利用者視点での超広視野映像の撮影機構に関する研究

A Study on Recording Mechanism of Wide-view Parallax-free User's View

1071007

研究代表者　　大阪大学 サイバーメディアセンター　准 教 授　　清川　清

[研 究 の 目 的]

人間の視線と注視点を追跡記録する撮影装置は人間工学，心理学，医学，産業の各分野で幅広く用いられている．しかし，従来の利用者視点映像のカメラ視点は肉眼の「近傍」であり肉眼自体ではない．この場合，肉眼とカメラ視点に位置ずれが生じ，特に近距離では利用者が実際に観察する情景とは大きく異なる映像が撮影される．これを解決するにはカメラ視点を肉眼と光学共役な位置に配置する必要があるが，平板ハーフミラー等を用いる従来手法では広視野の映像を撮影できない．一方，人の視野角は水平 220 度，垂直 135 度程度と極めて広い．しかし，魚眼レンズや全方位視覚センサを前頭部や頭頂部に搭載して広視野の利用者視点映像を撮影する従来手法では，やはり視点の位置ずれの問題が発生する．そこで，本研究では利用者視点と広視野という二つの要求を同時に満たす，広視野頭部搭載型カメラを提案し，その有用性を検証することを目的とする．

[研究の内容、成果]

1．広視野頭部搭載型カメラの概要

提案する広視野頭部搭載型カメラは図 1 に示すように小型カメラと双曲面ハーフミラーで構成される．小型カメラは，利用者の眼球と双曲面ハーフミラーに映り込んだ情景を撮影する．双曲面ミラーは内側焦点に入射する光線がミラー面で反射して外側焦点に収束する性質があるので，内側焦点を視点とする全方位映像を撮影できる．そこで，小型カメラを双曲面の外側焦点にカメラ主点が一致するように設置し，もう一つの焦点に眼球中心を配置する．基本的な光学的性質は全方位視覚センサと同一であり，単一視点という光学特性を持つ．これにより，カメラで撮影した映像を双曲面の焦点位置を視点とした透視投影画像等に変換することができる．また，提案システムでは，眼球中心と双曲面の焦点が一致するよう設計することで，透視投影画

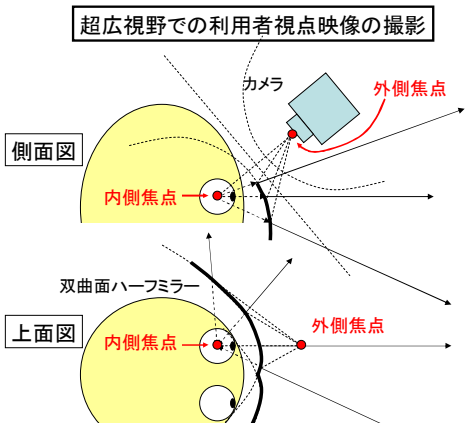


図 1: 基本レイアウト

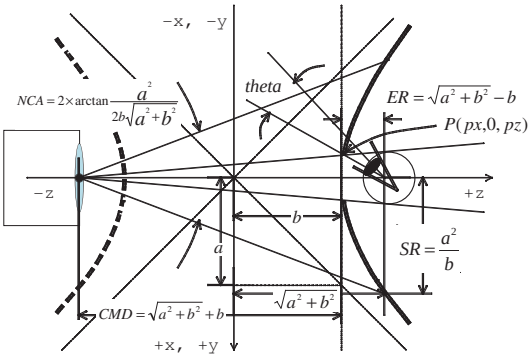


図 2: ミラーパラメータ

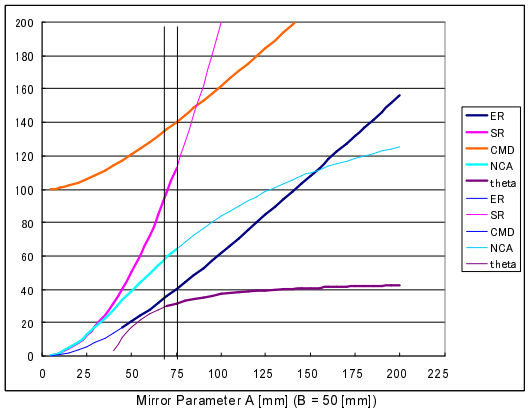


図 3: ミラーパラメータ a, b, ER, PMD, NCA の関係

像の視点を利用者視点と一致させる．つまり，双曲面ハーフミラーには利用者が観察する広視野の映像がそのまま映り込み，カメラ視点が肉眼そのものの映像となる．提案システムは，利用者視点での撮影と広視野性を同時に満たす．

2. ミラーパラメータ

二葉双曲面は一般に次式 (1) で与えられる．広視野頭部搭載型カメラの設計に際しては，パラメータ a, b 間に様々なトレードオフがある．図 2 に主なパラメータの関係を示す．

