دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

گروه مهندسی مکاترونیک

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

جبران‌سازی هوشمند خطا در مجموعه ربات‌های متحرک همکار

توسط:

هادی زارع جعفری

اساتید راهنما:

دکتر علیاری

دکتر تشنه لب

استاد مشاور:

دکتر موسویان

زمستان ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای:

را با عنوان:

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر علیاری		
استاد راهنما	دکتر تشنه لب		
استاد مشاور	دکتر موسویان		
استاد ممتحن	دکتر نحوی		
استاد ممتحن	دکتر مجد		
نماینده‌تحصیلات تکمیلی	دکتر نحوی		

با احترام و افتخار، تقدیم به پدر و مادرم

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر مهدی علیاری به خاطر حمایت ها و پشتیبانی های بسیار علمی تشکر و قدردانی می نمایم. همچنین از دوستان و بزرگورانی که بنده را در به انجام رسانیدن این پژوهش یاری نموده اند به ویژه جناب آقای مهندس عادل عباس پور و مهندس بهنام ارکان تشکر و قدردانی می نمایم.

چکیده

در این نوشتار، جبران‌سازی خطا در کنترل مجموعه ربات‌های متحرک همکار به هنگام رخداد خطاهایی همچون تغییر میزان اصطکاک سطح و یا تغییر پارامترهای تایر مورد تحلیل و بررسی قرار می-گیرد. مدل‌سازی‌هایی توسط معادلات نیوتن (بر اساس نیرو) و معادلات لاگرانژ از ربات متحرک با فرض غلتش به همراه لغزش صورت می‌پذیرند تا از طریق انطباق رفتارهای مدل‌های مذکور صحت و دقت مدل‌سازی‌های انجام شده مورد بررسی قرار گیرد.

تشخیص پارامترهای مجموعه ربات‌ها به هنگام وقوع خطا با بهره‌گیری از معادلات تایر و ربات، همچنین داده‌های مربوط به سرعت طولی و جانبی و دورانی چرخ صورت می‌پذیرد. لازم به ذکر است الگوریتم تخمین پارامتر ارائه شده توانایی تشخیص بسیاری از خطاها همچون کاهش ناگهانی ارتفاع مؤثر تایر، ساییدگی تایر و یا تغییر ضریب اصطکاک جاده-تایر را نیز دارا می‌باشد. جهت کنترل آرایش گروه، روش ساختار مجازی مورد استفاده قرار گرفته است و به منظور پیروی ربات از مسیر مطلوب در سطوح متفاوت الگوریتم کنترلی بر اساس روش خطی‌سازی فیدبک پیشنهاد و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

از طرفی دیگر نحوه‌ی قرارگیری هر ربات نسبت به جسم مورد جابجایی نیز، مسئله‌ای چالش برانگیز در نحوه‌ی ایجاد آرایش و کنترل آن می‌باشد، لذا آرایش بهینه توسط روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و PSO به دست می‌آید.

کلید واژه: جبران‌سازی خطا، ربات متحرک همکار، خطی‌سازی فیدبک، تخمین پارامتر.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... ه

