

Title	移動ロボットの目標追従タスクに適した電波到来方向探知手法
Author(s)	多田羅, 一昂; 李, 根浩; 丁, 洛榮
Citation	日本機械学会論文集, 81(829): 15-00109
Issue Date	2015
Type	Journal Article
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/16110
Rights	This is the author's version of a work accepted for publication by The Japan Society of Mechanical Engineers. Copyright (C) 2015 日本機械学会. 多田羅 一昂, 李 根浩, 丁 洛榮, 日本機械学会論文集, 81(829), 2015, p.15-00109. http://dx.doi.org/10.1299/transjsme.15-00109
Description	

移動ロボットの目標追従タスクに適した電波到来方向探知手法

多田羅 一昂^{*1}, 李 根浩^{*2}, 丁 洛榮^{*3}

Geometric model based directional sensing of electromagnetic waves and prototype implementation

Kazutaka TATARA^{*1}, Geunho LEE^{*2} and Nak Young CHONG^{*3}

^{*1,*3} School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

1-1 Asahidai, Nomi-shi, Ishikawa 923-1211, Japan

^{*2} Department of Environmental Robotics, University of Miyazaki

1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

Received 16 August 2013

Abstract

This paper introduces a novel direction-of-arrival (DoA) technique based on phase differences of electromagnetic waves. In detail, design and implementation issues for the DoA directional sensing are described, towards providing an efficient solution to mobile robot target tracking for various applications. What is the most important aspect from the practical point of view is how to realize accurate measurements of the bearing from an electromagnetic spot source. For the purpose, a DoA estimation model is proposed using a minimum number of antennas. Another focus lies in the implementation of an in-house DoA detection prototype considering the simplicity and generality of hardware configurations. This paper explains details of a purpose-built, cost-efficient solution ranging from the estimation model design to its hardware implementation suitable for autonomous robot navigation. Experimental results show that the proposed method for the DoA estimation and its hardware prototype can be considered quite satisfactory in an indoor environment.

Key words : Electromagnetic waves, Direction sensing, DoA detection prototype, Robot navigation, Target-oriented tasks

1. 緒 言

近年のロボット技術の進歩により、様々な移動ロボットが家庭(田神他, 2014)、公共の場(田村他, 2013)、自然環境、災害地(藤田, 大西, 2014)等の人の立ち入る事ができない環境(妻木他, 2012)さらには宇宙空間(小林他, 1998)等で用いられている。しかしながら技術の進歩にもよらず、山岳地での除雪作業中の転落事故や救出作業中の雪崩によって死者や重症者が発生している事が報告されている。このような事故を防ぐため人間に代わって移動ロボットが、道に沿っての除雪作業、山岳地帯での生存者探索や野生動物の監視追跡等の利用される事が新たなタスクとして期待されている。これらの様なタスクに共通している事は、ロボットが目標に向きつつ、近づいていく目標追従タスクであると考えている。また、タスクを実行するにあたり、未知の環境や悪天候下が想定される。このような環境では地形や気候によって、既存のセンサシステムの使用は制限される。前記の条件を考慮し、かつ、移動ロボットを用いる観点から見ると、正確な目標追従を実現し、さらに限られたリソースを効率よく活用するためには、ハードウェアの構成を最小限とするのが望ましいと考える。

No.15-00109 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00109]

^{*1} 正員, 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 (〒 923-1211 石川県能美市旭台 1-1)

^{*2} 正員, 宮崎大学 工学部 環境ロボティクス学科 (〒 889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

^{*3} 北陸先端科学技術大学院大学

E-mail of corresponding author: geunho@cc.miyazaki-u.ac.jp

移動ロボットに用いられる位置決定システムは、大きく参照座標系に基づいて絶対的もしくは、相対的座標のいずれかに分類する事ができる。例えば、全地球測位システム (GPS) は、絶対座標系の典型的な例である。一方で相対座標系を用いる例としては、カメラと測域センサ、例えば、レーザレンジファインダ、超音波センサ、赤外線センサに分類する事ができる。カメラを用いてロボットは1枚の画像から物体の存在を検出する事を可能にし、多くの情報を、一連の計算を通じて抽出する事ができる。画像処理技術は、照明や環境の変化に非常に敏感である事が課題の1つである。測域センサは、容易に使用する事ができ、様々な用途に用いられている。しかしながら、これらのセンサは通常、雑然とした環境下では、障害物の有無に左右され、自律移動は困難である。

また、無線通信技術の進歩により、様々な電波信号による測定システムが開発されている。これらの技術は、電波強度、周波数、時間差、位相等の信号特性を分析する事によって、方位や距離を測定する事が可能である。測定技術の例として、受信信号強度 (RSS)(Malajner, et al., 2012)(Menegatti, et al., 2009)、到来方向 (DoA)(Viciano-Abad, et al., 2014)(小宮山他, 2007)、到来時間 (ToA)(Priyantha, et al., 2005)(Trinh, et al., 2012)、到来時間差 (TDoA)(Xu, et al., 2013)(Prorok, et al., 2012)、及び到来周波数差 (FDoA)(Widodo, et al., 2013)(Chestnut, 1982) 等があげられる。これらの様な電波を利用する測定システムはロボットに搭載される通信機器を使用して測定する事が可能である。これは、様々な測域センサを搭載せずとも方向や距離が測定可能となり、シンプルかつコンパクトなハードウェア構成が実現可能である。特に、我々が注目した到来方向技術は後述する特徴を持つ。1) 波源出力の変化に対するロバスト性, 2) グローバルタイマやアンテナ角度制御部等の高度な機器が無くとも実現可能, 3) 通信で得られる追加情報 (位置, 時間等) が不要な簡単なアルゴリズムで実現可能である。

上述したタスクに必要な技術の中で、我々は新たな電波到来方向探知手法の開発に取り組む。前提として、移動ロボットは与えられたタスクを実行中であるとする。ロボットは、タスクが終了するまで目標に向かって移動し続けるので後述する2つの側面を考慮する必要がある。最初に、ロボットは目標との相対的な方向が変化しつづける。このため、ロボットは常に正確な方向を測定する事がタスクを実行する上では重要である。次に、これらのようなタスクに使用されるロボットの観点から、一般的な移動ロボットは、限られた電力及び計算資源しかもたない。そのため、ハードウェア構成を考慮すると1つの機器で通信と方向探知ができる事が望ましい。これらを考慮し、本論文では移動ロボットに利用できる到来方向技術を用いた、新たな探知手法を提案する。基本となる考えは、双曲線に基づいた幾何学的な到来方向モデルであり、電波源の種類や周波数によらず、正確な方向探知を可能とする。さらに提案手法をハードウェアで実現し、プロトタイプを製作する。プロトタイプの特徴として、最小限のアンテナ数で構成されており、複雑な計算を必要としない。また、グローバルタイマやアンテナ角度制御部等の追加機器を必要とせず、シンプルかつコンパクトにする事が可能である。プロトタイプを移動ロボットに搭載し、提案手法及びプロトタイプを用いた実機実験をおこない、有効性を確認した。後の章では、第2章で到来方向探知モデルを示し、第3章では提案モデルに基づいたプロトタイプの開発経緯を記述する。第4章では、プロトタイプの基礎実験結果を紹介し、また移動ロボットに搭載した実験結果を表す。第5章では本論文の結論を述べる。

