



مدل سازی دینامیک و سینماتیکی ربات WDFR و ارزیابی تجربی توانایی چیدن محصولات باغی توسط آن

محمد گهري^۱ - منا طهماسبی^{۲*} - محمدرضا زارع^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

چکیده:

با توسعه فناوری در زندگی بشر، ربات‌ها نیز در موارد مختلف کاربرد یافته‌اند مانند جراحی، ماشینکاری قطعات، بازرسی نظامی و کشاورزی. یکی از انواع ربات که دارای درجه آزادی بیشتر نسبت به ربات‌های مفصلی می‌باشد، ربات‌های انعطاف‌پذیر با محرک ریسمانی می‌باشد. این ربات‌های دارای قابلیت تطابق‌پذیری با محیط اطراف هستند و اخیراً کاربرد زیادی در امر بازرسی قطعات با هندسه پیچیده و همچنین جراحی‌های با محیط‌های بسته مانند لاپاروسکوپی یافته‌اند. همچنین این ربات‌ها برای چیدن محصولات از بین شاخ و برگ گیاهان مناسب به نظر می‌رسند. در این مقاله، ابتدا مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات WDFR که برای کنترل آن ضروری است، استخراج گردیده است. سپس، دقت ربات در موقعیت‌یابی توسط مدل‌های پایه‌گذاری شده و آزمایش‌های تجربی بررسی شد. همبستگی نتایج موقعیت‌یابی ربات با مدل تئوری و آزمایش‌های تجربی ضریب وابستگی ۰/۹۷ را نشان داد. در نهایت ارزیابی تجربی ربات در چیدن دو نوع میوه باغی هلو و انجیر انجام پذیرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که نیروی لازم برای چیده شدن هلو نسبت به انجیر بیشتر است اما تعداد مراحل متوالی برای انجام عملیات چیدن انجیر نسبت به هلو کمتر می‌باشد. در پژوهش‌های آینده سیستم کنترل خودکار برای این ربات ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی: ربات انعطاف‌پذیر، مدل دینامیک، مدل سینماتیکی، تیر اولر- برنولی، سامانه کنترل

مقدمه:

بیشینه داشته باشد. ربات‌های WDFR مناسب این کاربردها هستند اما ظرفیت بارپذیری و محدوده دقت آنها محدود است. این ربات‌ها در مقایسه با ربات‌های مفصلی مزایایی دارند مانند تعداد کمتر عملگر یا موتور، ساختار ساده‌تر و تطابق‌پذیری با شرایط فضای کاری. در خلال عملیات بازرسی ظرفیت بارپذیری و دقت موقعیت‌یابی به اهمیت ربات‌های جراحی نیست. همچنین در این ربات‌ها بار خارجی وارد شده از محیط اطراف به عنوان اغتشاش مهم است چرا که باعث تغییر فرم بازو می‌گردد. در نقطه مقابل ربات‌های برداشت محصولات ظرفیت باربرداری بری چیدن میوه یا بوته از دقت موقعیت‌یابی مهم‌تر است.

اغلب مدلسازی‌های انجام شده WDFR بر پایه خمش تیر یا تنوری تیر بنولی- اولر است که در اثر کشش تاندوم‌های

امروزه ربات‌ها در صنایع مختلف تولیدی و خدماتی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند و دیگر تجهیزات لوکس و فانتزی حساب نمی‌شوند. یکی از انواع ربات‌های کاربردی در عملیات‌های مختلف ربات انعطاف‌پذیر با محرک سیمی (WDFR) است (Suzumori et al., 1992) که توسط محققان در زمینه مهندسی پزشکی (Fisher et al., 2014; Dupont et al., 2012; Dupont et al., 2013; Zhou et al., 2009; et al., 2009) زیر دریا (Li & Du, 2012; Liao et al., 2012; Li et al., 2012) بازرسی توربین‌ها (Anonymous, 2022) و برداشت و بسته‌بندی محصولات کشاورزی بکار رفته است. (Chowdhary et al., 2019) در اغلب کاربردهای ذکر شده بازوی ربات باید کم‌حجم، انعطاف‌پذیر و هندسه تطابق‌پذیری داشته باشد تا بتواند کارایی

^۱ - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

^۲ - استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

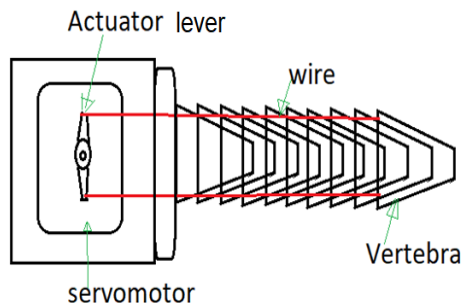
^۳ - دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه Besançon, Bourgogne-Franche-Comté فرانسه

