

遠隔操作マニピュレータによるボディチェック

辻田 哲平, 北原 理匡, 松島 駿介

遠隔操作マニピュレータに金属探知機をもたせ、操作者が安全な場所から検査対象者のボディチェックを行うことが可能なシステムについて紹介する。金属探知機によって対象者の体表面をなぞる作業において、服の下に隠した爆弾などを誤って起爆させるなどの問題があるため、対象者に接触することは好ましくない。一方で、金属探知機が体表面から離れ過ぎると探知できない可能性がある。この問題を解決するために開発した、体表面から一定距離を保って金属探知機をなぞらせることが可能な制御則についても紹介する。また、電磁誘導方式の金属探知機とマニピュレータを組み合わせることで、金属物体の形状を可視化する方法について紹介し、テラヘルツ波を用いた方法との比較を示す。今後の課題として、遠隔ボディチェックシステムの開発方針と本研究において OR の分野に期待することを記す。

キーワード：金属探知, 遠隔操作, ロボット, ボディチェック

1. はじめに

空港での金属探知 [1] に代表されるように、服の下に隠し持った不審物を検出する方法として、金属物の探知が有効である。人が隠し持つ金属物を探知するために、人体に有害な X 線検査装置を用いることはまれであり、安全な電磁誘導やミリ波などを用いた金属探知機が用いられることが多い。なかでも、電磁誘導方式は、仕組みが簡単であり安価で可搬性に優れる。このことから、空港などの限られた場所のみならず、街中での警備においても目にする必要がある [2, 3]。特に、可搬型の金属探知機は数千円から購入でき、人が手をもって対象者に振りかざすことで、容易に服の下にある金属物の場所を特定することが可能である。服の下に隠し持つ不審物を検出する方法として、手で触って確かめる方法もあるが、検査者が対象者に接触することで誤って爆発物を起爆する可能性がある。また、場合によっては、接触を伴う検査に対し、嫌悪感を抱かれ、ハラスメントなどの問題につながる可能性もある。さらには、爆発物を服の下ではなく直腸などの体内に隠し自爆攻撃をしかけるといった手口 [4] の場合、服の上から触っただけでは探知できない可能性がある。起爆装置などの金属物を含む爆弾を隠した場所の体表からの距離にもよるが、電磁誘導方式であれば人体組織の電気伝導率は金属物

に比して低いため探知できる可能性が高い [5]。しかし、対象者の体表面から数センチメートル以内で金属探知機を振りかざす必要があるため、検査者が対象者に接近する必要がある。このため、対象者が威力の高い爆発物を隠し持っており、検査中にこれを起爆させた場合は、検査者が殺傷される可能性がある。また、ナイフや拳銃などの武器を所有していた場合でも、その武器によって攻撃されることもありうる。そこで我々の研究グループは、これまで人が実施してきたこのように危険な作業をロボットで代わりに実施することを目的に、遠隔操作マニピュレータに金属探知機をもたせ、操作者は安全な場所から対象者のボディチェックを行うことが可能なシステムを開発している。本稿では、この開発中のシステムの紹介と、電磁誘導方式と本特集で山田 [6] が示したテラヘルツ波を用いた金属探知手法との比較について紹介する。

2 節では、電磁誘導方式による金属探知機の仕組みと特性について、3 節では、遠隔操作マニピュレータでボディチェックを行うシステムについて紹介する。また、4 節では、電磁誘導方式の金属探知機とロボットマニピュレータを組み合わせることで、金属物体の形状も計測可能なシステムについて紹介し、テラヘルツ波方式による計測結果との比較を行う。電磁誘導方式とテラヘルツ波方式のそれぞれに一長一短があるため、状況に応じた組み合わせ方法について議論を行う必要がある。そこで、OR の分野に期待することを 5 節にまとめる。