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

カメラ光軸および双曲面の軸は，視線検出が容易でかつ視界の妨げとならないよう，観察者視点下側 45° 方向とした．このレイアウトで，各種パラメータの詳細を検討する．眼球とミラーの最短距離であるアイリリーフ ER は凡そ以下の式 (2) で与えられる．眼鏡を着用した利用者を考慮すれば ER は 20mm 以上である必要がある．即ち，この場合 a は大きいほうがよい．

$$ER = \sqrt{a^2+b^2} - b \qquad (2)$$

ミラー頂点とカメラのレンズ中心の距離 CMD は以下の式 (3) で与えられる．CMD は頭部搭載型カメラ全体のサイズに直結し，実用的には 200mm 以下がよい．即ち，a は小さいほうがよい．

$$CMD = \sqrt{a^2+b^2} + b \qquad (3)$$

観察者の両眼視野 180° を撮影するには，耳側の視野が真横に達する必要がある．これに必要なカメラの撮影画角 NCA は以下の式 (4) で与えられる．市販のカメラを利用する場合，NCA は約 60° 以下であることが望ましい．即ち，a は小さいほうがよい．

$$NCA = 2 \times \arctan \frac{a^2}{2b\sqrt{a^2+b^2}} \qquad (4)$$

また，観察者の真横方向まで撮影するためのミラーの横方向のサイズもある程度小さな値に制限したい．眼球から真横方向のミラーまでの距離 SR は以下の式 (5) で与えられる．SR は実用的には 100mm 以下にすることが望ましい．即ち，a は小さいほうがよい．

$$SR = \frac{a^2}{b} \qquad (5)$$

さらに，観察者の下側視野の確保にも注意する必要がある．カメラは観察者の前下方向から観察者の眼球方向を撮影するが，その際眼球自体を撮影するためその部分にはミラーが存在しない．そのため，その領域に対応する観察者の下側視野は撮影できず利用者視点画像から欠落する．しかし，正面方向から下側の視野も手元での作業活動の記録等に重要であるためこの欠

落部分は小さくしたい．具体的には，下側視野角 $theta$ は 30° 程度の撮影が可能であることが望ましい．カメラのレンズ中心を頂点とし眼球(中心座標 $(0,0,c)$，半径 R) に外接する円錐とミラーの交わる円上の点 $P(p_x,0,p_z)$ を考えると，$theta$ は以下の式 (6) で与えられる．$theta$ を大きくするためには a は大きいほうがよい．

$$theta = 45 - \arctan(\frac{p_x}{c-p_z}) \quad (6)$$

$$p_x = \frac{-q \pm \sqrt{q^2-4pr}}{2p}, p_z = \frac{p_x}{R}\sqrt{4c^2-R^2} - c \quad (7)$$

$$p = \frac{(R^2-4a^2)c^2}{a^2b^2R^2}, q = \frac{2c\sqrt{4c^2-R^2}}{Rb^2}, r = -\frac{a^2}{b^2} \quad (8)$$

頭部搭載型カメラのミラーパラメータはこれらの事項を勘案して選択する必要がある．図 3 にミラーパラメータ b を 50mm，眼球半径 R を 12.5mm とした場合のパラメータ a および ER, SR, CMD, NCA, $theta$ の関係を示す．図から，a は凡そ 70-75mm の範囲内である必要があることが分かる．

3. 試作システム

a を 70mm，b を 50mm として試作した頭部搭載型カメラを図 4 に示す．小型カメラ（Point Grey Research Firefly MV, 640×480, 60FPS），一次全反射ミラーと双曲面ハーフミラー（透明メタアクリル (AL+Sio コート付き), 反射率 70%）から成る．双曲面ハーフミラーには，眼球を直接撮影するために直径約 2cm の眼球撮影用カットが設けられている．小型カメラは，一次全反射ミラーに映り込んだ双曲面ハーフミラー上の情景と，眼球撮影用カットを撮影し，図 5(左) のような画像を取得できる．本試作システムでは，水平視野角 116 度（鼻側 38 度，耳側 78 度），垂直視野角 122 度（上方 38 度，下方 84 度）を達成している．

