

時分割を用いた全周囲縮小画像取得システム

竹田 厳太郎[†] 圓道 知博[†] 藤井 俊彰^{††} 谷本 正幸[†]

[†]名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

^{††}東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 S3-61

E-mail: [†]takeda@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}{yendo,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp,
^{†††}fujii@it.ss.titech.ac.jp

あらまし 実写画像をもとに3次元情報を構築するImage Based Renderingの研究が盛んに行われている。本研究では、物体の3次元情報を取得するための、新しい全周囲画像取得システムを提案する。従来の放物面鏡を用いた画像取得システムでは、被写体を大きくすると、装置が大きくなってしまいう問題がある。そこで提案システムは高速度カメラと回転する斜面鏡、小さな凸面鏡を円形に配置したものをを用いる。被写体の周囲に配置された凸面鏡が各視点での被写体の縮小虚像をつくるため、従来システムより小型化が可能である。凸面鏡が生成した縮小像を、ミラー走査により1視点ずつ高速度カメラで取得する。またこの提案システムについて光線追跡法を用いたシミュレーションにより原理を確認した。取得画像に生じた歪みを補正することにも成功した。

キーワード 全周囲画像取得, 時分割, 凸面鏡, 高速度カメラ, 光線追跡法, 歪み補正

Time-multiplexed All-Around Convergent Views Acquisition System

Gentaro TAKEDA[†], Tomohiro YENDO[†], Toshiaki FUJII^{††}, and Masayuki TANIMOTO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

^{††} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550 Japan

E-mail: [†]takeda@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}{yendo,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp,
^{†††}fujii@it.ss.titech.ac.jp

Abstract In this paper, we present a new image acquisition system. The proposed system can capture the dynamic scene from all-around views. This system consists of 360 convex-mirrors, a tilted flat spinning mirror, and a high-speed camera. 360 convex-mirrors are put around an object and these form virtual images of it. The size of this system is smaller than that of early system since convex-mirrors form reducing virtual images. High-speed camera can acquire multi viewpoint images by mirror scanning. Here, we simulated this system with ray tracing and confirmed the principle. And we succeed to compensate distortions on these pictures.

Key words Acquisition System, time-multiplexing, Convex-mirror, High-speed camera, Ray Tracing, Correcting Distortion

1. ま え が き

実写画像をもとに任意の視点から見た画像を生成する技術は、Image Based Rendering と呼ばれ、その代表例として、Light Field [1], 光線空間法 [2] があげられる。光線空間とは、物体の見え方に基づいて3次元情報を記述したものである。光線空間法では非常に密なカメラ感覚で撮影された映像を基に4次元(3次元+時間)の空間データが構築される。その光線空間をもとに自由視点画像を生成するには、その2次元部分の空間を切り

出すことのみで可能である。つまり、十分な光線情報を取得さえできれば、簡単に写実的な画像を生成することができる。しかし、その取得には多くのコストが必要になり、特に隣接するカメラ間隔について、Chai らによる Plenoptic Sampling [3] や 國田らの等価被写界深度 [4] を満たす必要がある。このサンプリング間隔は、隣接カメラにおいて、対応点の視差が±1pixel以内という非常に密な間隔で、これを満たすために、静止シーンを対象とした一台のカメラを機械制御で微小に動かして撮影することが一般的であった。近年、Wilburn らにより動的シー

