مدل دینامیکی روبات ماهر برداشت کننده با سه درجه آزادی توسط روش تکراری نیوتن–اویلر

مجتبی نصرتی[1*]، داریوش زارع[2]، پیمان خرم شکوه[3]، عبدالرضا راستی طلب[4]

۱– دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲– دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳– دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۴– مربی گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون، داریون، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m-nosrati@shirazu.ac.ir

چکیده

روبات های برداشت کننده یکی از ابزار های مهم و کاربردی در صنعت کشاورزی به حساب می آیند، چرا که این نوع روبات ها با کاهش هزینه های کارگری و کاهش مصرف انرژی، باعث بهبود بکارگیری منابع به هنگام برداشت می شوند. روبات های برداشت کننده ماهر قادرند، در مکان هایی که نیاز به دقت، پایداری و تکرارپذیری است و امکان اشتباه و خستگی برای انسان وجود دارد، جایگزین کارگر ساده شوند. بکارگیری، کنترل و شبیه سازی رفتار روبات های ماهر برداشت کننده، نیازمند آگاهی از مدل حرکتی آنها است. در این مقاله، از تکنیک تکراری نیوتن–اویلر به منظور شناخت حرکتی یک روبات ماهر برداشت کننده با سه درجه آزادی استفاده گردیده است. در همین راستا، با استفاده از معادلات سینماتیک مستقیم و وارون، ضمن بررسی فضای کاری این روبات ماهر، مدل حرکتی مجری نهایی روبات با توجه به متغیر های مفصلی نشان داده شد و همچنین با محاسبه ژاکوبین، رابطه بین سرعت مفصلها و سرعت های دکارتی مجری نهایی به همراه تعیین نقاط تکین فضای کاری بررسی گردید. در نهایت با استفاده از معادلات دینامیکی مستقیم و وارون، مدل حرکتی این روبات شبیه سازی و کنترل پذیری آن مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: روبات ماهر برداشت کننده، شبیه سازی، کنترل، مدل دینامیکی.

مقدمه

در دهه های گذشته، تکنولوژی های پیشرفته و آخرین نتایج تحقیقات علمی، به منظور بهبود کیفیت محصولات کشاورزی و افزایش بهره وری در صنعت کشاورزی به کار گرفته شده است. برداشت خودکار محصولات کشاورزی یکی از این موضوعات مهم در صنعت کشاورزی به حساب می آید، چرا که با این تکنولوژی پیشرفته، هزینه های کارگری و مصرف انرژی به شدت کاهش یافته و باعث بهبود بکارگیری منابع می گردد (Bachche, 2015). در صنعت کشاورزی شیکر ها یکی از انواع برداشت کننده های خودکار محسوب می شوند که برای برداشت محصولات مقاومی مانند زیتون و بادام، طراحی و برای بهبود عملکرد آنها تحقیقات

بسیاری صورت پذیرفته است. به عنوان مثال، یک شیکر صنعتی مجهز به توده متغیر قابل کنترل، به جای توده ثابت معمولی به منظور برداشت محصول مورد بررسی قرار گرفته بطوریکه این طراحی به خوبی لرزش های بیش از حد ناشی از فرکانس طبیعی پایین و اینرسی بالای شیکر را به منظور حرکت مناسب آن، محدود کرده است (Affeldt *et al*., 1989). همچنین برای برداشت محصولاتی چون هلو و آلو باغی یک شیکر مجهز به شاخه الکترومغناطیسی بدون نیاز به شاخه گیرنده طراحی و در شرایط مزرعه مورد آزمایش قرار گرفت بطوری که یک نیروی الکترومغناطیسی اجازه می دهد بدون درگیری، شاخه به لرزش در آید، که این باعث تسهیل در برداشت خودکار شده است (Rosa *et al*., 2008). این در حالی است که در بعضی از تحقیقات از محدودیت های روش های برداشت خشن، مانند شیکر برای محصولات ظریفی که باید به صورت تازه در بازار عرضه گردند مانند گوجه فرنگی، پرتغال، سیب و یا توت فرنگی، اشاره شده است (Berlage & Langmo, 1982). لذا با توجه به محدودیت های اشاره شده و ضرورت و پتانسیل های موجود، روبات های برداشت کننده در صنعت کشاورزی یکی از زمینه های مورد علاقه محققان واقع شده است.

روبات های ماهر برداشت کننده قادرند، در مکان هایی که نیاز به دقت، پایداری و تکرارپذیری است و امکان اشتباه و خستگی برای انسان وجود دارد، جایگزین کارگر ساده شوند. به عنوان مثال یک روبات ماهر از نوع موازی به منظور برداشت محصولات کشاورزی سنگین مانند هندوانه ارائه شده است (Sakai *et al*., 2002). روبات های معمولی نیازمند گشتاور زیاد در مفصل ها به منظور بلند کردن محصولات سنگین می باشند اما در نوع موازی، گشتاور وارده به مفصل ها به طول بازوی مجری نهایی ارتباطی ندارد، بطوریکه این روبات را قادر ساخته است که محصولات سنگین را با کمترین مصرف انرژی برداشت نماید. همچنین به منظور برداشت محصول خیار در گلخانه، یک روبات ماهر برداشت کننده مورد ارزیابی قرار گرفته است (Hentena *et al*., 2009) و یا یک روبات برداشت کننده میوه به منظور برداشت گونه های مختلف محصولات درختی ارائه گردیده است، که مهمترین مزیت این روبات، توسعه سیستم کنترل و تشخیص محصول با تکنیک پردازش تصویر است (Mehta & Burks, 2014).

