

Springhead Users Manual

Yuichi Tazaki and Springhead Development Team.

目次

第 1 章	はじめに	7
第 2 章	Getting Started	9
2.1	ダウンロード	9
2.2	SVN から入手する	9
2.3	開発環境	9
2.4	ライブラリのビルド	10
2.5	サンプルプログラムのビルド	11
2.6	アプリケーションの作成	11
第 3 章	Springhead の構成	17
3.1	ディレクトリ構成	17
3.2	ライブラリ構成	17
3.3	クラス・API の命名規則	17
3.4	インタフェースとディスクリプタ	18
第 4 章	Base	21
4.1	行列・ベクトル演算	21
4.2	スマートポインタ	28
4.3	その他の機能	28
第 5 章	Foundation	29
5.1	実行時型情報	29
5.2	オブジェクト	29
5.3	ネームマネージャとシーン	31
5.4	タイマ	32
5.5	状態の保存・再現	33

第 6 章	Collision	35
6.1	概要	35
6.2	形状の作成	35
6.3	物性の指定	41
6.4	幾何情報の計算	42
第 7 章	Physics	45
7.1	概要	45
7.2	Physics SDK	45
7.3	シーン	46
7.4	剛体	48
7.5	関節	51
7.6	関節系の逆運動学	62
7.7	接触	70
7.8	関節座標系シミュレーション	70
7.9	ギア	70
第 8 章	Graphics	71
8.1	概要	71
8.2	Graphics SDK	71
8.3	シーン	72
8.4	描画アイテム	75
8.5	フレーム	76
8.6	カメラ	78
8.7	ライト	78
8.8	マテリアル	79
8.9	メッシュ	80
8.10	レンダラ	82
第 9 章	FileIO	89
9.1	概要	89
9.2	FileIO SDK	89
9.3	ファイルフォーマット	90
9.4	ファイルのロード・セーブ	93
9.5	インポート情報の管理	97

第 10 章	HumanInterface	99
10.1	概要	99
10.2	HumanInterface SDK	99
10.3	クラス階層とデータ構造	99
10.4	実デバイス	102
10.5	キーボード・マウス	102
10.6	ジョイスティック	106
10.7	トラックボール	106
10.8	Spidar	110
第 11 章	Creature	111
11.1	Creature モジュールの構成	111
第 12 章	Framework	113
12.1	概要	113
12.2	Framework SDK	114
12.3	Framework シーン	115
12.4	シーンのロードとセーブ	118
12.5	Framework オブジェクト	119
12.6	アプリケーションクラス	119
12.7	ウィンドウ	124
12.8	Framework を用いたシミュレーションと描画	124
12.9	デバッグ描画	125
12.10	力覚インタラクションのためのアプリケーション	127
第 13 章	Python 言語との連携	131
13.1	利用法	131
13.2	Python からの Springhead API 使用法	141
第 14 章	トラブルシューティング	145
14.1	概要	145
14.2	プログラムのビルド	145
14.3	物理シミュレーション関連	146
14.4	ファイル関連	146
14.5	その他のトラブル	146

索引

147

第 1 章

はじめに

このドキュメントは Springhead のマニュアルです。Springhead は物理シミュレーションやコンピュータグラフィクスなど使用するソフトウェアの作成を総合的に支援する C++ ライブラリです。

Springhead は多数のモジュールから成り立っており、中には仕様が流動的なものもあります。本ドキュメントでは、中でも使用頻度が高く、安定性の高い機能に焦点を絞って解説します。

第 2 章

Getting Started

Springhead をダウンロードしてから使えるようにするまでの流れを説明します。

2.1 ダウンロード

Springhead のウェブサイト <http://springhead.info/wiki/> から zip アーカイブをダウンロードできます。ただし、アーカイブの更新は必ずしも頻繁ではありません（よくないことですが）ので、最新のコードが入手できない可能性があります。常に最新のコードを使用したい人は、次に説明する Subversion レポジトリからコードを入手してください。

2.2 SVN から入手する

Springhead は Subversion を用いてバージョン管理を行っています。この文書の執筆時点で Springhead の Subversion レポジトリは

```
http://springhead.info/spr2/Springhead2/trunk
```

です。レポジトリからのコードのダウンロードは任意のユーザが行えますが、コードをコミットするには開発者として登録されている必要があります。

2.3 開発環境

Springhead は処理系非依存の思想のもとで開発されています。このため、原理的には Windows, Max, Unix などの多くの処理系で動作するはずですが、しかしながら、ほとんどの開発メンバーが Windows 上の Visual Studio を用いて開発を行っているため、それ以外の環境で問題無く動作する保証は残念ながらありません（多分動かないでしょう）。

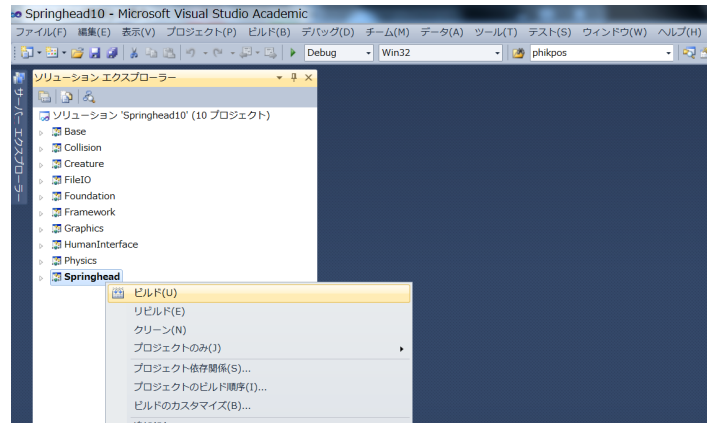


Fig. 2.1 Building the library

したがって、現状ではユーザーにも Windows + Visual Studio という環境での使用を推奨します。Windows や Visual Studio のバージョンについては、Windows XP/Vista/7, Visual Studio 2008/2010 では問題なく動作します。

2.4 ライブラリのビルド

Springhead を入手したら、まずライブラリをビルドします。以下では、Springhead を保存したディレクトリを `C:\Springhead2` と仮定して話を進めます。まず、Visual Studio で以下のソリューションファイルを開いて下さい。

```
C:\Springhead2\src\Springhead**.sln
```

ここで ** には Visual Studio のバージョン番号が入ります。Visual Studio 2010 なら `Springhead10.sln`、Visual Studio 2008 なら `Springhead9.sln` を開いて下さい。その他のソリューションファイル、プロジェクトファイルも同様の規則でナンバリングしてあります。

ソリューションを開いたら Fig. 2.1 に示すように Springhead プロジェクトをビルドしてください。ビルドに成功したら `C:\Springhead2\lib\win32` ディレクトリにライブラリファイル `Springhead*.lib` が作成されるはずです。

Table 2.1 ビルドの設定ごとに異なるいくつかの構成が用意されています。ユーザアプリケーションの都合に合わせて使い分けてください。

Table 2.1 Build configurations

構成名	ビルド設定	作成されるライブラリファイル名
Release	multithread	Springhead**.lib
Debug	multithread, Debug	Springhead**D.lib
ReleaseDLL	multithread, DLL	Springhead**M.lib
DebugDLL	multithread, Debug, DLL	Springhead**MD.lib

2.5 サンプルプログラムのビルド

サンプルプログラムをビルドするには

```
C:\Springhead2\src\Samples>All**.sln
```

を開きます。ビルドしたいサンプルをスタートアッププロジェクトに設定し、ビルド、実行してください。各プロジェクトは C:\Springhead2\lib\win32\Springhead**.lib をリンクするように設定されていますので、サンプルをビルドする前にライブラリのビルドが済んでいなければなりません。

残念なことですが、すべてのサンプルプログラムが問題なく動作する状態には維持されていません。Physics/BoxStack や Physics/Joints が比較的良くメンテナンスされていますので試してみてください。

2.6 アプリケーションの作成

Springhead を使って簡単なアプリケーションプログラムを作成する道筋を説明します。以下では Visual Studio 2010 を想定します。

プロジェクトの作成

「Visual C++ Win32 プロジェクト」を作成します。プロジェクト名は好きな名前を付けてください。アプリケーションの設定で「コンソールアプリケーション」を選び、空のプロジェクトをチェックします。

プロジェクトを作成したらソースファイルを作成します。ここでは仮に main.cpp とします。

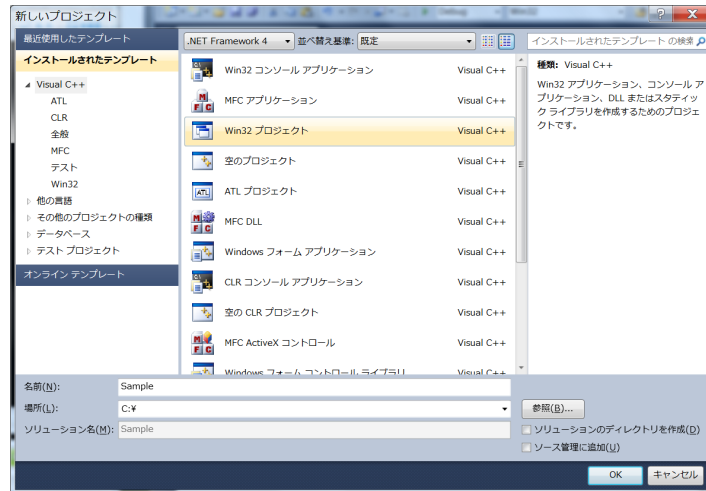


Fig. 2.2 Create new project



Fig. 2.3 Project configuration

ソースコードの編集

作成した `main.cpp` に Table 2.2 に示すコードを書き込んでください。これが Springhead を使用した (ほぼ) 最小のプログラムコードです。

プロジェクト設定

ビルドするまえにいくつかのプロジェクト設定が必要です。まずプロジェクトのプロパティページを開き、構成を「すべての構成」としてください。次に「C/C++」, 「全般」, 「追

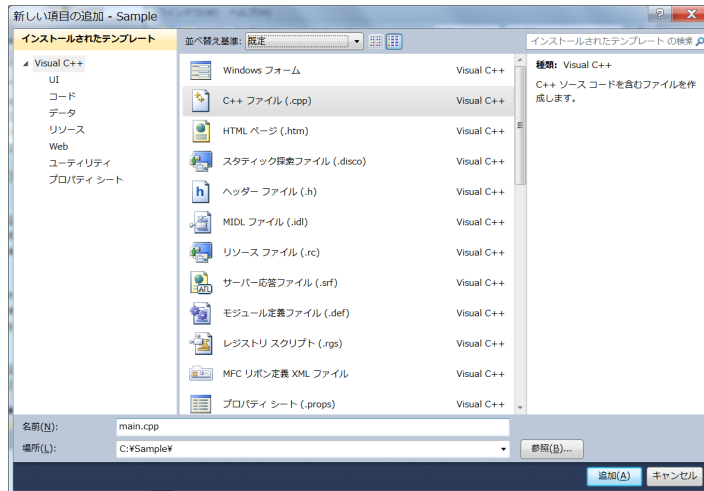


Fig. 2.4 Create source file

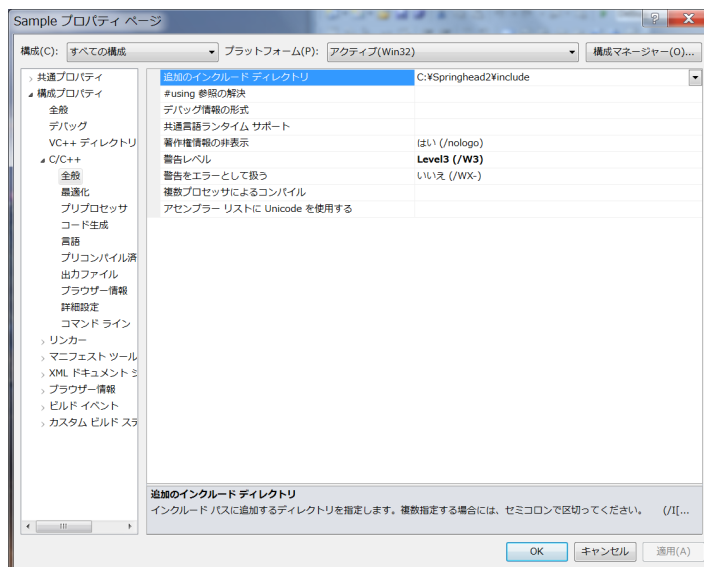


Fig. 2.5 Add include path

「追加のインクルードディレクトリ」に、Fig. 2.5 のように Springhead のインクルードファイルへのパスを指定してください。さらに、「リンカー > 全般 > 追加のライブラリディレクトリ」に Fig. 2.6 のように Springhead のライブラリファイルへのパスを指定します。

今度は構成を「Debug」にします。「C/C++ > コード生成 > ランタイムライブラリ」を「マルチスレッド デバッグ (/MTd)」にします。次に「リンカー > 入力 > 追加の依存ファイル」に Springhead10D.lib を追加してください。

最後に構成を「Release」に切り替えて同様の設定をします。ランタイムライブラリを「マルチスレッド (/MT)」として、追加の依存ファイルに Springhead10.lib を追加し

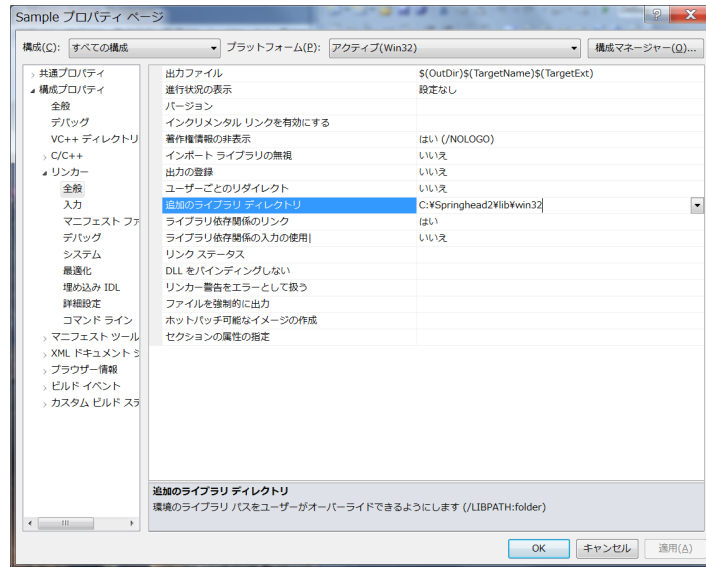


Fig. 2.6 Add library path

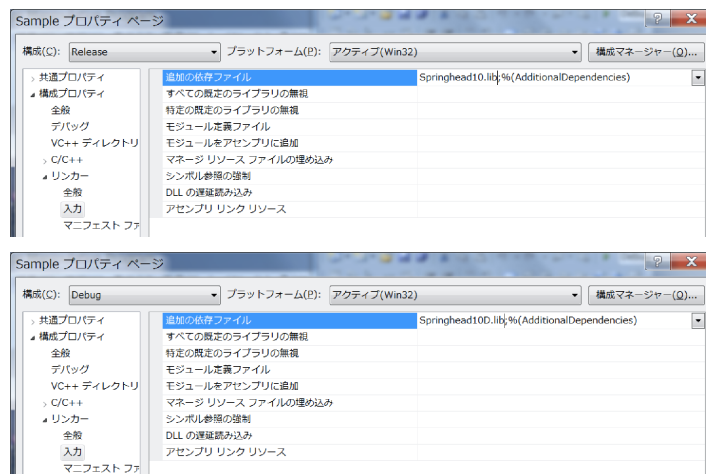


Fig. 2.7 Specify library file

ます。

ビルド・実行

以上で準備完了です。ビルド (F7) して、実行 (F5) してみてください。Fig. 2.8 のような画面が出てくれば成功です。

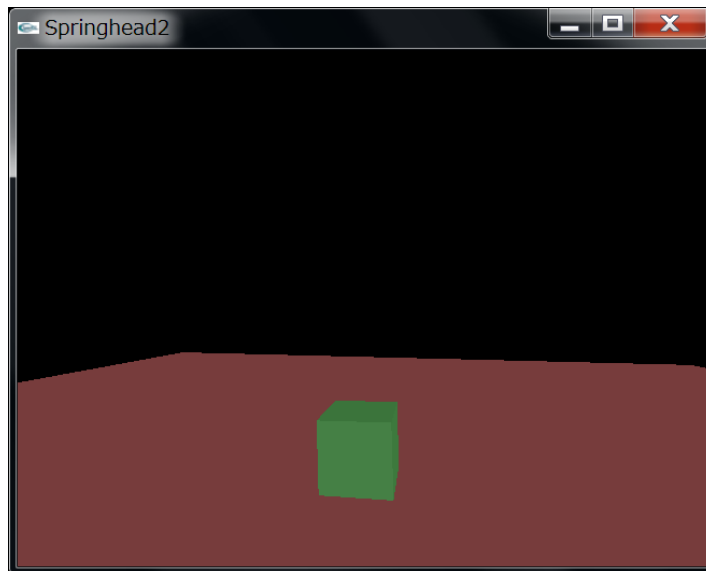


Fig. 2.8 Program running

Table 2.2 Simplest program code

```
#include <Springhead.h>
#include <Framework/SprFWApp.h>
using namespace Spr;

class MyApp : public FWApp{
public:
    virtual void Init(int argc = 0, char* argv[] = 0){
        FWApp::Init(argc, argv);

        PHSdkIf* phSdk = GetSdk()->GetPHSdk();
        PHSceneIf* phscene = GetSdk()->GetScene()->GetPHScene();
        CDBoxDesc bd;

        // 床を作成
        PHSolidIf* floor = phscene->CreateSolid();
        floor->SetDynamical(false);
        bd.boxsize = Vec3f(5.0f, 1.0f, 5.0f);
        floor->AddShape(phSdk->CreateShape(bd));
        floor->SetFramePosition(Vec3d(0, -1.0, 0));

        // 箱を作成
        PHSolidIf* box = phscene->CreateSolid();
        bd.boxsize = Vec3f(0.2f, 0.2f, 0.2f);
        box->AddShape(phSdk->CreateShape(bd));
        box->SetFramePosition(Vec3d(0.0, 1.0, 0.0));

        GetSdk()->SetDebugMode(true);
    }
} app;

int main(int argc, char* argv[]){
    app.Init(argc, argv);
    app.StartMainLoop();
    return 0;
}
```


第 3 章

Springhead の構成

3.1 ディレクトリ構成

Springhead のディレクトリ構成を Fig. 3.1 に示します .

3.2 ライブラリ構成

Springhead は複数のモジュールから構成されています . Table 3.1 にモジュール一覧を示します . Table 3.2 にモジュール間の依存関係を示します . 通常 , ユーザは Springhead を使用するにあたってこれらの依存関係を陽に意識する必要はありません . また , 何らかの事情で Springhead の特定の機能 (たとえば物理シミュレーション) のみを用いたいという場合に対応できるように , モジュール間の依存関係はなるべく疎になるように設計されています . したがってこのような場合には用途に応じて必要なモジュールのみを使えるようになっています .

3.3 クラス・API の命名規則

各モジュールに含まれるクラスの名前には , Table 3.1 に示されるようなモジュール固有のプリフィックスが付き (例: Physics モジュールの PHSolid , Collision モジュールの CDShape) . 一部にはこのルールにしたがわないクラスも存在します (例: Foundation モジュールの Object) .

API(クラスのメンバ関数) にも緩い命名規則があります . API 名は基本的に (動詞 + 目的語) という形式で処理内容を端的に表現します . また , 単語の先頭文字のみ大文字 , その他は小文字で表記します . 例としては PHSolid::SetMass , GRSdk::CreateScene などです .

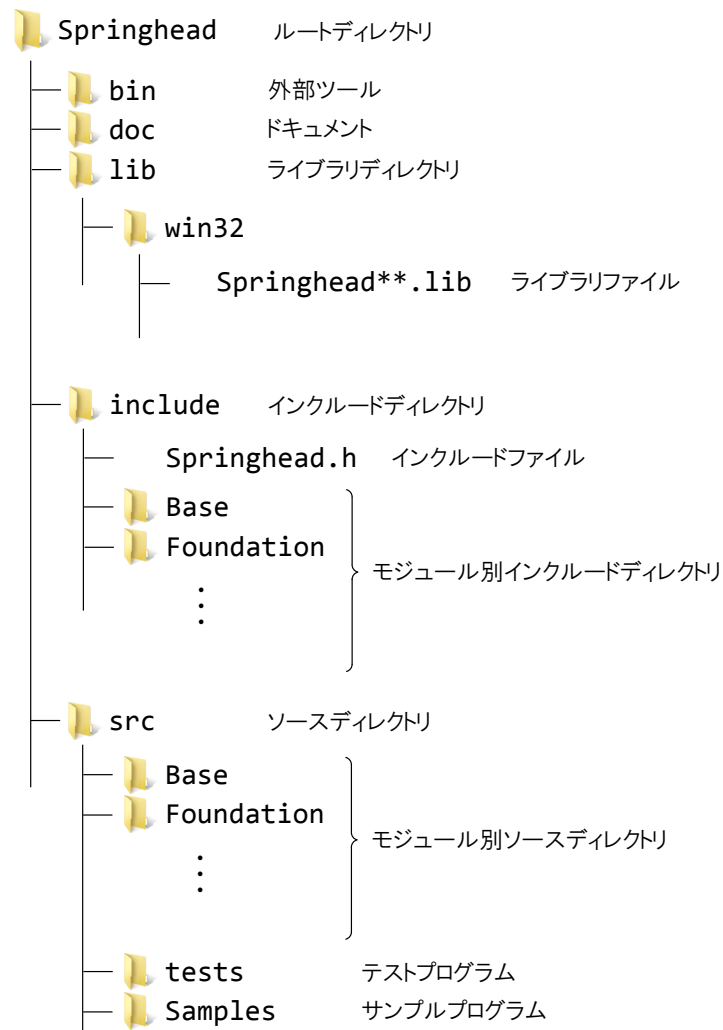


Fig. 3.1 Directory tree of Springhead

3.4 インタフェースとディスクリプタ

Springhead では仕様と実装を明確に分離するために、インタフェースクラスと実装クラスが分けられています。ユーザはインタフェースクラスのみを使用して Springhead の機能を利用します。ただし、Base と Foundation モジュールにあるごく基本的なクラス、および Framework のアプリケーションクラスは例外となっています。

また、Springhead のクラスにはそれぞれにディスクリプタが用意されています。ディスクリプタとは、そのクラスの読み書き可能な属性のみを集めた構造体です。ディスクリプタを利用することで、同じ設定のインスタンスを多数設定することが用意になります。また、ディスクリプタはファイルへのデータの保存や読み込みにおいても役立ちます。

Table 3.1 Springhead modules

モジュール名	プリフィックス	機能
Base	-	行列・ベクトル演算，スマートポインタ， その他基本機能
Foundation	UT	Springhead の基本クラス，実行時型情報
Collision	CD	衝突判定
Physics	PH	物理計算
Graphics	GR	シーングラフ，描画
FileIO	FI	ファイル入出力
HumanInterface	HI	ヒューマンインタフェースデバイスや インタラクション
Creature	CR	バーチャルクリーチャ
Framework	FW	モジュール間の連携と アプリケーション作成支援

Table 3.2 Module dependencies

モジュール名									
Base	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Foundation	○	-	-	-	-	-	-	-	-
Collision	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Physics	○	○	○	-	-	-	-	-	-
Graphics	○	○	-	-	-	-	-	-	-
FileIO	○	○	-	-	-	-	-	-	-
HumanInterface	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Creature	○	○	-	○	-	-	-	-	-
Framework	○	○	-	○	○	○	○	-	-

