

単一視点と均一解像度特性を有する 一般化全方位カメラモデル

青竹 貴之[†] 長原 一^{††} 谷内田 正彦[‡]

^{†, ††, ‡}大阪大学大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3

E-mail: [†]aotake@yachi-lab.sys.es.osaka-u.ac.jp, ^{††}nagahara@sys.es.osaka-u.ac.jp, [‡]yachida@is.oit.ac.jp

あらまし 凸面ミラーを用いた全方位カメラが、従来より数多く提案され、近年ではロボットの視覚や監視、バーチャルリアリティなど広視野角を必要とする応用分野で盛んに用いられている。それら全方位カメラの中で、主に単一視点の特性を持つ双曲面や放物面ミラーまたは均一解像度特性を持つミラーが、それらの幾何特性の利点から市販され、利用されてきた。しかしながら、これらの提案では全方位カメラのモデルを中心射影に限定してきた。本論文では、単一視点と均一解像度を有する全方位視覚センサの一般化モデルを提案する。このモデルにより、従来の中心射影カメラに加え平行射影カメラを含めたカメラの設計や解析が可能となる。これにより、光学特性や視野角、物理的制限などセンサ実装時に要求される制限に関する設計自由度が向上し、更なるセンサの最適化が可能となる。

A Generalized Omnidirectional Camera Model with Single Viewpoint and Constant Resolution

Takayuki AOTAKE[†], Hajime NAGAHARA^{††}, and Masahiko YACHIDA[‡]

^{†, ††, ‡}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

E-mail: [†]aotake@yachi-lab.sys.es.osaka-u.ac.jp, ^{††}nagahara@sys.es.osaka-u.ac.jp, [‡]yachida@is.oit.ac.jp

Abstract Many omnidirectional cameras with a convex mirror have been proposed for applications such as surveillance, robotics and virtual reality etc. that require large field of views. The cameras have a single center of projection or a constant resolution property have already manufactured as commercial products and frequently used for many applications. However, these kinds of cameras cannot maintain both of the properties. Recently, some papers proposed the omnidirectional camera that has both a single center of projection and constant resolution properties by using two mirrors. They have only modeled for perspective camera as a projective model. In this paper, we propose a general model for an omnidirectional camera that has both single viewpoint and constant resolution properties. We analyzed and designed the omnidirectional camera including any types of projection as perspective or orthographic by using the models. Moreover, we can find the optimal design independent of the projection types of the camera under the practical restrictions such as optical property, field of view and sensor size.

1 はじめに

近年、自律ロボットや監視など広視野角かつリアルタイムに周囲の環境情報を必要とするシステムの需要が高まってきており、周囲360度を観測することの出来る全方位カメラの重要性が高まってきていると言える。全方位カメラは、複数カメラを用いる

手法や凸面ミラーを用いる手法など、多様な手法によって実現されている [1]。このうち、凸面ミラーを用いる手法は一度に全方位がシームレス撮像できること、構造が単純なため小型化が図れることから盛んに研究されてきた。

凸面ミラーを用いた全方位カメラはミラー形状に

よってその特性が決定される。このため、球面 [2], 円錐面 [3], 双曲面 [4], 放物面 [5] など多様なミラー形状のカメラが従来より提案されてきた。双曲面ミラーや放物面ミラーを用いたカメラは単一視点を保持するという特性を持っている。単一視点は、通常のカメラが持つ特徴で、図 1-a に示すように、環境からカメラに入射する光線が一点で交わる特性のことである。全方位カメラにおいては、撮影した画像がミラー反射による歪みを持つが、単一視点を保持していれば、通常のカメラと同様の透視投影画像やパノラマ画像に歪みなく変換することが可能である。しかしながら、双曲面や放物面の全方位カメラは、図 1-b に示されるように、そのミラー形状から解像度特性が均一でないという問題点を持つ。これらのカメラでは画像の部位や入射角により画像分解能が変化することから、画像計測などの用途では問題になることがあった。

