

## **ÖNJÁRÓ ROBOTOK FEDÉLZETI HELYZET-MEGHATÁROZÓ ESZKÖZEI**

Az ember és a legtöbb állat számára létfontosságú a saját, illetve a környezetében lévő más élőlények, tárgyak térbeli helyzetének meghatározása. Ez a képesség nem csak az élő szervezetek, hanem az olyan autonóm szabályozási rendszerek számára is nélkülözhetetlen, mint a robotok. A használatban lévő robotok többsége rögzített helyzetű gyártósor része. Már az ilyen alkalmazásoknál is érzékelők sokaságára van szükség a biztonságos és megfelelő pontosságú mozgások végrehajtásához. Biztosra vehető azonban, hogy a közeljövőben egyre több területen jelennek meg olyan önjáró robotrendszerek, amelyek munkaterületükön szabadon mozognak, így képesek az útjukba kerülő akadályok kikerülésével tetszőleges pályát bejárni a célállomások között. Ehhez azonban olyan érzékelőkre van szükség, amelyek képesek biztosítani a navigációhoz szükséges megbízható, pontos pozícióadatokat. Az ipari alkalmazásoktól eltérően, ahol a munkakörnyezet általában ismert, a katonai, kutató, katasztrófavédelmi és egyéb kültéri alkalmazásoknál nincs pontos térkép a terepről, akadályokról, illetve sok esetben éppen ennek elkészítése a robot feladata. [1]

A fentebb felsorolt területeken dolgozó önjáró robotoknak, főleg a katonai alkalmazásokban, ahol emberi életek kerülhetnek komoly veszélybe, különlegesen magas minőségi és megbízhatósági követelményeknek kell megfelelniük. Ez azt jelenti, hogy a fedélzeti helyzet-meghatározó berendezéseknek és érzékelőknek is teljesíteniük kell ezen elvárásokat. Ilyen eszközök tervezése, fejlesztése során a megbízhatóság növelése érdekében egyszerűsége, ugyanakkor kellő mechanikai szilárdságra kell törekednünk.

Ha egy szabadon mozgó tárgy térbeli pozíciójának megállapítása a feladat, ismerni kell az adott tárgy elhelyezkedésének irányát két megfigyelési pontból, vagy négy megfigyelési ponttól való távolságát. Az első módszert az élőlények szemei, valamint a képfeldolgozó videokamerás rendszerek használják. Az utóbbi elv a nem képfeldolgozási elven működő helymeghatározó rendszerek alapja, és egyben ezen cikk témája is, különös tekintettel az ultrahangos megoldásokra, amelyek egyszerűségükből és mechanikai szilárdságukból kifolyólag kiválóan alkalmazhatók nagy megbízhatóságú rendszerekben.

## MATEMATIKAI ALAPOK

Koordinátageometriából ismert, hogy egy pont térbeli pozíciójának megállapításához négy másik ponttól való távolságának ismeretére van szükség, ugyanis egy távolsággal egy gömbfelületet, kettővel egy körvonalat, hárommal két pontot tudunk meghatározni. Mivel a távolság mérése általában digitálisan történik, ezért fontos szerepet játszik a mérés felbontásából adódó úgynevezett kvantálási hiba. Ennek köszönhető, hogy a mért értékek nem egy gömbfelületek által meghatározott pontot adnak meg, hanem egy gömbhéjak által kivágott térrészt, aminek térfogata a kvantálási hiba köbével arányos.

Matematikailag egy pont koordinátái a következőképpen határozhatók meg négy ismert koordinátájú ponttól való távolságaiból, ha  $(u_i; v_i; o_i)$  az  $i$ -edik ismert helyzetű pont koordinátái,  $r_i$  az  $i$ -edik mért távolság,  $(x; y; z)$  pedig az ismeretlen helyzetű pont keresett koordinátái:

$$\begin{cases} (x - u_1)^2 + (y - v_1)^2 + (z - o_1)^2 = r_1^2 \\ (x - u_2)^2 + (y - v_2)^2 + (z - o_2)^2 = r_2^2 \\ (x - u_3)^2 + (y - v_3)^2 + (z - o_3)^2 = r_3^2 \\ (x - u_4)^2 + (y - v_4)^2 + (z - o_4)^2 = r_4^2 \end{cases}$$

