



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش معماری کامپیوتر

طراحی و ساخت ربات بیلبارد باز

محمد ابن علیان

اساتید راهنما

دکتر سعید باقری شورکی

دکتر محمدتقی منظوری

دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی کامپیوتر

رساله کارشناسی ارشد

عنوان:

طراحی و ساخت روبات بیلارد باز

نگارش:

محمد ابن علیان

تصویب کنندگان

استاد راهنما:

دکتر سعید باقری شورکی

استاد مشاور:

دکتر محمد تقی منظوری

استاد مدعو:

دکتر مجید نیلی

امضا

امضا

امضا

تقدیم به سرہنگ آئورلیانو بوئندیا

و ہیولای درونش

چکیده:

تا پیش از سالهای آخر هزاره دوم دستاوردهای علم رباتیک در سطحی بود که به دلیل هزینه های بالای آن، از رباتها تنها در کاربردهای دشوار و محیطهای زیان آور یا خطرناک استفاده می شد. هزینه بالا، توانایی های محدود و تجربه کوتاه مدت این شاخه از دانش سبب می شد تا جز در محیطهایی چنان که گفته شد شاهد استفاده از رباتها نباشیم. ساخت و یا خریداری رباتی که اهداف سرگرم کننده باشد در آن دوران تجملی بیش از اندازه محسوب می شد.

امروزه، پس از سالها تجربه و تحقیق، دستاوردهای دانش رباتیک به حدی رسیده است که شاهد کاربرد رباتها در زمینه های مختلف زندگی روزمره هستیم. کاهش چشمگیر هزینه های ساخت روبات باعث شده است که روباتهایی با منظور آموزش و یا سرگرمی ساخته شوند. روباتها یا روبات بیلپارد باز، روباتی خودمختار است که علاوه بر آموزش به بازیکنان آماتور بیلپارد می تواند جهت سرگرمی بازیکنان نیز بکار گرفته شود. دلیل انتخاب چنین موضوعی به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد نه سرگرمی، که در اصل مواجهه با چالشهای مختلفی است که در مسیر ساخت چنین روباتی وجود دارد. چنان که خواهیم دید برای ساخته شدن چنین روباتی لازم است تا در هر یک از زمینه های طراحی و ساخت قطعات مکانیکی با امکانات مورد نیاز، قدرت پردازش تصویر و بینایی ماشین و نیز هوش ماشینی و یادگیری، عیار آموخته های دوران تحصیل مشخص شود و دانسته های تئوری در موضوعات مختلف در حیطه کاربرد محک خورد. علاوه بر این در طول طراحی هزینه های طرح همواره مد نظر بوده است و سعی شده حتی الامکان از قطعات ساده موجود و در دسترس استفاده شود تا هزینه ای برای سفارش یا ساخت قطعات کمیاب صرف نشود. در پایان، آنچه حاصل شد روباتی است که علاوه بر توانایی تشخیص توپها، قادر به انتخاب بهترین ضربه و نیز واردکردن ضربه مورد نظر به توپ و در نهایت کسب امتیاز در بازی است.

کلیدواژه ها: ربات (Robot)، بینایی ماشین (Machine Vision)، بلیارد (Billiards)،
تصمیم گیری (Decision Making)، کنترل موتور پله ای (Stepper Motor Control)

فهرست

صفحه	عنوان
۱	۱ مقدمه
۲	۱-۱ بازی بیلارد
۲	۱-۱-۱ تاریخچه
۵	۲-۱-۱ بازی و اهداف آن
۷	۲-۱ رباتیک
۷	۲-۲-۱ تاریخچه ربات ها
۸	۳-۲-۱ ربات های بیلارد باز
۹	۴-۲-۱ Roboshark، ربات بیلارد باز
۱۱	۲ ساختار مکانیکی
۱۲	۱-۲ محاسبه درجات آزادی
۱۲	۱-۱-۲ راستای ضربه
۱۵	۲-۱-۲ شدت ضربه
۱۶	۳-۱-۲ محل برخورد چوب و توپ
۱۸	۲-۲ مکانیسم و سازه اصلی ربات
۱۸	۱-۲-۲ مکانیسم ربات
۱۹	۲-۲-۲ محل قرارگیری ربات نسبت به میز
۲۵	۳-۲-۲ متغیرهای مفصلی و بازوهای ربات
۵۳	۴-۲-۲ محل قرارگیری میز بیلارد
۵۴	۵-۲-۲ محل قرارگیری دوربین

۵۵	۶-۲-۲ نورپردازی
۵۷	۷-۲-۲ موتورها
۵۸	۳ بینایی ربات
۵۹	۱-۳ توابع لازم برای تشخیص مکان توپها
۵۹	۱-۱-۳ تابع تسطیح تصویر
۶۴	۲-۱-۳ ذخیره تصویر پس زمینه
۶۶	۳-۱-۳ تابع محاسبه اختلاف با پس زمینه
۶۷	۴-۱-۳ تابع آستانه
۶۹	۵-۱-۳ تابع فیلتر میانه گیر
۷۱	۶-۱-۳ توابع تشخیص لبه و مرکز توپ
۷۳	۷-۱-۳ تابع آستانه روی تبدیل CHT
۷۵	۲-۳ توابع لازم برای تشخیص رنگ توپها
۷۵	۱-۲-۳ تابع تبدیل RGB به HSV
۷۶	۲-۲-۳ شمارش نقاط رنگی
۸۰	۳-۲-۳ حذف نویز
۸۱	۴ الگوریتمهای تصمیم گیری
۸۲	۱-۴ محاسبه پارامترها
۹۱	۲-۴ محاسبه راستای ضربه
۹۲	۱-۲-۴ مختصات توپ سفید مجازی
۹۵	۲-۲-۴ فاصله توپ سفید تا توپ سفید مجازی
۹۷	۳-۲-۴ فاصله توپ تا سبد
۹۹	۴-۲-۴ فاصله توپ تا خط D_1
۱۰۲	۵-۲-۴ فاصله توپ تا خط D_2
۱۰۵	۶-۲-۴ زاویه θ
۱۱۲	۳-۴ انتخاب بهترین ضربه از روی پارامترهای اصلی
۱۱۵	۴-۴ تنظیم پارامترهای ربات و حل معادلات Inverse Kinematic
۱۱۹	۵ موتور ها و درایورها
۱۲۰	۱-۵ موتورهای پله‌ای
۱۲۱	۱-۱-۵ طرز کار موتورهای پله‌ای
۱۲۳	۲-۱-۵ تشخیص نوع موتور

۱۲۳	۳-۱-۵ خصوصیات دیگر موتورهای پله‌ای
۱۲۵	۴-۱-۵ انتخاب موتور مناسب
۱۲۶	۵-۱-۵ ساختار داخلی و نحوه راه‌اندازی موتورهای پله‌ای تک قطبی
۱۳۵	۲-۵ درایورها و کنترلرها
۱۳۸	۶- خلاصه و نتیجه گیری
۱۳۹	۱-۶ عملکرد نهایی
۱۴۰	۲-۶ مقایسه
۱۴۱	۳-۶ دستاوردها
۱۴۲	۴-۶ خلاصه و نتیجه گیری
۱۴۴	مراجع

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
	فصل ۲- ساختار مکانیکی
۱۳	شکل ۱-۲: فضای کاری ربات
۱۳	شکل ۲-۲: ارتفاع لازم برای بخش ضربه زننده
۱۵	شکل ۳-۲: اجزای تشکیل دهنده راستای چوب
۱۶	شکل ۴-۲: مسیر حرکت توپها بدون سرعت دورانی
۱۷	شکل ۵-۲: مسیر حرکت توپها با وجود مولفه سرعت دورانی
۱۷	شکل ۶-۲: مسیر حرکت توپها با وجود مولفه سرعت دورانی
۱۸	شکل ۷-۲: نمای شماتیک ربات
۱۹	شکل ۸-۲: سازه اصلی شامل میز بازی و محل قرارگیری ربات
۲۰	شکل ۹-۲: خیز بیشینه محور
۲۱	شکل ۱۰-۲: خیز برای محوری با اتصال غیر صلب در دو انتها
۲۲	شکل ۱۱-۲: خیز برای قطعات ترکیبی
۲۳	شکل ۱۲-۲: مقطع محورهای فولادی بکار رفته در نخستین طرح
۲۴	شکل ۱۳-۲: مقطع محورهای آهنی بکار رفته در رویه سازه اصلی ربات
۲۴	شکل ۱۳-۲: مقطع محورهای آهنی بکار رفته در رویه سازه اصلی ربات
۲۵	شکل ۱۴-۲: مقطع محورهای آلومینیومی بکار رفته در بخش میانی سازه اصلی
۲۷	شکل ۱۶-۲: نمای شماتیک مفصل θ
۲۷	شکل ۱۷-۲: بخش ساخته شده برای مفصل θ

۲۸	شکل ۲-۱۸: اتصال end effector به موتور
۲۹	شکل ۲-۱۹: شمای مفصل Z در طرح ۱
۳۰	شکل ۲-۲۰: تصویر مفصل Z ساخته شده
۳۲	شکل ۲-۲۱: شمای مفصل Z
۳۲	شکل ۲-۲۲: صفحه میانی مفصل Z
۳۳	شکل ۲-۲۳: مفصل Z ساخته شده
۳۳	شکل ۲-۲۴: مفصل Z ساخته شده- نمایش بلبرینگ و مهره ball screw
۳۵	شکل ۲-۲۵: خیز شاسی مفصل Y
۳۶	شکل ۲-۲۶: مکانیسم Pinion و Rack
۳۷	شکل ۲-۲۷: چند نمونه از انواع ball screw به همراه ساختار داخلی آنها
۳۸	شکل ۲-۲۸: نمونه ای از تسمه تایمینگ
۳۹	شکل ۲-۲۹: اتصال بلبرینگ خطی به تسمه تایمینگ
۴۰	شکل ۲-۳۰: استفاده از چرخ برای جلوگیری از خمش محور بلبرینگ خطی
۴۰	شکل ۲-۳۱: شمای قطعه ساخته شده برای مفصل Y
۴۱	شکل ۲-۳۲: قطعه ساخته شده برای مفصل Y
۴۱	شکل ۲-۳۳: بلبرینگ خطی مفصل Y
۴۲	شکل ۲-۳۴: محاسبات گشتاور
۴۳	شکل ۲-۳۵: مفصل Y
۴۴	شکل ۲-۳۶: مفصل Y
۴۴	شکل ۲-۳۷: مفصل Y
۴۶	شکل ۲-۳۷: قرار گرفتن محور X در وسط میز
۴۶	شکل ۲-۳۸: قرار گرفتن محور X در لبه میز
۴۷	شکل ۲-۳۹: انحراف شاسی مفصل Y هنگام حرکت به چپ
۴۷	شکل ۲-۴۰: انحراف شاسی مفصل Y هنگام حرکت به راست
۴۸	شکل ۲-۴۱: افزودن یک بلبرینگ خطی دی‌گر به مفصل X
۴۹	شکل ۲-۴۲: انتقال همزمان نیروی موتور به دو تسمه تایمی‌نگ موازی
۴۹	کل ۲-۴۳: حرکت مفصل X با استفاده از دو تسمه تایمی‌نگ
۵۰	شکل ۲-۴۴: طرح اولیه برای بخش ضربه زننده
۵۱	شکل ۲-۴۵: ضربه زدن به توپ با وجود مانع
۵۳	شکل ۲-۴۶: اتصال بخش ضربه زننده به مفصل θ
۵۴	شکل ۲-۴۷: طرح اولیه برای پای‌ه دوربین

۵۵	شکل ۲-۴۸: طرح استفاده شده برای نصب دوربین
۵۶	شکل ۲-۴۹: ترتیب نخستین قرار گرفتن لامپ ها
۵۷	شکل ۲-۵۰: ترتیب قرارگیری لامپ ها در طرح نهایی
فصل ۳- بینایی روبات	
۶۰	شکل ۳-۱: تناظر نقاط در تصویر محدب و تصویر تسطیح شده
۶۰	شکل ۳-۲: تقسیم سطح میز به چهار منطقه
۶۴	شکل ۳-۳: تصویر پس زمینه
۶۶	شکل ۳-۴: تصویر توپها بر روی میز و اختلاف با تصویر پس زمینه
۷۱	شکل ۳-۵: تصویر حاصل از CHT
۷۳	شکل ۳-۶: حاصل تبدیلی CHT پس از اجرای تابع آستانه
۷۴	شکل ۳-۷: تشخیص توپها
۷۷	شکل ۳-۸: تصویر رنگی پس از تسطیح
فصل ۴- الگوریتمهای تصمیم گیری	
۸۵	شکل ۴-۱: نمونه ای از یک ضربه ممکن
۸۵	شکل ۴-۲: نمونه ای از یک ضربه ناممکن (به دلایل هندسی)
۸۶	شکل ۴-۳: نمونه دیگری از یک ضربه ناممکن (به دلایل هندسی)
۸۶	شکل ۴-۴: نمونه دیگری از یک ضربه ناممکن (به دلایل هندسی)
۸۷	شکل ۴-۵: نمونه ای از ضربه ناممکن (به دلایل فیزیکی)
۸۷	شکل ۴-۶: نمونه ای از ضربه ناممکن (به دلایل فیزیکی)
۸۸	شکل ۴-۷: مسیر حرکت توپها پس از ضربه
۹۰	شکل ۴-۸: معرفی پارامتر d_1
۹۰	شکل ۴-۹: معرفی پارامتر d_2
۹۱	شکل ۴-۱۰: معرفی پارامتر θ
۹۲	شکل ۴-۱۱: محاسبه مکان توپ سفید مجازی
۹۵	شکل ۴-۱۲: انتخاب مکان واقعی توپ مجازی
۹۶	شکل ۴-۱۳: فاصله توپ سفید تا توپ سفید مجازی
۹۸	شکل ۴-۱۴: فاصله توپ هدف تا سبد
۹۹	شکل ۴-۱۵: فاصله توپها از خط d_1
۱۰۲	شکل ۴-۱۶: فاصله توپها از خط D_2
۱۰۵	شکل ۴-۱۷: زاویه θ
۱۰۷	شکل ۴-۱۸: حالتی که توپ ممکن است به اشتباه مزاحم در نظر گرفته شود

۱۰۸	شکل ۴-۱۹: محدوده توپهای مزاحم
۱۰۹	شکل ۴-۲۰: نیم صفحه حرکتی توپ هدف
۱۱۳	شکل ۴-۲۱: مجموعه های مرجع برای پارامتر $d2$
۱۱۳	شکل ۴-۲۲: مجموعه های مرجع برای پارامتر θ
۱۱۵	شکل ۴-۲۳: محاسبه مکان قرارگیری end effector هنگام ضربه
۱۱۶	شکل ۴-۲۴: تغییر ارتفاع end effector برای ضربه
	فصل ۵- موتورها و درایورها
۱۲۰	شکل ۵-۱: مقطع ی یک موتور پله ای
۱۲۴	شکل ۵-۲: نمونه ای از نمودار های گشتاور/سرعت در موتورهای پله ای
۱۲۵	شکل ۵-۳: محاسبه گشتاور از راه تجربی
۱۲۶	شکل ۵-۴: ساختار داخلی موتور با پنج رشته سیم
۱۲۷	شکل ۵-۵: ساختار موتور پله ای با شش رشته سیم
۱۲۸	شکل ۵-۶: فاز ۱ در روش تشخیص رشته های موتور
۱۲۸	شکل ۵-۷: فاز ۲ در روش تشخیص رشته های موتور
۱۲۹	شکل ۵-۸: فاز ۴ در روش تشخیص رشته های موتور
۱۳۰	شکل ۵-۹: فاز ۳ در روش تشخیص رشته های موتور
۱۳۰	شکل ۵-۱۰: ساختار داخلی موتورهای پله ای شش رشته ای
۱۳۴	شکل ۵-۱۱: ساختار داخلی موتور universal
۱۳۴	شکل ۵-۱۲: پیکربندی تک قطبی موتور universal
۱۳۴	شکل ۵-۱۳: پیکربندی دو قطبی سری موتور universal
۱۳۵	شکل ۵-۱۴: پیکربندی دو قطبی موازی موتور universal
۱۳۶	شکل ۵-۱۵: ی یک درایور H-bridge برای موتور پله ای با جری آن پای-ن
۱۳۷	شکل ۵-۱۶: نمای شماتیک مدار کنترل موتورها

١- مقدمه

۱-۱ بازی بی‌لیارد

۱-۱-۱ تاریخچه

بیلیارد ریشه‌ی همه بازی‌های بیلیاردی روی میز بوده است. قبل از این که اسنوکر به عنوان یک بازی مطرح شود، تعدادی از انواع بازی‌های سب‌دار وجود داشت. در پیرامید با ۱۵ توپ صرفاً قرمز رنگ بازی می‌شد. این توپ‌های یک رنگ را به صورت مثلث کنار هم می‌چیدند. بازی با ضربه‌زدن به رأس مثلث که اکنون خال صورتی نامیده می‌شود، آغاز می‌شد. این بازی با دو بازیکن یا بیشتر که برای هر توپ را به درون سب‌د می‌انداخت، برنده محسوب می‌شد. همچنین بلاک پل هم مانند پیرامید با ۱۵ توپ بازی می‌شد. توپ سیاه بر روی نقطه‌ی مرکزی میز یا روی آنچه که امروزه نقطه سیاه نامیده می‌شود، جای داده می‌شد. بنابراین این به عنوان نقطه‌ی آغاز بازی بیلیارد شناخته شد مثل نقطه‌ای که توپ بیلیارد در آن جای می‌گرفت. هرکسی که توپ سیاه را به داخل سب‌د می‌انداخت با حذف رقبایش بازی را می‌برد. در لایف پول هر بازیکن یک توپ رنگی را انتخاب می‌کند. وقتی توپ به وسیله‌ی رقیبی زده شود، یک فرصت را از دست می‌دهد یا جریمه نقدی می‌شود. بازیکن بازنده سه برگ را از دست داده و آخرین بازیکن به عنوان برنده میدان را ترک می‌کند.

همهٔ اینها تا ۱۸۷۵ نه تنها در بریتانیا بلکه در هر جایی که تحت تأثیر قدرت بریتانیا بود، بازی‌های مشهوری بودند. در آن سال فیلد مارشال سرنویل باولز تصمیم گرفت تا با ترکیب بعضی از عوامل بازی‌های موجود بازی جدیدی را ابداع نماید. این بازی جدید امروزه به اسنوکر مشهور شده است.

نام اسنوکر از یک کلمه قدیمی نظامی منشاء گرفته است. اسنوکر - به معنی زشت‌ترین زشت - عبارتی بود که به دانشجویان دانشکده افسری در اولین سال ورودشان به کالج نظامی سلطنتی وول ویچ گفته می‌شد. در زبان هندی اسنوکر اصطلاح زشتی بود. بنابراین وقتی بازیکنی به صورت خودآگاه یا ناخودآگاه در موقعیتی قرار می‌گرفت که رقیبش نمی‌توانست مستقیماً به توپش ضربه بزند، به عنوان اسنوکر شهرت می‌یافت. برخلاف بلیارد که در آن بازیکنان حرفه‌ای می‌توانستند برای مدت طولانی رقبای خود را از دور خارج کنند، اسنوکر به عنوان یک نوع بازی جمعی‌تری ظاهر شد.

مسابقه حرفه‌ای ۱۹۲۷ از طریق ابتکار فردی جو دیویس آغاز شد. وی در تمام طول سال‌های ورزش خود عنوان قهرمانی مسابقات جهان را در این رشته ورزشی تصاحب کرد تا این که بعد از رقابت جهانی ۱۹۴۶ بازنشسته شد. در ابتدا عقیده عمومی بر آن بود که هر چیز قابل مشاهده‌یی که بر روی میز است در درون سبدها قرار گیرد تا بازی در یک شکل جدیدی با امنیت انجام شود. دیویس که همواره در حال پیشرفت بود با تکنیک‌های خود همه اینها را به هم ریخته و به اوج مهارت خود رسید. اکنون نتیجه بخی از آن تکنیک‌ها هم باعث ظهور بازیکنان برجسته در دنیا شده و هم جنبه‌ای تکنیکی بازی به طور گسترده‌ای با پیچیدگی‌های فعلیش توسعه یافته است. اولین برنامه تلویزیونی اسنوکر در پوت بلات سال ۱۹۶۹ از شبکه ۲ B.B.C نمایش داده شد. این شبکه بخش‌های زیادی از بازی فینال را هم پوشش داد. هنوز سال ۱۹۷۷ آغاز نشده بود که B.B.C تصمیم گرفت نه تنها رقبای فینال بلکه بازی‌های شبه فینال مسابقات جهانی ۱۹۷۷ را هم پوشش بدهد. بدین ترتیب اسنوکر به عنوان یک ورزش تلویزیونی برجسته نایل شد.

در ادامه همان سال B.B.C شرکتی تشکیل داد تا بازیکنان اسنوکر را از ابتدا تا پایان بازی‌ها در برابر حوادث ورزشی بیمه نماید. این نوآوری توجه افکار عمومی را نسبت به این ورزش جلب کرد و در نتیجه تقاضاهای بیشتری برای پخش تورنمنت‌ها در تلویزیون ایجاد کرد. بر این اساس چرخه طولانی مدت بازی‌های فصلی شکل گرفت که تا سال‌های اخیر هم ادامه داشت.

۱-۱-۲ بازی و اهداف آن

در اسنوکر با بیست و دو توپ رنگی بازی می‌شود (۱۵ توپ قرمز رنگ. یک توپ سفید و ۶ توپ با رنگ‌های دیگر). این توپ‌ها به روشی مشخص کنار هم قرار می‌گیرند. توپ سفید به عنوان توپ اصلی بیلارد شناخته می‌شود و از آن به صورت انتخابی هر دو بازیکن استفاده می‌کنند. آنان می‌توانند توپ را در هر جای محدوده‌ای نیم دایره (D) قرار دهند و بازی را از آنجا آغاز نمایند و ادامه دهند.

هدف بازی اسنوکر به دست آوردن امتیاز بیشتر نسبت به رقیب می‌باشد. امتیازات به دو رورش تعیین می‌شوند: یا به وسیله شماره‌های توپ‌های وارد شده به شش سبد میز بیلارد. یا به وسیله پنالتی‌ها. هر بازیکنی باید سعی نماید در ابتدا به یک توپ قرمز (با ارزش یک امتیاز) ضربه بزند. وقتی بازیکن توانست به یکی از توپ‌های قرمز ضربه بزند آنگاه باید با یکی از توپ‌های رنگی بازی کند. این توپ‌ها ارزش‌های متفاوتی دارند. امتیازات توپ‌های رنگی عبارتست از توپ سیاه: ۷، توپ صورتی: ۶، توپ آبی: ۵، توپ قهوه‌ای: ۴، توپ سبز: ۳ و توپ زرد ۲ امتیاز.

توپ‌های رنگی نامگذاری شده را در سبد نمی‌گذارند بلکه در نقاط مربوط به خودشان بر روی میز قرار می‌دهند. در طول بازی به طور متناوب هر بار با یک توپ قرمز بازی می‌کنند. انتخاب توپ‌های قرمز یا رنگ‌های دیگر تا زمانی که همه توپ‌های قرمز وارد سبد شوند. ادامه دارد. سپس توپ‌های رنگی به ترتیب شماره به صورت صعودی کنار هم در یک خط راست قرار می‌گیرند. مثلاً زرد اولین توپ است و سیاه در آخر قرار دارد. بازی آن قدر ادامه می‌یابد که در نهایت فقط توپ سفید بیلارد بر روی میز باقی می‌ماند.

جمع کردن نمرات توپ‌های به سبد افتاده "امتیاز" نامیده می‌شود. بازیکن اگر خطایی نماید

موقعیت مناسب خود بر روی میز را از دست می‌دهد.

جریمه‌ی ضربه خطا به توپ قرمز یک پنالتی چهار امتیازی (حداقل برای هر ضربه‌ی خطا) می‌باشد ولی تکرار خطا موجب افزایش امتیاز پنالتی به پنج، شش یا هفت امتیاز می‌شود. البته این در صورتی است که توپ سفید بلیارد به جای این که در ابتدا با توپ قرمز برخورد نماید با توپ‌های آبی یا صورتی و یا سیاه برخورد نماید. دومین نوع خطای اصلی ضربه زدن، پنالتی چهار امتیازی یا بیشتر را به همراه دارد. اگر تویی که توپ سفید بلیارد در ابتدا به آن ضربه زد قبل از افتادن به سبد به آن برخورد نماید امتیاز بالاتری دارد. در ادامه انداختن توپ به سبد (گرفتن امتیاز پنالتی) رقیب اجازه می‌یابد توپ سفید بلیارد را در محدوده‌ی نیم دایره (D) قرار دهد.

خطای عمومی سوم مربوط به خطای ضربه زدن به توپ رنگی تعیین شده است. اگر توپ مد نظر امتیاز بالاتری داشته باشد، این خطای دوباره شامل پنالتی چهار امتیازی یا بیشتر است. اگر توپ قهوه‌ای مدنظر باشد ولی توپ سیاه ضربه بخورد پنالتی هفت امتیازی است (حداکثر). همچنین اگر توپ سیاه مد نظر باشد ولی توپ سبز ضربه بخورد پنالتی باز هم هفت امتیازی است. در پنالتی‌ها امتیاز خود شخص کم نمی‌شود ولی در عوض به نمره رقیب اضافه می‌شود.

بخش عمده‌ی امتیازات با وارد سبد شدن توپ به دست می‌آید. البته امتیازات پنالتی صرفاً نتیجه غیر عمدی یا بدشانسی نیست. قرار نگرفتن ماهرانه بازیکنان اسنوکر اغلب به خطاها و واگذار کردن پنالتی به رقیب منجر می‌شود. در اسنوکر گاهی توپ‌ها طوری قرار می‌گیرند که نمی‌شود با توپ سفید بلیارد به توپ هدف طوری ضربه زد که توپ سفید بلیارد قبل از برخورد با توپ هدف به توپ‌های دیگر برخورد نکند. به طور قطع این حالت که اسنوکر نامیده می‌شود اغلب اوقات ارتباط تاکتیکی بازی دارد که ممکن است امتیاز بین چهار و هفت را به صورت پنالتی به دست آورده یا از دست بدهد.

در آغاز هر بازی توپ‌های قرمز در یک قالب مثلثی شکل که معمولاً با چوب یا پلاستیک ساخته شده، گذاشته می‌شود. با این وجود اسنوکر تنها از یک دست بازی تشکیل شده است. البته در مسابقات براساس توافق طرفین، تعداد بازی تعیین و انجام می‌شود.

در مسابقات آماتوری معمولاً سه، پنج و یا هفت دست بازی می‌کنند اما در فینال مسابقات حرفه‌ای جهانی سی و پنج دست بازی می‌شود. به نظر می‌رسد این مقدار بازی وقت زیادی می‌برد. این در حالی است که بعد از جنگ جهانی دوم که مسابقات جهانی بلیارد برگزار شد، دو هفته طول کشید تا ۱۴۵ دست بازی انجام و رقابتهای جهانی آن سال پایان پذیرد.

۱-۱-۳ خطاها

اسنوکر بازی است که در آن دو نفر به صورت مستقیم با هم رقابت می‌کنند ولی - مثل تنیس - می‌شود آن را چهار نفره هم بازی کرد. در این بازی ضربات خطا در موارد زیر رخ می‌دهد:

۱- اگر نوک چوب بازیکن در آن واحد بیش از یکبار به توپ سفید بلیارد ضربه بزند یا اگر نوک چوب با به طور همزمان با توپ سفید بلیارد و توپ هدف ارتباط ایجاد نماید، این به عنوان ضربه کشیده شناخته می‌شود.

ضربات کشیده عموماً زمانی که توپ سفید بلیارد و توپ هدف خیلی نزدیک بهم قرار داشته باشند، رخ می‌دهند. هر چه دو توپ مذکور نزدیک‌تر بهم باشند. ضربه‌ی کشیده‌ی احتمالی بی‌شتر خواهد داشت. اگر فاصله‌ی بین دو توپ کمتر از $2/5$ سانتیمتر باشد ضربه مجاز مشکل‌تر خواهد بود مگر اینکه به توپ هدف ضربه ضعیف‌تری زده شود.

اگر توپ سفید بلیارد به فاصله‌ی مشخصی از توپ هدف رسید بازیکن مجبور است بدون حرکت دادن آن بازی نماید. بازیکن خوب اغلب از این به عنوان امتیازش، برای توپ سفید بلیارد که می‌تواند بدون پنالتی هم بازی شود، استفاده می‌کند. او مجبور نیست به توپ دیگری ارتباط بدهد. بازی با رقیب در صورت تشخیص درستی ضربه یا موقعیتی که در آن توپ سفید بلیارد نمی‌تواند به خاطر تداخل با توپ‌های دیگر مستقیماً با توپ هدف برخورد نماید، اغلب ساده است.

۲- اگر توپ به میز نیرو وارد کرده باشد.

۳- اگر بازیکن در حال ضربه زدن، هر دو پایش را از زمین بلند نماید.

۴- اگر بازیکن با جایی به غیر از نوک چوب بیلارد به توپ ضربه بزند و یا آن را لمس نماید.

۵- اگر ضربه‌ی بازیکن سبب شود توپ سفید بیلارد از روی توپ‌های دیگر بپرد.

۶- بازی کردن با توپ‌هایی که در نقطه‌ی اشتباهی قرار دارند.

همان‌طور که در ابتدا توضیح داده شد، شش توپ رنگی بعد از این که به سبد انداخته شدند دوباره در نقاط مربوط به خودشان چیده می‌شوند اما اگر این نقاط اشغال و یا عملاً به وسیله‌ی توپ‌های دیگر جایگزین شده باشند، این توپ‌ها در نزدیک‌ترین نقطه به نقطه تعیین شده چیده می‌شوند. به عنوان مثال اگر بعد از به سبد انداختن توپ سبز جای مخصوص این توپ خالی نباشد و به جای آن جای توپ‌های صورتی، قهوه‌ای یا زرد آزاد باشد، سبز می‌تواند جایگزین نقطه صورتی شود.

اگر تمام نقاط روی میز اشغال شده باشند توپ رنگی جایگزین نزدیک‌ترین نقطه‌ی خود می‌شود بدون این که در یک خط مستقیم بین توپ‌ها و نزدیک‌ترین نقطه در باند بالایی با توپ‌های دیگر تماس ایجاد نماید.

۱-۲ رباتیک

۱-۲-۱ تعریف ربات

در سال ۱۹۷۹ برای ربات تعریف زیر از سوی موسسه ربات امریکا^۱ ارائه شد:

^۱ Robot Institute of America

”وسیله ای چند منظوره و با قابلیت برنامه ریزی مجدد که برای جابجایی مواد، قطعات، ابزار و وسایل ویژه با حرکات برنامه ریزی شده جهت انجام وظائف متنوعی بکار می رود.”^۱

طبیعی است که تعریفی با بیش از بیست سال قدمت شباهت زیادی به تصور امروزی ما از این واژه نداشته باشد. فرهنگ لغت وبستر^۲ تعریف جدی‌دتری را برای ربات ارائه داده است:

”دستگاهی خودکار که به طور طبیعی اعمالی را که برای انسان و یا ماشینیهای انسان نما تعریف شده اند انجام می دهد.”^۳

۱-۲-۲ تاریخچه ربات ها

نخستین بار کارل چاپک^۴، نمای‌شنامه نویس اهل چک این واژه را در یکی از نمای‌شنامه های خود به کار برد. ری‌شه این لغت در زبان چک نزدیکی به معنی ”برده ی کارگر برای کارهای دشوار” است و چنانکه از آن پی‌داست، نخستین برداشت از مفهوم ربات ماشینی‌های بود که وظایف دشوار و ناخوشایند و حتی در حالاتی غیر ممکن برای انسان ها را بر عهده داشتند.

تا مدت‌ها کاربرد رباتها محدود به چنین زمی‌نه‌هایی می شد. از آنجا که این دانش نخستین گامهای خود را بر می داشت و نیز ابزار لازم برای آن هنوز به تولید انبوه نرسیده بودند، و همچنین هزین‌ه بالای تحقیقات در این زمی‌نه ها تا سالها تصور ساخت رباتهای تفریحی در حکم اتلاف وقت و هزین‌ه بود.

^۱ “A reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools, or specialized devices through various programmed motions for the performance of a variety of tasks”

^۲ Webster

^۳ “An automatic device that performs functions normally ascribed to humans or a machine in the form of a human.”

^۴ Karel Capek (۱۸۹۰-۱۹۳۸)

در حال حاضر، پس از سالها کسب تجربه و انتشار دانش، و نیز با کاهش هزینه قطعات پر کاربرد در رباتها، دی‌گر رباتهای تفریحی نوعی تجمل به حساب نمی‌آیند. در حالی‌که روزگاری داشتن یک عروسک پیمانو نواز و یا ماشین شطرنج باز نشانی از اشرافیت بود، امروزه با هزینه‌ای نه چندان زیاد می‌توان صاحب یک ربات خانگی شد. همچنین پیشرفتهای عملی و تکنولوژی‌ک به حدی بوده که بسیاری از آنچه روزگاری دست‌نیافتنی می‌نمود اکنون به سادگی قابل اجراست. رباتها در حال حاضر بیش از هر زمان دی‌گری جای خود را در زندگی روزمره باز می‌کنند. جاروبرقی‌های هوشمندی که هر روز طرفداران بیشتری پیدا می‌کنند، سگهای رباتی‌ک خانگی، رباتهای آموزشی و غیره از نمونه محصولات جدید این دانش هستند که در حال حاضر به سادگی در هر جایافت می‌شوند.

۱-۲-۳ ربات های بی‌لمی‌ارد باز

پس از جستجوی بسیاری از زیاد و نامه نگاری با دانشگاهها و خبرگزاری‌های مختلف، سه نمونه از رباتهای بی‌لمی‌ار باز شناسایی شد. نخستین آنها رباتی با نام “snooker machine” است که توسط پروفیسور کورش خدابنده لو در سال ۱۹۸۸ میلادی و در دانشگاه بریستول^۱ انگلستان ساخته شده است. این ربات فاقد هوشمندی و تنها قادر به انجام حرکت‌های مکانیکی بوده است، چنانکه در مسابقه‌ای که بین آن و یکی از قهرمانان وقت انگلستان برگزار شد، ضربه مشخص به ربات گفته شده و ربات آن فرمان را اجرا می‌کرده است.

متأسفانه با وجود جستجوی زیاد هی‌چ مستنداتی از این پروژه یافت نشد. علاوه بر آن تلاشهای مکرر جهت تماس با پروفیسور خدابنده لو بی‌نتیجه ماند و همکاران سابق ایشان نیز از ایشان اظهار بی‌اطلاعی می‌کردند. همچنین از آنجا که شبکه خبری BBC برنامه مستندی از این ربات تهیه کرده بوده با آن شبکه نیز تماس گرفته شد ولی متأسفانه طی پاسخی گفته شد

^۱ Bristol University

که این شبکه تنها مجموعه محدودی از برنامه های خود را می تواند در اختیار افراد قرار دهد که شامل آن برنامه نمی شود.

ربات دوم، ربّاتی است که طی پروژه ای در دانشگاه واترلو^۱ در سال ۱۹۹۷ توسط جان ریچموند^۲ و جیم گرین^۳ در دوره کارشناسی تعریف شد. پس از مکاتبه با آقای ریچموند امکان دسترسی به مستندات محدودی که ایشان از پروژه داشتند فراهم شد. این ربات نیز از خانواده رباتهای Gantry بوده و برای حرکت های خطی از Ball Screw استفاده می کرده. همچنین مانند پروژه انجام شده دانشگاه صنعتی شریف از یک مدل کوچک میز بی‌لمی‌ارد در آن استفاده شده است. طی مکاتباتی که با مجری‌ان پروژه مشخص شد که این پروژه به دلیل رخداد نقص و از کار افتادن ball screw ها هیچگاه ساخته نشد.

پروژه سوم پروژه ای است که در دانشگاه مالتی مدی‌ای اندونزی در حال انجام است. به گفته آقای شینگ چی چو^۴ این پروژه در حاضر در دست اجراست و بخش پردازش تصویر و تصمی‌م‌گیری آن به پالی‌ان رسی‌ده. در آخرین تماسهای که با ایشان برقرار شد هنوز این پروژه به مرحله ساخت نرسیده بوده است.

۱-۲-۴ Roboshark، ربات بی‌لمی‌ارد باز

در اصطلاح بازی‌کنان حرفه ای بی‌لمی‌ارد، Pool Shark به کسی گفته می شود که علاوه بر مهارت در بازی بی‌لمی‌ارد، تلاش می کند تا از روشهای ناصحیح و غیر صادقانه برنده بازی شود. نام Roboshark نیز ریشه در این اصطلاح دارد. این ربات از خانواده رباتهای Gantry بوده و شامل سه بخش اصلی و کاملاً مجزا است:

^۱ University of Waterloo

^۲ John Richmond

^۳ Jim Green

^۴ Shing Chyi, Chua

ساختار مکانیکی

پردازش تصویری و بینایی ماشین

الگوریتم‌های تصمیم‌گیری

در فصلهای ۲، ۳ و ۴ این پایان‌نامه به بررسی مفصل هر یک از این سه بخش می‌پردازیم. به طور خلاصه می‌توان چنین گفت که ساختار این ربات شامل سه مفصل خطی برای مکان‌یابی در فضای سه بعدی و یک مفصل چرخشی برای تنظیم راستای ضربه است. ابتدا توسط دوربینی که در بالای میز قرار گرفته وضعیت توپها مشخص می‌شود. الگوریتم تصمیم‌گیری بهترین ضربه ممکن را تشخیص داده و ربات فرمان لازم را به موتورها صادر می‌کند. پس از وارد کردن ضربه ربات به سر جای خود بازگشته، نوبت جدی‌دی از بازی آغاز می‌شود. در فصل بعد ساختار مکانیکی ربات را با جزئیات کامل مرور خواهیم کرد.

