擬似乱数 M 系列によるスペクトル拡散音波の距離計測への応用

山根 章生*・伊与田 健敏*・崔 龍雲*
久保田 譲*・渡辺 一弘*

Range Measurements Using Spread Spectrum Sound Waves Modulated with Pseudo Random M-sequences

Akio YAMANE*, Taketoshi IYOTA*, Yongwoon CHOI*,
Yuzuru KUBOTA* and Kazuhiro WATANABE*

In order to develop an indoor, local positioning system and evaluate its ranging accuracy, range measurement experiments have been performed using spread spectrum sound waves at audio frequencies of 0.69, 3.0, and 10kHz, for which a relatively broad frequency response can be readily prepared by means of a pair of transmitter-receiver commercially available. A series of the experiments based on the demodulation of spread spectrum sound signals due to M-sequence (Pseudo Random Noise Code) with a 127-code length showed that the range measurement successfully yielded full-scaled ranging errors of less than 1% as the accuracy for the frequencies of 0.69 and 3.0kHz, and much smaller value of 0.037% for the full scale distance of 18m in the case of 10kHz. The capabilities of noise rejection to super-imposed white noise and signal discrimination between two different M-sequence codes have been also ensured for the phase shift keying modulation on longitudinal elastic waves. Discussions on the measurement precision are interestingly given in terms of the frequency of carrier wave and the traveling distance during the phase shift chip period as an analogy of pseudorange measurements in the global positioning systems.

Key Words: spread spectrum, sound wave, M-Sequence, range measurement, global positioning system

1. はじめに

屋内における人、ものの位置認識が正確にできれば実用的な種々の応用が期待できるであろう。たとえば、病院内の医師、看護婦、患者、また工場内の作業員の行動認識、さらに局所的には電動工具の作業動線追跡などが挙げられる。また、人間と共存するだろう自律移動ロボットにとっても自己位置の認識は、環境を認識し障害物を回避し、安全な走行制御を行なうための意思決定に不可欠な技術課題といえる。屋内に設置した種々のランドマークを用いた自己位置認識法^{1), 2)}、超音波距離センサを用いた方式³⁾、モニタカメラによる方式⁴⁾などもあるが、精度の確保、屋内環境へのランドマークの設置などによる利便性、リアルタイム性の欠如などの問題もあり、どれも決定的な自己位置確認の方式とはなり得ない現状である。

一方、屋外環境では世界規模の測位システムとして近年 GPS (Global Positioning System) の応用が進んでいる。複

数衛星からの電波伝播時間から求められた擬似距離より自己位置を測位し、汎用コードでは単独測位精度で約 15m⁵⁾の実用的な分解能を有している。しかしながら屋内では、衛星からの受信感度が極端に低下し、一般的には利用に適していない。屋内に擬似衛星を設置し、GPS のように電波で自己位置を認識する研究⁶⁾も進められているが、遠近問題やマルチパスの影響により精度の高い位置認識が困難である。さらにほかの精密機器や計測器の誤動作につながる可能性があるので、屋内での高周波帯電磁波の利用は嫌われることが多い。

筆者などはこれまでに、電波による GPS の原理をそのまま音波に置き換えて、音波で符号分割多重通信を行ない音波間の干渉を排除し、室内においても精度の高い測位システムを提案し実験的検討を行ってきた^{7), 8)}。伝播速度が比較的遅い音波に置き換えることで、直接波と反射波との受信時間間隔に比較的長い時間を持たせ、マルチパスの問題を軽減し直接波の識別が容易となる。GPS に比べはるかに低い周波数であり、かつ固定衛星であることから信号処理の回路構成も比較的簡便にできる。また、GPS の原理どおり 1チップ距離 (符号 1ビットに対応する信号伝播距離) の 1/10 程度の精度が確保できるとすると、40kHz の超音波では数 mm から数 cm の精度が望めることになる。これまで一般に多方向の

* 創価大学工学部 八王子市丹木町 1-236

* Faculty of Engineering, University of Soka, 1-236, Tangi, Hachioji, Tokyo
(Received February 26, 2003)
(Revised July 25, 2003)

