



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



ماشین‌های راه رونده شش پا در کشاورزی و تحلیل سینماتیکی آن‌ها

امین زاهدی^{۱*}، محسن شمسی^۲، مجتبی افتخاری^۳

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه شهید باهنر کرمان

*ایمیل مکاتبه کننده: aminzahedi1313@yahoo.com

چکیده

در کشاورزی مکانیزه امروزه وسایل کشنده از جمله تراکتورها، یکی از مهمترین ارکان به حساب می‌آیند. تراکتورها برای ایجاد کشش بیشتر باید وزن بیشتری داشته باشند تا میزان لغزش (بکسوات) کاهش یابد. این وزن زیاد باعث می‌شود تا با چند مرتبه عبور این کشنده‌ها از روی خاک، ضررهای زیادی به خاک وارد شود. به هم ریخته شدن ساختمان خاک و فشردگی خاک از جمله این ضررها می‌باشد. هم چنین لغزش (بکسوات) تراکتورها در زمین‌های کشاورزی یکی از عامل‌های کاهش بازده این وسایل در حین کار می‌باشد. ماشین‌های راه رونده به جای لاستیک‌های بزرگ دارای چندین عدد پا می‌باشد. ماشین‌های راه رونده را می‌توان با وزن کمتر ساخت تا باعث فشردگی کمتر خاک شود. هم چنین در ماشین‌های راه رونده لغزش (بکسوات) را می‌توان با افزایش طول ناخن‌ها، کاهش داد. مهم‌تر اینکه ماشین‌های راه رونده می‌توانند از موانع بزرگ که چرخ‌ها قادر به عبور از آن‌ها نیستند، بگذرند. تحلیل سینماتیکی ماشین‌های راه رونده کمک می‌کند تا بتوان موقعیت نوک پا را در هر لحظه مشخص کرد. در این تحقیق یک ماشین‌های راه رونده شش پا شبیه سازی شده است و به کمک سینماتیک روش پیدا کردن موقعیت هر یک از مفاصل نسبت به زمان مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل سینماتیکی، فشردگی، کشش، ماشین‌های راه رونده

مقدمه

امروزه با مکانیزه شدن سیستم‌های کشاورزی، تردد تراکتور و ماشین‌آلات کشاورزی بر روی خاک زراعی افزایش یافته است. این مهم می‌تواند پایداری خاک را تحت تاثیر قرار دهد. از مهمترین عوامل تهدید کننده پایداری خاک، تراکم و به هم خوردن ساختمان خاک بر اثر فشار ایجاد شده بین خاک و تایر تراکتور می‌باشد (حاضر و وظیفه و همکاران، ۱۳۹۰).



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



فشردگی خاک، حرکت بخشی از خاک زیر بار چرخ در هنگام حرکت تراکتور است. فشردگی خاک‌های کشاورزی بر اثر تردد ماشین در زمین‌های کشاورزی یکی از مشکلات اصلی کشاورزان و از عوامل مهم کاهش عملکرد محصول در برخی از مناطق می‌باشد (شیخ داوودی و همکاران، ۱۳۸۹). یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر بازده کشتی و گشتاور ماشین‌های کشتی از جمله تراکتورها، کنترل میزان لغزش (بکسوات) چرخ‌های محرک است. در تراکتورها به دلیل اجرای عملیات کاری در زمین‌های کشاورزی و شرایط متغیر و گوناگون سطح آن، مدام هر کدام از چرخ‌های محرک دچار لغزش می‌شوند که این عمل باعث اتلاف بالای انرژی و کاهش بازده خروجی می‌گردد (جلیلی و همکاران، ۱۳۹۱). مخرب‌ترین اثر تردد ماشین‌های کشاورزی در مزارع، فشردگی خاک است. فشردگی خاک می‌تواند اثرات منفی شدیدی را در تولید محصولات کشاورزی ایجاد کند (درویش‌پسند و همکاران، ۱۳۹۰). وسایل چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری برای کار در زمین‌های ناهموار و یا سست مناسب نیستند و دارای بازده پایینی می‌باشند. هم‌چنین این وسایل دارای قدرت مانور خوبی نمی‌باشند (Zielinska and Heng, 2002). ربات‌های راه‌رونده از سه دهه قبل به منظور شبیه‌سازی حرکت حشرات و حیوانات مورد مطالعه قرار گرفته شده‌اند (Soyguder and Allı, 2012). ربات‌های راه‌رونده ربات‌هایی هستند که از چند پا تشکیل می‌شوند و برای عبور از زمین با ساختارهای مختلف طراحی می‌شوند (Zhang, Liu et al. 2014). بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از مکانیزم پا برای عبور از سطوح ناهموار، گل‌آلود، نرم، ناهموار و با ساختار نامنظم، استفاده از سیستم‌های چرخ دار مناسب‌تر است (Zielinska and Heng, 2003). برخی از مزیت‌های ماشین‌های راه‌رونده نسبت به تراکتورها و سایر کشنده‌ها عبارتند از:

