

# RT ミドルウェアによる双腕レスキューロボットシステム開発

○遠橋 健太 (会津大学), 若園 拓也 (会津大学), 蓮實 雄大 (会津大学),  
中村 啓太 (会津大学), 矢口 勇一 (会津大学), 成瀬 継太郎 (会津大学)

## Dual-arm rescue robot system by RT-Middleware

○ Kenta TOHASHI (The University of Aizu), Takuya WAKAZONO (The University of Aizu),  
Yudai HASUMI (The University of Aizu), Keita NAKAMURA (The University of Aizu),  
Yuichi YAGUCHI (The University of Aizu) and Keitaro NARUSE (The University of Aizu)

Abstract : We have developed disaster response robot systems in the University of Aizu. For this system, we introduced dual-arm and developed the operator support by cooperation between the movement of the robot on the robot simulator Choreonoid and that of the actual robot. Moreover, we implemented a system based on OpenRTM-aist. For RoboCup JapanOpen 2019 NAGAOKA, we implement 3D mapping function by a depth camera on the arm as a new challenge. This paper shows our effort for disaster response robot systems based on OpenRTM-aist, operator support in teleoperation, cooperation with other software and 3D mapping, and future works for the system.

### 1. はじめに

会津大学では災害対応ロボットシステム開発を行っている。このシステムの特徴として、双腕ロボットを採用し、産業技術総合研究所が開発したロボットシミュレータである Choreonoid[1] 上のロボットと実ロボットの連携による操作者支援が挙げられる。これまで会津大学で開発してきたロボットシステムの構築には産業技術総合研究所が開発した RT ミドルウェアである OpenRTM-aist[2] を使用してきた。ロボカップジャパンオープン 2019 ながおか [3] においても OpenRTM-aist を使用した。

本稿では、我々がロボカップジャパンオープン 2019 ながおかのレスキュー実機リーグに対する取り組み、ロボットシステム、大会参加による知見、今後の課題について紹介する。

### 2. ロボット構成

ロボットの外形を図 1 に示す。我々のロボットは 2 本のメインクローラと 4 本のサブクローラで走行を行い、2 本の Kinova 社が開発した Jaco<sup>2</sup> アーム [4] を用いて物を掴む、回す等の操作を行う。

ロボット上には、6 台の Intel が開発した、Intel RealSense Depth Camera D435(以下 D435) を搭載している。搭載位置は 前方, 前方下側, 後方, 後方下側, 右アーム, 左アームである。また、熱検知必要な熱カメラとして、FLIR System の BOSON[6] を搭載している。

本システムでは PC を操作卓に 2 台、ロボット上に 1 台の計 3 台搭載している。構造と役割を図 2 に示す。操作卓とロボットの間は有線 LAN または無線 LAN で接続可能

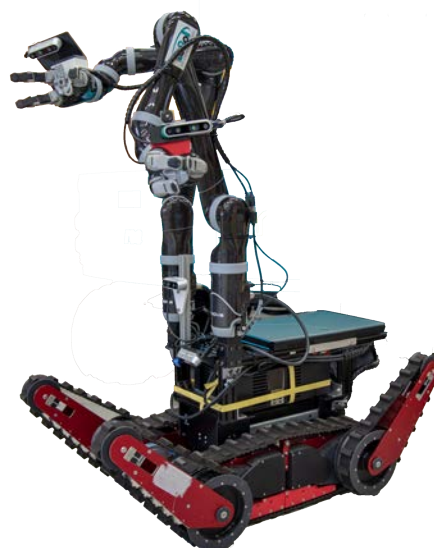


Fig. 1: Overview of our robot.

である。大会本番では安定性を重視し、無線 LAN での接続は行わなかった。

### 3. ロボットシステム

#### 3.1 RT ミドルウェアを用いた操作システム

本システムの映像転送を除くロボットシステムは OpenRTM-aist を使用して構成している。RT コンポーネントの接続関係を図 3 に示す。

RT コンポーネントを使用していることで、3 台のコンピュータそれぞれで動いているコンポーネントを意識することなく接続することができる。また、目視での練習や検

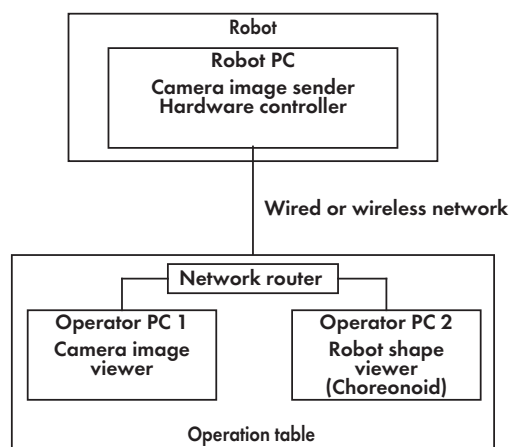


Fig. 2: Network structure in system and role for each PC.

