

## 第32回衛星設計コンテスト

### アイデアの部 ミッション概要書(3ページ以内)

#### 1. 作品情報・応募者情報

作品名(20文字以内) *作品内容が推測しやすいような名称を付けてください。(略称は不可) 自発光 QR コード <sup>®</sup> 式ランデブドッキング
副題(自由記入)
学校名 国立大学法人 茨城大学

#### 2. ミッションの概要(プレスリリース等で使用するので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。)

私たちが普段使っている QR コード<sup>®</sup>を LED チップで発光させて接近を行うランデブドッキングの方法を提案し、これを技術実証するミッションを行う。如何に安価でシンプルなシステムにするかに重点を置くことで、二つの異なる機能を LED アレイ 1 台にまとめることに成功した。相対接近では QR コード<sup>®</sup>表示に用いる LED チップアレイを用いて光無線通信を行うことにより GPS 相対航法を実現する。最終接近では QR コード<sup>®</sup>の角切り出しシンボルを目印に画像処理を用いて光学航法を行う。

#### 3. ミッションの目的と意義(目的・重要性・技術的/社会的意義等)

##### (a) 目的

新方式のランデブドッキング(RVD)におけるシステムの技術実証を目的とする。

##### (b) 重要性・技術的、社会的意義等

RVD 技術は、未だ確立しているとは言えない技術である。その背景には、RVD を行うための Approach 用の機器が高額であることが挙げられる。しかし、RVD 技術は燃料補給や機能追加といった軌道上サービスを行うプラットフォームに限らず、次世代の宇宙ステーション建築をはじめとした宇宙建築にも欠かせない技術である。本技術は人類の宇宙進出に大きく寄与する。

#### 4. ミッションの具体的な内容

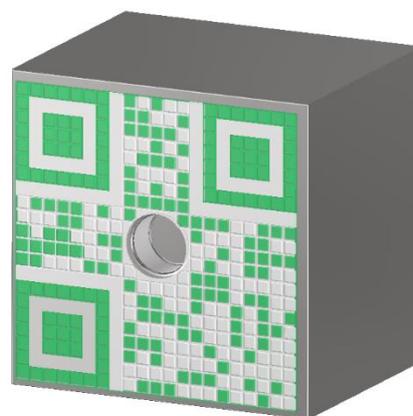
##### (a) ミッション概要

本実験は、RVD の Approaching Phase における検証のみが目的である。また、ETS-VII との対照実験にすることで、運用結果への評価がしやすくなる。そのため、大きな RVD の成功実績を収めた技術実証衛星 きく7号(ETS-VII)の運用を概ね参考にする。投入軌道は高度 550[km]の LEO 軌道である<sup>[2]</sup>。

##### (b) アイデア概要

私たちは、発光ダイオード(LED)による自発光型の QR コード<sup>®</sup>による自動 RVD を提案する。[図1]に、Target 衛星の斜視図を示す。但し、本画像では、Approach 用機器以外については考慮していない。

[図1]で緑色に光っているのは、脂環式ポリイミドの LED アレイ保護用カバーである。QR コード<sup>®</sup>カバーの各セルの内側に搭載された  $1.6 \times 0.8 \times 0.6$  [mm]の LED チップが擦りガラス加工を施した保護カバー内で乱反射し、四角形に光っているように見える。



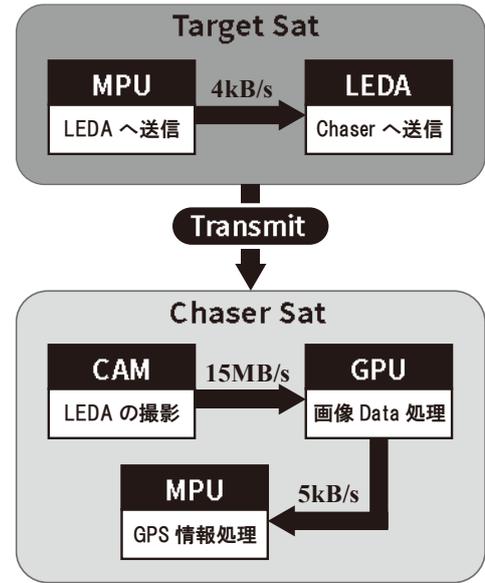
[図1] QR コード<sup>®</sup>点灯時の  
Target 衛星の斜視図

(c) Approaching 概要

本ミッションの Approaching Phase には、GPS 相対航法による Relative Approach (~500m) と、光学航法による Final Approach がある<sup>[2]</sup>。本文では、この二つを合わせ、Approaching Phase と表現している。

[図 2]に、Approaching Phase における全体フローを示す。但し、記載の伝送速度は各所における最大伝送速度である。

- 1) Approaching に用いる Target 衛星 (以下、Target) の主たる機器は、QR コード<sup>®</sup>表示用 LED、LED 制御用コンピュータ (表示箇所及び点灯スピードを制御する) である。
- 2) Approaching に用いる Chaser 衛星 (以下、Chaser) の QR コード<sup>®</sup>マーカ-用カメラ、データ処理装置 (画像データから QR コード<sup>®</sup>の読み取り、光無線通信のデータ取得) である。