تماس با زمین در نقاط مجزا: ماشین‌های چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری می‌توانند با فاصله معین موجود بین لاستیک یا زنجیر حرکت کنند و به همین دلیل قابلیت عبور از موانع را ندارند این درحالی است که ماشین‌های راه‌رونده به دلیل دارا بودن تعدادی پا به جای لاستیک قادرند تا با نقاط مجزا بر روی زمین تماس برقرار کنند.

عدم نیاز به جاده‌های آسفالت و هموار: ماشین‌های راه‌رونده برخلاف ماشین‌های چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری که توانایی عبور از موانع را ندارند می‌توانند به راحتی موانع را پشت سر بگذارند. این توانایی به این دلیل است که ماشین‌های راه‌رونده می‌توانند پاهای خود را در نقاط دلخواه قرار دهند و به این ترتیب از موانع سر راه خود عبور کنند یا به عبارت دیگر این ماشین‌ها دارای گام نا معین هستند که می‌توانند به راحتی از موانع عبور کنند.

کاهش فشردگی زمین: ماشین‌های راه‌رونده به دلیل حداقل تماسی که با زمین دارند نسبت به ماشین‌های چرخ لاستیکی و زنجیری در یک مسیر معین فشردگی کمتری وجود می‌آورند که این قابلیت برای استفاده این ماشین‌ها در کارهای کشاورزی بسیار ارزشمند می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده ماشین‌های راه‌رونده می‌توانند جایگزین خوبی برای تراکتورها و سایر کشنده‌ها باشند (زاهدی، ۱۳۹۲).



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج

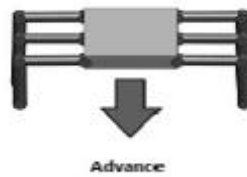


برای تحلیل سینماتیکی ربات‌های راه رونده می‌توان از روش دناویت - هارتنبرگ استفاده کرد. در این روش با استفاده از ماتریس‌های انتقال می‌توان با توجه به جا به جایی هریک از مفاصل موقعیت نوک پا را در هر لحظه بدست آورد (Roy and Pratihar, 2013).

سازمان پا در ماشین‌های راه رونده

یک ماشین‌های راه رونده می‌تواند چهار، شش و یا هشت پا داشته باشد. بنابراین یکی از راه‌های تقسیم بندی ماشین‌های راه رونده تعداد پاهای آن می‌باشد (Hurtado et al., 2012; García-López,). یکی دیگر از شیوه‌های دسته بندی ماشین‌های راه رونده نوع آرایش پاها یا نحوه اتصال پاها به شاسی می‌باشد. به طور کلی برای حرکت رو به جلو ماشین‌های راه رونده ۳ شیوه وجود دارد که عبارتند از: ۱. پیشروی از جلو ۲. پیشروی از جانب ۳. پیشروی دایره ای.

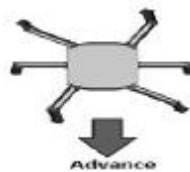
در شکل‌های زیر روش‌های پیشروی نمایش داده شده است (García-López, Hurtado et al. 2012):



شکل ۱: پیشروی از جلو



شکل ۲: پیشروی از جانب



شکل ۳: پیشروی دایره ای



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



به طور کلی پاها در ربات‌های ۶ پا به دو صورت به بدنه متصل می‌شوند. پاها می‌توانند هم به زیر شاسی و هم به کنار شاسی به صورت متقارن وصل شوند. در شکل‌های زیر شیوه‌های مختلف نمایش داده شده است (García-López, 2012):



