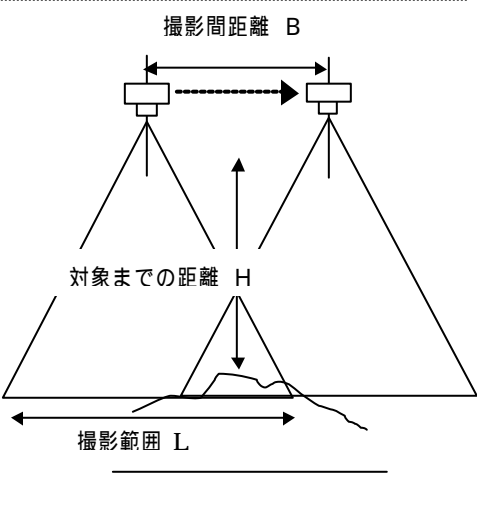


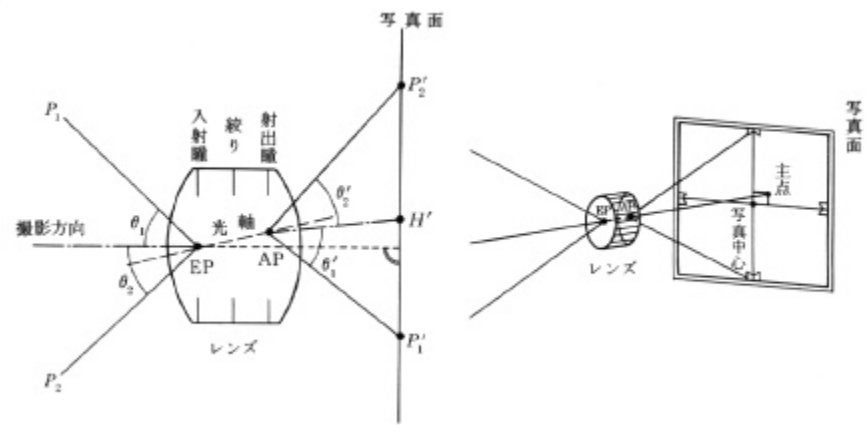
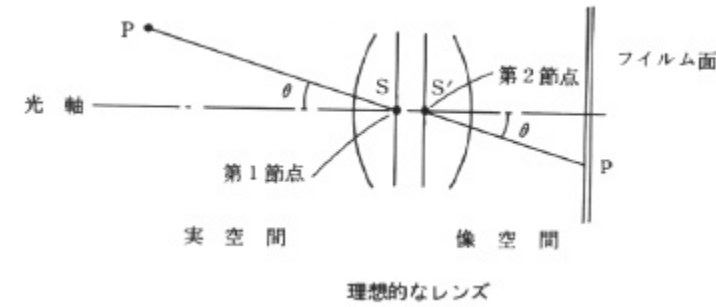
デジタルカメラを使用した場合の計測精度に影響を与える要因とその誤差量、及び対策に関して

要因	説明	想定される誤差量																																																																								
<p>基本的要因</p> <p>撮影形態 撮影プラットフォーム ラジコンヘリ、バルーン、高所作業車両</p>  <p>撮影間距離 B</p> <p>対象までの距離 H</p> <p>撮影範囲 L</p> <p>レンズ焦点距離 (f : mm)</p> <p>デジタルカメラ CCD 素子間隔(分解能) ( CCD : mm)</p>	<p>基本的要因から生じる誤差量(理想的な場合)は次式で算出される</p> $X, Y = k \times (H/f) \times \text{CCD}$ $Z = k \times (H/B) \times (H/f) \times \text{CCD}$ <p>ここで、k はサブピクセル計測実施時の経験的な係数 (k : 1.00) (H/B)は計測三角形の形態強度(写真測量では B/H を BH 比と呼ぶ) (H/f) は撮影スケール</p> <p>上式は、カメラ間距離(B)、対象までの距離(H)、カメラレンズ焦点距離(f)、さらにカメラ CCD 素子間隔( CCD)は複雑に関係し、計測時の誤差量が決定される。</p> <p>一般に、次のように言える。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. H/f が小さくなると計測誤差は小さくなる。</li> <li>2. B が長くなる(広くなる)と計測誤差は小さくなる</li> <li>3. CCD が小さくなると計測誤差は小さくなる</li> </ol> <p>ここで、カメラ間距離(B)は、カメラ架台の構造に関係し、カメラ間距離が長くなればなるほどカメラ架台重量に影響を与えると共に、カメラを取り付ける位置にも問題が発生する。さらに、使用するレンズの焦点距離は計測精度に直接影響するが、焦点距離 f が長くなれば、撮影する範囲が小さくなるため、計測対象サイズを考慮の上決定することになる。</p> <p>したがって、2つのカメラ間距離の異なる Z - System (Mini、Normal) に関しては、B が既に決められているため、撮影対象までの距離を要求精度に応じて、作業現場ごとに決定する必要がある。</p>	<p>左式から基本的要因から発生する計測誤差(精度)を下表でまとめた</p> <p>計算結果</p> <table border="1" data-bbox="1855 499 2715 1375"> <thead> <tr> <th colspan="4">次の仕様のデジタルカメラを使用した場合 f=9.2mm, CCD=0.0034mm, 画素サイズ = 2000 x 2000, H/B=1.67 で計算</th> </tr> <tr> <th>H</th> <th>± X, Y</th> <th>± Z</th> <th>L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.0m</td><td>1.8mm</td><td>3.1mm</td><td>3.7m</td></tr> <tr><td>10.0m</td><td>3.7mm</td><td>6.2mm</td><td>7.4m</td></tr> <tr><td>20.0m</td><td>7.4mm</td><td>12.3mm</td><td>14.8m</td></tr> <tr><td>40.0m</td><td>14.8mm</td><td>24.7mm</td><td>29.6m</td></tr> <tr><td>60.0m</td><td>22.2mm</td><td>37.0mm</td><td>44.3m</td></tr> <tr><td>80.0m</td><td>29.6mm</td><td>49.4mm</td><td>59.1m</td></tr> <tr><td>100.0m</td><td>37.0mm</td><td>61.7mm</td><td>73.9m</td></tr> <tr><td>120.0m</td><td>44.3mm</td><td>74.1mm</td><td>88.7m</td></tr> <tr><td>140.0m</td><td>51.7mm</td><td>86.4mm</td><td>103.5m</td></tr> <tr><td>160.0m</td><td>59.1mm</td><td>98.7mm</td><td>118.3m</td></tr> <tr><td>180.0m</td><td>66.5mm</td><td>111.1mm</td><td>133.0m</td></tr> <tr><td>200.0m</td><td>73.9mm</td><td>123.4mm</td><td>147.8m</td></tr> <tr><td>220.0m</td><td>81.3mm</td><td>135.8mm</td><td>162.6m</td></tr> <tr><td>240.0m</td><td>88.7mm</td><td>148.1mm</td><td>177.4m</td></tr> <tr><td>260.0m</td><td>96.1mm</td><td>160.5mm</td><td>192.2m</td></tr> <tr><td>280.0m</td><td>103.5mm</td><td>172.8mm</td><td>207.0m</td></tr> </tbody> </table> <p>B/H=1.67 : 60%ラップでの撮影を行った場合に相当します</p> <p>上記の表より明らかなように、X, Y, Z の測定誤差は対象までの距離に比例して大きくなります。H/B を小さくすれば(撮影間隔を大きくすれば) Z は小さくなりますが、それに反してステレオ範囲が小さくなり効率的な撮影ができなくなります。</p>	次の仕様のデジタルカメラを使用した場合 f=9.2mm, CCD=0.0034mm, 画素サイズ = 2000 x 2000, H/B=1.67 で計算				H	± X, Y	± Z	L	5.0m	1.8mm	3.1mm	3.7m	10.0m	3.7mm	6.2mm	7.4m	20.0m	7.4mm	12.3mm	14.8m	40.0m	14.8mm	24.7mm	29.6m	60.0m	22.2mm	37.0mm	44.3m	80.0m	29.6mm	49.4mm	59.1m	100.0m	37.0mm	61.7mm	73.9m	120.0m	44.3mm	74.1mm	88.7m	140.0m	51.7mm	86.4mm	103.5m	160.0m	59.1mm	98.7mm	118.3m	180.0m	66.5mm	111.1mm	133.0m	200.0m	73.9mm	123.4mm	147.8m	220.0m	81.3mm	135.8mm	162.6m	240.0m	88.7mm	148.1mm	177.4m	260.0m	96.1mm	160.5mm	192.2m	280.0m	103.5mm	172.8mm	207.0m
