加速度的上限を考慮した超音波センサ移動ロボットの速度制御*

江丸 貴 紀^{*1}, 星 野 洋 平^{*1}, 小 林 幸 徳^{*1}Speed Control of a Sonar-Based Mobile Robot
Considering the Limitation of AccelerationTakanori EMARU^{*2}, Yohei HOSHINO and Yukinori KOBAYASHI^{*2} Division of Human Mechanical Systems and Design, Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

For autonomous mobile robot, ultrasonic Time-of-flight (TOF) ranging systems are widely used to measure distance. However, ultrasonic TOF ranging systems tend to neglect minute reflected waves below the threshold level. Therefore, we have proposed the integration-type ultrasonic wave sensor which utilizes the integration value of sonar's reflected wave to recognize travelable area for autonomous mobile robot. The proposed method determines the pass and desired velocity simultaneously, but the calculated desired velocity changes significantly because of noise or error of the ultrasonic wave sensor. This paper presents the novel way to filter the velocity with considering the acceleration. By considering the acceleration, we can take the limitation of driving force of robot into consideration. The validity of the proposed method is investigated by applying the method to autonomous mobile robot in various environment.

Key Words: Integration-Type Ultrasonic Wave Sensor, Non-Linear Digital Filter, Autonomous Mobile Robot, Accelerated Velocity, Speed Control

1. 序 論

超音波センサは小型、軽量、システムの構成が簡単などの特徴を持ち、多くの自律移動ロボットにおいてナビゲーション、障害物回避などに用いられている。特に、障害物回避を含む移動の分野において、複数のソナーを同心円状に並べたソナーリングに関する多くの研究成果が報告されている^{(1)~(3)}。文献⁽¹⁾では、部分的な環境の情報が得られている場合のロボットの誘導問題を取り扱っている。これに対し、文献⁽²⁾⁽³⁾では完全に未知環境における誘導問題を取り扱っている。後者はいずれも grid map に基づく方法であるが、文献⁽²⁾の手法が

- ドアの通り抜けなど狭い所の通過が困難。
- 制御信号に対する低域通過フィルタの適用により、フィルタリングによる遅れが生じる可能性がある。

という欠点を持つものに対し、文献⁽³⁾の手法はこれらがある程度克服している。ただし、いずれの手法も grid map に基づくことから、正確なオドメトリ情報が必要とする。また、ソナーリングは複数のトランスデューサによって構成されるため、コスト、さらには搭載す

るためのスペースが必要であるという問題がある。

これに対して、著者の一人は二輪独立駆動輪を持つ小型移動ロボットを想定し、積分型超音波センサ⁽⁴⁾を用いたロボットの誘導方法を提案してきた^{(4)~(6)}。この手法は、未知空間における障害物回避・速度制御を、マップを生成することなく低コストで実現している。積分型超音波センサは一組の送受信器を回転(首振り)機構と共に用いており、センサを搭載するためのスペースという点で優れる。さらには、首振りの速度を変えることによって得られる情報量を変化させることができる、首を振る範囲を可変にすることで必要な範囲の情報のみを効率的に獲得することができるというメリットを併せ持つ。そして、このシステムによって得られる局所的な情報から Sub-Goal を求め、さらに三段階の速度切換を行うことにより効率的な移動を実現した⁽⁴⁾。本論文では、より大きな速度に対応することを目的に新たな速度決定アルゴリズムを提案し、さらに効率的な移動を実現する。しかしながら、提案手法によって得られる速度は誤差・雑音などの影響で大きく変動する。我々は、このシステムを車椅子や屋内搬送システムの自律化に応用することを目的としており、乗り心地や安全性の点から速度の大きな変動は避けなければならない。この問題を解決するため、本論文ではフィルタリングによる速度の平滑化を提案する。

* 原稿受付 2008 年 4 月 16 日。

^{*1} 正員、北海道大学工学研究科人間機械システムデザイン専攻
(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)。