証作業などの際にプログラムを書き換えることなく、コンポーネントの接続を切り替えるだけで別の形のシステムを構成することができるため開発の役に立った。

## 3.2 仮想世界を用いた操縦支援

会津大学では、Choreonoid を用いた操縦支援を実装、検証してきた [8]。今大会においても、このシステムを採用し練習と本番で使用した。我々のロボットは双腕であるため、アーム同士をぶつけてしまう、アームと車体をぶつけてしまうといった操縦ミスが発生し、操縦者はそれに気づくことができない。仮想空間で実ロボットと同じ形状をしたロボットが連動して動くことでカメラ映像からは確認できない部分を補うことができる。

## 3.3 映像転送

遠隔操作ロボットにおいて、カメラからの映像は操作者にとって非常に重要な情報となる。各所に多くのカメラを取り付けることで操縦が容易になる。しかし、カメラ台数を増やす場合、物理的条件だけでなく、ロボットから操作卓までの通信帯域にも影響を及ぼす。限られた通信帯域でより多くのカメラを扱う方法として 2 つのアプローチを実施した。

### 3.3.1 映像圧縮

カメラから得られた映像を圧縮して送信し、操作卓で展開することで帯域を節約することができる。我々はこの映像圧縮に NewTek が開発した NDI [7] を使用した。このラ

イブラリは映像や音声を低遅延で送信することができ、また圧縮/展開ともに CPU への負荷がさほど大きくないという特徴がある。これを用いて各カメラからの映像を転送している。

### 3.3.2 カメラスイッチャ

映像圧縮を行うだけではカメラ台数が増えれば増えるほど帯域を消費するという問題は解決しない。一方、多くのカメラを設置した場合であっても操作者が同時に見るカメラの台数は限られているため、常時すべての映像を転送すると無駄になってしまう。そこで、映像を送信するロボット側の PC で送信するカメラを切り替えるようにした。動作イメージを図 4 に示す。映像送信ソフトウェアと映像受信ソフトウェアで構成する。映像送信ソフトウェアは、映像受信ソフトウェアから要望があったカメラの映像を NDI で圧縮して送信する。映像送信ソフトウェアは映像ソースごとの差異を吸収する仕組みとなっており、D435 や BOSON, Web カメラなど様々な映像ソースを操作者は意識することなく切り替えて使用可能である。また、映像ソースの解像度が異なる場合でも対応可能であるため、高解像度が必要なカメラとそうでないカメラで解像度を変えることでも通信帯域の節約が可能である。

映像送信ソフトウェアは各種映像ソースに容易に対応できるように設計されている。今後の必要に応じて、IP カメラや HDMI 入力のカメラを容易に導入可能な状況となっている。

今大会で使用したソフトウェアは GitHub [9] で公開している。

QR コードの読み取りやレディネスボードに必要な動体検知などの画像処理も実装済みであり、画像処理も映像ソース同様各種処理が容易に追加可能な設計になっている。

実際に 8 つのカメラから 3 つを選択し、動作している画面を図 5 に示す。

左上が通常のカメラ映像、左下が熱カメラ、右が複数個の QR コード読み取りとなっている。熱カメラでは、人の手の温度を検知し、白く表示されている。

## 3.4 レディネステスト [10]

レディネステストの 10 個のタスクをクリアするための工夫として、CO<sub>2</sub> 濃度測定、双方向音声通信、Hazmat タグ認識について紹介する。

### 3.4.1 CO<sub>2</sub> 濃度測定

CO<sub>2</sub> センサには Sensair 社製の SENSEAIR K30 [11] を使用した。このセンサの UART を USB シリアル変換チッ

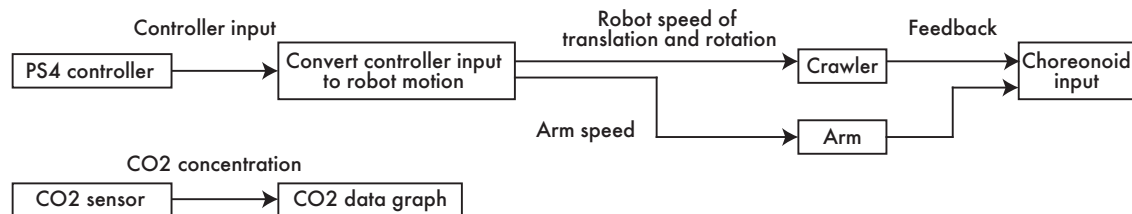


Fig. 3: RTC connection.

