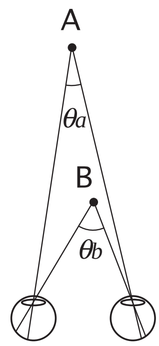
カメラによる三次元計測

1　立体視

人間の目が 2 つあるのは，奥行きの感覚を得るためである．したがって，右目用の写真，左目用の写真を用意し（ステレオペア写真と呼ぶ），右目で右写真，左目で左写真を見れば奥行き感のあるものとなる．これを立体視という．何の装置も使わず立体視するには訓練が必要だが，立体視鏡を利用すれば簡単に立体視ができる．対象物までの距離と右目写真・左目写真を撮影する間隔は奥行き感に影響を与える．当然，左右の間隔が大きいほど奥行き感を得ることができるが，立体視するのが難しくなる．

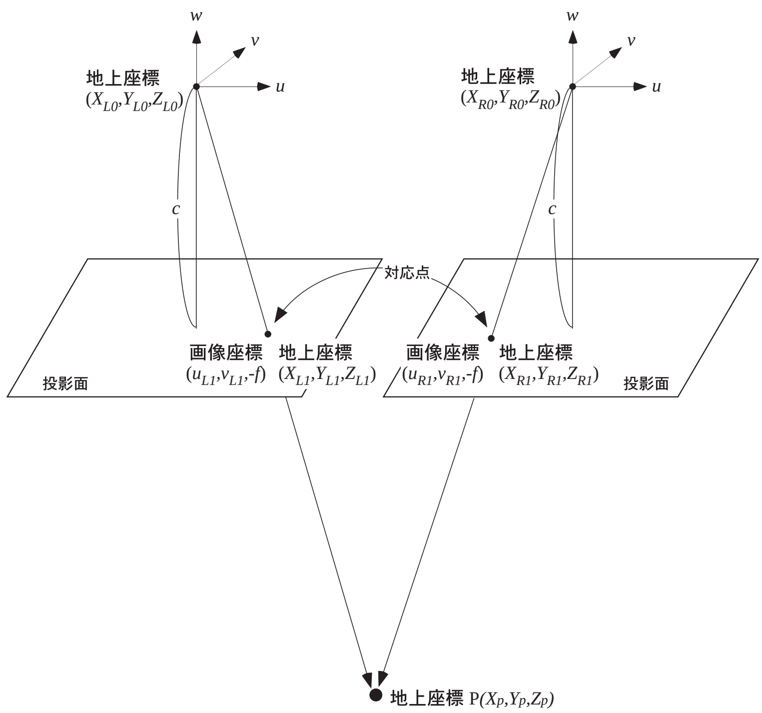
左右の間隔が大きいと立体視するのが難しいと述べたが，これは両眼視差によるものである．右図において点 B を見る時，左右の目とも網膜の中心に投影されるように目が動く．この時点 A は，右目と左目で投影される場所が大きくずれてしまう．これを両眼視差といい $\theta_a - \theta_b$ で表される．これが大きすぎると，心地好く立体視することができない．



両眼視差

2　ステレオ幾何モデル

三次元ステレオ幾何モデルを示す．図は，地上の対象物 P のステレオ画像が得られた時の幾何モデルを表したものである．外部標定において解説した図が二つになったにすぎない．左右の画像における外部標定結果を用いて対象物 P の地上座標 (X_p, Y_p, Z_p) を求めることが，カメラによる三次元計測である．左側のカメラの位置が (X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0})，姿勢が $(\omega_{L0}, \phi_{L0}, \kappa_{L0})$ であり，右側のカメラの位置が (X_{R0}, Y_{R0}, Z_{R0})，姿勢が $(\omega_{R0}, \phi_{R0}, \kappa_{R0})$ であったとする．対象物 P は，左右の画像において，それぞれ $(u_{L0}, v_{L0}, -c)(u_{R0}, v_{R0}, -c)$ という画像座標に投影されるが，対象物 P の地上座標はこのとき未知なので，どこに投影されるかは計算できない．したがって，対象物 P が投影されたそれぞれの画像座標を決定することが，三次元計測においては重要である．具体的には，対象物 P がそれぞれの画像上のどこに写っているのかを探し，その画像座標を正確に取得しなければならない．これら左右の画像座標は，**ステレオ対応点**と呼ばれ，目視判読で取得したり，画像処理手法によって取得したりする．画像処理を用いる場合は，対象物 P が含まれる左画像の小領域が，右画像においてはどこに相当するのかを**画像マッチング**の手法により決定できる．この手法は，**ステレオマッチング**とも呼ばれ，様々な手法が提案されている．これについては，画像処理の項目において解説する．何れにしてもステレオ対応点の画像座標が正確でなければ，三次元計測において大きな誤差を生じさせることになる．



