

氏名	森谷 潤一郎
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記号番号	博理工甲第 818 号
学位授与年月日	平成 23 年 3 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	屋内におけるオブジェクトのリモートポジショニングに関する研究 (Studies on Indoor Remote Positioning Systems)
論文審査委員	委員長 教授 長谷川孝明 委員 教授 島村 徹也 委員 准教授 伊藤 和人 委員 准教授 岡田 啓

論文の内容の要旨

本論文では、屋内測位社会基盤技術の確立を目指し、屋内におけるオブジェクトのリモートポジショニングのシステム構築方法および性能に関する研究を行っている。近年、位置依存のサービス、システム、環境の実現のために、位置情報の取得技術が重要になってきている。特に、屋内でも人や物の位置を把握したいというニーズが高くなっており、屋内で位置特定可能なシステムが様々提案されているが、その多くが研究段階であり、屋外における GPS (Global positioning system) のように広く一般に利用されているシステムが未だ確立されていない。位置特定システムは、周囲の環境からの信号などから自位置を特定するセルフポジショニング (Self-positioning) と、周囲の環境 (システム側) で位置を特定するリモートポジショニング (Remote-positioning) に大別される。本論文では、このリモートポジショニングを扱っている。また、位置特定技法としては、近接センシング手法 (Proximity sensing)、幾何学的計算手法 (Geometric calculation)、パターンマッチング (Pattern matching)、推測航法 (Dead reckoning) の 4 つに分類される。一般的に、幾何学的計算手法の TOA (Time of arrival) や TDOA (Time difference of arrival) 等の時間的なパラメータを利用した位置特定システムは、高精度になる可能性がある。電波等を伝送媒体とし時間的なパラメータを使用した屋内リモートポジショニングシステムの一つに逆 GPS 方式があり、その原理は提案されている。しかし、奥村らによって超音波単一パルスを用いた実験が、30cm 立方の空間で行われているだけである。また、ベルトコンベア上の物体のリモートポジショニングシステムも、空港のバゲッジハンドリングシステムやファクトリーオートメーションなどで利用されている。特に、近年、世界的主流になりつつある UHF 帯無線 IC タグの利用が物流・流通分野で進んでいる。しかし、その利用シーンの多くが、無線 IC タグの通過検出のみであり、2 次元での位置特定や高精度化などの技術開発が望まれている。また、実用上の観点から装置の簡略化が望まれている。これらに対し、第 2 章では、逆 GPS 方式の原理、代表的な位置特定システム、UHF 帯無線 IC タグの情物一致システムの従来研究など本論文を理解する上で必要な基礎知識を説明している。

第 3 章では、高精度な測位が期待される超音波を用いた逆 GPS 方式位置特定システムの性能・システム構築方法をシミュレーションおよび実験により明らかにしている。実用程度の空間 (4.00m × 6.00m × 2.40m)

での単一パルスでの実験により、バイアス誤差の絶対値の平均 0.02m、ランダム誤差の平均 0.03m、誤差の絶対値の 95%信頼区間 0.05m という結果を示している。マルチパスが雑音に比べて大きい場合、単一パルスにおいて信号の立ち上がりのみを用いて到来時刻を推定する手法の方が、立ち上がりと立ち下がりを用いる手法を比較し、測位精度が優れていることを示している。また、パルスをスペクトル拡散化することにより、分解能を下げずに連続発信による S/N 比の向上が可能であることを確認している。ハードウェア実験により、奥村らの超音波単一パルスでの実験と同程度の精度のまま、約 3.3 倍のレンジ (32 倍の空間) に測位範囲を拡大可能であったこと、S/N 比で 11 倍の改善がみられたことを示している。パルス空間長が 3cm であるのに対して SS (Spread spectrum) 信号の空間長が 3m と大きく異なっているが、これが改善されているのは積分効果のためである。さらに、誤差の傾向が GDOP (Geometric dilution of precision) の傾向と一致したことを確認している。これは誤差に GDOP が影響していることを示している。従って、アンテナ配置は、超音波トランスデューサの指向性や信号減衰の影響や NLOS (Non line of sight) だけでなく、GDOP を考慮して配置する必要がある。

