研究論文

RFID 測位センサーネットワークノードの開発に関する研究

坂井　朋之[*]　五十嵐　晃[*]　江口　和也[*]　坂井　修[*]
山田　敏浩[*]　菅野　明宏[*]　星野　公明[**]　石井　啓貴[**]
西村　俊治[***]　石月　斗志宏[***]　吉田　好文[***]

Research for Development of PositiningSenser Network Node withRFID

SAKAI Tomoyuki[*], IKARASHI Akira[*], EGUCHI Kazuya[*], SAKAI Osamu[*],
YAMADA Toshihiro[*], KANNO Akihiro[*],HOSHINO Kimiaki[**],ISHII Hirotaka[**],
NISHIMURA Toshiharu[***], ISHIZUKI Toshihiro[***] and YOSHIDA Yoshifumi[***]

抄　録

工作機械や産業機械メーカー等において，生産性向上や，受発注管理のために，各社とも工程管理ソフトを導入して，コスト低減の実現を進めている。しかし，汎用ソフトでは，作業員の勤務状況の入力を人手で行う必要があり，煩雑である。そこで，本研究では，作業員の動態状況を把握し自動で入力できるシステムの開発を目的とする。近距離動態管理システムのセンシング用通信ユニットには，通信規格として，IEEE802.15.4 を採用し，電界強度をもとに，位置範囲を特定する測位アルゴリズムを開発した。さらに，そのアルゴリズムを組み込み，実際に動態管理が可能なシステムのプロトタイプを開発した。また，当該システムの多様な現場への応用を可能とするため，指向特性の異なる平面アンテナを設計し，その評価を行った。今後，当該開発システムの位置管理機能を核として，生産現場のみならず，様々な場面への応用を想定している。

1. 緒　　言

工作機械や産業機械メーカーの生産形態は一品一様生産である。生産性向上や，受発注管理のためには，生産の進捗に応じた部材の適正調達や作業員の適正配置が不可欠であり，各社とも工程管理ソフトを導入して，その対策，およびコスト低減の実現を進めている。しかし，汎用ソフトでは，作業員の勤務状況の入力を人手で行う必要があり，そのための工数が増加する等矛盾した状況になっている。

そこで，作業員の動態状況を把握し自動で入力できるシステムを構築し，汎用の生産管理ソフトにアドオンできるシステムの開発を目的とする。

研究開発項目は，以下の 3 つである。

① 通信方式，通信ユニットの選定と，測位アルゴリズムの開発
② 使用環境に応じたアンテナの開発
③ 全体システムの開発

また，本研究では，開発したプロトタイプを将来のユーザーに対して，無償で使用していただくことを想定しているため，公共の場面において，電波を発射できるよう，使用する通信ユニットについては，技術基準適合証明の技術的手続きおよび事務手続きも行った。

以下に各項目について詳細を述べる。

*　研究開発センター
**　下越技術支援センター
*** 株式会社ジェイシーエム

2.　通信ユニットの選定と測位アルゴリズムの開発

2.1　通信ユニットの選定

本共同研究の無線通信による中精度近距離測位システムは主に屋内での使用を前提としている。ここでいう『中精度』とは，測位対象物の管理のための位置特定や位置推定を実現するのに十分な精度であると定義し，同様に『近距離』とは 10m 以内と定義した。また，屋内での電波伝播は，直接波，透過波，反射波が複雑に干渉しあうマルチパス干渉環境となるため，連続的な値ではなく，離散的な相対値を基に伝搬環境特性をモデル化する。本共同研究の無線通信による測位は，タグ（測位対象点）から送信された電波をカンバン（測位基準点）で受信した時の受信電力の計測値を利用して行う。受信電力の計測方法としては RSSI（受信信号強度）を使用する方法と LQI（リンク品質値）を使用する方法とがある。RSSI は受信信号強度(%) = (受信 RSSI / 最大 RSSI)×100 で算出され絶対値として示されるのに対し，LQI は復調後の符号誤り割合を示し受信信号強度と変調方式に依存する相対的な回線品質を示す。本共同研究では相対的な計測値に主眼をおくため LQI 値の計測機能を有する通信ユニットを選定する方針とした。技術仕様を表 1 に示す。

表 1　通信ユニットの技術仕様

項目	仕様概要
周波数帯	2.4GHz帯もしくは950MHz帯
送信方式	直接拡散もしくは狭帯域変調
送信出力	−30dBm以下もしくは通信距離5mの地点での受信電力が−80dBm以下となる設定が可能なこと、 また、送信出力の可変が可能なこと
通信規格	IEEE 802.11b もしくは IEEE 802.15.4 もしくは独自方式
ネットワーク機能	自動接続によりクラスタツリー型の構成が可能なこと
受信感度	～−80dBm
インタフェース	UART 1chを有すること
電源	乾電池もしくはボタン電池で動作すること

2.2　測位アルゴリズムの開発

2.2.1　基礎実験

実際の工場における場所や位置の管理は円形の領域では行わず矩形や正方形の領域を組合せた格子状の領域単位で管理している。このため本共同研究における測位とは基準点から連続的に同心円状の位置距離を計測するのではなく，基準点から管理対象が属する正方形の位置領域までの概距離を計測することで位置を特定することと定義した。

