

正射影速度場からの関節物体の立体情報復元法

A Method of Recovering Three-Dimensional Structure and Motion of Jointed Objects from Orthogonally Projected Optical Flow

柴田 勉

Tsutomu Shibata

杉江 昇

Noboru Sugie

(名古屋大学工学部情報工学科)

(Department of Information Science, Faculty of Engineering, Nagoya Univ.)

Abstract When one observes the 2-D dynamic images of moving objects, the 3-D structures are perceived. A method for the interpretation of the 3-D structures is proposed. It is assumed that two points in motion are connected rigidly to each other, and that the direction of the rotational velocity is constant throughout the period of observation. Then based on these assumptions, the rigid structure and the 3-D motion can be determined by observing the positions and velocities of the points on the orthographically projected 2-D images at two instants. This method was applied to synthetic images to recover the 3-D information.

1. ま え が き

我々は、3次元の環境を、2次元の網膜上に投影された像をもとにして、その3次元構造や、運動を知覚している。

そのうちで、3次元空間中を運動する剛体があるとき、その2次元投影像を観察することにより、剛体の3次元構造が復元されることがよく知られている。

この2次元投影像の動きから3次元構造を復元する問題は、Computer Visionの分野で興味を持たれている。([1], [2])

この問題は、概して、2つの観点で分類することができる。

その1つは、3次元構造を2次元に投影する際に、正射影で投影するか、又は中心射影を用いて投影するかによる分類である。

もう1つの分類は、2次元投影像から3次元構造を復元する際に、2次元投影像上の位置の情報のみを用いるか、それとも、位置の情報と速度の情報の両方を用いるかということである([1], [2], [3], [4])。

Ullman [1] は、正射影と中心射影の両方の面で、2次元像の位置の情報だけを用いることにより、この問題を扱った。このように、位置の情報だけを扱ったものでは、正射影像と中心射影像との両面から研究がなされている。

しかし、速度情報をも利用したものは、ほとんどが、中心射影像に関して研究が行なわれている。

正射影像で、速度情報をも利用する場合については、3点2画面で、剛体の構造が復元できることが示されている([5])。しかし、一方では、2点だけの観察によっても、3次元構造の知覚が行なわれることが知られている([3])。従って2点だけの観察からの3次元構造の復元の問題を考えることは興味深い。

本稿では、正射影像での2点の位置と速度の情報を利用して、剛体の3次元構造を復元する方法について述べる。

2点の観察で、3次元構造を復元するために、2つの仮定を設ける。

仮定の1つは、3次元空間中を運動する物体が剛体であるということである。

もう1つの仮定は、3次元空間中での運動としては、回転運動が必要であり、その回転運動の角速度ベクトルの方向が一定であるということである。

上記2つの仮定から、2点2画面の情報により、3次元構造の解の候補を得られることを示す。また、この方法を運動する関節物体に適用した結果も示す。

2. 3次元情報の抽出理論

ここでは、3次元空間を運動する物体の正射影された2次元投影像から、物体の3次元構造を復元する方法について述べる。2次元像の観察によって得られる情報として、2次元像上の点の位置と、各点の速度ベクトルを考える。

