

Szakmai zárójelentés

a Hibakorrekciós algoritmusok a koordináta mérés technikában című
T 042935 számú kutatási projekt keretében elvégzett feladatokról és
azok tudományos eredményeiről

A kutatási projekt keretében a következő feladatokat tűztük ki:

- Matematikai modell a mérőgép térbeli hibáinak egyidejű és folytonos leírására
- A térbeli hibák egyidejű mérésének megoldása
- Algoritmusok kidolgozása a hibák korrigálására
- A tapintó alakhibájából származó hiba korrigálása

A kutatási időszak alatt a két jelentős újdonság jelent meg a mérés technikában: a mikro elektromechanikai elemek ellenőrzésére szolgáló nagy pontosságú mérőgépek (elsősorban holland, német, svájci és amerikai kutatók munkáinak eredményeként) és a mikro fókuszált röntgen tomográfia. Míg az előbbinél a jelen kutatási projekt keretében kidolgozott módszerek alkalmazhatók, addig a tomográfia alkalmazása a makro- és mikrogeometriai mérés technikában teljesen új megközelítést igényel. Bár az utóbbi témakör nem tartozott a projekt célkitűzései közé, megvizsgáltuk, hogy ebben a kontextusban a számítógépes geometriai modellezés és a számítógépes grafika eljárásai hogyan alkalmazhatók a mérés technikai feladatok megoldásában. Vizsgálódásunk eredményeit egy konferencián elhangzott előadásban foglaltuk össze [5].

A nagy pontosságú mérőgépek esetén a megfelelő konstrukció kialakítása mellett jelentős szerepet kapnak a hibakorrekciós eljárások. Ennek alapvető gazdasági oka, hogy a pontosság kizárólag mechanikai úton történő biztosítása igen drága, ugyanakkor az ismételhetség megoldása, a súrlódás és a hiszterézis minimalizálásával, illetve kiküszöbölésével és a felbontás növelésével, a költségek szempontjából sokkalta kedvezőbb.

A mérőgép elemeihez rendelt koordináta rendszereknek, a referencia koordináta rendszerhez viszonyított térbeli helyzetét és orientációját az irodalomból ismert homogén koordináta transzformációk segítségével írjuk le. Ez a megközelítés a számítógépes grafikából és a geometriai modellezésből ismert és már alkalmazást nyert a különböző térbeli mozgások így robotok és a mérőgépek mozgásainak leírásában is.

A transzformációs mátrixok vonatkozhatnak egyrészt az ideális mozgásokra, másrészt a hibákkal terhelt mozgásokra. Különbségük adja a helyfüggő hibamátrixot. Az ún. összekötő elemeket, amelyek mozgó elempárok közötti kapcsolatot teremtik meg, reprezentáló mátrixok elemei állandóak. Az összekötő elemek bevezetése, az illető gépelem hőmérsékletének, illetve a hőgradiensnek az ismeretében, lehetővé teszi a hőtágulásból, illetve a hődeformációból származó hibák modellezését is. A 3x3-as ortonormált almátrix a szöghibákból eredő fordulásokat, míg a 3x1 oszlopvektor az eltolási hibákat reprezentálja. Mivel a mátrix szorzás nem kommutatív az egyes szöghibák méréséből származtatott mátrixok különbözőek, aszerint, hogy a szorzásokat milyen sorrendben hajtjuk végre. Ez a gyakorlatban úgy küszöbölhető ki, hogy kis szöghibákat feltételezve a $\cos\varphi \approx 1$ és a $\sin\varphi \approx \varphi$ megközelítéseket alkalmazva olyan speciális mátrixokat kapunk, amelyek most már kommutatívak lesznek. Az irodalomban megjelent közlemények közül szinte valamennyi, él ezzel az elhanyagolással. Ennek eredményeként a rotációs almátrixok elveszítik ortonormalitásukat, tehát nem egy térbeli forgatást fognak reprezentálni. A probléma a kiküszöbölésére dolgoztuk ki a következő bekezdésben ismertetett mérési eljárást, amely egy lépésben a transzformációs mátrixok meghatározásához vezet.

