



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년12월29일
(11) 등록번호 10-2483354
(24) 등록일자 2022년12월27일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06T 5/50 (2006.01) G06T 5/00 (2019.01)
G06T 7/593 (2017.01) H04N 13/204 (2018.01)
- (52) CPC특허분류
G06T 5/50 (2013.01)
G06T 5/001 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2021-0104085
(22) 출원일자 2021년08월06일
심사청구일자 2021년08월06일
- (56) 선행기술조사문헌
JP2020518080 A*
- Michael Zollhofer, ET AL: "Shading-based refinement on volumetric signed distance functions", ACM Transactions on Graphics, Volume 34, Issue 4, August 2015 Article No.: 96, pp.1-14(2015.08.31.) 1부.*
- Miroslava Slavcheva ET AL: "SobolevFusion: 3D Reconstruction of Scenes Undergoing Free Non-Rigid Motion", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 2018, pp. 2646-2655(2018.06.18.) 1부.*
- KR1020170071411 A
- *는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
- (72) 발명자
이상훈
서울특별시 영등포구 신봉로 77, 103동 2201호(신길동, 래미안에스티움)
- 이성민
서울특별시 서대문구 신촌로3나길 2, 201호(창천동)
- 강지우
서울특별시 서대문구 연희로8길 31(연희동)
- (74) 대리인
특허법인우인

전체 청구항 수 : 총 11 항

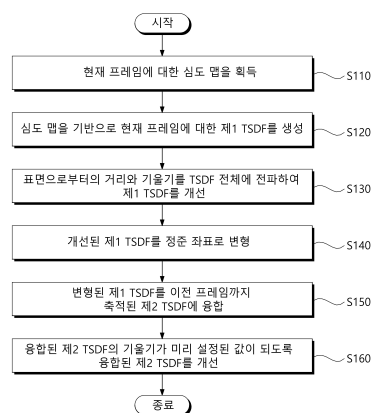
심사관 : 김광식

(54) 발명의 명칭 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 및 장치

(57) 요약

본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 및 장치는, 표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성함으로써, 퍼스펙티브 투영(perspective projection)으로 구해지는 TSDF 생성 시의 근본적인 오차를 개선할 수 있어, 보다 정확한 TSDF를 획득할 수 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

G06T 7/593 (2017.01)

H04N 13/204 (2018.05)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|-------------|---------------------------------------|
| 과제고유번호 | 1711114292 |
| 과제번호 | 2020R1A2C3011697 |
| 부처명 | 과학기술정보통신부 |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단 |
| 연구사업명 | 중견연구자지원사업 |
| 연구과제명 | 시각적 인지연구 기반 시공간 도메인 확장 최적화 기술 연구(2/5) |
| 기 여 율 | 1/1 |
| 과제수행기관명 | 연세대학교 산학협력단 |
| 연구기간 | 2021.03.01 ~ 2022.02.28 |

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하는 단계;

상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하는 단계;

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하는 단계;

개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하는 단계; 및

변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하는 단계;

를 포함하며,

상기 제1 TSDF 개선 단계는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득하는 것으로 이루어지는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에서,

상기 제1 TSDF 개선 단계는,

그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값과 미리 정의된 그리드 크기를 이용하여 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 과정을, 상기 제1 TSDF의 표면에서 상기 제1 TSDF의 표면과 멀어지는 방향으로 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트에 대해 수행하여, 상기 제1 TSDF를 개선하는 것으로 이루어지는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

청구항 4

제3항에서,

상기 제1 TSDF 개선 단계는,

그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값에 상기 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값을 더하여, 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 것으로 이루어지는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

청구항 5

제4항에서,

상기 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값은,

표면으로부터 그리드 포인트까지의 거리 및 상기 미리 정의된 그리드 크기 중 적은 값인,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

청구항 6

제1항에서,

상기 제1 TSDF 개선 단계는,

개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득하는 것으로 이루어지는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

청구항 7

제1항에서,

융합된 상기 제2 TSDF의 기울기(gradient)가 미리 설정된 값이 되도록 융합된 상기 제2 TSDF를 개선(refinement)하는 단계;

를 더 포함하는 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

청구항 8

제1항, 제3항 내지 제7항 중 어느 한 항에 기재된 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위하여 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

청구항 9

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성하는 3차원 복원 장치로서,

TSDF를 생성하기 위한 하나 이상의 프로그램을 저장하는 메모리; 및

상기 메모리에 저장된 상기 하나 이상의 프로그램에 따라 TSDF를 생성하기 위한 동작을 수행하는 하나 이상의 프로세서;

를 포함하고,

상기 프로세서는,

현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하고,

상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하며,

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하고,

개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하며,

변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하고,

상기 프로세서는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득하는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치.

청구항 10

삭제

청구항 11

제9항에서,

상기 프로세서는,

그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값과 미리 정의된 그리드 크기를 이용하여 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 과정을, 상기 제1 TSDF의 표면에서 상기 제1 TSDF의 표면과 멀어지는 방향으로 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트에 대해 수행하여, 상기 제1 TSDF를 개선하는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치.

청구항 12

제9항에서,

상기 프로세서는,

개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득하는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치.

청구항 13

제9항에서,

상기 프로세서는,

융합된 상기 제2 TSDF의 기울기(gradient)가 미리 설정된 값이 되도록 융합된 상기 제2 TSDF를 개선(refinement)하는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 및 장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하는, 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 물체와의 거리를 잴 수 있는 심도(depth) 카메라의 개발로 인해 3차원 복원에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 대부분의 연구에서 TSDF(truncated signed distance function)를 사용하여 물체의 표면을 표현한다. TSDF는 그리드(grid)한 볼륨 구조를 가지며 각 그리드 포인트(grid point)마다 물체 표면과의 거리 값을 저장하는 것으로, 물체 표면을 음 함수로 나타낸다. TSDF에서 물체 표면으로부터의 거리는 TSDF를 심도 카메라에 투영(projection)한 뒤 촬영된 심도 이미지와 투영(projection)되기 전 TSDF 그리드 포인트 간의 거리를 계산하는 것으로 구할 수 있다. 심도 카메라가 물체를 촬영하는 것은 퍼스펙티브 투영(perspective projection)에 의해서 수행되기 때문에 TSDF를 심도 카메라에 투영시킬 때에도 퍼스펙티브 투영으로 투영된다. 그러나, 퍼스펙티브 투영으로 인해 물체 표면으로부터의 최단 거리가 아닌 심도 카메라 방향으로의 거리가 계산되어 오차가 발생할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0003] 본 발명이 이루고자 하는 목적은, 표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성하는, 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 및 장치를 제공하는 데 있다.

[0004] 본 발명의 명시되지 않은 또 다른 목적들은 하기의 상세한 설명 및 그 효과로부터 용이하게 추론할 수 있는 범위 내에서 추가적으로 고려될 수 있다.

과제의 해결 수단

[0005] 상기의 목적을 달성하기 위한 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법은, 현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하는 단계; 상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하는 단계; 표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하는 단계; 개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하는 단계; 및 변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하는 단계;를 포함한다.

[0006] 여기서, 상기 제1 TSDF 개선 단계는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득하는 것으로 이루어질 수 있다.

[0007] 여기서, 상기 제1 TSDF 개선 단계는, 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값과 미리 정의된 그리드 크기를 이용하여 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 과정을, 상기 제1 TSDF의 표면에서 상기 제1 TSDF의 표면과 멀어지는 방향으로 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트에 대해 수행하여, 상기 제1 TSDF를 개선하는 것으로 이루어질 수 있다.

[0008] 여기서, 상기 제1 TSDF 개선 단계는, 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값에 상기 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값을 더하여, 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 것으로 이루어질 수 있다.

[0009] 여기서, 상기 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값은, 표면으로부터 그리드 포인트까지의 거리 및 상기 미리 정의된 그리드 크기 중 적은 값일 수 있다.

[0010] 여기서, 상기 제1 TSDF 개선 단계는, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득하는 것으로 이루어질 수 있다.

[0011] 여기서, 융합된 상기 제2 TSDF의 기울기(gradient)가 미리 설정된 값이 되도록 융합된 상기 제2 TSDF를 개선(refinement)하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0013] 상기의 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 컴퓨터 프로그램은 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 저장되어 상기한 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 중 어느 하나를 컴퓨터에서 실행시킨다.

[0015] 상기의 목적을 달성하기 위한 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치는, 표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성하는 3차원 복원 장치로서, TSDF를 생성하기 위한 하나 이상의 프로그램을 저장하는 메모리; 및 상기 메모리에 저장된 상기 하나 이상의 프로그램에 따라 TSDF를 생성하기 위한 동작을 수행하는 하나 이상의 프로세서;를 포함하고, 상기 프로세서는, 현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하고, 상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하며, 표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하고, 개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하며, 변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)한다.

[0016] 여기서, 상기 프로세서는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득할 수 있다.

[0017] 여기서, 상기 프로세서는, 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값과 미리 정의된 그리드 크기를 이용하여 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 과정을, 상기 제1 TSDF의 표면에서 상기 제1 TSDF의 표면과 멀어지는 방향으로 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트에 대해 수행하여, 상기 제1 TSDF를 개선할 수 있다.

[0018] 여기서, 상기 프로세서는, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 그리드 포인트를 기준으로 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득할 수 있다.