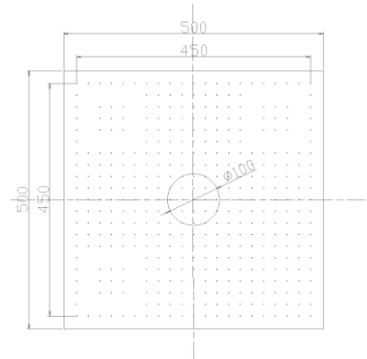
[図 2] Approaching Phase の全体フロー

(d) 詳細なシステム構成

1) QR コード<sup>®</sup>の表示方式

本ミッションの機器配置の制約上、QR コード<sup>®</sup>表示媒体は Target に設置した LED アレイ (LEDA) を用いる。LEDA カバーに塗布した赤外線カット剤の吸収波長との相性から、緑色 LED (OptoSupply 社製 OSXX1608C1AYG) を用いる。

[図 3]に LEDA 上の LED 配置図を示す。



[図 3] LED の配置

2) 光無線通信 (OWC) 発信機構

QR コード<sup>®</sup>表示用の LEDA を利用する。先行研究によると、イメージセンサを使用した赤色 LED (二次元コード切替速度: 30 [fps]) による OWC で 30 [bps] のデータが送信されるという<sup>[4]</sup>。二次元コード切替速度は受信するカメラのフレームレートに依存する。本ミッションで使用するカメラは 60 [fps] のものである。つまり、シリアル伝送では 60 [bps] で送信できることになる。

3) 光学系

価格を抑えるために、民生品のカメラを使用する。ある程度の拡大率が発揮でき、一定以上のフレームレートを持ち、また下位旧機種が宇宙利用経験のある、Canon PowerShot SX70 HS を使用する。

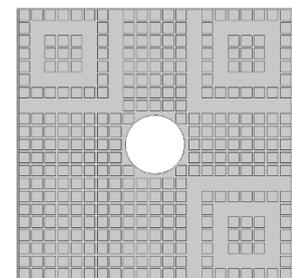
4) 画像処理ハードウェア

本ミッションでは Target の LEDA で発光している QR コード<sup>®</sup>をカメラで撮影し、この映像を画像処理する。迅速にアクチュエータによる軌道修正を行うため、QR コード<sup>®</sup>の読み取りと OWC 情報の取得をリアルタイムに行う必要がある。この処理を CPU や MPU で行おうとすると非常に無理がある。そのため、超小型 GPU 「NVIDIA Jetson Nano Developer Module」を使用する。

5) LEDA の保護機構

LED は耐熱性に劣る材料である。また、細かな点の状態よりも四角形に近い方が QR コード<sup>®</sup>の認識を行いやすい。そこで、耐熱性と視認性のために、LEDA に[図 4]のようなカバーを装着する。

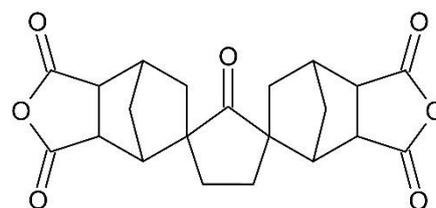
LEDA と対面する面に赤外線カット剤を塗布 (LEDA の保護) し、外壁面に擦りガラス加工 (光の拡散) を施した脂環式ポリイミドを用いる。



[図 4] LEDA カバーの背面図 (3D モデル) 472.5 [mm] × 472.5 [mm] × 5 [mm]

汎用ポリイミドは本来透明度が低い材料である。しかし、脂環式酸無水物と芳香族ジアミンの組み合わせから合成される脂環式ポリイミドは透明度が高いことで知られており<sup>[13]</sup>、昨今の研究により脂環式酸二無水物の「スピロノルボルナンテトラカルボン酸二無水酸(CpODA)」がENEOSによって開発された<sup>[14]</sup> ([図5])。

また、赤外線カット剤は、富士フィルム社のOIR-010を用いる。



[図5] CpODAの構造式

※ QRコード®はデンソーウェーブ(株)の登録商標である。

## 5. 主張したい独創性や社会的効果

### (a) 主張したい本ミッションの独創性

本ミッションの独創性最大の独創性は、QRコード®をRVDに用いることである。

光学航法の手法として、QRコード®の切り出しシンボルを用いた点である。過去の宇宙ミッションにおいて光学航法でQRコード®を用いた例はなく、世界初の提案である。また、光学航法用のマーカーを他のシステムと共用化した点も世界初の提案である。

### (b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

本ミッション最大のテーマ「安価なRVD技術」の実現により、より簡単に宇宙活動が行えるようになる。これまででは不可能だったミッションへの挑戦が可能になり得る。

更に、本ミッションで提案する技術を実現することは、私たちの社会生活へ大きく貢献し得る。QRコードとOWCの多重化通信コンポーネントの技術を実現すると、情報の選択的送信を行うことより容易にできるようになる。

