

## بالانسینگ بهینه روبات های بازودار صنعتی به روش الگوریتم ژنتیک

امین نیکوبین<sup>۱</sup>

anikoobin@iust.ac.ir

احمد شاهی<sup>۲</sup>

a\_shahi\_21@yahoo.com

### چکیده :

در این مقاله بالانسینگ بهینه برای روبات های بازودار صنعتی به روش الگوریتم ژنتیک معرفی می گردد. در حقیقت مسئله طراحی مسیر بهینه بصورتی است که حالتها، کنترلها و مقادیر وزنه تعادل به صورت همزمان تعیین گردیده بطوریکه شاخص عملکرد روبات برای حرکت نقطه به نقطه حداقل گردد. این روش بالانس می تواند با روشهایی مانند عدم بالانس، بالانس استاتیکی، تطبیقی مورد مقایسه قرار گیرد با این الویت که معیارهای عملکرد بدست آمده در این روش بسیار کمتر از سایر روشهاست.

با استخراج معادلات دینامیکی ربات و با معلوم بودن شرایط اولیه و نهایی و انتخاب تابع مسیر حرکت (به صورت چند جمله ای و spline) یک مسئله بهینه سازی تشکیل داده که در آن مجموع مربعات گشتاور بعنوان تابع هدف و قیود مسئله معادلات دینامیکی ربات می باشند. منظور از یافتن مسیر، یافتن تابع حرکت ربات و منظور از بالانس، یافتن جرم وزنه های تعادل برای بهینه نمودن تابع هدف می باشد. روش بهینه سازی بکار رفته الگوریتم ژنتیک بوده که روشی مستقیم می باشد و با الگوریتم جستجو نتایج رایج دست می دهد. مقایسه ی نتایج حاصل از این روش با روش بالانس بهینه کلاسیک که روشی غیر مستقیم بوده و از تشکیل معادله ی همیلتون حاصل گردیده نیز انجام می گردد.

**واژه های کلیدی:** روبات بازودار-مسیر بهینه-الگوریتم ژنتیک-وزنه تعادل-حرکت نقطه به نقطه

۱. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد سمنان

## مقدمه

دو لینکی معادلات دینامیکی استخراج و با در نظر گرفتن مسیر حرکت بصورت چند جمله ای ویا spline بهینه سازی انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده اند . بعلاوه مقایسه ای نیز با روش بالانسینگ که در مقاله ی نیکو بین - مرادی [۱] انجام شده است به عمل آمده است. در مقاله مذکور بهینه سازی به روش کلاسیک و تشکیل معادله همیلتون انجام شده است.

## مسیر بهینه

روباتهای صنعتی به دلیل سرعت و دقت و کارآمدی آنها در انجام عملیات تکراری، در صنایع بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. اما این ماشینهای پر قدرت نیاز به یک سری فعالیتهای اولیه از قبیل کالیبراسیون، طراحی حرکت برای انجام وظایف خود دارند. بنابراین تعیین مسیر هندسی و نیز کنترل آنها با توجه به قیود هندسی و محیط ربات بسیار حائز اهمیت است. در طول دهه های اخیر بسیاری از محققان سعی کرده اند که مسئله کنترل و طراحی حرکت را از یکدیگر تفکیک نمایند و با توجه به پیچیدگی مسئله، کنترل ربات را به دو سطح طراحی مسیر (Trajectory planning) و کنترل مسیر (Path control) تقسیم نموده اند. طراحی مسیر بهینه در واقع یک مسئله بهینه سازی بوده که موجب افزایش بهبود عملکرد ربات می گردد. تعیین مسیر بازوی ربات که اصطلاحاً طراحی مسیر (trajectory planning) نامیده می شود، یکی از مهمترین دغدغه های مهندسیین طراح می باشد. مسئله اصلی تعیین یک مسیر بهینه از نقطه شروع تا نقطه هدف می باشد بطوری که میزان مصرف انرژی ربات حداقل گردد. در دهه اخیر مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است، کومار و همکاران فرمولاسیون و کاربرد استراتژی تعیین یک مسیر بهینه را معرفی کردند [۴]. تیان و همکاران طراحی مسیر کارآمد برای ربات را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بررسی نمودند [۵].