* نویسنده مسؤول: tahmasebi.mona@gmail.com

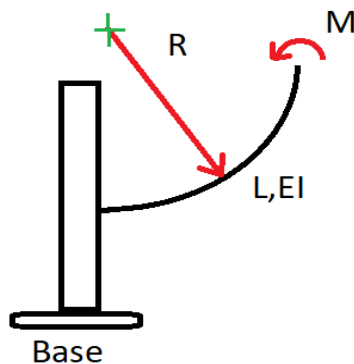


مجله مهندسی زیست سامانه

شده و موقعیت نقطه انتهایی بازو تغییر می‌کند چرا که انحناء بازو تغییر کرده است. در حقیقت مجموعه مهره‌ها مانند یک تیر یکسر درگیر دارای خیز انتهایی شده است. شعاع انحناء این تیر از تئوری خمش تیر محاسبه می‌گردد. شکل ۲ خمش و شعاع انحناء ناشی از آن را به تصویر کشیده است.



شکل ۱- اجزا ربات WDFR در حرکت صفحه‌ای



شکل ۲- شعاع انحناء و انحناء WDFR در اثر گشتاور خمشی انتهایی تیر

موقعیت انتهایی بازو توسط $P(x,y)$ مشخص می‌گردد و شعاع انحناء نیز R نامیده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است مولفه عمودی مکان نقطه P یعنی y از رابطه ۱ بدست آید:

$$(1)$$

$$y = R - R \cos \alpha = R(1 - \cos \alpha)$$

از طرف دیگر، موقعیت افقی نقطه انتهایی یعنی x از انحنای دایره شکل تیر توسط رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$(2)$$

$$x^2 + y^2 = R^2 \rightarrow x = \sqrt{R^2 - y^2}$$

در نهایت با ترکیب رابطه ۱ و ۲، x بصورت تابعی از R بدست می‌آید:

$$x = R\sqrt{2 \cos \alpha - \cos^2 \alpha} \quad (3)$$

یا

$$x = R \sin \alpha$$

زاویه رأس کمان حادث شده توسط α نام‌گذاری شده است. در نتیجه سینماتیک مکان انتهایی WDFR بر اساس شعاع انحناء بدست می‌آید. حال باید R بر اساس گشتاور خمشی M

بازو و خمش ایجاد شده است (Jones et al., 2009; Rucker et al., 2010; Camarillo et al., 2008; Lock et al., 2010; Rucker & Webster, 2011). مدل‌های پیشنهادی برای پیش بینی تغییر شکل و جابجایی WDFR در اثر بار خارجی اعمال شده عمل می‌کنند. اکثراً شرایط بارگذاری ساده است بنابراین برای شرایط کاری واقعی کاملاً کاربردی نیستند. در نتیجه مدل‌های سینماتیکی و دینامیکی نیاز است که بتواند رفتار WDFR را در بارگذاری‌های پیچیده مانند ارتعاش و یا تحریک پایه مدل کند. یک مدل دقیق باید بتواند موقعیت‌یابی با دقت قابل قبول ارائه کرده و نیروی لازم محرک را با توجه به دینامیک معکوس حساب کند تا مکان مطلوب نقطه انتهایی ربات بدست آید. از آنجایی که کاربرد ربات‌ها در کشاورزی افزایش یافته است (Tahmasebi et al., 2022) و کاربرد مکترونیک و حسگرها در کشاورزی دقیق جایگاه خود را یافته (Gohari et al., 2010; Tahmasebi et al., 2023)، ربات‌های انعطاف پذیر نیز می‌توانند با تغییراتی در این زمینه استفاده شوند.

این تحقیق بر آن است که یک مدل سینماتیک و دینامیکی از WDFR با کاربرد برداشت میوه ارائه کند و دقت - صحت آن را بر پایه نتایج آزمایشات تجربی بسنجد (Gohari et al., 2011; 2012) بر اساس مدل بدست آمده میزان انحناء بازو و شعاع انحناء قابل محاسبه است و تاثیر بار خارجی نیز قابل پیش بینی است.

مواد و روش‌ها

همان‌طور که قبلاً گفته شد مدل سینماتیکی WDFR برای موقعیت‌یابی نقطه انتهایی بازو مورد نیاز است. بنابراین در این مقاله ابتدا مدل سینماتیک شرح داده خواهد شد و سپس مدل دینامیکی بیان می‌گردد تا با کمک آن نیروی کشش لازم تاندوم‌ها برای رسیدن موقعیت مورد نظر حساب گردد. این بخش‌ها در ادامه توضیح داده می‌شود.

