

赤外線カメラと三次元測域センサを搭載したロボットによる 人間の活動状態推定 ～ 測域センサを用いた呼吸検出手法の提案 ～

尾形 一気 (筑波大学), 大矢 晃久 (筑波大学)

Human activity estimation by a mobile robot equipped with Thermography and Three-Dimensional SOKUIKI sensor ～ Proposal of breath detection using SOKUIKI sensor ～

Kazuki OGATA(Univ. of Tsukuba), and Akihisa OHYA(Univ. of Tsukuba)

Abstract— In this paper, we describe a method of breath detection using the mobile robot equipped with Thermography and SOKUIKI sensor. First, we described how to estimate the position and orientation of the body from the Three-Dimensional point cloud. And, we showed that breathing can be detected by measuring across the body by SOKUIKI sensor.

1. はじめに

1.1 研究背景

安心・安全のためのシステムとして、警備ロボットの研究が広く行われている。現状の警備ロボットでは、人感センサなどを用いた不審者の発見や、指定経路の巡回、自律走行しながらの情報発信などを実現させている [1]。

一方で安心・安全を提供するシステムの機能としては、体調が悪くなって座り込んだり倒れている人を発見することも必要だと言える。ロボットが人の疎らになった病院や駅構内などの環境を巡回し、救護を必要とする人を発見して人間の警備員に知らせる機能を付加できれば有用だと考えられる。

1.2 研究目的

将来の警備ロボットには、救護を必要とする人を発見・通報できるような機能の実現も求められている。本研究では、その基礎研究としてロボットに搭載したセンサを用いて人間の活動状態を推定することを目的とする。

歩いている、座り込んでいる、意識が無いといった人間の活動は、その大きさの順に以下の a~d のように分類できる。そして、ここではこの 4 つの段階のどれに該当するかを判別することを活動状態の推定とする。

- a) 移動している
- b) その場で動いている
- c) 動いていない
- d) 呼吸をしていない

本研究のアプローチとしては、まず赤外線カメラの画像から人間を検出し、その移動量を計測することにより a であるかを判断する。次に、a に該当しない場合は、人間に接近して詳細な三次元形状を計測することで、手足や身体の動きといった動作を検出し、b と c を判別する。そして、動作が確認できない場合には呼吸の有無を検出することで、最終的に a~d のどれに該当するかを判別することを考えている。

本稿では、特に活動状態推定の中でも呼吸検出の部分に注目して、測域センサを用いた呼吸計測手法を提案し、ロボットを用いた呼吸検出のアプローチを紹介する。

2. システムの構成

まず、本研究で用いるシステムの構成を以下に示す。ハードウェアとして、赤外線カメラと三次元測域センサ、それらを搭載するロボットを紹介し、ソフトウェアとしては三次元点群から人間検出するための手法を紹介する。

2.1 赤外線カメラ

本研究では環境中から人間を検出するために、非接触で対象物の表面温度を観測できる赤外線カメラ(サーモグラフィ)を用いる。人間の体温が年間を通して 36 前後に保たれていることから、人間と周囲の環境との温度差の情報を用いることで屋内であればロバストに人間を検出できると考えられる。

本研究では NEC Abio 赤外線テクノロジー製の赤外線カメラ NeoThermoTVS-610 を使用する。赤外線カメラの仕様を表 1 に、外観を図 1 に示す。このカメラは、ボロメータと呼ばれる熱量計を 320 × 240 個を敷き詰めるようにして構成した検出器を用いることで、視野内の温度分布を画像提示することができる。温度分布を表した画像のことを以下では熱画像と呼称する。



Fig. 1 NeoThermoTVS-610

Table 1 Specification of NeoThermoTVS-610

Measuring range	-15 ~ 300
Accuracy	± 2
Resolution	0.1
Detector	Uncooled focal plane array (microbolometer)
Spectral range	8 ~ 14 μ m
Field of view	25.8 ° (H) × 19.5 ° (V)
Thermal image pixels	320(H) × 236(V)
Video signal output	NTSC/PAL
Frame time	30 frames/s
Dimension	W115mm,D217mm,H142mm
Weight	2.6kg

