

RF タグの共振特性と FA への応用に関する研究

西 本 澄*

(平成 9 年 9 月 8 日受理)

A Study on Resonant Characteristics of RF tag device and Its Application to Factory Automation

Kiyoshi NISHIMOTO

(Received Sept. 8, 1997)

Abstract

An RF tag device is comprised of a spiral coil and a capacitor on a plastic film by a chemical etching technique and has been already used as a resonant marker for detecting shoplifting. It is small and light, so it may be applicable for vehicle navigation and product verification. When the excitation frequency of an electromagnetic wave radiating from an antenna traverses resonance, an electrical ring-down may be generated, so an RF tag device can be easily detected and its resonant frequency can be determined.

In this paper I have examined the resonant characteristics and performance of RF tag device to construct the sensing system consisting of the antenna and RF tag devices. And I have shown that RF tag devices can be utilized as a resonant identification for a mobile robot to determine its direction alternatively and to assort several kinds of articles. These examinations have proved RF tag devices to be useful in various areas of factory automation.

Key Words: Sensor, Electromagnetic Measurement, Mutual Inductance, Recognition, Radio Frequency, Resonance, Navigation, Classification

1. 序 論

電磁結合を利用する方式は雑音に弱い欠点があるものの環境の汚れに強く、ラジオ周波数領域の電磁波を利用したワイヤレス ID (RF-ID) がいろいろと開発されている。なかでもコイルとコンデンサから構成されるタグは電源が不要で低価格、長寿命という特長をもち、セキュリティシステムにおける使い捨てのデータキャリアとして需要は増大している。さらに、最近のフレキシブルな生産システムや物流システムにバーコードや IC カードなどが次々に導入されてきており、RF タグについても軽量、可撓性などの特長を活かし

た FA 分野での応用が考えられる。そこで、本論文では RF タグの ID を標識、商品ラベルとして使用する方法を提案する。

まず、RF タグの検出原理と共振周波数特性を明らかにし、RF タグを ID として効率よく検出するための設置条件について検討する。次に、共振周波数の異なる RF タグを走行面に敷設することにより、移動ロボットの誘導マーカとして使用できることを示す。具体的には RF タグを連続してあるいは離散的に要所あるいは分岐点に配置する場合、さらに、共振周波数の異なる 2 種類のタグをレール状に平行に設置する場合について小型移動ロボットを用いた誘導実験を行

* 広島工業大学工学部機械工学科

う。

さらに、物流システムへの応用を目標とした RF タグの応用例では、共振周波数の違いを利用した部品の仕分けをコンピュータと画像処理装置を用いてベルトコンベア上を流れる部品について実現する。

結論では、2つの応用例を通して、アンテナと非金属材料に貼付された RF タグで構成される計測システムが誘導マーカ、商品ラベルなどに利用でき、FA センサとして有用であることを述べる。

2. RF タグと検出原理

2.1 共振タグ

RF タグは図 1 に示すような数 cm 角のポリエチレンの片面あるいは両面に LC 回路をエッチング、印刷により作成したもので、渦巻状のコイルによるインダクタンス L と両面に適当な面積の電極で作られるコンデンサから成る。コイル、コンデンサともアルミニウムから成り、この 2つの素子を短絡させ、LC 回路を構成する。コンデンサの容量を C 、コイルのインダクタンスを L とするとき、RF タグの電気的な共振角周波数 ω_0 は次式で与えられる。

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (1)$$

コンデンサの静電容量 C はポリエチレンの厚さを t 、比誘電率を $\epsilon_s (=2.3)$ 、アルミニウムによる電極面積を S 、真空の誘電率を ϵ_0 として、 $C = \epsilon_s \epsilon_0 S/t$ で与えられる。

コイルの自己インダクタンス L はこれまでに提案されている実験式を用いて求めることができるが、相互インダクタンスの定義式から数値計算により求めることができる。コイルは巻数 8、線幅 0.6 mm、ピッチ 1 mm、厚さ 50 μm のアルミニウムから成り、 L の値は 3.6~4.0 μH である。コンデンサは、ポリエ