E-mail: emaru@eng.hokudai.ac.jp

ただし、ロボットのようなリアルタイムシステムではフィルタリングによる遅れは可能な限り小さくしなければならない。そこで、非線形フィルタ ESDS⁽⁷⁾を適用し、その妥当性について他手法との比較を行う。

さらに、定量的に比較するための指標として加速度に注目する。本論文ではロボットが滑らかに移動することを目的とし、ロボットの出力、すなわち最大加速度を考慮しつつ速度を平滑化する手法を提案する。加速度の上限に注目した制御は、マニピュレータ制御の分野で数多く行われており⁽⁸⁾⁽⁹⁾、移動ロボットへの適用も行われている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。文献⁽¹⁰⁾では加速度の上限を考慮して二駆動輪移動ロボットの最短時間制御軌道を求めている。この手法は、Pontryagin の最大原理を用いて左右両輪の加速度を bang-bang 制御しているが、環境に関する情報が既知であり、障害物の存在を考慮していない。我々の手法も、Pontryagin の最大原理に基づき加速度の bang-bang 制御を行うが、対象とする環境は障害物の存在する未知環境である。本論文では、この新しい手法を、非線形フィルタ ESDS を拡張することにより実装し、実環境における実験によってその有効性を確認する。

本論文の構成を述べる。2 章では積分型超音波センサシステムについて説明し、既存の経路生成アルゴリズムを説明するとともに、新たな速度決定アルゴリズムを提案する。3 章では、2 章で求めた速度に対してフィルタリングを行い、加速度の上限に着目した評価を行う。4 章では加速度の上限を満たしつつフィルタリングを実現する新たなフィルタを提案し、その有効性を確認する。最後に 5 章で本論文をまとめる。

2. 積分型超音波センサを利用した軌道生成

2.1 局所的情報による Sub-Goal・経路生成 積分型超音波センサは、1) 反射波の積分情報を利用する、2) 平面的に回転する回転機構と共に用いることにより自分の周囲の環境情報を連続的に獲得するという二つの特徴を持つ。図 1～3 に積分型超音波センサシステムと移動ロボットの概略を示す。図 1 は積分型超音波センサシステムを搭載した移動ロボットである。首振り機構は一組のトランスデューサをステッピングモータによって回転させることで実現している。ロボットの大きさは幅 100mm、長さ 200mm、高さ 180mm である。図 2 は壁面に対し計測を行ったときの模式図であり、システムの座標系を示している。図に示すとおり、トランスデューサの角度 θ に対応して距離値・積分値が得られるため、システムの座標系は極座標系となる。このときに得られた積分値・距離値を図 3 に示

Fig. 1 Appearance of the experimental robot.

Fig. 2 Wall scan environment with rotation system.

Fig. 3 Distance to wall and integration value.

す。ここでは壁までの距離を $L_{wall} = 0.45\text{m}$ として実験を行った。距離値はトランスデューサの指向性の範囲内で正しく得られたが、その範囲外では反射波が得られなかった。積分値は壁面との角度が垂直に近いほど大きな値となり、左右 ($0, 180^\circ$) の開空間では小さな値となった。既報ではこのシステムを用いて、以下のようなアイデアに基づいた移動ロボットのための軌道生成を行っている⁽⁶⁾。

- 超音波センサが 180° スキャンするごとに得られる n 個の距離値・積分値から Sub-Goal を生成し、局所的な情報から行動を決定する。
- Sub-Goal は現在のロボットの位置を原点とした極座標系で表すものとする。すなわち、角度を θ_p 、距離を l_p としたときに (l_p, θ_p) と表される。
- 開空間の大きさ l_p を利用して速度制御を行う。

- ロボットは、原点と Sub-Goal(l_p, θ_p) を通る円弧状の経路を計画し、速度 v で移動する。

以上の考え方にに基づき、積分型超音波センサシステムを用いて (l_p, θ_p) を求めることにより経路の生成を行い、さらに速度 v を求めることにより軌道を生成する。次節では、さらに効率の良い移動を実現するために、 l_p を利用した速度決定アルゴリズムを提案する。

