屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ

丹 沢 勉* 清 弘 智 昭* 森 英 雄*

Ultrasonic Range Finder with Cross-Correlation for Outdoor Mobile Mobots

Tsutomu Tanzawa*, Noriaki Kiyohiro* and Hideo Mori*

Ultrasonic range finders have already been used successfully in indoor mobile robots. However, in outdoor environment, the sensor should be robust against noise from vehicle engines, construction machines and other sound sources. The aim of this paper is to describe a simple, low-cost, and robust ultrasonic range finder which is based on the cross-correlation technique for accurate ranging of multiple objects in the field of view of the range finder. This sonar transmits wave coded by the pattern that consist of some narrow pulses, then calculates the cross-correlation between the transmitted signal form and the received signal. Furthermore, several this range finder can work simultaneously. The experimental results show this sonar is much more robust against noise than the conventional sonar, and the sensor can find objects fast and precisely for measuring with another sonar simultaneously.

Key Words: Sonar, Noisy Environment, Cross-Correlation, Mutual Interference

1. は じ め に

超音波センサは、他のセンサと比べて、小型、軽量、構造が単純、コンピュータとの接続が容易であるなどの特長を持つことから、多くの自律移動ロボットで環境認識や障害物の検出に用いられている。しかしながら、これらの自律移動ロボットのほとんどは、超音波センサにとって都合のよい屋内のような雑音の少ない環境下で用いられている [1]~[5]。

現在、我々は、視覚障害者のための歩行ガイドロボットの開発を行っている [6] [7]。このロボットは、視覚障害者を目的地まで障害物を回避しながら誘導するものである。しかしながら、このようなガイドロボットは主に屋外で用いられるため従来の超音波センサを用いてシステムを構成しようとするといくつかの問題が生じる。

一つは、環境雑音である。歩行ガイドロボットが主に走行する屋外においては、自動2輪車や工事現場での土木作業機械などの超音波センサにとっての雑音源となるものが多数存在している。また、これらの雑音のうち音圧レベルの高いものはインパルス状の雑音が主であり、振幅の変化しない雑音のレベルは比較的小さい。このような雑音は、パルス波を送波しその飛翔時間から距離を測定する通常の超音波センサにとっては最も有害である。このような雑音対策として、大出力の送信波を出力し S/N 比を高める方法があるが、高音圧レベルの雑音のある

環境下では対応することは困難である [5]。また、周波数変調した送信信号を出力し受信信号の周波数解析をする方法では、複雑な計算を行うために各センサごとに高性能なプロセッサが必要になり高価なシステムとなるなどの問題点が生じる [6]。

また、一般的に自律移動ロボットは複数の超音波センサを装備している。この場合、これらの超音波センサを同時に動作させると、互いに他のセンサの信号波を受信してしまい、自分自身の送波した音波を識別することが不可能となるため、障害物の方位を知ることができない。この対策として、ほとんどのロボットは、超音波センサを順次動作させるスキャニング法を用いている。この方法では、多くの超音波センサを持つ場合、すべてのセンサをスキャンするのにかなりの時間を要する。このため、ある程度の速さで移動するロボットでは、小さな物体などはスキャニング周期の間に通過してしまい検出ができない場合が生じる。また、センサを同時に動作させる方法として各センサの送信信号のキャリアの周波数を変え干渉を避ける方法もある。しかしながら、このためには広帯域のトランスデューサか、多種類の共振周波数のトランスデューサを用意しなければならないことなどから高コストになるなどの問題がある。

本論文では、送信信号として複数のパルスのある条件で配置したパターン信号で変調したものを送波し、その受信波の復調波と送信信号との間で相互相関演算を行うことにより、屋外環境下でも雑音に影響されない測距が可能となり、また、各センサごとに異なる送信パターンを用いることにより、従来できなかった複数の超音波センサの同時測定が可能なシステムについて提案している。さらに、送信信号と受信信号を2値化するこ