2. 電磁誘導による金属探知手法

2.1 節で電磁誘導による金属探知手法の原理につい

つじた てっぺい

防衛大学校システム工学群機械工学科

〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

t.tsujita@ieee.org

きたはら ただまさ, まつしま しゅんすけ

防衛大学校理工学研究科

〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

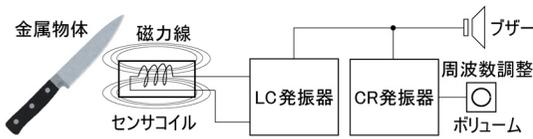


図1 電磁誘導を利用した金属探知機の仕組み (文献 [7] を参考に作成)

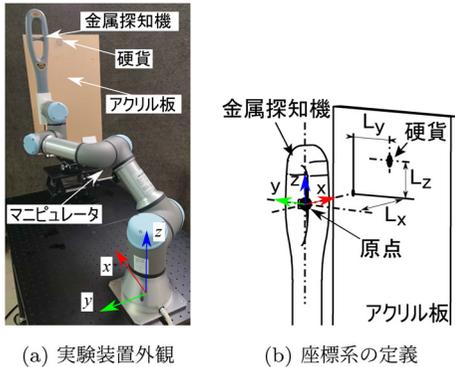


図2 探知可能距離の計測

で説明を行った後、本研究で使用する金属探知機の特性について 2.2 節と 2.3 節で示す。

2.1 探知原理

図 1 に、本研究で使用する電磁誘導方式の金属探知機の仕組みを示す。センサコイルとコンデンサから構成される LC 発振回路のセンサコイル部に、導電体である金属が近づくと、系のインダクタンス成分に変化が生じ、発振回路の周波数が変化する。2.3 節で使用する共立電子産業社製小型金属探知機 KN-Z9 では、この微小な発振回路の変化を可聴音としてブザーで出力するために、コンデンサと抵抗で構成される CR 発振回路の周波数とミックスすることで可聴域の音を生成している [7]。

2.2 可搬型金属探知機の振りかざし速度と探知可能距離

本研究では、遠隔操作マニピュレータにもたせる金属探知機には、可搬型金属探知機 GC-101H (C-Timvasion 社製) を用いることとした。本金属探知機は、重量 190 g (バッテリー含まず) で全長 375 mm である。対象との距離がより近く、振りかざす速度がより速いほど金属物を探知することができる。この金属探知機は、探知した場合に音が鳴り、探知していない場合には音が鳴らないという 2 値のみの情報が得られる。

この金属探知機の最大探知可能距離を計測するために、図 2 (a) に示すように、ロボットマニピュレータ UR3 (Universal Robots 社製) の手先に取り付け

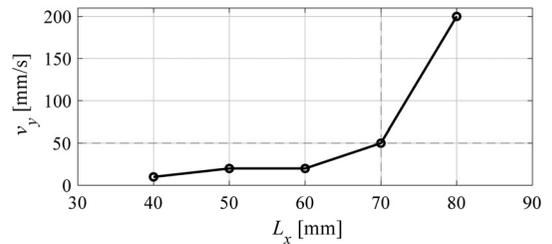


図3 振りかざし速度と探知可能距離

た。このマニピュレータによって、金属探知機をコイン (75%の銅と 25%のニッケルで作られた 100 円硬貨) が取り付けられているアクリル板から L_x 離れた距離で平行に移動させる。図 2 (b) に、測定範囲の定義を示す。速度 v_y でコインの中心から $L_y = -100$ mm から 100 mm まで水平方向に移動し、コインの検出に必要な最小速度と距離 L_x の関係を求めた。

この実験では、金属探知機を左右に 5 回動かした。したがって、金属探知機の測定面はコインを 10 回通過する。金属探知機の取扱説明書には、静止状態では金属を検出できないことがあると記載されているため、 $v_y = 10$ mm/s 以上 ($v_y \leq 200$ mm/s) で移動させることとした。コインを通過したときにアラームが 8 回以上鳴った場合の速度を最小速度として決定した。図 3 に、 $L_z = 0$ mm の場合の距離 L_x と最小水平速度 v_y の関係を示す。この図は、コインからの距離が増加するにつれて、必要な移動速度が指数関数的に増加することを示している。また、対象との距離が 70 mm であれば金属探知機を対象に対して水平に 50 mm/s 以上の速度で動かすことで探知可能であることが実験的に示されている [8]。このことから、3 節で示す遠隔操作マニピュレータでは、体表面から 70 mm の距離を保つことで、対象に非接触かつ探知可能距離内で金属探知機を振りかざすことを目指す。