از نظر ساختاری روبات های ماهر برداشت کننده از سه قسمت اصلی تشکیل شده اند (Bachche, 2015). بخش اول، سیستم تشخیص روبات است که در این قسمت، محصول و مکان آن تعیین می شود. سیستم پردازش تصویر با جداسازی محصول از پس زمینه، ضمن تعیین مکان محصول (مختصات X, Y, Z)، نحوه قرار گیری و تمایل آن را نیز تعیین می کند بطوریکه با مشخص شدن مکان و تمایل محصول، میزان جابجایی و زاویه تمایل مجری نهایی به منظور برداشت محصول تعیین می گردد. قسمت دوم، واحد برداشت کننده است، که عمل برش و جدا کردن محصول انجام می پذیرد و قسمت نهایی و مهم روبات، واحد کنترل است که در این واحد نحوه عملکرد روبات توسط سیستم های کنترلی مختلفی مانند کنترل سرعت، کنترل موقعیت و یا کنترل نیرو بهینه می شود. شناخت رفتار های دینامیکی و استاتیکی روبات های ماهر جزء مواردی هستند که برای طراحی، شبیه سازی و کنترل روبات های برداشت کننده، مورد نیاز است. تکنیک های مختلفی توسط محققان به منظور شناخت رفتاری روبات های ماهر به کار

گرفته شده است. برای نمونه، مدل دینامیکی یک روبات ماهر متحرک دو بازویی که بمنظور برداشت میوه و هرس درختان بلند مورد استفاده قرار می گرفت، بر اساس تکنیک تکراری گیبس–اپل محاسبه شده است و با توجه به همین معادلات حرکتی شبیه سازی عددی این روبات ماهر ارائه گردیده است (Korayem *et al*., 2014). همچنین یک مدل دینامیکی روبات ماهر که بر روی یک پایه متحرک قرار می گیرد، با استفاده از روش لاگرانژ–اویلر استخراج گردیده است. این مدل ارائه شده، برای روبات ماهر میتسوبیشی PA10-6CE که بر روی سطح یک کشتی قرار می گیرد، مورد بازبینی قرار گرفته است. در این مقاله، به منظور شناخت رفتاری دینامیکی و استاتیکی یک روبات ماهر برداشت کننده با سه درجه آزادی[۱] (3-dof HMR)، از روش تکراری نیوتن–اویلر بهره گرفته شده است (Craig, 1955). الگوریتم روش تکراری نیوتن–اویلر بسیار ساده، قابل توسعه، کاربردی و قابل تعمیم به ساختار های مختلف یک روبات ماهر می باشد. در بخش ۲,۱ و ۲,۲ این مقاله، معادلات سینماتیک مستقیم و وارون با هدف شناخت رفتار، فضای کاری و ارتباط بین فضای دکارتی و فضای مفصلی روبات ماهر 3-dof HMR ارائه می گردد. در بخش ۲,۳ ژاکوبین، سرعت و نیرو های استاتیکی با هدف بررسی ارتباط بین سرعت ها در فضای دکارتی و مفصلی، شناخت نقاط ناتکین فضای کاری و همچنین تاثیر نیرو های استاتیکی وارد بر بازوی مجری نهایی بر مفصل های روبات ماهر 3-dof HMR مورد ارزیابی قرار می گیرند و در بخش ۲,۴ معادلات دینامیک مستقیم و وارون به منظور شبییه سازی رفتار روبات ماهر 3-dof HMR و کنترل آن محاسبه می گردند.

مواد و روش ها

برای مطالعه رفتاری روبات ماهر 3-dof HMR، که هندسه پیچیده ای دارد، ابتدا شماتیک بازوی های مکانیکی آن رسم، سپس به منظور ساده سازی شناخت ساختار روبات ماهر 3-dof HMR به قسمت های مختلف آن بر اساس قرارداد دناویت–هارتنبرگ[۲] (Craig, 1955) چهارچوب هایی را متصل کرده و رابطه بین این چهارچوب ها بدست آورده شده است. در شکل ۱ شماتیک بازوهای این روبات ماهر و نحوه اتصال چهارچوب ها به رابط های روبات ماهر 3-dof HMR نشان داده شده است.

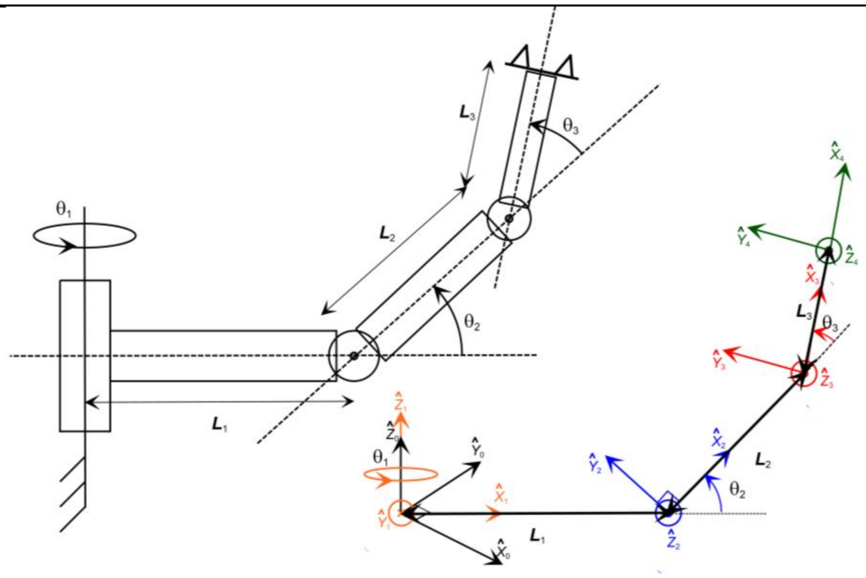
روابط بین چهارچوب ها بوسیله کمیت هایی مثل طول رابط (a)، زاویه پیچش رابط (α)، انحراف رابط (d) و زاویه مفصلی (θ) بر اساس قرارداد دناویت–هارتنبرگ تعریف می شود. جدول ۲ این کمیت ها را برای چهار چوب های متصل شده به بازو های روبات ماهر 3-dof HMR نشان می دهد.

تمام پارامتر هایی که در ادامه مقاله مورد استفاده قرار می گیرند، در جدول ۱ آورده شده است.

