

# 電波式センサを用いた人間存在検知性能の調査

○金 唯眞 (名古屋大学大学院), 山田 陽滋 (名古屋大学大学院), 岡本 正吾 (名古屋大学大学院)

## Investigation into Human Existence Detection Performance of A Radio Wave Sensor

○ Eugene KIM (NAGOYA UNIVERSITY), Yoji YAMADA (NAGOYA UNIVERSITY), and Shogo OKAMOTO (NAGOYA UNIVERSITY)

Abstract : Collaborative operation systems between human and robot applicable to cell production systems have attracted special interest in the field of manufacturing. This paper describes an examination for an experimental results investigating the human detection performance including his/her motion in the attempt of using a radio wave sensor that has fast response. A 24GHz radio wave doppler sensor has a function of detecting not only the relative distance of an object but also the speed, and the function can be potentially applied to the criteria for safety-related human existence/motion monitoring.

### 1. 緒 論

本稿は、ロボット新戦略で挙げられている Easy-to-Use 指向 [1] の産業用ロボット開発を目指し、人間・ロボット共存系を実現するための要素技術開発に関するものである。現在セル生産現場では、労働集約的な人手の投入に代わる自動化が行われている。ワイヤハーネス等、柔軟物ハンドリングやコネクタの樹脂部品への取り付け作業等、とくにロボットを利用した自動化についても鋭意取り組まれている。しかしながら、不良率の問題等解消すべき課題は多く、当面、人間とロボットが共存する協働作業システムが併せて検討されるべき状況にある。つまり、生産性を損なわないために、ロボットと人間が相互に作業空間を共有し、その空間の中でロボットに比較的単純な作業を高速高精度に行わせ、その傍らで、人間が比較的複雑な作業やエラーリカバリ、検査等の作業を行うことが一案として考えられる。しかし、そのためには厳格に労働安全規則を遵守し、作業者の安全を確保しなければならない。そのために、上記規則第 150 条の 4 の施行通達 (改正後)[2] に記載された国際安全規格に準拠した技術を適用して安全を確保する必要がある。

その第一は、個別機械 (グループ) との安全規格である製造環境におけるロボットの安全要求事項に関する規格 ISO 10218-1[3]、-2[4] である。この規格によれば、ロボットによる人間との協調作業を許す場合には、安全機能として運動中は要求される安全度水準の性能を有りする人間のモニタする技術の導入が求められている。加えて過度に生産性を損ねないためには、第 2 として、ISO/TS 15066[5] に規定された安全距離規範を満足するために、危険区域における人間の存在位置を検出することが要求されるのみならず、その運動状態 (速度) を検出することが望まれている。

これらの機能を有りするセンサを採用する場合には、セ

ンサが要求安全度水準を満たし得るか、またその検出分解能等のセンサ特性が十分であることを慎重に検討しなければならない。本研究では、人間の運動情報を含む存在検知機能を有りするセンサの例として、電波式センサを取り上げ、その使用可能性や適用限界を調べた実験について報告する。

### 2. 研究内容

#### 2.1 24GHz 電波式センサ

2001 年の日本電波法改正により、24GHz 帯が移動体検出装置に開放され、利用可能となった [10]。24GHz 帯は、欧米でも侵入検知センサとして使用可能であり、世界共通で使用可能な周波数帯である。また、24GHz 帯は、従来から侵入検知センサとして使用している 2.45GHz 帯と、現在、車間制御等に利用されている侵入センサよりも高精度な移動体検出帯域である。24GHz 帯はミリ波レーダで使用している 76GHz 帯の中間に位置し、低周波と低コストを維持しながら、高周波化のメリットを活かし、汎用性の高いセンサとして適切だと判断し、24GHz 電波式検知センサを採用した。

