

令和 5 年 3 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656251

研究課題名（和文）マイクロ波高精度多点測位技術の開発

研究課題名（英文）Development of a high-precision microwave positioning system

研究代表者

土井 靖生（DOI, YASUO）

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：70292844

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：全く新たな方法に基づく三次元同時多点測位システムの開発を行った。このシステムによれば、高詳細な測位精度(1mm)を高いサンプリング周波数で(>100Hz)、多点に対し同時に達成可能である。今回は単一測定点に対する測位実証を行い、~1mm精度・1kHzサンプリングという当初目標を満たす測位性能の実証を実現した。一方キャリア周波数として当初より高い周波数を用いた結果、多点に対する同時測位性能実証は、関連科研費によるシステム追加工後の実証となり、現在実証実験を進行中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本測位システムは、着衣下の人体に装着しその動作を直接測定可能であるため、通常の衣類を着用した自然な人体動作の計測が可能となる全く新しい動作計測システムであり、実用化すれば多方面への応用が期待出来る。また送信機の小型化により、人体動作計測に留まらない、様々な動作計測への応用が考えられる。本研究では、実用化へ向けた出発点として、まずは1点の測定点の即位を行う原理検証を行い、本システムの実現性を示すことが出来た。

研究成果の概要（英文）：We developed a noble 3D positioning system that enable us to make a high-precision (1mm) position measurement of multiple objects with a high frequency (>100Hz). We have demonstrated the targeted accuracy with 1kHz sampling frequency for measuring a single measuring object. On the other hand, simultaneous positioning of multiple objects is not achieved due to higher carrier frequency than originally planned. The demonstration of the multiple measurement is ongoing with a dedicated development by another grant.

研究分野：工学

キーワード：計測システム マイクロ波測距 モーションセンシング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

対象物の位置を三次元で特定し、その時間変化を捕らえるモーションセンシングは、その用途として幅広い。特に人体の動作計測は、スポーツ科学、医療応用等で広く利用されている。しかしながらその方法としては、主に赤外線カメラを用い、体格・体位を露出させるタイツ等を着用した上に赤外線を反射するマーカーを固定した状態で必要な動作を「演じて」もらう手法が通常用いられる。この方法では、従って自然な動作を測定する事は望めない。また近年、レーダー測距技術を応用したミリ波による非接触の空間構造測定が実現されているが、ミリ波帯の特性から測定の空間分解能を上げる為に大型の装置が必要である点、更には単一の測定ビームをスキャンする方式をとるために一回の測定に数十分の時間を要することから、人体動作等の動きを伴う測定に対しては実用的ではない。

## 2. 研究の目的

今回提案する測定方法は、**1 mm 程度までの高い位置精度、100 Hz 以上の高い時間分解能、数十点以上の多点同時測位が可能**という、これまでの赤外線モーションキャプチャーの最高レベル、若しくはそれを上回る精度を達成しつつ、**通常の着衣のままの測定が可能、且つ見通し 100 m 程度の遠方からの測定がリアルタイムで可能**と、既存のあらゆる測位技術とは完全に一線を画す内容である。この新しい測位技術の原理実証を行うことが、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

多チャンネル同時測位を目指すシステムの原理実証として、まずは単一チャンネルに対する測位性能の実証試験を行った。(株)アールアンドケーの協力の下に今回独自に開発した測位システムを用い、静止状態・及び空間を移動させた状態に於いて、安定した測位を実現するかの検証実験を行った。

## 4. 研究成果

測位原理の検証実験の為に、以下の1チャンネル対応測位システムを製作した。

### 4.1. 送信機

製作した送信機のブロック図、及び写真を図1に示す。

測定対象に装着する送信機は、10GHzの発振器により生成したサイン波に、スペクトラム拡散用の疑似ノイズ信号(10ビットM系列信号)を重畳する。疑似ノイズ信号のビットレート(周波数)は300Mcps(300MHz)である。

生成した送信波信号は、パワーアンプ(PA)にて信号増幅の後、パッチアンテナより送出する。パッチアンテナは送信半波長に相当する1.5cm角のサイズを有し、円偏波を送出する。受信機にて送信波を受信する際に、円偏波は直接伝搬波と壁などの障害物に対する一回反射波で偏波面の回転方向が逆向きになるため、直接伝搬波のみを選択的に受信出来る。信号の受信タイミング(アンテナ間距離)の正確な測定に対する最大の障害となる反射波除去のため、円偏波の利用は有効である。

