



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی‌ارشد در رشته‌ی مهندسی مکترونیک

عنوان

طراحی مسیر و کنترل برای یک ربات پرنده‌ی بدون سرنشین در محیط

شناخته شده

استاد راهنما

دکتر احمد قنبری

استاد مشاور

دکتر قادر کریمیان

پژوهشگر

آکو ویسی نژاد

شهریور ۱۳۹۲

نام خانوادگی دانشجو: ویسی نژاد	نام : آکو
عنوان پایان نامه: طراحی مسیر و کنترل برای یک ربات پرنده بی بدون سرنشین در محیط شناخته شده	
استاد راهنما: دکتر احمد قنبری	استاد مشاور: دکتر قادر کریمیان
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی مکترونیک
گرایش: مهندسی مکترونیک	دانشکده: مهندسی فناوری های نوین
دانشگاه: دانشگاه تبریز	تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۲
تعداد صفحات: ۷۴	
کلیدواژه: طراحی مسیر، طراحی خط سیر، کنترل، پرنده بی بدون سرنشین، تعقیب خط سیر، بهینه سازی	
چکیده	
<p>در این پایان نامه سعی شده است که روشی برای یافتن خط سیر برای پرنده های بدون سرنشین در محیط شناخته شده بهبود داده شود. برای یافتن خط سیر از الگوریتم <math>RRT^*</math> به همراه کنترلر <math>LQR</math> برای اولین بار برای یک ربات پرنده با فضای حالت ۱۲ بعدی استفاده شده، و نشان داده شده است که الگوریتم برخلاف آنچه که تاکنون پنداشته می شد، بیشتر از حساسیت به معیار سنجش فاصله، به معیار هزینه حساس است. و نیز با انتخاب هزینه اقلیدسی برای کمینه سازی، و هزینه <math>LQR</math> به عنوان سنجش فاصله سعی شده که کوتاه ترین مسیر در کوتاه ترین زمان ممکن یافته شود. همچنین نشان داده شده است که انتخاب فقط مکان به عنوان نمونه تصادفی برای نمونه برداری از فضا، باعث کاهش سریعتر طول مسیر به مقدار بهینه می شود. در این پایان نامه از مدل کوادروتور "دراگان فلایر" به عنوان ربات پرنده بی بدون سرنشین برای شبیه سازی ها استفاده شده است. همچنین برای کنترل پرنده به منظور تعقیب خط سیر طراحی شده، از کنترلر <math>LQR</math> استفاده شده، و نشان داده شده است که پرنده با تقریب بسیار خوبی مسیر را دنبال خواهد کرد. در کلیه مراحل این پایان نامه برای شبیه سازی ها از نرم افزار Matlab R2012b استفاده شده است.</p>	

## شکر و قدردانی

در این مجال مختصر و وظیفه خود می‌دانم از زحمات فراوان جناب آقای دکتر احمد قفبری، که صادقانه و دلسوزانه مراد امر تهیه‌ی این پایان‌نامه یاری فرموده‌اند سپاسگزار می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر قادر کریمیان که بار اهنمایی خود در پیشرفت این پایان‌نامه بنده را کمک نموده‌اند شکر می‌کنم و از خداوند منان آرزوی موفقیت در تمام مراحل زندگی را برای ایشان دارم.

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم که هرچه

دارم از آنهاست

## فهرست

۱	فصل اول
۲	مقدمه
۳	۱.۱ طراحی مسیر بدون در نظر گیری قیدهای تفاضلی
۳	۱.۱.۱ نمودار دید
۴	۲.۱.۱ نقشه راه احتمالی (PRM)
۶	۳.۱.۱ میدان پتانسیل
۹	۲.۱ طراحی مسیر با وجود قیدهای دیفرانسیلی
۱۱	۱.۲.۱ طراحی مسیر بر پایه‌ی نمونه برداری
۲۴	۲.۲.۱ طراحی مسیر مجزا
۲۵	۳.۲.۱ مدل حرکتی حالت-محدود یا مانور خودکار ماشین
۲۷	۴.۲.۱ جستجوی گراف پویا
۳۰	۵.۲.۱ برنامه نویسی ریاضی
۳۰	۶.۲.۱ کنترل افق محدود (کنترل پیش بینی کننده‌ی مدل)
۳۳	۷.۲.۱ روش‌های بر اساس هوش مصنوعی
۴۰	فصل دوم
۴۱	مقدمه
۴۲	۱.۲ رگولاتور خطی درجه دو (LQR)
۴۳	۱.۱.۲ رگولاتور LQ بهینه
۴۵	۲.۲ روش $LQR+RRT^*$ تغییر یافته

