

超音波センサによる距離値および反射波の積分値を利用した
自律移動ロボットの通行可能領域検出法*江丸 貴紀^{*1}, 田中 一男^{*2}, 土谷 武士^{*3}Strategy of Finding the Travelable Area for Autonomous Mobile Robot
Using Distance and Integration Value Obtained By Ultrasonic Wave SensorTakanori EMARU^{*4}, Kazuo TANAKA and Takeshi TSUCHIYA^{**} Division of Human Mechanical System and Design, Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N13W8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

The ultrasonic TOF (Time-of-flight) ranging system is today the most common sensing system employed in indoor mobile robotic systems, primary due to the ready availability of low-cost systems, their small size, simple circuits, and their ease of interfacing with computers. TOF ranging systems measure the round-trip time required for a pulse of emitted energy to travel to a reflecting object, then echo back to a receiver. However, ultrasonic TOF ranging systems tend to neglect minute reflected waves below the threshold level. In this paper, we propose a novel approach to utilize the minute reflected waves by integrating the reflected waves. It is implemented using a transducer with scanning system, and has a great ability of finding the travelable area for a robot in environments in which the distance cannot be obtained precisely. The proposed system is constructed by simple way so as to improve the utility value of sonar. The validity of the proposed method is investigated by applying this method to autonomous mobile robot in various environments such as environment with multiple obstacles, in the end of the hall, and so on.

Key Words: Moving Robot, Autonomy, Supersonic Wave, Measurement, Sensor, Integration Value, Obstacle Avoidance

1. 序 論

我々は、上肢に障害を持つ車椅子利用者の支援を目的として、脳波を用いた電動車椅子の開発を行っている⁽¹⁾。脳波は生体信号の中でも最高次の信号であると言われており、潜在的に非常に多くの情報を含んでいる。そのため、高齢者や身体障害者のためのコミュニケーションシステムに適していると考えられる。現在、図1における交差点を想定した比較的小さな実験フィールド内において、図2に示すシステムを用いた実験を行っている。その結果、80%程度の確率で目標に到達することが可能である⁽²⁾。しかし、同じく図1における障害物の存在する通路状環境では、その回避に細かい操作が必要であり、脳波で行うことは操作者の負担を増加させてしまう。そこで、操作者の負担を減らし安全な移動を行うために、このような通路状環

境における移動の自律化を本研究の目的とする。

自律化を実現するためにはセンサの搭載が必須である。現在、自律移動ロボットに搭載するためのセンサが数多く提案されているが、社会における応用範囲を広げるためには安価でなければならず、さらに車椅子に搭載するためにはコンパクトでなければならない。ここ数年、移動ロボットの自律化を目的としてレーザレンジファインダを用いる研究が数多くなされているが⁽³⁾、安価にコンパクトなシステムを実現するために、本論文では超音波センサを採用する。

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自己位置同定⁽⁴⁾、ナビゲーション⁽⁵⁾、障害物回避⁽⁶⁾などを行うために利用されている。特に、障害物回避を伴う移動を実現するために、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^{(7)~(10)}。Leonard⁽⁷⁾は完全な既知環境、Ishikawa⁽⁸⁾は部分的に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、Borenstein⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は grid map を用いることにより未知環境におけるロボットの誘導問題を取り扱っている。な

* 原稿受付 2007年6月10日。

^{*1} 正員、北海道大学工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13条西8)。^{*2} 正員、電気通信大学知能機械工学科(☎182-8585 調布市調布ヶ丘1-5-1)。^{*3} 正員、北海道工業大学電気電子工学科(☎006-8585 札幌市手稲区前田7条5-4-1)。

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

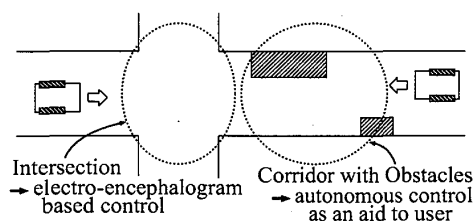


Fig. 1 Corridor environment.

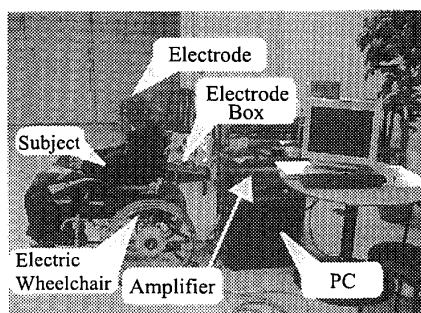


Fig. 2 Electro-encephalogram based control of an electric wheelchair.

お、文献⁽⁹⁾の手法が、

- ドアの通り抜けなど狭い所の通過が困難⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。
- 制御信号に対する low-pass filter 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。

という欠点を持つのにに対し、文献⁽¹⁰⁾ではこれらがある程度克服している。ただし、いずれの手法も正確なオドメトリ情報を必要とする。また、ソナーリングを構成するためには多数のトランスデューサやその制御回路が必要であることから、コスト的な問題、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。そのため、安価でコンパクトなソナーリングシステムを実現することは難しい。

そこで、本論文では1組のトランスデューサを回転機構と共に用いるセンシングシステムを採用する。このような回転機構を持つシステムは過去にも提案されているが⁽¹³⁾、そのほとんどは超音波センサを測距センサとして用いている。ソナーの測距方法として一般的なパルスエコー法⁽¹⁴⁾は、その測距原理から微弱な反射波を無視する傾向にある。たとえば、広い平面を測距する場合、その平面に対して垂直であれば精度の良い測距が可能であるが、その角度が大きくなるにつれて得られる反射波が微弱になり、正確な測距が行えなくなる。また、物体のエッジや円筒形・球形の障害物から得られる反射波も微弱であるため、確実に距離が得られるとは言い難い。反射波の情報を有効に使うという観点から、リーディングエッジの検出を複数回行うことにより、トランスデューサの指向性の範囲内にあ

