

スキャンライン投影法を用いた三次元形状復元の一手法

山縣 和則

中村 康弘

防衛大学校 情報工学科

現在様々な三次元計測の手法があるが、とくに臨場感通信などで有用な非接触三次元計測の新たな手法について提案する。本手法ではまず、2本の直角に交わったスリット光（スキャンライン）を計測対象に投影し、それを撮影する。次に、撮影された任意の2枚の画像からスキャンラインの交点を求め、三角測量の原理によって対象までの距離を測定する。スキャンラインを利用することで従来手法が持っていた対応点検索の問題を軽減することができる。また、光源としてプロジェクタを利用した。本研究ではスキャンライン投影法の原理に基づいた実験を行い、対象人物の三次元形状の復元を実現した。

A 3D shape reconstruction using scan-line projection method

Kazunori Yamagata,

Yasuhiro Nakamura

Department of Computer Science,

National Defense Academy

A non-contact 3-dimension measurement method is proposed. In this method, a measurement object is projected on the slit ray which crossed two right angles (called scan-line). The intersections of a scan-line are found from two pictures of taken, and the distance to an object is measured by the principle of triangulation. By using this method, the problem of the corresponding point reference which the conventional method had is reduced. In this study, the experiment based on scan-line projection method is conducted, and an object person's 3-dimensional form is reconstructed.

1. はじめに

近年、コンピュータの処理能力の向上により、従来二次元画像を利用していた分野においても三次元情報が利用される頻度が増えてきている [1]。しかし、一般に、三次元情報を入手することは二次元画像を取得することよりも困難であり、その入手方法にも各種制約があることが多い。そこで、必要な情報やその入手条件などにより様々な三次元計測法が提案されている [2]。

本報告ではとくに臨場感通信などで有用な非接触の三次元計測法について提案する。臨場感通信とは三次元コンピュータグラフィックスを用いて生成された仮想的な共有空間に通信者の三次元人物像を配置して、異なる場所にいる人々があたかも一堂に会しているような感覚を作り出すものである。この三次元人物像を作成するために三次元計測を利用している。

一般に接触型計測では非接触型計測よりも正確な計測が可能となるが、計測対象に何らかの装置を

装着するなどの負担が掛かり、マンマシンインターフェイスの面からも望ましくない。そのため、非接触で高精度な三次元計測法が必要となる。

そこで筆者らは、非接触のカメラ及びプロジェクタを利用した三次元計測の新たな手法について実験を行い、その結果を検討した。2章では既存の三次元計測法について、3章で本報告で提案する手法について述べ、4章でその実験結果を示す。5章で結論、今後の展望を述べる。

2. 三次元計測法

本章では既存の三次元計測法について述べる。

一般に三次元計測法は、対象と何らかの接触をして計測を実施する接触型計測と対象に接触せずに計測を行う非接触型計測に分けられるが、ここでは、非接触型計測についてのみを扱う。

2.1 三角測量

非接触型の三次元計測は一般に三角測量の原理を利用する。これは三角形の一辺とその両端の角度が決まれば、その三角形の角度が一意に決定できるという原理であり、図1の2点 a, b から対象物 o への角度 α, β と2点間の距離 L がわかれば対象への距離 D を求めることができる。

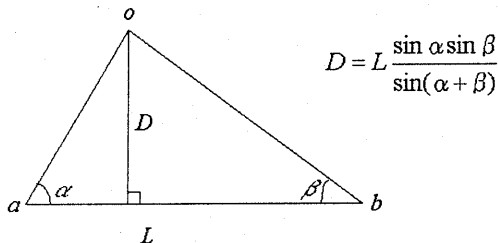


図 1: 三角測量

この2点 a, b それぞれにカメラを設置し対象を観察することのみで三次元計測を行う受動的手法と、一方から対象に光などを照射し、他方からそれを観察する能動的手法がある。受動的手法は光を照射する機構を必要としないので構成が容易だが、対応点検索に時間がかかり、また、その精度を向上させることが難しい。

以下、代表的な能動的手法について述べる。

2.2 スポット光投影法

スポット光投影法は、レーザなどの光源から対象に光（スポット光）を照射し、それをカメラなどで撮影することで計測を行う。光源から照射した光は対象上に一つの光点を作るので対応点検索は容易である。

しかしこの手法では、対象上をスポット光で二次元的に走査する必要があり、光源の機構が複雑になりがちである。また人物像の計測においてレーザ光源の使用は望ましくない。

2.3 スリット光投影法

スリット光投影法では対象を線状の光（スリット光）で走査する。この手法は現在、最も高速に精度の良い三次元計測を行うことができ、一般に市販されている計測装置はこの手法を利用しているものが多い。