Table 2 Specification of UTM-30LX

Light Source	Semiconductor laser diode(905nm)
Detection Range	0.1 ~ 30m, 270 °
Accuracy	0.1 ~ 10m: ± 30mm, 10 ~ 30m: ± 50mm
Angular resolution	0.25 °
Response time	25ms/scan
Dimension	W60mm,D60mm,H87mm
Weight	370g

Table 3 Specification of SPU-01b

Angular resolution	0.015 °
Maximum speed	90 ° /sec
Input SUPPLY	9 ~ 30V(DC)
Interface	RS-232C
Dimension	W75mm,D110mm,H59mm
Weight	750g

2.2 三次元測域センサ

ある程度の遠方からも計測したいこと、形状の変化から動作や呼吸を検出するために詳細な距離を計測したいことから、本研究では三次元計測のために測域センサを用いることとする。一方で測域センサは2次元平面を走査することから、これ単体では3次元的な形状を計測することができない。そこで、測域センサを振ることで三次元的な形状を計測する。

また、本研究では座り込んだり倒れているような人間を対象とするため、ロボットの前下方の物体に注目することになる。そのため床面から天井までの広範囲な測定は必要なく、高さが低い物体を対象とすることから、測域センサの計測面を床面と平行にしてチルト方向に振ることで三次元計測を行う。

後述の測域センサとパンユニットを組み合わせて構築した三次元測域センサを図2に示す。

2.2.1 測域センサ

本研究では遠方から人間を発見して近づくこと、三次元的な距離データを取得することを考えているので、検出距離が30mであり動作周期の早い北陽電機株式会社製のUTM-30LXを用いる。測域センサの仕様を表2に示す。このセンサは、走査時間25msの間に270°の範囲を1440ステップに分けて距離を測定可能で、スキヤニングに同期して1スキヤンに1パルスの同期信号を出力することができる。

2.2.2 自動一軸雲台パンユニット

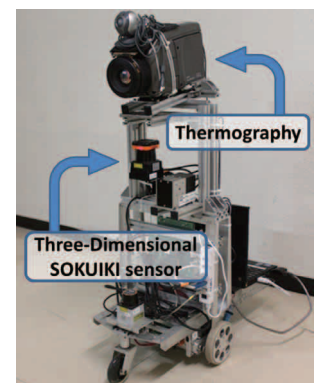
本研究では測域センサを振るために、PCから操作が可能な自動一軸雲台であるサスティナブルロボティクス社製のムービングヘッドPanUnit SPU-01bを使用する。

このSPU-01bには、指定した位置まで移動させることや、設定した速度で動作させることが可能なコマンドが用意されていて、RS-232C経由でPCから操作可能である。また、測域センサの同期信号が入力されたタイミングでの角度をサンプリング、出力できるという特徴がある。

2.3 移動ロボット

ロボットは筆者らの研究室で所有している移動ロボットプラットフォーム「山彦」を使用した。走行系の構成は独立二輪駆動制御を基本とし、従動車輪2輪、動輪2輪の合計4輪である。本研究で使用するロボットは、重量物を搭載することを考慮して、標準として着いている動輪のスプリングサスペンションは動作しないようにしている。山彦上には走行制御用のボードコンピュータが搭載されており、モータの速度制御やロータリーエンコーダ値の取得を行っている。

本研究では、このロボットに図1の赤外線カメラと図2の三次元測域センサを搭載して実験を行う。赤外線カメラの画角が小さいことに加えて、座り込んだり倒れている人間のような床面付近にある物体に接近して計測したいという要件があるため、下向き9.5度の仰角を設けて赤外線カメラを設置した。センサを搭載したロボットの外観を図3に示す。

