

RGB画像と距離画像を用いた 暗所下の物体の3次元形状復元

森田 暁人^{1,a)} 多田 幸生^{1,b)}

概要: 現在、宅配業において、産業用ロボットがそれぞれ形状が異なる荷物の一つ一つの形状を精度よく認識し、自動で配送先に応じたトラックまで荷物を把持して運搬してくれることに多くの期待が寄せられている。本研究では、このようなロボットのためのビジョンシステムの構築、特に物体の3次元形状復元を、RGB画像と距離画像を用いて行う。荷物の3次元形状は、Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)を用いた対応点探索による初期位置合わせを行った後、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを用いて復元する。ところが、宅配業におけるロボットの活動環境では、このような手法を用いるための十分な照明が与えられていないケースが多くある。そこで、ロボット側から荷物に対して模様を帯びた光を照射することで形状復元の精度を向上させた。また、その精度を比較実験によって示した。

1. 緒言

現在の日本の産業は、もはや産業用ロボットの活躍なしでは考えられない。あらゆる場面で産業用ロボットがもたらす作業の自動化が必要とされている。重い荷物を運搬しなければならない宅配業においても同じである。ロボットが倉庫内に積み上げられた荷物の一つを認識し、その荷物を把持して配送先に応じたトラックに分配していくことが期待されている。ところが一つ一つの荷物の形状が異なっているため、それぞれの荷物がどのような形状をしているかをロボットに精度よく認識させることは容易ではない。それらの認識を担っている産業用ロボットの視覚、つまり「ロボットの目」の高精度化や高速化を図るためにコンピュータビジョンに関する研究が今注目されている。

本研究では、配送業における産業用ロボットに荷物をどのように把持するべきか判断させるために、対象とする荷物を3次元的に捉え、復元させることで形状を認識させるシステムを構築する。一般的に物体形状の3次元復元をする際にはよくIterative Closest Point(ICP)アルゴリズム [1] が用いられている。ICPアルゴリズムは二つの距離画像の位置合わせの手法として広く知られており、二つの距離画像の最近傍点による対応付けと、全ての対応点から計算された最適な並進ベクトルによる位置合わせの二つの処理を交互に行っている。

しかし、従来のICPアルゴリズムにはいくつかの大きな問題がある。特に、センサから取得した二つの画像の対応点が予めある程度与えられていないと精度が上がらないという「初期位置合わせ」の問題を抱えている。そこで、本研究では、ICPアルゴリズムの「初期位置合わせ」の問題を解決し、3次元形状復元の精度を向上させる。

本研究では、外部情報を得るセンサデバイスとしてRGBカメラと距離画像センサを搭載した「Xtion PRO LIVE[2]」を利用する。Xtion PRO LIVEから完全に同期されたRGB画像と距離画像を得ることができるため、別角度から撮影された2枚の画像のRGB画像情報に対して予めScale-Invariant Feature Transform(SIFT)[3]を用いて対応付けをすることで「初期位置合わせ」を行うことができる。その後同期されているRGB画像から対応点が既知となった2枚の距離画像に対してICPアルゴリズムを適用することになる。しかしSIFTを用いる際、倉庫内の照明は薄暗くムラがあるため明瞭な画像を得にくく、もともと特徴の少ないダンボール箱などの荷物の対応付けは難しい。そこで、荷物に幾何学模様を含んだ照明を当てた上で、2枚の画像の対応付けを行う。すると照明を当てなければ特徴が乏しく難しかった対応点の抽出が、幾何学模様を含んだ照明を当てることで荷物にさらなる特徴点を与えることになり、2枚の画像の対応付けの精度を向上させることができる。

¹ 神戸大学

Kobe University, Nada, Kobe 657-8501, Japan

a) morita@opt.cs.kobe-u.ac.jp

b) tada@cs.kobe-u.ac.jp

2. 搬送ロボットのためのビジョンシステム

2.1 搬送作業

配送業で行われている荷物の仕分けの自動化を考えるために、現在、人の手によって行われている仕事の内容を以下に示す。

- (1) 多数の荷物が保管されている場所 (BOX と呼ぶ) から一つの荷物を取り出す。
- (2) 荷物に貼り付けられた伝票から搬送先を読み取る。
- (3) 指定された場所へ荷物を搬送し、荷物を降ろす。

