

光等位相面切断法によるロボット用 3次元計測システムの開発

Development of a 3D Range Sensor Based on Equiphase Light-Section Method

熊谷正朗*

KUMAGAI Masaaki*

*東北学院大学

*Tohoku Gakuin University

キーワード：ビジョンセンサ(Vision sensor), 3次元レンジファインダ(3-D range sensor),
光切断法(Light-section method), 位相シフト法(Phase shift method), 光等位相面(Equiphase plane)

連絡先：〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目13-1 東北学院大学工学部 機械創成工学科
熊谷正朗, Tel.:022-368-7358, Fax: 022-368-7070, E-mail: kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

ロボットにとって環境を認識するためのセンサは重要である。移動ロボットにとっては障害物や路面状況の把握、据え付け型のロボットであっても任意の作業のためには作業対象の形状認識が必要である。近年では、コンピュータの演算能力の向上に伴ってステレオビジョンが環境センサの一つとして広く用いられるようになってきた。これらのステレオビジョンの多くは複数のカメラのみからなる受動的なものである。光源を持たずに撮像のみを行うため、複数の計測を同時に行っても干渉することはなく、構造的にも単純である。著者が関わった研究でも2脚歩行ロボット¹⁾²⁾や4脚歩行ロボット³⁾に搭載して路面の状態や障害物の検出に用いたり、自動運転自動車の環境センサとして使用してきた⁴⁾。これらステレオビジョンで3次元情報を復元するためには、画面上で対応する

点を検出する必要があるが、模様のない平坦な壁や床、逆に模様が細かくとも繰り返しの多い模様では対応点の正確な検出は困難である。また、これらに該当せずとも、極端に凹凸が激しい場合はオクルージョンが発生し、不確定な結果が生じる。今後ロボットの活躍が期待される屋内環境ではこういった対象が多く、解決が必要である。そこで、カメラに特殊光源を併用する方式(アクティブステレオビジョン)の検討を開始した。

光源を併用した3次元ビジョンセンサは、これまで様々な方法が提案されている。これらは、モアレ干渉を用いた方法、従来のステレオビジョンの対応点探索を容易にするために光学的に模様を付加する方式^{5,6)}、光切断法⁷⁾、位相シフト法^{8,9)}などに大別される。それぞれ装置の構造、得たデータの解析、結果の精度などに一長一短があるが、産業界では位相シフト法が広く用いられているようである。

このような背景のもと、著者は新たに光切断法と位相シフト法から派生した手法を提案した¹⁰⁾。本手法は光切断法の改良を検討して着想したものである。光切断法ではスリット光を投影し、それによって測定対象上に生じた明線を撮像し、その形状をもとに測定対象の形状を算出するが、同時に投影できるスリット光の本数には限度がある。それに対して本手法では、スリット光に代えて、輝度が時間の正弦波関数で変化し位相情報を持つ光の面(光等位相面)を用いる。スリット光による光切断法では、スリット光を照射した面と対象の交線に明線が生じ、これを検出するが、本手法では光等位相面との交線上の点の輝度が正弦波関数で変化し、交差した面の位相情報を受け継ぐ。これをカメラで連続的に撮影し、処理することで各点の位相を検出し、距離に変換する。

本手法はなるべく汎用に使われることを開発の前提とした。従来のパターン投影型の手法は、暗所での利用が原則であったり、複数のパターンを切り替えるために人間がみると気分を害するなどの制約があった。これらについて原理的には解決可能であることを示した。

本稿では、初期の研究¹⁰⁾を受けて開発中の実用性検証用実験機で得られた成果も含めて、本手法について述べる。

2. 測定原理

まず、本手法の測定原理について述べる。投稿中を含む既発表の文献の繰り返しになるが、紙面にも余裕があるため、本稿のみで完結するように原理の詳細を再掲する。前もって、本手法の特徴をまとめると、

- 光源とカメラを併用したアクティブステレオビジョンの一種である。
- 単純な装置、単純な演算で、撮影画像のピク

セル単位での距離の検出が可能である。

- 従来のパターン投影型の手法とは異なり、屋内程度の明るさでの使用を前提としている。
- 複数ロボットでの同時使用をある程度考慮している。
- ステレオビジョンの弱点の一つであるオクルージョンの発生を容易に低減しうる。
- 投影パターンが人間に不快感を与えないように設定できる。

