

## 技術解説



## 最新三次元画像処理技術

Christian Hruscha\*, 山口新\*

## Latest Three Dimensional Image Processing Technology

Christian Hruscha and Arata Yamaguchi

**Synopsis**

Since the demand for 3D image processing technology has been rapidly growing during last years, we have focused on researching high-performance 3D measurement and object recognition techniques.

We developed a line laser scanner system for 3D measurements that is available as an extension library to FAST's Windows based image processing library. By experiment, we verified that the library provides highly accurate measurements. We also propose a line laser scanner system that is able to deal with halation and partial occlusion.

Further, we developed a 3D solution package that contains 3D scanner functionality based on structured light, as well as 3D object recognition technology, to be used with 3D scan data or with conventional stereo cameras. Experimental results demonstrate the accuracy of the object registration algorithm. The measuring accuracy using a structured light scanner in our experimental setup was better than 10  $\mu\text{m}$ . The package comes with a TCP/IP interface that allows easy integration into production systems.

## 1. はじめに

株式会社ファースト（以下、当社という）は1982年の創業以来、画像処理専用ハードウェアとソフトウェアの自社開発を営々と続け、今年で30年目を迎える。当初は画像処理装置とその装置専用ライブラリのリリースから開始し、近年では、性能向上が著しい市販PCで動作するWindows用の画像処理ライブラリの提供、より高速性を追求したFPGAやGPUなどのアーキテクチャを用いた技術開発も進めている。FAでの生産効率を高めるため、日々お客様の声に耳を傾け、画像処理技術を進化させ続けており、多数のお客様からの支持を得ている。

今日では2次元画像処理から3次元画像処理へと技術が発展し、近年ますます増える3次元画像処理に対する

要望の中で、特に3次元計測と3次元認識については、FA分野でも要求が多く当社でも技術開発に力を入れている。そこで、本文では、当社の3次元計測用のライブラリと3次元認識用のパッケージソフトウェアを用いた最新の画像処理技術について紹介する。

## 2. 3次元計測ライブラリ

## 2. 1 概要

当社はWindows用画像処理ライブラリのオプションとして光切断法を用いて対象物の高さを計測する3次元計測ライブラリをリリースしている。光切断法ではラインレーザを計測対象物に照射し、そのライン形状をカメラで撮像する（Fig. 1）。このとき、カメラの校正（キャリブレーション）をあらかじめ行っておけば、このライ

2012年11月2日受付

\*株式会社ファースト 技術開発本部 (Technical Development Division, FAST CORPORATION)

ン上の3次元の高さ情報を計算により求めることができる<sup>1), 2)</sup>。これを移動ステージと組み合わせることにより、対象物の3次元形状を計測することができる (Fig. 2)<sup>3)</sup>。

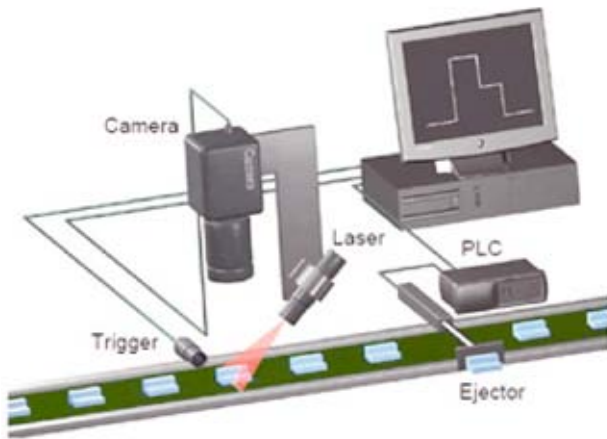
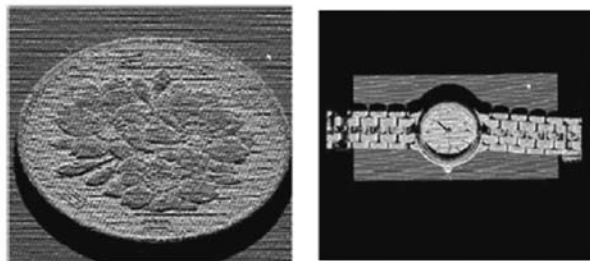


Fig. 1. 3D measurement system using line laser scanner.



a) Coin

b) Watch

Fig. 2. Measurement data.