شکل ۴: شیوه اتصال پاها به شاسی

مروری بر تحلیل‌های انجام شده

یکی از روش‌های تحلیل یک ربات سینماتیک معکوس می‌باشد که در این روش از معادلات سینماتیک هر پا در حین حرکت استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان با داشتن موقعیت نهایی هر پا میزان باز یا بسته شدن دقیق عمل‌گرهای هر پا را برای رسیدن به این موقعیت مشخص کرد. رن^۱ با ساخت یک ربات ۳ پا و با استفاده از سینماتیک معکوس عملکرد ربات را برای رسیدن به موقعیت خاص برنامه ریزی کرد (Ren and Hong, 2009). در سال ۲۰۱۴ کیم^۲ یک بازوی ربات با ۲ درجه آزادی که با مفاصل کشویی کار می‌کردند را طراحی کرد و با استفاده از ماتریس‌های انتقال سینماتیک بازو را مورد مطالعه قرار داد (Kim, Shin et al. 2014). برای بدست آوردن مقدار بهینه نیروی سر پای ربات و هم چنین محاسبه گشتاور مورد نیاز در مفاصل دو شیوه وجود دارد. در روش اول ابتدا با استفاده از ماتریس‌های انتقال، موقعیت سر پای ربات در فضا بدست می‌آید. این ماتریس نشان می‌دهد که با دوران هریک از مفاصل موقعیت سر پای در فضا چه تغییری می‌کند. سپس با استفاده از ماتریس ژاکوبین می‌توان سرعت نوک پا را بدست آورد. برای بدست آوردن شتاب نوک پا نیز با مشتق گرفتن از ماتریس سرعت این کمیت بدست می‌آید و به این ترتیب می‌توان نیروها و گشتاورهای لازم را در ادامه کار محاسبه کرد. هاوارد^۱ با استفاده از این شیوه، یک مدل از ربات را طراحی کرد و سپس مقادیر بهینه نیرو و گشتاور لازم را بدست آورد (Howard, Zhang et al. 1996). یکی از پارامترهای مهم در طراحی ربات‌ها، مصرف انرژی آن‌ها است. دو شیوه برای محاسبه مصرف انرژی در ربات‌ها وجود دارد. اول استفاده از روش نرمال کردن نیروهای پاها و دوم استفاده از روش نرمال کردن گشتاور مفاصل. روی^۲ با مدل سازی یک ربات ۶ پا به مقایسه این دو روش پرداخته است. وی در مدل خود با استفاده از هر دو روش و با توجه به فاکتور بتا توانست مصرف انرژی در دو روش را باهم مقایسه کند (Roy and Pratihar. 2013). در حرکت و گام برداشتن ربات ۶ پا دو مرحله وجود دارد: ۱. مرحله رفت و برگشت ۲. مرحله ساپورت. در مرحله رفت و برگشت ۳ پا بر روی زمین قرار دارند و ۳ پای دیگر در حال چرخش یا حرکت روبه جلو هستند. در هر چرخه گام برداشتن ۳ پای ربات بر روی زمین می‌ماند و تکیه گاه ربات می‌شود به این حالت مرحله ساپورت می‌گویند. حال مدت زمان مرحله رفت و برگشت و ساپورت در هر سیکل



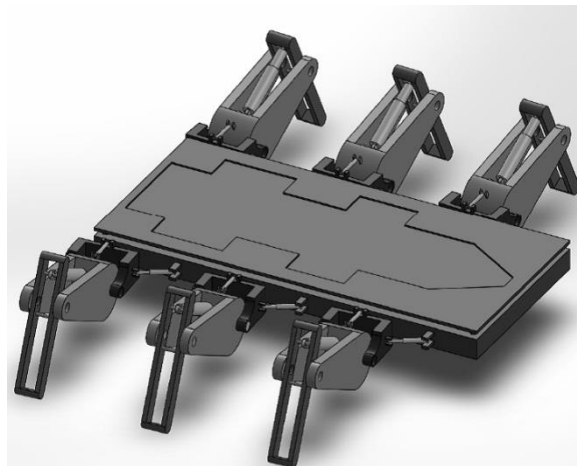
نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



گام برداشتن ربات می‌تواند متغیر باشد. در یک تحقیق مدت زمانی که هر کدام از پاها بر روی زمین قرار گرفتند بدست آمد و میزان مصرف انرژی آن‌ها به دو شیوه مینیمم کردن نیروی نوک پاها و گشتاور مفاصل باهم مقایسه شد (Richter, Simon et al. 2015).

