مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (1) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (1) 2012

المحاكاة الحاسوبية لتصحيح الأخطاء الفراغية في معالجات الروبوت الديكارتية

الدكتور محمد زهرة*

(تاريخ الإيداع 18 / 9 / 2011. قُبِل للنشر في 15/ 1 / 2012)

□ ملخّص □

ندرس هنا في هذا البحث كيفية تحسين العملية الإنتاجية باستخدام برامج روبوتات مباشرة في خطوط الإنتاج؛ إذ تعدّ المعايرة ضرورية لهذه الاستراتيجية العلمية. لقد تم دراسة بعض طرق المعايرة، ونوقشت مشاكلها والملاحظات التي يمكن أن تؤخذ بالاعتبار .

وسنستفيد من المعرفة المكتسبة من الأبحاث السابقة في مجال تعويض الأخطاء الهندسية في آلات التشغيل وتطبيق ذلك من حيث المبدأ على عملية تعويض الأخطاء في معالجات الروبوت الديكارتيه. إن الطريقة المطبقة تستخدم خوارزمية تعويض الأخطاء المبنية على أساس النتائج التي تم الحصول عليها من مخطط أخطاء الانحرافات، والبيانات الناتجة من تقنيات القياسات الليزرية، والتي يمكن مكاملتها من خلال نظام التحكم بمعالج الروبوت الديكارتي.

الكلمات المفتاحية: محاكاة حاسوبية، روبوت، أخطاء فراغية، معالجات ديكارتية.

* أستاذ مساعد – قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين– اللاذقية– سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (1) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (1) 2012

Computer Simulation for Spatial Errors Correction of Rectangular Robot Manipulators

Dr. Mohamad Zahra *

(Received 18 / 9 / 2011. Accepted 15 / 1 / 2012)

□ ABSTRACT □

In this paper, we study how to improve production process using direct robotic programs in production lines where calibration is necessary for this scientific strategy. Some calibration methods have been studies and its problems have been discussed with some comments considered.

Knowledge from the literature and previous research in the field of engineering errors compensation in machine tools have been used and applied in correcting errors in rectangular robot manipulators. The applied method uses the algorithm of compensation error deflections diagram and data resulted from laser measuring techniques which can be integrated through a controlling system using a rectangular robot manipulators.

Key words: Computer Simulation, Robot, Spatial Errors, Rectangular Manipulators.

*Assistant Professor, Production and Design Engineering Department, Faculty of Mech, &. Elect. Eng, Tishreen University, lattakia, Syria.

مقدمة:

إن كثيراً من الروبوتات المستخدمة في العملية الإنتاجية تستند في عملها إلى طرق تعليمية؛ إذ يحدد العامل كافة مواقع ذراع المعالج المطلوب من اجل العملية واتجاهاتها، والذي يمكّن من تصميم الروبوتات المراد تعليمها بهذه الطريقة بحيث تحقق أعلى قيم الدقة في أثناء عملها. ويمكن أن تتم هذه الطريقة ببرمجة الروبوت بحيث يصبح روبوتاً مرناً يوفر علينا استخدام عمليات إنتاج صغيرة ومحدودة، وتوفر علينا أيضا زمن التعطل المكلف؛ لذلك يمكن اللجوء إلى عمليات البرمجة لتقليل زمن التعطل، وتحسين مرونة العملية الإنتاجية.

بعض تطبيقات الروبوتات التي يمكن استخدامها لتحقيق هذا الغرض هي الروبوتات ذات التمثيل البياني أو التخطيطي باستخدام المحاكاة، والذي يساعد العامل على اختبار دورات العمل وتشغيلها قبل استخدام الروبوت بشكل فعلي. ومن أجل الحصول على نتائج مقبولة من أنظمة المحاكاة يجب توفر بيانات بعدية دقيقة من الروبوت المستخدم. وهذا يعني أن للدقة أهمية كبيرة جداً، ويتم ذلك ببرمجة الروبوتات من أجل المحاكاة. [1]،[2].

لقد تمت دراسات وأبحاث كثيرة في مجال معايرة الروبوتات، وتم تطوير العديد من الطرق المختلفة للقياس المباشر للوضعية الفراغية (ثلاثية الأبعاد) للروبوت والعوامل المؤثرة فيه. ويمكن تقسيم هذه الطرق بشكل واسع إلى مجموعتين: الأولى تستخدم الحساسات التماسية، والثانية تستخدم الحساسات اللاتماسية؛ وذلك من أجل القياس المباشر للوضعية الفراغية للروبوت والعوامل المؤثرة فيه، وتم دراسة عدة تقنيات قياس، ووضعت قوائم بإيجابيات العديد من طرق المعايرة وسلبياتها [3] , [4] .