۴۵	..... معیار فاصله و روش گسترش (رشد)	۱.۲.۲
۴۶	..... الگوریتم $LQR+RRT^*$ تغییر یافته	۲.۲.۲
۴۹	..... ربات پرنده‌ی مورد استفاده	۳.۲
۵۲	..... شبیه سازی	۴.۲
۵۸	..... کنترل	۲.۵
۶۰	..... نحوه‌ی نمونه برداری	۶.۲
۶۱	..... تابع هزینه	۷.۲
۶۲	..... پارامتر $\gamma$	۸.۲
۶۴	..... معیار سنجش فاصله	۹.۲
۶۶	..... فصل سوم	
۶۷	..... بحث	۱.۳.
۶۸	..... نتیجه گیری	۲.۳
۶۹	..... پیشنهادات برای کارهای آینده	۳.۳.
۷۰	..... منابع و مراجع	

صفحه	فهرست اشکال
۴	شکل ۱-۱ مقایسه‌ی مسیرهای بدست آمده توسط روش نمودار دید و بهبود یافته‌ی آن [۳۲]
۵	شکل ۲-۱ فلوجارت اجرای روش نقشه راه احتمالی بهبود یافته [۴]
۶	شکل ۳-۱ نمونه‌ی مسیر طراحی شده با ترکیب روش PRM و A* [۳۶]
۸	شکل ۴-۱ فلوجارت روش براساس نیروی مجازی [۱۳]
۱۳	شکل ۵-۱ مراحل پایه برای گسترش الگوریتم RRT [۲]
۱۳	شکل ۶-۱ نحوه‌ی گسترش RRT در یک محیط بدون مانع دو بعدی ( [۲۷] )
۱۴	شکل ۷-۱ مسیر یافته شده توسط روش RRT برای اتومبیل با فضای حالت ۴ بعدی [۲۹]
۱۴	شکل ۸-۱ دیاگرام کنترلی سیستم طراحی مسیر ماتریکس [۲]
۱۴	شکل ۹-۱ مراحل کلی الگوریتم طراحی مسیر [۳]
۱۹	شکل ۱۰-۱ نمونه‌ی ای از مسیر طراحی شده برای یک هلیکوپتر با روش MPC + RRT [۸]
۱۹	شکل ۱۱-۱ استراتژی روش ارائه شده با در نظرگیری RNP [۱۴]
۱۹	شکل ۱۲-۱ مقایسه‌ی بین دو الگوریتم RRT و RRT* در یافتن مسیر در یک محیط دو بعدی بدون مانع
۲۴	شکل ۱۳-۱ یافتن مسیر برای یک انتگرال‌گیر دو گانه با استفاده از دو الگوریتم RRT [۱۹]
۲۴	شکل ۱۴-۱ مسیر یافته شده توسط الگوریتم LQR+RRT* [۲۰]
۲۴	شکل ۱۵-۱ مقایسه‌ی مسیر طراحی شده و مسیر تعقیب شده توسط الگوریتم [۵]
۲۴	شکل ۱۶-۱ بلوک دیاگرام چهارچوب طراحی حرکت و کنترل [۱۲]
۳۵	شکل ۱۷-۱ مسیر طراحی شده توسط الگوریتم کلونی مورچگان [۳۳]
۳۷	شکل ۱۸-۱ نمونه‌ی ای از مسیر یافته شده توسط الگوریتم کلونی مورچگان به صورت ۳ بعدی [۳۸]
۴۶	شکل ۱-۲ مقایسه‌ی معیار فاصله‌ی اقلیدسی با معیاری که سرعت را هم محسوب میکند ( [۲۴] )
۵۰	شکل ۲-۲ طرح شماتیک یک کوادروتور
۵۳	شکل ۳-۲ نمودار تغییر مکان
۵۳	شکل ۴-۲ تغییرات زاویه ای
۵۴	شکل ۵-۲ سرعت های خطی (m/s)
۵۴	شکل ۶-۲ سرعت های زاویه ای (rad/s)
۵۵	شکل ۷-۲ محیط و نقاط مبدا و مقصد برای شبیه سازی ها
۵۶	شکل ۸-۲ خط سیرهای تولید شده توسط الگوریتم

