建設技術展等の開催報告

EE東北'15におけるUAV（マルチコプター）競技会の開催結果
～競技結果と技術特性の考察～

EE東北実行委員会事務局

1. はじめに

近年，空撮，測量などの分野におけるUAV（Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機）活用が普及しつつあり，特にマルチコプター（多数回転翼）を使ったさまざまな新技術が土木分野で開発され，広まりを見せている。

一方，我が国では高度成長期以降に整備した社会インフラが今後急速に老朽化してくる。一般の方々が安心して既存インフラを利用し続けることができるようにするためには，各施設の特徴を踏まえた適切な点検による現状確認と，その結果に基づく的確な修繕の実施が不可欠である[1)]。

国土交通省においても，「次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム」の開発・導入を目的として，老朽化が進む橋梁等の社会インフラの点検や災害発生時の状況調査に有効な技術の公募，現場における検証，評価が行われており，これらの取り組みにUAVを活用した技術を有する関連企業等が多数参画しているところである。

このような状況を鑑み，EE東北'15では，今後のUAVの利活用と普及を視野に入れ，UAVの技術特性と適用性の検証，更なる技術開発の促進，一般の方々への情報発信を目的として，UAV（マルチコプター）競技会（以下，「UAV競技会」という。）を実施したものである（写真―1）。

写真―1　マルチコプター

本報告は，UAV競技会の開催結果について報告を行うものである。

2. UAV競技会の開催趣旨

本競技会を開催したEE東北は，建設事業における調査設計，建設工事，維持管理，災害対応等に係わる新技術展示会として，平成２年度から開催しているものである。

近年，出展が増えるマルチコプターをはじめとするUAV技術は，機体の高性能化とペイロードの多様化により用途が拡大しており，空撮による現状確認や調査において有効活用が期待されるところである。

一方で，マルチコプターを用いて撮影した画像

で構造物の損傷等をどのように把握できるのかという定性的な検証，また，画像相関技術によって，構造物の寸法や損傷の範囲，大きさなどがどの程度の精度で検出できるのかという定量的な検証について，十分な経験データが得られていないのが現状である。

そこで，競技会というイベント的要素を持ちつつ，UAV技術（マルチコプター）の技術特性と適用性について検証を行うため，従来の飛行技術に「空撮・計測」の技術を競う要素を組み合わせた競技会を開催することとした。これは我が国初の試みである。

なお，UAV競技会は，総合技術部門と一般参加部門の２部門に分けて実施したが，今回は総合技術部門について報告する。

3.　総合技術部門の概要と結果

総合技術部門では，橋脚を模した門型の計測対象構造物の周囲をマルチコプターで飛行しながら，搭載した機材で空撮し，対象構造物の大きさと，亀裂に見立てた溝の長さ，コンクリート剥離に見立てた凹部の面積と最大深さをそれぞれ計測し，その正確さと，フライト時間，そして各競技者が自らの計測結果を説明するプレゼンテーションの優劣で勝敗を競った（写真―２）。

写真―２　橋脚を模した計測対象構造物

競技の構成と制限時間は次のとおりである。

①　空撮時間（15分以内/チーム）

②　データ解析・プレゼンテーション資料作成時間（110分以内/チーム）

③　プレゼンテーション発表時間（８分以内/チーム）

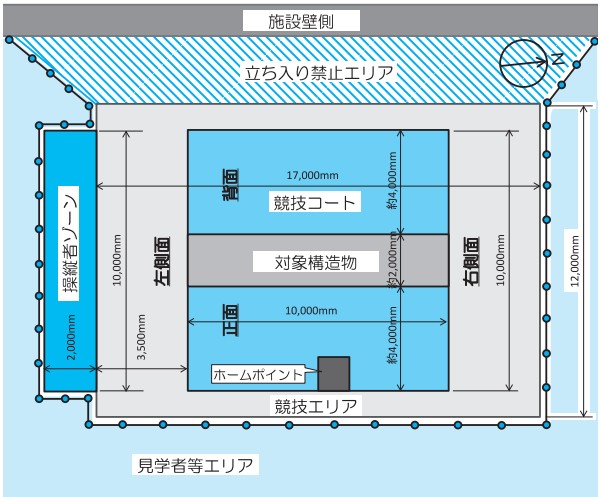
総合技術部門にはEE東北'15のブース出展者から５チームが参加した（写真―３）。（５チーム中１チームは規定時間内に離陸できなかったため，それ以降の競技はオープン参加とした）