[۱] 3-dof Harvesting Manipulator Robot(3-dof HMR)
[2] Denavit-Hatenberg

جدول ۱- تعریف پارامتر ها، پارامتر های مکانیکی و مشخصات فیزیکی مربوط به روبات ماهر 3-dof HMR

سمبل	توضیح پارامتر	واحد
L_i	طول رابط i	cm
$C_i\,,S_i$	کسینوس و سینوس مفصل i	-
$C_{ij}\,,S_{ij}$	کسینوس و سینوس مفصل $(i+j)$	-
θ_i	زاویه مفصل i	rad
${}_{i+1}^{\;\;i}T$	تابع تبدیل بین چهارچوب $\{i+1\}$ و چهارچوب $\{i\}$	-
${}_{i+1}^{\;\;i}R$	ماتریس دوران بین چهارچوب $\{i+1\}$ و چهارچوب $\{i\}$	-
${}^{i}X_{i+1}\,,{}^{i}Y_{i+1}\,,{}^{i}Z_{i+1}$	موقعیت دکارتی چهارچوب $\{i+1\}$ توصیف شده در چهارچوب $\{i\}$	cm
${}^{i+1}\omega_{i+1}\,,{}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1}$	سرعت زاویه ای و شتاب زاویه ای چهارچوب $\{i+1\}$ توصیف شده در چهارچوب $\{i+1\}$	$\frac{rad}{s},\frac{rad}{s^2}$
${}^{i+1}\upsilon_{i+1}\,,{}^{i+1}\dot{\upsilon}_{i+1}$	سرعت خطی و شتاب خطی مرکز چهارچوب $\{i+1\}$ توصیف شده نسبت به چهارچوب $\{i+1\}$	$\frac{cm}{s},\frac{cm}{s^2}$
${}^{i}J$	ژاکوبین توصیف شده نسبت به چهارچوب $\{i\}$	-
F	نیروی استاتیک	N
τ	گشتاور	$N.cm$
${}^{C}I$	تانسور اینرسی چهارچوب رابط محاسبه شده در چهارچوب $\{C\}$، که مرکز ان در مرکز جرمی رابط قرار دارد	-
${}^{i+1}\dot{\upsilon}_{C_{i+1}}$	شتاب خطی مرکز جرم رابط $\{i+1\}$، توصیف شده در چهارچوب $\{i+1\}$	$\frac{cm}{s^2}$



شکل ۱- شماتیک پارامتر های سینماتیک و نحوه اتصال چهارچوب به رابط ها بر اساس قرارداد دناویت-هارتنبرگ برای روبات ماهر برداشت کننده با سه درجه آزادی (3-dof HMR)

جدول ۲- پارامتر های رابط برای روبات ماهر 3-dof HMR

α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	i
۰	۰	۰	θ_1	۱
۹۰	L_1	۰	θ_2	۲
۰	L_2	۰	θ_3	۳
۰	L_3	۰	۰	۴

معادلات سینماتیک مستقیم

برای استخراج معادلات سینماتیک روبات ماهر 3-dof HMR، معادلات تبدیل کل، بین چهارچوب های نشان داده شده در تصویر ۱ و با توجه به پارامتر های مربوط به این چهارچوب ها که در جدول ۲ آورده شده است و همچنین بر اساس قانون زوایای اویلر (Craig, 1955) محاسبه گردیده اند. در معادله ۱ تبدیل کلی بین چهارچوب ها و در معادله ۲ تبدیل کلی بین چهارچوب مجری نهای (چهارچوب ۴) و چهارچوب پایه (چهارچوب ۰) محاسبه شده است.

$$ {}_1^0T=\begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0\\ S_1 & C_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\ {}_2^1T=\begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_1\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ S_2 & C_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\ {}_3^2T=\begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_2\\ S_3 & C_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\ {}_4^3T=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$ {}_4^0T={}_1^0T\,{}_2^1T\,{}_3^2T\,{}_4^3T=\begin{bmatrix} C_1C_{23} & -C_1S_{23} & S_1 & L_1C_1+L_3C_1C_{23}+L_2C_1C_2\\ S_1C_{23} & -S_1S_{23} & -C_1 & L_1S_1+L_3S_1C_{23}+L_2S_1C_2\\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_3S_{23}+L_2S_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} & & & {}^0X_{4ORG}\\ & {}_4^0R & & {}^0Y_{4ORG}\\ & & & {}^0Z_{4ORG}\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (۲)$$

مهمترین هدف در بدست آوردن معادلات سینماتیک، تعیین موقعیت $\left({}^0P_{4ORG}\right)$ و دوران $\left({}_4^0R\right)$ مجری نهایی (چهارچوب ۴) روبات ماهر نسبت به پایه (چهارچوب ۰) روبات ماهر بر اساس توابعی از متغیر های مفصلی است که توسط معادله های ۳ و ۴ نشان داده شده است. این معادلات از معادله ۲ بدست آمده اند.

$$ {}_4^0R=\begin{bmatrix} C_1C_{23} & -C_1S_{23} & S_1\\ S_1C_{23} & -S_1S_{23} & -C_1\\ S_{23} & C_{23} & 0\end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$ {}^0P_{4ORG}=\begin{bmatrix} {}^0X_{4ORG}\\ {}^0Y_{4ORG}\\ {}^0Z_{4ORG}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} C_1\left(L_1+L_2C_2+L_3C_{23}\right)\\ S_1\left(L_1+L_2C_2+L_3C_{23}\right)\\ L_2S_2+L_3S_{23}\end{bmatrix} \quad (۴)$$

معادلات سینماتیک وارون

برای تعیین زوایای مفاصل (Θ) با هدف قرار گرفتن چهارچوب ابزار (چهارچوب ۴) در مکان و جهت گیری مطلوب، معادلات سینماتیک وارون محاسبه گردیده اند. حل معادله های سینماتیک وارون به روش غیر خطی صورت می گیرد و در آن با داشتن مقادیر عددی ${}^{0}_{4}T$ می کوشیم مقادیر θ_1، θ_2 و θ_3 را محاسبه نماییم. به همین منظور با کمک معادلات سینماتیک مستقیم (معادلات ۲، ۳ و ۴) ابتدا، زوایای مفصلی بر اساس سینوس و کسینوس های آنها حل کرده و سپس با استفاده از تانژات وارون دو شناسه ای مقادیر زوایای مفصلی را بدست آمده اند.

