

空中超音波式モーションキャプチャ・空間寸法計測技術 (オリエンテータ)の開発

Development of Airborne Ultrasonic Motion Capture and Spatial Dimension Measurement Technology (Orientator)

○正 稲田 陽平^{*1}, 山本 摂^{*1}

武田 知弥^{*1}, 岡 悠介^{*1}

Yohei INADA^{*1}, Setsu YAMAMOTO^{*1},

Tomoya TAKEDA^{*1} and Yuusuke OKA^{*1}

^{*1} 東芝エネルギーシステムズ株式会社 Toshiba Energy Systems and Solutions Corporation

We have developed a spatial dimension measurement device (orientator) using airborne ultrasonic waves. We achieved spatial measurement by using 3 ultrasonic transducers and 3 ultrasonic microphones. The measurement principle is based on 3 sets of 3-side measurements. We acquire plane equations of microphones and transducers, and calculate the orientation angle and direction based on the surface normal vector. Using 40kHz ultrasonic wave, by transmitting through a plate with a 1mm diameter hole on the transmitting side and a plate with a 0.5mm diameter hole on the receiving side, it is possible to transmit it hemispherically and to receive it from any direction on the hemisphere. It is expected that this device can instantly measure the positional relationship of pipes, etc. at plant construction work with displaying the 3D data on PC. Test results show that the measurable distance range is about 1000 mm, the accuracy is about ± 1 mm. Furthermore, the 3D image is updated at approximately 13 frames per second (FPS). In the era of CPS (Cyber-Physical System), with cheaper and easier spatial dimension measurement devices and motion capture, it is expected that they will become more widespread in many fields, including plant construction and maintenance.

Key Words : Ultrasonic, 3D Motion Capture, Spatial Dimension Measurement, Orientation, 3-side measurements

1. 結 言

プラント建設および保全の現場では、各種機器、配管、部品の寸法計測と位置決めは、施工品質や安全性の確保において極めて重要な技術である。これらの作業は、設計図との整合性を保ち、配管接続等の精度を確保するために不可欠であり、施工後の保守・点検作業にも直結する。

従来、空間寸法計測にはレーザートラッカーなどの高精度な 3D スキャン装置が用いられてきたが、これらは専門的な知識と技能を要するため、高度な知識を持った専門の計測員が必要である。また、リアルタイムな位置計測技術として広く用いられている光学式モーションキャプチャは、光を用いるために計測用部品が多く、信号処理には高速な周辺回路が必要となることから、システム構成が複雑化し、導入コストも高くなる傾向がある。

そこで、プラント建設・保全の現場における計測と位置決め合理化を目的として、2 物体の空間的な相対位置関係（位置・向き・角度）を計測可能な空中超音波式空間寸法計測技術「オリエンテータ」を開発した。本技術は超音波送信機・受信機・温度補正機構から構成され、光学式と比較しシステムの構成要素が簡素であることから、専門知識を持たない現場作業員でも容易に取り扱うことが可能となり、計測作業の合理化が期待される。

本稿では、オリエンテータの測定原理および試作したプロトタイプのパフォーマンス評価を行い、さらに今後の課題と展望について述べる。

2. 計測原理

本装置の計測原理は、電波 GPS の計測原理⁽¹⁾⁽²⁾を超音波で実装し⁽³⁾放射状（半球状）に拡散伝播する超音波を用いた ToF(Time-of-Flight)法、及び 3 辺計測を拡張した計測方法である。剛体物理の基本定理として、6 自由度を持つ物体の配向（オリエンテーション）情報を知るためには、その物体が含む 3 点の空間座標を知れば良く⁽⁴⁾、その性質を利用した計測法である。

2.1 超音波を用いた3セットの3辺計測による受信機3点のリアルタイムな座標算出

超音波送信機3個, 超音波受信機3個で, 3セットの3辺計測をリアルタイムで実施できるように構成する(図1(a)参照). この時, 送信機が設置されている空間座標は既知であるとする. また, 受信機で受信する超音波がどの送信機から発信されたものを判別する必要があるが, 例えば TDMA(Time Division Multiple Access) (送信機を時間的に切り替えて, 1個ずつ超音波を発信する) 方式は有効な方法である.