## طراحی مسیر بهینه

طراحی مسیر یکی از مسائل اساسی در طرح و توسعه رباتها می باشد. تعیین مسیر بر اساس معیارهای بهینه مانند حداقل زمان عملکرد ویا حداقل انرژی مصرفی تعیین می گردد. با توجه به اینکه رباتها برای انجام وظایف دشوار و پیچیده که نیازمند حرکت غیرخطی می باشند، طراحی می گردند تعیین مسیر مطلوب

بطور کلی طراحی مسیر بهینه روبات بر اساس بهینه کردن تابع هدف می باشد. این مسئله کنترل بهینه به حدی پیچیده است که بایستی از طریق کامپیوتر حل گردد. دو استراتژی برای بهینه سازی مسیر ممکن است تعریف گردد: روش مستقیم و روش غیر مستقیم این روش ها در شکلهای مختلف استفاده گردیده و هر کدام فواید و معایب خود را دارا خواهند بود. نیکوبین - مرادی روش غیر مستقیم را برای بالانس ربات بازودار در حرکت نقطه به نقطه به کار گرفت [۱]. Fotehi و همکاران این روش را برای بدست آوردن زمان بهینه مسیر ربات دولینکی به کار برده [۲] و Furuno و همکاران از این روش برای طراحی مسیر بهینه ربات موبایل استفاده نمودند [۳]. استراتژی این روش بر مبنای نخست بهینه سازی سپس جدا سازی می باشد.

در کنار طراحی مسیر که کنترلها وحالتها را برای حصول عملکرد مطلوب به دست می دهد، یک روش کارآمد برای بهبود عملکرد ربات، بالانسینگ می باشد. بالانسینگ به دو نوع مستقیم و غیرمستقیم طبقه بندی می شود. در نوع مستقیم یک نیروی خارجی هیدرولیکی یا الکتریکی یا پنوماتیکی به سیستم اعمال شده در حالیکه در نوع غیر مستقیم از جرمهای جبران ساز یا فنر استفاده می شود. بدلیل عدم استفاده از نیروی محرک خارجی در نوع غیر فعال این روش ساده تر و کارآمد تر از نوع فعال می باشد.

در کاربردهای صنعتی مسائل کنترل بهینه به روش مستقیم که بر مبنای استراتژی نخست جدا سازی سپس بهینه سازی می باشد حل می گردند. این روش طراحی حرکت را از یک مسئله کنترل بهینه به یک مسئله بهینه سازی پارامتریک منتقل میکند.

در این مقاله یک روش جدید بر اساس حل مستقیم مسئله کنترل بهینه معرفی می شود، بطوریکه مسیر بهینه ربات در حرکت نقطه به نقطه با در نظر گرفتن وزنه تعادل به عنوان پارامترهای بهینه تعیین می گردند. در این روش که بالانسینگ بهینه نامیده می شود، حالت ها و مقادیر وزنه های تعادل بطور همزمان بدست آمده بطوریکه تابع هدف عملکرد داده شده حداقل می گردد. این روش می تواند در دو زمینه در نظر گرفته شود: طراحی مسیرو بالانسینگ که در مقایسه با روشهای بالانس استاتیکی و دینامیکی مزیت ویژه ای در حداقل نمودن شاخص عملکرد (حداقل گشتاور) خواهد داشت. روش بهینه سازی بکار گرفته شده روش ژنتیک الگوریتم می باشد. ابتدا برای یک روبات

ورودی) انجام خواهد شد. در این حالت نیز زمان کل حرکت بعنوان شاخص عملکرد قابل استفاده خواهد بود.

بطور کلی طراحی مسیر یک مسئله بهینه سازی می باشد که محاسبه مسیر بین دو نقطه هدف آن می باشد. الگوریتم های مختلفی برای این مسئله بهینه سازی وجود دارد که در این الگوریتم ها اطلاعات ورودی شامل موارد زیر می باشد:

- نقاط مشخص شده مسیر
- قيود هندسی مسیر (مانند موانع مسیر)
- قيود مربوط به سیستم تحریک (actuation system)
- قيود دینامیکی

معمولاً با مشخص نمودن حداقل اطلاعات مسیر مانند شرایط نقطه اولیه و نهایی، زمان انجام حرکت، ماکزیمم سرعت و اطلاعاتی از این قبیل می توان مسیر را تعیین نمود.

