

## 災害対応ロボットQuinceの開発と課題

千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター 小柳 栄次

### 1. ロボットの開発

ロボットの開発は目的指向で行われる。筆者は、神奈川県立の工業高校在職中に多くのロボットコンテストに参加した。ロボコンはルールが明確であり、どんなロボットを製作すればよいかイメージができる。当然その過程で、イメージを言葉に、言葉を具体的な戦略に、戦略に基づいたメカニズムを構想し、具体的な設計を経て、加工・組み立て、完成そして機能評価と



図1 福島原子力発電所で活躍するQuince

なる。

災害対応ロボットQuinceも例外ではなく、地下鉄サリン事件の教訓を基に2005～2011年の5カ年間NEDO戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト 被災建造物内移動RTシステム（特殊環境用ロボット分野）閉鎖空間内高速走行探査群ロボットにおいて、実用化に向けたプラットフォームとして開発された。

東日本大震災の大津波により、福島第一原子力発電所は、これまで経験したことのない原子力災害を引き起こした。Quinceは、原子力災害用に開発されたロボットではないが、被災建造物内を遠隔操作で情報収集でき、原子炉建屋内のモニタリングロボットとして期待された。

### 2. 想定と想定外

ロボコンの世界ではルールがあり、フィールドもある程度規定されている。想定外が起こるとすれば、期待通りに動作しないで壊れた、とか、まさか対戦相手があんなことをするとは思わなかった、であり、想定外と言っても認識不足が起因している。一方、災害現場の想定はかなり困難である。自然災害だけでも地震、噴火、

洪水、土石流、火砕流、津波などがあり、事故やテロにも対応すると、災害現場が多様すぎて、そこで活躍する具体的なロボットがイメージできなくなる。

設計するに当たり、想定＝仕様書の根幹であり、想定外となるとものづくりはできない。想定外の津波による災害現場は災害対応ロボットの開発・運用にあっても想定外である。想定した事態に対する備えと、想定外への対応のための備えが必要である。一方で、法令が定めるものは全てが想定内であり、非常時に役立つものではない。

### 3. Quince開発の軌跡

2005年にスタートした戦略PJは不特定多数の市民が被災する可能性のある大規模地下街でテロが発生したことを想定している。この想定に対し、解決しなければならない問題・研究課題を明確にし、それぞれの課題に精通した研究者・企業人によるプロジェクトチームがスタートした。筆者らのPTはIRS（国際レスキューシステム研究機構）を中心におよそ80名が担当した。本学は、ロボット本体の設計、製作、性能評価と、組み込みシステム、センサ系などの選定と実装、ロボット上のオペレーティングシステム、走行制御系などを担当した。また、東北大学、筑波大学、岡山大学、産業技術総合研究所、情報技術研究機構などは、それぞれアプリケーションソフトウェアの開発を担当した。

開発はおよそ二段階で行われ、第一段階では機能の検証を目的にKenafというロボットを開発した。

#### (1) Kenaf

Kenafは、ゴム製クローラでボディ全体を覆う特徴的な構造で、瓦礫上の走行機能を重視し、必要とされるセンサシステム、アプリケーションパーツの可能性、必要性を検証した。2006年

からは、実際に運用するハイパーレスキュー部隊の人たちの意見を取り入れ、次期Quinceに反映させている。

Kenafの特徴は運動性能であり、6 km/hで走行でき、重量はおよそ20kg、1回の充電で2時間以上稼働した。先端部の直径が大きいサブクローラは2対装備され、それぞれ独立に制御できる。これにより、狹隘環境から平坦地、階段、瓦礫上、急傾斜、雪上までも高速で移動することができる。

一方で大きな失敗もある。Kenafの開発当時、バッテリーはNi-CdからNI-MHに変わり、さらにLi系の2次電池が台頭してきた時代である。PTとしても重量／容積／蓄電容量／放電電力／充電時間などを総合的に判断し、Li-Po電池を初期段階で採用した。当時のLi-Po電池は、一部製品にバラツキがあった。筆者らが、遠征中のホテルで充電中に白煙をあげ、火災警報機が作動するという事件を起こした。レスキューロボットが災害を引き起こすことは絶対に許されない、直後には電源システムの交換を行った。