#### 2.2 FM-CW(Frequency Modulated Continuous Wave) を利用した距離測定原理

準ミリ波帯を用いたレーダとして使われる 24GHz 帯の電波式センサには 3 種類のモードが存在する。移動速度や変動等を測るモード、移動体の距離等を測る 2 周波モード、そして静止運動まで距離を測れる FM-CW センサタイプのモードがある。本研究では、静止あるいは準静止状態の距離まで測れる FM-CW タイプのセンサを採用する。FM-CW の距離測定概念図を Fig.1 に載せる。

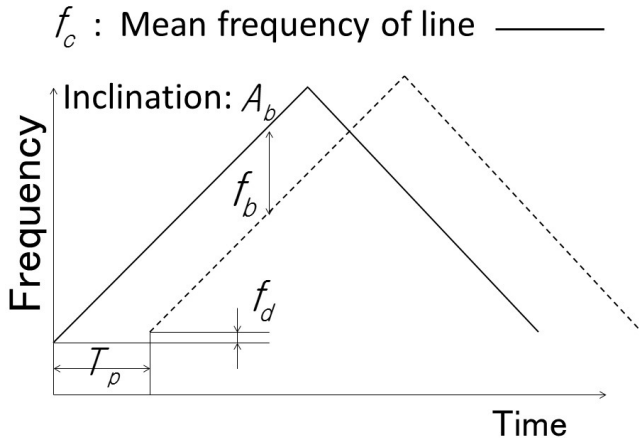


Fig. 1: FM-CW の原理概念図

時間に比例して振動数を掃引するとき、ある時刻  $t$  での角振動数の変調量を  $\omega_b$  とすると、変調定数  $A_b$  [rad/s<sup>2</sup>] は式 (1) で表すことができる。

$$\omega_b = A_b t \quad (1)$$

これを用いると、送信信号の波形は

$$v_{fm}(t) = A_c \cos\left(\omega_c t + \frac{A_b}{2} t^2\right) \quad (2)$$

で表現できる [7]。ここで  $\omega_c$  は中心周波数、 $A_c$  は送信信号の振幅である。

また同様に、受信信号の波形は信号の往復時間を  $T_p$  とすると

$$v_{fm}(t - T_p) = A_c \cos\left\{\omega_c(t - T_p) + \frac{A_b}{2}(t - T_p)^2\right\} \quad (3)$$

となる。

式 (2) と (3) を乗じて展開すると

$$V_{out}(t) = \frac{A_c^2}{2} \left[ \cos\left\{(2\omega_c - A_b T_p)t + A_b t^2 + \left(\frac{A_b}{2} T_p^2 - \omega_c T_p\right)\right\} + \cos\left\{A_b T_p t + \left(\omega_c T_p - \frac{A_b}{2} T_p^2\right)\right\} \right] \quad (4)$$

となる。式 (4) の一つ目の余弦の項は一般に混合器のカットオフ周波数を越えており、カットされる。2つ目の余弦の項の中身を微分することによりビート周波数  $f_b$  を得ることができる [8]。つまり

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left\{ A_b T_p t + \left(\omega_c T_p - \frac{A_b}{2} T_p^2\right) \right\} = \frac{A_b T_p}{2\pi} \quad (5)$$

となり、 $T_p$  で求められる目標からの距離はビート周波数  $f_b$  を測定することにより計算することができる [9]。

## 2.3 ドップラ効果を利用した速度測定原理

速度測定原理を説明するために図 2 を載せる。

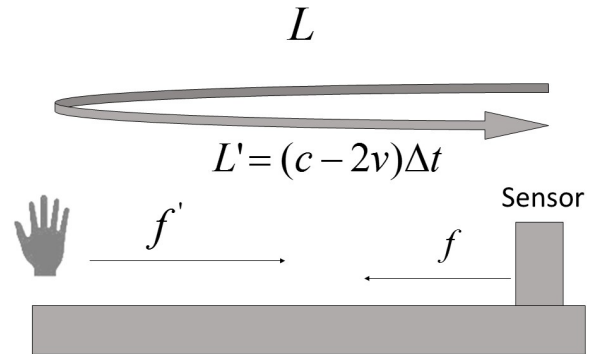


Fig. 2: 速度計算の原理模式図

電波を送信して、受信波と送信波の差が  $f_d$  だけあったときを想定する。 $f_d$  はドップラー周波数、つまり送信波の平均周波数  $f_c$  と、ドップラー効果によって変化した受信波の平均周波数  $f'$  との差である。