(x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, 3$	: マイク座標
(X_j, Y_j, Z_j) , $j = 1, 2, 3$	: トランスデューサ座標
v	: 音速[m/s] (空気中で約 331.3[m/s])
α	: 定数[m/(s °C)] (空気中で 約 0.6[m/(s °C)])
T	: 雰囲気温度 [°C]
t_{ij}	: 送信波の到着時刻 [s]
r_{ij}	: トランスデューサとマイクの距離 [m]
a, b, c, d	: 平面方程式1の係数
e, f, g, h	: 平面方程式2の係数
n_1	: 平面方程式1の法線ベクトル
n_2	: 平面方程式2の法線ベクトル
θ	: n_1 と n_2 の成す角度

と記号を定義するとき, 各トランスデューサと各マイクの距離を座標パラメータで記述すると,

$$r_{ij} = \sqrt{(X_j - x_i)^2 + (Y_j - y_i)^2 + (Z_j - z_i)^2} \quad (1)$$

である. 一方で, 各トランスデューサと各マイクの距離を音速, 定数, 雰囲気温度及び送信波の到着時刻で記述すると,

$$r_{ij} = (v + \alpha T)t_{ij} \quad (2)$$

で表される. ここで, 式(1)と(2)より,

$$(v + \alpha T)t_{ij} = \sqrt{(X_j - x_i)^2 + (Y_j - y_i)^2 + (Z_j - z_i)^2} \quad (3)$$

が成立する. 式(3)は非線形3元連立方程式が3組であり, 解 $((x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, 3)$ を導出するためには逐次計算法(ニュートン法)を用いた数値計算⁽⁵⁾⁽⁶⁾を実施するのが一般的である. 昨今の PC の性能では, ほぼ即時に(リアルタイムに)当該逐次計算は収束して解を算出できる.

2.2 送信機平面及び受信機平面の方程式とその法線ベクトルの導出

送信機3点を含む平面方程式(4)は既知とし, 上記2.1項で求めた受信機3点を含む平面方程式(5)が導出される(図1(b)参照).

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

$$ex + fy + gz + h = 0 \quad (5)$$

各々の平面方程式の法線ベクトルが簡単に求まり, 3次元空間におけるベクトルの余弦定理と内積の式⁽⁷⁾より, 法線ベクトル同士の成す角度が求まる(図1(b)参照).

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{n_1 \cdot n_2}{|n_1||n_2|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{ae + bf + cg}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \sqrt{e^2 + f^2 + g^2}} \right) \quad (6)$$

平面方程式(4)を含む物体に対する, 平面方程式(5)を含む物体の位置・向き・角度をリアルタイムに定量的に算出することができる.

以上, 式(3)~(6)の処理を反復継続する. 尚, 式(6)において, 例えば n_1 ベクトルを x-y 平面の法線ベクトル(0,0,1)に設定すれば, 平面方程式(5)と平面 x-y 平面が成す角度を算出できる.

この時, 送信機を基準面に設置し, 受信機をもう一方の測定対象面に設置して, 測定対象面を静止させれば空間計測装置を構成でき, 測定対象面を動作させればモーションキャプチャを構成できることとなる.