現在、Kenaf、Quinceに使用しているバッテリーは、Li-ionである。余談であるがこの製品は、プロのTVカメラに使用され、フル充電のまま航空機に搭載できる。

#### (2) Quinceの開発

レスキュー隊員からの指摘は「頼りなさ」であった。Kenafの上部には、ポリカーボネイト製の箱があり、その中にコントローラー、ビデオサーバー、無線機器などが実装されている。厚さ5 mmのポリカの強度は十分であったが、透明で内部が透けて見えるのは、頼りないという印象を与えた。

Quinceでは、IP66程度の防水防塵、高さ2 mからの滑落／落下に耐えるという仕様から、コントローラー全ては筐体内部に隠蔽することになった。これにより、狭いスペースに発熱するコントローラー、モータードライバー、モータ

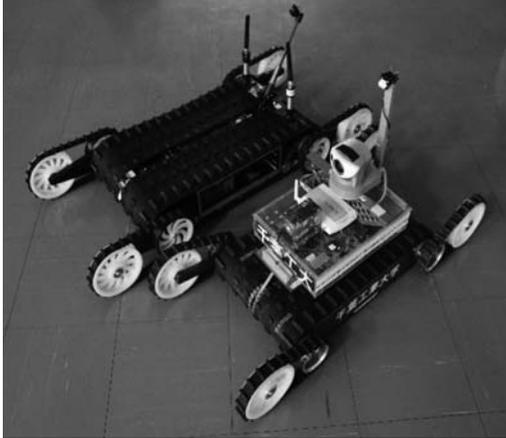


図2 レスキューロボットQuinceとKenaf

などが実装され、「熱」の問題が浮上した。一般にCPUが発熱すれば、冷却ファン、放熱フィン、ヒートパイプなどさまざまな冷却対策がとられている。一方ロボットに搭載するとすると、ファン→防水防塵機能への障害。ヒートパイプ→振動による冷媒の漏洩。また、重量や電力消費量の増加を招くことになる。結果的に採用したのは、放熱フィンである。ロボットが走行することにより、クローラの内側に空気の流れが起り冷却する。走行用モータはホイールインタイプとし、ハードウェアと分離している。

Quinceは2010年8月より千葉市消防局に消防資機材として試験的に運用がなされている。図2にQuinceとKenafを示す。

#### 4. 福島原子力発電所への対応

Quinceは国産ロボットとして唯一、福島第一原子力発電所内でモニタリングロボットとして活動している。原子力発電所の事故は想定外である。しかし筆者らは、事故当時ほぼ完成したシステムとしてのQuinceを6台所有しており、この国難に対処すべく、想定外に対応する機能を付加することにした。

原子力発電所内を遠隔操作するとき、2つの問題があった。1つは遠隔通信であり、もう1

つはロボットに搭載されている電子部品の耐放射線特性である。

##### (1) 原子炉建屋内の通信

通常、災害対応ロボットは、「人は安全な場所で、ロボットは危険な作業領域へ」が大原則であり、高濃度に汚染された原子炉建屋にはロボットのみが進出し必要な情報収集を行う。ご承知のように、放射線を遮るような壁は当然電波も届かないとされる。では実際にどうか？残念ながらこの種のデータは公開されていない。筆者らは、経済産業省と中部電力にお願いし、廃炉準備中の浜岡原子力発電所1号原子炉建屋内での無線通信実験を行った。これは異例中の異例であったが、緊急事態であることからQuinceに搭載されている無線機器全てと、通常では使用を制限されている機材の特性試験を行った。