この手法では対象を一次元的に走査するので、スポット光投影法よりも光源の機構を単純にすること

ができる。しかしながら、スリット光の特性やカメラと光源の位置関係によって対応点の問題が発生する可能性がある [3]。

2.4 パターン光投影法

上記二つの手法ではいずれも解像度の向上とともに撮影する画像数が増えるという特徴があるが、この画像数を減らすことを目的として開発されたのがパターン光投影法である。これはスリット光投影法におけるスリット光を複数同時に対象に投影するマルチスリット光投影法から発展したものである。

マルチスリット光投影法では複数投影されたスリット光を識別するために、そのスリット光の色や濃度を変化させている。しかしながらこの場合、対象の色や撮影環境による影響を受けやすく、計測精度に影響が出ることが多かった。そこで、対象や環境による影響を受けにくい2値パターンをいくつか投影することで対象空間を複数の二次元パターンでコード化する手法（空間コード化法）が考えられた。代表的なものとして、グレイコード投影法や、モアレ法 [4]、濃度傾斜光投影法 [5] などがある。

3. スキャンライン投影法

本章では、スリット光投影法が持つ対応点問題の解消を目的としたスキャンライン投影法を提案する。この手法を用いることで計算量を軽減することができる。また、光源としてプロジェクタを使用することによって光源の機構を単純にすることができる。

3.1 スリット光投影法の原理

スキャンライン投影法はスリット光投影法を拡張した計測方式であるので、まず、スリット光投影法の原理について述べる。

スリット光投影法ではスリット光を対象に照射して、対象表面で反射した光を撮影することで三次元計測を行う。実際に対象の座標を求めるためには次の計算を行う。

図2のように座標系の原点を撮像面の中心におき、水平方向を x 軸、垂直方向を z 軸、鉛直方向を y 軸とする。ここで撮像面上の点 $P'(x', y', 0)$ に対応する対象表面上の点 $P(x_p, y_p, z_p)$ は点 P' とカメラのレンズ中心 $F(0, 0, z_f)$ とを結ぶ直線 $P'-F$ 上に存在し、なおかつスリット光の作る平面上にある。

直線 $P'-F$ は次の式で表される。

$$\frac{x - x'}{-x'} = \frac{y - y'}{-y'} = \frac{z}{z_f}.$$

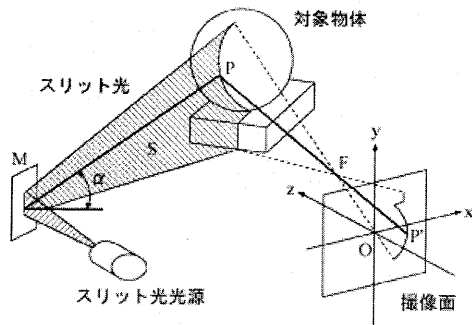


図 2: スリット光投影法

また、スリット光の偏向中心を $M(x_m, y_m, z_m)$ 、平面 S が x 軸となす角を α とすると、 S は次の式で表すことができる。

$$(x - x_m) - (z - z_m) \cot \alpha = 0.$$

これより点 P の座標は次式となる。

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{z_f + z_m - x_m \tan \alpha}{z_f + x' \tan \alpha} x' \\ y_p &= \frac{z_f + z_m - x_m \tan \alpha}{z_f + x' \tan \alpha} y' \\ z_p &= \frac{z_m + (x' - x_m) \tan \alpha}{z_f + x' \tan \alpha} z_f. \end{aligned}$$

以上のように、対象の空間座標はその撮像面上の座標 $(x', y', 0)$ とスリット光の偏向角 α から求めることができる。

3.2 本手法の原理

以下、スキャンライン投影法の原理について述べる。

3.2.1 スキャンライン

本手法では x 軸と y 軸にそれぞれ平行な 2 本のスリット光 (スキャンライン: 図 13) で対象を走査する。

スキャンラインを用いることで、スリット光による走査を x 軸、 y 軸方向に同時に行うのと同等の画像が得られる。光源としてはプロジェクタを使用するので、スキャンラインを生成するのは容易である。

3.2.2 任意の点の特定

走査開始から n_1 時間後の撮影画像中の垂直方向のスリット光の x 座標を $x_{n_1}(y)$ 、水平方向のスリット光の y 座標を $y_{n_1}(x)$ とおく。同様に n_2 時間後に