搬送作業の流れを図 1 に示す。

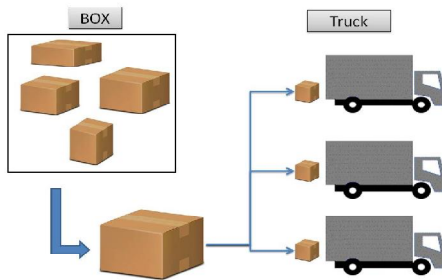


図 1 運搬作業の流れ
Fig. 1 Transportation task

また、以下に各環境について示す。

作業空間：荷物が収納されている倉庫

- 縦横 10m 程度で形は一定ではない。
- 地面は全くの平らではなく、多少の凸凹がある。
- 明るさは一定でなく、薄暗い。
- 同じ空間で人間と一緒に働く。

BOX：多数の荷物が保管されている棚のようなもの

- 大きさは縦横が 1m、高さが 2m 前後である。
- 一つの BOX の中に荷物が 40~50 個格納されている。
- 荷物は積み上げられるような形で BOX に格納されている。

BOX の一つの側面が開き、荷物を取り出す事ができる。

荷物：運送対象となる物体

- 重さは 0.1kg~25kg 程度である。
- 形状は四角のものだけでなく、ダンボール箱などで梱包されていない靴や瓶などのようなものもある。
- 荷物のどこかに伝票が貼りつけられている。

伝票：住所と時間帯指定が書かれ、荷物に貼り付けられた用紙
荷物の運搬先と運搬時間帯を指定する。

作業空間の一例を図 2 に、BOX とその中に格納された荷物の一例を図 3 に示す。

このような環境下におけるロボットによる荷物の自動仕分けの実現には図 4 に示すようにいくつかの問題を解決しなければならない。以下に実現すべき技術課題を示し、その詳細を述べる。



図 2 作業空間
Fig. 2 Working area



図 3 格納された荷物
Fig. 3 Stored shipments

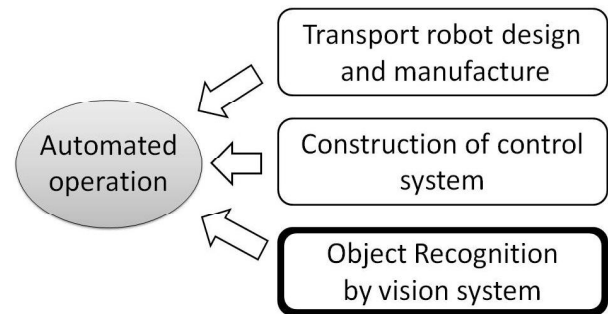


図 4 自動仕分けの実現に伴う技術課題
Fig. 4 Technical problems for the realization of automated carrying system

技術課題 1：搬送ロボットの設計と製作

アームを持ち、狭い空間にも対応できる運動性能を備えたロボットを設計し、製作する。

技術課題 2：制御システムの構築

リアルタイムで複数のロボットを同時に制御することができるシステムを構築する。

技術課題 3：ビジョンシステムの開発

ロボットに搭載したセンサを用いて、荷物及び周辺環境の認識を行うシステムを開発する。

この中で、本研究ではビジョンシステムの開発を行う。

2.2 ビジョンシステム

ビジョンシステムは更に細分化され、

- BOX 中の荷物一つ一つを認識し、荷物のどの部分をアームで把持するかを決定するため、荷物の 3 次元形状を復元する。
- 荷物に貼りつけてある伝票を見つけ出し、伝票を文字認識し、搬送先を読み取る。
- 他の物体とぶつからないよう移動するためのルートを見つけ出す。

