$X_{\text{obstacle1}}$ مختصات رئوس مانع اول است که خود ماتریسی $2 \times N_1$ می‌باشد، $X_{\text{obstacle2}}$ مختصات رئوس مانع دوم و ماتریسی $2 \times N_2$ و $X_{\text{obstacleM}}$ مختصات رئوس مانع M ام و ماتریسی $2 \times N_M$ می‌باشد.

برای امنیت بیشتر، مسیری انتخاب می‌شود که حداقل فاصله‌اش تا موانع فضای کار، بیشتر از چهار روش دیگر باشد. در واقع بیشینه‌سازی فاصله مسیر از موانع مورد نظر است. برای این منظور حداقل فاصله مسیر G_i از رئوس موانع از رابطه (۱۳) به دست می‌آید و از آنجا که می‌خواهیم هزینه کل سیستم حداقل گردد، این فاصله را از مجموع حداقل فاصله چهار مسیر تا موانع، کم کرده و پس از نرمالیزه‌سازی در هزینه کل سیستم لحاظ می‌کنیم.

$$\text{dist}(G_i, X_{\text{obstacles}}) \triangleq \min(|G_i| - |X_{\text{obstacles}}|) \quad (13)$$

$$J_{\text{safety}}(G_i) = \mu_2 \times \text{normalize} \left(\sum_{p=1}^4 \text{dist}(G_p, X_{\text{obstacles}}) - \text{dist}(G_i, X_{\text{obstacles}}) \right), \quad (14)$$

$i = 1, 2, 3, 4$

(G_i) تابعی معیار حداکثر فاصله تا موانع مسیر G_i می‌باشد.

در فضای پیکربندی شکل (۱۱) مسیر به دست آمده از الگوریتم HYBRID-VQVW همان مسیر گراف پدیداری می‌باشد. در واقع الگوریتم HYBRID-VQVW نشان می‌دهد که در این فضای پیکربندی، مسیر گراف پدیداری بهترین مسیر را نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌دهد. نتایج عددی جدول (۴) صحت این ادعا را نشان می‌دهند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با ترکیب چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج در یک ساختار واحد، یک الگوریتم طراحی مسیر سراسری جدید به نام HYBRID-VQVW پیشنهاد شد. در این الگوریتم در هر فاصله نمونه برداری، پس از ساخت چهار مسیر سراسری روی فضای پیکربندی، بهترین آن‌ها بر اساس ملاک‌های طول، امنیت و همواری مسیر انتخاب شد. در واقع مسیر تولید شده با این روش از مزایای هر یک از این چهار روش بهره گرفت و معایبشان را به حداقل رسانید. نتایج شبیه‌سازی این الگوریتم و مقایسه آن با الگوریتم‌های گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج نشان می‌دهند که مسیر تولید شده با این روش از مسیرهای دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه‌موج کوتاهتر و هموارتر بوده و نسبت به گراف پدیداری امن‌تر است. بنابراین در این روش مبادله‌ای موثر بین کوتاهترین، امن‌ترین و هموارترین مسیر انجام می‌گیرد. این راه‌حل نقطه شروع خوبی در حل عددی مسئله طراحی مسیر برای وسایل نقلیه خودگردان زیرآبی می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی پیاده‌سازی الگوریتم HYBRID-VQVW را در چندین فضای پیکربندی نشان می‌دهد. شکل‌های (۸) و (۹) دو فضای پیکربندی مختلف را نشان می‌دهند که در آنها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی HYBRID-VQVW مسیری به دست آمده است که مطابق جداول (۱) و (۲) طول و حداکثر تغییر زاویه حرکت آن از سه مسیر دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج کمتر بوده که از این لحاظ تقریباً با مسیر گراف پدیداری برابری می‌کند. برتری مسیر به دست آمده نسبت به روش گراف پدیداری همانطور که در این دو شکل نیز مشخص است امنیت آن می‌باشد. مسیر HYBRID-VQVW در فاصله مناسبی از موانع قرار گرفته است در نتیجه مسیری بدون برخورد را از نقطه شروع تا هدف ضمانت می‌کند. مقادیر هزینه کل نشان می‌دهند که هزینه روش جدید از چهار روش قبلی کمتر می‌باشد. در واقع با استفاده از این روش جدید می‌توان توازنی بین هر سه فاکتور طول، امنیت و همواری مسیر ایجاد کرد.

