

ポータブルな超音波3次元タグ

—手早いキャリブレーションを可能とする手法—

西田 佳史^{†,††} 西谷 哲史^{†††} 相澤 洋志^{††††} 堀 俊夫^{†,††} 溝口 博^{†††}

† 独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 〒135-0064 東京都江東区青海 2-41-6
†† CREST, JST 〒604-0847 京都府京都市中京区烏丸押小路ル秋野々町 535 日土地京都ビル 8F
††† 東京理科大学 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641
†††† 東京電機大学 〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2
E-mail: †y.nishida@aist.go.jp, ††j7500083@ed.noda.tus.ac.jp

あらまし 近年、人間の活動計測の研究のため、人間の行動を観察するシステムが必要となってきた。著者らは超音波3次元タグシステムの開発を行ってきた。超音波3次元タグシステムとは人間の行動を観察するための3次元位置計測装置である。本研究では、様々な環境で、手早く超音波3次元タグシステムを使用することを可能とする機能の実現を目指している。そのためには超音波受信器をキャリブレーションすることが必要となってくる。本稿では日常空間に任意に配置された超音波受信器の3次元位置をキャリブレーションする手法について述べている。
キーワード キャリブレーション, 超音波3次元位置計測装置, 人間活動計測

Portable Ultrasonic 3D Tag System

—Quick Calibration Method—

Yoshifumi NISHIDA^{†,††}, Akifumi NISHITANI^{†††}, Hiroshi AIZAWA^{††††}, Toshio HORI^{†,††}, and Hiroshi MIZOGUCHI^{†††}

† Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Aomi 2-41-6, Koto-ku, Tokyo, 135-0064 Japan
†† CREST, JST Nittochikyouto Bldg. 8F, Akinonochi 535, Oshikouji-Agaru Krasuma Nakagyou-ku Kyoto-shi, Kyoto, 604-0847 Japan
††† Tokyo University of Science Yamazaki 2641, Noda-shi, Chiba, 278-8510 Japan
†††† Tokyo Denki University Kandanshiki-cho 2-2, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan
E-mail: †y.nishida@aist.go.jp, ††j7500083@ed.noda.tus.ac.jp

Abstract Rapidly constructing a human activity observing system is required for a field research of human activities. The authors have developed an ultrasonic 3D tag system, which is a location sensing system for observing human activities. This study aims at establishing a systematic method for rapidly constructing an ultrasonic 3D tag system in various environments. A calibration function available in various environments is needed as one of basic functions of a portable ultrasonic 3D tag system. This paper describes methods for calibrating 3D positions of ultrasonic receivers which are put arbitrarily in a daily environment.

Key words Calibration, Ultrasonic Location Sensor, Human Activity Observation

1. はじめに

近年の計算機の発展に伴い、日常空間で人の活動や状態を認識し、それに基づいて人に対して適切な情報処理サービスを行うことへの関心が高まってきている[1]。本研究では日常空間における人間の行動の観察・認識技術の確立を目的としている。そのためには、十分な精度で確実に、しかもリアルタイムで人間の行動を観察できること、人の自然な行動に影響を与えないよう無拘束であること、周囲の環境によらず認識機能を容易に実現できることが必要である。

本研究では対象物のセンサ化を行うことにより、人の活動の頑健な観察機能を実現する手法を提案してきた[2]。"対象物のセンサ化"とは対象物本来の機能や性質を維持しつつ、対象物を利用する際に生じる随伴行動を、十分な精度で確実に検出する仮想センサとしての性質を対象物に付け加えることを指している。このようなアプローチを可能とするシステムとして、これまでに超音波3次元タグシステム(超音波式3次元位置計測装置)の開発を行い、部屋の壁や天井にとりつけた位置が既知である超音波受信器を使って、対象物にとりつけた超音波発信器の3次元位置を計測し、人の活動計測が可能であることを検

証してきた。本論文では、超音波3次元タグシステムをポータブル化し、より多様な環境で、手早く使用することを可能とする手法として、環境の任意の位置に取り付けられた超音波受信器をキャリブレーションする手法について述べる。

これまでに超音波を用いて3次元位置を計測する装置が多数提案されている。たとえば、Active Bat [3] や、Cricket [4]、DOLPHIN [5] があげられる。しかし、Active Bat, Cricket ではキャリブレーション手法について触れていない。DOLPHIN は、超音波送受信器を用いることによってキャリブレーションを必要としない手法を提案している。また、キャリブレーションをロボットによって行う手法[6]が提案されているが、ロボットを必要とする大掛かりなものである。