原稿受付 1995年12月22日

*山梨大学工学部

*Yamanashi University

Fig. 1 Experimental set up for observing the noise waveform

Fig. 2 Noise waveform from the working motorcycle engine

とにより相互相関の計算時間を大幅に縮小したため、8組の超音波センサを一つのコントローラで、リアルタイムで計算することが可能となった。ここでは、この超音波センサの原理、送信するパターン信号、システム構成について述べ、雑音に対する有効性を実験により示す。また、複数の超音波センサの同時測定が可能であることも示し、その有効性を示す。

2. 屋外における雑音

超音波センサに影響を与える屋外の雑音の特徴を調べるため、雑音の測定を行った。測定装置のシステム構成図を Fig. 1 に示す。測定装置は、40[kHz]の超音波レシーバ、増幅器、復調器、8[bit]のA/Dコンバータから構成されており、A/Dコンバータは100マイクロ秒ごとにサンプリングを行う。Fig. 2は、エンジンのかかっているオートバイの横1[m]の地点で測定したときの雑音の波形である。図から、屋外の雑音のうち音圧レベルの高いものはインパルス状の雑音が主であり、時間変化に対してはほぼ一定の振幅を持つ雑音のレベルは比較的小さいことが分かる。このような雑音は、パルス波を送波しその飛翔時間から距離を測定する通常の超音波センサにとっては最も有害である。

3. 雑音に影響されにくい超音波センサの原理

自律移動ロボットに搭載する超音波センサは小型・軽量・安価・リアルタイム性等が要求される。本超音波センサでは、市販のトランスデューサが使用でき、構造・信号処理が簡単な振幅変調を用いる。ただし、送信信号として、複数の幅の狭い一定幅のパルスを以下で示す条件により配置したパターン信号を用いる。この送信信号でキャリア信号を振幅変調してトランスデューサから連続して送信する。また、別のトランスデューサで受信した反射波を増幅、復調し、閾値 R_{thr} により2値化する。この受信信号と送信信号との間で相互相関を計算することにより、雑音と自分自身の信号との区別を行う。このとき、閾値 R_{thr} の大きさは、受信信号に含まれる一定の振幅を持つ雑音より大きく、反射信号より十分小さい値に設定する必要がある、ここでは実験的に決定している。

(a) The transmitting signal before modulation

(b) The demodulated received signal

(c) The cross-correlation operation

Fig. 3 Waveform examples of the transmitting signal, the received signal and calculated cross-correlation

送信信号と受信信号はサンプル化して演算を行うため、相互相関は離散的に計算され次式により求められる。

$$C(l) = \frac{\sum_{k=0}^{N_d-1} T(k) \cdot R(k+l)}{\sum_{k=0}^{N_d-1} T(k)} \quad (1)$$

ここで、 $T(k)$ は変調前の送信信号、 $R(k)$ は受信信号、 N_d は1周期のサンプリングデータ数である。Fig. 3(a)に送信パターンの一例を示す。この送信パターンは複数の幅の狭いパルスにより構成されている。送信信号 $T(k)$ と受信信号 $R(k)$ が0または1の2値であるため、論理積と加算のみで相関の計算が可能となる。

ここで、送信パターン信号として1サイクル中に周期的にパルスを配置した信号を用いると、一つの対象物に対して、相互相関値のピークが複数カ所表れてしまい、一意に対象物までの距離を決定できない。そこで、1サイクル中の相関の間に唯一相関値のピークを持つような非周期的なパターン信号を用いる必要がある。よって、遅延時間0の反射波は送信信号と同一であることから送信信号自身の相互相関値を計算した際、遅延時