2.3 小型金属探知機の対象物までの距離と周波数の関係

4 節で述べる電磁誘導方式を用いた金属物体の形状可視化手法においては、一回の測定で検出される範囲を限定する必要があるため、より小型な検出部を有する金属探知機を用いることとした。使用した小型金属探知センサ KN-Z9 (共立電子産業社製) の外観を図 4 (a) に示す。センサ部は円筒形で直径は 10.5 mm となっており、小さい物体を検出することに適している。本センサは、センサ部と金属が接している場合、ブザー音は聞こえなくなり、すこし離れると低い音が鳴り始めるように図 4 (a) の周波数調整ボリューム

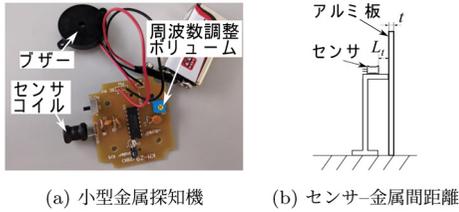


図 4 小型金属探知機の特性評価 [9]

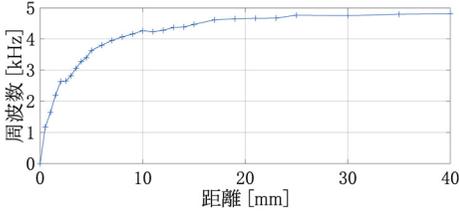


図 5 センサとアルミ板間距離 L_t と周波数の関係 [9]

を回し設定することが可能である。徐々に金属との距離を上げていくと音も徐々に高くなっていき、ある一定以上の距離では音の変化はなくなる。このセンサの特性を評価するために、ブザーに印加される電圧信号をオシロスコープ TBS1022 (Tektronix 社製) を使用し 100 kHz で取得し、数値計算ソフトウェア MATLAB (MathWorks 社製) によって FFT (Fast Fourier Transform) 解析を行い、金属物体までの距離と周波数の関係を導いた。図 4 (b) に示すように、アルミニウム合金製の板 ($t = 3 \text{ mm}$) をセンサ部の前に設置し、センサと板の距離 L_t を変化させて計測を行った。横軸に距離 L_t 、縦軸に信号周波数とした測定結果を図 5 に示す。 $L_t = 20 \text{ mm}$ 以上になると、周波数がほぼ一定となり、金属の有無を検出できないことがわかる。また、 $L_t = 10 \text{ mm}$ 以下の区間では、距離に応じて大きく周波数が変化していることがわかる。したがって、小型金属探知センサは、そのセンサ部を金属に 10 mm 以下の距離で近づけることで、明確な周波数の差を検出することができることが明らかになった [9]。

3. 遠隔ボディチェックシステム

図 6 に、本研究で開発した遠隔操作によって対象者のボディチェックを行うことが可能なシステムの概要を示す。3.1 節では使用するロボットについて説明し、3.2 節では開発したシステムの詳細について示し、3.3 節では本研究で提案している、金属探知機が対象者に衝突してしまうことを防止可能な対象-金属探知機間距離制御手法について紹介する。