برای محاسبه زاویه مفصلی (θ_1)، سینوس و کسینوس آن را می توان از معادله ۴ بدست آورد بطوریکه:

$$\cos\theta_1 = \frac{{}^{0}X_{4ORG}}{L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}} \qquad \sin\theta_1 = \frac{{}^{0}Y_{4ORG}}{L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}} \tag{۵}$$

و با استفاده از تانژانت وارون دو شناسه ای داریم:

$$\theta_1 = A\tan 2\left(\frac{{}^{0}Y_{4ORG}}{L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}}, \frac{{}^{0}X_{4ORG}}{L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}}\right) \tag{۶}$$

برای تعیین زاویه مفصلی (θ_3)، از معادله ۲ استفاده می کنیم با این تغییر که توابع تبدیل وابسته به زوایای (θ_1) و (θ_2) را به سمت چپ معادله انتقال می دهیم:

$$\left[{}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\right]^{-1}\,{}^{0}_{4}T = {}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T$$

$$\begin{bmatrix} C_1C_2 & S_1C_2 & S_2 & -L_1C_2 \\ -C_1S_2 & -S_1S_2 & C_2 & L_1S_2 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} & & & {}^{0}X_{4ORG} \\ & {}^{0}_{4}R & & {}^{0}Y_{4ORG} \\ & & & {}^{0}Z_{4ORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_3C_3 + L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & L_3S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{۷}$$

از تساوی عناصر (۴،۱) و (۴،۲) مربوط به دو طرف معادله ۷ می توان نوشت:

$$(C_1C_2)\,{}^{0}X_{4ORG} + (S_1C_2)\,{}^{0}Y_{4ORG} + (S_2)\,{}^{0}Z_{4ORG} - L_1C_2 = L_3C_3 + L_2 \tag{۸}$$

$$-(C_1S_2)\,{}^{0}X_{4ORG} - (S_1S_2)\,{}^{0}Y_{4ORG} + (C_2)\,{}^{0}Z_{4ORG} + L_1S_2 = L_3S_3 \tag{۹}$$

حال اگر دو معادله ۸ و ۹ را به توان دو برسانیم و با هم جمع کنیم داریم:

$$\left(C_1\,{}^0X_{4ORG}\right)^2+\left(S_1\,{}^0Y_{4ORG}\right)^2+\left(L_1\right)^2+2C_1S\theta_1\,{}^0Y_{4ORG}\,{}^0X_{4ORG}-2L_1C_1\,{}^0X_{4ORG}-2L_1S_1\,{}^0Y_{4ORG}+\left({}^0Z_{4ORG}\right)^2=\left(L_3\right)^2+\left(L_2\right)^2+2L_2L_3C_3 \qquad (۱۰)$$

اکنون با استفاده از معادله ۱۰ می توان سینوس و کسینوس زاویه (θ_3) را بدست آورد:

$$\begin{aligned}\cos\theta_3 &= \frac{\left({}^0X_{4ORG}C_1+{}^0Y_{4ORG}S_1-L_1\right)^2-\left(L_2\right)^2-\left(L_3\right)^2+\left({}^0Z_{4ORG}\right)^2}{2L_2L_3}\\ \sin\theta_3 &= \pm\sqrt{1-\left(C_3\right)^2}\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

وابستگی معادله ۱۱ به علامت مثبت و منفی، نشان از وجود دو جواب برای زاویه مفصلی (θ_3) می باشد.

$$\theta_3 = A\tan 2\left(\pm\sqrt{1-\left(C_3\right)^2},\frac{\left({}^0X_{4ORG}C_1+{}^0Y_{4ORG}S_1-L_1\right)^2-\left(L_2\right)^2-\left(L_3\right)^2+\left({}^0Z_{4ORG}\right)^2}{2L_2L_3}\right) \qquad (۱۲)$$

در نهایت برای محاسبه زاویه مفصلی (θ_2)، عناصر (۱،۱) و (۱،۲) مربوط به معادله ۴ را به توان دو رسانده و با یکدیگر جمع می کنیم:

$$\begin{aligned}&\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2=\left(L_1+L_2C_2+L_3C_{23}\right)^2\\ &\Rightarrow L_2\cos\theta_2+L_3\cos\left(\theta_2+\theta_3\right)=\sqrt{\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2}-L_1\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

با مقایسه معادله ۱۳ و عنصر (۳،۱) معادله ۴ یعنی $\left(L_3\sin(\theta_2+\theta_3)+L_2\sin\theta_2={}^0Z_{4ORG}\right)$، مقادیر سینوس و کسینوس زاویه مفصلی (θ_2) بدست می آیند:

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}K_1 & -K_2\\ K_2 & K_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_2\\ S_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sqrt{\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2}-L_1\\ {}^0Z_{4ORG}\end{bmatrix}\\ &\Rightarrow\begin{bmatrix}C_2\\ S_2\end{bmatrix}=\frac{1}{L_2^2+L_3^2+2L_2L_3C_3}\begin{bmatrix}K_1\left(\sqrt{\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2}-L_1\right)+K_2\,{}^0Z_{4ORG}\\ -K_2\left(\sqrt{\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2}-L_1\right)+K_1\,{}^0Z_{4ORG}\end{bmatrix}\end{aligned} \qquad (۱۴)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}K_1 &= L_2+L_3\cos\theta_3\\ K_2 &= L_3\sin\theta_3\end{aligned}$$

اکنون با به خدمت گرفتن تانژانت وارون دو شناسه ای می توان زاویه مفصلی (θ_2) را محاسبه نمود:

$$\theta_2 = A\tan 2\left(-K_2\left(\sqrt{\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2}-L_1\right)+K_1\,{}^0Z_{4ORG},K_1\left(\sqrt{\left({}^0X_{4ORG}\right)^2+\left({}^0Y_{4ORG}\right)^2}-L_1\right)+K_2\,{}^0Z_{4ORG}\right) \qquad (۱۵)$$

۱,۱. ژاکوبین، سرعت و نیرو های استاتیکی مربوط به روبات ماهر 3-dof HMR

هر بازوی مکانیکی ماهر، زنجیری از اجسام است که هر یک نسبت به اجسام مجاور خود حرکت می کند بطوریکه سرعت رابط $(i+1)$ عبارتست از سرعت رابط (i) به علاوه هر مولفه سرعتی که رابط $(i+1)$ به این حرکت اضافه می کند. معادله ۱۶ نحوه اشاعه سرعت خطی υ و دورانی ω را از رابطی به رابط دیگر نشان می دهد (Craig, 1955).