2.2 速度の決定 既報では速度の上限が 0.20m/s であったが⁽⁴⁾、この上限を大きくすることによりさらに効率の良い移動を実現する。そのために、本論文では障害物までの距離を表すパラメータ l_p を利用して安全な最高速度 v_{max} を定義する⁽¹²⁾。センサシステムは、ソナーのサンプリングタイム T_{sonar} ごとに距離値 $distance(i)$ と積分値 $integration(i)$ を獲得する。ただし、 $i = 0, 1, \dots, n-1$ である。従って、ロボットの行動を生成するサンプリング周期は nT_{sonar} となり、この周期ごとに Sub-Goal を生成する。

未知領域に対する十分な観測回数を N とすると、距離 l_p に存在する Sub-Goal に到達するまでに N 回以上の観測を行えば良いので、

$$l_p / (V \cdot nT_{sonar}) \geq N \quad (1)$$

を満たす必要がある。ただし、 n は 180° 回転する間の測定回数、 T_{sonar} はソナーのサンプリングタイム、 V はロボットの移動速度である。このとき、ロボットが取り得ることのできる最高速度 v_{max} は

$$v_{max} = l_p / (N \cdot nT_{sonar}) \quad (2)$$

と表される。なお、本論文ではハードウェアの限界から v_{max} の上限値を 0.85m/s とした。

十分な観測回数は以下のように決定した。本システムによって得られる l_p の最小値は 0.15m であり、ロボットの取り得る速度の最小値は 0.10m/s である。 $nT_{sonar} = 240\text{ms}$ とすると、この Sub-Goal に到達するまでに 6 回の測定が可能である。このことから、 $N = 6$ と設定した。文献⁽¹³⁾では N を環境に応じて適切に切り替える手法について検討しており $N = 4 \sim 8$ 程度で可変としたが、計算に時間がかかるなどの問題点がある。そこで、本論文では $N = 6$ と固定して実験を行うこととし、環境に応じて適切に N を設定する手法については今後の検討課題とする。なお、 l_p はセンサによって得られる計測値から求まる値であり、 v_{max} はノイズが含まれる l_p の関数となっている。そこで、次節で述べるアルゴリズムを用いて平滑化を試みる。

2.3 軌道生成アルゴリズム ここでは軌道を求めるためのアルゴリズムを示す。なお、手順 1~3 は

論文⁽⁴⁾で提案したものであり、速度を求める手順 4, 5 が新たに提案する部分である。

1. 積分値から開空間を探索するために Thr_{int} を決定する。これは積分値を 2 値化するための閾値であり、 $Thr_{int} = \sum_{i=0}^{n-1} integration(i) / n$ で求まる。
2. Thr_{int} を利用して $integration(i)$ を 2 値化する。

$$\begin{cases} integration(i) > Thr_{int} \rightarrow integration(i) = 1 \\ integration(i) \leq Thr_{int} \rightarrow integration(i) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

積分値が小さければ安全であるという考え方にに基づき、 $integration(i) = 0$ である領域に着目し開空間を探索する。この領域が複数存在する場合、これらの候補の中からその幅が最大の領域を選択し、その中心を θ_p とする。

3. θ_p 方向の距離値から、 l_p を決定する。超音波センサの方位角度の測定精度の悪さ、ロボットが計画された経路どおりに追従できないことを考慮し、 θ_p を中心にその指向性の範囲内の距離値を探索し、その最小値を l_p とする。
4. 式 (2) を用いて速度の上限 v_{max} を決定する。
5. 速度 v_{max} を ESDS によってフィルタリングすることによって、実際の移動速度 v を算出する。

$$v = \text{ESDS}(v_{max}) \quad (4)$$

以上の手順に従って局所的な情報から軌道を生成する。なお、2.2 節で示したとおり v_{max} の上限値を 0.85m/s としたこと、1 回の走査中のロボットの移動距離は最大 0.2m 程度となる。(2) 式より速度 v_{max} は距離 l_p に大きく依存するが、2.3 節のアルゴリズム手順 3 のとおり十分に安全を考慮して l_p を決めているため、図 5 に示すような走査中に大きく測定対象が変化するような環境では l_p 、すなわち v_{max} が小さくなるため問題はない。手順 5 で用いた ESDS については次節で説明する。