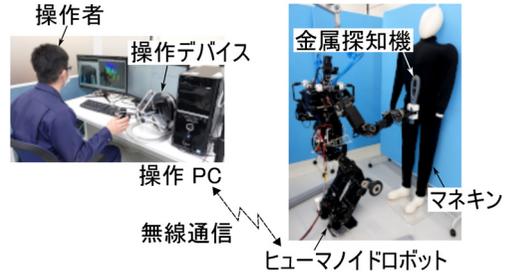


図 6 遠隔操作システムの概要

3.1 ヒューマノイドロボットについて

本システムでは、遠隔操作マニピュレータの一例として、図 6 に示した等身大ヒューマノイドロボット THORMANG3 (ROBOTIS 社製) [10] を使用している。THORMANG3 は、DARPA Robotics Challenge で使用された THORMANG [11] の後継機である。THORMANG3 の高さは 1,375 mm、構造は人体を模しており、1 自由度の腰、2 自由度の首、6 自由度の脚を 2 本、1 自由度のグリッパと 7 自由度をもつ腕を 2 本有している。制御には、Ubuntu Linux 16.04 LTS と ROS (Kinetic Kame) (Robot Operating System [12]) を用いており、胸部には運動制御やモータへの指令を行う運動制御 PC (MPC)、センサデータの処理を行う知覚 PC (PPC) が搭載されている。

近年では、車輪型移動ロボットに搭載されたマニピュレータに金属探知機を取り付けた例 [13] もあるが、ヒューマノイドロボットを用いる利点や特徴として以下の三つがあげられる [14]。

- 人間の環境がそのまま使える。
- 人の使う道具がそのまま使える。
- 人の形をしていることそのものに意味がある。

第一に、本研究の最終目的は、ボディチェックを行う専用機を開発することではなく、ボディチェック以外にも警備行動に同伴しさまざまな任務をこなすことが可能なロボットシステムを開発することである。このため、人とともに階段を上ったり、ドアノブを開けたりする必要がある。これらは人に合わせて作られた人間用の環境であり、この環境下で動作させるロボットの形状として人の形が適していると考えられる。第二に、今回使用する可搬型金属探知機は人のために作られた道具であり、これを使用可能とすることでロボット専用のものを用意することなく、警備班のなかで人と共有して使用することができる。第三に、人の形をしているほうが検査対象者に対して圧迫感が少ないといった効果や、人と同じ形状をしていることでハンド