## 6. 本論文中の略称一覧

[表1] 本論文中の略語一覧

略称	日本語名	英語名
ACT	アクチュエータ	Actuator
C/T	Chaser 衛星・Target 衛星間	Chaser Sat to Target Sat
Chaser	Chaser 衛星	Chaser Sat
CpODA	スピロノルボルナンテトラカルボン酸二無水酸	Spiro[3.3]heptane-2,6-dicarboxylic Dianhydride
CPU	中央演算処理装置	Central Processing Unit
DDE	1,1-ビス(4-クロロフェニル)-2,2-ジクロロエテン	p,p'-Dichlorodiphenyldichloroethylene
GPS	全世界測位システム	Global Positioning System
GPU	画像処理装置	Graphic Processing Unit
LED	発光ダイオード	Light Emitting Diode
LEDA	LED アレイ	LED Array
MPU	マイクロプロセッサ	Micro Processing Unit
ODA	4,4'-ジアミノジフェニルエーテル	4,4'-Diaminodiphenyl Ether
OWC	光無線通信	Optical Wireless Communication
PMDA	無水ピロメリット酸	Pyromellitic Dianhydride
RVD	ランデブドッキング	Rendezvous Docking

以上

## 第32回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

### 自発光 QR コード<sup>®</sup>式ランデブドッキング

国立大学法人茨城大学 宇宙工学研究会

川口守李<sup>1</sup>, 山田拓実<sup>2</sup>, 高津未彩<sup>3</sup>

本ミッションは、ランデブドッキング (RVD) の Approaching Phase の技術実証ミッションである。自発光 QR コード<sup>®</sup>と光無線通信による Approach 方法を提案する。

NASDA が ETS-VII で行った GPS 相対航法による Relative Approach と光学航法による Final Approach に用いている機材は、複数の別々の機材を用いており、システムが複雑化していた。本ミッションでは Approaching Phase 用の機器を発光ダイオード (LED) アレイと民生品カメラに置き換えることにより、機器の価格を抑え、かつシンプルなシステム構成にすることに成功した。

本解析書は、1 章に意義と目的、2 章にミッション概要、3 章にアイデア概要、4 章に衛星概要、5 章に Approach に用いる機器とシーケンス、6 章に QR コードと光無線通信 (OWC) の優位性、7 章に詳細な Approaching 機器の詳細説明を記した。

#### 1. 本ミッションの意義と目的

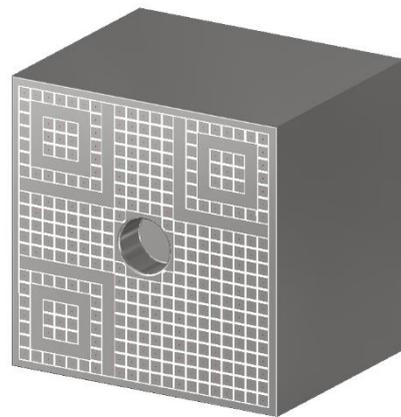
本ミッションは新方式のランデブドッキング (RVD) におけるシステムの技術実証を目的とする。

茨城大学宇宙工学研究会は、宇宙に高い志をもった茨城大学の学生が集まった本学の大学公認課外活動団体である。ゼロから自主ゼミで宇宙工学の基礎を学び、自ら宇宙開発への課題を見つけ、課題解決に向けたアイデアを、学部生の立場や視点で考えてきた。いつか、人工衛星を宇宙に飛ばしたい。そして社会に貢献したい。その第 1 歩として、私たちのアイデアを衛星設計コンテスト アイデアの部に出展する。

RVD は、今まさにトレンドともいえる分野である。2020 年には、MEV-1 によってインテルサット通信衛星との RVD を行った。また、JAXA の新事業推進部は、2030 年に軌道上サービスを行うプラットフォームを作ろうとしているという<sup>[1]</sup>。今日までに考えられてきたのは、一衛星に対して一衛星が RVD するという単純なシステムのみである。今回私たちが考えたアイデアは、宇宙空間に大型のステーションをつくるといった宇宙建築を見据え、

非常に衛星が込み合った環境でも行えるような完全自動の RVD システムである。

RVD を行う宇宙機において、打上げコストの次に多くの費用や手間を掛けているのが、相対接近と最終接近のフェーズである。安全のためにシステムが複雑化しやすい。そこで、本ミッションでは、安全且つシンプルで安価な完全無人・リモートの RVD における Relative Approach と Final Approach の手法を提案するとともに、これらの技術実証をおこなう。



[Figure 1] Target 衛星 (500[mm] Cube) の斜視図

1 茨城大学 工学部 物質科学工学科 3 年 (茨城大学宇宙工学研究会)

2 茨城大学 工学部 電気電子システム工学科 3 年 (茨城大学宇宙工学研究会)

3 茨城大学 工学部 情報工学科 2 年 (茨城大学宇宙工学研究会)

## 2. ミッション概要

本実験は、RVD の Approaching Phase における検証のみが目的である。また、ETS-VII との対照実験にすることで、運用結果への評価がしやすくなる。そのため、大きな RVD の成功実績を収めた技術実証衛星 きく7号 (ETS-VII) の運用を概ね参考にする<sup>[2]</sup>。