**Fig. 2** 3D SOKUIKI sensor**Fig. 3** Mobile Robot

2.4 三次元点群からの人間の抽出手法

本研究では、三次元点群と熱画像の情報を組み合わせることによって人間の形状を抽出する手法を提案する。以下にその手順の概要を示す。

屋内で撮影される図 4(a) のような熱画像には、背景の温度が概ね 2 の範囲に記録されていて、人間などの前景よりも背景の面積が大きいという特徴がある。そこで、ヒストグラム上で 2 程度の範囲に該当する度数が最も大きくなる位置を探することで、背景の温度範囲を求めることができ、それより高温側の範囲を抽出すると図 4(b) のようになる。一方で、このままではノイズや、蛍光灯などの人間以外の要素も抽出されるという問題がある。そこで、形状の特徴から人間ではないと考えられる要素を削除していくことで、最終的に図 4(c) の検出画像のように、人間の部分の画素値を 0 とする二値化画像を得ることができる [2]。

次に図 5 における、点 C に対する点 p のように、三次元点をカメラ座標系から観測した場合の、画像上の座標を求める。そして、検出画像におけるその座標の画素値が 0 となる点群を抽出することで、図 9 の赤点群のように熱画像から検出した人間の三次元形状を得ることができる。また図 9 以降、本稿で紹介する三次元点群の図では、左上枠内の画像が検出画像を表し、青の格子は一辺が 1m を、三角錐がロボットの位置を表している。

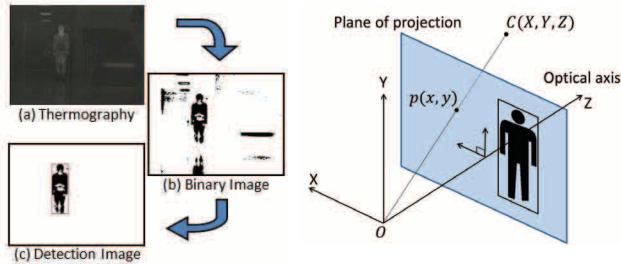


Fig. 5 Extraction of human from three-dimensional point cloud

Fig. 4 Human detection using Thermography

3. 測域センサを用いた呼吸計測手法の検討

呼吸を検出するためには、顔の温度変化から呼吸を計測する方法や [3], 呼吸に伴う体型上の変化を床面に敷いた圧力センサで計測する方法 [4] が提案されている。これらの研究の手法は、ベッドの上や椅子に座った状態など特定の場所や姿勢での測定を対象にしていることが特徴である。一方で警備ロボットのようなアプリケーションを考えると、ある程度姿勢や身体の向きが異なる状況でも呼吸検出できることが求められる。そこで本研究では、測域センサで計測する体形状の時間変化から呼吸検出を行うことを提案する。

人間の一回の呼吸による呼吸量は 0.5l 程度だと言われている。この呼吸の流入に伴う体形状の変化を計測するための特徴量として、本研究では、身体の三次元形状の時間変化、縦断面形状の時間変化、横断面形状の時間変化という 3 種類を考えた。身体の側面を下にして横たわった人間に対して、これらの特徴量を計測した結果を示す。

3.1 身体の三次元形状の時間変化

図 8 のように、身体の背面をロボットに向けて横たわった人間と、図 6 のような動かない物体に衣服をかぶせたもの (以下では不動物体と呼ぶ) を 0.6 秒周期で三次元計測した。そして、図 7, 9 のように得られる三次元点群の全点までの平均距離を算出し、その時間変化を観察した。図 10 のグラフに平均距離の時間変化を示す。上段のグラフは不動物体を計測した場合、下段のグラフは人間を計測した場合を表している。

図 10 下段のグラフは、上段のグラフと比較しても特徴的な変化が見られず、呼吸に伴う変位を確認することができない。三次元形状の時間変化から呼吸の様子を観察できなかったのは、人間の呼吸の周期がおおよそ 3 秒なのに対して三次元計測の周期が 0.6 秒と遅いこと、計測毎に測域センサのレーザが当たる位置が異なることが原因と考えられる。