距離情報を得るために、複数のパルス超音波センサを用いているが、この場合センサ間の干渉が問題となるため、複数の超音波センサを時分割で駆動させるスキャンニング法⁹⁾や、送信信号に相互相関の低いパルスコードを用いて、雑音下でも影響の少ない測距方法¹⁰⁾が研究されている。さらに、音波に位相変調を用いた例として、音波式ガス温度・流量計測¹¹⁾、パルス圧縮を用いた超音波探傷法¹²⁾、同じく実数直交擬似雑音系列¹³⁾またはM系列パルス列による超音波測距¹⁴⁾などが報告されている。また本研究と同様に、擬似乱数M系列で位相変調(PSK: Phase Shift Keying)した可聴音波を用いた研究として、ガス温度計測¹¹⁾や海中における多経路伝播の観測に関する研究¹⁵⁾もあり、受信利得の大幅な改善が確認されその有用性が報告されている。本稿では、擬似乱数M系列で位相変調されたスペクトル拡散音波を屋内空間で使い、屋内用GPSの構成を目的に、汎用の送受信音源固有の帯域制限、また周波数の変化に伴う拡散率の違いによって測距精度が、GPSのアナロジーとしてどう評価できるのかについてはじめて実験的検討を行なっている。得られた知見は帯域制限をさらに受けやすい汎用超音波送受信音源での屋内測位の可能性を示唆している。

本研究では、周波数特性の帯域が比較的広い可聴域帯の送受信音源(スピーカ、マイク)を用いて、可聴域(0.69, 3.0, 10kHz)におけるスペクトル拡散音波による測距実験を行なった。搬送波周波数10kHzを用いたスペクトル拡散音波では、距離範囲(～18m)の測距実験において、誤差として平均で0.037%(距離にして約7mm)を得た。可聴帯域を選んだ理由は、可聴帯域の送受信源の周波数特性は汎用超音波トランスデューサに比べ拡散帯域を確保しやすく、帯域制限を緩和した環境でスペクトル拡散の効果を明らかにするためである。本論文では、白色雑音を送信信号に加えた耐雑音評価、異なる擬似乱数系列による符号多重分割送信時の信号識別特性についても実験的検討を行なった。また、各周波数における測距実験では、周波数スペクトルの拡散時の搬送波周波数と擬似乱数系列による位相変調の1チップ距離が測距精度に与える影響についても検討した。

2. スペクトル拡散音波の送信と受信

2.1 スペクトル拡散音波の作成と識別

スペクトル拡散信号は、搬送波である正弦波を擬似乱数系列で位相変調¹⁶⁾して作られる。本研究で用いる擬似乱数系列はM系列で、Fig. 1で示される7ビットのシフトレジスタによって生成される。シフトレジスタの各ビットの値は7つのTapから取り出すことができ、どのTapの値を用いるかによって異なる乱数系列を発生させることが出来る。ここで、系列の周期を P とする。Tap1とTap7の値、もしくはTap3とTap7の値を用いて系列を発生させる場合には $P = 2^7 - 1$ となることがわかっており¹⁷⁾、この2種類のM系列を用いる。

送信されるスペクトル拡散信号の波形をFig. 2に示す。搬

Fig. 1 Maximum length linear shift register sequence to generate 7-bits M-sequences

Fig. 2 Spread spectrum signal to be launched from the speaker with phase-shift-keying modulation at every T_c [ms] on a carrier wave with a period of T [ms] which sampled at $T/16$

送波は周期 T [ms] の正弦波である。拡散変調に用いる擬似乱数系列は先に述べたM系列の0を-1に置き換えたもので、これを用いて変調周期(チップ長) T_c [ms]ごとに位相変調を行なっている。ここで用いているスペクトル拡散信号にはデータを乗せるための変調を行っていないので、一般的にいわれている形の拡散率を定義できない。そこで、本研究ではチップ長に対する擬似乱数系列1周期の時間 T_p の比、 T_p/T_c で拡散率を定義する。ここで、 $T_p = T_c P$ である。