などのタスクに分かれる。

本研究では、この中で、荷物の 3 次元形状復元を行うシステムを構築する。また、照明の明るさは一定でなく薄暗いという条件の下で復元を行う。復元を行う物体として、

荷物の中で特に数の多いダンボールに着目する。3次元形状復元を行うダンボールの例を図5に示す。



図5 3次元形状復元を行う荷物の例

Fig. 5 Sample of shipments for 3D shape restoration



図6 Xtion Pro Live

Fig. 6 Xtion Pro Live

本研究では、外部から情報を取得するデバイスとして、ASUS社のモーションキャプチャデバイス「Xtion PRO LIVE」を用いる。「Xtion PRO LIVE」はRGBカメラと距離画像センサを搭載している。距離画像センサの距離の計測方法は、近赤外線のパターンを照射し、模様の変化をCMOSカメラで読み取って距離を特定するものである。この距離画像センサを用いることで、ステレオによる距離画像の作成を行う手間が省け、処理速度の向上に役立つ。この「Xtion PRO LIVE」を図6に示す。

3. 物体の3次元形状復元に用いるアルゴリズム

物体の3次元形状復元は別の角度から撮影した同一の物体の二つの距離画像の位置合わせを行うことで実現する。距離画像センサを用いると、距離画像に加え、それに完全に同期されたRGB画像を得ることができる。これらを組み合わせることで、精度の高い3次元形状復元を目指す。

3.1 一般的に3次元形状復元に用いられるアルゴリズム

距離画像を用いて二つの画像の位置合わせをする Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムと、RGB画像を用いて初期位置合わせをする Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) を組み合わせて、3次元形状復元を行うプログラムを作成する。

3.1.1 Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム

Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムは、1992年に Besl と Mckey によって提案された手法で、点群で与えられたデータ形状を同じく点群で与えられたモデル形状に位置合わせするアルゴリズムである [1][4]。その二つの点群の対応関係は未知であるが、位置合わせの初期値は既知とし、初期値から非線形な誤差関数の最適化を行う手法である。つまり位置合わせの結果の精度は、与えられた初期値に大きく依存している。

標準 ICP アルゴリズムは、二つの距離画像の最近傍点による対応付けと、すべての対応点から計算された最適な並進ベクトルによる位置合わせの二つの処理を交互に行う。つまり、データ形状とモデル形状の対応点から推定された幾何変換をデータ形状に適用し、変換されたデータ形状からモデル形状中の最近傍点への対応付けを行う処理に戻ることで、繰り返し演算が構成される。

ところが、標準 ICP アルゴリズムには以下のような問題点が存在する。

- 初期値依存性：収束する極小値は初期値 \vec{q}_0 をどのように設定するかによる。
- 形状依存性：形状全体の大きさと比較して表面の凹凸が極端に大きかったり小さかったりする場合、位置合わせが難しい。

精度の高い3次元形状復元を行うためには、初期値として十分に位置合わせされた状態を与える必要がある。

3.1.2 Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)

どのような物体が画面内に存在しているかコンピュータに認識させるために用いられる局所特徴量として Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [3] が挙げられる。SIFT の処理は、キーポイント (特徴点) の検出と特徴量の記述の2段階に分けられる (図7)。

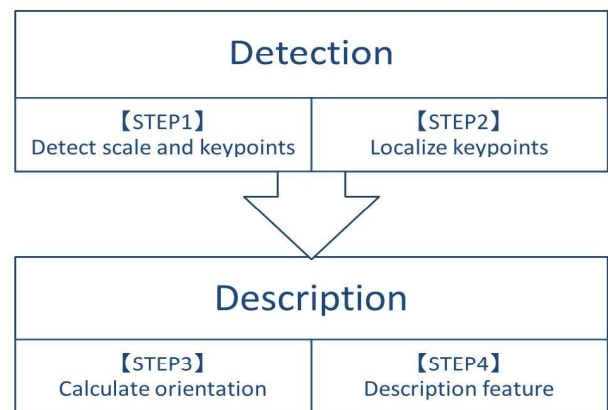


図7 SIFTの構成

Fig. 7 SIFT overview

キーポイントの検出の際には、コーナー点やあるピクセルを中心とした周辺領域に多くの濃淡情報を持つ点が検出される。以下に SIFT のアルゴリズムの処理の流れを示す。

キーポイント検出 { STEP1.スケールとキーポイント検出
STEP2.キーポイントのローカライズ

特徴量の記述 { STEP3.オリエンテーションの算出
STEP4.特徴量の記述

局所領域の特徴量記述を行い、スケールスペースを用い

ることで、画像のスケール変化や回転に不変な特徴量を記述することが可能である。

また、SIFTを用いることで、2枚の異なる画像の対応点探索による画像のマッチングを行うことができる。これは、SIFTにより異なる画像間で抽出された各キーポイント特徴量を比較することで、画像間の対応点探索が可能になるためである。

