



بسم الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## پیاده‌سازی سامانه‌ی اجتناب از مانع بروی ربات شش‌پره

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر – هوش مصنوعی و رباتیک

داریوش حسن‌پور‌آده

استاد راهنما

دکتر مازیار پال‌هنگ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی کامپیوتر – هوش مصنوعی و رباتیک آقای  
داریوش حسن پور آده  
تحت عنوان

پیاده سازی سامانه ی اجتناب از مانع بروی ربات شش پره

در تاریخ ... توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

دکتر مازیار پالهنگ

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر ...

۳- استاد داور (اختیاری)

دکتر ...

۴- استاد داور (اختیاری)

دکتر محمد رضا تابان

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

**تشکر و قدردانی**

پروردگار منّان را سپاسگزارم .....

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق  
موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه  
صنعتی اصفهان است.

تقدیم به  
پدر و مادر عزیزم

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
نه	فهرست تصاویر
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ پیش‌گفتار
۳	۲-۱ تعریف مساله
۳	۳-۱ چالش‌های موجود در مساله
۴	۴-۱ اهداف و دستاوردهای پژوهش
۴	۵-۱ ساختار پایان‌نامه
۵	فصل دوم: تاریخچه و مرور کارهای پیشین
۵	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲ تاریخچه پرواز و پهپاد
۱۱	۳-۲ مرور کارهای پیشین
۱۱	۱-۳-۲ الگوریتم‌های اولیه و تعمیم‌های آن‌ها
۱۶	۲-۳-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی در اجتناب از مانع
۱۷	۳-۳-۲ بینایی ماشین در اجتناب از مانع
۱۹	۴-۳-۲ سیستم‌های فازی در اجتناب از مانع
۲۱	۵-۳-۲ اجتناب از مانع در پهپادها
۲۵	۶-۳-۲ دیگر فعالیت‌ها و کاربردهای اجتناب از مانع
۲۶	۴-۲ نتیجه‌گیری
۲۶	مراجع
۳۱	چکیده انگلیسی



## فهرست تصاویر

- ۱-۲ موشک کروزر اولیه به نام RAE Larynx . . . . . ۷
- ۲-۲ هواپیمای Curtiss N2C-2 کنترل شونده از راه دور که در توسط ایالات متحده آمریکا در سال ۱۳۱۷ (۱۹۳۸ م.) ساخته شد. . . . . ۸
- ۳-۲ پهپاد پستونی OQ-2 یکی از موفق ترین پهپادهای اولیه که در دوران جنگ جهانی دوم ساخته شد و با تولید بیش از ۹،۴۰۰ عدد به تولید انبوه رسید. . . . . ۹
- ۴-۲ پهپاد MQ-1 Predator ساخته شده توسط شرکت آمریکایی General Atomics که علاوه بر توانایی اجرای عملیات شناسایی و نظارتی امکان اجرای حملات تخریبی به صورت محدود را دارد. . . . . ۱۰
- ۵-۲ پهپاد ۶ پره مورد استفاده در این پژوهش . . . . . ۱۰
- ۶-۲ (آ) هیستوگرام چگالی موانع، مورد استفاده در الگوریتم های VFF و VFH - (ب) هیستوگرام قطبی برای راهبری و گریز از موانع، معرفی شده در الگوریتم VFH . . . . . ۱۳
- ۷-۲ الگوریتم APF با معرفی میدان پتانسیل چرخشی برای رفع مشکل کمینه‌ی محلی موجود در الگوریتم PF ارائه شد. . . . . ۱۴
- ۸-۲ مسیریابی محلی براساس تولید نقاط مسیری پویا و میدان های جاذب و دافع - این شکل نشان می دهد که در اجتناب از مانع در حال کلی ۳ مرحله وجود دارد: قبل برخورد دوره ی برخورد، بعد برخورد. . . . . ۱۵
- ۹-۲ گسترش C-Space در فضای نقشه ی اختلاف . . . . . ۱۷
- ۱۰-۲ تشخیص عمق در یک عمق مشخص (رنگ آبی تیره) و ادغام ادومتری پهپاد و تشخیص های قبلی (رنگ های آبی روشن تر) به سرعت می توان نقشه ی کاملی از موانع مقابل پهپاد ساخت. . . . . ۱۸
- ۱۱-۲ شبکه ی عصبی با توابع فازی عضویت نوع-۱، به جهت بدست آوردن دستورات کنترلی اطلاعات ورودی شبکه قبل از پردازش به توابع فازی نوع-۱ داده شده و سپس به شبکه داده می شوند. . . . . ۲۰
- ۱۲-۲۶۱۲ عدد از کنترل های تعریف شده با دقت ۲۵ سانتی متر در مفهوم موقیت شبکه ای . . . . . ۲۲
- ۱۳-۲ جستجوی بیضوی گسترش داده شده برای پیدا کردن نقطه ی فرار معتبر در راستای رسیدن به هدف . . . . . ۲۳
- ۱۴-۲ سیستم LOAM . . . . . ۲۴
- ۱۵-۲ الگوریتم اجتناب از مانع تشک بادی محیطی . . . . . ۲۴
- ۱۶-۲ از نتایج پژوهش های صورت گرفته در اجتناب از مانع، الگوریتم میدان پتانسیل کمک کرده است که صندلی های چرخ دار در راهروهای پیچ در پیچ به صورت خودکار حرکت کنند. . . . . ۲۶

## چکیده

معمولا محیط‌هایی که ربات‌ها و بخصوص پهپادها در آن فعالیت دارند برای ربات‌ها و گاه‌ها برای انسان‌ها محیط ناشناخته‌ای می‌باشد، دنیای مدرن که به سمت طراحی و توسعه ربات‌های خودمختار حرکت می‌کند، راهبری و اجتناب از مانع به دلیل ایفای نقش بسیار مهم در موفقیت ربات‌های خودمختار، به عنوان یکی از چالش‌های مهم و هیجان انگیز در جوامع دانشگاهی و صنعتی شناخته شده است. برای اینکه ربات بتواند از موقعیت اولیه به موقعیت نهایی بدون برخورد با موانع موجود در محیط اطراف خود حرکت کند، اهمیت طرح‌ریزی حرکت بیش از پیش به چشم می‌آید؛ زیرا که برای طی مسیری بدون برخورد با موانع موجود در آن، ربات باید علاوه بر دارا بودن سیستمی بجهت طرح‌ریزی مناسب مسیر، به سیستم شناسایی و اجتناب از مانع مجهز باشد. در این میان پهپادها که به صورت معمول در مسائل مهم، از قبیل نظامی، امداد و نجات، شناسایی و نظارت و غیره مورد استفاده واقع می‌شوند و از طرفی دیگر ساخت آن‌ها هزینه‌بر می‌باشد، بنابراین نیاز به داشتن سیستمی برای تشخیص و اجتناب از مانع بیش از دیگر ربات‌ها احساس می‌شود.

این پژوهش با تمرکز به ربات‌های خانواده چندپره‌ها به ارائه‌ی روشی نوین برای اجتناب از مانع بر مبنای ترکیب اطلاعات عمقی از تصاویر استریو و حسگرهای فراصوتی پرداخته است و نهایتا پیاده‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان سیستمی برای تشخیص و اجتناب از مانع برخط برای پهپادهایی مجهز به حداقل سخت‌افزار مورد نیاز مورد استفاده واقع گردد.

**واژه‌های کلیدی:** ۱- پهپاد، ۲- امنیت پرواز، ۳- اجتناب از موانع.

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱ پیش‌گفتار

راهبری<sup>۱</sup> و اجتناب از مانع در دنیای رباتیک مدرن امروز به دلیل ایفای نقش بسیار مهم در موفقیت ربات‌های خودمختار، به عنوان یکی از چالش‌های مهم و هیجان‌انگیز در جوامع دانشگاهی و صنعتی شناخته شده است. امروزه ربات‌های چندپره<sup>۲</sup> [۱] کاربردهای فراوانی در صنعت، تفریحات عموم و قدرت نظامی ایفا می‌کند، که تنوعی به اندازه‌ی پهپادهایی به قطر کمتر از ۳ سانتی‌متر [۲] تا غول‌هایی که می‌توانند انسان را از زمین به پرواز درآورند [۳]، دارند. علت رشد نسبتاً سریع این نوع از پهپادها نسبت به پهپادهای هم‌تراز خود مانورپذیری ساده‌تر و نسبتاً کم‌هزینه بودن ساخت این خانواده از پهپادها می‌باشد. امکان برخورد<sup>۳</sup> و فرودآمدن درجا و همچنین قابلیت معلق ماندن در هوا باعث شده این خانواده از پهپادها به ابزاری مناسب برای عملیات‌های نظارتی<sup>۴</sup>، جستجو و نجات باشند.

همانقدر که طرفداران این خانواده بیشتر می‌شود انتظارات بیشتری نیز از آن‌ها می‌رود، امکانات و انتظاراتی که شاید از کمتر رباتی می‌رود، این پهپادها باید در کنار دارا بودن مانورپذیری و حرکات نمایشی‌ای که بتوانند

---

<sup>1</sup>Navigation

<sup>2</sup>Multirotor

<sup>3</sup>Land

<sup>4</sup>Surveillance

کاربران عادی خود را سرگرم نگه دارند، باید دارای سیستم‌های تعبیه‌شده برای حفظ امنیت ربات و اطرافیان آن باشد؛ لذا خطر سقوط در هر وسیله‌ی هوایی یک خطر جدی می‌باشد که علاوه بر اعمال خسارت به خود ربات خطر جانی برای افراد حاضر در محیط پیرامون وسیله که تحت تاثیر سقوط آن قرار می‌گیرند دارد. یکی از دلایل سقوط وسایل هوایی (و بخصوص در پهپادها) برخورد با موانع احتمالی موجود در مسیر است؛ به همین سبب مسالهی اجتناب از مانع به یکی از چالش برانگیزترین و هیجان انگیزترین مسالهی دنیای امروز رباتیک بدل شده است، بطوری که فقط در همین ۱۰ سال اخیر صدها مقاله‌ی پژوهشی در این راستا به چاپ رسیده است. که این پژوهش گامی کوچک در راستای ارائه و بهبود روشی برای تامین امنیت پهپادهای خانواده چندپره می‌باشد.

## ۲-۱ تعریف مساله

در این پژوهش هدف، طراحی و توسعه یک سیستم تشخیص و اجتناب از مانع برای ممانعت برخورد با موانع موجود در مسیر حرکت پهپادها چندپره (به صورت خاص) می‌باشد. محیطی که ربات در آن به پرواز درمی‌آید، برای ربات ناشناخته بوده و ربات هیچ دانشی قبلی نسبت به محیط و موانع موجود در آن ندارد. سیستم تشخیص مانع<sup>۱</sup> باید به گونه‌ای طراحی شود که موانع موجود در مسیر را از فاصله‌ی معقولی تشخیص کند و موقعیت نسبی آن با پهپاد را در واحد-فاکتورهای<sup>۲</sup> بصورت داده‌هایی قابل فهم برای سیستم به جهت تشخیص مانع، مشخص کند. سپس با دادن اطلاعات بدست آمده از موانع موجود در محیط به سیستم اجتناب از مانع<sup>۳</sup> یا طرح ریز ماموریت<sup>۴</sup> تحویل داده و این سیستم وظیفه‌ی تصمیم‌گیری مسیر و جهت‌دهی پهپاد را بر اساس اطلاعات محیطی دریافتی به عهده خواهد داشت.

از آنجا که راهبری در حالت کلی دربرگیرنده‌ی مباحث و شاخه‌های گسترده‌ای می‌باشد لذا به جهت قابل انجام بودن این پژوهش در مهلت مقرر از پیاده‌سازی انواع روش‌های مکان‌یابی و راهبری‌های مبتنی بر آن خودداری کرده و صرفاً بروی مسالهی اجتناب از مانع که خود مسالهی وسیع و چالش برانگیز می‌باشد تمرکز می‌کنیم.

## ۳-۱ چالش‌های موجود در مساله

برای دستیابی اهداف نوشته شده در این پژوهش چالش‌های زیادی وجود دارد، اولین و بزرگترین چالش ساخت پهپاد می‌باشد. ساخت پهپادی که بتوان توسط رایانه اطلاعات آن را که شامل اطلاعات حسگرهای سونار، دوربین‌های استریو و اطلاعات سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)<sup>۵</sup> را دریافت کرد و سپس با بعد از پردازش

<sup>۱</sup>Obstacle Detection System

<sup>۲</sup>Factor-units

<sup>۳</sup>Obstacle Avoidance System

<sup>۴</sup>Mission Planner

<sup>۵</sup>Global Positioning System

داده‌های دریافتی دستورهای کنترلی را به پهپاد ارسال کرد. با توجه به محدودهای برخی یارانه‌ها دیتاباس<sup>۱</sup> در حجم و تعداد دریافت هم‌زمان دو تصویر استریو به همراه دیگر اطلاعات چالشی بزرگ در راه‌اندازی پهپاد مورد استفاده در این پژوهش است.