まず、3次元空間を運動する物体に対して、次の2つの仮定をする。

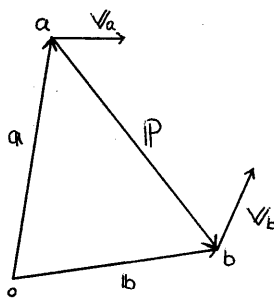


図 2.1 3次元空間中での
各ベクトル

仮定 1

3次元物体として剛体を考える。

今、3次元剛体上の2点a, bを考え、その位置ベクトルを各々、 q , l_b とする。

点bの点aに対する相対的な位置を表わすのに P を用いる。

$$P = l_b - q$$

ここで、点a, bが、同一剛体上にあるとすると、(1)式が成り立つ。

$$|P|^2 = \text{一定} \quad (1)$$

(1)式は、どの観察画面でも、共通に一定の値を取る。

更に、ここでは、速度情報を考えるので、(1)式を時間に関して一階微分する。

ここで、a点の速度ベクトルを V_a , b点の速度ベクトルを V_b とし、b点のa点に対する相対速度ベクトルを V とする。(1)式の一階微分は0であるから

$$P \cdot V = 0 \quad (2)$$

尚、 V は、b点のa点に対する相対速度ベクトルであるため、剛体の並進運動成分は、 V に含まれず、 V には剛体の回転運動成分のみが含まれることになる。

(2)式も、すべての観察画面で成立する式である。

仮定 2

剛体の3次元運動は、並進運動と回転運動から成っており、そのうちの回転運動の角速度ベクトルの方向は一定であるとする。

2枚の観察画面、フレーム1とフレーム2の各々で2点が観察されるとする。

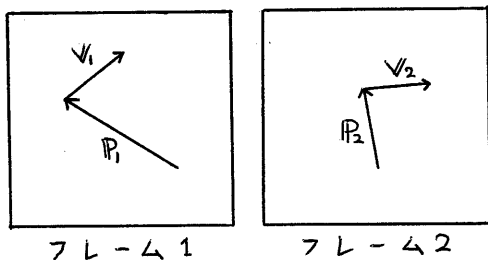


図 2.2 2点2フレーム
による情報

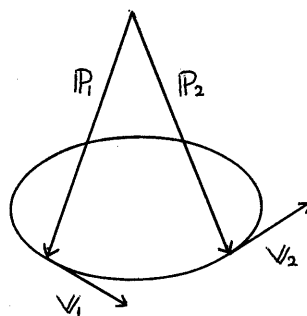


図 2.3 各ベクトルの関係

フレーム1での相対ベクトル P , V をそれぞれ、 P_1 , V_1 とし、同様にフレーム2での相対ベクトルを P_2 , V_2 とする(図 2.2)。仮定1と仮定2を満足する場合 P_1 , P_2 , V_1 , V_2 は、図 2.3 のような円錐上にある。

$$n = \frac{V_2 \times V_1}{|V_2 \times V_1|}$$

とする。まず、角速度ベクトル ω が一定の場合を考える。その時、 ω は、

$$\omega = \frac{\{P_1 - (P_1 \cdot n)n\} \times V_1}{|P_1 - (P_1 \cdot n)n|^2} = \frac{\{P_2 - (P_2 \cdot n)n\} \times V_2}{|P_2 - (P_2 \cdot n)n|^2}$$

と表わされる。仮定1を満足し、角速度ベクトル ω の方向が一定の場合、分母は、一定であるから、

$$\{P_1 - (P_1 \cdot n)n\} \times V_1 = \{P_2 - (P_2 \cdot n)n\} \times V_2$$

となる。更に、角速度ベクトル ω の大きさが時々刻々と変化する場合は

$$\left\{ P_1 - \frac{P_1 \cdot (V_2 \times V_1)}{|V_2 \times V_1|^2} (V_2 \times V_1) \right\} \times \frac{V_1}{|V_1|} = \left\{ P_2 - \frac{P_2 \cdot (V_2 \times V_1)}{|V_2 \times V_1|^2} (V_2 \times V_1) \right\} \times \frac{V_2}{|V_2|} \quad (3)$$

また、 P_1 , P_2 , V_1 , V_2 は、仮定1を満足しているから、(1), (2)より

$$\begin{cases} |P_1|^2 = |P_2|^2 & (4) \\ P_1 \cdot V_1 = 0 & (5) \\ P_2 \cdot V_2 = 0 & (6) \end{cases}$$

従って、(3)~(6)式を用いて、3次元情報を得ることができると考えられる。しかし、(3)式のベクトル式から解を得るのは、難解なため、次に、もう少し

簡略化することを考える。角速度ベクトルの方向が一定の場合も、 P_1, P_2, V_1, V_2 は、図2.3の円錐上にあるから

$$(P_1 - P_2) \perp (V_1 \times V_2)$$

が成り立っているはずである。故に、

$$(P_1 - P_2) \cdot (V_1 \times V_2) = 0 \quad (7)$$

を得る。(7)式は一次式となる。

従って、(4)~(7)式を用いて解の候補を得、更に(3)式を満足するものを解として採用する。

この方法で得られる解は、3次元の真の構造と、その鏡像とを含んでいる。

また、真の構造と、その鏡像とのペアに加えて、偽の構造と、その鏡像との2つのペアが得られる場合がある。

このような場合には、3枚のフレームの情報をを用いることにより、偽の構造の解のペアを解消することができる。第1フレーム、第2フレーム、第3フレームを考え、まず、第1フレームと第2フレームとから解の候補を得る。そして更に第2フレームと第3フレームとから解の候補を得る。これら両方の解の候補のうち、第2フレームの構造が一致するものを真の構造として採用する(図2.4)。

