

球技場向けフォーメーションカメラシステムの開発

竹家 章 仁

三菱電機先端技術総合研究所 〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

Development of Formation Camera System for Stadium

Akito TAKEYA

Advanced R&D Center, Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1 Tsukaguchi Honmachi, Amagasaki 661-8661

A formation camera system is developed to get a bird's-eye view of a stadium. This system is useful to analyze the strategy of high-level plays. It consists of two axisymmetric mirrors, an HDTV camera, a lens and a real-time image conversion electronics. It receives an image with distortion because it is set on the ceiling of the seats for the audience. The two mirrors with a contrived curvature correct the distortion and the electronics completes correction of the distortion. In this paper, a design method of the catoptric system and image conversion algorithm of the electronics are described. The simulation results show that the catoptric system has lower distortion and higher resolution than a conventional optics. The experimental results show that the catoptric system and the electronics complete correction of the distortion.

Key words: formation camera, vision system, catoptric system, image conversion

1. はじめに

サッカーやラグビーなどの団体球技では、選手の技量のみならず配置、すなわちフォーメーションも勝敗を大きく左右するので、チームの戦術分析のためにフォーメーションを把握することが欠かせない。フォーメーションを把握する方法としては、試合中に選手やボールを目視で追い記録する方法、もしくは、カメラで撮影した映像を見て記録する方法のみであった。これらの方法では観客席から選手の動きを追うため、選手の位置を正確につかむことが難しく、また全選手の位置を得るには人手や時間を要するため、非常に手間のかかる作業であった。このような背景から、神戸ウイングスタジアムではフィールド全景を歪みなく撮像・表示できるカメラシステムを開発することになり、神戸製鋼所と三菱電機は共同でこの開発にあたってきた。

このカメラシステムの開発では、筆者が先に提案した主、副2枚の反射鏡からなる全方位視覚システム^{1,2)}を応用することとした。この視覚システムは、対向配置された2枚の回転対称な反射鏡、レンズ、カメラからなり、全周の光景からの入射光が主鏡、副鏡の順にそれぞれの鏡面で

反射され、主鏡の開口部を通過してカメラのレンズに入射するように構成され、副鏡により結ばれた像をカメラで撮像することにより全周のパノラマ像が得られる。

全周を常時観測するために、球面鏡³⁾、双曲面鏡⁴⁾、放物面鏡⁵⁾等の曲面鏡を1枚用いた視覚システムが従来から数多く提案されている。これらは曲面鏡に映し出された虚像をカメラで撮像することで全周パノラマ像を得ているが、曲面鏡のもつ非点収差と像面湾曲により像がぼけてしまう。一方、筆者が提案した全方位視覚システムは反射鏡を2枚用いているので、1枚のみ使用しているシステムと比べて設計の自由度が高く、非点収差や像面湾曲を補正することが可能である。また、反射鏡は屈折レンズと比べて非球面化が容易なので、この特徴により屈折光学系では実現困難な種々の視野、射影が比較的容易に実現できる。

今回開発したシステムは、全方位視覚システムを応用した超広角反射光学系、ハイビジョンカメラ、リアルタイム画像変換装置などから構成されている。サッカーやラグビー用のほとんどの球技場には屋根がなく、カメラは観客席上部の天井などに設置されることとなるので、斜め上方から撮影されるフィールドは台形状に歪んでしまい、カメラ

E-mail: Takeya.Akito@bx.MitsubishiElectric.co.jp

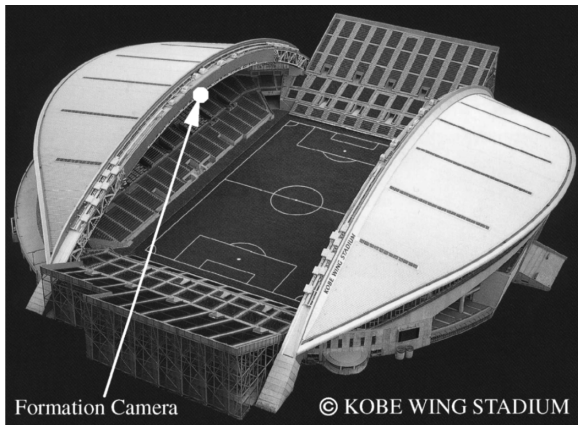


Fig. 1 Formation camera position in a stadium.

の設置位置が低いほど横長に大きく歪んでしまう。今回、全方位視覚システムの設計手法を改良したことで、光学系によりこのフィールドの歪みを補正することが可能になった。残った歪みも画像変換装置でほぼ完全に補正するので、フィールドを真上から俯瞰撮影したような画像が得られ、選手の位置、動き、フォーメーションをリアルタイムに確認できるようになった。

以下の章では、まず、本システムの概要を述べる。これには、課題と解決策などの開発の経緯も含まれる。つづいて、本システムの構成要素であるフォーメーションカメラとリアルタイム画像変換装置それぞれの開発に関して、前者では光学系の設計法、通常のレンズとの比較結果、カメラの概要について述べ、後者では画像変換アルゴリズム、装置の概要、変換結果について述べる。最後に本論文の結果をまとめる。

2. システムの概要

球技のフォーメーション戦術の研究に有用なデータ取得ができるよう、フォーメーションカメラシステムは以下の要求を満たす必要がある。

- フィールド全域を常時撮影できること
- フィールド真上からの俯瞰画像が得られること
- 選手、審判、ボール、白線が認識できること

設置予定の球技場は Fig. 1, Fig. 2 に示すような構造で、フォーメーションカメラシステムの開発に当たり以下の課題があった。

- フィールド上に屋根がない→斜め上方からの撮影になり、フィールドが歪む
- フィールドに対しボールが小さい→ボールを認識するにはハイビジョンカメラが必要
- フィールドに対し天井が低い→画角 140 度の超広角レ