Az eljárás lényege azon alapul, hogy egy szilárd test hat szabadságfokkal rendelkezik és ezeket a szabadságfokokat kell a mérés során megfelelő módszerrel „elvenni”. Ez a mozgástartománytól és a megkívánt pontosságtól függően különböző fizikai elven működő elmozdulás mérő eszközök segítségével történhet. A vizsgálataink során egy koordináta asztal esetén egy-, és kétsugaras lézer interferométert és három kapacitív érzékelőt használtunk. Nagyobb elmozdulás esetén ez utóbbi helyettesíthető egy ma már kapható háromsugaras

lézer interferométerrel. A mátrixot, amely a referencia koordináta rendszerhez viszonyítva az új koordináta rendszert határozza meg egyszerű, a lineáris algebrából ismert módszerek segítségével számítjuk ki. Az eljárást több konferencia előadáson ismertettük [8][13].

Részletesen elemeztük egy 2D-s koordinátaasztal pontosságát, a hibák hatását és ezek számítástechnikai úton történő korrekciójának módját. A vizsgálat tárgyát képező koordinátaasztal mérőrendszere egy, egy- és egy kétsugaras síktükrös lézer interferométerből áll. Az elemzés alapvetően a mérőrendszer elemek (az interferométerek, a tükrök alak és merőlegességi) hibáinak meghatározásával, ezek hatásának kiküszöbölésével foglalkozik. Ezen a téren elért eredményeinket két konferencia előadásban tettük közzé [4][6]. Az elemzéshez kapcsolódó méréseinkben használt interferométerek felbontása 10 nm, a tükrök síklapúságtól való eltérése kisebb, mint $\lambda/20$ volt. Ebben a témakörben, mérési eredményekkel kiegészített elemzésünket további publikációként egy referált nemzetközi folyóiratban tervezzük még az év folyamán közzétenni.

A mérési módszert sikeresen alkalmaztuk egy precíziós lineáris szán és egy optikai mérőgép asztalának hibáinak meghatározásánál. A szánt kifejezetten erre a célra készítettük és mozgását piezomotoros dörzshajtással oldottuk meg. A piezomotor alkalmazásának célja, mivel a szakirodalomban erre vonatkozóan semmiféle hasznosítható információ nem állt rendelkezésre, a rendkívüli nagy felbontás (10 nm) és a kettős működtetés nyújtotta lehetőségek kipróbálása volt. A kettős működtetés egyenáramú üzemmódban lehetővé teszi a felbontás további növelését. Ennek a lehetőségnek a kihasználása érdekében két párhuzamos nem-lineáris szabályozókört építettünk ki. Az első kör, amely AC üzemmódban működtetik a motort „durva” pozicionálásra szolgál és cél előtt, a vezérlő szoftverben meghatározott távolságra, állítja le szerkezetet. A működésnek ebben a szakaszában a mozgást a piezokristály felületén kialakuló felületi hullámok végzik. Ezt követően a szabályozás DC üzemmódba kapcsol, ahol a finompozicionálás a hagyományos, a kristály feszültség hatására történő nyúlásán alapul. Mindkét üzemmódban számoltunk a hiszterézissel, illetve a telítődéssel. A berendezés felépítését, a piezomotor működését és az irányítási rendszert,

valamint a berendezéssel szerzett első tapasztalatainkat egy nemzetközi konferencián tartott előadás keretében foglaltuk össze [9].

Az eljárással a mérési tartomány véges számú térbeli pontjában határozható meg a mozgó elemhez rendelt koordináta rendszer (frame), amelyet a referencia koordináta rendszerhez viszonyított transzformációs mátrixok reprezentálnak. A közbenső értékeket interpoláció segítségével határozzuk meg. Itt alapvetően két út járható: a hibamátrixok segítségével meghatározzuk a helyfüggő hibakorrekciós vektorokat és az interpolációt ezen a vektortéren hajtjuk végre, vagy a mátrix interpolációt végzünk és a közbenső korrekciós vektorokat az így kapott mátrixok segítségével határozzuk meg.

Az előbbi számítástechnikailag egyszerűbb, ugyanakkor magában hordozza mindazokat a hibákat, amelyek a rotáció koordináta értékenkénti interpolációjából adódnak.

Az első esetben a mérési pontok egy térbeli rácsot alkotnak és hibavektorok ennek a rácsnak a deformációjaként foghatók fel. Ez a megközelítés egyértelműen elvezetett bennünket a volumetrikus B-spline interpoláció alkalmazásához [7].

