همكاري رباتها در جابجايي جسم نامعين توسط كنترلر امپدانس چندگانه

فرزاد چراغپور سماواتي[1] وسيد علي اكبر موسويان[2]*

[1]دانشجوي دكتري مكانيك طراحي كاربردي دانشكده مهندسي مكانيک - دانشگاه خواجه نصير

[2]دانشيار دانشكده مهندسي مكانيك - دانشگاه خواجه نصير

(تاريخ دريافت ۸۵/۱۱/۷ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۱۰/۹ , تاريخ تصويب ۸۷/۱/۲۰)

چكيده

در جابجايي اجسام توسط بازوهاي رباتيک، اگر مشخصات جرمي جسم معلوم نباشد بايد با استفاده از روش هاي شناسايي پارامتر، به مشخصات مزبور دست يافت. پس از تعيين مشخصات جرمي، كنترل حركت ربات جهت جابجايي جسم مورد جابجايي، موضوع ديگري براي پژوهش است. در اين مقاله، تعيين پارامترهاي اينرسي جسم شامل جرم، ممان‌هاي اينرسي جسم حول محورهاي اصلي، و مختصات مركز جرم جسم مورد نظر مي‌باشد و فرض مي‌شود خصوصيات هندسي جسم كاملاً بر اساس اندازه‌گيري هاي اپتيكي معلوم هستند. پس از تعيين پارامترهاي اينرسي جسم، دو ربات همكار پوما ۵۶۰ آن را در طول يک مسير حركت مشخص جابجا مي‌نمايند كه در اين مسير برخوردي نيز با يک مانع رخ مي‌دهد. كنترلر امپدانس چندگانه، به كنترل رفتار حركتي جسم در تعامل نيرويي با مانع پرداخته، و با وجود خطاي تخمين در پارامترهاي ممان‌هاي اينرسي، بخوبي از عهدۀ كنترل حركت جسم بر روي مسير معين مطلوب برمي‌آيد.

واژه هاي كليدي: شناسايي پارامتر - مدلسازي ديناميكي- كنترل نيرو و امپدانس - كنترل امپدانس چندگانه

مقدمه

جابجايي اجسام، از مهمترين كاربرد ربات‌ها در صنايع است. در كاربردهايي مانند جوشكاري و نقاشي، هزينة بالاي نيروي كار و از سوي ديگر دقت زياد ربات‌ها، بازار تقاضاي چشمگيري براي آنها ايجاد نموده است. در بيشتر اين عمليات، بكارگيري استراتژي‌هاي كنترل موقعيت براي انجام وظايف كافي است، [۱]. در عملياتي چون مونتاژ و پوليشكاري، مي‌بايست علاوه بر كنترل موقعيت ربات، نيروهايي را نيز كه در تعامل با محيط اطراف ظاهر مي‌شوند، كنترل نمود. ازاين‌رو، قانون هاي كنترلي مختلفي براي كنترل همزمان حركت و نيرو در بازوهاي رباتيک، ارائه و توسعه يافته‌اند. فارغ از تنوع اين قانون ها، مي‌توان انواع روش هاي مختلف كنترل نيرو را در دو رهيافت اصلي كنترل تركيبي موقعيت/ نيرو و كنترل امپدانس طبقه‌بندي نمود.

در الگوريتم هاي كنترل امپدانس، براي ايجاد نيروي كنترلي، به طور همزمان از بازخورد سيگنالهاي موقعيت، سرعت و شتاب ربات استفاده مي‌شود. در اين شرايط، ربات همانند يک امپدانس مكانيكي است كه ميان نيرو و حركات آن، رابطة مطلوب تعريف شده برقرار است. بر خلاف الگوريتمهاي كنترل موقعيت/ نيرو، كه استراتژي كنترلي بر مبناي فيدبک كردن نيرو استوار است، در الگوريتم هاي كنترل امپدانس، موقعيت مجري نهايي به شكل صريح مورد كنترل قرار نمي‌گيرد و نيروي تعامل شده با محيط نيز به شكل صريح كنترل نمي‌شود، بلكه كنترلر رابطه‌اي ديناميكي ميان موقعيت، سرعت و نيروي اعمالي مجري نهايي ربات در نظر مي‌گيرد و يک قانون كنترلي، به صورت معادله‌اي كه مي‌بايست بر رفتار مجري نهايي حاكم باشد، تمهيد مي‌نمايد [۱].

ايدة كنترل امپدانس چندگانه[1]، در سال ۱۹۹۸ ارائه شده‌است. اين الگوريتم توانايي ايجاد هماهنگي براي همكاري چند بازوي رباتيک همكار را داراست. الگوريتم MIC، يک امپدانس مرجع را به جسم مورد جابجايي، همچون الگوريتم كنترل امپدانس جسم[2] [۲]، و به‌طور همزمان به هر يک از مجري‌هاي نهايي ربات، اعمال مي‌نمايد، بگونه‌اي كه كليه اجزاي تحت كنترل، با الگوي امپدانسي مشابهي رفتار خواهند نمود. بدين ترتيب، علاوه بر كنترل ديناميكي سيستم، و خنثي شدن اثرات اينرسي جسم مورد جابجايي، در مواردي كه جسم داراي انعطاف‌پذيري است، الگوريتم MIC، عملكرد بهتري از الگوريتمهاي مشابه از خود نشان مي‌دهد[۱۲]. همچنين الگوريتم MIC براي سيستم‌هاي رباتيک با پاية متحرک نيز قابل بكاربري است. اين الگوريتم براي مجموعة

* نويسنده مسئول : تلفن : ۷۷۳۳۴۳۳۸ , فاكس : ۷۷۳۴۳۳۰۰ , Email: moosavian@kntu.ac.ir

مشاركت‌كنندة چند بازو با پاية متحرك، نظير ربات‌هاي فضايي، كه در آن بازوهاي عامل به يک پايه با پرواز آزاد نصب شده‌اند، توسعه يافته است [۳]و[۲۱].

تاكنون، در پژوهشهاي انجام گرفته در به‌كارگيري الگوريتم MIC، فرض بر آن بوده است كه پارامترهاي جسم جابجا شده كاملاً معلوم است. بديهي است اين فرض در كاربردهايي كه ربات در محيطهاي جديد قرار مي‌گيرد و قصد جابجايي اجسام نامشخصي را دارد ، نيازمند بازنگري است. در اين مقاله روشي براي بكاربري الگوريتم در چنين مواردي معرفي شده است.

فرآيند شناسايي پارامتر در رباتيک در سه سطح مطرح مي‌شود[۴]. سطح اول، شامل شناسايي پارامترهاي مربوط به توصيف سينماتيک ربات است. در سطح دوم، شناسايي پارامترهاي مدل ديناميكي ربات مطرح مي‌شود و در سطح سوم، تعيين پارامترها در سطح مفاصل، نظير اصطكاک و مشخصات عملگر موردنظر است.

منظور از شناسايي پارامتر در اين نوشتار، صرفاً تعيين پارامترهاي اينرسي جسم مورد جابجايي، شامل: جرم، ممان‌هاي اينرسي جسم حول محورهاي اصلي، و مركز جرم جسم مي‌باشد و فرض برآن‌است كه خصوصيات هندسي جسم كاملاً معلوم هستند. زيرا در مواردي كه ربات در محيط هايي ناشناخته عمل مي‌نمايد، همچون ربات امدادگر در منطقه زلزله‌زده، مي‌توان از يک فرآيند پردازش تصوير به كمك سازوكارهاي بينايي براي تشخيص خصوصيات ابعادي جسم يا محيط اطراف بهره جست، [۵].

منطق مربوط به طراحي الگوريتم شناسايي پارامترهاي اينرسي، مشتمل بر چند نكتة اساسي است، كه درنظرگرفتن هريک، شكل و كاربرد الگوريتم را تغيير مي‌دهد. خطي يا غيرخطي بودن فرم معادلات شناسايي در الگوريتم شناسايي تاثيرگذار است؛ با توجه به اينكه مدل خطي تنها براي يک حالت از مجموعه حالات قرارگيري ربات برقرار است، براي تحت پوشش قرار دادن تمامي موقعيتهايي كه ربات مي‌تواند در فضاي كاري قرار گيرد، معادلات غيرخطي حركت نياز است[۶-۷]. با توجه به اينكه پارامترهاي هندسي مي‌توانند طي يک فرآيند كاليبراسيون، با دقتي بالا شناسايي شوند، مي‌توان اين پارامترها را دانسته فرض كرد؛ در اين صورت پارامترهاي مدل بصورت تابعي خطي از پارامترهاي اينرسي خواهند بود[۸].