$$f_d = f_c - f' \quad (6)$$

センサと対象物体の間で光が移動した距離を  $L$  とすると、相対速度  $v$  によって変化した距離の間に存在する波の数は

$$N = \frac{L}{\lambda} = \frac{c - 2v}{c} f_c \Delta t \quad (7)$$

で表すことができる。次に、変化した周波数を計算すると

$$f' = \frac{N}{\Delta t} = \frac{c - 2v}{c} f_c \quad (8)$$

したがって、ドップラー効果より相対速度  $v$  で生じる平均周波数の差は

$$f_d = f_c - \frac{c - 2v}{c} f_c \quad (9)$$

$$= \frac{2v}{c} f_c \quad (10)$$

となり、これは、もとの波形の波長  $\lambda$  を利用して表すことができる。そこで、 $v$  については

$$v = \frac{f_d}{2\lambda} \quad (11)$$

により、対象物体のセンサとの相対的な速さを計算することができる。

## 3. センサの特性調査

本稿では、単一センサの対象物体に対する相対距離および相対の速さに関する検出精度を性能調査の対象とする。

本研究では 24GHz の電波式センサの運動に関する検出信号の精度を評価する目的で、PLC (Programmable Logic Controller) により制御されるリニアスライダを使用する。リニアスライダは、最大速度 3 m/s まで制御が可能であり、最大移動距離は 0.825 m である。

### 3.1 FM-CW の掃引周波数

図 1 を用いて説明した FM-CW の原理に関して、実際には、周波数変調は滑らかに行われるのではなく、一定の時間をもってある値だけ一定の、すなわち、掃引サンプル時間をもって、掃引周波数分だけを変調するように設計されている。

掃引周波数は、距離検出に対してセンサの距離検出の誤差にかかわる意味で大きな役割を果す。センサは 24056.25 ~ 24244.38 MHz の領域内で変調可能であり、約 200 MHz の周波数変調幅を持つ。わが国の電波法関係上、それ以上の周波数変調はシミュレーションのみで制限されている [10]。図 3 は、掃引周波数が計測値に影響を及ぼす様子を

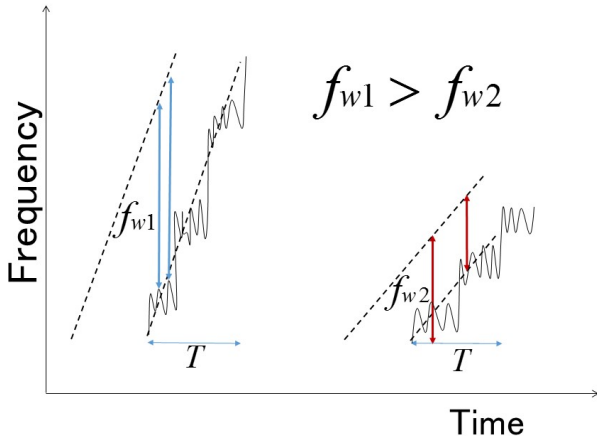


Fig. 3: 掃引周波数と誤差の関係

示している。図 3 から分かるように、同じ掃引時間 (変調が行われる時間)  $T$  の間に  $f_{w2}$  だけ掃引変調を行ったとき、 $f_{w1}$  のときと比べて真のビート周波数に対してノイズの値が大きいため誤差は掃引周波数の値に依存する。図 4 は、センサから 0~0.5 m のところまで往復運動を距離で取ったグラフである。周波数変調が始まる部分であるメイン周波数をそれぞれ 24.10, 24.15, 24.20 GHz に設定したとき、可変周波数領域幅が限られているため、変調できる周波数はそれぞれ約 150, 100, 50 MHz になる。そのため、図 4 のように比較的大きい掃引周波数をもつ 24.10 GHz のときに誤差が縮まることが分かる。