A transzformációs mátrixok egy Lie csoportot $SE(3)$ alkotnak, és az interpolációt ezen a csoporton kell megvalósítani. Mivel ez általánosságban nehézségekbe ütközik, illetve számításigényes ezért az interpolációt az eredeti 3D-s koordináta rendszerben a rotációt és a translációt külön-külön kezelve határozzuk meg. A rotációt a továbbiakban egység kvaternióként reprezentálva a Shoemake¹ által kidolgozott gömbi spline kvaternió interpolációt (spherical spline quaternion interpolation) alkalmazzuk. Ezzel biztosítjuk a mátrixok ortonormalitásának megőrzését és a sima átmenetet. A pozicionálási hibák közelítésére harmadfokú spline függvényeket használunk [8][13].

¹ Ken Shoemake: Animating rotation with quaternion curves. Computer Graphics, 19(3):245-254, 1985
Ken Shoemake: Quaternion calculus and fast animation. SIGGRAPH Course Notes, 10:101-121, 1987

Az algoritmusokat a Matlab rendszerben megvalósított szimulációs programmal ellenőriztük. A szimulációs eredmények azt bizonyítják, hogy az utóbbi módszerrel kapott közbenső értékek jobban közelítenek a valóságos közbenső értékekhez.

A mérőgépeken használt tapintók csúcsán általában egy gömb található. A mérés során ennek a gömbnek a sugarával kell korrigálni az eredményeket. Nyilvánvaló, hogy mivel a tapintási pont az ellenőrizendő alkatrész alakjától függően a gömb különböző pontjain helyezkedik el, a tapintó alakhibája növeli a mérési hibát. Ennek korrigálása a tapintógömb valódi alakjának és a tapintás irányának ismeretében egy korrekciós vektor hozzáadásával, illetve kivonásával történhet. Szükséges tehát a gömb alakjának megfelelő sűrűséggel történő reprezentálása, ami célszerűen gömbi koordináta rendszerben történik.

A mérőgép mozgásának szabályozását egy személyi számítógéppel és egy programozható digitális szabályozó berendezéssel valósítottuk meg. Az utóbbi a szabályozási kör paramétereinek tetszőleges beállítása mellett lehetővé teszi korrekciós értékek és síkbeli korrekciós vektorok megadását. Az adatok bevitele egy előzőleg összeállított Excel táblából történhet, amelynek tartalmát a mérési adatok a fent említett interpolációs eljárások alkalmazásával a személyi számítógép állítja elő.

A fenti kutatási eredményeket összefoglaló közlemény 2007 folyamán a Springer kiadónál jelenik a prof. Tenreiro Machado szerkesztette Intelligent Engineering Systems című könyv részeként.

A növekvő pontossági követelmények jelentősen megváltoztatják a koordináta mérőgépek konstrukcióit. A törekvések az Abbe féle hibák teljes kiküszöbölésére és termikus hatások minél nagyobb mértékű csökkentésére irányulnak. Az irodalomból megismerhető legfontosabb konstrukciókat és azok meghatározó jellemzőit [11] dolgozat foglalja össze, és ezek közül bemutatja azokat, amelyek ötvözhetőek egy új konstrukció kialakításánál. A közlemény egyúttal kimerítően ismerteti a mérési bizonytalanságot meghatározó hibákat.

A kutatási projekt utolsó szakaszában, a második kutatási év mérési eredményeire alapozva, azt vizsgáltuk, hogy a referenciafelület hibáiból adódó térbeli mérési hibák légcsapágyazás esetén, hogyan származtathatók. Ennek a feladatnak megoldása, amely eredetileg nem szerepelt terveink között, de az eredmények további hasznosítása szempontjából van jelentősége, még nem zárult le. Előzetes számításainkat még mérésekkel szükséges ellenőrizni.

A projekt végrehajtása során szerzett ismereteinket és tapasztalatainkat egy automatikus mérőóra kalibráló berendezés megvalósításában hasznosítottuk. A berendezésről két nemzetközi publikációban számoltunk be [10][12]. A berendezés végleges változatának elkészültét, részletes bevizsgálását és kalibrálását követően további közleményt tervezünk egy referált nemzetközi tudományos folyóiratban megjelentetni.

Tervezzük továbbá egy légcsapágyazással, piezomotorokkal és digitális hajtással ellátott, számítógép vezérlésű nagy pontosságú koordináta asztal kialakítását, amely egy moduláris felépítésű mérő- és megmunkálógép család alapját van hivatva képezni. Az erre vonatkozó tervek rendelkezésre állnak és kivitelezésük megkezdődött.

Összefoglalva a projektben kitűzött feladatokat maradéktalanul megoldottuk és mint az, az utolsó két bekezdésből is kitűnik lépéseket tettünk az eredmények hasznosítása érdekében is.

Budapest 2007 február 27

Hermann Gyula