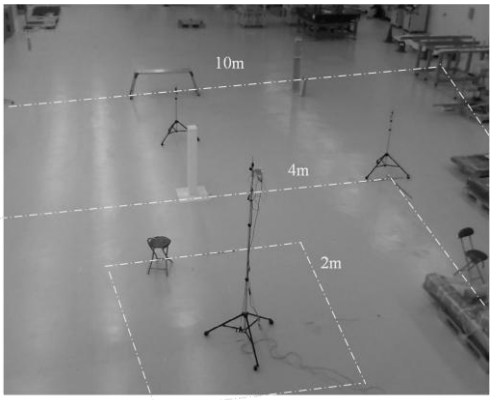

図 1　同心正方形による位置管理

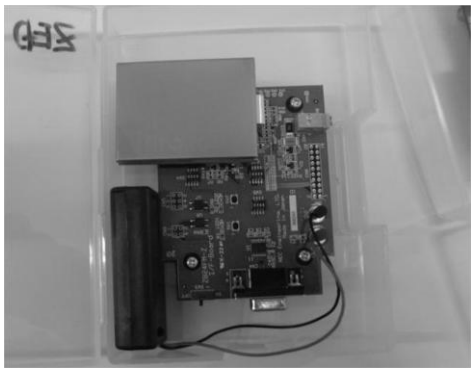

図 2　実験に使用した通信ユニット

具体的には『近距離』要件より一辺 10m 以下の一定の大きさを有する正方形の管理対象領域を，中心は同一で，辺の長さが異なる複数の正方形（以下，同心正方形と記述する）のサブ領域に分割し，管理対象領域の中心に設置されたカンバン（測位基準点）からタグ（測位対象点）を走査し，そのタグが属している同心正方形サブ領域を特定する（図 1）。

計測は出力低減済み通信ユニット SD タイプを使用した（図 2）。送信出力は最小出力の-16.6dBm に設定した。距離 4.0m 地上高 1.5m 対向時の LQI 受信電力換算値は-77.1 dBm で標準仕様の-44.1dBm から約 30dB 低

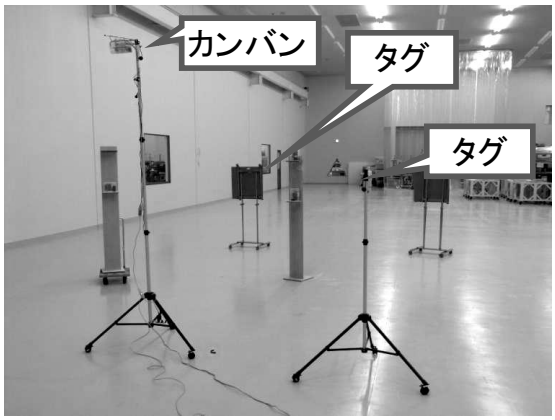

図 3　実験場の様子

減している。カンバン（測位基準点）側は等方性を確保できる方向で設置し，タグ（測位対象点）側は双指向性となる方向で設置し指向性による変動を無視せずに計測を行った。図 3 に実験場の様子を示す。

2m，4m，10m の同心正方形の領域を設定し各々の正方形の辺上を図 4 に示すように任意の速度（静止～徒歩）で任意の方向に直線

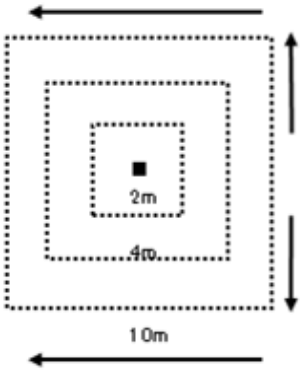

図 4　実験時の移動経路

移動した。また，その際計測された，LQI の基本統計量を表 2 に示す。同心正方形の辺上

表 2　領域内側移動実験時の基本統計量

（単位：dBm）

		2m辺上	4m辺上	10m辺上
LQI	平均	-68.06	-73.06	-76.03
	標準偏差	0.99	0.96	0.64
	中央値	-67.92	-72.23	-75
	最頻値	-60.85	-79.92	-79.92
送信電力換算	標準偏差	8.48	8.22	5.51
	分散	71.83	67.54	30.32
標本数		73	73	73

を直線移動した場合でも測位基準点からの距離が遠くなるにつれて分散が小さくなることが確認できる。LQI の相対度数分布を近似式で表すと，距離毎に度数分布が異なることが確認できるためこの特性を利用して位置判別が可能なのではないかという仮説を得た。

2.3　モデルの生成

本共同研究では基礎実験の結果に基づき，距離の判別は基準点からの位置領域ごとの LQI 分散の変化のみを変量として使用する。目的システムの適用環境に対応した同心正方形の位置領域ごとの LQI 分散モデルを作成し，測位基準点で観測された LQI 分散と照合することにより位置領域を特定することを試みた。