۲- ساختار مکانیکی

۲-۱ محاسبه درجات آزادی

بررسی بازی بیلیارد نشان می دهد که هر ضربه با سه پارامتر کلی زیر مشخص می شود:

۱- راستای ضربه

۲- شدت ضربه

۳- محل برخورد چوب با توپ

Roboshark قادر است با تنظیم مؤلفه‌های هر یک از سه پارامتر فوق، آنها را تنظیم کرده و هر نوع ضربه دلخواهی به توپ وارد کند. در زیر به شرح پارامترهای فوق و مؤلفه‌های آنها می‌پردازیم.

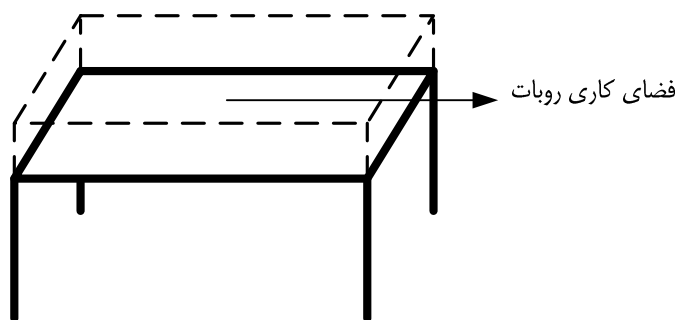
۲-۱-۱ راستای ضربه

برای تنظیم این پارامتر، دو مؤلفه زیر بایستی تنظیم شوند:

الف) مکان انتهایی چوب^۱

ب) راستای چوب

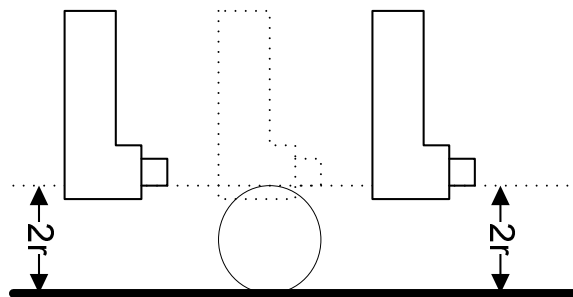
مکان هندسی مؤلفه الف، یک فضای محدود بالای میزبازی است و برای عملکرد مناسب، ربات باید بتواند به هر نقطه این فضا دسترسی داشته باشد. به عبارت دیگر، فضای کاری ربات باید شامل فضای بالای میز، با طول و عرض برابر با میز و ارتفاع حداقل برابر با قطر یک توپ باشد. شکل ۲-۱ این محدوده را نشان می‌دهد:



شکل ۲-۱: فضای کاری ربات

^۱ Cue

به منظور جلوگیری از برخورد چوب با توپ حین و حرکت چون به نقطه مشخص جهت ضربه، این ارتفاع باید بیش از قطر توپها باشد. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۲-۲: ارتفاع لازم برای بخش ضربه زننده

هر رباتی که فضای کاریش شامل محدوده مشخص شده در شکل فوق باشد یک انتخاب ممکن برای ربات بیلیارد باز است. ساختارهای مختلفی می‌توانند چنین شرطی را برآورده کنند، از جمله ربات articulated، ربات استوانه‌ای^۱ و ربات سه درجه آزادی خطی. همچنین ساختارهای دیگری که بیش از سه درجه آزادی دارند نیز برای این طرح قابل بکارگیری هستند ولی طبیعی است که در طرح بهینه جایی نداشته باشند، چرا که برای مکان یابی در فضای کاری ربات سه درجه آزادی لازم و کافی است.

در مقایسه مکانیسمهای معروفی چون articulated، استوانه‌ای و سه درجه آزادی خطی، ربات سه درجه آزادی خطی به عنوان مناسبترین طرح انتخاب شده است چرا که در ساختارهای دیگر، فضای کاری حول نقطه اتصال زمین ربات متقارن است و برای اینکه با کمترین هزینه کل فضای کاری ربات در شکل ۲-۱ در دسترس باشد، ربات بایستی در وسط میز قرار بگیرد که بدیهی است به دلیل جلوگیری از حرکت توپها انتخاب معقولی نیست. همچنین به دلیل طول زیاد میز

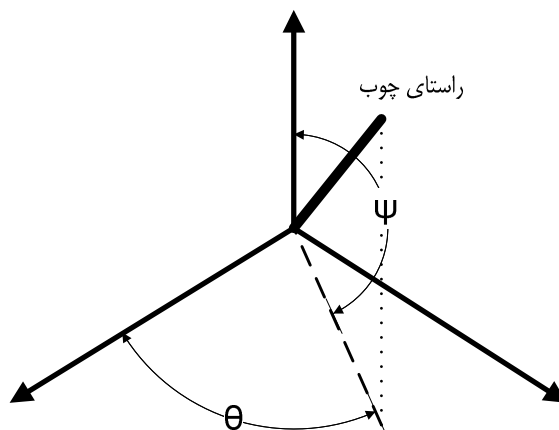
^۱ Cylindrical

وابعاد وسیع فضای کاری و با توجه به اینکه در تعیین موقعیت end effector از کنترل حلقه باز استفاده شده و مفاصل^۱ خطی^۲ انتخاب بهتری به نظر می‌رسند، چرا که خطای نهایی در حد خطای عملگرها^۳ و موتورهاست، حال آنکه برای مفاصل چرخشی^۴، این خطا علاوه بر دقت موتور به طول لینک^۵ هم بستگی دارد که این طول در این پروژه مقداری قابل توجه و در حد متر است.

از طرف دیگر، با توجه به محدودیت توان پردازشی و حجم محاسبات در فاز پردازش تصویر و دیگر الگوریتمها، انتخاب ربات سه درجه آزادی خطی این مزیت را خواهد داشت که مسائل Inverse Kinematic آن با کمترین محاسبات قابل انجام خواهند بود. کاهش زمان این محاسبات منجر به کاهش زمان لازم برای یک سیکل عملکرد ربات خواهد شد.

برای مشخص شدن مولفه ب (راستای چوب) باید دو مولفه جزئی آن که در شکل با θ و ψ

مشخص شده‌اند تنظیم شوند.



^۱ Joints

^۲ Prismatic

^۳ Actuators

^۴ Revolute

^۵ Link

شکل ۲-۳: اجزای تشکیل دهنده راستای چوب

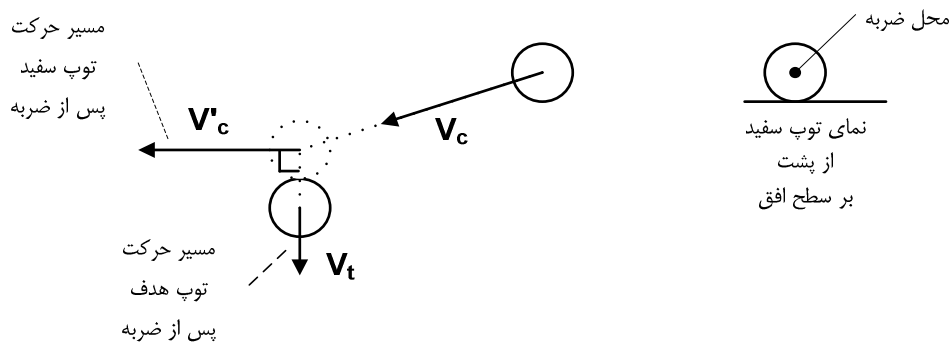
θ دوران حول محور Z در دستگاه مختصات نهایی ربات سه درجه آزادی خطی و ψ دوران حول محور X در آن دستگاه است. بررسی بازی بیلپارد نشان می‌دهد که از زاویه ψ تنها در حالت‌هایی بسیار خاص و توسط بازیکنان بسیار حرفه‌ای استفاده می‌شود. از آنجا که کاربرد این پارامتر محدود به موارد بسیار نادری است و نیز در اغلب بازی‌های متداول تخلف محسوب می‌شود (چون باعث بلندشدن توپ از سطح میز می‌شود) از آن صرف نظر شده و همواره آنرا برابر صفر منظور می‌کنیم. با این حساب تنها کفایت از یک مفصل چرخشی برای تنظیم راستای چوب استفاده کنیم. این راستا همواره موازی با سطح افق و با مقداری بین 0 و 2π در سطح افق نسبت به محور X خواهد بود.

۲-۱-۲ شدت ضربه

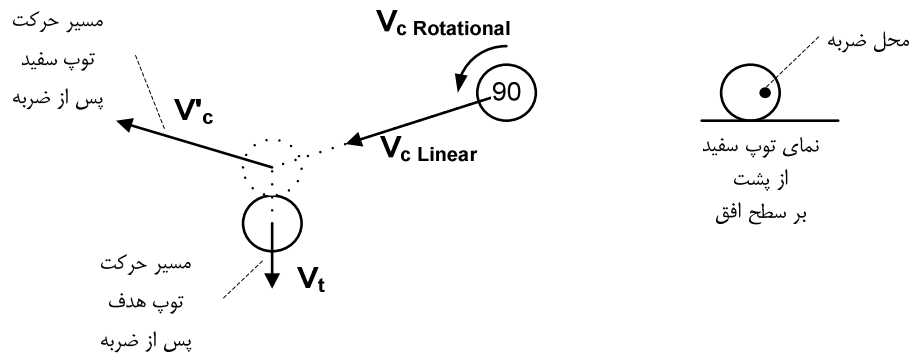
پس از راستای ضربه، شدت ضربه مهمترین پارامتر یک ضربه است. گرچه این پارامتر در راستای حرکت توپها نقشی ندارد، ولی در مکان نهایی توقف توپها و موقعیت برای چرخه بعدی بازی تأثیری قطعی دارد. همچنین اگر این پارامتر به درستی تنظیم نشود ممکن است ضربه به خطا منجر شود، چرا که در صورتی که شدت ضربه از حدی پایین تر باشد توپ سفید در مسیر خود پیش از رسیدن به توپ هدف متوقف شده و به آن اصابت نخواهد کرد. از سوی دیگر اگر این پارامتر بیش از حد زیاد باشد، توپ سفید نیز پس از برخورد با توپ هدف در سید قرار خواهد گرفت که هر دو حالت طبق قوانین خطا محسوب شده و جریمه خواهند داشت. علاوه بر این، چنانکه در فصل یک گفتیم محل متوقف شدن توپ سفید پس از برخورد با توپ هدف نیز از اهمیت بالایی در بازی برخوردار است.

۲-۱-۳ محل برخورد Cue و توپ

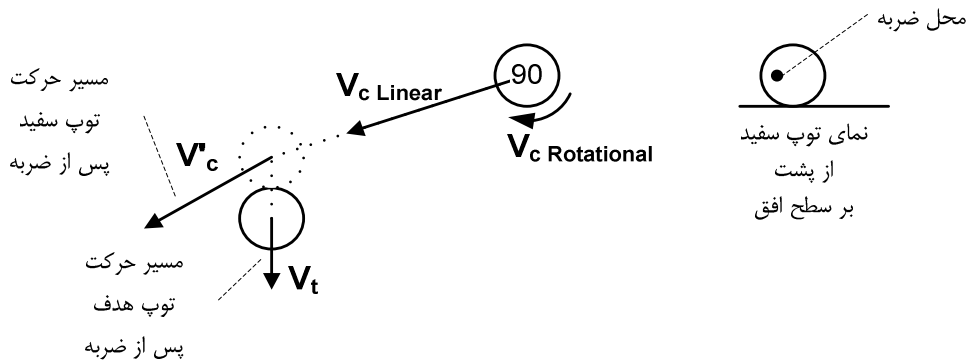
گرچه این پارامتر در سطوح نخستین بازی دارای کاربرد زیادی نیست ولی از آنجا که در سطوح پیشرفته نقش مهمی در ضربه‌ها ایفا می‌کند در طراحی مدنظر گرفته شده است، چنانکه ربات قادر است به هر نقطه از سطح توپ ضربه خود را وارد کند. این پارامتر به این شکل در ضربه موثر است که علاوه بر سرعت خطی، به توپ سرعتی دورانی در راستا و اندازه دلخواه می‌دهد، چنانکه توپ پس از برخورد با مانع مسیری را غیر از آنچه در حالت عادی حرکت می‌کند خواهد پیمود. این نوع ضربه‌ها در ضربه‌های غیرمستقیم و نیز حالاتی که توپ هدف در نزدیکی سد و در امتداد مستقیم توپ سفید است کاربرد دارد، چرا که با افزودن یک مؤلفه سرعت دورانی موازی با سطح افق می‌توان مسیر توپ پس از ضربه را به دلخواه به چپ یا راست منحرف کرد و مانع افتادن توپ سفید در سبد شد (شکل‌های ۲-۴ تا ۲-۶). همچنین با ایراد مؤلفه سرعت دورانی عمودی می‌توان سرعت توپ پس از برخورد را کنترل کرد، چنانکه توپ به مسیر خود ادامه داده و یا به سمت خلاف جهت اولیه حرکت کند



شکل ۲-۴: مسیر حرکت توپها بدون سرعت دورانی



شکل ۲-۵: مسیر حرکت توپها با وجود مولفه سرعت دورانی

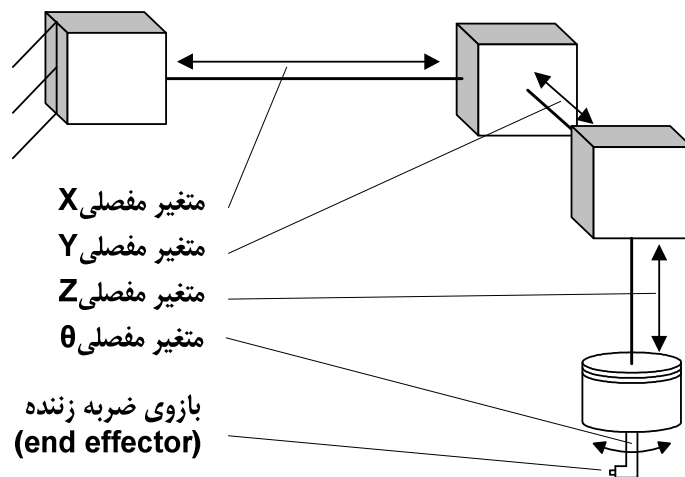


شکل ۲-۶: مسیر حرکت توپها با وجود مولفه سرعت دورانی

۲-۲ مکانیسم و سازه اصلی ربات

۱-۲-۲ مکانیسم ربات

چنانکه گفته شد، طرح انتخابی برای ربات مکانیسم خطی سه درجه آزادی است که به منظور قابلیت تنظیم راستای end effector یک درجه آزادی دورانی به آخرین مفصل خطی افزوده شده و یک ربات چهار درجه آزادی P-P-P-R با نمای شماتیک زیر پدید می‌آید:



شکل ۲-۷: نمای شماتیک ربات

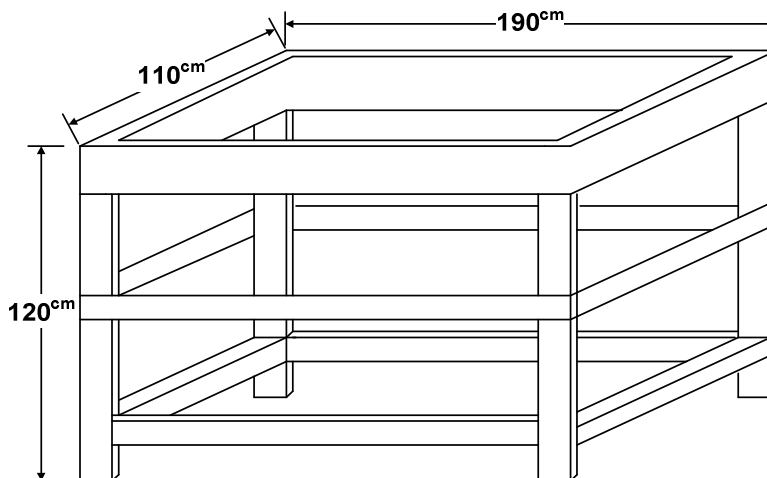
۲-۲-۲ محل قرارگیری ربات نسبت به میز

درایده نخست بنا بود ربات در فضای میز و بدون اتکا به آن معلق باشد. مهمترین مزیت این ایده، راحتی بازیکن حریف در حرکت و انجام ضربات است، چرا که ربات هیچ دخالتی در فضای اطراف میز ندارد و به راحتی قادر به حرکت است.

از ایرادات اصلی این طرح می‌توان به هزینه بالای آن اشاره کرد، چرا که باتوجه به لزوم ثابت بودن و دقت در محل قرارگیری، برای معلق نگاه داشتن ربات در بالای سطح میز یا باید به شکلی آنرا به سقف متصل کرد و یا با پایه‌های بزرگی در اطراف و با فاصله از میز آنرا بالای میز معلق نگاه داشت که هر دوی این روشها هزینه زیادی جهت نصب بدنه اصلی خواهند داشت. ایراد دیگر این طرح آنست که میز کاملاً مستقل از ربات است و اگر یکی از آنها نسبت به دیگری حرکت کند، محاسبات مکان‌یابی اولیه دستخوش تغییر شده و بایستی مجدداً صورت گیرند که هزینه بالاسری^۱ محاسبات را افزایش می‌دهد.

طرحی که برای ربات انتخاب شد، اسفاده از میز ترکیبی هم برای میزبازی در یک طبقه و هم برای بدنه ربات در طبقه بالایی آن است. شکل زیر شمای از این طرح را نشان می‌دهد:

^۱ overhead

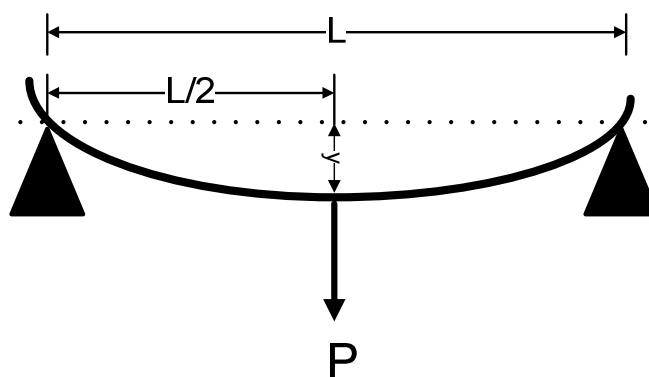


شکل ۲-۸: سازه اصلی شامل میز بازی و محل قرارگیری ربات

در شکل فوق میز بازی بیلارد بر سطح میانی قرار می گیرد و از سطح بالایی به عنوان شاسی اصلی ربات استفاده می شود. برای ساخت سازه اصلی نکته مهم این بود که مصالح و ساختمان طرح بایست چنان انتخاب می شد که خمش یا خیز محورهای مختلف سازه در برابر وزن ربات از میزان آستانه قابل قبول بیشتر نشود.

در یک محور خطی با بار ثابت، مقدار بیشینه خیز هنگامی است که بار وسط محور قرار

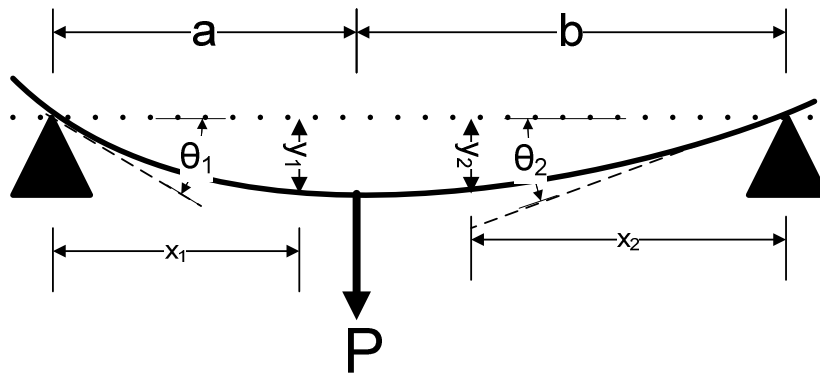
گرفته باشد:



شکل ۲-۹: خیز بیشینه محور

در حالت کلی میزان خیز در حالتی که دو انتهای محور با اتصال غیر صلب بر روی تکیه

گاه قرار دارند از رابطه زیر حساب می‌شود:



شکل ۲-۱۰: خیز برای محوری با اتصال غیر صلب در دو انتها

$$\theta_1 = \frac{\bar{P}.a.b.(l+b)}{6l.E.I}$$

$$\theta_2 = \frac{\bar{P}.a.b.(l+a)}{6l.E.I}$$

$$y_1 = \frac{\bar{P}.b.x_1}{6l.E.I}(l^2 - b^2 - x_1^2)$$

$$y_2 = \frac{\bar{P}.b.x_2}{6l.E.I}(l^2 - b^2 - x_2^2)$$

که در آن I ممان اینرسی محور و E ضریبی است که به جنس آن بستگی دارد و برای آهن (فولاد) و آلومینیوم برابر است با:

$$E_{Fr} = 207 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$E_{Al} = \frac{207}{3} \times 10^9 \text{ Pa}$$

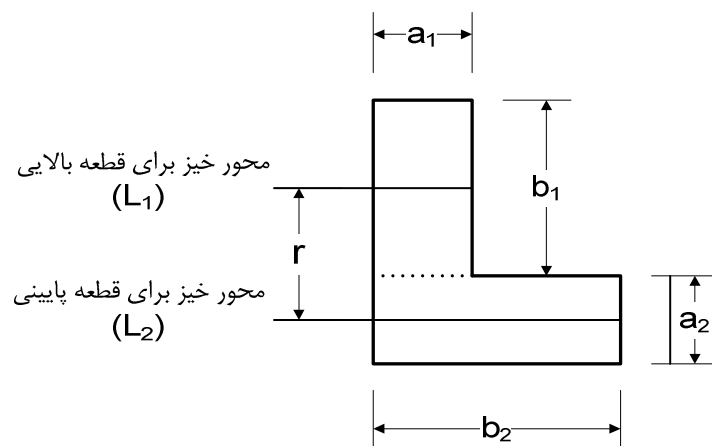
در حالتی که مقطع محور به شکل مستطیل با عرض a و طول b باشد مقدار I برابر است

با:

$$I = \frac{1}{12} b.a^3$$

در حالتی که مقطع محور را بتوان از کنار هم قرار دادن چند مستطیل بدست آورد مانند

زیر محاسبه خواهیم کرد:



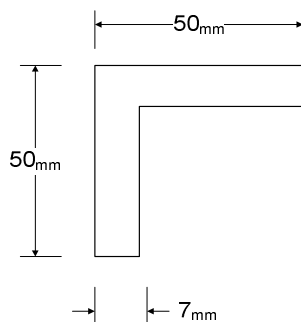
شکل ۲-۱۱: خیز برای قطعات ترکیبی

در شکل فوق، ممان اینرسی کل قطعه هنگام خیز حول محور L_1 از رابطه زیر حساب می

شود:

$$I_T = \frac{1}{12}a_1b_1^3 + \frac{1}{12}(b_2 + \frac{1}{12}r^2)(a_2 + \frac{1}{12}r^2)^3$$

اگر محور از پروفیل‌های مختلف هندسی تشکیل شده باشد می‌توان با استفاده از رابطه فوق میزان خیز آن را در برابر بار محاسبه کرد. با توجه به وزن کل ربات، در نظر گرفتن حاشیه امنیت، در نظرگیری کاربردهای احتمالی آینده ربات و نیز موجودیت اجناس در بازار در طرح اول تصمیم گرفته شد از محورهای فولادی استفاده شود. مقطع این محورهای فولادی در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.

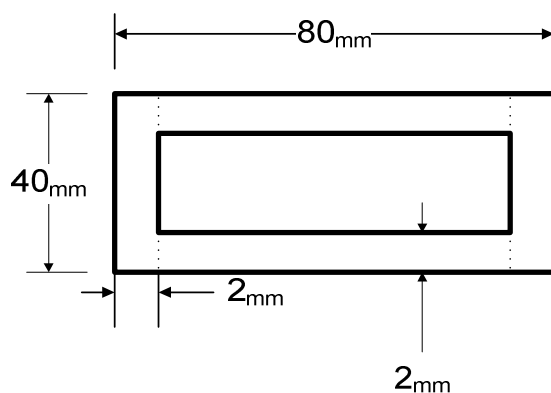


شکل ۲-۱۲: مقطع محورهای فولادی بکار رفته در نخستین طرح

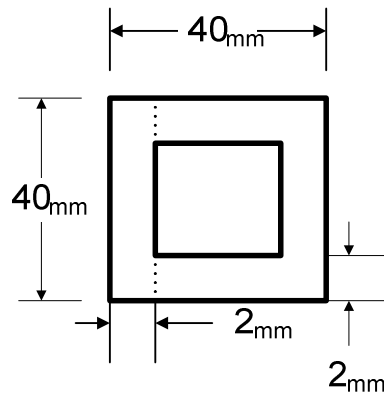
با توجه به اینکه سازه برای تحمل بار ۵۰۰ نیوتن طراحی می‌شد و آستانه خیز قابل قبول در بحرانی‌ترین حالت ۲ میلی‌متر بود، انتخاب فوق از نظر محاسبات فیزیکی انتخاب مناسبی بود، چرا که پس از محاسبه طبق رابطه گفته شده، در بحرانی‌ترین حالت میزان خیز آن در محدوده

مجاز قرار می‌گرفت. پس از ساخته شدن چهارچوب رویه میز، برای ساخت ادامه آن با مشکل مواجه شدیم: به دلیل عدم امکان جوش آهن یا آلومینیوم به فولاد مجبور بودیم برای پایه‌های میز هم از فولاد استفاده کنیم که هزینه بسیار زیادی در پی داشت. محاسبات نشان می‌داد که هزینه فولاد لازم برای پایه‌ها به تنهایی بیش از مقدار هزینه ساخت کل یک میز آهنی با پروفیل مستطیل است. متأسفانه به دلیل عدم آگاهی قبلی و فقدان مشاور مناسب چاره‌ای جز کنار گذاشتن طرح قبلی - با وجود هزینه‌های انجام شده - نبود.

در طرح دوم پس از محاسبات مربوط به میزان بیشینه خیز، برای ساخت سازه اصلی از محورهای آهنی با پروفیل مستطیل برای ساخت چهارچوب رویی و پروفیل مربع شکل برای پایه‌ها استفاده شد. مقطع این محورها در شکل ۲-۱۳ و ۲-۱۴ به چشم می‌خورد.

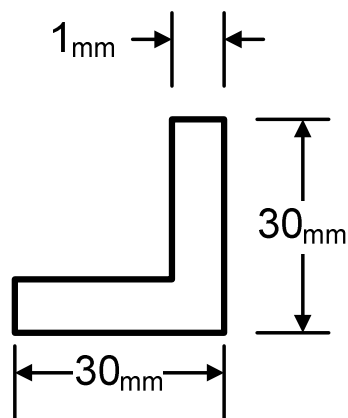


شکل ۲-۱۳: مقطع محورهای آهنی بکار رفته در رویه سازه اصلی ربات



شکل ۲-۱۳: مقطع محورهای آهنی بکار رفته در رویه سازه اصلی ربات

برای ساخت طبقه میانی میز که محل قرارگیری میز بازی است از نبشی های آلومینیومی استفاده شد. دلیل این انتخاب این بود که خیز در این قسمت پارامتر مهمی نیست، چرا که وظیفه این قسمت تنها نگهداری میز بازی است. میزبازی از جنسی غیرقابل انعطاف ساخته شده و همواره سطح آن افقی است. خم شدن قسمت نگهدارنده میز تنها ارتفاع کل میز را تغییر می دهد که مقداری ثابت است و با منظور کردن آن در محاسبات Kinematic می توان آنرا جبران کرد. بنا به آنچه گفته شد و نیز سبک و ارزان بودن آلومینیوم برای این قسمت از نبشی آلومینیومی با مشخصات زیر استفاده شده است.



شکل ۲-۱۴: مقطع محورهای آلومینیومی بکار رفته در بخش میانی سازه اصلی

۲-۲-۳ متغیرهای مفصلی و بازوهای ربات

پس از معرفی سازه اصلی به شرح ایده‌ها و پیاده‌سازی متغیرهای مفصلی و بازوهای ربات می‌پردازیم.

چنان که گفته شد ربات از نوع چهار درجه آزادی P-P-P-R است که در واقع از افزودن یک درجه آزادی دورانی به انتهای یک ربات سه درجه آزادی خطی ساخته شده است و تشکیل یک ربات سریال چهار درجه آزادی را داده است. طراحی متغیرهای مفصلی باید از انتها صورت بگیرد، چرا که در توالی مفصل‌ها برای مشخص شدن پارامترهای هر مفصل از قبیل گشتاور، نیرو، میزان جابجایی و غیره باید مشخصات مفصل بعدی را بدانیم. این موضوع ریشه در این نکته دارد که در رباتهای سریال هر مفصل کل مفصل بعد را به همراه محرک^۱ها و سایر متعلقات حرکت می‌دهد و برای محاسبه گشتاورهای مختلف بایست از وزن مفاصل بعد آگاهی داشته باشیم. با توجه به این نکات ابتدا به شرح متغیر مفصلی θ و سپس به ترتیب X, Y, Z می‌پردازیم.

متغیر مفصلی θ

وظیفه این متغیر مفصلی، تعیین راستای end effector (معادل چوب بازی بیلبارد) مطابق دستور صادر شده از بخش نرم‌افزاری ربات است. با توجه به مشخصات end effector و جرم کم آن (حدود ۵۰ گرم) انتخاب موتور پله‌ای به عنوان محرک این مفصل انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد، چرا که دقت زیادی دارد، احتیاجی به استفاده از گیربکس ندارد و در عین حال

^۱ actuator

گشتاور کافی برای دوران end effector دارد. مزیت دیگر این نوع موتور برای این کاربرد آنست که به سادگی امکان قفل شدن آن در وضعیت دلخواه وجود دارد و در نتیجه پس از قراردادن end effector در راستای خواسته شده، بر اثر شدت ضربه و تکانه وارده از سوی موتور از راستای صحیح خارج نمی‌شود.

با توجه به دقت زیادی که برای این مفصل لازم است از یک موتور پله‌ای با دقت ۰٫۹ درجه استفاده شد که در صورت استفاده در حالت نیم پله، دقتی معادل ۰٫۴۵ درجه خواهد داشت. از آنجا که end effector ابعاد و جرم کمی دارد مستقیماً در امتداد محور موتور نصب می‌شود. همچنین به دلیل این که لختی دورانی مجموعه متصل به مفصل θ (شامل end effector و اتصالات) مقدار زیادی نیست، این مجموعه مستقیماً و بدون استفاده از جعبه دنده^۱ به شفت موتور متصل^۲ شده است. جدول ۱-۲ مشخصات موتور محرک مفصل θ را نشان می‌دهد. مشخصات مربوط به end effector در بخش مربوطه توضیح داده شده است.

پارامتر	مقدار
نوع	Unipolar, ۶ wires
دقت	۰٫۹ Degree
گشتاور	۰٫۱ N/m
ولتاژ	۱۲ v

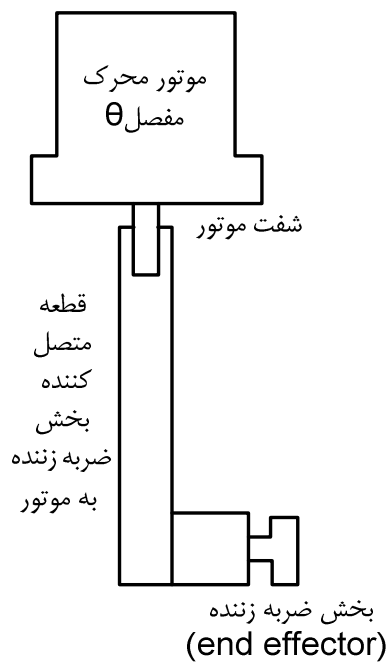
جدول ۱-۲: مشخصات موتور محرک مفصل θ

از آنجا که راستاهای مختلف θ موازی سطح افق هستند و به عبارت دیگر دوران end effector در صفحه‌ای افقی قرار می‌گیرد موتور این مفصل بایستی چنان نصب شود که شفت آن

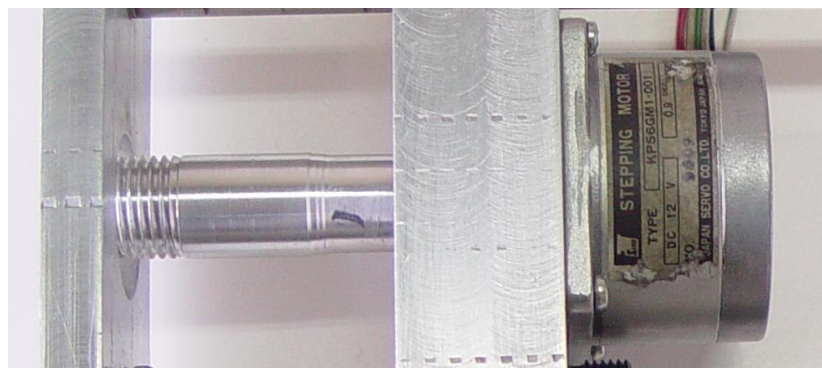
^۱ gearbox

^۲ couple

عمود بر سطح افق باشد. شکل ۱۶-۲ نمای شماتیک قرارگیری اجزای این مفصل را نشان می دهد و مفصل واقعی در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است.



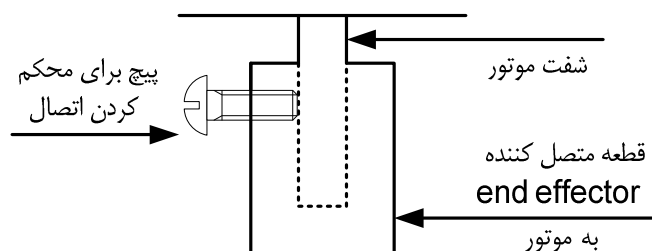
شکل ۱۶-۲: نمای شماتیک مفصل θ



شکل ۱۷-۲: بخش ساخته شده برای مفصل θ

همچنین اتصالی که از طریق آن end effector به شفت موتور متصل می‌شود نیز در

شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۲: اتصال end effector به موتور

در پیاده‌سازی، برای شاسی این مفصل از یک صفحه آلومینیومی با ابعاد $30 \times 77 \times 130$ میلی‌متر استفاده شده است. موتور θ در بالای آن صفحه قرار گرفته و با ۴ عدد پیچ به صفحه متصل شده. محوری که موتور را به end effector وصل می‌کند به شفت متصل شده و پس از گذشتن از داخل صفحه آلومینیومی، در سوی دیگر صفحه به end effector متصل می‌شود.

متغیر مفصلی Z

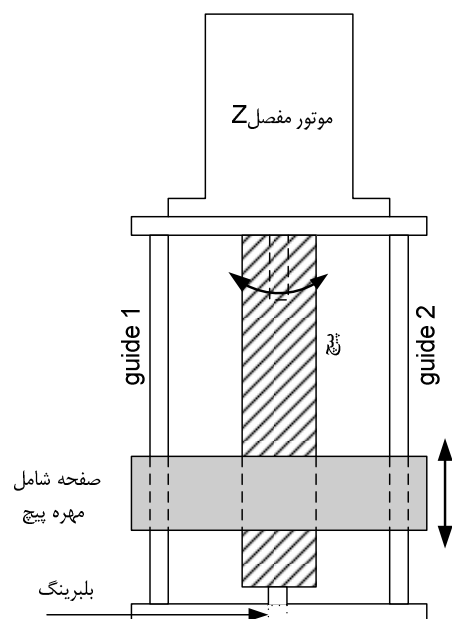
وظیفه این مفصل جابجایی عمودی مفصل θ و end effector متصل به آن است. این متغیر مفصلی، یک متغیر مفصلی خطی و عمودی است که بعد از مفصل y و قبل از مفصل θ قرار گرفته است. بنابراین کل بخش متغیر مفصلی θ بایستی توسط این مفصل حرکت داده شود. دو طرح برای پیاده‌سازی این متغیر مفصلی وجود داشت که در هر دو از مکانیسم پیچ و مهره برای تبدیل حرکت دورانی موتور به حرکت خطی استفاده شده است. با توجه به نمونه وسایل بیلپارد بکار گرفته شده و قطر توپهای آن این مفصل بایستی حداقل جابجایی به اندازه ۳ سانتی‌متر را در راستای عمودی میسر کند.