まず、Target 衛星と Chaser 衛星を高度 550km の LEO 軌道上の別々の位置に投入する。次に、軌道変換を行い、相対接近、最終接近を経て、ドッキングに至る。以下に、本ミッションにおける RVD のシーケンスを表で示す。本解析書で扱う Phase を **Bold** にした。

[Table 1] RVD Sequence ([2]を基に改変)

RVD Flight Phase	Relative Distance
(1) Launch	
(2) Orbit Transfer	~ 20 [km]
(3) <b>Relative Approach</b>	~500 [m]
(4) <b>Final Approach</b>	2~10 [m]
(5) Docking	0 [m]

## 3. アイデア概要

私たちは、自発光型の QR コード<sup>®</sup>による自動 RVD を提案する。[Figure 1]に、Target 衛星の斜視図を示す。ただし、本画像では、Approach 用機器以外については考慮していない。

本コンテストで私たちが提案するのは、如何に安く、かつシンプルに自動 RVD を行うか、に重点を置いたアイデアである。現在のところは技術的に不可能であるものや、地上での実証が不完全な技術を含んでいる。

基本的なシステム構成は、QR コード<sup>®</sup>をチップ型の発光ダイオード (LED) を用いて自発光させ、この LED を用いて光無線通信を行うというしくみである。詳細な説明は次章以降に譲る。

Table 1 の Relative Approaching Phase では、ETS-VII の例を踏襲して GPS 相対航法を行う<sup>[3]</sup>。その際の Chaser 衛星-Target 衛星間通信 (C/T 通信) に OWC を

用いる。

Table 1 の Final Approach Phase では、光学航法の手段として、QR コード<sup>®</sup>をマーカーに用いる。

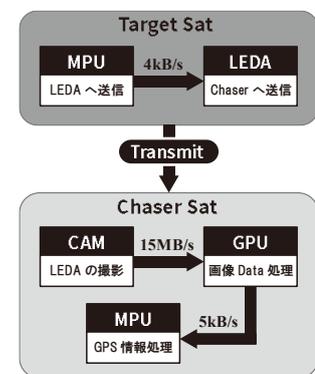
## 4. 衛星概要

本ミッションは、Target 衛星 (以下、Target) と Chaser 衛星 (以下、Chaser) の二台の衛星で構成される。

衛星サイズは、一台あたり 500 [mm] とする。側面に合計 348 個の LED チップを貼り付け、これを用いて QR コード<sup>®</sup>を表示する。Chaser 内にある QR コード<sup>®</sup>データと Target から読み取った QR コード<sup>®</sup>情報を比較することにより、Final Approach を行う。

## 5. Approaching 概要

[Figure 2]に Approaching Phase における全体フローを示す。ただし、記載の伝送速度は各所における最大伝送速度である。



[Figure 2] Approaching Phase の全体フロー

### (1) Approaching 機器構成

Target の主たる機器は、QR コード<sup>®</sup>表示用 LED、LED 制御用コンピュータ (表示箇所及び点灯スピードを制御する) である。Chaser の QR コード<sup>®</sup>マーカー用カメラ、データ処理装置 (画像データから QR コード<sup>®</sup>の読み取り、光無線通信のデータ取得) である。

光無線通信の受信方式には、フォトニクスダイオードを用いるものとイメージセンサを用いるものがある。イメージセンサはフォトニクスダイオードよりも処理速度が劣るが、正確な調整などが不要である<sup>[4]</sup>。フォトニクスダイオードをセンサに用いると、フォトニクスダイオードのアライメント機構が必要になる。システムの単純化の目的を考えると、明らかにイメージセンサで行う方が、フォトニクスダイオードより優位性がある。処理速度の遅さは、パラレル通信によって解決する。

### (2) Relative Approach のシーケンス

基本的なシーケンスを[Figure 3]に示す。

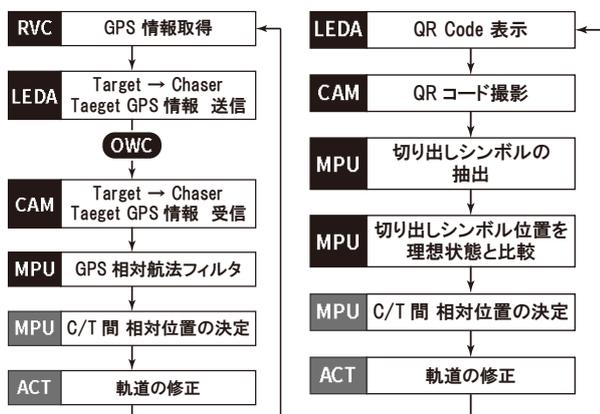
Relative Approach は GPS 相対航法により行う。GPS 相対航法の概要は以下の通りである<sup>[3]</sup>。