مدل سینماتیکی WDFR

ربات WDFR ساختاری شبیه ستون فقرات انسان دارد و شامل سیم‌های تاندمی، مهره‌ها، موتورهای محرک و پایه می‌باشد. شکل بخش مهره‌ها مانند مخروط ناقص است و مجموعه آنها بصورت یک زنجیره در کنار یکدیگر قرار گرفته است. این ساختار باعث می‌شود که هر مهره بتواند در سه جهت چرخش داشته باشد مانند آن است که مفصل کروی بین مهره‌ها قرار دارد. چهار رشته سیم تاندم از همه مهره‌ها گذشته و در نهایت به سروموتورهای محرک وصل شده‌اند. شکل ۱ این پیکربندی WDFR را در حالت مسطح نشان می‌دهد. هرگاه که یکی از سیم‌ها کشیده می‌شود سیم دوم آزاد توسط طرف دیگر اهرم سروموتور آزاد می‌گردد. این عمل باعث ایجاد خمش WDFR



محاسبه گردد:

(۴)

در شعاع مقطع تیر یعنی:

$$M = Fc \quad (11)$$

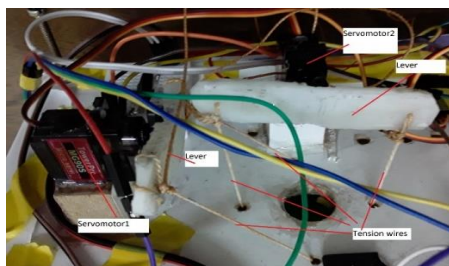
بدین ترتیب دینامیک مدل WDFR برای بدست آوردن موقعیت عملگر انتهایی بر اساس گشتاور اعمالی کامل شد. اکنون هر دو پارامتر موقعیت مکانی نقطه انتهایی و کشش لازم تاندوم برای رسیدن به مکان مطلوب در دسترس هستند و طراحی کنترل گر WDFR امکان پذیر می گردد.

ارزیابی تجربی WDFR

برای صحت سنجی دقت مدل دینامیکی و سینماتیکی WDFR، یک بازوی رباتیک توسعه داده شد که می تواند در صفحه دو بعدی و فضای سه بعدی حرکت داشته باشد. WDFR ساخته شده دارای ۱۰ مهره با طول ۴۵ میلی متر و شعاع ۱۵ میلی متر است که توسط ۴ رشته سیم به هم زنجیروار متصل شده اند. انتهای هر جفت سیم تاندوم به دو سر اهرم یک سروموتور بسته شده است. با این پیکربندی چرخش اهرم هر سروموتور باعث اعمال کشش در رشته های تاندوم می گردد. در شکل ۴-الف دستگاه ساخته شده نمایش داده شده است. کنترل سروموتورها توسط برد آردینو اونو انجام گرفته است. میزان کشش رشته های تاندوم توسط نیروسنج فنی انجام شد بطوری که هر ۹۰ درجه چرخش اهرم متصل به شفت موتور باعث ایجاد یک نیوتن نیروی کشش می شد. محل قرارگیری سروموتورها در پشت صفحه پایه ربات است و در شکل ۴-ب نمایش داده شده است. مکان عملگر نهایی توسط دو خط کش عمود بر هم در دو محور عمودی و افقی اندازه گیری و ثبت شد.



الف



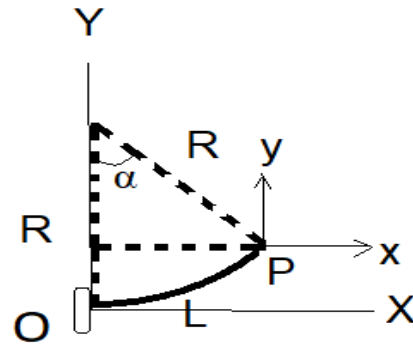
ب

شکل ۴-الف: ربات انعطاف پذیر توسعه داده شده، ب: اجزا حرکتی ربات

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \rightarrow R = \frac{EI}{M}$$

که در آن E مدول الاستیسیته و I گشتاور دوم سطح مقطع

تیر است. در دینامیک مدل WDFR برای محاسبه M لازم است که کشش سیمها در محاسبه خمش دخالت داده شوند.



شکل ۳- موقعیت انتهایی بازو و شعاع انحناء

دینامیک مدل WDFR

در تیر خمیده شده ارتباط بین گشتاور مکانیکی و شعاع انحناء از رابطه ۵ بدست می آید:

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (5)$$

که در حقیقت معکوس شعاع انحناء برابر است با:

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (6)$$

از طرف دیگر تنش عمودی وارده بر مقطع عرضی تیر توسط

رابطه زیر اعمال می گردد:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (7)$$

تنش عمودی در نتیجه تقسیم نیروی کششی سیم F بر

سطح مقطع عرضی تیر A بدست می آید:

$$\frac{F}{A} = \frac{Mc}{I} \rightarrow M = \frac{IF}{cA} \quad (8)$$

از رابطه ۴ و ۸ کشش سیم تاندوم F برای رسیدن به شعاع

انحناء مطلوب R استفاده می گردد:

$$F = \frac{AcE}{R} \quad (9)$$

در این رابطه A سطح مقطع تیر و c شعاع سطح مقطع

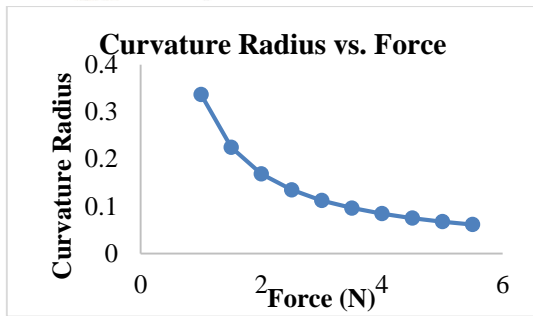
دایروی تیر است. همچنین در تیر یکسر گیردار به عنوان WDFR