参加した機体はクアッドコプターが３機，ヘキサ及びオクトコプターがそれぞれ１機ずつであった。

写真―３　総合技術部門の競技状況

(1)　総合計測結果と考察

総合技術部門の競技は，各競技者の競技条件を極力均一にするために全て屋内で行った。図―１に競技会場のレイアウト図を示す。



図―１　総合技術部門競技会場図

前述のとおり，競技は幾つかの項目によって構成されているが，本報告では主として計測課題の結果概要と，課題のうち寸法計測並びにひび割れ長さの結果について報告を行うこととする。

各競技者の計測結果は，正解値に対する計測誤差を基に，優（A又はB判定），良（C判定），可（D又はE判定），不可（Z判定）の６段階で評価した。

表―１に今回の競技成績を各競技者の課題達成度合いと，フライト時間からまとめた結果を示す。なお，下表に示す数値は寸法計測，ひび割れ長さ計測，損傷面積計測，損傷深さ計測の４つの課題を総合した結果である。

表―１　計測精度とフライト時間

競技者	フライト時間	計測率	B判定以上の計測率	単位時間当たり計測精度
チームA	600秒	0.800	0.320	1.254×10^{-2}
チームB	*469秒	0.680	0.280	$*1.376\times10^{-2}$
チームC	960秒	*0.800	*0.480	1.191×10^{-2}
チームD	729秒	0.600	0.280	0.967×10^{-2}
チームE	680秒	0.600	0.160	0.900×10^{-2}
平均	688秒	0.696	0.304	1.138×10^{-2}

注）＊印は各項目の最高値を示す。

① ここで，「計測率」とは全計測課題のうち撮影又は計測のできた課題の割合である。

② 「計測率」の数値が0.800とは，当該競技者が全25課題の８割の計測課題を撮影又は計測できたことを示している。

③ また，「B判定以上の計測率」とは全課題（25課題）のうち成績が優であるB判定以上の計測ができた割合を示す。

空撮の技術特性と適用性の検証は，空撮・計測精度が重要な要素であるが，飛行時間が限定されるUAVの特性からフライト時間の短さも加えて競技としている。このため，計測精度に時間の要素を加えた計測結果の正確度を表す指標として次式に示すような「単位時間当たり計測精度」を設定し評価した。この指標は，数値が大きいほど，精度の高い計測が効率的にできたことを示す。

$$\text{単位時間当たり計測精度}=\frac{5\times\text{A判定数}+4\times\text{B判定数}+3\times\text{C判定数}+2\times\text{D判定数}+\text{E判定数}}{\text{課題数}\times\text{飛行時間}}$$

競技結果は，「計測率」が５チーム全てで６～８割となっており，競技会場の関係から非常に狭いフライト空間であったにもかかわらず，好成績であったのではないかと考えている。また，総合的評価となる「単位時間当たり計測精度」は，チームBが最も高い結果となった。これは，データ解析処理の結果も考慮する必要があるが，少ない時間で計測に必要な空撮を効率的に行えた結果と考えられる。

一方で，「計測率」及び「B判定以上の計測率」で最も良い成績を上げたチームCは，フライト時間の長さが要因となり，総合的評価に影響した。

表―２には，競技課題別に「計測率」の結果を示す。

表―２　競技課題別計測率

競技課題名	正　面	右側面	左側面	上　面	背　面
ひび割れ長さ計測	0.600 1.000	0.200 0.600	0.800	0.400	—
損傷面積計測	0.800	0.400	0.800	0.600 0.600	0.800
損傷深さ計測	0.600	0.200	0.600	0.400 0.400	0.600
平均	0.750	0.350	0.733	0.480	0.700

（注）右側面とは正面側から対象構造物を見て右側であり，左側面とは同様に左側である（図－１参照）。

上表から分かるように，操縦者ゾーンからマルチコプターの機体の動きが確認可能な範囲（正面や左側面，背面）は撮影又は計測できる割合が高い結果となった。反面，右側面や上面のような操縦者ゾーンからマルチコプターの機体の動きが把握しづらい範囲は撮影又は計測できる割合が低い結果となった。

特に，構造物の背後となる右側面は，操縦者からは死角となり，プロポ等のモニタ画面情報頼りで操縦が難しくなるため，これが計測結果の低さに影響を与えたものと考えられる。

