

円振動眼ステレオ： 一般化オプティカルフローに基づく距離画像計測

東京大学 安藤 繁^{1,a)}

概要：三次元環境中での距離画像計測には多大な需要があり、多くの方法や実用システムが開発されてきている。しかし、特定の光やレーザ光の投影が必要な能動的方法には、測定レンジの狭さや測定系の複雑さや校正への要求、対象に与える影響などの問題がある。一方、対象からの光のみを利用する両眼ステレオなどの受動的方法はこのような問題が少なく、生物の三次元視覚との対応からも長く期待がもたれてきた。しかし、測定条件大きく対象パターンに依存し、また対応探索などの画像処理上の不確かさから、実環境で信頼度高く適用可能なほどの十分な頑健性が得られているとは言い難い。本発表では、このような受動的な距離画像計測に関して、撮像系を円状に振動させ、その際に得られる画像のオプティカルフローに基づく、直接代数的な奥行き検出法を提案する。提案法では、視点の位置を円周状に振動させて三次元対象を撮像する。この際に生じる距離に応じて変化する画像の局所的円振動を一般化オプティカルフロー偏微分方程式で表現し、これに筆者らが提案する数学的技法である荷重積分法を適用することにより、フレーム内のフーリエ係数画像から振動半径を求める厳密な直接代数解法を導く。フーリエ係数画像は、同じく筆者らの開発になる時間相関イメージセンサにより各フレームごとに実時間で取得する。振動半径は、透視変換の幾何学的関係から容易に距離に変換される。試作システムの具体的構成を示すとともに、実環境での実験によりその有効性を明らかにする。

1. はじめに

三次元環境中での距離画像計測には多大な需要があり、多くの方法が開発されてきている。しかし、それらの多くは特定の明暗パターンを有する光やレーザ光の投影が必要な能動的方法であり、測定レンジの狭さや測定系の複雑さ、対象に与える影響などの問題から逃れられない。これに対し両眼ステレオなどの受動的方法は、環境光で照明された対象からの光のみを利用し、これらの問題がなく計測上の制約も少ないが、両眼対応に関する画像解析の不安定さから、実環境で信頼度高く適用可能なほどの十分な頑健性は得られていない。本発表では、このような従来の受動的な距離画像計測に対して、撮像系を円状に振動させ、その際に得られる画像の時間変化のフーリエ係数間の代数演算により奥行きを算出する方法を提案し、実験システムを試作し、その性能を確認する。

提案する方法の最大の特徴は、その出発点の理論的枠組みであるオプティカルフロー推定にある。計算機視覚や流体計測で用いられるオプティカルフロー偏微分方程式は、

本来、その係数である2次元速度は時間の関数でも空間の関数でもかまわない。我々はこれを時間の関数として一般化し、その有限な観測時間内での変化をフーリエ級数により表現する [1], [2], [3]。この方程式に、著者らが開発してきた数学的技法である荷重積分法(2.3節で詳述)を適用すると、その有限観測時間内での画素上の明暗変化のフーリエ係数を係数とし、速度のフーリエ係数を未知数とする厳密な代数方程式が立てられることを示す。このようなフーリエ係数で表現される運動の最も簡単な場合が対象の円振動である。

2. 円振動眼ステレオ法

この章では、軸平行型と輻輳型に分けて円振動眼ステレオ法を定式化する。それらの原理は、視点の円振動に伴って画像に生じる局所的で微小な円振動と、その振動半径の距離依存性にある。軸平行型では、カメラの水平軸と垂直軸と光軸の平行を保ちながら、視点(カメラのレンズ中心位置)を円振動させる。輻輳型では、上記に加えて、光軸が特定の深さの1点で常に交わるような傾角運動(味噌すり運動)を与える。円振動の周波数はカメラのフレーム周波数の整数倍に一致させ、位相はフレームに同期させる。

¹ 情報理工学系研究科システム情報学専攻, 工学部計数工学科
University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{a)} ando@alab.t.u-tokyo.ac.jp

