

2 - 4) SLAM

2 -4 -1) 測域センサレイの開発

本研究において開発を行なった測域センサレイの初期型プロトタイプを図2-4-24に示す．図2-4-24(a)は，2個のLaser Range Finder (LRF)と2個のアクチュエータから構成されるセンサレイの基本モジュールであり，図2-4-25(a)に示すシステム構成図によりデータ計測を行なうシステムとなっている．測域センサレイは，実装するロボットの形状や使用目的にあわせて，この基本モジュールを図2-4-24(b)のように複数個組み合わせることによって，3次元計測を行なう．

2つのLRFを回転させるためのアクチュエータの仕様を表2-4-3，2-4-4に示す．モータの回転軸とLRFの光軸を一致させることによって最低限の座標変換により3次元復元が可能となる．さらに，本研究では，3次元の自己位置推定をリアルタイムに行うための構成として，図2-4-24(b)の上面の基本モジュールのように，LRFを異なる位相差で設置する．このセンサレイは，第5回，第6回フィールド評価会時にセンサボックスごとWARECに搭載し，SLAMを行った．しかし，このモデルは，WARECの仕様に対し，サイズが大きく，重量も重いなどの問題があった．そこで，さらに改良を加えた測域センサレイが図2-4-24(c)に示すセンサレイである．このセンサレイは，アクチュエータを表2-4-5に示すものに変更するなどの改良を加え，第7回フィールド評価会時にWARECに組み込む形で搭載した．本センサの構成図を図2-4-25(b)に示す．また，このセンサレイは4つのLRFそれぞれにアクチュエータを搭載しており，個別に回転させることができる．これにより，自己位置推定と3次元計測を同時に行うことができるようになっている．センサレイの計測範囲を図2-4-26(a)に，東北大学屋内フィールドでの3次元地図の計測例を図2-4-26(b)に示す．

表2-4-3 UST10LXの仕様

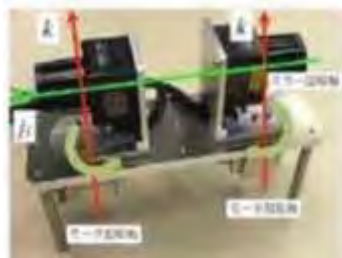
検出距離	0.06 ~ 20[m]
測距精度	± 40 [mm]
走査角度	270 [°]
走査時間	25 [msec]
角度分解能	0.25 [°]
インターフェース	Ethernet 100BASE-TX

表2-4-4 FHA-8Cの仕様

減速比	50
瞬間最大トルク [N・m/A]	3.3
最大回転速度[r/min]	120
トルク定数	1.3
一方向位置決め精度 [Sec]	120
検出分解能	400000
エンコーダ形式	アブソリュート

表2-4-5 Dynamixel XM430-W210-Rの仕様

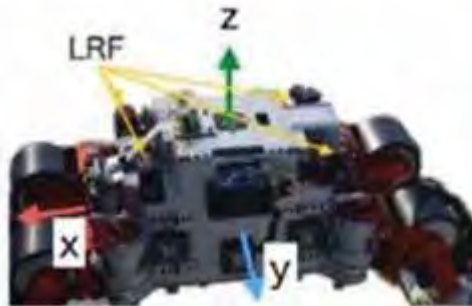
瞬間最大トルク [N・m/A]	3.0[N・m/A] (at 12V, 2.3A)
最大回転速度[r/min]	77 (at 12V)
角度分解能	0.088 °(360°/4096)
減速比	212.6:1
エンコーダ形式	アブソリュート



(a) 基本モジュール



(b) 構成例

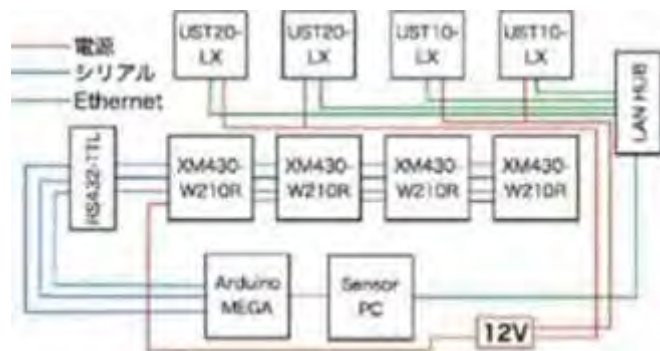


(c) WAREC搭載例

図2-4-24 測域センサアレイの初期型プロトタイプ

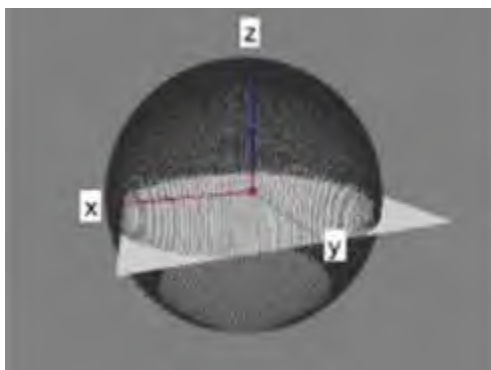


(a) 基本モジュール



(b) 改良型測域センサアレイ

図2-4-25 システム構成



(a) 計測範囲



(b) 3次元復元

図2-4-26 測域センサアレイにおける3次元復元

2-4-2) 測域センサアレイからの特徴点抽出と3次元環境地図の構築

測域センサアレイの目的の1つは、脚口ポットが移動した各地点における計測距離データを統合することによって、3次元環境地図構築を行なうことである。このような環境地図構築をより高速かつ高精度に行なうためには、図2-4-27に示すフローチャートのように、測域センサアレイによって計測された3次元点群データから環境地図構築に必要な特徴点抽出を行ない、抽出された特徴点で、環境地図の構築を行う必要があることが考えられる。以下、本節では、測域センサアレイを用いた特徴点抽出手法を提案する。



図2-4-27 測域センサアレイを用いた3次元環境地図構築のフローチャート

A) 特徴点の定義

ここでは、本研究における特徴点についての定義を行う。基本的に、 L 台のセンサから構成される測域センサアレイを考える際、各領域は、 l 番目のセンサにおいて計測可能であるかないかの2つの領域に区分可能なため、遮蔽領域として 2^L 個の領域に分割可能である。本研究において用いる初期型測域センサアレイの基本モジュールのLRFは2個であるため、遮蔽領域は図2-4-28に示すとおり、(1)-(4)の4つの領域に分割される。本研究において特徴点検出を行なう領域は、センサアレイによって生じる視差領域が存在する(3)の領域を対象とする。(3)の領域内において、遮蔽物によって生じる(1)と(2)の領域は、物体のエッジのような遮蔽が生じやすい計測点が多数含まれていることが想定される。そこで本研究では、測域センサアレイにおける特徴点と定義し、2個のLRFから生じる視差を用いた特徴点抽出を行う。



図2-4-28 測域センサアレイにおける遮蔽領域の定義

B) Dynamic Time Warpingを用いた特徴点の抽出

各LRFによって計測された距離データを図2-4-29のように距離画像配列として保持し、同じLRFの計測番号をシーケンスデータとして取り出し、比較することによって、上述の特徴点となる3次元距離データを抽出する。ここで、図2-4-29の各距離画像における k はLRFの計測番号、 j_1, j_2 はLRFを回転させているアクチュエータの角度番号を表す。

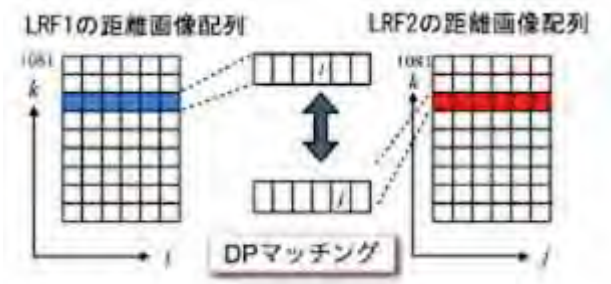


図2-4-29 提案手法の概念図

本研究では，これらの特徴点抽出を動的計画法におけるテンプレートマッチング手法の1つである Dynamic Time Warping (DTW)を用いて行なう．ここで，DTWにおけるコスト関数 $c_k(i, j)$ を，以下の式のように距離差分の絶対値によって定義する．

$$c_k(j_1, j_2) = |d_{k,j_1}^1 - d_{k,j_2}^2| \quad (1)$$

ここで， d_{k,j_1}^1 は，LRF₁における角度番号 j_1 における k 番目の計測距離を表す．このコスト関数から，DTWにおける定式化を以下に示す．

(i) Optimal Value Function

$$V_k(j_1, j_2) \triangleq \text{minimum cost so far, arriving at state } (j_1, j_2). \quad (2)$$

k indicates the measurement number of LRF.

(ii) Recurrence Relation

$$V_k(j_1, j_2) = c_k(j_1, j_2) + \min \begin{cases} \text{Expansion: } V_k(j_1 - 1, j_2) \\ \text{Match: } V_k(j_2 - 1, j_2 - 1) \\ \text{Contraction: } V_k(j_1, j_2 - 1) \end{cases} \quad (3)$$

(iii) Boundary Condition

$$V_k(1, 1) = c_k(1, 1) \quad (4)$$

Answer is given by $V_k(J_1, J_2)$.

ここで， J_1, J_2 は，各LRFの角度番号の最大値を表す．このように，動的計画法における最適価値関数として，各計測距離の差分の絶対値の総和の最小値とすることによって，ずれが存在するシーケンスデータのマッチングを行なうことが可能となる．従来のDTWでは，この最適価値関数の値とそのマッチングしたアクションを使用することによってシーケンスデータ同士が一致するかどうかを判断するために使われている手法であるが，本研究では，逆にDTWにおけるずれが生じている部分に着目して，特徴点の抽出を行なう．具体的には，ExpansionとContractionのアクションが生じる際には，図2-4-30，2-4-31のように，片方のLRFから計測可能で，もう片方からは計測不可能な距離データが含まれることが考えられ，このような点は，エッジ部分となる点や距離データが前後のシーケンスで変化する部分として考えられる．よって，本研究では，DTWにおけるExpansionとContractionを取った距離データを特徴点として抽出する．

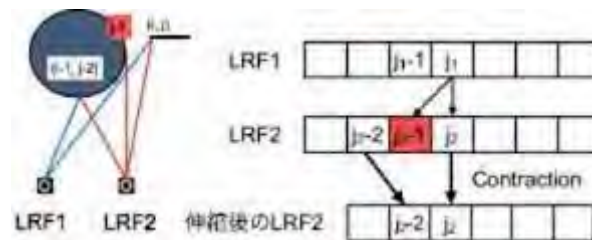


図2-4-30 伸縮アクションの概念図



図2-4-31 拡張アクションの概念図

C) 部分マッチングDTW

上述のように、DTWを用いることによって、3次元点群データから視差情報に基づく特徴点抽出を行うが、DTWにおける計算コストを考える際、基本的な計算コストは、 $O(KJ_1J_2J_3)$ となっている(K はLRFにおける計測データ数を表す)。また、必要なメモリ空間に関しては、Optimal Value FunctionとPolicy Tableを保存しておく必要があるため、 $2J_1J_2$ のメモリ空間を確保しておく必要がある。測域センサアレイにおいて疎なデータ計測を行なう際は、リアルタイムにおいて実行可能な手法であると考えられるが、密なデータ計測を行なう際には、さらなる特徴点抽出の高速化とメモリ空間の節約が求められる。さらに、本特徴点抽出のひとつの欠点として、各LRFにおいて計測を終えるまで特徴点抽出を行なうことができず、ロボットは停止してデータ計測を行わなければならない。そこで本研究では、DTWを部分的に適用することによって、特徴点抽出の高速化とメモリ空間の削減を試みる。具体的には、図2-4-31に示すように特徴点抽出を行いたい番目の距離データの前後 m 個のシーケンスデータを取り出し、上述におけるDTWによってマッチングを行うことによって同じように特徴点の抽出を行なう。DTWにおけるコスト関数と定式化は、上述と同様のものを用いる。また、特徴点の抽出の際には、先ほどと同様にExpansionとContractionのアクションを取ったものを特徴点として抽出するが、先ほどと異なるのはLRF1における $m+1$ 番目のデータがExpansionをLRF2における $m+1$ のデータにおいてContractionをアクションとして取ったものを特徴点として抽出することである。このような部分マッチングを用いることによって、計算コストは $J_1=J_2(=J)$ とした時、 $O(KJ(2m+1)^2)$ となりシーケンス長の m を調整することによって計算コストの削減が可能となる。また、必要なメモリ量においても、Optimal Value FunctionとPolicy Tableにおいて必要な $2(2m+1)^2$ となり大幅な削減が可能である。さらに、本特徴点抽出は、特徴点抽出を行なう i 番目のデータから m 回の計測後に行なうことが可能であるため、モータを回転させながらほぼ逐次的に特徴点抽出が可能となる手法となっている。

D) 特徴点からの3次元環境地図構築

ここでは、特徴点抽出後における、3次元点群を用いた環境地図構築手法について説明する。基本的に、測域センサアレイを搭載した脚口ロボットは、各地点において計測を行なうとともに、得られた計測データから上述の特徴点抽出を行うことによって、環境地図構築の点群集合を収集していく。現在地と1地点前との位置合わせのアルゴリズムとして、本研究では、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを適用する。ICPアルゴリズムにおける誤差関数の最適化にHornによって提案されているUnit quaternionによる手法を用いることで、座標変換行列を推定する。

E) DTWによる特徴点抽出

本研究では、提案手法における特徴点抽出手法が可能かどうか検証するために、特徴的な建物の形状をしている屋内で測域センサアレイを用いて計測を行なった(図2-4-32)。本実験では、アクチュエータの角度を 1° 刻みで180回計測($J_1=J_2=180$)することによってデータ収集を行なった。図2-4-33に、計測結果と特徴点の抽出結果を示す。計測された3次元点群データの総数は384748個となっており、抽出された特徴点の総数は5315となっている。また、計測結果から床面や天井面などの単純な平面データが除去されており、エッジ部分となる建物の角部が多く抽出されている。このことから、DTWにおける、ExpansionとContraction部分を抽出することによって、3次元点群データにおける特徴点抽出できていると考えられる。ここで、より詳細に特徴点の抽出ができているかの検証を行なうために、図2-4-33における $k=170$ のデータのみを切り出した結果を図2-4-34に示す。本図からも基本的にコーナーとなる部分においては、ExpansionとContractionのアクションが最適なアクションとして取られており、距離データにおける点群の特徴点として抽出できていることがわかる。図2-4-34においては、抽出された特徴点における誤検出の割合は少ないが、図2-4-34のオレンジ色の楕円のような

に，いくつかの誤検出と考えられる点が含まれていることがわかる．これは，測域センサアレイのキャリブレーション誤差によって計測データが大きくずれており生じている誤検出だと考えられる．



図2-4-32 実験環境



(a) 3次元復元

(b) 特徴点抽出

図2-4-33 提案手法による特徴点抽出結果



(a) 計測データ



(b) 特徴点抽出

図2-4-34 特徴点抽出結果 ($k = 170$)

F) 部分マッチングDTWによる特徴点抽出

ここでは，先ほどと同様のデータを用いて部分マッチングDTWによる特徴点抽出に関する実験を行った．実験結果を図2-4-35に示す．シーケンス長 m が小さい間は，先程の全体のシーケンスを用いたものと比較して，より少ない特徴点の数となっていることがわかる．これは，計測データにおける各LRFのずれが m よりも大きい場合は，本提案手法における特徴点として抽出できないことが考えられる．しかしながら，特徴点として各コーナーを検出できており，特徴点抽出手法として適用可能であることがわかる． m を増加させるにつれて，上述のDTWとほぼ同様の特徴点が抽出可能となっている．ここで，誤検出点が多く含まれた検出結果を図2-4-36に示す．本結果は図2-4-36(a)のオレンジの楕円の領域においてセンサにおける計測ノイズから多くの誤検出点が含まれている結果となっている．このような誤検出点を除去するための簡単な手法として，式(1)におけるコスト関数においてしきい値を導入し，ある一定以上の差($c_k(i, j) > r$)があるものだけを特徴点として抽出する方法が考えられる． $r = 50$ [mm]として，しきい値による除去を使った特徴点抽出結果を図2-4-37に示す．図2-4-36(b)と比較して，ノイズとなる点のある程度除去できており，コーナーとなる部分の検出ができていることがわかる．

また，表2-4-6に本実験において，特徴点抽出にかかった計算時間を示す．ここで，表2-4-6における平均は，部分マッチングDTWにおける， j 番目のアクチュエータの角度ごとにおける計算時間の平均を表し，合計は全ての計測データに対して処理が終了するまでの時間を表す．また，本実験において

使用したPCの仕様は、2.13GHz Intel Core 2 Duo搭載のMacBookAirとなっている。結果より、DTWを用いた場合と比較して、部分マッチングDTWを用いた場合の方がどの結果とも計算時間を短縮できたことが分かる。また、 $m=1$ における合計の処理時間は、約50 msecとなっており、取得可能な特徴点の数は少ないが高速に特徴点抽出を行えていると考えられる。また、アクチュエータの各角度に対する平均時間では、 $m=4$ の場合においても約2msecとなっており、本研究において用いたLRFのサンプリング周期25msecと比較して大幅に短い時間で処理が可能となっている。LRFのサンプリング周期より短い時間で処理を終えることで、モータを回転させながら特徴点の取得を行なうことが可能なことから、高速な特徴点抽出が実現できていると考えられる。

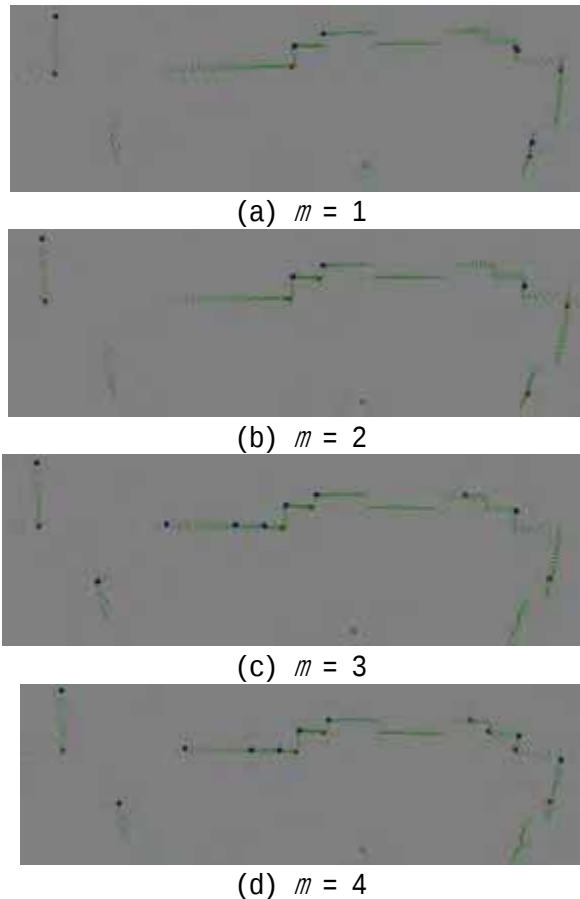


図2-4-35 部分マッチングDTWによる特徴点抽出結果

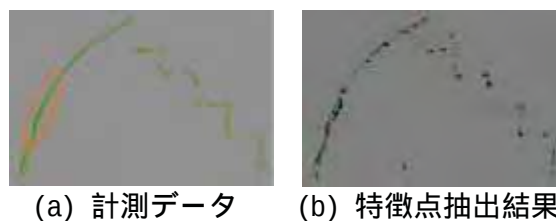


図2-4-36 多くの誤検出を含む特徴点抽出結果例



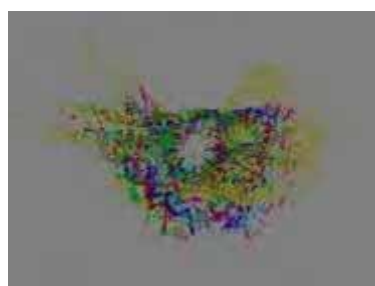
図2-4-37 しきい値を用いた場合における特徴点抽出結果

表2-4-6 各手法における計算時間の比較結果

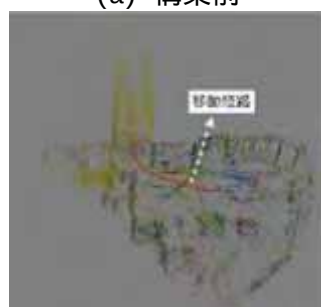
	部分マッチングDTW				DTW
サイズ	$m=4$	$m=3$	$m=2$	$m=1$	-
平均[s]	0.0022	0.0014	0.0008	0.0002	-
合計[s]	0.3941	0.2476	0.1325	0.05	0.958

G) 3次元環境地図構築結果

最後に、定常的に同じ特徴点が抽出できているかを検証するために、同一の環境において異なる10箇所の場所でデータの計測を行ない、抽出された特徴点のみを用いて3次元環境地図の構築（自己位置推定）を行なった。図2-4-38に地図構築結果を示す。抽出された特徴点には、ノイズとなっている特徴点も存在するが、多くの部分において同じ角部などが抽出されており、3次元環境地図の構築に用いることが可能な特徴点抽出を行えている。このように提案手法を用いることによって、3次元環境地図において必要な特徴点を定常的に抽出可能であり、削減された点のみを用いることによって地図構築等の処理を高速化できる。



(a) 構築前



(b) 構築後

図2-4-38 特徴点抽出手法を用いた3次元環境地図構築結果

2-4-3) 進化戦略を用いた実時間自己位置推定

本章では、提案手法である測域センサアレイを用いた実時間3次元自己位置推定手法を提案する。図2-4-39に全体のフローチャートを示す。図2-4-39に示すように、本提案手法では、測域センサアレイに搭載されている各LRFによる計測後、計測データ点群を各軸において構築を行っている環境地図と2次元平面上で一致度を計算することによって、各平面軸における自己位置推定を行なっていく。次に、各軸によって推定された自己位置推定結果より、ロボットの位置・姿勢($x, y, z, \theta^{\text{roll}}, \theta^{\text{pitch}}, \theta^{\text{yaw}}$)を算出し、算出された姿勢情報に基づいて、測域センサアレイに搭載されているアクチュエータを制御することによって、自己位置推定のしやすい平面に、LRFの計測平面を合わせるような流れとなっている。以降の節では、フローチャートの各項目について説明する。

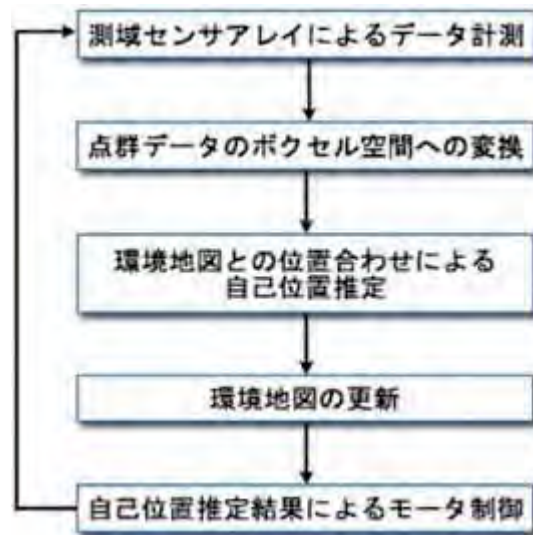


図2-4-39 実時間自己位置推定手法のフローチャート

A) 各平面軸における自己位置推定の最適化

本研究では，地図表現方法として，占有格子空間地図を用いる．占有格子空間地図は，2次元空間を有限の大きさを持つ格子を用いて表現し，計測距離データに応じて各格子の占有度合いを更新する地図の表現手法である．図2-4-40に占有格子空間の概念図を示すが，基本的には各測域センサからの計測情報が存在したセルに対して占有度を上げ，センサが透過したセルに対しては占有度を下げることによって，地図を更新する．本手法においては，以下の式に示される方法を用いて各格子の値を更新する．

$$map_t(x,y) = \frac{hit_t(x,y)}{hit_t(x,y) + err_t(x,y)} \quad (2-4-5)$$

ここで， $hit_t(x,y)$ と $err_t(x,y)$ は，それぞれ，時刻 t までに格子 (x,y) において，LRFによって計測された回数とLRFが透過した回数を表す．式(1)を用いることにより，地図の更新アルゴリズムは，以下のAlgorithm 1によって更新を行なっていく．ここで，LRFによる i 番目の計測データは計測距離 d_i と計測方向 θ_i の (d_i, θ_i) ， $i=1,2, \dots, M, j=1,2, \dots, L$ によって表現されており， M はLRFの計測データ数を表す． $L_i (= [\alpha^{Res} \cdot d_i])$ は，実空間から占有格子空間上へ距離データを変換する際の解像度を表しており，係数 α^{Res} を調整することによって，地図の解像度を変更することが可能である．また，式(2-4-6)における (x_p, y_p) はロボットの現時刻における占有格子空間上での位置座標， r_p は姿勢を表す．

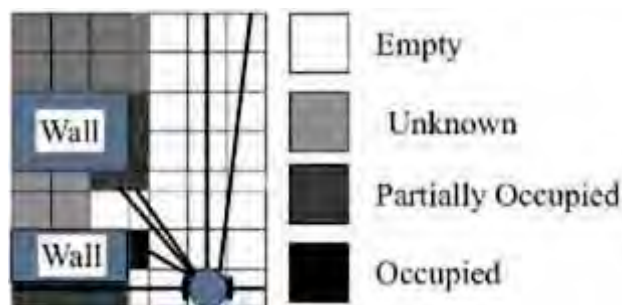


図2-4-40 占有格子空間地図の概念図

Algorithm 1: Map-update

```

for i=1 to M do
  for j=1 to Li do
     $u_{i,j} = \frac{j}{L_i} \left( d_i \cos(\theta_i + r_p) \right) + x_p$  (2-4-6)
     $v_{i,j} = \frac{j}{L_i} \left( d_i \sin(\theta_i + r_p) \right) + y_p$ 
     $x_{i,j} = \left[ \alpha^{Map} \cdot u_{i,j} \right]$ 
     $y_{i,j} = \left[ \alpha^{Map} \cdot v_{i,j} \right]$  (2-4-7)
    if j = Li then
      hitt(xij, yij) ← hit(t-1)(xij, yij) + 1 (2-4-8)
    else
      errt(xij, yij) ← err(t-1)(xij, yij) + 1 (2-4-9)
    endif
  endfor
Endfo

```

地図構築手法を用いて環境地図の構築を行なうことは可能であるが，適切に地図の更新するためには，ロボットの自己位置(x_p, y_p)と姿勢 r_p を高精度で推定しなければならない．本提案手法では，自己位置推定解の探索に進化計算の1つである，進化戦略(Evolution Strategy: ES)を用いる．基本的にESは，個体群を解集合とした多点探索手法の1つであり，交叉や突然変異といった遺伝的操作と適者生存に基づく選択を行なうことによって，解集合を更新し，探索を行なっていく．本手法では， μ 個の親個体，1個の子個体から構成される個体群から次世代の親個体となる μ 個体を選択する連続世代交代モデルの1つである($\mu+1$)-ESを用いる．以下に($\mu+1$)-ESにおける，手順の流れを示す．

```

begin
  Initialization
  repeat
    Creation ( $\lambda$ )
    Evaluation
    Selection ( $\mu$ )
  until termination_condition is True
end.