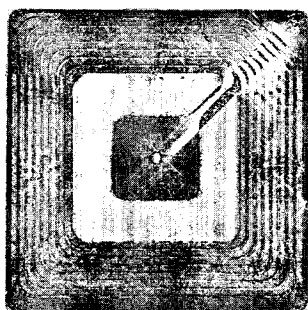


Fig. 1 RF tag device

チレンの厚さ t が 26 μm 、電極面積 S は約 100 mm^2 で電極面積を調整することにより容量 (100 pF 前後) を変化させて 7.8 MHz から 8.8 MHz の共振角周波数を得ている。

2.2 検出原理

タグの検出は周波数が増える電磁波を送信機からアンテナを介して空間に放射することにより行う。ループアンテナもコイルとみなせ、タグが近接すると 2つのコイルは電磁的に結合し、このとき誘起される起電力によりタグに電流が生じる。ここで、電磁結合の度合はタグとアンテナ間の相互インダクタンス M を用いて表すことができる。

送信機から放射される電磁波の発振周波数が共振周波数に一致、あるいは近づくとき、タグは電氣的に共振し、RF タグに大きな電流が流れ、検出回路にリングングを生じる。この現象を検出することにより、タグの存在を認識できる。特に、検出距離は相互インダクタンス M とコイルの共振の良さ $Q(=\omega L/r)$ に依

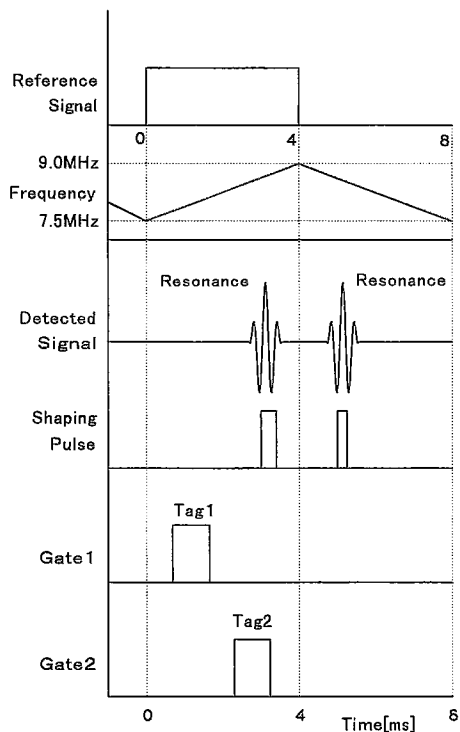


Fig. 2 A typical set of waveforms associated with the detected circuit

存する。 r はコイルの抵抗値である。

2.3 計測システム

計測システムでは周期 8 ms でアンテナから放射する周波数を変化させ、タグの存在とタグの共振周波数を共振時にアンテナ回路で検出されるリングング信号の振幅と時刻(位相)から測定する。この計測装置では 7.5 MHz から 9.0 MHz に共振周波数をもつ RF タグを検出できる。特に、選別されたタグを用い、アンテナに対するタグの位置と姿勢を一定に保てば、0.1 MHz の共振周波数の違いを検出できる。信号処理回路では数種類の共振周波数の異なるタグの判別を簡単化するために、同期信号から特定の周波数範囲をカバーするゲート信号を生成し、このゲート信号とコンパレータでパルス整形された計測信号との論理積回路からの 2 値出力によりタグの判別を行う。RF タグの検出および共振周波数の計測時の信号の流れを図 2 に示す。本論文では 3 種類のマーカーを用いる。タグ 1 は周波数 8.0~8.3 MHz, タグ 2 は 8.6~8.9 MHz, タグ 3 は 8.3~8.6 MHz の周波数範囲をカバーする。

ロボットの誘導および部品の仕分けの実験に用いた RF タグの検出器はアンテナと送受信回路で構成され、これらを 140×120×20 mm の筐体に納め、小型化した。アンテナには直径 1 mm の銅線による 120×100 mm, 巻数 3 の矩形コイルを用いた。アンテナ開口部は 120×100 mm で、タグの姿勢に検出性能が依存するが、アンテナ面前後の 120×100×100 mm の空間内にあるタグを検出できる。なお、アンテナの自己インダクタンスは約 2.0 μH である。