はじめに、Chaser/Target 衛星に設置された GPS 測定装置を用いて GPS 衛星から GPS データを取得する。次に、Chaser に Target から、シュードレンジやデルタレンジ、使用した GPS 衛星情報などを送信する。この受信は OWC によって行う。最後に、GPS 相対航法フィルタにより C/T 間の相対位置を決定し、アクチュエータで Chaser の位置を補正する。

### (3) Final Approach のシーケンス

基本的なシーケンスを[Figure 4]に示す。

Final Approach は光学航法により行う。従来の光学航法では光を衛星に照射し、その反射光によって相対距離と衛星中心を認識した<sup>[2]</sup>。ここに用いるランデブレーダ (RVR) は非常に高価である。コスト低減とシステムの簡潔化を目的に、QR コード<sup>®</sup>をランデブマーカ (RVM)として用いる。



[Figure 3] Relative Approach のシーケンス

[Figure 4] Final Approach のシーケンス

## 6. 優位性

### (1) Relative Approach における OWC の優位性

OWC は、可視光の点滅によってデータを送信し、これをフォトニクスダイオードやイメージセンサで受信するものである。二進法信号を、点灯を 1、消灯を 0 として送信する。

現在の宇宙空間におよそ 4400 個の人工衛星が飛行している。その人工衛星が用いる通信のほとんどは短波長を用いている。

人工衛星が用いることが可能な電波帯域は 4~

20[GHz]とごく限られた狭い帯域である<sup>[6]</sup>。今以上に宇宙空間を飛行する人工衛星が増加した場合、混線が発生し、大きな事故に繋がる可能性がある。

この混線と無縁ともいえる技術が OWC である。この技術では可視光を用いるため、ほかの衛星との電波干渉を避けることができるのが一つの利点である。

また、OWC は直進性が高いという特徴がある。本ミッションでは高度 550 [km]の LEO 軌道上で運用を行う。このとき、まわりに一切の衛星がないと仮定すると、理論上、1660[km]の距離で通信が行えることとなる。

ETS-VII において行われた GPS 相対航法においては、C/T 間で同一の GPS 衛星と通信できる必要から C/T 間相対距離 500[m]の地点から Relative Approach を行った。つまり、OWC で GPS 相対航法を行うための条件は満たしているといえる。

本ミッションでは ETS-VII と同様高度 550[km]での実験であるためこの条件を変更することは不可能であるが、より高度が高い場所に打ち上げて行う RVD においては、より遠距離からの通信を行うことができる。

### (2) Approaching における QR コード<sup>®</sup>マーカ の優位性

Final Approach では、相対距離と衛星中心の認識により最終的な C/T 間相対位置調整を行う。

QR コード<sup>®</sup>の規格は、[Figure 5]に表されるように、三隅に  の形 (切り出しシンボル) が配置されている。切り出しシンボルの配置は絶対的に決められているものであるため、Chaser が読み取った QR コード<sup>®</sup>と、正常位置関係時の QR コード<sup>®</sup>の切り出しシンボルの位置関係を比較することによって Final Approach を行うという方法である。

QR コードをマーカに用いることにより、Final Approach 時に同時にテキストデータを送信することができる。たとえば、Target 衛星のステータスや Target 衛星の GPS 情報などを送信することができる。



[Figure 5] 21×21 QR コード<sup>®</sup> (誤り訂正レベル H) 読み込むと 012345

更に、太陽の影の状況であっても視認できるようにす

るため、この QR コード<sup>®</sup>は自発光型である。また、自発光型の QR コード<sup>®</sup>を使用することで、GPS 相対航法における C/T 間通信リンクとしての役割を OWC で果たすことができる。Relative Approaching Phase と Final Approaching Phase の両方に同一システムが利用できるということが本システム最大の優位点である。

## 7. 詳細なシステム構成

### (1) QR コード<sup>®</sup>表示機構

#### ① QR コード<sup>®</sup>の様式

本ミッションでは、QR コード<sup>®</sup>のマトリックス情報から衛星固有番号を送信する。衛星固有番号は 8 桁で表されるため、8 文字×8bit/文字=64bit の表示が必要である。

#### ② 表示方法

表示媒体は Target に設置した LED アレイ (LEDA) を用いる。「(4) LEDA の保護機構」に示す赤外線カット剤の透過率は波長 550[nm]付近が 93%前後と最も高い<sup>[12]</sup>。そのため波長 550[nm]近傍の波長をもつ LED が最も効果的に QR コードを表示できる。そこで、緑色 (波長 565~575[nm]) のチップ式 LED (OptoSupply 社製 OSXX1608C1AYG)<sup>[5]</sup>を用いる。チップ式の LED を [Figure 6](次ページ)のように配置する。