در فضای پیکربندی شکل (۱۰) همانطور که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود، حداکثر تغییر زاویه جهت حرکت^{۱۲} و طول مسیر کمتر از ۴ روش دیگر می‌باشد. در واقع نتایج عددی نشان می‌دهند که در این فضای پیکربندی خاص الگوریتم HYBRID-VQVW توانسته مسیری کوتاهتر و هموارتر از مسیر گراف پدیداری را تولید کند. از لحاظ امنیت نیز همانطور که از شکل (۱۰) مشخص است، مسیر امن است و در فاصله مناسبی از موانع قرار گرفته است. هزینه کل مسیر جدید نیز از هزینه چهار مسیر دیگر کمتر است.

Table (1): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, Vornoi diagram, quad tree and front-wave methods over configuration space (1)

جدول (۱): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج روی فضای پیکربندی (۱)

روش فاکتور بهینگی	گراف پدیداری	دیاگرام ورونوی	درخت چهاروجهی	جبهه موج	الگوریتم HYBRID-VQVW
طول مسیر	529.561149	595.9010792	578.1689594	594.953738	537.7659556
حداقل فاصله تا موانع	10	25.72896101	15.00408443	13.18198052	10
حداکثر تغییر زاویه حرکت	38.16219759	77.19848556	60.34376605	90	38.16219759
هزینه کل	0.161929	0.200494	0.191556	0.264165	0.158231

Table (2): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, Vornoi diagram, quad tree and front wave methods over configuration space (2)

جدول (۲): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج روی فضای پیکربندی (۲)

روش فاکتور بهینگی	گراف پدیداری	دیاگرام ورونوی	درخت چهاروجهی	جبهه موج	الگوریتم HYBRID-VQVW
طول مسیر	475.5729896	550.9355736	502.5868227	903.153082	501.8277375
حداقل فاصله تا موانع	10	12.48040191	10.80296909	22.78352526	12.28030003
حداکثر تغییر زاویه حرکت	24.56851901	62.74598389	59.61981296	50.19442891	47.03022948
هزینه کل	0.141046	0.301871	0.16192	0.234955	0.133678

Table (3): Comparison of HYBDIR-VQVW trajectory with visibility graph, vornoi diagram, quad tree and wave front methods over configuration space (3)

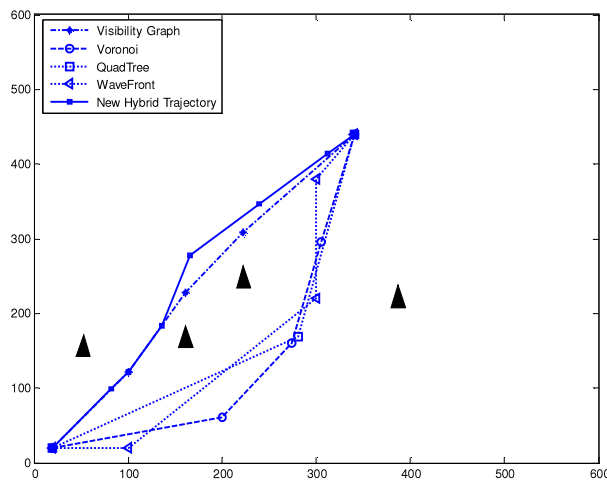
جدول (۳): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت چهاروجهی و جبهه موج روی فضای پیکربندی (۳)

روش فاکتور بهینگی	گراف پدیداری	دیاگرام ورونویی	درخت چهاروجهی	جبهه موج	الگوریتم HYBRID-VQVW
طول مسیر	567.1652772	707.3611561	585.8884574۴	638.3625461	547.2573494
حداقل فاصله تا موانع	10	16.1906414	17.20703382	15.151829	10
حداکثر تغییر زاویه حرکت	۳۴,۴۹۳۶۶۷۷۹	113.4317841	50.02809731	47.95910672	28.52895861
هزینه کل	۰,۱۵۶۹۲۹	0.317683	0.153667	0.212061	0.129768

Table (4): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, vornoi diagram, quad tree and wave front methods over configuration space (4)

جدول (۴): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت چهاروجهی و جبهه موج روی فضای پیکربندی (۴)