طرح ۱

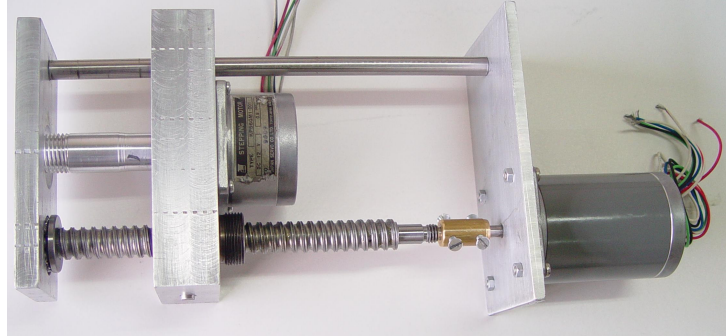
در این طرح موتور به یک پیچ با مشخصاتی که در جدول ۲-۲ موجود است متصل می‌شود. مهره متناظر با پیچ در واقع همان صفحه‌ای است که موتور مفصل θ روی آن و end effector پایین آن نصب می‌شود. برای اینکه با چرخاندن پیچ، مهره هم همراه آن بچرخد از دو guide موازی با پیچ که در دو طرف پیچ قرار گرفته‌اند و از میان صفحه مهره گذشته‌اند استفاده شده است. شکل‌های زیر طرح شماتیک و قطعه واقعی را نشان می‌دهند.

پارامتر	مقدار
جنس پیچ	آلومینیوم
طول پیچ	۱۵۰mm
طول مفید پیچ	۱۰۰mm
گام پیچ	۲mm
قطر پیچ	۲۰mm

جدول ۲-۲: مشخصات پیچ در طرح ۱



شکل ۲-۱۹: شمای مفصل Z در طرح ۱



شکل ۲-۲۰: تصویر مفصل Z ساخته شده

پیچ و دو محور guide در دو سر به دو صفحه آلومینیومی محکم^۱ شده‌اند. از آنجا که طول پیچ و دو محور مساوی است این دو صفحه با هم موازی هستند. دو محور guide به دو صفحه پیچ شده‌اند و خود پیچ در بالا مستقیماً به شفت موتور متصل شده و در پایین جهت تسهیل گردش بر روی یک بلبرینگ قرار گرفته است.

پس از محاسبه گشتاور لازم برای موتور و با در نظر گرفتن ضریب ایمنی انتظار بر آن بود که یک موتور پله‌ای با گشتاور ۰/۶ نیوتن متر بتواند نیروی لازم برای حرکت در راستای Z را فراهم آورد ولی در عمل دو مشکل عمده مانع تحقق این امر شد. دلیل نخست، اصطکاک زیاد در guide ها بود، چرا که مستقیماً سطح فلز بر روی سطح فلزی دیگر حرکت می‌کرد. دلیل دوم و دلیل عمده این بود که گرچه محل سوراخهایی که guide ها را به دو صفحه ابتدایی و انتهایی پیچ می‌کرد با دقتی در حد دهم میلی متر تعبیه شده بود، ولی به علت استفاده از دستگاههای قدیمی و نه چندان دقیق، در عمل چنان شده بود که به دلیل انحراف بسیار جزئی در مکان اتصال، در محور قدری از حالت توازی انحراف پیدا کرده بودند و همین مانع حرکت صفحه میانی به بالا و پایین می‌شد. به

^۱ fix

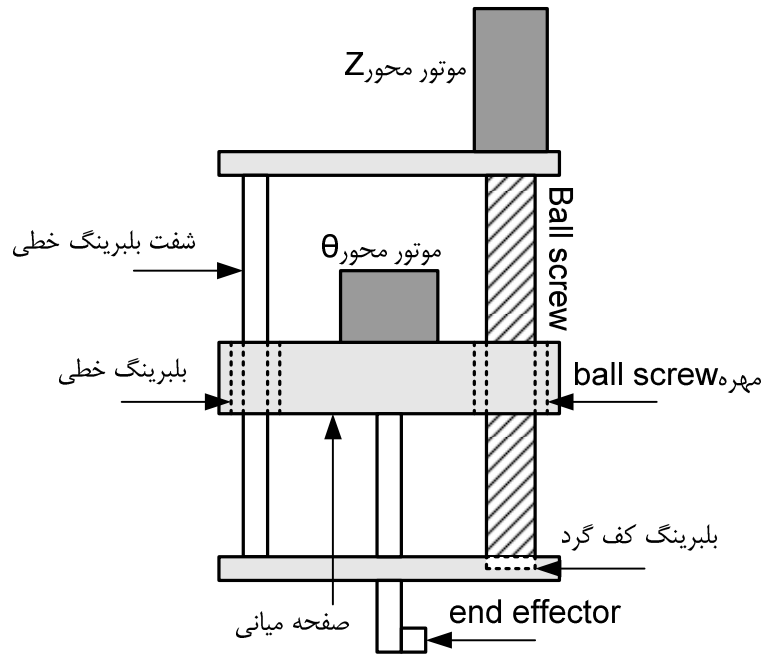
همین دلیل با اعمال تغییراتی در این طرح به طرحی بسیار کارآمدتر برای پیاده‌سازی مفصل Z رسیدیم:

طرح ۲

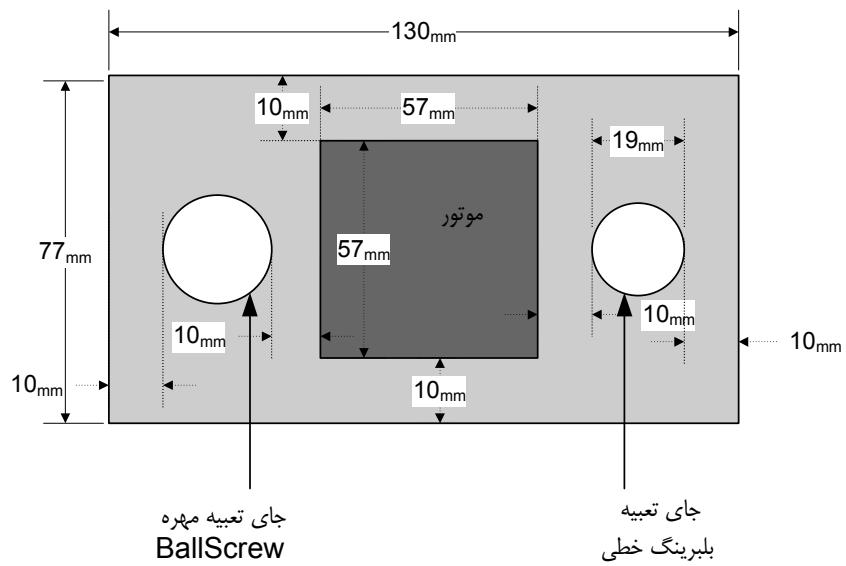
در این طرح یکی از guide ها حذف شده است. بجای پیچ از ball screw استفاده شده که مهره آن در صفحه میانی تعبیه شده است. گرچه گام ball screw دو برابر گام پیچ قبل بود، ولی اصطکاک آن به شدت کاهش یافته بود. شایان ذکر است که به دلیل محدودیت اجناس بازار امکان انتخاب ball screw با توجه به طرح از پیش تعیین شده وجود نداشته و در واقع طرح براساس ابعاد ball screw ارائه شده است. شایان ذکر است که یافتن ball screw در حد و اندازه‌های مناسب برای ربات زمان قابل توجهی به طول انجامید.

علاوه بر تبدیل پیچ ساده به ball screw در طرح ۲، guide موازی با پیچ هم تبدیل به یک شفت و یک بلبرینگ خطی^۱ شده که خود بلبرینگ آن در صفحه میانی تعبیه شده و شفت آن موازی با ball screw است. این تغییر هم باعث کاهش اصطکاک در این طرح تا حد قابل ملاحظه‌ای شده است. علاوه بر این، انتهای ball screw بجای اینکه مانند طرح قبل روی یک بلبرینگ ساده قرار بگیرد روی یک بلبرینگ کف گرد قرار گرفته که این امر نیز موجب تسهیل چرخش ball screw می‌شود. در نهایت کم شدن بسیار زیاد اصطکاک در مقایسه با طرح قبل از یکسو و نیز کاهش تعداد guide ها و تحمیل محدودیت کمتر به ساختار از سوی دیگر باعث شده تا این طرح به سادگی عملکرد مناسب از خود نشان دهد. در شکل های زیر طرح شماتیک این ساختار و نیز تصویر قطعه واقعی ساخته شده مشاهده می‌شوند.

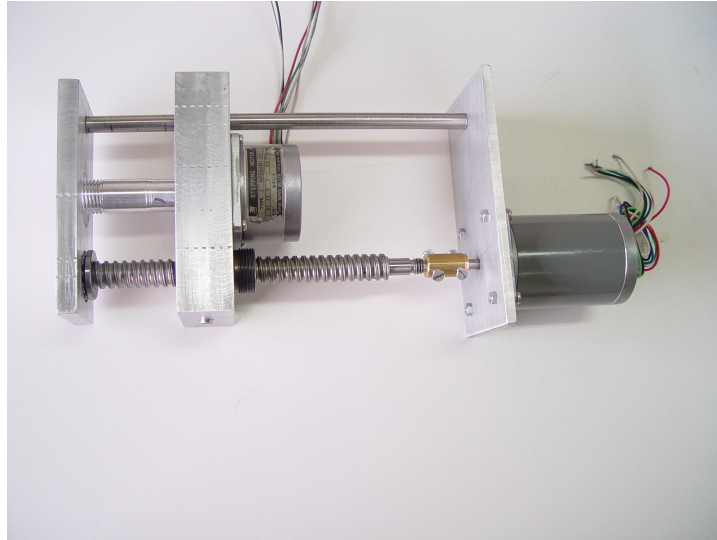
^۱ Line Bearing



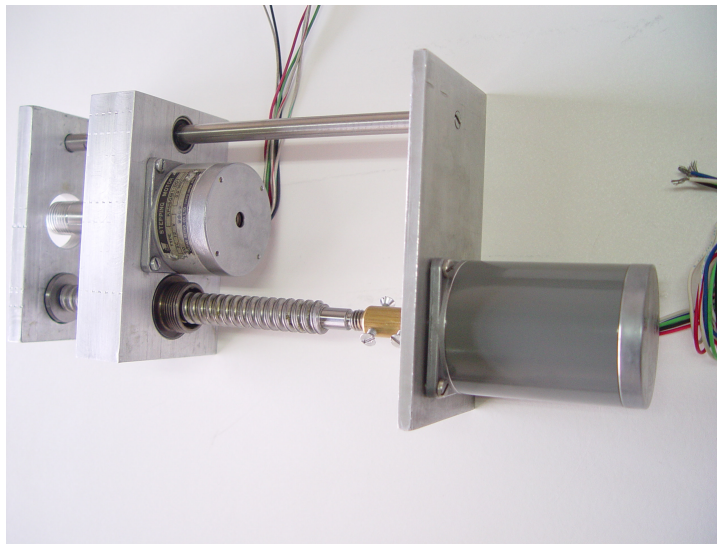
شکل ۲-۲۱: شمای مفصل Z



شکل ۲-۲۲: صفحه میانی مفصل Z



شکل ۲-۲۳: مفصل Z ساخته شده



شکل ۲-۲۴: مفصل Z ساخته شده- نمایش بلبرینگ و مهره ball screw

به دلایل مشابه آنچه برای مفصل θ گفته شد، برای این مفصل نیز از موتور پله‌ای استفاده شده است. پس از محاسبات مربوط به گشتاور و نیز با در نظر داشتن اینکه ابتدا برای طرح ۱ موتور پله‌ای با گشتاور 0.16 نیوتن متر خریداری شده بود، از همان موتور به عنوان محرک در این مفصل استفاده شده است. با توجه به اینکه گام ball screw بکار رفته در مفصل 4 میلی متر و دقت

موتور ۰/۹ درجه - معادل ۴۰۰ پله در دور - است، دقت متغیر مفصلی Z برابر ۰/۰۱ میلی متر خواهد بود.

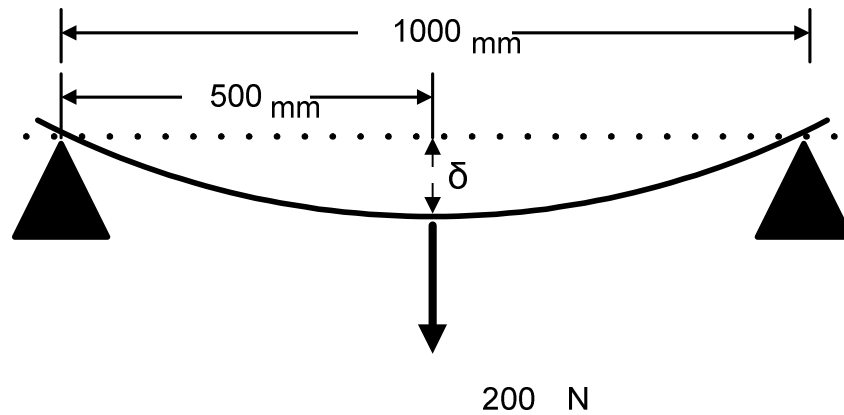
اتصال مفصل θ به مفصل Z

چنانکه در شکل‌های فوق دیده می‌شود، مهره ball screw در یک قطعه آلومینیومی که در میان ابتدا و انتهای بازه حرکتی مفصل Z قرار گرفته است تعبیه شده. این قطعه آلومینیومی (شکل ۲-۲۲) علاوه بر نگهداری مهره ball screw در راستای مکان بلب‌رینگ خطی، موتور و اتصالات مفصل θ را نیز نگاه داشته است؛ چنانکه با حرکت مفصل Z مفصل θ نیز با آن در راستای عمودی حرکت خواهد کرد.

متغیر مفصلی Y

این متغیر مفصلی نیز خطی ولی عمود بر راستای Z و در صفحه افقی است. یکی از دو محور X, Y باید موازی با عرض میز و دیگری موازی با طول آن باشد. از آنجا که شاسی محور Y تنها دو تکیه‌گاه در دو انتهای لینک دارد بهتر آن است که این شاسی این محور موازی با عرض میز اختیار شود تا طول کمتری داشته و میزان خیز آن در برابر تحمل بار مقدار کمتری باشد. میزان خیز لینک‌ها از آن جهت حائز اهمیت است که ارتفاع end effector را تغییر می‌دهد و چنانچه این مقدار از یک آستانه مشخص بیشتر باشد در ضربه تأثیرگذار خواهد بود.

با استفاده از روابط خیز محور در برابر اعمال بار که در مبحث طراحی سازه اصلی گفته شد، محاسبات زیر نشان می‌دهند که برای بار ۲۰۰ نیوتن و با در نظر گرفتن حاشیه امنیت، استفاده یک قطعه آلومینیومی به ابعاد ۲۰×۱۰۰×۱۰۰۰ میلی متری به عنوان شاسی محور Y انتخاب مناسبی بوده و خیزی در حد قابل قبول خواهد داشت:



شکل ۲-۲۵: خیز شاسی مفصل Y

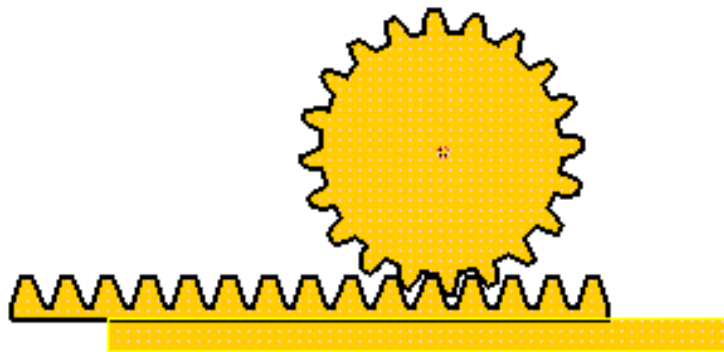
$$\delta = \frac{pl^3}{48EI} = \frac{200 \times 1^3}{48 \times 69 \times 10^9 \times \frac{1}{12} \times 0.1 \times 0.02^3} < 0.001$$

با این حساب کفایت بر روی قطعه آلومینیومی فوق بتوان یک حرکت خطی با طول و دقت مناسب به وجود آورد تا به عنوان متغیر مفصلی Y بکار گرفته شود. طول موثر این حرکت باید حداقل به اندازه عرض میز بازی (۴۵۰ میلی متر) باشد ولی با توجه به کاربردهای احتمالی ربات در آینده طولی بیشتر از آنچه لازم است (۷۵۰ میلی متر) برای آن در نظر گرفته شده است. در زیر به شرح ایده‌های طراحی و نیز پیاده‌سازی نهایی این متغیر مفصلی می‌پردازیم.

برای انتخاب محرک این مفصل ایده‌های زیادی بررسی شده است. همه انتخابها مبتنی بر استفاده از موتورهای الکتریکی و تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی هستند چرا که محرک‌های دیگر از قبیل سیستمهای پنوماتیکی حجم و وزن قابل توجهی داشته، از دقت لازم نیز برخوردار نیستند. در میان انواع مکانیسمهای تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی، مکانیسمهای زیر برای این کاربرد بررسی شدند:

Rack & Pinion

این مکانیسم برای تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی استفاده می شود. یکی از کاربردهای متداول این مکانیسم در سیستم فرمان اتوموبیل‌های قدیمی و برای انتقال نیرو از چرخ فرمان به محور چرخ‌هاست. این مکانیسم را می توان در حکم دو چرخ دنده درگیر فرض کرد که شعاع یکی از چرخ دنده ها بی نهایت بوده و تبدیل به یک سطح خطی شده است. چرخش چرخ دنده کوچک (pinion) حول محور خود سبب جابجایی خطی سطح دندانه دار (rack) می شود. شکل ۲-۲۶ طرز کار این مکانیسم را نشان می دهد.



شکل ۲-۲۶: مکانیسم Pinion و Rack

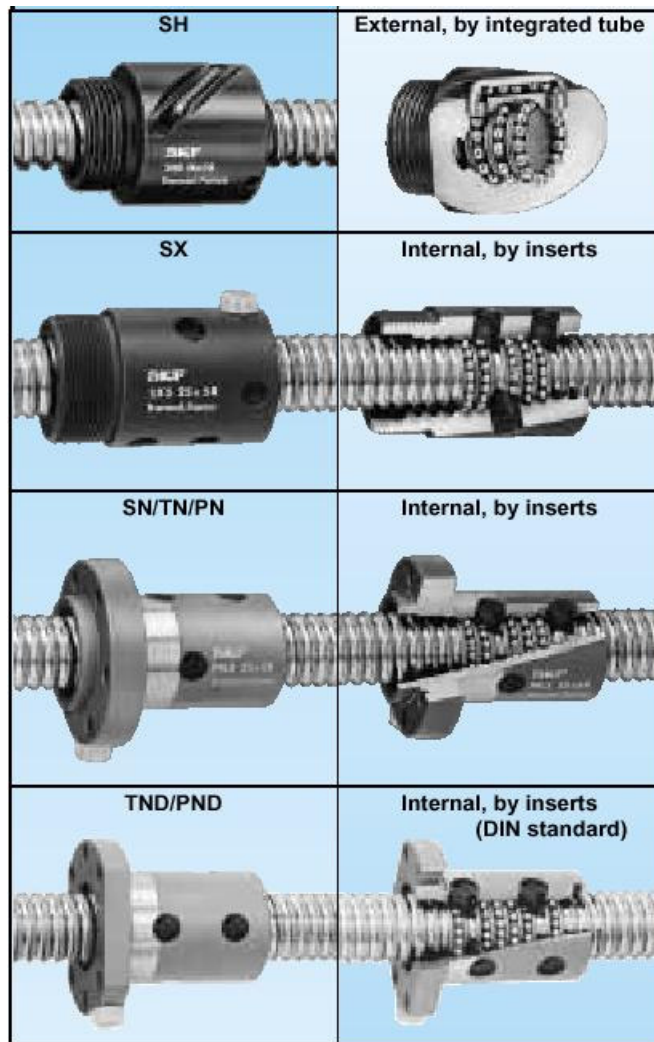
از معایب این مکانیسم می توان به دقت پایین آن در کاربردهای عادی و نیز اتلاف نسبتاً زیاد نیرو در آن اشاره کرد. همچنین یافتن آن در ابعاد دلخواه و با هزینه مناسب به هیچ وجه ساده نیست. با توجه به این دلایل از بکارگیری این مکانیسم صرف نظر شده است.

Ball Screw

Ball Screw در واقع یک پیچ و مهره است که در مهره آن از ایده بلبرینگ استفاده شده است، به این معنی که وجود ساچمه هایی در مهره که بر روی شیارهای پیچ می لغزند اصطکاک سیستم را تا حد بسیار زیادی کاهش می دهند. همچنین به دلیل اینکه این مکانیسم به مشابه پیچ

عمل می کند می تواند افزایش نیروی زیادی داشته باشد. بدیهی است که در برابر این افزایش نیرو هزینه کاهش سرعت را خواهیم داشت. شکل ۲-۲۷ تصویری از این ابزار را ارائه می دهد.

مکانیسم ball screw از چند جهت ایده مناسبی برای این کاربرد است. نخست دقت بسیار زیاد آن و دیگری افزایش نیرو و بازده بالا که منجر می شود بتوان از موتورهایی با گشتاور پایین تر از آنچه در مکانیسمهای دیگر لازم است به عنوان actuator استفاده شود. در برابر این مزایا، این ساختار معایبی دارد که منجر شد در نهایت از آن در پیاده سازی نهایی استفاده نشود. از جمله این معایب یکی کندبودن حرکت خطی آن است که با توجه به طول زیاد محور باعث کندشدن عملکرد کلی ربات می شود. دلیل دیگر که در واقع دلیل اصلی رد کردن این طرح بود هزینه بسیار زیاد ball screw با ابعاد بزرگ بود که بار مالی زیادی بر پروژه تحمیل می کرد.

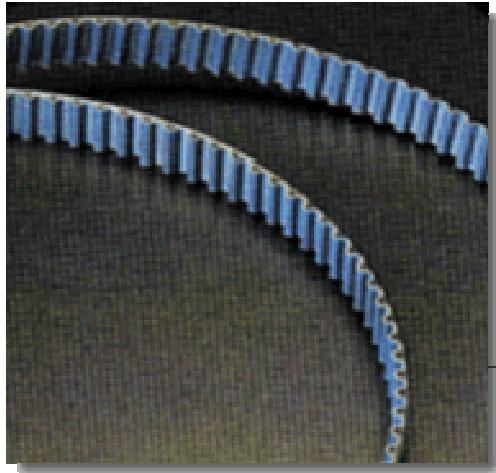


شکل ۲-۲۷: چند نمونه از انواع ball screw به همراه ساختار داخلی آنها

تسمه تایمینگ و پولی ۱

نمونه ای از تسمه تایمینگ در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است. این نوع تسمه مانند تسمه عادی بوده و تنها این تفاوت را دارد که به دلیل وجود دندانه هایی بر روی آن، می تواند با دقت زیادی بدون لغزش کنترل شود.

^۱ Timing Belt and Pulley



شکل ۲-۲۸: نمونه ای از تسمه تایمینگ

این نوع این مکانیسم علاوه بر دقت کافی، سرعت قابل قبول و هزینه معقول مزایای دیگری نیز دارد که مهمترین آن انعطاف پذیر بودن آن است. به عبارت دیگر، در طرحهای دیگر چنانکه تعداد نیرو با محوری که مفصل Y بر روی آن حرکت خطی دارد موازی نبوده و اندکی انحراف داشته باشند- که در ساخت قطعات کاملاً محتمل است- به خاطر صلب بودن محورها سیستم قفل شده واز حرکت باز میماند. برای رفع این مشکل ناگزیر به رعایت حاشیه امنیت^۱ بیشتر بین اتصالات بودیم که این امر به لق بودن^۲ بیشتر در سیستم منجر می شد. در مکانیسم تسمه تایمینگ به دلیل آنکه جنس تسمه قابل انعطاف^۳ است این مشکل به خودی خود حل می شود. علاوه بر آن با تغییر شعاع پولی ها می توان افزایش نیروی سیستم را کمتر یا بیشتر کرد چنانکه سرعت و یا نیروی مقاوم سیستم قابل کنترل باشند در زیر به چگونگی ساخت این مفصل می پردازیم.

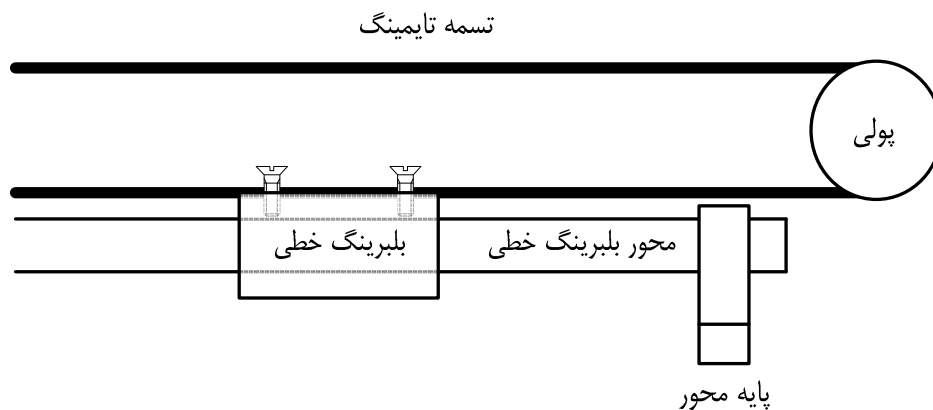
حرکت خطی مفصل Y بایستی بر روی شاسی آلومینیومی گفته شده در صفحات پیش پیاده سازی شود. برای این منظور از یک بلبرینگ خطی با طول محور ۷۵ سانتی متر (طول مفید ۶۵

^۱ tolerance

^۲ back lash

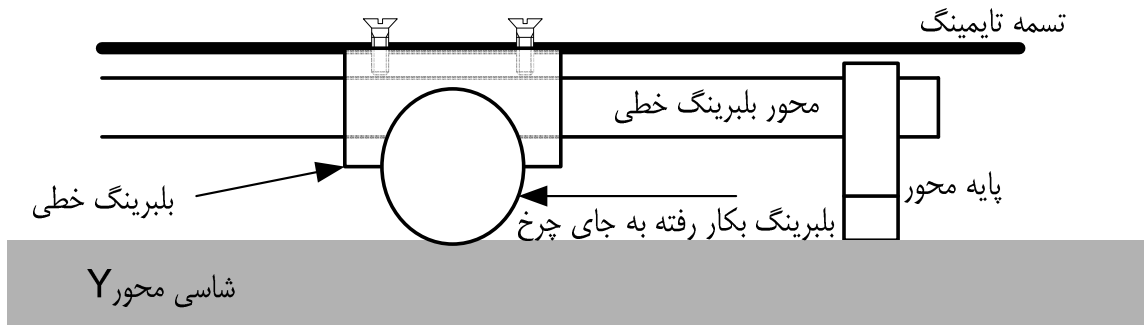
^۳ flexible

سائتی متر) استفاده شده است. برای اعمال نیرو به بلبرینگ خطی در امتداد محور، یک تسمه تایمینگ به آن متصل شده است که موازی با محور بلبرینگ خطی قرار می‌گیرد (شکل ۲-۲۹)



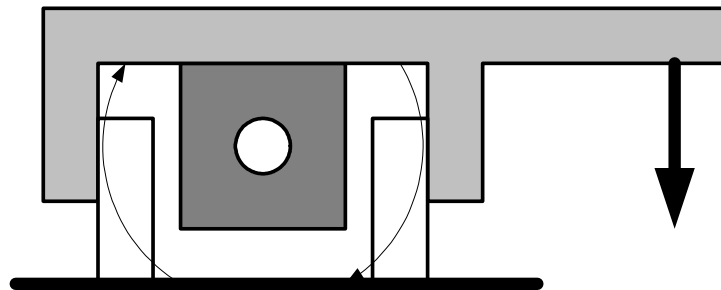
شکل ۲-۲۹: اتصال بلبرینگ خطی به تسمه تایمینگ

برای جلوگیری از خم شدن محور در برابر وزن مفصل های Z و θ که به آن متصل هستند به نحوی می‌بایست نیروی وارد بر محور را به شاسی منتقل کنیم. برای این منظور به دو طرف Line bearing دو چرخ متصل شد که نیرو را از روی محور برداشته و به شاسی منتقل می‌کنند. چنانچه شعاع این دو چرخ مناسب باشد مانع از خم شدن محور یا شفت بلبرینگ خطی خواهند شد. در شکل ۲-۳۰ این موضوع مشاهده می‌شود.

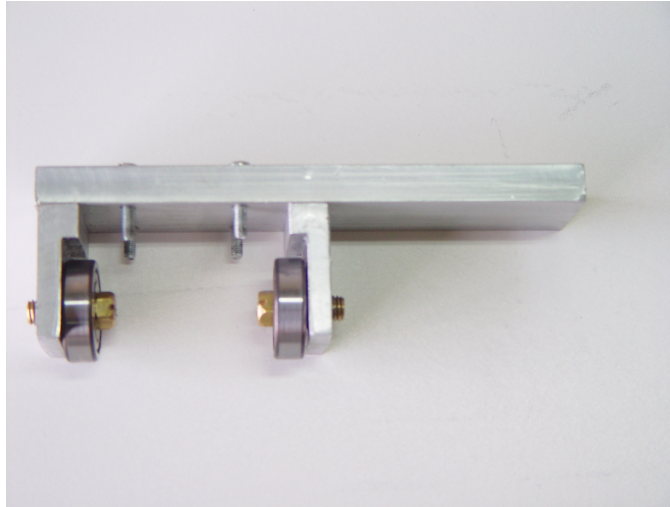


شکل ۲-۳۰: استفاده از چرخ برای جلوگیری از خمش محور بلبرینگ خطی

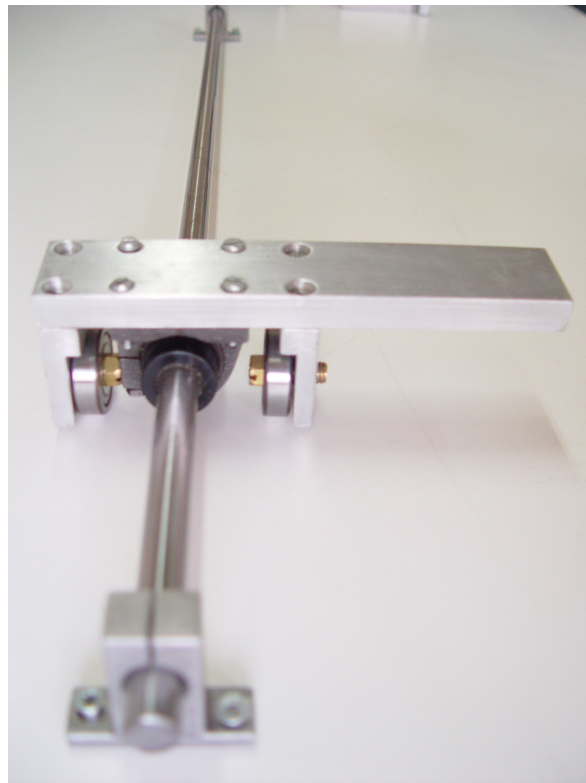
شایان ذکر است که چون مفصل Z و θ به یک طرف بلبرینگ خطی متصل می‌شود تنها به یکی از چرخها و وارد می‌شود و چرخ دیگر تنها برای خنثی کردن گشتاورهای احتمالی در جهت دیگر تعبیه شده است. شمای قطعه ساخته شده و نیز تصویری واقعی آن در شکل‌های ۲-۳۱ و ۲-۳۲ ارائه شده است.



شکل ۲-۳۱: شمای قطعه ساخته شده برای مفصل Y

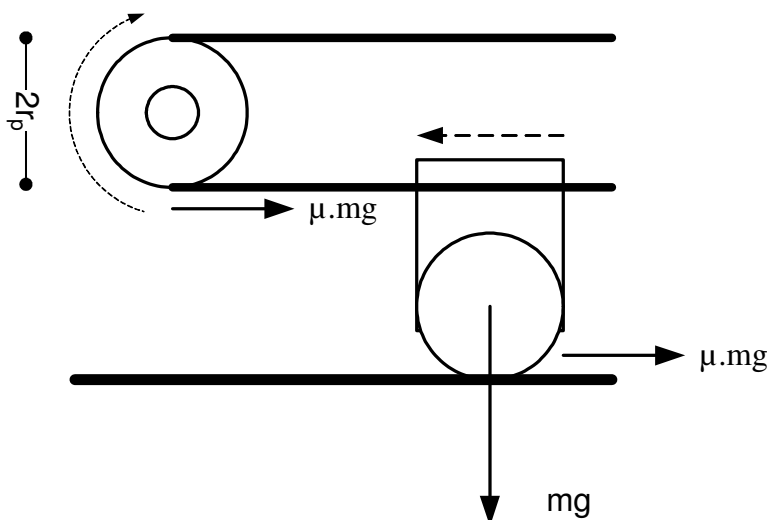


شکل ۲-۳۲: قطعه ساخته شده برای مفصل Y



شکل ۲-۳۳: بلبری نگ خطی مفصل Y

برای انتقال نیرو به تسمه از یک موتور پله‌ای استفاده شده است. در انتخاب موتور دو پارامتر مهم وجود دارد: دقت و گشتاور. محاسبات مربوط به گشتاور موتور در زیر ارائه شده است.



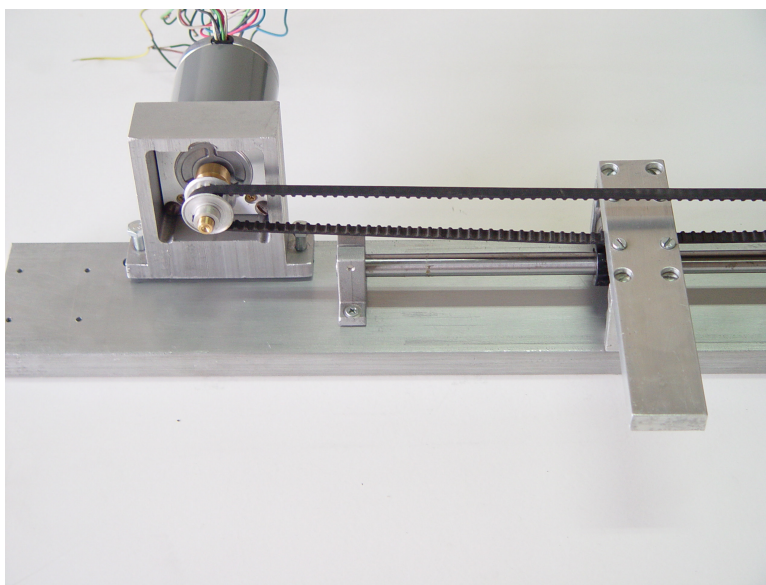
شکل ۲-۳۴: محاسبات گشتاور

پس از محاسبات فوق، با در نظر گرفتن حاشیه امنیت و کاربردهای احتمالی آینده ربات و نیز موجودیت اجناس در بازار، موتوری مشابه آنچه برای مفصل Z استفاده شده بود تهیه شد. مشخصات این موتور در جدول زیر به چشم می‌خورد.

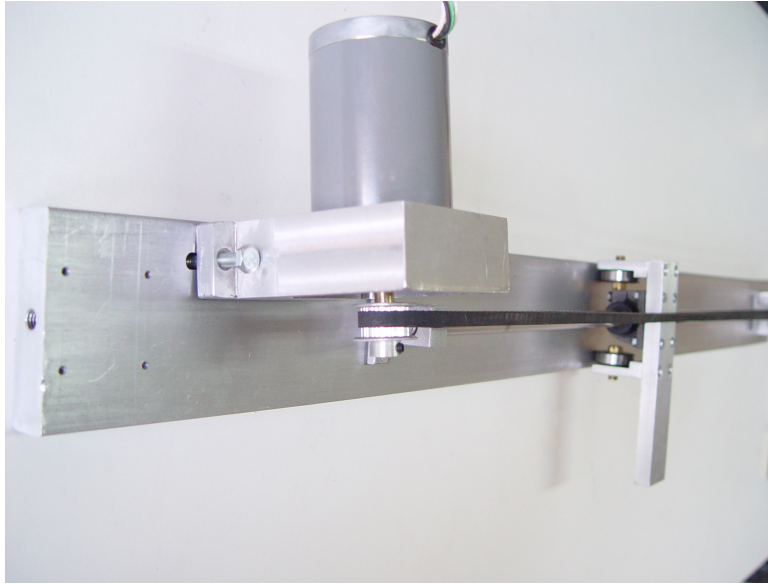
پارامتر	مقدار
نوع	Unipolar, ۶ wires
دقت	۱,۸ Degree
گشتاور	۰,۶ N/m
ولتاژ	۳ V
جریان	۲,۷ A

جدول ۲-۳: مشخصات موتور محرک مفصل Y

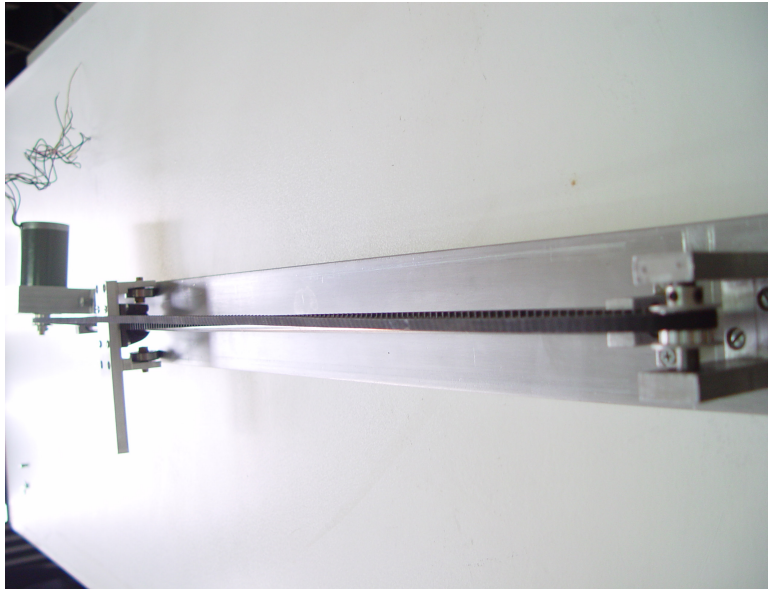
همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهند که دقتی در حد میلی‌متر برای عملکرد مناسب کافی است. با توجه به شعاع پولی‌های موجود در بازار (۲۰ میلی‌متر) دقت حرکت خطی مفصل ناشی از گردش موتور با دقت ۰،۹ درجه برابر ۰،۳ میلی‌متر است که بیش از حد لازم نیست. دقت را برآورده می‌کند. برای اتصال موتور، یکی از پولی‌های دو سر تسمه مستقیماً به شفت موتور متصل شده و پولی انتهایی دیگر بر روی پایه‌ای که محور آن با استفاده از دو بلبرینگ می‌چرخد قرار گرفته است. از مراحل قابل توجه این قسمت ساخت پایه‌ای برای موتور بود که بتواند با توجه به ابعاد موتور، آنرا عمود بر تسمه بر روی شاسی نگه دارد. تصویر نهایی این مفصلی به همراه تصویر قطعه ساخته شده در شکل‌های ۲-۳۵ تا ۲-۳۷ مشاهده می‌شوند.