### ۱-۳-۱ الزامات اساسی طراحی مسیر

الزامات اساسی یک مسیر مورد نظر عبارتند از:

- مسیر بایستی نسبت به یک فریم ثابت مشخص گردد.
- مسیر بایستی هموار (smooth) در نظر گرفته شود به این معنی که تابع مسیر و حداقل مشتقات مرتبه اول و دوم آن پیوسته باشد.

\* مسیر بایستی الزامات مربوط به اجرای وظایف ربات را برآورده سازد.

### ۱-۳-۲ طراحی مسیر بر مبنای فضای مفصل ها

در این روش مسیر بر حسب توابعی از زوایای مفصل ها بیان می شود. زوایای مفصل ها استفاده از روش سینماتیک معکوس ربات بدست می آیند. این روش به لحاظ محاسباتی ساده می باشد. مسئله اساسی حرکت ابزار از موقعیت موجود به موقعیت مورد نظر (goal position) می باشد، بطوری که تغییر در موقعیت و جهت (orientation) در نظر گرفته شود. معمولاً لازم است که جزئیات بیشتری از حرکت مشخص گردد. یک راه برای بیان جزئیات بیشتر در نظر گرفتن یک سری نقاط دیگر (علاوه بر نقطه نهایی) از مسیر حرکت می باشد. این نقاط گره (knot) نام دارند. همان گونه که قبلاً گفته شد از الزامات اساسی مسیر حرکت، منظم بودن آن است. چنانچه مسیر حرکت نامنظم (rough) باشد موجب سایش مکانیزم و افزایش ارتعاش خواهد گردید. با در نظر گرفتن لزوم منظم بودن مسیر حرکت توابع spline مکعب (Cubic spline) یک تابع مناسب می باشد. در این مقاله علاوه بر spline

کاری دشوار و پیچیده می باشد. بطور کلی دو رویه برای طراحی مسیر حرکت وجود دارد: ۱- بر اساس سینماتیک ربات که در آن مسیر حرکت (موقعیت، سرعت، شتاب) فقط نسبت به قيود سینماتیکی تعیین می شود. ۲- بر اساس دینامیک حرکت که در آن اطلاعات مسیر علاوه بر قيود سینماتیکی، بر مبنای قيود دینامیکی نیز تعیین خواهد شد. به عبارت دیگر مسیر بر مبنای فضای مفصل های ربات یا بر مبنای فضای عملیاتی ربات (work space) محاسبه خواهد شد. در فضای مفصل ها مسیر بصورت تابعی از موقعیت، سرعت و شتاب هر مفصل و در فضای عملیاتی بر اساس مختصات (کارتزین) پنجه ربات در نظر گرفته می شود. روش اول از نظر محاسباتی ساده تر بوده و روش دوم برای مسیر های دارای مانع، مناسب می باشد. جهت طراحی مسیر مطلوب، مسیر هندسی (geometric path) مورد نیاز می باشد. این مسیر هم در فضای عملیاتی و هم در فضای مفصل های ربات تعریف می گردد.

توابع مسیر در فضای عملیاتی می توانند بصورت خطی، پارابولیک، دایره ای یا یک تابع تحلیلی در نظر گرفته شوند. در فضای مفصل ها مسیر هندسی از اختصاص مقادیر اولیه و نهایی (و گاهی اوقات نقاط میانی) پارامترهای مفصل (موقعیت، سرعت، شتاب) بدست می آید. قوانین حرکت نیز در تعیین مسیر بایستی مد نظر قرار گیرد، به این معنی که تابع مسیر و مشتقات اول و دوم (سرعت و شتاب) بایستی پیوسته باشند که از این منظر توابع چند جمله ای مناسب می باشند. شاخص های مورد استفاده در طراحی مسیر شامل: ۱- مدت زمان بهینه حرکت و ۲- انرژی مکانیکی بهینه عملگر (actuator) می باشد. مطالعات زیادی در زمینه طراحی مسیر بر اساس زمان بهینه انجام گرفته که در آنها حداقل نمودن زمان پیمایش مسیر یا حداکثر نمودن سرعت منیپولاتورها با ارضای قيود دینامیکی و سینماتیکی بررسی شده است. لو و همکاران ضمن معرفی یک مدل سیستماتیک برای منیپولاتورهای موازی، طراحی مسیر بر مبنای زمان بهینه و چند جمله ای درجه ۳ را با یکدیگر مقایسه نموده اند [۶]. در برخی از کاربردها، ربات مسیر از پیش تعیین شده (predefined path) را طی می کند (مانند برش لیزری، جوشکاری قوسی) در این حالت حداقل نمودن زمان حرکت در یک مسیر مشخص همراه با برآورده ساختن قيود دینامیکی و سینماتیکی مورد نظر قرار می گیرد. اما در بسیاری از کاربردها که ربات فقط از نقاط مشخصی عبور می کند، طراحی مسیر بر مبنای شاخص عملکرد (مانند گشتاور

ri (فاصله جوینت تا وزنه تعادل!)، mci (جرم وزنه تعادل)

