

画像映像情報の立体可視化技法に関する研究

Performance technology applied in making the three-dimensional display using visual image information

辻岡勝美*¹, 古橋秀夫*², 秦野和郎*³, 比嘉俊太郎*⁴,
内田悦行*², 與語照明*⁵, 劉京南*⁶, V. T. Chitnis*⁷

Katsumi TSUJIOKA, Hideo FURUHASHI, Kazuo HATANNO, Shuntaro HIGA,
Yoshiyuki UCHIDA, Teruaki YOGO, Jing-Nan LIU and Vijay T. CHITNIS

An automatic measuring system of three-dimensional shapes by a projection method with grating pattern from an optical spatial modulator has been developed. The characteristics of the system were studied. This system is composed of a projector, an optical spatial modulator, a CCD camera, and a computer. A liquid crystal is used as the optical spatial modulator. The grating patterns that are projected on the surface of the object are controlled by the computer-connected with the optical spatial modulator. The projected patterns are measured by the CCD camera. The data are transferred to the computer. After a transformation into line data, the data are analyzed to obtain the coordinate of the surface of the object.

This system has following advantages. (1) It is possible to capture the surface topography without any contact. (2) The time required for the measurements is shorter than the light-section method. (3) An optical spatial modulator using a liquid crystal is possible to control the grating patterns accurately by a computer.

1. はじめに

近年の科学技術の進歩には目を見張るものがある。特に映像情報技術の多様化は飛躍的な進歩を果たし、多くの分野で有効活用されている。この分野で重要な技術は、情報収集技術（画像の取込み）と画像表示技術（表現方法）であり、それらの進歩が次世代の映像情報技術になるものと思われる。情報収集の分野では高精度、短時間性が求められる。また、画

像表示技術の分野では取込み画像の再現性が重要視される。従来の二次元表示が三次元表示に進化し、いわゆるバーチャルディスプレイの時代が到来するものと考えられている。この場合においても、情報収集の精度維持、短時間性、表示技術における再現性が重要な要素であることに変わりはない。本研究のねらいは、対象とする物体の三次元形状計測技術、三次元表示技術をとおして、次世代の画像映像情報の立体可視化技術を構築することにある。

*¹ 愛知工業大学大学院電気・材料工学専攻（豊田市）
藤田保健衛生大学 衛生学部（豊明市）

*² 愛知工業大学 情報通信工学科（豊田市）

*³ 愛知工業大学 電子工学科（豊田市）

*⁴ 愛知工業大学 建築学科（豊田市）

*⁵ (株)オプトン（瀬戸市）

*⁶ 東南大学 自動制御系（中国、南京市）

*⁷ Length Standard Section, National Physical
Laboratory（New Delhi, India）

本研究で行うべき研究範囲は広く、多くの専門分野からの研究者の協力が必要である。今回、基礎分野から応用分野まで、また、国際的な研究グループの構成により、新たな創造的発想を生み出すことをねらった。

我々は研究の第一段階として三次元形状情報の取込みについて検討を行った。三次元形状情報を獲得する方法としては表1のごとく種々の方法がある。

表1 各種三次元形状計測法

接触式	
点計測	: タッチプローブ方式
面計測	: スライディングゲージ法 : リボン式包絡線法
非接触式	
点計測	
光プローブ方式	: オートフォーカス式プローブ : 三角測量方式プローブ : 画像計測式プローブ
超音波方式	
磁気方式	
面計測	
断面計測方式	: シルエット法 : 光切断法 : レーザー光切断法 : レーザー光走査法 : 光包絡線法
等高線計測法	: モアレトポグラフィ法 : 干渉縞法 : ホログラフィ法
ステレオ写真法	
パターン投影法	

我々は短時間、無侵襲の特性に着目し、格子パターン投影による光学的三次元形状計測法について研究を進めている。また、本手法における格子パターン作成では、従来の格子パターンが固定されたものではなく、透過形液晶の電氣的制御による空間光変調方式を採用した。

2. パターン投影による三次元形状計測の原理

格子パターン投影法を用いた三次元形状計測の原理について述べる。システムの構成配置を図1に示す。物体空間座標系をX-Y-Z三次元座標系、また、CCDカメラ中の観測座標系をx-y二次元座標系とする。プロジェクタで測定物にストライプアレイ状のパターンを投影する。投影されたストライプアレイ状パターンを投影方向とは別の方向から観察すると、パターンは測定物の表面の形状に応じて変形

