

بهینه‌سازی ساختار هدف در سیستم ردیابی حرکت مبتنی بر دوربین

امیرحسین ناییبی* و علیرضا احمدی فرد*

چکیده

در ردیابی هدف با دوربین ساختار هدف بر دقت ردیابی بسیار تاثیر دارد. در این مقاله روشی جدید برای بهینه‌سازی محل قرار گرفتن پنج نشانگر بر روی یک هدف قابل رویت برای دوربین ارائه می‌گردد. تابع هدف پیشنهادی برای جایابی نشانگرها برابر با مجموع فاصله هر نشانگر از کلیه صفحاتی است که از ترکیب سه تایی‌های موجود آمده از سایر نشانگرها تشکیل می‌گردد. برای جلوگیری از متقارن شدن ساختار هدف که بر حسب زنی نشانگرها را در تصویر ناممکن می‌سازد، از یک قید که تضمین می‌کند اختلاف فاصله بین زوج نشانگرها از یک حداقل بیشتر شود، استفاده می‌نماییم. برای حداکثر کردن تابع هدف پیشنهادی با قید اشاره شده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

نتایج تجربی حاصل از جایابی نشانگرها در هدف با استفاده از روش پیشنهادی (با اعمال و بدون اعمال قید) و سایر روش‌ها ارزیابی گردیدند. این روش‌ها به لحاظ خطای تخمین وضعیت سه بعدی سرعت ردیابی در حضور نویز مورد مقایسه قرار گرفتند. این نتایج کارایی روش پیشنهادی برای جایابی نشانگرها را تایید می‌نماید.

کلیدواژه‌ها

ردیابی هدف مبتنی بر مدل، طراحی ساختار هدف، ردیابی مبتنی بر دوربین، ردیابی وضعیت سه بعدی

۱ مقدمه

۱-۱ معرفی موضوع

ردیابی حرکت به معنی تخمین و پیش‌بینی مکان و جهت هدف نسبت به یک دستگاه مختصات مرجع، کاربردهای متنوعی دارد. به عنوان مثال می‌توان به ساخت انیمیشن [۱]، واقعیت افزوده [۲]، تجزیه و تحلیل راه رفتن^۲ در علوم ورزشی [۳] و پزشکی [۴] و کنترل ربات [۵] اشاره کرد.

سیستم‌های بسیاری جهت ردیابی هدف وجود دارند که هر کدام از سنسورهای متفاوتی برای این منظور استفاده می‌کنند. مانند سنسورهای مکانیکی که دقت بسیار بالایی دارند ولی جهت استخراج وضعیت^۳ (موقعیت و مکان) هدف باید با آن تماس داشته باشند [۶] یا سنسورهای غیر تماسی مثل سنسورهای

اینرسی [۷]، سنسورهای صوتی [۸] سنسورهای مغناطیسی [۹] سنسورهای رادیویی [۱۰] و سنسورهای مبتنی بر دوربین (نوری) [۱۱]. از بین سنسورهای غیر تماسی سنسورهای مغناطیسی و نوری به دلیل دقت خوب و سرعت بالا کاربرد بیشتری دارند [۱۲]. از طرفی وجود فلز متحرک در محیط باعث ایجاد اغتشاش در سنسورهای مغناطیسی می‌شود و لذا در کاربردهایی مثل کنترل ربات سنسورهای نوری مناسب‌تر هستند. در سیستم ردیابی بر اساس دوربین لازم است نقاطی از جسم هدف در تصویر دوربین قابل رویت باشند [۱۱]. این نقاط می‌توانند نقاط شاخص جسم باشند و یا نشانگرهای خاصی باشند

این مقاله در تیرماه سال ۹۷ دریافت، در تیرماه ۹۸ بازنگری و در مردادماه همان سال پذیرفته شد.

* دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

رایانامه: am_nayebi@yahoo.com
ahmadyfard@shahroodut.ac.ir

¹ Augmented Reality

² Gait Analysis

³ Pose

سای^۳ [۱۶] برای تعیین وضعیت هدف استفاده شده است حداقل هفت نشانگر باید روی هدف قرار داشته باشند. طراحی بهینه هدف با حداقل کردن تابع انرژی که با فاصله نشانگرها از یکدیگر رابطه عکس دارد نیز انجام شده است [۱۷]. مشکل روش تابع انرژی این است که با این روش ساختار هدف متقارن بدست می‌آید و لذا یافتن تناظر نشانگرها با مشکل مواجه می‌شود. در [۱۴] تاثیر چند ترکیب مختلف نشانگر بر خطای تخمین موقعیت بررسی شده است و نشان داده شده است که اگر نشانگرها به جای اینکه در یک صفحه قرار داشته باشند در یک حجم توزیع شده باشند خطای ردیابی می‌تواند تا ۴۱٪ بهبود یابد. در [۱۸] نشانگرها طوری روی سطح جسم قرار داده می‌شوند که از زاویه‌های مختلف حداقل تعداد مشخصی از آنها دیده شوند. مشکل اینجاست که در این روش باید مدل سه بعدی جسم (مش) معلوم باشد. در [۱۹] طراحی بر اساس اختلاف فاصله نشانگرها انجام شده است تا عدم تقارن هدف حفظ شود. همچنین ارزیابی‌ها فقط بر اساس تعداد ردیابی‌های درست ارائه شده است و دقت ردیابی بررسی نشده است. در [۲۰] فاصله نشانگرها از محل اتصال طوری تعیین شده‌اند تا کوچکترین تفاوت بین فاصله نشانگرها از یکدیگر (معیار عدم تشابه^۴ یا NS) حداکثر شود. معیار NS با کمی تغییر در [۲۱] نیز استفاده شده است به علاوه قرار نداشتن نشانگرها در یک راستا نیز به عنوان قید مسئله طراحی بهینه هدف پیشنهاد شده است. با این حال تاثیر ساختار هدف بر دقت ردیابی بررسی نشده است. در [۲۲] نیز روشی مشابه [۲۱] ارائه شده است با این تفاوت که قید حداقل و حداکثر فاصله مجاز نشانگرها از یکدیگر نیز لحاظ شده است ولی باز هم تاثیر ساختار هدف بر دقت ردیابی بررسی نشده است. در [۲۳] روشی هندسی برای تولید تعداد زیادی هدف با ساختارهای متفاوت ارائه شده است و تنها متفاوت بودن ساختار هدف در نظر گرفته شده است و تاثیر آن بر خطای ردیابی بررسی نشده است. در [۲۴] نیز تنها اشاره‌ای به ساختار مناسب هدف شده است و روشی ارائه نشده است.

۱-۳ روش پیشنهادی

در این مقاله ما به دنبال طراحی بهینه ساختار یک هدف با پنج نشانگر هستیم که در سیستم ردیاب مبتنی بر تنها یک دوربین با پارامترهای ذاتی^۵ معلوم استفاده می‌شود (شکل ۱). اگر تعداد نشانگرها کمتر از پنج انتخاب شود با توجه به احتمال بودن انسداد نشانگرها، احتمال اینکه حداقل سه نشانگر در تصویر قابل تشخیص باشند کم می‌شود و در این حالت تخمین وضعیت هدف غیر ممکن می‌شود. تعداد بیشتر نشانگر نیز با اینکه می‌تواند باعث افزایش قابلیت اطمینان و دقت ردیابی شود ولی به دلیل افزایش پیچیدگی و وزن هدف مناسب نیست.

که روی جسم قرار می‌گیرند و در تصویر دوربین به راحتی قابل تشخیص هستند. معمولاً نشانگرها در تصویر راحت‌تر از نقاط شاخص جسم قابل تشخیص هستند و مکان آنها در تصویر را با دقت بیشتر و پردازش کمتری می‌توان بدست آورد؛ لذا، استفاده از نشانگر باعث افزایش دقت و سرعت سیستم می‌شود.

نشانگرهای مورد استفاده در این سیستم‌ها یا فعال هستند و از خود نور تولید می‌کنند یا غیر فعال هستند و تنها بازتاب کننده نور هستند. امروزه در سیستم‌های ردیاب نوری از نشانگرهای فعال به دلیل لزوم وجود سخت‌افزار اضافی روی نشانگر (به عنوان منبع نور) کمتر استفاده می‌شود. معمولاً از نشانگرهای غیر فعال کروی که قادر به بازتاب نور در جهت‌های مختلف می‌باشند، استفاده می‌شود. به منظور تعیین وضعیت سه بعدی هدف نسبت به دستگاه متصل به دوربین، حداقل سه نشانگر با موقعیت معلوم نسبت به دستگاه مختصات متصل به هدف لازم است اما در عمل از تعداد بیشتری نشانگر استفاده می‌شود تا در صورت همپوشانی نشانگرها سیستم قادر به ردیابی هدف باشد.

