解説



レーザ光を用いた 3D 形状計測について

高井利久*

3D Shape Measurement That Uses the Laser Light

Toshihisa Takai

Synopsis

Non-contact three-dimensional measurement has been widely applied recently. This is because the measurement enabled a new type of shop-floor production (monodukuri) which increased the productivity and made it possible to measure free-form surface which had been impossible in the past.

Triangulation 3D scanner is an equipment that realizes the three-dimensional measurement. Especially, the laser probe method is less subject to the color and the luster of the object, so it is a very worthwhile way to measure industrial instrumentation. Details of the scanner are described in this article.

1. 緒 言

近年は光学式非接触三次元計測の需要が高まってきているが、その背景には 3D CAD の普及や新しいものづくり手法の要求、三次元形状処理技術の進歩が考えられる。市場では原理の違う多様な光学式非接触三次元計測機が実用化されており、現在の非接触 3 次元計測の原理は、おおよそ次の 3 種類に大別できる。

- · 三角測量法
- ・焦点法
- · Time of Flight 法
- 一般的には原理・手法により Table 1 のように分類される.

また手法により特徴的な傾向がある. いずれの手法に

おいても距離換算と角度検出により三次元座標を取得するが、原理的な特性から、計測距離・計測精度はFig.1 のように位置づけられる¹⁾.

格子投影方式には、空間コード法、位相シフト法など 投影するパターンや方法によりさらに多くの方式が考案 されている.

各方式の概略図を Fig.2 ~ 7 に示す.

本稿では取り上げないが CT やミリ波, 音波を利用した計測機もある.

これらの非接触式三次元測定機は有接触式と比較し高速に面形状計測が行えることから、従来不可能であった自由曲面のリバースエンジニアリング (CAM:Computer Aided Manufacturing) やシミュレーション (CAE:Computer Aided Engineering) へと幅広い応用が期待されている。特

Table 1. Features of third-order noncontact former measuring instruments.

Method	Principle	Feature			
		Environment	Target color	Speed	Accuracy
Pattern projection	Triangulation	×	Δ	0	0
Light cut	Triangulation	Δ	×	\triangle	\triangle
Laser beam	Triangulation	0	0	×	Δ
Multi camera	Triangulation	0	Δ	0	×
Confocal laser	Focal	_	0	×	0
Time of Flight	Time of Flight	0	0	×	×

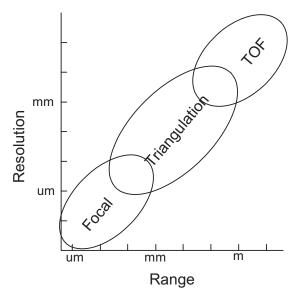


Fig.1. Classification of 3D scanner.

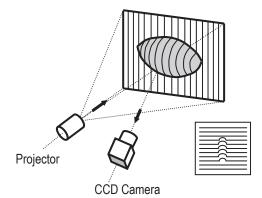


Fig.2. Pattern projection.

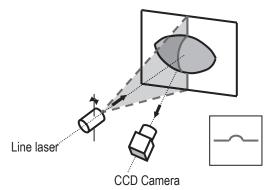
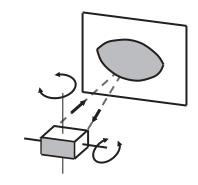


Fig.3. Light cut.



Laser displacement sensor Fig.4. Laser beam.

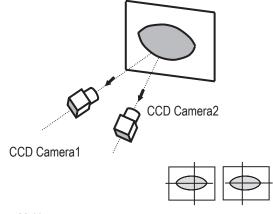


Fig.5. Multi camera.

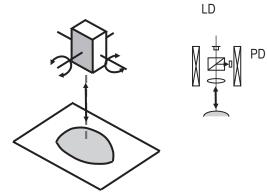


Fig.6. Confocal laser.

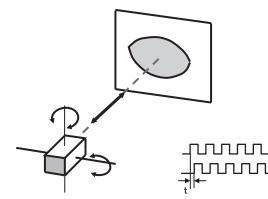


Fig.7. Time of Flight.

に自動車の分野では CAT(Computer Aided Testing) として 広く利用されていて新車開発期間の短縮化を実現させて いる (Fig.8, Fig.9).

しかし、計測範囲、計測精度、計測後の点群データ処理など要求される内容も多岐にわたり汎用的な一気通貫なシステムが存在しないのが現状である.

本稿では、対象物の色や光沢の影響を受けずに高精度な計測が行える光学式非接触三次元計測の入力装置(以下, 3D スキャナ)について述べる²⁾.