## 2. 2 適応事例

当社のライブラリは接続可能なカメラが豊富で、VGA クラスから5メガクラスのカメラまで、多くのメーカーのカメラに対応している。対象となるワークの大きさに応じてカメラを選択することができるので、さまざまな場面に3次元計測ライブラリを用いることが可能である。

- 道路の路面計測 (Fig. 3)
- エンジン部品の取り付け検査
- 高温下での鋼材表面のキズ検査

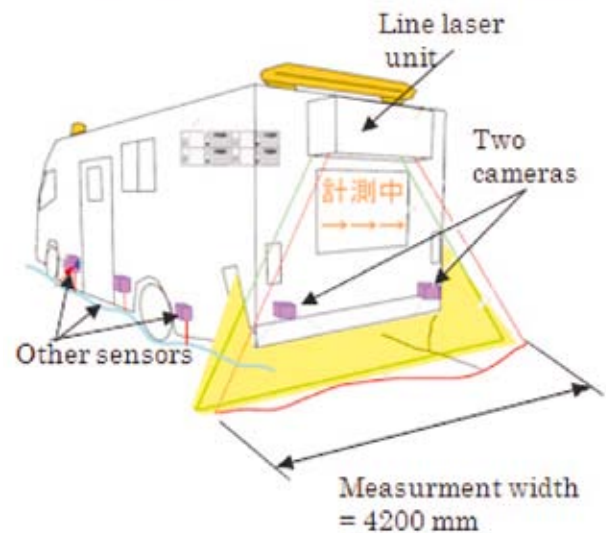


Fig. 3. Car installed line laser scanner system in rear.

## 2. 3 計測精度

光切断法ライブラリの計測精度を以下の方法で検証した。厚さの異なる2つの標準ゲージ (ミットヨ製) を並べ段差を作り (Fig. 4), 計測結果と理想値との比較を行った。検証で用いた装置スペックを Table 1 に示す。レーザ光を対象物の真上から照射し、60°傾けた位置からカメラで撮像し計測を行う (Fig. 5)。ブロックゲージは 1.01 mm と 1.00 mm を用いた。計測したデータの中

から1ライン分のデータを図に示す (Fig. 6). 光切断法ライブラリを用いることで0.01 mmの段差を判別することが可能であることが分かる.

通常の2次元画像処理では苦手とされる反射率の高いワークに対して計測評価を行った. 検証で用いた装置スペックを Table 2 に示す. 対象物は厚さ0.012 mmのアルミ箔である. アルミ箔の上に細かく切ったアルミ箔の断片を載せて計測を行った (Fig. 7). 計測データに断片の形状が見てとれる. 反射率の高いワークでも高精度に計測が可能であることがわかる.

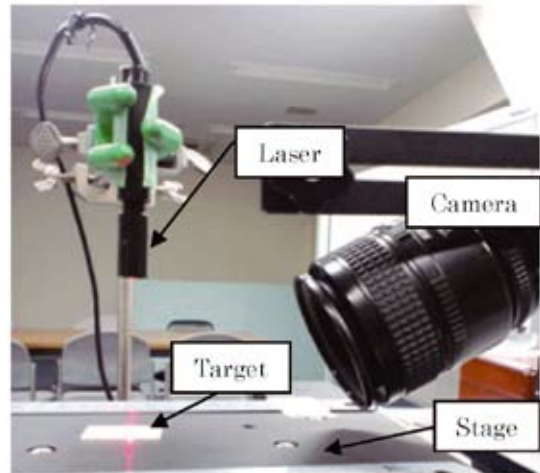


Fig. 5. Vertical distance measurement using line laser.



Fig. 4. Standard gauge.  
(thickness 1.01 mm and 1.00 mm)

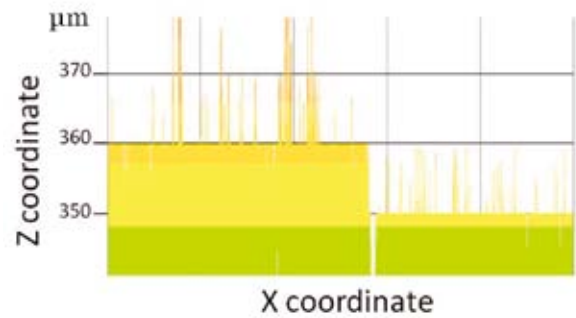


Fig. 6. Measurement data

Table 1. System specification

	Spec.
Camera (pix)	1280×1024
Lens (mm)	60
Laser width (mm)	0.015
Laser wavelength (nm)	640

Table 2. System specification

	Spec.
Camera (pix)	1280×1024
Lens (mm)	30
Laser width (mm)	0.015
Laser wavelength (nm)	640
Resolution (mm)	0.02