إن طرق المعايرة الحالية للروبوتات تستخدم جهازاً يجب اختباره من أجل المعايرة مع الأخذ بالاعتبار طريقة تشغيله واستخدامه. وتكون الطرق التجارية الحالية لمعايرة الروبوت محدودة؛ إذ إنها تقوم فقط بعملية تصحيح جزئي للأخطاء الهندسية، وأخطاء التوافق مع الحمل، ومن هذه الطرق تلك التي تستخدم أجهزة المعايرة والقياس العادية والتي تحتاج زمناً طويلاً، وفي كل مرة يجب إعادة المعايرة عندما يحدث خلل في الآلات والمعدات. ويمكن استخدام زوج من أجهزة التيودوليت الإلكترونية مع نظام معايرة تم تصميمه باستخدام برنامج المحاكاة [5]. وتمت معايرة الروبوت من أجل تصحيح الأخطاء الهندسية وغير الهندسية من خلال تطبيق اختبارين منفصلين:

1- تم توجيه المعالج كي يتحرك من خلال سلسلة حركات، وتم توجيه نقطة تمركز الأداة أو الآلة؛ لتبقى في وضعية واحدة . إن أية حركة لنقطة تمركز الآلة سيكون سببها وجود أخطاء انحراف مشتركة .

2- تم الطلب من نقطة تمركز الأداة أو الآلة لتترك بعيداً عن نقطة الصفر المرجعية ثم العودة إلى النقطة المرجعية. إن أي انحراف يتم بين الوضعية الدنيا والوضعية النهائية يكون سببه حدوث تأخر أو تخلف، ويتم تكرار هذا الاختبار لكافة مفاصل الحركة للروبوت.إن درجة دقة هذه المعايرة محدودة من حيث عدم إمكانية مشاهدة تمثيل كامل لهذه الأخطاء على كامل حجم التشغيل. وتكون طريقة المعايرة بسيطة؛ إذ توفر علاقة خطية للاختلاف والانحراف بين النقاط المقاسة.

ولقد أجريت محاولات وأبحاث عديدة من أجل تحديد الأخطاء الحاصلة في عمل آلات التشغيل وتعويضها [6]، إن إمكانية استخدام طريقة هندسية مشتركة من أجل تغطية الطريقة الشائعة الاستعمال في مجال تعويض الأخطاء في مختلف أنواع الآلات ثلاثية المحاور وأشكالها يمكن تبسيطها على بعض أشكال الآلات. وبعد ذلك يمكن تطبيق إشارات التصحيح المتولدة في الطريقة المذكورة من خلال نظام التحكم في المحور المناسب. يمكن تكييف نظام تعويض الخطأ من أجل عوامل معينة مثل التوافق مع الحمولة والتأثير الحراري، مثل هذا النظام يتميز بقدرته على

التعويض خلال زمن حقيقي لأخطاء التوضع المنهجية، التي تنتج عن كافة المحاور الرئيسة للانحراف الهندسي، وهذه الطريقة تحتاج فقط إلى قياس عناصر الخطأ لكل محاور الآلة في خط وحيد. وبالنتيجة يكون زمن المعايرة في هذه الطريقة أقل من الطرق الأخرى وهي أكثر اقتصادية [7][8]. ويمكن تطبيق هذه التقنية بشكل متساوٍ أو مكافئ على المعالجات الديكارتية.

إن طرق التحليل الأخرى لأجزاء الروبوت الجسري (الديكارتي) تقدم معلومات مفيدة للتحسينات الجارية خلال عملية التصميم، لكنها ليست مناسبة لعمليات تصحيح الخطأ بزمن حقيقي. ويعود السبب في ذلك؛ لأنها تقتصر فقط على التحليل الإنشائي لتحديد خطة الحمولة الدنيا. [9]

أهمية البحث وأهدافه:

إن الهدف الأساسي من البحث هو تحسين أداء الروبوتات المستخدمة في العملية الإنتاجية، والتي تمكّن من تحسين الطاقة الإنتاجية بشكل أفضل، وذلك عن طريق تحسين نوعية مجموعات التشغيل وفعاليتها، وكذلك عن طريق زيادة المرونة الإجمالية على خط الإنتاج , والذي يسمح بدوره للشركات الصانعة أن تبدل الإنتاج سريعاً لتلبية احتياجات الزبائن كما تشاء وحسب الطلب ، وللحد من زمن التعطل ولزيادة معدل المرونة يجب تنفيذ عمليات برمجة الروبوتات بشكل مباشر من أجل النمذجة والمحاكاة، ولتحقيق هذه الأهداف يجب معايرة الروبوتات المستخدمة في العملية الإنتاجية وتصحيح الأخطاء.