سيگنالهاي مورد استفاده در فرآيند شناسايي پارامترهاي اينرسي مي‌توانند مجموعه‌اي از سيگنال هاي موقعيت (q)، سرعت ($\dot{q}$) و شتاب($\ddot{q}$) مربوط به متغيرهاي مفصلي ربات و همچنين مقادير نيرو و گشتاور(τ) باشند. براساس اين كه اطلاعات مربوط به اين مقادير به چه شكل اندازه‌گيري مي‌شوند، مي‌توان روش هاي متفاوتي براي تخمين پارامترهاي اينرسي در نظر گرفت.

به عنوان نمونه، تخمين پارامترهاي اينرسي مي‌تواند با استفاده از مقادير نيروها و گشتاورهاي مفاصل ربات، همراه با مقادير موقعيت و سرعت و شتاب مفاصل انجام گيرد[۹]. دراين روش، هرچند اين مزيت وجود دارد كه در پياده‌سازي به تجهيزاتي چون سنسورهاي نيرو/گشتاور احتياج نخواهد بود، اما خطاهاي مربوط به اندازه‌گيري گشتاور در مفاصل، ناشي از ديناميک مدل نشده عملگرها و اصطكاک مدل نشده، به خطاهاي تخمين افزوده مي‌شوند.

در روشي ديگر، پاية ربات بر روي سنسور شش درجه آزادي نيرو/گشتاور نصب مي‌شود، و نيروها و گشتاورهاي عكس‌العملي روي پايه در موقعيتهاي مختلف ربات، براي تخمين پارامترهاي اينرسي ربات،اندازه‌گيري مي‌شود [۱۳-۱۴]. هرچند اين روش براي برخي از كاربردها موثر است، اما به‌كمک آن محاسبة تمامي پارامترهاي اينرسي ربات امكان‌پذير نيست. همچنين اين روش بصورت استاتيكي ارائه گرديده است و بصورت ديناميكي قابل اجرا نمي‌باشد.

اجراي الگوريتم شناسايي پارامترهاي ربات مي‌تواند به صورت برخط[۳] يا خارج خط[۴] انجام شود. در روش هايي كه به صورت خارج خط انجام مي‌شوند، اين امكان وجود دارد كه فرايند تخمين را با دقت و زمان بيشتر، مشابه فرايند كاليبراسيون، و با حركت دادن ربات در جهاتي مستقل براي يافتن پارامترهاي اينرسي انجام داد[۱۵]. هرچند در اين گونه روشها با توجه به كم بودن اثرات نويز دقت بالاتري به دست مي‌آيد ولي محدوده بكاربري اين روشها محدود است.

الگوريتم هايي كه بصورت *برخط* كار مي‌كنند، اين مزيت را دارند كه مي‌توانند در شرايطي كه پارامترهاي اينرسي ربات در حين كار دچار تغيير مي‌شوند، به كار گرفته شده و پارامترهاي تغيير يافته را شناسايي نمايند. به عنوان مثال، در يک ربات با پايه متحرک، كه انرژي حركتي از مخزن سوخت تامين مي‌شود، تغيير در ميزان سوخت مخزن و يا حمل نمودن جسمي خارجي، مي‌تواند باعث تغيير در جرم،

موقعيت مركز جرم، و اينرسي ربات گردد. از نمونه‌هاي اين روش‌ها مي‌توان به روش ارائه شده در [۱۰] اشاره نمود. در اين روش، يک الگوريتم تخمين بهينة ديناميکي، براي تخمين پارامترهاي اينرسي جسمي که توسط رباتي متحرک در زميني ناشناخته و ناهموار برداشته شده، ارائه شده است.

هرچند اجراي برخط الگوريتم تخمين، کاربردهاي آن را به‌شدت توسعه مي‌دهد، اما با توجه به حجم بالاي محاسبات، اين امر به قدرت پردازشگر ربات بستگي خواهد داشت. لازم به ذکر است که طراحي مانوري که توسط ربات به جسم داده مي‌شود، تا فرايند شناسايي پارامترهاي اينرسي انجام گيرد، در تمامي روش‌ها، از اهميت ويژه‌اي برخوردار است.

در اين مقاله، يک الگوريتم تخمين ديناميکي و برخط ارائه مي‌شود که بر پاية اطلاعات مربوط به انکودرهاي مفاصل، و سنسورهاي سرعت، همچنين سنسورهاي نيرو/گشتاور در مجري نهائي، فرآيند شناسايي را انجام مي‌دهد. مسيرهاي شناسايي که به واسطه آنها فرآيند شناسايي پارامترهاي ديناميکي يك ربات در زمان مناسب و با دقتي مناسب شناسايي گردند، تمهيد مي‌شوند. از مزيت هاي الگوريتم ارائه شده، اجراي ديناميکي و برخط آن، با قابليت تعدادي نمونه‌گيري مي‌باشد.

الگوريتم تخمين‌گر

روشهاي متعددي براي بيان معادلات الگوريتم تخمين بيان شده‌اند که هريک بنابر ويژگيهاي معرفي شده در بخش قبل طرح‌ريزي يافته‌اند. از جمله مشهورترين اين روش‌ها مي‌توان به روش استفاده از معيار حداقل مربعات خطا، [۱۱]و[۱۶]، روش استفاده از وارون‌ساختگي و تجزيه ماتريس به مقادير تکين، [۱۷]، و روش استفاده ازمدل انتگرالي در معادلات انرژي، [۱۸]، نام برد.

در اين مقاله، در فرمول بندي الگوريتم تخمين‌گر، از تلفيق روش‌هاي حداقل مربعات خطا و تجزيه ماتريس به مقادير تکين استفاده مي‌شود. الگوريتم از داده‌هاي انکودرهاي نسبي مفاصل ربات، سيگنال هاي موقعيت را اندازه‌گيري مي‌نمايد. همچنين سيگنال هاي سرعت به کمک تاکومتر، و سيگنال هاي شتاب در صورت امکان به وسيلة شتاب‌سنج اندازه‌گيري شده وگرنه تخمين عددي از آنها به‌عمل مي‌آيد، و در اختيار الگوريتم قرار مي‌گيرند. سيگنال هاي نيرو و گشتاور به وسيلة يک سنسور در مچ ربات، مولفه‌هاي نيرو و گشتاور را در سه راستاي مختصات اندازه‌گيري مي‌کنند. همچنين مقادير گشتاور موتورها در هر يک از مفاصل ربات در دسترس است.

براي فرمولاسيون تخمين پارامترهاي اينرسي، از معادلات نيوتن- اويلر استفاده مي‌شود. فرض مي‌شود که هر لينک ربات از نظر نيرويي نسبت‌به محيط اطراف ايزوله است و نيروي اينرسي بر روي هر مفصل را مي‌توان از شتاب لينک به دست آورد.

در آغاز، يک بازوي رباتيک با n مفصل دوراني در نظر گرفته مي‌شود. فرض کنيم هر لينکi داراي يک دستگاه مختصات محلي P_i است که مبدا آن بر روي مفصل i قرارگرفته‌است. بردار $\vec{p}_i$ مشخص‌کنندة موقعيت دستگاه P_i نسبت به دستگاه مختصات/اينرسي با مبدا O است، شکل(۱). در مرکز جرم لينک، دستگاه مختصات Q_i قرار مي‌گيرد که در راستاي محورهاي اصلي لينک انتخاب‌شده‌است. موقعيت مرکز جرم نسبت به مبدا دستگاه P_i، بوسيلة بردار موقعيت $\vec{c}_i$ مشخص‌مي‌شود؛ همچنين مرکز جرم نسبت به مرجع اينرسي O، به وسيلة بردار $\vec{q}_i$، مشخص‌شده‌است.

