B123

ミリ波レーダによる濃煙空間の計測・可視化手法の検討

††大峯 幸雄○ †酒井 正樹 †青木 義満 ††高木 幹雄

† 芝浦工業大学工学部 情報工学科

†† 芝浦工業大学大学院 電気工学専攻

E-mail: †{mine, sakai, aoki}@aoki-medialab.org

†† mikio@sic.shibaura-it.ac.jp

Examination of the measurement / visualization technique of the dark smoke space by the millimeter wave radar

††Yukio Omine†Masaki Sakai†Yoshimitsu Aoki††Mikio Takagi

ABSTRACT

In this paper, we aim at visualizing smoke-filled space in front of fire crews using millimetric wave radar sensor. Our proposed system is composed of the millimetric-wave radar, a stereo camera, and gyroscope sensor attached on them. Millimetric-wave has a property of filtering out smoke. The FM-CW millimetric-wave radar can output a 2D reflection density values from obstacles for one-time scanning in invisible space. As for visible space by eyesight, we utilize the 3D stereo camera which can capture a 3D distance map with color information in an angular field of view. Both of the sensors have the capable of real-time scanning (10 frames/sec), and we manually operate them to scan target space. The scanned frame data is stored with 3D direction information from a gyroscope sensor. To construct the 3D space map, we integrate the 2D maps from the millimetric-wave radar and the 3D maps from the stereo camera using the gyroscope data.

Keywords : Smoke space visualization, Millimetric-wave radar, Gyroscope sensor,
3D space reconstruction

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、日本国内だけではなく、世界的に自然災害や人的災害が急増している。このような現状の中、それらの災害に対してどのような危機管理を行うかが重要な課題となっており、工学技術を応用した各種セキュリティシステムの研究開発が行われている。特に火災発生現場における救急活動においては、炎同様に作業上大きな障害となるのが、眼前に立ち込める煙である。濃度の高い煙の存在は、消防隊員の空間把握能力を大きく低下させる。現状、このような状況下において、消防隊員は手に検索棒という発光する棒を持ち、周囲の物体や人の体に当たる感触を探りながら救助活動を行っている。そこで、立ち込める煙を見透かし、空間の3次元地図を得ることができれば、救助活動の大きな手助けとなる。

人間が立ち入ることのできない、危険度の高い災害発生現場における救急活動においては、様々な計測センサを搭載した救助・探索用ロボットの利用が検討されている[1][2]。その一例として、濃煙空間の中の障害物を探索し、状況把握を行うロボットが提案されている[3]。しかし、刻々と地面や周辺の状況が変化する環境下において、迅速な状況判断と移動性が求められることが多く、解決すべき課題も多い。濃煙空間内にいる消防隊員自身がセンサを身に付け、現場の状況認識を支援するようなシステムは未だ開発されていない。

1.2 研究目的

本研究では、火災現場における救命・消火活動において、作業員による現場の状況把握が最も重要な問題であると考え、煙が立ち込める3次元空間（濃煙空間）を可視化することを目的とする。可視や熱赤外領域の計測手

段では不可能である濃煙空間内での3次元計測には、自動車前方車両検知センサとして開発されている小型のミリ波レーダ装置を用い、手振りにより多数方向の奥行きデータを取得する。同時に得られたジャイロセンサの方位情報を元に距離データを統合し、空間の3次元地図を作成する。得られた3次元地図を可視化・提示することで消防隊員の空間認識能力を増強させるのが提案する計測システムの目的である。全体の処理の流れを図1に示す。

Fig1 The overall processing of the system

本稿では、主に提案する計測システムの概要と、ミリ波レーダの空間3次元計測の適用可能性について述べる。検証実験では、煙のない空間での3次元計測及び空間の構築を行い、計測システムの基本的な性能について検討した。

2. 計測システム

本計測機器の概要を図2に示す。

Fig2 External appearance of the measuring system

2.1 ミリ波レーダ

濃煙空間における奥行き計測には、前方車両との距離計測用レーダとして使用されている、76GHz帯ミリ波レーダを用いる。測距方式はFMCW方式であり、検知エリア内のターゲットの距離、相対速度、角度情報、信号強度のデータを出力することが可能である。濃霧や雨など、悪天候下においてもロバストな計測が可能なることから、濃煙環境下での距離計測への適用を検討している。

