

マルチプロジェクタによるコード化プロジェクションを利用した物体認識

鈴木 健太[†] 坂上 文彦[†] 佐藤 淳[†]

[†] 名古屋工業大学 情報工学専攻 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

E-mail: ††{kenta,sakaue,junsato}@cv.nitech.ac.jp

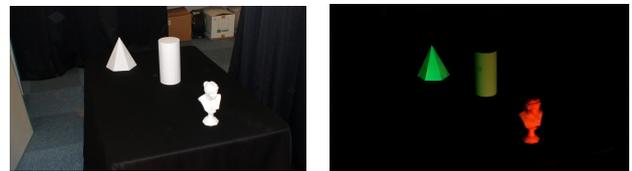
あらまし 本研究では、複数のプロジェクタから特殊なパターンを投影するコード化プロジェクションを利用した物体認識法を提案する。コード化プロジェクションとは近年提案されたプロジェクタを用いた視覚補助手法であり、カメラを用いることなく距離情報や高さ情報の強調が可能である。本研究では、この強調結果をカメラで撮影し、その結果から幾何学的不変量を計算することにより物体認識を行う方法を提案する。この方法はステレオカメラを用いて 3 次元復元を行い、物体認識を行う方法と異なり、誤対応による復元誤りを回避することが可能であるため、安定な認識を実現することが可能となっている。この方法を実環境において適用することにより、提案法の有効性を確認した。キーワード マルチプロジェクタカメラシステム、コード化プロジェクション、不変量、物体認識

1. はじめに

近年、画像から物体認識を行う研究が盛んに行われ、様々な分野に応用され始めている。例えば、ITS の分野では歩行者や道路標識の認識によりドライバーの支援を行う方法 [1], [2] などが研究されている。また、防犯カメラによる異常者認識 [3] やロボットのビジョンへの応用 [4] など、物体認識は多岐にわたり利用されている。一般に画像に投影された物体形状はカメラと物体との相対的な位置関係によって変化するため、このような見かけの形状の違いがあっても適切に認識可能な任意視点画像による認識手法が必要とされている。

任意視点画像から物体認識を行う方法の 1 つとして幾何学的不変量を用いた方法 [5] ~ [7] がある。この方法では撮影された画像から、視点の移動や回転などに対して不変な特徴量を抽出し、これを用いて認識を行う。しかし、一般的なカメラで撮影して得られる画像には 2 次元の情報しか含まれないため、3 次元物体認識を行うための 3 次元幾何学的不変量を計算することはできない。そのため、従来の方法では複数のカメラで撮影した画像から対象物の形状を 3 次元復元し、復元結果から 3 次元不変量を計算することで認識を行っていた。しかし、3 次元形状の復元には画像間での対応点を探索する必要があるため、計算コストがかかることや、対応点の誤対応による誤認識が発生するといった問題がある。そこで本研究では、これらの問題を解決するために、3 次元復元を介さずに単一画像から 3 次元情報を取得し、3 次元物体認識を行う新たな方法を提案する。

本研究では、対象物体に対してプロジェクタから光を当て、その投光色から 3 次元物体認識を行う方法を考える。ここでは特に、複数のプロジェクタから特定のパターンを対象物体に投光し、距離情報を強調提示するコード化プロジェクション [8] を利用して物体認識を行う



(a) 投光前

(b) 投光後

図 1 コード化プロジェクションによる距離強調提示

ことを考える。このコード化プロジェクションを利用することにより、図 1 に示すように 3 次元情報を色によって強調提示することが可能になる。これは距離情報を色情報に変換する手法として考えることができるため、投光結果をカメラで撮影することにより、単眼カメラで 3 次元形状復元ができ、3 次元幾何学的不変量を求めることができる。この方法では従来のステレオ法のように複数の画像間での対応探索を行う必要がないので、原理的に誤対応が発生することが有り得ない。このため、誤対応による認識誤りを抑制することが可能となる。以降では、このようなプロジェクタ投光に基づく物体認識手法を提案する。

2. コード化プロジェクションによる 3 次元情報強調提示

2.1 3 次元情報強調提示の基本原則

まず、本研究の基となるコード化プロジェクションについて説明する。一般的にプロジェクタは、2 次元情報を 3 次元空間の物体表面に投影するものである。そのため、通常の投影方法を用いた場合、面的な情報の提示しか行うことができなかった。一方、コード化プロジェクションでは 2 台のプロジェクタからコード化された画像を同時に投影することで、物体の 3 次元情報を計測することなく、直接対象物体上に距離情報を提示することを実現している。本節では、このコード化プロジェクシ

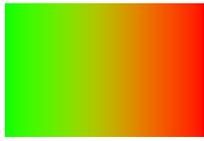


図2 投影画像

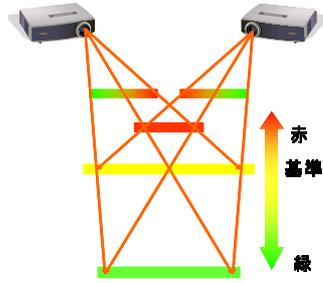
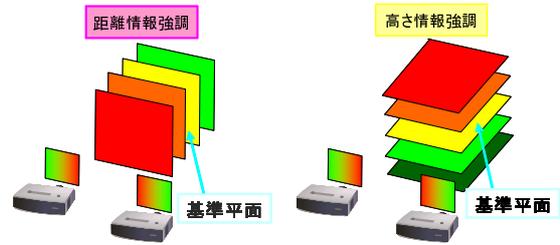