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^{i+1}_{i}R\,{}^{i}\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \\ {}^{i+1}\upsilon_{i+1} &= {}^{i+1}_{i}R\left({}^{i}\upsilon_i + {}^{i}\omega_i \times {}^{i}P_{i+1}\right) + \dot{d}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \qquad (۱۶)$$

معادله ۱۶ را برای محاسبه سرعت مبدا هر چهارچوب به کار برده و از چهارچوب پایه که سرعت صفر دارد شروع می کنیم. معادلات ۱۷ و ۱۸ نحوه اشاعه سرعت از رابطی به رابط دیگر مربوط به روبات ماهر 3-dof HMR را نشان می دهند.

$${}^0\omega_0 = \begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix},\ {}^1\omega_1 = \begin{bmatrix}0\\0\\\dot{\theta}_1\end{bmatrix},\ {}^2\omega_2 = \begin{bmatrix}\dot{\theta}_1 S_2\\\dot{\theta}_1 C_2\\\dot{\theta}_2\end{bmatrix},\ {}^3\omega_3 = \begin{bmatrix}\dot{\theta}_1 S_{23}\\\dot{\theta}_1 C_{23}\\\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_3\end{bmatrix},\ {}^4\omega_4 = {}^3\omega_3 \qquad (۱۷)$$

$${}^0\upsilon_0 = \begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix},\ {}^1\upsilon_1 = \begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix},\ {}^2\upsilon_2 = \begin{bmatrix}0\\0\\-L_1\dot{\theta}_1\end{bmatrix},\ {}^3\upsilon_3 = \begin{bmatrix}\dot{\theta}_2 L_2 S_3\\\dot{\theta}_2 L_2 C_3\\-L_1\dot{\theta}_1 - L_2\dot{\theta}_1 C_2\end{bmatrix},\ {}^4\upsilon_4 = \begin{bmatrix}0 & L_2S_3 & 0\\0 & L_2C_3+L_3 & L_3\\-L_1-L_2C_2-L_3C_{23} & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\\dot{\theta}_2\\\dot{\theta}_3\end{bmatrix} \qquad (۱۸)$$

برای تغییر توصیف سرعت زاویه ای $\left({}^4\omega_4\right)$ و سرعت خطی $\left({}^4\upsilon_4\right)$ نسبت به چهارچوب پایه ماتریس دوران ${}^0_4R$ را در سرعت های بدست آمده ضرب نموده ایم:

$${}^0\upsilon_4 = {}^0_4R\,{}^4\upsilon_4 = \begin{bmatrix}-L_3S_1C_{23}-L_2C_2S_1-L_1S_1 & -L_3C_1S_{23}-L_2S_2C_1 & -L_3C_1S_{23}\\ L_3C_1C_{23}+L_2C_2C_1+L_1C_1 & -L_3S_1S_{23}-L_2S_2S_1 & -L_3S_1S_{23}\\ 0 & L_3C_{23}+L_2C_2 & L_3C_{23}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\\dot{\theta}_2\\\dot{\theta}_3\end{bmatrix} \qquad (۱۹)$$

از معادله ۱۹ می توان برای محاسبه ژاکوبین استفاده نمود. ژاکوبین یک فرم چند بعدی از مشتق است که برای برقراری ارتباط بین سرعت های مفصلی و سرعت های زاویه ای استفاده می شود. معادلات ۲۰ و ۲۱ ژاکوبین هایی را نشان می دهند که سرعت های مفصلی $\left[\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3\right]^T$ را به سرعت های دکارتی ${}^4\upsilon_4$ و ${}^0\upsilon_4$ به ترتیب مرتبط می کنند.

$$ {}^{4}J_{4} = \begin{bmatrix} 0 & L_2S_3 & 0 \\ 0 & L_2C_3 + L_3 & L_3 \\ -L_1 - L_2C_2 - L_3C_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (۲۰) $$

$$ {}^{0}J_{4} = {}^{0}_{4}R\,{}^{4}J_{4} \begin{bmatrix} -L_3S_1C_{23} - L_2C_2S_1 - L_1S_1 & -L_3C_1S_{23} - L_2S_2C_1 & -L_3C_1S_{23} \\ L_3C_1C_{23} + L_2C_2C_1 + L_1C_1 & -L_3S_1S_{23} - L_2S_2S_1 & -L_3S_1S_{23} \\ 0 & L_3C_{23} + L_2C_2 & L_3C_{23} \end{bmatrix} \qquad (۲۱) $$

همچنین برای محاسبه سرعت های مفصلی بر اساس سرعت های دکارتی، از ژاکوبین وارون در حالت ناتکین استفاده گردیده است. معادله ۲۲ این ارتباط را نشان می دهد.

$$ \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \left({}^{0}J_{4} \right)^{-1} {}^{0}\upsilon_{4} \qquad (۲۲) $$

از معادله ۲۳ برای محاسبه گشتاور مفصلی ناشی از بار خارجی وارد به مجری نهایی استفاده گردیده است. در این معادله از ترانهاده ژاکوبین برای برقراری این ارتباط استفاده شده است (Craig, 1955).

$$ \tau = \left({}^{0}J_{4}\left(\Theta\right) \right)^{T} {}^{0}F_{4} \qquad (۲۳) $$

با جایگزینی معادله ۲۱ در ۲۳ گشتاور های مفصلی مربوط به روبات ماهر 3-dof HMR که ناشی از نیروهای استاتیکی وارد بر مجری نهایی می باشند، بدست آمده است.

$$ \begin{bmatrix} {}^{1}n_1 \\ {}^{2}n_2 \\ {}^{3}n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_3S_1C_{23} - L_2C_2S_1 - L_1S_1 & L_3C_1C_{23} + L_2C_2C_1 + L_1C_1 & 0 \\ -L_3C_1S_{23} - L_2S_2C_1 & -L_3S_1S_{23} - L_2S_2S_1 & L_3C_{23} + L_2C_2 \\ -L_3C_1S_{23} & -L_3S_1S_{23} & L_3C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{0}f_x \\ {}^{0}f_y \\ {}^{0}f_z \end{bmatrix} \qquad (۲۴) $$

