

モバイル環境での頑健な超音波モーショントラッキングシステムの開発

A Robust Ultrasound Motion-capture System in Mobile Environments

2011010



研究代表者

北海道大学大学院
情報科学研究科

教授

杉本 雅 則

【研究の目的】

モーショントラッキングシステム（以下 MCS と略す）は、CG やスポーツ科学等、幅広い分野で使用されている。しかし、現在市販されている光学および磁気方式の MCS は、大変高価（数百万～数千万円）である、機材が環境に固定され限られた場所でしか使用できないなど、いくつかの課題がある。本研究では、申請者が独自に開発した高精度超音波測距技術を利用し、実用性能を満たしつつ極めて安価でかつポータブルな MCS を開発する。多くの人が容易に入手、利用できる MCS を実現することで、多様な学術領域、産業分野での波及効果を期待できる。さらに、本 MCS 実現を通して確立される個々の技術は、関連分野での問題解決の有用な知見を与えると考える。

【研究の内容、成果】

1. 研究概要

我々のグループでは、超音波を用いた測距手法を構築しその評価を行ってきた。位相一致法（Phase Accordance Method: PAM）[1] と呼ばれる手法では、2つの異なる周波数の超音波を重畳し、それらの位相差が0となる点を時刻基準点として、送信機側で検出する。3m 測距において標準偏差 0.032 mm という極めて高い性能を示すことが、これまでの実験で確認され

ている。この性能は、狭帯域超音波トランスデューサを用いた測距としては我々が知る限り世界最高レベルである。また、本手法を拡張することにより、ロボットトラッキングシステム [2] やドップラーシフト補償による速度と測距の同時計測が可能な拡張位相一致法 [3] を提案した。

超音波を用いた3次元位置推定は、三辺測量（trilateration）の原理に基づく。GPS の例から明らかなようにターゲット位置の推定精度は、(1) 距離計測精度および (2) センサ（GPS の場合は人工衛星）の空間的配置に依存する。図1に示す通り、センサが空間的に分散している場合は、GDOP（Geometric Dilution of Precision）値が低くなり高い精度が得られる（good GDOP）が、集中している場合は GDOP が高くなり精度は悪くなる（poor GDOP）。しかし、センサを空間中に分散すると、システムが大規模になり設置の容易さや可搬性が乏しくなるといった問題がある。

我々のグループで構築した3次元位置認識シ



図1 長いベースライン（右）と短いベースライン（左）

システム [4][5] は、センサ間の基線長を小さくすることで、コンパクトな実装かつ一定レベルの精度を実現した。しかし、以下の点が問題であった。

- 超音波トランスデューサの位相特性

超音波トランスデューサは指向性を持っており、超音波の入射角によって位相特性が変化する。提案測距手法は位相差を時刻基準点とするため、位相特性の変化は測距の誤差に直結する。

- poor GDOP による 3 次元位置認識精度の限界

GDOP 値が高い場合、測距の小さな誤差が 3 次元位置認識の大きな誤差に増幅される。特に、距離方向 (z 方向) と鉛直な面 (xy 平面) での誤差が極めて大きくなる。

そこで、本研究では以下の 2 つの方法を用いることにより、高精度かつコンパクトな 3 次元モーションキャプチャシステムを提案した。

- 超音波トランスデューサの位相特性の補償
- 単眼カメラと超音波による深さ方向の計測の統合

本研究では、複数の入射角での超音波トランスデューサの位相特性を計測し、スプライン関数によって位相補償平面を構築する。カメラによって得られるターゲットの位置 (カメラを原点とするターゲットの方向) により、超音波測距の補正を行うと同時に、それと鉛直な面での誤差を小さくできると期待される。

2. 提案手法

2.1 カメラと超音波による 3D 位置認識

図 2 において、カメラと超音波受信機の基線

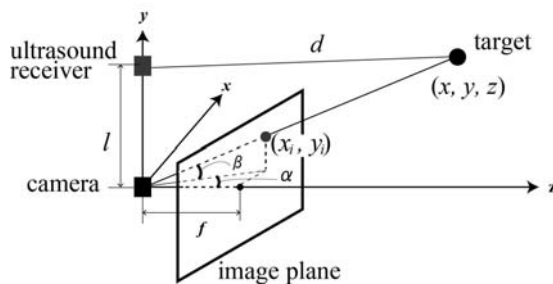


図 2 カメラと超音波による 3 次元位置認識の概要

長を l 、カメラの焦点距離を f 、ターゲットのカメラ画像での位置を (x_i, y_i) 、超音波測距により計測されたターゲットまでの距離を d とする。このとき、ターゲットの位置 (x, y, z) は以下の 3 つの式から求めることができる。