2. 幾何学的な到来方向探知モデル

2-1 定義及び表記

本論文で使用する定義及び表記について説明する。図1-(a)に示すように A_1 及び A_2 と示される2本のアンテナを移動ロボット r の上部に装着する。電波源 S は、周波数 f (または波長 λ)の電波を発する。具体的に S は、点波源とみなす。 A_1 及び A_2 で受信された電波信号(以下信号)は、 $e_1(t)$ 及び $e_2(t)$ と定義する。 r は相対座標 \vec{x} 及び \vec{y} を持ち、 \vec{y} は r の進行方向の縦軸と定義する。さらに、到来方向の計算のために \vec{y} と $\pm\vec{x}$ はそれぞれ0度と ± 90 度の方向として定義する。 A_1, A_2 及び S の位置は、それぞれ $p_{a1} = (x_{a1}, y_{a1}), p_{a2} = (x_{a2}, y_{a2})$ 及び $p_s = (x_s, y_s)$ で表記する。任意の2点 p_i 及び p_j 間の距離は $dist(p_i, p_j)$ として示される。具体的に、 $dist(p_{a1}, p_{a2})$ は、 d として定義され、 d は \vec{y} によって2等分される。次に、 S からアンテナ A_1 及び A_2 への伝搬を考える。信号 $e_1(t)$ 及び $e_2(t)$ は同一電波源 S からの信号であるが、アンテナ間の距離によって、図1-(b)のように $e_1(t)$ と $e_2(t)$ 間に遅れが生じる。この遅れが位相差であり、 ϕ_{12} と定義される。

図1-(c)では、 S を平面波源と仮定した時、 A_1 及び A_2 に到来する $e_1(t)$ 及び $e_2(t)$ の到来角 θ は等角である。ここで、 θ は、位相差 ϕ_{12} が到来角に直接関連するので、三角法の余弦の定理を用いて得る事ができる。しかしながら、平

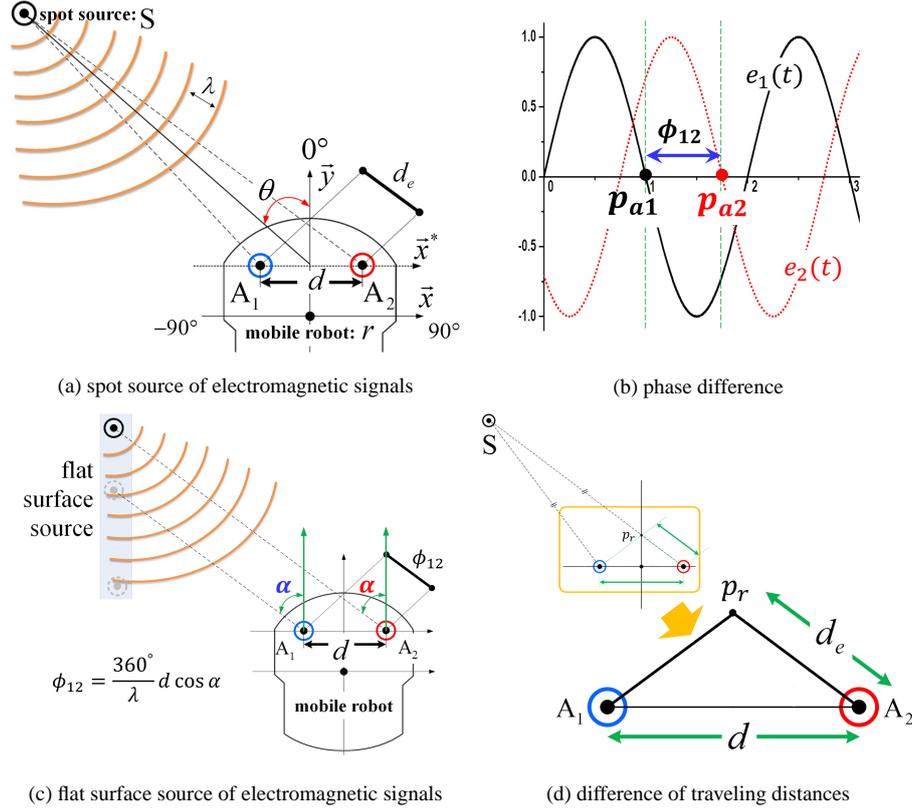


Fig. 1 Definitions and notations for a DoA approximation model

面波源は理想的であるが, 実際には存在しない. 特に信号の周波数が比較的低く, 信号長が長くなる場合, 実際の伝搬環境下では平面波として扱う事は困難であると考えられる. 現実的な信号の特性を考慮した場合, 到来角が常に(互いに同一)等角ではない点波源を, 考慮する必要がある. 次に, アンテナ間の距離による信号伝搬の遅れを考える. アンテナ A_1 を基準とした時, アンテナ A_2 に到達する電波の遅れをたとえたのが図 1-(d) である. 電波源 S から A_1 までの距離を $dist(p_{a1}, p_s)$ とし. また $dist(p_{a1}, p_s)$ と等距離である仮想点 p_r を $dist(p_r, p_s)$ とする. p_r と A_2 間の距離差を, 本論文では電氣的距離差 $d_e = dist(p_r, p_{a2})$ として表す (図 1-(a) を参照).

2.2 幾何学的な到来方向探知モデル

本論文では, 点波源に基づいた, 正確性の高いモデルを提案し, より高精度の到来角 θ を求め, 移動ロボットにも使用する事ができる事を目指す. さらに, モデルに沿ったハードウェアは構成をシンプルにし, 搭載機器を少なくし, 追加のデータ無しで, 角度を推定できる事が好ましいと考えられる.

図 1-(a) で示すように, 到来角 θ の推定手法の考え方として電氣的距離差 d_e を使用する. また, 電波源 S から 2 つのアンテナ間の伝搬距離はそれぞれ次のように記述する事ができる.

