

カメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づく 多様なカメラの動き制御の分析と検討

深津 真 二[†] 北村 喜 文[†]
正城 敏 博[†] 岸野 文 郎[†]

カメラの動き制御においては、カメラの位置 (X, Y, Z) と姿勢 ($roll, pitch, heading$) をどのように利用者からの入力に対応させるかが問題となり、さまざまな制御手法がある特定のタスクや環境での利用を目的に個々に提案されている。しかし、これまで、さまざまなカメラ制御手法を一貫した規則のもとで、系統的に分析や評価できる枠組みはなかった。本論文では、さまざまなカメラの動き制御を、カメラの外部パラメータである位置と姿勢成分に対する制御に分解し、各成分に対する拘束という形で表現する。この際、カメラの各位置・姿勢成分に対して付加される拘束として、拘束の適用方法とその拘束で用いられるデータの形式の違いにより、4種類の拘束 ($direct, fix, follow, depend$) を提案する。また、従来より提案されているカメラ制御手法を、カメラの位置と姿勢に対して付加される拘束の違いに基づき分析することで、系統的にその特徴や効果を評価する。さらに、このカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加を用いたシステムとして仮想環境内ナビゲーションシステムを実装し、このシステムを用いて、各種拘束を付加することによる効果を検証した結果について報告する。

A Study for the Variations of Camera Control with Restrictions on the Positions and Orientations of Camera

SHINJI FUKATSU,[†] YOSHIFUMI KITAMURA,[†] TOSHIHIRO MASAKI[†]
and FUMIO KISHINO[†]

Many methods and metaphors for effective camera control have been proposed. However, a lot of these methods have been made based on the specific purpose and there is no framework that enables to deal with different camera control methods systematically. This paper discusses placing the restrictions on the parameters of the position and orientation of a camera as the framework. The restrictions on each parameters of the camera are classified into four conditions: **direct**, **fix**, **follow**, and **depend**. In this framework, various camera control methods are expressed with the combination of restrictions. Moreover, it enables to evaluate the general performances and effects of the camera control methods. This paper examines the characteristics and effects of each restriction on the parameters of a camera in the navigation system that controls a camera in different way based on the proposed framework.

1. はじめに

仮想世界におけるカメラ視点から実世界における監視カメラやロボットカメラまで、利用者がそれら環境中に配置されたカメラの動き（移動と回転）を制御するシステムにおいて、利用者が的確にそのカメラの位置と姿勢を操作できることは重要な問題である。制御されるカメラパラメータとしては、カメラの位置と姿勢の他に視野角、アスペクト比、フォーカスなどが

存在する¹⁾。しかし、本論文では一般的なコンピュータグラフィックスで用いられる理想的なピンホールカメラをカメラモデルに考え、各種のパラメータのうち、外部パラメータであるカメラの位置と姿勢の6自由度をその制御対象とする。

カメラの動き制御においては、カメラのある時刻 t の位置・姿勢成分

$$\mathbf{C}(t) = (C_1(t), C_2(t), \dots, C_j(t), \dots, C_6(t)) \quad (1)$$

を、利用者からの入力

$$\mathbf{I}(t) = (I_1(t), I_2(t), \dots, I_i(t), \dots, I_m(t)) \quad (2)$$

にどのように対応させるかが問題となる（図1参照）。

[†] 大阪大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

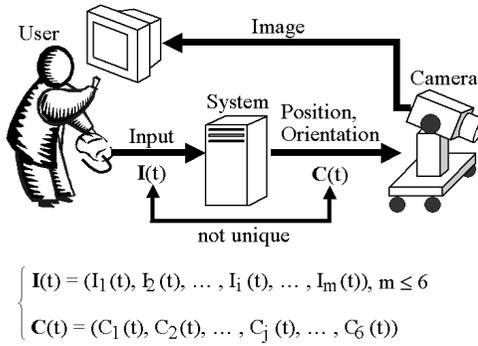


図1 カメラの動き制御インタフェース

Fig. 1 Control the positions and orientations of camera.

利用者からの入力自由度は用いるデバイスにより異なるが、一般的には、多くの自由度を利用者が操作することは精度や効率などの面で困難である。そこで、6以下の自由度 ($m \leq 6$) の入力をうまく使って、カメラの位置と姿勢を決定しようとするさまざまな制御手法が提案され、評価されている。たとえば、マウスの入力(2自由度)をカメラの複数の自由度に関連付けたり、不足分をシステム側で補う手法が提案されている^{2),3)}。また、6自由度入力デバイスを用いた場合でも、入力の自由度をそのまま対応させるのではなく、入力の自由度と異なる値を適用したり、入力の自由度に処理を加えることで、効果的なカメラ制御を実現する手法がいろいろと提案されている^{4)~7)}。しかし、このようなカメラ制御手法の多くは、ある特定のタスクや環境での利用のみを目的に個々に提案されてきたため、さまざまなカメラ制御手法を一貫した規則のもとで、系統的に分析や評価できる枠組みはなかった。

