

Free-Hand 선화로부터 점진적 3차원 물체 복원

(Progressive Reconstruction of 3D Objects from a Single
Freehand Line Drawing)

오 범 수 [†] 김 창 현 ^{**}
(Beom-Soo Oh) (Chang-Hun Kim)

요 약 본 논문은 하나의 스케치 면도인 선화로부터 면 인식의 탐색 영역을 축소하고 다양한 3차원 물체를 빠르게 복원하는 점진적인 알고리즘을 제안한다. 복원 과정의 입력으로 사용되는 스케치 면도는 파선이 제거되지 않은 모서리-꼭지점 그래프인 2차원 스케치 면도로서 3차원 와이어프레임 물체의 부정확한 free-hand 스케치이다. 알고리즘은 두 단계로 수행된다. 면 인식 단계에서는 스케치 면도로부터 모든 가능한 면을 생성하고 탐색 공간을 축소하기 위한 기하학적 위상학적 제약 조건을 이용하여 면을 불가능한 면, 기본 면, 최소 면으로 분류한다. 제안 알고리즘은 물체를 구성하는 실제 면을 빠르게 인식하기 위하여 최소면만을 탐색한다. 물체 생성 단계에서는 면의 스케치 순서에 따라 물체의 꼭지점 좌표를 최적화 함으로써 3차원 구조를 점진적으로 계산한다. 점진적 방법은 복원 과정에서 물체와 스케치 도면 사이의 관계로부터 유도된 3차원 제약 조건을 적용함으로써 최적 3차원 물체를 빠르게 복원한다. 또한, 스케치 도중에 시점 이동을 허용한다. 점진적 복원 알고리즘을 기술하고 실제 구현 결과를 보인다.

키워드 : 점진적 물체 복원, free-hand 스케치, 최소면 탐색

Abstract This paper presents a progressive algorithm that not only can narrow down the search domain in the course of face identification but also can fast reconstruct various 3D objects from a sketch drawing. The sketch drawing, edge-vertex graph without hidden line removal, which serves as input for reconstruction process, is obtained from an inaccurate freehand sketch of a 3D wireframe object. The algorithm is executed in two stages. In the face identification stage, we generate and classify potential faces into implausible, basis, and minimal faces by using geometrical and topological constraints to reduce search space. The proposed algorithm searches the space of minimal faces only to identify actual faces of an object fast. In the object reconstruction stage, we progressively calculate a 3D structure by optimizing the coordinates of vertices of an object according to the sketch order of faces. The progressive method reconstructs the most plausible 3D object quickly by applying 3D constraints that are derived from the relationship between the object and the sketch drawing in the optimization process. Furthermore, it allows the designer to change viewpoint during sketching. The progressive reconstruction algorithm is discussed, and examples from a working implementation are given.

Key words : progressive object reconstruction, free-hand sketch, minimal face search

• 본 연구는 대학 IT연구센터 육성(가운데에 점)지원사업의 연구결과로 수행되었음

† 비 회 원 : 고려대학교 컴퓨터학과
obs@vizutech.com

** 종신회원 : 고려대학교 컴퓨터학과 교수
chkim@korea.ac.kr

논문접수 : 2001년 12월 17일
심사완료 : 2003년 1월 6일

1. 서 론

기계 부품의 개념적인 설계 단계에서 설계자들은 기계 부품에 대한 기본적인 생각을 주로 종이 위에다 그리는 경향이 있다. 이러한 설계자의 경향은 제품의 기본 개념을 표현하는 수단으로써 컴퓨터를 사용하는 인터페이스가 적절하지 않기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 2차원 스케치 도면으로부터 물체의 3차원 정보를 복원하는 방법이 있다. 2차원 스케치 도면은 기계 부품의 개념적인 설계 단계에서 그려지는 3차원 와이어프레임 모델에 대한 부정확한 투영이다. 선분 도면을 이용하여 3차원 정보를 표현하는 방법은 기하학 정보의 입력이 용이하다. 3차원 모델이 얻어지면, 제어나 수정이 가능하다. 또한, 보다 자세하고 정확한 모델을 얻기 위하여 상세한 스케치가 가능하다. 이러한 접근 방법은 설계자들의 생각을 CAD(Computer-Aided Design) 시스템으로 전달하는 수단을 제공한다.

그러나, 3차원 물체를 표현하는 스케치 도면을 처리하는 시스템은 드물다. 복원의 주요 어려움은 스케치 평면으로부터 3차원으로의 역투영을 수행해야 하는 것이다. 이러한 과정은 수학적으로 해가 무수히 많이 존재한다. 또한, 2차원 스케치 도면은 3차원 와이어프레임 모델의 부정확한 투영이기 때문에 복원의 어려움을 배가시킨다. 그러나, 인간은 스케치 도면에 표현된 3차원 물체를 쉽게 인지한다. 본 논문에서는 이러한 인간의 능력을 컴퓨터 상에서 수행하려고 한다.

2차원 스케치 도면으로부터 3차원 기하 정보를 복원하기 위해서는 첫째, 스케치 도면상의 선분을 분석하여 모서리-꼭지점 그래프를 생성한 후 [1], 2차원 모서리-꼭지점 그래프인 스케치 평면 위에 그려진 3차원 물체를 구성하는 실제면에 대응하는 모서리 순회인 2차원 면을 인식하여야 한다 [2, 3]. 둘째, 인식된 면-모서리-꼭지점 사이의 기하학적/위상학적 관계를 이용하여 3차원 물체를 재구성한다 [4, 5]. 즉, 3차원 물체를 이루는 각 꼭지점의 깊이 정보를 복원하여야 한다.

전통적인 면 인식 방법은 스케치 면도로부터 생성된 후보면을 불가능한 면과 최소면으로 분류하고 조합 탐색을 통하여 물체를 구성하는 실제 면을 인식하나, 하나의 스케치 면도는 무수히 많은 3차원 물체에 대응되기 때문에 탐색 대상이 되는 최소면의 수의 방대함으로 인하여 많은 조합 탐색을 요구한다. 또한, 기존 3차원 복원 방법들은 완전한 고정된 시점에서의 오프라인 스케치로부터 이미지 정형성을 이용하여 유도된 목적 함수를 깊이 값에 대하여 최소화 함으로써 3차원 물체를 복원하였다. 따라서, 시점이 변하는 온라인 스케치에 적용시키기 어려우며, 모든 2차원 요소간의 전체적인 관계를 이용하기 때문에 많은 처리 시간이 요구된다.

본 논문에서는 면 분류를 통한 빠른 면 인식 방법과 설계자의 스케치 순서에 따라 빠르게 3차원 물체를 복원하는 점진적 알고리즘에 대하여 기술한다. 그림 1은

점진적 3차원 복원 과정의 개념도이다. 면 인식 단계에서 알고리즘은 후보면 생성한 후, 효율적으로 면을 분류하여 탐색 대상이 되는 최소면의 수를 줄인다. 스케치 면도와 물체 사이의 제약 조건을 도입함으로써 후보면을 탐색 과정 없이 실제면으로 결정되는 기본면, 실제면으로 될 수 없는 불가능한 면, 그리고 그 상태가 결정되지 않은 최소 면으로 분류한다. 축소된 최소면만을 탐색함으로써 물체를 구성하는 2차원 실제면을 빠르게 인식한다. 물체 생성 단계에서 제안 방법은 스케치로부터 물체에 대한 기하 정보를 복원하기 위하여 물체를 구성하는 면을 덧붙여 나감으로써 물체의 대략적인 모양인 부분 물체로부터 세부적인 위치를 점진적으로 최적화 하기 위하여 면의 스케치 순서를 복원한다. 최적화 과정에서 부분 물체와 스케치 평면 사이의 관계로부터 유도된 3차원 제약 조건을 사용함으로써 빠르게 3차원 완전 물체를 복원한다. 점진적 3차원 복원 알고리즘의 주요 특징은 다음과 같다.

- 빠른 면 인식 : 후보면을 스케치 면도와 물체의 제약 조건을 이용하여 불가능한 면, 기본면, 최소면으로 효율적으로 분류하여, 탐색 대상이 되는 최소면

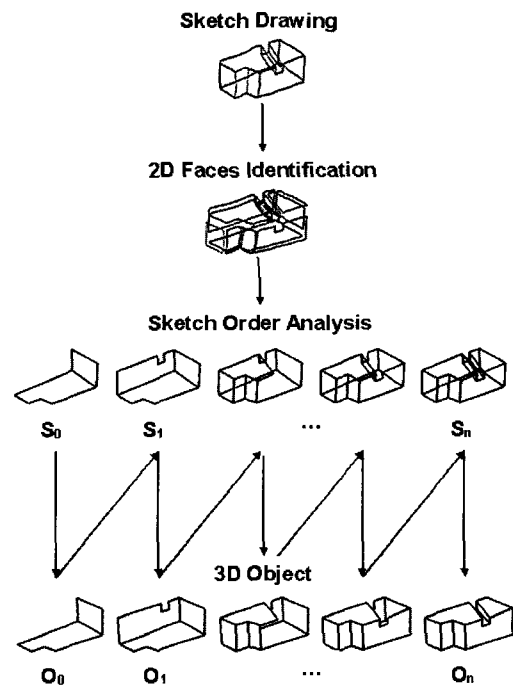


그림 1 스케치 도면으로부터 점진적 3차원 복원 방법의 개요도

의 수를 축소시킴으로써 물체를 구성하는 실제면을 빠르게 인식한다.

- 빠른 물체 복원 : 오프라인 스케치 면도의 경우 사용자가 그린 면의 스케치 순서를 예측하여 스케치 면도와 물체 사이의 기하학적 관계를 목적 함수화하여 3차원 구조를 점진적으로 계산함으로써 물체를 빠르게 복원한다.
- 시점 변화 허용 : 점진적 알고리즘은 스케치 면도와 물체와의 관계만을 이용하기 때문에 스케치 면도의 2차원 요소간의 관계를 재계산하지 않고 온라인 스케치의 시점 변화를 허용한다.