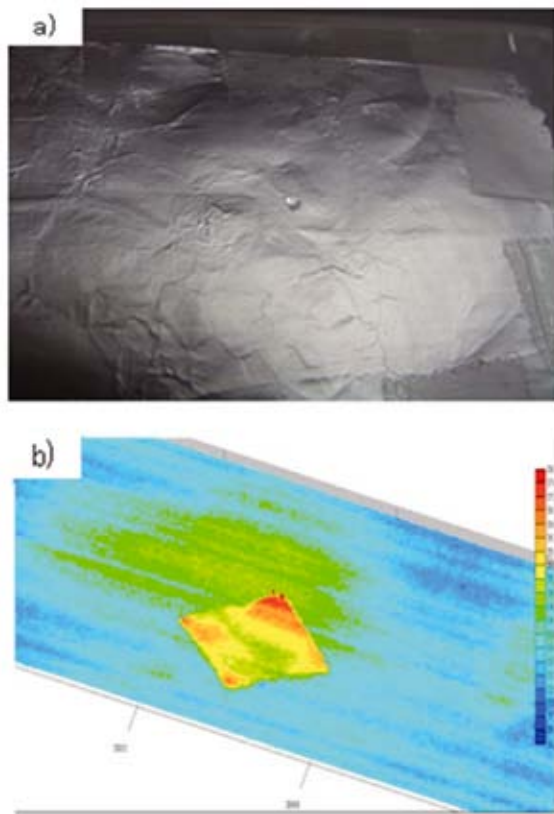


Fig. 7. Aluminum foil sample.  
a) Target and b) Measurement data

## 2. 4 遮蔽対策

表面に光沢があるワークを計測すると、ハレーションによりレーザー光の線幅が太くなる場合がある。レーザー光の線幅が太くなると、それがノイズとなり、計測精度が不安定になる。この現象はカメラの位置によって変わる。Fig. 8はワークに照射したレーザー光を異なる位置から撮影した画像であるが、同じ位置のレーザー光を撮像しても、カメラの位置によって線幅が異なることがわかる。そこで、カメラを2台使い、レーザー光の線幅を比較し、幅の狭いほうを採用することでハレーションによるノイズを軽減する3次元計測システムを開発した (Fig. 9)。

このシステムは、照射されたレーザー光が対象物の影に隠れ、カメラから見えない現象（遮蔽）に対しても有効である。画像上でレーザー光が存在していない箇所は遮蔽

によるデータの欠損とみなし、レーザーが存在するほうを採用することで欠損を補う良好な3次元データを取得することができる (Fig. 10)。

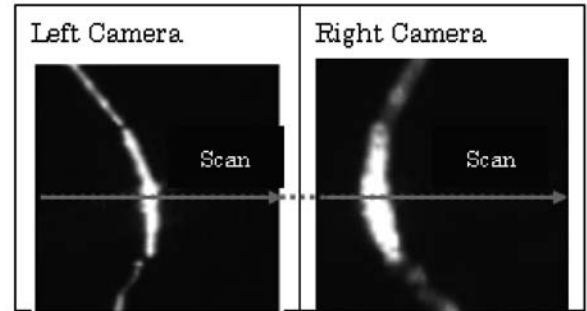


Fig. 8. Line laser imaged with stereo camera. Halation is significantly stronger in right image.

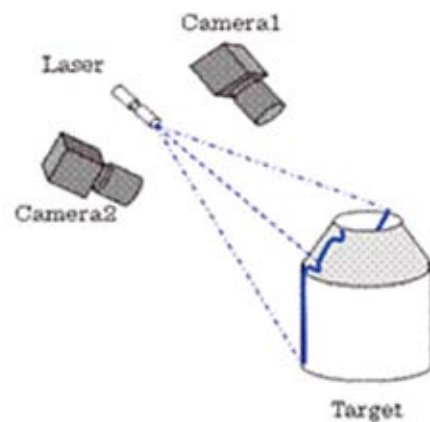


Fig. 9. Stereo camera system combined with line laser.