その結果、原子炉建屋内において、ロボットを無線で遠隔操縦することは不可能という結論に達した。人は電話で会話するとき、途中で通信が途切れても話の前後の成り行きから推論し、会話を継続することができる。しかし、原子炉建屋内で動作するQuinceでは、情報収集のために7台のビデオカメラが搭載され、15Mbps以上の通信機能が必要である。

その後は、光ファイバケーブル、POE、有線LANなど可能性があるものを片端からテストした。現在、Quinceの通信システムはVDSLとツイストペアケーブルを組み合わせ。およそ500mの遠隔地から安定した双方向通信を実現している。また、得られた知見を元に有線-無線ハイブリッドシステムを構築し、福島に投入している。

図3に2台体制で運用した場合のシステム構成を示す。また、図4に操作画面を示す

##### (2) ロボットの耐放射線特性

Quinceに搭載している電子部品の耐放射線特性を確認/検証するため、日本原子力研究機構高崎量子応用研究所の指導/助言を受け実施

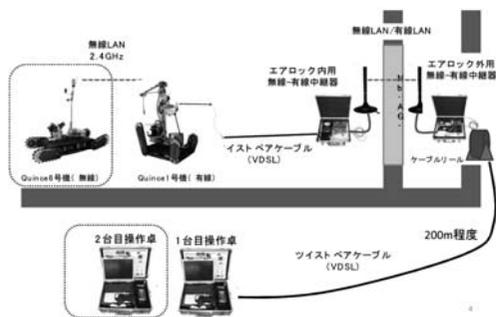


図3 有線無線ハイブリッド運用



図4 有線ロボットの操作画面

した。

人を放射線から防護するには、

- ① 時間：被曝量は時間に比例する。
- ② 距離：放射線の強さは、線源からの距離の2乗に反比例して小さくなる。
- ③ 遮蔽：透過力の大きな $\gamma$ 線やX線でも厚いコンクリートや鉛板などである程度遮蔽できる。

ロボットは、人に替わって高線量下で活動することが求められており、状況によっては①時間、②距離について回避できない。③遮蔽は重要な要素であるが、大型の建設機械とは異なり、小型の移動ロボットに重い遮蔽を装着することは非常に困難である。

放射線による電子部品の故障については、宇宙線による人工衛星の故障があり、放射線に関してJAXAより助言を得た。一方、航空宇宙で

使用されるデバイスと、Quinceに搭載されている、主に民生用電子部品では、明らかに価格と性能が異なると判断し、以下の実験を行った。

### (3) 実験1回目

線源はコバルト線型線源3本を利用、線源より0.66[m]の位置に被照射物を設置した。図6の試験環境にて、20Sv/hの $\gamma$ 線を照射した。このときの照射時間は5時間で、トータルドーズ100Svである。なお、照射量を確認するため、照射量測定試験体(アミノグレイ)を各被照射体付近に設置した。

被照射物は、CPUボード(AtomZ510PT)搭載組み込みボード。DC-DCコンバータ(32V→12V→5V)。LANHub(8ポート)。電池(Li-ion)内部に各種保護回路搭載。無線機(2.4GHz)。POE給電器。ビデオサーバー(4ch)。車載用小型CCDカメラ。

動作確認手法として、

- ①Pingテスト：CPU、無線機、ビデオサーバー、POE給電器。
- ②画像テスト：カメラ。
- ③メモリ：組み込みボード上のCF。
- ④USB：CPUにキーボードで入力。