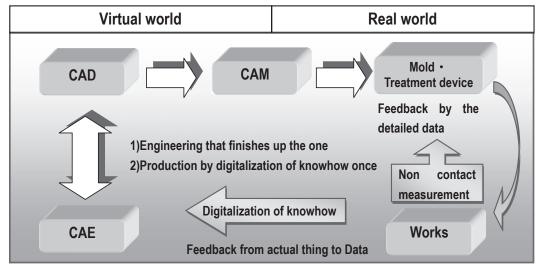


Fig.8. Method of shortening at new car development period using 3D scanner.

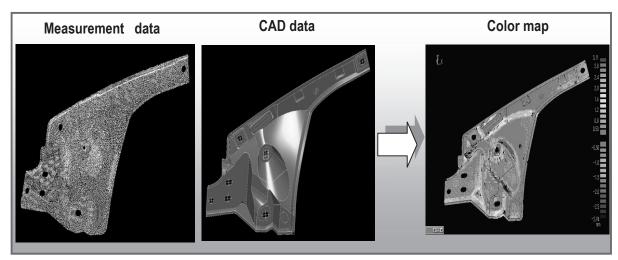


Fig.9. Compare measurement data with CAD data and color display of difference point.

2. ポイント光走査方式

三角測量の原理を Fig.10 に示す. 計測距離 L は,

レンズ間距離:d

レンズ焦点距離:f

撮像素子上の位置:xとすると.

 $L=d \times f(x)$

で表される.

一般的には d, f は固定であり, x を求めることで L を 導き出すことができる.

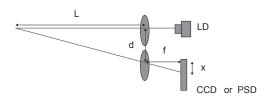


Fig.10. Principle of triangulation.

2. 1 構 造

3D スキャナは、レーザ投光部と受光部から構成される. 実際の構造図を Fig.11 に示す.

レーザダイオードから出射されたレーザ光をコリメータレンズを通して集光させ、レーザ光が対象物に当たり散乱した光を結像レンズを通して CCD 上に結像する. 結像位置により距離が一意に決まることで、距離が計測できる. この時の CCD の信号波形を Fig.12 に示す.

三次元座標を得るためにはレーザ光をX軸方向およびY軸方向に走査し、またその走査角度を求める必要がある。レーザ光の走査は、Fig.13 のようにガルバノミラーにより行いこの時の角度はロータリーエンコーダにより取得する。

三角測量により求めた距離と角度から Fig.14 のように 三次元座標を求めることができる.

レンズ間距離、レンズ焦点距離を変えることで計測範

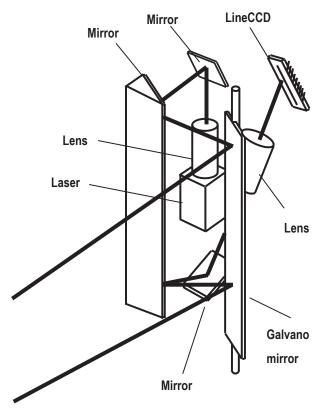


Fig.11. Structure of 3D scanner.

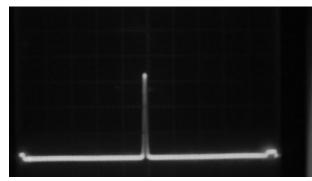


Fig.12. Signal of the CCD.

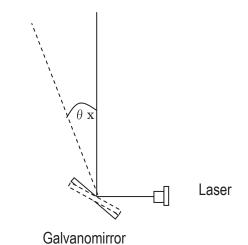


Fig.13. Galvanomirror.

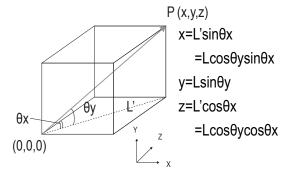


Fig.14. Coordinates calculation.

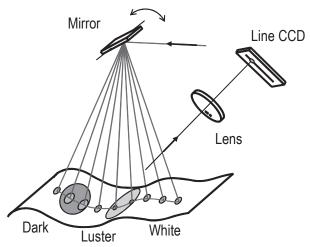
囲および計測分解能の違う 3D スキャナを構成することができる。装置例を Fig.15 に示す。



Fig.15. 3D-scanners with triangulation method.

2. 2 特 徵

ポイント光走査方式はライン切断方式と比較して,同じレーザパワーであっても放射強度が高いため,対象物の色や表面状態および環境光の影響を受けにくい特徴を持つ.また,計測点ごとに放射強度を変化させることができるため黒色から光沢まで混在した材質を同時に計測することが可能となっている(Fig.16, Fig.17).