شکل ۲-۳۵: مفصل Y



شکل ۲-۳۶: مفصل Y



شکل ۲-۳۷: مفصل Y

اتصال محور Z به محور Y

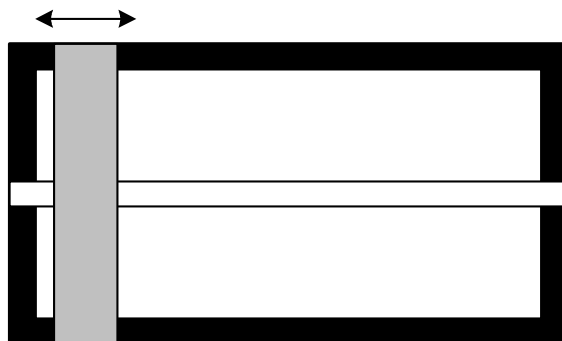
از آنجا که محور Z عمود بر محور Y است و اندازه متغیر مفصلی Z نقشی در تعیین مقدار متغیر مفصلی Y ندارد و برعکس، تنها کافی است که مفصل Z چنان به مفصل Y متصل شود که همراه با حرکت آن مفصل، کل اجزای مفصل Z نیز جابجا شود. محل قرارگیری نقش اسای در مکانیسم ربات نداشته و از آنجا که در کل طول عمر ربات ثابت می‌ماند می‌توان آنرا در هر مکانی به مفصل Y متصل کرده و در فاز کالیبراسیون تنظیمات لازم را انجام داد.

هنگام ساخت، صفحه رویی مفصل Z که موتور آن بخش را نگاه می‌دارد با دو پیچ به زائده‌ای که به همین منظور بر روی شاسی چرخهای متصل به بلبرینگ مفصل Y تعبیه شده است متصل می‌شود.

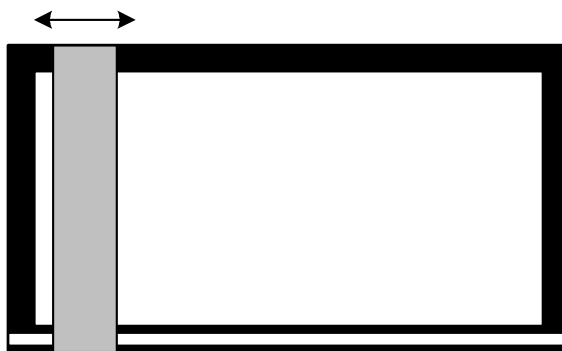
مفصل X

این مفصل در ترتیب سریال مفاصل، نخستین مفصل ربات است و وظیفه آن جابجایی مفصل Y در راستای طول میز است. از آنجا که ساختار ربات ساختار سریال است، این جابجایی منجر به جابجایی end effector در راستای عرض میز شده و باعث کامل شدن درجات آزادی لازم خواهد بود.

برای ساخت این مفصل خطی، از یک بلبرینگ خطی با قطر محور ۱۶ میلی‌متر و به طول ۱۹۰۰ میلی‌متر (برابر با طول میز) استفاده شده است. از آنجا که قرارگیری بلبرینگ خطی و محور مربوطه در وسط میز مانع دید دوربین بکار رفته در بخش پردازش تصویر می‌شود امکان بکارگیری مکانیسمی مشابه مکانیسم محور Y وجود ندارد و برای همین منظور بلبرینگ مفصل X بجای اینکه به وسط شاسی محور Y متصل شود به انتهای آن متصل شده است. در شکل های ۲-۳۷ و ۲-۳۸ این موضوع و راه حل آن نشان داده شده است.



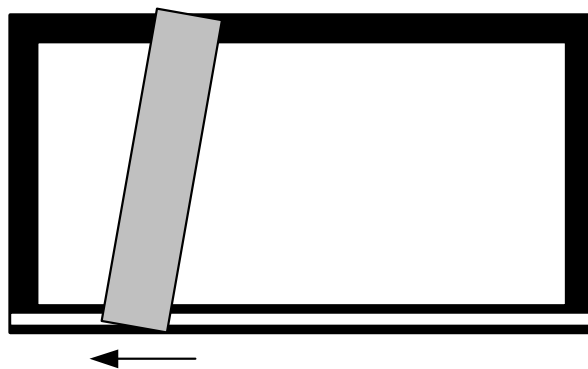
شکل ۲-۳۷: قرار گرفتن محور X در وسط میز



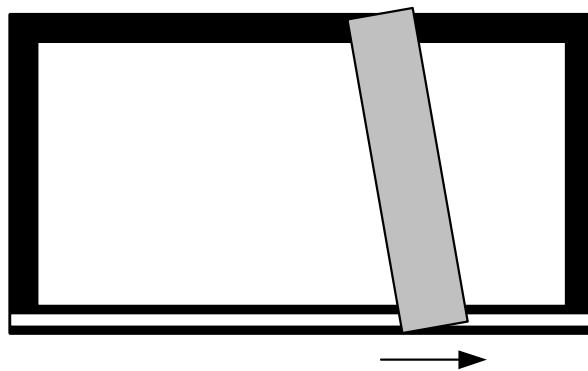
شکل ۲-۳۸: قرار گرفتن محور X در لبه میز

برای انتقال نیرو و به حرکت درآوردن مفصل X، از یک موتور پله‌ای استفاده شده است که با چرخش درآوردن یک Pulley باعث حرکت timing belt می‌شود. این timing belt موازی محور بلبرینگ خطی X بوده و در راستای متغیر مفصلی به آن نیرو وارد می‌کند. برای آنکه وزن شاسی محور y که متصل به بلبرینگ خطی X است باعث خمش این محور نشود به دو انتهای شاسی y دو چرخ متصل شده است، چنانکه وزن شاسی از طریق چرخها به میز منتقل شود و بلبرینگ خطی تنها نقش هدایت شاسی محور y را در راستایی موازی با طول میز به عهده داشته باشد.

با وجود اتصالات کاملاً صلب بین شاسی مفصل Y و بلبرینگ خطی محور X ، به علت وجود یک حاشیه امنیتی جزئی بین قطر داخلی بلبرینگ خطی و قطر محور آن مقدار کمی لقی در بلبرینگ وجود دارد که در انتهای دیگر شاسی منجر به انحراف زیادی می‌شود. از آنجا که طول شاسی مقداری قابل توجه و در حدود متر است، انحراف جزئی بلبرینگ خطی از راستای خود منجر به جابجایی تشدید شده در سوی دیگر می‌شود. این موضوع بویژه در آغاز حرکت شاسی مفصل Y بیش از پیش نمایان می‌شود چرا که به دلیل اینرسی سوی دیگر با تأخیر نسبت به سوی متصل به بلبرینگ حرکت خود را آغاز می‌کند. این موضوع در شکل های ۲-۳۹ و ۲-۴۰ نشان داده شده است.

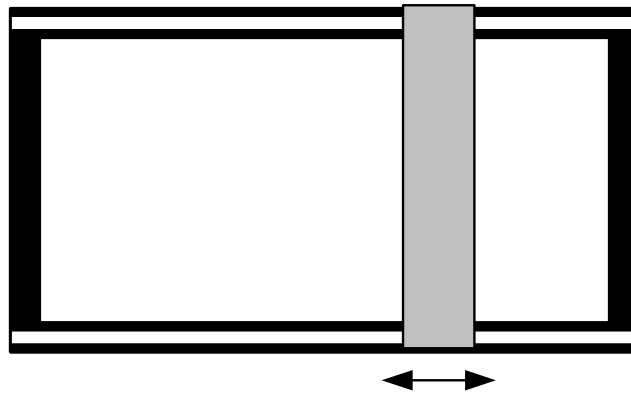


شکل ۲-۳۹: انحراف شاسی مفصل Y هنگام حرکت به چپ



شکل ۲-۴۰: انحراف شاسی مفصل Y هنگام حرکت به راست

برای رفع این مشکل نخستین ایده آن بود که مانند شکل ۲-۴۱، انتهای آزاد شاسی مفصل Y نیز مانند سوی دیگر به یک بلبرینگ خطی متصل شود.

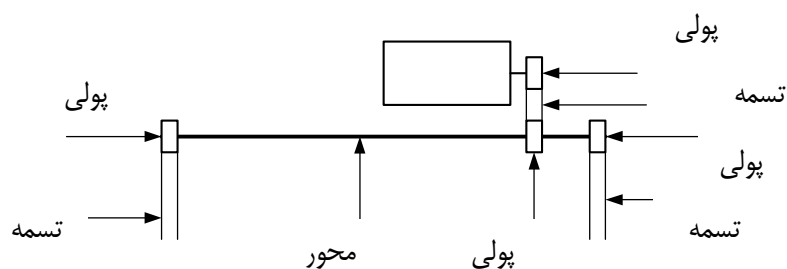


شکل ۲-۴۱: افزودن یک بلبرینگ خطی دی‌گر به مفصل X

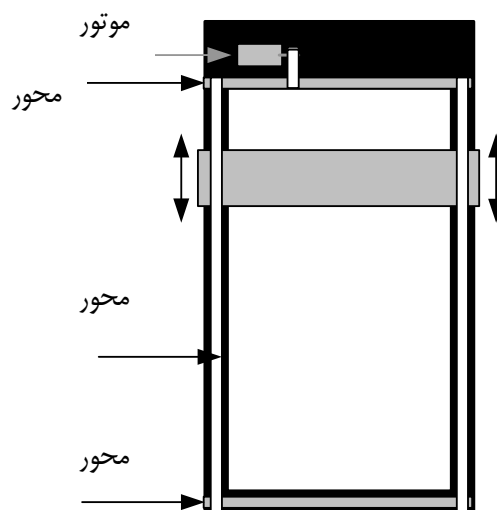
در عمل، این ایده گرچه منجر به کاهش لقی سیستم شد، ولی آنرا حذف نکرد. از سوی دیگر اختلافی جزئی در راستای دو محور بلبرینگهای خطی موجب قفل شدن سیستم می‌شد، چنانکه اگر دو محور اندکی از حالت توازی خارج می‌شدند به دلیل کم یا زیاد شدن فاصله آنها در عین ثابت بودن طول شاسی مفصل Y سبب می‌شد امکان حرکت در راستای X از سیستم سلب شود با توجه به این دلایل این طرح کنار گذاشته شد و از ایده دی‌گری استفاده شد.

در ایده دوم به جای انتقال نیروی موتور به یک انتهای شاسی مفصل X، انتقال نیرو به دو انتهای شاسی صورت می‌گیرد. انتقال نیرو به سوی دیگر سبب غلبه بر اینرسی شده و شاسی بدون انحراف در راستای محور X حرکت خواهد کرد. برای این منظور به انتهای دیگر شاسی نیز یک تسمه تالی‌می‌نگ متصل شده است. گفتنی است که برای ایراد نیرو به این قسمت نباید از یک موتور مستقل استفاده کرد، چرا که عدم همزمانی بین دوموتور ممکن است باعث خطا شود. به همین دلیل نیروی موتور ابتدا به یک محور صلب منتقل می‌شود که در دو سوی آن دو پولی متصل

به تسمه های زمانی قرار دارند. به این طریق نیروی موتور به مقدار مساوی و در یک زمان به هر دو انتهای شاسی مفصل λ منتقل می شود. شکل های ۴۲-۲ و ۴۳-۲ بیانگر این ایده هستند.



شکل ۴۲-۲: انتقال همزمان نیروی موتور به دو تسمه تای می نگ موازی



شکل ۴۳-۲: حرکت مفصل X با استفاده از دو تسمه تای می نگ

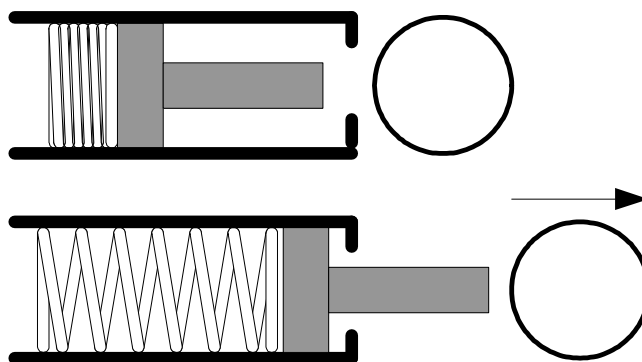
موتور مفصل X بر روی صفحه ای از جنس تفلون با ضخامت ۲۷ میلی متر و ابعاد ۹۹۰ میلی متر در ۳۰۰ میلی متر قرار گرفته است. شکل ۴۳-۲ موقعیت این صفحه و مفصل X را بر

روی کل میز نشان می‌دهد. همچنین دو پولی دیگر برای تسمه‌های تالی می‌نگ در انتهای دیگر میز تعبیه شده است.

بخش ضربه زننده^۱

از آنجا که تعیین موقعیت و راستای end effector توسط مفصلهای چهارگانه ربات انجام می‌شوند، تنها وظیفه‌ای که برعهده end effector باقی می‌ماند وارد ساختن ضربه با شدت قابل کنترل است.

در نخستین طرح برای ساخت end effector از فنر استفاده شد. پس از محاسبه شدت ضربه، یک موتور DC فنری را متناسب با شدت ضربه فشرده می‌کرد. فنر هنگام بازشدن به انتهای میله‌ای فلزی نیرو وارد می‌کرد و آن میله به توپ موردنظر ضربه می‌زد. شکل ۲-۴۴ بیانگر این مراحل است:



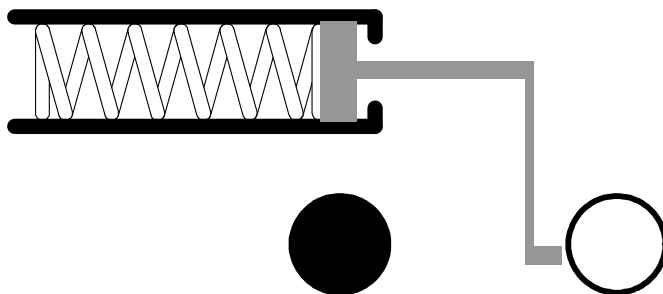
^۱ end effector

شکل ۲-۴۴: طرح اولیه برای بخش ضربه زننده

با توجه به شرایط بازی، محاسبه نشان می دهد که سرعت اولیه لازم برای توپ سفید حداکثر نیم متر بر ثانیه است. با توجه به این موضوع و در نظر گرفتن حاشیه امنیت، میزان مقاومت فنر با توجه به حداکثر جابجایی ممکن (ده سانتی متر) محاسبه می شود. برای فشرده کردن فنری که بتواند سرعت اولیه لازم را به توپها بدهد گشتاور قابل توجهی خواهد بود، تا حدی که مقدار گشتاور لازم برای موتورهای معمولی که بتوان با توجه به محدودیت مکان نصب از آنها استفاده کرد مقداری بسیار زیاد است. به همین منظور از جعبه دنده^۱ برای افزایش نیروی موتور استفاده شد. از آنجا که جعبه دنده بکار رفته می بایست با ضریب بالایی نیروی موتور را افزایش دهد و با توجه به اتلاف انرژی در چرخ دنده های متوالی از worm gear در این قسمت استفاده شد. با worm gear استفاده شده، نسبت افزایش نیرو به میزان ۱: ۱۲۰ حاصل می شود با این حساب موتور کوچکی قادر به فشرده کردن فنر به میزان دلخواه می بود.

همچنین برای اتصال این قسمت به موتور مفصل θ از لوله های خمیده استفاده شد. برای اینکه با باز شدن فنر، بخش ضربه زننده به بیرون پرتاب نشود بر روی لوله حاوی فنر شیاری ایجاد شده بود و یک زائده مکمل بر روی قسمت داخلی بخش ضربه زننده تعبیه شده بود تا علاوه بر حفظ راستای بخش ضربه زننده و جلوگیری از دوران حول محور لوله، میزان جابجایی خطی آنرا نیز کنترل کند. ویژگی دیگر بخش ساخته شده، امکان ضربه زدن به توپی بود که در نزدیکی توپهای دیگر قرار داشت. این امکان با بوجود آوردن یک پله بر روی قسمت بیرونی بخش ضربه زننده بوجود آمده بود (شکل ۲-۴۵).

^۱ gear box



شکل ۲-۴۵: ضربه زدن به توپ با وجود مانع

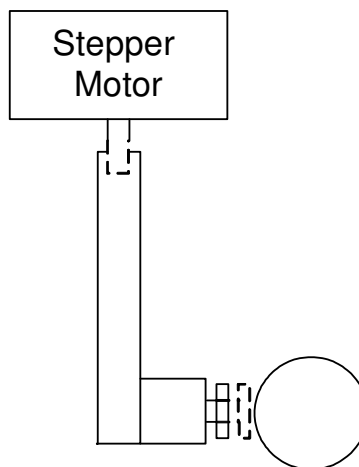
ایراد اصلی این طرح، اتلاف انرژی فنر هنگام بازشدن بود. هنگام بازشدن، فنر می‌بایست چرخ دنده‌ها را در خلاف جهت قبلی بچرخاند تا بتواند به وضعیت آغازین بازگردد که غلبه بر اصطکاک بین چرخ دنده‌ها و نیز چرخاندن شفت موتور در خلاف جهت اولیه بخش اعظم انرژی ذخیره شده در فنر متراکم را متوجه خود می‌کند. از سوی دیگر چنانچه از worm gear استفاده می‌شد اصولاً حرکت چرخ دنده‌ها معکوس پذیر نبود و ضربه زدن غیرممکن می‌شد. برای رفع این مشکل نیاز به طراحی یک مکانیسم کلاچ برای آزاد کردن آخرین چرخ دنده از بقیه چرخ دنده‌ها بود.

برای طراحی کلاچ پس از بررسی‌های زیاد، ساده‌ترین راه استفاده از یک حرکت مکانیکی بر اثر میدان مغناطیسی برآورد شده برای این منظور تصمیم بر آن شد که از حرکت فیزیکی صفحه‌های یک رله به اندازه کافی قوی استفاده شود.

در این مرحله از کار مشکلات دیگری نمایان شدند. یکی تنظیم دقیق چرخ‌دنده‌ها و اتصال به کلاچ، و دیگری تضمین درگیر شدن صحیح مجدد آنها پس از بازگشت کلاچ به جای اولیه. برای غلبه بر این مشکلات احتیاج به مکانیسم، طراحی و ساخت با دقت و هزینه بالا بود و پس از مدتی این ایده با وجود ساخت قطعات کنار گذاشته شد.

طرح دوم استفاده از جک‌های کوچک بادی^۱ برای ضربه‌زدن به توپ بود. از آنجا که این جک‌ها به همراه شیر، اتصالات و کمپرسور مربوطه در آزمایشگاه رباتهای فوتبالیست (small size) دانشکده موجود بود و استفاده از آنها هزینه‌ای در بر نداشت، با هماهنگی‌های انجام شده تصمیم بر آن شد که از آنها استفاده شود. البته به دلیل استفاده از قطعات آماده امکان استفاده از وسائلی که دقیقاً شدت ضربه موردنظر را تأمین کنند وجود نداشت ولی خوشبختانه ابزار موجود تا حد قابل قبولی پاسخگوی نیازهای موجود بودند.

با این حساب در طرح نهایی از یک کمپرسور هوا که قادر به فشردن هوا تا فشار ۸ اتمسفر بود استفاده شد. خروجی کمپرسور به یک شیر با کنترل الکتریکی ۵ ولت متصل است که از نرم‌افزار و با واسط‌های سخت افزاری فرمان می‌گیرد. خروجی شیر به یک جک کوچک با ابعاد ۳×۳×۵ سانتی متری متصل است و پیستون داخل سیلندر جک با باز شدن شیر و بر اثر فشار هوای فشرده شده به توپ ضربه می‌زند. برای اتصال end effector به ربات، باید آنرا به آخرین مفصل آن متصل کرد. برای این منظور از یک قطعه آلومینیومی به شکل زیر برای اتصال end effector به مفصل θ استفاده شده است که در شکل ۲-۴۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۶: اتصال بخش ضربه زننده به مفصل θ

^۱ Pneumatic

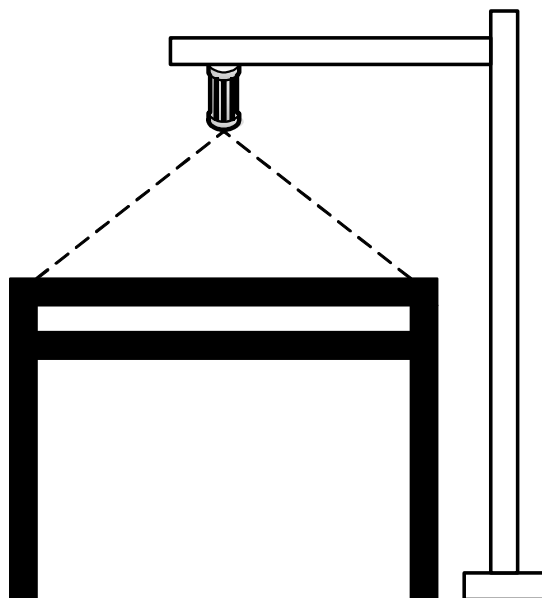
همچنین با توجه به کوچک بودن مقطع پیستون بکار رفته، احتمال انحراف توپ از مسیر پیش بینی شده بر اثر خطایی جزئی در مکان ضربه وجود خواهد داشت. به همین دلیل به انتهای بخش خارجی پیستون بادی قطعه‌ای آلومینیومی به شکل زیر متصل شده است تا بتوان از صحت مسیر توپ مطمئن گشت.

۲-۲-۴ محل قرارگیری میز بیلیارد

با توجه به فضای کای ربات که با دانستن متغیرهای مفصلی و نیز طول لینک‌های ربات مشخص می‌شود، میز بازی بیلیارد باید موازی با صفحه رویه میز اصلی و با فاصله‌ای برابر $h+z$ از آن قرار گیرد که h اختلاف ارتفاع end effector از رویه میز و Z دامنه حرکتی متغیر مفصلی Z است. برای قراردادن میز بیلیارد در آن مکان از قطعات نبشی آلومینیومی نصب شده در میانه پایه‌های میز اصلی استفاده شده است. این ساختار امکان جابجا کردن میز بیلیارد را در راستای X و Y نیز فراهم می‌آورد. همچنین امکان نصب این نگهدارنده‌های نبشی شکل در چند ارتفاع مشخص وجود دارد.

۲-۲-۵ محل قرارگیری دوربین

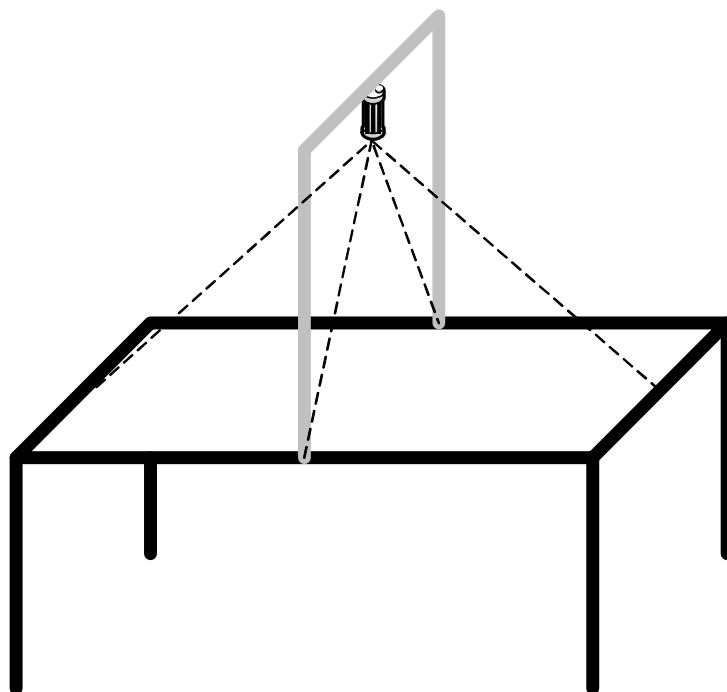
ابتدا دوربین توسط پایه ای مستقل از میز چنان در بالای میز و با دید عمودی قرار می‌گرفت که تصویر عمودی آن منطبق بر مرکز میز بیلیارد باشد. این طرح در شکل ۲-۴۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۷: طرح اولیه برای پایه دوربین

ایراد اصلی این طرح ناپایداری بسیار زیاد مکان دوربین بود، چنانکه با کوچکترین ضربه احتمالی به پایه دوربین، نوسانهای زیاد باعث کاهش چشمگیر دقت تصاویر دریافتی دوربین می شد. علاوه بر این به دلیل فیکس نبودن پایه دوربین به میز اصلی، جابجا کردن میز اصلی باعث برهم خوردن کل تنظیمات مربوط به تصویر می شد.

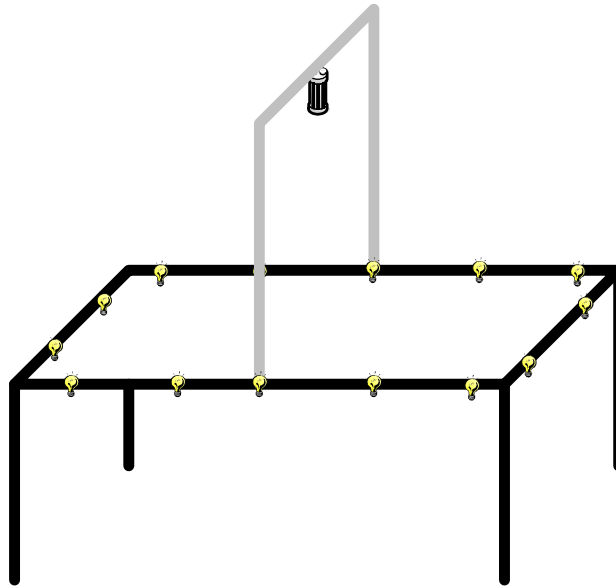
برای غلبه بر این مشکلات تصمیم بر آن شد که پایه دوربین چنان به میز متصل شود که علاوه بر جابجایی نسبی صفر بر اثر حرکت میز، نوسانات آن نیز به حداقل برسد. برای این منظور از ساختاری مانند شکل ۲-۴۸ استفاده شده است.



شکل ۲-۴۸: طرح استفاده شده برای نصب دوربین

۲-۲-۶ نورپردازی

با توجه به اینکه دوربین استفاده شده در پروژه از کیفیت ممتازی بهره نمی‌برد و نیز وجود سایه‌هایی که کار پردازش تصویر را مشکل می‌کنند ناگزیر به استفاده از نورپردازی مناسب برای پردازش تصویر هستیم. برای این منظور ابتدا ۱۲ عدد لامپ هالوژن ۵۰ وات و ۱۲ ولت در محیط میز قرار گرفتند. برای تبدیل برق شهر به برق ۱۲ ولت از یک ترانس ۱۲ ولتی ۱۰۰۰ وات استفاده می‌شود که تغذیه موتورها را نیز برعهده دارد. شکل ۲-۴۹ محل قرارگیری لامپها را در طرح نخست نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴۹: ترتیب نخستین قرار گرفتن لامپ ها

پس از نصب چراغها مشاهده شد که سایه‌های بوجود آمده در اطراف توپها به نحو چشمگیری کارایی پردازش تصویر را پایین می‌آورند: برای رفع این مشکل صفحه‌ای آلومینیومی و موازی با سطح میز به بخش افقی پایه‌های دوربین متصل شد و چهار چراغ هالوژن در بالای سطح میز بر روی آن صفحه قرار گرفتند. تصاویر دریافتی توسط دوربین نشان می‌دهد در این حالت که چراغها به شکل عمودی در بالای میز قرار گرفته‌اند سایه و نویزهای ناشی از نورپردازی تا میزان چشمگیری کاهش پیدا می‌کنند. شکل ۲-۵۰ طرز قرارگیری چراغها را در حالت دوم نشان می‌دهد.

۳- بینایی ربات

از آنجا که مکان هایی که ممکن است توپ ها بر روی میز داشته باشند حالت های نامحدودی دارد برای تشخیص مکان توپها بر روی میز ناگزیر از افزودن قابلیت های بینایی به ربات هستیم. برای این منظور یک دوربین در بالای میز مانند آنچه در شکل ۲-۴۸ مشخص شده است قرار گرفته است. تصویر وضعیت توپها توسط این دوربین و از طریق یک کارت فریم گراپر به کامپیوتر منتقل می شود. در ادامه نخست توابعی را بررسی خواهیم کرد که برای پیاده سازی بینایی ربات لازم هستند. پس از آن به کاربرد آنان و نیز نمونه هایی از عملکرد این توابع خواهیم پرداخت.

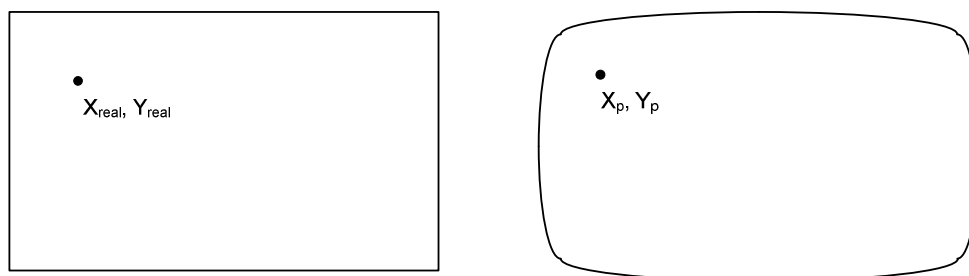
۳-۱- توابع لازم برای تشخیص مکان توپها

۳-۱-۱- تابع تسطیح تصویر

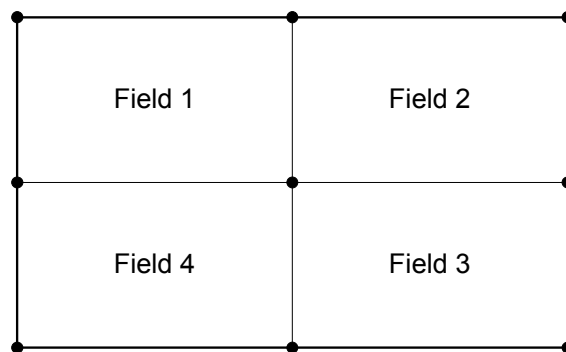
از آنجا که تصویر دریافت شده در واقع تبدیلی دو بعدی از یک فضای سه بعدی است و فاصله دوربین تا تمام نقاط سطح میز یکسان نیست، تصویر دریافتی دچار قدری تحذب خواهد بود. به همین دلیل مختصات مرکز و ابعاد توپهایی که در لبه های تصویر هستند ممکن است با مقدار

واقعی تفاوت داشته باشد و برای این منظور لازم است که تحذب تصویر تصحیح شود. برای این منظور از روشی بر پایه درونیابی^۱ استفاده شده است.

