

距離画像を用いた3次元運動の計測における運動計測性の評価

梅田和昇[†] 新井民夫[†]

距離画像から3次元運動を計測する手法として、微小運動に関する運動パラメータと距離画像の関係式を用いて運動を算出する手法が提案されている。本方式は、特徴点の抽出、対応点の探索などの処理が不用であるため、高速かつ汎用性の高い運動計測が可能であるが、局所的な距離変化から運動を計測するため、例えば、円筒面における中心軸回りの回転、中心軸方向の並進のように、対象の形状によっては計測できない運動がありうる。そこで本論文では、本手法における運動計測性を評価し、すべての運動成分が計測できる条件の定式化、計測結果の誤差分布の導出、計測できない運動方向（運動計測不能方向）を持つ形状に関する考察を、運動計測性を表す指標となる行列を元に統一的に行う。また誤差を持つ距離画像を用いた計測では、運動計測不能方向に関しても、形式的に誤った解が求まるという問題がある。この場合、運動計測不能方向を抽出し、その方向への誤った解を除去することが必要である。そこで、距離画像の誤差を考慮した運動計測不能方向の抽出を、並進・回転運動の共分散行列をそれぞれ評価する手法として構築することにより、誤差を含む距離画像において形状が運動計測不能方向を持っていても適用できる運動計測手法を確立する。また、高速に距離画像の入力が可能な距離センサを用いた実験を行い、本手法の有効性を示す。

Evaluation of Observability in the Measurement of Three Dimensional Motion from Range Images

KAZUNORI UMEDA[†] and TAMIO ARAI[†]

Measurement of three dimensional (3D) motion is one of the most important issues on robot vision. An essential equation between 3D motion parameters and range data was introduced for measuring 3D motion parameters from range images. In the measurement of motion parameters with the equation, there are some undetectable motion directions depending on the shape of an object. In this paper, observability with the equation is evaluated. A matrix which represents the observability is introduced and using the matrix, (1) the condition for measuring motion parameters in every direction is formulated, (2) error distribution of measured motion parameters is calculated, and (3) undetectable motion directions are discussed on primitive shapes. When the shape of an object has undetectable motion directions, measured motion parameters contain wrong components. In this paper, a method to remove the wrong components is also introduced. The undetectable motion directions are calculated by using the covariance ellipse which represents the error distribution. A method to divide the ellipse into translational and rotational covariance ellipses is introduced for the purpose. Some experiments show the efficiency of the proposed methods.

1. 序 論

3次元運動パラメータの計測は移動ロボット等の視覚機能として非常に重要である。濃淡画像を用いた3次元運動計測の研究がこれまで多数行われてきた^{1),2)}。しかし、濃淡画像のみから3次元運動を計測する手法はいわゆる不整定問題³⁾であり、計測精度、計測時間、対象物形状等の問題が多く実用的でない。

これに対し、距離画像は3次元情報を直接的に含むので実用性は高いが、入力方法に問題があるとされて

きた。しかし最近では距離画像入力手法の研究が多く行われ^{4),5)}、測定点数は数百～数万点と濃淡画像に比べ少ないものの、運動計測に利用できるほど高速入力が可能なセンサが開発されている⁶⁾⁻⁸⁾。

距離画像から3次元運動を計測する手法には大別して2種ある。一つは2枚の距離画像間での同一特徴の対応づけから運動を決定する手法であり⁹⁾⁻¹¹⁾、今一つは微小運動に関する運動パラメータと距離画像の関係式を用いて運動を算出する手法である。後者の基本式は、Hornら¹²⁾、山本ら^{8),13)}、新井ら^{14),15)}が独立に導出している。以後、この式を文献15)に従い、運動・距離式 (Motion-Range Equation) と呼ぶ。

後者の方式は、特徴点の抽出、対応点の探索といっ

[†] 東京大学工学部精密機械工学科
Department of Precision Machinery Engineering,
Faculty of Engineering, University of Tokyo

た時間のかかる処理が不要な点で前者に優れるが、局所的な距離変化から運動を計測するため、例えば、円筒面における中心軸回りの回転、中心軸方向の並進¹²⁾のように、対象の形状によっては計測できない運動がありうる。

そこで本論では、運動・距離式を用いた計測における運動計測性を評価し、

- すべての運動成分が計測できる条件の定式化、
- 運動パラメータの誤差分布の導出、
- 計測できない運動方向を持つ形状に関する考察を行う。

また、誤差を持つ距離画像を用いた計測では、計測できない運動方向を持つ形状に関しても、形式的に誤った解が求まってしまう。この場合、計測できない運動方向を抽出し、その方向への誤った解を除去することが必要である。そこでさらに、

- 距離画像の誤差を考慮した計測できない運動方向の抽出手法を確立する。

これにより、計測対象が計測できない運動方向を持ちうる場合においても正当な解を算出する運動計測手法を確立する。

まず2章で運動・距離式を示した後、3章で運動計測性の評価を行う。そして4章で距離画像の誤差を考慮した計測できない運動方向の抽出手法を確立する。さらに5章で実験を行って本論で提案する手法の有効性を示し、最後に6章で結論を述べる。