図3 コード化プロジェクション



(a) 距離情報強調 (b) 高さ情報強調
図4 基準平面の設定の仕方による強調提示の変化

の概要について説明する。

まず、コード化プロジェクションで投影する画像について述べる。コード化プロジェクションでは、プロジェクタからは、図2のような縦方向の輝度値は一定で、横方向では輝度値が滑らかに変化するグラデーション画像を投影する。この画像では、横方向の輝度 r (赤), g (緑), b (青) は以下の式を満たすように変化している。

$$\begin{cases} r = \frac{x}{W} \times 255 \\ g = 255 - \frac{x}{W} \times 255 \\ b = 0 \end{cases} \quad (0 \leq x \leq W) \quad (1)$$

ここで x は画像の横ピクセルの座標, W は画像の横幅である。また輝度は8ビットで量子化されており, $0 \sim 255$ の整数値を取るものとする。

図3に示すように図2の画像を一方のプロジェクタから投影し, この画像を左右反転した画像をもう一方のプロジェクタから投影する。このように投影を行うと, 3次元空間で2台のプロジェクタの投影光が合成され, その投影光の和が物体上において観測される輝度となる。

この場合, 投影光が完全に重なりあう位置では, r と g の輝度が均等に混合されるため, 観測される合成色は黄色となる。また, 黄色に観測される位置よりプロジェクタに近い位置では, g より r の輝度値が大きくなるので観測色は赤色に近づく。同様に, プロジェクタから遠い位置では, r より g の輝度値が大きくなるので観測色は緑色に近づく。このように黄色に観測される位置を基準として観測色が決定されるため, 黄色となる平面は基準平面と呼ばれる。このようにコード化プロジェクションにおける3次元強調提示は, 基準平面に従って決定される。

2.2 基準平面を変化させた場合の3次元情報強調提示

コード化プロジェクションでは, 基準平面の配置を変更することにより距離情報だけでなく, 様々な方向の3次元情報を強調提示することが可能である。例えば基準平面を画像平面に対して平行に設定した場合, 図4(a)に示すように奥行き情報が提示可能となる。また, 基準平面を画像平面に対して垂直に設定した場合には, 図4(b)に示すように高さ情報が提示可能となる。

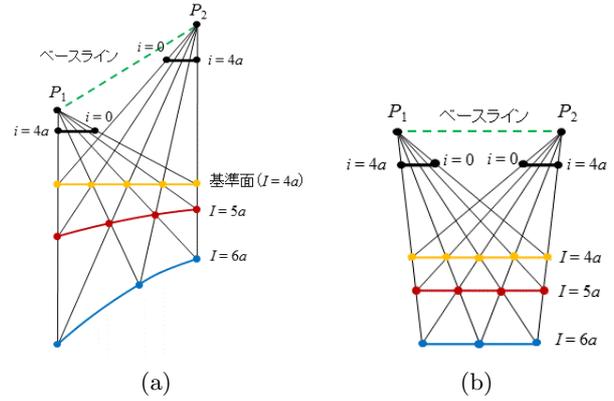


図5 強調される空間の歪み

ただし, 基準平面は, 2台のプロジェクタの投影点間を結ぶベースラインに対して平行となるように設置しなければならない。これは, ベースラインと基準平面とが平行でない場合には, 強調される空間に非線形の歪みが生じるためである。図5(a)に示すように, P_1, P_2 から照度が0から $4a$ に線形に変化するグラデーション画像を互いに逆向きに投影した場合を考える。この時, 基準平面上の照度は一様に $4a$ となる。しかし, 照度が $5a, 6a$ となる点の集合は図に示す通り曲面状に歪む。このように, プロジェクタ間のベースラインと基準平面とが平行でない場合には提示する3次元情報に非線形の歪みが生じることから, これを避けるために, 図5(b)に示すように, 基準平面はベースラインと平行に設置する必要がある。この平行性が保たれさえすれば, 基準面のチルト角は前述の通り自由に設定してよい。

このようにして実現されるコード化プロジェクションは, 物体に対して直接投影を行うため, 提示される3次元情報には決して位置ずれが生じない。また, 従来の距離計測法はカメラによる撮影やコンピュータでの処理を行う必要があるのに対し, この手法では投光を行うのみである。そのため, 距離計測および3次元情報提示を同時に行うことができ, 時間の遅れがなく, 光速で3次元情報提示を行うことができる。