جابجایی عمودی انتهای تیر یا y حین اعمال گشتاور خمشی

در انتهای تیر برابر است با:

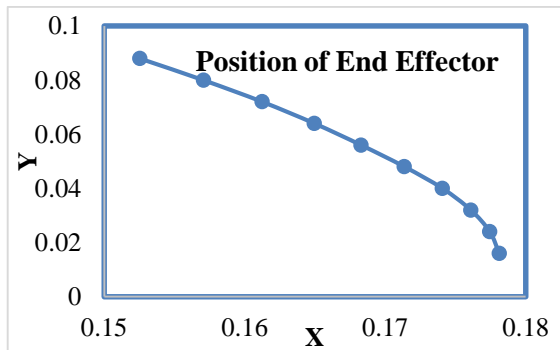
$$y = \frac{ML^2}{2EI} \quad (10)$$

همچنین گشتاور اعمالی برابر با ضرب نیروی کشش تاندوم

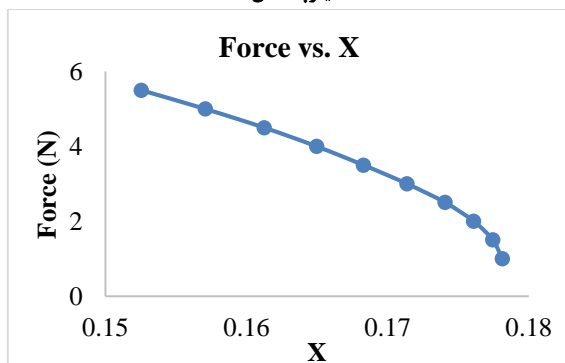
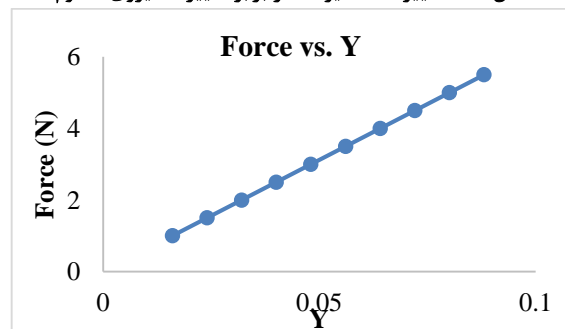


شکل ۸- تغییرات شعاع انحناء با افزایش نیروی تاندوم

در مورد دیگر برای اینکه اثر مدول الاستیسیته بازو در ربات انعطاف پذیر بررسی شود، مدول یانگ به ۳۰۰ کیلوپاسکال افزایش داده و موقعیت مکانی عملگر انتهایی در شکل ۹ نشان داده شد. همچنین کاهش مقدار X و افزایش مقدار Y متناسب با افزایش کشش در تاندومها در شکل ۱۰ و ۱۱ به تصویر کشیده شده است. همانند مورد قبلی، شعاع انحناء با افزایش نیرو کاهش یافته است. این مورد در شکل ۱۲ مشهود است.

