

NAIST-IS-MT9851041

修士論文

実環境情報を用いた屋外設置ステレオカメラの校正法

小林 幹知

2000 年 2 月 14 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

小林 幹知

指導教官： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
眞鍋 佳嗣 助教授
金山 憲司 教授

実環境情報を用いた屋外設置ステレオカメラの校正法^{*}

小林 幹知

内容梗概

近年，車両や人間等の立体物を検知する研究として，ステレオ画像センサの屋外での適用が注目されている．ステレオ法を用いて3次元計測を行う場合に，重要なのは正確性であり，そのためには，高精度なステレオカメラ校正が必須である．従来の方法ではステレオカメラ校正を室内で行っていたため，室内の校正パターンと計測対象とのスケールの違いから計測誤差が大きくなるという問題があった．また屋外で巨大な校正パターンを設置するのは現実的でないと考え，本研究では，ステレオカメラの外部パラメータを実環境での既存の3次元情報を用いて推定することで，従来の方法よりも高精度なステレオカメラ校正を可能にする．

また屋外では風などでカメラがゆれることにより計測精度が悪化する．屋外におけるリアルタイムでの高精度な3次元計測を実現するためにはゆれを補正する必要がある．そこで本研究では，第2にゆれパラメータとしてゆれ方向角度，ゆれ幅の2つを定義し，さらに実環境の情報を用いてゆれ補正を行い高精度な3次元計測を目指す．またゆれ補正の手法にあげられる対応点問題とリアルタイム性の2つの課題を改善するためにゆれを予測し，解決を試みる．

キーワード

3次元計測, ステレオ画像センサ, カメラ校正, ゆれ補正, ゆれ予測

^{*}奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9851041, 2000年2月14日.

Calibration technique for outdoor stereo vision using the environmental information^{*}

Masatomo Kobayashi

Abstract

For various purposes of outdoor measurement, many sensors of detecting three-dimensional (3-D) objects such as vehicles, human, etc. have been developed in recent years. Among them, the stereo-based image ones are getting more and more attractions because of their wide detection areas and robustness to the changes of outer conditions. For the stereo vision, camera calibration technique plays an important role in the preservation of a high 3-D measurement precision over a wide detection area. A classical camera calibration is performed by observing a calibration object whose geometry is known with a very good precision in 3-D space. However, this method is difficult to bring into operation for outdoor applications. Because the size of a calibration object is very different from the range of interest, the performance of calibration degrades along with the increase of scale difference between the calibration object and the recognition object. A new calibration technique using the environmental information such as white lines, or traffic signs on the ground is proposed in this thesis and its effectiveness has been confirmed by experiments. In the experiments, an average 50 percent decrease in the relative error of the 3-D measurement over a wide detection area has been observed. Moreover, the 3-D measurement precision is affected by camera vibration because of the blowing wind. It is necessary to revise

^{*}Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9851041, February 14, 2000.

the camera vibration for an effective outdoor 3-D measurement. Two vibration parameters, vibration direction and intensity, which can be estimated from the environmental information, are defined and used to modify the 3-D measurement results. A prediction method of the vibration parameters is furthermore proposed for the reduction of matching errors and processing time.

Keywords:

3-D measurement, stereo vision, camera calibration, vibration revision, vibration prediction

目 次

1. はじめに	1
2. ステレオ視による 3 次元計測	3
2.1 計測原理	3
2.2 カメラパラメータ	5
2.3 一般的なステレオカメラ校正	6
3. 実環境情報を用いたステレオカメラ校正	8
3.1 平面物体のステレオ視	8
3.2 平面校正パターンを用いたステレオカメラ校正 -従来手法-	9
3.2.1 平面パラメータ導出	11
3.2.2 内部パラメータ導出	12
3.3 従来手法の検討	15
3.3.1 平面パラメータ	16
3.3.2 内部パラメータ	17
3.4 提案手法	18
3.5 実験結果	20
4. 屋外設置のためのゆれ補正	21
4.1 ゆれ補正	21
4.2 ゆれ補正の必要性	24
4.3 ゆれパラメータ推定手順	25
4.3.1 対応点探索方法検討	27
4.3.2 正規化相関法の検討-対応点の信頼性	31
4.3.3 ゆれパラメータ推定	32
4.4 ゆれ予測	32
4.4.1 ゆれ幅	33
4.4.2 ゆれ方向角度	34
4.5 実験結果	35

4.5.1	ゆれ補正	35
4.5.2	ゆれ予測	38
5.	考察	42
5.1	実環境情報を用いたステレオカメラ校正	42
5.2	屋外設置のためのゆれ補正	42
5.2.1	ゆれ補正	42
5.2.2	ゆれ予測	43
5.2.3	今後の課題	43
6.	おわりに	44
	謝辞	45
	参考文献	46
	付録	49
A.	回転の表現	49
B.	ゆれパラメータ導出	50

図 目 次

1	ステレオ視による 3 次元空間の計測	3
2	平行ステレオにおける 3 次元計測	4
3	内部パラメータ	6
4	ステレオカメラ校正	7
5	平面のステレオカメラへの射影	9
6	平面校正パターン	10
7	歪み補正座標変換	13
8	回帰直線	13
9	焦点距離算出	14
10	歪み補正処理の前後画像	17
11	座標系の定義	22
12	ゆれパラメータ	23
13	屋外画像	26
14	静止画像	28
15	ゆれ後画像 (ssd)	29
16	ゆれ後画像 (相関法)	29
17	ノイズ付加したゆれ後画像	31
18	局所解による $Q_{A\omega\varphi}(A, \omega, \varphi)$ の変化	34
19	道路画像	36
20	駐車場画像	36
21	動画画像	38
22	動画画像のゆれ幅, ゆれ方向角度	39
23	推定データによる相対誤差が 50% 超える割合	39
24	ゆれ幅予測結果	40
25	ゆれ幅の相対誤差	40
26	回転の定義	49

表 目 次

1	従来手法の外部パラメータ	15
2	従来手法の 3 次元計測結果 (測距誤差)	15
3	平面パラメータの推定結果	16
4	歪みパラメータ	17
5	内部パラメータ	18
6	基礎実験の 3 次元計測結果 (測距誤差)	19
7	外部パラメータ	20
8	3 次元計測誤差 (測距誤差)	20
9	ゆれによる想定誤差	25
10	ssd の評価値	30
11	相関法の評価値	30
12	ssd と相関法の比較結果	30
13	ssd と相関法の検討結果	31
14	ノイズによる相関値の変化	32
15	ゆれパラメータ	37
16	ゆれによる 3 次元計測誤差 (道路画像)	37
17	ゆれによる 3 次元計測誤差 (駐車場画像)	37

1. はじめに

ステレオ視は三角測量の原理によりシーン中の各点までの距離を測定する技術である．ステレオ視は非接触かつ受動的に距離計測が可能である [1] ため，移動ロボットにおける 3 次元視覚センサや 3 次元シーンのモデリングにおける入力部として期待される技術である．そのため我々は近年，車両や人間などの立体物を検知する研究として，ステレオ画像センサの屋外への適用を考えてきた [2][3][4][5][6]．屋外で，ステレオ画像センサを適用する利点として，単眼視に比べ，立体物の高さを計測することができるため影や重なりなどの環境変動に強いことがあげられる．しかし問題として，ステレオ画像対における対応点探索とステレオカメラ校正があげられる．まずステレオ画像対における対応点探索の困難さと計算量の膨大さでは，奥富・金出 [7] は複数の基線長を利用したマルチベースラインステレオ法により，誤対応の可能性を減少させると共に計測精度を向上させることが可能であることを示した．一方ステレオカメラ校正では，R. Y. Tsai[8] と J. Weng[9] がカメラの内部パラメータと外部パラメータを 3 次元位置が既知な校正パターンとカメラ座標の対応から求めることを提案した．しかし屋外での設置を考えた場合に室内の校正パターンと計測対象とのスケールの違いから計測誤差が大きくなるという問題が出てくる．それを解決するためには巨大な校正パターンを設置すればいいのだが，それはあまりにも現実的ではない．Z. Zhang[10] は実環境情報を用いた屋外の校正を提案している．しかしその場合でも実環境情報を用いた距離の近辺でしか校正されておらず近い距離での計測精度はスケールの違いにより精度が悪化するという問題がある．

本研究では車両や人間など立体物を屋外で検知するステレオ画像センサにおいて，室内の情報と屋外の実環境情報の両方を用いることで，近距離から遠距離までの広範囲において高精度な 3 次元計測が可能な屋外設置ステレオカメラの校正法を提案する．すなわち室内での校正パターンを使った校正と，実環境情報すなわち道路平面を使った校正の 2 つを組み合わせることで広範囲での高精度な 3 次元計測を可能にする．

屋外でのステレオ画像センサ適用のもう一つの問題として，風などによりカメラがゆれることで計測精度の悪化が考えられる．屋外におけるリアルタイムでの

高精度な 3 次元計測を実現するためには，そのゆれを補正する必要がある．小さなゆれ，すなわちビデオカメラの微小な手ぶれの補正に対しては多くの研究 [11] がなされており市販品に内装されているが，それらはゆれている画像を補正するものである．画像を補正する場合には，補正に時間がかかり，その上拘束条件を用いないと補正できないことがある．そのことから我々は画像を補正するのはステレオ画像センサの屋外実利用ではないと考えた．そこで本研究では第 2 にゆれをパラメータで表し，そのパラメータで補正を行う手法を提案する．ゆれの無い(静止) 画像とゆれた後の画像の関係を表すゆれパラメータとして，ゆれ幅とゆれ方向角度を定義する．実環境情報から，これらのパラメータを算出し，ゆれ補正を行うことで高精度な 3 次元計測を可能にする．

ゆれパラメータは，入力画像と基準画像の対応点探索で求まるが，これらにかかる時間と誤対応の問題に対しては，ゆれの予測により対応点探索の範囲を縮小することで解決する．これまで，動物体の予測に関するさまざまなところで研究がなされている [12][13] [14][15][16] が，カメラ自身のゆれについての予測研究はやられていないのが現状である．そこで，本研究ではゆれに対するモデルをつくることで予測を可能にする．

本論文では以下の章から構成される．2 章では基礎となるステレオ視における 3 次元計測の手法を説明する．3 章では室内の情報と実環境の情報の両方を用いたカメラ校正を提案し，画像を用いて実験を行った結果についてを報告する．4 章ではゆれ補正について提案し，画像で実験を行った結果について報告する．5 章ではこれらの結果に対する考察を，6 章において総括を述べる．

2. ステレオ視による 3 次元計測

この章ではステレオ視を用いた計測の仕方，その計測に必要なカメラパラメータ，そしてカメラパラメータを算出するためのステレオカメラ校正について簡単に説明する．

2.1 計測原理

図 1 に基準カメラ，検査カメラと呼ぶ 2 台のカメラを用いたステレオ視で 3 次元空間を計測する状態を示す．3 次元空間のある点 P が基準カメラによって m_b に観察され，検査カメラによって m_i に観察されたことが分かれば，両カメラのレンズ中心とそれぞれの観察点を結ぶ直線の交点として，三角測量の原理で点 P の 3 次元位置を求めることができる．

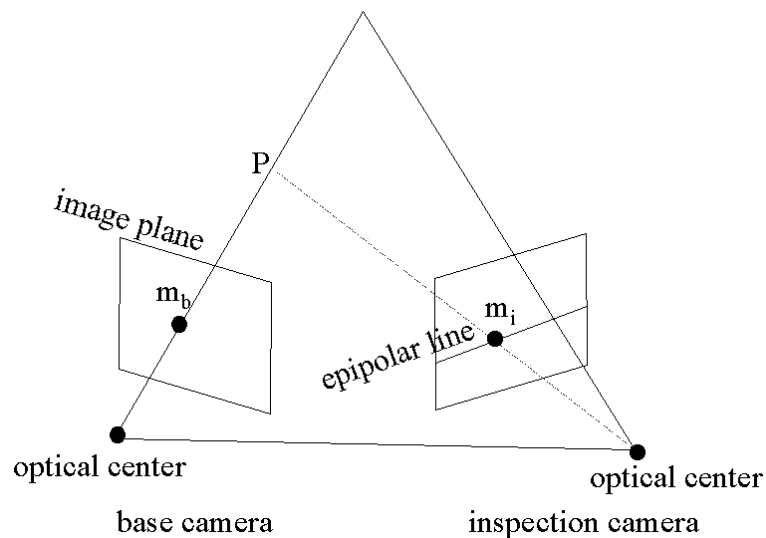


図 1 ステレオ視による 3 次元空間の計測

特に 2 台のカメラが図 2 のように平行な場合は 3 次元座標点 $(X, Y, Z)^T$ (T は転

置ベクトルを表す) は式 (1) によって計算される .

