

探査ローバ搭載を目的とした小型低消費電力なレーザ距離画像センサの開発

石上 玄也（慶應大） 水野 貴秀（JAXA）

＜概要＞本研究では、ローバ搭載を目指した小型低消費電力のレーザ距離画像センサ（Laser Range Imager, LRI）を開発中である。本ポスターでは、LRIのシステム構成、計測原理およびそのキャリブレーション方法を示し、LRIの試作機を用いたフィールド実証試験についても報告する。

研究開発の背景と目的

ローバの自律移動における環境認識

未知環境において、ローバの自律移動を実現するためには、周囲の障害物や地形の凹凸、斜度といった環境の幾何学情報を得ることが重要である→カメラやレーザ距離計による環境認識

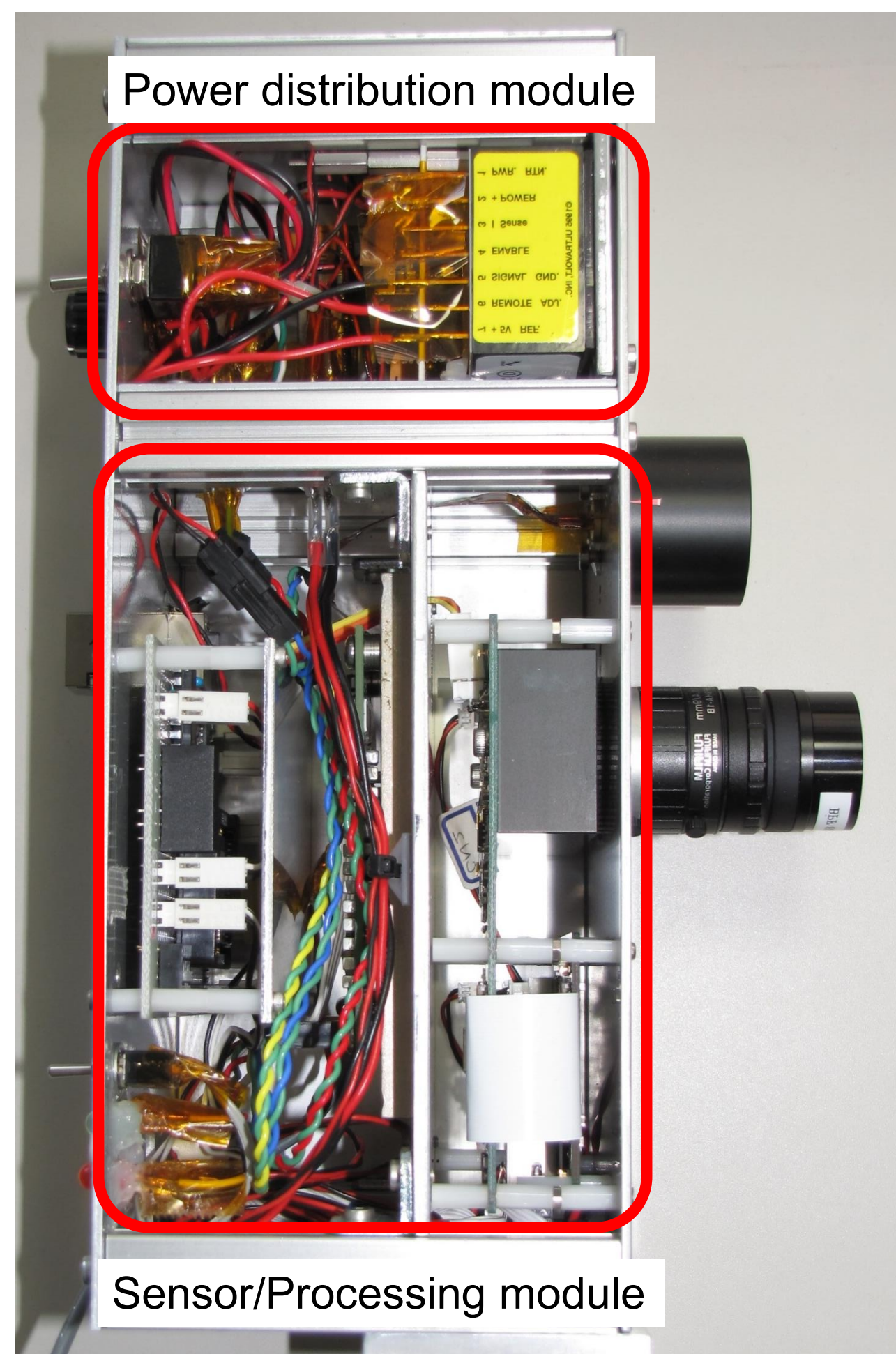
| | カメラ | レーザ距離計 |
|----|---|---|
| 原理 | ● ステレオ視による3次元の幾何学情報の取得 | ● 光の飛行時間に基づく3次元距離計測 |
| 長所 | ■ 色情報・テクスチャの取得が可能である。 ■ 宇宙実績品が多数あり。 | ■ 計算コストが低い。 ■ 光の反射強度を擬似グレースケール画像として使える。 |
| 短所 | ■ ステレオ処理における計算コストが高い。 ■ 外乱光による影響が大きい。 ■ ステレオカメラキャリブレーションが必要である。 | ■ 一般に消費電力が大きい。 (MESA社製SR4500は120W程度) ■ スキャン型はアクチュエータなどの駆動系が必要である。 |