- شکل ۹-۲ نمودارهای مربوط به خط سیر با تکرار ۵۰۰ ..... ۵۷
- شکل ۱۰-۲ خط سیرهای تولید شده توسط الگوریتم ..... ۵۸
- شکل ۱۱-۲ کنترلر طراحی شده برای کنترل ربات پرنده‌ی مورد نظر ..... ۵۹
- شکل ۱۲-۲ مسیرهای طراحی و تعقیب شده توسط ربات با استفاده از الگوریتم و کنترلر طراحی شده ..... ۵۹
- شکل ۱۳-۲ نمودار مسیر طراحی شده و مسیر تعقیب شده ..... ۶۰
- شکل ۱۴-۲ مقایسه‌ی طول مسیرهای بدست آمده از انتخاب مکان تصادفی و انتخاب حالت تصادفی ..... ۶۱
- شکل ۱۵-۲ مقایسه‌ی مسیرهای بدست آمده با کمینه سازی تابع هزینه‌ی LQR و اقلیدسی ..... ۶۲
- شکل ۱۶-۲ مقایسه‌ی دو مقدار برای  $\gamma$  ..... ۶۳
- شکل ۱۷-۲ نمودار زمان اجرای الگوریتم و طول مسیرهای بدست آمده با دو  $\gamma$ ی مختلف ..... ۶۴
- شکل ۱۸-۲ طول مسیرهای بدست آمده با استفاده از دو معیار فاصله‌ی اقلیدسی و LQR ..... ۶۵



صفحه	فهرست جداول
۹	جدول ۱-۱ روش‌های طراحی مسیر بدون در نظر گیری قیدهای تفاضلی.....
۱۰	جدول ۲-۱ روش‌های طراحی خط سیر با در نظر گیری قیدهای دیفرانسیلی.....

## فهرست علائم

## علائم لاتین

هزینه‌ی کنترلر LQR	J
تعداد موانع موجود در قضا	N
سطح گسسته سازی یا تعداد متغیرهای لازم برای تقریب فضا	M
کران بالای الگوریتم	O()
بعد فضای مسئله	d
ماتریس بهره	k
زمان	t
مختصه مکان و نیز نشان دهنده ی حالت در الگوریتم ها	x
مختصه مکان	y
مختصه مکان	z
ورودی	u
گراف شامل مجموعه ی راس ها و یال ها	G
مجموعه‌ی راس‌های درخت	V
مجموعه‌ی یال‌های درخت	E
شعاع همسایگی	r

## علائم یونانی

طول یال	$\varepsilon$
مقدار ثابت	$\eta$ و $\gamma$
حجم گوی واحد	$\xi$
حجم فضا	$\mu$
گشتاور هر موتور کوادروتور	$\nu$
پیشران‌ه‌ی هر موتور	$\tau$
زاویه رول	$\theta$
زاویه پیچ	$\phi$
زاویه یاو	$\psi$

**بالانویس ها و زیرنویس ها**

ترانهادهی ماتریس T

تکرارهای الگوریتم i

۱

## فصل اول

### مطالعه پیشینه تحقیق

## مقدمه

در طی دهه‌ی گذشته تغییرات اساسی در زمینه‌ی طراحی مسیر و خط سیر ربات‌های متحرک و به خصوص UAV ها به وجود آمده است. طراحی حرکت پرنده‌های بدون سرنشین به دلیل پیچیدگی‌هایی که در استراتژی‌های طراحی پیشین در نظر گرفته نشده، بسیار سخت می‌باشد، مانند: اهمیت بیشتر محدودیت‌های دینامیکی، اغتشاشات جوی که تعقیب خط سیر از پیش تعیین شده به طور دقیق را غیر ممکن می‌کند، عدم قطعیت در حالات پرنده، و همچنین شناخت محدود محیط به دلیل محدودیت‌های حساسه‌ها. همین اختلافات محرک استفاده‌ی بیشتر از پس خورد و نیز دیگر روش‌های مهندسی کنترل در طراحی حرکت برای پرنده‌های بدون سرنشین شده است.