A számítást jelentős mértékben leegyszerűsíthetjük azzal, hogy a fix pontok helyét úgy választjuk meg, hogy az egyik a koordináta-rendszer origójában, a többi pedig egy-egy tengelyen legyen. Mivel esetünkben ennek semmi akadálya, érdemes ezzel az esettel számolni. Legyenek  $(u; v; o)$  az ismert helyzetű pontok koordinátái az adott tengelyen:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r_1^2 \\ (x - u)^2 + y^2 + z^2 = r_2^2 \\ x^2 + (y - v)^2 + z^2 = r_3^2 \\ x^2 + y^2 + (z - o)^2 = r_4^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r_1^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 = r_2^2 + 2ux - u^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 = r_3^2 + 2vy - v^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 = r_4^2 + 2oz - o^2 \end{cases}$$

Ebből az egyenletrendszerből nagyon egyszerűen kifejezhetőek a keresett koordináták:

$$\underline{\underline{x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + u^2}{2u}}} \quad \underline{\underline{y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + v^2}{2v}}} \quad \underline{\underline{z = \frac{r_1^2 - r_4^2 + o^2}{2o}}}$$

## HELYZETMEGHATÁROZÁS A GYAKORLATBAN

Technikailag egyszerűbb távolságot mérni, mint szögeket, ezért a ma használatos pozíció-meghatározó eszközök, például a műholdas GPS rendszer, általában a fent említett módszert használják. A GPS (Global Positioning System) 24 db, földkörüli pályán, 20,240 km-es magasságban keringő műhold segítségével működő rendszer. Azért van 24 szatellitre szükség, mert így teljesül az a követelmény, hogy bármely időpontban, a föld bármely pontján vehető legalább négy műhold által sugárzott jel. Ez a jel egy digitális információcsomag, amely tartalmazza az adott műholdon lévő atomóra időadatait, a műhold pályadatait, az esetleges korrekciókat és egyéb adatokat. A vevőbe, vagyis a felhasználó által használt GPS készülékbe érkező időadat, és a készülék saját órája által mért időadat különbsége egyenesen arányos a vevő és az adott műhold távolságával. Az időadatok különbsége abból adódik, hogy a műhold által kibocsátott információcsomag, elektromágneses hullám lévén fénysebességgel terjed, tehát idő kell ahhoz, hogy a vevőbe érkezzon. A távolságokból a már megismert egyenletrendszer alapján könnyen kiszámolhatók a vevő koordinátái:

$$\begin{aligned}P_1 &= \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2} + c\delta t \\P_2 &= \sqrt{(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2} + c\delta t \\P_3 &= \sqrt{(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2} + c\delta t \\P_4 &= \sqrt{(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2} + c\delta t\end{aligned}$$

ahol:  $P_i$  — az adott műhold mért távolsága a vevőtől;  
 $X_i, Y_i, Z_i$  — a műhold ismert koordinátái;  
 $X, Y, Z$  — a vevő keresett koordinátái;  
 $\delta t$  — az órahiba;  
 $c$  — a fénysebesség.

Problémát okoz azonban, hogy míg a műholdak atomórái tökéletesen szinkronizáltak működnek, addig a vevőben lévő óra nem. Ez az időeltérés, az úgynevezett órahiba mind a négy egyenletben azonos módon jelenik meg, ezt kiejtve a koordináták pontosan számíthatók [2].