以下に Physics モジュールの剛体を表す PHSolid クラスを例にとって説明します。

```
// given PHSolidIf* phScene,
PHSolidDesc desc;
```

```
desc.mass = 1.0;

PHSolidIf* solid = phScene->CreateSolid(desc);
```

上のコードで `PHSolidDesc` は `PHSolid` クラスのディスクリプタです。まずそのメンバ変数 `mass` に値をセットすることで剛体の質量を設定しています。次に、剛体を作成するために `CreateSolid` 関数が呼ばれます。ここで `CreateSolid` は物理シーンを表す `PHScene` クラスのメンバ関数です。実際には `PHScene` クラスのインタフェース `PHSceneIf` を取得する必要がありますが、ここでは既に得られているとしています。剛体が作成されると、`CreateSolid` からインタフェース `PHSolidIf` のポインタが返されます。これ以降の剛体の操作はこのインタフェースを介して行います。

```
solid->SetMass(5.0);
```

基本的に、ディスクリプタを介して設定可能な属性はインタフェースの `Get/Set` 系関数を使って取得、設定ができるようになっています。場合に応じて便利な方を使ってください。

Springhead オブジェクトはすべて内部でメモリ管理されていますので、ユーザが明示的に `delete` する必要はありません（また、してはいけません）。`Create` されたオブジェクトはプログラムの終了時に自動的に破棄されます。

より詳しく知りたい人は

以降の章では各モジュールについてより詳しく説明します。Springhead を利用する上で、すべてのモジュールを詳しく理解する必要はありません。必要に応じて参照してください。

第 4 章

Base

Base モジュールは基本機能の集合体です。以下では項目別にそれらについて解説します。

4.1 行列・ベクトル演算

Table 4.1 によく使われる行列・ベクトルクラスを示します。末尾の整数はベクトルや行列のサイズを表し、 f 、 d はそれぞれ `float` 型、`double` 型に対応します。

ベクトル

ベクトル型は物体の位置や速度、力などの物理量を表現するために頻繁に使われます。例えば `double` 型の要素からなる 3 次元ベクトル x を定義するには

```
Vec3d x;
```

とします。要素アクセスは `[]` 演算子を用います。

```
x[0]; // 0-th element
```

この他、`Vec[2|3][f|d]` については `.x`、`.y`、`.z` でも要素アクセスできます。任意の固定サイズのベクトルも使えます。`float` 型の 10 次元ベクトルは

Table 4.1 Matrix and vector classes

クラス名	機能
Vec[2 3 4][f d]	ベクトル
Matrix[2 3 4][f d]	行列
Quaternion[f d]	単位クォータニオン
Affine[f d]	アフィン変換
Pose[f d]	3次元ベクトルとクォータニオンの複合型

```
TVector<10, float> x; // 10-dimensional float vector
```

とします。可変長ベクトルは

```
VVector<float> x;
x.resize(10); // can be resized at any time
```

で使えます。

基本的な演算は一通りサポートされています。

```
Vec3d a, b, c;
double k;

c = a + b; // addition
a += b;

c = a - b; // subtraction
a -= b;

b = k * a; // multiply vector by scalar
a *= k;

k = x * y; // scalar product

x % y; // vector product (3D vector only)
```

すべてのベクトル型について以下のメンバ関数が使えます。

```
a.size();           // number of elements
a.norm();           // norm
a.square();         // square of norm
a.unitize();        // normalize
b = a.unit();       // normalized vector
```

行列

行列は平行移動や回転などの変換や、剛体の慣性モーメントを表現するために使われます。例えば、`double` 型の要素からなる 3×3 行列 A は次のように定義します。

```
Matrix3d A;
```

要素アクセスは `[]` 演算子を用います。

```
x[0][1]; // element at 0-th row, 1-th column
```

任意の固定サイズの行列も使えます。メモリ上に列方向に要素が整列した行列は

```
TMatrixCol<2, 3, float> M; // column-oriented 2x3 matrix
```

要素が行方向に整列した行列は

```
TMatrixRow<2, 3, float> M; // row-oriented 2x3 matrix
```

となります。ちなみにさきほどの `Matrix3d` は `TMatrixCol<3,3,double>` と等価です。可変サイズ行列は

```
VMatrixCol<float> M;
M.resize(10, 13); // column-oriented variable matrix
```

で使えます。`VMatrixCol` では要素はメモリ上で列方向に並びます。一方 `VMatrixRow`

では行方向に要素が並びます。

行列型についても、ベクトル型と同様の四則演算がサポートされています。行列とベクトル間の演算は次のようになります。

```
Matrix3d M;
Vec3d a, b;

b = M * a;           // multiplication
```

すべての行列型について以下のメンバ関数で行数および列数が取得できます。

```
M.height();         // number of rows
M.width();          // number of columns
```

2x2, 3x3 行列については以下の静的メンバ関数が用意されています。

```
Matrix2d N;
Matrix3d M;
double theta;
Vec3d axis;

// methods common to Matrix2[f|d] and Matrix3[f|d]
M = Matrix3d::Zero();           // zero matrix; same as M.clear()
M = Matrix3d::Unit();           // identity matrix
M = Matrix3d::Diag(x,y,z);      // diagonal matrix

N = Matrix2d::Rot(theta);       // rotation in 2D

M = Matrix3d::Rot(theta, 'x');   // rotation w.r.t. x-axis
                                // one can specify 'y' and 'z' too
M = Matrix3d::Rot(theta, axis); // rotation along arbitrary vector
```

アフィン変換

アフィン変換は主にグラフィクスにおける変換を指定するために使用します。アフィン変換型 `Affine[f|d]` は 4x4 行列としての機能を備えています。加えて以下のメンバ関数が使えます。


```

Affinef A;
Matrix3f R;
Vec3f p;

R = A.Rot();           // rotation part
p = A.Trn();          // translation part

```

また、よく使用するアフィン変換を生成する静的メンバが用意されています。

```

A = Affinef::Unit();           // identity transformation
A = Affinef::Trn(x, y, z);     // translation
A = Affinef::Rot(theta, 'x');  // rotation w.r.t. x-axis
                                // one can specify 'y' and 'z' too
A = Affinef::Rot(theta, axis); // rotation w.r.t. arbitrary axis
A = Affinef::Scale(x, y, z);  // scaling

```

クォータニオン

クォータニオンは主に物理計算における剛体の向きや回転を表現するために使います。クォータニオンは4次元ベクトルの基本機能を備えています。

要素アクセスは [] 演算子に加えて以下の方法が使えます。

```

Quaterniond q;
q.w;           // same as q[0]
q.x;           // same as q[1]
q.y;           // same as q[2]
q.z;           // same as q[3]
q.V();        // vector composed of x,y,z elements

```

演算は以下のように行います。まず、クォータニオン同士の積は回転の合成を表します。

```

Quaterniond q, q0, q1;
q0 = Quaterniond::Rot(Rad(30.0), 'x'); // 30deg rotation along x-axis
q1 = Quaterniond::Rot(Rad(-90.0), 'y'); // -90deg rotation along y-axis

q = q1 * q0;

```

つぎに、クォータニオンと 3 次元ベクトルとの積は、ベクトルの回転を表します。

```
Vec3d a(1, 0, 0);
Vec3d b = q0 * a;
```

このように、クォータニオンは基本的に回転行列を同じような感覚で使えます。Quaterniond[f|d] には以下のメンバ関数があります。まず回転軸と回転角度を取得するには

```
Vec3d axis = q.Axis();           // rotation axis
double angle = q.Theta();       // rotation angle
```

とします。また、逆回転を表す共役クォータニオンを得るには

```
q.Conjugate();                  // conjugate (reverse rotation)

Quaterniond y;
y = q.Conjugated();            // return conjugated quaternion
y = q.Inv();                   // return inverse (normalized conjugate)
```

とします。Conjugate はそのクォータニオン自体を共役クォータニオンに変換するのに対し、Conjugated は単位共役クォータニオンを返します。Inv は Conjugated とほぼ等価ですが、戻り値のノルムが 1 となるように正規化を行います。回転を表すクォータニオンは理論上は必ずノルムが 1 なので正規化は不要ですが、実際は数値計算における誤差で次第にノルムがずれてくることがあります。このような誤差を補正するために適宜正規化を行う必要があります。

回転行列と相互変換するには以下のようにします。

```
Matrix3d R = Matrix3d::Rot(Rad(60.0), 'z');
q.FromMatrix(R);                // conversion from rotation matrix
q.ToMatrix(R);                 // conversion to rotation matrix
```

FromMatrix は渡された回転行列 R と等価なクォータニオンとして q を設定します。一方 ToMatrix は、参照渡しされた R を q と等価な回転行列として設定します。

同様に、以下はオイラー角との相互変換を行います。

```
Vec3d angle;
q.ToEuler(angle);    // to Euler angle
q.FromEuler(angle);  // from Euler angle
```

最後に、以下の関数は2つのベクトルに対し、片方をもう片方に一致されるような回転を表すクォータニオンを求めます。一般に2つのベクトルを一致させる回転は一意ではありませんが、RotationArcは両方のベクトルに直交する軸に関する回転、いわば最短距離の回転を求めます。

```
Vec3d r0(1, 0, 0), r1(0, 1, 0);
q.RotationArc(r0, r1);    // rotation that maps r0 to r1
```

ポーズ

ポーズは位置と向きの変換型です。役割としてはアフィン変換に似ていますが、全部で7つの成分で表現できるためアフィン変換よりもコンパクトです。ポーズは物理計算での剛体の位置と向きを表現するためなどに用います。

Pose[f|d]型のメンバ変数はPosとOriの2つのみで、それぞれポーズの並進成分(Vec3[f|d])と回転成分(Quaternion[f|d])への参照を返します。

```
Posed P;
P.Pos() = Vec3d(1, 2, 3);
P.Ori() = Quaterniond::Rot(Rad(45.0), 'x');
Vec3d p = P.Pos();
Quaterniond q = P.Ori();
```

初期値について

Vec[2|3|4][f|d]型はゼロベクトルに初期化されます。Matrix[2|3][f|d]型およびAffine[f|d]型は単位行列に初期化されます。また、Quaternion[f|d]は恒等写像を表すクォータニオンに初期化されます。

4.2 スマートポインタ

参照カウントにもとづくスマートポインタです。参照カウントが 0 になったオブジェクトのメモリを自動的に解放するためにユーザが手動で `delete` を実行する手間が省け、メモリリークの危険が低減できます。

参照カウントクラスは `UTRefCount` です。Springhead のほとんどのクラスは `UTRefCount` を継承しています。スマートポインタはテンプレートクラス `UTRef` です。以下に例を示します。

```
class A : public UTRefCount{};
UTRef<A> a = new A();
// no need to delete a
```

4.3 その他の機能

UTString

文字列型です。現状では `std::string` と等価です。

UTTypeDesc

Springhead のクラスが持つ実行時型情報です。

UTTreeNode

ツリー構造の基本クラスです。

第 5 章

Foundation

Foundation モジュールはすべての Springhead クラスの基本クラスを定義します。普通に使っている限り、ユーザが Foundation の機能を直接利用することは少ないでしょう。

5.1 実行時型情報

(ほとんど)すべての Springhead オブジェクトは実行時型情報 (RTTI) を持っています。C++ にも `dynamic_cast` などの RTTI 機能がありますが、これよりも大幅にリッチな型情報が提供されます。

実行時型情報のクラスは `IfInfo` です。IfInfo は次節で紹介する `Object` クラスから取得できます。

5.2 オブジェクト

ほとんどすべての Springhead オブジェクトは `Object` クラスから派生します。オブジェクトは複数の子オブジェクトを持つことができます。Springhead のデータ構造はオブジェクトが成すツリー構造によって出来上がっています。Foundation モジュールにおける `Object` からのクラス階層を Fig. 5.1 に示します。

まず `Object` クラスの子オブジェクトの作成・管理に関する関数を紹介します。

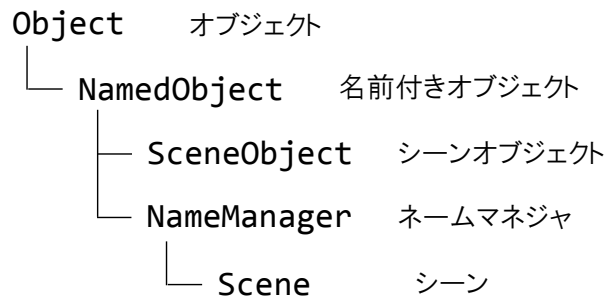


Fig. 5.1 Object class hierarchy

ObjectIf

```
size_t NChildObject()
```

子オブジェクトの数を取得する。

```
ObjectIf* GetChildObject(size_t pos)
```

pos 番目の子オブジェクトを取得する。

```
bool AddChildObject(ObjectIf* o)
```

オブジェクト *o* を子オブジェクトとして追加する。正しく追加されたら `true`，それ以外は `false` を返す。

```
bool DelChildObject(ObjectIf* o)
```

オブジェクト *o* を子オブジェクトから削除する。正しく削除されたら `true`，それ以外は `false` を返す。

```
void Clear();
```

クリアする。

これらの関数は派生クラスによって実装されますので，追加できる子オブジェクトの種類や数などはクラスごとに異なります。また，Springhead を普通に使用する範囲内ではユーザがこれらの関数を直接呼び出す場面はないでしょう。

ストリーム出力のために以下の機能があります。

ObjectIf

```
void Print(std::ostream& os) const
```

オブジェクトの内容をストリーム os に出力する .

Print は、基本的にはそのオブジェクトの名前を出力し、子オブジェクトの Print を再帰的に呼び出します。ただし派生クラスによって Print で出力される内容がカスタマイズされている場合はその限りではありません。

NamedObject は名前付きオブジェクトです。NamedObject の派生クラスには名前を文字列で与えることができ、名前からオブジェクトを検索することができます。名前付きオブジェクトには、直接の親オブジェクト以外に、名前を管理するためのネームマネージャが対応します。

NamedObjectIf

```
const char* GetName()
```

名前を取得する .

```
void SetName(const char* n)
```

名前を設定する .

```
NameManagerIf* GetNameManager()
```

ネームマネージャを取得する .

名前付きオブジェクトからはさらにシーンオブジェクトが派生します。シーンオブジェクトからは周辺モジュールのオブジェクト (PHSolid, GRVisual など) が派生します。

SceneObjectIf

```
SceneIf* GetScene()
```

自身が所属するシーンを取得する .

5.3 ネームマネージャとシーン

ネームマネージャは名前付きオブジェクトのコンテナとして働き、それらの名前を管理します。また、ネームマネージャはそれ自身名前付きオブジェクトです。

NameManagerIf

```
NamedObjectIf* FindObject(UTString name)
```

名前が name のオブジェクトを検索し，見つければそのオブジェクトを返す．見つからなければ NULL を返す．

シーンはシーンオブジェクトのコンテナです．シーンの基本クラスは Scene で，ここから各モジュールのシーン (PHScene, GRScene, FWScene など) が派生します．Scene クラスは特に機能を提供しません．

5.4 タイマ

タイマ機能も Foundation で提供されます．タイマクラスは UTTimer です．タイマを作成するには

```
UTTimerIf* timer = UTTimerIf::Create();
```

とします．UTTimer には以下の API があります．

[Get Set]Resolution	分解能の取得と設定
[Get Set]Interval	周期の取得と設定
[Get Set]Mode	モードの取得と設定
[Get Set]Callback	コールバック関数の取得と設定
IsStarted	動いているかどうか
IsRunning	コールバック呼び出し中
Start	始動
Stop	停止
Call	コールバック呼び出し

SetMode で指定できるモードには以下があります．

MULTIMEDIA	マルチメディアタイマ
THREAD	独立スレッド
FRAMEWORK	Framework が提供するタイマ
IDLE	Framework が提供するアイドルコールバック

マルチメディアタイマは Windows が提供する高機能タイマです．独立スレッドモードで

は、タイマ用のスレッドが実行され Sleep 関数により周期が制御されます。FRAMEWORK と IDLE モードを利用するには FWApp の CreateTimer 関数を用いる必要があります。基本的に FRAMEWORK モードでは GLUT のタイマコールバックが使われ、IDLE モードでは GLUT のアイドルコールバックが使われます。

Framework モジュールの FWApp を利用する場合は、FWApp の CreateTimer 関数を利用する方が便利でしょう。

5.5 状態の保存・再現

シミュレーションを行うと、シーンを構成するオブジェクトの状態が変化する。ある時刻での状態を保存しておき、再現することができると、数ステップ前に戻ったり、あるステップのシミュレーションを、力を加えた場合と加えない場合で比べたりといった作業ができる。Springhead では、ObjectStatesIf を用いることで、以下のようにシーン全体の状態をまとめてメモリ上に保存、再現することができる。

```

    PHSceneIf* phScene;
    省略：phScene (物理シミュレーションのシーン) の構築
    UTRef<ObjectStatesIf> states;
    states = ObjectStatesIf::Create();           // ObjectStates オブ
オブジェクトの作成
    states->AllocateState(phScene);             // 保存用のメモリ確
保
    states->SaveState(phScene);                 // 状態の保存
    phScene->Step();                             // 仮の
シミュレーションを進める
    省略：加速度の取得など
    states->LoadState(phScene);                 // 状態の再現
    states->ReleaseState();                     // メモリ
の開放
    省略：力を加えるなどの処理
    phScene->Step();                             // 本番
のシミュレーションを進める

```

5.5.1 保存・再現のタイミング

Springhead のシーン (PHScene や CRScene) は、複数のエンジン (PHEngine や CREngine の派生クラス) を呼び出すことで、シミュレーションを進める。シーンは、エンジンの呼び出し中以外のタイミングであればいつでも状態を保存・再現することがで

きる。

5.5.2 シーン構成変更の制約

状態保存用のメモリは、シーンの構成に依存している。AllocateState(), SaveState(), LoadState() だけでなく、ObjectStatesIf::ReleaseState() も依存するので、ObjectIf::AddChildObject() などの API によってシーンの構成を変化させてしまうと、保存・再現だけでなくメモリの開放もできなくなる。変更前に開放するか、シーン構成を戻してから開放する必要がある。

第 6 章

Collision

6.1 概要

Collision モジュールは物理計算の基礎となる衝突判定機能を提供します。事実上 Collision モジュールは Physics モジュールのサブモジュールとなっており、両者は密接に依存しています。ユーザは主として剛体に衝突判定用形状を割り当てる際に Collision モジュールの機能を利用することになります。

Collision モジュールのクラス階層を Fig. 6.1 に示します。衝突判定形状はすべて CDSShape から派生します。アルゴリズムの性質上、形状はすべて凸形状でなければなりません。

6.2 形状の作成

衝突判定形状は次の手順で作成・登録します。

1. 形状を作成する
2. 剛体へ形状を追加する
3. 形状の位置を設定する

以下に順を追って説明します。

まず形状を作成するには次のようにします。

```
// given PHSdkIf* phSdk  
  
CDBoxDesc desc;  
desc.boxsize = Vec3d(1.0, 1.0, 1.0);
```

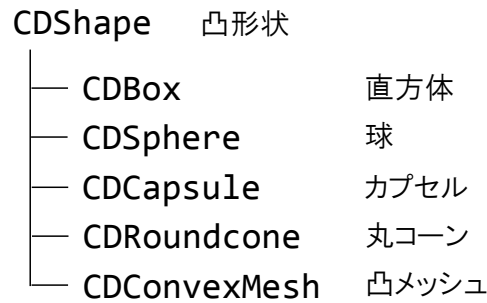


Fig. 6.1 Class hierarchy of Collision module

```
CDBoxIf* box = phSdk->CreateShape(desc)->Cast();
```

衝突判定形状のオブジェクトは Physics モジュールが管理します。このため、形状を作成するには PHSdk クラスの CreateShape 関数を使います。PHSdk については 7 章を参照してください。形状を作成するには、まず種類に応じたディスクリプタを作成し、寸法などのパラメータを設定します。この例では直方体クラス CDBox のディスクリプタを作成して一辺が 1.0 の立方体を作成します。ディスクリプタを指定して CreateShape を呼び出すと、対応する種類の形状が作成され、そのインタフェースが返されます。ただし戻り値は形状の基底クラスである CShape のインタフェースですので、派生クラス（ここでは CDBox）のインタフェースを得るには上のように Cast 関数で動的キャストする必要があります。

形状を作成したら、次にその形状を与えたい剛体に登録します。

```
// given PHSolidIf* solid
solid->AddShape(box);          // first box
```

剛体クラス PHSolid については 7 章を参照してください。ここで重要なことは、一度作成した形状は 1 つの剛体にいくつでも登録でき、また異なる複数の剛体にも登録できるということです。つまり、同じ形状を複数の剛体間で共有することで、形状の作成コストやメモリ消費を抑えることができます。

AddShape 関数で登録した直後の形状は、剛体のローカル座標系の原点に位置しています。これを変更したい場合は SetShapePose 関数を使います。

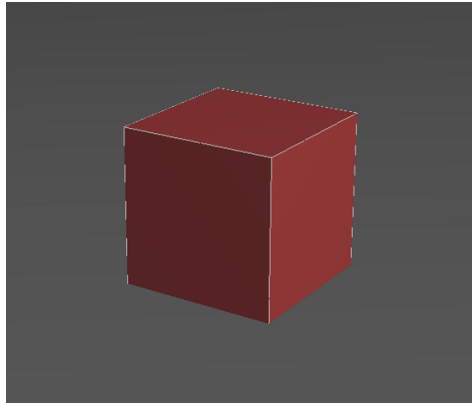


Fig. 6.2 Box geometry

```
solid->AddShape(box);          // second box
solid->AddShape(box);          // third box

// move first shape 1.0 in x-direction
solid->SetShapePose(0, Posed(Vec3d(1.0, 0.0, 0.0), Quaterniond()));

// rotate second shape 30 degrees along y-axis
solid->SetShapePose(1, Posed(Vec3d(),
                             Quaterniond::Rot(Rad(30.0), 'y')));
```

`SetShapePose` の第 1 引数は操作する形状の番号です。最初に `AddShape` した形状の番号が 0 で、`AddShape` するたびに 1 増加します。形状の位置や向きは剛体のローカル座標系で指定します。また、形状の位置・向きを取得するには `GetShapePose` 関数を使います。

以下では Springhead でサポートされている形状を種類別に解説します。

直方体

直方体 (Fig. 6.2) のクラスは `CDBox` です。

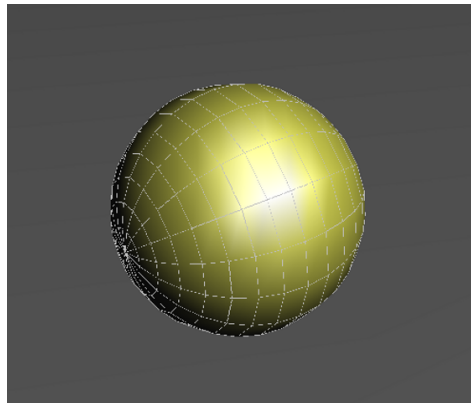


Fig. 6.3 Sphere geometry

 CDBoxDesc

Vec3f boxsize 各辺の長さ

 CDBoxIf

Vec3f GetBoxSize()

void SetBoxSize(Vec3f)

球

球 (Fig. 6.3) のクラスは CDSphere です .

 CDSphereDesc

float radius 半径

 CDSphereIf

float GetRadius()

void SetRadius(float)

カプセル

カプセル (Fig. 6.4) のクラスは CDCapsule です . カプセルは円柱の両端に半球がついた形をしています .