برای حالت بدون بالانس وزنه های تعادل را صفر در نظر گرفته و برای بالانس استاتیکی وزنه های تعادل را به صورتی در نظر میگیریم که در معادله دینامیکی  $G_1=G_2=0$  گردد. برای بالانسینگ بهینه مجموع مربعات گشتاورها را به صورت زیر به عنوان تابع هدف در نظر گرفته و بهینه سازی با روش ژنتیک الگوریتم انجام می گردد:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (\tau_1^2 + \tau_2^2) dt$$

## ۲- شبیه سازی

در این بخش هدف یافتن مسیر و بالانس بهینه برای یک ربات دو درجه آزادی است. به بیان دقیق تر منظور از یافتن مسیر، یافتن تابع حرکت ربات در فضای مفصلی و منظور از بالانس، یافتن جرم وزنه های تعادل به منظور بهینه سازی تابع هزینه زیر است.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (\tau_1^2 + \tau_2^2) dt$$

شماتیک ربات را به همراه وزنه های تعادلی در شکل (1) دیده می شود. محدودیتهای اولیه و نهایی زوایای مفصل ها را برای موقعیت و سرعت به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$q_1(t_0) = q_{10}, \dot{q}_1(t_0) = v_{10}, q_2(t_0) = q_{20}, \dot{q}_2(t_0) = v_{20}, q_1(t_f) = q_{1f}, \dot{q}_1(t_f) = v_{1f}, q_2(t_f) = q_{2f}, \dot{q}_2(t_f) = v_{2f}$$

## ۲-۱ مسیره های مختلف در نظر گرفته شده

مسیره های مختلف به صورت زیر در نظر گرفته می شوند:

حالت اول: در این حالت نتایج به دست آمده از [۱] را عیناً در نظر می گیریم. در این مقاله مسیر و جرم وزنه های تعادلی با استفاده از بهینه سازی کلاسیک و تشکیل معادله همپلتونین به دست آمد

حالت دوم: در این حالت تابع مسیر هر دو مفصل را به صورت زیر، چندجمله ایهای درجه سه در نظر می گیریم

مکعبی از توابع spline درجه پنج نیز برای مسیر ربات دو لینکی استفاده گردیده است.

## ۱- فرمولاسیون کلی

در شکل (۱) یک ربات دو لینکی شامل وزنه های تعادل نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود جرمهای  $m_{c1}$  و  $m_{c2}$  به ترتیب به لینکهای ۱ و ۲ متصل شده اند. معادلات دینامیکی ربات دو درجه آزادی به همراه وزنه های تعادلی به صورت زیر است [1]:

(۱)

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

که در آن

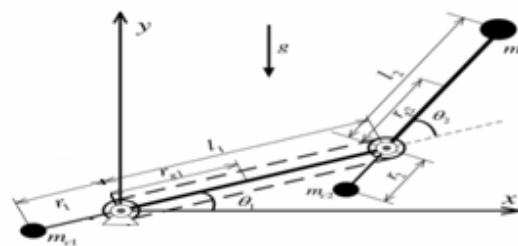
$$\begin{aligned} M_{11} &= m_1 r_{g1}^2 + m_2 (l_1^2 + 2l_1 r_{g2} \cos q_2 + r_{g2}^2) + m_p (l_1^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2 + l_2^2) + m_{c1} r_1^2 \\ &\quad + m_{c2} (l_1^2 - 2l_1 l_2 \cos q_2 + l_2^2) + m_{c1} r_1^2 + m_{c2} (l_1^2 - 2l_1 l_2 \cos q_2 + r_2^2) + I_1 + I_2 \\ M_{12} &= m_2 (l_1 r_{g2} \cos q_2 + r_{g2}^2) + m_p (l_1 l_2 \cos q_2 + l_2^2) + m_{c2} (-l_1 r_2 \cos q_2 + r_2^2) + I_2 \\ M_{22} &= m_2 r_{g2}^2 + m_p l_2^2 + m_{c2} r_2^2 + I_2 \end{aligned}$$