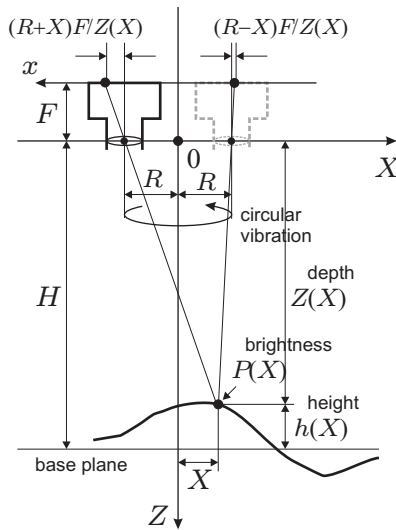


図 1 円振動眼ステレオ撮像系の幾何学配置 (軸平行型)。 R : 円振動半径, F : 焦点距離, $P(X, Y)$: 対象表面の明るさ, $Z(X, Y)$: 対象表面の奥行き, H : 撮像中心から基準面までの距離, $h(X, Y)$: 対象表面の基準面からの高さ。図では Y 軸は省略。

2.1 軸平行型円振動眼ステレオ撮像系

最初に軸平行型について考える。撮像系を対象に平行な面内で光軸平行を保ちつつ半径 R で円振動させた場合に発生する画像の振動の半径は、図 1 を参照し、焦点距離を F とすると、透視変換の関係より、像点座標 (x, y) とそれに結像する三次元空間中の物体点座標 $(X(x, y), Y(x, y), Z(x, y))$ との対応は

$$x = \frac{FX(x, y)}{Z(x, y)}, \quad y = \frac{FY(x, y)}{Z(x, y)}$$

画像上の強度 $p(x, y)$ と物体点上の明度 $P(X, Y)$ の対応は

$$p(x, y) = P(X(x, y), Y(x, y))$$

と表される。よって得られる画像は

$$\begin{aligned} f(x, y, t) &= p\left(\frac{F(X(x, y) - R \cos \omega t)}{Z(x, y)}, \frac{F(Y(x, y) - R \sin \omega t)}{Z(x, y)}\right) \\ &= p\left(x - \frac{FR}{Z(x, y)} \cos \omega t, y - \frac{FR}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \end{aligned}$$

のような、距離の逆数に比例した半径の円振動を含む形で表現される。

2.2 軸平行型円振動眼ステレオ偏微分方程式

円振動の半径 R が $Z(x, y)$ が一定と見なせる程度に十分小さいと仮定し、かつ $p(x, y)$ の空間変化 (画像のテクスチャの明暗変化) に対して $Z(x, y)$ の空間変化を無視すると、その時間微分は、

$$\frac{\partial}{\partial t} f(x, y, t)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial}{\partial t} p\left(x - \frac{FR}{Z(x, y)} \cos \omega t, y - \frac{FR}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \\ &= \frac{\partial p}{\partial x} \left(x - \frac{FR}{Z(x, y)} \cos \omega t, y - \frac{FR}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \frac{FR\omega}{Z(x, y)} \sin \omega t \\ &\quad - \frac{\partial p}{\partial y} \left(x - \frac{FR}{Z(x, y)} \cos \omega t, y - \frac{FR}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \frac{FR\omega}{Z(x, y)} \cos \omega t \end{aligned}$$

x, y 偏微分は、そのまま

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, t) &= \frac{\partial p}{\partial x} \left(x - \frac{FR}{Z(x, y)} \cos \omega t, y - \frac{FR}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, t) &= \frac{\partial p}{\partial y} \left(x - \frac{FR}{Z(x, y)} \cos \omega t, y - \frac{FR}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \end{aligned}$$

と書かれるため、 $f(x, y, t)$ は偏微分方程式

$$\begin{aligned} &\left(-\frac{FR\omega}{Z(x, y)} \sin \omega t\right) \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, t) \\ &+ \left(\frac{FR\omega}{Z(x, y)} \cos \omega t\right) \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, t) + \frac{\partial}{\partial t} f(x, y, t) = 0 \end{aligned}$$

を満たす。この偏微分方程式は、 $Z(x, y)$ が一定の拡がりの中では、円振動の半径 $FR/Z(x, y)$ が複数画素にまたがる場合であっても、パターンが円振動半径よりも細かい場合であっても成立する。