2.4 非線形デジタルフィルタ ESDS ESDS はスライディングモードシステムを利用した非線形フィルタであり、信号成分の変化に遅れなく追従するという特徴を持つ⁽⁷⁾。ESDS は以下の式で表される。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -UR^2 \text{sign}(U(x_1 - y) + |x_2|x_2 / (2R^2)) \end{cases} \quad (5)$$

ただし sign は signum 関数を表し、 U, R は設計者の与えるパラメータである。また、スライディングモードで問題となるチャタリングを軽減するために、 signum 関数を飽和関数で近似している。この境界層の大きさを支配するパラメータを m とした⁽¹⁴⁾。上記の連立微

Fig. 4 Experimental result in the end of the hall (Experiment A).

Fig. 5 Experimental environment with small travelable area (Experiment B).

分方程式を解くことにより、入力信号 y に対して $x_1(t)$ が平滑値、 $x_2(t)$ が微分値として求まる。

3. ESDS による平滑化の妥当性

2章において提案したアルゴリズムでは、その手順5において v_{max} を平滑化するために非線形フィルタ ESDS を用いる。そこで、本章では他手法との比較によりその妥当性を検討する。

図4, 5は2章で提案した手順4によって求められた v_{max} である。それぞれの図において、(a)はロボットの実際の軌道であり、(b)は先ほど述べたアルゴリズムによって得られた v_{max} である。図4, 5それぞれの環境を Experiment A (以下 Exp. A) および Experiment B (以下 Exp. B) と呼ぶ。いずれも原点から出発したロボットが壁面の近くまで移動し、方向転換している。 v_{max} は超音波センサによって獲得した距離値を基に算出されており、実環境における雑音や誤差の影響によって大きく振動する。そのため、この v_{max} を利用してロボットを誘導すると、速度が不連続に変化するために滑らかに動くことができない。そこで、Exp. B で得られたデータに対して ESDS を適用してフィルタリングを行った結果、図6実線のように速度の変化が滑らかになり、 v_{max} を利用することに起因する、

- 急加速・急減速を行い、滑らかに動かない。

Fig. 6 Processed results using ESDS in the Exp. B.

Fig. 7 Processed results using MF and LPF in the Experiment B.

- v_{max} の変化が大きすぎるために、駆動輪として用いているステッピングモータが脱調し、ロボットが速度指令値に追従できない。また、オドメトリを用いる際に誤差が生じる。

などの現象が緩和された。なお、ESDS は設計パラメータとして U, R と m を与えるが、これらは追従性を支配するパラメータ UR^2 と境界層の大きさを支配するパラメータ m の2つにまとめられる⁽¹⁴⁾。このパラメータの決定方法については本章の後半で説明する。

ここで、ESDS による平滑化の妥当性を検証するため、他手法との比較を行う。フィルタは、線形フィルタと非線形フィルタに大別することができるが、ここではそれぞれから代表的なものとして低域通過フィルタ (LPF)、メジアンフィルタ (MF) を取り上げる。

MF は、インパルス性雑音の除去および突発的な信号成分の変化を保存するという特徴を持つ非線形フィルタである。 L 個のサンプルを大きさ順に並べ替え、その中央値をフィルタ出力とする。時刻 i の v_{max} を $v_{max}(i)$ 、処理に用いるデータの個数を L とすると

$$v = \text{MED}\{v_{max}(i), v_{max}(i-1), \dots, v_{max}(i-(L-1))\} \quad (6)$$

となる。MED は中央値を求める演算を表す。図7(a)は Exp. B で得られたデータに対して $L = 5$ の MF を適用した処理結果である。これに対し、LPF は高周波

Fig. 8 v_{max} and its acceleration.

Fig. 9 Processed results using LPF in the Exp. A.