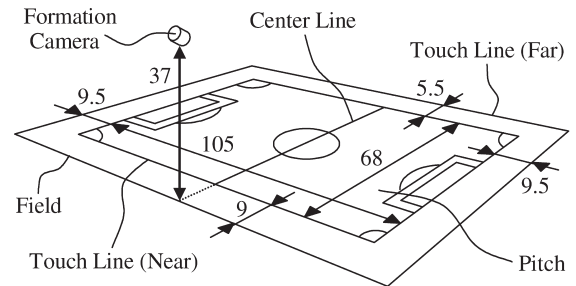


Fig. 2 Camera position and visual field (m).

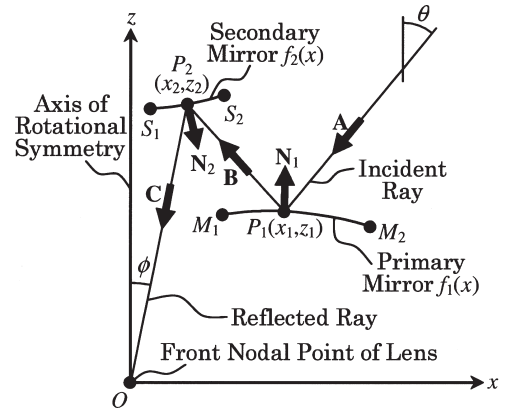


Fig. 3 Design of mirrors.

ンズが必要だが、ハイビジョンカメラ用には市販品がない

これらの課題を解決するため、

- 1台のハイビジョンカメラでフィールド全域を撮影
- 2枚の反射鏡からなる全方位視覚システムを採用し、反射光学系によりフィールドの歪みを極力補正
- リアルタイム画像変換装置で残った歪みを完全に補正することとした。

3. フォーメーションカメラの開発

3.1 設計

3.1.1 設計方法

反射鏡は回転対称であるから、断面形状を決定すれば形状が決定する。Fig. 3 に反射光学系の設計法を説明するための図を示す。Fig. 3 において、レンズの前側節点⁹⁾を座標の原点とし、横軸を x 軸、縦軸を反射鏡の回転対称軸である z 軸とする。ここで、以下の条件 (以下、主鏡条件) を与えることにより、主鏡の断面形状が一意的に決まる。

主鏡条件 1 主鏡への入射光の入射範囲 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$,
前側節点への反射光の入射範囲 $\phi_{\min} \sim \phi_{\max}$,
 θ と ϕ の関係 (射影)

主鏡条件 2 副鏡の断面形状 $f_2(x)$

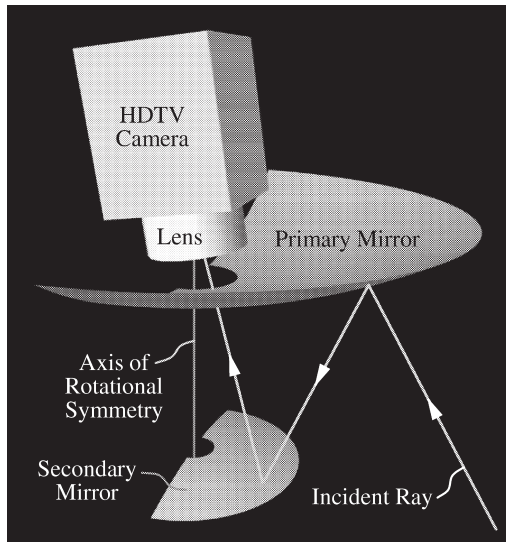


Fig. 4 Structure of formation camera.

主鏡条件3 主鏡反射面の内周上の点 M_1 の位置設計手順としては、まず主鏡条件1をハイビジョンカメラとレンズの仕様、被写体の大きさ、撮像距離等の拘束条件から決め、つづいて主鏡条件2, 3をパラメータスタディにより収差が最小となるように決めることで、主鏡の断面形状を設計する。

次に、主鏡条件から決まる主鏡の断面形状 $f_1(x)$ の求め方を述べる。Fig. 3で示すように、光線が点 P_1 、点 P_2 で反射され、視点 O に入射する場合について考える。点 P_1 、点 P_2 の座標をそれぞれ (x_1, z_1) 、 (x_2, z_2) とし、入射光ベクトルを \mathbf{A} 、点 P_1 での反射光ベクトルを \mathbf{B} 、点 P_2 での反射光ベクトルを \mathbf{C} とし、点 P_1 、点 P_2 における反射面の法線ベクトルをそれぞれ \mathbf{N}_1 、 \mathbf{N}_2 とすると、これらの成分は次式のように表される。

$$\mathbf{A} = (-\sin\theta, -\cos\theta) \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = (x_2 - x_1, z_2 - z_1) \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = (-x_2, -z_2) \quad (3)$$

$$\mathbf{N}_1 = (-f'_1(x_1), 1) \quad (4)$$

$$\mathbf{N}_2 = (f'_2(x_2), -1) \quad (5)$$

ここで、 $f'_1(x_1)$ は $f_1(x)$ の $x=x_1$ における1階の導関数、 $f'_2(x_2)$ は $f_2(x)$ の $x=x_2$ における1階の導関数である。これらのベクトルには、反射の法則により以下の関係が成り立つ。

$$\left(\mathbf{A} + \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}\right) \cdot \mathbf{N}_1 = 0 \quad (6)$$

$$\left(\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} + \frac{\mathbf{C}}{|\mathbf{C}|}\right) \cdot \mathbf{N}_2 = 0 \quad (7)$$