شیبه سازی ماشین راه رونده شش پا

شکل ۵ یک ماشین راه رونده ۶ پا را نشان می‌دهد که در برنامه solidworks شبیه سازی شده است. این ماشین از یک شاسی مستطیل شکل تشکیل شده است. در دو طرف شاسی ۶ پا به صورت متقارن قرار گرفته اند. هر پا دارای ۳ درجه آزادی است که از ۳ عضو تشکیل شده است. این سه عضو توسط سه مفصل دوران کننده به هم متصل شده‌اند. برای جابه‌جایی مفاصل از جک‌های دو طرفه کمک گرفته شده است. هر پا دارای ۳ جک دو طرفه می‌باشد.



شکل ۵: شمای کلی ماشین

تحلیل سینماتیکی ماشین راه رونده

به منظور تحلیل سینماتیکی ماشین موارد زیر فرض شده است:

حرکت رو به جلو ماشین یک حرکت با سرعت ثابت می‌باشد و ماشین بر روی سطح صاف حرکت می‌کند.

ماشین دارای یک ارتفاع ثابت تا سطح زمین است و هم‌چنین موازی سطح حرکت می‌کند.

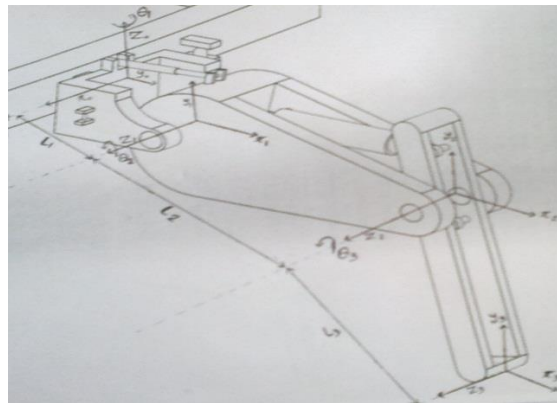


نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



مرکز ثقل شاسی ماشین به عنوان مرکز ثقل کل ماشین در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل ۶ مدل دناویت - هارتنبرگ (Lee, Fu et al. 1987) برای مدل سازی سینماتیکی هر پا استفاده شده است.



شکل ۶: پای ماشین در مختصات هارتنبرگ

جدول ۱ پارامترهای مورد نیاز برای روش دناویت - هارتنبرگ را نشان می‌دهد. در این جدول (a_i) طول هر عضو، (α_i) زاویه پیش‌مفاصل، (d_i) جابه‌جایی مفاصل کشویی و (θ_i) میزان دوران مفاصل می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای دناویت - هارتنبرگ

عضو	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	L_1	90	0	θ_1
2	L_2	0	0	θ_2
3	L_3	0	0	θ_3

ماتریس انتقال T رابطه انتقال و دوران بین دستگاه مختصات (i) و ($i-1$) که به هر عضو پا متصل است را بیان می‌کند. این ماتریس یک ماتریس مربعی 4×4 می‌باشد. برای هر عضو پا باید این ماتریس تشکیل شود (García-López, Hurtado et al. 2012).



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

با توجه به ماتریس انتقال قبل، ماتریس انتقال برای عضو ۱ که بین دستگاه‌های مختصات ۰ و ۱ قرار دارد چنین می‌شود:

هم چنین ماتریس تبدیل برای عضو شماره ۲ که بین دستگاه‌های مختصات ۱ و ۲ قرار دارد چنین می‌شود:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

به همین ترتیب ماتریس تبدیل برای عضو شماره ۳ که بین دستگاه‌های مختصات ۲ و ۳ قرار دارد چنین می‌شود:

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

برای بدست آوردن مختصات و وضعیت نوک پا در هر لحظه بر اساس جابه‌جایی مفاصل باید از فرمول زیر استفاده کنیم تا ماتریس انتقال نهایی بدست آید (García-López, Hurtado et al. 2012).

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \prod_{i=1}^3 T_i \quad (2)$$

حال با توجه به فرمول بالا می‌توان فرم نهایی ماتریس انتقال که مختصات نهایی پنجه پا را نشان می‌دهد، را بدست آورد.

