

機関番号：35403

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21700211

研究課題名（和文） 金属加工品の 3次元形状と質感を計測・表示可能な
光学的検査装置の開発研究課題名（英文） An Optical Inspection System with the Ability to Identify
Surface Roughness and Detect the 3-D Shape of Metal Parts

研究代表者

大谷 幸三（OHTANI KOZO）

広島工業大学・情報学部・准教授

研究者番号：40351978

研究成果の概要（和文）：本研究では、光沢のある金属加工品の 3次元形状と質感を計測・表示可能な光学的検査装置の開発に取り組んだ。本装置は、三角測量原理に基づくレーザレンジファインダ(LRF)を基本としている。LRFは計測精度、得られた測定データの信頼性、測定時間などの面で有利な点が多い半面、鏡面物体の測定が困難なことが知られている。この問題を解決するため、本研究ではレーザスポット光の 2次元入射位置と 2次元入射角度を検出可能な画像センサを開発し、それを適用した鏡面物体の 3次元測定が可能な LRF の試作を行った。さらに、この画像センサを適用した場合の光線追跡式の導出を行うとともに、レーザ走査シミュレータを備えた 3次元測定システムを試作し、各種実験によりその有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：In industry, a laser rangefinder based on an active triangulation technique is useful because it is able to achieve a favorable balance between measurement accuracy and measurement time. However, conventional triangulation-based rangefinders are known to be difficult to apply to the 3-D shape measurement of specular objects. In this study, we proposed an advanced laser rangefinder to obtain the 3-D shape of specular objects and developed a prototype rangefinder equipped with the laser scanning simulator based on inverse raytracing to scan specular objects efficiently.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：3次元計測、外観検査、レーザレンジファインダ、画像センサ、光反射特性

1. 研究開始当初の背景

一般に、金属加工品の外観検査では、3次元形状と傷の 2項目を検出することが要求される。これには、光センサと光源を用いた画像計測法がよく用いられる。傷を形状の一部として捉えれば、傷検出に要求される分解能で 3次元形状を測定すればよい。この場合、

光干渉法など高い分解能（ナノ～マイクロメートルオーダー）を有する測定法が適用される。しかし、光干渉法の測定範囲は xyz 方向ともに数 mm 程度に限られ、比較的大きな加工物に適用することは現実的ではない。さらに、得られる 3次元形状は測定点同士の相対的な位置関係であり、絶対的な 3次元形状を

獲得することができない。そこで、たとえば3次元形状を接触式の3次元座標測定機で、傷を光反射強度法や干渉法で検出するなど、それぞれ別の装置で検査しているのが実状である。

申請者らはこれまでに、独自開発した画像センサを用いたレーザレンジファインダ(LRF)を構築している。LRFとは、レーザ光投影法を基本原理とした距離計測装置である(図1)。その測定範囲は、干渉法と比較して2桁程度広く、レーザ光走査によって3次元形状を測定する。ただし、従来のLRFは拡散物体しか測定できないという制約があった。これに対し、申請者らのLRFは、光沢のある鏡面物体も測定できるという大きな利点がある。本課題では、このLRFを基本原理とし、金属加工品の3次元形状と傷を同時に検出可能な非接触検査装置への展開を図った。本装置の特徴は、物体に投影したレーザ光の反射軌跡と反射強度から、物体の3次元形状に加え、光反射特性を同時に抽出する点にある。光反射特性は物体表面の粗さや色に依存したパラメータであり、質感の基本情報となる。この質感は金属加工品の傷や加工精度を目視検査する際に非常に有用となる。本課題の成果は、金属加工品の概観検査分野において、検査時間、コスト及び信頼性の面で大きな効果をもたらすものと考えられる。