ただし、チップ式 LED は 1.6×0.8×0.6 [mm]であり、一個当たり 30 [mA]/5 [V]である。すべてを点灯した場合の消費電力は、 $P = VI$ より、下式で表される。

$$30 \text{ [mA]} \times 348 \times 5 \text{ [V]} = 52.2 \text{ [W]}$$

現実にはすべてのチップ式 LED が点灯されることなく、全体の 6~7 割程度の点灯であるため、35~40[W] を消費すると考えることができる。

[Table 2] マイコンの仕様<sup>[7]</sup>

Raspberry Pi Zero W	
SoC	BCM2835
Memory	512 MB
GPIO	40-pin GPIO header

この表示データは、MPU による制御で行う。

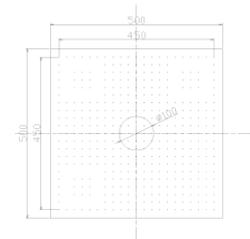
Raspberry PI zero W を用いる。事前に LEDA 上の点灯箇所をソフトウェアに書き込んで置き、その情報を基に

MPU からコマンドを発信しシフトレジスタを介して QR コード<sup>®</sup>を表示する。[Table 2]にマイコンの仕様を示す。

### (2) OWC 発信機構

#### ① OWC 発信情報

OWC は、Relative Approach Phase において、GPS 情報の送信を行う。文献



[Figure 6] LED の配置

調査を行っても GPS 相対航法における必要データの具体的な情報を取得することはできなかったため、本論文では GPS 情報の一種である RMC メッセージを基に計算する。RMC メッセージは英数字 78 文字である。英数字 1 文字は 8bit であることから、RMC メッセージデータを送信する必要があり、624bit となる。

#### ② OWC 発信機構

QR コード<sup>®</sup>表示用の LEDA を利用する。先行研究によると、イメージセンサを使用した赤色 LED (二次元コード切替速度:30[fps]) による OWC で 30 [bps] のデータが送信されるという<sup>[4]</sup>。二次元コード切替速度は受信するカメラのフレームレートに依存する。本ミッションで使用するカメラは 60 [fps] のものである。つまり、シリアル伝送では 60[bps] で送信できることになる。なお、大気下での送受信であれば空気による減衰を考慮する必要があるが、本ミッションは大気圏外での送受信であるため、空気による減衰は無視できる。

#### ③ QR コード<sup>®</sup>による OWC の送受信プロセス

はじめに、LEDA を Target のカメラから 60 [fps] で撮影する。次にこれらの情報を画像処理によって二進法信号に変換する。最後に、この二進法信号を翻訳してコマンドデータに変換する。なお、画像処理の機構については(4)で述べる。

### (3) 光学系

本ミッションに適用可能な産業用の光学機器はやや高価であり、更に宇宙用のイメージセンサとなると非常に高額である。そこで、本ミッションでは民生品の使用を検討する。

① 要求

本ミッションにおいて光学系は、Relative Approach の OWC 用と、Final Approach におけるマーカー認識に使用する。Relative Approach において 500 [m]地点にある LEDA の分解が必要であるため、ズーム機構に優れたものである必要がある。また、Relative Approach における通信速度を向上させるためにはある一定以上のフレームレートを持っている必要がある。加えて、宇宙利用実績がある機器の方が望ましい。

② 光学系仕様

[Table 3] に光学系の仕様を示す。

[Table 3] 光学系仕様<sup>[8]</sup>

Canon PowerShot SX70 HS	
Maximum magnification	80X
Focal length	3.8 (W)-247.0mm (T)
Effective number of pixels	About 20.3 million pixels
Frame Rate (MAX)	FHD: 60fps / 4K: 30fps

この機器の下位旧機種である Canon PowerShot S110 が 2024 年 2 月 17 日に H3 ロケット 2 号機で打ち上げられた CE-SAT-IE に副光学系として搭載され、写真送信に成功している<sup>[9]</sup>。

(4) 画像処理ハードウェア

① 要求

本ミッションでは Target の LEDA で発光している QR コード<sup>®</sup>をカメラで撮影し、この映像を画像処理する。迅速にアクチュエータによる軌道修正を行うため、QR コード<sup>®</sup>の読み取りと OWC 情報の取得をリアルタイムに行う必要がある。

② 画像処理ハードウェア仕様

画像処理ハードウェアの仕様を[Table 4]に示す。

この画像処理を中央処理装置 (CPU) やマイクロプロセッサ・ユニット (MPU) で行おうとしたが、リアルタイムでの処理を行うことは難しかった。そこで、本ミッションでは超小型の画像処理装置 (GPU) を用いることとした。

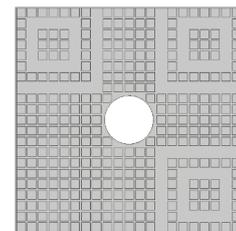
[Table 4] 画像処理ハードウェア<sup>[10]</sup>

NVIDIA Jetson Nano Developer Module	
GPU	128-core NVIDIA Maxwell™ architecture GPU
GPU Max Frequency	921MHz
CPU	Quad-core ARM® Cortex®-A57 MPCore processor
CPU Max Frequency	1.43GHz
Cash Memory	4 GB 64 bits LPDDR4 1600MHz - 25.6 GB/s
Video Encode	4Kp30   4x 1080p30   9x 720p30 (H.264/H.265)
Size	69.6 mm X 45 mm