間 0 のときのみ大きな値を持ち、その他のときには、小さな値を持たせる必要がある。このような条件から、送信信号のパターンは、次式を満たさなければならない。

$$\text{Max}\{C(l)\} \ll 1.0 \quad (l \neq 0) \quad (2)$$

また、相互相関の値 $C(l)$ が閾値 C_{thr} より大きいとき、対象物までの距離 $Dist$ は、次式で与えられる。

$$Dist = \frac{V_s}{2 \cdot f_s} \cdot l \quad (3)$$

ただし、 f_s は受信信号のサンプリング周波数、 V_s は、空気中を音が伝搬する速度である。

4. 送信パターン

4.1 送信パターンの形状

相互相関を利用して雑音の影響を少なくするのに用いられる信号の代表例として M 系列信号が挙げられる。この M 系列を送信信号として用いた場合、超音波送信器からの直接波がなく、超音波センサの測定可能領域内に物体が一つしか存在しない場合には雑音に対して十分強い測定が可能である。しかし、実際には、送信トランスデューサからの直接波が受信信号に含まれ、センサの測定可能範囲内に複数の物体が存在することが十分考えられる。このような場合には、受信信号は、Fig. 4 に示すように遅延時間の異なる送信パターン信号が重なり合った信号となる。このような受信信号を 2 値化すると、1 周期中のほとんどが 1 の値を持つようになる。その結果、雑音が存在しない環境下で測定した受信信号と送信信号の相互相関演算を行っても、対象物に対応する遅延時間以外のときにも相互相関値は大きな値を持ち、正確に対象物までの測定結果を出力することはできなくなる。このことは、近接した複数の超音波センサを同時に動作させた場合にも起こり得ることである。ここでは、簡単化するためキャリア信号の干渉は無視している。

そのため、超音波センサで用いる送信信号は、遅延時間が異なる送信パターン信号が複数重なり合った場合でも送信パターン信号の特徴を失わないように、特徴となる部分ができるだけ重ならない信号を用いる必要がある。そこで、送信信号として、Fig. 3(a) に示すような複数の幅の狭いパルスを用いて構成する。その際、式 (2) を示すようにパルスを配置する必要がある。

しかし、実際には、パルス幅の狭くなると、超音波トランスデューサの効率が落ちるため、適当なパルス幅を用いる必要がある。Fig. 5 に本超音波センサシステムで使用している超音波トランスデューサの周波数特性を示す。また、この周波数特性から超音波トランスデューサを RCL の直列回路と仮定した際のパルス幅と最大強度の関係を Fig. 6 に示す。ただし、図中では、パルス幅 $W = 600[\mu\text{s}]$ の値を 1 とし相対値で示している。この図から、送信信号のパルス幅は大きいほうがトランスデューサからの出力音が大きくなり、ある程度の大きさで飽和しているのが分かる。

また、送信信号のパルスの幅は測定範囲内に複数の物体が存在するときの分解能に大きく関係している。Fig. 7 に示すように、近接した二つの物体を測定するとき、幅の広いパルスを出

Fig. 4 Waveforms using M sequence signal as the transmitting signal

Fig. 5 Frequency characteristics of the ultrasonic transducer

Fig. 6 Sound intensity varying the pulse width

Fig. 7 The range resolution and the pulse width

力したときには、二つの物体からの反射信号が重なり合い、これらを二つの物体として認識できなくなる。これに対して、幅の狭いパルスで測定した場合には、二つの物体として認識することが可能である。このことから、パルス幅が狭いほど分解能がよいことが分かる。実際には、トランスデューサの変換効率と分解能との間で適当な点を決定する必要がある。ここでは、変換効率がほぼ飽和している $400[\mu\text{s}]$ をパルス幅として送信信号を構成する。このとき、分解能は、約 $0.17[\text{m}]$ である。

4.2 パルス数と雑音に対する強度の検討

ここでは、送信信号の1周期を $51.2[\text{ms}]$ 、パルス幅を $400[\mu\text{s}]$ とした場合を考える。

簡単にするために、送信信号の1周期をパルス幅 W の2倍の幅で64区画に分割し、この区割りごとにパルスを配置するときを考える。ここで、区割りをパルス幅の2倍としたのは、トランスデューサの周波数特性によりパルスが時間方向に広がるのを考慮したためである。また、雑音は、送信信号を構成するパルス幅とほぼ同じ幅とし、前述した区割りに配置されるものとする。このとき、送信信号の自己相関は、次式に示すように区割り幅ごとに演算するものとする。