ローバ搭載型の小型・低消費電力のレーザ距離計の開発

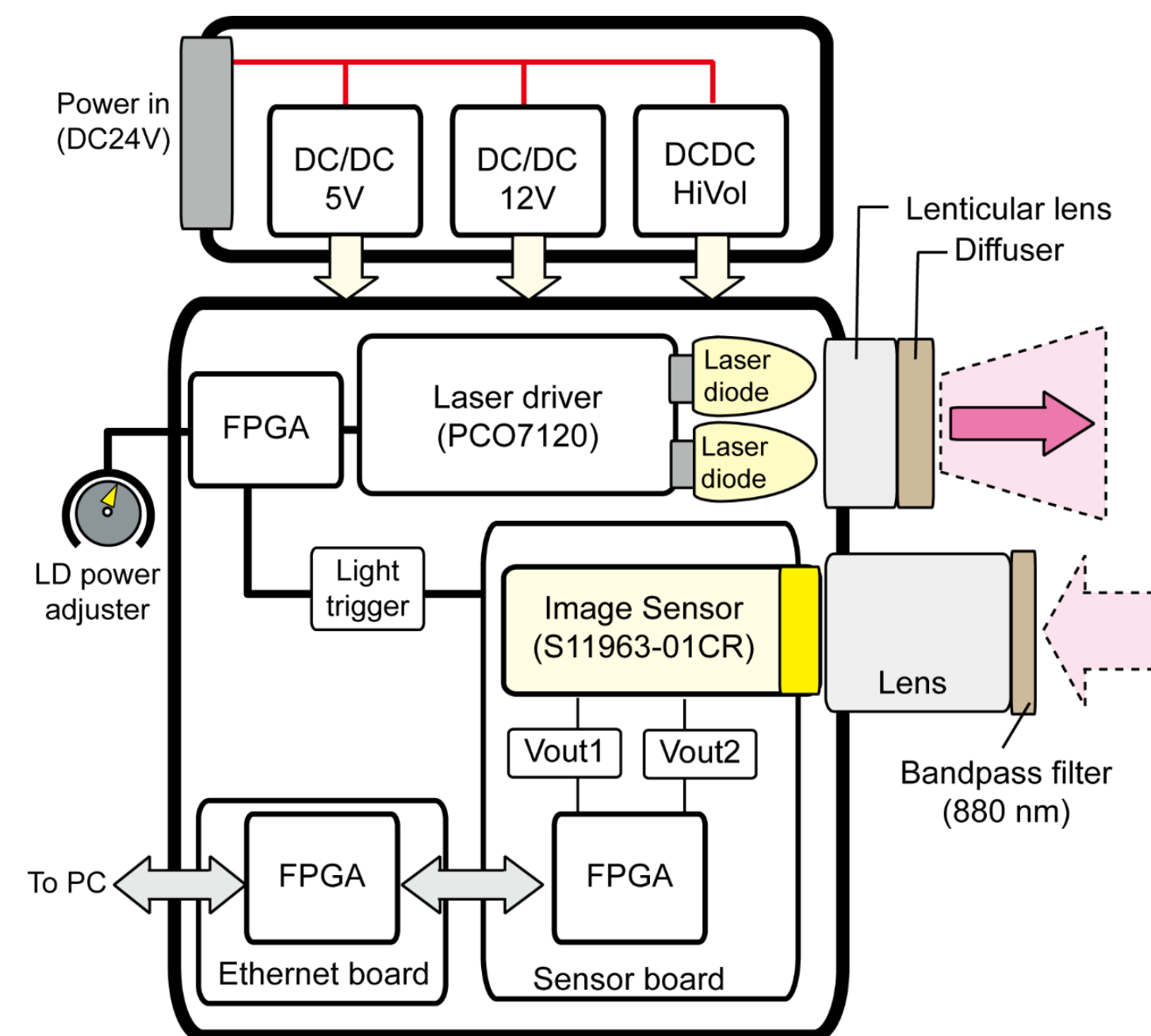
- ✓ レーザパルス方式による低消費電力化
- ✓ 距離画像センサを用いたスキャンレス化