モデルとの照合は判別分析法（Discriminant analysis）を用いて行う。判別分析法とはある程度重複する部分を持ついくつかの母集団の群データに基づき，新しい標本が得られたときこの標本がどの群に属するかを判定・予測する手法である。具体的には，個々のデータと群の汎距離を計算し判別する方法を採用した。モデルとして計測した LQI データ A 群および，B 群があり各々の LQI の平均値に対し，新しく観測されたデータ X の値を各群の平均値との隔たりの大小で判別しようとしても各群の分散が異なるため正しく分類できない（図 5）。ここで，各モデルデータ群の相対度数分布を母集団分布と同じ確率分布とみなし，母平均を μ_A，μ_B　母分散

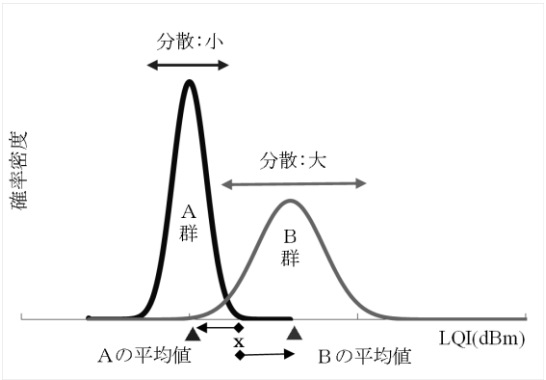

図 5　計測データと平均値の隔たりの例

を σ^2_A，σ^2_B とし，観測されたデータ X と各母平均との隔たりを分散で標準化した汎距離を求める。

$$D_A = \sqrt{\frac{(X-\mu_A)^2}{\sigma^2{}_A}}, \quad D_B = \sqrt{\frac{(X-\mu_B)^2}{\sigma^2{}_B}}$$

このときの判別方法は，

$$D_A - D_B \leqq 0 \quad \Longrightarrow 群Aに属する$$
$$D_A - D_B > 0 \quad \Longrightarrow 群Bに属する$$

となる。[1)]

実際のモデル用計測データの例を表 3 に示す。表中の『1m 内』が群 A，『2m 内』が群 B を表

表 3　モデル用計測データの例

基準地点	1m内	2m内
平均	-75.17	-77.50
標準偏差	5.434087	5.839164

表 4　モデルデータによる判別分析

群A (1m内) 群B (2m内)	$D_A - D_B$	判別
観測値X　-78.20	0.419664	>0 (群B)

し，平均および分散が各々群の母平均と母分散を表す。いま真値=3m の観測値 -78.20 dBm が得られたとする。汎距離を計算すると判別式は非負となり群 A と群 B の群間判別においては群 B に属すると判定できる（表 4）。この結果から 2 群の判別を各群間で繰り返すことによって処理が可能であると判断した。

その後，このアルゴリズムをもとにして，複数のカンバンへの展開を図り，最終的に，計測ソフトウェアを作成した。

なお，基礎実験においては，当初，通信ユニットとして SD タイプを使用したが，将来の製品化を視野に入れるために，製品化候補として，通信ユニット（TI 社評価開発キット CC2530ZDK-ZNP-MINI：以下 CC2530ZDK）を使用してモデルデータの取得と判別分析による位置領域判別についての検証も行った。その結果，SD タイプと同様の結果が得られている。

3.　使用環境に適したアンテナの開発

3.1　目的

本共同研究で開発する近距離動態管理システムは，様々な作業環境において利用されることを想定しているため，送受信アンテナの特性は，利得や指向性において，様々なバリエーションでの実証が求められている。あわせて，この近距離動態管理システムは，将来的には複数回書き換え可能なリライタブルシートへの実装を視野に入れている。

したがって当研究所では，CC2530ZDK に接続可能な小型平面アンテナを 2 種類試作開発し評価を行うこととした。

3.2　電磁界シミュレーション

電磁界シミュレーションとは，マクスウェル方程式を演算することにより，対象物と電磁場の相互作用の解析を行うためのツールである。アンテナ開発においては，電磁界シミュレーションソフト上に仮想的にアンテナモデルを構築し，材料パラメータを設定し，マクスウェル方程式を演算し，アンテナ性能を記述する上で重要な反射特性や指向特性を計算機上で演算を行い，目標とするアンテナ仕様に近いアンテナの設計を行うことで，アンテナ設計，試作，測定評価のプロセス工数の低減に寄与することができる。

本共同研究プロジェクトでは，CC2530ZDK に実装するアンテナ開発・設計を行うためのツールとして，電磁界シミュレーションソフト（Agilent Technologies 社製「ADS Momentum」）を導入した。「ADS Momentum」は，平面構造を基本として限定された 3 次元（2.5 次元）構造用の電磁界シミュレーションソフトである。解析エンジンは，モーメント法を採用している。

3.3　八木・宇田アンテナの設計

八木・宇田アンテナは，特定方向の電磁波の位相をそろえて指向性を鋭くしたアンテナである。アンテナ設計に設計条件は，使用するCC2530ZDK の技術仕様，アンテナ加工条件等の制約から，表 5 のとおりとした。

