

تحلیل سیستم موقعیت‌دهی تصادفی اجسام برای شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی

محمد طاهای ابدی^{۱*}، حامد کاشانی^۲ و نادر آریایی‌فر^۳

۱، ۲ و ۳. پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

*شهرک قدس، کدپستی ۸۳۴-۱۴۶۶۵

abadi@ari.ac.ir

این مقاله به بررسی سینماتیکی سیستمی می‌پردازد که برای ایجاد شرایط کم‌وزنی در سطح زمین استفاده می‌شود. این سیستم شامل دو قاب عمود برهم و سطحی برای نصب نمونه آزمایشگاهی است. قاب‌ها حول دو محور عمود برهم و با سرعت زوایه‌ای تصادفی دوران داده می‌شود که منجر به تغییر پیوسته راستای بردار جاذبه زمین از دیدگاه ذرات نمونه آزمایشگاهی می‌شود. سرعت زوایه‌ای بین دو مقدار تصادفی براساس تابع معینی تغییر داده می‌شود تا حد بالای شتاب مجازی ایجادشده از مقدار معینی کمتر باشد. معیارهای ارزیابی شرایط کم‌وزنی با استفاده از مدل سینماتیکی حرکت نمونه آزمایشگاهی ارائه می‌شود. این معیارها براساس مقدار میانگین مؤلفه‌های بردار شتاب و گرانش از دیدگاه نمونه آزمایشگاهی تعریف می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کم‌وزنی، موقعیت‌دهی تصادفی، تحلیل سینماتیکی

مقدمه

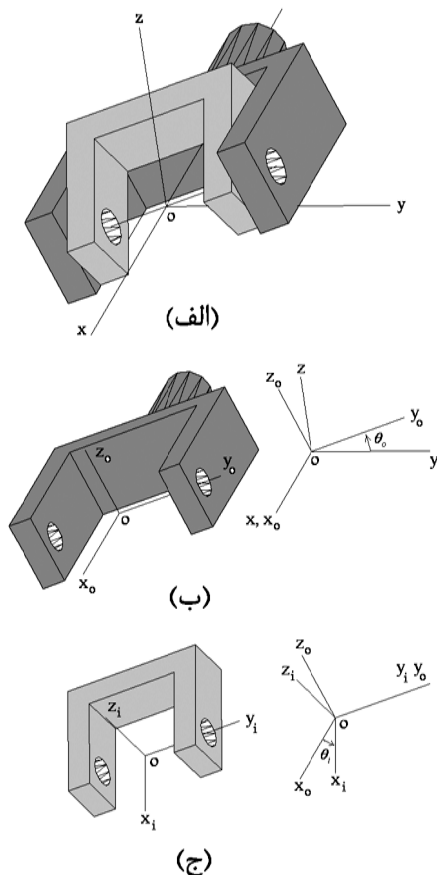
به‌منظور بررسی ارتباط بین تغییر پیوسته راستای جسم نسبت به بردار جاذبه و شرایط کم‌وزنی، حرکت دورانی آن را حول محوری در نظر بگیرید که عمود بر راستای بردار جاذبه است. اگر ذرات جسم نسبت به یکدیگر حرکت نسبی نداشته باشند و دوران جسم کاملاً به ذرات جسم منتقل شود نیروی وزن از دیدگاه هر ذره در راستاهای مختلفی در حین دوران آن در مسیر دایره‌ای اعمال می‌شود به طوری که در یک دور دوران حول محور ثابت، میانگین نیروی جاذبه اعمالی به ذره در این دوره زمانی، صفر است. تغییر راستای بردار نیروی وزن از دیدگاه ذرات جسم را با دوران حول دو محور نیز می‌توان ایجاد کرد. در این صورت هر ذره حول نقطه‌ای واقع در محل تلاقی دو محور و در سطح کروی حرکت می‌کند. در دوران جسم حول یک یا دو محور که سرعت زوایه دوران در هر محور ثابت است، هر ذره مسیر منظمی را طی می‌کند که برای شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی یا بی‌وزنی موجودات زنده مناسب نیست زیرا ایجاد حرکت منظم موجب می‌شود که موجودات زنده رشد خود را با این شرایط تطبیق دهند [۴]. برای ایجاد شرایط کم‌وزنی یا بی‌وزنی نیاز

اعمال نیروی جاذبه بر موجودات زنده در سطح زمین بر نحوه رشد سلولی، ساختار و عملکرد آنها مؤثر است. حذف نیروی جاذبه باعث تغییر در نحوه رشد و عملکرد موجودات زنده می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای ایجاد شرایط کاهش یا حذف نیروی جاذبه پیشنهاد شده است [۱-۲]. ایستگاه فضایی برای بررسی رفتار موجودات زنده در شرایط بی‌وزنی استفاده شده است که مقدار شتاب جاذبه در این ایستگاه ۱۰ هزار برابر کمتر از شتاب جاذبه در سطح زمینی است و شرایط بسیار مناسبی برای ایجاد محیط بی‌وزنی مهیا می‌کند. آزمایش در پروازهای فضایی، روش دیگری برای ایجاد شرایط بی‌وزنی یا کم‌وزنی است [۳]. استفاده از ایستگاه فضایی و پروازهای فضایی بسیار گران است و برای کاهش هزینه تحقیقاتی سعی می‌شود شرایط بی‌وزنی و کم‌وزنی در سطح زمین شبیه‌سازی شود. تغییر پیوسته راستای نمونه نسبت به بردار جاذبه یکی از روش‌های مناسب شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی در سطح زمین است که در این مقاله بررسی می‌شود.

برای تحلیل سینماتیکی هر ذره از جسم متصل به قاب داخلی، دستگاه‌های مختصاتی روی هر یک از قاب‌های داخلی و خارجی، علاوه بر دستگاه مختصات ثابت در نظر گرفته شده است که محورهای دستگاه مختصات متصل به قاب خارجی زیرنویس 0 و محورهای متصل به قاب داخلی زیرنویس i دارد و برای دستگاه مختصات ثابت، زیرنویسی در نظر گرفته نمی‌شود. این سه دستگاه مختصات در شکل (۱) نشان داده شده است. مبدأ این سه دستگاه مختصات در محل تلاقی محور دوران قاب‌های داخلی و خارجی است.

قاب خارجی حول محور X_o با سرعت زاویه‌ای ω_o دوران می‌کند و همواره محور X_o قاب خارجی بر محور X دستگاه مختصات ثابت منطبق است. دوران قاب خارجی موجب می‌شود زاویه بین محور Y_o نسبت به محور Y تغییر کند که مقدار آن در زمان t مطابق با شکل (۱-ب) با $\theta_{0(t)}$ نشان داده شده است. بردار موقعیت نقطه‌ای در دستگاه مختصات ثابت را می‌توان برحسب بردار موقعیت این نقطه در دستگاه متصل به قاب خارجی بدین صورت بیان کرد:

$$\mathbf{r} = \mathbf{D}_o \mathbf{r}_o \quad (1)$$



شکل ۱- طرح کلی سیستم موقعیت‌دهی تصادفی و دستگاه‌های مختصات مورد استفاده برای تحلیل سینماتیکی

است که علاوه بر کاهش یا حذف نیروی جاذبه، شرایط گرانشی یکنواختی برای رشد موجودات زنده در جهات مختلف ایجاد شود. بنابر این نیاز به مسیر حرکتی است که به صورت تصادفی، پیوسته جهت آن تغییر می‌کند تا از رشد موجود زنده در جهت مشخصی جلوگیری شود.

