St4RTrack: RECONSTRUCTION VÀ TRACKING 4D MỘT CÁCH ĐỒNG THỜI

Môn học: CS519 - Phương pháp luận NCKH

Lớp: CS519.Q11.KHTN

GVHD: PGS.TS Lê Đình Duy

Tóm tắt

- Link Github của nhóm: https://github.com/NguyenPhamPhuongNam/CS519.Q11.KHTN.git
- Link YouTube video: https://www.youtube.com/watch?v=yjxTd2HOY1c

Nguyễn Phạm Phương Nam

Hồ Ngọc Luật

Giới thiệu

Reconstruction:
Tái tạo ảnh 3D đối với tọa độ World

Tracking:
Theo dõi vị trí 3D của 1 điểm theo thời gian

- Các mô hình trước không gắn kết tự nhiên giữa hai bài toán

- Đề xuất: **St4RTrack** – mô hình học sâu feed-forward
  → **vừa Reconstruction 3D, vừa Tracking 3D** trực tiếp từ video RGB
  → làm việc trong **hệ toạ độ thế giới (world frame)**, tách được chuyển động camera và chuyển động của vật thể.

Mục tiêu

- Khai thác lại sự cộng hưởng giữa **reconstruction 3D** và **correspondence 2D** ngay cả trong **cảnh động**, bằng cách đưa thêm thông tin **chuyển động 3D dày đặc** (3D point tracking).

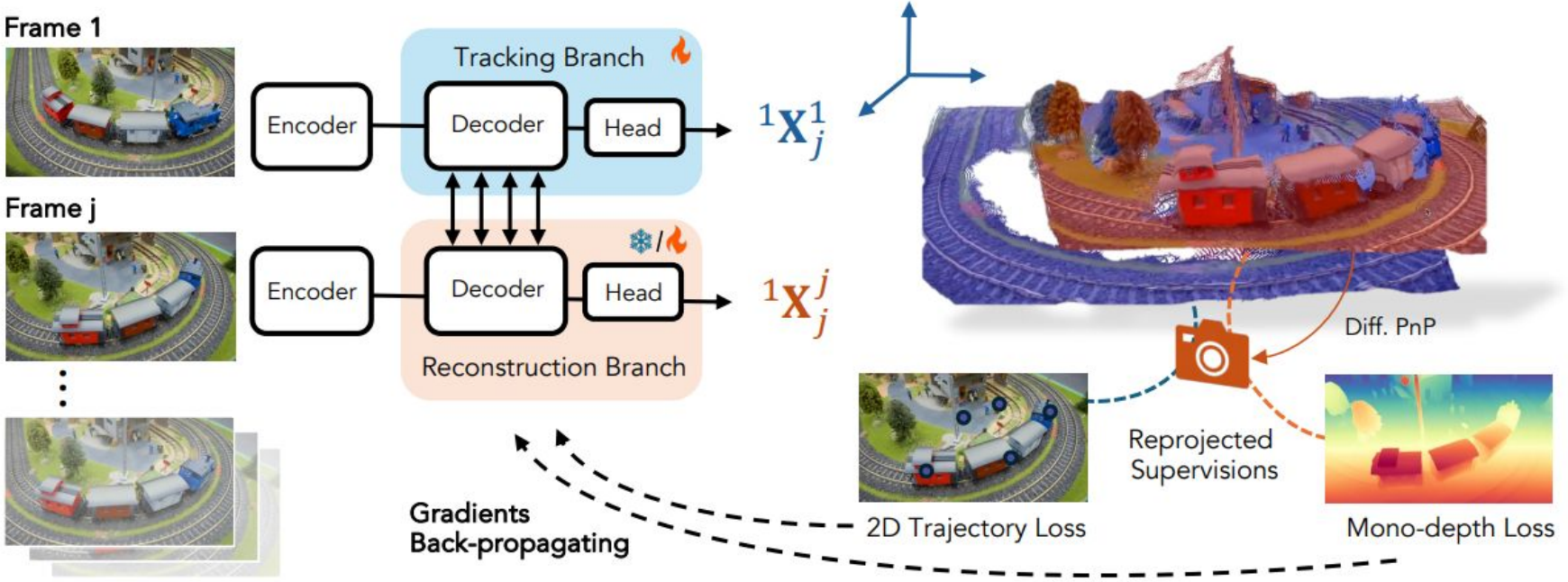
- Xây dựng một khung thống nhất để **vừa reconstruction 3D, vừa tracking 3D** trong **hệ toạ độ thế giới**, tách được **chuyển động camera** và **chuyển động cảnh** từ video RGB.