2. 관련 연구

하나의 스케치 도면은 차원이 부족하기 때문에 사라진 차원을 추출하기 위한 추가적인 방법이 존재하여야 한다. 하나의 도면으로부터 3차원 물체를 복원하기 위한 많은 방법이 연구되어 왔다. 그 접근 방법에 따라 선분 분류 접근 방법[6,7,8,9], 기울기 공간 접근 방법[10], 선형 시스템 접근 방법[11,12], 상호 작용 생성 접근 방법[13,14,15], 프리미티브 인식 접근 방법[15], 그리고 최소 표준편차 접근 방법[4,14,16,17,18] 등 많은 접근 방법이 존재한다. Wang et al.[19]과 Lipson[20]은 하나의 투영 면도로부터 3차원 물체 복원에 대한 자세한 조사를 수행하였다.

특히, 파선을 제거한 하나의 면도를 해석하는 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이러한 방법들은 선분 교차 라이브러리 (junction library)에 기반을 둔 다양한 선분 분류 (line labeling) 기법을 제시하였다. 이러한 기법에 따르면, 면도의 모든 선분들은 면의 오목 교차, 볼록 교차 또는 가리는 면의 모서리로 분류된다. 해석 결과 일관성 있는 선분 분류의 집합이 탐색 된다. 그러나, 파선이 제거되었기 때문에 면 인식이나 선분 분류 과정이 간단하다.

Marill[18]은 꼭지점의 깊이 정보를 최소 각도 표준편차(MSDA : Minimum Standard Deviation of Angle)를 이용한 최적화 기반 복원 방법을 제안하였다. 그의 방법은 교차점에서의 MSDA로부터 유도된 목적 함수를 최소화함으로써 스케치 평면을 3차원 물체로 확장 시킨다. 그러나, 이러한 기술은 직교하지 않는 모델에 대하여 부적절한 복원 결과를 야기함을 실험을 통하여 알 수 있다.

Braid and Wang[16]은 conjugate gradients 를 이용하여 최적화 과정의 속도를 향상시킴으로써 Marill의 방법을 개선하였다.

Leclerc and Fisler[17]은 서로 교차하지 않는 모든

모서리 순회를 인식하였으나, 오목 다각형 면에 적용할 수 없으며, 스케치 도면과 같이 부정확한 스케치의 경우에 적용할 수 없다. 또한 물체 복원 과정에서 면의 평탄성 (face planarity)을 이용하여 Marill의 방법을 수정하였으나, 복원 물체 유형이 제한적이다.

Lamb[14]는 선분 분류 기법에 기반을 두고 상호 작용하는 복원 시스템을 구현하였으며, 주축(principal axis)를 인식하고 대칭성을 검사하여 애매성이 발생할 경우 사용자의 개입을 허용한다.

Grimstead et al.[11]은 파선이 제거된 하나의 직교 투영도로부터 삼면체 (tri-hedral) 물체를 생성하였다. 복원의 선분 분류와 이미지 정형성으로부터 유도된 목적 함수를 반복적인 최소 자승법 (least-square solution)에 기반을 두고 복원하였다.

Shpitalni and Lipson[3]는 최대 순회 공식 (maximum rank equation)과 인접면 이론(face adjacency theorem)을 이용하여 효율적으로 2차원 면을 인식하였다. 그러나, 수 많은 불가능한 면을 포함하는 최소면 탐색 영역에 대한 많은 조합 탐색을 요구한다.

Lipson and Shpitalni[4]은 다양한 이미지 정형성을 수식화 하여 목적 함수를 생성하고 최적화 방법에 기반을 둔 평면과 원통면을 포함하는 다양한 3차원 물체를 복원하였다. 매니폴드, 논-매니폴드, 그리고 이러한 물체들의 조합을 포함하는 다양한 물체에 대하여 실험을 한 결과 최적해를 생성함을 알 수 있다.

많은 연구가 수행되었지만, 크게 다음과 같은 두 가지 이유로 인하여 실제적인 복원 시스템을 개발하기는 어렵다. (i) 하나의 2차원 스케치 면도는 무수히 많은 3차원 물체에 대응 가능하며, 수 많은 후보면을 가지고 있기 때문에 기존 방법들은 면 인식 과정에서 많은 조합 탐색을 요구한다. 따라서, 탐색 영역을 축소하는 방법이 제시되어야 한다. (ii) 최소 표준편차 접근 방법에 기반을 둔, 많은 방법들이 제시되었으나, 대부분 이미지 정형성을 수식화 하여 목적함수를 생성하고 최적화 시키기 때문에 최적화의 속도가 느리며, 2차원 요소간의 관계만을 사용하기 때문에 시점이 변화하는 온라인 스케치에 적용하기 힘들다. 따라서, 오프라인 스케치와 온라인 스케치에 모두 적용 가능한 복원 방법이 요구되며, 빠른 복원을 위한 효율적인 최적화 방법이 요구된다.

3. 문제 정의

2.1 시스템 개요

스케치 도면은 매니폴드 또는 논-매니폴드 3차원 물체에 대한 하나의 2차원 투영이다. 스케치 복원의 목적

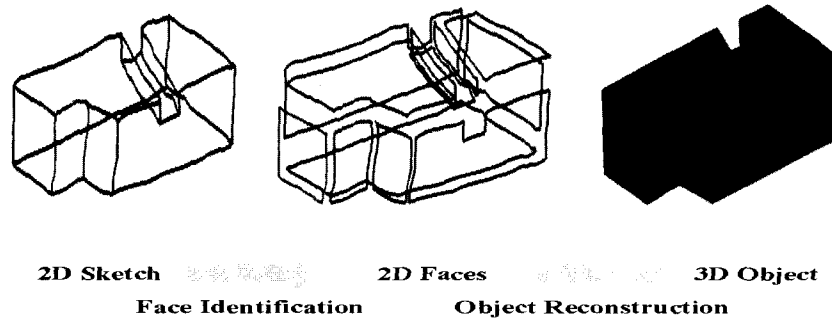


그림 2 시스템 개요

은 투영 면도 만으로부터 유도된 정보를 이용하여 스케치 도면에 표현된 3차원 물체의 정보를 재구성하는 것이다. 2차원 스케치 면도로부터 3차원 물체 복원은 크게 면 인식 단계와 물체 복원 단계로 구성되어 있다. 면 인식 단계에서 제안 알고리즘은 선분 도면을 분석하여 모서리-꼭지점 그래프를 얻은 후[1], 모서리-꼭지점 그래프의 기하학적/위상학적 제약 조건을 이용하여 물체의 위상학적 정보를 재구성한다. 물체 복원 단계에서 제안 알고리즘은 다양한 정형성 제약 조건을 이용하여 물체의 각 꼭지점의 깊이 값을 복원하여 기하학 정보를 재구성한다. 시스템의 개요는 그림 2 와 같다.

2.2 가정

- **스케치 도면** : 입력 투영 면도는 일반적인 물체의 와이어프레임 모델을 표현하며, 모서리-꼭지점 그래프로 이루어진 2차원 선분 도면이다.
- **온라인 스케치 도면과 오프라인 스케치 도면** : 온라인 스케치 도면은 고정 시점 또는 이동 시점을 가질 수 있으며 스케치 순서를 가지고 있다. 그러나, 오프라인 스케치 도면은 고정 시점에서의 물체에 대한 와이어프레임 모델이며 스케치 순서를 알 수 없다.
- **3차원 물체** : 복원 3차원 물체는 스케치 도면에 그려진 매니폴드 또는 논-내미폴드 물체이다. 그러나, 복원 시스템은 3차원 물체의 유형, 스케치가 그려진 시점 또는 시점에서의 상대적인 위치 등 어떠한 3차원 정보도 주어지지 않는다.
- **일반적인 시점** : 투영 면도는 모든 모서리와 꼭지점을 표현하는 일반적인 시점에서의 물체에 대한 투영이다. 즉, 물체의 어떠한 모서리와 꼭지점도 투영 면도에서 우연히 겹치지 않아야 한다.

3.3 요구 사항

- **최적해 복원** : 하나의 2차원 스케치 도면의 각 꼭

지점의 깊이 값은 임의의 값을 가져도 위상 정보가 보장되므로 스케치 도면은 무수히 많은 3차원 물체에 대한 투영일 수 있다. 따라서, 복원 결과는 주어진 투영에서 그려진 최적의 3차원 물체에 도달하여야 한다. 즉, 인간이 스케치 도면을 보고 추론하는 물체를 복원해야 한다.

- **스케치 순서 복원** : 오프라인 스케치 도면의 경우 하나의 물체를 평면 위에 그리는 수 많은 순서가 존재한다. 본 논문에서 제안하는 점진적 복원 알고리즘을 이용하여 최적해를 복원하기 위하여 최적 스케치 순서를 분석해야 한다.
- **시점 이동** : 온라인 스케치 도면의 경우 물체의 일부분을 복원한 후 3차원상에서 물체를 바라보는 시점을 이동하여 보다 편리한 시점에서 스케치를 계속할 수 있다. 이러한 시점 이동은 사용자로 하여금 보다 편리한 시점에서 물체의 부분 부분을 점진적으로 그리게 할 수 있다. 따라서, 알고리즘은 이러한 시점 이동에 있어서 효율적인 복원 알고리즘을 제공하여야 한다.

4. 면 인식 과정

본 장에서는 면 인식 단계에서 기하학적/위상학적 제약 조건에 기반을 두고 후보면을 분류함으로써 면 인식의 탐색 공간을 축소시키는 방법에 대하여 기술한다.