طراحی ساختار هدف یا به عبارتی دیگر تعیین چیدمان نشانگرهای متصل به هدف در یک سیستم ردیاب نوری به دو دلیل اهمیت دارد اول به خاطر تاثیر آن بر خطای ردیابی و دوم به خاطر تاثیر آن بر قابل شناسایی بودن نشانگرهای هدف از یکدیگر (مسئله تناظر^۱). به خوبی معلوم است که ساختار هدف بر خطای ردیابی تاثیر می‌گذارد. برخی ساختارها باعث افزایش دقت ردیابی می‌شوند و برخی حتی غیر قابل ردیابی هستند (به عنوان مثال ۳ نشانگر در یک راستا^۲) [۱۳] و [۱۴]. از طرفی به منظور تعیین درست وضعیت هدف باید تناظر بین نشانگرها در صحنه و تصویرشان در دوربین معلوم باشد. یعنی بتوانیم تشخیص دهیم که تصویر هر نشانگر در خروجی دوربین مربوط به کدام نشانگر هدف است. با توجه به اینکه در اکثر موارد نشانگرها ظاهر یکسان دارند چیدمان آنها روی هدف باید به گونه‌ای باشد تا بتوان آنها را از یکدیگر تشخیص داد. اگر نشانگرها به صورت متقارن روی هدف قرار گرفته باشند تشخیص آنها ناممکن می‌شود و هرچه تقارن چیدمان نشانگرها کمتر باشد تشخیص آنها از یکدیگر آسان‌تر خواهد بود.

۱-۲ پیشینه

تاکنون تلاش‌های متعددی در زمینه تعیین چیدمان نشانگرهای هدف در سیستم‌های ردیاب مبتنی بر دوربین صورت گرفته است. به عنوان مثال [۱۳] و [۱۵] با شبیه‌سازی به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف هدف از جمله اندازه، ارتفاع و تعداد نشانگرها بر خطای موقعیت‌یابی پرداخته‌اند ولی روشی برای طراحی هدف ارائه نداده‌اند. همچنین از آنجاکه در [۱۵] از روش کالیبراسیون

³ Tsai Calibration

⁴ Non-similarity

⁵ Intrinsic Parameters

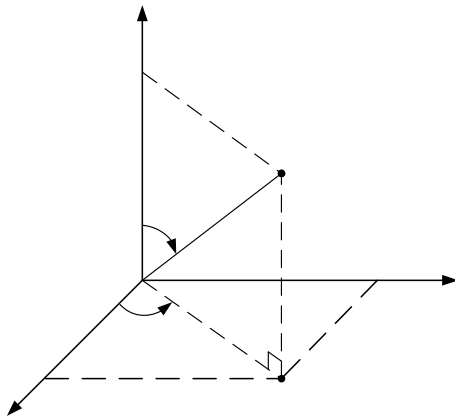
¹ Correspondence Problem

² Collinear

جمعیت اولیه تصادفی متفاوت تکرار شده است و بهترین جواب به عنوان جواب بهینه انتخاب شده است.

پارامترهای این بهینه‌سازی (مختصات نشانگرها) در دستگاه مختصات کروی در نظر گرفته شده‌اند. اگر مختصات کارترین i امین نشانگر در دستگاه متصل به هدف با $\mathbf{p}_i^t = [x_i^t \ y_i^t \ z_i^t]^T$ نمایش داده شود با توجه به شکل ۲، روابط ۱ بین مختصات کروی $(r_i^t, \phi_i^t, \theta_i^t)$ و کارترین نشانگر i ام برقرار خواهد بود.

$$\begin{aligned} x_i^t &= r_i^t \sin \phi_i^t \cos \theta_i^t \\ y_i^t &= r_i^t \sin \phi_i^t \sin \theta_i^t \\ z_i^t &= r_i^t \cos \phi_i^t \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۲ مختصات کروی

در طراحی ساختار هدف بازه تغییرات پارامترها به صورت رابطه ۲ لحاظ شده است. در ادامه ابتدا تابع هدف جدیدی به نام DFP جهت تعیین موقعیت نشانگرها ارائه می‌شود سپس مقایسه‌ای بین کارایی توابع هدف پیشنهادی با تابع هدف سایر روشها انجام می‌شود.

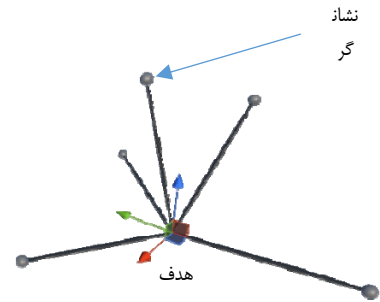
$$\begin{cases} 10\text{cm} \leq r_i^t \leq 30\text{cm} \\ 0^\circ \leq \theta_i^t < 360^\circ \\ 0^\circ \leq \phi_i^t \leq 85^\circ \end{cases} \quad (2)$$

۲-۱ روش DFP ساده و مقید

هر سه نشانگر از هدف تشکیل یک صفحه یکتا می‌دهند (مشروط بر اینکه هر سه مجزا باشند). به این ترتیب برای یک هدف با N نشانگر، ترکیب سه‌تایی مختلف نشانگر و در نتیجه M صفحه مختلف وجود دارند. مقدار M از رابطه ۳ بر حسب N قابل محاسبه است.

$$M = \binom{N}{3} = \frac{N!}{(N-3)! \times 3!} \quad (3)$$

در روش DFP ساده مختصات نشانگرها در دستگاه متصل به هدف طوری تعیین می‌شود که مجموع فاصله تمام نشانگرها از این M صفحه حداکثر شود. معادله صفحه یکتای گذرنده از سه نشانگر مجزای \mathbf{p}_j^t ، \mathbf{p}_k^t و \mathbf{p}_l^t (به صورت رابطه ۴ قابل بیان است [۲۵]) که در آن عملگر ضرب داخلی، یک نقطه دلخواه از این صفحه و بردار عمود بر این صفحه (شکل ۳) در دستگاه



شکل ۱ ردیابی هدف متشکل از پنج نشانگر با یک دوربین

همانطور که اشاره شد افزایش فاصله بین نشانگرها خطای موقعیت‌یابی هدف را کاهش می‌دهد. با افزایش فاصله بین نشانگرها حجم چندوجهی محیط بر نشانگرها نیز افزایش می‌یابد با لحاظ این موضوع در این مقاله یک تابع هدف جدید به نام DFP^۱ برای چینش نشانگرها در یک هدف پیشنهاد شده است. این تابع برابر با مجموع فاصله هر نشانگر از صفحات تشکیل شده توسط ترکیب سه‌تایی‌های سایر نشانگرها تعریف می‌گردد. با حداکثر نمودن این تابع نشان می‌دهیم که دقت موقعیت‌یابی نسبت به سایر روش‌های مرور شده بیشتر می‌شود. به علاوه برای پرهیز از بدست آوردن ساختارهای متقارن که در آن بر حسب زنی نشانگرها ناممکن می‌شود قید عدم تشابه به تابع هدف اعمال می‌گردد. بر این اساس روش اشاره شده را DFP مقید می‌نامیم.

روش‌های پیشنهادی DFP ساده و DFP مقید را با تابع انرژی مرجع [۱۷]، تابع انرژی مقید و NS مقید [۲۲] به لحاظ تجربی مقایسه می‌نماییم. این روش‌ها از لحاظ دقت، سرعت ردیابی و همچنین حساسیت در برابر نویز تصویر مورد ارزیابی قرار گرفته و با هم مقایسه می‌شوند.