一方、Srinivasan[6], Gasparら [7], Conroyら [8], Hicksら [9, 10] は、画像の分解能が均一な全方位カメラを提案している。Gasparらは入射角や水平座標、垂直座標と画像座標が線形、Conroyらは入射角と画像中の面積が線形、Hicksらは立体角と画像中の座標が線形とそれぞれ定義している。これらの研究では、所望の解像度特性を満たす全方位ミラーの形状を解析的に求めることで均一解像度特性を実現している。しかしながら、これらのミラーを用いた全方位カメラは、先に述べた単一視点の特性を満たさない。図 2 に均一解像度の全方位センサの例として Gaspar らのセンサの特性を示す。図 2-b より均一解像度特性を満たしていることが、図 2-a より単一視点の特性を満たさないことがそれぞれ確認できる。このような多視点射影カメラは一般的なカメラの幾何とは異なるため、透視変換画像のような一般的なカメラ画像には変換できない。また、従来よりある一般的な画像幾何や画像処理手法の多くは単一視点を前提にしているため、これらの手法を近似的にしか利用できないという問題を持つ。さらに多視点幾何を真面目に扱うには、単一視点と比べて複雑なモデル化や解析が必要となる [11]。

このように単一視点や均一解像度特性は応用分野にとっては極めて有用な特性であるが、単一ミラーを用いた全方位カメラにおいては両立が不可能であった。これに対し、吉田ら [12, 13] や Hicksら [14] は、2枚のミラーと中心射影レンズを使用することで、単一視点と均一解像度特性を両立する全方位カメラを提案した。これらの手法は単一視点と均一解像度特

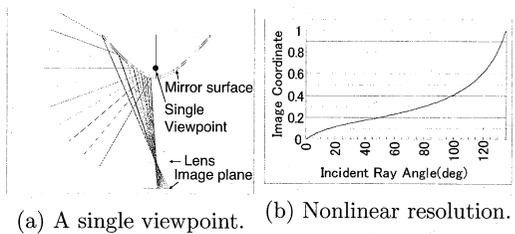


図 1: 双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサ

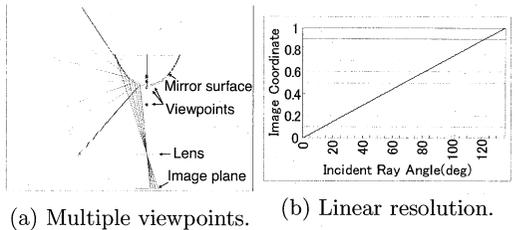


図 2: Gaspar らのミラーを用いた全方位視覚センサ

性それぞれの幾何的な拘束条件を導出しミラー形状を解析的に求めることで、両特性を同時に満たす全方位カメラを実現した。しかしながら、これらの研究では、全方位カメラに用いるカメラの射影モデルを中心射影に限定していた。カメラの射影モデルには通常のレンズに代表される中心射影 (Perspective projection) とテレセントリックレンズにより実現される平行射影 (Orthographic projection) がある。従来の単一視点や均一解像度の全方位カメラにおいても、中心射影のカメラ [4], [6] を用いたモデルだけでなく、平行射影のカメラ [5], [10] を用いたモデル双方が提案され議論されてきた。

本論文では、全方位カメラモデルの一般化を行い、中心射影だけでなく平行射影に関しても同様に表現できるモデルの提案を行う。この一般化モデルを用いることで、全方位カメラに用いるカメラの射影方式に関わらず解析か設計を行うことが出来る。さらには光学特性や視野角、物理的制限などセンサ実装時に要求される制限に関する設計自由度が向上し、さらなるセンサの最適化が可能となる。

2 一般化カメラモデル

提案する全方位カメラモデルは、同軸に配置された 2 枚の回転対称のミラー (第 1 ミラーと第 2 ミラー) と対応するレンズ系、CCD カメラで構成される。提案カメラモデルを図 3 に示す。全方位カメラ単一視点を原点 O とし、光軸方向に Z 軸、放射方向に R 軸をそれぞれ取る直交座標系で考えることにする。ここで、 $F_1(r)$, $F_2(r)$ はそれぞれ R 座標値が r

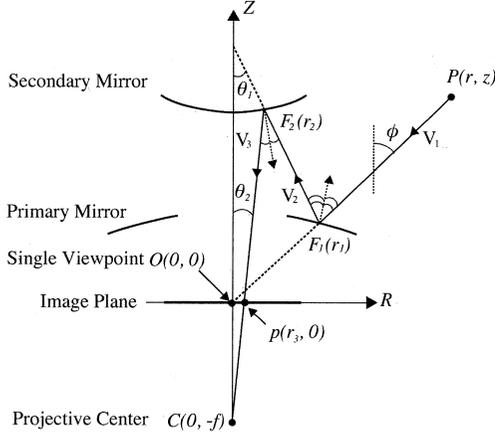


図 3: 提案全方位カメラのモデル

であるときの第 1 ミラー, 第 2 ミラーの Z 座標値を表す関数である. また, カメラの焦点距離を f , 投影中心を $C(0, -f)$, 画像面を $z = 0$ の面とおく.