۱,۲. دینامیک مستقیم و دینامیک وارون روبات ماهر 3-dof HMR

نیرو های لازم برای به حرکت در آوردن بازوهای مکانیکی ماهر، تابعی از شتاب و توزیع جرم در بازو ها می باشند. معادله نیوتن همراه با همتای دورانی آن، معادله اویلر، رابطه بین نیروها، لنگر های لختی و شتابها را در بازو های مکانیکی ماهر نشان می دهند. معادله ۲۵ و معادله ۲۶ به ترتیب معادلات نیوتن و اویلر را نشان می دهند:

$$ F = m\dot{\upsilon}_C \qquad (۲۵) $$

$$ N = {}^{C}I\dot{\omega} + \omega \times {}^{C}I\omega \qquad (۲۶) $$

با به کار گیری الگوریتم دینامیکی بسته نیوتن-اویلر (Craig, 1955) برای روبات ماهر 3-dof HMR که در شکل ۱ نشان داده شده است، گشتاور های مفصلی هر رابط محاسبه گردیده است. در به کار گیری این الگوریتم، فرض شده است که توزیع جرم در انتهای هر رابط متمرکز و نیروی خارجی بر روی بازوی مجری نهایی وارد نمی شوند. همچنین برای تاثیر نیروی گرانش بر روی بازوهای مکانیکی ماهر فرض شده است که پایه روبات با شتاب ($1G$) به سوی بالا حرکت می کند. معادله ۲۷، بردار گشتاور مفصلی را با توجه به مشخصات موقعیت زاویه مفصلی (Θ)، سرعت زاویه مفصلی $(\dot{\Theta})$ و شتاب زاویه ای مفصلی $(\ddot{\Theta})$ روبات ماهر 3-dof HMR ، نشان می دهد.

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + B(\Theta)\left[\dot{\Theta}\dot{\Theta}\right] + C(\Theta)\left[\dot{\Theta}^2\right] + G(\Theta)$$
$$\begin{bmatrix} {}^{1}n_1 \\ {}^{2}n_2 \\ {}^{3}n_3 \end{bmatrix} = M(\Theta)\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + B(\Theta)\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + C(\Theta)\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + G(\Theta) \tag{۲۷}$$

که در آن $M(\Theta)$ ماتریس جرم، $B(\Theta)$ ماتریس ضرایب کوریولیس، $C(\Theta)$ ماتریس ضرایب گریز از مرکز و $G(\Theta)$ ماتریس مربوط به گرانی، به ترتیب توسط معادلات ۲۸ تا ۳۱ نشان داده شده است.

$$M(\Theta) = \begin{bmatrix} m_1L_1^2 + m_2\left(L_1 + L_2C_2\right)^2 + m_3\left(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2L_2^2 + m_3\left(\left(L_3 + L_2C_3\right)^2 + \left(L_2S_3\right)^2\right) & m_3L_3\left(L_3 + L_2C_3\right) \\ 0 & m_3L_3\left(L_3 + L_2C_3\right) & m_3L_3^2 \end{bmatrix} \tag{۲۸}$$

$$B(\Theta) = \begin{bmatrix} -2m_2L_2S_2\left(L_1 + L_2C_2\right) - 2m_3\left(L_2S_2 + L_3S_{23}\right)\left(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\right) & -2m_3L_3S_{23}\left(L_1 + L_2C_2\right) & 0 \\ 0 & 0 & -2m_3L_3\left(L_2S_3\right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{۲۹}$$

$$C(\Theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ m_2L_2S_2\left(L_1 + L_2C_2\right) + m_3\left(L_2S_2 + L_3S_{23}\right)\left(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\right) & 0 & -m_3L_3\left(L_2S_3\right) \\ m_3L_3S_{23}\left(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\right) & m_3L_3\left(L_2S_3\right) & 0 \end{bmatrix} \tag{۳۰}$$

$$G(\Theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ m_2L_2C_2 + m_3\left(L_2C_2 + L_3C_{23}\right) \\ m_3\left(L_3C_{23}\right) \end{bmatrix} \tag{۳۱}$$

از معادله ۲۷ می توان برای بررسی کنترل پذیری روبات ماهر 3-dof HMR استفاده نمود، همچنین برای شبیه سازی روبات ماهر 3-dof HMR، مدل دینامیکی بدست آمده را بایستی بر اساس شتاب حل کنیم، بطوریکه:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = M^{-1}(\Theta)\left(\begin{bmatrix} {}^{1}n_1 \\ {}^{2}n_2 \\ {}^{3}n_3 \end{bmatrix} - B(\Theta)\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \end{bmatrix} - C(\Theta)\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} - G(\Theta)\right) \tag{۳۲}$$

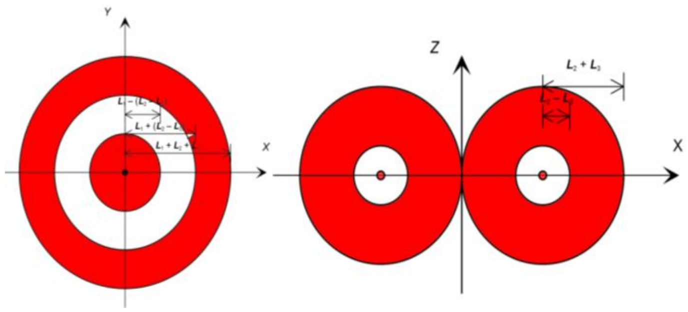
نتایج و بحث

فضای کاری روبات ماهر 3-dof HMR

فضای کاری حجمی از فضا است، که مجری نهایی روبات ماهر به آن می تواند دسترسی داشته باشد. در صورتی که محصول در فضای کاری روبات ماهر 3-dof HMR قرار نداشته باشد، روبات ماهر قادر به برداشت محصول نخواهد بود، بنابراین شناخت محدودیت های فضای کاری روبات از اهمیت بالایی برخوردار است. از معادلات سینماتیک وارون ۵، ۱۱، ۱۳ و ۱۴ برای بدست آوردن فضای کاری روبات ماهر 3-dof HMR استفاده شده است، بطوریکه برای صفحه X، Y و Z داریم:

$$\begin{aligned}
&\left|{}^{0}X_{4ORG}\right| \le L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\\
&\left|{}^{0}Y_{4ORG}\right| \le L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\\
&\left({}^{0}X_{4ORG}\right)^2 + \left({}^{0}Y_{4ORG}\right)^2 = \left(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}\right)^2\\
&\left(L_2 - L_3\right)^2 \le \left({}^{0}Z_{4ORG}\right)^2 + \left({}^{0}X_{4ORG}C_1 + {}^{0}Y_{4ORG}S_1 - L_1\right)^2 \le \left(L_2 + L_3\right)^2
\end{aligned} \tag{۳۳}$$

شکل ۲ با استفاده از معادلات ۳۳ فضای کاری روبات ماهر را در صفحه x-y و x-z نشان می دهد.



