

三点直角法による空間座標の取得とその応用

6年A組 川口 恭平

指導教諭 末谷 健志

1. 要約

特殊なマーカを使用することで、物体の空間座標をカメラ一台で正確に取得するアルゴリズム（これを三点直角法と名付けた）の開発に成功した。また、独自に構築した 3DCG の描画システムとあわせ、カメラにより得られた現実の映像にリアルタイムに 3DCG を合成するシステム（コンポジット 3D と名付けた）の構築に成功した。

キーワード モーションキャプチャ、YUV、3DCG、USB カメラ、透視投影

2. 研究の背景

近年、コンピュータの普及と高速化にはめざましいものがあり、一昔前までは処理能力的に不可能とされていたことも今では簡単に実現できるようになった。そこで、これまで高価な機材や設備を必要とした物体の座標取得—モーションキャプチャーが一般家庭にあるパソコンと安価な USB カメラを用いて実現できないかと考え、その研究に取り組むことにした。また、前回の研究において構築することができたオリジナルの 3DCG 描画システムとそのシステムをあわせることで、仮想的なヴァーチャルリアリティを実現できないかと考え、その研究に取り組んだ。

3. 目的

一般家庭にあるパソコンと安価な USB カメラを用いて、物体の正確な空間座標取得を実現するシステムを構築する。物体は大きさがああるので位置といっても一概には定められない。そこで物体のある点をその物体の位置の代表点として定め、その代表点の空間座標を取得する方法を考える。また、

そのシステムと 3DCG 描画システムを併用することで擬似的なヴァーチャルリアリティを実現する。

4. 研究の内容

(1) 仮説

仮説 I

三点直角法を用いてマーカの空間座標をリアルタイムに取得することができる。

仮説 II

仮説 I におけるシステムを用いて、実際の映像にリアルタイムに 3DCG を合成することができる。

なお上記仮説を検証するソフトを開発する環境は以下の通りである

OS : Windows XP SP2

IDE : Microsoft Visual Basic 6.0

(2) 研究の方法

研究 I

カメラで識別できる三つの点（以下、識別点）で直角二等辺三角形をつくった下記

のようなマーカを代表点につける。そして USB カメラでそのマーカを写し、その位置を三点直角法によって決定する。なお、識別点として今回は三つの異なった色の粘土を使い、YUV 形式に変換したカメラ映像から色の違いを利用してそのカメラ映像における座標を取得する。

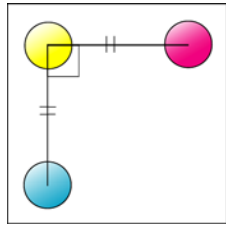


図 1

—三点直角法—

三点直角法とはカメラ映像が物体の空間座標を透視投影した結果として得られるものであると仮定し、カメラ映像上のマーカの位置情報から、物体の空間座標を算出する方法である。

なお、計算結果として得られる空間座標はカメラの位置を原点とし、カメラ映像の縦横、および奥行きを軸とした正規直交系の座標として得られる。

マーカ上の識別点の空間座標を

$$P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$$

とおくと、この三つの識別点が直角二等辺三角形をなすことから、

$$\begin{cases} \overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_1P_3} = 0 \\ \left| \overrightarrow{P_1P_2} \right| = L \\ \left| \overrightarrow{P_1P_3} \right| = L \end{cases}$$

(L は二等辺の長さ)

が成り立つ。

また、カメラ映像における、識別点の平面座標をそれぞれ $Q_1(x'_1, y'_1)$, $Q_2(x'_2, y'_2)$, $Q_3(x'_3, y'_3)$ とおくと、 $P \rightarrow Q$ は透視投影なので

$$Q_i = \frac{S}{z_i \tan \theta} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$$

($i=1,2,3$) S は映像の幅長 θ はカメラの画角

が成り立つ。

以上の式を未知変数 z_1, z_2, z_3 についての方程式として解くことで、マーカ上の識別点の空間座標 P_1, P_2, P_3 を決定する。実際に計算すると、次の方程式系を得る。

$$(p\gamma + 1)z_1^2 + \{(p\beta_2 + 1)z_2 + (p\beta_3 + 1)z_3\}z_1 + (p\delta + 1)z_2z_3 = 0$$

$$z_2 = \frac{(p\beta_2 + 1)z_1 \pm \sqrt{\{(p\beta_2 + 1)^2 - (p\alpha_2 + 1)(p\gamma + 1)\}z_1^2 + (p\alpha_2 + 1)L^2}}{p\alpha_2 + 1}$$

$$z_3 = \frac{(p\beta_3 + 1)z_1 \pm \sqrt{\{(p\beta_3 + 1)^2 - (p\alpha_3 + 1)(p\gamma + 1)\}z_1^2 + (p\alpha_3 + 1)L^2}}{p\alpha_3 + 1}$$

$$\begin{aligned} \beta_2 &= x'_1x'_2 + y'_1y'_2 & p &= \left(\frac{\tan \theta}{S} \right)^2 \\ \beta_3 &= x'_1x'_3 + y'_1y'_3 & \alpha_2 &= x'^2_2 + y'^2_2 \\ \gamma &= x'^2_1 + y'^2_1 & \alpha_3 &= x'^2_3 + y'^2_3 \\ \delta &= x'_2x'_3 + y'_2y'_3 \end{aligned}$$