アンテナから発信される電磁波の周波数は 8 ms の周期で 7.8 MHz から 9.0 MHz に上昇し、さらに 9.0 MHz から 7.8 MHz に下降する。したがって、1 s 間に125回、この周波数範囲に共振周波数をもつタグの存在と共振周波数を検出できる。共振現象を 1 周

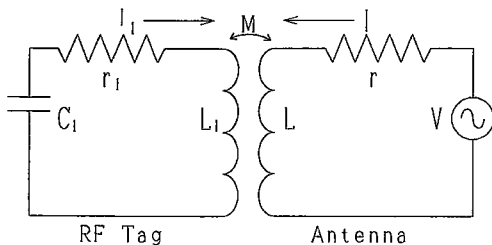


Fig. 3 Equivalent circuit

期内で周波数の上昇時と下降時の 2 回検出できるので、この検出時刻情報から雑音か RF タグによる信号かを判断できる。

2.4 アンテナとタグとの相互インダクタンス

アンテナおよび RF タグをコイルとみなすと図 3 のような等価回路が得られる。ここで、アンテナとタグのコイル抵抗および自己インダクタンスをそれぞれ r, r_1, L, L_1 , アンテナとタグの相互インダクタンスを M とし、アンテナに加える交流電圧を \dot{V} , アンテナおよびタグに流れる交流電流を \dot{I}, \dot{I}_1 とすると次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= R\dot{I} + j\omega L\dot{I} + j\omega M\dot{I}_1 \\ 0 &= r_1\dot{I}_1 + j\omega L_1\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I} + \frac{\dot{I}_1}{j\omega C_1} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、アンテナ回路における電圧と電流の関係を $\dot{V} = Z\dot{I}$ の形で整理するとインピーダンス Z の虚数部、すなわち、リアクタンス X は次のように表される。

$$X = \omega \left[L - \frac{\omega M^2 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)}{r_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)^2} \right] \quad (3)$$

図 4 は相互インダクタンスおよび周波数に対するアンテナ送受信回路のインピーダンス Z の値を示したものである。 M の値が大きくなるにつれて共振周波数が高くなること、共振時の鋭さを示す Q 値が大きくなることわかる。このように、アンテナとタグを含めたシステムの共振周波数は $X=0$ のときに得られ、

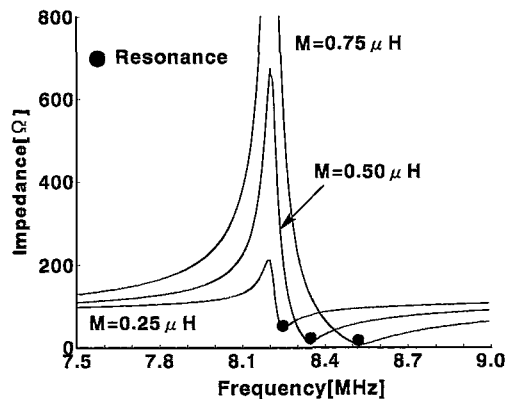


Fig. 4 Variation of Impedance Z with the excitation frequencies

r_1 が小さい場合、共振角周波数 ω_r はアンテナとタグ間の電磁結合度 $k^2 = M^2 / LL_1$ を用いて次式で与えられる。

$$\omega_r = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k^2}} \quad (4)$$

(4)式から明らかなように電磁結合度 k が大きいとき、すなわち、アンテナとタグが近接し、相互インダクタンス M が大きくなると共振周波数は大きくなる。いっぽう、 k が小さい場合、計測値として得られる共振周波数はタグが本来もつ共振周波数に近づく。したがって、あらかじめ決められた共振周波数のタグを走行面上に設置したり、ベルトコンベア上を流れる部品に貼付することにより、タグを外部標識として、あるいは商品ラベルとして利用できる。

2.5 タグの位置と姿勢の検出性能への影響

タグの検出性能がアンテナとタグの距離や姿勢に依存する点が RF タグを FA 分野で実用化する場合に大きな課題となる。(4)式は相互インダクタンス M が大きくなると計測される共振周波数が高くなること、逆に M の値が小さくなると本来の共振周波数 f_0 に近い値が計測値として得られることを示している。しかし、 M が小さくなるとタグそのものの検出が困難になる。