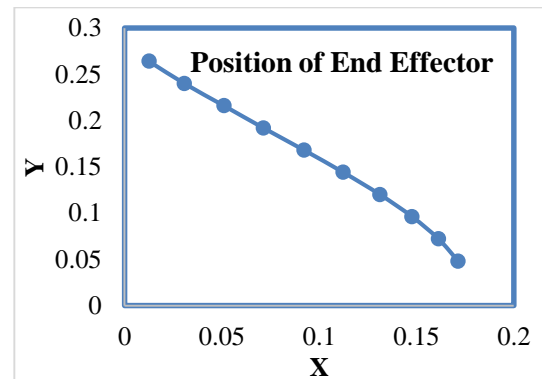


شکل ۹- موقعیت انتهایی بازو زمانی که مدول الاستیسیته ۳۰۰ کیلوپاسکال است

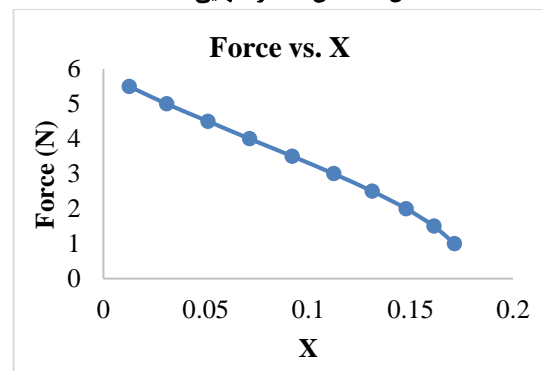
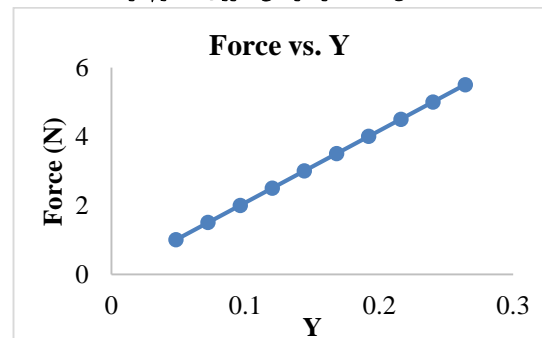
شکل ۱۰- تغییرات مقادیر X در برابر تغییرات نیروی تاندومشکل ۱۱- تغییرات ارتفاع عملگر انتهایی، Y ، با افزایش نیرو

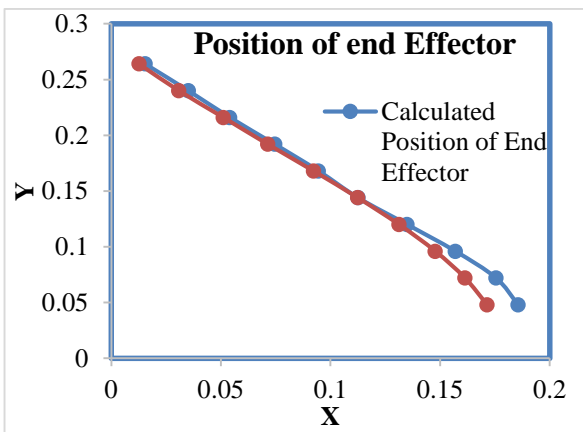
همچنین با مدل سینماتیکی و دینامیکی بدست آمده برای WDFR، یک برنامه رایانه‌ای برای محاسبه مکان عملگر انتهایی در نرم افزار متلب نوشته شد تا با کمک آن میزان کشش لازم تاندوم و چرخش سروموتور محاسبه گردد. مکان محاسبه شده عملگر انتهایی با توجه به میزان کشش رشته تاندوم در شکل ۵ ترسیم شده است. همان طور که در شکل مشخص است ارتفاع مکانی عملگر نهایی با افزایش کشش صعود کرده است. در این مورد مدول الاستیسیته بازو ۱۰۰ کیلوپاسکال بوده است.

برای درک بهتر اصول حرکت بازو، تغییرات مقادیر X و Y در برابر کشش تاندوم در شکل های ۶ و ۷ رسم شده اند. در حقیقت کاهش مقدار X با افزایش کشش رشته تاندوم رخ می دهد اما برعکس مقدار Y همان طور که انتظار می رود افزایش یافته است. به علاوه میزان شعاع انحناء با افزایش نیروی کششی کاهش می یابد (شکل ۸).

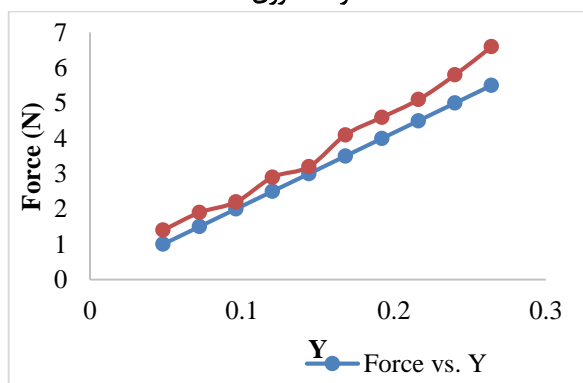


شکل ۵- مکان عملگر انتهایی WDFR

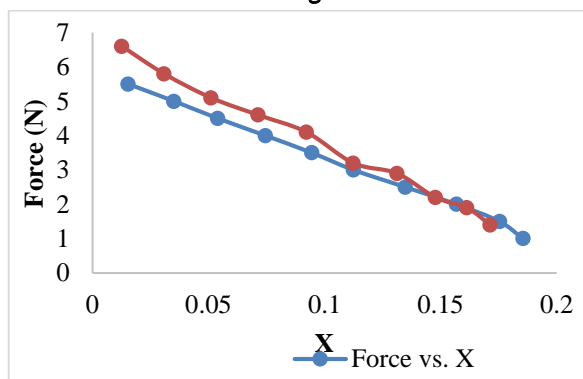
شکل ۶- تاثیر افزایش نیروی تاندوم بر X شکل ۷- اثر کشش تاندوم بر Y