という点が上げられる。

2.1 光等位相面切断法の概念

光切断法の原理をFig. 1に示す。光源からスリット光を測定対象に照射し、その対象に映った明線を検出する。このとき、明線は対象の形状に応じて曲線となったり区分的になり、それを解析することで3次元形状を復元する。原理が明白であるものの、明線を一意に特定するためには多くとも数本が同時投影の上限となり、また明線の形状解析も処理量が多く、計測時間を要する。最近では、特殊なイメージセンサとスリット光の高速走査装置を用いることで、計測の高速化が図られている⁷⁾。

本手法ではスリット光に代えて、位相情報をもった光を投影することで、光切断法の欠点の克服を行った。具体的には、強度が時間の正弦波関数となるような光の面を投影する。正弦波関数としたため、個々の面は特定の位相情報を有する光の面(光等位相面)となる。位相情報を持つため、Fig. 2に示すように面を同時に近接して(連続的に)投影することが可能である。このとき、光切断法において対象に見られた明線は、ある位相をもって輝度が変化する点の集合となる。ある位相で投影した面の幾何学的位置と、同じ位相をもつ点が検出できれば、3次元形状の復元ができる。

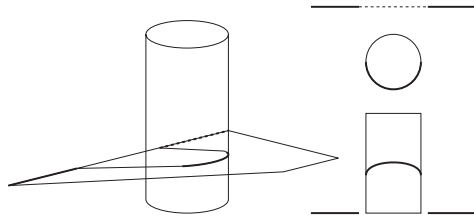


Fig. 1 従来の光切断法の概念図 - 対象にスリット光を照射すると対象上には断続的な曲線が浮かび上がる。 / Traditional light-section method. A slit light is projected to target, and bright segmented and/or curved lines will be observed on the target.

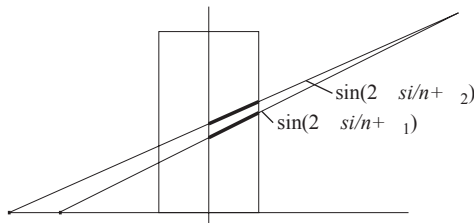


Fig. 2 光等位相面切断法の概念図 - 時間の正弦波関数で変調した光を対象に投影する。光はその照射方向によって異なる位相をもつ。 / Equiphase light-section method. Lights whose intensities are modulated by sinusoidal function with different phases are projected to the target instead of slit light in light-section method.

実際には、3次元情報の復元には、Fig. 3に示すようなより直接的な方法を使用した。物体が(b)の位置にあるとき、カメラ画像上のある画素にはB点が映る。そのとき、その画素では位相 ϕ_2 が観測される。一方、物体が(a), (c)にある場合は、A, C点が撮影され、観測される位相は ϕ_3, ϕ_1 になる。实例をFig. 4に示す。これは対象を等時間間隔で撮影した8枚の画像から同一部分を切り抜き、上下に並べたものである。部分毎に明暗のタイミング、すなわち位相が異なることが確認できるが、これらは奥行き異なる物体である。この手法により、画面上のある点の位相を検出するのみで距離の情報が得られる。位相から距離への変換は各種パラメータから逐一計算する方法や、あらかじめ校正した数値テーブルなどを用いて変換する手法が考えられる。

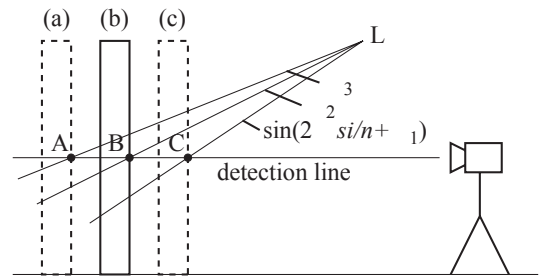


Fig. 3 位相検出による対象の検出 - カメラ映像上のあるピクセルがもつ位相は、そのピクセルが観測している対象がどの光等位相面と交差しているかによって決まる。図中Lは光源を示す。 / Detection of target by detecting lighting phase. Observed phase on each pixel in camera image depends on which equiphase-plane crosses the objects. (L denotes light source)



Fig. 4 変調光で照らされた対象の画像の時間変化 - 変調光下で撮影した連続画像8枚から同じ部分を切り抜き上下に並べた。対象毎に明暗の位相が異なることが観測される。 / An example of sequence of modulated images. Same narrow horizontal parts of 8 images are arranged in order of them. Several sections whose phases are different from each other can be found.

