

全方位ステレオカメラを用いた距離画像の作成

九州工業大学 ○佐藤亮輔 黒木秀一

Range image generation using omnidirectional stereo cameras
Ryosuke Sato, Shuichi Kurogi, Kyushu Institute of Technology

Abstract: Recently the necessity of understanding three-dimensional environment for all directions is increasing for performing a robot's navigation, operational support in a remote place, etc. To navigate a robot, we should acquire three-dimensional position information of all directions around a robot. But the technique of acquiring three-dimensional information for all the directions is not established. In this paper, the surrounding picture is acquired using an omnidirectional visual sensor, the technique of acquiring three-dimensional position information from the obtained omnidirectional stereo images is proposed.

1. まえがき

ロボットのナビゲーションや遠隔地における操作支援などを行う上で、全方位の3次元環境を理解する必要性が高まってきている。全方位の3次元環境を理解するためには、観測地点の周囲において観測対象の3次元情報を獲得しなければならない。しかし、全方位の3次元情報を獲得する手法は確立されておらず、3次元情報の確立が望まれている。我々の研究室では従来の移動ロボットの距離計測にレーザレンジファインダ (LRF) を使用していた。本研究では、観測領域ならびに光学系の特性から、双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサとして提案されている HyperOmni Vision を用いて画像を取得する。本研究の目的は全方位視覚センサ2台を垂直方向に配置した全方位ステレオカメラを移動ロボットに搭載し、周囲360°の距離計測を行うことである。その課題といたしまして3次元情報の取得が必要となる。本論文では、全方位視覚センサを用いて周囲の画像を同時に取得し、得られた全方位画像から3次元位置情報を獲得する手法を提案する。

2 全方位カメラについて

全方位カメラとは双曲面ミラーをカメラの前に設置することで周囲360°を一度に撮影できるカメラである。

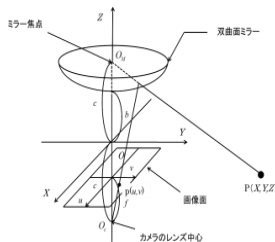


Fig. 1. Omnidirectional camera.

2.1 全方位カメラの構成

全方位カメラは図1に示すような鉛直下向きに双曲面ミラーとその下から鉛直上向きに設置されたカメラで構成されている。これにより、周囲360°を一度に撮影することができる。双曲面ミラーは次式で表すことができる。

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (1)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (2)$$

全方位カメラから直接得られる全方位画像は、周囲の情景が双曲面ミラーに反射したものを撮影した画像のため、通常のカメラとは違い円形領域に投影された画像となる。

2.2 全方位カメラの特性

任意の点 $P(X, Y, Z)$ に対する画像上で写像点 $p(u, v)$ とした時、点 P の方位角 θ は次式で表される。

$$\tan\theta = \frac{Y}{X} = \frac{v}{u} \quad (3)$$

このように、360°パノラマ状の領域内にある世界座標上の対象物の方位角 θ は画像上の写像点の方位角と等しい。また、図2のような点 P と Z 軸を含む鉛直断面を想定すると、点 P と p の間には次式が成り立つ (ただし、 f はカメラの焦点距離を表す)。

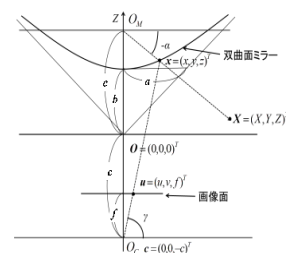


Fig. 2. Projection of $X=(X, Y, Z)^T$.