دومین چالشی که در طی پیاده‌سازی این پژوهش باید بر آن غالب می‌شدیم، چالش تشخیص مانع با استفاده از تصاویر استریو و حسگرهای سونار بود، باید عمق‌سنجی از تصاویر استریو و ترکیب این اطلاعات با اطلاعات بدست آمده توسط حسگرها به تشخیص موانع و موقعیت نسبی آن‌ها پرداخته و سپس با ارائه‌ی اطلاعات حس شده از محیط به سیستم اجتناب از مانع تحویل داده می‌شد و این سیستم طبق وظیفه‌ی تعریف شده برای آن، باید حرکت بعدی متناسب با موقعیت موانع موجود در مسیر را معین کند؛ که همه‌ی این موارد باید به صورت بلادرنگ<sup>۲</sup> صورت می‌گرفت بنابراین بهینه‌گی روش و کدهای نوشته از درجه اهمیت بسزایی برخوردار هستند.

#### ۴-۱ اهداف و دستاوردهای پژوهش

؟؟

#### ۵-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم به مروری خلاصه از تاریخچه‌ی پرواز و پهپاد و همچنین مروری مفصل و ساختارمند بر پژوهش‌های بروز صورت گرفته در رابطه با موضوع این پژوهش خواهیم پرداخت. در فصل سوم به روش ارائه شده بجهت تشخیص و اجتناب از مانع در پهپادهای چندپره با استفاده از ترکیب اطلاعات تصاویر استریو و حسگرهای سونار آورده شده است. در فصل چهارم این نگارش به بررسی نتایج عملی بدست آمده روش ارائه شده خواهیم پرداخت و توسط آزمایش‌های گوناگون نشان خواهیم داد که روش ارائه شده موثر می‌باشد و درنهایت در فصل پنجم به جمع‌بندی کلی از این پژوهش خواهیم پرداخت.

<sup>۱</sup>Databas

<sup>۲</sup>Real-time

## فصل دوم

### تاریخچه و مرور کارهای پیشین

#### ۱-۲ مقدمه

«پرنده هدایت‌پذیر از دور یا به اختصار پهپاد که به آن وسیله هوایی بدون سرنشین نیز گفته می‌شود، نوعی وسیله هوایی هدایت‌پذیر از راه دور است.» تعریفی است که از پهپاد در ویکی‌پدیا آمده است [۴]. پهپاد به دو دسته کنترل‌شونده از راه دور توسط عامل انسانی و به صورت کاملاً خودکار و برنامه‌ریزی شده می‌شوند. تاریخچه به وجود آمدن پهپادهای مدرن ریشه نظامی داشته و در مأموریت‌های نظامی که برای انسان خطر یا خسته کننده بودند استفاده می‌شد. به جهت پیشرفت روزافزون تکنولوژی‌های ساخت پهپاد، اکنون شاهد کاربردهای غیرنظامی آن‌ها هستیم. راهبری پهپادها همانند سایر ربات‌ها دارای خطراتی هستند که مهمترین آن‌ها خطر برخورد با موانع موجود در مسیر هست که در مورد پهپادها غالباً منجر به از دست رفتن کنترل، سقوط و از بین رفتن ربات می‌شود. از اینجا هست که نیاز به ارائه روش‌های اجتناب از مانع برخط<sup>۱</sup> در پهپادها ضروری به نظر می‌رسد. از میان روش‌های اجتناب از مانع روش حسگر-مبنا<sup>۲</sup> در زمینه‌ی ربات‌های هوایی استفاده می‌شود زیرا علاوه بر دینامیک پویا و غیرخطی پهپادها که هم‌بستگی شدیدی با متغیرهای محیطی (همانند سرعت جریان، تراکم هوا و غیره) دارد تغییرات محیط خارجی نیز از پویایی بالایی برخوردار است. روش‌های دیگری همانند طرح‌ریزی

---

<sup>1</sup>Online

<sup>2</sup>Sensor-based

سراسری [۵] نیز به جهت اجتناب از مانع وجود دارد ولی به دلیل آنکه این روش در صنعت هوایی به دلایل ذکر شده توانایی مورد استفاده قرار گرفته شدن را ندارد و از پیگیری این روش در این پژوهش اجتناب می‌کنیم.

در ادامه‌ی این فصل به مروری کوتاه از تاریخچه‌ی پرواز و پهپادها می‌پردازیم و سپس به بررسی کارهای قبلی انجام شده در رابطه با اجتناب از موانع ربات‌های چندپره به صورت خاص می‌پردازیم. دلیل آنکه به صورت خاص بروی روش‌های پیاده‌سازی شده بروی ربات‌های چندپره تمرکز می‌کنیم این است که پهپادها در حالت عموم دارای دینامیک و مشخصات منحصر به فرد و نهایتاً دارای کنترل‌های متفاوتی هستند که این امر منجر خواهد شد که هر حسگری را نتوان در هر پهپادی مورد استفاده قرار داد؛ که این دلایل باعث می‌شود روش‌های متفاوتی بجهت اجتناب از مانع برای انواع پهپادها مطرح شود. برخی از روش‌ها مانند روش‌های VFH [۶] و VFH+ [۷] دارای عمومیت هستند که می‌توان آن‌ها را در ربات‌های زمینی و اکثر ربات‌های هوایی مورد استفاده قرار داد. لذا در مرور این بخش علاوه بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی اجتناب از مانع ربات‌های چندپره به بررسی مختصر این روش‌های عمومی نیز خواهیم پرداخت.

## ۲-۲ تاریخچه پرواز و پهپاد

از دیرباز رویای پرواز در ذهن انسان‌ها جا باز کرده بود، آسمان محلی مقدسی بود که استوره‌های باستان با هیبتی خداوندی از آن به زمین می‌آمدند... که این طرز نگرش نیازمند این بود که پرواز کردن و صعود به گنبد کبود به کهن‌ترین آرزوی آدمی بدل شود. این آرزو در اولین فرصت خود یعنی در حدود ۴۰۰ سال ق.م. با اختراع کایت<sup>۱</sup> که می‌توانست پرواز کند توسط مردمان چین به آتشی شعله‌کش در میان نسل بشر بدل گردید. جایگاه پرواز بقدری باارزش بود که در آن موقع کایت را به عنوان یک وسیله مقدس برای مراسم‌های مذهبی استفاده می‌کردند. بعد از گذشت سالیان دراز لئوناردو داوینچی در سال ۸۵۹ (۱۴۸۰ م.) فرصتی دوباره به این رویای کهن داد تا بلکه بتواند این رویا را به واقعیت بدل کند؛ وی اولین مطالعه رسمی تاریخ را بروی ماهیت پرواز انجام داد که این مطالعه شامل بیش از ۱۰۰ نقشه و تئوری پرواز بود. در سال ۱۱۶۲ (۱۷۸۳ م.) اولین بالن هوای گرم توسط برادران منتگولفیر<sup>۲</sup> ارائه شد. همچنین اولین گلايدر به همت آقای کی‌لی<sup>۳</sup> در یک دوره ۵۰ ساله در بین سال‌های ۱۱۷۸ (۱۷۹۹ م.) و ۱۲۲۹ (۱۸۵۰ م.) اختراع شد و بهبود پیدا کرد. در سال ۱۲۷۰ (۱۸۹۱ م.) یک مهندس آلمانی<sup>۴</sup> روی ایرودینامیک و طراحی گلايدرها مطالعه کرد و اولین فردی بود که توانست گلايدری را طراحی کند که می‌توانست یک انسان را در مسافت‌های طولانی حمل کند. در همان سال آقای لنگلی<sup>۵</sup> متوجه

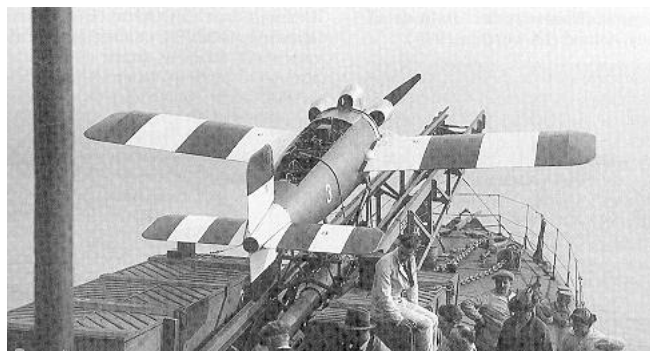
<sup>1</sup>Kite

<sup>2</sup>Joseph and Jacques Montgolfier

<sup>3</sup>George Cayley

<sup>4</sup>Otto Lilienthal

<sup>5</sup>Samuel P. Langley



شکل ۲-۱: موشک کروز اولیه به نام RAE Larynx

شد که به نیرو جهت پرواز انسان نیاز هست و مدلی را ارائه داد که دارای موتور بخار بود توانست ۳/۴ مایل را قبل اینکه سوختش تمام شود حرکت کند [۸].

جنگ‌ها در کنار ویرانگری‌هایی که از خود پشت سر می‌گذارند همیشه باعث تکامل و جهش عمل بشری بوده‌اند؛ در جنگ‌های جهانی (به‌خصوص جنگ جهانی دوم) نوآوری‌های زیادی در زمینه‌ی علوم هوا و فضا و رباتیک شد. اولین بار در اواخر جنگ جهانی اول بود که یک هواپیمای بدون سرنشین اختراع شد که توسط یک سامانه‌ی رادیویی کنترل می‌شد. در میانه‌ی جنگ‌های جهانی (سال‌های ۱۳۰۶ تا ۱۹۲۷ م.) تا ۱۳۰۸ (۱۹۲۹ م.) اولین موشک کروز (شکل ۲-۱) که بصورت یک هواپیمای تک-باله ساخته شد که از روی یک کشتی جنگی پرتاب و توسط خلبان خودکار هدایت می‌شد. موفقیت‌آمیز بود ساخت این موشک باعث شد که چند سال بعد هواپیماهای بدون سرنشین و کنترل‌کننده‌ی رادیویی در سال ۱۳۰۹ (۱۹۳۰ م.) ساخته شوند. در طی جنگ جهانی دوم نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا شروع به انجام آزمایشاتی در زمینه‌ی هواپیماهای رادیوکنترلی در دهه‌ی ۱۳۰۹ (۱۹۳۰ م.) کرد که نهایتاً منجر به ساخت هواپیمای بدون سرنشین Curtiss N2C-2 شد که به صورت کنترل از راه دور از یک هواپیمای دیگر کنترل می‌شد که به عنوان یک سامانه‌ی ضد هوایی به خدمت گرفته شد. در همین دوران ایالات متحده آمریکا تلاش کرد دستاوردهای خود را در زمینه‌ی هواپیماهای بدون سرنشین کنترل شونده از راه دور را بروی بمب افکن‌های B-17 Flying Fortress و B-24 Liberator خود به اجرا در بیاورد که نهایتاً منجر به شکست و از دست رفتن شمار زیادی از بمب افکن‌ها شد. هواپیمای TDN-1 یک هواپیمایی بدون سرنشین بود که در سال ۱۳۱۹ (۱۹۴۰ م.) ساخته شد که می‌توانست یک بمب ۱۰۰۰ پوندی (حدوداً ۴۵۰ کیلوگرم) را به پرواز درآورده و به هدف بزند [۹].

در تاریخچه‌ی هواپیماهای بدون سرنشین تا قبل از جنگ سرد به دلیل نبود تکنولوژی‌های مدرن امروزی جنس هواپیماها از جنس موتور، پیستون و گازوییل بودند و ارتباط کنترلی آن‌ها بصورت رادیویی بود و معمولاً دارای خلبان خودکار نبوده و در صورت وجود چنین سامانه‌ای، سیستمی بسیار ساده داشته و ادومتری آن‌ها صرفاً بر





شکل ۲-۲: هواپیمای Curtiss N2C-2 کنترل شونده از راه دور که در توسط ایالات متحده آمریکا در سال ۱۳۱۷ (۱۹۳۸ م.) ساخته شد.

مبنای قطب‌نما، میزان سرعت و مدت زمان حرکت بود. در دوران جنگ سرد و بعد از آن بود که جهش‌های بزرگ در تکنولوژی‌های ساخت هواپیماهای بدون سرنشین ایجاد شد.

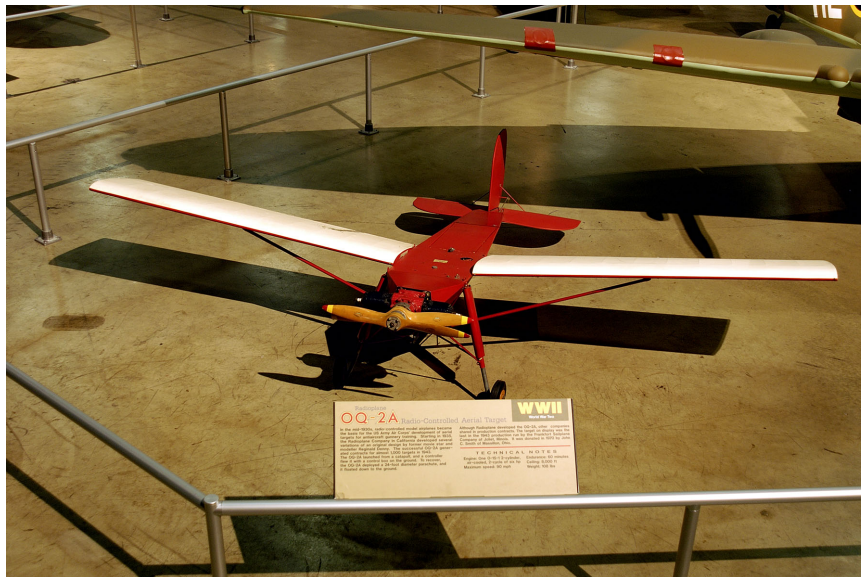
در دوران جنگ سرد در پی موفقیت‌آمیز پهباد پستونی OQ-2 [۱۰] هواپیماهای رادیویی<sup>۱</sup> به دوره‌ی جدیدی از نوآوری‌ها وارد شدند و موج جدیدی از استفاده و بکارگیری پهپادها در ارتش ایالات متحده‌ی آمریکا به راه افتاد. شرکت Globe بعد از ساخت پهپاد پیستونی KDG Snipe در سال ۱۳۲۵ (۱۹۴۶ م.) به ساخت پهپادهای KD2G و KD5G پرداخت که از نمونه‌های اولیه پهپادهای موتور-جت می‌باشند، کرد. در نهایت در اواخر دهه‌ی ۱۳۲۹ (۱۹۵۰ م.) پهپادهای جنگی پر قدرت پا به عرصه‌ی کاربردهای نظامی در سطح گسترده گذاشتند.