する。この変形したパターンをCCDカメラで観測し、カメラ観測面上の二次元座標から物体の三次元の物体空間座標が変換される。

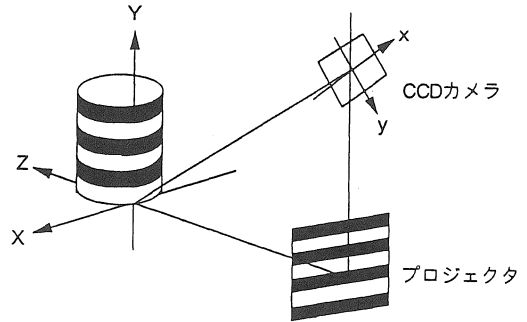


図1 パターン投影法による三次元形状計測

ここでは、物体空間座標系と観測座標系について述べる。図2にプロジェクタ、測定物、CCDカメラの配置図を示す。物体空間座標系を原点O(0,0,0)としたX-Y-Z直角三次元座標系、CCDカメラによる観測座標系をx-y直角二次元座標系とする。プロジェクタレンズの主点をA(0,0,-a)に置き、プロジェクタのレンズの光軸をZ軸に合わせる。またCCDカメラのレンズ主点をZ-Y平面内の点B(0,b,-a)に置き、カメラレンズの光軸が原点Oを通るように配置する。観測座標系の原点Oを(0,b+d,-a-c)に置き、X軸と平行になるようにx軸をとる。プロジェクタから射出されるn番目の格子線とZ軸とのなす角度を θ_n とする。またX-Y平面内に得られる格子上の点をD(-X, a tan θ_n , 0)とする。このとき、物体に投影された物体空間座標系の座標値T(X,Y,Z)と、それに対する観測座標系の座標値t(x,y)の関係式は点Tが直線ADと直線tBの交点であることから、1式が導き出される。

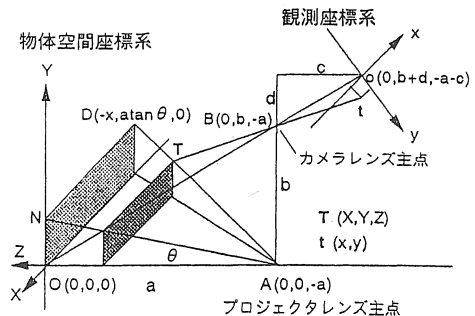


図2 パターン投影法による三次元形状計測の原理

$$\begin{aligned}
 X &= -b\sqrt{a^2+b^2}x/H \\
 Y &= (mab\sqrt{a^2+b^2}-b^2y)\tan\theta_n/H \\
 Z &= (-ma^2\sqrt{a^2+b^2}+aby)\tan\theta_n-a^2y-b^2y/H \\
 H &= (ma\sqrt{a^2+b^2}-by)\tan\theta_n+mb\sqrt{a^2+b^2}+ay \\
 c &= ma, \quad d = mb
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

1式より，n番目の格子点の観測座標系における二次元座標値 $t(x,y)$ を知ることにより，物体空間座標系の三次元座標値 $T(X,Y,Z)$ を知ることができる。

3. 三次元形状計測システムの構成

本項では我々の構築した空間光変調パターン投影による三次元形状計測システムについて述べる。図3にシステム構成を示す。格子状パターンの投影には液晶式ビデオプロジェクタを用いた。通常，格子パターンの投影には縞状のパターンを持つフィルムを光源の前に置くが，パターンの間隔や位置を変化させる場合，機械的な操作が必要となり，精度に問題がある。液晶式ビデオプロジェクタを用いることにより，これらの機械的操作は電気的に行える。また，液晶式ビデオプロジェクタでは制御に要する時間を短くすることが可能である。

物体に投影された格子パターンの観察には CCD カメラを用いた。CCD カメラにより撮影された変形格子画像はビデオ信号としてパーソナルコンピュータ内の画像ボードに取り込まれる。取り込まれたビデオ信号は画像処理の後，前述の1式により物体空間座標の三次元座標値に変換される。

