運動物体追跡のための超音波位置計測システムの開発*

(第2報, 実験)

村田 英人**, 橋本 正治***, 内田 満哉****

The Development of an Ultrasonic Measuring System for the Tracking of a Moving Target (2nd Report, Experiment and Results)

by Hideto MURATA, Masaharu HASHIMOTO, and Michiya UCHIDA

A system using ultrasonic sensors was developed to track a moving target. In Part 1, the new techniques for sharpening the ultrasonic beam and for electronically sweeping the axis of emission of the beam, and their theoretical bases were described. In Part 2, the outline of the system is described. The performance verified by experiments is as follows: The maximum trackable velocity of a moving object at a distance of 1.2 m from the ultrasonic sensor system is 480 mm/sec. The measurement error in the position of a target moving with this maximum velocity is 91 mm.

Key Words: Ultrasonic Measuring, Moving Target, Tracking

1. 緒 言

計測媒体としての超音波は光にくらべて指向性が鈍いことが短所となる。そのため従来の超音波式計測法では逆に指向性を鈍くし球面波を発生させて、その伝ば時間を空間の3箇所測定し、三角測量の原理に基づいて三次元座標を求めるものであった⁽¹⁾⁽²⁾。もしも指向性の鋭い超音波が得られれば光のように物体からの最大反射音圧方向の検出により物体の存在方向が求められ、さらに音波の小さい伝ば速度を利用して伝ば時間より距離が求められて最終的に三次元位置が測定できる。本研究の目的は前報⁽³⁾で提案された12個の超音波トランスデューサの同時駆動による指向性のせん鋭化とトランスデューサ間の駆動位相差による超音波ビームの電氣的偏向による走査計算の短縮可能性さらに特別に音響的に整備されていない環境下での追跡可能性などを試作したシステムにより確認することである。

2. 検出装置の構成

2.1 ハードウェア構成 製作した装置のブロック図(図1)の各部の詳細について以下に述べる。

放射音波制御部では周波数40 kHzの発振信号より5種類の位相の異なった信号を生成しパルス幅約400 μ sのトーンバースト波を送波器群に送り、空間に放射する。図2にこの回路のブロック図を、図3に各部の波形を示す。原発振波(図3のA, 10 MHz)をカウンタ1で分周し基準発振波(図3のB, 40 kHzのく形波)を作る。プリセットカウンタ2(8 bit)は基準発振波の立ち上がりおよび立ち下がりエッジ(図3のC)で

図1 システム構成

* 昭和58年11月12日 関西支部秋期大会講演会および昭和59年3月23日 関西支部第59期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年4月12日。

** 正員, 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

*** 正員, 摂南大学工学部 (〒572 寝屋川市池田中町17-8)。

**** 学生員, 三菱重工業(株)下関造船所 (〒750 下関市彦島)。

位相遅れの値を読み込み、原発振波によりカウンタアップする。カウンタ2の出力はT-FF(T形フリップフロップ)により基準発振波より(256-位相遅れ量) $\times 0.1 \mu\text{s}$ だけ位相の遅れた40 kHzの信号を生成する(図3のD)。以下同様にしてカウンタ3~5によって順に位相の遅れた信号が生成される(図3のE, F)。位相の変化量は最大 180° で、その分解能は 1.44° である。アナログスイッチSW1は位相の遅れと進みを切替える。正弦波変換回路はく形波を正弦波に変換しSW2は正弦波をトーンバースト波に変調する。SW3は各送波器に送る信号を切替える。増幅器は信号電圧を34 V_{p-p} に増幅し、送波器を駆動している。各送波器への入力パワーは約100 mWである。

受波信号処理部では物体からの反射音波を入力とし超音波の伝ば時間と反射音波の計測を行う。図4にその回路図を示す。物体からの反射音波を的確にとらえるためには音波の放射方向に受波器を向ける必要がある。しかし本手法では電氣的に放射音波の方向を偏向させているために、常に送波器の正面軸方向から反射音波が得られるとは限らない。すなわち受波器の指向性の鋭さは望ましくないから本研究では受波器の指向

性を鈍くするために4個の受波器を用い、それらの向きを送波器の正面軸方向からわずかにずらせて送波器と同一の架台に設置する。また送波器の近くでは放射音波の影響により正確に反射波が検出できない恐れがあるため、受波器を図5に示すように送波器から遠ざけて設置した。4個の受波器によって検出された反射音圧信号は図4に示すように約60 dB増幅され、ローパスフィルタおよび波形整形回路を通過したあとで加算平均される。加算された信号は再び増幅されその最大値をピークホールド回路によって求め、8 bit A-D変換器によって量子化している。また、加算平均信号を微分した値をある適当に定められたいき値と比較して反射波の到達時刻が検出される。伝ば時間の計測は12 bitのカウンタに141 kHzの発振波を入力して行っている。したがって分解能は距離に換算して約2.5 mmとなりカウンタ容量より最大計測距離は約5 mとなる。

