

مقایسه رفتار استاتیکی و دینامیکی پیگر بندیهای مختلف رباتهای الاستیک

دکتر محسن بهرامی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندس منصور توفیقی

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

یکی از عوامل کاهش دقت نقطه انتهایی رباتها تغییر شکل الاستیکی سازه ربات تحت نیروهای استاتیکی یا دینامیکی است. در این مقاله رفتار الاستیکی پیگر بندیهای مختلف رباتها بررسی می شود و نشان داده می شود که خطای حاصل از اعمال نیروی متشابه استاتیکی به نقطه انتهایی پیگر بندیهای مختلف رباتها و همچنین فرکانس طبیعی و پاسخ دینامیکی پیگر بندیهای مختلف متفاوت است. مطالعه خطا و پاسخ دینامیکی بر روی یک ربات 2R صفحه ای صورت گرفته است و برای مطالعه فرکانس طبیعی از یک ربات بخصوص 3R استفاده شده است.

Study of Static and Dynamic Behavior of Different Configuration of Elastic Robot Arm

M. Bahrami, Ph.D

Mech. Eng. Dept. AmirKabir Univ. of Tech.

M. Tofighi, MSc.

Mech. Eng. Dept. AmirKabir Univ. of Tech.

ABSTRACT

One of the main causes of robot end effector position inaccuracies under static and dynamic loadings is the elasticity of the arm. In this work the elastic behavior of different possible configurations of a planar 2R and a spatial 3R robot arm is studied. It is shown that the position error under static loads applied to the end effector, and natural frequencies and dynamic responses are different for different configurations.

رباتها است. عوامل زیادی باعث می شوند که موقعیت نقطه انتهایی با محل پیش بینی شده متفاوت باشد. یکی از عوامل ایجاد خطا، تغییر شکل الاستیکی ربات است. مطالعات زیادی در مورد فرموله کردن و کنترل مکانیزم های الاستیک صورت گرفته است. از جمله اولین مطالعات در این زمینه فرموله کردن یک مکانیزم چهار بازوئی الاستیک توسط Winfery است (۱). توسط Sadler و Sandor با روش المانهای محدود و جرم متمرکز مکانیزم های الاستیک فرموله شده است (۲). هم چنین فرموله کردن بازوهای الاستیک به روش المانهای محدود انجام شده است (۳). شاهین پور و مقداری، رفتار الاستیکی یک ربات 2R

لغات کلیدی:

Workspace	فضای کاری
Configuration	پیگر بندی
End Point	نقطه انتهایی
SAP IV	سپ

۱- مقدمه

دقت نقطه انتهایی رباتها یکی از موارد مهم در طراحی و کنترل

تحت بارگذاری استاتیکی را به روش ماتریسی فرموله کرده‌اند (۴) وهم-چنین مشخصه تغییر شکل الاستیکی ربات Puma 560 را بررسی کرده‌اند (۵). از جمله مطالعات در مورد کنترل مکانیزم‌های الاستیک، کنترل یک مکانیزم دوبازویی دو مفصلی با سختی گسترده است که توسط Book و Maizza neto و Witney صورت گرفته است (۶). برای جبران خطای الاستیکی، نظریات متعددی از جمله کنترل فعال (۷) ارائه شده است. علی‌رغم مطالعات زیادی که تاکنون انجام شده است هنوز برای دستیابی به دقت بالاتر کوشش می‌شود، ولی توجهی به این مطلب نشده است که برای هر نقطه داخل فضای کاری ربات‌ها، معمولاً بیش از یک پیگیربندی وجود دارد (۸). قبلاً نشان داده شده است که پیگیربندی‌های مختلف یک مکانیزم صلب برای حرکت نقطه انتهایی در مسیر مشخصی دارای مشخصه‌های سینماتیکی و دینامیکی متفاوت می‌باشد (۹).

در این مقاله خطای نقطه انتهایی دو پیگیربندی ربات 2R در اثر اعمال نیروی واحدی به نقطه انتهایی محاسبه و مقایسه شده است. این مطالعه بر روی ربات‌ها با مفاصل صلب و با مفاصل الاستیک صورت گرفته است. سپس پاسخ دینامیکی دو پیگیربندی منتهی به یک نقطه ربات 2R تحت اعمال یک نیروی پله‌ای مقایسه شده است. برای مطالعه فرکانس طبیعی از ربات 3R خاصی استفاده شده است.

