

## هدایت و کنترل یک ربات زیرآبی به روش کنترل فازی

مهدی قنوتی<sup>۱</sup>، افشین قنبرزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ؛ [www.royak.ir](http://www.royak.ir)

<sup>۲</sup> دکترای مهندسی مکانیک

### چکیده

در این طرح هدایت و کنترل یک ربات زیر آبی شامل سه موتور و پروانه های متصل به آن انجام شده است. برای کنترل ربات که شامل چهار درجه آزادی است از کنترل فازی که از روش های نوین کنترل محسوب می شود استفاده شده است. کنترل فازی بر اساس تجربیات انسانی و نوشتن قوانین مورد نیاز انجام می گیرد. ربات همچنین قابل کنترل و هدایت توسط کاربر نیز می باشد. از این ربات می توان در محیط دریا یا استخر برای یافتن نقطه هدف و قرار گرفتن در جهت مورد نظر استفاده کرد. علاوه بر این ربات می تواند مسیری مشخص را نیز دنبال کند و در آن مسیر به جستجو بپردازد. این ربات قادر است انواع موانع در سطح یا در عمق را پشت سر بگذارد و به سمت هدف حرکت کند و عبور از موانع را با استفاده از قوانین فازی انجام می دهد، بدین معنی که در برخورد با هر نوع مانعی، ربات زیرآبی تصمیم لازم را برای عدم برخورد با آن در نظر گرفته و از آن عبور می کند. برای شبیه سازی سیستم مورد نیاز از نرم افزارهای 'webots' که یک نرم افزار قوی در شبیه سازی رباتهای متحرک می باشد و نرم افزار ریاضی 'maple' استفاده شده است و نتایج بدست آمده از محیط شبیه سازی شده بسیار نزدیک به واقعیت می باشند.

**کلمات کلیدی:** ربات زیرآبی خودمختار<sup>۲</sup>، گریز از موانع<sup>۳</sup>، Rov<sup>۴</sup>

### مقدمه

در این طرح به بررسی سیستم هدایت و کنترل یک ربات زیرآبی با چهار درجه آزادی پرداخته می شود که در محیط سه بعدی دریا یا استخر قرار گرفته است. و با گریز از موانع به سمت هدف پیش می رود.

ربات های زیرآبی از مهم ترین رباتها می باشند که در بسیاری از امور دریایی کاربرد دارند. خصوصا در اکتشافات، امداد و تحقیق. لذا با توجه به این موضوع همواره در تکامل هستند. اولین رباتهای زیرآبی مستقل در سال ۱۹۷۰ در دانشگاه MIT در آمریکا توسعه یافتند. و هم اینک نیز این دانشگاه رباتهای زیرآبی موفق ساخته می شود [1]. بعد از آن شوروی سابق برای اهداف نظامی مورد استفاده قرار داد که آنها را ربات زیر دریایی هم می گفتند. امروز رباتهای زیرآبی برای عمق ها مختلف ساخته می شوند و آنها تا عمقهای ده هزار متر هم

می روند [2]. ناوبری این رباتها بوسیله سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) و قطب نما و ژيروسکوپ صورت می گیرد [3]. از چالشهای اصلی در طراحی آنها توان یا انرژی مورد نیاز، مساله هدایت و گریز از موانع است.

با توجه به توسعه صنعت دریا نوردی در ایران و وجود منابع نفتی و ترافیک بالا در خلیج فارس نیاز به رباتهای زیرآبی بسیار محسوس است. لذا انجام کارهای تحقیقاتی در این زمینه می تواند راه گشای ساخت چنین رباتهایی شود تا پروژه هایی دریایی ما با کیفیت بهتری انجام شود. در همین راستا در این طرح سعی بر آن شده که همه مراحل کنترل و شبیه سازی یک ربات زیر آبی انجام شود اگرچه طراحی قطعات آن از نظر دوام و استحکام نیاز به پروژه دیگری دارد ولی در اینجا فرض بر آن بوده که تمامی قطعات با توجه به بار اندکی که تحمل می کنند دچار هیچ گونه شکستی نمی شوند و پروژه حالت دینامیکی و کنترلی به خود می گیرد تا طراحی اجزا.

و سرانجام استراتژی های مختلف برای رسیدن به اهداف از پیش معلوم و عبور از موانعی که ممکن است در سر راه ماموریت باشد، بحث این پروژه است. هرگاه ارگانی بخواهد این طرح را عملی کند مطمئنا بر پایه این طرح و اندکی آزمایش می تواند ربات را بسازد.

### بدنه اصلی مقالات

تعریف ربات زیر آبی: یک وسیله نقلیه قابل کنترل از راه دور یا خودمختار زیردریایی است. ربات زیرآبی به اپراتور این امکان را می دهد که این وسیله را در اعماق آب کنترل و هدایت کند و از طریق اعمال فرامین عملیات مورد نظر را از طریق تجهیزات ربات، انجام دهد، یا اینکه در حالت خودمختاری ربات خود به درک محیطش بپردازد و به صورت مستقل از انسان در آب حرکت کند که هر دو اختصارا «ربات زیرآبی» خوانده می شود [4].

تعریف مساله: در این طرح یک ربات زیرآبی با توجه به امکانات و کارهایی که از آن خواسته شده است طراحی و شبیه سازی اولیه می شود سپس معادلات دینامیکی حرکت آن استخراج شده و با توجه به این معادلات سیستم کنترلی تعریف می گردد. با توجه به توانایی این سیستم کنترلی، طرح اصلاح شده و شبیه سازی نهایی انجام می گیرد و در محیط نرم افزار نتایج بررسی می شوند. همچنین این ربات علاوه بر رسیدن به نقطه هدف و قرار گرفتن در جهت مطلوب باید بتواند از موانع احتمالی پیش رو هم عبور کند. در نهایت مدل اصلی ربات و محیط حرکت آن شبیه سازی شده و ربات در آن به

<sup>۱</sup> [www.cyberbotics.com](http://www.cyberbotics.com).

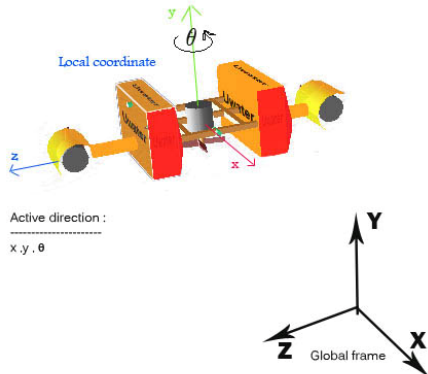
<sup>۲</sup> Autonomus underwater vichels.

<sup>۳</sup> Obstacle avoidance.

<sup>۴</sup> Remotely operated underwater vehicles.