یکی از روش‌های ایجاد مسیر تصادفی حرکت جسم برای شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی، دوران آن حول دو محور عمود برهم است که مقدار سرعت زاویه‌ای دوران حول هر محور به صورت تصادفی تغییر می‌کند. تغییر تصادفی مقدار سرعت زاویه‌ای هر محور، از ایجاد مسیر حرکت متناوب جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر، شتاب شعاعی در هر ذره از جسم بر اثر حرکت بر روی سطح کره ایجاد می‌شود که مقدار آن متناسب با فاصله از مرکز دوران و مجذور سرعت زاویه‌ای دوران است. پس در ذراتی که از مرکز دوران فاصله دارند نیروی مجازی‌ای ناشی از این شتاب ایجاد می‌شود که از دیدگاه هر ذره، جهت آن ثابت و در امتداد شعاع کره است. بنابراین با تغییر پیوسته راستای حرکت ذرات جسم در سطح کره می‌توان رفتار آن را تحت اثر شتاب جاذبه مختلف بررسی کرد.

در این مقاله سینماتیک سیستم موقعیت‌دهی تصادفی بررسی می‌شود که ذرات جسم مورد نظر را حول دو محور عمود بر هم با سرعت زاویه‌ای متغیر دوران می‌دهد و مقدار سرعت زاویه‌ای هر محور به صورت تصادفی تغییر داده می‌شود. اگرچه حرکت جسم در سیستم موقعیت‌دهی تصادفی، موجب تغییر پیوسته راستای حرکت نمونه نسبت به بردار جاذبه می‌شود ولی تغییر راستای نمونه، موجب ایجاد شتاب و نیروی مجازی در نمونه می‌شود که محاسبه انتگرال آنها در مدت زمان مشخصی اهمیت دارد. برای اطمینان از ایجاد شرایط بی‌وزنی نیاز است علاوه بر تغییر پیوسته مسیر حرکت، مقدار انتگرال نیروی اعمالی بر هر ذره صفر باشد. مقدار و راستای نیرویی که به هر ذره از جسم اعمال می‌شود باید در حین حرکت از دیدگاه هر ذره ثابت باشد تا شرایط کم‌وزنی شبیه‌سازی شود. مدل سینماتیکی برای تحلیل حرکت یک جسم در سیستم موقعیت‌دهی تصادفی نیاز است تا اثر تغییرات سرعت دوران، تغییر راستای جسم نسبت به بردار جاذبه و بردار شتاب ایجادشده بر اثر حرکت در مسیر تصادفی برای هر ذره از جسم در هر لحظه تعیین شود و با محاسبه انتگرال آن در بازه زمانی معین، مطابقت شرایط ایجادشده در جسم با شرایط کم‌وزنی بررسی شود.

مدل سینماتیکی

شکل (۱-الف) طرح شماتیکی از تجهیزات متحرک سیستمی را نشان می‌دهد که از دو قاب U شکل تشکیل شده است. جسمی که باید شرایط کم‌وزنی در آن ایجاد شود به قاب داخلی متصل می‌شود.

فاصله نقطه متصل به قاب داخلی نسبت به مبدأ دستگاه مختصات ثابت مطابق رابطه (۵) تغییر نمی‌کند و بر اثر دوران دو قاب، فقط راستای بردار موقعیت در دستگاه مختصات ثابت تغییر می‌کند. بنابراین مسیر حرکت نقطه متصل به قاب داخلی بر روی سطح کروی قرار گرفته است که شعاع آن برابر با فاصله نقطه از محل تلاقی دو محور دوران است.

سرعت نقطه‌ای متصل به قاب داخلی با توجه به مؤلفه‌های سرعت زاویه‌ای در قاب‌های داخلی و خارجی و مقدار دوران ایجادشده در دو قاب تعیین می‌شود. شکل (۲) بردارهای سرعت زاویه‌ای هر قاب را نسبت به دستگاه مختصات متصل به دو قاب داخلی و خارجی نشان می‌دهد. بردار سرعت زاویه‌ای کل از جمع برداری آنها تعیین می‌شود که مؤلفه‌های آن در دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی مطابق با شکل (۲) برابر است با:

$$\boldsymbol{\omega} = [w_o \cos \theta_i \quad w_i \quad w_o \sin \theta_i]^T \quad (7)$$

از آنجا که مبدأ دستگاه مختصات قاب داخلی ثابت است بنابراین بردار سرعت نقطه‌ای متصل به این قاب چنین بیان می‌شود:

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (8)$$

با جایگذاری مؤلفه‌های بردار موقعیت و سرعت زاویه‌ای در دستگاه مختصات قاب داخلی در رابطه فوق، مؤلفه‌های سرعت در این دستگاه مختصات تعیین می‌شود. یعنی

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} w_i z_i - w_o y_i \sin \theta_i \\ w_o x_i \sin \theta_i - w_o z_i \cos \theta_i \\ w_o y_i \cos \theta_i - w_i x_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

از آنجا که نقطه مورد نظر نسبت به دستگاه مختصات قاب داخلی حرکت نسبی ندارد و مبدأ این دستگاه نیز ثابت است، شتاب نقطه متصل به قاب داخلی با توجه به بردار سرعت زاویه‌ای، مشتق زمانی آن و بردار موقعیت بدین صورت بیان می‌شود:

$$\mathbf{a} = \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (10)$$

که $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ بردار شتاب زاویه‌ای است که مؤلفه‌های آن در دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی از مشتق‌گیری رابطه (۷) نسبت به زمان تعیین می‌شود. یعنی:

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} \dot{w}_o \cos \theta_i - w_o w_i \sin \theta_i \\ \dot{w}_i \\ \dot{w}_o \sin \theta_i + w_o w_i \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

که \mathbf{r}_o و \mathbf{r} به ترتیب بردار موقعیت در دستگاه مختصات ثابت و دستگاه مختصات متصل به قاب خارجی و \mathbf{D}_o ماتریس دوران است که با توجه به مقدار زاویه دوران بدین صورت تعیین می‌شود:

$$\mathbf{D}_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_o & -\sin \theta_o \\ 0 & \sin \theta_o & \cos \theta_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

قاب داخلی حول محور Y_o با سرعت زاویه‌ای ω_i دوران می‌کند به طوری که همواره دو محور Y_o و Y_i بر هم منطبق است. زاویه بین محور X_i نسبت به محور X_o بر اثر دوران قاب داخلی تغییر می‌کند که مقدار آن در زمان t مطابق با شکل (۱-ج) برابر با $\theta_i(t)$ نشان داده شده است. بردار موقعیت نقطه‌ای در دستگاه مختصات متصل به قاب خارجی را می‌توان برحسب بردار موقعیت این نقطه در دستگاه متصل به قاب داخلی بدین صورت نوشت:

$$\mathbf{r}_o = \mathbf{D}_i \mathbf{r}_i \quad (3)$$

که \mathbf{r}_i بردار موقعیت در دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی و \mathbf{D}_i ماتریس دوران است که برحسب مقدار زاویه دوران بدین صورت بیان می‌شود:

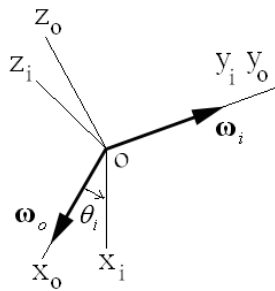
$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

بنابراین بردار موقعیت نقطه‌ای متصل به قاب داخلی را می‌توان از ترکیب روابط (۱) و (۳) در دستگاه مختصات ثابت تعیین کرد. یعنی:

$$\mathbf{r} = \mathbf{D}_o \mathbf{D}_i \mathbf{r}_i = \mathbf{D} \mathbf{r}_i \quad (5)$$

که \mathbf{D} ماتریس تبدیل است که از ضرب دو ماتریس تعریف‌شده در روابط (۲) و (۴) بدین صورت تعیین می‌شود:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_o \mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ \sin \theta_o \sin \theta_i & \cos \theta_o & -\sin \theta_o \cos \theta_i \\ -\cos \theta_o \sin \theta_i & \sin \theta_o & \cos \theta_o \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$



شکل ۲- بردارهای سرعت زاویه‌ای ناشی از دوران دو قاب سیستم موقعیت‌دهی تصادفی

قاب داخلی بیان کرد. برای این منظور از ماتریس تبدیل \mathbf{D} استفاده می‌شود و مؤلفه‌های شتاب جاذبه برحسب زاویه دوران قاب‌ها در دستگاه متصل به قاب داخلی بیان می‌شود. یعنی:

$$\mathbf{g} = \mathbf{D}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} -\cos \theta_o \sin \theta_i \\ \sin \theta_o \\ \cos \theta_o \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه فوق از خواص متعامد ماتریس تبدیل ($\mathbf{D}^T = \mathbf{D}^{-1}$) استفاده شده است.

در تعیین نحوه تغییرات سرعت زاویه‌ای دو قاب نسبت به زمان باید این نکته در نظر گرفته شود که انتگرال شتاب مماسی و انتگرال شتاب ثقل از دیدگاه هر ذره پس از گذشت مدت زمانی از دوران جسم، صفر شود. در دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی که ذرات نسبت به آن حرکت نسبی ندارند این دو قید بدین صورت بیان می‌شود:

$$\int_0^t m \mathbf{a}_T dt \rightarrow \mathbf{0} \quad (18)$$

$$\int_0^t m \mathbf{D}^T \mathbf{g} dt \rightarrow \mathbf{0} \quad (19)$$

برای ایجاد شرایط کم‌وزنی در سیستم موقعیت‌دهی تصادفی، قاب خارجی و داخلی در فاصله زمانی معینی با سرعت زاویه‌ای ثابت دوران داده می‌شود و سپس با استفاده از دنباله تصادفی، مقدار سرعت زاویه‌ای تغییر داده می‌شود و تا سپری شدن مدت زمانی معینی، مقدار آن ثابت باقی می‌ماند و این روند ادامه داده می‌شود. چگونگی تغییر سرعت زاویه‌ای بین دو مقدار تصادفی اهمیت دارد زیرا پرش ناگهانی از یک مقدار سرعت زاویه‌ای به مقداری دیگر که ممکن است با تغییر جهت دوران همراه باشد از نظر فیزیکی غیرممکن است زیرا تغییر ناگهانی سرعت زاویه‌ای به مفهوم شتاب زاویه‌ای بی‌نهایت است که برای ایجاد آن نیاز است گشتاور با مقدار بسیار بزرگی به محور قاب‌ها اعمال شود. از طرف دیگر، شتاب‌های نمونه در دستگاه موقعیت‌دهی تصادفی نباید از حدی معلوم تجاوز

همان‌طور که بیان شد مسیر حرکت یک ذره از نمونه آزمایشگاهی بر روی سطح کره قرار دارد. بنابراین بردار شتاب را می‌توان به دو بردار شتاب شعاعی و شتاب مماسی تقسیم کرد که بردار شتاب شعاعی در راستای خط شعاعی کره و بردار شتاب مماسی در راستای مماس بر سطح کره است. بنابراین شتاب حرکت هر ذره بدین صورت بیان می‌شود:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_T + \mathbf{a}_R \quad (12)$$

که \mathbf{a}_T و \mathbf{a}_R به ترتیب بردار شتاب مماسی و شعاعی است. از تعریف ضرب خارجی دو بردار نتیجه می‌شود بردار تعریف‌شده با عبارت اول سمت راست رابطه (۱۰) همواره عمود بر بردار شعاعی و بردار تعریف‌شده با عبارت دوم، همواره در راستای بردار شعاعی است. بنابراین می‌توان بردارهای شتاب مماسی و شعاعی را بدین صورت نوشت:

$$\mathbf{a}_T = \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r} \quad (13\text{-الف})$$

$$\mathbf{a}_R = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (13\text{-ب})$$

اندازه بردارهای شتاب مماسی و شعاعی برابرند با:

$$|\mathbf{a}_T| = |\dot{\boldsymbol{\omega}}| |\mathbf{r}| \sin \alpha_1 \quad (14\text{-الف})$$

$$|\mathbf{a}_R| = (\boldsymbol{\omega})^2 |\mathbf{r}| \sin \alpha_2 \quad (14\text{-ب})$$

که α_1 زاویه بین بردار $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ و \mathbf{r} ، α_2 زاویه بین بردار $\boldsymbol{\omega}$ و \mathbf{r} است. اندازه بردار سرعت زاویه‌ای و مشتق آن به ترتیب با استفاده از روابط (۷) و (۱۱) بدین صورت تعیین می‌شود:

$$|\boldsymbol{\omega}| = \sqrt{\omega_i^2 + \omega_o^2} \quad (15\text{-الف})$$

$$|\dot{\boldsymbol{\omega}}| = \sqrt{\omega_i^2 \omega_o^2 + \dot{\omega}_i^2 + \dot{\omega}_o^2} \quad (15\text{-ب})$$

اگر بیشترین فاصله نقطه‌ای از نمونه آزمایشگاهی که بر روی میز دستگاه شبیه‌ساز کم‌وزنی بسته می‌شود r_{\max} باشد، حداکثر مقدار شتاب مماسی و شعاعی نمونه آزمایشگاهی برای حالت $\alpha_1 = \alpha_2 = \pi/2$ برابر است با:

$$|\mathbf{a}_T| \leq r_{\max} \sqrt{\omega_i^2 \omega_o^2 + \dot{\omega}_i^2 + \dot{\omega}_o^2} \quad (16\text{-الف})$$

$$|\mathbf{a}_R| \leq r_{\max} (\omega_i^2 + \omega_o^2) \quad (16\text{-ب})$$

دوران نمونه آزمایشگاهی در دستگاه شبیه‌ساز کم‌وزنی موجب می‌شود که راستای بردار جاذبه از دیدگاه هر ذره از نمونه آزمایشگاهی تغییر کند. شتاب جاذبه از دیدگاه این ذرات را می‌توان برحسب مؤلفه‌های بردار شتاب جاذبه در دستگاه مختصات متصل به