۲- ایجاد نظریه

برای نشان دادن ایده تفاوت مشخصه الاستیکی پیگیربندی‌های مختلف ربات‌ها از یک ربات 2R استفاده شده است. مشخصات این ربات در جدول ۱ دیده می‌شود.

پارامتر	بازوی اول	بازوی دوم
L_1 (cm)	۷۰	۴۰
I_1 (cm ⁴)	۱۴/۲۴	۱۴/۲۴
A_1 (cm ²)	۴/۱۲	۴/۱۲
ν	۰/۳	۰/۳
E (N/cm ²)	۰/۲۱×۱۰ ^۸	۰/۲۱×۱۰ ^۸
ρ (Kg/cm ³)	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۷۸

جدول ۱: مشخصات ربات 2R

که L_1 و L_2 و A_1 و ν و E و ρ به ترتیب عبارتند از طول، ممان اینرسی، سطح مقطع، ضریب پواسن، مدول یانگ و جرم مخصوص بازوی زام. این ربات توسط دو پیگیربندی می‌تواند به نقاط داخل فضای کاری اش دسترسی داشته باشد که این دو پیگیربندی در شکل ۱ با $AB'C$ و ABC نشان داده شده‌اند، به ترتیب آنها را Elbow-up و Elbow-down می‌نامیم.

ربات در صفحه XY طوری در نظر گرفته شده است که نقطه انتهایی روی محور Y ها باشد و دو بازو عمود بر یکدیگر باشند، سپس پیگیربندی دیگر منتهی به همان نقطه محاسبه شده است. نیروی ۱۰۰۰ نیوتن تحت زاویه ۵۰ درجه (در مختصات کلی Global) به نقطه انتهایی هر دو پیگیربندی اعمال شد (شکل ۱). فرض می‌شود که

محرك (Actuator) های مفاصل به طور کامل فعال باشند که در این صورت سختی پیچشی آنها را می‌توان بی‌نهایت در نظر گرفت (۴). تغییر مکان نقطه انتهایی برای دو پیگیربندی از روش کاستگلیانو محاسبه شد. بردار تغییر مکان نقطه انتهایی دو پیگیربندی در شکل ۱-ب نشان داده شده است و مقادیر عددی آنها در جدول ۲ مقایسه شده است.

تغییر مکان	Elbow-up	Elbow-down
مولفه X خطا (cm)	۰/۲۸۵۵	۰/۵۸۵۶
مولفه Y خطا (cm)	-۰/۹۹۸۷×۱۰ ^{-۲}	۰/۲۳۷۹
جهت پرداز خطا (درجه)	-۳۰	۲۲/۰۹۷°
قدر مطلق خطا (cm)	۰/۲۸۵۶	۰/۶۳۱۴

جدول ۲: تغییر مکان نقطه انتهایی دو پیگیربندی شکل ۱

چنانچه از شکل ۱-ب و جدول ۲ واضح است، بردار خطای نقطه انتهایی هم از نظر مقدار و هم از نظر جهت برای دو پیگیربندی متفاوت است. ذیلاً "مطالعه کلی تری صورت می‌گیرد.