例えば、アンテナ正面中央部にタグが存在し、タグ面がアンテナ面と垂直に近い場合、 M の値は非常に小さくなり、タグの検出は困難となる。しかし、タグがアンテナ面に対して垂直でも、タグが中央から外れた位置に存在する場合、 M の値は大きくなり、その存在を検出できる。このようにタグ面がアンテナ面に対し直角に近い姿勢をとるとき、タグの検出がタグの位置に依存し、実用的でない。

そこで、タグ面とアンテナ面がほぼ平行である場合の検出性能について考える。タグとアンテナまでの距離が 20 mm 以下のとき、 M の値は大きくなり、共振周波数は本来の値より大きくなる。同時にアンテナに対するタグの位置と姿勢により M の値は変化し、共振周波数も大きく変化する。これに対し、タグとアンテナとの距離が 40 mm 以上になると M の値は小さくなり、タグ本来の共振周波数に近い値が計測値として得られ、タグの位置と姿勢による影響も小さくなる。

次に、アンテナ面とタグ面が平行でない場合の検出性能について考える。アンテナとタグの距離が大きい場合、タグのアンテナ面に対する傾きが 20° 以下であ

れば、相互インダクタンス M はタグがアンテナ面に対し、平行な場合の値に比較して小さくなるが、 M の値の変化は小さく、共振周波数の変化もわずかである。しかし、傾きが 30° 以上になると M の値はかなり小さくなり、タグの存在の検出が困難になる。

以上の点を考慮して本研究ではアンテナ面とタグ面をほぼ平行とし、アンテナから検出するタグまでの距離を 50 mm あるいは 60 mm に設定して、移動ロボットの誘導実験および部品の仕分け実験を行った。

3. 移動ロボットの誘導

移動ロボットは前輪がボールキャスタ、後輪がパルスモータにより独立に駆動できる 2DWIC 方式で、トレッドは 240 mm、車輪の直径は 100 mm、ロボットの大きさは $300 \times 200 \times 180$ mm である。アンテナはアンテナ面が走行面に平行となるように設置され、8 ms ごとにタグの存在と共振周波数を計測する。移動ロボットの誘導方式としては電磁誘導式、光学誘導式が一般的であり、1対のコイル、光センサアレイにより軌道からのずれをフィードバックして滑らかな走行を実現している。本論文では、RF タグを利用した誘導システムの基本性能の確認を目的とし、1台のアンテナで移動ロボットの誘導実験を行った。

平坦な走行面で移動ロボットの誘導を行う場合、アンテナ面とタグの距離はほぼ一定となるが、アンテナに対するタグの相対的な位置と姿勢はロボットの動きとともに変化する。したがって、誘導実験では、アンテナに対するタグの位置と姿勢により、共振周波数が大きな変化を生じないようにアンテナとタグの距離は 50 mm とした。しかし、それでもアンテナとタグ間の相互インダクタンスの大きさは変化し、共振周波数が変化するので、2つの検出周波数間に 0.3 MHz 程度の余裕をもたせ、2つの異なるタグを確実に検出できるようにした。

3.1 離散的にタグを配置する場合

まず、タグを分岐点、要所などに離散的に配置する場合について考える。この場合、タグの共振周波数に分岐点で“左旋回90度”、“右旋回90度”、“停止”、さらに“左旋回45度”などの情報を対応させることにより、ロボットの誘導を行うことができる。誘導実験では、走査周波数が 7.5~9.0 MHz の範囲に限られた検出装置を用いたので、8.1 MHz (タグ1)、8.4 MHz (タグ2)、8.7 MHz (タグ3) 付近に共振周波数をもつ3種類のタグを選んで用い、図5のような経