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{63} T_S(i) \cdot T_S(i+j) = P & (j=0) \\ \sum_{i=0}^{63} T_S(i) \cdot T_S(i+j) \leq N & (j \neq 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 P は送信信号の1周期を構成するパルス数である。つまり、 P は相互相関値の最大値、 N は相互相関値の閾値の下限に対応して値である。

ここでは、 $P-N$ を雑音に対する強度とする。この $P-N$ は、誤った測定結果を出力するのに最低限必要な1周期の受信信号中に含まれなければならない雑音の数を示している。したがって、 $P-N$ の値ができるだけ大きいパルス数 P を用いればよい。

今、Fig. 8 に示す三つのパルスで構成された送信信号を考えよう。送信信号を構成する q 番目と r 番目のパルス間の距離を $D_{qr}(q, r = 1, 2, 3 \text{ } q! = r)$ と表す。ただし、 D_{qr} は1周期未満の距離とし、送信信号を環状にして考えている。この送信信号では、 D_{qr} は6個存在する。送信信号 $T(i)$ が $N = 1$ となる

Fig. 8 The Transmitting pattern signal

ためには、この6個すべての D_{qr} が異なる値を持つ必要がある。 P 個のパルスで送信信号を構成した場合には、任意の2組のパルスの組み合わせ数は、 ${}_PC_2$ となり、その二つのパルスによって構成されるパルス間数 K_p は、

$$K_p = {}_PC_2 \times 2 = P \cdot (P-1) \quad (5)$$

である。

ここで、送信信号の1周期を64分割しその区画にパルスを配置することから、パルス間の距離 D_{qr} は最大でも64種類までしか取ることはできない。したがって D_{qr} が64個以上であれば $N > 1$ となる。 $N = 2$ の場合は、同一のパルス間距離を2回まで取り得ることから、 D_{qr} は128までである。このことから、 D_{qr} の数と N との関係は次式で与えられる。

$$\frac{K_p}{64} = \frac{P \cdot (P-1)}{64} \leq N \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

ただし、実際は、送信信号のパルスの配置により、上式で示した N より大きくなることがある。ここでは、おおまかな傾向が分かればよいので、これに関しては無視する。

また、 $j = 0$ 以外の送信信号の自己相関値の最大値が N である送信信号 $T(i)$ が、 n 個遅延時間がずれて重なり合った場合、受信信号は、次式で表される。ここでは、簡単にするため、キャリア信号については考えない。

$$R_S(i) = \sum_{n=1} T_S(i - K_n) \quad (7)$$

ただし、 k_n は物体までの距離に応じて変化する値である。よって、送信信号と受信信号との相互相関の式は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} C_S(j) &= \sum_{i=0}^{63} T_S(i) \cdot R_S(i+j) \\ &= \sum_n \left\{ \sum_{i=0}^{63} T_S(i) \cdot T_S(i - k_n + j) \right\} \\ &\leq \sum_n N = N \cdot n \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、送信信号が n 個のパルスから構成された場合の $j = kn(n = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 最大の値を Nn とする、このことか

Fig. 9 Minimum threshold level N varying the number of pulses

Fig. 10 Robustness for the noise varying the number of pulses

ら、超音波センサの測定可能範囲内に複数の物体が存在した場合や送信器からの直接波が存在した場合には、送信信号を構成するパルス数 P と Nn の関係は式 (6), (8) より Fig. 9 となり、雑音に対する強度 $P-Nn$ は Fig. 10 になる。