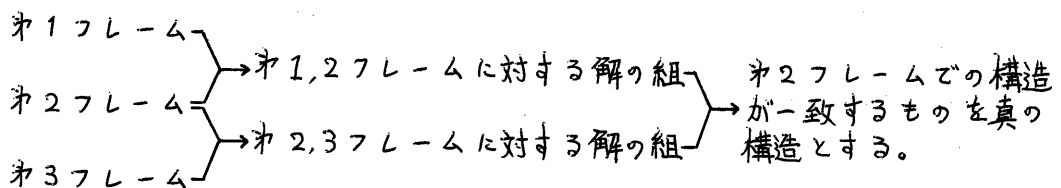


図2.4 2点3フレームによる復元

以上の方法により、3次元構造を復元することができる。

3. シミュレーション実験

この章では、計算機内部で生成した関節物体のシミュレーション・データを用いて、2章で述べた復元を試してみる。

この実験では、計算出力として、剛体のつながり具合だけを見るようにした。

2章の方法で、実際には、3次元構造を求めることができるが、ここでは、その復元された3次元座標値を用いて、3次元での剛体ロッド長を計算し、その長さが、各フレームを通して一定となっているかどうかで観測している2点が剛体でつながっているかどうかを判定した。

構造復元のために入力するデータとしては、一連の複数枚の観察画面での、複数個の点の位置と速度の情報を考える。

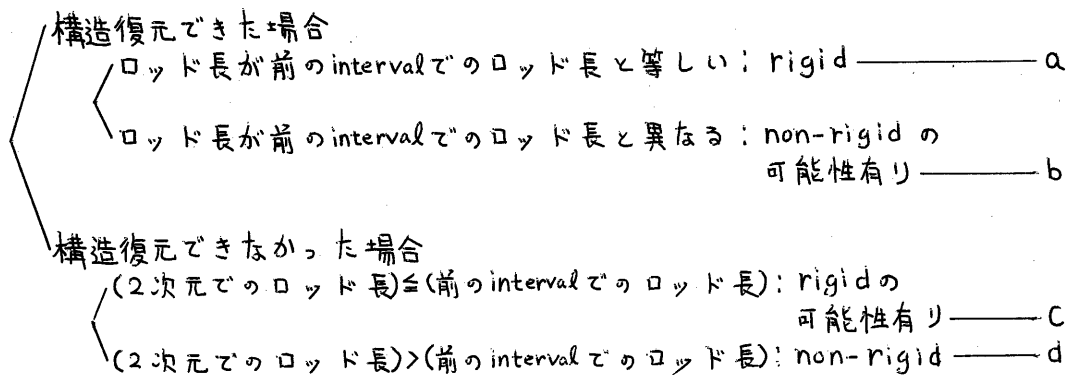
そして、構造復元のためには、そのうちの2点、2画面の情報を利用する。

2章で述べた偽の構造については、現在復元している時点の前時点で復元されたロッド長に最も近い構造を採用することにした。

また、実際には、つながっていないはずの2点の情報に上述の方法を適用しても、計算誤差や、運動条件などにより、構造復元してしまい、誤った判定をしてしまうことが考えられる。

また、その逆に、実際には、つながっているはずの2点の情報を用いた場合でも、計算誤差や運動条件などにより、構造を復元できない場合も考えられる。

ここでは、これらの誤判定の影響を緩和するために、つながり具合の判定に、ヒステリシスの特性を持たせた。つながり具合の度合(剛体らしさ)を-5~5の11段階とする。そして、次のように場合分けして、剛体性の値を定めた。



a の場合	剛体性を1つ上げる
b の場合	剛体性を1つ下げる
c の場合	剛体性を2つ下げる
d の場合	剛体性を4つ下げる

3.1 簡単な連結ロッドによる実験

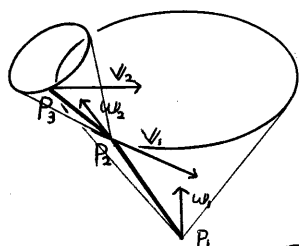


図3.1 2本のロッドの運動

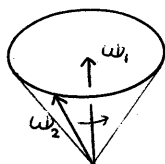


図3.2 角速度ベクトルの動き

まず初めに、連結された2本のロッドに対して実験を行なってみた。図3.1に示すように、2本の剛体ロッド上に3点 P_1 , P_2 , P_3 を考え、 P_1P_2 , P_2P_3 はそれぞれ剛体とする。2本のロッドは点 P_2 でジョイントにより連結されていると考える。そして点 P_1 は、空間の定点に固定されており、ロッド P_1P_2 の回転角速度ベクトル ω_1 は、常に一定である。従って P_1P_2 は、図3.1のような円錐を描く。またロッド P_2P_3 の回転角速度ベクトルは ω_2 であるが、これは、ロッド P_1P_2 に対して一定となっている。従って空間に固定された座標系に対しては、 ω_2 は、その方向が一定とはならず、図3.2のように、 ω_2 は ω_1 により、円錐を描くようになっている。