### 4.2. 受信機

製作した受信機のブロック図、及び写真を図2に示す。

ブロック図左端の4本の受信アンテナは、送信機と同一のパッチアンテナである。図1のパッチアンテナから送出された送信波を、同一のパッチアンテナで受信することにより、送信アンテナから受信アンテナに直接伝搬する送信波を選択的に受信し、1回反射波の受信を抑制する。GPSと同様の受信・測位原理を採用するため、受信アンテナは最低4本(空間3次元+電波到達時間1次元の4次元測位のため)が必要である。本来は各受信アンテナについてそれぞれ独立の受信回路が必要であるが、ここでは予算の制約のため、4本のアンテナをサイクリックにスイッチングしながら、単一の受信回路による検波を行っている。

各受信アンテナで受信した受信波に対し、ノイズ除去のためのフィルタリング(ローパスフィルターRF及びバンドパスフィルターBPF)及び受信信号復調の下処理としての周波数ダウンコンバート(10GHz→1GHzに周波数変換。図2ブロック図中Down converterによる)を行う。更に送信機と同種の疑似ノイズ信号を重畳することにより、スペクトラム逆拡散を行い、送信信号

(10GHz サイン波、ここではダウンコンバートされた 1GHz のサイン波となる)の復調を行う。疑似ノイズ信号は FPGA にて生成し、信号の重畳タイミングを 0.5 ビットずつずらしながら信号再生に成功する疑似ノイズ信号の生成タイミングを探る。成功した生成タイミングから、複数の受信アンテナに到達する送信波のタイミングのずれ、すなわち送受信アンテナ間の相対距離差が測定出来る。この相対距離差を利用し、受信アンテナに対する相対的な送信アンテナ位置を算出する。

再生した送信信号(1GHz サイン波)の位相を I-Q 検波回路にて測定し、各アンテナの受信信号の位相差を計算することで、疑似ノイズ信号のビット長(300Mcps → 約 1m)以下の微小な受信タイミングのずれを計測することで、最終的に 1mm の測位精度を達成する。

#### 4.3. 計測結果

以上製作した送受信機システムを用い、送信アンテナ静止状態、及びゆっくりと移動させた状態について、受信信号の再生、及び送信アンテナ(測定対象)の測位実験を行った。今回、複数の受信アンテナで受信回路を共有する時分割受信を行っているため、送信機の速い速度での移動に対する測位実験は実施していない。4本の受信アンテナについて各 1kHz、合計 4kHz の信号受信を行うことで、1kHz の測位サンプリングを実現している。

測位実験の結果を図 3 及び図 4 に示す。受信機の FPGA にてスペクトラム逆拡散信号の生成及びタイミングの制御を行うことで、受信信号の安定した再生を実現した。再生された受信信号位相を用いることで、4本の受信アンテナからの送信アンテナ位置の相対距離を計算し、そこから受信アンテナの張る測定空間内の位置を計算することで、送信機位置を同定した。同定された位置は、受信信号ノイズに起因する位相差ノイズの影響を受けてある程度揺らいでいるが、その揺らぎの振幅は概ね 1mm 以下に収まっており、目標とする測位の相対位置精度 ~1mm を十分達成していると言える(図 3)。

送信アンテナを静止状態から、間欠的にゆっくりと移動させながら測位を行った結果を図 4 に示す。図中赤線で示すのが測位位置である。ここでは 1 次元方向の移動距離を表示している。静止位状態で、図 3 と同様に ~1mm の安定性を達成し、また移動中も安定した位置の追尾が行えることを確認した。図中青、及び緑に、測位中の 2 本のアンテナに対する受信信号強度を参考の為に示している。特に送信機移動中は、主に送信アンテナの向きの微小な振動に因るとされる受信信号の揺らぎが見られるが、概ね安定した受信信号強度が得られており、ここからも静止・移動中共に安定した測位が実現出来ていることが分かる。各静止位置で受信信号強度が相対的に異なるのは、移動の結果、送受信アンテナ間距離が変化することに因る。