می‌توان زاویه‌ای که هر مفصل در مرحله رفت و برگشت دوران می‌کند را تابعی از زمان در نظر گرفت. بنابراین این تابع به صورت یک تابع درجه ۵ از زمان به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$\theta_j = a_{j_0} + a_{j_1} t + a_{j_2} t^2 + a_{j_3} t^3 + a_{j_4} t^4 + a_{j_5} t^5 \quad (3)$$



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



در معادله بالا $a_{j_0}, a_{j_1}, a_{j_2}, a_{j_3}, a_{j_4}$ و a_{j_5} ضرایب ثابت هستند که با اعمال شرایط مرزی در مرحله چرخش، این ضرایب بدست می‌آیند. در معادله (۳)، j بیانگر شماره مفاصل می‌باشد که می‌تواند ۱، ۲ یا ۳ باشد. معادلات سرعت و شتاب در مرحله چرخش با مشتق گرفتن از معادله (۳) بدست می‌آیند. بنابراین در این فاز معادلات مسیر، سرعت و شتاب به این فرم می‌باشند.

$$\dot{\theta}_j = a_{j_1} + 2a_{j_2}t + 3a_{j_3}t^2 + 4a_{j_4}t^3 + 5a_{j_5}t^4 \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_j = 2a_{j_2} + 6a_{j_3}t + 12a_{j_4}t^2 + 20a_{j_5}t^3 \quad (5)$$

برای محاسبه سرعت و شتاب در مرحله ساپورت باید از ماتریس تبدیل ژاکوبین استفاده کرد. فرم کلی ماتریس ژاکوبین به شکل زیر است. برای محاسبه ماتریس ژاکوبین باید از مختصات نوک پا که از ماتریس انتقال نهایی بدست می‌آید مشتق گرفته شود. بدین منظور از ماتریس زیر استفاده می‌شود.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

با اعمال ماتریس معادله (۶) در ماتریس انتقال 0T_3 ماتریس ژاکوبین برای پا در مرحله ساپورت بدست می‌آید.

حال با داشتن ماتریس ژاکوبین مقادیر سرعت و شتاب در مرحله ساپورت از طریق معادلات زیر بدست می‌آیند (Roy and Pratihar, 2013):

$$\dot{P} = J \dot{\theta} \quad (7)$$

$$\ddot{P} = J\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta} \quad (8)$$

در معادلات بالا (P) بردار مکان ربات، (\dot{P}) بردار سرعت ربات که فقط دارای مؤلفه سرعت در راستای x می‌باشد، (\ddot{P}) بردار شتاب ربات، ($\dot{\theta}$) بردار سرعت مفاصل و ($\ddot{\theta}$) بردار شتاب زاویه ای مفاصل می‌باشد.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin\theta_1 & (L_1 + L_2 \cos\theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos\theta_1 & (L_1 + L_2 \cos\theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin\theta_1 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin\theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

نتایج

با جایگذاری ماتریس‌های مربوط به هر یک از مفاصل در معادله ۱، فرم کلی ماتریس انتقال برای یک پا به شکل زیر بدست می‌آید.

$$JJ = \begin{bmatrix} -(L_1 + L_2 C\theta_2 + L_3 C(\theta_2 + \theta_3)) S\theta_1 & -(L_2 S\theta_2 + L_3 S(\theta_2 + \theta_3)) C\theta_1 & -(L_3 S(\theta_2 + \theta_3)) C\theta_1 \\ (L_1 + L_2 C\theta_2 + L_3 C(\theta_2 + \theta_3)) C\theta_1 & -(L_2 S\theta_2 + L_3 S(\theta_2 + \theta_3)) S\theta_1 & -(L_3 S(\theta_2 + \theta_3)) S\theta_1 \\ 0 & L_2 C\theta_2 + L_3 C(\theta_2 + \theta_3) & L_3 C(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$px = (L_1 * L_2 \cos\theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos\theta_1 \quad (10)$$

$$py = (L_1 + L_2 \cos\theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin\theta_1 \quad (11)$$