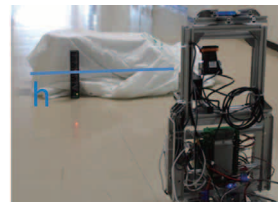


Fig. 6 How to measure a thing that does not move

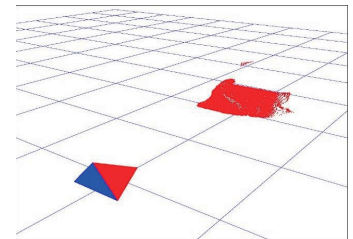


Fig. 7 Measurement example of a thing that does not move



Fig. 8 how to measure human from the back

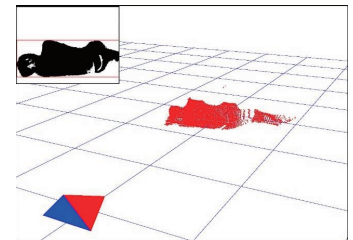
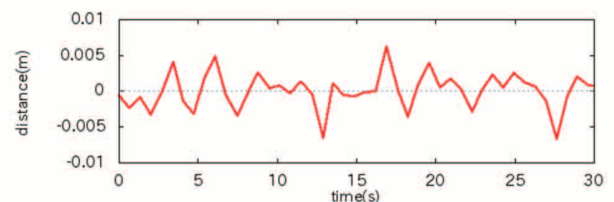
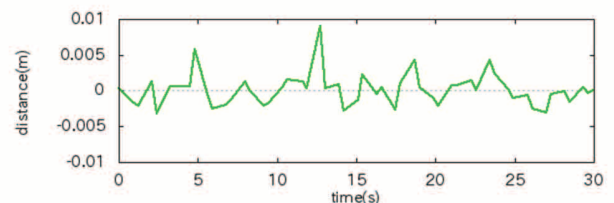


Fig. 9 Measurement example of human from the back



(a) Result of measuring the thing that does not move



(b) Result of measuring the human

Fig. 10 Temporal change of the average distance of 3D point cloud

3.2 縦断面形状の時間変化

次に、縦断面形状の時間変化を観察した結果を示す。図 6, 8 における直線 h 上を測定するように測域センサの仰角を固定し、人間を計測した点群までの平均距離の時間変化を求めた。ここでは 40Hz で計測を行い、図 11 の上段には不動物体、下段にはロボットに背面を向けて横たわった人間の計測結果を示す。

図 11 の下段のグラフから、不動物体を測定した場合には数 mm 程度の変位があることがわかる。下段のグラフでは、上段のグラフに比べてわずかに大きな変動があるものの、周期的な変位ではなく、この結果からは呼吸に伴う変位を確認できないと言える。身体を縦断的に計測する場合には、測定値の中で呼吸に伴って体形状が変化している部分が少ないことが影響し、呼吸の様子を観察できなかったと思われる。

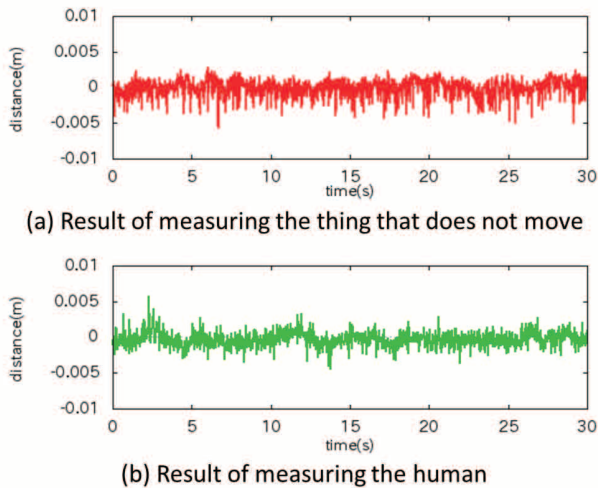


Fig. 11 Temporal change of the average distance measured in the longitudinal

3.3 横断面形状の時間変化

次に、横断面形状の時間変化を観察した結果を示す。測域センサの計測面を垂直に固定して図 12, 13 における直線 v 上を測定し、人間を計測した点群までの平均距離の時間変化を求めた。図 11 の上段には不動物体、下段にはロボットに背面を向けて横たわった人間の計測結果を示す。