$$C_2 = l_1 \sin q_2 (-m_2 r_{g2} - m_p l_2 + m_{c2} r_2) \dot{q}_1^2$$

$$C_1 = l_1 \sin q_2 (-m_2 r_{g2} - m_p l_2 + m_{c2} r_2) (2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)$$

$$G_1 = (m_1 r_{g1} + m_2 l_1 + m_p l_1 - m_{c1} r_1 + m_{c2} l_1) g \cos q_1 + (m_2 r_{g2} + m_p l_2 - m_{c2} r_2) g \cos (q_1 + q_2)$$

$$G_2 = (-m_2 r_{g2} - m_p l_2 + m_{c2} r_2) g \cos (q_1 + q_2)$$



شکل (۱)- شماتیک ربات دو لینکی

mi (جرم لینک) ، li (طول لینک) ، li (ممان اینرسی لینک) ، mp (جرم ابزار انتهایی) ، rgi (فاصله جوینت تا مرکز ثقل لینک)

از پارامترهای  $a_4$  و  $a_5$  برای بهینه سازی استفاده می کنیم. در این صورت سایر پارامترها با دستگاه معادلات زیر به دست می آیند.

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 - a_4 t_0^4 - a_5 t_0^5 \\ v_0 - 4a_4 t_0^3 - 5a_5 t_0^4 \\ q_f - a_4 t_f^4 - a_5 t_f^5 \\ v_f - 4a_4 t_f^3 - 5a_5 t_f^4 \end{bmatrix}$$

حالت هفتم: مسیر این حالت دقیقاً مانند حالت قبل و با انجام بهینه سازی روی جرم وزنه های تعادلی است.

حالت هشتم: مسیر این حالت با استفاده از spline درجه ۵ با ۶ نقطه میانی در نظر گرفته خواهد شد.

محدودیت های موقعیت و سرعت مانند قبل بوده بنابراین برای هر مفصل ۱۲ و در مجموع ۲۴ متغیر بهینه سازی داریم.

حالت نهم: مسیر این حالت دقیقاً مانند حالت قبل و با انجام بهینه سازی روی جرم وزنه های تعادلی است، بنابراین دارای ۲۶ متغیر بهینه سازی داریم.

### نتایج :

در این قسمت شرایط یکسانی برای حالت های فوق در نظر گرفته می شوند. فرض می کنیم ربات می خواهد در فضای کارترین در لحظه  $t_0 = 0s$  از نقطه  $X_0 = [1, 0]^T m$  در حالت سکون به نقطه  $X_f = [0, 1.73]^T m$  در لحظه  $t_0 = 1s$  به حالت سکون برسد. با استفاده از روابط سینماتیک معکوس ربات این مقادیر را به مقادیر متناظر در فضای مفصلی تبدیل می کنیم که به صورت زیر می شود.

$$q_1(t_0) = \frac{\pi}{3}, q_2(t_0) = \frac{2\pi}{3}, q_1(t_f) = -\frac{2\pi}{3}, q_2(t_f) = -\frac{\pi}{3}$$

$$\dot{q}_1(t_0) = 0, \dot{q}_2(t_0) = 0, \dot{q}_1(t_f) = 0, \dot{q}_2(t_f) = 0$$

در حالت اول نتایج به دست آمده از بهینه سازی کلاسیک که توسط نیکوبین-مرادی (مرجع ۱) انجام شده است را در نظر می گیریم. با توجه به اینکه در کلیه برنامه های نوشته شده در اینجا از پارامترهای یکسان با مقاله مزبور استفاده شد، مقایسه نتایج امری

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

برای بدست آوردن ضرایب چند جمله ای با قرار دادن محدودیتها در معادله فوق به دستگاه چهارمعادله چهارمجهول زیر می رسیم.

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ v_0 \\ q_f \\ v_f \end{bmatrix}$$

جرم وزنه های تعادل را در این حالت صفر در نظر می گیریم. در واقع در این حالت هیچگونه بهینه سازی نداریم.