つぎに、スペクトル拡散した信号を受信し識別するためには、相関値の計算が必要である¹⁶⁾。スペクトル拡散信号の処理は実際にはデジタルデータで行なっており、信号は8ビットの2進数で扱っているので-128から+127の間の値をとる。そのために相関値の最大値は $2^{14}/2$ となる。また、搬送波周期の1/16の時間でサンプリングを行なっており、サンプリング周期 $T_s = T/16$ が基本的な時間の単位になる。Fig. 5～9の横軸は基本的には時刻 t であるが、各時刻に対応するサンプリングの番号 N_s を用いると $t = N_s T_s$ と表わすことが出来るので、横軸には N_s を用いている。

2.2 実験システムの構成

実験で用いるシステムの構成をFig. 3に示す。システムはスペクトル拡散音波を送り出す送信機と音波を受け取り信号の識別を行なう受信機から構成されている。

送信機で送り出される音波の波形データはあらかじめ信号生成部で作成され、波形メモリに記憶される。送信機は波形データを波形メモリから読み出しD/A変換部によってアナログ電圧に変換され増幅された後、スピーカから音波として送信する。

Fig. 3 A block diagram of the experimental setup

Fig. 4 Transmission characteristic with frequency for the used speaker-microphone spaced at 30cm

Fig. 5 A part of the received signal waveform after air transmission over a distance of 0.5m. Solid arrows indicate locations of phase shift for the modulation

受信機側では、音波の送信が開始されると同時に受信が開始され、マイクによって電圧に変換された音波の信号を A/D 変換部でデジタルの波形データに変換し受信波形メモリに保存していく。受信が終了した後、信号識別部が波形メモリに保存された波形データを読み出して相関計算を行ない信号の識別処理を実行する。

送信側の D/A 変換部と受信側の A/D 変換部はサンプリングにおけるタイミングのずれを防ぐために同一のクロック信号によって動作させている。以上のような手順によって、スペクトル拡散音波の送受信の実験を行なう。

2.3 搬送波の周波数とスペクトル拡散音波の帯域

スペクトル拡散信号の帯域幅は搬送波の周波数 f_{cr} ($= 1/T_c$) [Hz] を中心に $2/T_c$ で表わされる¹⁸⁾。本研究では $T_c = 3T$ に設定して実験を行なうので、帯域幅は $2f_{cr}/3$ となる。Fig. 4 は送信音源—空中伝播路 (30cm)—受信音源系の周波数特性である。3つの搬送波周波数における帯域幅をそれぞれ、図中に示す。帯域内における利得の変動は、搬送波周波数 0.69kHz では約 -5dB, 3.0kHz では約 -10dB, 10kHz では約 -20dB となっている。

3. 実験結果と検討

3.1 スペクトル拡散音波の受信波形と相関関数

0.69kHz の搬送波周波数に (Tap1,7) の M 系列擬似乱数符号で位相変調を行ない、送信音源 (スピーカ ch.L) から音波として送信し、0.5m 隔てた受信音源 (マイク) で受信した受信波形メモリの信号を Fig. 5 に示す。送信波形メモリの信号 (Fig. 2) は一定の振幅の正弦波で、位相変調点がめいりようであるが、実際の受信信号は振幅が一定にならず、Fig. 5 の矢印で示すようにかろうじて位相の転移点を確認できる程度に歪んだ波形であることがわかる。これは、送信音源—空中伝播路 (30cm)—受信音源系の周波数特性 (Fig. 4) による帯域制限、反射波の重畳などによるものと考えられる。

この受信波形に対して、送信側と同じ (Tap1,7) の M 系列符号を用いて逆拡散して得られた相関関数を、伝播距離 5m, 10m, 20m についてのおおの Fig. 6(a), (b), (c) に示した。縦軸は相関値で、横軸 N_s は前述したサンプル位置を示す番号である。この N_s は時間軸に相当するが、Fig. 6 では任意の位置で示している。Fig. 6 に示すように、逆拡散後の相関

Fig. 6 Resultant correlation values as a function of the sampling number N_s for (a) 5-, (b) 10-, and (c) 20-m propagation distances. Solid arrows indicate the detection of signal arrival from the transmitter

Fig. 7 White noise super-imposed signals set at a waveform memory in the transmitter with the signal to noise ratios of (a) 1:1, (b) 1:2, and (c) 1:4, as a function of the sampling number N_s