位置計測の要求精度は、アプリケーションによって異なる。数十 cm の誤差が許容されるものから、数 cm 程度の誤差が要求されるものまで、様々な精度が必要となると考えられる。したがって、キャリブレーション手法も、必要な精度を実現するための簡便な手法を複数用意しておき、アプリケーションに合わせて選択するという解決法が現実的であると考えられる。このような観点から、本研究では、アプリケーションに応じて必要な精度を実現するための体系的なキャリブレーション手法を

目指している．本論文では，キャリブレーション作業を必要とするが，環境の任意の位置に取り付けられた超音波受信器を手早くキャリブレーションする手法を提案し，提案手法の有効性検証実験を報告する．

2. ポータブルな超音波 3 次元タグのための手早いキャリブレーション手法

2.1 キャリブレーションと計測

本稿で扱うキャリブレーションとは，超音波 3 次元タグシステムにおいて，発信器の 3 次元位置を求める際に基準となる受信器の位置を求めることを指す．図 1 に示すように，既知である複数の超音波受信器（図中黒色）中の位置から図に示したような受信器・発信器の位置に関する方程式を解くことで超音波発信器（図中白色）の位置を求めることが計測にあたり，逆に，既知である複数の超音波発信器の位置から超音波受信器の位置を求めることがキャリブレーションであり，両者は本質的には同じ問題である．

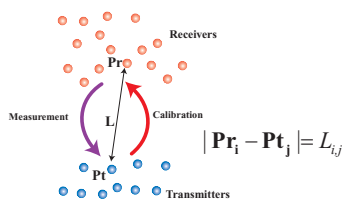


図 1 キャリブレーションと計測
Fig. 1 Calibration and measurement

2.2 従来のキャリブレーション手法と問題点

これまでに知られている 3 次元位置推定手法を利用したキャリブレーション手法として，以下の 2 つの手法が考えられる．

2.2.1 受信器が配置された空間とほぼ同じ大きさをもつキャリブレーション装置を使う手法

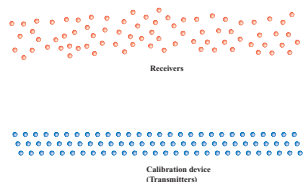


図 2 実際には困難なキャリブレーション手法—その 1
Fig. 2 Improbable calibration method 1

図 2 のようにキャリブレーションすべき対象物と同じ大きさを持つ複数の発信器からなるキャリブレーション装置であるが，これを実際に作成したり，設置することは困難である．

2.2.2 受信器の位置から十分に遠方にキャリブレーション装置を置く手法

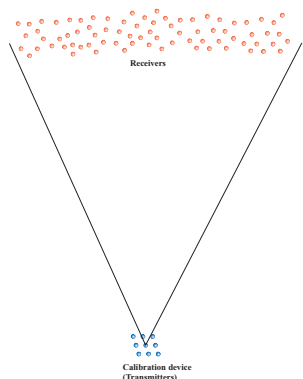


図 3 実際には困難なキャリブレーション手法—その 2
Fig. 3 Improbable calibration method 2

図 3 のようにキャリブレーションすべき対象物から十分に遠方からキャリブレーションする手法があるが，床・天井などが存在する閉空間で用いることは不可能であり，遠方のため超音波が到達できないことも考えられる．

2.3 手早いキャリブレーションを可能にする手法の提案

2 つのキャリブレーション手法を提案する．また，2 つの提案手法に関して，ありえそうな特殊な場合として，受信器が平面上に取り付けられている場合の手法について述べる．

2.3.1 提案手法 1: 3 個以上の発信器を用いる手法 キャリブレーション手法の概要

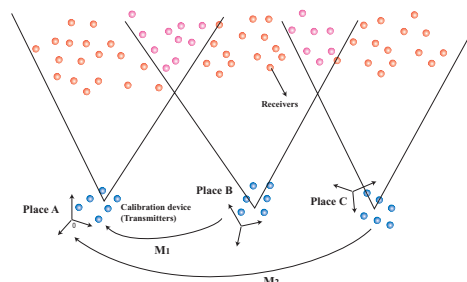


図 4 手早いキャリブレーション手法—その 1
Fig. 4 Quick calibration method 1

手順 1：適当に移動させた A,B,C,D,..., 地点にてキャリブレーション装置（図中白色）に取り付けられた複数の発信器を用いて，受信器（図中黒色）の 3 次元位置を計算する [2]（図 4 参照）．