2.3 時間軸荷重積分法の適用

荷重積分法とは、空間や時間の荷重積分観測量から被測定量を厳密かつ直接代数的に求めるために、近年著者らによって発見された数学的方法論である。被測定量を係数として含む偏微分方程式から出発し、その有限領域における荷重積分によって、荷重積分量を観測量とし被測定量である係数を未知数とする代数方程式を得る。これまでに適用された対象には、オプティカルフロー推定 [4], [5], [6], [7], [8], 周波数推定 [9], 音源定位 [10], [11], 極定位 [12], 白色干渉ピーク決定 [13], ドップラ速度分布映像法 [14], 空間フィルタ速度測定法の厳密化 [15] などがある。

時間相関イメージセンサ [16], [17], [18] のフレーム周期を T , フレーム周波数 $\Delta\omega = 2\pi/T$, 振動周波数を $\omega = m\Delta\omega$ とし (m : 正の整数), 速度を複素形式で、

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(t) &= v_x(t) + jv_y(t) \\ &= -\frac{FRm\Delta\omega}{Z} \sin(m\Delta\omega t) + j\frac{FRm\Delta\omega}{Z} \cos(m\Delta\omega t) \\ &\equiv \mathbf{a}e^{jm\Delta\omega t} \end{aligned}$$

と表し、さらに複素微分演算子とその共役を

$$\nabla_z = \frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y}, \quad \nabla_z^* = \frac{\partial}{\partial x} - j\frac{\partial}{\partial y}$$

で表す。このとき、一般に

$$\begin{aligned} &v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ (v_x + jv_y) \left(\frac{\partial}{\partial x} - j\frac{\partial}{\partial y} \right) + (v_x - jv_y) \left(\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \{ \mathbf{v} \nabla_z^* + \mathbf{v}^* \nabla_z \} \end{aligned}$$

であることに注意すると、前述の微分方程式は

$$(ae^{jm\Delta\omega t}\nabla_z^* + a^*e^{-jm\Delta\omega t}\nabla_z + 2\frac{\partial}{\partial t})f(x, y, t) = 0$$

の形に書かれる。この左辺を荷重関数 $e^{-jn\Delta\omega t}$ でフレーム期間 $[0, T]$ にわたり荷重積分すると、

$$\begin{aligned} & \int_0^T e^{-jn\Delta\omega t} (ae^{jm\Delta\omega t}\nabla_z^* + a^*e^{-jm\Delta\omega t}\nabla_z + 2\frac{\partial}{\partial t})f(x, y, t) dt \\ &= a\nabla_z^* \int_0^T f(x, y, t)e^{-j(n-m)\Delta\omega t} dt \\ &+ a^*\nabla_z \int_0^T f(x, y, t)e^{-j(n+m)\Delta\omega t} dt \\ &+ 2 \int_0^T \frac{\partial}{\partial t} f(x, y, t)e^{-jn\Delta\omega t} dt \\ &= a\nabla_z^* g_{n-m} + a^*\nabla_z g_{n+m} + 2[f(x, y, t)e^{-jn\Delta\omega t}]_0^T \\ &+ 2jn\Delta\omega \int_0^T f(x, y, t)e^{-jn\Delta\omega t} dt \\ &= a\nabla_z^* g_{n-m} + a^*\nabla_z g_{n+m} + 2F_0 + 2jn\Delta\omega g_n \end{aligned}$$

ただし

$$g_m(x, y) \equiv \int_0^T f(x, y, t)e^{-jm\Delta\omega t} dt$$

は参照信号周波数 $m\Delta\omega$ における相関画像、

$$F_0(x, y) \equiv [f(x, y, t)e^{-jn\Delta\omega t}]_0^T = [f(x, y, t)]_0^T$$

はフレームの前端と後端の明度の差、すなわち積分境界値項（画像）である。対象の運動が無視できる場合には画像の運動は周期運動であり、積分境界値項 $F_0(x, y)$ は零である。このため、荷重積分方程式は、最終的に

$$2jn\Delta\omega g_n + a\nabla_z^* g_{n-m} + a^*\nabla_z g_{n+m} = 0$$

と書かれる。以降、具体的に $n = m$ （参照信号周波数 = 振動周波数）に選ぶと、

$$2jm\Delta\omega g_m + a\nabla_z^* g_0 + a^*\nabla_z g_{2m} = 0$$

よって

$$\begin{bmatrix} \nabla_z^* g_0 + \nabla_z g_{2m} & j(\nabla_z^* g_0 - \nabla_z g_{2m}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Re a \\ \Im a \end{bmatrix} = -2jm\Delta\omega g_m$$