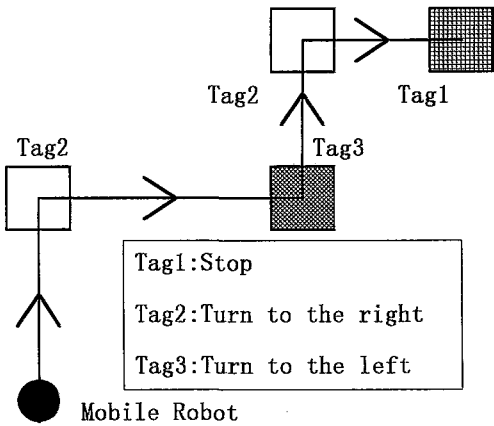


Fig. 5 Path constructed with several kinds of RF tag devices

路を走行させ、ロボット上に搭載されたアンテナで異なる周波数のタグを検出できることを確認した。しかし、ロボットがタグの情報にしたがって旋回などを行い、次にとる進行方向がタグを検出したときのロボットの方向に依存するので、次に検出すべきタグを進路上に検出できない場合が生じる。したがって、このようなシステムを実現するためにはロボットに正確な初期姿勢を与えること、さらに、ロボット自身にも精度のよい直進・旋回能力が要求される。

3.2 連続してタグを配置する場合

図6のように走行面に連続してタグを敷設する場合を考える。1台のアンテナでタグとアンテナとの相対位置と姿勢を計測するのは、3.1でも述べたように困難である。例えば、タグに沿って直進し、軌道を逸脱したことがすぐに確認できればトレッド間中心を旋回中心として図6に示すように自転し、軌道に復帰できるが、右回り、あるいは左回りに旋回するのがよいかという情報をタグ（センサ）から得ることが困難である。さらに、大きく逸脱した場合には試行錯誤による方法で軌道へ復帰せざるを得ない。この方法によれば確実にタグを追跡することができ、タグのもつ共振周波数に情報をもたせることにより種々の動作を指令することができるが、移動ロボットの走行速度は遅くなり、ロボットの円滑な走行は期待できない。

3.3 レール状にタグを配置する場合

滑らかな走行を実現するために走行面に図7のよう

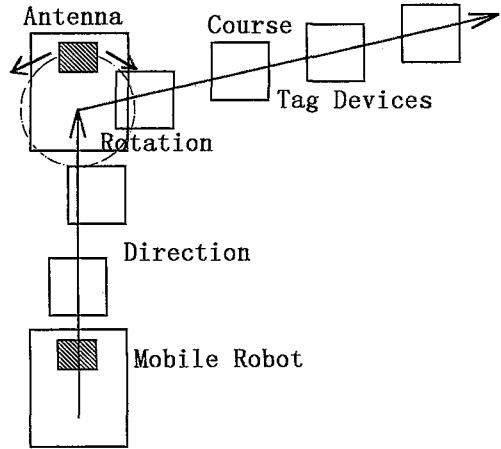


Fig. 6 Continuous Path constructed with RF tag devices

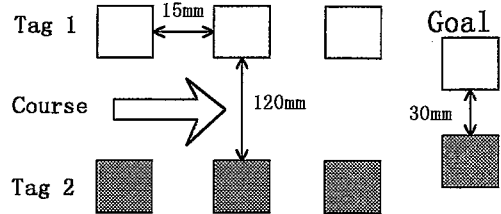


Fig. 7 Track constructed with two kinds of RF tag devices

に2種類のタグを平行に敷設してその中央を移動ロボットに走行させる実験を行った。ロボットが左右にそれ、経路左側、あるいは右側に敷設されているマーカを検出した場合には右、あるいは左に舵をきる。但し、アンテナがタグを検出しない場合にロボットを直進させるので、一度コースを外れた場合に暴走する欠点がある。

今回の実験では、同時に2つの周波数が検出されるようにタグを配置して始点あるいは終点とした。図7の走行路でスタート地点から出発したロボットはゴール地点を検出して、そこで180度回転し、再びもとの走行路をスタート地点まで戻る。但し、復路では左右のタグの機能をロボット上のソフトウェアで切り換えている。