شکل ۱۵- مقایسه موقعیت انتهایی ربات در حالت واقعی و پیش‌بینی شده توسط تئوری



شکل ۱۶- تاثیر نیرو در مقادیر Y در حالت واقعی و پیش‌بینی شده با مدل

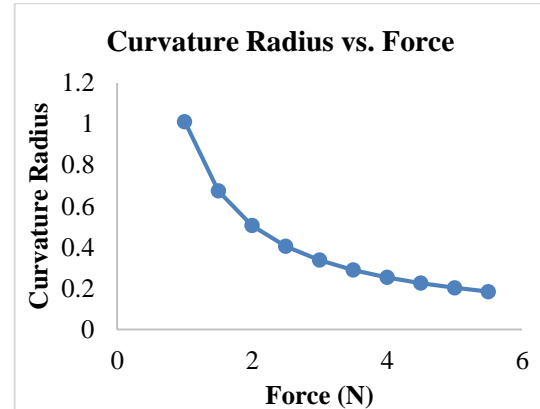


شکل ۱۷- تاثیر افزایش نیرو بر مقدار X بدست آمده در مقایسه با مقدار واقعی

همچنین رفتار بازوی ربات WDFR از طریق اندازه‌گیری طول معادل بین نقطه مرجع O و مکان عملگر نهایی P بررسی شد. این مقدار \bar{L} نامیده شد از طریق رابطه ۱۲ محاسبه گردید:

$$\bar{L} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (12)$$

مقدار عملی \bar{L} در مقابل مقدار محاسبه شده توسط مدل در مقابل هم در شکل ۱۸ رسم شدند. ضریب همبستگی بین این دو مقادیر توسط رگرسیون خطی $R^2=0/97$ بدست آمد که در

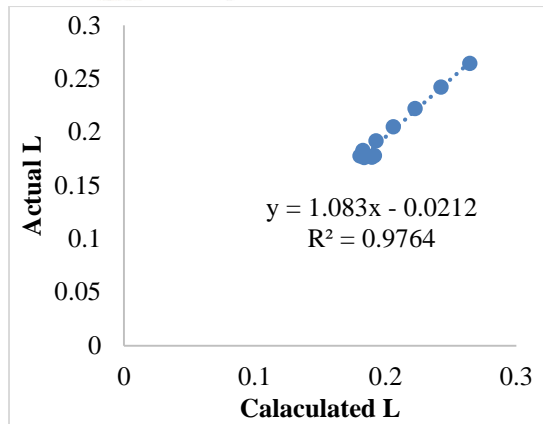


شکل ۱۲- مقادیر شعاع انحنا در برابر افزایش نیروی کشش تاندوم

مجموعه آزمایشات تجربی برای WDFR طراحی شد تا کشش‌های متفاوتی از تاندوم توسط دو سروموتور اعمال شود. با گردش هر ۹۰ درجه‌ای اهرم متصل به شفت، سروموتور میزان $0/5$ نیوتن نیروی کششی بر تاندوم‌ها ایجاد کرد. بنابراین گردش 180 درجه‌ای اهرم ۱ نیوتن اعمال نیرو به همراه داشت و گردش هر دو سروموتور دوران در فضای سه بعدی برای ربات ایجاد می‌نمود. موقعیت‌های متفاوتی با ترکیب گردش این دو سروموتور می‌توان ایجاد کرد. در بخش نتایج نقاط متفاوت و متنوعی که با این ربات بدست آمدند نشان داده شده و بحث گردیده است. همچنین ربات WDFR در چیدن دو نوع میوه باغی انجیر و هلو آزمایش شد. میانگین نیروی کشش لازم نخ قرقره‌های محرک در حرکت دادن میوه چیده شده، نیروی لازم برای چیدن میوه توسط گیره انتهایی و خیز انتهایی بازو اندازه‌گیری و ثبت شد.

نتایج

با اجرای فرامین حرکت، موقعیت‌های متفاوت در فضای کاری در اثر مقادیر مختلف کشش بکار برده شده در تاندوم توسط سروموتورها بدست آمد. برای مقایسه بهتر مدل تئوری با نتایج تجربی فقط حرکت‌های مسطح در صفحه توسط یک سروموتور در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است موقعیت عملگر انتهایی توسط خمش ایجاد شده در اثر کشش تاندوم روندی شبیه به مدل دینامیکی دارد. اگرچه روند این دو نمودار شبیه است اما ارتفاع عملگر نهایی متفاوت است. به نظر می‌رسد کشش کم نخ در عمل باعث این موضوع باشد. این اختلاف مقادیر در اندازه‌های X و Y در اثر نیرو در شکل ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- همبستگی بین طول معادل بازو بدست آمده از نتایج آزمایش و مقادیر منتج از مدل

پس از استخراج مدل دینامیکی و سینماتیکی ربات WDFR و امکان‌سنجی استفاده از آن در برداشت میوه، در پژوهش‌های آینده سامانه کنترل و سامانه ماشین بینایی برای تشخیص میوه طراحی و بررسی خواهد شد.