次の仕様のデジタルカメラを使用した場合 f=9.2mm, CCD=0.0034mm, 画素サイズ = 2000 x 2000, H/B=1.67 で計算																																																																										
H	± X, Y	± Z	L																																																																							
5.0m	1.8mm	3.1mm	3.7m																																																																							
10.0m	3.7mm	6.2mm	7.4m																																																																							
20.0m	7.4mm	12.3mm	14.8m																																																																							
40.0m	14.8mm	24.7mm	29.6m																																																																							
60.0m	22.2mm	37.0mm	44.3m																																																																							
80.0m	29.6mm	49.4mm	59.1m																																																																							
100.0m	37.0mm	61.7mm	73.9m																																																																							
120.0m	44.3mm	74.1mm	88.7m																																																																							
140.0m	51.7mm	86.4mm	103.5m																																																																							
160.0m	59.1mm	98.7mm	118.3m																																																																							
180.0m	66.5mm	111.1mm	133.0m																																																																							
200.0m	73.9mm	123.4mm	147.8m																																																																							
220.0m	81.3mm	135.8mm	162.6m																																																																							
240.0m	88.7mm	148.1mm	177.4m																																																																							
260.0m	96.1mm	160.5mm	192.2m																																																																							
280.0m	103.5mm	172.8mm	207.0m																																																																							

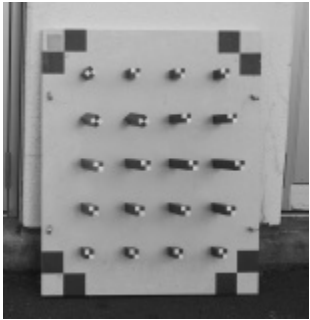
デジタルカメラを用いた計測を行う場合、必要な計測精度を決めた上で、上記で示した基本的要因を考慮し撮影計画を立てる必要がある。さらに、市販されているデジタルカメラは非計測用カメラに分類されているため、さらに、次ページで示す内部定位(カメラキャリブレーション)を事前に算出しておくことが計測精度を確保する上で必要となる。

要因	説明	想定される誤差量																																																																																																								
レンズの光軸ズレ ( $x_p, y_p$ : mm)	<p>前ページで示した計測誤差量は、理想的な撮影状況下での計測誤差量であり、ここで述べるカメラ・レンズなどハード的な内部的要因（内部定位）による計測誤差発生を考慮しない場合について示したものである。</p>	<p>内部的要因の誤差量をしない場合は、次で示すような計測誤差となる。</p>																																																																																																								
レンズ焦点距離 補正量 ( $f$ :mm)	<p>撮影において、対象 P はレンズ中心 O（針穴）を通り、フィルム面（CCD 素子面）上の点 p に一直線に結像される。これを写真測量では共線条件と呼び、写真測量の基本条件である。