در همین دوره که مسابقه‌ی اتمی بین ایالات متحده‌ی آمریکا و شوروی سابق شدت یافته بود، ایالات متحده‌ی آمریکا ۸ فقره از بمب افکن‌های B-17 Flying Fortresses خود را به پهپادها تبدیل کرد. این که تلاش قبلا در دوران جنگ جهانی دوم با شکست مواجه شده بود این دفعه موفقیت‌آمیز از آب درآمد و این هواپیماها به جهت جمع‌آوری اطلاعات در ابر-رادیواکتیو<sup>۲</sup> به خدمت گرفته شد. این هواپیماها در هنگام برخاست و فرود توسط یک کنترل کننده بروی یک جیب کنترل می‌شد و در هنگام پرواز وسیله‌ی یک هواپیمای B-17 دیگر از راه دور کنترل می‌شد. گرچه پیکربندی این پهپاد دارای موفقیت‌هایی در اجرا بود ولی به دلیل سیستم پیچیده‌ی پیاده‌سازی شده روی آن میزان اتفاقات آن نیز بالا بود.

پهپادها همیشه به عنوان وسیله‌ی غیرقابل اعتماد و پرهزینه‌ی دیده می‌شد تا اینکه نیروی هوایی اسرائیل جهش بزرگی در پیشرفت روزبه‌روز پهپادها در پیروزی بر نیروی هوایی سوریه در سال ۱۳۶۱ (۱۹۸۲ م.) ایجاد کرد.

<sup>۱</sup>Radioplane

<sup>۲</sup>Radioactive Cloud



شکل ۲-۳: پهپاد پستونی OQ-2 یکی از موفق‌ترین پهپادهای اولیه که در دوران جنگ جهانی دوم ساخته شد و با تولید بیش از ۹,۴۰۰ عدد به تولید انبوه رسید.

اسرائیل با پیاده‌سازی سیستمی که با همکاری پهپاد و جنگنده‌های دارای خلبان توانستند به سرعت تعداد زیادی از هواپیماهای جنگنده سوری را از بین ببرند. در این جنگ پهپادها به عنوان طعمه<sup>۱</sup>، متخل کننده<sup>۲</sup> الکترونیکی و شناساگر ویدئویی<sup>۳</sup> مورد استفاده واقع می‌شدند [۹].

در حالت کلی پهپادها را میتوان به ۵ دسته زیر دسته‌بندی کرد [۱۱]:

۱. هدف و طعمه<sup>۴</sup>: تیراندازی کردن به اهداف زمینی و هوایی.
۲. شناسایی<sup>۵</sup>: جمع‌آوری اطلاعات نظامی.
۳. مبارزه<sup>۶</sup>: امکان تهاجم نظامی برای ماموریت‌های خطر.
۴. تحقیقات و توسعه<sup>۷</sup>: برای تحقیق و توسعه پهپادهای آزمایشی نسل آینده.
۵. تجاری و غیرنظامی<sup>۸</sup>: اختصاصا برای کاربردهای غیرنظامی طراحی شده‌اند.

در دوره حاضر پهپادهای پیشرفته‌ی زیادی با کاربردهای مختلفی ساخته شده است. که از معروف‌ترین و پیشرفته پهپادهای نظامی می‌توان به پهپاد MQ-1 Predator که متعلق به ارتش ایالات متحده‌ی آمریکا می‌باشد که این پهپاد در اوایل دهه‌ی ۱۳۶۹ (۱۹۹۰ م.) برای کاربردهای نظارتی ساخته شد که دارای دوربین‌ها و

<sup>1</sup>Decoy

<sup>2</sup>Jammer

<sup>3</sup>Video Reconnaissance

<sup>4</sup>Target and decoy

<sup>5</sup>Reconnaissance

<sup>6</sup>Combat

<sup>7</sup>Research and development

<sup>8</sup>Civil and Commercial



شکل ۲-۴: پهپاد MQ-1 Predator ساخته شده توسط شرکت آمریکایی General Atomics که علاوه بر توانایی اجرای عملیات شناسایی و نظارتی امکان اجرای حملات تخریبی به صورت محدود را دارد.



شکل ۲-۵: پهپاد ۶ پره مورد استفاده در این پژوهش

تعدادی سنسور دیگر می‌باشد و بعدها به گونه‌ای تغییر یافت که امکان حمل ۲ عدد موشک را نیز داشته باشد؛ این پهپاد از سال ۱۳۷۴ (۱۹۹۵ م.) در عملیات‌های نظامی مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

پهپادی که در این پژوهش به صورت خاص مورد توجه واقع شده از خانواده‌ی پهپادهای چندپره می‌باشد. خانواده‌ی پهپادهای چندموتوره به پهپادهایی گفته می‌شود که برای پرواز به بیش از دو موتور نیازمند هستند. مزیت کاربردی این خانواده از پهپادها، سادگی نسبی مکانیکی آن بجهت کنترل پرواز می‌باشد که این سادگی علاوه بر اینکه هزینه‌ی ساخت و تولید این نوع از کوپترها را پایین می‌آورد<sup>۱</sup>، باعث شده این خانواده به جمع پهپادهایی با استفاده‌ی غیرنظامی و تجاری بپیوندد. پهپادهای ۳ پره، ۴ پره، ۶ پره و ۸ پره از زیرمجموعه‌های متعارف این خانواده می‌باشند [۱]. ما روش پیشنهادی خود را در این تحقیق را بروی یک دستگاه ۶ پره اجرا کرده‌ایم که در فصل‌های بعدی مفصلاً شرح داده خواهد شد.

بدون در نظر گرفتن امکانات خاص، به راحتی می‌توان با مبلغ تاجیزی حدود ۱۰ دلار کوادکوپتری بجهت تفریح داشت [۱۳]!

## ۲-۳ مرور کارهای پیشین

مسأله‌ی چالش برانگیز اجتناب از مانع از قدیم تا به کنون یکی از مسائلی بوده که توجهات زیادی را به خود جلب کرده است بطوری که از سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) تا به کنون چندصد مقاله علمی در این رابطه منتشر شده است؛ در این پژوهش ما علاوه بر در نظر داشتن روش‌های قدیمی که موفقیت‌آمیز بودن آن‌ها در طی زمان ثابت شده است، روش‌های نوین را نیز مورد بررسی قرار داده‌ایم. از آنجایی که این مسأله حجم قابل توجهی تحقیق را به خود تخصیص داده است ما بجهت اینکه این پژوهش به‌روز باشد در این قسمت فقط به مروری خلاصه از آنچه که از سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) تا به کنون منتشر شده است بسنده می‌کنیم.

در این قسمت به بررسی روش‌های متعددی که بجهت اجتناب از مانع صورت گرفته است خواهیم پرداخت که در ابتدا الگوریتم‌های پایه این شاخه از رباتیک را مرور خواهیم کرد سپس به بررسی روش‌های مختلفی چون کنترل، شبکه‌های عصبی مصنوعی، پردازش تصویر و بینایی ماشین در اجتناب از مانع خواهیم پرداخت؛ همچنین به مروری بر روش‌های اجتناب مانع پیاده‌سازی شده در ربات‌های زمینی و پهپادها در حالت کلی خواهیم پرداخت و در نهایت با معرفی کارهایی که در ربات‌های چندپره به صورت انحصاری و همچنین از دیگر کاربردهای الگوریتم‌های اجتناب از مانع در دنیای مدرن به این بخش خاتمه خواهیم داد. لازم به ذکر است که تمامی الگوریتم‌هایی که در این قسمت معرفی و مرور می‌گردد جز الگوریتم‌های بلادرنگ می‌باشند زیرا که ماهیت اجتناب از مانع این پژوهش نیازمند روش‌های بلادرنگ می‌باشد به همین جهت از بررسی روش‌های برون‌خطی<sup>۱</sup> خودداری می‌کنیم.

## ۲-۳-۱ الگوریتم‌های اولیه و تعمیم‌های آن‌ها

همان‌طور که در ابتدای این فصل آمده است، روش‌های اجتناب از مانع حالت کلی به دو دسته‌ی طرح‌ریزی سراسری و حسگر-مبنا تقسیم می‌شوند و همان‌طور که قبلاً نیز آورده شده است به دلیل عدم کاربری روش‌های طرح‌ریزی سراسری در ربات هدف این پژوهش از ارائه و پیگیری این نوع از روش‌ها در این تحقیق اجتناب می‌کنیم. در مورد الگوریتم‌های اولیه<sup>۲</sup> که موفق عمل کرده‌اند می‌توان به الگوریتم‌های میدان پتانسیل (PF)<sup>۳</sup>، میدان نیروی مجازی (VFF)<sup>۴</sup>، هیستوگرام میدان برداری و بهبودیافته‌اش (VFH<sup>۵</sup> و VFH<sup>۶</sup>) اشاره کرد.

در الگوریتم PF [۱۴] که به منظور هدایت بازوهای ربات به سمت موقعیت هدف با محدود عدم برخورد

<sup>۱</sup>Offline

<sup>۲</sup>Legacy Algorithms

<sup>۳</sup>Potential Field

<sup>۴</sup>Virtual Force Field

<sup>۵</sup>Vector Field Histogram

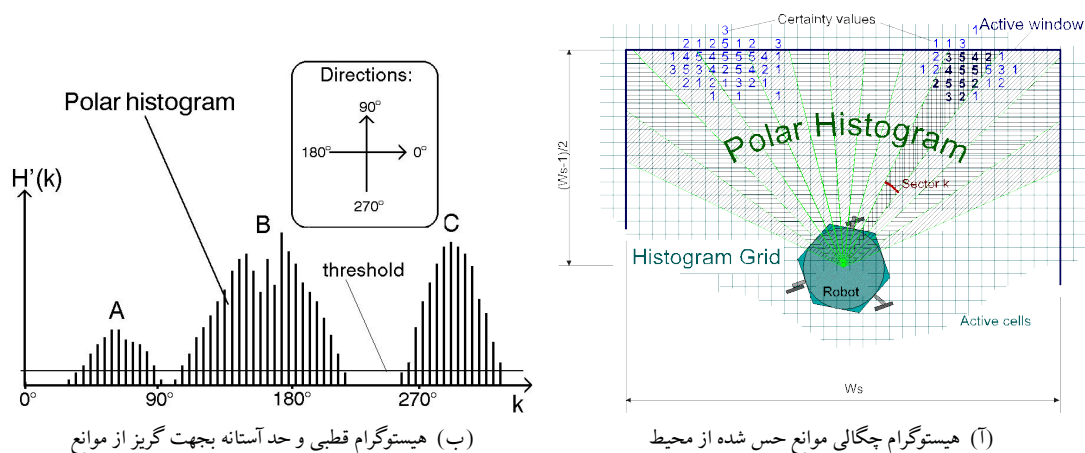
<sup>۶</sup>Vector Field Histogram+

با موانع مشخص موجود در مسیر ارائه شد که بعدها در زمینه‌های دیگر رباتیک بجهت اجتناب از مانع مورد استفاده واقع گردید. در طراحی این روش ربات، موانع محیط و موقعیت هدف به صورت یک نقطه فرض شده است که هریک از این نقاط به صورت مجازی دارای یک بار علامت‌دار می‌باشد که در نتیجه میدان پتانسیلی به جهت جذب و دفع یک دیگر دارند. جنس بارهای ربات و موانع یکسان و مخالف بار موقعیت هدف در نظر گرفته می‌شوند. ربات باتوجه به این اینکه بار آن هم علامت موانع بوده به صورت طبیعی از موانع گریزان می‌شود و به سمت هدف جذب می‌گردد؛ مجموع کنش-واکنش ربات/موانع/هدف باعث می‌شود که موانع نیروی دافعه و هدف نیروی جاذبه به ربات اعمال می‌کنند و مسیر حرکت ربات را برآیند این دو نیرو تعیین می‌کند. این روش در کنار سادگی پیاده‌سازی معایب عمده‌ای نیز دارد، اول اینکه باید محیط کاملاً شناخته شده باشد دوم اینکه در شرایطی ربات تحت این الگوریتم فلج شده و امکان ادامه‌ی مسیر حتی با وجود مسیر بدون مانع برای ربات مهیا نمی‌شود و این زمانی رخ می‌دهد که مجموع نیروهای دافعه و جاذبه روی ربات برابر باشند. به خاطر این معایب این روش کاربردی در رباتیک مدرن نداشته و بیشتر جنبه صنعتی دارد.