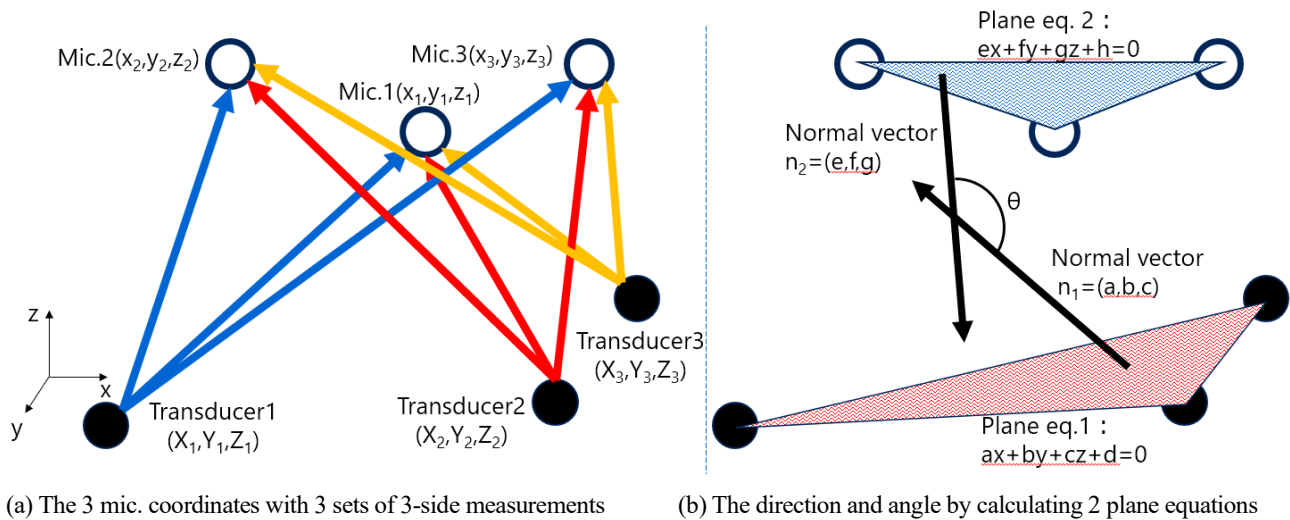


Fig.1 3 sets of 3-side measurements using 3 transducers and 3 microphones
and determining the direction and angle by calculating 2 plane equations

3. 装置の構成と動作状況

3.1 装置の構成

図 2(a)に装置のダイアグラム図を示す. 3 個のトランスデューサから 1 個ずつ交互に超音波を発信し(TDMA 方式), 3 個の受信機で送信機からの超音波を受信する. 雰囲気温度に合わせた音速補正用に熱電対を使用する. それらから得たデータを元に, PC にて演算し, 物体の相対位置関係を PC 画面に映し出す (図 2(b)参照).

実装上の重要な点は, 超音波の送信機と受信機において, 当該超音波の波長より十分小さな直径の穴を通すと放射状 (半球状) に超音波が拡散伝播する性質を利用していることである⁽⁸⁾. 40kHz 帯の超音波を使用し, 送信機側は $\phi 1\text{mm}$ の孔, 受信機側は $\phi 0.5\text{mm}$ の孔を通すことにより, 超音波を半球状に飛ばせて, 半球状の任意の方向からの超音波を受信できることを確認した.

また, 送信した超音波を受信した際, その飛行時間を測定するために, 音波同定方法として相互相関を取る必要があるが, 特徴的な送信超音波波形を生成して使用することで可能にした⁽⁹⁾.

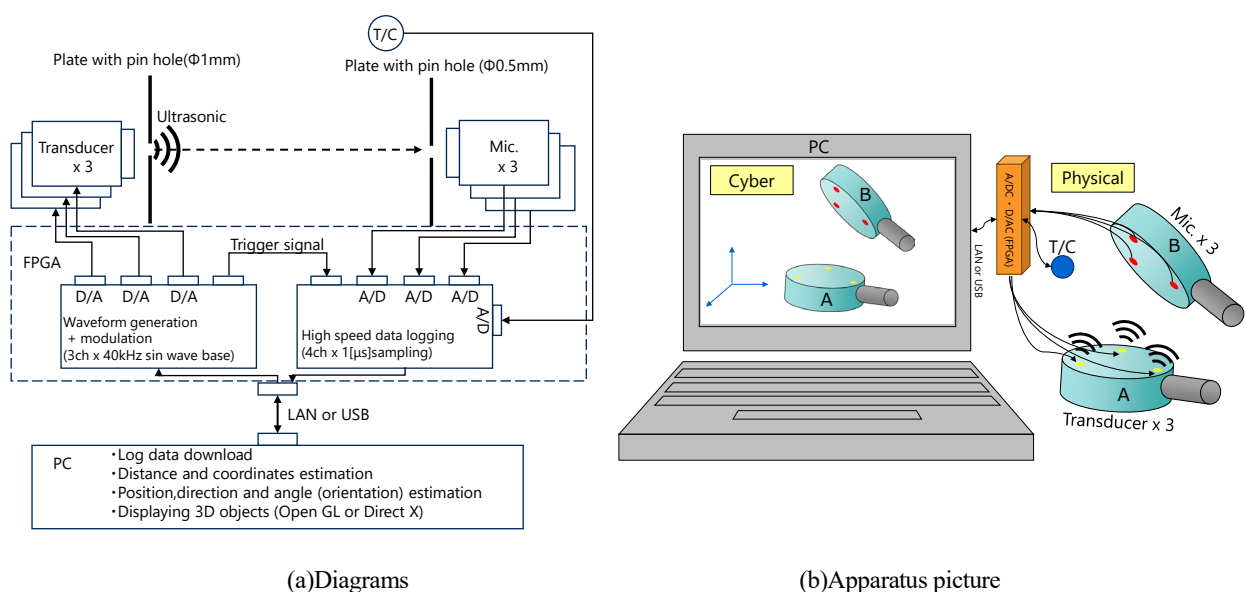
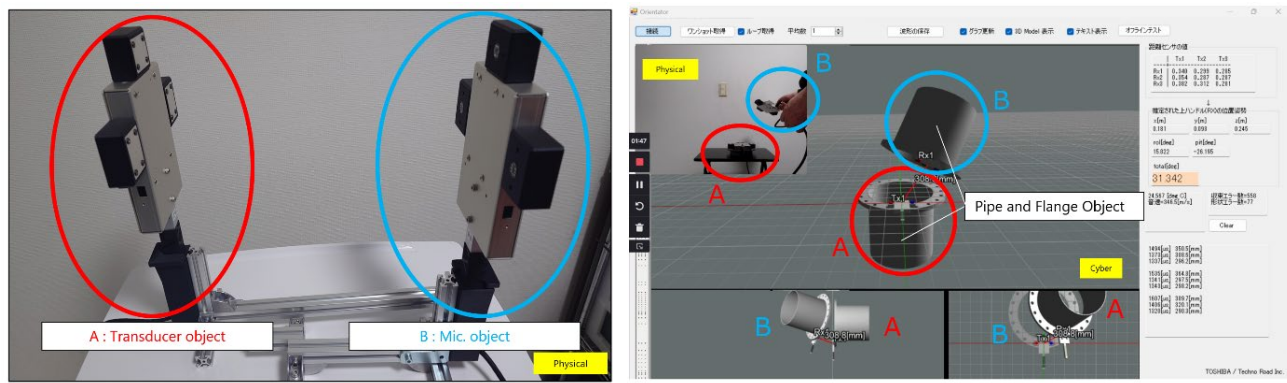