領域の雑音を除去する線形フィルタである。ただし、LPFの次数は二次、 f_0 はカットオフ周波数、 Q は Q 値(Quality Factor)を表す。図7(b)はExp. Bで得られたデータに対して $f_0 = 0.11\text{Hz}$ 、 $Q = 1.0$ のLPFを適用した処理結果である。

いずれの手法も v_{max} に存在する振動は抑制されており、平滑化という観点からは評価が難しい。そこで、以下に述べる理由から加速度に注目して評価を行う。ロボットの質量を M 、加速度を a 、そのときに必要となる推力を F とすると $F = Ma$ なる関係が成り立つ。ロボットの出力には上限があることから加速度にも上限が存在することになり、過大な加速度を必要とする速度指令値には追従できないことになる。すなわち、加速度の上限に注目することで、定量的な評価が可能となる。ここでExp. AおよびExp. Bによって得られた v_{max} の差分を取ることで加速度を求めたものを図8に示す。 v_{max} が大きく振動しているため、その加速度は大きくなる傾向が見られる。この加速度を抑制するという観点から図6、7で示した平滑化の結果を再検討する。なお、平滑化の結果、部分的に $v > v_{max}$ となる場合があるが、 v_{max} は十分に安全な速度として計算されており、部分的にこの速度を上回することは実用上問題ない。なお、 v は v_{max} を各手法によりフィルタリングしたあとの速度を表すものとする。

- ESDS: パラメータ UR^2 の値によって、加速度の制限が可能である。例えば、加速度の上限(a_{limit})

Fig. 10 v_{max} and its integration value. v_{max} is obtained in the Experiment A.

を15とした場合、図6に示すように $UR^2 = 7$ とすることで、 a_{limit} を満たすことができる。ただし、パラメータの設定には試行錯誤が必要である。

- MF: v_{max} の平滑化は可能だが、突発的な信号成分の変化が保存されるため、加速度は大きくなる。
- LPF: パラメータ f_0 の値によって、加速度を制限することが可能である。 $a_{limit} = 15$ とした場合、 $f_0 = 0.11\text{Hz}$ とすることでこの条件を満たす。ただし、パラメータ設定は試行錯誤が必要である。

以上の結果から、加速度に上限がある場合、ESDSもしくはLPFの適用が妥当である。ただし、処理の対象となる信号の波形が異なる場合、パラメータの再設計が必要となる場合がある。LPFのパラメータを $f_0 = 0.11\text{Hz}$ 、 $Q = 1.0$ としたままExp. Aで得られた信号を処理した例を図9(a)に示す。この結果、加速度の最大値は30程度となり、先ほど考慮した $a_{limit} = 15$ を超える。図9(b)は、 $a_{limit} = 15$ となるようにパラメータを再設計した例であるが、このときのパラメータは $f_0 = 0.07\text{Hz}$ 、 $Q = 1.0$ となり、LPFが処理の対象となる信号の性質に対してロバストではないことが分かる。これはESDSも同様であり、いずれの手法も加速度の上限を保証しつつフィルタリングを行うことはできない。

4. 加速度の上限を考慮した v_{max} のフィルタリング

前章の結果から、ESDS、LPF、MFとも加速度の上限を保証しつつ v_{max} のフィルタリングを行うことはできない。そこで、加速度の上限を明示的な設計パラメータとして与えることができるフィルタを提案する。基本的なアイデアは、ESDS⁽⁷⁾の入力信号として v_{max} の積分値を用いるということである。これまでESDSの入力 y として v_{max} を用いていたが、ここでは y を以下のように定義する。

$$y = \int v_{max} dt \quad (7)$$

このとき、ESDS を解くことにより得られる推定値は以下のようになる。

$$\begin{cases} x_1 = \int v_{max} dt \text{ の平滑値} \\ x_2 = v_{max} \text{ の平滑値} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、

$$\sigma = U(x_1 - y) + |x_2| x_2 / (2R^2) \quad (9)$$

とおくと、式 (5) より

$$\dot{x}_2 = -UR^2 \text{sign}(\sigma) \quad (10)$$

となることから、

$$|x_2| \leq UR^2 \quad (11)$$

なる関係が成り立つ。これは $\dot{v}_{max}$ 、すなわち加速度の上限をパラメータ UR^2 によって制限することが可能であることを意味している。従って、加速度の上限 a_{limit} を満たしつつフィルタリングを行うためには、