الگوریتم VFF [۱۵] که چند سال بعد از الگوریتم PF در سال ۱۳۶۸ (۱۹۸۹ م.) برپایه‌ی ایده‌ای که قبلاً الگوریتم میدان پتانسیل ارائه داده بود را برای کاربرد در محیط‌های ناشناخته ارائه شد. در این الگوریتم نیز همانند الگوریتم PF ربات تحت تاثیر نیروهای جاذبه و دافعه‌ی موقعیت‌های هدف و موانع حرکت می‌کند با این تفاوت که این نیروها توسط موقعیت‌های معین و از پیش تعریف شده محاسبه و اعمال نمی‌گردد بلکه با وقتی موانع توسط حسگرهای ربات که دور تا دور ربات را تحت پوشش قرار داده‌اند حس گردیدند، یک نوع نمایشگر هیستوگرامی در ربات از موانع اطراف خود بوجود می‌آید و به ازای بار حس مانع مقداری از سلول‌ها که مرتب با موقعیت حس شده از مانع می‌باشد بروز رسانی می‌شود. این الگوریتم توانسته است که موقعیت نسبتاً خوبی از موانع را در هیستوگرام خود در طی زمان بدست بیاورد. بعد از محاسبه‌ی مقادیر هیستوگرام میزان و جهت نیروی دافعه و جاذبه‌ای که باید به ربات برای حرکت به سمت هدف وارد شود محاسبه شده و در نهایت اطلاعات حرکتی به کنترل‌کننده‌ی ربات داده می‌شود، تفاوت این روش با شبکه‌ی قطعیت [۱۶، ۱۷] در نحوه‌ی بروز رسانی این روش می‌باشد که در پیچیدگی زمانی الگوریتم بسیار موثر است، در VFF زمانی که موقعیت یک هدف در هیستوگرام ربات بروز رسانی می‌شود که خانه از جدول به بروز شده ولی در حالی که در شبکه‌ی قطعیت که احتمال وجود موانع محاسبه می‌شود با بروز شدن مقدار یک خانه از جدول مقادیر احتمالی خانه‌های مجاور نیز بروز می‌شود که از نظر محاسباتی پیچیدگی بالایی دارد. لازم به ذکر است که الگوریتم VFF نیز به سبب اینکه برای راهبری<sup>۱</sup> همانند PF از نیروهای دافعه و جاذبه موانع و هدف استفاده می‌کند، به صورت پیش‌فرض

---

<sup>۱</sup>Navigation



شکل ۲-۶: (آ) هیستوگرام چگالی موانع، مورد استفاده در الگوریتم‌های VFH و VFH - (ب) هیستوگرام قطبی برای راهبری و گریز از موانع، معرفی شده در الگوریتم VFH

معایب راهبری الگوریتم PF را نیز دارد.

الگوریتم VFH [۶] که در سال ۱۳۷۰ (۱۹۹۱ م.) توسط طراح الگوریتم VFH برای رفع نواقص آن ارائه شد. در این روش نیز همانند روش VFH جدول هیستوگرامی (شکل ۲-۶ (آ)) از موانع در ربات تشکیل می‌شود. با این تفاوت که در هنگام راهبری بجای استفاده بردارنیروهای جاذبه و دافعه یک هیستوگرام دیگر از روی هیستوگرام قبلی ساخته می‌شود که میزان چگالی وجود موانع در دور تا دور ربات (یعنی ۰ تا  $360^\circ$  درجه) را نمایش می‌دهد سپس با استفاده از این هیستوگرام قطبی<sup>۱</sup> (شکل ۲-۶ (ب)) جهت حرکت مناسب برای ادامه‌ی مسیر و رفع موانع با در نظر گرفتن یک حد آستانه بدست می‌آید.

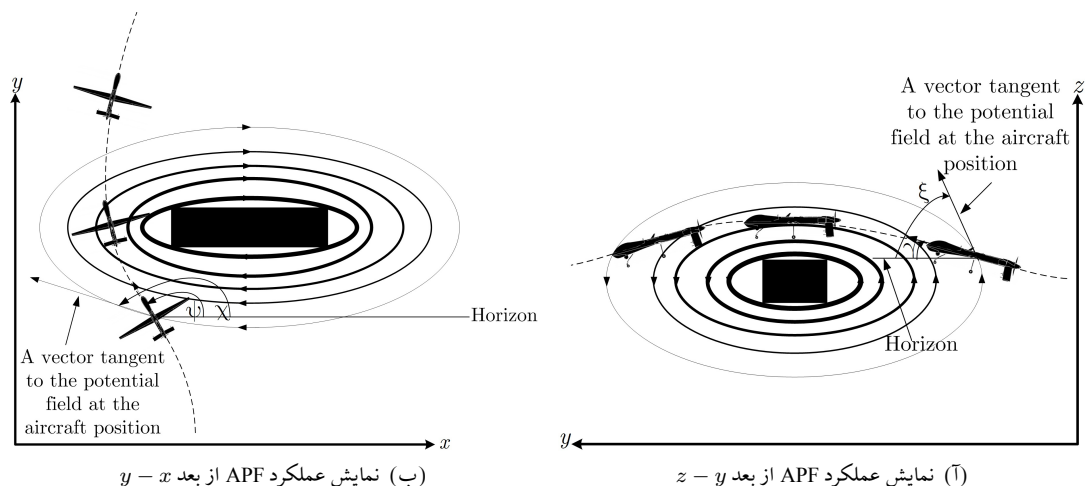
در الگوریتم VFH+ [۷] بهبود یافته الگوریتم VFH می‌باشد که در این الگوریتم سعی شده است که احتمال برخورد ربات با موانع کمینه شود. در الگوریتم VFH بعد از ساخته شدن هیستوگرام یک مرتبه کاهش بعد داده می‌شود تا به جهت حرکت تعیین شود ولی در الگوریتم VFH+ این کاهش بعد برای رسیدن به جهت حرکت در ۴ مرحله صورت می‌گیرد؛ به همین دلیل که VFH+ بعد از گذراندن ۴ مرحله به جهت حرکت دست پیدا می‌کند از نقطه نظر ریاضی اطلاعات کمتری نسبت به VFH در طی این فرایند از دست می‌دهد لذا در نهایت ربات را با فرمان‌هایی نرم و مطمئن به حرکت وامی‌دارد.

الگوریتم‌های بالا الگوریتم‌های نسبتاً قدیمی هستند ولی به دلیل جامعیت آن‌ها هنوز مقالاتی در رابطه با کاربردها یا بهبودهای مدرن این الگوریتم‌ها ارائه می‌شود. یکی از بهبودهایی که به الگوریتم PF در سال‌های اخیر داده شده حل مشکل وقوع قرارگرفتن ربات در کمینه‌ی محلی میدان پتانسیل می‌باشد که الگوریتم  $APF^2$  [۱۸] میدان پتانسیل اطراف موانع را بصورت دورانی تعریف می‌کند و می‌تواند ربات را از قرار گرفتن در

<sup>۱</sup>Polar

<sup>۲</sup>Adaptive Artificial Potential Field





شکل ۷-۲: الگوریتم APF با معرفی میدان پتانسیل چرخشی برای رفع مشکل کمینه‌ی محلی موجود در الگوریتم PF ارائه شد.

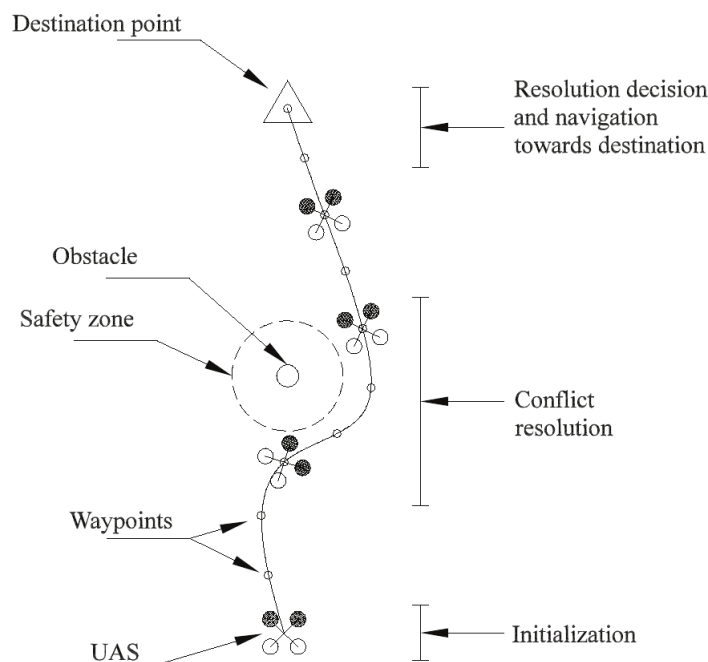
کمینه‌های محلی برحذر دارد - در هنگامی که ربات مستقیماً به سمت هدف در حال حرکت است نهایتاً به نقطه‌ای خواهد رسید که برآیند نیروهای دافعه و جاذبه صفر می‌گردد و باعث می‌شود بدون اینکه ربات به مقصد برسد فلج شده و متوقف می‌شود، روش ارائه شده در مقاله مذکور از رخداد این امر جلوگیری می‌کند. APF رفتاری سازگار<sup>۱</sup> با نحوه‌ی همگرایی ربات به مانع دارد. همان طور که در شکل ۷-۲ آمده است زمانی که ربات در میدان پتانسیل مانع قرار می‌گیرد به جهت چرخان بودن این میدان، برآیندی از نیروی چرخشی وارده از سمت میدان و سرعت کنونی ربات جهت‌گیری متناسب با جهت حرکت (معمولاً نرم - مگر در مواقعی که ربات به صورت عمود به سمت مانع حرکت کند) برای اجتناب از برخورد با مانع صورت می‌گیرد.

چندسال بعد از ارائه‌ی الگوریتم APF در پژوهشی دیگر [۱۹، ۲۰] از میدان پتانسیل چرخشی به جهت ساماندهی خودکار ربات‌های چند-عاملی<sup>۲</sup> ساختارمند برای راهبری و اجتناب از مانع با حفظ محدودیت رعایت ساختار بین ربات‌ها استفاده شده است. بدین‌گونه ربات‌ها در ابتدا در یک ساختار تقریبی قرار می‌گیرند و با توجه به تعداد ربات‌ها و نوع ساختار یک میدان پتانسیل چرخشی با یک شعاع معین (وابسته به نوع ساختار) در میان ربات‌ها ایجاد می‌شود که باعث توزیع خودکار و مناسب عامل‌ها در ساختار تعریف شده می‌شوند. در این رویه عاملین در هنگام مواجهه با موانع بنا به ماهیت الگوریتم‌های میدان پتانسیل، از خود انعطاف نشان داده و ساختار از حالت اولیه خود خارج می‌شوند؛ سپس باوجود یک جاذبه مجازی در مرکز ساختار باعث می‌شود که بعد از رفع، موانع عاملین دوباره به سمت ساختار اولیه همگرا شود.

الگوریتم میدان پتانسیل همچنین در راهبری پهپادها در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱].

<sup>۱</sup>Adaptive

<sup>۲</sup>Multi-Agent



شکل ۸-۲: مسیریابی محلی براساس تولید نقاط مسیری پویا و میدان‌های جاذب و دافع - این شکل نشان می‌دهد که در اجتناب از مانع در حال کلی ۳ مرحله<sup>۲</sup> وجود دارد: قبل برخورد<sup>۴</sup> دوره‌ی برخورد، بعد برخورد.

در این روش که با نام DWG<sup>۱</sup> در سال ۱۳۹۵ (۲۰۱۶ م.) ارائه شد، بر اساس GPS چندین قدم جلوتر از آنچه که پهباد در آن قرار دارد را محاسبه می‌کند زمانی که مانع‌ای مشاهده شد با توجه به موقعیت مانع الگوریتم DWG مسیر جدیدی به جهت رسیدن به هدف محاسبه می‌گردد (شکل ۸-۲). این مقاله بهبودی بروی الگوریتم PF ارائه نداده است ولی روشی بجهت محاسبه‌ی مطمئن‌ترین دستورات کنترلی به پهباد را با استفاده از تکنیک تولید نقاط مسیری پویا<sup>۲</sup> و به کمک PF معرفی کرده است.

از دیگر کاربردهای الگوریتم PF می‌توان به پژوهشی در رابطه با استفاده‌ی این الگوریتم در منطق بازی «سفینه‌ی فضایی»<sup>۵</sup> اشاره کرد که یک بازی استراتژیک می‌باشد [۲۲]. فضای پویا بازی‌ها باعث شده که پیدا کردن مسیر برای عاملین دشوار باشد که معمولاً از الگوریتم A\* برای پیدا کردن مسیر در بازی‌ها استفاده می‌شود. در مقاله نشان داده شده است که ترکیب الگوریتم‌های A\* و PF می‌تواند نتیجه بهتری در برداشته باشد. ترکیب استفاده‌ی این دو الگوریتم بدین‌گونه است که در زمانی که عامل به جستجوی دشمن می‌گردد از الگوریتم A\* استفاده می‌کند و زمانی که دشمن در دسترس عامل قرار گرفت از الگوریتم PF برای حمله استفاده می‌کند، بدین وسیله مقاله سعی کرده است که در کنار اینکه با استفاده از الگوریتم A\* برای جستجوی بخش‌هایی از فضای بازی که عاری از حضور دشمن است از احتمال قرارگیری در کمینه‌های محلی الگوریتم میدان پتانسیل کم کند

<sup>۱</sup>Dynamic Waypoints Generation

<sup>۲</sup>Dynamic Waypoints Generation

<sup>۵</sup>StarCraft



و از طرف دیگر در زمانی که دشمن در دسترس هست از هزینه‌های سربار اضافی الگوریتم  $A^*$  جلوگیری کند. همانطور که دیدیم و قبلاً نیز گفته شده بود سادگی الگوریتم میدان پتانسیل باعث شده است که این الگوریتم بعد از چندین دهه برخلاف دیگر الگوریتم‌های اولیه کماکان الگوریتمی فعال در زمینه‌ی اجتناب از مانع می‌باشد.