手順 2：各地点において計算可能であった受信器の中で，複数の地点から計算可能であった受信器（図中灰色）を選択する．
手順 3：選択された受信器の 3 次元座標をもとに，地点 A をワールド座標として，キャリブレーション装置の位置（座標変換行列）を最小二乗法で求める．

手順 4：求められた座標変換行列を使って，各地点で求めた受信器の位置をワールド座標系へと変換し統合する．

手順 1 と手順 3 について具体的に説明する．

手順 1 の詳細：ある地点で計測された距離データを用いた受信器の位置の求め方

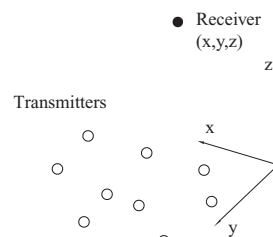


図 5 発信器と受信器
Fig. 5 Position of transmitters and receivers

図 5 のように超音波発信器 i 個が平面上になく，それぞれの位置 $(x_1, y_1, z_1) \sim (x_i, y_i, z_i)$ が既知の状態超音波受信器の位置 (x, y, z) を計測する原理を示す．球と球の交線が存在する平面を利用する方法である．

i 個の発信器の位置を $(x_1, y_1, z_1) (x_2, y_2, z_2), \dots (x_i, y_i, z_i)$ とする．その i 個のそれぞれの発信器と受信器の距離を l_1, l_2, \dots, l_i として，図 6 のようにそれらを半径とした球を描く．すると，それぞれの球の交点を結ぶ面ができる．その面の交点は 1 点に定まり受信器の位置 (x, y, z) が得られる．ただし， i 個の発信器が一直線上にあるときは求めることはできない．それぞれの球の式は以下ようになる．

$$(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = l_1^2 \quad (1)$$

$$(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = l_2^2 \quad (2)$$

$$(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 = l_3^2 \quad (3)$$

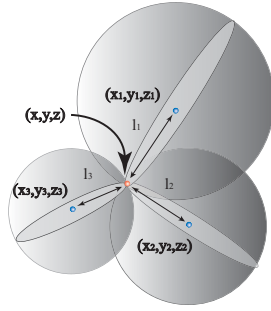


図 6 3次元位置推定方法の基本
Fig. 6 Trilateration

⋮

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = l_i^2 \quad (4)$$

式(1), 式(2), 式(3), 式(4)より球の交線を含む平面の方程式を以下のように得られる.

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y + 2(z_2 - z_1)z = l_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - l_2^2 + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \quad (5)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y + 2(z_3 - z_1)z = l_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - l_3^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \quad (6)$$

⋮

$$2(x_i - x_1)x + 2(y_i - y_1)y + 2(z_i - z_1)z = l_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - l_i^2 + x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \quad (7)$$

よって以下のような連立方程式が得られる.

$$\mathbf{AP} = \mathbf{B} \quad (8)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_i - x_1) & 2(y_i - y_1) & 2(z_i - z_1) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} l_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - l_2^2 + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ l_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - l_3^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ \vdots \\ l_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - l_i^2 + x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

図 7 に示すように発信器の配列が同一平面上になく, 発信器の数を 4 個以上用いる場合は, 行列 \mathbf{A} がフルランクとなり, 以下の式を用いた最小二乗法により \mathbf{P} を求められる. 図 8 に示すようなフルランク以外の場合の詳細は, 文献 [2] に述べられている.

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (12)$$

手順 3 の詳細: 2 つの地点から同時に計測可能であった受信器の位置に基づいて, キャリブレーション装置の位置を求める方法

図 8 のように 9 個の発信器と 27 個の受信器を用いて, キャリブレーションを行う場合について示す.

まず, A 地点にて 9 個の発信器を用いて, 受信器の 3 次元位置を計測する. 発信器の指向性により, 図 8 のように 27 個よりも少ない受信器しか計測できない場合がある. 計測可能であった受信器の位置を (x_{a1}, y_{a1}, z_{a1}) , (x_{a2}, y_{a2}, z_{a2}) , $\dots, (x_{a18}, y_{a18}, z_{a18})$ として, A 地点を基準としたローカル座標における発信器の位置 (x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}) , (x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}) , $\dots, (x_{A9}, y_{A9}, z_{A9})$ は既知であるとし, ワールド座標 (A