Fig. 8 Resultant correlation values as a function of the sampling number N_s for (a) 1:1, (b) 1:2, and (c) 1:4 of the signal to noise ratio, after 20-m propagation. Solid arrows indicate the detection of signal arrival from the transmitter

関数はめいりょうなピーク値を有し、同期捕捉点として正確に検出できていることがわかる。また、伝播距離が長くなるにつれ、受信信号の信号強度が減衰するため相関値が減少し、直接波を示す最初の相関ピーク後に反射波の受信を示すピークがより顕著に現れているのがわかる。本実験では、直接波が最初に到達するものとし、最初の相関値ピークを捕捉位置

とした。また、実験は幅 2.4m、高さ 2.5m、長さ 25.0m の廊下で行なっている。Fig. 6(c) のように最初のピーク値より、反射波と考えられる 2 番目以降のピーク値が大きくなる場合もある。これは、伝播空間である廊下内において伝播経路長がわずかに異なる反射波が強め合って直接波強度を上回るためと考えられる。

Fig. 9 Correlation values as a function of the sampling number N_s for two different M-sequence codes simultaneously launched from the two speakers (ch.L and ch.R), distanced at (a) 0.18-, and (b) 0.72-m. Solid and dashed curves show the correlation values for signals from ch.L and ch.R, respectively. Solid arrows indicate the detection of signal arrival from the transmitters

Fig. 10 Measured distances with the distance between the two speakers for the carrier frequencies of (a) 0.69- and (b) 3.0-kHz

3.2 耐雑音性と信号識別の評価

スペクトル拡散信号の大きな利点の1つは耐雑音性に優れていることである。本研究のように縦波弾性波である音波においてどの程度の耐雑音性を示すかを明らかにするために、白色雑音の重畳下における同期捕捉点の検出実験を行った。Fig. 6と同様の送受信音源を用い、搬送波周波数 0.69kHz、伝播距離が 20m になるよう設置した。

送信機・波形メモリ (ch.L) 内に格納されたスペクトル拡散波形データに対し、信号対雑音強度比で 1:1, 1:2, 1:4 の混合比となるように、信号 ($f_{cr} = 0.69\text{kHz}$) の拡散幅 ($2f_{cr}/3 = 0.46\text{kHz}$) に対し約 6 倍の帯域を持つ白色雑音を

加算して全体の振幅が 8bit となるようにした。Fig. 7 に送信波形メモリ内の白色雑音を重畳した送信波形 (a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:4 を示す。Fig. 7(a)~(c) はいずれも拡散擬似乱数符号の最初の 3 ビットまでの雑音を含む位相変調波形である。本実験では、前述のとおり搬送波 3 周期を拡散擬似乱数符号 1 ビット (1 チップ長: $T_c[\text{ms}]$) としているので、1 周期 16 サンプルとすると、 $N_s = 49, 97$ が位相の転移点となる。これらの信号を受信し、Fig. 6 と同様に逆拡散して相関関数を求めると Fig. 8(a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:4 となる。Fig. 8 に見られるように白色雑音に対しては、いずれの混合比の信号においても同期捕捉点を示す相関値のピークが得られている。また、

Fig. 11 Measured distance error as a function of the acoustic travelling distance in the case of the 10-kHz carrier frequency

雑音強度が増加するにしたがって相関値が小さくなるのは混合信号全体の振幅を 1 としているため、相対的に信号強度が小さくなっていることによるものである。スペクトルが広い白色雑音に対して、スペクトル拡散信号が高い利得で検出されるのは一般的に認められている知見であるが、電波に比べてはるかに帯域制限を受けやすい環境下の音波についてもその利点が認められることが明らかとなった。

同一の周波数で、きわめて近い符号列すなわち符号間相関の高い信号による妨害行為（ジャミング）はこの議論から除くことにして、符号間相関の低い 2 つの M 系列乱数符号を用いて、同時に送信した 2 つの音波の信号識別能力を実験的に検討することは重要である。