本論文では、さまざまなカメラ制御手法のタスクや環境に依存しない一般的な特徴や効果を表現可能とすることを目的に、さまざまなカメラの動き制御を、カメラの位置 (X, Y, Z) と姿勢 (*roll, pitch, heading*) 成分に対する制御に分解し、各成分に対する拘束という形で表現する。そして、これら各種拘束の付加による効果を蓄積することにより、新たな制御手法の作成や作成した手法の特徴や効果を推量するための指針として役立つ。この際、カメラの各位置・姿勢成分に対して付加される拘束として、拘束の適用方法とその拘束で用いられるデータの形式の違いにより、4種類の拘束 (*direct, fix, follow, depend*) を提案する。そして、これまでに提案されているさまざまなカメラ制御手法を、カメラの位置と姿勢に対して付加される拘束の違いに基づき分析する。さらに、このカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加を用いて、さまざまな

カメラ制御を実現するアプリケーションの1つとして、仮想環境内ナビゲーションシステムを実装し、このシステムを用いて、各種拘束を付加することによる効果を検証した結果について述べる。

2. 仮想環境におけるカメラ制御手法

仮想環境におけるカメラ視点の動きを制御する手法として、これまでにさまざまな手法が提案されている。たとえば、マウスの移動を環境の幾何情報や特殊な変換フィールドをもとに仮想環境中のカメラの動きへと変換する手法^{2),3)}、利用者が身に付けた6自由度入力デバイスによりカメラの移動方向⁴⁾、または、位置と姿勢を直接制御させる手法^{5)~7)}などが提案されている。ほかにも、マウスで画面上の移動先の地点を指定し、キーボードを用いてその地点への前進や後退を行う手法⁸⁾や、環境中のある物体の画像上での位置を指定することで、その要求に沿う位置と姿勢へカメラを自動的に移動させる手法^{9),10)}など、カメラの取得する画像を用いたカメラ制御手法も提案されている。

また、より実際の利用状況を考慮し、行うタスクや環境に応じた適切なカメラ制御を実現したシステムもいろいろと提案されている。Wernertらはカメラ視点の適切な移動方向や視線方向を教示するものとしてガイドアバタを導入するとともに、利用者が任意に制御可能なカメラの位置や姿勢成分を、移動時の速度や静止時で変化させる手法 (*Fixed gaze, Motion-weighted gaze*) を提案している¹¹⁾。ほかにも、MaPSと呼ばれる仮想環境内ナビゲーションシステム¹²⁾やカーナビゲーションシステム¹³⁾では、ナビゲーションの補助用に提示される地図画像をさまざまなスタイルで提示するために、その地図画像を取得するカメラの制御手法として、いろいろな手法を提案している (*Map View, Bird's eye View, Targetting Satellite Camera* など)。さらに、CINEMAと呼ばれるシステムでは、さまざまなカメラの動きを専用のコマンドを用いてプログラミングすることを実現している¹⁴⁾。

これらは、それぞれの手法が想定するアプリケーションでの有効性を向上させる目的で個々に提案されてきたが、詳しく調べてみると、いずれも、カメラの位置と姿勢を表す6つの自由度に対してある種の拘束を加えることによって実現されていることが分かる。この点について、次章で述べる。

3. カメラの位置と姿勢に対する拘束の付加

図2に示すとおり、カメラの各種パラメータのうち、外部パラメータと呼ばれるカメラの位置と姿勢

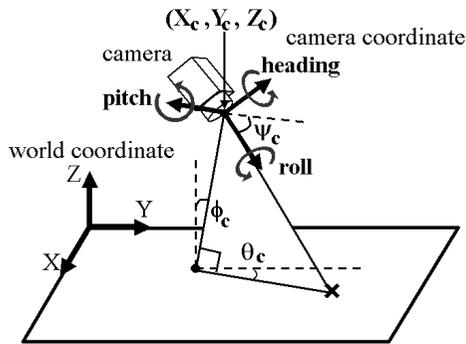


図2 カメラの位置・姿勢成分

Fig. 2 Positions and orientations of camera.

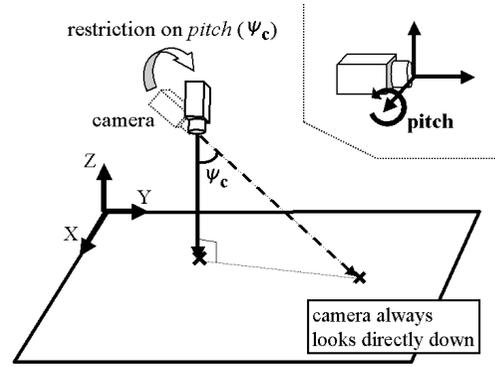
図3 fixの拘束例 ($pitch(t) = -90(\text{deg})$)

Fig. 3 Example of restriction of fix.

