

効率よく目的地にたどり着くには？
～生物から学ぶナビゲーション技術～

国立情報学研究所 志垣 俊介

SHIGAKI@NII.AC.JP

1 ナビゲーションとは？

電子的に自動車（やオートバイや自転車など）の走行時に
現在位置や目的地への経路案内（道案内）を行う機能

(Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/>)



カーナビによるナビゲーション



標識によるナビゲーション

画像引用 (Adobe Firefly, <https://firefly.adobe.com/>)

匂いを用いたナビゲーション（匂い源探索）



空間中の匂い情報を頼りにその発生源を特定

匂い源探索能力の応用先

災害時での人命救助， 空港内での危険物・爆発物の搜索

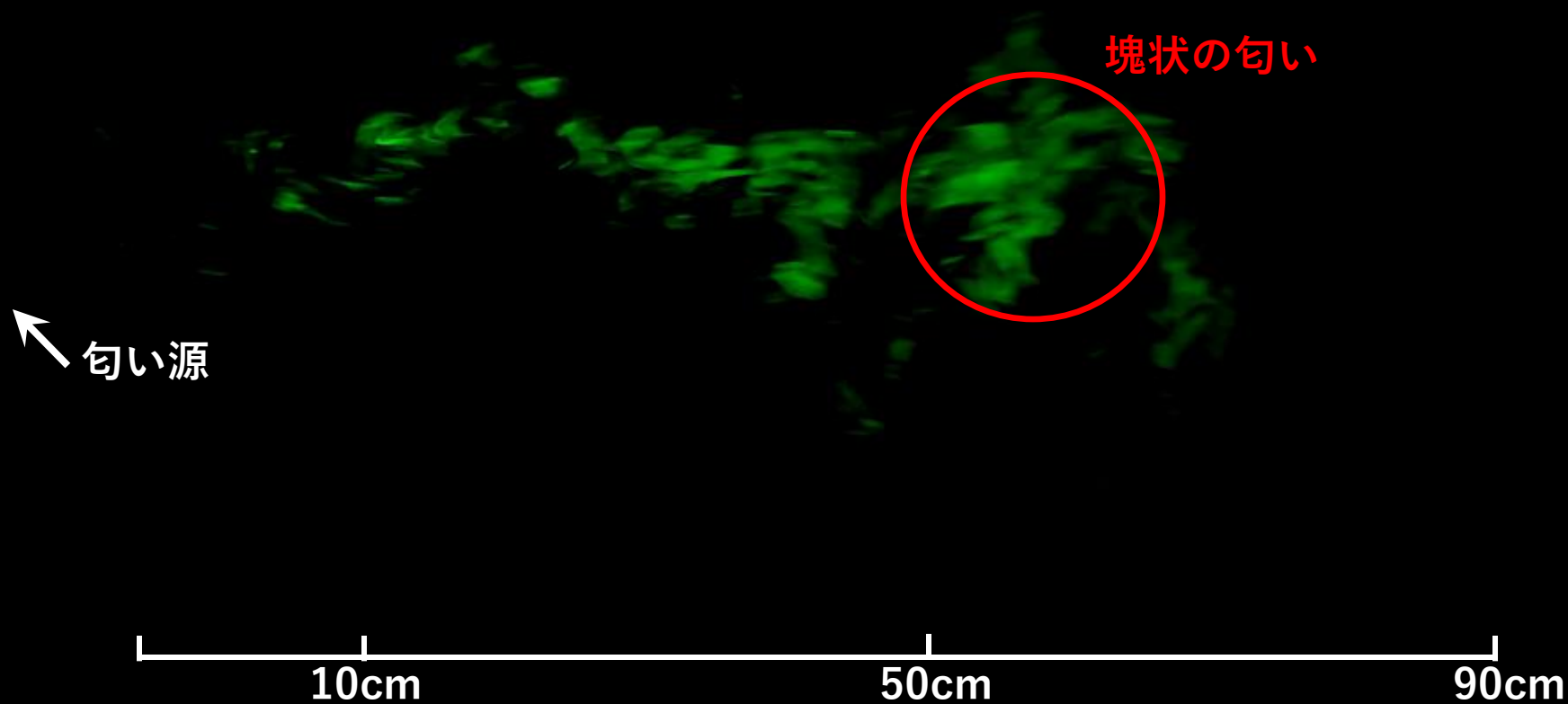


複雑な匂いの拡散

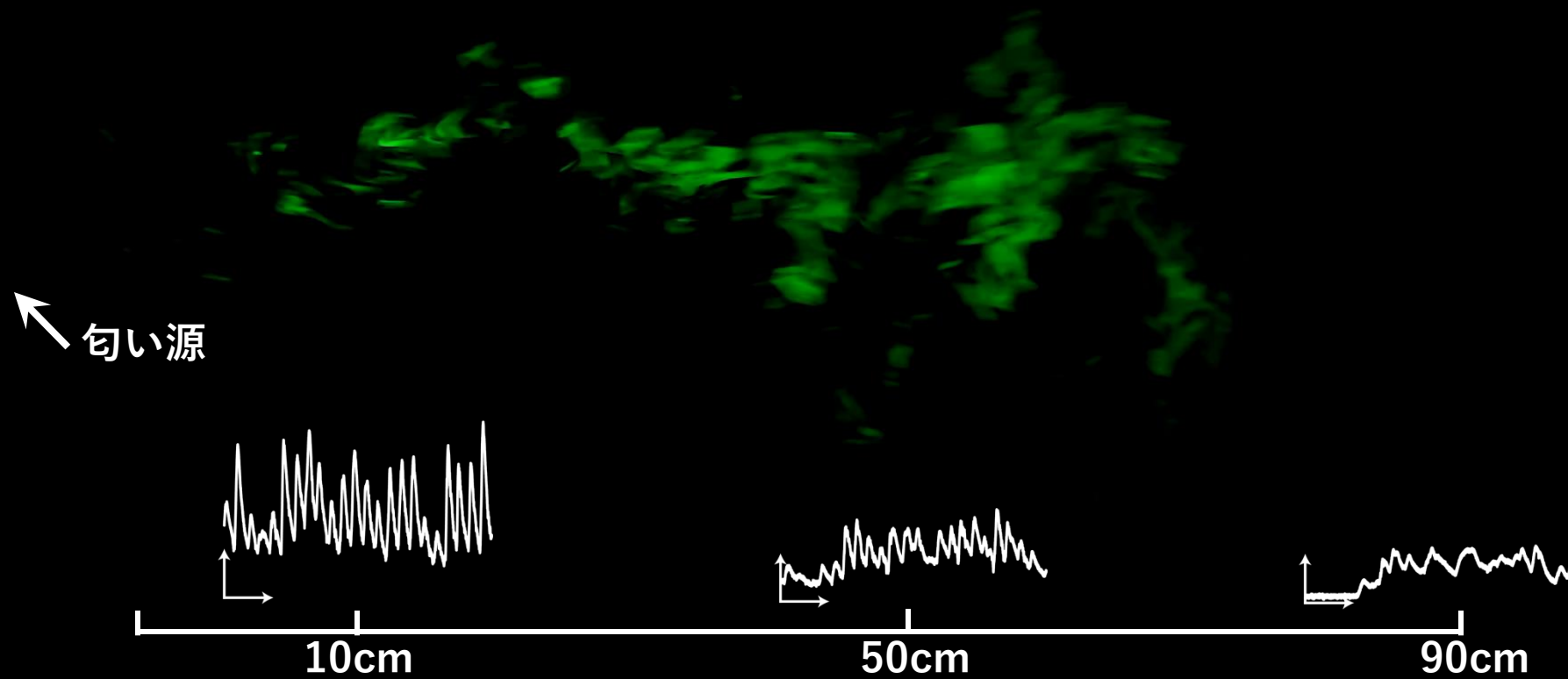
匂い源
↖



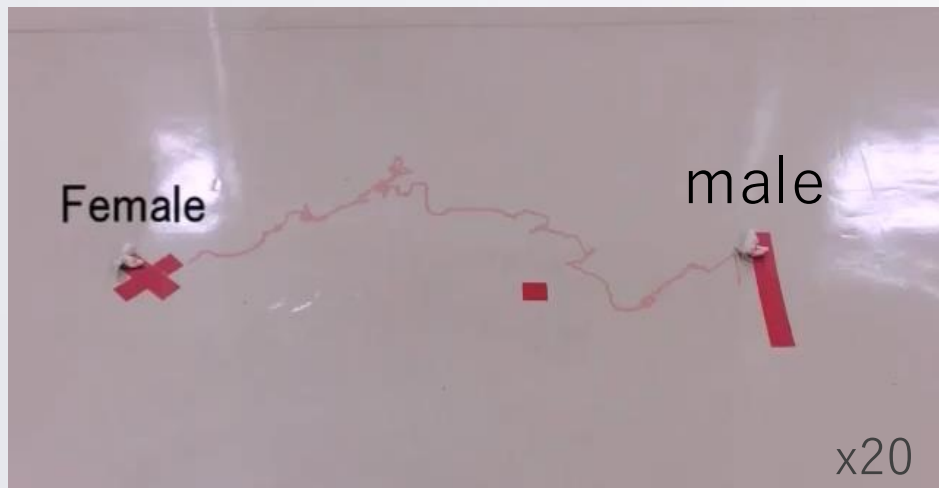
複雑な匂いの拡散



複雑な匂い構造



昆虫の匂い源探索能力



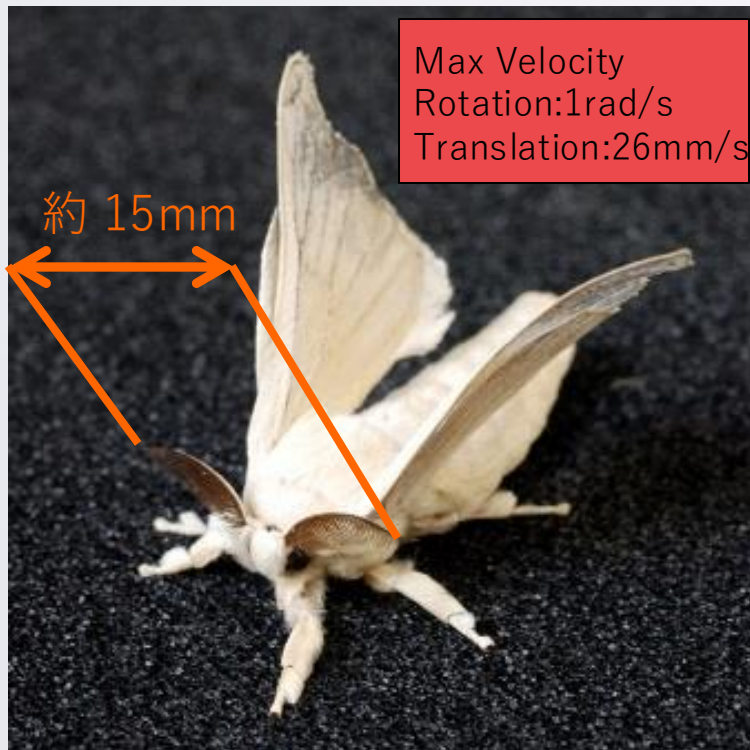
歩行昆虫 (カイコガ)



飛翔昆虫 (スズメガ)