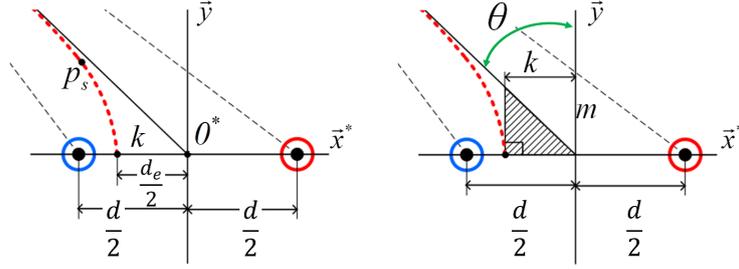
$$\begin{aligned} dist(p_{a1}, p_s) &= |\overline{p_{a1}p_s}| = \sqrt{(x_{a1} - x_s)^2 + (y_{a1} - y_s)^2} \\ dist(p_{a2}, p_s) &= |\overline{p_{a2}p_s}| = \sqrt{(x_{a2} - x_s)^2 + (y_{a2} - y_s)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) を用いることにより, 電氣的距離差 d_e を新たに下記式で求める事ができる.

$$d_e = |\overline{p_{a1}p_s} - \overline{p_{a2}p_s}| \quad (2)$$

また, 図 1-(b) で示したように位相差 ϕ_{12} と d_e の関係を考える. d_e と ϕ_{12} は異なる物理量であるため, まず距離を角度に変換する. 1 周期の角度 360 度を波長 λ で割った $\frac{360}{\lambda}$ を乗じる事によって, d_e を角度に変換でき, 位相差を求める事が可能である (Ellerbruch, 1967). このことから ϕ_{12} は下記の式のように表される.

$$\phi_{12} = \frac{360}{\lambda} d_e \quad (3)$$



(a) locus of candidates for a source location (b) approximation model for asymptotes

Fig. 2 Geometric analogy between a hyperbola and estimation model

逆に1波長 λ を360度で割った $\frac{\lambda}{360}$ を乗じることによって、位相差 ϕ_{12} を電氣的距離差 d_e に変換することができ、下記式で求める事ができる。

$$d_e = \frac{\lambda}{360} \phi_{12} \quad (4)$$

式(2)と(4)を用いる事で、 d_e と ϕ_{12} 間の幾何学的な関係の展開は、以下の式でまとめる事が可能である。

$$d_e = |\overrightarrow{p_{a1}p_s} - \overrightarrow{p_{a2}p_s}| = \frac{\lambda}{360} \phi_{12} \quad (5)$$

式(5)では、アンテナの位置 p_{a1} 及び p_{a2} が既知であるが、電波源の位置 $p_s = (x_s, y_s)$ 及び ϕ_{12} が不明である。さらに、式(5)の中で p_s は、二次方程式で表されているため、多数の候補点が存在する。そこで、二次曲線上の p_s が満たすべき条件である、 $|\overrightarrow{p_{a1}p_s} - \overrightarrow{p_{a2}p_s}| = d_e$ の条件を用いて、新たな推定手法を提案する。

簡略化のために、図2-(a)で表すように \bar{x} と平行かつアンテナ間を通る横軸を新たに \bar{x}^* と定義する(図1-(a)参照)。ここで、 \bar{x}^* と \bar{y} の交点を新たな原点 0^* として定義する。これによって y_{a1} 及び y_{a2} が0となり、式(5)を以下のように簡単化する事ができる。

$$\sqrt{(x_{a1} - x_s)^2 + y_s^2} - \sqrt{(x_{a2} - x_s)^2 + y_s^2} = d_e \quad (6)$$

図2-(a)に示すようにアンテナの配置は \bar{y} が d を2等分するように設定されている。そのため、 $|x_{a1}|$ 及び $|x_{a2}|$ は 0^* から等距離にあり、 x_{a2} を $-x_{a1}$ とみなす事ができる。式(6)の x_{a2} に $-x_{a1}$ を代入し、両辺を二乗して再整理すると、以下の式を得る。

$$(x_{a1}^2 - k^2)x_s^2 - k^2y_s^2 = k^2(x_{a1}^2 - k^2) \quad (7)$$

ここで k は $\frac{d_e}{2}$ を表す。両辺を $k^2(x_{a1}^2 - k^2)$ で割った後、式(7)を下式のように書き換える。

$$\frac{x_s^2}{k^2} - \frac{y_s^2}{(x_{a1}^2 - k^2)} = 1 \quad (8)$$

直観的に、 \bar{x}^* と \bar{y} の座標系に基づき、式(8)は $p_{a1} = (x_{a1}, 0)$ 及び $p_{a2} = (-x_{a1}, 0)$ の2つの焦点を持つ双曲線で表せる事が分る。一般的に、双曲線は p_s で与えられる2つの焦点までの距離の差が $2|x_{a1}|$ に等しくなるような点の軌跡と定義されている(稲垣, 佐伯, 1979)。これに基づき、図2-(a)で示すように、 0^* から双曲線と \bar{x}^* との交点までの距離は k とみなす事ができる。さらに変数 m は $\sqrt{(x_{a1}^2 - k^2)}$ と定義し、式(8)に代入して一般化する。

$$\frac{x_s^2}{k^2} - \frac{y_s^2}{m^2} = 1 \quad (9)$$

図2-(b)で表すように、式(9)の双曲線における漸近線は $y_s = \pm \frac{m}{k} x_s$ で求める事ができる。

式(8)(式(9))が持つ双曲線との幾何学的な類似を考える。2つの焦点 p_{a1} 及び p_{a2} を持つ式(8)は、 $(\frac{d}{2})^2$ を $|x_{a1}|^2$ に置き換えられる。また、上述したように $(\frac{d_e}{2})^2$ は k^2 に置き換えられる。図2-(b)で表した、 \bar{y} から漸近線までが到来角

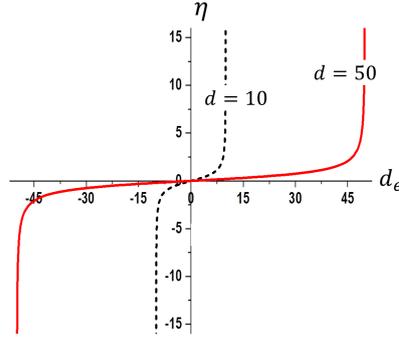


Fig. 3 Geometric relations between η and d_e according to d

θ となる. つまり, $\frac{m}{k}$ は漸近線の傾きである. 到来角 θ は $\frac{k}{m}$ となり, k 及び m から到来角を求めるとが可能となる. まとめると下記の式で求められる.