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_b B}{d} \\ \frac{y_b B}{d} \\ \frac{f B}{d} \end{pmatrix} \quad (1)$$

f は焦点距離 , B はカメラ間の距離 , $d = y_b - y_i$ は視差である . 奥行き Z は視差 d に反比例する .

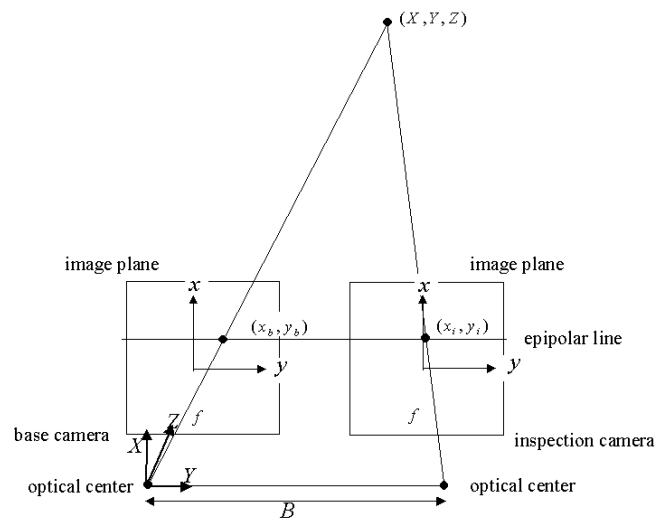


図 2 平行ステレオにおける 3 次元計測

しかし , 基準カメラ と検査カメラの 2 枚の画像のみから , 基準カメラの観測点 m_b に対応する検査カメラ観測点 m_i であることを判断するのは容易なことではない . これをステレオ視における対応点問題と呼ぶ . 図 1 のステレオカメラの配置関係から , 両カメラのレンズ中心と 2 つの観測点 m_b , m_i は同一平面上に存在することがわかる . すなわち , m_i は両カメラのレンズ中心と基準カメラの画像点 m_b で決まる平面と検査カメラの画像面が交わる直線に存在する . この直線はエピポーラ線と呼ばれ , ステレオ画像対における対応点探索がエピポーラ線上に拘束されることをエピポーラ拘束条件と呼ぶ . 基準カメラと検査カメラの幾何学的配置が既知であれば , 基準カメラの各観測点に検査カメラの画像面上のエ

ピポラ線を求め，そのエピポラ線上で対応点探索を行なうことにより，対応点探索のための計算量を削減することができる．一般には，内部パラメータが等しい2台のカメラをお互いの光軸が平行でかつ画像面が同一平面上に存在するように配置する場合が多い(図2)．このようなカメラ配置により，画像をラスタ走査する場合の走査線とエピポラ線を一致させることがで，さらに計算量を削減することが可能である．このように配置されたステレオカメラを標準ステレオカメラと呼ぶ．

2.2 カメラパラメータ

ステレオ視による3次元空間のある物体の距離を得るためにはカメラパラメータを知る必要がある．カメラパラメータは個々のカメラに固有に特性である内部パラメータと3次元空間におけるカメラの位置を指定する外部パラメータに分類される．

内部パラメータはカメラのレンズの歪みのないピンホールカメラでモデル化した場合に，パラメータを焦点距離 f ，垂直方向画素サイズ s_x ，水平方向画素サイズ s_y ，画像中心 (x_o, y_o) で表現する．焦点距離 f ，垂直方向画素サイズ s_x ，水平方向画素サイズ s_y がすべて1，画像中心 $(0, 0)$ のカメラを正規化カメラとしたとき，内部パラメータを，図3および式(2)で表されるように，正規化カメラ座標をカメラ座標に変換する行列として定義することができる．

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{s_x} & 0 & x_o \\ 0 & \frac{f}{s_y} & y_o \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{N} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)において $\alpha_x = f/s_x$ $\alpha_y = f/s_y$ と置き換えることにより内部パラメータを未知数4の行列として表現できる．一方，外部パラメータは3次元ワールド座標系からカメラ中心座標系への回転 (*roll, pitch, yaw*) および並進で記述される．ステレオカメラシステムにおいて一台のカメラを基準カメラ，もう一台のカメラを検査カメラと呼ぶことにする．基準カメラのレンズ中心を原点とする3次元座標系をワールド座標系にとり，光軸方向をZ軸，画素の垂直方向をX軸，水平方

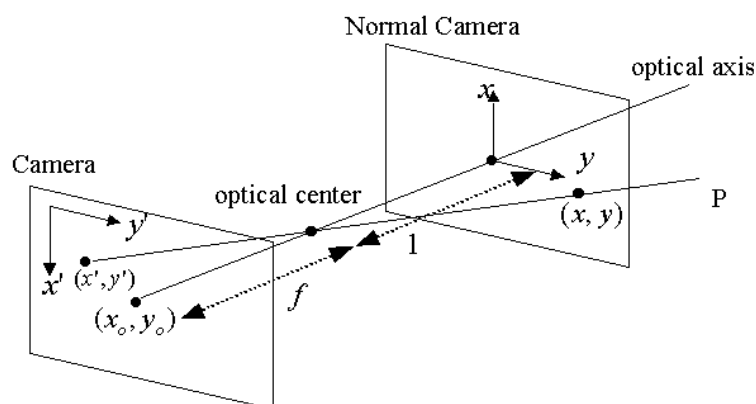


図 3 内部パラメータ

向を Y 軸としたとき，ワールド座標系から検査カメラ中心の座標系への運動パラメータである 3×3 の回転行列 R および 3×1 並進ベクトル t が検査カメラの外部パラメータである．回転の表現方法および符号については付録 A を参照されたい．このように一対のステレオカメラにおいてカメラパラメータはそれぞれのカメラの内部パラメータと，カメラ対の相対的な位置関係である外部パラメータにより記述される．

2.3 一般的なステレオカメラ校正

ステレオカメラシステムの幾何学的な配置を正確に求めることをステレオカメラ校正と呼ぶ．一般にステレオカメラ校正は 2.2 節で述べた内部パラメータおよび外部パラメータなどを求めることであり，観察されたステレオ画像対から絶対的な 3 次元位置を決めることを可能にする．そのステレオカメラ校正方法はさまざまな方法があるが，レンズ歪みを扱わない場合は次の手順のように簡単に説明することができる（図 4 を参照）．

1. 3 次元空間における位置が既知の多数の参照点と，おのこのカメラにおける対応関係から，3 次元ワールド座標点とその 2 次元画像座標の間の射影を定める射影行列を P_b, P_i を最小 2 乗近似により求める． P_b は基準カメラ

における射影行列， P_i は検査カメラにおける射影行列である．その射影行列は以下のように表される [17] ．

$$P_b = N_b \cdot [R_b, t_b]$$

$$P_i = N_i \cdot [R_i, t_i]$$

N_b, N_i は基準カメラおよび検査カメラの内部パラメータ， R_b, t_b と， R_i, t_i はそれぞれ校正パターンと基準カメラの関係，校正パターンと検査カメラの関係を示している．

2. 行列 P_b, P_i をそれぞれ基準カメラの内部パラメータ行列 N_b と，校正パターンと基準カメラの関係である回転行列 R_b ，並進ベクトル t_b ，検査カメラの内部パラメータ行列 N_i と，校正パターンと検査カメラの関係である回転行列 R_i ，並進ベクトル t_i にそれぞれ分解する．
3. カメラごとに得られる $(R_b, t_b), (R_i, t_i)$ からステレオ対の相対的な位置関係である外部パラメータ，回転 R および並進 t を求める．

ステレオカメラ校正は各カメラの内部パラメータと外部パラメータが未知の状態から，ステレオカメラシステムの幾何学的な配置を決定する問題である．

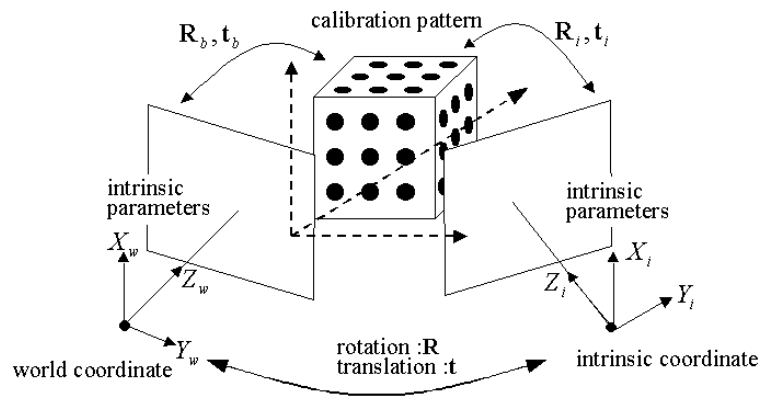


図 4 ステレオカメラ校正

3. 実環境情報を用いたステレオカメラ校正

ステレオカメラ校正の手法には2章のほかにもあげられるが，人工の環境では，フロア，壁など平面で構成されているものが多いことに着目し，本研究ではそのような平面を用いるステレオカメラ校正を行う．

3.1 平面物体のステレオ視

まず最初に，3次元空間に置かれた平面を一对のステレオカメラで観察する場合に，基準画像座標点とその検査カメラでの対応点は射影変換行列よりお互いに変換できる [18][19]．すなわち，図 5*のように3次元空間に置かれた平面上の点 P が基準カメラにおいて m_b に観察され，検査カメラにおいて m_i に観察される時， m_b から m_i への変換行列を 3×3 の射影変換行列を H として

$$m_i = H \cdot m_b \quad (3)$$

と記述することができる．ここで， m_b および m_i は射影座標で表されており，等号は射影的な意味で成立する．式 (3) を通常の符号の意味で記述すると式 (4) となる．ここで h_{ij} は射影変換行列の要素， $m_b = (x_b, y_b, 1)^T$, $m_i = (x_i, y_i, 1)^T$ ．式 (4) から射影変換行列 H のスケールが任意なので，9変数であるが8自由度である．

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{h_{11} \cdot x_b + h_{12} \cdot y_b + h_{13}}{h_{31} \cdot x_b + h_{32} \cdot y_b + h_{33}} \\ y_i &= \frac{h_{21} \cdot x_b + h_{22} \cdot y_b + h_{23}}{h_{31} \cdot x_b + h_{32} \cdot y_b + h_{33}} \end{aligned} \quad (4)$$

射影変換行列 H は平面の方程式，カメラの内部パラメータおよび外部パラメータを暗黙的に含んだ行列である．一方，これらのパラメータが既知の場合，式 (3) は (5) のように記述することができる [20]．

*本研究では横ステレオカメラではなく縦ステレオカメラを用いて実験を行ったので図 5では縦ステレオカメラで示す．そのとき，下カメラが基準カメラで，上カメラが検査カメラとする．

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{N}_i \cdot \left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{n}^T}{z} \right) \cdot \mathbf{N}_b^{-1} \cdot \mathbf{m}_b \quad (5)$$

すなわち

$$\mathbf{H} = \mathbf{N}_i \cdot \left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{n}^T}{z} \right) \cdot \mathbf{N}_b^{-1} \quad (6)$$

ここで， $\mathbf{N}_b, \mathbf{N}_i$ は基準カメラおよび検査カメラの内部パラメータ， \mathbf{R} および \mathbf{t} は検査カメラの外部パラメータ， \mathbf{n} は平面の単位法線ベクトル， z は基準カメラから平面までの距離である．

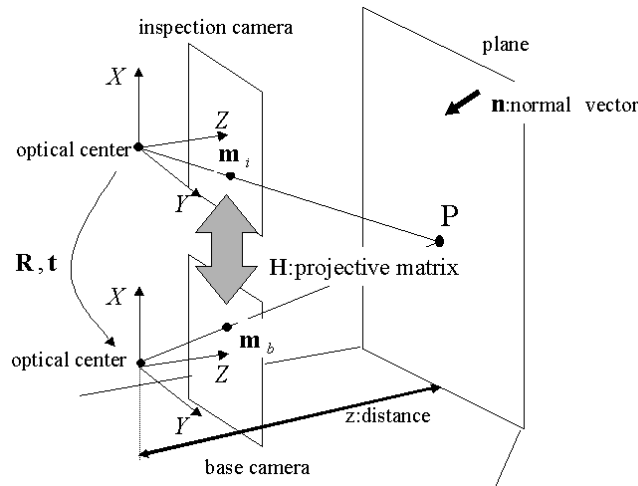


図 5 平面のステレオカメラへの射影

3.2 平面校正パターンを用いたステレオカメラ校正 -従来手法-

従来手法の一例として，室内での図 6 のような平面校正パターン（点と点の間の距離が既知）を用いてカメラパラメータを算出するステレオカメラ校正を説明する．3.1 節で，平面における基準カメラと検査カメラの関係は射影変換行列 \mathbf{H} で表すことができることを示したが，そのとき内部パラメータ ($\mathbf{N}_b, \mathbf{N}_i$) が既知