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ز

فصل ۱- مقدمه و بیان مسئله ۱

۱-۱- کنترل آرایش ۲

۱-۱-۱- روش‌های کنترل آرایش ۳

۱-۱-۲- روش ساختار مجازی ۴

۱-۱-۳- روش رفتار-مبنا ۴

۱-۱-۴- روش راهنما-پیرو ۵

۱-۲- طرح‌ریزی حرکت و گریز از موانع ۸

۱-۳- مدل‌سازی حرکت ربات با فرض غلتش به همراه لغزش ۸

۱-۴- بیان مسئله و ساختار پیشنهادی ۱۰

۱-۵- سازمان‌دهی پایان‌نامه ۱۱

فصل ۲- مدل‌سازی دینامیکی ربات و تایر ۱۳

۲-۱- مدل‌سازی دینامیکی ربات ۱۳

۲-۱-۱- مدل‌سازی ربات با فرض غلتش به همراه لغزش ۱۴

۲-۱-۱-۱- مدل‌سازی سینماتیکی ۱۴

۲-۱-۱-۲- مدل‌سازی دینامیکی ۱۶

۲-۱-۲- بررسی و صحه گذاری مدل دینامیکی ربات ۱۸

۲-۱-۳- مدل‌سازی دینامیکی ربات با فرض غلتش محض ۱۸

۲-۲- مدل‌سازی تایر ۲۰

۲-۲-۱- دینامیک تایر ۲۱

۲-۲-۱-۱- سیستم مختصات و پارامترهای دینامیکی تایر ۲۱

۲-۲-۲- بررسی رفتار تایر به ازای لغزش‌های متفاوت ۲۸

۲-۳- جبران‌سازی خطا ۳۰

۲-۳-۱- اصطلاحات ۳۱

۲-۳-۲- سیگنال‌ها و حالت‌ها ۳۱
۲-۳-۳- توابع و عملکردها ۳۲
۲-۳-۴- الگوریتم تشخیص خطای پیشنهادی ۳۲
۲-۳-۴-۱- تخمین پارامترهای تایر بر اساس معادلات تایر ۳۳
۲-۳-۴-۲- تخمین پارامترهای تایر توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی ۳۵
۲-۳-۵- الگوریتم ژنتیک ۳۸
۲-۳-۵-۱- ارائه نتایج ۴۲

فصل ۳- کنترل تعقیب مسیر و کنترل آرایش ۴۴

۳-۱-۱- کنترل تعقیب مسیر ۴۴
۳-۱-۱-۱- کنترل فیدبک حالت ۴۵
۳-۱-۱-۲- روش کنترلی خطی‌سازی فیدبک ۴۵
۳-۱-۱-۳- طراحی الگوریتم کنترلی طبقاتی ۴۸
۳-۱-۱-۴- کنترل سرعت طولی ۴۸
۳-۱-۱-۵- کنترل لغزش جانبی ۵۰
۳-۱-۱-۶- شبیه‌سازی و ارائه نتایج ۵۱
۳-۱-۱-۷- ارائه نتایج در صورت عدم وقوع خطا در ربات فردی ۵۲
۳-۱-۱-۸- ارائه نتایج در صورت وقوع خطا در ربات فردی ۵۴
۳-۱-۲- کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها به هنگام خطا ۵۷
۳-۱-۲-۱- طراحی کنترل کننده ۵۹
۳-۱-۲-۲- - شبیه‌سازی و ارائه نتایج ۶۰
۳-۱-۲-۳- ارائه نتایج به هنگام عدم وقوع خطا ۶۰
۳-۱-۲-۴- ارائه نتایج به هنگام وقوع خطا ۶۴

فصل ۴- تعیین آرایش بهینه مجموعه ربات‌های متحرک همکار ۶۸

۴-۱- روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت ۶۹
۴-۱-۱- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات ۷۰
۴-۲- تعریف هدف بهینه‌سازی آرایش مجموعه ربات‌ها جهت جابجایی جسم ۷۳
۴-۳- شبیه‌سازی و ارائه نتایج ۷۳
۴-۳-۱- ارائه پارامترهای آرایشی بهینه به هنگام حضور سه ربات ۷۴
۴-۳-۲- ارائه پارامترهای آرایشی بهینه به هنگام حضور دو ربات ۷۴

