

جابه‌جا کردن غیرفعال یک شیء خاص در مسیر مارپیچ قابل پیش‌بینی بر مبنای هوش مکانیکی

عبدالله باجلان^۱، عادل اکبری مجد^{۲*}

* نویسنده مسئول: akbarimajd@uma.ac.ir

چکیده

روش‌های جابه‌جا کردن اشیاء در علم رباتیک معمولاً به دو دسته کلی جابه‌جا کردن اشیاء با گرفتن و جابه‌جا کردن اشیاء بدون گرفتن تقسیم می‌شوند. هدف اصلی این مقاله تعریف روشی خاص برای جابه‌جا کردن اشیاء است که در آن علاوه بر اینکه شیء گرفته نمی‌شود، عمل جابه‌جا کردن آن به صورت غیرفعال انجام می‌شود. در این روش علاوه بر تغییر مکان شیء، تغییر موقعیت زاویه‌ای و کنترل مسیر حرکت شیء نیز مطرح می‌باشد و مسیر تعیین شده به صورت یک منحنی مارپیچ سه بعدی با شعاع و شیب ثابت می‌باشد. این روش سیستمی را مطرح می‌کند که در آن محرک و نیز کنترل کننده‌ی فعال وجود ندارد. این سیستم نیازمند نوعی هوش مکانیکی غیرفعال برای رساندن شیء از وضعیت مبداء، در امتداد مسیر تعیین شده، به وضعیت هدف می‌باشد. این هوش با بهره‌گیری از شکل هندسی شیء و با تکیه بر تعامل دینامیکی شیء با دیگر اجزای سیستم به وجود می‌آید. ابتدا یک شکل کلی که تامین کننده شرایط مورد نیاز باشد، برای شیء در نظر گرفته می‌شود و بعد از بررسی سینماتیک و دینامیک مسله ابعاد دقیق و روابط حاکم بر شکل هندسی آن به دست می‌آید. در نهایت از نرم افزار ADAMS برای شبیه‌سازی این سیستم استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی

حرکت غیرفعال، جابه‌جا کردن اشیاء، مکانیزم غیرفعال، هوش مکانیکی، جابه‌جا کردن بدون گرفتن

۱- کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۱- مقدمه

بسیاری را می‌توان یافت که در آنها فرآیند جابه‌جایی ساده و تکراری است. بدیهی است که در چنین مواردی به وجود یک دست رباتی ماهر نیازی نیست. در چنین مواردی روش جابه‌جا کردن اشیاء بدون گرفتن، روشی سودمند به شمار می‌رود. در روش‌های جابه‌جا کردن اشیاء بدون گرفتن که گاه روش‌های پویا^۱ هم نامیده می‌شوند، شیء توسط عملیاتی مانند هل دادن [۵،۴]، روی رأس چرخاندن [۶]، لغزاندن [۷]، پرتاب کردن [۸-۱۰] و ... جابه‌جا می‌شود.

روش جابه‌جا کردن بدون گرفتن در مقایسه با روش دیگر دارای مزایا و معایبی است. اما به نظر می‌رسد در مواردی که از ربات انتظار انجام دادن وظایف گوناگون نمی‌رود و عمل جابه‌جا کردن شیء فاقد پیچیدگی زیاد است و نیز سادگی و هزینه معیارهای اصلی در انتخاب مکانیزم جابه‌جا کننده هستند، این روش نسبت به روش قبل برتری داشته باشد. زیرا کمینه‌گرایی در مکانیزم [۱۱]، هزینه کمتر [۱۲]، امکان انتقال شیء به خارج از فضای کاری، نداشتن مشکلات کنترل سفتی^۲ و نیرو مربوط به در دست گرفتن^۳ پایدار، نداشتن بحث هماهنگی انگشتان در حین جابه‌جا کردن شیء، داشتن ربات‌هایی با درجات آزادی کمتر از درجات آزادی وظیفه‌ی^۴ مورد نظر و بهره‌گیری از دینامیک محیط و هندسه‌ی ربات و شیء از جمله مزایای قابل توجه این روش هستند.

به نظر می‌سد با الگوگیری از عملکرد طبیعت بتوان مزیت قابل توجهی را به روش جابه‌جا کردن اشیاء بدون گرفتن افزود. در مکانیزم‌های جابه‌جا کردن اشیاء در طبیعت علاوه بر نگرفتن اشیاء از محرکه‌ها نیز استفاده نمی‌شود. این یعنی جابه‌جا کردن بدون گرفتن و غیرفعال اشیاء. در روش‌های

مبحث جابه‌جا کردن اشیاء به موضوع دانش و تکنولوژی مورد نیاز برای رساندن یک یا چند شیء از موقعیت و جهت‌گیری اولیه به موقعیت و جهت‌گیری هدف می‌پردازد. جابه‌جا کردن اشیاء در گستره وسیعی از جنبه‌های زندگی بشر مطرح است. به عنوان نمونه می‌توان محیط‌های خانگی، محیط‌های صنعتی، محیط‌های شهری و محیط‌های خارج از جو زمین را نام برد. بنابراین مشخص می‌شود که جابه‌جا کردن اشیاء پدیده‌ای بسیار متنوع است. یعنی جابه‌جا کردن یک یا چند شیء در محیط و موردی خاص می‌تواند بسیار ساده و تکراری بوده و در موردی دیگر بسیار پیچیده و بغرنج باشد. در طول سالیان متمادی تلاش‌های زیادی برای ایجاد تسهیل در انجام فرآیندهای جابه‌جا کردن اشیاء صورت گرفته که یکی از نتایج آن مطرح شدن جابه‌جا کردن اشیاء توسط ربات‌ها بوده است. در مکتوبات فنی می‌توان دو روش کلی برای جابه‌جا کردن اشیاء توسط ربات‌ها شامل جابه‌جا کردن با گرفتن [۱] و جابه‌جا کردن بدون گرفتن [۲] را تشخیص داد. در روش‌های مبتنی بر گرفتن شیء توسط دستان ربات گرفته می‌شود و در حالیکه حرکت نسبی بین دست و شیء صفر است، به وضعیت دلخواه منتقل می‌شود. دستهای رباتی مورد استفاده در این روش‌ها معمولاً توانایی انجام جابه‌جایی‌های متنوع و پیچیده-ای را دارند. این دست‌ها عموماً مکانیزم‌هایی پیچیده و پرهزینه هستند. تا کنون برخی کارها در راه کاهش این پیچیدگی انجام شده است. برای مثال در [۳] جابه‌جا کردن با دستان ساده مطرح و بررسی می‌شود. اما به نظر می‌رسد حتی با وجود کارهای انجام شده در این راه، روش جابه‌جا کردن اشیاء با گرفتن همچنان روشی پرهزینه و پیچیده می‌باشد. علاوه بر این همانطور که قبل‌تر گفته شد موارد