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x}{z}, \quad \frac{y_i}{f} = \frac{y}{z}, \quad x^2 + (y-l)^2 + z^2 = d^2 \quad (1)$$

2.2 拡張位相一致法

拡張位相一致法は、TOF (Time of Flight) に基づく測距手法である。拡張位相一致法で用いられる送信信号は、図 3 に示すように 2 つの送信波から構成される。1 番目の送信波 $s_d(t)$ は、2 つの正弦波で構成されるビート信号の 1 周期分であり、以下の式で表される。

$$s_d(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + a_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2)$$

ここで $a_i, \omega_i, \phi_i (i=1, 2)$ はそれぞれ、振幅、角周波数、位相である。1 周期分の信号なので、2 つの正弦波の位相差が 0 となる点は一つである。受信機側では、信号受信中の時刻 t_w で検波を行うと、時刻基準点 (epoch) までの時刻 t_e は以下のように表すことができる (詳細は [1] を参照のこと)。

$$t_e = -\frac{\phi_1 - \phi_2}{\omega_1 - \omega_2}$$

超音波送受信機間の時刻同期が取れていれば、時間 $t_w + t_e$ に音速をかければ距離が求まる。しかし、移動体の場合はドップラーシフトにより、

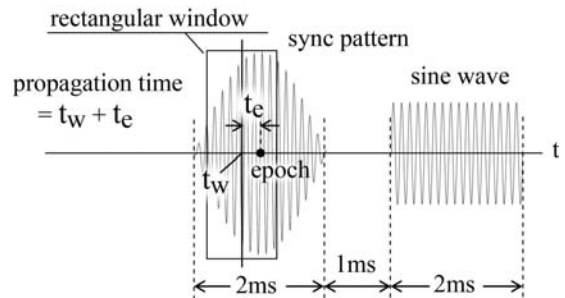


図 3 拡張位相一致法で用いる送信信号

角周波数が変化する。そこで、以下の式で表される 2 番目の送信波 $s_v(t)$ を用いて、ドップラシフト推定を行う。

$$s_v(t) = a_1 \sin(\omega_0 t + \phi_0)$$

詳細は [3] に譲るが、提案手法ではドップラシフトによって、送信波の振幅は変化しないことに着目して、ドップラシフト量を求める。評価実験では、 $\omega_0 = 40.0$ kHz, $\omega_1 = 39.75$ kHz, $\omega_2 = 40.25$ kHz とした。実験結果から、フーリエ変換等従来手法に比べて極めて高速かつ高精度な推定が行えること、ドップラシフト補正した角周波数を用いることにより、静止時とほぼ同程度の精度で時刻基準点が求まることを確認できた。

2.3 超音波トランスデューサの位相特性とその補正

超音波トランスデューサはその指向性により、信号の入射角に依存して振幅および位相の特性が変化する。特に拡張位相一致法は 2 つの正弦波の位相差に着目して距離計測を行う手法であるため、位相特性の変化は測距の誤差となることを意味する。そこで、決められた距離からの送信信号に対し、入射角を変えつつ測距を行うことで、位相特性を計測した。

超音波送信機および受信機（日本セラミック社 T40-16 および R40-16）の設置は以下のように行った。超音波受信機の位置は、三脚を用いて高さ 1,000 mm から 1,600 mm まで 30 mm 刻みで変更する。一方、超音波送信機は高さ 1,300 mm に設置された電動スライダ（Oriental Motor 社, SPVL8M150UA）に装着され、水平方向に -400 mm から 400 mm の間を 40 mm 刻みで移動することで位置を変更する。送受信機間の距離は 1,500 mm である。よって、信号の入射角が水平方向 ± 11.3 度、鉛直方向 ± 8.5 度の範囲で 441 点での計測が行われた。各計測点での計測回数は 30 回であった。測定結果から得られた標準偏差は 4.32×10^{-3} rad と