画像 I_1 中のあるキーポイント k_{I_1} と画像 I_2 中のあるキーポイント k_{I_2} の特徴量をそれぞれ $\mathbf{v}^{k_{I_1}}$, $\mathbf{v}^{k_{I_2}}$ とすると、特徴量間のユークリッド距離 d は次式によって算出される。

$$d(\mathbf{v}^{k_{I_1}}, \mathbf{v}^{k_{I_2}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{128} (v_i^{k_{I_1}} - v_i^{k_{I_2}})^2} \quad (1)$$

あるキーポイント1点に対して、異なる画像中に含まれる全キーポイントとの特徴量間の距離 d を算出し、特徴量の距離 d が最も小さい点 k_1 を対応点として検出する。ここで、 d_1 は k_1 とのユークリッド距離、 d_2 は k_2 とのユークリッド距離を表す。

3.2 暗所下の物体の3次元形状復元

標準 ICP アルゴリズムは、3.1.1 節で述べたようにいくつかの問題点を抱えている。初期位置合わせを行うこと無しに ICP アルゴリズムを実行すると精度の良い3次元形状復元は行えない。そのため有効な初期位置合わせを行う必要があり、SIFTを用いた対応点探索による初期位置合わせを行う。しかし、暗所下の物体を撮影した場合、RGB画像内に明るさのムラができてしまい、特徴ベクトルの正規化では対応できない特徴量の変化が生じてしまう。そのため、暗所下で撮影された不明瞭な RGB 画像から正しい対応点の組み合わせを得ることが難しく、十分な位置合わせを行うことができない。そこで本研究では、撮影対象を暗所下の物体に絞り、模様を帯びた光を物体に対して照射した上で SIFT を用いた初期位置合わせを行い、その後 ICP アルゴリズムを実行するシステムを構築した。システムの流れは以下の通りである。

【初期位置合わせの工程】

STEP1: 模様光を照射し、RGB 画像を取得する。

STEP2: 2枚の RGB 画像の SIFT を用いた対応点探索を行い、ホモグラフィ(平面射影変換)行列 [5] を求める。

STEP3: ホモグラフィ行列とカメラの内部パラメータより並進ベクトルを求める。

STEP4: ほぼ同じ XYZ 座標上に物体が位置する2枚の距離画像を取得する。

【ICP アルゴリズムの工程】

STEP5: ICP アルゴリズムを実行する。

各工程の詳細は以下の通りである。

STEP1: 「模様光を照射し、RGB 画像を取得する。」

SIFT を用いる際に対応点が多く見つかるよう、撮影対象の物体に対してセンサ側から光を当てる。こうすることで得られた鮮明な RGB 画像を用いて正確な SIFT を用いた対応点探索を行い、十分な初期位置合わせの結果を得ることができる。さらにこの時、特徴を多く含んだ模様を帯びた光を照射することで、SIFT を行った際に有効なキーポイントがより多く見つかり、対応点探索の精度が向上する。このような模様光を照射した状態で、距離画像センサとして用いている Xtion PRO LIVE から、完全に同期された RGB 画像と距離画像を取得する。

STEP2: 「2枚の RGB 画像の SIFT を用いた対応点探索を行い、ホモグラフィ行列を求める。」

SIFT により2枚の RGB 画像間で抽出された各キーポイントの特徴量を比較することで、画像間の対応点探索を行う。その後、異なる位置から撮影された2枚の画像データのそれぞれに写っている撮影対象物体の画像内での位置が、相対的にどれだけズレがあるかを計算するために、求められた対応点の組み合わせからホモグラフィ行列を求める。

STEP3: 「ホモグラフィ行列とカメラの内部パラメータより並進ベクトルを求める。」

カメラの内部パラメータの逆行列と、画像データ A から画像データ B へのホモグラフィ行列をかけあわせることで、 A を撮影した時のカメラ座標の原点から B を撮影した時のカメラ座標の原点への移動ベクトルを求める。これを並進ベクトルと呼ぶ。この時、カメラの内部パラメータは予めチェックボードを用いたコーナー点検出により決定しておく。