$$pz = L_2 \sin\theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (12)$$

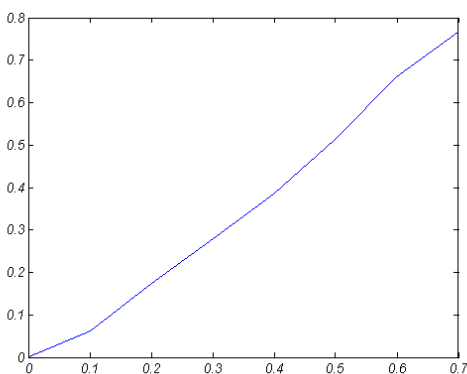
با اعمال ماتریس (۶) در ماتریس تبدیل 0T_3 ماتریس ژاکوبین برای پا در مرحله ساپورت به فرم زیر بدست می‌آید که در آن $s = \sin$ و $c = \cos$.

با استفاده از این ماتریس ژاکوبین و معادلات ۸ و ۷ می‌توان سرعت و شتاب ربات در مرحله ساپورت را محاسبه کرد. همان‌طور که قبلاً گفته شد دوران مفاصل در مرحله رفت و برگشت به صورت یک تابع درجه ۵ از زمان تغییر می‌کند. در این مرحله می‌توان با اعمال شرایط مرزی نمودار تغییرات هر یک از مفاصل را بر حسب زمان بدست آورد. با استفاده از شرایط مرزی و نرم‌افزار matlab نمودار تغییرات زوایای هر یک از مفاصل θ_1 و θ_2 و θ_3 بر حسب زمان در یک باز شدن جک‌ها در شکل‌های زیر نمایش داده شده است.

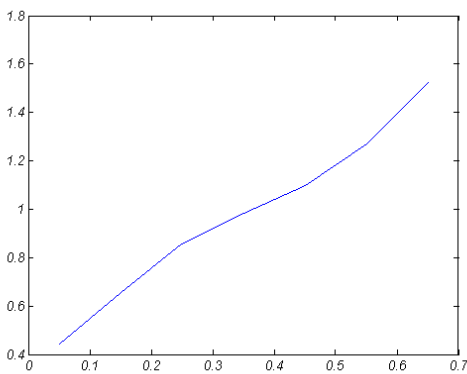
در انجام این محاسبات فرض شده است که جک‌های موجود در هر پا با سرعت خطی ثابت 20 mm/s باز می‌شوند.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



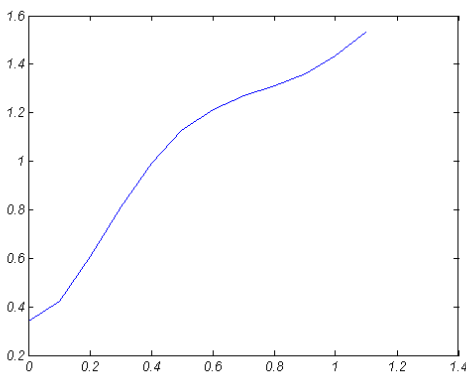
شکل ۷: تغییرات زاویه θ_2 بر حسب زمان



شکل ۸: تغییرات زاویه θ_2 بر حسب زمان

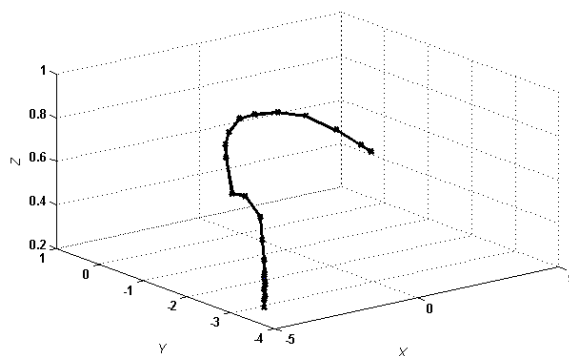


نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



شکل ۹: تغییرات زاویه θ_3 بر حسب زمان

حال با استفاده از تغییرات زوایا بر حسب زمان و با استفاده از معادلات ۱۲ تا ۱۰ می‌توان مسیر حرکت پا را در یک فرآیند باز شدن جک‌ها رسم کرد. شکل زیر مسیر حرکت پا را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار matlab رسم شده است.