3次元環境中の任意の点 $P(r, z)$ から光軸正方向に角度 ϕ をなし, 単一視点 $O(0, 0)$ に向かって入射する光線 V_1 は, 第 1 ミラーとの交点 $(r_1, F_1(r_1))$ で反射する. 反射光線 V_2 は光軸と角度 θ_1 をなして第 2 ミラーに入射し, 第 2 ミラー上の点 $(r_2, F_2(r_2))$ で反射する. この反射光線 V_3 は第 1 ミラーの中央に設けたホールを通過して角度 θ_2 をなしてレンズ主点に達し, これにより画像点 $p(r_3, 0)$ に射影される.

3 単一視点の条件導出

ここでは, 全方位カメラが単一視点を保持するための条件式を導出する. 単一視点を保持するには, 図 3 に示すような環境からの光線が単一視点 $O(0, 0)$ に向かって入射し, 第 1 ミラーと第 2 ミラーで反射後, レンズ主点 $C(0, -f)$ に入射するといった光路をとる必要がある. このことより以下のような過程で単一視点の条件式が得られる.

まず, 幾何的な拘束条件から以下の式がそれぞれ得られる. ただし, F_1 と F_2 はそれぞれ r_1, r_2 における第 1 ミラー, 第 2 ミラーの Z 座標 $F_1(r_1)$ と $F_2(r_2)$ を表すものとし, 以下この表記に準じる.

$$\phi = \arctan \frac{r_1}{F_1} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{r_1 - r_2}{F_2 - F_1} \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{r_2}{F_2 + f} \quad (3)$$

$$r_3 = f \tan \theta_2 = \frac{f}{F_2 + f} r_2 \quad (4)$$

また, 光の反射の法則より, 以下の式が 2 枚のミラーそれぞれについて得られる. ただし, F'_1 と F'_2 はそれぞれ, 各ミラー上の点 (F_1, r_1) と (F_2, r_2) における傾きを表す.

$$\phi + \arctan F'_1 = \theta_1 - \arctan F'_1 \quad (5)$$

$$\theta_1 - \arctan F'_2 = \theta_2 + \arctan F'_2 \quad (6)$$

式 (1), (2) を式 (5) に, 式 (2), (3) を式 (6) にそれぞれ代入して三角関数を消去すると, 次の 2 式が得られる.

$$\frac{r_1}{F_1} = \frac{\frac{r_1 - r_2}{F_2 - F_1} - \frac{2F'_1}{1 - (F'_1)^2}}{1 + \frac{r_1 - r_2}{F_2 - F_1} \frac{2F'_1}{1 - (F'_1)^2}} \quad (7)$$

$$\frac{r_1 - r_2}{F_2 - F_1} = \frac{\frac{r_2}{F_2 + f} + \frac{2F'_2}{1 - (F'_2)^2}}{1 - \frac{r_2}{F_2 + f} \frac{2F'_2}{1 - (F'_2)^2}} \quad (8)$$

さらに, 式 (7), (8) を F'_1, F'_2 について整理すると, 単一視点の条件式が以下のように得られる.

$$F_1'^2 + 2\alpha F_1' - 1 = 0 \quad (9)$$

$$F_2'^2 - 2\beta F_2' - 1 = 0 \quad (10)$$

ただし, α, β はそれぞれ以下の式で表される.

$$\alpha = \frac{F_1(F_2 - F_1) + r_1(r_1 - r_2)}{F_1(r_1 - r_2) - r_1(F_2 - F_1)} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{r_2(r_1 - r_2) + (F_2 + f)(F_2 - F_1)}{r_2(F_2 - F_1) - (F_2 + f)(r_1 - r_2)} \quad (12)$$

このモデルにおいての f が有限値の場合, 中心射影を表す. 平行射影は $f = \infty$ として表され, 式 (4) および, 式 (12) は,

$$r_3 = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{f}{F_2 + f} r_2 = r_2 \quad (13)$$

$$\beta = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{r_2(r_1 - r_2) + (F_2 + f)(F_2 - F_1)}{r_2(F_2 - F_1) - (F_2 + f)(r_1 - r_2)} = \frac{F_2 - F_1}{r_1 - r_2} \quad (14)$$

として表される.