STEP4: 「物体がほぼ同じ XYZ 座標上に位置する2枚の距離画像を取得する。」

対応点探索を行う2枚の RGB 画像を A, B とした時、 A に向けて B を移動させる並進ベクトルが得られる。この時、それぞれ XYZ 座標を持つ B の距離画像の点群一つ一つにこの並進ベクトルを作用させ B の変換を行う。これより物体がほぼ同じ XYZ 座標上に位置する2枚の距離画像を取得する。

STEP5: 「ICP アルゴリズムを実行する。」

初期位置合わせが行われ、物体がほぼ同じ XYZ 座標上に位置する2枚の距離画像に対して ICP アルゴリズムを実行する。

上記のようなシステムを用いて一方向からの撮影のみでは確認することのできなかった物体表面を点群として取得し、正確に統合することで物体表面の形状を復元する。形状復元した物体表面の形状データを用いて、物体の運搬の際にロボットが把持する荷物の位置を正確に推定できるようにすることを本研究での3次元形状復元の目標とする。

4. 復元実験

構築した3次元形状復元アルゴリズムを用いて、暗所下のダンボール箱の3次元形状復元を行う。本節では今回行った実験の内容と結果、そしてその考察について述べる。

本研究の実験は、BOXに積まれた複数の荷物の個別認識が完了した上で、表面が隠れている部分が少ない荷物に対して3次元形状復元を行う状況を想定している。

4.1 実験環境

復元を行う物体について述べ、その後、実験内容について説明する。

4.1.1 復元を行う物体

荷物として特に数の多いダンボール箱の3次元形状復元を行う。縦0.47m、横0.48m、奥行0.36mのダンボール箱(図8)を実験に用いた。



図8 復元を行うダンボール箱
Fig. 8 Cardboard box

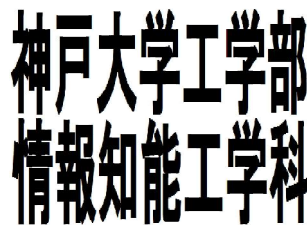


図9 照射する模様光
Fig. 9 Pattern light

また、照射する模様光として特徴点が複雑に分布した図9を用いる。

4.1.2 実験内容

本研究の実験では、以下の(a), (b), (c)の各条件で取得したデータの三次元復元の精度を比較する。この時、部屋の照明は実際の現場の倉庫の照明と同じ程度に設定する。

また、Xtion PRO LIVEを利用することで、照明の有無に関係なく同様の距離画像データを取得することができるため、RGB画像を用いた初期位置合わせを行わない場合、3次元形状復元の結果は模様光を照射したものもしないものも同じ結果になる。従って、本研究の実験条件から、“模様光を照射しない”かつ“初期位置合わせを行わない”，というものを除いた。

- (a) {
 - ・模様光：照射する
 - ・初期位置合わせ：行わない
- (b) {
 - ・模様光：照射しない
 - ・初期位置合わせ：行う
- (c) {
 - ・模様光：照射する
 - ・初期位置合わせ：行う

物体の設置条件： 固定する。

模様光の照射条件： 「EPSON LCD PROJECTOR MODEL:EMP-1700[6]」を用いて模様光を照射する。模様光はカメラの画角内にすべて収まるように照射する。また、「EPSON LCD PROJECTOR MODEL:EMP-1700」から物体まで2.2m離れている。

カメラの撮影位置条件： 物体の重心から2.5m離れたある点を正面点と定義し、その点を通る全長2.1mの直線上から撮影を行う(図10, 赤色の直線で示し、以降、撮影直線と呼ぶ)。撮影直線は物体を中心とした半径2.5mの円の接線となるように設置し、正面点が撮影直線の中心点となるようにする。撮影直線左端から0.3m刻みで8枚の撮影を行い、それぞれの撮影位置を1,2,3,...,7,8とする。カメラ座標Z軸は撮影直線と常に直交している。また、カメラ座標Y軸は常に鉛直方向を向いている。