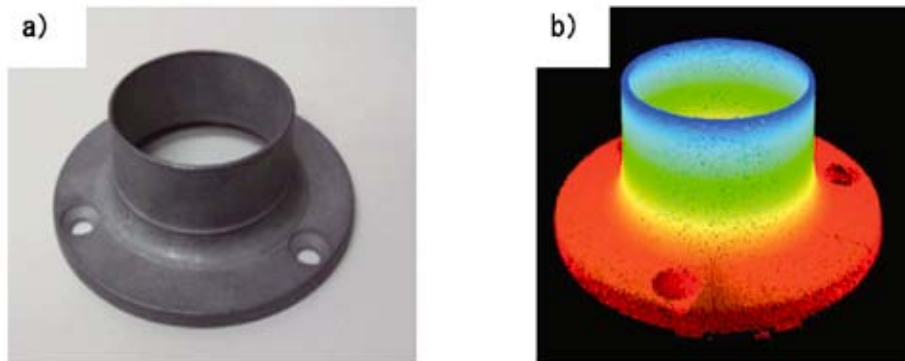


Fig. 10. Workpiece sample.

a) Target and b) Measurement data

### 3. 3次元認識用パッケージソフトウェア

#### 3. 1 概要

軸関節ロボットを使用したピックアップや組付けのテーマでは対象の3次元的な位置・傾き情報が必要となるため、従来の2次元位置決め処理では対応が難しかった。

このような3次元的な位置決め技術を必要とするニーズに対し、当社では従来からソリューションあるいはアプリケーションという形で開発し、現場に投入して経験を積んできた。その過程で培われた機能、特にロボットビジョンとして最適な機能をひとまとめにして、低価格なパッケージソフトウェアに仕上げた。

#### 3. 2 特徴

3次元認識用パッケージソフトウェアは最新の3次元画像認識技術で対象物の3次元的な位置と傾きを求めることができる。カメラを2台使用するステレオカメラ方式と、プロジェクタ1台とカメラ1台を組み合わせたプロジェクション方式の2種類の3次元計測機能が同梱されており、どちらを利用するかは用途に合わせて、自由に選択できる。どちらもロボットビジョンに好適である。

認識処理では、計測された3次元データと事前に登録されたモデルとの一致度が高い対象物の位置・傾きが出力される。モデルの登録はCADデータから行える。また、認識条件に制限はかかるが（認識角度範囲が狭くな

るなど）、計測データからモデルを構築することも可能である。

プロジェクション方式で計測された3次元データはファイル出力が可能である。スキャンした対象物表面の3次元データを3次元計測の評価としても利用可能である。

単なる評価用アプリケーションだけではなく、ロボットコントローラとの通信機能も持っており、FA現場に直接導入が可能である。

#### 【パッケージソフトウェアの主な機能】

- カメラ・プロジェクタ・ロボットキャリブレーション
- ステレオカメラ方式による3次元オブジェクト認識（位置決め）
- プロジェクション方式による3次元オブジェクト認識（位置決め）
- プロジェクション方式による3次元計測評価
- CADデータからモデル登録が可能
- 計測データからモデル登録が可能（認識条件に制限有）
- Ethernet (TCP/IP) を介した画像撮像、位置決め実行、および結果出力

#### 3. 3 適応事例

本パッケージソフトウェアはVGAクラスから5メガクラスの高分解能カメラまで接続することが可能で、カメラの取り付け位置も自由に替えることができる。したがって、案件ごとにカスタマイズが可能で、例えば以下のような適用事例がある。

### ■段積みされた段ボールのデパレーション

異なるサイズの段ボールが混在していても認識が可能 (Fig. 11)

### ■部品のピックアップ&プレース

箱に無造作に入っている対象物を認識 (Fig. 12)

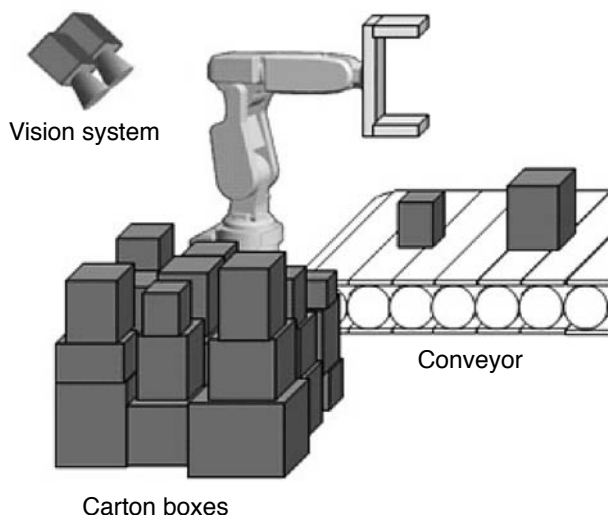


Fig. 11. Robot picks up carton box and places it onto conveyor. Carton boxes of different sizes can be handled at same time.