در این پایان نامه ما به مسئله‌ی طراحی خط سیر برای یک ربات پرنده‌ی بدون سرنشین می‌پردازیم. در ادامه‌ی این فصل به شرح مسئله پرداخته و پس زمینه و کارهای انجام شده را مرور می‌کنیم. در فصل دوم مواد و روشهای مورد استفاده را بررسی کرده و شبیه سازی‌ها را ارائه می‌دهیم و نیز بحث کوتاهی در مورد آن‌ها خواهیم داشت. و نهایتاً در فصل سوم نتایج را بررسی کرده و پیشنهادهایی برای کارهای آینده ارائه می‌دهیم.

## ۱.۱ طراحی مسیر بدون در نظر گیری قیدهای تفاضلی

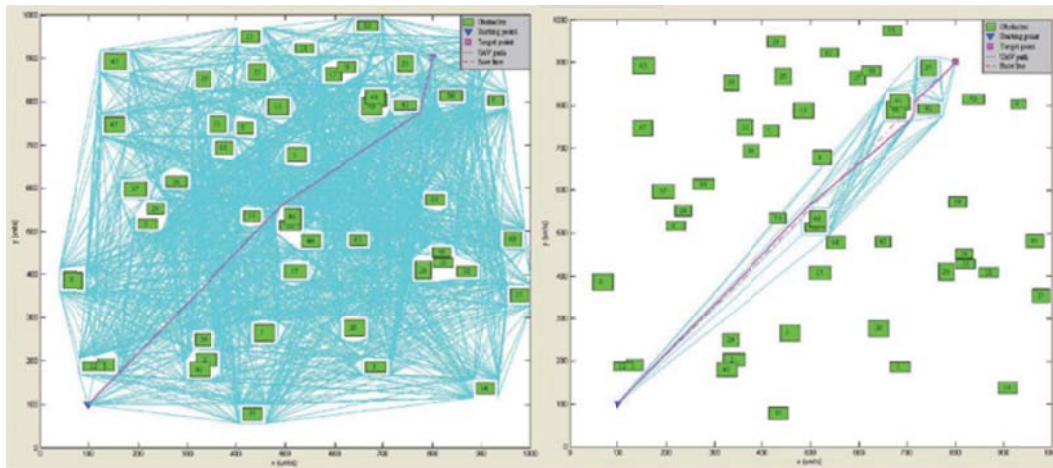
در این بخش طراحی مسیر بدون در نظر گیری قیدهای دینامیکی نیز به طور مختصر توضیح داده خواهد شد، زیرا این روشها اغلب به عنوان پایه ای برای الگوریتم های با قیدهای دینامیکی به کار برده می شوند. بسیاری از الگوریتم های مطرح شده در این فصل در مقالات و کتاب ها شرح داده شده اند، به همین دلیل در اینجا به طور بسیار مختصر به آنها می پردازیم. جدول ۱-۱ مقایسه ی جامعی از الگوریتم ها را ارائه میدهد. قابل ذکر است اصطلاحات به کار رفته در این پایان نامه بر اساس تعاریف استیون لاوله [۱] و هوانگ آوجا [۳۴] می باشد.

### ۱.۱.۱ نمودار دید<sup>۱</sup>

این روش یک حل دقیق برای مسئله ی خودروی نقطه ای میباشد، که هم کامل و هم بهینه بوده و در تکرار  $O(N^2)$  یک حل دقیق برای مسئله ی خودروی نقطه ای ارائه می دهد، اینجا به طور بسیار مختصر به آنها پرداخته میشود. با این حال این روش فقط برای فضای دوبعدی قابل محاسبه است. ثابت شده است که در فضای پیکربندی با بیشتر از دوبعد سختی حل دقیق از درجه ی NP است. این روش از این قاعده استفاده می نماید که کوتاهترین مسیر از رئوس مانع ها می گذرد.