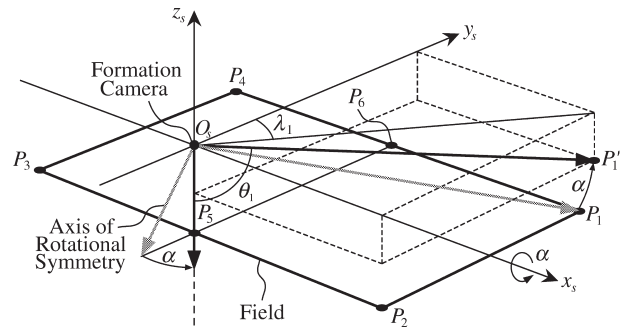


Fig. 5 Angle of elevation θ and azimuth λ .

式(6)、(7)と主鏡条件1, 2より、 $f'_1(x_1)$ は (x_1, z_1) の関数により表されるので、この式を M_1 から数値積分することにより主鏡の断面形状 $f_1(x)$ を求めることができる。この詳細については、文献1を参照されたい。

3.1.2 拘束条件

フォーメーションカメラとして機能させるため、以下の拘束条件を与えた。

- 全方位視野は必要ないので、主・副鏡には半円のみ使用 (Fig. 4)
- 射影はほとんどの超広角光学系で採用されている等距離射影⁷⁾
- ハイビジョンカメラ仕様は、カメラ部が2/3インチ3CCD, 1280×720 pixel, レンズ部が $f=20$ mm, $f/2.8$
- 夜間も照明により絞りは $f/8.0$ 以上に絞って使用
- 高さ37mに設置されたカメラからピッチを含む124×82.5mのフィールドを撮像 (Fig. 2)

3.1.3 射影の実現方法

フィールドを高解像度でとらえるためには、画面上におけるフィールドの占める割合が大きくなるように射影を設定する必要がある。

Fig. 5に示すように、フォーメーションカメラの設置位置を原点とする座標系 x_s, y_s, z_s を定義し、撮像フィールドの4隅を点 $P_{1, \dots, 4}$ 、フィールド外周とセンターライン延長線の交点を点 $P_{5,6}$ とおく。

まず、フォーメーションカメラの回転対称軸を y_s, z_s 平面内で z_s 軸に α 度傾けて設置したときの、フォーメーションカメラから見た各点の入射角 θ 、方位 λ を求める。各点を点 $P_n(x_{sn}, y_{sn}, z_{sn})$ ($n=1, \dots, 6$) とおき、回転対称軸が z_s 軸と重なるように、点 P_n への視線ベクトルを y_s 軸回りに α 度回転すると、

$$\overrightarrow{O_s P_n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sn} \\ y_{sn} \\ z_{sn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} x_{s_n} \\ y_{s_n} \cos \alpha - z_{s_n} \sin \alpha \\ y_{s_n} \sin \alpha + z_{s_n} \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

に変換されるので、入射角 θ_n および方位 λ_n (y_s 軸方向が $\lambda=0^\circ$) はそれぞれ次のように求められる。

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x_{s_n}^2 + (y_{s_n} \cos \alpha - z_{s_n} \sin \alpha)^2}}{y_{s_n} \sin \alpha + z_{s_n} \cos \alpha} \quad (9)$$

$$\lambda_n = \tan^{-1} \frac{x_{s_n}}{y_{s_n} \cos \alpha - z_{s_n} \sin \alpha} \quad (10)$$

次に、副鏡に映った画像上における各点の位置からフィールド像の縦横サイズを求める。Fig. 6 に示すように、副鏡の内周半径を r_{in} 、外周半径を r_{out} とし、入射角が最も小さくなる点 P_5 の入射角 θ_5 度方向が内周上に、入射角が最も大きくなる点 P_1 の入射角 θ_1 度方向が外周上に映っているとする。等距離射影を採用することにより画像上において副鏡中心からの距離 r が入射角 θ と比例するので、射影の式は次のようになる。

$$r = \frac{\theta - \theta_5}{\theta_1 - \theta_5} (r_{out} - r_{in}) + r_{in} \quad (11)$$

よって、フィールドの縦横サイズ h , w はそれぞれ次のように求められる。

$$\begin{aligned} h &= \left| \overrightarrow{O_k P'_6} \right| - \left| \overrightarrow{O_k P'_2} \right| \cos \lambda_2 \\ &= \frac{\theta_6 - \theta_5}{\theta_1 - \theta_5} (r_{out} - r_{in}) + r_{in} \\ &\quad - \left(\frac{\theta_2 - \theta_5}{\theta_1 - \theta_5} (r_{out} - r_{in}) + r_{in} \right) \cos \lambda_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} w &= 2 \left| \overrightarrow{O_k P'_2} \right| \cos \lambda_2 \\ &= 2 \left(\frac{\theta_2 - \theta_5}{\theta_1 - \theta_5} (r_{out} - r_{in}) + r_{in} \right) \sin \lambda_2 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、フィールド像の縦横比がハイビジョンカメラのアスペクト比 9:16 と同じであるとすると、

$$h : w = 9 : 16 \quad (14)$$

が成り立つ。この式に式 (12)、式 (13) を代入し、 r_{in}/r_{out} について解くと、

$$\frac{r_{in}}{r_{out}} = \frac{8(\theta_6 - \theta_5 - (\theta_2 - \theta_5) \cos \lambda_2) - 9(\theta_2 - \theta_5) \sin \lambda_2}{8(\theta_6 - \theta_1 - (\theta_2 - \theta_1) \cos \lambda_2) - 9(\theta_2 - \theta_1) \sin \lambda_2} \quad (15)$$