る複数の物体を検出する方法が提案されているが⁽¹⁵⁾、閾値以下の情報は本質的に無視される。そこで、本論文ではその欠点を解消する方法として、積分型超音波センサ⁽¹⁶⁾を提案する。これは、パルスエコー法では無視されてきた微弱な反射波の情報を利用することを目的とし、受信器によって得られた反射波の積分値を利用する方法である。また、提案手法では回転機構により空間的に連続してセンシングを行うことにより、自分の近傍の相対的な変化が明確になることが期待される。本論文では、この局所的な情報から通行可能であると思われる領域、すなわち開空間を認識し、その方向へ移動することを繰り返すことにより、障害物の存在する未知空間で移動することを目的とする。さらに、提案手法を車椅子を想定した二輪独立駆動の移動ロボットに実装し、その有効性を確認する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では、本論文で提案する積分型超音波センサシステムについて簡単な実験例を示し説明を行う。3章では、提案するシステムによって得られる情報から経路を生成し、ロボットを誘導する方法を提案する。なお、本論文で取り扱う二輪独立駆動の移動ロボットは、そのキネマティクスについて多くの知見が得られている。そこで、この知見を利用して、センサ情報からロボットの両輪の回転角速度を導出する方法についても3章で述べる。4章では、提案手法の有効性を確認するため移動ロボットへの実装を行い、その実験結果を示す。最後に、5章で本論文のまとめを行う。

2. 積分型超音波センサシステムの提案

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2つの特徴を持つ。本章では、この積分型超音波センサの概要を述べる。さらに、単純な環境における測定例を示し、提案するシステムの特徴を明らかにする。

2.1 積分型超音波センサの測定原理 図3は、トランスデューサの指向性の範囲内に複数の障害物が存在する実験環境を示したものであり、この環境において図4に示すシステムによって得られたデータを図5(a)に示す。障害物はいずれも幅15cm、高さ30cmの超音波を反射しやすい木材であり、これらを図3のように設置した。トランスデューサの指向性は50°であり、測定範囲内には床・2つの障害物以外に物体は存在しない。図5下部に示す反射波は、オペアンプによって増幅したものであり、上部の波形がその積分値を示す。なお、これらのデータは回転機構を用いず、静止

した状態で得られたものである。図4に示すとおり、受信器によって得られた反射波は以下の手順に従って処理される。

1. 低雑音オペアンプを利用したアナログ差動増幅回路により反射波を増幅する。
2. 絶対値回路によってその絶対値を取る。
3. 積分を行い、その積分値をある時間でA/D変換することによりデジタル値として取り出す。

以上の信号処理部をアナログ回路で作成し、この回路をワンチップマイコンH8/3664により制御する。なお、今回の実験ではA/D変換するまでの時間を12msとし、トランスデューサから200cmまでの範囲の反射波を積分する。これは、対象としている廊下の幅やロボットの速度を考慮した結果である。アナログ回路から出力される積分値は、H8/3664上の10bit A/Dコンバータによって0~1023のデジタル信号に変換される。

2.2 積分値の物理的な意味 提案手法によって得られる積分値について考察するために実験を行った。その結果が図5である。図5(a)は障害物が2つ存在し、その距離は30および60cm、(b)、(c)は障害物が1つ、その距離はそれぞれ30、60cmである。なお、(b)および(c)の測定対象は図3に示す幅15cm、高さ30cmの

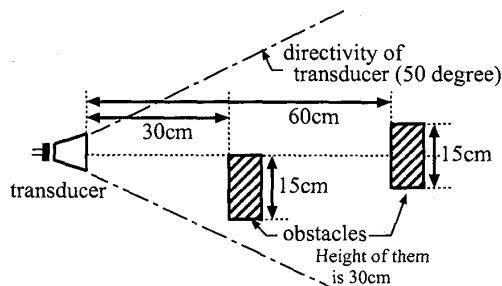


Fig. 3 Example of experimental environment: there are two obstacles in directivity of transducer.

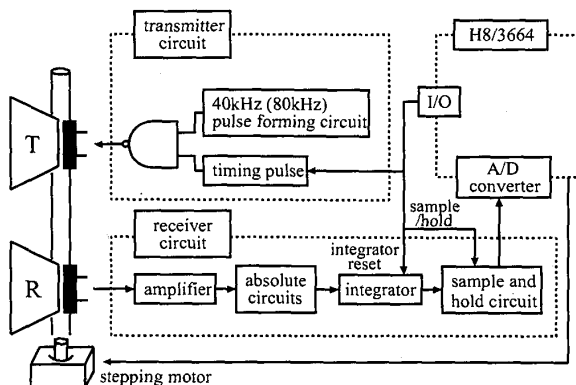
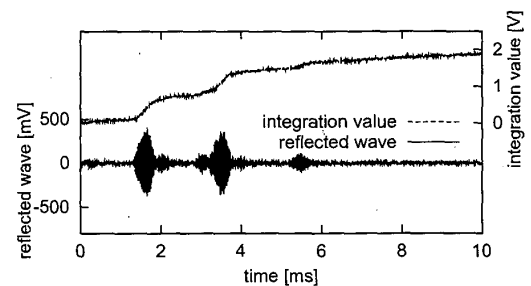


Fig. 4 System configuration of integration-type ultrasonic wave sensor.

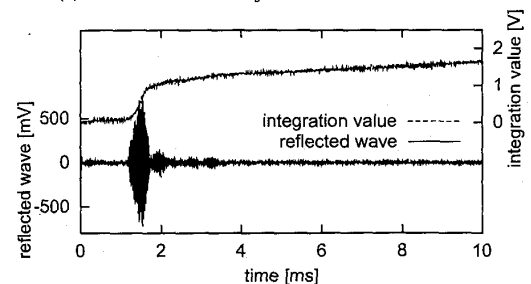
木材であり、これをトランスデューサの正面に垂直に設置した。この結果から、障害物までの距離が近かったり、障害物が複数存在する場合に積分値が大きくなる傾向がある。

ロボットが局所的な情報を用いて安全に移動するためには、障害物が密に存在する方向や、より近くに存在する方向を避けて移動することが必要である。すなわち、積分値の大きな方向を避け、積分値の小さな方向にロボットを誘導することが望ましい。しかし、積分値の大小を絶対的に評価することは困難である。そこで、回転機構を用いて周囲の情報を連続的に取得することにより、積分値の相対的な評価を試みる。次節では、回転機構による情報の取得について説明する。