The laser power is changed depending on interfacestute.

Fig.16. A special feature of the laser probe method.



Fig.17. A result of the measurement by the laser probe method.

2. 3 特性検証

三次元測定機搭載用 3D スキャナ TDS-PH による特性 検証を Table 2 の内容で行った.

●仕様

TDS-PH の標準仕様を **Table 3** に示す. 今回の検証は視野長 50 mm, X 計測ピッチ 0.1 mm ですべて行った.

Table 3. Specification of TDS-PH.

TDS-PH	Spec			
Measurement distance (Z)	160 ~ 220 mm			
View length (X)	20,50,100,140 mm			
X measurement pitch	0.05,0.1,0.2,0.4 mm			
Accuracy	0.05 mm			
Measurement speed	30 ~ 60 Line/sec			
Sampling speed	15000 point/sec			

●条件

·環境温度 20.0 ℃ ± 3 ℃

・試験片

基準ブロック・スチール: No.516-953-30 50 mm(ミットヨ社製)Fig.18

基準ブロック・セラミック: No.611675-02 50 mm(ミットヨ社製)Fig.18

基準球: ϕ 60 mm 鋼球 Ti コーティング Fig.19

基準面:アルミ研磨白塗装 Fig.20

: 石定盤(ミツトヨ社製)

試験片は光学式の非接触三次元計測機にとって,非常 に条件の悪いものを選定し実力値を確認する.

・フィルタ処理

取得したデータはフィルタリング処理(間引き,離散した点の削除、スムージングなど)は一切行わない.



Fig.18. Standard blocks: steel(on the left), ceramic(on the right).



Fig.19. Standard sphere.

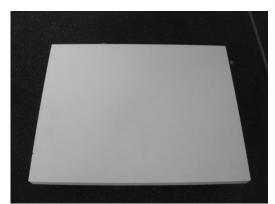


Fig.20. Standard plate.

●計測方法と測定結果

①基準ブロック

石定盤の上に基準ブロックを設置し、石定盤からの高さを測定する (Fig.21, Fig.22).

Table 2. Measurement items.

Target		Verification item	
Standard Block	Steel	Height from base level	
	Ceramic	Height from base level	
Standard sphere Ti coating		Error margin of tolerance of Sphere	
		Error margin of diameter of Sphere	
Standard plate	Aluminum white painting	Error margin of Plane	
	Standard plate stone	Error margin of Plane	



Fig.21. Appearance of the measurement.

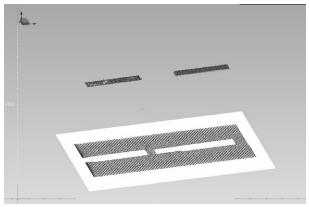


Fig.22. Data of the standard blocks.

②基準球

・球トレランス誤差

すべての測定点から最小二乗球の中心座標を計算して 使用したすべての測定点に対して,最小二乗球の中心か らの距離を計算しこの中心からの距離の標準偏差を求め る

· 球直径誤差

すべての測定点から最小二乗球の直径値を計算して基準球の実測値との差を求める (Fig.23).

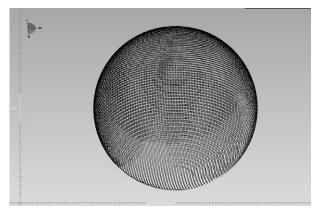


Fig.23. Data of the standard sphere.

③基準平面

すべての測定点から最小二乗平面を計算してこの平面 から各測定点への距離の標準偏差を求める (Fig.24).

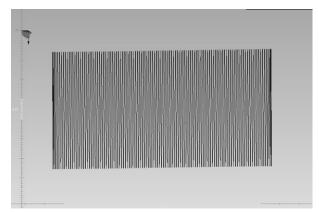


Fig.24. Data of the standard plate.

2. 4 考 察

Table 4 に計測結果を示す.

基準ブロック・スチールでは、真値に対して +0.046 mm と仕様範囲内であり光沢面に強いことが裏付けされた。セラミックでは 0.259 mm と大きな誤差を生じている。これは、レーザ光がセラミック内部に吸い込まれ想定以上のビーム径として CCD 上に結像したことによると考えられる (Fig.25). 誤差が大きくなるのはレーザ光の放射強度が高いことが原因の一つであるが、セラミックに限らず内部に透過する材質のものは同じ傾向となることが予測される。

基準球は光沢のある曲面であるが, データ抜け無く安

Table 4. Measurement result.