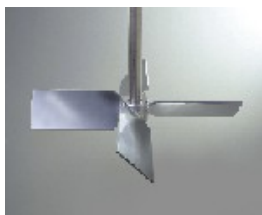
جنس بدنه ربات از آلومینیوم با چگالی  $2750 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است. موتورهای از نوع الکتریکی سرو یا dc باید باشند که اینجا بیشتر روی سرو موتور تاکید شده است و گشتاوری معادل  $1/5 \text{ Nm}$  فراهم می کنند که برای حرکت ربات کافیست.

به دلیل حفظ تعادل بهتر و اینکه مرکز جرم پایین تر از مرکز فشار ربات، هنگام غوطه وری باشد مرکز جرم ربات ۵ سانتی متر پایین تر از مرکز هندسی ربات قرار دارد. یعنی مرکز جرم ربات ۵ سانتی متر پایین تر از مرکز موتور وسطی و در مختصات  $(0, -0.05, 0)$  قرار دارد و دستگاه مختصات محلی مطابق شکل ۲ در مرکز ربات قرار داده شده است



شکل ۲: دستگاه های مختصات محلی و جهانی و سه متغیر اصلی

پروانه هایی که برای حرکت ربات در نظر گرفته شده اند از نوع جریان موازی مانند پروانه یک قایق موتوری می باشند ولی در اینجا به صورت ساده و با پیچش ۴۵ درجه در نظر گرفته شده اند که هر پره به صورت مکعب مستطیلی با ابعاد ۶ سانتی متر ارتفاع، ۲ سانتی متر عرض و ۰/۵ سانتی متر ضخامت در نظر گرفته شده است و در سری A200 شرکت Lightnin مطابق شکل ۳ قرار دارد.



شکل ۳: A200 پره کلاسیک با پیچش ۴۵ درجه

وزن ربات مقداری کمتر از نیروی ارشمیدس در حالت غوطه وری کامل در نظر گرفته شده است که اگر در هر شرایطی کلیه موتورهای خاموش شدند ربات بوسیله نیروی ارشمیدس به سطح آب آورده می شود. با این ایده ربات Uwater برای پایین رفتن نیاز به چرخش پروانه پایینی دارد تا بر نیروی ارشمیدس غلبه کند. اگر چه اختلاف بین وزن ربات و نیروی ارشمیدس کل بسیار اندک است و موتور وسط نیاز به گشتاور زیادی برای پایین رفتن ندارد. اصولاً در هر دو

حرکت واداشته می شود. نتیجه طرح به عینه مشاهده شده و کارایی آن مورد ارزیابی می تواند قرار گیرد. دو نوع هدف مطرح و فرضیات زیر ناظر بر حرکت رباتند:

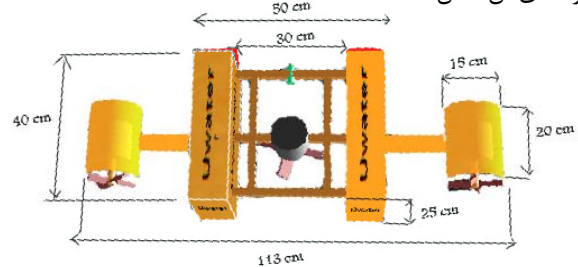
۱- ربات به نقطه مطلوب<sup>۵</sup> برود و رو به جهت<sup>۶</sup> خواسته شده قرار گیرد. در این روش ربات خود هر مسیری را می تواند برای رسیدن به هدف انتخاب کند، اما مسیر باید یکی از کوتاهترین مسیرها باشد و با کمترین زمان و به مانعی نیز اصابت نکند.

۲- ربات یک مسیر مطلوب را که مدنظر است را طی کند و شروع و پایان این مسیر مشخص است. فرضاً ربات باید در امتداد خطی در کنار یک کشتی غرق شده حرکت کند، یا دور آن بچرخد و بوسیله تجهیزاتی که روی آن نصب است مثلاً دوربین فیلمبرداری، کاوش کند.

رباتی که در این پروژه طراحی و سیستم کنترلش تعریف می شود را با نام Uwater خواهیم شناخت که هم به صورت خودمختار هدایت می شود و هم در صورت نیاز به صورت دستی و بوسیله کاربر. همچنین این ربات بدون کابل است یعنی انرژی لازم را از باتری همراه خودش بدست می آورد.

### بیان طرح: ربانی با چهار درجه آزادی و دارای سه موتور محرک

برای حرکت و کنترل در نظر گرفته شد که دو موتور در طرفین برای حرکت به جلو و عقب و چرخش و یک موتور در زیر برای حرکت عمق. لذا چهار درجه آزادی وجود دارد شامل  $X, Y, Z$  و یک درجه چرخش ربات یعنی  $\phi$  حول محور عمود بر سطح  $Y$  برای کنترل حرکت ربات باید این چهار مولفه کنترل شوند. در شکل ۱ طرح و اندازه های آن نشان داده شده است.



شکل ۱: طرح ربات Uwater

پهنای کل ربات ۱۱۳ سانتی متر، ارتفاع آن ۲۵ سانتی متر، طول آن ۴۰ سانتی متر، طول هر بال ۳۱/۵ سانتی متر، جرم کل ربات با احتساب باتری و تمام موارد مورد نیاز ۲۱/۹۲ کیلوگرم است و جرم هر موتور ۲/۵ کیلوگرم برآورده شده است.

جهت عمق و جلو ربات نزدیک به حالت تعادل قرار دارد تا با کمترین نیرو به حرکت بیفتد .

### مدل کردن ربات زیرآبی Uwater:

مدل کردن ربات زیرآبی از نگاه کلی بوسیله رایانه بدین صورت انجام گرفت که بوسیله نرم افزار webots نخست محیط آب با ویژگی نیروی ارشمیدس و نیروهای درگ برنامه نویسی شد . اجزا و موانع لازم هم در قسمت گرافیکی قرار داده شد. سپس قطعات ربات شامل بدنه و موتورهای الکتریکی و خصوصیاتشان و بالهای ربات و نهایتا پروانه ها مدل شد . نحوه قرار گیری این اجزا در کنار هم و نوع مفصل نیز مشخص گردید . اکنون ربات زیرآبی بصورت ساکن روی آب شناور ماند و منتظر فرمان شد تا حرکت کند. بوسیله تعیین زاویه ی خط واصل بین نقطه هدف تا مرکز ربات ،سوی هدف مشخص شد و دستور حرکت در برنامه صادر شد . (برنامه و فایل اجرای مدل قابل ارائه بر روی سی دی می باشد).نهایتا وقتی ربات توانست به حرکت بیفتد باید معادلات دیفرانسیل حرکت آن در دو جهت X محلی و Y مطلق و چرخش کلی ربات مشخص شود تا بتوان نیروی لازم برای حرکت و رسیدن به سرعت مطلوب و نهایتا نیروی لازم برای توقف را برآورد کرد .پس از اتمام این مرحله از کار نوبت به عبور از موانع می رسد.