$$|\theta| = \tan^{-1} \frac{k}{m} \quad (10)$$

また, k は $\frac{d_e}{2}$ に, m は x_{d1} を $\frac{d}{2}$ に置き換え $\sqrt{(\frac{d}{2})^2 - (\frac{d_e}{2})^2}$ としたとき, 式 (10) は下記の式ようになる.

$$|\theta| = \tan^{-1} \frac{\frac{d_e}{2}}{\sqrt{(\frac{d}{2})^2 - (\frac{d_e}{2})^2}} = \tan^{-1} \frac{d_e}{\sqrt{d^2 - d_e^2}} \quad (11)$$

ここで, $d > d_e$ 条件の下, 形式的に式 (11) は到来方向探知モデルとして定義する. また, 勾配 η は下式のように表す.

$$\eta = \pm \frac{d_e}{\sqrt{d^2 - d_e^2}} \quad (12)$$

最後に, \vec{x}^* と \vec{y} に関する漸近線を示す.

$$y_s = \pm \frac{1}{\eta} x_s \quad (13)$$

2.3 探知モデル考察

ここでは, 提案モデルの特徴を議論する. 1つ目に, 式 (13) での漸近線は 0^* を通る直線であるが η は d_e に依存する. 言い換えれば, 漸近線は d_e の変化に従って η が変化し, 正確かつ効率的に推定する事が可能であることを意味する. 2つ目に, ϕ_{12} の比較として (式 (3) 中の $\phi_{12} = \frac{360}{\lambda} d_e$), ほとんどの既存の手法では位相差が等しく, 入射角が $\frac{360}{\lambda} d \cos \alpha$ と定義される. 移動ロボットのタスクを考慮すると ϕ_{12} と α 間の誤差が性能及び効率に影響を与える事になる. より興味深いのは, 式 (11) において, θ が 0 度になり, d_e が 0 に近づく事は S が 0 度の位置にある事を示しており, これは進行方向に S があるという事である. この 0 度方向は, 移動ロボットの仮想目標との相対的な方向を維持するのは, 様々なタスクへの活用に役立つ. さらに d_e と η の関係を図 3 で表すと, 特定の区間では傾きが一定であるが, この区間を過ぎると, d_e と η の関係が一定ではない事が確認できた. これは到来角が大きくなり, d と d_e の長さが近くなり, 式 (11) の分母が 0 に近づくため急激に変化するためである. 3つ目に, 式 (11) では θ が正か負か判断する事ができない. これは, A_1 及び A_2 を有するアンテナレイ数が限られているためである. 代替案としてはアンテナ数を増やす事である. しかしながら, アンテナ数が増加する事により, 移動ロボットへ実装する際に, 機構及び実装が複雑になる. 本論文では, アンテナ及び追加機器を追加する代わりに, 最小限のアンテナを用いた新たなプロトタイプで正確な θ の取得を可能とする. プロトタイプの詳細な説明は, 第 3 章で行う.

3. 電波到来方向探知プロトタイプの設計思想及び製作

この章では, 提案された探知モデル (式 (11)) に基づいた電波到来方向探知プロトタイプの製作について説明する. また, 我々はこのプロトタイプが, 移動ロボットの目標追従タスクに適しているかどうかを調べるために, 市販の移動ロボット上に搭載する統合過程を説明する.

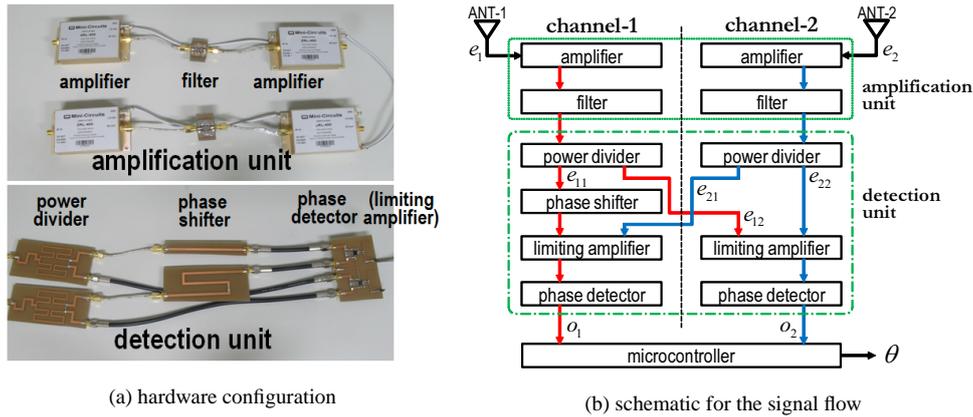


Fig. 4 Details on DoA detection prototype

3.1 到来方向探知プロトタイプ的设计思想

電波到来方向探知プロトタイプの設計と実装は、第1章で述べた広範囲な移動ロボットのタスクに利用が可能かを探る事を目的としている。この目的を達成するために、設計は、電波検出のための複雑な装置(グローバルタイマ、指向性アンテナやアンテナ角度制御部)や高性能な演算装置を必要としない「簡略化」を最も重要な機能として考慮している。最終的には、単純なプロトタイプを容易に移動ロボットに搭載できるようにし、広範囲なタスクに活用できる事を目指している。

ロボットは任意の方向に移動できるため、プロトタイプで測定した θ は十分な精度を持たせる必要がある。精度を向上させるために、信号を受信する新たなハードウェアユニットを設計した。設計したユニットは、ロボットが移動している中でも、信号が有効に活用できる事を可能としている。

次に、潜在的な用途に適した波長帯を考慮した。このとき、波長帯の利用率、データ管理、及び信頼性等のいくつかの考慮すべき条件が存在する。この条件に基づいて、我々のプロトタイプの設計では315 MHzの周波数帯を選択した。1つの注目すべき利点は、最大100 kbpsの通信中にロボットは方向及び距離を測定するために利用する事が可能である。次に、この周波数帯は、無数の産業、科学や医療で利用する周波数帯より利用が少なく、電波干渉がおきにくい。また、一般的に利用される周波数帯より波長が長いいため壁や家具等の障害物を介してより広い範囲にデータを伝送する事ができる。実際に、近い周波数帯(428 MHz)での研究(浅田, 岡田, 2006)では、深さ60 cmの雪に埋もれたビーコンを信号を用いた三角測量で位置を特定できる事が報告された。

3.2 プロトタイプ構造及びコンポーネント

図4-(a)は到来方向探知プロトタイプのハードウェア構成を示している。プロトタイプは、増幅及び検出ユニットの2つのユニットから構成される。増幅ユニットは受信した信号を増幅し、フィルタリングした後に再度増幅を行う。もう一方の検出ユニットは、信号から θ の値及び符号を抽出する役割を持つ。