## ۲-۳-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی در اجتناب از مانع

در سال ۱۳۸۸ (۲۰۰۹ م.) در طی پژوهشی [۲۳، ۲۴] از سه عدد شبکه‌های عصبی برای حل مشکل اجتناب از مانع با استفاده کرده‌اند که بعدها در سال ۱۳۹۰ (۲۰۱۱ م.) توسط پژوهشی دیگر [۲۵] بهبود یافت. در این روش سه عدد شبکه‌ی عصبی ۴ لایه‌ای برای اهداف جستجوی هدف، اجتناب از مانع و دنبال کردن دیوار استفاده کردند، برای آموزش هرکدام از این شبکه‌های عصبی داده‌های آموزشی متفاوتی در نظر گرفته شد. داده‌های ورودی این شبکه‌ها فاصله تا هدف و اطلاعات دریافتی از سنسورها هستند که شامل فاصله سنجیده شده توسط سونارها از ۴ جهت اصلی ربات و خروجی این شبکه‌ها نیز زاویه‌ی فرمان ربات می‌باشد.

رساله‌ای در سال ۱۳۹۲ (۲۰۱۳ م.) به بررسی این مساله پرداخت که «چگونه می‌توان یک معماری شبکه عصبی ارائه داد که برای هر نوع از ربات‌ها با هر تعداد و نوع از سنسورها سازگار باشد؟» [۲۶] زیرا که پرواضح است تمامی کارهایی که در رابطه با راهبری ربات‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی در صورتی که نوع یا تعداد سنسورهای متصل به ربات تغییر کنند (همانند روش‌های پیشنهادی در [۲۳-۲۵، ۲۷])، علاوه بر ساختار شبکه‌های عصبی باید کل داده‌های آموزشی نیز به‌روز رسانی شوند. در این رساله با فرض اینکه داده‌های سنسورها دوبعدی هستند با استفاده از شبکه‌های PCNN و استخراج ویژگی PCA ابعاد داده‌های ورودی را عادی‌سازی<sup>۱</sup> می‌کند سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی دستورات کنترلی به عنوان خروجی می‌دهد.

در پژوهشی [۲۸] که در سال ۱۳۹۵ (۲۰۱۶ م.) صورت گرفته با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning و شبکه‌های عصبی به تشخیص و اجتناب از موانع ثابت و متحرک پرداخته است. در پژوهش که بروی یک ربات چهارچرخ آکرم<sup>۲</sup> انجام شد، با ترکیب استفاده‌ی یادگیری تقویتی و شبکه‌ی عصبی سیستمی خود-یادگیر<sup>۳</sup> بجهت اجتناب از مانع ارائه دادند. در این روش از جدول Q برای ذخیره‌سازی حالات و اعمالی که ربات در طی مسیر از نقطه‌ی شروع تا خاتمه انجام می‌دهد و در هر گام بعد از بروز رسانی جدول Q به بروز رسانی وزن‌های شبکه با توجه به ورودی و خروجی جدول Q می‌پردازد و در نهایت شبکه‌ی عصبی یادگرفته شده معادل با جدول یادگرفته شده Q می‌شود و در صورت شکست ربات (برخورد با مانع) مقادیر جدول Q با استفاده از شبکه‌ی عصبی یادگرفته شده بروز رسانی می‌شود.

<sup>۱</sup>Normalization

<sup>۲</sup>Ackermann

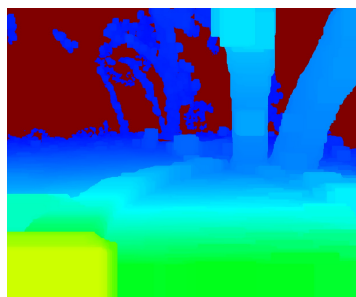
<sup>۳</sup>Self-learning

## ۲-۳-۳ بینایی ماشین در اجتناب از مانع

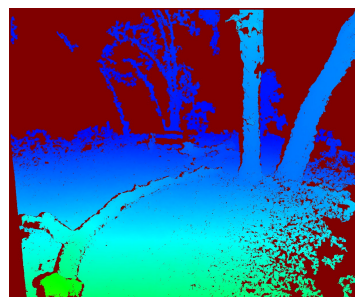
در تحقیق که در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) بروی ترکیب اطلاعات سنسور لیزری دامنه‌یاب<sup>۱</sup> و اطلاعات حاصل از دوربین استریو صورت گرفت [۲۹] در این تحقیق که بر روی یک ربات زمینی پیاده‌سازی شد برای افزایش سرعت محاسباتی از اطلاعات عمقی بدست آمده دوربین‌ها قسمتی از اطلاعات را که بیشتر از یک ارتفاع مشخص از زمین را دارد دور می‌ریزد سپس یک نقشه‌ی ۲ بعدی از نواحی اشغالی از تصاویر ۳ بعدی و در نهایت با ترکیب اطلاعات سنسور لیزری و نقشه‌ی دوبعدی بدست آمده از دوربین‌های استریو، نقشه‌ی ۲ بعدی اشغالی از محیط را می‌سازد و به الگوریتم VFH+ جهت راهبری و اجتناب از مانع می‌دهد.

در سال ۱۳۹۲ (۲۰۱۳ م.) در پژوهشی [۳۰] با استفاده از سنسور سه‌بعدی کینکت<sup>۲</sup> در چهار مرحله اقدام به تشخیص مانع می‌کند، در مرحله‌ی نخست اطلاعات عمقی از سنسور کینکت به یک فضای ۳ بعدی با استفاده از اطلاعات کالیبراسیون<sup>۳</sup> سنسور منتقل می‌شود. در مرحله‌ی دوم صفحه‌ی زمین در این فضا تشخیص و حذف می‌شود، در مرحله‌ی سوم یک نقشه‌ی ۲ بعدی فضای اشغالی<sup>۴</sup> با تصویر کردن<sup>۵</sup> این نقشه به نمای بالا به پایین<sup>۶</sup> ساخته می‌شود و در مرحله‌ی آخر الگوریتم اجتناب از مانع با استفاده از این نقشه‌ی فضای اشغالی تصمیم می‌گیرد که چگونه ربات را کنترل کند. در این پژوهش تمرکز اصلی بروی تشخیص مانع گذاشته شده است زیرا که برای الگوریتم اجتناب از مانع به صورت یک حالت کلی بحث شده است.

پژوهشی دیگر بروی اجتناب از مانع بر مبنای تصویر بروی یک ربات چهارپره در سال ۱۳۹۳ (۲۰۱۴ م.) انجام شد [۳۱]. در این تحقیق اجتناب از مانع به سبب بهینگی در پردازش داده و امکان پردازش و راهبری



(ج) نقشه‌ی جابجایی گسترش داده شده



(ب) نقشه‌ی اختلاف - هرچه رنگ تیره‌تر (متماثل به قرمز و آبی) اختلاف و جابجایی پیکسل‌ها در تصویر دوربین سمت چپ و راست کمتر و عمق بیشتر.



(آ) تصویر دوربین سمت چپ

شکل ۲-۹: گسترش C-Space در فضای نقشه‌ی اختلاف

<sup>1</sup>Laser Range Finder

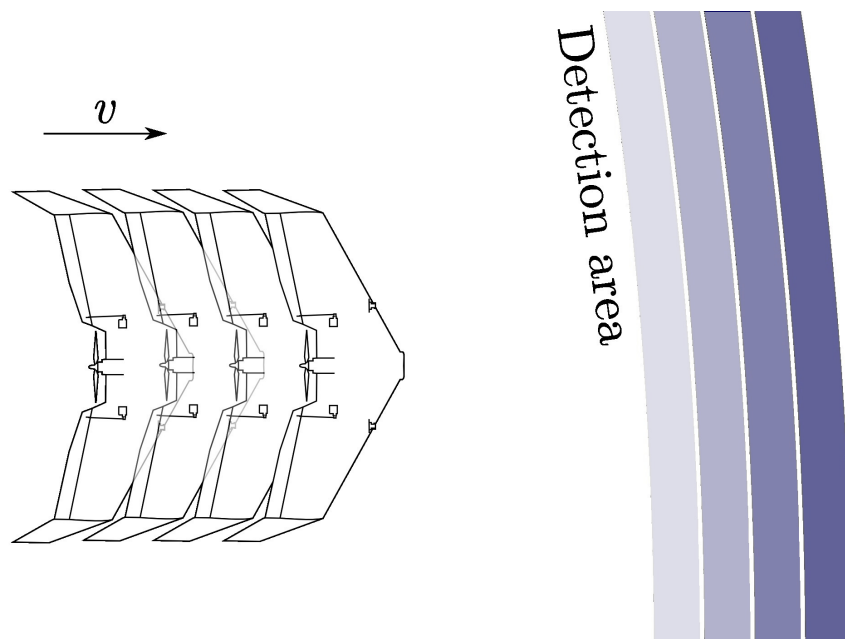
<sup>2</sup>Kinect

<sup>3</sup>Calibration

<sup>4</sup>Occupancy Map

<sup>5</sup>Projecting

<sup>6</sup>Top-Down View



شکل ۲-۱۰: تشخیص عمق در یک عمق مشخص (رنگ آبی تیره) و ادغام ادومتری پهناد و تشخیص های قبلی (رنگ های آبی روشن تر) به سرعت می توان نقشه ی کاملی از موانع مقابل پهناد ساخت.

برخط ربات در سطح نقشه ی اختلاف<sup>۱</sup> (که از مراحل اولیه عمق سنجی با استفاده از تصاویر استریو می باشد) صورت گرفته است. این پژوهش گسترشی<sup>۲</sup> به نام C-Space Expansion معرفی کرده است که بصورت متناسب ابعاد جابجایی نواحی موجود در نقشه ی اختلاف را گسترده می کند که در نهایت کمک میکند تا اغتشاش های موجود در نقشه حذف گردد و نقشه را بتوان به چند قطعه<sup>۳</sup> عمده شکست و حفره های فرار از موانع را تشخیص داد (شکل ۲-۹). در این مقاله بجهت راهبری از تکنیک نقاط مسیر که در قسمت های قبلی آورده شده است، استفاده می کند.

پژوهشی [۳۲] در سال ۱۳۹۴ (۲۰۱۵ م.) به ارائه ی الگوریتمی سریع برای شناسایی و اجتناب از مانع در پهنادهایی با سرعت پرواز بالا ارائه داد. ایده ای که این مقاله داده جالب است و مساله ی استخراج نقشه ی اختلاف و تطبیق بلوک<sup>۴</sup> را به جستجو میان اعماق تعریف کرده است. حال با محدود کردن جستجوی میزان جابجایی بلوک ها، می توان فقط به شناسایی اشیایی که در یک فاصله ی معین قرار دارند پرداخت و به ازای در نظر نگرفتن اشیایی که در فاصله ای غیر از این قرار دارند، میتوان سرعت الگوریتم را بصورت توانی افزایش داد. در نهایت با استفاده از ادومتری پهناد و اطلاعات تجمعی حاصل از این تطبیق الگوهای محدود می توان اطلاعات فاصله ی پیکسل هایی که از قبل از و فاصله ی دور شناسایی شده اند را بازسازی کند (شکل ۲-۱۰).

<sup>1</sup>Disparity Map

<sup>2</sup>Expansion

<sup>3</sup>Segment

<sup>4</sup>Block Matching

در تحقیقی که در سال ۱۳۹۵ (۲۰۱۶ م.) بروی راهبری مبتنی بر تصاویر استریو [۳۳] صورت گرفت که تلاشی در راستای یادگیری خود-مختاری ربات‌های پرنده با رویکرد راهبری تصویری<sup>۱</sup> به جهت اجتناب از مانع می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از دو دوربین استریو تصاویر، نقشه‌ی اختلاف قالب<sup>۲</sup>‌های این دو دوربین را بدست می‌آورند، سپس با استفاده از یک تخمین‌زن نقشه‌ی عدم شباهت بروی تصویر سمت چپ مدلی را یادگرفته و بعد از گذراندن شدن از فیلتری به واحد تصمیم‌گیری ارسال می‌گردد. در حین یادگیری تخمین‌زن نقشه مشغول به یادگیری می‌باشد ولی بعد از دوره‌ی یادگیری فقط با استفاده از تصاویر دوربین سمت چپ و تخمین‌زن به تصمیم‌گیری می‌پردازد و فقط در صورتی که تخمین‌زن در انجام وظیفه‌ی خود شکست بخورد و نتواند تخمینی معتبر ارائه دهد با استفاده از تصاویر استریو از تصادف جلوگیری به عمل می‌آید؛ با این روش از سر بار محاسباتی‌ای که هربار توسط پردازش تصاویر استریو به عمل می‌آید جلوگیری می‌شود.