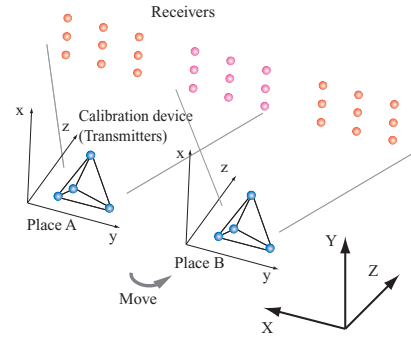


図 7 キャリブレーションシステムと受信器 (キャリブレーション装置に取り付けられた 4 個以上の発信器が同一平面上に存在しない場合)

Fig. 7 Experimental system of calibration (in case of non-coplanar transmitters)

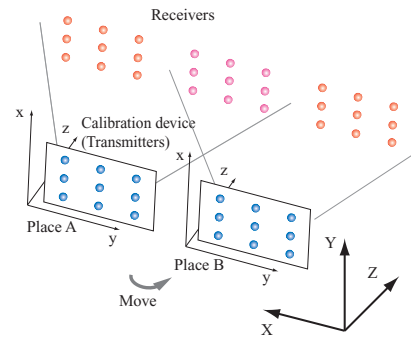


図 8 キャリブレーションシステムと受信器 (キャリブレーション装置に取り付けられた 4 個以上の発信器が同一平面上に存在する場合)

Fig. 8 Experimental system of calibration (in case of coplanar transmitters)

地点を基準としたローカル座標) においては (X_{A1}, Y_{A1}, Z_{A1}) , (X_{A2}, Y_{A2}, Z_{A2}) , $\dots, (X_{A9}, Y_{A9}, Z_{A9})$ とする.

次に B 地点に発信器を移動させて受信器の 3 次元位置を計測する. このときの受信器の位置を (x_{b1}, y_{b1}, z_{b1}) , (x_{b2}, y_{b2}, z_{b2}) , $\dots, (x_{b18}, y_{b18}, z_{b18})$ とする. B 地点を基準としたローカル座標における発信器の位置を (x_{B1}, y_{B1}, z_{B1}) , (x_{B2}, y_{B2}, z_{B2}) , $\dots, (x_{B9}, y_{B9}, z_{B9})$ とし, ワールド座標 (A 地点を基準としたローカル座標) においては (X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1}) , (X_{B2}, Y_{B2}, Z_{B2}) , $\dots, (X_{B9}, Y_{B9}, Z_{B9})$ とする.

図 8 を見てわかるように A 地点で受信器の 3 次元位置を計測した場合と B 地点で受信器の 3 次元位置を計測した場合で重なる部分, つまり A 地点と B 地点の両方で 3 次元位置が計測できる受信器 (図中灰色) がある. A 地点にて計測できた受信器の位置を (x_{a9}, y_{a9}, z_{a9}) , $(x_{a10}, y_{a10}, z_{a10})$, $\dots, (x_{a18}, y_{a18}, z_{a18})$ とし, B 地点にて計測できた受信器の位置を (x_{b1}, y_{b1}, z_{b1}) , (x_{b2}, y_{b2}, z_{b2}) , $\dots, (x_{b9}, y_{b9}, z_{b9})$ とする. ここで回転と並進の役割を持つ 4×4 行列の変換行列 \mathbf{M} を考えると以下のように表すことができる.

$$\mathbf{P}_{A'} = \mathbf{M}_{BtoA} \mathbf{P}_{B'} \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_{BtoA} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{A'} = \begin{pmatrix} x_{a10} & x_{a11} & \dots & x_{a18} \\ y_{a10} & y_{a11} & \dots & y_{a18} \\ z_{a10} & z_{a11} & \dots & z_{a18} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{B'} = \begin{pmatrix} x_{b1} & x_{b2} & \cdots & x_{b9} \\ y_{b1} & y_{b2} & \cdots & y_{b9} \\ z_{b1} & z_{b2} & \cdots & z_{b9} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

M_{BtoA} を式 (17) を用いて最小二乗法により求める。

$$\mathbf{M}_{BtoA} = \mathbf{P}_A \cdot \mathbf{P}_B^T (\mathbf{P}_B \cdot \mathbf{P}_B^T)^{-1} \quad (17)$$

しかしながら、式 (17) によって求めた変換行列 M_{BtoA} には、拡大・縮小成分も含まれているため、後述するように変換行列を複数使用して座標変換を行った場合に、座標系に歪みを生じさせる原因となる。この場合、そこで Z 軸まわりに角度 α 、新しい Y 軸まわりに角度 β 、最後に新しい Z 軸まわりに角度 γ の回転と、X 軸に T_x 、Y 軸に T_y 、Z 軸に T_z 並進移動させる座標変換行列として以下のような行列を使用し、非線形最適化 (例えば、Nelder-Mead downhill simplex method) を行うことで、 $\alpha, \beta, \gamma, T_x, T_y, T_z$ を求める手法が有効である。