حالت سوم: در این حالت تابع مسیر را مانند حالت قبل چند جمله ای درجه ۳ در نظر می گیریم اما بر روی جرم وزنه های تعادل بهینه سازی انجام می دهیم.

حالت چهارم: در این حالت تابع مسیر یک چند جمله ای درجه ۴ است. محدودیت های موقعیت و سرعت دقیقاً مانند حالت قبل است و به علت وجود پارامتر اضافی می توانیم بهینه سازی انجام دهیم. معادله مسیر به صورت زیر است.

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4$$

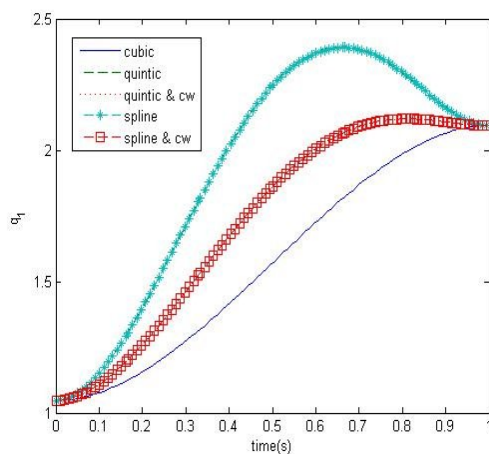
از پارامتر  $a_4$  برای بهینه سازی استفاده می کنیم. در این صورت سایر پارامترها با دستگاه معادلات زیر به دست می آیند.

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 - a_4 t_0^4 \\ v_0 - 4a_4 t_0^3 \\ q_f - a_4 t_f^4 \\ v_f - 4a_4 t_f^3 \end{bmatrix}$$

حالت پنجم: مسیر این حالت دقیقاً مانند حالت قبل و انجام بهینه سازی روی جرم وزنه های تعادلی است.

حالت ششم: در این حالت تابع مسیر چند جمله ای درجه ۵ است. محدودیت های موقعیت و سرعت دقیقاً مانند حالت قبل است و به علت وجود دو پارامتر اضافی می توانیم بهینه سازی انجام دهیم. معادله مسیر به صورت زیر است.

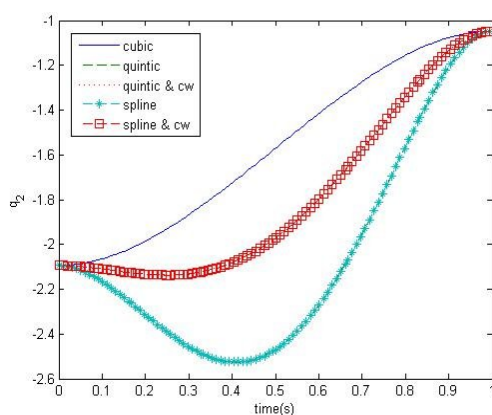
$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$



شکل ۲- نمودار موقعیت مفصل اول

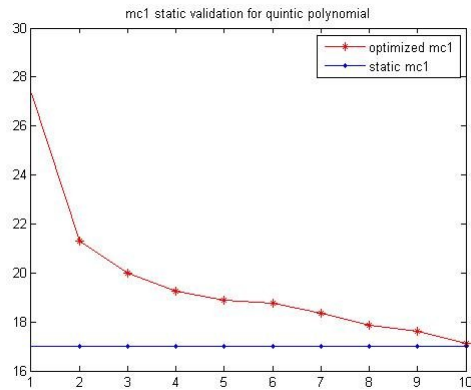
منطقی است. از الگوریتم ژنتیک نرم افزار Matlab برای بهینه سازی استفاده و تعداد جمعیت را ۵۰۰۰، جمعیت نخبه را ۵، نسبت ترکیب را ۰/۷ و حداکثر تعداد نسل ها ۱۰۰ در نظر گرفته میشود. حالت های مختلف مسیر با وبدون وزنه تعادلی را در نظر گرفته وبهینه سازی را انجام می دهیم. مقایسه نتایج حالت های مختلف در جدول ۲ آمده است. نمودارهای مسیرهای دو حالت در شکل های (۲) الی (۵) آمده است. همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می گردد با افزایش درجه چند جمله ای تابع مسیر، میزان گشتاور ورودی کاهش یافته و برای هر مسیر، در نظر گرفتن وزنه های تعادل و استفاده از آن به عنوان پارامتر بهینه سازی موجب کاهش انرژی میگردد.