4.1 인식 알고리즘

스케치에 표현된 물체의 면을 인식하는 것은 선택의 문제이다. 즉, m 개의 후보면 중 2^m 개의 조합 탐색을 통하여 하나의 타당한 물체를 표현하는 k 개의 면을 선택하는 것이다. 식 (1)과 같은 목적 함수를 최적화 함으로써 물체를 이루는 실제 면을 인식할 수 있다[3]. 본 논문에서는 조합 탐색에 이용되는 최소면의 수를 축소

함으로써 실제 면을 빠르게 인식한다. 단, 식 (1)에서 꼭지점 v 와 모서리 e 를 포함하는 면의 수를 $R(v)$ 와 $R(e)$ 로 정의하고, 상한을 $R^+(v)$ 와 $R^+(e)$ 로 정의한다.

$$|R^+(e) - R(e)| + |R^+(v) - R(v)| \quad (\text{식 1})$$

4.2 후보면의 분류 정의

선분 도면에 표현된 3차원 물체의 면에 대응되는 무수히 많은 후보면이 존재한다. 따라서, 면 인식의 탐색 공간을 축소시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 표 1 과 같이 모든 후보면을 불가능면, 기본면, 그리고 최소면 - 각각 $PF, IF, BF,$ 와 MF 으로 정의 - 으로 분류함으로써 탐색 공간을 축소시키는 몇 가지 제약 조건을 기술한다.

물체를 실제 구성하는 면의 집합을 AF 라 정의하면 식 (2) ~ 식 (4) 를 유도할 수 있으며, 최소면만을 탐색함으로써 실제면의 집합을 인식할 수 있음을 의미한다.

$$IF \cup MF \cup BF = PF \quad (\text{식 2})$$

$$IF \cap MF = MF \cap BF = BF \cap IF = \emptyset \quad (\text{식 3})$$

$$BF \subseteq AF, AF \subseteq (BF \cup PF) \quad (\text{식 4})$$

4.3 면 분류 단계

꼭지점 v 와 모서리 e 를 포함하는 면의 수를 $R(v)$

와 $R(e)$ 로 정의하고, 상한을 $R^+(v)$ 와 $R^+(e)$ 로 정의한다[3]. 또한, $RF(v)$ 와 $RF(e)$ 를 꼭지점 v 와 모서리 e 를 포함하는 면의 집합으로 정의한다. 후보면을 분류하기 위한 6 단계는 다음과 같다.

단계 1. n 개의 모서리를 이용하여 모든 후보면의 집합, 즉 PF 를 생성한다. 초기값은 $IF = MF = BF = \emptyset$ 이다. 단, 식 (5) 에서 $makeface$ 는 스케치 상의 모든 모서리를 이용하여 교차하지 않는 모서리 순회를 생성하는 것이다.

$$PF = makeface \{e_1, \dots, e_n\} \quad (\text{식 5})$$

예를 들어, 단계 1로부터 그림 3 과 같은 2차원 스케치로부터 교차하지 않는 모서리 순회로써 15개의 후보면이 생성 가능하다.

단계 2. 모든 후보면의 집합 PF 중, 내부를 연결하는 모서리가 존재할 경우 불가능한 면의 집합 IF 의 원소이다.

$$\{f | f \in PF, [f = (f_1 \cup f_2) - (f_1 \cap f_2), \text{ if } \forall e \in (f_1 \cap f_2), e \text{ is the internal edge of } f]\} \quad (\text{식 6})$$

단계 2에서, 그림 3 과 같은 모든 후보면 중에서 7개

표 1 후보면의 분류

면 분류	정의	집합 기호
후보 면	교차하지 않는 모든 모서리 순회	PF (Plausible Faces)
불가능한 면	실제 물체를 구성하는 면으로 사용되지 않는 면	IF (Implausible Faces)
최소 면	탐색 대상인 물체를 구성할 수 있는 면	MF (Minimal Faces)
기본 면	반드시 물체를 구성하는 면	BF (Basis Faces)

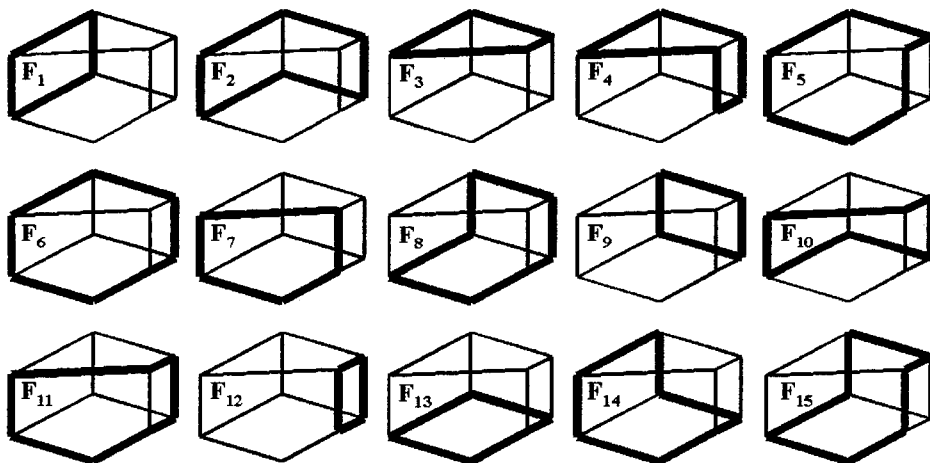


그림 3 스케치와 모든 후보면의 집합 (15개)

의 불가능한 면 $f_2, f_4, f_5, f_6, f_8, f_{11}$ 과 f_{14} 을 분류할 수 있다.

단계 3. 모든 후보면의 집합 PF 중 불가능한 면의 집합 IF 가 아닌 면 중에서, 연결된 두 모서리를 포함하는 면의 집합의 개수가 1개일 경우, 기본면 BF 의 원소이다.

$$\{f \mid f \in (PF - IF) = F, \\ [Connected\ edges\ e_1, e_2, n[RF(e_1) \cap RF(e_2)]=1, \text{ (식 7)} \\ f \in RF(e_1) \cap RF(e_2)]\}$$

그림 3의 스케치에 식 (7)을 적용하면 6개의 기본면 $f_1, f_3, f_7, f_9, f_{12}, f_{13}$ 을 분류할 수 있다. 그러나, 인접 면 이론[3]에 따르면, 면 f_7 과 f_{13} 은 동시에 존재할 수 없다. 따라서, 다음과 같은 제약 조건이 단계 3에 추가 되어야 한다.

$$\{f \mid f_1, f_2 \in BF, \forall e \in (f_1 \cap f_2) \text{ are smooth. } \} \text{ (식 8)}$$

그림 3의 스케치에 식 (8) 을 적용하면 두 면 f_7 과 f_{13} 은 기본면이 아닌 후보면의 상태로 되돌아간다.

단계 4. 모든 후보면 중 불가능한 면과 기본면으로 분류되지 않은 면들 중, 모서리 e 를 포함하는 기본면의 수가 최대 순위 수 $R^*(e)$ 와 같을 때, 모서리 e 를 포함하는 나머지 면들은 불가능한 면의 집합 IF 의 원소이다.

$$\{f \mid f \in (PF - BF - IF), [\exists e, RBF(e) = R^*(e), \\ f \in (RF(e) - RBF(e))]\} \text{ (식 9)}$$

단계 4에서, 그림 4 와 같이 면 f_{10} 과 f_{15} 를 불가능한 면으로 결정할 수 있다.

단계 5. 불가능한 면의 집합 중에서 모서리 e 의 최대 순위 수 $R^*(e)$ 와 모서리를 포함하는 면의 수의 차가 1 보다 클 경우, 모서리의 순회는 최소면 집합의 원소이다.

$$\{f \mid f \in IF, F = (PF - IF), \\ f \in makeface\{e \mid (R+(e) - n(RF(e))) \geq 1\}\} \text{ (식 10)}$$

단계 6. 면의 분류 집합이 변하지 않을 때까지 단계 3에서 단계 5까지를 반복한다. 모든 후보면 중 불가능한

면 집합의 원소와 기본면 집합의 원소가 아닌 면은 결정되지 않은 최소면 집합의 원소이다.

단계 5와 단계 6은 그림 2의 예제에는 영향을 미치지 않는다. 그림 3의 예제에서 기본 면 f_1, f_3, f_9 와 f_{12} 을 분류되었으며, 최소면은 f_7 과 f_{13} 로 분류되었다. 본 논문에서는 축소된 최소면만을 탐색함으로써 물체를 구성하는 실제 면을 빠르게 인식한다.

5. 물체 복원 과정

본 장에서는 면의 스케치 순서에 따라 물체의 꼭지점의 좌표를 최적화 함으로써 스케치 면도에 내포된 3차원 구조를 점진적으로 계산하는 방법에 대하여 논한다. 또한, 시점 이동을 허용하는 온라인 스케치에 효율적으로 적용 가능함을 보인다.

5.1 전처리 과정

오프라인 스케치 도면으로부터 3차원 물체를 점진적으로 복원하기 위하여 면이 그려지는 스케치 순서를 분석한다. 하나의 물체를 그리기 위한 스케치 순서의 경우는 무수히 많다. 만약, 물체를 이루는 n 개의 실제면이 존재하고 면 단위로 스케치 한다면, 대략 (실질적으로는 더 적지만) $n!$ 개의 스케치 순서가 존재한다. 제안 알고리즘은 다음과 같은 제약 조건에 따라 초기 스케치와 연속된 스케치 순서를 분석한다.