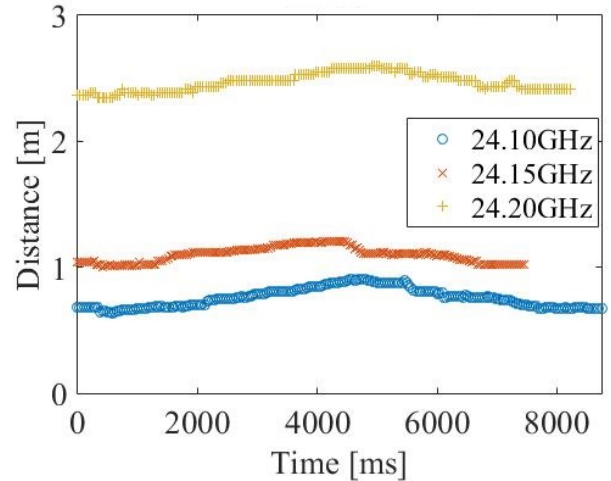


Fig. 4: 掃引周波数による誤差の違い

したがって、掃引周波数を最大にし、掃引周波数を約 200 MHz に設定した上で、同一の条件の下で得られた結果のグラフを図 5 に載せる。

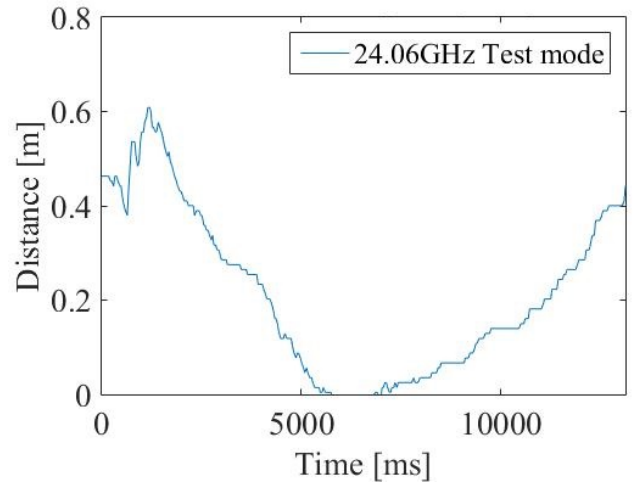


Fig. 5: 近距離計測値の補間値

図 5 から分かるように、図 4 の場合と比べて距離の誤差が小さくなっていることが分かる。したがって、この条件の下で以下の実験を行うことにした。

### 3.2 検知距離制限方法

センサの値の受信部の指定として、まず、受信部の信号増幅を調節して設定することができる。ゲイン設定値を変えることにより、検出距離を調節する。すなわち、ゲインを下げることにより、遠くの物体を検出しなくて済むようになる。次にもう一つ、検出距離にかかわるパラメータと

して、ピーク検出閾値を設定する。ピーク検出閾値を変え  
ることにより、さらに高感度で対象物体までの距離を検出  
することができる。

本実験では、リニアスライダを用いて 1.5 m から 0.7 m  
までセンサに向けて対象物体を移動した。センサは金属  
を検知するため、リニアスライダの上に金属材質の鉄板を  
乗せて移動させた。リニアスライダは、PLC によって 0.5  
m/s の一定速度で制御した。検出位置範囲として、任意に  
1m 以内のを検出するように設定し、それぞれの値に対し  
て 5 回分の実験を行った。それぞれの値に対する結果を図  
6,7,8,9 に表示する。まず、図 6 は受信ゲインを 23.5 dB に  
設定した上、ピーク閾値を 60 dB に設定したときの図であ  
る。同じく、図 7,8,9 もピーク閾値を 5 dB ずつ減らしな  
がら実験を行った場合に得られた結果である。