よって近傍画素の連立により、

$$\begin{bmatrix} \langle |\nabla_z^* g_0 + \nabla_z g_{2m}|^2 \rangle \\ -j\langle (\nabla_z^* g_0 - \nabla_z g_{2m})^* (\nabla_z^* g_0 + \nabla_z g_{2m}) \rangle \\ j\langle (\nabla_z^* g_0 + \nabla_z g_{2m})^* (\nabla_z^* g_0 - \nabla_z g_{2m}) \rangle \\ \langle |\nabla_z^* g_0 - \nabla_z g_{2m}|^2 \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Re a \\ \Im a \end{bmatrix} = -2jm\Delta\omega \begin{bmatrix} \langle (\nabla_z^* g_0 + \nabla_z g_{2m})^* g_m \rangle \\ -j\langle (\nabla_z^* g_0 - \nabla_z g_{2m})^* g_m \rangle \end{bmatrix}$$

の実部の方程式を解く。 $m \geq 1$ を大きく選ぶことで、対象の動きによる明暗変化の影響を受けにくくできる。

複素振動半径 a から距離 $Z(x, y)$ を算出するには、円振動の同期信号からその振動位相 $\phi = \angle a$ を求め、

$$\Re\{ae^{-j\phi}\} = \frac{FRm\Delta\omega}{Z(x, y)}$$

の関係から

$$Z(x, y) = \frac{FRm\Delta\omega}{\Re\{ae^{-j\phi}\}}$$

のように計算する。

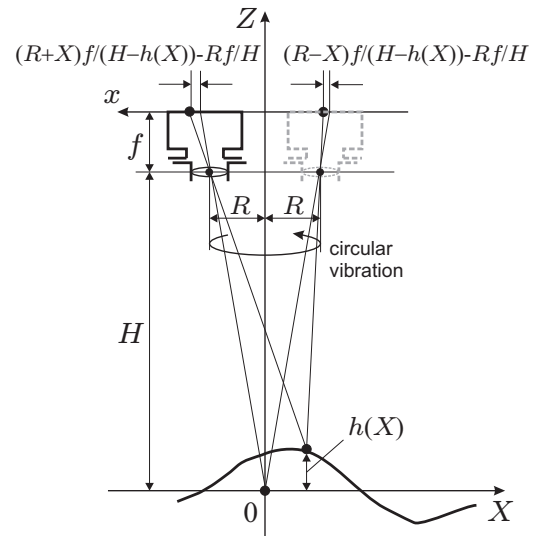


図2 円振動眼ステレオ撮像系の幾何学配置（輻輳型）。撮像レンズにあり（像面中心の光軸からのシフト）を与えることで、円振動にかかわらず基準面に関しては振動がない状態で捉えるようにして撮像する。 R : 円振動半径, F : 焦点距離, H : 撮像中心から基準面までの距離, $h(X, Y)$: 対象表面の基準面からの高さ。図では Y 軸は省略。

2.4 輻輳型円振動眼ステレオ撮像系

次に輻輳型では、回転の際に奥行き H の面（基準面）で円振動が生じないように像面の原点を円振動に連動して回転させる（光軸の味噌すり運動）。このときにレンズ中心が基準面の原点を見込む角が輻輳角となる。このときの像点の振動半径は

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ (R - X) \cdot \frac{F}{H - h(X)} - \frac{RF}{H} \right. \\ & \left. + (R + X) \cdot \frac{F}{H - h(X)} - \frac{RF}{H} \right\} \\ &= \frac{FR}{H - h(X)} - \frac{FR}{H} \\ &\simeq \frac{FR}{H^2} \cdot h(X) \end{aligned}$$

のように奥行き H の基準面に対する相対的な高さに比例するものとなる。基準面は対象の奥行き分布のほぼ中心に

置くように調整する。また、これにより基準面付近では円振動による画像のぼけも生じなくなる。このときの円振動ステレオ偏微分方程式は、

$$\begin{aligned} & \left\{ -\left(\frac{FR\omega}{Z(x,y)} - \frac{FR\omega}{H} \right) \sin \omega t \right\} \frac{\partial}{\partial x} f(x,y,t) \\ & + \left\{ \left(\frac{FR\omega}{Z(x,y)} - \frac{FR\omega}{H} \right) \cos \omega t \right\} \frac{\partial}{\partial y} f(x,y,t) \\ & + \frac{\partial}{\partial t} f(x,y,t) = 0 \end{aligned}$$