2.3 基準平面に基づくプロジェクタ画像の校正

コード化プロジェクションによる3次元情報提示は, 前述したとおり基準平面を基準にして距離情報を色情報として提示する。従って, このシステムを構成するには,

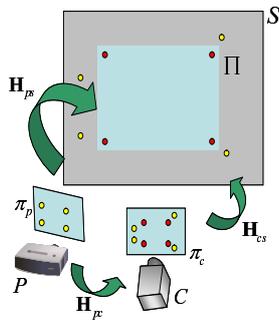


図 6 基準平面に基づくプロジェクタ画像の校正

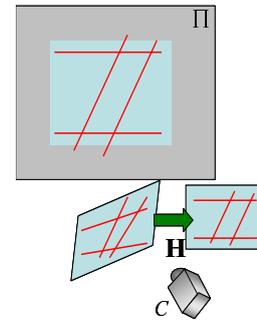


図 7 カメラ画像の平行化

基準平面に基づいて各プロジェクタの画像を校正することが必要である。本節では、このプロジェクタ画像の校正法について説明する。

図 6 に示すように、空間中にスクリーン S 、カメラ C 、プロジェクタ P が配置されたシーンを考える。このとき、スクリーン S が基準平面となるようにプロジェクタを校正する方法を考える。そのためには、複数のプロジェクタからの投影画像がスクリーン S 上でずれなく重なるようにする必要がある。これは、それぞれのプロジェクタからスクリーン S 上の任意の位置へ任意の投影が行えれば実現できる。このために、プロジェクタ画像からスクリーン S への平面射影変換 H_{ps} を計算して用いる。

まず、スクリーン上に位置が既知な基底点 4 点以上を用意し、これをカメラで撮影してスクリーン S とカメラ C の間の平面射影変換 H_{sc} を求める。次に、プロジェクタ P からスクリーン S に対してマーカとなる点（以降マーカ点と呼ぶ）を 4 点以上投影し、これをカメラで観測することによりプロジェクタ P とカメラ C の間の平面射影変換 H_{pc} を求める。 H_{sc} と H_{pc} が求めれば、プロジェクタ P とスクリーン S の間の平面射影変換 H_{ps} が $H_{ps} = H_{sc}^{-1}H_{pc}$ により求まる。このようにして求めた平面射影変換 H_{ps} によりプロジェクタの投影画像を変換することで、基準平面上において複数のプロジェクタの投影画像をずれなく重ね合わせることが可能となり、スクリーンを基準平面としてプロジェクタを校正することができる。

3. コード化プロジェクションに基づく物体認識

3.1 コード化プロジェクションを利用した 3 次元形状取得

任意の位置姿勢で置かれた 3 次元物体の認識を行うためには対象物の 3 次元情報が必要である。しかし、通常のカメラを用いて 3 次元物体を撮影すると、撮影画像からは 1 次元分の情報が欠落し 2 次元情報しか得ることができない。また、複数のカメラを用いたステレオカメラ系を用いて復元を行う場合、誤対応などの問題により、得られた 3 次元形状に大きな誤差が含まれることがある。

そこで本研究では、コード化プロジェクションにより物体上に 3 次元情報を提示しこれをカメラで観測することで、明示的な 3 次元形状復元を行わずに単一画像から 3 次元物体認識を行う方法を考える。

3.2 カメラの設置とカメラ画像の平行化

2 章で説明したように、コード化プロジェクションを用いると、奥行き情報を色情報として物体上に提示することができる。このとき、一方のプロジェクタと同じ位置にカメラを設置し、物体上に投影された色情報を観測することにする。ここで、カメラの位置はプロジェクタと一致している必要があるが、カメラの姿勢はプロジェクタと異なっても問題はない。また、カメラの内部パラメータも未知のまま構わない。

このように設置されたカメラの画像面と基準平面とは一般に平行ではない。そこで、カメラ画像を基準平面に基づいて平行化する。このような平行化はカメラの画像面と基準平面との間の平面射影変換 H を計算し、この平面射影変換によってカメラ画像を変換することで行うことができる。このような平面射影変換は、図 7 に示すように基準平面上に配置された 2 組の平行線を撮影し、撮影した画像中でこれらの線を平行化することで容易に求まる。また、2.3 節におけるプロジェクタの校正時にカメラをあらかじめ一方のプロジェクタと同じ位置に設置しておけば、プロジェクタ校正時に求めたスクリーンとカメラとの間の平面射影変換 H_{sc} をカメラ画像平行化のための平面射影変換 H としてそのまま用いることができる。

3.3 色情報からの視差推定

次に、色情報から奥行き情報を求める方法について説明する。そのために、まず、一般的に用いられる視差を利用した奥行き計測法について述べる。視差とは、二つの地点での観測位置の違いによる対象物の見え方の違いであり、対象物体がカメラに近いほど視差は大きくなる。また、視差と奥行きは反比例の関係にあることが知られており、視差 d が求まったとき奥行き D は次のように表せる。

$$D = \frac{1}{d} \quad (2)$$

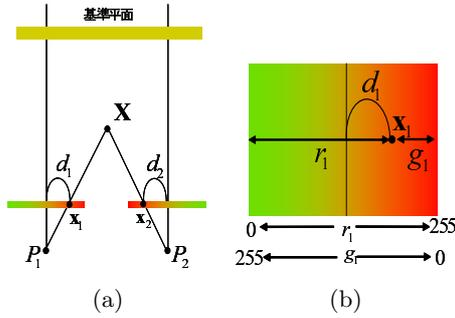


図 8 視差と色情報の関係

このように視差を求めることができれば、そこから奥行きを求めることができる。

通常の2台のカメラによるステレオ法では、2つの画像中の対応点の位置の差より視差を計算する。これに対して提案法では、コード化プロジェクションによって生成される物体上の合成色から視差を計算する。このため、提案法では従来のステレオ法のように対応する点を探索する必要はなく、原理的に誤対応が発生しないという優れた性質を持っている。