物体の中心と撮影直線の中心点の距離： 2.5m

地面からカメラのまでの高さ 0.7m

実験でのカメラの解像度は、RGB画像、距離画像ともに640×480ピクセルである。またプログラムの作成については画像処理のライブラリ集であるOpenCV[7]を使用し、距離画像センサを使用する際にはOpenNI[8]を用いた。

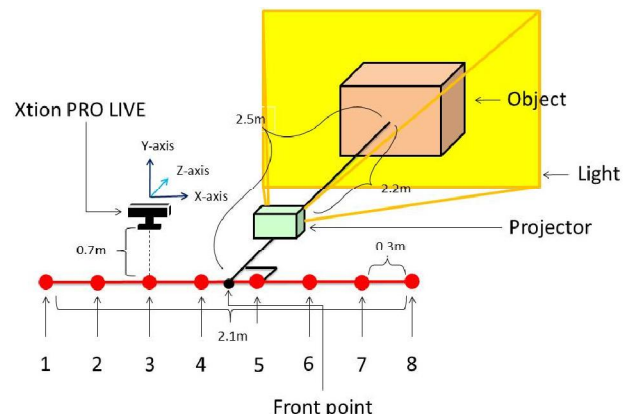


図10 カメラの撮影位置条件

Fig. 10 Positional relationship of experimental apparatus in experiment

4.2 実験結果

ダンボール箱の3次元形状復元を行う。表1に、各撮影位置で撮影されたふたつのデータを(a), (b), (c)それぞれの手法を用いて3次元形状復元を行った後の、データ形状とモデル形状のズレの値を示す。この時、データ形状とモデル形状の重心、最も左端の点、および最も右端の点のズレの平均をとった値を各撮影位置同士のズレの値としている。これら3点のズレの平均値が小さければ小さいほど、3次元形状復元が精度高く実行されていると言える。

表1 ダンボール箱の3次元形状復元結果

Table 1 3D shape restoration result of cardboard box

Mislocation value		technique		
		(a)	(b)	(c)
Camera station of source and reference	1 and 2	0.035282	0.017474	0.011840
	2 and 3	0.088567	0.164427	0.022047
	3 and 4	0.098287	0.136119	0.021166
	4 and 5	0.075520	0.097621	0.054937
	5 and 6	0.087863	0.045954	0.041908
	6 and 7	0.087000	0.024549	0.033465
	7 and 8	0.043863	0.013511	0.038024
Average mislocation value		0.073768	0.071379	0.031912

図11に、撮影位置1と2で撮影されたデータを(a)の手法で3次元形状復元した点群画像を示す。また、同位置での撮影データを(b)の手法で3次元形状復元を行った点群画像を図12に、(c)の手法で3次元形状復元を行った点群画像を図13に示す。

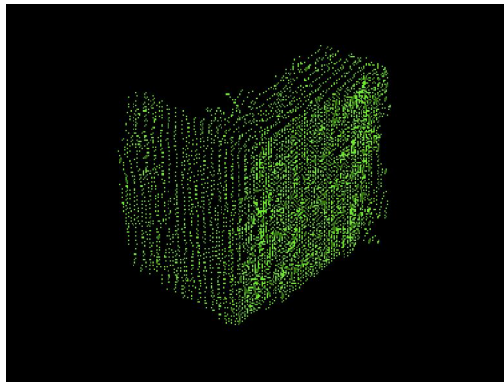


図11 撮影位置1と2で撮影されたデータを(a)の手法で3次元形状復元した点群画像

Fig. 11 3D shape restoration result of "1 and 2" by (a)

また、図14に模様光を照射せずに3と4の撮影位置から得られた2枚のRGB画像の対応点探索を行った結果を示し、図15に模様光を照射した状態で3と4の撮影位置から得られたRGB画像の対応点探索を行った結果を示す。図14および図15中の様々な色で描画された直線は、2枚の画像の対応点の組み合わせを信頼度の高い順に15組選び、点と点の間を直線で結んだものである。