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۶

۵-۱- نتیجه گیری ۷۶

۵-۲- پیشنهادات ۷۷

فهرست مراجع ۷۹

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۸۳

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۸۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: میانگین خطاهای آموزش ۴۰
جدول ۲-۲: میانگین خطاهای آزمایش ۴۰
جدول ۲-۳: میانگین خطاهای کل شبیه سازی ۴۰
جدول ۲-۴: مقایسه‌ی دقت و سرعت روش مدل محور و شبکه عصبی ۴۳
جدول ۳-۱: مشخصات ربات متحرک ۵۱
جدول ۴-۱: پارامترهای آرایش با توجه به دستگاه متصل به جسم با روش PSO ۷۴
جدول ۴-۲: پارامترهای آرایش با توجه به دستگاه متصل به جسم با روش الگوریتم ژنتیک ۷۴
جدول ۴-۳: مقایسه‌ی روشهای بهینه‌سازی به هنگام حضور سه ربات ۷۴
جدول ۴-۴: پارامترهای آرایش با توجه به دستگاه متصل به جسم با روش PSO ۷۵
جدول ۴-۵: پارامترهای آرایش با توجه به دستگاه متصل به جسم با روش الگوریتم ژنتیک ۷۵
جدول ۴-۶: مقایسه‌ی روشهای بهینه‌سازی به هنگام حضور دو ربات ۷۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ خودروهای نظامی در حال مانور [۱۱] ۲
شکل ۱-۲ هواپیماهای شکاری در حال سوخت گیری یکی از مشکلترین مانورهای هواپیماهای شکاری که نیاز به دقت فراوان خلبان دارد [۱۱] ۳
شکل ۱-۳ نمونه‌هایی از آرایشهای نظامی هواپیماهای شکاری[۱۱] ۳
شکل ۱-۴ ساختار مجازی، مرکز ساختار مجازی، مسیر مطلوب مرکز ساختار و مسیر مطلوب ربات ناام [۲] ۴
شکل ۱-۵ دو نمونه از ساختار راهنما-پیرو با الگوهای متفاوت برای پیروی[۱۳] ۵
شکل ۱-۶ (a) گروه رباتها در حالت اولیه (b) رباتها پس از تشکیل آرایش [۱۹] ۶
شکل ۱-۷ شکل گیری آرایش با استفاده ازمدل‌های زاویه-فاصله و فاصله-فاصله [۱۹] ۶
شکل ۱-۸ اشکال مختلف آرایشی (a)ستونی (b)خطی (c)گوهای (d)دو ستونی [۱۹] ۷
شکل ۱-۹ نحوه‌ی ارتباط بین اعضا [۱۹] ۷
شکل ۱-۱۰ ساختار مجموعه رباتهای پیشنهادی بدون جسم ۱۱
شکل ۱-۱۱ ساختار مجموعه رباتهای پیشنهادی به همراه جسم ۱۱
شکل ۲-۱ ربات با دو چرخ محرک ۱۵
شکل ۲-۲ سیستم مختصات تایر[۳۴] ۲۲
شکل ۲-۳ چگونگی به وجود آمدن گشتاور مقاوم غلتشی[۳۴] ۲۴
شکل ۲-۴ چگونگی به وجود آمدن گشتاور خود تنظیم[۳۴] ۲۵
شکل ۲-۵ تایر و نیروها وگشتاورهای وارد بر آن[۳۴] ۲۶
شکل ۲-۶ فرمول های سینوسی وکسینوسی magic formula [۳۴] ۲۸
شکل ۲-۷ نحوه تغییرات نیروی طولی تایر نسبت به لغزش ۲۹
شکل ۲-۸ نحوه تغییرات نیروی جانبی تایر نسبت به لغزش ۳۰
شکل ۲-۹ دیاگرام الگوریتم تخمین پارامتر ۳۵
شکل ۲-۱۰ الگوی کلی شبکه عصبی مصنوعی[۳۷] ۳۶
شکل ۲-۱۱ نمایش شماتیک شبکه های عصبی[۳۷] ۳۷
شکل ۲-۱۲ نمودار رگرسیون ضریب بیشینه اصطکاک طولی ۴۱
شکل ۲-۱۳ نمودار رگرسیون ضریب بیشینه اصطکاک عرضی ۴۲

شکل ۳-۱ الگوریتم کنترلی طبقاتی ۴۸
شکل ۳-۲ نمودارهای مقایسه‌ای مسیر مطلوب و مسیر واقعی سیستم، خطا در راستای x و y و خطای راستای ربات نسبت به مسیر مطلوب در صورت عدم وقوع خطا در ربات فردی ۵۲
شکل ۳-۳ میزان لغزش طولی چرخ‌های سمت راست و چپ در صورت عدم وقوع خطا در ربات فردی. ۵۳
شکل ۳-۴ میزان لغزش جانبی چرخ‌های سمت راست و چپ در صورت عدم وقوع خطا در ربات فردی ۵۳
شکل ۳-۵ نمودار گشتاورهای چرخ‌های سمت راست و چپ در صورت عدم وقوع خطا در ربات فردی. ۵۴
شکل ۳-۶ نمودارهای مقایسه‌ای مسیر مطلوب و مسیر واقعی سیستم، خطا در راستای x و y و خطای راستای ربات نسبت به مسیر مطلوب در صورت وقوع خطا در ربات فردی ۵۵
شکل ۳-۷ میزان لغزش طولی چرخ‌های سمت راست و چپ در صورت وقوع خطا در ربات فردی ۵۶
شکل ۳-۸ میزان لغزش جانبی چرخ‌های سمت راست و چپ در صورت وقوع خطا در ربات فردی ۵۶
شکل ۳-۹ میزان گشتاورهای چرخ‌های سمت راست و چپ در صورت وقوع خطا در ربات فردی ۵۷
شکل ۳-۱۰ مسیرِ ساختار مجازی و نحوه‌ی قرار گیری رباتها نسبت به مرکز ساختار مجازی با استفاده از پارامترهای آرایش ۵۸
شکل ۳-۱۱ نمودارهای خطا در جهت x در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۱
شکل ۳-۱۲ نمودارهای خطا در جهت y در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۱
شکل ۳-۱۳ نمودارهای خطای راستا در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۲
شکل ۳-۱۴ خطای فاصله در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۲
شکل ۳-۱۵ مسیرِ مطلوب و واقعی رباتها در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا.....۶۳
شکل ۳-۱۶ نمودارهای خطا در جهت x در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۵
شکل ۳-۱۷ نمودارهای خطا در جهت y در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۵
شکل ۳-۱۸ نمودارهای خطای راستا در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۶
شکل ۳-۱۹ خطای فاصله در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا ۶۶
شکل ۳-۲۰ مسیر مطلوب و واقعی رباتها در مجموعه رباتها در صورت عدم وقوع خطا.....۶۷
شکل ۴-۱ نمایش برداری رفتار ذره **i** در الگوریتم PSO با ضریب اینرسی [۴۲] ۷۲