## ۲-۳-۴ سیستم‌های فازی در اجتناب از مانع

در سال‌های اخیر کاربرد سیستم‌های فازی در اجتناب از مانع نیز نسبتاً فعالیت‌هایی بجهت تحقیق بوده و از این بُعد در پژوهش‌ها نگاه‌های متفاوتی به مسأله‌ی اجتناب از مانع شده است. پژوهشی [۳۴] در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) به معرفی سیستمی فازی با استفاده از حسگرهای مادون‌قرمز به اجتناب از مانع پرداخته است. در این پژوهش سیستمی با استراتژی واکنش‌گرا<sup>۳</sup> بر مبنای کنترل قواعد فازی<sup>۴</sup> که به وسیله‌ی اطلاعات دریافتی از حسگرهای مادون‌قرمز تغذیه می‌شود، ارائه شد. کنترل‌کننده‌ی منطق فازی این سیستم اطلاعات دریافتی از ۳ عدد سنسور متصل به ربات (که یک ربات دیفرانسیلی می‌باشد) به عنوان ورودی گرفته و سرعت هریک از چرخ‌ها را به عنوان خروجی برمی‌گرداند. به دلیل محاسباتی دو تابع عضویت<sup>۵</sup> «نزدیک» و «دور» برای فازی کردن مقدار ورودی‌ها مورد استفاده واقع شد. همچنین ۷ عدد تابع عضویت برای فازی کردن سرعت موتورهای مورد استفاده واقع شده است. بعد از تعیین این توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌ها با استفاده از ۸ قانون کنترلی نوشته به‌صورت فازی و استفاده از عملگر  $min - max$  با غیرفازی کردن<sup>۶</sup> خروجی سرعت موتورها، نهایتاً اقدام به کنترل ربات و اجتناب از مانع کرده است.

در همان سال در پژوهشی دیگر، از روش Neuro-Fuzzy برای یادگیری و بهبود کنترل ربات برای اجتناب از مانع استفاده شده است [۳۵]. در این روش قوانین فازی که توسط برخی از مسیرهایی برای اجتناب از مانع که توسط عامل انسانی به ربات ارائه می‌شود، توسط سیستم Neuro-Fuzzy یادگرفته می‌شود. این سیستم در طی روند

<sup>1</sup> Visual Navigation

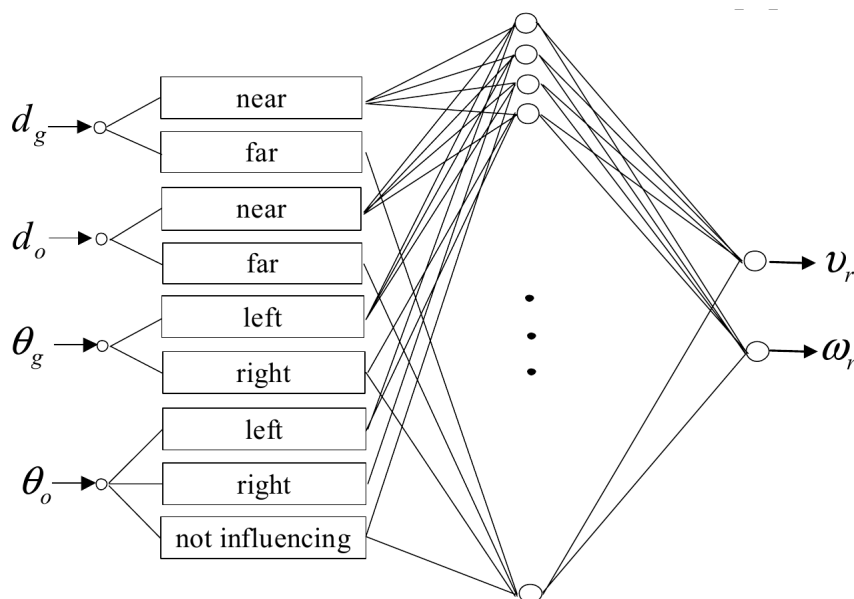
<sup>2</sup> Frame

<sup>3</sup> Reactive Strategy

<sup>4</sup> Rule-based

<sup>5</sup> Membership function

<sup>6</sup> Defuzzification



شکل ۲-۱۱: شبکه‌ی عصبی با توابع فازی عضویت نوع-۱، به جهت بدست آوردن دستورات کنترلی اطلاعات ورودی شبکه قبل از پردازش به توابع فازی نوع-۱ داده شده و سپس به شبکه داده می‌شوند.

یادگیری قواعد مربوط به نحوه‌ی اجتناب از مانع در مسیرهای ارائه شده و همچنین توابع عضویت را استخراج می‌کند. در این روش عامل انسانی در سناریوهای مختلف اقدام به هدایت ربات کرده و اطلاعات حسگرها به عنوان ورودی شبکه و زاویه‌ی فرمان متناظر با هر ورودی به عنوان خروجی شبکه برای آموزش داده می‌شود. در تلاشی دیگر [۳۶] در سال ۱۳۹۴ (۲۰۱۵ م.) راه‌حل دیگری برای مسأله‌ی اجتناب از مانع ارائه شد که این بار استفاده از شبکه‌های عصبی با داده‌های ورودی فازی نوع-۲<sup>۱</sup> پیشنهاد شد که بهبودی به روش قبلی ارائه شده در [۳۷] که از توابع عضویت نوع-۱ در ورودی‌های شبکه استفاده می‌کرد. در این روش داده‌های ورودی کریسپ<sup>۳</sup> به توابع عضویت فازی نوع-۲ داده می‌شوند و به ازای هر بعد از داده ۳ خروجی «مقدار عادی» توابع عضویت (همان امیدریاضی در هر نقطه از دامنه‌ی تابع)، «حداکثر مقدار» و «حداقل مقدار» به عنوان ابعاد ورودی جدید به شبکه داده می‌شوند. در این روش نشان داده شده است که استفاده از توابع عضویت نوع-۲ برای مدیریت کردن شرایط غیر مطمئن و ناشناخته بهتر از توابع نوع-۱ عمل می‌کنند. در شکل ۲-۱۱ شبکه‌ی عصبی با توابع نوع-۱ آورده شده است که برای ربات‌های فوتبالیست مورد استفاده واقع شد؛ در نسخه توابع نوع-۲ این شبکه توابع ورودی شبکه از نوع-۱ به نوع-۲ تغییر پیدا کرده‌اند.

<sup>۱</sup>Type-2 Fuzzy

<sup>۲</sup>Membership functions

<sup>۳</sup>Crisp

## ۲-۳-۵ اجتناب از مانع در پهپادها

تا به این قسمت پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی اجتناب از مانع در حالت کلی (بدون در نظر گرفتن و طبقه‌بندی براساس ربات مورد تحقیق) در زمینه‌ها و روش‌های متعددی معرفی شد؛ در این قسمت به پژوهش‌های انجام شده بروی انواع پهپادها متمرکز می‌شویم. زیرا دینامیک و کنترل پهپادهای به‌مراتب پیچیده‌تر از دیگر ربات‌ها می‌باشند و همچنین محدوده‌ی حسگرهای مورد استفاده این گونه از ربات‌ها به نوع پهپاد، سرعت پرواز و میزان قابلیت پردازش‌های برخطی که ربات می‌تواند بروی سیستم‌های خود انجام دهد بستگی دارد. زیرا که به عنوان مثال در ربات‌های زمینی چهارچرخ این امکان وجود دارد ربات در زمان پردازش کردن اطلاعات حسگرهای خود بدون اینکه تعادل خود را از دست دهد به راحتی توقف کرده و بعد از تصمیم‌گیری در مورد مسیر حرکت به ادامه‌ی حرکت بپردازد، ولی همچنین امکانی در اکثر پهپادها وجود ندارد یا اگر هم داشته باشد از نظر توان مصرفی و کنترل بسیار هزینه‌بر است. لذا در این قسمت به دلیل ارتباط با ربات هدف این پژوهش صرفاً به مرور پژوهش‌های انجام شده بروی پهپادها در حالت کلی متمرکز خواهیم شد.

در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) روشی برای اجتناب از برخورد با دیوار<sup>۱</sup> با استفاده از نقشه‌ی عمق بدست آمده از جریان نوری<sup>۲</sup> معرفی شد [۳۸]. جریان نوری که معمولاً برای مساله‌های اجتناب از مانع بدون استفاده از دوربین‌های استریو بکار برده می‌شود به روشی گفته می‌شود که با استفاده از اطلاعات سرعت حرکت پهپاد و میزان جابجایی اجسام (بصورت سرعت زاویه‌ای آن‌ها) بین قالب‌های تصاویر، به محاسبه‌ی فاصله‌ی بین دوربین و جسم می‌پردازد. در این پژوهش با ارائه راهکاری برای محاسبه‌ی عمق با دیوارهای دارای بافت<sup>۳</sup> پرداخته است و نهایتاً روش ارائه شده را در متلب شبیه‌سازی کرده و آزموده است.

در سال ۱۳۹۰ (۲۰۱۱ م.) تیمی که بروی پهپادهای چندپره تحقیق می‌کنند، مدل افزایشی<sup>۴</sup> را برای تشخیص و اجتناب از مانع با استفاده از تصاویر دوربین‌های استریو معرفی کردند [۳۹]. این روش که در دو قسمت مدل افزایشی تشخیص مانع و مدل افزایشی اجتناب از مانع ارائه شد، در ابتدا بعد از بدست آوردن نقشه‌ی اختلاف دو تصویر استریو اقدام به محاسبه‌ی عمق هریک از پیکسل‌ها با استفاده از یک ماتریس تبدیل کردند. به دلایلی که شرح داده شده است در این پژوهش بجای استفاده از نقاط ابری<sup>۵</sup> یک نقشه‌ی کروی<sup>۶</sup> بعدی از میانه‌ی فواصل موجود در هر زاویه از این کره مجازی با استفاده از تاباندن اشعه‌های مجازی به مرکزیت ربات می‌سازد. هر اشعه  $r(\theta, \varphi)$  فاصله‌ی اولین مانعی که به آن برخورد می‌کند را ذخیره می‌کند، که در اینجا  $\theta$  زاویه ارتفاعی<sup>۶</sup> و  $\varphi$  زاویه

<sup>۱</sup>Wall collision avoidance

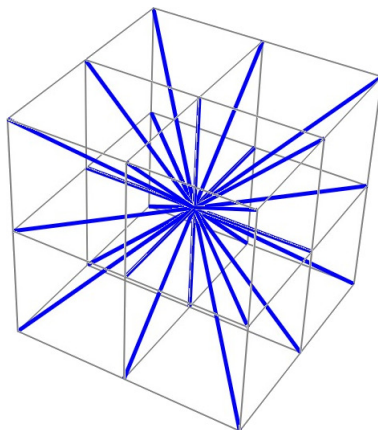
<sup>۲</sup>Optical flow

<sup>۳</sup>Texture

<sup>۴</sup>Incremental

<sup>۵</sup>Point Cloud

<sup>۶</sup>Elevation angle



شکل ۲-۱۲: ۲۶ عدد از کنترل‌های تعریف شده با دقت ۲۵ سانتی‌متر در مفهوم موقعیت شبکه‌ای

سمت<sup>۱</sup> این اشعه است. بعد از ساخته شدن نقشه‌ی اسکن<sup>۳</sup> بعدی به ساخت نقشه‌ی فضای اشغالی می‌پردازد که با محاسبه‌ی افزایشی احتمال وجود یک مانع در یک نقطه به شرط مشاهدات بدست آمده از آن نقطه به ساخت نقشه‌ی بعدی<sup>۲</sup> دودویی از موانع روبروی ربات می‌پردازد. بعد از ساخت نقشه‌ی موانع موجود به معرفی الگوریتم برنامه‌ریزی زمانی افزایشی<sup>۳</sup> یا همان الگوریتم اجتناب از مانع پرداخته است. در این پژوهش از مفهوم موقعیت شبکه‌ای<sup>۴</sup> (شکل ۲-۱۲) بجهت اینکه مساله‌ی اجتناب از مانع به دو زیرمساله<sup>۵</sup> حرکت ربات و جستجوی گراف تبدیل شود که برای جستجوی گراف خود از الگوریتم \*ADA<sup>۶</sup> استفاده کرده است.