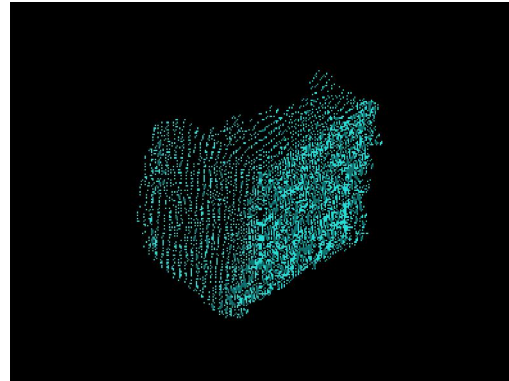


図12 撮影位置1と2で撮影されたデータを(b)の手法で3次元形状復元した点群画像

Fig. 12 3D shape restoration result of "1 and 2" by (b)

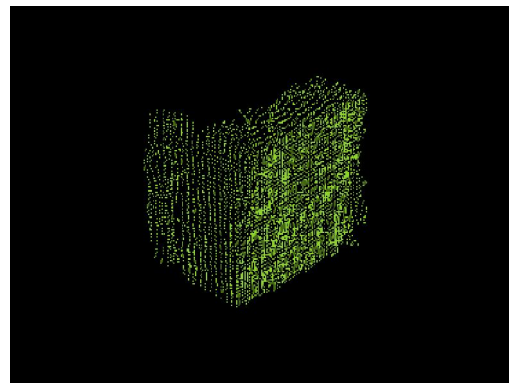


図13 撮影位置1と2で撮影されたデータを(c)の手法で3次元形状復元した点群画像

Fig. 13 3D shape restoration result of "1 and 2" by (c)

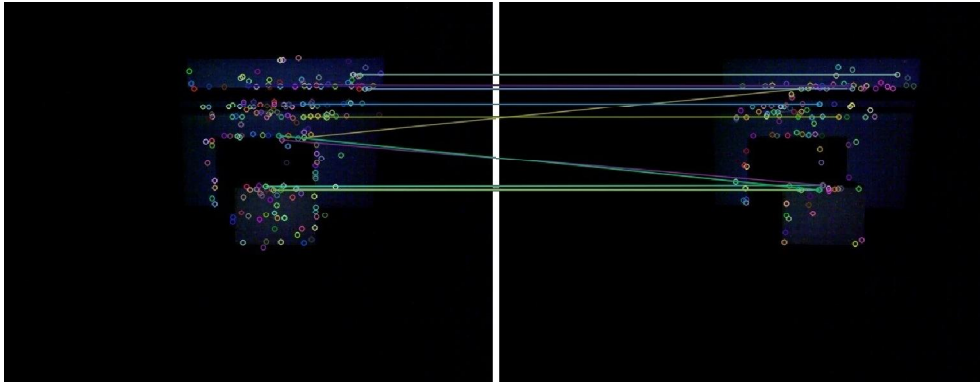


図 14 模様光を照射せずに 3 と 4 の撮影位置から得られた 2 枚の RGB 画像の対応点探索を行った結果

Fig. 14 Matched images of cardboard box taken at camera station 3 and 4 without pattern light

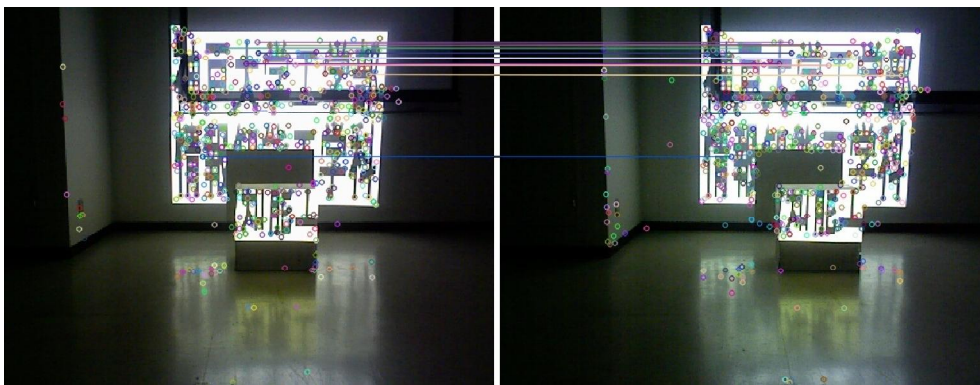


図 15 模様光を照射しながら 3 と 4 の撮影位置から得られた 2 枚の RGB 画像の対応点探索を行った結果

Fig. 15 Matched images of cardboard box taken at camera station 3 and 4 with pattern light