Laser Range Imager

Laser Range Imager (LRI)

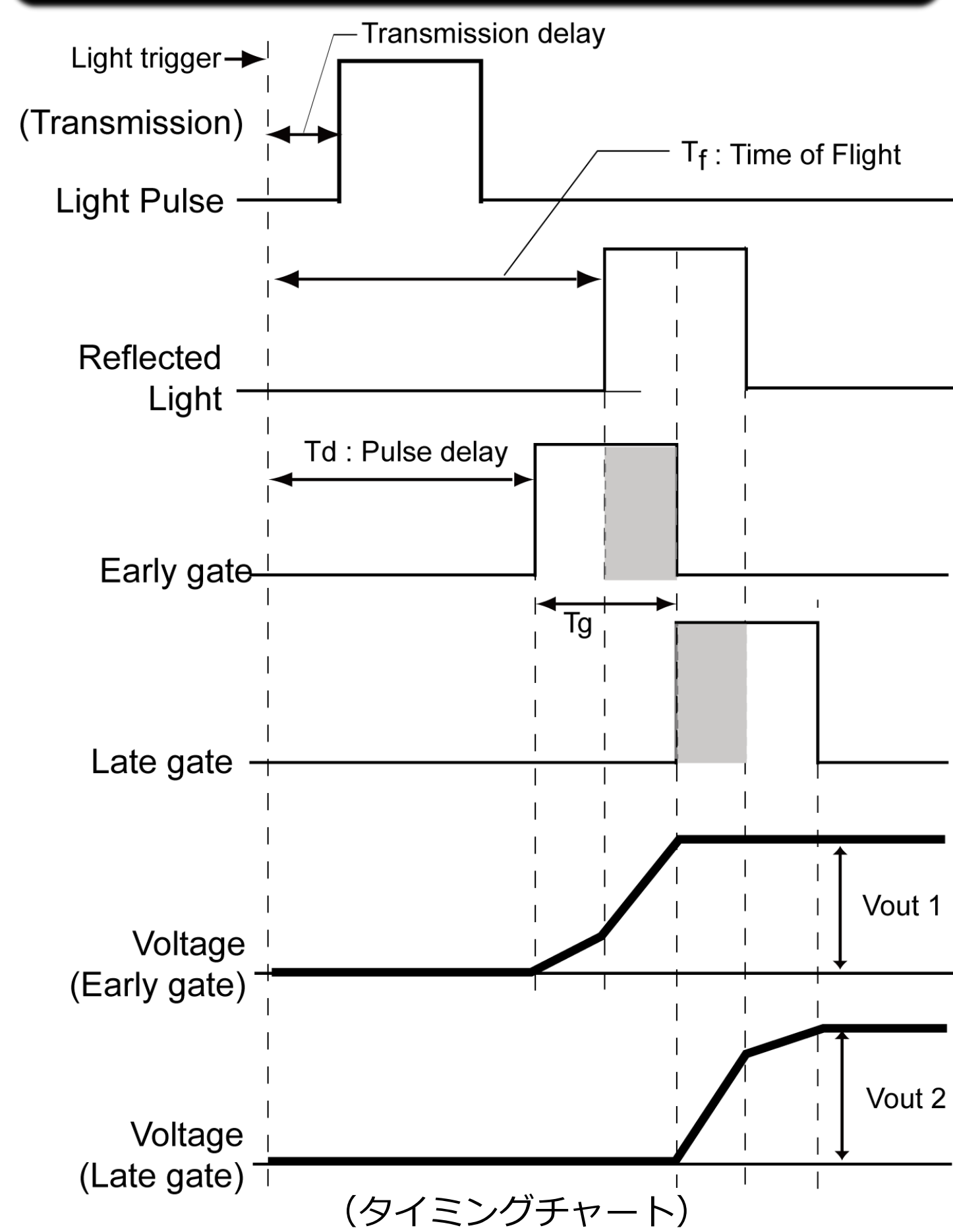


- 重量：1.78 kg (うち0.95kg構造部材)
- 寸法：94 x 100 x 234 mm
- センサ：S11963-01CR (160×120 pixel, 浜松ホトニクス社製)
- 測定可能距離：～9.0 m



| | | FY2013 (Ver. 1.0) | FY2014 (Ver. 1.1) |
|-------------|---------|------------------------|------------------------|
| 送信系 | パルスレーザ | LD L11348-330-04J x 1台 | LD L11348-330-04J x 2台 |
| | パワー | 90 W MAX | 90 W MAX |
| 受信系 | 波長 | 880 nm | 880 nm |
| | パルス幅 | 30 ns | 30 ns |
| 受信系 | 繰り返し | < 150 kHz | < 150 kHz |
| | レンズ | HF9 HA- 1B (フジノン) | DF6HA-1B (フジノン) |
| 受信系 | 焦点距離 | 9 mm | 6 mm |
| | フィルタ | λc=880 nm, Δ=12 nm | λc=880 nm, Δ=50 nm |
| 受信系 | FOV | 30 × 22 deg | 43 × 32 deg |
| | フレームレート | TBD (対象の反射率に依存) | TBD (対象の反射率に依存) |
| 消費電力 (Max.) | | 5.5 W | 7.2 W |

LRIの距離計測原理



モノパルスレーダの測距原理に基づき、各ピクセルが有するEarly-gate, Late gateと呼ばれる2つのゲートに捉えられる電荷量の比から、距離を計測することが可能である。

センサ出力電圧

| Gate | Reflected light | Readout voltage |
|------------|-----------------|-----------------|
| Early gate | First half | Vout1 |
| Late gate | Last half | Vout2 |

$$V_1 = V_{out1} - V_{dark1}$$

反射光による正味の電圧値 バックグラウンドノイズ (背景光)