Távolság, és ezáltal térbeli pozíció meghatározására lézer fényt is használhatunk. Egyik lehetőség hogy a lézernyalábbal irányt jelölünk ki, a lézerforráshoz képest eltolt érzékelővel, pedig tulajdonképpen iránymérést valósítunk meg. Másik módszer a fényt, mint elektromágneses hullámot használja. Lényege, hogy lézerimpulzust vagy szinuszosan modulált fényerejű lézerfényt bocsátunk ki, amely a vizsgált felületről visszaverődve jut az érzékelőbe. Impulzusnál az

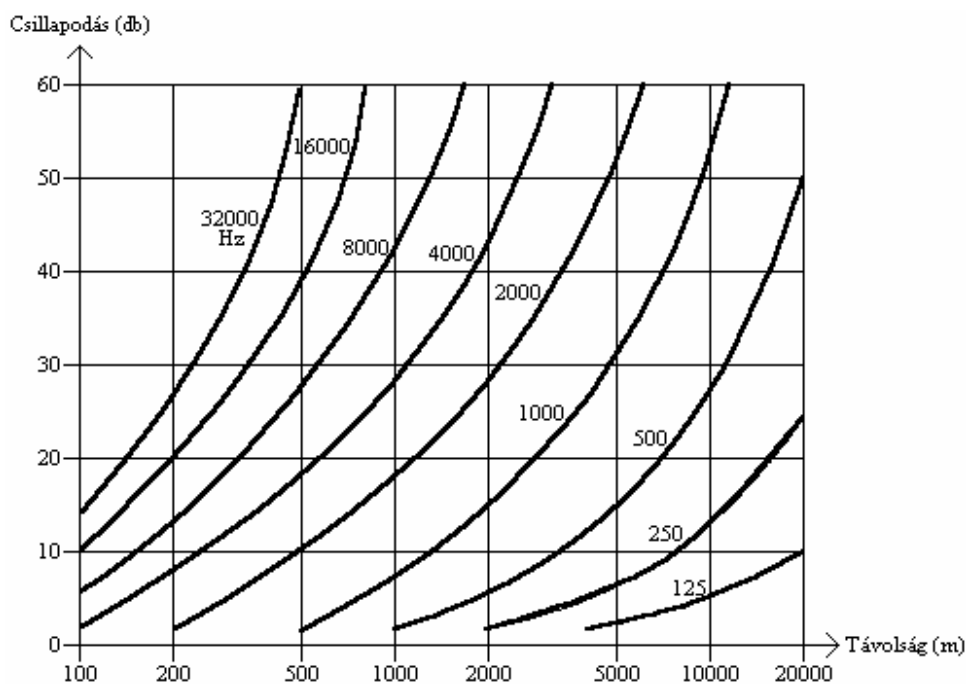
impulzus modulált jelnél, pedig a jel fázisának terjedési ideje lesz a távolsággal arányos mennyiség. A gyakorlatban pontosabb mérésekhez főként az utóbbi megoldások valamelyikét használják

Tárgyak térben elfoglalt helyzetének meghatározására használt megoldás még a gyorsulásmérés is (pl. 3D sisakok). Ekkor a kiinduló helyzettől való eltérést állapítják meg, de a módszer nagy hátránya a pontatlanság, hiszen a gyorsulás-pozíció átalakításhoz integrálásokra van szükség, ezért az időbeli kvantáltságból eredő hibák folyamatosan összeadódnak.

## TÁVOLSÁGMÉRÉS ULTRAHANG SEGÍTSÉGÉVEL

A már említett műholdas helymeghatározó rendszerben fénysebességgel haladó elektromágneses jelek segítségével állapítják meg a bemérendő készülék, és a műhold távolságát. Ez a megoldás kisebb méretek esetén ma még nem használható. Levegőben a hang terjedési sebessége hat nagyságrenddel kisebb, mint a fényé, így kitűnően alkalmazható kis méretek esetén is. A hang sebessége szobahőmérsékletű levegőben körülbelül 344 m másodpercenként. Ha megmérjük a hanghullám terjedéséhez szükséges időt, akkor könnyen kiszámíthatjuk a megtett távolságot, így már 10 MHz-es mintavételi frekvenciával is nagyjából  $3,44 \cdot 10^{-5}$  m-es felbontást kapunk. Ez azt jelenti, hogy egyszerű és nagy felbontású ultrahangos távolságmérő készíthető.