طرائق البحث ومواده:

إن طريقة البحث ومواده تعتمد على إجراء عمليات قياس لحركة الروبوتات الديكارتية باستخدام أجهزة قياس عالية الدقة والحساسية بهدف معرفة الأخطاء الناتجة عن حركة هذه الروبوتات، واستخدام المعادلات التي تعطي عناصر الخطأ في كل من المحاور الثلاثة التي تتداخل فيها الأخطاء، ثم إيجاد نموذج حاسوبي لمحاكاة عملية تصحيح الأخطاء، بالإضافة إلى الاعتماد على مراجع علمية متخصصة، وبحوث علمية منشورة في مجلات عالمية في هذا المجال .

النتائج والمناقشة:

أ- اختبار الأخطاء الهندسية في آلات قياس الإحداثيات الديكارتية المماثلة للروبوت.

إن الأخطاء التي تحصل في أثناء عمل الروبوتات يمكن تصنيفها كما يلي :

1- أخطاء هندسية :

ويكون لها تأثيرات ثابتة في الدقة المتعلقة بالروبوت المدروس. ويعود سبب العديد من هذه الأخطاء إلى عملية تصنيع الآلة. ومن المؤكد أنه كلما زادت درجة تعقيد شكل الآلة ونموذجها زاد احتمال حصول أخطاء مركبة.

2- أخطاء التكيف مع الحمل:

وتحدث نتيجة اختلاف الحمولات الدنيا التي تقع على جسم المعالج، ويمكن أن يختلف وزن الحمولة الدنيا وتوزعها بشكل واسع حسب نطاق الأعمال التي يتم إنجازها، وقد تحدث مشاكل أخطاء التوافق أو التكيف مع الحمل

بالشكلين الستاتيكي والديناميكي، بحيث يكون هذا الأخير أكثر تعقيداً عند الحاجة إلى تحليله ولا سيما في الأنظمة المتشعبة والمتعددة الاتصالات.

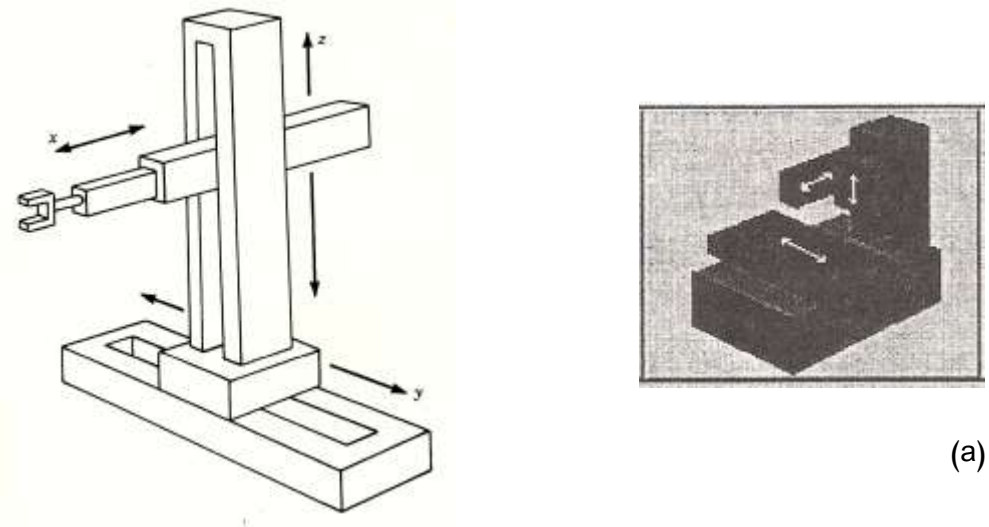
3- الأخطاء العددية (الرقمية):

وتحدث نتيجة لوجود مشاكل في دقة البرمجة والتحكم. ومع أن هذه الأخطاء المنفصلة قد تحدث وتبدو قليلة الأهمية لكنها قد تتراكم كي تخلق مصدراً مستقلاً للأخطاء وهذه مسألة بالغة الأهمية في الأنظمة العالية الدقة مثل التحكم في آلات التشغيل ذات المواصفات العالية، وآلات قياس الإحداثيات.

4- أخطاء مجالات التشغيل:

يمكن ملاحظته في مجالات تشغيل الروبوتات، إذ على الرغم من أن تأثيرات الوسط الحرارية لقوى القطع الكبيرة تكون أكثر أهمية في مجال آلات التشغيل منها في الروبوتات، إلا أنه عند تشغيل الروبوت في ظل حمولات عالية قد يؤدي لتوليد حرارة عالية من المحركات، الأمر الذي يجب أن يؤخذ بالاعتبار. إن الأبحاث السابقة [10] التي أجريت على الأخطاء الحرارية التي ترافق عمل الآلات أدت إلى تطوير طريقة غير مباشرة تستخدم نموذجين أحدهما حراري، والثاني نموذج تشوه. ويمكن استخدام هذين النموذجين في معالجات الروبوت الديكارتية مثل الربوتات الجسرية وآلات قياس الإحداثيات، وذلك من أجل تصحيح الأخطاء الحرارية التي قد تحصل.