2.1.1 煙に対する透過性

煙のようにミリ波の波長に比べ微小な粒子では以下の

レイリー散乱近似が成り立つことが知られている。波長の4乗に反比例して散乱が増加する(透過しなくなる)。ミリ波の波長に対して、煙の粒子は非常に小さいので、光波と比べて散乱しにくく、透過しやすい性質を持っている。現在、自動車で実用化されているミリ波レーダは霧や雨、雪などに対しても強い耐性を示しており、煙が充滿する空間中でも同様に計測が可能であると考えられる。

$$\sigma = 4 \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^4 (\pi a^2) \quad (1)$$

σ : Rear scattering cross-section area
 a : Particle radius
 λ : Wavelength

2.1.2 測距方法

FMCWレーダは連続波の送信信号(CW)に周波数変調(FM)を施したものをを用いる。送信信号として、図3上の実線で示すように周波数変調を三角波の繰り返しで施したものをを使うとすると、距離Rのところにある目標からの反射信号の周波数は図3上の点線のように変化する。このとき、送信信号と反射信号のビート周波数(送信信号と反射信号の周波数差)は図3下のようにになる。このとき反射信号のビート周波数と目標距離には(2)式の関係があり、ビート周波数を検知することにより対象物体までの距離が得られる。

Fig3 Relationship between distance and transmission / received signals

$$R = \frac{C}{4 \cdot \Delta F \cdot f_m} \cdot f_r \quad (2)$$

R : Distance to target
 f_r : Beat frequency
 C : Light speed
 f_m : Modulation frequency
 ΔF : Amplitude of frequency modulation

また装置は、一次元走査により、一度で得られるデータ(1フレーム)は水平1ライン $\pm 10^\circ$ 、 0.55° 間隔38ビーム、1ビーム当たり0.5m間隔で384点から構成される信号強度データである(図4)。データ取得レートは最高10Hzであり、動的な距離計測が可能である。レーダ出力データはFFT処理されたパワースペクトルで

ある。信号強度レベルに応じて各計測点を色分けし、3次元空間中に反射強度情報付きの点群データとして配置する。

Fig4 Radar data acquirable by 1-dimensional scan

3. 3次元空間の構築手法

ミリ波レーダによって1回の一次元走査で得られる点群データは図4に示した通りであり、空間解像度が低い。そこで、ミリ波レーダを複数の場所から様々な方向へ向けて走査し、点群データの空間解像度を向上させる。走査毎に得られた信号強度付きの点群データを3次元空間中に統合するには、観測者の位置（正確にはレーダアンテナの放射開始点）と姿勢を計測する必要がある。姿勢の計測には3軸方位角が計測可能なジャイロセンサ（Inertia2/Intersense社）を用い、スキャン時の3軸角度データ（yaw, pitch, roll）を得る。また、位置の検出に関しては加速度センサと地磁気センサを利用したドッドレコニングによる推定手法を検討中である。推定された観測者の3次元位置及び姿勢情報位置の原点3次元空間を構築する際、重要となってくるのは角度データである。計測する際、ミリ波レーダ、ステレオカメラは三脚に固定してジャイロセンサを三脚の回転軸の中心に固定する。固定した支点から水平方向に角度を振って断続的にデータを取得していく際、ジャイロセンサにより角度データ（yaw, pitch, roll）を取得する。

計測位置*i*において、*n*回の走査により信号強度データを取得した場合を考える。ミリ波レーダの放射開始点を原点としたローカル座標系における信号強度データを $I_i(x, y, z)$ 、ジャイロの3軸回転角度及び推定位置により座標変換を施した後のワールド座標系における信号強度データを $I_i(X_w, Y_w, Z_w)$ とすると、計測位置*i*において得られた点群データ ξ_i 及び全ての計測位置において得られたデータを統合した点群データ集合は図5の通りに表される。ステレオ計測の結果得られた距離データに対しても同様に計測位置及び姿勢データを用いて点群データを統合し3次元マップを生成する。

$$\xi_i = \{ I_i(X_w, Y_w, Z_w) \mid t=1, 2, \dots, n \}$$

ξ_i : Point cloud dataset
obtained at position *i*
t: Scan frame number
s: Number of scanning position

$$\Rightarrow \bigcup_{i=1}^s \xi_i \quad \text{Integrated point cloud dataset from multiple measurement points}$$