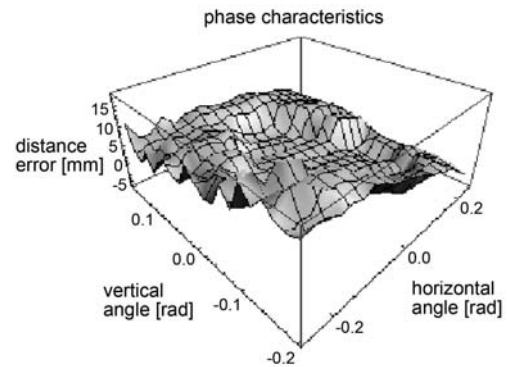


図 4 超音波測距にスプライン関数を適用することにより求めた位相補間曲面

なり、精度の高い位相特性の計測が行われたことが分かる。

次に、離散的に得られた計測値に対し、B スプライン関数を用いて補間曲面を生成した。その結果を図 4 に示す。

カメラと超音波受信機は基線長 l だけ離れており、よって図 2 の α, β は超音波受信機への正しい入射角ではない。そこで以下の手順で受信機への超音波の入射角を求めることで、位相特性補正を行う。

1. 式 (1) を用いて

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{x}{z}, \quad \beta' = \tan^{-1} \frac{y-l}{\sqrt{x^2+z^2}} \text{ を求める}$$

2. α および β' を用いて位相特性補正を行い、 d を更新する
3. d の変化が閾値以下になれば終了し、そうでなければ 1. に戻る

3. 評価実験

3.1 実験設定

提案手法のモーションキャプチャシステムとしての評価にあたり、その 3D トラッキング性能を確認するため、まずは以下の 2 つの実験を実施した。

1. 静止状態実験：位相特性補正なし (w/o comp.) および補正あり (w/ comp.)
2. トラッキング実験：速度 0.1 m/s および 1.0 m/s, それぞれ補正なしおよび補正あり

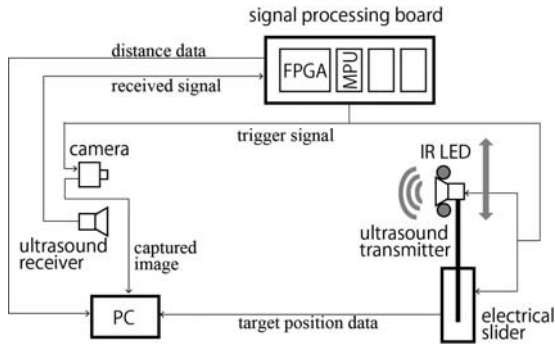


図5 実験設定

実験1では、前節で述べた超音波トランスデューサの入射角による補正の効果を調べる。実験2では、移動体の速度を変えつつ、提案手法のトラッキング性能を評価する。

図5に実験設定の概要を示す。信号処理基板のMPUからは、超音波送信センサおよびカメラ（Point Grey 社、Firefly MV, 1,328×1,048 pixel）に対してトリガ信号が送られ、超音波信号の送信および画像の取得が行われる。超音波受信センサで受信された信号は信号処理基板上のFPGAで高速処理され、測距結果が出力される。一方、赤外線フィルタを介して得られたカメラ画像はPCに送信される。PC上ではsub pixelレベルの輝点抽出が行われ、測距結果と式(1)を用いてターゲット（超音波送信機）の3次元位置が求められる。なお、輝点抽出とカメラパラメータの補正には、OpenCVに付属ライブラリを使用した。

位相特性の計測と同様、超音波送信機は電動スライダに装着された。また、図5に示すように送信機周囲の3個の赤外線LEDは、その重心が送信機の位置と一致するように配置された。カメラと超音波受信センサの基線長は、27.5 mmである。

3.2 静止状態実験

前節の位相特性での計測位置とは異なる位置にターゲットを配置し、その3次元位置を測定した。送受信機間の距離は1,900 mmである。実験の結果を、表1に示す。計測位置数は8カ所、各計測位置での計測回数は30回である。

表1 静止状態での3次元位置認識結果

	x-axis	y-axis	z-axis	3D error
RMSE (mm) without compensation	0.92	0.30	2.52	2.70
RMSE (mm) with compensation	0.85	0.28	0.85	1.24