上記条件にもとづいて設計したアンテナイメージを図 6 に示す。

表 5　八木・宇田アンテナの設計条件

設計項目		設計仕様
中心周波数		2.45　GHz
基板	素材	FR-4（ガラスエポキシ）
	板厚	0.3mm
入力インピーダンス		中心周波数において50Ω
素子		4素子 （導波器2素子、放射器・導波器1素子）

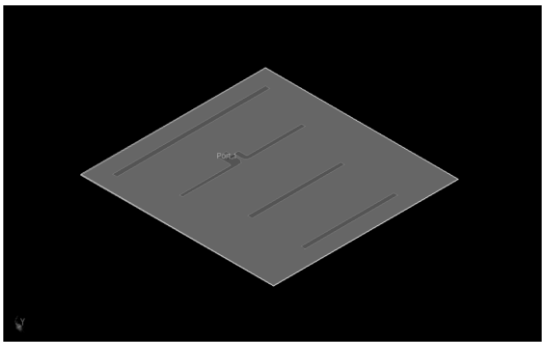

図 6　八木・宇田アンテナの設計イメージ

なお，本アンテナ設計においては，実装するCC2530ZDK の仕様上，入力インピーダンスを 50Ω に設計する必要がある。そのため，アンテナレイアウトの設計において放射器エレメントと導波器，反射器エレメントの間隔を変化させることで，それを実現した。

シミュレーション評価結果として，リターンロス特性，VSWR（定在波比），スミスチャート，指向性パターンをそれぞれ，図 7，8，9，10 に示す。

リターンロスは，アンテナの特性を表す重要な指標であり，図 7 から，共振周波数は 2.453GHz となったことがわかる。

VSWR は，一般的に 2.0 以下に設計する必要があると言われているが，図 8 に示すように，

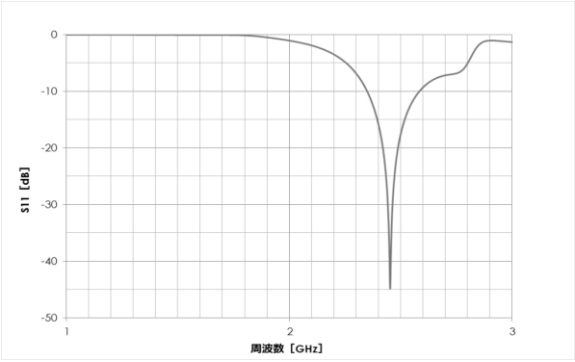

図 7　八木・宇田アンテナリターンロス特性

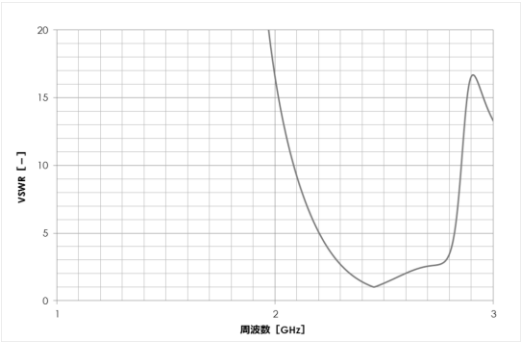

図 8　八木・宇田アンテナ VSWR

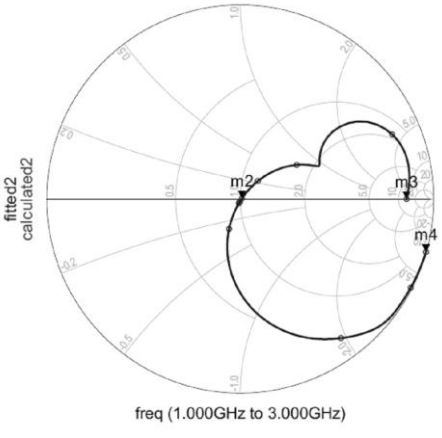

図 9　八木・宇田アンテナスミスチャート

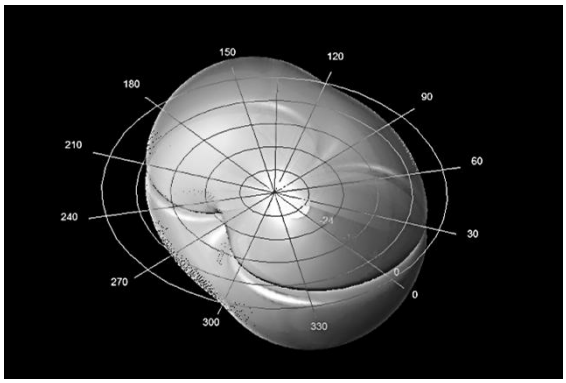

図 10　八木・宇田アンテナ指向性パターン

今回の結果は，2.453GHz 付近で 1～2 の値を示していることがわかる。

図 9 では，m2（共振周波数：2.456GHz）におけるインピーダンスは，　Z0 ×(1.018 + j0.006)となっており，設計目標値に近い値となっている。