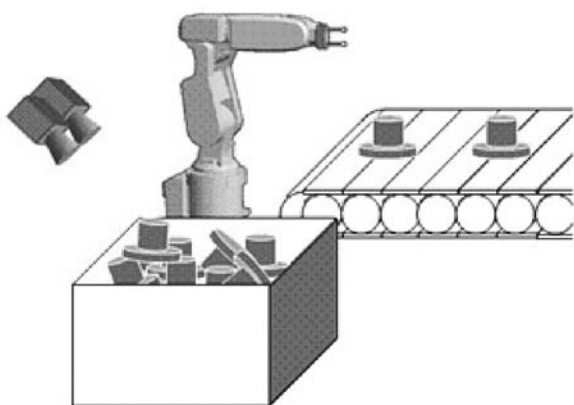


Fig. 12. Robot takes target from box and places it onto conveyor.

## 3. 4 ステレオカメラ方式

ステレオカメラシステムとは2台のカメラを少しずらして平行に配置したものである (Fig. 13). 一般的には、2台のカメラで同時に同じ対象物を撮像し、その対象物の画像上での映る位置の違い (視差) から、対象物までの距離を計算する<sup>4)</sup>. 当社の認識処理は、対象物の輪郭情報だけを使って、対象物の認識 (位置・姿勢) を行う<sup>5)</sup>. 輪郭情報だけを扱うことにより、計算のためのデータ量が大幅に削減できるため、認識処理の高速化が可能となる. また、輪郭部分は画像上では背景とのコントラストが得やすいため安定して検出することができる. これにより高速かつ安定した認識が可能となる. Fig. 14 は認識処理で計測された輪郭位置を画像上に、赤点または緑点でプロットしたものである. 赤点は、認識された対象物の中から、アプリケーション上で指定された対象物の輪郭位置を示し、それ以外の対象物の輪郭位置を緑点で表わしている. パッケージソフトウェアでは認識結果を数値だけでなく画像からも簡単に確認することができる.

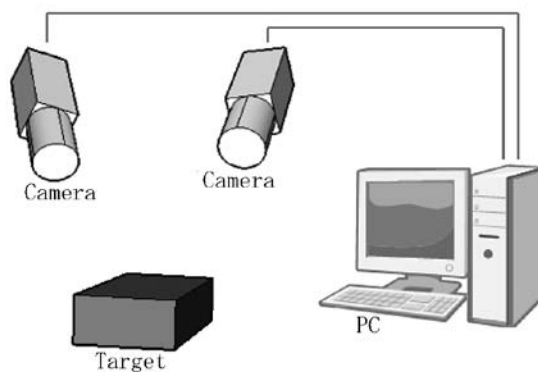


Fig. 13. Stereo camera system.

## 3. 5 プロジェクション方式

1台のカメラと1台のプロジェクタを使用して立体視する方法である (Fig. 15). プロジェクタから特定の縞パターンを対象物に照射する. 縞パターの位相を変えなが

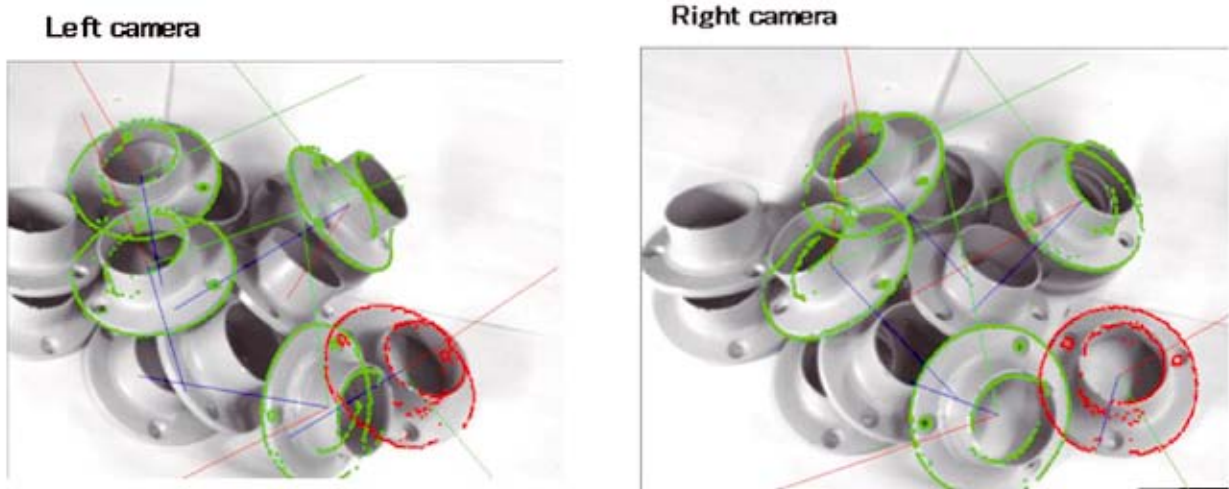


Fig. 14. Calculation of target edges.