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
دستگاه مختصات مرجع	XY
موقعیت ربات در دستگاه عمومی	x_c, y_c
مرکز جرم ربات	P_c
نقطه‌ی میانی محور رابط چرخ	P
نصف فاصله‌ی دو چرخ	b
فاصله p تا $\mathrm{p_c}$	d
شعاع چرخ	r
انرژی جنبشی	$T(\mathrm{q}, \dot{\mathrm{q}})$
انرژی پتانسیل	$U(\mathrm{q})$
خطای ربات	e
ماتریس جرمی ربات	M
ماتریس کوریولیس	$\mathrm{C}(\mathrm{q}_c, \dot{\mathrm{q}}_c)$
پارامترهای گیرش	$x_i(1), x_i(2)$
پارامترهای آرایش در روش راهنما و پیرو	l_x, l_y
موقعیت مطلوب ربات	x_d, y_d
موقعیت جدید ربات	x_n, y_n
خطای جدید آرایش ربات	$\mathbf{e}_n$
راستای ربات	φ
سرعت چرخ راست	$\dot{\theta}_r$
سرعت چرخ چپ	$\dot{\theta}_l$
گشتاور چرخ راست	τ_r
گشتاور چرخ چپ	τ_l
راستای جسم	γ
راستای مطلوب ربات	φ_d
سرعت طولی چرخ راست	$\dot{\rho}_2$
سرعت طولی چرخ چپ	$\dot{\rho}_1$
سرعت جانبی چرخ راست	$\dot{\eta}_2$
سرعت جانبی چرخ چپ	$\dot{\eta}_1$
سرعت در راستای x چرخ راست	v_{xr}
سرعت در راستای x چرخ چپ	v_{xl}

سرعت در راستای y چرخ راست	v_{yr}
سرعت در راستای y چرخ چپ	v_{yl}
لغزش طولی	k
لغزش جانبی	α
جرم ربات	m_r
جرم تایر	m_w
نیروی طولی تایر چپ	f_{x2}
نیروی طولی تایر راست	f_{x1}
نیروی جانبی تایر چپ	f_{y1}
نیروی جانبی تایر راست	f_{y2}
ممان اینرسی ربات حول محور z	I_{rz}
ممان اینرسی چرخ حول محور z	I_{wz}
ممان اینرسی چرخ حول محور y	I_{wy}
ضریب نیروی مقاوم غلتشی	μ_r
ترم لغزشی سرعت	$\dot{\delta}_i$
نیروی اصطکاک در حالت غلتش محض	f_s
ممان اینرسی مجموعه ربات و چرخ‌ها	I_z
نیروی عمودی چرخ هرزگرد	f_{zc}
نیروی عمودی چرخ راست	f_{zr}
نیروی عمودی چرخ چپ	f_{zl}
سرعت در راستای x در دستگاه محلی	$\dot{x}$
سرعت در راستای y در دستگاه محلی	$\dot{y}$
سرعت در راستای x در دستگاه عمومی	$\dot{x}_c$
سرعت در راستای y در دستگاه عمومی	$\dot{y}_c$
شتاب در راستای x در دستگاه محلی	a_x
شتاب در راستای y در دستگاه محلی	a_y
فاصله‌ی محور جلو و عقب	h
ارتفاع مرکز ثقل ربات از زمین	L
سرعت بیشینه‌ی مجاز ربات	v_{max}
سرعت دورانی مطلوب تایر	ω_{des}
سرعت طولی مطلوب تایر	v_{des}
شتاب دورانی تایر	$\dot{\omega}$