図 10 に，共振周波数(f = 2.456GHz)における八木・宇田アンテナのアンテナゲインの指向性パターンのシミュレーション結果（3 次元イメージ図）を示す。八木・宇田アンテナの特徴通り，導波器方向に鋭い指向性を示している事が分かる。

3.4　小型メアンダライン・モノポール・アンテナの設計

もう 1 種類のアンテナとして，小型メアンダライン・モノポール・アンテナを検討した。小型のメアンダライン・アンテナはモノポールアンテナと同様の放射特性を持つ。またメアンダラインの段数，縦線の間隔，ピッチを変えることにより，同じ高さのモノポールアンテナに比べ共振周波数を低くできる特徴がある。前節で述べた，八木・宇田アンテナと同様に，設計イメージを図 11 に，共振周波数(f=2.442GHz)における指向性パターンのシミュレーション結果を図 12 に示す。これから，前述の八木・宇田アンテナに比べ広い指向性を有している事が分かる。

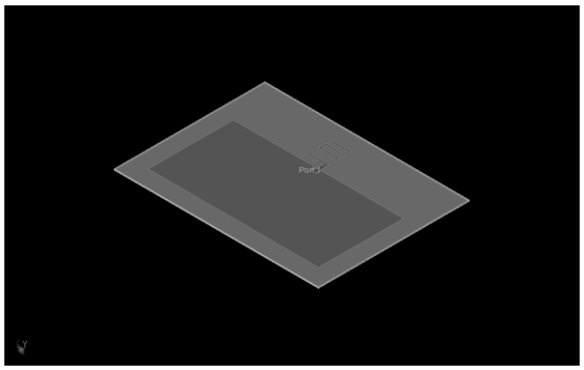

図 11　小型目アンダライン・モノポール・アンテナの設計イメージ

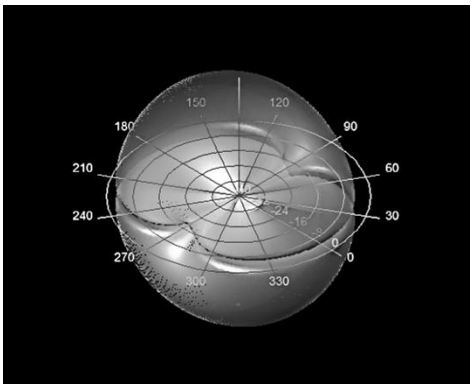

図 12　小型メアンダライン・モノポール・アンテナ指向性パターン

3.5　アンテナの加工

アンテナはサンハヤト（株）製「クイックポジ感光基板作製システム」を用い作製した。「クイックポジ感光基板作製システム」はプリント基板の試作等に用いられるシステムである。