Fig5 Integration of point cloud datasets

4. 実験と考察

4.1 実験概要

今回、室外において固定された1地点から装置を三脚に設置した上で回転させて断続的にデータを取得して3次元構築した実験（4.2），また、複数の地点から装置を連続的に手振りし、3次元計測する実験（4.3）を実施した。室外においては人、自動車、建築物がある環境で、ミリ波レーダ、ステレオカメラ両機器による計測と3次元空間の可視化を行った。なお、今回の実験は全て煙のない環境下での実験である。

4.2 屋外空間の計測実験

屋外の実験では、人物を2人配置し、計測を行った。計測装置の位置を三脚で一箇所に固定し、水平方向に15°、垂直方向に-10°～10°までを10°刻みで回転させ、各々の姿勢においてデータの取得を行った。取得したミリ波レーダの信号強度データを3章の手法により3次元空間内にマッピングする。また、ステレオカメラで計測した3次元マップをミリ波レーダの計測結果検証のために用いる。ミリ波レーダから得た3次元地図とステレオカメラから構築した3次元地図との対応を図6に示す。左右の壁面及び人物の存在位置に強い反射信号が得られた。2名の人物は2m離れて立っていたが、データの分布から両者をセグメンテーションすることができた。建物の入り口付近から内部に関してレーダの反射データが取得されていることから、レーダの多重反射により計測箇所から不可視な領域（オクルージョン）に対してもミリ波が到達し、対象物を捕らえられる可能性があることがわかった。

Fig6 The measurement result in the outdoors

4.3 複数地点からの手振りによる計測

4 章で述べた目標とする実用化の形態に最も近い、センサを可視化したい空間へ向けて手振りし、連続的にスキャンして空間解像度を高める基礎的な実験を行った。実験環境は屋外で、図 7 に示すように人物を囲む矩形領域の辺上に 6 点を設定し、計測地点既知の条件のもと、各地点において計測装置を人物の存在する方向へ 6 秒間ずつ走査した。ミリレーダのフレームレートは 10Hz とした。予めステレオ計測してステレオの 3 次元地図を構築しておき、それとミリ波レーダデータより検出された信号強度の高い点群データを重ね合わせ、検証を行った。結果を図 8 に示す。

多地点から手振りでデータを連続取得したことで、人物の前後の表面上に点群データを得ることができた。ステレオ計測の結果と照合した結果、人物の幅・奥

Fig7 Experiment environment

Fig8 The result measured by shaking manually

行きに関して実際の人物の大きさと同等の値を得ることができた。人物の周辺までデータに広がりが見えるが、この主な原因は装置を振った際の位置ずれ、角度検出の誤差であると考えられる。

4.4 3 次元ラベリング処理による視認性の向上

図 8(右)のように、装置を振った際の位置ずれや角度検出の誤差で生じたデータが人物周辺まで広がっているため、視認性が低い。そこで、3 次元空間内に仮想的な 3 次元ブロックを用意し、各ブロック内の信号強度の出現頻度、信号強度の総和、点群の 3 次元的な連結性を算出し、閾値処理によって各ブロックを表示、または、消去することで、人物周辺のノイズデータを除去することができ、視認性を高めることができる。

Fig9 After label processing

5. まとめ

火災現場における救命・消火活動において、煙が立ち込める空間（濃煙空間）を可視化するシステム実現へ向けての基礎的な検討を行った。ミリ波レーダから得られた距離情報とジャイロセンサの方位情報を統合することで、可視や熱赤外領域の計測手段では不可能である濃煙可視化を目指している。本稿では、煙のない状況でミリ波レーダの 3 次元計測適用の可能性を検証した。その結果、空間解像度に問題は残るものの、人物や壁面などの対象物を検出可能であることがわかった。また空間的なラベリング処理を施すことにより、視認性を高めることができた。(図 9)

今後の課題としては、加速度センサ情報からの位置推定処理の実装、構築した 3 次元地図情報のわかりやすい提示方法などがある。また、実際に煙の存在する空間において実証実験を実施し、システムの評価を行う予定である。

参考文献

- 1) <http://www.mie.eng.himeji-tech.ac.jp/manuf1/inchworm/inchworm/robot.html>
- 2) http://www.c-crews.co.jp/gnext_express/news/back/0308/030822_05.html
- 3) <http://www.tfd.metro.tokyo.jp/ts/soubi/robo/03.htm>