左右のレールの間隔とレールを構成する各タグの間隔については次の点を考慮して決めた。

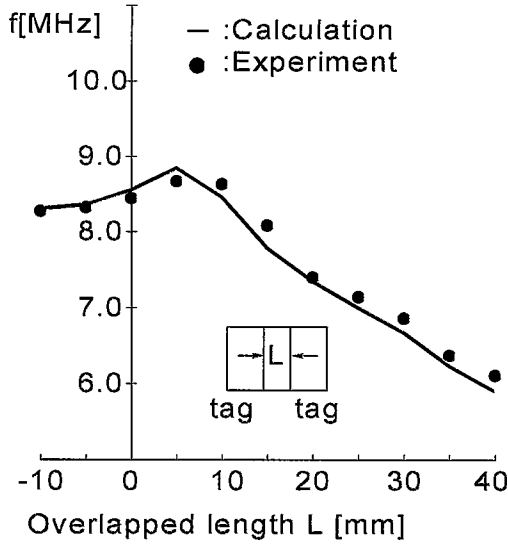


Fig. 8 Variation of resonant frequency with overlapped length

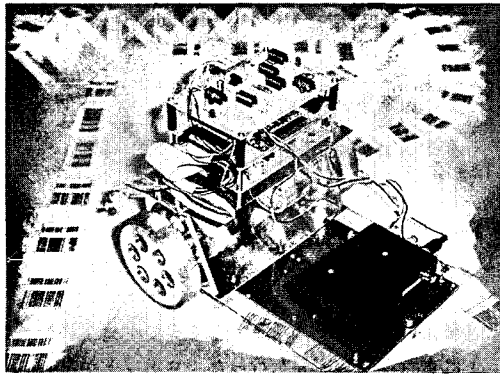


Fig. 9 Experimental course and a mobile robot with detection antenna

誘導実験では、ロボットに寸法 120 mm×100 mm の矩形アンテナを搭載して走行面に設置されたタグを識別させる。矩形アンテナの 120 mm の辺が車軸方向と平行となるように搭載しており、始点・終点以外の位置でアンテナにより左右のタグを同時に検出することのないようにレールの間隔を 120 mm とした。

また、同一共振周波数をもつタグを図 8 に示すように重ね合わせて、あるいは隣り合わせて配置するとき、システムで計測される共振周波数はタグ固有の共振周波数より高くなる。しかし、隣り合うタグの間隔を次第に大きくしていくとタグがお互いに与える影響は小

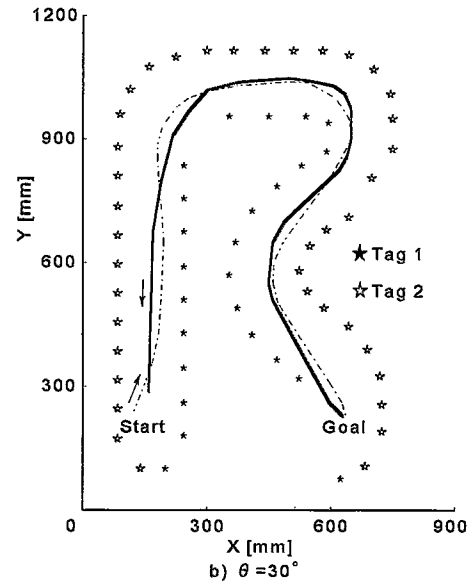
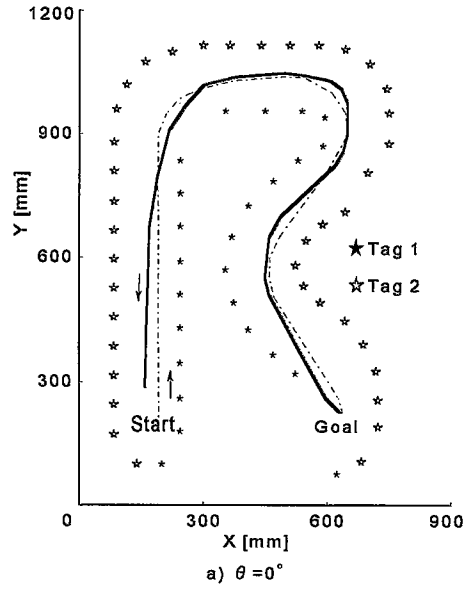