となり、副鏡の内、外径比をこの値にすることで、フィールドを画面いっぱい映し出すことが可能になる。

設計するときには θ と ϕ の関係 (主鏡条件 1) が必要になる。レンズの前側節点から副鏡に映った画像までの距離を l とおくと、

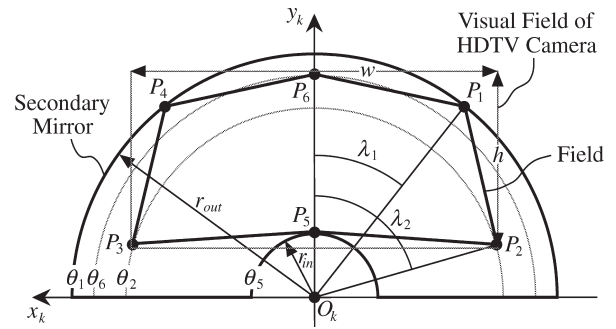


Fig. 6 Image in secondary mirror.

$$\begin{aligned} r_{in} &= l \tan \phi_{min} \\ r &= l \tan \phi \end{aligned} \quad (16)$$

$$r_{out} = l \tan \phi_{max}$$

が成り立ち、また $\theta_5 = \theta_{min}$, $\theta_1 = \theta_{max}$ なので、これらを式 (11) に代入すると、 θ と ϕ には以下の関係が得られる。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \times (\tan \phi_{max} - \tan \phi_{min}) + \tan \phi_{min} \right) \quad (17)$$

ここで、 ϕ_{min} と ϕ_{max} には式 (15)、式 (16) より以下の関係が成り立つ。

$$\phi_{min} = \tan^{-1} \left(\frac{r_{in}}{r_{out}} \tan \phi_{max} \right) \quad (18)$$

3.1.4 設計結果

主鏡条件 1 において、 $\theta_{max} (= \theta_1)$ と $\theta_{min} (= \theta_5)$ は式 (9) により α から求められ、 ϕ_{min} は式 (18) により ϕ_{max} から求められ、 θ と ϕ の関係は式 (17) により与えられる。主鏡条件 2 において、副鏡の断面形状を

$$\left(\frac{x-p}{a} \right)^2 + \left(\frac{z-q}{b} \right)^2 = 1 \quad (19)$$

で表される楕円の一部とし、この形状は扁平率 $c (= (a-b)/a)$ が与えられることで主鏡条件 3 を含む $M_{1,2}$, $S_{1,2}$ の位置から一意的に決まる。よって、副鏡形状式 (19) を与え、射影式 (17) を拘束条件とした $\{\alpha, \phi_{max}, c, M_{1,2}, S_{1,2}\}$ のパラメータスタディにより、光学系の解像度がハイビジョンより高い状態において、評価関数「画面上におけるフィールドの占める割合」が大きくなるように光学系の最適設計¹⁾をおこなった。ここで、光学系の解像度がハイビジョンより高い状態とは、副鏡により結ばれるメリジナル像面とサジタル像面の非点隔差⁸⁾が、レンズの絞り $f/8.0$ における被写界深度⁹⁾内にある状態をいう。

最適設計の結果、 $\alpha = 17.000$ 度、 $\phi_{max} = 15.730$ 度、副鏡の断面形状を

$$\left(\frac{x+2.323}{139.053} \right)^2 + \left(\frac{z-229.323}{27.811} \right)^2 = 1 \quad (20)$$

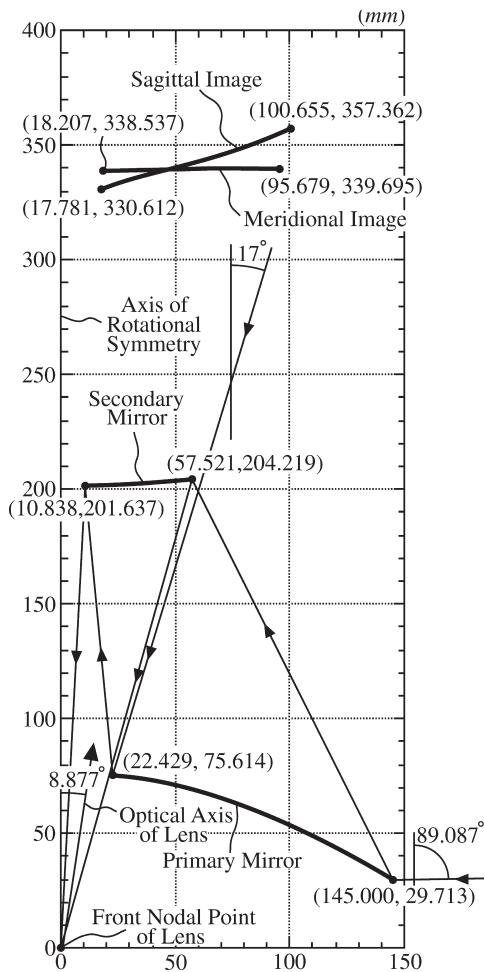


Fig. 7 Sectional shape of formation camera.