をそれぞれ15~30分ごとに確認した。

図5に照射したデバイスを、図6に照射試験

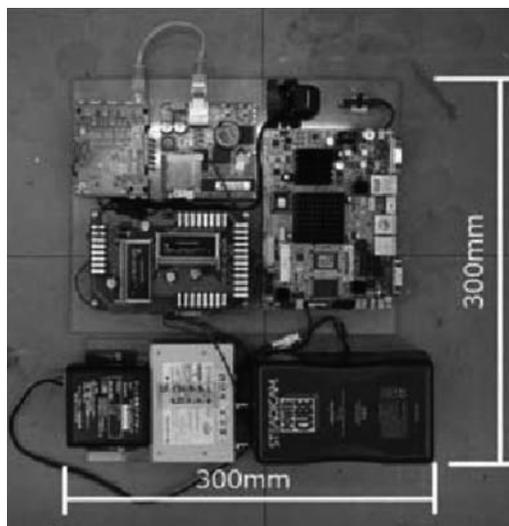


図5 照射試験を行ったQuinceの電子デバイス

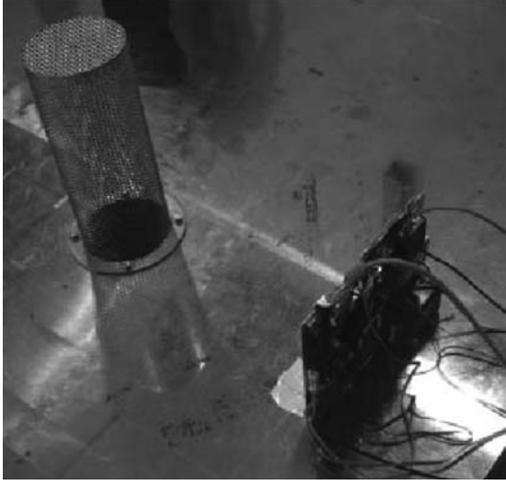


図6 照射試験のようす

中の状況を示す。照射試験の結果、5時間後、全てのデバイスは正常に動作を行っていた。しかし、各デバイスには個体差があること、検体数が1個であることから、全てを結論づけるには問題があるが、およその判断材料として有益な知見を得た。

#### (4) 実験4回目

1回目の実験結果は、従来の知見と異なる部分が多い。緊急時の原子炉建屋内では万一のトラブルも許されないことから、2回目の実験を行うこととした。

線源と被照射物は1回目と同じ。前回に100Sv照射しており、2回目を終了すると総線量は200Svとなる。一方、新たな被照射物として、Quinceに搭載するセンサ類を選定した。これらについては、線源から0.45[m]の位置に設置した。これにより、センサ類は40Sv/hの線量を受けることになる。2回目の実験も5時間連続であり、センサ類も総線量200Svとなる。

追加した被照射物は、スキャナ式レンジセンサ（3機種）。3次元距離画像センサ。CAN-USBデバイス。PTZネットワークカメラ。USBHub。MotorDriver（CPU，AD，DC-DCなど搭載）。

動作の確認方法はPC上にセンサデータを表示させることと、通信 packets を表示させることで確認した。なお、照射中にモータ回転実験は行っていない。

#### (5) 実験結果

JCO臨界事故後に行われた耐放射試験において、ノートPCは50Sv付近で故障している。また、別の実験でもCCDカメラは数分で映像に乱れが生じるとの報告もあった。

今回、総線量200Svを照射したが

- ・124Sv付近でスキャナ式レンジセンサ：応答なし。回収後に動作確認を行ったが動作しなかった。
- ・169Sv付近で車載用小型CCDカメラの色調が変化。その後バッテリー交換を行うが、その後より映像が出力されない。
- ・スキャナ式レンジセンサの1機種では、センサデータは返してきたが、照射中は大きなノイズが混入し、誤差のため実用的でないことも確認された。

試験の結果、Quinceのデバイスは200Svまで耐えることが判明した。前述のように、検体数の少なさと個体差の問題はあるが、現状のシステムで、「走行性能を大幅に低下させる遮蔽」