شکل ۲- فضای کاری روبات ماهر 3-dof HMR که در شکل ۱ نشان داده شده است.الف) صفحه x-y ب) صفحه x-z

با توجه به فضای کاری نشان داده شده در شکل ۲، مشخص است که، مجری نهایی قادر به پوشش دادن فضای دایره ای شکل با معادله $\left\{0 \le \left({}^{0}Z_{4ORG}\right)^2 + \left({}^{0}X_{4ORG}C_1 + {}^{0}Y_{4ORG}S_1 - L_1\right)^2 \le \left(L_2 - L_3\right)^2\right\}$ نمی باشد، البته این نقصان را می توان با اضافه کردن یک درجه آزادی مثل اضافه کردن یک مفصل لغزشی به روبات ماهر حل نمود.

نقاط تکین فضای کاری

هنگامی که بازوی مکانیکی ماهر در وضعیت تکین قرار می گیرد، یک یا چند درجه آزادی خود را در فضای دکارتی از دست می دهد. این بدان معناست که در فضای دکارتی، راستایی وجود دارد که در آن، صرفنظر از آنکه چه سرعت مفصلی انتخاب شود، نمی

توان بازوی مکانیکی روبات ماهر را حرکت داد. برای پیدا کردن نقاط تکین روبات ماهر 3-dof HMR دترمینان ژاکوبین آن بررسی گردید:

$$\begin{aligned} &\left|{}^{4}J_{4}\right| = 0 \\ &L_2 L_3 \sin\theta_3 \left(-L_3 \sin\left(\theta_2+\theta_3\right) - L_1 - L_2 \cos\theta_2\right) = 0 \\ &\Rightarrow \theta_3 = K\pi \quad K = 0,1,2,\ldots \end{aligned} \tag{۳۴}$$

با مساوی صفر قرار دادن دترمینان ژاکوبین روبات ماهر، مشخص شد که ژاکوبین زمانی که زاویه مفصلی θ_3، مقدار ۰ و یا ۱۸۰ درجه باشد، رتبه کامل خود را از دست می دهد. از لحاظ ساختاری زمانی که $\theta_3 = 0$، رابط ۲ و ۳ در امتداد یکدیگر قرار می گیرند. در این حالت، مجری نهایی به هنگام حرکت یک درجه آزادی را از دست می دهد. به همین ترتیب اگر $\theta_3 = 180$، رابط های ۲ و ۳ بر روی یکدیگر خم شده و مجددا حرکت مجری نهایی در فضای دکارتی یک درجه آزادی خود را از دست می دهد.

گشتاور اغتشاش

یک سیستم کنترلی برای اینکه بتواند بازوهای مکانیکی ماهر را حرکت دهد، بایستی بر گشتاور ناشی از حرکت روبات ماهر غلبه کند. تعیین میزان این گشتاور، در طراحی کنترلر بسیار حائز اهمیت است. به همین منظور برای تعیین میزان گشتاورهای مفصلی روبات ماهر ناشی از حرکت بازوهای مکانیکی آن، ابتدا مسیری در فضای کاری روبات ماهر با معادله ${}^{0}Z_{4ORG}\left(t\right) = 0.5\times \mathrm{Sin}\left(5X\left(t\right)\right) - 1.55$ تعیین گردید. شکل ۳ (الف) این مسیر را در فضای کاری نشان می دهد. برای تعیین موقعیت، سرعت و شتاب ابتدا و انتهای مسیر، یک معادله درجه پنج برای هر درجه آزادی از فضای دکارتی به کار گرفته شد.

$${}^{0}X_{4ORG}\left(t\right) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \tag{۳۵}$$

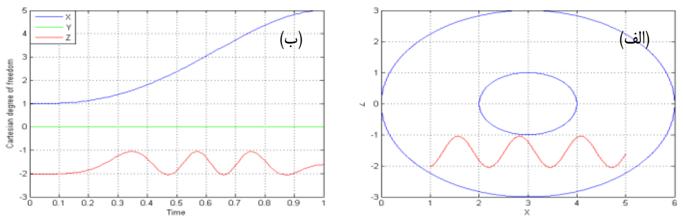
سپس قید های حاکم بر این معادله تعیین گردید:

$$\begin{cases} {}^{0}X_{4ORG}(0) = 1;\ {}^{0}\dot{X}_{4ORG}(0) = 0;\ {}^{0}\ddot{X}_{4ORG}(0) = 0; \\ {}^{0}X_{4ORG}(t_f) = 5;\ {}^{0}\dot{X}_{4ORG}(t_f) = 0;\ {}^{0}\ddot{X}_{4ORG}(t_f) = 0;\ t_f = 1\ s \end{cases} \tag{۳۶}$$

با توجه به قید های ۳۶، درجات آزادی فضای دکارتی به صورت معادله ۳۷ محاسبه شد.