Fig.2 Apparatus Configuration

3.2 装置の動作確認

図 3(a)に装置写真，図 3(b)に PC 上で走る 3D 表示プログラム画面を示す．当該図中における A の物体に対する B の物体の位置・向き・角度（配向（オリエンテーション））情報をリアルタイムに取得して PC 画面に連続的に表示することにより，空間寸法計測装置やモーションキャプチャとして使用することができる．

図 3(b)の PC 用ソフトウェア画面表示は，事前にフランジ付きの配管オブジェクトを作成しておき，そのフランジ面に適切に装置を配備した場合に，その配管同士がどのような位置・向き・角度関係にあるかを瞬時に測定できることを示すデモンストレーションである．プラントの建設工事においては，タンク，ポンプ等，各機器を据え付ける際の微小誤差は配管接続時に吸収するが，送信機と受信機を物体に合わせるだけで PC 上に配管同士の位置・向き・角度が表示されるため計測の専門知識は不要であり，接続する配管の動きが PC 上にリアルタイムに表示されるので，図面要求の寸法に合わせる作業がより合理的に実施できることを確認した．



(a)Apparatus (physical) (b)Apparatus (cyber) displaying Objects on PC Software

Fig.3 Picture and Hardcopy of PC software for apparatus

4. 試験結果（性能）

表 1 に，装置プロトタイプの試験結果（性能）を示す．図 3(a)の装置の A と B を固定して，PC 用プログラム上に表示されている距離と，物理的に管理した測定距離を比較し，その固定している状態で，画面に表示されているデジタル値の変化（時間経過とともに生じる真値からの揺らぎ）の量を確認した．ただし，Mismeasurement rate（誤計測割合）については，図 3(a)の装置の A を固定し B を自在に動かして計測した際の値である．

Table1 Examination result and performance of apparatus

Spatial dimension measurement range	Motion capture operating range	Spatial dimensional accuracy	Measurement angle accuracy	FPS (Frame per Second)	Mismeasurement rate (MAX.)
About 1000 mm	About 700 mm	About ±1 mm	About ±1 °	About 13 FPS	5 FPS(*)

* Depends on the device's speed, position, direction, and angle (orientation).