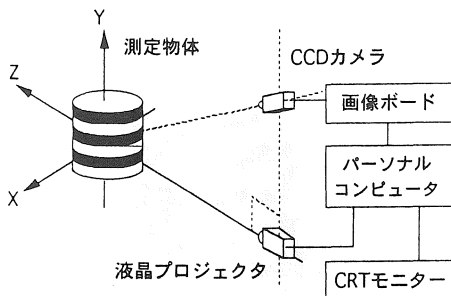


図3 三次元形状計測システムの構成

以下に，パーソナルコンピュータ内で行われる画像処理について述べる。画像処理のフローチャートを図4に示す。また，図5にフローチャートに対応する各画像を示す。

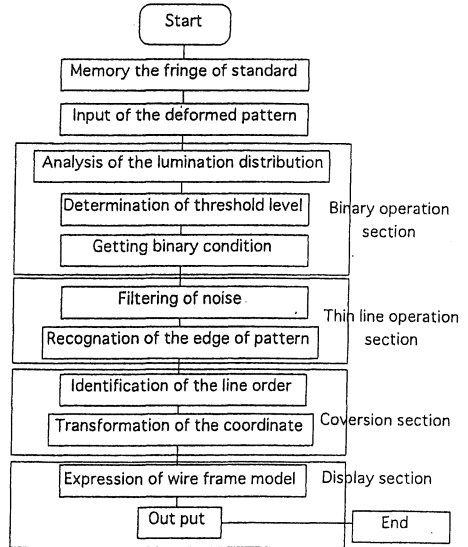


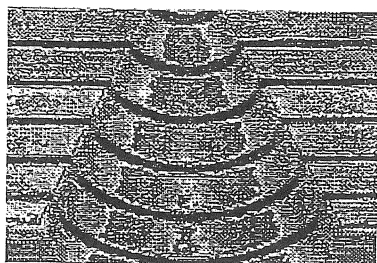
図4 フローチャート

CCD カメラにより撮影されパーソナルコンピュータの画像ボードにより取り込まれた変形格子の画像は二値化される。ここで256階調の変形格子画像はしきい値により白と黒の画像に判別される。次に，二値化された変形格子画像は細線化される。パターン投影法における細線化は，座標変換時のサンプリングする点を残す作業である。本研究では二値化された縞について，白から黒，黒から白というように二値化された縞パターンの辺縁を検出する方法を用いた。細線化の手法として縞パターンの中央を検出する方法も報告したが，中央を検出する方法では縞と直交する方向の空間分解能の劣化が問題となる。二値化，細線化ののち，三次元座標変換が行われる。三次元座標変換は，観測座標系の二次元画像データから物体空間系の三次元座標値に変換する作業である。ここでの二次元画像データは二値化，細線化されたデータを用いる。細線化された画像データについてx軸の点ごとにy軸方向に走査し，画像中の細線化された点をサンプリングする。出現する点の順番に前述の1式における θ_n は更新される。式に二次元座標値 x,y ，そして θ_n を代入することにより三次元座標値 X,Y,Z が求められる。

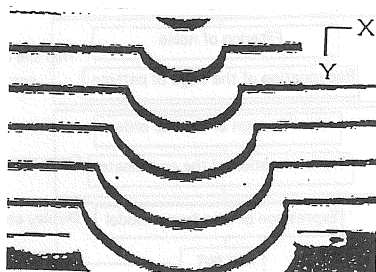
4. 画像差分による測定範囲の拡大と精度の向上

空間光変調パターン投影による三次元形状計測は電気的に制御されたストライプアレイ状のパターン光を測定物に投影して物体の三次元座標値を得る方法であり、非接触、非侵襲、短時間計測などの利点を有する。しかし、測定範囲が狭い、測定精度が充分でない等の問題点もあった。この問題を解決する方法として位相シフト方式が報告されている。しかし、位相シフト方式では格子のピッチの大小により、誤差の発生や「位相とび」が発生する。我々は、この問題を解決する手法として、新しくストライプアレイ状パターンの有無について画像差分したのち三次元座標変換を行う方法を提案する。