```

($\mu+1$)-ESは，初期化終了後，子となる個体を1つ生成し，個体の評価を行なっていく．この手法は，常に親個体を μ 個体保持するため，解集合の多様性が保たれた状態において，近傍探索が可能な手法であり，山登りの的に探索を行うことにより，より精度の高い自己位置推定が可能となるため本手法において採用した．

自己位置推定の最適化における，進化戦略では，各個体を現時刻におけるロボットの自己位置($g_{k,1}$, $g_{k,2}$)と姿勢($g_{k,3}$)として表現し，各遺伝子に対して，遺伝的操作を行なっていくことによって，探索を行なっていく．遺伝的操作の1つである，交叉には，最良個体とランダムに選択された個体から交叉を行なうエリート交叉を用いる．また，突然変異には以下の式によって計算される適応的突然変異を用いる．

$$g_{k,j} \rightarrow g_{k,j} + \left(\alpha^{ES} \cdot \frac{f_{\max} - f_k}{f_{\max} - f_{\min}} + \beta^{ES} \right) \cdot N(0,1) \quad (2-4-10)$$

ここで， fit_k は， k 番目の個体の適応度を表し， $f_{\max}$ と $f_{\min}$ は，それぞれ，個体群中の最大，最小の適応度を表す．また， $N(0,1)$ は，平均0，分散1の正規乱数を α^{ES} と β^{ES} は，それぞれ，係数とオフセットを表す．このように突然変異では， α^{ES} の値によって，探索範囲を設計することが可能であり，遠隔モニタリングに使用する脚ロボットの最大移動速度に応じて，適切な係数を設計することによって，各ロボットにおける自己位置推定の探索を行なうことが可能である．また， k 番目の適応度 fit_k は以下の式

によって計算される．

$$\begin{aligned}
 fit_k &= p_t^{occ}(x_{i,L}, y_{i,L}) \cdot \sum_{i=1}^M map_i(x_{i,L}, y_{i,L}) \\
 p_t^{occ}(x_{i,L}, y_{i,L}) &= \frac{\sum_{i=1}^M hit'_i(x_{i,L}, y_{i,L})}{\sum_{i=1}^M hit'_i(x_{i,L}, y_{i,L}) + \sum_{i=1}^M err'_i(x_{i,L}, y_{i,L})} \\
 hit'_i(x_{i,L}, y_{i,L}) &= \begin{cases} 1 & \text{if } hit_i(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \\ 0 & \text{else if } err_i(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \end{cases} \\
 err'_i(x_{i,L}, y_{i,L}) &= \begin{cases} 1 & \text{if } err_i(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \\ 0 & \text{else if } hit_i(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2-4-11}$$

式(7)より，自己位置推定解の探索において，適応度は，基本的に地図の占有度の総和によって決定される．適応度が高くなるほど，LRFのよって計測された格子の座標と現時刻までに構築された地図情報の一致度合いが高くなるため，より精確に自己位置が推定されていることが考えられる．そのため，本問題は最大化問題に帰着される．ここで， p_t^{occ} はペナルティ項を表す．基本的には，地図の占有度の総和のみでも自己位置推定が可能であるが，探索が局所解に陥ってしまう場合が存在する．そのためのペナルティ項として，多くの非占有状態のセルに対して，LRFの計測データが一致した時に，ペナルティ項が低くなるように設計が式(2-4-11)では行われており，自己位置推定が失敗することを防ぐための係数となっている．また，進化戦略における探索は，探索回数が T 回を越えた時に探索を終了する．進化戦略による探索が終了した後，最良個体の遺伝子を現時刻における自己位置とし，地図の更新を行なっていく（Algorithm 3.2）．

Algorithm 3.2: Total Procedure of SLAM

```

 $t = 0$ ,  $hit_t(x,y) = 0$  and  $err_t(x,y) = 0$ 
Input the LRF data
if  $t \neq 0$  then
    Estimate the robot pose using  $(\mu+1)$ -ES
end if
Perform Map-update
 $t = t + 1$ 
return to step 1

```

B) 測域センサレイを用いた3次元位置姿勢の算出

本研究において，基本的には，前節の進化戦略に基づく自己位置推定手法によって，各測域センサから2次元の位置推定を行い，それらの情報を統合することによって最終的な多足歩行ロボットの3次元位置姿勢を算出する．具体的には，各測域センサによって推定可能な平面を図2-4-41に示すが，各平面によって2次元上での自己地位推定を行なっていくことによって (x, y, z) の3次元位置座標の算出と x - y 平面からは姿勢角 θ^{yaw} ， y - z 平面からは姿勢角 θ^{roll} ， x - z 平面からは姿勢角 θ^{pitch} を算出することができる．また，本研究では，複数の異なる計測平面上において自己位置推定を行なっていくため，算出されるロボットの位置座標 (x, y, z) に重複が生じる．そこで，多足歩行ロボットが移動する平面は，基本的に図2-4-41における x - y 平面上であり， x - y 平面を中心とした自己位置推定を基軸に，得られた y 座標の値を固定値として， y - z 平面における自己位置推定に使用することによって，遺伝子型の情報を削減することで，進化戦略の探索における解空間を絞り，計算コストの削減を行う．さらに， x - z 平面における推定時には，この y - z 平面の推定時に得られた z 座標と x - y 平面の推定時に得られた x 座標を同様に固定値として用いることによって， θ^{pitch} のみの探索を行なっていくことで，全体的な計算コストを削減し，リアルタイムにおける測域センサを用いた自己位置推定を実現する．

C) ロボットの姿勢に基づく測域センサレイの制御

上述のように本研究では，測域センサレイを用いたリアルタイムにおける3次元空間における自己位置推定を行なっていくが，本手法は，2次元空間における自己位置推定を統合して3次元の位置姿

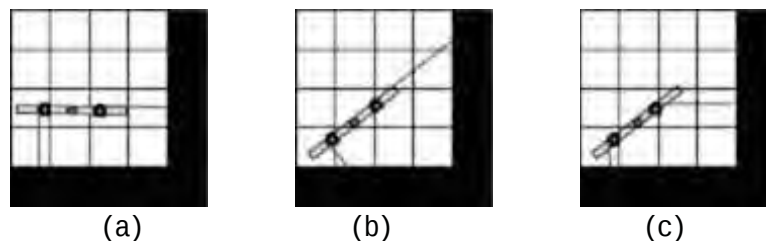
勢を推定しているため，ロボットが旋回を行なった際においては，図2-4-42の(a)-(b)に示すように，異なる格子空間上の平面を計測することが予想され，そのような場合には，2次元の自己位置推定が破綻してしまうことが考えられる．そこで本研究においては，3次元自己位置推定によって，得られた姿勢情報をもとに図2-4-42(c)のように同一の格子空間の平面を計測可能なように制御することによって，ロボットの姿勢変化に伴う自己位置の破綻を防ぐ．

D) 実験結果

ここでは，革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の第5回フィールド評価会において，計測を行なったデータを用いて，リアルタイムにおける3次元位置推定が可能であるかの検証を行う．3次元自己位置推定の結果例を図2-4-43に示すが，白丸の中心がロボットの自己位置を表しており，ロボットの移動に伴い，適切に自己位置が更新されており，提案手法によって3次元の自己位置推定が可能であることがわかる．また，この際における，計測から3次元の位置姿勢の算出までに要した平均計算時間は，0.12sとなっているため，提案手法により，測域センサを用いたリアルタイムの3次元自己位置推定が可能であることを示した．



図2-4-41 各測域センサにおける計測平面



(a) (b) (c)

図2-4-42 各条件における計測結果例



(a) 移動前



(b) 移動後

図2-4-43 3次元自己位置推定結果

2 - 5) はしご検出

遠隔操作ロボットで捜索活動を行う際、ロボットに把持動作を行わせる機会は多々ある。例えば、梯子や階段の昇降を行う際には、梯子の棧や階段の手すりなどを把持すると転倒の危険性が低くなる。ただし、ロボットが把持動作を行うためには把持対象となる部位の正確な情報が必要不可欠である。そこで、円柱情報として円柱直径を獲得する新たな手法を提案した。点の数、円柱中心点表面までの距離と円柱直径の関係性、また円柱エッジを特定することにより円柱直径を推定する方法について述べた。その上で導出された2つの値を組み合わせることにより、精度の高い円柱直径を推定する方法について示した。

提案手法では、入力データとして RGB 画像及び深度画像 (Depth 画像) を用いる。また、二つの手法により円柱直径を推定することで、より高精度な円柱直径の推定を行う。一つ目は、三次元点群を用いた推定手法である。この方法は、深度画像より算出した三次元点群を用いて、円柱領域の一定範囲内に含まれる点の数、およびセンサと円柱中心点の表面までの距離を測定距離とし、点の数・測定距離・円柱直径の関係を用いることで、円柱直径を推定する。二つ目はエッジ画像を用いた推定方法である。この方法は、RGB 画像から算出したエッジ画像から円柱の長手方向のエッジを特定し、それらのエッジの間の距離を用いて円柱直径を推定する。なお、提案手法では、データの分散値から推定値の信頼性を決めることとし、重みづけ平均を行い最終的な円柱直径を推定する。

提案手法の検証を次のように行った。対象の円柱として、点群の数を測定する際に用いた直径 18, 26, 32, 48mm の四種類の塩化ビニール管を使用した。ただし、測定距離を 0.9 ~ 1.5m 間において刻み幅 0.2m とした。RGB 画像及び深度 (Depth) 画像を取得し提案手法を適用して円柱直径を推定した。各分散値及び平均値を求めるときのデータの総数を 5 とし、円柱領域は深度画像より算出した三次元点群に対して手動で円柱領域だけが残るような閾値処理を施すことで作成した。また本実験では、RGB センサとして ASUS 社がモーションキャプチャデバイスとして提供している Xtion Pro Live を使用した。

表 2-4-7 は、提案手法を用いて推定した円柱直径の平均値と標準偏差を示したものである。比較のために、円柱情報の獲得としてよく知られている Point Cloud Library にある円柱あてはめを用いた。推定される円柱半径より算出した円柱直径の平均値と標準偏差を表 2-4-8 に示す。円柱あてはめを用いる際のパラメータとして、円柱モデルの導出回数を 10000 回、表面法線の重みの影響を 0.1、円柱モデルまでの距離の閾値を 50mm 以下にした。本検証では、平均値および標準偏差を求める際のデータの総数は 10 とした。

表 2-4-7 と表 2-4-8 を比較してみると、多くの場合で提案手法の方が良い精度で円柱直径推定していることがわかる。また、提案手法は標準偏差の値が小さいため推定された円柱直径の値のばらつきが少ないことがわかる。円柱あてはめで得られた推定値の標準偏差が大きくなった理由としては、円柱パラメータを導出する際に、RANSAC によるロバスト推定を用いているからではないかと考える。また Point Cloud Library にある円柱あてはめ (表 2-4-8) において精度が劣った理由として点群の数の関連性モデルを作成する際の測定データの数に関係しているのではないかと考える。そのため測定データを増やすことで精度を向上させることができると考える。

表 2-4-7 提案手法の結果

円柱直径(18.0mm)			円柱直径(32.0mm)		
測定距離	平均値	標準偏差	測定距離	平均値	標準偏差
(m)	(mm)		(m)	(mm)	
0.9	17.89	0.778	0.9	30.31	0.004
1.1	18.90	0.326	1.1	32.50	0.190
1.3	20.77	0.938	1.3	32.83	0.036
1.5	21.02	1.012	1.5	33.89	0.604
円柱直径(26.0mm)			円柱直径(48.0mm)		
測定距離	平均値	標準偏差	測定距離	平均値	標準偏差
(m)	(mm)		(m)	(mm)	
0.9	26.86	0.773	0.9	47.10	0.338
1.1	27.63	0.686	1.1	47.54	0.407
1.3	27.61	1.098	1.3	46.89	0.323
1.5	27.86	0.469	1.5	47.28	0.204

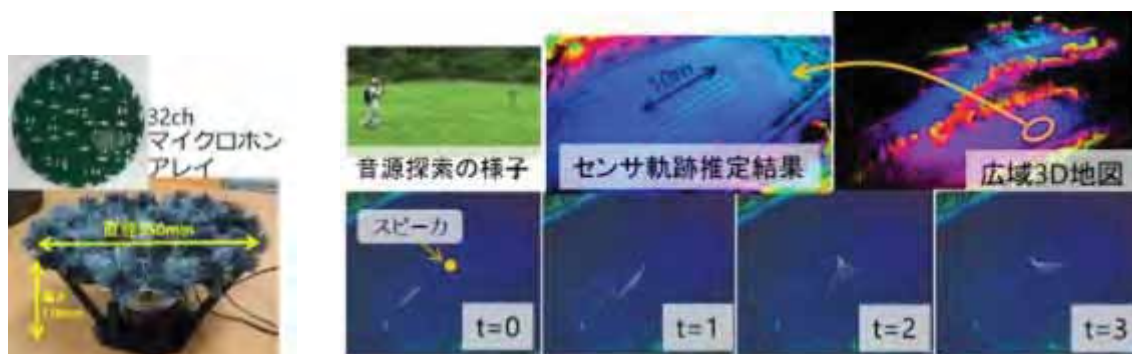
表 2-4-8 PCL にある円柱あてはめの結果

円柱直径(18.0mm)			円柱直径(32.0mm)		
測定距離	平均値	標準偏差	測定距離	平均値	標準偏差
(m)	(mm)		(m)	(mm)	
0.9	16.08	3.471	0.9	35.15	3.495
1.1	15.97	0.806	1.1	31.91	6.842
1.3	16.88	1.037	1.3	28.01	4.325
1.5	18.99	2.974	1.5	28.76	4.464
円柱直径(26.0mm)			円柱直径(48.0mm)		
測定距離	平均値	標準偏差	測定距離	平均値	標準偏差
(m)	(mm)		(m)	(mm)	
0.9	28.08	2.813	0.9	55.90	3.309
1.1	25.36	1.504	1.1	52.62	6.336
1.3	27.17	3.447	1.3	51.89	7.270
1.5	24.38	3.877	1.5	42.68	3.652

2 - 6) 音源検出

まず既存のマイクロホンアレイを用いた音源探索の性能検証から開始した。最終的には、16 チャネルマイクロホンアレイを WAREC-1 の胴体と一体型になるよう設置し、移動中および作業中に周囲の音源をリアルタイムに検出するシステムとして WAREC に統合した。

初年度となる 2015 年度は、既存の 32 チャネルマイクロホンアレイに屋外で風切り音を抑制するための風防を取り付け、センサの自己位置・姿勢を推定するための LIDAR と一体化したユニットを作成した(図 2-4-44(a))。センサユニットを手を持った状態で屋外での性能評価を行い、移動しながら音源位置を推定可能であることを確認した。



(a) LIDAR と一体化したユニット

(b) 屋外での性能評価

図 2-4-44 2015 年度のセンサユニット

2 年目となる 2016 年度は、前年度に作成したセンサユニットを WAREC-1 の胴体に設置し、瓦礫を腹ばい移動する WAREC からリアルタイムに音源検出する機能を実装した。LIDAR によるリアルタイム 6 自由度位置姿勢推定、およびマイクロホンアレイによる複数音源定位を統合し、3 次元地図上にどこから音がするか到来方向を提示するシステムを実現した。



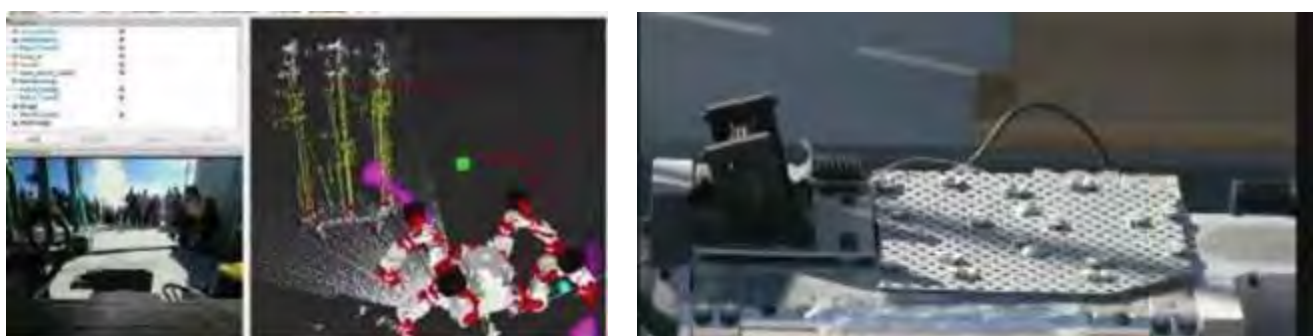
図 2-4-45 2016 年度のセンサユニット

3 年目となる 2017 年度は，WAREC-1 の遠隔操縦者へロボット周囲の音情報をオンライン提示する，移動用の遠隔操作インタフェースに，(1)で検出した音情報をリアルタイムに提示するシステムを実装した．WAREC-1 の移動に伴い相対的に変化する音源方向を時系列に接続する音源追跡機能を開発し，移動中も音源ごとに色分け提示する機能を実現した．



図 2-4-46 2017 年度のセンサユニット

最終年度となる 2018 年度は，新たに形状設計した 16 チャンネルマイクロホンアレイ(図 2-4-47(a))を，他大学が開発するセンサと共に WAREC-1 に一体型となるよう胴体上面に設置し，移動中および作業中に検出した周囲の音情報を遠隔操作者にリアルタイム提示する機能として，WAREC に本格統合を完了した．本機能は他大学開発のシステムと共に WAREC 内蔵のコンピュータで動作し，評価会では，レーザセンサで検出した 3 本のパイプ(首都大開発)のうち，右側のパイプからガス漏れ音が出ていることを検知するデモンストレーション (図 2-4-47(b))を行った．



(a) ガス漏れ音の検知

(b) 16 チャンネルマイクロホンアレイ

図 2-4-47 2018 年度のセンサユニット

2 - 7) 過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システム

プラント内移動における遠隔操作に関して，過去画像履歴を用いた遠隔操作インタフェースを開発した．本システムは，過去に取得したカメラ画像に，現在の移動体の位置・姿勢を考慮して移動体 CG モデルを重畳することで俯瞰的な画像を生成するシステムである．災害現場において，移動体は狭い空間への進入を可能とするための空間制約と，不安定な通信環境でも遠隔操作を可能とする通信制約を解決しなければならない．本システムは，移動体の遠隔操作に必要なカメラのみで実現できるため，

追加の機構で移動体が大きくなることはなく、動画ではなく画像を断続的に送るため、通信帯域の圧迫も避けられる。災害現場で問題になる上述の 2 点の制約について考慮した移動体のタフな遠隔操作インタフェースである。

本システムのアルゴリズムを以下に示す（図 2-4-48 参照）。

1. 現在のカメラ画像を取得し、そのときのカメラの位置姿勢とともに「過去画像履歴」に保存する
2. 過去画像履歴から評価関数を用いて最もよい視点を提供する背景画像を選択する
3. ロボットの現在の関節角度を用いてロボットの CG モデルの形状を決定する
4. 現在の位置姿勢にロボットの CG モデルを選択した背景画像に統合して表示する

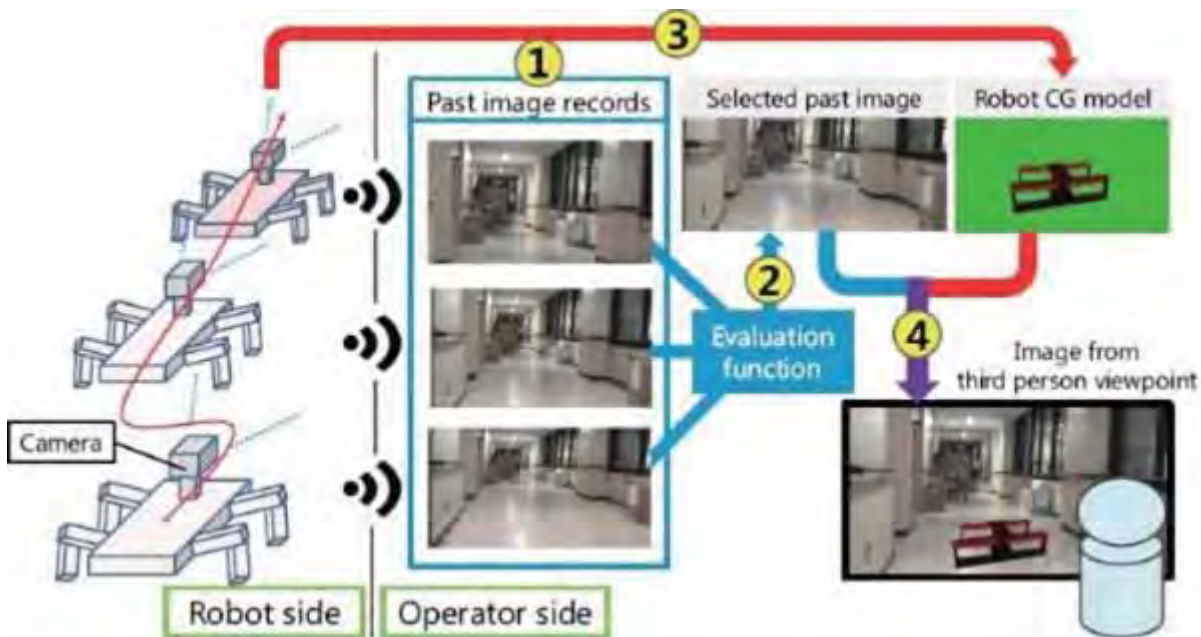


図 2-4-48 過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システムの概要図

本システムを 4 脚ロボット WAREC-1 に適用した。図 2-4-49 に示すように、ロボットの移動環境に応じて、ロボットの状態を俯瞰できる視点での映像を提示し、遠隔操作に使用可能であることを確認した。



(a) がれき環境

(b) はしごを含むプラント設備環境

(c) 段差のある環境

図 2-4-49 様々な環境下での俯瞰映像提示結果。

また、図 2-4-50 に示すように、WAREC-1 は各脚を用いて様々な姿勢・移動形態をとることが可能であるが、これらにも対応した俯瞰映像を提示できることを確認した。

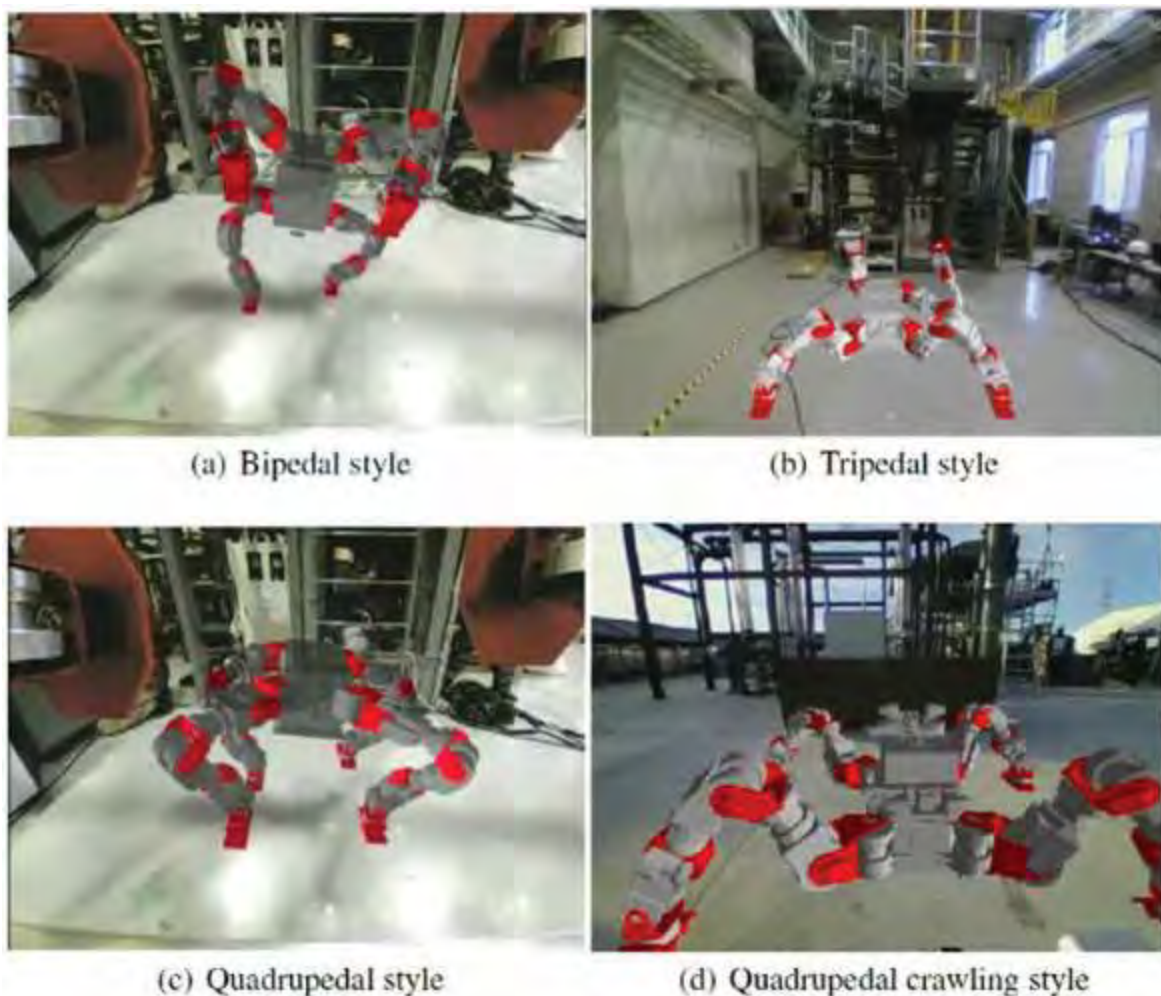


図 2-4-50 WAREC-1 の様々な姿勢・移動形態に対応した俯瞰映像提示結果．左上から，(a)2 足形態，(b)3 足形態，(c)4 足形態，(d)4 足腹ばい形態．

また，他研究機関との連携として，図 2-4-51 に示すように，俯瞰映像上への音源追跡結果の提示，タンジブル UI 上への表示統合を実現している．

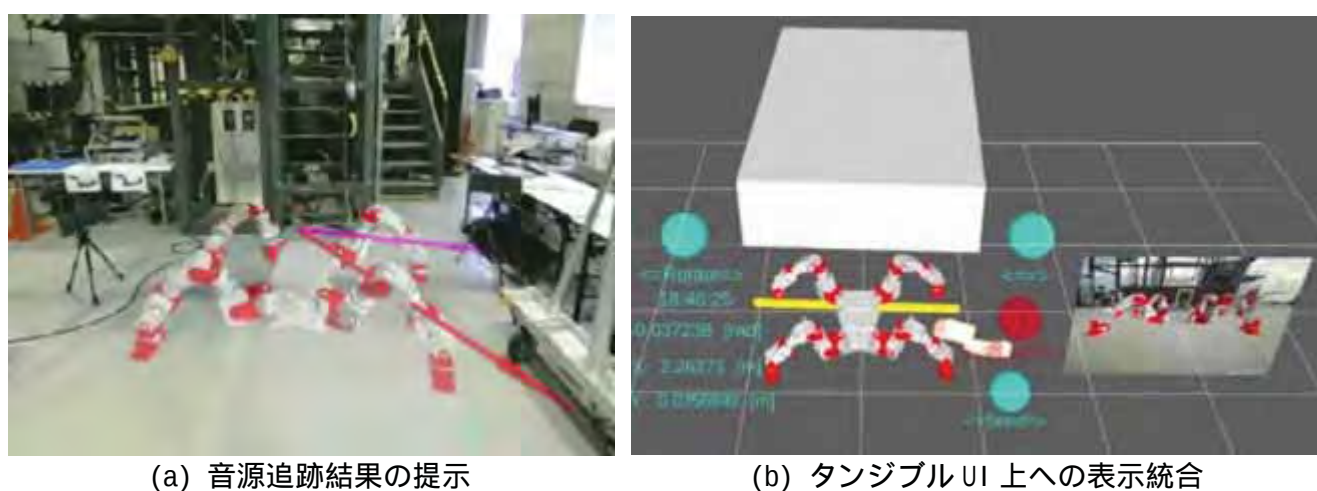


図 2-4-51 他研究機関との連携結果

提案システムによる俯瞰映像上のロボット CG モデルは，実ロボットと形状をリアルタイムに同期しているため，実ロボットの関節が故障して異常がある場合などに，操作者はロボットの異変にすぐに気が付くことができる．操作者が実環境中の実ロボットの様子を俯瞰的にモニタリングできる本システムは失敗時のリカバリにとって有効であると考えられる．