の場合，行列 H から R, t, n, z を求めることは一般的に可能であるが，そのときの解は唯一ではない [17]．しかし平面パラメータ (n, z) が分かれば，そこから唯一の外部パラメータを求めることができる．その具体的な方法を以下に示す．

1. 図 6 の平面の特徴点から，両画像の対応点を決定し，それから最小 2 乗法により射影変換行列 H を算出する．
2. 平面パラメータと内部パラメータを導出する (参照 3.2.1, 3.2.2) ．
3. 行列 H ，平面パラメータ n, z ，内部パラメータ N_b, N_i が分かっているので，そこから式 (7) を評価関数として，ニュートン法を用いて最適な外部パラメータ R, t を推定する．

$$Q_{rt}(R, t) = \min \left(\left(H - N_i \cdot \left(R + \frac{t \cdot n^T}{z} \right) \cdot N_b^{-1} \right)^2 \right) \quad (7)$$

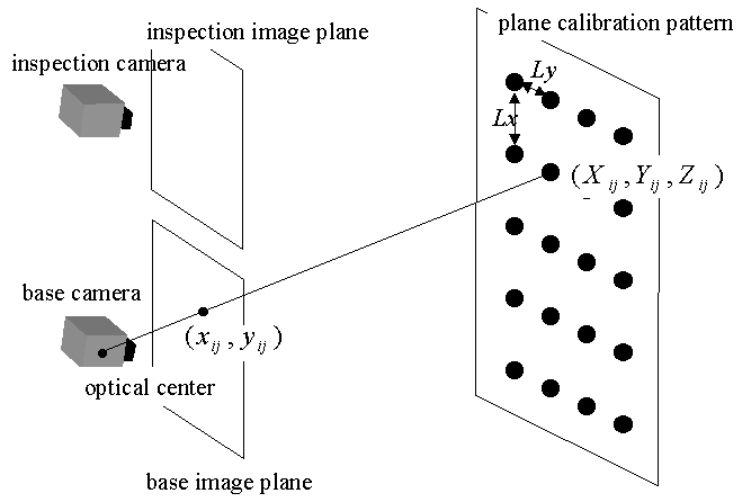


図 6 平面校正パターン

3.2.1 平面パラメータ導出

平面校正パターンにおける点と点の距離が分かっているのでそこから平面パラメータを算出することができる．平面方程式は式 (8) , そして焦点からその平面上の点までの直線は式 (9) のようになる．

$$n_x \cdot X + n_y \cdot Y + n_z \cdot Z = z \quad (8)$$

$$\frac{X}{x_{ij}} = \frac{Y}{y_{ij}} = \frac{Z}{f} \quad (9)$$

(n_x, n_y, n_z) は法線ベクトル \mathbf{n} , (x_{ij}, y_{ij}) は平面上の点における基準カメラ画像点 (図 6) , f は焦点距離 (図 6) を表す．ここで平面パラメータは4つあるが, 自由度は3つであるから, $n_z = 1$ と仮定することで, 式 (8) は式 (10) のようになる．

$$n'_x \cdot X + n'_y \cdot Y + Z = z' \quad (10)$$

式 (9) , 式 (10) から平面上の3次元座標点は式 (11) のようになる．

$$\begin{aligned} X_{ij} &= \frac{z \cdot x_{ij}}{n'_x \cdot x_{ij} + n'_y \cdot y_{ij} + f} \\ Y_{ij} &= \frac{z \cdot y_{ij}}{n'_x \cdot x_{ij} + n'_y \cdot y_{ij} + f} \\ Z_{ij} &= \frac{z \cdot f}{n'_x \cdot x_{ij} + n'_y \cdot y_{ij} + f} \end{aligned} \quad (11)$$

この式 (11) から算出した平面上の3次元座標点と, 図 6のような点と点の間の距離がそれぞれ $Lx = 60(cm)$, $Ly = 30(cm)$ の既知のスケールを用いて次式 (12) からニュートン法を用いて最適な (n_x, n_y, z) を推定する．

$$\begin{aligned} Q_{plane}(n_x, n_y, z) = & \\ & \min \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} [(X_{ij+1} - X_{ij})^2 + (Y_{ij+1} - Y_{ij})^2 + (Z_{ij+1} - Z_{ij})^2 - Lx^2]^2 \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=1}^J [(X_{i+1j} - X_{ij})^2 + (Y_{i+1j} - Y_{ij})^2 + (Z_{i+1j} - Z_{ij})^2 - Ly^2]^2 \right) \quad (12) \end{aligned}$$

ここで I, J はそれぞれ縦，横の特徴点の数である．

しかし $\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 1$ であるので算出した (n'_x, n'_y, z') を式 (13) を用いて (n_x, n_y, n_z, z) に修正する必要がある．

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{\sqrt{n_x'^2 + n_y'^2 + 1.0}} \\ n_x &= k \cdot n_x' \\ n_y &= k \cdot n_y' \\ n_z &= k \\ z &= k \cdot z' \end{aligned} \tag{13}$$

修正した結果 (n_x, n_y, n_z, z) が本来の平面パラメータである．

3.2.2 内部パラメータ導出

内部パラメータを算出する際，画素サイズは既知とし，焦点距離，画像中心を算出する．

歪み補正

実際の画像はレンズの焦点距離が短くなるほど，画像上での幾何歪みが大きくなる．そのためその歪みを補正しないと，正確な内部パラメータを算出することができない．補正する方法を以下に示す．

1. 初期値として歪み定数パラメータ k' ，歪み中心座標 (x_o, y_o) と仮定する．
2. 歪みラメータ値を用いて指定したパターンの座標値 (x_r, y_r) を補正前の座標値 (x_R, y_R) から式 (14) を用いて変換する (図 7)．

$$R = \frac{r}{1 + k \cdot \tan^2 \omega} \tag{14}$$

$$R = \sqrt{x_R^2 + y_R^2}$$

$$r = \sqrt{x_r^2 + y_r^2}$$

$$\tan \omega = \frac{R}{f}$$

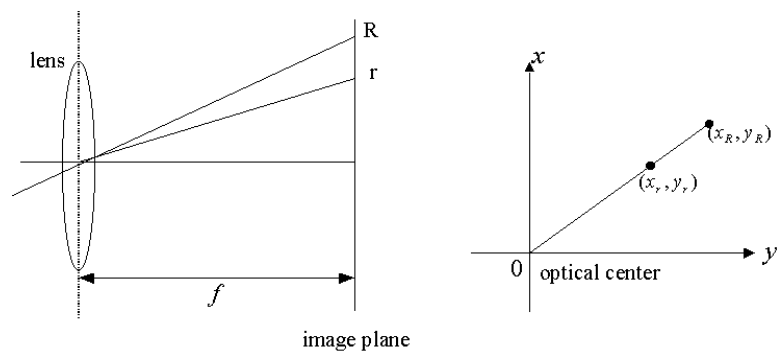


図 7 歪み補正座標変換

3. 図 8 のように各辺の回帰直線を算出する .

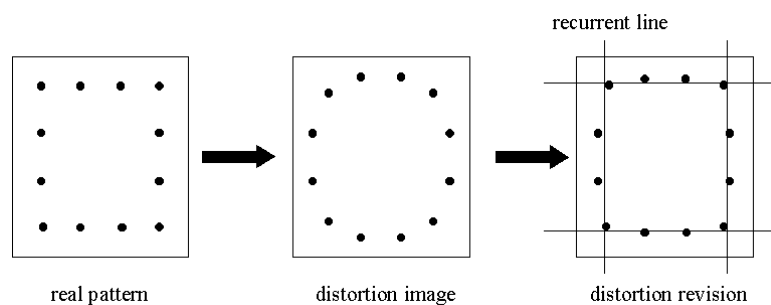


図 8 回帰直線

4. 補正後の座標点群と算出した回帰直線との自乗誤差の総和を算出する .
5. そのときの自乗誤差の総和が最適歪みパラメータ k の自乗誤差の総和と比べて , 最小なら歪みパラメータ k' を最適歪みパラメータ k として更新する .
6. 歪みパラメータ k' に Δk , Δx_o , Δy_o を加算し , その値を用いて 2 . から繰り返す .
7. すべての変更が終了したときに , すべてのにおける自乗誤差の総和が最小なときが最適な歪みパラメータ k である .

このような歪みパラメータを用いて，歪み補正を行いそれから内部パラメータを算出する．

ここで求めた歪み中心座標 (x_o, y_o) はレンズの中心，すなわち画像の中心座標であるあるので，画像中心座標がわかる．

焦点距離

図 9のようにカメラが平面校正パターンと平行になるように設置する．ここで Lx, Ly, z は実測値を用いる．そうすることで式 (15) により簡単に焦点距離を算出することができる．

$$f = \frac{1}{(I-1) \cdot J} \left(\sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=1}^J \frac{z \cdot \sqrt{(x_{ij} - x_{i+1j})^2 + (y_{ij} - y_{i+1j})^2}}{Lx} \right) + \frac{1}{I \cdot (J-1)} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \frac{z \cdot \sqrt{(x_{ij} - x_{ij+1})^2 + (y_{ij+1} - y_{ij+1})^2}}{Ly} \right) \quad (15)$$

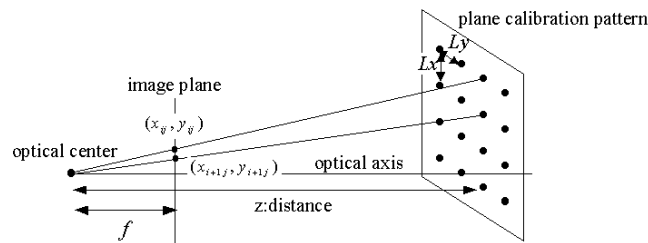


図 9 焦点距離算出

3.3 従来手法の検討

3.2節の手法を用いて検討を行った．外部パラメータを推定した結果を表 1 に示す．

表 1 従来手法の外部パラメータ

		従来手法
R	$roll(rad)$	0.0001
	$pitch(rad)$	0.0056
	$yaw(rad)$	0.09680
t	$t_x(m)$	0.3850
	$t_y(m)$	-0.0881
	$t_z(m)$	0.0075

この外部パラメータを用いて，室内と屋外を 3 次元計測した結果を表 2 に示す．室内とは約 4m の計測距離のことを，屋外とは約 40m の計測距離のことをいう．

表 2 従来手法の 3 次元計測結果 (測距誤差)

	室内	屋外
従来手法	0.5	7.8

単位 (%)

ここで測距誤差というのは式 (16) のような各特徴点の計測距離と真値の差の平均を百分率で示した値のことをいう．

$$(\text{測距誤差}) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|d_i - Z_i|}{Z_i} \quad (16)$$

d_i はカメラから各特徴点の 3 次元計測距離， Z_i はカメラから各特徴点の距離の真値， n は特徴点の個数である．

またカメラパラメータ (2.2節で述べた) を除いた対応点の座標精度のみによる測距誤差の限界は経験的に1画素の1/4, すなわち $\Delta d = 0.25(pixel)$ となる. 40m地点での計測誤差は式 (17) から求められ約 1m である. また計測距離が遠くなればなるほど測距誤差は大きくなる. 以上のことから室内, 屋外の限界測距誤差はそれぞれ 0.3%, 2.7% であり, 測距誤差は限界測距誤差に近いほど正確なカメラパラメータ, すなわち精度がいいといえる.

$$\begin{aligned} \text{(対応点の座標精度による誤差)} &= \frac{z^2}{Bf} \cdot \Delta d \\ B &: \text{カメラ間の距離 (40cm)} \end{aligned} \quad (17)$$

それをふまえて表 2 を参照すると測距誤差は室内では精度がいいが, 屋外では限界測距誤差の 3 倍近く精度が悪化していることがわかる.

主な悪化の原因として 2 つあげられる.