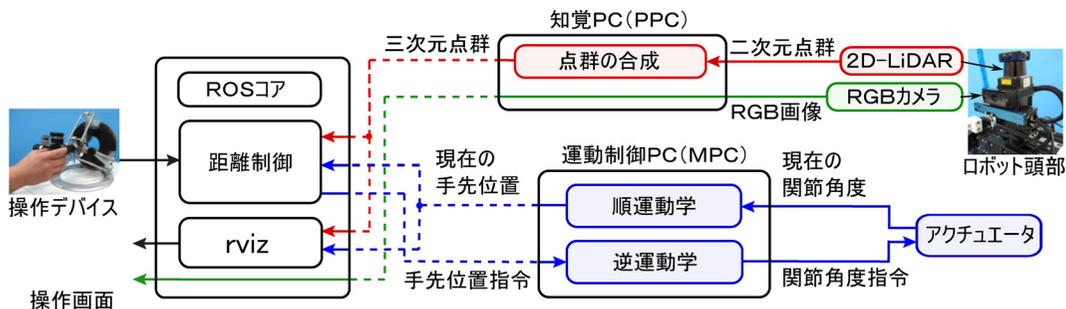


図7 遠隔操作システムの構成図

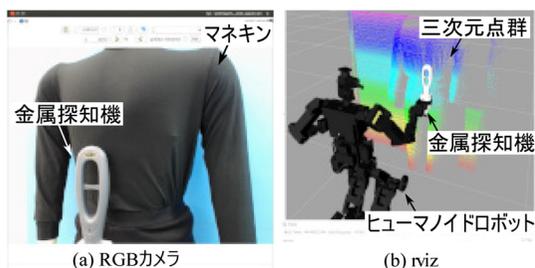


図8 ボディチェック時の操作画面

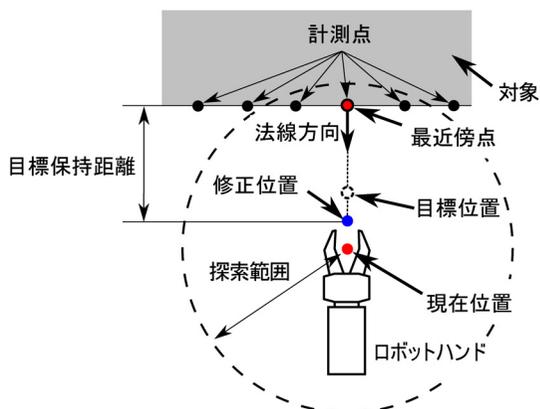


図9 対象-手先間距離制御

部の可動範囲の面から、人の体表面を金属探知機でなぞりやすいと行った利点が考えられる。これらの理由から、本研究では等身大ヒューマノイドロボットを用いることとした。

3.2 遠隔操作システムの構成

ロボットが手先にもった金属探知機と検査対象者の接触を回避しつつ、体表から一定の距離 (70 mm) を保つために、本研究では対象者の表面形状をレーザー照射によって測定可能な LiDAR (Light Detection And Ranging) を利用する。LiDAR には、1 点のみの距離を測定するもの、平面状に走査し二次元距離情報を得るもの、立体的に走査し三次元距離情報を得るものがある。測定点は離散的であることから、これらの距離情報の集合は点群 (Point cloud) と呼ばれる。図 7 に示すように、THORMANG3 には二次元点群を得ることのできる UTM-30LX-EW (北陽電機社製) を頭部に搭載しており、首を縦に振ることで取得した複数の二次元点群情報をロボットの胸部に搭載されている PPC で処理することで、ロボットの周囲の三次元点群情報を得ることができる。操作者は、図 8 に示すように情報可視化ソフトウェア rviz [12] 上でロボットの頭部に搭載された RGB カメラの映像と三次元点群情報を見ながら、操作デバイス Omega.7 (Force Dimension

社製) [15] を用いて、ロボットの右腕を遠隔操作する。本デバイスの持ち手を握り、三次元的に動かすことでロボットの手先も同じように動かすことができる。

3.3 対象-金属探知機間距離制御

操作者は、三次元点群情報によって奥行き方向の距離を把握しながら金属探知機を振りかざすことができるが、対象との衝突を避けながら、金属探知機の探知可能距離を保つことは難しい。そこで、本研究では操作者が対象に金属探知機を押しつけるような指令を与えても、指令を修正し自動的に体表との距離を保つ制御を提案している [16]。この制御則によって、操作者は操作デバイスを用いて金属探知機を対象に押しつけるように左右・上下に移動させることで一定距離を保ちながら表面をなぞることができる。

図 9 に示すように、操作デバイスによって与えられるロボットハンドの目標位置から環境の三次元点群に対して、任意に設定した目標保持距離の範囲内で最近傍探索を行い、求めた最近傍点における対象表面の法線方向に、目標保持距離を確保できるように目標位置からオフセットした位置を修正指令値とする。この修正指令値にロボットハンドが移動するように、逆運動