2. 運動・距離式

文献15)に従って、距離画像から3次元運動パラメータを計測するための基本式である運動・距離式(Motion-Range Equation)を示す。

距離画像とは、図1に示すようにセンサ座標系の原点から計測方向 $t_1 \sim t_n$ (単位ベクトル) に距離 $r_1 \sim r_n$ が得られたものであるとする。ここで計測方向 $t_1 \sim t_n$ はセンサ座標系から見て変化しないと仮定する。この仮定は、投光法、時間伝播法等の能動的な高速距離画像入力手法において一般に成立するので妥当である。また、計測方向 $t_1 \sim t_n$ には誤差がなく、距離 $r_1 \sim r_n$ は正規分布で表される測定誤差を持ち、その標準偏差 $\sigma_{r1} \sim \sigma_{rn}$ が既知であると仮定する。

相対運動する剛体対象物の距離画像を考える(センサが移動していても構わない)。図2において、距離画像中の1点である計測方向 t の距離を r とし、その点における法線ベクトルを n 、距離 r の変化率を \dot{r} と

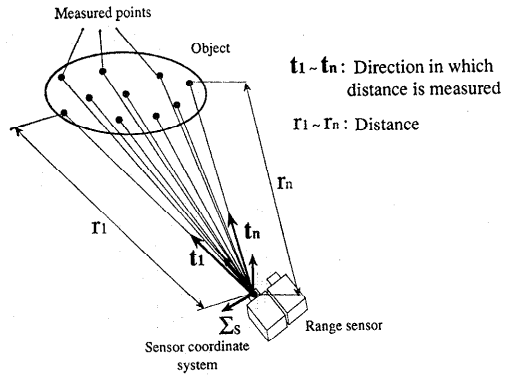


図1 距離画像のパラメータ
Fig. 1 Parameters of a range image.

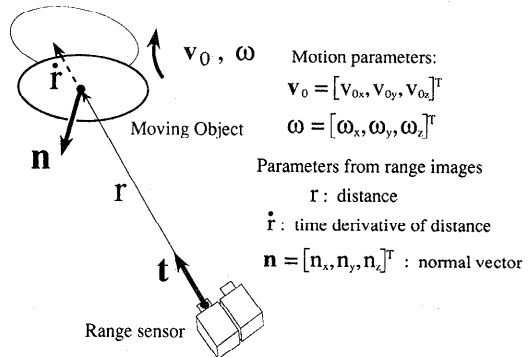


図2 運動・距離式のパラメータ
Fig. 2 Parameters of motion-range equation.

する。 n は測定点での平面パッチの当てはめにより求められ¹⁵⁾、 \dot{r} は2枚の距離画像における距離の差から求められる。

一方、剛体対象物の3次元運動は並進速度3成分、回転速度3成分の計6成分の運動パラメータで一意に表現される。回転中心をセンサ座標系の原点としたときの並進速度ベクトルを v_0 、回転速度ベクトルを ω とする。

このとき運動・距離式は、式(1)で表される。

$$n^T \cdot v_0 + r \cdot (t \times n)^T \cdot \omega = \dot{r} \cdot (n^T \cdot t) \quad (1)$$

本式は、移動物体の距離計測点における速度ベクトル v と距離画像のパラメータの間に成立する式(2)に、速度ベクトル v を剛体の運動パラメータ v_0, ω で表す式(3)を代入することで求められる。

$$n^T \cdot v = \dot{r} \cdot (n^T \cdot t) \quad (2)$$

$$v = v_0 + \omega \times (rt) \quad (3)$$

ここで、運動・距離式が適用できる条件を定性的に示しておく。

運動・距離式が成立するためには、式(2)、(3)が共に成立すればよい。式(2)が成立するためには、次の2つの条件が満たされればよい。①移動物体上で距離が計測される点は2枚の距離画像で一般に異なるが、計測方向 \boldsymbol{t} の2計測点の間で滑らかであること、②法線ベクトル \boldsymbol{n} を求めるために、平面パッチを当てはめる測定点の間隔が、形状の凹凸に比べ十分小さいこと。また式(3)が成立するためには、運動が微小であればよい。

以上をまとめて、“運動・距離式が適用できるのは、表面形状が局所的に滑らかな物体が微小運動を行う場合である”といえる。

なお1章で述べたように運動パラメータと距離画像の関係式は、三つの研究グループによりほぼ同時期に導出されている。Hornら¹²⁾の range rate constraint equation はセンサの運動パラメータに関して定式化したため符号が逆になっている以外は、運動・距離式と同じである。また、山本⁹⁾の導出した式もほぼ同等であるが、この式では対象物上の式を導出する点において、距離の計測方向(図1の $\boldsymbol{t}_1 \sim \boldsymbol{t}_n$)がほぼ等しいと仮定できない場合は誤差が生じてしまう。