با توجه به معادلات نيوتن- اويلر حاکم بر حرکت لينکi ، خواهيم‌داشت:

$$ {}_q\vec{f}_i = \vec{f}_{ii} + m_i\vec{g} = m_i\ddot{\vec{q}}_i \quad (۱) $$

$$ {}_q\vec{n}_i = \vec{n}_{ii} - \vec{c}_i \times \vec{f}_{ii} = {}_q\bar{I}_i\dot{\vec{\omega}}_i + \vec{\omega}_i \times \left({}_q\bar{I}_i\vec{\omega}_i \right) \quad (۲) $$

که درآن:

${}_q\vec{f}_i$: نيروي خالص وارد بر لينکi ، روي دستگاه q؛

${}_q\vec{n}_i$: گشتاور خالص وارد بر لينک i حول مرکز جرم لينکi ، روي دستگاه q؛

$\vec{f}_{ij}$: نيرو در مفصل i ناشي از حرکت لينک j ؛

$\vec{n}_{ij}$: گشتاوردرمفصلi ناشي از حرکت لينک j ؛

m_i: جرم لينک i؛

${}_q\bar{I}_i$: ماتريس ممان‌اينرسي لينک حول مرکز جرم خودش؛

$\vec{\omega}_i$: بردار سرعت زاويه‌اي لينک؛

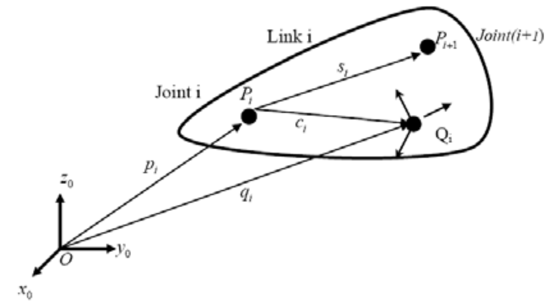
$\vec{g}$: بردار گرانش. $\vec{g} = [0,0,-9.8]\left(m/\sec^2\right)$

با توجه به اين که قبل از فرآيند تخمين، موقعيت مرکز جرم لينک $\vec{c}_i$، و شتاب آن $\ddot{\vec{q}}_i$ ، نامعلوم است، مي‌بايست اين جمله به طريقي محاسبه‌شود. ازاين‌رو شتاب مرکز جرم لينک i را به‌کمک شتاب مفصل i ، $\ddot{\vec{p}}_i$ ، بيان مي‌نماييم؛

$$\ddot{\vec{q}}_i = \ddot{\vec{p}}_i + \dot{\vec{\omega}}_i \times \vec{c}_i + \vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{c}_i) \quad (۳)$$

با جانشاني معادلة (۳) در (۱)، داريم:

$$\vec{f}_{ii} = m_i(\ddot{\vec{p}}_i - \vec{g}) + \dot{\vec{\omega}}_i \times m_i \vec{c}_i + \vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times m_i \vec{c}_i) \quad (۴)$$



شكل ۱ : مبدا دستگاه‌هاي مختصات.

اگر چه جملات $\vec{c}_i \times (\dot{\vec{\omega}}_i \times \vec{c}_i)$ و $\vec{c}_i \times (\vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{c}_i))$ به صورت دومجذوري در موقعيت نامعلوم مركز جرم $\vec{c}_i$ ظاهرشده‌اند، مي‌توان با بيان تنسور ممان‌اينرسي لينک i حول مفصل p، بيان‌شده در دستگاه اينرسي، ${}_p\vec{I}_i$، به‌جاي محاسبة آن حول مركزجرم، ${}_q\vec{I}_i$، اين جملات را حذف‌نمود.

$$\vec{n}_{ii} = (\vec{g} - \ddot{\vec{p}}_i) \times m_i \vec{c}_i + {}_p\vec{I}_i \dot{\vec{\omega}}_i + \omega_i \times ({}_p\vec{I}_i \vec{\omega}_i) \quad (۵)$$

براي اين كه بتوانيم معادلات را به شكل يک دستگاه معادلات خطي بازنويسي كنيم، اپراتورهايي را براي جملات نيرو و گشتاور تعريف مي‌كنيم.

$$\vec{\omega} \times \vec{c} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{=} [\vec{\omega} \times] \vec{c} \quad (۶)$$

$$\vec{I}\vec{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_x & 0 & \omega_y & \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & \omega_x & 0 & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}_{3\times 6} \begin{bmatrix} I_{xx} \\ I_{xy} \\ I_{xz} \\ I_{yy} \\ I_{yz} \\ I_{zz} \end{bmatrix}_{6\times 1} \stackrel{\Delta}{=} [\cdot\vec{\omega}] \begin{bmatrix} I_{xx} \\ I_{xy} \\ I_{xz} \\ I_{yy} \\ I_{yz} \\ I_{zz} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

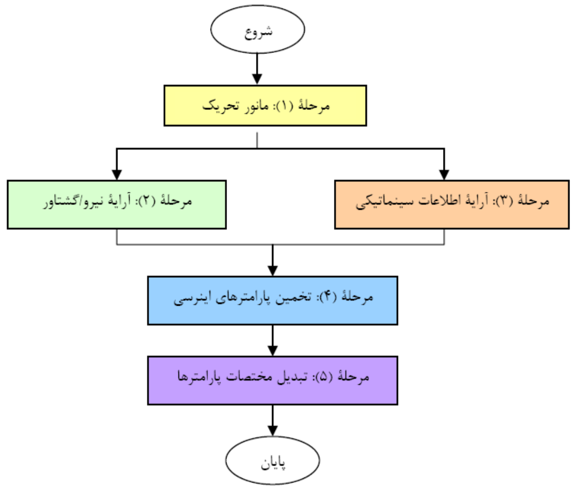
كه‌به‌صورت زير مي‌توان مجهولات را در يک آراية مجزا تفكيک‌نمود:

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_{ii} \\ \vec{n}_{ii} \end{bmatrix}_{6\times 1} = \begin{bmatrix} \ddot{\vec{p}}_i - \vec{g} & [\dot{\vec{\omega}}_i \times] + [\vec{\omega}_i \times][\vec{\omega}_i \times] & 0 \\ 0 & [(\vec{g} - \ddot{\vec{p}}_i) \times] & [\cdot\dot{\vec{\omega}}_i] + [\vec{\omega}_i \times][\cdot\vec{\omega}_i] \end{bmatrix}_{6\times 10} \begin{bmatrix} m_i \\ m_i \vec{c}_i \\ I_{xx_i} \\ I_{xy_i} \\ I_{xz_i} \\ I_{yy_i} \\ I_{yz_i} \\ I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

اين معادله را مي‌توان به‌صورت مختصري به صورت زير نوشت:

$$w_{ii_{6\times 1}} = A_{i_{6\times 10}} \phi_{i_{10\times 1}} \quad (۹)$$

هنگامي‌كه يک جسم صلب توسط ربات برداشته مي‌شود، مي‌توان جسم را بعنوان قسمتي از آخرين لينک، يا قسمتي از مچ ربات در نظر گرفت؛ ازاين‌رو تخمين پارامترهاي جسم، معادل با تخمين پارامترهاي اينرسي تغييريافتة مربوط به لينک آخر ربات مي‌باشد. بنابراين مي‌توان از رابطة (۹) براي تخمين پارامترهاي جسم مورد جابجايي نيز بهره‌برد. با توضيحات فوق، الگوريتم تخمين شامل پنج مرحلة اصلي نشان داده شده درشكل (۲) است، كه هر يک از آنها از زيربخش هايي تشكيل مي‌شوند.



شكل ۲ : مراحل الگوريتم تخمين‌گر.

مرحلة اول: مانورتحريک؛ مسير از پيش طراحي‌شده‌اي‌است كه به‌منظور تحريک پارامترهاي اينرسي مجهول به ربات اعمال‌مي‌شود. در مرحلة اول الگوريتم تخمين، مانورهاي تحريک ايجاد، و توابع زماني q، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ توليد مي‌شوند تا در مراحل بعد به ربات اعمال‌شوند.