不動物体を計測した図 14 上段のグラフでは、縦断的に計測した図 10 とほぼ同様な値のばらつきが見られる。ロボットに前面に向けた場合の図 14 からは、30 秒間で 6 回という呼吸と同程度の周期的な変位を明確に確認することができる。これは、横断的に計測することで同じタイミングで体形状が変化する場所を測定するため、縦断的に計測した場合に比べて顕著な変位が確認できるのではないかと考えられる。

これらの結果より、測域センサを用いて呼吸に伴う変位を計測するためには、身体の胴体部分を横断的に計測することが有効だと言える。

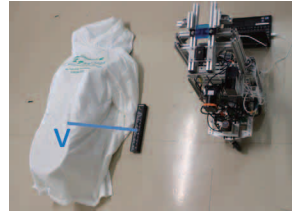


Fig. 12 How to measure a thing that does not move

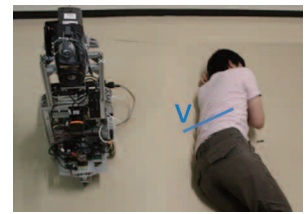


Fig. 13 How to measure human from the Ventral side

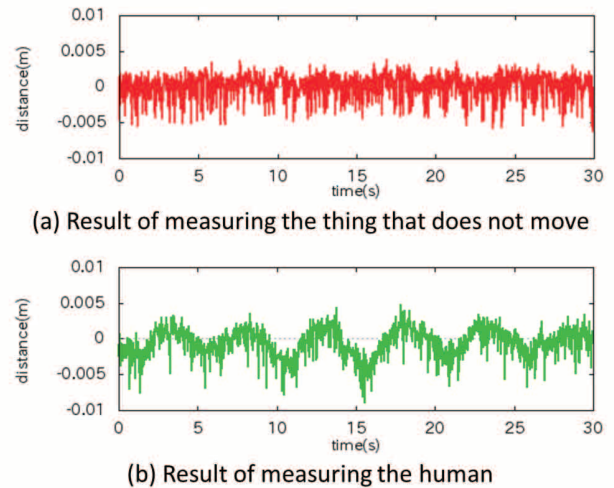


Fig. 14 Temporal change in the average distance of cross section

4. 人間の胴体の位置と身体の方をを推定する方法

3. 章の内容から、測域センサで呼吸の様子を観察するためには、身体の胴体部分を横断的に計測することが効果的だとわかった。一方でロボットによって自動的に呼吸検出を行うという目標を考えると、胴体を横断的に計測するためには、身体の方と胴体の位置を求める必要がある。そこで、人間の三次元点群から胴体位置と身体の方をを推定することを試みた。

4.1 胴体位置の推定

直立姿勢における重心位置は、頭頂から身体の方を長軸長に対して 47% の位置、つまり腹部の辺りにくることがわかっている [5]。姿勢が変化することでその位置は多少変動するものの、重心位置は腹部から胸部の範囲に収まると考えられる。

そこで本研究では、人間を計測した三次元点群の重心位置を胴体位置の推定値とすることにした。点群の密度が距離の二乗に反比例するため、人間に該当する部分における点群の、距離の二乗で重みを付けを行った重心位置を胴体位置の推定値とした。

