### HIGH-FIDELITY TRAINING AND VALIDATION OF MINIATURE DISTRIBUTED SPACE SYSTEMS

Tae Ha "Jeff" Park, Sumant Sharma, Prof. Simone D'Amico Stanford's Space Rendezvous Laboratory (SLAB) slab.stanford.edu









- Space Rendezvous Laboratory
- Hardware-In-The-Loop (HIL) Validation
- HIL Testbeds: Vision-Based Sensors (VBS)
- Spacecraft Pose Estimation Dataset (SPEED)
- Towards SPEED 2.0



## Overview





Develop, validate, and embed the necessary cutting-edge technologies into swarms of micro- and nano-satellites to be launched in space in the next five years







Small (local)

Develop, validate, and embed the necessary cutting-edge technologies into swarms of micro- and nano-satellites to be launched in space in the next five years



Moderate Large (global)

### **Inter-satellite Distance**





Develop, validate, and embed the necessary cutting-edge technologies into swarms of micro- and nano-satellites to be launched in space in the next five years





## **Space Rendezvous Laboratory**

### Enabling miniature distributed space systems for unrivaled space science and exploration





Lessons Learned and Challenges

### Space Flight Missions



Embedding and Integration into Spacecraft

Prototype Algorithms High-Fidelity Validation and Training





# Hardware-In-The-Loop (HIL) Validation









Blue Canyon Technologies Nano Star Tracker

Using two different sources of sensor stimulation, we can address the domain gap between synthetic and real environments



## **HIL Testbeds: Vision-Based Sensors** (VBS)

### **Robotic Testbed**



GomSpace NanoCam C1U







### Software

- OpenGL-based real-time rendering of non-stellar objects and dynamic star field
- High-fidelity replication of radiometric and geometric properties of space environment

### Accuracy

- Arcsecond-level angular precision of point sources of light
- 8 orders of magnitude of radiometric intensity

### **Applications**

- Far-range angles-only navigation
- Close-range pose estimation
- Asteroid stereoscopic imaging









## Robotic Testbed:

### <u>Hardware</u>

- <u>Two 6DOF KUKA robot arms</u> in a 8 x 3 x 3m room
- Arm 1 mounted on a 7m ceiling-mounted rail drive
- Arm 2 installed on ground, carries payload up to 10kg
- <u>10 LED wall panels</u> simulate **albedo** in Earth orbit
- <u>Vicon optical tracking system</u> provides independent estimate of mockup and camera trajectories

### **Accuracy**

- Sub-mm, sub-deg accuracy telemetry
- For Vicon, calibration is needed to resolve bias in userdefined and true reference frames

### **Applications**

- Close-range pose estimation
- Relative navigation and docking simulations
- Asteroid orbit simulations









## **Pose Estimation**



Utilizing a 3D model of an uncooperative target spacecraft in conjunction with a single monocular image from a servicer spacecraft to determine the pose of the target relative to the servicer.











pace

rendezvou

Accurate relative pose information can benefit various missions involving on-orbit servicing and space situational awareness.

## Motivation





Small Body Exploration

**Inter-satellite Distance** 







![](_page_15_Picture_2.jpeg)

![](_page_15_Picture_4.jpeg)

# **SPEED: Synthetic Image Generation**

- As compared to [1], the SPEED image generation pipeline has:
  - Improved 3D texture model of the target
  - Calibrated camera model and distortion parameters
  - $q(R_{BC})$  and  $t_{BC}$
  - Actual Earth imagery and time information from Himawari-8 [2]

![](_page_16_Picture_6.jpeg)

![](_page_16_Picture_7.jpeg)

[1] Beierle, Connor; High Fidelity Validation of Vision-based Sensors and Algorithms for Spaceborne Navigation; Stanford University, PhD Thesis (2019). [2] Bessho, Kotaro, et al. "An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites." Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II 94.2 (2016): 151-183.