از آنجا که یافتن تابعی که بتواند با دریافت هر نقطه تصویر محدب، مختصات واقعی آن را محاسبه کند و در عین حال سر تا سر سطح میز را نیز پوشش دهد کار دشواری است، تصویر را به چهار منطقه مساوی تقسیم کرده و برای هر منطقه پارامترهای تابع درون یاب را مستقلاً محاسبه می کنیم. تابعی که برای نظیر کردن نقاط تصویر محدب به نقاط واقعی استفاده شده است یک تابع درونیابی درجه دوم ناقص به شکل زیر است:



شکل ۳-۱: تناظر نقاط در تصویر محدب و تصویر تسطیح شده



شکل ۳-۲: تقسیم سطح میز به چهار منطقه

^۱ Interpolation

$$X_{real} = a_0 + a_1 X_p + a_2 Y_p + a_3 X_p Y_p$$

$$Y_{real} = b_0 + b_1 X_p + b_2 Y_p + b_3 X_p Y_p$$

برای یافتن هشت پارامتر معادلات فوق، بایستی هشت معادله وجود داشته باشد. برای یافتن این هشت معادله، مختصات واقعی نقاط مرزی چهار ناحیه شکل ۳-۲ را با اندازه گیری دستی مشخص می کنیم. از برابر قرار دادن مختصات آنان در تصویر واقعی و تبدیل یافته نقاط نظیر آنها در تصویر محدب برای هر قسمت هست معادله به وجود آمده و پارامترهای لازم از حل آن دستگاه محاسبه می شوند. تابع زیر وظیفه حل دستگاه را بر عهده دارد:

```
void CMdispMFCView::rs_solveEq(int n)
{
    int x,y,i;
    int max;
    double k,temp;

    for(x=0;x<n;x++) {
        max=x;
        for(y=x+1;y<n;y++)
            if (fabs(rs_tempEqu[x][y])>rs_tempEqu[x][max])
                max=y;

        for(i=0;i<n+1;i++) {
            temp=rs_tempEqu[i][x];
```



```

for(j=.;j<γ;j++) {
    for(i=.;i<γ;i++) {
        for(k=.;k<γ;k++) {
            for(l=.;l<γ;l++) {
                rs_tempEqu[.][l+k*γ]=∅;

rs_tempEqu[∅][l+k*γ]=rs_fieldPixelPos[i+k][j+l][.];

rs_tempEqu[γ][l+k*γ]=rs_fieldPixelPos[i+k][j+l][∅];

rs_tempEqu[γ][l+k*γ]=rs_fieldPixelPos[i+k][j+l][.] * rs_fieldPixel
Pos[i+k][j+l][∅];

rs_tempEqu[φ][l+k*γ]=rs_fieldRealPos[i+k][j+l][.];
            }
        }
        rs_solveEq(φ);

    for(c=.;c<φ;c++)

rs_fieldMapParm[i+j*γ][c]=rs_tempEqu[φ][c]/rs_tempEqu[c][c];

```

```

for(k=0;k<2;k++)
    for(l=0;l<2;l++) {
        rs_tempEqu[0][l+k*2]=1;
rs_tempEqu[1][l+k*2]=rs_fieldPixelPos[i+k][j+1][0];
rs_tempEqu[2][l+k*2]=rs_fieldPixelPos[i+k][j+1][1];
rs_tempEqu[3][l+k*2]=rs_fieldPixelPos[i+k][j+1][0]*rs_fieldPixelPos[i+
k][j+1][1]; rs_tempEqu[4][l+k*2]=rs_fieldRealPos[i+k][j+1][1];
    }
rs_solveEq(4);
for(c=0;c<4;c++)

rs_fieldMapParm[i+j*2][c+4]=rs_tempEqu[4][c]/rs_tempEqu[c][c];

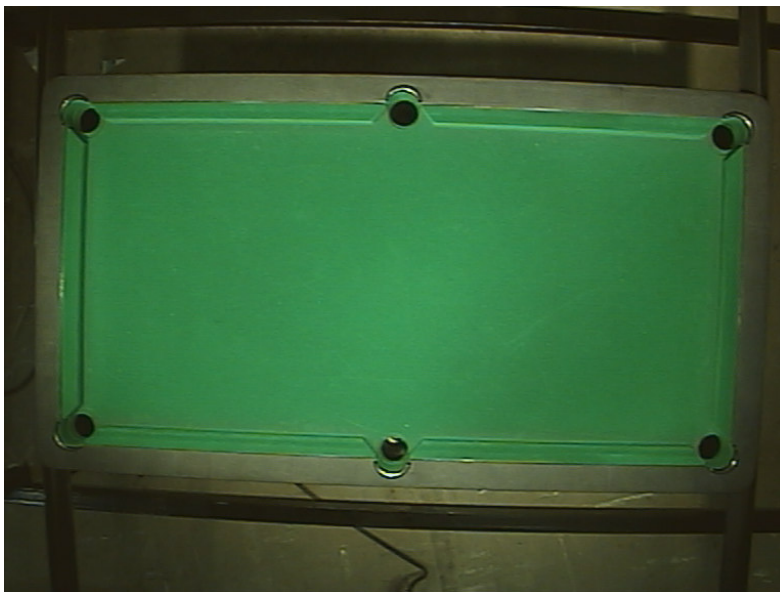
    }
}
}

```

۳-۱-۲ ذخیره تصویر پس زمینه

جهت تشخیص مکان توپها بر روی میز، ابتدا از حالتی که بر روی میز هیچ توپی وجود ندارد سه فریم تهیه می شود. میانگین این سه فریم را تصویر پس زمینه نامیده و جهت استفاده های بعدی ذخیره می کنیم. تصویر پس زمینه در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. دلیل اینکه از

میانگین سه فریم بجای یک فریم استفاده می شود وجود برخی نویز های مربوط به دوربین یا محیط است. همچنین برای بروز از تکرار نویزهای متناوب، فاصله زمانی بین این سه فریم را اعدادی انتخاب می کنیم که نسبت به هم اول باشند. تابع زیر وظیفه تهیه تصویر پس زمینه را بر عهده دارد:



شکل ۳-۳: تصویر پس زمینه

```
void CMdispMFCView::OnGrabback()
{
    MdigGrab(((CMdispMFCApp*)AfxGetApp())->MilDigitizer,
rs_MilImageProc[0]);
    Sleep(۱۰۰);
}
```

```
MdigGrab(((CMdispMFCApp*)AfxGetApp()->MilDigitizer,  
rs_MilImageProc[1]);
```

```
Sleep(33);
```

```
MdigGrab(((CMdispMFCApp*)AfxGetApp()->MilDigitizer,  
rs_MilImageProc[2]);
```

```
int x,y;
```

```
long int imageindex;
```

```
for(x=0;x<rs_sizeX;x++) {
```

```
    for(y=0;y<rs_sizeY;y++) {
```

```
        imageindex=x*3+y*3*rs_sizeX;
```

```
        rs_ImageBackAddr[imageindex]=(rs_ImageProcAddr[0][imageind  
ex]+rs_ImageProcAddr[1][imageindex]+rs_ImageProcAddr[2][imageind  
ex])/3;
```

```
        rs_ImageBackAddr[imageindex+1]=(rs_ImageProcAddr[0][imagei  
ndex+1]+rs_ImageProcAddr[1][imageindex+1]+rs_ImageProcAddr[2][im  
ageindex+1])/3;
```

```
        rs_ImageBackAddr[imageindex+2]=(rs_ImageProcAddr[0][imagei  
ndex+2]+rs_ImageProcAddr[1][imageindex+2]+rs_ImageProcAddr[2][im  
ageindex+2])/3;
```

```
}
```

```
}
```

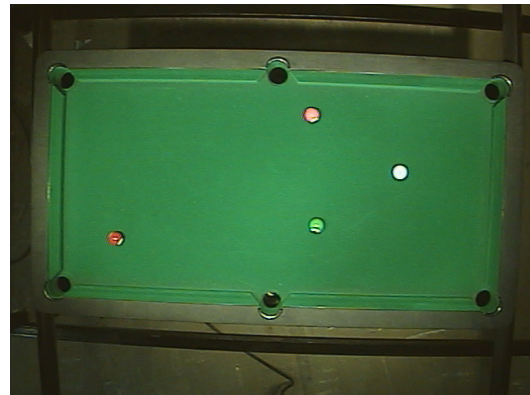
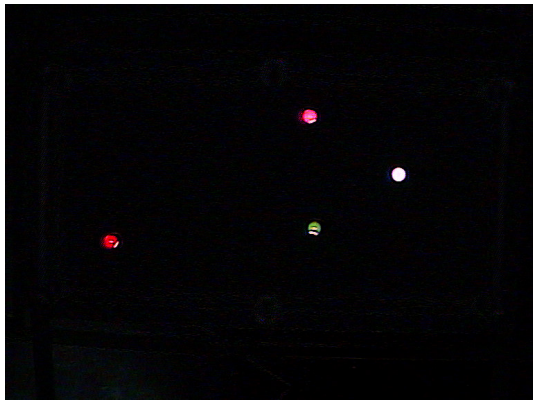
```
MbufSave("background.tif",rs_MilImageBack);
```

```
MbufCopy(rs_MilImageBack,((CMdispMFCDoc*)GetDocument()  
)->MilImage);
```

```
}
```

۳-۱-۳ تابع محاسبه اختلاف با پس زمینه

پس از ذخیره کردن تصویر پس زمینه، از صحنه ای که توپها بر روی میز قرار دارند یک فریم تهیه شده و اختلاف آن با تصویر پس زمینه به روش محاسبه اختلاف مقادیر R و G و B نقاط نظیر محاسبه می شود. شکل ۳-۴ الف تصویر توپها بر روی میز و شکل ۳-۴ ب حاصل تفاضل آن فریم را از تصویر پس زمینه نشان می دهد.



شکل ۳-۴: الف) تصویر توپها بر روی میز ب) اختلاف با تصویر پس زمینه

۳-۱-۴ تابع آستانه^۱

پس از محاسبه تصویر ۳-۴ ب ، یک تابع آستانه نیز بر روی آن اجرا می شود و در نهایت تصویری تک رنگ از لکه هایی متناظر با تویپهای روی میز خواهیم داشت. این تابع به سادگی نقاطی را که روشنایی آنان از حد خاصی بیشتر است با نقاط روشن و بقیه نقاط را با نقاط تیره مشخص می کند. تابع زیر انجام این عملیات را بر عهده دارد:

```
void CMdispMFCView::rs_backThreshold(unsigned char *srcbuf,  
unsigned char *trgbuf, int thresh)  
{  
    int imageindex;  
    int x,y;  
  
    for(x=0;x<rs_sizeX;x=x++) {  
        for(y=0;y<rs_sizeY;y++) {  
            imageindex=x+y*rs_sizeX;  
            double d;  
  
            d=abs(srcbuf[imageindex*۳]-  
rs_ImageBackAddr[imageindex*۳])+
```

^۱ Threshold Function


```

int px,py;
double x1,y1,x2,y2;

long int imageindex1,imageindex2;

imageindex1=0;
imageindex2=0;

for(x1=0;x1<rs_sizeX;x1=x1+.5) {
    for(y1=0;y1<rs_sizeY;y1=y1+.5) {

        rs_mapField(x1,y1,x2,y2,0);

        if (fabs(x2)>412.5) {
            x2=0;
        }
        if (fabs(y2)>212.5) {
            y2=0;
        }

        px=int((x2+412.5)*.8);
        py=int((y2+212.5)*.8);
    }
}

```

```

        imageindex\=int(x\)+int(y\)*rs_size;
        imageindexʔ=int(px)+int(py)*rs_size;

        trgbuf[imageindexʔ]=srcbuf[imageindex\];
    }
}
}

```

۳-۱-۵ تابع فیلتر میانه گیر^۱

جهت رفع نویزهای احتمالی از فیلتر میانه گیر بر روی تصویر استفاده می شود. در این فیلتر مقدار هر نقطه با مقدار میانه نقاط اطراف آن جایگزین می شود. تابع این فیلتر در زیر مشخص شده است:

```

void CMdispMFCView::rs_medFilter(unsigned char *buf,int parm)
{

    int x,y;

    long int index;
    for(x=۱;x<rs_size-۱;x++) {

```

^۱ Median Filter

```

for(y=1;y<rs_sizey-1;y++) {
    index=x+y*rs_sizex;

    int tempnums[9];

    tempnums[0]=buf[index];
    tempnums[1]=buf[index+1];
    tempnums[2]=buf[index-1];
    tempnums[3]=buf[index+rs_sizex];
    tempnums[4]=buf[index-rs_sizex];
    tempnums[5]=buf[index+rs_sizex-1];
    tempnums[6]=buf[index-rs_sizex+1];
    tempnums[7]=buf[index+rs_sizex+1];
    tempnums[8]=buf[index-rs_sizex-1];

    qsort( (void *)tempnums, 9, sizeof( char * ), compare

);

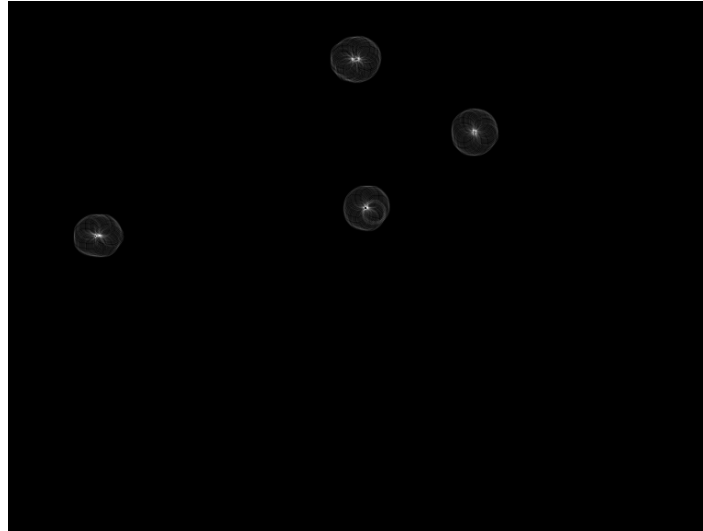
    buf[index]=tempnums[parm];

}
}
}

```

۳-۱-۶ توابع تشخیص لبه^۱ و مرکز توپ

پس از یافتن تصویر مسطح شده توپها و اجرای تابع میانه گیر بر روی آن، تصویر آماده است تا مکان مرکز توپها را در آن تشخیص دهیم. برای این کار از تابع Circular Hough Transform (CHT) استفاده شده است. پیش از یافتن مکان مرکز توپها با روش CHT لازم است که مکان لبه توپها تشخیص داده شود. برای این کار با پیمایش نقاط تصویر، هر نقطه ای را که مقدار آن با نقاط سمت چپ یا بالای آن متفاوت بود به عنوان لبه در نظر می گیریم. به محض اینکه نقطه ای به عنوان لبه یافت شد به مرکز آن نقطه و به مرکز شعاع توپ که مقداری معلوم است در تصویر خروجی دایره ای رسم می کنیم. به دلیل اعوجاج تصویر لبه توپها این کار را با دایره هایی به شعاع نزدیک نقاط لبه نیز تکرار می کنیم. در نهایت در تصویر خروجی نقاط پررنگ تر بیانگر وجود تویی به آن مرکز بر روی میز هستند. شکل ۳-۵ تصویر خروجی را نشان می دهد.



شکل ۳-۵: تصویر حاصل از CHT

قطعه برنامه زیر الگوریتم فوق را پیاده سازی می کند:

^۱ Edge Detection Function

```

for(x=·;x<rs_size;x++) {
    for(y=·;y<rs_size;y++) {
        imageindex=x+y*rs_size;
        int z;
        z=(abs(rs_MonoProcAddr[·][imageindex]-
rs_MonoProcAddr[·][imageindex-
\])+abs(rs_MonoProcAddr[·][imageindex]-rs_MonoProcAddr
[·][imageindex-rs_size]));

        if (z>·) {

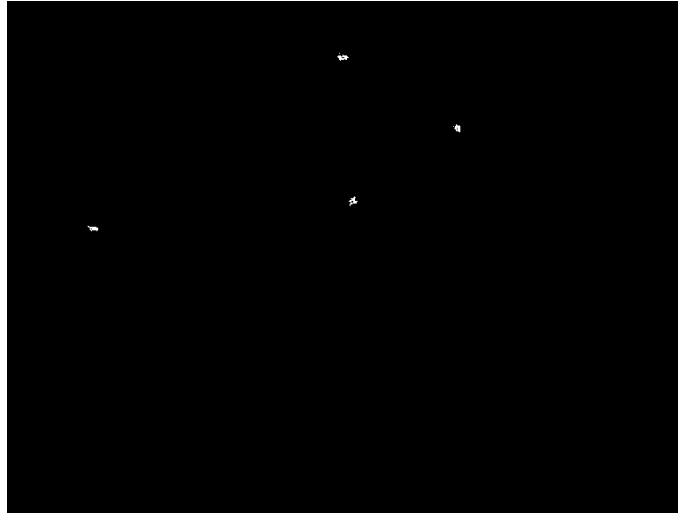
            double theta;
            int nx,ny,px,py;
            px=x;
            py=y;
            for(theta=·;theta<π*PI;theta=theta+·) {

                nx=int(px+·*·*cos(theta));
                ny=int(py+·*·*sin(theta));

                if (rs_inField(nx,ny)) {
                    rs_MonoProcAddr[\][nx+ny*rs_size] =
rs_MonoProcAddr[\][nx+ny*rs_size]+Δ;

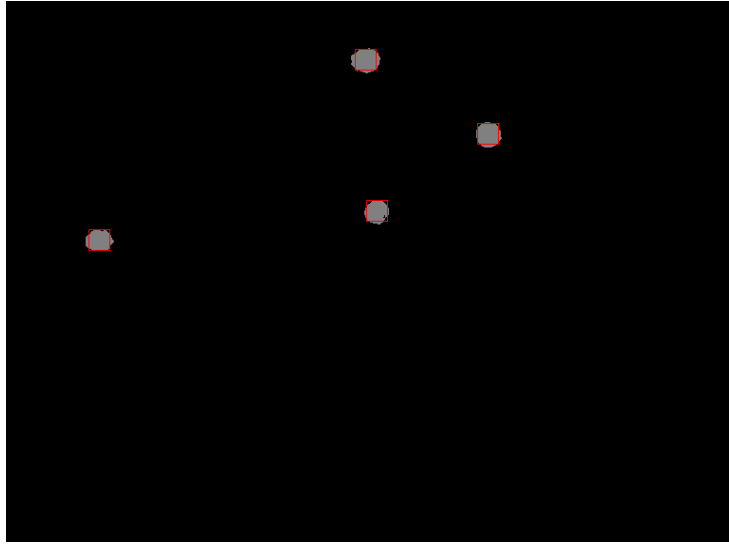
                    }
                nx=int(px+·*·*cos(theta));

```

شکل ۳-۶: حاصل تبدیلی CHT پس از اجرای تابع آستانه

پس از یافتن مکان قرارگیری توپها برای اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم، خروجی نهایی بر روی تصویر دورنگ در زیر نشان داده شده است. تکرار الگوریتم نشان می دهد که عملکرد آن تقریباً بدون نقص بوده و با خطایی در حد میلی متر مختصات مرکز توپها تشخیص داده می شود. شکل ۳-۷ این موضوع را نشان می دهد. مربع ها در این تصویر بیانگر دایره محیطی توپها هستند. چنانچه دیده می شود در برخی نقاط به دلیل وجود سایه توپ ها، اندازه آنها از مقدار واقعی بزرگتر دیده می شود.



شکل ۳-۷: تشخیص توپها

۳-۲ توابع لازم برای تشخیص رنگ توپها

۳-۲-۱ تابع تبدیل RGB به HSV

از آنجا که دوربین استفاده شده در سیستم رنگی PAL عمل می کند و خروجی آن در حالت RGB است ابتدا آن را به حالت HSV تبدیل می کنیم که تشخیص رنگ توپها ساده تر باشد. برای این کار از تابع زیر استفاده می کنیم:

```

void CMdispMFCView::rs_rgb2hsv(unsigned char r, unsigned char g,
unsigned char b, int *h, int *s, int *v)
{
    int mini, delta;
    int r1,g1,b1;
    r1=(int)r;
    g1=(int)g;
    b1=(int)b;
    *v = r1;
    mini = r1;
    if (g1 > *v) *v = g1;
    if (g1 < mini) mini = g1;
    if (b1 > *v) *v = b1;
    if (b1 < mini) mini = b1;
    delta = *v - mini;
    if ((*v == r1) || (delta == r1))
    {
        *h = r1;
        *s = r1;
    }
    else
    {
        *s = ((delta * 255) / *v);
        if (*v == r1)

```

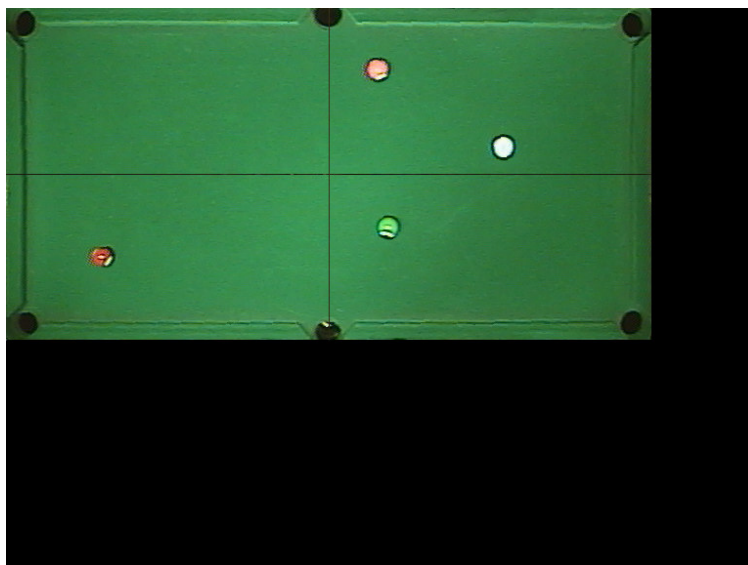
```

        *h = (int)((g\ - b\ ) * ٤٠ / delta);
if (*v == g\ )
        *h = ١٢٠ + (int)((b\ - r\ ) * ٤٠ / delta);
if (*v == b\ )
        *h = ٢٤٠ + (int)((r\ - g\ ) * ٤٠ / delta);
if (*h < ٠) *h = *h + ٣٦٠;
}
}

```

٣-٢-٢ شمارش نقاط رنگی

برای تشخیص رنگ توپ ها این بار یک فریم رنگی از میز تهیه شده و با الگوریتم گفته شده مسطح می شود. شکل ٣-٨ این تصویر را نشان می دهد.



شکل ۳-۸: تصویری رنگی پس از تسطیح

پس از این عمل، اشیائی که در محدوده میز نیستند به عنوان نویز حذف می شوند. به مرکز نقاط تشخیص داده شده در مرحله قبل و به شعاعی برابر شعاع توپها دایره ای در نظر می گیریم. حال برای تشخیص رنگ توپ، تمام نقاط داخل این دایره را پیمایش کرده و تعداد نقاط هر رنگ را در آرایه ای ذخیره می کنیم. برای تشخیص رنگ هر نقطه این دایره از یک جدول مرجع استفاده می کنیم. در این جدول حدود سه پارامتر H و S و V برای هر یک از رنگهای به کار رفته در توپها مشخص شده است. در پایان، مشخص خواهد شد که از هر رنگ چه تعداد نقطه در محدوده هر توپ وجود دارد. رنگ توپ برابر رنگی است که بیشترین تکرار را در این محدوده داشته است. از آنجا که رنگ سفید در همه توپها بکار رفته و ممکن است در برخی حالات خاص قرار گیری توپ بر روی میز تعداد نقاط سفید بیش از تعداد نقاط رنگ اصلی توپ دیده شود تعداد نقاط سفید را با ضریبی که به شکل تجربی به دست می آید تضعیف می کنیم، چنانکه در عین حال که رنگ توپهای رنگی در همه حالات قرارگیری به درستی تشخیص داده شود، توپ سفید همچنان به عنوان توپ سفید تشخیص داده شود. قطعه برنامه زیر این الگوریتم را پیاده سازی می کند:

```
for(i=۱;i<rs_objs[۰].n+۱;i++) {  
    int bx,by;  
    bx=int(rs_objs[i].x);  
    by=int(rs_objs[i].y);  
  
    if ((bx<۲۰) || (bx>۶۶۰))  
  
        continue;
```

```

if ((by<۲۰) || (by>۳۴۰))
    continue;
int np=۰;
int crs[۳][۲۰];
int cr۳[COLORMAX];

int mi,mj;

for(mi=۰;mi<rs_colorsNum;mi++) {
    cr۳[mi]=۰;
}

for(mi=۰;mi<۳;mi++) {
    for(mj=۰;mj<۲۰;mj++) {
        crs[mi][mj]=۰;
    }
}

for(x=bx-۲۰;x<bx+۲۰;x++) {
    for(y=by-۲۰;y<by+۲۰;y++) {
        imageindex=x+y*rs_sizeX;
        if (sqrt((x-bx)*(x-bx)+(y-by)*(y-by))<۰.۸*۱۵۰) {

```

```

        np++;

        int h,s,v;

        rs_rgb2hsv(rs_ImageProcAddr[\][imageindex*3+2],
                  rs_ImageProcAddr[\][imageindex*3+1],

        rs_ImageProcAddr[\][imageindex*3],&h,&s,&v);

        for(mi=0;mi<rs_colorsNum;mi++) {
        if ((h>=rs_colors[mi][0]) && (h<=rs_colors[mi][2]) &&
        (s>=rs_colors[mi][1]) && (s<=rs_colors[mi][4])
        &&(v>=rs_colors[mi][3]) && (v<=rs_colors[mi][5]))
        {
                crv[mi]++;
        }

        }

        crs[0][h/3]++;
        crs[1][s/3]++;
        crs[2][v/3]++;

```

}
}
}

پس از تاثیر ضریب مربوط به رنگ سفید، در این مرحله کافیسیت در آرایه رنگی هر توپ عنصری را که دارای بیشترین مقدار است به عنوان رنگ توپ در نظر بگیریم.

۳-۲-۳ حذف نویز

در پایان، پس از تشخیص رنگ توپها جهت به حد اقل رساندن خطاهای احتمالی، توپهایی را که رنگ سبز دارند به عنوان لکه هایی از میز در نظر گرفته و حذف می کنیم. همچنین اگر در یک توپ کمتر از شش نقطه با رنگ مجاز وجود داشته باشد نیز آن را به عنوان توپ شناسایی نمی کنیم.

۴- الگوریتم‌های تصمیم‌گیری

هنگامی که صحبت از بازی بلیارد می شود شاید نخستین تصویری که به خاطر می آوریم لحظه ای است که بازیکن روی یک ضربه تمرکز کرده و با ضربه ای در حد بالاترین دقت ممکن آدمی به توپ وارد می کند. گرچه این مرحله نقش مهمی در بازی بلیارد دارد، ولی داستان ضربه پیش از این مرحله آغاز شده است: هنگامی که بازیکن در اطراف میز حرکت می کند و با سنجیدن موقعیت توپها بر روی میز ، بهترین ضربه ممکن را بر اساس استراتژی خود – که ناشی از خبرگی و دانش قبلی است- انتخاب می کند. انتخاب ضربه مناسب نه تنها امکان کسب امتیاز در نوبت جاری را افزایش می دهد، بلکه سبب می شود در نوبتهای بعدی توپها در موقعیت مناسبتری برای بازیکن و یا در موقعیت دشوارتری برای حریف قرار گیرند. به عبارت دیگر می توان گفت در برتری یک بازیکن نه تنها دقت ضربه، که انتخاب مناسب ضربه هم نقش انکار ناپذیری دارد.

با توجه به آنچه گفته شد به اهمیت روشی برای انتخاب ضربه پی می بریم. در کل این پایان نامه هر جا از واژه "ضربه" در نقش اسم استفاده شده است منظور یک زوج مشخص و معین شامل توپ هدف و سبد هدف است که بازیکن یا ربات تصمیم دارد توپ هدف را درون سبد هدف قرار دهد. یکی از مهمترین بخشهای نرم افزاری ربات، بخش **Fuzzy Shot Selector** است که از روشهای فازی برای تشخیص بهترین ضربه ممکن استفاده می کند. این بخش مشخص می کند که کدام توپ بایست در کدام سبد قرار گیرد و برای تشخیص این موضوع از روشهای فازی استفاده می کند، چرا که در بازیهای واقعی نیز به نظر می رسد این مرحله با بکارگیری منطق نادقیق انجام می شود. برعکس در مرحله ضربه زدن به توپ از نهایت دقت استفاده می شود و روش های فازی در آن قسمت کارایی نخواهند داشت. چنان که خواهیم دید، **Roboshark** نیز در آن مرحله از روشهای

هندسی دقیق استفاده می کند. در زیر به شرح الگوریتم انتخاب بهترین ضربه می پردازیم و پس از آن الگوریتم محاسبه پارامترهای ضربه را بازگو می کنیم.

۴-۱ محاسبه پارامترها

پیش از بیان پارامترها، لازم است برخی مفاهیم را از فصل ۱ به طور مختصر یادآوری کنیم:

توپ سفید^۱: توپی که لازم است ضربه چوب بازی^۲ به آن وارد شود. لازم است که پس از ضربه زدن، این توپ حد اقل با یک توپ دیگر برخورد داشته باشد.

توپ هدف^۳: توپی است که بازیکن قصد دارد آنرا درون سبد جای دهد. لازم است که توپ سفید مستقیماً به این توپ برخورد کرده و آنرا به درون سبد^۴ هدایت کند.

سبد: هر یک از مکانهای اطراف میز که توپهای هدف در آنها قرار می گیرند.

پس از بررسی بازی های انجام شده توسط بازیکنان خبره و طی پرسش و پاسخ های انجام شده با آنان، پارامترهای مؤثری که ایشان بر اساس آنان تصمیم گیری می کنند مشخص شد. نتیجه تحقیقات این بود که پارامترهای زیر ممکن است در انتخاب ضربه تاثیر داشته باشند:

فاصله توپ هدف از سبد هدف

^۱ Cue Ball

^۲ Cue

^۳ Target Ball

^۴ Pocket

فاصله توپ سفید تا توپ هدف

زاویه بین خط واصل توپ سفید تا توپ هدف با خط واصل توپ هدف تا سبد هدف

زاویه بین خط واصل توپ هدف تا سبد هدف با خط عمود بر طول میز

امتیاز توپ هدف

رنگ توپ هدف (مستقل از امتیاز آن)

همچنین مطالعات بیشتر نشان داد که از میان پارامترهای فوق سه پارامتر نخست پارامترهای عمومی تر و مهمتری هستند، چرا که مثلاً امتیاز توپ هدف در بازی های مختلف، متفاوت است و یا ممکن است اصولاً بین توپها فرقی نباشد. همچنین رنگ توپ تنها بر روی بازیکنان اثر روانی دارد، چنانکه ممکن است در شرایط با اختلاف جزئی، توپی را که رنگ درخشان تری دارد به توپ ساده تری که رنگ مات دارد، ترجیح دهند. با این حساب، در مدلی که برای یافتن بهترین ضربه استفاده شده است تنها سه پارامتر به شرح زیر دخالت دارند:

d_1 : فاصله توپ سفید تا توپ هدف

d_2 : فاصله توپ هدف تا سبد هدف

θ : زاویه بین راستای دو فاصله فوق

پیش از توضیح درباره چگونگی تأثیر این پارامترها در مدل بکار گرفته شده برای انتخاب بهترین ضربه، مروری خواهیم داشت بر چگونگی یافتن این پارامترها از روی تصویر ورودی این بخش.

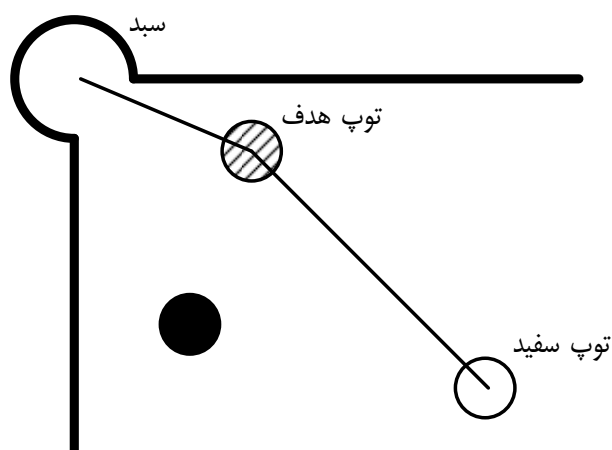
چنانکه در فصل پیش دیدیم، وظیفه بخش بینایی ربات یافتن مکان توپها بر روی میز است. به طور خلاصه، بخش بینایی ربات تصویری را که از طریق دوربین بالای میز و به واسطه

کارت frame grabber دریافت کرده است پردازش کرده و مکان و نوع توپها را در یک آرایه سه بعدی (طول ، عرض و نوع توپ) باز می گرداند. بخش پیش پردازش انتخاب ضربه، آرایه فوق را به عنوان وودی گرفته و پارامترهای لازم برای ماژول اصلی انتخاب ضربه را از روی آن پیدا می کند.

در حالت کلی تعداد ضربه های ممکن برابر $p*(b-1)$ است که در آن n برابر تعداد کل توپهای روی میز و $n-1$ تعداد توپها بجز توپ سفید است. P تعداد سبدهای اطراف میز و اغلب برابر ۶ است. برخی از این $p*(b-1)$ ضربه، ضربه های ناممکن هستند، چنانکه به دلایل هندسی امکان نتیجه بخش بودن آن ها برابر صفر است.

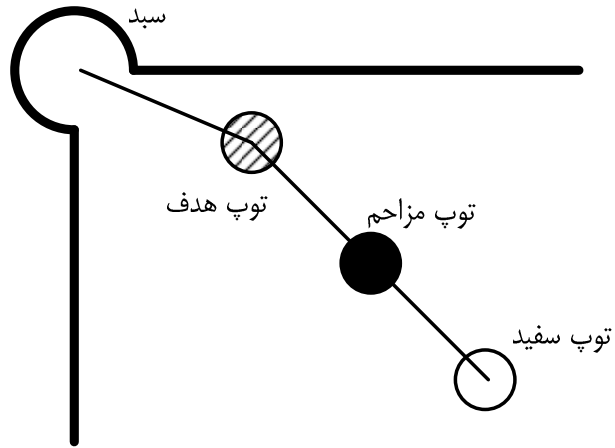
شایان ذکر است که در این پروژه تنها ضربات مستقیم^۱ بررسی می شوند، یعنی ضرباتی که در آن توپ سفید مستقیماً به توپ هدف برخورد کرده و توپ هدف مستقیماً درون سبد قرار می گیرد.

حالات ناممکن شامل حالاتی است که یکی از دو خط d_1 و d_2 توسط یک توپ دیگر (جز توپ سفید و توپ هدف) قطع می شود و یا شرط $90 < \theta < 270$ برای آن صادق نیست. شکل های زیر یک ضربه ممکن و چند ضربه ناممکن را نشان می دهند:

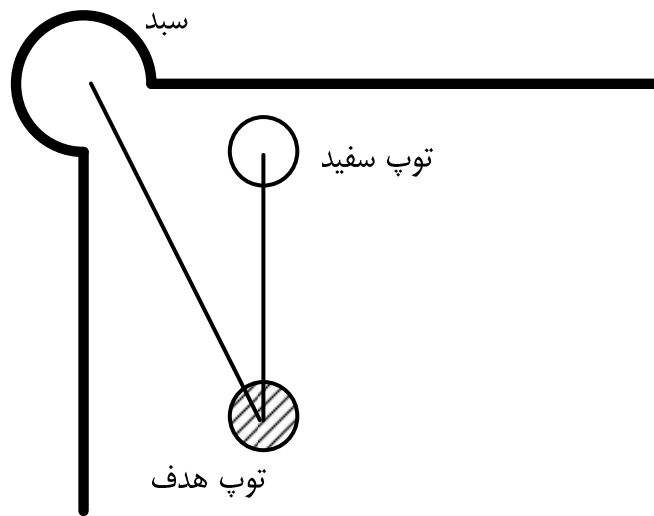


^۱ Direct Shots

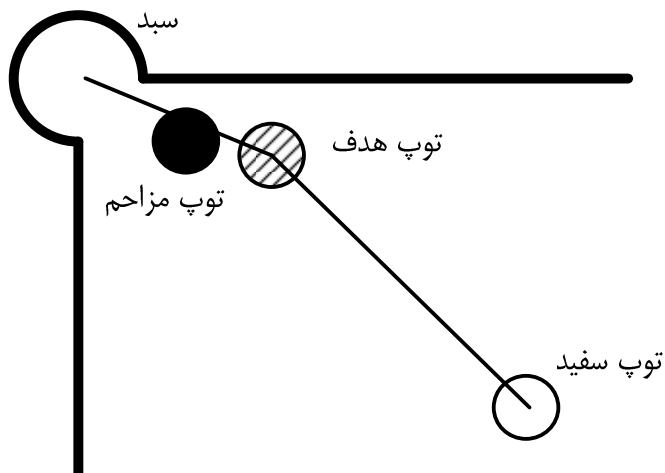
شکل ۴-۱: نمونه ای از یک ضربه ممکن



شکل ۴-۲: نمونه ای از یک ضربه ناممکن (به دلایل هندسی)

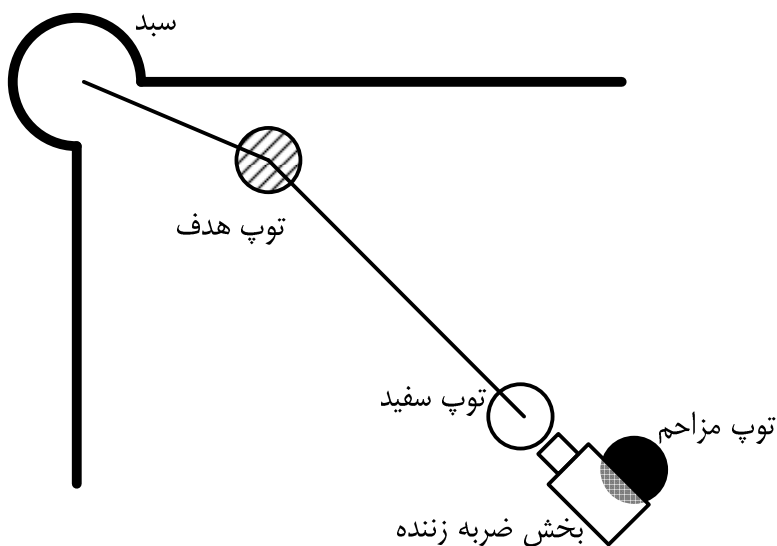


شکل ۴-۳: نمونه دیگری از یک ضربه ناممکن (به دلایل هندسی)

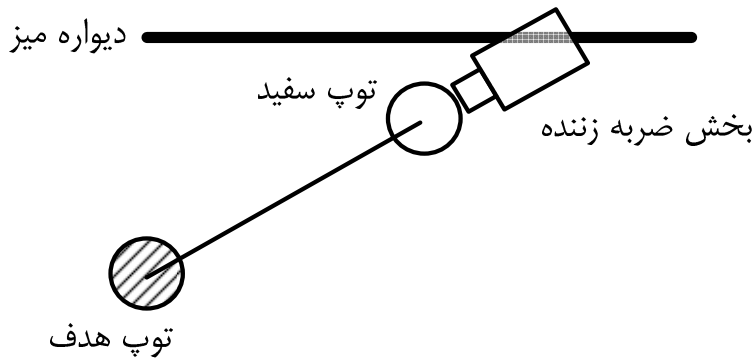


شکل ۴-۴: نمونه دیگری از یک ضربه ناممکن (به دلایل هندسی)

علاوه بر اینها، ممکن است ضربه ای به این دلیل ناممکن باشد که امکان قرار گرفتن end effector در راستای لازم وجود نداشته باشد. دلیل این امر قرار گرفتن توپهای دیگر در فاصله بسیار کم از توپ سفید است. چنانکه end effector نتواند بدون لمس کردن آنان در مکان مناسب قرار گیرد، شکل های زیر این حالت را نشان می دهند:

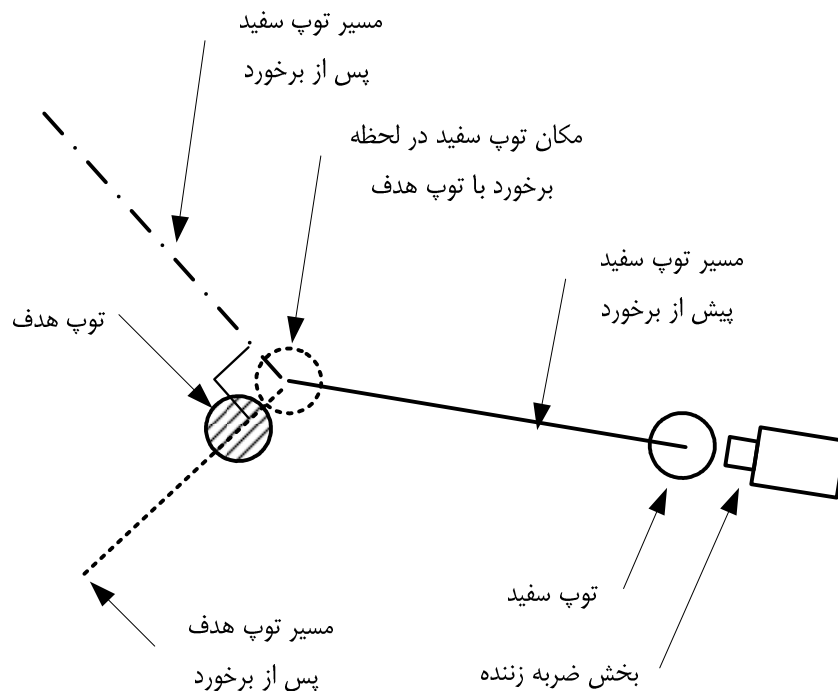


شکل ۴-۵: نمونه ای از ضربه ناممکن (به دلایل فیزیکی)



شکل ۴-۶: نمونه ای از ضربه نا ممکن (به دلایل فیزیکی)

الگوریتم انتخاب بهترین ضربه وظیفه دارد ابتدا ممکن بودن یک ضربه را بررسی کند و سپس در صورت امکان ثمربخش بودن آن ضربه، عددی به عنوان احتمال قرار گرفتن توپ هدف در سبد به آن ضربه نظیر کنند. برای تعیین ممکن بودن یک ضربه از روشهای کلاسیک و بر پایه اصول هندسی استفاده می شود ولی برای تعیین میزان امکان موفق بودن ضربه از یک مدل فازی که با استخراج خبرگی بازیکنان حرفه ای حاصل شده استفاده می شود. پیش از تعریف پارامترهای میانی و اصلی، مرور مختصری خواهیم داشت بر قواعد فیزیکی / هندسی حاکم بر بازی بیلیارد. چنانچه در مدل استفاده شده توپها را در حکم نقطه در نظر بگیریم با برخورد توپ سفید به توپهای دیگر، توپ هدف تنها در یک راستا و راستای حرکت توپ سفید حرکت خواهد کرد، حال آنکه در محاسبات مربوط به بازی نمی توان از حجم توپها صرف نظر کرد. شکل زیر مسیر حرکت توپ سفید و توپ هدف را پس از برخورد نشان می دهد:



شکل ۴-۷: مسیر حرکت توپها پس از ضربه

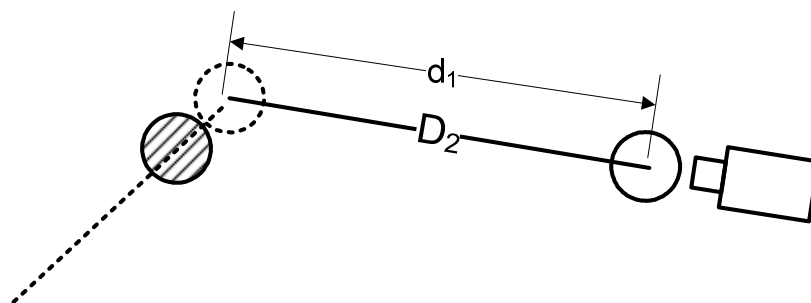
مسیر توپ سفید تنها در حالتی مطابق شکل فوق است که تصویر مؤلفه سرعت دورانی آن در صفحه موازی با میز بازی صفر باشد. چنان که می دانیم، حرکت توپها شامل دو حرکت مستقل است: نخست حرکت خطی مرکز ثقل توپ بر روی صفحه موازی با سطح میز ، و دیگری حرکت دورانی توپ که می تواند با هر شدت و هر راستایی باشد. در صورتی که توپ هنگام حرکت دارای مؤلفه سرعت دورانی هم باشد پس از برخورد با یک جسم در راستائی متفاوت با آنچه که در شکل پیش نشان داده شده حرکت می کند. از این ویژگی می توان جهت کنترل راستای حرکت توپ سفید پس از برخورد و در نتیجه کنترل تقریبی مکان توقف توپ سفید برای تأثیر در نوبت بعد بازی استفاده کرد. تأثیر سرعت دورانی توپ را در رفتار پس از ضربه می توان چنین توجیه کرد که نقاط روی محیط دایره عظیمه افقی توپ علاوه بر سرعت خطی ناشی از حرکت مرکز ثقل توپ ، یک مؤلفه سرعت خطی دیگر ناشی از سرعت دورانی و شعاع توپ نیز دارند. پس از برخورد توپ به سطح ، با توجه به جنس توپ و سطح و میزان لغزندگی یا چسبندگی آنها این مؤلفه مقداری کاهش

می یابد. این شتاب کند شونده مؤلفه سرعت فوق باعث وارد آمدن نیرویی متناسب با جرم توپ و شتاب گفته شده از سوی توپ به سطح می شود و سطح نیز متقابلاً نیرویی در خلاف جهت وارد می کند. این نیرو بر راستای حرکت عادی توپ پس از برخورد تأثیر گذاشته و سبب انحراف مسیر حرکت توپ از حالت عادی می شود.