2 - 8) 移動ユーザインタフェース

脚ロボットは自由度が高いため一般に遠隔操作が難しい．脚ロボットの国際競技会である DARPA ROBOTICS CHALLENGE では，脚ロボットの本体や脚先の目標位置を，マウスを用いて仮想空間内で入力する遠隔操作システムが主流であった．しかし，ロボットと環境との位置関係が分かりにくいという問題点とロボットへ与える指令の入力に時間がかかるという問題点があった．

我々は先行研究においてクローラ型ロボットを対象として，環境認識と操作指令入力を容易にする，視覚情報と触力覚情報を複合提示するシステム（図 2-4-52）を開発した．これは実機と周囲の環境を仮想空間内に再現し，ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いて操作者に立体的に提示するものである．さらに，操作者は，操作者の指の動きと連動した指 CG モデルによってロボット CG モデルを動かすことができる．これにより，操作者はロボットのミニチュアをジオラマ上で直接触って動かしているかのような感覚を操作することができる．

本プロジェクトでは，クローラ型ロボットのために研究開発してきた提案システムを，脚ロボットプラットフォームに適用するための改良・改善を行った．なお，提案システムそのものを視触覚融合提示システムと呼び，これを脚ロボットの遠隔操作に適用した場合，仮想マリオネットシステム，もしくはタンジブルユーザインタフェース(タンジブル UI)と呼ぶこととする．本プロジェクトの脚ロボットは，はしご昇降，腹ばい移動によるがれき上走行，車輪移動による平面走行を行う．そのため，移動 UI としては，

- ・はしご昇降のための脚先の目標位置の出力
- ・腹ばい移動のためのロボット本体の目標位置の出力
- ・腹ばい・車輪移動のためのロボット本体の目標並進速度・目標回転速度の出力

を行うことが必要となる．以下，本システムの概要について述べ，その後，上記 3 点に関する研究成果を述べる．

2 -8 -1) 提案システムの概要

図 2-4-53 に提案システムの概要を示す．左上・左下・右の画像はそれぞれ，実ロボット，操作者が HMD を通して見ている映像，操作者の様子である．操作者が見ている映像は 3 次元仮想空間であり，仮想空間内にはロボットの CG モデル，ロボット周辺の環境の CG モデル，操作者の指の CG モデルが存在する．操作者が指先を動かすと，仮想空間内の指の CG モデルが実際の操作者の指の動きと同じように仮想空間内で移動する．この指の CG モデルを用いて，操作者はロボット CG モデルを動かし実ロボットを操作する．システム内では指先位置を常時算出しており，仮想空間内における指 CG モデルと他の CG モデルとの接触判定や，指先位置を基にしたロボットへの指令の生成を行う．操作者のロボット周囲の環境を認識しやすくするため，仮想空間内の環境 CG モデルに対するロボット CG モデルの位置や形状を実ロボットの位置・形状とリアルタイムに同期させている．

また，操作者が指の CG モデルでロボット CG モデルの操作したい部位を掴んだときに，ロボットの CG モデルを掴んでいる感覚をサーボモータによる自作の反力提示デバイスによって提示する．これにより，遠隔地にあるロボットを直接触っているような感覚をオペレータに提示することができる．さらに，ロボット CG モデルが環境に衝突したときには机上の力覚提示デバイスにより操作者の手に対して反力を提示する．



図 2-4-52 Robot operation device with haptic device

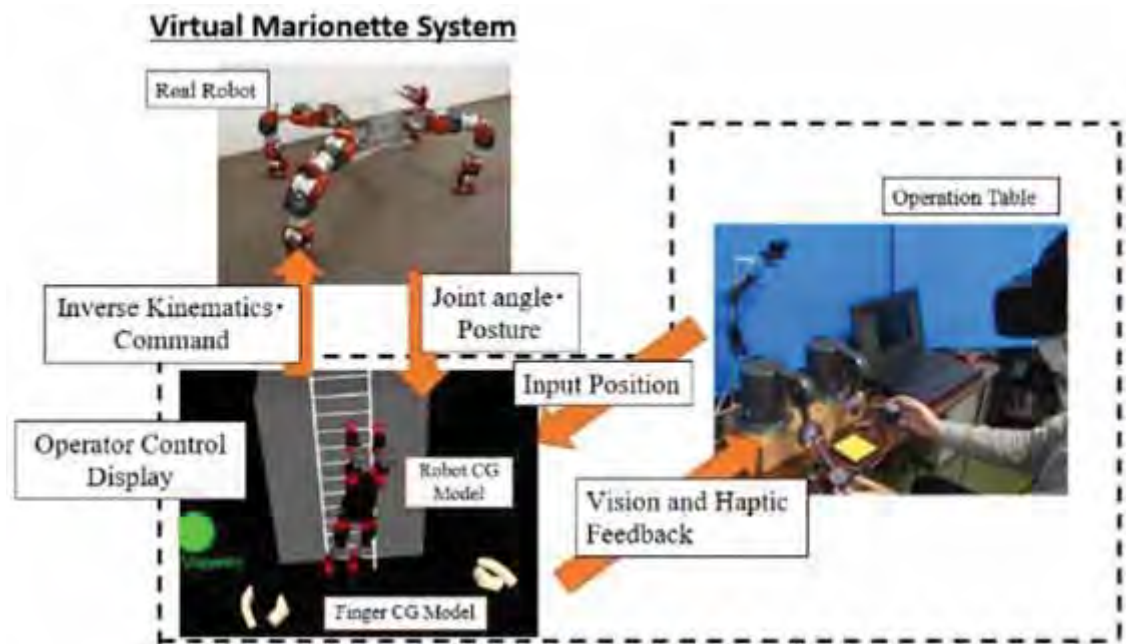


図 2-4-53 Overview of the system in this research

2 -8 -2) はしご昇降のための脚先の目標位置の出力]

本システムを用いた脚口ロボットのはしご昇降の遠隔操作の流れを図 2-4-54 に示す．はしご昇降の動作は自律的に制御されているとする．介入が必要であると操作者が判断した場合に，本システムを用いて遠隔操作を行う．

脚の操作方法について述べる．図 2-4-55 の左上の画像は，操作する脚を選択する前のロボットモデルの状態である．肌色で描画されている指の CG モデルを操作して，脚先を掴むと上段真ん中の画像の状態になる．ここで，橙色で描画されているのは現在選択されているロボットの部位である．その後，脚先をつまんだ指を動かすことで，操作者の指先の位置をロボットの脚先の目標位置として，逆運動学計算が行われる．その結果を図 2-4-55 の上段右のように，半透明のモデルで目標姿勢として表す．その後，操作者が指先を開くと，システムは操作者が形状の変更を終了したとみなし，最終的に半透明で描画された目標姿勢に重なるようロボットに指令が行われる．これにより，実際の脚口ロボットのミニチュアをつかんで動かしているかのような感覚を操作者に提示することができる．

逆運動学計算と有効性検証実験の詳細は既発表文献に示している．この既発表文献では，脚口ロボットの変形タスクにおいて被験者実験から従来手法よりも提案手法の方が脚先の位置を指定しやすく，環境認識がしやすいことが確認されている．また，本システムは 2017 年 11 月のフィールド評価会のはしご登りの操作にも用いられており，その有効性を実証している．

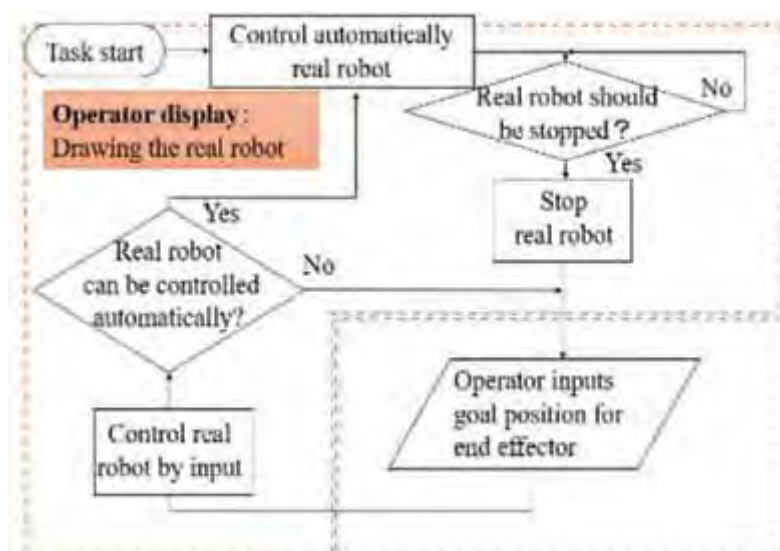


図 2-4-54 The flowchart of operation process

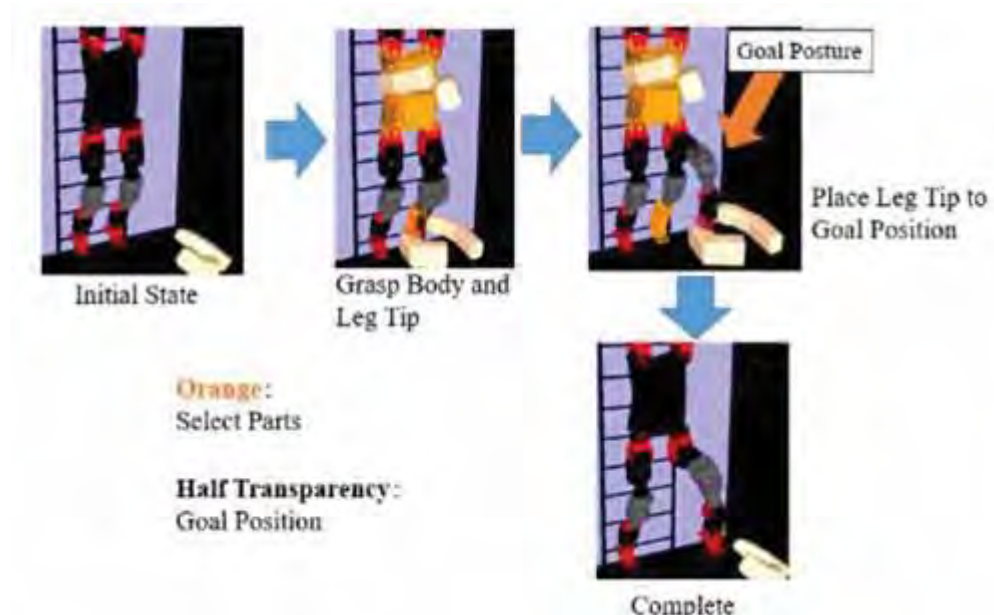


図 2-4-55 Operation process

2 -8 -3) 腹ばい移動のためのロボット本体の目標位置の出力

ここでは、移動の目標地点を出力するための機能について述べる。図2-4-56に本機能について2018年6月のフィールド評価会で実証試験をした際の操作者への提示画面を示す。

操作者が指 CG モデルによってロボット CG モデルの本体部分を把持すると目標位置の入力モードとなる。このとき、半透明状のロボット CG モデルを指 CG モデルの間に描画する。この半透明状のロボット CG モデルが目標位置を示すものとなる。操作者がロボットを移動させたい位置姿勢で指を開き、把持を解除すると、半透明状のロボット CG の位置姿勢を目標位置としてロボットに送信する。

本機能は2017年11月のフィールド評価会ではしご前までの移動、2018年6月のフィールド評価会での段差前までの移動に用いられた。どちらのフィールド評価会でも問題なく動作しており、有効性を実証している。

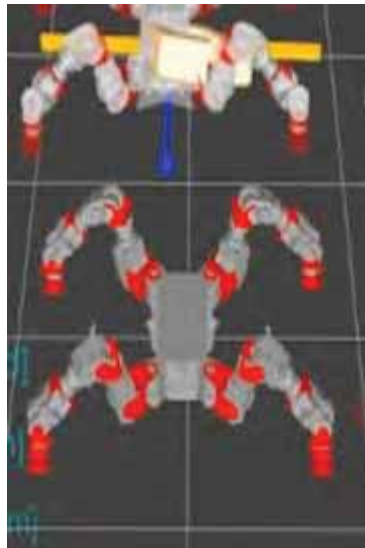


図 2-4-56 Inputting of target position

2 -8 -4) 腹ばい・車輪移動のためのロボット本体の目標並進速度・目標回転速度の出力

システムに実装した脚型ロボットの平面上での移動の操作方法について述べる．操作者が力覚提示デバイスを装着し，HMD を通して見ているロボットの CG モデルの胴体部分を摘んだ際のモードとして目標速度の入力モードを実装した．目標位置入力モードとの切り替えは，仮想空間内のボタンを指 CG モデルで触ることにより行う．

目標速度入力モードでは，掴んだ状態で移動させたい方向へ半透明のロボット CG モデルを動かすとその方向へ実ロボットが移動し，回転させたい方向へ半透明のロボット CG モデルを捻ると実ロボットがその方向へ回転する．具体的には操作者の人差し指と親指の midpoint の位置を基に，掴んだときの位置から現在の位置へのベクトルから目標並進速度を生成する．一方，図 2-4-57 に示すように，人差し指と親指を結ぶ直線を用いて，掴んだときの直線と現在の直線のなす角度 $\theta_d (= \alpha - \beta)$ からロボット本体の目標回転速度を生成する．

なお，本機能は，当初腹ばい移動のみのために研究開発をしており，実ロボット（シミュレータ）の仕様上，並進操作指令と回転操作指令は同時に与えていなかった．しかし，ロボットにメカナムホイールが搭載され，平面での全方向移動が可能となったため，最終的には前後方向の目標並進速度，左右方向の目標並進速度，本体中心の目標角速度の 3 つを同時に出力可能とした．これらを同時に出力することはゲームパッドでは不可能なことであり，本システムを用いることでゲームパッドと比較しても操作が容易になると考えられる．この機能の有用性は 2018 年 11 月のフィールド評価会で実証した．なお，2018 年 11 月のフィールド評価会では，本システムの簡易版として指の位置計測デバイスとして Leap Motion を用いた．脚ロボットの移動のためのソフトウェアは全て ROS により通信を行っており，このようにデバイスの変更が容易な点も本システムの特長である．

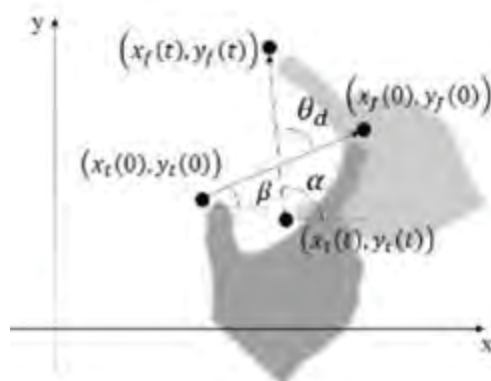


図 2-4-57 Calculation of target velocity

タンジブル UI は脚口ボットの脚先位置を入力することができる機能が実装されていると述べた。上述した通り、この機能は自律移動をしている脚口ボットに対して、介入が必要だと操作者が判断したときに用いるものであり、基本的には失敗時のリカバリのための機能である。

また、本システムを活用すると脚先の目標位置だけでなく、各関節の目標角度も入力することができる。クローラ型ロボットに搭載したマニピュレータの各関節の目標角度を本システムで入力可能であることは過去の文献で発表済みであり、本機能により脚口ボットの転倒復帰を直感的に行うことができる。実ロボットにおいては実験をしていないが、Choreonoid を用いたシミュレータでは実際に転倒したロボットを復帰可能であることを確認した。さらに、仮想空間内の操作者の指の CG モデルと他の CG モデルが衝突した際の反力提示力機能や半自律的な転倒復帰機能についても研究開発を行い、その有効性を検証している。

2 - 9) 作業ユーザインタフェース

災害現場等の危険作業下では環境の不確定要素が多く、高度な認識・判断能力や作業実行能力が必要となり、ロボットを遠隔操作する機能が重要となる。そこで、装着性と操作性が優れた軽装備のマスタと、スレーブロボットのセンサフィードバック制御機能を統合することで、実用的な作業に対応可能な遠隔操作システムの開発を行った。

2 -9 -1) 遠隔操作システム

図 2-4-58 に開発した遠隔操作システム、図 2-4-59 に使用したマスタの概観を示す。操作者の上半身に装着されたマスタによって、両手先の位置姿勢、指の曲げ角度、首の向きを計測し、UDP を用いて 10ms ごとにスレーブロボットのコントローラに送る。コントローラでは、逆運動学に基づいてロボットの関節角度に変換すると同時に操作者のためのアシスト制御の補正を加える。また、スレーブの視覚情報がヘッドマウントディスプレイ(HMD)によって操作者に提示される。

FST (Flexible Sensor Tube) は長さ 50mm のリンクと関節で構成されたセンサであり、各関節には曲げ角度を検出する角度センサが内蔵されており、任意の三次元位置・形状を計測することができる。本システムでは、腕と首の計測に FST を使用する。腕用の FST は全長 1050mm、関節数 23 個である。

FSG (Flexible Sensor Glove) は操作者の手の形状を計測するためのセンサグローブである。各指の背面に 2 本または 4 本のワイヤを装着し、ワイヤの伸縮を直動ポテンショメータによって計測することで関節角度を得る。指先には力提示装置が付属している。

HMD としては Oculus Rift を使う。スレーブ側カメラの映像を表示することで、没入感の高い操作が可能となる。また、AR (Augmented Reality) 技術により、操作者の手とロボットの手の映像等を実画像に重畳して表示する。これにより、マスタ・スレーブ間の誤差、制御の遅れを容易に認識可能となる。

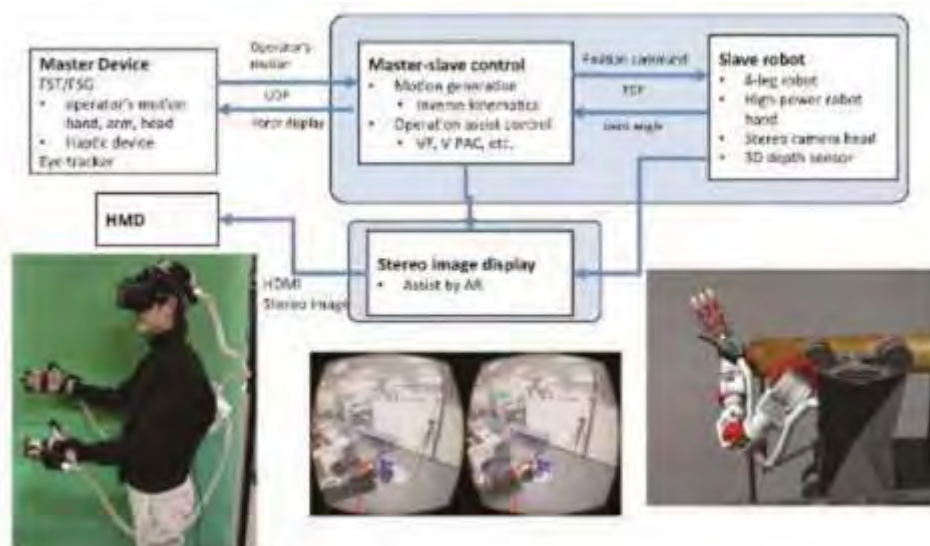


図 2-4-58 遠隔操作システム

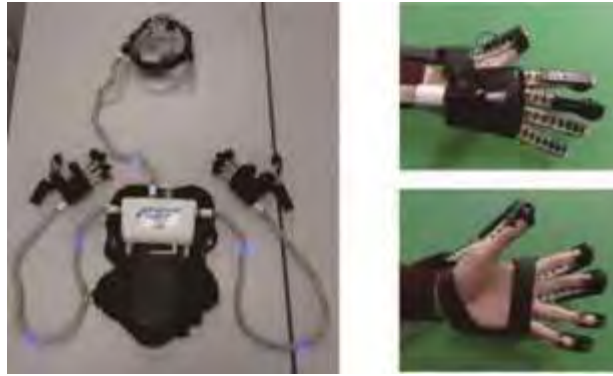


図 2-4-59 FST・FSG

2-9-2) 操作制御

FST は多関節リンク機構であり，一般的なマニピュレータと同様の手順で関節角度から順運動学を用いて手先の位置姿勢目標を求めることができる．

一方，本システムではマスタとスレーブが異構造であり，サイズも大きく異なる．また，関節角の可動範囲の違いも大きい．そのため，マスタ側の手先の位置姿勢をロボットアームの目標角度の計算に変換するのに，数値的解法（Levenberg-Marquardt：LM）法および特異値分解フィルタ（Singular Value Filter：SVF）を用いる．これより，マスタの指令位置姿勢がスレーブの可動域外にあった場合においても，可動域内の最近傍となるようにスレーブを制御できる．

2-9-3) アシスト制御

従来より，マスタ・スレーブにおいて精密な動作を高速に実行することは難しい問題であった．これには，視覚や触覚等の感覚提示に時間遅れと，スレーブロボット自体のダイナミクスによる遅れが大きく影響している．これに対して，自律制御を部分的に統合するアシスト制御を導入することで，操作を容易にすることを試みた．特に 仮想拘束（VF）と視覚ベース予測アシスト制御（V-PAC）の2つの手法を導入した．

A) 仮想拘束（VF）

壁をなぞるような動作やバルブを回すような操作の場合，ロボットをあらかじめ定めた拘束空間内で動作させると，操作者の負担が減少する．スレーブロボットの動作に仮想的な拘束を加える手法は Virtual Fixture（VF）と呼ばれ，これまでも多くの研究が行われてきたが，本開発では VF を実用的な操作に適用する．

図 2-4-60(a) はバルブ操作の例であり，スレーブの動作はバルブ中心に対する回転動作となるように拘束される．図 2-4-61(a) は，実際に WAREC-1 でバルブを回す操作に適用した例である．VF を導入することで，回転作業の作業速度を向上させることができた．

一方，図 2-4-60(b) はドリル操作の例であり，穴が正確に開けられるように，ドリルが壁に接した後は，ドリルが壁に垂直となり，かつ垂線方向のみ動作するように仮想拘束を与える．図 2-4-61(b) は，WAREC-1 で電動ドリルによる穴あけを行った場合である．ここでも，動作を垂線方向に拘束することで動作速度が向上されることが検証できた．

VF の設定は手動または自動で行われる．スレーブ側のセンサにより対象の位置姿勢の 3 次元計測が可能で，かつ計測の信頼度が高い場合は自動で，それ以外の場合は手動で設定することで，不確定な環境に柔軟に対応が可能である．



(a) バルブ操作



(b) ドリル操作

図 2-4-60 仮想拘束(VF)



(a)

(b)



(c)

(d)

(a) バルブ操作



(a)

(b)



(c)

(d)

(b) ドリル操作

図 2-4-61 仮想拘束(VF)の実験結果

B) 視覚ベース予測アシスト制御(V-PAC)

リーチング動作の操作制御に自律制御を統合する手法として、視覚ベース予測アシスト制御 (Vision-based Predictive Assist Control: V-PAC) を開発した。スレーブロボットはリーチングの目標物体候補を視覚センサによってあらかじめ認識しておき、初期の手先動作と視線方向から目標物体を推定する。リーチング動作軌道を予測すると同時に、スレーブロボットの動作を視覚フィードバック制御によってリアルタイムで修正される。

V-PAC における、マスタとスレーブの動作と、対応する処理の流れを図 2-4-62(a), (b) にそれぞれ示す。重要な点として、V-PAC はマスタの操作の動作指令を修正することによる半自律制御であることが挙げられる。そのため、操作に違和感の少ない動作アシストが可能となる。

WAREC-1 の物理シミュレータにおいて、提案手法の有効性を検証した。図 2-4-62(c) は B~D の把持動作の時系列を表しており、把持物体を予測して動作をアシストする様子を示している。結果として、作業速度が向上するとともに、操作者の負担が軽くなることが検証できた。

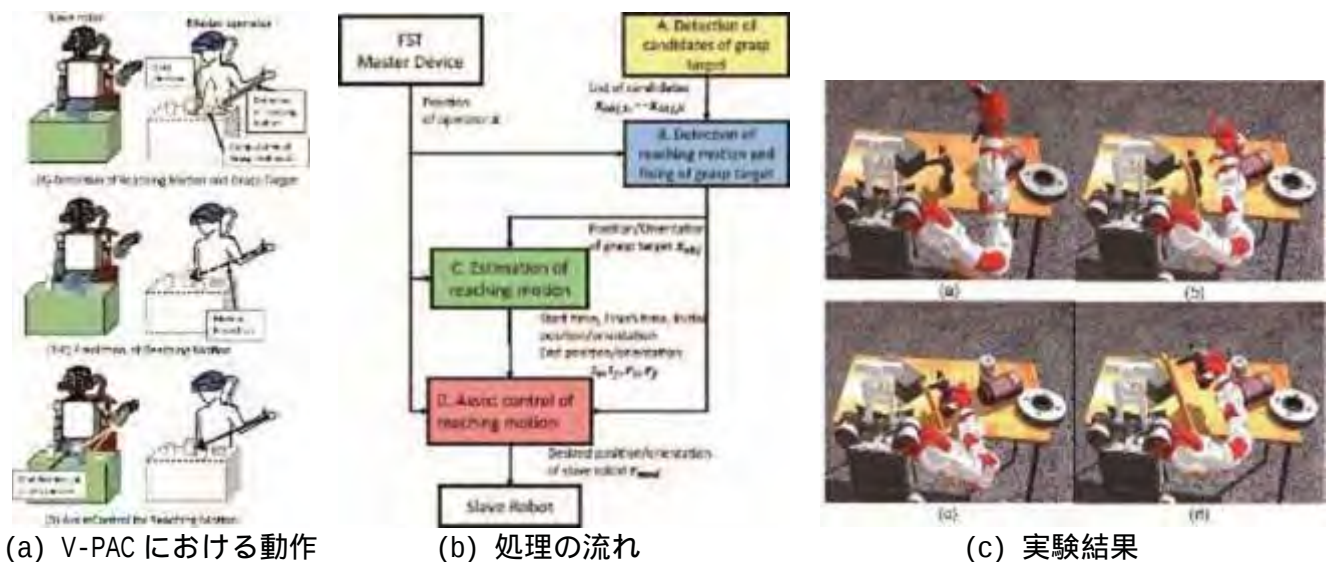


図 2-4-62 V-PAC

2 - 1 0) 操作ゲイン

「操作ゲインの決定および適応技術に関する研究」は、ロボットの遠隔手動操作性を高める目的で同構造マスタ・スレーブ(MS)システムにおいて作業状態に応じたスケール・ゲイン調整を行うものである。