- ESDS の入力信号として $\int v_{max} dt$ を用いる。
- ESDS のパラメータ UR^2 を設定する際に、 $UR^2 \leq a_{limit}$ を満たす UR^2 を指定する。

という指針に基づき設計すればよい。

提案手法では、正負の方向の加速度、すなわち加速・減速双方の加速度について考慮している。従って、加速度 a は

$$|a| < a_{limit} \quad (12)$$

を満たしている。ただし、文献⁽⁴⁾で述べたとおり、PSD とのセンサフュージョンにより危険回避のためにその場で停止する場合もあり、このときの速度は $v_{max} = 0$ となる。即座に停止することにより負の方向の加速度が大きくなるが、加速する場合と違って物理的に実現は可能であり、危険回避という観点から例外的に許容する。

実環境において得られたデータに対する適用例を示す。図 10 は Exp. A で得られた v_{max} に対して $\int v_{max} dt$ を求めたものである。その場回転をするときに速度 $v_{max} = 0$ となるので、積分値の発散を抑えるため、そのタイミングで積分値を 0 にリセットするようにした。

図 11(a)~(d) は Exp. A に対する ESDS の処理結果である。パラメータは、それぞれ (a) $UR^2 = 10$, (b) $UR^2 = 15$, (c) $UR^2 = 20$, (d) $UR^2 = 30$ であり、境界層の大きさを決定するパラメータ m はすべて $m = 15$ とした。さらに、図 12 は境界層導入の有効性を確認するために行った実験の結果を示すものである。図 11(b) は $m = 15$ の境界層付き ESDS による処理結果を表す。さらに、図 12(a) は $m = 10$ の境界層付き

Fig. 11 Processed results using ESDS of varied UR^2 in the Experiment A.

ESDS による処理結果、(b) は境界層を導入しない場合の処理結果である。ESDS は Pontryagin の最大原理に基づく最短時間系を内包する非線形フィルタであり、その結果、境界層無し ESDS の加速度は bang-bang 制御となる。しかし、加速度の大きな振動は速度の滑らかさ、さらにはエネルギー効率の面からも望ましくない。そこで境界層を導入した結果、加速度の上限を満たしつつ速度・加速度とも平滑化が可能である。ただ、パラメータの選定によっては図 11(a) の 15~20s 付近に示すとおり、速度の上限 v_{max} に対してフィルタリング後の v が 2 倍以上になる場合がある。これは、比較的小さな UR^2 に対し m を大きく設定したために、元信号に対する追従性が悪くなったためである。 m を小さく設定することによってこの現象を緩和することは可能だが、小さくしすぎると図 12(b) に示すようにチャタリングの影響が現れる。良好な追従性とチャタリングの除去はトレードオフの関係にあるが、図 11(d) や 12(a) に示すとおり、適切なパラメータの選定により両者を満たすことは可能である。これらの結果から、加速度の上限を UR^2 によって明示的に与えつつ v_{max} の平滑化が実現できていることが確認できた。

なお、ESDS は式 (5) によって表される連立微分方程式を解くことによって平滑値を得ることができる。ただし、一般的な微分方程式の解法であるルンゲクッタ法は比較的長い計算時間を必要とするため、リアルタイム性を必要とするロボットへの適用は不向きであ

Fig. 12 Processed results using ESDS.