ويكون شكل المعالج الديكارتي وتكوينه وآلة قياس الإحداثيات الجسرية هو نفسه، المبين على الشكل (1-a,b)، حيث يوضح الشكل (1,a) التركيب التقليدي لهذه الآلة، والشكل (1,b) المعالج المكافئ .



الشكل (1- a,b) آلة قياس الإحداثيات الجسرية والروبوت المماثل.

إن عملية المعايرة لآلة قياس الإحداثيات، يمكن تطبيقها على مثل هذا الروبوت. ويكون مجال القياس على كل محور مسافة بعيدة عن نقطة القياس للمؤشر. هذا التركيب سيعطي أخطاء ناتجة عن مبدأ الانحراف، فعندما يتحرك مؤشر قياس نظام آلات قياس الإحداثيات يتأثر موقعه بمقدار ست درجات من درجات الحرية المتعلقة بكل محور

للحركة. وهذه الدرجات هي: الوضعية الخطية – الخطوة– الالتفاف (Roll)(الحركة حول المحور الطولي) – الانعراج (الازاحة الزاوية) – الاستقامة من جانب لجانب، والإستقامة من الأعلى والأسفل، يضاف إلى ذلك أخطاء درجات الحرية التي تنشأ كذلك بسبب نقص التعامد بين المحاور، وهذه الأخطاء مجتمعة تسمى أخطاء التعامد.

إن الـ6 درجات حرية لكل محور مع الـ3 أخطاء تعامد تشكل الـ21 مصدر خطأ. وبالتالي فان كافة عناصر الخطأ هذه ستؤدي إلى حدوث خطأ إجمالي بين وضعية المؤشر الفعلية والوضعية التي تحددها 3 مقاييس إحداثيات .

إن عناصر الخطأ الناتجة عن الانحرافات الهندسية في تركيب آلة قياس الإحداثيات مكونة من عنصرين: أخطاء عشوائية وأخرى منهجية. إن الأخطاء المنهجية يمكن قياسها و استخدامها لتحديد خواص درجة دقة آلة قياس الإحداثيات وتوضيحها. ويمكن كذلك استخدام هذه القياسات لتطوير طريقة تعويض الخطأ إمّا بالوصل مع حاسب (كومبيوتر) يضاف لآلة قياس الإحداثيات وإمّا عن طريق معالج خارجي. كذلك يمكن تقسيم الأخطاء المنهجية إلى ثلاثة عناصر خطأ محددة أخرى، وهي الخطأ الحلقي (الدائري)، والخطأ اللاحلقي، والدوري أو التخلف (التأخر).

لا يمكن قياس عناصر الخطأ العشوائية بشكل مباشر، ولا يمكن تعويضها وحسابها اعتماداً على برنامج آلة قياس الإحداثيات أو معالج خارجي. مثل هذه الأخطاء يمكن تمثيلها على شكل قيم وسطية إحصائية. وهذا التمثيل يعطينا معلومات، ويرشدنا إلى الدقة الإجمالية لنظام آلة قياس الإحداثيات أو النموذج المدروس (المعالج اليكارتي).

إن المعادلات التالية تعطي عناصر الخطأ في كل من المحاور الثلاثة التي تتداخل فيها الأخطاء لتعطي الخطأ المنهجي المركب.

$$\left.\begin{aligned} X_{error} &= +Y_{strt(X)} + Z_{strt(X)} + \left(Y_{Pitch} \,.\, Z\right) + \left(Y_{Roll} \,.\, Z\right) + \left(Y_{Yaw} \,.\, Y\right) \\ &+ \left(XZ_{sqr} \,.\, Z\right) + \left(XY_{sqr} \,.\, Y\right) \\ Y_{error} &= Y_{lin} + X_{strt(Y)} + Z_{strt(Y)} + \left(X_{Roll} \,.\, Z\right) + \left(Y_{Pitch} \,.\, Z\right) + \left(YZ_{sqr} \,.\, Z\right) \\ Z_{error} &= Z_{lin} + X_{strt(Z)} + Y_{strt(Z)} - \left(X_{Roll} \,.\, Y\right) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

إذ إنّ:

X_{lin} : الانزياح الخطي للمحور X .

X_{Roll} : الانزياح الالتفافي(Roll) للمحور X .

X_{strt} : الانزياح من جانب إلى آخر أو الانزيح من الأعلى للأسفل للمحور X .

Y_{Pitch}: الانزياح الخطوي للمحور Y.

Y_{sqr}: الانزياح التربيعي للمحور Y .

Y_{Yaw}: الانزياح الزاوي للمحور Y .