مانورتحريک‌طرح‌شده، داراي معادلاتي به‌صورت‌زيرمي‌باشد:

$$q_i(t) = \begin{cases} q_{iini} + \frac{1}{2} k_i t^2 \ldots\ldots\ldots\ldots (0 < t < t_{bi}) \\ \frac{1}{2} k_i t_{bi}^2 + k_i t_{bi}(t - t_{bi}) \ldots\ldots (t_{bi} < t < t_f - t_{bi}) \\ q_{ifinal} - \frac{1}{2} k_i (t - t_f)^2 \ldots\ldots (t_f - t_{bi} < t < t_f) \end{cases} \quad (۱۰)$$

كه در آن:

i : انديس مفصل؛

t_{bi} : مدت‌زمان‌مربوط‌به‌بخش‌شتاب‌دار(سهمي) مفصل iام؛ $[s]$

t_f : زمان نهايي مانور؛ $[s]$

q_{iini} : مقدار اولية موقعيت مفصل iام؛ $[rad]$

q_{ifinal} : مقدار نهايي موقعيت مفصل iام؛ $[rad]$

k_i : مقدار شتاب مفصل i ام؛ $[rad/s^2]$

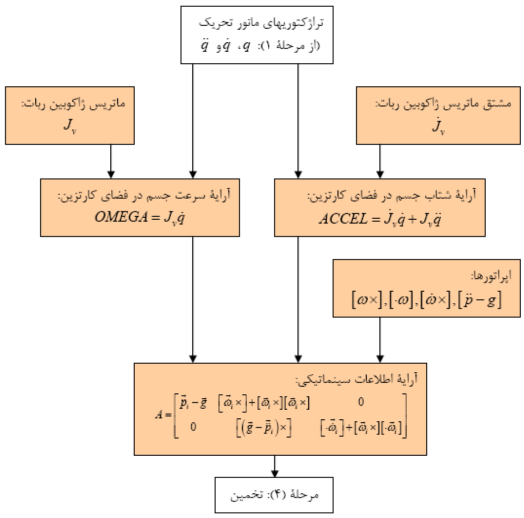
مدت زماني که فرآيند تخمين انجام‌مي‌گيرد، $t = 5\,(\text{sec})$ است؛ از اين رو پريود نمونه‌برداري $T = 0.05\,(\text{sec})$ مي‌باشد و تعداد ۱۰۰ نمونه اطلاعات براي فرآيند شناسايي به کار گرفته مي‌شود.

مرحلة دوم: آراية نيرو/گشتاور؛ که توسط الگوريتم تخمين در مرحلة چهارم مورد استفاده قرار خواهد گرفت، گشتاور خالصي است که صرفاً براي جابجايي جسم مجهول بکار برده شده و در فضاي کارتزين يا همان فضاي کاري ربات بيان شده است وعبارت است از:

$$WRENCH = \begin{bmatrix} \vec{f}_{ii} \\ \vec{n}_{ii} \end{bmatrix} = -\left(J_v^T\right)^{-1}\left(\tau_o - \tau_m\right) \qquad (۱۱)$$

در رابطة فوق، آرايه‌اي که تحت عنوان $WRENCH$ نامگذاري گرديده است، نيرو/گشتاور خالصي است که به ربات، صرفاً جهت جابجايي جسم، واردمي‌شود؛ براين‌اساس τ_o، آرايه نيرو/گشتاور در فضاي مفصلي است در هنگاميکه ربات به همراه جسم مانور شناسايي را انجام‌مي‌دهد، و τ_m، آراية نيرو/گشتاور در فضاي مفصلي است در هنگامي که ربات به‌تنهايي مانور شناسايي را انجام‌مي‌دهد و گشتاورها فقط صرف حرکت لينک ها مي‌شوند.

مرحلة سوم: آراية اطلاعات سينماتيکي؛ مقادير بردارهاي سرعت و شتاب جسم، که فرض‌شده‌است توسط ربات به صورت کاملاً صلب گرفته شده است، را مي‌توان با فرض نبود عدم قطعيت، به‌کمک توابع زماني مانور تحريک و ماتريس ژاکوبين ربات و مشتق آن به‌دست‌آورد. چراکه با اعمال اين مقادير به مدل ديناميکي است که آراية نيرو/گشتاور توليد شده است؛ گام هاي اين مرحله در شکل (۳) آمده‌است.



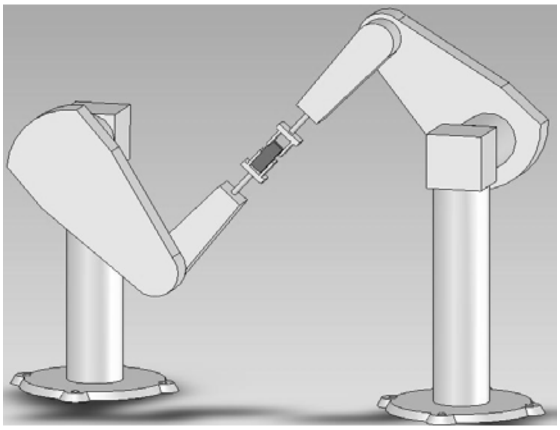
شکل ۳ : مرحله سوم الگوريتم تخمين‌گر.

مرحلة چهارم: تخمين پارامترهاي اينرسي؛ در اين مرحله، به‌کمک آراية نيرو/گشتاور و آراية اطلاعات‌سينماتيکي حاصل از مانور تحريک، به‌وسيلة روش تخمين حداقل مربعات، آراية پارامترهاي اينرسي تخمين‌زده‌مي‌شود. با توجه به اين که تعداد معادلات، ۶ معادلة حرکت، از تعداد مجهولات، ۱۰پارامتر اينرسي، کمتراست، با هر بار نمونه‌برداري، ۶ معادلة بيشتر به معادلات اضافه مي‌شود؛ از اين رو با N بار نمونه‌برداري، مي‌توان آرايه‌هاي تعميم يافتة w_{nn} و A_n را شکل داد. با اجراي معادلات در يک صورت تکرار شوندة ۱۰۰ مرتبه‌اي، اطلاعات به‌دست آمده براي تخمين پارامترهاي اينرسي به کارگرفته‌مي‌شود.

$$\phi_{n_{10\times1}} = \left(A^T{}_{10\times600}A_{600\times10}\right)^{-1}_{10\times10} A^T{}_{10\times600}w_{600\times1} \qquad (۱۲)$$

توجه شود که روش حداقل مربعات را وقتي ماتريس $(A^T A)$ معکوس‌پذير نيست نمي‌توان به کار گرفت. در اين شرايط، مي‌توان از روش SVD يا روش تجزيه ماتريس بر مبناي اندازه‌هاي تکين استفاده نمود، [۱۷].

مرحلة پنجم: تبديل مختصات پارامترها؛ با توجه به اين که الگوريتم تخمين، پارامترها را در مختصات اينرسي به دست مي‌دهد، در مرحلة پنجم، مختصات پارامترهاي تخمين زده شده را به دستگاه مختصات جسم تبديل مي‌نماييم. زيرا ممان هاي اينرسي جسم نسبت به محورهاي خود جسم معنادارتر هستند.



شکل ۴: همکاري دو ربات پوما۵۶۰ براي جابجايي يک جسم.

پياده سازي الگوريتم تخمين

براي پياده‌سازي الگوريتم تخمين، يک ربات پوما ۵۶۰ با مشخصات مندرج در مرجع [۱۹]، درنظرگرفته‌شده‌است. جسم مجهول، يک بلوک فولادي به‌ابعاد $12\times5\times2\,[cm]$ است؛ جرم اين جسم برابر با $m = 936\,[gr]$، و ممانهاي

اينرسي آن حول محورهاي اصلي كه از مركز جرم عبور مي‌كنند، عبارتنداز:

$$I_{xx} = 0.0011544\left[kg.m^2\right], I_{yy} = 0.0002262\left[kg.m^2\right] \quad (۱۳)$$
$$I_{ZZ} = 0.0013182\left[kg.m^2\right]$$

در شكل (۵)، نمودار مانور تحريک مفاصل ربات پوما ۵۶۰، شامل توابع موقعيت، سرعت و شتاب آورده‌شده‌است.

زمان بخش سهمي نمودارها، $t_b = 1.5[s]$ است. مقادير شتاب مانورها عبارتند از:

$$k = [0.262 \quad 0.001 \quad 0.11 \quad 0.715 \quad 0.01 \quad 0.5](rad/s^2) \quad (۱۴)$$

مقادير اوليه زاوية مفاصل:

$$q_{ini} = [15 \quad 15 \quad 0 \quad -100 \quad 0 \quad 0](\deg) \quad (۱۵)$$

و مقدار نهايي آن :

$$q_{final} = [95 \quad 15.3 \quad 33 \quad 105 \quad 3 \quad 150](\deg) \quad (۱۶)$$

با توجه به اين مانور، خطاي جرم‌تخمين‌زده‌شده، به‌وسيلة الگوريتم براي ۱۰۰بار نمونه‌برداري مقدار *5.67%-* تعيين مي‌گردد.