¹ Dynamic

² Stiffness

³ Grasp

⁴ Task

شد [۱۳]. از آن به بعد کارهای زیادی در مورد جابه‌جا شدن غیرفعال انجام شده است که می‌توان برخی از مثالهای آن را در [۱۴-۱۶] یافت. در این حال نشان داده شد که از نظر دینامیکی جابه‌جا شدن مشابه با جابه‌جا کردن است [۱۷, ۱۸]. این یعنی نتایج جابه‌جا شدن غیرفعال را می‌توان در طراحی مکانیزم‌های جابه‌جا کننده غیرفعال به کار برد. اما برای اولین بار در [۱۹] مفهوم «جابه‌جا کردن دینامیکی غیرفعال اشیاء»^۳ PDOM مطرح شد. در این مقاله مصرف کمتر انرژی، کارآمدی بیشتر، عدم نیاز به صرف هزینه انرژی و زمان جهت مطالعه استراتژیهای کنترل، پایداری تضمین شده و به وجود آمدن یک ساختار جهت بهینه‌سازی سیستمهای فعال به عنوان برخی ویژگیهای مهم سیستمهای غیرفعال ذکر شده و سه مثال از روش بیان شده مطرح می‌شود. در مکانیزم‌های جابه‌جا شدن و جابه‌جا کردن فوق الذکر، گرانش تنها نیروی تولید حرکت است و کنترل کننده‌ی فعالی وجود ندارد. به طور ویژه در این مکانیزم‌ها یک سطح شیب‌دار به عنوان ابزاری برای بهره‌برداری از نیروی گرانش و تولید حرکت وجود دارد.

در این تحقیق از سطح شیب‌دار مارپیچ به عنوان عامل پایه برای جابه‌جا کردن غیر فعال یک شیء خاص در امتداد مسیرهای منحنی قابل پیش‌بینی استفاده می‌شود. این در حالیهست که در مکانیزم مطرح شده همانطور که قبل تر گفته شد، محرک و همچنین کنترل کننده فعالی وجود ندارد. پس باید نوعی هوش ساختاری غیرفعال در مکانیزم جابه‌جایی وجود داشته باشد، تا شیء بتواند در مسیرهای مورد نظر جابه‌جا شود. شکل هندسی شیء کلید این مسئله است. در واقع می‌توان این هوش را در هندسه شیء و تحت تأثیر تعامل دینامیکی آن با سطح شیب‌دار پایه تعبیه کرد. در نهایت حاصل کار حاضر معرفی یک مکانیزم ساده برای

جابه‌جا کردن اشیاء در طبیعت، مکانیزم جابه‌جا کننده شدیداً وابسته به ویژگی‌های شیء جابه‌جا شونده است. در واقع در طبیعت بر اساس ویژگی‌های شیء جابه‌جا شونده یک ساختار طبیعی می‌تواند با آن در برهم‌کنش دینامیکی قرار گرفته و با شکل دادن به قوانین فیزیکی موجود، به مکانیزم جابه‌جا کننده تبدیل شود. به عنوان مثال قطره‌های باران را می‌توان در نظر گرفت. در اینجا جرم قطره‌ها ویژگی تعیین کننده است. زمانی که جرم قطره‌های باران به حد خاصی برسد، سطح زمین با استفاده از قانون گرانش به مکانیزم جابه‌جا کننده تبدیل می‌شود. در این روشها به جای اینکه یک مکانیزم پیچیده با توانایی انجام جابه‌جایی‌های متنوع به کار گرفته شود، برای یک یا چند جابه‌جایی مشخص یک مکانیزم ویژه در نظر گرفته می‌شود. واضح است که چنین عملکردی از یک طرف باعث کاهش شدید پیچیدگی مکانیزم و رسیدن به نقطه ایده‌آل از نظر مصرف انرژی شده و از طرف دیگر باعث کاهش شدید تنوع کارکردهای مکانیزم می‌شود. این مقاله به دنبال توسعه‌ی استفاده از مکانیزم‌های غیر فعال در مبحث جابه‌جا کردن اشیاء با الهام از روشهای طبیعت است.

اولین کارهای انجام شده برای توسعه سیستم‌های غیرفعال در رباتیک را می‌توان در حیطه ربات‌های پادار یافت. حاصل این کارها به وجود آمدن یک روش خاص ایجاد تعادل دینامیکی برای ربات‌های دوپا به نام مکانیزم‌های خود نوسان بوده است. مکانیزم‌های خود نوسان یعنی سیستم‌هایی که از نوعی نوسان درونی برای راه رفتن استفاده می‌کنند. این نوسان ممکن است به علت کاهش انرژی مکانیزم در اثر عاملی مانند جاذبه ایجاد شود. مثالی از این نوع، «ربات راه - رونده‌ی غیرفعال»^۱ PDW است که توسط مک گیر^۲ ارایه

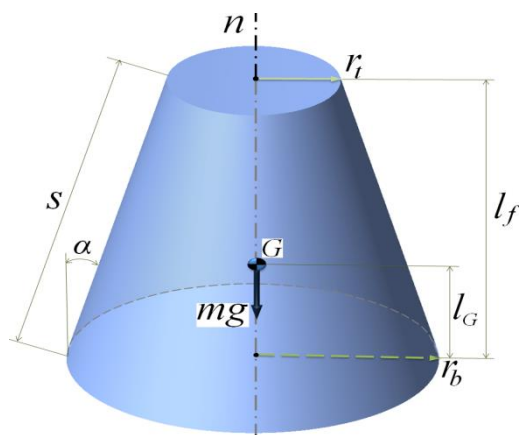
1 Passive Dynamic Walker
2 mcGeer

$$s = \sqrt{(r_b - r_t)^2 + l_f^2} \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{l_f}{\sqrt{(r_b - r_t)^2 + l_f^2}} \quad (2)$$

همچنین جرم این جسم با m و مرکز جرم آن در نقطه G نشان داده می‌شوند. نقطه G بر روی محور تقارن n مخروط قرار دارد و فاصله‌ی آن از کف برابر است با:

$$l_G = \frac{l_f(r_b^2 + 2r_b r_t + 3r_t^2)}{4(r_b^2 + r_b r_t + r_t^2)} \quad (3)$$



شکل (۲) یک مخروط ناقص و مشخصات آن

در ادامه مطالب از عنوان شیء برای نامیدن مخروط ناقص معرفی شده استفاده می‌شود. در این مقاله انطباق حرکت غیرفعال شیء با سطح شیب‌دار ماریچ، به طور دقیق بررسی می‌شود. در ادامه فرض می‌شود لغزشی وجود نداشته باشد و حرکت از نوع غلتش خالص باشد.