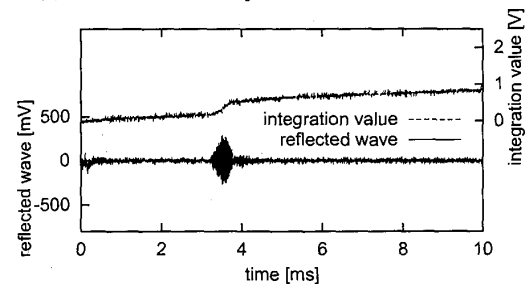
2.3 回転機構を用いた静止した壁に対する測定 回転機構によるデータ取得の特徴を明らかにするために実験を行った。図6に示すとおり、ステッピングモータを用いた回転機構にトランスデューサを設置し、壁面に対し回転しながらセンシングを行う。また、パルスエコー法による距離測定を同時に行うことにより、積分値・距離値という2つの情報を獲得する。結



(a) Distances to two objects are 30cm and 60cm.



(b) Distance between object and transducer is 30cm.



(c) Distance between object and transducer is 60cm.

Fig. 5 Reflected wave and integration value.

果を図7に示す。図7(a)は村田製作所製MA80A1(中心周波数=80kHz, 半減全角=7°), (b)は日本セラミック株式会社製T/R40-16(中心周波数=40kHz, 半減全角=50°), (c)はKoman Tech社製ST/R40-10IN(中心周波数=40kHz, 半減全角=100°)を用いた測定結果である。座標系は, 正面を90°とし, 0~180°の範囲の測定を行った。ここでは, 壁までの距離 $L_{wall} = 45\text{cm}$, 超音波センサのサンプリングタイム $T_{sonar} = 20\text{ms}$, 180°回転する間の測定回数 $n = 48$ とした。また, 予備実験より(c)の測定可能距離が最も小さく225cmだったため, この実験では距離の最大値を225cmと設定した。

実験の結果, 距離値はいずれのトランスデューサについてもおよそ半減全角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ず, 最大値である225cmを示した。このように中間値を取らないのは, 距離を求めるためのパルスエコー法が, 反射波を認識するためにある閾値を用いているためである。その一方で, 積分値は, いずれのトランスデューサについても壁面との角度が垂直に近いほど大きな値を示し, 左右(0, 180°)の通行可能な領域, すなわち開空間からは小さな値が得られた。距離値の場合と異なり, 積分値の変化は連続的であることが特徴的である。すなわち, 積分値の絶対的な大きさには壁との角度, 距離などの物理的な意味が内在されている。しかし, 得られたデータからこれらの物理的な意味を解釈し, さらにロボットの行動を生成することは大変困難である。そこで, 回転機構を用いて周囲のデータを連続的に取得することにより, 測定地点における方向・積分値の関係とロボットの移動可能な領域とを対応付けすることが可能となる。すなわち, 回転機構の導入により, 得られたセンシングデータを複雑な解釈を行うことなくロボットの局所的な行動決定に生かすことができる。詳細なアルゴリズムについては3章で述べる。

2.4 トランスデューサの選定 前節では指向性の異なる3種類のトランスデューサについて実験を行ったが, 開空間を認識するためにどのような性質を持つトランスデューサが望ましいのかを考察する。一般に超音波センサの欠点は角度分解能が悪いことだとさ

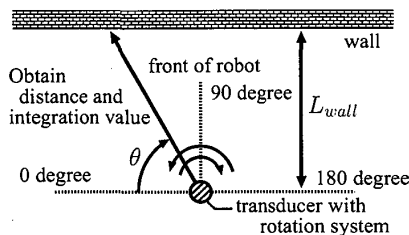
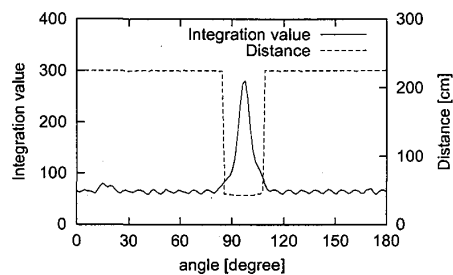
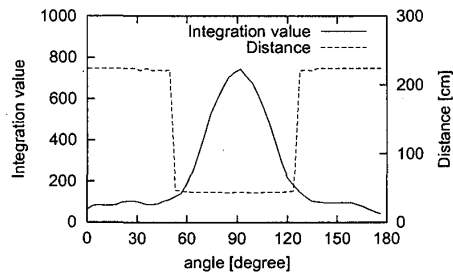


Fig. 6 Wall scan environment with rotation system.

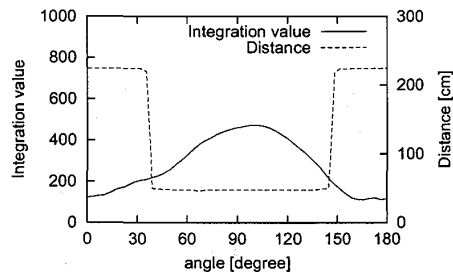
れている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾. 80kHzのトランスデューサは7°という鋭い指向性を持ち, 角度分解能という意味では良好な性質をもつように思われる。しかし, 図7(a)の実験結果からわかるとおり, 超音波センサが鋭い指向性を持つということは, 斜めの壁に対する測定性能が著しく劣化することを意味している。これは, 例えばロボット正面に壁が存在していても, その角度が垂直からおおよそ $\pm 10^\circ$ 以上傾いていれば認識できないことを示しており, 本論文で想定しているタスクを考慮すると適切ではない。その一方で, 半減全角が最も大きいST/R40-10INは, 斜めの壁に対する認識能力に最も優れている。しかし, 半減全角の値が大きいということは, トランスデューサの正面に障害物が存在していなくてもその指向性の範囲内にある障害物からの反射波を検出するということである。その結果, 図7(c)の実験結果も示すとおり, このトランスデューサでは壁面(90°付近)と開空間(0, 180°付近)から得られる積分値の差が小さい。すなわち, 比較的狭い開空間がロ



(a) MA80A1 (Murata Manufacturing Co., LTD.), Center frequency is 80kHz, -6dB directivity is 7 degree.