今、図8(a)のように、2台のプロジェクタ P_1, P_2 を無限遠平面が基準平面となるように校正した場合を考える。また、プロジェクタ P_1 上の点 x_1 の光とプロジェクタ P_2 上の点 x_2 の光が3次元空間中の点 X に照射されているとする。

このとき、空間中の点 X における視差 d を観測輝度 R, G, B を用いて表す。 P_1 の赤、緑、青の投影輝度をそれぞれ r_1, g_1, b_1 とし、 P_2 の赤、緑、青の投影輝度をそれぞれ r_2, g_2, b_2 としたとき、観測輝度 R, G, B は以下に示すように P_1 と P_2 の投影光の和で表される。

$$\begin{cases} R = r_1 + r_2 \\ G = g_1 + g_2 \\ B = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 P_1, P_2 のそれぞれの投影輝度は式(1)の通りであるとする。ただし、 P_1 と P_2 の投影輝度は互いに左右反転しているものとする。このとき、 P_1 の投影輝度 r_1, g_1 をプロジェクタ P_1 上の点 x_1 の位置 d_1 を用いて表すことを考える。 x_1 は画像中心から d_1 の距離に有ることから、 x_1 における輝度 r_1, g_1 は d_1 を用いて次の様に表される。

$$\begin{cases} r_1 = d_1 + \frac{255}{2} \\ g_1 = \frac{255}{2} - d_1 \end{cases} \quad (4)$$

同様に、 P_2 の投影輝度 r_2, g_2 は d_2 を用いて次の様に表される。

$$\begin{cases} r_2 = d_2 + \frac{255}{2} \\ g_2 = \frac{255}{2} - d_2 \end{cases} \quad (5)$$

よって、式(3)、(4)、(5)より、観測色 R, G, B を $d_1,$

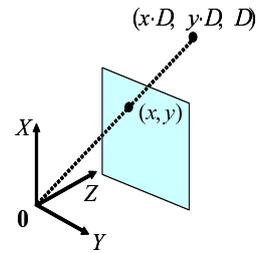


図 9 奥行き D における3次元座標

d_2 を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{cases} R = d_1 + d_2 + 255 \\ G = 255 - d_1 + d_2 \\ B = 0 \end{cases} \quad (6)$$

視差 d が $d_1 + d_2$ で表されことを考慮すると、式(6)から視差 d を以下のように導出できる。

$$2d = 2(d_1 + d_2) = R - G \quad (7)$$

これにより、色情報から視差を求めることができ、また式(2)より視差の逆数を取ることで奥行きを求めることができる。即ち、点 X の奥行き D は以下のように計算することができる。

$$D = \frac{1}{R - G} \quad (8)$$

以上より、コード化プロジェクションによって提示された色情報から奥行きを求めることができる。

3.4 色情報に基づく3次元情報の復元

次に、コード化プロジェクションによって得られた奥行き情報から3次元情報を復元する方法について考える。前述の通り、観測カメラはコード化プロジェクションを行うプロジェクタの一方と同一の位置(または非常に近い位置)に設置されている。このとき、撮影画像中の点 $m = [u, v]^T$ における観測輝度が R, G, B であったとすると、この点のカメラ視点を原点とした奥行き D は式(8)より求まる。しかし、このようにして得られた奥行き D は基準平面に対して垂直な方向における奥行きであることから、カメラの画像面が基準平面と平行でない場合には、 D をそのまま点 m の奥行きとすることはできない。そこで、カメラの画像面を仮想的に回転させて基準平面と平行化する。このようなカメラ画像の平行化は先に求めた平面射影変換 H を用いて以下を行うことができる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{m} \quad (9)$$

このようにして画像の平行化を行って得られる画像座標 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ の奥行きが D であることから、図9に示すように、この画像点に対応する3次元点 X の座標は次のように求めることができる。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \cdot D \\ y \cdot D \\ D \end{bmatrix} \quad (10)$$

このようにして画像中の各画素に対応する3次元点を色情報より高密度に復元することができる。

この方法では、従来法のように複数の画像間で対応点探索をすることなく単一画像から3次元情報を得ることができるため、誤対応問題は一切生じない。

3.5 色情報に基づく3次元射影不変量の計算

以上により、コード化プロジェクションによって得られる色情報から3次元情報が復元できる。しかし、このようにして得られた3次元情報は3次元射影変換の不定性をもつ。そこで、この不定性の影響なく物体認識を行うために3次元射影不変量を計算する。