同構造MSシステムは、人の身体動作「そのもの」を「そのまま」ロボットに伝達可能できる遠隔操作システムの一形態である。その利点は、人の身体動作「そのもの」を伝えられることに起因するところが大きく、具体的には、手先の微細な動きや腕の姿勢を意識せずに指令できる、複数の自由度を容易に同時制御できる、スレーブの状態を直感的に認識できる、などが挙げられる。一方で、人の身体動作そのものを「そのまま」ロボットに伝達することから、この性質による欠点・課題も挙げられる。具体的には、ヒューマンファクターに起因する位置決め精度限界および、身体動作に係る疲労、などである。そこで、精度限界を打ち破り、かつ疲労を抑えるには、「そのまま」ではなく「かえて」ロボットへ伝達することが重要であると考えた。また、調整しうる操作者とロボットに関する入出力パラメータとして、操作者が見るカメラ映像が挙げられる。現状は、固定の画角や解像度が用いられているが、遠隔操作時は視覚情報が正確に獲得できないと手先位置決め精度が低下するということが知られている。そこで、ロボットアーム操作と映像提示の双方に対しスケール・ゲイン調整を行うことで操作性向上が飛躍的に向上するのではないかと考えた。以下で、その具体的な内容を述べる。

2 -1 0 -1) ロボットアーム操作に対するスケール・ゲイン調整

スケール・ゲインをそれぞれ以下のように定義する。

- ・スケール：作業領域の拡大・縮小・回転する機能
- ・ゲイン：作業領域を変更せず、入出力間の疎密（感度）を変更する機能

A) スケール：拡大

筋活動度 M が最大随意筋出力(Maximum Voluntary Contraction: MVC)の20%を超えると、持久時間が急激に低下することが知られている。このことから、筋活動度の手を伸ばした状態での作業が20%VMCより小さくなるように調整する。ロボットおよび操作者の基準点から手先までのベクトルを、それぞれ x_R および x_0 、スケールを S とすると、拡大式は、

$$x_R = S \times x_0 \quad (2-4-12)$$

となる。20%MVC未満となる最小の拡大係数 S は、次式となる。

$$S = \min[S | M \leq 0.2 \times MVC] \quad (2-4-13)$$

B) スケール：回転

基本方針として、筋活動度の高い頭頂より上での作業(20%MVC)を、頭頂より下でできるようにする。回転式は、

$$x_R = R(\theta) \times x_O \quad (2-4-14)$$

となる。筋出力を20%以下にする回転角度は、次式で求まる。

$$\theta = \min[\theta | M \leq 0.2 \times MVC] \quad (2-4-15)$$

C) ゲイン：局所的縮小

1.2mm以下の精度が必要な作業では位置合わせまでの時間が顕著に増加するといわれている。基本方針として、20%MVC以内の作業範囲で、2mmの精度が必要な作業を可能にする。把持到達運動は、リーチング動作と位置決め動作に大別できることから、両者で異なるゲイン(G_{rea} , G_{pos})を適用する。ゲインの切替え位置を x_{cha} とすると、ゲイン調整式は、

$$x_R = x_{cha} + G_{pos} \times \left(x_O - \frac{x_{cha}}{G_{rea}} \right) \quad (2-4-16)$$

となる。ゲイン値は、以下の3つの関連式に基づき決定する。

(1)20%MVC以内の範囲で作業： $x_{obj} = x_{Rmax}$ で x_O が最大となる。このときの筋出力が20%MVC以下となればよいから

$$\frac{x_{Rmax} - x_{cha}}{G_{pos}} + \frac{x_{cha}}{G_{rea}} = x_O < x_{nff} \quad (2-4-17)$$

(2)リーチング動作の精度：リーチング動作時は体性感覚を基にしたフィードフォワード制御が行われる。体性感覚の精度は40mmであるから、 G_{pos} で操作を行う領域 x_{sgr} は、

$$x_{sgr} > G_{rea} \times 40 \text{ mm} \quad (2-4-18)$$

であり、この式を満たす最小の x_{sgr} を選定する。

(3)位置決め動作の精度：作業時間が顕著に増加せずに作業可能な精度は1.2mmであるから、 A_{req} を要求精度とすると、

$$1.2 = A_{req}/G_{pos} \quad (2-4-19)$$

とすることができる。以上より、 $A_{req} = 2 \text{ mm}$ とし、快適に操作が可能な解を選定すると次式で決定される。

$$\begin{aligned} G_{pos} &= 1.67, & G_{rea} &= 3.16 \\ x_{sgr} &= 127\text{mm}, & x_{cha} &= 1023\text{mm} \end{aligned} \quad (2-4-20)$$

D) ゲイン：領域制限

基本方針として、手振れによる誤差を補正するために、規定動作ベクトル上のみをロボットが動くように動作領域を制限する。規定される動作ベクトルが分かっていることが条件であり、例えば、バルブ開閉作業では、動作領域をバルブの円周上のみ、コンクリート削孔では、動作領域をハンマードリルの向いている方向に設定できる。 $G_{Limit} \in \{0,1\}$ を、規定方向は1、それ以外は0とする係数とすると、次式で決まる。

$$x_R = G_{Limit} \times x_O \quad (2-4-21)$$

E) 評価試験

同構造MSシステムを用いて仮想空間上のタスクを行う実験を行った。

(1)筋疲労実験1：スケール・ゲイン変更システムの有効性を検証するために、バルブの上についたマーカまでリーチング・位置決め動作を、3分間でできるだけ多く行わせるタスクを行った。筋電(% MVC)、動作完了回数を計測した結果、スケール・ゲインを調整することにより筋出力を低減できる可能性が示唆された。

(2)筋疲労実験2：回転の有効性を検証するために，上方に配置したバルブについて(1)と同じことを行う．実験の結果，作業領域を回転することにより筋出力を低減でき，効率を向上できる可能性が示唆された．

(3)精度実験：ゲイン・スケール変更システムの有効性を検証するため，手に持ったドリルを穴の開いた壁に向かって動作するタスクを行わせた．その際，ドリルの誤差を常に一定(2cm)以内に収めるように指示した．主観的作業負荷(NASA-TLX)，動作完了時間を計測した結果，作業領域の制限により効率を向上できる可能性が示唆された．



Scale : Enlarge



Scale : Rotate



Gain : Partial shrink



Gain : Constraint of motion

図2-4-63 Scale Gain tuning System

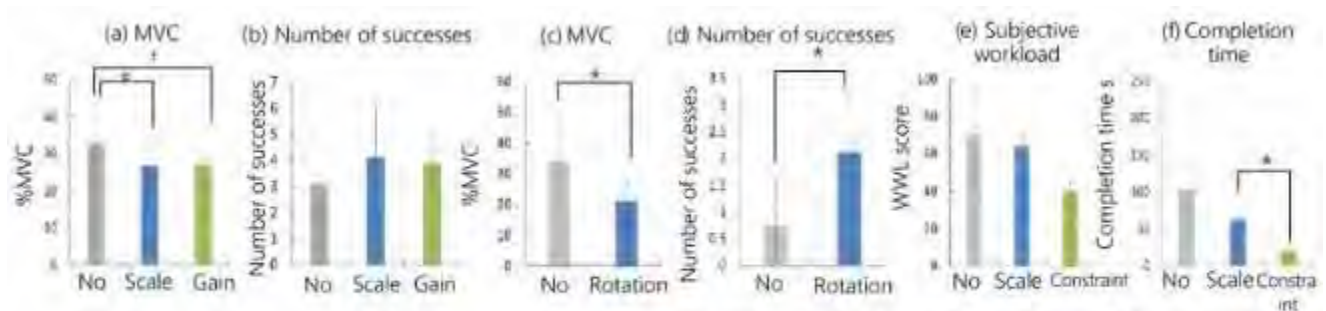


図 2-4-64 Experimental results (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, and †: $p < 0.1$)

2 -1 0 -2) 映像提示に対するスケーリング調整

映像スケーリングを以下のように定義する．

- ・映像スケーリング：提示映像の画角，解像度を作業に応じて変更する機能

A) 遠隔操作時の人の視野特性

スケーリングパラメータを決定するために，MSシステムを用いたロボットの遠隔操作において提示される映像と，人の視野特性との関係について分析した．MSシステムにおける映像システムには，二次元モニターやヘッドマウントディスプレイなどが利用される．モニターと対峙する人の視野領域は，細かな情報を瞬時に受容可能な領域，安定して観察が可能な領域，外乱に影響され視野座標系が変化しやすい領域，補助的にしか利用されない領域などに分類できる．この観点では，提示映像は作業目標物が規定可能な環境においては常にズームした状態を保ち，人が情報を瞬時に受容可能な領域内で最

大となるようなズーム率で固定すればよいと考えることもできる．しかし，未知環境では，映像をズームした状態で固定すると周辺環境の認識が困難になる可能性や，ロボットアーム操作における手先位置の認識に関する自己受容感覚を歪めてしまう可能性が考えられる．したがって，人の視野特性上，提示映像のズーム率は作業状態に応じて常に切り替え可能な状態とすることが有用だと考えられる．

B) スケールの調整

把持到達運動は，リーチング動作と位置決め動作に大別できる．前者では，体性感覚を用いたフィードフォワード制御，後者では，映像によるフィードバック制御が主たる制御系となる．そこで，リーチング時には，スケーリングを行わない．スケーリングを行うデメリットは自己受容感覚にバイアスがかかってしまうことである．そこで，C/D比をリーチング動作と位置決め動作時で一定にすることにより，マスタの動作量と映像上のスレーブの動作量が把握しやすくなると考えられる．体性感覚の精度が40mmであることを考慮して，作業対象とロボットハンドとの距離が127[mm]以内に接近したとき，リーチング動作時のゲイン($G_{rea}=3.16$)と位置決め作業時のゲイン($G_{pos}=1.67$)を設定している．以上から，映像の拡大率 S_v は，

$$S_v = G_{rea}/G_{pos} = 1.89, \quad (2-4-22)$$

となる．

C) スケールの切り替わり方法

調整方法として，調整の前後が非連続的に切り替えるもの，ある程度連続的に切り替わるものが考えられる．Visual Momentumを鑑みると，連続的な変化のほうが好ましいと考えられるが，非連続との差について検証する．非連続的切り替えでは，目標物と手先との間の距離 x に対する拡大率変更曲線 $S_v(x)$ をシグモイド関数とした．

$$S_v = Z_{max} \times 1/(1 + e^{-ax}), \quad (2-4-23)$$

ただし，ゲイン a を0.1と設定した． Z_{max} は，最大ズーム率である(1.25/1.89/10)．本関数は， $x=127$ のとき， S_v が Z_{max} の0.5倍となるよう設定されている．

D) スケールの調整方法

また，調整の随意/不随意における作業パフォーマンスの差を検証するために，自動調整機能だけでなく手動調整機能についても実装した．自動では，既述のように，操作のゲイン変更される位置(127[mm])に手先が到達した際に切り替える．手動では，フットペダルを用いて1-10倍までの任意調整を行えるようにした．

E) 評価試験

ロボットの遠隔操作を模擬したVRシミュレータ環境を用いてバルブへのリーチング動作を行う評価試験を実施した．タスクは，バルブ円周上上部に設置された10[mm]角の立方体マーカをロボットのハンドに設置された10[mm]角の立方体マーカを重ね合わせる動作とした．被験者には3秒以上それぞれのマーカの重心位置の距離が5[mm]以下となる位置で重ね合わせることを要求し，その成功回数を記録した．映像提示は40インチのモニタを使用し，被験者とモニタとの距離は1200[mm]とした．バルブ(+マーカ)を正面と側面から捉えた2つの映像を提示した．タスクは3分間1試行とした．切り替え条件(手動/自動)，切り替えタイプ(連続/非連続)，ズーム率(なし/1.25/1.89/10)をパラメータとして，これらの組み合わせ8つの条件を定義し，比較実験を行った．

(1)スケールの有無比較：スケールを変更したほうがスケールを変更しなかった群に対してタスク成功回数が有意に向上する結果が得られた．この結果から，視覚的に認知困難なサイズの作業対象が存在する場合に関して，映像ズームの有用性が示唆された．

(2)スケールの手動・自動比較：スケールを自動で変更したほうがスケールを手動で変更した群に対してタスク成功回数が向上する傾向がみられた．手動で成功率が低下した要因として，オペレータの主観評価アンケートよりアームを操作しながらだと二重タスクとなり，操作が難しくなるという傾向が得られた．これより，作業中の映像は可能な限り付随的に調整することが有用だと考えられる

(3)映像切り替え非連続・連続比較：スケールを連続的に変更した群の方がスケールを非連続的に変更した群に対してタスク成功回数が向上する傾向がみられた．映像の切り替えが非連続的な場合は10倍までズームされると切り替え時に混乱しやすいというアンケート結果より，一定以上の拡大率の場合，映像を拡大する際は，連続的なスケール変更の方がより適切だと考えられる

(4)最大ズーム率間比較：最大拡大率1.25倍および1.89倍の場合はスケールを連続的に変更したほうが非連続的に変更した群に対してタスク成功回数が向上する傾向がみられた．最大ズーム率10倍の場合はズーム率を連続的に変更した群の方がズーム率を非連続的に変更した群に対してタスク成功回数が有意に向上する結果が得られた．

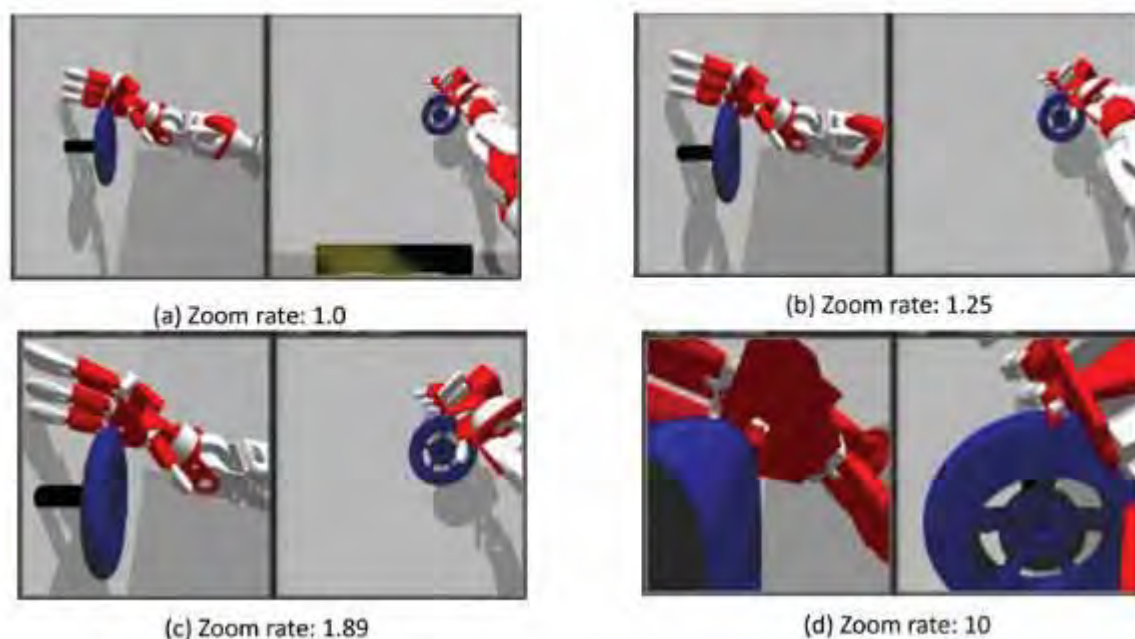


図2-4-65 Base image and scale-up images

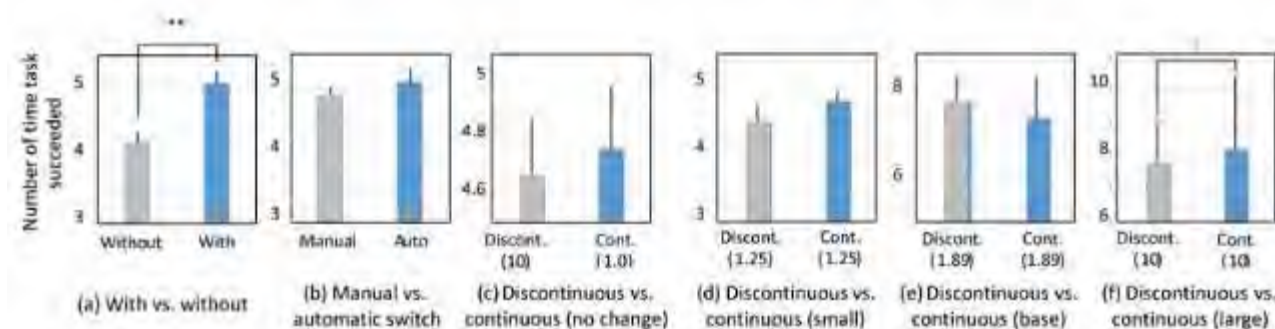


図 2-4-66 Experimental results

3) 成果の活用

3 -1) 脚ロボットのプラットフォーム

・ × × 社より WAREC-1 のアクチュエータユニットを改良し，* * に使用したいとの要請があり，成果の適用を検討した．

・ × × 社より WAREC-1 の肢を* * に使用したいとの要請があり，成果の適用を検討している．

・ また，World Robot Summit のインフラ・災害対応カテゴリーの競技種目のうち，トンネル事故災害対応・復旧チャレンジのシミュレーションで使用するプラットフォームロボットに WAREC-1 が採択された．

3 -2) 高出力ロボットハンド

- ・脚ロボット用ハンドについて，××社より**内での作業に使用したいとの要請があり，成果の適用を検討した．
- ・××社より**用ロボットハンドとして使用したいとの要請があり，成果の適用を検討している．
- ・××社より**へ使用したいと要請があり，成果の適用を検討している．

3 -3) 過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システム，移動ユーザインタフェース

- ・過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システムを 2016 年 11 月以降 WAREC-1 に統合．4 足腹ばい移動でのがれき環境走破，3 足腹ばい移動およびはしご取りつき・昇降，腹ばい・4 足立ち・2 足立ちの移動形態の遷移，複数カメラ併用による段差よじ登り動作，車輪を用いた高速移動における俯瞰映像提示・遠隔操作支援を実現．また他研究機関との連携として，俯瞰映像上への音源追跡結果の提示，タンジブル UI 上への表示統合を実現．
- ・移動 UI についてもタンジブル UI を 2017 年 11 月以降 WAREC-1 に統合．はしご昇降，腹ばい移動，車輪移動を実現他研究機関との連携により，環境モデル表示，音源追跡結果の提示，過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システムとの統合を実現．
- ・ここで提案した移動のためのユーザインタフェースについて，現在××社より**内の点検に使用したいとの要請があり，成果の適用を検討した．

3 -4) 操作ゲイン

- ・MS システムは，「手先の動作や腕の姿勢を意識せずに指令可能」，「多くの自由度を容易に同時に制御可能」，「スレーブ状態を直感的に認識可能」などの利点を有している．一方で，既述のように，人の身体動作そのものを「そのまま」ロボットに伝達するため，「ヒューマンファクターに起因する位置決め精度限界」や「身体動作に係る疲労」などの欠点・課題も挙げられる．本研究で提案する「スケール・ゲイン調整」は，「そのまま」ではなく「かえて」ロボットへ伝達することで，制御精度を飛躍的に向上させ，身体・精神的疲労の抑制をねらうものである．これは，「操作ゲイン切替による操作支援システム」や「建機の基本入出力パラメータ(BIOG)の自動調整システム」の研究において，マスタ入力量に対するスレーブ出力量の関係性を作業内容や操作技能に応じて調整することで，作業性能が大きく向上することを確認したことに，着想を得ている．これによって，復旧及び防災の早期・高品質化だけでなく，危険作業の遠隔操作化による施工の安全化にもつながる．また，有事だけでなく，平時のプラント等の維持管理にも利用できる．このように遠隔操作の高度化を図る研究であるため，導入済みの場所ではより合理化が進み，未導入の分野では導入による安全・効率化が進むといった幅広い貢献が期待できる．

(5) 飛行ロボット

1) サマリー

飛行ロボットでは、災害の厳しい環境での飛行ロバスト性として、以下の機能を実現する．強風 15m/s，豪雨 100mm/h，構造隣接飛行 50cm，水上離発着，急激な負荷変動，プロペラ 1 枚故障時リカバリ，他．その上に音声・映像情報収集，マッピング・ロバスト無線・物体操作機能を搭載して，飛行ロボットの災害対応・復旧・予防用途の拡大を図る．ImPACT 研究期間中から ACSL-PF1 への製品搭載を進め，期間内に実災害への適用をすることを目標として開発を行った．

2) 技術的成果

2 -1) タフロボット型災害対応飛行ロボットに関する研究

2 -1 -1) 動力系故障判断システムの確立と故障容認制御・フォルトトレランス制御

フォルトトレランス制御技術を，実機に実装して実用性の検証を行った．図 2-5-1 のように，プロペラが 2 つ停止した状態でも安全に着陸が可能な機体の開発に成功した．



図2-5-1 プロペラ停止飛行

2 -1 -2) セルフチューニング制御による次世代オートパイロットの開発

質量や慣性モーメントなどが変化しても常に飛行性能を一定に保つために，適応制御理論を応用してセルフチューニング制御を実現する．図 2-5-2 は飛行中のドローンから 2 リットルの水放出した際の様子で，放出前後の高度変化を 5 cm以内に抑えることができた．

2 -1 -3) 複数機の同時飛行によるスワーム飛行，編隊飛行，リーダー・フォロワー飛行

図 2-5-3 のように離着陸を含む飛行全体を自律飛行させ，5 機を同時に直列飛行させる編隊飛行に成功した．直列で複数の機体を自律飛行をさせる際の課題であったのが，ウェイポイントに到達する毎に一時停止する点で，後方を飛行する機体が前方の機体に衝突する可能性があった．しかし，ウェイポイントで一時停止することなくシームレスなウェイポイント通過する機能開発により，安全に直列飛行が実現可能となった．さらに，その飛行の様子を 1 台の PC からモニタリングすることにも成功している．



図2-5-2 飛行中に重量変化する機体の挙動



図2-5-3 5機が直列編隊飛行する様子

2 -1 -4) 従来の飛行ロボットをはるかに凌ぐ、超ロバストなスーパー飛行ロボットの研究開発

次項の防水性と合わせて、風速 20m/s 環境下でのホバリング実施、及び 10m/s 環境下での自律飛行が可能な機体開発に成功。あわせて、長距離飛行を目指し他機体性能として、飛行速度 20m/s (72km/h) での自律飛行にも成功し、災害時に運用可能な機体の機能開発を行った。また、災害時には目視外環境での飛行が想定されるため、機体のテレメトリ情報を把握するための電波を、920MHz 帯による直接通信だけでなく、LTE 通信を用いたインターネット経由での情報取得可能な機能開発を実施し、地上での動作確認が完了したため、有事の際に技術適用が可能となった。

2 -1 -5) 天候型（完全防水・防雪型）で着水・離水可能な機体の開発

災害対応飛行ロボットは雨天時や降雪時も飛行する必要がある。そのため、軽量で長距離飛行が可能な ACSL-PF1 の防水化を実施し、IPX3 の認証を取得した。豪雨を想定した環境での試験のため、大型降雨実験施設にて 300mm/h の環境下で 20 分間の飛行に成功。雨量変化させながら、計 100 分間雨天環境での飛行試験を実施し、雨天環境下でも安定した飛行ができることを確認した。



図2-5-4 PX3認証試験の様子



図2-5-5 300mm/hの環境下での飛行試験の様子

2 -2) 飛行ロボットのための軽量高把持力ロボットハンドの開発

提案するロボットアームは汎用のドローンに取り付けても動力伝達系を工夫することによりアームの動きがドローンの姿勢に悪影響を与えない特長を持っている．この動力伝達系については特許申請中である．実機を製作しその動作検証を行った．図2-5-6のようにハンドに500 gのおもりを把持させ、250 mm/sの速さで前後方向に3往復200 mm動かした場合にどの程度ドローンが姿勢を崩し、それに伴いホバリング位置がずれるかを検証した．ドローンには汎用機であるDJI社製のS900を用いた．同図において赤線はドローンの移動軌跡を示している．同図左は提案機構を用いた場合であり、同図右は用いなかった場合である．また、手先の動きはどちらとも同じである．同図左の方が明らかにその場でホバリングしており安定した飛行が実現できている．つまり、本アームの提案機構が有効に動作していることが分かる．

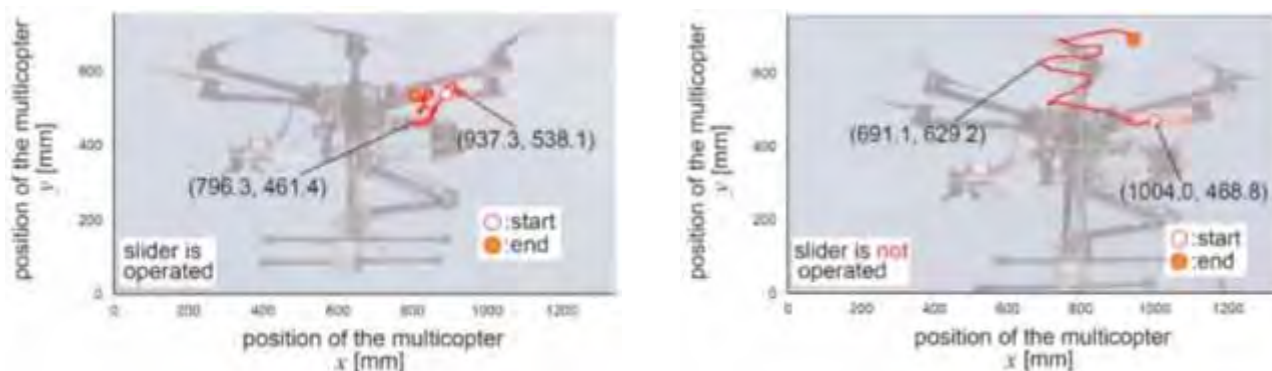


図2-5-6 アームの動きの力学的影響

左：本機構を用いた場合のドローンの軌跡 右：本機構を用いなかった場合のドローンの軌跡

また，図2-5-7に示すように開発したアームおよびハンドを用いて設置・回収作業および着陸動作を実現した．同図左のように，高所にあるロープにパン・チルドステージに取り付けたカメラの設置および回収に成功した．このとき用いたステージおよびカメラ等の全質量は1 kgである．ゆえに，1 kg以下であればさまざまなセンサ，ロボット，物資などの設置・回収作業ができるため，さまざまな応用展開が期待できる．また，このとき特殊な脱着装置は必要なく，取手があれば十分に設置・回収ができることも同時に示すことができた．つまり，緊急時に物資を搬送したい場合，取手さえ付いていれば，着陸することなく物資を搬送できることが分かった．また第4回フィールド評価会では，同図左の動作を，第5回フィールド評価会では緊急物資の搬送のデモンストレーションを行い成功した．また，同図右のようにアームとハンドを脚として用いて鳥が木の枝に留まるように着陸することにも成功した．着陸時には完全にプロペラを停止することができる．また，離陸にも成功している．



図2-5-7 カメラ設置とパイプ上への着陸

左：ロープにパン・チルドステージのついたカメラを設置および回収（設置した装置の質量：1kg）
右：鳥が木の枝に留まるように，パイプを掴み着陸および離陸（着陸時プロペラは停止）

更に，ACSL社製ドローンACSL-PF1にアームとハンドを搭載し，図2-5-8のように，高所への物品輸送と傾斜地への物品輸送試験に成功し，緊急時の物資輸送に有効な技術であることを確認した．



図2-5-8 物資運搬
左：高所へのLED灯を運搬，設置 右：傾斜地への救急医療品運搬，設置

2 -3) 生物の柔軟構造を規範とした超口バスト回転翼

飛行ロボットにおいて掲げる達成目標の一つに「構造物近くでの気流の変化や急激に変化する突風等の外乱に対する口バスト性」がある．現在使用されている翼構造は一般的な CFRP（炭素繊維強化プラスチック）製のスムーズな形状の剛体翼であり，これが外乱に対しての弱点となっている．また，災害現場での情報収集や，近年検討されている配達等への応用では，市街地を飛行するため，回転翼からの騒音を抑制することは，非常に重要である．