以上の実験から、位置精度 ~1 mm、サンプリング周波数 1kHz という、当初想定した仕様を十分に満たす測位性能を確認し、本予算に於ける開発を完了した。

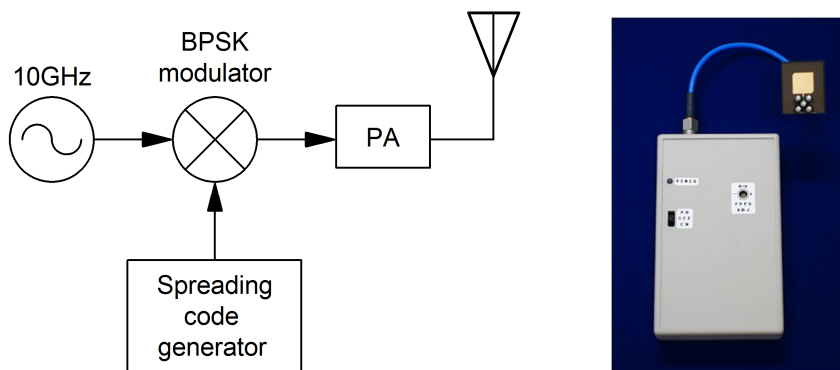


図 1 送信機ブロック図(左図)及び実際に製作した送信機(右図)。ブロック図の詳細については本文を参照。右图中右上の金色の四角部分が、信号波送出的ためのパッチアンテナ部(大きさ 1.5cm 角)である。パッチアンテナに青の配線でつながった箱には、左図に示す送信波生成回路、及び回路駆動用のバッテリーが納められている。回路は個別の回路素子を組み合わせた試作品のためサイズが大きいが、実用化に際し専用 IC チップ化すれば、回路サイズはバッテリー含めパッチアンテナ以下のサイズに収まり、パッチアンテナと一体化出来る。

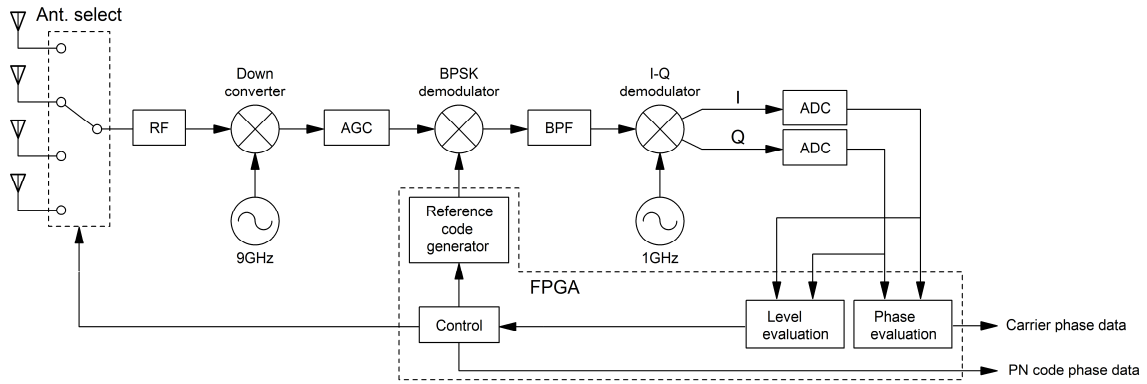


図 2 受信機ブロック図(上图)及び実際に製作した受信機(下图)。ブロック図の詳細については本文を参照。図 1 の送信機に用いたパッチアンテナと同一の受信アンテナを 4 本用意し、各アンテナに到達する送信波の時間差を、信号復調に用いる疑似ノイズ信号の重畳タイミング差、及び復調された信号の位相差より求める。求めた到達時間差から、送受信アンテナ間距離の相対差を知ること、受信アンテナの張る空間内に於ける送信アンテナの位置を算出する。今回製作した受信機は、1 つの受信回路を 4 本の受信アンテナで共有し、受信アンテナをサイクリックに切り替えながら時分割受信を行う。