**歩行や飛翔に関わらず高い
匂い源探索能力を保有している**

カイコガ雄成虫



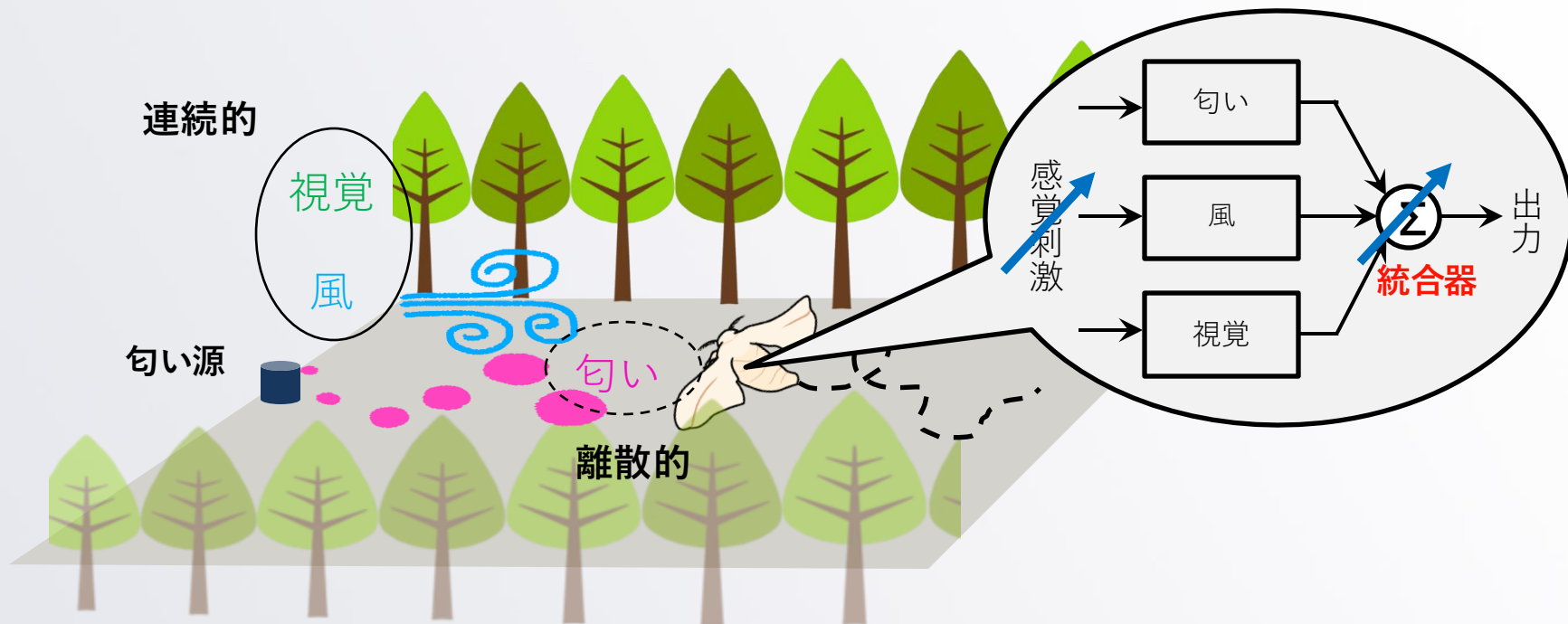
成虫になると、

- ・ 食べず，飲まず，飛ばず
- ・ フェロモンによる雌探索行動を発現



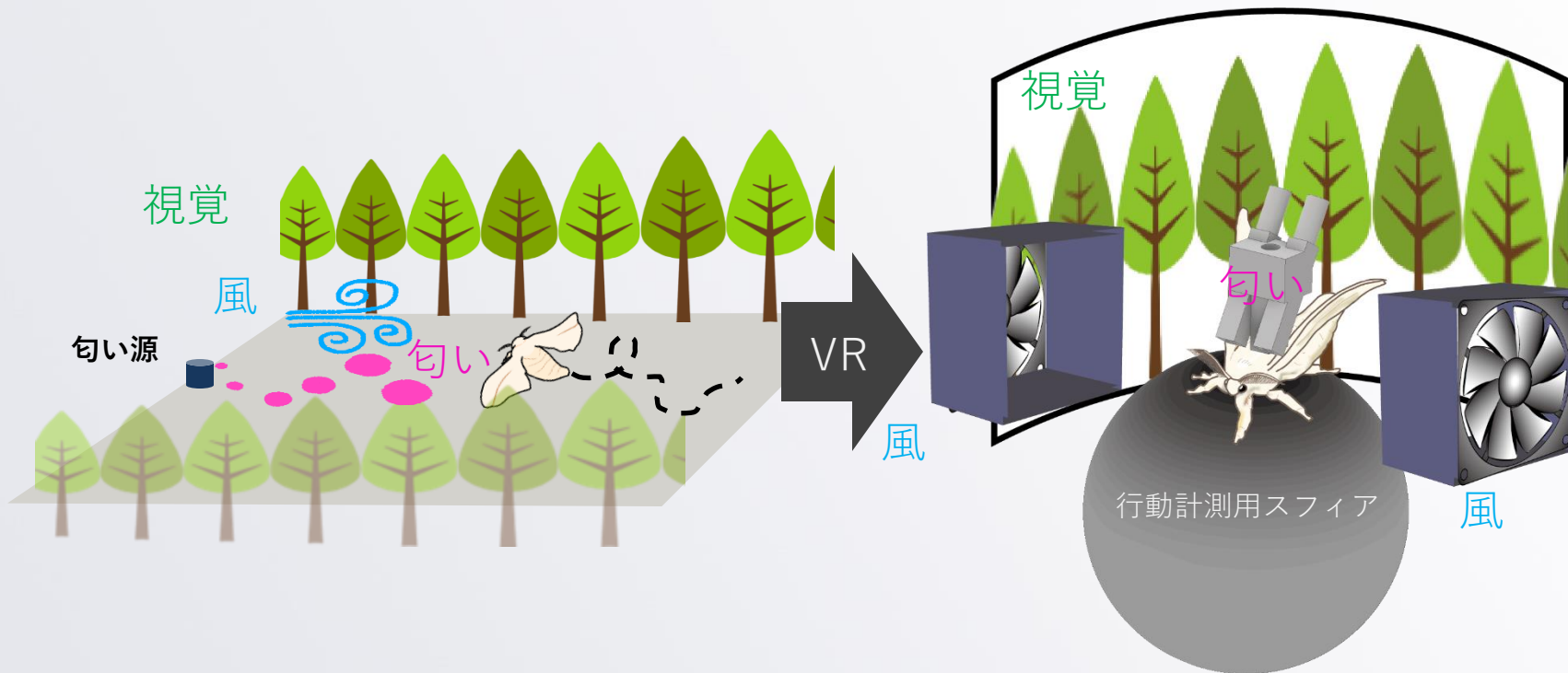
匂い源探索中に得られる環境情報

匂い源に向かうまでに環境から様々な情報を獲得