۳- تحلیل جابه‌جایی غیرفعال شیء جابه‌جا شونده

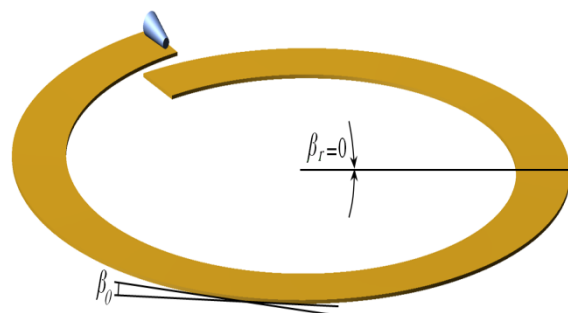
۳-۱- مدل سینماتیکی جابه‌جایی

برای مطالعه حرکت شیء از چارچوب O_{XYZ} استفاده می‌شود (شکل (۳)). محل مبدأ این چارچوب نقطه‌ی مرکز ثقل شیء (COG) است. این چارچوب به شیء متصل بوده و همراه با آن جابه‌جا شده و دوران می‌کند. همچنین جهت-گیری چارچوب گفته شده به این شکل است که محور Y

جابه‌جا کردن یک شیء خاص در سه بعد با الهام از روشهای جابه‌جا کردن اشیاء در طبیعت است. این مکانیزم بسیار ساده است و می‌تواند شیء را بدون گرفتن و به صورت غیرفعال در مسیرهایی منحنی و قابل پیش‌بینی جا-به‌جا کند. این مکانیزم از نظر مصرف انرژی در شرایط کاملاً ایده‌آل است.

۲- تشریح اجزاء مکانیزم

مکانیزم مطرح شده در این مقاله از دو جزء تشکیل شده است. جزء اول شیء جابه‌جا شونده و جزء دوم بستر جابه-جایی. در اینجا یک سطح شیب‌دار ماریچ با شیب β_0 به عنوان بستر جابه‌جایی معرفی می‌شود (شکل (۱)). حال مسئله این است: شیء مورد نظر چه شکل هندسی باید داشته باشد تا با قرار گرفتن بر روی سطح شیب‌دار ماریچ یک حرکت غیرفعال دقیقاً منطبق بر این سطح داشته باشد؟ در واقع شیء‌ای با شکل هندسی مخروط ناقص عمودی پاسخ پرسش اخیر است. در شکل (۱) یک سطح ماریچ در حالیکه یک مخروط ناقص بر روی آن قرار گرفته است دیده می‌شود.

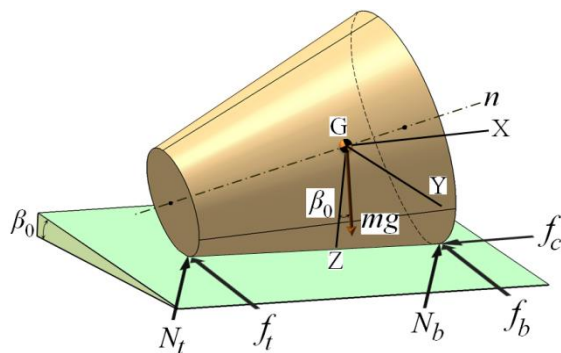


شکل (۱) یک سطح ماریچ و یک مخروط ناقص بر روی آن

شعاع‌های مقاطع کوچک و بزرگ مخروط مورد نظر به ترتیب r_t و r_b بوده و ارتفاع عمودی آن با l_f نشان داده خواهد شد. طول یال و زاویه‌ی شیب که در شکل (۲) با s و α نشان داده شده‌اند از روابط زیر به دست می‌آیند:

می‌شود. لغزش جانبی باعث انحراف شیء از مسیر پیش‌بینی شده می‌شود، اما تأثیر چندانی بر روی تغییر نوع حرکت از غلتش خالص به غلتش - لغزش ندارد. اما بدیهی است که لغزش طولی باعث تغییر نوع حرکت شده و از این طریق موجب ایجاد انحراف شیء از مسیر پیش‌بینی شده می‌شود.

ابتدا شرط عدم لغزش جانبی بررسی می‌شود. به همین منظور لازم است شتاب جانب مرکز شیء در جریان حرکت را به دست آورد. برای به دست آوردن شتاب جانب مرکز لازم است ابتدا شتاب خطی حرکت شیء را به دست آورد. به همین منظور نمودار پیکر آزاد شیء در لحظه شروع حرکت رسم می‌شود و معادلات حرکت شیء بر طبق قوانین مکانیک نیوتنی بر اساس نمودار رسم شده نوشته می‌شود. این معادلات باید بر حسب یک چارچوب مبتنی بر مسیر نوشته شوند. نمودار پیکر آزاد شیء در لحظه شروع حرکت آن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵) نمودار پیکر آزاد شیء در لحظه شروع حرکت

شکل کلی معادلات حرکت برای شکل (۵) عبارتند از:

$$\sum F_x = -ma_x \quad (12)$$

$$\sum F_y = ma_y \quad (13)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (14)$$

$$\sum M_x = \dot{H}_x - H_y \omega_z + H_z \omega_y \quad (15)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (16)$$

$$\sum M_z = \dot{H}_z - H_x \omega_y + H_y \omega_x \quad (17)$$

سرعت‌های v_t ، v_b و v را بر حسب سرعت زاویه‌ای شیء حول محور Z_0 می‌توان به دست آورد. بر مبنای محاسبه سرعت زاویه‌ای حول محور Z_0 به دست می‌آید:

$$v_b = \omega_{z_0} (R_t + l_f \cos \alpha) \quad (7)$$

$$v_t = \omega_{z_0} R_t \quad (8)$$

$$v = \omega_{z_0} (R_t + (l_f - l_G) \cos \alpha) \quad (9)$$

در نهایت از تلفیق روابط (۲)، (۴)، (۵)، (۷) و (۸) به دست می‌آید:

$$R_t = \frac{l_f^2 r_t}{(r_b - r_t) \sqrt{(r_b - r_t)^2 + l_f^2}} \quad (10)$$

همچنین بدیهی است که شعاع مسیر حرکت برای مرکز جرم شیء را از رابطه زیر می‌توان به دست آورد:

$$R_G = R_t + (l_f - l_G) \cos \alpha \quad (11)$$

این رابطه نشان می‌دهد که شعاع مسیر حرکت تنها به پارامترهای هندسی شیء بستگی دارد. رابطه‌ی (۱۱) به این معنا است که مسیر شیء بر روی سطح شیب‌دار مارپیچ به شکلی است که در هر لحظه می‌توان آن را به صورت یک منحنی با شعاع ثابت R_G برای مرکز جرم شیء در نظر گرفت. ارتفاع این منحنی سه بعدی با گذر زمان تغییر می‌کند اما در تمامی لحظات شعاع انحنای آن ثابت بوده و مرکز انحنای آن بر روی محور Z_0 قرار دارد. پس به وضوح دیده می‌شود که مسیر حرکت شیء بر روی سطح مارپیچ، منطبق بر سطح است.