سنسورهای لازم ، مانند فاصله یاب ، gps و مادون قرمز به ربات اضافه شد و برنامه نویسی عبور از موانع توسط اطلاعات گرفته شده از محیط بوسیله سنسورها تکمیل می شود و ربات راه خود را برای رسیدن به هدف پیدا می کند . در اینجا کار مدل کردن و شبیه سازی ربات به انجام می رسد و در صورت تمایل می توان ربات را ساخت و برنامه را به پردازنده آن منتقل کرد .

### مدلسازی دینامیکی،استخراج معادلات حرکت ربات:

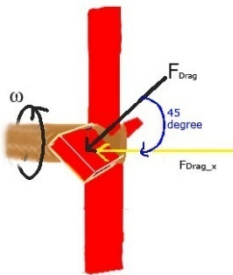
ربات زیرآبی مورد بررسی در این طرح دارای چهار درجه آزادی است ،ولی موتورهای آن به گونه ای چیده شده اند که فقط در سه جهت حرکت عمده دارد که شامل حرکت به سمت جلو با متغیر X،حرکت دورانی حول محورعمودی گذرنده از مرکز آن Y با متغیر  $\theta$  و حرکت در جهت عمق با متغیر Y .یک حرکت بدون موتور هم ربات معمولا در پیچ ها انجام می دهد که حرکت جانبی در راستای محور Z است.که چون کوچک است معادلات آن نوشته نمی شود.لازم به توضیح است که ربات چون یک جسم صلب است در فضا عموما شش درجه آزادی دارد. ولی دوران حول محور های افقی اتفاق نمی افتد .مگر آنکه برخوردی صورت گیرد ،که آن هم جز فرضیات نیست .لذا می توان حرکت کلی ربات را چهار درجه محسوب کرد.

الف)حرکت دورانی ربات: قانون نیوتن را برای دوران حول محور Y نوشته و برآیند گشتاورها بدست آورده می شود .

$$\sum M = I\alpha \quad (1)$$

که  $I$  ممان اینرسی جرمی حول محور Y گذرنده از مرکز جرم ربات است. و آن را باید محاسبه نمود . چون بدنه ربات همواره افقی است . می توان گفت محور Y و محور Y جهانی همیشه موازی و هم راستا قرار دارند و فقط دارای دوران نسبت به هم می باشند که این قید دو درجه آزادی از حرکت کلی ربات را می گیرد و آن را به چهار درجه تقلیل می دهد .  $\theta$  دوران حول محور Y است که در جهت پادساعتگرد مثبت است. ممان اینرسی جرمی ربات به طور کل حول محور Y برابر  $I=2.565 \text{ kg.m}^2$  بدست آمد.

به منظور محاسبه گشتاور وارد بر ربات حول محور Y نخست باید نیروی جلوبرندگی پره ها را محاسبه نمود. در شکل ۴ یکی از پروانه ها نشان داده شده است و نیروی درگ وارد بر آن کشیده شده است که این نیرو عامل جلو رفتن ربات است.



شکل ۴: پروانه ربات و نیروی درگ وارد بر آن

نیروی درگ جلوبرنده وارد بر یک پره چنین بدست می آید:

$$F_D = -\frac{1}{2} \rho c_D A \sin 45 \times v_f^2 \quad (2)$$

در این فرمول نخست باید سرعت سیال را دانست که این سرعت از رابطه ۳ بدست می آید[5]:

$$T = 2\pi\rho\omega \frac{R^4 v_f}{4} - 2\pi\rho v_f^2 \frac{R^3}{3} \quad (3)$$

فرمول ۳ رابطه بین گشتاور موتور و سرعت دورانی پروانه و سرعت خطی سیال را بیان می دارد. اگر این رابطه را برحسب  $v_f$  بازنویسی کنیم یک معادله درجه ۲ خواهیم داشت دلتا این رابطه چنین است

$$\Delta = 9R^2\omega^2 - 16 \times \frac{6T}{\pi\rho R^3} \quad (4)$$

$e_x$  و به طور کلی  $e$  در سه جهت برای تمام اجزا سازنده ربات باید محاسبه شود. پس قرار دادن گشتاور از معادله ۷ و گشتاور نیروی درگ مقاوم از رابطه ۹ و ممان اینرسی کل در رابطه ۱ بدست می آید

$$\Sigma T = 8.412 \times 10^{-4} \times \omega - 2\dot{\theta}_y^2 (r_1^3 e_{1x} + r_3^3 e_{3x} + r_6^3 e_{6x}) = 2.565\ddot{\theta}$$

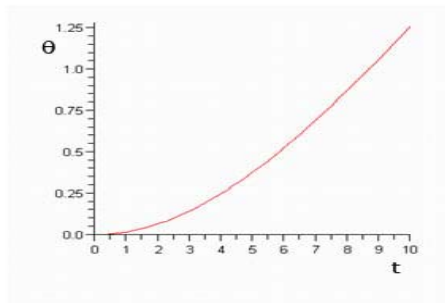
در معادله بالا  $\omega$  سرعت زاویه ای پروانه است و  $\ddot{\theta}$  سرعت دورانی کل ربات حول محور  $y$  است و  $r$ ها فاصله مرکز جرم هر جسم تا مرکز ربات است که سرعت خطی را ایجاد می کند و بازوی گشتاور نیز می باشند. پس از قرار دادن مقادیر متغیرهای یک معادله دیفرانسیل غیر خطی برای دوران ربات بدست می آید

$$2 \cdot 565\ddot{\theta} + 1 \cdot 682\dot{\theta}^2 - 8 \cdot 412 \times 10^{-4}\omega^2 = 0 \quad (10)$$

وقتی این معادله را با شرایط اولیه صفر حل شود و سرعت زاویه ای ثابت ۱۰ رادیان بر ثانیه نیز برای چرخش پروانه های ربات انتخاب شود چنین جوابی بدست خواهد آمد:

$$\theta(t) = -\frac{1}{290}\sqrt{4206} \times t + \frac{2565}{1682} \ln\left(\frac{1}{2}e^{\left(\frac{58}{12825}\sqrt{4206}t\right)} + \frac{1}{2}\right) \quad (11)$$

در شکل ۶ تغییرات  $\theta$  با زمان در ده ثانیه اول نشان داده شده است



شکل ۶: تغییرات دوران ربات حول محور  $y$

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود نمودار تقریباً با سرعت ثابت افزایش می یابد و بعد از قریب به ۵ ثانیه به سرعت ثابت و ماکزیمم ۰/۲۲۳ رادیان بر ثانیه می رسد.