5. 今後の課題と展望

5.1 空間寸法計測装置として計測可能距離範囲を伸ばすために

表 1 では，計測可能距離範囲が空気中で約 1000mm であるが，プラント建設等の現場では，2000mm 以上が望まれ，範囲は広いほど良い．計測精度と計測距離はトレードオフであるが，精度を保った計測可能距離範囲の向上には，以下の SN 比向上のための検討が必要である．

- (1) 超音波送信機の出力向上，及び超音波受信機の感度向上．
- (2) 発信した超音波と受信した超音波の波形について，相互相関の取り方の改善による性能向上．

- (3) 超音波受信データの積算回数の適正化。

5.2 モーションキャプチャとしての性能を向上させるために

表 1 では、モーションキャプチャとしての性能は可動範囲が約 700mm、画面描画回数は約 13 FPS、そのうち収束演算等のエラー回数は最大 5 FPS である。配管等移動時の監視によって作業安全性を高めるために、画面描画回数の増加と収束演算回数を減少させるには、以下の検討が必要である。

- (1) 現在は送信波形として比較的波数の多い波⁹⁾を使用しているが、波数を減じると共に、受信側で同定しやすい（相互相関が採りやすい）波形を検討すること。
- (2) 逐次計算法（ニュートン法）を用いる空間座標算出時の演算において、収束エラーが発生することがあるので、計算ルーチンをより確実に適切な推定値に収束するように改善すること。

尚、可動範囲を伸ばす検討は、前記 5.1 項と同様である。

5.3 装置をより安価に供給するために

本装置（超音波式）は、光学式モーションキャプチャと比較すると、部品点数が少なく、各部品も音速度を取扱う程度の性能で良く、各種演算（逐次計算法（ニュートン法）や PC 画面における 3D 描画含む）の演算負荷も小さく、PC も一般的な性能のもので十分動作するため、システムを安価に構成できる。さらに将来的に装置をより安価に供給するためには、以下の検討が必要である。

- (1) 汎用 FPGA ボード（図 2(a)参照）の代わりに、専用の電子回路(D/AC, A/DC, 他)を使用すること。
- (2) 可能な限り部品点数を少なくすること。
- (3) 超音波送信機も MEMS 化すること（本装置では、超音波受信機は MEMS マイクを使用している）。

6. 結 語

超音波でも空間寸法計測装置・モーションキャプチャを構成でき、配管オブジェクトを PC 内部に構築し、位置関係計測が可能であることを示せた。今後、主にハードウェアの SN 比改善を基に計測可能範囲や画面描写回数の性能を向上させたい。また、ジャイロや重力センサ等と組み合わせて、応用範囲を広げたい。本装置は用途によって光学式モーションキャプチャの安価な代替品として使用可能だが、音波でのみ計測可能な分野（有色不透明液体（重油、液体ナトリウム、等）内部、光が使えない暗所、高環境光場、等）への適用も検討したい。

CPS (Cyber-Physical System)時代への融和性が高いデバイスになることを期待しており、各種機能拡張により、本装置を応用できる産業・学術分野は、プラント建設・保全の現場を始め、多岐に亘ると考えている。

文 献

- (1) 石島義之 著、「GPS の原理と宇宙応用について（平成 15 年度）」、宇宙航空研究開発機構, JAXA-RM-03-014
- (2) 坂井丈泰 著、「GPS 技術入門」、東京電機大学出版局
- (3) 本間祐介ら 著、「可聴音波および超音波を用いた逆 GPS 方式位置特定システムの比較実験」、埼玉大学大学院理工学研究科、社団法人 電子情報通信学会 ITS-2006-93(2007-03)
- (4) 藤原邦男 著、「物理学序論としての力学」、東京大学出版会、P.178
- (5) 発明者：稲田陽平、＜日本国特許権＞「空間位置計測装置、空間位置計測方法及び空間位置計測プログラム」、権利者：東芝, JP 6626175 B2
- (6) Inventor : Yohei Inada, <Patent in U.S.> "Apparatus, method and program for spatial position measurement", Assignee : TOSHIBA, US 9817104 B2
- (7) 齋藤正彦 著、「線型代数入門」、東京大学出版会、P.6
- (8) 中村僖良 著、「日本音響学会編 音響工学講座⑧「超音波」、コロナ社、P.26～27
- (9) 佐々木克浩ら 著、「複数の超音波信号による同時距離計測システムに関する研究」、富山県工業技術センター研究報告、No.25(2011)