3. 運動・距離式を用いた計測における運動計測性

本章では、運動計測性の評価を行うことにより、運動・距離式を用いた運動計測手法を確立する。具体的には、

- すべての運動成分が計測できる条件の定式化、
- 運動パラメータの誤差分布の導出、
- 計測できない運動方向を持つ形状に関する考察を行う。

3.1 すべての運動成分が計測できる条件

対象物上の m 点で運動・距離式を導出したとする。次の連立方程式(4)が成立する。

$$A\boldsymbol{x} = \boldsymbol{y} \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\boldsymbol{n}_1^T}{\boldsymbol{n}_1^T \cdot \boldsymbol{t}_1} & \frac{r_1 \cdot (\boldsymbol{t}_1 \times \boldsymbol{n}_1)^T}{\boldsymbol{n}_1^T \cdot \boldsymbol{t}_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\boldsymbol{n}_m^T}{\boldsymbol{n}_m^T \cdot \boldsymbol{t}_m} & \frac{r_m \cdot (\boldsymbol{t}_m \times \boldsymbol{n}_m)^T}{\boldsymbol{n}_m^T \cdot \boldsymbol{t}_m} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \vdots \\ \hat{r}_m \end{bmatrix}$$

ただし、 \boldsymbol{x} は並進、回転の運動パラメータを合わせた6次元ベクトル $\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{v}_0^T, \boldsymbol{\omega}^T]^T$ である。また A 、 \boldsymbol{y} は距離画像から算出される $m \times 6$ 行列、 m 次元ベクトルである。行列 A が運動にかかわらず算出されることに注意。

式(4)から運動パラメータ \boldsymbol{x} が一意に算出される条件、すなわちすべての運動成分が計測できる条件は、明らかに、行列 A のランクが6であることである。

3.2 運動パラメータの算出

すべての運動成分が計測できる場合の運動パラメータ算出順序を誤差の検討を含めて述べる。

距離 r の誤差は既知であると仮定した(2章参照)。法線ベクトル \boldsymbol{n} の誤差、ならびに距離の変化率 \dot{r} の誤差は距離 r の誤差より算出できる。そこで最小2乗法により、運動パラメータの最尤推定値 $\hat{\boldsymbol{x}}$ および共分散行列 C_x が求められる¹⁶⁾。このとき、式(4)において \boldsymbol{y} だけでなく、 A も誤差を持つため、 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 、 C_x を求めるには一般には非線形最小2乗法を解くことが必要であるが、運動パラメータ \boldsymbol{x} が十分小さい場合、 A の誤差が無視でき、 \boldsymbol{y} の誤差、すなわち距離の変化率 \dot{r} の誤差のみを考慮すればよい¹⁷⁾。また、 $\hat{r}_1 \sim \hat{r}_m$ の誤差は一般に対象物上の計測点までの距離がほぼ等しいため、すべての計測点で等しいと仮定できる。そこで、 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 、 C_x が行列 A を用いて次のように解析的に求められる。

$$\hat{\boldsymbol{x}} = (A^T A)^{-1} A^T \boldsymbol{y} \quad (5)$$

$$C_x = \sigma_r^2 (A^T A)^{-1} \quad (6)$$

σ_r : $\hat{r}_1 \sim \hat{r}_m$ の標準偏差

3.3 運動計測誤差の評価

運動パラメータの誤差の分布は、式(5)、(6)のパラメータを用いた式(7)の共分散楕円¹⁶⁾によって図3のように図式的に表される。

$$(\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}})^T A^T A (\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}) = \sigma_r^2 \cdot \chi^2 \quad (7)$$

ここで式(7)の χ^2 は自由度6の χ^2 分布の値を表し、運動パラメータが式(7)の共分散楕円内に入る確率が χ^2 分布表より算出される。この場合の共分散楕円は、運動パラメータの推定値 $\hat{\boldsymbol{x}}$ を中心とする運動パラメータ空間内の超楕円体であり、この共分散楕円の径の大きさが運動計測誤差が評価できる。

楕円の軸方向は行列 $A^T A$ の固有ベクトルであり、

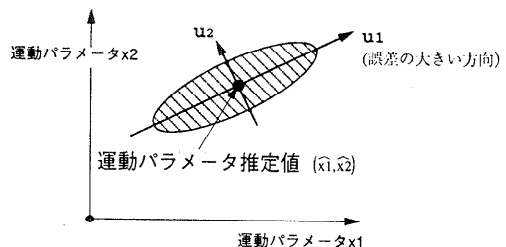


図3 運動パラメータの共分散楕円
Fig. 3 Covariance ellipse of motion parameters.

その径は、対応する固有値の平方根 (=行列 A の特異値) に反比例する。すなわち共分散楕円は行列 A により、その分布が決定されるといえる。ここで 3.1 節で述べたように行列 A が運動の影響を受けないため、共分散楕円も運動に関係なく (つまり 1 枚の距離画像から) 求められる。

3.4 運動計測不能方向を持つ形状

以下、計測できない運動方向を運動計測不能方向と呼ぶことにする。運動計測不能方向を持つ形状は、行列 A のランクが落ちる形状として定義される。この時数学的には、6 次元運動パラメータ空間における運動計測不能方向が、次式の行列 W の基底ベクトルとして求められる。

$$W = I - A^+ A$$

A^+ : A の擬似逆行列

より直感的には、「運動計測不能方向とは 2 距離画像間に距離変化を生じさせない、形状の運動方向である」と説明できる。これは運動・距離式が 2 枚の距離画像での距離の変化率 \dot{r} を用いて運動パラメータを計算するため、変化率ゼロの運動は計測できないことを意味している。例えば円筒面では中心軸回りの回転および中心軸に平行な並進がこれに相当する。

以下、表 1 および図 4 に運動計測不能方向を持つ基本形状を挙げる。

また、これらの基本形状が合成された形状では、おのおのの基本形状の運動計測不能方向の積空間が、その運動計測不能方向となる。

以上のように、すべての運動成分が計測できるかどうかの判別、運動計測不能方向が存在するときのその抽出、あるいは運動パラメータの誤差分布の評価等の

表 1 運動計測不能方向を持つ形状例
Table 1. Shapes having undetectable motion directions.