این ربات باید قادر باشد در زاویه مورد نظر بایستد فرضاً در ۹۰ درجه، لذا پس از طی دورانی به منظور ترمز گرفتن پروانه های ربات شروع به چرخیدن به صورت عکس جهت اولیه می کنند و پس از توقف کامل، موتور خاموش می شود. مساله تازه این است که ربات در کجا شروع به ترمز گرفتن کند تا در جهت مطلوب متوقف شود؟ جهتی که رو به سوی هدف است و نقطه شروع جلو رفتن است؟ پاسخ به این سوال مستلزم حل معادله دیفرانسیلی است که مانند معادله دیفرانسیل (۱۰) است به جز آنکه گشتاور عکس به ربات وارد

اگر دلتا مثبت باشد معادله جواب دارد. برای اینکه رابطه ثابتی بین گشتاور و سرعت زاویه ای برقرار باشد، گشتاور را به وسیله برنامه کنترلی طوری تنظیم می کنیم که همواره سرعت زاویه ای به ربات بدهد که دلتا صفر شود و دارای سرعت زاویه ثابتی باشیم در این صورت سرعت خطی سیال یا همان جلو رفتن ربات برابر می شود با

$$v_f = \frac{3R\omega}{8} \quad (5)$$

از انجایی که  $R=0.06$  m در نتیجه  $v_f = 0.0225\omega$  و نیروی

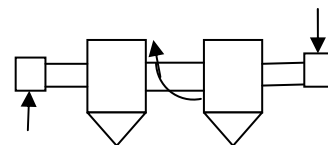
درگ برای چهار پره که یک پروانه است برابر می شود با

$$F_D = 4 \times -0.424 \times (0.0225\omega)^2 = 8.56 \times 10^{-4}\omega^2 \quad (6)$$

که ۰/۴۲۴ حاصلضرب  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ،  $A = 0.02 \times 0.06$  در ضریب درگ  $C_D = 2$  است. با فرض اینکه نیروی جلوبرندگی بر مرکز پروانه وارد می شود و با توجه به اینکه فاصله نیروها تا مرکز ربات ۰/۴۹ متر است گشتاوری که باعث چرخش کل ربات می شود برابر می شود با:

$$T = 2 \times F_x \times 0.49 = 8.412 \times 10^{-4} \times \omega^2 \quad (7)$$

$F_x$  نیروی درگ در جهت  $x$  محلی است یعنی همواره عمود بر مرکز پروانه که این گشتاور مطابق شکل ۵ وارد می شود



شکل ۵: گشتاور وارد بر ربات زیرآبی

اما نیروی درگ وارد بر بدنه ربات در جهت مخالف چرخش عمل می کند. هفت جسم داریم که در مجموع بدنه ربات را تشکیل می دهد و نیروی درگ وارد بر آنها در راستای محور  $x$  محلی وارد می شود. برای سهولت در کار ضریب  $e_x$  را بدین صورت تعریف می کنیم.

$$e_x = \frac{1}{2}\rho C_D A_x \quad (8)$$

و نیروی درگ وارد بر بدنه ربات چنین محاسبه می شود

$$f_{dx} = -e_x v_x^2 \quad (9)$$

لذا برای داشتن مقدار لحظه ای مسافت لازم برای توقف، همواره و در هر لحظه برنامه ربات باید این معادله را حل کند

$$\theta_s(t_s) = \theta_b(t_s) - a \quad (16)$$

که  $a$  مقدار دورانیست که ربات تاکنون پیموده و  $t_s$  زمان لازم برای توقف و  $\theta_s$  دوران لازم برای توقف است. لذا ربات برای رسیدن به زاویه مطلوب  $\theta_g$  باید نخست  $\theta_s - \theta_g$  رادیان دوران کند آنگاه شروع به توقف کند به اندازه  $t_s$  ثانیه.

بدین ترتیب مساله دوران ربات به پایان می رسد و دو مساله دیگر باقی می ماند نخست معادله دیفرانسیل جلو رفتن و ترمز در آن جهت به گونه ای که در نقطه مطلوب بایستد و دوم مساله حرکت در عمق یا معادله دیفرانسیل این حرکت است و نحوه توقف در عمق به گونه ای که ربات نه بالا رود نه پایین برود.

ب) حرکت رو به جلو : از آنجا که ربات همواره در جهت  $X$  محلی حرکت می کند. بنابراین قانون دوم نیوتن را در این جهت نوشته و نیروهای وارده را که شامل جلوبرندگی موتورهای چپ و راست و نیروی درگ مخالف حرکت وارد بر بدنه است را یافته و معادله دیفرانسیل را خواهیم نوشت. مقدار نیروی جلوبرندگی که قبلاً برای یک موتور بدست آمد اکنون در دو ضرب می شود چون دو موتور در یک جهت کار می کنند. سرعت زاویه ای  $15$  رادیان بر ثانیه برای دوران پروانه ها و جلو رفتن ربات مناسب است. مانند حالت الف معادله دیفرانسیل یافته می شود و مجموع نیروها در جهت  $X$  چنین معادله دیفرانسیلی را می دهد:

$$0 \cdot 3785 - 51 \cdot 57\ddot{x}^2 = 21 \cdot 921\ddot{x} \quad (17)$$

حل این معادله دیفرانسیل با نرم افزار maple با شرایط اولیه صفر برای سرعت و جابه جایی چنین است

$$x(t) = -0.086t + 0.423Ln(0.5e^{(0.408t)}) + 0.5 \quad (18)$$

در اینجا نیز مانند حالت دوران معادله سرعت در حال ترمز یافته می شود و ریشه آن را بدست آورده تا زمان لازم برای توقف بدست آید و از این زمان، مسافت لازم برای توقف بدست آید. و لذا ربات همواره در نقطه  $X_g - X_s$  شروع به توقف می کند و پس از گذشت  $t_{sx}$  ثانیه متوقف می شود. که  $X_g$  فاصله تا نقطه هدف است و  $X_s$  مسافت لازم برای توقف است. ماکزیمم سرعت خطی ربات  $8/6$  سانتی متر بر ثانیه بدست می آید. در اجرا به دلیل اینکه همه شرایط ایده ال نیست عمل ربات را در نزدیکی نقطه هدف با سرعت کمتری حرکت می دهیم تا ترمز ناگهانی در سرعت بالا موجب تکانه نشود و ربات شروع

می شود و شرایط اولیه نیز دیگر صفر نیستند. چنین معادله دیفرانسیل غیر خطی می شود

$$2 \cdot 565\ddot{\theta} + 1 \cdot 682\dot{\theta}^2 + 8 \cdot 412 \times 10^{-4}\omega^2 = 0 \quad (11)$$