ساختار مقاله در ادامه به صورت زیر می‌باشد: در بخش ۲ روش‌های DFP ساده و مقید، تابع انرژی ساده و مقید و NS مقید شرح داده می‌شوند و ساختار بهینه هدف برای هر روش بدست می‌آید. شبیه‌سازی و ارزیابی اهداف بدست آمده از روش‌های مختلف مذکور در بخش ۳ انجام می‌شود. در نهایت در بخش ۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

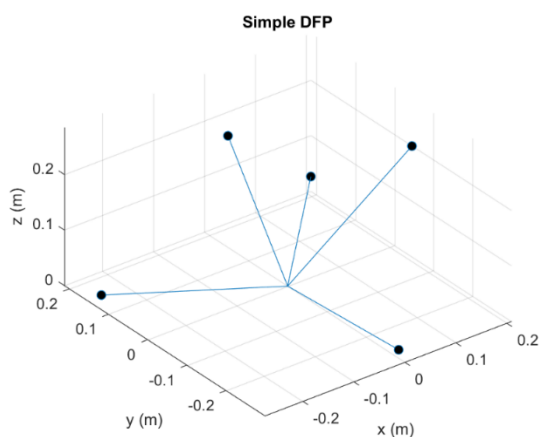
۲ طراحی بهینه ساختار هدف

در طراحی بهینه ساختار هدف به دنبال تعیین مختصات پنج نشانگر در دستگاه متصل به هدف هستیم به طوری که یک تابع هدف حداقل یا حداکثر شود. از الگوریتم ژنتیک (GA)^۲ با اندازه جمعیت ۱۰۰۰ برای این بهینه‌سازی استفاده شده است و به منظور رسیدن به جواب بهینه سراسری، بهینه‌سازی ۱۰۰ بار و هر بار با

¹Objective Function

²Distance From Plane

³Genetic Algorithm



شکل ۴ هدف طراحی شده با روش DFP ساده

ساختاری که با استفاده از این روش بدست می‌آید تا حدی متقارن است. برای نشان دادن این موضوع فاصله تمام نشانگرها از یکدیگر را در جدول ۲ در نظر بگیرید. ملاحظه می‌شود که فاصله نشانگر ۱ تا نشانگرهای ۲ و ۴ برابرند (49.3cm). فاصله نشانگر ۳ تا نشانگرهای ۲ و ۴ نیز با هم برابرند (43.1cm). همچنین فاصله نشانگر ۵ تا نشانگرهای ۲ و ۴ هر دو برابر 35.4cm هستند. تشابه فاصله نشانگرها کار تشخیص آنها از یکدیگر را مشکل می‌کند لذا برای پرهیز از این مسئله یک قید عدم تشابه به مسئله بهینه‌سازی اضافه می‌کنیم.

بردار $\mathbf{v} = [v_1 \dots v_n]^T$ را به گونه‌ای در نظر بگیرید که مؤلفه‌های آن تمام فاصله‌های بین N نشانگر هدف باشند. این بردار $n = \frac{N(N-1)}{2}$ مؤلفه دارد. حال مجموعه S را متشکل از قدر مطلق اختلاف هر جفت از مؤلفه‌های بردار \mathbf{v} در نظر بگیرید یعنی $S = \cup_{i \neq j} |v_i - v_j|$. به منظور بدست آوردن ساختاری غیر متقارن، به تابع هدف روش DFP قید عدم تشابه به صورت زیر اضافه می‌شود:

$$\begin{cases} \max f_{obj}(\mathbf{p}_1^t, \dots, \mathbf{p}_N^t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M d_{ij} \\ \text{s.t. } S_{min} \geq d_m \end{cases} \quad (8)$$

منظور از S_{min} کوچکترین عضو مجموعه S است و پارامتر d_m حداقل اختلاف مجاز بین فاصله‌های نشانگرها را مشخص می‌کند. حداقل اختلاف بین فاصله‌های نشانگرها در روش DFP ساده صفر بدست آمده است (سطر آخر)

جدول (۲) که نشان از وجود تقارن در ساختار هدف دارد. در جدول ۳ مختصات بهینه نشانگرها که با روش DFP مقید بدست آمده‌اند ($d_m = 3cm$) ارائه شده است. همچنین مدل سه‌بعدی هدف در شکل ۵ رسم شده است.

جدول ۳ مختصات نشانگرهای هدف طراحی شده با روش DFP مقید

θ	ϕ	r_i	z_i	y	x	i
-70.27	44.48	29.12	20.78	-19.20	6.89	1
-130.06	85.00	29.15	2.54	-22.22	-18.69	2
133.95	13.82	30.00	29.13	5.16	-4.97	3
123.38	85.00	29.02	2.53	24.14	-15.91	4
9.22	85.00	30.00	2.61	4.79	29.50	5

متصل به هدف هستند. همچنین بردار \mathbf{n}_j از رابطه ۵ بدست می‌آید که در آن \times عملگر ضرب خارجی است.

$$\mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{p}^t - \mathbf{p}_j^t) = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{n}_j = (\mathbf{p}_k^t - \mathbf{p}_j^t) \times (\mathbf{p}_i^t - \mathbf{p}_j^t) \quad (5)$$

هر صفحه در فضای سه‌بعدی با بردار عمود بر آن و یک نقطه روی آن کاملاً مشخص می‌شود [۲۵]؛ برای این اساس، فرض می‌کنیم \mathbf{n}_j و \mathbf{p}_j^t بردار عمود و یک نقطه از صفحه زام (یکی از M صفحه هدف) باشند آنگاه فاصله نشانگر i ام از صفحه زام عبارت خواهد بود از [۲۶]:

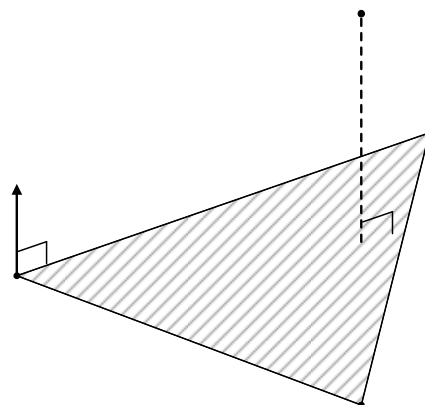
$$d_{ij} = \left| \frac{\mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{p}_i^t - \mathbf{p}_j^t)}{\|\mathbf{n}_j\|} \right| \quad (6)$$

منظور از $\|\mathbf{n}_j\|$ طول بردار \mathbf{n}_j است. در روش DFP ساده ساختار بهینه (مختصات نشانگرها) با حداکثر کردن تابع هدف f_{obj} به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\max f_{obj}(\mathbf{p}_1^t, \dots, \mathbf{p}_N^t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M d_{ij} \quad (7)$$

در

جدول ۱ مختصات پنج نشانگر هدف طراحی شده به این روش آمده است. همچنین ساختار هدف در شکل ۴ ارائه شده است.

شکل ۳ صفحه تشکیل شده از سه نشانگر \mathbf{p}_j^t ، \mathbf{p}_k^t و \mathbf{p}_i^t

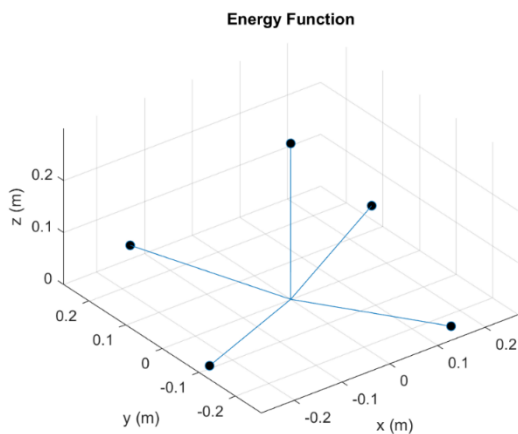
جدول ۱ مختصات نشانگرهای هدف طراحی شده با روش DFP ساده

θ	ϕ	r_i	z_i	y	x	i
156.69	85.00	30.00	2.61	11.83	-27.45	1
45.56	85.00	30.00	2.61	21.34	20.93	2
156.72	18.62	30.00	28.43	3.79	-8.80	3
-92.20	85.00	30.00	2.61	-29.86	-1.15	4
-23.33	41.67	30.00	22.41	-7.90	18.31	5

جدول ۲ فاصله (بر حسب cm) نشانگرهای هدف طراحی شده با روش

DFP ساده از یکدیگر

	Marker 1	Marker 2	Marker 3	Marker 4	Marker 5
Marker 1	49.3				
Marker 2	32.8	43.1			
Marker 3	49.3	55.8	43.1		
Marker 4	53.6	35.4	30.1	35.4	
Marker 5					35.4