増幅ユニットは $\frac{1}{4}$ 長のダイポールアンテナを2つ持ち、4つのMini-Circuits ZRL-400増幅器と2つのEPCOS SAW filterから構成されている。非常に低電力の入力により、増幅器は2段構成となっている。さらに、 d は $\frac{\lambda}{2}$ に設定されている。

検出ユニットは主に3つのパーツから構成されている。1つ目のパーツ、power dividerの役割は、インプットチャンネルとアウトプットチャンネル間のインピーダンスを維持しながらインプットチャンネルからの入力信号を分割する事である。RF信号の損失を最小限にするために、Wilkinson power divider(Wilkinson, 1960)を設計し、これをプリント基盤(PCB)上に電送線路として形成した。このpower dividerを使用する事で、 A_1 及び A_2 におけるRF入力は最小の損失で出力2組に分割される。2つ目のパーツ、phase shifterは送信された信号の位相角を変更するために使用される。phase shifterはPCB上の長さの異なる各伝送路長を利用して出力信号に対して90度の位相差を生成する事が可能である。3つ目のパーツ、phase detectorはphase shifterの出力を合成し、 $|\theta|$ 及び符号を出力する。高速位相検出を得るために、ミキサーを用いたphase detectorは、Analog Devices AD8302チップ及び受動部品を組み合わせる事で製作した。

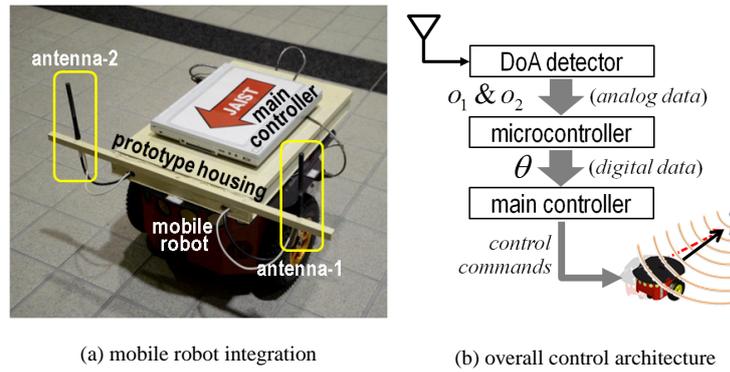


Fig. 5 DoA detection prototype mounted on a mobile robot

図 4-(b) に示すように、 e_1 と e_2 の個々のパスは、それぞれ $CHANNEL-1$ 及び $CHANNEL-2$ と呼ばれる。増幅ユニットで e_1 と e_2 は増幅され、フィルタリングされる。次に power divider により e_1 (及び e_2) は、 e_{11} と e_{12} (及び e_{21} と e_{22}) に 2 分割される。その後、 e_{21} と e_{12} は $CHANNEL-1$ と $CHANNEL-2$ に相互交換される。phase shifter を通過すると e_{11} の位相は 90 度遅れて出力される。limiting amplifier (図 4-a 参照) において信号の大きさを調節しながら、 e_{11} 及び e_{21} (e_{12} 及び e_{22}) は $CHANNEL-1$ ($CHANNEL-2$) として合成される。phase detector によって、 $CHANNEL-1$ は \bar{y} に対しての符号を出力する。一方、 $CHANNEL-2$ は \bar{y} に対する $|\theta|$ を出力する。

図 5-(a) は、開発した到来方向探知プロトタイプをロボットに統合した様子である。全体的なシステムは大きく、メインコントローラを含む MobileRobots Pioneer 3-DX、到来方向探知プロトタイプ及びマイクロコントローラから構成されている。作製したファラデーケージ上に、メインコントローラとマイクロコントローラを搭載した。メインコントローラとして Windows7 を搭載したノート PC を使用し、ケージ上に配置している。図 5-(b) は、プロトタイプからの電圧出力が $|\theta|$ 及び符号を表し、Atmel ATmega128 マイクロコントローラに入力され、符号付き θ となり、10 ビットのデジタル値に変換される。メインコントローラは RS-232C を介してマイクロコントローラ及びロボットに接続される。メインコントローラへの入力は符号付き θ である。この入力により、メインコントローラは θ に応じたコマンドを送信し、ロボットの動作を制御する。

提案した到来方向探知プロトタイプの特徴は以下のようなものがあげられる。プロトタイプは多数のサンプルや再帰処理を使用せず、高性能な計算装置無しでロボットはリアルタイムに θ を探知する事が可能である。一般的なダイポールアンテナを使用する事により、特定のデバイス (例えば、指向性アンテナと回転機構) や特別の電波技術を用いずにシステムを構築する事ができる。これらの機能に加えて、プロトタイプはロボットで想定される環境で用いるタスクに必要な精度を提供する。第 4 章では、この測定結果を示す。

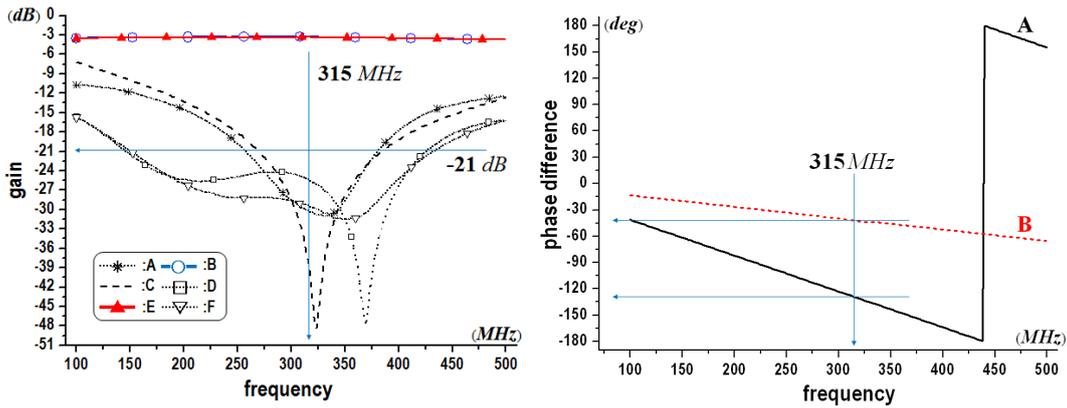
4. 評価実験結果及び考察

到来方向探知プロトタイプを、ロボットの自律移動に用いる場合、 θ の高い推定精度を提供する事が重要である。したがって、評価基準と性能指数は、プロトタイプがどの程度、実際の到来角と θ の差を最小限に抑える事ができるかを調べるために設定した。最初に示す動作実験の測定結果は、プロトタイプが求められる基準に応じて動作するかどうかを調べた。次に、到来方向探知プロトタイプの探知パフォーマンスと移動ロボットを用いたプロトタイプの有効性を検証する実験を実施した。