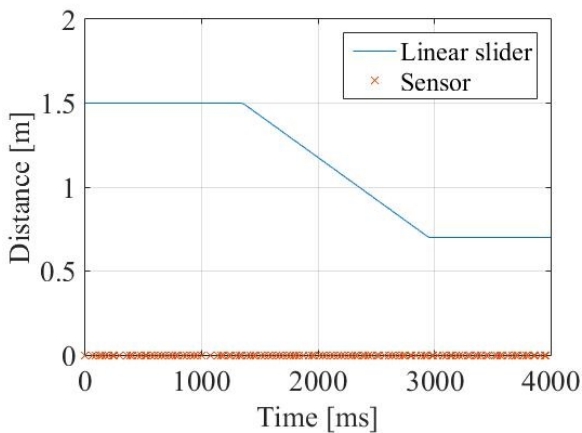


Fig. 6: 受信ゲイン (23.5 dB) とピーク閾値 (60 dB) による検知距離制限

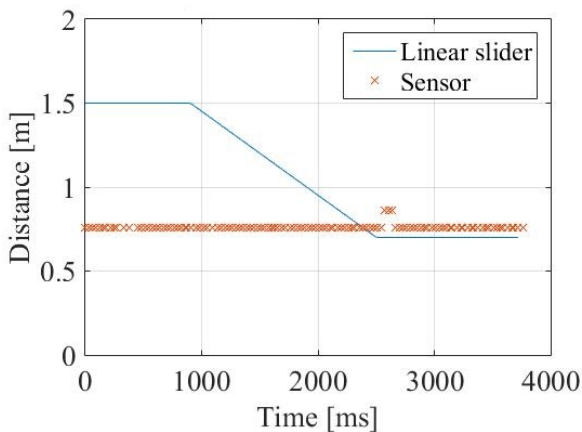


Fig. 7: 受信ゲイン (23.5 dB) とピーク閾値 (55 dB) による検知距離制限

図 6 の場合は、ピーク検出閾値が高いため、1.5 m ~0.7

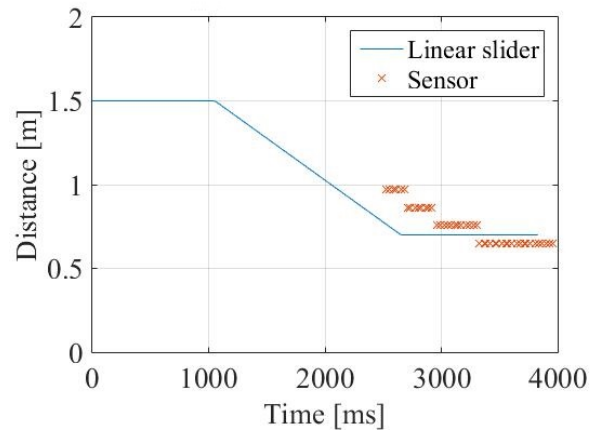


Fig. 8: 受信ゲイン (23.5 dB) とピーク閾値 (50 dB) による検知距離制限

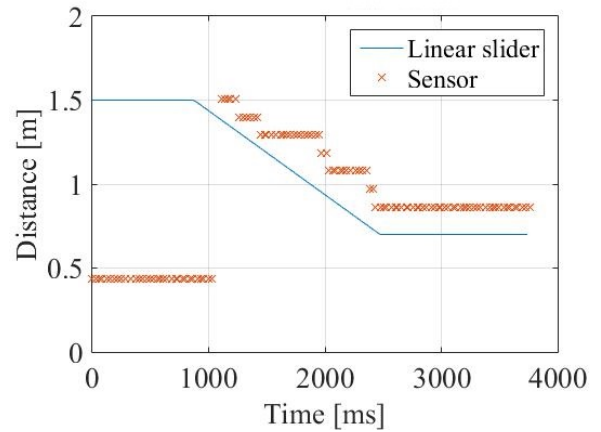


Fig. 9: 受信ゲイン (23.5 dB) とピーク閾値 (45 dB) による検知距離制限

m の検出領域の中ではリニアスライダの動きを検出でき  
なかった。ここで、ピーク検出閾値を下げると、図 7 に示  
すように、対象物体までの距離がいくらか検出対象とでき  
るようになり、リニアスライダを用いた校正により、平均  
0.84 m の位置で検出した。さらに、図 8 では検出距離が  
大きくなり、平均 0.93 m の位置で検出できるようになっ  
た。最後に、図 9 に示されるように平均が 1.4 m まで大き  
くなることが確認できた。

## 4. 結言

### 4.1 まとめ

本研究では、単一の 24GHz 帯域のセンサを対象として、  
対象物体までの相対距離および、物体との相対速さに関し  
て精度評価に関する調査を行った。

センサは3つのモードの中で、運動あるいは静止状態の距離まで測れる FM-CW タイプのセンサを採用した。

センサの性質の中で受信部設定による距離制限方法を調べた。また、FM-CW モードの性質の中で掃引周波数による相対距離検出値特性を調べた。その結果本研究では距離制限法を用いて、0.5 m ~1.5 m の範囲の間で検出距離を制限することが可能になった。

## 4.2 今後の課題

本実験では、検出精度に関する評価に資するデータが得られるようになったところまでを報告することができた。しかしながら、安全性の観点から検出データの信頼性に関わる統計的な誤差分散に関する評価、さらには、ロボットの運動速度を考慮に入れた精度の評価を行うまでには至っていない。今後は、これらのさらに合理的な観点に立った評価を展開する計画である。

## 5. 謝辞

本研究の一部は「知の拠点あいち」プロジェクト(Ⅱ期)の研究テーマ「愛知次世代」ロボットの生産性・市場創出を推進する要素技術開発に関する事業により達成された。

また、実験の実施と本研究の進行にあたり、名古屋大学修士2年の武田峻矢君と学部4年池上徹弥君に協力を頂いた。

## 参考文献

- [1] ロボット革命実現会議 “ロボット新戦略 Japan's Robot Strategy-ビジョン・戦略・アクションプラン”, 2015/1/23-6.