شکل ۶ هدف طراحی شده با روش تابع انرژی ساده

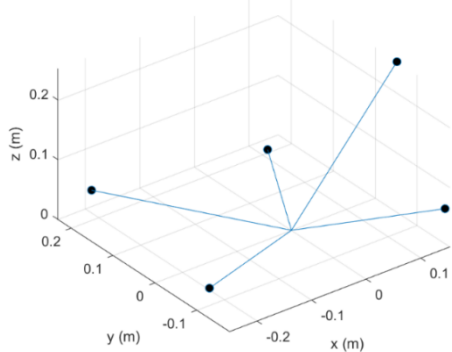
مانند قبل در روش تابع انرژی مقید برای از بین بردن تقارن، قید عدم تشابه (با $d_m = 3cm$) به مسئله بهینه‌سازی اضافه شده است. ساختار بهینه بدست آمده با این بهینه‌سازی در جدول ۷، جدول ۸ و شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۷ مختصات نشانگرهای هدف طراحی شده با روش تابع انرژی مقید

θ	ϕ	r_i	z_i	y	x	i
-152.53	79.84	28.62	5.05	-13.00	-24.99	1
-50.80	73.78	23.89	6.67	-17.78	14.50	2
129.01	84.85	30.00	2.70	23.22	-18.81	3
64.43	76.34	17.23	4.07	15.11	7.23	4
-18.88	32.63	30.00	25.27	-5.24	15.31	5

جدول ۸ فاصله (بر حسب cm) نشانگرهای هدف طراحی شده با روش تابع انرژی مقید از یکدیگر

	Marker 1	Marker 2	Marker 3	Marker 4	Marker 5
Marker 1	34.6				
Marker 2	52.9	28.7			
Marker 3	49.9	43.7	37.8		
Marker 4	47.0	40.7	31.7	55.8	
Marker 5					30.5



شکل ۷ هدف طراحی شده با روش تابع انرژی مقید

۲-۳ روش NS مقید

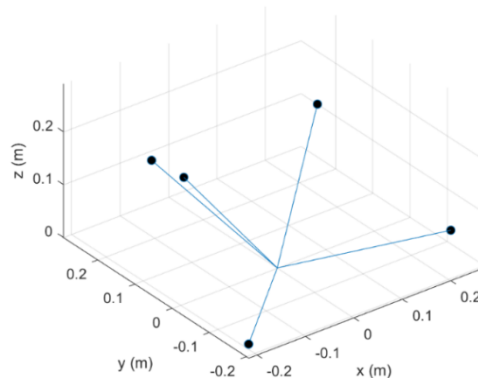
روش NS مقید برگرفته از روش ارائه شده در مرجع [۲۲] است. در این روش به منظور کاهش هرچه بیشتر تقارن، حداقل اختلاف

جدول ۴ نیز شامل فاصله نشانگرها از یکدیگر است. ملاحظه می‌شود که با این روش حداقل اختلاف فاصله‌ها 2.9cm بدست آمده است که مبین عدم تقارن ساختار هدف بدست آمده با روش DFP مقید است.

جدول ۴ فاصله (بر حسب cm) نشانگرهای هدف طراحی شده با روش DFP مقید از یکدیگر

	Marker 1	Marker 2	Marker 3	Marker 4	Marker 5
Marker 1	34.6				
Marker 2	52.9	28.7			
Marker 3	49.9	43.7	37.8		
Marker 4	47.0	40.7	31.7	55.8	
Marker 5					55.8

Constraint DFP



شکل ۵ هدف طراحی شده با روش DFP مقید

۲-۲ روش تابع انرژی ساده و مقید

روش تابع انرژی بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۷] است. در این روش تابع انرژی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. منظور از تابع انرژی مجموع معکوس تمام فاصله‌های بین نشانگرها است:

$$f_{obj}(\mathbf{p}_1^t, \dots, \mathbf{p}_N^t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i} \quad (9)$$

با حداقل کردن تابع انرژی مختصات بهینه نشانگرها مطابق جدول ۵ بدست آمده‌اند. با محاسبه فاصله نشانگرها از یکدیگر (جدول ۶) ملاحظه می‌شود که در این حالت ساختار هدف تقارن زیادی دارد (شکل ۶) و S_{min} صفر شده است.

جدول ۵ مختصات نشانگرهای هدف طراحی شده با روش تابع انرژی ساده

θ	ϕ	r_i	z_i	y	x	i
-64.34	85.00	30.00	2.61	-26.94	12.94	1
115.70	85.00	30.00	2.61	26.93	-12.96	2
25.72	85.00	30.00	2.61	12.97	26.92	3
-15.42	0.02	30.00	30.00	0.00	0.01	4
-154.32	85.00	30.00	2.61	-12.95	-26.93	5

جدول ۶ فاصله (بر حسب cm) نشانگرهای هدف طراحی شده با روش تابع انرژی ساده از یکدیگر

	Marker 1	Marker 2	Marker 3	Marker 4	Marker 5
Marker 1	59.8				
Marker 2	42.3	42.3			
Marker 3	40.5	40.5	40.5		
Marker 4	42.3	42.3	40.5	59.8	
Marker 5					40.5

بازی Unity (شکل ۹) شبیه‌سازی شده است. تصویر دوربین بدون اعوجاج^۲ فرض شده است. هر یک از پنج هدف طراحی شده در بخش قبل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. ارزیابی‌ها بر اساس خطای باز-تولید^۳، خطای موقعیت، خطای دوران و سرعت همگرایی انجام شده‌اند. همچنین تاثیر نویز تصویر نیز بررسی شده است. اگر مختصات نشانگر i ام هدف در دستگاه متصل به دوربین را با صورت زیر قابل بیان است:

$$\mathbf{p}_i^c = \mathbf{R}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{p}_i^t + \mathbf{t} \quad (11)$$

ماتریس $\mathbf{R}(\boldsymbol{\omega})$ که بردار از بردار $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ می‌باشد، ماتریس دوران و بردار \mathbf{t} محور دوران است که طول آن می‌باشد، ماتریس دوران توسط فرمول رودریگز [۲۷] به صورت زیر برحسب $\boldsymbol{\omega}$ بیان می‌شود:

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{I} + \frac{\sin \theta}{\theta} [\boldsymbol{\omega}]_x + \frac{(1 - \cos \theta)}{\theta^2} [\boldsymbol{\omega}]_x^2 \quad (12)$$

که در آن \mathbf{I} ماتریس همانی و $[\boldsymbol{\omega}]_x$ ماتریس ضرب خارجی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[\boldsymbol{\omega}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & \omega_y \\ \omega_x & 0 & -\omega_z \\ -\omega_y & \omega_z & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

همچنین \mathbf{t} بردار انتقال هدف نسبت به دوربین است. در دوربین بدون اعوجاج مختصات دو بعدی تصویر نشانگر i ام بر حسب پیکسل $[u_i \ v_i]^T$ با رابطه زیر به \mathbf{p}_i^c بر حسب متر مرتبط است [۱۳]:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}\mathbf{p}_i^c \quad (14)$$

که در آن \mathbf{K} ماتریس پارامترهای داخلی دوربین است که مقادیر آن در این شبیه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 406.1659 & 0 & 476.5 \\ 0 & 406.1659 & 234.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

از آنجا که \mathbf{K} یک ماتریس بالا مثلثی با عناصر قطری غیر صفر است معکوس آن وجود دارد و بالا مثلثی نیز خواهد بود [۲۸]. از طرفی چون عنصر واقع در سطر سوم و ستون سوم ماتریس \mathbf{K} یک است عنصر متناظر آن در \mathbf{K}^{-1} نیز باید یک باشد؛ لذا، داریم:

$$\mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در آن $[\tilde{u}_i \ \tilde{v}_i]^T$ مختصات نرمال شده تصویر نشانگر i ام است. با توجه به (۱۱)، (۱۴) و (۱۶) داریم:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{B}(\mathbf{R}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{p}_i^t + \mathbf{t})}{\mathbf{c}^T(\mathbf{R}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{p}_i^t + \mathbf{t})} \quad (17)$$

ماتریس \mathbf{B} و بردار \mathbf{c} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

بین فاصله‌های نشانگرها یعنی S_{min} حداکثر می‌شود. این روش دو قید نیز دارد:

۱. فاصله نشانگرها از یکدیگر بین D_1 و D_2 باشد.
۲. فاصله هر نشانگر تا خط واصل هر جفت نشانگر دیگر از H بیشتر باشد.

