

氏名	小木曾 里樹				
学位の種類	博士（工学）				
学位記番号	博甲第9416号				
学位授与年月日	令和2年3月25日				
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当				
審査研究科	システム情報工学研究科				
学位論文題目	マルチパスに対してロバストな少素子マイクロフォンアレイを用いる屋内測位法に関する研究				
主査	筑波大学	教授	工学博士	水谷 孝一	
副査	筑波大学	准教授	博士（工学）	海老原 格	
副査	筑波大学	准教授	博士（工学）	若槻 尚斗	
副査	筑波大学	助教	博士（工学）	善甫 啓一	
副査	筑波大学	助教	博士（工学）	前田 祐佳	
副査	筑波大学	准教授	博士（工学）	庄野 和宏	
副査	防衛大学校	教授	工学博士	森下 久	

論文の要旨

審査対象論文は、少素子のマイクロフォンアレイと非同期の音響ビーコンを用いるマルチパスに対してロバストな屋内測位法の確立を目的としている。

【第1章】では、測位法の歴史とこれまでに提案されている測位法について概説する事によって、本研究の背景を示している。ここでは測位の方法と利用例について述べた後、屋内測位はマルチパスや見通し外による信号の変化が課題であることを述べている。屋内測位法について具体的な例とその課題を示し、高精度測位には時間情報の計測が必要であること、これを比較的容易に達成できる測位法に音響測位があることが示されている。この上で、音響測位には到来時間、到来時間差、到来方向の3種類があり、前者の2種類は時刻動機が必要で機材が複雑にやすいことを指摘している。また、到来方向を用いる場合は時刻同期が不要だがマルチパスによる影響で測位精度が低いこと、受信機に多数のマイクロフォンが必要であり煩雑になることが課題であることを示した上で、これらを解決できれば簡便でマルチパスにロバストな測位を実現可能であると述べている。

【第2章】では、非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロフォンアレイを用いて測位を行う原理を示し、その有効性を実験により確認している。分離可能な音源を複数配置し、これに対して4素子から成るマイクロフォンアレイと車輪回転数を用いて測位を行う手法を提案している。この際、マルチパス等による音源方向の不正確さを、マイクロフォンアレイ素子間の幾何学的関係から評価する手法を提案している。音響ビーコンは周波数帯域幅2kHzのアップチャープ信号とし、6m四方の空間の四隅に配置し評価を試みている。測位対象となる移動ロボットでは、移動時の車輪回転数を計測す

るとともに、これらの音を4素子のマイクロフォンアレイを用いて評価している。その結果、車輪回転数のみを用いる手法ではy軸が最も大きく平均0.67 m、標準偏差1.5 m程度の測位誤差が発生するのに対し、提案手法では平均0.069 m、標準偏差0.2 m程度の誤差で測位が可能であるとしている。音の遮蔽がある場合、音源方向の誤差が生じたものの、これに対応する不正確さの評価値が大きくなり、測位への影響を抑える。ただし、マルチパスによる音源方向の誤検出はマイクロフォンアレイの幾何学的関係からは検出できず、他の手法が必要であることを示唆した。以上により、非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロフォンアレイを用いる測位の原理と測位が可能であると結論づけている。

【第3章】では、非同期音響ビーコンの配置及び信号設計をシミュレーションを用いて評価している。音響ビーコンの配置及び受信機の位置関係による測位誤差の変化を定量化するため、音響ビーコン及び受信機の幾何学的関係の条件数を定義している。条件数の評価はシミュレーションによって行い、一定の音源位置の誤差、音源方向の誤差を与えた場合の測位誤差について条件数との比較を実施している。このシミュレーションから、測位誤差と条件数はよく対応しており、これによって音源配置の評価が可能であることが示唆された。次に、音源方向を用いる測位でビーコンから発する信号について、擬似乱数系列を用いる場合の設計パラメータによる音源方向推定および測位への影響を検討している。音響ビーコンが発する信号について、変調のキャリア周波数、チップレート及びM系列信号の次数を変化させた結果、M系列符号を用いる場合、チップレートとキャリア周波数が音源方向推定に影響を与え、これらを適切に設定することで測位が可能であることを示している。また、音源方向推定のためのマイクロフォン間伝搬時間推定を対象として異なる変調のパラメータにおけるドップラシフトの影響を検討し、相互相関関数を用いる伝搬時間の正確さの評価指標を提案している。この中で、相互相関関数の最大値対実効値比を用いて伝搬時間の不正確さを評価できること、チップレートとキャリア周波数を適切に設定することで2 m/s以上の速度でも伝搬時間計測が可能であることが示されている。