4 均一解像度特性の条件導出

ここでは, 均一解像度特性を保持するための一般的な条件式を示し, 提案カメラモデル固有の条件式を導出する. 均一解像度特性はその定義方法によって異なり, 今までに多様な定義がなされている. カメラが均一解像度特性を持つということは一般に, 3

次元環境中の要素 X と画像中の要素 x が以下のような線形関係式を満たしているということである。

$$X = a \cdot x + b \quad (15)$$

ただし、 a 、 b は X と x の関係を表すための線形係数である。これらの係数は、鉛直視野角をはじめとしたカメラの要求スペックや CCD 解像度、使用するテレセントリック光学系の作動距離や倍率などにより決定される。前述の均一解像度特性はそれぞれ式 (15) の X に、入射角 [7, 8]、水平座標 [7]、垂直座標 [7] や三次元中の立体角 [10] を、 x に画像中の座標 [7] や画像中の面積 [8, 10] をそれぞれ代入したものである。以下に、5 つの有用な均一解像度特性の例を示し、今回の提案カメラモデル固有の条件式を導出する。

なお、平行射影のときは、式 (13) と同様 $f = \infty$ のときであるので、式 (17)、(20)、(23)、(25)、(27) において、 $\frac{F_2+f}{f} = 1$ とおけばよい。

4.1 入射角-半径線形特性

入射角-半径線形特性 (Angle-Radius constant resolution) とは、カメラへの入射角と画像中心からの距離、すなわち画像座標とが線形関係となる特性のことである。入射角に対して分解能が一定であるため、カメラのエゴモーション推定 [15] などのような球面幾何を用いる応用に適した特性である。

入射角-半径線形特性を持たせるには、図 3 における入射角 ϕ と画像座標 $p = (r_3, 0)$ とが線形関係であるようにすればよい。すなわち、式 (15) は式 (16) のように書き表される。

$$\phi = a \cdot r_3 + b \quad (16)$$

この式に、式 (1)、(4) を代入することによって、入射角-半径線形特性の条件式 (17) が得られる。

$$r_2 = \frac{F_2 + f}{af} \left(\arctan \frac{r_1}{F_1} - b \right) \quad (17)$$

4.2 水平座標-半径線形特性

水平座標-半径線形特性 (Horizontal-Radius constant resolution) とは、カメラの光軸方向 Z 軸と垂直となる 3 次元環境中の水平座標と画像中心からの距離、すなわち画像座標とが線形関係となる特性のことである。この特性を持たば、カメラの Z 軸と垂直をなす地面などの水平面がユークリッド変形の下で射影される。また、凸ミラーを用いるため通常のカメラで撮像するより広角に水平面が撮像できる。こ

のため、ロボットナビゲーション [16] などのような、画像を用いた距離や角度を測定する必要のある応用に適している特性である。

単一視点 O から距離 D だけ離れた水平面 l 上の点 $P(r, z)$ から放たれた光が、図 3 の画像点 p に到達するとき、点 P の座標値 r 、 z はそれぞれ幾何的に以下のように表すことができる。

$$r = D \cdot \tan \phi, \quad z = D \quad (18)$$

水平座標-半径線形特性を持たせるには、この点 $P(r, z)$ と画像座標 $p = (r_3, 0)$ とが線形関係であるようにすればよい。すなわち、式 (15) は式 (19) のように書き表される。

$$r = a \cdot r_3 + b \quad (19)$$

この式に、式 (1)、(4)、(18) を代入することによって、水平座標-半径線形特性の条件式 (20) が得られる。

$$r_2 = \frac{F_2 + f}{af} \left(\frac{r_1}{F_1} - b \right) \quad (20)$$

ただし、単一視点を保持しているカメラにおいて、線形性は単一視点 O から水平面 l までの距離 D に依らないため、式 (20) では簡単のため $D = 1$ としている。

4.3 垂直座標-半径線形特性

垂直座標-半径線形特性 (Vertical-Radius constant resolution) とは、カメラの光軸方向 Z 軸に平行となる 3 次元環境中の垂直座標と画像中心からの距離、すなわち画像座標とが線形関係となる特性のことである。この特性を持たば、カメラの Z 軸と平行をなす建造物の壁などの垂直な面に対して解像度が一定となる。つまり、壁上のマーカーや特徴点などのランドマークが、その位置に関係なく歪まず撮像することができる。このため、ランドマーク検出を行うロボットなどへの応用に適している特性である。