通常，マルチコプターの操縦は操縦者らが機体及びその周囲が目視できる状態で行うのが一般的であり，その点で今回のUAV競技会は特殊なケースであり，非常に難易度が高かったともいえる。しかしながら，インフラの点検や調査等での

活用を考えた場合，ハイピアや長大橋の主塔など，作業地点までのアプローチが難しい状況があるため，十分な操縦者視界が得られない条件下での作業も予想され，このような作業条件下におけるマルチコプターを含めたドローンに関する技術開発が望まれるところである。

⑵　寸法計測結果と考察

次に競技課題の内容別に考察を行う。

寸法計測では対象構造物の大きさを写真撮影し，取得した画像情報から指定された対象構造物の長さを計測する競技課題である。

寸法計測に当たっては，撮影した数十枚から数百枚の画像データを解析用のソフトウェアに取り込み，これをSfM（Structure from Motion）と呼ばれるデータ処理技術を用いて３次元モデルを構築する。SfMとは，カメラの視点をさまざまに変えながら撮影対象物を撮影し，得られた複数枚の画像データから当該撮影対象物の３次元形状とカメラの撮影位置を復元する手法である。

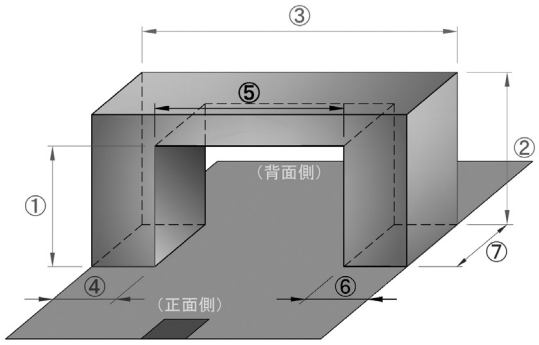
SfMによって構築した３次元モデルは，長さ，幅，高さの情報を持っており，これを３次元CAD（Computer Aided Design）を用いて，それぞれの寸法の計測を行っている。

なお，今回は解析に用いるソフトウェアについても指定は行っておらず，各競技者によっていくつかの写真データを３次元化できる計測ソフトウェアが使用されている。本報告ではPhotoScanによる計測を前提に報告を行っている。

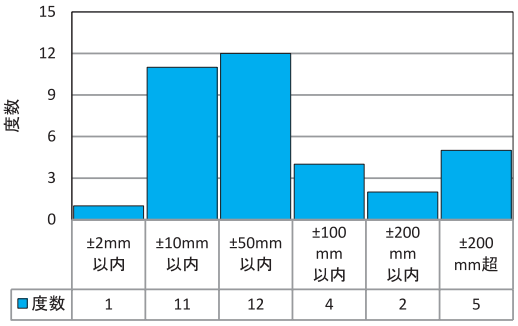
図―２には寸法計測課題の配置図を，図―３には計測全７箇所を通しての計測誤差のヒストグラムを示す。

ここで図―３に整理したデータの傾向がふた山型となっているため，計測誤差±100mm超え（±200mm以内と±200mm超）のデータ７件について，その内訳を確認した。結果は図―４に示すとおりであり，ほぼ特定の１チームの計測データが集中していることが分かった。

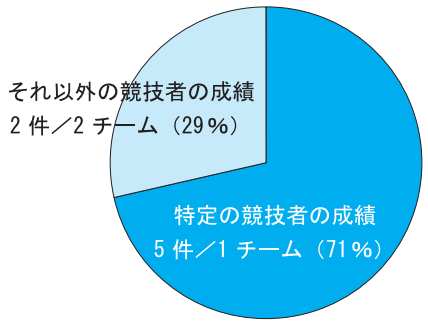
当該データの計測誤差は，全体平均と比較して大きい差異が生じており，競技者の違いによる影響が顕著に表れたケースであり，この要因としては，競技者間の空撮計画や計測精度を高めるための撮影手法の違いが考えられる。



図―２　寸法計測課題配置図



図―３　寸法計測の計測誤差



図―４　計測誤差±100mm超えのデータ内訳

表―３には計測を行った結果について，計測課題別に整理したものを示す。なお，表中の計測誤差の平均値は異常値を棄却したものである。

計測結果としては，参加５チーム全てにおいて，課題全７箇所を計測することができた。

表―3　寸法計測の計測結果

課題	課題正答	計測者数	誤差の平均値
①	3,066mm	5	17.25mm
②	3,968mm	5	11.25mm
③	10,100mm	5	9.50mm
④	2,096mm	5	21.50mm
⑤	5,902mm	5	バラツキ大
⑥	2,100mm	5	29.00mm
⑦	2,178mm	5	17.40mm