実際の環境下において、超音波センサの測定可能範囲内には多くても 1~3 個の物体しか存在しない場合がほとんどである。このことから、三つの物体からの反射波に送信器からの直接波を加えた場合を考えると、送信信号を構成するパルス数は、4 から 8 程度が最適であると考えられる。また、このときの $P-N$ の値は 3~4 であるが、屋外の雑音の測定では、1 周期中に含まれるインパルス状の雑音の数は、1 から 2 であり、十分対応ができると考えられる。

4.3 送信信号の作成方法

上述した送信パターン信号の条件を満たすパルスの配置の一例を以下に示す

- 送信信号の 1 周期の初めにパルス一つ配置する。
- そのパルスと送信信号の 1 周期の終わりとの中点より後方に次のパルスを配置する。
- 必要なパルス数になるまで ii) を繰り返す。

4.4 非干渉性

通常のインパルス型の超音波センサでは、複数のセンサを同時に動作させると、あるセンサの反射信号と他のセンサからの反射信号とが区別できず、誤動作を起こす。そこで、相互相関を用いた超音波センサシステムを用い、各センサごとに異なるパターンを送信することで、他のセンサからの反射波中から自分の反射信号を検出でき、同時測定が可能となる。

各センサの送信パターンは、他のセンサのパターンとできるだけ区別しやすいことが望まれる。相互相関を計算する際、受信パターンが自身で出力したパターンの場合は大きな値を取り、

Fig. 11 Sonar System with 8 set Sensors

Fig. 12 Block diagram of the sonar system

他のセンサが出力したパターンの場合にはできるだけ小さい値しかとらないことが必要となる。そこで、いかなる l に対しても近接する超音波センサの送信信号 $Tr_1(k)$ と $Tr_2(k)$ の相互相関値は十分小さくしなければならない。そのため、各超音波センサの送信パターンは 1 サイクル中のすべての相関値に対して次式を満たす必要がある。

$$\frac{\sum_{k=0}^{N_d-1} Tr_1(k) \cdot Tr_2(k+l)}{\sum_{k=0}^{N_d-1} Tr_1(k)} \ll 1 \quad (9)$$

ただし、 Tr_1 は自身の送信信号、 Tr_2 は他の超音波センサの送信信号である。

5. システム構成

今回制作した超音波センサシステム全体の写真を Fig. 11 に示す。また、システムの構成図を Fig. 12 に示す。

このシステムは、8 組の超音波センサとそれらを統括する一つのコントローラから構成されている。コントローラは 486DLC-40[MHz] の PC Board を用いている。このコントローラでは、8 組の送信信号の生成、相互相関の計算、物体までの距離の計算、ホストコンピュータとの通信を同時に行う。

各センサ回路では、40[kHz] のキャリア信号をコントローラで生成された送信信号により ON-OFF 変調し、48 Vp-p に増幅して超音波トランスデューサから出力する。また、超音波受信器により受信された信号は、増幅、復調された後、コンパレータにより 2 値化され、100[μs] ごとにサンプリングされる。その際の検波の時定数は 50[μs] としている。

また、ここで用いた超音波センサの指向特性および周波数特性を Fig. 13 に示す。

Fig. 13 Directional characteristics of the ultrasonic transducer

6. ロボットへの実装および実験結果

次に、上述の超音波センサの有効性を示す二つの実験結果を示す。

第1の実験は、移動ロボットに上述の超音波センサを設置し、雑音のある環境下において壁沿い走行を行った。ここで用いた移動ロボットの外観を Fig. 14 に示す。このロボットは、スズキ（株）製の電動椅子をベースとして用いている。また、二つのキャストと左右の駆動輪を用いており、左右の駆動輪の回転差で旋回を行う。Fig. 15 にロボットのシステム構成図を示す。超音波センサシステムと車体制御システムから構成されており、共有メモリを用いて互いに通信を行う。