主な工程は以下のとおりである。

工程①：アートワーク（パターンフィルム作成）
工程②：露光
工程③：現像
工程④：エッチング
工程⑤：外形切断

3.6　アンテナの評価

前節で述べたように，加工したアンテナについて，実際の特性評価を行い，シミュレーション結果との比較を行った。

3.6.1　測定条件

測定項目は，①リターンロス測定，②指向性パターン，の 2 つとした。

使用した設備は，

①リターンロス

・ネットワークアナライザー
　Agilent　Technology　8753E

②指向性パターン

・電波暗室　1GHz 超　簡易電波暗室
・スペクトラムアナライザ
　Agilent　Technology　E7405A

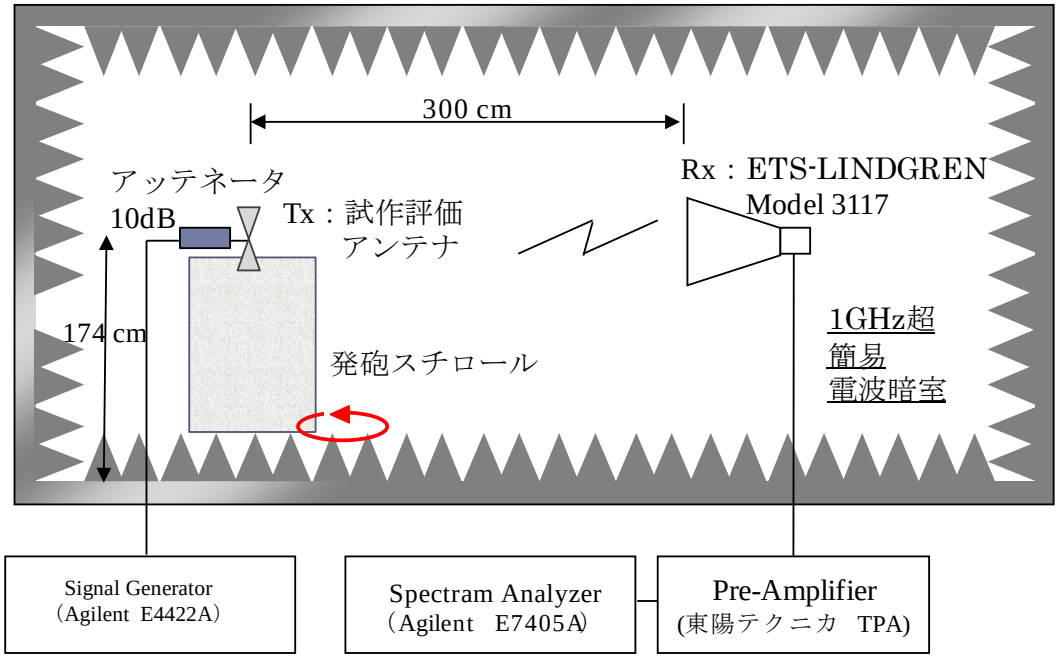

図 13　指向性パターン測定系ブロック図

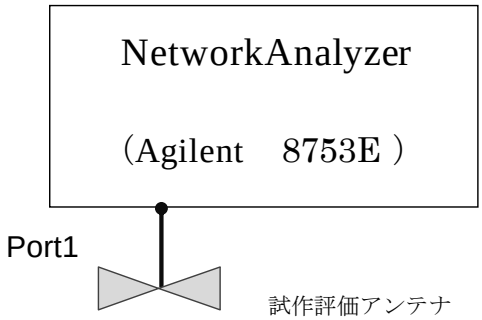

図 14　リターンロス測定系ブロック図

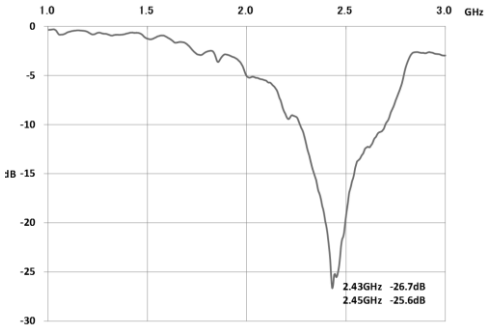

図 15　リターンロス測定結果

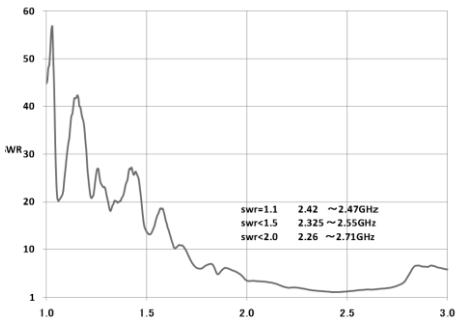

図 16　VSWR 測定結果

・信号発生機

Agilent　Technology　E4422A

・プリアンプ

東陽テクニカ　RF PRE AMPLIFIER TPA

・試験アンテナ（Tx）

試作アンテナ

・受信アンテナ（Rx）

ETS-Lindgren　3117

指向性パターンの測定系ブロック図を図 13 に，リターンロスの測定系ブロック図を図 14 に示す。

3.6.2　アンテナ単体の評価結果

八木・宇田アンテナのリターンロスの測定結果について，図 15 に示す。これから，共振周波数は，2.43GHz ということがわかる。これは，シミュレーション結果の 2.453GHz と若干ずれ

ている。また，VSWR 測定結果を図 16 に示す。これから，2.26GHz～2.716GHz という広範囲で，VSWR が 2.0 以下ということがわかる。これは，シミュレーション結果と符号している。

次に，指向性パターン測定結果の 1 例について，図 17 に示す。これより，0° 方向への指向性が良好であることがわかる。

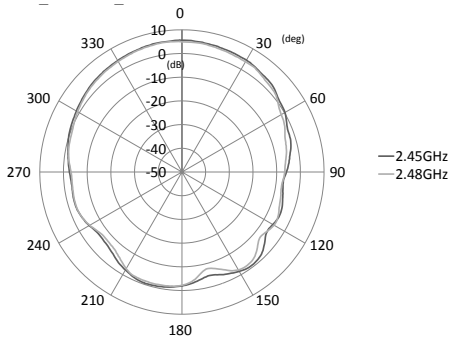

図 17　指向性パターン測定結果

同様にして，小型メアンダライン・モノポール・アンテナ，および，CC2530 ZDK の標準アンテナについても測定し，それらの指向特性を比較した結果を図 18 に示す。

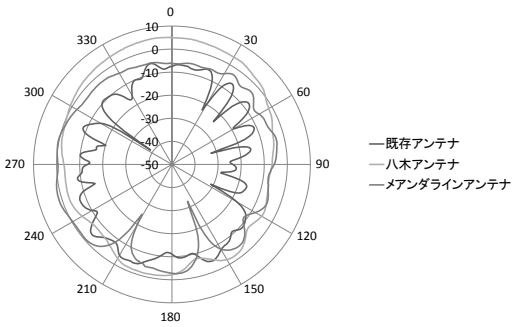

図 18　3 種類のアンテナ特性比較

これより，八木・宇田アンテナは 0° 方向に対して標準アンテナよりも指向特性が良く，小型メアンダライン・モノポール・アンテナは全方向において，標準アンテナより指向特性が良いことがわかる。