فصل ۱– مقدمه و بیان مسئله

حمل و جابجایی اجسام، بی‌شک یکی از مهمترین وظایف ربات‌ها در تاریخ علم رباتیک است. در دو دهه‌ی قبل، پژوهشگران علوم زیستی گونه‌هایی از رفتارهای آرایش یافته را در طبیعت مشاهده کرده‌اند. آنها دریافته‌اند حیوانات گروه‌هایی را تشکیل می‌دهند تا بتوانند در قالب آن گروه‌ها به صورت موثرتری یافته‌هایشان را با هم تبادل کنند و از همین طریق بتوانند غذای بیشتری بیابند و خود را در برابر خطرات احتمالی محافظت کنند[۱]. اما نکته قابل توجه در زندگی حیوانات این است که آنها همواره تلاش می‌کنند در عین حضور در گروه، قلمرو شخصی خود را حفظ نمایند و در یک فاصله مشخص از همسایگان خود زندگی کنند [۲].

در دهه‌ی اخیر، توجه به کنترل آرایش ربات‌های همکار به صورت وسیعی در مباحث رباتیک رشد پیدا کرده است. استفاده از گروهِ ربات‌های آرایش یافته دارای مزایایی نسبت به استفاده از ربات‌ها به صورت جداگانه است که از جمله آنها می‌توان به بهره‌وری استفاده از منابع (مانند اشتراک استفاده از سنسورها)، امکان موازی کردن ربات‌ها[۱]، بالارفتن اطمینان و مقاومت بیشتر در برابر نقایص[۲] اشاره کرد. آرایش کنترلی سیستم‌های رباتیک چند عضوی[۳] و خودروهایی که به صورت هوشمند عمل می‌کنند مورد توجه دانشمندان فراوانی قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام شده هم در زمینه تئوری‌پردازی و هم در زمینه‌های کاربردی بوده است. موارد فراوانی را می‌توان نام برد که کاربرد چند ربات در حالت گروهی کاراتر از کاربرد جداگانه چند ربات است [۳,۴]:

وظایف توزیع شده در فضای کاری: به عنوان مثال، تنظیم آرایش شبکه سنسورهای متحرک، سیستم های هدایت هوشمند در اتوبان‌ها (AHS[۴]) یا مأموریت‌های جستجو و نجات؛

استفاده در مکان‌های پرخطر: مکان‌هایی که برای انسان‌ها خطرناک باشد. برای مثال، نیروگاه‌های هسته‌ای و یا برای پاک کردن مواد شیمیایی سمی و خطرناک، تجسس در میادین جنگی و تخریب معادن و غارها، آتش سوزی در جنگل‌ها؛

افزونگی[۱]: در این حالت اگر یکی از ربات‌ها از کار بیافتد، سایر ربات‌ها قادر به کامل کردن وظیفه هستند؛

---

[1] Robot Parallelism

[2] Fault tolerant

[3] Multi-Agent Robotic Systems

[4] Automated Highway Systems

وظایفی که مقیاس کاری آنها با زمان تغییر پیدا می‌کنند: بسیاری از وظایف نیاز به ازدیاد یا کاهش فضای کاری خود در حین فرایند عمل توسط ربات‌ها را دارند؛

وظایفی که اجرای آن توسط یک ربات امکان پذیر نیست: به عنوان مثال جابجایی اجسام بسیار بزرگ و سنگین؛

۱-۱- کنترل آرایش

در این بخش به بیان مقدمه‌ای در رابطه با کنترل آرایش گروهی ربات‌ها پرداخته می‌شود. در ابتدا تعریف کنترل آرایش خواهد آمد، پس از آن به مزایای استفاده از اشکال آرایش یافته ربات‌ها پرداخته خواهد شد و به نمونه‌هایی از کاربرد آرایش ربات‌ها اشاره خواهد شد. سپس انواع تکنیک‌های مورد استفاده برای کنترل آرایش و مزایا و معایب آنها بررسی می‌شود. در انتها به مبحث تعقیب مسیر توسط ربات‌های چرخ‌دار با فرض غلتش به‌همراه لغزش و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