光軸方向 Z 軸から距離 D だけ離れた垂直面 l 上の点 $P(r, z)$ から放たれた光が、図 3 の画像点 p に到達するとき、点 P の座標値 r 、 z はそれぞれ幾何的に以下のように表すことができる。

$$r = D, \quad z = \frac{D}{\tan \phi} \quad (21)$$

垂直座標-半径線形特性を持たせるには、この点 $P(r, z)$ と画像座標 $p = (r_3, 0)$ とが線形関係であるようにすればよい。すなわち、式 (15) は式 (22) のように書き表される。

$$z = a \cdot r_3 + b \quad (22)$$

この式に、式 (1), (4), (21) を代入することによって、垂直座標-半径線形特性の条件式 (23) が得られる。

$$r_2 = \frac{F_2 + f}{af} \left(\frac{F_1}{r_1} - b \right) \quad (23)$$

ただし、単一視点を保持しているカメラにおいて、線形性は Z 軸から垂直面 l までの距離 D に依らないため、式 (23) では簡単のため $D = 1$ としている。

4.4 入射角-面積線形特性

入射角-面積線形特性 (Angle-Area constant resolution) とは、カメラへの入射角と画像中の面積とが線形関係となる特性のことである。この特性を持てば、得られた全方位画像を横軸と縦軸がそれぞれ経度と緯度で表されるメルカトル図法として知られるパノラマ画像に変換したとき、面積の分解能が一定になる。この緯度経度パノラマ画像は、ステレオ視においてエピポーラ線が直線で現れるという特徴に加えて、天球画像を直交座標として表現できる特徴も持っているため、全方位画像を用いた画像処理を行う場合に適している。

入射角-面積線形特性を持たせるには、図 3 における入射角 ϕ と画像中の円の面積とが線形関係であるようにすればよい。画像中の円の面積は画像座標 $p = (r_3, 0)$ より πr_3^2 と求められるので、式 (15) は式 (24) のように書き表される。

$$\phi = a \cdot \pi r_3^2 + b \quad (24)$$

この式に、式 (1), (4) を代入することによって、入射角-面積線形特性の条件式 (25) が得られる。

$$r_2 = \frac{F_2 + f}{f} \sqrt{\frac{1}{a\pi} \left(\arctan \frac{r_1}{F_1} - b \right)} \quad (25)$$

4.5 立体角-面積線形特性

立体角-面積線形特性 (Solid angle-Area constant resolution) とは、3次元環境における球冠の面積と、対応する画像中の面積とが線形関係となる特性のことである。この特性を持てば、3次元環境中においてカメラからの立体角が等しければ、画像中の画素数が等しくなる。このため、3次元環境を 360 度、可能な全ての入射角に対して公平な処理が行える。さらに、3次元環境中のある物体までの距離が既知であれば、画像に写る物体に対応する画素数から面積を測定することができるため、画像計測への応用に適している。

単一視点 O から距離 D だけ離れた球面上の点 P から放たれた光が、図 3 の画像点 p に到達する様子

を示したものである。球冠の面積は、カメラへの入射角 ϕ を用いて $2\pi D^2(1 - \cos \phi)$ と表せる。また、画像中の円の面積は画像座標 $p = (r_3, 0)$ より πr_3^2 と求められる。よって、オフセット b を最小視野角とすると、式 (15) は式 (26) のように書き表される。

$$2\pi(1 - \cos \phi) = a \cdot \pi r_3^2 + 2\pi(1 - \cos b) \quad (26)$$

ただし、球の半径 D は任意なので、式 (26) では簡単のため $D = 1$ としている。

この式に、式 (1), (4) を代入することによって、立体角-面積線形特性の条件式 (27) が得られる。

$$r_2 = \frac{F_2 + f}{f} \sqrt{\frac{2}{a} \left\{ \cos b - \cos \left(\arctan \frac{r_1}{F_1} \right) \right\}} \quad (27)$$

5 実験

提案手法を用いて、平行射影による単一視点と均一解像度特性を併せ持つ全方位カメラモデルを設計した。

本提案手法では、3章で求めた単一視点の条件式と、4章で求めた均一解像度特性の条件式とを連立微分方程式として解くことによって、ミラー形状を導出する。すなわち、単一視点の式 (9), (10) に加え、目的の用途に応じて、式 (17), (20), (23), (25) や (27) の中から均一解像度をなす関係式を 1 つ選択して、合計 3 本の式の連立微分方程式を解くことで、単一視点と所望の均一解像度特性を併せ持つミラー形状 F_1, F_2 を得る。