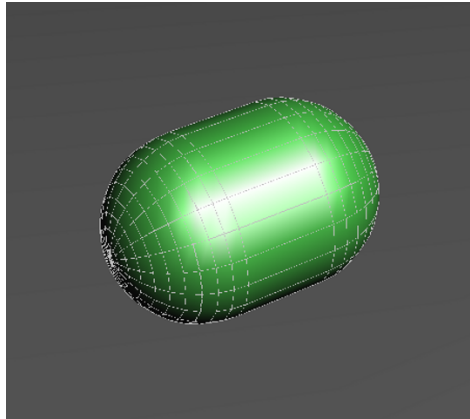


Fig. 6.4 Capsule geometry

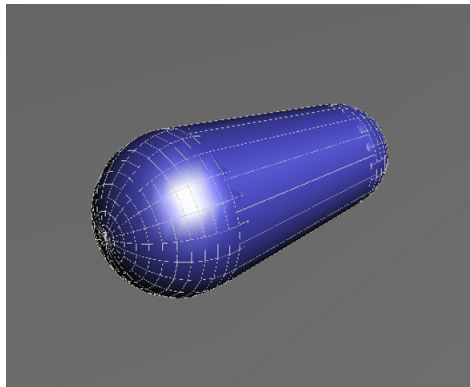


Fig. 6.5 Round cone geometry

CDCapsuleDesc

float	radius	半球の半径
float	length	円柱の長さ

CDCapsuleIf

```
float GetRadius()  
void SetRadius(float)  
float GetLength()  
void SetLength(float)
```

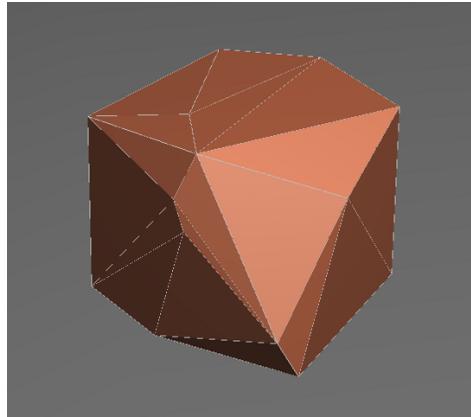


Fig. 6.6 Convex mesh geometry

丸コーン

丸コーン (Fig. 6.5) のクラスは `CDRoundCone` です。丸コーンはカプセルの両端の半径が非対称になったものです。

CDRoundConeDesc		
Vec2f	radius	各半球の半径
float	length	半球間の距離
CDRoundConeIf		
Vec2f	GetRadius()	
void	SetRadius(Vec2f)	
float	GetLength()	
void	SetLength(float)	
void	SetWidth(Vec2f)	

`SetWidth` 関数は、丸コーンの全長を保存したまま半径を変更します。

凸メッシュ

凸メッシュ (Fig. 6.6) のクラスは `CDConvexMesh` です。凸メッシュとは凹みや穴を持たない多面体です。頂点座標を指定することで自由な形を作成することができます。

CDConvexMeshDesc

vector<Vec3f>	vertices	頂点座標の配列
---------------	----------	---------

CDConvexMeshIf

Vec3f*	GetVertices()	頂点配列の先頭アドレス
int	NVertex()	頂点数
CDFaceIf*	GetFace(int i)	<i>i</i> 番目の面
int	NFace()	面数

凸メッシュが作成される際, `CDConvexMeshDesc::vertices` に格納された頂点を内包する最小の凸多面体 (凸包) が作成されます. 多面体の面を表す `CDFace` のインタフェースを以下に示します.

CDFaceIf

int*	GetIndices()	頂点インデックス配列の先頭アドレス
int	NIndex()	面の頂点数

`NIndex` は面を構成する頂点の数を返します (通常 3 か 4 です). 面は頂点配列を直接保有せず, インデックス配列として間接的に頂点を参照します. したがって, 面の頂点座標を得るには

```
// given CDConvexMeshIf* mesh
CDFaceIf* face = mesh->GetFace(0);           // get 0-th face
int* idx = face->GetIndices();
Vec3f v = mesh->GetVertices()[idx[0]];      // get 0-th vertex
```

とします.

6.3 物性の指定

形状には摩擦係数や跳ね返り係数などの物性を指定することができます. 形状の基本クラスである `CShape` のディスクリプタ `CShapeDesc` は `PHMaterial` 型の変数 `material` を持っています.

PHMaterial

float	density	密度
float	mu0	静止摩擦係数
float	mu	動摩擦係数
float	e	跳ね返り係数
float	reflexSpring	跳ね返りバネ係数 (ペナルティ法)
float	reflexDamper	跳ね返りダンパ係数 (ペナルティ法)
float	frictionSpring	摩擦バネ係数 (ペナルティ法)
float	frictionDamper	摩擦ダンパ係数 (ペナルティ法)

形状作成後に物性を指定するには CShapeIf の関数を使います。

CShapeIf

```

void SetDensity(float)
float GetDensity()
void SetStaticFriction(float)
float GetStaticFriction()
void SetDynamicFriction(float)
float GetDynamicFriction()
void SetElasticity(float)
float GetElasticity()
void SetReflexSpring(float)
float GetReflexSpring()
void SetReflexDamper(float)
float GetReflexDamper()
void SetFrictionSpring(float)
float GetFrictionSpring()
void SetFrictionDamper(float)
float GetFrictionDamper()

```

6.4 幾何情報の計算

形状に関する幾何情報を計算する関数を紹介します。

CDShapeIf

float CalcVolume()	体積を計算
Vec3f CalcCenterOfMass()	質量中心を計算
Matrix3f CalcMomentOfInertia()	慣性行列を計算

CalcVolume は形状の体積を計算します。体積に密度 (GetDensity で取得) を掛ければ質量が得られます。CalcCenterOfMass 関数は、形状のローカル座標系で表された質量中心の座標を計算します。CalcMomentOfInertia 関数は、形状のローカル座標系で表された質量中心に関する慣性行列を計算します。ただし、密度を 1 とした場合の値が返されますので、実際の慣性行列を得るには密度を掛ける必要があります。

第 7 章

Physics

7.1 概要

Physics モジュールは物理シミュレーション機能を提供します。主にサポートされているのは、マルチボディダイナミクスと呼ばれる剛体と関節などの拘束からなる動力学シミュレーションです。今のところソフトボディや流体、パーティクルなどの機能はサポートされていません。

7.2 Physics SDK

Physics モジュールのすべてのオブジェクトは SDK クラス PHSdk によって管理されます。PHSdk クラスは、プログラムの実行を通してただ 1 つのオブジェクトが存在するシングルトンクラスです。PHSdk オブジェクトを作成するには以下のようにします。

```
PHSdkIf* phSdk = PHSdkIf::CreateSdk();
```

通常この操作はプログラムの初期化時に一度だけ実行します。また、Framework モジュールを使用する場合はユーザが直接 PHSdk を作成する必要はありません。

PHSdk の機能はシーンと形状の管理です。シーンに関する機能は次節で説明します。また、形状に関する機能は以下の通りです。

PHSdkIf

CDSshapeIf*	CreateShape(const CDSshapeDesc&)	形状を作成
CDSshapeIf*	GetShape(int)	形状を取得
int	NShape()	形状の数

異なるシーン間で形状を共有できるように、形状管理はシーンではなく PHSdk の機能になっています。詳しくは6章を参照してください。

7.3 シーン

シーンは物理シミュレーションを行う環境を表します。複数のシーンを作成できますが、シーン同士は互いに独立しており、ユーザが直接橋渡し処理をしない限りは影響を及ぼしあうことはありません。シーンクラスは PHScene で、PHScene オブジェクトは PHSdk により管理されます。

PHSdkIf

PHSceneIf*	CreateScene(const PHSceneDesc& desc)	シーンを作成
int	NScene()	シーンの数
PHSceneIf*	GetScene(int i)	シーンを取得
void	MergeScene(PHSceneIf* scene0, PHSceneIf* scene1)	シーンを統合

シーンを作成するには以下のようにします。

```
PHSceneIf* phScene = phSdk->CreateScene();
```

引数にディスクリプタを指定することもできます。MergeScene は、scene1 が保有するオブジェクトをすべて scene0 に移動した後に scene1 を削除します。

シーンは剛体や関節などの様々な構成要素の管理を行うほか、物理シミュレーションに関する設定を行う機能を提供します。各構成要素の作成についてはそれぞれの節で説明しますので、以下ではシミュレーション設定機能について述べます。

PHSceneDesc

double	timeStep	時間ステップ幅
unsigned	count	シミュレーションしたステップ数
Vec3d	gravity	重力加速度
double	airResistanceRate	空気抵抗係数
int	numIteration	LCP の反復回数

PHSceneIf

```

double      GetTimeStep()
void        SetTimeStep(double)
unsigned    GetCount()
void        SetCount(unsigned)
void        SetGravity(const Vec3d&)
Vec3d      GetGravity()
void        SetAirResistanceRate(double)
double      GetAirResistanceRate()
int         GetNumIteration()
void        SetNumIteration()

```

`timeStep` は一度のシミュレーションステップで進める時間幅です。小さいほどシミュレーションの精度は上がりますが、同じ時間シミュレーションを進めるのにかかる計算コストは増大します。

`count` はシーン作成後にシミュレーションした累積ステップ数です。`count` と `timeStep` の積が経過時間を表します。

`gravity` は重力加速度ベクトルです。

`airResistanceRate` は、シミュレーションの安定性を向上するために毎ステップに各剛体の速度に掛けられる係数です。例えば `airResistanceRate` が 0.95 であればステップごとに速度が 95% になります。このように強制的に減速をかけることで、精度を犠牲に安定性を得ることができます。

`numIteration` は、拘束力を計算するために内部で実行されるアルゴリズムの反復回数です。一般に、反復回数に関して指数関数的に拘束力の精度が向上し、計算コストは比例的に増大します。

シミュレーションの実行

シミュレーションを 1 ステップ進めるには `Step` 関数を呼びます。

PHSceneIf

```

void        Step()                シミュレーションを 1 ステップ進める

```

`Step` を実行すると、おおまかに述べて内部で次の処理が行われます。

- 衝突判定と接触拘束の生成
- 拘束力の計算

- 剛体の速度および位置の更新

7.4 剛体

剛体は物理シミュレーションの基本要素です。剛体のクラスは `PHSolid` です。まず剛体を作成・管理するための `PHScene` の関数を示します。

`PHSceneIf`

<code>PHSolidIf*</code>	<code>CreateSolid(const PHSolidDesc&)</code>	剛体を作成する
<code>int</code>	<code>NSolids()</code>	剛体の数
<code>PHSolidIf**</code>	<code>GetSolids()</code>	剛体配列の先頭アドレス

剛体を作成するには

```
PHSolidIf* solid = phScene->CreateSolid();
```

とします。ディスクリプタを指定して作成することもできます。また、`GetSolids` は作成した剛体を格納した内部配列の先頭アドレスを返します。したがって、例えば 0 番目の剛体を取得するには

```
PHSolidIf* solid = phScene->GetSolids()[0]; // get 0-th solid
```

とします。

つぎに剛体自身の機能を説明します。

物性

`PHSolidDesc`

<code>double</code>	<code>mass</code>	質量
<code>Matrix3d</code>	<code>inertia</code>	慣性行列
<code>Vec3d</code>	<code>center</code>	質量中心
<code>bool</code>	<code>dynamical</code>	物理法則にしたがうか

PHSolidIf

double	GetMass()
double	GetMassInv()
void	SetMass(double)
Vec3d	GetCenterOfMass()
void	SetCenterOfMass(const Vec3d&)
Matrix3d	GetInertia()
Matrix3d	GetInertiaInv()
void	SetInertia(const Matrix3d&)
void	CompInertia()
void	SetDynamical(bool)
bool	IsDynamical()

GetMassInv と GetInertiaInv はそれぞれ質量の逆数と慣性行列の逆行列を返します。CompInertia は、その剛体を持つ形状とそれらの密度をもとに剛体の質量、質量中心と慣性行列を計算し、設定します。dynamical は、その剛体が物理法則に従うかどうかを指定するフラグです。もし dynamical が true の場合、その剛体に加わる力が計算され、ニュートンの運動法則にしたがって剛体の速度が変化します。一方、dynamical が false の場合は外力による影響を受けず、設定された速度で等速運動します。これはちょうど の質量をもつ場合と同じです。

状態

PHSolidDesc

Vec3d	velocity	速度
Vec3d	angVelocity	角速度
Posed	pose	位置と向き

PHSolidIf

Vec3d	GetVelocity()
void	SetVelocity(const Vec3d&)
Vec3d	GetAngularVelocity()
void	SetAngularVelocity(const Vec3d&)
Posed	GetPose()
void	SetPose(const Posed&)
Vec3d	GetFramePosition()
void	SetFramePosition(const Vec3d&)
Vec3d	GetCenterPosition()
void	SetCenterPosition(const Vec3d&)
Quaterniond	GetOrientation()
void	SetOrientation(const Quaterniond&)

velocity, angVelocity, pose はそれぞれグローバル座標系に関する剛体の速度，角速度，位置および向きを表します．[Get|Set]FramePosition はグローバル座標系に関する剛体の位置を取得/設定します．これに対して [Get|Set]CenterPosition は剛体の質量中心の位置を取得/設定します．偏心している剛体はローカル座標原点と質量中心が一致しないことに注意してください．[Get|Set]Orientation はグローバル座標系に関する剛体の向きを取得/設定します．

力の印加と取得

剛体に加わる力には

- ユーザが設定する外力
- 重力
- 関節や接触から加わる拘束力

の3種類があり，それぞれについて並進力とトルクがあります．ここで，重力は重力加速度と剛体の質量より決まり，拘束力は拘束条件を満たすように内部で自動的に計算されます．以下ではユーザが剛体に加える外力を設定・取得する方法を示します．

PHSolidIf

```
void          AddForce(Vec3d)
void          AddTorque(Vec3d)
void          AddForce(Vec3d, Vec3d)
Vec3d         GetForce()
Vec3d         GetTorque()
```

並進力を加えるには `AddForce` を使います .

```
solid->AddForce(Vec3d(0.0, -1.0, 0.0));
```

とすると剛体の質量中心に並進力 $(0, -1, 0)$ が加わります . ただし力はグローバル座標系で表現されます . 一方

```
solid->AddTorque(Vec3d(1.0, 0.0, 0.0));
```

とすると剛体の質量中心に関してモーメント $(1, 0, 0)$ が加わります . 作用点を任意に指定するには

```
solid->AddForce(Vec3d(0.0, -1.0, 0.0), Vec3d(0.0, 0.0, 1.0));
```

とします . この場合は並進力 $(0, -1, 0)$ が作用点 $(0, 0, 1)$ に加わります . ここで作用点の位置は剛体のローカル座標ではなくグローバル座標で表現されることに注意してください . `AddForce` や `AddTorque` は複数回呼ぶと , それぞれで指定した外力の合力が最終的に剛体に加わる外力となります .

外力を取得するには `GetForce` , `GetTorque` を使います . ただし , これらの関数で取得できるのは直前のシミュレーションステップで剛体に作用した外力です . したがって直前のシミュレーションステップ後に `AddForce` した力は取得できません .

7.5 関節

拘束とは剛体と剛体の間に作用してその相対的運動に制約を加える要素です . 拘束のクラス階層を Fig. 7.1 に示します . まず拘束は関節と接触に分かれます . 関節はユーザが作

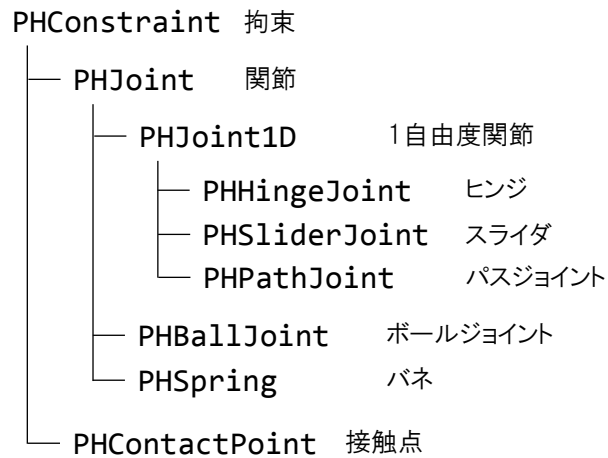


Fig. 7.1 Constraint class hierarchy

成しますが，接触は衝突判定結果にもとづいて自動的に生成・削除されます．関節はさらにいくつかの種類に分けられます．

細かな説明は後回しにして，まずは関節の作成方法から見ていきます．

関節の作成

以下ではもっとも使用頻度の高いヒンジの作成を例にとって関節の作成方法を説明します．ヒンジを作成するには次のようにします．

```

PHSolidIf* solid0 = phScene->GetSolids()[0];
PHSolidIf* solid1 = phScene->GetSolids()[1];

PHHingeJointDesc desc;
desc.poseSocket.Pos() = Vec3d( 1.0, 0.0, 0.0);
desc.posePlug.Pos()   = Vec3d(-1.0, 0.0, 0.0);
PHHingeJointIf* joint
    = phScene->CreateJoint(solid0, solid1, desc)->Cast();
  
```

作成したい関節の種類に応じたディスクリプタを作成し，これを PHScene の CreateJoint 関数に渡して関節を作成します．このとき，ディスクリプタとともに連結したい剛体のインタフェースも渡します．CreateJoint は PHJointIf*を返しますので，作成した関節のインタフェースを得るには Cast で動的キャストします．

関節に関する PHScene の関数を以下に示します．

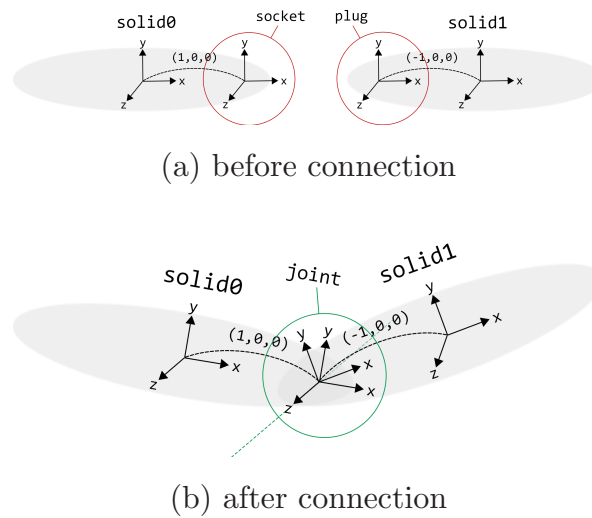


Fig. 7.2 Socket and plug

PHSceneIf

```

PHJointIf* CreateJoint(PHSolidIf*, PHSolidIf*, const
    PHJointDesc&)
int NJoint()
PHJointIf* GetJoint(int i)

```

NJoint はシーン中の関節の個数を返します。GetJoint は i 番目の関節を取得します。

ソケットとプラグ

さて、上の例でディスクリプタに値を設定している箇所に注目してください。この部分で関節の取り付け位置を指定しています。Springhead では、ソケットとプラグと呼ばれるローカル座標系を用いて関節の取り付け位置を表現します。ソケットとプラグとは、その名前から連想するように、連結する剛体に取り付ける金具のようなものです。CreateJoint の第 1 引数の剛体にソケットがつき、第 2 引数の剛体にプラグがつきます。ソケットとプラグがそれぞれの剛体のどの位置に取り付けられるかを指定するのがディスクリプタの poseSocket と posePlug です。上の例ではソケットの位置が $(1, 0, 0)$ 、プラグの位置が $(-1, 0, 0)$ でした (Fig. 7.2(a))。この場合は Fig. 7.2(b) のように剛体が連結されます。後述するように、ヒンジはソケットとプラグの z 軸を一致させる拘束です。したがって連結された剛体同士はソケットとプラグの z 軸を回転軸として相対的に回転することができます。

ソケットとプラグに関するディスクリプタとインタフェースを紹介します。

PHConstraintDesc		
Posed	poseSocket	ソケットの位置と向き
Posed	posePlug	プラグの位置と向き
PHConstraintIf		
PHSolidIf*	GetSocketSolid()	ソケット側の剛体
PHSolidIf*	GetPlugSolid()	プラグ側の剛体
void	GetSocketPose(Posed&)	
void	SetSocketPose(const Posed&)	
void	GetPlugPose(Posed&)	
void	SetPlugPose(const Posed&)	
void	GetRelativePose(Posed&)	相対的な位置と向き
void	GetRelativeVelocity(Vec3d&, Vec3d&)	相対速度
void	GetConstraintForce(Vec3d&, Vec3d&)	拘束力

GetRelativePose はソケット座標系から見たプラグ座標系の相対的な位置と向きを取得します。同様に、GetRelativeVelocity はソケットから見たプラグの相対速度をソケット座標系で取得します。ここで第 1 引数が並進速度、第 2 引数が角速度です。GetConstraintForce はこの拘束が剛体に加えた拘束力を取得します (第 1 引数が並進力、第 2 引数がモーメント)。具体的には、ソケット側剛体に作用した拘束力をソケット座標系で表現したものが得られます。プラグ側剛体には作用反作用の法則によって逆向きの力が作用しますが、これを直接取得する関数は用意されていません。

関節の種類

Springhead で使用可能な関節の種類は

- ヒンジ (PHHingeIf)
- スライダ (PHSliderIf)
- パスジョイント (PHPathJointIf)
- ボールジョイント (PHBallJointIf)
- バネ (PHSpringIf)

の 5 種類です。種類ごとに、自由度・拘束の仕方・変位の求め方が異なります。

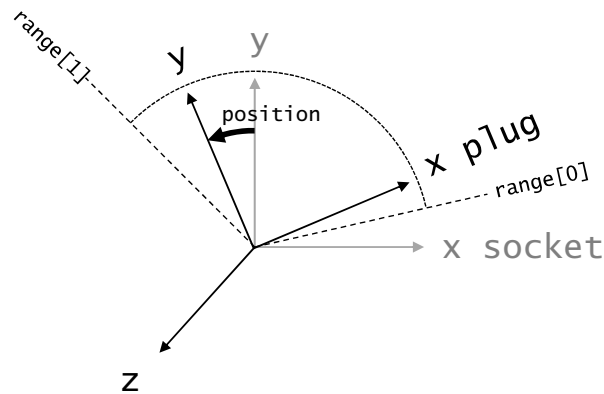


Fig. 7.3 Hinge joint

ヒンジ

ヒンジは1軸回転関節です。ヒンジは、Fig 7.3 に示すようにソケットとプラグの z 軸が一致するように拘束します。このときソケットの y 軸とプラグの y 軸の成す角 (x 軸同士でも同じことですが) が関節変位となります。

関節変位を取得する API は1自由度関節 (PH1DJointIf) で共通です。そのためヒンジに限らずスライダ・パスジョイントでも使用できます。

PH1DJointIf クラス

```
double GetPosition()
```

関節の変位を取得します。変位のはかり方は関節の種類に依存します。

スライダ

スライダは1自由度の直動関節です。スライダは、Fig 7.4 に示すようにソケットとプラグの z 軸が同一直線上に乗り、かつ両者の x 軸、 y 軸が同じ向きを向くように拘束します。このときソケットの原点からプラグの原点までが関節変位となります。

パスジョイント

パスジョイントはソケットとプラグの相対位置関係を1パラメータの自由曲線で表現する関節です。詳しくは後述します。

T.B.D.