数	形 状	運動計測不能方向
3	平面状物体	法線と垂直な方向の並進 2 自由度および法線方向回りの回転
	球 面	中心回りの回転 3 自由度
2	円筒面	中心軸方向の並進と中心軸回りの回転
1	2次元平面上の任意の図形の平行移動により構成される面	平行移動方向
	軸対称物体面 (円筒, 球面以外)	中心軸方向の回転
	ねじ形状	ねじり方向

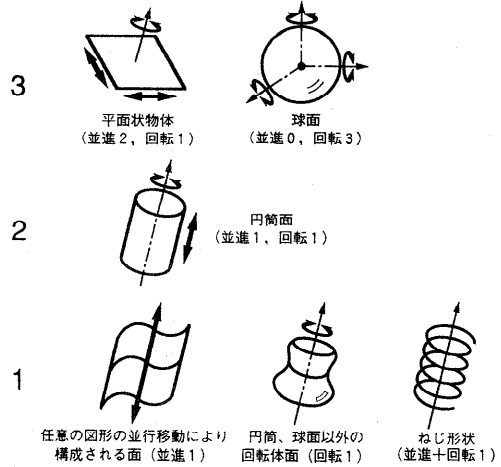


図 4 運動計測不能方向を持つ形状例
Fig. 4 Shapes having undetectable motion directions.

運動計測性の評価を行うためには式 (4) の行列 A を求めればよい。すなわち、行列 A が運動・距離式を用いた運動計測における運動計測性を評価するための指標となる値だといえる。

そこで形状が既知の対象物では、対象物上の十分多数の点で運動・距離式を算出して式 (4) の行列 A を求めることによって、運動計測性の評価を行えばよい。また未知の形状の対象物の運動を実際の距離画像で計測した場合も、すべての運動成分が計測できる場合には行列 A を求めることによって運動計測誤差の分布に関する評価を行えばよい。運動計測不能方向が存在する場合に関しては、次章で論じる。

4. 誤差を持つ距離画像を用いた運動計測における運動計測不能方向の抽出

実際の計測では運動を計測した対象物が 3.4 節で例示したような運動計測不能方向を持つ形状の場合でも、距離画像の誤差のため式 (4) の行列 A のランクが落ちず、運動計測不能方向にも誤った解が求まってしまう。この場合、運動計測不能方向を抽出して、その方向の誤った解を除く必要がある。そこで以下、共分散楕円を利用して、誤差のため行列 A のランクが落ちない場合に運動計測不能方向を抽出する手法を確立する。

4.1 運動計測不能方向の抽出のための戦略

運動計測不能方向への共分散楕円の径は、理論値、すなわち距離画像に誤差がない場合には、無限大になる (行列 A の特異値が 0 になる)。距離画像の誤差に

起因する行列Aの誤差によって、径は有限の値になるが、それでも他の計測可能な運動方向への径に比べて十分に大きくなるはずである。よって、共分散楕円の径が大きい方向を運動計測不能方向と扱う方法が考えられる。

しかし、実際に予備的な実験を進めてみると、運動パラメータ6成分の共分散楕円から運動計測不能方向を求めることは困難であった。その原因は、回転の誤差が並進の誤差にまぎってしまうためと考えられる。一方、表1に示すように、大抵の計測不能成分を含む形状では、回転中心を適当に設定することで運動計測不能方向が回転のみ、あるいは並進のみに分離できる。

そこで、回転と並進を分離し、それぞれの共分散楕円を評価すれば、回転と並進の誤差の混入が防がれ、回転、並進それぞれの運動計測不能方向が抽出できると考えられる。

4.2 運動計測不能方向の抽出のための手法

以下、回転と並進の誤差を分離し、それぞれの運動計測不能方向を別々に求める手法を提案する。

これまでのセンサ原点を回転中心とした運動パラメータを $x_0 = [v_0^T, \omega^T]^T$ 、共分散行列を C_{x_0} とおく。 C_{x_0} は、

$$C_{x_0} = \sigma_s^2 (A^T \cdot A)^{-1} = \begin{bmatrix} C_{v_0} & C_{v_0, \omega} \\ C_{v_0, \omega}^T & C_{\omega} \end{bmatrix} \quad (8)$$

と分割される。 C_{v_0} 、 C_{ω} 、 $C_{v_0, \omega}$ は、それぞれ並進 v_0 の共分散行列、回転 ω の共分散行列、並進 v_0 と回転 ω の間の共分散行列（すべて 3×3 行列）を表す。

回転中心を位置ベクトル $r = [r_x, r_y, r_z]^T$ の点Cに移動したときの運動パラメータを $x_c = [v_c^T, \omega^T]^T$ とする。このとき、並進パラメータ v_c は、

$$v_c = v_0 + \omega \times r \quad (9)$$

と表される。一方、回転パラメータ ω は回転中心の位置によらず一定である。

(1) 回転運動の計測不能方向の抽出

共分散行列 C_{ω} は回転中心の位置によらず一定である。 C_{ω} から回転パラメータ ω のみの共分散楕円を求め、軸方向、径を算出する。三つの軸方向のうち径が他の方向の径より十分に大きいものがあるとき、図5に示すように、その方向を回転に関する運動計測不能方向と見なす。