Fig. 10 Trajectories of robot

さくなり、ほぼ 15 mm の距離で本来の周波数をもつタグとして検出できる。したがって、左右のレールを構成する各タグの間隔は 15 mm とした。

3.4 移動ロボットの誘導実験

2つの異なる共振周波数をもつタグ1とタグ2を図9のようにレール状に配置し、移動ロボットの誘導実

験を行った。信号検出部では、8.0~8.3 MHz および 8.6~8.9 MHz の共振周波数を 8 ms ごとに計測し、このときの出力をフリップフロップ回路で次の計測結果が得られるまで保持する。その出力から移動ロボットは軌道から左右のどちらにずれているかを判断する。例えば、左にずれている場合には右車輪を停止させ、右車輪接地点を中心にトレッド間長さを回転半径として旋回させる。直進走行速度は 100 mm/s である。実際に図9の走行路を走行させたときの2つの実験例を移動ロボットのトレッド間中心の軌跡により、図10に示す。

移動ロボットはいずれもほぼコース中央に設置し、スタートさせているが、軌跡1はその姿勢 θ をコースに平行とした場合 ($\theta=0^\circ$) のものであり、軌跡2はその姿勢 θ をコースに平行な方向から30度右に傾けた場合 ($\theta=30^\circ$) のものである。特に、軌跡2では、すぐに右側のタグを検出して左旋回して正常な経路に復帰している。軌跡1および軌跡2ともに走行経路は、ほぼ一致しており、走行経路にも再現性がある。今回の走行経路はかなり曲率半径の小さい、ロボットにとってむずかしい経路であるが、共振周波数の違う2種類のタグをレール状に配置する方式を用いて移動ロボットをスムーズに誘導することができた。

4. タグの ID を利用した部品の仕分け

FA における物流システムを目標として、ベルトコンベア上に流れる部品に共振周波数の異なるタグをはり、仕分けを行うシステムを構築した。図11にシステムの概観図を示す。コンピュータには(株)三菱電機製のムーブマスタを用いた。

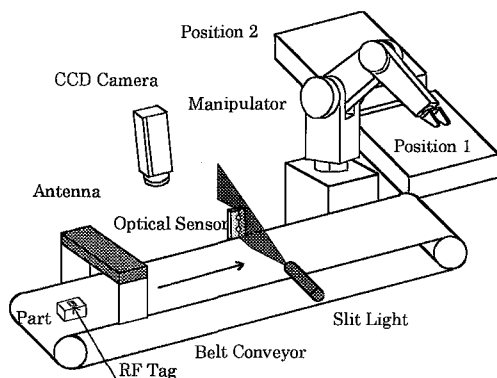


Fig. 11 Schematic diagram for classifying parts or articles

部品の仕分けは図12に示す手順で行う。ベルトコンベア上を一定速度で流れる部品に共振周波数 8.0~8.3 MHz (タグ1) と 8.6~8.9 MHz (タグ2) の2種類のタグを貼り付け、タグの通過とタグの共振周波数をアンテナで検出する。同時に、上方から CCD カメラで部品を撮影し、コンベア上の部品の位置と姿勢を画像計測する。さらに、スリットレーザー光と光センサから部品の流れる速度、すなわち、ベルトコンベアの速度を推定し、ムーブマスタが部品を保持するタイミングを計る。ハンドは画像計測で得られた部品のベルトコンベア上での位置と姿勢に応じて待機し、部品を取り上げ、共振周波数の違いにより2つの場所に仕分けする。

4.1 検出のための設定条件

2.5で述べたようにタグがアンテナ中央部を通過する場合、アンテナ面とタグ面のなす角度が直角に近づくときタグの検出が困難となる場合がある。したがって、部品の仕分け実験では図11に示すようにベルトコ