送波器および受波器の架台は図5に示すような構成である。サーボモータによって駆動されている各回転軸の可動角度範囲は $\pm 40^\circ$ であり、約 0.3° の分解能である。また受波器は送波器群の設置平面より162 mm前方に突き出して取付けられている。

図2 放射音波制御部

図3 放射音波制御部波形

図4 受波信号処理回路

2.2 ソフトウェア構成 検出装置の制御および計測処理手順を以下に述べる。

最初に行わねばならないことは目標物体の同定である。超音波を用いた計測法では対象物体と検出装置との間に他の物体が存在しないということが前提となる。したがって放射音波によって全空間を走査して最も反射波の伝ば時間が短い方向にある物体が目標物体であると同定できる。このときには電氣的な放射音波の偏向によって全空間を走査することは困難であり、機械的に送波器の向きを変化させることが必要となる。本研究では運動物体の追跡および位置計測を主目的としているから、計測処理に先だつ目標物体の同定は人間が手動で行い、この初期化の自動化は行わない。また反射波の音圧信号の中から目標物体からの信号を同定し、受波信号処理部(図4)におけるピークホールド回路のリセット信号を与えるタイミングを定めることも手動で設定用ポテンシオメータにより最初に行う。

最大反射音圧方向の決定のための処理は放射音波の方向を電氣的に偏向させ4方向からの反射音圧(S_a, S_b, S_c, S_d)を求め、次式によって最大反射音圧方向ベクトル $\mathbf{g}$ を求めることである。

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \partial S / \partial \theta_1 \\ \partial S / \partial \theta_2 \end{pmatrix} \cdots \cdots (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_1} \doteq \frac{\sqrt{3}}{2 \cos \theta_2} (S_a - S_b + S_c - S_d) \cdots \cdots (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_2} \doteq \frac{1}{2} (S_a - S_b - S_c + S_d) \cdots \cdots (3)$$

放射音波の偏向方向は図2のスイッチSW1とSW3によって4方向に設定できる。偏向角はプリセットカウンタに与える位相データ(8 bit)によって最大約 $\pm 5^\circ$ 変化させている。また偏向角の大きさは反射音圧の大きさに対応して変化させている。目標物体が送波器の正面軸に近い位置にあるとき反射音圧は大きく、逆に正面軸からのずれが大きくなるほど小さくなると考えられる。そこで表1に示すように反射音圧が小さいほど偏向角が大きくなるように位相データを設

図5 送波器・受波器架台

定した。目標物体からの反射音圧は4個の受波器によって検出され加算された後に計算機によってゲイン可変の増幅器で増幅される。増幅率も反射音圧の大きさに応じて変化させて検出装置から目標物体までの距離が変化しても常に反射音圧が検出できるように増幅する。実際の受波信号は図6のように得られる。音波の放射直後に大きな入力信号 S_1 が得られているが、これは送波器からの直接波である。そのために目標物体からの反射音圧を図4のピークホールド回路で検出できるように反射音圧 S_2 が得られる直前でピークホールド回路をリセットしている。電氣的偏向による4方向の音波の放射によって得られる反射音圧を式(2), (3)に代入することにより受波器正面軸方向を定める架台の回転角度 θ_1, θ_2 (図5)に関する目標物体からの反射音圧グラジエントベクトル $\mathbf{g}$ が求められる。得られた $\mathbf{g}$ を使って反射音圧最大の方角を最急上昇法によって探索して常に受波器中心軸が目標物体の方角を向くようにする。

$$\theta_{i+1} = \theta_i + h \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} \cdots \cdots (4)$$

ここで θ は $(\theta_1, \theta_2)^T$ であり、図5の閉ループ制御回路に与えられる目標電圧に相当する。 h は反射音圧の最大値探索におけるステップ長であり目標物体からの反射音圧の値が大きくなるほどステップ長が短くなるように設定した。目標物体までの距離測定は図2のスイッチSW2によってトーンバースト波が放射されると同時に図4の伝ば時間計測のためのカウンタを動作させて反射波が得られるまでの時間を計測することによって行う。目標物体までの距離 L はカウンタの値より求めた反射波到達時間 T を用いて次式で求められる。

表1 音圧と位相変化量の関係

OUTPUT of A/D c. (sound pressure)		Phase data (deg.)
225 ~	224	10.4
223 ~	208	16.3
207 ~	192	22.2
191 ~	176	28.1
175 ~	160	34.0
159 ~	144	40.0
143 ~	128	45.9
127 ~	112	51.8
111 ~	96	57.7
95 ~	0	63.6

図6 受波信号

$$L = \frac{cT + l_{tr}}{2} + l_{off} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 c は音波の伝ば速度、 l_{tr} は送波器と受波器間の距離、 l_{off} は送波器と基準座標系原点との間の距離である。