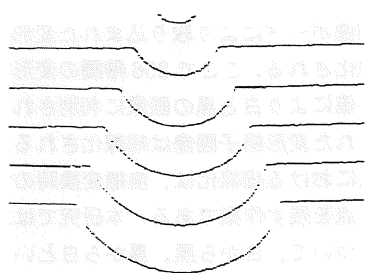
格子パターン投影法を用いた三次元形状計測では二次元のストライプアレイ状パターンを物体に投影し、プロジェクタ光源とは異なった位置に置かれた観測系である CCD カメラにより変形パターン画像を収集することで物体表面の形状計測が行われる。しかし、物体の形状により、投影されたパターン光の輝度は強弱を持って CCD カメラにより取込まれる。つまり、プロジェクタ光源に対向している面では高い輝度で撮影され、プロジェクタ光源に対向していない面では低い輝度で撮影される。このような場合、固定されたしきい値で二値化すると、二値化された画像データは物体の正確な形状を反映しないものとなる。図 6 に円筒状の物体における画像処理の経過を示す。図 6 (a) は CCD カメラにより撮影された物体の画像、図 6 (b) は二値化された画像、図 6 (c) は細線化された画像である。画像中央では縞パターンが等間隔であるのに対し、辺縁では等間隔ではない。パターンの 1 本 1 本を見れば、変形の程度が異なり、結局、部位によって直径の異なる物体として三次元座標変換される。本来、円筒状のものが異なった形状のものとして観測される。



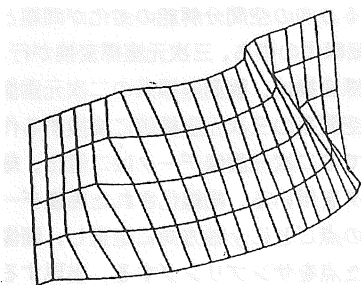
(a) 画像の取り込み



(b) 二値化

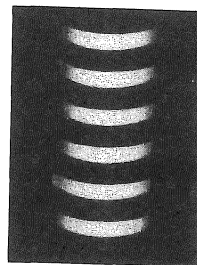


(c) 細線化

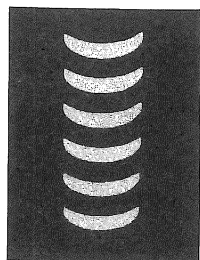


(d) 三次元表示 (ワイヤーフレーム表示)

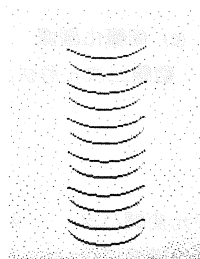
図 5 画像処理の流れ



(a) 収集画像



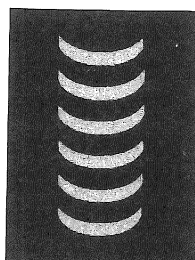
(b) 二値化画像



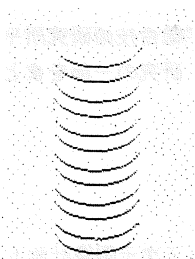
(c) 細線化画像

図6 従来の方法における処理画像

本研究では物体の形状により投影されたパターンの輝度に変化するという問題を解決する手法として、縞状パターンの有無について画像差分する方法を考案した。図7に図6と同様の物体について画像差分を行った結果を示す。図7(a)は二値化された画像、図7(b)は細線化された画像である。



(a) 二値化画像

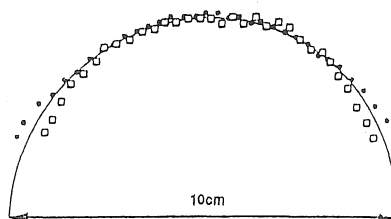


(b) 細線化画像

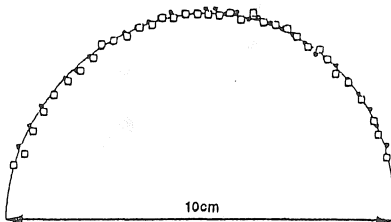
図7 画像差分後の処理画像

従来の方法で測定を行った図6の場合、本来ならば均等な間隔であるはずの縞パターンが不均等なものとして画像処理された。図7の画像差分の後に二値化された画像、細線化された画像では縞パターンの幅は均等であり、また、その間隔も等しくなった。

図8は物体空間座標系のX-Z面の一部について表示したものである。黒丸印は縞パターンの下縁について二値化、細線化を行ったのち、座標変換された三次元座標値、白角印は縞パターンの上縁について、同様に座標変換された三次元座標値である。(a)は従来の手法による結果、(b)は画像差分による結果である。プロジェクタ光源に対向した面では測定精度に両者の差は見られなかった。しかし、プロジェクタ光源に対向していない側方では、従来の手法による結果に測定精度の劣化が見られた。また、画像差分を行った方がサンプリング点が多く、測定範囲が拡大したことが確認できた。