今回、連立方程式を解く方法として、ルンゲクッタ法を用いた。解く際には、初期値 $F_1(0), F_2(0)$ の値、線形パラメータ a, b を与えた。以下において、設計した提案カメラモデルの幾何学的特性のシミュレーション結果を示す。幾何特性を評価するにあたって、光学設計ソフト「ZEMAX」(ZEMAX Development Co.) と 3DCG ソフト「LightWave3D 9」(NewTek Inc.) を用いた。評価を行うにあたって、表 1 のパラメータを用いて設計したカメラを使用した。今回は例として、入射角-半径線形特性、水平座標-半径線形特性、垂直座標-半径線形特性、入射角-面積線形特性、立体角-面積線形特性を示した。

5.1 単一視点の評価

表 1 のパラメータを用いて設計した、均一解像度特性を持つカメラモデルに対して、光学設計ソフト「ZEMAX」を用いて光路追跡を行った。結果を図 5, 6 の左図に示す。中心射影、平行射影に関わりなく各均一解像度特性を持つカメラモデル全てにおいて、

表 1: 設計に用いたパラメータ

(a) Perspective projection model

Resolution property	Surface type	$F_1(0)$	$F_2(0)$	a	b
Angle-Radius	Convex & Convex	5	35	8	$\frac{\pi}{4}$
Horizontal-Radius	Convex & Convex	20	40	15	0
Vertical-Radius	Convex & Convex	5	25	6	-16
Angle-Area	Convex & Convex	8.5	68.5	18	$\frac{\pi}{4}$
Solid angle-Area	Convex & Convex	8	58	70	$\frac{\pi}{4}$

(b) Orthographic projection model

Resolution property	Surface type	$F_1(0)$	$F_2(0)$	a	b
Angle-Radius	Convex & Convex	0.47	6.47	3	$\frac{\pi}{4}$
Horizontal-Radius	Convex & Convex	0.5	1.5	25	0
Vertical-Radius	Convex & Convex	0.35	5.35	4	0.5
Angle-Area	Convex & Convex	0.25	3.25	7	$\frac{\pi}{4}$
Solid angle-Area	Convex & Convex	0.5	5.5	10	$\frac{\pi}{4}$

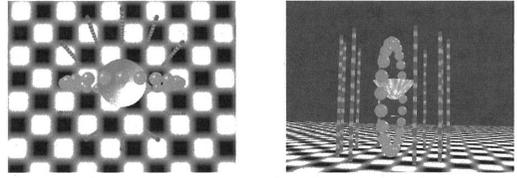
全ての入射主光線が第1ミラー内部で1点に交わっていることが観測できるので、提案カメラモデルが単一視点を保持していることが確認できた。

5.2 均一解像度特性の評価

同様に、表1のパラメータを用いて設計した各均一解像度特性のカメラモデルに対して、3DCGソフト「LightWave 3D」を用いて撮像画像のシミュレーションを行い、設計通りの均一解像度特性を実現できているかを確認した。

撮像シミュレーションを行った環境は、図4に示すように、床面に対してカメラモデルの光軸が垂直になるように配置したものである。床面は市松模様で、そこから垂直に等間隔の縞模様の円柱が立ててある。また、カメラ座標-R-Z面においてカメラモデルの単一視点を中心とした円上に15度間隔で球が配置されている。以上の環境下で撮像シミュレーションをした結果を図5, 6右に示す。

図5-a, 6-a右図より、いずれも撮像した球の中心が等間隔になっていることから、中心射影、平行射影に関わらず設計通り入射角-半径線形特性を満たしていることが確認できた。図5-b, 6-b右図より、いずれも床面の市松模様が画像の位置に関わりなく均等な市松模様が撮像できていることから、中心射影、平行射影に関わらず設計通り水平座標-半径線形特性を満たしていることが確認できた。図5-c, 6-c右図より、いずれも撮像した円柱の縞模様であることから、中心射影、平行射影に関わらず設計通り垂直座標-半径線形特性を満たしていることが確認できた。図5-d,e, 6-d,e右図より、いずれも画像中の球の面積がほぼ均等となっていることから、中心



(a) Overhead view.

(b) Side view.