$Z(x,y) \simeq H$, $Z(x,y) - H = h(x,y)$ では

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{FR\omega}{H^2} h(x,y) \sin \omega t \right) \frac{\partial}{\partial x} f(x,y,t) \\ & + \left(\frac{FR\omega}{H^2} h(x,y) \cos \omega t \right) \frac{\partial}{\partial y} f(x,y,t) + \frac{\partial}{\partial t} f(x,y,t) = 0 \end{aligned}$$

のように与えられる。荷重積分方程式の形は軸平行型の場合と同一である。

複素振動速度半径 a から距離 $Z(x,y)$ を算出するには、軸平行型の場合と同様に、

$$ae^{-j\phi} = \frac{FR\omega}{Z(x,y)} - \frac{FR\omega}{H}$$

の関係より

$$\frac{1}{Z(x,y)} = \frac{ae^{-j\phi}}{FR\omega} + \frac{1}{H} = \frac{ae^{-j\phi}H + FR\omega}{FHR\omega}$$

よって

$$Z(x,y) = \frac{FHR\omega}{ae^{-j\phi}H + FR\omega}$$

とすればよい。

3. 円振動眼ステレオ撮像系の実現法

実現には、1) 光軸をシフトさせ、そのシフト量を円周上で変化させる仕組み、および、2) それによって時間的に変化する入射光量を荷重積分する方法、の2点がポイントとなる。後者については時間相関イメージセンサで容易に実現できる。前者については、反射または屈折の光学素子群を撮像系の光軸上に設置し、それらを光軸回りに回転させることで実現される。回転軸付近で回転軸平行に光を通過させるために中空モータが必要となる。また、光学素子群の回転によって光軸シフト以外の変化、例えば偏光状態の変化が生じないことも必要となる。

【ロンボイドプリズムを用いる方法】

図3(a),(b)に示す。この方法では大きな光軸シフトを容易に発生可能であり、中距離から遠方の対象の三次元計測に適する。光軸シフト量をプリズムの入出射面サイズ以下にできないため、近接した対象の計測では輻輳型が必須となる。プリズムの反射面を金属コートするなど、入射光の偏光による反射率の変化を少なくする配慮が必要である。

【傾斜平面ガラス窓の屈折による方法】

図4に示す。比較的狭い視野で小さな光軸シフトを得るの

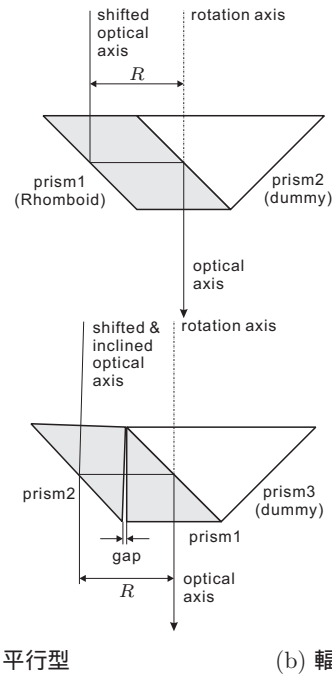


図3 円振動眼ステレオ撮像系における光軸シフト法。白色で表した右側のプリズムは光軸シフト回転時のダイナミックバランスのためのダミー。(b)ではギャップの厚さを調整すると輻輳の基準面位置を可変できる。

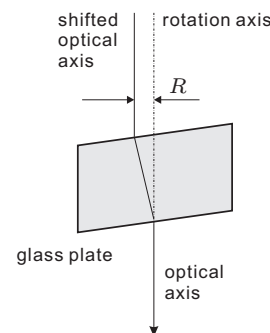


図4 傾斜平面窓を用いた光軸シフト法。広視野は確保しにくい、シフト量は平面窓の傾きで可変できる。

に適する。入射面を非平行とすれば輻輳型に用いることができる。偏光状態の変化を少なくするため平面ガラス窓の傾角を小さくする、屈折による色収差を防止するため低分散のガラス材を用いるなどの配慮が必要となる。