A ma használatos ultrahangos berendezések szinte kizárólag a visszhangjelenséget, vagyis a felületről visszaverődő hangjelet használják ki. Az adó és a vevő általában egy helyen van, leggyakrabban a két funkciót ugyanaz az egység látja el. Így az adóból kibocsátott jel a készülék-felület távolságot kétszer megtéve érkezik vissza a vevőbe. Ezek az eszközök általában az emberi fül számára nem hallható tartományba tartozó, 20 kHz fölötti hanghullámokat alkalmazzák. Ennek legfontosabb előnye éppen az, hogy nem hallható, tehát nem zavaró. Hátránya viszont a hang terjedése során fellépő csillapodás, melynek mértéke a frekvenciával nő. Ennek a csillapodásnak az oka a disszipáció, melynek során a hang energiája hővé alakul. A csillapodás frekvenciától való függését az 1. ábra mutatja [3].



1. ábra. Különböző frekvenciájú hangok csillapodása levegőben való terjedés során [2]

## Ultrahang felhasználásával működő berendezések

Mivel jelen cikknek nem célja az alkalmazási területek mindenre kiterjedő ismertetése, itt csak néhány fontosabb felhasználási példa kerül bemutatásra. Talán a legismertebb ultrahang felhasználási terület az orvosi képalkotás, ami a hanghullám különböző közegek határain való visszaverődésének és elhajlásának érzékelésén alapul.

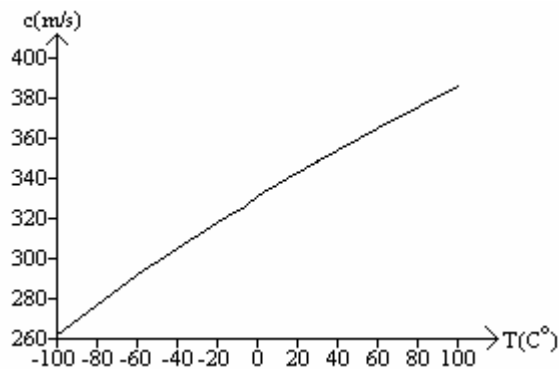
A hajózásban alkalmazott mélységmérési módszerek is a visszhangjelenséget, vagyis a folyó- vagy tengerfenékről visszaverődő hanghullámokat használják. Vízben a hang sebessége jóval nagyobb, körülbelül 1500 m másodpercenként, a csillapodása viszont sokkal kisebb mértékű, mint gázokban, így akár 12 000 m-es mélységig is mérhetünk vele. Másik hajózásban, főként a haditengerészetben használt eszköz a szonár, amely a távoli hajók vagy tengeralattjárók által kibocsátott hanghullámokat felfogva érzékeli azok jelenlétét és irányát [4].

Az iparban gyakran alkalmaznak ultrahangos távolságmérőket tartályokban lévő anyagok érintésmentes szintméréséhez. Másik fontos ipari felhasználási terület a roncsolásmentes anyagvizsgálat, ahol a vizsgálandó anyagban ultrahang hullámokat keltenek, és a repedésről vagy más szerkezeti hibáról visszaverődő

hanghullámokat érzékelik. Ezzel a módszerrel nem csak felismerhető, hanem lokalizálható is az anyaghiba.

## A hangsebesség-változás és az offszethiba hatásának kiküszöbölése

Mint láthattuk sokféle készülék használ ultrahangot távolság méréshez. Ezek általában a „bemérendő” tárgy felületéről visszaverődő jel késleltetési idejét mérik. Minden ilyen esetben problémát okoz, hogy a hang sebessége nem állandó, hanem függ a közeg, tulajdonságaitól, hőmérsékletétől, összetételétől, valamint a hang frekvenciájától. Mivel a frekvencia általában állandó, ez utóbbi nem jelent megoldandó problémát, de a levegő hőmérsékletének változásai jelentősen befolyásolják az ilyen mérések pontosságát. Az olyan esetekben, amikor nagyobb pontosságot követelnek meg, ezeket a tényezőket is ellenőrizni, vagyis mérni kell, ami tovább bonyolítja a feladatot. A hangsebesség hőmérséklettől való függését a 2. ábrán látható grafikon mutatja.