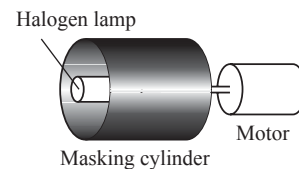


Fig. 5 変調光を生成する光源 - 正弦波関数の透過度をもつ円筒(この例では2周期)をビデオ信号に同期させ、モータで回転する。円筒内にハロゲンランプを入れ光源とした。 / Lighting system. A cylinder with striped pattern of sinusoidal function (two per revolution in this case) is driven by a motor synchronized to video signal. A bright light source such as halogen lamp is inserted to cylinder.

以上のような光等位相面を投影するためには、Fig. 5に示すような装置が使用できる。これは円周方向に正弦波状の透過度の分布を持った円筒をモータで等速回転させ、中にランプを入れたものである。たとえば、図に示す円筒の場合、その透

過度 α は円筒の基準点との中心角 ψ の関数として

$$\alpha(\psi) = 0.5 + 0.5 \sin(2\psi) \quad (1)$$

と表される。これを回転させることで、光源から見て180 [deg]の範囲に対して、 $[0, 2\pi]$ の位相差をもった光等位相面を連続的に生成することが出来る。他の手法がプロジェクタや特殊なマスクを使用するのに対して、回転要素がある以外は非常に単純な装置で実現できること、さらに回転数を変えるのみで計測条件を変化させることができることも本手法の利点の一つである。なお、円筒に代えてより単純な円盤状のマスクも使用できると思われるが、その場合は回転軸からの距離に応じて位相の分布の粗密が変わるため、設計が複雑となると考えられる。

2.2 位相の検出方法

上述のように、本手法の要は対象に投影された変動光の位相を検出することである。以下、4節にわけて位相の検出方法と光等位相面の投影方式について論じる。

まず、上述のような縞模様の回転円筒により、ある方向¹に照射される光の強度は

$$I = I_0(a + b \sin(2\pi ft + \phi)) \quad (2)$$

と表される。ここで I 、 I_0 は時変する実際の強度と最大値を決定する定数、 a 、 b は平均値と振幅を決める定数($a + b = 1$ 、 $a - b$ は最低強度)、 t は時刻、 f は円筒の回転速度と縞模様の間隔によって決定される周波数である。

これを投影した対象をビデオカメラで撮影する。連続して取得した画像のうち、 i 番目の画像上の座標 (x, y) の画素の輝度 $Y_{xy}[i]$ を

$$Y_{xy}[i] = Y_{0,xy}(a + b \sin(2\pi i/n + \phi)) + Y_{B,xy} \quad (3)$$

¹簡単のため、各図では光等位相面は光源から放射状に投影されるように記載したが、光学系を用いて平行にするなど方向を変えても以下の議論は成立する。最終的に位相と距離を変換する箇所に対応すればよい。ただし、等位相面同士が測定対象付近で交差してはならない。

によって表す。ここで $Y_{0,xy}$ は輝度の最大値を決定する定数、 $Y_{B,xy}$ は使用した光源以外の背景光による輝度である。 n は縞を1周期投影するのに必要なフィールド数(コマ数)である。逆に、 n フィールドで処理を行うと決定した場合には、そのように映像信号に同期させて円筒を回転させる。なお、 x, y, i は整数である。また撮像時に各点の輝度が飽和しないものと仮定する。

画素の位相 ϕ を検出するためには、 $Y_{xy}[i]$ に参照波 $\sin(2\pi i/n)$ 、 $\cos(2\pi i/n)$ を乗じた上で n フィールド分の輝度を積算する。

$$\begin{aligned} \overline{Y_{C,xy}} &= (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\sin(2\pi i/n) Y_{xy}[i]\} \\ &= (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\sin(2\pi i/n) (aY_{0,xy} + Y_{B,xy})\} \\ &\quad + (bY_{0,xy}/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\sin(2\pi i/n) \sin(2\pi i/n + \phi)\} \\ &= \{(aY_{0,xy} + Y_{B,xy})/n\} \sum_{i=0}^{n-1} \sin(2\pi i/n) \\ &\quad + (bY_{0,xy}/2n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\cos(\phi) - \cos(4\pi i/n + \phi)\} \\ &= 0 + (bY_{0,xy}/2) \cos \phi = (bY_{0,xy}/2) \cos \phi. \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{Y_{S,xy}} &= (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\cos(2\pi i/n) Y_{xy}[i]\} \\ &= (bY_{0,xy}/2) \sin \phi. \quad (5) \end{aligned}$$