Fig. 9 は搬送波周波数 0.69kHz を用い、2 つの送信音源（スピーカ ch.L, ch.R）に（Tap1,7）,（Tap3,7）の M 系列を割り当て同時に送信し、受信音源での受信後に逆拡散した相関関数の波形を示している。実験では ch.L を受信音源から 0.5m の位置に、また ch.L と ch.R にあらかじめ距離の差 d を与えており、Fig. 9(a) は $d = 0.18\text{m}$, (b) は $d = 0.72\text{m}$ の場合である。図中矢印 L, R はおのおのの音波の同期捕捉点である相関値ピークを示す。この場合、2 つの音源の出力レベルは同一としている。ch.R は ch.L より後方に設置されているため、受信における相関値ピークの値は ch.L に比べやや小さいことがわかる。また ch.L と ch.R の距離差 d にしたがって、同期捕捉点の時間差が大きくなることがわかる。Fig. 9 から、符号分割多重において正しく目的の信号のみ検出が可能であること、また検出時間の差より計測した距離が設置距離にほぼ一致することが明らかとなった。

3.3 測距実験

搬送波周波数 0.69, 3.0, 10kHz における測距実験を行ない、それぞれの精度について検討を行なった。0.69, 3.0kHz については、Fig. 9 と同様に 2 つの送信源の設置位置差 d を 0.1~6.0m の範囲の任意 9 地点において、各地点 5 回の計測

を行なった。距離差 d が 6.0m 以上になると、後方に設置した ch.R の信号が ch.L に比べて小さくなり、相対的に相関関数が極端に小さくなるので、10kHz については ch.L と受信音源（マイク）の組み合わせで 0.3~18m の範囲で実験を行っている。

Fig. 10(a), (b) は、搬送波周波数 0.69kHz と 3.0kHz の場合の測距結果を示している。Fig. 10(a) の距離 $d = 3.0\text{m}$ 近傍で大きな誤差を示した以外は、ほぼ直線的な計測結果を示している。この比較的大きな誤差は、廊下を伝播する反射波の中には干渉効果でときとして直接波に比べ大きな相関値ピークを示す場合があり、そのため直接波のピークの位置が不明確になったことによるものである。誤差評価では、この 1 計測点は除くことにする。誤差の評価値としてフルスケール誤差 %FS[%] を、

$$\%FS = \frac{|d_m - d|}{L} \cdot 100$$

と定義する。ここで、 $d_m[\text{m}]$ は計測値の平均値、 $d[\text{m}]$ は設定距離、 $L[\text{m}]$ は計測最大距離を示す。0.69kHz では %FS の平均値として 0.59%, 3.0kHz では 0.21% が得られた。また、Fig. 11 は 10kHz における距離に対する測定誤差 ($d_m - d$) を示している。 $L = 18\text{m}$ として、このときの %FS の平均値は 0.037% となる。このように、計測の誤差は周波数の増加と共に小さくなることがわかる。

M 系列符号の 1 チップ長は $T_c = 3T$ に設定しているため、音速 340m/s とした場合、1 チップの距離は搬送波 0.69kHz で 1.47m, 3.0kHz で 0.34m, 10kHz では 0.1m となる。汎用の GPS では、一般に 1 チップ距離の 1/10 程度の誤差¹⁹⁾とされている。本実験では、1 チップ距離の 1/15 (10kHz) から 1/40 (0.69kHz) の誤差となる。擬似乱数符号による拡散信号は復調するときにサンプル時間ごとに積和演算を行なっている。各周波数での誤差はサンプル数に換算すると 0.69kHz で 1.1, 3.0kHz で 1.7, 10kHz では 3.2 サンプルに相当する。これからサンプリング周波数を高くすればさらに精度が上がることも期待できるが、演算時間の増大をまねき実用性が損なわれる。誤差が相関関数ピーク値のサーチ時の数サンプルに留まっていることが明らかになったことは、実用システムの設計にとって大きな知見といえる。

一般的な超音波パルスエコー型測距センサの測距精度は、周波数を上げることにより計測距離分解能が向上し、40kHz で 0.01m 程度²⁰⁾とされている。また周波数 200kHz でも、距離分解能は $2.00 \times 10^{-3}\text{m}$ 程度となる²⁰⁾。本実験の結果は、スペクトル拡散音波の距離精度を決定する要素としては周波数だけではなく、チップ長、サンプル周期があるため、搬送波周波数 10kHz の低い周波数においても、計測距離 18m 内において、%FS 平均値が 0.037%, 距離にして数 mm という小さな誤差で測定できることが明らかとなった。