(b) T/R40-16 (Nippon Ceramic Co., LTD.), Center frequency is 40kHz, -6dB directivity is 50 degree.



(c) ST/R40-10IN (Koman Tech Co., LTD.), Center frequency is 40kHz, -6dB directivity is 100 degree.

Fig. 7 Distance to wall and integration value by using various transducers (L_{wall} is 45cm).

ロボット近傍に存在していても、半減全角の大きなトランスデューサではその認識が困難である。そこで、本論文では開空間を精度良く認識するために、半減全角が 50° のトランスデューサ, T/R40-16 を用いる。

3. 局所的情報を用いた経路生成

本章では、積分型超音波センサによる移動ロボットの経路生成を行う。説明のため、図8に示すような壁面で区切られた通路状環境において、通路に沿って移動することを想定する。

提案する積分型超音波センサシステムを利用することにより、 180° スキャンするごとに n 個の距離値・積分値が得られるものとする。これら2つの情報の間に矛盾が存在する場合でも妥当な経路を生成するために、以下の方針を採用する。ただし、本章では説明のため単純な環境を例として取り上げ、距離値と微分値に矛盾が生じる環境に対する適用例は4章で取り上げる。

- 超音波センサが前方 180° をスキャンするごとに Sub-Goal を生成し、行動を決定する。
- Sub-Goal は現在のロボットの位置を原点、向きを 90° 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。
- 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。ただし、 $v < l_p/(nT_{sonar})$ とする。すなわち、ロボットは、計画された Sub-Goal に到達する前に新たな Sub-Goal を逐次生成する。

以上の考え方にに基づき、積分型超音波センサシステムにより (l_p, θ_p) を求めることにより経路の生成を行う。

以下、3.1節では Sub-Goal を求めるアルゴリズムの流れを示し、3.2節～3.4節において具体的なパラメータの決定方法を述べる。3.5節では求めた Sub-Goal にロボットを追従させるための、左右車輪に対する速度指令値の決定方法を述べる。さらに、3.6節では提案手法の限界について議論し、PSD センサの導入による解決を提案する。

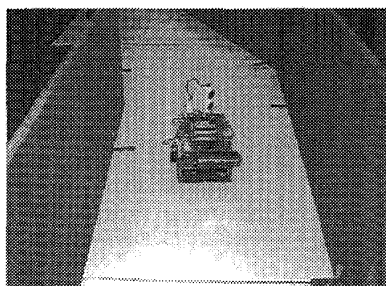


Fig. 8 Corridor environment.

3.1 局所的情報を利用した経路生成アルゴリズムの流れ

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周期は nT_{sonar} となり、この周期ごとに、以下の手順に従って Sub-Goal を生成する。

1. 積分値から開空間を探索するために、積分値を2値化するための閾値 Thr_{int} を決定する。
2. Thr_{int} を利用して $integration(i)$ を2値化し、開空間を探索する。相対的に積分値が小さい方向が安全であるという方針に基づき、 Thr_{int} より小さな値を持つ領域に着目する。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. 開空間の大きさ l_p から速度 v を決定する。
5. 決定された (l_p, θ_p) から円弧状の経路を生成する。

3.2 閾値 Thr_{int} の算出とその妥当性の検証 前節で述べたアルゴリズムを様々な環境に適用するためには、閾値 Thr_{int} の設定が重要となる。ただし、閾値の設定方法を複雑にしまうと、単純な方法で開空間を探索できると言うメリットが失われてしまう。そこで、以下のように 180° スキャンする間の積分値の平均を求め、この値を Thr_{int} として採用する。

$$Thr_{int} = \sum_{i=0}^{n-1} integration(i)/n \quad (1)$$

この閾値決定方法の妥当性を検証するために、簡単な実験を行った。なお、2.3節ではトランスデューサ(c)に合わせて距離の最大値を225cmとしていたが、ここで用いているトランスデューサ(b)は255cmまで測距可能であるため、距離の最大値を255cmとした。図8に示す通路状環境で得られたデータ例を図9(a)～(c)に示す。(a)は45cm幅の通路の中心でセンシングを行った場合、(b)は、同じく45cm幅の通路であるが、ロボットの前方右側30cmのところに、幅12cmの障害物を置いたときに得られるセンシングデータを表している。また、(c)は幅80cmの通路状環境において得られるデータを表している。このように、障害物の有無や通路の幅に変化がある環境を一定の閾値で扱うことは大変困難であるが、提案手法を用いることによ

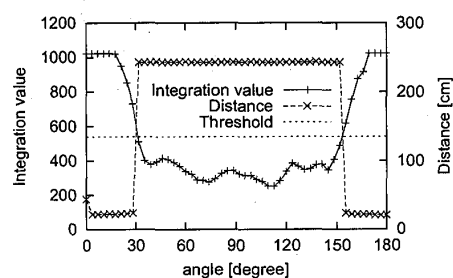
り, (a) では 540, (b) では 701, (c) では 467 とそれぞれ図中, 点線で示すとおり, 妥当な閾値を設定することができる。

3.3 θ_p の算出 まず, 前節で求めた閾値を用いて積分値を 0.1 に 2 値化する。2 値化後のデータにおいて, '0' はその方向が開空間であることを意味している。そこで, 1 回のスキャンによって得られた n 個のデータ列について 0 の値を持つデータに着目し, その幅が最大となるところを探索する。具体的には, 0 の値を持つデータの領域を探索し, その m 番目の領域の両端をそれぞれ α_m, β_m と定義する。このとき,

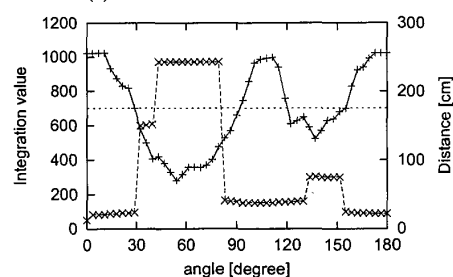
$$\text{MAX}(|\alpha_m - \beta_m|) \quad m = 0, 1, \dots \quad (2)$$

を満たす領域が最も安全であると考えられる。上記の式を満たす α, β をそれぞれ α_M, β_M と定義する。この領域の中心, すなわち $(\alpha_M + \beta_M)/2$ に対応する角度にロボットを誘導すればよいので, この角度は,

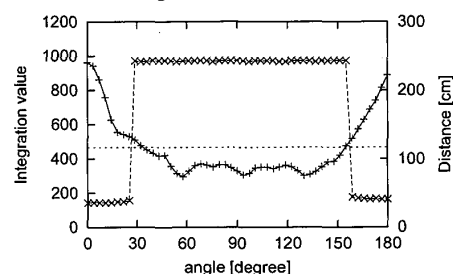
$$\theta_p = 90(\alpha_M + \beta_M)/n \quad (3)$$



(a) Width of the corridor is 45cm.