1. 室内, 屋外ともに高精度な計測距離を与えるステレオカメラのシステムができていないことによる屋外領域での測距誤差に与える影響.
2. 内部パラメータの正確さや対応付けのときに起こる誤差による, 外部パラメータの正確さへの影響

3.3.1 平面パラメータ

3.2節の従来手法で用いた平面パラメータを表 3 に示す.

表 3 平面パラメータの推定結果

	n_x	n_y	n_z	z
パラメータ値	-0.0028	-0.0095	0.9995	3.9960

3.3.2 内部パラメータ

歪み補正

歪みパラメータの初期値 $k' = -0.15$ とし,そしてステップ幅 $\Delta k = 0.002(max \pm 0.15)$, $\Delta x_o = 1(max \pm 10(pixel))$, $\Delta y_o = 1(max \pm 10(pixel))$ と設定した.これらの値はすべて実験で得られた経験的な値である.

これらのパラメータを用いて,歪み補正の実験を行った.歪み補正前と後の画像を図 10に示す.歪みが補正されていることがわかる.そのときの歪み定数,歪み中心を表 4に示す.また歪み中心が画像中心である.

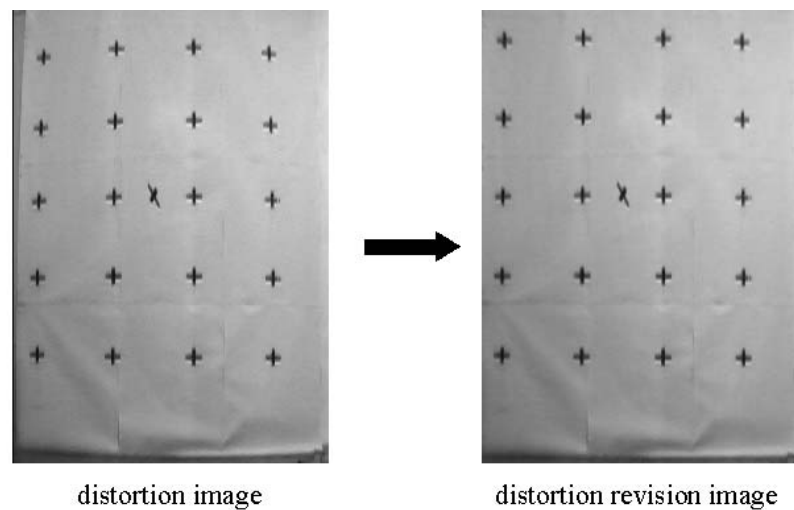


図 10 歪み補正処理の前後画像

表 4 歪みパラメータ

	base camera		inspection camera	
	歪み定数 k	歪み中心 (x_o, y_o)	歪み定数 k	歪み中心 (x_o, y_o)
パラメータ値	-0.132	(246,129)	-0.132	(265,129)

焦点距離

歪み補正後の画像を用いて式 (15) から焦点距離を算出した．その結果は $f = 8.85(mm)$ となった．

最後に内部パラメータの値を表 5 にまとめておく．

表 5 内部パラメータ

		パラメータ値
歪み定数 k		-0.132
画像中心 $(x_o, y_o)(pixel)$	基準カメラ	(246, 129)
	検査カメラ	(265, 129)
焦点距離 $f(mm)$		8.85
画素サイズ (mm)	$CCDH$ (縦)	5.12
	$CCDW$ (横)	4.8
解像度 $(pixel)$	$HEIGHT$ (縦)	512
	$WIDTH$ (横)	240

3.4 提案手法

3.2節で用いた従来手法では室内でステレオカメラ校正を行っていたために，スケールの違いから屋外の3次元計測精度が悪化する問題が想定された．実際にこの問題は実験(3.3節)により確認できた．屋外での3次元計測精度を良くするためには屋外での情報を使ったステレオカメラ校正が考えられる．しかし屋外では校正パターンを置く場合，視野が広がるため10mを越える巨大な校正パターンが必要となり，現実的ではない．そこで屋外での特徴点は道路など地面から多くとれることに着目し，その地面を平面として用いるステレオカメラ校正を考えた．

ここで内部パラメータは室内での校正による従来手法の値を使うことができるが，平面パラメータは平面校正パターンの点と点の間の真の距離がわからないため算出することができない．そこで基礎実験としてカメラの俯角とカメラから平

面までの距離の実測値を用いてステレオカメラ校正を行い，室内と屋外での 3 次元計測精度を比較した．その結果を表 6 に示す．

表 6 基礎実験の 3 次元計測結果 (測距誤差)

	室内	屋外
基礎実験	2.8	3.4
従来手法	0.5	7.8

単位 (%)

その結果をみると屋外での測距誤差が良くなっているが逆に室内の測距誤差は従来手法に比べ悪くなっている．これは従来手法と同じくスケールの違いによって精度が悪くなっていると考えられる．この結果から室内から屋外まですなわち広範囲での高精度 3 次元計測を行うには，やはり室内と屋外の両方の情報を用いる校正法が適切と考えられる．すなわち式 (18) から最適な外部パラメータ \mathbf{R}, \mathbf{t} を推定することで，広範囲での高精度な 3 次元計測が可能となる．

$$Q_{in-out}(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \min \left(\sum_{n=1}^N \left(\mathbf{H}_{indoor} - \mathbf{N}_i \cdot \left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{n}_{indoor}^T}{z_{indoor}} \right) \cdot \mathbf{N}_b^{-1} \right)^2 + \left(\mathbf{H}_{outdoor} - \mathbf{N}_i \cdot \left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{n}_{outdoor}^T}{z_{outdoor}} \right) \cdot \mathbf{N}_b^{-1} \right)^2 \right) \quad (18)$$

$\mathbf{H}_{indoor}, \mathbf{n}_{indoor}, z_{indoor}$ は室内のパラメータ

$\mathbf{H}_{outdoor}, \mathbf{n}_{outdoor}, z_{outdoor}$ は屋外のパラメータ

3.5 実験結果

提案手法から求めた外部パラメータを表 7 に示す．他の手法の結果も示しておく．

表 7 外部パラメータ

		提案手法	従来手法	基礎実験
R	$roll(rad)$	0.0000	0.0001	0.0000
	$pitch(rad)$	0.0002	0.0056	0.0007
	$yaw(rad)$	0.0311	0.09680	0.3059
t	$t_x(m)$	0.4066	0.3850	0.3898
	$t_y(m)$	-0.0002	-0.0881	-0.01852
	$t_z(m)$	0.0076	0.0075	-0.0217

そしてこの外部パラメータを用いて 3 次元計測した結果を，表 8 に示す．

表 8 3 次元計測誤差 (測距誤差)

	室内	屋外
提案手法	0.6	3.7
従来手法	0.5	7.8

単位 (%)

提案手法を従来手法と比較してみると，室内での測距誤差はほとんど変わらず，そして屋外の測距誤差は約 1/2 に改善されている．

4. 屋外設置のためのゆれ補正

屋外設置，特に柱など不安定なところにステレオカメラを設置した場合，風などの影響によりカメラがゆれることがある．このときの平面とカメラの位置関係はステレオカメラ校正を行ったときから変化しているため，正しい3次元計測は望めない．またリアルタイムでステレオカメラ校正を行うのも現実的に不可能である．本研究では，上記で求めたステレオカメラ校正を初期設定として，リアルタイムで入力される画像と初期設定（静止状態）とのズレを算出する．具体的にはゆれ幅とゆれ方向角度という2つのパラメータを定義し，これらを用いてリアルタイムでゆれ補正を行う手法を提案する．

4.1 ゆれ補正

ゆれ補正の前に静止状態でのワールド座標系の座標 $\bar{\mathbf{M}}_w = (\bar{X}_w, \bar{Y}_w, \bar{Z}_w)^T$ からカメラ座標系の座標 $\bar{\mathbf{M}}_c = (\bar{X}_c, \bar{Y}_c, \bar{Z}_c)^T$ との関係は式 (19) のようになる．ここでワールド座標系は柱の立地点を原点とした座標系，カメラ座標系は基準カメラのレンズ中心を原点とした座標系とする（図 11）．ワールド座標系を柱の立地点にするのは，車など立体物を検出する場合に，地面からの高さや立体物の奥行きを表現しやすいためである．

$$\bar{\mathbf{M}}_w = \mathbf{R}(Y, \gamma) \cdot \bar{\mathbf{M}}_c + \mathbf{t} \quad (19)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \quad \mathbf{t} = \begin{pmatrix} H \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

γ : 俯角 (rad/sec)

静止状態ではカメラ座標系から \mathbf{R}, \mathbf{t} を用いてワールド座標系に変換し3次元計測を行うことができる，しかしゆれが発生した状態ではこれらの関係が変わってしまい，静止状態の \mathbf{R}, \mathbf{t} を用いて精度が良い3次元計測を行うことは不可能となる．

そこでゆれを考慮したときのワールド座標系の座標 $\widetilde{\mathbf{M}}_w = (\widetilde{X}_w, \widetilde{Y}_w, \widetilde{Z}_w)^T$ とカメラ座標系の座標 $\widetilde{\mathbf{M}}_c = (\widetilde{X}_c, \widetilde{Y}_c, \widetilde{Z}_c)^T$ の関係は式 (20) のようになる．支点座標

$\widetilde{\mathbf{M}}_f = (\widetilde{X}_f, \widetilde{Y}_f, \widetilde{Z}_f)^T$ はゆれの支点を原点とした座標系の座標である．(図 11)．

$$\begin{aligned}\widetilde{\mathbf{M}}_w &= \mathbf{R}_f \cdot \mathbf{M}_f + \widetilde{\mathbf{t}}_f \\ \widetilde{\mathbf{M}}_f &= \mathbf{R}_c \cdot \widetilde{\mathbf{M}}_c + (\mathbf{t} - \mathbf{t}_f)\end{aligned}\quad (20)$$

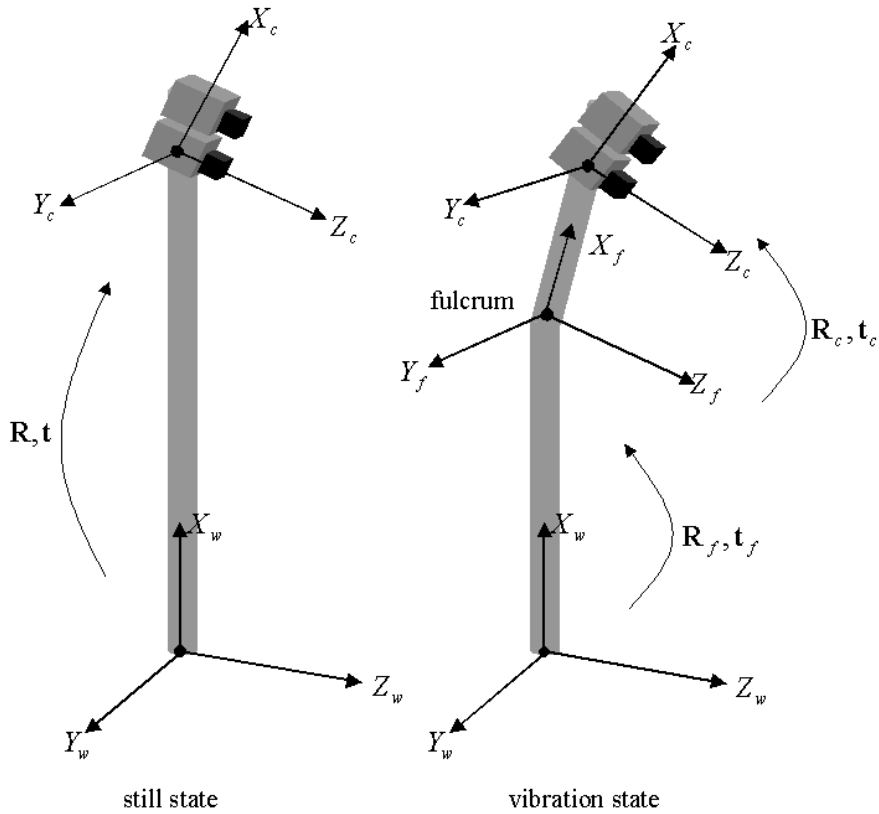


図 11 座標系の定義

すなわちゆれによって変わる関係 $\mathbf{R}_f, \mathbf{R}_c, \mathbf{t}_f$ をなんらかのパラメータを用いて表すことができれば，高精度な 3 次元計測を実現することができる．そこでそのゆれパラメータとしてゆれ幅 d ，ゆれ方向角度 β (図 12) を定義する．ゆれ幅 d は角度 α でいうと式 (21) となり Y 軸の回転行列，そしてゆれ方向角度 β は X 軸の