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \gamma} \quad (5)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{f}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (6)$$

ミラーの焦点 O_M からの点 P の方位角 θ および伏角 α はカメラのレンズ中心 O_C を双曲面の焦点位置にすることで、写像点 $p(u, v)$ より求めることができる。また、点 $P(X, Y, Z)$ から写像点 $p(u, v)$ を求める場合、山澤の論文 [1] より世界座標から画像座標への座標変換式は式 (3) から式 (6) を変換する事で式 (7) と式 (8) のように求まる。

$$u = \frac{a^2 f X}{-(b^2 + c)Z + 2bc \|X\|} \quad (7)$$

$$v = \frac{a^2 f Y}{-(b^2 + c)Z + 2bc \|X\|} \quad (8)$$

2.3 パノラマ展開

パノラマ展開 [2] とは、全方位画像を円筒状に切り取り、広げた画像を作成する手法である。展開はまず全方位画像を極座標表現に変換する。

$$u = r \cos \theta \quad (9)$$

$$v = r \sin \theta \quad (10)$$

さらに、図3の元画像より、縦方向に r 、横方向に θ を等間隔で r, θ に対応する x, y の画素を再配置して図4のようなパノラマ画像を作成する。

3 全方位ステレオシステムについて

3.1 全方位ステレオ画像の取得

全方位ステレオ画像を取得するには、全方位視覚センサを水平方向に配置する方式と垂直方向に配置する方向が考えられるが、本研究では垂直方向に配置した。[3] 垂直方向に配置した場合は、上下の全方位画像の中心部において対応関係を求めることが可能となり、全方位ステレオ画像を取得できる。また、センサを垂直方向 (図1のZ軸方向) に配置し、高さの異なる位置で2枚の全方位画像を取得することで、全方位ステレオ画像の画像中心からの放射線上でエピポーラ拘束を成立させることが可能となる。放射線上でエピポーラ拘束が成立することにより、全方位ステレオ視における対応点探索を直線上で効率的に行うことが可能となる。

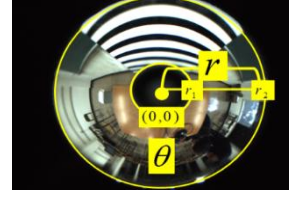


Fig.3. Original omnidirectional image.

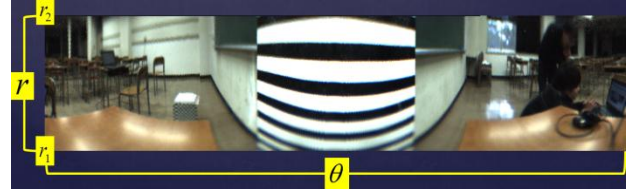


Fig.4. Panorama image.

3.2 全方位ステレオ画像間の関係

全方位ステレオ画像を取得する際の全方位視覚センサの位置関係を図5に示す。全方位ステレオ画像間では画像中心から伸びる放射線上でエピポーラ拘束が成立しているため、3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ の全方位画像 I_l, I_u に対する写像点は同一の方位角 θ を持つ。このとき、全方位画像上での写像点の座標をそれぞれ $p_l(r_1, \theta)$ 、 $p_u(r_2, \theta)$ とすると、(11) 式の関係が得られる。 d は全方位画像上の位置ずれを表す視差である。

$$r_2 = r_1 - d \quad (11)$$

(11) 式ならびに図5からわかるように、3次元環境中の同一対象物体が写像される際の画像中心からの半径は、全方位画像 I_u 上の方が全方位画像 I_l 上に比べて必ず小さいという関係にある ($r_2 < r_1$)。

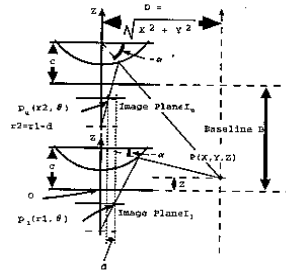


Fig.5. Relation between the projected points in omnidirectional stereo images.

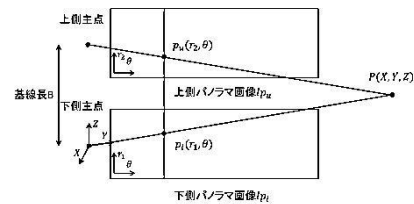


Fig.6. Arrangement of omnidirectional stereo camera and the three-dimensional position of an object.