[0019] 여기서, 상기 프로세서는, 융합된 상기 제2 TSDF의 기울기(gradient)가 미리 설정된 값이 되도록 융합된 상기 제2 TSDF를 개선(refinement)할 수 있다.

발명의 효과

[0020] 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 및 장치에 의하면, 표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성함으로써, 퍼스펙티브 투영(perspective projection)으로 구해지는 TSDF 생성 시의 근본적인 오차를 개선할 수 있어, 보다 정확한 TSDF를 획득할 수 있다.

[0021] 본 발명의 효과들은 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치를 설명하기 위한 블록도이다.

도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 동작을 설명하기 위한 도면이다.

도 3은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법을 설명하기 흐름도이다.

도 4는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 도 4에 도시한 TSDF 개선 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 도 4에 도시한 TSDF 융합 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 설명하기 위한 도면으로, 리지드 장면(rigid scene)에 대한 실험 결과를 나타낸다.

도 8은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 설명하기 위한 도면으로, 동적인 장면(dynamic scene)에 대한 실험 결과를 나타낸다.

도 9는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 설명하기 위한 도면으로, 동적인 시퀀스(dynamice sequence)에 대한 실험 결과를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세히 설명한다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나, 본 발명은 이하에서 게시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시예들은 본 발명의 게시가 완전하도록 하고, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다.

[0024] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.

[0025] 본 명세서에서 "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하기 위한 것으로, 이들 용어들에 의해 권리범위가 한정되어서는 아니 된다. 예컨대, 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성 요소도 제1 구성 요소로 명명될 수 있다.

[0026] 본 명세서에서 각 단계들에 있어 식별부호(예컨대, a, b, c 등)는 설명의 편의를 위하여 사용되는 것으로 식별부호는 각 단계들의 순서를 설명하는 것이 아니며, 각 단계들은 문맥상 명백하게 특정 순서를 기재하지 않는 이상 명기된 순서와 다르게 일어날 수 있다. 즉, 각 단계들은 명기된 순서와 동일하게 일어날 수도 있고 실질적

으로 동시에 수행될 수도 있으며 반대의 순서대로 수행될 수도 있다.

- [0027] 본 명세서에서, "가진다", "가질 수 있다", "포함한다" 또는 "포함할 수 있다" 등의 표현은 해당 특징(예컨대, 수치, 기능, 동작, 또는 부품 등의 구성 요소)의 존재를 가리키며, 추가적인 특징의 존재를 배제하지 않는다.
- [0030] 이하에서 첨부한 도면을 참조하여 본 발명에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법 및 장치의 바람직한 실시예에 대해 상세하게 설명한다.
- [0032] 먼저, 도 1 및 도 2를 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치에 대하여 설명한다.
- [0033] 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치를 설명하기 위한 블록도이고, 도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 동작을 설명하기 위한 도면으로, 도 2의 (a)는 TSDF 근사화 과정을 나타내며, 도 2의 (b)는 심도 맵(depth map)을 나타내고, 도 2의 (c)는 정답(Ground Truth)을 나타내며, 도 2의 (d)는 도 2의 (b)를 통해 종래의 방법을 통해 근사화된 TSDF(Raw TSDF)를 나타내고, 도 2의 (e)는 도 2의 (b)를 통해 본 발명에 따른 3차원 복원 방법을 통해 근사화된 TSDF(Refined TSDF)를 나타낸다.
- [0034] 도 1을 참조하면, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치(이하 '3차원 복원 장치'라 한다)(100)는 표면(surface)으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성한다.
- [0035] 즉, 3차원 복원 장치(100)는 표면과의 거리가 가까울수록 퍼스펙티브 투영(perspective projection)으로 계산되는 표면과의 거리가 실제 표면과의 최단 거리로 근사화되는 사실을 기반으로, 표면으로부터 정확한 거리를 TSDF 전체에 전파하고, TSDF의 값뿐만 아니라 기울기(gradient)도 물체 표면으로부터 TSDF 전체로 전파하여, 더욱 정확한 TSDF를 생성할 수 있다.
- [0036] 도 2의 (a)를 참조하면, 지점(point) p_1 은 실제 표면 s_1^* 과 더 가깝지만 심도 카메라의 뷰(view) 방향에 종속적이기 때문에 지점 p_1 은 심도 카메라 방향에 위치한 표면 s_1 과의 거리를 통해 근사화하게 되고, 지점 p_2 는 실제 표면 s_2^* 와 더 가깝지만 심도 카메라의 뷰 방향에 종속적이기 때문에 지점 p_2 는 심도 카메라 방향에 위치한 표면 s_2 와의 거리를 통해 근사화게 된다. 이에 따라, 도 2의 (b)에 도시된 심도 맵을 기반으로 종래의 방법을 통해 복원된 TSDF(도 2의 (d)에 도시된 Raw TSDF)는 도 2의 (c)에 도시된 정답과 많은 차이가 있음을 확인할 수 있다. 즉, 종래의 방법에 따른 TSDF는 물체의 실제 표면으로부터의 최단 거리가 아닌 심도 카메라 방향으로의 거리를 기반으로 계산되기 때문에 오차가 발생할 수 있다. 이에 반면, 본 발명은 표면으로부터의 거리와 기울기를 TSDF 전체에 전파하여 TSDF를 생성하기 때문에, 도 2의 (b)에 도시된 심도 맵을 기반으로 본 발명을 통해 복원된 TSDF(도 2의 (e)에 도시된 Refined TSDF)는 도 2의 (c)에 도시된 정답과 유사함을 확인할 수 있다. 즉, 본 발명은 표면으로부터의 정확한 거리를 TSDF에 전파함으로써 심도 카메라의 뷰 방향에 종속적이지 않는 TSDF를 생성하고, 이로 인해 종래의 방법보다 더욱 정확한 TSDF를 생성할 수 있다.
- [0038] 이를 위해, 3차원 복원 장치(100)는 하나 이상의 프로세서(110), 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체(130) 및 통신 버스(150)를 포함할 수 있다.
- [0039] 프로세서(110)는 3차원 복원 장치(100)가 동작하도록 제어할 수 있다. 예컨대, 프로세서(110)는 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체(130)에 저장된 하나 이상의 프로그램(131)을 실행할 수 있다. 하나 이상의 프로그램(131)은 하나 이상의 컴퓨터 실행 가능 명령어를 포함할 수 있으며, 컴퓨터 실행 가능 명령어는 프로세서(110)에 의해 실행되는 경우 3차원 복원 장치(100)로 하여금 TSDF를 생성하기 위한 동작을 수행하도록 구성될 수 있다.
- [0040] 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체(130)는 TSDF를 생성하기 위한 컴퓨터 실행 가능 명령어 내지 프로그램 코드, 프로그램 데이터 및/또는 다른 적합한 형태의 정보를 저장하도록 구성된다. 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체(130)에 저장된 프로그램(131)은 프로세서(110)에 의해 실행 가능한 명령어의 집합을 포함한다. 일 실시예에서, 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체(130)는 메모리(랜덤 액세스 메모리와 같은 휘발성 메모리, 비휘발성 메모리, 또는 이들의 적절한 조합), 하나 이상의 자기 디스크 저장 디바이스들, 광학 디스크 저장 디바이스들, 플래시 메모리 디바이스들, 그 밖에 3차원 복원 장치(100)에 의해 액세스되고 원하는 정보를 저장할 수 있는 다른 형태의 저장 매체, 또는 이들의 적합한 조합일 수 있다.

- [0041] 통신 버스(150)는 프로세서(110), 컴퓨터 관독 가능한 저장 매체(130)를 포함하여 3차원 복원 장치(100)의 다른 다양한 컴포넌트들을 상호 연결한다.
- [0042] 3차원 복원 장치(100)는 또한 하나 이상의 입출력 장치를 위한 인터페이스를 제공하는 하나 이상의 입출력 인터페이스(170) 및 하나 이상의 통신 인터페이스(190)를 포함할 수 있다. 입출력 인터페이스(170) 및 통신 인터페이스(190)는 통신 버스(150)에 연결된다. 입출력 장치(도시하지 않음)는 입출력 인터페이스(170)를 통해 3차원 복원 장치(100)의 다른 컴포넌트들에 연결될 수 있다.
- [0045] 그러면, 도 3을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법에 대하여 설명한다.
- [0046] 도 3은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법을 설명하기 흐름도이다.
- [0047] 본 발명에 따른 3차원 복원 방법의 설명 편의를 위해, 현재 프레임에 대한 TSDF를 "제1 TSDF"로 명명하고, 이전 프레임까지 축적된 TSDF를 "제2 TSDF"로 명명하여, 본 발명에 대해 이하 설명한다.
- [0048] 도 3을 참조하면, 3차원 복원 장치(100)의 프로세서(110)는 현재 프레임(frame)에 대한 심도 맵(depth map)을 획득할 수 있다(S110).
- [0049] 즉, 3차원 복원 장치(100)는 물체의 주변에 위치하여 해당 물체를 촬영하는 단일 심도 카메라(도시하지 않음)와 연결되어, 단일 심도 카메라를 통해 심도 맵을 획득할 수 있다.
- [0051] 그런 다음, 프로세서(110)는 심도 맵을 기반으로 현재 프레임에 대한 제1 TSDF를 생성할 수 있다(S120).
- [0053] 그런 다음, 프로세서(110)는 표면으로부터 거리와 기울기를 TSDF 전체에 전파하여 제1 TSDF를 개선(refinement)할 수 있다(S130).
- [0054] 즉, 프로세서(110)는 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선할 수 있다.
- [0055] 보다 자세히 설명하면, 프로세서(110)는 그리드 포인트를 기준으로 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값과 미리 정의된 그리드 크기를 이용하여 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 과정을, 제1 TSDF의 표면에서 제1 TSDF의 표면과 멀어지는 방향으로 제1 TSDF의 각 그리드 포인트에 대해 수행하여, 제1 TSDF를 개선할 수 있다.
- [0056] 이때, 프로세서(110)는 그리드 포인트를 기준으로 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값에 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값을 더하여, 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선할 수 있다.
- [0057] 여기서, 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값은 표면으로부터 그리드 포인트까지의 거리 및 미리 정의된 그리드 크기 중 적은 값일 수 있다.
- [0058] 그리고, 프로세서(110)는 개선된 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득할 수 있다.
- [0059] 보다 자세히 설명하면, 프로세서(110)는 개선된 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 그리드 포인트를 기준으로 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득할 수 있다.
- [0061] 그런 다음, 프로세서(110)는 개선된 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)할 수 있다(S140).
- [0063] 그런 다음, 프로세서(110)는 변형된 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)할 수 있다(S150).
- [0065] 이후, 프로세서(110)는 융합된 제2 TSDF의 기울기가 미리 설정된 값이 되도록 융합된 제2 TSDF를 개선할 수 있다(S160).
- [0066] 예컨대, 프로세서(110)는 융합된 제2 TSDF의 기울기가 1이 되도록 융합된 제2 TSDF를 개선할 수 있다.
- [0069] 그러면, 도 4 내지 도 6을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 과정에 대하여 보다 자세하게 설명한다.