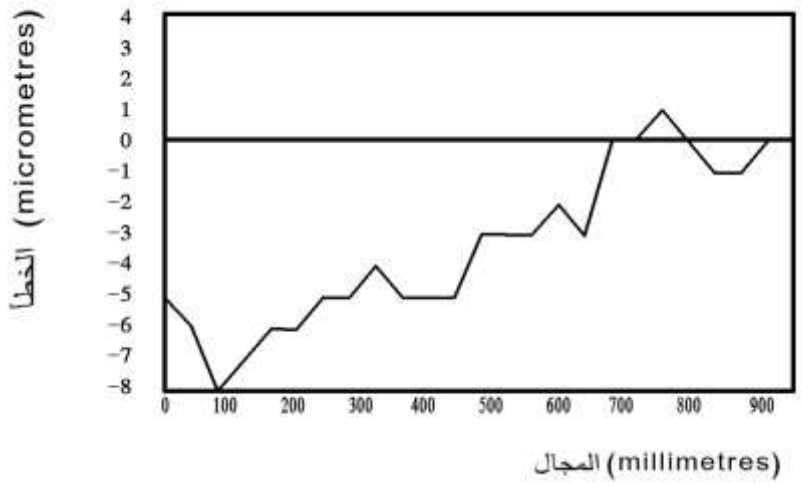
إن التبدلات في درجة حرارة الجو بالإضافة إلى الحرارة المنتشرة من داخل الآلة يمكن ظاهرياً أن يكون له تأثير مهمّ على درجة دقة الآلة. إذ إنّ تبدلات درجة الحرارة المحيطية تسبب تشوهاً وتغيراً في تركيبة الآلة، وهذا له تأثير كبير في تعامد المحاور. وقد تحدث أخطاء خطية عند وجود اختلاف في التمدد بين مقاييس آلة قياس الإحداثيات وقطعة التشغيل المقاسة.

إن طريقة القياس الحالية والأكثر فعالية لقياس درجة الدقة وكشف الأخطاء داخل آلة قياس الإحداثيات تعتمد

على استخدام مقياس التداخل الليزري الضوئي [11]؛ إذ إنّ استخدام نظام الليزر يسهل عمليات قياس الوضعية والسرعة والخطوة والانعراج (الازاحة الزاوية) والتناسب والاستقامة مباشرة. ويمكن قياس التعامد اعتماداً على نظام الليزر أو باستخدام مربع الدقة، وكذلك يمكن قياس دقة التأرجح باستخدام حساسات قياس الكترونية. وتتم عمليات القياس باتجاه واحد أو باتجاهين و يتيح لنا الأخير قياس التخلف أو التأخر.

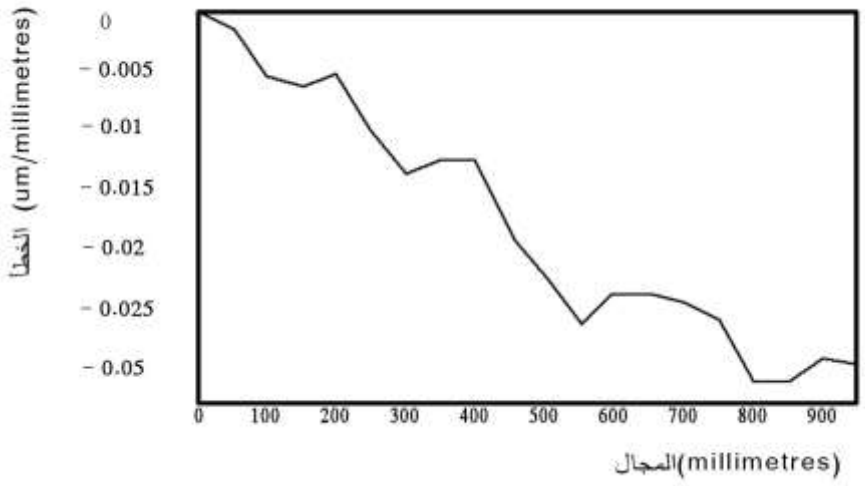
وتوضح الأشكال من 2 إلى8 المخططات المثالية باستخدام الليزر لمحور وحيد(منفرد)لآلة قياس الإحداثيات .

إذ يوضح الشكل (2) القياس الخطي للمحورX ؛ إذ يصل الخطأ لحدود 10 ميكرومترعلى طول متراحد للمحور.