- 초기 스케치 (S_0) 분석 : 물체를 스케치 할 때, 직교하면서 인접한 면을 먼저 그리는 것이 일반적이며, 또한 면의 크기가 적은 것 보다는 큰 면을 먼저 그리는 경향이 있다. 여기에서, 초기 스케치 (S_0)는 그림 3의 좌측과 같이 최소 두 개의 이웃 면과 6개 이상의 꼭지점이 존재한다고 가정한다.
- 연속적인 스케치 분석 ($S_i, i > 0$) : 인간이 스케치를 하라 때, 이전 스케치 도면 면들의 이웃 면들을 그리는 경향이 있다. i 번째의 스케치를 생성하기 위하여 ($i-1$) 번째의 스케치의 이웃 면들 중 그림 5(a)와 같이 이전에 스케치 된 모서리의 수의 비율이

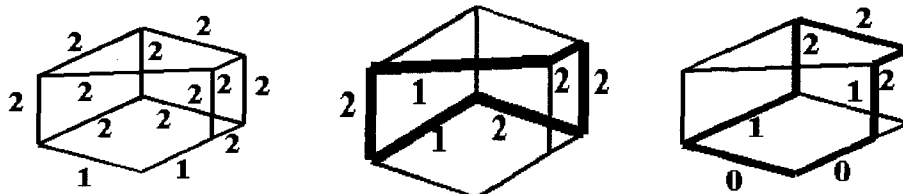
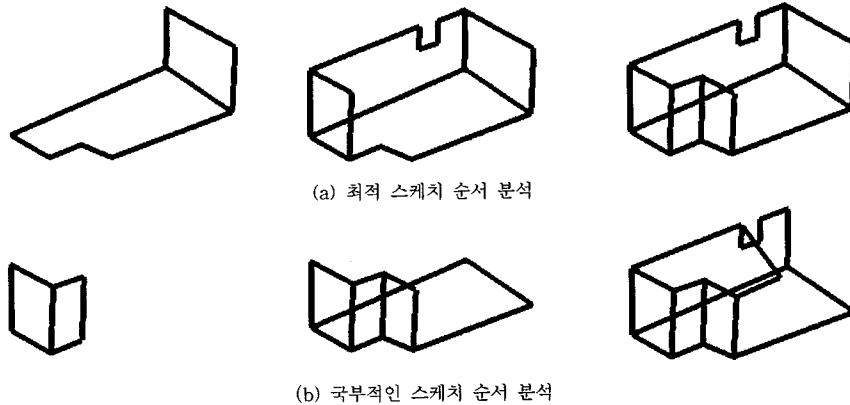


그림 4 식 (9)을 만족하는 불가능한 면



(b) 국부적인 스케치 순서 분석

그림 5 스케치 순서 분석

많은 것을 선택한다.

제안 스케치 순서 복원은 인간이 물체를 그리는 순서와 일치하며 자연스러운 것이다. 이러한 관점에서 그림 5 (a) 는 일반적인 최적 스케치 분석 결과이며, 그림 5 (b) 는 부자연스러운 국부적인 스케치 순서 분석 결과이다.

5.2 초기화

초기 스케치 (S₀)로부터 초기 물체 (O₀)를 복원하기 위하여 먼저 각도 분산 그래프(ADG: Angular distribution graph)를 이용하여 스토르크의 분산을 분석함으로써 주축을 인식한다. ADG는 스케치 도면의 모든 선분 사이의 각도를 샘플링하여 생성한다. 주축이 인식된 후, 다양한 이미지 정형성[4]에 대한 계수에 가중치를 두어 목적 함수를 생성하고, 초기 스케치 (S₀)의 각 점 P(X, Y)에서의 깊이 값이 Z 값에 대하여 목적 함수를 최적화 함으로써 초기 물체 (O₀)를 재구성한다. 초기 스케치 도면에 존재하는 n 개의 점들에 대하여, n 차원 비선형 최적화 문제를 Brent[21] 최소화 알고리즘을 이용하여 푼다. ADG는 어느 정도의 직교성이 존재하는 대부분의 전형적인 기계 부품에 대한 좋은 초기 추정치를 제공한다.

초기 물체가 재구성되면 동차 좌표계에 표현된 3차원 꼭지점 v 을 스케치 도면 위의 표준 동차 좌표계에 표현된 2차원 점 p 로 투영하는 투영 매트릭스 T를 정의할 수 있다. 실험 결과, 스케치 도면 자체가 부정확하다 라도 3차원 물체와 2차원 평면 사이의 관계를 투영 매트릭스 T 로 잘 정의할 수 있음을 알 수 있었다. 매트릭스 T 는 식 (11)과 같이 정의한다[15].

$$\begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0 & t_1 & t_2 & t_3 \\ t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ t_8 & t_9 & t_{10} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (식 11)$$

투영 매트릭스는 다음과 같이 구할 수 있다. 스케치 도면상의 표준화된 2차원 직선 l (a, b, c)가 있다고 가정할 때, 투영 매트릭스 T 를 이용하여 직선 l 에 투영되는 3차원 면 A 를 정의할 수 있다(식 12).

$$A = [l_a \quad l_b \quad l_c]T = \begin{bmatrix} l_a t_0 + l_b t_4 + l_c t_8 \\ l_a t_1 + l_b t_5 + l_c t_9 \\ l_a t_2 + l_b t_6 + l_c t_{10} \\ l_a t_3 + l_b t_7 + l_c \end{bmatrix}^T \quad (식 12)$$

따라서, 스케치 도면 상의 2차원 점 p (p_u, p_v)에서 직교하는 두 2차원 직선을 l_h (0, 1, -p_v)와 l_v (1, 0, -p_u) 라고 정의하면, 식 (12)로부터 각각의 2차원 직선에 투영되는 3차원 평면 A_h 와 A_v를 정의할 수 있다. 평면을 구성하는 3차원 꼭지점은 평면 위에 존재하여야 하므로, 평면 A_h 와 점 p 에 대응하는 3차원 꼭지점 v 로부터 식 (13)을 유도할 수 있다. 마찬가지로 평면 A_v 와 꼭지점 v로부터 식 (14)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_x(t_4 - p_v t_8) + v_y(t_5 - p_v t_9) + \\ v_z(t_6 - p_v t_{10}) + t_7 - p_v = 0 \end{aligned} \quad (식 13)$$

$$\begin{aligned} v_x(t_0 - p_u t_8) + v_y(t_1 - p_u t_9) + \\ v_z(t_2 - p_u t_{10}) + t_3 - p_u = 0 \end{aligned} \quad (식 14)$$

대응하는 3차원 위치가 알려진 각 2차원 점은 식 (13) 과 식 (14)와 같은 두 개의 선형 방정식을 제공한

다. i 번째 투영 매트릭스 T_i 의 11개의 계수를 풀기 위하여 스케치 도면의 최소 6 개 이상의 점을 가지고 있어야 한다. SVD(Singular Value Decomposition) 방법을 이용하여 식 (13)과 식 (14) 와 같은 선형 방정식을 풀 수 있다[22].

5.3 3차원 제약 조건

점진적으로 꼭지점의 위치를 추정하기 위하여 스케치 평면과 물체 사이의 관계로부터 세 가지 3차원 제약 조건을 유도한다. 복원 과정에서 각 꼭지점은 다음 세가지 제약 조건을 만족해야 한다.

- **꼭지점 제약 조건** : 식 (11) 에 따르면, 투영 매트릭스 T 에 의하여 3차원 물체의 각 꼭지점 v 는 대응하는 2차원 꼭지점 p 에 투영되어야 한다 (그림 6). 즉, 각 꼭지점 v 는 $Tv - p = 0$ 을 만족하여야 한다. 3차원 물체를 구성하는 n 개의 꼭지점이 있다고 가정할 때, 꼭지점 제약 조건은 식 (15)와 같이 정의한다.

$$F_{vertex} = \sum_{i=0}^{n-1} \{ (Tv_i - p_u^i)^2 + (Tv_i - p_v^i)^2 \} \quad (식 15)$$

단, 식 (15)에서 (p_u^i, p_v^i) 는 물체를 구성하는 i 번째 꼭지점 v_i 에 대응하는 스케치 평면상의 점의 좌표; T 는 이전 부분 물체 복원 단계에서 추출된 투영 매트릭스이다.

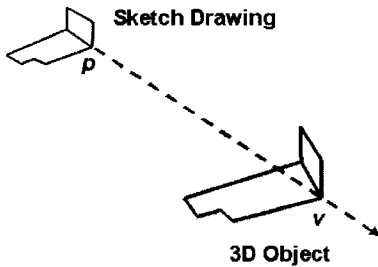


그림 6 꼭지점 제약 조건

- **모서리 제약 조건** : 스케치 도면 상의 2차원 직선 $l(p_1 p_2)$ 이 존재할 경우 식 (2)에 의해 3차원 평면 A 를 생성할 수 있다. 2차원 직선 l 에 대응하는 3차원 직선 $L(v_1, v_2)$ 는 평면 A 위에 존재하여야 한다. 모서리 제약 조건은 식 (16)과 같이 2차원 직선과 투영 매트릭스로부터 생성된 평면과 꼭지점과의 거리 차의 제곱의 합으로 정의한다. 그러나, 그림 6 과 같이 꼭지점 제약 조건과 모서리 제약 조건을

만족하는 무수히 많은 직선이 존재한다. 3차원 물체를 구성하는 n 개의 모서리가 있다고 가정할 때, 모서리 제약 조건은 식 (16) 과 같이 정의한다.

$$F_{edge} = \sum_{i=0}^{n-1} \{ (l_i Tv_1)^2 + (l_i Tv_2)^2 \} \quad (식 16)$$

단, 식 (16) 에서 v_1 과 v_2 는 3차원 직선 L 의 두 꼭지점; l 은 L 에 대응하는 2차원 직선; T 는 이전 부분 물체 복원 단계에서 추출된 투영 매트릭스이다.