図 4: 撮像環境

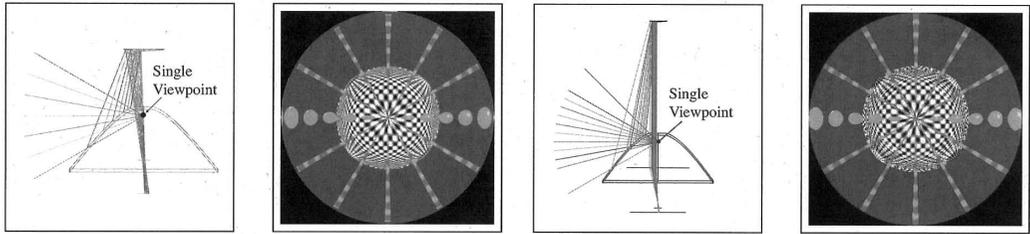
射影、平行射影に関わらず設計通り入射角-面積線形特性および立体角-面積線形特性が実現されていることが確認できた。

6 おわりに

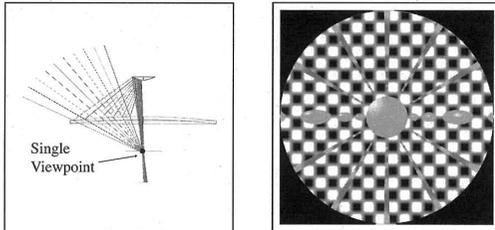
本稿では、単一視点と均一解像度特性を併せ持つ全方位視覚カメラモデルを中心射影のみに絞ったものから平行射影にも対応するように拡張しそのモデル化を行った。このモデルにおいて、単一視点と均一解像度特性の条件式を導出し連立微分方程式として数値的に解くことにより、提案カメラモデルの幾何特性が、中心射影でも平行射影でも実現できることをシミュレーションにより確認した。また、従来より提案されてきた5つの均一解像度特性、すなわち入射角-半径線形特性、水平座標-半径線形特性、垂直座標-半径線形特性、入射角-面積線形特性、立体角-面積線形特性の全てにおいて本モデルを用いて実現できることを確かめた。今後は、平行射影のモデルと中心射影のモデルの光学特性を比較することにより、どちらのモデルが光学的に有利であるか比較検討する。これにより、単一視点と均一解像度を持つセンサの最適化の議論をさらに包括的に行うことが出来る。さらにこれらの解析や最適化に基づいて実機を製作することで、本提案の実用性や有用性を確認する。

参考文献

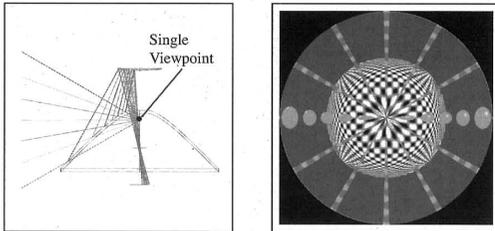
- [1] R. Benosman and S. B. Kang, "Panoramic Vision: Sensors, theory, and Applications," Springer.
- [2] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman, "Image-based homing," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.620-625, 1991.
- [3] Y. Yagi, S. Kawato, "Panorama Scene Analysis with Conic Projection," Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.181-187, 1990.
- [4] K. Yamazawa, Y. Yagi, and M. Yachida, "Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection," Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, no.2, pp.1029-1034, 1993.
- [5] V. Peri and S. K. Nayar, "Omnidirectional video



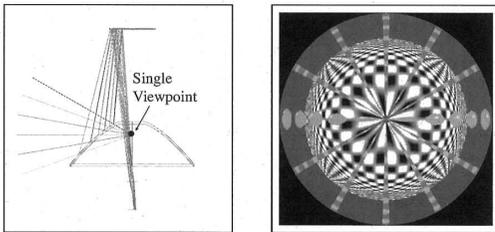
(a) Angle-Radius constant resolution.



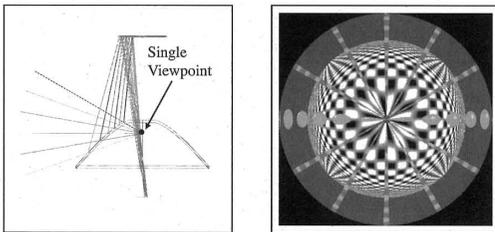
(b) Horizontal-Radius constant resolution.



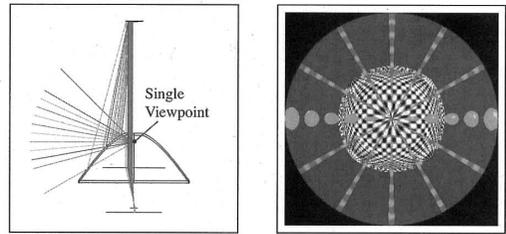
(c) Vertical-Radius constant resolution.