これら $\overline{Y_{C,xy}}$ と $\overline{Y_{S,xy}}$ をすべての画素に対して求め、各画素の ϕ を得ることができる。以上の処理は位相シフト法と共通であり、文献⁸⁾でも述べられている。

さらに、参照波を乗じることなく加算することで、対象を通常の非変調光で照明した場合に得られる輝度を得られる。

$$\begin{aligned} \overline{Y_{xy}} &= (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} Y_{xy}[i] \\ &= (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} (aY_{0,xy} + Y_{B,xy}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (bY_{0,xy}/n) \sum_{i=0}^{n-1} \sin(2\pi i/n + \phi) \\
= & (aY_{0,xy} + Y_{B,xy}) \quad (6)
\end{aligned}$$

ここまで輝度 Y で代表したが，カラー画像の場合は三原色 R, G, B でも同様の処理が可能である．カラーカメラを用いた場合には，距離情報とカラー画像が同時に得られる(位相検出においては R, G, B より Y を得るか， $R + G + B$ などを使用する)．

以上のように，本手法では単純な線形の積和演算を使用する．光切断法は明線の検出に2値化を使用し，その閾値の設定が必要であり，対象の色や反射率，周囲の光の影響を受けやすい．それに対して，本手法はこれらの影響を受けにくい特徴がある．また，演算が単純であるため，最終的にハードウェアでの実装が容易と考えられる．

一方，位相情報を持たせるには複数(最低3，数十が望ましい)の画像が必要である．そのため，一度に面で情報がとれるとはいえ，撮影時間はある程度必要である．しかし，本手法では撮影枚数(n)と検出精度には関連があり，精度を犠牲にして高速化したり，撮像回数を増やして精度を向上させたりすることが選択できる．

2.3 高調波の利用

上述の原理式では n フィールド中に1周期分の縞が含まれる場合を想定した．しかし， s 倍の高調波も以下のように使用できる．

各画素の輝度は

$$Y_{xy}[i] = Y_{0,xy}(a + b \sin(2\pi si/n + \phi)) + Y_{b,xy} \quad (7)$$

によって変化するとし，参照波にも s 倍の周波数をもった $\sin(2\pi si/n)$ および $\cos(2\pi si/n)$ を使用する．

$$\begin{aligned}
& \overline{Y_{C,xy}} \\
= & (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\sin(2\pi si/n) Y_{xy}[i]\} \\
= & \{(aY_{0,xy} + Y_{b,xy})/n\} \sum_{i=0}^{n-1} \sin(2\pi si/n)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (bY_{0,xy}/2n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\cos(\phi) - \cos(4\pi si/n + \phi)\} \\
= & (bY_{0,xy}/2) \cos \phi, \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\overline{Y_{S,xy}} & = (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\cos(2\pi si/n) Y_{xy}\} \\
& = (bY_{0,xy}/2) \sin \phi \quad (9)
\end{aligned}$$

ただし， s は n の倍数ではないものとする．

このように s 倍の周波数の輝度変化を生じさせるには，同一の模様で円筒を s 倍の速度で回転させるか，縞模様の間隔を $1/s$ とする場合が考えられ，前者に関連しては2.5節にて後述する．後者については，分解能向上が期待できる．縞の密度を s 倍にした場合，もとの模様では $[0, 2\pi]$ の位相差があったのに対して， $[0, 2s\pi]$ の位相差を投影できる．これは単純に分解能が s 倍になることが期待でき，照明および撮影条件や対象の色などにより取得した映像での明度振幅が低下した場合などに効果的である(なお，原理式上は差はなく，実装時に生じる差である)．一般的な位相シフト法ではこの考えで細かな縞を投影している．しかし，式(8)(9)より得られる位相は $[0, 2\pi]$ であるため，本来の $[0, 2s\pi]$ を復元するために位相連結と呼ばれる作業が必須となる．なだらかな物体の場合は容易であるが凹凸の激しい対象では連結は容易ではない．これが位相シフト法での研究課題の一つとなっている．本手法では以下で述べる周波数多重により，この位相連結の問題を解決した．