(b) There is an obstacle in right front of robot. Corridor's width is 45cm.



(c) Width of the corridor is 80cm.

Fig. 9 Distance and integration value which are obtained in various corridor environments.

と求まる。この方向が, ロボットの回りに存在する開空間の中で最も安全であると判断された方向である。

3.4 l_p および v の決定 開空間が存在する方向 θ_p について, その領域の奥行き方向の大きさ l_p を決定する。超音波センサにより距離 $\text{distance}(i)$ が求まっているので, これを単純に利用した例を図 10 に示す。これは, 図 9(b) に示す距離データを直交座標系にプロットし, さらに θ_p 方向の距離値を l_p として採用した場合の Sub-Goal を示したものである。この Sub-Goal に対し, 3.5 節で述べる円弧状の経路を計画した結果, 図 10 に示すように経路の途中で衝突してしまう可能性が非常に大きい。これは, トランスデューサの指向性が 50° と比較的大きいため, 角度分解能について高い精度が得られないためである。そこで, 図 11 に示すように θ_p を中心にトランスデューサの指向性の範囲の距離値を探索し, その最小値を l_p と定義する。

なお, l_p は開空間の大きさを表しているため, この値を利用してロボットの速度 v を決定する。 l_p が大きければ速度を大きく, l_p が小さければ速度を小さくすることを基本方針とし, 速度を 3 段階で切り替えることにより制御を行う。詳細については 4 章で述べる。

3.5 経路情報を利用したロボットの行動生成 経路情報から二輪独立駆動ロボットの行動を実際に決定するために, 左右両輪の回転角速度を決定する。ま

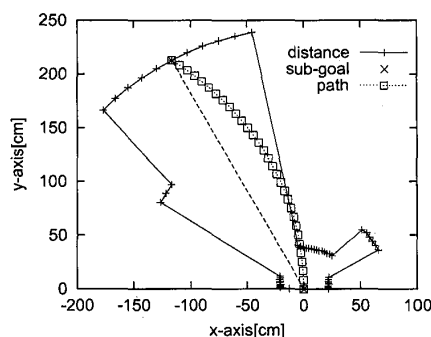


Fig. 10 Distance and sub-goal of Fig. 9(b). It caused the collision on the way to the sub-goal.

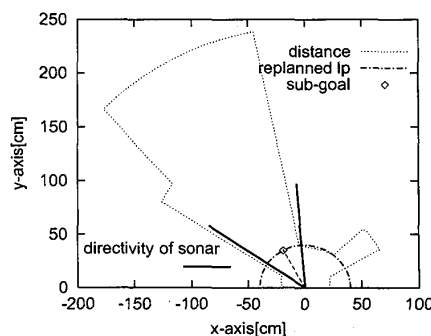


Fig. 11 Replanned sub-goal by considering directivity of sonar.

ず, Sub-Goalが極座標形式で表現されているので, これを図10に示すような直交座標系に変換する. Sub-Goal(l_p, θ_p)に対応する座標を(x_p, y_p)とすると, 以下の関係が成り立つ.

$$\begin{cases} x_p = -l_p \cos \theta_p \\ y_p = l_p \sin \theta_p \end{cases} \quad (4)$$

原点からSub-Goalに対して滑らかにロボットが移動するように, 原点とSub-Goalを通る円弧をロボットの経路とする. ロボットが滑らかに移動するためには, 旋回円の接線の向きが原点において 90° となる必要があり, このことから円弧は一意に決定される. ロボットの中心の旋回半径を ϕ とすると, $\phi = (x_p^2 + y_p^2)/(2x_p)$ のように表すことができるので, ロボットの経路は以下のように表される.

$$(\phi(1 - \cos \phi), |\phi| \sin \phi) \quad (5)$$

ただし, $0 \leq \phi \leq 2|90 - \theta_p|$ である. 想定している二輪独立駆動ロボットがこの軌道を移動するためには, 左右の車輪の移動速度を求める必要がある. そこで, 良く知られている二輪独立駆動ロボットのキネマティクスを利用して車輪の回転角速度を決定する. 図12に示すように, 微小時間 dt の間に車両がP点からQ点に移動したとする. 車輪の半径を r , 車輪間の距離を L , 内輪の旋回半径を R , 右および左の車輪の回転角速度をそれぞれ ω_R, ω_L とおくと, 以下が成り立つ.

$$\begin{cases} R d\phi = r \omega_L dt \\ (R + L) d\phi = r \omega_R dt \end{cases} \quad (6)$$

この式を変形することにより, 左右の車輪の角速度の比が以下のように求まる.

$$R \omega_R = (R + L) \omega_L \quad (7)$$

また, P点の移動速度を v とすると,

$$(R + L/2) d\phi = v dt \quad (8)$$

が得られる. ここで, 式(6), (8)を用いることにより

$$v = r(\omega_R + \omega_L)/2 \quad (9)$$

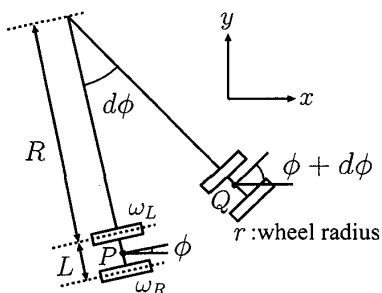


Fig. 12 Kinematics of wheeled mobile robot.