(2) 並進運動の計測不能方向の抽出

並進の共分散行列は回転中心の位置によって変化する。そのため計測不能な並進運動を抽出するには、適

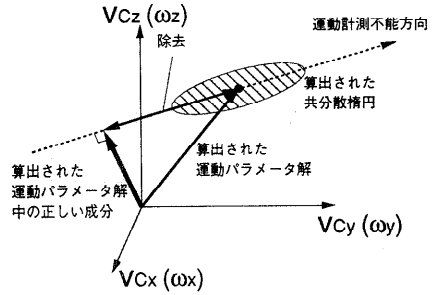


図5 回転・並進運動の計測不能方向
Fig. 5 Undetectable direction of rotational translational motion.

当な回転中心を設定してやる必要がある。式(9)より誤差の伝播則¹⁶⁾を用いて v_c の共分散行列を求めると、

$$C_{v_c} = C_{v_0} + C_{v_0, \omega} \cdot R^T + R \cdot C_{v_0, \omega}^T + R \cdot C_{\omega} \cdot R^T \quad (10)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{bmatrix}$$

となる。式(10)より並進の共分散行列が変化し誤差が大きくなる理由が回転の誤差の影響であることが示唆される。そこで、並進パラメータの誤差を小さくする回転中心を選べば、回転誤差の影響を小さくすることができ、並進の運動計測性の評価を適切に行えると考えられる。

並進パラメータ v_c の誤差の大きさを表す基準の一つとして、 C_{v_c} の対角成分の和、すなわち v_c の各成分の自己分散の和 M を考える。 M を最小にする回転中心 r は、 M が r の成分の2次の項までしか含まないため、解析的に求められる。付録に M を最小にする回転中心 r の算出結果を示す。

以上で並進の誤差を小さくする回転中心 r が求められた。このときの並進の共分散行列 C_{v_c} は式(10)から算出される。 C_{v_c} から並進の共分散楕円を求め、あとは回転の場合と同様にして図5に示すように、並進に関する運動計測不能方向が求められる。

以上、本節で提案した手法が適用できるのは、“運動計測不能方向が回転と並進とに分離できる形状”に対してである。図4に示す基本形状では、ねじ形状に対して適用不可能であり、それ以外の形状に対しては適用可能である。ねじ形状では、運動計測不能方向が並進と回転の合成されたねじ運動の方向であり、回転中心をどう設定しても運動計測不能方向を並進のみあるいは回転のみとすることが不可能である。一般の運動計測不能方向を持つ物体の形状のほとんどはねじ形状以外の図4中の基本形状（あるいはその組み合わせ）

であると考えられ、本手法の実用上の適用範囲は十分に広いといえる。

4.3 運動計測不能方向を考慮した運動計測

今までの討議をまとめ、以下に示す運動計測手順を提案する。この手順で行うことにより、距離画像からの運動計測において、たとえ距離画像に誤差が含まれ、計測対象が運動計測不能方向を含む形状である場合にも、正当な解の評価が可能となる。

①センサ原点を回転中心としたときの運動パラメータ $x_0 = [v_0^T, \omega^T]^T$ および共分散行列 C_{x_0} を求める。

② C_{x_0} から並進運動および回転運動の計測不能方向をそれぞれ求める。

運動計測不能方向が存在しないと求まった場合には、①の x_0 および C_{x_0} を解とする。

③運動計測不能方向が求まった場合、並進誤差が最小となる回転中心 C 点における運動パラメータ $x_c = [v_c^T, \omega^T]^T$ から、図5に示すように並進あるいは回転の運動計測不能方向の成分を除き、その運動計測不能方向はそのままその方向へは運動が計測できないと見なす。

5. 運動計測実験

5.1 実験システム

本実験では距離センサとしてキャノンの反町によって開発されたものを用いる⁷⁾。本センサは投光法を用いており、1,000点あまりのスポット光を投影し、各スポット像までの距離を三角測量によってハードウェアで算出し、測定点数1,056点の距離画像を1/30秒(ビデオレート)で出力する。また本センサの距離計測誤差は距離の2乗に比例し、距離1,000mmで1.3mm(標準偏差)である。

実験システム全体の構成を図6に示す。

以後の実験では、センサから約1,000mmのところに対象物を置き、距離画像を入力した。また、法線ベクトル n は距離画像の各点の近傍7点に平面パッチを当てはめて算出した。

5.2 運動パラメータの導出例

まず運動・距離式を用いた運動計測手法の有効性を示すため、すべての運動が求まる例として、3面が観測される一辺100mmの立方体の運動を計測した例を示す¹⁵⁾。図7に示すようにセンサからほぼ z 軸方向に約1,000mmのところ立方体を置き、2枚の距離画像を入力し、3.2節に従って運動パラメータを計測した。

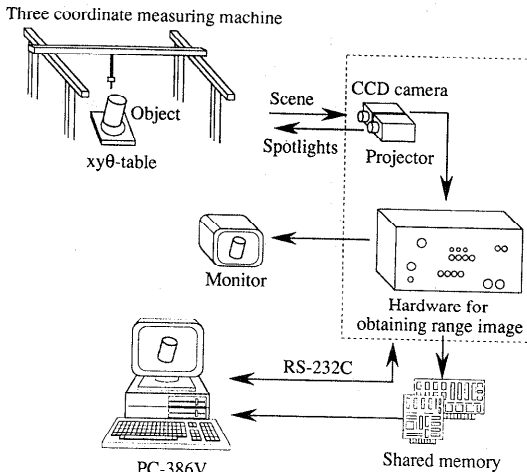


図6 実験システムの構成
Fig. 6 Experimental system.