۳- خطای الاستیکی نقطه انتهایی تحت بارهای استاتیکی

برای تعمیم ایده فوق دو پیگیربندی ربات 2R با مشخصات جدول ۱ در وضعیت هندسی شکل ۲ در نظر گرفته شدند. نیروی ۱۰۰۰ نیوتن به دست ربات اعمال شد و حول نقطه انتهایی ۵ درجه به ۵ درجه دوران داده شد (شکل ۲). برای هر زاویه اعمال نیرو، تغییر مکان نقطه انتهایی برای دو پیگیربندی محاسبه و مقایسه شد. تغییر مکان‌ها با استفاده از برنامه المانهای محدود سب توسط یک برنامه پیش‌عامل به دست آمدند (۱۰). شکل ۵ تغییر مکان کلی و مولفه‌های آن را برای دو پیگیربندی شکل ۲ برحسب زاویه اعمال نیرو نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۵ واضح است برای تمامی جهات اعمال نیرو به نقطه انتهایی، مقدار خطای حاصله برای دو پیگیربندی متفاوت است و شدت این اختلاف بستگی به جهت اعمال نیرو دارد. برای مطالعه بیشتر بار دیگر همین مطالعه با در نظر گرفتن الاستیسیته مفاصل صورت گرفت. یعنی وقتی که سختی پیچشی مفصل اول $K_1 = ۰/۵ \times 10^{-8}$ N.cm/rad و سختی پیچشی مفصل دوم $K_2 = ۰/۱ \times 10^{-8}$ N.cm/rad باشد، نتایج در شکل ۶ مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل ۵ و ۶ واضح است که وقتی الاستیسیته پیچشی مفاصل در نظر گرفته شود، اختلاف رفتار الاستیکی پیگیربندی‌های مختلف از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. مثلاً چنانچه نیروی ۱۰۰۰ نیوتن در امتداد ۳۰ درجه به نقطه انتهایی دو پیگیربندی ربات با مفاصل صلب و ربات با مفاصل الاستیک اعمال شود (شکل ۲) اختلاف خطای الاستیکی دو پیگیربندی ربات با مفاصل صلب ۳۱/۱٪ و در مورد ربات با مفاصل الاستیک ۳۵/۷٪ خواهد بود.

۴- پاسخ دینامیکی نقطه انتهایی تحت بارهای دینامیکی

برای مطالعه پاسخ دینامیکی پیگیربندی‌های مختلف ربات‌ها تحت بار دینامیکی، ربات 2R با مشخصات مندرج در جدول ۱، در موقعیت هندسی شکل ۳ قرار گرفته و نیروی دینامیکی پله‌ای ۱۰۰۰ نیوتن،

است. یعنی مقدار خطا و جهت آن و زمان لازم تا استهلاک ارتعاش و درصد استهلاک ارتعاش پس از زمان معینی از اعمال نیرو برای دو پیکربندی متفاوت است.

۵- فرکانس طبیعی

برای مطالعه فرکانس طبیعی ربات

$$(a_1 = 0, a_2 = 90, S_1 = S_2 = S_3 = 0.0) 3R$$

با مشخصات جدول ۴ در نظر گرفته شد. علت عدم انتخاب ربات 2R برای این مطالعه آن است که دو پیکربندی مختلف ربات 2R قرینه هستند و در نتیجه برای مطالعه فرکانس طبیعی مناسب نیست.

پارامتر	بازوی اول	بازوی دوم	بازوی سوم
L_i (cm)	۷۰	۴۰	۲۰
I_i (cm ⁴)	۱۴/۲۴	۱۴/۲۴	۱۴/۲۴
A_i (cm ²)	۴/۱۲	۴/۱۲	۴/۱۲
ν	۰/۳	۰/۳	۰/۳
E (N/cm ²)	۰/۲۱×۱۰ ^۸	۰/۲۱×۱۰ ^۸	۰/۲۱×۱۰ ^۸
ρ (Kg/cm ³)	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۷۸

جدول ۴: مشخصات ربات 3R

ربات 3R مورد نظر با چهار پیکربندی مختلف می‌تواند به نقطه $(X = 0, Y = 75, Z = 15)$ برسد (شکل ۴). فرکانس طبیعی و تغییر مکان ماکزیمم در اثر فرکانس طبیعی برای چهار پیکربندی فوق محاسبه و مقایسه شد. نتایج فوق به ترتیب در جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌شود. همانطور که از جدول ۵ واضح است فرکانس طبیعی پیکربندی‌های مختلف متفاوتند.

کمیت	پیکربندی اول	پیکربندی دوم	پیکربندی سوم	پیکربندی چهارم
فرکانس طبیعی مو د اول	۴/۳۷۳	۴/۵۵۵	۴/۳۷۳	۴/۵۵۵
فرکانس طبیعی مو د دوم	۴/۵۲۱	۴/۷۹۵	۴/۵۲۱	۴/۷۹۵

جدول ۵: مقایسه فرکانس طبیعی مو د اول و مو د دوم ۴ پیکربندی مختلف ربات 3R در شکل ۴ (فرکانس بر حسب سیکل بر ثانیه)