- [0070] 도 4는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 과정을 설명하기 위한 도면이다.
- [0071] 도 4를 참조하면, 본 발명에 따른 3차원 복원 과정은 "TSDF 생성(TSDF Generation) 과정", "TSDF 개선(TSDF Evolution for Refinement) 과정", "TSDF 변형(TSDF Evolution for Deformation) 과정" 및 "TSDF 융합(TSDF Evolution for Fusion) 과정"을 통해, 단일 심도 카메라(depth sensor)로부터 제공받은 시퀀스(sequence)로부터 3차원 복원을 수행할 수 있다.
- [0072] 심도 카메라(depth sensor)로부터 획득한 심도 맵은 불완전하고 노이즈가 많아 멀리 떨어진 표면의 TSDF 값은 에러가 많다. 이는 변형(deformation) 과정에서 TSDF 간의 불일치를 만들고 전체적인 복원(reconstruction) 정확도를 감소시키게 된다. 본 발명은 정확도가 높은 TSDF를 획득하기 위해 TSDF 개선(refinement) 방법과 TSDF 융합(fusion) 방법을 제안한다. TSDF는 심도 맵으로부터 획득되기 때문에, 심도 카메라의 뷰(view) 방향에 종속적인데 비해, 본 발명에 따른 3차원 복원 방법은 TSDF가 뷰에 종속적이지 않게 만들어 줄 수 있다. 또한, 변형(deformation) 과정에서 TSDF가 노이즈로 인해 서로 완벽하게 정렬되지 않을 수 있어, 두개의 TSDF를 융합(fusion)하는 과정에서 아티팩트(artifact)가 발생할 수 있다. 본 발명은 레벨-세트 융합(level-set fusion)을 적용하여 융합(fusion) 과정에서 발생하는 아티팩트(artifact)를 억제할 수 있다.
- [0073] 여기서, TSDF 생성 과정(TSDF Generation)은 현재 프레임에 대한 심도 맵을 기반으로 현재 프레임에 대한 제1 TSDF를 생성하는 것을 말한다. TSDF 개선(TSDF Evolution for Refinement) 과정은 표면으로부터의 거리와 기울기를 TSDF 전체에 전파하여 제1 TSDF를 개선하는 것을 말한다. TSDF 변형(TSDF Evolution for Deformation) 과정은 개선된 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형하는 것을 말한다. TSDF 융합(TSDF Evolution for Fusion) 과정은 변형된 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합하고, 융합된 제2 TSDF의 기울기가 미리 설정된 값이 되도록 융합된 제2 TSDF를 개선하는 것을 말한다.
- [0074] 이하, 본 발명에 따른 3차원 복원 과정 중에서 종래의 기술과 차별화되는 부분에 대해서만 자세하게 설명하고, 종래의 기술과 동일한 부분에 대해서는 간략하게 설명한다.
- [0076] TSDF 생성(TSDF Generation) 과정
- [0077] TSDF 생성 과정은 현재 프레임에 대한 심도 맵을 기반으로 현재 프레임에 대한 제1 TSDF를 생성하는 것을 말한다.
- [0078] 즉, 좌표계 $X=(X,Y,Z) \in \mathbb{R}^3$ 상의 3D 지점(point)에 대응되는 그리드 포인트(즉, 그리드 복셀) $x=(x,y,z) \in \mathbb{N}^3$ 의 경우, 제1 TSDF $\Phi(x)$ 는 부호화 거리(signed distance)를 측정하는 것에 의해 구축된다. 부호화 거리 $\text{dist}(X)$ 는 아래의 [수학식 1] 및 [수학식 2]와 같이 지점을 심도 맵 D 에 투영하는 것에 의해 근사화된다.

수학식 1

[0079]
$$\text{dist}(x)=D(\Pi(x))-Z$$

수학식 2

[0080]
$$\Phi(x)=\text{sgn}(\text{dist}(x)) \cdot \min(|\text{dist}(x)|,\tau)/\tau$$

수학식 3

[0081]
$$\omega(x)=\begin{cases} 1.0, & \text{if } \text{dist}(x)>-\tau \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- [0082] 여기서, $\Pi: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{N}^2$ 는 그리드 포인트를 3D 좌표계로부터 심도 맵으로 투영하기 위한 투영 연산자(projection operator)를 나타낸다. $\text{sgn}(\cdot)$ 은 부호 연산자(sign operator)를 나타낸다. τ 는 절단 마진(truncated

margin)을 나타낸다. $\omega(x)$ 는 TSDF 가중치를 나타낸다.

[0084] TSDF 개선(TSDF Evolution for Refinement) 과정

[0085] 도 5는 도 4에 도시한 TSDF 개선 과정을 설명하기 위한 도면으로, 도 5의 (a)는 본 발명에 따른 TSDF 개선(refinement) 과정을 나타내고, 도 5의 (b)는 심도 맵을 나타내며, 도 5의 (c)는 종래의 방법을 통해 획득된 TSDF(Raw TSDF)를 나타내고, 도 5의 (d)는 본 발명에 따른 개선된 TSDF(Refined TSDF)를 나타낸다.

[0086] 본 발명에 따른 TSDF 개선 과정은 제1 TSDF의 값 중 표면과 근처의 값만이 정확하다는 것을 동기(motivation)로 한다. 도 5에 도시된 바와 같이, 제1 TSDF의 표면 근처의 값은 심도 카메라의 뷰 방향과 관련없이 0에 가깝기 때문이다.

[0087] TSDF 개선 과정은 제1 TSDF 중 물체 표면의 값을 물체 표면과 떨어진 값으로 전파시켜 제1 TSDF가 단위 법선(unit normal)을 가지게 하여 심도 카메라 뷰와 독립적이게 만든다. 즉, TSDF 개선 과정은 제1 TSDF의 각 그리드 포인트의 값을 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하는 것을 말한다.

[0088] 보다 자세히 설명하면, TSDF 개선 과정은 그리드 포인트를 기준으로 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값과 미리 정의된 그리드 크기를 이용하여 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선하는 과정을, 제1 TSDF의 표면에서 제1 TSDF의 표면과 멀어지는 방향으로 제1 TSDF의 각 그리드 포인트에 대해 수행하여, 제1 TSDF를 개선한다.

[0089] 즉, TSDF 개선 과정은 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(즉, 그리드 복셀)의 값을 단위 법선(unit normal)의 방향으로부터 획득된 값을 이용하여 반복적으로 대체하는 것에 의해 표면으로부터의 거리를 제1 TSDF 전체에 전파한다. 제1 TSDF의 모든 그리드 포인트를 물체 표면에서부터 물체 표면의 반대 방향으로 그 값을 업데이트 한다. 전파의 단위 스텝(unit step) 거리는 미리 정의된 그리드 크기 v_s 에 따라 결정된다. 반복 횟수 $i \geq 1$ 에서의 제1 TSDF의 개선(refinement)은 아래의 [수학식 4]와 같다. 즉, 제1 TSDF 값은 아래의 [수학식 4]와 같이 표면과 가까운 방향의 값에서 단위(unit) 거리만큼 더하는 것으로 개선된다.

수학식 4

$$\Phi_t^{i+1}(x) = \Phi_t^i(x - \text{sgn}(\Phi_t^i(x)) \cdot n) + v_s$$

[0091] 여기서, $\text{sgn}(\cdot)$ 은 제1 TSDF의 해당 그리드 포인트가 표면 안인지 밖인지 구별해 주는 부호 연산자(sign

operator)를 나타낸다. $n = \frac{\nabla \Phi_t}{|\nabla \Phi_t|}$ 이다. v_s 는 미리 정의된 그리드 크기, 즉 제1 TSDF 그리드 한 칸의 크기를 나타낸다.