このようなモデルを考え、そのデータの x 成分、 y 成分のみを構造復元のための入力データとし、 z 成分を構造復元により求めるようにした。これを実行した例を表3.1に示す。 P_1 , P_2 , P_3 の初期位置と、 ω_1 , ω_2 の初期値を与えておく。ここでは、3つの実行例が示してある。各表の上段は、復元の通し番号、左端の数字のペアは、各点のペアに対応する。

$P_1 = (0.0 \quad 0.0 \quad 0.0)$
 $P_2 = (0.3000D+01 \quad 0.4000D+01 \quad 0.6000D+01)$
 $P_3 = (0.2000D+01 \quad 0.2000D+01 \quad 0.9000D+01)$

1. $\Omega_1 = (0.1000D-01 \quad 0.1000D-01 \quad 0.1000D-01)$
 $\Omega_2 = (0.5000D+02 \quad 0.5000D+02 \quad 0.6000D+02)$

pair	frame													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1-2	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1-3	0	-4	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-5	-5	-5	-5
2-3	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5

2. $\Omega_1 = (0.1000D+00 \quad 0.1000D+00 \quad 0.1000D+00)$
 $\Omega_2 = (0.5000D+02 \quad 0.5000D+02 \quad 0.6000D+02)$

pair	frame													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1-2	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1-3	-3	-4	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-5	-5	-5	-4	-5	-5
2-3	0	-1	-2	-1	0	1	2	3	2	1	2	3	4	5

3. $\Omega_1 = (0.1000D+01 \quad 0.1000D+01 \quad 0.1000D+01)$
 $\Omega_2 = (0.5000D+02 \quad 0.5000D+02 \quad 0.6000D+02)$

pair	frame													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1-2	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1-3	-3	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2-3	-3	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5

表3.1 シミュレーション実験
 実行例1

なせるため、ロッド2-3のつながりを見つけ出せたが、 ω_1 が大きくなってくると ω_2 が空間座標に対して一定とは見なせなくなってくるため、つながり具合の誤判定を起こしたものと思われる。

3.2 人間の歩行パターンによる実験

ここでは、更に、人間の歩行パターンを模したシミュレーション・データに対して、3.1と同じ実験を試みた。人間の歩行パターンのデータを生成するプログラムが、James E. Cuttingにより発表されている[6]。このプログラムでは、人間が歩いている姿を真横から見たものとなっている。

この実験では、このプログラムを改訂し、より3次元的に観察されるようにした。つまり、進行方向が、観察面と平行ではなく、観察面に一定の角度を持って向かってくるようにした。この人間のモデルでは、図3.3のようなものと考え、点として図3.3に示した15点を観察する。

そして、図3.3の実線で結んだ部分は、剛体ロッドとなっている。

このようなデータに対して、構造復元を行った結果が表3.2である。この表で

3枚の表で、 ω_2 はすべて同一であり、 ω_1 は表1から表3になるに従い、大きさが大きくなっている。

これを見ると、 ω_1 は空間座標に対して常に一定となっているため、各表を通して、ロッド1-2のつながり具合の判定が正しく行なわれている。また、1-3のペアでは、各表を通して、つながっていないと判定されている。

これに対し、2-3のロッドを見てみると、 ω_1 が小さい時は、正しくつながっていると判定されている。しかし、 ω_1 が大きくなるにつれて、2番目の表では、判定が変動をはじめ、更に3番目の表では、つながっていないとの判定がなされている。