2.4 複数周波数の同時使用

ここで用いている検出方法は周波数の選択性に優れている． n フィールド中に， s_1 および s_2 周期(ともに整数で $s_1 \neq s_2$ とする)の正弦波を考える．

$$\begin{aligned}
Y_{xy}[i] = & Y_{0,xy}(a + b_1 \sin(2\pi s_1 i/n + \phi_1) \\
& + b_2 \sin(2\pi s_2 i/n + \phi_2)) \quad (10)
\end{aligned}$$

ただし， b_1, b_2, ϕ_1, ϕ_2 はそれぞれの波の振幅および位相を示す．これまで同様に，ここに参照波 $\sin(2\pi s_1 i/n)$

を乗じて積算する．

$$\begin{aligned}
 & \overline{Y_{C1,xy}} \\
 = & (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\sin(2\pi s_1 i/n) Y_{xy}[i]\} \\
 = & (b_1 Y_{0,xy}/2n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\cos(\phi_1) - \cos(4\pi s_1 i/n + \phi_1)\} \\
 & + (b_2 Y_{0,xy}/2n) \sum_{i=0}^{n-1} \{\cos(\phi_2 + 2\pi s_2 i/n - 2\pi s_1 i/n) \\
 & \quad - \cos(\phi_2 + 2\pi s_2 i/2 + 2\pi s_1 i/n)\} \\
 = & (b_1 Y_{0,xy}/2) \cos \phi_1. \tag{11}
 \end{aligned}$$

同様に $\overline{Y_{S1,xy}}$, $\overline{Y_{C2,xy}}$, $\overline{Y_{S2,xy}}$ も求まる．

この周波数選択制は以下のような利点をもたらす．

- 処理区間 n が等しいならば，複数の光源とカメラの組を使用できるため，周波数を互いに違えることができれば，複数台のロボットで同時に使用できる．
- 一組で複数周波数を同時に使用できる．前節で述べたような位相連結が必要な場合に，大まかに検出するための n フィールドに 1 周期の正弦波，分解能を得るために s 周期の正弦波の縞模様を重畳すれば，連結処理が非常に容易となる．
- 1 台のカメラに対して，複数の方向から異なる周波数の光源を同時に照射することで，対象物自身の影によるオクルージョンを大幅に低減できる．1 台のカメラで撮影し，各々の光源毎に各ピクセルの距離を求め，信頼度（たとえば輝度振幅）に基づき合成すればよいので，処理も容易である．
- 蛍光灯のフリッカも一つの周波数と見なし，その影響を避けることが出来る．

2.5 サンプルング定理の応用によるちらつき防止

従来の特殊光源を併用した 3 次元のビジョンセンサは人の目に優しいとは言えない．投光パターンを移動させたり切り替えたりするため，気分を害する．本手法も縞模様を回転させるため，単純には目に触れると不快である．

しかし，人間の目はおおむね 50 [Hz] を越えるとその明暗を感じなくなる．そこで，円筒を高速回転させることを考えた．基本的には 2.3 節で述べた手法により，単に高速回転させても処理は可能である．しかし，もう一検討加え，カメラのサンプルングを応用する手法を検討した．

高調波の倍率を，たとえば $s = n + 1$ のように，処理フィールド数 n の倍数の近辺に設定すると，

$$\begin{aligned}
 & \sin(2\pi s i/n + \phi) = \sin(2\pi(n+1)i/n + \phi) \\
 = & \sin(2\pi i + 2\pi i/n + \phi) = \sin(2\pi i/n + \phi) \tag{12}
 \end{aligned}$$

のようにサンプルング定理(折返し)により元の周期として観測される．カメラで撮影(サンプルング)した場合にはこの式の通りとなり，人間の目で観測した場合は s 倍の周波数を観測することになる．約 60 [Hz] で撮影する NTSC カメラで n フィールドの区間は $60/n$ [Hz] であり， $s = n + 1$ 倍にすると $60(1 + 1/n)$ [Hz] となるため，60 [Hz] より高くなり，人間の目にはほぼ知覚されなくなる．