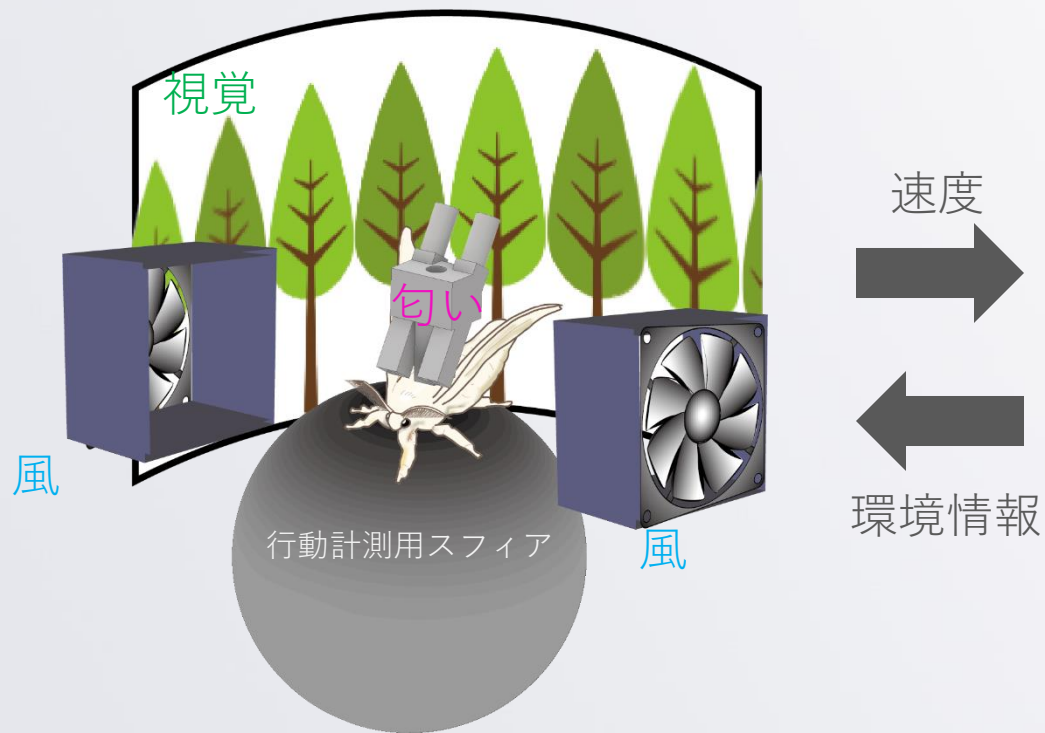
昆虫用仮想現実(VR)システム

感覚刺激に対する行動出力の関係を取得



昆虫用仮想現実(VR)システム

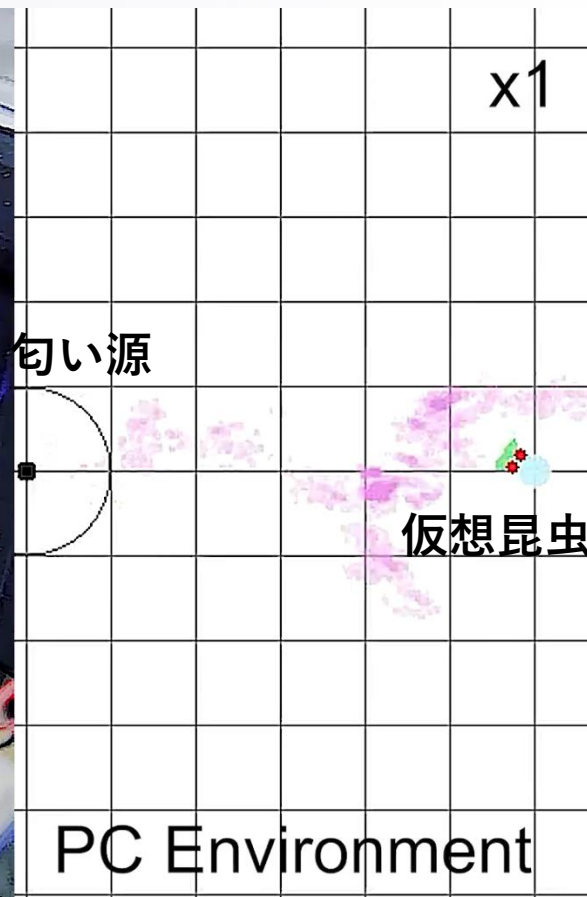
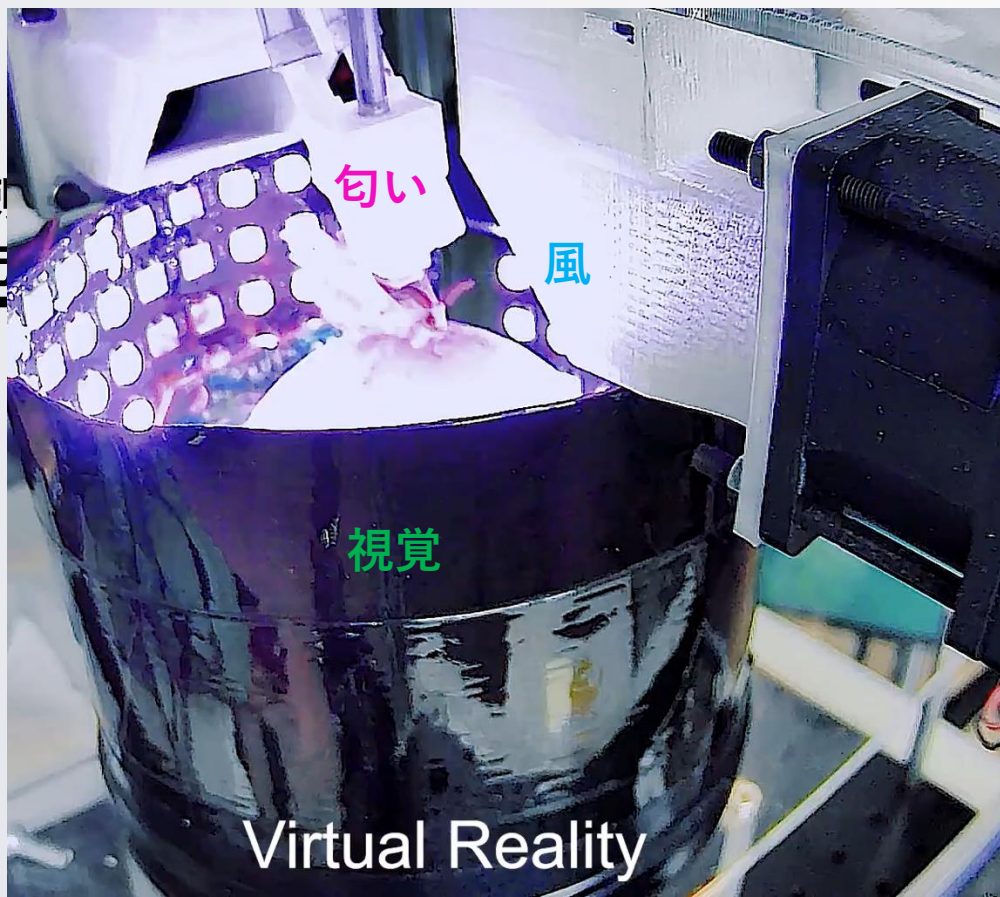
感覚刺激に対する行動出力の関係を取得