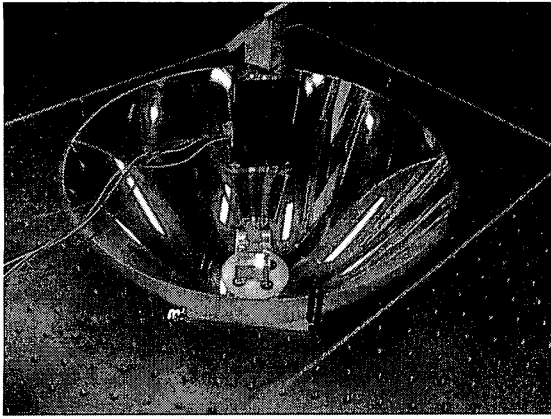


図1 放物面鏡を用いた取得装置

ンを記録する LightField Camera [5] と称したものが報告されている。これは基本的には多視点画像を取得するものであり、密な光線情報の取得は困難である。真に密な光線空間を取得する研究としては、4次元の光線空間を何らかの方法で2次元に変換し、それを2次元映像として取得する方法がある。カメラアレイを用いる方法 [6] やレンズアレイを用いた LIFLET [7] がこれにあたる。実際にカメラで密な光線空間を取得する場合、カメラを密に配置するには限界がある。また、視点数を増やすためにはカメラ台数を増やす必要がある。カメラ台数を増やすことは、各カメラの位置合わせを行う必要性や、カメラの内部パラメータの違いにより生じる取得画像の色調や画像面のずれを補正するコストが増加するという問題がある。

そのため、藤井らにより一台のカメラで密な光線空間を取得する装置 [8], [9] が実現されている。この装置の原理は、二枚の放物面鏡により実像を作り、それを走査ミラーで反射させ高速度カメラで光線空間を取得するものである。この装置の特徴は、実像をミラーで走査させることによって、被写体に負荷をかけずに一台のカメラで様々な角度から撮影可能な点である。これはカメラを円形に配置して撮影することと等価である。カメラアレイでの撮影では、多視点での撮影をカメラ台数を多くすることによって実現している。対して、この装置では高速度カメラで被写体を高速に撮影し、走査ミラーで視点を巡回させることによって、時分割で実現することができる。しかし、この手法では大きな物体（人間の顔程度のもの）を撮影することができなったり、歪みの補正ができなったりという問題がある。そこで、本研究では放物面鏡を用いる代わりに小さな凸面鏡を被写体の周りに円形に配置し、凸面鏡が生成した縮小虚像を取得することにより、これらの問題を解決し、人間の顔の大きさ程の物体が撮影できる時分割の光学系を提案する。また、それにより生じた歪みを補正する。これらをシミュレーションによって確認する。

2. 従来の全周囲画像取得手法

2.1 ターンテーブルを用いる手法

ターンテーブルを用いる手法では、回転するターンテーブル



図2 撮影方法

に被写体をのせ、それをテーブルの外側から撮影することで、被写体の全周囲画像を取得する。この手法では、被写体を少しずつ回転させながら撮影を行うため、回転角を微小にすることで視点数を増やすことができる。この手法では、全周囲画像取得に必要なカメラの方向合わせは、1台のカメラをターンテーブルの中央に向ける簡易な作業でよい。しかし、動的シーンの取得には被写体を高速に回転させる必要があるため不可能であり、実質的に静的シーンでのみ利用される。

2.2 カメラアレイを用いる手法

カメラアレイを用いる手法は、複数台のカメラを被写体を中心に円形に配置することで撮影を行う。この手法では、1台のカメラが1つの視点に相当する。そのため、全てのカメラを同期させて取得することで、多視点の動的シーンの画像を取得することが出来る。ただし、この手法では視点数の増加に伴いカメラの数も増加するため、コストが視点数にほぼ比例する。また、カメラの物理的な位置や方向のみではなく、カメラ内部のレンズの向きなどの内部パラメータを考慮して位置や方向を調節しなければならず、実際には位置合わせは難しい作業である。また、カメラの物理的な大きさにより非常に多くの視点での画像取得が不可能であるため、疎なカメラ配置で取得した画像を元にして、実際には取得できていない視点での取得画像を推定する「補間」という技術を用いて解決する必要がある。しかし現段階では、補間した画像の品質には問題がある。

2.3 放物面鏡を用いた手法

カメラ配置やターンテーブルの手法での問題を解決するために、鏡を用いて映し出される被写体の像を取得する手法がある。この手法は被写体の全周囲画像を取得する手法であり、本提案手法と同様に時分割で一定の範囲の視点で撮影した画像を取得するものである。この装置は図1, 2に示すような装置である。この装置は2枚の放物面鏡と高速度カメラ、水平方向にモーターで回転する鏡で構成されている。この装置での取得法は、2枚