شکل ۱۰: مسیر حرکت پا

مراجع

۱. حاضر وظیفه، ا. احمدی مقدم، پ. فوج لعلی، م. ۱۳۹۰. اثرات فشار باد تایلر بر تنش‌های سطحی خاک و مقاومت غلشی چرخ در تراکتورهای زراعی. اولین همایش ملی راهبردهای دستیابی به کشاورزی پایدار.
۲. شیخ داوودی، م.ج. پشم فروش، م. اکبری، ف. خبیر، ع. ۱۳۸۹. بررسی اثر فشار باد و سرعت پیشروی روی



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



فشرده‌گی خاک و مقاومت غلتشی تایرهای لاستیکی در خاک‌های شخم خورده. ششمین کنگره ملی مهندسی
ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون.

۳. جلیلی، م. لغوی، م. کامکار، س. ۱۳۹۱. ارزیابی اثر عملکرد دیفرانسیل بر کاهش بازده گشتاور (کشش) در ماشین‌های کششی (تراکتور). هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون.
۴. درویش پسند، ز. شریعتی، م. صیاد، غ.م. ۱۳۹۰. بررسی اثر تردد ماشین‌آلات کشاورزی بر برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از نفوذ سنج صفحه‌ای. اولین کنگره ملی علوم و فناوری‌های نوین کشاورزی.
۵. زاهدی، ا. ۱۳۹۲. ماشین‌های راه رونده در کشاورزی. پایان نامه کارشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه کرمان، بخش مهندسی بیوسیستم.

6. *García-López, M. C., Hurtado, E. G., Vargas-Soto, E., Ramos-Arreguín, J. M., Sotomayor-Olmedo, A. & Morales, J. C. M. 2012. Kinematic analysis for trajectory generation in one leg of a hexapod robot. Procedia Technology. Vol 3(0), 342-350.*
7. *Howard, D., Zhang, S. J. & Sanger, D. J. 1996. Kinematic analysis of a walking machine. Mathematics and Computers in Simulation. Vol 41(5-6), 525-538.*
8. *Kim, S.-H., Shin, Y. J., Kim, K.-S. & Kim, S. 2014. Design and control of robot manipulator with a distributed actuation mechanism. Mechatronics. Vol 24(8), 1223-1230.*
9. *Lee, C., Fu, K. & Gonzalez, R. 1987. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw Hill International Editions.*
10. *Ren, P. & Hong, D. 2009. Triple Stance Phase Displacement Analysis With Redundant and Nonredundant Sensing in a Novel Three-Legged Mobile Robot Using Parallel Kinematics. Journal of Mechanisms and Robotics. Vol 1(4), 041001-041001.*
11. *Richter, H., Simon, D., Smith, W. A. & Samorezov, S. 2015. Dynamic modeling, parameter estimation and control of a leg prosthesis test robot. Applied Mathematical Modelling. Vol 39(2), 559-573.*
12. *Roy, S. S. & Pratihari, D. K. 2013. Dynamic modeling, stability and energy consumption analysis of a realistic six-legged walking robot. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Vol 29(2), 400-416.*
13. *Soyguder, S. & Alli, H. 2012. Kinematic and dynamic analysis of a hexapod walking–running–bounding gaits robot and control actions. Computers & Electrical Engineering. Vol 38(2), 444-458.*
14. *Zhang, H., Liu, Y., Zhao, J., Chen, J & Yan, J. 2014. Development of a bionic hexapod robot*



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



for walking on unstructured terrain. Journal of Bionic Engineering. Vol 11(2), 176-187.

15. Zielinska, T. & Heng, J. 2002. *Development of a walking machine: mechanical design and control problems. Mechatronics. Vol 12(5), 737-754.*
16. Zielinska, T. & Heng, J. 2003. *Mechanical design of multifunctional quadruped. Mechanism and Machine Theory. Vol 38(5), 463-478.*



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Six Leg Walking Machines in Agriculture and Their Kinematic Analysis

Abstract

In mechanized agriculture wheel type tractors are a key factor of performance. To exceed the tractor traction heavier ones must be used which compact the soil. The ordinary wheel type tractors also slip over the soil which reduces their efficiency. The light proposed walking machines which have legs instead of wheels are an alternative to heavy wheeled tractors with lighter weight and less slippage. They can also pass over large obstacles which never a wheel can do. This paper introduces walking machines and solves an example to calculate the position of each joint relative to the time.

Keywords: Compact, kinematic analysis, traction, walking machine.