</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">計測の条件：H=3.3m, B=0.7m, f=50mm</th> </tr> <tr> <th>測点</th> <th>VX(mm)</th> <th>VY(mm)</th> <th>VZ(mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-0.63</td><td>0.05</td><td>-4.87</td></tr> <tr><td>2</td><td>-0.27</td><td>-0.52</td><td>-0.78</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.08</td><td>-0.76</td><td>2.96</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.64</td><td>-0.72</td><td>6.15</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.43</td><td>-0.79</td><td>3.44</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.22</td><td>-0.37</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.65</td><td>-0.09</td><td>-6.27</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.50</td><td>0.02</td><td>-2.02</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.56</td><td>-0.25</td><td>1.58</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.09</td><td>-0.64</td><td>4.59</td></tr> <tr><td>11</td><td>-0.31</td><td>-0.47</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>12</td><td>-0.48</td><td>-0.32</td><td>-0.40</td></tr> <tr><td>13</td><td>-0.68</td><td>0.26</td><td>-2.91</td></tr> <tr><td>14</td><td>-0.14</td><td>-0.17</td><td>-1.15</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.08</td><td>-0.26</td><td>3.02</td></tr> <tr><td>16</td><td>0.17</td><td>0.33</td><td>-0.33</td></tr> <tr><td>17</td><td>0.24</td><td>-0.19</td><td>-1.31</td></tr> <tr><td>18</td><td>0.42</td><td>0.69</td><td>-3.53</td></tr> <tr><td>19</td><td>0.54</td><td>0.48</td><td>-0.32</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.97</td><td>0.17</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>21</td><td>-0.19</td><td>-0.07</td><td>4.11</td></tr> <tr><td>22</td><td>-0.09</td><td>0.21</td><td>-0.34</td></tr> <tr><td>23</td><td>-0.87</td><td>0.62</td><td>-2.63</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.15</td><td>1.54</td><td>0.47</td></tr> </tbody> </table>	計測の条件：H=3.3m, B=0.7m, f=50mm				測点	VX(mm)	VY(mm)	VZ(mm)	1	-0.63	0.05	-4.87	2	-0.27	-0.52	-0.78	3	0.08	-0.76	2.96	4	0.64	-0.72	6.15	5	0.43	-0.79	3.44	6	0.22	-0.37	0.05	7	-0.65	-0.09	-6.27	8	0.50	0.02	-2.02	9	0.56	-0.25	1.58	10	0.09	-0.64	4.59	11	-0.31	-0.47	0.87	12	-0.48	-0.32	-0.40	13	-0.68	0.26	-2.91	14	-0.14	-0.17	-1.15	15	0.08	-0.26	3.02	16	0.17	0.33	-0.33	17	0.24	-0.19	-1.31	18	0.42	0.69	-3.53	19	0.54	0.48	-0.32	20	0.97	0.17	0.68	21	-0.19	-0.07	4.11	22	-0.09	0.21	-0.34	23	-0.87	0.62	-2.63	24	0.15	1.54	0.47
計測の条件：H=3.3m, B=0.7m, f=50mm																																																																																																										
測点	VX(mm)	VY(mm)	VZ(mm)																																																																																																							
1	-0.63	0.05	-4.87																																																																																																							
2	-0.27	-0.52	-0.78																																																																																																							
3	0.08	-0.76	2.96																																																																																																							
4	0.64	-0.72	6.15																																																																																																							
5	0.43	-0.79	3.44																																																																																																							
6	0.22	-0.37	0.05																																																																																																							
7	-0.65	-0.09	-6.27																																																																																																							