本研究では，環境外乱に対する回転翼の脆弱性と，回転翼の騒音性を改善し，口バスト性を有するタフな飛行ロボットを実現するために，微細構造・柔軟回転翼の研究開発を目的とする．前年度までの進捗状況を踏まえ，本年度は低騒音型翼の開発を主として，以下の課題を設定した．

2 -3 -1) 低騒音型翼の作製方法の確立と，形状・構造最適化

ミニサーベイヤ（自律研）のプロペラの後縁部において，適切な形状・配置の構造を付与することにより，空力性能の低減を抑制しつつ，実機に搭載したホバリング時において，ミニサーベイヤの場合は4.2dBの騒音抑制を実現した．また，作製段階において，プロペラバランスの調整を数段階で行うことで，製作誤差を極力取り除いた．ここで得られた知見を応用することにより，PF -1（自律研）用のプロペラの後縁に同様の構造を付与した静音型プロペラを開発した．性能の検討をプラスチック板を付与することで行い，最も優れた性能を得られた形状を用いて，カーボン一体型のプロペラを作製し，これをPF -1 に搭載した場合，ホバリング時には，従来型のプロペラと比較して，8.1dBの騒音レベル低減を実現した．また，周波数解析の結果により，特に，人が不快に感じるとされる高周波数域での著しい騒音抑制を実現した．

ファントム(DJI)用プロペラを用いて，前縁部におけるセレーション構造の配置（向き）のパラメトリックスタディによる最適化により，飛行性能を維持しつつ，騒音抑制を実現した．

2 -3 -2) 低騒音型翼の低騒音化原理・適用範囲の解明

サイズの異なるファントム用(DJI)，ミニサーベイヤ用（自律研）のプロペラにおいて，どちらもプロペラの後縁部における板形状の構造の適切なサイズ・形状・配置を伴った付与により，翼面積の増加・揚力の増加を実現し，ホバリング時の回転数（回転速度）を減少させることで，飛行効率の

減少を抑制しつつ騒音抑制を実現できることを明らかとした。また、もともとなるプロペラサイズ・形状により、付与する構造のサイズ、3次元形状、配置の最適解があることを明らかとした。

2 -3 -3) 柔軟回転翼の理論的検証と実験的評価

ジンバル機構をモータ底部に配置した機構を伴うドローンの実験結果をもとに、柔軟性によるロバスト性の向上を実現する新たなドローンのデザインの検討・導出を行った。また、実際の環境外乱などを想定して、変動流を実現した風洞での実験セットアップを構築し、多方向からの変動流中（正弦波）における柔軟プロペラの応答を確認した。

2 -3 -4) フィールド評価

開発した低騒音型翼は形状の変化、揚力・抗力の増加が伴うため、実機に搭載する際は飛行パラメータ（始動回転数、ホバリング回転数、位置・姿勢制御関数）の同定が必要となる。自律研の協力のもと、低騒音型翼をミニサーベイヤ機体の実装し、ホバリング飛行を実現した。また、現在自律研の協力のもと、新たな統合機体PF-1（自律研）にてシステム同定を行った。

2 -3 -5) 具体的な研究成果

実際の研究成果としては、以下の図2-5-9～図2-5-12の通りである。



図2-5-9 Phantom用プロペラ，ミニサーベイヤ用プロペラでの低騒音型翼。

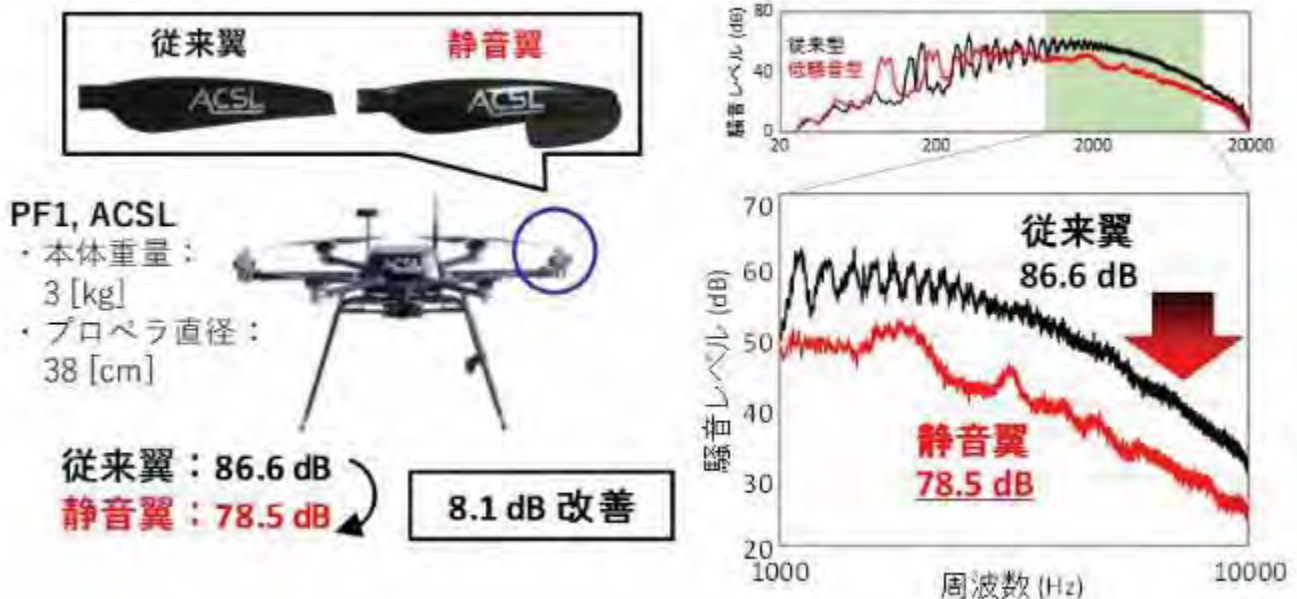


図2-5-10 PF-1用プロペラでの低騒音型翼。

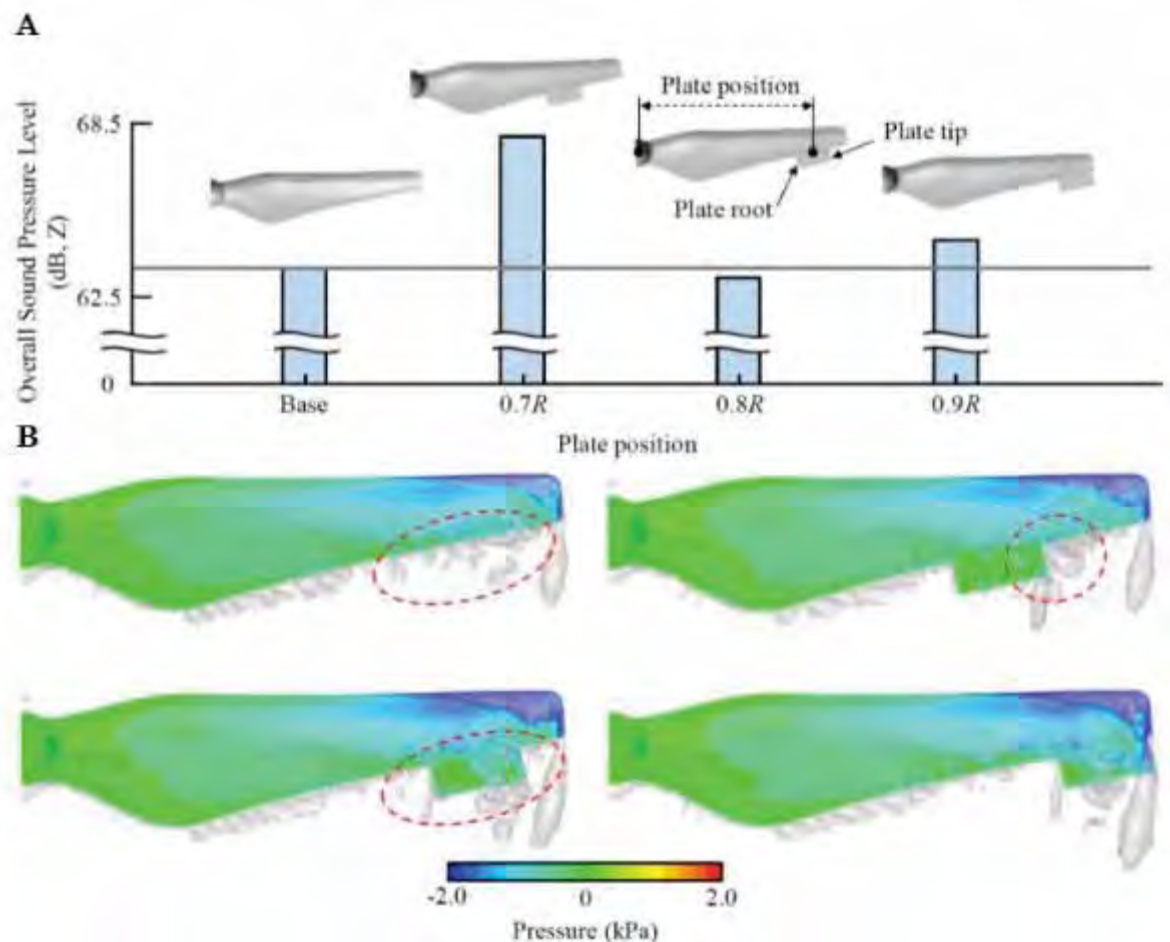


図2-5-11 低騒音型プロペラの最適化，空力騒音メカニズムの解明

ファントム用プロペラでの配置の最適化．（A）各モデルにおける騒音レベル．ファントム翼の場合，0.8Rの取り付け位置で騒音レベルが最も減少していることがわかる．（B）乱流モデルを用いた数値解析可視化結果．騒音レベルが最も高い0.7Rの取り付け位置では，板の翼端から放出される渦とプロペラ後縁から放出される渦の干渉が確認できる．

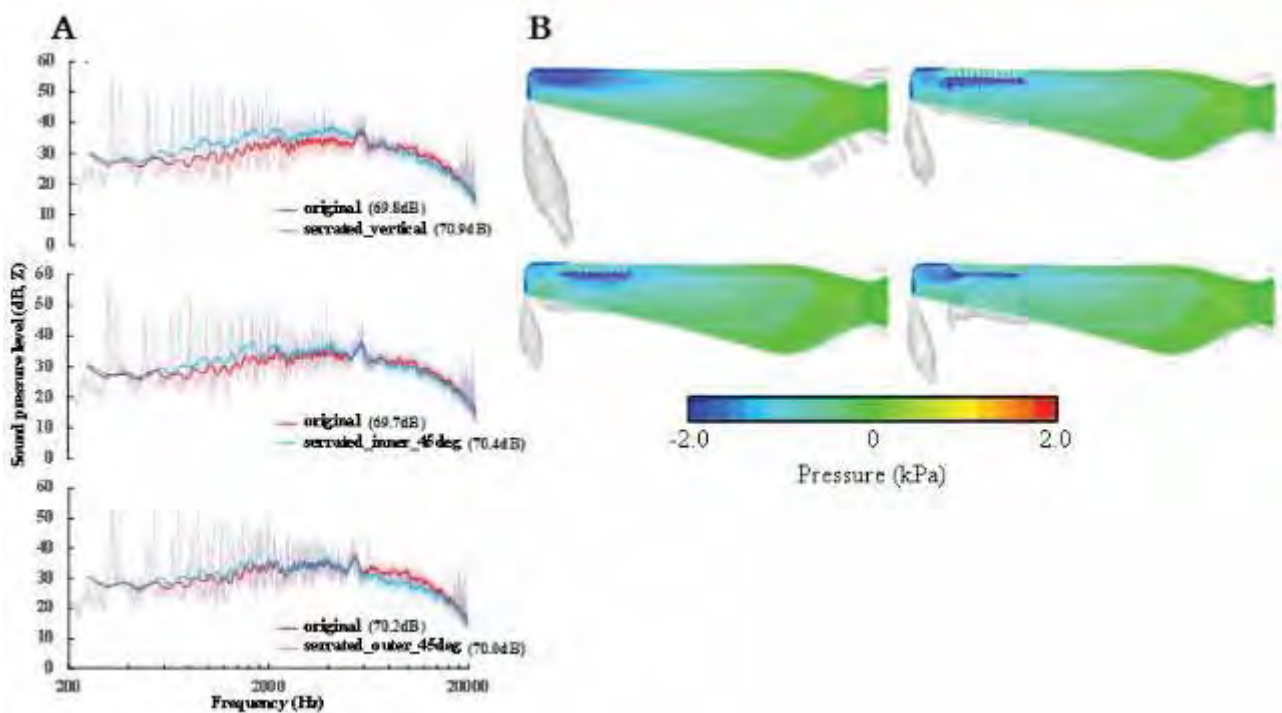


図 2-5-12 ファントム用プロペラでのセレーション構造の向き最適化．（A）各モデルにおける騒音レベル．前縁に対して翼端側（外側）45° 向きに配置したモデルのみ，騒音が抑制されていることがわかる．（B）乱流モデルを用いた数値解析可視化結果．各モデルにおいて，セレーション構造により縦渦が生じ，前縁付近における負圧領域で差異が確認できる．

本研究で開発されたプロペラは，従来のプロペラと比較して，騒音特性が著しく改善されることから，市街地での情報収集を想定した被災時の飛行ロボットに搭載することで，被災者への心理的圧迫を軽減することや夜間の飛行が可能となる．また，特に早稲田大・東工大・熊本大グループで開発が進められている，災害時の音源定位システムを搭載したドローンへと統合することにより，感知レベルの向上が見込まれる．



図2-5-13 静音型ドローンの活用構想

2 -4) ピッチ角制御方式への変更とモータ集約化によるミニサーバイヤーの機動性向上

ほとんどのマルチロータ機で用いられている回転数による飛行コントロールを、コレクティブピッチによる飛行コントロールに置き換えた。このことによって、入力信号に対する推力変化の時間遅れが1/6程度に短縮した。このことは、速い飛行コントロールが可能になり、激しい擾乱時での安定な飛行の可能性を意味している。ヨーイング軸周りの大きなモーメントを発生するために、回転数のコントロール機能も併せ持つことが必須である。さらに、コレクティブピッチによる飛行コントロールをキーテクノロジーとしたマルチロータ機の高性能化を、複数の視点から検討した。コレクティブピッチによる飛行コントロールを採用することによって、以下が可能になる。A) ~ C) については、図2-5-14に示す機体において実現し目標を達成した。

A) 負の推力発生によるコントロールモーメントの増大

対称翼型を持ち捻じれないブレードを採用することで、コレクティブピッチの符号を変えることで、鉛直上下対称に推力が発生可能にした、このことによって、下降飛行が速くなり、また、注目する軸に対し左右のブレードの推力の向きを反対にすることで、大きなコントロールモーメントを発生可能にした。

B) モータ集約化による機体質量、慣性モーメント低減

同一方向に回転するロータは1つのモータで回転させることにした。このことによって、モータ数はロータ数によらず2になり、モータの全質量は低下する。また、これらのモータを重心付近に配置することで3軸周りの慣性モーメントを半減させた。なお、モータ数を1でなく2にするのは、反対方向に回転するロータの回転数に差をつけ、大きなヨーイングモーメントを発生するためである。

C) ロータのトルク変動配分

同一方向に回転するロータは1つのモータで回転する。同一方向に回転するロータのトルク比を工夫することで、姿勢制御モーメント発生時のモータの出力変化がない様にした。このことで、姿勢制御によってモータ出力にマージンを持たせる必要がなくなる。ロータ、モータの回転数を変化させるヨーイング運動制御のみが、モータ出力のマージンを考慮する必要がある理由である。

D) オートローテーションの可能性検討

ロータピッチが可変であるため、モータ故障時にロータのコレクティブピッチを変えることで、風車モード（ロータがモータで駆動されるのではなく、流入する風により駆動される）の性能を上げることができるため、モータ故障時の緊急避難沈下飛行であるオートローテーションの可能性が高まる。垂直オートローテーションについて現在までにシミュレーションを行った。1モータが故障時、ヨーイング運動が起きない様、他のモータ、ロータも停止させると、十分に沈下速度を抑えることができない。図2-5-15に示すオートローテーション試験機を製作したが、風車モード時のモータ負荷をほぼ0にし風車性能を向上させるため、モータにオーバーランニングクラッチ機構を加えたものである。この機体を使用し、近々、垂直オートローテーションの飛行試験を行う。その飛行試験は以下の様に行い、上記方法よりも沈下率を抑えられる可能性を検討する。1モータ、ロータが停止した際、向かい合うモータ、ロータは停止させるが、他のロータはモータ駆動し、推力を発生する。ヨーイング運動が起こるが、その運動は姿勢安定に役立つ。

コレクティブピッチによる飛行コントロールを採用したことによって可能になるものではないが、以下の件についても検討を行った。これらの技術検討の成果は、全てのマルチロータ機に利用できるものである。

E) ダクト

ホバリング時の効率を表すFoM (Figure of Merit) を最大で70%程度向上させるダクト形状を実験的に見つけた。図2-5-15に示した機体にダクト装着した機体の飛行を、図2-5-16に示す。ロータ間の距離が近い場合にはダクト装着によって、横風遭遇時に飛行が不安定化する問題が生じたが、ロータ間の距離を離すことで問題は解決した。また、屋外で、風速3m/s以下、ペイロード1.6kgを積載した状

態でのホバリング時の消費電力を計測したところ、ダクトの搭載により消費電力が17%程度削減されることが確認された。なお、ダクト搭載の有効性はペイロード重量が増大するほど増加する。

F) 壁との干渉に関するCFD(数値流体力学), EFD(実験流体力学)手法による検討
インフラチュック等のミッション時, マルチロータ機は壁と干渉する環境で飛行する。CFD, EFDによって, 壁付近でのマルチロータ機の空力性能を評価した。CFD結果の1例として, 横壁からの距離とロータ発生推力, 機体に働くピッチングモーメントとの関係を図2-5-17~2-5-19に示す。この成果を用いて, 壁付近での飛行コントロールの方法の検討を現在進めている。



図2-5-14
コレクティブ制御方式
マルチローター機



図2-5-15
オートローテーション試験用
クアドロータ機



図2-5-16
ダクテッドロータ採用クアドロータ機

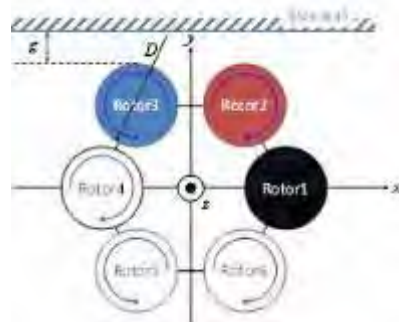


図2-5-17
壁前のマルチロータ機

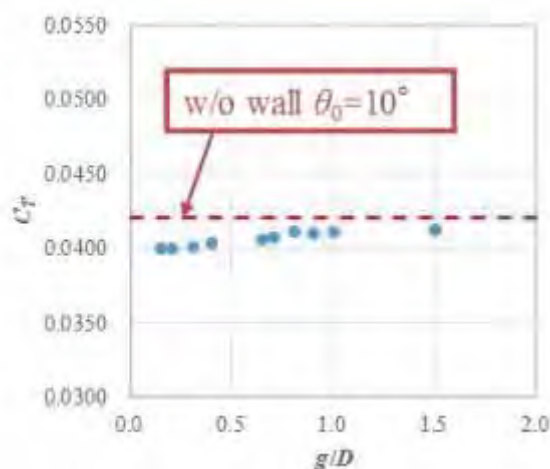


図2-5-18 壁付近でのロータ発生推力係数 $C_T = Z / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2)$ (赤点線は壁のない時の値)

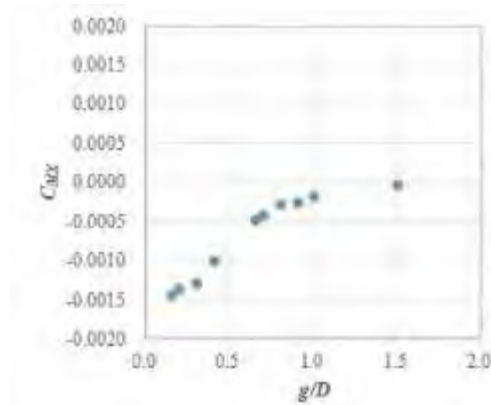


図2-5-19 機体に働くピッチングモーメント係数 $C_{MX} = M_X / (\rho \pi R^3 V_{tip}^2)$ (頭上げが正)

2-5) UAV 搭載マイクロホンアレイを用いた音源探索・同定，複数マルチロータを用いた音源探査技術

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた音源探索技術を実現するために以下の課題を設定した。

1. UAV に搭載したマイクロホンアレイを用いた音
2. 源の時間・位置の検出技術 (音源探索技術) 。
3. 組込み処理化を通じた音源探索技術と他グループの技術との統合および統合デモ構築 。
4. 検出した音源に対する，音源の聞き分け技術 (音源同定技術) 。
5. オペレータにわかりやすいユーザインタフェース技術 (UI 技術)

音源探索技術の性能については，MUSIC法の組込み処理化を行った。実時間で処理が可能であることを示し，組込み処理化によって，基地局へのデータ伝送量を1/100以下に抑えることができた。構築したシステムをフィールド評価会でのデモに適用した。

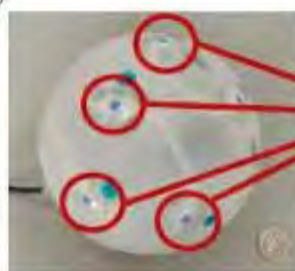
統合デモについては，極限音響チームの単独デモとして，上述の組込み処理版の音源探査技術，熊本大学が中心で開発した3D音源位置推定技術を搭載したシステムのデモを行った (図2-5-23，2-5-24)。また，搭載したマイクロホンアレイは，16チャンネルにマイクの本数を増やすことによって音源探査のカバーエリアを大きくしてUAVが多少傾いてもロバストに音源を検出できるようにした (図2-5-20)。さらに，雨天時への対応のため，防水型のマイクロホンアレイを構築した (図2-5-22)。実際に第4回フィールド評価会は雨天であったが，問題なく瓦礫下に閉じ込められた要救助者に見立てた土管の中から漏れてくる声に対して音源探査を行うことができた。

音源同定は，これまで開発を行ってきたCNNベースの音源同定システムをオンライン化してデモを実施した (図2-5-23)。これにより，タフワイヤレス (NICT) が開発したの無線システムと統合を行い第7回の評価会にてデモを実施した (図2-5-24，2-5-25)。

UIに関しては，水平角，方位角を同時に表示するUIから，3D地図上に音源位置を表示するUIを熊本大学が中心となって開発した (図2-5-21)。なお，ポイントクラウドの地図データは早稲田大学の鈴木らのチームから提供を受けた。



マイクロホンアレイ搭載ドローン
(後方の2つはカウンターウェイト)



マイクロホン
16個を搭載

マイクロホンアレイ:
複数のマイクロホンで構成

図 2-5-20 フィールド評価会で用いたドローン

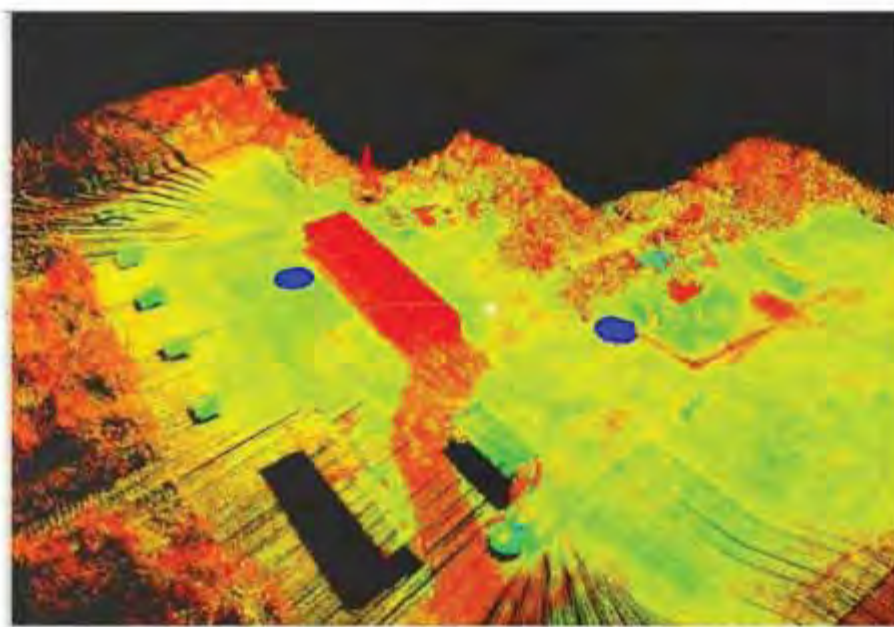


図 2-5-21 地図上に 3D 音源位置 (青丸) 実時間表示



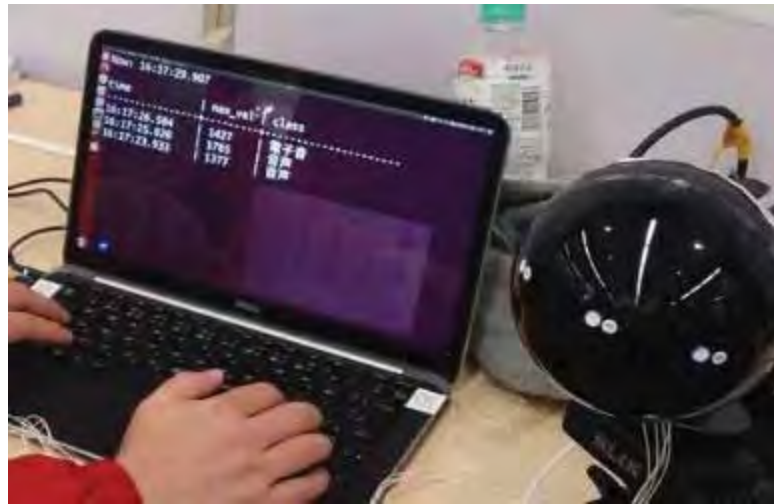


図2-5-23 第3回フィールド評価会での音源同定デモの様子
PC上にオンラインで音源名が識別・表示される。

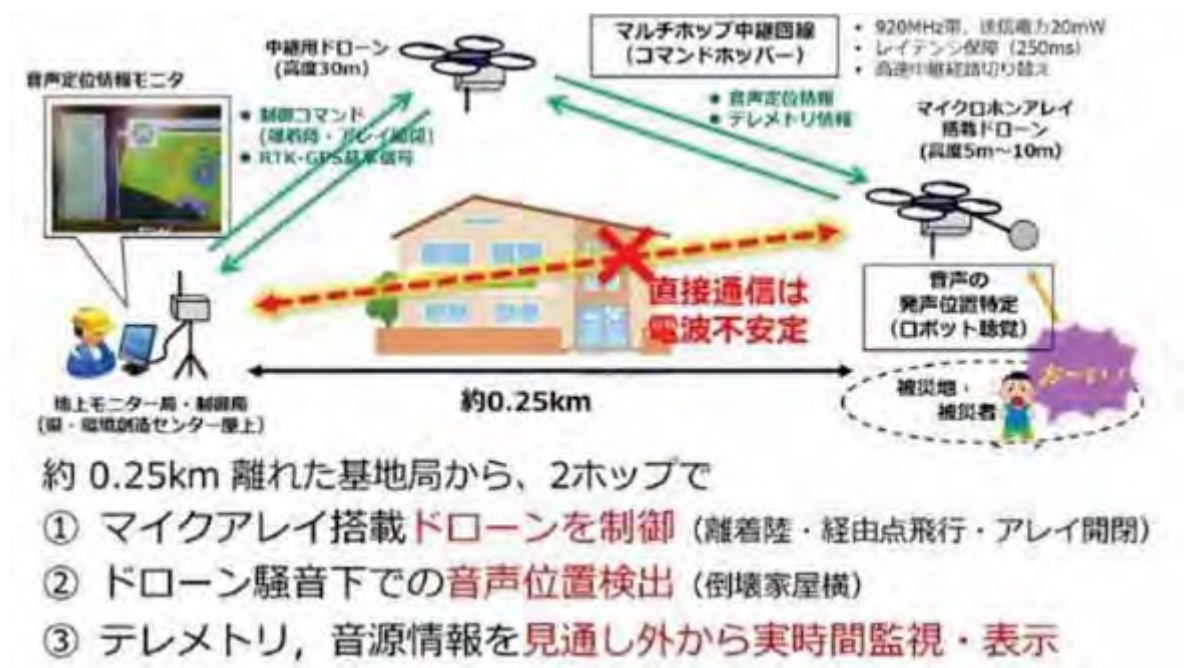


図2-5-24 第7回フィールド評価会での音源同定デモの概要



図2-5-25 第7回フィールド評価会で使用した機体外観

また、本研究では以下の取組みも行っている。

- ・複数のマルチロータからの音情報を統合するシステム開発

平成28年度のシステムで12chのマイクアレイと、機体本体に内蔵した音響信号収録装置と信号処理用PCを組み合わせ、音源方向を検出を実現していたが、マルチチャネルの音響情報を地上局