超音波センサは、上段（地上高 63[cm]）に前方、左右斜め前方、左右側方の 5 方向、下段（地上高 15[cm]）に前方、左右側方の 3 方向、計 8 個設置している。超音波センサシステムは、送信パターンを四つのパルスで構成し、そのパルス幅 W は、400[μs] としている。また、受信信号と相互相関の閾値は、 $Rthr = 0.25$, $Cthr = 0.75$ としている。

壁沿い走行では、上段の左側方の超音波センサを用い、左側の壁との距離を一定（1[m]）となるように走行制御を行った。その際用いた制御方法を以下に示す。

$$\begin{cases} \text{LeftMotor} \\ \quad = \text{Velocity} - K_1 \cdot \{(\text{ref_dist} - \text{dist}) - K_2 \cdot \text{Dir}\} \\ \text{RightMotor} \\ \quad = \text{Velocity} + K_1 \cdot \{(\text{ref_dist} - \text{dist}) - K_2 \cdot \text{Dir}\} \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 LeftMotor , RightMotor は左右のモータへの指令、 Velocity は車体の速度、 ref_dist は、壁までの距離の目標値、 dist は、超音波センサにより測定された壁までの距離、 Dir はロボットの方向、 K_1, K_2 は定数である。この制御間隔は 50[ms] ごとに行っている。

また、雑音源として、同移動ロボット上に超音波センサと同じ 40[kHz] の超音波トランスデューサを左側方に向けて設置し、屋外における雑音と同様に幅の狭いパルス（400[μs]）をランダムに出力する。また、出力する雑音の強度は、超音波センサの受信信号中において壁からの反射波の強度と同程度となるようにした。

実験結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16(a), (b) は、一般的な単一パルスの超音波センサと相互相関の超音波センサを用いて、雑音のない環境下で壁沿い走行を行った結果である。両方

Fig. 14 Sonar on the mobile robot

Fig. 15 Block diagram of the robot

の超音波センサとも、壁までの距離を正確に測定できており、ロボットは壁との距離が一定となるよう走行している。走行しはじめにロボットの移動軌跡が蛇行するのは、キャストの初期角度によるものである。

また、Fig. 16(c), (d) は、単一パルスの超音波センサと相互相関の超音波センサを用い、雑音のある環境下で実験を行ったときの結果である。単一パルスを用いた場合には、雑音に大きく影響され壁までの距離を正確に測定できていないことが分かる。それに対し、相互相関を用いた超音波センサでは、雑音の影響を受けず壁までの距離を正確に測定できており、壁との距離がほぼ一定で走行している。この実験から、相互相関を用いた超音波センサは、屋外の雑音に対して非常に有効であることが示された。

第2の実験は、複数の超音波センサの同時測定の有効性を示すため、単一パルスの超音波センサと相互相関を用いた超音波センサの2種類の超音波センサを用いて物体検出の実験を行った。

Fig. 16 Experimental results for the robot moving along the wall in the noisy environment

Fig. 17 Experimental set up for detecting the object

実験方法を、Fig. 17 に示す。前の実験で用いたロボットを 1.5[m/S] で直進走行させ、1.5[m] 離れた壁と 1[m] 離れた地点に設置した直径 5[cm] の円柱の検出を試みた。このロボットには、障害物検出用に地上高 55[cm] に前方、左右斜め前方、左右側方の五つを、段差検出用に地上高 12[cm] に前方、左右側方の三つをロボットに装着している。

Fig. 18 にその実験結果を示す。Fig. 18(a) は単一パルスの超音波センサを用い、8 個の超音波センサを同時に動作させた場合の測定結果である。ただし、互いに干渉させないため、1