با دوران اولیه  $a$  و سرعت دورانی اولیه  $C$  که این سرعت معمولاً ماکزیمم یا  $0/223$  است، جواب معادله چنین بدست می آید:

$$\theta_b = a + \frac{2565}{3364} \ln \left( \frac{1}{4206} \left( 290 \sin \left( \frac{29}{12825} \sqrt{4206t_b} \right) c + \cos \left( \frac{29}{12825} \sqrt{4206t_b} \right) \sqrt{4206t_b} \right)^2 \right) \quad (12)$$

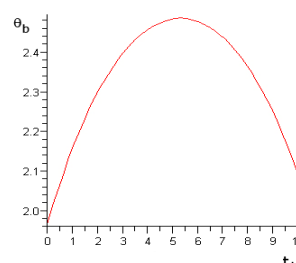
که  $\theta_b$  مقدار دوران هنگام ترمز گرفتن است از معادله ۱۲ مشتق گرفته می شود تا سرعت دورانی ربات هنگام ترمز کردن بدست آید

$$\dot{\theta}_b = \frac{1.524(42.527 \cos(0.146t_b)c - 9.510 \sin(0.146t_b))}{290 \sin(0.146t_b)c + 64.85 \cos(0.146t_b)} \quad (13)$$

و ریشه این معادله به دست آورده می شود یعنی جایی که ربات سرعت دورانی آن صفر می شود و توقف می کند. که چنین می شود

$$t_s = 6.819 \tan^{-1}(4.471c) \quad (14)$$

$t_s$  زمان لازم برای توقف ربات است. مشاهده می گردد که این زمان وابسته به سرعت در حال دوران ربات است. از آنجایی که ربات یک سرعت حدی دارد لذا این زمان نیز یک حدی دارد و اگر ربات با سرعت حدی  $0/223$  رادیان بر ثانیه شروع به توقف کند زمان توقف  $5/34$  ثانیه می شود. اکنون نمودار دوران در حال ترمز باید مورد بررسی قرار گیرد تا مقدار دوران لازم برای ایستادن نیز یافته شود. فرضاً ربات در زاویه  $1/97$  رادیان به حداکثر سرعت خود یعنی  $0/223$  رادیان بر ثانیه رسیده با این شرایط اولیه نمودار دوران در حال ترمز رسم شده است. شکل (۷). در این نمودار پس از قریب به  $5$  ثانیه سرعت صفر شده و ربات شروع به چرخش در جهت عکس می کند. لذا در همین نقطه باید حرکت متوقف شود و زاویه مطلوب ما در این نقطه باید قرار گیرد. مقدار دوران ماکزیمم تا ایست کامل برابر است با مقدار  $\theta_b$  در معادله (۱۲) به ازای  $5/34$  ثانیه



شکل ۷: تغییرات دوران در حال ترمز با زمان

دوران لازم برای توقف کامل ربات برابر است با:

$$\theta_s(5 \cdot 34) = \theta_b(5 \cdot 34) - a = 0 \cdot 526 \quad (15)$$

در این حالت مجموع تمام نیروهای ارشمیدس و وزن و نیروی موتور برابر صفر خواهد شد. لذا ربات چون سرعت اولیه ی آن نیز از قبل صفر شده بوده است در جای خود می ایستد.

بدین ترتیب ربات یک توقف و ایست موفقیت آمیز خواهد داشت. بنابراین در هر عمقی که ربات بخواهد بایستد باید  $y_s$  متر، قبل از هدف شروع به توقف به اندازه  $t_{sd}$  ثانیه کند. که این زمان از حل معادله دیفرانسیل و مشتق گیری و بدست آوردن ریشه مشتق بدست می آید.

$$t_{sd} = -4.163 \tan^{-1}(13.03v) \quad (20)$$

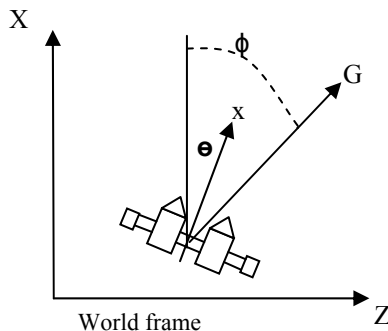
که  $v$  سرعت در جهت عمق ربات زیرآبی است. بدین ترتیب حرکت و ایستادن ربات در سه جهت اصلی آن تفسیر می شود و حال ربات قادر به حرکت است ولی استراژی حرکت به سوی هدف آن هنگامی که مانعی نباشد هنوز مشخص نشده است.

#### استراتژی حرکت:

اکنون ربات قادر به حرکت است. چگونه حرکت کند که نزدیکترین مسیر را طی کند یا کوتاهترین زمان را؟ در استراتژی حرکت ربات  $U_{water}$  ربات همزمان که دارد خود را در راستای زاویه هدف قرار می دهد، تغییر ارتفاع نیز می دهد یعنی ارتفاع مستقل از جهت گیری می شود و این باعث می شود بخشی از مسیر پیموده شود و ربات زودتر به هدف برسد اگرچه مسیرش به صورت یک منحنی می شود که پایین تر از خط مستقیم مرتبط بین هدف و مرکز ربات، قرار می گیرد. برای اینکه ربات در زاویه هدف قرار بگیرد مختصات مکان خودش و نقطه هدف را باید بداند. نقطه شروع را هر لحظه با سیستم موقعیت یاب جهانی gps پیدا می کند و مختصات هدف نیز در شروع برنامه، کاربر باید به ربات بدهد. در اینجا مختصات هدف را  $(x_g, y_g, z_g)$  و مختصات مرکز ربات را  $(x_r, y_r, z_r)$  فرض می شود. لذا زاویه هدف  $\phi$  چنین بدست می آید.

$$\phi = \tan^{-1} \left| \frac{z_g - z_r}{x_g - x_r} \right| \quad (21)$$

$\phi$  زاویه بردار RG با محور جهانی X است بردار RG بردار است که مرکز ربات یعنی نقطه R را به نقطه هدف یعنی G وصل می کند.  $\theta$  زاویه جهت گیری ربات نسبت به محور جهانی و ثابت X است مانند شکل ۱۰ و کار برنامه ربات این است که اختلاف این دو زاویه را صفر کند یعنی  $\phi - \theta = 0$

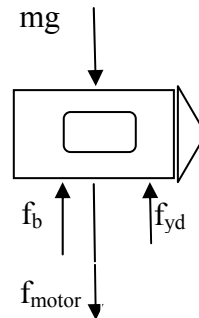


شکل ۱۰: جهت گیری ربات در صفحه افقی

بنابراین ربات پس از روشن شدن بلافاصله زاویه های  $\phi$  و  $\theta$  را می یابد و اختلاف آنها را بدست می آورد در صورتی که اختلافشان مثبت

به ارتعاش نکند. در واقع به جای تغییر آنی سرعت در هنگام ترمز سرعت به صورت چند مرحله شروع به کاهش می کند.