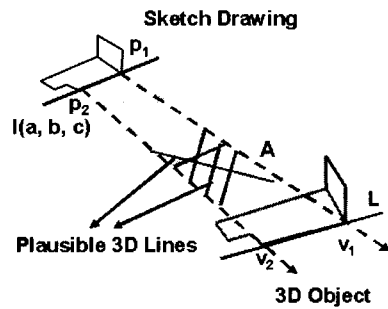


그림 7 모서리 제약 조건

- **면 제약 조건** : 3차원 꼭지점 v 는 그 꼭지점을 포함하는 3차원 평면 위에 존재해야 한다. 꼭지점, 모서리, 그리고 면 제약 조건을 이용하여 그림 7 과 같은 무수히 많은 직선 중 그림 8 과 같이 최적의 3차원 직선을 이루는 꼭지점의 좌표를 제약할 수 있다. 3차원 물체를 구성하는 n 개의 면과 각 면을 구성하는 m 개의 꼭지점이 있다고 가정할 때, 면 제약 조건은 식 (17) 과 같이 정의한다.

$$F_{face} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \{ a_i x_i^j + b_i y_i^j + c_i z_i^j + d_i \}^2 \quad (식 17)$$

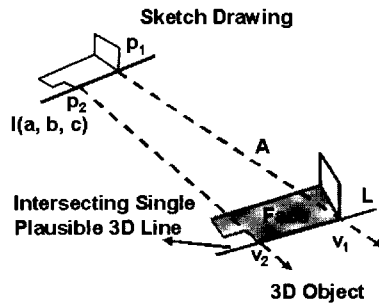


그림 8 면 제약 조건

단, 식 (17) 에서 a_i, b_i, c_i 와 d_i 는 i 번째 평면의 방정식은 계수이며 $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1$ 을 만족; (x_i^j, y_i^j, z_i^j) 는 i 번째 평면을 이루는 j 번째 꼭지점의 좌표이다.

5.4 최적화 기반 물체 재구성

본 논문에서는 스케치 도면으로부터 3차원 물체를 재구성하기 위하여 꼭지점의 좌표를 스케치 순서에 따라 점진적으로 계산한다. $(i+1)$ 번째 스케치 도면에 대응하는 부분 물체 (O_{i+1}) 은 이전 단계에서 복원된 부분 물체 (O_i) , 투영 매트릭스 (T_i) , 그리고 $(i+1)$ 번째 스케치 도면 (S_{i+1}) 으로부터 유도된 목적 함수를 최소화 함으로써 복원한다. 목적 함수는 현재 복원 단계 부분 물체의 각 꼭지점의 좌표에 대하여 최적화 된다. 본 논문에서는 목적 함수 $(F_{progressive})$ 를 앞서 언급한 세 가지 3차원 제약 조건의 합으로써 식 (19) 와 같이 정의한다.

$$F_{progressive} = F_{vertex} + F_{edge} + F_{face} \quad (식 18)$$

물체의 3차원 구성을 표현하는 꼭지점의 좌표값 (x, y, z) 을 포함하는 벡터를 V 라 가정하자. 목적 함수의 값 $F_{progressive}(V)$ 는 세 가지 제약 조건을 계산함으로써 얻어진다. V 를 제어하면서 최적해를 찾는 문제는 완전한 $3 \times n$ 차원 비선형 최적화 문제이다. 단, n 은 현재 복원 과정에 있는 부분 물체를 구성하는 꼭지점의 개수이다. 본 논문에서는 Brent[21] 최소화 알고리즘을 이용하여 비선형 문제를 해결하였다. 비선형 문제는 최소화 과정에서 많은 시간이 소요되기 때문에 실제 구현에서는 면 단위로 최적화 하여 3차원 구조를 복원하였다.

비록 비선형 문제를 작은 단위의 문제로 나누어서 최적화를 할지라도, 전역해에 대한 근접한 초기 국부해를 추정하는 것은 비선형 최적화 문제에서 매우 중요하다. 초기 물체를 복원하는 데 있어서는 ADG를 이용하여 초기 값을 추정하였다. 연속된 부분 물체 복원 과정에서는 i 번째 해에 대한 초기 추정은 $i-1$ 번째 부분 물체로 가정하였다. 점진적 3차원 복원 알고리즘은 이와 같이 물체의 3차원 구조를 재구성하는데 효율적인 초기 추정 값을 제공한다. 그림 9 는 점진적인 부분 물체 복원 과정 및 최종 복원 결과를 나타낸다.

5.5 시점 이동

온라인 스케치의 경우 설계자는 하나의 물체를 스케치 평면 상에 그릴 때, 물체의 일부분을 복원한 후, 3차원 공간상에서 물체를 바라보는 시점을 바꾸어 보다 편리한 시점에서 보다 자세한 스케치를 그릴 수 있다. 부분 물체의 3차원 꼭지점의 좌표 벡터 $V(X, Y, Z, 1)$ 는 시점 이동을 가져오는 4×4 3차원 변환 매트릭스 M 에 식 (19)와 같이 $V'(X', Y', Z', 1)$ 로 변환된다. 즉, 3차원 꼭지점 V 는 시점 이동시 새로운 스케치 도면에서 $P(X', Y')$ 점들로 투영된다.

$$V' = MV \quad (식 19)$$

Lipson[4]의 알고리즘과 같이 3차원 물체를 재구성하기 위하여 스케치 도면의 모든 2차원 요소간의 관계를 이용한다면 시점 이동하기 전의 이전 스케치 도면에서 계산된 가중치 이미지 정형성 등의 값을 사용할 수 없다. 또한, 시점이 이동할 때, 물체를 이루는 꼭지점의 좌표가 변하므로 깊이 값을 구하기 위하여는 다시 최적화

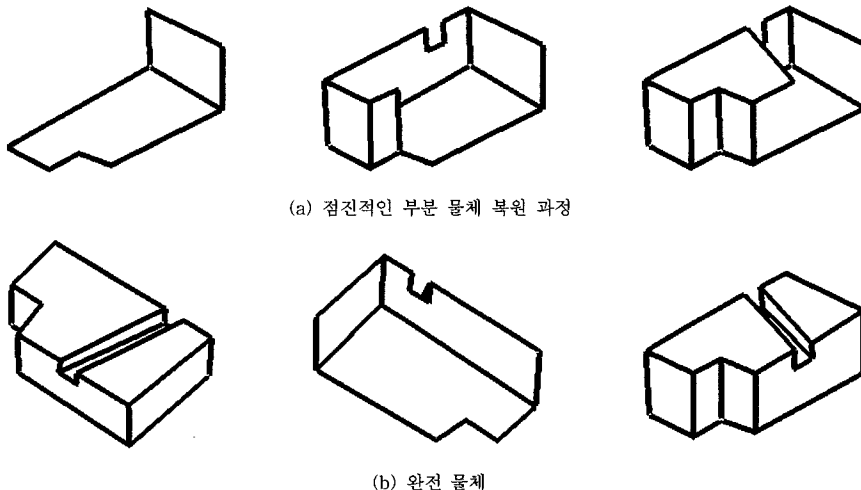
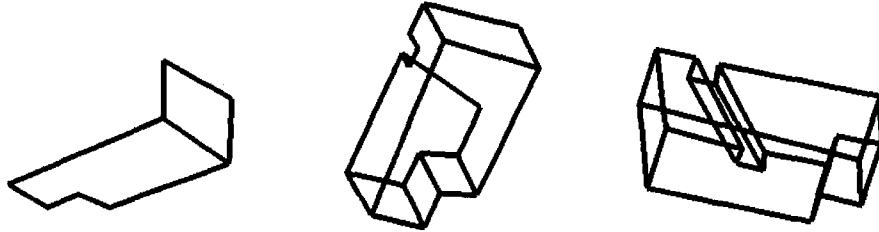
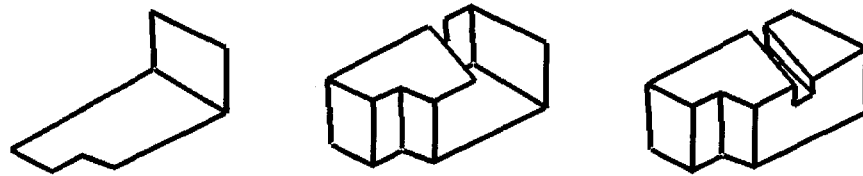


그림 9 복원 결과



(a) 시점 이동 온라인 스케치 도면



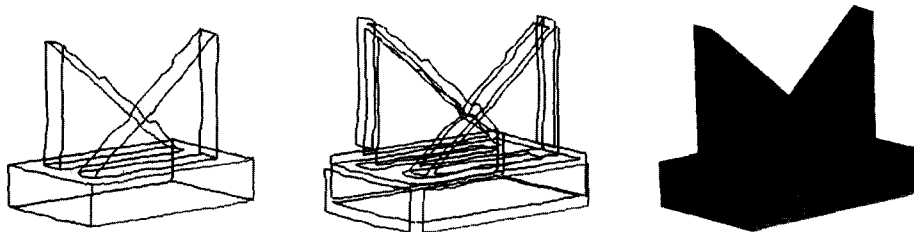
(b) 시점에 대응되는 점진적 복원 결과

그림 10 시점 이동 복원 결과

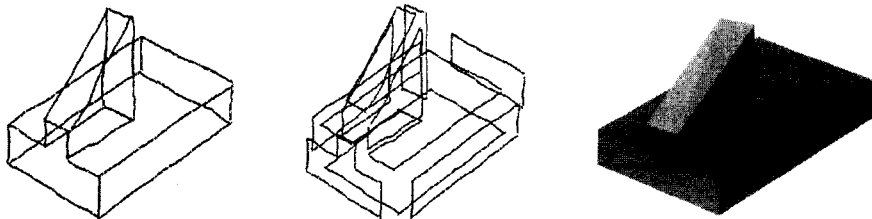
를 시켜 주어야 한다. 따라서, 스케치 평면상의 2차원 요소만을 이용한 3차원 복원 알고리즘은 시점 이동을 허용하는 온라인 스케치에 적용하기는 어렵다.