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma & -\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta & T_x \\ \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & T_y \\ -\sin \beta \cos \lambda & \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta & 0 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

M_{BtoA} を用いて B 地点を基準としたローカル座標での受信器の位置 P_B をワールド座標 (A 地点を基準としたローカル座標) に変換することができる。

$$\mathbf{P}'_B = \mathbf{M}_{BtoA} \cdot \mathbf{P}_B \quad (19)$$

同様に、 $M_{BtoA}, M_{CtoB}, M_{DtoC}$ などを求め、

$$\mathbf{P}'_C = \mathbf{M}_{BtoA} \cdot \mathbf{M}_{CtoB} \cdot \mathbf{P}_C \quad (20)$$

$$\mathbf{P}'_D = \mathbf{M}_{BtoA} \cdot \mathbf{M}_{CtoB} \cdot \mathbf{M}_{DtoC} \cdot \mathbf{P}_D \quad (21)$$

などを計算することで、A 地点を基準としたローカル座標をワールド座標として、受信器の位置を表すことができる。

2.3.2 提案手法 2: 1 個のみの発信器を用いて、自由に動かす手法

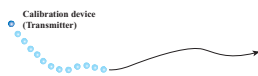
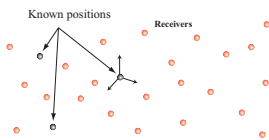


図 9 手早いキャリブレーション手法-その 2
Fig. 9 Quick calibration method 2

キャリブレーション手法の概要

手順 1: 3 個の受信器を選び、その三角形の 3 辺の長さを実測し、その 3 個の受信器 (図中灰色) の 3 次元位置を決める (図 9 参照)。

手順 2: 1 つの発信器 (図中白色) を移動させて、3 個の受信器 (図中灰色) より移動している発信器 (図中灰色) の 3 次元位置を計算する。

手順 3: 移動している発信器 (図中灰色) を 4 個以上選び、2.3.1 節と同様に受信器の 3 次元位置を計算する。

2.3.3 受信器が全て同一平面上にあることが分かっている場合の手法

キャリブレーション手法の概要

キャリブレーションの方法は上記の 2.3.1 節、2.3.2 節のいずれの方法でもよい。すべての受信器が平面上にあることを考慮にいれてキャリブレーションを行う。

図 10 において、 P_{r_i} は受信器の座標であり、 P_{t_j} は発信器

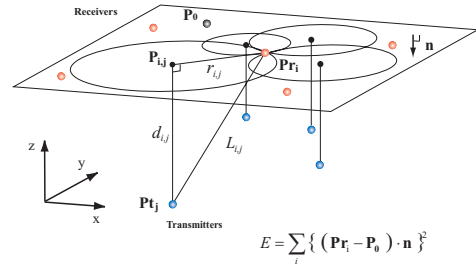


図 10 平面拘束
Fig. 10 Planar restraint

の座標である。 P_0 は平面上の点であり、 n は平面の法線ベクトルである。まずは受信器の位置を計測し平面を考える。そのために、

$$\sum_{l,m} (\mathbf{P}_{r_l} - \mathbf{P}_{r_m}) \quad (22)$$

を特異値分解することにより、法線ベクトル n を求める。さらに

$$E = \sum_i \{ (\mathbf{P}_{r_i} - \mathbf{P}_0) \cdot \mathbf{n} \}^2 \quad (23)$$

より、最小二乗法により P_0 を求める。これにより平面の式を求めることができる。また、平面からの発信器の距離 $d_{i,j}$ が求められ、発信器と受信器の距離 $L_{i,j}$ が計測されているので $r_{i,j}$ が求められる。そして、発信器から平面に下ろした垂線と平面との交点 $P_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ も求めることができる。

ここで $P_{i,j}$ を中心として半径 $r_{i,j}$ の球を考える。この球は発信器の数だけ考えることができ、それらの交点に受信器があると考えられる。受信器の位置を (x_i, y_i, z_i) とすると球は、

$$(x_{1,1} - x_i)^2 + (y_{1,1} - y_i)^2 + (z_{1,1} - z_i)^2 = r_{1,1}^2 \quad (24)$$

$$(x_{1,2} - x_i)^2 + (y_{1,2} - y_i)^2 + (z_{1,2} - z_i)^2 = r_{1,2}^2 \quad (25)$$

⋮

$$(x_{1,j} - x_i)^2 + (y_{1,j} - y_i)^2 + (z_{1,j} - z_i)^2 = r_{1,j}^2 \quad (26)$$