در سال ۲۰۰۹ روسلی عمر و دا وی گو از دانشگاه لیکستر انگلستان [۳۲] از روشی بر پایه ی نمودار دید برای طراحی مسیر برای پرنده های بدون سرنشین استفاده کردند. روش آنها بدین شکل بود که ابتدا خطی مستقیم از مبدا به نقطه ی هدف وصل میکرد و سپس موانعی که این خط را قطع می کردند، مدنظر قرار داده و روش نمودار دید را اعمال می نمودند. با استفاده از این روش مشکل افزایش شدید زمان اجرای الگوریتم پایه که به صورت نمایی با تعداد موانع افزایش می یافت تقریباً حل می شد. مشکل اصلی این روش این است که دو بعدی بوده و در محیط های با ابعاد بالاتر ارائه نشده است و حتی در صورت اجرا در این محیطها زمان اجرا به شدت افزایش می یابد. دیگر اینکه روش دینامیک وسیله را مد نظر قرار نداده و همچنین مسیر تولیدی هموار نیست و باید بعداً هموار سازی شود. مسیرهای طراحی شده توسط روش اصلی و روش بهبود یافته در شکل ۱-۱ مشاهده می شوند.

<sup>۱</sup> Visibility graph



شکل ۱-۱ مقایسه‌ی مسیرهای بدست آمده توسط روش نمودار دید و بهبود یافته‌ی آن [۳۲]

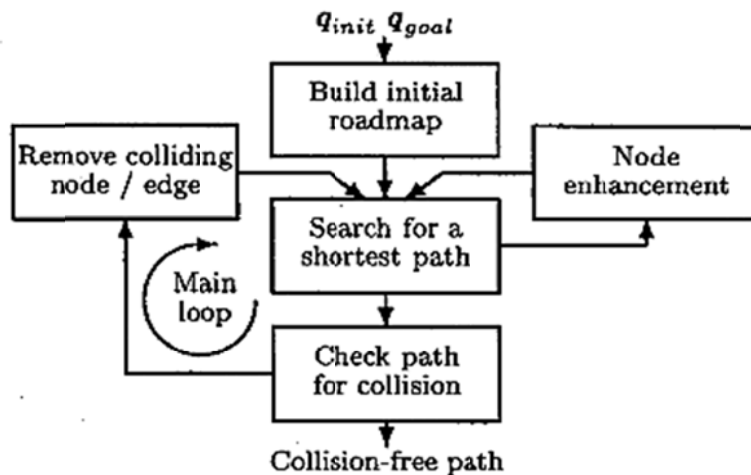
### ۲.۱.۱ نقشه راه احتمالی<sup>۱</sup> (PRM)

این روش از آن جهت که برای مسائل با پیچیدگی و ابعاد دلخواه و همگرایی به صورت احتمالی، قابل اعمال است، اهمیت دارد. این روش عمدتاً برای مسائل کنترلی درجایی که فضا پیچیده و دارای ابعاد زیادی است، به کار می‌رود. به هر حال سرعت همگرایی پایین است و مسیرهای تولیدی بهینه نیستند. در حالتی که فضای پیکربندی دوبعدی و سه بعدی باشد، قبل از اینکه خط سیر نهایی برای به وجود آید، باید مسیرهای حاصل به مقدار زیادی هموار شوند. همچنین همگرایی این روش برای مسائلی با مسیرهای طولانی بسیار کند خواهد بود.

روبرت بولین و لیدیا کاوراکی در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه چمبرلز، [۴]، با کاهش تعداد بررسی برخوردها تلاش کردند که نقشه راه احتمالی را بهبود ببخشند. روش آنها که آن را نقشه راه احتمالی تنبل نامیدند بر این اساس بود که تعداد بررسی برخوردها را در طی طراحی کاهش می‌دادند و بنابراین زمان اجرای الگوریتم نیز کاهش پیدا می‌کرد. این الگوریتم یک نقشه راه در فضای پیکربندی می‌ساخت که نقاط اولیه و هدف آن را خود کاربر تعیین کرده و نقاط میانه آن هم به صورت تصادفی تولید می‌شد. نقاط همسایه با یالهایی که به عنوان مسیر شناخته می‌شود به هم متصل می‌شدند. تفاوت این روش با روش اصلی (نقشه راه احتمالی) این بود که آنها ابتدا فرض می‌کردند که کلیه نقاط و یالها برخوردی با موانع ندارند،