کنترل مکان و جهت‌گیری نسبی مجموعه ربات‌ها و هدایت گروهی آنها در قالب یک واحد هماهنگ و منظم را کنترل آرایش[۲] ربات می‌نامند[۵]. موارد فراوانی را می‌توان نام برد که کاربرد چند ربات در حالت گروهی کاراتر از کاربرد جداگانه چند ربات است: که از جمله آنها می‌توان ماموریت‌های جستجو و نجات[۶,۷]، سیستم های هدایت خودکار در بزرگراه‌ها[۸]، کنترل ترافیک هوایی [۹] را نام برد. از جمله سایر کاربردهای تعدادی مجموعه ربات‌های آرایش یافته می‌توان به استفاده در ارتش، برای تجسس و تخریب معادن و غارها و شناسایی و تجسس در میادین جنگی[۱۰] ، استفاده در مکان‌های پرخطر مانند نیروگاه‌های هسته‌ای و یا برای پاک کردن مواد شیمیایی سمی و خطرناک اشاره کرد. در زیر تصاویری از زمینه‌های که در آنها امکان کاربرد ربات‌های آرایش‌یافته وجود دارد، آمده است[۱۱].

شکل ۱-۱ خودروهای نظامی در حال مانور [۱۱]

[1] Redundancy

[2] Formation Control

شکل ۱-۲ هواپیماهای شکاری در حال سوخت گیری یکی از مشکل‌ترین مانورهای هواپیماهای شکاری که نیاز به دقت فراوان خلبان دارد [۱۱]

شکل ۱-۳ نمونه‌هایی از آرایش‌های نظامی هواپیماهای شکاری[۱۱]

استفاده از اشکال آرایش یافته در ماهواره‌ها به خصوص برای کنترل ریز ماهواره‌ها نیز توجه فراوانی را به خود جلب کرده است؛ هنگامی که یک گروه از ماهواره‌ها به صورت هماهنگ با هم فعالیت می‌کنند کارایی بالاتری دارند، به خصوص در مواردی که از ماهواره‌ها برای تهیه تصاویر استفاده می‌شود همکاری گروهی ماهواره‌ها به تولید تصاویر با وضوح و کیفیت بیشتر می‌انجامد[۱۲]. استفاده از اشکال آرایش یافته در صنایع فضایی، در سال‌های اخیر، سبب دست‌یابی به سیستم‌ها و شبکه‌های پیچیده‌تری از ماهواره‌ها شده است که خود به نوعی نویدبخش استفاده هرچه بیشتر از اشکال آرایش یافته ربات‌ها در آینده خواهد بود.

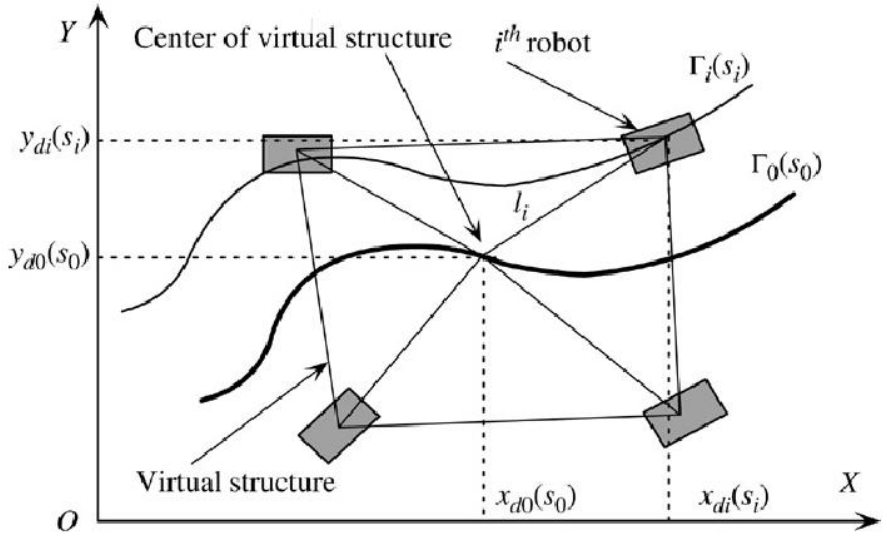
۱-۱-۱- روش‌های کنترل آرایش

روش‌های گوناگونی برای کنترل شکل آرایشی ربات‌های هوشمند به کار گرفته شده است. در حالت کلی این روش‌ها سعی می‌کنند از طریق هماهنگ کردن هرچه بیشتر ربات‌ها، آرایش مطلوب را به وجود

آورند. روش‌های مورد استفاده برای کنترل آرایش را می‌توان به سه دسته کلی روش ساختار مجازی[1]، روش رفتار مبنا[2] و روش راهنما–پیرو[3] تقسیم کرد. اما هر کدام از روش‌های مذکور دارای مزایا و معایبی هستند که در زیر به اختصار به آنها اشاره می‌شود[۱۳].