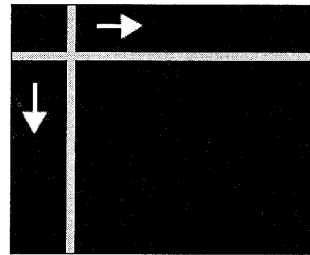


図 3: スキャンライン

ついて $x_{n_2}(y), y_{n_2}(x)$ とおくと、この 2 枚の画像を重ね合わせるによってできた新たな二つの交点の座標は、 $x_{n_1}(y_{n_2}), y_{n_1}(x_{n_2})$ となる。重ね合わせる画像を変えながら交点の座標を求めることで撮影画像中の任意の点を容易に特定することができる。

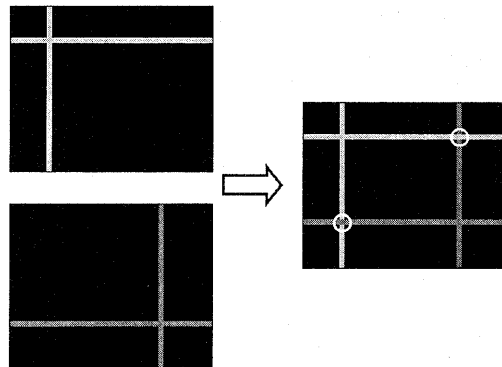


図 4: 任意の点の特定

3.2.3 座標変換

測定装置と対象の間で投影座標系 (図 5) とワールド座標系 (観測座標系: 図 6) の二つの座標系を考える。

まず、光源であるプロジェクタを中心とした投影座標系では、走査開始から n 時間後に投影している光の x 座標を x_n 、 y 座標を y_n とおくと、その直線の式は、

$$\frac{x}{x_n} = \frac{y}{y_n} = \frac{z}{z_a}$$

となる。ここで、 z_a はプロジェクタのパラメータから既知の値である。

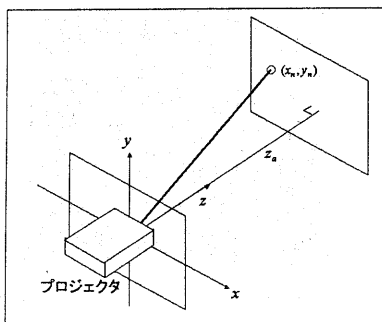


図 5: プロジェクタ座標系

この直線の式を観測用のカメラを中心としたワールド座標系に変換した式,

$$\frac{x \cos \theta - z \sin \theta}{x_n} = \frac{y}{y_n} = \frac{x \sin \theta + z \cos \theta}{z_n}$$

との交点を求めれば、対象の空間座標を求めることができる。

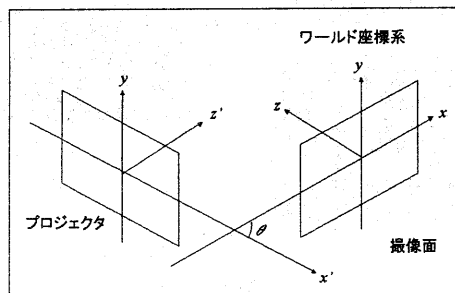


図 6: ワールド座標系

4. 実験

3章で述べたスキャンライン投影法の原理に基づいて実験環境を構築し、三次元計測を行った。

4.1 実験装置

実験装置はプロジェクタ、カメラの他に制御用のコンピュータから構成されている。実験装置の構成を図7に示す。プロジェクタはプレゼンテーション用に一般に市販されているものであり、コンピュータからのRGB信号を出力することができる。

能動的な三次元計測において精度に影響を与える要因として、光源とカメラの座標系のなす角度(図

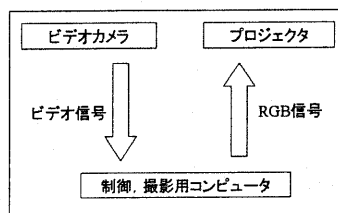


図 7: 実験装置の構成

6の θ)がある。この角度が大きいくほど対象の距離を正確に求めることができるが、不可視領域(図8)も大きくなる。

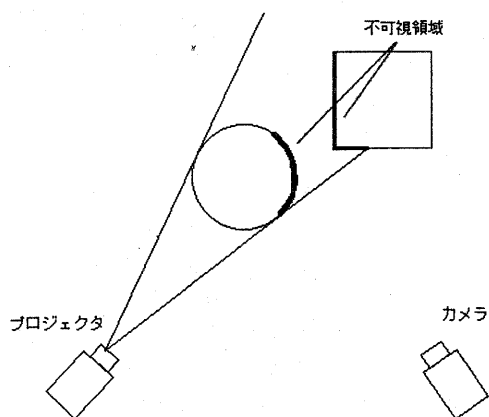


図 8: 不可視領域

今回の実験では比較的近距離(500-1000mm)の対象を測定することを想定して、角度を 30° とした。

4.2 計測手順

1. 制御用のコンピュータでスキャンラインを生成し、それをプロジェクタにRGB信号として送る。スキャンラインはプロジェクタから対象に投影する。
2. ビデオカメラでスキャンラインを投影した対象を撮影する。撮影した画像はコンピュータに取り込む。
3. 1,2を繰り返して必要な枚数の画像を取り込む。
4. 得られた画像から距離画像を算出する。