(a) 従来の方法による座標値



(b) 画像差分された画像による座標値

図8 形状計測の精度と測定範囲の比較 (X-Z平面)

5. 動態三次元形状計測の試み

パターン投影による三次元形状計測は非接触、非侵襲に加えて短時間計測の特長を有する。本項では、この特長を利用して運動を行う物体の動態三次元形状計測を試みた。図9に動態三次元形状計測システム

ムの構成を示す。CCD カメラにより観測された変形格子パターンは動画としてビデオテープレコーダに記録される。その後、設定の時間間隔でパーソナルコンピュータ内にて画像データが二値化、細線化され、三次元座標変換が行われる。

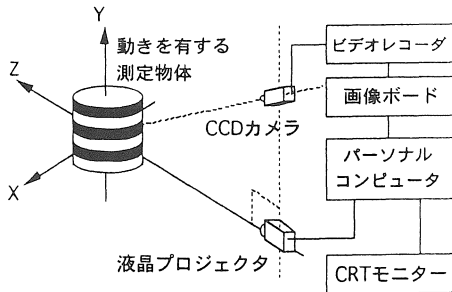
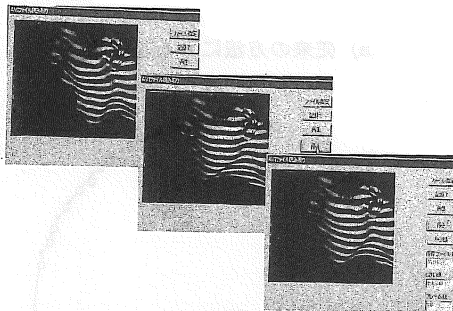
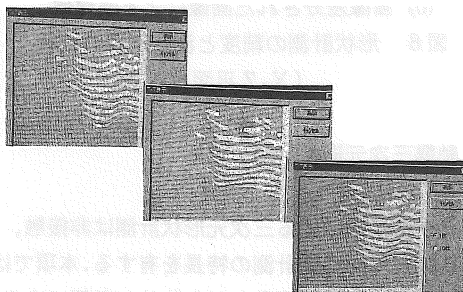


図9 動態三次元形状計測システム

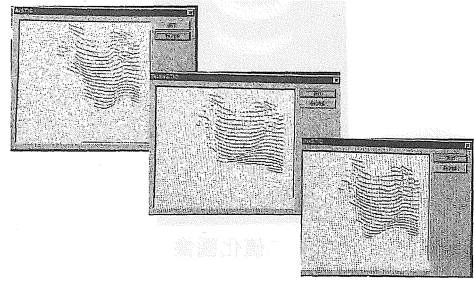
図10に人体の顎関節において、開口位から閉口位まで運動を行った場合の結果の一部を示す。本計測では画像の時間分解能を向上させるために静止画像作成時にフレーム静止画ではなく、フィールド静止画を使用した。このシステムでは秒間30コマでの画像データの収集が可能である。



(a) 収集画像



(b) 二値化画像



(c) 細線化画像

図10 動態三次元形状計測

6. おわりに

本論文では空間光変調パターン投影による三次元形状計測システムの構築について述べた。また、本システムにおける測定範囲の制限、物体辺縁の精度劣化について原因の解析を行った。さらに、この問題解決のための手法として、パターンの有無について画像差分する方法を提案した。画像差分を行う方法は瞬時に投影する格子パターンを制御できるという空間光変調器の特性を有効に利用したもので、簡便且つ実用的である。

次に、動態三次元形状計測について報告した。動きのある物体について三次元形状計測を行うことは、将来、広い分野での応用が期待される。この技術も空間光変調パターン投影による三次元形状計測システムの利点を利用したものである。

本研究は次世代の三次元形状計測システム、三次元画像表示システムを構築しようとするものである。そのためには従来技術にも増して精度、短時間性を高める必要がある。研究では基礎技術から広い範囲の応用技術までの取り組みが必要であり、関連分野の研究者の参加によりこれを実現できた。