راستای آن از دیدگاه ذره ثابت و در جهت شعاعی و به سمت مرکز کره است همواره کمتر یا مساوی با حاصل ضرب مجذور اندازه بردار سرعت زاویه‌ای کل و شعاع کره است. بنابراین سرعت زاویه‌ای قباب‌های داخلی و خارجی دستگاه شبیه‌سازی کم‌وزنی طوری انتخاب می‌شود که مجموع مجذور آنها مقدار ثابت باشد. یعنی

$$\omega_i^2 + \omega_o^2 = \omega_T^2 \quad (22)$$

که ω_T اندازه بردار سرعت زاویه کل است. پس در نمونه‌های آزمایشگاهی که بر روی میز دستگاه شبیه‌ساز کم‌وزنی بسته می‌شود حداکثر شتاب جانب مرکز در نقاطی ایجاد می‌شود که بیشترین فاصله را از مرکز کره دارند که مقدار حداکثر شتاب جانب مرکز یا شتاب جاذبه مجازی مطابق با روابط (۱۶-ب) و (۲۲) تعیین می‌شود. یعنی

$$|\mathbf{a}_R| \leq r_{\max} \omega_T^2 \quad (23)$$

بنابراین اندازه بردار سرعت زاویه‌ای کل با توجه به حداکثر فاصله نمونه آزمایشگاهی از مرکز کره و مقدار مجاز شتاب ثقل مجازی بدین صورت تعیین می‌شود:

$$\omega_T^2 = \frac{g_{\max}}{r_{\max}} \quad (24)$$

که g_{\max} حداکثر شتاب جانب مرکز یا شتاب جاذبه مجازی است که در نمونه آزمایشگاهی ایجاد می‌شود. باید توجه شود که مقدار سرعت زاویه‌ای قباب خارجی با استفاده از رابطه (۲۲) برحسب مقدار سرعت زاویه‌ای کل و سرعت زاویه‌ای قباب داخلی محاسبه می‌شود.

اگر سرعت زاویه‌ای قباب داخلی و خارجی ثابت باشد مقدار زاویه دوران دو قباب برابر است با:

$$\theta_{i(t)} = \theta_{i(0)} + \bar{\omega}_i t \quad (25\text{-الف})$$

$$\theta_{o(t)} = \theta_{o(0)} + \bar{\omega}_o t \quad (25\text{-ب})$$

که $\theta_{i(0)}$ و $\theta_{o(0)}$ به ترتیب زاویه اولیه قباب داخلی و خارجی در لحظه شروع حرکت قباب‌ها و $\bar{\omega}_o$ و $\bar{\omega}_i$ مقادیر ثابتی است که به ترتیب بیانگر مقدار سرعت زاویه‌ای ثابت قباب داخلی و خارجی است. مقدار زاویه قباب خارجی را می‌توان با استفاده از رابطه (۲۲) بدین صورت بیان کرد:

$$\theta_{o(t)} = \theta_{o(0)} + t \sqrt{\omega_T^2 - \bar{\omega}_i^2} \quad (26)$$

موقعیت نقطه دلخواهی از نمونه نسبت به دستگاه مختصات ثابت با استفاده از روابط (۵) و (۶) تعیین می‌شود:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_i \cos \theta_i + z_i \sin \theta_i \\ x_i \sin \theta_o \sin \theta_i + y_i \cos \theta_o - z_i \sin \theta_o \cos \theta_i \\ -x_i \cos \theta_o \sin \theta_i + y_i \sin \theta_o + z_i \cos \theta_o \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (27)$$

مؤلفه‌های بردار شتاب مماسی حرکت نقطه مورد نظر در

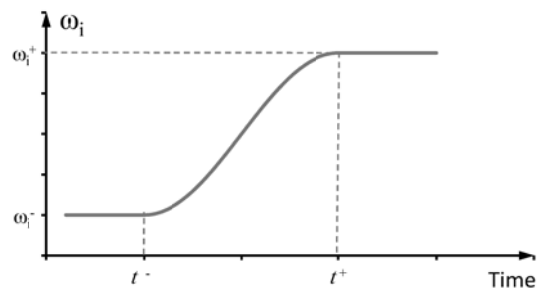
کند زیرا تغییرات ناگهانی شتاب موجب انحراف از شرایط بی‌وزنی می‌شود. بنابراین نیاز است تغییر پیوسته‌ای در سرعت زاویه‌ای قباب داخلی نسبت به زمان بین دو ناحیه مطابق با شکل (۳) ایجاد شود به طوری که شیب منحنی در ابتدا و انتهای ناحیه گذرا صفر باشد تا تغییر سرعت زاویه‌ای ملایم و بدون تغییر شتابی ناگهانی در نمونه انجام شود. منحنی بین دو ناحیه با سرعت زاویه‌ای ثابت باید طوری انتخاب شود که شتاب حرکت نمونه از مقدار مجازی بیشتر نشود. معادله تغییر سرعت زاویه‌ای در ناحیه گذرا بدین صورت انتخاب می‌شود:

$$\omega_{i(t)} = \frac{\omega_i^+ + \omega_i^-}{2} - \frac{\omega_i^+ - \omega_i^-}{2} \cos \left(\pi \frac{t - t^-}{t^+ - t^-} \right) \quad (20)$$

که ω_i^+ و ω_i^- به ترتیب سرعت زاویه‌ای در ابتدا و انتهای ناحیه گذرا، t^+ و t^- به ترتیب زمان شروع و خاتمه تغییر سرعت زاویه‌ای است. شتاب زاویه‌ای قباب داخلی در ناحیه گذرا از مشتق زمانی رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$\dot{\omega}_{i(t)} = \frac{\omega_i^+ - \omega_i^-}{t^+ - t^-} \frac{\pi}{2} \sin \left(\pi \frac{t - t^-}{t^+ - t^-} \right) \quad (21)$$

در ادامه، تحلیل سینماتیکی در شرایطی ارائه می‌شود که قباب‌ها با سرعت زاویه‌ای ثابت یا سرعت زاویه‌ای گذرا حرکت داده می‌شود که این دو ناحیه به ترتیب ناحیه پایدار و ناحیه گذرا نامیده می‌شود.



شکل ۳- نحوه تغییر سرعت زاویه‌ای در بین دو فاصله زمانی

تحلیل سینماتیکی در ناحیه پایدار

همان‌طور که بیان شد هر ذره از نمونه آزمایشگاهی بر روی سطح کره حرکت می‌کند که راستای شتاب جانب مرکز از دیدگاه هر ذره راستای ثابتی دارد و مقدار آن طبق رابطه (۱۶-ب) تعیین می‌شود. بنابراین برای نقاطی که در مرکز کره نیستند بر اثر دوران دو قباب، شتاب شعاعی ایجاد می‌شود که از دیدگاه هر نقطه متصل به قباب داخلی، راستای آن ثابت است. اندازه بردار موقعیت هر ذره برابر شعاع کره است که مقدار آن برای هر ذره ثابت است و اگر اندازه بردار سرعت زاویه‌ای کل ثابت باشد مقدار شتاب جانب مرکز که

حداکثر مقدار شتاب مماسی با جایگذاری روابط (۲۲) و (۳۰) در رابطه (۱۶- الف) بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$|\mathbf{a}_T| \leq r_{\max} \omega_T^2 \sqrt{\frac{\omega_i^2 \left(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_T^2}\right) + \dot{\omega}_i^2}{\omega_T^4 \left(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_T^2}\right)}} \quad (31)$$

در شرایطی که $w_i^2/w_T^2 = 0.5$ باشد مقدار شتاب مماسی حداکثر برابر است با:

$$|\mathbf{a}_T| \leq r_{\max} \omega_T^2 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2\dot{\omega}_i^2}{\omega_T^4}} \quad (32)$$