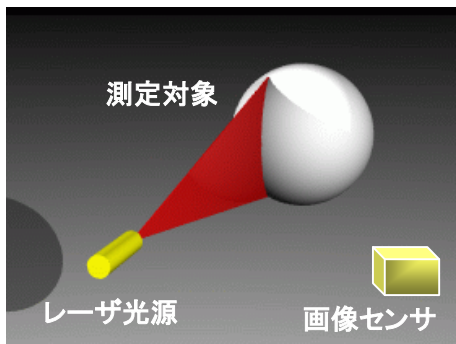


図1：LRFの構成

2. 研究の目的

本研究では、前述した背景に基づき、以下の3つの課題に取り組んだ。

- (1) スポット光の2次元入射位置と2次元入射角度を検出可能な画像センサを構築する。そして、この画像センサを三角測量原理に基づくLRFに適用し、3次元計測装置を試作する。
- (2) 上記LRFに適用可能な3次元導出式として、逆光線追跡法を導出する。画像センサで検出した光入射位置と光入射角度を基に、物体へ投影したレーザスポット光の光線軌跡を推定

し、投影点の3次元位置を算出できるようにする。

- (3) 上記の光線追跡アルゴリズムをコンピュータ上で計算できるようにシミュレータを作成する。この目的はレーザの走査効率を高めるためである。シミュレータで試算したレーザ投光手順に基づいて試作装置を動作させ、対象物体の3次元形状と質感を計測・表示する。

3. 研究の方法

(1) 試作装置の基本構成と原理

図2は本研究の試作装置の構成を示している。装置は画像センサ、光源、回転と平行移動を行う自動移動ステージ、コンピュータから成る。まず、コンピュータシミュレーションによって、光源から測対象物体へ照射されたレーザ光の軌跡を光線追跡法を用いて推定する。このとき、シミュレータで使われる測定対象の3次元形状データは、設計時の3次元CADデータ(DXF形式)を用いる。シミュレータでは系統的にレーザ投光角度や投光位置を変えながら、物体からの反射光が画像センサへ到達する投光パターン、すなわち3次元計測に有効な投光パターンを抽出していく。次に抽出した投光パターンを実機に与え、実際に測定対象にレーザを投光し、三角測量原理に基づいて3次元測定を行う。このとき、画像センサでは、入射光の位置と角度が検出できるため、これを基に次節で述べる逆光線追跡法により、測定対象の3次元形状を測定することが可能となる。最後に実機での形状測定結果と設計時の3次元CADデータを比較すれば、測定対象物体の幾何形状を検査することができる。

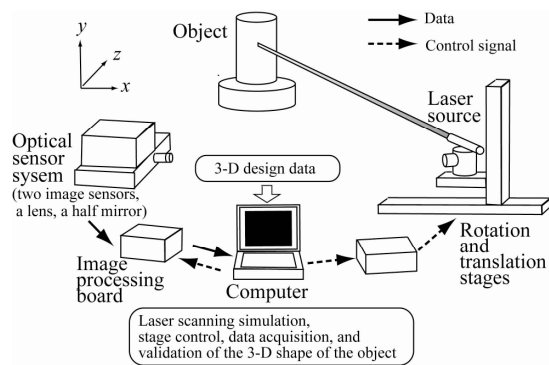


図2：試作装置の構成と原理

(2) 逆光線追跡法

試作装置の光学系とパラメータを図3に示す。レーザ光源から測定対象物体に投影された光は物体表面で反射し、レンズで集光さ

れた後、ハーフミラーで2分割され、2台の画像センサ上に結像する。ここで画像センサ1と2は、互いが直交するように配置されており、ハーフミラーの中心から画像センサまでの距離が異なる ($d_1 < d_2$)。このとき、ハーフミラーの位置 h 、および画像センサ1, 2上の結像位置 p_4, p_5 をそれぞれ式(1)とおくと、レンズ出口からハーフミラーへ向かう光線ベクトル u_3 は式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} h &= (h_x, h_y, h_z), p_4 = (p_{4x}, p_{4y}, p_{4z}), \\ p_5 &= (p_{5x}, p_{5y}, p_{5z}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$u_3 = (d_1 - d_2, p_{5x} - p_{4x} + h_y - h_x, p_{5z} - p_{4z}) \quad (2)$$