本報告は、本学総合技術研究所平成10年度～12年度プロジェクト研究の一部をまとめた中間報告である。

参考文献

- 1) 井口, 佐藤, 「三次元画像計測」, 昭光堂, (1990)
- 2) 吉沢, 「光三次元計測」, 新技術コミュニケーションズ, (1993)

- 3) 吉沢, 鈴木, 「格子パターン投影による三次元形状の自動計測」, 精密工学会誌, 53(3), 422, (1987)
 - 4) K. Tsujioka, H. Ito, H. Furuhashi, S. Higa, N. Hayashi, J. Yamada, K. Hatano and Y. Uchida, "Three-Dimensional Shapes Measurement using Grating Patterns from an Optical Spatial Modulator", '94 Korean Automatic Control Conference, International Sessions '94KACC, (Daejeon, Korea), Proceedings, pp.561-565, (1994.10)
 - 5) K. Tsujioka, Y. Ida, H. Anno, K. Katada, S. Koga, Y. Uchida, "Respiration-synchronized X-ray CT Scanning System", The 14th World Congress of the International Measurement Confederation, (Tampere, Finland), XIV IMEKO World Congress, Vol.7, pp.77-82, (1997.6)
 - 6) K. Tsujioka, Y. Ida, K. Katada, S. Koga, Y. Uchida and Y. Yamano, "Respiration synchronized CT scanning system using optical three-dimension shapes measurement method", 2nd China-Japan Symposium on Mechatronics, (Chengdu, China), No.A33, Proceedings, pp.236-241, (1997.9)
 - 7) 辻岡, 周, 山野, 古橋, 比嘉, 内田, 「光学式形状計測システムにおける画像処理速度」, 平成 10 年度第 31 回照明学会全国大会, No.159, 講演論文集, p.259, (1998.7)
 - 8) 辻岡, 山野, 古橋, 比嘉, 内田, 「画像差分による光学的三次元形状計測の精度向上」, 平成 11 年度第 32 回照明学会全国大会, No.137, 講演論文集, p.227, (1999.7)
 - 9) C.-Y. Chen, J.-N. Liu, L.-L. Yu and Y. Uchida, "Three-Dimensional Surface Estimation by Grating Projection", Soul Journal of Chinese Science and Technology Articles, Application Research of Computers, Vol.16, No.7, pp.78-79, (1999.7)(in Chinese), 「結構光投影法在三維検測和物象重建系統中的応用」, 陳, 劉, 余, 内田, 中国計算機学会会誌 計算機応用研究, Vol.16, No.7, pp.78-79, (1999.7)
 - 10) K. Tsujioka, J.-N. Liu, H. Furuhashi, K. Hatano and Y. Uchida, "Expanding the Measurable Area in Three-dimensional Shape Measurement System using an Optical Modulator", The 4th Asian/Pacific International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, IMC'99, (Beijing, China), No.SAP2-2, Proceedings, pp.64-67, (1999.8)
 - 11) 藤井, 辻岡, 古橋, 内田, 「格子パターン投影法による三次元形状計測システムを用いた動態計測」, 平成 11 年度電気関係学会東海支部連合大会, No.468, 講演論文集, p.234, (1999.9)
 - 12) 辻岡, 古橋, 秦野, 内田, 「空間光変調パターン投影を用いた三次元形状計測システムにおける測定範囲拡大と精度の向上」, 1999 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.13, 講演論文集, pp.77-81, (1999.9)
 - 13) K. Tsujioka, H. Furuhashi, K. Hatano, S. Higa and Y. Uchida, "Acquiring Even Striped Patterns Intensity in Three-Dimensional Shape Measurement System using an Optical Modulator", SPIE's International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, Vision System Engineering, (Boston, Massachusetts, USA), Proceedings of SPIE, Three-Dimensional Imaging, Optical Metrogy, and Inspection V, Vol.3835, pp215-222, (1999.9)
 - 14) 辻岡, 藤井, 古橋, 内田, 「光学的三次元形状計測における物体表面模様の影響除去について」, 平成 12 年電気学会全国大会, No.1-072, 講演論文集, Vol.1, (2000.3)
 - 15) 辻岡, 古橋, 秦野, 内田, 「空間光変調パターン投影を用いた三次元形状計測システムにおける測定範囲拡大と精度の向上」, 電気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌, Vol.120-A, No.4, (2000.4) (印刷中)
- (受理 平成 12 年 3 月 18 日)