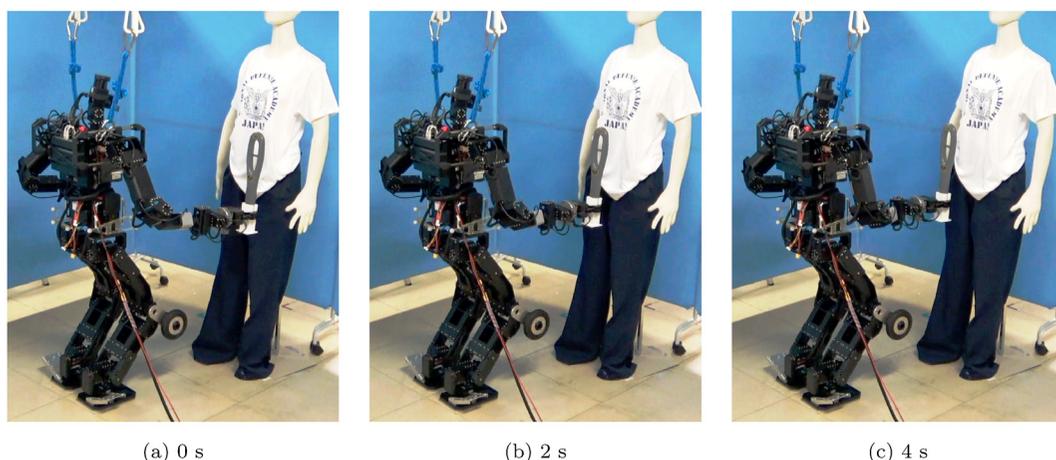


図 10 ヒューマノイドロボットによるボディチェックの様子

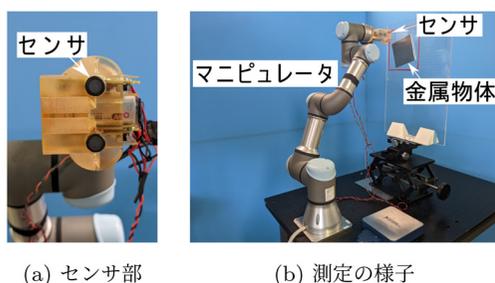


図 11 電磁誘導方式金属物体形状可視化システム [9]

学 [17] を解くことでロボットの目標関節角度を求める。そして、この目標関節角度をロボットの関節に搭載されているサーボモータに指令として与えることで、対象とロボットハンドにもった金属探知機との距離が任意に設定した目標保持距離を超えて近づかないようにすることができる。図 10 に、動作の様子を示す。実験の結果、腹部近辺のみを検査する場合、おおむね 4s かかることが明らかになった。

4. 形状可視化システム

3 節で示したシステムでは、金属物の有無を探知するのみであり、その物体がナイフなのか、携帯電話なのか、爆弾なのかといったことはわからなかった。そこで、2.3 節に示した小型金属探知機のセンサ部をマニピュレータに取り付け、センサの位置を変化させながら複数箇所の金属の有無を計測することで形状の可視化を試みた [9]。

4.1 形状可視化システムの構成

図 11 にロボットマニピュレータ UR3 を用いた形状可視化システムの外観を示す。図 11 (a) に示すように、



図 12 電磁誘導方式金属物体形状可視化システムの構成 [9]

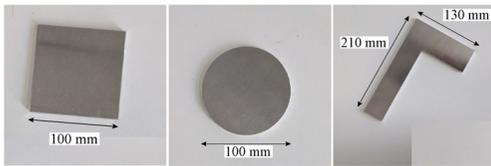
マニピュレータのエンドエフェクタ部にセンサを取り付け、図 11 (b) に示すように、金属物体表面をなぞらせる。図 12 にもとづいて、電磁誘導方式金属物体形状可視化システムの構成を説明する。センサが出力する電圧信号を取得し、自動で周波数解析を行うために、ブザー部の電圧信号を A/D 変換ボード PCI-6220 (National Instruments 社製) を用いて電子計算機に取り込む。本ボードは数値計算ソフトウェア MATLAB から直接電圧信号の読み取りができる。本ボードで電圧を 100 kHz で取得し、信号の FFT 解析を行い周波数を記録する。また、UR3 の位置制御は、URToolbox [18] を用いて MATLAB から行い、現在位置と周波数の同時計測を行うことで形状の可視化を行った。

4.2 可視化アルゴリズム

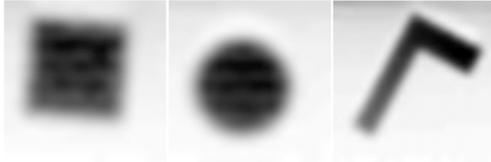
形状のグレースケール画像の生成は式 (1) にもとづいて行う。画像座標系 (画像左上を原点とし、右方向を u 軸、下方向を v 軸とする) における位置 (u, v) の各ピクセルの輝度値 $I_{u,v}$ を 0~1 の範囲で計算する。

$$I_{u,v} = \frac{f_{u,v} - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \quad (1)$$