8	0.50	0.02	-2.02																																																																																																							
9	0.56	-0.25	1.58																																																																																																							
10	0.09	-0.64	4.59																																																																																																							
11	-0.31	-0.47	0.87																																																																																																							
12	-0.48	-0.32	-0.40																																																																																																							
13	-0.68	0.26	-2.91																																																																																																							
14	-0.14	-0.17	-1.15																																																																																																							
15	0.08	-0.26	3.02																																																																																																							
16	0.17	0.33	-0.33																																																																																																							
17	0.24	-0.19	-1.31																																																																																																							
18	0.42	0.69	-3.53																																																																																																							
19	0.54	0.48	-0.32																																																																																																							
20	0.97	0.17	0.68																																																																																																							
21	-0.19	-0.07	4.11																																																																																																							
22	-0.09	0.21	-0.34																																																																																																							
23	-0.87	0.62	-2.63																																																																																																							
24	0.15	1.54	0.47																																																																																																							
ラジアルレンズ歪み （補正係数： $k_1, k_2$ ）	<p>しかし、この条件は理想であり、現実には下図で示す内部的要因（光軸ズレ、焦点距離、レンズ歪み及び CCD 素子歪み）により、誤差を生じ一直線に結像されない。特に、航空写真測量カメラと違い、市販の非計測用カメラ（デジタルカメラ）ではこの誤差量は数十マイクロン～数百マイクロンになることもあり、許容精度を確保するためには無視することはできない。</p>																																																																																																									
フィルム変形（CCD 素子）歪み （補正係数： $p_1 \sim p_6$ ）		<p>* VX, VY, VZ：検証座標 - 計測座標</p> <p>* 撮影条件「H=5m, B=1m, f=10mm」の誤差量算出は相似的に考え「<math>\times 1.5 \times 5.0 = \times 7.5</math>」となり、上記誤差 5.0mm の場合 37.5mm となる</p>																																																																																																								

内部定位



	対 策	検査方法																																																																																																								