در همین سال پژوهشی دیگر به جهت تشخیص و اجتناب از مانع بروی پهپادها صورت گرفت؛ در این پژوهش [۴۰] که از تنظیم نقاط مسیری برای راهبری پهپاد استفاده کرده است، الگوریتم معرفی شده با استفاده از ترسیم یک استوانه‌ی مجازی بروی نقشه‌ی فضای اشغالی و عمق‌سنج لیزری در مسیر حرکت تشخیص می‌دهد که آیا احتمال برخورد با موانع در مسیر کنونی وجود دارد یا خیر. در صورتی که در مسیر کنونی احتمال برخورد وجود داشت، یک جستجوی بیضوی گسترش داده‌شده<sup>۷</sup> برای پیدا کردن نقطه‌ی فرار<sup>۸</sup> در راستای رسیدن به هدف، اجرا می‌شود که در شکل ۲-۱۳ به عنوان نمونه آمده است. در این پژوهش مسیر پرواز کنونی در نقشه‌ی فضای اشغالی را برای یافتن نزدیک‌ترین مانع که در یک فضای امن<sup>۹</sup> قرار دارد بررسی می‌شود؛ این فضا که در واقع نشان‌دهنده‌ی این است که در صورتی که جسمی در داخل این فضا قرار داشته باشد این جسم در فضای داخلی پرواز پهپاد قرار دارد و ریسک برخورد زیادی دارد. در زمانی که در داخل این فضای امن جسمی قرار گرفت

<sup>۱</sup> Azimuth angle

<sup>۲</sup> Binary

<sup>۳</sup> Incremental path planing

<sup>۴</sup> Lattice concept

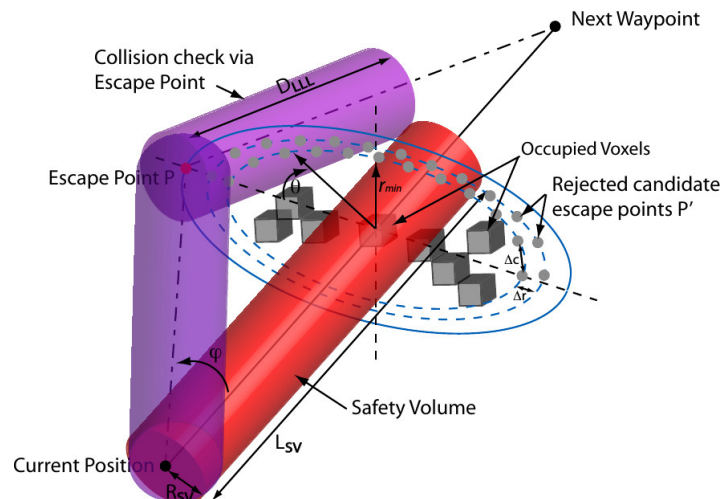
<sup>۵</sup> Subproblem

<sup>۶</sup> Anytime Dynamic A\*

<sup>۷</sup> Expanding elliptical search

<sup>۸</sup> Escape point

<sup>۹</sup> Safty Volume



شکل ۲-۱۳: جستجوی بیضوی گسترش داده شده برای پیدا کردن نقطه‌ی فرار معتبر در راستای رسیدن به هدف

اقدام به جستجوی یک نقطه‌ی فرار در راستای رسیدن به هدف تعیین شده می‌کند. این نقطه‌ی فرار همانطور که در شکل ۲-۱۳ آمده است یک جستجوی بیضوی به مرکزیت مانع تشخیص داده شده و در راستای جهت برداری به سمت هدف صورت می‌گیرد. این بیضی جستجو از یک شعاع کمینه<sup>۱</sup> شروع می‌شود و تا رسیدن به حداکثر مقدار گسترش داده می‌شود و در هربار گسترش بررسی می‌شود که در صورتی که نقطه‌ی فرار به نقاط موجود در آن شعاع تخصیص داده شود، آیا جسمی در فضای امن تعریف شده برای پهباد قرار خواهد داشت یا خیر؟ بعد از پیدا کردن یک نقطه‌ی فرار به صورت حریصانه نقطه‌ی فرار را به آن تخصیص داده می‌شود و به عنوان نقطه‌مسیری میانی مورد استفاده واقع می‌گردد.

چند سال بعد در سال ۱۳۹۳ (۲۰۱۴ م.) پژوهشی دیگر بروی تشخیص و اجتناب از مانع بروی پهبادها با استفاده داده‌های حسگر LIDAR<sup>۲</sup> پرداخته است [۴۱]. در این پژوهش به بررسی سیستم LOAM<sup>۳</sup> که توسط نیروی هوایی ایتالیا برای اجتناب از مانع طراحی و توسعه داده شده، پرداخته است. این سامانه که صرفاً برای استفاده در پهبادها طراحی نشده است و جنبه‌ی عمومی برای کلیه وسایل نقلیه‌ی هوایی دارد، توانایی تشخیص موانع موجود در مسیر یا نزدیکی مسیر پرواز را دارد، می‌توان بین موانع تشخیص داده شده اولیت‌بندی کند و خدمه را از وجود مانع مطلع سازد. در این سیستم داده‌های حسگر را به ۳ عدد تشخیص دهنده‌ی موانع سیم، درختان، ساختمان‌ها در دو سطح پایین و بالا<sup>۴</sup> می‌دهد سپس با ترکیب اطلاعات این ۶ عدد تشخیص دهنده به ساختن نقشه‌ی موانع می‌پردازد.

در پژوهشی دیگر در سال ۱۳۹۵ (۲۰۱۶ م.) به معرفی الگوریتم اجتناب از مانع تشک بادی محیطی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>Minimum

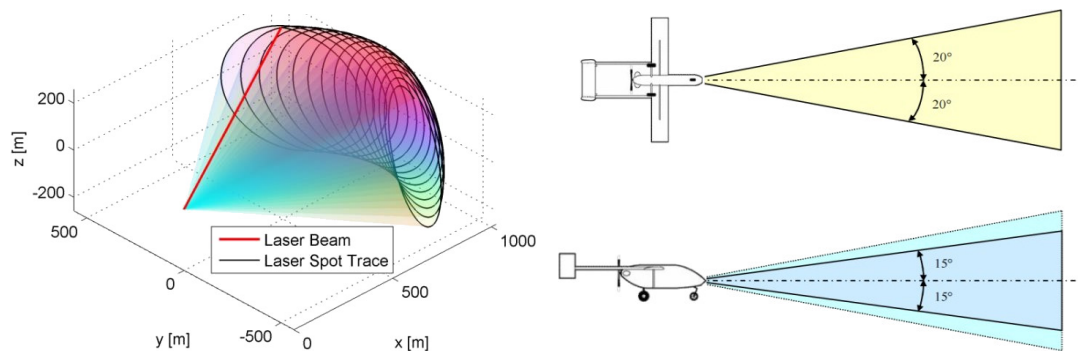
<sup>۲</sup>Light Detection and Ranging

<sup>۳</sup>Laser Obstacle Avoidance Marconi

<sup>۴</sup>Low and high level

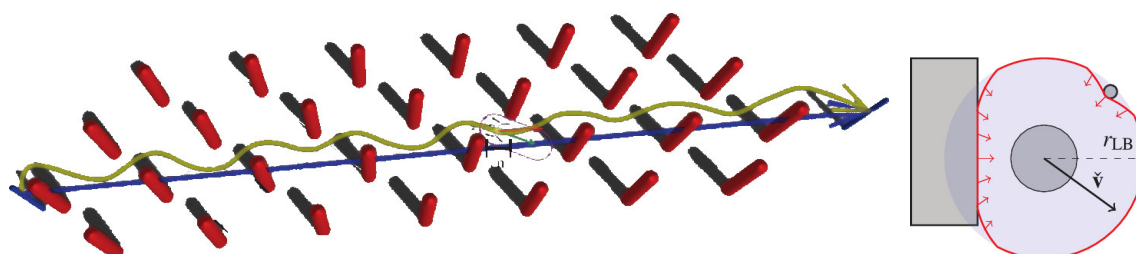
<sup>۵</sup>Cushioned Extended-Periphery Avoidance





(آ) زوایای سمت و ارتفاعی اسکن شده، همانطور که می‌بینیم به جهت افزایش (ب) نحوه‌ی اسکن کردن محیط، در یک الگوی بیضوی با زوایای مختلف، بهره‌وری از اسکن کردن کل فضای مقابل پهپاد پرهیز کرده و صرفاً به بررسی که امکان تشخیص موانع خطرناک مانند سیم‌های برق را می‌دهد. مسیر روبروی پهپاد پرداخته است.

شکل ۲-۱۴: سیستم LOAM



(ب) شبیه‌سازی انجام شده الگوریتم تشک بادی محیطی بروی یک محیط با موانع متعدد و نسبتاً پیچیده

(آ) در ایده‌ی تشک بادی محیطی، برآیند نیروهای دافعه وارده به ربات از سمت یک مانع، وابسته به میزان نزدیکی ربات به آن مانع می‌باشد.

شکل ۲-۱۵: الگوریتم اجتناب از مانع تشک بادی محیطی

پرداخته است که با استفاده از تعدادی حسگر لیزری که پیرامون ربات ۶ پره مورد تحقیق بسته شده است، با در نظر گرفتن ۳ محور اجتناب از مانع، پرواز نرم و رسیدن به هدف، اقدام به اجتناب از مانع کرده است [۴۲]. این الگوریتم که به نوعی می‌توان جز تعمیم‌های الگوریتم PF دانست که با همان ایدئولوژی‌ای که موانع نیروی پتانسیلی دافعه و هدف نیرو پتانسیل جاذبه بروی ربات اعمال می‌کند، ارائه شده است. ایده‌ای جالبی که در این پژوهش سعی شده به آن پردازد این است که هر مانعی در کنار اینکه دور یا نزدیک بدون آن می‌توان در شدت نیروی دافعه‌ای که به ربات اعمال می‌کند متغیر است، میزان نزدیکی به ربات در برآیند جهت نیروی دافعه‌ای آن مانع نیز تاثیرگذار است (شکل ۲-۱۵ (آ)). همانطور که در شکل ۲-۱۵ (ب) که نتیجه‌ی شبیه‌سازی این الگوریتم آمده است می‌بینیم پهپاد با نظر گرفتن میزان و جهت نیروی اعمال شده از طرف مانع به صورت دندان‌های<sup>۱</sup> به سمت هدف حرکت می‌کند، رفتاری که برای این گونه از محیط‌ها کاملاً طبیعی می‌باشد.

<sup>۱</sup> Zikzak

## ۲-۳-۶ دیگر فعالیت‌ها و کاربردهای اجتناب از مانع

در این قسمت در مورد مسائل کلی که در دیگر قسمت‌های این فصل نمی‌گنجد صحبت خواهد شد. مباحث این قسمت شامل دیگر روش‌های معرفی شده در سال‌های اخیر برای حل مسأله‌ی اجتناب از مانع که در زمینه‌ی پژوهشی این تحقیق نیستند، کاربردهای<sup>۱</sup> اجتناب از مانع در مسائل روزمره چون کمک به افراد با معلولیت‌های جسمی که مجبور به استفاده از صندلی چرخ‌دار<sup>۲</sup> و سیستم‌هایی برای کمک به افراد نابینا و غیره معرفی خواهند شد که نشان‌دهنده از اهمیت و بروز بودن مسأله‌ی اجتناب از مانع در دنیای مدرن امروز می‌دهد.

در طول مطالعاتی که برای تهیه‌ی این فصل صورت گرفت به مقالاتی برخورد شد که به مسأله‌ی اجتناب از مانع در انواع ربات‌ها از بعد کنترل حمله شده است [۴۳-۴۶]. در این مقالات با دست بردن در روابط کنترلی مربوط به ربات مورد پژوهش، سعی کرده‌اند که سهم خود را در مهار کردن چالش اجتناب از مانع ایفا کنند. با توجه به اینکه این مقالات خارج از حوضه‌ی دانش این تحقیق بوده و صرفاً به جهت جامعیت دادن به مطالب مندرج در این فصل آورده شده است، برداشت‌هایی که در مطالعه این مقالات بدست آمده است روند اجتناب از مانع در زمینه‌ی کنترل در حالت کلی به این اصل برمی‌گردد که فرض شده است که اطلاعاتی از پیش تعریف شده از مانع موجود در محیط که بسته به نوع ربات و کنترل آن حداقل شامل اطلاعات موقعیتی مانع می‌باشد، در اختیار سیستم هست. سپس با دخیل دادن این اطلاعات در روابط کنترلی ربات سعی شده است که بصورت اتوماتیک در سطح کنترل از موانع اجتناب گردد.

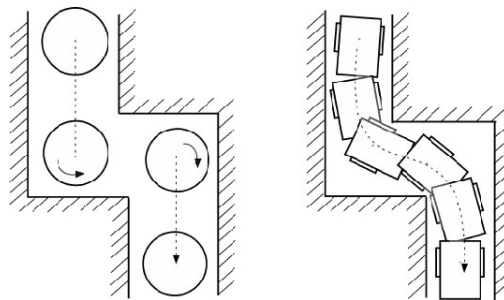
از طرف دیگر اجتناب از مانع علاوه بر علم رباتیک و نظامی کاربردهای غیر نظامی مدرن نیز در طی سالیان اخیر پیدا کرده است. به عنوان مثال در صنعت قایق‌رانی سیستم‌های اجتناب از مانع به کمک ملوانان آمده که در زمان‌های استراحت خود را با آرامش خاطر سپری کنند [۴۷-۴۹]. در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) الگوریتم میدان پتانسیل به یاری افراد بروی صندلی‌های چرخ‌دار شتافته است [۵۰] در این تحقیق با استفاده از حسگرهای فاصله‌سنج در اطراف صندلی به فرد معلول نشسته بر صندلی چرخ‌دار کرده‌اند که همانند آنچه که در شکل ۲-۱۶ آمده است، از راهروهای پیچ در پیچ که کنترل و حرکت در آن‌ها مشکل می‌باشد به صورت خودکار عبور کنند. پژوهش مشابه دیگری [۵۱] در همین سال با ترفندی تفاوت در همین زمینه صندلی چرخ‌دار صورت گرفت. بار دیگر در سال ۱۳۹۰ (۲۰۱۱ م.) فناوری‌های اجتناب از مانع به کمک صنعت صندلی‌های چرخ‌دار آمد [۵۲] که به کمک بینایی و یادگیری ماشین به یاری افرادی که از آسیب‌های ادراکی<sup>۳</sup> برای گذر از معابر شلوغ شتافته است. همچنین در این تحقیق علمی-کاربردی از بینایی ماشین برای یافتن مسیر<sup>۴</sup> جهت کمک به افراد

<sup>۱</sup> Applications

<sup>۲</sup> Wheelchair

<sup>۳</sup> Cognitive impairment

<sup>۴</sup> Wayfinding



شکل ۲-۱۶: از نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در اجتناب از مانع، الگوریتم میدان پتانسیل کمک کرده است که صندلی‌های چرخ‌دار در راهروهای پیچ در پیچ به صورت خودکار حرکت کنند.