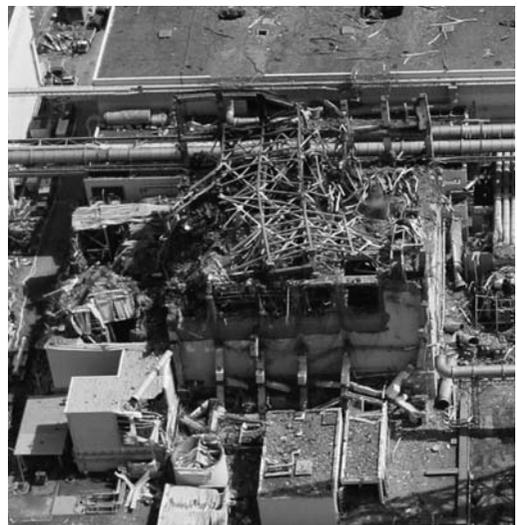


図7 福島原子力発電所3号原子炉建屋

が必要ないとの結論を得た。

## 5. 福島第一原子力発電所での活動

東日本大震災で被災した福島第一原子力発電所に対し、Quinceを派遣するための準備は3月17日より開始された。一番の問題は情報不足であり、次々に様相を変える現場。対症療法的に対策が講じられていたが、決定打に欠けていた。それでも3月末には通信、4月下旬には放射線の問題を解決した。5月下旬には、東京電力より正式採択が決まり、ロボットの改良とともにオペレーターの育成も開始された。

### (1) Quinceのメンテナンス

Quinceは実用化を目的に開発されたロボットシステムであり、研究用のものと本質的に異なる。大学の研究は新規性であり、可能性のあるあらゆるシステムに挑戦し、その有効性を見出すことにある。つまり、極論を言うと10回に1回でも成功すれば、その可能性を検証したことになる。一方で、実用化のシステムは100

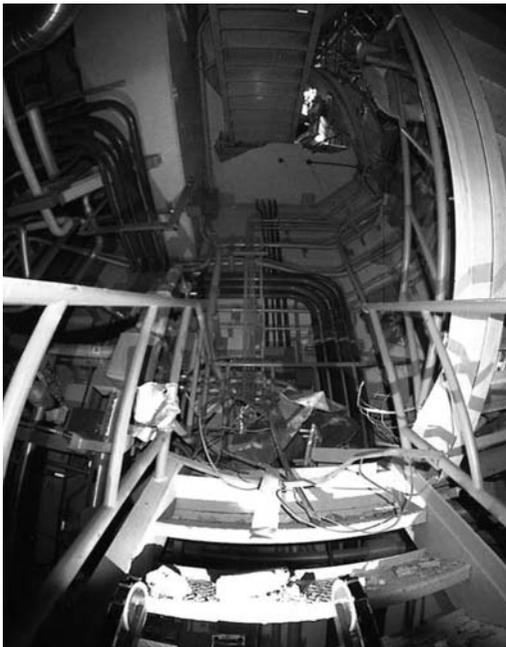


図8 3号原子炉建屋2階から3階踊り場付近

回のうち1回でもトラブルがあれば、安心して使えないとしてお蔵入りになる。大学で開発したロボットが即実戦配備された例は極めて少ない。さらに最も過酷な原子力災害対応は世界でも初めてである。使用する環境が過酷ならば、メンテナンスが必要である。という考えは根本から否定される。ロボットをメンテナンスすること・イコール・作業員の被爆である。つまり原子力災害対応ロボットはメンテナンスができない。Quinceには、2m落下に耐えるよう、さまざまな場所に衝撃緩衝パーツが使われる。これらのパーツは消耗部品として定期的に交換することが必要であった。これができないとなると、全て再設計が求められ、連日繰り返される実験を得て解決した。

## 6. まとめ

Kenaf, Quinceの加工, 組み立て, コントローラの組み込みなどは、全て千葉工業大学の学生が行っている。学生は、長野県立松本工業高校、長野工業高校の卒業生である。彼らは高校時代に、マイコンカーラリーや電気自動車の大会に参加しており、ものづくりに精通している。

ロボットコンテストを経験した学生の良さは、期限内にもものづくりを終了できることにある。当たり前のように、未体験の加工、緊急性を要する設計にあたり、自分の能力、技量を判断し、時間を読めること、最後までやり通すことができる。

想定外の事故に対し、彼ら若きエンジニアを育てた工業高校にエールを送る。