۳-۲- بررسی شرایط عدم لغزش

همانطور که قبلاً نیز گفته شد شرط اعتبار تحلیل انجام شده تا اینجا عدم لغزش است. در مکانیزم مطرح شده دو نوع لغزش برای شیء می‌تواند اتفاق بیفتد. یکی لغزش جانبی که در جهت محور X به وجود می‌آید و دیگری لغزش طولی که در جهت محور Y (جهت حرکت شیء) ایجاد

که در رابطه (۲۷) شعاع قاعده‌ی شیء در محل مرکز جرم آن بوده و با $r_G = r_b - l_G \tan \alpha$ برابر است. با قرار دادن رابطه (۲۷) در رابطه (۱۳) شتاب خطی شیء به شکل زیر استخراج می‌شود:

$$a_Y = \frac{r_G^2 R_G m g \sin \beta_0}{I_X R_G - I_{XZ} r_G + r_G^2 R_G m} \cos \theta \quad (28)$$

حال شتاب جانب مرکز را می‌توان از رابطه‌ی $a_X = \frac{v^2}{R_G}$ به دست آورد. v سرعت حرکت شیء است و برای به دست آوردن آن از رابطه‌ی $a_Y ds = v dv$ می‌توان استفاده کرد. در این رابطه $ds = R_G d\theta$ است. در نتیجه سرعت حرکت شیء بر حسب زاویه‌ی طی شده توسط آن به شکل زیر استخراج می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{2r_G^2 R_G^2 m g \sin \beta_0}{I_X R_G - I_{XZ} r_G + r_G^2 R_G m} (\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (29)$$

پس شتاب جانب مرکز عبارت است از:

$$a_X = \frac{2r_G^2 R_G m g \sin \beta_0}{I_X R_G - I_{XZ} r_G + r_G^2 R_G m} (\sin \theta - \sin \theta_0) \quad (30)$$

با به کار بردن شتاب جانب مرکز به دست آمده در رابطه‌ی (۱۲) نیروی جانب مرکز شیء بر حسب زاویه‌ی طی شده به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$f_c = mg \sin \beta_0 \sin \theta + \frac{2r_G^2 R_G m^2 g \sin \beta_0}{I_X R_G - I_{XZ} r_G + r_G^2 R_G m} (\sin \theta - \sin \theta_0) \quad (31)$$

در واقع رابطه (۳۱) مقدار نیرویی را نشان می‌دهد که باید در جریان حرکت شیء از طرف سطح بر آن وارد شود تا شیء در جهت محور X لغزش نکند (عدم لغزش جانبی). با توجه به شکل (۵) در صورتی سطح می‌تواند این نیرو را وارد کند که $f_c < \mu_s N_b$ باشد. برای به دست آوردن N_b از رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$\sum F_Z : N_t = mg \cos \beta_0 - N_b \quad (32)$$

ω ها مولفه‌های بردار سرعت زاویه‌ای حول G و H ها مولفه‌های بردار مومنتوم زاویه‌ای حول همان نقطه هستند. برای حل معادلات حرکت (۱۲) تا (۱۷) باید از مولفه‌های H نسبت به زمان بتوان مشتق گرفت که این مولفه‌ها عبارتند از:

$$H_X = I_X \omega_X - I_{XY} \omega_Y - I_{XZ} \omega_Z \quad (18)$$

$$H_Y = -I_{YX} \omega_X + I_Y \omega_Y - I_{YZ} \omega_Z \quad (19)$$

$$H_Z = -I_{ZX} \omega_X - I_{ZY} \omega_Y + I_Z \omega_Z \quad (20)$$

I ها در روابط فوق بیانگر گشتاورها و حاصل ضرب‌های لختی شیء هستند. چارچوب O_{XYZ} به شیء متصل است و همراه آن انتقال یافته و دوران می‌کند. این امر به معنی آن است که گشتاورها و حاصل ضرب‌های لختی به دست آمده، نسبت به چارچوب مذکور ثابت و تغییر ناپذیر هستند. در نتیجه مشتقات آنها صفر است. همچنین با توجه به شرایط حرکت شیء روی سطح مولفه‌های Y بردارهای گشتاور، شتاب زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای صفر هستند. یعنی:

$$\dot{\omega}_Y = \omega_Y = 0 \quad (21)$$

بنابراین مشتق مومنتوم زاویه‌ای نسبت به زمان به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\dot{H}_X = I_X \dot{\omega}_X - I_{XZ} \dot{\omega}_Z \quad (22)$$

$$\dot{H}_Y = 0 \quad (23)$$

$$H_Z = -I_{ZX} \dot{\omega}_X + I_Z \dot{\omega}_Z \quad (24)$$

شتاب زاویه‌ای برداری آزاد است. پس می‌توان گفت:

$$\dot{\omega}_Z = \omega_{Z0} \quad (25)$$

$$\dot{\omega}_X = \omega_{X0} \quad (26)$$

بر این اساس برای به دست آوردن شتاب خطی شیء باید از روابط (۶) و (۹) نسبت به زمان مشتق گرفت و با به کار بردن روابط حاصل در رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

$$f_t + f_b = \left(\frac{I_X R_G - I_{XZ} r_G}{r_G^2 R_G} \right) a_Y \quad (27)$$

$$f_t + f_b \leq \mu_s (N_t + N_b) \quad (۴۳)$$

با قرار دادن روابط (۱۴)، (۲۷) و (۲۸) در رابطه (۴۳) به دست می‌آید:

