

移動ロボット相互の空間光通信を用いた  
相対的位置の同定と位置情報の共有  
(課題番号：15500119)

平成15年度～平成16年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）  
研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者：橋 啓八郎  
(広島市立大学・情報科学部・教授)

## はしがき

本冊子は、平成15年度～平成16年度の二年間、科学研究費補助金：基盤研究(C)(2)の補助を受けて実施した研究「移動ロボット相互の空間光通信を用いた相対的位置の同定と位置情報の共有」(課題番号：15500119)の研究成果報告書である。この研究の当初の目的は、複数の移動ロボットが協同作業を行うときに、相手の移動ロボットを可動式灯台と見立ててその方位を検出し、作業空間中の複数の移動ロボットが三角測量の要領で、相互に相対的な位置を求めるアルゴリズムを開発することであった。

複数の移動ロボットが三角測量の要領で相互の距離・方位を導出するには、二辺と狭角(二つの辺とその間に挟まる角)または、二角と狭辺(二つの角とその間に挟まる辺)を検知する必要がある。本研究では当初、ロボットが直進移動した時の開始地点と終了地点で相手ロボットの方向角度を検知し、移動距離と始点終点で検知した相手の角度をもとに、相互の距離・方位を算出する方法を検討した。事前の思考実験では、当初検討した方法でお互いの距離・方位を算出できると考えたが、研究が進むに従って、実際の作業空間では障害物の配置や形状、床面の凹凸や滑り、ロボットの動特性などで正確な直進移動に多くの困難があることが明らかとなった。そこで我われは実験方法の一部を見直し、通常移動ロボットが搭載している超音波ソナーやTVカメラなどのセンサを空間光通信システムと併用して、複数の移動ロボット間で相互に距離・方位を算出する方法を研究した。

研究途中で実験方法の一部を変更したため、当初の目的である複数の移動ロボット相互の相対的な位置を同定するアルゴリズムの開発には時間的な不足を生じ、計画の完遂には到らなかったが、研究した光通信システムの光入射角検出機能を用いた相対的位置検出のシミュレーションのほか、超音波ソナーによる精密距離計測方式の考案や、作業空間中の特徴的地形を検出する方法の考案など、複数移動ロボットの協同作業と位置同定の基礎となる重要な考案を得ることができ、有意義な研究であった。

研究組織

研究代表者： 橋 啓八郎 (広島市立大学・情報科学部・教授)

研究分担者： 高井 博之 (広島市立大学・情報科学部・助手)

研究分担者： 安田 元一 (長崎総合科学大学・工学部・教授)

交付決定額(配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成15年度	1,600	0	1,600
平成16年度	1,900	0	1,900
総計	3,500	0	3,500

研究発表

(1) 学術誌等

なし

(2) 口頭発表

[1] H.TAKAI, G.YASUDA and K.TACHIBANA: "A Space-division Wireless Communication System for Ad Hoc Networking and Cooperative Localization of Multiple Mobile Robots", Preprints of the 16th International Federation of Automatic Control IFAC World Congress2005, Paper ID:05004, July 2005, (Prague) Czech. -To be appeared-

[2] 高井 博之, 橘 啓八郎: 「複数移動ロボットの相互協力のための空間分割光無線通信システム」, 第6回YRP移動体通信産学官交流シンポジウム(2004), pp.164-165, 2004年7月, 神奈川県横須賀市

[3] H.TAKAI, G.YASUDA and K.TACHIBANA: "Function Integration for Team Operations of Mobile Robots: Inter-robot Communication and Mutual Localization", Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics ICAR2003, pp.1431-1436, July 2003, (Coimbra) Portugal.

(3) 出版物

なし

研究成果による工業所有権の出願・取得

なし

## 研究の目的

近年、複数の移動ロボットによる共同作業が注目されている。特に、人間型の二足歩行型移動ロボットは、人間と同等な作業環境で人間と同じ機械や道具を用いることができるので、複数ロボットの相互協力によって複雑で高度な作業が実施できると期待されている。複雑で高度な作業を効率よく処理するため、共同作業を行う複数のロボットは、それぞれのロボットが持つ作業手順などの情報を共有しなければならない。本研究は、複数の移動ロボットが共同で作業するとき、お互いが作業の邪魔をしないよう、無線通信で情報交換すると同時にそれぞれが発する送信信号をビーコンに用いて相互の位置を検出する、位置同定アルゴリズムを研究した。