با اختلالات اداری و حافظه‌ای استفاده کرده است. یک بررسی، به کاربرد اجتناب از مانع در یاری رساندن به افراد نابینا یا کم‌بینا در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) پرداخته است [۵۳]، حالت کلی تکنیک‌هایی که در این بررسی آورده شده این است که با استفاده از حسگرهایی (سونار، دوربین‌های استریو و ...) که محیط اطراف را می‌سنجند و بعد از شناسایی اشیاء موجود در مسیر حرکت که احتمال برخورد وجود دارد، به یک وسیله‌ای (یک دستگاه سوتی در گوش مخاطب، جهت‌دهی به چرخ‌های راهبر یا ارسال سیگنال لرزشی قسمت‌های متفاوت بدن فرد و ...) موقعیت نسبی شی به فرد و دستورات لازم به جهت رفع مانع اطلاع رسانی می‌شود.

## ۴-۲ نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا به مروری خلاصه از تاریخچه‌ی پرواز و روند به‌وجود آمدن پهپادها پرداختیم، سپس با معرفی الگوریتم‌های اولیه اجتناب از مانع که از الگوریتم‌های بنیادین این حوزه می‌باشند پرداختیم و بعد از آن به‌صورت ساختارمند پژوهش‌هایی که از سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) تا به کنون برای تعمیم این الگوریتم‌ها انجام شده است، ارائه شد. در قسمت‌های بعدی کاربردهای شبکه عصبی مصنوعی، بینایی ماشین و سیستم‌های فازی در اجتناب از مانع معرفی شد. سپس پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی اجتناب از مانع بروی ربات‌های پهپادها به صورت خاص مورد مرور واقع شدند و نهایتاً با گذری خلاصه بر اثرهای پژوهش‌های انجام شده در علم رباتیک برای حل مسأله‌ی اجتناب از مانع بر زندگی روزمره انسان‌ها به این فصل خاتمه دادیم.

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد در این فصل فقط پژوهش‌های بروز که از سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ م.) تا به کنون انجام شده است آورده‌ایم، که این تصمیم بر مبنای دو اصل «بروز بودن مطالب پیش‌زمینه‌ی این پژوهش» و «حفظ تناسب متنی این نگارش» صورت گرفته شده است؛ همچنین علاوه بر بروز بودن پژوهش‌های معرفی شده، همان‌گونه که نشان داده شد، پرکاربرد بودن این زمینه در مسائل گوناگون دنیای مدرن نشان از اهمیت پژوهشی این موضوع می‌دهد.

## مراجع

- [1] Wikipedia, "Multirotor — wikipedia, the free encyclopedia." <https://en.wikipedia.org/wiki/Multirotor>, 2016. [Online; accessed 6-September-2016].
- [2] A. Drones, "AERIUS – The NEW World's Smallest Quadcopter." <https://aerixdrones.com/products/aerius-the-new-worlds-smallest-quadcopter>, 2016. [Online; accessed 23-September-2016].
- [3] EHANG, "EHANG184 – world's first Autonomous Aerial Vehicle." <https://www.youtube.com/watch?v=IrPejpbz8RI>, 2016. [Online; accessed 23-September-2016].
- [4] Wikipedia, "Unmanned aerial vehicle — wikipedia, the free encyclopedia." [https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_aerial\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle), 2016. [Online; accessed 6-September-2016].
- [5] S. N. H. Izadi, "Autonomous navigation in unknown off-road environment based on family of bug algorithms," Master's thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, 1 2014.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278–288, 1991.
- [7] I. Ulrich and J. Borenstein, "VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots," in *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 1572–1577, IEEE, 1998.
- [8] NASA, "History of flights." <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/UEET/StudentSite/historyofflight.html>. [Online; accessed 4-September-2016].
- [9] Wikipedia, "History of unmanned aerial vehicles — wikipedia, the free encyclopedia." [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_unmanned\\_aerial\\_vehicles](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_unmanned_aerial_vehicles), 2016. [Online; accessed 4-September-2016].
- [10] Wikipedia, "Radioplane OQ-2 — wikipedia, the free encyclopedia." [https://en.wikipedia.org/wiki/Radioplane\\_OQ-2](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioplane_OQ-2), 2015. [Online; accessed 6-September-2016].
- [11] TheUAV, "UAVs." <http://www.theuav.com>. [Online; accessed 6-September-2016].

- [12] Wikipedia, "General atomics MQ-1 predator — wikipedia, the free encyclopedia." [https://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Atomics\\_MQ-1\\_Predator](https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator), 2016. [Online; accessed 6-September-2016].
- [13] Amazon, "Cheerson cx-10 mini 29mm 4ch 2.4ghz 6-axis gyro — Amazon." <https://www.amazon.com/Cheerson-2-4GHz-6-Axis-Quadcopter-Bright/dp/B00KXZC762/>. [Online; accessed 6-September-2016].
- [14] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *The international journal of robotics research*, vol. 5, no. 1, pp. 90–98, 1986.
- [15] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179–1187, 1989.
- [16] H. Moravec and A. Elfes, "High resolution maps from wide angle sonar," in *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 116–121, IEEE, 1985.
- [17] H. P. Moravec, "Sensor fusion in certainty grids for mobile robots," *AI magazine*, vol. 9, no. 2, p. 61, 1988.
- [18] H. Rezaee and F. Abdollahi, "Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance of unmanned aircrafts," in *2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1–6, IEEE, 2012.
- [19] H. Rezaee and F. Abdollahi, "Mobile robots cooperative control and obstacle avoidance using potential field," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, pp. 61–66, IEEE, 2011.
- [20] H. Rezaee and F. Abdollahi, "A decentralized cooperative control scheme with obstacle avoidance for a team of mobile robots," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 1, pp. 347–354, 2014.
- [21] G. E. D. Flores, E. S. E. Quesada, S. S. Cruz, L. R. G. Carrillo, and R. Lozano, "Online UAS local path-planning algorithm for outdoors obstacle avoidance based on attractive and repulsive potential fields," in *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 514–520, IEEE, 2016.
- [22] J. Hagelbäck, "Potential-field based navigation in starcraft," in *2012 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG)*, pp. 388–393, IEEE, 2012.
- [23] M. K. Singh and D. R. Parhi, "Intelligent neuro-controller for navigation of mobile robot," in *Proceedings of the International conference on advances in computing, communication and control*, pp. 123–128, ACM, 2009.
- [24] D. Parhi and M. Singh, "Real-time navigational control of mobile robots using an artificial neural network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, no. 7, pp. 1713–1725, 2009.
- [25] M. K. Singh and D. R. Parhi, "Path optimisation of a mobile robot using an artificial neural network controller," *International Journal of Systems Science*, vol. 42, no. 1, pp. 107–120, 2011.
- [26] S. H. Dezfoulan, D. Wu, and I. S. Ahmad, "A generalized neural network approach to mobile robot navigation and obstacle avoidance," in *Intelligent Autonomous Systems 12*, pp. 25–42, Springer, 2013.
- [27] K.-H. Chi and M.-F. R. Lee, "Obstacle avoidance in mobile robot using neural network," in *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on*, pp. 5082–5085, IEEE, 2011.
- [28] M. Duguleana and G. Mogan, "Neural networks based reinforcement learning for mobile robots obstacle avoidance," *Expert Systems with Applications*, 2016.
- [29] S. Kumar, D. Gupta, and S. Yadav, "Sensor fusion of laser and stereo vision camera for depth estimation and obstacle avoidance," *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, no. 25, pp. 20–25, 2010.

- [30] B. Peasley and S. Birchfield, "Real-time obstacle detection and avoidance in the presence of specular surfaces using an active 3d sensor," in *Robot Vision (WORV), 2013 IEEE Workshop on*, pp. 197–202, IEEE, 2013.
- [31] L. Matthies, R. Brockers, Y. Kuwata, and S. Weiss, "Stereo vision-based obstacle avoidance for micro air vehicles using disparity space," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3242–3249, IEEE, 2014.
- [32] A. J. Barry and R. Tedrake, "Pushbroom stereo for high-speed navigation in cluttered environments," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3046–3052, IEEE, 2015.
- [33] K. van Hecke, G. de Croon, L. van der Maaten, D. Hennes, and D. Izzo, "Persistent self-supervised learning principle: from stereo to monocular vision for obstacle avoidance," *arXiv preprint arXiv:1603.08047*, 2016.
- [34] C. Rusu and I. Birou, "Obstacle avoidance fuzzy system for mobile robot with ir sensors," *Development and Application Systems*, p. 22, 2010.
- [35] S. Dutta, "Obstacle avoidance of mobile robot using pso-based neuro fuzzy technique," *International Journal of Computer Science and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 301–304, 2010.
- [36] C.-J. Kim and D. Chwa, "Obstacle avoidance method for wheeled mobile robots using interval type-2 fuzzy neural network," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 677–687, 2015.
- [37] C.-J. Kim, M.-S. Park, A. V. Topalov, D. Chwa, and S.-K. Hong, "Unifying strategies of obstacle avoidance and shooting for soccer robot systems," in *Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, Oct*, pp. 17–20, 2007.
- [38] S. Zingg, D. Scaramuzza, S. Weiss, and R. Siegwart, "Mav navigation through indoor corridors using optical flow," in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 3361–3368, IEEE, 2010.
- [39] L. Heng, L. Meier, P. Tanskanen, F. Fraundorfer, and M. Pollefeys, "Autonomous obstacle avoidance and maneuvering on a vision-guided mav using on-board processing," in *Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE international conference on*, pp. 2472–2477, IEEE, 2011.
- [40] S. Hrabar, "Reactive obstacle avoidance for rotorcraft uavs," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4967–4974, IEEE, 2011.
- [41] R. Sabatini, A. Gardi, and M. Richardson, "Lidar obstacle warning and avoidance system for unmanned aircraft," *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 718–729, 2014.
- [42] J. Jackson, D. Wheeler, and T. McLain, "Cushioned extended-periphery avoidance: A reactive obstacle avoidance plugin," in *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 399–405, IEEE, 2016.
- [43] Q. Geng, H. Shuai, and Q. Hu, "Obstacle avoidance approaches for quadrotor uav based on backstepping technique," in *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 3613–3617, IEEE, 2013.
- [44] H. Dong and Z. Du, "Obstacle avoidance path planning of planar redundant manipulators using workspace density," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 12, 2015.
- [45] P. Yao, H. Wang, and Z. Su, "Real-time path planning of unmanned aerial vehicle for target tracking and obstacle avoidance in complex dynamic environment," *Aerospace Science and Technology*, vol. 47, pp. 269–279, 2015.
- [46] H. Yang, X. Fan, P. Shi, and C. Hua, "Nonlinear control for tracking and obstacle avoidance of a wheeled mobile robot with nonholonomic constraint," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 741–746, 2016.
- [47] R. Stelzer, K. Jafarmadar, H. Hassler, and R. Charwot, "A reactive approach to obstacle avoidance in autonomous sailing.," 2010.

- [48] T. Bandyopadhyay, L. Sarcione, and F. S. Hover, “A simple reactive obstacle avoidance algorithm and its application in singapore harbor,” in *Field and Service Robotics*, pp. 455–465, Springer, 2010.
- [49] H. K. Heidarsson and G. S. Sukhatme, “Obstacle detection and avoidance for an autonomous surface vehicle using a profiling sonar,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 731–736, IEEE, 2011.
- [50] H. Seki, M. Hikizu, and Y. Kamiya, *Real-time obstacle avoidance using potential field for a nonholonomic vehicle*. INTECH Open Access Publisher, 2010.
- [51] M. R. Petry, A. P. Moreira, R. A. Braga, and L. P. Reis, “Shared control for obstacle avoidance in intelligent wheelchairs,” in *2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 182–187, IEEE, 2010.
- [52] P. Viswanathan, J. J. Little, A. K. Mackworth, and A. Mihailidis, “Navigation and obstacle avoidance help (noah) for older adults with cognitive impairment: a pilot study,” in *The proceedings of the 13th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pp. 43–50, ACM, 2011.
- [53] D. Dakopoulos and N. G. Bourbakis, “Wearable obstacle avoidance electronic travel aids for blind: a survey,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 40, no. 1, pp. 25–35, 2010.

# Implementation of obstacle avoidance system on quadcopter

Dariush Hasanpour Adeh

d.hasanpoor@ec.iut.ac.ir

[DATE]

Department of Electrical and Computer Engineering  
Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran  
Degree: M.Sc. Language: Farsi

**Supervisor: Assoc. Prof. Maziar Palhang (palhang@cc.iut.ac.ir)**

## **Abstract**

**Key Words:** Drone, Flight security, Obstacle avoidance





**Isfahan University of Technology**

Department of Electrical and Computer Engineering

# Implementation of obstacle avoidance system on quadcopter

A Thesis

Submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master of Science

**by**

**Dariush Hasanpour Adeh**

Evaluated and Approved by the Thesis Committee, on ...

1. Maziar Palhang, Assoc. Prof. (Supervisor)
2. ..., Prof. (Examiner)
3. ..., Prof. (Examiner)

Mohamad Reza Taban, Department Graduate Coordinator