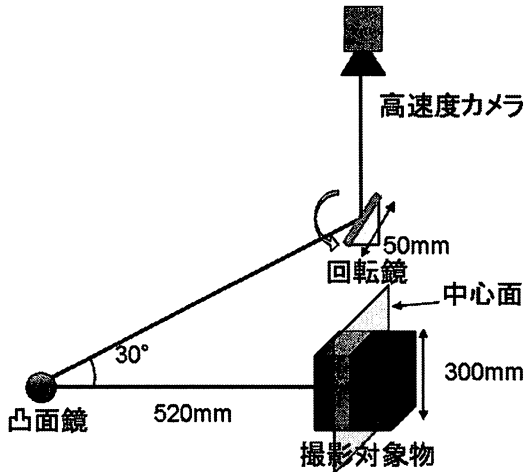


図5 シミュレーション条件



図6 取得結果

- 被写体中心-凸面鏡の距離 520mm
- 回転鏡 50mm 四方の正方形, 斜度 60°
- 高速度カメラ 解像度 300 × 300pix
- 撮影フレーム 10,800fps

シミュレーションの概略を図5に示す。この条件下では式2で表される、倍率Zは0.0096倍になる。装置全体の大きさはおよそ1m四方に収まる程の大きさである。

4.3 実験結果

先に述べたシミュレーション状況において、結果の例として被写体の正面からの視点での取得画像と、60°回転した視点での取得画像を図6に示す。

シミュレーション実験の結果、被写体の全周囲の画像を1°間隔で取得できている。しかし、取得画像は中心部分が膨らんでいるような歪みが生じているこれは凸面鏡の球面に反射した光線により作られる虚像を取得しているためだと考えられる。そのため、この歪みを補正する必要がある。

5. 歪み補正

5.1 奥行きによる歪み

生じた歪みを補正するために、歪みの特性について考える。この歪みが奥行き依存性があるかということが、補正を行う際に重要になる。放物面鏡を用いた手法では、取得画像が奥行き

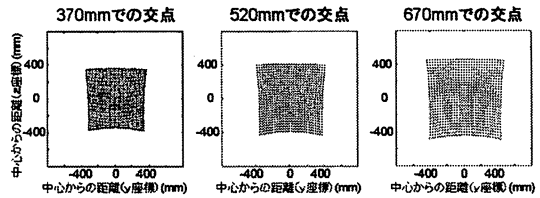


図7 奥行きによる歪み

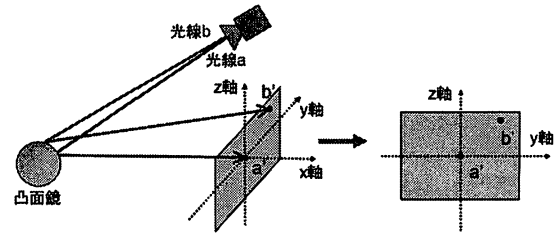


図8 光線の通過点 (提案手法)

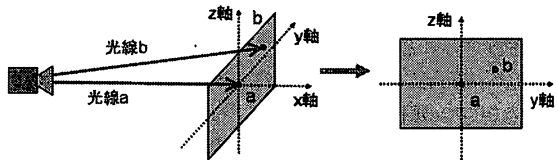


図9 光線の通過点 (直接撮影)

によって変化する性質があったため、補正を完全に行うということは不可能であった。しかし、歪みに奥行き依存性がない場合には、生じた歪みはレンズ歪みと同等のものと考えられることができるため、補正が可能である。そのため、取得画像に見られる歪みは奥行きによって変化するものであるか、シミュレーション実験を行い確認した。

図8に示すようにカメラから出た光線が凸面鏡に反射した先にy-z平面を設置する。平面と交わる点を記録した。凸面鏡から平面までの距離を変化させて、それぞれについてシミュレーションを行った。シミュレーション条件は以下に示す。