昆虫用VRによる行動計測

M. Yamada *et al.*, elife, 2021

感覚刺激
提示方法



昆虫用VRを用いた実験

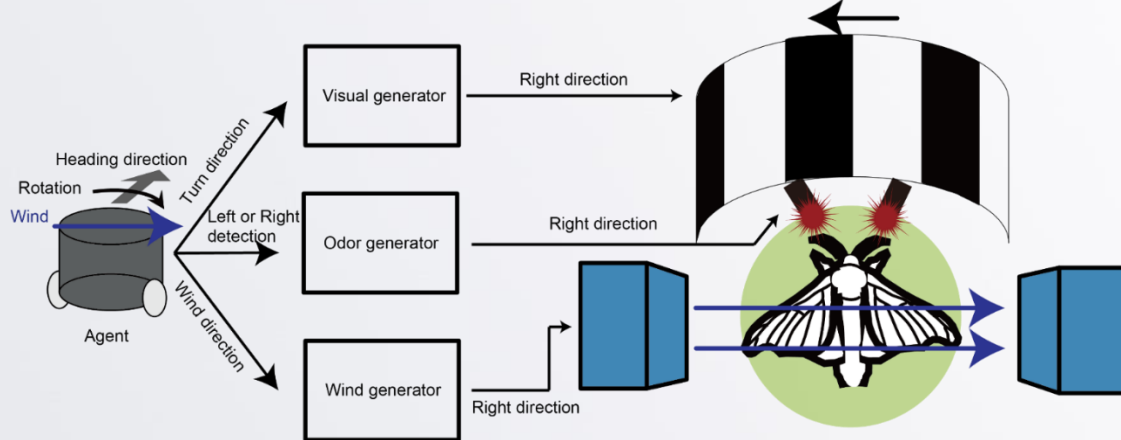
	2種類以下の感覚刺激提示					3種類の感覚刺激提示		
	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. i	Cond. ii	Cond. iii
風	×	○	×	●	×	○	●	○
視覚	×	×	○	×	●	○	○	●

* 匂いは常に提示. ○: 提示, ×: 提示しない, ●: 仮想昆虫の検出方向とは逆方向から提示.

昆虫用VRを用いた実験

	2種類以下の感覚刺激提示					3種類の感覚刺激提示		
	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. i	Cond. ii	Cond. iii
風	×	○	×	●	×	○	●	○
視覚	×	×	○	×	●	○	○	●

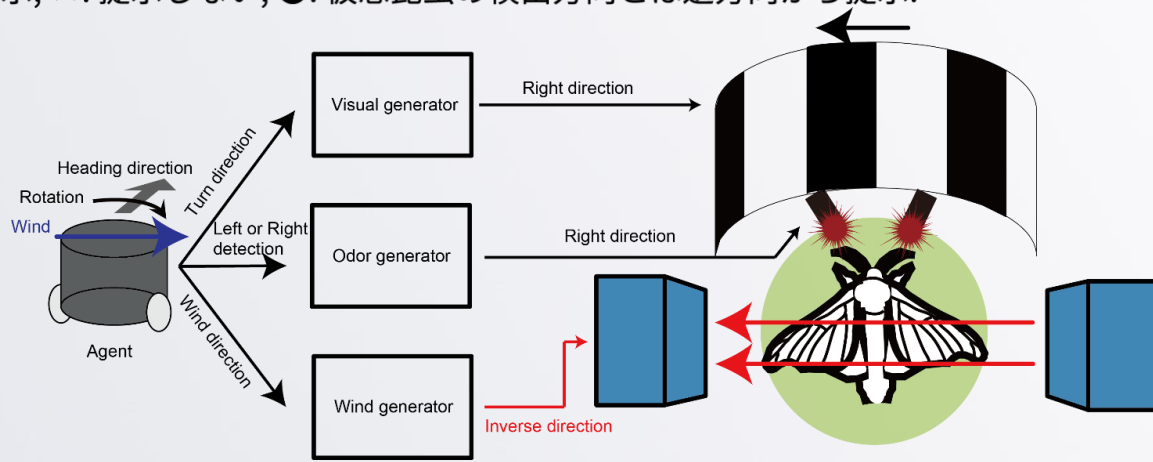
* 匂いは常に提示. ○: 提示, ×: 提示しない, ●: 仮想昆虫の検出方向とは逆方向から提示.



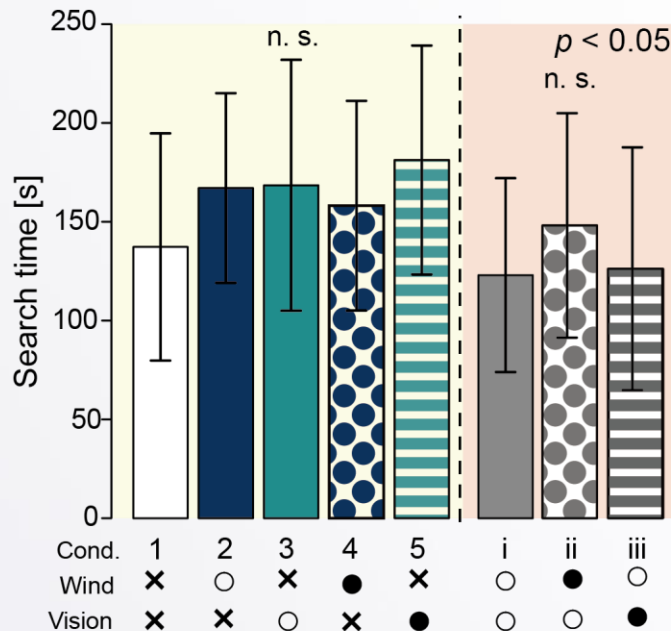
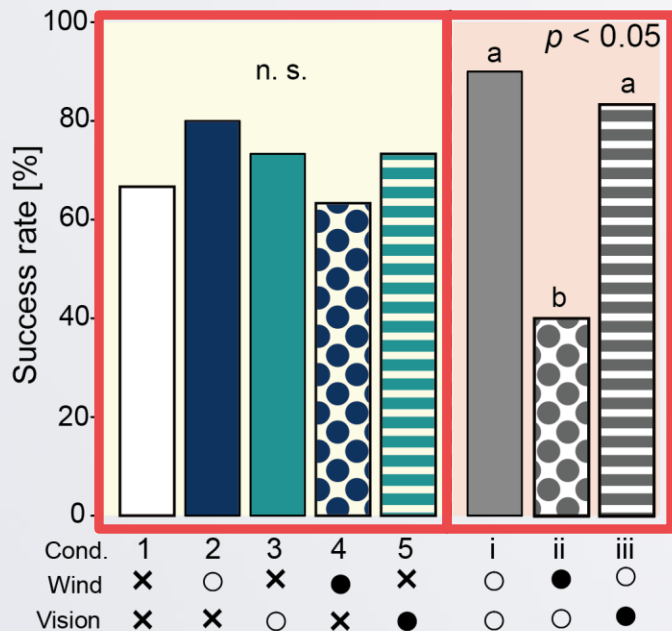
昆虫用VRを用いた実験

	2種類以下の感覚刺激提示					3種類の感覚刺激提示		
	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. i	Cond. ii	Cond. iii
風	×	○	×	●	×	○	●	○
視覚	×	×	○	×	●	○	○	●

* 匂いは常に提示. ○: 提示, ×: 提示しない, ●: 仮想昆虫の検出方向とは逆方向から提示.