حقیقت میزان همگرایی بین نتایج تجربی و مدل دینامیکی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که بیان شد، آزمایش‌های تجربی جهت بررسی امکان‌پذیر بودن چیدن میوه توسط ربات WDFR انجام پذیرفت. در این آزمایشات دو نوع میوه انجیر و هلو توسط ربات برداشت شدند. مسیر چیدن توسط کاربر انتخاب شد و مقادیر چرخش لازم در هر دو سروموتور از طریق برد آردینو ثبت گردید. شکل ۱۹ و ۲۰ تعدادی از آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- چیدن میوه انجیر از انتهای دم توسط عملگر انتهایی



شکل ۲۰- چیدن میوه هلو توسط ربات WDFR



های متنوع بتوان از آن استفاده کرد. همچنین ارزیابی ربات در چیدن دو نوع میوه هلو و انجیر نشان داد نیروی کشش نخ ایجاد شده توسط سروموتور، نیروی لازم در گیره انتهایی بازو و خیز ایجاد شده در بازو برای میوه هلو بیشتر از انجیر است و مقادیر میانگین این تفاوت را نشان می‌دهد. به علاوه، تعداد عملیات‌هایی که توسط ربات انجام می‌گیرد تا عمل گرفتن و چیدن میوه انجام شود برای میوه هلو بیشتر از انجیر بود.

References

- Anonymous. 2022. JetSnake system, Snake Arm. <http://www.ocrobotics.com/>
- Camarillo, D. B., Milne, C. F., Carlson, C. R., Zinn, M. R., & Salisbury, J. K. (2008). Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators. *IEEE transactions on robotics*, 24(6), 1262-1273.
- Chowdhary, G., Gazzola, M., Krishnan, G., Soman, C., & Lovell, S. (2019). Soft robotics as an enabling technology for agroforestry practice and research. *Sustainability*, 11(23), 6751.
- Dupont, P. E., Lock, J., Itkowitz, B., & Butler, E. (2009). Design and control of concentric-tube robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(2), 209 - 225.
- Dupont, P., Gosline, A., Vasilyev, N., Lock, J., Butler, E., Folk, C., ... & del Nido, P. (2012, January). Concentric tube robots for minimally invasive surgery. In *hamlyn symposium on medical robotics* (Vol. 7, p. 8).
- Fisher, T., Hamed, A., Vartholomeos, P., Masamune, K., Tang, G., Ren, H., & Tse, Z. T. (2014). Intraoperative magnetic resonance imaging – conditional robotic devices for therapy and diagnosis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 228(3), 303-318.
- Gohari, M., Rahman, R. A., Raja, R. I., & Tahmasebi, M. (2011, December). New biodynamical model of human body responses to vibration based on artificial neural network. In *14th Asia Pacific Vibration Conference, Dynamics for Sustainable Engineering*. Hong Kong SAR, China: Hong Kong Polytechnic University.
- Gohari, M., Hemmat, A., & Afzal, A. (2010). Design, construction and evaluation of a variable-depth tillage implement equipped with a GPS. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 41(1).
- Gohari, M., Abd Rahman, R., Raja, R. I., & Tahmasebi, M. (2012, February). Bus seat suspension modification for pregnant women. In *2012 International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE)* (pp. 404-407). IEEE.

در جدول ۱ نتایج آزمایش ربات آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در میوه انجیر نسبت به هلو نیروی کشش نخ برای حرکت میوه چیده شده و همچنین نیروی گیره ربات کمتر است. این امر به علت آن است که میوه هلو وزن بیشتری دارد و بنابراین نیروی کشش نخ در فرقه محرک باید بیشتر باشد. از طرف دیگر، نیروی لازم در گیره یا پنجه ربات برای میوه هلو بیشتر است که این نیز به علت شکل میوه هلو و وزن بیشتر آن است. خیز اندازه‌گیری شده در بازوی ربات نیز در حین حمل میوه چیده شده نشان می‌دهد که وزن بیشتر میوه‌های هلو باعث خیز بیشتر در بازو گردیده‌اند.

جدول ۱- مقادیر میانگین نیروی‌های اندازه‌گیری شده در چیدن

میوه‌ها			
نوع میوه	میانگین نیروی کشش نخ لازم برای حرکت میوه چیده شده (نیوتن)	میانگین نیروی لازم در گیره انتهایی ربات (نیوتن)	میانگین خیز ایجاد شده در بازو هنگام چیدن (سانتی‌متر)
انجیر	۵	۱۲	۴
هلو	۸	۲۱	۷

جدول ۲- توالی عمل کردن سروموتورها در چیدن هلو

شماره مرحله حرکت	سروموتور ۱	سروموتور ۲
۱	۱۵ درجه	-
۲	-	۴۵ درجه
۳	۳۰ درجه	۳۰ درجه
۴	۱۵ درجه	-
۵	۶۰ درجه	-