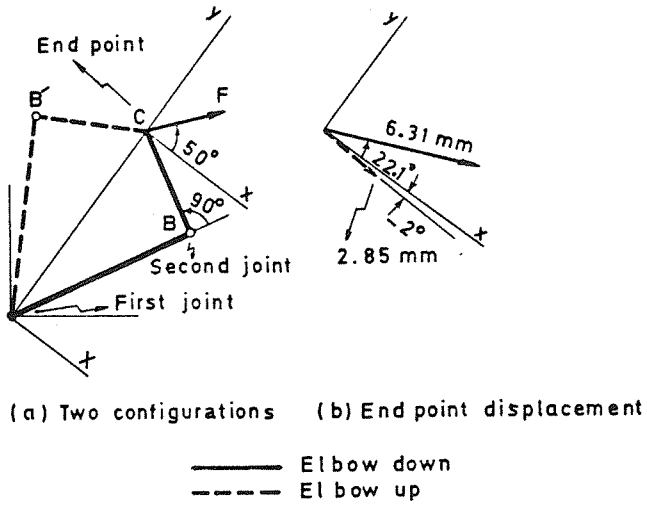
Eigen vector (mode 1)	پیکربندی اول	پیکربندی دوم	پیکربندی سوم	پیکربندی چهارم
قدر مطلق خطا (میلیمتر)	۷/۲۰۷	۱۰/۶۷۵	۷/۲۰۷	۱۰/۶۷۵
مولفه X بردار خطا (میلیمتر)	-۱/۴۳۲۹	۰/۵۲۴۲	-۱/۴۳۲۹	۰/۵۲۴۲
مولفه Y بردار خطا "	۱/۷۳۹۳	-۲/۲۵۵۹	۱/۷۳۹۳	-۲/۲۵۵۹
مولفه Z بردار خطا "	۶/۸۴۶	۹/۰۲۲۲	۶/۸۴۶	۹/۰۲۲۲

جدول ۶: مقایسه ماکزیمم خطای نقطه انتهایی (Eigen vector) در اثر فرکانس طبیعی (مود اول)

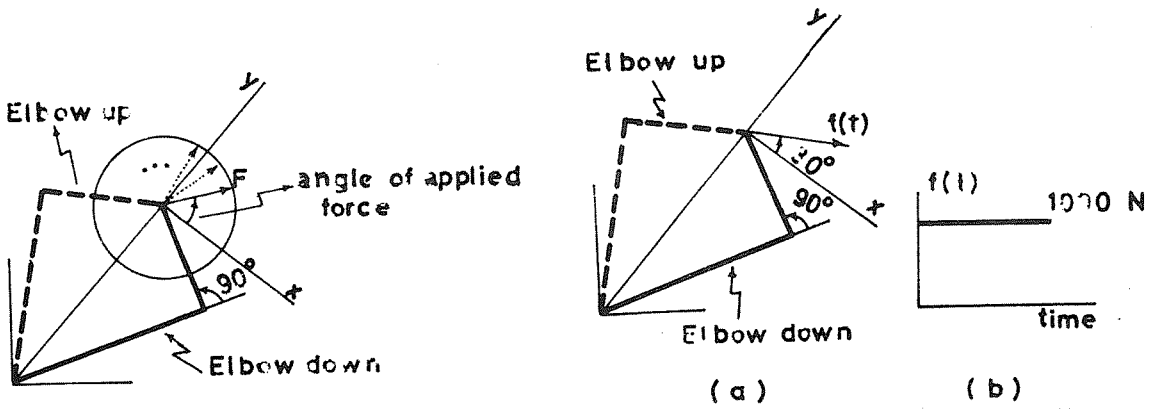
ت زاویه ۳۰ درجه (در محورهای کلی) به دست ربات اعمال شد (نکل ۳). مولفه X و Y پاسخ دینامیکی دو پیکربندی مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، در هر دو شکل مذکور مقیاس پاسخ دینامیکی دو پیکربندی متفاوت است و این به آن علت است که امکان مقایسه دو منحنی مهم شود. در جدول ۳ مقادیر عددی پاسخ دینامیکی دو پیکربندی ایسه شده‌اند. همان طوری که جدول ۳ و منحنی‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند، پاسخ دینامیکی نقطه انتهایی دو پیکربندی تحت اعمال نیروی دینامیکی مشترک به نقطه انتهایی دو پیکربندی اساساً متفاوت