$$\mu_s > \frac{(I_X R_G - I_{XZ} r_G) \tan \beta_0}{k_1} \quad (۴۴)$$

اما با شروع حرکت شیء و سرعت گرفتن آن، شرایط پیچیده‌تر می‌شود. با توجه به رابطه $a_x = \frac{v^2}{R_G}$ و رابطه (۱۲) واضح است که با افزایش سرعت شیء مقدار نیروی جانب مرکز f_c نیز زیاد می‌شود. با افزایش یافتن مقدار این نیرو، برای اینکه برآیند گشتاورها حول محور Y صفر باقی بماند، مکان نیروی N_t شروع به حرکت به سمت محور Z می‌کند. این در حالسیت که در چنین شرایطی مقدار N_t و N_b و به طبع آنها f_t و f_b ثابت است. پس تغییر به وجود آمده در مکان وارد آمدن N_t و f_t باعث خواهد شد که برآیند گشتاورها حول محور Z تغییر کرده و به بیان دقیق‌تر کاهش پیدا کند. نتیجه این امر به وجود آمدن لغزش و منحرف شدن شیء از مسیر دایروی پیش‌بینی شده برای آن، به صورت افزایش فاصله از نقطه مرکز دوران C خواهد بود. بدیهی است که هر چه بر مقدار نیروی f_c افزوده شود، تغییر مکان نیروهای N_t و f_t نیز بیشتر شده و در نتیجه انحراف شیء از مسیر دایروی پیش‌بینی شده برای آن و همچنین انحراف شتاب خطی شیء از مقدار پیش‌بینی شده با رابطه‌ی (۲۸)، بیشتر خواهد شد. برای غلبه بر این مشکل باید محدوده تغییر مکان نیروهای N_t و f_t را کوچک کرد. برای این کار می‌توان مطابق شکل (۶) قسمت‌هایی از مقاطع کوچک و بزرگ شیء به ضخامت‌های به ترتیب l_t و l_b را دست نخورده باقی گذاشت و دیگر قسمت شیء را به گونه‌ای برداشت که از آن یک میله‌ی استوانه‌ای به قطر r_{ax} باقی بماند. محور این میله باید همان محور n مخروط اولیه باشد. در چنین ساختاری فضای موجود برای حرکت نیرو-

با قرار دادن رابطه (۳۱) در رابطه (۳۲) و بازآرایی آن با استفاده از شکل (۵):

$$\begin{aligned} \sum M_Y : N_b (r_b \tan \alpha + l_G) \cos \alpha \\ + f_c (r_b - l_G \tan \alpha) \cos \alpha \\ - N_t ((l_f - l_G) \cos \alpha - r_t \sin \alpha) = 0 \end{aligned} \quad (۳۳)$$

حال با تعیین:

$$l_b = (r_b \tan \alpha + l_G) \cos \alpha \quad (۳۴)$$

$$l_t = ((l_f - l_G) \cos \alpha - r_t \sin \alpha) \quad (۳۵)$$

و همچنین $N_t + l_b = s$ ، عبارت خواهد بود از:

$$\begin{aligned} N_b = \frac{m g r_G \sin \beta_0 \sin \theta}{s} + \frac{m g l_t \cos \beta_0}{s} \\ + \frac{2 r_G^3 R_G m^2 g \sin \beta_0}{I_X R_G - I_{XZ} r_G + r_G^2 R_G m} (\sin \theta - \sin \theta_0) \end{aligned} \quad (۳۶)$$

در نهایت برای تعیین شرط عدم لغزش جانبی با تعیین

$$k_1 = I_X R_G - I_{XZ} r_G + r_G^2 R_G m \quad (۳۷)$$

$$k_2 = k_1 (r_G \sin \beta_0 \sin \theta + l_t \cos \beta_0) \quad (۳۸)$$

$$k_3 = (2 r_G^3 R_G m \sin \beta_0 (\sin \theta - \sin \theta_0)) \quad (۳۹)$$

شرط عدم لغزش جانبی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\mu_s > \frac{2 s r_G^2 R_G m g \sin \beta_0 (\sin \theta - \sin \theta_0)}{k_2 + k_3} \quad (۴۰)$$

برای حصول اطمینان از عدم لغزش شیء در جهت محور Y می‌بایست دو نوع شرط عدم لغزش را بررسی کرد. اول شرط استاتیکی عدم لغزش و دوم شرایط دینامیکی عدم لغزش. شرط استاتیکی می‌گوید که اگر شیء در هر نقطه از مسیر حرکتش بدون سرعت اولیه قرار گیرد نباید دچار لغزش شود. این شرط را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$f_t \leq \mu_s N_t \quad (۴۱)$$

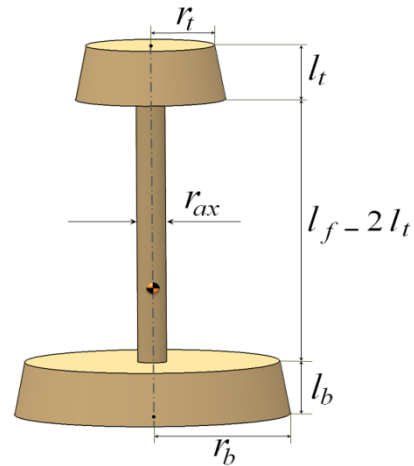
$$f_b \leq \mu_s N_b \quad (۴۲)$$

هدف یافتن ضریب اصطکاکی است که شرایط عدم لغزش را تأمین کند. از جمع کردن روابط (۴۱) و (۴۲):

مقداری کاهش می‌یابد و N_i بر اساس حاکمیت رابطه (۱۴) به همان اندازه افزایش پیدا می‌کند، اما مقدار هیچ یک از آنها به مقدار اولیه‌اش باز نمی‌گردد. در واقع می‌توان گفت افزایش f_c باعث می‌شود N_i مقدار کمی کاهش یافته و N_b به همان مقدار افزایش یابد. در نتیجه مقدار f_i کمی کم شده و مقدار f_b کمی زیاد می‌شود. حاصل این تغییر مقدار نیروها تغییر مقدار گشتاور موجود حول محور Z و در نهایت به وجود آمدن لغزش و ایجاد انحراف در حرکت شیء می‌باشد. البته لازم به ذکر است که این نوع انحراف بسیار کوچک‌تر از حالتی خواهد بود که N_i اجازه تغییر مکان آزادانه داشته باشد. بدیهی است که افزایش ضریب اصطکاک بین شیء با سطح موجب کاهش این نوع انحراف خواهد شد. زیرا مقابله با لغزش، عملکرد ذاتی اصطکاک است و انحرافی که در اینجا ایجاد می‌شود، نتیجه بروز لغزش خواهد بود.

مواردی که تا اینجا ذکر شد از طریق ایجاد حالت لغزش در حین حرکت باعث انحراف شیء از مسیر و شتاب پیش‌بینی شده برای آن می‌شوند. اما مورد دیگری نیز وجود دارد که در صورت وقوع می‌تواند در حرکت شیء انحراف به وجود بیاورد. این مورد جدا شدن نقاطی از شیء یا تمام آن از سطح است. جدا شدن شیء از سطح در اثر عاملی مانند وجود ناهمواری بر روی سطح می‌تواند ایجاد شود. اما حالتی از جدا شدن شیء از سطح که در اینجا اهمیت بیشتری دارد، در اثر افزایش تمایل شیء برای دوران حول محور Y تحت تاثیر افزایش نیروی f_c است. در واقع این امکان وجود خواهد داشت که شیء حول محوری موازی با محور Y و گذرنده از نقطه تماس مقطع بزرگ شیء با سطح، شروع به غلتیدن بکند. بدیهی است که اگر در برهه-ای از زمان حرکت، شیء حول محور گفته شده حتی به اندازه‌ی کوچکی نیز دوران داشته باشد، مسیر و شتاب آن از

های N_i و f_i از $(l_f - l_G)$ به l_i محدود می‌شود. هر چه ضخامت l_t و l_b کوچک‌تر باشد محدوده‌ی حرکت نیروهای گفته شده کوچک‌تر می‌شود و در نتیجه میزان انحراف مسیر و شتاب حرکت شیء از مقادیر پیش‌بینی شده کوچک‌تر خواهد بود. همچنین لازم به ذکر است که باید $l_t = l_b$.