2. ábra. A hang terjedési sebességének hőmérséklettől való függése [5]

Az összefüggést jól közelíti a következő képlet:

$$c = \frac{1087\sqrt{273 + T}}{54,15}$$

ahol:  $c$  — a hangsebesség m/s-ban;

$T$  — a hőmérséklet °C-ban megadva [6].

A hangsebesség hőmérsékletfüggéséből adódó probléma megoldását nagyon megkönnyítené, ha az ismeretlen távolság késleltetési ideje mellett ismert, rögzített távolságok adatai is rendelkezésre állnának. Legyenek  $a, b$  az ismert, rögzített távolságok,  $t_a, t_b$  az ezen távolságokon mért idők,  $x$  az ismeretlen és keresett tá-

volság,  $t_x$  az ehhez tartozó mért idő,  $v$  a pillanatnyi hangsebesség,  $h$  pedig az elektronika késéséből adódó offszethiba (például az erősítés fázistolása). A két utóbbi mennyiséget joggal vehetjük azonosnak a három mérés esetére. Így a következő összefüggések írhatók fel:

$$\begin{cases} x = v(t_x - h) \\ a = v(t_a - h) \\ b = v(t_b - h) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = vt_x - vh \\ a = vt_a - vh \\ b = vt_b - vh \end{cases}$$

A jobb oldali egyenletrendszer második és harmadik egyenletéből az elsőt kivonva a következőket kapjuk:

$$\begin{cases} a - x = v(t_a - t_x) \\ b - x = v(t_b - t_x) \end{cases}$$

Az első egyenletet a másodikkal elosztva, levezethető a keresett távolság:

$$\frac{t_a - t_x}{t_b - t_x} = \frac{a - x}{b - x} \Rightarrow (t_a - t_x)(b - x) = (t_b - t_x)(a - x)$$

$$x = \frac{b(t_a - t_x) - a(t_b - t_x)}{t_a - t_b}$$

Az eredményből látszik, hogy kiesik mind a sebesség, mind az offszethiba. További előnye még a módszernek, hogy az így kapott eredmény dimenziója megegyezik azzal, amiben a rögzített távolságokat megadjuk. Az is látszik, hogy a megoldás kiküszöböli még a számlálási frekvencia esetleges ingadozásából adódó hibákat is, azzal a jóság feltételezéssel, hogy legalább a három mérés alatt az nem változik.

### Háromdimenziós ultrahangos pozíció meghatározó készülék

Ahogy azt a fentiekben láttuk, ahhoz, hogy távolságmérés segítségével háromdimenziós pozíciót lehessen meghatározni, a keresett pont legalább négy fix ponttól való távolságát kell megmérni. Sok esetben azonban elég, ha csak a fél teret képezzük le. Ekkor azt lehet megállapítani, hogy a három fix pont síkjának egyik oldalán hol helyezkedik el az ismeretlen helyzetű pont.

Szükség lehet rá, hogy mindkét típusú végpontból, tehát rögzített helyzetűből, és mozgóból is többet használjunk. Erre a hangsebesség-változás, és az offszethiba kiküszöböléséhez szükséges fix távolságok mérése miatt kerülhet

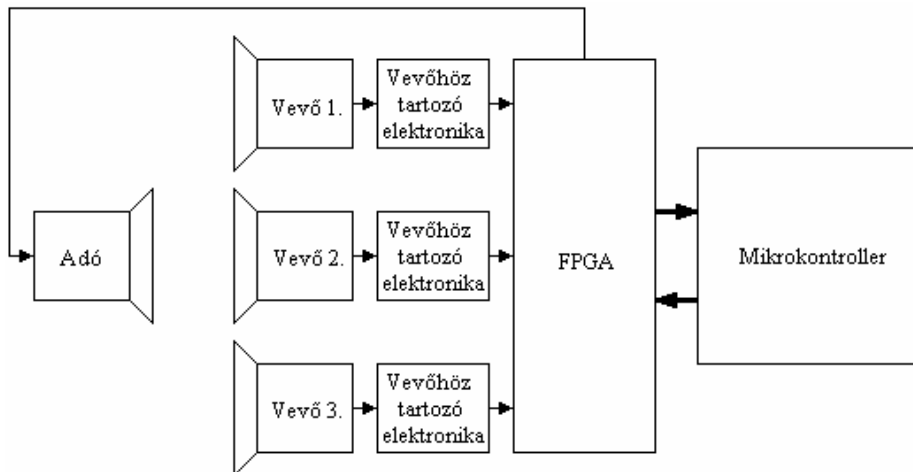
sor, valamint azért, mert egy tárgy térbeli elhelyezkedésének megállapításához több pontjának pozícióját is meg kell határozni.