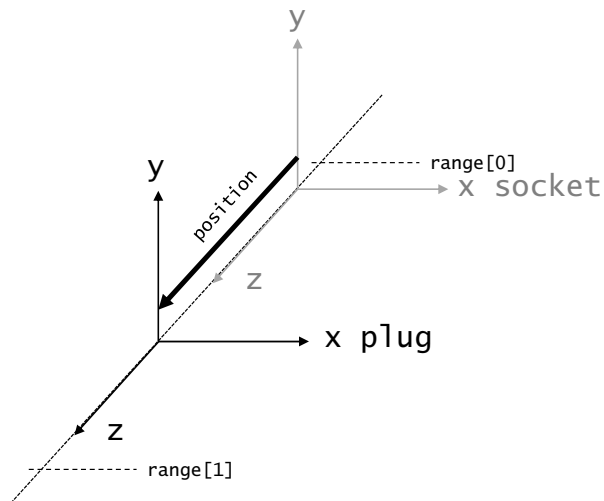


Fig. 7.4 Slider joint

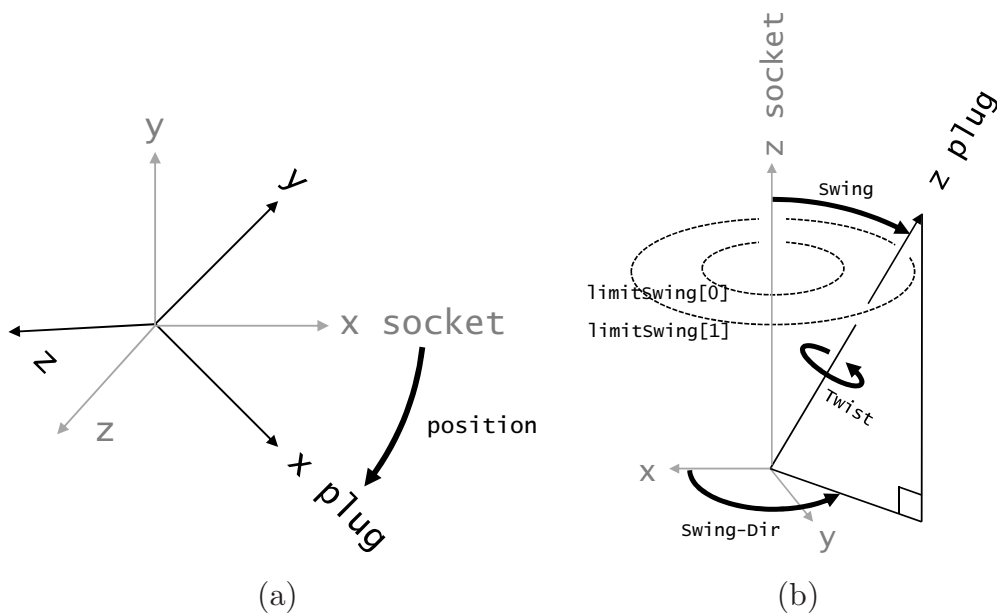


Fig. 7.5 Ball Joint

ボールジョイント

ボールジョイントは3自由度の回転関節です。ボールジョイントはFig 7.5(a)に示すようにソケットとプラグの原点が一致するように拘束します。ソケット座標系をプラグ座標系に変換するようなクォータニオンが変位となります。

一方で、ボールジョイントの変位はオイラー角の一種である Swing-Twist 座標系 (Fig 7.5(b)) で取得することもできます。ソケットとプラグのz軸同士がなす角をスイン

グ角 (Swing) , プラグの z 軸をソケットの x-y 平面への射影がソケットの x 軸となす角をスイング方位角 (Swing-Dir) , プラグの z 軸周りの回転角度をツイスト角 (Twist) と呼びます . Swing-Twist 座標系は , 後述するボールジョイントの関節可動範囲の指定に用います .

この 2 種類の変位は , それぞれに対応した関数で取得することができます .

PHBallJoint クラス

Quaterniond GetPosition()

ソケット座標系をプラグ座標系に変換するようなクォータニオンを返します .

Vec3d GetAngle()

Swing-Twist 座標系で表現された関節変位を返します .

バネ

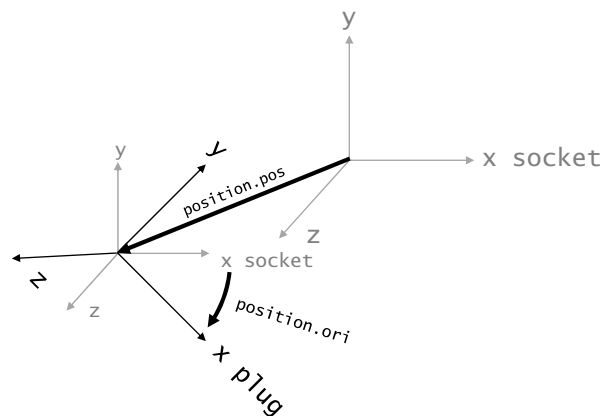


Fig.7.6 Spring

剛体間を連結するダンパ付きバネです . ソケット座標系とプラグ座標系が一致するときが自然状態で , 位置の変位・姿勢の変位に比例して自然状態に戻すような力・モーメントを発生します . 並進運動に作用するバネ・ダンパ係数と , 回転運動に作用するバネ・ダンパ係数はディスクリプタによってそれぞれ設定できます .

PHSpringDesc

Vec3d	spring	並進運動に対するバネ係数
Vec3d	damper	並進運動に対するダンパ係数
double	springOri	回転運動に対するバネ係数
double	damperOri	回転運動に対するダンパ係数

有効化と無効化

PHConstraintDesc

bool	bEnabled	有効/無効フラグ
------	----------	----------

PHConstraintIf

void	Enable(bool)
bool	IsEnabled()

有効な拘束は拘束力を生じます。無効化された拘束は存在しないのと同じ状態になりますが、削除するのとは異なりいつでも再度有効化することができます。作成直後の拘束は有効化されています。

関節制御

1 自由度関節の場合

PHJoint1DDesc

double	spring	可動範囲下限
double	damper	可動範囲上限
double	targetPosition	可動範囲制限用バネ係数
double	targetVelocity	可動範囲制限用ダンパ係数
double	offsetForce	
double	fMax	

PHJoint1DIf

double	GetPosition()	関節変位を取得
double	GetVelocity()	関節速度を取得
void	SetSpring(double)	

double	GetSpring()	
void	SetDamper(double)	
double	GetDamper()	
void	SetTargetPosition(double)	
double	GetTargetPosition()	
void	SetTargetVelocity(double)	
double	GetTargetVelocity()	
void	SetOffsetForce(double)	
double	GetOffsetForce()	
void	SetTorqueMax(double)	最大関節トルクを設定
double	GetTorqueMax()	最大関節トルクを取得

関節を駆動する力 f は次式で与えられます。

$$f = K(p_0 - p) + D(v_0 - v) + f_0$$

ここで p, v はそれぞれ関節変位と関節速度で `GetPosition`, `GetVelocity` で取得できます。その他の記号とディスクリプタ変数との対応は以下の通りです。

K	spring
D	damper
p_0	targetPosition
v_0	targetVelocity
f_0	offsetForce

上の式はバネ・ダンパモデルとPD制御則の二通りの解釈ができます。前者としてとらえるなら K はバネ係数, D はダンパ係数, p_0 はバネの自然長, v_0 は基準速度となります。後者としてとらえる場合は K はPゲイン, D はDゲイン, p_0 は目標変位, v_0 は目標速度となります。また, f_0 は関節トルクのオフセット項です。上の式で得られた関節トルクは最後に $\pm f_{\text{Max}}$ の範囲に収まるようにクランプされます。

ボールジョイントの場合

ヒンジと同様に, バネダンパモデル・PD制御を実現します。ボールジョイントの変位はクォータニオンで表されるため, 目標変位 `targetPosition` はクォータニオンで, 目標速度 `targetVelocity` は回転ベクトルで与えます。

PHBallJointDesc	
double spring	バネ係数
double damper	ダンパ係数
Quaterniond targetPosition	目標変位
Vec3d targetVelocity	目標速度
Vec3d offsetForce	モータートルク
double fMax	関節トルクの限度

可動域制限

CreateLimit は可動範囲制約オブジェクトのディスクリプタを引数にとります。1 自由度関節の可動範囲制約の場合、Vec2d range が可動域を表します。range[0] が可動域の下限、range[1] が上限です。range[0] < range[1] が満たされているときに限り可動範囲制約が有効となります。デフォルトでは range[0] > range[1] となる値が設定されていて、可動範囲制約は無効となっています。

関節の変位が可動範囲限界に到達したとき、範囲を超過しないように可動範囲制約の拘束力が作用します。このとき、関節変位を範囲内に押し戻す力はバネ・ダンパモデルで計算されます。このバネ係数とダンパ係数はそれぞれディスクリプタの spring, damper で指定します。

tips

可動範囲用の spring, damper は初期値でも十分大きな値が設定されていますが、関節制御において非常に大きなバネ・ダンパ係数を用いると可動範囲制約のバネ・ダンパが負けてしまうことがあります。その場合には関節制御より大きな係数を適切に再設定すると、可動範囲内で関節を制御する事ができるようになります。

1 自由度関節の場合

PH1DJointLimitDesc クラス

Vec2d range

可動範囲を表します。range[0] が下限、range[1] が上限です。

double spring
double damper

可動範囲を制限するためのバネ・ダンパモデルの係数です。

PH1DJointLimitIf クラス

IsOnLimit()

現在の関節姿勢が可動範囲外にある時に true を返します。この関数が true を返すような時、関節には可動域制約を実現するための拘束力が発生しています。

ボールジョイントの場合

ボールジョイントの可動範囲は Fig 7.5(b) に示す Swing-Twist 座標系によって指定します。

ボールジョイントに対しては 2 種類の可動範囲制約を使用することができます。

- ConeLimit は円錐形の可動範囲制約で、主に関節のスイング角を一定範囲内に制約します。
- SplineLimit は自由曲線形の可動範囲制約で、プラグ座標系 z 軸の可動範囲を閉曲線で指定することができます。

ここでは ConeLimit について説明します (SplineLimit については後述します)。

PHBallJointConeLimitDesc クラス

Vec2d limitSwing

スイング角の可動範囲です。概念的には、関節が一定以上に折れ曲がらないようにする制約です (スイング角の下限を設定する事もできるので、実際には一定以上にまっすぐにならないようにする機能も有しています)。

limitSwing[0] が下限, limitSwing[1] が上限です。limitSwing を取得・設定するための API は

```
PHBallJointConeLimitIf::[Set|Get]SwingRange(range)
```

です。

limitSwing[0] > limitSwing[1] となる時は無効化されます。デフォルトでは limitSwing[0] > limitSwing[1] となる値がセットされています。

Vec2d limitTwist

ツイスト角の可動範囲です。概念的には、関節が一定以上にねじれないようにするための制約です。

limitTwist[0] が下限, limitTwist[1] が上限です。limitTwist を取得・設定するための API は

```
PHBallJointConeLimitIf::[Set|Get]TwistRange(range)
```

です。

limitTwist[0] > limitTwist[1] となる時は無効化されます。デフォルト

では $\text{limitTwist}[0] > \text{limitTwist}[1]$ となる値がセットされています。

```
double spring
double damper
```

可動範囲を制限するためのバネ・ダンパモデルの係数です。1 自由度関節の場合と同じです。

PHBallJointConeLimitIf クラス

```
IsOnLimit()
```

現在の関節姿勢が可動範囲外にある時に true を返します。1 自由度関節の場合と同じです。

ボールジョイントの自由曲線可動域

パスジョイント

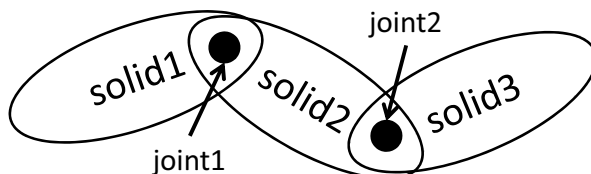
弾塑性変形バネダンパ

7.6 関節系の逆運動学

逆運動学 (IK) は、剛体関節系において剛体が目標位置に到達するよう関節を制御する機能です。

Springhead では、関節系のヤコビアンを用いた IK 機能が使用可能です。物理シミュレーションの 1 ステップごとに関節系のヤコビアンを計算し、それに基づいて剛体を目標位置・姿勢に近づけるような各関節の角速度を計算します。シミュレーションを続けることで、最終的に剛体が目標位置・姿勢となった状態が得られます。

Springhead 上の剛体関節系に対して IK を使用するには、少々下準備が必要です。次のように 3 つの剛体が直線状につながった関節系を例にとって解説します。



IK を使用するには、まず IK に用いるための関節を「アクチュエータ」として登録する必要があります。

```
// given PHSceneIf* phScene
// given PHSolidIf* solid1, solid2, solid3
// given PHHingeJointIf* joint1 (solid1 <-> solid2)
// given PHHingeJointIf* joint2 (solid2 <-> solid3)

PHIKHingeActuatorDesc descIKActuator;

PHIKHingeActuatorIf* ikActuator1
    = phScene->CreateIKActuator(descIKActuator);
ikActuator1.AddChildObject(joint1);

PHIKHingeActuatorIf* ikActuator2
    = phScene->CreateIKActuator(descIKActuator);
ikActuator1.AddChildObject(joint2);
```

PHIKHingeActuatorIf は PHHingeJointIf に対応するアクチュエータクラスです。次に、関節系の親子関係を登録します。親アクチュエータに、子アクチュエータを登録します。

```
ikActuator1.AddChildObject(ikActuator2);
```

また、IK を用いて到達させる先端の剛体を「エンドエフェクタ」として登録する必要があります。

```
PHIKEndEffectorDesc descEndEffector;

PHIKEndEffectorIf* ikEndEffector1
    = phScene->CreateIKEndEffector(descEndEffector);
ikEndEffector1.AddChildObject(solid3);
```

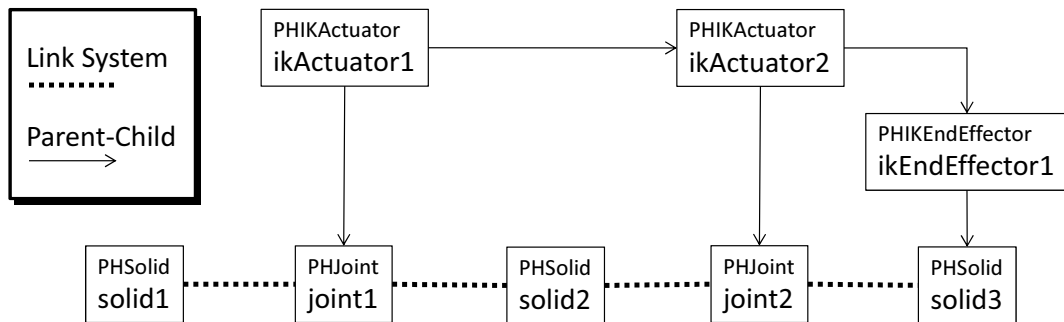
最後に、剛体関節系の親子関係において、エンドエフェクタの直接の親にあたるアクチュエータに対し、エンドエフェクタを登録します。

```
ikActuator2.AddChildObject(ikEndEffector1);
```

この例では `solid1 -(joint1)-> solid2 -(joint2)-> solid3` のように関節が接

続されていますから、関節系の末端である `solid3` をエンドエフェクタにした場合、直接の親にあたるアクチュエータは `joint2` に対応するアクチュエータ、すなわち `ikActuator2` ということになります。

ここまでの作業で、生成されたオブジェクトの関係は以下のようになっているはずです。



これで下準備は終わりです。

目標位置をセットし、IK エンジンを実効にすると IK が動き始めます。

```

// solid3 goes to (2, 5, 0)
ikEndEffector1->SetTargetPosition(Vec3d(2, 5, 0));

phScene->GetIKEngine()->Enable(true);

...
phScene->Step(); // IK is calculated in physics step
...
  
```

IK エンジン

IK の計算は、PHScene が持つ IK エンジン (PHIKEngine) によって実現されています。IK エンジンはデフォルトでは無効となっています。

```
phScene->GetIKEngine()->Enable(true);
```

を実行することで有効となります。GetIKEngine() は、PHScene が持つ IK エンジンを取得する API です。

Springhead における IK の計算原理は、関節系のヤコビ行列 (ヤコビアン) に基づきます。全アクチュエータの関節角度に微小変化量 $\Delta\theta$ を与えた時の、全エンドエフェクタの

位置の微小変化量 Δr は、関節系のヤコビアン J を用いて

$$\Delta r = J\Delta\theta$$

と表されます。毎ステップごとに関節系ヤコビアン J および目標位置に向かう微小変位 Δr を計算し、上記の線形連立方程式を解くことで各関節に与える角速度を求めます。

線形連立方程式の求解にはガウス=ザイデル法による繰り返し解法を用いています。そのため 1 ステップあたりの繰り返し計算の回数によって計算速度と計算精度のトレードオフがあります。繰り返しの回数は、

```
// 20 iteration per 1 physics step
phScene->GetIKEngine()->SetNumIter(20);
```

のようにして設定することができます。

PHSceneIf クラス

PHIKEngineIf* GetIKEngine()

IK エンジンを取得します。

PHIKEngineIf クラス

Enable(bool b)

IK エンジンの有効・無効を切り替えます。引数が true ならば有効化し、false ならば無効化します。

SetNumIter(int n)

IK の繰り返し計算回数を 1 ステップあたり n 回にセットします。

アクチュエータ

Springhead では、IK に使用する各関節をアクチュエータと呼びます。IK は、アクチュエータを駆動させて剛体を目標位置に到達させます。

< オブジェクト関係図 >

IK エンジンはアクチュエータを複数保持し、各アクチュエータが各関節を保持します。アクチュエータオブジェクト一つにつき、関節が一つ対応します。アクチュエータオブジェクトの具体的な役割は、関節の状態を IK エンジンに伝え、IK の計算のうち関節ヤコビアンなどの計算など関節ごとに行う部分を実行し、IK の計算結果に従って関節を動かす事

です。

アクチュエータクラスの種類と作成

本稿執筆時点では、IK 用アクチュエータとして使用できるのはヒンジとボールジョイントのみです。それぞれに対応したアクチュエータクラスがあります。

- PHIKHingeActuator は PHHingeJoint に対するアクチュエータです。ヒンジジョイントの 1 自由度を駆動に用います。
- PHIKBallActuator は PHBallJoint に対するアクチュエータです。ボールジョイントは 3 自由度の関節ですが、後述するエンドエフェクタの姿勢制御を行わない (エンドエフェクタの位置のみを制御する) 場合は、エンドエフェクタの位置を変化させることのできる 2 自由度のみを駆動に用います (使用する 2 自由度の軸は 1 ステップごとに更新されます)。

```
// given PHSceneIf* phScene  
  
PHIKHingeActuatorDesc descIKActuator;  
PHIKHingeActuatorIf* ikActuator  
    = phScene->CreateIKActuator(descActuator);
```

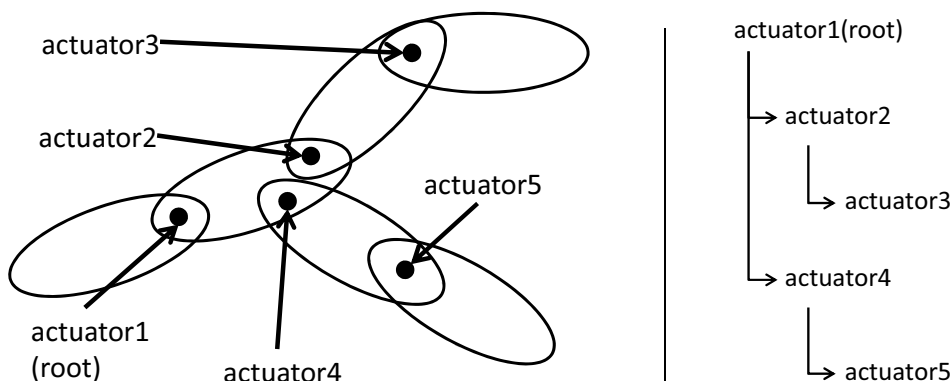
アクチュエータを作成するには、PHSceneIf の CreateIKActuator 関数を用います。引数はアクチュエータのディスクリプタです。PHIKHingeActuatorDesc 型のディスクリプタを渡すとヒンジ用のアクチュエータが作成され、PHIKBallActuatorDesc 型のディスクリプタを渡すとボールジョイント用のアクチュエータが作成されます。

作成された時点では、アクチュエータは関節と対応付けがされていません。アクチュエータの子要素に関節を登録することで対応付けが行われます。

```
// given PHHingeJointIf* joint  
ikActuator->AddChildObject(joint);
```

アクチュエータの親子関係の登録

次のように二股に分岐したリンクを例にとります：



計算上、IK で駆動する関節系は木構造でなければなりません。Springhead では、アクチュエータの親子関係を作ることによって関節の木構造を設定します。

```
// given PHIKActuator ikActuator1, ikActuator2
ikActuator1->AddChildObject(ikActuator2);
```

AddChildObject を呼び出すと、アクチュエータに対し「子要素」となるアクチュエータを登録することができます。これを全てのアクチュエータに対して行うことでアクチュエータの木構造が設定されます。このときアクチュエータの親子関係は、前出の図の右側のようにになります。

関節のダンパ係数と IK

関節の運動は、IK 機能によって計算された目標関節角速度を関節に SetTargetVelocity することで実現します。目標速度に関する関節の振る舞いは、関節の damper パラメータによって変化します。一般に damper が大きいほど関節は固くなり、外乱の影響を受けづらくなります。この性質はそのまま IK の振る舞いにも受け継がれます。

重み付き IK

通常、IK は全ての関節を可能な限り均等に使用して目標を達成するように計算されます。一方、キャラクターの動作に用いる場合などで、手先を優先的に動かし胴体はあまり動かさない、といった重み付けが要求される場面があります。

Springhead の IK には、このような重み付けを設定することができます。

```
// given PHIKActuator ikActuator1, ikActuator2
ikActuator1->SetBias(2.0);
ikActuator2->SetBias(1.0);
```

SetBias は、指定した関節をあまり動かさないように設定する関数です。Bias には 1.0 以上の値を設定します。大きな値を設定した関節ほど、IK による動作は小さくなります。デフォルトではどのアクチュエータも 1.0 となっており、全関節が均等に使用されます。

エンドエフェクタ

剛体・関節系を構成する剛体の一部を、「エンドエフェクタ」に指定することができます。エンドエフェクタには目標位置・姿勢を指示することができます。IK エンジンには、エンドエフェクタ剛体が指定された目標位置・姿勢を達成するようアクチュエータを制御します。

エンドエフェクタの作成

エンドエフェクタは PHSceneIf の CreateIKEndEffector を用いて作成します。引数には PHIKEndEffectorDesc を渡します。

```
// given PHSceneIf* phScene  
  
PHIKEndEffectorDesc descEndEffector;  
  
PHIKEndEffectorIf* ikEndEffector  
    = phScene->CreateIKEndEffector(descEndEffector);
```

アクチュエータ同様、エンドエフェクタも作成時点では剛体との対応を持ちません。AddChildObject により剛体を子要素として登録する必要があります。

```
// given PHSolidIf* solid  
  
ikEndEffector.AddChildObject(solid);
```

次に、エンドエフェクタ剛体を親剛体に連結しているアクチュエータに対し、エンドエフェクタを子要素として登録します。

```
// given PHIKActuatorIf* ikActuatorParent  
  
ikActuatorParent.AddChildObject(ikEndEffector);
```

こうすることでエンドエフェクタはアクチュエータ木構造の葉ノードとなり、IK の計算に使用できるようになります。

なお、エンドエフェクタは一つの関節系に対して複数作成することができます。この場合、IK は複数のエンドエフェクタが可能な限り同時に目標位置・姿勢を達成できるようにアクチュエータを制御します。また、エンドエフェクタは関節系の先端剛体に限りません。

目標位置の設定

エンドエフェクタの目標位置は `SetTargetPosition` によって指定します。

```
// solid3 goes to (2, 5, 0)
ikEndEffector->SetTargetPosition(Vec3d(2, 5, 0));
```

エンドエフェクタに目標姿勢を指示し、エンドエフェクタが特定の姿勢をとるように関節系を動作させることもできます。

```
ikEndEffector->SetTargetOrientation( Quaterniond::Rot('x', rad(30)) );
ikEndEffector->EnableOrientationControl(true);
```

目標姿勢は `Quaterniond` で設定します。姿勢制御はデフォルトでは無効になっており、使用するには `EnableOrientationControl` を呼んで有効化する必要があります。

`EnablePositionControl` および `EnableOrientationControl` を用いると、位置制御・姿勢制御の両方を個別に有効・無効化することができます。

```
// 位置制御あり，姿勢制御なし（デフォルト）
ikEndEffector->EnablePositionControl(true);
ikEndEffector->EnableOrientationControl(false);
```

```
// 位置制御なし，姿勢制御あり
ikEndEffector->EnablePositionControl(false);
ikEndEffector->EnableOrientationControl(true);
```

```
// 位置制御あり，姿勢制御あり
ikEndEffector->EnablePositionControl(true);
```

```
ikEndEffector->EnableOrientationControl(true);
```

7.7 接触

T.B.D.