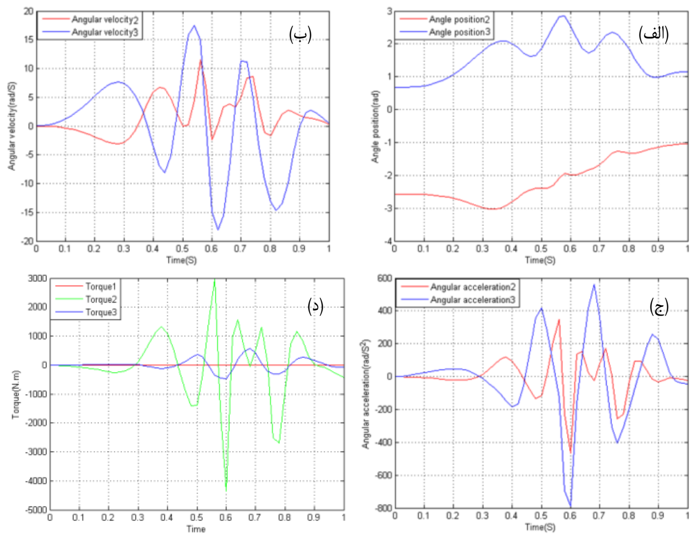
$$\begin{aligned} &\Rightarrow {}^{0}X_{4ORG}\left(t\right) = 1 + 20t^3 - 20t^4 + 4t^5 \\ &{}^{0}Z_{4ORG}\left(t\right) = 0.5\times \mathrm{Sin}\left(5X\left(t\right)\right) - 1.55 \\ &{}^{0}Y_{4ORG}\left(t\right) = 0 \end{aligned} \tag{۳۷}$$

در شکل ۳ (ب) تغییرات درجات آزادی فضای دکارتی نشان داده شده است.



شکل ۳-الف) مسیر تعیین شده در فضای کاری روبات ماهر ب) تغییرات درجات آزادی فضای دکارتی مسیر تعیین شده

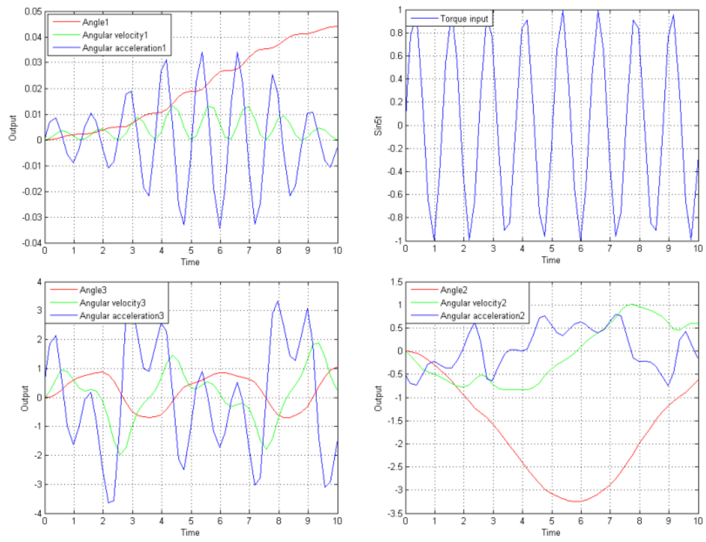
سپس با استفاده از معادلات۶، ۱۲ و ۱۵، موقیت، سرعت و شتاب مفصل های لولایی روبات ماهر محاسبه و در شکل ۴ به تصویر کشیده شده اند. در نهایت با جایگذاری موقیت، سرعت و شتاب زوایای مفصلی در معادله ۲۷، گشتاور اعتشاش ناشی از حرکت روبات ماهر 3-dof HMR در مسیر تعیین شده شکل ۳ محاسبه گردید.



شکل ٤-الف) موقعیت زوایای مفصلی ب) سرعت زوایای مفصلی ج) شتاب زوایای مفصلی د) گشتاور اغتشاش ناشی از حرکت روبات در مسیر تعیین شده

شبیه سازی روبات ماهر 3-dof HMR

از معادله ۳۲ به منظور شبیه سازی روبات ماهر 3-dof HMR استفاده گردید. معادله ۳۲ نحوه حرکت روبات ماهر در اثر اعمال گشتاورهای مفصلی را نشان می دهد. به منظور شناخت حرکتی روبات ماهر ابتدا بردار گشتاور مفصلی با معادله $\tau = \mathrm{Sin}\, 5t$ انتخاب و سپس با استفاده از معادله ۳۲ نحوه تغییرات موقعیت، سرعت و شتاب زوایای مفصلی محاسبه شد. شکل ۵ تغییرات زوایا مفصلی ناشی از گشتاور مفصلی اعمال شده را نشان می دهد.



شکل ۵- گشتاور مفصلی به همراه موقعیت، سرعت و شتاب زوایای مفصلی

نتیجه گیری کلی

این مقاله معادلات سینماتیک و دینامیک مستقیم و وارون یک روبات ماهر برداشت کننده با سه درجه آزادی را با هدف شناخت حرکتی آن ارائه می کند. این معادلات از روش تکراری نیوتن-اویلر بدست آمده اند. روش ارائه شده در این مقاله قابل تعمیم به انواع روبات های ماهر از جمله روبات های ماهر متحرک با درجات آزادی بالاتر است که می تواند برای تحقیقات آینده مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

Affeldt, H. A., Brown, G. K., & Gerrish, J. B. (1989). A New Shaker for Fruit and Nut Trees. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *44*, 53-66 .

Bachche, S. (2015). Deliberation on Design Strategies of Automatic Harvesting Systems: A Survey. *Robotics*, *4*, 194-222 .

Berlage, A. G., & Langmo, R. D. (1982). Machine- VS Hand-Thinning of Peaches. *American Society of Agricultural Engineers*, *25*(3), 538-543 .

Craig, J. J. (1955). *Introduction to robotics mechanic and control*.

Hentena, E. J. V., Slot, D. A. V .t., Hold, C. W. J., & Willigenburge, L. G. V. (2009). Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, *65*, 247-257 .

Korayem, M. H., Shafei, A. M., & Seidi, E. (2014). Symbolic derivation of governing equations for dual-arm mobile manipulators used in fruit-picking and the pruning of tall trees. *Computers and Electronics in Agriculture, 105*, 95-102 .

Mehta, S. S., & Burks, T. F. (2014). Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting .*Computers and Electronics in Agriculture, 102*, 146-158 .

Rosa, U. A., Cheetancheri, K. G., Gliever, C. J., Lee, S. H., Thompson, J., & Slaughter, D. C. (2008). An electro-mechanical limb shaker for fruit thinning. *Computers and Electronics in Agriculture, 61*, 213-221 .

Sakai, S., Iida, M., & Umeda, M. (2002). *Heavy Material Handling Manipulator for Agricultural Robot.* Paper presented at the International Conference on Robotics &Automation, Washington, DC.