به سادگی می توان دریافت که در صورتی که مؤلفه افقی سرعت دورانی توپ صفر باشد، راستای توپ پس از برخورد تغییر نخواهد کرد. مولفه عمودی سرعت دورانی توپ به شکل مشابه در سرعت توپ پس از برخورد، و نه راستای آن مؤثر است.

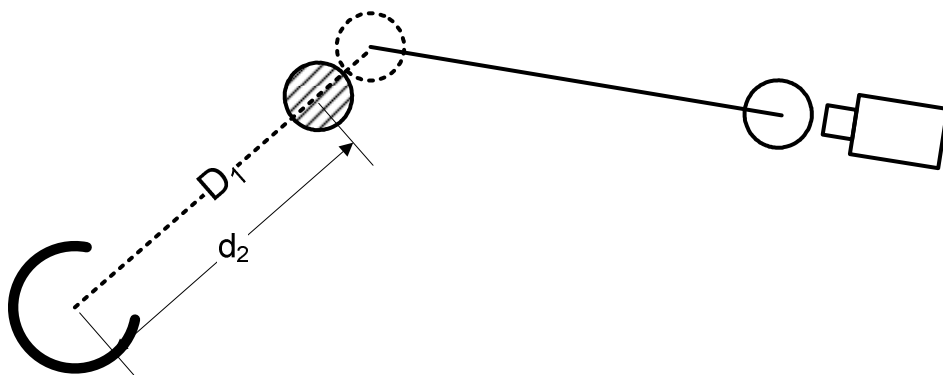
گرچه ربات ساخته شده قادر به وارد ساختن انواع ضربه ها با سرعت دورانی های قابل تنظیم است، ولی از آنجا که در محاسبه ضربات مسیر توپ سفید پس از برخورد در محاسبات گنجانده نشده و تنها مسیر حرکت توپ هدف پس از برخورد دارای اهمیت فرض شده از محاسبه نوع ضربه صرفنظر می کنیم. بدیهی است که امکان پیاده سازی چنین ضربه های پیچیده به سادگی و با تغییراتی در برنامه ممکن است.

چنانکه دیدیم، توپ سفید با برخورد به نقطه ای از توپ هدف منجر به حرکت آن می شود. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۴-۸: معرفی پارامتر d_1

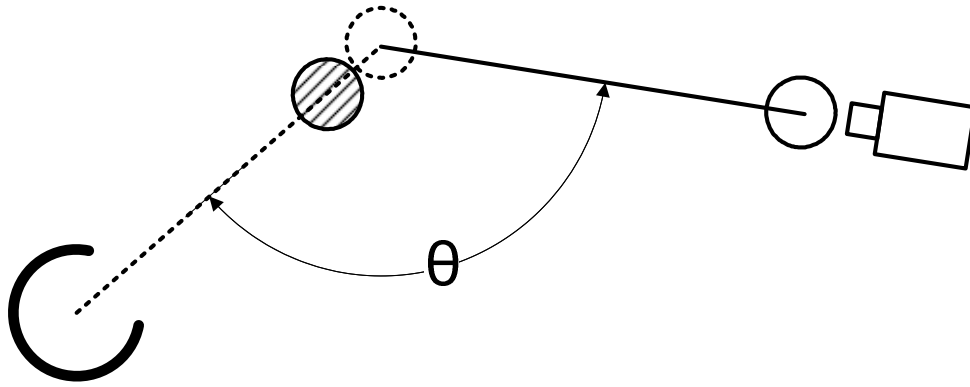
با کمی تغییر و به دلایلی که بعداً خواهیم دید، d_1 را فاصله توپ سفید تا مکانی که توپ سفید در لحظه برخورد قرار دارد تعریف می کنیم. مکانی را که توپ سفید در لحظه برخورد با توپ هدف را توپ سفید مجازی^۱ می نامیم. چنانکه از پیش به خاطر داریم، دیگر پارامتر موثر در مدل تشخیص بهترین ضربه، فاصله توپ هدف از سبد بود. این پارامتر را d_2 می نامیم. شکل زیر پارامتر d_2 را برای ضربه ای فرضی نشان می دهد:



شکل ۴-۹: معرفی پارامتر d_2

دیگر پارامتر موثر در مدل انتخاب بهترین ضربه θ است که بنا به تعریف زاویه بین خط D_1 و D_2 است و در شکل زیر نشان داده شده است:

^۱ Virtual Cue Ball



شکل ۴-۱۰: معرفی پارامتر θ

۴-۲ محاسبه راستای ضربه

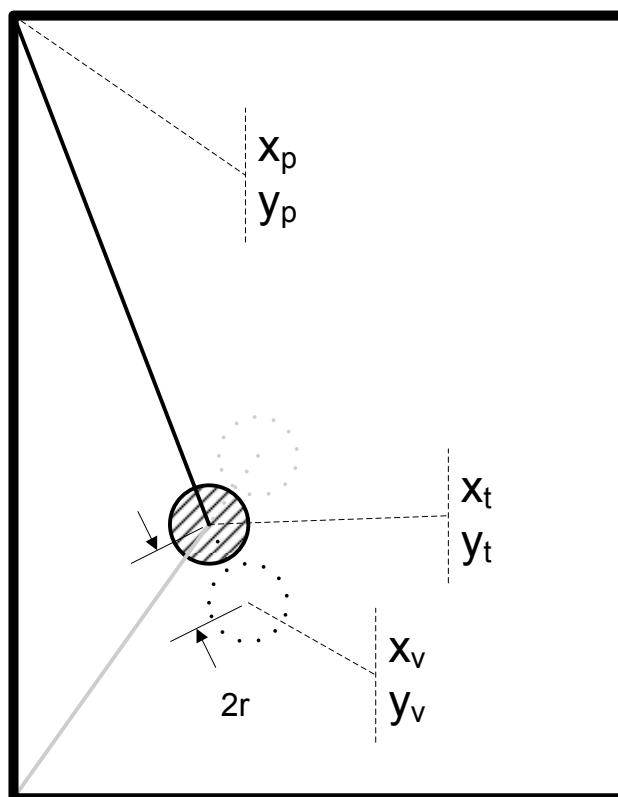
با توجه به راستای حرکت توپ هدف پس از برخورد توپ سفید با آن، برای محاسبه راستای یک ضربه بایست به شکل زیر عمل کنیم:

برای قرار دادن توپ هدف t در سبب p ، خطی از مرکز t به مرکز p رسم می‌کنیم. این خط راستایی است که توپ هدف باید بر روی آن حرکت کند. برای چنین رفتاری، مرکز توپ سفید مجازی بایستی در امتداد این خط باشد، با توجه به دانستن شعاع توپها می‌توان به سادگی مکان توپ سفید مجازی را به دست آورد. از اتصال مرکز توپ سفید مجازی به توپ سفید خطی حاصل می‌شود که مشخص کننده راستای ضربه ای است که cue باید به توپ سفید وارد کند.

چنان که گفتیم، الگوریتم به کار رفته با استخراج پارامترهایی از روی تصویر ورودی ابتدا امکان پذیر بودن هر یک از $p^*(b-1)$ ضربه را بررسی می‌کند و سپس با استفاده از سه پارامتر d_1 و d_2 و θ ، امکان موفق بودن ضربه بدست می‌آید. همچنین برای یافتن سه پارامتر فوق نیاز به یافتن برخی پارامترهای میانی است که توابع مختلفی وظیفه یافتن آنها را برعهده دارند. در زیر به شرح روش یافتن این پارامترها و توابع مربوطه می‌پردازیم. شایان ذکر است که در این مرحله تنها ورودی برنامه برداری شامل مختصات و رنگ یا شماره هر توپ بر روی میز است.

۱-۲-۴ مختصات توپ سفید مجازی

با دانستن مختصات مرکز هر توپ هدف (X_t, Y_t) و محل هر سبد (X_p, Y_p) می توان محل توپ سفید مجازی برای هر زوج توپ و سبد را محاسبه کرد. از روی شکل زیر و با توجه به تعریف توپ سفید و مجازی خواهیم داشت:



شکل ۴-۱۱: محاسبه مکان توپ سفید مجازی

با توجه به شکل فوق و دانستن اینکه دو خط واصل سبد به توپ هدف و توپ سفید مجازی در یک راستا قرار دارند می توان نوشت:

$$\frac{x_v - x_p}{x_t - x_p} = \frac{y_v - y_p}{y_t - y_p}$$

و نیز با توجه به اینکه توپ سفید مجازی مماس بر توپ هدف است و فاصله بین دو مرکز

آنها برابر ۲r است می توان نوشت:

$$4r^2 = (x_v - x_t)^2 + (y_v - y_t)^2$$

از رابطه نخست نتیجه می شود:

$$x_v = \frac{(x_t - x_p)(y_v - y_h)}{y_t - y_p} + x_p$$

و یا به عبارت دیگر:

$$x_v = \frac{x_t - x_p}{y_t - y_p} y_v - \frac{(x_t - x_p)y_h}{y_t - y_p} + x_p$$

برای سادگی کار ضرایب رابطه حقی فوق را A و B می نامیم، چنانکه رابطه فوق به شکل

زیر ساده شود:

$$x_v = A.y_v + B$$

که در آن A و B مقادیری معلوم هستند. با توجه به این جایگزینی برای x_v می توان رابطه دوم را به شرح زیر نوشت:

$$4r^2 = (Ay_v + B - x_t)^2 + (y_v - y_t)^2$$

و مجددا تعریف می کنیم:

$$C = B - x_t$$

و از بسط آخرین رابطه خواهیم داشت:

$$A^2 y_v^2 + C^2 + 2ACy_v + y_v^2 + y_t^2 - 2y_v y_t - 4r^2 = 0$$

و پس از مرتب کردن آن:

$$y_v^2 (A^2 + 1) + y_v (2AC - 2y_t) + C^2 + y_t^2 - 4r^2 = 0$$

که با تعریف متغیرهای جدید می توان آنرا به شکل خلاصه زیر نوشت:

$$D \cdot y_v^2 + E \cdot y_v + F = 0$$

از حل معادله درجه ۲ فوق خواهیم داشت:

$$\Delta = E^2 - 4DF$$

$$y_{v_1} = \frac{-E + \sqrt{\Delta}}{2D}$$

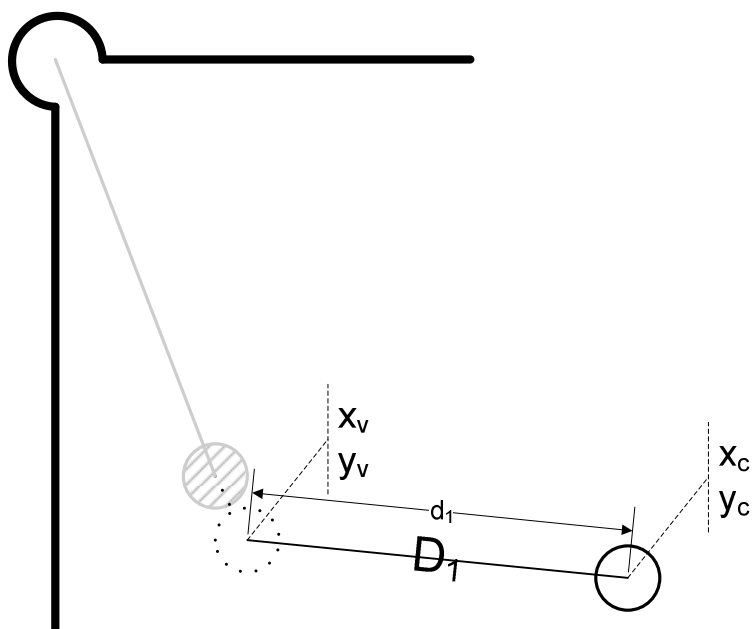
$$y_{v_2} = \frac{-E - \sqrt{\Delta}}{2D}$$

و:

$$x_v = Ay_v + B$$

وجود داشتن دو جواب برای مکان توپ سفید مجازی به این دلیل است که در امتداد خط
واصل سبد به توپ هدف، دو نقطه با فاصله ۲۲ از مرکز توپ هدف وجود دارد. شکل زیر بیانگر این
نکته است:

با دانستن مختصات توپ سفید در لحظه جاری (x_c, y_c) و با توجه به مختصات توپ سفید مجازی برای هر زوج توپ-سبد (x_v, y_v) که در بالا روش یافتن آن توضیح داده شد، فاصله توپ سفید تا هر توپ سفید مجازی به سادگی از روی رابطه زیر مشخص می شود:



شکل ۴-۱۳: فاصله توپ سفید تا توپ سفید مجازی

$$d_1 = \sqrt{(x_v - x_c)^2 + (y_v - y_c)^2}$$

با توجه به یکتا بودن مکان توپ سفید، برای نگهداری فاصله فوق برای هر ضربه ممکن، احتیاج به یک بردار با $p^*(b-1)$ عنصر خواهیم داشت. تابع زیر وظیفه محاسبه فواصل فوق را بر عهده دارد:

```

float computeppdistance ( int x۱ , int y۱ , int x۲ , int y۲ )
{
float a,b,r;
double c;

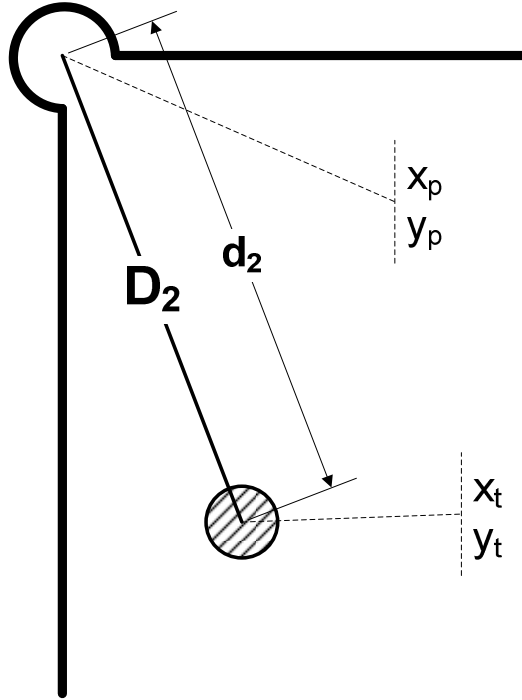
a = (float) x۱ - (float) x۲;
b = (float) y۱ - (float) y۲;
c = (double) a * a + (double) b * b;
r = (float) sqrt(c);
return r;
}

```

۳-۲-۴ فاصله توپ تا سبد

با دانستن مختصات هر توپ هدف (x_t, y_t) و نیز مختصات هر سبد (x_p, y_p) ، فاصله هر

توپ تا هر سبد به سادگی محاسبه می شود:



شکل ۴-۱۴ : فاصله توپ هدف تا سبد

$$d_2 = \sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2}$$

برای نگهداری فاصله هر یک از $b-1$ توپ تا هر یک از p سبد احتیاج به یک بردار $b-p^*$ (۱) عنصری خواهد بود. تابع زیر محاسبات لازم برای یافتن فاصله هر توپ تا هر سبد را انجام می

دهد:

float computeppdistance (int x۱ , int y۱ , int x۲ , int y۲)

```
{
float a,b,r;
double c;
```

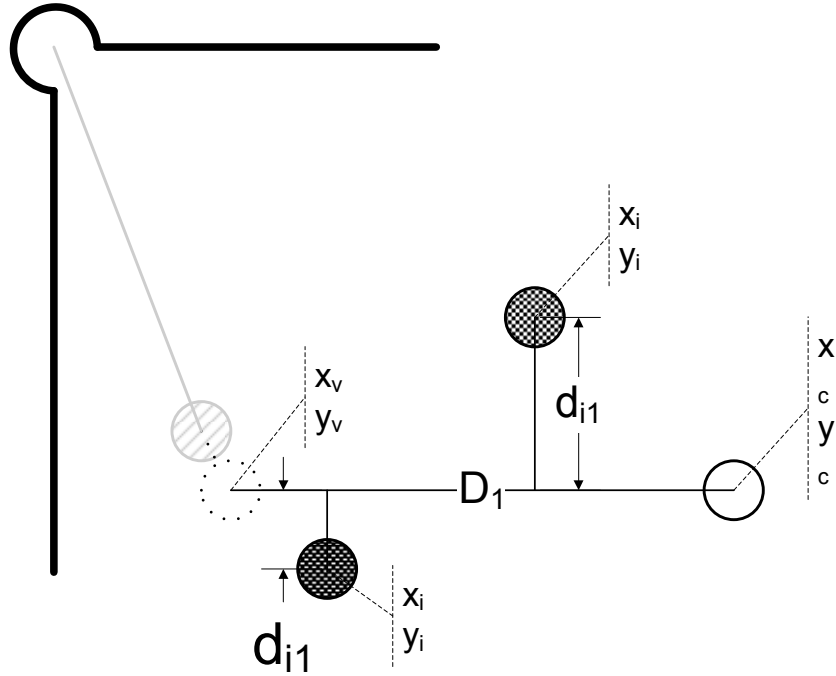
```

a = (float) x۱ - (float) x۲;
b = (float) y۱ - (float) y۲;
c = (double) a * a + (double) b * b;
r = (float) sqrt(c);
return r;
}

```

۴-۲-۴ فاصله توپ تا خط D_1

چنان که به خاطر داریم برای هر زوج توپ-سبد، خط D_1 خطی است که مرکز توپ سفید را به مرکز توپ مجازی متناظر با آن زوج توپ-سبد وصل می کند. برای بررسی امکان پذیر بودن ضربه بایستی مطمئن شویم که توپ دیگری بر سر مسیر توپ سفید تا توپ مجازی مربوطه قرار ندارد و به عبادت دیگر فاصله هر توپ تا خط D_1 بیشتر از حدی معین (مثلا قطر توپ) است. فاصله هر توپ (x_i, y_i) از خط D_1 متناظر با هر توپ هدف (x_p, y_p) از روی رابطه زیر محاسبه می شود:



شکل ۴-۱۵: فاصله توپها از خط d_{i1}

$$d_{i1} = \frac{|(x_c - x_v)(y_v - y_i) - (x_v - x_i)(y_c - y_v)|}{\sqrt{(x_c - x_v)^2 + (y_c - y_v)^2}}$$

برای ذخیره سازی فاصله $b-2$ توپ (همه توپها بجز توپ سفید و توپ هدف) از خط واصل

هر یک از $b-1$ توپ هدف ممکن تا هر یک از p سبب اطراف میز، احتیاج به یک بردار $b-p^*$

($b-2$)* $(b-1)$ عنصری خواهیم داشت. تابع زیر فاصله هر توپ تا هر خط D_1 را محاسبه می کند:

float computepldistance (int xp , int yp , float x1 , float y1 , float x2 ,

float y2)

{

float xs , ys , xb , yb ; //X_small , X_big

```
float top,bottom,left,right;
```

```
long int a , b;
```

```
double c;
```

```
float r;
```

```
if (x\ < xʔ)
```

```
{
```

```
xs = x\;
```

```
xb = xʔ;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
xs = xʔ;
```

```
xb = x\;
```

```
}
```

```
if (y\ < yʔ)
```

```
{
```

```
ys = y\;
```

```
yb = yʔ;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
ys = yʔ;
```

```
yb = y\;
```

```
}
```

```

top = ys - radius;
bottom = yb + radius;
right = xb + radius;
left = xs - radius;

if ( ( xp<right) && (xp>left) && (yp<bottom) && (yp>top) )
{
a = (long int) (x1 - x2) * (y2 - yp) - (long int) (x2 - xp) * (y1 - y2);
b = (long int) (x1 - x2) * (x1 - x2) + (long int) (y1 - y2) * (y1 - y2);
c = (double) labs(a) / sqrt(b);
}

else
c = -1;

r = (float) c;
return r;
}

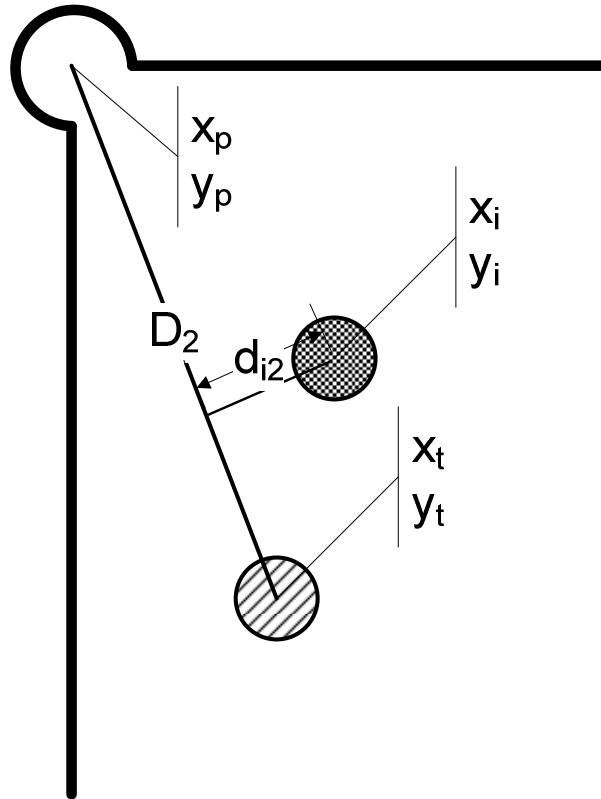
```

مشخص است که اگر یکی از فواصل فوق کمتر از قطر توپ باشد، ضربه متناظر با خط D_1 امکان پذیر نخواهد بود.

۵-۲-۴ فاصله توپ تا خط D_2

مشابه آنچه در مورد قبل گفته شد برای یافتن فاصله هر توپ با مختصات (X_i, Y_i) از خط

D_2 (خط واصل توپ هدف (X_t, Y_t) تا سبد (X_p, Y_p)) می توان از رابطه زیر استفاده کرد:



شکل ۴-۱۶: فاصله توپها از خط D_2

$$d_{i2} = \frac{|(x_t - x_p)(y_p - y_i) - (x_p - x_i)(y_t - y_p)|}{\sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2}}$$

ذخیره سازی این فواصل برای b توپ موجود بر روی میز و p سبد ، احتیاج به یک بردار

$p*(b-1)*(b-2)$ عنصری خواهد داشت. تابع زیر مقدار فاصله فوق را برای همه توپها و همه

سبدها محاسبه می کند:

```
float xs , ys , xb , yb ; //X_small , X_big
```

```
float top,bottom,left,right;
```

```
long int a , b;
```

```
double c;
```

```
float r;
```

```
if (x $\lambda$  < x $\Upsilon$ )
```

```
{
```

```
  xs = x $\lambda$ ;
```

```
  xb = x $\Upsilon$ ;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
  xs = x $\Upsilon$ ;
```

```
  xb = x $\lambda$ ;
```

```
}
```

```
if (y $\lambda$  < y $\Upsilon$ )
```

```
{
```

```
  ys = y $\lambda$ ;
```

```
  yb = y $\Upsilon$ ;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
  ys = y $\Upsilon$ ;
```

```
  yb = y $\lambda$ ;
```

```
}
```

```

top = ys - radius;
bottom = yb + radius;
right = xb + radius;
left = xs - radius;

if ( (xp < right) && (xp > left) && (yp < bottom) && (yp > top) )
{
    a = (long int) (x1 - x2) * (y2 - yp) - (long int) (x2 - xp) * (y1 - y2);
    b = (long int) (x1 - x2) * (x1 - x2) + (long int) (y1 - y2) * (y1 - y2);
    c = (double) labs(a) / sqrt(b);
}

else
    c = -1;

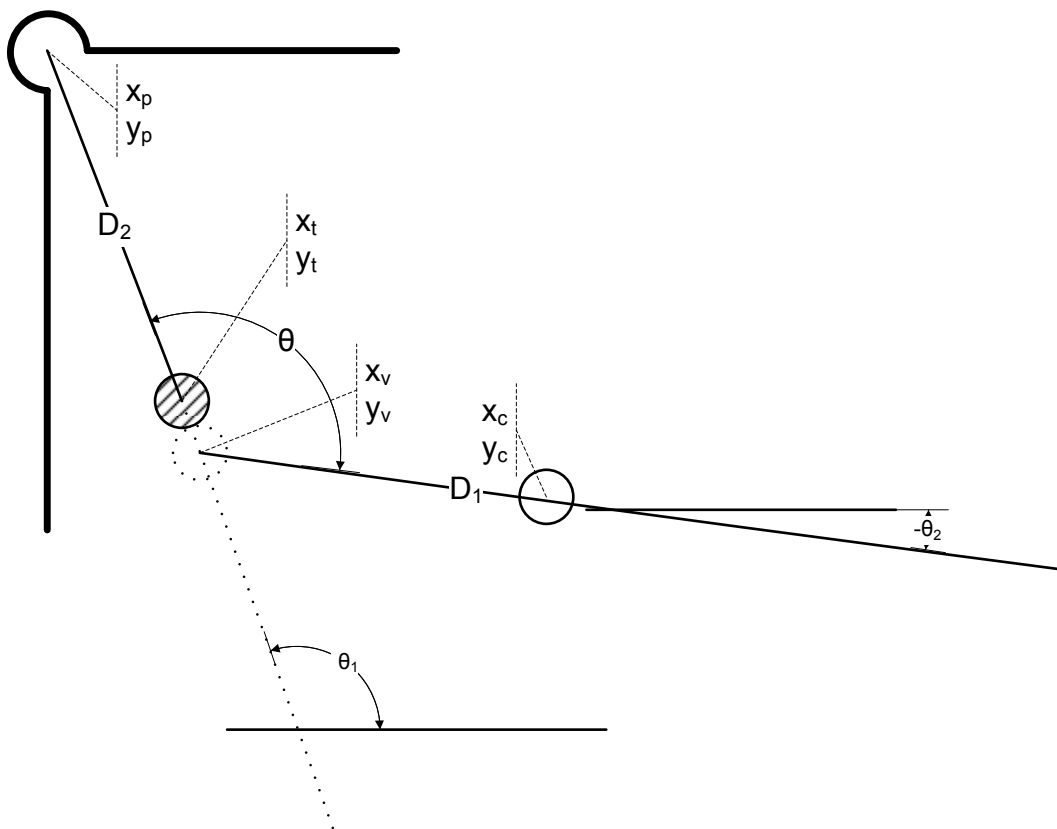
r = (float) c;
return r;
}

```

مشابه آنچه در حالت قبل داشتیم، در صورتی که این فاصله کمتر از حد مشخصی بر حسب شعاع توپ باشد ضربه متناظر با آن ناممکن خواهد بود. کمترین مقدار مجاز برابر قطر توپ خواهد بود و می توان آنرا به عنوان پارامتری قابل تنظیم تحت عنوان میزان ریسک پذیری ربات، در نظر گرفت.

۴-۲-۶ زاویه θ

این زاویه یکی از پارامترهای نهایی است که ربات بر اساس آنها تصمیم گیری می کند. بنا به تعریف، θ زاویه بین دو خط D_1 و D_2 است. خط D_1 خطی است که از مرکز توپ سفید (x_c, y_c) و مرکز توپ سفید مجازی (x_v, y_v) می گذرد و خط D_2 نیز خطی است که از مرکز توپ هدف (x_t, y_t) و سبد (x_p, y_p) می گذرد. با توجه به شکل، می توان ابتدا زاویه هر یک از خطوط D_1 و D_2 را با افق محاسبه کرد و سپس تفاضل آنها را به عنوان زاویه بین دو خط در نظر گرفت:



شکل ۴-۱۷: زاویه θ

همچنین برای اینکه همواره زاویه کوچکتر از 180° درجه به عنوان زاویه بین دو خط در نظر گرفته شود می توان به سادگی شرط زیر را گذاشت:

$$IF(\theta > 180^\circ)$$

$$THEN(\theta \leftarrow 360^\circ - \theta)$$

نگهداری زاویه فوق برای همه ضربه های ممکن احتیاج به یک بردار $p^*(b-1)$ عنصری

دارد. تابع زیر نشان می دهد که محاسبه θ در برنامه چگونه انجام می شود:

```
double computetpangel (float xc , float yc , float xv , float yv , float xt ,
float yt , float xp , float yp)
{
    double a,b,r,p;

    p = atan2(1,1) * 4;
    a = atan2( xc-xv , yc-yv ) * 180 / p;
    b = atan2( xp-xt , yp-yt ) * 180 / p;

    if (a<0)
        a = a + 180;

    if (b<0)
        b = b + 180;

    r = fabs( b - a );
    if ( r < 90 )
        r = 180 - r;

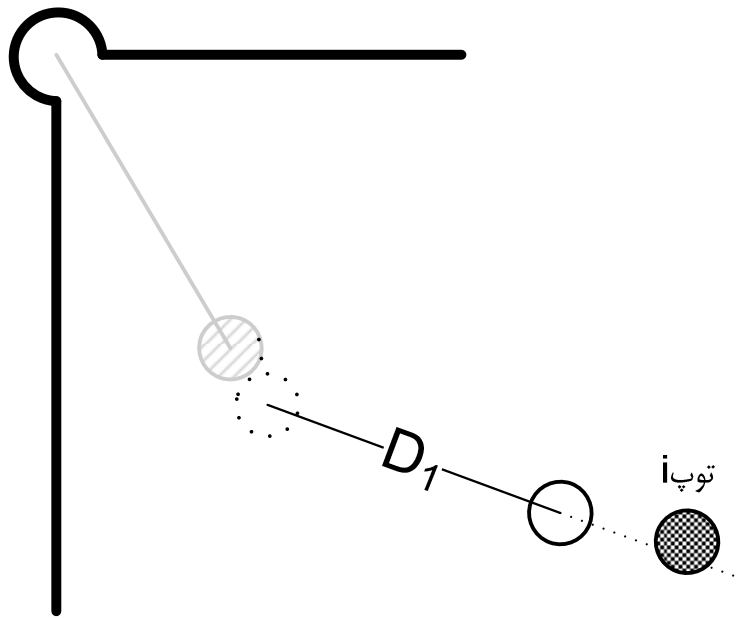
    return r;
}
```

یادآوری می شود که برای ممکن بودن ضربه ، باید شرط $90 < \theta < 180$ برقرار باشد.

نکاتی مفید برای محاسبه پارامترها:

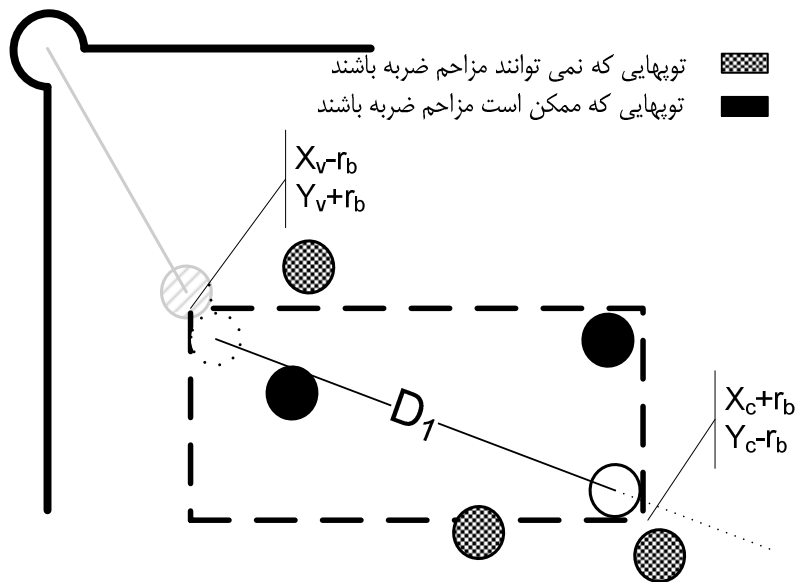
۱- به هنگام محاسبه فاصله یک نقطه از یک خط (در تابع `computepl distance`)

ممکن است با مشکل زیر مواجه شویم:



شکل ۴-۱۸: حالتی که توپ ممکن است به اشتباه مزاحم در نظر گرفته شود

در این حالت گرچه فاصله توپ i تا خط D_1 کمتر از قطر توپهاست ، ولی توپ i مزاحم ضربه نیست. برای اینکه برنامه در چنین حالتی از ضربه صرف نظر نکند، و نیز اینکه توپهایی که در فاصله بسیار دور از خط D_1 قرار دارند در محاسبه وارد نشوند و در زمان محاسبات صرفه جویی شود تنها فاصله توپهایی را از خط حساب می کنیم که در محدوده زیر قرار داشته باشند:



شکل ۴-۱۹: محدوده توپهای مزاحم

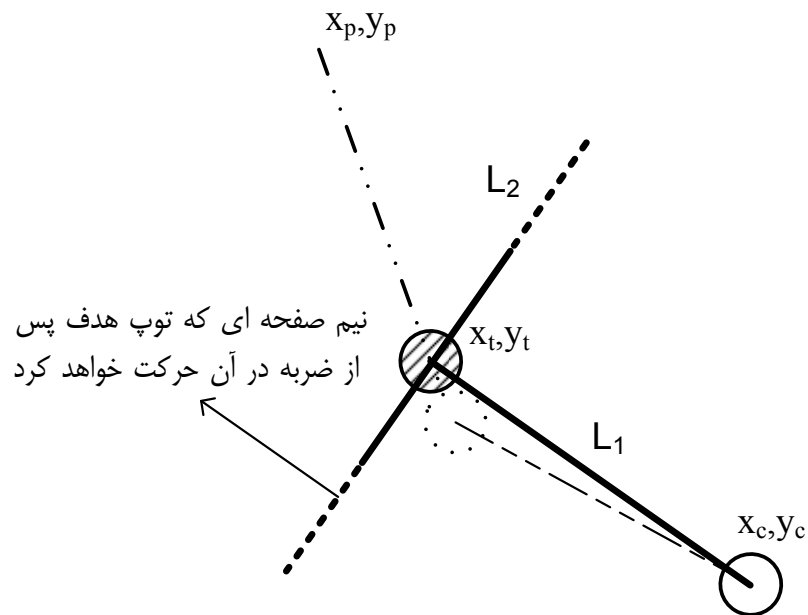
در شکل فوق r_b شعاع توپها و مقداری ثابت است. چنانچه توپی در این محدوده قرار نداشته باشد، برای فاصله آن تا خط D مقدار "۲-" منظور می شود که به معنای آن است که توپ مزاحم ضربه نیست.