제안 점진적 복원 알고리즘에서는 복원 3차원 물체는 스케치 도면에 독립적인 (X, Y, Z) 좌표를 가진다. 또한, 이전 시점에서 계산된 모든 정보를 이용할 수 있다.

단지 새로운 스케치 도면 (P') 과 물체간의 관계를 정의하는 투영 매트릭스 T 만 재계산한다. 새로운 투영 매트릭스 T' 은 매트릭스 곱셈 연산 $T' = TM$ 으로 빠르게 계산 가능하다. 그 결과, 시점 이동을 허용하는 온라인 스케치로부터 빠르게 3차원 물체를 복원할 수 있다 (그림 10).



(a)



(b) 다중해

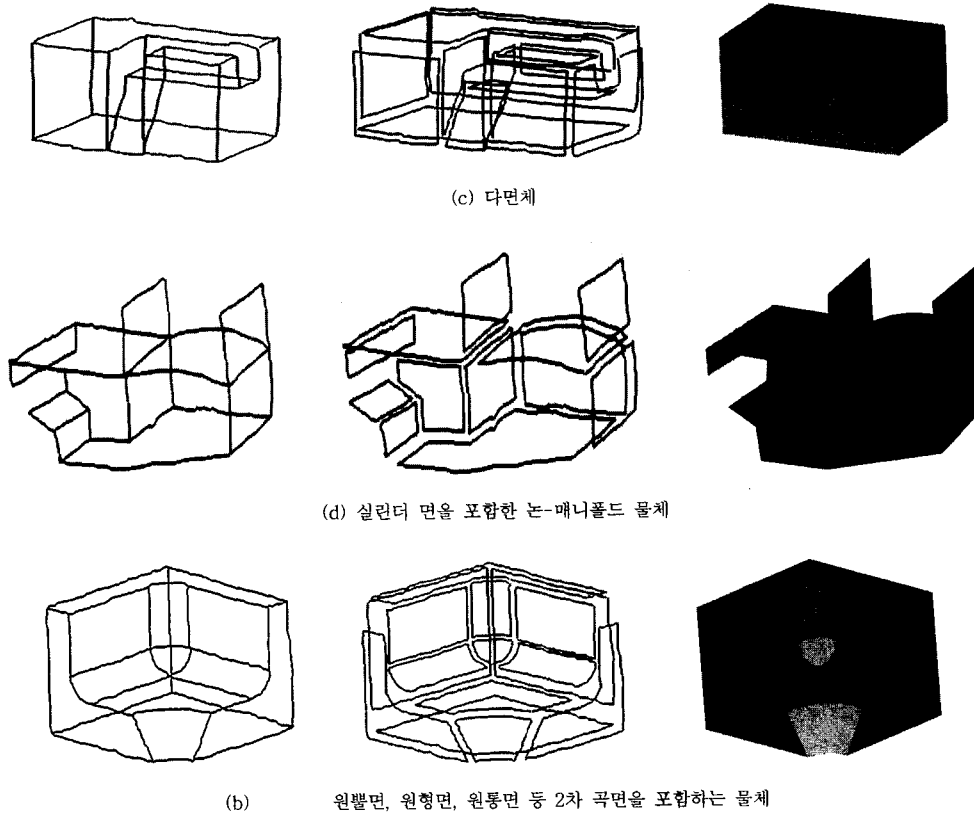


그림 11 면 인식 실험 결과 (좌로부터 입력 2차원 스케치, 인식 2차원 면, 복원 3차원 물체)

표 2 면 인식 결과 평가

A: 제안 방법, B: Sphitalni의 방법

그림 11	적용 방법	PF	IF	BF	MF	SOL	Time(sec)
(a)	A	33	17	16	0	1	30
	B	33	14	-	19	1	142
(b)	A	37	25	8	4	2	60
	B	37	18	-	19	2	60
(c)	A	279	265	14	0	1	138
	B	279	159	-	120	1	1200
(d)	A	205	193	12	0	1	551
	B	205	164	-	41	1	1091
(e)	A	896	882	14	0	1	4420
	B	896	679	-	202	1	7283

6. 실험 결과

제안 알고리즘의 효율성을 평가하기 위하여 그림 11 ~ 그림 16 과 같은 다양한 스케치 도면에 적용하였다. 실험은 펜티엄 III 프로세서 (600 MHz)를 탑재한 PC

상에서 수행하였다.

6.1 결과

면 인식 과정의 효율성을 측정하기 위하여 그림 11 과 같은 다양한 스케치에 대하여 적용하여 보았다. 표 2

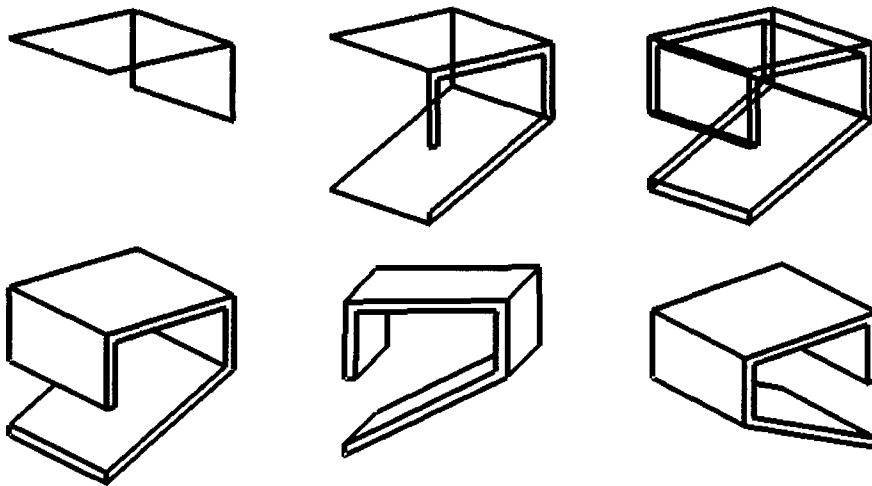
는 본 논문에서 제안하는 면 분류 및 면 인식 방법이 탐색 공간을 효율적으로 축소함을 보여준다. 또한, 면 인식의 탐색 시간이 축소된 최소면만을 탐색함으로써 현저히 단축됨을 알 수 있다.

제안 알고리즘의 물체 복원 정확성을 측정하기 위하여 그림 12(a)와 같이 합성 물체를 정투영하여 얻은 스케치 도면으로부터 스케치 순서 분석 및 점진적 복원을 수행하였다. 제안 알고리즘은 정확한 스케치 도면 뿐만 아니라 그림 12(b)와 같은 부정확한 스케치 도면(평행 투영 free-hand 스케치 도면)에도 적용 가능하였다. 그림 12(c)와 같은 사영 투영의 경우 초기 물체 복원

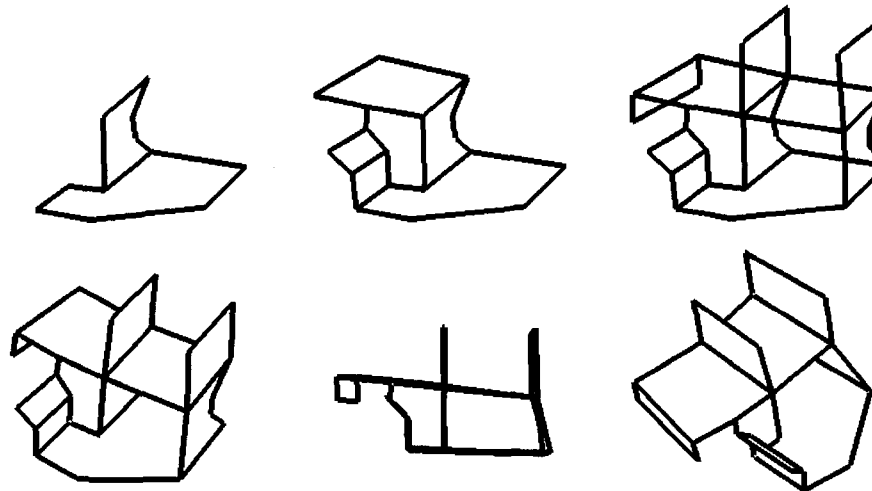
에서 이미지 정형성(평행 투영이라고 가정)을 사용하기 때문에 약간 뻐뻐어진 물체를 생성하였다. 실험에서는 초기 물체는 주어진다고 가정하였다.

그림 13과 같은 보다 복잡한 기계 부품에 대하여 제안 알고리즘을 적용시킨 결과, 복원 결과는 제품에 대한 기본적인 생각을 전달하기에 충분히 자세하고 정확하게 모델링 됨을 알 수 있었다. 단, 그림 13에서 사용하는 스케치 도면들은 스케치 하기에 너무 복잡하여 합성 물체를 투영시킨 데이터를 입력 스케치로 사용하였다.