3次元空間における射影不変量は、空間中の6点から構成される4つの平行六面体の体積の複比によって定義されることが知られている。すなわち、式(10)により復元された3次元点の内の6点を \mathbf{X}_i ($i = 1, \dots, 6$) とすると、次式により3次元射影不変量が求まる。

$$I = \frac{|\tilde{\mathbf{X}}_1 \tilde{\mathbf{X}}_2 \tilde{\mathbf{X}}_3 \tilde{\mathbf{X}}_4| |\tilde{\mathbf{X}}_6 \tilde{\mathbf{X}}_2 \tilde{\mathbf{X}}_3 \tilde{\mathbf{X}}_5|}{|\tilde{\mathbf{X}}_1 \tilde{\mathbf{X}}_2 \tilde{\mathbf{X}}_3 \tilde{\mathbf{X}}_5| |\tilde{\mathbf{X}}_6 \tilde{\mathbf{X}}_2 \tilde{\mathbf{X}}_3 \tilde{\mathbf{X}}_4|} \quad (11)$$

ここで $(\tilde{\cdot})$ は齊次座標を表す。この不変量 I を特徴量として用いることにより、視点やカメラの違いに依らない3次元物体認識を行うことができる。

3.6 物体法線の奥行き推定に対する影響とその軽減

これまでに述べた方法により、コード化プロジェクションを利用することで単一画像から3次元物体の不変量を求めることができる。しかし、実際にはプロジェクタの光を物体に当てた場合に物体表面で拡散反射や鏡面反射が発生するため、プロジェクタから投光された照度と物体面で観測される輝度とは異なる。ここでは、対象物体の表面が拡散反射面で構成されているものと仮定し、反射による輝度の変化を取り除いて物体認識を行う方法について考える。

今、図10に示すように物体上のある点における法線ベクトルを \mathbf{N} とし、 P_1 と P_2 の光源方向ベクトルを \mathbf{L}_1 、 \mathbf{L}_2 とする。これらのベクトルのノルムは1とする。また、物体表面は白色であり反射率が R 、 G 、 B 共に1であるものとする。このとき、物体表面において実際に観測される輝度 R' 、 G' 、 B' は以下のように表される。

$$\begin{cases} r'_i = r_i \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{N} = r_i \cos \theta_i \\ g'_i = g_i \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{N} = g_i \cos \theta_i \\ b'_i = b_i \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{N} = b_i \cos \theta_i \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (12)$$

$$\begin{cases} R' = r'_1 + r'_2 = r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 \\ G' = g'_1 + g'_2 = g_1 \cos \theta_1 + g_2 \cos \theta_2 \\ B' = b'_1 + b'_2 = b_1 \cos \theta_1 + b_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (13)$$

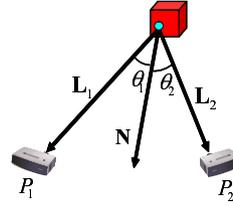


図10 物体法線の影響

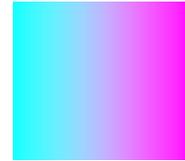


図11 投影画像

この式から明らかな通り、観測される輝度は式(3)とは異なるため、式(7)の方法では視差を正しく求めることができない。

そこで物体法線の影響を軽減し、近似的な視差を求めることを考える。ここでは、赤、緑のグラデーションパターンに加えて照度が一定な青のパターンを同時に投影し、これを用いて法線方向の影響を軽減させる方法を示す。まず、プロジェクタからの投影画像を図11に示すようなグラデーション画像に変更する。この投影画像は、今まで投影画像として用いていたグラデーション画像に対して、輝度値が一定の青色を加えたものであり、横方向の輝度は次の式を満たす。

$$\begin{cases} r = \frac{x}{W} \times 255 \\ g = 255 - \frac{x}{W} \times 255 \\ b = 255 \end{cases} \quad (0 \leq x \leq W) \quad (14)$$

この式が示す通り、青色成分は投光場所に関わらず一定である。そのため、観測輝度 B' は法線方向のみに依存して決定される。これを用いて法線方向の影響を軽減する。まずプロジェクタの照度は式(12)を用いると以下のように表すことができる。

$$\begin{cases} R = r_1 + r_2 = \frac{r'_1}{\cos \theta_1} + \frac{r'_2}{\cos \theta_2} \\ G = g_1 + g_2 = \frac{g'_1}{\cos \theta_1} + \frac{g'_2}{\cos \theta_2} \\ B = b_1 + b_2 = \frac{b'_1}{\cos \theta_1} + \frac{b'_2}{\cos \theta_2} \end{cases} \quad (15)$$

さらに、 R 、 G の成分を B で除算することにより、以下の式が得られる。

$$\begin{cases} \frac{R}{B} = \frac{\frac{r'_1}{\cos \theta_1} + \frac{r'_2}{\cos \theta_2}}{\frac{b'_1}{\cos \theta_1} + \frac{b'_2}{\cos \theta_2}} \\ \frac{G}{B} = \frac{\frac{g'_1}{\cos \theta_1} + \frac{g'_2}{\cos \theta_2}}{\frac{b'_1}{\cos \theta_1} + \frac{b'_2}{\cos \theta_2}} \end{cases} \quad (16)$$