7.8 関節座標系シミュレーション

T.B.D.

7.9 ギア

T.B.D.

第 8 章

Graphics

8.1 概要

Graphics は 3D シーンの描画機能を提供するモジュールです。

8.2 Graphics SDK

Graphics モジュールのすべてのオブジェクトは SDK クラス `GRSdk` によって管理されます。`GRSdk` クラスは、プログラムの実行を通してただ 1 つのオブジェクトが存在するシングルトンクラスです。`GRSdk` オブジェクトを作成するには以下のようにします。

```
GRSdkIf* grSdk = GRSdkIf::CreateSdk();
```

通常この操作はプログラムの初期化時に一度だけ実行します。また、Framework モジュールを使用する場合はユーザが直接 `GRSdk` を作成する必要はありません。

`GRSdk` には以下の機能があります。

- レンダラの作成
- デバイスの作成
- シーンの管理

レンダラとは処理系に依存しない抽象化された描画機能を提供するクラスです。レンダラのクラスは `GRRender` です。

一方、デバイスは処理系ごとの描画処理の実装を行うクラスです。現在の Springhead では OpenGL による描画のみがサポートされています。OpenGL 用デバイスクラスは `GRDeviceGL` です。

レンダラをデバイスに関する `GRSdk` の関数を以下に示します。

GRSdkIf		
GRRenderIf*	CreateRender()	レンダラを作成
GRDeviceGLIf*	CreateDeviceGL()	OpenGL デバイスを作成
GRRenderIf		
void	SetDevice(GRDeviceIf*)	デバイスの設定
GRDeviceIf*	GetDevice()	デバイスの取得

初期化

Graphics モジュールを使用するには以下の初期化処理を必ず実行する必要があります。

```
GRRenderIf* render = grSdk->CreateRender();
GRDeviceIf* device = grSdk->CreateDeviceGL();
device->Init();
render->SetDevice(device);
```

GRRender の SetDevice 関数でデバイスを登録すると、レンダラは実際の描画処理をそのデバイスを用いて行います。将来的に処理系ごとにデバイスを使い分けることを想定し、上の処理はユーザが行うことになっています。Framework モジュールを使用する場合はユーザ自身で上の手続きを行う必要はありません。

8.3 シーン

シーンの作成

Graphics モジュールのシーンは、コンピュータグラフィクスにおけるいわゆるシーングラフと同等のものです。シーンクラスは GRScene です。シーンを作成するには次のようにします。

```
GRSceneIf* grScene = grSdk->CreateScene();
```

GRScene はディスクリプタによる設定項目を持ちません。また、Fig. 8.1 に示すように GRSdk オブジェクトは任意の数のシーンを保持できます。

シーン作成に関する GRSdk の関数は以下の通りです。

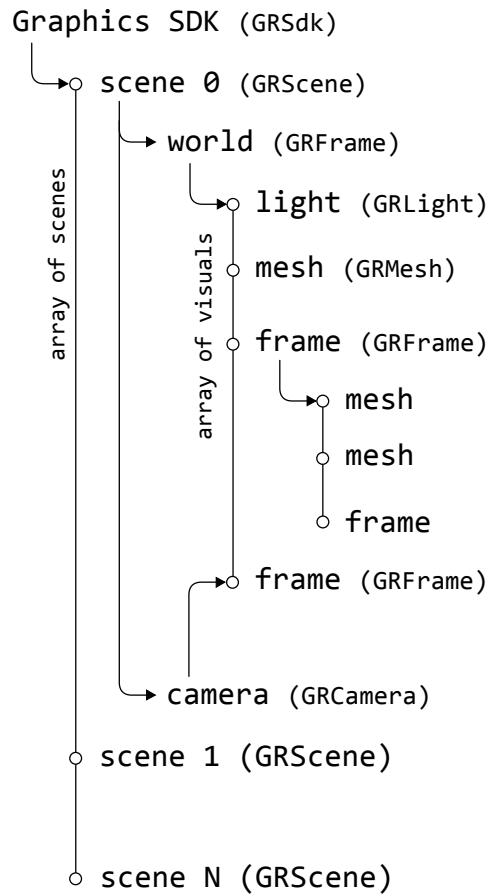


Fig. 8.1 Graphics data structure

GRSdkIf

GRSceneIf*	CreateScene()	シーンを作成
GRSceneIf*	GetScene(size_t)	シーンを取得
size_t	NScene()	シーンの数
void	MergeScene(GRSceneIf*, GRSceneIf*)	シーンの統合

シーンの機能

シーンを作成したら、次はそのコンテンツであるフレームやメッシュ、カメラやライトなどを作成してシーンに加えていきます。この方法としては完全に手動でシーンを構築する他にも FileIO モジュールを使用してファイルからシーンをロードする方法もあります。以下に GRScene の関数を示します。

GRSceneIf

GRFrameIf*	GetWorld()	ワールドフレームの取得
GRCameraIf*	GetCamera()	カメラの取得
void	SetCamera(const GRCameraDesc&)	カメラの設定
GRVisualIf*	CreateVisual(const GRVisualDesc&, GRFrameIf*)	描画アイテムの作成
void	Render(GRRenderIf*)	描画

Fig. 8.1 に示すように、1 つのシーンはただ 1 つのワールドフレームを持ち、それを基点として任意の数の描画アイテムがツリー状に連なります。ワールドフレームは GetWorld で取得します。

特殊な描画アイテムにカメラがあります。カメラはワールドフレーム以下のツリーとは別に、GRScene が保持します (Fig. 8.1)。カメラの設定は SetCamera で行います。カメラを取得するには GetCamera を使います。また、カメラはシーングラフ中の 1 つのフレームを参照し、これを視点の設定に用います。イメージとしてはカメラが参照先のフレームに取り付けられていると考える方が自然でしょう。参照先のフレームの移動に応じてカメラもシーン中を移動することになります。

シーンの描画

描画処理はプログラムの描画ハンドラで行います。GLUT を使う場合は glutDisplayFunc で登録したコールバック関数がこれにあたり、また Framework モジュールの FWApp を使う場合は Display 仮想関数がこれにあたります。以下が典型的な描画処理です。

```
render->ClearBuffer();           // clear back buffer
render->BeginScene();            // begin rendering

grScene->Render(render);         // render scene

render->EndScene();              // end rendering
render->SwapBuffers();           // swap buffers
```

ClearBuffer は描画バッファを所定の色で塗りつぶします。塗りつぶし色の取得/設定は GRRender の GetClearColor, SetClearColor を使います。

```
render->SetClearColor(Vec4f(1.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f));
```



Fig. 8.2 Class hierarchy of visual items

```
render->ClearBuffer();          // clear back buffer in red
```

BeginScene と EndScene はシーンの描画の前後で必ず呼び出します。SwapBuffers はフロントバッファとバックバッファを切り換えることで描画内容を画面上に表示します。

GRScene の Render 関数は、カメラ (GRCamera) の Render とワールドフレーム (GRFrame) の Render を順次呼び出します。まずカメラの描画によって視点と投影変換が設定され、次にワールドフレームの描画によってシーングラフが再帰的に描画されます。

8.4 描画アイテム

シーングラフを構成する描画アイテムの基本クラスは GRVisual です。GRVisual から派生するクラスを Fig. 8.2 に示します。描画アイテムには以下の共通の機能があります。

GRVisualIf

```

void      Render(GRRenderIf*)
void      Rendered(GRRenderIf*)
void      Enable(bool)
bool      IsEnabled()
  
```

Render はアイテムの描画を行い、Rendered は描画の後処理を行います。描画処理は描画アイテムの種類ごとに異なります。これについては次節以降で説明します。

Enable 関数は描画処理の有効化/無効化を行います。無効化されたアイテムは描画されません。IsEnabled 関数は有効/無効状態を返します。

描画アイテムを作成するには GRScene の CreateVisual 関数に種類ごとのディスクリプタを指定して呼び出します。

8.5 フレーム

フレームは座標変換を定義すると同時に他の描画アイテムのコンテナとしての役割を持ちます。フレームのクラスは `GRFrame` です。次のコードは、フレームを作成してワールドフレームの子として登録します。

```
GRFrameDesc desc;
GRFrameIf* frame =
    grScene->CreateVisual(desc, grScene->GetWorldFrame())->Cast();
```

`CreateVisual` 関数は指定されたディスクリプタに対応する描画アイテムを作成し、指定された親フレームの子として登録します。親フレームを省くとデフォルトでワールドフレームに登録されます。したがって上のコードは `CreateVisual(desc)` としてもかまいません。

`GRFrame` の `Render` 関数は、子描画アイテムの `Render` を順次呼び出します。

親子関係

フレーム間の親子関係を管理する関数には次のものがあります。

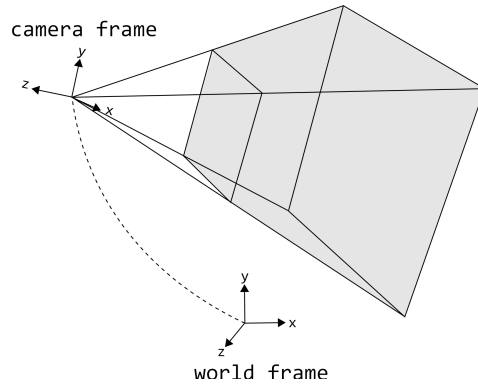
`GRFrameIf`

<code>GRFrameIf*</code>	<code>GetParent()</code>
<code>void</code>	<code>SetParent(GRFrameIf*)</code>
<code>int</code>	<code>NChildren()</code>
<code>GRVisualIf**</code>	<code>GetChildren()</code>

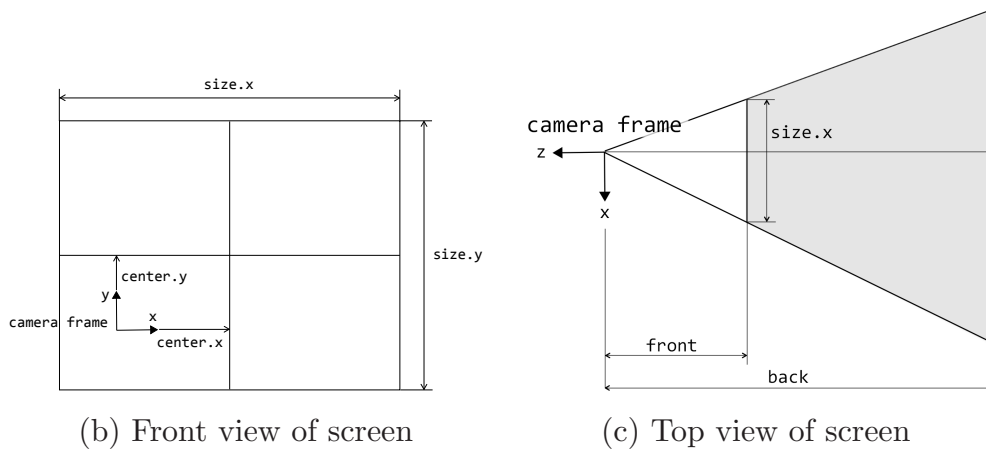
`GetParent` は親フレームを取得します。`SetParent` はそのフレームの親フレームを変更するために使います。`NChildren` はそのフレームの子である描画アイテムの数を返します。これらにはフレーム以外の描画アイテムも含まれることに注意してください。`GetChildren` は子描画アイテムの配列を取得します。

座標変換

フレームの座標変換を操作する関数は以下の通りです。



(a) Perspective frustum



(b) Front view of screen

(c) Top view of screen

Fig. 8.3 Camera parameters

GRFrameIf

```

Affinef    GetTransform()
Affinef    GetWorldTransform()
void       SetTransform(const Affinef&)

```

GetTransform, SetTransform はそれぞれフレームとその親フレームとの間の相対的な座標変換を取得/設定します。例えば

```
frame->SetTransform(Affinef::Trn(1.0, 0.0, 0.0));
```

とすると親フレームに対して相対的に x 方向に 1.0 移動します。

8.6 カメラ

カメラは描画における視点の設定と投影変換を管理します。はじめにカメラのディスクリプタを見ていきます。

GRCameraDesc

Vec2f	size	スクリーンサイズ
Vec2f	center	スクリーン中心座標
float	front	前方クリップ面
float	back	後方クリップ面

各変数の定義は Fig. 8.3(b),(c) を参照してください。設定を変更するには以下のようにします。

```
GRCameraDesc desc;
grScene->GetCamera()->GetDesc(&desc);
desc.front = 3.0f;
grScene->SetCamera(desc);
```

上では GetDesc 関数で既存の設定をディスクリプタにコピーし、front を変更してから SetCamera 関数で再設定しています。

一方、GRCamera の関数は以下の通りです。

GRCameraIf

```
GRFrameIf*  GetFrame()
void        SetFrame(GRFrameIf*)
```

GetFrame, SetFrame 関数はカメラフレームを取得/設定します。Fig. 8.3(a) のように、カメラフレームはカメラの視点を定義します。

8.7 ライト

ライトはシーンの照明を設定するための描画アイテムです。ライトのクラス GRLight のディスクリプタの代表的な変数を以下に示します。

GRLightDesc

Vec4f	ambient	環境光
Vec4f	diffuse	拡散光
Vec4f	specular	鏡面光
Vec4f	position	ライト位置

減衰係数やスポットライトなどのより詳細な設定項目についてはソースファイルを参照してください。OpenGL の仕様と同様，position の第 4 成分 position.w が 0 の場合は平行光源となり，(x,y,z) 方向の無限遠にライトがあることになり，position.w が 1 の場合は (x,y,z) の位置に点光源がおかれます。

8.8 マテリアル

マテリアルは材質を指定するためのアイテムです。マテリアルのクラスは GRMaterial です。通常，マテリアルは次節で説明するメッシュの子描画アイテムとなります。ファイルからメッシュをロードする場合は，メッシュの作成と同時にマテリアルも自動的に作成され，メッシュの子として追加されます。GRMaterial のディスクリプタは以下の通りです。

GRMaterialDesc

Vec4f	ambient	環境色
Vec4f	diffuse	拡散色
Vec4f	specular	鏡面色
Vec4f	emissive	自己発光
float	power	鏡面係数
UTString	texname	テクスチャファイル名

レンダラにマテリアルを設定すると，次に別のマテリアルを設定するまでの間の形状描画にそのマテリアルの描画属性が適用されます。マテリアルを設定するにはいくつかの方法があります。一つ目は GRMaterialIf の Render 関数を呼ぶ方法です：これに加え，以下に示す GRRender の関数のいずれかを用いることもできます。

GRRenderIf

void	SetMaterial(const GRMaterialDesc&)	描画マテリアルの設定
void	SetMaterial(const GRMaterialIf*)	描画マテリアルの設定
void	SetMaterial(int)	描画マテリアルの設定

以下の例はマテリアルを設定する 3 通りの方法を示しています。どの方法を用いても結果は変わりません。

```
// given GRRenderIf* render, GRSceneIf* scene
GRMaterialDesc md;
md.diffuse = Vec4f(1.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);
// 1.
render->SetMaterial(md);
// 2.
GRMaterialIf* mat = scene->CreateVisual(md)->Cast();
mat->Render(render);
// 3.
render->SetMaterial(mat);
```

毎回マテリアルを作成するのは煩わしいことがあります。そのような場合はレンダラの予約色を指定することも可能です。

```
// 4.
render->SetMaterial(GRRenderBaseIf::RED);
```

使用可能な予約色は X11 web color にもとづいています。詳しくは `SprGRRender.h` ヘッダファイルを

`GRRenderBaseIf` が持つ予約色 (全 24 色, Table 8.1 参照) です。

8.9 メッシュ

メッシュは多面体形状を表現するための描画アイテムです。メッシュのクラスは `GRMesh` です。メッシュを作成する方法には

- ディスクリプタを用いて手動で作成する
- `FileIO` モジュールを利用してファイルからメッシュをロードする

の二通りがあります。後者の方法では、モデリングソフトで作成し、Direct3D の X 形式などで出力したファイルから形状をロードすることができます。詳しくは 9 章を参照してください。また、メッシュのみをロードする簡易機能として `FWObjectIf::LoadMesh` が用意されています。

以下では前者の手動構築の方法について説明します。メッシュのディスクリプタは次の通りです。

GRMeshDesc

vector<Vec3f>	vertices	頂点
vector<GRMeshFace>	faces	面
vector<Vec3f>	normals	法線
vector<GRMeshFace>	faceNormals	面法線
vector<Vec4f>	colors	色
vector<Vec2f>	texCoords	テクスチャ座標
vector<int>	materialList	マテリアルリスト

vector は C++ の可変長配列コンテナです。vertices は頂点座標を格納した配列です。ただし頂点座標を設定しただけでは形状は定義されません。メッシュは面の集合ですので、faces を設定する必要があります。GRMeshFace の定義は以下の通りです。

GRMeshFace

int	nVertices	頂点数
int	indices[4]	頂点インデックス

nVertices は 1 つの面を構成する頂点数で、3 か 4 を設定します。indices には nVertices 個の頂点インデックスを設定します。このとき

$$\text{vertices}[\text{faces}[i].\text{indices}[j]]$$

が i 番目の面の j 番目の頂点座標となります。

GRMeshDesc のメンバ変数の中で vertices と faces は必須ですが、その他のメンバは必ずしも設定する必要はありません。normals は各頂点の法線の向きを格納する配列です。normals[i] が vertices[i] の法線を与えます。normals を省略した場合、法線は自動生成されます。このとき、各頂点の法線はその頂点を共有する面の法線の平均で与えられます。

normals に加えて faceNormals を設定した場合、異なる方法で法線が与えられます。このとき

$$\text{normals}[\text{faceNormals}[i].\text{indices}[j]]$$

が i 番目の面の j 番目の頂点に対応する法線となります。

colors は頂点色です。colors[i] が i 番目の頂点の色を与えます。

texCoords は頂点ごとのテクスチャ UV 座標を与えます。テクスチャを描画するには、メッシュに割り当てるマテリアルにテクスチャファイル名が設定されている必要があります。

`materialList` は面ごとに異なるマテリアルを割り当てるために用います。`materialList[i]` が i 番目の面のマテリアル番号を与えます。ただし、番号に対応するマテリアルは別途メッシュに割り当てておく必要があります。

メッシュへのマテリアルの割当て

ファイルからメッシュをロードする場合、もしファイル中にマテリアル情報が含まれていればそれをもとに自動的にマテリアルがメッシュへ割り当てられます。

手動でメッシュに割り当てるには、`AddChildObject` を使います。以下に例を示します。

```
// given GRSceneIf* scene, GRFrameIf* frame
GRMeshDesc meshDesc;
// ... setup discriptor here ...

// create mesh and attach it to frame
GRMeshIf* mesh = scene->CreateVisual(meshDesc, frame)->Cast();

GRMaterialDesc matDesc0, matDesc1;
// ... setup materials here ...
GRMaterialIf* mat0 = scene->CreateVisual(matDesc0, frame)->Cast();
GRMaterialIf* mat1 = scene->CreateVisual(matDesc1, frame)->Cast();

// attach materials to mesh
mesh->AddChildObject(mat0);    //< material no.0
mesh->AddChildObject(mat1);    //< material no.1
```

最初に割り当てられたマテリアルを 0 番として昇順でマテリアル番号が決まります。前述のマテリアルリストを用いる場合はこのマテリアル番号を面毎に指定してください。

8.10 レンダラ

レンダラの機能を項目別に説明します。レンダラは提供するプリミティブな描画機能は非常に多岐に渡りますが、これらのほとんどの関数は特別な描画処理を必要としない限りユーザが直接呼び出すことはありません。個々の関数を詳しく説明していくと膨大な量になりますので、ここでは一覧程度にとどめます。詳細な仕様はソースコードのコメントを

参照してください。

基本機能

描画時のお決まりの処理です。8.3 節を参照してください。

GRRenderIf

void	GetClearColor(Vec4f&)	背景色の取得
void	SetClearColor(const Vec4f&)	背景色の設定
void	ClearBuffer()	描画バッファをクリア
void	BeginScene()	描画の開始
void	EndScene()	描画の完了
void	SwapBuffers()	描画バッファのスワップ

ディスプレイリスト

ディスプレイリストに関する機能です。GRMesh が内部で使用します。

GRRenderIf

int	StartList()	ディスプレイリスト作成開始
void	EndList()	ディスプレイリスト作成完了
void	DrawList(int)	ディスプレイリストの描画
void	ReleaseList(int)	ディスプレイリストの解放

デプステスト，アルファブレンディング，ライティング

描画機能を切り替えるための関数です。

GRRenderIf

void	SetDepthWrite(bool)	デプスバッファへの書き込み On/Off
void	SetDepthTest(bool)	デプステストの On/Off
void	SetDepthFunc(TDepthFunc)	デプスバッファの判定条件
void	SetAlphaTest(bool)	アルファブレンディングの On/Off
void	SetAlphaMode(TBlendFunc, TBlendFunc)	アルファブレンディングのモード
void	SetLighting(bool)	ライティングの On/Off

テクスチャ

GRRenderIf

int	LoadTexture(UTString)	テクスチャのロード
void	SetTextureImage(UTString, int, int, int, int, char*)	テクスチャの設定

シェーダ

GRRenderIf

void	InitShader()	シェーダの初期化
void	SetShaderFormat(ShaderType)	シェーダフォーマットの設定
bool	CreateShader(UTString, UTString, GRHandler&)	シェーダオブジェクトの作成
GRHandler	CreateShader()	シェーダオブジェクトの作成
bool	ReadShaderSource(GRHandler, UTString)	シェーダプログラムをロード
void	GetShaderLocation(GRHandler, void*)	ロケーション情報の取得