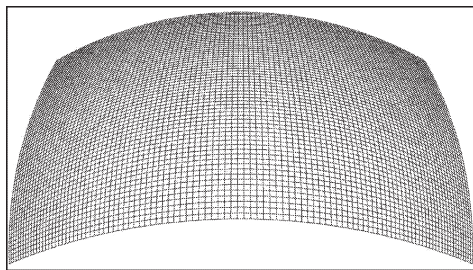


Fig. 8 Simulated image of formation camera.

$M_1 = (22.429, 75.614)$, $M_2 = (145.000, 29.713)$, $S_1 = (10.838, 201.637)$, $S_2 = (57.521, 204.219)$ (単位はすべて mm) とし、レンズを z 軸から 8.877 度傾けて設置するとき、ハイビジョンの解像度より高い状態で、画面上におけるフィールドの占める割合が最も大きくなった。このときの主鏡、副鏡の断面形状と 2 つの像面位置を Fig. 7 に示す。

3.2 評価

今回設計したフォーメーションカメラの模擬画像を Fig. 8 に、通常のレンズ (対角角 140 度、歪曲収差なし)

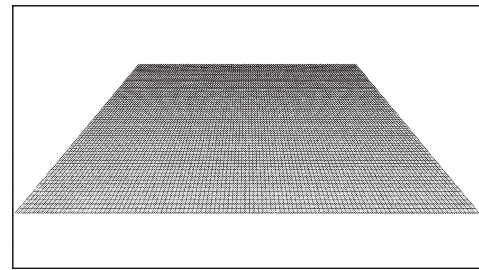


Fig. 9 Simulated image of general camera.

Table 1 Comparison of formation and general camera.

	Formation camera	General camera
Occupation rate of field in image	69.1%	40.8%
Ball size		
Far corner	1.2 pixels	1.1 pixels
Near end of center line	3.2 pixels	2.4 pixels
Length of center line	562 pixels	409 pixels
Length of touch line		
Far	1039 pixels	582 pixels
Near	1282 pixels	1249 pixels

で同じ位置からフィールドを画面いっぱいに撮影した場合の模擬画像を Fig. 9 に示す。また、これらの模擬画像から求めたフィールドの画面占有率、画面上におけるサッカーボールの大きさ、センターライン、タッチラインの各長さを Table 1 に示す。これからわかる通常のレンズに対するフォーメーションカメラの利点は、

- フィールドの画面占有率が約 1.7 倍→画素の有効活用
- ボールは大きく、ラインも長く映る→フィールド全体で拡大される
- タッチラインの奥と手前の長さの差が少ない→フィールドの歪みが少ない

すなわち、フォーメーションカメラの撮像画像は通常のレンズと比べて高解像度かつ低歪みであることがわかる。

3.3 フォーメーションカメラの概要

Fig. 10 に製作したフォーメーションカメラの外観を示す。反射鏡は主、副ともに非球面のため、超精密旋盤によるアルミの削り出し品とし、反射面には酸化対策としてフッ化マグネシウム (MgF_2) を蒸着した。また、風防には割れても飛び散らないように合わせガラスを使用し、風防の外側には埃と雨滴の除去用にブローを設置した。

4. 画像変換装置の開発

4.1 画像変換アルゴリズムの検討

変換画像の全画素についてそれぞれが対応する原画像上での座標を求めることで変換テーブルを作成し、この変換テーブルをもとに変換処理をおこなう。この変換テーブル

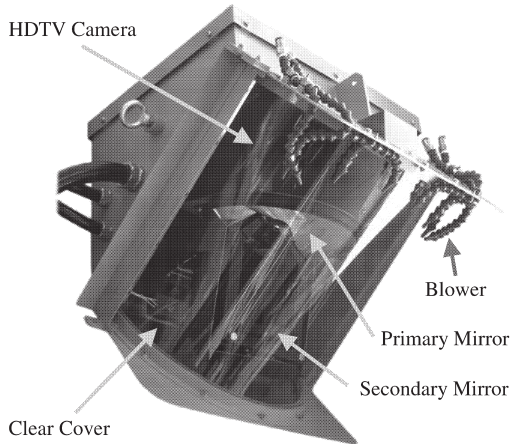


Fig. 10 Formation camera.

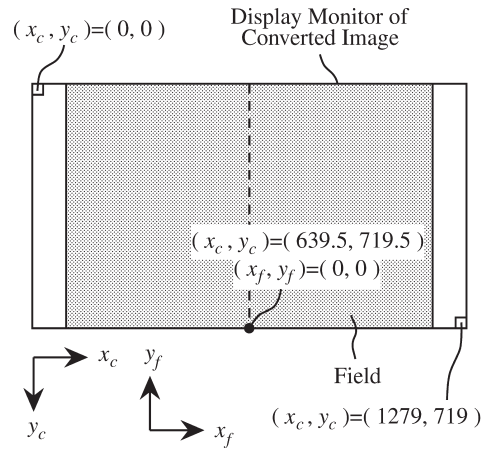


Fig. 11 Coordinates system of converted image and field.