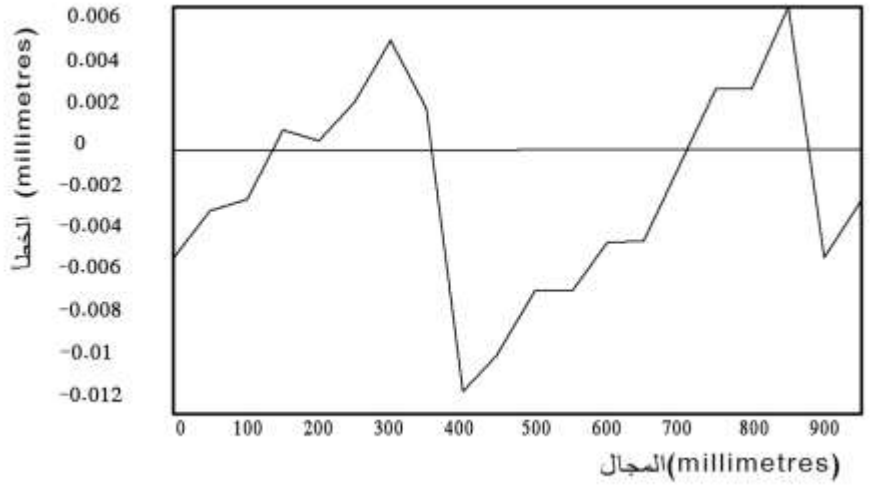
الشكل(2) القياس الخطي للمحورX .

ويبين الشكل (3) قياس خطوة المحورX . وبكون خطأ الخطوة بحدود 0.05mm بالاتجاه السالب على طول متر واحد.



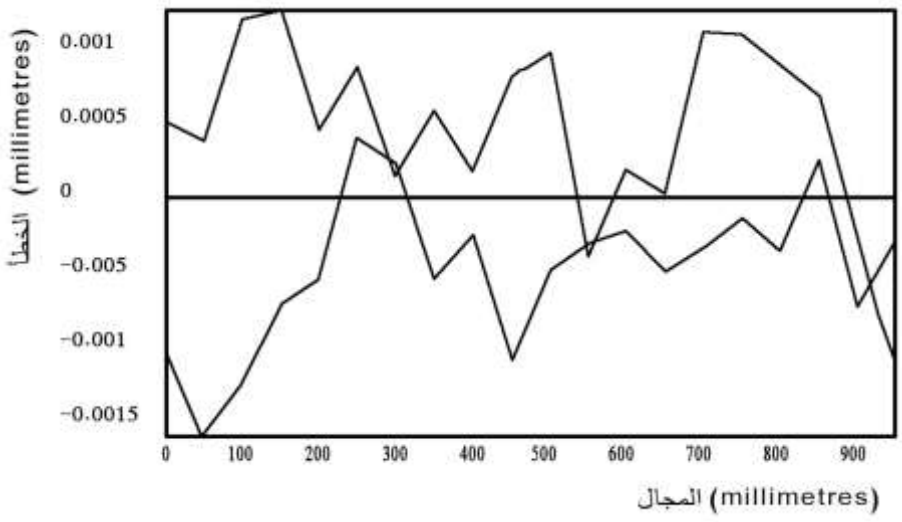
الشكل (3) خطوة المحورX .

ويبين الشكل (4) قياس الانعراج (الازاحة الزاوية) للمحورX . ويتراوح الخطأ من $-0.012mm$ إلى $+0.006mm$ على طول متر واحد.



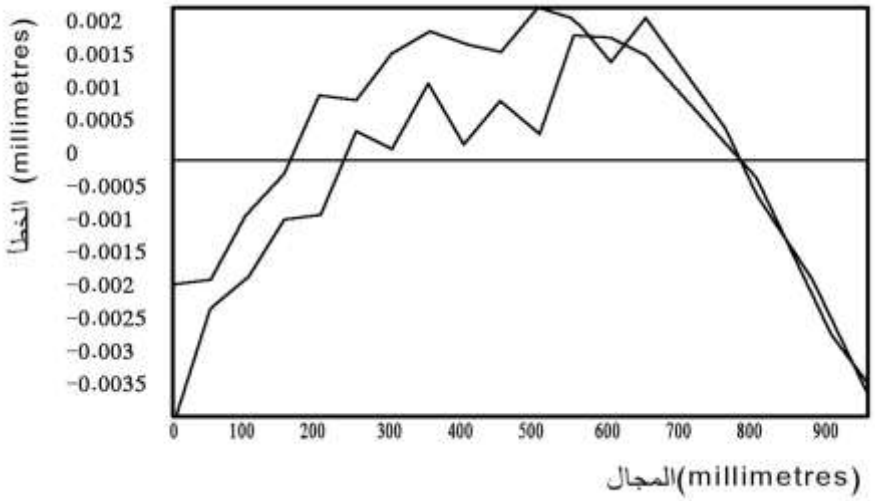
الشكل (4) الانعراج (الإزاحة الزاوية) للمحور

ويبين الشكل (5) قياس الاستقامة باتجاهين للمحورX. ويكون الخطأ بحدود $\pm 0.004mm$ في الاتجاهين الموجب والسالب.