- 凸面鏡 半径 10mm
- 光線数 30 × 30 900本
- 凸面鏡とy-z平面との距離
 - 370mm
 - 520mm
 - 670mm

高速度カメラの位置、凸面鏡の位置は図5と同じ条件で行った。その結果を図7に示す。

5.2 シミュレーションに基づく画像補正の手法

図7より、交点の分布は3つの奥行きで互いに相似形であることがわかる。すなわち、凸面鏡の反射により生じる歪みは奥行きに依存しないことがわかる。よって以下の方法により補正ができる。

図6で取得した画像は、光線追跡法により光学系を通して取得されたものである。その画像の補正をするために、被写体を

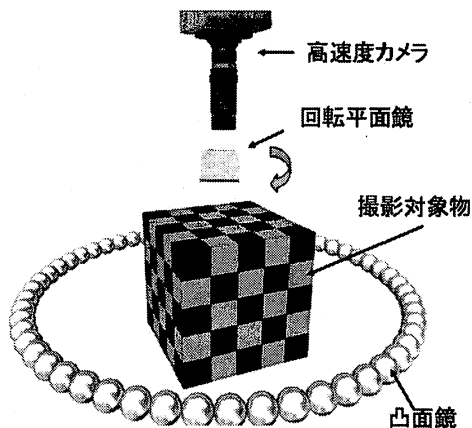


図3 提案する光学系の概略

の放物面鏡により被写体の実像を作り、その像を回転鏡で走査した画像を取得するものである。回転鏡の角度に同期させて画像を撮影できる機能を持つ高速度カメラを用いて、回転鏡内の像を撮影することで、1台のカメラでの取得が可能であり、また回転鏡を利用して視点を移動させているため、時分割により様々な視点での画像を取得している。また、回転鏡の走査時間を非常に短くすることで、動的シーンの画像取得が可能となる。

しかし、この装置では放物面鏡によって作りだされる実像は被写体と同じ大きさの像であるため、大きな被写体の撮影を行おうとする際、その被写体を覆う程の大きな放物面鏡と、被写体と同じ大きさの回転鏡を用いなくてはならない。人間の顔程度の大きさの被写体を撮影しようとする際、巨大な装置が必要になってしまうという問題がある。また、放物面鏡の特性により取得画像に補正困難な歪みが生じてしまうという問題もある。

3. 提案手法

3.1 提案光学システム

提案する光学システムを図3に示す。提案する光学系は高速度カメラと360個の凸面鏡、回転する平面鏡で構成される。撮影対象の周りに凸面鏡を360個、1度間隔に配置する。各凸面鏡には撮影対象物の虚像が映り、そのひとつひとつが異なる視点の像となる。撮影対象物上部に傾けた平面鏡を配置し、回転させて作り出された360の虚像が順に映るように走査する。最後に装置上方に固定した高速度カメラを用いて1度間隔の全周囲画像を取得する。この斜面鏡の回転速度を、1視点に必要なフレーム数と一致させること、高速度カメラの撮影速度を回転回数×視点数にして撮影することによって、全視点での動的シーンを撮影することが可能である。

3.2 像の形成

本研究では、被写体の縮小像を結像させる光学系として凸面鏡を用いた。凸面鏡は図4に示すように虚像を形成する。凸面鏡の曲率半径をRとすると、凸面鏡の焦点距離fは式1で表される。

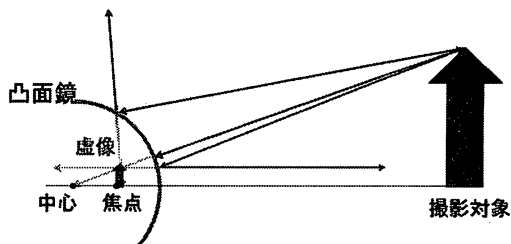


図4 虚像の形成原理

$$f = \frac{-R}{2} \quad (1)$$

被写体と鏡面への距離をaとすると、結像虚像の倍率Zは式2で表される。

$$Z = \frac{f}{a} \quad (2)$$

凸面鏡を用いることで、作られる虚像は凸面鏡の球面によって形が変形されると考えられる。しかし、変形が起こらない平面鏡を用いる場合、被写体を鏡に写すためには鏡と被写体の距離を大きくしなくてはならず、360視点での像を写すためには非常に大きな装置が必要になってしまう。そのため、式2でのZの値を小さなものとし、装置の縮小化を行うことが必要である。