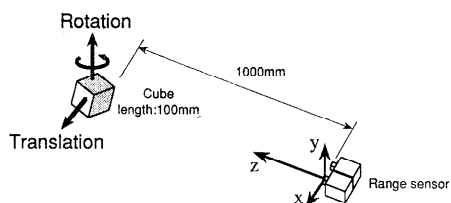


図7 運動計測実験の設定
Fig. 7 Setting of experiments.

(1) x 軸方向の30mmの並進

計測点数(式(4)の m)が約40点で、各成分の計測誤差が、

並進: 0.5~1.5mm 回転: 0.01~0.02rad
であった。

(2) y 軸回りの 10° の回転

計測点数が約75点で、各成分の計測誤差が、
並進: 0.5mm以下 回転: 0.01rad以下
であった。

並進運動、回転運動とも高い精度で運動パラメータが算出されている。また運動パラメータの算出に要した時間はパーソナルコンピュータで0.5秒以下と高速であり、運動・距離式を用いた運動計測の有効性が示されている。またこれらの誤差は式(6)から得られる誤差の推定値と比較し、妥当な値であった。

算出された運動パラメータから式(3)を用いて距離画像の各点での移動ベクトルを算出した結果を図8、9に示す。それぞれ並進、回転が正しく計測できている様子が示されている。

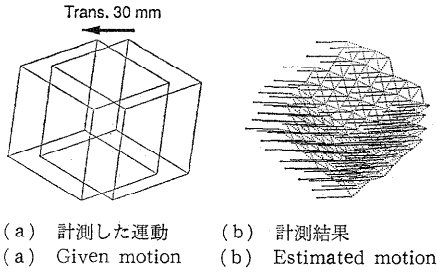


図 8 並進運動の計測
Fig. 8 Measurement of translation.

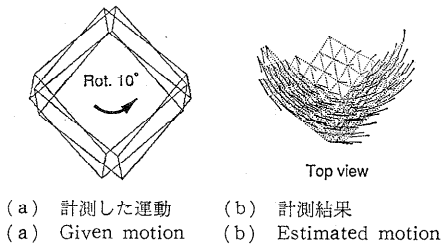


図 9 回転運動の計測
Fig. 9 Measurement of rotation.

5.3 運動計測不能方向の導出例

円筒面, 1面しか見えない立方体の運動計測不能方向を抽出する実験を行った. 3.2節に従って距離画像から運動パラメータ6成分の共分散行列を求め, 4.2節の手法により回転と並進それぞれの運動計測不能方向を抽出した. 図10(c)~(e), 11(c)(d)で, 求められた計測不能方向を, おのおの設定された回転中心を始点として示す.

(1) 円筒面

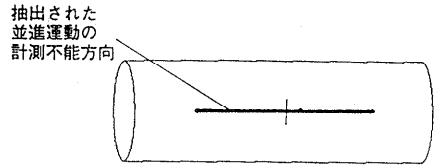
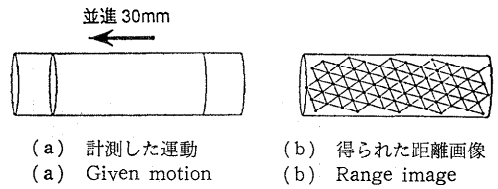
直径50mm, 長さ150mmの円筒面の運動計測不能方向を求めた結果を図10に示す. (d)は4.2節の手法を用いず, 回転中心を距離画像の重心にした結果である.

図10より, 最適な回転中心の導出を考慮していない(d)では運動計測不能方向がうまく検出できていないのに対し(並進の運動計測不能方向が2方向になってしまっている), 4.2節の手法では円筒面の運動計測不能方向である軸方向の並進, 回転が共に正しく抽出されており, 4.2節の手法の有効性がいえる.

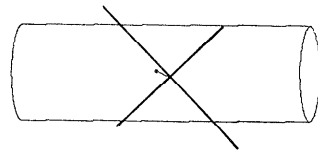
(2) 1面しか見えない立方体

距離センサから1面しか見えない1辺100mmの立方体の運動計測不能方向を求めた結果を図11に示す.

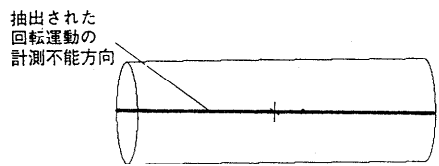
運動計測不能方向である面に平行な並進, 面に垂直



(c) 抽出された並進運動の計測不能方向
(c) Estimated undetectable direction of translational motion



(d) 並進運動の計測不能方向の抽出失敗例
(d) Failure of estimation of undetectable direction of translational motion



(e) 抽出された回転運動の計測不能方向
(e) Estimated undetectable direction of rotational motion

図 10 円筒面の運動計測不能方向の抽出

Fig. 10 Estimation of undetectable motion direction of a cylinder.