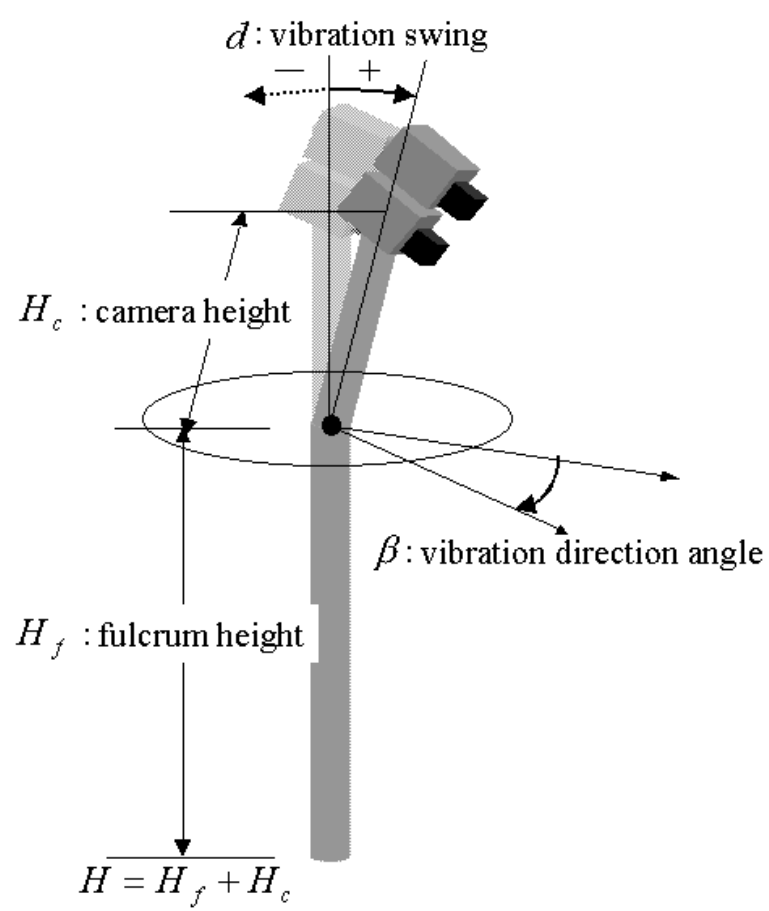


図 12 ゆれパラメータ

回転行列で表される．ちなみに α β とともに反時計回りが+である．

$$\alpha = -2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{d}{2 \cdot H_c}\right) \quad (21)$$

H_c : カメラから支点までの距離

そして $\mathbf{R}_f, \mathbf{R}_c, \mathbf{t}_f$ は式 (22) のように定義できる．

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_f &= \mathbf{R}(X, \beta) \cdot \mathbf{R}(Y, \alpha) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_c &= \mathbf{R}(X, -\beta) \cdot \mathbf{R}(Y, \gamma) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \\ \mathbf{t}_f &= \begin{pmatrix} H_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

以上の方法でゆれパラメータを用いて 3 次元計測を行えば，精度の向上が望める．またゆれパラメータは実環境の情報を用いることで算出することができるので屋外設置ステレオカメラでのリアルタイム 3 次元計測が可能となる適用ができる．

4.2 ゆれ補正の必要性

実際，ゆれによる計測誤差，すなわちゆれ後のワールド座標系の 3 次元座標点 $\widetilde{\mathbf{M}}_w(\widetilde{X}_w, \widetilde{Y}_w, \widetilde{Z}_w)$ と静止状態での 3 次元座標点 $\bar{\mathbf{M}}_w(\bar{X}_w, \bar{Y}_w, \bar{Z}_w)$ の距離 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ は式 (23) となる．支点は地面 ($H_f = 0$) と仮定し， α は 0 に近いことから $\cos \alpha = 1$ と近似している．

$$\widetilde{\mathbf{M}}_w - \bar{\mathbf{M}}_w = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha (\cos \beta \cdot \bar{Z} + \sin \alpha \cdot \bar{Y}) \\ \sin \alpha \sin \beta \cdot \bar{X} \\ -\sin \alpha \cos \beta \cdot \bar{X} \end{pmatrix} \quad (23)$$

そのことを確認するために図 12 のモデルで，支点位置は 0(m)，カメラの高さは 8(m)，俯角 20(degree)，そしてゆれ幅は 12(cm) と仮定し，シミュレーションを行った．そのシミュレーションの結果を表 9 に示す．3 次元計測点は高さ 2(m)，水平方向 0(m)，奥行き 40(m) である．

表 9 ゆれによる想定誤差

ゆれ方向角度 (°)	高さ	水平方向	奥行き
0	+60	0	-3
45	+43	+2	-2
90	+0.1	+3	0
135	-43	+2	+2
180	-60	0	+3
225	+43	-2	-2
270	-0.1	-3	0
315	-43	-2	+2

単位 (cm)

この表から分かるように最大で高さ 60(cm) の誤差があり水平方向 2(cm)，奥行き (3cm) となっている．水平方向，奥行きはほとんど誤差がでていないが，高さは 2(m) に対して 60(cm) と一番影響を受けている．そのことから高さ計測にはゆれ補正が不可欠であることが分かる．

4.3 ゆれパラメータ推定手順

ゆれパラメータがわかれば式 (20)，(22) から 3 次元計測を行えることを説明したが，そのゆれパラメータを求める具体的な手法を示す．

1. 静止画像から実環境の情報である地面の基準点 (\bar{x}_n, \bar{y}_n) を決定する．

2. 正規化相関法 (4.3.2) を用いて図 13のゆれ後画像での対応点 $(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n)$ を探索し対応点の中で信頼のおける点だけを使用する .

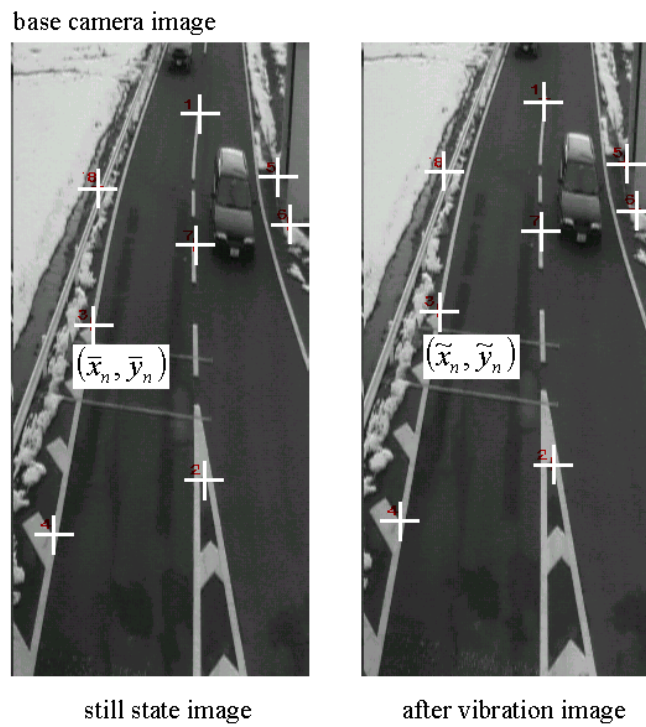


図 13 屋外画像

3. ゆれパラメータを推定する (4.3.3) .
4. そのパラメータを用いてゆれ補正を行い 3 次元計測する .
- 以上の手順からゆれ補正を行い高精度な 3 次元計測を可能にする .

4.3.1 対応点探索方法検討

対応点探索方法として，代表的な方法である最短距離法 (ssd) と正規化相関法との比較実験をを行った．それぞれの式は (24)，(25) で与えられる [21]．

$$ssd: \quad D(x, y) = \sum_i \sum_j (T(i, j) - W(i + x, j + y))^2 \quad (24)$$

$$\text{相関法:} \quad R(x, y) = \frac{1}{M \times N} \sum_i^M \sum_j^N T(i, j) \cdot W(i + x, j + y) \quad (25)$$

$T(i, j)$ は既知のパターンに関するモデル (テンプレート)， $W(i, j)$ は候補領域を示す． M, N は縦と横のウィンドウサイズである．

一般に，処理時間の方は ssd 法が短く，正規化相関法の方は $T(i, j), W(u, j)$ を正規化するのに時間がかかるが，精度はその逆で，正規化相関法が良い (画像の輝度およびコントラストの線形変化とノイズ影響を受けにくい)．それを確認するために屋外画像を用いて比較実験を行った．

比較には図 14 の静止画像と，輝度変化の代表的な線形補正処理した画像， γ 補正処理した画像，そして白色ノイズを付加した画像での実験を行った (図 15，図 16)．それぞれの評価値を表 10，11 に示す．評価値として ssd では以下の式を，相関法では相関値を用いる．

$$(\text{評価値}) = \frac{D(0, 0) \times 9}{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 D(i, j)}$$

$D(0, 0)$: 類似点

$D(i, j)$: 類似点を含むまわり 8 点

これは類似点の $D(0, 0)$ がまわりの 8 点より高くなればなるほど評価値は低くなり，類似点の $D(0, 0)$ がまわりの 8 点と変わらなければ評価値は高くなる．

ssd と相関法の比較した結果を表 12 に示す．以上のことから ssd は輝度変化やノイズによって対応点がとれていないときがあり，またとれていたとしても評価値から判断するのは困難である．両手法の違いをまとめると表 13 のようになるが，本研究では環境の変化に強い相関法を採用した．



図 14 静止画像

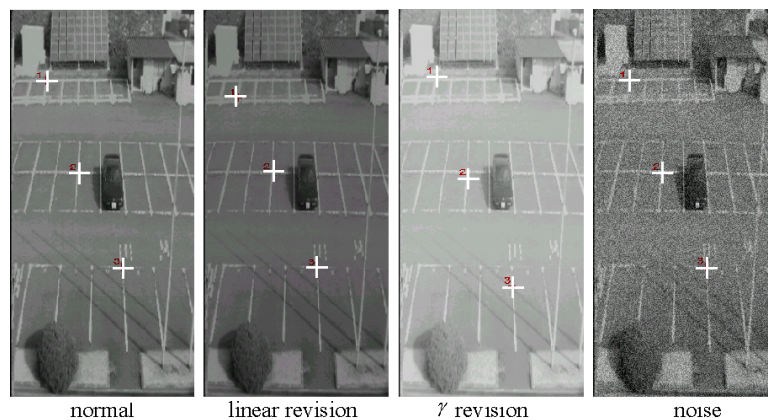


図 15 ゆれ後画像 (ssd)

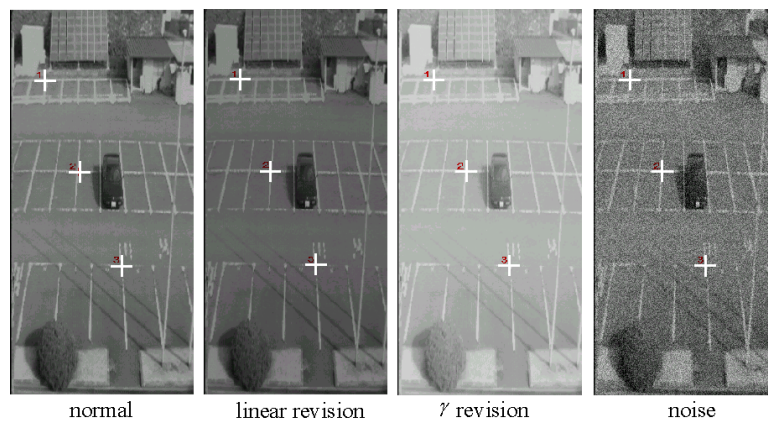


図 16 ゆれ後画像 (相関法)

表 10 ssd の評価値

	原画像	線形補正画像	γ 補正画像	ノイズ画像
特徴点 1	0.12	なし	なし	0.73
特徴点 2	0.05	0.74	0.98	0.70
特徴点 3	0.03	0.86	なし	0.78

なし:明らかな誤対応

表 11 相関法の評価値

	原画像	線形補正画像	γ 補正画像	ノイズ画像
特徴点 1	0.95	0.96	0.93	0.57
特徴点 2	0.99	0.98	0.98	0.68
特徴点 3	0.99	0.96	0.97	0.57

表 12 ssd と相関法の比較結果

		原画像	線形補正画像	γ 補正画像	ノイズ画像
ssd	特徴点 1		×	×	
	特徴点 2			×	
	特徴点 3			×	
相関法	特徴点 1				
	特徴点 2				
	特徴点 3				