شکل (۶) شیء جدید با ساختار اصلاح شده

بدیهی است که تحلیل‌ها و نتایج به دست آمده برای شیء اولیه در مورد ساختار جدید معرفی شده نیز معتبر هستند. تنها لازم است در روابط از مقادیر مربوط به ساختار جدید معرفی شده استفاده کرد. در ادامه مقاله منظور از شیء همین ساختار جدید هستند. نمودار پیکر آزاد شیء جدید را می‌توان همانند نمودار پیکر آزاد شیء اولیه فرض کرد که در آن مکان نیروهای N_i و f_i در جریان حرکت ثابت است. اما برای این ساختار جدید نیز افزایش f_c از راه دیگری موجب بروز انحراف از مسیر و شتاب پیش‌بینی شده خواهد شد. در این حالت وقتی که f_c زیاد می‌شود برای ارضای رابطه (۱۶) و صفر ماندن برآیند گشتاورها حول محور Y، مقدار N_i کاهش پیدا می‌کند. رابطه (۱۴) نشان می‌دهد که در این لحظه N_b به مقدار کاهش N_i افزایش می‌یابد. در صورت تداوم این شرایط تعادل گشتاورها حول محور Y به هم خواهد خورد. برای جلوگیری از وقوع این پدیده نیروی N_b

ناقص تعریف می‌شود که مشخصات آن عبارتند از: $l_f=248\text{mm}$, $r_b=49\text{mm}$, $r_r=43\text{mm}$ جنس این شیء از فولادی با چگالی 7801 kg/m^3 بوده و جرم آن برابر با $m=12.877\text{kg}$ است. همچنین یک سطح شیب‌دار با زاویه نیز در نظر گرفته شده و شیء در شرایط اولیه‌ای معادل با $\theta_i = 0$ بر روی سطح قرار می‌گیرد. در چنین شرایطی سطح در جای خود ثابت می‌شود و یک تماس سه بعدی بین شیء و سطح تعریف می‌شود. بر مبنای رابطه (۱۰) باید مسیر حرکت غیرفعال شیء در امتداد یک سطح مارپیچ با شعاع $R_r=1776.813\text{ mm}$ (برای مرکز قاعده کوچک) باشد. حال باید یک شبیه‌سازی بین این شیء و سطح مارپیچ تعریف شود و نتیجه آن با نتیجه نشان‌داده شده توسط رابطه (۱۰) (حرکت منطبق بر سطح) مقایسه شود. به همین منظور یک شبیه‌سازی به مدت ۱۰/۵S انجام می‌شود. در شکل (۷) شش عکس از مراحل مختلف حرکت شیء در جریان شبیه‌سازی نشان داده شده است. شکل (۷) کلیت موضوع حرکت شیء در مسیر مارپیچ را تأیید می‌کند.

مقادیر پیش‌بینی شده منحرف خواهد شد. می‌توان برای جلوگیری از ایجاد این انحراف شرطی را به این صورت بیان کرد که: لازم است در تمام لحظات حرکت شیء $N_i > 0$ باشد. برای بیان دقیق این شرط N_b از رابطه (۳۶) در رابطه (۱۴) قرار داده می‌شود و با استفاده از شرط گفته شده به دست می‌آید:

$$\tan \beta_0 < \frac{k_1(s-l_t)}{r_G(k_1 \sin \theta - r_G^2 R_G m (\sin \theta - \sin \theta_0))} \quad (45)$$

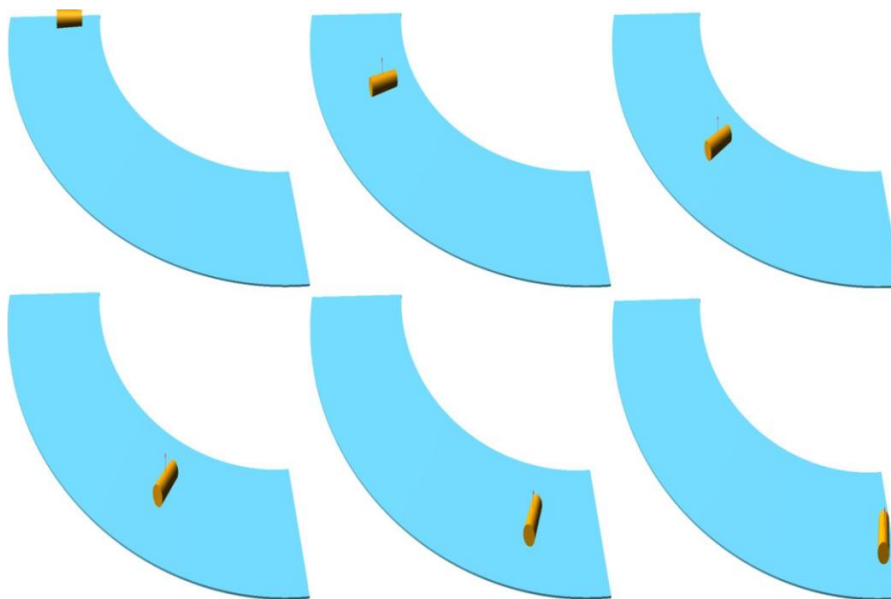
می‌توان تشخیص داد که بیشترین مقدار عبارت سمت راست نامساوی (۴۵) در $\theta = \frac{\pi}{2}$ می‌باشد پس شرط بالا را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$\tan \beta_0 < \frac{k_1(s-l_t)}{r_G(k_1 + r_G^2 R_G m \sin \theta_0)} \quad (46)$$

رعایت موارد ذکر شده در این بخش موجب تطابق حرکت شیء با نتایج به دست آمده در این مقاله خواهد شد.