رامتر	Elbow - up	Elbow - down
ندار خطا ماکزیمم (میلیمتر)	۸/۱۸۶	۱۴/۴۰۵
اویه بردار خطا ماکزیمم (درجه)	-۱۱/۲۶۶۷	۱۷/۶۶۸
ولفه X خطا ماکزیمم (میلیمتر)	۸/۰۲۹۵	۱۰/۹۰۱
ولفه Y خطا ماکزیمم (میلیمتر)	۱/۵۹۹	۳/۴۷۲
مان بروز خطای ماکزیمم پس از اعمال نیرو (ثانیه)	۰/۱	۰/۱
مان لازم برای استهلاک ۹۵٪ ارتعاش (ثانیه)	۰/۹۱	۰/۸۲
درصد استهلاک (ثانیه)	۰/۲۸	۰/۲۸
ثانیه پس از اعمال نیرو	۲۴۲٪	۲۲٪

جدول ۳: مقایسه پاسخ دینامیکی دو پیکربندی ربات 2R تحت نیروی دینامیکی پله ای ثابت ۱۰۰۰ نیوتنی در امتداد ۳۰ درجه

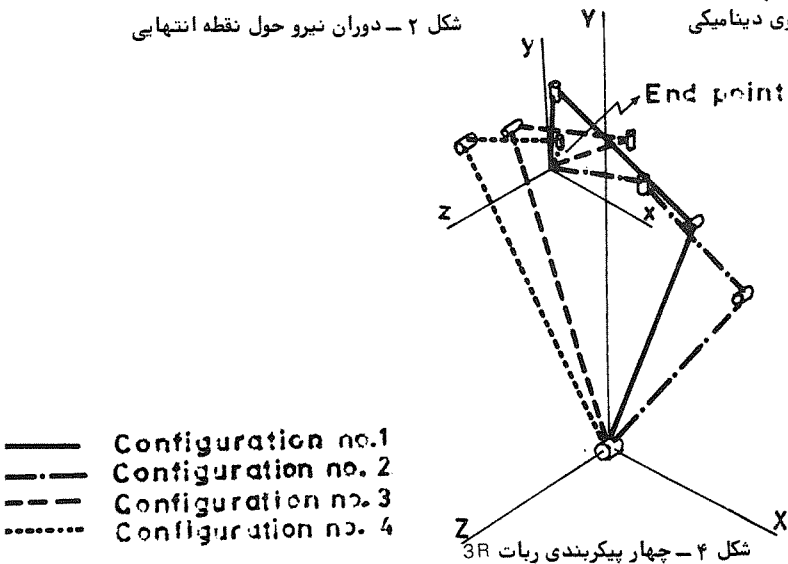


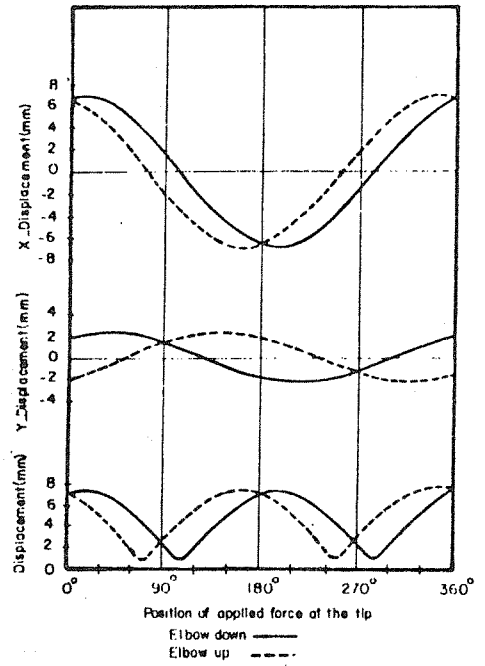
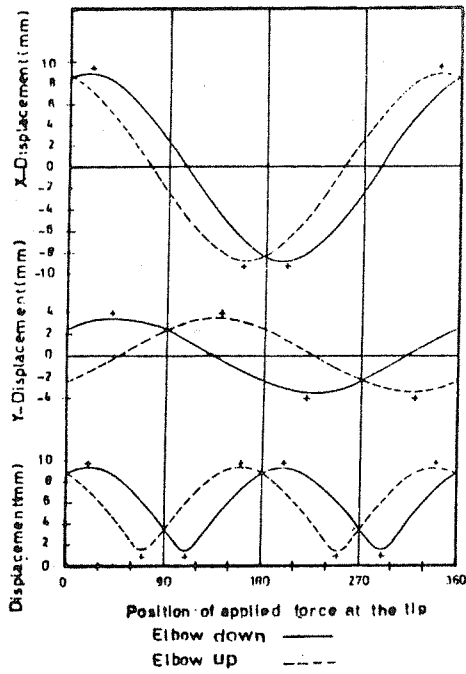
شکل ۱- دو پیکربندی ربات 2R تحت نیروی ۱۰۰۰ نیوتن