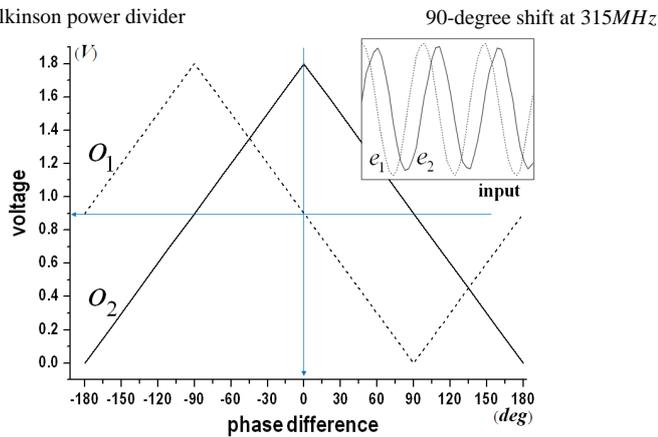
4.1 到来方向探知プロトタイプの動作実験

動作評価のために、測定実験はプロトタイプの power divider、phase shifter、phase detector について測定を行った。測定実験では、測定装置として、Agilent Technologies E5071C ネットワークアナライザ及び LeCroy Wave Runner 6100 オシロスコープを使用した。

双方向 Wilkinson power divider の散乱理論 (Poza, 2005) に基づくと、power divider の端子出力は理論的には -3 dB になる。図 6-(a) は、製作した power divider の出力特性を測定した実験結果を示している。B 及び E 線は、入力を 2 分割したものである。次に、A、D 及び F 線は個々の端子での反射特性をプロットしたものである。また、出力端子の分離



(a) output characteristics according to the scattering parameters of the Wilkinson power divider (b) measurement result of the phase difference ϕ_{12} with the parameters of the Wilkinson power divider



(c) measurement result of the output for the phase detector

Fig. 6 Operating test results for the DoA detection prototype

は、C 線で表されている。B 及び E 線では 315 MHz でほぼ -3 dB という結果が測定できた。他の線は非常に小さな反射 (-21 dB 未満) を示すが、我々の power divider は、1 つの入力を低損失で 2 つに分割できる事を確認した。

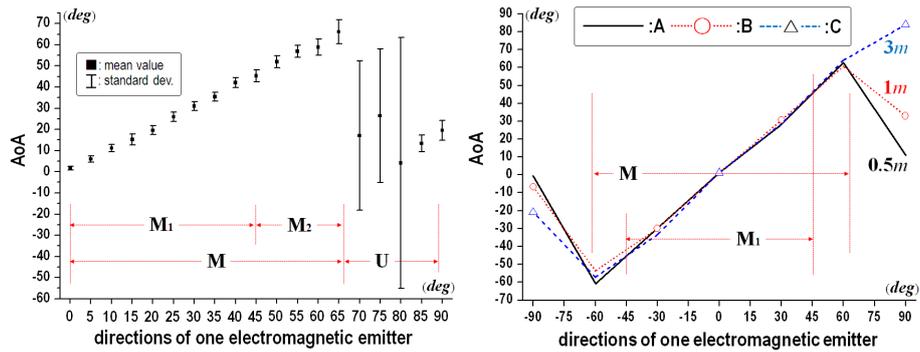
図 6-(b) は、phase shifter によって得られた、90 度の位相遅延の測定結果を示す。黒の実線 (A 線) は、製作した phase shifter の周波数に応じた位相測定値である。また、phase shifter を通していない測定値は赤色破線 (B 線) で示している。これらの結果から、製作した phase shifter は 315 MHz において 90 度の位相遅延を生成する事が可能である事が確認できた。

最後に、phase detector の評価結果は、2 つの正弦波の入力を使用したものを図 6-(c) に示す。phase detector を使用して、2 つの出力 (o_1 及び o_2) を得る事ができた。最初に、 o_1 を点線でプロットし、 θ の符号を示している。一方、実線でプロットした o_2 は、 $|\theta|$ を示している。 o_1 と o_2 を比較すると、 o_1 は符号を表すために、90 度位相遅延されている事が分かる。 o_2 の最大値は 0 度で出力されるため、最大値から差分を取る事で、 θ の絶対値を得られる事を確認できた。この事から phase detector は θ を取得できる事を確認できた。

4.2 移動ロボットを用いたプロトタイプの評価実験

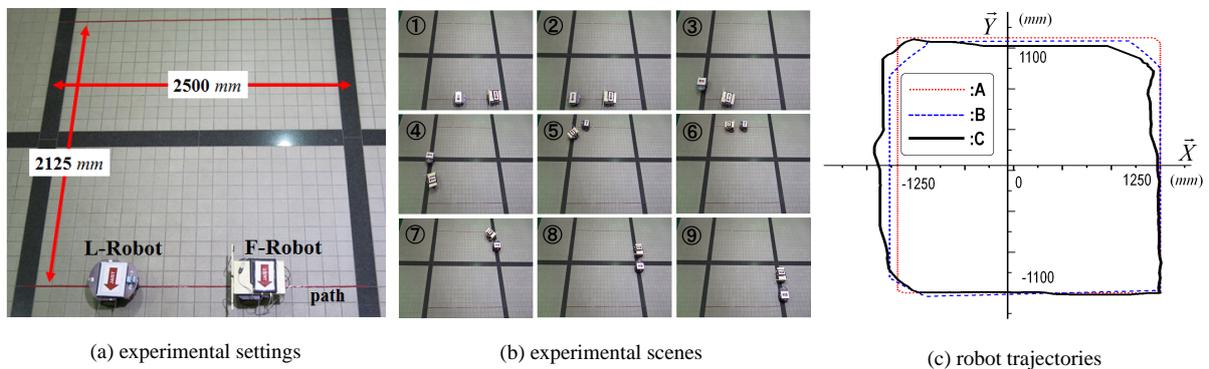
移動ロボットを用いた方向探知プロトタイプの有効性と実用性を調査するために、行った実験結果を示す。詳細な実験条件を次のようにまとめる。S として、Agilent Technologies E4330B RF signal generator を日本の電波法の法規定に従って使用した。さらに、移動する S として、当研究室で開発した 315 MHz の JP-RFID タグ (Tatara, et al, 2012) を移動ロボット上に装着した。追従実験では、最大 0.5 m/s 移動する。また、角速度の最大値は 0.785 rad/s である。2.14 dBi の利得を持つ 2 つの標準的な Linx Technologies $\frac{1}{4}$ ダイポールアンテナを、ロボットの前面に取り付けた。(図 5-(a) を参照) 最後に、実験は図 8 で示す大ホールで行った。