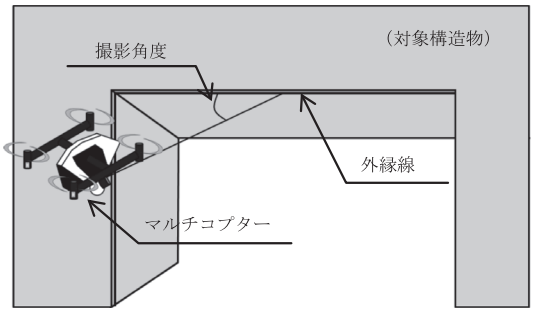
計測誤差の面では，各計測課題において部位の長短にかかわらず，概ね20mm前後の精度であった。一般的にUAVによる写真測量は，撮影距離に対して，おおよそ1/1,000～1/3,000の精度で計測が可能であり，例えば30m程度の撮影距離であれば，おおよそ30mm程度の誤差に収まることが多いとされている[2)]。

UAV競技会の撮影距離では，最大でも5m程度，最小で1～2m程度であったが，極端な近距離という撮影条件や画像相関時のマッチングのズレ等を考慮すれば，今回の精度は十分妥当であると考えられる。

その一方で，課題⑤のみバラツキが大きいという結果であった。課題⑤の内訳としては誤差20mm程度と150mm程度に分かれ，前者は他の課題と同程度の結果であったが後者は差異が大きくなっている。

今回参加した5チームの機体は全てジンバル機能を装備しており，画像のぶれによる影響は少ないことから，後者の差異の要因としては，撮影する角度の違いが考えられ，図―5に示すような外縁線（エッジ）の片側の面（内側上面）に対する撮影角度が極端に浅くなる等の理由により，精度の良い画像撮影ができず，その結果，画像相関にも影響が生じ，結果，誤差が大きくなったものと思われる。この点にも競技者間の撮影手法の違いによる影響が見られた。

また，写真測量にあっては実体視を行うため，一定のオーバーラップ，サイドラップが必要となる。しかし，今回は競技を室内としたことから，機体はマニュアルによる操縦となったため，フライト空間の狭さと相まって実体視に必要な重複した撮影ができなかったことも一因として考えられる。



図―5　計測誤差への撮影角度による影響(1)

表―4には，競技者別の「計測率」と「単位時間当たり計測精度」の結果を示す。この表から，チームBは，特に正解値に対して1mm以内の計測を行うなど，この数値が圧倒的に高いことから，寸法計測で他競技者をリードした形となった。

表―4　寸法計測の計測精度

競技者	計測率	単位時間当たり計測精度
チームA	1.000	1.428×10^{-3}
チームB	1.000	7.006×10^{-3}
チームC	1.000	3.572×10^{-3}
チームD	1.000	3.723×10^{-3}
チームE	1.000	4.832×10^{-3}
平均	1.000	4.112×10^{-3}

今回のUAV競技会開催に当たっては，競技会開催自体が初めての試みであり，特に，一般の方々がどの程度興味を持って参加していただけるかが不明であったため，総合技術部門並びに一般参加部門ともに機体に搭載する撮影機材について制限を設けていない。また，機体自体もモータ駆動で回転翼により飛行するマルチロータヘリコプターであればどんな機体でもよく，機体重量，ロータ数，翼数による制限も設けなかった。いわゆる無差別級による競技会である。

しかしながら撮影カメラの性能が計測誤差に与える影響は大きいことから，カメラの画素数，撮像素子の性質や性能，レンズの性質と性能，撮影方法，シャッター速度等による検証も今後，必要である。

⑶　ひび割れ長さ計測結果と考察

ひび割れは，RC構造物に発生したひび割れ，クラックを想定している。競技はひび割れ箇所を写真撮影し，取得した画像情報からひび割れの長さを計測し，その計測精度を競うものである（写真―4）。

ひび割れ長さ計測課題の配置図を図―6に示す。

一般的にRC構造物のひび割れ幅の伸展を評価するには，0.2mm以上のひび割れ捕捉が必要とされていることから，計測課題のひび割れ幅の最小部はRC構造物調査の要求精度と整合させ0.2mm以上とし，今回の競技では，ひび割れ長さ579～1,807mmの6つの計測課題を用意した。