三次元ステレオ幾何モデル

ステレオ対応点の画像座標が決定されれば，対象物 P の地上座標を求めることは，さほど難しいものではない．つまり，左カメラの投影中心から対応点へのベクトルの延長線上に対象物 P があり，右カメラについても投影中心から対応点へのベクトルの延長線上に対象物 P がある．したがって，三次元空間における二直線の交点を計算すれば良いことになる．

具体的には，まず対応点の画像座標を地上座標に変換しなければならない．, 左画像の場合，対応点の画像座標 $(u_{L0}, v_{L0}, -c)$ を地上座標 (X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1}) に変換するには，カメラの姿勢による回転行列をとカメラの位置 (X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}) を用いて表すと，以下のようになる．

$$\begin{pmatrix} u_{L1} \\ v_{L1} \\ -c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{L1} - X_{L0} \\ Y_{L1} - Y_{L0} \\ Z_{L1} - Z_{L0} \end{pmatrix} \tag{1}$$

上式はカメラの位置から対象物 P が画像上に投影された座標へのベクトルについての関係式である．地上座標系でのベクトルを求めるには，逆行列を利用し，以下の式で計算できる．

$$\begin{pmatrix} X_{L1} - X_{L0} \\ Y_{L1} - Y_{L0} \\ Z_{L1} - Z_{L0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_{L1} \\ v_{L1} \\ -c \end{pmatrix} \tag{2}$$

このベクトルを用いて，空間直線の式は，媒介変数 t を用いて以下のように表すことが出来る．

$$\begin{cases} X &= (X_{L1} - X_{L0})t + X_{L0} \\ Y &= (Y_{L1} - Y_{L0})t + Y_{L0} \\ Z &= (Z_{L1} - Z_{L0})t + Z_{L0} \end{cases} \tag{3}$$

右画像についても同様に空間直線の式をたてるが，このとき媒介変数を s とすると，以下のようになる．

$$\begin{cases} X &= (X_{R1} - X_{R0})s + X_{R0} \\ Y &= (Y_{R1} - Y_{R0})s + Y_{R0} \\ Z &= (Z_{R1} - Z_{R0})s + Z_{R0} \end{cases} \tag{4}$$

これら，２直線の交点を求めるわけであるが，空間直線に誤差が含まれているので２直線が交わることはない．したがって，２直線間の距離が最も近い部分が，求めたい地上座標といえる．その座標を求めるには，様々な方法があるが，簡単な方法としては，２直線間の距離の関数より求めることが出来る．つまり，２直線間の距離の二乗 L^2 は，以下の式で表すことが出来る．

$$\begin{aligned} L^2 &= \{(X_{L1} - X_{L0})t + X_{L0} - (X_{R1} - X_{R0})s - X_{R0}\}^2 \\ &= \{(Y_{L1} - Y_{L0})t + Y_{L0} - (Y_{R1} - Y_{R0})s - Y_{R0}\}^2 \\ &= \{(Z_{L1} - Z_{L0})t + Z_{L0} - (Z_{R1} - Z_{R0})s - Z_{R0}\}^2 \end{aligned} \tag{5}$$

距離 L が最小となる媒介変数 s, t を求めれば良いので，この距離 L の関数を s, t で偏微分し，それらが 0 となる s, t を求める．つまり，$\frac{\partial L^2}{\partial s} = 0, \frac{\partial L^2}{\partial t} = 0$ を計算し，連立一次方程式を解くことになる．s, t が求まれば，それぞれの空間直線の式に代入し，最も距離の近い場所が２点求まる．それら２点の中点が求める三次元座標となる．