[0092] 표면으로부터의 거리가 v_s 보다 작은 경우 표면을 넘어가 버리기 때문에, 아래의 [수학식 5]와 같이 표면으로부터 그리드 포인트까지의 거리 및 미리 정의된 그리드 크기 중에서 적은 값을 이용한다.

수학식 5

$$\Phi_t^{i+1}(x) = \Phi_t^i(x - \text{sgn}(\Phi_t^i(x)) \cdot \tilde{n}) + \tilde{v}_s(x)$$

[0094] 여기서, $\tilde{v}_s(x) = \min(v_s, |\Phi_t^i(x)|)$ 이다. $\tilde{n} = \frac{\nabla \Phi_t}{|\nabla \Phi_t|} \frac{\tilde{v}_s}{v_s}$ 이다.

[0095] 즉, TSDF 개선 과정은 그리드 포인트를 기준으로 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트의 값에 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값을 더하여, 제1 TSDF의 그리드 포인트의 값을 개선한다. 여기서, 미리 정의된 그리드 크기를 기반으로 획득된 값은 표면으로부터 그리드 포인트까지의 거리 및 미리 정의된 그리드 크기 중 적은 값일 수 있다.

[0096] 또한, TSDF 개선 과정은 개선된 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로 부터 획득할 수 있다. 보다 자세히 설명하면, TSDF 개선 과정은 개선된 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 그리드 포인트를 기준으로 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득할 수 있다.

[0097] 즉, 심도 카메라로부터의 제1 TSDF 값은 불완전하고 노이즈가 있기 때문에 정확한 표면 법선(normal) 방향을 획득하기 위해서는 신뢰할 수 있는 기울기를 계산하는 것이 필수적이다. 유한한 차이(finite difference)의 정의로부터, 기울기의 3개의 유형(forward, backward, central differences)은 기울기 연산자로 고려될 수 있다.

[0098] 3개의 유형(forward, backward, central differences)에 대한 x축 방향에 따른 종래의 기울기는 각각 아래의 [수학식 6] ~ [수학식 8]과 같다. y축 방향에 따른 종래의 기울기도 x축 방향에 따른 종래의 기울기와 동일한 방법에 의해 계산한다.

수학식 6

[0099]
$$\nabla_x \Phi_t^+ = \Phi_t(x+1, y, z) - \Phi_t(x, y, z)$$

수학식 7

[0100]
$$\nabla_x \Phi_t^- = \Phi_t(x, y, z) - \Phi_t(x-1, y, z)$$

수학식 8

[0101]
$$\nabla_x \Phi_t^0 = \frac{\nabla_x \Phi_t^+ + \nabla_x \Phi_t^-}{2}$$

[0102] 즉, 종래의 기울기 계산 방법은 표면과는 상관없이 기준 지점으로부터 앞 지점의 값과 뒤 지점의 값과의 차이로 기울기를 계산한다.

[0103] 그러나, 제1 TSDF는 노이즈가 많기 때문에, 본 발명은 신뢰성있는 기울기를 구하기 위한 방법을 제안한다. 제1 TSDF는 표면과 멀어질수록 에러가 커지기 때문에, 본 발명은 표면과 가까운 방향으로부터 기울기를 구하는 방법을 제안한다. 본 발명의 x축 방향에 따른 기울기는 아래의 [수학식 9]와 같이 계산한다. 본 발명의 y축 방향에 따른 기울기도 본 발명의 x축 방향에 따른 기울기와 동일한 방법에 의해 계산한다.

수학식 9

[0104]
$$\nabla_x \Phi_t = \begin{cases} \nabla_x \Phi_t^+, & \text{if } \Phi_t \geq 0, \nabla_x \Phi_t^+ \leq 0 \text{ or } \Phi_t < 0, \nabla_x \Phi_t^+ \geq 0 \\ \nabla_x \Phi_t^-, & \text{if } \Phi_t < 0, \nabla_x \Phi_t^+ \geq 0 \text{ or } \Phi_t \geq 0, \nabla_x \Phi_t^+ \leq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0105] 즉, 본 발명에 따른 기울기 계산 방법은 표면과 가까운 쪽과의 차이로 기울기를 계산한다. 예컨대, 그리드 포인트에 대한 기울기는 그리드 포인트를 기준으로 표면과 가까운 방향에 위치한 그리드 포인트를 이용하여 획득될 수 있다.

[0106] 이때, 표면의 법선(normal) 방향은 항상 z축 방향으로 향하기 때문에, 본 발명에 따른 z축 방향에 대한 기울기는 아래의 [수학식 10]과 같이 계산한다.

수학식 10

$$\nabla_z \Phi_t = \begin{cases} \nabla_z \Phi_t^-, & \Phi_t \geq 0 \\ \nabla_z \Phi_t^+, & \Phi_t < 0 \end{cases}$$

[0107]

[0108]

위의 [수학식 9] 및 [수학식 10]에서 제안된 본 발명에 따른 기울기 측정을 통해 표면 방향으로부터의 기울기를 획득할 수 있다. 특히, [수학식 9]의 측정은 기울기 흐름의 증가 또는 감소 방향을 찾아 x축 방향 및 y축 방향에 따른 표면 방향으로부터의 기울기를 계산한다. 한편, [수학식 10]의 측정은 심도 카메라의 캡처 방향을 이용하여 z축 방향에 대한 기울기를 계산한다. 측정을 통해 본 발명에 따른 TSDF 개선 과정이 특정 순서없이 표면 근처에서 표면에서 먼 쪽으로 완전히 병렬적으로 제1 TSDF의 그리드 포인트를 업데이트할 수 있다.

[0110]

TSDF 변형(TSDF Evolution for Deformation) 과정

[0111]

TSDF 변형 과정은 개선(refinement)된 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하는 것을 말한다.

[0112]

즉, 현재 프레임의 제1 TSDF Φ 에 대한 모션 필드 $\Psi=(U,V,W) \in \mathbb{R}^3$ 를 구하여, 현재 프레임에 대한 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)한다. 여기서, 모션 필드 Ψ 는 정준 좌표(canonical coordinate) 상에서 현재 프레임 t의 제1 TSDF $\Phi_t(x)$ 를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF $\Phi_t^{fuse}(x)$ 에 정렬(align)하는데 이용된다. 즉, TSDF 변형 과정은 $\Phi_t^{deform}(x) = \Phi_t(x + \Psi) \simeq \Phi_t^{fuse}(x)$ 를 만족하는, 변형된 제1 TSDF $\Phi_t^{deform}(x)$ 을 찾는 것이다.

[0113]

즉, TSDF 변형 과정은 현재 프레임 t의 제1 TSDF $\Phi_t(x)$ 와 이전 프레임까지 축적된 정준 좌표(canonical coordinate) 제2 TSDF $\Phi_t^{fuse}(x)$ 사이의 모션 필드 Ψ 를 구하는 것이다. 모션 필드 Ψ 는 모션 필드의 기울기가 1이 되도록, 아래의 [수학식 11]을 최적화하는 것을 통해 획득된다.

수학식 11

[0114]

$$E_{deform}(\Psi) = E_{data}(\Psi) + \omega_{smooth} E_{smooth}(\Psi)$$

[0115]

여기서, $E_{deform}(\Psi)$ 은 TSDF 변형에 대한 에너지(energy)를 나타낸다. $E_{data}(\Psi)$ 는 데이터(data) 에너지 항을 나타내고, 아래의 [수학식 12]와 같다. $E_{smooth}(\Psi)$ 는 평활도(smoothness) 에너지 항을 나타내고, 아래의 [수학식 13]과 같다. ω_{smooth} 는 모션의 평활도(smoothness)의 균형을 위한 상수이다.

수학식 12

[0116]

$$E_{data}(\Psi) = \frac{1}{2} \sum_x (\Phi_t(x + \Psi) - \Phi_t^{fuse}(x))^2$$

[0117]

여기서, $E_{data}(\Psi)$ 는 이전 프레임까지 축적된 정준 좌표(canonical coordinate) 제2 TSDF $\Phi_t^{fuse}(x)$ 와 현재 프레임 t에 대한 제1 TSDF $\Phi_t(x)$ 에 모션 필드를 적용한 것과 차이를 나타낸다.

수학식 13

$$E_{smooth}(\Psi) = \frac{1}{2} \sum_x (|\nabla U|^2 + |\nabla V|^2 + |\nabla W|^2)$$

[0118]

[0120] TSDF 융합(TSDF Evolution for Fusion) 과정

[0121] 도 6은 도 4에 도시한 TSDF 융합 과정을 설명하기 위한 도면으로, 도 6의 (a)는 이전 프레임까지 축적된 TSDF Φ_t^{fuse} 를 나타내고, 도 6의 (b)는 현재 프레임 t에 대한 TSDF Φ_t 를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)한 결과 Φ_t^{deform} 를 나타내며, 도 6의 (c)는 도 6의 (a)와 도 6의 (b)를 종래의 방법에 따라 융합(fusion)한 결과 $\Phi_{t+1}^{\sim fuse}$ 를 나타내고, 도 6의 (d)는 융합(fusion)된 TSDF $\Phi_{t+1}^{\sim fuse}$ 를 본 발명에 따라 개선(refinement)한 결과 Φ_{t+1}^{fuse} 를 나타낸다.