内部定位	<p>下図で示すカメラ検定用のキャリブレーションフィールドを用い、写真測量におけるセルフキャリブレーションバンドル標定解析手法を用いて行う。</p> <p>内部的要因の誤差量を補正するために、次式で示すキャリブレーションモデルを使用する。このモデルは村井モデルといわれ、デジタルカメラを含む非計測用カメラのキャリブレーションにおいて実績のあるモデルである。</p> $x = (x'/f) f + x_p - x' (k_1 r^2 + k_2 r^4) - (p_1 x' + p_2 y' + p_3 x' y' + p_4 y'^2)$ $y = (y'/f) f + y_p - y' (k_1 r^2 + k_2 r^4) - (p_5 x' y' + p_6 x'^2)$ <p>ここで、<math>x' = x - x_p</math>, <math>y' = y - y_p</math>, <math>r^2 = x'^2 + y'^2</math>, <math>(x, y)</math> は写真座標</p> <p>デジタルカメラの場合は、一般に、フィル変形の影響は視できるほど小さい結果が報告されている。</p> <p>上記キャリブレーションモデルを用いて、補正を行った結果を下表に示す。</p> <table border="1" data-bbox="724 968 1555 1885"> <thead> <tr> <th colspan="4">計測の条件：H=3.3m, B=0.7m, f=50mm</th> </tr> <tr> <th>測点</th> <th>VX(mm)</th> <th>VY(mm)</th> <th>VZ(mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-0.32</td><td>-0.24</td><td>1.37</td></tr> <tr><td>2</td><td>-0.09</td><td>-0.41</td><td>-0.35</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.26</td><td>-0.60</td><td>-0.17</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.65</td><td>-0.41</td><td>-1.39</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.28</td><td>-0.66</td><td>0.59</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.08</td><td>-0.25</td><td>0.14</td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.85</td><td>-0.29</td><td>-1.56</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.35</td><td>0.15</td><td>-1.30</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.34</td><td>-0.18</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.08</td><td>-0.45</td><td>-0.09</td></tr> <tr><td>11</td><td>-0.06</td><td>-0.39</td><td>-0.02</td></tr> <tr><td>12</td><td>-0.25</td><td>-0.24</td><td>0.79</td></tr> <tr><td>13</td><td>-0.42</td><td>0.22</td><td>-1.14</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.14</td><td>-0.16</td><td>-0.78</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.05</td><td>-0.15</td><td>-0.12</td></tr> <tr><td>16</td><td>-0.10</td><td>0.35</td><td>0.19</td></tr> <tr><td>17</td><td>0.08</td><td>-0.18</td><td>-0.03</td></tr> <tr><td>18</td><td>0.28</td><td>0.46</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>19</td><td>0.34</td><td>0.37</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.69</td><td>0.18</td><td>1.06</td></tr> <tr><td>21</td><td>-0.22</td><td>0.05</td><td>0.78</td></tr> <tr><td>22</td><td>0.19</td><td>0.20</td><td>-0.13</td></tr> <tr><td>23</td><td>-0.58</td><td>0.49</td><td>-0.60</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.52</td><td>1.30</td><td>1.87</td></tr> </tbody> </table>	計測の条件：H=3.3m, B=0.7m, f=50mm				測点	VX(mm)	VY(mm)	VZ(mm)	1	-0.32	-0.24	1.37	2	-0.09	-0.41	-0.35	3	0.26	-0.60	-0.17	4	0.65	-0.41	-1.39	5	0.28	-0.66	0.59	6	0.08	-0.25	0.14	7	-0.85	-0.29	-1.56	8	0.35	0.15	-1.30	9	0.34	-0.18	0.93	10	0.08	-0.45	-0.09	11	-0.06	-0.39	-0.02	12	-0.25	-0.24	0.79	13	-0.42	0.22	-1.14	14	0.14	-0.16	-0.78	15	0.05	-0.15	-0.12	16	-0.10	0.35	0.19	17	0.08	-0.18	-0.03	18	0.28	0.46	1.00	19	0.34	0.37	0.99	20	0.69	0.18	1.06	21	-0.22	0.05	0.78	22	0.19	0.20	-0.13	23	-0.58	0.49	-0.60	24	0.52	1.30	1.87	<p>カメラ検定用のキャリブレーションフィールドをデジタルカメラで撮影し、上記で示した内部的要因（光軸ズレ量（<math>x_p, y_p</math>）補正焦点距離量（<math>f</math>）, レンズ歪み係数、フィルム変形係数）を算出する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>この時の検定制限は、標準偏差で撮影距離(L)に対して0.20%以内とする。 これは、撮影距離5mでは約1mm以内に相当する。</li> <li>内部的要因の検定書（キャリブレーション証明書）を提出することとする。</li> </ol> <p>実施時期、及び間隔</p> <p>内部的要因は、定期的な検査が必要である。カメラレンズを取り外し、長期間保管する場合は、次回の実稼働前に必ず内部的要因の検定を行うものが必要である。</p>