ブ経由でロボット上の PC に接続した。このセンサに 1 秒に一回  $\text{CO}_2$  濃度を問い合わせる RT コンポーネントを作成した。これに合わせ、過去 60 秒間の  $\text{CO}_2$  濃度をグラフとして表示する RT コンポーネントを作成しこれらをつなぎ合わせることで  $\text{CO}_2$  の検知とした。この部分は大会中一度もトラブルが発生することなく安定して動作した。

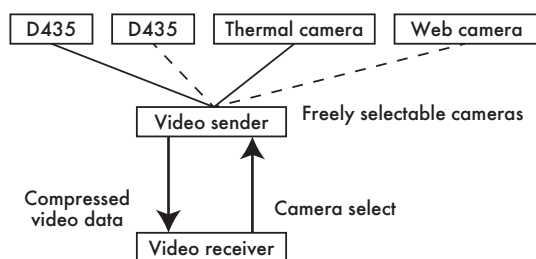


Fig. 4: Video switcher architecture.

### 3.4.2 双方向音声通信

双方向音声通信は映像と同じく NDI を使用して実現した。マイク、スピーカへの入出力は Advanced Linux Sound Architecture (ALSA) を用いて行った。ALSA は Linux における音声を扱う低レベル API を提供するためレイテンシの向上が見込める一方、バッファリング等を手動で行う必要がある。NDI と ALSA の組み合わせにより非常に低遅延で双方向音声通信を実現することができた。本大会で使用した音声通信ソフトウェアは GitHub[12] で公開している。この部分はマイクの物理的なスイッチを入れ忘れるというトラブルがあった以外は安定して動作した。

### 3.4.3 Hazmat タグ認識

Hazmat タグの認識は使用する 12 種類のタグから AKAZE[13] 特徴を抽出し、カメラ画像に対しても AKAZE 特徴を抽出した後マッチングすることで実現を試みた。本番では、解像度の不足や通信のノイズ、光の加減などの変化に対応できず認識には失敗した。

## 4. 地図生成

我々のロボットは、悪路走破性が低いため、MAN/MOB の競技において点数を獲得することが困難である。そこで、EXP2 の Large-area inspection に着目し、この競技において 3D 地図を作成することで点数を獲得する戦略とした。大会約 3 週間前にこの競技が実施されることが発表されたため、既存のハードウェアで実現可能でかつ短期間で実装可能な簡易的な地図作成を行うことにした。

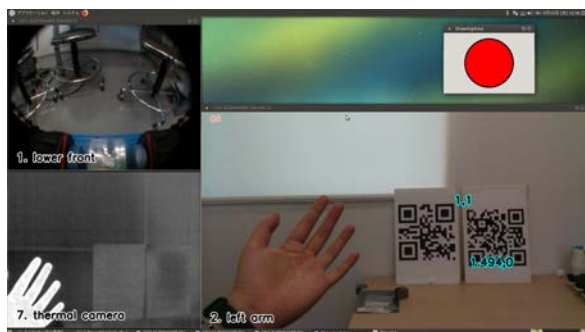


Fig. 5: Camera viewer screen.

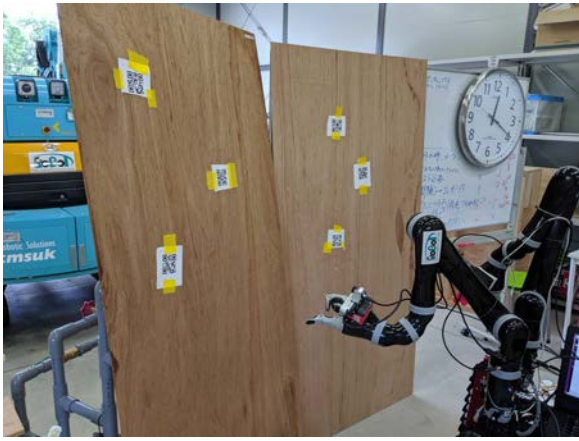


Fig. 6: Large-area inspection testing (Real world).