4.3 実験結果

まず、計測対象として、ワールド座標系の xy 平面と平行に配置した平板の計測を実施した。原点から平板までの距離 (z) を 500–1000mm まで変化させ、その誤差を算出したものを表 1 に表す。この結果から 5% 以内の誤差で計測ができることがわかる。

表 1: 平板の測定誤差

距離 (mm)	平均誤差 (mm)	誤差/距離 (%)
500	14.88	2.97
600	25.12	4.18
700	21.03	3.00
800	38.61	4.82
900	43.72	4.85
1000	45.30	4.53

次に人物を対象として実験を行った。まず対象にスキャンラインを投影した画像を撮影する (図 9)。

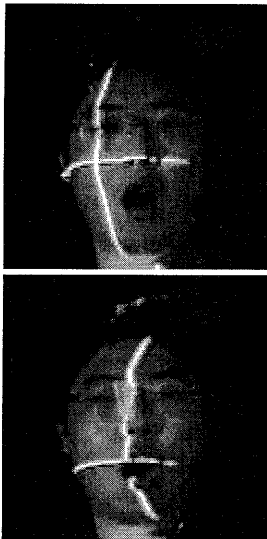


図 9: スキャンライン投影

予備実験で求めた適当な閾値を使用してスキャンラインを抽出する (図 10)。

任意の 2 枚の画像から交点を検出して (図 11)、その点までの距離を求め、距離画像を作成した (図 12, 13)。

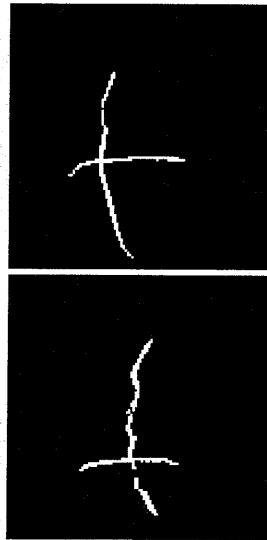


図 10: スキャンラインの抽出

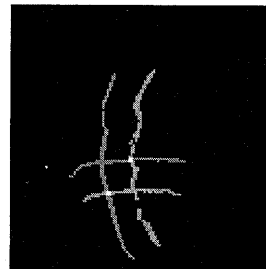


図 11: 交点

5. まとめ

本報告では、従来の三次元計測法の計算量の軽減を目的としたスキャンライン計測法を提案した。この方法を用いることで、プロジェクタによる可視光を用いた三次元計測を実現することができた。

今回の実験では、距離 500mm から 1000mm の範囲を誤差 5% 以内で計測することができた。本手法では、計測と同時に対象の色情報を得ることができるので、臨場感通信等の CG への応用も可能であると考えられる。また、今回、光源としてコンピュータで制御されたプロジェクタを利用したため、スキャンラインの形状、速度等は容易に変更することができる。これにより、必要な部分の走査速度を落とすことにより解像度を上げることも可能である。

今後、計測誤差の低減のために、スキャンラインの形状の検討、プロジェクタやカメラの特性を考慮

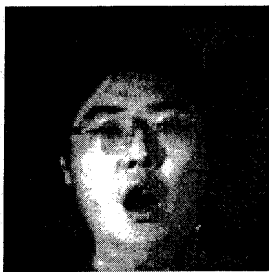


図 12: 元画像

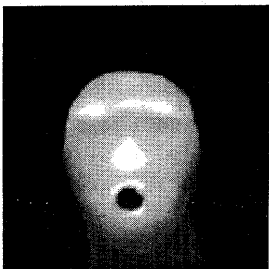


図 13: 距離画像

したキャリブレーション等が必要である。

参考文献

- [1] 山内康晋, 三原功雄, 土井美和子: 実時間インタラクションのための3次元手姿勢判定法の提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6, pp.1290-1298(2001)
- [2] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂(1990)
- [3] Oshima, M. and Shirai, Y.: Object recognition using three-dimensional information, IEEE Trans., Vol.PAMI-5, No.4, pp.353-361(1983)
- [4] 盧存偉, 山口証, 井口征士: 強度変調モアレ縞の強度・位相解析による3次元計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-A, No.9, pp.1257-1264(1998)
- [5] 宮阪健夫, 松井康之, 佐藤寛紀, 荒木和男: 濃度傾斜光投影法を用いたリアルタイム三次元計測装置の開発, 第7回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.251-254(2001)