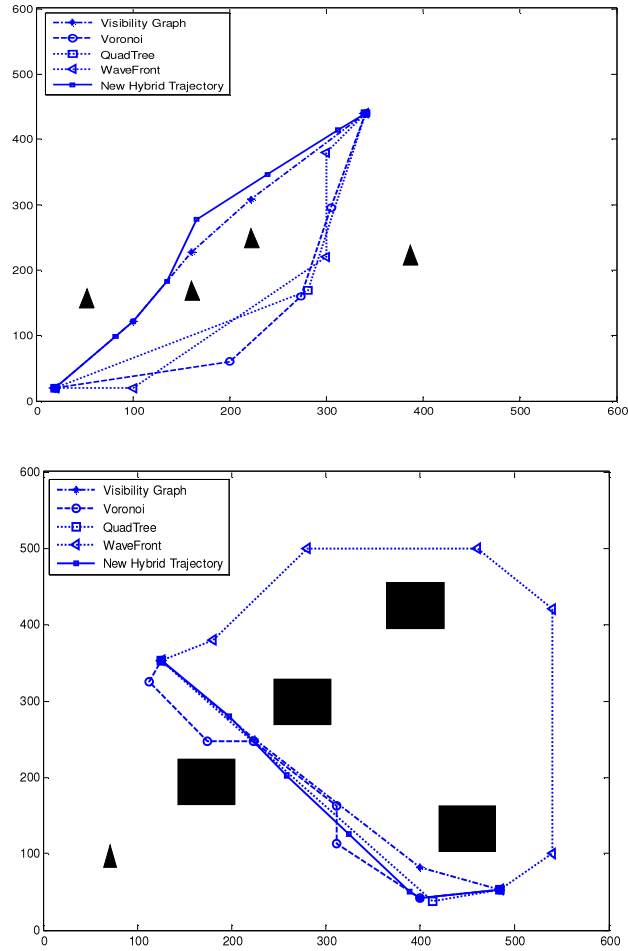
روش فاکتور بهینگی	گراف پدیداری	دیاگرام ورونویی	درخت چهاروجهی	جبهه موج	الگوریتم HYBRID-VQVW
طول مسیر	439.8700417	581.4543858	462.0814361	810.7589643	439.8700417
حداقل فاصله تا موانع	10	38.23043682	16.41739304	38.23477381	10
حداکثر تغییر زاویه حرکت	35.40679663	70.40613298	45.43306511	45	35.40679663
هزینه کل	0.180716	0.238885	0.189842	0.20984	0.180716



شکل (۸): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت

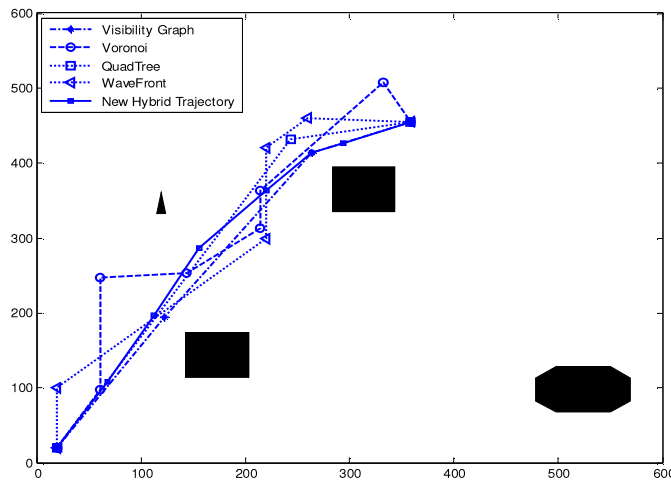
چهاروجهی و جبهه موج در فضای پیکربندی (۱)

Fig. (8): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, Vornoi diagram, quad tree and wave front methods over configuration space (1)



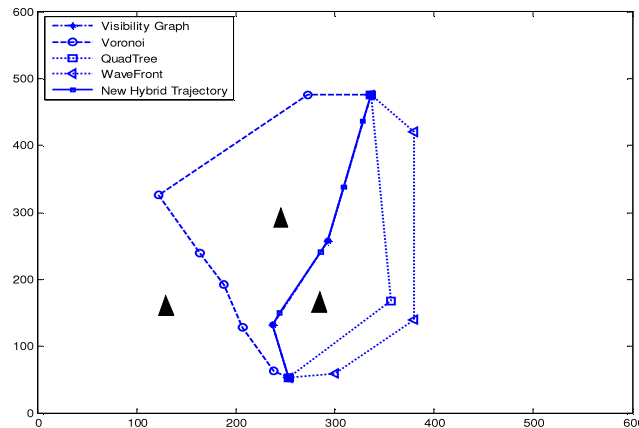
شکل (۹): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت چهاروجهی و جنبه موج در فضای پیکربندی (۲)

Fig. (9): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, Vornoi diagram, quad tree and wave front methods over configuration space (2)



شکل (۱۰): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونویی، درخت چهاروجهی و جنبه موج در فضای پیکربندی (۳)

Fig. (10): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, Vornoi diagram, quad tree and wave front methods over configuration space (3)



شکل (۱۱): مقایسه مسیر HYBRID-VQVW با چهار روش سراسری گراف پدیداری، دیاگرام ورونوی، درخت چهاروجهی و جبهه موج در فضای پیکربندی (۴)
 Fig. (11): Comparison of HYBRID-VQVW trajectory with visibility graph, Vornoi diagram, quad tree and wave front methods over configuration space (4)