使用している Jaco<sup>2</sup> アームはフィードバックとしてアームの土台の座標を原点 (0,0,0) とした手先の 3 次元座標を出力する。また、手先が向いている方向を x,y,z それぞれの回転角として出力する。さらに、左アームには D435 が搭載されており、ここから D435 を原点 (0,0,0) とした 3D 点群を出力可能である。この 2 つを組み合わせ、アームが一定量移動するごとに 3D 点群を撮影し、平行移動及び回転を行うことで広いエリアの 3D 地図を作成することとした。台車の移動を考慮する場合には、移動後すでに読み取った QR コードのうち 3 枚をもう一度読み取ることで 3 点測量の原理で台車の移動量を推定可能である。

大会本番までに実装できたのは台車の移動を考慮していない、静止状態を前提とした 3D 地図作成である。地図作成の流れを以下に示す。

- (1) アームの手先が一定量動いたことを検知する。
- (2) 3D 点群と 2D 画像を撮影する。
- (3) 現在のアームの位置と角度を元に撮影した 3D 点群にアフィン変換をかける。
- (4) 撮影した 2D 画像に対して ZBar[14] を用いて QR コードの読み取りを実施し、画像上の QR コードの 2 次元位置を求める。
- (5) QR コードの画像上の 2 次元位置を実世界上の 3 次元位置に変換する。
- (6) 提出用データにまとめる。

実際に図 6 に示す環境において 3D 地図を作成した結果を図 7 に示す。アームが出力する手先の位置と実際にカメラが取り付けられている位置が異なるため、重ね合わせる際に誤差が生じ、ズレて重なり合っている。

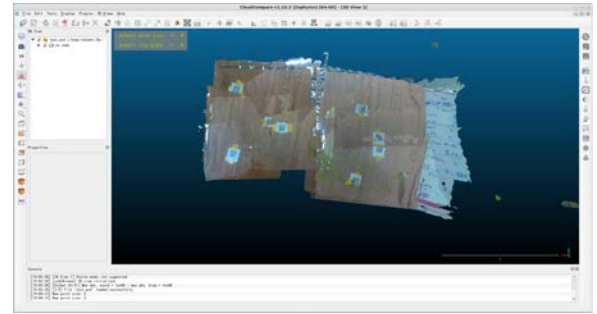


Fig. 7: Generated 3D map.

## 5. 挑戦結果・考察

### 5.1 当日変更点

当日の競技変更により EXP2 の Large-area inspection が壁面ではなく Culvert 状になり、作成した簡易的な 3D 地図生成は適用できなかった。このため、当日にプログラムを書き換え、地図生成なしで読み取った QR コードを画面に出力しファイルにも書き込むよう変更した。

### 5.2 ロボットの安定性

大会会場は非常に暑く、ロボットにとって過酷な状況であった。我々は大学での操縦練習も暑い環境で行っており、外気温が高い状態でロボットを酷使するとモータの駆動関係に問題が発生することがわかっていて、そこで挑戦するタスクの間を最低でも 2 時間空けることで冷却時間を確保し、熱がこもりやすい部分を冷やすことにした。これにより、熱が問題のトラブルはなかった。

一方で、タスク実行中にカメラ画像が止まってしまうという問題が多発した。原因はアームを動かした際にアーム上のカメラのコードを引っ掛けるなどして接触が悪くなり止まってしまうものと、USB ハブとハードウェアの相性問題の 2 点があった。コードを引っ掛ける問題に関しては、ホットボンドでの固定を増強とケーブルの束ね方の変更で再発を防いだ。ハブの相性問題は、問題を起こしていた手のひらカメラを無効にすることでその場での対策とした。

### 5.3 競技結果

チームの目標は予選突破とした。これは、このチームでロボカップに本格的に参加するのは初めてであること、WRS2018 インフラ・災害対応カテゴリ災害対応標準性能評価チャレンジ [15] においてギリギリで予選突破できなかったことがあげられる。





Fig. 8: DEX1 (Meter/Valve).