جدول ۲- مقایسه گشتاور مورد نیاز بر اساس تابع مسیر

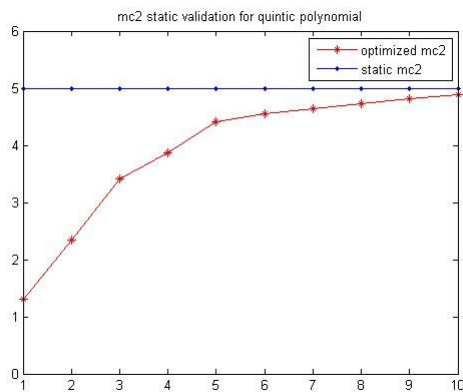


شکل ۳- نمودار موقعیت مفصل دوم

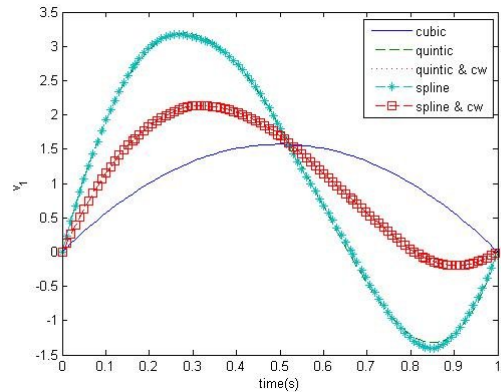
شماره	نوع مسیر	وزنه های تعادل	تابع هزینه
۱	بهینه [۱]	بهینه [۱]	$J = 564.2$
۲	چند جمله ای درجه سه	صفر	$J = 3000.3$
۳	چند جمله ای درجه سه	بهینه سازی	$J = 902.28$
۴	چند جمله ای درجه چهار	صفر	$J = 1323.3$
۵	چند جمله ای درجه چهار	بهینه سازی	$J = 688.9$
۶	چند جمله ای درجه پنج	صفر	$J = 951.3$
۷	چند جمله ای درجه پنج	بهینه سازی	$J = 579.7$
۸	Spline درجه پنج	صفر	$J = 649.2$
۹	Spline درجه پنج	بهینه سازی	$J = 579.7$



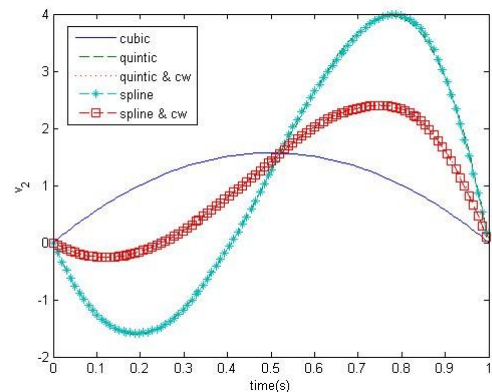
شکل ۶- نمودار مقایسه مقدار وزنه تعادل اول درحالت‌های بالانس بهینه و استاتیکی نسبت به زمان



شکل ۷- نمودار مقایسه مقدار وزنه تعادل دوم درحالت‌های بالانس بهینه و استاتیکی نسبت به زمان



شکل ۴- نمودار سرعت مفصل اول



شکل ۵- نمودار سرعت مفصل دوم

## اعتبارسنجی نتایج حاصل از spline درجه ۵.

بر اساس روش گفته شده در [۱] یک روش برای صحت سنجی روش spline درجه ۵ که بهترین شاخص عملکرد را در بین روش‌های گفته شده دارد، مقایسه مقادیر وزنه‌های تعادلی بهینه با حالت استاتیکی است. در واقع با زیاد شدن زمان مقادیر وزنه‌های تعادلی باید به مقادیر استاتیکی نزدیک شوند. این مقادیر طبق محاسبات [۱] برابر  $m_{c1} = 17, m_{c2} = 5$  هستند. برای اطمینان از این موضوع برای زمانهای یک تا ده ثانیه هر یک ثانیه یک بار بهینه‌سازی را انجام می‌دهیم. شکل‌های صفحات بعد نمودار مقادیر بهینه وزن‌ها بر حسب زمان کل است. دیده می‌شود که با افزایش زمان این مقادیر به مقادیر استاتیکی نزدیک می‌شوند. نمودارهای مربوطه در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود.