[0122] TSDF 융합 과정은 변형(deformation)된 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하고, 융합된 제2 TSDF의 기울기가 미리 설정된 값(예컨대, '1' 등)이 되도록 융합된 제2 TSDF를 개선(refinement)하는 것을 말한다.

[0123] 즉, 현재 프레임 t에 대한 제1 TSDF $\Phi_t(x)$ 를 본 발명에 따른 TSDF 개선 과정을 통해 개선(refinement)하여 $\Phi_t^{refine}(x)$ 를 획득한다. 그리고, TSDF 변형 과정에서, 개선된 제1 TSDF $\Phi_t^{refine}(x)$ 를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF $\Phi_t^{fuse}(x)$ 에 정렬하기 위해, 변형된 제1 TSDF $\Phi_t^{deform}(x)$ 를 획득한다. 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF $\Phi_t^{fuse}(x)$ 는 정준 좌표(canonical coordinate) 상에서 첫번째 프레임부터 이전 프레임 t-1까지의 TSDF의 누적이다.

[0124] 그리고, TSDF 융합 과정은 변형(deformation)된 현재 프레임의 제1 TSDF와 이전 프레임까지 축적된 정준 좌표(canonical coordinate) 제2 TSDF를 합치는 과정이다. 종래의 융합 방법은 아래의 [수학식 14] 및 [수학식 15]와 같이 단순한 이동 평균(moving average)으로 계산한다.

수학식 14

$$\omega_{t+1}^{fuse}(x) = \omega_t^{fuse}(x) + \omega_t^{deform}(x)$$

[0125]

수학식 15

$$\Phi_{t+1}^{fuse}(x) = \frac{\omega_t^{fuse}(x) \cdot \Phi_t^{fuse}(x) + \omega_t^{deform}(x) \cdot \Phi_t^{deform}(x)}{\omega_{t+1}^{fuse}(x)}$$

[0126]

[0127] 여기서, $\omega_t^{fuse}(x)$ 및 $\omega_t^{deform}(x)$ 는 각각 프레임 t에서의 그리드 포인트 x에 대한 $\Phi_t^{fuse}(x)$ 및 $\Phi_t^{deform}(x)$ 에 대응되는 TSDF 가중치이다.

[0128] 종래의 방법은 융합(fusion)하는 도중 기울기가 바뀌게 될 수 있어 노이즈를 유발할 수 있다. 본 발명은 융합(fusion)을 한 다음 아래의 [수학식 16]과 같이 개선(refinement)을 하는 것을 통해 보다 정확한 융합(fusion) 방법을 제안한다. 즉, [수학식 16]의 TSDF 융합에 대한 에너지(energy)를 변분법에서의 미분(variational derivative)을 이용하여 제2 TSDF의 그리드 포인트의 값을 반복적으로 업데이트하는 것을 통해 최소화하여, 융

합된 제2 TSDF를 개선할 수 있다.

수학식 16

$$E_{fuse}(\Phi_t) = \sum_x E_{data}(\Phi_t) + \omega_{dist} E_{dist}(\Phi_t)$$

여기서, $E_{fuse}(\Phi_t)$ 는 TSDF 융합에 대한 에너지(energy)를 나타낸다. $E_{data}(\Phi_t)$ 는 데이터(data) 에너지 항을 나

타내고, $E_{data}(\Phi_t(x)) = \frac{1}{2} (\Phi_{t+1}^{fuse}(x) - \Phi_t(x))^2$ 이다. $E_{dist}(\Phi_t)$ 는 정규화(regularization) 에너지 항을 나
타내고, 아래의 [수학식 17]과 같다. w_{dist} 는 0보다 크고, 전파(propagation) 및 정규화(regularization)의 균
형을 위한 상수이다.

수학식 17

$$E_{dist}(\Phi_t) = \int p(|\nabla \Phi_t|) dx$$

$$p(s) = \begin{cases} \frac{1}{(2\pi)^2} (1 - \cos(2\pi s)), & \text{if } s \leq 1 \\ \frac{1}{2} (s-1)^2, & \text{if } s > 1 \end{cases}$$

여기서, 이다.

즉, TSDF 융합 과정의 수행 결과, 융합된 제2 TSDF의 기울기가 1이 되도록 유지할 수 있다.

도 6에 도시된 바와 같이, 본 발명은 도 6의 (a)에 도시된 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF Φ_t^{fuse} 의 기울기를
도 6의 (d)에 도시된 개선된 제1 TSDF Φ_{t+1}^{fuse} 로 전파함으로써 노이즈 및 오정렬(misalignment)로 인한 뚜렷한
값의 변화를 방지한다.

정리하면, 융합(fusion)을 하는 동안 기울기를 유지하도록 하여, 현재 프레임의 노이즈가 융합(fusion)된 결과
에 반영되지 않도록 한다.

그러면, 도 7 내지 도 9를 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능에 대하여 설명
한다.

본 발명에 따른 3차원 복원 방법의 성능 실험을 위한 상세 내용은 아래와 같다.

- Nvidia RTX 2080 Ti GPU를 이용

- bounding volume : $150 \times 150 \times 150$

- 그리드 크기 : 3mm ~ 10mm

- ω_{smooth} : 0.3

- α_{deform} : 0.2

- ω_{dist} : 0.02

- α_{fuse} : 0.2

- 절단 마진(truncated margin) τ : $5 \times$ 그리드 크기

- 반복 횟수 : 5

- [0150] 리지드 장면(rigid scene)에 대한 실험
- [0151] 도 7은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 설명하기 위한 도면으로, 리지드 장면(rigid scene)에 대한 실험 결과를 나타낸다.
- [0152] 즉, 도 7은 프레임 t가 0, 90 및 180인 경우의 리지드 장면(rigid scene)에 대한 질적 비교 결과로, 도 7의 (a)는 종래의 KinectFusion 방법을 통해 복원된 결과를 나타내고, 도 7의 (b)는 종래의 SDF2SDF 방법을 통해 복원된 결과를 나타내며, 도 7의 (c)는 본 발명에 따른 3차원 복원 방법을 통해 복원된 결과를 나타낸다.
- [0153] - 종래의 KinectFusion 방법 : ICP(Iterative Closest Points)를 이용하여 TSDF의 등가면(iso-surface)과 주어진 프레임 심도 사이의 리지드 변환(rigid transform)을 찾는 것임(S. Izadi, D. Kim, O. Hilliges, D. Molyneaux, R. Newcombe, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, D. Freeman, A. Davison et al., "KinectFusion: Real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera", in Proc. Ann. Symp. User Interface Software and Technology, 2011, pp. 559-568. & R. A. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. J. Davison, P. Kohi, J. Shotton, S. Hodges, and A. Fitzgibbon, "KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking", in Proc. IEEE Int. Symp. Mixed Augmented Reality, 2011, pp. 127-136. 참조)
- [0154] - 종래의 SDF2SDF 방법 : 리지드 변환(rigid transform)을 찾기 위해 TSDF 기울기를 이용하는 것임("SDF-2-SDF: Highly accurate 3D object reconstruction", in Proc. Eur. Conf. Comput. Vis., 2016, pp. 680-696. 참조)
- [0155] 도 7에 도시된 바와 같이, 종래의 KinectFusion 방법에 따른 복원 결과는 두 개의 머리를 가진 개와 같은 아티팩트(artifact)가 발생한다. 표면 거리를 최소화하는 종래의 KinectFusion 방법에 비해 종래의 SDF2SDF 방법은 TSDF 차이를 최소화한다. 따라서, TSDF의 모든 유효한 값은 종래의 SDF2SDF 방법의 최적화 과정에 포함되어 종래의 KinectFusion 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 종래의 SDF2SDF 방법에 따른 결과는 시간이 지남에 따라 증가하는 노이즈와 오류에 의해 종래의 SDF2SDF 방법의 정렬 및 복원에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 본 발명에 따른 3차원 복원 방법은 시간 경과에 따른 오류를 처리하여 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 정렬 및 복원 결과를 보여줌으로써, 종래의 방법보다 더 향상된 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.
- [0157] 동적인 장면(dynamic scene)에 대한 실험
- [0158] 도 8은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 설명하기 위한 도면으로, 동적인 장면(dynamic scene)에 대한 실험 결과를 나타낸다.
- [0159] VolumeDeform[18] 내의 "Minion"과 "Sunflower"의 단일-뷰(single-view) RGB-D 스트림을 이용하고, 종래의 KillingFusion 방법, 종래의 SobolevFusion 방법 및 종래의 SurfelWarp 방법을 이용하여, 동적인 장면(dynamic scene)에 대한 본 발명에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 실험하였다.
- [0160] - 종래의 KillingFusion 방법 : M. Slavcheva, M. Baust, D. Cremers, and S. Ilic, "KillingFusion: Nonrigid 3D reconstruction without correspondences", in Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., 2017, pp. 1386-1395. 참조
- [0161] - 종래의 SobolevFusion 방법 : M. Slavcheva, M. Baust, and S. Ilic, "SobolevFusion: 3D reconstruction of scenes undergoing free non-rigid motion", in Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., 2018, pp. 2646-2655. 참조
- [0162] - 종래의 SurfelWarp 방법 : W. Gao and R. Tedrake, "SurfelWarp: Efficient non-volumetric single view dynamic reconstruction", in Proc. Robot.: Sci. Syst., 2018. 참조
- [0163] 도 8에 도시된 바와 같이, 종래의 SobolevFusion 방법은 Sobolev 공간의 기울기를 이용한 계층적인 전파에 의해 종래의 KillingFusion 방법보다 더 나은 결과를 보여준다. 종래의 SobolevFusion 방법은 Sobolev 공간 내의 coarse-to-fine 진화를 이용한 노이즈가 많은 기울기에 효율적으로 대처함으로써 종래의 SurfelWarp 방법보다 더 나은 정확도를 달성한다. 그럼에도 불구하고, 종래의 SobolevFusion 방법과 종래의 KillingFusion 방법은 TSDF의 불안전성과 불완전성으로 인해 생성 및 융합에 의해 TSDF 오류가 누적되는 문제가 있다. 본 발명에 따른 3차원 복원 방법은 더 나은 정확성과 신뢰성을 달성할 수 있다.