となる。これら球の平面の式は行列で以下のように表せる。

$$\mathbf{A} \mathbf{P} = \mathbf{B} \quad (27)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2(x_{1,2} - x_{1,1}) & 2(y_{1,2} - y_{1,1}) & 2(z_{1,2} - z_{1,1}) \\ 2(x_{1,3} - x_{1,1}) & 2(y_{1,3} - y_{1,1}) & 2(z_{1,3} - z_{1,1}) \\ 2(x_{1,4} - x_{1,1}) & 2(y_{1,4} - y_{1,1}) & 2(z_{1,4} - z_{1,1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} r_{1,1}^2 - x_{1,1}^2 - y_{1,1}^2 - z_{1,1}^2 - r_{1,2}^2 + x_{1,2}^2 + y_{1,2}^2 + z_{1,2}^2 \\ r_{1,1}^2 - x_{1,1}^2 - y_{1,1}^2 - z_{1,1}^2 - r_{1,3}^2 + x_{1,3}^2 + y_{1,3}^2 + z_{1,3}^2 \\ r_{1,1}^2 - x_{1,1}^2 - y_{1,1}^2 - z_{1,1}^2 - r_{1,4}^2 + x_{1,4}^2 + y_{1,4}^2 + z_{1,4}^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (30)$$

最小二乗法により受信器の位置 (x_i, y_i, z_i) を求める。

3. キャリブレーション手法の検証実験

3.1. 1超音波3次元構築システム

超音波 3 次元タグシステムは、超音波発信装置 (超音波 3 次元タグ)、超音波受信・増幅装置、距離計測装置、無線式超音波発信制御装置、データ収集装置、PC からなっている。システ

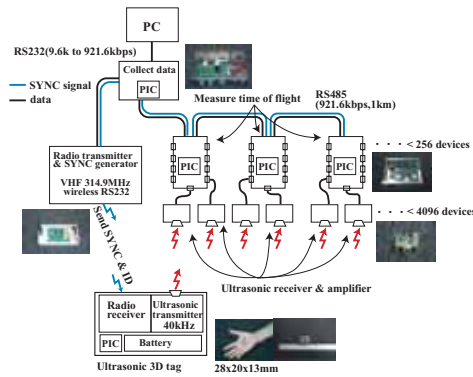


図 11 システム構成
Fig.11 System configuration

ム構成を図 11 に示す。超音波発信装置は、超音波パルスを送信し、超音波受信・増幅装置は超音波パルスを受信し増幅する。距離計測装置は超音波発信部からの超音波パルスが超音波受信部に到達するまでの時間を計測する。無線式超音波発信制御装置は、超音波発信装置に ID を無線で送信し、システム全体に同期信号を送信する。データ収集装置は、距離計測装置により計測された時間のデータを収集し、PC に送信する。PC では、超音波発信部と超音波受信部の距離に基づいて 3 次元位置を計算する。

3.1.2 超音波 3 次元タグシステムの仕様

- 下記に超音波 3 次元タグシステムの基本仕様を示す。
- システム全体
- ・サンプリング周波数 50[Hz/個](at worst)
 - ・時分割・同時ハイブリッド発信方式
 - ・誤差は、1-8[cm]
- ソフトウェア
- ・サポート OS：Windows/Linux
 - ・3 次元位置計測機能
 - ・ネットワークサーバー機能
 - ・キャリブレーション機能
- ハードウェア
- ・3 次元タグの大きさ 28 × 20 × 13[mm]
 - ・電池寿命 1 日程度
 - ・3 個から 4096 個までのセンサを増設可能
 - ・各装置の接続（追加）は RS485 で、デージーチェーン方式



図 12 キャリブレーションシステム
Fig.12 Calibration system

3.2 精度検証

精度検証方法

図 13 においてキャリブレーションを行うことにより計測された受信器（図中黒色）と実際の受信器（図中灰色）の距離を e_1, e_2, \dots, e_n とする。そのとき、平均誤差を以下のように定義した。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (31)$$