4.　開発した通信ユニットの技術適合証明

開発する通信ユニットを使用し，今後，展示会等でのデモを想定しているため，製品化候補通信ユニットについて，公共の場でも電波を発射できるように，当該通信ユニットについて，技術基準適合証明を行なった。以下，申請の事前試験および，申請の手続きについて述べる。

4.1　事前試験

2.4GHz 帯技術適合証明の申請手続きに必要な，以下の申請項目について，当所の設備を利用して，申請前の簡易計測試験を実施した。

（1）実効放射電力
（2）空中線利得
（3）空中線電力
（4）占有周波数帯域幅
（5）拡散周波数帯域幅
（6）周波数偏差
（7）指向特性

試験に使用した設備を表 6 に示す。今回の計測は，16CH 分の計測が必要であるが，そのうちの 1CH の結果について，表 7 に示す。

表 6　技術基準適合証明
事前簡易計測試験に係る試験設備

測定設備	メーカー名・型式
電波暗室	工業技術総合研究所　電波暗室（登録）
	トーキンEMCエンジニアリング製　特別仕様
	工業技術総合研究所　簡易電波暗室（1GHz超）
	ETS-Lindgren製　特別仕様
EMIテストレシーバ	ROHDE & SCHWARZ ESU26
プリアンプ	東陽テクニカ　TPA0108-40
受信用アンテナ	ダブルリッジドガイドアンテナ
	ETS Lindgren 3117
送信用アンテナ	ダブルリッジドガイドアンテナ
	Schwarzbeck BBHA9120B
信号発生器	Agilent N5181A-506

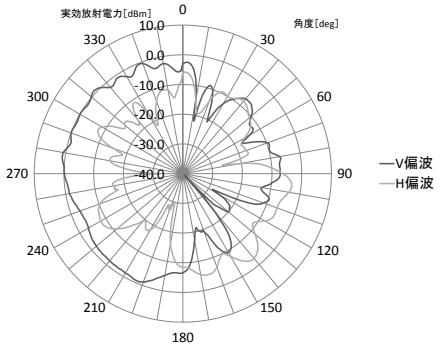

図 19　指向特性の測定結果の例

表 7　2.4GHz 帯技術適合証明事前簡易計測試験に係る測定結果の例

CH	周波数	実効放射電力：(非拡散時)	空中線利得	半値幅(非拡散時)	空中線電力(非拡散時)	占有周波数帯域幅	拡散周波数帯域幅	周波数偏差
	GHz	dBm	dBi	deg	dBm	MHz	MHz	
1	2.405	4.732	0.385	81	-1.74594397	2.772435897	3.717948718	6.66E-06

また指向特性については，一例として，図 19 に示すような結果となり，これらの結果をもとに，技術基準適合証明申請を行った。

4.2　手続きの流れ

下記の図 20 に示す流れに沿って，申請を行った。前節で述べた，事前試験結果のほか，設計図面やブロック図，工事設計書等を揃えたうえに，現物となるユニットを添えて，申請し，結果として，図 21 に示す技術基準適合証明シールを交付された。

図 20　手続きの流れ

図 21　技術基準適合証明シール

5.　全体システムの開発

5.1　ハードウェアの仕様

ハードウェアとしては，無線モジュール格納ケースより小型化する事，電池の交換時間を延ばすために電池の大容量化を実現する事，低コスト化を図るために片面基板での開発を行う事を念頭に開発を行った。図 22 に端末の外観を示す。

図 22　開発した端末の外観

5.2　ソフトウェアの仕様

ソフトウェアは RF サブシステム，測位計算サブシステムおよび，見える化サブシステムから構成される。RF サブシステムはタグ（測位対象点）とカンバン（測位基準点）デバイスのファームウェアから成り IEEE802.15.4 ネットワークを構成する。標準のファームウエアに対してタイマ設定による LQI の任意間隔での送出機能や送信出力制御機能の追加改造を行った。

測位計算サブシステムはカンバンからの LQI データ収集，測位判別制御および判別計算プログラムから成る。計測されたデータは LQI デー

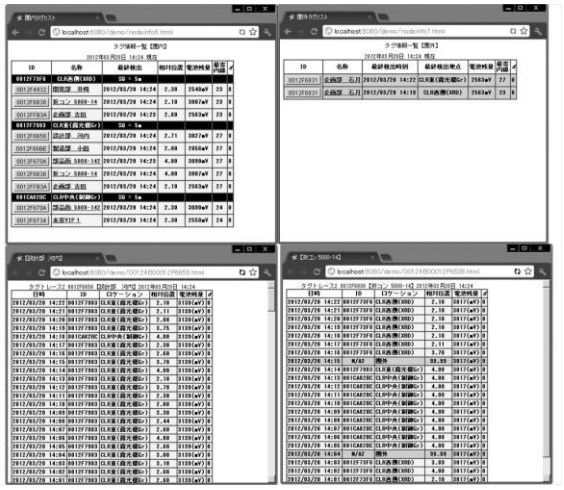

図 23　Web モニタ画面

図 24　タブレット端末の外観

タに格納され，カンバン（測位基準点）が設置された場所の名前や管理距離範囲の情報および，タグ（測位対象点）の属性（社員番号や所属・氏名，備品番号や名称等）が格納され，カンバン（測位基準点）が設置された場所の名前や管理距離範囲の情報および，タグ（測位対象点）の属性（社員番号や所属・氏名，備品番号や名称等）が格納された位置情報データを参照し処理を行う。