4. 実験装置の試作と距離画像計測実験

4.1 試作実験機の構成

図5に製作した装置の構成図を、図6に写真を示す。ロンボイドプリズム方式を採用し、プリズム開口は $25 \times 25 \text{mm}^2$ 、円振動半径は $R = 25 \text{mm}$ である。入射光の偏光の影響を避けるため、円偏光フィルタ（偏光板と $1/4$ 波長板の貼り合わせ）を用いて特定方向の直線偏光成分のみを取り出し、さらにこれを円偏光化してプリズムに導入している。入手可能な中空モータの中空径が 25mm と細く全長が 60mm と長いため、視野の中心部以外ではプリズム開口によるケ

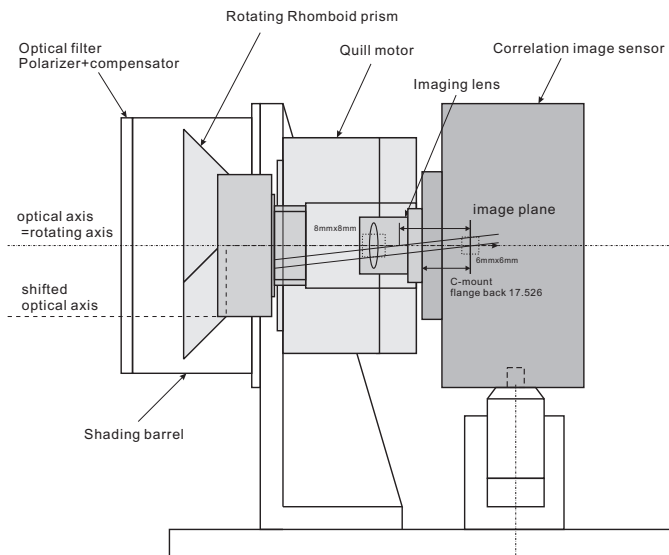


図 5 円振動眼距離画像計測装置の構成。ロンボイドプリズムを中空モータ前端に設置し軸内に撮像レンズを置く。円振動半径（光軸シフト量）は 25mm，円振動周波数はフレームの 1 倍。

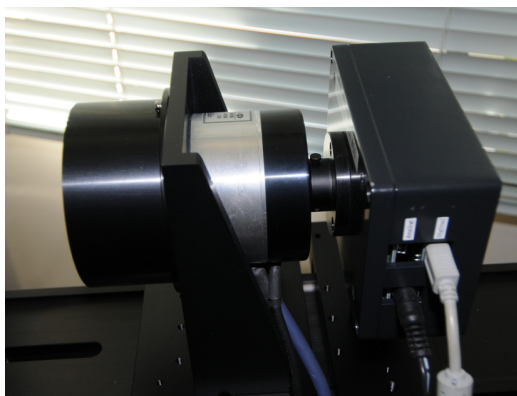


図 6 円振動眼距離画像計測装置。左の黒い鏡筒部内に回転ロンボイドプリズムが設置されている。中央部は中空モータと回転エンコーダ，右側は Hamatech HCI4 時間相関カメラ（実験系の構成の詳細は図 5 を参照）

ラレが生じる点は，今回はやむをえないとした。プリズム固定部の機械的強度の関係で，円振動周波数はフレーム周波数と同一（15Hz, $m = 1$ ）である。モータの駆動パルス列はカメラのデジタル波形発生機能により生成し，同時にモータの Z 相出力により回転位相を検出する。

撮像時には，強度画像と 2 系統の Bayer 配列上で $g_0(x, y)$, $g_1(x, y)$, $g_2(x, y)$ の 3 画像を同時に取得し，PC に転送する。必要な複素微分は PC 上で 2 次元の FFT と逆 FFT による周波数領域処理により行う。この際，Bayer 配列の補間も同時に実行する。直接代数法による再構成には 3×3 から 5×5 画素の局所最小 2 乗法を用いる。

4.2 実験結果

図 7(a),(b),(c) に，検出された画像と距離画像の再構成

例を示す。立体表示はプリズム開口サイズによるケラレの少ない中央部の円領域内だけで行っている。対象は古いタイル貼りの壁面や周辺の地面と樹木であり，手前の壁面までの距離は約 30m，遠方の樹木までの距離は約 50m である。(c) の三次元再構成結果を見ると，全体として解像度の高い推定が印象的である。壁面の平坦部における奥行きのはらつきは 10cm 以下であり，一部の若干異常な応答は明度変化や凹凸，光沢の有無などに影響されているように見える。これらは偏光依存性やプリズム回転に伴う内面反射の変化の除去が不十分なことが主原因と見られる。