このことを利用すると，原理実験および調整を行う際には低速度で回転させ，実働段階では検出処理はそのまま回転数のみを $n + 1$ 倍とする使い方も可能である．また，カメラを介して動作を確認することも容易である．ただし，縞模様が高速で移動することには変わりなく，シャッタースピードの高速なカメラが必要である．

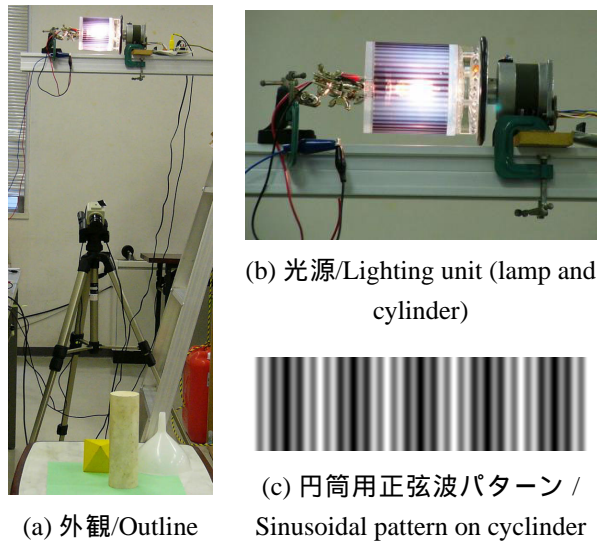


Fig. 6 実験装置 / Experimental system.

3. 実証実験

以上の原理を検証するために、Fig. 6に示す簡単な装置を試作し、実験を行った。ステッピングモータにアクリル製のコップを取り付け、その外周に(c)に示すような2種類の周期を重畳した模様を印刷したOHPフィルムを貼り付けた。各々1回転あたり5周期および25周期であるが、円筒の $1/5(72[\text{deg}])$ を周期の単位としたため、処理上は処理区間で1周期と5周期を重畳したものとなる。モータは、ビデオカメラの映像信号から抽出した垂直同期信号をそのまま駆動パルスとして分配した。1回転あたり400パルス(200ステップ品を1-2相励磁)としたため、自動的に80フィールド、約 $(4/3)[\text{s}]$ が処理周期となった(これは蛍光灯のフリッカ周期の整数倍ではないため、影響を受けた)。円筒内には自動車用のハロゲン電球を挿入した。カメラは市販されている安価な40万画素のNTSCカラーCCDカメラである。画像の処理はLinux(KNOPPIX EduTG 0.9)が稼働するPentium 2.6 [GHz]の汎用PC上にC++で実装し、映像はVideo for Linuxにより取得した。なお、リアルタイムの画像表示なども含めたCPU演算負荷は約20%、最後の画像を取り込んでから50 [ms]以内に全処理が完了した。