な回転が共に正しく抽出されている.

以上の実験より, 4.2節で導いた運動計測不能方向の導出法の有効性が示されている.

6. 結 論

本論は距離画像から3次元運動を計測するための手法の提案を述べたものである. 以下に述べる結論を得た.

(1) 剛体の運動パラメータ6成分と距離画像との間に成立する基本式(運動・距離式)を用いた手法を解析し, その運動計測性の評価手法を明らかにした. すなわち, 運動計測性評価の指標となる行列を定め, そ

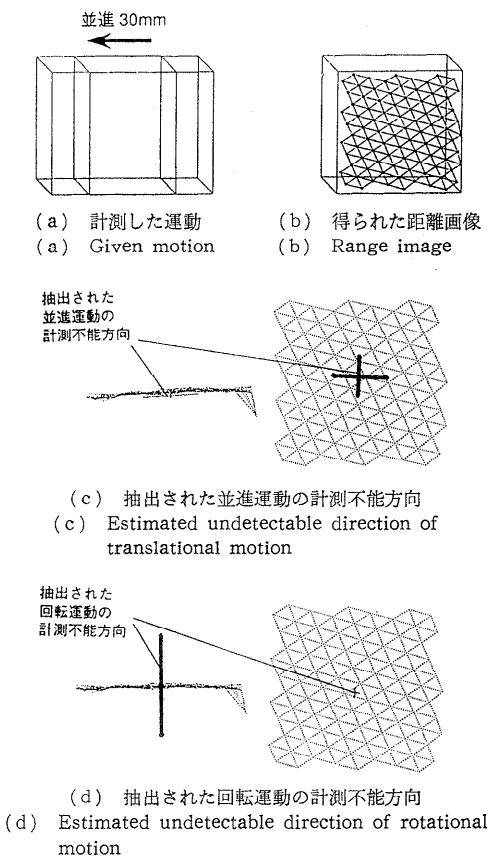


図 11 立方体の運動計測不能方向の抽出

Fig. 11 Estimation of undetectable motion direction of a cube.

の行列を元に、

- すべての運動成分が計測できる条件の定式化、
- 運動計測誤差の分布の算出、
- 運動計測不能方向の算出

を統一的行うことができることを示した。

(2) 距離画像の誤差に強い計測手法を確立した。すなわち、実際の計測で起こる距離画像の誤差の影響を排除する方法として、回転中心を適当に設定して運動パラメータの共分散行列を並進、回転それぞれの共分散行列に分割して運動計測不能方向を抽出する手法を確立した。

本論で論じた運動・距離式を用いた運動計測手法に特徴抽出に基づく手法を相補的に組み合わせる枠組みの確立が、今後の課題である。

謝辞 距離センサに関して多くの有益な助言をいただいたキャノン株式会社の反町誠宏氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Tsai, R. Y. and Huang, T. S.: Uniqueness and Estimation of Three-Dimensional Motion Parameters of Rigid Objects with Curved Surfaces, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-6, No. 1, pp. 13-27 (1984).
- 2) 金谷健一: 画像理解—3次元認識の数理, 森北出版 (1990).
- 3) Poggio, T., Torre, V. and Koch, C.: Computational Vision and Regularization Theory, *Nature*, Vol. 317, No. 26, pp. 314-319 (1985).
- 4) 谷内田正彦: 視覚を用いた3次元位置・形状の計測とその応用, システムと制御, Vol. 29, No. 10, pp. 631-638 (1985).
- 5) 山本裕之, 田宗道弘, 田村秀行: 距離画像の入力と処理, 信学技報, IE 86-128, pp. 49-59 (1987).
- 6) Hebert, M.: Outdoor Scene Analysis Using Range Data, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1426-1432 (1986).
- 7) 反町誠宏: アクティブ距離センサ, 第5回産業における画像センシング技術シンポジウム, 2-5, pp. 67-72 (1990).
- 8) 山本正信ほか: 距離動画像を用いた非剛体運動パラメータの直接的推定法, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 9, pp. 1129-1141 (1991).
- 9) Kehtarnavaz, N. and Mohan, S.: A Framework for Estimation of Motion Parameters from Range Images, *Comput. Vision Graphics Image Process.*, Vol. 45, No. 1, pp. 88-105 (1989).
- 10) 長尾武司, 新井民夫, 梅田和昇: 距離画像による物体の認識と運動解釈, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 161-162 (1990).
- 11) Szeliski, R.: Estimating Motion from Sparse Range Data without Correspondence, *IEEE 2nd Int. Conf. Computer Vision*, pp. 207-216 (1988).
- 12) Horn, B. K. P. and Harris, J. G.: Rigid Body Motion from Range Image Sequences, *Comput. Vision Graphics Image Process.*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-13 (1991).
- 13) Yamamoto, M.: Direct Estimation of Deformable Motion Parameters from Range Image Sequence, *Proc. ICCV '90*, pp. 460-464 (1990).
- 14) 新井民夫, 梅田和昇: 距離画像を用いた多面体の運動計測, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 297-298 (1989).
- 15) Arai, T. and Umeda, K.: Measurement of 3D Motion Parameters from Range Images, *IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, pp. 383-388 (1991).
- 16) Brandt, S.: *Statistical and Computational Methods in Data Analysis*, North-Holland

Publishing Company (1970), データ解析の方法 数理統計学とコンピュータ (吉城 肇, 高橋 秀知, 小柳義夫訳), みすず書房 (1976).