図 7 は θ の測定 100 回分の統計分析の結果を示している。平均値及び標準偏差は、それぞれ黒点及び 5~95% の



(a) according to the intervals of 5 degrees while an electromagnetic emitter is at 1m away (b) according to the distances to one electromagnetic emitter while is moved at intervals of 15 degrees

Fig. 7 Statistical analysis results of 100 trials over the θ measurement



(a) experimental settings (b) experimental scenes (c) robot trajectories

Fig. 8 Path tracking experiments for the mobile robot equipped with the DoA detection prototype

範囲の信頼区間を持つエラーバーとして表した。まず、図 7-(a) では S が 0° から 1 m の距離で 5 度毎に測定値をプロットした。結果から、 0 度 ~ 90 度の試験範囲は、 θ の測定結果に基づいて、2 つの区間、信頼できる区間 M 及び信頼性に欠ける区間 U に分類する事ができた。次に、 θ が測定可能な区間を M と定義し、 θ の信頼性によって M_1 と M_2 の 2 つの区間に分割した。 M_1 の区間は、 0 度 ~ 45 度からなり、個々の標準偏差は 2.5 未満である。 M_2 の区間は、 45 度 \sim 約 65 度からなり、角度が 45 度から徐々に増加するにつれて、標準偏差が増加する。 S から 1 m の距離に配置し、平均 (標準偏差) は、 0 度、 30 度、及び 60 度の角度で、それぞれ 1.75 度 (0.84)、 31.00 度 (2.12)、及び 58.8 度 (3.78) であった。 M_2 の区間では M_1 の区間と比べて精度が低下したが、 θ を測定する事が可能であった。 θ の測定値における統計的解析に基づいて、区間 M_2 も利用可能な区間と考える。また、 U の区間では、実際の角度とは大幅に異なっていた。

次に、図 7-(b) は、割り当てた距離において 15 度間隔で S を移動させ、 θ を測定したグラフである。 A, B 及び C 線は、それぞれ 0.5 m 、 1 m 、及び 3 m の距離で測定した平均値を示す。結果から、到来方向探知プロトタイプは、電波法の規定内で -60 度 ~ 60 度の範囲で θ を測定する事ができた。図 7-(a) の結果と同様に、 -60 度 ~ 60 度の範囲は利用可能範囲と考える M とする事ができる事を確認した。特に、 -45 度 ~ 45 度の範囲は、正式に M_1 として定義する。具体的に、 θ と S は、 M_1 区間では線形的な関係である事を確認した。この性質は、ロボットが与えられた方向に向いながら、目標との誤差を推定する事が可能である事を意味している。

最後に、到来方向探知プロトタイプをロボットに搭載し、目標に追従できるか実験をおこなった。JP-RFID タグ (Tatara, et al., 2012) をリーダーロボット (以下 L-ロボットと表記) の上部に設置した。L-ロボットが設定された経路に沿って移動すると (図 8-(a) 参照)、プロトタイプを搭載したフォアロボット (以下 F-ロボットと表記) は L-ロボットの方向を探知し、相対角度を計算する。計算に基づいて、F-ロボットは、第 2 章に記述したように、L-ロボットに対して 0 度方向を維持しながら追従しようとする。図 8-(b) は、図 8-(a) の条件で行った実験のスナップショットを示している。図 8-(c) では、赤線 ('A'), 青点線 ('B') 及び黒実線 ('C') は、それぞれ与えられた経路、L-ロボット軌跡及び F-ロボットの追従軌跡を表している。軌跡から、F-ロボットは、プロトタイプを使用して方向を探知する事に

より,L-ロボットに追従する事が可能であることを確かめた. 具体的には,F-ロボットは個々の, コーナーで回転を実現する事ができた. これらの結果から,F-ロボットは我々の実験室の条件下でプロトタイプの実出力に基づいて,0度方向の自律移動を生成できる事を確認した.

その結果,提案された到来方向探知モデルに基づいたプロトタイプは,ロボットに容易に搭載可能で,簡単かつ正確な測定機能を提供する事を確かめた. このプロトタイプを用いて実環境下のタスクが可能であることを確認したが,多様な実環境で起こりうる後記する様な問題を考慮する必要がある. 一般的に,位相差技術は,高 SNR のため非常によく動作するが,強い同一チャンネル干渉及び,または複数のパスにより失敗する事が報告されている. 今後の課題は,これらの制限に対処するため,新たな技術的解決策を模索する事である. さらに,本論文では,大ホールで実験を行ったが,障害物や移動物体が存在する環境下での実験をおこない,信頼性の向上を目指す事が必要である.

5. 結 言

本論文では,移動ロボットの目標追従タスクに向けた,新たな到来方向探知モデルとプロトタイプの開発について紹介した. 提案した手法は,点波源を用い,到来角が同一ではないと前提した,幾何学的な到来方向探知モデルである. 幾何学的なモデルに基づき最小限のアンテナ数で探知可能なプロトタイプを製作した. 特に phase shifter を用いて位相を 90 度遅れさせる事に,数学的なモデルでは判別不可能であった,符号の判別を可能とした. プロトタイプを移動ロボットに搭載し,到来方向探知の有効性を確認し,目標追従実験をおこなった. 試作したプロトタイプは,市販移動ロボットに簡単に搭載でき,高い信頼性及び容易にシステムに統合できた. 最後に,プロトタイプは,追加の装置が不要であるため,費用の面で効果的であり,移動ロボットの様々なタスクに応用が期待される.