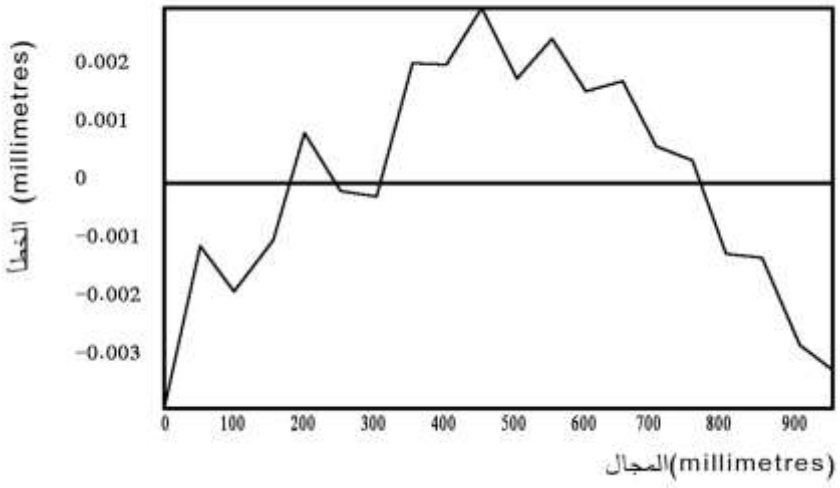
الشكل (5) قياس الاستقامة باتجاهين للمحورX.

ويبين الشكل (6) قياس الاستواء الشاقولي باتجاهين للمحورX. ويكون الخطأ بحدود $\pm 0.0015mm$ في الاتجاهين الموجب والسالب.



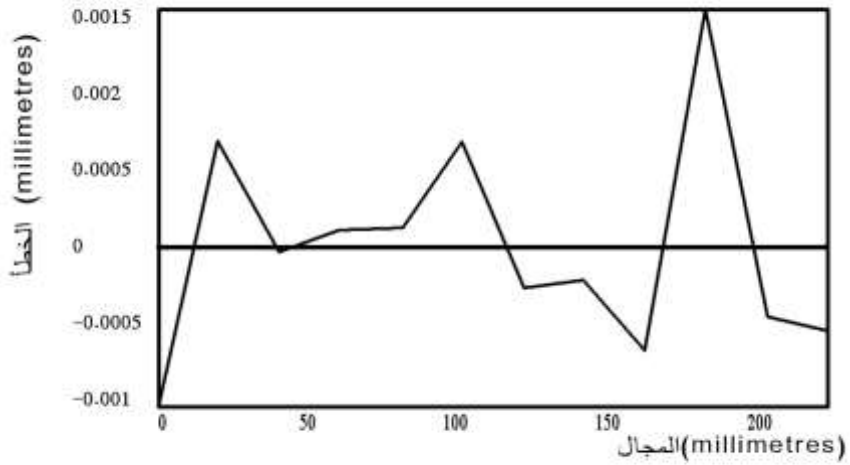
الشكل (6) قياس الاستواء الشاقولي باتجاهين للمحورX .

ويبين الشكل (7) قياس تربيع المحور من Z الى X . ويتراوح الخطأ بين $\pm 0.003mm$ على طول متر واحد.



الشكل (7) قياس تربيع المحور من Z الى X .

ويبين الشكل (8) قياس تربيع المحور من X الى Z . ويتراوح الخطأ بين $\pm 0.00125mm$ على طول حوالي 200mm.



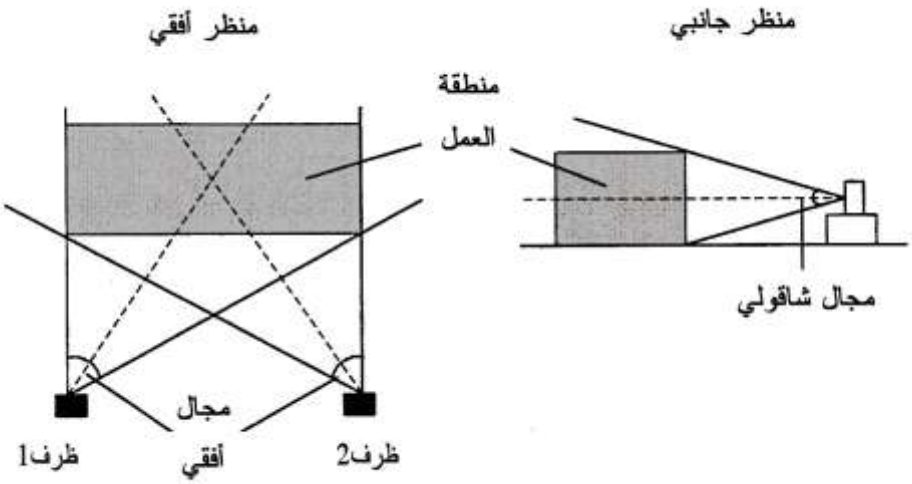
الشكل (8) قياس تربيع المحور من X إلى Z .