قید دوم برای پرهیز از قرار گرفتن نشانگرها روی یک خط راست می‌باشد. لذا در این روش مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \max f_{obj}(\mathbf{p}_1^t, \dots, \mathbf{p}_N^t) = S_{min} \\ s. t. \quad D_1 \leq v_i \leq D_2, i = 1, \dots, n \\ h_{min} \geq H \end{cases} \quad (10)$$

که در آن h_{min} حداقل فاصله نشانگرها از خطوط واصل تمام جفت نشانگرهای هدف است. پارامترهای $D_1 = 15cm$ ، $D_2 = 100cm$ و $H = 12cm$ قرار داده شدند. مختصات بهینه نشانگرها در جدول ۹ و فاصله نشانگرها از یکدیگر در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند. در این روش $S_{min} = 4.4cm$ شده است که نشان از تقارن بسیار کم هدف طراحی شده با این روش دارد. این ساختار بهینه در شکل ۸ نشان داده شده است.

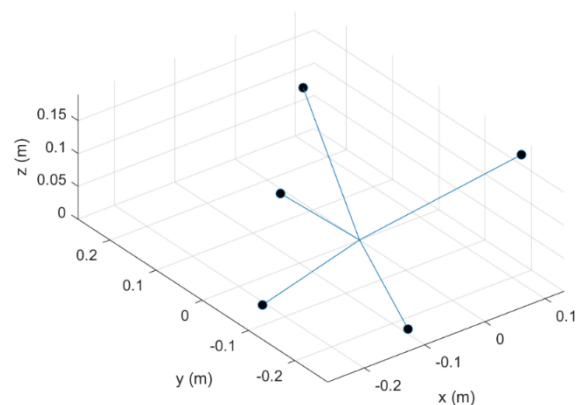
جدول ۹ مختصات نشانگرهای هدف طراحی شده با روش NS مقید

θ	ϕ	r_i	z_i	y_i	x_i	i
67.20	76.85	30.00	6.82	26.93	11.32	1
-154.40	50.57	29.73	18.88	-9.92	-20.71	2
-53.69	53.31	27.66	16.53	-17.87	13.13	3
-153.49	79.82	29.58	5.23	-13.00	-26.05	4
-115.14	83.73	30.00	3.28	-27.00	-12.67	5

جدول ۱۰ فاصله (بر حسب cm) نشانگرهای هدف طراحی شده با روش NS مقید از یکدیگر

	Marker 1	Marker 2	Marker 3	Marker 4	Marker 5
Marker 1	50.3				
Marker 2	34.8	45.9			
Marker 3	41.1	15.0	54.7		
Marker 4	19.5	30.4	24.5	59.1	
Marker 5					

Constraint NS



شکل ۸ هدف طراحی شده با روش NS مقید

۳ شبیه‌سازی و ارزیابی

به منظور ارزیابی روش DFP ارائه شده در این مقاله با روش‌های مطرح شده در بخش قبل، ردیابی تک دوربینی^۱ هدف در موتور

²Distortion

³Re-Projection Error

¹Monocular

مختلف نویز تصویر رسم شده‌اند. در هر سه نمودار خطا با افزایش نویز زیاد می‌شود. در مورد روش NS مقید ملاحظه می‌شود که خطای موقعیت و دوران با سرعت بیشتری افزایش یافته است و این یعنی ردیابی هدف طراحی شده به روش NS مقید حساسیت بیشتری نسبت به نویز تصویر داشته است. در شکل ۱۷ نیز میانگین تعداد تکرار الگوریتم LM بر حسب نویز تصویر رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش نویز تصویر تعداد تکرار لازم برای همگرایی LM افزایش می‌یابد و این افزایش با شیب یکسانی برای هر پنج هدف صورت گرفته است.

۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی بهینه ساختار هدف در ردیابی سه‌بعدی با دوربین مورد تحقیق قرار گرفته است. برای این منظور تابع هدفی جدید به نام DFP معرفی گردید. این تابع بر اساس حداکثرکردن مجموع فاصله هر نشانگر از تمام صفحاتی که توسط سه‌تایی‌های سایر نشانگرها تعریف می‌گردد، پیشنهاد گردیده است. از آنجا که هدف طراحی شده با روش DFP کمی متقارن بود با افزودن قید عدم تقارن روش DFP مقید معرفی شد که باعث از بین رفتن تقارن هدف شد. با استفاده از شبیه‌سازی در موتور بازی Unity هدف طراحی شده با روش DFP و مقید با اهداف طراحی شده با روش‌های تابع انرژی (ساده و مقید) و روش NS مقید از لحاظ خطای باز-تولید، خطای تخمین وضعیت سه‌بعدی و سرعت ردیابی مقایسه شدند. از شبیه‌سازی انجام شده این نتیجه حاصل شد که با اینکه هدف طراحی شده با روش NS مقید کمترین خطای باز-تولید را دارد ولی بیشترین خطای تخمین وضعیت را دارد و سرعت ردیابی این هدف کمتر از اهداف طراحی شده با سایر روش‌ها است. به علاوه خطای تخمین وضعیت سه‌بعدی آن نسبت به نویز تصویر حساسیت بیشتری دارد. از طرفی اهداف طراحی شده با روش‌های DFP ساده و تابع انرژی ساده با اینکه خطای باز-تولید کمی بیشتر داشتند ولی کمترین خطای تخمین وضعیت سه‌بعدی را داشتند و سرعت ردیابی این اهداف بیشتر از بقیه بود؛ ولی، مشکل آنها متقارن بودن آنها است که کار تفکیک نشانگرها از یکدیگر را با مشکل مواجه می‌کند. از این رو با توجه به اینکه هدف طراحی شده به روش DFP مقید متقارن نیست و خطای تخمین وضعیت سه‌بعدی آن نیز کم است (کمتر از هدف طراحی شده به روش تابع انرژی مقید و کمی بیشتر از اهداف طراحی شده به روش‌های DFP ساده و تابع انرژی ساده) و خطای باز-تولید آن در حد سایر هدف‌ها است، مناسب‌تر از سایر هدف‌ها می‌باشد.

برای تعیین وضعیت هدف نسبت به دوربین لازم است بردارهای ω و t بدست آیند. روشی که در این شبیه‌سازی برای این منظور استفاده شده است بر اساس حداقل کردن مجموع مربعات خطای باز-تولید تصویر نشانگرهای هدف می‌باشد. مربع خطای باز تولید نشانگر i ام به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$e_i^2(\omega, t) = (\tilde{u}_i - \tilde{u}_i^*)^2 + (\tilde{v}_i - \tilde{v}_i^*)^2 \quad (19)$$

که در آن $[\tilde{u}_i^* \ \tilde{v}_i^*]^T$ مختصات نرمال شده نشانگر i ام است که از تصویر دوربین استخراج شده است و همراه با خطای کوانتیزاسیون و نویز می‌باشد. در این شبیه‌سازی با حداقل کردن تابع هدف زیر، ω و t تخمین زده می‌شوند:

$$f_{obj}(\omega, t) = \sum_{i=1}^N e_i^2(\omega, t) \quad (20)$$

از آنجا که این تابع برحسب پارامترها غیر خطی است از الگوریتم لوبنبرگ-مارکارد (LM)^۱ برای حداقل کردن آن استفاده شده است. چون LM یک الگوریتم تکراری است احتیاج به حدس اولیه‌ای دارد که به اندازه کافی به جواب بهینه نزدیک باشد تا همگرایی آن تضمین شود. به همین دلیل در این شبیه‌سازی ابتدا مقدار اولیه ω و t با استفاده از روش غیر تکراری [EPnP] [۲۹] بدست می‌آید سپس مقدار آنها با الگوریتم LM تصحیح می‌شود.