詳細な導出過程は省略するが、レンズのパラメータを基に逆光線追跡を行うことにより、対象物体の3次元位置 p_1 は式(4)で導出することができる。

$$\begin{aligned} p_0 &= (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z}), L = (L_x, L_y, L_z), \\ p_2 &= (p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$p_1 = p_2 + \frac{L_y(p_{2x} - p_{0x}) - L_x(p_{2y} - p_{0y})}{u_{1y}L_x - u_{1x}L_y} u_1 \quad (4)$$

ここで、 p_0, L, p_2 は、それぞれ、レーザ光源の位置、投光方向ベクトル、レンズ入口側の光入射位置を表す。

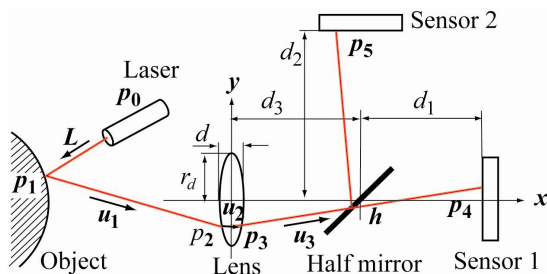


図3：光線追跡の座標系とパラメータ

(3) 3次元計測シミュレータ

本研究では、LRFの測定原理を基に図4に示すシミュレータを製作した。このシミュレータは、LRFにおいて測定対象物体の3次元CADデータに基づいて、投光したレーザ光の光線軌跡を計算し、その様子をグラフィカルインタフェース(OpenGL)で確認することができる。以下にその処理手順を示す。

- ① OpenGLの基本設定を行い、画面上に新しいウィンドウを作成する。
- ② 実機の構成に合わせて2台の画像センサとハーフミラー、レンズ、レーザ光源の位置をそれぞれ設定する。

- ③ 測定対象物体の3次元CADデータを読み込み、画面上に描画する。
- ④ レーザ光源の位置と投光角度を基に、物体表面の照射点位置とレーザの反射方向を求める。
- ⑤ レンズの位置および屈折率を基に、反射光がレンズへ到達するまでの光線軌跡を求め、処理⑥へ移る。レンズへ到達しない場合、処理⑦に移る。
- ⑥ レンズから画像センサに到達するまでの光線軌跡を求め、画像センサへの光入射位置を求める。そして、このときのレーザ投光位置と投光角度および画像センサへの入射位置をファイル出力する。
- ⑦ レーザ光源の位置もしくは投光角度を変える。
- ⑧ 測定対象物体全体を系統的に走査し終えるまで④～⑦を繰り返す。