表2 移動状態での3次元位置認識結果 (0.1 m/s)

	x-axis	y-axis	z-axis	3D error
RMSE (mm) without compensation	1.01	0.31	2.28	2.51
RMSE (mm) with compensation	0.90	0.29	0.74	1.20

表3 移動状態での3次元位置認識結果 (1.0 m/s)

	x-axis	y-axis	z-axis	3D error
RMSE (mm) without compensation	0.95	0.32	2.76	2.93
RMSE (mm) with compensation	0.93	0.34	1.34	1.66

表1から明らかなように、位相特性の補正を行うことにより、RMSE（root means square error: 平均2乗誤差）の改善が確認できた。

3.3 トラッキング実験

図5に示すように、ターゲットがカメラの光軸との鉛直な面上を0.1 m/s、および1.0 m/sで移動する場合の実験結果を表2および表3に示す。ターゲットは電動スライダ上で往復運動を行い、それぞれ179回および64回の計測が行われた。

上記の表から、ターゲットトラッキングの場合は、静止状態よりもRMSE、ともに悪化が見られるものの、位相特性補正を行うことでいずれも2 mm未満に抑えられている。静止状態実験およびトラッキング実験で得られた結果の累積分布関数（cumulative distribution function: CDF）および90パーセンタイルでの各々の値を、図6に示す。位相特性補償を行った結果、静止状態、0.1 m/s および1.0 m/s における90 percentileでの値は、それぞれ2.92 mm, 3.63 mm, および7.23 mmであった。

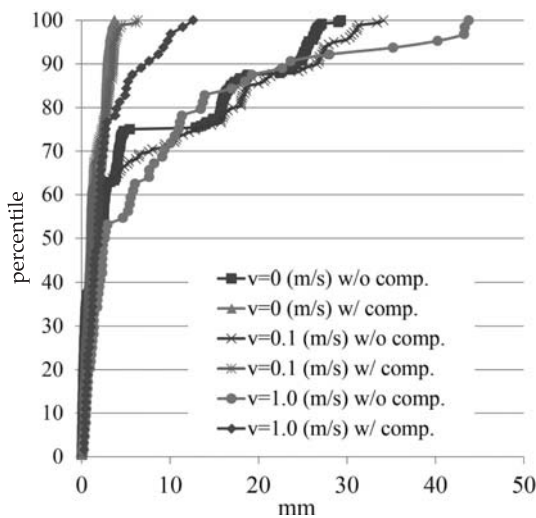


図6 静止状態および移動状態位置認識における累積分布関数

[今後の研究の方向, 課題]

これまでの研究を踏まえた結論と今後の課題は以下のようにまとめられる。

●コンパクトでロバストな3次元トラッキング手法

基線長が短い (27.5 mm), つまり GDOP 値が高いにも関わらず, 極めて高精度の3次元位置推定が実現できた。従来の無線信号による三辺測量では基線長が短い場合, 図1に示したようにターゲットまでの距離方向の精度が高くても, それと直交する面での精度が悪化する可能性がある。逆に, ステレオカメラでの3次元位置認識では基線長が短い場合, ターゲットまでの測距精度が悪化する。提案手法は, 高精度な超音波測距技術を用い, カメラおよび超音波計測の特徴を生かすことによって高精度な3次元認識を実現したと言える。また, 基線長を短くできれば, 計測装置をコンパクトに設計することが可能となり, 実装のコスト (環境等への設置など) も小さくできる。さらに, 三辺測量やステレオカメラでは, No Line of Sight (NLOS) やオクルージョンによりターゲットからの信号や画像が得られない超音波受信センサやカメラが1つでも存在すれば, 3次元位置認識に失敗する。その点, 提案手法は, コンパクトな設計

にできるため, 位置認識に失敗する可能性を従来よりも小さくできると考えられる。

●トラッキング可能領域の拡大

超音波信号は空気中での減衰が大きいので, 離れた (5 m 以上) ターゲットに対する高精度の測距は難しい。また, 本稿で用いた超音波受信センサは指向性が強いので, トラッキング可能な領域は限定される。同様の問題はカメラにも当てはまる。よって, 広角の超音波トランスデューサやカメラを使用する, 複数の超音波トランスデューサを搭載してより受信可能な入射角を広げる, などの工夫が求められる。