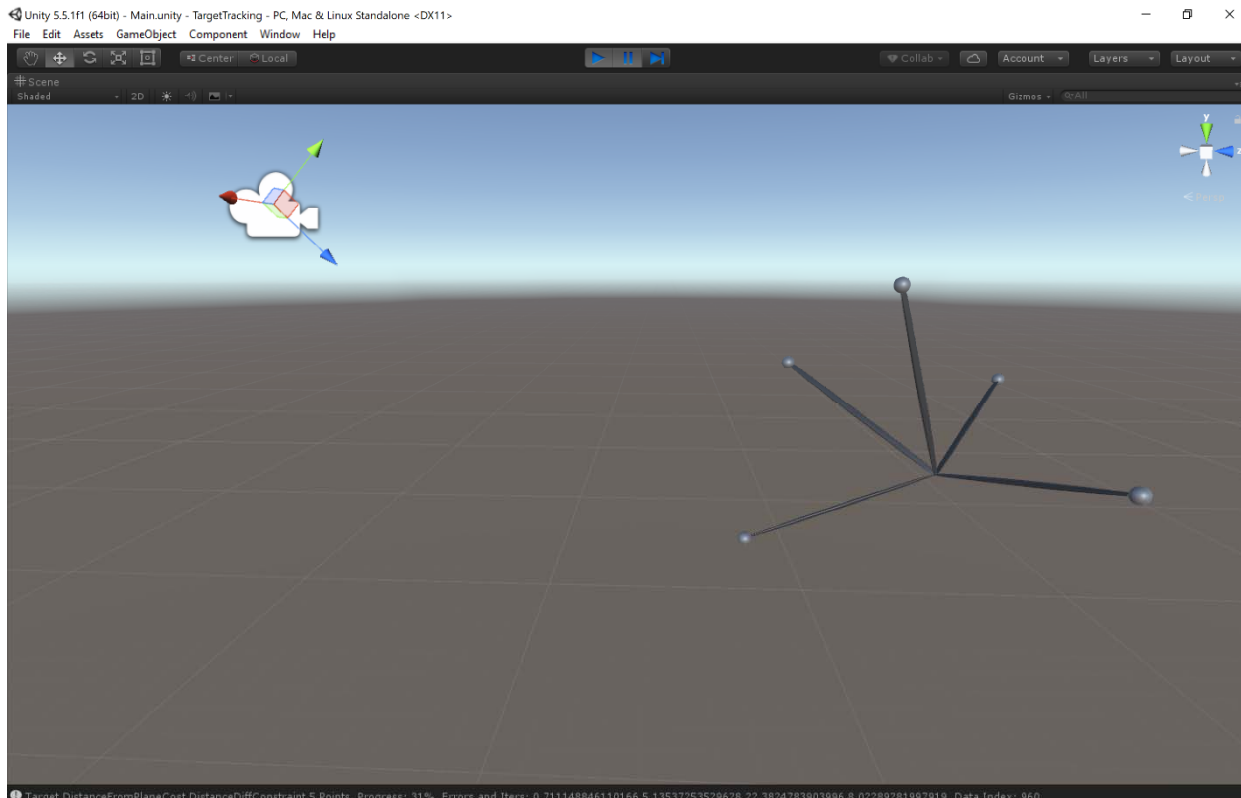
این شبیه‌سازی حدود ۳۰۰۰ بار برای هر یک از اهداف بدست آمده در بخش قبل تکرار شده است و هر بار هدف در وضعیت متفاوتی مقابل دوربین قرار داده شده است و موقعیت و دوران آن به روش فوق تخمین زده می‌شوند. در شکل ۱۰ جذر میانگین مربعات (RMS) خطای باز تولید نشانگرهای اهداف مذکور در تکرارهای شبیه‌سازی رسم شده است. ملاحظه می‌شود که کمترین و بیشترین خطای باز-تولید به ترتیب مربوط به هدف طراحی شده با روش NS مقید و تابع انرژی ساده بوده است.

در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب RMS خطای موقعیت و دوران در تکرارهای شبیه‌سازی رسم شده‌اند. ملاحظه می‌شود که این بار بدترین عملکرد (بیشترین خطا) مربوط به روش NS مقید می‌باشد و روش تابع انرژی کمترین خطا را داشته است.

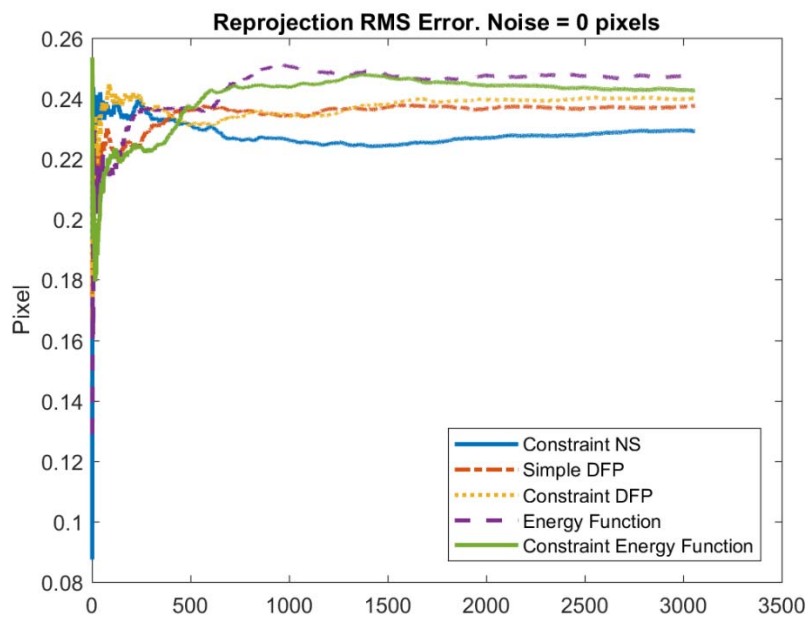
میانگین تعداد تکرارهای لازم برای همگرا شدن الگوریتم LM به ازاء پنج هدف طراحی شده در شکل ۱۳ بر حسب تکرارهای شبیه‌سازی رسم شده است. ملاحظه می‌شود که ردیابی هدف طراحی شده به روش NS مقید از همه کندتر بوده است و برای این هدف به طور میانگین حدود ۵,۸ تکرار در الگوریتم LM لازم است. در حالی که ردیابی اهداف طراحی شده به روش تابع انرژی ساده و DFP ساده از بقیه سریعتر بوده‌اند و LM بطور میانگین حدود ۵,۲ تکرار همگرا شده است.

تاثیر نویز تصویر بر خطاها و سرعت ردیابی نیز بررسی شده است. در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ و شکل ۱۶ به ترتیب RMS خطای باز-تولید، خطای موقعیت و خطای دوران بر حسب مقادیر