で処理する際に広帯域の情報伝送が必要であった。特に、複数のマルチロータが同時に音源定位する際に十分な通信路を確保する上で障害となる。そこで、音響処理装置を包含した一体型の16chアレイを開発し、機上で音源方向推定処理までを実現することで、地上との通信に必要な帯域を削減した。また、実際の複数機への運用に向け、28年度とは異なる機体（機体は東京工業大学所有）にも、開発した装置を搭載し、地上音源の定位が可能であることを確認した。

- ・音源の位置推定技術の確立

平成28年度では音の到来方向を検知を実現した。本年度は、別のマルチロータヘリコプタによって計測した点群マップ情報を用い、音源が地上に存在するという仮定の下で、音源方向情報に機体の位置・姿勢情報と統合することで、音源の三次元位置を直接推定する手法を開発した。

また、空中からの収録では、定位対象となる音源が複数検出されることが多いことが分かったため、これらの音源を適切に識別する手法を開発した。

マルチロータヘリコプタに搭載可能な音響モジュールとして、完成度の高いシステムが構築でき、11月の評価会では非公開デモながら、機能することを実証できた。特に、音源の位置を直接に特定できること、デモでは瓦礫中（土管）に埋もれている人の発する声を定位出来た点、成果として強調したい。さらに、複数の音源からの信号を分離し、これらを識別することで、個別に定位する手法、ならびに環境中の音源同士が近く、分離の難しい場合に繰り返しベイズ推定によって音源位置を推定する手法も提案した。これらの技術は、学術論文¹、国際会議¹（IROS SRSS Best paper finalist）、口頭発表⁶として発表している（一部発表予定）。東京工業大学・早稲田大学と共同でプレスリリースを実施（平成29年12月7日）。朝日新聞、テレビ朝日などで取り上げられた。

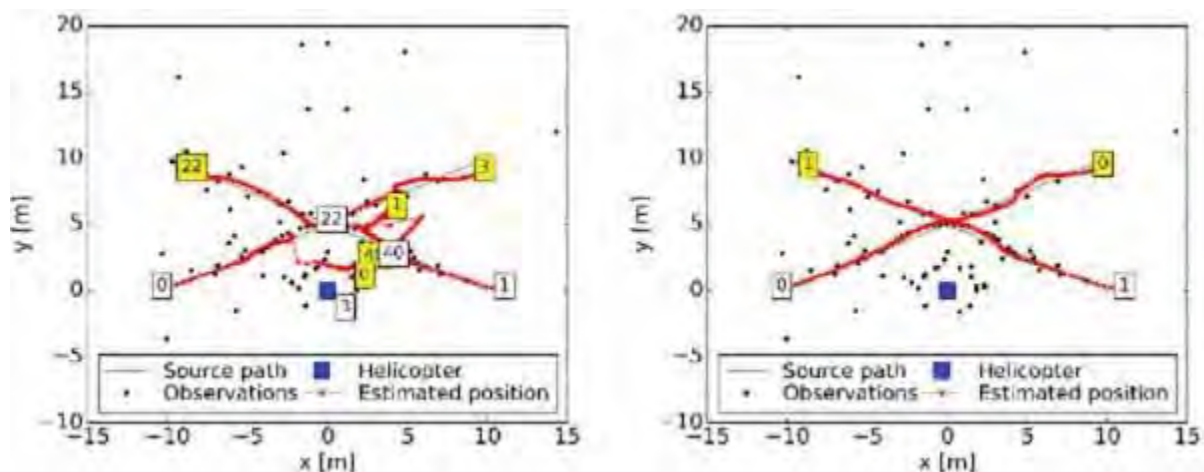


図2-5-26 音源識別を併合したマルチロータからの複数移動音源定位の例
（左：従来法，右：提案法）

さらに、UAV用マイクロフォンアレイによる收音と音源探索については、実フィールド評価会で人の叫び声や土管の中からの叫び声に対する音源位置推定が実時間でできることが実証できた。その成果はSensorsに投稿し、採録、掲載された。また、JRM等にも論文を投稿した。

2 -6) タフ・ロボティクスのためのタフ・ワイヤレス技術の研究開発

ロボット・ドローンの見通し外制御技術については、920MHz帯を活用し遅延時間保証型マルチホップ通信機能、空間冗長型動的ルーティング制御機能、および総務省が新たに制度化した169MHz帯と組み合わせた周波数冗長機能を備えたマルチホップC2無線通信システム（コマンドホッパーと命名）の開発実装を完了した。ドローン等飛しょう体間位置情報共有システム（ドローンマッパーと命名）については、マルチホップ通信機能を備え、見通し外にある飛しょう体同士の位置情報共有機能を実装し、さらに、地上・ドローン・飛行する有人ヘリコプター間で位置情報が共有できることを実証した。

コマンドホッパーを搭載したドローンを飛行させるフィールド評価実験により、障害物のため操縦者から見通し外にあるドローンを地上設置中継局あるいはドローン搭載中継局を経由して1ホップから3ホップまでのマルチホップ経由にて飛行制御および監視することに成功し、1ホップ当たり2 km～3 kmの距離でC2リンクを結ぶことが可能であることを確認した(図2-5-27)。このコマンドホッパーは、多様なメーカのドローンに実装できるよう、フライトコンピュータの通信方式に依存しない方法で設計し、実証実験では自律制御システム研究所製、エンルート製、イームズロボティクス製の各ドローンに搭載してマルチホップ中継制御による見通し外飛行ができることを確認した。さらに169MHz帯バックアップ無線を用いて、飛行中に920MHz帯と切り替えながらドローンを飛行制御できることを実験により確認した(図2-5-28)。さらに、汎用センサデータ伝送機能を用いて、飛行ロボット分科会に属する極限音響チーム(東工大、神奈川大、熊本大、早稲田大の合同チーム)との合同デモンストレーションを行った。これは、ドローンに取り付けられた特殊な小型球形マイクロホンアレイによって要救助者が救助を求める声の発生源の座標を特定する機能を持ったドローン(以下、音響ドローンという)にコマンドホッパー装置を搭載し、音響ドローンの見通し外遠隔制御およびテレメトリ取得と、小型球形マイクロホンアレイで得られた要救助者の発生源座標情報を同時にコマンドホッパーのマルチホップ回線で双方向伝送させることに成功した(図2-5-29)。

また、ドローンマッパーについてもプロトタイプを搭載したドローンによるフィールドでの評価実験を行い、完全見通し条件が得られれば半径最大10 km程度の範囲で複数のドローンの位置をタブレット端末のディスプレイ上にリアルタイムで表示することに成功した(図2-5-30)。さらに、ドローンに搭載されたドローンマッパーは、ドローン間の直接機体間通信により周囲を飛行する他の複数ドローンの位置をリアルタイム把握できることから、これを利用して飛行制御を行う装置を開発し、これに簡単なニアミス回避アルゴリズムを実装した自動ニアミス回避システムを開発した。このシステムを2機、あるいは3機のドローンに搭載した飛行実証実験を実施し、地上のオペレータを介さずに自動でニアミス回避を行うことに成功した。(図2-5-30b, 図2-5-30c)



図2-5-27 コマンドホッパー装置による見通し外ドローン制御実験の構成

169MHz帯⇄920MHz切り替え実験

想定シナリオ

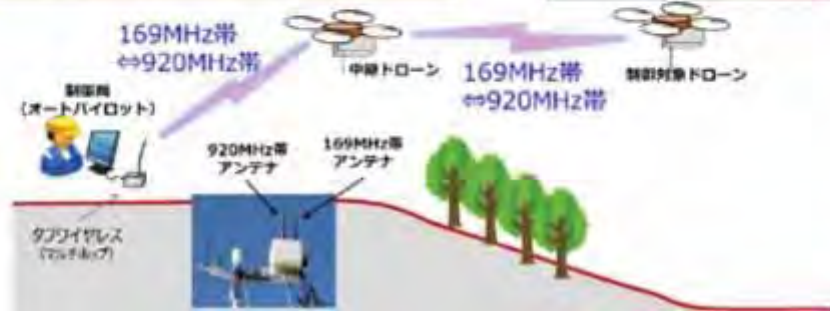
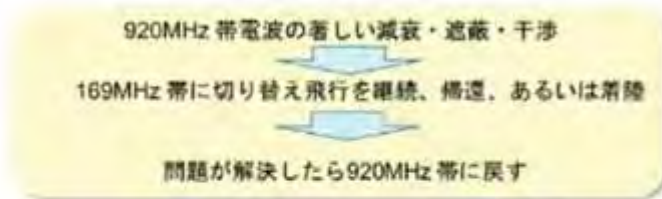


図 2-5-28 コマンドホッパー装置による周波数切替実験の構成

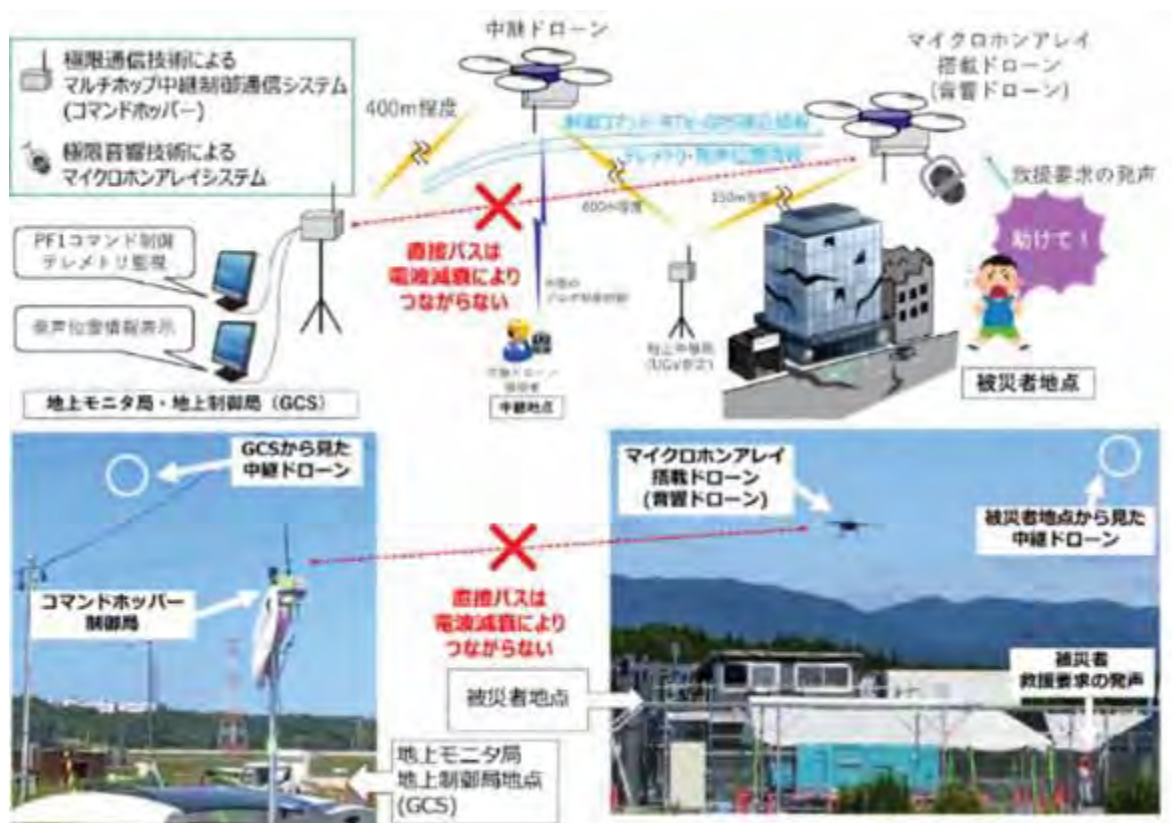


図 2-5-29 音響ドローンの見通し外遠隔制御および発声源座標情報の同時伝送実験の構成



図 2-5-30 ドローン等飛しょう体間の位置情報共有システム（ドローンマッパー）

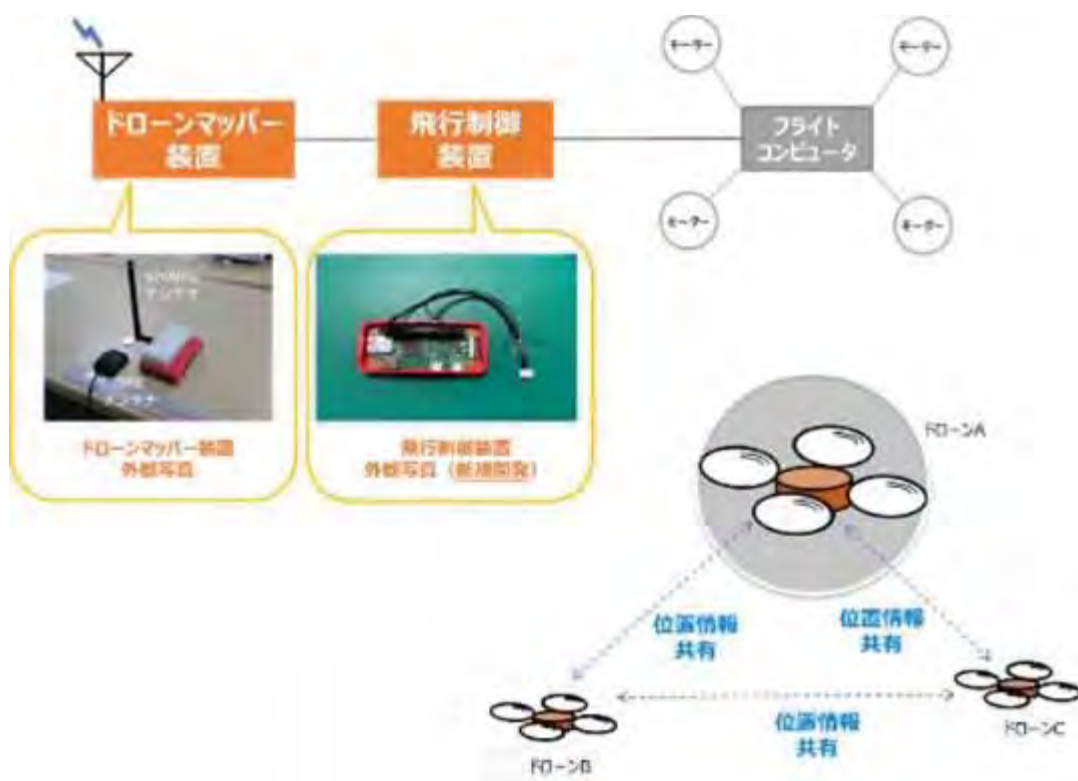


図 2-5-30b ドローンマッパーによる自動ニアミス回避システムの構成



1 対 1 のニアミス回避飛行の軌跡



飛行制御試験時の様子（3機のドローンによるニアミス回避）

図 2-5-30c 自動ニアミス回避の実証実験

2 -7) マルチ GNSS アンテナによるロバストかつ高精度な位置姿勢推定と超高精度レーザ計測の実現

現状多くのドローンは、建物や構造物の近くで機体の位置姿勢推定精度が低下し、災害環境の精密な三次元計測が困難という課題があった。本研究では、上空から情報を取得するためのドローンを対象とした、ロバストかつ高精度な衛星測位技術とそれを利用した高精度三次元計測手法を開発した。

複数のGNSSアンテナを用いることで、GNSSアンテナの幾何的な拘束を用いた「高精度な位置・姿勢推定手法」と、アンテナの冗長性を用いた「ロバストな測位手法」を開発した。特に複数のGNSSアンテナを用いた、GNSSマルチパス推定手法を開発することで、建物に囲まれたタフな環境において、GNSSの測位精度を向上させる手法を開発した。

さらに、この推定した高精度位置姿勢情報と、レーザスキャナにより取得した距離情報を用いて、環境の三次元地図の作成手法を構築した。精密に推定したUAVの位置姿勢情報を用いて、レーザスキャナにより計測した距離データを座標変換することで、三次元地図を作成する手法を構築した。

プロトタイプとして図2-5-31に示すように6個のGNSSアンテナ、レーザスキャナを搭載したセンサシステムを開発し、UAVに搭載した。UAVとセンサシステムを物理的に切り離すことで、プロペラの振動によるGNSS信号受信強度の低下の問題を防いだ。開発した手法を用いて作成した環境の三次元地図を図2-5-32に示す。図中の赤い点ほど標高が高いことを示している。地上にマーカを配置し、作成した三次元地図の精度検証を実施したところ、およそ5cmの精度で絶対座標（緯度・経度・標高）が計測できることを確認した。



図2-5-31 複数GNSSアンテナ搭載の三次元計測システム

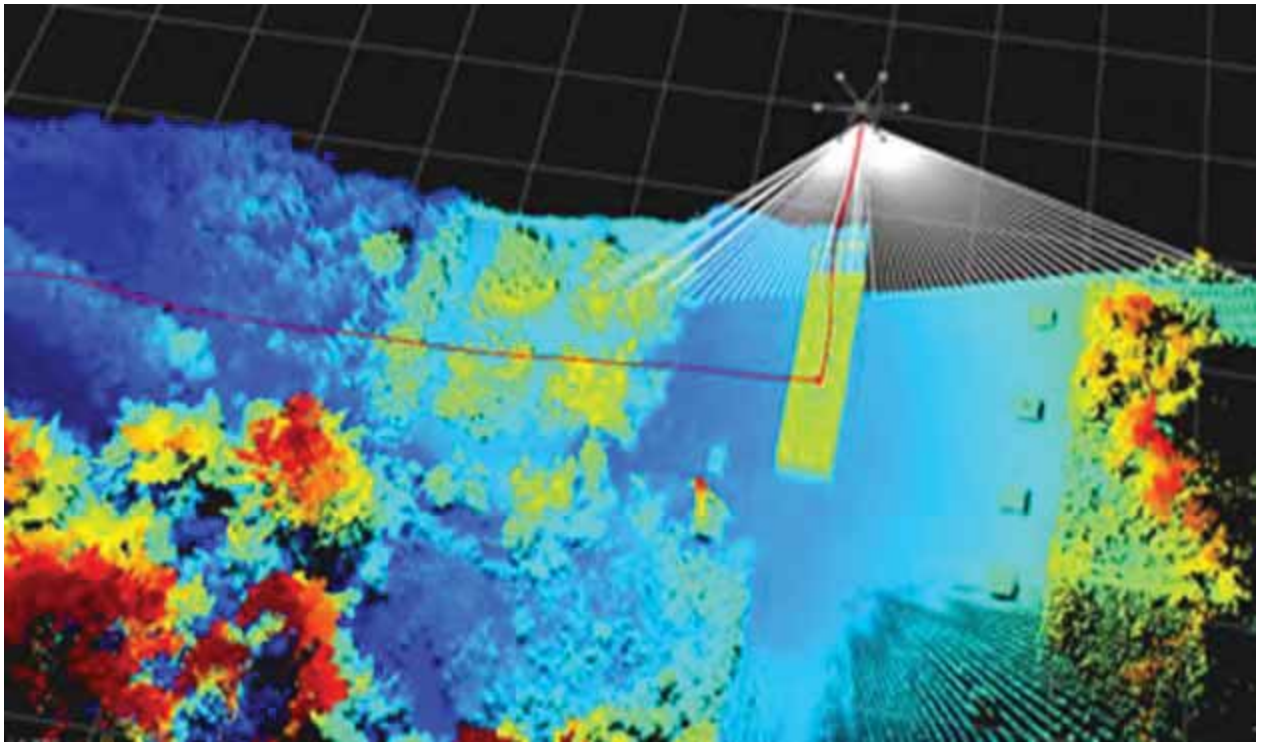


図 2-5-32 UAV を用いて作成した三次元地図

2 -8) 地勢の多重解像度データベースを用いた飛行プラットフォームによる被災状況の効率的な把握と情報提示

災害時の情報収集にはマルチコプタが用いられる。マルチコプタは、カメラや位置姿勢情報を得るためのセンサ等を取り付けることで、情報の取得を行うことができる。マルチコプタで得た情報と災害発生前に取得した地勢データを比較することで、被災状況を把握できる。地勢データの取得には地上設置型レーザスキャナや車載型レーザスキャナが用いられる。これらのレーザスキャナを用いて高解像度の地勢データを都市全体にわたって取得したとき、膨大な数の点群となる。大規模な点群を高解像度かつ広範囲に扱う場合、メモリを大きく消費してしまうほか処理時間が長くなるといった問題が発生するため、マルチコプタを用いたマッチングを迅速かつ効率的に行うことが困難になる。本研究グループでは、この問題を解決するため、大規模点群から多数の解像度のデータベース(以下、多重解像度データベースとする)を構築し、飛行ロボットの位置情報からデータベース内の任意の視点を再現することで被災状況を迅速かつ効率的に把握するシステムを開発した。データベースはその性質上、新しい建物ができた場合や建物が建て替わった場合に更新が必要となる。小林らは、新規点群を既存のデータベースに局所的に追加することで、データベースの更新を行った。小林らの提案する手法を用いてデータベースの更新を行う場合、既存点群に対して新規点群を追加するだけなので、既存の点群と新規点群が重複する箇所が発生する。この状態では現実の建物形状とは異なったものがデータベース上に表示されるため、データベースとしては不適格なものとなる。そこで、本研究では多重解像度データベースにおける新たなデータベースの更新方法を考案した。

A) 大規模点群からのDeep Learningによる構造物の検出電信柱の損壊状況の把握

近年、MMS(Mobile Mapping System)やLiDAR(Light Detection And Ranging)といった広域3次元計測技術が発展してきた。これにより、MMS計測車両などを用いて、都市全体を点群として網羅したデータの取得が可能となった。都市全体を点群として網羅したデータは、インフラのメンテナンスや自動車の安全性向上への利用が期待されている。

しかし、取得された点群データは膨大な量の構造物の点群を含んでいる。膨大な点群データを活用するためには、これらの構造物を抽出し、各構造物に正しく分類することが必要となる。この分類を手動で行う場合、膨大な時間がかかってしまい、膨大な点群データを活用することが困難となってしまう。

う．この分類をコンピュータが自動的に行うことで，より短い時間で有意な点群の活用ができると考えられる．そこで，クラス分類問題などが得意である機械学習を用いて，構造物を抽出し，各構造物に正しく分類する．本研究では人が生活を行う上でのライフラインである構造物に焦点を当て，大規模な点群データからDeep Learningにより電柱を検出し，ラベル付けを行うことを目的とする．

B) 地勢データの多重解像度データベースにおける効率の良い局所的な点群の置き換え

四分木構造でない点群において，点群の削除と追加を用いた置換処理手法を提案し，それをもとに多重解像度データベースにおける点群の置換処理手法を提案した（図2-5-33）．また，新規追加点群として静岡大学浜松キャンパス内の共通講義棟の3次元点群を取得し，既存の静岡大学周辺多重解像度データベースに対して置換処理を行った．局所的に点群を置換するため，多重解像度データベース全体を作り直す場合と比べて短時間での更新が可能になった．



図2-5-33 点群の置換

C) 大規模点群からのDeep Learningによる構造物の検出電柱の損壊状況の把握

本研究では，3次元点群データをボクセル表現を用いて， 32×32 のボクセルデータに変換し，VoxNetを用いることで学習を行うことができた．学習によって得られたパラメータを用いて，検出したい領域からの目的の構造物の領域の検出を行うことができた．しかし，目的の構造物以外の領域が誤って検出されている．原因として，学習を行うための学習データと教師データのトレーニングセットのデータ数と種類が少ないことが考えられる．

2-9) 劇的な周囲環境変化に対してタフなスーパーバイザ型ナビゲーション・制御システムの開発

災害現場における強外乱環境下やGPSなどのナビゲーションセンサが使用できない空間での飛行ロボットの安定した自律飛行を目指し，環境変化に対してタフなスーパーバイザ型ナビゲーション・制御システムを開発した．システムの全体像を図2-5-34に示す．

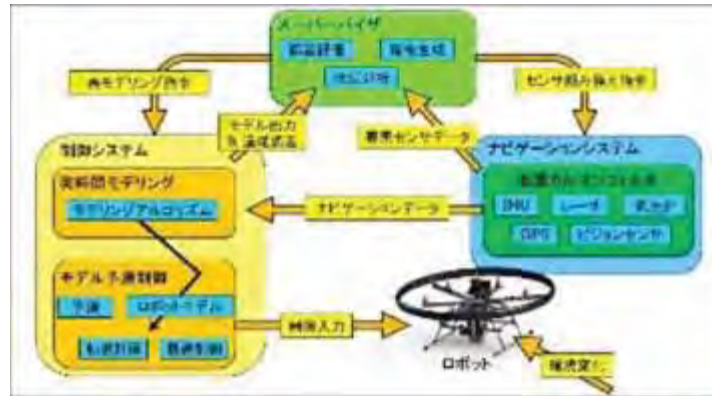


図 2-5-34 スーパーバイザ型ナビゲーション・制御システム

このシステムは、「センサ構成組み替え可能なナビゲーションシステム」、「モデル予測制御を基礎とした制御システム」、そして「スーパーバイザ」から構成されている。それぞれのモジュールに関する開発成果を以下に示す。

2 -9 -1) センサ構成組み替え可能なナビゲーションシステム

開発したナビゲーションシステムを図2-5-35に示す。本ナビゲーションシステムでは、加速度と角速度、GPSから得られる機体絶対位置と速度、LIDARベースSLAMによって推定された相対位置情報を拡張カルマンフィルタによって融合し、GPS・非GPSのそれぞれの環境およびその境界において精度の高い絶対位置・速度を推定することが可能である。