ら撮像した画像から投影パタンの変化量を計測する。

Fig. 16 は同じ周波数で位相の異なる縞パターンを照射し、撮像した画像例である。一般的に、同じ周波数で位相の異なる縞パターンを3～5回撮像し計測を行う。高さ方向の計測範囲に合わせて複数の周波数の縞パターンを用いる<sup>6), 7)</sup>。

事前にカメラとプロジェクタの校正（キャリブレーション）を行うことで、計測データを3次元情報に変換することができる。これにより対象物表面の3次元データが取得できる (Fig. 17)。

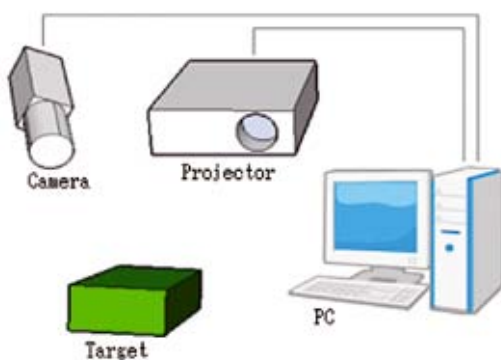


Fig. 15. Projection system.

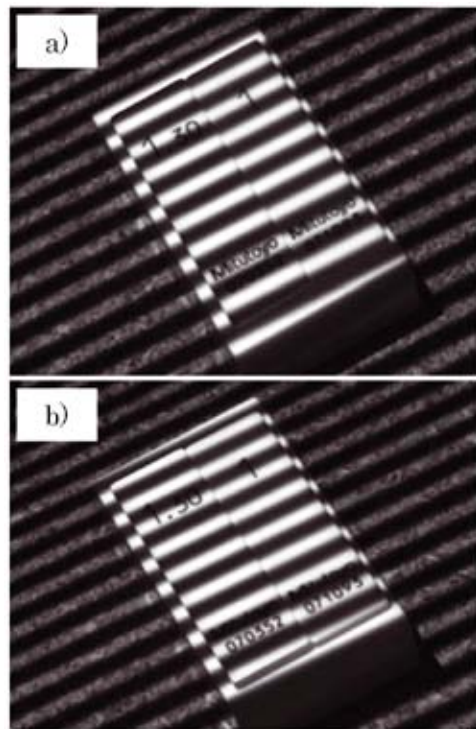


Fig. 16. Phase shifting of projected pattern.

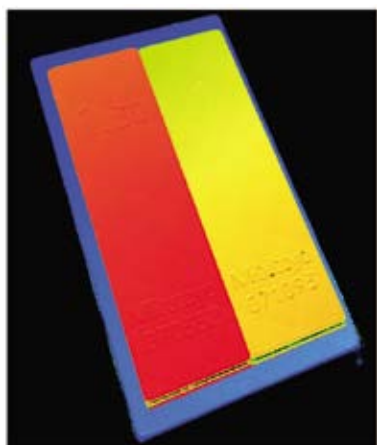


Fig. 17. Measurement data.

### 3. 6 性能比較

曲面の多い対象物や表面が無地の対象物、あるいは画像上の濃淡差が少ないので輪郭を安定して捉えることができない対象物は、ステレオカメラ方式では対応が難しいが、プロジェクション方式では対象物表面の3次元データを取得することができるので認識が可能となる。また、プロジェクション方式は画像の全画素に対して処理を行うため密度の高い3次元データを得ることができる。輪郭情報だけを用いるステレオカメラ方式に比べて認識精度が高い。

一方で、プロジェクタの光量を超えるような外乱光が入る場合、3次元データを計測できないという問題があるが、ステレオカメラ方式ではLED照明を当てることで外乱光の影響を低減できる。また、プロジェクション方式のほうは縞パターンを変化させながら複数枚画像を撮像するため、トータルの処理時間がステレオカメラ方式に比べて長いケースがある。実際の適用では、対象物、現場環境などを考慮して最適な手法を選択する。