جدول ۳- توالی عمل کردن سروموتورها در چیدن انجیر

شماره مرحله حرکت	سروموتور ۱	سروموتور ۲
۱	-	۳۰
۲	۱۵ درجه	۳۰ درجه
۳	-	۴۵ درجه
۴	۱۵ درجه	-
۵	-	-

نتیجه‌گیری

مدل سینماتیکی و دینامیکی برای ربات WDFR بر اساس تئوری تیر خمشی بدست آمد. نتایج مدل سینماتیکی و دینامیکی نشان دادند که دقت پیش‌بینی موقعیت عملگر انتهایی و میزان خطی بودن آن به مدول الاستیسیته تیر ساخته شده از زنجیره مهره‌ها دارد. به علاوه نتایج تجربی همبستگی خوبی با مدل دینامیکی نشان دادند چه در زمینه پیش‌بینی موقعیت عملگر انتهایی و چه در تخمین نیروی کشش لازم برای رسیدن به موقعیت مورد نظر. ارزیابی مدل دینامیکی و سینماتیکی بدست آمده می‌تواند برای طراحی سامانه کنترل خودکار این ربات بکار رود تا در کاربرد



Jones, B. A., Gray, R. L., & Turlapati, K. (2009, October). Three dimensional statics for continuum robotics. In 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 2659-2664). IEEE.

Li, Z., & Du, R. (2012, June). Design and analysis of a biomimetic wire-driven flapping propeller. In 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob) (pp. 276-281). IEEE.

Li, Z., Gao, W., Du, R., & Liao, B. (2012, November). Design and analysis of a wire-driven robot tadpole. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 45202, pp. 297-303). American Society of Mechanical Engineers.

Liao, B., Li, Z., & Du, R. (2012, December). Robot tadpole with a novel biomimetic wire-driven propulsor. In 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (pp. 557-562). IEEE.

Lock, J., Laing, G., Mahvash, M., & Dupont, P. E. (2010, October). Quasistatic modeling of concentric tube robots with external loads. In 2010 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (pp. 2325-2332). IEEE.

Rucker, D. C., & Webster III, R. J. (2011). Statics and dynamics of continuum robots with general tendon routing and external loading. IEEE Transactions on Robotics, 27(6), 1033-1044.

Rucker, D. C., Jones, B. A., & Webster, R. J. (2010, May). A model for concentric tube continuum robots under applied wrenches. In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 1047-1052). IEEE.

Suzumori, K., Iikura, S., & Tanaka, H. (1992). Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms. IEEE Control systems magazine, 12(1), 21-27.

Tahmasebi, M., Gohari, M., & Emami, A. (2022). An autonomous pesticide sprayer robot with a color-based vision system. Int. J. Robot. Control Syst, 2(1), 115-123.

Tahmasebi, M., Gohari, M., Malvajerdi, A. S., & Hedayatipoor, A. (2023). Development and Field Evaluation of a Variable-Depth Tillage Tool Based on a Horizontal Pneumatic Sensor Measurement. Journal of Agricultural Machinery, 13(1), 85.

Zhou, Y., Ren, H., Meng, M. Q. H., TSZ HO TSE, Z. I. O. N., & Yu, H. (2013). Robotics in natural orifice transluminal endoscopic surgery. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 13(02), 1350044.



Kinematics and Dynamics of a Fabricated Wire Driven Flexible Robot and Experimental Evaluation of that in Fruits Picking

Mohammad Gohari¹ Mona Tahmasebi^{2*} -Mohammadreza Zare³

1- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- - Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Arak, Iran

3- Master Student in Mechatronic, University of Besançon, Bourgogne-Franche-Comté, France

*Corresponding author: tahmasebi.mona@gmail.com

Received: 05 May 2023

Accept: 10 Jun 2023

Abstract

Robot applications are developed by IoT, telemetry, and human requirements in boring or precision jobs such as surgery, industrial inspections, field monitoring in army applications, or agriculture harvesting. Researchers for different tasks design various robots. Flexible robots are established based on mentioned applications because they can adapt their geometry to the working conditions. The current study introduced a wire-driven flexible robot inspired by animal trunks. It can move in planar and space based on its structure. Firstly, a kinematic model was established to predict the end effector position, and then a dynamic model was developed to calculate the required tension of the tendon based on bending beam theory. A test rig was developed to evaluate acquired models. The results show good agreement between test results and outputs of models. The correlation ratio between actual values in positioning and predicted by models is 0.97. Thus, dynamic and kinematic models can be used in the design of controllers in future works. Finally, experimental evaluation on fruit picking shows that this robot can pick various peaches and figs in different sizes. The required forces for picking in figs is lower than peach. Oppositely, picking sequential steps in fig harvesting is lower than peach. In future works, an automatic controller will introduce for this WDFR. Keywords: wire-driven flexible robot, dynamic model, kinematic model, Euler-Bernoulli Beam theory, controller system

Keywords: Flexible robot, dynamic model, kinematic model, Euler-Bernoulli beam, control system