4.2 身体の方をの推定

次に、身体の方をの推定値としては、点群における共分散行列から求める長軸ベクトルを用いることにした。距離の二

乗で重み付けをした点群の、人間に該当する部分における共分散行列を求め、その最大固有値に対する固有ベクトルを長軸ベクトルとして求める。

4.3 身体の方角と胴体位置の推定実験

今回考案した手法を用いて、身体の方角と胴体位置を正しく推定できるのかを調べた。仰向けに横たわった姿勢、ロボットに背を向けて横たわった姿勢、膝を抱え込んで横たわった姿勢の人間を三次元計測し、身体の方角と胴体位置の推定を行った。その結果を図 15~17 に示す。図中では、胴体の推定位置を通り、長軸ベクトルを法線ベクトルとする平面を境にして、点群を赤と青の 2 色に色分けしている。また緑線は、算出した長軸ベクトルに平行で胴体位置から 0.8m 離れた直線を表している。

いずれの結果においても、緑線が人の身体の方角と一致していることを確認できる。また胴体の推定位置については、図 15 では点群の境界が腹部にあり、図 16 では腰部の周辺にあることが確認できる。また、足を抱え込むようにして横たわった人間を計測した図 17 においては、胸部の周辺に点群の境界があることがわかる。これは、足を抱え込んだことにより重心位置が頭部方向に移動したためだと考えられる。この実験より、今回考案した方法で、胴体位置と身体の方角を推定することが可能だと言える。