Mivel a távolságmérések végpontjai esetünkben ultrahang adók illetve vevők, először azt kell eldönteni, hogy melyek legyenek rögzítettek és melyek szabadon mozgóak. Ha kevesebb adóra van szükség, mint vevőre, akkor célszerű azt a megoldást választani, hogy a vevők legyenek rögzítve, mert egy adó jelét egyszerre több, különböző helyen lévő vevő képes feldolgozni, míg több adó nem működhet egyszerre, hiszen nem lehetne megkülönböztetni a belőlük jövő ultrahang jeleket.

A vevők számát tehát csak a rendelkezésre álló hardver eszközök korlátozzák. Ezzel szemben több adó használata problémát jelent, amire kétféle megoldás létezik. Az egyik, hogy a különböző adók különböző jeleket bocsátanak ki, amelyeket meg lehet egymástól különböztetni. Erre a legegyszerűbb példa, különböző frekvenciájú jelek alkalmazása, hiszen ekkor elméletileg sávszűrők segítségével külön lehet választani a különböző adókból jövő jeleket. Azonban ilyen megoldás esetén nehezen megoldható gondot jelent a vevők megvalósítása, hiszen ezek általában csak a saját rezonanciafrekvenciájuk közvetlen környezetébe eső hangokat képesek fogni [7]. Ezért egyszerűbb a másik megoldást választani, amely időosztáson alapul. Ez annyit jelent, hogy az adók nem egyszerre adják le ultrahang jelüket, hanem először az egyik, majd miután ezt feldolgoztuk, a másik, és így tovább. Ez egyszerű megoldás ugyan, de hátránya, hogy minél több adót használunk, annál jobban csökken az időbeli felbontás, vagyis egy pozíció mérése időegységenként annál kevesebbszer történhet meg [8].

Egy egyszerű ultrahangos helyzet-meghatározó berendezés lehetséges felépítését a 3. ábra szemlélteti. Az ábrán látható elrendezésben három rögzített helyzetű vevő van. Az adót felszerelhetjük közvetlenül arra a tárgyra, amelynek térbeli helyzetét vizsgálni szeretnénk, de elképzelhető olyan összeállítás is, amikor az adó által kibocsátott jel a vizsgálandó tárgyról visszaverődve jut a vevőkbe (így tájékozódnak a denevérek is). Az első esetben könnyű dolgunk van, mivel az adót pontszerű sugárzónak tekinthetjük. A második esetben nehezebb pontos koordinátákat meghatározni ugyanis nagyobb kiterjedésű tárgyaknál nem csak egyetlen pontról verődnek vissza hanghullámok.

A mérés kezdetén az adó egy rövid ultrahang hullámot bocsát ki, ezzel egy időben pedig elindul egy gyors számláló, ami az impulzus kibocsátása és vevőkbe érkezése között eltelt időt méri. A számlálót és a méréshez szükséges egyéb digitális áramköröket célszerű programozható logikai áramkörben (FPGA) megvalósítani. Az adatok feldolgozását, az analóg áramkörök szabályozását, valamint a külvilággal való kapcsolattartást egy mikrokontroller végzi. Léteznek olyan integrált áramkörök, amelyekben e két egységet, az FPGA-t (Field Programmable Gate Array) és a mikrokontrollert egy tokban helyezték el, így egy kevés alkatrészt tartalmazó, ezáltal kis méretű eszközt készíthetünk.