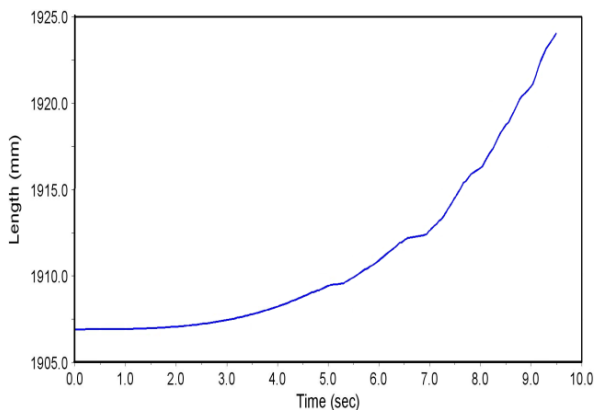
۴- شبیه‌سازی

هدف از این بخش ارزیابی صحت عملکرد مکانیزم معرفی شده و همچنین نتایج به دست آمده برای شیء با ساختار اصلاح شده است. به این منظور ابتدا شیء با شکل مخروط



شکل (۷) شش عکس از مراحل مختلف حرکت شیء بر روی سطح مارپیچ

در این مرحله یک شبیه سازی مشابه برای بررسی حرکت شیء جدیدی بر روی سطح مارپیچ انجام می شود. نمودار فاصله ی بین محور دوران تا مرکز قاعده کوچک شیء اصلاح شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در نمودار شکل (۱۰) دیده می شود بیشترین انحراف شیء اصلاح شده از مسیر پیش بینی شده برابر با $18/93\text{mm}$ است. کاملاً روشن است که مقدار انحراف از مسیر پیش بینی شده بعد از اصلاح ساختار شیء به مقدار زیادی کاهش یافته است. مقدار انحراف در اینجا حدود $1/06\%$ شعاع مسیر حرکت است که این انحراف می تواند ناشی از خطاهای محاسباتی نرم افزار و همچنین لغزش غیر قابل اجتناب شیء باشد. به هر شکل کاهش قابل توجه در انحراف از مسیر، بهبود عملکرد شیء با ساختار اصلاح شده بر اساس توضیحات آمده را تأیید می کند.

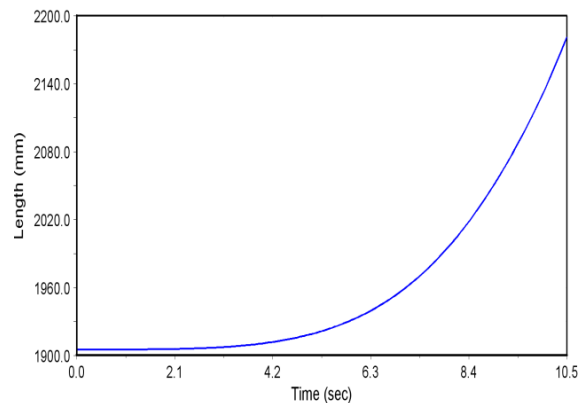


شکل (۱۰) نمودار نشان دهنده فاصله مرکز قاعده کوچک شیء

با ساختار اصلاح شده از محور دوران سطح مارپیچ

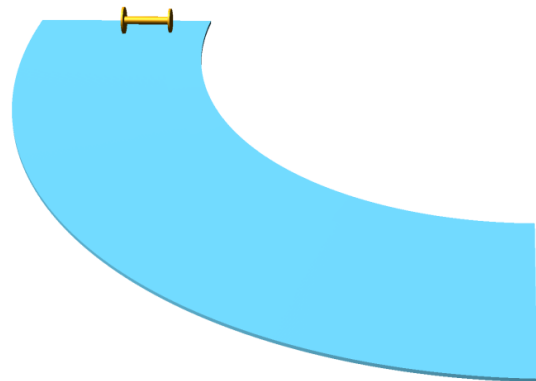
تحلیل های انجام شده در بخش قبلی دو نکته را بیان می کردند. اول اینکه کاهش مقدار l_t و l_b باعث کاهش مقدار انحراف از مسیر پیش بینی شده خواهد شد و دوم اینکه افزایش ضریب اصطکاک میان شیء و سطح نیز همین اثر را خواهد داشت. در اینجا دو مجموعه شبیه سازی برای ارزیابی دقیق تر این دو مورد صورت گرفته است. برای هر مجموعه شبیه سازی حداکثر شعاع مسیر (R_{max})، حداکثر

اما برای بررسی دقیق تر می توان از نمودار فاصله بین محور دوران و مرکز قاعده کوچک که در شکل (۸) نشان داده شده است، استفاده کرد. این نمودار فاصله بین مرکز قاعده کوچک شیء تا محور دوران سطح را بر حسب زمان نشان می دهد. همچنین نشان می دهد که حداکثر میزان انحراف از فاصله ثابت محاسبه شده بین دو نقطه $276/339\text{mm}$ است. میزان این انحراف بزرگ است. در مرحله بعد جهت ارزیابی صحت تحلیل های انجام شده و نتایج به دست آمده در مورد اصلاح ساختار شیء، شیء با ساختار اصلاح شده (تشریح شده در بخش قبل) در نظر گرفته می شود. مقادیر پارامترهای این شیء عبارتند از: $r_{ax}=14\text{mm}$ و $l_b=l_t=10\text{mm}$ است. شکل (۹) شیء جدید را در شرایط اولیه قرار گرفتن بر روی سطح نشان می دهد.



شکل (۸) نمودار نشان دهنده فاصله مرکز قاعده ی کوچک شیء از

محور دوران سطح مارپیچ



شکل (۹) شیء با ساختار اصلاح شده بر اساس توضیحات آمده در

بخش قبل

غیرفعال، مکانیزمی را معرفی می‌کند که تنها از نیروی گرانش برای تولید حرکت استفاده می‌کند. عموماً در مکانیزم‌های غیرفعال حرکت تولید شده در امتداد یک خط راست می‌باشد. در حالیکه در بسیاری از کاربردها یک حرکت و جابه‌جایی راست خط مطلوب نیست. جابه‌جا کردن اشیاء توسط بازوهای رباطی و واگن‌ها دو مثال از چنین کاربردهایی هستند.

در این مقاله یک مکانیزم جابه‌جایی غیرفعال بدون گرفتن برای جابه‌جا کردن یک شیء خاص در امتداد مسیر مارپیچ قابل پیش‌بینی معرفی شده است. این مکانیزم متشکل از دو جزء است. یکی شیء جابه‌جا شونده و دیگری بستر جابه‌جایی. بستر جابه‌جایی به صورت یک سطح مارپیچ در نظر گرفته می‌شود و شیء جابه‌جا شونده در ابتدا به شکل یک مخروط ناقص تعیین می‌شود.

تحلیل سینماتیکی انجام شده و در نتیجه ویژگی‌های مسیر جابه‌جایی غیرفعال شیء بر روی سطح مارپیچ بر حسب مشخصات هندسی آن به دست آمده است. در جریان این تحلیل، عدم لغزش شیء بر روی سطح به عنوان یک شرط لازم تعیین شده است. در ادامه تحلیل‌هایی برای به دست آوردن شرایط لازم جهت حصول عدم لغزش شیء در جریان حرکت آن، انجام شده که یکی از نتایج اصلی آن اصلاح شکل هندسی شیء جابه‌جا شونده بوده است.