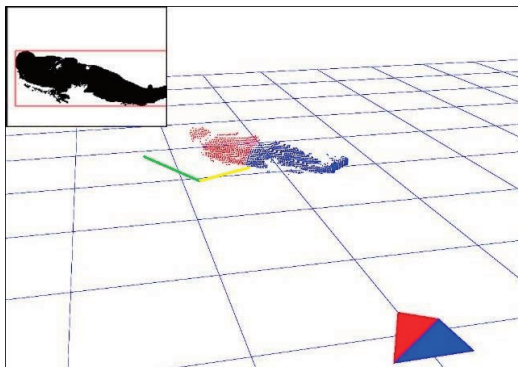


Fig. 15 3D measurement results of supine position

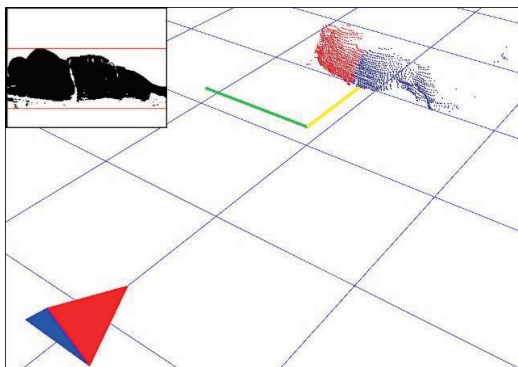


Fig. 16 3D measurement results of lateral position

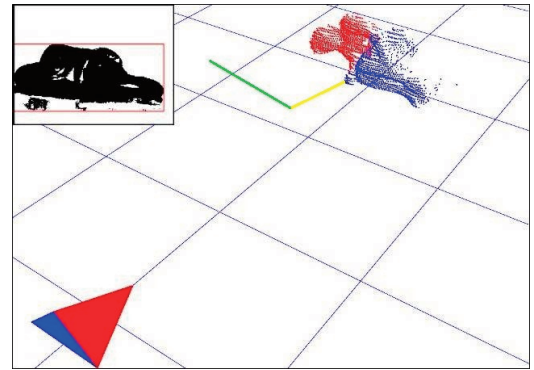


Fig. 17 3D measurement results of the posture that hugging the foot



Fig. 18 Measurement position in the body part

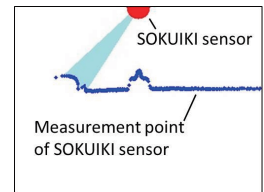


Fig. 19 Measurement example with SOKUIKI sensor

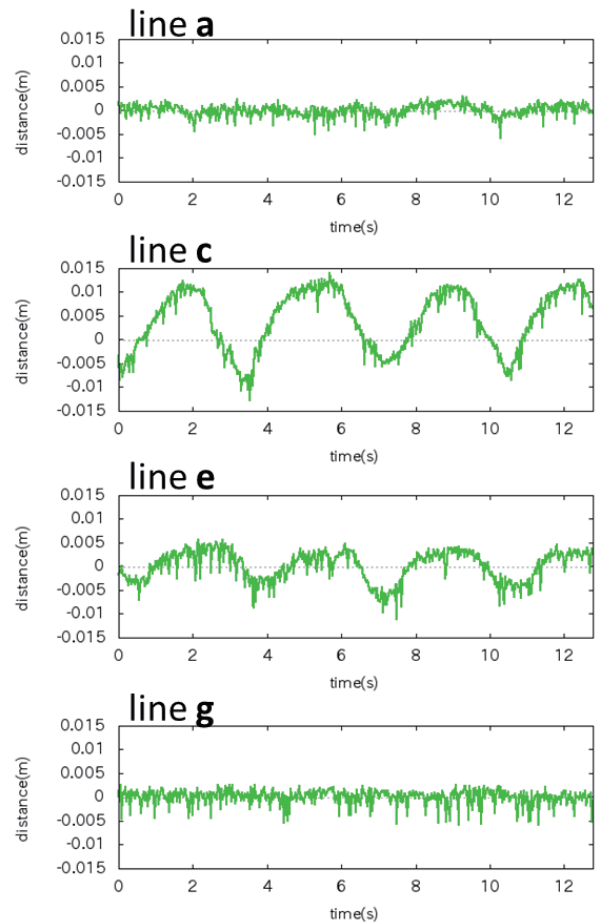


Fig. 20 Measurement result of line a to line g

5. 胴体部分における呼吸計測実験

胴体の推定位置が腹部から胸部の範囲に収まることがわかった。次に、この範囲を横断的に計測することで呼吸の様子を計測できるのかを調べた。人間から 0.8m 離れた位置にロボットを設置し、計測面を垂直にした測域センサのレーザが図 18 の a~g 線上に当たるようにして計測を行った。そして、図 19 の計測例のようなデータの内、人間を計測している薄青線で囲む部分の平均距離の時間変化を求めた。その結果のうち line a,c,e,g における結果を図 20 に示す。line c と line e のグラフからは、どちらも 12.8 秒間に約 4 回分の周期的な変位が見られる。全体として、b~f において呼吸に伴う変位を確認することができた。うつ伏せや横向けなど異なる姿勢においても実験を行った結果、同様に呼吸の様子を観察できたことから、腹部から胸部にかけての胴体部分を横断的に計測することで呼吸検出を望めることがわかった。

6. ロボットを用いた呼吸検出実験

人間の三次元形状から胴体位置と身体の方角を推定する方法を提案し、測域センサで胴体部分を横断的に計測することにより呼吸検出が望めることがわかった。そこで、胴体位置を推定し、身体と垂直な方向に測域センサのレーザを当てて呼吸検出を行う一連の動作を実装した。

まず、図 21 のような人間の三次元点群において、今回提案した手法を用いて胴体位置と身体の方角を推定する。次に、身体の方角に垂直で胴体位置を始点とする長さ 0.8m の線分である黄線を算出する。さらに、黄線の端点までロボットを移動させるために緑線のような動作計画を立てる。そして緑線に沿ってロボットを移動させ、測域センサの計測面を垂直に固定して黄線を計測した。

その結果における、人間に該当する部分までの平均距離の時間変化 (12.8 秒間) を図 22 上段のグラフに、さらにそのデータ 512 点に対して FFT によりフーリエ変換を行って求めたパワースペクトルを下段のグラフに示す。