表 13 ssd と相関法の検討結果

	長所	短所
ssd	探索時間が短い	雑音，画像の補正に弱い
相関法	雑音，画像の補正に強い	探索時間がかかる

4.3.2 正規化相関法の検討-対応点の信頼性

4.3.1で ssd と相関法の比較検討を行い正規化相関法を採用したが，対応点探索のときに輝度の変化，ノイズ，車の重なりの影響で誤対応する可能性がある．そこで相関値がどの値まで信頼がおけるか白色ノイズを図 17のように図 15，16 のノイズ画像 (noise1) に 1.25 倍ずつ付加していき検討を行った．そのときの相関値を表 14に示す．その結果，相関値が 0.4 以下では対応の信頼がおけないことがわかる．

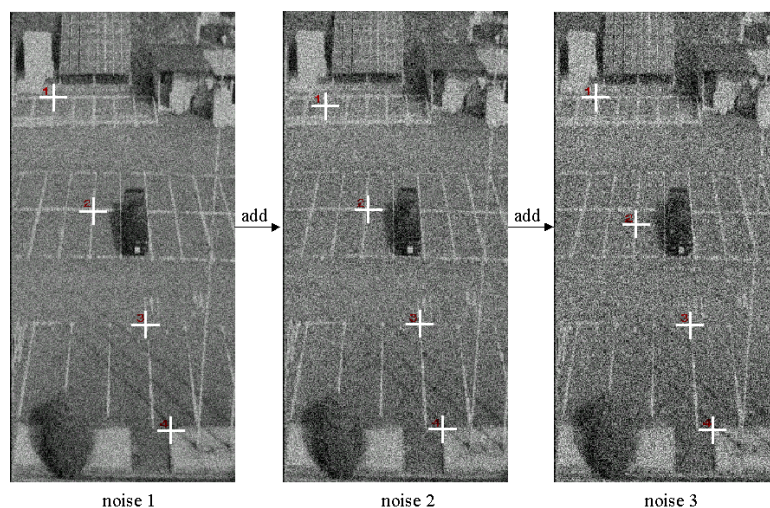


図 17 ノイズ付加したゆれ後画像

表 14 ノイズによる相関値の変化

	特徴点 1	特徴点 2	特徴点 3	特徴点 4
noise1	0.57	0.68	0.57	0.71
noise2(noise1 × 1.25)	0.35	0.45	0.43	0.62
noise3(noise2 × 1.25)	なし	0.39	0.32	0.58

なし:明らかな誤対応

4.3.3 ゆれパラメータ推定

ゆれパラメータは静止画像の基準点 (\bar{x}_n, \bar{y}_n) とゆれ後画像のその対応点 $(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n)$ から以下の式 (26) を用いて推定することができる．この式には見えていないが，特徴点の実環境では道路などの平面から多くとれることから高さを 0 と仮定することができ，それを利用している (付録 B)．この式は α の角度が 0 に近いので $\cos \alpha = 1, \sin \alpha = \alpha$ と近似している．

$$Q_{\alpha\beta}(\sin \alpha, \beta) = \min \left(\sum_{n=1}^N \left(\tilde{x}_n - \frac{(\cos \gamma \cdot g(\sin \alpha, \beta) - \bar{x}_n) H - h \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta \cdot H_f}{(\sin \gamma \cdot g(\sin \alpha, \beta) - f) H + h \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta \cdot H_f} \right)^2 + \sum_{n=1}^N \left(\tilde{y}_n - \frac{\bar{y}_n - h \sin \alpha \sin \beta \cdot H_f}{(\sin \gamma \cdot g(\sin \alpha, \beta) - f) H + h \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta \cdot H_f} \right)^2 \right) \quad (26)$$

$$g(\sin \alpha, \beta) = \sin \alpha (\bar{y}_n \cdot \sin \beta - f \cdot \cos \gamma \cos \beta + \bar{x}_n \cdot \sin \gamma \cos \beta)$$

$$h = f \cdot \sin \gamma + \bar{x}_n \cdot \cos \gamma$$

4.4 ゆれ予測

対応点探索方法に，ノイズに強い正規化相関法を用いることにしたが，正規化相関法は探索に時間がかかる．そして探索範囲については最大ゆれ幅から求めたゆれ後画像点 $(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n)$ と静止画像点 (\bar{x}_n, \bar{y}_n) を減算した値を $\Delta x(pixel), \Delta y(pixel)$

とした場合，最低でも $2\Delta x(pixel) \times 2\Delta y(pixel)$ のエリアが必要である．これでは実際にリアルタイムの探索は難しい．本研究では実環境での実用化を考え，さらに改善を行う．

風などの自然におこるゆれはある程度，周期性を持っていると考えられ（参照 [22]），それを利用することでゆれを予測することができる．以下にゆれ幅とゆれ方向角度の予測方法を示す．

4.4.1 ゆれ幅

風などで起こるゆれの振動を短時間では一定と仮定することによって，以下の方法で予測することができる．

d' を現時点 t でのゆれ幅とすると，過去 $t_i (i = -1, -2 \dots)$ のゆれ幅 d'_i を用いて式 (27) からニュートン法を用いて，最大ゆれ幅 $A(cm)$ ，角速度 $\omega(rad/sec)$ ，位相 $\varphi(rad)$ を推定する．

$$Q_{A\omega\varphi}(A, \omega, \varphi) = \min \left(\sum (d'_i - A \sin(\omega t_i + \varphi))^2 \right) \quad (27)$$

それらを推定することによって，現時点 t での \tilde{d}' を式 (28) から予測することができる．

$$\tilde{d}' = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (28)$$

ここで考えなければいけないのが，ニュートン法で解くときの局所解問題である．そのため初期値は解に近い値を入れるのだが， A, ω, φ は全くの未知である．そして式 (27) は \sin が入っているためよけいに局所解に陥りやすい（図 18）．それについての解決方法を以下に示す．

局所解問題

ある範囲で初期値を変えて，評価値 $Q_{A,\omega,\varphi}(A, \omega, \varphi)$ が最小になるような A, ω, φ を導き出す．その方法を以下に示す．

1. 初期範囲 $A = A_{min} \sim A_{max}(cm), \omega = \omega_{min} \sim \omega_{max}(rad/sec), \varphi = -\pi \sim \pi(rad)$ とする

2. その範囲で初期値を $\Delta A(cm), \Delta \omega(rad/sec), \Delta \varphi(rad)$ ずつ変化させ, A, ω, φ を推定する．そのときに推定パラメータが推定途中に初期範囲以外になった場合は, その初期値での推定は終了する．
3. すべての初期範囲で推定し終わったときに, $Q_{A\omega\varphi}(A, \omega, \varphi)$ の評価値が一番最小のときの $\tilde{A}, \tilde{\omega}, \tilde{\varphi}$ を推定結果とする．
4. その推定した値から予測したゆれ幅 \tilde{d}' が, 現時刻でのゆれ幅 d' とあまり誤差がなかった場合は, 次の時刻での A, ω はあまり変動してないと考え, 現時刻の推定結果である $\tilde{A}, \tilde{\omega}$ を中心にその周りのみを初期範囲に限定し 2. の処理を行う．かなりの誤差がある場合は 1. の初期範囲で 2. を行う,

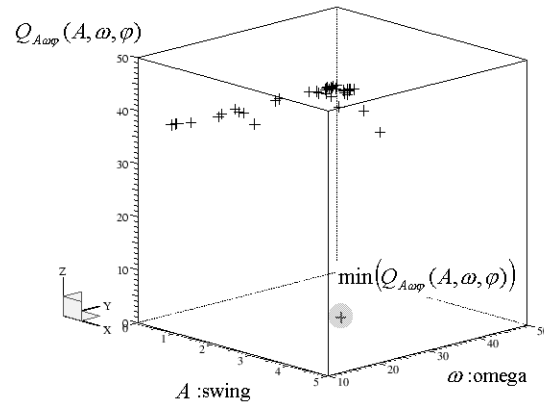


図 18 局所解による $Q_{A\omega\varphi}(A, \omega, \varphi)$ の変化

4.4.2 ゆれ方向角度

現時点 t でのゆれ方向角度 β' とすると β' は, 短時間でのゆれの方向はあまり変わらないと考え, 式 (29) から予測を行う．

$$\beta' = \frac{\beta'_{-1} + \beta'_{-2} + \beta'_{-3}}{3} \quad (29)$$

4.5 実験結果

実際の画像を用いてゆれ補正，ゆれ予測を行った．その結果を以下に示す．そのとき，ゆれパラメータを推定する際に，図 12 のようなモデルを考えた場合，その支柱の固有振動数は約 2～5(Hz) である [22]．そこから少し余裕をもたせた範囲を初期範囲として， $A_{min} = 1(cm)$ ， $A_{max} = 10(cm)$ ， $\omega_{min} = 6(rad/sec)$ ， $\omega_{max} = 64(rad/sec)$ と設定した．またステップ幅は幅をいろいろ変えて実験を行い， $\Delta A = 1(cm)$ ， $\Delta\omega = 0.5(rad/sec)$ ， $\Delta\varphi = 0.5(rad)$ のように設定した．

4.5.1 ゆれ補正

実際の道路画像と駐車場の画像を用いて実験を行った．

道路画像の図 19 の静止画像とゆれ後画像 (画像 1, 画像 2) を用いて実際にゆれパラメータ推定し 3 次元計測を行った．図中で + の 8 点は推定に用いた特徴点で， (車の屋根) は 3 次元計測の実験を行った点である．車の屋根のカメラ静止状態での 3 次元計測は高さ 1.03(m)，水平方向 3.07(m)，奥行き 21.50(m) である．ここで支点位置は 5.5(m)，そこからカメラまでの高さは 1.5(m) で，俯角は 25.5(degree) である．

また駐車場画像 (図 20) でも同様にゆれパラメータを推定し 3 次元計測を行った．図中で + は推定に用いた特徴点 8 点で， は 3 次元計測の実験を行った点である．カメラ静止状態での 3 次元計測は高さ 1.41(m)，水平方向 3.54(m) 奥行き 27.77(m) である．ここで支点位置 11.15(m) は，そこからカメラまでの高さは 1.65(m) で，俯角は 24.5(degree) である．

推定したそれぞれのゆれパラメータを表 15 に示す．またそのときの補正なし，補正ありのときの 3 次元計測誤差を表 16，表 17 に示す．

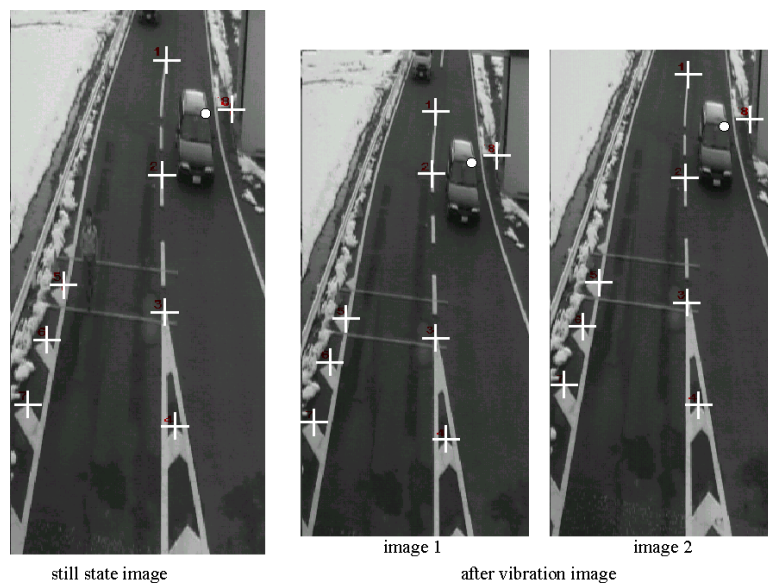


図 19 道路画像

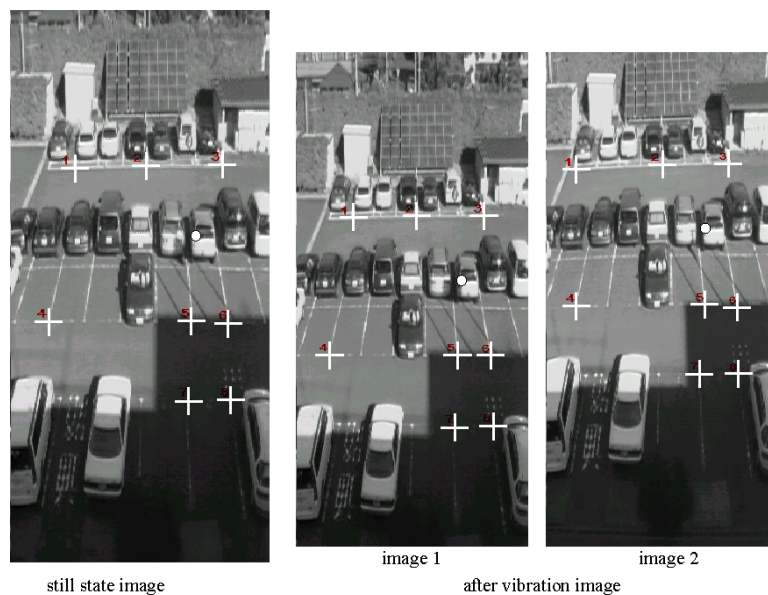


図 20 駐車場画像

表 15 ゆれパラメータ

	道路画像		駐車場画像	
	画像 1	画像 2	画像 1	画像 2
ゆれ幅 (cm)	-5.40	4.49	-4.83	6.67
ゆれ方向角度 (deg)	-35.4	-2.74	-12.47	36.63