レンジエラー感度

$$E = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$$

- 近距離の場合： $V_1 > V_2 \rightarrow E > 0$
- 長距離の場合： $V_1 < V_2 \rightarrow E < 0$

距離推定式

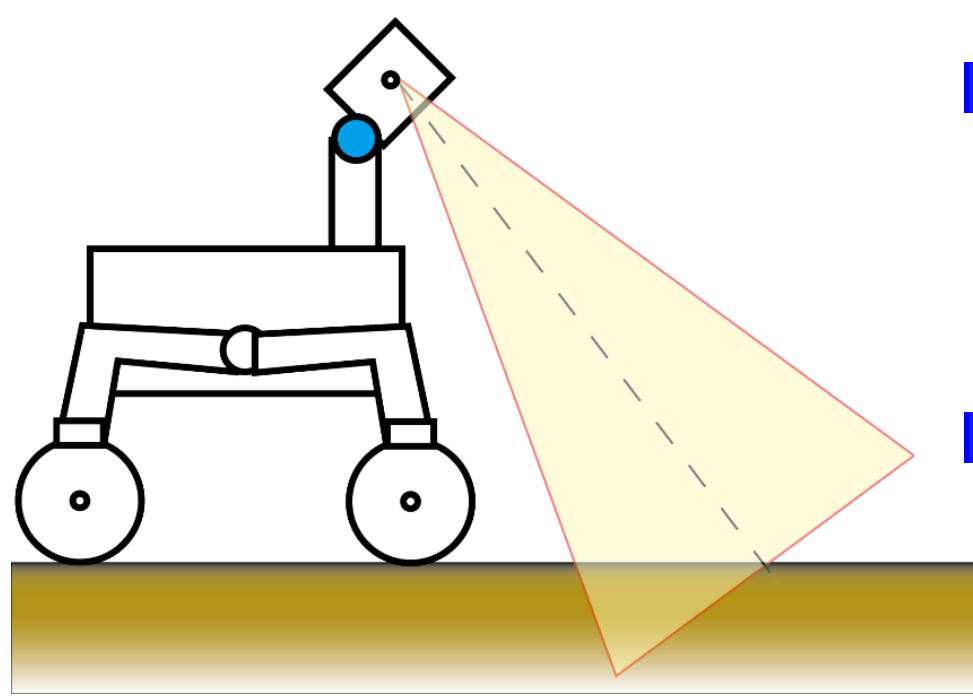
$$T_f(x, y) = T_d - [a(x, y, S) \cdot E(x, y) + b(x, y, S)]$$

- レンジエラー感度とTOFは線形の関係がある。
S: 信号レベル (反射強度 $V_1 + V_2$)