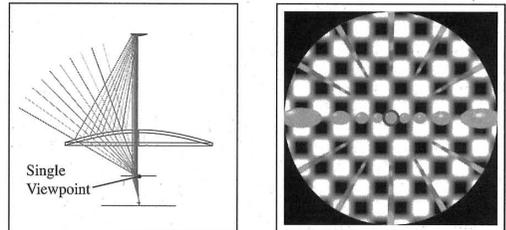
(d) Angle-Area constant resolution.



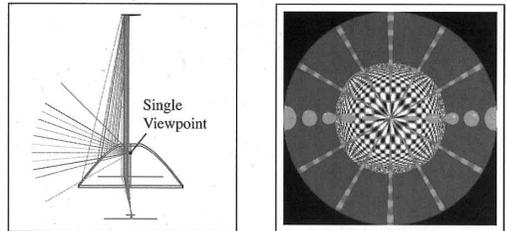
(e) Area-Area constant resolution.



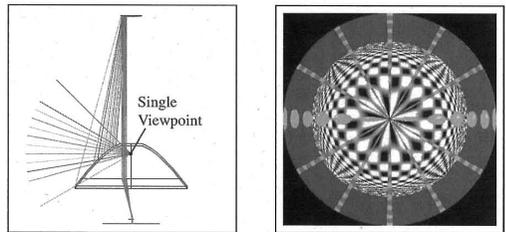
(a) Angle-Radius constant resolution.



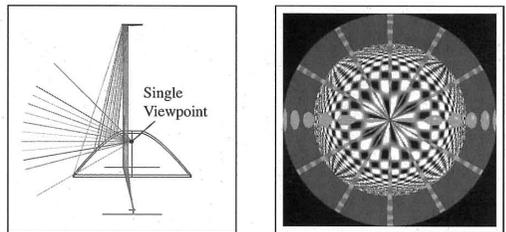
(b) Horizontal-Radius constant resolution.



(c) Vertical-Radius constant resolution.



(d) Angle-Area constant resolution.



(e) Area-Area constant resolution.

図 5: 中心射影モデルのシミュレーション結果

図 6: 平行射影モデルのシミュレーション結果

- system,” Proc. U.S.-Japan Graduate Student Forum in Robotics, pp.28-31, 1996.
- [6] M. V. Srinivasan, “A New Class of Mirrors for Wide-angle Imaging,” Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks, June 2003.
 - [7] J. Gaspar, C. Decco, J. Okamoto Jr and J Santos-Victor, “Constant Resolution Omnidirectional Cameras,” Proc. Int. Workshop on Omnidirectional Vision, pp.27-34, June 2002.
 - [8] T. Conroy and J. Moore, “Resolution invariant surfaces for panoramic vision systems,” Proc. Int. Conf. Computer Vision, pp.392-397, 1999.
 - [9] A. Hicks and R. Bajcsy, “Catadioptric sensors that approximate wide-angle perspective projections,” Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, pp.97-103, 2000.
 - [10] R. A. Hicks, R. Perline, “Equiresolution catadioptric sensors,” Applied Optics, Volume 44, Issue 29, pp.6108-6114, 2005.
 - [11] R. Swaminathan, M. D. Grossberg and S. K. Nayar, “Non-Single Viewpoint Catadioptric Cameras: Geometry and Analysis,” Int. J. Computer Vision, Vol. 66, No. 3, pp.211-229, 2006
 - [12] K. Yoshida, H. Nagahara and M. Yachida, “An Omnidirectional Vision Sensor with Single Viewpoint and Constant Resolution,” The Institute of Electronics, Information and Communication Engineerings, Vol. J90-D, No. 8, pp. 1912-1920, Aug, 2007.
 - [13] Hajime Naghara, Koji Yoshida, Masahiko Yachida: “An Omnidirectional Vision Sensor with Single View and Constant Resolution”, Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV2007), Rio de Janeiro, Brazil, Oct, 2007
 - [14] R. Andrew Hicks, Marc Millstone and Kostas Daniilidiis, “Realizing any central projection with a mirror pair,” Applied Optics, Volume 45, Issue 28, pp.7205-7210, October 2006
 - [15] R. Nelson and J. Aloimons, “Finding motion parameters from spherical motion fields (or the advantage of having eyes in the back of your head),” Biological cybernetics, Vol. 58, No. 4, pp.261-273, 1988.
 - [16] T. Nakamura and H. Ishigro, “Automatic 2D Map Construction using a Special Catadioptric Sensor,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robotics and Systems, pp.196-201, 2002.