以下に背景からの反射波の影響とその対策および計測に要する時間について検討する。音波を放射し物体からの反射音波を受波し、音圧を求めるという処理を連続して4回行う場合、1回めに放射した音波による背景からの反射音波が2回め以後の反射音波の検出に影響を及ぼすおそれがある。このような影響を排除する最も簡単な方法は1回めの放射音波による背景からの反射波が検出された後に2回めの放射を行うという方法である。しかし、この方法には計測に要する時間が大きくなるという欠点がある。本研究では以下に示す手法を用いて計測所要時間を増大させることなく背景からの反射波の影響を排除した。背景からの反射波が目標物体からの反射音波の検出に影響を及ぼす場合として次の二つの場合が考えられる。

(1) 背景からの反射波が目標物体からの反射波の直前に検出されてしまい背景からの反射波を目標物体からの反射波であると判定してしまう場合。

(2) 背景からの反射波と目標物体からの反射波が重なってしまい、正しい反射音圧が得られない場合。

(1)の場合は計測を行う周期を変化させることによって目標物体からの反射波を同定することができる。すなわち、同一周期で計測を行うと背景からの反射波は物体からの反射波と同様に同一周期で受波される。このために背景からの反射波を目標物体からの反射波であると判定してしまう。このとき、計測を行う周期を変化させて、すべての反射音波のうち到達時間の変化しないものを背景からの反射波として除去することができる。(2)の場合は入力音圧は真の音圧よりも大きい値で検出される。そのため2回以上の計測を行い、最も小さい値の音圧信号を用いることにより背景の影響を排除した。

次に計測に要する時間について検討する。本方法の場合、目標物体の位置を1回計測するために必要な最小放射回数は反射波の同定および距離測定のための2パルスと方向探索のための4方向の反射音圧測定のための8パルスの合計10パルスである。目標物体を測定装置から1.3 m離れた位置において計測を実施したとき反射波の同定および距離測定に約30 ms 反射音圧測定および方向探索に50 ms かかる。したがって1回の計測に要する時間は、約80 ms である。

3. 性能 検 定

本計測法における距離測定および方向測定に関する測定能力と運動物体の追跡能力について以下に述べる。目標物体までの距離計測は音波の伝ば時間を計測することによって行っている。目標物体として静止している100 mm×100 mmの平板を用いた場合の送波器から物体までの距離 x と音波の伝ば距離 y の実測値を図7に示す。 x, y のデータを最小二乗法により直線回帰分析すると、その関係は次式で表され相関係数は0.9996となった。

$$y = 2.0017x - 162 \quad [\text{mm}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで送波器、受波器間の距離は162 mmである。図7において測定値に不連続な部分(円で囲まれた部分)が見られるが式(6)によって得られる値と比較して音波の伝ば距離に関して14 mmの差がある。すなわち物体までの距離に換算すると7 mmの誤差となる。この値は音波の波長(8.6 mm)と比較して一波長以下の誤差である。

目標物体の方向測定能力を評価するために半径65 mmの紙製半球を送波器から1.2 m離れた位置に置き測定した。送波器正面軸方向($\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$)から 12° ずれた方向に目標物体を設置したときの反射波音圧極値探索過程を反射音圧分布とともに図8に示す。極値探索は約5ステップ約0.4 sで終了している。極値探索は最大傾斜方向に進行しており本研究の方向検出法の妥当性が確認できた。本研究では目標物体として半球を用いたが目標物体の形状について以下のように検討した。反射音圧は目標物体の形状により変化するが、反射面では光と同様に入射角と反射角が等しくなる。したがって送波器と受波器が近接している場合には反射面で拡散反射がないため放射方向に垂直に設置されていない場合、反射波を受波することは不可能とな

図7 静止物体の位置測定

る。目標物体が一つの平面のみで構成されることはまれであり、通常は多面体あるいは曲面である。少なくとも微少な部分で放射方向に対して垂直となり反射波が受波できると考えられる。このために本研究では目標物体として球面状のものを採用した。

運動物体に対する本測定装置の追跡能力および方向測定精度について以下に検討する。本装置では4方向に偏向させた放射音波によって得た目標物体からの4個の反射音圧の差より最大反射音圧方向を求めている。そのため追跡開始時には4個の偏向された主極のうちいずれか一つに目標物体がとらえられていなければならない。実験の結果、送波器正面軸から 12° 以内にある目標物体であれば追跡開始が可能であった。最大追跡可能速度は本装置の処理速度および送波器正面軸の方向を制御するサーボモータの能力によって定まるが、送波器正面軸の方向を 0.4 s に 12° 回転することができた。すなわち最大追跡速度は送波器正面軸の方向に関して $30^\circ/\text{s}$ である。目標物体が静止している場合、送波器正面軸の方向に関する精度は最大反射音圧の探索ステップに依存する。本研究では反射音圧の値が大きくなるほどステップ長を短くしている。最大反射音圧付近では最小のステップ長で探索するため、方向に関する精度は送波器姿勢の制御能力と等しくなる。本装置では送波器正面軸の方向を $\pm 40^\circ$ 変化させるのに8 bitのD-A変換器を介してサーボモータを制御しているから送波器正面軸方向の設定精度、すなわち測定精度は約 0.3° となる。