検出結果例をFig. 7に示す。3種類の例を示した。

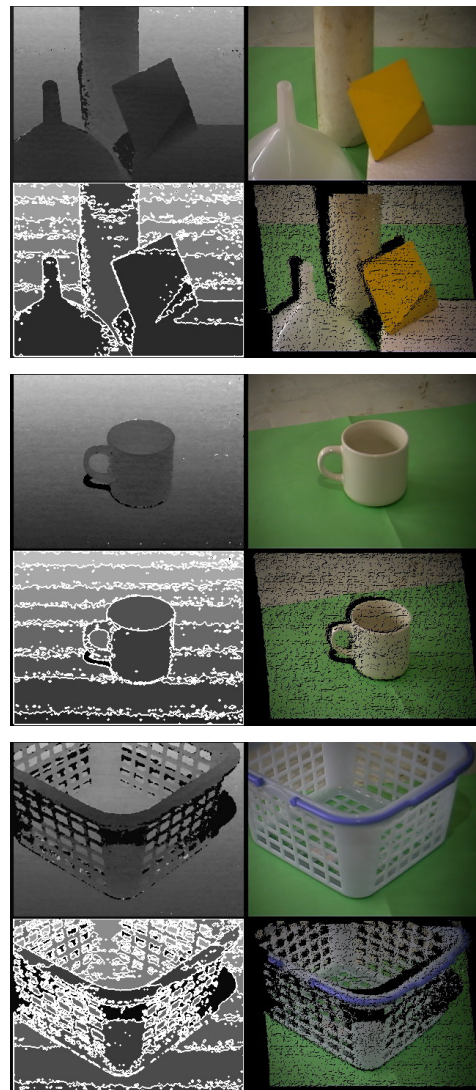


Fig. 7 実験結果の一例 - 左上は距離画像(明:遠方, 暗:手前), 右上は式(6)による通常画像, 左下は距離画像の等距離線, 右下は仮想的に鉛直軸回りに回転したもの。 / Some of experimental results. Each image consists four parts, top-left: brief range image (brighter pixel means farther point), top-right: normal picture obtained with equation (6), bottom-left: contour of range image, bottom-right: horizontally rotated top-right image in 3D using range image.

各例で左上は位相をもとに簡易的に変換した距離画像(暗いほど手前), 右上は同時に得た通常画像, 左下は距離画像の等高線, 右下は距離をもとに鉛直周りの回転変換を試みたものである(黒部は画像情報の無い部分)。従来のステレオビジョンでは困難な模様のない面や繰り返し模様のある構造の距離分布が明確に得られていることが分かる。Fig. 8

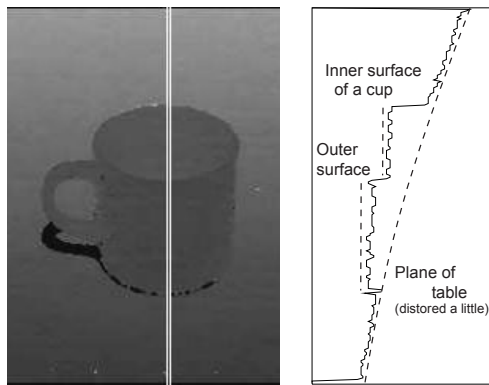


Fig. 8 距離画像の断面 - 机面, カップの前面, カップの後方内面が確認できる. / Cross section of range image. There faces were found; top plane of table, frontal outer surface and back inner surface of cup.

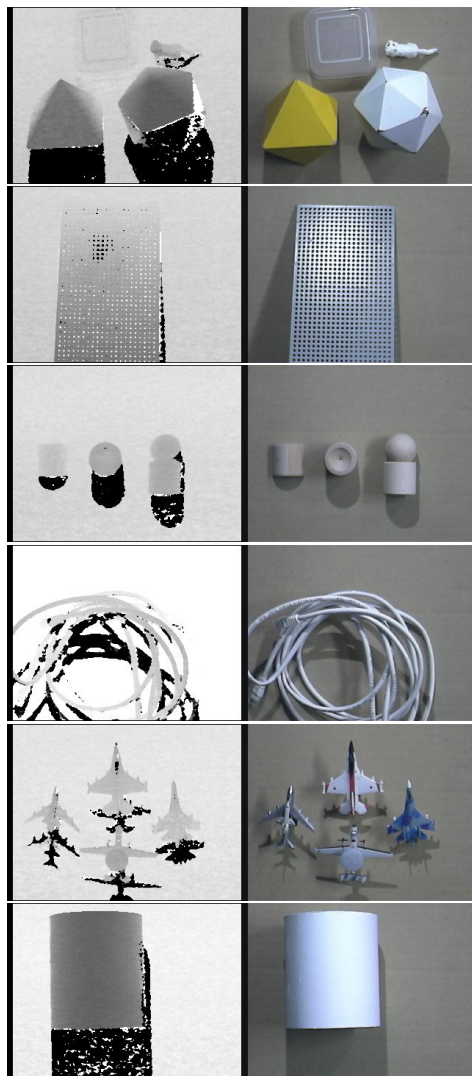


Fig. 9 開発中のシステムによる計測例 / Some of experimental results with new developing system.