Target			Actual measurement value	Measurement result			
Standard	Steel		50.000 mm	50.046 mm			
Block	Ceramic		50.000 mm	50.259 mm			
Standard sphere	Ti coating	Tolerance (σ)	_	0.028 mm			
		Diameter	60.010 mm	60.006 mm			
Standard plate	Standard plate Aluminum white painting (σ) Standard plate stone (σ)		_	0.009 mm			
			_	0.019 mm			

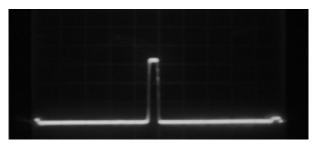


Fig.25. Signal of the CCD with error margin factor.

定しており計測結果も球トレランス誤差は σ =0.028 mm で, 球直径誤差は 0.004 mm でカタログ仕様範囲内である. 球形状の場合は、スキャナから見て球側面はレーザ光の 反射を捉えにくく, また, 面直の位置では正反射となる など厳しい条件であるが、曲面に対してばらつきが少な くまた寸法誤差も小さいことが実証された.

基準平面は白塗装板で σ =0.009 mm, 石定盤で σ =0.019 mm の結果であるが石定盤は表面の反射率が一律 では無いため、スキャナへの戻り光量のばらつきが大き くなり白塗装板と比較して誤差が大きくなると推測され

今回の検証において、対象物にレーザ光を照射した時 の光の散乱状態が測定誤差に大きく影響を与えることが 確認され、精度向上において今後の課題である.

3. 計測の実際

各産業分野に適応した機種により工業計測, ロボット, リバースエンジニアリング、生産現場、アパレル、研究 など幅広く使用されている.

<計測>

- ・プレスパネル, ホワイトボデイ, 鋳造, 鍛造, 脂成形 部品変形解析, (寸法検査, 各種計測, 穴径, 穴中心間の 距離計測)
- ・断面 CAD との比較、面と面の角度比較、パイプ計測、 服地計測, 廃材計測
- ・生産工事現場 材木形状 (Fig.26), 土量計測
- ・人体各部位の形状計測 顔面計測,頭形状,歯型計測 (Fig.27), 骨計測, 人工骨計測, 脳形状

<検査>

·FA の自動化ラインにおける工場生産物の形状と寸法 (体積, 面積, 間隔, 高さ) 計測および良否判定 自動車部品検査, 車体歪み建付け, 溶接後の品質形状, 刻印文字,建設資材検査,タイヤ検査

<ロボット視覚>

・ロボットの視覚機器 ロボットピッキング ロボット 溶接習い

<測量>

・各種構造物の立体配置の計測 プラント計測, 建築物 計測, 遺跡測量 (Fig.28)

<その他>

・文化財, 焼き物, 美術品

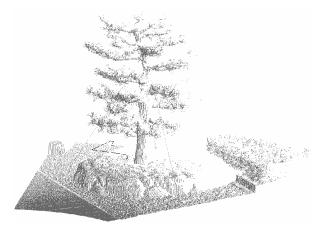


Fig.26. Tree.

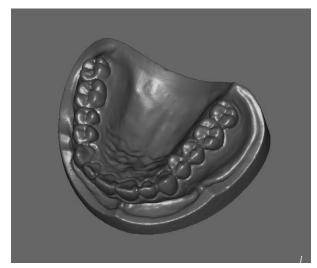


Fig.27. Denture mold.



Fig.28. Old tomb.

4. まとめ

スチール,セラミックなど反射率の異なる計測対象を用いて特徴的な性能検証を行った。金属では光沢・曲率など面の質にはほとんど影響されず高精度に計測を行えることが確認された。一方セラミックについては大きな誤差を生じる結果となり今後の課題として残るが、レーザ放射強度の最適化により改善が期待できる。

性能面以外でも軽量・小型・廉価など三次元計測への 要求はさまざまであり、これに応えるため、積極的に開 発にとりくんでいく必要がある.

3D スキャナ製造メーカとして信頼性のある製品を提供 普及させ、ユーザの製品品質の向上に貢献したいと考えている.

(文献)

- 1) 社団法人 日本機械工業連合会, 社団法人 日本オプトメカトロニクス協会:平成14年度オプトメカトロニクス技術ロードマップの作成調査研究報告書,日機連14先端-10,2003,111.
- 2) 吉沢 徹:最新光三次元計測,朝倉書店,2006,13.