直接描画

GRRenderIf

void	SetVertexFormat(const GRVertexElement*)	頂点フォーマットの指定
void	SetVertexShader(void*)	頂点シェーダーの指定
void	DrawDirect(TPrimitiveType, void*, size_t, size_t)	頂点を指定してプリミティブを描画
void	DrawIndexed(TPrimitiveType, size_t*, void*, size_t, size_t)	頂点とインデックスを指定してプリミティブを描画
void	DrawArrays(TPrimitiveType, GRVertexArray*, size_t)	頂点の成分ごとの配列を指定して, プリミティブを描画
void	DrawArrays(TPrimitiveType, size_t*, GRVertexArray*, size_t)	インデックスと頂点の成分ごとの配列を指定して, プリミティブを描画

基本形状描画

GRenderIf

void	DrawLine(Vec3f, Vec3f)	線分を描画
void	DrawArrow(Vec3f, Vec3f, float, float, float, int, bool)	矢印を描画
void	DrawBox(float, float, float, bool)	直方体を描画
void	DrawSphere(float, int, int, bool)	球体を描画
void	DrawCone(float, float, int, bool)	円錐の描画
void	DrawCylinder(float, float, int, bool)	円筒の描画
void	DrawCapsule(float, float, int, bool)	カプセルの描画
void	DrawRoundCone(float, float, float, int, bool)	球円錐の描画
void	DrawGrid(float, int, float)	グリッドを描画
void	SetFont(const GRFont&)	フォントの設定
void	DrawFont(Vec2f, UTString)	2次元テキストの描画
void	DrawFont(Vec3f, UTString)	3次元テキストの描画
void	SetLineWidth(float)	線の太さの設定

カメラ

GRenderIf

void	SetCamera(const GRCameraDesc&)	カメラの設定
const GRCameraDesc&	GetCamera()	カメラの取得

ライト

GRenderIf

void	PushLight(const GRLightDesc&)	ライトをプッシュ
void	PushLight(const GRLightIf*)	ライトをプッシュ
void	PopLight()	ライトをポップ
int	NLights()	ライトの数

座標変換

GRRenderIf

void	Reshape(Vec2f, Vec2f)	ウィンドウサイズの変更
void	SetViewport(Vec2f, Vec2f)	ビューポートの設定
Vec2f	GetViewportPos()	ビューポート原点の取得
Vec2f	GetViewportSize()	ビューポートサイズの取得
Vec2f	GetPixelSize()	1 ピクセルの物理サイズを取得
Vec3f	ScreenToCamera(int, int, float, bool)	スクリーン座標からカメラ座標への変換
void	EnterScreenCoordinate()	スクリーン座標系へ切り替える
void	LeaveScreenCoordinate()	スクリーン座標系から戻る

GRRenderIf

void	SetViewMatrix(const Affinef&)	視点行列の設定
void	GetViewMatrix(Affinef&)	視点行列の取得
void	SetProjectionMatrix(const Affinef&)	投影行列の設定
void	GetProjectionMatrix(Affinef&)	投影行列の取得
void	SetModelMatrix(const Affinef&)	モデル行列の設定
void	GetModelMatrix(Affinef&)	モデル行列の取得
void	MultModelMatrix(const Affinef&)	モデル行列に変換をかける
void	PushModelMatrix()	モデル行列をプッシュ
void	PopModelMatrix()	モデル行列をポップ
void	ClearBlendMatrix()	ブレンド変換行列のクリア
bool	SetBlendMatrix(const Affinef&, int)	ブレンド変換行列の設定

Table 8.1 Reserved colors

INDIANRED		(205 92 92)	AQUA		(0 255 255)
LIGHTCORAL		(240 128 128)	CYAN		(0 255 255)
SALMON		(250 128 114)	LIGHTCYAN		(224 255 255)
DARKSALMON		(233 150 122)	PALETURQUOISE		(175 238 238)
LIGHTSALMON		(255 160 122)	AQUAMARINE		(127 255 212)
RED		(255 0 0)	TURQUOISE		(64 224 208)
CRIMSON		(220 20 60)	MEDIUMTURQUOISE		(72 209 204)
FIREBRICK		(178 34 34)	DARKTURQUOISE		(0 206 209)
DARKRED		(139 0 0)	CADETBLUE		(95 158 160)
PINK		(255 192 203)	STEELBLUE		(70 130 180)
LIGHTPINK		(255 182 193)	LIGHTSTEELBLUE		(176 196 222)
HOTPINK		(255 105 180)	POWDERBLUE		(176 224 230)
DEEPPINK		(255 20 147)	LIGHTBLUE		(173 216 230)
MEDIUMVIOLETRED		(255 21 133)	SKYBLUE		(135 206 235)
PALEVIOLETRED		(255 112 147)	LIGHTSKYBLUE		(135 206 250)
CORAL		(255 127 80)	DEEPSKYBLUE		(0 191 255)
TOMATO		(255 99 71)	DODGERBLUE		(30 144 237)
ORANGERED		(255 69 0)	CORNFLOWERBLUE		(65 105 225)
DARKORANGE		(255 140 0)	ROYALBLUE		(65 105 225)
ORANGE		(255 165 0)	BLUE		(0 0 255)
GOLD		(255 215 0)	MEDIUMBLUE		(0 0 205)
YELLOW		(255 255 0)	DARKBLUE		(0 0 139)
LIGHTYELLOW		(255 255 224)	NAVY		(0 0 128)
LEMONCHIFFON		(255 250 205)	MIDNIGHTBLUE		(25 25 112)
LIGHTGOLDENRODYELLOW		(250 250 210)	CORNSILK		(255 248 220)
PAPAYAWHIP		(255 239 213)	BLANCHEDALMOND		(255 235 205)
MOCCASIN		(255 228 181)	BISQUE		(255 228 196)
PEACHPUFF		(255 218 185)	NAVAJOWHITE		(255 222 173)
PALEGOLDENROD		(238 232 170)	WHEAT		(245 222 179)
KHAKI		(240 230 140)	BURLYWOOD		(222 184 135)
DARKKHAKI		(189 183 107)	TAN		(210 180 140)
LAVENDAR		(230 230 250)	ROSYBROWN		(188 143 143)
THISTLE		(216 191 216)	SANDYBROWN		(244 164 96)
PLUM		(221 160 221)	GOLDENROD		(218 165 32)
VIOLET		(238 130 238)	DARKGOLDENROD		(184 134 11)
ORCHILD		(218 112 214)	PERU		(205 133 63)
FUCHSIA		(255 0 255)	CHOCOLATE		(210 105 30)
MAGENTA		(255 0 255)	SADDLEBROWN		(139 69 19)
MEDIUMORCHILD		(186 85 211)	SIENNA		(160 82 45)
MEDIUMPURPLE		(147 112 219)	BROWN		(154 42 42)
BLUEVIOLET		(138 43 226)	MAROON		(128 0 0)
DARKVIOLET		(148 0 211)	WHITE		(255 255 255)
DARKORCHILD		(153 50 204)	SNOW		(255 250 250)
DARKMAGENTA		(139 0 139)	HONEYDEW		(240 255 240)
PURPLE		(128 0 128)	MINTCREAM		(245 255 250)
INDIGO		(75 0 130)	AZURE		(240 255 255)
DARKSLATEBLUE		(72 61 139)	ALICEBLUE		(240 248 255)
SLATEBLUE		(106 90 205)	GHOSTWHITE		(248 248 255)
MEDIUMSLATEBLUE		(123 104 238)	WHITESMOKE		(245 245 245)
GREENYELLOW		(173 255 47)	SEASHELL		(255 245 238)
CHARTREUSE		(127 255 0)	BEIGE		(245 245 220)
LAWNGREEN		(124 252 0)	OLDLACE		(253 245 230)
LIME		(0 255 0)	FLORALWHITE		(255 250 240)
LIMEGREEN		(50 205 50)	IVORY		(255 255 240)
PALEGREEN		(152 251 152)	ANTIQUWHITE		(250 235 215)
LIGHTGREEN		(144 238 144)	LINEN		(250 240 230)
MEDIUMSPRINGGREEN		(0 250 154)	LAVENDERBLUSH		(255 240 245)
SPRINGGREEN		(0 255 127)	MISTYROSE		(255 228 225)
MEDIUMSEAGREEN		(60 179 113)	GAINSBORO		(220 220 220)
SEAGREEN		(46 139 87)	LIGHTGRAY		(211 211 211)
FORESTGREEN		(34 139 34)	SILVER		(192 192 192)
GREEN		(0 128 0)	DARKGRAY		(169 169 169)
DARKGREEN		(0 100 0)	GRAY		(128 128 128)
YELLOWGREEN		(154 205 50)	DIMGRAY		(105 105 105)
OLIVEDRAB		(107 142 35)	LIGHTSLATEGRAY		(119 136 153)
OLIVE		(128 128 0)	SLATEGRAY		(112 128 144)
DARKOLIVEGREEN		(85 107 47)	DARKSLATEGRAY		(47 79 79)
MEDIUMAQUAMARINE		(102 205 170)	BLACK		(0 0 0)
DARKSEAGREEN		(143 188 143)			
LIGHTSEAGREEN		(32 178 170)			
DARKCYAN		(0 139 139)			
TEAL		(0 128 128)			

第 9 章

FileIO

9.1 概要

FileIO はファイル入出力機能を提供するモジュールです。Framework から利用するのが簡単ですが、単体で用いるとより細かな作業ができます。

9.2 FileIO SDK

FileIO モジュールのすべてのオブジェクトは SDK クラス FISdk によって管理されます。FISdk クラスは、プログラムの実行を通してただ 1 つのオブジェクトが存在するシングルトンクラスです。FISdk オブジェクトを作成するには以下のようにします。

```
FISdkIf* fiSdk = FISdkIf::CreateSdk();
```

通常この操作はプログラムの初期化時に一度だけ実行します。また、Framework モジュールを使用する場合はユーザが直接 FISdk を作成する必要はありません。

FISdk には以下の 2 つの機能があります。

- ファイルオブジェクトの作成
- インポートオブジェクトの作成

ファイルオブジェクトは、ファイルからのシーンのロードおよびセーブを担います。ファイルの基底クラスは FIFile で、ファイルフォーマットの種類ごとに専用のファイルクラスが派生します (Fig??)。

ファイル作成に関する FISdk の関数を以下に示します。


```

        radius = 0.5    # radius に 0.5 を代入
    }
    CDBox bigBox{
        boxsize = 2.0 1.1 0.9
    }
}

```

Spr ファイルのノードはディスクリプタ (第??節) を参照) に 1 対 1 で対応します。ディスクリプタさえ用意すれば自動的に使えるノードの型が増えます。ファイルで値を代入しないと、ディスクリプタの初期値になります。上の例では、PHSdk に追加される sphere(CDSphere 型) は、

```

CDSphereDesc desc;
desc.material.mu = 0.2;
desc.radius = 0.5;

```

としたディスクリプタ desc で作るのと同じことになります。

Spr ファイルの文法を BNF + 正規表現で書くと

```

spr    = node*
node  = node type, (node id)?, block
block = '{' (node|refer|data)* '}'
refer = '*' node id
data  = field id, '=', (block | right)
right = '[' value*, ']' | value
value = bool | int | real | str | right

```

となります。right 以降の解釈は field の型に依存します。

9.3.2 X ファイル

「X ファイル」は、Direct3D のファイルフォーマットで、拡張子は .x です。モデリングソフト XSI で使われており、多くのモデリングツールで出力できます。3D の形状データ、マテリアル、テクスチャ、ボーンなどを含めることができます。Springhead2 では、標準的な X ファイルのロードと、Springhead2 独自のノードのロードとセーブができます。ただし独自ノードを手書きする場合は Spr ファイルの方が書きやすく便利ですのでそちらの使用をおすすめします。

X ファイルの例を示します。

```
xof 0302txt 0064          #最初の行はこれから始まる

#   ノードは ,
#       型名 , ノード名 { フィールドの繰り返し   子ノード }
#   からなる .
PHScene scene1{
    0.01;0;;              #フィールド は 値; の繰り返し
    1;0;-9.8;0;;         #値は 数値, 文字列またはフィールド
    PHSolid soFloor{     #子ノードは , ノードと同じ
        (省略)
    }
}
# コメントは #以外に // も使える
```

独自ノードの定義

Springhead2 の通常のノードは、オブジェクトのディスクリプタ(??節)に1対1で対応します。ロード時には、ディスクリプタに対応するオブジェクトが生成され、シーングラフに追加されます。セーブ時には、オブジェクトからディスクリプタを読み出し、ノードの形式でファイルに保存されます。

オブジェクトのディスクリプタには、必ず対応するノードがあります。例えば、SprPHScene.h には、

```
struct PHSceneState{
    double timeStep;      ///< 積分ステップ
    unsigned count;      ///< 積分した回数
};
struct PHSceneDesc:PHSceneState{
    /// 接触・拘束解決エンジンの種類
    enum ContactMode{ MODE_NONE, MODE_PENALTY, MODE_LCP};
    Vec3f gravity;       ///< 重力加速度ベクトル . デフォルト値は
(0.0f, -9.8f,0.0f) .
};
```

のように、ステートとディスクリプタが宣言されています。この PHSceneDesc に対応する X ファイルのノードは、

```
PHScene scene1{
    0;;          #PHSceneState::count      最後の; は PHSceneState 部の終わりを
    示す .
    1;          #PHSceneDesc::ContactMode
    0;-9.8;0;; #PHSceneDesc::gravity      最後の; は PHSceneDesc 部の終わりを示
    す .
}
```

のようになります。クラスのメンバ変数がそのままフィールドになります。また、基本クラスは、先頭にフィールドが追加された形になります。

通常ノードの一覧は [TBU: デスクリプター一覧のページ](#) を参照下さい。

X ファイルのノード

Springhead2 の独自ノードだけでなく、普通の X ファイルのノードもロードできます。X ファイルには、

```
Frame{
    FrameTransfromMatrix{ 1,0,0,0, 0,1,0,0, 0,0,1,0, 0,0,0,1; }
}
```

のようなフレームのノード型がありますが、Springhead2 には対応するディスクリプタやオブジェクトがありません。そこで、これらは、GRFrame や PHFrame に変換されてロードされます。TBW ノード一覧のページ ([pageNodeDefList](#)) を参照下さい。

9.4 ファイルのロード・セーブ

Fig 9.2 は、ファイルのロード・セーブの手順を示しています。ロード時にはまずファイルをパースしてディスクリプタのツリーを作ります。次にディスクリプタのツリーをたどりながら、オブジェクトのツリーを作ります。一方、セーブ時には、ディスクリプタツリーは作りません。オブジェクトツリーをたどりながらオブジェクトからディスクリプタを作り、その場でファイルに書きだしていきます。

ファイルのノードとディスクリプタツリーのノードは 1 対 1 に対応しますが、オブジェクトのツリーではそうとは限りません。

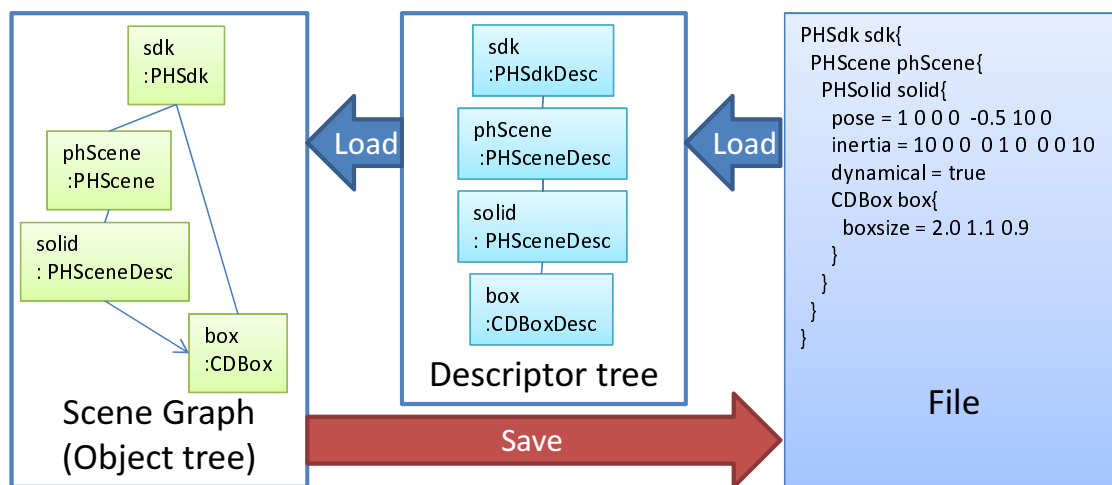


Fig. 9.2 Overview of file operation

9.4.1 ファイルロードの仕組み

ファイルのパーズ

ファイルのロードは、FIFileSpr や FIFileX のような FIFile の派生クラスの LoadImp() メソッドが行います。ファイルパーズの実装は、boost::spirit を用いて実装されています。Init() メソッドでパーサの文法を定義しています。

ディスクリプタの生成

パーサは FIFileLoadContext をコンテキストとして使いながらパーズを進めます。fieldIts にロード中のデータの型情報をセットしていきます。ノード名やメンバ名からディスクリプタやメンバの型を知る必要がありますが、ビルド時に SWIG で生成しているディスクリプタの型情報を PHSdk::RegisterSdk() が登録したものを using しています。新しいノードが出てくる度に FIFileLoadContext::datas にディスクリプタを用意し、データをロードするとそこに値をセットしていきます。他のノードへの参照は、この時点ではノード名の文字列で記録しておきます。

参照のリンク

ファイルをすべてロードし終わると、LoadImp() から抜けて、FIFile::Load(FIFileLoadContext*) に戻ってきます。他のノード (他のディスクリプタ) への参照をノード名の文字列を頼りにポインタでつないでいきます。

オブジェクトの生成

オブジェクト生成は、`FILoadContext::CreateScene()` が、ディスクリプタツリーを根本からたどりながら順に行います。ディスクリプタからオブジェクトを生成するのは、そのオブジェクトの先祖オブジェクトです。先祖オブジェクトが生成できない場合は SDK の生成を試みます。SDK 以外が一番根本にあるファイルをロードするためには、予め先祖オブジェクトを用意しておく必要があります。`FIFile::Load(ObjectIfs& objs, const char* fn)` の `objs` 引数はその役割をします。

生成されたオブジェクトは、親の `AddChildObject()` ですぐに子として追加されます。

参照のリンク

ディスクリプタ間の参照はポインタになっていますが、シーングラフは繋がっていません。ディスクリプタの参照に従って、ディスクリプタから生成されたオブジェクト間に参照を追加します。リンクは、`AddChildObject()` 関数を呼び出すことで行われます。親子と参照の区別はつかなくなります。あるノードの下に子ノードを書いても、別のところに書いたノードへの参照を書いても同じシーングラフになるわけです。

9.4.2 ファイルロードの実際

Framework を使うのと簡単です。

```
virtual void FWMyApp::Init(int argc, char* argv[]){
    UTRef<ImportIf> import = GetSdk()->GetFISdk()->CreateImport();
    GetSdk()->LoadScene(fileName, import); // ファイルのロード
    GetSdk()->SaveScene("save.spr", import); // ファイルのセーブテスト
```

FISdk 単体で使う場合は次のようになります。

```
int main(){
    // ファイルローダで生成できるように、各 SDK の型情報を登録
    PHSdkIf::RegisterSdk();
    GRSdkIf::RegisterSdk();
    FWSdkIf::RegisterSdk();
    // ファイルのロード
    UTRef<FISdkIf> fiSdk = FISdkIf::CreateSdk();
    FIFileIf* file = fiSdk->CreateFileFromExt(".spr");
    ObjectIfs objs; // ロード用オブジェクトスタック
```

```

fwSdk = FWSdkIf::CreateSdk(); // FWSDK を用意
// 子オブジェクト作成用に fwSdk をスタックに積む
objs.push_back(fwSdk);
// FWSDK 以下全体をファイルからロード
if (! file->Load(objs, "test.spr") ) {
    DSTR << "Error: Cannot open load file. " << std::endl;
    exit(-1);
}
// ファイル中のルートノード (複数の可能性あり) が objs に積まれる。
for(unsigned i=0; i<objs.size(); ++i){
    objs[i]->Print(DSTR);
}
...

```

9.4.3 ファイルセーブの仕組み

ファイルセーブは、FiFile がシーングラフをたどりながら、オブジェクトをセーブしていきます。各オブジェクトの GetDescAddress() か、実装されていなければ GetDesc() を呼び出してディスクリプタを読み出します。シーングラフには、あるノードが複数のノードの子ノードになっている場合があるため、2重にセーブしないように2度目以降は参照としてセーブします。

ディスクリプタを取り出したら、ディスクリプタの型情報を利用して、ディスクリプタのメンバを順番にセーブしていきます。実際にデータをファイルに保存するコードは、FiFileSpr など FiFile の派生クラスにあります。

9.4.4 ファイルセーブの実際

Framework を使うのと簡単です。

```

virtual void FWMyApp::Save(const char* filename){
    UTRef<ImportIf> import = GetSdk()->GetFISdk()->CreateImport();
    GetSdk()->SaveScene(filename, import); // filename にシーンをセーブ
}

```

FISdk 単体で使う場合は次のようになります。


```
void save(const char* filename, ImportIf* ex, ObjectIf* rootNode){
    // ファイルのセーブ
    UTRef<FISdkIf> fiSdk = FISdkIf::CreateSdk();
    FIFileIf* file = fiSdk->CreateFileFromExt(".spr");
    ObjectIfs objs; // ロード用オブジェクトスタック
    objs.push_back(rootNode);
    file->SetImport(ex);
    file->Save(*objs, filename);
}
```

9.5 インポート情報の管理

T.B.W. (Import を使うと別のファイルに書いたノードを呼び出すことができる。Import を使ってロードしたシーンをセーブ場合、ファイル保存時にどこまでをファイルに保存するのかが問題になる。これを管理するのが Import の役割だと思う。by 長谷川)

第 10 章

HumanInterface

10.1 概要

HumanInterface モジュールは、ハードウェアや入力デバイスを利用するための処理系に依存しないインタフェースを提供します。

ほとんどの場合、HumanInterface の機能は Framework モジュールを介してアクセスすることになります。この場合は、後述するヒューマンインタフェースオブジェクトやデバイスの作成をユーザ自身で行う必要はありません。

10.2 HumanInterface SDK

HumanInterface モジュールのすべてのオブジェクトは SDK クラス HISdk によって管理されます。HISdk クラスは、プログラムの実行を通してただ 1 つのオブジェクトが存在するシングルトンクラスです。HISdk オブジェクトを作成するには以下のようにします。

```
HISdkIf* hiSdk = HISdkIf::CreateSdk();
```

通常この操作はプログラムの初期化時に一度だけ実行します。また、Framework モジュールを使用する場合はユーザが直接 HISdk を作成する必要はありません。

10.3 クラス階層とデータ構造

HumanInterface モジュールのクラス階層を Fig. 10.1 に示します。

デバイスには実デバイスと仮想デバイスがあります。実デバイスは現実のハードウェアに対応し、例えば Win32 マウスやあるメーカーの A/D 変換ボードを表す実デバイスがあ