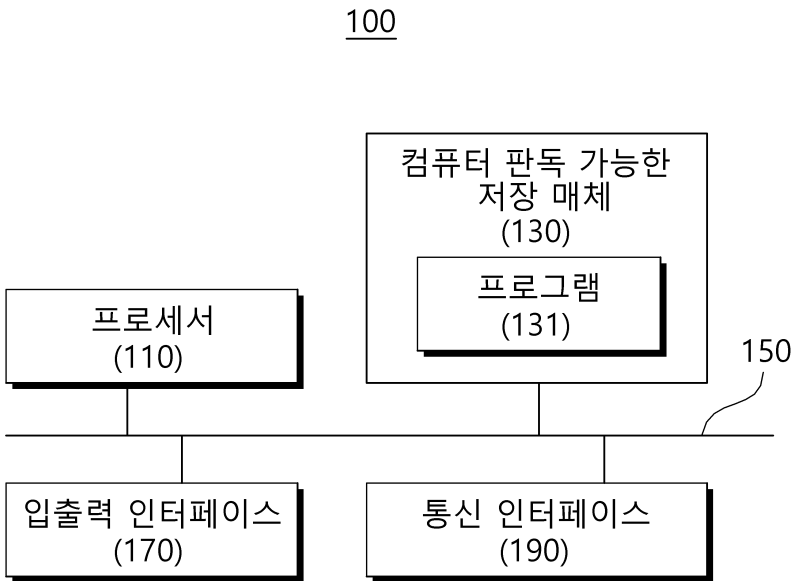
- [0165] 동적인 시퀀스(dynamice sequence)에 대한 실험
- [0166] 도 9는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 설명하기 위한 도면으로, 동적인 시퀀스(dynamice sequence)에 대한 실험 결과를 나타낸다.
- [0167] 즉, 도 9에 도시된 첫번째 행과 두번째 행은 각각 프레임 넘버 50 및 300에서의 복원 결과를 나타내고, 도 9에 도시된 세번째 행은 두번째 행에 해당하는 뒷면을 나타낸다.
- [0168] Microsoft Kinect Azure를 이용하여 캡처된 단일 스트림을 이용하고, 종래의 KinectFusion 방법 및 종래의 SobolevFusion 방법을 이용하여, 동적인 시퀀스(dynamice sequence)에 대한 본 발명에 따른 3차원 복원 방법의 성능을 실험하였다.
- [0169] 도 9에 도시된 바와 같이, 종래의 KinectFusion 방법은 표면 법선(normal)이 고르지 않은 노이즈가 많은 심도에 충분히 대처할 수 없고, 물체 변형을 전혀 처리할 수 없으므로 동적인 시퀀스에서 심각한 아티팩트(artifact)가 발생한다. 시퀀스의 초기 프레임(첫번째 행)에서, 종래의 SobolevFusion 방법과 본 발명에 따른 3차원 복원 방법의 차이는 크지 않다. 본 발명에 따른 3차원 복원 방법을 이용하여 복원한 모양은 노이즈가 많지 않다. 그러나, 시퀀스의 중간 프레임(두번째 행)에서 상당한 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 종래의 SobolevFusion 방법은 단기 시퀀스에서 점진적으로 3D 모양을 복원하지만, 동적인 물체에 대한 완전한 3D 모양을 거의 생성하지 못한다. 이는 도 9의 마지막 행(세번째 행)에 도시된 바와 같이 후면에서 보다 명확하게 확인할 수 있다. 본 발명에 따른 3차원 복원 방법은 동적으로 움직이는 물체를 추적하여 TSDF에서 전체 물체를 복원함으로써, 동적인 물체를 정확하게 추적할 수 있다.
- [0172] 본 실시예들에 따른 동작은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체는 실행을 위해 프로세서에 명령어를 제공하는데 참여한 임의의 매체를 나타낸다. 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 예컨대, 자기 매체, 광기록 매체, 메모리 등이 있을 수 있다. 컴퓨터 프로그램은 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어 분산 방식으로 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드가 저장되고 실행될 수도 있다. 본 실시예를 구현하기 위한 기능적인(Functional) 프로그램, 코드, 및 코드 세그먼트들은 본 실시예가 속하는 기술 분야의 프로그래머들에 의해 용이하게 추론될 수 있을 것이다.
- [0173] 본 실시예들은 본 실시예의 기술 사상을 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예에 의하여 본 실시예의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 실시예의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 실시예의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

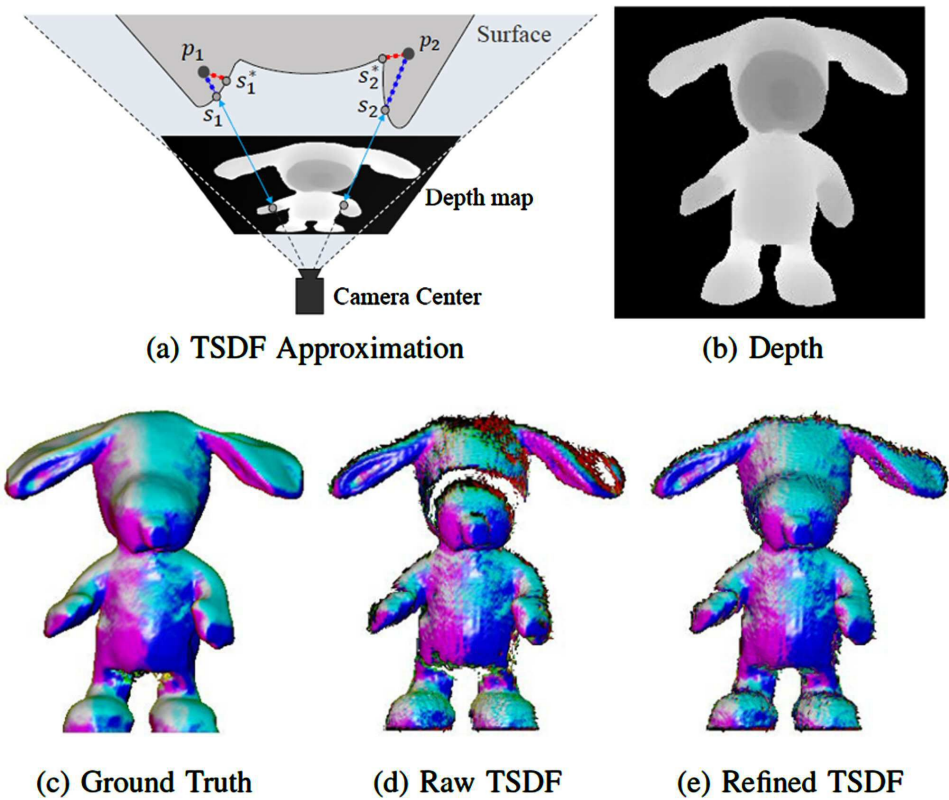
- [0174] 100 : 3차원 복원 장치,
 110 : 프로세서,
 130 : 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체,
 131 : 프로그램,
 150 : 통신 버스,
 170 : 입출력 인터페이스,
 190 : 통신 인터페이스

