

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650076

研究課題名(和文)カメラ画像と超音波測距による可搬性を備えた高精度モーションキャプチャシステム

研究課題名(英文)A Portable and Precise Motion-capture System using a Single Camera and Ultrasound

研究代表者

杉本 雅則 (SUGIMOTO, MASANORI)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90280560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：超音波とカメラを用いて、モーションキャプチャのための3次元トラッキングシステムを構築した。超音波により距離、カメラにより距離方向の鉛直面でのターゲット位置を取得する。提案システムは安価なカメラと超音波送受信機で構成され、非常にコンパクトに実装できる。測位性能向上のため、超音波送信機の位相特性補正を行い、位相補正面をBスプライン関数で補完するという方法を取った。実験の結果RMSEが1.20mm(静止時)、1.66mm(毎秒1m)での3次元トラッキングが可能であることが示された。これは、最新の高価なモーションキャプチャシステムに匹敵する性能である。

研究成果の概要(英文)：We proposed a 3D tracking technique that integrates a single camera and ultrasound. We use ultrasound to measure the distance accurately to a moving target and the camera for identifying the 2D position of the target on the image plane. A prototype system consists of a target unit mounting one ultrasound transmitter, and a receiver unit with one inexpensive camera and one ultrasound receiver. We implemented these units in a lightweight and compact way to make the system robust to non-line-of-sight problems. To improve the ranging performance, we applied phase characteristic compensation of the ultrasound transducers by interpolating with a B-spline function and creating a compensated curved surface. Experimental results show that root-mean-square errors of the proposed system are 1.20mm and 1.66mm for static and mobile (target velocity: 1.0 m/s) settings, respectively. Thus, the performance of the system is comparable with that of high-end systems.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センシングデバイス・システム モーションキャプチャシステム

1. 研究開始当初の背景

コンピュータアニメーション、スポーツ科学、リハビリテーションなど、モーションキャプチャシステム(MCS)用途は広い。また、Microsoft Kinect の登場で、多くの人々の関心を集めつつある。MCS の実現技術として主に、(1)多数カメラ、(2)電磁場、(3)慣性センサの3つが挙げられる。(1)(2)では高精度(RMSE 1mm 以下)、高フレームレート(100fps 以上)を実現できる点、(3)では比較的安価に実現できる点が利点となっている。しかし、それぞれに問題点がある。(1)では、オクルージョンを避けつつ高精度を実現するため、多数のカメラ(10 またはそれ以上)を使用する。よって、すべてのカメラについてキャリブレーションを行う作業がきわめて煩雑になるなど、設置作業の時間的、人的コストのため可搬性に乏しい。(2)では、作業領域が比較的狭い範囲に限られる、電磁場に影響を与える環境での利用が困難などの問題点がある。また、(1)(2)の技術で実現された商用システムは高額(100~1000 万円以上)である。(3)では、積分によりマーカの3次元位置を求めるため、高い精度を実現するのは難しい。上記から、高精度、比較的安価、一般人でも容易に利用可能、かつ可搬性のある実用的なシステムが存在しないことが分かる。

2. 研究の目的

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を実現するための基盤技術を開発する。多くの人々が容易に入手、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、本研究の過程で確立される個々の手法は、関連分野での問題解決の有用な知見を与えると考えられる。

本研究で構築される手法では、超音波送信機と単眼カメラを1つの計測ユニットとする。超音波(深さ方向で高精度)とカメラ(深さ方向に対する鉛直面に強い)との利点を組み合わせることにより、どこまで高精度な3次元位置認識およびトラッキングが可能かを明らかにする。

3. 研究の方法

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。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

乏しくなるという問題がある。

我々のグループで構築した3次元位置認識システムは、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ことになる。
- ・ 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。

カメラと超音波による3D位置認識は以下のように行う。カメラと超音波受信機の基線長を 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。

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

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、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となる点は唯一つである。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。

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

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、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、ドップラーシフト推定を行う。

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

提案手法ではドップラーシフトによって、送信波の振幅は変化しないことに着目して、ドップラーシフト量を求める。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、ドップラー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。

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。

4. 研究成果

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, 0.2 m/s, 0.5 m/s および 1.0 m/s、それぞれ補正なしおよび補正あり