4. 視線検出

本研究では，Nitschke らの先行研究に倣い，

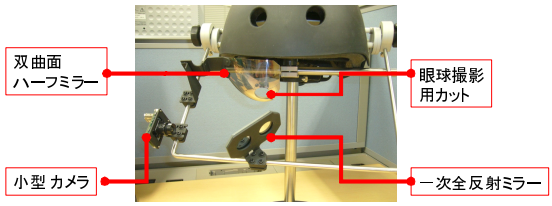


図 4: 頭部搭載型カメラの構造

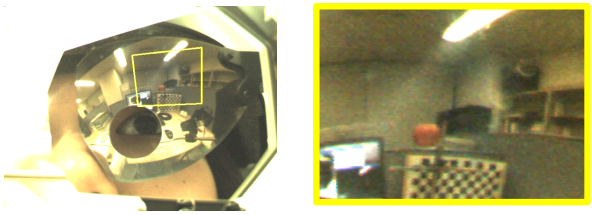


図 5: (左) 広視野画像上の写像点 (黄色枠の四隅)(右) 平面透視投影画像

眼球中心から瞳孔中心への方向ベクトルを視線ベクトル T とみなす．画像中の眼球中心座標 (x_c,y_c) は，頭部搭載型カメラを装着した際，予め画像を 1 枚撮影して検出しておく．眼球が動き，新しく検出された画像中の瞳孔の中心点 (x,y) と眼球中心座標 (x_c,y_c) より T を以下の式から求める．ここで，f は pixel から mm へと変換する係数である．

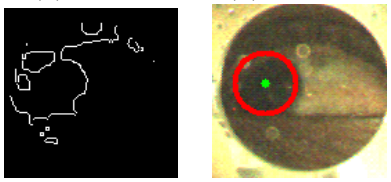
$$T = \begin{bmatrix} (x-x_c)f \\ (y-y_c)f \\ \sqrt{{r_E}^2 - (t_0^2+t_1^2)f^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

瞳孔の検出は眼球撮影用カット周辺の画像を用いて，二値化，ノイズ除去，エッジ検出，まつげ除去，ハフ変換，という手順で行う（図 6 参照）．

5. 評価実験

図 7 左のように壁に付したマーカーをランダムに 10 箇所選び，それぞれ 11 回ずつ 5 名の被験者に注視させ，前節の視線検出手法の精度評価を行った．5 名の被験者の視線検出誤差 (rad.) の平均を視線方向ごとに求めたグラフを図 8 に示す．

(a) 二値化　(b) 膨張収縮　(C) エッジ検出



(d) まつ毛除去　(e) 検出結果

図 6: 視線検出処理

図 7: (左) 評価実験に用いたマーカー (右) 被験者の様子

全体の平均誤差は 0.340532 rad.≈19.485939° となった．図の x と y は，画像上の注視マーカーをクリックして求めた真値の座標である．視線が周縁に向くにつれて誤差が大きくなる傾向がある．今後，ハフ変換の改善などにより，瞳孔検出精度を高める必要がある．また，被験者間で最大 2 倍以上誤差のバラつきがあったが，これはヘルメットの装着性を高め，眼球中心を動的に校正することで大幅に改善できる．

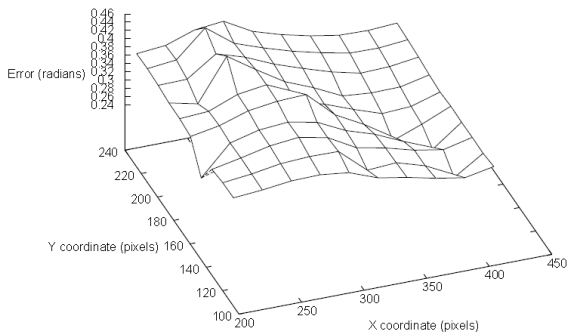


図 8: 全被験者の平均視線推定誤差 (rad.)

[今後の研究の方向、課題]

本研究では，利用者視点と広視野という二つの要求を同時に満たす，広視野アイマークレコーダを提案した．双曲面ハーフミラーを用いた頭部搭載型カメラは，双曲面の焦点と利用者の視点を一致させることで，利用者視点と同じ位置から撮影した映像を得ることができた．また，この試作システムを用いて視線検出を行い，その動作を確認した．

今後の課題として，眼球中心の動的な検出や瞳孔検出手法の改善による視線検出精度の向上が挙げられる．また，本装置を用いて自動車運転時のドライバの行動解析などの応用システムを構築していく予定である．

[成果の発表、論文等]

1) 間下以大, 住谷英里佳, 清川清, 竹村治雄: “双曲面ハーフミラーを用いた視点一致型広視野アイマークレコーダ”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009), (2009). (発表予定)

2) K. Kiyokawa, E. Sumiya, K. Kiyokawa, H. Takemura, : “A Wide-view Parallax-free Eye-mark Recorder with a Hyperboloidal Half-silvered Mirror,” ACM Virtual Reality Software and Technology, (2009). (投稿中)

[参考文献]

1) 山澤, 八木, 谷内田: “移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ HyperOmni Vision の提案”, 信学会論文誌 D–II, J79–D–II, 5, pp. 698–707 (1996).

2) 尾上, 山澤, 竹村, 横矢: “全方位画像センサを用いた実時間テレプレゼンスと画像表示遅延に関する実験的評価”, 情報処理学会 研究報告, CG86-10, pp. 49–54 (1997).

2) C. Nitschke, A. Nakazawa and H. Takemura.: “Display-camera calibration from eye reflections,” 情報処理学会 CVIM 研究会 CVIM-164, pp. 113–120 (2008).