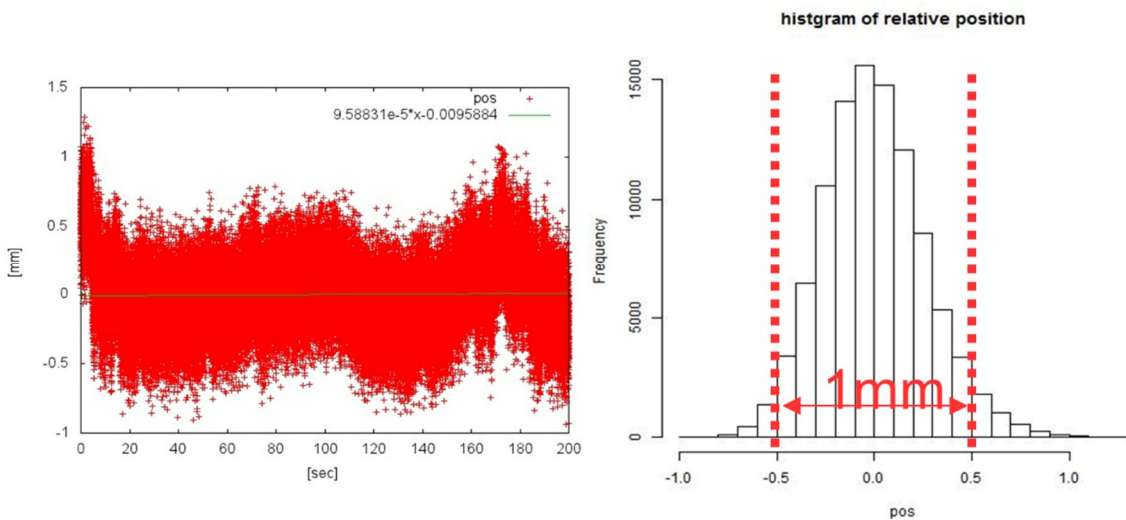


図 3 計測した送信機位置の長周期(200 秒)安定性。左図に測位相対位置の 200 秒間の時間変化、右図に同データの頻度分布を示す。相対位置精度約 1mm での測位を達成した。

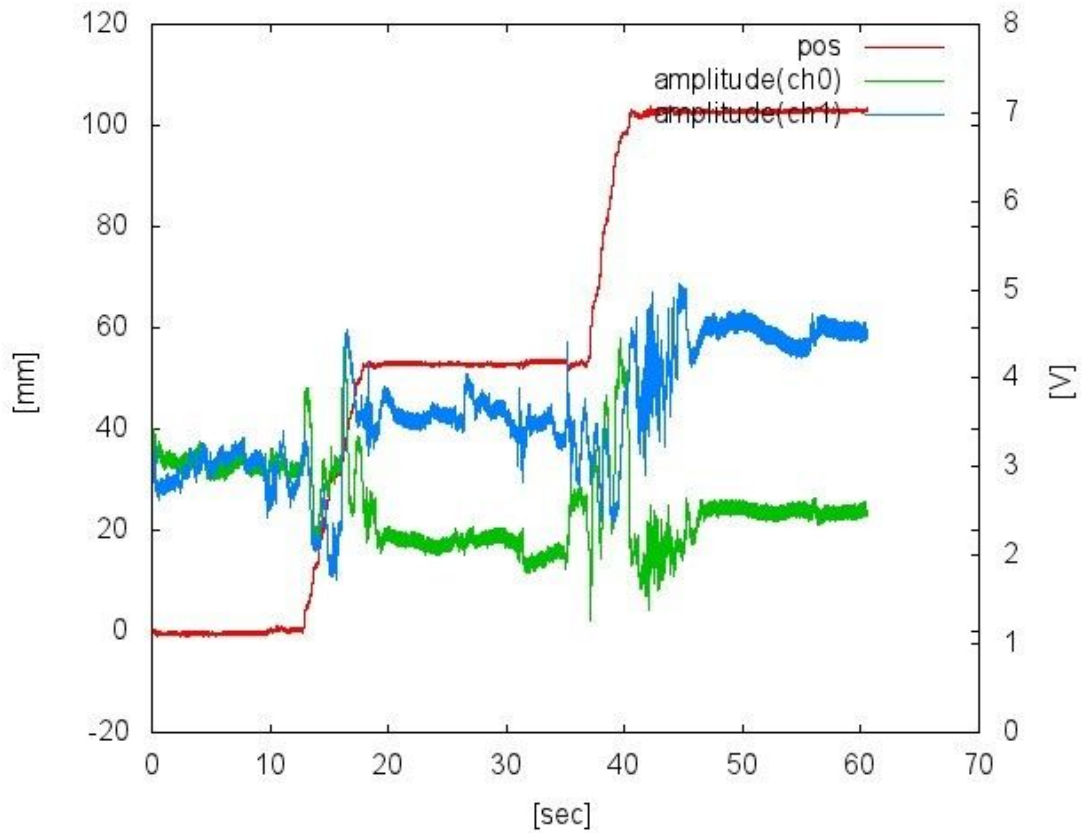


図 4 位置変動に対する追従(赤線)、及び同測定中の受信信号レベルの時間変化(緑線・青線)。静止した送信アンテナを、間欠的にゆっくりと動かしながら位置測定を行った。静止中・移動中共に、安定した受信信号レベル、及びその結果として安定した測位を実現した。