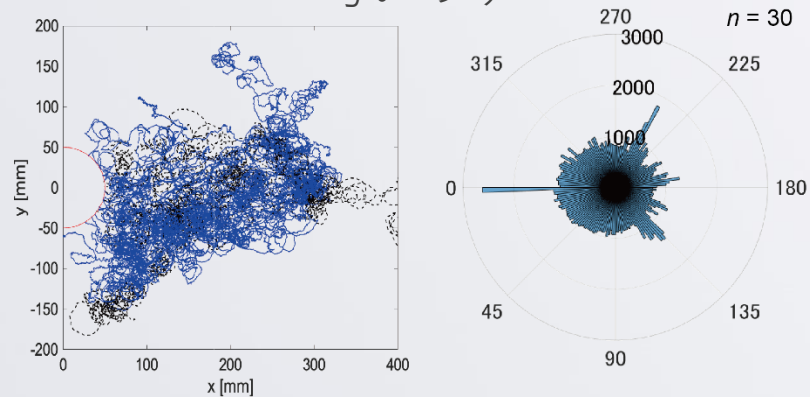
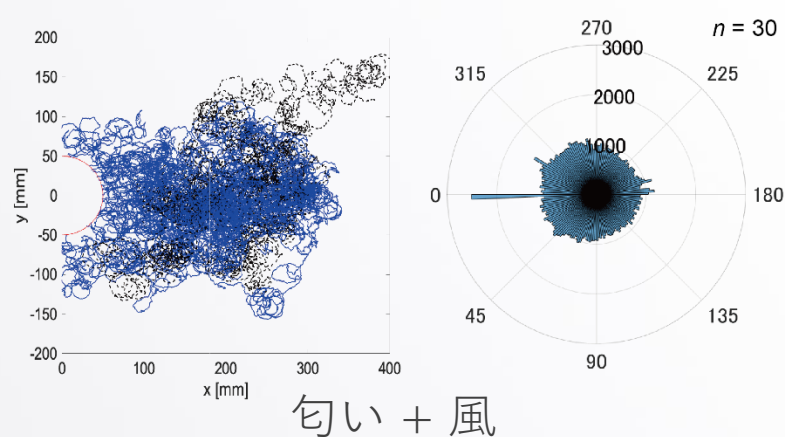
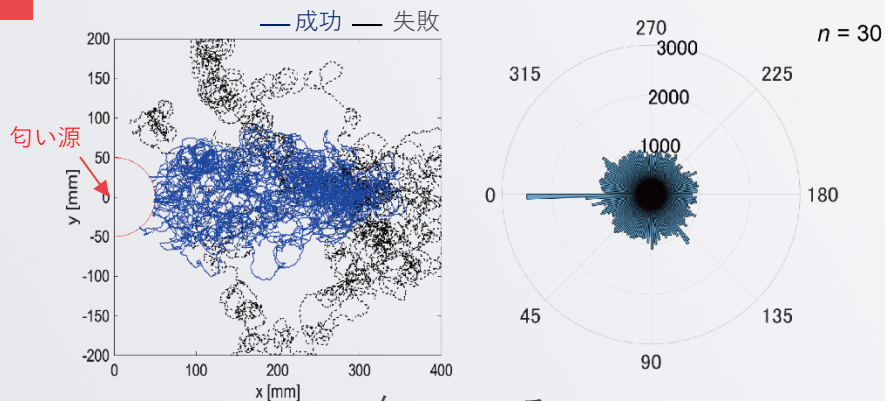


探索性能の比較



- 匂い，風，視覚の全てを使うことが匂い源探索の性能向上に重要
- 匂いに加えて風向きの情報も探索性能に大きく影響

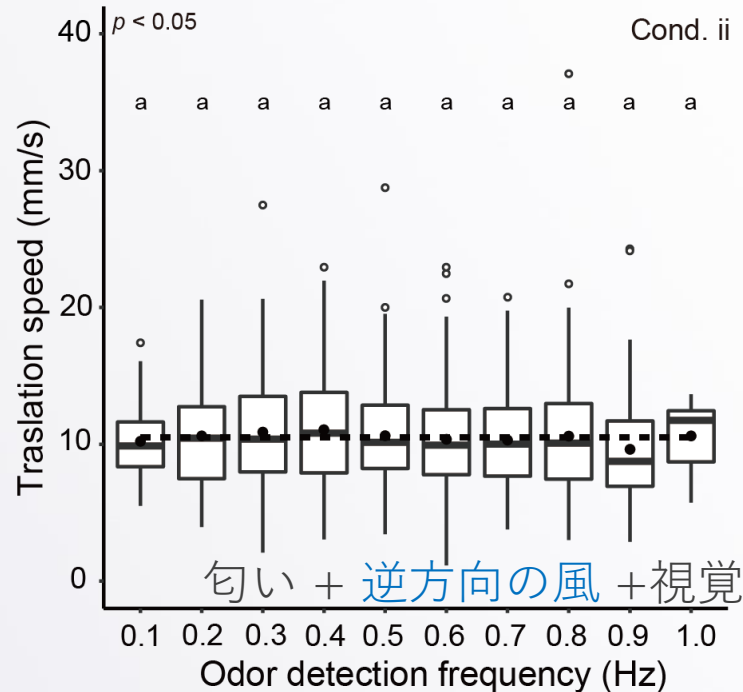
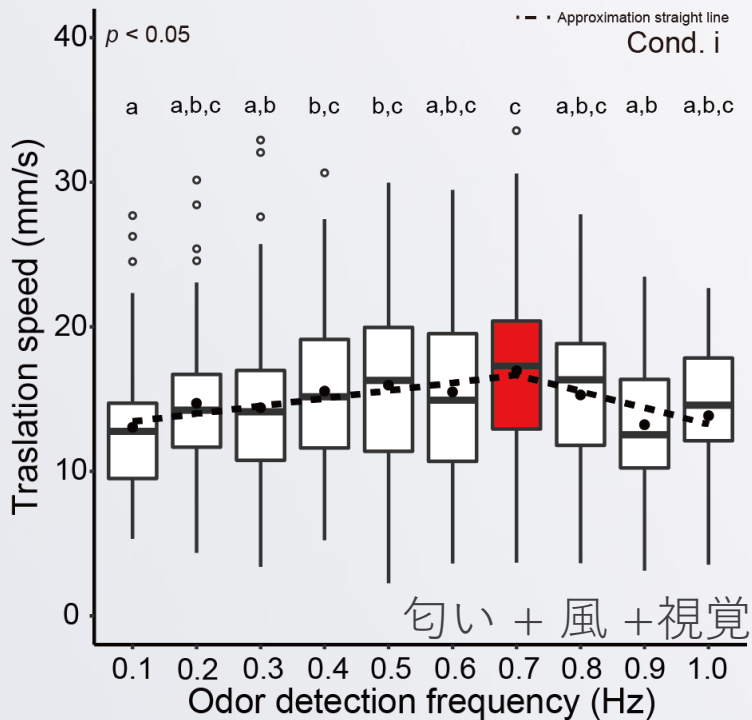
風刺激によって変化する探索軌跡