a: 線形性, b: 時間オフセット
- 係数a, bは事前のキャリブレーションによって同定する。

$$D(x, y) = 0.5C \times T_f(x, y) + D_o(x, y)$$

D_o : オフセット距離
C: 光速

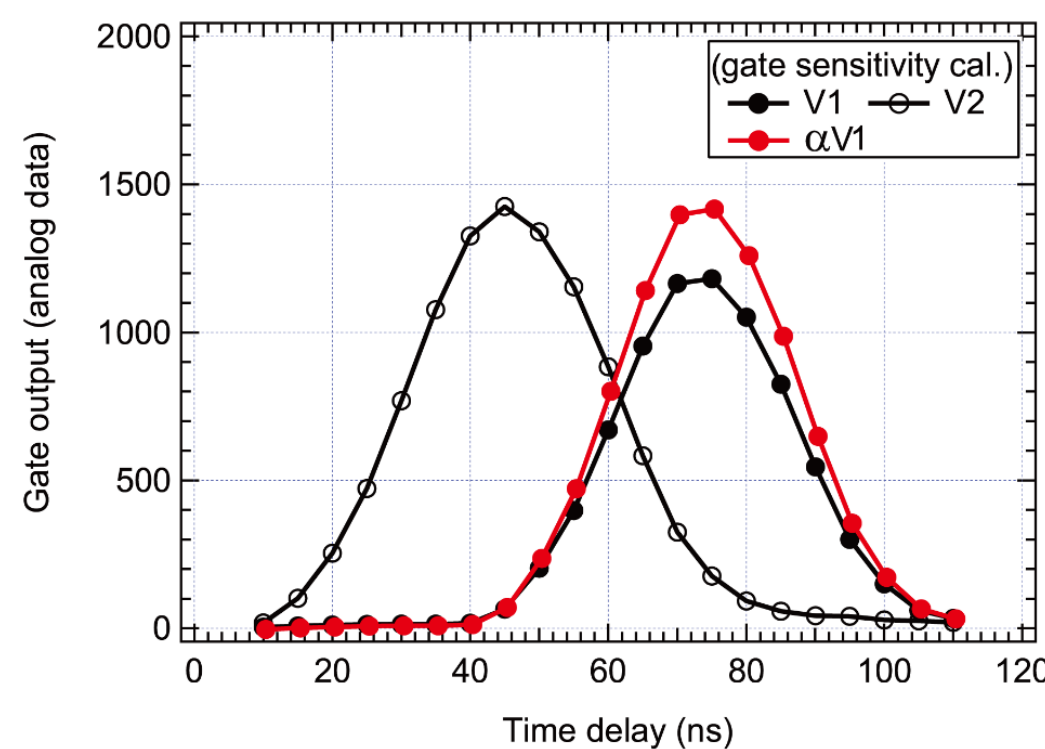
ローバ搭載時のパラメータ設定指針



- パルス遅延時間 T_d は、目標計測距離の基準値 (ローバマスト高と視線角度) から決定できる。
- ゲート開放時間 T_g は距離基準値からの相対的な計測可能距離を決定する。
($T_g = 20$ nsの場合, ± 1.5 mとなる)