### 3. 7 認識性能

ステレオカメラ方式とプロジェクタ方式の認識精度の検証を行った (Table 3)。ステージの上にワークを乗せ、一定間隔でステージを移動させながら認識処理を行う。ステージは基準位置から1 mm 間隔で10回 (総移動量10 mm) 移動させる。それぞれの箇所での認識を行い、基準位置からの移動距離を計算で求める。Table 4

はステージの移動量 (理想値) と計測データとの比較である。理想値との誤差も表に記載した。

実験結果よりステレオカメラ方式に比べ、プロジェクション方式のほうが高精度であることが確認できた (Fig. 18)。ロボットピッキングの場合、ロボットハンドが安全にターゲットを把持するための遊びが必ず存在することから、認識処理の目標精度を1 mm 以内と設定している。認識精度を粗くすることで、計算量が大幅に削減され、処理時間を実運用レベルまで落とすことができる。どちらの手法も目標精度を大きくクリアしており、ピッキング案件に導入することが可能である。

以下は実験で使用したステージのスペックである。

#### ■ボールねじリード精度 (等級)

C3 (代表移動量誤差 = 12  $\mu$ m, 変動 = 8  $\mu$ m)

#### ■ステッピングモータパルス分解能

0.1  $\mu$ m / パルス

Table 3. System specification

	Spec.	
	Stereo camera	Projection
Sensor distance (mm)	370	395
Work distance (mm)	810	770
Resolution (mm)	0.54	0.47
Camera (pix)	640×480	640×480
Lens (mm)	12	12

Table 4. Measurement results.

Theoretical (mm)	Stereo camera		Projection	
	Measurement (mm)	Error (mm)	Measurement (mm)	Error (mm)
1.0	0.861	-0.139	1.003	0.003
2.0	1.972	-0.028	1.999	-0.001
3.0	2.861	-0.139	3.023	0.023
4.0	4.024	0.024	3.977	-0.023
5.0	4.845	-0.155	5.030	0.030
6.0	6.005	0.005	5.962	-0.038
7.0	6.936	-0.064	6.968	-0.032
8.0	8.009	0.009	7.978	-0.022
9.0	8.955	-0.045	8.994	-0.006
10.0	10.023	0.023	10.022	0.022



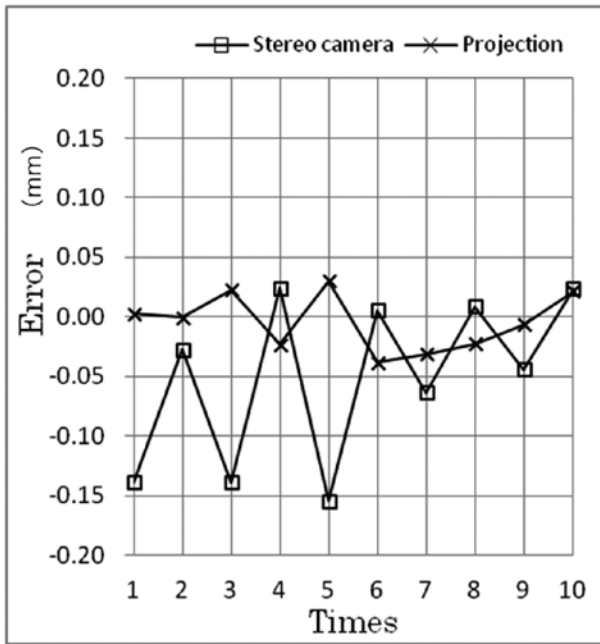


Fig. 18. Comparison of stereo camera and projection systems.

Table 5. System specification.

	Spec.
Sensor distance (mm)	140
Work distance (mm)	300
Resolution (mm)	0.019
Field of view (mm)	50×37
Camera (pix)	2592×1944
Lens (mm)	35



Fig. 19. Vertical distance measurement using plane fitting.

### 3. 8 計測

プロジェクション方式では、スキャンした3次元データをASCII（またはPLY,STL形式）データファイルとしてエクスポートすることができる。

プロジェクション方式の計測精度を検証した（Table 5）。厚さの異なる2つのブロックゲージ（ミットヨ製）を並べ段差を作る。プロジェクション方式でスキャンしたあと、それぞれのブロックゲージで平面近似し、平面間の距離を計算する。近似する平面の面積は約20 mm<sup>2</sup>とした（Fig. 19）。検証では、0.01 mm～0.05 mm, 0.1 mm～0.5 mmの段差を作成し、それぞれ10回計測しRMS（平均二乗偏差Root Mean Square）を算出した（Table 6）。すべての段差でRMS誤差が10 μm以下であった。プロジェクション方式を用いて高精度な計測が可能であるといえる。

Table 6. Measurement results.