- 風によって横風方向(y方向)の動きが抑制
- 常に逆から風が提示されると風下方向への移動が増加

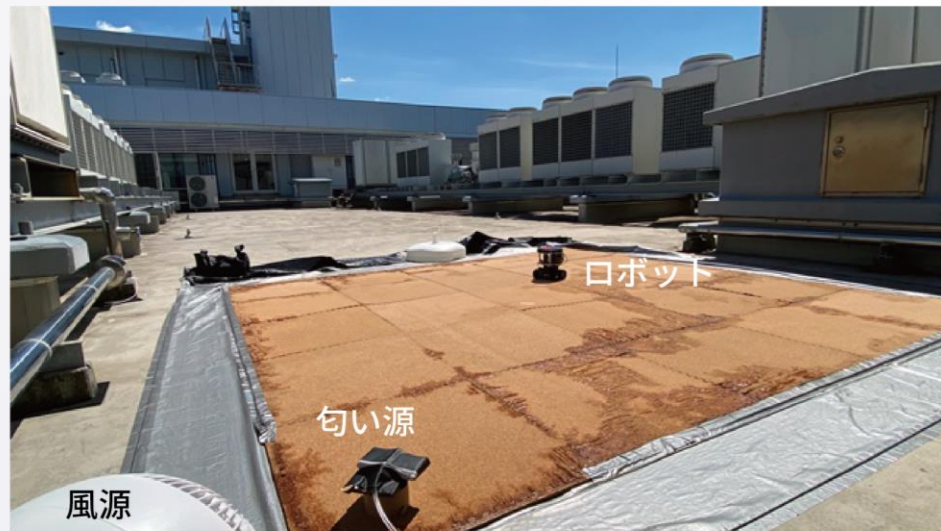
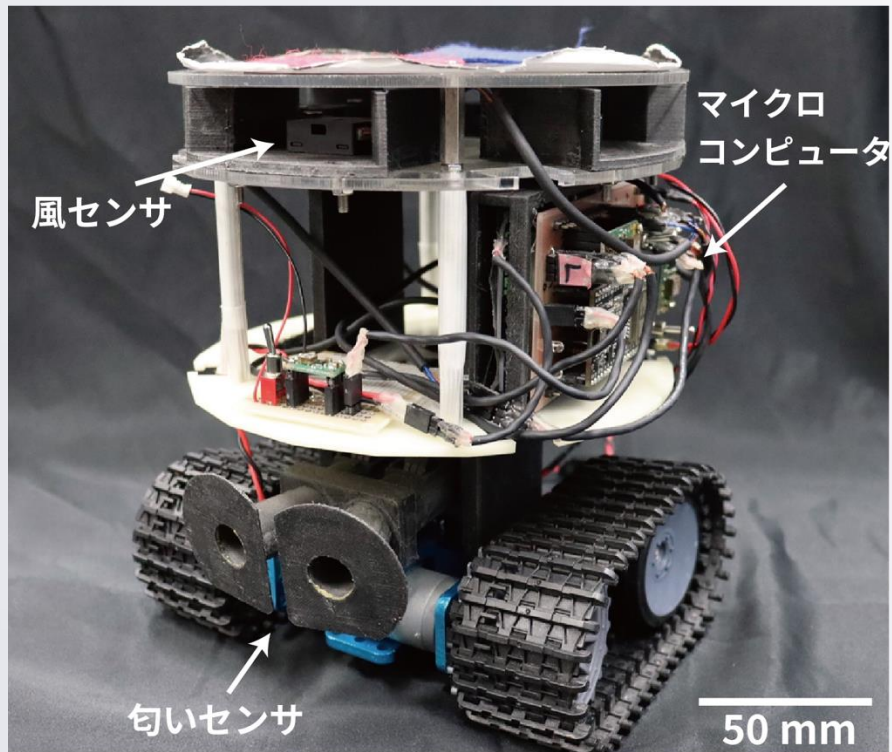
感覚刺激によって変化する移動速度

M. Yamada *et al.*, *elife*, 2021



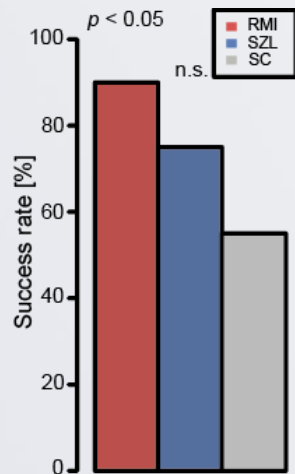
探索の積極性を変化させているのでは？

匂い源探索ロボットへの実装と検証

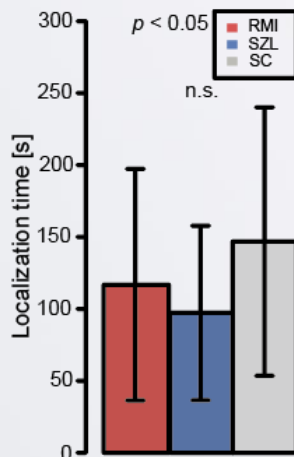


複数センサを搭載したロボットで
昆虫のナビゲーションモデルを検証

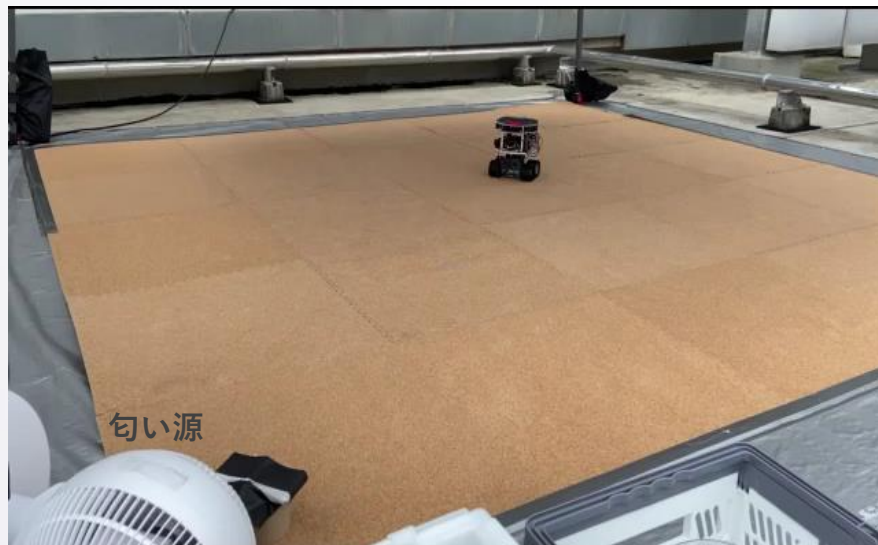
匂い源探索ロボットへの実装と検証



探索成功率



探索時間



複雑な環境においても状況適応的に行動を切替えることが探索性能向上に重要

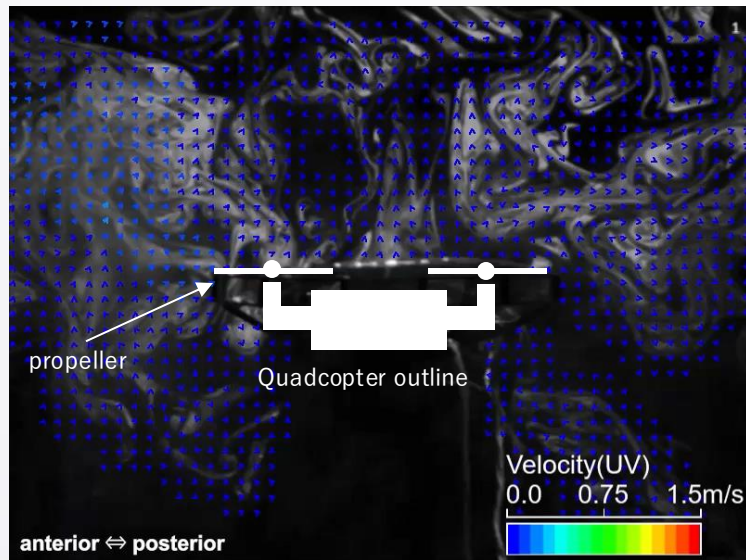
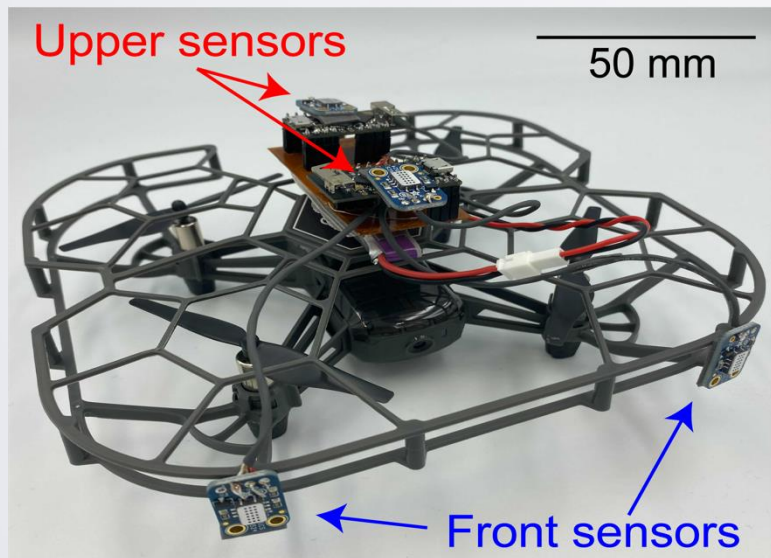
匂いは三次元的に拡散