17) 中川 徹, 小柳義夫: 最小2乗法による実験データ解析, 東京大学出版会 (1982).

付 録

式(8)において,

$$C_{v_0} = \begin{bmatrix} \sigma_{v_0x}^2 & \sigma_{v_0xv_0y} & \sigma_{v_0xv_0z} \\ \sigma_{v_0xv_0y} & \sigma_{v_0y}^2 & \sigma_{v_0yv_0z} \\ \sigma_{v_0xv_0z} & \sigma_{v_0yv_0z} & \sigma_{v_0z}^2 \end{bmatrix},$$

$$C_{\omega} = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_x}^2 & \sigma_{\omega_x\omega_y} & \sigma_{\omega_x\omega_z} \\ \sigma_{\omega_x\omega_y} & \sigma_{\omega_y}^2 & \sigma_{\omega_y\omega_z} \\ \sigma_{\omega_x\omega_z} & \sigma_{\omega_y\omega_z} & \sigma_{\omega_z}^2 \end{bmatrix},$$

$$C_{v_0,\omega} = \begin{bmatrix} \sigma_{v_0x\omega_x} & \sigma_{v_0x\omega_y} & \sigma_{v_0x\omega_z} \\ \sigma_{v_0y\omega_x} & \sigma_{v_0y\omega_y} & \sigma_{v_0y\omega_z} \\ \sigma_{v_0z\omega_x} & \sigma_{v_0z\omega_y} & \sigma_{v_0z\omega_z} \end{bmatrix}$$

とおく, このとき, 式(10)より M を計算すると,

$$\begin{aligned} M = & (\sigma_{\omega_y}^2 + \sigma_{\omega_z}^2) \cdot r_x^2 + (\sigma_{\omega_z}^2 + \sigma_{\omega_x}^2) \cdot r_y^2 \\ & + (\sigma_{\omega_x}^2 + \sigma_{\omega_y}^2) \cdot r_z^2 - 2 \cdot (\sigma_{\omega_x\omega_y} \cdot r_x \cdot r_y \\ & + \sigma_{\omega_y\omega_z} \cdot r_y \cdot r_z + \sigma_{\omega_x\omega_z} \cdot r_x \cdot r_z) \\ & + 2 \cdot \{ (\sigma_{v_0y\omega_x} - \sigma_{v_0z\omega_y}) \cdot r_x \\ & + (\sigma_{v_0z\omega_x} - \sigma_{v_0x\omega_z}) \cdot r_y + (\sigma_{v_0x\omega_y} - \sigma_{v_0y\omega_x}) \cdot r_z \} \\ & + (\sigma_{v_0x}^2 + \sigma_{v_0y}^2 + \sigma_{v_0z}^2) \end{aligned}$$

となる. M を r で微分して 0 とおけば, 式(11)が成り立つ.

$$Pr = q \tag{11}$$

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_y}^2 + \sigma_{\omega_z}^2 & -\sigma_{\omega_x\omega_y} & -\sigma_{\omega_x\omega_z} \\ -\sigma_{\omega_x\omega_y} & \sigma_{\omega_z}^2 + \sigma_{\omega_x}^2 & -\sigma_{\omega_y\omega_z} \\ -\sigma_{\omega_x\omega_z} & -\sigma_{\omega_y\omega_z} & \sigma_{\omega_x}^2 + \sigma_{\omega_y}^2 \end{bmatrix}$$

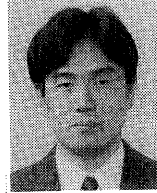
$$q = \begin{bmatrix} \sigma_{v_0z\omega_y} - \sigma_{v_0y\omega_z} \\ \sigma_{v_0x\omega_z} - \sigma_{v_0z\omega_x} \\ \sigma_{v_0y\omega_x} - \sigma_{v_0x\omega_y} \end{bmatrix}$$

P は C_{ω} の成分から計算され, また q は $C_{v_0,\omega}$ の成分から計算される. M を最小にする回転中心 r は式(12)により求められる.

$$r = P^{-1}q \tag{12}$$

(平成4年12月17日受付)

(平成5年4月8日採録)



梅田 和昇 (正会員)

1967年生. 1989年東京大学工学部精密機械工学科卒業. 1991年同大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 同年同博士課程進学, 現在に至る. ロボットビジョン, 特に距離画像処理の研究に従事. ロボット学会, 精密工学会各会員.



新井 民夫

1947年生. 1970年東京大学工学部精密機械工学科卒業. 1977年同博士課程修了. 工学博士. 1987年東京大学工学部精密機械工学科教授. 1979年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員. 産業用ロボット言語の標準化活動を推進. 自動組立, 移動ロボット, 距離画像処理などの研究に従事. 精密工学会誌編集委員長, 自動化推進協会会長. 精密工学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, IEEE, 自動車技術会各会員.