با جایگذاری رابطه (۲۱) در (۳۲) داریم:

$$|\mathbf{a}_T| \leq r_{\max} \omega_T^2 \sqrt{\frac{1}{4} + 2 \left[\frac{\left(\frac{w_i^+}{w_T} - \frac{w_i^-}{w_T}\right) \times \frac{\pi}{w_T(t^+ - t^-)} \sin\left(\pi \frac{t - t^-}{t^+ - t^-}\right) \right]^2} \quad (33)$$

مقدار داخل کروشه بیشترین مقدار ممکن می‌شود اگر:

$$\frac{w_i^+}{w_T} = -\frac{w_i^-}{w_T} = 1, \quad \sin\left(\pi \frac{t - t^-}{t^+ - t^-}\right) = 1 \quad (34)$$

که در این صورت شتاب مماسی حداکثر برابر است با:

$$|\mathbf{a}_T| \leq \frac{1}{2} r_{\max} \omega_T^2 \sqrt{1 + \frac{32\pi^2}{w_T^2(t^+ - t^-)^2}} \quad (35)$$

باید توجه داشت که مقدار w_T با توجه به شرایط میکروگرویتی و با استفاده از رابطه (۲۴) تعیین می‌شود. اگر مقدار شتاب مماسی حداکثر برابر با $a_{T\max}$ باشد پهنای ناحیه گذرا مطابق با رابطه (۳۵) برابر است با:

$$t^+ - t^- = \frac{4\pi\sqrt{2}}{w_T \sqrt{\left(\frac{2a_{T\max}}{g_{\max}}\right)^2 - 1}} \quad (3)$$

باید توجه بشود که نسبت $a_{T\max}/g_{\max}$ باید بزرگتر از ۰/۵ انتخاب شود تا عبارت زیر رادیکال عدد بزرگتر از صفر شود.

دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۳- الف) بدین صورت بیان می‌شود:

$$\mathbf{a}_T = \bar{w}_i \sqrt{w_T^2 - \bar{w}_i^2} \begin{bmatrix} -y_i \cos \theta_i \\ x_i \cos \theta_i + z_i \sin \theta_i \\ -y_i \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (28)$$

مؤلفه‌های شتاب مماسی مطابق با رابطه فوق توابع متناوبی هستند که دوره تناوب آنها برابر با $T = 2\pi/\bar{w}_i$ است. بنابراین انتگرال مؤلفه‌های شتاب مماسی پس از گذشت این دوره تناوب صفر می‌شود. حداکثر مقدار شتاب مماسی با توجه به روابط (۱۶- الف) و (۲۲) برابر است با:

$$|\mathbf{a}_T| \leq r_{\max} \sqrt{\bar{w}_i^2 w_o^2} = r_{\max} \sqrt{\bar{w}_i^2 (w_T^2 - \bar{w}_i^2)} \\ = r_{\max} w_T^2 \sqrt{\frac{\bar{w}_i^2}{w_T^2} \left(1 - \frac{\bar{w}_i^2}{w_T^2}\right)} \quad (29)$$

مقدار سرعت زاویه‌ای قاب داخلی به صورت تصادفی تعیین می‌شود و همواره مقدار آن کمتر یا مساوی با مقدار سرعت زاویه‌ای کل است. رابطه فوق وقتی به بیشترین مقدار می‌شود که $\bar{w}_i^2/w_T^2 = 0.5$ باشد که در این صورت مقدار حداکثر شتاب مماسی برابر با $r_{\max} w_T^2/2$ است.

تغییرات مؤلفه‌های شتاب ثقل از دیدگاه ذره با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود که توابع متناوبی هستند و پس از گذشت دوره تناوب صفر می‌شود.

تحلیل سینماتیکی ناحیه گذرا

اگر مقدار سرعت زاویه‌ای قاب داخلی تغییر داده شود ولی همواره سرعت زاویه‌ای قاب خارجی طوری محاسبه شود که مقدار مجموع مجذور سرعت زاویه‌ای کل ثابت باشد رابطه (۲۳) اندازه حداکثر شتاب جانب مرکز را بیان می‌کند که همواره مقدار و جهت آن از دیدگاه نمونه آزمایشگاهی ثابت است. بنابراین شتاب ثقل مجازی در دستگاه شبیه‌ساز کم‌وزنی در ناحیه گذرا را می‌توان کمتر یا مساوی مقدار مجاز ایجاد کرد.

شتاب مماسی در هر ذره از نمونه آزمایشگاهی بر اثر حرکت آنها بر روی سطح کره با سرعت و جهت متغیر ایجاد می‌شود. نرخ تغییرات سرعت زاویه‌ای قاب داخلی با استفاده از رابطه (۲۱) بیان می‌شود و برای محاسبه نرخ تغییرات سرعت زاویه‌ای قاب خارجی از رابطه (۲۲) نسبت به زمان مشتق گرفته می‌شود که نتیجه می‌شود:

$$w_o \dot{w}_o = -w_i \dot{w}_i \quad (30)$$

نحوه تحلیل مدل سینماتیکی

برای تعیین مسیر حرکت و تغییرات شتاب‌های حرکت و شتاب ثقل با توجه به نحوه تغییرات سرعت زاویه‌ای قاب داخلی و خارجی نرم‌افزاری تهیه شد. در این نرم‌افزار نحوه تغییرات سرعت زاویه‌ای دو قاب تعریف‌شده است و می‌توان مقدار آنها را ثابت و متفاوت با هم یا دارای تغییرات تصادفی نسبت به زمان در نظر گرفت. برای تحلیل مدل سینماتیکی نیاز است موارد زیر تعریف شود:

- محاسبه تغییرات سرعت زاویه‌ای قاب داخلی و خارجی نسبت به زمان
- محاسبه مسیر حرکت نقطه‌ای از نمونه آزمایشگاهی نسبت به دستگاه مختصات ثابت
- کنترل موتورهای محرک دستگاه شبیه‌سازی کم‌وزنی
- جمع‌آوری اطلاعات سنسورهای دستگاه شبیه‌سازی کم‌وزنی
- محاسبه اندازه بردارهای شتاب مماسی و شتاب شعاعی و مؤلفه‌های آنها و میانگین آنها نسبت به دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی
- محاسبه مقدار مؤلفه‌های شتاب ثقل و میانگین آنها نسبت به دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی
- نتایج تحلیل حرکت جسم در دستگاه شبیه‌سازی کم‌وزنی در این بخش برای بررسی نحوه عملکرد دستگاه شبیه‌سازی کم‌وزنی، با استفاده از مدل سینماتیکی و نرم‌افزار تهیه‌شده، به برخی از نتایج در شرایط مختلف اشاره می‌شود.