文 献

- 浅田 峯夫, 岡田 敏美, 400MHz 帯ビーコン電波の雪中伝搬特性, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.7 (2006), pp.1318-1324.
- Chestnut, P., Emitter localization accuracy using TDOA and differential doppler, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.AES-18, No.2 (1982), pp.214-218.
- Ellerbruch, D. A., UHF and microwave phase-shift measurements, Proceedings of the IEEE, Vol.55, No.6 (1967), pp.960-969.
- 藤田 淳, 大西 献, 災害対応ロボット Super Giraffe の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.2 (2012), pp.148-150.
- 稲垣 信夫, 佐伯 卓也, 幾何学 (1979), 森北出版.
- 小林 順, 大川 不二夫, 加藤 了三, 複数台の宇宙ロボットによる浮遊物体の制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.628 (1998), pp.4710-4716.
- 小宮山 優, 北野 齊, 桑原 光彦, 電波到来方向推定を用いた測位システム, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7 (2007), pp.1061-1067.
- Malajner, M., Planinsic, P. and Gleich, D., Angle of arrival estimation using RSSI and omnidirectional rotatable antennas, IEEE Sensors Journal, Vol.12, No.6 (2012), pp.1950-1957.
- Menegatti, E., Zanella, A., Zilli, S., Zorzi, F. and Pagello, E., Range-only SLAM with a mobile robot and a wireless sensor networks, Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation (2009), pp.8-14.
- Pozar, D. M., Microwave Engineering (2005), John Wiley & Sons (3rd edition.).
- Priyantha, N. B., Balakrishnan, H., Demaine, E. D. and Teller, S., Mobile-assisted localization in wireless sensor networks, Proceedings of 24th IEEE International Conference on Computer Communications (2005), pp.172-183.
- Prorok, A., Gonon L. and Martinoli, A., Online model estimation of ultra-wideband TDOA measurements for mobile robot localization, Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation (2012), pp.807-814.
- 田神 俊樹, 樋口 勝, 滝田 謙介, 中里 裕一, 回転ブラシ形自走洗浄ロボットの走行・洗浄特性に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.820 (2014), DOI : 10.1299/transjsme.2014trans0346.
- 田村 雄介, 濱崎 峻資, 山下 淳, 浅間 一, 環境に応じた人間の移動予測に基づく移動ロボットの人物回避, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.799 (2013), pp.617-628.

- Tatara, K., Lee, G., Ono, H. and Chong, N. Y., Locally communicative interaction framework for adaptively self-organizing mobile sensor networks, *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (2012), pp.1134-1139.
- Trinh, L. A., Thang, N. D., Kim, D., Lee, S. and Chang, S., Application of matrix pencil algorithm to mobile robot localization using hybrid DOA/TOA estimation, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.9 (2012), pp.254-263.
- 妻木 俊道., 内田 康之, 福島 E. 文彦, 三浦 有信, 玉田 守, 無人小型視察ロボットの開発, *日本機械学会論文集C編*, Vol.78, No793 (2012), pp.3267-3278.
- Viciano-Abad, R., Marfil, R., Perez-Lorenzo, J. M., Bandera, J. P., Romero-Garces, A. and Reche-Lopez, P., Audio-visual perception system for a humanoid robotic head, *Sensors*, Vol.14, No.6 (2014), pp.9522-9545.
- Widodo, S., Shiigi, T., Hayashi, N., Kikuchi, H., Yanagida, K., Nakatsuchi, Y., Ogawa, Y. and Kondo, N., Moving object localization using sound-based positioning system with doppler shift compensation, *Robotics*, Vol.2, No.2 (2013), pp.36-53.
- Wilkinson, E. J., An N-way hybrid power divider, *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.MTT-8 (1960), pp.116-118.
- Xu, B., Sun, G., Yu, R. and Yang, Z., High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.24, No.8 (2013), pp.1567-1576.

References

- Asada, M. and Okada, T., Propagation characteristics of beacon radio waves at 400 MHz on the snow-mounted ground, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J89-B, No.7 (2006), pp.1318-1324 (in Japanese).
- Chestnut, P., Emitter localization accuracy using TDOA and differential doppler, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.AES-18, No.2 (1982), pp.214-218.
- Ellerbruch, D. A., UHF and microwave phase-shift measurements, *Proceedings of the IEEE*, Vol.55, No.6 (1967), pp.960-969.
- Fujita, J. and Onishi, K., The development of disaster response robot Super Giraffe, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.32, No.2 (2012), pp.148-150 (in Japanese).
- Inagaki, N. and Saeki, T., *Geometry* (1979), Morikita publishing (in Japanese).
- Kobayashi, J., Ookawa, F. and Katou, R., Handling of a floating object by several space robots, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64, No.628 (1998), pp.4710-4716 (in Japanese).
- Komiyama, M., Kitano, H. and Kuwabara, Y., DoA-based local area positioning system, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.7 (2007), pp.1061-1067 (in Japanese).
- Malajner, M., Planinsic, P. and Gleich, D., Angle of arrival estimation using RSSI and omnidirectional rotatable antennas, *IEEE Sensors Journal*, Vol.12, No.6 (2012), pp.1950-1957.
- Menegatti, E., Zanella, A., Zilli, S., Zorzi, F. and Pagello, E., Range-only SLAM with a mobile robot and a wireless sensor networks, *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation* (2009), pp.8-14.
- Pozar, D. M., *Microwave Engineering* (2005), John Wiley & Sons (3rd edition.).
- Priyantha, N. B., Balakrishnan, H., Demaine, E. D. and Teller, S., Mobile-assisted localization in wireless sensor networks, *Proceedings of 24th IEEE International Conference on Computer Communications* (2005), pp.172-183.
- Prorok, A., Gonon L. and Martinoli, A., Online model estimation of ultra-wideband TDOA measurements for mobile robot localization, *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation* (2012), pp.807-814.
- Tagami, T., Higuchi, M., Takita, K. and Nakazato, Y., Study on a self-propelled cleaning robot driven by a rotational brush, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.80, No.820 (2014), DOI : 10.1299/transjsme.2014trans0346.
- Tamura, Y., Hamasaki, S., Yamashita, A. and Asama, H., Collision avoidance of mobile robot based on prediction of human movement according to environments, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.79, No.799 (2013), pp.617-628 (in Japanese).

- Tatara, K., Lee, G., Ono, H. and Chong, N. Y., Locally communicative interaction framework for adaptively self-organizing mobile sensor networks, *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (2012), pp.1134-1139.
- Trinh, L. A., Thang, N. D., Kim, D., Lee, S. and Chang, S., Application of matrix pencil algorithm to mobile robot localization using hybrid DOA/TOA estimation, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.9 (2012), pp.254-263.
- Tsumaki, T., Uchida, Y., Fukushima, F. E., Miura, Y. and Tamada, M., Development of the unmanned small scout robot, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.78, No793 (2012), pp.3267-3278 (in Japanese).
- Viciano-Abad, R., Marfil, R., Perez-Lorenzo, J. M., Bandera, J. P., Romero-Garces, A. and Reche-Lopez, P., Audio-visual perception system for a humanoid robotic head, *Sensors*, Vol.14, No.6 (2014), pp.9522-9545.
- Widodo, S., Shiigi, T., Hayashi, N., Kikuchi, H., Yanagida, K., Nakatsuchi, Y., Ogawa, Y. and Kondo, N., Moving object localization using sound-based positioning system with doppler shift compensation, *Robotics*, Vol.2, No.2 (2013), pp.36-53.
- Wilkinson, E. J., An N-way hybrid power divider, *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.MTT-8 (1960), pp.116-118.
- Xu, B., Sun, G., Yu, R. and Yang, Z., High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.24, No.8 (2013), pp.1567-1576.