<sup>۱</sup> Probabilistic Roadmap

و سعی می‌کردند که با جستجو کوتاه‌ترین مسیر را بیابند. سپس نقاط و مسیر بین آنها برای تشخیص وجود برخورد با موانع بررسی می‌شدند. اگر برخوردی با مانعی تشخیص داده می‌شد، نقاط مربوطه و یال‌های بین آنها حذف می‌شدند. سپس طراح دوباره نقاط و یال‌هایی جدید تولید کرده و سعی می‌کرد که کوتاه‌ترین مسیر را بیابد، و این فرایند آنقدر ادامه می‌یافت که مسیری بدون برخورد پیدا شود. آنها با استفاده از این روش توانستند زمان اجرای نقشه راه احتمالی را کاهش دهند. روش آنها کامل بوده اما بهینه نبود. و نیز در محیط‌های با تعداد موانع زیاد زمان اجرای الگوریتم به شدت افزایش می‌یافت که این قسمت موثر از روش پایه آنها (نقشه راه احتمالی) بود. همچنین نحوه‌ی انتخاب نقاط میانه بر روی مسیر نهایی موثر است که روش مناسبی برای این کار عنوان نشده است. در شکل زیر نحوه‌ی اجرای روش را مشاهده می‌کنیم.



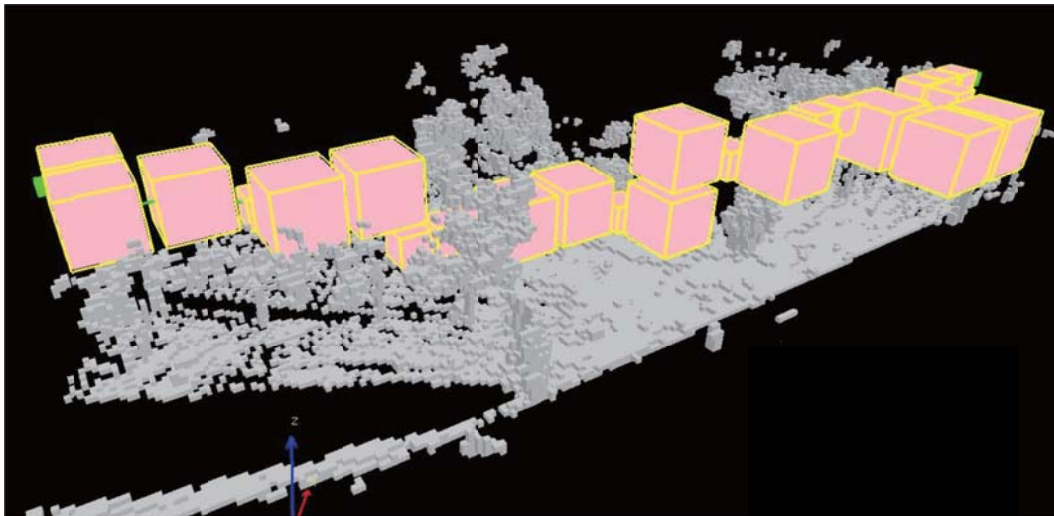
شکل ۱-۲ فلوجارت اجرای روش نقشه راه احتمالی بهبود یافته [۴]

فی یان و همکاران در سال ۲۰۱۲ از دانشگاه دالیان چین، [۳۶]، روشی جدید بر مبنای PRM برای طراحی مسیر برای پرنده‌های بدون سرنشین در محیط‌های پیچیده ارائه دادند. در این روش آنها ابتدا فضا را با استفاده از روش اکت تری<sup>۱</sup> تقسیم بندی کرده و نمایش می‌دادند و سپس از روش PRM که اصطلاحاتی در آن انجام داده بودند نقشه راهی برای مسیر ساخته و سپس با روش A\* بهترین مسیر را