تحلیل سینماتیکی با سرعت زاویه‌ای قاب‌های ثابت

قاب‌های دستگاه با سرعت زاویه‌ای ثابتی حرکت داده می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده با روابط ارائه‌شده در بخش‌های قبل مقایسه می‌شود تا از صحت عملکرد نرم‌افزار اطمینان حاصل شود. زاویه اولیه قاب‌های داخلی و خارجی صفر در نظر گرفته می‌شود و مسیر حرکت برای نقطه‌ای تعیین می‌شود که موقعیت آن نسبت به دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی برابر با $R(\sqrt{0.5}, \sqrt{0.2}, \sqrt{0.3})$ است که R فاصله نقطه از مرکز دوران است. سرعت زاویه‌ای قاب داخلی و خارجی به ترتیب $0.8\omega_T$ و $0.6\omega_T$ انتخاب می‌شود که مجموع مجذور آنها برابر با ω_T^2 است. پس دوره تناوب دوران قاب داخلی و خارجی به ترتیب $\pi/0.4\omega_T$ و $\pi/0.3\omega_T$ است. شکل (۴) مسیر حرکت این نقطه را نشان می‌دهد که پس از گذشت زمان معینی مسیر ایجادشده مجدداً تکرار می‌شود. همان‌طور که در رابطه (۲۷) بیان شده است مؤلفه‌های بردار موقعیت به صورت توابع مثلثاتی مانند $\cos\theta_i$ ، $\cos\theta_o$ و $\sin\theta_i$ ، $\sin\theta_o$ است. دوره تناوب توابع حاصل ضرب برابر کوچک‌ترین مضرب مشترک دوره تناوب آنها است

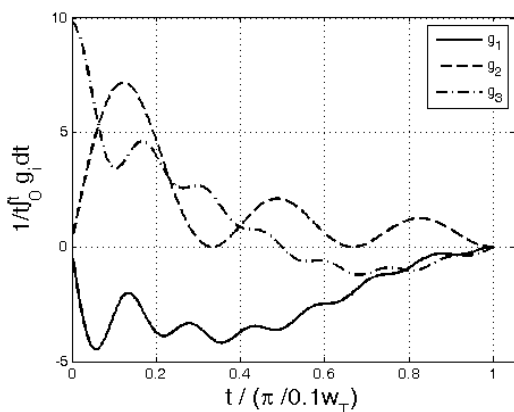
- حداکثر مقدار شتاب ثقل مجاز
 - حداکثر فاصله نمونه آزمایشگاهی از مرکز دوران
 - زاویه اولیه قاب‌های خارجی نسبت به دستگاه مختصات ثابت
 - زاویه اولیه قاب داخلی نسبت به قاب خارجی
 - نمو زمانی برای محاسبه انتگرال‌ها به صورت عددی
 - حداکثر شتاب مماسی مجاز در تغییر سرعت زاویه‌ای
 - مدت زمانی که سرعت زاویه‌ای قاب‌ها ثابت باشد.
- برای تعیین مسیر حرکت نیاز است مقدار زاویه دوران هر قاب تعیین شود تا با استفاده از روابط (۵) و (۶) برای نقطه معینی از جسم در دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی، بردار موقعیت آن در دستگاه مختصات ثابت تعیین شود. مقدار زاویه دوران از انتگرال‌گیری عددی سرعت زاویه‌ای هر قاب و مقدار اولیه زاویه هر قاب تعیین می‌شود.

مقدار سرعت زاویه‌ای دوران در هر بازه زمانی با استفاده از نرم‌افزار به صورت تصادفی طوری تعیین می‌شود که شرط بیان‌شده در رابطه (۲۲) ارضا شود.

سرعت زاویه‌ای دو قاب در لحظه اولیه صفر است و مقدار زاویه‌ای اولیه آنها در منوی ورودی نرم‌افزار تعیین می‌شود. سرعت زاویه‌ای قاب داخلی به صورت تصادفی تعیین می‌شود که مقدار آن در محدوده $W_T \leq W_i \leq W_T$ انتخاب می‌شود. علاوه بر سرعت دوران قاب داخلی، جهت دوران آن با توجه به بازه انتخابی برای مقادیر تصادفی ممکن است تغییر داده شود. مقدار سرعت زاویه‌ای در شروع حرکت از مقدار صفر به مقدار تصادفی با استفاده از رابطه (۲۰) تغییر می‌کند. مقدار سرعت زاویه‌ای قاب خارجی در هر لحظه براساس مقدار سرعت زاویه‌ای کل و مقدار سرعت زاویه‌ای قاب داخلی محاسبه می‌شود. باید توجه شود که مقدار سرعت زاویه‌ای قاب خارجی به صورت تصادفی تغییر داده می‌شود زیرا از مقدار تصادفی، سرعت زاویه‌ای قاب داخلی محاسبه می‌شود.

مقدار مؤلفه‌های شتاب شعاعی و شتاب مماسی برای دو ناحیه پایدار و گذرا با استفاده از رابطه (۱۳) به‌دست می‌آید و از مؤلفه‌های آن نسبت به زمان انتگرال‌گیری می‌شود تا بتوان میانگین آنها را محاسبه

تغییرات مؤلفه‌های شتاب ثقل نسبت به هر ذره از نمونه آزمایشگاهی در یک دوره تناوب در شکل (۵) نشان داده شده است. مؤلفه‌های شتاب ثقل در دستگاه مختصات محاسبه شده است و میانگین آن از انتگرال این مؤلفه‌ها در کل بازه زمانی و تقسیم آنها بر مقدار زمان کنونی به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود مقدار میانگین مؤلفه‌های شتاب جاذبه در یک دوره تناوب به سمت صفر میل می‌کند.

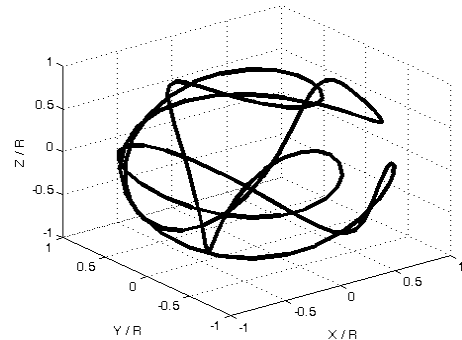


شکل ۶- تغییرات مؤلفه‌های شتاب ثقل از دیدگاه ذره از نمونه آزمایشگاهی نسبت به زمان در اثر حرکت قاب‌های داخلی و خارجی با سرعت زاویه‌ای ثابت

تحلیل سینماتیکی سیستم موقعیت‌دهی تصادفی

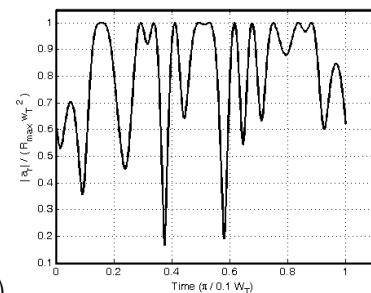
سرعت زاویه‌ای قاب داخلی و خارجی در این تحلیل به صورت تصادفی تغییر داده می‌شود تا شرایط کم‌وزنی شبیه‌سازی شود. زاویه اولیه قاب‌های داخلی و خارجی در این تحلیل صفر در نظر گرفته می‌شود. سرعت زاویه‌ای قاب داخلی در لحظه اولیه صفر و مقدار سرعت زاویه قاب خارجی برابر با w_T است. شکل (۷) تغییرات سرعت‌های زاویه‌ای قاب داخلی و خارجی را در ۲۰۰۰ ثانیه اول حرکت نشان می‌دهد. موقعیت نقطه‌ای که حداکثر فاصله از مرکز دوران را دارد به صورت $R(\sqrt{0.5}, \sqrt{0.2}, \sqrt{0.3})$ نسبت به دستگاه مختصات قاب داخلی در نظر گرفته می‌شود. بازه زمانی که قاب‌ها با سرعت زاویه‌ای ثابت حرکت می‌کنند ۴۰ ثانیه انتخاب شده است. حداکثر شتاب ثقل مجاز $10^{-4} g$ و مقدار شتاب مماسی حداکثر $7 \times 10^{-4} g$ در نظر گرفته شده است. بنابراین اندازه بردار سرعت زاویه کل مطابق با رابطه (۲۴) مقدار $w_T = \sqrt{10^{-4} g/R} = 0.031 \text{ rad/s}$ برای مقدار واحد R و پهنای ناحیه گذرا مطابق با رابطه (۲۶) مقدار $t^+ - t^- = \frac{4\pi\sqrt{2}}{w_T\sqrt{199}} = 40.1$ محاسبه می‌شود.