が成り立つ. 式(7), (9)より, 左右の車輪の回転角速度は以下のように表される.

$$\begin{cases} \omega_R = 2(R + L)v/(r(2R + L)) \\ \omega_L = 2Rv/(r(2R + L)) \end{cases} \quad (10)$$

速度 v は先ほど示したアルゴリズムに従って決定され, L はロボットの大きさから決定される. 従って, 式(10)および(4)を利用して

$$\begin{cases} \omega_R = v(1 - L \cos \theta_p/l_p)/r \\ \omega_L = v(1 + L \cos \theta_p/l_p)/r \end{cases} \quad (11)$$

と表すこともできる. すなわち, センサから求まる極座標形式の表現(l_p, θ_p)をそのまま用いることにより, 簡単な計算でロボットの行動を生成できる.

3.6 提案するシステムの限界 超音波センサだけでは解決が困難な問題もある. 図13は, ロボットが壁に向かって斜めに向かって進む状況を表しており,

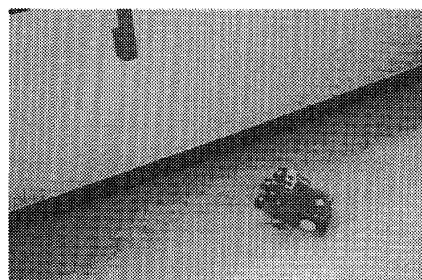


Fig. 13 Experimental environment in which a robot moves toward the wall aslant.

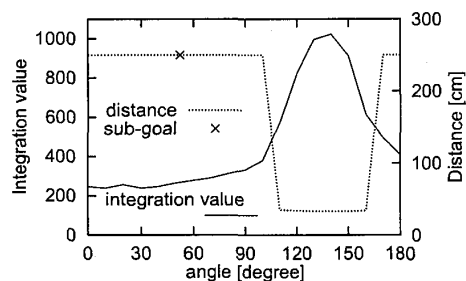


Fig. 14 Distance and integration value obtained in Fig. 13. Calculated sub-goal is also plotted.

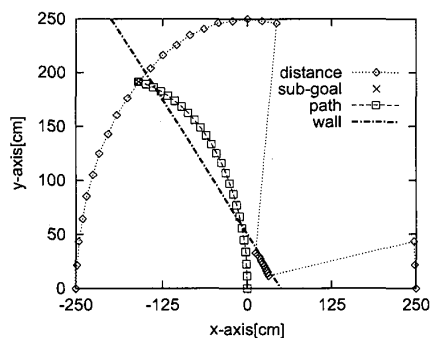


Fig. 15 Planned path and wall. The path causes the collision on the way to the sub-goal.

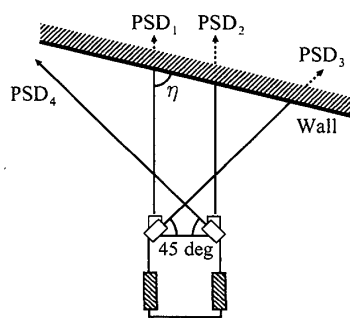


Fig. 16 PSD arrangement and slanted wall recognition.

図 14 はそのとき得られた距離・積分値、およびこれらのデータから求められた Sub-Goal である。この Sub-Goal に対して、提案手法による経路生成を行った結果を図 15 に示す。壁の情報もプロットしたところ、前方 50cm 程度のところに存在する壁に向かって衝突するような経路を生成した。これは、超音波センサと壁の角度が大きくなるにつれて反射波が微弱になることから、壁を認識できないためである。このように、超音波センサのみによる解決が困難な場合を想定し、ロボット前方に 4 つの PSD (Position Sensitive Detector: 半導体位置検出素子)⁽¹⁹⁾を図 16 のように設置し、壁に対して斜めに向かっていく状況を認識する。図 7 の実験結果より、壁とロボットとの角度 η が $\eta < 55^\circ$ または $\eta > 125^\circ$ の場合、超音波センサによるロボット正面の壁の認識はできない。しかし、 $\eta < 35^\circ$ および $\eta > 145^\circ$ の場合、提案手法によってロボット側方に壁があることが認識できるため、この場合は Sub-Goal に補正を加える必要はない。さらに、

- センシングシステムを小型化する必要から PSD₁ と PSD₂ の距離をあまり大きくできない。
- PSD の分解能がおよそ 1cm であるため、1cm 程度の計測誤差を避けることができない。

ことを考慮して、以下の場合に Sub-Goal に対する補正を加える。

case-I. PSD₁ によって得られた距離値が x 以下であり、かつ PSD₁ と PSD₃ により $30^\circ < \eta < 60^\circ$ であると認識された場合。

case-II. PSD₂ によって得られた距離値が x 以下であり、かつ PSD₂ と PSD₄ により $120^\circ < \eta < 150^\circ$ であると認識された場合。

なお、PSD₁ の距離値を ρ_1 、 $\eta=30^\circ$ 、 60° のときの PSD₃ の距離値をそれぞれ ρ_3 、 ρ'_3 とすると、

$$\begin{cases} \rho_3 = (\sin 30^\circ / \sin 105^\circ) \rho_1 \\ \rho'_3 = (\sin 60^\circ / \sin 75^\circ) \rho_1 \end{cases} \quad (12)$$

が成り立つので、case-I は $(\sin 30^\circ / \sin 105^\circ) \rho_1 < \rho_3 < (\sin 60^\circ / \sin 75^\circ) \rho_1$ と表せる。case-II についても同様である。4.2 節で述べるとおり、今回の実験ではロボットの速度が 8~20cm/s であることを考慮し、 $x = 40\text{cm}$ と設定した。また、経路の補正は以下のように行う。なお、 (l'_p, θ'_p) は補正後の Sub-Goal を表す。

case-I. $(l'_p, \theta'_p) = (\text{PSD}_1 \text{ の距離値}, 45^\circ)$

case-II. $(l'_p, \theta'_p) = (\text{PSD}_2 \text{ の距離値}, 135^\circ)$

さらに、case-I および case-II の条件が同時に満たされた場合、前方に移動できる空間がないと認識する。この場合、ロボットはその場に静止し、積分型超音波センサシステムによる 360° のスキャンを行い開空間を探索する。その後、3.3 節で述べた算出方法に基づき θ_p を求め、その場で θ_p 方向に回転する。つまり、通常は前方 180° の開空間探索のみを行うが、行き止まりのような環境では、デッドロックに陥る事を防ぐために 360° のスキャンを行う。このように、必要に応じてセンシング範囲の動的な変更が容易であることは、提案するシステムの大きな利点である。