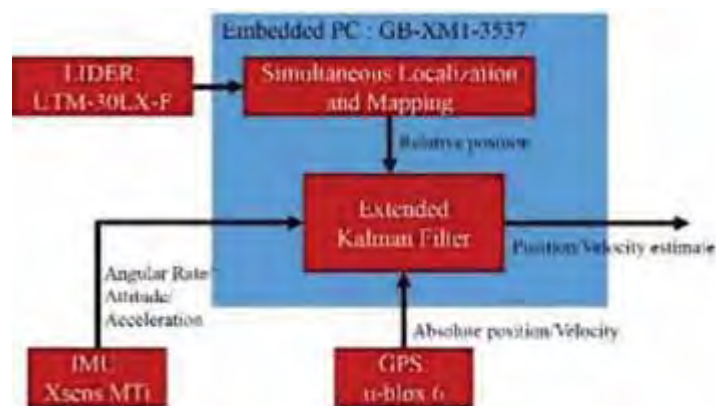
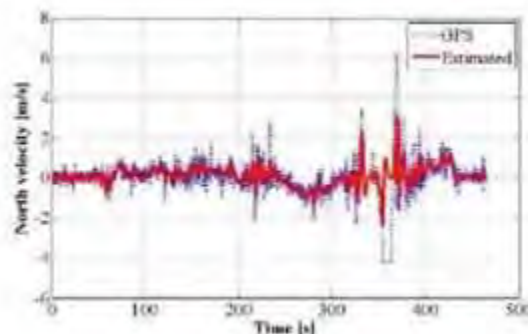
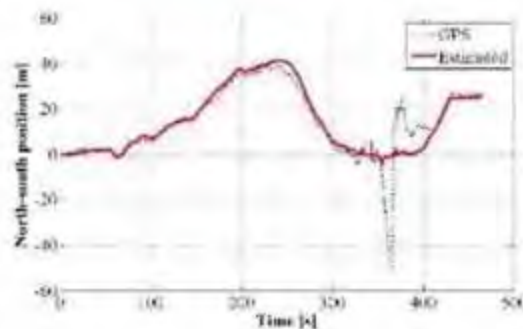


図2-5-35 センサ構成組み替え可能なナビゲーションシステム

構築したシステムを飛行ロボット上の組み込みコンピュータに実装し、GPS 空間と非 GPS 空間を行き来する飛行試験によって有効性を検証した。実験結果を図 2-5-36 に示す。



(a) 速度推定結果



(b) 位置推定結果

図 2-5-36 ナビゲーションシステムの推定結果

図中の破線が GPS の生データを，実線がナビゲーションシステムの推定データを表している．各図ともに 300 [s] 以前が屋外での飛行，300 [s] 以降が屋内に進入した後の飛行データである．まず，(a) より GPS の速度データに対して推定された速度データでは大幅にノイズが低減されていることがわかる．これは，ナビゲーションシステムにおいては GPS データだけではなく，よりノイズの少ない LIDAR ベース SLAM の測位データを複合しているためである．また，(b) においてはロボットが屋内に進入した後に GPS データが 40 [m] 程度の大きな誤差を生じているが，ナビゲーションシステムの推定データは安定していることがわかる．これは，屋外から屋内に進入した際に GPS データを主体とした推定から LIDAR ベース SLAM を主体とした推定に滑らかに移行した結果であるといえる．また，本ナビゲーションシステムを用いて第 2 回評価会の際に行った GPS・非 GPS 環境を行き来する自律飛行の様子を図 2-5-37 に示す．このフライトではそれぞれの環境およびその境界付近における安定した飛行を実現した．以上により開発したナビゲーションシステムの有効性が示された．



(a) GPS 環境



(b) 境界付近



(c) 非 GPS 環境

図 2-5-37 第 2 回評価会デモンストレーション

2-9-2) モデル予測制御を基礎とした制御システム

モデル予測制御を用いた姿勢制御系および位置制御系の構築を行った．まず，姿勢制御系に関して設計したモデル予測制御系を組み込みコンピュータに実装し，飛行ロボットの姿勢制御実験を実施した．実験結果を図 2-5-38 に示す．図中の破線が姿勢目標値，実線がセンサから取得した機体姿勢を表している．図より，機体姿勢が目標値に精密に追従しており，設計した制御系の有効性が示された．

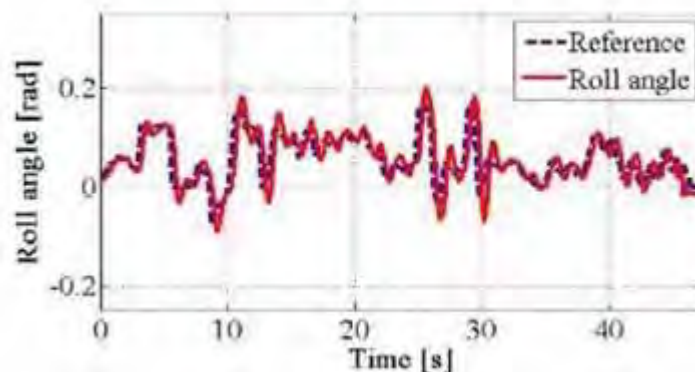


図 2-5-38 モデル予測制御による姿勢制御実験

つづいて、モデル予測制御を用いた位置制御系を機体に実装し、強風外乱下を模擬した飛行制御実験を実施した。この実験では、強風外乱にさらされた場合に発生する積分誤差の累積による飽和現象に対して設計したモデル予測制御系が有効であるかを検証した。はじめに、機体を定位置でホバリングさせ、強風外乱を模擬するためにロープを用いて機体を引っ張る。その後、機体を解放した際の挙動を観察した。従来制御による実験の様子を図2-5-39(a)に、モデル予測制御系による実験の様子を(b)にそれぞれ示す。図中のStartが初期位置および目標位置、Holdがロープを引っ張った際の拘束位置、Endがロープを解放した際の機体の終端位置である。図より、従来制御においては、拘束時に積分誤差が累積したことにより解放後に目標位置を大きく行き過ぎているが、モデル予測制御では行き過ぎが緩和していることがわかる。これはモデル予測制御が機体の未来の状態を予測しながら制御を行うことにより、行き過ぎの挙動を軽減した結果であり、構築した制御系の有効性を示す結果となっている。



(a) 従来制御

(b) モデル予測制御

図 2-5-39 モデル予測制御による位置制御実験

2 -9 -3) スーパーバイザにおける周囲環境認識システム

スーパーバイザの機能の一つである周囲環境認識システムを構築した。システムに機体搭載のLIDARおよびGPSの観測データを入力することによって機体周囲環境が「屋内広大」、「屋内狭小」、「屋外広大」、及び「屋外狭小」のどれに分類されるかを判別する。5層の順伝播型ニューラルネットワークを用いて、図2-5-40に示す各周囲環境を認識するシステムを構築した。LIDARおよびGPSのデータセットを作成し、110個の訓練データによって学習を行い、22個のテストデータに対して検証実験を実施した。



図 2-5-40 周囲環境の定義

図2-5-41に実験結果を示す。図より、訓練データに対して100%の認識率を示したことに加え、テストデータに対しても90%以上の認識率を達成することができたことがわかる。

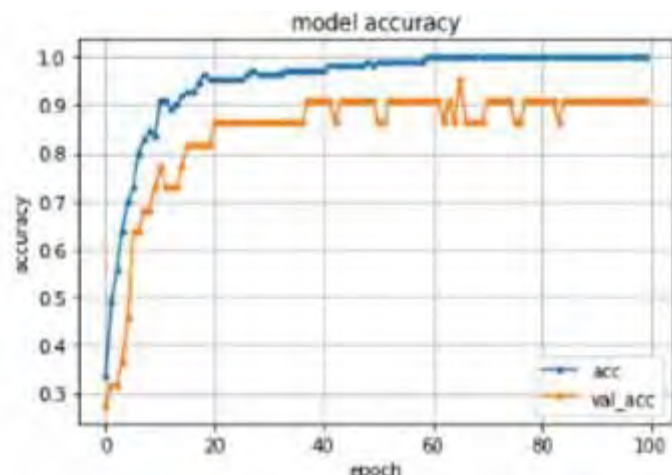


図 2-5-41 周囲環境認識実験結果

2-10) コヒーレント・ドップラー・ライダーによるドローンの落下を防ぐ橋梁近傍の微小風観測システム

ドップラー・ライダーは $1.54\mu\text{m}$ 帯のレーザーを用いて、空気中の微細浮遊物質を散乱体とすることで大気風の動きを捉える観測機器であるが望遠鏡の大きさの制限や工作精度、データ解析アルゴリズムの完成度の問題により、空間分解能は50m程度が限界で、乱流を検出することは困難であった。また重量があり容易に持ち運びすることが難しい。平成29年度の研究開発ではこれまで制作してきたドップラー・ライダーのコンポーネントの小型化を図り、地上設置可搬型ドップラー・ライダーの開発を行い、平成30年度には社会実装を見据えて、上市可能なドローン落下を防止する可搬型ドップラー・ライダーを開発しその実用性と事業化に向けた道筋を定めることが目標である。

平成29年度は平成27年度及び平成28年度に製作してきたドップラー・ライダーの実績を基に、各コンポーネントの小型化と検証を平成29年4月から開始し、11月の全体試験までに開発を行った。この開発で得られる結果は随時次年度に本格開発を計画している上市可能なドップラー・ライダーの製作へ向けてフィードバックを行った。これまで設計・製作を行ってきたドップラー・ライダーのコンセプトを利用し、信号処理システムは既存のソフトウェアを用い、地上設置可搬型では三脚に載せて観測を行なった。フィールド実験で得られた知見をもとに実用化へ向けた調整及びコンポーネントの見直しを行い、平成29年度は図2-5-42に示すような1m²以内のラックに光プロセッサ部、データ処理部を収納し、望遠鏡は長さが約70cm、口径が約10cmで三脚に固定して持ち運べる大きさのものを用意することで、屋外フィールドに持ち出して観測できるところまで進めた。またソフトウェアの改良を進め、観測制御機能、データ収集機能、データ表示システムを備えるソフトのプロトタイプを完成させた。



図2-5-42 光コンポーネントとデータ処理部の見直しによる小型化

平成29年度に組み立てを行なったドップラー・ライダーを図2-5-43に示す．これまで述べてきた各コンポーネント，信号処理・制御部，望遠鏡を接続し組み立てを行なった．望遠鏡は三脚に固定し，本体も足回りに可動部がついているため，移動させて観測することが可能である．動作は100Vの家庭用コンセントから電源を供給するだけでセットされているものが全て作動する．

図2-5-44は試験観測による動作状況とデータ取得状況を示す．図の左側に各レンジ毎のスペクトルを表示し，右側に観測距離毎の受信強度を表示している．種光源の周波数が80MHzであるため，山や建物に反射して戻ってきた光はドップラーシフトせずに80MHzのところにピークが立っているが，観測レンジ毎の風の情報は中心周波数からのドップラーシフト量から求められる．平成29年度の目標であるコンポーネントの小型化まで進めることができた．



図2-5-43 組み立てたドップラーライダー本体と望遠鏡部

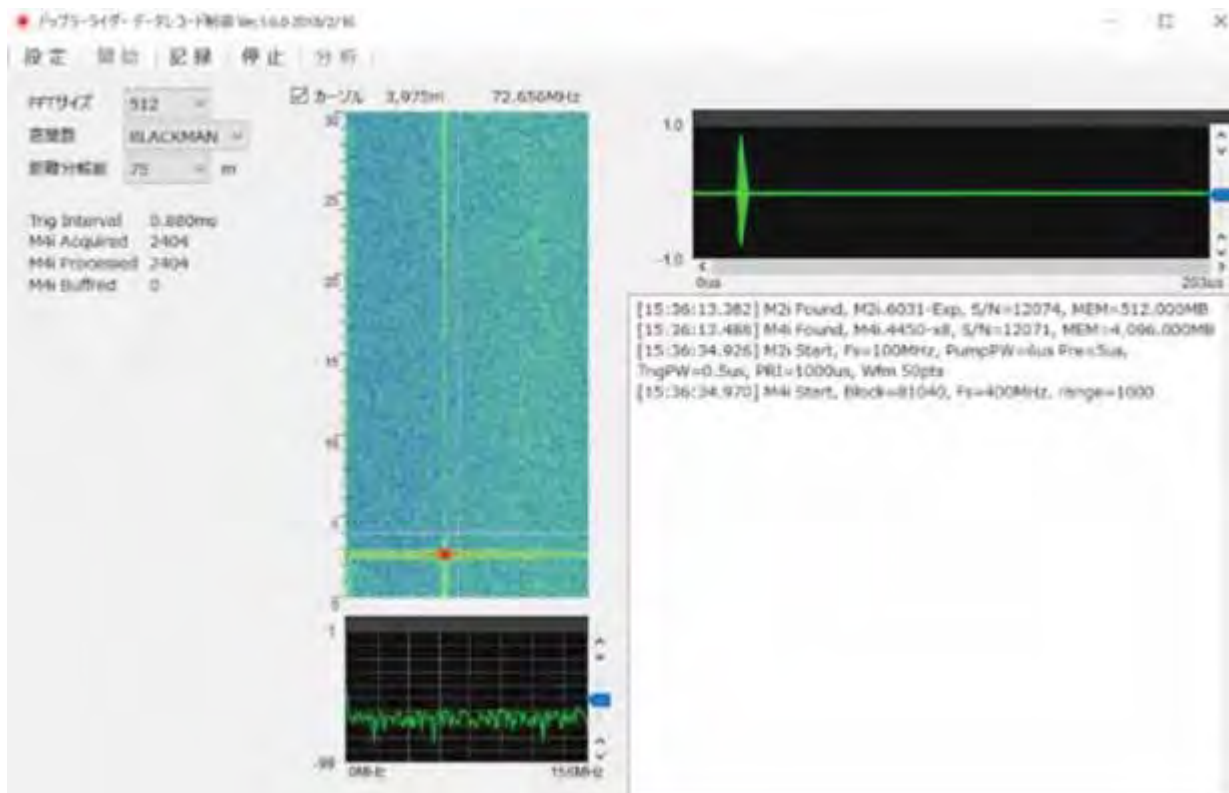


図2-5-44 ソフトウェアのプロトタイプとデータ取得状況

平成30年度は研究成果の社会実装につなげるため、平成29年度に実施した各コンポーネントの小型化と検証結果を基に、市場に投入できるドップラー・ライダーの開発、製作を行った。これまで開発を進めてきた、ドップラー・ライダーのコンポーネントを防水・防塵仕様の筐体に収納し、災害現場やドローンの飛行ルート風のモニタリングすることを前提として屋外観測に耐えられるものとした。また、平成29年度は測定方向は手動で望遠鏡を回転させるシステムであったが、モータで制御する回転機構部を取り付け、水平360度、垂直90度方向に自由に回転させられる機構を付加した。



図2-5-45 市場向け可搬型ドップラー・ライダー

ドローンの安全運航の課題は飛行ルートの風況を詳細に把握することであり、ドップラー・ライダーはドローンの安全運航を支える基盤技術となることが期待される。ドップラー・ライダーをドローン飛行ルートに展開することによって、図2-5-46のように上空風のマップが作成可能となる。例えば、図2-5-47のように災害時の緊急医療などにおける希少品高速輸送サービス展開が今後想定されるが、上空風の風況マップにより気流の変化に応じてリアルタイムに進路変更を行うことで、緊急輸送物資の安全な運航を実現することに貢献できる。

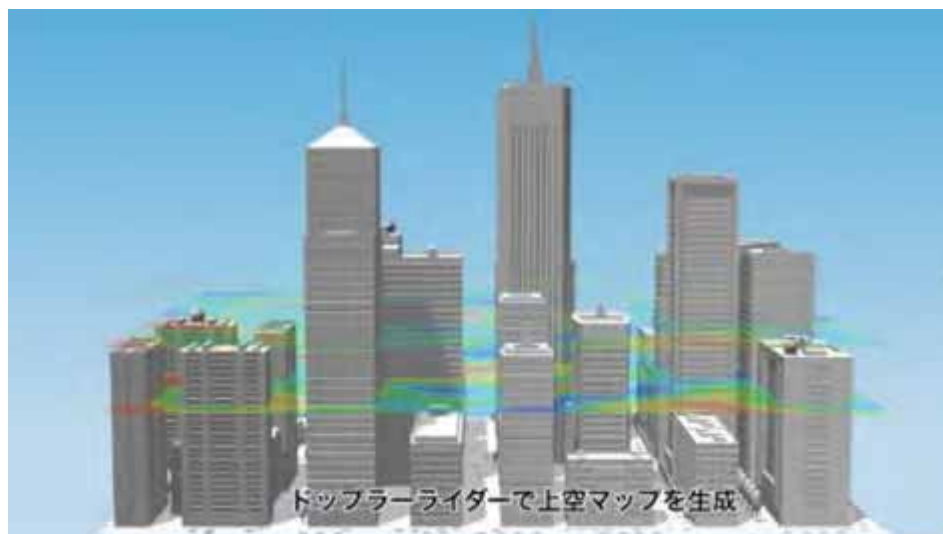


図2-5-46 ドップラー・ライダーによる上空風マップの作成

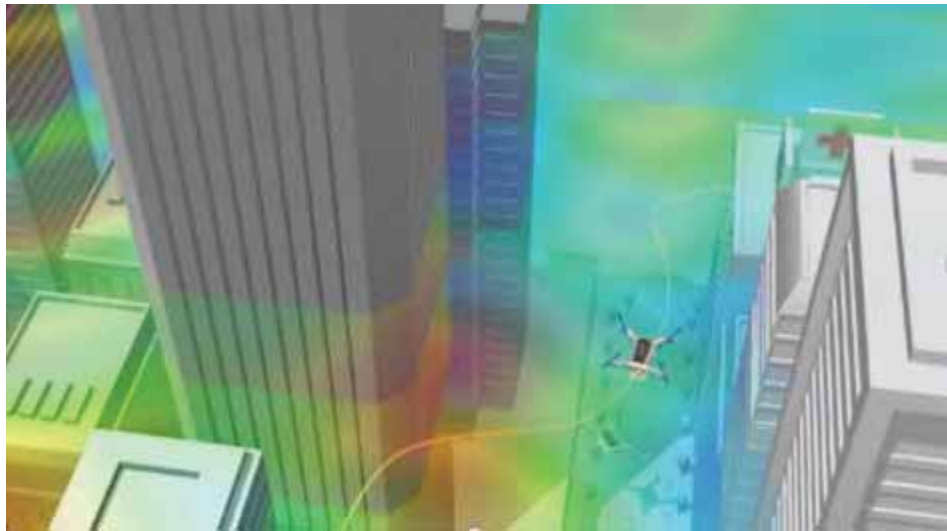


図 2-5-47 ドローンによる緊急輸送物資の安全な輸送

2 -1 1) 防災分野におけるドローンの性能評価・実証

飛行ロボット（ドローン）の災害発生時の被災地における広域情報収集の有効性を検証し，防災の観点からドローンに求められる飛行性能および情報収集のためのセンシングの要件を明らかにする．災害研のグループは，2017年12月からプロジェクトに参加したので，2017年度は災害分野でのドローン利用状況の調査を踏まえた，実証フィールド・実証計画の検討を行った．

研究期間全体における実証の項目は表2-5-1の通りである．研究開始（平成29年12月）からは，調査候補地の検討，ドローンの仕様調査・調達を行い，実証を行った．

表2-5-1 実証試験項目

実証フィールド	実証内容および目標設定
水害被災地	ドローン空撮画像からのがれき・流木の3Dマッピングから，がれき・流木の体積を計測できるかの実証を行う．
活断層・火山火口周辺	大地震後に立入規制される危険地域で地表断層をマッピングし，地盤変動や地震像を早急に把握する．また，火口形状や噴出物の体積の経時変化を計測する．
土砂災害	土砂災害の発生現場において，2次災害のリスクが高く，人間が立ち入れない場所でドローンによる空撮を行い，得られる画像や3Dモデルを応急対策や崩壊メカニズム解明に役立てる．
都市域，建物密集地域	被災建物外観調査の高速化の検証を行う．中高層建物の壁面のドローンの高速撮影による質の検証を行う．さらに，建物密集地域の建物を対象としたドローンの高速撮影による質の検証及び撮影ルートの最適化の検証を行う．
病院施設周辺	ドローンによる医療施設の情報収集支援をの目的に資するためのドローンの飛行・運用計画，機能，法的妥当性について検討する．

文化財・歴史資料保全	文化財指定された史蹟や歴史的な古建築などが災害時に被災した際の被害把握を，文化財保護の観点から行う．
------------	--

2 -1 1 -1) 九州北部豪雨災害画像の解析

先行研究として，平成29年7月九州北部豪雨被災地において撮像された画像から，Structure from Motion (SfM)による瓦礫の抽出と体積の推定を行った．使用したのは，平成29年7月九州北部豪雨被災地である東峰村において田所・野波らが撮像した画像である．図2-5-48に自律制御システム研究所製PF-1の飛行ルートを示す．

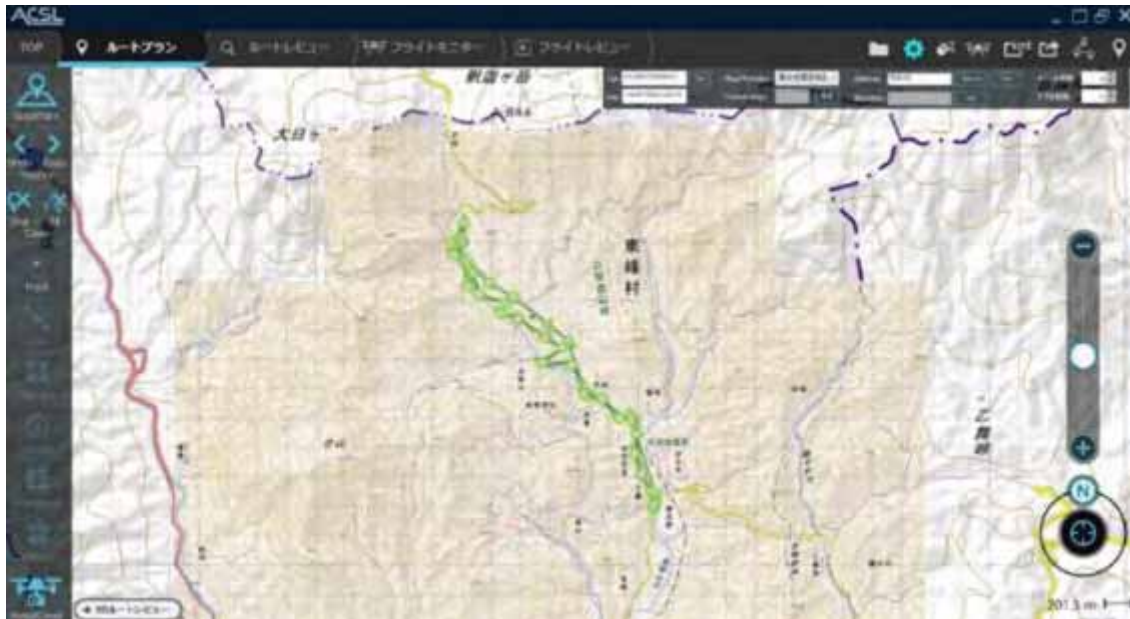


図2-5-48 平成29年7月九州北部豪雨被災地におけるPF-1飛行ルート

解析手順は以下である．

- 1) 撮影された静止画からオルソモザイク画像を作成（図2-5-49）
- 2) Structure from Motion (SfM)によるDSM作成（図2-5-49）
- 3) 作成されたDSMと国土地理院DEMの差分処理による瓦礫の抽出（図2-5-50）
- 4) 瓦礫体積の算出とマッピング（図2-5-51）