番手前の物体のみを測定した。この手法では、円柱の後方の壁の検出ができず、ロボットの周囲の環境認知が不十分であることが分かる。Fig. 18(b) は、単一パルスの超音波センサを用い、複数の物体検出を行った結果である。このとき、同時に 8 個の超音波センサを動作させると互いに干渉してしまうため、8 個の超音波センサをスキャンして測定を行った。測定頻度が低くなり、壁は検出できているが、円柱からの反射信号は、2 点でしか測定できておらず、物体からの反射信号と雑音との区別が非常に難しいことが分かる。それに対し Fig. 18(c) では、相互相関を用いた超音波センサは、複数超音波センサの同時測定と測定範囲内の複数の物体の検出が可能であるため、壁と円柱の検出が同時に行われ、また、単位時間当たりの測定回数を多くすることができるので、確実に物体検出が可能となる。これにより確実にロボットの周辺環境認知が可能となることが示された。

7. ま と め

雑音源の多い屋外環境を移動する移動ロボットのための雑音に強い、小型で安価な超音波センサを提案した。送信信号とし

Fig. 18 Experimental results of detecting the object

て複数の一定幅のパルスはある条件を満たすように配置した信号を用い、トランスデューサの共振周波数で振幅変調した信号

を出力する。受信波を増幅復調し送信信号と相互相関演算を行い距離を判別する。また、各超音波センサごとにパターン信号と変えることにより、従来の超音波センサではできなかった近接した複数の超音波センサの同時動作が可能となることを示した。このようなコーディングを行うことにより、比較的簡単なシステムで雑音に強く、かつ複数動作が可能な超音波センサが実現できた。

雑音中における測定実験の結果から、従来の超音波センサと比べ雑音に対して非常に強いことが明らかとなった。また、従来のセンサではできない、複数物体の検出、および近接した複数の超音波センサの同時測定も、各センサごとに異なるパターン信号を出力することが可能であり、その優位性を実験により示した。

参考文献

- [1] R. Kuc and B. Barshan: "Docking Mobile Robots Using a Bat-like Sonar," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1439-1444, 1994.
- [2] Y. Nagashima and S. Yuta: "Ultrasonic sensing for a mobile robot to recognize an environment," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.805-812, 1992.
- [3] D. Langer and C. Thorpe: "Sonar Based Outdoor Vehicle Navigation and Collision Avoidance," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1445-1450, 1992.
- [4] W.D. Rencken and Siemens AG: "Autonomous Sonar Navigation in Indoor, Unknown and Unstructured Environment," Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.431-438, 1994.
- [5] 大野孝幸, 大矢見久, 油田信一: "送受信回路の改良による超音波センサの測距性能の向上", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.3, pp.1093-1094, 1994.
- [6] S. Tachi and K. Komoriya: "Guide Dog Robot," International Symposium on Robotics Research, vol.2, pp.333-340.
- [7] H. Mori, S. Kotani and K. Ishii: "A Guide Dog Robot Project 'HARUMOBU'," Int'l conf. on Advanced Robotics, Nov. 1993.
- [8] B. Edde: "RADAR," PTR Prentice Hall, 1993.
- [9] J.J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte: "Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [10] K. audenaert, H. Perremans, Y. Kawahara and J. Van Campenhout: "Accurate Ranging of Multiple Objects using Ultrasonic Sensors," IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1733-1738, 1992.

丹沢 勉 (Tsutomu Tanzawa)

1970年3月19日生。1992年山梨大学工学部電子情報工学科卒業。1994年同大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修了。同年より山梨大学大学院博士後期課程に在籍。(日本ロボット学会学生会員)

森 英雄 (Hideo Mori)

1938年3月5日生。1961年東京工業大学工学部電気工学課程卒業。同年富士通(株)入社。1965年山梨大学工学部電子工学科講師。現電子情報工学科教授。眼を持つ自律移動ロボットの研究とその応用として歩行ガイドロボット、白線引きロボットの研究開発に従事。工学博士。情報処理学会、計測制御学会、日本心理学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)

清弘智昭 (Noriaki Kiyohiro)

1947年7月14日生。1971年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1975年山梨大学工学部電気工学科助手。1989年より同大学工学部電子情報工学科助教授。工学博士。計測、制御、情報通信、電子デバイス、機器工学の研究に従事。印刷学会、電気学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)