共同作業にあたる複数の移動ロボットは、互いに近距離に位置する場合が多い。我々は、移動ロボット相互の近距離通信には、壁や障害物で容易に遮断できる赤外線が適していると考えた。赤外線は指向性が強く、ロボットの移動・回転による通信の途絶が懸念される。研究分担者：高井博之は平成13年度から平成14年度の2年間、科学研究費補助金(若手研究(B))「移動ロボット相互の近距離通信のための空間分割光無線通信システムの開発」(課題番号：13750365)を得て、移動ロボットの相互通信を主な目的とした光無線通信システムの開発に取り組んだ。この通信システムは、PSD (Position Sensitive Device : フォトダイオード光入射角センサ)を受光素子に用い、複数の受光素子を円周上に並べ、全方向の信号を受信できると同時に通信相手の方向角度も検知できる。我々は、ロボット相互の相対的な位置は、検知した通信相手の方向角度をもとに、三角測量の要領で同定できると考えた。本研究の目的は、先に考案した空間分割光通信システムの光入射角検出機能を用いた、ロボット相互の位置同定アルゴリズムの開発である。

## 研究の内容

本研究は、移動ロボット相互間の相対的な位置同定の研究である。三角測量による位置同定では、二辺と狭角(二つの辺とその間に挟まる角)または、二角と狭辺(二つの角とその間に挟まる辺)を検知する必要があり、距離と角度が正確に求まらなければ、正確な相対位置は判らない。また、移動ロボットに搭載したセンサを用い、作業空間中に基準点を見つけなければ、障害物の位置などの情報が共有できず、効率的な共同作業はできない。そこで平成15年度から平成16年度の2年間の研究期間中に、

- 1) 光入射角センサを用いた三角測量のシミュレーションと位置計測誤差の推定
  - 2) ロボット搭載センサを用いた作業空間基準点検出法の検討
- を行った。

## 実験の方法と結果

### 1. 光入射角センサを用いた三角測量のシミュレーションと位置計測誤差の推定

本研究では、空間分割光通信システムの光入射角検出機能を用い、移動ロボット相互の位置を同定するアルゴリズムを開発する。通信システムに用いるPSD(フォトダイオード光入射角センサ)の角度検出実験結果をもとに、三角測量による位置検出シミュレーションを行った。

図1に光入射角センサの角度検出実験結果を示す。図1から判るように、センサから光源が離れるに従って、角度の検出精度が上がる。これは、至近距離の場合、距離に対してセンサの大きさが影響を与えるためである。

図2に位置検出シミュレーションの結果を示す。図2は、直径100mmのロボット3台を一辺400mmの正三角形の頂点に配置し、その周囲を光源が移動した時の位置検出誤差を示している。このシミュレーションでは、光源がロボットと一直線に並ぶなど、計算不可能な場合を除き、約90%の精度が得られた。

現実には、それぞれのロボットが移動するので、相互の正確な位置を検出するには、基準となるロボット間の距離が正確でなければならない。ロボット相互の距離測定方法として、ロボットに搭載されている超音波センサと無線通信を併用し、電波と超音波の伝播時間の差から距離を求める方法が提案されている。今後、より正確な相対位置計測のため、基準ロボット間の正確な距離についても研究を進める。