を対象とする．ここで， (X_c, Y_c, Z_c) は世界座標系 (X, Y, Z) におけるカメラの位置を表し， $(\psi_c, \phi_c, \theta_c)$ はカメラの世界座標系の各軸 (X, Y, Z) 回りの回転角 ($pitch, roll, heading$) を表す．

3.1 カメラの位置・姿勢成分に対する拘束

従来より提案されているさまざまな制御手法によるカメラの動き制御を，カメラの位置と姿勢に対する制御に分解する．そして，各位置・姿勢成分に対する制御をその成分に対する拘束の付加という観点から分析し，整理する．その結果，さまざまなカメラ制御手法において，カメラの各位置・姿勢成分に対して付加される拘束は，拘束の適用方法とその拘束で用いられるデータの形式により，次の *direct*，*fix*，*follow*，*depend* の4種類に分類される．この際，実質的な処理として1つの成分に対し複数の拘束を付加することは可能であるが，主となる拘束の適用形態と拘束の付加による効果は提案する4種の拘束に大別される．ここで，拘束が付加されるカメラの位置・姿勢成分 $C_j(t)$ は $\{X(t), Y(t), Z(t), pitch(t), roll(t), heading(t)\}$ を表し， $I_i(t)$ は入力デバイスからのデータを表す．

- *direct*.

$$C_j(t) = f(I_i(t)) + b, \quad b: \text{定数.} \quad (3)$$

拘束が付加される成分に，入力デバイスからのデータ $I_i(t)$ を適用．

- *fix*.

$$C_j(t) = A. \quad (4)$$

拘束が付加される成分を，つねにある絶対定数 A に固定．

- *follow*.

$$C_j(t) = T(t) + b, \quad b: \text{定数.} \quad (5)$$

拘束が付加される成分を，時間により変化する動的変数データ $T(t)$ に合わせて変化．

- *depend*.

$$C_j(t) = f(C'(t)) + b, \quad b: \text{定数.} \quad (6)$$

$C'(t)$: $C_j(t)$ 以外の位置・姿勢成分．

拘束が付加される成分を，他の位置・姿勢成分 $C'(t)$ に従属して変化．

2章で述べたような各カメラ制御手法は，カメラの各位置・姿勢成分に対して，上記の4種類の拘束のいずれかを付加し，それらを組み合わせることで実現される．次節以降で，各拘束の詳細とその拘束を付加することによる効果について述べる．また，3.6節では，カメラの位置と姿勢に対して拘束を付加することにより，画像上の表示位置に基づくカメラ制御を実現する方法について述べる．

3.2 *direct* の拘束

拘束が付加されるカメラの位置・姿勢成分に，入力デバイスからの複数のデータのうちのいずれかの成分を適用する．その結果，利用者は入力デバイスを操作することにより，拘束が付加されたカメラの位置・姿勢成分を任意に制御することができる．この *direct* の拘束は，入力デバイスを用いたカメラ制御手法においては，カメラの位置・姿勢成分に対する初期状態での拘束としてよく用いられる．

3.3 *fix* の拘束

拘束が付加されるカメラの位置・姿勢成分を，環境における絶対的な位置や方向の値に固定する．その結果，拘束を付加されたカメラの位置・姿勢成分は，つねに設定されたデータの値を保つ．たとえば， $\{X(t), Y(t), Z(t)\} = \{X_a, Y_a, Z_a\}$ とすると，カメラは絶対的な位置 (X_a, Y_a, Z_a) に固定され， $pitch(t) = -90(\text{deg})$ とすると，カメラはつねに環境での真下を向く (図3参照)．また， $roll(t) = 0(\text{deg})$ とすると，カメラの水平軸はつねに環境の水平面と平行に保たれ， $heading(t) = 0(\text{deg})$ とすると，つねにカメラの向き

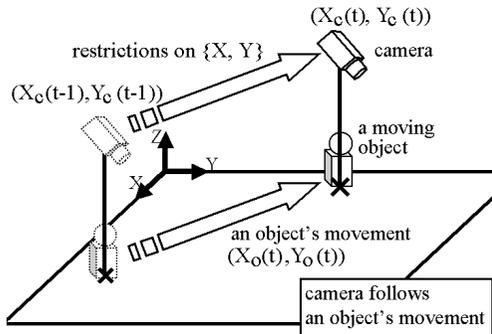


図4 followの拘束例 ($\{X(t), Y(t)\} = \{X_o(t), Y_o(t)\}$)
Fig. 4 Example of restriction of follow.

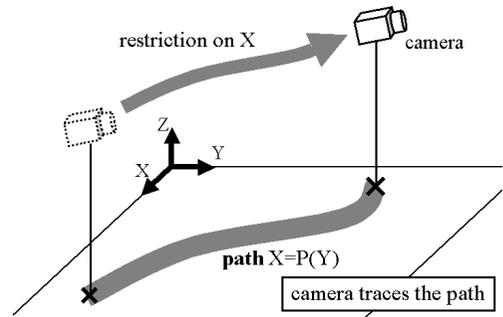


図5 dependの拘束例 ($X(t) = P(Y(t))$)
Fig. 5 Example of restriction of depend.