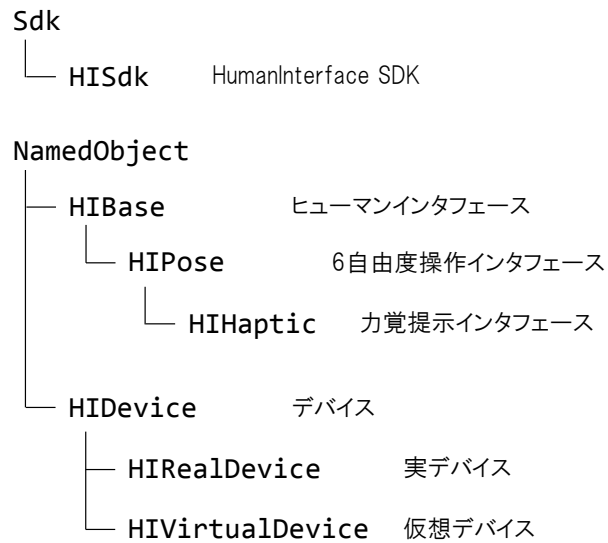


Fig. 10.1 HumanInterface class hierarchy



Fig. 10.2 HumanInterface module data structure

ります。一方、仮想デバイスは実デバイスが提供する機能単位を表し、処理系に依存しません。例えば、1つの A/D 変換ポートや抽象化されたマウスインタフェースがこれにあたります。基本的に、初期化時を除いてはユーザは実デバイスに触れることはなく、仮想デバイスを通じてそれらの機能を利用することになります。

ヒューマンインタフェースはデバイスよりも高度で抽象化された操作インタフェースを提供します。

次に HumanInterface モジュールのデータ構造を Fig. 10.2 に示します。HISdk オブ

ジェクトはヒューマンインタフェースプールとデバイスプールを持っています。デバイスプールとは実デバイスの集まりで、それぞれの実デバイスはその機能をいくつかの仮想デバイスとして外部に提供します。

デバイスの機能を使うには、

1. 実デバイスを作成する
2. 実デバイスが提供する仮想デバイスにアクセスする

という2段階の手順を踏みます。以下にそれに関する HISdk の関数を紹介します。

HISdkIf

```

HIRealDeviceIf*   AddRealDevice(const IfInfo* ii, const void*
                        desc = NULL)
HIRealDeviceIf*   FindRealDevice(const char* name)
HIRealDeviceIf*   FindRealDevice(const IfInfo* ii)

```

AddRealDevice は型情報 ii とディスクリプタ desc を指定して実デバイスを作成します。FindRealDevice は名前か型情報を指定して、既存の実デバイスを検索します。たとえば、内部で GLUT を用いるキーボード・マウス実デバイスを取得するには

```

hiSdk->FindRealDevice(DRKeyMouseGLUTIf::GetIfInfoStatic());

```

とします。

仮想デバイスを取得および返却する方法には HISdk を介する方法と HIRealDevice を直接呼び出す方法の2通りがあります。

HISdkIf

```

HIVirtualDeviceIf* RentVirtualDevice(const IfInfo* ii, const
                        char* name, int portNo)
bool                ReturnVirtualDevice(HIVirtualDeviceIf* dev)

```

RentVirtualDevice はデバイスプールをスキャンして型情報に合致した最初の仮想デバイスを返します。実デバイスを限定したい場合は name で実デバイス名を指定します。また、複数の仮想デバイスを提供する実デバイスもあります。この場合はポート番号 portNo で取得したい仮想デバイスを指定できます。デバイスの競合を防ぐために、一度取得された仮想デバイスは利用中状態になります。利用中のデバイスは新たに取得することはできません。使い終わったデバイスは ReturnVirtualDevice で返却することに

よって再び取得可能になります。

```
HIRealDeviceIf
```

```
HIVirtualDeviceIf* Rent(const IfInfo* ii, const char* name, int
                        portNo)
bool Return(HIVirtualDeviceIf* dev)
```

こちらは実デバイスから直接取得，返却するための関数です．機能は同様です．

10.4 実デバイス

Springhead ではいくつかのメーカー製のハードウェアが実デバイスとしてサポートされていますが，処理系に強く依存する部分であるため本ドキュメントの対象外とします．興味のある方はソースコードを見てください．

10.5 キーボード・マウス

キーボードおよびマウスの機能は包括して 1 つのクラスとして提供されています．キーボード・マウスの仮想デバイスは DVKeyMouse です．実デバイスとしては Win32 API を用いる DRKeyMouseWin32 と GLUT を用いる DRKeyMouseGLUT があります．提供される機能に多少の差異があるので注意して下さい．

仮想キーコード

Ascii 外の特特殊キーには処理系依存のキーコードが割り当てられています．この差を吸収するために以下のシンボルが DVKeyCode 列挙型で定義されています．

DVKeyCode

ESC	エスケープ
F1 - F12	ファンクションキー
LEFT	
UP	
RIGHT	
DOWN	
PAGE_UP	Page Up
PAGE_DOWN	Page Down
HOME	Home
END	End
INSERT	Insert

必要に応じてシンボルが追加される可能性がありますので、完全なリストはヘッダファイルで確認してください。

コールバック

DVKeyMouse からのイベントを処理するには DVKeyMouseCallback クラスを継承し、イベントハンドラをオーバーライドします。DVKeyMouseCallback はいくつかのヒューマンインタフェースクラスが継承しているほか、後述するアプリケーションクラス FWApp も継承しています。

DVKeyMouseCallback

```
virtual bool    OnMouse(int button, int state, int x, int y)
```

マウスボタンプッシュ/リリース

```
virtual bool    OnDoubleClick(int button, int x, int y)
```

ダブルクリック

```
virtual bool    OnMouseMove(int button, int x, int y, int zdelta)
```

マウスカーソル移動/マウスホイール回転

```
virtual bool    OnKey(int state, int key, int x, int y)
```

キープッシュ/リリース

OnMouse はマウスボタンのプッシュあるいはリリースが生じたときに呼び出されます。button はイベントに関係するマウスボタンおよびいくつかの特殊キーの識別子を保持し、その値は DVButtonMask 列挙子の値の OR 結合で表現されます。state はマウスボタン状態変化を示し、DVButtonSt 列挙子のいずれかの値を持ちます。x, y はイベント生成時のカーソル座標を表します。例として、左ボタンのプッシュイベントを処理するには次のようにします。

```
// inside your class definition ...
virtual bool OnMouse(int button, int state, int x, int y){
    if(button & DVButtonMask::LBUTTON && state == DVButtonSt::DOWN){
        // do something here
    }
}
```

OnDoubleClick はマウスボタンのダブルクリックが生じたときに呼ばれます。引数の定義は OnMouse と同様です。

OnMouseMove はマウスカーソルが移動するか、マウスホイールが回転した際に呼ばれます。button は直前のマウスプッシュイベントにおいて OnMouse に渡されたのと同じ値を持ちます。x, y は移動後のカーソル座標、zdelta はマウスカーソルの回転量です。

OnKey はキーボードのキーがプッシュされるかリリースされた際に呼ばれます。state は DVKeySt 列挙子の値を持ちます。key はプッシュあるいはリリースされたキーの仮想キーコードを保持します。

以下に関連する列挙子の定義を示します。

DVButtonMask

LBUTTON	左ボタン
RBUTTON	右ボタン
MBUTTON	中ボタン
SHIFT	Shift キー押し下げ
CONTROL	Ctrl キー押し下げ
ALT	Alt キー押し下げ

DVButtonSt

DOWN	ボタンプッシュ
UP	ボタンリリース

DVKeySt

PRESSED	押されている
TOGGLE_ON	トグルされている

API として提供される機能

以下に DVKeyMouse の関数を示します。

DVKeyMouseIf

```
void    AddCallback(DVKeyMouseCallback*)
void    RemoveCallback(DVKeyMouseCallback*)
int     GetKeyState(int key)
void    GetMousePosition(int& x, int& y, int& time, int count=0)
```

AddCallback はコールバッククラスを登録します。一つの仮想デバイスに対して複数個のコールバックを登録できます。RemoveCallback は登録済のコールバッククラスを解除します。

GetKeyState は DVKeyCode で指定したキーの状態を DVKeySt の値で返します。

GetMousePosition は count ステップ前のマウスカーソルの位置を取得するのに用います。ただし count は 0 以上 63 以下でなければなりません。x, y にカーソル座標が、time にタイムスタンプが格納されます。

サポート状況に関する注意

使用する実デバイスによっては一部の機能が提供されないので注意して下さい。

OnMouseMove においてマウスホイールの回転量を取得するには、実デバイスとして DRKeyMouseWin32 を使用するか、freelut とリンクしてビルドした Springhead 上で DRKeyMouseGLUT を使用する必要があります。

OnKey においてキーのトグル状態を取得するには実デバイスとして DRKeyMouseWin32 を使用する必要があります。

GetKeyState は DRKeyMouseWin32 でのみサポートされます。

GetMousePosition において、タイムスタンプを取得するには DRKeyMouseWin32 を用いる必要があります。

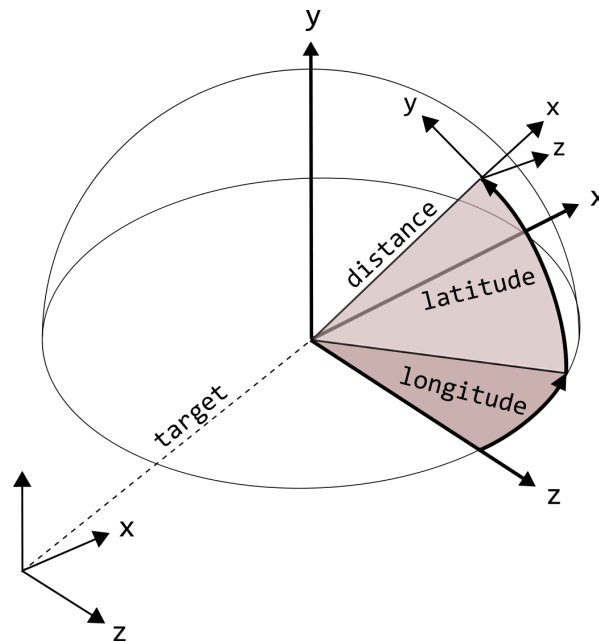


Fig. 10.3 Trackball

10.6 ジョイスティック

ジョイスティックの仮想デバイスは DVJoyStick です。実デバイスとしては GLUT を用いる DRJoyStickGLUT のみがあります。

T.B.D.

10.7 トラックボール

トラックボールはキーボード・マウスにより並進・回転の 6 自由度を入力するヒューマンインタフェースです。トラックボールを使うことにより、カメラを注視点まわりに視点変更することができるようになります。

トラックボールを操作する方法には、API を直接呼び出す方法と、仮想マウスにコールバック登録する方法の二通りがあります。同様に、トラックボールの状態を取得する方法にも API 呼び出しとコールバック登録の二通りがあります。仮想マウスとトラックボールおよびユーザプログラムの関係を Fig. 10.3 に示します。

回転中心と回転角度

カメラの位置と向きは、注視点、経度角、緯度角および注視点からの距離によって決まります。

HITrackballDesc

Vec3f	target	回転中心
float	longitude	経度 [rad]
float	latitude	緯度 [rad]
float	distance	距離

HITrackballIf

Vec3f	GetTarget()
void	SetTarget(Vec3f)
void	GetAngle(float& lon, float& lat)
void	SetAngle(float lon, float lat)
float	GetDistance()
void	SetDistance(float dist)

範囲指定

以下の機能で角度および距離に範囲制限を加えられます。

HITrackballDesc

Vec2f	lonRange	経度範囲
Vec2f	latRange	緯度範囲
Vec2f	distRange	距離範囲

HITrackballIf

void	GetLongitudeRange(float& rmin, float& rmax)
void	SetLongitudeRange(float rmin, float rmax)
void	GetLatitudeRange(float& rmin, float& rmax)
void	SetLatitudeRange(float rmin, float rmax)
void	GetDistanceRange(float& rmin, float& rmax)
void	SetDistanceRange(float rmin, float rmax)

コールバック登録

HITrackballIf

```
DVKeyMouseIf*   GetKeyMouse()
void             SetKeyMouse(DVKeyMouseIf*)
void             SetCallback(HITrackballCallback*)
```

トラックボールをマウス操作するには DVKeyMouse クラスにコールバック登録する必要があります。コールバック登録するには SetKeyMouse、登録先の仮想マウスを取得するには GetKeyMouse を呼びます。

また、ユーザプログラムがトラックボールにコールバック登録して状態変化に反応できるようにするには、HITrackballCallback クラスを継承し、SetCallback 関数に渡します。HITrackballCallback は以下の単一の仮想関数を持ちます。

HITrackballCallback

```
virtual void     OnUpdatePose(HITrackballIf* tb)
```

OnUpdatePose はトラックボールの位置・向きに変化が生じる度に呼ばれます。引数の tb は呼び出し元のトラックボールを示します。

マウスボタン割当て

HITrackball は内部で DVKeyMouseCallback を継承します。SetKeyMouse により DVKeyMouse にコールバック登録すると、マウスカーソルが移動するたびに OnMouseMove イベントハンドラが呼び出され、トラックボールの内部状態が更新されます。マウス移動時のボタン状態に応じてトラックボールのどの状態が変化するかはある程度カスタマイズが可能です。以下に関連する機能を示します。

HITrackballDesc

int	rotMask	回転操作のボタン割当て
int	zoomMask	ズーム操作のボタン割当て
int	trnMask	平行移動操作のボタン割当て

HITrackballIf

```
void      SetRotMask(int mask)
void      SetZoomMask(int mask)
void      SetTrnMask(int mask)
```

rotMask, zoomMask, trnMask はそれぞれ回転操作, ズーム操作, 平行移動操作に割り当てたいマウスボタンに対応する OnMouseMove の button 引数の値を表します。以下に対応関係をまとめます。

マウス移動方向	button 値	変化量
左右	rotMask	経度
上下	rotMask	緯度
上下	zoomMask	距離
左右	trnMask	注視点 x 座標
上下	trnMask	注視点 y 座標

デフォルトのボタン割当ては以下の通りです。

```
rotMask      LBUTTON
zoomMask     RBUTTON
trnMask      LBUTTON + ALT
```

したがって, 左ボタンドラッグで回転操作, 右ボタンドラッグでズーム操作, [ALT] キー + 左ドラッグで平行移動となります。

なお, 現状ではマウスの移動方向との対応をカスタマイズすることはできません。また, マウスホイールの回転とトラックボールを連動させる機能も未実装です。

マウス操作に対する極性と感度

マウス移動量と角度変化量, 距離変化量との比例係数を下記の機能で設定できます。

HITrackballDesc

```
float      rotGain      回転ゲイン [rad/pixel]
float      zoomGain     ズームゲイン [rad/pixel]
float      trnGain      平行移動ゲイン
```

HITrackbarIf

```
float      GetRotGain()
void       SetRotGain(float g)
float      GetZoomGain()
void       SetZoomGain(float g)
float      GetTrnGain()
void       SetTrnGain(float g)
```

トラックボールで視点を動かす

トラックボールの位置と向きをカメラに反映するには、描画処理の冒頭で以下のようにします。

```
// given GRRenderIf* render
render->SetViewMatrix(trackball->GetAffine().inv());
```

10.8 Spidar

Spidar はワイヤ駆動型の 3 軸・6 軸力覚提示ヒューマンインタフェースです。
T.B.D.

第 11 章

Creature

Creature モジュールは、物理シミュレータを用いてバーチャルクリーチャ（自律動作するキャラクタ）を作成する機能を提供します。

Springhead の物理シミュレーション機能は、人間・動物・キャラクタ・ロボット等の身体動作をシミュレーションすることにおいても利用価値があります。剛体・関節系で身体モデルを作成し、関節に組み込まれた制御機能や関節系の IK 機能を用いて身体動作を生成することができます。物理シミュレータ内の情報（物体の運動・形状・接触力等）を利用してバーチャルな感覚（センサ）情報の生成もできます。感覚・制御のループを回すことで自律動作するキャラクタやロボットが実現できます。

こうしたバーチャルなキャラクタ・ロボット等を総称して、バーチャルクリーチャ（Creature：生き物）と呼びます。

11.1 Creature モジュールの構成

下図に Creature モジュールの構成を示します。

```
CRCreature
+-- CRBody
|+-- CRBodyPart (CRObject)
+-- CREngine
   +-- CRController
```

CRCreature は、バーチャルクリーチャ 1 体分の機能を統括するオブジェクトです。身体と制御エンジンを有しています。

CRBody は、バーチャルクリーチャの身体モデルを統括します。身体モデルは身体構成

部品の集合体です。CRBodyPart は、身体構成部品ひとつひとつに対応するオブジェクトです。剛体あるいは関節の 2 種類があり、さらに IK での動作に対応するかどうかによって計 4 種類に細分されます。

CREngine は、バーチャルクリーチャのステップ処理の実行主体です。CRCreature の Step 関数が 1 回呼ばれるたびに、CRCreature が保持する全ての CREngine の Step 関数が順に実行されます。CRController は CREngine の一種で、バーチャルクリーチャの身体制御を担当します。実際の制御機能は CRController を継承した各クラスが担当します。眼球運動制御、首運動制御等があります。

第 12 章

Framework

12.1 概要

Framework はモジュール間の連携を促進してアプリケーションの作成を支援するためのモジュールです。

Framework モジュールのデータ構造を Fig. 12.1 に示します。最上位にはアプリケーションクラス FWApp があります。ユーザは FWApp を継承することで独自のアプリケーションを作成します。FWApp の中にトップレベルウィンドウ (FWWin) の配列、Framework SDK (FWSdk)、およびウィンドウマネージャ (FWGraphicsAdaptee) を持ちます。

FWWin はトップレベルウィンドウで、そのウィンドウに対応する入力デバイスやビューポート情報を保持するレンダラ、そのウィンドウと関連付けられたシーンへの参照などを持ちます。また、図中では省略されていますがサブウィンドウや GUI コントロールを持つこともできます。

FWSdk の役割は周辺モジュールの機能統合です。その中に周辺モジュールの SDK クラスや Framework シーン (FWScene) の配列を持ちます。

ウィンドウマネージャは処理系に依存するデバイスの初期化やイベントハンドリングを行います。ウィンドウマネージャはインタフェースを公開していませんのでユーザはその存在を陽に意識する必要はありません。図ではデータ構造の説明のためにあえて記載しています。

以下では個々の構成要素について説明していきます。

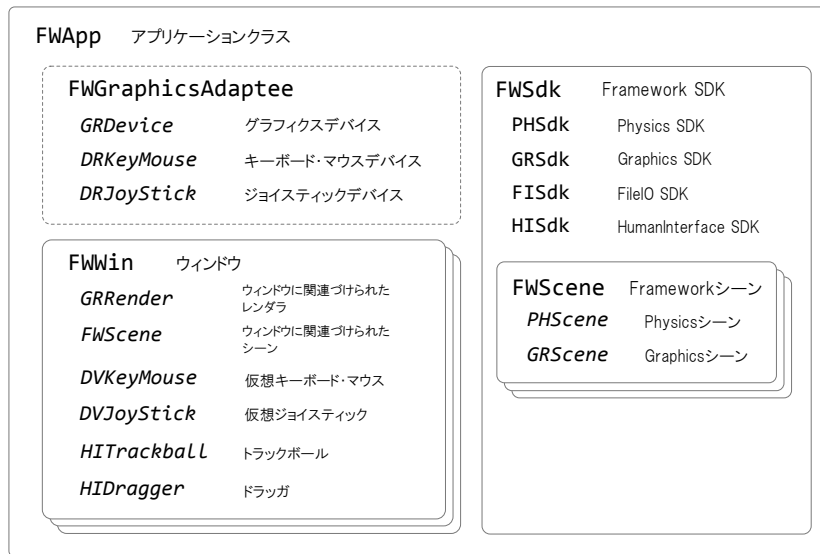


Fig. 12.1 Framework data structure

12.2 Framework SDK

Framework モジュールのすべてのオブジェクトは SDK クラス `FWSdk` によって管理されます。 `FWSdk` クラスは、プログラムの実行を通してただ 1 つのオブジェクトが存在するシングルトンクラスです。 `FWSdk` オブジェクトを作成するには以下のようにします。

```
FWSdkIf* fwSdk = FWSdkIf::CreateSdk();
```

通常この操作はプログラムの初期化時に一度だけ実行します。 `FWSdk` を作成すると、同時に `PHSdk`、`GRSdk`、`FISdk`、`HISdk` も作成されます。したがってこれらをユーザが手動で作成する必要はありません。各モジュールの機能にアクセスするには以下の関数により SDK を取得します。

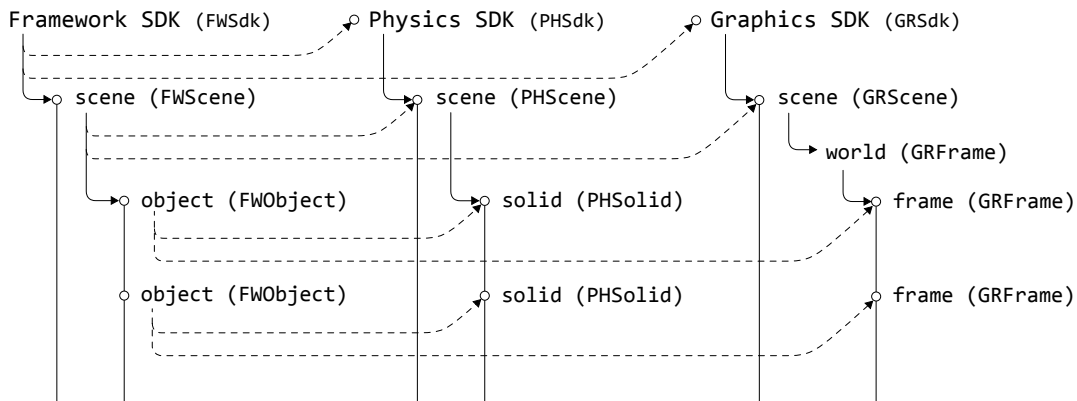


Fig. 12.2 Data structure of Framework, Physics and Graphics modules

FWSdkIf

PHSdkIf* GetPHSdk()

Physics SDK を取得する .

GRSdkIf* GetGRSdk()

Graphics SDK を取得する .

FISdkIf* GetFISdk()

FileIO SDK を取得する .

HISdkIf* GetHISdk()

HumanInterface SDK を取得する .