اعمال قانون كنترلي امپدانس چندگانــه بــر دو ربات همكار

با توجه به تخميني كه الگوريتم تخمين‌گر از پارامترهاي اينرسي جسم به‌دست‌مي‌دهد، در مرحلة بعد، اين جسم به‌وسيلة الگوريتم كنترلي امپدانس چندگانه توسط دو ربات همكار پوما۵۶۰ جابجا مي‌شود. فرمولاسيون كنترلر امپدانس چندگانه به‌طور كامل در مراجع [۳] و[۱۲] ارائه‌گرديده‌است، كه در اينجا براي بكارگيري در همكاري دو ربات مرتب مي‌گردد. لازم به ذكر است كه در همكاري ربات‌ها براي جابجائي يک جسم، كنترل نيروهاي داخلي به‌وجود آمده در جسم نيز حائز اهميت است كه در اينجا مجال بحث آن نيست، [۲۰].

براي تعيين فرامين كنترلي در الگوريتم MIC ، از معادلات حركت در فضاي وظيفه استفاده‌مي‌شود. فرض‌كنيم معادلة ديناميكي بازوي عامل مشاركت كننده در هدايت جسم در فضاي وظيفه به‌شكل زير باشد:

$$H(q)\ddot{x} + C(q,\dot{q}) = Q \quad (۱۷)$$

كه در آن q آراية مختصات تعميم‌يافته است، و شامل جابجايي‌ها و زواياي مفصلي مي‌شود؛ آراية x، مختصات در فضاي كاري را توصيف مي‌نمايد و به صورت $x = \left[x_E^T, \delta_E^T\right]$ بيان مي‌شود؛ x_E موقعيت مجري نهايي بوده و δ_E مجموعةزواياي اويلر مي‌باشد كه جهتگيري مجري نهايي را توصيف‌مي‌نمايد. آراية C، شامل تمامي جملات غيرخطي سرعت و جملات گرانشي است. آراية سرعت‌ها در فضاي كاري، $\dot{x}$، بر حسب مختصات تعميم يافته به صورت زير قابل بيان‌است:

$$\dot{x} = J_c\dot{q} \quad (۱۸)$$

كه در آن J_c ماتريس ژاكوبين ارتباط ميان سرعت‌ها در مختصات تعميم يافته و سرعت‌ها در فضاي‌كاري است. آراية نيروي تعميم‌يافته در فضاي‌كاري، Q، به‌شكل زير بيان خواهد شد:

$$Q = Q_{app} + Q_{react} \quad (۱۹)$$

در اين رابطه Q_{react}، نيروي واكنشي بر مجري‌نهايي است، و Q_{app}، نيروي كنترلي اعمالي به مجري‌نهايي مي‌باشد كه از دو بخش تشكيل‌مي‌گردد؛ بخش اول مربوط به حركت مجري‌نهايي و بخش دوم مربوط به نيروي اعمالي وارد بر جسم است.

$$Q_{app} = Q_m + Q_f \quad (۲۰)$$

كه Q_m، نيروي كنترلي است كه منجر به حركت مجري نهايي مي‌شود و Q_f، نيروي مورد نياز جهت اعمال به جسم توسط مجري‌نهايي را نشان‌مي‌دهد. براي دستيابي به مقادير مناسب آراية نيرو، معادلات حركت جسم تحت كنترل نيز مورد نياز خواهد بود. معادلات حركت جسم صلب به شكل زير نوشته مي‌شود:

$$M\ddot{x} + F_\omega = F_c + F_o + GF_e \quad (۲۱)$$

كه در آن:

- M : ماتريس جرمي جسم؛
- $\ddot{x}$: آراية شتاب مركز جرم جسم است؛ $x = \left[x_G^T, \delta_{obj}^T\right]^T$، آراية مختصات مركز جرم در فضاي‌كاري است به‌طوريكه x_G، بردار موقعيت مركزجرم جسم نسبت‌به اينرسي و δ_{obj}، جهت‌گيري جسم را با مجموعة زواياي اويلر توصيف‌مي‌كند؛
- F_ω : آراية جملات غيرخطي سرعت نظير جملات نيروهاي جانب مركز و كوريوليس است؛
- F_c : آراية نيرو/گشتاور تماسي جسم است؛
- F_o :آراية نيرو / گشتاورخارجي، به غير از نيرو / گشتاورهاي تماسي و نيرو/گشتاورهاي وارده از مجريان نهايي به جسم است؛

F_e : آراية نيرو/گشتاور وارده از تمام مجريان‌نهايي است که در هدايت جسم موثرند. اگر تعداد مجريان نهايي n باشد، بعد اين آرايه $6n\times 1$ خواهد بود.

G : آرايه‌اي $6\times 6n$ بعدي است، که ماتريس چنگ زدن[۵] ربات ناميده مي‌شود و به‌وسيلة رابطة (۲۲) بيان مي‌شود.

ماتريس G، براي مجموعه‌اي با n بازوي دست‌اندرکار به صورت زير است:

$$G=\begin{bmatrix} 1_{3\times3} & 0_{3\times3} & \cdots & 1_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ S_{obj}^T\left[r_e^{(1)}\right]_{3\times3}^{\times} & S_{obj}^T & \cdots & S_{obj}^T\left[r_e^{(n)}\right]_{3\times3}^{\times} & S_{obj}^T \end{bmatrix}_{6\times 6n}$$ (۲۲)

در اين رابطه، $1_{3\times3}$ و $0_{3\times3}$ به ترتيب ماتريس هاي واحد و صفر با بعد۳ هستند. جملة $r_e^{(i)}$، بردار موقعيت امين مجري نهايي نسبت به مرکز جرم جسم است؛ ماتريس S_{obj}، ماتريسي است که ميان بردار سرعت زاويه‌اي جسم و نرخ زماني زواياي اويلر ارتباطبرقرارمي‌سازد.

$$\omega_{obj}=S_{obj}\dot{\delta}_{obj}$$ (۲۳)

که با انتخاب مناسب مجموعه زواياي اويلر، ماتريس S_{obj} منفرد نخواهد شد.

هدف کنترلي، محاسبة آراية نيرو/گشتاورهاي کنترلي مناسب، Q، وارد به مجموعه، براي ايجاد رفتار مطلوب خواهد بود. از اين رو مي‌بايست اجزاي Q_f، Q_m و Q_{react} تعيين شوند. قانون مطلوب امپدانس براي حرکت جسم به شکل زير انتخاب‌مي‌شود:

$$M_{des}\ddot{e}+K_d\dot{e}+K_pe=-F_c$$ (۲۴)

در رابطة فوق، e، خطاي تعقيب جسم را توصيف مي‌کند، به طوريکه $e=x_{des}-x$؛ ضرايب K_d و K_p، ضرايب تقويت[۶] ماتريسي کنترلر هستند که معمولاً قطري انتخاب مي‌شوند؛ و M_{des} ماتريس‌بهرة جرم مطلوب جسم مي‌باشد.

نکته شايان توجه آن است که قانون کنترلي در رفتار جسم در شرايط برخورد[۷] اعمال‌مي‌شود، بنابراين به تمهيد نيروي برخورد مي‌پردازد.

آراية نيرو/گشتاورهاي مطلوب اعمالي توسط مجريان نهايي بر جسم F_e عبارتستاز:

$$F_{e_{req}}=G^{\#}\left\{MM_{des}^{-1}\left(M_{des}x_{des}+K_d\dot{e}+K_pe+\hat{F}_c\right)+F_{\omega}-\left(\hat{F}_c+F_o\right)\right\}$$ (۲۵)

ماتريس $G^{\#}$، ماتريس شبه معکوس G مي‌باشد. ماتريس $G^{\#}$، به‌شکل زير تعريف مي‌شود:

$$G^{\#}=W^{-1}G^T\left(GW^{-1}G^T\right)^{-1}$$ (۲۶)

که در اين رابطه W، ماتريس وزن در فضاي‌وظيفه است، به‌گونه‌اي‌که متغيرهاي‌خطي و زاويه‌اي را هم‌وزن مي‌کند. دررابطة (۲۵)، با فرض مشخص‌بودن جملة F_o، هم‌چنين مشخص‌بودن پارامترهاي اينرسي و مشخصات هندسي جسم، براي به‌دست‌آوردن آراية $F_{e_{req}}$، مي‌بايست مقدار آراية $\hat{F}_c$، مقدار تخميني نيروي تماسي F_c ، جايگزين شود.