三次元的に匂い追従することが広域の探索には重要

三次元的に探索するためには？

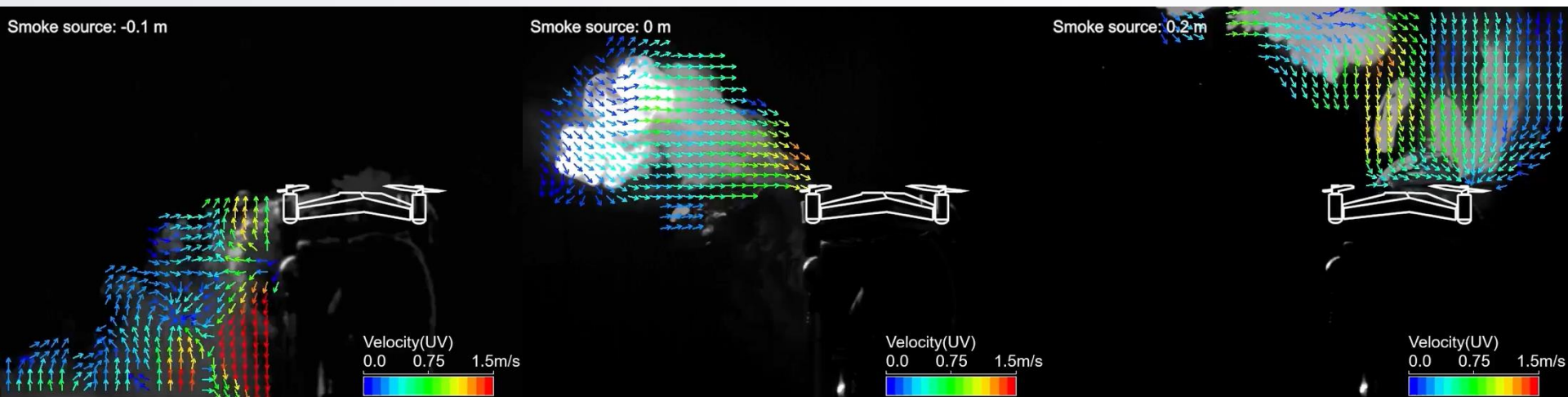
S. Shigaki, *et al.*, Trans. Inst. Meas. 2022



三次元に移動可能なドローンを用いて匂い源探索を実現
風センサが使えない状況でどのように対処するか？

複数のセンサで流れを見る

S. Shigaki, *et al.*, Trans. Inst. Meas. 2022



匂い源：-0.1 m

匂い源：0.0 m

匂い源：0.2 m

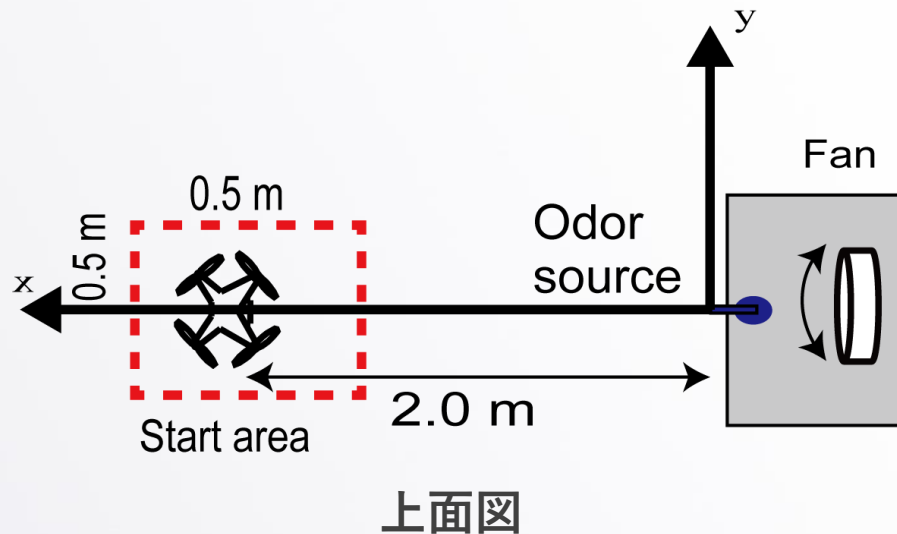
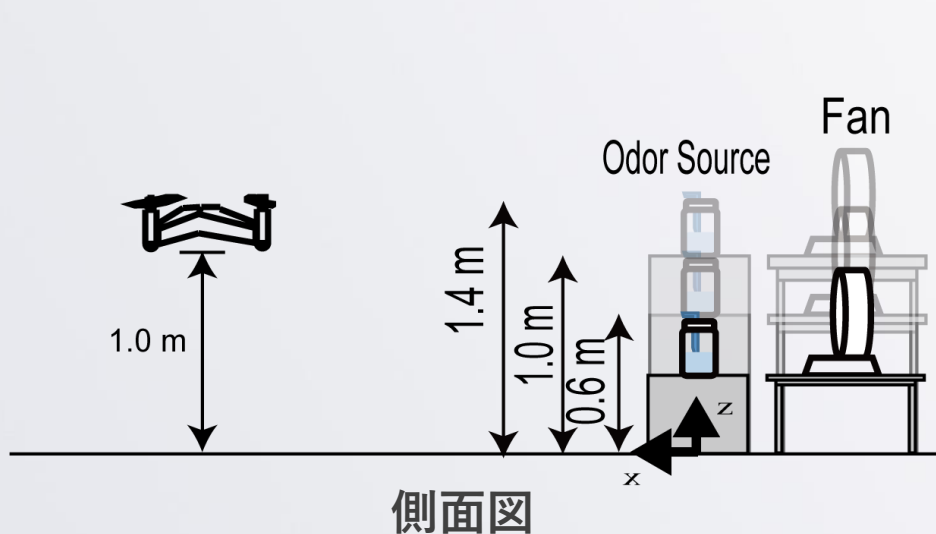
匂いの流れを可視化した結果…