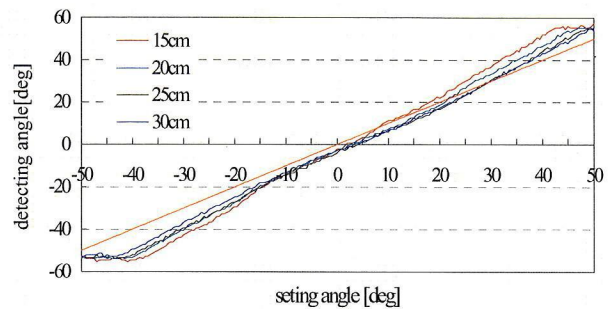


図1 光入射角センサの角度検出結果

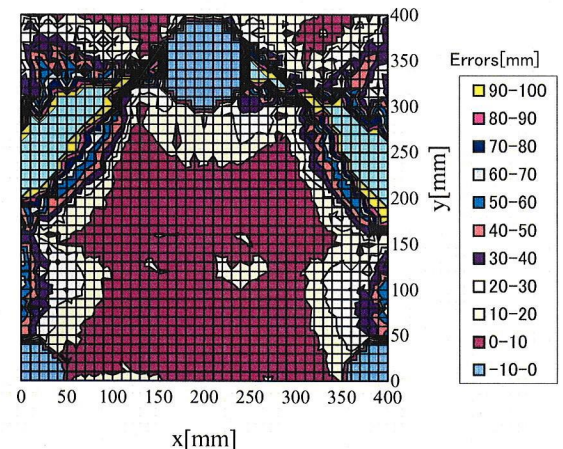


図2 位置検出シミュレーションの結果

## 2. ロボット搭載センサを用いた作業空間基準点検出法の検討

一般に個々の移動ロボットは、独自の座標系を用いて障害物検出や軌道生成を行うため、移動ロボットが相互に位置情報を共有するには、ロボットの内部情報を共通の座標系に変換する必要がある。移動ロボットは、未知の環境で作業する場合も多く、既知の地形地図情報に依存せず共通座標系を獲得し、位置同定する手法が必要である。我々は、協同作業する各ロボットは互いに近接しているので局所的な作業空間の相対的な位置情報があれば、十分にタスクを達成できると考えた。そこで、理想的な小空間で光通信の信号を局所的な共通座標軸に使用し、複数のロボットが搭載するセンサで作業空間の同じ特徴地形を観測して、位置情報を得る方法を検討した。

一般的な移動ロボットには、障害物を検出し衝突を回避するため、超音波ソナーやTVカメラなどのセンサを搭載している。そこで本研究では、理想的な屋内作業空間を想定し、

i) 超音波センサの測距能力の向上

ii) TVカメラを用いた障害物の距離・方位検出

について検討した。一般的な屋内作業空間には、壁や柱によって形成される“コーナ”や“エッジ”が数多く存在する。この“コーナ”や“エッジ”を作業空間中の特徴地形として検出する方法を検討した。

i) 超音波センサの測距能力の向上

移動ロボットに搭載されるセンサは、小型軽量で低消費電力なものが望まれる。超音波センサは小型で構造が簡単のため、多くの移動ロボットに搭載されている。超音波センサを回転させながら距離を計測し、特徴地形(コーナ)を検出する実験を行った。図3に実験結果を示す。超音波センサの形状や周波数により、ビーム幅が異なる。この実験では超音波センサに円筒形ホーンを取付け超音波のビーム幅を制御し、正確な特徴地形が検出できる