距離校正試験

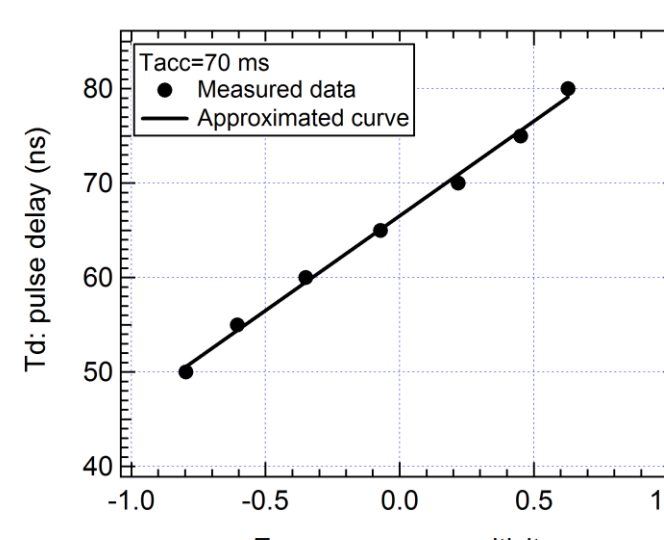
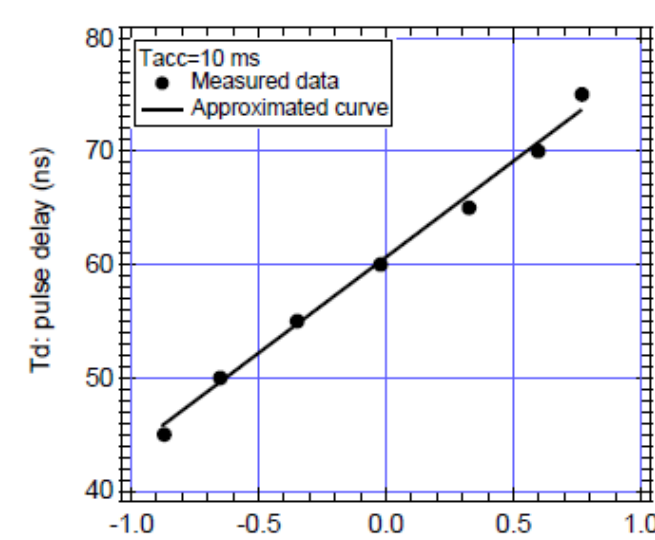
- Early/Late-gateの感度差補正



- 距離推定の諸係数の実験的同定
→ 距離誤差は +/- 5 cm程度

(LRI Ver1.0)