شکل ۲- دوران نیرو حول نقطه انتهایی

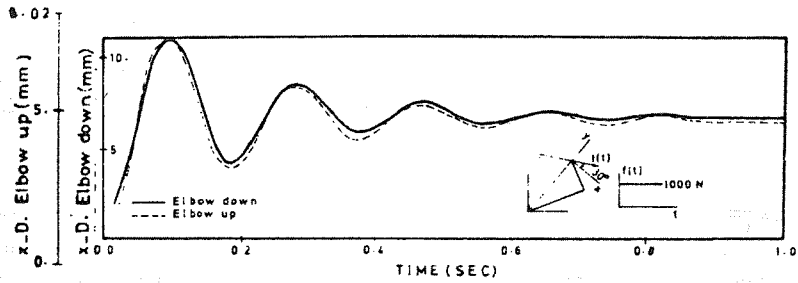
شکل ۳- دو پیکربندی ربات 2R تحت نیروی دینامیکی



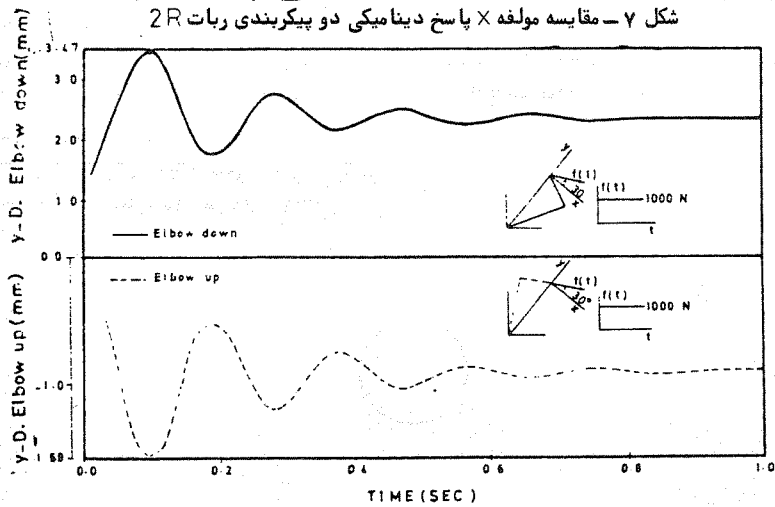


شکل ۵ - خطای نقطه انتهایی برحسب زاویه اعمال نیرو (ربات با مفصل صلب)

شکل ۶ - خطای نقطه انتهایی برحسب زاویه اعمال نیرو (ربات با مفصل الاستیک)



شکل ۷ - مقایسه مولفه X پاسخ دینامیکی دو پیکربندی ربات 2R



شکل ۸ - مقایسه مولفه Y پاسخ دینامیکی دو پیکربندی ربات 2R

در جدول ۶ مولفه‌های X و Y و Z تغییر مکان نقطه انتهایی در اثر مود اول فرکانس طبیعی برای ۴ پیکربندی شکل ۴ مقایسه شده‌اند. همانطور که از این جدول واضح است خطای حاصل از ماکزیمم تغییر مکان ناشی از فرکانس طبیعی برای پیکربندی‌های مختلف منتهی به یک نقطه متفاوت است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