は環境の基準方向に向けられる。

3.4 followの拘束

拘束が付加されるカメラの位置・姿勢成分を、時間により変化する動的変数データに合わせて変化する。その結果、拘束が付加されたカメラの位置・姿勢成分は、その拘束で用いられる動的変数データに従い、自動的に変化する。動的変数データとしては、さまざまなデータが考えられる。たとえば、 $\{X(t), Y(t)\} = \{X_o(t), Y_o(t)\}$ とすると、環境中を移動する物体 ($X_o(t), Y_o(t)$) に追従してカメラが移動し (図4参照), $Z(t) = Z_o(t) + 100$ とすると、その移動物体の100m上空にカメラが配置される。また、 $\{pitch(t), roll(t)\} = \{M_p(t), M_r(t)\}$ とすると、あらかじめ設定された動作データ ($M_p(t), M_r(t)$) に基づきカメラが回転し、 $heading(t) = heading_o(t)$ とすると、環境中を移動する物体の向き ($heading_o(t)$) に追従してカメラの向きが変化する。

3.5 dependの拘束

カメラのある位置・姿勢成分を、それ以外の位置・姿勢成分に従属して変化させる。このdependの拘束では、カメラの各位置・姿勢成分を直接拘束する先の3種の拘束と異なり、拘束を付加する成分と従属関係に指定する成分との対応関係をさまざまな関数や条件を用いて設定する。この際、dependの拘束が付加された成分の処理は、従属関係に指定された成分に付加されている拘束に依存する形となる。しかしながら、上述のようにその拘束の設定方法が先の3種の拘束と異なることから、本論文ではdependを1つの拘束として提案する。このdependの拘束をカメラの各位置・姿勢成分に組み合わせて利用する場合、拘束間で競合が生じないように配慮する必要がある。たとえば、 $Z(t) = f(X(t))$ と設定する場合、 Z 成分以外の拘束により、 $X(t) = f(Z(t))$ となるような設定をして

はいけない。

dependの拘束として、 $X(t) = P(Y(t))$ 、ただし $P(Y)$ はバスの軌跡データとすると、 Y 成分の制御に応じてカメラが設定されたパス上を移動し (図5参照)。

$$\begin{cases} X(t) = \sin(\text{heading}(t)) + X(t-1) \text{ かつ} \\ Y(t) = \cos(\text{heading}(t)) + Y(t-1) \end{cases}$$

とすると、視線方向 ($heading(t)$) へカメラが移動する。また、 $Z(t) = E(X(t), Y(t))$ 、ただし $E(X, Y)$ は環境中の各地点の標高データとすると、カメラの移動にともなう環境の起伏に応じてカメラが昇降し、 $pitch(t) = P(X(t), Y(t))$ 、ただし $P(X, Y)$ は環境中の各地点での傾斜角データとすると、カメラの移動にともなう地平面の傾きの変化に応じてカメラが回転し、 $roll(t) = R(X(t), Y(t))$ 、ただし $R(X, Y)$ は環境中の各地点での法線データとすると、カメラの移動にともなう各地点での法線方向の変化に応じてカメラが回転する。ほかにも、 $heading(t) = \tan^{-1} \left(\frac{X_c(t) - X_c(t-1)}{Y_c(t) - Y_c(t-1)} \right)$ とすると、移動方向 (位置の変化) に一致するようにカメラの向きが変化する。

3.6 画像上の表示位置に基づくカメラ制御

カメラの位置・姿勢成分のいくつかにdependの拘束を付加し、それらを組み合わせることにより、環境中のある場所や物体の提示画像上での表示位置を保ちつつ、カメラの位置や姿勢を制御できる。この画像上の表示位置に基づくカメラ制御は非常に有用であり、従来より提案されているカメラ制御手法でも広く実現されている^{9),10)}。そこで、カメラの位置と姿勢に対する拘束の付加を用い、これを実現する方法を本節で述べる。

図6に画像上の表示位置、カメラの位置と姿勢、表示される環境中の地点 P_g (注視点) の関係を示す。この際、 (X_g, Y_g, Z_g) は環境中の注視点の座標を表し、

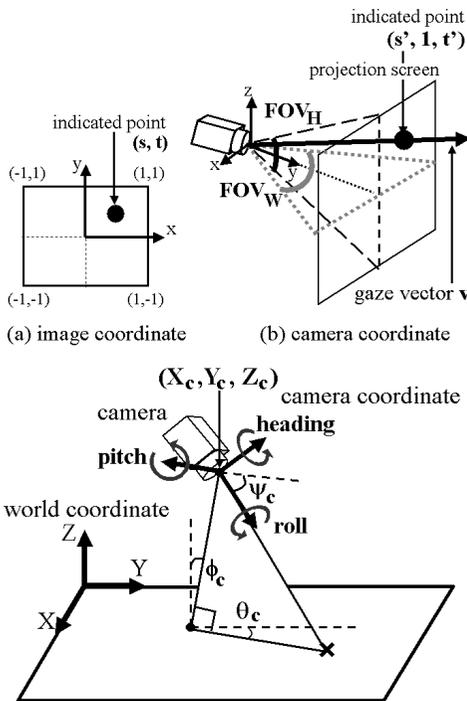


図6 画像上の表示位置へのカメラの視線ベクトル

Fig. 6 Gaze vector through indicated point on the image.