表 16 ゆれによる 3 次元計測誤差 (道路画像)

	ゆれ補正なし			ゆれ補正あり		
	高さ	水平方向	奥行き	高さ	水平方向	奥行き
画像 1	58	11	16	5	17	26
画像 2	53	16	5	5	16	14

単位 (cm)

表 17 ゆれによる 3 次元計測誤差 (駐車場画像)

	ゆれ補正なし			ゆれ補正あり		
	高さ	水平方向	奥行き	高さ	水平方向	奥行き
画像 1	89	15	7	8	9	22
画像 2	108	39	16	26	17	23

単位 (cm)

4.5.2 ゆれ予測

実際のゆれ動画像 (図 21) を用いて予測の実験を行った．その動画像のサンプリングごとのゆれ幅，ゆれ方向角度を図 22に示す．サンプリング周期は $1/30(\text{sec})$ である． ゆれ幅

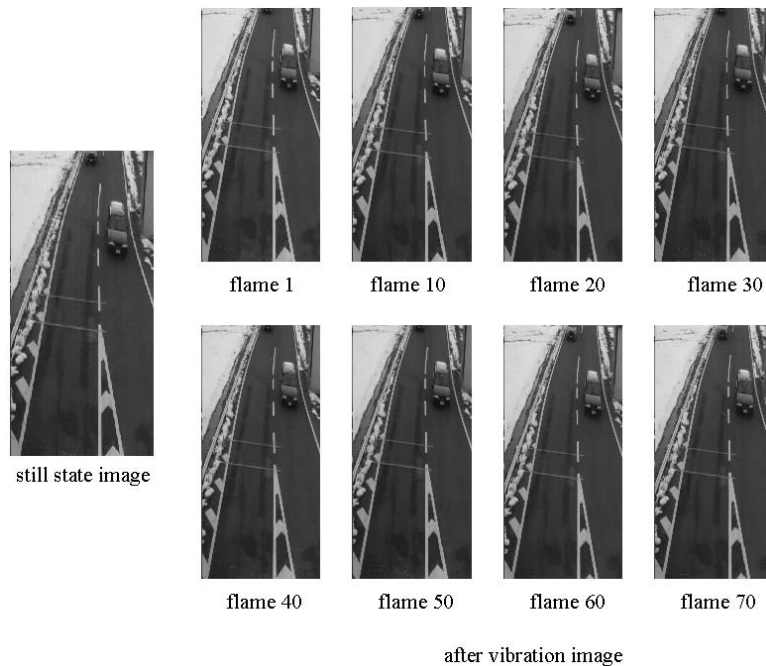


図 21 動画像

A, ω, φ の推定に用いるデータ数を時間のことを考え 3~7 にし，そのときの相対誤差が 50%を超える割合を図 23に示す．相対誤差の算出方法は

$$(\text{相対誤差}) = \frac{|d' - \tilde{d}|}{4} \cdot 100 \quad (30)$$

である．

その結果を見るとデータ数 6 からはあまり変わらないことがわかる．そのことから推定に用いるデータ数は 6 にする．

データ数 6 個で推定した場合に予測結果を図 24に示す．またそのときの相対誤差を図 25に示す．

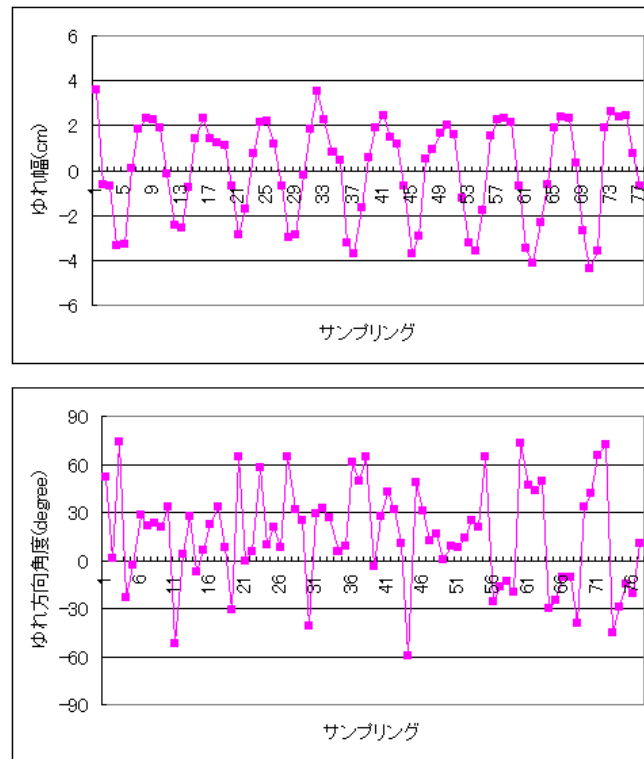


図 22 動画像のゆれ幅，ゆれ方向角度

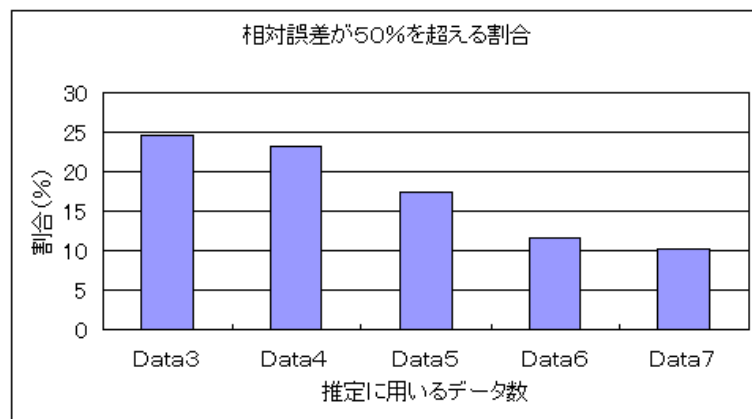


図 23 推定データによる相対誤差が 50%を超える割合

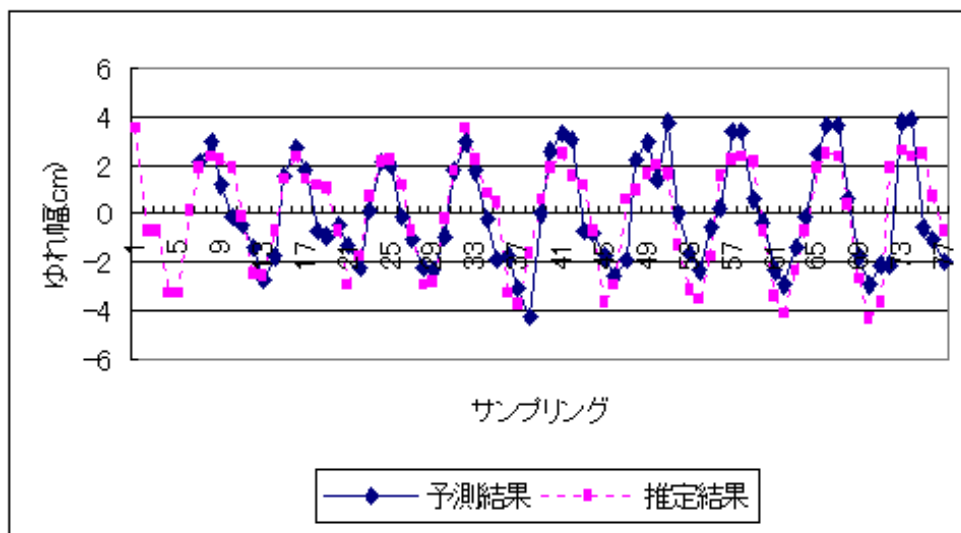


図 24 ゆれ幅予測結果

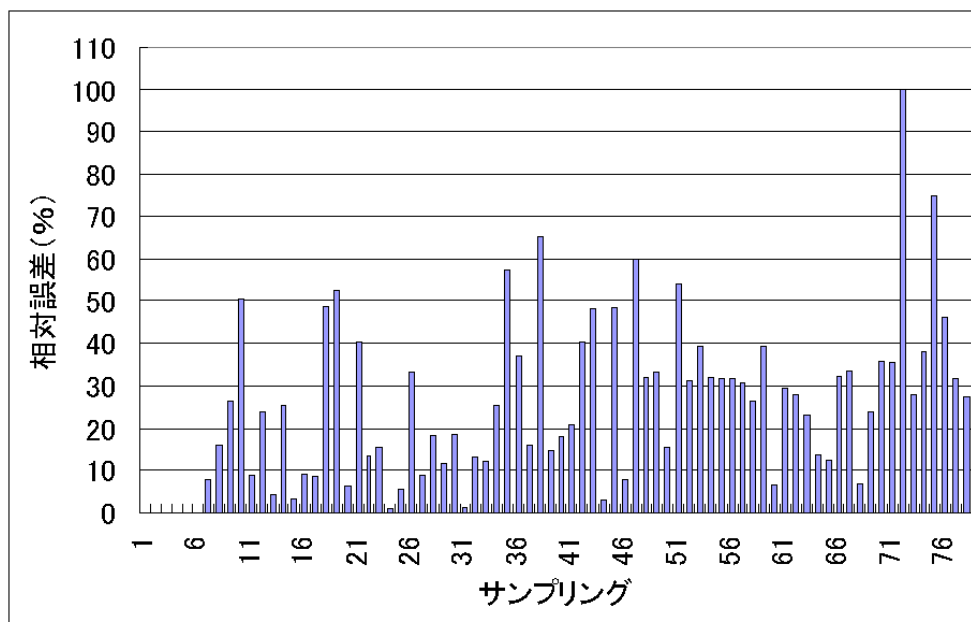


図 25 ゆれ幅の相対誤差

ゆれ方向角度

ゆれ方向角度は短時間においてあまり変わらないと仮定したが，図 22をみるとゆれ方向角度の値が変動している．そのことからゆれ方向角度の予測は意味がないので実験を行わなかった．それについては 5章の考察で述べる．

5. 考察

3章では実環境情報を用いたステレオカメラ校正を，そして4章ではゆれ補正についてそれぞれ画像を用いて実験を行った．その結果についての考察を以下に述べる．

5.1 実環境情報を用いたステレオカメラ校正

本研究の提案手法は室内では従来手法と比べて 0.5% , 0.6% とほとんど変わらないといえる．また屋外では基礎実験と比べ，3.4%, 3.7% とこれもほとんど変わらないことから広範囲にわたって 3 次元計測精度がよくなっているといえる．

本来，室内と屋外の情報を両方用いることで，室内と屋外の測距誤差は従来手法や基礎実験に比べ，若干悪化することが想定されるが，本研究ではほとんど変わっていない．変わらない理由については，より最適な外部パラメータに近づいたからだと考えられる．そのことから推定した外部パラメータを用いて，室内と屋外の間の距離 (4m ~ 40m) での測距誤差は従来手法と基礎実験に比べて良いと考えられる．そのことから広範囲での 3 次元計測が可能といえる．しかし，仮に 100m 先を 3 次元計測を行った場合，ステレオカメラシステムが完全でないので精度がいいかどうかは疑問である．そのことについて今後考える必要がある．

今後さらに精度向上するためには内部パラメータの精度をあげるか，もしくは内部，外部パラメータ両方を同時に推定することがなどが考えられる．

5.2 屋外設置のためのゆれ補正

5.2.1 ゆれ補正

表 16，表 17 のゆれ補正なしの水平方向，奥行きは両方ともほとんど静止状態の 3 次元計測値と変わっていないことから，高さのみのゆれ補正が必要であるといえる．そして高さの誤差に着目してみると，道路画像の場合，ゆれ補正なしでは画像 1 では誤差が 58cm と影響を大きく受けているがゆれ補正することで誤差が 5cm まで補正されていることがわかる．画像 2 でも誤差 53cm が 5cm まで補