ج) حرکت در جهت عمق: در جهت پایین یا بالا علاوه بر نیروهای موتور، درگ  $f_{yd}$  و وزن ربات، نیروی ارشمیدس  $f_b$  نیز اضافه شده است. از آنجایی که ربات در حالت خاموش به سطح آب می آید در نتیجه برای ایستادن و ترمز گرفتن در جهت عمق یا  $y$  دیگر نیازی نیست موتور عکس بچرخد. فقط کافیه با دور کمتری حرکت کند به گونه ای که مجموع نیروی رو به پایین موتور و وزن ربات کمتر از نیروی ارشمیدس شود. مطابق شکل (۸)

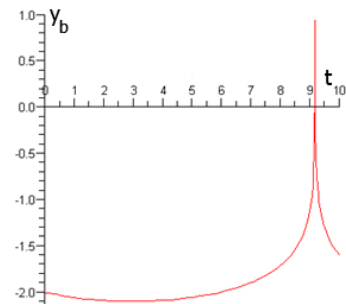


شکل ۸: نیروهای عمقی

معادله دیفرانسیلی که از نوشتن قانون دوم نیوتن برای نیروها در جهت  $y$  بدست می آید چنین است:

$$-21 \cdot 92 \ddot{y} + 68 \cdot 61 \dot{y}^2 - 0 \cdot 40 = 0 \quad (19)$$

برای اینکه حرکت عمقی ربات متوقف شود معادله دیفرانسیل حرکت همان است فقط مقدار سرعت زاویه ای موتور از ۱۲ رادیان بر ثانیه که هنگام پایین آمدن دارا است به ۵ رادیان بر ثانیه کاهش می یابد و پس از رسیدن به سرعت در جهت عمق صفر، به منظور پایداری توقف در عمق، باید سرعت زاویه پروانه موتور وسط به  $9/73$  رادیان بر ثانیه برسد و این نتایج از حل معادله دیفرانسیل هر تکه از حرکت و بررسی آنها بدست می آید. در شکل ۹ نمودار حرکت عمقی ربات را تا قبل از پایداری سرعت دیده می شود. سرعت اولیه و عدم تعادل در نیروها باعث حرکت نوسانی هنگام توقف می شود. برای خنثی کردن این نوسانات باید به محض رسیدن به سرعت صفر بار دیگر قدرت رو به پایین ربات را با افزایش سرعت دورانی موتور وسط بیشتر کرد تا توقف پایدار بدست آید.



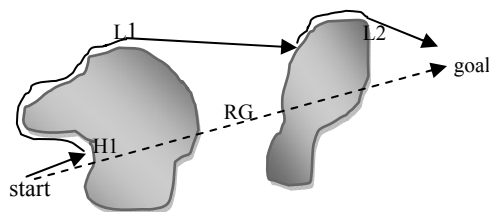
شکل ۹: حرکت عمقی ربات و توقفی چند ثانیه ای



می شود و این برنامه حرکت ربات تا رسیدن به هدف را کنترل می کند .

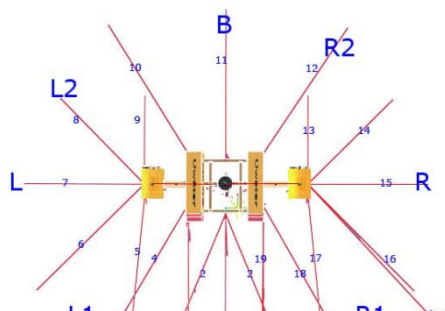
### عبور از موانع:

تحقیقاتی درباره عبور از موانع رباتهای زیرآبی به روش کنترل فازی انجام شده است [6]. در الگوریتم های گریز از موانع ، خواننده های سنسور نقش مهمی در مسیر آینده ربات بازی می کند [7]. روشی که در عبور از مانع ربات زیر آبی Uwater مورد استفاده قرار می گیرد بدین صورت است که ربات هر لحظه بردار RG را که از مرکز ربات به هدف متصل است به وسیله داده های سنسورهایش بررسی می کند، به آن اندازه ای که برد سنسورهایش است اگر مانعی در سر راهش بود مرز آن مانع را می پیماید و دور می زند تا جایی که دیگر بر سر راهش یا همان بردار RG دیگر مانعی نبیند آنگاه از مانع جدا می شود و به سمت هدف حرکت می کند. از آنجایی که ممکن است هنگام جدا شدن ربات از مانع جهت گیری آن به سمت هدف نباشد لذا این شرط نیز باید در نقطه جدایی بررسی شود که ربات نیاز به چرخش اضافی نداشته باشد . لذا اگر دو شرط برقرار بود ربات جدا می شود اول بردار RG به مانعی برخورد و دوم اینکه اختلاف زاویه جهت گیری ربات و جهت هدف کمتر از  $45^\circ$  باشد یا  $\beta < 45^\circ$  و چنین الگوریتمی دو مانع را چنین طی می کند



شکل ۱۱: عبور از مانع ربات زیرآبی

بردار فرضی خط چین RG که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در هر نقطه از مسیر ربات، عوض می شود چون ربات زیر آبی همواره در جهت نوک یا جلو خود حرکت می کند هنگامی که از کنار مانعی عبور می کند بوسیله سنسورهای جانبی متوجه مانع می شود. اکنون که استراتژی کلی عبور از مانع ربات زیرآبی مشخص شد باید طرح سنسورها معلوم شود و از روی آن مفاهیم فازی چون چپ و راست و جلو و عقب و همچنین فرمانهای دور زدن چپ و راست تبیین شوند . یعنی اینکه منظور از سمت چپ ربات کجاست آیا چپ با جلو یا عقب تداخل دارد یا مجزاست؟ یک مانع چه مقدار از فضای پیرامون ربات را می پوشاند؟ برای پاسخ به چنین پرسشهایی باید چیدمان دقیق سنسورهای فاصله یاب را بر روی ربات پیدا نمود و برای ربات مفاهیم چپ و راست ، جلو و عقب مشخص شود و دستورات لازم در صورت برخورد هر ناحیه یا چند ناحیه به مانع داده شود. چیدمان سنسورهای مادون قرمز پیرامون ربات Uwater و شماره گذاری آنها در شکل ۱۲ به تصویر کشیده شده است.