匂いの到達地点が匂い源の高さによって異なる

複数の匂いセンサの検出状態で行動を変化させる

ドローンによる匂い源探索

S. Shigaki, *et al.*, Trans. Inst. Meas. 2022

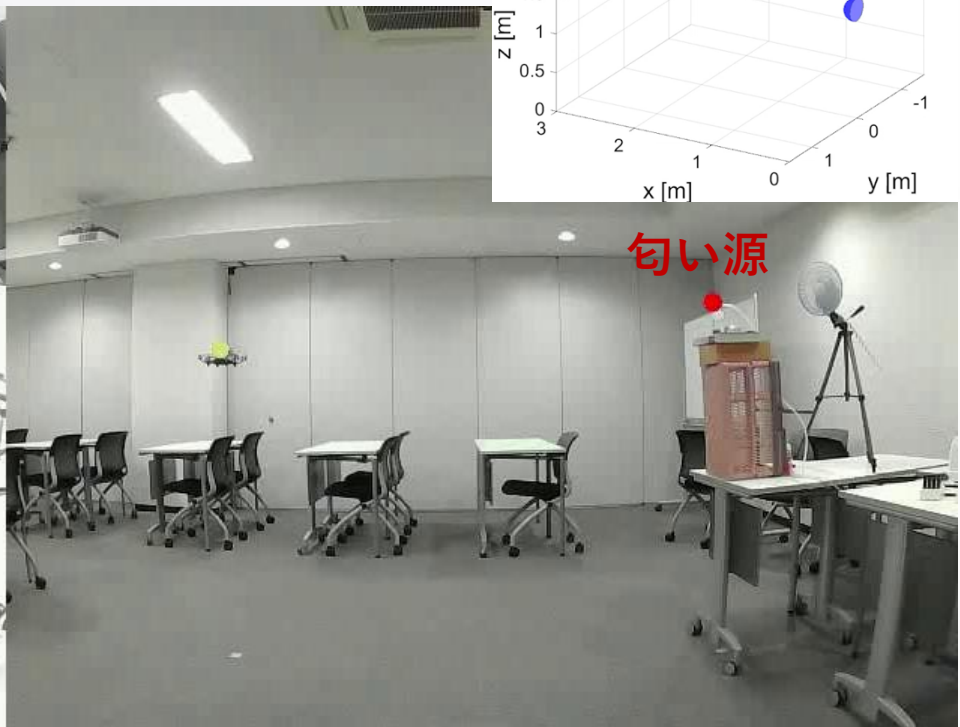
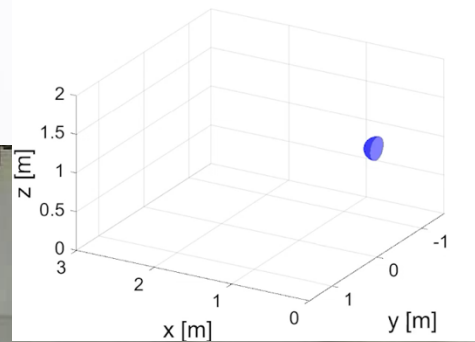


- 匂い源高さ : 0.6, 1.0, 1.4 m
- 探索基準: ドローンが2分以内に匂い源に到達すること

ドローンによる匂い源探索: 1.4m

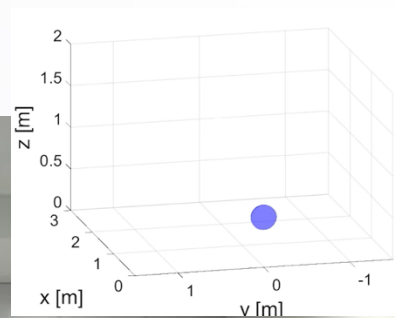
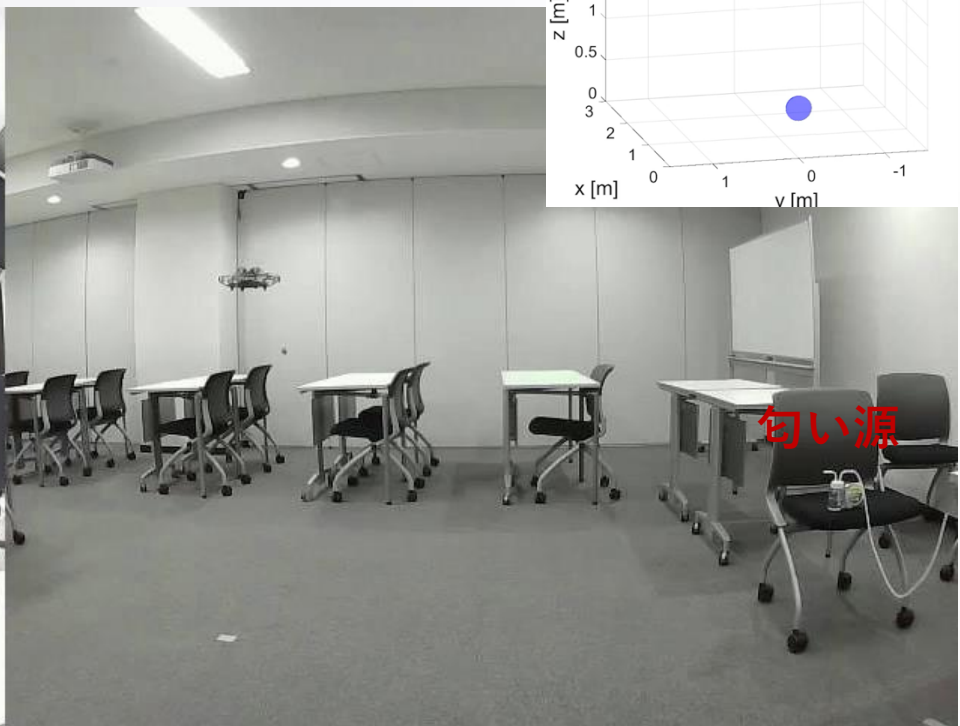


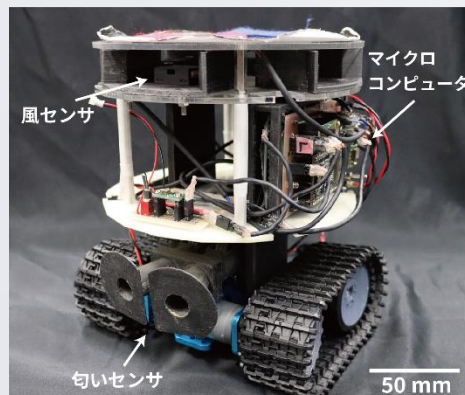
S. Shigaki, *et al.*, Trans. Inst. Meas. 2022



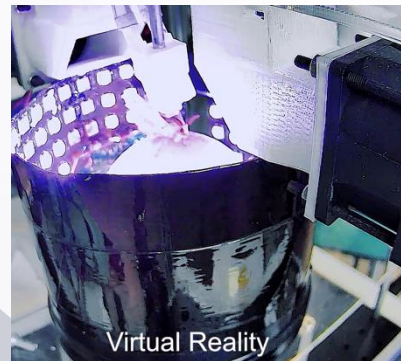
21 ドローンによる匂い源探索: 0.6m

S. Shigaki, *et al.*, Trans. Inst. Meas. 2022



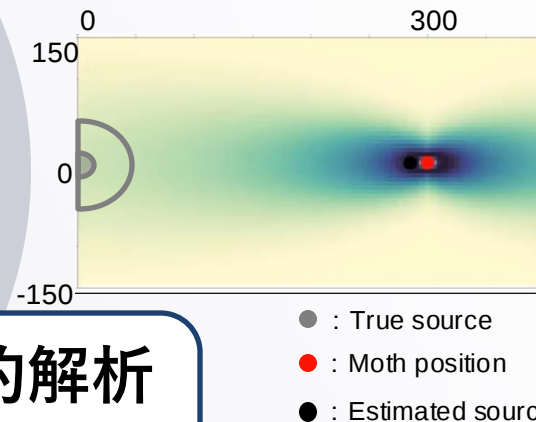


生物学的実験
生物の計測



工学的再構成
生物の再現

情報学的解析
生物の理解



1. Yamada, M., Ohashi, H., Hosoda, K., Kurabayashi, D., Shigaki, S. (2021). Multisensory-motor integration in olfactory navigation of silkworm, *Bombyx mori*, using virtual reality system. *Elife*, 10, e72001.
2. Shigaki, S., Yamada, M., Kurabayashi, D., Hosoda, K. (2023). Robust moth-inspired algorithm for odor source localization using multimodal information. *Sensors*, 23(3), 1475.
3. Shigaki, S., Yoshimura, Y., Kurabayashi, D., Hosoda, K. (2022). Palm-sized quadcopter for three-dimensional chemical plume tracking. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-12.
4. <https://sshigaki.jimdofree.com/>