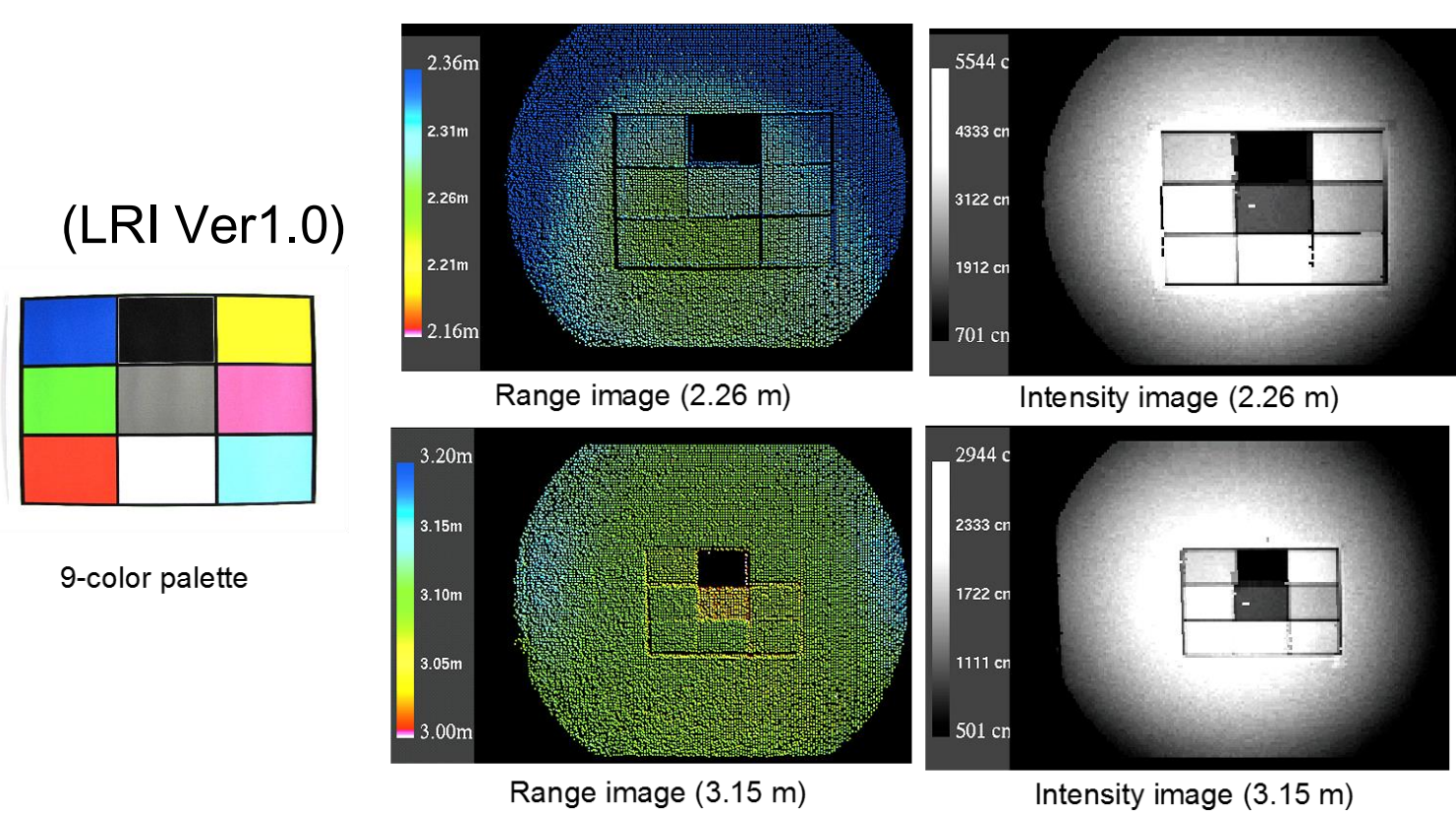
(LRI Ver1.1)



線形近似: $R^2 = 99.8\%$

LRIによる距離測定試験

- 9色のカラーパレットを対象とした屋内環境での測距試験
→ 最大誤差は 5 cm であった



| Target (m) | T_d (ns) | D_{ave} (m) | Error (m) | D_{std} (m) |
|------------|------------|---------------|-----------|---------------|
| 1.00 | 60 | 1.02 | 0.02 | 0.02 |
| | 70 | 1.01 | 0.01 | 0.01 |
| 2.26 | 60 | 2.30 | 0.04 | 0.05 |
| | 70 | 2.33 | 0.07 | 0.05 |
| 3.15 | 65 | 3.07 | -0.08 | 0.03 |
| | 70 | 3.10 | -0.05 | 0.02 |
| 75 | 70 | 3.08 | -0.07 | 0.03 |
| | 75 | 3.08 | -0.07 | 0.03 |

フィールド試験

- 伊豆大島裏砂漠、西湖コウモリ穴 (溶岩洞窟) において、LRIの計测试験を実施した。多孔質玄武岩 (スコリア, 反射率 5%程度) に対しても、距離計測が可能であることを実証している。