4. おわりに

本論文では、擬似乱数符号列として系列長 127 の M 系列

を用いて、音波を直接位相変調したスペクトル拡散可聴音波信号を用いて、受信信号の逆拡散、耐雑音評価、異なる2つの符号系列の多重分割信号識別、さらに測距実験による測距誤差評価を行なった。一連の実験結果は、GPSにおける電波帯のスペクトル拡散波による測位のための擬似距離測定におけるアナロジーとして検討を加え、室内における局地的測位が可能であることを初めて明らかにした。

実験では、汎用の送信音源（スピーカ）／受信音源（マイク）の帯域制限下において、位相変調した縦波弾性波が逆拡散によって識別できる相関関数波形として取得でき、耐雑音性、多重分割送信時の信号識別性が優れていることが確認された。また、このシステムによる測距実験では、0.69, 3.0, 10kHzにおいてフルスケール誤差で1%以下の計測が可能であることが明らかになった。特に、10kHzでは、18mの距離範囲で0.037%（約7mm）の誤差が実現された。これらの誤差は、搬送波周波数に加えて、チップ長の設定、信号のサンプリング周波数によって評価でき、GPSと同じ概念で説明できることが示された。

実用的には、超音波の実験が望まれるが、計測に広く利用されている市販の汎用圧電素子型超音波トランスデューサの帯域は、今回用いた可聴域の送受信系に比べるとさらに狭い。たとえば、40kHzを中心に10kHzにおいて-15から-20dBの減衰を示す²¹⁾。本実験結果から、これらを送受信音源として利用した場合、擬似乱数M系列による搬送波への変調チップ長を $T_c = 10T$ とし、搬送波周波数40kHzを中心に8kHzの帯域幅に周波数スペクトルのメインローブを納めるようにすれば実現性が見出せることになる。この場合、1チップ距離は8.5cmとなるが、その1/10程度の精度は確保できると概算できる。また、擬似乱数符号列のコード長を長くして、拡散比を高めることにより、受信機におけるS/N比を高くすることによっても、精度の向上と計測距離範囲を拡大することも可能であろう。

今後、実際の測位となると、少なくとも3点からの測距が必要となり、相関性の低い符号列を複数用意することが必要になるが、GPSと異なる点は本方式では信号源が固定擬似衛星となり、衛星の移動にかかわる複雑な処理過程がかなり簡便化されると考えられる。マルチパスについても、音波の速度から反射波と直接波の識別は比較的容易になる。音波は電波に比べて、温度、空気の状態の揺らぎに、影響を強く受けやすいという特有の問題もある。また、電波と共通のドップラー効果、遠近問題なども残されている。本研究は、これらの問題を考慮したアルゴリズムを処理系に用いて、擬似固定衛星である送信音源を適当に配置すれば、室内測位に十分応用可能であることを示唆するものである。