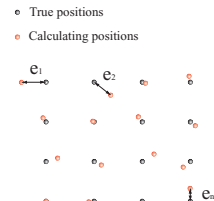


図 13 誤差計算方法
Fig.13 Method of calculating error

3.3 キャリブレーションの実験結果

提案手法 1 を用いたキャリブレーションの実験結果を図 14, 15 に示す。キャリブレーションに要した作業時間は、5 分程度であった。キャリブレーション装置として、同一平面上になく、発信器 4 個取り付けられているものを使用し、80 個の受信器をキャリブレーションした。図 14 は、受信器の位置を求めるのに平面拘束条件を使用しない場合の結果であり、75 個の受信器の位置を求めることができた。求められなかった原因は安定した距離データを得ることができなかったためである。局所的（75cm 四方の範囲にある受信器 16 個を選び、それらの真の位置と比較）に見た場合と全体的（求められた全ての受信器の位置と、それらの真の位置とを比較）に見た場合での平均誤差 E 、誤差値の最大値、誤差値の最小値を求めた。表 1 に示す。図 15 は、平面拘束条件を使用した場合の結果であり、77 個の受信器の位置を求めることができた。同様に局所的に見た場合と全体的に見た場合での平均誤差 E 、誤差値の最大値、誤差値の最小値を求めた。表 2 に示す。

次に、提案手法 2 を用いたキャリブレーションの実験結果を図 16, 17 に示す。キャリブレーション装置として、発信器 1 個を使用し、80 個の受信器をキャリブレーションした。図 16 は、受信器の位置を求めるのに平面拘束条件を使用しない場合の結果であり、76 個の受信器の位置を求めることができた。求められなかった原因は得られた距離データが少なかったためである。局所的に見た場合と全体的に見た場合での平均誤差 E 、誤差値の最大値、誤差値の最小値を表 3 に示す。図 17 は、平面拘束条件を使用した場合の結果であり、76 個の受信器の位置を求めることができた。同様に局所的に見た場合と全体的に見た場合での平均誤差 E 、誤差値の最大値、誤差値の最小値を求めた。表 2 に示す。

上述した実験により提案手法 1, 2 とともに平面拘束した場合の方が、精度の向上が見られた。このことは、受信器の配置に関して、既に分かっている条件を適切に拘束条件として与えることで高精度なキャリブレーションが可能であることを示している。実際の応用を考えた場合、天井面という平面に受信器を取り付け、キャリブレーションを行うという状況も想定されるので、そのような場合に、平面拘束を用いたキャリブレーション手法が有効になる手法であると考えられる。

また、人の活動の計測を考えた場合、4~5m 離れた物体間や人間間の距離を正確に測定できることよりも、1~2m といった局所的な相対位置が正確に測定できることが求められると考えられる。局所的な範囲でのキャリブレーションの誤差は、全体的な場合と比較し少なくなっており、人の活動の計測を目的とした場合には有効なキャリブレーション手法であると考えられる。

表 1 提案手法 1 の誤差
Table 1 Error of proposed method 1

	平均誤差 E	誤差値の最大値	誤差値の最小値
全体的	142mm	333mm	39mm
局所的	79mm	200mm	19mm

4. おわりに

本稿では、これまで開発してきた人の活動を観察するシステムである超音波式 3 次元タグシステムをポータブル化することを目的とし、実際に人の活動が生じる多様な環境で手早く超音

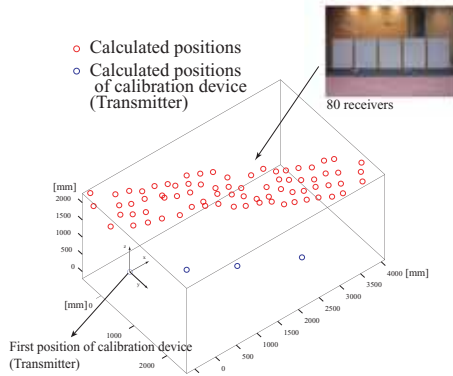


図 14 提案手法 1 の実験結果 (発信器 4 個, 受信器 80 個の場合)

Fig. 14 Experimental result of proposed method 1 (in case of 4 transmitters, and 80 receivers)

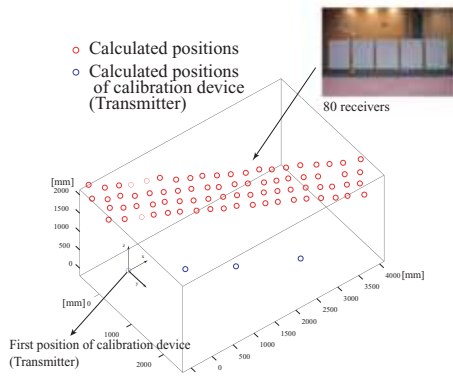


図 15 提案手法 1 の実験結果 (平面拘束あり, 発信器 4 個, 受信器 80 個の場合)

Fig. 15 Experimental result of proposed method 1 (with coplanar constraint in case of 4 transmitters, and 80 receivers)