که در این حالت دوره تناوب برابر با $\pi/0.1\omega_T$ است. بنابراین مسیر حرکت پس از گذشت این دوره تناوب تکرار می‌شود که این شرایط در مسیر حرکت به دست آمده از نرم‌افزار مشاهده می‌شود.

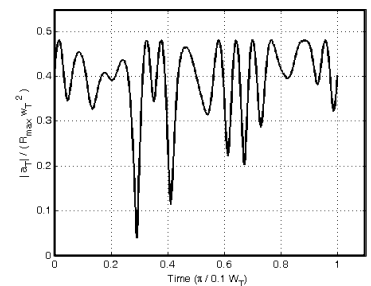


شکل ۴- مسیر حرکت نقطه‌ای از نمونه آزمایشگاهی با حرکت قاب‌های داخلی و خارجی در سرعت زاویه‌ای ثابت

تغییرات اندازه بردار شتاب مماسی و شعاعی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود مقدار حداکثر شتاب شعاعی همواره کمتر یا برابر با $R\omega_T^2$ است که با تحلیل سینماتیکی مطابقت دارد. بنابراین ایجاد شتاب ثقل مجازی معینی در دستگاه شبیه‌ساز کم‌وزنی امکان‌پذیر است. اندازه بردار شتاب مماسی در یک دوره تناوب در شکل (۵-ب) نشان داده شده است و نتیجه می‌شود که مقدار آن همواره کمتر از $R\omega_T^2/2$ است که این مقدار با تحلیل سینماتیکی مطابقت دارد.



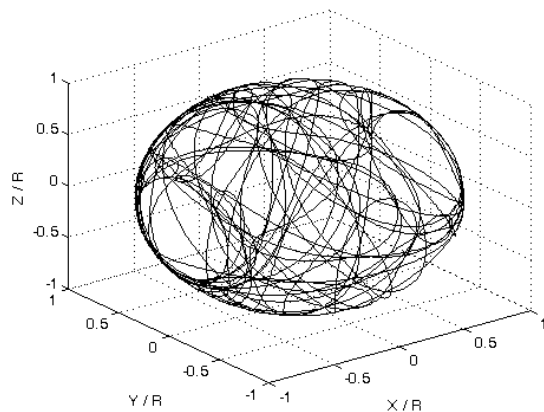
(الف)



(ب)

شکل ۵- تغییرات اندازه بردارهای شتاب نسبت به زمان در حرکت نقطه‌ای از نمونه آزمایشگاهی با حرکت قاب‌های داخلی و خارجی در سرعت زاویه‌ای ثابت (الف) شتاب شعاعی (ب) شتاب مماسی

شکل (۸) مسیر حرکت نقطه‌ای از نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در بیشترین فاصله از مرکز دوران قرار دارد. نمودار زمانی ۱ ثانیه برای محاسبه مسیر حرکت و انتگرال‌ها در این تحلیل استفاده شده است. از آنجا که سرعت زاویه‌ای قاب‌های داخلی و خارجی مقادیر تصادفی هستند مسیر حرکت تکرارشونده نیست و نمونه آزمایشگاهی که با این شرایط آزمایش می‌شود مسیر نامتناوبی را برخلاف دوران حرکت قابها با سرعت زاویه‌ای ثابت طی می‌کند.

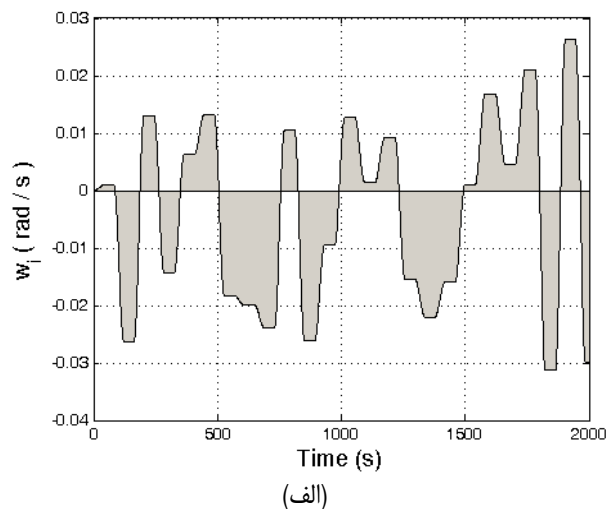


شکل ۸- مسیر حرکت با انتخاب تصادفی سرعت زاویه‌ای قاب‌های داخلی و خارجی پس از گذشت ۷۲۰۰ ثانیه

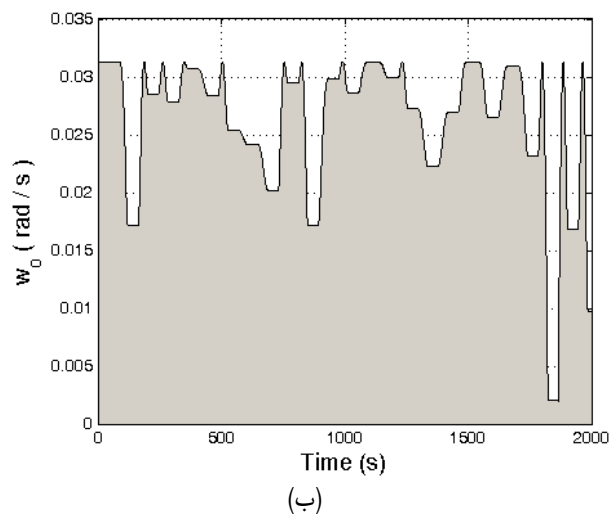
مقدار شتاب جاذبه مجازی در این شرایط مطابق با نتایج ارائه‌شده در شکل (۹ - الف) مساوی یا کمتر از مقدار $10^{-4}g$ است و شرایط بسیار مناسبی برای شبیه‌سازی بی‌وزنی تأمین می‌شود. اندازه بردار شتاب مماسی ناشی از حرکت بر روی سطح کره و در جهات مختلف در شکل (۹ - ب) از شروع حرکت تا زمان ۲۰۰۰ ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار آن همواره کوچکتر از مقدار $7 \times 10^{-4}g$ است و همان‌طور که در بخش تحلیل سینماتیکی گذرا بیان شد این شتاب در شرایط خاص در حین عبور از ناحیه گذرا ایجاد می‌شود.