۲- برای محاسبه امکان پذیر بودن ضربه پیش از محاسبه پارامترهای فوق می توان به این شرح عمل کرد: اگر خطی گذرا از مرکز توپ هدف و عبور بر خط واصل توپ سفید به توپ هدف پس از ضربه توپ سفید میز را به دو نیم صفحه تقسیم کند، مطمئناً حرکت توپ هدف پس از ضربه توپ سفید در نیم صفحه ای صورت خواهد گرفت که توپ سفید در آن قرار ندارد. با توجه به این مطلب، ضربه در صورتی ممکن است که از دومحل توپ سفید و سبد، یکی در یک سوی خط عمود فوق و دیگری در سوی دیگر باشد. اگر معادله آن خط به شکل $ax+by+c=0$ باشد، باید برای توپ سفید با موقعیت (x_c, y_c) و سبد با موقعیت (x_p, y_p) شرط زیر برقرار باشد:

$$(ax_c + by_c + c)(ax_p + by_p + c) < 0$$

باتوجه به شکل، می توان معادله خط عمود بر خط واصل توپ سفید تا توپ هدف را به

شکل زیر محاسبه کرد.



شکل ۴-۲۰: نیم صفحه حرکتی توپ هدف

ابتدا معادله L_1 را به شرح زیر پیدا می کنیم:

$$\frac{x - x_c}{y - y_c} = \frac{x_t - x_c}{y_t - y_c}$$

$$(x - x_c)(y_t - y_c) = (y - y_c)(x_t - x_c)$$

$$x(y_t - y_c) - x_c(y_t - y_c) = y(x_t - x_c) - y_c(x_t - x_c)$$

$$L_1: (y_t - y_c)x + (x_c - x_t)y + y_c(x_t - x_c) - x_c(y_t - y_c) = 0$$

$$m_{L_1} = \frac{x_t - x_c}{y_t - y_c}$$

و سپس معادله L_2 را با توجه به اینکه L_1 بر L_2 عمود است به شرح زیر می نویسیم:

$$m_{L_2} = -\left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)$$

$$L_2: y - y_t = -\left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)(x - x_t)$$

$$\left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)x + y - \left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)x_t - y_t = 0$$

حال مطابق آنچه گفته شد، برقراری رابطه زیر شرط لازم برای ممکن بودن ضربه است:

$$\left[\left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)x_c + y_c - \left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)x_t - y_t \right] \times \left[\left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)x_p + y_p - \left(\frac{y_t - y_c}{x_t - x_c}\right)x_t - y_t \right] < 0$$

چنانچه رابطه فوق برقرار بود، پارامترهای شش گانه گفته شده محاسبه شده، و از روی سه

پارامتر میانی و با توجه به پارامترهایی چون فاصله بقیه توپها از مسیرهای لازم ضربه، بهترین ضربه

انتخاب می شود. محاسبه برای انتخاب بهترین توپ تنها بر روی ضرباتی انجام می شود که شروط زیر را داشته باشند:

الف) رابطه بند ۲ بالا در مورد آنها صادق باشد.

ب) فاصله نزدیکترین توپ به خطوط D_1 و D_2 تا یکی از آن دو خط ، بیشتر از مقداری مشخص باشد. این مقدار مشخص در کمترین حالت برابر دو برابر شعاع توپ است. قطعه برنامه زیر نشان می دهد فاصله کمترین توپ تا خطوط D_1 و D_2 چگونه محاسبه می شود:

```
for ( k = ۱ ; k < totalballs ; k++ ) // K starts from ۱ not ۰ . cueball is ball ۰ .
{
    if (k != i)
    {
        b_tpdistance [k][i][j] = computepldistance ( ball[k].x ,
ball[k].y , ball[i].x , ball[i].y , pocket[j].x , pocket[j].y );
        cout << "The distance of the ball " << k << " to the " << i <<
"- " << j << " TP line: " << b_tpdistance [k][i][j] << endl;
        b_cvdistance [k][i][j] = computepldistance ( ball[k].x ,
ball[k].y , ball[۰].x , ball[۰].y , virtualcue[i][j][۰] , virtualcue[i][j][۱] );
        cout << "The distance of the ball " << k << " to the " << i <<
"- " << j << " VC line: " << b_cvdistance [k][i][j] << endl << endl;
    }
    else
    {
        b_tpdistance [k][i][j] = -۱; // -۱ Means the ball K makes no
problem for this shot.
```

```

        b_cvdistance [k][i][j] = -۱; //-۱ Means the ball K makes no
        problem for this shot.

```

```

    }

```

```

}

```

```

min_b_tpdistance [i][j] = ۹۹۹;

```

```

min_b_cvdistance [i][j] = ۹۹۹;

```

```

for (k = ۱ ; k < totalballs ; k++)

```

```

{

```

```

    if ( k!=i && b_tpdistance [k][i][j] < min_b_tpdistance [i][j] &&
    b_tpdistance[k][i][j] > ۰)

```

```

        min_b_tpdistance [i][j] = b_tpdistance [k][i][j];

```

```

    if ( k!=i && b_cvdistance [k][i][j] < min_b_cvdistance [i][j] &&
    b_cvdistance[k][i][j] > ۰)

```

```

        min_b_cvdistance [i][j] = b_cvdistance [k][i][j];

```

```

    }

```

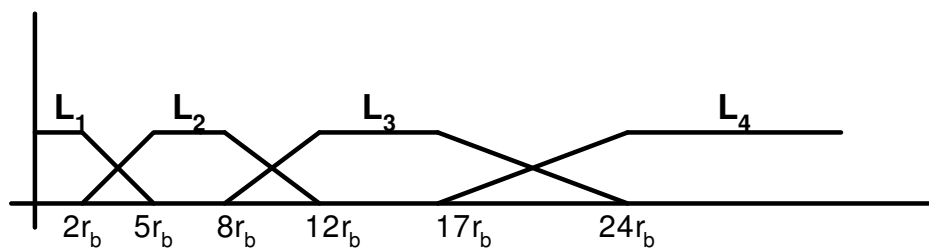
چنانچه دو شرط الف و ب صادق بود، مقدار پارامترهای $d_۱$ و $d_۲$ (اندازه خطوط $D_۱$ و $D_۲$)

و نیز θ (زوایه بین آنها) به ماژول فازی انتخاب بهترین ضربه می رسد.

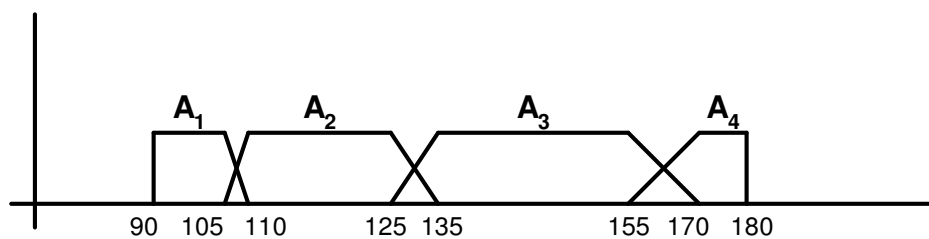
۳-۴ انتخاب بهترین ضربه از روی پارامترهای اصلی

در این مرحله از الگوریتمی استفاده شده که سه پارامتر d_1 و d_2 و θ را به عنوان ورودی گرفته و برای ضربه متناظر با آن فواصل، عددی را به عنوان میزان توصیه آن ضربه باز می گرداند. یادآوری می کنیم همه ضربه هایی که به این مرحله رسیده اند از نظر روابط فیزیکی و هندسی امکان پذیر هستند و وظیفه این قسمت انتخاب بهترین آنهاست.

برای استفاده از این الگوریتم فازی ، ابتدا لازم است پارامترهای ورودی تبدیل به پارامترهای فازی شوند. برای این منظور، مجموعه های مرجع زیر برای پارامترها تعریف شده اند:



شکل ۴-۲۱: مجموعه های مرجع برای پارامتر d_2



شکل ۴-۲۲: مجموعه های مرجع برای پارامتر θ

برای تصمیم گیری در مورد انتخاب بهترین ضربه ، از قواعدی به شکل اگر ... آنگاه استفاده شده است. به منظور جلوگیری از زیاد شدن تعداد قوانین ، از تأثیر پارامتر d_1 در بخش

شرط صرفنظر شده و تأثیر آن در بخش جواب شرط نمود دارد. پس از بررسی بازی بازیکنان خبره و پرسش و پاسخ انجام شده با آنان ، مقدار خروجی قوانین فازی به شرح زیر مشخص شد:

$$۱- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۱) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۱) \text{ THEN } Y = \frac{1.30D - d_1}{D}$$

$$۲- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۱) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۲) \text{ THEN } Y = \frac{1.20D - d_1}{D}$$

$$۳- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۱) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۳) \text{ THEN } Y = \frac{1.15D - d_1}{D}$$

$$۴- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۱) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۴) \text{ THEN } Y = \frac{1.10D - d_1}{D}$$

$$۵- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۲) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۱) \text{ THEN } Y = \frac{1.65D - d_1}{D}$$

$$۶- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۲) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۲) \text{ THEN } Y = \frac{1.60D - d_1}{D}$$

$$۷- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۲) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۳) \text{ THEN } Y = \frac{1.55D - d_1}{D}$$

$$۸- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۲) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۴) \text{ THEN } Y = \frac{1.50D - d_1}{D}$$

$$۹- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۳) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۱) \text{ THEN } Y = \frac{1.87D - d_1}{D}$$

$$۱۰- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۳) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۲) \text{ THEN } Y = \frac{1.85D - d_1}{D}$$

$$۱۱- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۳) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۳) \text{ THEN } Y = \frac{1.75D - d_1}{D}$$

$$۱۲- \text{ IF } (\theta \text{ is } A_۳) \text{ AND } (d_۲ \text{ is } L_۴) \text{ THEN } Y = \frac{1.70D - d_1}{D}$$

$$13\text{- IF } (\theta \text{ is } A^4) \text{ AND } (d_2 \text{ is } L_1) \text{ THEN } Y = \frac{2.50D - d_1}{D}$$

$$14\text{- IF } (\theta \text{ is } A^4) \text{ AND } (d_2 \text{ is } L_2) \text{ THEN } Y = \frac{1.95D - d_1}{D}$$

$$15\text{- IF } (\theta \text{ is } A^4) \text{ AND } (d_2 \text{ is } L_3) \text{ THEN } Y = \frac{1.90D - d_1}{D}$$

$$16\text{- IF } (\theta \text{ is } A^4) \text{ AND } (d_2 \text{ is } L_4) \text{ THEN } Y = \frac{1.80D - d_1}{D}$$

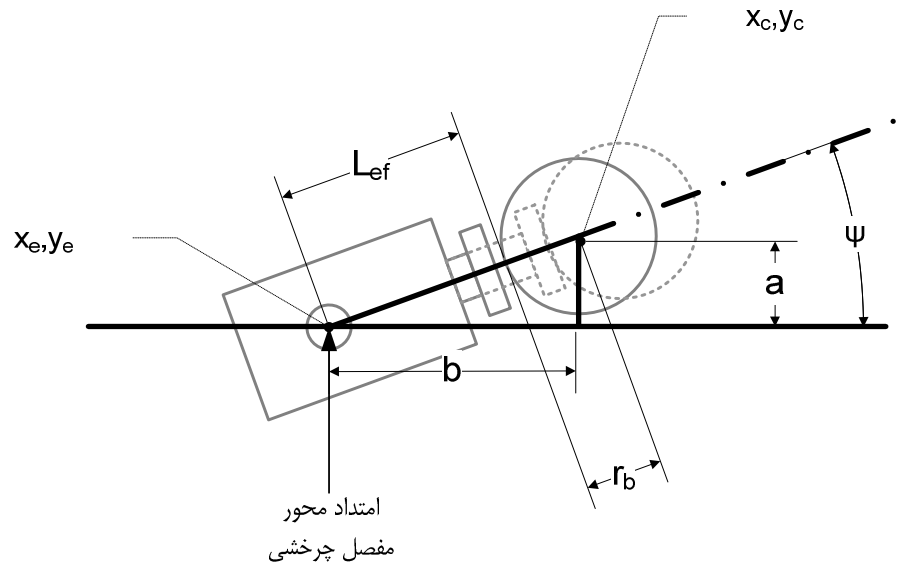
چنانچه از این روابط پیداست ، به نظر می رسد مهمترین پارامتر، زاویه θ است و پس از آن d_1 و در نهایت d_2 پارامترهای مهم بعدی هستند. در مقایسه پاسخ الگوریتم با انتخاب بازیکنان خبره نشان می دهد که الگوریتم در اکثر اوقات جوابی یکسان با بازیکنان دارد و در اندک موارد باقی مانده ، بازیکنان خبره پاسخ الگوریتم را قابل قبول توصیف می کنند.

نکته ای که پس از یافتن مدل فوق به چشم آمد، یافتن پارامتر نسبتاً مهم دیگری بود که گر چه بازیکنان به شکل ضمنی آنرا در نظر می گیرند ولی در پرسشهای به عمل آمده از ایشان به نظر می رسد دانش آگاهانه به آن ندارند. این پارامتر "انحراف خط d_2 از خط عمود بر طول میز در نقاط میانی طول میز" برای سبدهای وسط طول میز بازی بود. در صورت فرصتی برای ادامه پروژه این پارامتر نیز بررسی خواهد شد ولی آمار نشان می دهد بدون آن نیز پاسخ الگوریتم کاملاً مناسب است.

۴-۴ تنظیم پارامترهای ربات

و حل معادلات Inverse Kinematic

پس از اینکه بهترین ضربه ممکن توسط الگوریتم فازی به شکل زوج توپ هدف - سبد هدف مشخص شد، نوبت به این می رسد که ربات ضربه خواسته شده را به توپ سفید جهت قرار گرفتن توپ هدف در سبد هدف وارد کند. برای این منظور ابتدا باید موقعیت مطلوب **end effector** محاسبه شود و سپس معادلات **Inverse Kinematic** جهت رسیدن به آن موقعیت حل شود. موقعیت **end effector** برای ضربه متناظر با زوج توپ هدف (X_t, Y_t) و سبد هدف (X_p, Y_p) به شکل زیر محاسبه می شود:



شکل ۴-۲۳: محاسبه مکان قرارگیری **end effector** هنگام ضربه

با توجه به شکل فوق خواهیم داشت:

$$\sin \alpha = \frac{a}{L_{ei} + r_b}$$

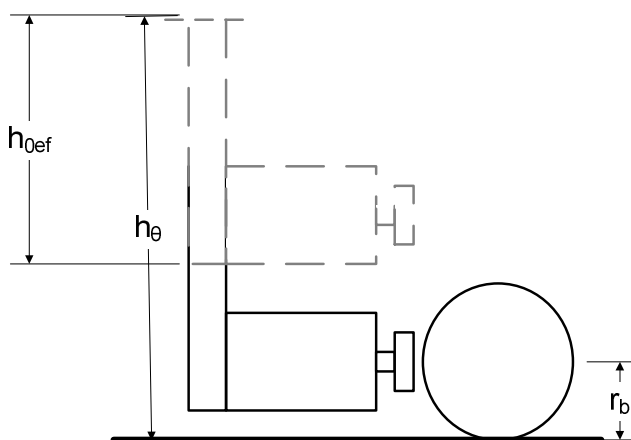
$$\cos \alpha = \frac{b}{L_{ei} + r_b}$$

$$x_e = x_t - b = x_t - (L_{ei} + r_b) \cos \alpha$$

$$y_e = y_t - a = y_t - (L_{ei} + r_b) \sin \alpha$$

که در آن α زاویه ضربه با سطح افق است. همچنین ارتفاع **end effector** برای ضربه به

شکل زیر محاسبه می شود:



شکل ۴-۲۴: تغییر ارتفاع **end effector** برای ضربه

$$\Delta h = h_\theta - h_{0ef} + r_b$$

که در آن $h_{.ef}$ فاصله پایین ترین نقطه **end effector** از محل اتصال با محور θ ، h_θ

فاصله مفصل θ تا سطح میز و r_b شعاع توپ است. پس از یافتن موقعیت و راستای لازم برای **end**

effector، لازم است متغیرهای مفصلی ربات چنان تنظیم شوند که **end effector** را در

وضعیت مطلوب قرار دهند. از آنجا که نقطه نهایی ربات (انتهای ساختار سریال) محل اتصال end effector به ربات است و با توجه به اینکه ربات مکانیسم چهار درجه آزادی دارد که از افزودن یک درجه آزادی دورانی به یک ربات سه درجه آزادی خطی حاصل شده ، معادلات Inverse Kinematic به ساده ترین حالت ممکن قابل حل است. جهت قرار گرفتن ربات برای وارد ساختن ضربه ، ابتدا متغیرهای مفصلی از حالت ابتدایی (حالت صفر) به شرح زیر تغییر پیدا می کنند:

$$x = x_t - b = x_t - (L_{ei} + r_b) \cos \alpha$$

$$y = y_t - a = y_t - (L_{ei} + r_b) \sin \alpha$$

$$\theta = \text{Arctg}\left(\frac{x_c - x_v}{y_c - y_v}\right)$$

سپس با تغییر مقدار z, end effector در مقابل توپ قرار می گیرد:

$$z = h_\theta - h_{0ef} + r_b$$

حال تنظیمات ربات برای وارد ساختن ضربه مناسب است. شدت ضربه از رابطه زیر

محاسبه می شود:

$$P_s \propto \frac{d_1 d_2}{\text{Cos}(\theta)}$$

که ضریب تناسب در آن به جنس توپها و میزان اصطکاک بین توپ و میز بستگی دارد و به صورت آزمون و خطا تنظیم شده است. پس از وارد کردن ضربه ، متغیر مفصلی Z به حالت قبل بازمی گردد:

$$z = 0$$

و ربات به نقطه صفر مراجعت می کند. در اینجا یک چرخه کار ربات تمام شده و در صورت لزوم چرخه جدیدی آغاز می شود.

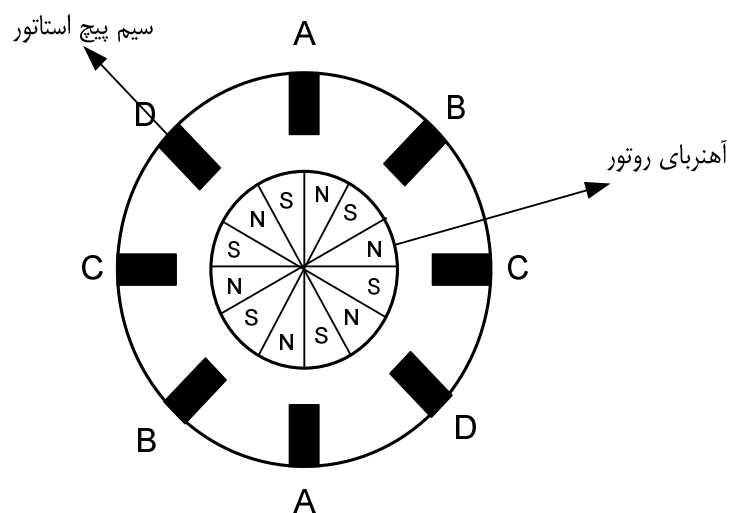
نکته دیگر این است که علاوه بر عملکرد خودکار ربات می توان از آن در حالت **manual** استفاده کرد، چنانکه کل محاسبات فوق توسط کاربر و یا بازیکن انجام شود و مستقیماً با تنظیم متغیرهای مفصلی به توپ سفید ضربه وارد شود.

۵- موتورها و درایورها

چنان‌که در فصل مربوط به ساختار مکانیکی ربات دیدیم، همهٔ مفصل‌های ربات توسط موتورهای پله‌ای حرکت می‌کنند. در این فصل مروری خواهیم داشت بر انواع موتورهای پله‌ای، نحوهٔ کارکرد آنان محاسبات مربوط به استفاده از آنان و اطلاعاتی از این قبیل، همچنین انواع درایورها و تجهیزات مربوطه پس از آن مرور شده است. در انتها موتورها و مدارک بکار رفته در این پروژه، و نیز نرم‌افزار مربوط به کنترل موتورها مرور خواهد شد.

۵-۱ موتورهای پله‌ای

موتورهای پله‌ای دقیق‌ترین نوع موتوری هستند که می‌توان در رباتها بکار برد. از سوی دیگر پیچیده‌ترین نوع موتورها نیز هستند و به علاوه نسبت توان به وزن آنها مقدار خیلی زیادی نیست. برخلاف انواع دیگر موتورها، آهنربای دائمی به شفت موتور متصل است و آهنرباهای الکتریکی در اطراف آن و در محیط موتور قرار دارند. شفت موتوری بی‌آنکه اتصال الکتریکی به قسمتی دیگر از موتور داشته باشد می‌تواند حول محور خود دوران کند. شکل ۵-۱ مقطع یک موتور پله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱: مقطع ی‌ک موتور پله ای

موتورهای پله‌ای ذاتاً سرعت کمی دارند، چرا که برای حرکت دقیق و نیز حفظ موقعیت مطلوب ساخته شده‌اند. سرعت دورانی آنها اغلب بین ۵۰ تا ۱۰۰ دور در دقیقه است و با توان برابر، اغلب از یک موتور DC حجم و وزن بیشتری دارند. به دلیل توان پایین، این موتورها برای ربات‌هایی که احتیاج به نیروی زیاد دارند. مثلاً ربات‌های کشتی‌گیر - مناسب نیستند.

۵-۱-۱-۵ طرز کار موتورهای پله‌ای

موتورهای پله‌ای در مقایسه با سایر انواع موتورها ساختار پیچیده‌ای دارد و بررسی دقیق روابط الکتریکی و مکانیکی آن مجال بسیار بیش از این فصل لازم دارد. برای اطلاع دقیق از روابط و معادلات حاکم بر آن می‌توان کتاب‌هایی که در این زمینه نوشته شده‌اند رجوع کرد.

حرکت موتور پله‌ای به شکل تغییر مکان از یک وضعیت به وضعیت دیگر و به شکل گسسته انجام می‌شود که هر یک از این وضعیت‌ها را یک پله می‌نامیم. تعداد پله‌هایی که شفت موتور باید طی کند تا یک دور کامل حول محور خود بچرخد به عنوان یکی از پارامترهای موتور شناخته می‌شود و اغلب تحت عنوان تعداد پله‌های موتور نامیده می‌شود. پارامتر دیگری که مشابه با پارامتر قبلی است، درجه بر پله بوده و بیانگر زاویه‌ای است که با تغییر وضعیت از یک پله به پله مجاور پیموده می‌شود.

تعدادی سیم‌پیچ در بدنه موتور قرار دارند و چنان تعبیر شده‌اند که آهنربای دائمی موتور (دورانگرا یا rotor) با دقت زیاد از یک موقعیت در موقعیت دیگر قرار گیرد. به محفظه شامل سیم‌پیچ‌ها استاتور می‌گوییم. با اعمال ولتاژ به دو سر یک قطب استاتور، سیم‌پیچ مربوطه دارای خاصیت مغناطیسی شده و روتور توسط قطب‌های غیر هم‌نام بهر سر خود جذب می‌شود. این نیرو باعث دوران روتور می‌شود، چنانکه مقابل قطب‌های غیرهم‌نام خود قرار گیرد روتور شامل تعدادی آهنربای

دائمی است که با مغناطیسی شدن قطبهای استاتور، مقابل آنها قرار می‌گیرد. به هریک از آهنرباهای الکتریکی استاتور، یک دندانه یا tooth می‌گوییم. یکی از پارامترهای روتور تعداد این دندانه‌ها یا number of tooth است. سیم پیچهای استاتور همانطور که در شکل مشخص است طبق روال معینی تکرار می‌شوند، ترتیب فراگیری این سیم‌پیچها به نوع موتور پله‌ای بستگی دارد.

موتورهای پله‌ای به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: تک قطبی و دوقطبی. موتورهای تک قطبی را چهارفاز و موتورهای دو قطبی را دو فاز نیز می‌نامند. در موتورهای تک قطبی روال قرار گرفتن سیم‌پیچها در ماژولهای چهارتایی است، یعنی چهار سیم پیچ مختلف وجود دارد. که با رعایت ترتیب، تکرار می‌شوند. در موتورهای دو فاز، این ماژولها دوتایی هستند به عبارت دیگر در موتورهای تک قطبی هر سیم‌پیچ سه تا در میان تکرار می‌شود درحالیکه در موتورهای دو قطبی سیم‌پیچها یک در میان تکرار می‌شوند. در موتورهای تک قطبی سیم‌پیچهای استاتور تنها با یک نوع قطبیت فعال می‌شوند که دلیل نامگذاری آنها نیز همین نکته است.

در موتورهای دو قطبی، قطبیت مغناطیسی سیم‌پیچها همراه با تغییر قطبیت الکتریکی جریان گذرنده از آن تغییر می‌کند و باعث می‌شود سرهر سیم‌پیچ دو نوع مختلف قطبیت مغناطیسی پیدا کند. در این موتورها به محض اینکه روتور از مقابل سیم‌پیچ دارای قطبیت مخالف حرکت کرده و به موقعیت بعدی رفت، سیم‌پیچی که در لحظه قبل مقابل روتور بوده دارای قطبیت عکس می‌شود.

موتورهای دو قطبی نسبت به موتورهای تک قطبی سریعتر و دقیقتر هستند، چرا که تعداد سیم‌پیچها نصف تعداد آنها در موتورهای تک قطبی است و به دلیل اینکه فضای کمتری اشغال می‌کنند می‌توان از سیم‌پیچهای بزرگتر و در نتیجه قوی‌تر در آنها استفاده کرد. مشکل استفاده از آنها این است که احتیاج به منبع تغذیه‌ای دارند که بتواند قطبیت جریان را تغییر دهد. از آنجا که موتورهای تک قطبی تنها احتیاج به منبع تغذیه‌ای دارند که بتواند قطبیت جریان را تغییر دهد. از آنجا که موتورهای تک قطبی تنها احتیاج به یک قطبیت مشخص دارند استفاده از آنها ساده‌تر است

و به همین دلیل بیشترین مورد مصرف را در کاربردهای رباتیک دارند. درحالیکه برای راهاندازی موتورهای دو قطبی احتیاج به یک مدار معکوس کننده جریان و یا یک H-bridge است، موتورهای تک قطبی به سادگی با استفاده از ترانزیستورهای تقویت کننده جریان راهاندازی می‌شوند.

۵-۱-۲ تشخیص نوع موتور

از آنجا که اغلب موتورهای پله‌ای از دستگاههای قدیمی باز شده و بدون هیچ توضیحی از سوی فروشنده به فروش می‌رسند لازم است روشی وجود داشته باشد که بتوان نوع آنرا تشخیص داد. چنین روش پیچیده نیست موتورهای دو فاز اغلب چهار رشته سیم دارند که برای هر سیم پیچ دو تا از آنها استفاده می‌شود موتورهای تک فاز ممکن است پنج، شش و یا هشت رشته سیم داشته باشند. در صورت وجود پنج رشته سیم، یکی از آنها به عنوان سر مشترک بکار رفته و چهارتای دیگر مربوط به سیم پیچ متناظر هستند. چنانچه موتور شش رشته سیم داشته باشد دو تا از آنها سرمشترک و چهار رشته دیگر مربوط به سیم پیچها هستند.

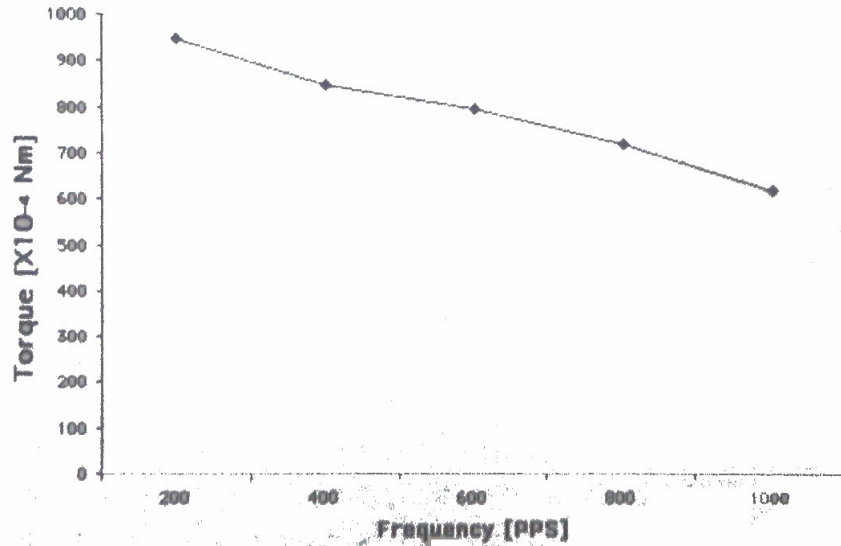
لازم به ذکر است که برخی موتورهایی که شش رشته سیم دارند هم می‌توانند به شکل تک قطبی و هم به شکل دو قطبی عمل کنند که برای این منظور شرکت سازنده بایستی تمهیداتی در نظر گرفته باشد. موتورهایی که هشت رشته سیم دارند به عنوان موتور پله‌ای **universal** شناخته می‌شوند و از آنان می‌توان به عنوان موتور تک قطبی (با متصل کردن دو به دو رشته‌ها). و هم به عنوان موتور دو قطبی (با اتصال سویال سیم پیچها) استفاده کرد. علاوه براین احتمال کمی وجود دارد که بتوان اطلاعات بیشتری درباره موتور با استفاده از موتورهای جستجوی اینترنتی پیدا کرد.

همچنین سایت اینترنتی www.jameco.com حاوی اطلاعات مفیدی دربارهٔ موتورهای پله‌ای است.

۵-۱-۳ خصوصیات دیگر موتورهای پله‌ای

اندازهٔ هر پله در موتورهای پله‌ای از چند دهم درجه تا حدود ۳۰ درجه است. برای اینکه موتور بتواند حرکت یکنواختی ایجاد کند بهتر است از موتورهایی با اندازهٔ پلهٔ حداکثر ۳/۶ درجه در هر پله استفاده کرد. علاوه بر اندازهٔ پله، در بکارگیری موتورها قدرت آنها نیز پارامتر مهمی است. قدرت موتورهای پله‌ای برخلاف موتورهای DC که با توان آنها و برحسب ولت سنجیده می‌شود اغلب با گشتاور آنها و برحسب نیوتن متر بیان می‌شود. دو نوع گشتاور برای موتورهای پله‌ای تعریف می‌شود: گشتاور ایستایی و گشتاور در حرکت.

گشتاور ایستایی، مقدار بیشینهٔ گشتاوری است که موتور ساکن در حال تغذیه می‌تواند تحمل کند بی‌آنکه موقعیت آن تغییر کند. گشتاور در حرکت بیانگر گشتاور وارد شده از سوی موتور هنگام حرکت است و به نرخ پالسها یا سرعت موتور بستگی دارد. پارامتر دیگر موتورهای پله‌ای ولتاژ تغذیه و مقاومت سیم‌پیچهاست که موتورهای مختلف مقادیر مختلفی دارند. خاطر نشان می‌شود که مقدار گشتاور موتور کاملاً مستقل از چنین پارامترهایی است. بهترین راه برای بدست آوردن گشتاور موتور استفاده از نمودارهای شرکت سازنده است. اغلب دو نمودار مختلف گشتاور برحسب سرعت موتور وجود دارد: نمودار Pull-In و نمودار Pull-Out. نمودار Pull-In بنابه تعریف مقدار بیشینهٔ گشتاوری است که ممکن است به موتور اعمال شود بی‌آنکه موتور در حرکت خود پله‌ای را رد کند. در اینجا منظور از حرکت، هنگام شروع به کار یا توقف موتور است. اغلب مقدار گشتاور Pull-Out برای ما اهمیت دارد. بنا به تعریف، این گشتاور مقدار بیشینهٔ گشتاوری است که موتور می‌تواند در سرعت مشخص ایجاد کند. نمونه‌ای از نمودار گشتاور/سرعت برای موتور پله‌ای در شکل ۵-۲ دیده می‌شود.



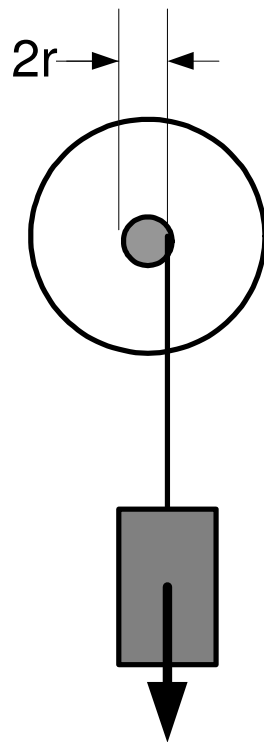
شکل ۵-۲: نمونه ای از نمودارهای گشتاور/سرعت در موتورهای پله ای

۵-۱-۴ انتخاب موتور مناسب

یادآور می‌شویم که موتورهای پله‌ای گرچه بسیار دقیق هستند، ولی به هیچ وجه موتورهای پر قدرتی محسوب نمی‌شوند. همچنین گشتاور موتور را نمی‌توان به هیچ وجه از روی مشخصات دیگری از قبیل ولتاژ، جریان، مقاومت سیم‌پیچها تعداد پله در دور و... بدست آورد.

تنها قواعد کلی این است که موتور پله‌ای بزرگتر از موتور کوچکتر قوی‌تر است و موتور دو قطبی از موتور یک قطبی. همچنین تجربه نشان می‌دهد در حالتی که موتور از منبع تغذیه جدا است هرچه چرخاندن شفت آن سخت‌تر باشد موتور گشتاور بیشتری دارد. تنها روش دقیق برای یافتن گشتاور موتور پیش از خریدن آن، مراجعه به برگه نمودارها و کاتالوگ فنی آن است که اغلب موجود نیست.

البته راه دیگری برای محاسبه گشتاور موتور به شرح زیر وجود دارد.



$$W = mg$$

شکل ۵-۳: محاسبه گشتاور از راه تجربی

می‌توان مطابق شکل ۵-۳، شفت موتور را به یک پولی متصل کرد و با آویختن وزنه‌ای به آن، موتور را به حرکت درآورد. برای یافتن گشتاور موتور در دور مشخص، می‌توان به جرم وزنه آنقدر اضافه کرد تا برای نخستین بار موتور پله‌ای را رد کند. با محاسبه بیشترین وزنی که موجب رد کردن پله نمی‌شود، می‌توان گشتاور آنرا در آن دور بخصوص از رابطه زیر محاسبه کرد:

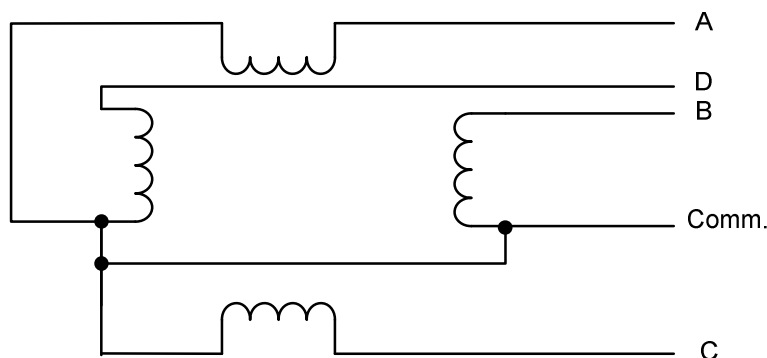
$$\tau = r \cdot W$$

۵-۱-۵ ساختار داخلی و نحوه راه‌اندازی موتورهای پله‌ای تک قطبی

از آنجا که در این پروژه تنها از موتورهای پله‌ای تک قطبی استفاده شده از شرح عملکرد و ساختار موتور پله‌ای دو قطبی صرف نظر کرده و تنها به توضیح این موارد برای موتورهای تک قطبی بسنده می‌کنیم. در این موتورها، جریان سیم‌پیچ جهتی ثابت دارد و چهار سیم‌پیچ مختلف باعث حرکت آنها می‌شود این موتورها اغلب دارای پنج یا شش رشته هستند و گرچه دقت آنها در محدوده نسبتاً وسیعی متنوع است، ولی اغلب با دقت $3/6$ درجه (۱۰۰ پله در دور) یا $7/5$ درجه (۴۸ پله در دور) ساخته می‌شوند.