مطابق با تعاريف رابطة (۲۰)، بخش نيرويي در آراية نيرو/گشتاور کنترلي عبارتست از:

$$Q_f^{(i)}=F_{e_{req}}^{(i)}$$ (۲۷)

از طرفي لازم است تا نيروي کنترلي $Q_f^{(i)}$، نيروي عکس العمل وارد بر iامين مجري نهايي جسم را خنثي‌کند. بنابراين نيروي واکنشي تعريف شده در رابطة (۱۹)، برابر خواهد بود با:

$$Q_{react}^{(i)}=-F_e^{(i)}$$ (۲۸)

که در رابطه فوق، آراية F_e ، برابر است با:

$$F_e=G^{\#}\left[M\ddot{x}+F_{\omega}-\left(F_c+F_o\right)\right]+\left(1-G^{\#}G\right)F_{\text{int}}$$ (۲۹)

بنابر آنچه گفته شد، قانون کنترلي امپدانس چندگانه، امپدانسهايي مشابه امپدانس مطلوب جسم را به مجريان نهايي اعمال‌مي‌کند. بنابراين مشابه معادلة (۲۴)، قانون امپدانس براي iامين مجري نهايي را مي‌تواند به‌شکل زير نوشت:

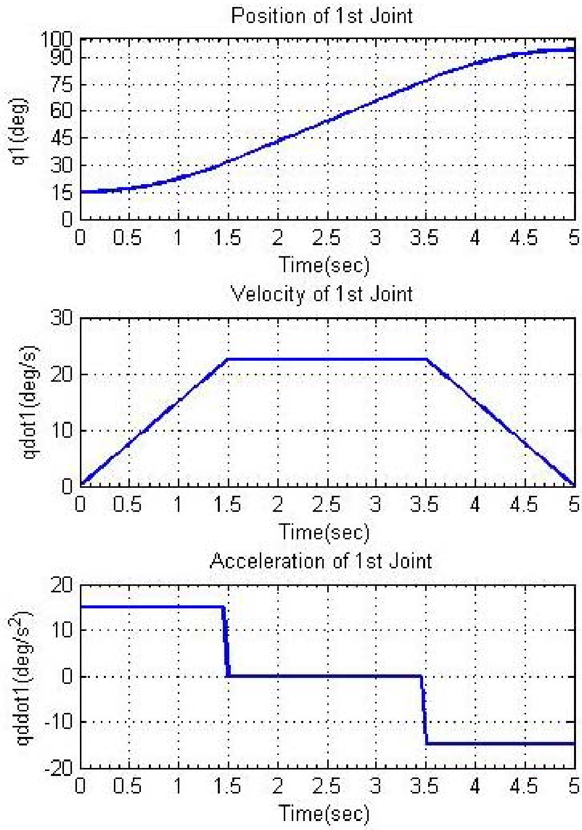
$$M_{des}\ddot{\tilde{e}}^{(i)}+K_d\dot{\tilde{e}}^{(i)}+K_p\tilde{e}^{(i)}=-F_c$$ (۳۰)

که در رابطة فوق، $\tilde{e}^{(i)}$، بردار خطاي موقعيت و جهت گيري iامين مجري نهايي و برابر با $\tilde{e}^{(i)}=\tilde{x}_{des}^{(i)}-\tilde{x}^{(i)}$ مي‌باشد. مشابه بخش نيرويي آراية نيرو/گشتاور کنترلي، بخش حرکتي آن نيز به‌صورت زير به دست مي‌آيد:

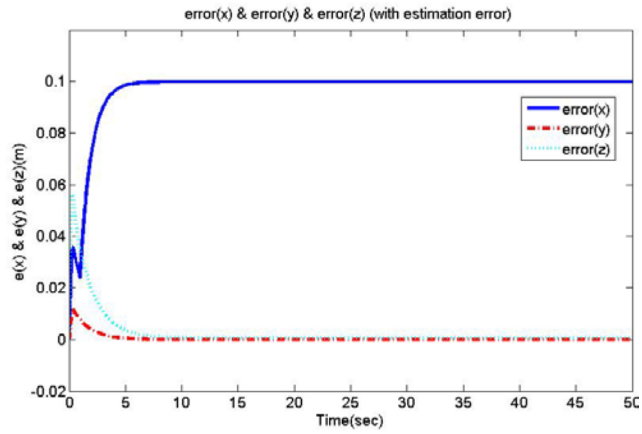
$$Q_m^{(i)}=H^{(i)}\left(q^{(i)}\right)M_{des}^{-1}\left[M_{des}\ddot{x}_{des}^{(i)}+K_d\dot{e}^{(i)}+K_pe^{(i)}+F_c\right]+C^{(i)}\left(q^{(i)},\dot{q}^{(i)}\right)$$ (۳۱)

با جايگزيني مقدار تخميني نيروي تماسي خواهيم‌داشت:

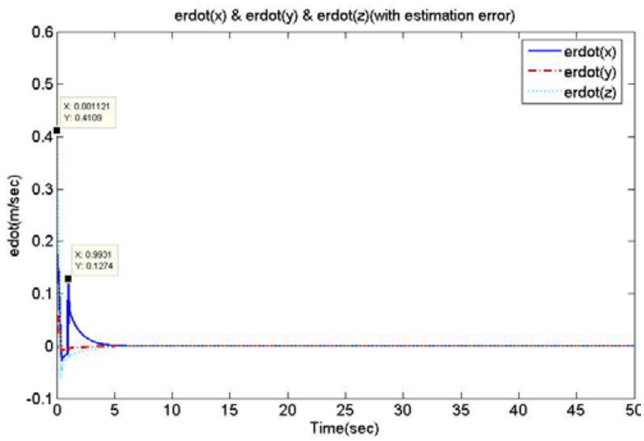
$$Q_m^{(i)}=H^{(i)}\left(q^{(i)}\right)M_{des}^{-1}\left[M_{des}\ddot{x}_{des}^{(i)}+K_d\dot{e}^{(i)}+K_pe^{(i)}+\hat{F}_c\right]+C^{(i)}\left(q^{(i)},\dot{q}^{(i)}\right)$$ (۳۲)



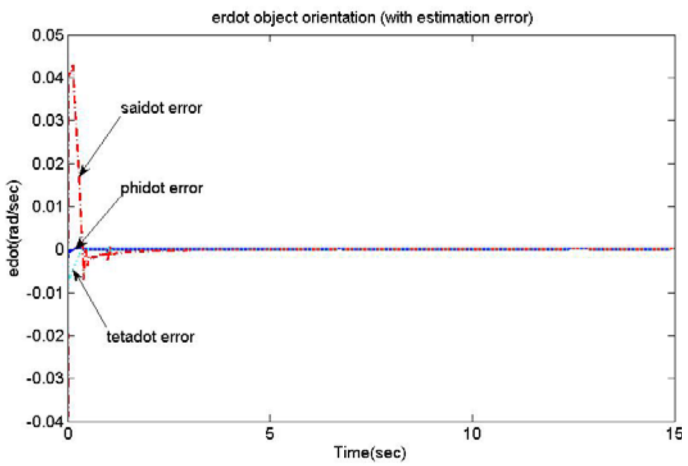
شكل ۵: نمودارهاي موقعيت، سرعت و شتاب مربوط به مانور مفصل اول ربات پوما ۵۶۰.



شكل ۶:خطاي موقعيت مركز جرم جسم (متر).



شكل ۷:خطاي سرعت خطي جسم (متر بر ثانيه).



شكل ۸:خطاي سرعت دوراني جسم (راديان بر ثانيه).

با جانشيني معادلات (۲۷) و (۳۲) در (۲۰) نيروي اعمالي كنترل محاسبه مي‌شود.

نتايج شبيه‌سازي

براي شبيه‌سازي مجموعه رباتيک با دو ربات پوما ۵۶۰ شكل (۴) ، ماتريس جرمي جسم عبارتست از:

$$M = \begin{bmatrix} M_{obj} 1_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & S_{obj}^T \bar{I}_G S_{obj} \end{bmatrix} \qquad (۳۳)$$

كه در رابطة (۳۳)، مقادير M_{obj} و $\bar{I}_G$ مقادير واقعي پارامترهاي اينرسي جسم هستند. آراية جملات غير خطي عبارت است از:

$$F_\omega = \begin{Bmatrix} 0_{3\times1} \\ S_{obj}^T \left(\left[\omega_{obj}\right]^\times \bar{I}_G \omega_{obj} + \bar{I}_G \dot{S}_{obj} \dot{\delta}_{obj} \right) \end{Bmatrix} \qquad (۳۴)$$

آراية نيرو/گشتاور تماسي جسم عبارت است از:

$$F_c = \begin{Bmatrix} f_c \\ S_{obj}^T n_c \end{Bmatrix} \qquad (۳۵)$$

آراية نيرو/گشتاور خارجي به‌غيراز نيرو/گشتاورهاي تماسي و نيرو/گشتاورهاي وارده از مجريان‌نهايي به جسم عبارت است از:

$$F_o = \begin{Bmatrix} f_o \\ S_{obj}^T n_o \end{Bmatrix} \qquad (۳۶)$$

مقدار نيروي خارجي روي جسم به غير از نيروي برخورد، تنها نيروي گرانشي خود جسم است كه برابر با $f_o = m_{obj} g$ مي‌باشد، ولي هيچ گشتاور خارجي به غير از گشتاور ناشي از برخورد به آن وارد نمي‌شود، پس $n_o = 0$.