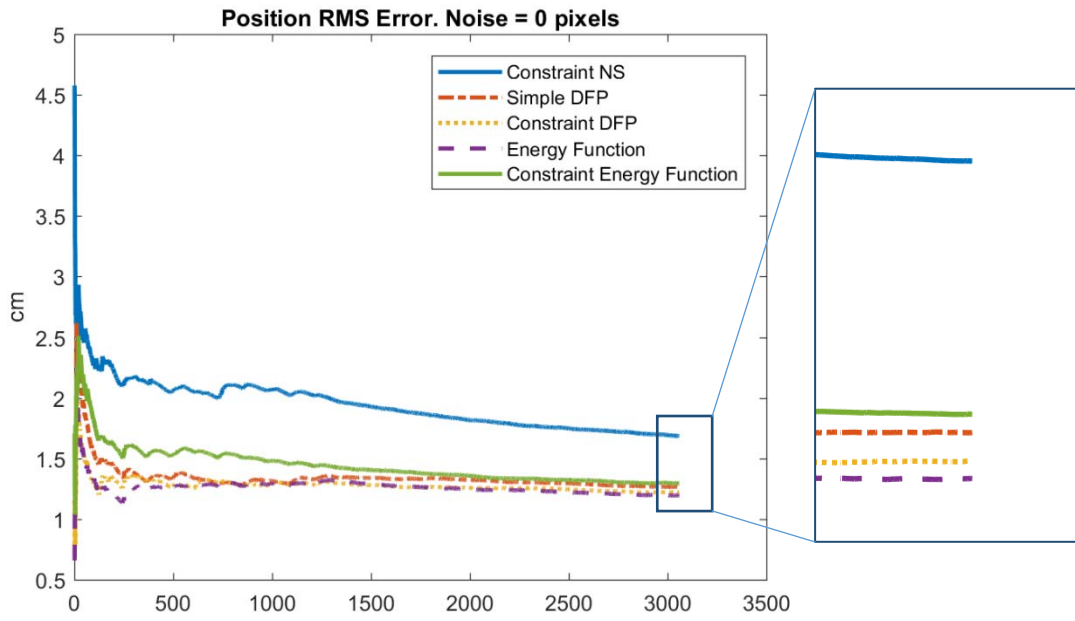
¹Levenberg-Marquardt



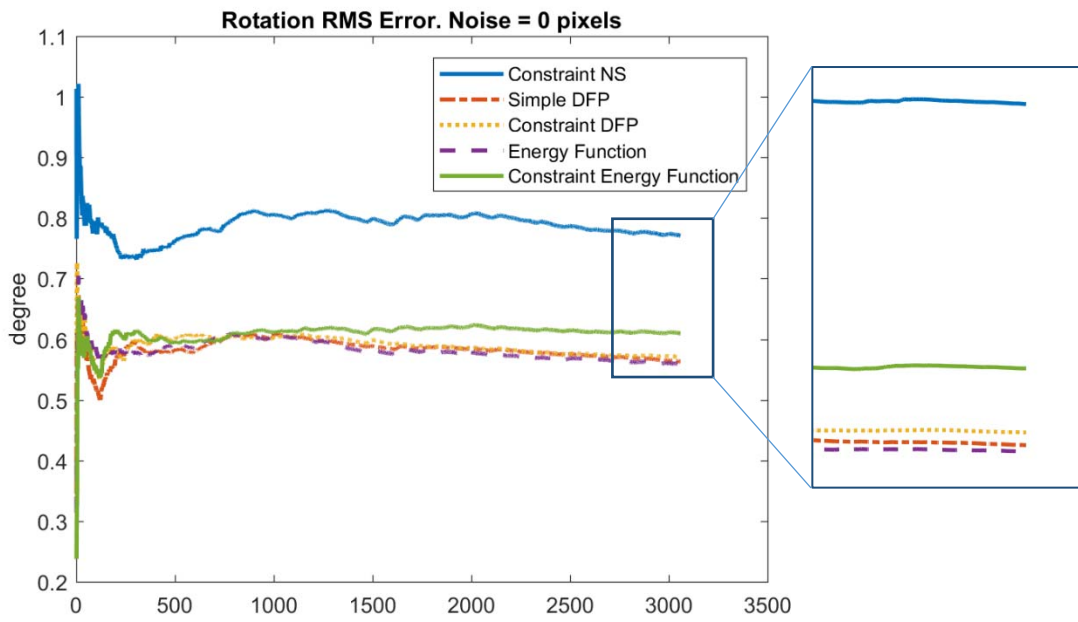
شکل ۹ شبیه‌سازی انجام شده در موتور بازی Unity



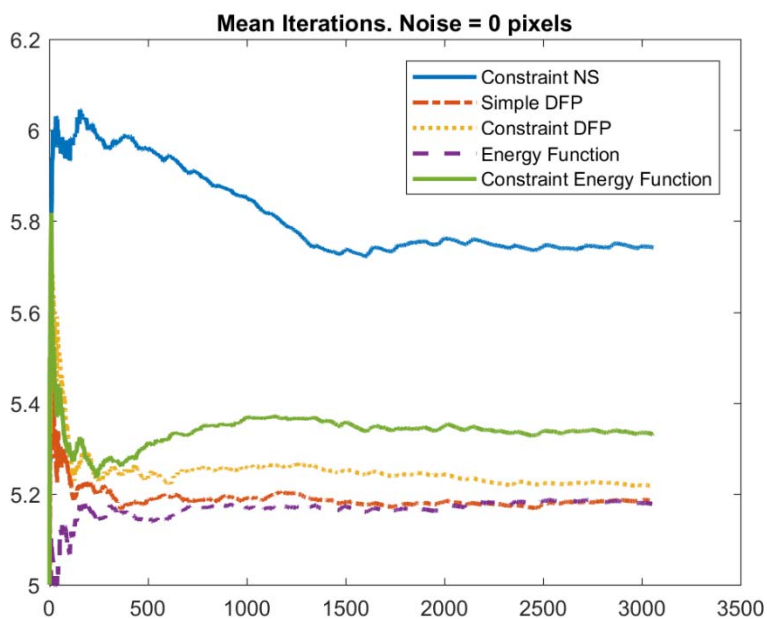
شکل ۱۰ RMS خطای باز-تولید اهداف طراحی شده در تکرارهای شبیه‌سازی



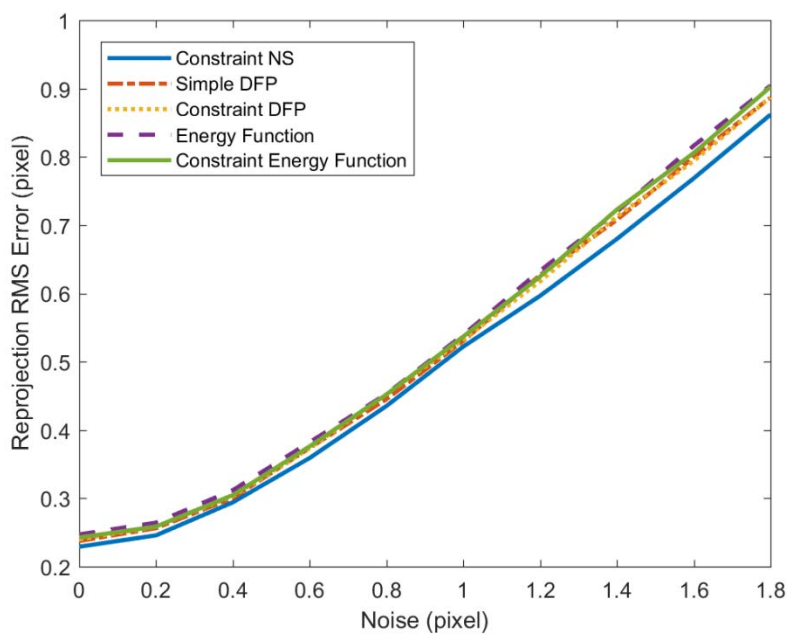
شکل ۱۱ RMS خطای تخمین موقعیت اهداف طراحی شده در تکرارهای شبیه‌سازی



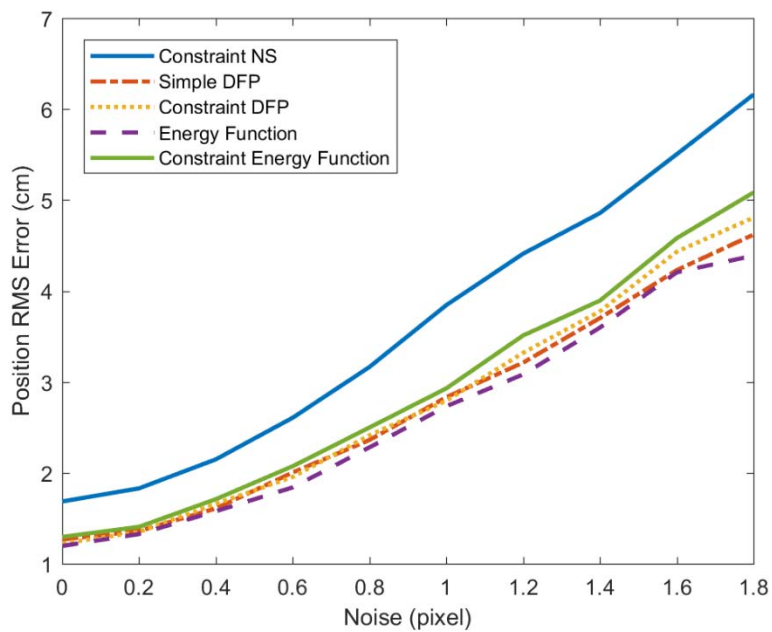
شکل ۱۲ RMS خطای تخمین دوران اهداف طراحی شده در تکرارهای شبیه‌سازی



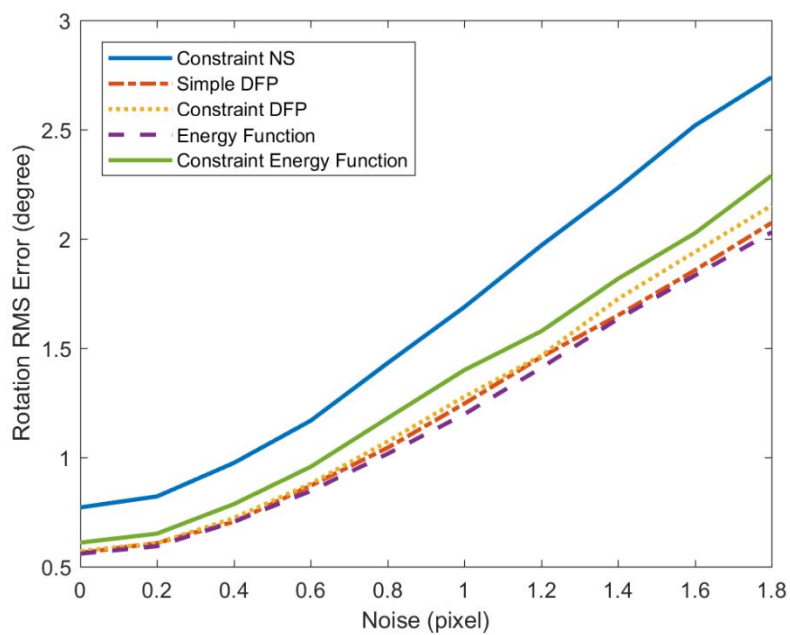
شکل ۱۳ میانگین تکرارهای لازم الگوریتم LM