(5) LEDA の保護機構

① 意義

LED は耐熱性に劣る材料である。また、細かな点の状態よりも四角形に近い方が QR コード<sup>®</sup>の認識を行いやすい。



[Figure 7] LEDA カバーの背面図 (3D モデル) 472.5 [mm]×472.5 [mm]×5 [mm]

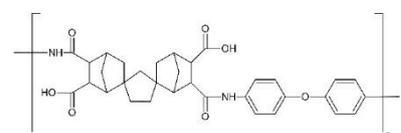
そこで、耐熱性と視認性のために、LEDA に [Figure 7]のようなカバーを装着する。

② 要求

高い耐熱性が最も重視される。宇宙空間は空気のない環境であるため、赤外光の遮断が最も有用である。また、本ミッションは宇宙空間でのミッションであるため、対候性が求められる。また、ドットがあまりにも細かいと QR コードの認識が難しいため、光を拡散させる必要がある。四角形に光を拡散させることが最も望ましい。

③ 使用する材料

LEDA と対面する面に赤外線カット剤を塗布 (LEDA の保護)



[Figure 8] PAA(CpODA+DDE)<sup>[11]</sup>

し、外壁面に擦りガラス加工(光の拡散)を施した脂環式ポリアミドを用いる。

使用する脂環式ポリアミドは、ENEONが開発した脂環式酸無水物「スピロノルボルナンテトラカルボン酸二無水酸(CpODA)」と芳香族ジアミンの組み合わせから合成されるポリアミドとする。以下に、先行研究による具体例を示す<sup>[11]</sup>。

また、赤外線カット剤は、富士フィルム OIR-010を用いる。以下に、赤外線カット剤の仕様を示す。

[Table 5] 赤外線カット剤<sup>[12]</sup>

Fujifilm OIR-010	
$\lambda_{max}$	984 [nm], 1094 [nm]
Form	Powder

#### ④ 脂環式ポリアミドの優位性

対候性の観点から、ポリアミドを用いることとする。汎用ポリアミドの最大の欠点は透過性である。PMDA/ODAをはじめとする汎用ポリアミドは、紫外領域に吸収端を持つ。しかし、近年の研究により、透過性の高いポリアミドが開発されてきている。

脂環式酸無水物と芳香族ジアミンの組み合わせから合成されるポリアミドは紫外～可視領域に高い光透過性を持つ<sup>[13]</sup>。ENEOS ENEHYDE™ CpODA は全光線透過率が90%前後であり<sup>[14]</sup>、極めて高い光透過性を持つ脂環式酸無水物である。以下に構造式を示す。

## 8. 検証実験

### (1) 概要

本実験は、LEDA による、QR コードの読み取りの可否及びOWCの実施可否の検証を目的に行った。そのため、実験の意図性を損なわない部分に関しては、予算や技術的な観点から変更を加えたとした。

しかし、実験装置製作中問題が発生した。本来、LEDの光の方向や拡散を制御させる目的のLEDケースの3DプリンタFDM方式の制御(生成)が上手



[Figure 9] 制作中の LED カバーなし基板

くいかないことである。LED ケースは必要不可欠なものであるが諦め、基板に LED を密集させる形ではんだ付けする方法に変更した。

その他の主な変更点は以下の通りである。

#### ① LED の種類の変更

制作費用の観点から、チップ LED から電球型の LED にした。

#### ② LEDA ケース及び LEDA カバーの省略

#### ③ カメラの変更

本論文の中では打ち上げ時に最適なものの選択をしたが、予算の観点から、個人所有のコンパクトデジタルカメラ (Fujifilm FinePix XP140) に変更した。但し、フレームレートは、FHD : 59.94fps、4K : 15fps<sup>[15]</sup>である。

#### ④ Chaser 衛星の構成変更

Chaser 衛星のこのシステムにおける必要な部分はカメラであり、それ以外の部分は無関係である。そのため、三脚にカメラを載せたものを Chaser 衛星の模型として扱う。

#### ⑤ Chaser 衛星のデータ処理法の変更

Chaser 衛星のデータ処理は本来は GPU を利用する予定であったが、本実験では、予算の観点から個人の PC (Intel Core i5-12400, Nvidia GTX1660 SUPER, RAM:32GB) によるデータ処理とした。また、それに伴い、LEDA 撮影データはリアルタイム送信・解析ではなく、動画による解析とした。

### (2) 実験内容

#### ① LEDA による QR コードの読み取り

LEDA で QR コードを表示し、カメラで撮影し、Python で作製したソフト (OpenCV を利用) で解析。

#### ② LEDA による OWC の受信

LEDA の点灯により、OWC データをカメラで撮影 (受信) し、Python で作製したソフト (OpenCV を利用) で解析。

## 9. 今後の展望

本アイデアは、通学途中の電車で貼ってある QR コード®から始まった。JR 常磐緩行線の車両は小田急線

に直通する列車であり、小田急線内のホームドアは、ホームに設置されたカメラが QR コード®を読み込むことによりドアの開閉を行うというものである。仕組みなどを調べたところ、カメラが QR コード®に記載された列車の情報を読み込むことによって開けるドアの場所も制御するという仕組みだとわかった<sup>[16]</sup>。これを人工衛星の RVD に転用できたら面白いと思い提案に至った。