ここで、プロジェクタ P_1 とプロジェクタ P_2 の位置が十分に近いとすると、 \mathbf{L}_1 と \mathbf{L}_2 の方向がほぼ等しくなる。これにより、 $\cos \theta_1 \approx \cos \theta_2$ の近似式が成立する。従って、式(16)は以下のように書き換えられる。

$$\begin{cases} \frac{R}{B} \approx \frac{r'_1 + r'_2}{b'_1 + b'_2} = \frac{R'}{B'} \\ \frac{G}{B} \approx \frac{g'_1 + g'_2}{b'_1 + b'_2} = \frac{G'}{B'} \end{cases} \quad (17)$$

このようにして得られた式では、 $\cos \theta_1$ 、 $\cos \theta_2$ の影響が排除されており、物体表面の法線方向によらずに計算

が行えることが分かる．また，これを用いて以下の式が得られる．

$$\begin{aligned} \frac{2d}{510} &= \frac{2d}{B} \\ &= \frac{R - G}{B} \\ &\approx \frac{R' - G'}{B'} \end{aligned} \quad (18)$$

つまり，視差 d は以下のように観測輝度から計算できる．

$$d \approx \frac{255(R' - G')}{B'} \quad (19)$$

これにより，法線方向の影響を軽減させつつ 3 次元形状の計測を行うことが可能となる．

さらに，計測された点から 6 点を選択し，射影不変量として体積の複比を計算することで，視点に依らない 3 次元物体認識が実現できる．既に述べた通り，計測された形状には射影的な不定性が含まれるが，射影不変量を用いることにより，その影響を排除することが可能である．これにより，対象物体の観測方向，観測位置などに関わらず 3 次元物体認識が可能となる．

以上により，コード化プロジェクションを利用した単眼視での物体認識法について述べた．以降では提案法を用いて，実際に物体の不変量計算を行うことにより，提案法による物体認識の有効性を検証する．

4. 実験

4.1 実環境実験

まず，本実験の環境を図 12 に示す．図に示す通り 2 台のプロジェクタを対象物体に正体するように配置した．このとき，2 台のプロジェクタ間の距離は $2m$ であった．また，片方のプロジェクタにはレンズ直上にカメラを設置し，このカメラを用いて観測を行った．2 台のプロジェクタからグラデーションパターンの投影を行い，その結果をカメラで撮影することにより認識を行った．実験に使用したプロジェクタの解像度は 1280×960 であり，そのうちグラデーション部分の解像度は 800×400 とした．また，カメラの解像度は 640×480 であった．

このような環境において，スクリーンをベースラインに対して平行になるように設置し，図 13 に示すように基準平面に基づいてそれぞれのプロジェクタ画像を校正した．スクリーンとベースラインの間の距離は $1.25m$ であり，基準平面の大きさは $0.3m \times 0.21m$ とした．図 13(b) に示すように，校正後には 2 台のプロジェクタ光が基準平面上において正しく重なっていることが分かる．

4.2 物体認識

次に，パターン光を投光して撮影した実画像から不変量を計算し，物体認識を行った結果を示す．対象として

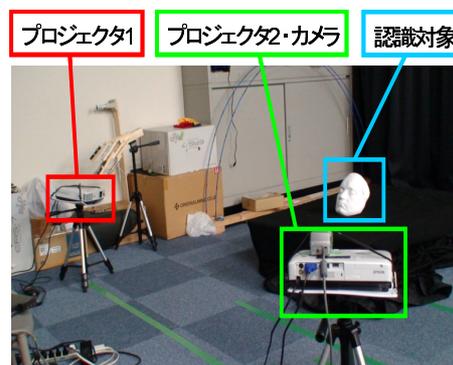


図 12 実験環境



(a) 校正前 (b) 校正後

図 13 基準平面の校正



(a) マスク (b) 女性

図 14 白色物体

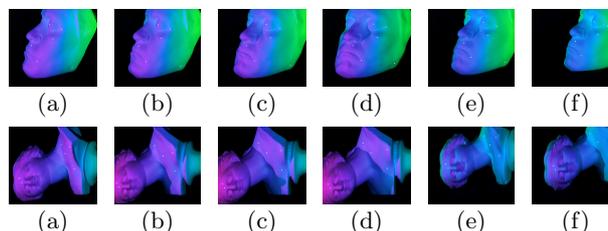


図 15 撮影画像の例 (マスクと女性)

は，図 14 に示す形状の異なる白色物体 2 つを用いた．図 12 の環境で，これらの物体を回転，並進させ，異なる位置，姿勢において撮影を行った．撮影された画像にはメディアンフィルタを適用し，画像ノイズの影響を軽減させた．図 15 に撮影画像の例を示す．このような画像から 3 次元物体の不変量計算を行うために，撮影画像間で同一の点を手動で選択した．点を選択する際には，色が急激に変化する物体形状のエッジ部分やプロジェクタの投影によってできる影部分は選択しないように注意した．選択した点を図 15 に白点で示す．これらの画像点から得られる 6 点より，3 章で提案した方法を用いて 3 次元情報を取得し，不変量を計算した．その結果を図 16 に示す．グラフの横軸は，(a)~(f) までの画像に対応しており，縦軸はそれぞれの位置，姿勢で得られた不変量である．