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、

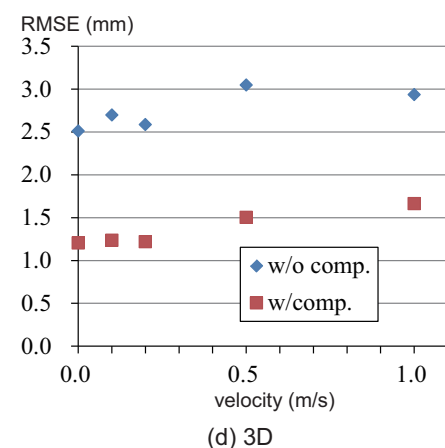
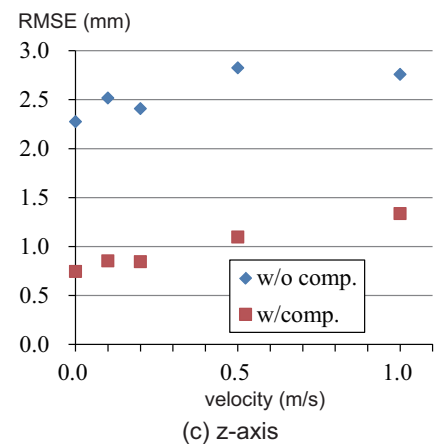
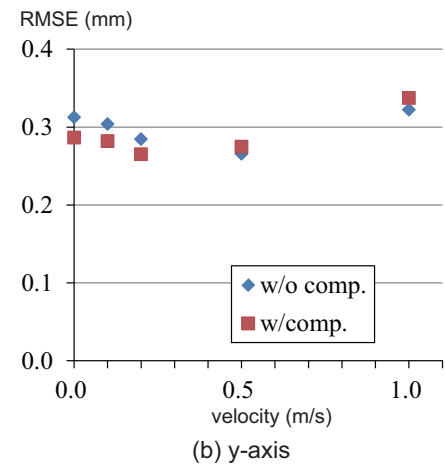
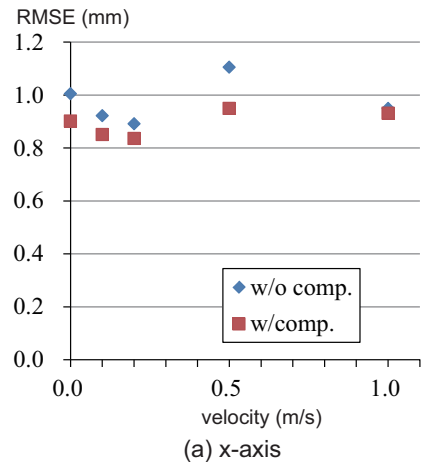


図 1 静止および移動状態での RMSE

提案手法のトラッキング性能を評価する。

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, 1328 x 1048 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。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。

4. 1 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1,900mmである。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。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)の値はx軸、y軸、z軸、3次元位置がそれぞれ1.01→0.90, 0.31→0.29, 2.28→0.74, 2.51→1.20となり性能向上が確認できた(図1)。

4. 2 ターゲットトラッキング実験

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では、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。

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2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、1.71mm、および2.69 mmであった。

本研究では、基線長が短い(27.5 mm)、つまりGDOP値が高いシステムにも関わらず、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、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。

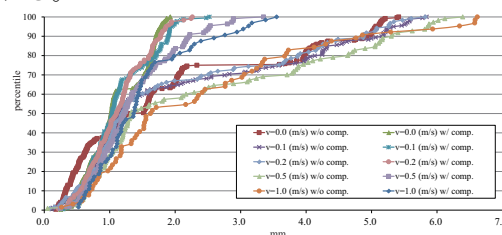


図2 静止および移動状態でのCDF

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] Sugimoto, M., Kanie, N., Nakamura, S., Hashizume, H.: An Accurate and Compact 3D Tracking System Using a Single Camera and Ultrasound, *Journal of Location Based Services*, Volume. 8, Issue 1, pp. 18-35 (2014).

[学会発表] (計 6 件)

- [2] Akiyama, T., Nakamura, M., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Smart Phone Localization Method using Dual-carrier Acoustic Waves, In *Proceedings of IEEE IPIN 2013*, Montbeliard-Belfort, France, pp.330-338 (2013年10月29日).
- [3] 中村, 秋山, 杉本, 橋爪: 超音波とスマートフォンを用いることによる屋内3次元位置推定, 2013 情報処理北海道シンポジウム, 室蘭, 2013年10月5日.
- [4] 秋山, 中村, 杉本, 橋爪: 2 搬送波音波を用いたスマートフォンによる屋内測位手法, 日本音響学会 2013年秋季研究大会, 豊橋, 2013年9月25日.
- [5] Sugimoto, M., Kanie, N., Nakamura, S., Hashizume, H.: An Accurate 3D Localization Technique using a Single Camera and Ultrasound, In *Proceedings of IEEE IPIN 2012*, Sydney, Australia, pp. 1-8, (2012年11月14日).
- [6] 橋爪, 杉本: 空中超音波の特性と対象測位・イメージング技術, 日本音響学会秋季研究発表会, 信州大学, 長野, 2012年

9月20日.

- [7] 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27日).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者 杉本 雅則 (SUGIMOTO Masanori)
北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 90280560

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者 橋爪 宏達 (HASHIZUME Hiromichi)
国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号: 40172853