شکل (۱۰) تغییرات میانگین مؤلفه‌های شتاب ثقل از دیدگاه ذره متصل به قاب داخلی را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های شتاب گرانش نسبت به دستگاه مختصات متصل به قاب داخلی بیان شده است و انتگرال آنها از زمان شروع حرکت تا زمان مورد نظر محاسبه و مقدار حاصل بر زمان کنونی تقسیم شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مقدار میانگین مؤلفه‌های شتاب ثقل در لحظه‌های اولیه حرکت مقدار زیادی است ولی پس از گذشت زمان کمی به شدت افت می‌کند. بنابراین حرکت نمونه با سرعت تصادفی قابها شرایط مناسبی برای شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی فراهم می‌کند.

همان‌طور که در شکل (۷ - الف) مشاهده می‌شود سرعت قاب داخلی از مقدار صفر و با تغییر پیوسته مطابق با رابطه (۲۰) به مقدار معینی در مدت زمان ۴۰/۲۲ ثانیه افزایش داده می‌شود و سپس سرعت زاویه آن به مدت ۴۰ ثانیه مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد سرعت زاویه منفی به صورت تصادفی تعیین می‌شود که بیانگر تغییر جهت دوران، علاوه بر تغییر مقدار سرعت دوران است. این مرحله تغییرات تا پایان زمان حرکت ادامه داده می‌شود. سرعت قاب خارجی با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود که تغییرات آن در شکل (۷ - ب) نشان داده شده است. باید توجه شود که جهت دوران قاب خارجی را نمی‌توان معکوس کرد زیرا برقراری شرط ثابت بودن مقدار اندازه بردار سرعت زاویه‌ای کل در حین عبور از ناحیه گذرا امکان‌پذیر نیست.



(الف)



(ب)

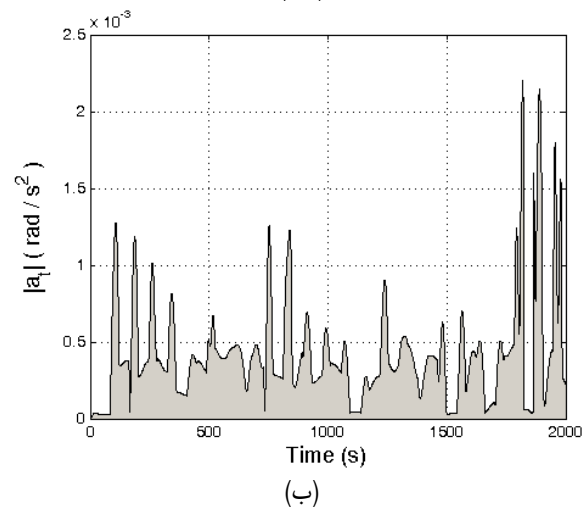
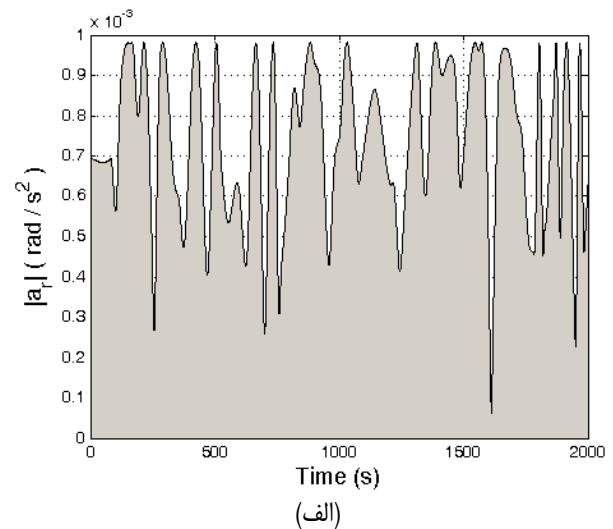
شکل ۷- نحوه تغییرات سرعت زاویه‌ای قاب‌های داخلی و خارجی در ۲۰۰۰ ثانیه اول حرکت

نتیجه گیری

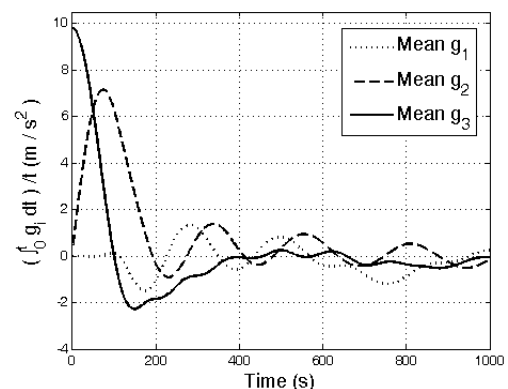
تحلیل سینماتیکی مسیر حرکت تصادفی یک ذره بر اثر دوران حول دو محور عمود بر هم نشان می‌دهد که با تغییر پیوسته راستای هر ذره از نمونه نسبت به بردار جاذبه زمین، شرایط مناسبی را برای شبیه‌سازی کم‌وزنی در سطح زمین ایجاد می‌کند زیرا برخلاف دوران تک محوره یا دومحوره با سرعت زاویه‌ای ثابت، مسیر حرکت از نظم خاصی پیروی نمی‌کند. از آنجاکه حرکت نمونه بر مسیر منظم موجب می‌شود موجود زنده رشد خود را با این شرایط تطبیق دهد، پس موقعیت‌دهی تصادفی با تغییر نامنظم مسیر حرکت، شرایط غیریکنواختی برای نمونه ایجاد می‌کند که مطابقت بسیار خوبی با شرایط کم‌وزنی در فضا دارد. این سیستم راستای بردار جاذبه را از دیدگاه هر ذره پیوسته تغییر می‌دهد. اگر اندازه سرعت زاویه‌ای کل مقدار ثابتی در نظر گرفته شود، همواره شتاب جانب مرکز ثابتی ایجاد می‌شود که از دیدگاه این ذره، همواره جهت آن ثابت است که حد بالای آن با توجه به سرعت زاویه‌ای کل و حداکثر فاصله از مرکز دوران تعیین می‌شود. شتاب مماسی در سیستم موقعیت‌دهی تصادفی را می‌توان با تغییر پیوسته سرعت زاویه‌ای و حفظ پیوستگی شتاب زاویه‌ای و با انتخاب مناسب مدت زمان تغییر سرعت محدود کرد.

مراجع

- [1] Klaus D. M., "Clinostats and bioreactors," *Gravitational and Space Biology Bulletin* 14(2) June 2001, pp. 55-64.
- [2] Kraft T. F. B., van Loon J. J. W. A., Kiss J. Z., "Plastid position in arabidopsis columella cells is similar in microgravity and on a random-positioning machine," *Planta*, 211, 2000, pp.415-422.
- [3] Hoson T., Kamisaka S. Masuda Y., Yamashita M. and Buchen B., "Evaluation of the three-dimensional clinostat as a simulator of weightlessness," *Planta* 203, 1997, pp.187-197.
- [4] Brown A.H., Dahl A. O., Chapman D. K., "Limitation on the use of the horizontal clinostat as a gravity compensator," *Plant Physiology*, Vol. 58, 1976. pp. 127-130.



شکل ۹- تغییرات شتاب در ۲۰۰۰ ثانیه اول حرکت با انتخاب تصادفی سرعت زاویه‌ای
قاب‌ها الف) شتاب شعاعی ب) شتاب مماسی



شکل ۱۰- تغییرات مؤلفه‌های شتاب ثقل در ۱۰۰۰ ثانیه اول حرکت از دیدگاه ذره در حال دوران با انتخاب تصادفی سرعت زاویه‌ای