۱–۱–۲– روش ساختار مجازی

در روش ساختار مجازی، کل نظام آرایشی شبیه یک ساختار واحد و کاملاً صلب در نظر گرفته می‌شود [۱۴].



شکل ۱-۴ ساختار مجازی، مرکز ساختار مجازی، مسیر مطلوب مرکز ساختار و مسیر مطلوب ربات ام [۲]

در این روش حرکت مطلوب به صورت کلی به مرکز ساختار مجازی القا می‌شود، به این مفهوم که با توجه به موقعیت هر کدام از ربات‌ها نسبت به مرکز ساختار مجازی برای هر یک از ربات‌ها یک مسیر حرکت اختصاص داده می‌شود که وظیفه اصلی هر ربات دنبال کردن مسیر حرکت مربوطه خواهد بود.

۱–۱–۳– روش رفتار–مبنا

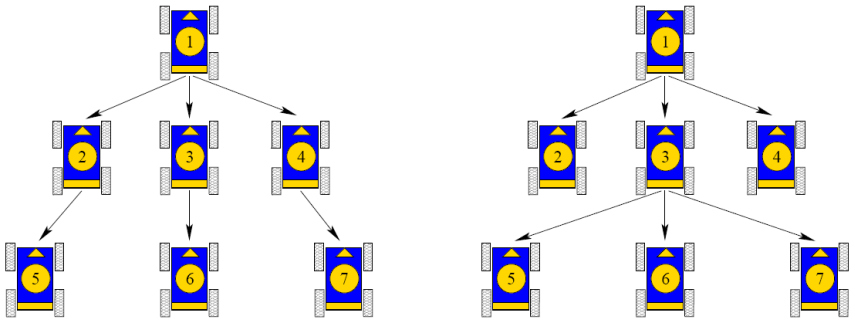
در روش **رفتار–مبنا**، رفتارهای مطلوب و مورد نظر از یک ربات، از قبل برای سیستم مشخص می‌شود. عملکرد نهایی هر ربات بسته به وضعیت ربات، از طریق وزن‌گذاری روی هرکدام از رفتارهای از پیش تعیین شده و برآیندگیری از آن‌ها بدست می‌آید. این رفتارهای از پیش تعیین شده می‌تواند شامل جلوگیری از برخورد با موانع، جلوگیری از برخورد با سایر ربات‌ها، جستجوی هدف و حفظ شکل آرایشی

[1] Virtual Structure approach
[2] Behavior Based approach
[3] Leader- Follower approach

باشد[۱۵]. مهمترین محدودیت روش رفتار مبنا، دشوار بودن آنالیز ریاضی این رفتارها است که موجب شده است کنترل آرایش‌ها با دقت زیاد، دشوار است [۱۶].