## نتیجه گیری

در این تحقیق طراحی مسیر بهینه و تعیین وزنه های تعادل بصورت همزمان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک انجام گردید. پارامترهای اساسی این الگوریتم به روش آزمون و خطا تعیین گردیده و همانطور که دیده شد، در هر بار انجام بهینه سازی یعنی اضافه کردن و در نظر گرفتن وزنه تعادل در ربات دولینکی استفاده از آنها به عنوان پارامتر بهینه سازی مصرف انرژی و گشتاور مورد نیاز کاهش می یابد اما در حالتی که مسیر به صورت spline درجه ۵ در نظر گرفته شد هر چند میزان مصرف انرژی از روش بهینه سازی کلاسیک قدری بیشتر می باشد، اما مقدار وزنه های تعادل که اهمیت ویژه ای در کاهش اینرسی ربات دارد بصورت چشمگیری کاهش یافته است.

Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico, Sep. 2010

منابع

[9] L. Tian , C. Collins, "An Effective Robot Trajectory Planning

Method Using A Genetic Algorithm," *Mechatronics* 14 (2004) 455–470.

[10] A. A. N. Aljawi, H. Diken And S. A. Alshahrani, "Selection of a Trajectory Function for Minimum Energy Requirements of a Spherical Robot," *JKAU: Eng. Sci.*, vol. 15 no. 2, pp. 99-110 (2004 A.D./1425 A.H.)

[11] J. H. Mathews and K. K. Fink, "Numerical Methods Using Matlab, Prentice-Hall Inc. 4<sup>th</sup> Edition, 2004 "

[12] J. J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control," Pearson Education International, 3<sup>th</sup> Edition, 2005.

, "Robot M. Vidyasagar, S. Hutchinson, M. W. Spong[13] Modeling and Control," John Wiley & Sons, Inc, 2006.

[14] A. A. Ata , "Optimal Trajectory Planning Of Manipulators: A Review," *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2, No. 1 (2007) 32-54.

[15]W. P. Bailón, E. B. Cardiel, I. J. Campos, A. R. Paz, "Mechanical Energy Optimization in Trajectory Planning for Six DOF Robot Manipulators Based on Eighth-Degree Polynomial Functions and a Genetic Algorithm," International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico, Sep. 2010

[12] A. A. N. Aljawi, H. Diken And S. A. Alshahrani, "Selection of a Trajectory Function for Minimum Energy Requirements of a Spherical Robot," *JKAU: Eng. Sci.*, vol. 15 no. 2, pp. 99-110 (2004 A.D./1425 A.H.)

[13] J. H. Mathews and K. K. Fink, "Numerical Methods Using Matlab, Prentice-Hall Inc. 4<sup>th</sup> Edition, 2004 "

[14] J. J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control," Pearson Education International, 3<sup>th</sup> Edition, 2005.

[1]A. Nikoobin, M. Moradi, "Optimal Balancing of Robot Manipulators in Point-to-point Motion", *Robotica*, 10, 1017, 2010.

[2] Fotouhi, R., Szyszkowski, W."An algorithm for time optimal control problems". *J of Guidance, control, and Dynamics*, 1998, vol.120, pp.414-418.

[3]. Furuno, S., Yamumoto, M., Mohri, A."Trajectory planning of mobile manipulator with stability considerations". *IEEE Int. Conf on Robotics and Automation*.2003, vol.3, pp. 3403-3408.

[4]. Derendra, P., Kumar, M. " optimization technique applied to manipulators for path planning and torque minimization". *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2002,15, PP:241- 252.

[5]. L. Tian , C. Collins, "An Effective Robot Trajectory

Planning Method Using A Genetic Algorithm," *Mechatronics* 14 (2004) 455–470.

[6]. Lou, Y., Feng, F., Yu, M. "Trajectory Planning and Control of parallel Manipulator". *IEEE Int. Conference on control and Automation* . pp 1013-1018. 2009

[7] A. A. Ata , "Optimal Trajectory Planning Of Manipulators: A Review," *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2, No. 1 (2007) 32-54.

[8] W. P. Bailón, E. B. Cardiel, I. J. Campos, A. R. Paz, "Mechanical Energy Optimization in Trajectory Planning for Six DOF Robot Manipulators Based on Eighth-Degree Polynomial Functions and a Genetic Algorithm," *International Conference on*