3. ábra. Háromdimenziós ultrahangos helyzet-meghatározó blokkvázlata

### Robotok ultrahangos navigációs eszközei

A GPS alapú rendszerek a koordinátákon kívül a tengerszint feletti magasságot is meg tudják határozni. Léteznek azonban olyan alkalmazások, amelyekben a felszín feletti magasság GPS-el elérhetőnél nagyobb pontosságú és időbeli felbontású meghatározására van szükség. A hajózásban használt mélységmérési módszerekhez hasonló elvet alkalmazva olyan ultrahangos magasságmérőt készíthetünk, amely civil vagy katonai alkalmazású robotrepülőgépek automatikus fel- és leszállását segíti. 5–10 m-ig megfelelő pontosságú magasságadatokat lehet biztosítani az irányító automatikának tizedmásodperces frissítési idővel, így kis magasságokban biztonságosabban manőverezhet a robotrepülő.

Az olyan önjáró szárazföldi robotoknál, még azoknál is, amelyek fel vannak szerelve képfeldolgozó navigációs elektronikával, szükség lehet ultrahangos radarra. Előfordulhat, hogy a robotnak olyan terepen kell dolgoznia, ahol a különleges fényviszonyok miatt nem lehet biztonságosan felismerni a tárgyakat és kikerülni az esetleges akadályokat. Ultrahang alkalmazásával az előbbi probléma megoldható.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az ultrahang elektromágneses hullámokhoz képest nagyságrendekkel kisebb sebessége lehetővé teszi, hogy segítségével kis távolságok mellett (néhányszor 10 m), egyszerűen, nagy pontossággal, lehessen térbeli pozíciót meghatározni.

Önjáró (guruló, lépegető, repülő stb.) robotok egyéb fedélzeti helyzetmeghatározó eszközeit, pl. a GPS-t kiválóan kiegészíti az ultrahangos radar. Ennek segítségével a repülő robotok fel- és leszállása biztonságosabbá tehető, a szárazföldi robotok, pedig érzékelhetik, kikerülhetik az útjukba kerülő tárgyakat, akadályokat. Pontossága és egyszerű felépítése miatt az ultrahangos távolságmérés katonai, kutató, katasztrófavédelmi és egyéb nagy megbízhatóságot igénylő kültéri alkalmazásoknál is jól használható.

Egy megbízhatóan működő, olcsó pozíció-meghatározó készülék használata egyéb területen is hasznos lehet. Ilyen eszköz sok esetben kiválthatja a bonyolult és drága, képfeldolgozáson alapuló rendszereket. A fent említett egyszerű háromdimenziós berendezéssel meg lehet valósítani számítógépekhez használható háromdimenziós pointer eszközöket, melyekről a PC pontosan „tudja”, hogy a felhasználó mit csinál velük. Ez az eszköz alkalmas lehet különböző háromdimenziós alkalmazások vezérléséhez (pl. virtuális valóság, szimuláció).

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] VOGEL MIKLÓS: Ipari robotjárművek helymeghatározó eszközei. Műszerügyi és mérés technikai közlemények, 2001. 37. évfolyam, 68. szám.
- [2] HUSTI GYÖRGY: Globális helymeghatározó rendszer. 2000.
- [3] KURUTZ IMRE–SZENTMÁRTONY TIBOR: A műszaki akusztika alapjai. 2001.
- [4] SOMKUTI EMIL: Hírközlés, mélységmérés és radar alkalmazása a hajózásnál. 1956.
- [5] SÁLYI ISTVÁN: Pattantyús 2. kötet, Alaptudományok és anyagismeret, 1961.
- [6] [http://arts.ucsc.edu/ems/music/tech\\_background/te-01/soundspeed.html](http://arts.ucsc.edu/ems/music/tech_background/te-01/soundspeed.html)
- [7] GÉMESI JÓZSEF: Piezoelektromos anyagok. 1964.
- [8] <http://www.channelindustries.com>
- [9] [http://www.micropilot.com/resources/manuals/Manual-MP2000\\_11\\_07\\_02.pdf](http://www.micropilot.com/resources/manuals/Manual-MP2000_11_07_02.pdf)