図 8(a),(b) に，よりレンジの広い対象に対する強度画像と距離画像を示す。対象は，手前側の低層の建物の屋上フェンス部と高層部の奥方向に広がる壁面，遠方の高層建築物の奥行きが 2 段になった壁面である。(a) が強度画像で，(b) に距離を明暗で表した距離画像を示す。周辺部はプリズムのケラレで結果が乱れているが，全体として奥行きの分布がかなりの高解像度と安定さで捉えられている。手前の樹木までの距離は約 10m，手前の屋上フェンスまでの距離は約 30m，後方の高層建築物の壁面までの距離は手前側で約 120m，後ろ側で約 130m である。(a) の強度画像では，手前側の樹木に円振動によるリング状のぼけが観察できる。屋上の水平模様や高層部壁面の垂直模様など，パターンの単方向性による再構成結果の乱れは見られず，全方向の視差情報を利用できる円振動眼ステレオの特色が現れている。

5. おわりに

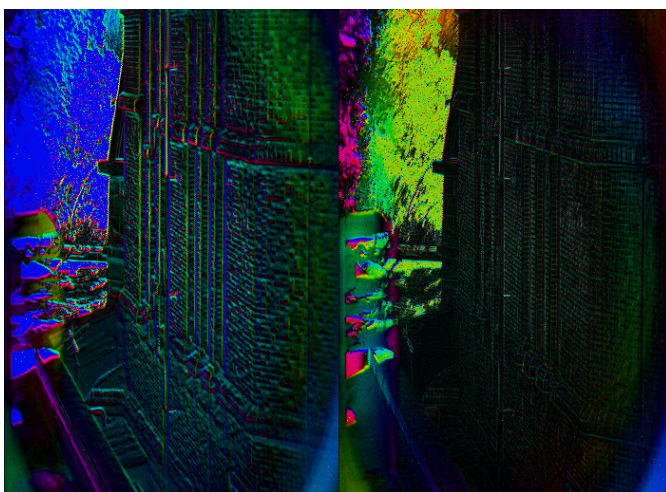
受動光による距離画像計測の新しい原理を提案した。撮像系を円周状に振動させ，その際に生じる画像の局所的円運動を時間相関イメージセンサにより複数の複素フーリエ係数の分布として捉え，これらの間の代数演算により画素ごとに奥行きを算出する。一般化オプティカルフロー偏微分方程式と荷重積分法により定式化を行い，回転ロンボイドプリズムを用いた実験システムを試作し，原理の正当性を確認するとともに，実用化に向けて諸性能に関する見通しを得た。

参考文献

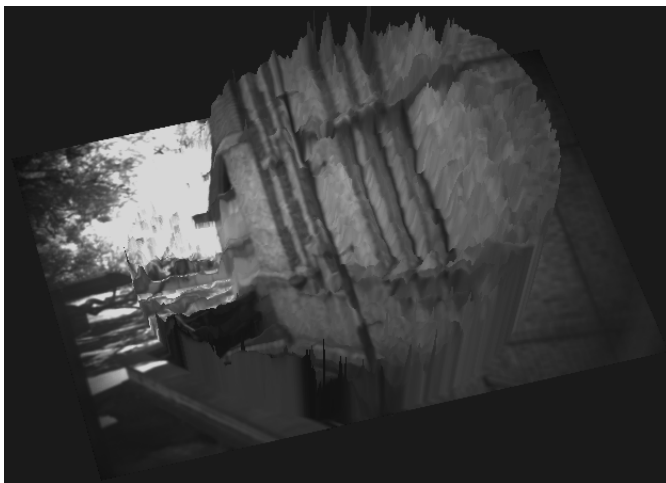
- [1] 安藤, 奈良, 応用数学会年會, 東京, 2014.
- [2] 安藤, 稲垣, IEICE 信号処理研究会, SIP2014-79, 大阪, 2014.
- [3] 安藤, SICE パターン計測研究会, 東京, 2014.
- [4] S. Ando, D. Wei, and P. Masurel, T. Kurihara, SIAM Conference on Imaging Science, Minneapolis, 2006.
- [5] 魏, Masurel, 栗原, 安藤, 電子情報通信学会論文誌, vol.J90-D, no.8, pp.2009-2018, 2007.
- [6] 安藤, 魏, Masurel, 情報処理学会 CVIM 論文誌, vol.49, no.6, pp.13-21, 2008.
- [7] S. Ando, T. Kurihara, and D. Wei, Proc. VISAPP 2009, pp.480-487, Lisboa, 2009.
- [8] 安藤 繁, 計測と制御, vol.51, no.9, pp.10-17, 2012 .
- [9] S. Ando and T. Nara, IEEE Trans. Signal Processing,