目標物体が運動する場合の測定精度と運動追跡能力を評価するために目標物体の運動が直線およびだ円の場合について実験した。図9に示すような大形の縦形プロッタともいえるべきものを製作し、ペンブロック部に目標物体をとりつけた。半径65, 50 mmおよび35 mmの半球状の目標物体に図10(a)に示すような直線運動を与えたときに得られた測定誤差の最小値と最大値を図11に示す。この測定誤差とは測定によって推定される運動直線と真の運動直線間の垂直距離であ

る。図11より明かなように、目標物体が小さくなるほど誤差は大きくなるが、最小誤差は物体の大きさや移動速度にかかわらず一定の値(約70 mm)となっている。これは実験装置の設定位置が理論値と異なっていたために生じたか、あるいは放射音波が送波器正面軸に対して正確に対称に放射されていないためと考えられる。そのほかにも誤差の原因として目標物体が有限の大きさを持っているために実際の反射面が物体の代表点と一致しないことが考えられる。図10に示すような実験状態では音波の反射面が物体の代表点の運動直線上から常に10 mm程度ずれており誤差として検出される。X, Y, Z成分に関する測定誤差は表2に示すように往復直線運動の折り返し点で瞬間的に静止した物体の測定値の平均誤差によって評価できる。図10(a)の実験では x は距離, y は θ_2 , z は θ_1 に対応している。目標物体は、ほぼ z 軸に平行な直線上を運動しており z 座標に関する分散が最も大きくなっている。また運動速度が増加しても測定誤差があまり大きくなることが特徴的である。

測定精度に対する背景の影響について検討する。図12に空間を音波で走査したときの反射波音圧の時間に対する変化を示す。測定は通常の実験室状態下で行ったが、床や天井および背景からの反射波が大きく現れている。このような測定環境下で物体にだ円運動(図10(b))を与えて計測を行ったときの物体の運動軌跡とその追跡軌跡を図13に示す。本装置の場合、背景の

図9 標的駆動機構

図8 標的方向探索過程

(a) 直線運動

(b) だ円運動

図10 標的の運動

(a) 最小値

(b) 最大値

図 11 直線運動標的の追跡誤差

表 2 追跡誤差

Velocity (mm/sec)	Root mean square error(mm)		
	x	y	z
115	9	22	92
220	10	23	87
315	12	41	96
427	15	43	104

影響によって物体の追跡に失敗することなく、物体が追跡できている。以上により本研究で用いた背景の影響を排除する方法が有効であることが確認された。

4. 結 言

本論文は前報に述べた原理に基づいて製作した超音波運動物体追跡システムの構成と得られた性能について述べている。実験結果は次のようにまとめられる。

(1) 静止している被測定物体(トランスデューサ前方 1.2 m に設定された 100 mm×100 mm の平板)の測定位置精度は 7 mm であり、この値は使用した 40 kHz 超音波の一波長 8.5 mm 以下である。

(2) 空間走査のために位相制御による電氣的ビーム偏向も併用すると、反射音圧極値探索の一ステップ実行時間は 0.08 s と比較的高速の測定が可能となった。

(3) 送波トランスデューサアレイ正面から 1.2 m の距離にある平面内を運動する物体(半径 35, 50, 65 mm の 3 種類の紙製半球)を追跡した結果、追跡可能な運動速度は 480 mm/s であった。この最大運動速度

(a) θ_1 (b) θ_2

図 12 受波信号

図 13 だ円運動追跡軌跡

に対する位置計測誤差の平均値は 91 mm であった。

(4) 被測定物体(半径 35, 50, 65 mm の半球状紙製物体)の大きさや運動速度(100~500 mm/s の範囲内)が測定精度に及ぼす影響は位置誤差の最小値に関しては、ほとんどないことが確認された。

(5) 静止している背景からの反射エコーの影響の排除のために提案された測定計算法により背景からの反射波の大きい通常の実験室内でも確実に目標物体を追跡できた。

文 献

- (1) 大園・ほか 2 名, 精密機械学会講演論文集, (昭 58), 863.
- (2) Moritz, W., E. ほか 2 名, *IEEE Trans. In. Mea.*, 25-1 (1976), 43.
- (3) 村田・ほか 2 名, 機論, 本論文集の 1562 ページ.