3.3 Birch Fieldによる対応点探索

全方位ステレオ視を用いて3次元情報を獲得するには、片方の画像中に見えている注目点がもう片方の画像のどこに存在するのか求める必要がある。本研究ではまず、上下の全方位画像を2.3節で説明したパノラマ画像に変換する。このとき、下側全方位画像をパノラマ展開した画像を I_{p_l} 、上側を I_{p_u} とする。全方位ステレオ画像間では中心から伸びる同一の方位角をなす放射線上でエピポーラ拘束が成立するため、パノラマ画像では上下の対応点は図6のような走査線上に存在する。本研究ではfeature-based matching手法のBirch Field法[4]を用いて対応関係を求める。本研究のシステムが利用したBirch Field法では、初めに上下パノラマ画像の走査線上の特徴点と特徴点の対応を1次元の探索問題として考え、それらの対応によって特徴の無い領域に対しても動的計画法(DP)によって視差 d を与える。

3.4 3次元情報の取得

実際の3次元環境を理解するには対応点探索で得られた全方位の視差情報そのものではなく、視差を基に対象物体の3次元座標を計算する。まず、座標系の設定を行う(図5)。3次元ワールド座標系の原点は相対的に低い位置に配置する全方位視覚センサの光学系の原点とする。相対的に高い位置に配置する全方位視覚センサの光学系の原点は、3次元ワールド座標系ではカメラ間の基線長である B を考慮して $(0, 0, B)$ の位置になる。奥行き D ($=\sqrt{X^2+Y^2}$) (12)

は全方位視覚センサの双曲面ミラーの焦点とカメラレンズ中心を通るZ軸から対象物体までの水平方向の距離とする。このとき、3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ を対象物体とすると、2.2節で述べた関係(3,4,5,6)式より全方位ステレオ画像対 I_l, I_u の各々に対して、低い位置に配置した全方位視覚センサでは、

$$Z = D \tan \alpha + c \quad (13)$$

高い位置に配置した全方位視覚センサでは、基線長 B を考慮して

$$Z = D \tan \alpha' + c + B \quad (14)$$

が成立する。ただし、 Z :実環境中での対象物体の高さ、 D :実環境中での対象物体までの奥行き、 B :カメラ間基線長、 c :双曲面ミラーのパラメータ、 α, α' :ミラー焦点と対象物体との伏角である。

以上の関係より、奥行き D はカメラ間の基線長 B と3次元環境中における対象物体と下側の全方位視覚センサのミラー焦点との伏角 α ならびに上側のミラー焦点との伏角 α' を用いて次のように表せる。

$$D = \frac{B}{\tan \alpha - \tan \alpha'} \quad (15)$$

ここで、全方位ステレオ画像対 I_l, I_u での写像点を各 $p_l(r_l, \theta), p_u(r_u, \theta)$ とすると、ミラー焦点との伏角 α および α' は視差 d と注目画素の半径 r_l を用いて以下の式で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \tan^{-1} \frac{f}{r_l} - 2bc}{(b^2 + c^2) \cos \tan^{-1} \frac{f}{r_l}} \quad (16)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \tan^{-1} \frac{f}{r_l - d} - 2bc}{(b^2 + c^2) \cos \tan^{-1} \frac{f}{r_l - d}} \quad (17)$$

ただし、 b, c :双曲面ミラーのパラメータ、 f :カメラの焦点距離上式から奥行き D は注目画素の半径 r_l と視差 d から計算できることがわかる。また、奥行き D を求めることによって、高さ Z も(13)式から求めることができる。

4. 実験と考察

本実験では全方位ステレオシステムより得られた距離データの性質について検証する。このとき用いた全方位カメラの双曲面ミラーパラメータ a, b, c および焦点距離 f 、基線長 B の値を表1に示す。