- [2] 厚生労働省, 産業用ロボットに係る労働安全衛生規則第150条の4の施行通達の一部改正について, 基発1224第2号, 2013.
- [3] ISO 10218-1 Robots for industrial environments - Safety requirements part 1:Robot.
- [4] ISO 10218-2 Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots Part 2:Robot systems and integration.
- [5] ISO/TS 15066 Robots and robotic devices - Collaborative robots, Robots et dispositifs robotiques
- [6] Yoshijiro Hori, Toshiyuki Moribayashi, Choichiro Tsuchihashi and Yoshihiro Sasaki, “24 GHz Intrusion Detection Sensor for Vehicle Antitheft Systems”, 富士通テン技報, Vol.22, No.1.
- [7] Jau-jr Lin, Yuan-Ping Li, Wei-Chiang Hsu and Ta-Sung Lee, “Design of an FWCW radar baseband signal processing system for automotive application”, *Lin et al. SpringerPlus*, 5:42. 2016.
- [8] Graham M Brooker, “Understanding Millimetre Wave FMCW Radars”, *1st International Conference on Sensing Technology*, 2005

- [9] Raphael Rouveure, Patrice Faure, Marie-Odile Monod, “Panoramic millimeter-wave radar for perception in mobile robotics applications, Part 1: Principles of FMCW radar and of 2D image construction”, *Elsevier 0921-8890.*, 2016
- [10] Kazuhiro Yamaguchi, Mitsumasa Saitoy, Kohei Miyasaka and Hideaki Matsue, “Design and Performance of a 24 GHz Band FM-CW Radar System and Its Application”, *APWiMob 2014*, Bali 28-30 Augustus 2014.