شود سمت چپ می چرخد در صورتی اختلافشان منفی باشد به سمت راست می چرخد تا اختلاف به صفر برسد. علامت زاویه ها هم مثلثاتی است یعنی پادساعتگرد مثبت است و ساعتگرد منفی است . در شکل ۱۰ هر دو زاویه چون نسبت به جهت مثبت X ساعتگرد چرخیدن دارای مقدار منفی هستند. بنابراین اولین برنامه حرکت چنین است

$$\begin{cases} \text{rotate left, } \varphi - \theta > 0 \\ \text{go ahead, } \varphi - \theta = 0 \\ \text{rotate right, } \varphi - \theta < 0 \end{cases}$$

البته در عمل قرار گرفتن در نقطه ای که اختلافش صفر باشد مشکل است. بنابراین در یک حاشیه ای از صفر دستور جلو رفتن صادر می شود . بنابراین قوس دوران را به سه منطقه  $Q_1$  ،  $Q_2$  و  $Q_0$  تقسیم می کنیم. این روش استفاده از کنترل فازیست. هرگاه ربات در منطقه  $Q_1$  قرار گرفت ربات در جهت هدف است و شروع به حرکت به سمت جلو می کند. جدول یا پایگاه قواعد حرکت ربات در صفحه مطابق جدول ۱ است و بعد سوم این جدول قواعد تغییر ارتفاع را نشان می دهد که همانگونه که پیشتر گفته شد مستقل از حرکت صفحه ایست. در این جدول بسته به اینکه ربات در چه فاصله ای و در چه زاویه ای نسبت به هدف قرار گرفته است دستوری صادر می شود.

جدول ۱ : پایگاه قواعد و دستورات

| $q_0$  | $q_2$   | $q_1$             | $q_2$   | $q_0$  | $\pi$ |
|--------|---------|-------------------|---------|--------|-------|
| -1     | -0.06   | -0.04             | 0.04    | 0.06   |       |
| Rotate | Srotate | Go                | Srotate | Rotate | $Q_0$ |
| right  | right   | ahead             | left    | left   | 2     |
| Rotate | Srotate | Go                | Srotate | Rotate | $Q_3$ |
|        |         | $w=8\text{rad/s}$ |         |        | 0.15  |
| Rotate | Srotate | go                | Srotate | Rotate | $Q_2$ |
| Rotate | Srotate | Goal              | Srotate | Rotate | 0.08  |
|        |         |                   |         |        | $Q_1$ |
| Rotate | Srotate | go                | Srotate | Rotate | 0.08  |
|        |         |                   |         |        | $Q_2$ |
| Rotate | Srotate | Go                | Srotate | Rotate | 0.15  |
|        |         | $w=8\text{rad/s}$ |         |        | $Q_3$ |
| Rotate | Srotate | Go                | Srotate | Rotate | 2     |
|        |         | ahead             |         |        | $Q_0$ |

d[m]

که d فاصله افقی مرکز ربات تا نقطه هدف است که ستون جدول ۱ را شامل می شود و به چهار ناحیه تقسیم شده است . ردیف این جدول  $-\pi < \beta = \varphi - \theta < \pi$  برحسب رادیان را نشان می دهد که به سه ناحیه تقسیم شده است. که این دستورات چرخش به راست ، به چپ ، حرکت به طرف جلو و دستور جلو رفتن با سرعت کم (go) و چرخش با سرعت کم برای دورانیهای کوچک (Srotate) می باشند. تغییر ارتفاع ربات مستقل از این جدول است و با شرط هایی روی  $y_g - y_r$  کنترل می شود، که  $y_g$  ارتفاع هدف و  $y_r$  ارتفاع مرکز ربات است . بدین ترتیب تمام این دستورات و قواعدی که گفته شد بعداً به زبان برنامه کامپیوتری که در این طرح زبان C است نوشته

بدین ترتیب ربات در مواجهه با انواع مختلف موانع، چرخش لازم را انجام می دهد. گاهی مانع مانند دیواری عریض است که ربات باید در کنار آن حرکت کند و وقتی به انتهای آن رسید حول انتهای مانع بچرخد تا در راستای هدف قرار گیرد سپس از مانع جدا شود. بدین منظور یک دستور ویژه چرخش نیاز است که مرکز آنی دوران ربات را انتهای دیوار یا مانع قرار دهد. در اینجا دیگر دو موتور با سرعتهای مساوی و در خلاف جهت هم نمی چرخند و حتی حول مرکز جرم ربات نیز نمی چرخند بلکه با حرکتی دایره ای حول انتهای دیوار می چرخند به گونه ای که نیروی گریز از مرکز موجب جدایی زود هنگام ربات از مانع نشود. این دستورات را Rcircle و Lcircle در برنامه نامیده می شوند در این دستورات یک موتور با سرعت زاویه ای دو برابر موتور دیگر می چرخد اینجا قاعده هفتم و هشتم نوشته می شود که مربوط به نقطه جداییست، برعکس شش قاعده قبل که مربوط به نقطه تماس بودند.

۷- هنگامی که ربات در کنار مانع درست چپ خود (از دید جلو) در حرکت است، اگر سنسور ۶ مقدار صفر را نشان داد یعنی انتهای مانع است آنگاه Rcircle تا زمانی که مجموعه فازی L فعال است و ربات در راستای هدف قرار گیرد

۸- هنگامی که ربات در کنار مانع درست راست خود در حرکت است اگر سنسور ۱۶ مقدار صفر را نشان داد یعنی انتهای مانع است آنگاه Lcircle تا زمانی که مجموعه فازی R فعال است و ربات در راستای هدف قرار گیرد.

برای موانعی که در زیر یا بالای ربات ظاهر می شوند یا در واقع جلوی حرکت عمقی را می گیرند. سنسورهای مادون قرمز در بالا و پایین ربات قرار داده شده است. به طور کلی این ربات دارای سه حالت کلیدی است که می توانند بعضاً همزمان نیز اجرا شوند.

- ۱- کلید اول و اصلی و اولویت اول: حرکت به سوی هدف
- ۲- کلید دوم: هنگام برخورد با موانعی در افق، برنامه عبور از موانع افقی
- ۳- کلید سوم: برخورد با موانع عمقی بالا یا پایین، توقف حرکت عمقی

کلید اول و دوم در هر زمان فقط یکی اجرا می شود. ولی کلید سوم همزمان با هر یک از کلیدهای اول یا دوم می تواند اجرا شود بنابراین ربات دارای چهار حالت می شود: کلید اول به تنهایی، کلید اول و سوم، کلید دوم به تنهایی، کلید دوم و سوم.