4. 実験

4.1 より複雑な環境における経路生成例 図 9 の例では、距離値を使っても積分値と同様な行動決定を行うことができる。これは、距離情報と積分値の示す情報が矛盾しないからであり、例えば、距離に反比例するような単純なポテンシャル法による開空間の認識も可能である。しかし、環境によっては距離値と積分値の情報が矛盾する場合がある。この矛盾は、距離値が閾値処理した後の信号であるのに対して、積分値は閾値処理を行っていないことが主な原因である。たとえば図 7(b) の 50° 近辺では距離値が不連続に変化しているが、積分値は障害物までの距離や角度の情報を内包しており、 $50^\circ \sim 90^\circ$ で連続的に変化する。距離値と積分値が矛盾を含む例として図 17 に実験環境、図 18 に得られたデータを示す。ただし、このような環境では超音波の乱反射によって引き起こされるマルチパスが問題となる。一般に、マルチパスと斜めの壁に対する計測能力はトレードオフの関係にあり、これらの要素は送出する超音波のエネルギーの大きさに依存する。しかし、得られた距離値においてマルチパスの影響を判断することは大変困難である。そこで、本論文では送出する超音波のエネルギーを小さく設定した。

$30^\circ \sim 60^\circ$ 、 $120^\circ \sim 150^\circ$ 付近の距離値を見ると、大きな距離値が連続して得られており、距離値からはこれらの空間が開空間であると判別できる。しかし、距離値だけではどちらの領域がより安全か判断すること

はできない。一方、積分値から求められた開空間の方向 θ_p は 42° であり、より安全な経路が選択された。図 19 に超音波センサによって得られた距離値、および提案手法によって得られた Sub-Goal・経路を示す。すなわち、提案手法によって、距離値のみでは得ることのできない適切な経路が生成されることが明らかとなった。これは、斜めの壁に対する測定の脆弱さなどに起因して信頼できる距離値を得ることができない環境下において、提案手法が有効に働くことを示している。

4.2 障害物回避 提案手法の有効性を確認するため、二輪独立駆動ロボットによる実験を行った。実験結果を図 20(a) に示す。ロボットは、原点を初期位置とし、局所的な情報から推定される最も大きな開空間

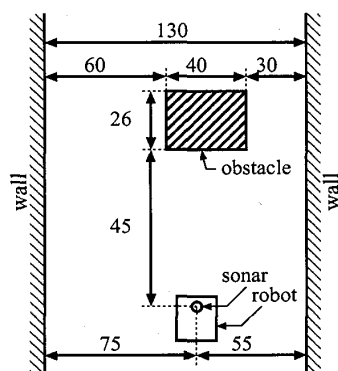


Fig. 17 Experimental environment (unit=cm).

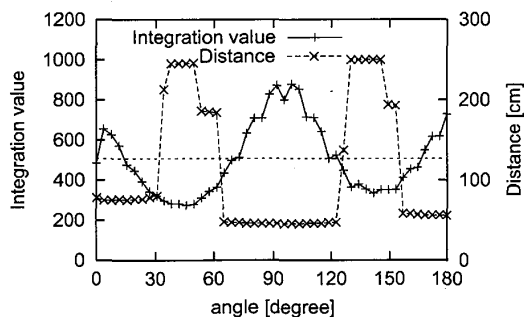


Fig. 18 Obtained data in Fig. 17. There is inconsistency between distance and integration value.

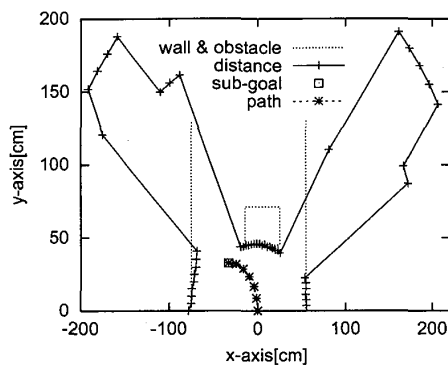
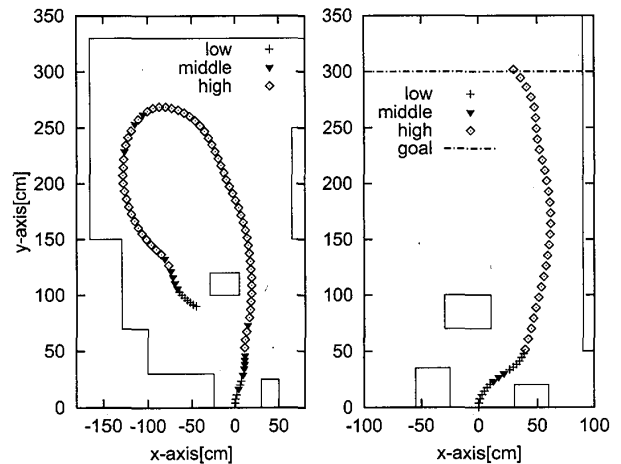


Fig. 19 Appropriate path is planned in spite of the existence of inconsistency.



(a) Trajectory of robot with avoiding obstacles. (b) Trajectory of robot from start to goal (300cm).

Fig. 20 Experimental results using mobile robot.