本論文製作の上で最も残念であったことは具体的な実証の結果を示せなかったことである。「茨城大学工学系同窓会多賀工業会 2024 年度 学生活動支援助成金」を獲得できたが、実験装置の製作が上手くいかず、本論文には実験が間に合わなかった。最終審査会には LED カバー無し又は LED カバー付き実証結果を持って挑む予定である。

## 9. 謝辞

コンテストへの出展にあたり、茨城大学宇宙工学研究会の設立に協力してくれた仲間たち、研究活動を外から援護して下さいました本学工学部、学務部学生支援課の職員の皆さまと、我々のプロジェクトに賛同して協力してくれた宇宙工学研究会の工学部・理学部の後輩学生らには感謝してもしきれない。また、先で挙げた「茨城大学工学系同窓会多賀工業会 2024 年度 学生活動支援助成金」は研究活動に大きな力を与えてくれた。

最後に、本会顧問を快く引き受けて下さり、本論文に多くのアドバイスを下さった、茨城大学理工学研究科物質科学工学領域 永野隆敏先生に心からの感謝を申し上げます。

### ・参考文献

- [1] “燃料補給、機器交換～人工衛星の世界が劇的に変わる「軌道上サービス」～”, JAXA 新事業促進部, 2022-05-20, [https://aerospacebiz.jaxa.jp/topics/news/20220520\\_in\\_orbit\\_servicing/](https://aerospacebiz.jaxa.jp/topics/news/20220520_in_orbit_servicing/) (参照 2024-07-07)
- [2] 杵野正明(2011), ランデブドッキング用光学航法のシステムデザインに関する研究, 慶応義塾大学博士論文(未公開)
- [3] 河野功・杵野正明・鈴木孝・五日市敦・前田裕昭・内田千秋(2001), ETS-VII 自動ランデブ用 GPS, 相対航法システムの設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.4, pp.281-289
- [4] 田中 仁・萬代 雅希・渡辺 尚(2010), 二次元コードを用いた

可視光通信の基礎考察と実験について, 第8回情報学ワークショップ, pp.165-170

- [5] “OSXX1608C1A”, 秋月電子通商, [https://akizukidenshi.com/goodsaffix/OSXX1608C1A\\_ver\\_a\\_10.pdf](https://akizukidenshi.com/goodsaffix/OSXX1608C1A_ver_a_10.pdf) (参照 2024-07-07)
- [6] “地球観測データが届けられるしくみ”, JAXA サテナビ, <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/satellite-knowledge/whats-eosatellite/transmission/index.html> (参照 2024-07-07)
- [7] “Raspberry Pi hardware”, Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html> (参照 2024-07-07)
- [8] “仕様 PowerShot SX70HS”, CANON, <https://personal.canon.jp/product/compact-digital-camera/powershot/sx70hs/spec> (参照 2024-07-07)
- [9] “超小型人工衛星 CE-SAT-IE 軌道投入および交信に成功しました”, CANON Electronics Inc., 2024-02-19, <https://www.canon-elec.co.jp/news/post-6546/> (参照 2024-07-07)
- [10] “Jetson Nano Developer Kit and Module”, NVIDIA, <https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/product-development/> (参照 2024-07-07)
- [11] 京谷悠里・佐藤久美子・菊池康昭・松本俊彦(2020), ポリイミド・芳香族高分子 最近の進歩 2020, pp.146-149
- [12] “赤外線カット剤カタログ”, フジフィルム, [https://asset.fujifilm.com/master/jp/files/2023-05/0e7db5594e085a61bb9f02e3b8cc266c/infrared-absorber\\_catalog.pdf](https://asset.fujifilm.com/master/jp/files/2023-05/0e7db5594e085a61bb9f02e3b8cc266c/infrared-absorber_catalog.pdf) (参照 2024-07-07)
- [13] 日本ポリイミド・芳香族系高分子研究会 編, 最新ポリイミド : 基礎と応用 改訂, エヌ・ティー・エス(2010)
- [14] 小松信一・小池剛・椎橋彬(2019), 脂環式酸二無水物「ENEOS ENEHYDE™(エネハイド) CpODA」の開発, JXTG Tech Review, Vol.61, No3, pp26-30
- [15] FinePix XP140 | カメラ | FUJIFILM X-Series & GFX -Japan, フジフィルム, <https://fujifilm-x.com/ja-jp/products/cameras/xp140/> (参照 2024-11-13)
- [16] “地下鉄初！デンソーウェーブと東京都交通局が開発した新型 QR コードを用いたホームドア開閉制御システムが運用開始”, デンソーウェーブ, 2019-10-03, [https://www.denso-wave.com/ja/adcd/info/detail\\_\\_191003\\_01.html](https://www.denso-wave.com/ja/adcd/info/detail__191003_01.html) (参照 2024-07-07)
- [17] 茂原 正道・鳥山 芳夫 著, 衛星設計入門, 培風館(2002)