この方程式系を z_1 について解くのだが、この方程式系を代数的に解くのは困難なので、解は二分法による近似解として計算する。

このとき、二分法の初期値として

$$\begin{aligned} z_m &= 0, \\ z_M &= \min\left(\sqrt{\frac{(p\alpha_2 + 1)}{(p\beta_2 + 1)^2 - (p\alpha_2 + 1)(p\gamma + 1)}} L, \sqrt{\frac{(p\alpha_3 + 1)}{(p\beta_3 + 1)^2 - (p\alpha_3 + 1)(p\gamma + 1)}} L \right) \end{aligned}$$

を与えるのが適当である。なお、根号内が両方とも負になる場合、経験的にはあるが解が存在しないようである。

なお、解が2個以上である場合があるが、その判別は上記の式から行うことはできないので、実際の映像と比較し、現実適合するほうを選択する。

研究 II

三点直角法によって得られた座標を元に三次元座標の平行移動、回転を行い、その結果を 3DCG としてカメラ映像に上書きする形で合成する。この 3DCG を描くのに必要な描画エンジンは、独自に開発した。

なお、このときの座標変換の式は以下のとおりとする。

$$X' = \begin{pmatrix} \frac{\overrightarrow{P_1P_2}}{|\overrightarrow{P_1P_2}|} \cdot X \\ \frac{\overrightarrow{P_1P_3}}{|\overrightarrow{P_1P_3}|} \cdot X \\ \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}}{|\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}|} \cdot X \end{pmatrix} + P_1$$

(3) 研究の結果

研究 I マーカの空間座標をリアルタイムに取得することができた。

研究 II カメラ映像のマーカの位置に 3DCG をリアルタイムに合成できた。

以上の結果より、仮説 I、II を実証することができた。

5. 考察

—研究 I—

三点直角法によりマーカ上の識別点の

正確な空間座標を取得することができた。また、単位を厳密に設定することで、空間座標の単位をメートル法など、現実に使っている空間距離の単位にすることができた。問題点としては、識別点の座標取得の精度がやや低かったため、算出した座標に多少のブレがあったことと、カメラの画素の限界やレンズのゆがみなどから、完全な透視投影モデルが実現されず、カメラからの距離が大きくなればなるほど、算出される空間座標の誤差が大きくなったことがある。また、三点直角法の解の判別に今回は識別点の見かけの大きさを用いたのだが、大きさの取得の精度が悪いためたびたび誤った解を選択していた。

—研究 II—

三点直角法によって算出された識別点の空間座標をもとに 3DCG をリアルタイムに合成することができた。また、光源の位置をうまく設定することでより現実味のある合成を可能にすることができた。問題点としては、三点直角法の処理と 3DCG 描画の処理を並行しておこなうため、全体として処理が重かったことが上げられる。また、マーカよりも手前に何か物体があっても、3DCG がその上に上書きされてしまうので、結果位置関係に矛盾が生じることがあった。

6. まとめと今後の課題

今回の研究で開発した三点直角法は、精度、処理速度ともに実用的であり、さまざまな分野に応用できることが確認された。今後は、その精度を向上させるために、識別点の座標取得精度の向上および最適解の

選択アルゴリズムの改良が考えられる。また、3DCG の処理をハードウェアに任せることによる処理速度向上が考えられる。三点直角法が高価な機器や高速なコンピュータを必要としない点から、インターネットショッピングなどでの模様替えのシミュレーションや、建物の建築後の景観をシミュレーションするなどの応用が考えられる。

7. 謝辞

今回の研究を通じて協力してくださった末谷先生にこころよりお礼申し上げます。

8. 資料

研究 I

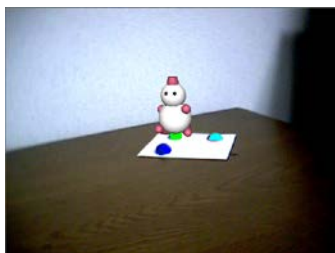


図 2

	X	Y	Z
P1	0.5	-0.4	47.6
P2	-0.8	-1.9	43
P3	5.3	-0.6	46.2
誤差	4.7 E-2		



図 3

	X	Y	Z
P1	-1.2	-1.3	21.5
P2	-2.9	-2.5	17
P3	3.5	-1.8	19.9
誤差	4. E-2		

研究 II

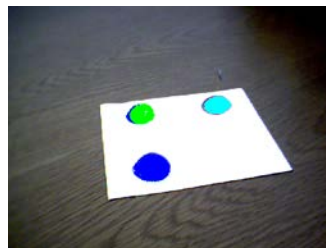


図 4

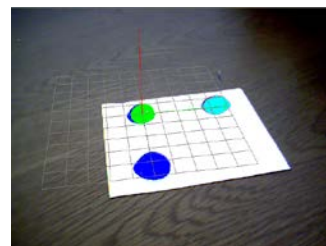


図 5



図 6

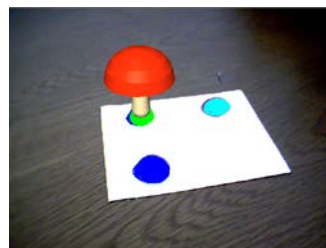


図 7