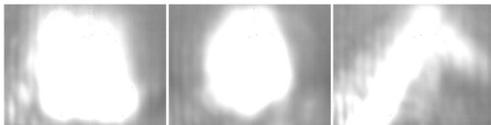
ここで、 $f_{u,v}$ 、 f_{min} および f_{max} は、それぞれ、位置 (u, v) において測定された周波数、測定全体での最低周波数および測定全体での最高周波数を表している。求められた $I_{u,v}$ 値をもとに、256 階調のグレースケール



(a) 対象物の外観



(b) 電磁誘導方式による可視化画像



(c) テラヘルツ波方式による可視化画像

図 13 対象物と可視化結果 [9]

ル画像を生成する。

4.3 実験結果

図 13 (a) に示す 100 mm 四方の正方形と直径 100 mm の円形、および外形 210 mm×130 mm の L 字のアルミニウム合金製板 (厚み 3 mm) の可視化を行った。ロボットマニピュレータを用いて、図 11 (b) に示すように垂直に立てたアクリルプレートにアルミニウム合金製板を両面テープで貼り付け、10 mm 離れた状態で、センサを 10 mm ずつ格子状に移動させた。各計測点では、0.5 s 静止させ、マニピュレータの手先のブレが収まってから計測した。比較のために本特集で山田 [6] が示したテラヘルツ波方式で、1.53 m 離れた状態で同じ対象物を撮影した。電磁誘導方式で撮影された金属物体の形状を図 13 (b) に、テラヘルツ波方式で撮影された形状を図 13 (c) に示す。なお、電磁誘導方式では、正方形型および円形型の計測には 332 s、L 字型の計測には 870 s 要した。テラヘルツ波方式で、撮影に要した時間は 1/50 s であった。

図 13 (b) のように、電磁誘導方式では、金属物が存在すると信号周波数が低くなり、(1) 式によって、輝度値が小さくなるため、対象の形状が黒く描かれている。一方、テラヘルツ波方式では、図 13 (c) のように金属物が存在すると反射強度が強くなり、センサで検出される輝度値が上がるため白で描かれている。図 13 (b) と (c) を比較すると、(b) では物体形状の輪郭が比較的是っきりと得られているのに対し、(c) では輪郭の曖昧さが目立つ。また、縦縞状のノイズが見られる。した

表 1 電磁誘導方式とテラヘルツ波方式の比較

方式	距離	時間	鮮明さ
電磁誘導	~10 [mm]	332~870 [s]	○
テラヘルツ波	1~3 [m]	1/50 [s]	△

がって、画像の鮮明さの観点からは電磁誘導方式の方が優れている。しかし、電磁誘導方式では対象物に対して 10 mm 以下にセンサ部を近づける必要がある、時間がかかるといった欠点がある。これに対して、テラヘルツ波方式では、距離 1~3 m 程度離れたところから測定が可能であり、測定にかかる時間も 1/50 s と高速であるといった利点がある。これらの電磁誘導方式とテラヘルツ波方式の特徴をまとめると、表 1 のようになる。

5. 今後の課題

本稿では、金属探知の方法として、電磁誘導を用いて金属物体の有無のみを判別する方法、マニピュレータの位置情報と組み合わせることで可視化する方法、テラヘルツ波を用いた可視化の方法の 3 種類を示した。今後、4 節で示した装置をヒューマノイドロボットにもたせ、物体形状の可視化を試みる予定である。

現状では、電磁誘導を用いた可視化手法は、100 mm 四方の探知に 5 分以上かかることが明らかになっている。そこで、センサを複数搭載し同時にスキャンすることで可視化の高速化を行う予定である。しかし、図 10 に示すように、ロボットがその腕を対象者の一部の表面に振りかざすだけでも数秒かかる。全身を検査するには分単位での時間がかかることが予想される。これに対して、テラヘルツ波を用いた方式では一回の測定にかかる時間が 1/50 s と極めて高速であるが、画像が不鮮明であるといった問題もある。それぞれの画像から深層学習などを用いた物体判別を行い、その危険物の検出確率を定量的に明らかにする予定であるが、画像の鮮明さから、電磁誘導方式による可視化手法の方が正答率が高いものと予想される。また、探知可能距離においては、テラヘルツ波を用いた方法では数メートル離れた箇所から探知することが可能であるが、電磁誘導を用いた方法では数センチメートルまで近づく必要がある。