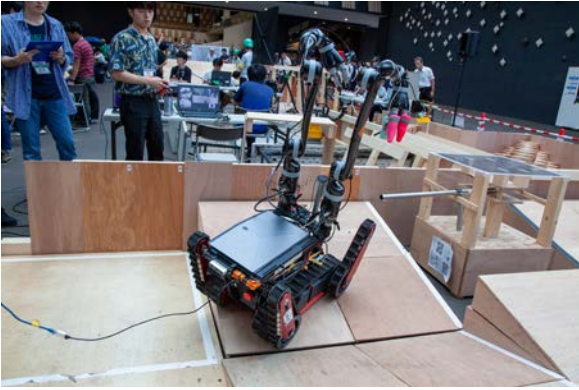


Fig. 9: DEX2 (L-Shaped Obstacle on uneven ground).

### 5.3.1 予選

挑戦した競技は DEX1, DEX2, EXP2 の 3 つである。決勝進出の条件となる MAN1/2 はロボットの破損を防ぐため挑戦するものの無理をせずリタイアするという戦略を取った。

- ・ DEX1(配管検査) 4 周目のバルブを 2 つ回すことまで成功し 17 点, 半自律加点が 1.5 倍あり, レディネステストに 5 つ成功 127.5 点 (図 8)
- ・ DEX2(障害除去) 1 回目の引き出しに成功, 不整地を走行して反対側に回することは危険と判断して実施せず, 1 点。半自律加点が 1.5 倍あり, レディネステストに 9 つ成功 13.5 点 (図 9)
- ・ EXP2 (壁面検査) QR コード 4 個の読み取りに成功, 半自律加点が 1.5 倍あり, レディネステストに 8 つ成功 48 点 (図 10)

予選 2 日間が終了した段階の正規化後のスコアを表 1 に示す。結果として 4 位になり決勝に進出することができた。

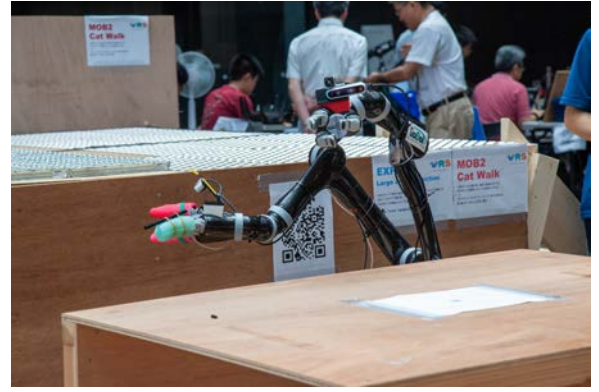


Fig. 10: EXP2 (Large-area inspection).

Table 1: Preliminary score (normalized).

Task	Score
MAN1 (Traverse)	0.0
MAN2 (Negotiate)	0.0
DEX1 (Meter/Valve)	18.9
DEX2 (L-Shaped Obstacle on uneven ground)	10.0
EXP2 (Large-area inspection)	53.3
Total amount	82.2

### 5.3.2 決勝

決勝のタスクはプラント災害を模したものとトンネル災害を模したものの 2 つであった。プラントタスクは、キャットウォーク周辺にある QR コードの読み取り, バルブを回しメータを規定値に合わせる, 坂道上でレディネステストを行う, ジャングルジム内でレディネステストを行うというものであった。トンネルタスクは, ステップフィールド上の QR コード及び Hazmat タグを認識する, ジャングルジム内にアームのみを入れてレディネステストを行う。予選に比べより荒れた路面を走行して L 字棒引き抜きを行う, 穴の空いた地面上から QR コードを読み取るというものであった。決勝は走行, アーム操作ともに求められるタスクとなったため, 取り組める範囲は狭かった。そこで, 予選で読み取ることができなかった一番小さい QR コードを読み取れるようにすることを目標とした。QR コードの読み取りを操作卓側の PC で行っていたがこれをロボット側で行うことで映像転送のノイズによる影響を取り除き, カメラ画像そのもののノイズはメディアアンフィルタを挿入することで軽減を試みた。決勝の結果を表 2 に示す。

悪路走破ができず, 得点を取りに行くことができなかったこと, 決勝においても各種トラブルが発生しアームが操作できない, ロボットそのものの操縦ができないなどにより点数を取ることができなかった。

Table 2: Final score.	
Task	Score
Tunnel	2.0
Plant	1.0
Total amount	3.0

### 5.3.3 考察

競技の点数にレディネステストの点数を掛け算するというスコアの算出方法であるため、やはりレディネステストの対策が重要であった。DEX1 は競技で点数は取れていたもののレディネステストで筒が根本から抜けてしまい5点しか取れなかったことで、正規化後のスコアに影響してしまっていた。