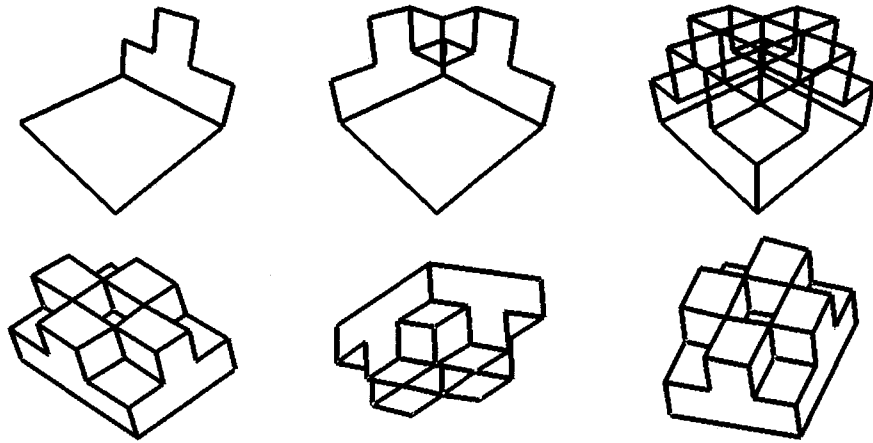
복원 결과의 정확성을 검증하기 위하여, 복원 3차원 물체를 임의의 회전 변환과 함께 파선이 제거된 결과



(a) 매니폴드 물체 (직교 투영)

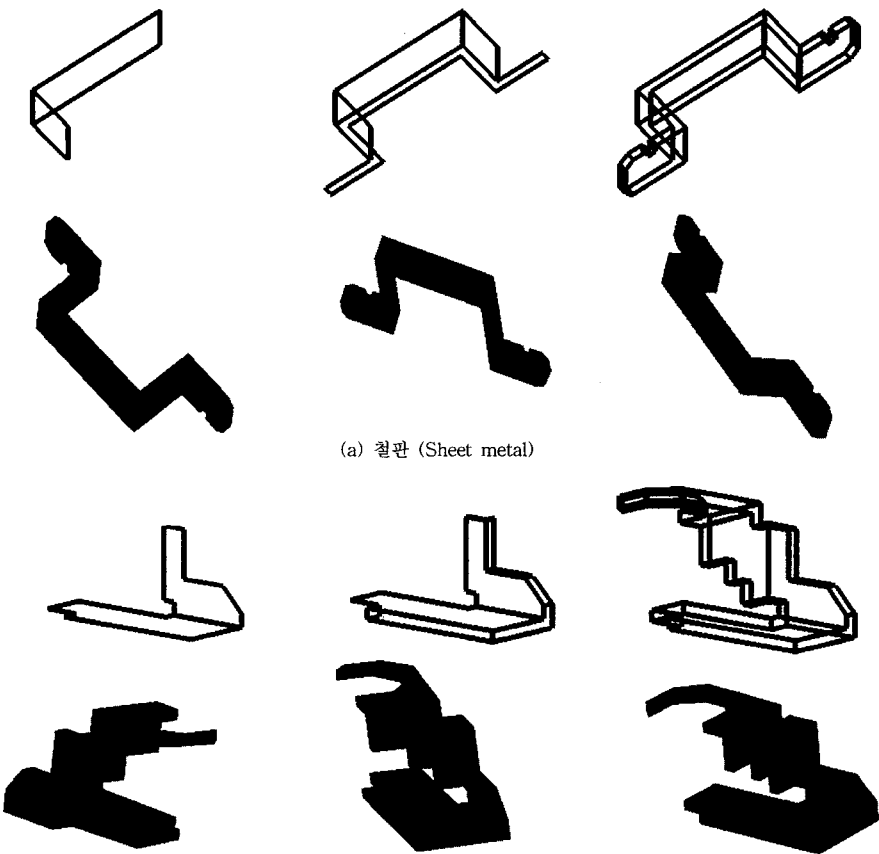


(b) 논-매니폴드 물체 (평행 투영)



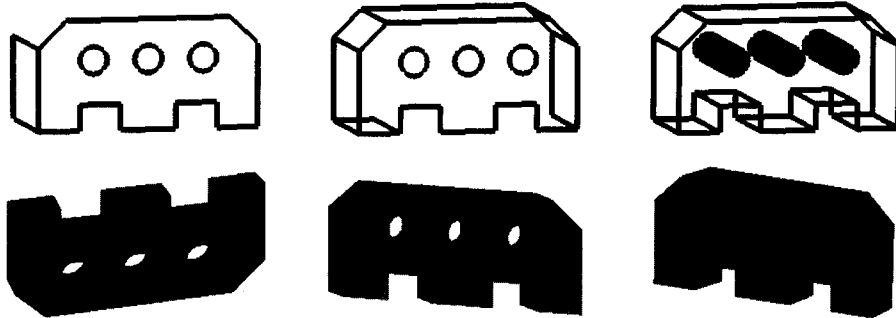
(c) 홀을 가지고 있는 물체 (사영 투영)

그림 12 최적 스케치 순서와 고정 시점에서의 복원 결과



(a) 철판 (Sheet metal)

(b) 일반적인 기계 부품



(c) 홀을 가진 부품

그림 13 최적 스케치 순서와 기계 부품 복원

표 3 점진적 복원 알고리즘 평가

스케치 면도	스케치 면도 요소			점진적 복원 알고리즘	
	꼭지점의 수	모서리의 수	면의 수	$F_{progressive}(V)$	복원 시간 (초)
그림 12(a)	20	30	12	0.30	7
그림 12(b)	28	39	11	1.47	8
그림 12(c)	32	56	26	0.36	21
그림 13(a)	48	72	26	0.73	30
그림 13(b)	68	100	34	2.14	58
그림 13(c)	124	186	64	0.52	74

(그림 12)와 렌더링한 결과 (그림 13)를 도시하였다. 일반적으로, 스케치 평면이 정확할수록 보다 정확한 3차원 모델을 생성할 수 있었다. 표 3은 다양한 투영 도면과 물체에 대하여 점진적 복원 알고리즘을 적용하였을 경우의 평가 결과이다. 제안 알고리즘은 다양한 스케치 도면으로부터 최적해를 빠르게 복원하였다.

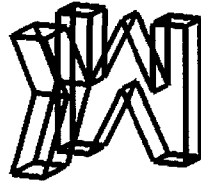
6.2 결과 분석

복원 결과의 질을 평가하기 위하여, 스케치 복원 분야에서 가장 좋은 결과를 생성한다고 알려진 Lipson의 방법을 이용하여 비교하였다. 그의 방법은 거의 평행 투영을 가진 free-hand 스케치 도면에 잘 적용된다. 본 논문에서는 Lipson 알고리즘, 점진적 복원이 가능하도록 수정된 Lipson 알고리즘, 제안 점진적 복원 알고리즘을 구현하고 비교하였다.

그림 14 와 같이, 목적 함수의 수렴이 최적해의 복원을 의미하지는 않는다. 실험 결과 인간의 인지 능력을 정확하게 시뮬레이션 할 수 있는 절대적인 목적 함수와 알고리즘은 존재하지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 물론, 이 예가 Lipson의 알고리즘을 저평가할 목적은 없

다. 그림 14 의 예는 3차원상에서 평행하지 않은 많은 선분들이 유연히 스케치 평면상에서 평행한 경우로써 Lipson 알고리즘의 최악의 경우이다. 그의 방법은 대부분의 스케치에 안정적으로 복원이 수행되기 때문에 본 논문에서 이미지 정형성을 이용한 초기 물체를 생성하는데 사용하였다.

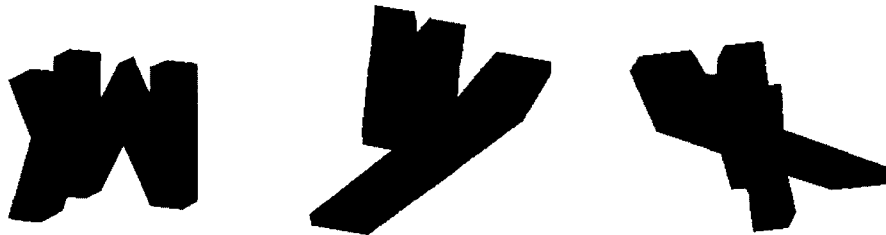
제안 점진적 복원 알고리즘은 기존 방법들과 비교하여 많은 장점을 가지고 있으나, 몇 가지 단점 또한 가지고 있다. 첫째, 그림 15(a) 와 같이 전체 완전 물체의 모양과 비교하여 초기 물체가 지역적인 경우 최적해를 복원하기 어렵다. 초기 물체가 완전 물체를 제대로 반영하지 못하므로 투영 매트릭스가 부정확하다. 이러한 부정확성은 점진적으로 다음 단계의 부분 물체 복원에서 목적 함수와 투영 매트릭스에 점진적인 영향을 미쳐 그림 15 (b)와 같이 최적의 해를 생성하지 못하게 된다. 이러한, 국부 초기화에 따른 잘못된 복원은 그림 15(c) 와 같이 선분 평행성 및 동일 직선성과 같은 이미지 정형성을 첨가하여 보정할 수 있다.