- Cho phép **huấn luyện và thích nghi trên video in-the-wild không có nhãn 4D đầy đủ**

- Thiết lập **chuẩn đánh giá trong world frame** cho bài toán tracking và reconstruction 3D, hướng tới một hệ **nhận thức 4D đa nhiệm, không phụ thuộc tác vụ**.

Nội dung và Phương pháp

Overview



Nội dung và Phương pháp

Biểu diễn 4D

Hợp nhất **reconstruction + long-term 3D tracking** bằng cách dự đoán **hai pointmaps phụ thuộc thời gian** trong cùng world frame.

- Input: video RGB, neo I_1 làm world frame.
- Output: $f(I_1, I_j) = \left({}^1X_j^1,\ {}^1X_j^j\right)$

  ${}^1X_j^1$: tracking (điểm frame 1 tại time j).

  ${}^1X_j^j$: reconstruction (frame j tại time j).

- Kết quả:

  Tracking dài hạn: $\{{}^1X_t^1\}_{t=1}^T$

  Tái tạo động: $\{{}^1X_t^t\}_{t=1}^T$

  Mạng: ViT + Siamese Transformer + 2 head.

Nội dung và Phương pháp

Phương pháp huấn luyện và thích nghi video thật

Pretrain trên dữ liệu 4D tổng hợp:

- Quy mô nhỏ, chuyển động & hình học chưa đa dạng như video thật.
- Pointmap phải “di chuyển tự do” trong world frame → cần fine-tuning trên dữ liệu thực.

Áp dụng lên dữ liệu thực:

- Giải camera pose (R_j, T_j) từ ${}^1X_j^j$ (PnP+RANSAC, differentiable).
- Reproject điểm tracking $\hat{x}_{j,n} = \pi\Big(K\big(R_j\,{}^1X_{j,n}^1 + T_j\big)\Big)$
- 2D track consistency: so với pseudo 2D tracks (CoTracker)
- Depth consistency: so với mono-depth (MoGe)
- 3D self-consistency: đồng bộ tracking với reconstruction tại time j

- Loss tổng quát: $L = L_{\text{traj}} + \lambda_1 L_{\text{depth}} + \lambda_2 L_{\text{align}}$

Nội dung và Phương pháp

Điểm cải tiến so với phương pháp gốc

- Trong video thật, occlusion/fast motion làm pseudo-label nhiễu, khiến việc tối ưu kéo lệch pose và pointmap -> mask che khuất và độ tin cậy theo điểm để chỉ học từ các điểm đáng tin.
- Tạo mask occlusion từ 2 pointmaps : reproject điểm tracking sang frame *j*, rồi so sánh depth của điểm đó với depth bề mặt visible từ reconstruction tại cùng pixel : $m_n = \mathbf{1}\left[z_{j,n}^{\text{trk}} \le z_j^{\text{rec}}(\hat{x}_{j,n}) + \tau\right]$
- Confidence/uncertainty theo điểm: Mạng dự đoán σ_n^2 cho mỗi điểm: điểm kém tin -> σ_n^2 lớn -> giảm trọng số khi tính loss
- Loss robust: $L_{\text{traj}}^{\text{robust}}$: reprojection 2D so với CoTracker, được lọc bởi m_n và được trọng số bởi σ_n^2 .

  $L_{\text{align}}^{\text{robust}}$: nhất quán 3D giữa tracking và reconstruction, được lọc bởi m_n và được trọng số bởi σ_n^2.

  L_{depth} : depth consistency so với MoGe (giữ nguyên).

Kết quả dự kiến

- Xây dựng pipeline thống nhất tái tạo 3D động và tracking 3D dài hạn trong **world coordinate** từ video RGB.
- Cải tiến giai đoạn thích nghi video thật bằng **occlusion-aware mask + confidence weighting** để giảm outlier/occlusion, giúp tracking ổn định hơn.
- Đánh giá trên reconstruction & world-frame tracking với so sánh/ablation (baseline vs proposed) và trực quan hóa kết quả.

Tài liệu tham khảo

- https://arxiv.org/pdf/2504.13152 : St4RTrack: Simultaneous 4D Reconstruction and Tracking in the World
- Dust3r: Geometric 3d vision made easy. 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 20697– 20709, 2023.
- https://arxiv.org/abs/2410.03825 : MONST3R: A simple approach for estimating geometry in the presence of motion