(θ_g, ψ_g) は画像上の表示位置 (s, t) から導出されるカメラの姿勢成分に対するオフセット回転を表す。なお、この導出の処理過程は付録に示す。

カメラの各位置・姿勢成分に対して depend の拘束を付加し、それらを組み合わせる際に、カメラの位置と姿勢に対して付加される拘束間で競合を生じさせず、画像上の表示位置に基づくカメラ制御を実現する方法としては、次の3通りの方法が存在する。この際、各式中で用いられる $\{X_{gc}, Y_{gc}, Z_{gc}\}$ は、カメラと注視点間の距離 $\{|X_g - X_c|, |Y_g - Y_c|, |Z_g - Z_c|\}$ を表す。

- a) X と Y に depend の拘束を付加。

利用者はカメラの高さや姿勢を任意に制御でき、次式に従い、カメラが注視点をとらえる位置へ移動。

$$X_c = Z_{gc} \tan(90 - \psi_c) \sin(\theta_c + \theta_g) + X_g \quad (7)$$

$$Y_c = Z_{gc} \tan(90 - \psi_c) \cos(\theta_c + \theta_g) + Y_g \quad (8)$$

- b) $pitch$ と $heading$ に depend の拘束を付加。

利用者はカメラの位置や高さを任意に制御でき、次式に従い、カメラが注視点をとらえるように回転。

$$pitch = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{gc}}{\sqrt{X_{gc}^2 + Y_{gc}^2}} \right) - \psi_g \quad (9)$$

$$heading = \tan^{-1} \left(\frac{X_{gc}}{Y_{gc}} \right) - \theta_g \quad (10)$$

- c) Z と $heading$ に depend の拘束を付加。

利用者はカメラの位置や俯角を任意に制御でき、次式に従い、カメラの高さや向きが変化。

$$Z_c = Z_g + \sqrt{X_{gc}^2 + Y_{gc}^2} * \tan(\psi_c + \psi_g) \quad (11)$$

$$heading = \tan^{-1} \left(\frac{X_{gc}}{Y_{gc}} \right) - \theta_g \quad (12)$$

従来、このような画像上の表示位置に基づくカメラ制御は、カメラの位置や姿勢に対する直接的な制御とはまったく異なる制御として扱われてきた⁹⁾。それに対し、本節で説明した手法のように画像上の位置情報をカメラの姿勢成分へのオフセット回転へ変換することにより、このような画像上の表示位置に基づくカメラ制御もカメラの位置と姿勢に対する拘束を用いて表現することが可能となる。

4. カメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づくさまざまなカメラ制御手法の分析

本章では、従来より提案されているさまざまなカメラ制御手法^{4),5),13),15)~17)}を、カメラの位置と姿勢に対して付加される拘束の違いに基づき分析する。表1に各文献で提案、評価されている手法において、カメラの各位置・姿勢成分に付加される拘束の一覧を示す。この際、カメラの各位置・姿勢成分に対して付加される拘束を、拘束の種類(拘束で用いられるデータ)という形で表し、depend の拘束における画像上の表示位置に基づくカメラ制御を*depend(拘束で用いられるデータ)[表示物体や場所]で表す。なお、 $pitch$, $roll$, $heading$ 成分をそれぞれ p , r , h と短縮して表す。

Bowman らは、6 自由度入力デバイスを用いたカメラ制御手法として、カメラの位置と姿勢すべての成分を直接制御する hand-directed、カメラの高さと姿勢の一部が固定された torso-directed、視線方向へカメラが移動する gaze-directed、カメラが動的データに従い自動的に制御される system automated などの手法を実装し、比較評価した^{4),15),16)}。そして、gaze-directed では操作の直感性、hand-directed では自由度の高さ、system-automated では簡便さを各手法の効果としてあげた。各手法を3章で述べたカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づき分析することで、各手法の効果がどのような拘束を付加することに起因するかが分かり、手法単位ではなく、より詳細な評価が可能となる。

Ware らは 6 自由度トラッカを用いた 3 種のカメラ

表 1 さまざまなカメラ制御手法においてカメラの各位置・姿勢成分に付加される拘束
 Table 1 Restrictions on positions and orientations of camera in various camera control methods.

Control method	X	Y	Z	pitch	roll	heading
Bowman's work ^{4),15),16)}						
hand-directed	direct	direct	direct	direct	direct	direct
torso-directed	direct	direct	fix	fix	fix	direct
gaze-directed	depend(p,h)	depend(p,h)	depend(p,h)	direct	direct	direct
system automated	follow	follow	follow	follow	follow	follow
Ware's work ⁵⁾						
eyeball-in-hand	direct	direct	direct	direct	direct	direct
scene-in-hand	direct	direct	direct	direct	direct	direct
	depend(p,r,h)	depend(p,r,h)	depend(p,r,h)	direct	direct	direct
flying-vehicle-control	direct	direct	direct	direct	direct	direct
Watanabe's work ¹³⁾						
bird's eye view	*depend(z,p,h) [user]	*depend(z,p,h) [user]	fix	fix(small)	fix	follow(user)
pseudo bird's eye	*depend(z,p,h) [user]	*depend(z,p,h) [user]	fix	fix(large)	fix	follow(user)
plan view	*depend(z,p,h) [user]	*depend(z,p,h) [user]	fix	fix(-90)	fix	follow(user)
Darken's work ¹⁷⁾						
forward-up view	*depend(z,p,h) [the center]	*depend(z,p,h) [the center]	fix	fix(small)	fix	follow(user)
north-up view	fix	fix	fix	fix(small)	fix	fix(north)