도면

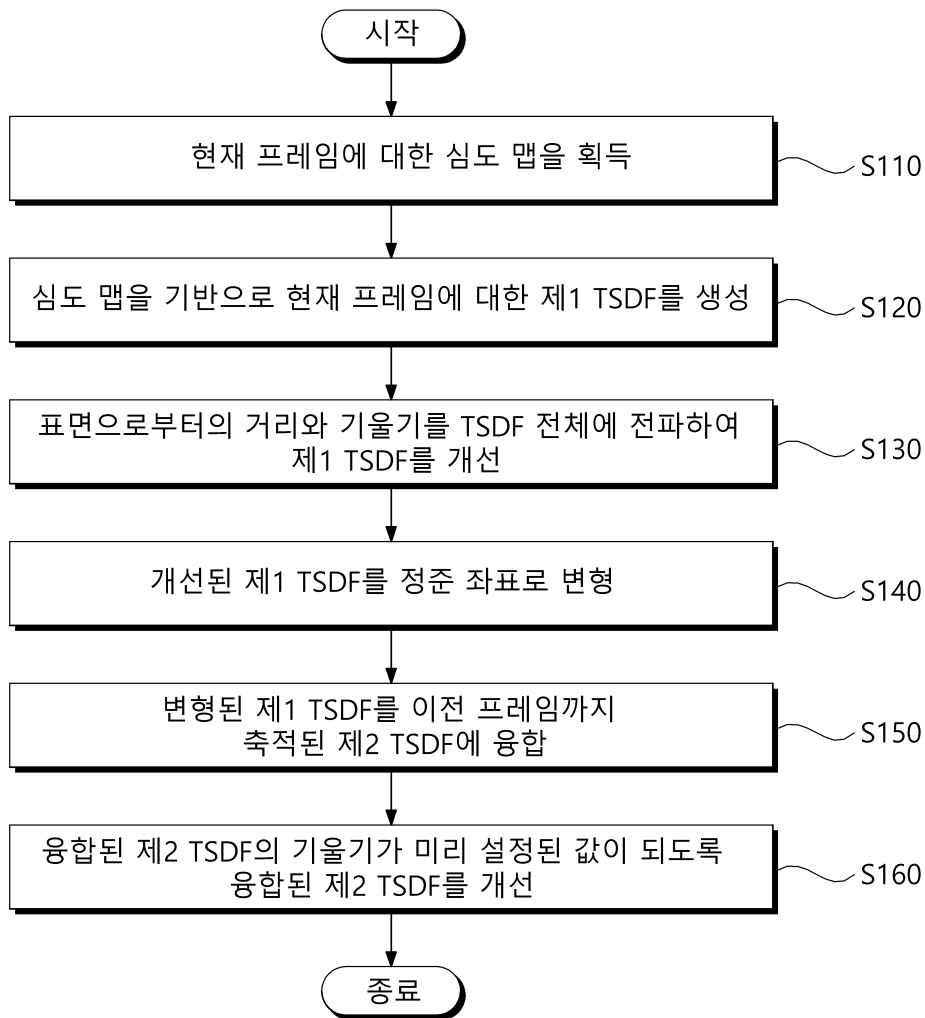
도면1



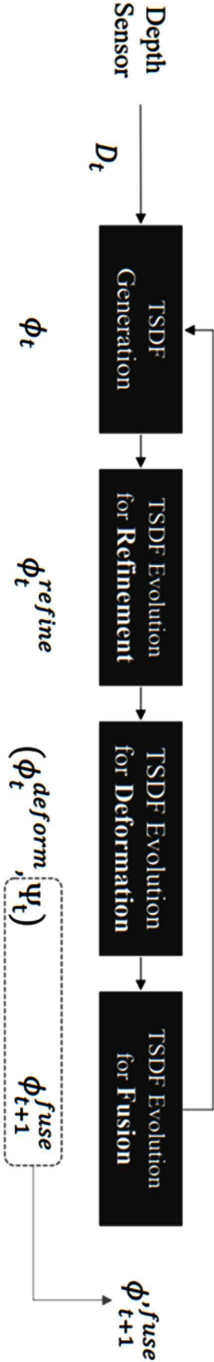
도면2



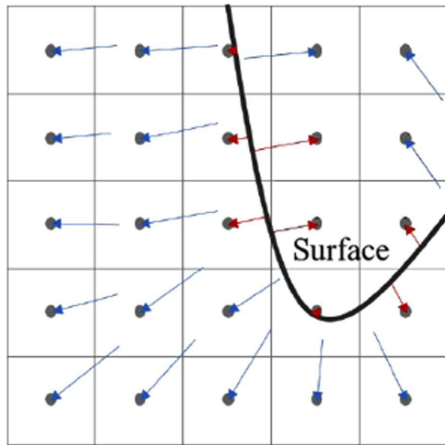
도면3



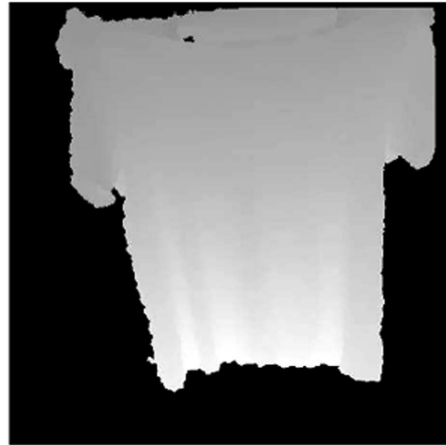
도면4



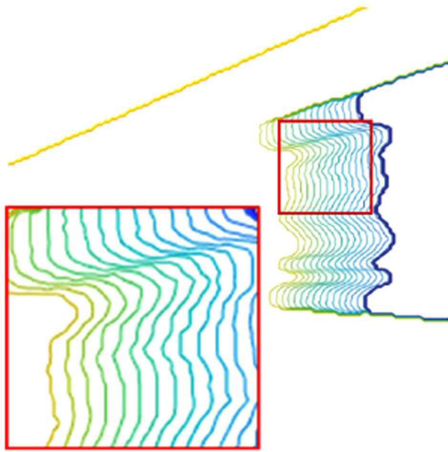
도면5



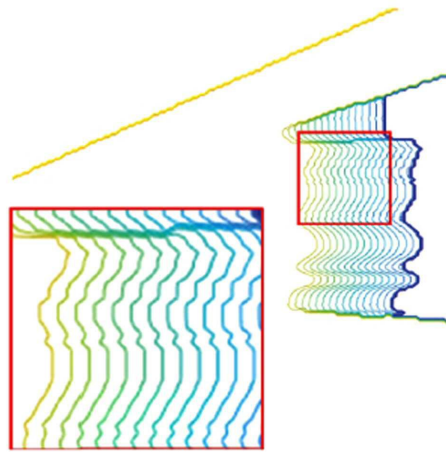
(a) TSDF Refinement



(b) Depth

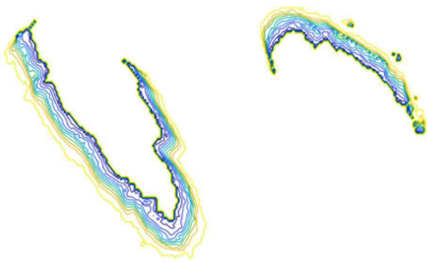


(c) Raw TSDF

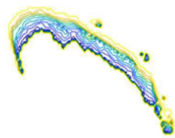


(d) Refined TSDF

도면6



(a) ϕ_t^{fuse}



(b) ϕ_t^{deform}

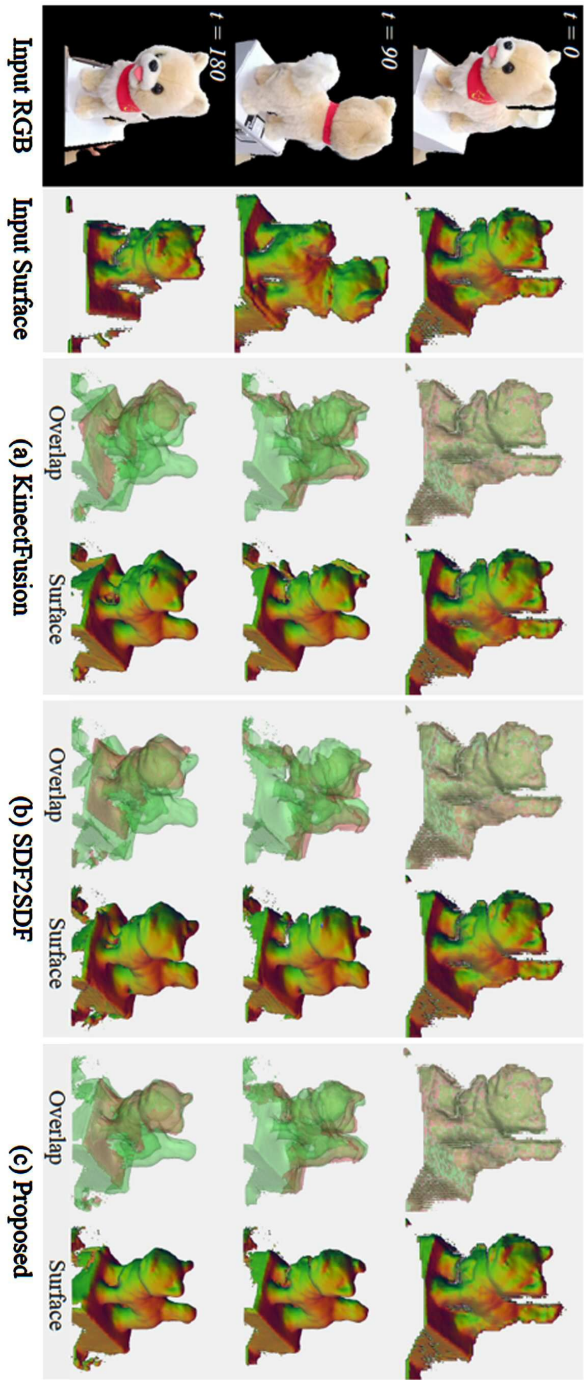


(c) $\tilde{\phi}_{t+1}^{fuse}$

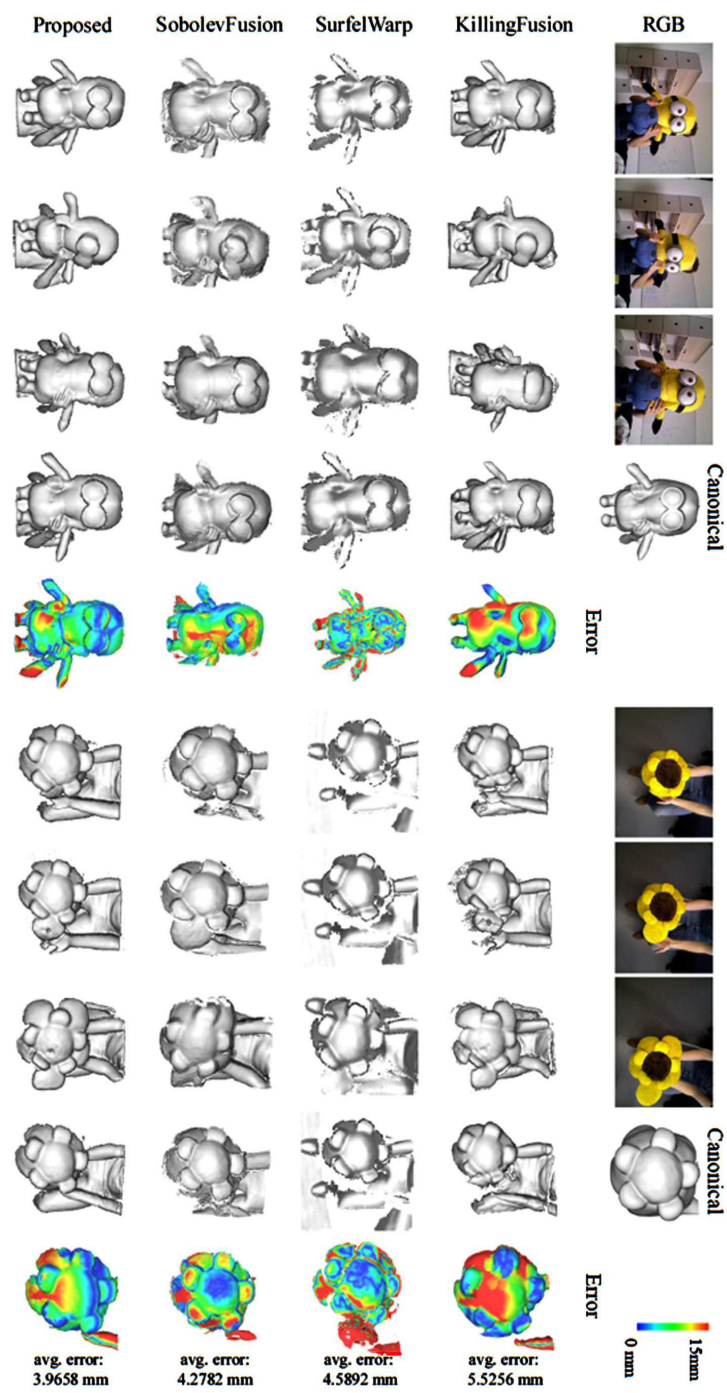


(d) ϕ_{t+1}^{fuse}

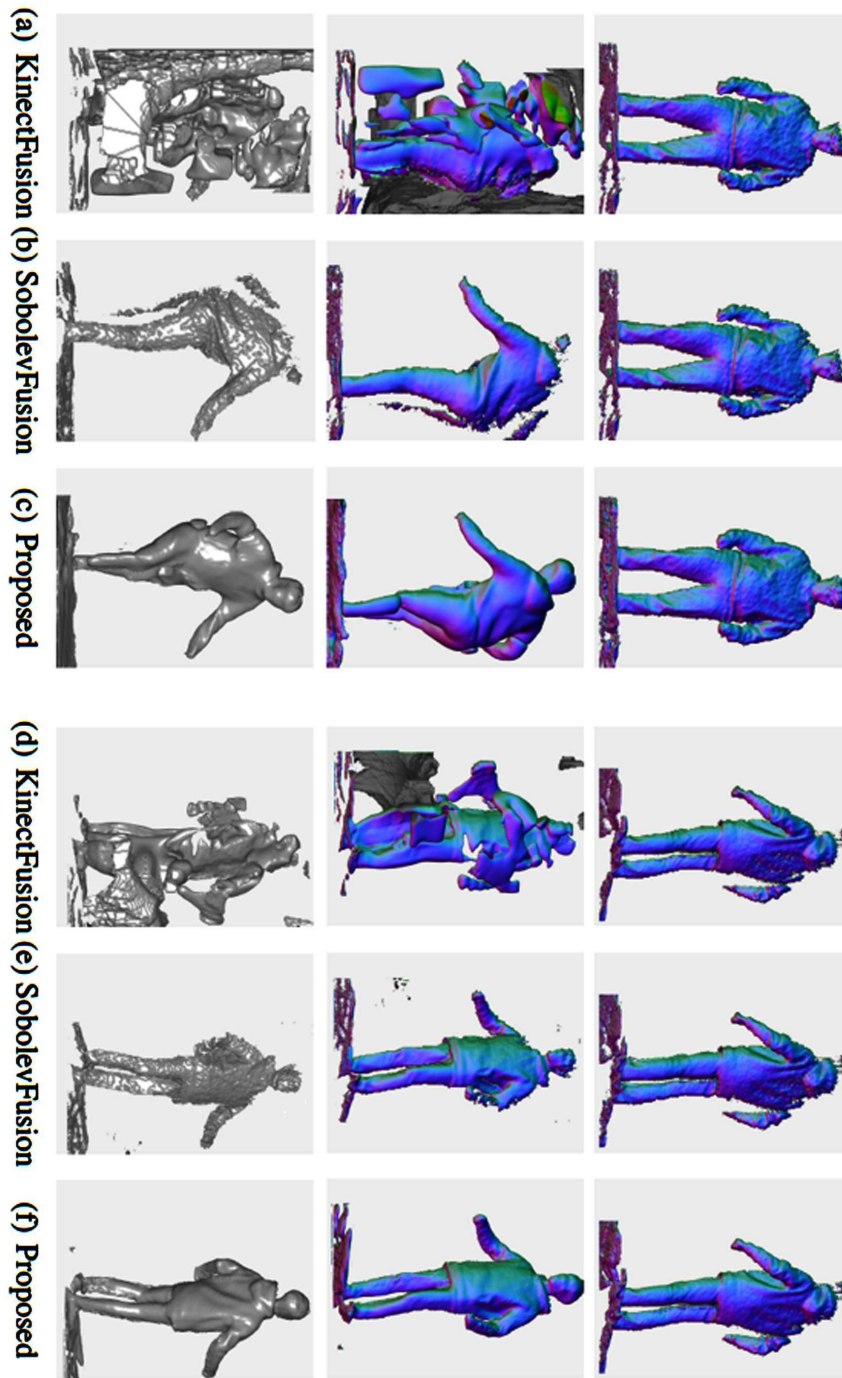
도면7



도면8



도면9



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 1

【변경전】

현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하는 단계;

상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하는 단계;

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선

(refinement)하는 단계;

개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하는 단계; 및

변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하는 단계;

를 포함하며,

상기 제1 TSDF 개선 단계는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득하는 것으로 이루어지는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

【변경후】

현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하는 단계;

상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하는 단계;

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하는 단계;

개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하는 단계; 및

변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하는 단계;

를 포함하며,