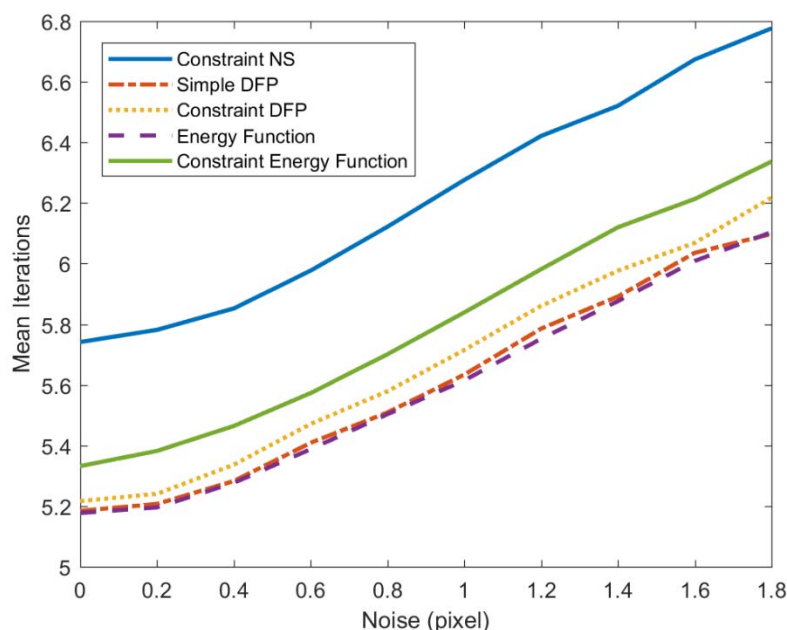
شکل ۱۴ تاثیر نویز تصویر بر خطای باز-تولید



شکل ۱۵ تاثیر نویز تصویر بر خطای تخمین موقعیت



شکل ۱۶ تاثیر نویز تصویر بر خطای تخمین دوران



شکل ۱۷ تاثیر نویز تصویر بر تکرارهای الگوریتم LM

networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 8, pp. 3897–3906, 2011.

- [9] K.-Y. Chen, K. Lyons, S. White, and S. Patel, “uTrack: 3D input using two magnetic sensors,” in *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 2013, pp. 237–244.
- [10] F. Adib, Z. Kabelac, D. Katabi, and R. C. Miller, “3D Tracking via Body Radio Reflections,” in *NSDI*, 2014, vol. 14, pp. 317–329.
- [11] V. Lepetit and P. Fua, “Monocular model-based 3d tracking of rigid objects: A survey,” *Found. Trends@ Comput. Graph. Vis.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–89, 2005.
- [12] G. Welch and E. Foxlin, “Motion tracking: No silver bullet, but a respectable arsenal,” *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 22, no. 6, pp. 24–38, 2002.
- [۱۳] ا. ناییب آستانه، ردیابی سه بعدی اشیای صلب با چند دوربین، پایان نامه کارشناسی ارشد برق، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶.
- [14] J. B. West and C. R. Maurer, “Designing optically tracked instruments for image-guided surgery,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 23, no. 5, pp. 533–545, 2004.
- [15] S. Vogt, A. Khamene, F. Sauer, and H. Niemann, “Single camera tracking of marker clusters: Multiparameter cluster optimization and experimental verification,” *Proc. - Int. Symp. Mix. Augment. Reality, ISMAR 2002*, pp. 127–138, 2002.
- [16] R. Tsai, “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses,” *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. 3, no. 4, pp. 323–344, 1987.
- [17] L. Davis, J. Rolland, R. Parsons, and E. Clarkson, “Methods for designing head-tracking probes,” in

مراجع

- [1] A. Menache, *Understanding motion capture for computer animation and video games*. Morgan kaufmann, 2000.
- [2] A. B. Craig, *Understanding augmented reality: Concepts and applications*. Newnes, 2013.
- [3] A. Shingade and A. Ghotkar, “Animation of 3d human model using markerless motion capture applied to sports,” *Int. J. Comput. Graph. Animat.*, vol. 4, no. 1, pp. 27–39, 2014.
- [4] A. Patrizi, E. Pennestrì, and P. P. Valentini, “Comparison between low-cost marker-less and high-end marker-based motion capture systems for the computer-aided assessment of working ergonomics,” *Ergonomics*, vol. 59, no. 1, pp. 155–162, 2016.
- [5] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB® Second, Completely Revised*, vol. 118. Springer, 2017.
- [6] X. Gu, Y. Zhang, W. Sun, Y. Bian, D. Zhou, and P. O. Kristensson, “Dexmo: An inexpensive and lightweight mechanical exoskeleton for motion capture and force feedback in VR,” in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2016, pp. 1991–1995.
- [7] D. Roetenberg, H. Luinge, and P. Slycke, “Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors,” *Xsens Motion Technol. BV, Tech. Rep.*, vol. 1, 2009.
- [8] G. Isbitiren and O. B. Akan, “Three-dimensional underwater target tracking with acoustic sensor



امیرحسین ناییب آستانه مدرک کارشناسی را سال ۱۳۸۳ از دانشگاه فردوسی مشهد در رشته مهندسی برق گرایش کنترل، مدرک کارشناسی ارشد را سال ۱۳۸۶ از دانشگاه فردوسی مشهد در رشته مهندسی برق گرایش کنترل و مدرک دکتری تخصصی را سال ۱۳۹۳ از دانشگاه فردوسی مشهد در رشته مهندسی برق گرایش کنترل اخذ نمودند. ایشان از سال ۱۳۹۳ در دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود مشغول به فعالیت بودند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان بینایی ماشین سه‌بعدی، شناسایی سیستم و رباتیک است.



علیرضا احمدی فرد مدرک کارشناسی را از دانشگاه صنعتی اصفهان در مهندسی الکترونیک و کارشناسی ارشد را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر در مهندسی مخابرات اخذ نمودند. ایشان مدرک دکتری تخصصی از مرکز CVSSP دانشگاه Surrey در سال ۲۰۰۲ اخذ نمودند. ایشان از سال ۱۳۸۷ در دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شناسایی الگو و پردازش تصاویر و سیگنال می‌باشد.

Proceedings of the Joint Conference on Information Sciences (JCIS), 2002, no. January, pp. 498–502.

- [18] L. Davis, F. G. Hamza-Lup, and J. P. Rolland, "A method for designing marker-based tracking probes," in *Mixed and Augmented Reality, 2004. ISMAR 2004. Third IEEE and ACM International Symposium on*, 2004, pp. 120–129.
- [19] C. Jansen, F. Steinicke, K. Hinrichs, J. Vahrenhold, and B. Schwald, "Performance improvement for optical tracking by adapting marker arrangements," in *IEEE VR 2007 Workshop on Trends and Issues in Tracking for Virtual Environments*, 2007.
- [20] T. Pintaric and H. Kaufmann, "Affordable infrared-optical pose-tracking for virtual and augmented reality," in *Proceedings of Trends and Issues in Tracking for Virtual Environments Workshop, IEEE VR*, 2007, pp. 44–51.
- [21] T. Pintaric and H. Kaufmann, "A rigid-body target design methodology for optical pose-tracking systems," in *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, 2008, pp. 73–76.
- [22] A. Breitenmoser, L. Kneip, and R. Siegwart, "A monocular vision-based system for 6D relative robot localization," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, 2011, pp. 79–85.
- [23] D. Gierlach, A. Gustus, and P. van der Smagt, "Generating marker stars for 6d optical tracking," in *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on*, 2012, pp. 147–152.
- [24] M. Faessler, E. Mueggler, K. Schwabe, and D. Scaramuzza, "A monocular pose estimation system based on infrared leds," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 907–913.
- [25] "3D Coordinate Geometry – Equation of a Plane," *Brilliant.org*. [Online]. Available: <https://brilliant.org/wiki/3d-coordinate-geometry-equation-of-a-plane/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [26] W. Cheney and D. Kincaid, *Linear algebra: Theory and applications*. Jones & Bartlett Publishers, 2010.
- [27] R. M. Murray, *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, 1994.
- [28] G. Strang, *Introduction to Linear Algebra*, 4th ed. Wellesley Cambridge Press, 2009.
- [29] V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, and P. Fua, "Epnnp: An accurate $O(n)$ solution to the pnp problem," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 81, no. 2, p. 155, 2009.