上記手法により，ドローン撮影による瓦礫のマッピングは可能であることが実証できた．

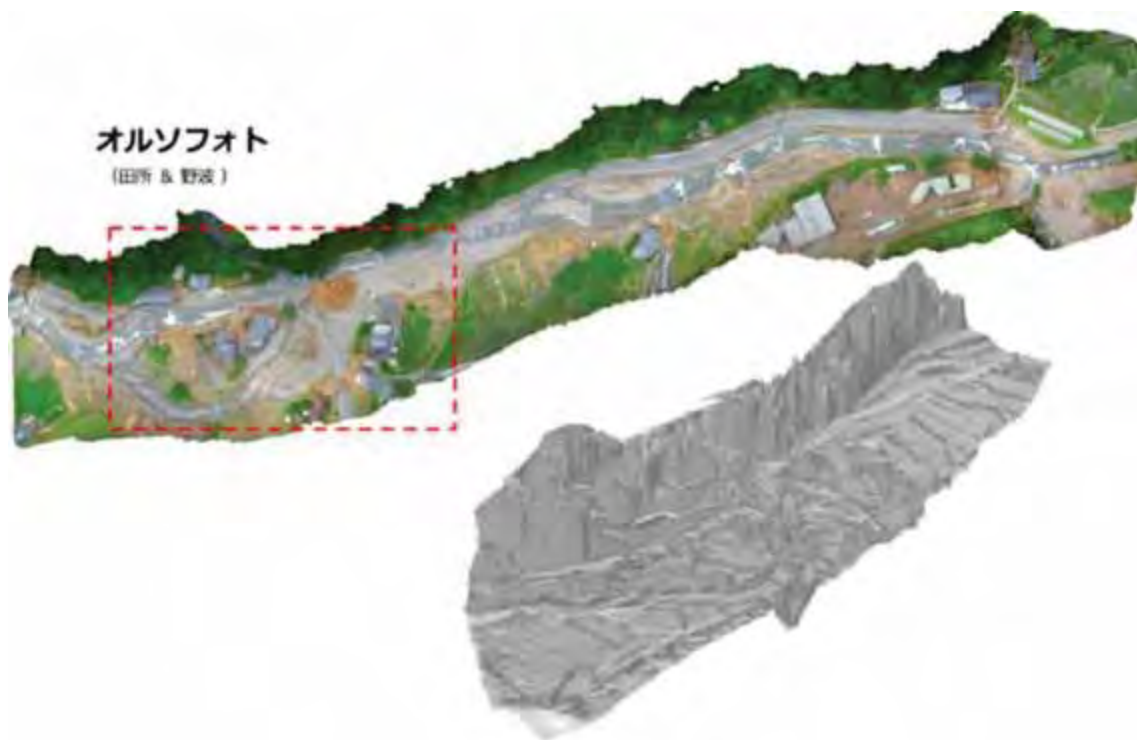


図2-5-49 平成29年7月九州北部豪雨被災地のオルソモザイク画像とSfMによるDSM

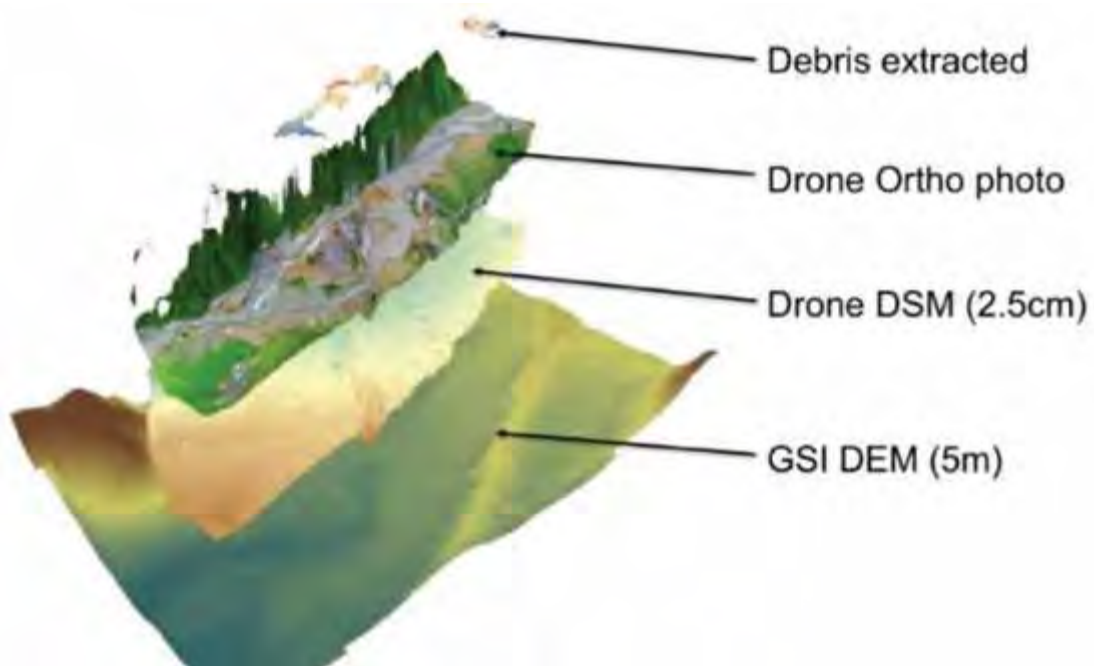


図2-5-50 DSMとDEMの差分処理による瓦礫の抽出

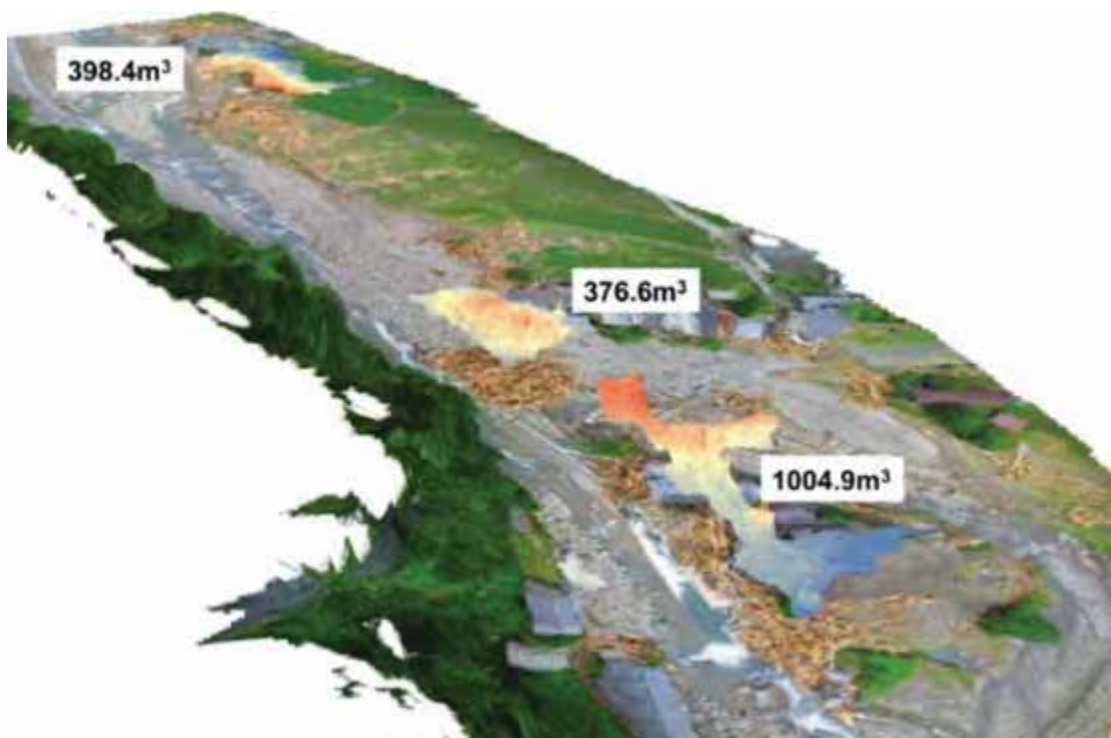


図2-5-51 瓦礫（流木）の体積推定とマッピング

2 -1 1 -2) 岡山市半田山斜面崩壊調査

2018 年 7 月 7 日に発生した，岡山市の半田山の斜面崩壊を空撮し，3D 化による調査を行った．



図2-5-52 岡山市半田山



図2-5-53 西側斜面 オルソモザイク



図2-5-54 西側斜面 ポイントクラウド

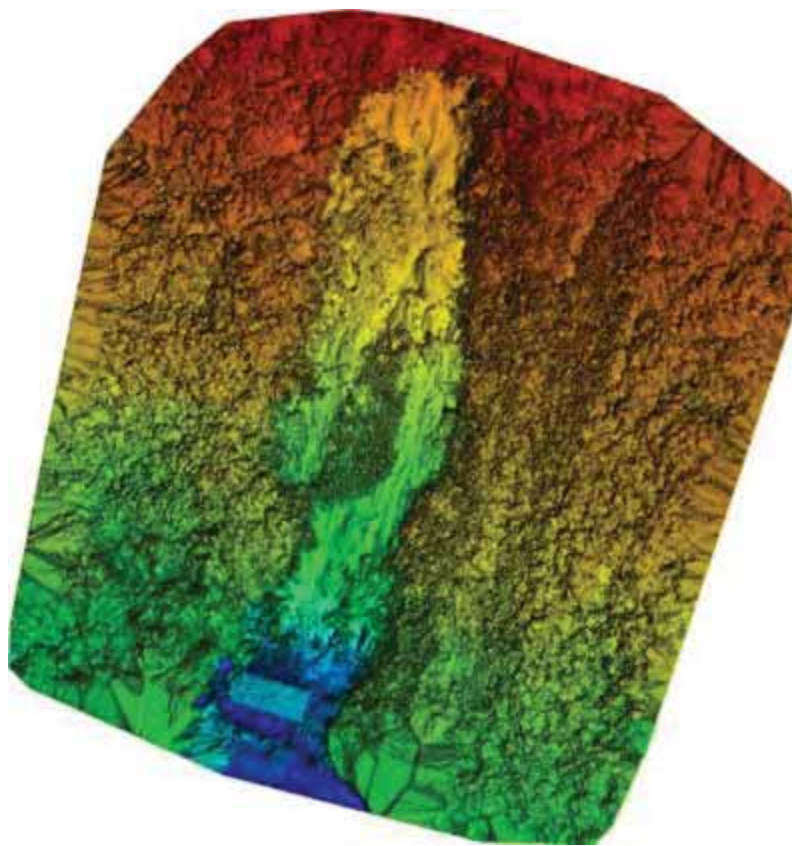


図2-5-55 西側斜面 DSM

2 -1 1 -3) 災害医療における飛行ロボットの利活用

災害医療におけるドローン利活用の実効的な運用にむけて、下記を行った

- ・ 8月4日に行われた南海トラフ地震を想定した大規模地震時医療活動の総合的な実働訓練において日本 DMAT がドローンの実証訓練をしようとしたが、目視外飛行に対する飛行許可が間に合わず断念
- ・ 9月3日ドイツ CBRN 国際シンポジウムでドローンを用いた特殊災害対応を見学
- ・ 9月20日に日本医科大学千葉北総病院 DMAT チームが行う実証訓練を見学
- ・ 11月2日のデモにおいて南相馬市立総合病院の協力を得て、災害本部に見立てた病院の1室において情報把握を検証
- ・ 日本 DMAT, 日本医科大学, 岩手医科大学などのチームとともに災害医療におけるドローン利活用のあり方についてコンセンサス形成のために議論

2 -1 1 -4) 岩手県和泉町乙茂地区 調査

2016 年台風 10 号に伴う河川氾濫の被災地において、下記を行った。現地計測結果およびその後のシミュレーション結果に基づいて、河川氾濫シミュレーションに必要な地形計測精度を検討。対象地域は発災時に濁流が旧河川道の流れ下った可能性があり、その検証も行った。

1. 河川氾濫シミュレーションのための地形をドローンで計測
2. 地中レーダーによる地盤構造の把握 (旧河川道の把握)



図2-5-56 ドローン地形計測範囲

2 -1 1 -5) 岩手宮城内陸地震断層調査

2008年に発生した、岩手宮城内陸地震の断層において、ドローンによるLiDAR計測を行った



図2-5-57 調査地点

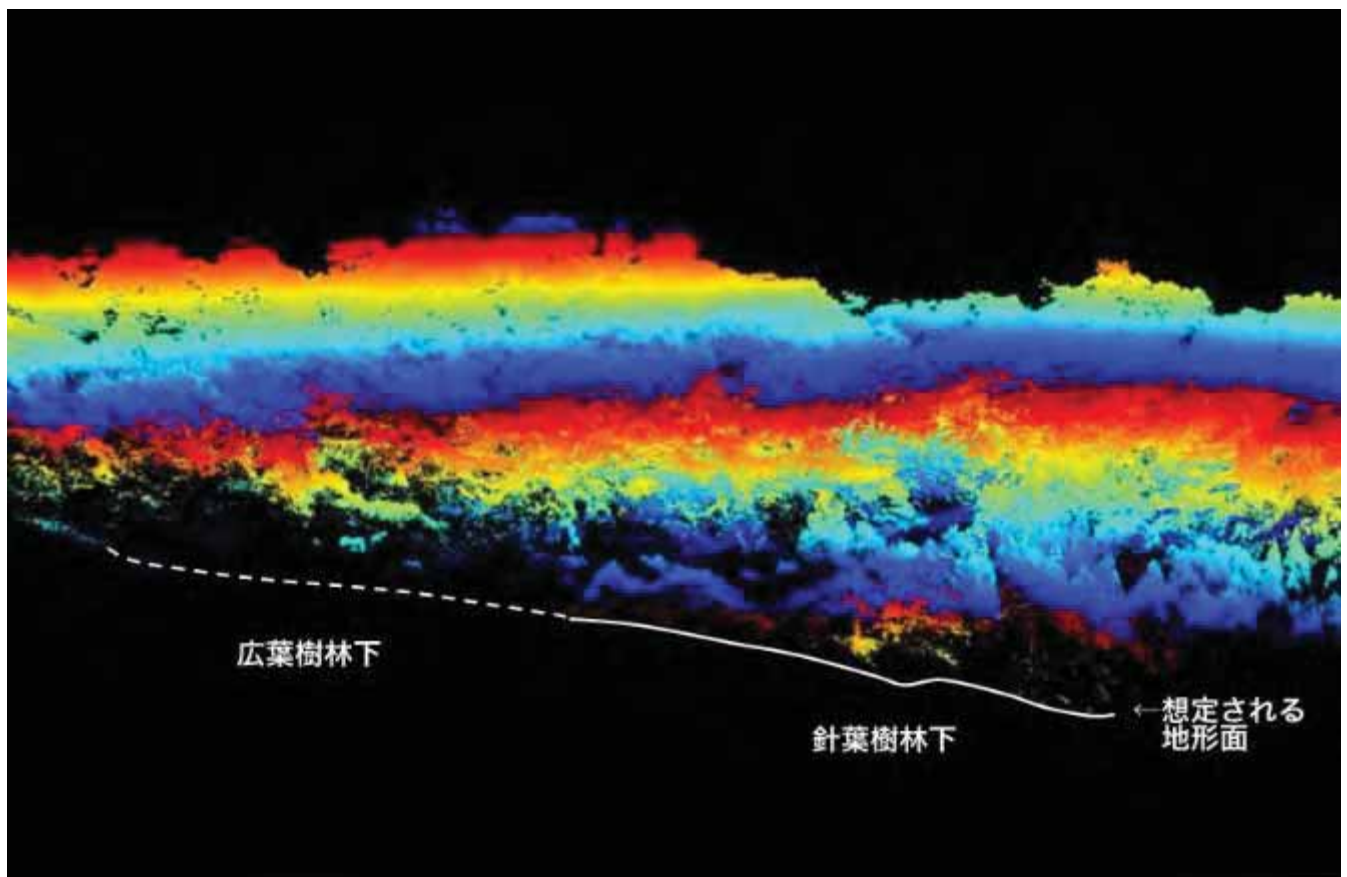


図2-5-58 取得データ

2 -1 2) 飛行プラットフォーム用柔軟ロボットハンド機構

飛行体に柔軟ロボットハンド機構を搭載することにより，不定形物サンプルリターンおよび極限環境ランディングを行った．

柔軟ロボットハンド機構は図2-5-59に示す柔軟な袋とその袋の膜内の粉体で構成される．粉体部を真空にすることによる膜の硬化を利用した可変剛性機構を有する．物体を柔軟な袋になじませて把持するため，極低押付力での把持や不定形脆弱物の把持・回収を厳密な位置制御を行うことなく実現することが可能となる．

その実証に際し，飛行体とグリッパの実機を試作した（図2-5-60）．飛行体の質量は2.9kgであり，グリッパの剛性切り替え用のマイクロポンプを搭載した．グリッパは直径が100mm，質量が約270gである．



図2-5-59 柔軟ロボットハンドの構造



図2-5-60 柔軟ロボットハンド実機外観

柔軟ロボットハンドを搭載した飛行体で物体の把持・回収実験を行った．飛行体を物体にアクセスさせ、グリップをなじませ、袋全体を硬化させることで把持することに成功した．また、回収した物体を離し、再び置くことにも成功した．グリップは物体との接触で容易に変形して飛行姿勢に大きな影響を与えないほど柔軟であり、また物体はグリップの直径内の袋で包み込めるとの位置にあっても把持できるため、飛行体の位置調整が多少困難な状況にあっても把持可能である．

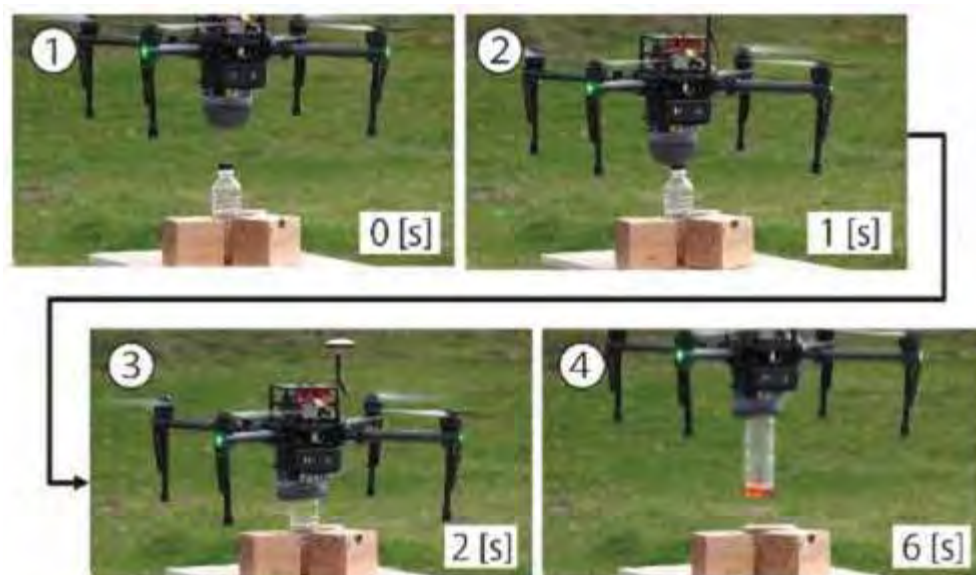


図2-5-61 60gのペットボトルの把持・回収

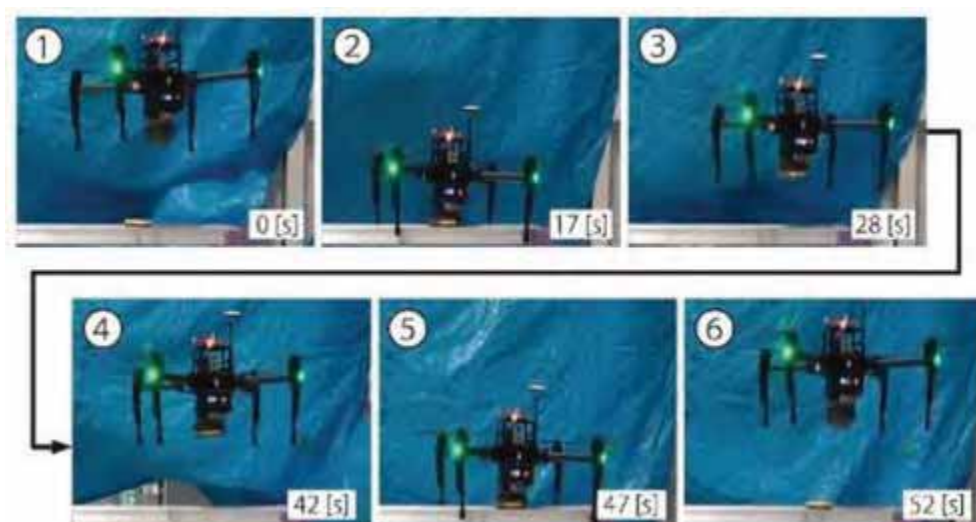


図2-5-62 120gの携帯電話の把持・回収

また、不定形対象物を把持し、その対象上で着地することに成功した（図2-5-63、2-5-64）。2.9kgの機体をカラーコーンと垂直ポールに着地させ、その後完全にプロペラを停止させ、再び離陸させた。したがって、ロボットハンドを脚としても用いることが可能となり、ヘリポートのような平らな地面がなくても飛行体を環境に直接把持・着地することができる。

鋭利を含む不定形対象物に対し、厳密な位置制御を行うことなく把持・着地することが可能である。このため、風で飛行が安定しない環境や災害時の瓦礫が散乱した環境で、不定形脆弱なサンプル回収や不整地上の着地と情報収集を行う飛行体への活用が見込まれる。

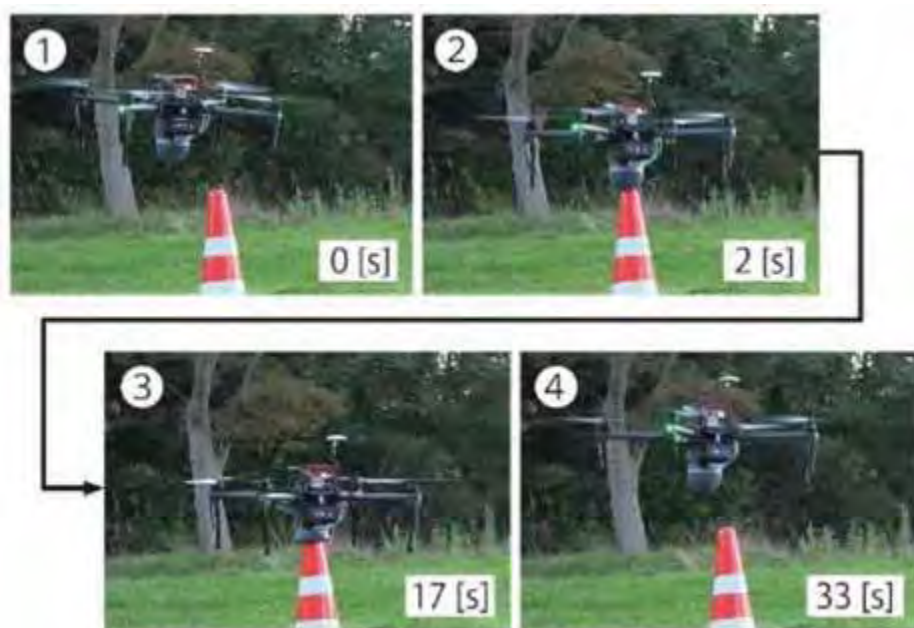


図2-5-63 直径40mmのカラーコーンへの着地

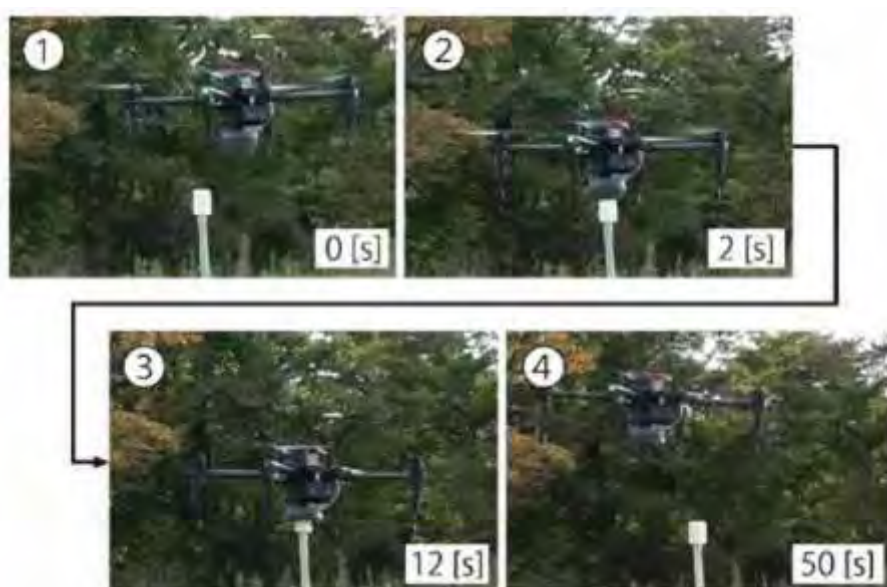


図2-5-64 直径50mmの垂直ポールへの着地

3) 成果の活用

3-1) タフロボット型災害対応飛行ロボットに関する研究

2017年7月、九州北部豪雨において、内閣府からの要望により、飛行ロボット（ドローン）による災害現場調査を実施した。

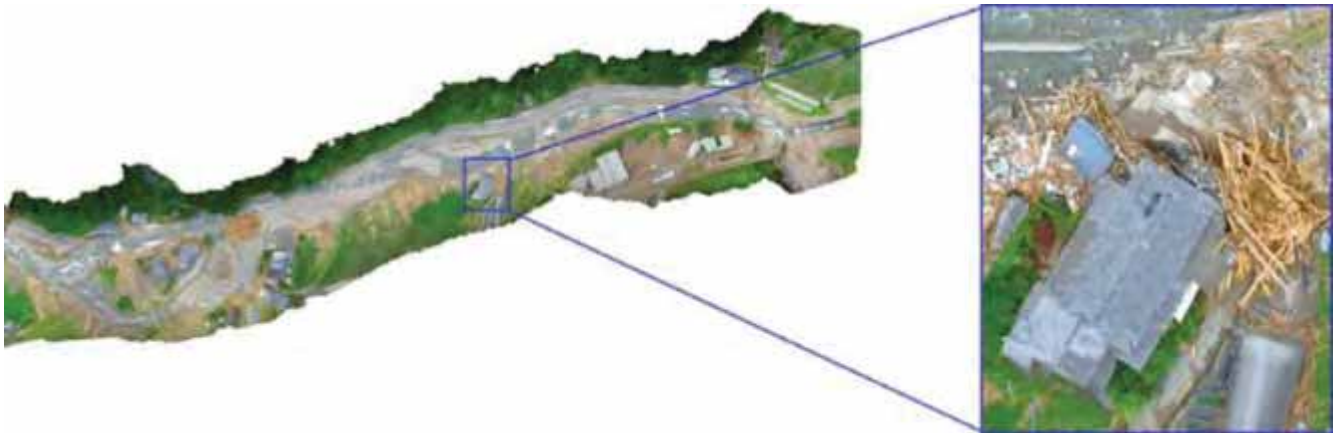


図 2-5-65 九州北部豪雨飛行現場のオルソ画像

3 -2) 飛行ロボットのための軽量高把持力ロボットハンドの開発

- ・平成 30 年 10 月 14 日に尾道市防災フェアにおいて、消防局と自衛隊と共に公開訓練に参加し、海難救助を想定して海で溺れかけている要救助者に浮輪を搬送するデモを実施。
- ・現在、(株)モチユ、(株)啓文社製作所、(株)HIVEC とで、実用化に向けてアームを開発しており、消防局に販売することを目指している。また、操作方法の教育とセットでの展開を検討中。

3 -3) UAV 搭載マイクロホンアレイを用いた音源探索・同定、複数マルチロータを用いた音源探査技術

- ・活用についての問い合わせを受けている。無線通信技術との統合による、災害救助現場での遠隔音源探索、千葉大の技術と統合した静音翼による音源探索向上が発展的な応用例になると考える。また、音の位置だけでなく、音の種類を聞き分ける機能を構築していくことにより付加価値を高める意味で有効と考えている。

3 -4) タフ・ロボティクスのためのタフ・ワイヤレス技術の研究開発

A) コマンドホッパー

- ・目視外での運航を含む無人航空機の運航管理システムの研究開発における活用への展開
NEDO DRESS プロジェクトにおける無人航空機の運航管理システムに関する研究開発の一部を受託し、その中で、TRC で開発したマルチホップ C2 リンク技術（コマンドホッパー）をさらに拡張し、外部ネットワークへの接続・複数機種対応化（マルチプラットフォーム）・実用化を想定した改修設計

に展開した。なお、本技術については、TRC の中で特許出願を行った。

- ・電力設備の遠隔点検システムにむけた共同研究への展開

電源開発（株）と共同研究契約を結び、TRC で開発したコマンドホッパー技術を用いた山中の電力設備点検用ドローンへの適用の検討を実施した。

（プレスリリース：<https://www.nict.go.jp/info/topics/2017/08/170818-1.html>）

B) ドローンマッパー

- ・目視外での運航を含む無人航空機の遠隔識別・飛行位置把握の研究開発における活用への展開
NEDO DRESS プロジェクトにおける無人航空機の運航管理システムに関する研究開発の一部をスカパーJSAT(株)を通じて受託し、その中で、TRC で開発したドローン位置情報共有技術（ドローンマッパー）をさらに拡張し、長距離化開発（ドローンマッパーの LoRa 化）とそれによる有人機とドローン間の位置・ID 情報共有実験の実施（プレスリリース：<https://www.nict.go.jp/press/2018/03/20-1.html>）、小型化開発に展開した。また、本技術については、実用化を希望するメーカー：ナチュアソリユーションズ(株)と共同で TRC において特許出願を行った。

- ・総務省東北総合通信局が実施したドローンの飛行位置把握に関する調査検討への展開

平成 29 年度に実施された東北総合通信局の調査検討に TRC で開発したドローンマッパー技術を入力し、これを新たに検討対象となった 400MHz 帯無線に適用したフィールド実験が実施され、複数ドローンの広域位置把握に有効であることが確認された。

(プレスリリース : <http://www.soumu.go.jp/soutsu/tohoku/hodo/h300307a1001.html> ,
<http://www.city.minamisoma.lg.jp/index.cfm/8,41098,221,html>)

・ リモート ID 方式の検討における候補技術の 1 つとして提案
政府が策定する「空の産業革命に向けたロードマップ」において新たに技術課題として挙げられた「遠隔からの機体識別と飛行位置把握」の実現に向けた標準化候補技術の 1 つとして、JUTM におけるワーキンググループにおいて入力し、国プロ化に向けた具体的な検討が開始された。

3 -5) マルチ GNSS アンテナによるロバストかつ高精度な位置姿勢推定と超高精度レーザ計測の実現
・ テラドローン株式会社と、製品化・実用化に向けて協議を行っている。

3 -6) 劇的な周囲環境変化に対してタフなスーパーバイザ型ナビゲーション・制御システムの開発
・ 開発成果の一部であるナビゲーションシステムが、インフラ構造物点検ドローンの実証実験において用いられた。

3 -7) 防災分野におけるドローンの性能評価・実証

下記の成果活用を行った。詳細については、2) 技術成果を参照のこと。

- ・ 九州北部豪雨災害について、福岡県東峰村の被害状況推定を実施した。
- ・ 西日本豪雨災害について、岡山大学半田山斜面崩壊調査を実施した。
- ・ 南相馬市立病院の協力で、災害本部に見立てた病院の一室で情報把握を検証した。
- ・ 2016 年台風 10 号被災地について、地形と地盤構造の調査を実施した。
- ・ 2008 年に発生した岩手宮城内陸地震の断層について、LiDAR による地形計測を実施した。