を求めるために、以下のように座標系を定義し、各座標間の変換式を示す。

- 変換画像座標系 $x_c y_c$ (pixel) : 変換画像が表示されるモニター画面上の座標系, 原点は画面左上, サイズは 1280×720
- フィールド座標系 $x_f y_f$ (m) : フィールド面上の座標系, 原点はフォーメーションカメラから見て手前中央, サイズは 124×82.5
- スタジアム座標系 $x_s y_s z_s$ (m) : スタジアムの座標系, 原点はフォーメーションカメラの位置
- カメラ極座標系 $\theta \lambda$ (rad) : フォーメーションカメラへの入射角, 方位で表される極座標系
- カメラ座標系 $x_k y_k z_k$ (m) : フォーメーションカメラの座標系, 原点はレンズの前側節点
- 物体平面座標系 $x_p y_p$ (m) : レンズがピントを合わせた物体平面上の座標系, 原点は物体平面とレンズの光軸との交点
- 原画像座標系 $x_o y_o$ (pixel) : 原画像が表示されるモニター画面上の座標系, 原点は画面左上, サイズは 1280×720

4.1.1 変換画像座標系→フィールド座標系

Fig. 11 に示すように、縮尺を調整し（縦方向 720 pixel → 82.5 m）、フィールドを画面中央に表示するため、変換式は次のように表される。

$$(x_f, y_f) = \left((x_c - 639.5) \frac{82.5}{720}, (719.5 - y_c) \frac{82.5}{720} \right) \quad (21)$$

4.1.2 フィールド座標系→スタジアム座標系

Fig. 12 に示すように、フォーメーションカメラはフィールド座標系の原点上の高さ 37 m 地点に設置されているので、変換式は次のように表される。

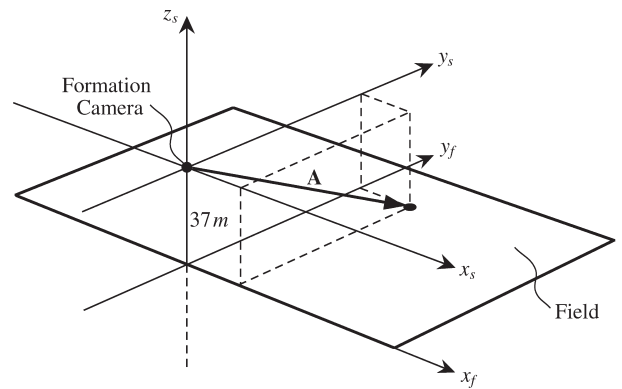


Fig. 12 Coordinates system of field and stadium.

$$(x_s, y_s, z_s) = (x_f, y_f, -37) \quad (22)$$

4.1.3 スタジアム座標系→カメラ極座標系

Fig. 13 に示すように、フォーメーションカメラの回転対称軸を $y_s z_s$ 平面内で z_s 軸に α 度傾けて設置したとき、原点 O_s からフィールド上の点 $P(x_s, y_s, z_s)$ への視線ベクトルの入射角 θ および方位 λ は、式 (9)、式 (10) と同様に次のように表される。

$$(\theta, \lambda) = \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{x_s^2 + (y_s \cos \alpha - z_s \sin \alpha)^2}}{y_s \sin \alpha + z_s \cos \alpha}, \tan^{-1} \frac{x_s}{y_s \cos \alpha - z_s \sin \alpha} \right) \quad (23)$$

4.1.4 カメラ極座標系→カメラ座標系

カメラ極座標系とカメラ座標系には Fig. 14 に示すような関係があるので、変換式は次のように表される。

$$(x_k, y_k, z_k) = \left(\sin \lambda, \cos \lambda, \tan \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \right) \quad (24)$$

ここで、 ϕ は式 (17) により θ から求められる。

4.1.5 カメラ座標系→物体平面座標系

Fig. 15 に示すように、レンズの向きと回転対称軸 (z_k 軸)

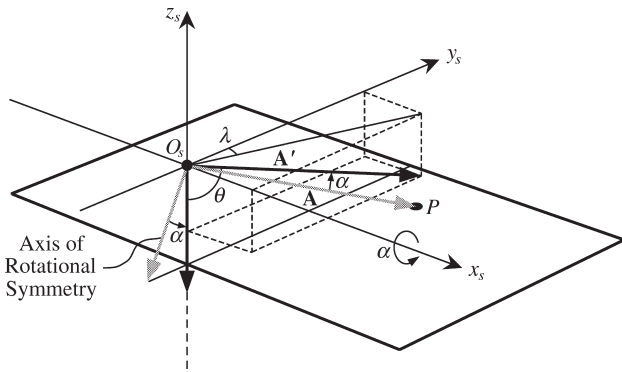


Fig. 13 Coordinates system of stadium and polar coordinates system of camera.

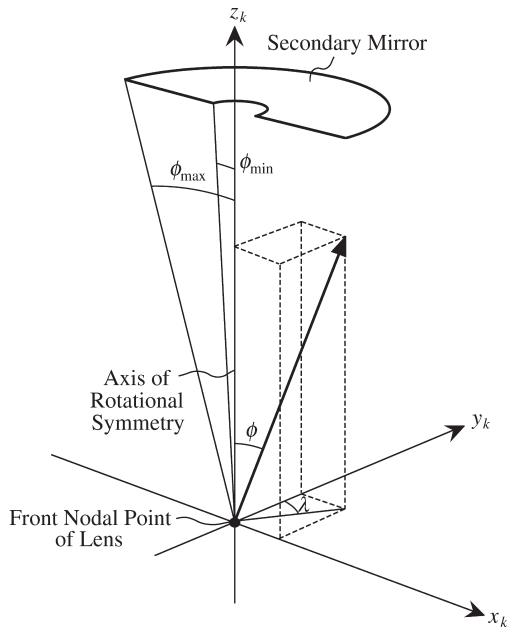


Fig. 14 Polar coordinates system and coordinates system of camera.