(a) 스케치 도면



(b) Lipson 알고리즘[4] 적용 결과 (230 초, $f = 21.10$)

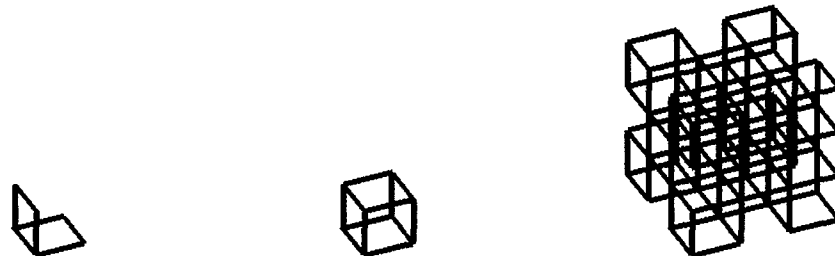


(c) 수정된 Lipson[4] 알고리즘 적용 결과 (69 초, $f = 21.68$)

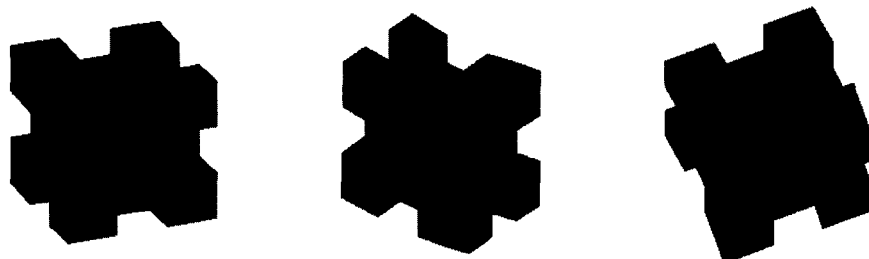


(d) 점진적 복원 알고리즘 적용 결과 (17 초, $f = 79.68$)

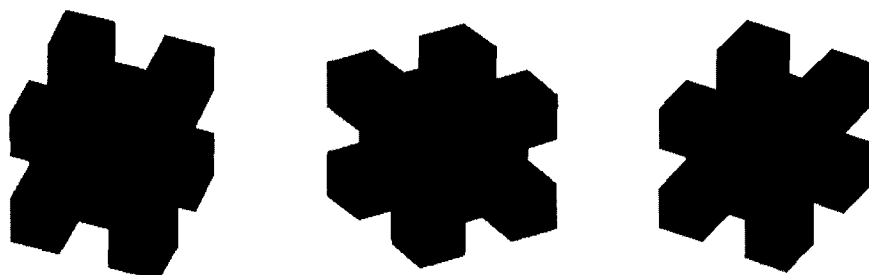
그림 14 복원 알고리즘 비교 (f : Lipson의 알고리즘에서 사용하는 목적 함수의 최소 값)



(a) 국부 스케치 순서



(b) 복원 실패

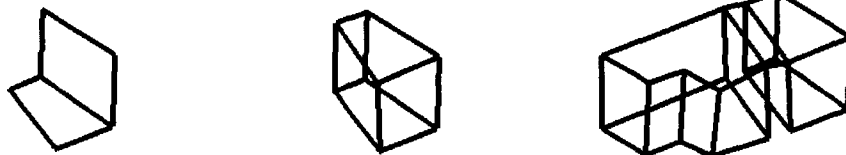


(c) 이미지 정형성을 첨부한 복원 교정

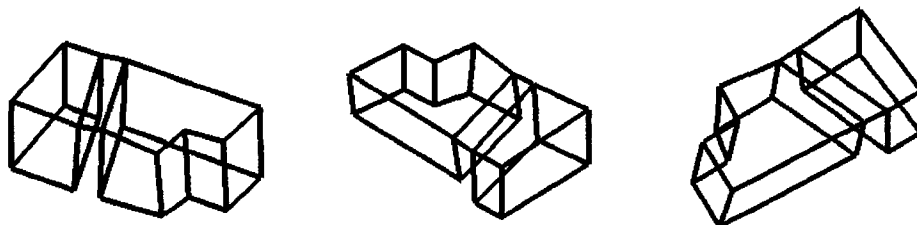
그림 15 국부 스케치로 인한 복원 실패 및 교정

둘째, 제안 알고리즘에서는 부분 물체에 면을 추가해 나감으로써 완전 물체를 복원하기 때문에 면이 연결된 정보가 존재하지 않을 수 있는 복합 차원을 가진 논-매

니폴드 물체에 대하여 최적해를 복원하기 어렵다. 그림 16 은 복합 차원을 가지 물체의 국부적인 스케치와 복원 결과를 나타낸다.



(a) 복합 차원 물체 스케치 순서



(b) 복원 결과

그림 16 복합 차원 논-매니폴드 물체 복원

7. 결 론

본 논문은 하나의 스케치 면도로부터 면 인식의 탐색 영역을 축소하고 다양한 3차원 물체를 빠르게 복원하는 점진적인 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 면 인식 단계에서 스케치상의 모든 후보면을 불가능한 면, 기본면, 그리고 최소면으로 분류하고, 축소된 최소면만을 탐색함으로써 물체를 이루는 실제면을 빠르게 인식하였다. 또한, 면이 그려지는 스케치의 순서에 따라 점진적으로 3차원 구조를 재구성함으로써 복원의 효율성을 증대시키는 점진적 복원 알고리즘을 제안하였다. 점진적 복원 알고리즘을 이용하여 스케치 도면으로부터 기계 부품을 통합적이고 자동으로 복원하는 시스템을 개발할 수 있었다. 제안 알고리즘은 정투영, 평행투영 그리고 사영 투영으로부터 기존 알고리즘보다 빠르고 정확하게 매니폴드 또는 논-매니폴드 물체를 재구성하였다. 또한, 스케치 평면의 이미지 정형성을 재계산하지 않고 시점 이동을 허용하는 온라인 스케치에 쉽게 적용 가능함을 보였다.

향후 연구 과제로는 첫째, 스케치 순서를 면 단위에서 모서리 또는 단위 물체 단위로 확장하여 복합 차원 물체에 대한 보다 정확한 최적해를 복원하는 것이다. 둘째, 제안 알고리즘을 확장하여 일반적인 기계 부품에서 나타나는 2차 곡면체로의 대상 물체의 확대이다. 마지막으로, 스케치 도면 자체의 부정확성을 보정하여 정확한 3차원 물체의 복원 알고리즘을 연구하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Shpitalni and H. Lipson. Classification of Sketch Strokes and Corner Detection Using Conic Sections and Adaptive Clustering. *Trans. of the ASME. J. of Mechanical Design*, 119(2), 1997.
- [2] B. S. Oh and C. H. Kim. Fast Reconstruction of 3D Objects from Single Free-Hand Line Drawing. *LNCS*, 2059:706-715, 2001.
- [3] M. Shpitalni and H. Lipson. Identification of Faces in a 2D Line Drawing Projection of a Wireframe Object. *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intell.*, 18(10):1000-1012, 1996.
- [4] H. Lipson and M. Shpitalni. Optimization Based Reconstruction of a 3D Object From a Single Freehand Line Drawing. *Computer Aided Design*, 28(8):651-663, 1996.
- [5] B.S. Oh and C. H. Kim. Progressive 3D Reconstruction from a Sketch Drawing. In 9th Pacific Graphics, pp. 108-117, 2001.
- [6] D. A. Huffman. *Impossible Objects as Nonsense Sentences*. Machine Intelligence, Edinburgh University Press, pp. 295-323, 1971.
- [7] T. Kanade. Recovery of the Three-Dimensional Shape of an Object from a Single View. *Artificial Intelligence*, 17:409-460, 1980.
- [8] J. Malik. Interpreting Line Drawing of Curved Object. *Int. J. of Computer Vision*, 1:73-103, 1987.
- [9] E. Marti, J. Regomcos, J. Lopez-Krahe, and J. J. Villanueva. Hand Line Drawing Interpretation as Three-Dimensional Objects. *Signal Processing*, 32:91-110, 1993.
- [10] A. K. Mackworth. Interpreting Pictures of Polyhedral Scenes. *Artificial Intelligence*, 4:121-137, 1973.
- [11] I. J. Grimstead and R. R. Martin. Creating Solid Models from single 2D Sketches. *Solid Modeling '95*, pp. 323-337, 1995.
- [12] K. Sugihara. *Interpretation of Line Drawing*, The MIT Press, 1986.
- [13] Y. Fukui. Input Method of Boundary Solid by Sketching. *Computer Aided Design*, 20(8):434-440, 1988.
- [14] D. Lamb and A. Bandopadhyay. Interpreting a 3D Object from a Rough 2D Line Drawing. *Proceeding of Visualization 90*, pp. 59-66, 1990.
- [15] D. F. Rogers and J. A. Adams. *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McDraw-Hill, 1976.
- [16] L. Braid and P. Wang. Three-Dimensional Object Recognition Using Gradient Descent and the Universal Three-Dimensional Array Grammar. *SPIE*, 1607:711-718, 1991.
- [17] Y. G. Leclerc and M. A. Fischler. An Optimization Based Approach to the Interpretation of Single Line Drawings as 3D Wire Frames. *Int. J. of Computer Vision*, 9(2):113-136, 1992.
- [18] T. Marill. Emulating the Human Interpretation of Line Drawings as Three-Dimensional Objects. *Int. J. of Computer Vision*, 6(2):147-161, 1991.
- [19] W. Wang and G. Grinstein. A Survey of 3D Solid Reconstruction from 2D Projection Line Drawings. *Computer Graphics Forum*, 12:137-158, 1993.
- [20] H. Lipson. *Computer Aided 3D Sketching for Conceptual Design*. PhD Thesis, Israel Institute of Technology, Israel, 1998.
- [21] R. P. Brent. *Algorithms for Minimization without*

Derivatives. Prentice Hall, Englewood Cliffs N. J.,
Chap. 7. 1973.

- [22] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling,
and B. P. Flannery. *Numerical Recipes in C: The
Art of Scientific Computing (2nd ed.)*. Cambridge
University Press, Cambridge, 1992.



오 범 수

1996년 2월 고려대학교 학사. 1998년 2
월 고려대학교 전산학 석사. 2002년 2월
고려대학교 전산학 박사



김 창 현

1981년 9월~1989년 3월 한국과학기술원
시스템 공학연구소 선임연구원. 1990년 4
월 1993년 3월 University of Tsukuba
전산학 박사. 1993년 2월~1995년 2월
한국과학기술원 시스템 공학연구소 책임
연구원. 1995년 3월~현재 고려대학교 컴
퓨터학과 교수. 2000년 1월~현재 컴퓨터
그래픽스 학회 부회장. 2001년 2월~현재 정보과학회 SIGCG
위원장