چنانچه نشان داده شد، مشخصه الاستیکی پیکربندی‌های مختلف ربات‌ها اساساً متفاوت است. از دیدگاه استاتیکی این تفاوت بدین نحو بیان می‌شود که خطای ناشی از اعمال نیروی مشابهی به نقطه‌ی انتهایی پیکربندی‌های مختلف ربات‌ها هم از نظر مقدار و هم از نظر جهت متفاوت است. بنابراین برای هر جهت اعمال نیروی خارجی، یکی از پیکربندی‌ها تغییر شکل الاستیکی کمتری می‌دهد و یا به عبارت دیگر منجر به خطای کمتری می‌شود، یعنی دقت بالاتری دارد. از دیدگاه دینامیکی، فرکانس طبیعی و بردار مشخصه پیکربندی‌های مختلف متفاوت است. همچنین پاسخ دینامیکی نقطه انتهایی پیکربندی‌های مختلف تحت اثر اعمال نیروی دینامیکی مشابه متفاوت است. این تفاوت نه تنها در مقدار و جهت بردار تغییر مکان نقطه انتهایی است بلکه شکل

منحنی پاسخ دینامیکی و نحوه استهلاک آنها نیز متفاوت است. بنابراین در صورت حساسیت طراحی نسبت به یک فرکانس خاصی می‌توان با تغییر پیکربندی فرکانس طبیعی آن را تغییر داد و یا در مواردی که پاسخ دینامیکی نقطه انتهایی و نحوه استهلاک آن مورد نظر باشد به انتخاب پیکربندی مناسب می‌توان پاسخ دینامیکی نقطه انتهایی را با نظر دامنه و یا نحوه استهلاک تغییر داد.

نتایج فوق می‌تواند برای طراحی یک ربات برای طی مسیر خاصی و یا کارکرد خاصی مورد استفاده قرار بگیرد، بدین ترتیب که قیود عملی مفاصل را طوری قرار داد که از پیکربندی با مشخصه الاستیکی مناسب استفاده شود تا از دقت بالاتری استفاده گردد و با مشخصه دینامیکی مورد نظر تامین شود.

به‌عنوان یک نتیجه، قبل از هرگونه اقدامی برای کاهش و یا حذف خطای نقطه انتهایی به روشهایی، از قبیل کنترل فعال، باید انتخاب پیکربندی مناسب بررسی شود، انتخاب پیکربندی مناسب با توجه به جهت اعمال نیروی خارجی و دقت مورد نیاز باید صورت بگیرد. این مطالعه می‌تواند به‌عنوان بخشی از مطالعه برای طراحی و کنترل ربات‌ها در نظر گرفته شود.

منابع:

- R.C. Winfrey, "Dynamic Analysis of Elastic Link Mechanisms by Reduction of Coordinate", Tran. ASME, J. Eng. for Industry Vol. 94, No. 1, PP. 547 — 589 (1972).
 - J. P. Sadler, and G.N. Sandor, Tran. ASME, J. Eng. Industry, 13, Vol. 95, No. 2, (1973).
 - Bahgat. B. M., Willment K. D., "Finite Element Vibrational Analysis of Planar Mechanisms", J. Mechanism and Machine Theory, Vol. 11, PP. 47 — 71 (1976).
 - M. Shahinpoor and A. Meghdari, "Combined Flexured — joint — Stiffness Matrix and the Elastic Deformation of a Servo — Controlled Two — Link Robot Manipulator", Robotics Int. J., (1986).
 - A. Meghdari, M. Shahinpoor, "Elastic Deformation Characteristics of a PUMA 560 Robot Manipulator", international Journal of Robotic and Automation, Jan. (1987).
 - 6— A. Zalukey and D.E. Haradt, "Active Control of Robot Structure Deflection", Trans. ASME, J. Dyn. Sys. Measurement and Control, Vol. 106, PP. 63—69 (1984).
 - 7— W.J. Book, A. Maizza — neto, D.E. Whitney, "Feedback control of two Beam, two joint Systems with Distributed Flexibility" trans. ASME, J. Dyn. Sys. Measurement and Control, PP. 424 — 431, (1975).
 - 8— J. Rastegar, P. Deravi, M. Bahrami, "Manipulator Working Space and Number of Possible Configuration", 11th Canadian cong. of Applied Mech., Edmonton, Canada, (1987).
 - 9— M. Bahrami, P. Deravi, J. Rastgar, "The effect of Selected Working configuration on Dynamic characteristics of Manipulator" Int. Conf. of Automation, Spain (1987).
- ۱۰- بهرامی، محسن (و) توفیقی، منصور. "پیش‌عامل برای برنامه‌های محدود SAP IV". تهران. مجله علمی و فنی امیرکبیر. سال سوم. پائیز و زمستان ۱۳۶۷. شماره ۰۱۰ ص ۷۵-۷۹.