のなす角を β 度とおく。レンズの向きが回転対称軸と重なるように x_k 軸回りに β 度回転すると、前側節点 O_k から点 $C(x_k, y_k, z_k)$ へのベクトル \mathbf{B} は次に示す \mathbf{B}' に変換される。

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \cos\beta - z_k \sin\beta \\ y_k \sin\beta + z_k \cos\beta \end{bmatrix} \quad (25)$$

ここで、前側節点 O_k から物体平面上的点 F へのベクトルを $a\mathbf{B}'$ 、前側節点から物体平面までの距離を S_1 とすると、 z 軸成分について

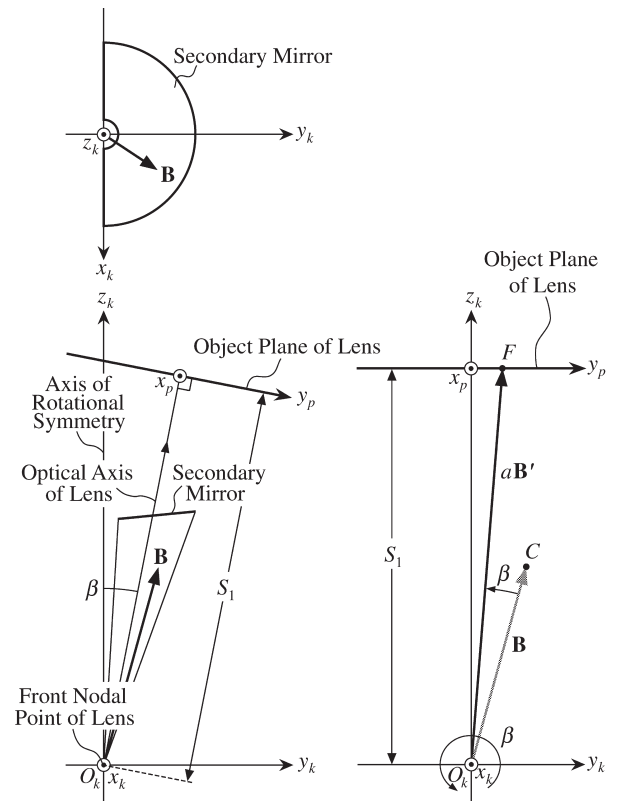


Fig. 15 Coordinates system of camera and object plane.

$$S_1 = a(y_k \sin\beta + z_k \cos\beta) \quad (26)$$

が成り立ち、 a について解くと

$$a = \frac{S_1}{z_k \cos\beta + y_k \sin\beta} \quad (27)$$

と求められる。よって、変換式は次のように表される。

$$(x_p, y_p) = (ax_k, a(y_k \cos\beta - z_k \sin\beta)) \quad (28)$$

4.1.6 物体平面座標系→原画像座標系

Fig. 16 に示すように、レンズ系の焦点距離を f とおくと、前側節点から S_1 の地点にピントを合わせたとき、後側節点から CCD までの距離 S_2 は結像公式より次のように求められる。

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f} \quad (29)$$

$$S_2 = \frac{fS_1}{S_1 - f}$$

このとき、レンズの倍率 m は

$$m = \frac{S_2}{S_1} = \frac{f}{S_1 - f} \quad (30)$$

と求められる。Fig. 17 に示すように、変換式は、CCD の有効サイズが 9.6×5.4 mm、有効画素数が 1280×720 pixel なので、縮尺(縦方向 5.4 mm \rightarrow 720 pixel)と倍率 m を考慮すると、次のように表される。

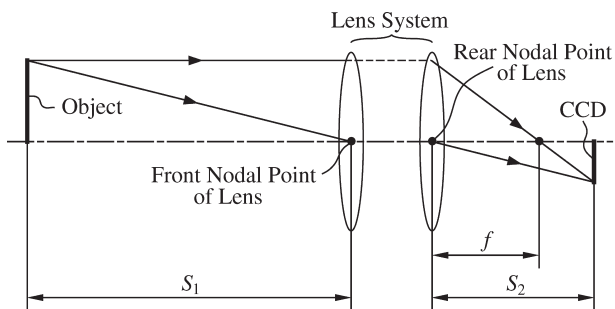


Fig. 16 Image formation formula.

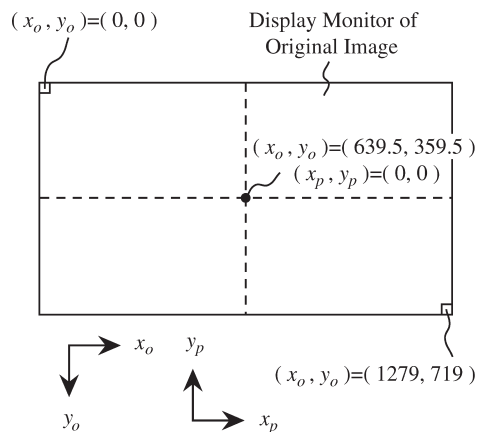


Fig. 17 Coordinates system of original image.

$$(x_o, y_o) = \left(\frac{720}{5.4 \times 10^{-3}} m x_p + 639.5, 359.5 - \frac{720}{5.4 \times 10^{-3}} m y_p \right) \quad (31)$$

以上の式に、設計により決定した $\alpha (= \theta_{\min})$, β , $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$, $\phi_{\min} \sim \phi_{\max}$, S_1 の各値を代入して変換画像の全画素について変換テーブルを作成する。

5. 画像変換装置の概要

5.1 走査方式について

走査方式として最も一般的なインターレース（飛び越し）走査には、動画変換による撮像・表示タイミングの逆転で映像にちらつきが生じたり、ボール等の小さな被写体が走査線に飛び越され画面から消えてしまう等の問題がある。よって、今回はプログレッシブ（順次）走査を採用した。この方式は上から順に映像を走査していく方式なので、インターレース走査で生じた問題は発生しない。

5.2 構成

リアルタイム画像変換装置は、コントローラー（PC）と画像変換回路（拡張ボックス）から構成され、それぞれ ISA バスにより結ばれている。コントローラーは、変換テーブルを計算するとともに画像変換回路をコントロール

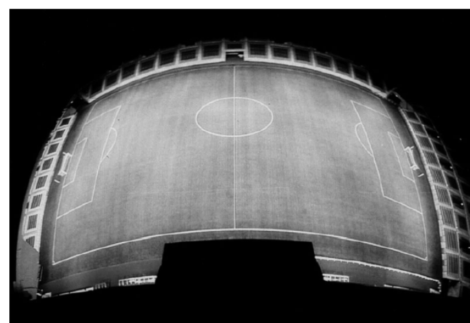


Fig. 18 Original image.