これは、 ω_1 が小さい時は、短い時間間隔で ω_1 が一定と見

		12345678901234567890123456789012345678901234
Right Wrist	- Left Ankle	.....
Right Wrist	- Left Knee	.01231.....
Right Wrist	- Right Hip	.0.....
Right Wrist	- Left Wrist	.01210.....
Right Wrist	- Left Elbow	.012343210.....
Right Wrist	- Left Shoulder	.....
Right Wrist	- Left Hip	.....
Right Wrist	- Mid Shoulder	0.....
Right Wrist	- Mid Hip	.....
> Left Ankle	- Left Knee	.01201.....0
Left Ankle	- Right Hip	.....
Left Ankle	- Left Wrist	.....
Left Ankle	- Left Elbow	.....
Left Ankle	- Left Shoulder	.....
Left Ankle	- Left Hip	.....
Left Ankle	- Mid Shoulder	.....
Left Ankle	- Mid Hip	.....
Left Knee	- Right Hip	.....
Left Knee	- Left Wrist	.....
Left Knee	- Left Elbow	.....
Left Knee	- Left Shoulder	.....
> Left Knee	- Left Hip	...01.....
Left Knee	- Mid Shoulder	.....
Left Knee	- Mid Hip	.....
Right Hip	- Left Wrist	.....
Right Hip	- Left Elbow	.....
Right Hip	- Left Shoulder	.....
> Right Hip	- Left Hip	.0123455555555554210...01234555555555555555
Right Hip	- Mid Shoulder	.....
> Right Hip	- Mid Hip	.0123455555555555543212345555555555555555
> Left Wrist	- Left Elbow	012345555555555555553455
Left Wrist	- Left Shoulder	.....
Left Wrist	- Left Hip	.0.....
Left Wrist	- Mid Shoulder	.....
Left Wrist	- Mid Hip	.....
> Left Elbow	- Left Shoulder	...01234555555555555555555555555555555555
Left Elbow	- Left Hip	...01.01.....
Left Elbow	- Mid Shoulder	012345555555555531.....
Left Elbow	- Mid Hip	.0.....
Left Shoulder- Left Hip		01234555534231201.....
> Left Shoulder- Mid Shoulder		.012345555555555555555555555543212345555555555
Left Shoulder- Mid Hip		01.....0.....0123120...0.
Left Hip - Mid Shoulder		01231.01231.....
> Left Hip - Mid Hip		.0123455555555555543212345555555555555555
> Mid Shoulder- Mid Hip		.....

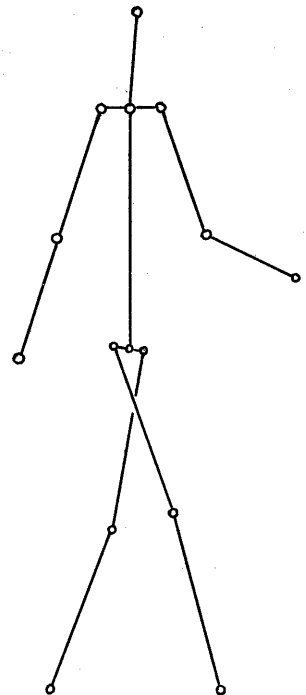


表3.2 シミュレーション実験
実行例2

図3.3 人間のモデル

は、つながり具合の0～5の段階のみを表示するようにした。表の見方は表3.1と同じである。>印をつけたペアが、つながっているはずのペアである。大雑把に見て、>印ではつながっていると判定されているが、Left Ankle-Left kneeとLeft knee-Left Hipのペアでは、3.1節で述べたのと同じ理由で、つながり具合に誤判定が起きていると考えられる。また、Mid Shoulder-Mid Hipのペアでは、運動に回転成分が含まれていないため、復元が行われない。また、つながっていないはずのペアで、つながっているとの判定がされているのは、短い時間内に、つながっているように観察される期間があるからであると思われる。

4. むすび

本稿では、正射影された2次元投影像上の2点の位置と速度の情報を利用することにより、その3次元構造を復元する方法について述べた。そして、簡単なシミュレーション実験により、2次元像の情報から、3次元構造を復元し、各点のつながり具合を調べることができた。

今後の課題としては、各点のつながり具合を調べるだけでなく、実際の3次元構造を計算機内部で組み立てることである。

しかし、この場合に、1本のロッドの復元に対して、1つの真の構造と、その鏡像とが生ずるという問題がある。例えば、 n 本のロッドの構造を復元した場合 2^n 個の構造の可能性が考えられるわけである。

鏡像の問題は、正射影像では、避けられない問題であり、従って、今後、この鏡像による、多くの構造の可能性をいかに減らしてゆくかを検討する必要がある。

謝 辞 日頃より貴重な御討論を頂く本学杉原助教授並びに杉江研究室の方々に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] Ullman, S : The interpretation of visual motion, Cambridge. MIT Press 1979
- [2] Ullman, S : Analysis of visual motion by biological computer. IEEE Computer. 14, 57-69 (August 1981)
- [3] Johansson G : Visual perception of biological motion and a model for its analysis. Perception & Psychophysics. 14, 202-211 (1973)
- [4] Hoffman, D.D., Flinchbaugh, B.E. : The interpretation of biological motion. Biol. Cybernetics. 42, 195-204 (1982)
- [5] Sugihara, K., Sugie, N. : Recovery of rigid structure from orthographically projected optical flow. Computer Vision, Graphics and Image Processing (to be published)
- [6] Cutting, J.E. : A Program to generate synthetic walkers as dynamic point-light displays. Behavior Research Methods & Instrumentation. 10(1), 91-94