第 4 章では、超音波と比較し測位範囲が広く、近年普及している無線 LAN で利用されている 2.4GHz 帯無線信号を用いた逆 GPS 方式位置特定システムを構築し、その構築方法および、実験によりその性能を明らかにしている。構築したシステムは、信号強度が遅延時間差に大きな影響を及ぼすのを避けるために、位相連続 FSK (CP-FSK) を用い復調後に相関値を取得する。さらに、ns オーダの遅延時間差を検出するために、設計・実装面を工夫しジッタ低減を行っている。具体的には、FSK の位相を連続にすることによる位相変動によるジッタの除去、FSK 変調に DDS (Direct digital synthesizer) を利用することによる送信タイミングの変動の除去、受信アンテナに指向性をもたせることによるマルチパスの除去、相関演算に XOR 回路を用いることによる入力レベルの変動による影響を低減、遅延調整回路を内蔵させることによる回路の遅延のばらつき補正を行っている。屋内環境(空間サイズ: 9.16m × 6.10m × 2.50m)での実験により、バイアス誤差の大きさが 0.86 ~ 1.85m、ランダム誤差の標準偏差 0.14m 以下という結果を得たこと、バイアス誤差が支配的であったことを示している。さらに、NLOS などを考慮して 5 つ以上の複数アンテナを配置する際の精度改善のための 1 つの方法として、複数アンテナから 4 つを選ぶ全組み合わせでの推定位置の平均を求め、それを利用し各組み合わせでの仮の GDOP を計算し、仮の GDOP が最も良いアンテナパターンを選択する手法を提案し、シミュレーションにより有効性を示している。第 5 章では、普及型のタグリーダを用いてコンベア上を移動するオブジェクトに付けられた UHF 帯無線 IC タグの 2 次元位置を特定するシステムを実現している。提案システムは、ベルトコンベアが設置されている工場などで、準静的ではあるものの、物品を置くために人が入り、置かれた物によって電波環境が変化するような長い時間間隔において電波環境の変化を伴う時変マルチパス環境に対し、パターンマッチング手法をすることで適応的な位置推定を可能にしている。実験により、数 cm の精度でタグの 2 次元位置を推定可能であることを示している。また、環境変化よりも十分短い周期で学習することにより、適応的な位置推定を可能とする本手法の有効性を示している。第 6 章では、これらの総括として、3 種の屋内リモートポジショニングシステムの構築方法およびその性能に関する知見をまとめている。

以上より、屋内測位社会基盤技術の確立を目指し、屋内におけるオブジェクトのリモートポジショニング手法の性能向上および実用化のための重要な知見を得ている。

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は、2011年2月7日に論文発表会を開催した。その発表を含めて学位論文の審査を行った結果を以下に示す。

本論文では、屋内測位社会基盤技術の確立を目指し、屋内におけるオブジェクトのリモートポジショニング手法のシステム構築方法および性能に関する研究を行っている。まず、超音波を伝送媒体とした逆 GPS 方式位置特定システムの性能の明確化およびシステム構築方法に関する知見を得ている。次に、2.4GHz 帯無線信号を伝送媒体とした逆 GPS 方式位置特定システムの性能の明確化およびシステム構築方法に関する知見を得ている。最後に、ベルトコンベア上を移動するオブジェクトに付けられた UHF 帯無線 IC タグの 2 次元位置を簡易な方法で特定する手法の実現を行っている。

近年、位置依存のサービス、システム、環境の実現のために、位置情報の取得技術が重要になってきている。特に、屋内でも人や物の位置を把握したいというニーズが高くなっており、屋内で位置特定可能なシステムが様々提案されているが、その多くが研究段階であり、屋外における GPS のように広く一般に利用されているシステムが未だ確立されていない。位置特定システムは、周囲の環境からの信号などから自位置を特定するセルフポジショニングと、周囲の環境(システム側)で位置を特定するリモートポジショニングに大別される。本論文では、このリモートポジショニングを扱っている。また、位置特定技法としては、近接センシング手法 (Proximity sensing)、幾何学的計算手法(Geometric calculation)、パターンマッチング (Pattern matching)、推測航法(Dead reckoning)の 4 つに分類される。一般的に、幾何学的計算手法の TOA (Time of arrival) や TDOA (Time difference of arrival) 等の時間的なパラメータを利用した位置特定システムは、高精度になる可能性がある。

電波等を伝送媒体とし時間的なパラメータを使用した屋内リモートポジショニングシステムの一つに逆 GPS 方式があり、その原理は提案されている。しかし、奥村らによって超音波単一パルスを用いた実験が、30cm 立方の空間で行われているだけである。また、ベルトコンベア上の物体のリモートポジショニングシステムも、空港のバゲッジハンドリングシステムやファクトリーオートメーションなどで利用されている。特に、近年、世界的主流になりつつある UHF 帯無線 IC タグの利用が物流・流通分野で進んでいる。しかし、その利用シーンの多くが、無線 IC タグの通過検出のみであり、2 次元での位置特定や高精度化などの技術開発が望まれている。また、実用上の観点から装置の簡略化が望まれている。