ラ制御メタファを提案し、その評価結果で eyeball-in-hand と flying-vehicle-control に比べ、scene-in-hand での操作が難しいことを示した⁵⁾。しかし、その原因については定性的な検討にとどまっている。そこで、scene-in-hand をカメラの位置と姿勢に対する拘束に基づき分析すると、表 1 に示すように、X, Y, Z 成分の制御に direct の拘束の付加と depend (p,r,h) の拘束の付加の 2 つの制御方法が存在することが分かる。そして、この X, Y, Z 成分の制御における競合が操作性を悪くする要因であることが即座に分かる。

Watanabe らは、カーナビゲーションシステムにおけるナビゲーション画像（つねに利用者を中心に表示し、かつ利用者の向きが画像の上側に対応）提示用カメラの制御において、カメラの俯角（pitch）の設定が与える影響について評価実験を行った¹³⁾。その結果、環境の空間構造認識には、俯角を環境を眺望する角度に設定することが有用であることを示した。また、Darken らは、仮想環境でのナビゲーションシステムにおいて、仮想環境の全体を表示した地図を提示する際の向き（カメラの向きに相当）の設定が与える影響について評価実験を行った¹⁷⁾。その結果、地図の向きを北に固定することは環境の大局的理解に有効であり、利用者の向きに合わせて回転させることは利用者を基準にした移動に有効であることを示した。ここでも、各手法をカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づき分析することで、各手法での違いが明確に

なり、異なる研究者の提案手法も同じ枠組みで評価ができる。たとえば、Watanabe の bird's eye view と Darken の forward-up view は、X, Y 成分に対して同じ depend の拘束が付加されるが、拘束で用いられるデータが前者は利用者の位置で後者は環境の中心の位置であるため、異なる手法としてとらえられる。

5. 仮想環境内ナビゲーションシステム

カメラの位置と姿勢に対する拘束の付加を用い、さまざまなカメラ制御を実現するアプリケーションの 1 つとして、仮想環境内ナビゲーションシステムを構築した。この仮想環境内ナビゲーションシステムにおいては、利用者の通常の視点から見た等身大画像（User's view）に加え、仮想環境を大局的にとらえる鳥瞰カメラから見た鳥瞰画像（Overview image）が利用者に提示される⁷⁾。このシステムをベースにして、利用者は 6 自由度入力デバイスを用いて、任意に利用者視点を制御できるとともに、鳥瞰カメラの位置と姿勢に対してさまざまな拘束を付加することができるよう、次に示す拘束の設定を実現する。また、鳥瞰画像上の表示位置に基づく鳥瞰カメラの制御も実現する。なお、拘束の設定はキーボードによりコマンドラインからのメニュー選択で行う。

- direct : 6 自由度デバイスからの入力を適用。
- fix : 環境の絶対的な位置や方位に固定。
- follow : あらかじめ設定されたモーションデータ

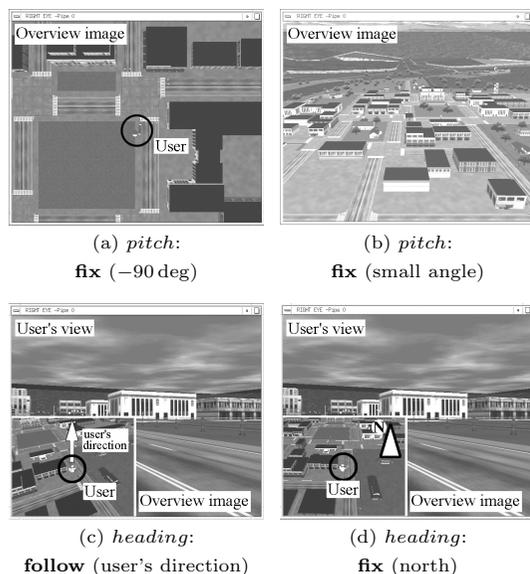


図7 利用者への提示画像例(等身大画像+鳥瞰画像)

Fig. 7 User's view (life-size local image and overview image).

や環境中を移動する利用者視点の位置や姿勢に合わせて変化。

- **depend**: 視線方向へのカメラの移動, 移動方向へのカメラの追従, カメラの移動にともなう環境中の標高や地平面データに基づく高さや傾きの変化. 実装した仮想環境内ナビゲーションシステムにおいて, 鳥瞰カメラの位置と姿勢に対して各種拘束を付加した際に提示される鳥瞰画像(a, b), 利用者への提示画像(c, d)例を図7に示す.

実装した仮想環境内ナビゲーションシステムを用い, 数人の被験者により, 鳥瞰カメラの位置と姿勢に対して付加する拘束をさまざまに変え, 各種拘束が付加されることによる効果を評価した. また, 4章での分析結果と照合することで, 提案するカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づく分析の効果を検証した.