3.3 像の走査

凸面鏡に映る像は被写体に対して円周上に配置されているため、固定したカメラでの撮影ができない。そこで被写体の上部に傾けた斜面鏡を図5のように配置し、凸面鏡に映された各視点での像を回転鏡に映し出す。また、この傾斜した斜面鏡を、光学系の中心を軸として回転させることで、各凸面鏡に映し出された被写体の像を順番に映し出すことが可能である。高速度カメラはこの回転する斜面鏡を真上から撮影する。高速度カメラは、凸面鏡と斜面鏡で2回反射された被写体を取得することになる。撮影時、高速度カメラのシャッターを切るタイミングと回転鏡が凸面鏡を映し出すタイミングの同期をとる必要がある。また、凸面鏡の鏡面が連続的でないためシャッターを切る時間を非常に短い時間で行わなくてはならない。そのためには多くの光量が必要となる。

4. 画像取得シミュレーション

4.1 シミュレーション装置の構成

提案する光学システムについて、光線追跡法を用いたシミュレーションを行った。人間の顔程度の大きさの物体を撮影することを想定して、1辺30cmの立方体の全周囲画像を取得した。平面鏡に映る像を高速度カメラで撮影するシミュレーションをした。

4.2 シミュレーション条件

シミュレーション条件を以下に示す。

- 被写体 300mm 四方の格子模様の立方体
- 凸面鏡 半径10mm, 360個, 配置間隔1°
- 撮影視点数 360視点

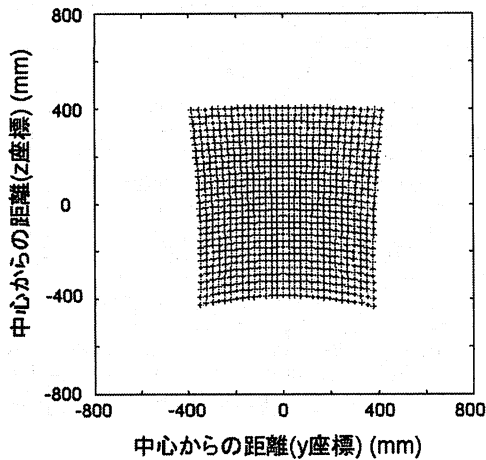


図 10 提案手法で撮影した場合

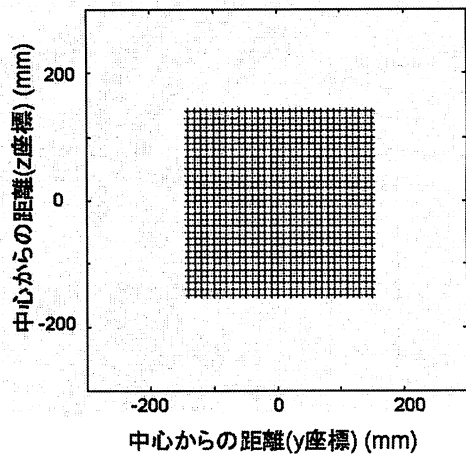


図 11 直接撮影した場合

直接撮影した理想的な状況を想定し、理想的な光線と提案システムを用いて撮影した際の光線との比較を行い、補正を行う。まず、被写体を直接撮影した理想的な状況での光線を考える。図 8 に示すように、カメラから光線を発する。このカメラから出た光線の先に $y-z$ 平面を設置する。カメラから出た光線とこの $y-z$ 平面が交わる点を、平面上の 2 次元座標 $I_{ij}(y_{ij}, z_{ij})$ として記録しておく。ここで (i, j) は、理想画像の画素 1 点を表し、 (y_{ij}, z_{ij}) は画素 (i, j) が通る光線が図 8 の右側と交わったときの平面上の座標である。同様に、提案システムを用いた状況での光線を考える。(図 9) カメラから出た光線と平面が交わる点を平面上 $P_{i'j'}(y_{i'j'}, z_{i'j'})$ として記録しておく。ここでも (i', j') は画像上の画素 1 点を表している。ここまでで、直接撮影した理想状況の場合と提案システムの場合の交点座標が算出されている。