に向かっていくように移動する。実験に用いたロボットのパラメータは、 $L = 107\text{mm}$, $r = 28\text{mm}$ である。また、 $T_{\text{sonar}} = 20\text{ms}$, $nT_{\text{sonar}} = 960\text{ms}$ とし、 180° スキャンする間に $n = 48$ 回の測定を行った。ロボットの速度は、表 1 のとおり $8 \sim 20\text{cm/s}$ とし、表 2 に従って決定する。なお、計測中は静止せず、移動と計測を同時に行った。このとき、計測中の移動距離はおよそ $8 \sim 20\text{cm}$ となるが、この値が周囲の環境に応じて適切に制御されるため、行動決定に差し障るような影響は計測に現れなかった。なお、図 20(a) に示す軌跡は、ロボットの移動を 480ms ごとにプロットしたものである。この結果から、ロボットが、速度を動的に制御しながら障害物を回避できることを確認した。

4.3 速度制御の評価 速度制御の妥当性を検討するため、ロボットの移動時間の評価を行った。実験条件は前節と同じとした。図 20(b) に示すとおり、原点を初期位置とするロボットが、 y 方向に 300cm 移動するまでの時間を計測した。比較のため、速度を Low, Middle, High と一定にしての実験も行った。実験は各手法について 10 回ずつ行い、衝突せずにゴールに到達した回数の割合、さらにゴールに到達するまでの平均時間を評価した。なお、平均時間はゴールに到達した試行の平均を取っており、失敗した試行については到達時間を求める計算から除外した。結果を表 1 にまとめる。まず、ロボットの速度を 'High' に固定した場合、ゴールに到達する割合が極端に小さくなる。速度が小さくなるに従って、ゴールへの到達確率は上昇するが、速度が 'Low' のときにゴールに到達するまでの時間は、'High' のときの約 2.5 倍となっている。つまり、速度を固定したときの 'ゴールへ到達する割合' と 'ゴールに到達するまでの時間' はトレードオフの関係

Table 1 Travel time and achievement ratio.

	variable speed (proposed method)	fixed speed		
		low	middle	high
achievement ratio	100%	100%	80%	30%
travel time [s]	20.48	41.86	28.87	16.48
speed [cm/s]	8/12/20	8	12	20

Table 2 A rule of how to determine speed.

l_p [cm]	$l_p \leq 30$	$30 < l_p \leq 45$	$l_p > 45$
speed [cm/s]	8	12	20

にある。

これに対し、提案手法は動的に速度を切り替えることにより、高いゴールへの到達確率を保ちながらゴールに到達するまでの時間を短縮することが可能である。図 20(b) に示すとおり、ロボットが障害物に囲まれている y 座標が 0~80cm の地点では、ロボットの速度は小さくなる。一方、 y 座標が 100~300cm の地点では、大きな開空間が存在するためにロボットの速度は大きくなる。これは、提案手法による速度制御の有効性を示すものである。

5. ま と め

本論文では、測距センサとして一般に用いられている超音波センサの新たな測定方法として、反射波の積分値を利用する積分型超音波センサを提案した。積分型超音波センサは、回転機構と組み合わせることによりロボット周囲の開空間を検出し、その局所的な情報から Sub-Goal を生成することによりロボットを誘導する方法である。一般的な超音波センサは、障害物が複数存在する環境・行き止まりのような環境ではマルチパスの影響などで信頼できる距離値を得ることが困難であるが、提案手法はこのような状況における高い開空間探索能力を持つことから、比較的安価で入手しやすい超音波センサの利用価値を高めるものとして非常に有用である。さらに、二輪独立駆動ロボットを想定することにより、その左右輪の回転角速度を、Sub-Goal の情報から簡単な計算で求められることを示した。実機による実験の結果、ロボットが速度を制御しながら障害物を回避できることを示し、提案手法の実環境における有効性を示した。

文 献

- (1) Tanaka, K., Matsunaga, K. and Hori, S., Electroencephalogram-based Control of a Mobile Robot, *IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol.124, No.3 (2004), pp.890-896.
- (2) Tanaka, K., Matsunaga, K. and Wnag, H.O., Electroencephalogram-Based Control of an Electric Wheelchair, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.21, No.4 (2005), pp.762-766.
- (3) Negishi, Y., Miura, J. and Shirai, Y., Map Generation of a Mobile Robot by Integrating Omnidirectional Stereo and

Laser Range Finder, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.21, No.6 (2003), pp.110-116.

- (4) Wehn, H.W. and Bélanger, P.R., Ultrasound-based robot position estimation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.13, No.5 (1997), pp.682-692.
- (5) Mataric, M.J., Integration of representation into goal-driven behavior-based robots, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.8, No.3 (1992), pp.304-312.
- (6) Borenstein, J. and Koren, Y., Error eliminating rapid ultrasonic firing for mobile robot obstacle avoidance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.11, No.1 (1995), pp.132-138.
- (7) Leonard, J.J. and Lim, J.H., Mobile robot relocation from Echolocation Constraints, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.9 (2000), pp.1035-1041.
- (8) 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*, Vol.11, No.6 (1993), pp.856-867.
- (9) Borenstein, J. and Koren, Y., Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.19, No.5 (1989), pp.1179-1187.
- (10) Borenstein, J., The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.7, No.3 (1991), pp.278-288.
- (11) Budenske, J. and Gini, M., Why is it so difficult for a robot to pass through a doorway using ultrasonic sensors?, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1994), pp.3124-3129.
- (12) Stoeter, S.A., Mauff, F.L. and Papanikolopoulos M., Real-time door detection in cluttered environments, *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*, (2000), pp.187-192.
- (13) Feder, H.J.S., Leonard, J.J. and Smith, C.M., Adaptive mobile robot navigation and mapping, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.18, No.7 (1999), pp.650-668.
- (14) Everett, H.R., *Sensors for mobile robots: theory and application*, (1995), A.K. Peters, Ltd.
- (15) Yata, T., Ohya, A. and Yuta, S., A Fast and Accurate Reflecting Points Measurable Sonar-ring System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.17, No.8 (1999), pp.121-130.
- (16) Emaru, T., Tanaka, K. and Tsuchiya, T., Speed control of a sonar-based mobile robot by using integration type ultrasonic wave sensor, *Proc. 4th International Conference on Advanced Mechatronics*, (2004), pp.7-12.
- (17) Yuta, S., Ultrasonic Sensing for Robots - Current Limitation and Future Expectation-, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.20, No.4 (2002), pp.389-392.
- (18) Webb, P. and Wykes, C., High-resolution beam forming for ultrasonic arrays, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.12, No.1 (1996), pp.138-146.
- (19) Park, W.S. and Cho, H.S., Measurement of fine 6-degrees-of-freedom displacement of rigid bodies through splitting a laser beam: experimental investigation, *SPIE Journal of Optical Engineering*, Vol.41, No.4 (2002), pp.860-871.