正されている．また駐車場でも同様に画像 1 ではゆれ補正なしでは 89cm だったが，ゆれ補正することによって 8cm まで誤差を補正できており，画像 2 でもゆれ補正なしで 108cm が，ゆれ補正することによって 26cm まで誤差を補正できている．

そのことから補正を行うことでゆれている場合でも高精度な 3 次元計測が行えているといえる．

5.2.2 ゆれ予測

図 24,25 からゆれ幅の予測を検討してみるとゆれ幅が最大ゆれ幅に近いときに誤差が大きくなっている．しかし探索範囲を考えた場合に，ゆれを予測しないときはこの場合では $\pm 4\text{cm}$ の探索範囲が必要だが，予測を行うことによって，89.85%の精度から考えて，半分の $\pm 2\text{cm}$ の探索範囲で行えるので探索範囲は $1/2$ に減っている．そのことで時間の短縮と誤対応を減らすことができる．

一方，ゆれ方向角度では推定結果がゆれ幅の値が大きいときは，ゆれ方向角度がおよぼす影響が大きいため推定できているが，ゆれ幅が 0 に近いとき，方向がおよぼす影響が小さくなるので，正確な方向を推定するのが難しい．今後ゆれ幅が 0 に近いときに前時刻でのゆれ方向角度を現時刻のゆれ方向角度にするなど新たな予測方法を考える必要がある．

5.2.3 今後の課題

今後の課題として，予測の精度向上と対応点の信頼性があげられる．予測できていなかった場合に，対応点から判断するしかないので，その対応点が信頼のおける点かどうかを判断する必要がある．また屋外では環境の変化があるので，それにも対応できるような，精度がいい対応点探索が必要である．また本研究ではサンプリング周期を $1/30(\text{sec})$ として実験を行ったが，現時点で $1/30(\text{sec})$ での処理は無理である．今後サンプリング周期を遅くして考える必要がある．またゆれ幅とゆれ方向角度ともに推定結果に若干の誤差が残るため，ゆれ予測に影響しており今後ゆれパラメータの推定誤差の望まれる．

6. おわりに

本研究ではステレオ画像センサを屋外に設置するために，広範囲で高精度 3 次元計測を行えるように室内と屋外の両方の情報を用いて，それを組み合わせるステレオカメラ校正を提案した．また風などのゆれによって 3 次元計測精度が悪化するのをゆれパラメータ（ゆれ幅，ゆれ方向角度）と実環境情報を用いて行うことでゆれ補正を行う手法を提案した．さらに対応点問題とリアルタイム性を考慮し，ゆれ予測を加えることでより実用的な手法を目指した．その結果，提案した手法を用いることでゆれに強くなり，リアルタイムで高精度な 3 次元計測が可能となった．今後屋外でのステレオ設置への適用が期待される．

謝辞

本研究の機会を与えてくださり、数々の有益なご指導を与えてくださいました像情報処理学講座の千原 國宏教授に深甚の謝意を表します。

副指導教官としてご助言頂いた横矢 直和教授，眞鍋 佳嗣助教授，金山 憲司教授，に心から感謝致します。

また，本研究の終始にわたり，ご指導を賜り，また，常に有益なご助言で著者を導いて頂きましたオムロン連携講座の緒方 司郎助教授，およびオムロン株式会社の来海 雅俊氏，呉 越氏に深く感謝致します。

本研究を通じて数々の有益なご助言，ご協力を与えてくださいました，東京電機大学理工学部建築環境工学科の河井 宏允教授に厚く御礼申し上げます。

日頃から，ご指導，ご助言をいただいた像情報処理学講座の土居 元紀助手，黒田 知宏助手誠にありがとうございました。

修士論文を書くにあたって，ご助言をいただいた像情報処理学講座の松坂 勝彦氏，世古 登志洋氏どうもありがとうございました。

また，日頃からお世話になった，像情報処理学講座の博士，修士のみなさん，いつもあたたかい心配りをして頂いた櫛本 季子秘書どうもありがとうございました。

参考文献

- [1] Y. Shirai, “Three-Dimensional Computer Vision”, Springer-Verlag, 1987.
- [2] K. Ohashi, et al, “Vehicle Recognition from Parking Images using a Stereo Camera”, Proceeding of The 4th World Congress on ITS, Berlin, Oct. 1997.
- [3] Y. Asokawa, et al, “Automatic Vehicle Recognition by Silhouette Theory” , Proceeding of The 5th World Congress on ITS, Korea, Oct. 1998.
- [4] M. Kimachi, et al, “A vehicle recognition method robust against vehicle’s overlapping based on stereo vision” , Proceedings of IEEE/IEEJ/JSAI Conference on ITS’99, Tokyo, Oct. 1999.
- [5] K. Kanayama, “Applications of Image Technology to Road Traffic Systems” , Proceedings of the Annual Meeting of the Television Society of Japan, pp.514-517, 1996.
- [6] A Saito, et al, “Silhouette VisionTM:New Video Vehicle Detection Field Proven Robust And Accurate” , Proceeding of The 6th World Congress on ITS, Toronto, Nov. 1999.
- [7] 奥富 正敏, 金出 武雄, “複数の基線長を利用したステレオマッチング”, 信学論 (D-II), vol.J75-D-II, no.8, pp.1317-1327, Aug. 1992.
- [8] R. Y. Tsai, “A versatile camera calibration technique for accurary 3Dmachine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”, IEEE, Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, no.4, pp.323-344, Aug. 1987.
- [9] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, “Camera calibration with distorton models and accuracy evaluation”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell. vol.14, no.10, pp.965-980, Oct. 1992.

- [10] Z. Zhang, O. Faugers, R. Deriche, “An Effective Technique for Calibrating a Binocular Stereo Through Projective Reconstruction Using Both a Calibration Object and the Environment”, *Artificial Intelligence Journal*. vol.1, no.1, pp.57-68, Fall. 1997.
- [11] 森村 淳, 魚森 謙也, 石井 浩史, 赤堀 裕志, 北村 好徳, 坂口 隆, “純電子式画像揺れ補正技術”, *National Technical Report*, vol.37, no.3, pp.308-314, 1991.
- [12] W. Neuenschwandaer, P. Mohr, G. Szekey, O. Kubler, “Initializing snake”, in *Proc. CVPR*, pp.658-663, 1994.
- [13] 福井 和広, 久野 義徳, “マルチスネークによる動物体の輪郭追跡”, *情処研資*, vol.CV80-24, pp.177-184, 1992.
- [14] 畑 幸一, 大谷 淳, 岸野 文郎, 中津 良平, “複雑な輪郭の自動検出・追跡法”, *信学論 (D-II)*, vol.J81-D-II, no.4, pp.706-715, 1998.
- [15] 宮田 真, 白井 良明, 久野 義徳, 三浦 純, “時系列ステレオ画像を用いた動物体の検出と距離測定”, *画像の認識・理解のシンポジウム (MIRU'96)*, pp.II79-II84, 1996.
- [16] 田村 洋, 横矢 直和, “ステレオ画像からの運動予測に基づく物体追跡”, *情処第 49 全大会*, 1F-4, 1994.
- [17] 徐 剛, 辻 三郎, “3次元ビジョン”, 共立出版, 1998.
- [18] 金谷 健一, “画像理解 3次元認識数理”, 森北出版, pp.82-84, 1990.
- [19] 虹野 浩, 金出 武雄, “任意カメラ配置におけるステレオ視とステレオ校正”, *信学論 (D-II)*, vol.J79-D-II, no.11, pp.1810-1818, Dec. 1996.
- [20] O.Faugeras, ”Three-Dimensional computer vision,a geometric viewpoint”, *The MIT press*, pp.207-208, 1993.
- [21] 杉山 善明, 泉 康裕, 有木 康雄, “部分空間射影による顔領域の追跡”, *画像の認識・理解のシンポジウム (MIRU'96)*, pp.I19-I24,1996.

[22] 社団法人日本鋼構造協会, “構造物の耐風工学”, 東京電機大学出版局, 1997.

付録

A. 回転の表現

$roll, pitch, yaw$ は, 任意の回転を Z 軸まわりの回転 ($roll$) ϕ , 次に新しい Y 軸まわりの回転 ($pitch$) θ , 最後に新しい X 軸まわりの回転 (yaw) ψ の 3 段階の回転によって表すものである. $roll, pitch, yaw$ を用いた回転行列 R は次のような式になる. それぞれ反時計回りを + とする (図 26).

$$\begin{aligned} R &= R(Z, \phi)R(Y, \theta)R(X, \psi) \\ &= \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 1 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (31) \end{aligned}$$

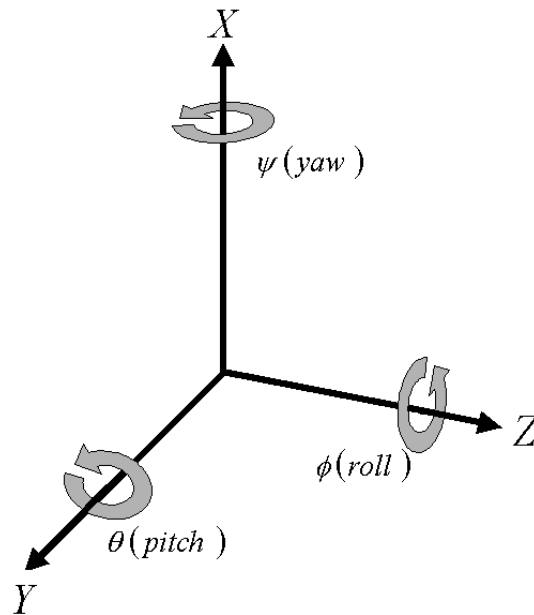


図 26 回転の定義

B. ゆれパラメータ導出

ゆれた場合のワールド座標系からカメラ座標系に変換する式は以下のようになる．

$$\widetilde{\mathbf{M}}_c = \mathbf{R}_{-\beta}^{-1} \mathbf{R}_\gamma^{-1} \left(\mathbf{R}_\beta^{-1} \mathbf{R}_\alpha^{-1} (\widetilde{\mathbf{M}}_w - \mathbf{t}_f) - (\mathbf{t} - \mathbf{t}_f) \right) \quad (32)$$

この式からゆれ後画像点は

$$\begin{aligned} \tilde{x}_c &= \frac{\widetilde{X}_c}{\widetilde{Z}_c} \cdot f \\ \tilde{y}_c &= \frac{\widetilde{Y}_c}{\widetilde{Z}_c} \cdot f \end{aligned} \quad (33)$$

のようになる．ここでゆれ前画像点は

$$\begin{aligned} \bar{x}_c &= \frac{\bar{X}_c}{\bar{Z}_c} \\ \bar{y}_c &= \frac{\bar{Y}_c}{\bar{Z}_c} \end{aligned} \quad (34)$$

となる．ここで式 (34) から $\widetilde{\mathbf{M}}_w$ は式 (35) のようになる．このときに特徴点が地面にあるので $\widetilde{X}_w = 0$ と仮定する．

$$\begin{aligned} \widetilde{Y}_w &= \frac{-\bar{y}_c \cdot H}{\bar{x}_c \cos \gamma + f \sin \gamma} \\ \widetilde{Z}_w &= \frac{(\bar{x}_c \sin \gamma - f \cos \gamma) H}{\bar{x}_c \cos \gamma + f \sin \gamma} \end{aligned} \quad (35)$$

式 (35) を式 (32) に代入することで，式 (33) は次式のようになる．

$$\tilde{x}_c = \frac{(\cos \gamma \cdot g(\sin \alpha, \beta) - \bar{x}_c) H - h \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta H_f}{(\sin \gamma \cdot g(\sin \alpha, \beta) - f) H + h \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta H_f} \quad (36)$$

$$\tilde{y}_c = \frac{\bar{y}_c - h \sin \alpha \sin \beta H_f}{(\sin \gamma \cdot g(\sin(\alpha, \beta)) - f) H + h \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta H_f} \quad (37)$$

$$g(\sin \alpha, \beta) = \sin \alpha (\bar{y}_c \cdot \sin \beta - f \cdot \cos \gamma \cos \beta + \bar{x}_c \cdot \sin \gamma \cos \beta)$$

$$h = f \cdot \sin \gamma + \bar{x}_c \cdot \cos \gamma$$