表―5には計測を行った結果について計測課題毎に整理したものを示す。なお，表中の計測誤差の平均値は異常値を棄却したものである。

ひび割れ長さ計測では，寸法計測に比べ撮影又は計測できた割合が低く，計測誤差の値も大きい結果となった（課題③を除く5箇所の平均誤差の平均値105.30mm）。

課題①や②のように，ひび割れ幅の変化が少なく，かつ操縦者ゾーンからマルチコプターの機体の動きが確認可能な範囲に存在する計測課題については，寸法計測との間で計測誤差に差異は少ない結果となった。

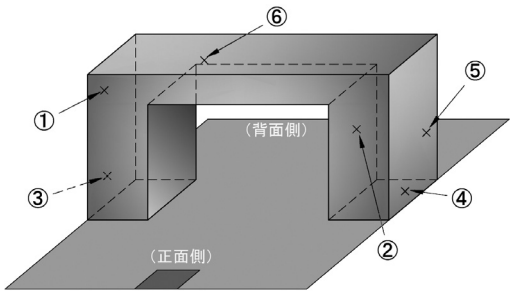
ただし，課題③については機体の動きが確認しやすい箇所であるにもかかわらず，バラツキが大きいという結果であった。課題③の内訳としては誤差20mm程度と400mm程度に分かれ，前者は他の課題と同程度の結果であったが，後者は差異が大きくなっている。

一方，操縦者ゾーンからマルチコプターの機体の動きが把握しづらい課題④～⑥については，撮影又は計測できる割合が低い結果となった。

競技会場は，上面は競技会場天井部との離隔が狭く，また側面は会場内の安全対策施設として大型のネットが設けられたため，飛行空間としてはかなり狭いフライトゾーンとなった。撮影しづらくなったことから撮影数が少なく，かつ撮影する画像も図―7に示すような，かなり小さな角度のついた斜め画像となるため，精度の良い画像撮影ができず，その結果，画像相関にも影響が生じ，結果，誤差が大きくなったものと考えられる。

計測結果をひび割れの形状で考察すると，円弧状で矢高の高い曲線（課題③）や屈曲した曲線（課題⑤），ひび割れ幅の変化が大きい曲線（課題⑥）

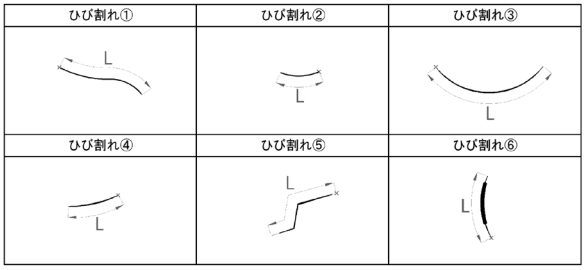
写真―4　ひび割れの計測状況

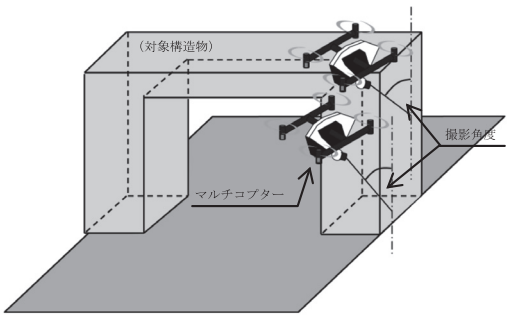


図―6　ひび割れ長さ計測課題配置図

表―5　ひび割れ長さの計測結果

課題	課題正答	計測者数	誤差の平均値
①	1,310mm	3	30.50mm
②	579mm	5	38.00mm
③	1,807mm	4	バラツキ大
④	750mm	1	61.00mm
⑤	1,301mm	3	250.00mm
⑥	940mm	2	147.00mm
平均	―	―	105.30mm





図―7　計測誤差への撮影角度による影響(2)

も誤差が大きい結果となった。

しかしながら，課題の位置及び曲線の形状のどちらが計測誤差に影響を及ぼす要因として支配的であるか，今回の競技結果のみでは判断は困難であった。

表―6には，競技者別の「計測率」と「単位時間当たり計測精度」の結果を示す。

表―6　ひび割れ長さ計測の計測精度

競技者	計測率	単位時間当たり計測精度
チームA	0.500	1.112×10^{-3}
チームB	0.667	1.422×10^{-3}
チームC	0.833	2.083×10^{-3}
チームD	0.500	1.143×10^{-3}
チームE	0.500	1.471×10^{-3}
平均	0.600	1.446×10^{-3}