【第4章】では、マイクロフォン間の相互相関関数を位置の尤度として用いる測位法を提案している。非同期の音響ビーコンと2素子のマイクロフォンアレイを用いる測位手法について、その測位精度を4素子のマイクロフォンアレイを用いる測位と比較している。その結果、提案手法はマイクロフォン間の相互相関関数を状態変数に応じ参照して尤度計算を行い、音源方向が一意に定まらない場合でも測位可能であることが確認された。また、強い反射波のある環境、及び音響ビーコンが遮蔽された場合においても、従来法に比べ測位誤差に対する影響が少なくロバストな測位が可能であることを実験から示している。

【第5章】では、本研究の総括がなされ、少素子のマイクロフォンアレイと非同期の音響ビーコンを用いるマルチパスにロバストな屋内測位法を確立したと結論付けている。

審査の要旨

【批評】

本論文は2素子を含むごく少素子のマイクロフォンアレイと非同期の音源を用いることで時刻同期不要かつマルチパスにロバストな屋内測位法を実現する試みに関するものである。

従来の測位法においては、振幅を計測する場合は時刻同期が不要だが測位精度が向上し難いこと、信号の伝搬時間を計測する場合は測位精度が高いが時刻同期が必要であることを示している。これに対し本論文では、時刻同期が不要かつマルチパスにロバストな測位法として、音源方向と測位対象の車輪回転数を用いるハイブリッド測位法を提案している。当該手法は従来誤差が大きいとされている音源方向による測位法について、信号処理により音源方向の不正確さを評価することで機材の時刻同期が不要かつ誤差を低減しており独創的であり、時刻同期が全く不要な測位機器は実用面でも有用と認められる。提案法は実験における測位結果から測位精度を議論しており、音源が遮蔽され直達する音がない場合、音源方向に大きな誤差が生じるものの、測位への影響が見られないことを示している。屋内というマルチパス環境において、4素子のマイクロフォンアレイを用いて音源の遮蔽に対してもロバストな測位が可能な原理を示していることは評価に値する。

音源方向を用いる測位について、音源配置と測位対象の位置によって測位精度が変化することを示し、これを定量化する試みがなされている。音源配置と測位対象の位置から求まる幾何学的関係に関し、これのヤコビアン条件数を用いることで、測位誤差の大きさを予測できることが示されている。当該成果は実験を行わずとも測位誤差の予測を可能とするものであり、実利用へ向けた有用性がある。また、ビーコンに用いる音源のパラメータについて、測位誤差への影響とドップラシフトによる誤差を求めている。その結果、パラメータの中でも特にチップレートとキャリア周波数が測位へ影響することを示し、これらを適切に設定する必要があることが示された。

本論文では、壁面により生じる強いマルチパスによる測位への影響について、その本質は音源方向を一意に定めようとするにありと指摘している。この観点から、音源方向の尤度を測位へ用いる測位法を提案している。提案法ではマイクロフォンアレイで求めた各素子間の相互相関関数について、その値を各素子間における音の到来時間差の尤度として仮定している。この上で、ある位置について本来得られるべき音の到来時間差を計算、この時間差における相互相関関数の値を尤度として用いることで、音源方向を一意に定める過程を経ず位置の尤度を評価する手法を提案している。これについて屋内における実験により測位精度を議論しており、音源が遮蔽された場合、及び強い反射波が到来する場合でも測位精度が顕著な劣化を見せないことを示している。これに加え測位に必要な計算時間と測位精度の関係についても実験に基づく議論を行っており、現実的な計算量でマルチパスにロバストな測位を実現できることを示している。また、従来の原理では測位が不可能であった2素子という最小構成のマイクロフォンアレイでも従来法と同等程度の測位が可能と示したことは評価に値する。

本論文で提案された音源方向を一意に定める必要のない測位の原理は、マルチパス、見通し外の音源による測位への影響、原理的に一意に音源方向を定められない2素子のマイクロフォンアレイなど、これまで個別に捉えられていた課題を統一的に解決する新たな測位法を確立している。これにより少素子のマイクロフォンアレイでもマルチパスにロバストな測位が可能となるほか、音源方向に限らな

い他の測位法でも当該原理により測位法を記述でき、マルチパスによる測位精度劣化への対策として貢献する基礎となる可能性がある。本論文は今後も屋内測位分野およびその応用分野を含め、様々な工学分野への展望が期待できることから高く評価できる。

【最終試験の結果】

令和2年1月27日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。