●多点同時トラッキングによるモーションキャプチャシステムの実装

提案手法は安価に実装できるにもかかわらず, 光学式あるいは磁気式のモーションキャプチャシステムの位置認識精度 (誤差 1 mm 程度) に匹敵できる精度を実現している。よって複数の送受信装置を用いることで光学-超音波によるハイブリッド型のモーションキャプチャシステムを構築が可能となる。しかし, その実現にはフレームレートの向上が不可欠である。拡張位相一致法では, 図3に示した通りドップラシフト推定のための正弦波を追加した分だけ送信時間が長い。我々はこの正弦波なしでも移動体測距を高精度に行う手法 [6] をすでに構築しており, よって送信時間を短縮することは可能である。また, 超音波を用いた 3 m の距離計測には, 伝播時間だけでも約 10 ns を要する。そのため理論的な限界は, 約 100 fps となる。複数の送信機を用いる場合, 時分割による3次元位置計測を行えば, 送信機の数に応じてフレームレートは悪化する。よって, 現在の active system から passive system への設計変更を行う, あるいは広帯域超音波センサを用い周波数分割による測距を行う, 等の拡張が必要となる。

[参考文献]

- [1] 橋爪, 金子, 杉本: 位相一致法による正確な超音波位置認識手法とその特性, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-A, No. 4, pp. 435-447, 2008.
- [2] Ito, T., Sato, T., Tulathimutte, K., Sugimoto, M., Hashizume, H.: A Scalable Tracking System Using Ultrasonic Communication, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E92-A, No. 6, pp. 1408-1416, 2009.
- [3] 佐藤, 杉本, 橋爪: 高精度超音波移動体測位のための位相一致法の拡張手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-A, No. 12, pp. 953-963, 2009.
- [4] Sugimoto, M., Tulathimutte, K., Ito, T., Sato, T., Hashizume, H.: An Ultrasonic 3D Positioning System using a Single Compact Receiver Unit, In *Proc. of LOCA 2009*, pp. 240-253, Tokyo, Japan, 2009.
- [5] Nakamura, S., Sato, T., Sugimoto, M., Hashizume, H.: An Accurate Technique for Simultaneous Measurement of 3D Position and Velocity of a Moving Object Using a Single Ultrasonic Receiver Unit, In *Proc. of IPIN 2010*, ETH Zurich, Switzerland, pp. 1-7, 2010.
- [6] Sato, T., Nakamura, S., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Extended Phase Accordance Method: A Real-time and Accurate Technique for Estimating Position and Velocity of Moving Objects using Ultrasonic Communication, *Sensors and Transducer Journal* (special issue, Dec. 2010), Vol. 9, pp. 56-70, 2010.
- using a Single Camera and Ultrasound, In *Proceedings of IEEE IPIN 2012*, Sydney, Australia, pp. 1-8, November 2012.
(http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6418874)
- [8] 杉本, 蟹江, 中村, 橋爪: 単眼カメラと超音波を用いた高精度三次元位置認識手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH 2012), 浜松, 静岡 (2012 年 5 月).
- [9] 蟹江, 中村, 杉本, 橋爪: 単眼カメラと超音波による高精度三次元位置認識手法, 電子情報通信学会超音波研究会, 日野, 東京 (2012 年 2 月).
- [10] Nakamura, S., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Measuring Phase Characteristics of Ultrasonic Microphones for Accurate Ultrasonic Localization Systems, In *Proceedings of IEEE IUS 2011*, pp. 979-982, Orlando, FL, October 2011.
- [11] Nakamura, S., Sato, T., Terabayashi, K., Sugimoto, M., Hashizume, H.: An Accurate and Compact 3D Positioning System for a Moving Target by Integrating Extended Phase Accordance Method and Particle Filter, In *Proceedings of IEEE IPIN 2011*, Guimaraes, Portugal, September 2011.
(<http://ipin2011.dsi.uminho.pt/detailedProgram.php>).
- [12] Sato, T., Nakamura, S., Terabayashi, K., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Design and Implementation of a Robust and Real-time Ultrasonic Motion-capture System, In *Proceedings of IEEE IPIN 2011*, Guimaraes, Portugal, pp. 1-6, September 2011.
(http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6071907)

[当該研究期間の成果発表論文]

- [7] Sugimoto, M., Kanie, N., Nakamura, S., Hashizume, H.: An Accurate 3D Localization Technique