آراية نيرو/گشتاور وارده از تمام مجريان نهايي است كه در هدايت جسم موثرند عبارت است از:

$$F_e = \begin{Bmatrix} F_e^{(1)} \\ F_e^{(2)} \end{Bmatrix} \qquad (۳۷)$$

كه درآن داريم:

$$F_e^{(i)} = \begin{Bmatrix} f_e^{(i)} \\ n_e^{(i)} \end{Bmatrix}_{6\times1} \qquad (۳۸)$$

با توجه به اين كه تماس مجري نهايي هر يک از ربات‌ها با جسم به‌صورت نقطه‌اي بوده و هيچ گشتاوري را بر جسم اعمال نمي‌كنند، ماتريس G برابر است با:

$$G = \begin{bmatrix} 1_{3\times3} & 0_{3\times3} & 1_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ S_{obj}^T \left[r_e^{(1)}\right]_{3\times3}^\times & 0_{3\times3} & S_{obj}^T \left[r_e^{(2)}\right]_{3\times3}^\times & 0_{3\times3} \end{bmatrix} \qquad (۳۹)$$

كه $1_{3\times3}$ ماتريس‌هماني مرتبة۳ و $0_{3\times3}$ ماتريس صفر مرتبة۳ است. $r_e^{(i)}$ بردار موقعيت i امين مجري‌نهايي نسبت به مركز جرم جسم مي‌باشد و ماتريس S_{obj} برابر استبا:

$$S_{obj} = \begin{bmatrix} 0 & -S\phi & C\varphi S\theta \\ 0 & C\phi & S\varphi S\theta \\ 1 & 0 & C\theta \end{bmatrix} \qquad (۴۰)$$

در طول مسير مطلوبي كه جسم بايد طي كند، يک مانع طراحي شده كه موقعيت آن در راستاي محور x و برابر با $x_w = 1[m]$ است؛ سختي در نظر گرفته شده براي اين مانع، برابر با $k_w = 1e5[N/m]$ مي‌باشد. نيرو و گشتاور واقعي برخورد جسم با مانع به‌صورت زير مي‌باشد:

$$f_c = k_w\left(x_w - \left(x_o + r_c\right)\right) \qquad (۴۱)$$
$$n_c = r_c \times f_c$$

که r_c فاصلة بين مرکز جرم جسم تا نقطه برخورد جسم با مانع است.

باتوجه به اینکه ربات دوم داراي یک واسط RCC است، ميتوان از طريق مقدار نيروي واقعي اعمالي از سوي جسم به مجري نهايي دوم، اين نيرو را به صورت زير به‌دست آورد:

$$f_e^{(2)} = k_e\left(x_e^{(2)} - \left(x_o + r_e^{(2)} + l_{free}\right)\right) + b_e\left(\dot{x}_e^{(2)} - \left(\dot{x}_o + r_e^{(2)}\right)\right) \qquad (۴۲)$$

ضرايب k_e و b_e به‌ترتيب سختي و ميرايي مربوط به RCC، l_{free} طول‌آزاد RCC، و $x_e^{(2)}$ موقعيت مجري نهايي ربات دوم مي‌باشد. دراين مجموعة رباتيک طول مجري نهايي هر ربات برابر با $[m]$ 0.2 انتخاب‌شده، که باتوجه به اينکه ربات دوم داراي واسط RCC مي‌باشد، طول RCC موجود برروي مجري‌نهايي دوم برابر $[m]$ 0.1 متر است. سختي و ميرايي آن نيز به ترتيب برابربا $k_e = 2000\ [N/m]$ و $b_e = 500\ [N.s/m]$ است.

براي به‌دست‌آوردن نيروي واقعي اعمالي از طرف جسم به مجري نهايي ربات اول از معادلة ديناميکي جسم کمک‌مي‌گيريم:

$$f_e^{(1)} = B_1^{-1}\left\{\begin{array}{l} m_{obj}\left\{\begin{array}{l} \dot{J}_V^{(1)}\dot{q}^{(1)} + J_V^{(1)}\ddot{q}^{(1)} + \omega_{obj}\times\left(\omega_{obj}\times\left(-r_e^{(1)}\right)\right) + \left(-r_e^{(1)}\right)\times\dot{\omega}_{obj} \\ +\left(r_e^{(1)}\times I_o^{(-1)}\right)S_{obj}^T\left(I_o\dot{\omega}_{obj} + \omega_{obj}\times I_o\omega_{obj} - \left(n_c + n_o\right)\right) \end{array}\right\} \\ -B_2 f_e^{(2)} - \left(f_c + f_o\right) \end{array}\right\} \qquad (۴۳)$$

که در آن:

$$B_1 = \left(r_e^{(1)} \times I_o^{(-1)}\right)S_{obj}^T r_e^{(1)^\times} + 1_{3\times3} \qquad (۴۴)$$
$$B_2 = \left(r_e^{(1)} \times I_o^{(-1)}\right)S_{obj}^T r_e^{(2)^\times} + 1_{3\times3}$$

در صورتي که موقعيت دقيق مانع براي ما مجهول باشد، مي‌توان نيروي برخورد را به‌صورت زير تخمين زد:

$$\hat{F}_c = M\ddot{\hat{x}} + F_\omega - F_o - GF_e \qquad (۴۵)$$

که در آن داريم:

$$\ddot{\hat{x}} = \frac{\dot{x}_t - 2\dot{x}_{t-\Delta t} - \dot{x}_{t-2\Delta t}}{\Delta t^2} \qquad (۴۶)$$

نيروي مورد نياز جهت حمل جسم که به عملگرها داده مي‌شود برابر است با:

$$F_{e_{req}} = G^{\#}\left\{\begin{array}{l} \hat{M}M_{des}^{-1}\left(M_{des}x_{des} + K_d\dot{e} + K_p e + \hat{F}_c\right) \\ +F_\omega - \left(\hat{F}_c + F_o\right) \end{array}\right\} \qquad (۴۷)$$

که در رابطة فوق $\hat{M}$ ماتريس جرمي تخمين زده شدة جسم توسط الگوريتم تخمين‌گر است.

نيروي مورد نياز جهت حرکت ربات برابر است با:

$$\tilde{Q}_m^{(i)} = \tilde{H}^{(i)}\left(q^{(i)}\right)M_{des}^{-1}\left[M_{des}\ddot{\tilde{x}}_{des}^{(i)} + K_d\dot{\tilde{e}}^{(i)} + K_p\tilde{e}^{(i)} + \hat{F}_c\right] + \tilde{C}^{(i)}\left(q^{(i)}, \dot{q}^{(i)}\right) \qquad (۴۸)$$

پس از تعيين مقدار گشتاور اعمالي به عملگرها که حاصل جمع گشتاور مورد نياز براي حرکت جسم، به‌همراه حرکت بازوهاي ربات است، بايد دقت شود که اين گشتاور به دست آمده از مقدار ظرفيت گشتاور توليدي توسط عملگرها بيشتر نباشد، که در اين صورت مقدار گشتاور ماکزيمم توليدي توسط عملگر، جايگزين گشتاور مورد نياز مي‌شود.