ひび割れ長さ計測は，競技課題全体を通して他の競技課題の精度と比較して精度が悪い。また，チームCの数値が高いが，寸法計測のように各競技者間の差が小さくなっている。この要因としては，ひび割れ幅の大きさが影響しているものと考えられる。

表―7に計測箇所ごとのひび割れ幅の構成比を示す。

ひび割れの計測結果では，幅の狭い（0.2mm以上0.4mm未満）ひび割れの割合が大きくなるにつれて計測誤差も大きくなっている。これは，細くなっている曲線の終始点を正確に捉えることに難しさがあったのではと推測する。

0.2mmのひび割れ幅を精度良く検出するためには，非常に小さなピクセル画像が必要であり，なおかつ，理想的な明るいぶれのない画像が必要なことから，これをマルチコプター単独による写真測量で実現することは，難易度が高いと思われる。

表―7　計測箇所ごとのひび割れ幅構成比

計測課題	幅0.2～0.4mm未満	幅0.4～0.6mm未満	幅0.6mm以上
①	4％	2％	94%
②	1％	1％	98%
③	9％	9％	82%
④	9％	23%	68%
⑤	16%	15%	69%
⑥	13%	12%	75%

その点を考慮すれば今回の結果は現状レベルにおいては十分妥当な結果であり，実用性は十分にあると考えられる。

4.　検証結果

今回の競技会の計測結果を通して，マルチコプターを用いた外観変状調査，状況確認ツールとして一定の成果が得られることは確認できたが，一方では，インフラ点検等への活用には計測精度を確保するため，種々の課題があることも分かった。

計測誤差はカメラの画素数，撮像素子の性質や性能，レンズの性質と性能，撮影方法，シャッター速度，手ぶれ補正の性能，画像相関ソフトウェアのアルゴリズムによる特徴，解析にかけられる時間等，多くの要因があり，計測精度がどこでどれだけ担保されるのかは現時点では判断できない。

特に，今回は競技会を室内で実施したが，点検や調査の対象物は室外の自然の中に存在するため，実施条件として風対策も必要である。

今後も競技会を含むさまざまな機会を通して，十分な経験データやノウハウの蓄積が必要であるが，調査・確認ツールとしての技術課題を解決することで技術が高度化し，結果としてインフラ点検等への応用に対しても有効な手段となるものと考えられる。

5. おわりに

総合技術部門では空撮・操縦・解析技術の正確性など，まだまだ伸び代の大きい結果になり，今後の技術進展が期待される楽しみな結果となった。

参加者募集を４月に行ったところ，総合技術部門は５チームの募集に対して７チームの申込み，一般参加部門は８チームの募集に対して，全国から32チームもの申込みをいただいた。昨今のドローン報道の影響か，UAV競技会への注目度の高さなのか，短い募集期間にもかかわらず，多数の申込みをいただき，競技会参加者の書類選考には苦慮したが，各参加者の技術レベルは高く，競議結果からさまざまな検証を行うことができた。

また，競技会場の特性から，対象構造物に衝突する機体も見られたが，市場では機体の接触や衝突を自動で回避可能なシステムも既に開発されていることから，今後はこのようなシステムを搭載した挑戦も考えられ，参加機体自体の更なる技術的レベルアップも進んでいくものと思われる。

今回の競技会は，UAV（マルチコプター）による操縦技術と空撮・計測技術を組み合わせた日本初の競技会ということからか，2,000名を超える大勢のギャラリーにお越しいただいて，熱心に見学していただき，社会インフラの維持管理におけるマルチコプターの持つ可能性・有用性を示すことや，高い技能を有する参加者の皆さんとの交流の場となったことなどの狙いも果たせたと考えている。

一方では，多くの改善点も見つかり，真剣勝負をされていた皆さんにしっかりお応えできるよう，更に良い競技会にしていければと考えている。

最後に，マルチコプターの利活用は，地上での撮影や大型ヘリなどを使った高所から撮影では得ることのできなかった画像を伝えることができる。昨今，建設業界でも広報の重要性が叫ばれていることから，今後もマルチコプターの特性を活かした取り組みを検討していきたいと考えている。

【参考文献】

1） 国土交通省：「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」（2013.3）
2） 西村正三：インフラ構造物の変状調査とモニタリングのための遠隔測定法の開発と評価に関する研究（2012.12）