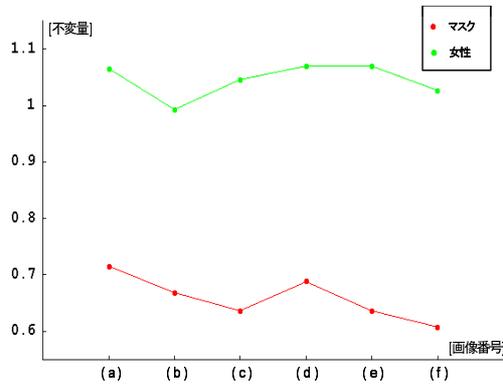


図 16 不変量

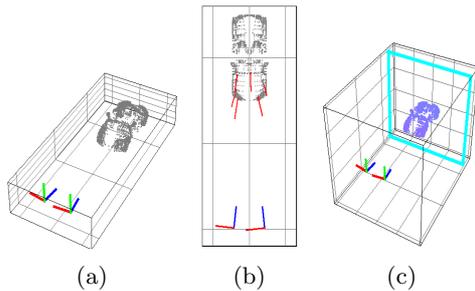


図 17 シミュレーション環境

図 16 より、それぞれの物体において位置や姿勢にかかわらず概ね等しい値が取得可能であることが確認できた。また、異なる物体では不変量の値に違いが有ることから物体認識を行うことが可能であることが確認できた。

4.3 シミュレーションによる精度評価

次に、シミュレーション実験により提案法の精度を評価した結果を示す。シミュレーション環境を図 17 に示す。このプロジェクタとカメラの解像度はそれぞれ 640×480 とした。図 17(b) に示すように、不変量計算に使用する点の法線方向はそれぞれ異なるように選択した。この実験では、図示した通り、プロジェクタ前面に車両を配置し、この物体の射影不変量を計算した。物体の大きさは幅約 $2m$ であり、白色の拡散反射面により構成されるものとした。また、プロジェクタ間の距離は $2m$ とした。カメラは右側のプロジェクタと同じ位置に配置した。さらに、プロジェクタから投光を行った結果を図 17(c) に示す。基準平面は図 17(c) の青枠で示すように設定し、これを用いてプロジェクタの校正を行った。

4.4 物体法線軽減の有無における精度評価

まず、3.4 節で示した法線の影響軽減効果を確認する実験を行った。この実験では、対象物体を回転させながら投光、不変量計算を行い、それぞれのシーンにおける不変量の値を調べた。このとき、法線の影響軽減を行った場合と、行わない場合のそれぞれについて不変量の値を調べた。図 18 に不変量計算に使用した観測画像の例を示す。また、図 19 に回転角度ごとの不変量の計算結

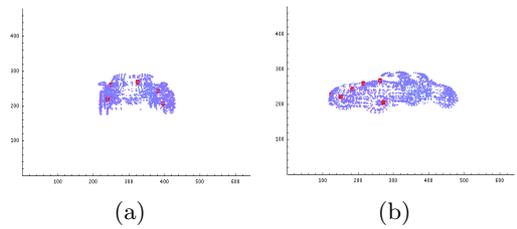


図 18 観測画像の例

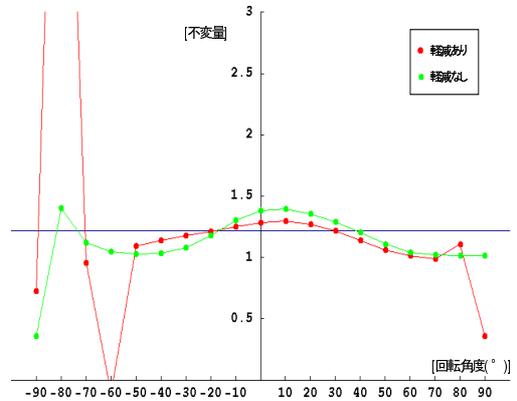


図 19 物体法線軽減の有無における不変量相違度

果を示す。なお、図 19 の回転角度 0 度は図 17(b) で示された車両の向きである。青色の横線は投光照度そのまま観測された場合に計算される不変量であり、真値である。また、緑点は法線の影響軽減を行わない場合の結果であり、赤点は法線の影響軽減を行った場合の結果である。また、表 1 にそれぞれの方法から得られた真値との平均誤差を示す。