上述のように、電磁誘導を用いた方式とテラヘルツ波を用いた方法は、それぞれ一長一短がある。そこで、警備ロボットが直面する状況に応じて、それぞれの探知システムの特性を考慮し、OR の手法に基づく最適な警備計画の導出が、有効な手段の一つであると考えられる。

6. おわりに

本稿では、遠隔操作マニピュレータに金属探知機をもたせ、操作者は安全な場所から対象者のボディチェックを行うシステムについて紹介した。また、電磁誘導方式とマニピュレータを組み合わせることで、金属物体の形状を可視化する方法を示し、テラヘルツ波を用いた方法と比較した。また、今後の課題として、遠隔ボディチェックシステムの開発方針とORの分野に期待することを記した。

参考文献

- [1] 前田隆, “空港のセキュリティについて,” 電気設備学会誌, **40**, pp. 357–359, 2020.
- [2] 吉沢龍彦, “それでも街頭へ 候補者「暴力で社会変わらない」, 聴衆「萎縮いけない」 参院選,” 朝日新聞 (東京), 2022年7月10日, p. 25, 2022.
- [3] 志村英司, “駅で不審者対応訓練,” 朝日新聞 (愛知), 2022年1月6日, p. 23, 2022.
- [4] R. Nordland, “Attacker in Afghanistan hid bomb in his body,” *The New York Times*, 8 June, 2013.
- [5] R. Bunker, C. Flaherty, *Body Cavity Bombers: The New Martyrs: A Terrorism Research Center Book*, iUniverse, 2013.
- [6] 山田俊輔, “テラヘルツ波を用いた金属物検知,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **67**, pp. 528–534, 2022.
- [7] 共立電子産業, 『金属探知機キット KN-Z9 取扱説明書』, 2020.
- [8] S. Matsushima, T. Tsujita and S. Abiko, “Detecting suspicious objects with a humanoid robot having a metal detector,” In *Proceedings of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 832–837, 2020.
- [9] 辻田哲平, 飯田裕貴, 山田俊輔, “移動ロボットに搭載可能な非接触金属物体形状可視化装置の比較,” 第39回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2021AC1F3-05, 2021.
- [10] ROBOTIS, “THORMANG3,” *ROBOTIS e-Manual*, <https://manual.robotis.com/docs/en/platform/thormang3/introduction/> (2022年7月12日閲覧)
- [11] S. Kim, M. Kim, J. Lee, S. Hwang, J. Chae, B. Park, H. Cho, J. Sim, J. Jung, H. Lee, S. Shin, M. Kim, N. Kwak, Y. Lee, S. Lee, M. Lee, S. Yi, K.-. K. C. Chang and J. Park, “Approach of team SNU to the DARPA robotics challenge finals,” In *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 777–784, 2015.
- [12] 岡田慧, “ROS (ロボット・オペレーティング・システム)”, 日本ロボット学会誌, **30**, pp. 830–835, 2012.
- [13] セコム株式会社, 「自律走行型巡回監視ロボット「セコムロボット X2」のサービス提供を開始」, https://www.secom.co.jp/corporate/release/2019/nr_20190523.html (2022年7月12日閲覧)
- [14] 梶田修司, 『ヒューマノイドロボット』, オーム社, 2020.
- [15] force dimension, “Haptic Devices - omega.x,” <https://www.forcedimension.com/products/omega> (2022年2月18日閲覧)
- [16] S. Matsushima, T. Tsujita and S. Abiko, “Distance control between an object and an end-effector for contactless surface tracking works by a humanoid robot,” In *Proceedings of IEEE/ASME International Symposium on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1724–1729, 2020.
- [17] D. N. Nenchev, A. Konno and T. Tsujita, *Humanoid Robots: Modeling and Control*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [18] URToolbox, <https://github.com/kutzer/URToolbox> (2022年7月12日閲覧)