データ収集と測位計算はデータベース（MySQL）をインタフェースとして各々非同期に並列分散処理を行うため，目的システム適用時のネットワーク構成設計やハードウエア構成設計の独立性と柔軟性を確保している。見える化サブシステムは Web モニタ（図 23）とタブレット端末（図 24）による表示盤からなり，データベースと TCP/IP ネットワークを介して独立して通信するため，目的システムの用途に合わせた拡張性の高い構成を可能としている。

RF サブシステムのセンシング部は，①移動判別モード，②動態測位モード，③静態測位モード，④ゲート検知モード，⑤混合モードの 5 つの動作モードを実装した（表 8）。

①移動判別モードは対象物の移動の有無（位置の変化，高さの変化，向きの変化）を判別する。②動態測位モードは対象物が指定した同心正方形の内側に位置するか外側に位置するかの距離範囲を判別し，LQI 分散モデルと送信出力の組合せによって 3m 以内，5m 以内，7m 以内，10m 以内，10m 以上の 5 つのレンジを切替えて計測，または，3m～10m の一連の距離範囲のどこの内側に位置するかを計測する。このモードは主に作業員の動態管理で使用することを想定している。③静態測位モードは主にほとんど移動しない対象物が移動を開始した状態を判別する。検査装置などの位置管理での使用を想定している。④ゲート検知モードは対象物が位置を

表 8　5 つの動作モード

測位モード	対象レンジ	分解能	出力	参照モデル名	群判別回数	不偏分散閾値	群判別閾値	最小計測間隔	標準計測間隔
①移動判別モード ②動態測位モード	1m～10m	2m～3m	+4.5dBm	Y1Y2Y3Y4	84	1.902	0.15	1秒	5秒
	5m 内外	5m	-10dBm	Y1,Y2	20	1.902	0.15	1秒	5秒
	3m内外	3m	-22dBm	Y1,Y2	12	1.902	0.15	1秒	5秒
③静態測位モード	1m～10m	2m～3m	+4.5dBm	Y1Y2Y3Y4	84	1.902	0.15	1秒	60秒以上
④ゲート検知モード	3m内外	3m	-22dBm	Y1,Y2	12	1.902	0.15	1秒	20秒
⑤混合モード	1m～10m	2m～3m	+4.5dBm	Y1Y2Y3Y4	84	1.902	0.15	60秒	60秒

表 9　混合モードの動作パターン

毎正分(秒)	00	10	20	30	40	50	00	10
処理	ネットワーク初期化	ゲート検知モード		動態測位・静態測位・移動判別モード			ネットワーク初期化	・・・
出力	-22dBm			+4.5dBm			-22dBm	・・・

固定されたカンバン（測位基準点）に接近あるいは通過したかを判別し，いわゆるゲート型の位置情報管理での使用を想定している。⑤混合モードは①から④までのモードをソフトウエアの指示で組合せてひとつのカンバン（測位基準点）ユニットで混在運用する。これは指定された計測所要時間を指定された配分で時分割して各モードを切替えてひとつのユニットに複数の計測モードを割りつけて運用を行う（表 9）。

6.　今後の予定

以上により，全体システムを開発することができた。当該システムの特徴は，無線により非接触で，中精度の位置（範囲）特定を，低消費電力で行うシステムである。これらの特徴を活かすことができるような用途であれば，今回提案した生産現場における作業者の動態管理だけでなく，事務所での在席管理や，備品等の位置管理等，幅広い応用先が想定できる。今後，顧客評価用システムのリリースを行い，各業種の顧客に様々な評価実証試験を行っていただき，着実な実用化を図りたいと考えている。

7.　結　　言

(1)無線通信規格および周波数はそれぞれ，IEEE802.15.4，2.4GHz 帯の通信ユニットを採用し,測位方式は，電界強度の平均値と標準偏差から，ある範囲内にいるのか範囲外なのかの判別分析を行うことで，位置範囲の特定をするアルゴリズムを開発した。

(2)通信ユニットのうち，生産現場において，製造される機械側に設置する（カンバン側）用に指向特性の異なる 2 種類の平面アンテナの設計，加工，評価を行い，指向性パターンの異なる 2 種類の平面アンテナの試作を行った。

(3)上記通信ユニットおよびアルゴリズムにより，生産現場等において作業者の動態管理が可能なデモシステムを開発した。

謝辞

本研究を進めるにあたり，電波計測技術に関して有益なアドバイスをいただいた，新潟大学工学部佐々木教授，石井准教授に感謝する。

また，統計理論に関して有益なアドバイスをいただいた，新潟大学医歯学総合病院赤澤教授に感謝する。

参考文献

1)河口至商，“多変量解析入門Ⅰ”，1973，p81-93.