法線軽減	無	有
平均誤差 (-90 度 ~ 90 度)	0.1786	0.5264
平均誤差 (-50 度 ~ 50 度)	0.1189	0.06512

表 1 平均誤差

まず、図 19 の結果を見ると、回転角度が小さい場合には、法線の影響軽減を行った方が真値に近い不変量を計算できていることが分かる。また、表 1 の -50 度 \sim 50 度の平均誤差からも回転角度が小さい場合には提案法が有効であることが確認できる。しかし、回転角度が大きくなった場合には、法線の影響軽減を行うことにより計算される不変量が真値から大きく外れてしまう場合が発生する。これは、法線の影響を軽減する際に除算を用いているため、青色の観測値が小さくなる場合では計算結果が不安定になっているものと考えられる。ただし、実際の場合ではそこまで大きな回転角が与えられることはあまりないと考えられるため、提案法は、実用上十分有効であると考えられる。

4.5 ノイズの影響による精度評価

次に、画像ノイズが不変量計算に与える影響を調べた。実験環境は先の実験と同様のものを用い、 R, G, B それ

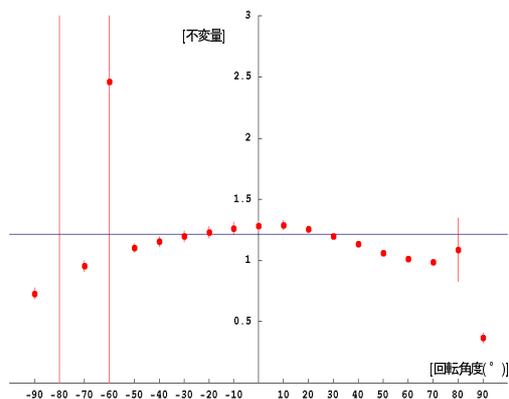


図 20 ノイズの影響による不変量相違度

それぞれの観測輝度および座標値に標準偏差 1 のガウシアンノイズを印加した。このようにして得られる画像から不変量の計算を行った。不変量計算はノイズの種類を変化させながら各回転角度ごとに 500 回繰り返して計算を行い、その平均と標準偏差を求めることで計算安定性の評価を行った。図 20 に各回転角度毎の不変量の平均値および標準偏差を示す。図中の青線は不変量の真値、赤点は計算された不変量の平均値、赤線は標準偏差を示す。

図 20 を見ると、-80 度、-60 度、80 度の場合には推定される値が極端に不安定になっているが、その他の部分に関しては安定な不変量計算が実現できていることが分かる。大きな角度で不安定となる原因としては、先の実験と同様に青色成分による除算が関係しているためと考えられる。実際に計算が不安定となっている角度では、光源方向と法線方向がほぼ垂直になるため、観測される輝度が小さくなる。そのような値で除算を行い、距離計算を行っているため、計算結果が非常に不安定になってしまったものと考えられる。

しかし、前述した通り、実環境で認識を行う際には実用的な回転範囲は制限されると考えられるので、このような角度の大きなシーンの不安定性については、実用上、問題にならないと考えられる。これにより、実際に撮影されるシーンについては、提案法を用いることにより、物体の撮影角度に関係なく安定な物体認識を実現可能であることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、マルチプロジェクトシステムを用いたコード化プロジェクションに基づく物体認識法を提案した。提案法では、コード化プロジェクションによって提示される色情報から視差を利用することで奥行きを求め、そこから 3 次元情報を取得し、不変量を計算した。これにより、ステレオ法等を用いた明示的な 3 次元復元を介することなく単一画像からの 3 次元物体認識を実現した。物体表面の反射により視差が正しく求めることができない問題を解決するために、新しい投影パターンを提案し、これを用いることにより、反射の影響を考慮した視差計

算が可能であることを示した。更に、推定された形状から射影不変量を計算することで物体の位置や方向に依存しない不変量を計算可能であることを示した。最後に、提案法を用いた実画像実験を行うことにより、同一の物体であれば位置や角度に関わらずほぼ等しい不変量が取得可能であることを確認した。また、シミュレーション実験により提案法のロバスト性に関する評価を行った。

今後の課題としては、不変量計算精度の向上や、色付き物体の物体認識法の検討が挙げられる。

文 献

- [1] 松島宏典, 胡振程, 内村圭一, ステレオセンサを用いた歩行者認識, 情報処理学会研究報告. ITS, 2006, 67, 49-54 (2006).
- [2] 莫舸舸, 青木由直, カラー画像における道路標識の認識, 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, 87, 12, 2124-2135 (2004).
- [3] 青木康洋, 岩井儀雄, 谷内田正彦, パーティクルフィルタによる人物行動認識と例外行動検出 (一般セッション 2, 三次元画像, 多視点画像), 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学, 107, 538, 95-102 (2008).
- [4] 三浦純, 白井良明, 不確かさを考慮した移動ロボットのための視覚とそのプランニング, 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, 44, 17, 37-50 (2003).
- [5] MUNDAY, J. and ZISSERMAN, A., *Geometric Invariance in Computer Vision*, MIT Press (1992).
- [6] 佐藤淳, コンピュータビジョン—視覚の幾何学—, コロナ社 (1999).
- [7] 杉本晃宏, コンピュータビジョン - 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ (1998).
- [8] 稲垣雅彦, 坂上文彦, 佐藤淳, 車載マルチプロジェクトを用いた悪路走行支援のための路面形状強調提示, 第 15 回画像センシングシンポジウム (SSII09), No. IS2-04 (2009).