۱-۱-۴- روش راهنما-پیرو

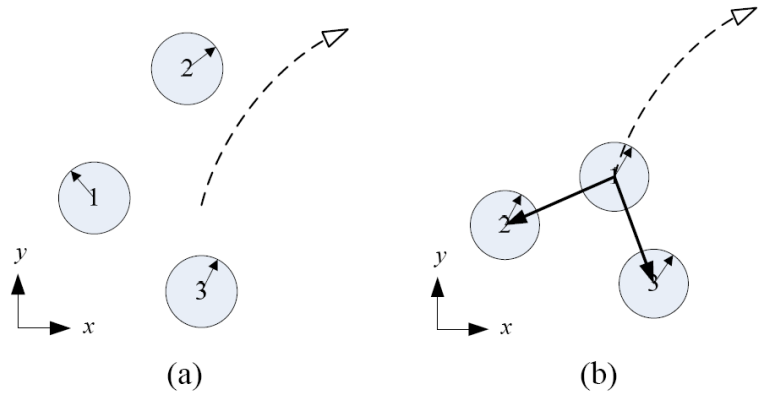
در روش **راهنما پیرو** یکی از ربات‌های گروه به عنوان راهنما در نظر گرفته می‌شود و سایر ربات‌ها موظف به پیروی از راهنما هستند. به این ترتیب مسئله هدایت آرایش یافته ربات ها تبدیل به دو مسئله ساده‌تر می‌شود؛ یکی مسئله تعقیب مسیر توسط راهنمای گروه و دیگری مسئله حفظ آرایش توسط سایر ربات‌های گروه. البته باید توجه داشت که بسته به الگوهای متفاوت مورد استفاده در آرایش، یک ربات می‌تواند راهنمای ربات دیگر باشد در حالی‌که خود پیرو رباتی دیگر است(شکل ۱-۵). به منظور تشکیل و حفظ نظام آرایش مطلوب ربات‌های پیرو موظفند موقعیت خود را با توجه به موقعیت راهنما تنظیم کنند. بدین ترتیب برای تعیین یک مانور آرایشی فقط نیاز است که حرکت راهنما و مکان نسبی میان ربات راهنما و ربات پیرو مشخص شود[۱۷].



شکل ۱-۵ دو نمونه از ساختار راهنما-پیرو با الگوهای متفاوت برای پیروی[۱۳]

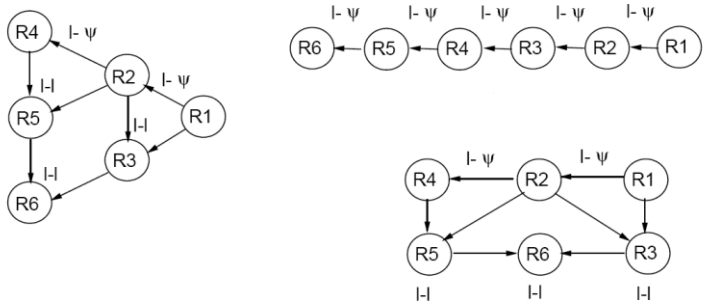
مهمترین مزیت روش راهنما-پیرو را می‌توان سادگی و کارایی آن دانست. این روش دارای معایبی نیز می‌باشد. موقعیت راهنما در هر لحظه باید به سایر ربات‌ها اطلاع داده شود؛ در صورتی‌که سیگنال موقعیت ربات راهنما به هر دلیلی صادر نشود آرایش ممکن است به سرعت از بین برود. یکی دیگر از نقاط ضعف این روش پیچیدگی حذف اغتشاشات سیستم است[۱۸].

هنگامی که مسیر حرکت ربات راهنما مشخص شده باشد به کمک سینماتیک معکوس می‌توان سرعت خطی و زاویه‌ای مطلوب برای طی مسیر توسط ربات را بدست آورد. با مشخص شدن نحوه‌ی حرکت ربات راهنما می‌توان توسط قوانین کنترلی محلی به موقعیت‌های مطلوب سایر ربات‌ها برای تشکیل آرایش دست‌یافت. بنابراین در حالت کلی می‌توان مسئله کنترل آرایش ربات‌ها را به صورت تعمیمی از مسئله عمومی رهگیری مسیر توسط ربات دانست[۱۹] (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶ (a) گروه ربات‌ها در حالت اولیه (b) ربات‌ها پس از تشکیل آرایش [۱۹]

در روش راهنما-پیرو می‌توان ازمدل‌های زاویه-فاصله و یا فاصله-فاصله استفاده کرد. در مدل زاویه-فاصله ربات‌ها به صورت حلقه ای یک زنجیر کنترل می‌شوند که در آن هر ربات از یک ربات پیروی می‌کند. در مدل فاصله-فاصله هر ربات به صورت همزمان از دو ربات پیروی می‌کند(شکل ۱-۷). آرایش گروهی ربات‌ها می‌تواند در اشکال گوناگونی همچون خطی و ستونی، گوه‌ای و ... شکل بگیرد(شکل ۱-۷). آقای دزایی با استفاده از تئوری گراف‌ها مدلی کنترلی برای گروهی از ربات‌ها ارائه کرده است که می تواند برای عبور از میان موانع، آرایشی مناسب را به وجود آورد[۲۰].



شکل ۱-۷ شکل گیری آرایش با استفاده ازمدل‌های زاویه-فاصله و فاصله-فاصله [۱۹]