4.3 考察

表 1 から分かるように、モデル形状とデータ形状のズレの値の平均値は (c) の手法を用いた場合が最も小さくなっている。このことより模様光を照射した上で SIFT を用いた初期位置合わせを行う (c) による 3 次元形状復元は、初期位置合わせを行わない復元 (a) や、模様光の照射なしに曖昧な初期位置合わせを行った上での復元 (b) と比べ、精度の高い 3 次元形状復元を行っていることがわかる。

初期位置合わせを行わない (a) の手法を用いた場合、どの隣り合う撮影位置同士の形状復元もほぼ同精度で行われたため、それぞれのズレの値に大きなばらつきは見られない。また、初期位置合わせを行っていないため、初期位置合わせの誤りによる形状復元の失敗というケースが存在しないこともズレの値に大きなばらつきが見られない要因として考えられる。

模様光の照射を行わずに不鮮明な RGB 画像をもとに初期位置合わせを行った (b) の手法を用いた場合、初期位置合わせを行っていない (a) と比べるとズレの値の平均値は小さくなっているが、それぞれの撮影位置におけるズレ

の値に大きなばらつきがある。これは、不鮮明な RGB 画像同士の対応点探索の際に生じた誤対応 (図 14) が、誤った並進ベクトルをデータ形状に作用させることがあるからであると考えられる。表 1 上では、"2and3" や "3and4" でそのような誤対応があったと推測される。それら以外の撮影位置では比較的小さいズレを得ているケースも見られるが、このような誤対応をしてしまう可能性を多く持っていることから、(b) は不安定な手法であると考えられる。

(c) の手法を用いた場合、ズレの値の平均値は (a)、(b) に比べ小さく、また、各撮影位置によるズレの値にも大きなばらつきは見られない。このことから、対応点探索の際の誤対応の可能性も低く (図 15)、比較的精度も高く安定している手法であると考えられる。

5. 結論

本研究では、暗所下の物体に、特徴を多く持つ模様を帯びた光を当てることで、より正確な対応点探索を行い、十分な初期位置合わせを行うことで、3 次元形状復元の精度

の向上を図った。その結果、模様光を照射しない場合や初期位置合わせを行わない場合と比べ、高い精度かつ、安定した形状復元を行うことができた。

本研究の発展として、より効果的な照射光の模様を提案することが考えられる。特徴を抽出しやすい模様光を照射することで、より正確な並進ベクトルが得られる。正確な並進ベクトルを得ることができれば、離れた撮影位置から得られる距離画像同士の初期位置合わせも精度よく行うことができると考えられる。また、さらなる発展として、復元の際に用いる画像データを2枚より多く使用し、より復元部分の多い形状復元をすることが考えられる。この場合、一度形状復元を行った二つのデータに対し、さらに新たなデータを統合することになる。そのためには、一度形状復元を行ったデータに対する初期位置合わせを正確に行うシステムを構築する必要がある。これらの改良されたアルゴリズムを用いて物体の完全な3次元形状復元を行うことで、産業用ロボットがもたらす作業の自動化がさらに発展していくだろう。本研究で作成したアルゴリズムもその発展の一端を担うことが期待できる。

参考文献

- [1] Paul J.Besl and Neil D.McKey. A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256, (1992)
- [2] "XtionPROLIVE" http://www.asus.com/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/ (2014/02/18 アクセス)
- [3] D. G. Lowe." Object Recognition from Local Scale-Invariant Features," International Conference on Computer Vision, pp1150-1157(1999)
- [4] Berthold K. P. Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions, *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, Vol.4, No.4, pp.629-642, (1987)
- [5] Oliver Faugeras." Three-dimensional computer vision" A geometric viewpoint, MIT Press, (1993)
- [6] "EPSON LCD PROJECTOR MODEL:EMP-1700" <http://www.epson.jp/products/back/hyou/elp/emp1700.htm> (2014/02/18 アクセス)
- [7] "OpenCV" <http://opencv.jp/>(2014/02/18 アクセス)
- [8] "OpenNI" <http://www.openni.org/>(2014/02/18 アクセス)