る。そこで、既報で提案している計算高速化手法⁽¹⁵⁾を用いることにより計算コストの大幅な削減が可能であり、平滑値をリアルタイムで推定することができる。

5. 結 論

本論文では、積分型超音波センサシステムによって得られる距離値・積分値から速度を求めるためのアルゴリズムを提案し、さらに速度に対するフィルタリングについて検討した。想定するセンサシステムによって得られる速度指令値 v_{max} は、誤差・雑音などの影響で大きく変動する。この変動を抑制するために、フィルタリングによる平滑化を行ったが、平滑値のみに注目するだけではロボットの動きを滑らかにすることはできない。そこで、本論文ではロボットの出力、すなわち加速度を考慮しつつ v_{max} の平滑化が可能なフィルタを提案した。提案手法は、ESDS の入力として v_{max} の積分値を用いることにより、加速度の制限と速度の平滑化という二つの目的を満たすものである。その結果、加速度の上限を明示的にパラメータとして指定しながら速度を平滑化できることを確認した。今後は本研究で得られた成果を利用して、

- 加速度と車椅子等の乗り心地の関連について明らかにし、安全かつ快適な自律車椅子を実現する。
- 車椅子等を想定した場合、操作者の意思と自律的な制御が矛盾した場合の解決法について研究を行い、安全かつ効率的な移動を実現する。

等の課題に取り組む予定である。

謝 辞

本研究の一部は小澤・吉川記念エレクトロニクス研究助成金の補助を受けて行われた。ここに示して感謝の意を表する。

文 献

- (1) Ishikawa, S. and Asaka, S., A Method of Piloting an Autonomous Mobile Robot in Dynamically Changing Environment Including Moving Obstacles, *Journal of the*

Robotics Society of Japan (in Japanese), Vol.11, No.6 (1993), pp.856–867.

- (2) Borenstein, J. and Koren, Y., Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.19, No.5 (1989), pp.1179–1187.
- (3) Borenstein, J., The Vector Field Histogram – Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.7, No.3 (1991), pp.278–288.
- (4) Emaru, T., Tanaka, K. and Tsuchiya, T., Strategy of Finding the Travelable Area for Autonomous Mobile Robot Using Distance and Integration Value Obtained by Ultrasonic Wave Sensor, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C* (in Japanese), Vol.74, No.737 (2008), pp.98–107.
- (5) Emaru, T., Oikawa, K., Tanaka, K. and Tsuchiya, T., Strategy of Decision Making for Autonomous Mobile Robot by Using Distance and Integration Value of Ultrasonic Wave Sensor, *Proceedings of the 9th Robotics Symposia* (in Japanese), (2004), pp.120–125.
- (6) Emaru, T., Oikawa, K., Tanaka, K. and Tsuchiya, T., Speed Control of Robot by Using Integration-Type Ultrasonic Wave Sensor, *Proceedings of the 21th Annual Conference of the Robotics Society of Japan* (in Japanese), (2004), CD-ROM.
- (7) Emaru, T. and Tsuchiya, T., Research on Estimating Smoothed Value and Differential Value by Using Sliding Mode System, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.19, No.3 (2003), pp.391–402.
- (8) Bobrow, J.E., Optimal Robot Plant Planning Using the Minimum-Time Criterion, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.4, No.4 (1988), pp.443–450.
- (9) Weinreb, A. and Bryson, A., Optimal Control of Systems with Hard Control Bounds, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.30, No.11 (1985), pp.1135–1138.
- (10) Reister, D.B. and Pin, F.G., Time-Optimal Trajectories for Mobile Robot with Two Independently Driven Wheels, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.13, No.1 (1994), pp.38–54.
- (11) LaValle, S.M. and Konkimalla, P., Algorithms for Computing Numerical Optimal Feedback Motion Strategies, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.20, No.9 (2001), pp.729–752.
- (12) Miura, J., Negishi, Y. and Shirai, Y., Considering Map and Motion Uncertainties in Unknown Environments, *Journal of the Robotics Society of Japan* (in Japanese), Vol.24, No.1 (2006), pp.47–55.
- (13) Emaru, T. and Tsuchiya, T., Implementation of Unconsciousness Movements for Mobile Robot by Using Sonar Sensor, *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, (2007), pp.96–101.
- (14) Emaru, T. and Tsuchiya, T., How to Decide the Parameters of ESDS, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C* (in Japanese), Vol.67, No.664 (2001), pp.3844–3849.
- (15) Emaru, T., Tsuchiya, T. and Tanaka, K., Fast Calculating Method for Eliminating the Impulse Noise, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C* (in Japanese), Vol.70, No.689 (2004), pp.62–68.