(a) 強度画像



(b) 相関画像 (左半分が $n = 1$, 右半分が $n = 2$)

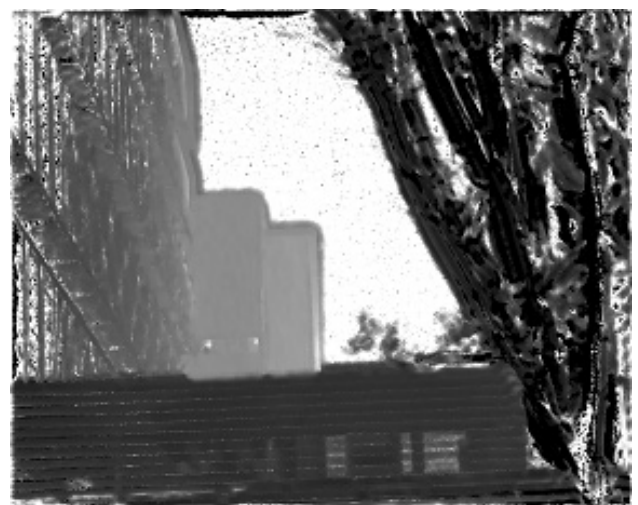


(c) 三次元再構成結果の立体表示

図 7 実験例 1。東大本郷キャンパスの法文一号館と安田講堂前広場を工学部 6 号館 2 階から眺めたもの。(b) の 2 種の相関画像はそれぞれ位相を色相, 振幅を明度で表現しており, 壁面や樹木の細部まで鋭敏に捉えている。(c) では強度画像をテクスチャマップして表示し, 壁面の傾斜と凹凸がよく再構成されている。プリズムの開口サイズが小さいため, ケラレが生じない中央部の円領域内だけで距離分布を立体表示している。



(a) 強度画像



(b) 距離画像

図 8 実験例 2。東大本郷キャンパスの工学部二号館 (下部の旧館屋上と左方の新館壁面) と三号館 (中央遠方の新館高層部) を六号館 3 階から眺めたもの。(a) が強度画像で (b) が距離を明暗で表した距離画像。周辺部はプリズムのケラレで結果が乱れている。

vol.57, no.9, pp.3317-3329, 2009.

- [10] 小山, 栗原, 安藤, 電気学会論文誌, vol.129-E, no.10, pp.350-356, 2009.
- [11] S. Ando, T. Nara, and T. Levy, J. Acoust. Soc. Am., vol.134, no.4, pp.2799-2813, 2013.
- [12] T. Nara and S. Ando, Inverse Problems, vol.26, ID:015011, 2010.
- [13] 佐藤, 栗原, 安藤, SICE 論文集, vol.46, no.9, pp.539-546, 2010.
- [14] 持田, 安藤, SICE 論文集, vol.48, no.5, pp.265-272, 2012.
- [15] S. Ando, T. Nara, and T. Kurihara, Measurement Science and Technology, vol.25, no.8, 085001, 2014.
- [16] S. Ando and A. Kimachi, IEEE Trans. Electron Devices, vol.50, no.10, pp.2059-2066, 2003.
- [17] S. Ando, T. Nara, N. Ono, and T. Kurihara, IEEE Trans. Magnetics, vol.43, no.3, pp.1044-1051, 2007.
- [18] 安藤, 来海, 電気学会センサマイクロマシン部門誌, vol.129, no.5, pp.129-137, 2009.
- [19] 来海 暁, 安藤 繁, 計測と制御, vol.47, no.1, pp.10-17, 2008.