![](_page_16_Figure_12.jpeg)

![](_page_16_Figure_13.jpeg)

![](_page_16_Picture_14.jpeg)

Testbed for Rendezvous and Optical Navigation (TRON)

![](_page_17_Picture_2.jpeg)

![](_page_17_Picture_3.jpeg)

## **SPEED: TRON Image Generation**

![](_page_17_Picture_5.jpeg)

### **Background masking**

![](_page_18_Picture_2.jpeg)

Ground-truth pose for SPEED real images are obtained from the calibrated Vicon system

- Produces target & camera poses w.r.t. Vicon base reference frame  $\rightarrow$  Relative pose of target w.r.t. camera
- deg-level and cm-level accuracy pose labels

![](_page_18_Picture_6.jpeg)

## **SPEED: TRON Image Generation**

![](_page_18_Picture_8.jpeg)

![](_page_18_Picture_10.jpeg)

![](_page_18_Picture_11.jpeg)

![](_page_18_Picture_12.jpeg)

## Image Comparison

### PRISMA (Flight Image)

![](_page_19_Figure_2.jpeg)

Beierle (Synthetic Image) [1]

### SPEED (Synthetic Image)

![](_page_19_Picture_5.jpeg)

![](_page_19_Picture_6.jpeg)

[1] Beierle, Connor; High Fidelity Validation of Vision-based Sensors and Algorithms for Spaceborne Navigation; Stanford University, PhD Thesis (2019).

SPEED (Synthetic Image)

10<sup>5</sup> -PRISMA Beierle SPEED 10<sup>4</sup> (-)  $10^3$ 10<sup>2</sup>  $10^2$ 10<sup>1</sup> 10<sup>0</sup> 100 10<sup>2</sup> 10<sup>1</sup> Image Intensity (-)

SPEED (Real Image)

![](_page_19_Picture_11.jpeg)

					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
・まち・・・・・・・・・ (職種・・・・、)			「「「「」」、「「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、		
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
こうれ ・ キュント ショント・・・ 語い 正確 キャー・			そう マネ・シン ほうよう	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · ·	** • • • • • * * • •	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••
・、家をよう、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、		1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
@ e * · · · * £ W × 1 a ≠ · ∳ ★ z · · ·		*** ** ** ** ** ** **	· · · · · · · · · · · · · · · ·	* * * # # # # * *	
		- キャッチャー 一般 - ふく・		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· • * · · • · · · · · · · · · · · · · ·
キ・ダク・・・・ 二 弟を・・ ク・カ も・・ ディ		- 「「「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
			·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
「「「「「」」、「「」」、「「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、			マー・シート・「豊富・		
			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · ·
今日・1、東・・日、日、「東・・・	·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· # # - 4 - • •	* * * *	52 • • • • • •
	· · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		1 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• • • • • •
1、「製菓ややく、し、し、「シー」を、、、「「「「「「」」を、「」、「「「」」を、、、、、、、、、、、、、、、	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· «… ★ ◆ * * * . ? … ? ?			
* ・、、「臣 * ・・、、 * ( * ・・・ * ) * ・・・ * * * /* * /*	10 + 1 + var +	2* · · · * * * * * * * *	$\mathbf{x} \cdot \mathbf{x} \in \mathbf{x} \cdot \mathbf{x} \cdot \mathbf{x}$		· · · · · · ·
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""	・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・		
	•	1	* * • • * * * * * *	· · · · · · · · · · ·	• • • •
		「「「」、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、			

![](_page_20_Picture_1.jpeg)

- More emphasis on domain gap
  - Test with real images of varying level of domain gap from synthetic images
- Improvement of real images and pose labels
  - More diverse poses with second robotic arm
  - Fusing Vicon estimates and TRON telemetry
- Improved illumination condition
  - Sun simulator

![](_page_21_Picture_8.jpeg)

## **Towards SPEED 2.0**

![](_page_21_Picture_10.jpeg)

### HIGH-FIDELITY TRAINING AND VALIDATION OF MINIATURE DISTRIBUTED SPACE SYSTEMS

Tae Ha "Jeff" Park, Sumant Sharma, Prof. Simone D'Amico Stanford's Space Rendezvous Laboratory (SLAB) slab.stanford.edu

![](_page_22_Picture_2.jpeg)

![](_page_22_Picture_3.jpeg)

![](_page_22_Picture_4.jpeg)