まず, カメラの位置と姿勢すべてに対して **direct** の拘束を付加することは, 自由度の高いカメラ制御を可能とし, **follow** (motion data) の拘束を付加することは, 自動的なカメラ移動を実現し, 他のタスクへの集中を促進することが分かった. また, X, Y, Z 成分に対して **depend** (p,h) の拘束を付加することは, 視線方向へのカメラ移動を実現し, 直感的なカメラ制御を可能とすることが分かった. これらと同様の結果は, Bowman らの研究における知見と一致している^{4),15),16)}. また, 前述した X, Y, Z 成分に対する **depend** (p,h) の拘束の付加とは逆に, *pitch*,

heading 成分に対して **depend** (X, Y, Z) の拘束を付加した場合, 移動方向へ視線方向が追従し, カメラ制御の理解が容易であることが分かった.

また, 図7(a)のようにカメラの俯角(*pitch*)を真下に固定(**fix** (-90 deg))することは, 地図的な画像を提示し, 環境の大局的理解に有効であり, 図7(b)のように地平線が表示されるような浅い角度に固定(**fix** (small angle))することは, 環境の空間構造の正確な認識に有効であることが分かった. このことは, Watanabe らの研究結果と一致している¹³⁾. さらに, これら *pitch* の拘束に加え, Z に対して **fix** の拘束を付加し, その際に固定するデータの値を変えて実験した結果, この *pitch* の拘束による効果はカメラの高さに依存し, 環境を俯瞰する高さの際に有効に働くことが分かった.

ほかにも, 図7(c)のようにカメラの向き(*heading*)に対して, **follow** (user's direction) の拘束を付加することは, つねにカメラの向きを利用者の向きに一致させる結果, 利用者を基準とした環境の理解, 進行方向の理解に有効であり, 図7(d)のように **fix** (north) の拘束を付加することは, つねにカメラを北に向ける結果, 環境の大局的理解に有効であることが分かった. なお, この *heading* の拘束の効果を調べるに際し, X と Y に対しては利用者の移動に追従してカメラが移動する **follow** (user) の拘束を付加し, Z に対しては環境のある一部が俯瞰できるような高さに固定する **fix** の拘束を付加して評価を行った. その結果, 前述した *heading* に対する拘束を付加することによる効果と Darken らによる環境の全体を表示した地図の提示する際の向きが与える影響とが一致した¹⁷⁾. このことより, 前述した *heading* に対する拘束を付加することによる効果は, X, Y, Z に対して付加される拘束によらず, *heading* の拘束のみによりもたらされることが分かった.

6. おわりに

さまざまなカメラ制御手法を系統的に扱い, 各手法の一般的な特徴や効果を評価するための枠組みとして, カメラの位置 (X, Y, Z) と姿勢 (*pitch, roll, heading*) に対する拘束の付加に基づく分析について説明した. その際, 従来より提案されているさまざまなカメラ制御手法を分析し, そのカメラの位置と姿勢に対して付加される拘束として, 4種類の拘束 (**direct, fix, follow, depend**) を提案し, 各拘束の詳細について説明した. また, そのカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づき, 従来より提案されてきたカメラ制

御手法を分析した。さらには、このカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加を用い、さまざまなカメラ制御を実現するアプリケーションの1つとして、仮想環境内ナビゲーションシステムを実装し、各種拘束を付加することによる効果の検証を行った。