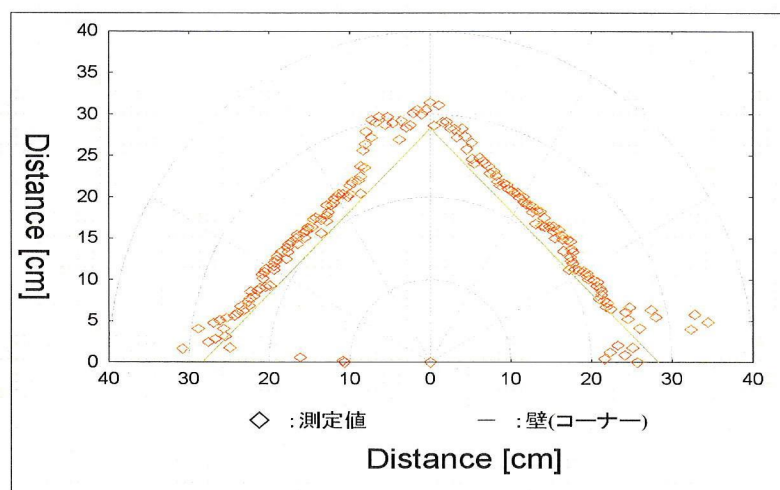


図3 超音波センサによる特徴地形(コーナ)の検出



ことを確かめた。

次に我々は、超音波センサの受信信号処理回路を工夫し、距離検出能力と距離検出精度を向上する方法を検討した。従来、超音波センサの受信回路には、広帯域信号増幅回路と包絡線検波を用い、超音波の発射から反射信号受信までの伝播往復時間を計測し、障害物までの距離を求めていた。この回路方式では、超音波反射信号以外の雑音の混入も多く、正確な距離計測を行うことはできなかった。我々は、超音波センサの受信回路に同調増幅回路を用い、超音波近傍の周波数を選択的に増幅し不要な信号を除去する実験を行った。また、航空機用レーダに用いられる測距方式の1つマルチPRF測距法を用い、距離検出能力の向上を検討した。図4にマルチPRF測距法のモデルを示す。マルチPRF測距は、超音波パルスの繰返し周期が短いので、航空機用レーダでは移動目標の検出に使用されている。図5にマルチPRF測距実験の結果を示す。超音波パルス1周期の送信に対し、同調増幅を用いることで十分な反射信号が得られていることが判る。

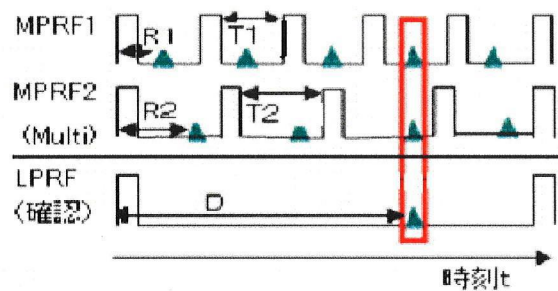


図4 マルチPRF測距法のモデル

今後の研究課題として、精密な特徴地形の検出だけでなく、複数障害物の距離検出や移動障害物の速度検出など、超音波の性質を生かしたセンシング手法の開発に取り組む。

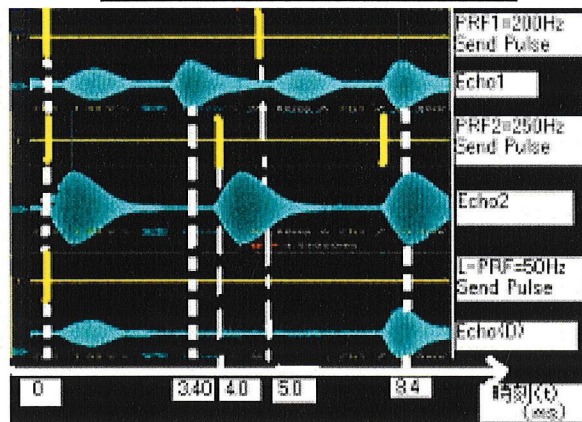


図5 マルチPRF測距実験の結果

## ii)TV カメラを用いた障害物の距離・方位検出

移動ロボットの遠隔制御には、作業空間の状態を確認するためTVカメラが搭載される。移動ロボットに搭載されたTVカメラを用い、作業空間中の特徴地形検出を試みた。近年、半導体の高集積化が進み、さらに精密なプラスチック・レンズ、大出力半導体レーザ光源が実用化された。本研究ではこれらの素子を用い“コーナ”や“エッジ”検出を実験した。

レーザ光を円筒形レンズを通して集光することで、光が扇状に広がり空間中に線を引く、小電力ライン・ジェネレータが実用化されている。このレーザ扇状光が物体に当たってで



レーザ断面画像から、対象物の凹凸、即ち、作業空間中の“コーナ”や“エッジ”を検出する。図6にレーザ断面画像のモデルを示す。強いレーザ光は視覚に対し有害である。本研究では、レーザ発光時間をTVカメラの1フレーム時間に制限し、フレーム間差分画像からレーザ断面画像を切り出して、“コーナ”や“エッジ”の頂点を検出する方法を検討した。TVカメラ・パラメータの、レンズの明るさと撮像素子の感度によって角度検出能力が、レンズの画角と撮像素子の密度によって角度検出精度が決まる。ライン・ジェネレータとTVカメラを用いた、画像処理による特徴地形検出の実験を行い、意図通りの実験結果を得た。

今後の課題として、照明LEDを異なる方向に配置し、それぞれ別々に点灯して得られる照明条件の異なる画像からの特徴地形検出や、光の性質を変化した時の角度検出能力・精度の相違について研究する。

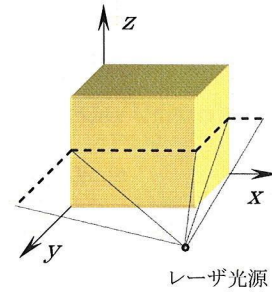


図6 レーザ断面画像