表 2 提案手法 1 の誤差 平面拘束あり

Table 2 Error of proposed method 1 with coplanar constraint

	平均誤差 E	誤差値の最大値	誤差値の最小値
全体的	103mm	268mm	15mm
局所的	38mm	126mm	2mm

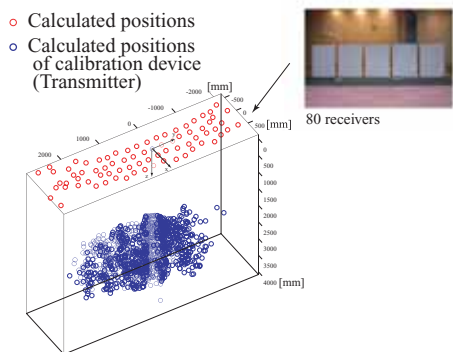


図 16 提案手法 2 の実験結果 (発信器 1 個, 受信器 80 個の場合)

Fig. 16 Experimental result of proposed method 2 (in case of 1 transmitters, and 80 receivers)

表 3 提案手法 2 の誤差

Table 3 Error of proposed method 2

	平均誤差 E	誤差値の最大値	誤差値の最小値
全体的	98mm	464mm	9mm
局所的	79mm	450mm	4mm

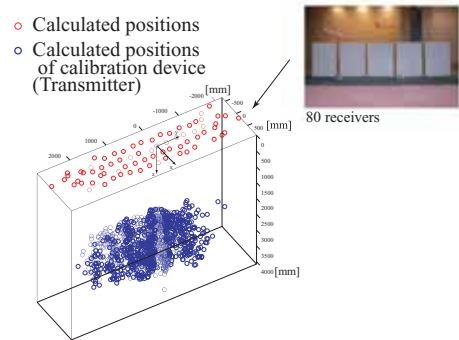


図 17 提案手法 2 の実験結果 (平面拘束あり, 発信器 1 個, 受信器 80 個の場合)

Fig. 17 In case of planar restraint (with coplanar constraint in case of 1 transmitters, and 80 receivers)

表 4 提案手法 2 の誤差 平面拘束あり

Table 4 Error of proposed method 2 with coplanar constraint

	平均誤差 E	誤差値の最大値	誤差値の最小値
全体的	79mm	333mm	4mm
局所的	69mm	264mm	4mm

波 3 次元タグシステムを構築するための必要機能としてのキャリブレーション手法を述べた。検証実験により 3 個以上の発信器を用いる手法においては $5 \times 1 \times 4$ [m] の空間におかれた 80 個の受信器の位置をキャリブレーション可能であることを確認した。また、1 個の発信器を用いる手法においても $5 \times 1 \times 4$ [m] の空間におかれた 80 個の受信器の位置をキャリブレーション可能であることを確認した。いずれの場合も、受信器が全て同一平面上にあることがわかっている状況では、キャリブレーション手法に平面拘束を行うことにより精度がよくなることがわかった。

今後の課題としては、精度を向上させるためのアルゴリズムやキャリブレーション装置の改良を行うこと、要求精度を実現するためのキャリブレーション手法を体系化すること、実際に提案したキャリブレーションを用いて多様な環境で手早く超音波 3 次元タグシステムを構築し、日常空間での人の活動を観察しデータ収集を行うことなどがあげられる。

参考文献

- [1] 独立行政法人 産業技術総合研究所編, “デジタル・サイバー・リアル 人間中心の情報技術,” 丸善, 2002.
- [2] Y. Nishida, H. Aizawa, T. Hori, N.H. Hoffman, T. Kanade, and M. Kakikura, “3D Ultrasonic Tagging System for Observing Human Activity,” *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003)*, pp. 785-791, 2003
- [3] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, “A New Location Technique for the Active Office,” *IEEE Personal Communications, Vol.4, No.5*, pp. 42-47, October 1997.
- [4] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan, “The Cricket Location-Support system,” *Proc. 6th ACM MOBICOM*, August 2000.
- [5] Y. Fukuju, M. Minami, H. Morikawa, and T. Aoyama, “DOLPHIN: An Autonomous Indoor Positioning System in Ubiquitous Computing Environment,” *Proc. of IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems(WSTFES2003)*, pp. 53-56, May 2003.
- [6] A. Mahajan, and F. Figueroa, “An Automatic Self Installation and Calibration Method for a 3D Position Sensing System using Ultrasonics,” *Robotics and Autonomous Systems 28(4)*, pp. 281-294, September 1999.