ضرايب بهره کنترلي MIC بر مبناي معادلة خطاي عملگر به صورت زير بدست‌مي‌آيند:

$$M_{des} = diag(10,10,10,1,1,1)$$
$$K_p = diag(200,200,200,10,10,10) \qquad (۴۹)$$
$$K_d = diag(300,300,300,1000,1000,1000)$$

مسير مطلوبي که جسم بايد طي‌کند، به صورت زير در نظر گرفته مي‌شود:

$$X_{Gdes} = 0.7 + 0.4\left(1 - e^{-t}\right)[m], Y_{Gdes} = 0.2[m]$$
$$Z_{Gdes} = 0.2\left(1 - e^{-t}\right)[m] \qquad (۵۰)$$
$$\theta_{xdes} = \theta_{ydes} = \theta_{zdes} = 0.0[rad]$$

نمودارهاي حاصل از شبيه‌سازي براي مجموعة رباتيک با دو ربات پوما ۵۶۰ که قصد جابجايي جسمي نامعين را که پارامترهاي اينرسي آن در طي يک مانور توسط يکي از دو ربات شناسايي شده است، را در يک مسير تعيين شده دارند و در طول مسير با يک مانع برخوردمي‌کنند، درادامه نشان داده شده است.

نمودار شکل(۶)، خطاي موقعيت مرکزجرم را در راستاي سه محور x، y و z نشان‌مي‌دهد. مشاهده‌مي‌شودکه جسم در ثانية يکم، در راستاي x با يک مانع برخوردکرده و متوقف مي‌شود (که با افزايش خطا و تثبيت آن در فاصلة بين مانع و موقعيت مطلوب نهائي همراه است). درحالي که در راستاهاي y و z، به مسير خود ادامه‌مي‌دهد و خطاي موقعيت در راستاهاي مزبور به سمت صفر ميل پيدامي‌کند.

نمودار شکل(۷)، خطاي مربوط به سرعت خطي جسم را بيان مي‌کند، که تنها در لحظة برخورد در راستاي محور x

مقدار اندکي خطا ايجادشده که به‌سرعت به‌سمت صفر ميل‌مي‌کند. نمودار شکل (۸)، خطاي سرعت دوراني مرکز جرم جسم را نشان‌مي‌دهد که تنها در راستاي محور y مقدار اندکي خطا ايجادشده که به‌سرعت به‌سمت صفر ميل‌مي‌کند. اين نتايج، نشانگر عملکرد مناسب کنترلر *MIC*، با وجود خطاي موجود در پارامترهاي جسم نامعين و نيز وجود برخورد با مانع محيطي مي‌باشد.

نتيجه‌گيري

اين مقاله با هدف افزايش گسترة کاربرد الگوريتم کنترلي MIC در محيطهاي ناشناخته ارائه شده‌است. ازاين‌رو، يک الگوريتم تخمين ديناميکي و برخط، براي تخمين پارامترهاي اينرسي جسم نامشخصي که ربات قصد جابجايي آن را دارد، ارائه‌گشته‌است. اين الگوريتم، بر پاية اطلاعات مربوط به انکودرهاي مفاصل، سنسورهاي سرعت و شتاب (درصورت وجود)، و هم‌چنين سنسورهاي نيرو/گشتاور در مچ ربات، فرآيند شناسايي را انجام‌مي‌دهد. باتوجه‌به‌اين که فرايند شناسايي در مرحلة اوليه انجام وظيفه، و به صورت برخط انجام مي‌پذيرد، قابليت استفاده از تعدادي موقعيت در روند تخمين، به‌جاي چند موقعيت محدود، از ويژگي‌هاي الگوريتم ارائه شده است. با توجه به مانور تحريک داده شده، خطاي جرم تخمين‌زده‌شده، به‌وسيلة االگوريتم موجود براي ۱۰۰ بار نمونه‌برداري ميزان *5.67%-* تعيين شد.

پس از تعيين پارامترهاي اينرسي جسم نامعين، دو ربات همکار پوما ۵۶۰ آن را در طول يک مسير حرکت مشخص جابجا مي‌نمايند؛ در اين مسير برخوردي با يک مانع رخ مي‌دهد. کنترلر امپدانس چندگانه، به‌کنترل رفتار حرکتي جسم در تعامل نيرويي با مانع پرداخته، و با وجود خطا، خصوصاً در تخمين پارامترهاي ممان‌هاي اينرسي، به‌خوبي از عهدة کنترل نيرويي جسم برآمده است که خود بيانگر مقاوم بودن اين الگوريتم کنترلي است.

مراجع

1 - Hogan, N. (1985). "Impedance control: an approach to manipulation: Part I- Theory." *Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, Vol. 107, PP.1-7.

2 - Schneider, S. A. and Cannon, Jr. R. H. (1992). "Object Impedance Control for Cooperative Manipulation: Theory and Experimental Results." *IEEE Transactions on Robotics and Automation,* Vol.8, No.3, PP.383-394.

3 - Moosavian, S. A. and, Rastegari, R. (2006). "Multiple-Arm Space Free-Flying Robots for Manipulating Objects with Force Tracking Restrictions." *Journal of Robotics and Autonomous Systems,* Vol. 54, No. 10, PP. 779-788.

4 - Ostring, M. et. al. (2003). "Closed-loop identification of an industrial robot containing flexibilities." *Control Engineering Practice,* Vol. 11, PP. 291-300.

5 - Austin, D. J. and McCarragher, B. J. (2001). "Geometric constraint identification and mapping for mobile robots." *Robotics and Autonomous Systems,* Vol. 35, PP. 59-76.

6 - Renaud, P., et al. (2006). "Kinematic and dynamic identification of parallel mechanisms." *Control Engineering Practice,* Vol. 14, PP.1099-1109.

7 - Johansson, R., et al. (2000). "State-space system identification of robot manipulator dynamics." *Mechatronics,* Vol. 10, PP. 403-418.

8 - Grotjahn, M., Daemi, M. and Heimann, B. (2001). "Friction and rigid body Identification of Robot dynamics." *International Journal of Solids and Structures,* Vol. 38, PP.1889-1902.

9 - Yurkovich, S., Tzes A. P., Lee I. and Hillsley, K. L. (1990). "Control and system identification of a two-link flexible manipulator." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, PP.1510-1516.

10 - Sujan, V. A. and Dubowsky, S. (2003). "An optimal information method for mobile manipulator dynamic parameter identification." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* Vol. 2, No. 2, PP. 215-225.

11 - Atkeson, C. G., An, C. H. and Hollerbach, J. M. (1986). "Estimation of inertial parameters of manipulator loads and links." *The International Journal of Robotics Research,* Vol. 5, No. 3, PP. 101-119.

12 - Moosavian, S. A. A. and Papadopoulos, E. (1998). "Multiple impedance control for object manipulation." *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Con. On Intelligent Robots and Systems*, Victoria, Canada, Oct. 13-17.

13 - West, H., Papadopoulos, E., Dubowsky, S. and Cheah, H. (1989). "A method for estimating the mass properties of a manipulator by measuring the reaction Moments at its base." *Proc. of the IEEE Intl. Con. on Robots and Automation,* PP.1510-1516.

14 - Liu, G., Iagnemma, K., Dubowsky, S. and Morel, G. (1998). "A base force/torque sensor approach to robot manipulator inertial parameter estimation." *Proc. of the IEEE Intl. Con. on Robots and Automation*, PP. 661-667.

15 - Ma, D. and Hollerbach, J. M. (1996). "Identifying mass parameters for gravity compensation and automatic torque sensor calibration." *Proceeding of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis,* Minnesota, PP. 661-667.

16 - Gautier, M. and Khalil, W. (1988). "On the identification of the inertial parameters of robots." *Proc. of The Con. On Decision and Control,* Austin, Texas, PP.2264-2269.

17 - Pfeiffer, F. and Holzl, J. (1995). "Parameter identification for industrial robots." *Proc. of the IEEE Int. Con. On Robots and Automation*, PP.1468-1476.

18 - Dutkiewicz, P., Kozlowski, K.R., and Wroblewski, W. S. (1993). "Experimental identification of robot and load dynamics parameters." *Second IEEE Conference on Control Applications,* Vancouver, B.C.

19 - Armstrong, B., Khatib, O. and Burdick, J. (1986). "The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA560 arm." *Proc. of the IEEE Intl. Con. on Robots and Automation,* San Francisco, PP. 510-518.

20 - Rastegari, R. and Moosavian, S. A. A. (2006). "Multiple Impedance Control of Cooperative Manipulators Using Virtual Object Grasp." *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications (CCA),* Munich, Germany.

21 - Moosavian, S. A. A., Rastegari, R. and Papadopoulos, E. (2005). "Multiple Impedance Control for Space Free-Flying Robots." *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics,* Vol. 28, No. 5, PP. 939-947, September.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده درمتن

1 - Multiple Impedance Control, MIC
2 - Object Impedance Control
3 - On-Line
4 - Off-Line
5 - Grasp Matrix
6 - Gain
7 - Contact