今後の課題としては、システム開発者がさまざまな拘束を簡単に設定できるツールやインタフェースの開発、さまざまな拘束を付加することによる効果の定量的な評価、各位置と姿勢に付加される拘束の組合せに関する分析、本論文で述べたカメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づくカメラの動き制御の分析の有効性に対する評価などがあげられる。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費基盤研究(B)(2)12480096、ならびに通信・放送機構によって行っている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松山隆司, 久野義徳, 井宮 淳(編): 多重画像の統合による多機能高精度画像計測, コンピュータビジョン技術評論と将来展望, 2章, 新技術コミュニケーションズ(1998).
- 2) Hanson, A.J. and Wernert, E.A.: Constrained 3D Navigation with 2D Controllers, *Proc. Visualization '97*, pp.175-182, IEEE (1997).
- 3) Igarashi, T., Kadobayashi, R., Mase, K. and Tanaka, H.: Path Drawing for 3D Walkthrough, *Proc. UIST '98*, pp.173-174, ACM (1998).
- 4) Bowman, D., Koller, D. and Hodges, L.H.: Travel in Immersive Virtual Environments: An Evaluation of Viewpoint Motion Control Techniques, *Proc. Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.45-52 (1997).
- 5) Ware, C. and Osborne, S.: Exploration and Virtual Camera Control in Virtual Three Dimensional Environments, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.175-183, ACM (1990).
- 6) Hix, D.J., Swan, E.II., Gabbard, J.L., Mcgee, M., Durbin, J. and King, T.: User-Centered Design and Evaluation of a Real-Time Battlefield Visualization Virtual Environment, *Proc. Virtual Reality '99*, pp.96-103, IEEE (1999).
- 7) 深津真二, 北村喜文, 正城敏博, 岸野文郎: 座標系対連動法による仮想環境内ナビゲーションのための鳥瞰カメラ視点の直感的制御, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D-II, No.9, pp.1905-1915 (2000).
- 8) Mackinlay, J.D., Card, S.K. and Robertson, G.G.: Rapid Controlled Movement Through a Virtual 3D Workspace, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.171-176 (1990).
- 9) Gleicher, M. and Witkin, A.: Through-the-lens Camera Control, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '92)*, Vol.26, No.2, pp.331-340, ACM (1992).
- 10) Blinn, J.: Where Am I? What Am I Looking At?, *Computer Graphics and Applications*, Vol.8, No.4 pp.76-81, IEEE (1998).
- 11) Wernert, E.A. and Hanson, A.J.: A Framework for Assisted Exploration with Collaboration, *Proc. Visualization '99*, pp.241-248, IEEE (1999).
- 12) Edwards, J.D.M. and Hand, C.: MaPS: Movement and Planning Support for Navigation in an Immersive VRML Browser, *Proc. VRML '97*, pp.65-73 (1997).
- 13) Watanabe, M., Nakayama, O. and Kishi, N.: A Bird's-eye Map Display, *Automotive Engineering*, Vol.104, No.5, pp.59-63 (1996).
- 14) Drucker, S.M., Galyean, T.A. and Zeltzer, D.: CINEMA: A System for Procedural Camera Movements, *Proc. Symposium on Interactive 3D Graphics '92*, pp.67-70, ACM (1992).
- 15) Bowman, D., Koller, D. and Hodges, L.F.: A Methodology for the Evaluation of Travel Techniques for Immersive Virtual Environments, *Virtual Reality: Research, Development, and Applications*, Vol.3, No.2, pp.120-131 (1998).
- 16) Bowman, D., Davis, E., Badre, A. and Hodges, L.F.: Maintaining Spatial Orientation during Travel in an Immersive Virtual Environment, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.8, No.6, pp.618-631 (1999).
- 17) Darken, R.P. and Cevik, H.: Map Usage in Virtual Environments: Orientation Issues, *Proc. Virtual Reality '99*, pp.133-140, IEEE (1999).

付録 画像上の表示位置のカメラの姿勢成分に対するオフセット回転への変換手順(3.7)

1. 画像上での表示位置 (s, t) を通るカメラ座標系における視線ベクトル v の導出.

$$v = \frac{(s', 1, t')}{\sqrt{s'^2 + t'^2 + 1 + 0}} \quad (13)$$

$$s' = \tan\left(\frac{FOV_W}{2}\right) * s, \quad FOV_W: \text{水平視野角}$$

$$t' = \tan\left(\frac{FOV_H}{2}\right) * t, \quad FOV_H: \text{垂直視野角}$$

2. 視線ベクトル v にカメラの roll 回転 (ϕ_c) を適用し, 世界座標系におけるカメラ視線ベクトル V に変換.

$$V = v * R_Y(\phi_c) \quad (14)$$

$$R_Y(\phi_c) = \begin{pmatrix} \cos(\phi_c) & 0 & -\sin(\phi_c) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\phi_c) & 0 & \cos(\phi_c) \end{pmatrix}$$

3. カメラ視線ベクトル V の世界座標系における回転成分である, カメラの姿勢成分に対するオフセット回転 (θ_g, ψ_g) を導出.

$$\theta_g = \tan^{-1} \left(\frac{V_Y}{V_X} \right) \quad (15)$$

$$\psi_g = \sin^{-1}(V_Z) \quad (16)$$

$$V = (V_X, V_Y, V_Z)$$

(平成 12 年 11 月 8 日受付)

(平成 13 年 4 月 6 日採録)



深津 真二

昭和 49 年生. 平成 9 年大阪大学工学部通信工学科卒業, 平成 11 年同大学大学院電子情報エネルギー工学専攻博士前期課程修了. 現在, 同大学院博士後期課程在学中. 主にバー

チャルリアリティとヒューマンインタフェースの研究に従事.



北村 喜文 (正会員)

昭和 37 年生. 昭和 62 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 同年, キヤノン株式会社情報システム研究所, 平成 4 年~8 年 ATR 通信システム研究所, 平成 9

年より大阪大学大学院工学研究科助教授, 現在に至る. ヒューマンインタフェース等の研究に従事. 博士(工学). ACM, IEEE, ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会等会員.



正城 敏博

昭和 44 年生. 平成 9 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 同年, 同大学大学院電子情報エネルギー工学専攻助手, 平成 12 年同大学大学院電子情報エネルギー工学専攻講師, 現在に至る. バーチャルリアリティ, ならびに VLSI 化設計に関する研究に従事. 博士(工学). IEEE, 日本バーチャルリアリティ学会等会員.



岸野 文郎

昭和 21 年生. 昭和 46 年名古屋工業大学大学院電子工学専攻修士課程修了. 同年日本電信電話公社(現 NTT)電気通信研究所入所. 同ヒューマンインタフェース研究所におい

て, 高速・広帯域通信システムの研究・実用化, 画像処理の研究に従事. 平成元年 ATR 通信システム研究所知能処理研究室室長. 画像処理, 知能処理, 臨場感通信の研究に従事. 平成 8 年より大阪大学大学院工学研究科教授, 現在に至る. 博士(工学). ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会等会員.