## نتایج

بدین ترتیب ربات زیرآبی موانع را با موفقیت پشت سر خواهد گذاشت و تمام این قواعد به صورت برنامه C در محیط کنترلی نرم

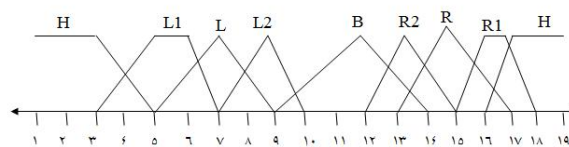
شکل ۱۲: شمارگذاری سنسورهای افقی ربات Uwater

دو مجموعه تعریف می شود. نخست مجموعه سنسورها یا  $ir$  مجموعه ای از ۱۹ سنسور که دارای جایگاه مشخصی هستند. مجموعه دوم، مجموعه فرامین قابل اجرا برای ربات است، سپس روی این دو مجموعه، مجموعه های فازی تعریف می شود و با قواعدی آنها به هم ربط داده می شوند.

$$ir = \{ir1, ir2, ir3 \dots ir19\}$$

$$act = \{Go, left\}$$

که فرمان Rcircle دور زدن حول انتهای مانع است. در شکل ۱۳ مجموعه های فازی چپ، جلو و ... روی مجموعه سنسورها تعریف شده است و به صورت ظاهری نیز در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱۳: مجموعه های فازی سمت های پیرامون ربات

H معرف این است که جلو ربات مانع را حس کرده است، B معرف عقب، R1 معرف راست و جلو، R معرف راست، R2 معرف راست و پایین به همین ترتیب L یعنی چپ ربات مانع را حس کرده است. نخستین شرط برای ورود به دستورات عبور از موانع این است که یکی از سنسورها مانعی را نشان دهد در این صورت برنامه حرکت به سمت هدف موقتاً قطع شده و برنامه دوم یعنی عبور از مانع و قواعد فازی مطابق زیر اجرا می شود:

- ۱- اگر H یا L1 آنگاه left rot (به چپ بچرخ تا جایی که جلو مانعی نباشد)
- ۲- اگر R1 یا (R1 و H) آنگاه right rot
- ۳- اگر R یا L آنگاه Go
- ۴- اگر B یا L2 یا R2 آنگاه Go
- ۵- اگر H و L و R آنگاه left rot یعنی اگر مانع بزرگی جلوی ربات را تماماً گرفته باشد
- ۶- اگر H و L1 و L و R1 و R آنگاه go back. مانند مانع U شکل یعنی سه طرف ربات مانع باشد.



ربات و عبور آن از موانع و رسیدن به هدف نزد نویسندگان موجود و قابل ارائه است.

افزار Webots مانند این دستور نوشته و حرکت ربات شبیه سازی شده است و انواع مختلف موانع را با این دستورات پشت سر گذاشت

```
Void dBodyAddForce (dBodyID, dReal fx, dReal fy,  
dReal fz);
```

که نیرویی در سه جهت به یک جسم با شناسه مشخص اضافه می کند. شکل ۱۴ گذر ربات از یک مانع U شکل و چرخش دایره ای در نقطه جدایی را حول انتهای مانع نشان می دهد .

#### مراجع

[1]-Sofge Erik, MIT Submarine Is Most Autonomous Robot Ocean Researcher Yet, Published on: Popular Mechanics September 29, 2008

[2]-Blidberg.Richard,The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV);A Brief Summary, Autonomous Undersea Systems Institute, Lee New Hampshire, USA,2007

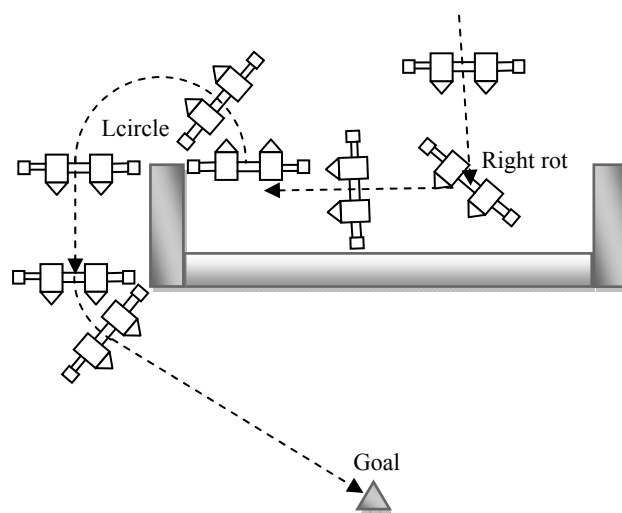
[3]-Corke Peter, Carrick Detweiler, Matthew Dunbabin, Experiments with Underwater Robot Localization and Tracking, , IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma, Italy, April 2007

[4]-www.Rov.org & www.Auv.ir

[5]- Douglas J.F ,Fluid mechanics,3th edition,long man press, 1986

[6]-Kanakakis.v,Valavanis.k.p and Tsourveloupis.n, Fuzzy-Logic Based Navigation of Underwater Vehicles, Technical University of Crete, Journal of Intelligent and Robotic Systems 40: 45–88, © Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 2004

[7]-Roland&Norbakhsh, Introduction to Autonomous mobile robots ,MIT press,2004



شکل ۱۴: عبور ربات زیرآبی از مانع U شکل

#### نتیجه گیری و جمع بندی.

در این طرح نشان داده شد که می توان با حداقل موتورها و صرفه جویی در توان و انرژی و بوسیله کنترل فازی رباتی طراحی کرد که به اهداف از قبل طراحی شده دست یابد . Uwater علی رغم جثه یک متری خود نقشی اساسی در مواقع لزوم دارد ، این ربات نتایج جالبی را برای ما اکتشاف می کند .سادگی کنترل آن با دست نیز بر قابلیت مانور بالای آن افزوده است به طوری که کاربر در هر لحظه می تواند بین دو حالت کنترل خودمختار و دستی سوئیچ کند و همه چیز را در دست خود بگیرد . Uwater اساسی است برای طرح های بزرگتر ،اساسی که همواره ثابت است و با امکانات بهتر بر همین اساس می توان طرح های فوق العاده ای را عرضه نمود .مطمئنا بهترین نتیجه زمانی حاصل می شود که این ربات ساخته شود و مدل واقعی آن به عینه مشاهده شود که به خوبی کار می کند زیرا که تمامی احتمالات ممکن در نظر گرفته شده است . جزئیات ریزی که در برنامه نوشته شده است ولی در شرح مقاله، به دلیل محدودیت کامل بدان پرداخته نشد اما اگر همین نکات کوچک نیز نبودند ربات به درستی حرکت نمی کرد.تمامی فایل ها و فیلم های شبیه سازی

برای دانستن بیشتر درباره رباتها به سایت زیر  
مراجعه کنید  
[www.royak.ir](http://www.royak.ir)