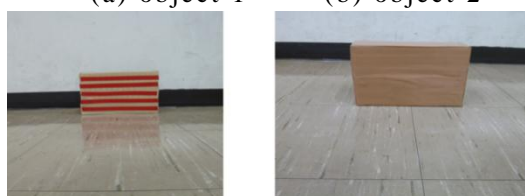
本実験で用いた対象物を図7(a)から図7(d)に示す。各対象物に対して奥行き30[cm]から100[cm]までの間で10[cm]間隔で設置し、各伏角での奥行き D を求め、グラフにプロットした。図7(a),(b),(d)の対象物を測定して得られた結果を図8から図10に示す。図7(b)の対象物は測定不可能となった。これは本研究で用いたBirch Fieldでは視差を獲得できなかったためだと考えられる。実験結果より特徴点の多い対象物では距離を測定できることが分かったが、特徴点の少ない対象物に対しては距離測定をすることが難しいことが分かった。また、どの結果もグラフに傾きがみられるがこれは動的計画法を用いて視差を与えているためだと考えられる。

Table1.Specifications of the omnidirectional camera depicted in Fig.2 and Fig.5.

a	10.9mm
b	12.2mm
c	16.4mm
f	32.7mm
B	100.0mm

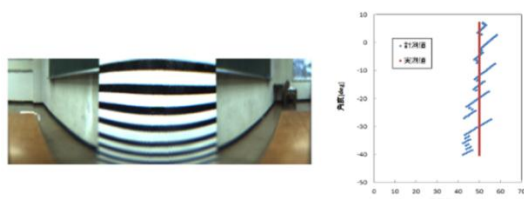


(a) object 1 (b) object 2



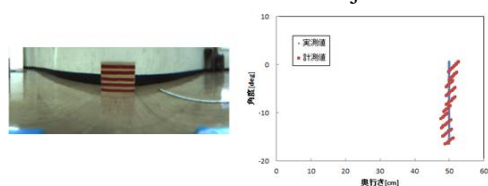
(c) object 3 (d) object 4

Fig.7. Four objects examined.



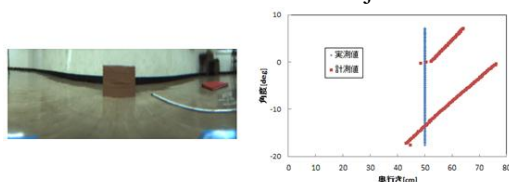
(a) (b)

Fig.8. (a) Panorama image and (b) range data obtained from object 1.



(a) (b)

Fig.9. (a) Panorama image and (b) range data obtained from object 3.



(a) (b)

Fig.10. (a) Panorama image and (b) range data obtained from object 4.

5 結論

本研究では、全方位ステレオカメラを用いた距離画像を作成し、その距離画像の性質について調べることができた。本研究では Birch Field法を用いたため特徴点の多い対象物に対しては有用性があると考えられるが、特徴点の少ない廊下や壁に対する適用は難しいと考えられる。また、どのような対象物に対しても正確な計測を行うには本研究で用いた Birch Field法以外の対応点探索アルゴリズムを考えるか、Birch Field法で得られたデータを処理する方法を考える必要がある。

参考文献

- [1] 山澤一誠, ” 全方位視覚センサ HyperOmni Vision に関する研究-移動ロボットのナビゲーションのために-”, 大阪大学博士論文, pp.3-8, 1997.
- [2] 小串渉, ” ステレオカメラと全方位カメラを用いたレスキューロボット援竜のための画像補助システムの開発”, 九州工業大学大学院修士論文, pp.8-9, 2010.
- [3] 茶園篤, 山澤一誠, ” 全方位ステレオ視による 3次元情報の獲得”, 映像メディア学会誌 vol.51, No.10, pp.1745-1753, 1997.
- [4] S. Birchfield and C. Tomasi, ”Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo”, International Journal of Computer Vision, 35(3), pp.269-293, 1999.