2- نظام التتابع الليزري المستخدم لتعويض وتصحيح الأخطاء:

إن التقنية المذكورة سابقا تستخدم بيانات من أجهزة قياس تداخل الليزر والحساسات الإلكترونية، وأجهزة قياس التشوهات، وذلك لتصميم نموذج للدقة بالنسبة إلى نظام ثلاثي المحاور.إن البحث يتم حول إنشاء جهاز تتابعي ليزري للحصول على نظام معايرة آلي دقيق، وذلك خلال زمن قصير جدا.

إن النظام الليزري المستخدم والمبين على الشكل (9) يستخدم ظرفين لتتبع الليزر، في هذا النظام كل ظرف يستطيع أن يتتبع حركة عاكس باستخدام كاشف خطأ رباعي لقياس انحرافات الحزمة الراجعة ، ويتم تحويل الإشارة عن طريق أمرإلى المرايا العاكسة الفعلية في ظرف الليزر الذي يقوم بالتنظيم من أجل تعويض وتصحيح هذا الانحراف .

بعد ذلك يمكن تعيين موقع العاكس المطلوب عن طريق عملية التثليث، وبمقارنة الموقع والوضعية المطلوب أن يتقيد بها الروبوت والموضع الفعلي سيعطي الخطأ عند تلك النقطة. عند ذلك يمكن وضع مخطط خطأ بافتراض وجود علاقة خطية للآلة، وهذا ستتم مقارنته مع الخطأ الحجمي (الثلاثي الأبعاد) الناتج من المعادلات (1) لتحديد درجة الدقة . وكل تناقص في زمن المعايرة سيتم ضبطه مقابل نقص الدقة حين تقرير الطريقة الأفضل لاستخدامه من أجل كل آلة .



الشكل (9) نظام التتابع الليزري المستخدم .

الاستنتاجات والتوصيات:

1-تبين الطريقة المقترحة قابلية تحقيق تصحيح هندسي مهم بوجود العوامل المعيقة مثل التباين والدقة وقابلية تكرار كل محور من محاور الآلة.

2-يمكن استخدام تقنيات القياس التتابعي الليزري والحساسات الإلكترونية ومربعات قياس الدقة من أجل قياس عناصر الخطأ التي تكوّن النظام ثلاثي المحاور .

3-تمكن نتائج مخططات أخطاء الانحرافات وبيانات القياس الليزري من إنشاء طريقة هندسية أو خوارزمية من أجل تحديد الدقة بالنسبة إلى نظام ثلاثي المحاور.

4- بينت نتائج الطريقة المدروسة، بالمقارنة مع الطرق المدروسة سابقاً في هذا المجال مثل: الطرق التي استخدمت ظرفاً واحداً فقط لتتبع الليزر، بأنها أكثر دقة في مجال المعايرة وتصحيح الأخطاء، وذلك خلال زمن قصير جداً.

المراجع:

1- PETER CORKE, - *Robotic, Vision and Control: Fundamental Algorithms in Matlab*, McGraw-Hill. ISPN:38611468637, 2011, 550.

2- LOW KIN HUAT,- *Industrial Robotics: programming, Simulation, and Application,* McGraw-Hill. ISPN: 43618106683, 2007, 690

3- SMITH, EG,- *High- Precision Measurement System Based on Laser Interferometer,* SciVerse, Physical Sience and Engineering, V281, 2008, 744-749.

4- BELFONTE. G, BONA. B, CANUTO. E, FERRORIS. F. *Co-ordinate Measuring Machines and Machines Tools, Self Calibration and Error Correction.* CIRP, Manufacturing Technology, Torino- Italy, V36, 2008, 359-364.

5- PATHRE, U. - *Simulation and Calibration for Off-line Programming of Industial Robots*, 1994, SME, MS94-210.

6- ZIEGERT, J. ET.– *Error Compensation in Machine Tools, a Neural Network Approach.* Journal of Intelligent Manufacturing Centre,V115, 1994, 143-151.

7- KRURTH, JB., RANHOREK, P., JONGE, L. DE., *Self- Calibration Method and Software Error Co- Ordinate Measuring Machine Using Artefact Measurements*. Department of mechanical Engineering, Leuven, Belgium. V14, 2003, 157-167.

8- DANG, QC., YOU, S., KIM, W., *Complate 3-D Self Calibration of Co- Ordinate Measuring Machine*. CIRP, Manufacturing Technology, Torino- Italy, V55, 2006, 527-530.

9- LAWO, M. - A *scheme of a knowledge based system for optimal modeling and design of robots*, DE-Vol. 69-2, Advances in Design Automation –Volume 2 ASME 1994.

10- ALIN, JP. POSTLETHWAITE, SR. – *Practical Thermal Error Compensation for CNC Machine Tools,* Proceeding for the Eleventh Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Monterey, California, Nov. 1996. 648-653

11- KUZMAN, H. PFEIRFER, T. FLUGGE, J.- *Scales VS. Laser Interferometers Performance and Comparison of two Measuring Systems.* CIRP, Manufacturing Technology, Germany, V42, 2008, 753-767.