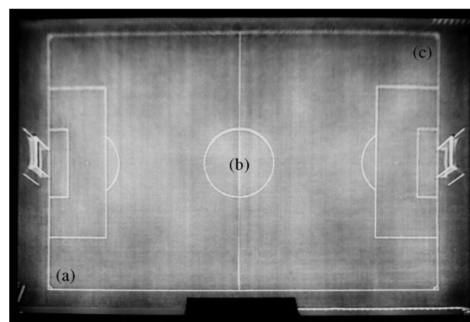


Fig. 19 Converted image ((a), (b) and (c) are magnified area as Fig. 20).

し、画像変換回路は、変換テーブルを用いて画素の並び替えをおこなう。

5.3 変換例

Fig. 18 に球技場で撮像した原画像、Fig. 19 に変換画像を示す。原画像からは、模擬画像（Fig. 8）と同様に低歪みかつ高解像度であることを確認し、変換画像からは、歪みがほぼ完全に補正されていることを確認した。厳密には、カメラの設置誤差により歪みは若干残っているが、選手の相対的な位置関係であるフォーメーションはこの画像から容易に把握できるので、この程度の歪みであれば許容範囲内であるといえる。また、斜めから撮影した画像をあたかも真上から撮影したかのような画像に変換しているので、Fig. 20 に示すように、選手やボール等の画像は撮像位置から見て放射状に引き伸ばされてしまうが、撮像位置が比較的高い位置であるために伸びる量も大きくなく、フォーメーションの把握に支障はない。

6. おわりに

今回、球技場のフィールドを斜め上方から撮影しても、真上から俯瞰撮影したかのような画像が得られるフォーメーションカメラシステムを考案した。このシステムは、2枚の反射鏡からなる全方位視覚システムを応用した超広角

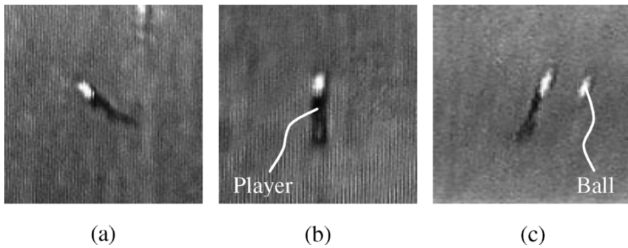


Fig. 20 Magnified image of Fig. 19.

反射光学系，ハイビジョンカメラ，リアルタイム画像変換装置などから構成されている。斜め上方からの撮影ではフィールドは横長の台形状に歪んでしまうが，光学系を工夫することで歪みを極力補正し，残った歪みもリアルタイム画像変換装置によりほぼ完全に補正することができる。よって，フィールド上に屋根がない球技場でも，観客席上にある天井などの比較的高い位置にこのシステムを設置することができれば，真上から俯瞰撮影したかのような画像が得られるので，フォーメーションの把握が容易におこなえるようになる。

本論文では，フィールドの歪みを補正するための反射光学系の設計法を明らかにし，解像度がハイビジョンより高くなるように，かつ画面上におけるフィールドの占める割合が大きくなるように，パラメータスタディにより最適設計をおこなった。評価結果から，通常のレンズと比べてフィールドの占有率が1.7倍に向上し，歪みも減少していることを確認した。また，光学系で補正しきれなかったフ

ィールドの歪みを補正するための画像変換アルゴリズムについても明らかにし，実撮像画像を用いた変換結果から，フィールドの歪みがほぼ完全に補正されていることを確認した。

最後に，本システムの開発にあたり，多大なるご協力をいただいた神戸製鋼所，神戸ウイングスタジアム関係者各位に謝意を表す。

文 献

- 1) 竹家章仁，黒田 健，西口憲一，市川 晃：“2枚の反射鏡からなる全方位視覚システム”，計測自動制御学会論文集，**34** (1998) 1751-1758.
- 2) 市川 晃，竹家章仁：“全方位視覚システムの最適設計”，計測自動制御学会論文集，**35** (1999) 1243-1252.
- 3) J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Reisman: "Image-based homing," *Proc. of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento (1991) pp. 620-625.
- 4) K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida: "Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection," *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, Yokohama (1993) pp. 1029-1034.
- 5) S. K. Nayar: "Catadioptrico omnidirectional camera," *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Juan, Puerto Rico (1997) pp. 482-488.
- 6) 小柳修爾：光技術用語辞典（オプトロニクス社，1994）p. 128.
- 7) 中川治平：レンズ設計工学（東海大学出版会，1990）pp. 123-128.
- 8) 小倉敏布：写真レンズの基礎と発展（朝日ソノラマ，1996）pp. 72-75.
- 9) 小柳修爾：光技術用語辞典（オプトロニクス社，1994）pp. 193-194.