<sup>۱</sup> Octree



می‌یافتند. در این پژوهش با اضافه کردن جعبه‌های پوشاننده‌ی دیگر سعی نمودند که در روش PRM برای بررسی تماس جعبه‌ها زمان کمتری صرف شود، هرچند این کار باعث افزایش زمان مرحله‌ی تقسیم بندی فضا می‌گشت، اما زمان کاهش یافته در مرحله‌ی بررسی تماس آنقدر زیاد بود که این افزایش زمان را به خوبی جبران می‌کرد، و سبب کاهش زمان اجرای کل الگوریتم می‌گشت به طوری که زمان اجرا از ۴۳ ثانیه برای حالت عادی را به حدوداً ۲ ثانیه برای الگوریتم بهبود یافته در محیط شبیه سازی شده در مقاله کاهش دادند. البته این روش هرچند کامل است اما بهینه نبوده و مسیر نهایی نیز نیاز به هموار سازی دارد. همچنین محدودیت‌های ذاتی و قیده‌های دینامیکی بر روی پرنده را برای طراحی مسیر مد نظر قرار نداده‌اند. نمونه‌ای از مسیر طراحی شده توسط این الگوریتم را در شکل ۱-۳ مشاهده می‌کنیم.



شکل ۱-۳ نمونه‌ی مسیر طراحی شده با ترکیب روش PRM و \*A [۳۶]

### ۳.۱.۱ میدان پتانسیل<sup>۱</sup>

روش‌های میدان پتانسیلی بر اساس ایده‌ی اختصاص دادن یک تابع پتانسیل به فضا و شبیه سازی خودرو به صورت یک بار نقطه‌ای که به نیروهای وارده از طرف میدان پتانسیل وارد می‌شود است. نقطه‌ی هدف کمترین پتانسیل را داشته و خودرو را به خود جذب می‌کند. درحالی که موانع خودرو را دفع می‌نماید. روش‌های میدان پتانسیل به دلیل پیچیدگی محاسباتی کم، بسیار شناخته شده‌اند، اما مشکل اصلی آنها

<sup>۱</sup> Potential field

کامل نبودن است. با این حال یک میدان پتانسیلی که خواص یک تابع ناوبری را هم داشته باشد، یک الگوریتم طراحی کامل خواهد بود.

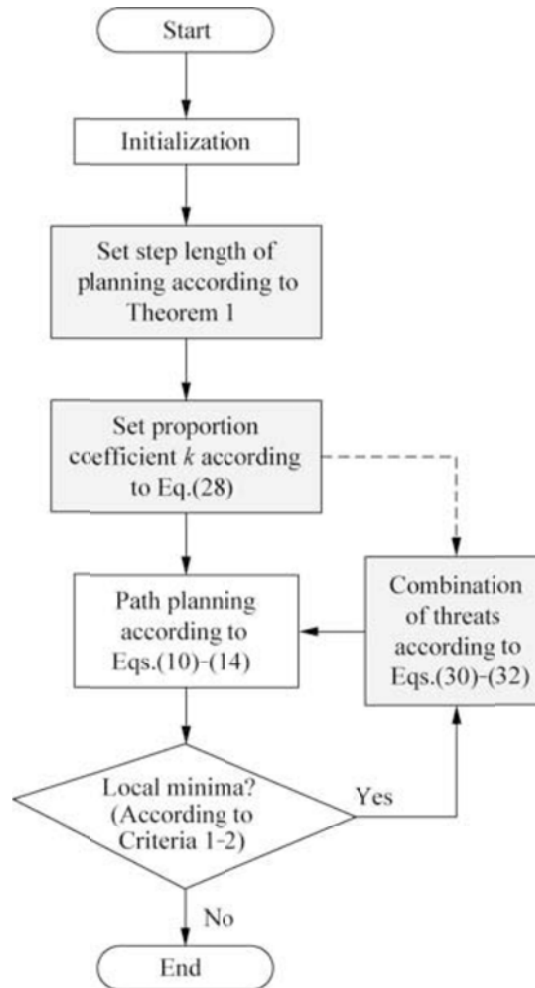
دانگ ژونینگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ از دانشگاه علوم هوایی و فضایی چین، [۱۳]، روشی بر اساس میدان نیروی مجازی<sup>۱</sup>، که یکی از روشهای زیر مجموعه‌ی میدان پتانسیل است، برای طراحی مسیر پرنده‌های بدون سرنشین در محیط‌های پیچیده ارائه کردند. در این روش مدل یکپارچه‌ی ریاضی برای طراحی مسیر پرنده بر اساس نیروی مجازی ساخته شده و روش حل بهینه‌ی مربوطه بر اساس شاخص‌های مورد نیاز ارائه می‌گردد. روش آن‌ها مراحل ثابتی داشته و نیز شرایط کمال در این مقاله آورده شده است. شبکه‌های بیزی<sup>۲</sup> و منطق فازی<sup>۳</sup> برای تنظیم سازگاری مشخصه‌های طراحی که حالت محیط را به صورت پویا و دقیق منعکس می‌کنند استفاده شده است. با ترکیب این دو روش مقدار  $k$  که ضریب نیروی وارده از طرف هر مانع است به صورت تحلیلی بدست می‌آید و باعث کاهش خطا می‌گردد. همچنین برای حل مشکل گرفتار شدن در مینیمم‌های محلی از ترکیب تهدیدها (موانع) استفاده شده است. وقتی موانعی که باعث یک توزیع مقعر میدان در منطقه‌ای می‌شوند با هم ترکیب گردند، میدان پتانسیل مجازی به شکل یک توزیع محدب تغییر یافته و باعث فرار از کمینه‌ی محلی می‌گردد. در شکل ۱-۴ فلوجارت طراحی مسیر توسط این روش را مشاهده می‌نمایید.