謝辞 本研究において実験システムの構築、計測実験に協力してくださった、三上孝一氏（現、松下電器産業）、武信誠一氏（本学大学院情報システム学専攻博士前期2年生）に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 青柳, 木口, 常峰, 高野: 簡易バーコードランドマークの画像認識と傾斜補正による移動ロボットの位置・姿勢計測, 電学論C, **121**-2, 375/384 (2001)
- 2) 岩田, 高橋, 佐々木, 高野: LED 灯台を用いた移動ロボット用位置姿勢検出システム, 精密工学学会, **61**-11, 1579/1583 (1995)
- 3) M.Drumheller: Mobile Robot Localization Using Sonar, IEEE Trans. On Pattern Anal. Machine Intell., **PAMI**-9-2, 325/332 (1987)
- 4) 勝屋, 八木, 谷内田: 全方位視覚センサによる動環境での静止環境地図および自己位置の同時推定, 日本ロボット学会誌, **17**-3, 432/438 (1999)
- 5) 日本航海学会 GPS研究会著: GPS シンポジウム 2001, 194, 正陽文庫 (2001)
- 6) D.Yun, H.Jun and C.Kee: Precise Calibration of Pseudolite Positions In Indoor Navigation System, Proc. of the 6th GPS Workshop, 679/684 (1999)
- 7) 三上, 山根, 武信, 崔, 伊与田, 渡辺, 久保田: 拡散変調音波の耐雑音性の評価, 第33回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, 25/26 (2001)
- 8) A.Yamane, K.Mikami, S.Takenobu, Y.Choi, T.Iyota, K.Watanabe and Y.Kubota: Development of Range Sensing System Using Spread Spectrum Sound Waves, Proc. of the 10th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR2001), 671/675 (2001)
- 9) J.Borenstein and Y.Koren: Noise Rejection for Ultrasonic Sensors in Mobile Robot Applications, Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1727/1732 (1992)
- 10) 丹沢, 清弘, 森: 屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ, 日本ロボット学会誌, **15**-4, 542/549 (1997)
- 11) 深山, 森本, 北山, 今田, 下平, 沖村: 音波式ガス温度・流量計測における信号処理法と試験信号波形について, 計測自動制御学会論文集, **37**-1, 21/29 (2001)
- 12) 和高, 永塚, 三須, 浦崎, 小池: 相補系列を用いた符号化位相変調パルス圧縮超音波探傷法, 電子情報通信学会技術研究報告, **US89**-34, 15/22 (1989)
- 13) 棚田, 佐々木, 前田, 堀: 実数直交擬似乱数系列を用いた超音波測距方式, 電子情報通信学会スペクトル拡散通信研究会, **SS87**-27, 63/71 (1987)
- 14) 大槻, 奥島: 海中における超音波伝搬状況観測のためのM系列2周期信号法, 日本音響学会誌, **38**, 619/623 (1982)
- 15) 峰屋, 大槻, 奥島: M系列信号音波を用いた相模湾の多経路伝搬音波の観測, 海洋音響学会誌, **17**, 106/113 (1990)
- 16) 横山光雄著: スペクトル拡散通信システム, 145/25, 科学技術出版社 (1988)
- 17) 柏木潤著: M系列とその応用, 16, 昭晃堂 (1996)
- 18) 丸林, 中川, 河野共著: スペクトル拡散通信とその応用, 22, 電子情報通信学会 (1998)
- 19) 日本測地学会編著: GPS —人工衛星による精密システム—, 26, 日本測量協会 (1989)
- 20) 谷腰欣司著: 超音波とその使い方 超音波センサ・超音波モータ, 102, 日刊工業新聞社 (1994)
- 21) 村田製作所: <http://www.murata.co.jp/index.html>, 製品カタログ (送信器 MA40S4S, 受信器 MA40S4R)

[著者紹介]

山根章生（学生会員）

2000年創価大学工学部情報システム学科卒業。現在、同大学院工学研究科情報システム学専攻博士後期課程在学中。日本ロボット学会会員。

伊与田 健 敏（正会員）

1986年東北大学工学部応用物理学卒業。92年同大学院工学研究科応用物理学専攻修了。現在、創価大学工学部講師。画像による環境認識、超音波による距離計測と測位システムなどの研究に従事。日本物理学会、電子情報通信学会の会員。（工学博士）

崔 龍 雲

1983年韓国中央大学工学部電子計算学科卒業。95年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程システム科学専攻修了。現在、創価大学工学部講師。ロボットビジョン、自律移動ロボットの研究に従事。日本ロボット学会、電子情報通信学会などの会員。（工学博士）

久保田 讓（正会員）

1963年室蘭工業大学工学部機械工学科卒業。68年北大大学院工学研究科精密工学専攻博士課程単位取得退学、同年室蘭工業大学講師。現在、創価大学工学部教授。制御、ロボット挙動などの研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。（工学博士）

渡 辺 一 弘（正会員）

1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。81年同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、創価大学工学部教授、同学部情報システム学科長。レーザの光情報装置への応用、光ファイバセンサ、自律移動ロボットの自己位置認識システムなどの研究に従事。電気学会、日本ロボット学会、応用物理学会、可視化情報学会などの会員。（工学博士）