図 22 上段のグラフからは約 4 回の周期的な変位を確認できる。また、下段のスペクトルには 0.3Hz 付近に最も高いピークが見られる。人間の呼吸は 15~20 回/分程度、つまり周波数にすると 0.25~0.33Hz であると言われている。このことから、呼吸の様子を計測できていることがわかる。

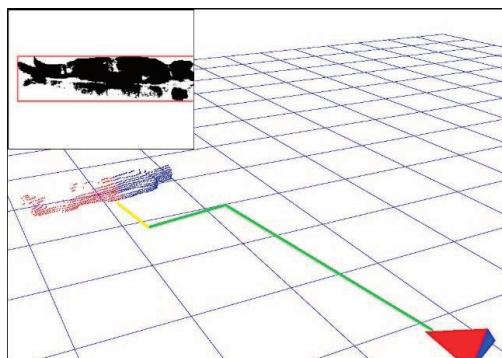


Fig. 21 Robot Motion Planning for respirometry

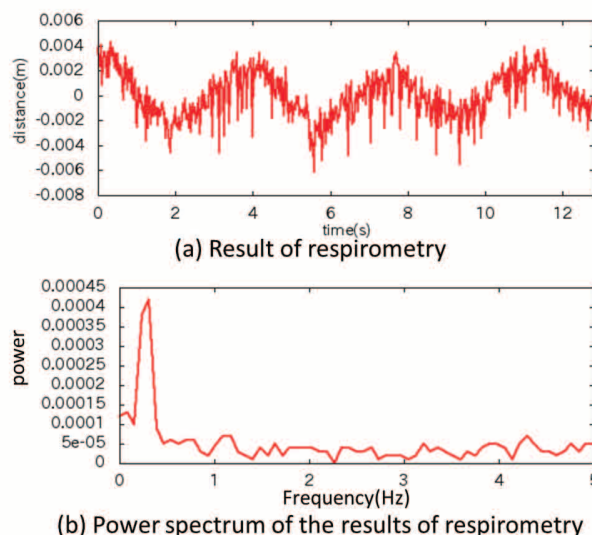


Fig. 22 Respirometry results in the situation of Fig.21

7. おわりに

7.1 まとめ

本稿では、巡回する警備ロボットによる人間の活動状態推定の一環として、測域センサを用いた呼吸計測手法と、ロボットを用いた呼吸検出のアプローチを提案した。

まず、測域センサを用いて呼吸を計測するためには、胴体部分を横断的に測定することが有効であることを示した。次に、人間の三次元点群から胴体位置と身体の方角を推定することで、呼吸計測を行う位置を算出する方法を提案した。さらに、人間の三次元点群から胴体位置と身体の方角を算出し、ロボットを移動させて呼吸計測を行うという一連の流れを実装し、実験から本手法の有効性を確認した。

7.2 今後の課題

今後の課題としては、呼吸検出以外の活動状態推定に取り組むことを考えている。具体的には、手足や身体の動きといった動作を検出する方法を検討する。そして、今回提案した呼吸検出と組み合わせることで、人間検出と活動状態推定の実現を目指したい。

参考文献

- [1] 総合警備保障株式会社, http://www.alsok.co.jp/corporate/robot/reborg_q.html
- [2] 尾形一気, 大矢晃久: "巡回警備ロボットのための赤外線カメラを用いた人間検出", 日本機械学会・ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH'11), 2A1-L02, 2011.
- [3] 埴大, 柳沼洋平, 榎本祐亮, 小出泰介, 山口喜美夫: "遠赤外線画像を用いた鼻呼吸検出の自動化に関する一検討", 第9回情報科学フォーラム (FIT2010), 2010.
- [4] 西田佳史, 武田正資, 森武俊, 溝口博, 佐藤知正: "圧力センサによる睡眠中の呼吸・体位の無侵襲・無拘束な計測", 日本ロボット学会誌 Vol.16, No.5, pp.705~711, 1998.
- [5] 松井秀治: "運動と身体の重心-各種姿勢の重心位置に関する研究-", 体育の科学社, 1958.