از شبیه‌سازی در نرم افزار ADAMS برای ارزیابی تحلیل‌های انجام گرفته، استفاده شد. نتیجه شبیه‌سازی‌ها صحه‌گذاری تحلیل‌های انجام شده است. به نظر می‌رسد شیء که در نهایت در این مقاله به عنوان شیء جابه‌جا شونده معرفی شده است، بتواند کاربردهای جالبی داشته باشد. از جمله اینکه از این شیء به عنوان چرخ‌های غیرفعال یک وسیله‌ی متحرک چرخ‌دار و یا یک ربات متحرک، می‌توان

انحراف از مسیر پیش‌بینی شده (d_{max}) و درصد انحراف از شعاع پیش‌بینی شده (d_{rel}) در یک جدول ارائه شده‌اند. جدول (۱) تأثیر تغییر مقدار l_b و l_t را بر دقت شیء در تعقیب مسیر پیش‌بینی شده برای آن نشان می‌دهد. جدول (۲) تأثیر تغییر دادن ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد.

جدول (۱) تأثیر تغییر مقادیر l_b و l_t بر روی انحراف از مسیر پیش‌بینی شده برای شیء

l_t, l_b (mm)	R_{max} (mm)	d_{max} (mm)	d_{rel}
۸۰	۱۸۱۲/۲۸۱	۳۵/۴۸۶	%۵۲
۶۰	۱۸۰۹/۵۲۷	۳۲/۷۱۴	%۱۱/۸۴
۴۰	۱۸۰۱/۶۶۴	۲۴/۸۵۱	%۱۱/۳۹
۲۰	۱۸۰۰/۳۲۱	۲۳/۵۰۰	%۱۱/۳۲
۱۰	۱۷۹۵/۷۴۶	۱۸/۹۳۰	%۱۱/۰۶

جدول (۲) تأثیر تغییر ضرایب اصطکاک بین شیء با سطح بر روی انحراف از مسیر پیش‌بینی شده برای شیء

μ_s	μ_d	R_{max} (mm)	d_{max} (mm)	d_{rel}
۰/۲	۰/۱	۱۸۵۷/۴۸۳	۸۰/۶۷۰	%۴/۵۴
۰/۴	۰/۲	۱۸۱۶/۷۷۲	۳۹/۹۵۹	%۲/۲۴
۰/۶	۰/۴	۱۸۰۲/۸۲۴	۲۶/۰۱۱	%۱/۴۶
۰/۸	۰/۶	۱۷۹۶/۴۴۷	۱۹/۶۳۴	%۱/۱۱
۱	۰/۸	۱۷۹۲/۷۷۶	۱۵/۹۶۳	%۰/۸۹

نتایج آورده شده در جدول‌ها به وضوح تحلیل‌های انجام شده در این مقاله را صحه‌گذاری می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

جابه‌جا کردن اشیاء کاربردهای زیادی در صنعت دارد. مکانیزم‌های غیرفعال موضوع جدیدی است که از دیدگاه ذخیره‌ی انرژی و سادگی بسیار جالب است. مکانیزم

- [10] Batz G., Yaqub A., Wu H., Kuhlentz K., Wollherr D., Buss M., Dynamic manipulation: nonprehensile ball catching, In Proc Control & Automation (MED), 18th Mediterranean Conference on IEEE, 2010, pp. 365-370.
- [11] Bicchi A., Goldberg K.T., Minimalism in robot manipulation, In lecture Notes, Workshop in 1966 IEEE international conference on Robotics and Automation, 1996.
- [12] Akellas S., Huang W.H., Lynch K.M., Mason M.T., Parts feeding on a conveyor with a one joint robot, *Journal of Algorithmica*, vol. 26, 2000, pp. 313-344.
- [13] Mcgeer T., Passive dynamic walking, *International Journal of Robotics Research*, vol. 7, 1990, pp. 62-82.
- [14] Collins S., Ruina A., Tedrake R., Wisse M., Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers, *Science*, vol. 307, 2005, pp. 1082-1085.
- [15] Spong M.W., Bullo F., Controlled symmetries and passive walking, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, 2005, pp. 1025-1031.
- [16] Ikemata Y., Sano A., Fujimoto H., Generation and local stabilization of fixed Point based on a stability mechanism of passive walking, In Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, pp. 3218-3223.
- [17] Beigzadeh B., Nili Ahmadabadi M., Meghdari A., Akbarimajd A., A dynamic object manipulation approach to dynamic biped locomotion, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, 2008, pp. 570-582.
- [18] Akbarimajd A., Nili Ahmadabadi M., Ijspeert A., Analogy between juggling and hopping: active object manipulation approach, *Advanced Robotics*, vol. 25, 2011, pp. 1793-1816.
- [19] Beigzadeh B., Megdari A., Sohrabpour S., Passive dynamic object manipulation: preliminary definition and examples, *Acta Automatica Sinica*, vol. 36, 2010, pp. 1711-1719.
- استفاده کرد. همچنین به نظر می‌رسد بتوان از این شیء برای ایجاد حرکت رباتهای راه رونده غیرفعال در امتداد مسیرهای منحنی ایده گرفت.
- مراجع:**
- [1] Wimböck T., Ott C., AlbuSchäffer A., Hirzinger G., Comparison of object-level grasp controllers for dynamic dexterous manipulation, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, 2012, pp. 3-23.
- [2] Prats M., Del Pobil A.P., Sanz P.J., Robot-environment interaction in robot physical interaction through the combination of vision tactile and force feedback, 2013, Springer Berlin Heidelberg.
- [3] Roddriguez A., Mason M.T., Srinivasa S., Manipulation capabilities with simple hands, Int Symposium on Experimental Robotics (ISER 2010), December, 2010.
- [4] Marek K., Wyatt J., Stolkin R., Prediction learning in robotic pushing manipulation, In Proceedings International Conference on Advanced Robotics, 2009, pp. 1-6.
- [5] Behrens M.J., Robotic manipulation by pushing at a single point with constant velocity: modeling and techniques, PhD thesis, University of Technology Sydney, 2013.
- [6] Yoshida E., Poirier M., Laumond J.P., Kanoun O., Lamiroux F., Alami R., Kazuhito Y., Pivoting based manipulation by a humanoid robot, *Autonomous Robots*, vol. 28, 2010, pp. 77-88.
- [7] Vose T.H., Umbanhowar P., Lynch K.M., Sliding manipulation of rigid bodies on a controlled 6-DoF plate, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, 2012, pp. 819-838.
- [8] Akbarimajd A., Nili Ahmadabadi M., Manipulation by juggling of planar polygonal objects using tow 3-DOF manipulators, IEEE/ASME conf on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), (Zurich), Sept 2007.
- [9] Akbarimajd A., Optimal motion planning of juggling by 3-DOF manipulators using adaptive PSO algorithm, *robotica*, doi: 10.1017/S026357471300115X, 2014.