これらに対し、第 2 章では、逆 GPS 方式の原理、代表的な位置特定システム、UHF 帯無線 IC タグの情報一致システムの従来研究など本論文を理解する上で必要な基礎知識を説明している。

第 3 章では、高精度な測位が期待される超音波を用いた逆 GPS 方式位置特定システムの性能・システム構築方法をシミュレーションおよび実験により明らかにしている。実用程度の空間(4.00m × 6.00m × 2.40m)での単一パルスでの実験により、バイアス誤差の絶対値の平均 0.02m、ランダム誤差の平均 0.03m、誤差の絶対値の 95%信頼区間 0.05m という結果を示している。マルチパスが雑音に比べて大きい場合、単一パルスにおいて信号の立ち上がりのみを用いて到来時刻を推定する手法の方が、立ち上がりとしち下がりを用いる手法と比較し、測位精度が優れていることを示している。また、パルスをスペクトル拡散化することにより、分解能を下げずに連続発信による S/N 比の向上が可能であることを確認している。ハードウェア実験によ

り、奥村らの超音波単一パルスでの実験と同程度の精度のまま、約 3.3 倍のレンジ (32 倍の空間) に測位範囲を拡大可能であったこと、S/N 比で 11 倍の改善がみられたことを示している。パルス空間長が 3cm であるのに対して SS 信号の空間長が 3m と大きく異なっているが、これが改善されているのは積分効果のためである。さらに、誤差の傾向が GDOP の傾向と一致したことを確認している。これは誤差に GDOP が影響していることを示している。従って、アンテナ配置は超音波トランスデューサ指向性や信号減衰の影響や NLOS だけでなく、GDOP を考慮して配置する必要がある。

第 4 章では、超音波と比較し測位範囲が広く、近年普及している無線 LAN で利用されている 2.4GHz 帯無線信号を用いた逆 GPS 方式位置特定システムを構築し、その構築方法および、実験によりその性能を明らかにしている。構築したシステムは、信号強度が遅延時間差に大きな影響を及ぼすのを避けるために、位相連続 FSK (CP-FSK) を用い復調後に相関値を取得する。さらに、ns オーダの遅延時間差を検出するために、設計・実装面を工夫しジッタ低減を行っている。具体的には、FSK の位相を連続にすることによる位相変動によるジッタの除去、FSK 変調に DDS (Direct digital synthesizer) を利用することによる送信タイミングの変動の除去、受信アンテナに指向性をもたせることによるマルチパスの除去、相関演算に XOR 回路を用いることによる入力レベルの変動による影響を低減、遅延調整回路を内蔵させることによる回路の遅延のばらつき補正を行っている。屋内環境 (空間サイズ: 9.16m × 6.10m × 2.50m) での実験により、バイアス誤差の大きさが 0.86 ~ 1.85m、ランダム誤差の標準偏差 0.14m 以下という結果を得たこと、バイアス誤差が支配的であったことを示している。さらに、NLOSなどを考慮して 5 つ以上の複数アンテナを配置する際の精度改善のための 1 つの方法として、複数アンテナから 4 つを選ぶ全組み合わせでの推定位置の平均を求め、それを利用し各組み合わせでの仮の GDOP を計算し、仮の GDOP が最も良いアンテナパターンを選択する手法を提案し、シミュレーションにより有効性を示している。

第 5 章では、普及型のタグリーダを用いてコンベア上を移動するオブジェクトに付けられた UHF 帯無線 IC タグの 2 次元位置を特定するシステムを実現している。提案システムは、ベルトコンベアが設置されている工場などで、準静的ではあるものの、物品を置くために人が入り、置かれた物によって電波環境が変化するような長い時間間隔において電波環境の変化を伴う時変マルチパス環境に対し、パターンマッチング手法をすることで適応的な位置推定を可能にしている。実験により、数 cm の精度でタグの 2 次元位置を推定可能であることを示している。また、環境変化よりも十分短い周期で学習することにより、適応的な位置推定を可能とする本手法の有効性を示している。

第 6 章では、これらの総括として、3 種の屋内リモートポジショニングシステムの構築方法およびその性能に関する知見をまとめている。

以上のように、当論文で述べられた屋内におけるオブジェクトのリモートポジショニングに関する一連の研究は工学的に極めて有用であり、博士 (工学) の称号を授与にふさわしいと判定した。