بی‌نوشت:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1- Remotely Operated Vehicle | 7- Mobile Robotics Interactive Tool |
| 2- Autonomous Underwater Vehicle | 8- Voronoi Diagram |
| 3- Global Algorithms | 9- QuadTree |
| 4- Local (Reactive) | 10- WaveFront |
| 5- Configuration Space (C-Space) | 11- Hotel Load |
| 6- Visibility Graph | 12- Yaw |

مراجع

- [1] A.B. Shah, "An obstacle avoidance strategy for the 2007 darpa urban challenge", M.S. Thesis, The Ohio State University, USA, 2008.
- [2] F.L. Lewis, S.S. Ge., "Autonomous mobile robots sensing, control, decision making and applications", CRC Press, New York, USA, 2006.
- [3] T. Lozano-Perez, M.A. Wesley, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", ACM Dig. Lib., Vol.22, No.10, pp.560-570, 1979.
- [4] R. Prasanth Kumar, A. Dasgupta, C.S. Kumar, "Real-time optimal motion planning for autonomous underwater vehicles", Science Direct/ocean Engi., Vol.32, No.11-12, pp.1431-1447, 2005.
- [5] E. Masehian, M.R. Amin-Naseri, "A voronoi diagram-visibility graph-potential field compound algorithm for robot path planning", Wiley InterScience, Vol.21, No.6, pp.275-300, 2004.
- [6] G. Antonelli, S. Chiaverini, R. Finotello, R. Schiavon, "Real-time path planning and obstacle avoidance for rais: An autonomous underwater vehicle", IEEE/Oceanic Engineering, Vol.26, No.2, April 2001.
- [7] J. Borenstein, Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots", IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyb., Vol.19, No.5, pp.1179-1187, Sep - Oct. 1989.
- [8] D.B. Marco, A.J. Healey, R.B. McGhee, "Autonomous underwater vehicles: Hybrid control of mission and motion", Spr. Auto. Rob., Vol.3, No.2-3, pp.95-112, 1996.
- [9] V. Rigaud, et al, "UNION :Underwater intelligent operation and navigation", INRIA Sophia, pp.25-35, 1996.
- [10] J.C. Hyland, F.J. Taylor, "Mine avoidance techniques for underwater vehicles", IEEE/Oceanic Engineering, Vol.18, No.3, July 1993.
- [11] V. Kanakakis, N. Tsourveloudis, "Evolutionary path planning and navigation of autonomous underwater vehicles", Pro. of 15th Medi. Conf. on Con. and Aut., pp.27-29, 2007.
- [12] N.K. Yilmaz, P.F.J. Lermusiaux, N.M. Patrikalakis, "Path planning of autonomous underwater vehicles for adaptive sampling using mixed integer linear programming", Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Sep. 2005.
- [13] W. Hong-jian, X. Wei, "Research on global path planning based on ant colony optimization for AUV", Jou. of Mar. Sci. and App., Vol.8, No.1, pp.58-64, 2009.
- [14] R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, "Introduction to autonomous mobile robots", The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 2004.
- [15] J.L. Guzmán, et al, "An interactive tool for mobile robot motion planning", Rob. and Aut. Sys., Vol.56, pp.396-409, 2008.

- [16] J. Laumond, "Obstacle growing in a nonpolygonal world", Else. Inf. Proc. Let., Vol.25, No.1, pp.41-50, April 1987.
- [17] C.H. Papdimitriou, "An algorithm for shortest-path motion in three dimensions", Science Direct, Vol.20, No.5, pp.259-263, 1985.
- [18] K.K. Gupta, Z. Gue, "Motion planning for many degrees of freedom sequential search with backtracking", IEEE Trans. on Con. and Aut., Vol.11, No.6, pp.2328-2333, 1995.
- [19] O. Takahashi, R.J. Schilling, "Motion planning in a plane using generalized voronoi diagrams", IEEE Trans. on Con. and Aut., Vol.5, No.2, pp.143-150, 1989.
- [20] J. Canny, "A voronoi method for the piano_movers problem", IEEE/ICRA, pp.530-535, 1985.
- [21] R.A. Finkel, J.L. Bentley, "Quad trees a data structure for retrieval on composite keys", ACTA Info., Vol.4, No.1, pp.1-9, 1974.
- [22] L.A. Gonzalez, "Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle", B.E. Thesis, The University of Western Australia, Australia, 2004.
- [23] Y.S. Jung, K.W. Lee, M.H. Choi, B.H. Lee, "An efficient underwater coverage method for multi-AUV with sea current disturbances", Int. Jou. of Con., Auto. and Sys., Vol.7, No.4, pp.615-629, 2009.
- [24] J.W. Nicholson, "Autonomous optimal rendezvous of underwater vehicles", Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2004.