## 6. まとめ

チームの目標であった予選突破を達成することができた。これは我々が可能なタスクはどれかを事前に検討したこと、レディネステストで点数を取ることを重視したことが効果を発揮したと考える。我々のチームの操縦者は今年に入り初めてこのロボットに触ったという人がほとんどであったが、操縦支援の活用や練習により本番でもきちんと操作することができた。一方で、大会当日にロボットのトラブルが多発してしまい、予選1日目に関しては全種目で満足な点数を取ることができなかった。安定したロボットシステムの開発が今後の課題となり、次期型ロボットにおいても重視する必要があると考えた。また、次期型ロボットでは本ロボットで困難な不整地走破性やMAN/MOBの競技で点数を取れるようにすることが目標である。

## 謝辞

ロボカップジャパンオープン 2019 ながおか運営の皆様、レスキュー実機リーグ運営の皆様に深く感謝いたします。

また、ロボットの製作、当日のサポートを行っていた、株式会社アイザックの皆様、本ロボットの制作に関わったすべての方々、当日の操縦を行った皆様のおかげで決勝進出を達成することができました。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Choreonoid ホームページ — Choreonoid ホームページ, <https://choreonoid.org/ja>, アクセス日: 2019 年 9 月 20 日
- [2] OpenRTM-aist, <https://openrtm.org/openrtm/ja>, アクセス日: 2019 年 9 月 19 日

- [3] ジャパンオープン 2019 |RJC ロボカップ日本委員会, <http://www.robocup.or.jp/japanopen2019/>. アクセス日: 2019 年 9 月 19 日
- [4] Jaco |Robotic arm |Kinova, <https://www.kinovarobotics.com/en/products/assistive-technologies/kinova-jaco-assistive-robotic-arm>, アクセス日: 2019 年 9 月 19 日
- [5] Depth Camera D435 - Intel® RealSense™ Depth and Tracking Cameras, <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435>, アクセス日: 2019 年 9 月 19 日
- [6] Boson |FLIR Systems, <https://prod.flir.jp/products/boson> アクセス日: 2019 年 9 月 19 日
- [7] NDI.tv |Your Official Destination for All Things NDI®, <https://ndi.tv/>, アクセス日: 2019 年 9 月 19 日
- [8] Keita Nakamura, Kenta Tohashi, Hikaru Harasawa and Jun Ogawa: "Advanced control system for dexterous dual-arm robot motion", *The Twenty-Fourth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2019*, pp.644-649 (2019)
- [9] KentaTohashi/NDI-Video-Sender\_Receiver: NDI Video Send/Receive Program [https://github.com/KentaTohashi/NDI-Video-Sender\\_Receiver](https://github.com/KentaTohashi/NDI-Video-Sender_Receiver), アクセス日: 2019 年 9 月 20 日
- [10] ロボカップジャパンオープン 2019 レスキュー実機リーグルールブック, [https://drive.google.com/file/d/108MmR13BRR754KgPF1m\\_FW0En7NRQbDL/view](https://drive.google.com/file/d/108MmR13BRR754KgPF1m_FW0En7NRQbDL/view), アクセス日: 2019 年 9 月 28 日
- [11] Senseair K30 |Senseair, <https://senseair.com/products/flexibility-counts/senseair-k30>, アクセス日: 2019 年 9 月 20 日
- [12] GitHub - KentaTohashi/NDI-Audio-Sender\_Receiver, [https://github.com/KentaTohashi/NDI-Audio-Sender\\_Receiver](https://github.com/KentaTohashi/NDI-Audio-Sender_Receiver), アクセス日: 2019 年 9 月 20 日
- [13] Pablo F Alcantarilla, Jesús Nuevo, and Adrien Bartoli: "Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces." *Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 34(7):1281-1298, 2011.
- [14] ZBar bar code reader, <http://zbar.sourceforge.net>, アクセス日: 2019 年 9 月 20 日
- [15] Satoshi Tadokoro, Tetsuya Kimura, Masayuki Okugawa, Katsuji Oogane, Hiroki Igarashi, Yoshikazu Ohtsubo, Noritaka Sato, Masaru Shimizu, Soichiro Suzuki, Tomoichi Takahashi, Shin'ichiro Nakaoka, Mika Murata, Mitsuru Takahashi, Yumi Morita and Elena Mary Rooney: "The World robot summit disaster robotics category |achievements of the 2018 preliminary competition" *Advanced Robotics*, 33:17,854-857 (2019)