処理⑥で得られた投光条件は、理論上LRFで3次元形状を測定可能な投光パターンであり、これを基に実機の投光走査を制御する。

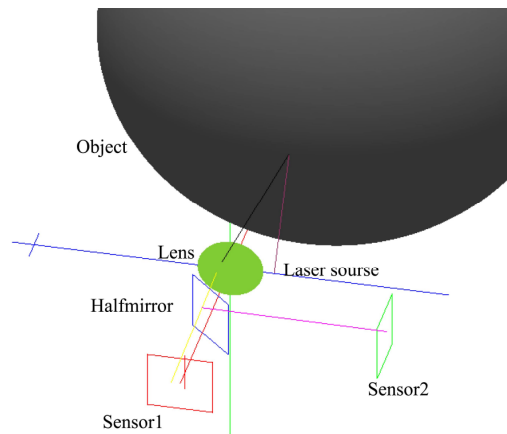


図4：光線追跡シミュレータの画面

4. 研究成果

試作装置による3次元形状計測実験を行った。図5に試作した装置の外観写真を示す。また、主要な構成機器の仕様を表1に記す。

実験では、まず、測定対象として50mm四方の鏡面平板を用いた。画像センサとレーザ光源を既定の位置に設置した後、シミュレータによって測定対象表面の50mm四方を1mmステップで走査し、計2500の投光パターンの反射光軌跡を計算した。そのうち、物体からの反射光が画像センサへ到達する有効投光パターン数は393であった。この393パターンを試作装置のステージコントロールへ利用し、実際に3次元位置を測定した。その結果が図6である。図中の+がレーザ照射点の3次元座標を示している。形状測定の誤差は最大4.6mmとなり、この実験では十分な精

度は得られなかった。ただし、大きな誤差が生じているのは、物体からの反射光がレンズ周辺部へ到達した場合であり、これについてはレンズ前方への絞りの導入などで回避できる。その他の誤差の要因としては、光学系の組み付け誤差が挙げられる。ただし、シミュレータにより3次元計測な有効な投光パターンのみを用いたため、測定効率は従来に比べて約6倍に向上させることができた。

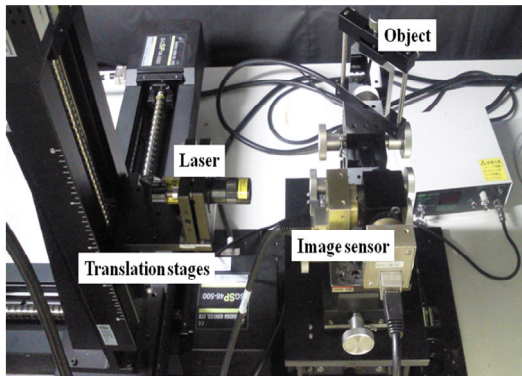


図5：試作装置の外観写真

表1：主な構成機器の仕様

CMOS カメラ (2台)	SILICON VIDEO 9T001C 解像度 2048×1536 画素サイズ 3.2 μ m ²
両凸レンズ	$\Phi = 30\text{mm}$, $f = 50\text{mm}$
ハーフミラー	30mm×30mm
半導体レーザ	出力 5mW, 波長 635nm
自動ステージ	分解能 $x = 0.08\mu\text{m}$, $y = 0.06\mu\text{m}$ $z = 0.08\mu\text{m}$, $\theta = 0.5 \times 10^{-4}\text{deg}$

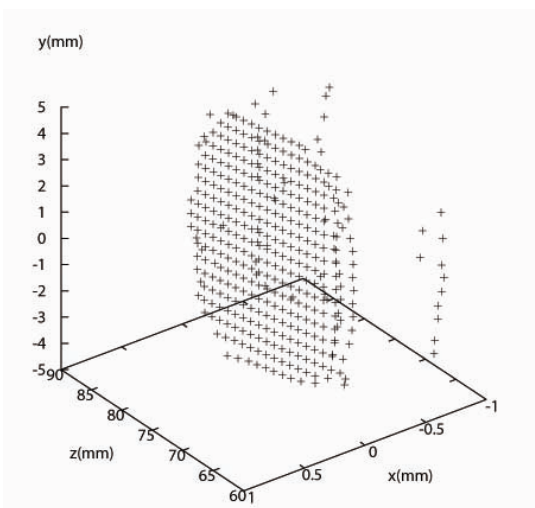


図6：鏡面平板の測定結果

レンズの収差による影響を排除するため、レンズ周辺への光入射を絞りで制限した状態で、拡散球体と鏡面球体を測定した。測定結果を図7と図8に示す。このとき、奥行き距離に対する測定精度は、それぞれ 0.65%と

0.24%となった。絶対誤差は約 0.6mm 程度となり、当初目標とした 0.1mm を達成することはできなかったものの、画像センサの光学系を校正するなど、今後の精度改善に繋がる指針を得ることができた。