計測の条件：H=3.3m, B=0.7m, f=50mm																																																																																																										
測点	VX(mm)	VY(mm)	VZ(mm)																																																																																																							
1	-0.32	-0.24	1.37																																																																																																							
2	-0.09	-0.41	-0.35																																																																																																							
3	0.26	-0.60	-0.17																																																																																																							
4	0.65	-0.41	-1.39																																																																																																							
5	0.28	-0.66	0.59																																																																																																							
6	0.08	-0.25	0.14																																																																																																							
7	-0.85	-0.29	-1.56																																																																																																							
8	0.35	0.15	-1.30																																																																																																							
9	0.34	-0.18	0.93																																																																																																							
10	0.08	-0.45	-0.09																																																																																																							
11	-0.06	-0.39	-0.02																																																																																																							
12	-0.25	-0.24	0.79																																																																																																							
13	-0.42	0.22	-1.14																																																																																																							
14	0.14	-0.16	-0.78																																																																																																							
15	0.05	-0.15	-0.12																																																																																																							
16	-0.10	0.35	0.19																																																																																																							
17	0.08	-0.18	-0.03																																																																																																							
18	0.28	0.46	1.00																																																																																																							
19	0.34	0.37	0.99																																																																																																							
20	0.69	0.18	1.06																																																																																																							
21	-0.22	0.05	0.78																																																																																																							
22	0.19	0.20	-0.13																																																																																																							
23	-0.58	0.49	-0.60																																																																																																							
24	0.52	1.30	1.87																																																																																																							



無