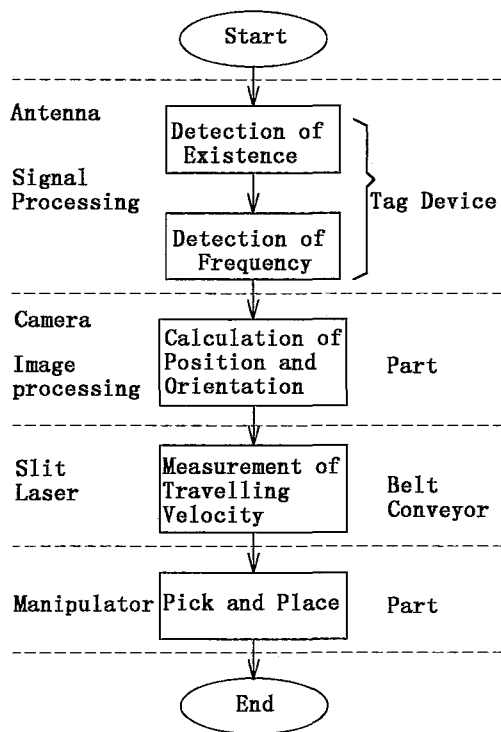


Fig. 12 A flow chart for classifying parts or articles

ンベア面を基準とし、アンテナ面およびタグ面が平行となるように実験条件を設定した。ここで、ベルトコンベアの幅は 120 mm であり、矩形アンテナの 120 mm の辺をコンベアの幅方向にあわせ、コンベア上を流れる部品がタグ検出器の計測範囲内を通過するようにした。部品の寸法は 80×50×35 mm であり、上面に 40 mm 角のタグを貼付する。実験で使用した部品の場合、タグ面とアンテナ面との距離は約 60 mm となる。なお、ベルトコンベアの最大速度は 12 m/min である。

4.2 実験結果

ベルトコンベア上を流れる部品に共振周波数の異なるタグを貼ることで、部品の存在の認識、仕分け先を認識させることができた。特に、タグの識別については100%の成功率を実現できた。

ところで、部品の最大流れ速度が今回の仕分け実験ではマニピュレータの動作速度、ハンドの開閉速度により決まる。しかし、タグの識別については、本システムで使用するアンテナの検出範囲がコンベアの流れ方向に 100 mm 程度であり、雑音の影響を受けることなく 8 ms に 1 回、タグを正確に検出できれば 750 m/min の部品速度に対応できる。実際にムーブマスタの腕をさらに延長し、先端速度を大きくしてタグの検出と共振周波数測定を行い、200 m/min の速度までタグが検出できることを確認した。

5. 結 論

RF タグの共振特性および検出性能をアンテナとタグの位置と姿勢について明らかにするとともに、共振周波数の異なる RF タグを用いて移動ロボットの誘導および部品の仕分けを行い、RF タグの FA への応用が可能かどうかを検討し、次のような点を明らかにした。

- 1) タグとアンテナの距離が小さい場合、タグの位置と姿勢により共振周波数が大きく変化する。これらの影響はタグとアンテナの距離を大きくすることにより低減できる。したがって、RF タグの安定した検出を実現するためには、タグをアンテナの検出範囲内で、アンテナ面に対し可能な限り、平行に設置

するのがよい。

- 2) RF 共振タグの共振周波数の違いを利用して移動ロボットを誘導することができる。この方法によればタグの配置を変えることにより経路の変更が容易となる。
- 3) マニピュレータとベルトコンベアを用いた物流システムにおいて、部品に共振周波数の異なるタグを貼り付けることにより、仕分けが可能である。また、高速移動する部品についてもタグの存在および共振周波数を検出できる。

今回の実験では 4 cm 角のタグと 120×100 mm のアンテナを使用して約 10 cm の計測距離を実現しているが、電波法の範囲内で電磁波の発射強度をさらに大きくすることにより、また、アンテナの寸法を大きくすることにより、計測範囲を大きくすることができる。

なお、RF タグの用途開発に関する研究については、(株)三宅との共同研究による成果であり、三宅正光社長をはじめ、内堀晋弥氏、畑中芳紀氏に深く感謝する。

文 献

- 1) 西本, RF 共振タグを利用した移動ロボットの誘導, 日本機械学会第73期全大会, 2807, (1995), 273-274
- 2) 柴田, 西本他, RF タグの共振周波数の違いを利用したロボットの誘導, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96, 21昼67, (1996), 1201-1204
- 3) 西本, RF 共振タグのロボット近接センサ・誘導センサへの応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95, 57-F108, (1995), 1204-1205
- 4) 西本, 近接するタグの共振特性の変化を利用した非接触変位センサ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96, 21朝17, (1996), 815-818
- 5) 西本, 近接するタグの共振特性の変化を利用した非接触変位センサ, 日本機械学会論文集, 63-603, C, (1997), 176-181