この座標をそれぞれ図 10, 11 に示す。同一平面において、画素値を取得する座標がずれていることを示しており、図 10 から図 11 にマッピングされている座標と近いものを順に選んで補正を行う。そのために、 I_{ij} と $P_{i'j'}$ を全探索して、座標の一致する I_{ij} と $P_{i'j'}$ の組み合わせ (i, j) と (i', j') を探す。最後に、歪んだ画像の (i', j') の色情報を (i, j) の画素にコピーし、新たな補正後の画像を作成する。図 8, 9 では平面上の点 b の位置に b' の画素をコピーすることとなる。このような手法で図 6 の取得画像の補正を行う。

5.3 画像補正結果

提案手法で取得した画像(図 6)の補正を行った結果を図 12 に示す。原画像に生じていた中央が膨らんだような歪みが補正されている。実際に被写体を撮影する際でも、凸面鏡の曲率半径や配置などのパラメータを与えることによって、この手法で補正が行える。また、図 12 は画像の一部が白くなっているが、これはこの白い部分の画素に対応する、取得原画像の画素が存在しなかったことによるものである。

6. 考 察

本研究で提案した手法は、凸面鏡を複数個つなぎ合わせた鏡

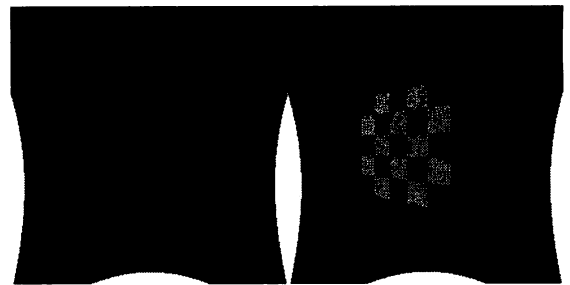


図 12 補正結果

を用いて光線の走査を行った。鏡面が連続面でないため、回転鏡により高速度カメラが像を捉える時間が非常に短くなってしまふ。この場合、各視点で像を取得しようとする際に、回転鏡の回転角度と高速度カメラのシャッタータイミングを厳密に同期させる必要がある。また、撮影時間が非常に短いために、必要光量が膨大なものになってしまうという問題がある。提案手法は、時分割で撮影することによって、多視点での動シーン撮影を可能にしたということができるが、鏡面が連続的ではないために撮影時間を非常に短くする必要があり、時分割でのメリットを活かしきれていないといえる。問題を改善するためには、先行研究で用いられた放物面鏡のように、鏡面が連続的なものを用いる必要がある。そこで、楕円面鏡を用いた光学系の検討を行った。

楕円面鏡を重ね合わせた光学系(図 13)で光線追跡法でのシミュレーションを行った結果、図 14 のような像を取得した。これは像を 10 分の 1 以下に縮小したものである。鏡面が連続的な光学系においても縮小像の取得が可能である。しかし、光線は取得できているものの、図 14 を見て分かるように歪みが非常に大きい。また、歪み方が奥行きに依存するものであるため、今後、反射面や歪みの解析、補正手法について考える必要がある。