Theoretical (mm)	RMS (mm)	Theoretical (mm)	RMS (mm)
0.01	0.0008	0.1	0.0014
0.02	0.0034	0.2	0.0018
0.03	0.0007	0.3	0.0028
0.04	0.0008	0.4	0.0026
0.05	0.0016	0.5	0.0074

### 3. 9 通信機能

ロボットピッキングのシステムを導入する場合、ビジョンシステムとロボットとの連動が必ず要求される。そのような要求に対して、パッケージソフトウェアではロボットコントローラとの通信機能を提供する。Ethernet (TCP/IP) を介してロボットコントローラからパッケージソフトウェアに、画像の撮像や位置決め実行を指示し、位置決め結果 (3次元座標, 姿勢) をロボットコントローラへ送信することができる。事前にロボットとビジョンシステムとの校正 (キャリブレーション) を行えば、ロボット座標系で対象物の3次元座標・姿勢が出力されるので、ロボットに直接移動先を指示することができる。

当社のシステムでは、ロボットコントローラ側がクライアント、パッケージソフト側が、サーバとなる (Fig. 20)。したがって、導入先で作成されたロボット制御アプリケーションの中で、パッケージソフトに対して以下のような命令 (コマンド) を送ることでパッケージソフトが持つさまざまな機能を使うことができる。通信コマンド仕様は公開されており、導入先でも簡単にピッキングシステムを構築することができる。

#### 【主なコマンド】

- ロボット座標系とカメラ座標系のキャリブレーション
- ステレオカメラ方式で撮像開始
- ステレオカメラ方式を用いた位置決め実行
- プロジェクション方式で撮像開始
- プロジェクション方式を用いた位置決め実行
- 認識結果 (ロボット座標系) の取得

## 4. 最後に

本報告では、3次元画像計測ライブラリと3次元認識用パッケージソフトウェアの機能および性能検証の結果を紹介した。今後も、基礎的な技術開発だけにとどまらず、多様なニーズに合わせて性能・機能を向上させ、より多くの現場で品質向上・コスト削減に貢献したいと考えている。

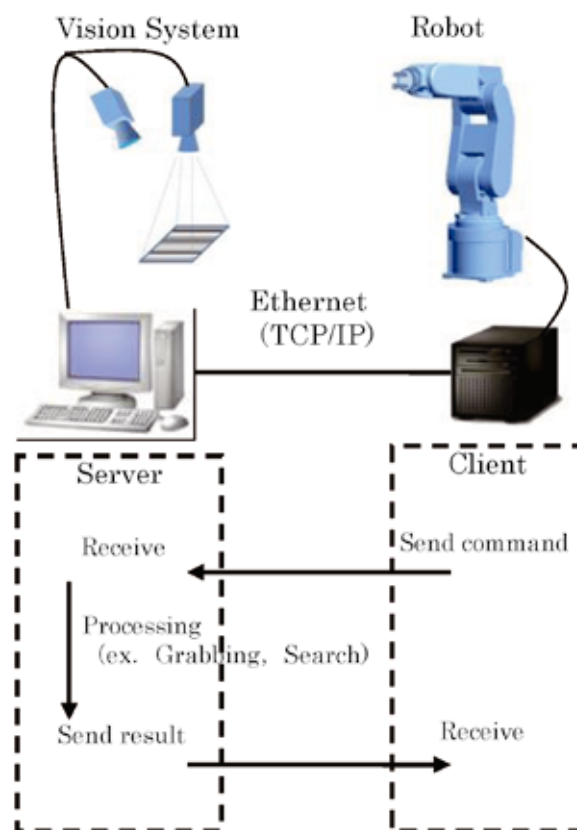


Fig. 20. Robot picking system.

(文献)

- 1) 高井利久: 電気鉄鋼, 79(2008), 305
- 2) 山田龍三: 電気鉄鋼, 79(2008), 313
- 3) 古田島喜一郎, 千葉紀之: 映像情報 Industrial, 産業開発機構(株), 2010, 2.
- 4) 高木幹雄, 下田陽久監修: 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2004, 9.
- 5) 古田島喜一郎: 画像ラボ, 日本工業出版, 2010, 3.
- 6) 吉澤徹: 光三次元・産業への応用, アドコムメディア, 2008, 6.
- 7) 三高良介, 濱田長生: 松下電工技報, 2002, 8