الف) ساختار داخلی

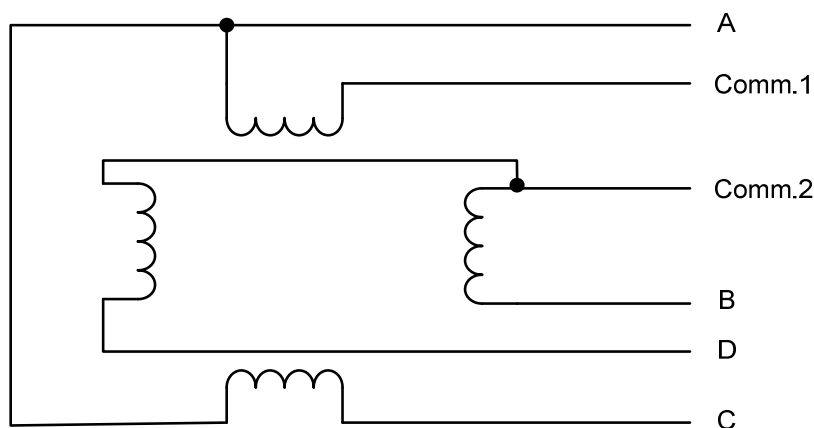
چنانچه موتور دارای پنج رشته سیم باشد، یکی از آنها سر مشترک نامیده شده و به ولتاژ مثبت تغذیه متصل می‌شود. شکل ۴-۵ ساختار داخلی این نوع را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: ساختار داخلی موتور با پنج رشته سیم

چنانچه موتور دارای شش رشته سیم باشد از دو مدار مجزا هر یک شامل دو سیم‌پیچ و یک سر مشترک تشکیل شده است. این نوع موتور که ساختار آن در شکل ۵-۵ نشان داده شده متداولترین نوع موتور پله‌ای است و در اغلب قطعاتی که از موتور پله‌ای استفاده می‌کنند مانند چاپگرها و دیسک درایوها، از این نوع استفاده شده است.

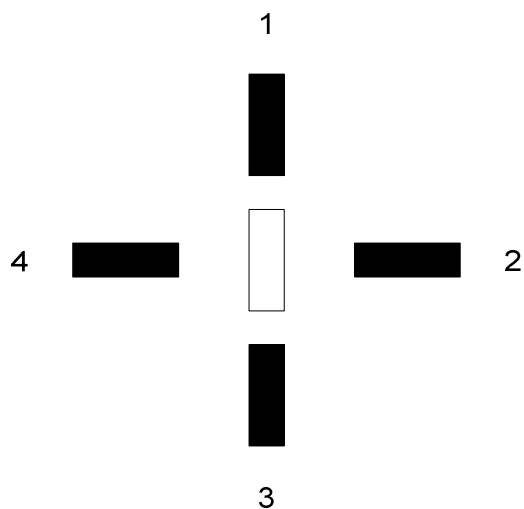
مسأله‌ای که به احتمال بسیار زیاد هنگام کار با موتورهای پله‌ای گریبانگیرمان خواهد شد، تشخیص سیمها و ترتیب آنها است. روش زیر، یافتن ترتیب سیمهای موتور پنج رشته‌ای را ممکن می‌سازد.



شکل ۵-۵ : ساختار موتور پله ای با شش رشته سیم

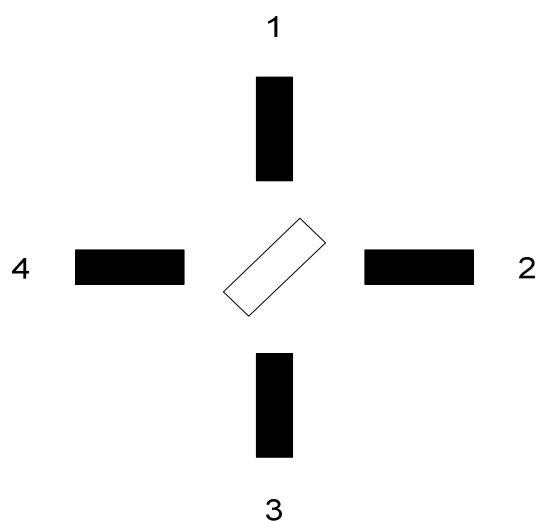
۱- ابتدا با اهم‌متر رشته سیم مشترک را پیدا می‌کنیم. برای یافتن سر مشترک کافیسست مقاومت بین هر دو رشته را حساب کنیم. سر مشترک، رشته سیمی است که مقاومت دیده شده بین آن با هر رشته دیگر مقداری برابر باشد. مقاومت دیده شده بین دو رشته سیم فاز موتور، دو برابر مقاومت دیده شده بین رشته سیم مشترک و یک سیم فاز خواهد بود. پس از شناسایی، رشته سیم مشترک را به ولتاژ مثبت تغذیه وصل می‌کنیم.

۲- قطعه‌ای مقوا یا فلز یا هر چند دیگر را چنان به شفت موتور متصل می‌کنیم که بتوانیم حرکت آنرا با چشم تشخیص دهیم. به طور دلخواه یکی از رشته سیمهای فاز را «فاز ۱» نامیده و به زمین متصل می‌کنیم. با اتصال این سیم به زمین ممکن است شفت موتور اندکی حرکت کند. در این مرحله موتور در موقعیت خود قفل شده است.



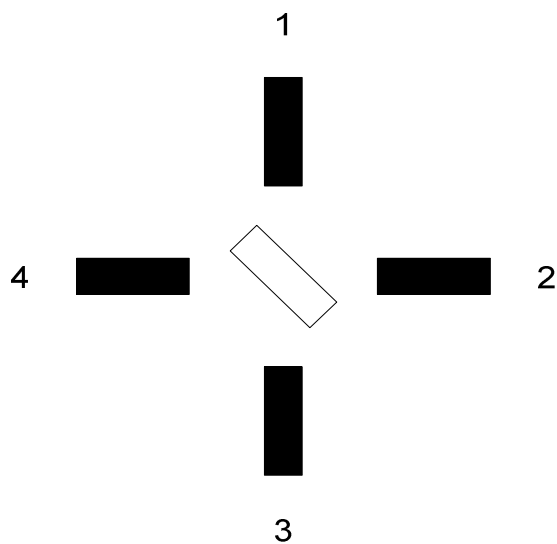
شکل ۵-۶: فاز ۱ در روش تشخیص رشته های موتور

۳-یک رشته سیم دیگر را انتخاب کرده، و درحالیکه حرکت احتمالی شفت موتور را به دقت تحت نظر داریم، آنرا به زمین منبع تغذیه وصل می‌کنیم. چنانچه شفت به اندازه یک پله در جهت گردش عقربه‌های ساعت حرکت کند، آنرا فاز ۲ می‌نامیم.



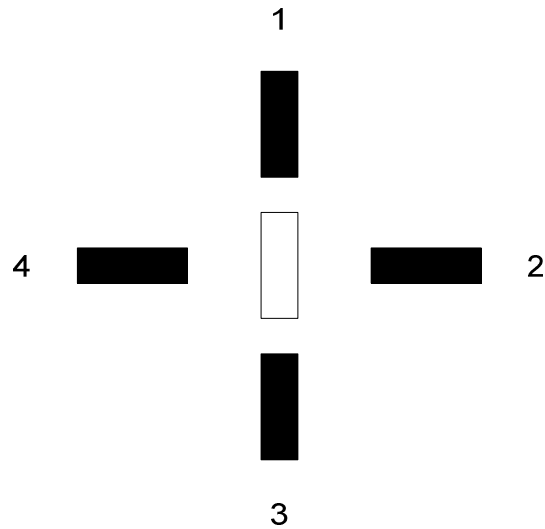
شکل ۵-۷: فاز ۲ در روش تشخیص رشته های موتور

۴- یک رشته سیم دیگر را از میان دو رشته باقیمانده انتخاب کرده و به زمین متصل می‌کنیم. چنانچه شفت موتور به اندازه یک پله در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت حرکت کند، آنرا فاز ۴ می‌نامیم.

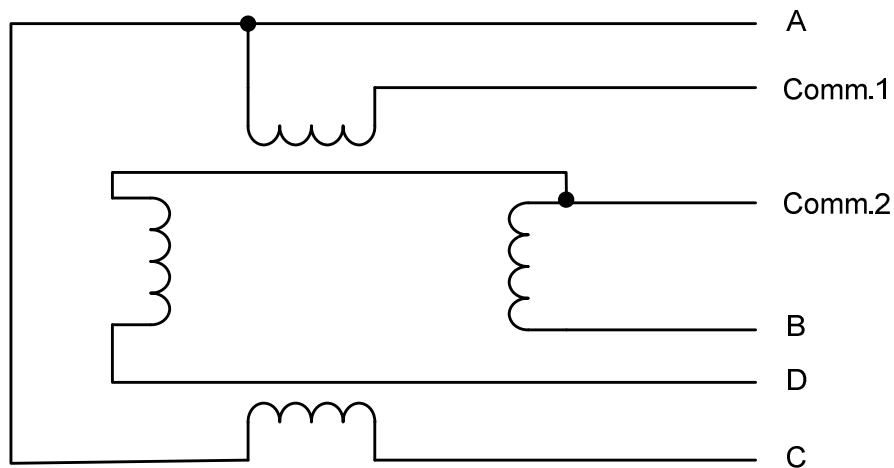


شکل ۵-۸: فاز ۴ در روش تشخیص رشته‌های موتور

۵- برای اطمینان از اینکه انتخابها صحیح بوده، فاز ۳ (رشته باقیمانده) را به زمین منبع تغذیه وصل می‌کنیم. در این حالت شفت موتور نباید حرکتی داشته باشد. روش فوق برای تشخیص فازهای مختلف موتورهای پله‌ای با پنج رشته سیم مناسب است. برای تشخیص فازهای مختلف موتورهای پله‌ای شش رشته‌ای، به روش زیر عمل می‌کنیم.



شکل ۵-۹: فاز ۳ در روش تشخیص رشته های موتور



شکل ۵-۱۰: ساختار داخلی موتورهای پله ای شش رشته ای

ساختار داخلی این موتورها در شکل فوق دیده می شود. تشخیص فازهای این موتور بسیار ساده است. پس از تشخیص سرهای مشترک مشابه گام ۱ روش قبل، سیم پیچهای متصل به آنرا می یابیم. به این شکل دو دسته سیم خواهیم داشت که در هر یک سر مشترک و دو سر فاز قرار دارد. فازهای یک دسته را A و C و فازهای دسته دیگر را B و D می نامیم. ترتیب نامگذاری C, A یا D, B تنها ممکن است جهت دوران موتور را تغییر دهد.

ب) نحوه راه‌اندازی

چنانچه گفتیم، موتور پله‌ای شامل یک روتور در وسط بدنه است که می‌تواند حول محور خود دوران کند. در محیط داخلی بدنه، سیم‌پیچ‌هایی قرار گرفته‌اند که با اعمال ولتاژ به دو سر آنها و با عبور جریان، خاصیت مغناطیسی پیدا می‌کنند. اصطلاحاً اعمال ولتاژ به دو سر سیم‌پیچ و عبور جریان از آنها «روشن کردن» سیم‌پیچ می‌نامیم. حال کفایت ترتیب روشن شدن سیم‌پیچها به شکلی باشد که روتور را به دوران وادارند تا موتور کار کند. تأخیر بین روشن شدن یک سیم‌پیچ تا روشن شدن سیم‌پیچ بعدی سرعت موتور را مشخص می‌کند. به توالی روشن شدن سیم‌پیچها، «الگوی پله‌ای»^۱ گفته می‌شود.

در موتورهای تک فاز، سه نوع الگو برای به حرکت درآوردن موتور وجود دارد: الگوی موجی^۲، الگوی نیم پله^۳ و الگوی دو فازه. در الگوی موجی، در هر لحظه تنها یک سیم‌پیچ روشن است و روتور در هر لحظه مقابل سیم‌پیچ روشن قرار می‌گیرد. در الگوی نیم پله، در هر نوبت به طور یک در میان یک و دو سیم‌پیچ روشن هستند.

در این روش به دلیل اینکه تعداد موقعیتهای روتور یا تعداد پله‌ها دو برابر می‌شود، دقت موتور دو برابر حالت موجی است. در روش الگوی دو فازه، در هر لحظه دو سیم‌پیچ مجاور همزمان روشن هستند. به دلیل اینکه نیروی مغناطیسی وارد بر روتور در این حالت بیشتر خواهد بود (۴/۱) درصد بیش از حالت الگوی موجی) ولی در مقابل به دلیل اینکه در هر لحظه دو سیم‌پیچ به شکل همزمان روشن هستند مصرف توان در این الگو دو برابر الگوی موجی است. جداول ۵-۱ تا ۵-۳، الگوهای بکار رفته در هر یک از سه حالت را نشان می‌دهند.

^۱ Step Pattern

^۲ Wave Pattern

^۳ Half Step

	A	B	C	D
۱	خاموش	خاموش	خاموش	روشن
۲	خاموش	خاموش	روشن	خاموش
۳	خاموش	خاموش	خاموش	روشن
۴	خاموش	خاموش	خاموش	روشن

جدول ۵-۱: الگوی موجی

	A	B	C	D
۱	خاموش	خاموش	روشن	روشن
۲	خاموش	خاموش	روشن	روشن
۳	خاموش	خاموش	خاموش	روشن
۴	خاموش	خاموش	خاموش	روشن

جدول ۵-۲: الگوی دو فازه

	A	B	C	D
۱	روشن			
۲	روشن	روشن		
۳		روشن		
۴		روشن	روشن	
۵			روشن	

۶	روشن	روشن
۷		روشن
۸	روشن	روشن

جدول ۳-۵: الگوی نیم پله

همچنین با وجودی که از موتورهای پله‌ای دو قطبی در این پروژه استفاده نشده، الگوی موجی نیم پله و دو فازة عملکرد آنها برای مقایسه با موتورهای پله‌ای تک قطبی در جداول ۴-۵ و ۵-۵ زیر مشخص شده است.

	A	B	C	D
۱	-	+		
۲			+	-
۳	+	-		
۴			-	+

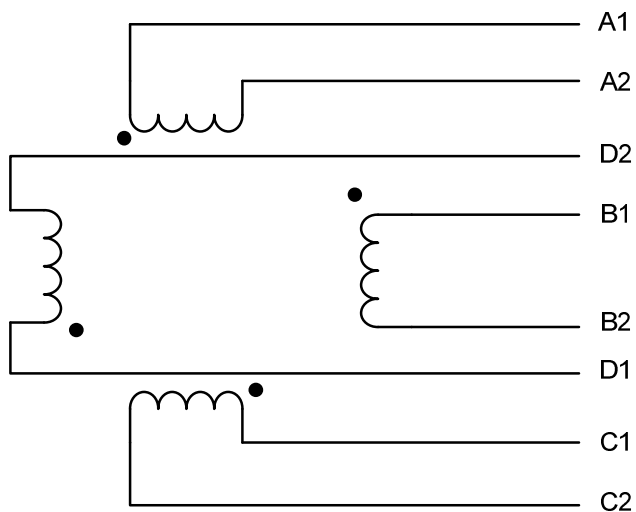
جدول ۴-۵: الگوی موجی برای موتورهای دو قطبی

	A	B	C	D
۱	-	+	-	+
۲	-	+	+	-
۳	+	-	+	-
۴	+	-	-	+

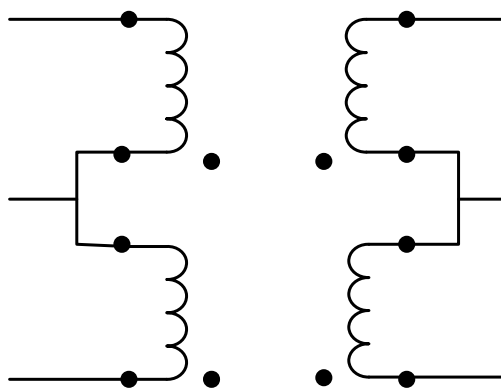
جدول ۵-۵: الگوی دو فازه برای موتورهای دو قطبی

همچنین ساختار یک موتور universal با هشت رشته سیم و انواع مختلف پیکر بندی آن

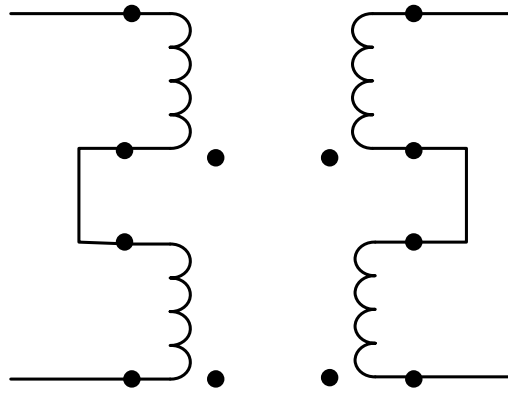
برای استفاده‌های مختلف جهت مقایسه با موتور پله‌ای تک قطبی در زیر مشخص شده است.



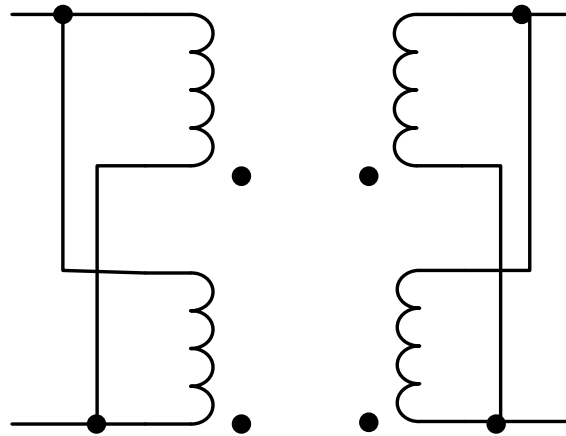
شکل ۵-۱۱: ساختار داخلی موتور Universal



شکل ۵-۱۲: پیکربندی تک قطبی موتور universal



شکل ۵-۱۳: پیکربندی دو قطبی سری موتور universal

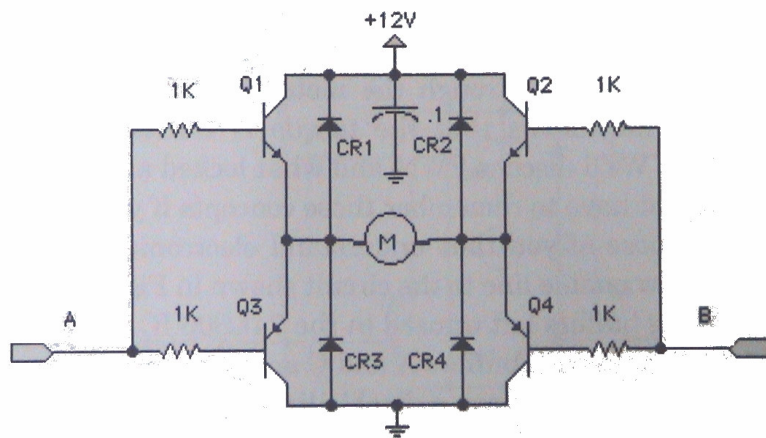


شکل ۵-۱۴: پیکربندی دو قطبی موازی موتور universal

چنانکه مشاهده می‌شود بین ساختار سری موتور پله‌ای universal و موتور تک قطبی شش رشته‌ای تشابه آشکاری وجود دارد. تجربه نشان می‌دهد که با نادیده گرفتن دو سر مشترک موتور پله‌ای تک قطبی شش رشته‌ای می‌توان از آن به عنوان موتور دو قطبی استفاده کرد. در این حالت برای راه‌اندازی موتور پله‌ای باید از مداری برای تغذیه استفاده کرد که بتواند قطبیت جریان سیم‌پیچها را تغییر دهد. یک انتخاب برای این کاربرد، درایوهای H-bridge DC هستند که در شکل ۵-۱۵ نمونه ساده‌ای از آنان برای موتورهای با جریان پایین دیده می‌شود.

۵-۲ درایورها و کنترلرها

در این پروژه از موتورهای پله‌ای تک فاز شش رشته‌ای به عنوان actuatorها استفاده شده است. ورودی کنترلی این موتورها از یک دستگاه کامپیوتر شخصی که وظیفه پردازش تصویر را نیز برعهده دارد و از طریق درگاه موازی صادر می‌شود از آنجا که درگاه موازی کامپیوتر شخصی قدرت جریان دهی پایینی دارد از آی سی ULN ۲۸۰۳ برای تقویت جریان استفاده می‌شود. علاوه بر این، به دلیل اینکه درگاه موازی کامپیوتر شخصی قادر به ارسال حد اکثر ۸ بیت در هر زمان است و چهار موتور بکار رفته در ربات احتیاج به ۱۶ بیت برای راه اندازی دارند، برای ارسال فرمان به موتورها از یک کدگشای آدرس استفاده شده است.

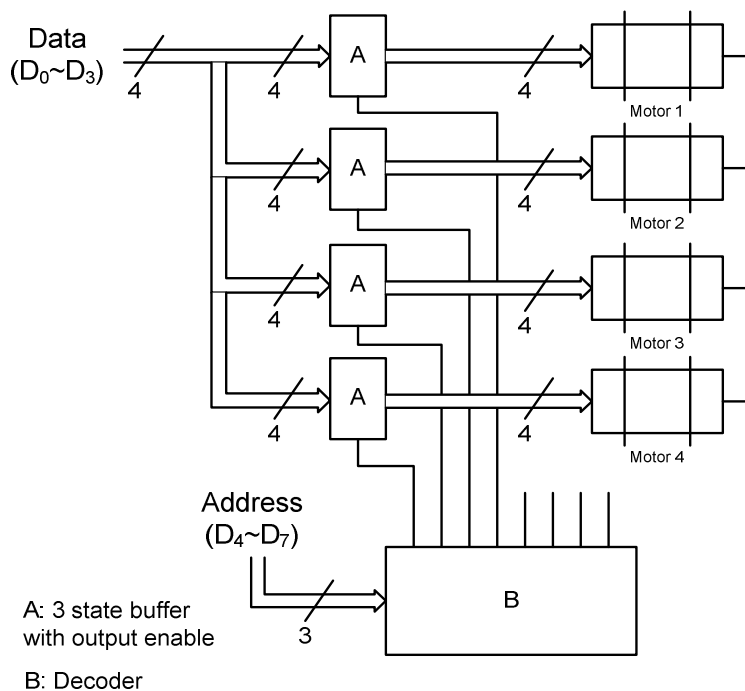


شکل ۵-۱۵: یک درایور H-bridge برای موتور پله‌ای با جریان پایینی

بیت‌های D۰ تا D۳ بیت‌های کنترل و بیت‌های D۴ تا D۷ بیت‌های آدرس در نظر گرفته شده اند. بیت‌های D۴ تا D۷ مشخص می‌کنند که رشته بیت ارسال شده روی بیت‌های D۰ تا D۳ متعلق به کدام موتور می‌باشند. از آنجا که علاوه بر چهار موتور، شیر کنترل کننده ضربه زننده نهایی نیز

باید از همین درگاه فرمان لازم را دریافت کند از سه بیت جهت آدرس دهی استفاده شده است.

شکل ۵-۱۶ نمای شماتیک مدار مربوط به کنترل موتورها را نمایش می دهد.



شکل ۵-۱۶: نمای شماتیک مدار کنترل موتورها

در عمل، خروجی بافرهای سه حالته که در شکل با A نشان داده شده اند بیت ورودی درایور جریان هستند. برای اینکه هر پایه آی سی ULN2803 قدرت جریان دهی نیم میلی آمپر دارد، برای هر ورودی موتور چهار یا هشت ماژول آن با هم موازی شده اند. تعداد درایورهای موازی بستگی به جریان لازم برای راه اندازی موتور دارد. همچنین الگوی ورودی به موتورها به شکل دوفاز پله کامل در نظر گرفته شده تا بتوان گشتاور بیشتری بدست آورد. بدیهی است که در صورت نیاز به دقتهای بالاتر می توان از الگوی نیم پله نیز کمک گرفت.

۶- خلاصه و نتیجه گیری

۶-۱ عملکرد نهایی

پس از ساخت ربات نوبت به محک زدن آن در محیط واقعی می رسد. آزمایش نشان می دهد که ربات در بخش تصمیم گیری کاملا رفتار مناسبی دارد و ضربه انتخاب شده اغلب اوقات بهترین ضربه ممکن است. از آنجا که بهترین ضربه از دید افراد مختلف یکسان نیست نمی توان یک معیار ثابت و قطعی برای انتخاب بهترین ضربه داشت. در جایی که قرار گیری توپها بر روی میز به شکلی است که بازیکنان بلیارد در مورد بهترین انتخاب اتفاق نظر دارند تجربه نشان می دهد که ربات بدون خطا عمل می کند ولی در حالاتی که بین بازیکنان مختلف اختلاف نظر هست طبیعتا نمی توان گفت ضربه انتخاب شده توسط ربات قطعا بهترین ضربه ممکن بوده است.

در بخش بینایی، دقت عمل ربات مناسب و با خطای در حد میلی متر است. از دلایل این خطا می توان به وجود سایه اطراف توپها و نیز کیفیت تصویر دریافتی اشاره کرد. از آنجا که وضوح دوربین عالی نبوده است مجبور بوده ایم تا جای ممکن آن را پایین و نزدیک به سطح میز نصب کنیم که این عمل موجب شده انحنای زمین در انتهای تصویر مقداری قابل توجه باشد و پس از اعمال تابع تسطیح همچنان خطایی جزئی وجود داشته باشد. به هر حال این خطا در بخش ضربه زننده و با بزرگتر کردن انتهایی آن بخش که وظیفه ضربه زدن به توپ سفید را بر عهده دارد تا حدودی جبران شده است.

در بخش مکان یابی و مکانیسم حرکتی، شاید عمده ترین ایراد کند بودن حرکتهاست. از آنجا که هدف استفاده از موتورهایی با هزینه معقول بوده است امکان استفاده از سیستم افزایشده سرعت (مانند چرخ دنده ها) وجود نداشته چرا که در همین شرایط نیز موتور ها با گشتاوری نزدیک به گشتاور بیشینه خود عمل می کنند و در صورت استفاده از سیستم های افزایشده سرعت دقت مکان یابی موتور ها به شدت کاهش خواهد یافت. این موضوع اصطلاحا رد کردن پله در موتورهای

پله ای نامیده می شود. ایراد دیگر وجود مقداری جزئی لقی^۱ در محل اتصال مفصل Z به مفصل Y است که البته در آخرین لحظات با خنثی کردن یک گشتاور نادیده مانده سیستم تا حد زیادی جبران شد و در حال حاضر ربات قادر است عمل مکان یابی را با دقتی در حد سه دهم میلی متر انجام دهد. این دقت برای زمینه کاری ربات دقتی مناسب ارزیابی می شود.

در نهایت، نتیجه ضربه های ربات نشان می دهد که عملکرد آن در حالتی که rule base فازی ضربه را با ضریبی بیش از ۱/۸ توصیه می کند، یعنی ضربه هایی که خروجی قانون فازی مربوط به آنها به شکل $Y=(A.D-d_1)/D$ با $A>1,8$ است به احتمال بیش از ۹۰ درصد به ثمر می رسند که البته این احتمال با زیاد شدن مقدار A بیشتر می شود. در مورد ضربه هایی که توصیه شدگی کمتری دارند به دلیل اینکه توپها و میز استفاده شده مدلی ساده و بدون دقت کافی هستند ضربه انجام شده گاه با خطاهایی همراه است. منظور از دقت ناکافی در اینجا کروی نبودن توپها و ناهمواریهای جزئی در سطح میز است که موجب می شود توپها مسیری جز آنچه از نظر محاسبات تئوری انتظار می رود طی کنند.

۶-۲ مقایسه

چنانکه در فصل مقدمه گفته شد، رباتهای بسیار کمی مشابه با Roboshark طراحی شده اند. از میان آنها، Snooker Machine ساخته شده در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه بریستول تنها رباتی است که واقعا ساخته شده است. رباتی که در دانشگاه واترلو طراحی شده به دلیل آسیبهایی که به قطعات آن رسیده پیش از کامل شدن رها شده و به مرحله ساخت نرسیده است. همچنین ربات دانشگاه مالتی مدیای اندونزی هنوز در مراحل طراحی بخشهای نرم افزاری است و تا آخرین اخبار حاصله هنوز به مرحله ساخت و محک خوردن واقعی نرسیده است. علاوه بر اینها در

^۱ Backlash

دانشگاه استلن بوش^۱ افریقای جنوبی نیز پروژه ای مشابه در حال بررسی جهت اجراست. با این اوصاف، تنها ربات مشابه جهت مقایسه ربات Snooker Machine دانشگاه بریستول است.

متاسفانه به دلیل فقدان منابع کامل امکان مقایسه کمی دو ربات وجود ندارد ولی با این حال به نظر می رسد توانایی های Snooker Machine به هیچ وجه قابل مقایسه با Roboshark نباشد. گرچه اطلاع دقیقی از جزئیات Snooker Machine وجود ندارد، ولی با همین اطلاعات موجود می توان متوجه برتری های Roboshark شد. Snooker Machine اصولاً قادر به تشخیص بهترین ضربه نبوده است و ضربه مناسب توسط مجریان پروژه و با استفاده از تجربه انسانی به ربات گفته می شده است. علاوه بر این، چنان که از نوشته های پراکنده روی شبکه های مختلف بر می آید این ربات به دلیل نامعلومی تنها قادر به پوشش ۷۰ درصد سطح میز بوده است. Snooker Machine بر روی میز واقعی بیلارد عمل می کرده که با توجه به ابعاد بزرگتر کار ساده تری در پیش داشته چرا که خطاها در مقیاس های کوچکتر تاثیر بیشتری از خود نشان می دهند. البته بایست این نکته را هم در نظر داشت که Snooker Machine از نظر زمانی پیش از Roboshark ساخته شده و قطعاً انتظاراتی که از رباتها در آن زمان وجود داشته با انتظارات کنونی بسیار فاصله دارد.

۳-۶ دستاوردها

دستاورد این پروژه به هیچ وجه محدود به ربات ساخته شده نیست و می توان مدعی شد که مهمترین دستاورد این پروژه تجربه ای است که در طی مدت بیش از یک سال حاصل شده است. راه هایی که به بن بست منجر شده گرچه استفاده ای در این طرح نداشته است ولی قطعاً در پروژه های آتی بسیار مورد توجه خواهد بود. انتظار می رود چنانچه پروژه مشابه دیگری جهت اجرا

^۱ Stellenbosch

تعریف شود در زمانی حدود ۵۰ درصد زمان طرف شده بر روی این پروژه و با هزینه ای حدود ۷۰ درصد هزینه انجام شده قابل ساخت باشد. همچنین این پروژه خاستگاه ایده های بسیاری در هر یک از بخشهای ساختار مکانیکی، بینایی ماشین و الگوریتم های تصمیم گیری بوده است که تا پیش از زمان دفاع منجر به انتشار دو مقاله در کنفرانسهای بین المللی شده است و علاوه بر این امکان گسترش آن ایده ها تا چندین گام پیش تر وجود دارد. ساخت ربات مرحله ای بسیار زمانگیر بوده که بیش از دو سوم زمان پروژه را به خود اختصاص داده و حال با داشتن چنین بستر آماده ای امکان بکارگیری ایده های نو چه در زمینه پردازش تصویر و چه الگوریتم های تصمیم گیری مهیاست. از ساختار مکانیکی ربات با تغییراتی جزئی می توان در کاربرد های بسیار متنوعی بهره جست. به طور مثال کافیسیت که بخش end effector با یک gripper تعویض شود تا بتوان از ربات در کاربرد های مشابه pick and place استفاده کرد. امید است همچنانکه تجربه های حاصل از پروژه های قبلی رباتیک انجام شده در دانشکده در این ربات کاربرد داشته اند، این ربات نیز به نوبه خود بتواند در آینده راهگشای پروژه های بعدی باشد.

۶-۴ خلاصه و نتیجه گیری

در بخش ساخت این پروژه سعی بر این بوده که تا جای ممکن از قطعات و موادی استفاده شود که به سادگی در دسترس هستند. در جایی که نیاز به قطعه خاصی بوده که به سادگی در دسترس نبوده بجای اینکه به سفارش آن قطعه روی بیاوریم سعی بر آن بوده که از نزدیکترین قطعه مشابه استفاده شده و طراحی سایر بخشهای مرتبط با آن قطعه چنان تغییر کند که عملکرد ربات بی عیب باقی بماند.

نکته ای که اشاره به آن خالی از فایده نیست، آن است که تجربه ساخت این ربات نشان داد که یک مهندس خوب نه تنها کسی است که بتواند از ابزار کار خویش بیشترین بهره را ببرد،

بلکه باید بداند که هر نوع ابزاری را چگونه و از چه منبعی می توان تهیه کرد. در شروع کار عدم آگاهی کافی در این زمینه باعث شد که زمان قابل توجهی از وقت پروژه صرف یافتن چنین مکانهایی برای تهیه قطعات و ابزار لازم شود.

نکته دیگری که لازم است به آن اشاره شود آن است که با توجه به تکنولوژی ساختی که در حال حاضر برای پروژه های دانشجویی موجود است و بدون روی آوردن به تکنولوژی های ساخت گران قیمت، ساختار های بسیار دقیق به هیچ وجه انتخاب مناسبی نیستند. چنانچه دقت ساخت قطعه ای از حدی بیشتر باشد یا باید بهای زیادی بابت ساخت آن پرداخت شود و یا در عمل خطای ساخت آن را غیر قابل استفاده می کند. تجربه ناشی از این پروژه نشان می دهد که بهتر است تا جای ممکن از طرح های قابل انعطاف و ساختارهای خود تنظیم استفاده شود. بطور مثال، در ساخت مفصل X ربات ابتدا از دو بلبرینگ خطی استفاده شد ولی از آنجا که هنگام نصب خطا در تعبیه سوراخها باعث شد خطایی در حد میلی متر در دو متر طول محور ها باشد سیستم قفل شده و استفاده از آن ناممکن می شد. به عنوان راه حل در طرح بعدی از تسمه استفاده شد که ماهیتی قابل انعطاف دارد و به سادگی می تواند خطایی در حد سانتی متر را تحمل کند. چنین راه حل هایی در بسیاری موارد می توانند راه گشا باشند. علاوه بر این شدیداً توصیه می شود که از تحمیل هرگونه محدودیت اضافی به سیستم تا جای ممکن خود داری شود، چرا که با توجه به ضعفهای تکنولوژی ساخت احتمال خطا بسیار بالا خواهد بود. پس از انجام این پروژه نگارنده به جد معتقد است که قرار دادن چهار نقطه فیزیکی - و نه هندسی - در یک صفحه می تواند از حل یک مساله ریاضی بسیار دشوار تر باشد.

در انتها می توان گفت Roboshark با استفاده از یک ساختار ساده مکانیکی ولی دقیق، یک الگوریتم پردازش تصویر سریع و کارا و نیز بهره جویی از روشهای حسابگری نرم توانسته است عملکردی قابل قبول از خود نشان دهد. در عین حال در هر سه زمینه اصلی (مکانیسم حرکتی،

پردازش تصویر و تصمیم‌گیری) امکان توسعه و بهبود وجود دارد و می‌توان در آینده برای محک
زدن ایده‌های جدید در هر یک از زمینه‌های فوق از آن استفاده کرد.

مراجع

- [١] Dennis Clark and Michael Owings "Building Robot Drive Trains",
TAB Robotics, McGraw-Hill, ٢٠٠٣
- [٢] Mark W. Spong and M. Vidyasagar "Robot Dynamics and Control",
Wiley Text Books, ١٩٨٩
- [٣] M.F.Spotts "Design of Machine Elements", Printicehall, ١٩٧٨
- [٤] Gordon McComb, "Robot Builder's Sourcebook", TAB Robotics,
McGraw-Hill, ٢٠٠٣
- [٥] David Cook, "Robot Building for Beginners", APress, ٢٠٠٢
- [٦] H.J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Kluwer
Academic Publishers, ١٩٩٦

- [٧] Tom Mitchell, "Machine Learning," McGraw Hill, ١٩٩٧
- [٨] W. C. Marlow, "The Physics of Pocket Billiards," ISBN: ٠٩٦٤٥٣٧٠٠١,
Philadelphia, PA: AIP, ١٩٩٥.
- [٩] R. Shepard, "Amateur physics for the amateur pool player", ٣rd
Edition, ١٩٩٧.
- [١٠] Clive Everton, "Snooker and Billiards: Technique, Tactics,
Training", Trafalgar Square, ١٩٩٢
- [١١] Zadeh, L.A., "Fuzzy sets," Information and Control, Vol. ٨, pp. ٣٣٨-
٣٥٣, ١٩٦٥.
- [١٢] Zadeh, L.A., "Fuzzy Logic," Computer, Vol. ١, No. ٤, pp. ٨٣-٩٣,
١٩٨٨.
- [١٣] Mamdani, E.H. and S. Assilian, "An experiment in linguistic
synthesis with a fuzzy logic controller," International Journal of Man-
Machine Studies, Vol. ٧, No. ١, pp. ١-١٣, ١٩٧٥.

[14] Yip R.K.K., Tam P.K.S., Leung D.N.K., "Modification of the Hough transform for circles and ellipses detection using a 2-dimensional Array," Pattern Recognition, vol. 25, pp. 1007-1022, 1992.

[15] J. Bruce, T. Balch, and M. Veloso. "Fast and inexpensive color image segmentation for interactive robots" In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '00), volume 3, pages 2061, 2000.