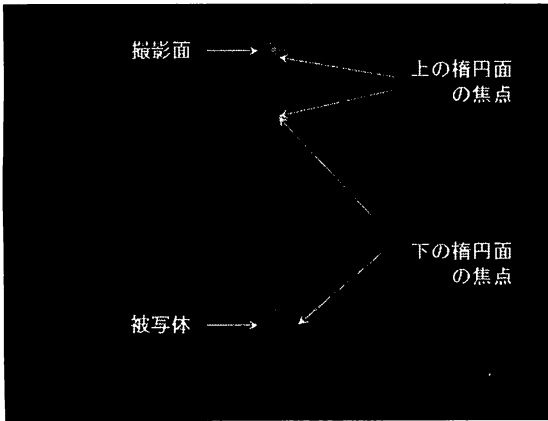


図 13 楕円面鏡を用いた光学系

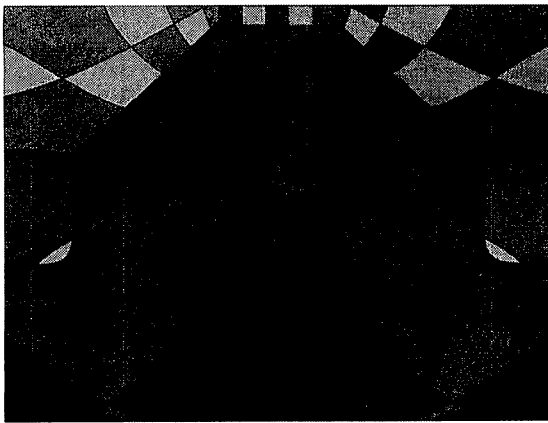


図 14 楕円面鏡による取得画像

7. むすび

今回、凸面鏡と回転する平面鏡、高速度カメラを組み合わせた新しい時分割を用いた全周画画像取得システムを提案した。被写体の周りに並べた 360 個の凸面鏡により各視点での縮小虚像をつくり、その像を回転する平面鏡により走査し、高速度カメラで取得するというものである。従来の全周画画像取得システムと比べ大きな被写体の撮影が可能である。シミュレーションの結果、360 視点で 300mm 四方の被写体の画像を取得できることを確認した。取得した画像には凸面鏡の特性による歪みが生じていたが、その歪みが奥行き依存のものでなく補正が可能であることが確かめられた。

今後の課題としては高速度カメラのシャッターを切るタイミングを回転鏡との同期をとる方法、凸面鏡の大きさや配置位置の最適なパラメータの発見、撮影時に必要な光量をいかにして与えるかの検討が必要である。また連続鏡面での取得系についても設計・解析を行っていく。

謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構の高度通信・放送研究開

発に係る委託研究「多並列・像再生型立体テレビシステムの研究開発」によって行われた。

文 献

- [1] M.Levoy, P.Hanrahan, "Light Field Rendering" ACM SIGGRAPH '96, pp.317-42, 1996.
- [2] 藤井, 他 "光線群による 3 次元空間情報の表現とその応用," テレビジョン学会誌, Vol.50, No.9, pp.1312-1318,1996
- [3] J.Chai et al., "Plenoptic Sampling," SIGGRAPH 2000, pp.307-318(2000).
- [4] 國田, 他 "多眼カメラを用いた任意視点人物像の実時間生成システム," 信学論, J84-D-II, No.1, pp.189-138(2001)
- [5] B.Wilburn et al. "The Light Field Video Camera," SPIE Electronic Imaging, 4676, 2002.
- [6] B.Wilburn et al. "High Performance Imaging Using Large Camera Arrays," SIGGRAPH' 05, pp.765-776, 2005.
- [7] 河, 他 "レンズアレイを用いた実時間全焦点自由視点画像合成システム," 映像情報メディア学会誌 Vol.59, No.10, pp.1483-1487(2005)
- [8] 藤井, 他 "走査光学系と高速度カメラを用いた光線空間のリアルタイム取得装置," 3D Image Conference, pp.197-200(2004)
- [9] 眞能啓輔, 岡道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸 "ミラー走査による全周画光線取得実験," 電子情報通信学会技術研究報告会.IE, 画像工学, Vol.107, No.380 pp. 123-127,2007