はカップを撮影した距離画像の断面である。撮影の奥行きを広く取ったこと、および処理上の問題により量子化誤差が顕著ではあるが、カップを置いている机面、カップの手前外面および奥内面が検出されている。

以上の結果より手法の有望性が確認できたため、より実用性を高めたシステムの開発を開始した。円筒の精度を向上させ、その駆動系を速度および位置制御したDCサーボモータに変更して任意の速度で同期回転可能なようにした。まだ完成はしていないが、現段階で得られている実験結果の一例をFig.9に示す。処理は120フィールド(約2[s])で行い、モータは約12[rps](720[rpm])で回転させ、サンプリング定理併用条件で使用した。理論通り、ごくわずかに明滅が感じられるが模様は肉眼では観察されないものとなった。また、処理周期を蛍光灯のフリッカ周期の整数倍としたため、屋内の蛍光灯照明下でも問題なく使用可能であることを確認した。

先の結果と撮影条件も異なるため、この結果のみで単純には比較できないが、改良に伴い安定した計測が可能となった。結果1枚目の画像の上部に置いた小さなプラスチック容器の底の形状や、高さ20[mm]程度の猫の模型の凹凸などから5[mm]未満の上下が検出できている。なお、これらの測定における検出レンジは130[mm]程度(白:低~黒:高)に設定した。

現在は開発途上であり、ビデオ信号、モータ、ソフトウェア間の同期の微調整は手動で行っているため、条件を一定にするためにも連動するための回路の開発が必要である。また、処理ソフトウェアも演算の分解能が不足しているため、ハードウェアの分解能を活かすための改良が必要である。それと同時にDCモータの制御にみられるゆるやかなジッタが計測結果全体の前後動となるため、処理側にモータの回転を反映させる必要があると考えている。

4. おわりに

本稿では、光切断法および位相シフト法をもとに考案した移動ロボット用の3次元環境センシング手法の原理と、その実証試験について述べた。本手法は単純な装置、単純な処理によって、屋内環境で作業するロボットに有用な3次元距離情報を提供することが可能であることを示した。特に、模様のない対象、複雑な構造の対象、繰り返しの多い対象など従来の方式では苦手とされていたものを観測可能とし、また周囲の人間に対する配慮も行った。現在は実証装置の開発を進めており、処理のハードウェア化も含めて、ロボットに搭載可能なシステムとして実用化したいと考えている。また、応用先として、農業用ロボットのための植物の構造解析なども考えている。農業ロボット分野では収穫などの機構は開発されつつあるが、果実の位置などの検出が容易ではないと聞いている。本手法では植物の枝の構造を取得することも可能と考えられる。

最後に、実証装置の開発では東北学院大学工学部機械工場の方々の協力を得ていることをここに記し、謝意を表したい。

参考文献

- 1) 熊谷正朗, 江村超: 人型2脚歩行ロボットの斜面歩行に関する研究 - ステレオビジョンによる斜度推定とその斜面歩行への応用 -, 計測自動制御学会論文集, **37-11** .1040/1047(2001)
- 2) 河野秀行, 江村超, 熊谷正朗: 視覚情報による2脚ロボットの不整地歩行に関する研究, ROBOMECH '02, 1A1-H04 (2002)
- 3) 小関篤史, 江村超, 熊谷正朗: 4脚ロボットのステレオビジョンを用いた不整地歩行に関する研究, ROBOMECH '02, 2P1-E10 (2002)
- 4) Takashi Emura, Masaaki Kumagai and Lei Wang: A Next-Generation Intelligent Car for Safe Drive, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **12-5**, pp.545-551 (2000)
- 5) Hans-Gerd Maas, Robust Automatic Surface Reconstruction with Structured Light, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **29-B5**, 709/713 (1992)
- 6) Peter Albrecht and Bernd Michaelis, Improvement of the Spatial Resolution of an Optical 3-D Measurement Procedure, *IEEE Trans, on Instrumentation and Measurement*, **47-1**, 158/162 (1998)
- 7) 大池祐輔, 新宅宏彰, 池田誠, 浅田邦博: 光切断法による高精細・実時間3次元撮像システム, 情報映像メディア学会誌, **57-9**, 1149/1151 (2003)
- 8) V. Srinivasan, H.C.Liu, and M. Halioua: Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects, *Applied Optics*, **23-18**, 3105/3108 (1984)
- 9) 三高良介, 濱田長生: 位相シフト法による高速高精度3次元計測技術, 松下電工技法, no.78, 10/15 (2002)
- 10) KUMAGAI Masaaki: Development of a 3D Vision Range Sensor using Equiphase Light-Section Method, *Proc. of IEEE/RSJ IROS 2004*, 2161/2166 (2004)