در نهایت این روش با روش  $A^*$  مقایسه شده و نشان داده شده است که روش جدید سریعتر بوده و برای کارهای عملی بهتر است. هرچند طول مسیر بدست آمده با روش  $A^*$  کوتاه‌تر می‌باشد. البته روش ارائه شده در فضای ۲ بعدی بوده و در فضاهای با ابعاد بالاتر ارائه نشده است. یکی دیگر از مشکلات روش این است که مسیر بدست آمده هموار نبوده و بدون هموار سازی قابل طی شدن نیست و البته هموار سازی نیز انجام نشده است. همچنین روش ارائه شده دینامیک وسیله مد نظر قرار نمی‌دهد.

<sup>1</sup> Virtual Force

<sup>2</sup> Bayesian Belief Network

<sup>3</sup> Fuzzy Logic



شکل ۴-۱ فلوجارت روش براساس نیروی مجازی [۱۳]

## جدول ۱-۱ روشهای طراحی مسیر بدون در نظر گیری قیدهای تفاضلی

الگوریتم	نوع مسئله	ابعاد	کمال	بهینگی	زمان اجرا
<b>روشهای نقشه راه</b>					
گراف دید	خودرو نقطه‌ای	۲	کامل	بهینه	$O(N^2)$
گراف دید با نمونه برداری لبه	خودرو نقطه‌ای	۳	کامل	بهینه‌ی تفکیکی	
نقشه راه ورونوی	خودرو نقطه‌ای	۲	کامل	غیر بهینه	$O(N \text{ Log } N)$
<b>روشهای میدان پتانسیل</b>					
میدان پتانسیل	انواع مسئله	دلخواه	ناکامل	غیر بهینه	
میدان پتانسیل هدایت شده	انواع مسئله	دلخواه	کامل	غیر بهینه	
میدان پتانسیل هارمونیک	خودرو نقطه‌ای	دلخواه	کامل	غیر بهینه	$O(M \text{ Log } M)$
<b>روشهای احتمالاتی</b>					
میدان پتانسیل تصادفی	انواع مسئله	دلخواه		غیر بهینه	
نقشه راه احتمالاتی	انواع مسئله	دلخواه	کامل	غیر بهینه	

## ۲.۱ طراحی مسیر با وجود قیدهای دیفرانسیلی

اکثر مسائل طراحی خط سیر مربوط به کاربردهای امروزی UAV باید به عنوان مسائل دینامیکی مقید در نظر گرفته شوند. رفتار وسایل نقلیه هوایی را نمی‌توان صرفاً با سینماتیک آن‌ها به خوبی تقریب زد، (همانطور که اغلب در موارد زمینی وجود دارد). تهیه‌ی معادلات حرکت به طور مستقیم به تضمین صحت و درستی طراحی مربوط می‌شود. تقریب دینامیکی از طریق یک مدل حرکتی با در نظر گیری قیدهای موجود منجر به تولید مدل‌های کافی برای استفاده در این موارد می‌شود. معادلات حرکت در جزئیات انرژی مؤثر حرکت وسیله نقلیه یا مدت زمان عبور باهم مرتبط اند. برای مثال کنگ و متلر در سال