상기 제1 TSDF 개선 단계는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로부터 획득하는 것으로 이루어지는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 방법.

【직권보정 2】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 9

【변경전】

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성하는 3차원 복원 장치로서,

TSDF를 생성하기 위한 하나 이상의 프로그램을 저장하는 메모리; 및

상기 메모리에 저장된 상기 하나 이상의 프로그램에 따라 TSDF를 생성하기 위한 동작을 수행하는 하나 이상의 프로세서;

를 포함하고,

상기 프로세서는,

현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하고,

상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하며,

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하고,

개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하며,

변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하고,

상기 프로세서는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으

로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로 부터 획득하는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치.

【변경후】

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF(truncated signed distance function) 전체에 전파하여 TSDF를 생성하는 3차원 복원 장치로서,

TSDF를 생성하기 위한 하나 이상의 프로그램을 저장하는 메모리; 및

상기 메모리에 저장된 상기 하나 이상의 프로그램에 따라 TSDF를 생성하기 위한 동작을 수행하는 하나 이상의 프로세서;

를 포함하고,

상기 프로세서는,

현재 프레임에 대한 심도 맵(depth map)을 획득하고,

상기 심도 맵을 기반으로 상기 현재 프레임에 대한 제1 TSDF(truncated signed distance function)를 생성하며,

표면으로부터의 거리(distance)와 기울기(gradient)를 TSDF 전체에 전파하여 상기 제1 TSDF를 개선(refinement)하고,

개선된 상기 제1 TSDF를 정준 좌표(canonical coordinate)로 변형(deformation)하며,

변형된 상기 제1 TSDF를 이전 프레임까지 축적된 제2 TSDF에 융합(fusion)하고,

상기 프로세서는, 상기 제1 TSDF의 각 그리드 포인트(grid point)의 값을 상기 제1 TSDF의 표면의 값을 기반으로 개선하고, 개선된 상기 제1 TSDF의 그리드 포인트에 대한 기울기를 상기 제1 TSDF의 표면과 가까운 방향으로 부터 획득하는,

단일 심도 카메라를 이용한 3차원 복원 장치.