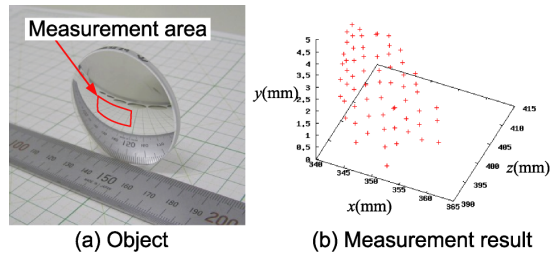


図7：鏡面球体の測定結果

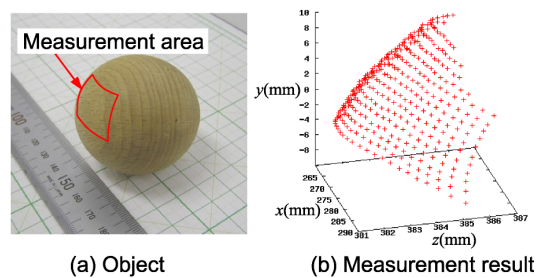


図8：拡散球体の測定結果

今後の課題としては、3次元測定の詳細な誤差要因の解析、装置の校正、複雑な形状に対する提案手法の有効性の検証などが挙げられる。

なお、当初目標としていた物体表面の質感表現については申請期間内に十分な検討を行うことができなかったため、今後の課題とした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

(1) K. Ohtani, T. Okazaki and M. Baba, "Evaluation of Surface Shape and Refractive Index of a Transparent Plate Based on Light Path Analysis," Applied Mechanics and Materials, vol. 36, pp. 458-465, 2010. 11

(2) L. Li, K. Ohtani and M. Baba, "Recovering Shape of a Specular Object in the Presence of Interreflection," Applied Mechanics and Materials, vol. 36, pp. 451-457, 2010. 11

〔学会発表〕(計8件)

(1)山本真, 大谷幸三, 馬場充, “反射特性の制約を緩和した光学的3次元形状検査装置に関する研究,” 日本機械学会中国四国支部第49期総会・講演会, 2011.3.5, 岡山理科大

(2)大谷幸三, 馬場充, “スポット光投影法による透明物体の3次元形状と屈折率の計測,” 第19回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.192-193, 2010.11.27, 島根大

(3)大谷幸三, 山本真, 馬場充, “鏡面物体へ適用可能な光学的外観検査装置に関する研究,” 第19回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.194-195, 2010.11.27, 島根大

(4)山本真, 大谷幸三, 馬場充, “逆光線追跡法による鏡面物体の3次元測定システム,” 第15回知能メカトロニクスワークショップ, CD-ROM(H2), 2010.9.2, 愛媛大

(5)K.Ohtani, S.Yamamoto, L.Li and M.Baba, “An Advanced Laser Rangefinder Equipped with a Scanning Simulator,” SICE Annual Conference 2010, pp.3135-3139, 2010.8.21, Taipei, Taiwan

(6)L.Li, K.Ohtani and M.Baba, “A Rangefinder Simulator for 3D Shape Reconstruction of an Object with Various Reflectance,” International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010 (CPIM2010), A091, 2010.3.17, Gunma, Japan

(7)大谷幸三, 馬場充, “逆光線追跡法による鏡面物体の3次元形状計測,” 第18回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.258-259, 2009.11.29, 鳥取大

(8)K.Ohtani and M.Baba, “A Laser Rangefinder with the Ability to Identify Surface Roughness and Detect the 3-D Shape of Metal Parts,” ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE2009), pp.3451-3456, 2009.8.20, Fukuoka, Japan

6. 研究組織

(1)研究代表者

大谷 幸三 (OHTANI KOZO)
広島工業大学・情報学部・准教授
研究者番号：40351978

(2)研究協力者

馬場 充 (BABA MITSURU)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：80156538

山本 真 (YAMAMOTO SHIN)
広島工業大学大学院・工学系研究科・
博士前期課程