12.3 Framework シーン

Framework モジュールの主な機能の 1 つに Physics シーンと Graphics シーンの同期があります . Fig. 12.2 に 3 つのモジュールの SDK とシーンの関係を示します . FWSdk は任意の数のシーン (FWScene クラス) を保持します . また , シーンは任意の数のオブジェクト (FWObject クラス) を保持します . Fig. 12.2 に示すように , オブジェクトは Physics モジュールの剛体と Graphics モジュールのトップフレームを一対一に対応づけます . ここでトップフレームとはワールドフレームの直下にあるフレームのことです . 物理シミュレーションにより計算される剛体の運動をフレームの座標変換に反映させること

で、シミュレーションの様子を Graphics モジュールの機能を利用して可視化することができます。

シーン作成に関する FWsdk の関数を以下に示します。

HITTrackballIf

```
FWSceneIf* CreateScene(const PHSceneDesc&, const GRSceneDesc&)
```

シーンを作成する。

```
int NScene()
```

シーンの数を取得する

```
FWSceneIf* GetScene(int i)
```

i 番目のシーンを取得する。

```
void MergeScene(FWSceneIf* scene0, FWSceneIf* scene1)
```

scene1 の子オブジェクトを scene0 に移す。

シーンを作成するには以下のようにします。

```
FWSceneIf* fwScene = fwSdk->CreateScene();
```

FWScene を作成すると、同時に PHScene と GRScene も作成され、FWScene とリンクされます。CreateScene にディスクリプタを指定することもできます。NScene は作成したシーンの数を返します。

シーンを取得するには GetScene を使います。GetScene に指定する整数は作成された順番にシーンに与えられる通し番号です。

```
fwSdk->CreateScene();           // create two scenes
fwSdk->CreateScene();
FWSceneIf *fwScene0, *fwScene1;
fwScene0 = fwSdk->GetScene(0); // get 1st scene
fwScene1 = fwSdk->GetScene(1); // get 2nd scene
```

MergeScene を使うと 2 つのシーンを統合して 1 つのシーンにできます。

```
fwSdk->MergeScene(fwScene0, fwScene1);
```

上のコードでは scene1 が持つ FWObject が scene0 に移され、同時にシーンが参照する PHScene と GRScene についてもそれぞれの MergeScene 関数により統合が行われます。

次に、FWScene の基本機能を以下に示します。

FWSceneIf

void SetPHScene(PHSceneIf*)	Physics シーンの設定
PHSceneIf* GetPHScene()	Physics シーンの取得
void SetGRScene(GRSceneIf*)	Graphics シーンの設定
GRSceneIf* GetGRScene()	Graphics シーンの取得
FWObjectIf* CreateFWObject()	オブジェクトの作成
int NObject()const	オブジェクトの数
FWObjectIf** GetObjects()	オブジェクト配列の取得
void Sync(bool)	同期

[Set|Get] [PH|GR]Scene 関数はシーンに割り当てられた PHScene や GRScene を取得したり、別のシーンを割り当てたりするのに使用します。

CreateFWObject 関数は FWObject オブジェクトを作成します。このとき、新たに作成された FWObject には PHSolid および GRFrame は割り当てられていない状態になっているので注意してください。これらも同時に作成するには、以下のコードを 1 セットで実行します。

```
FWObjectIf* fwObj = fwScene->CreateFWObject();
fwObj->SetPHSolid(fwScene->GetPHScene()->CreateSolid());
fwObj->SetGRFrame(
    fwScene->GetGRScene()->CreateVisual(GRFrameDesc()->Cast);
```

Sync 関数は PHScene と GRScene の同期に用います。

```
fwScene->Sync(true);
```

とすると、このシーンが参照する PHScene 中の剛体の位置と向きが、同じくこのシーンが参照する GRScene 中のトップフレームの位置と向きに反映されます。このときの剛体とトップフレームとの対応関係は FWObject により定義されます。

逆に

```
fwScene->Sync(false);
```

とすると、同様のメカニズムで各トップフレームの位置と向きが対応する剛体に反映されます。

12.4 シーンのロードとセーブ

FileIO モジュールを利用してシーンをロード、セーブするための関数が用意されています。まずロードには以下の関数を用います。

FWSdkIf

```
bool LoadScene(UTString path, ImportIf* imp, const IfInfo* ii,
ObjectIfs* objs)
```

シーンをロードする。

path はロードするファイルへのパスを格納した文字列です。imp にはインポート情報を格納するための Import オブジェクトを与えます。インポート情報を記憶する必要のない場合は NULL で構いません。ii はロードするファイルの種類を明示するための型情報です。NULL を指定するとパスの拡張子から自動判別されます。objs はロードによって作成されるオブジェクトツリーの親オブジェクトを格納した配列です。

ロードに成功すると true、失敗すると false が返されます。ロードされたシーンは FWSdk のシーン配列の末尾に加えられます。

次に、シーンをセーブするには以下の関数を使います。

FWSdkIf

```
bool SaveScene(UTString path, ImportIf* imp, const IfInfo* ii,
ObjectIfs* objs)
```

シーンをセーブする。

引数の意味は LoadScene と同様です。imp にはロード時に記憶したインポート情報を与えます。省略するとシーン全体が単一のファイルにセーブされます。

セーブに成功すると true、失敗すると false が返されます。

12.5 Framework オブジェクト

FWObject は PHSolid と GRFrame の橋渡しが主な役割ですので、それ自体はそれほど多くの機能を持っていません。

12.6 アプリケーションクラス

Springhead を利用するアプリケーションの作成を容易にするために、アプリケーションクラス FWApp が用意されています。2.6 に FWApp を使って簡単なアプリケーションを作成する方法について説明しましたのでそちらも合わせて参考にしてください。

冒頭で説明した通り、Springhead のほとんどのオブジェクトは、親オブジェクトの Create 系関数を使って作成しますが、FWApp は例外的に、C++ のクラス継承を用いてユーザのアプリケーションクラスを定義する方法をとります。この方が仮想関数によって動作のカスタマイズがフレキシブルに行えるからです。

以下では FWApp の機能やユーザが実装すべき仮想関数について順に見ていきます。

初期化

FWApp の初期化処理は仮想関数 Init で行います。

FWApp

```
virtual void Init(int argc, char* argv[])
```

以下に Init 関数のデフォルトの実装を示します。

```
void FWApp::Init(int argc, char* argv[]){
    // create SDK
    CreateSdk();
    // create a single scene
    GetSdk()->CreateScene();
    // initialize window manager
    GRInit(argc, argv);
    // create main window
```

```
CreateWin();  
// create timer  
CreateTimer();  
}
```

はじめに

```
CreateSdk();
```

で SDK を作成します。つぎに

```
GRInit(argc, argv);
```

でウィンドウマネージャが作成されます。デフォルトでは GLUT を用いるウィンドウマネージャが作成されます。さらに

```
GetSdk()->CreateScene();
```

で FWScene を 1 つ作成します。つづいて

```
CreateWin();
```

でメインウィンドウを作成します。最後に

```
CreateTimer();
```

でタイマを作成します。

この基本処理に追加してなんらかの処理を行う場合は

```
virtual void Init(int argc = 0, char* argv[] = 0){  
    // select GLUTI window manager  
    SetGRAdaptee(TypeGLUI);  
}
```



```
// call base Init
FWApp::Init(argc, argv);

// do extra initialization here

}
```

のように、FWApp::Init を実行してから追加の処理を行うのが良いでしょう。一方、以下に挙げるようなカスタマイズが必要な場合は Init 関数の処理全体を派生クラスに記述する必要があります。

- シーン生成をカスタマイズしたい
- ウィンドウの初期サイズやタイトルを変更したい
- 異なる種類のタイマが使いたい

この場合は、上に載せた Init のデフォルト処理をもとに必要な部分に修正を加えるのが良いでしょう。

プログラムの全体の構造は通常以下ようになります。

```
MyApp app;

int main(int argc, char* argv[]){
    app.Init(argc, argv);
    app.StartMainLoop();
    return 0;
}
```

ここで MyApp はユーザが定義した FWApp の派生クラスです（もちろん他の名前でも構いません）。MyApp のインスタンスをグローバル変数として定義し、main 関数で Init、StartMainLoop を順次実行します。StartMainLoop 関数はアプリケーションのメインループを開始します。

タイマ

タイマの作成には CreateTimer 関数を使います。通常、CreateTimer は Init の中で呼びます。

FWApp

```
UTTimerIf* CreateTimer(UTTimerIf::Mode mode)
```

引数 `mode` に指定できる値は `UTTimer` の `SetMode` と同じです。5.4 節を参照してください。戻り値として `UTTimer` のインタフェースが返されます。周期などの設定はこのインタフェースを介して行います。

シミュレーション用と描画用に 2 つのタイマを作成する例を以下に示します。

```
UTTimerIf *timerSim, *timerDraw;
timerSim = CreateTimer(MULTIMEDIA);
timerSim->SetInterval(10);
timerDraw = CreateTimer(FRAMEWORK);
timerDraw->SetInterval(50);
```

この例ではシミュレーション用には周期を 10[ms] のマルチメディアタイマを使い、描画用には周期 50[ms] のフレームワークタイマ (GLUT タイマ) を使っています。

タイマを始動すると、周期ごとに以下の仮想関数が呼ばれます。

FWApp

```
virtual void TimerFunc(int id)
```

タ

イマの判別は引数 `id` で行います。

`TimerFunc` のデフォルトの振る舞いでは、カレントウィンドウのシーンの `Step` を呼び、つぎに `PostRedisplay` で再描画要求を発行します (その結果、直後に `Display` 関数が呼び出されます)。この振る舞いをカスタマイズしたい場合は `TimerFunc` 関数をオーバーライドします。

```
void TimerFunc(int id){
    // proceed simulation of scene attached to current window
    if(id == timerSim->GetID()){
        GetCurrentWin()->GetScene()->Step();
    }
    // generate redisplay request
    else if(id == timerDraw->GetID()){
        PostRedisplay();
    }
}
```

```
}
```

この例ではシミュレーションと描画に異なる 2 つのタイマを使用しています。

描画

描画処理は次の仮想関数で行います。

```
FWApp
```

```
virtual void Display()
```

Display は描画要求が発行されたときに呼び出されます。描画要求は PostRedisplay 関数で行います。

```
FWApp
```

```
virtual void PostRedisplay()
```

Display 関数のデフォルトの振る舞いではカレントウィンドウの Display 関数が呼ばれます。

キーボード・マウスイベント

FWApp は各ウィンドウに関連付けられた仮想キーボード・マウスデバイス DVKeyMouse にコールバック登録されています。したがって以下の仮想関数をオーバーライドすることでキーボード・マウスイベントを処理できます。

```
FWApp
```

```
virtual bool OnMouse(int button, int state, int x, int y)
```

```
virtual bool OnDoubleClick(int button, int x, int y)
```

```
virtual bool OnMouseMove(int state, int x, int y, int zdelta)
```

```
virtual bool OnKey(int state, int key, int x, int y)
```

各イベントハンドラの詳細については 10.5 節を参照して下さい。

12.7 ウィンドウ

ウィンドウやその他の GUI コントロールの作成も Framework によってサポートされています。すでに述べてきたとおり、FWApp はトップレベルウィンドウの配列を持ちます。

12.8 Framework を用いたシミュレーションと描画

Framework モジュールを介して物理シミュレーションを行うには以下の関数を使います。

FWSdkIf

void Step()

FWSdk の Step はアクティブシーンの Step を呼びます。したがって GetScene()->Step() と等価です。一方 FWScene の Step は、保持している PHScene の Step を呼びます。したがって GetPHScene()->Step() と等価です。両方とも薄いラッパー関数ですが、ユーザのタイプ回数節約のために用意されています。

Framework を用いた描画には 2 通りの方法があります。1 つは Graphics のシーングラフを用いる方法、もう 1 つは Physics シーンを直接描画する方法です。後者はデバッグ描画とも呼ばれています。

FWSdkIf

void Draw()

void SetDebugMode(bool)

bool GetDebugMode()

Draw 関数は描画モードに応じた描画処理を行います。Draw は通常アプリケーションの描画ハンドラから呼び出します。[Set|Get]DebugMode は通常描画モード (false) とデバッグ描画モード (true) を切り替えます。

通常描画モードにおいて Draw 関数を呼ぶと、はじめにアクティブシーンについて Sync(true) が呼ばれ、剛体の状態がシーングラフに反映されます。次にアクティブシーンが参照する GRScene の Render 関数が呼ばれ、シーングラフが描画されます。この方法ではシーングラフが持つライトやテクスチャなどの情報を最大限利用してフォトリアリスティックな描画が可能です。その反面、物理シミュレーションが主目的である場合には

シーングラフの構築という付加的なコストを支払わなければならないというデメリットもあります。

デバッグ描画については次節で説明します。

12.9 デバッグ描画

デバッグ描画モードでは PHScene の情報だけを用いて描画が行われるので、シーングラフ構築の手間が省けます。また、剛体に加わる力などの物理シミュレーションに関する情報を可視化することができます。一方で、予約色しか使えないなど、描画の自由度には一定の制約が生じます。

デバッグ描画モードでは FWScene の DrawPHScene 関数により描画処理が行われます。

FWSceneIf

```
void DrawPHScene(GRRenderIf* render)
```

DrawPHScene は、各剛体に割り当てられている衝突判定形状、座標軸、作用している力、接触断面などを描画します。項目別に描画を行ったり、描画色を設定するには後述する描画制御関数を用います。

デバッグ描画時のカメラとライト

デバッグ描画においてもカメラの情報は GRScene が参照されます。もし GRScene がカメラを保有している場合はそのカメラの Render が呼ばれ、視点と投影変換が設定されます。GRScene がカメラを持たない場合は手動で設定する必要があります。

ライトについては、もし外部でレンダラに対してライト設定がされている場合はその設定が優先され、レンダラが 1 つもライトを持たない場合は内部でデフォルトライトが設定されます。

個別の描画

以下の関数は DrawPHScene から呼び出されますが、ユーザが個別に呼び出すこともできます。

FWSceneIf

<code>void DrawSolid(GRRenderIf*, PHSolidIf*, bool)</code>	剛体を描画
<code>void DrawShape(GRRenderIf*, CDShapeIf*, bool)</code>	形状を描画
<code>void DrawConstraint(GRRenderIf*, PHConstraintIf*)</code>	拘束を描画
<code>void DrawContact(GRRenderIf*, PHContactPointIf*)</code>	接触を描画
<code>void DrawIK(GRRenderIf*, PHIKEngineIf*)</code>	IK 情報を描画

描画制御

以下の関数は描画の On/Off を切り替えます。

FWSceneIf

<code>void SetRenderMode(bool solid, bool wire)</code>
<code>void EnableRender(ObjectIf* obj, bool enable)</code>
<code>void EnableRenderAxis(bool world, bool solid, bool con)</code>
<code>void EnableRenderForce(bool solid, bool con)</code>
<code>void EnableRenderContact(bool enable)</code>
<code>void EnableRenderGrid(bool x, bool y, bool z)</code>
<code>void EnableRenderIK(bool enable)</code>

`SetRenderMode` はソリッド描画（面を塗りつぶす）とワイヤフレーム描画（面の輪郭）の On/Off を切り替えます。

`EnableRender` は指定したオブジェクトの描画の On/Off を切り替えます。項目ではなくオブジェクトレベルで描画制御したい場合に便利です。obj に指定できるのは剛体 (PHSolidIf*) か拘束 (PHConstraintIf*) です。

`EnableRenderAxis` は項目別に座標軸の描画を設定します。world はワールド座標軸, solid は剛体, con は拘束の座標軸です。

`EnableRenderForce` は力とモーメントの描画を設定します。solid は剛体に加わる力（ただし外力のみで拘束力は除く）、con は拘束力です。

`EnableRenderGrid` は各軸に関してグリッドの描画を設定します。

`EnableRenderIK` は IK 情報の描画を設定します。

以下の関数は描画属性を指定するのに使います。

FWSceneIf

```
void SetSolidMaterial(int mat, PHSolidIf* solid)
void SetWireMaterial (int mat, PHSolidIf* solid)
void SetAxisMaterial(int matX, int matY, int matZ)
void SetAxisScale(float world, float solid, float con)
void SetAxisStyle(int style)
void SetForceMaterial(int matForce, int matMoment)
void SetForceScale(float scaleForce, float scaleMoment)
void SetContactMaterial(int mat)
void SetGridOption(char axis, float offset, float size,
int slice)
void SetGridMaterial(int matX, int matY, int matZ)
void SetIKMaterial(int mat)
void SetIKScale(float scale)
```

SetSolidMaterial は指定した剛体のソリッド描画色を指定します。mat に指定できる値は 8.8 節で述べた予約色です。solid に NULL を指定するとすべての剛体の色が指定された値になります。SetWireMaterial は同様に剛体のワイヤフレーム描画色を指定します。

SetAxisMaterial は座標軸の色を x, y, z 個別に指定します。SetAxisScale は座標軸の縮尺を指定します。SetAxisStyle は座標軸のスタイルを指定します。

SetForceMaterial, SetForceScale はそれぞれ力（並進力とモーメント）の描画色と縮尺を指定します。

SetContactMaterial は接触断面の描画色を指定します。

SetGridOption はグリッドのオプションを指定します。SetGridMaterial はグリッドの描画色を指定します。

SetIKMaterial, SetIKScale は IK 情報の描画色と縮尺を指定します。

12.10 力覚インタラクションのためのアプリケーション

Springhead2 にはシーンとの力覚インタラクションのためのエンジン PHHapticEngine が含まれています。ここでは力覚インタラクションのためのアプリケーションの作成方法について説明します。まずは、通常の Framework アプリケーションの作成と同様に、ひ

な形クラスである FWApp を継承してアプリケーションを作成します。そして、Init 関数内で力覚インタラクションを有効化と、力覚インタラクションシステムのモードを設定します。

```
// given PHSceneIf* phScene,
phScene->GetHapticEngine()->EnableHapticEngine(true);
phScene->GetHapticEngine()->
SetHapticEngineMode(PHHapticEngineDesc::MULTI_THREAD);
```

力覚インタラクションシステムのモードはシングルスレッドアプリケーションのための SINGLE_THREAD，マルチメディアアプリケーションのための MULTI_THREAD，局所シミュレーションを利用した LOCAL_DYNAMICS の 3 種類があります。標準では MULTI_THREAD が設定されています。MULTI_THREAD，LOCAL_DYNAMICS のモードはマルチスレッドを利用したアプリケーションとなり、物理シミュレーションを実行する物理スレッド、力覚レンダリングを実行する力覚スレッドが並列に動きます。そのため、それぞれのスレッドをコールバックするためにタイマを設定し直す必要があります。


```
// given PHSceneIf* phScene,
int physicsTimerID, hapticTimerID // 各タイマの ID
// FWApp::TimerFunc をオーバーライドしたコールバック関数
void MyApp::TimerFunc(int id){
    if(hapticTimerID == id){
        // 力覚スレッドのコールバック
        phScene->StepHapticLoop();
    }else{
        // 物理スレッドのコールバック
        phScene->GetHapticEngine()->StepPhysicsSimulation();
        PostRedisplay(); // 描画
    }
}
```

次にユーザがオブジェクトとインタラクションするためのポインタ，力覚ポインタ `PHHapticPointer` を作ります．そして，どのインタフェースと結合するのかを設定します．`PHHapticPointer` は `PHScene` から作ることができます．`PHHapticPointer` は `PHSolid` を継承したクラスで `PHSolid` の関数を利用して，質量，慣性テンソル，形状などを合わせて設定します．例えば `Spidar-G6` と接続する場合には，

```
// given PHSceneIf* phScene,
// given HISpidarIf* spg,
PHHapticPointerIf* pointer = phScene->CreateHapticPointer();
/*
    質量，慣性テンソル，形状などを設定する
*/
pointer->SetHumanInterface(spg);
```

とします．さらに `PHHapticPointer` について以下の関数を用いて，力覚提示のためのパラメータを設定します．

`PHHapticPointerIf`

```
void SetHumanInterface(HIBaseIf* interface)
void SetDefaultPose(Posed pose)
void SetPosScale(double scale)
void SetReflexSpring(float s)
void SetReflexDamper(float s)
void EnableFriction(bool b)
void EnableVibration(bool b)
void SetLocalRange(float s)
void SetHapticRenderMode(PHHapticPointerDesc::HapticRenderMode
m )
```

`SetHumanInterface` は力覚ポインタにヒューマンインタフェースを割り当てます。`SetDefaultPose` はシーン内での力覚ポインタの初期位置を指定します。`SetPosScale` はシーン内での力覚ポインタの可動スケールを指定します。`SetReflexSpring` は力覚レンダリング（反力計算）のためのバネ係数値を設定します。`SetReflexDamper` は力覚レンダリングのためのダンパ係数値を設定します。`EnableFriction` は力覚ポインタの摩擦提示を有効化します。`EnableVibration` は力覚ポインタの振動提示を有効化します。`SetLocalRange` は局所シミュレーションシステムを使用時の局所シミュレーション範囲を指定します。`SetHapticRenderMode` は力覚レンダリングのモードを指定します。

最後の `SetHapticRenderMode` には `PENALTY`、`CONSTRAINT` のモードがあります。`PENALTY` は力覚ポインタが剛体に接触した時の各接触点の侵入量とバネダンパ係数を乗じたものを足しあわせたものが反力として計算され、インタフェースから出力されます。`CONSTRAINT` は力覚ポインタが剛体に侵入していない状態（プロキシ）を求め、力覚ポインタとプロキシの距離の差分にバネダンパ係数を乗じたものを反力として計算します。

第 13 章

Python 言語との連携

EmbPython モジュールは、スクリプト言語 Python との連携機能を提供します。Python インタプリタから Springhead の機能呼び出ししたり、Springhead アプリケーションに Python インタプリタを組み込んでスクリプティングエンジンとして使用するという事ができます。

EmbPython モジュールの使用により、Python インタプリタ上に Springhead API クラスへのインタフェースクラスが提供されます。ユーザは Python インタフェースクラスを使用して Springhead の各機能にアクセスします。Python インタフェースクラスは内部的に Springhead の機能呼び出し、結果を Python インタフェースクラスに変換して返します。

13.1 利用法

大きく分けて二通りの利用法を想定しています。

一つは、C++ で実装された Springhead アプリケーションに対し、Python インタプリタを組み込むことです。Springhead アプリケーションの機能の一部を Python スクリプト記述し、拡張性を高めます。

もう一つは、Python インタプリタに対する外部拡張モジュール (Python DLL, pyd) として提供された Springhead を利用することで、Python アプリケーションに Springhead の機能を組み込む利用法です。

どちらの場合においても、EmbPython モジュールは Python 側から Springhead の関数を呼び出すためのインタフェースを提供します。関係を Fig 13.1 に示します。

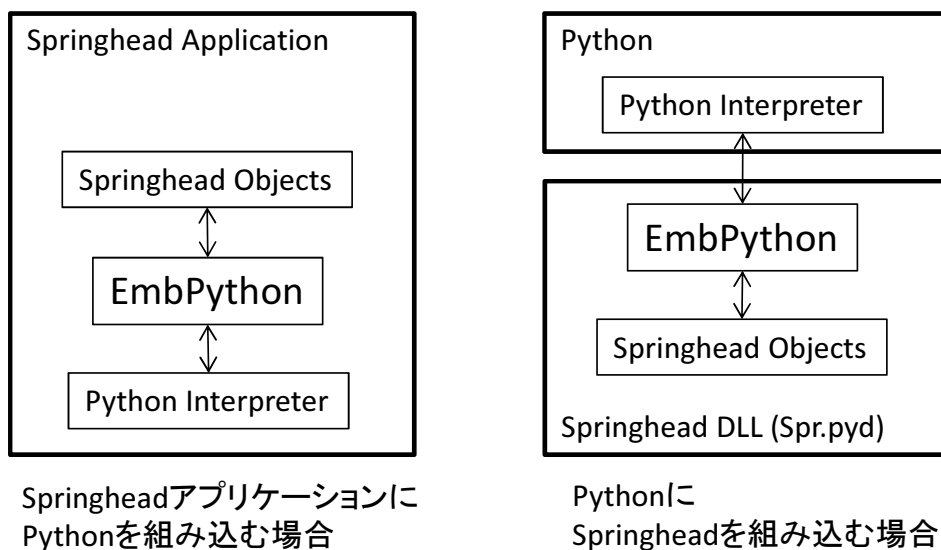


Fig. 13.1 Python 連携と EmbPython モジュールの位置づけ

Springhead への Python 組み込み

Springhead アプリケーションに Python インタプリタを組み込んで利用する方法を解説します。本節ではまず Springhead に同梱された Python インタプリタ組み込みサンプルを紹介し、簡単な使い方を説明します。その後、サンプルにおける Python インタプリタ組み込みのためのソースコードについて解説します。

PythonSpr サンプルのビルドと実行

Python インタプリタ組み込みサンプルは `src\Samples\EmbPython\PythonSpr` にあります。ビルドすると `PythonSpr.exe` ができます。

PythonSpr サンプルは標準的な Springhead サンプルアプリケーションフレームワークに Python インタプリタを組み込んだもので、物理シーンを構築・シミュレーション・描画する事ができます。Python インタプリタからは `phSdk` や `fwSdk` にアクセスすることができ、表示機能を切り替えたりシーンにオブジェクトを作成したりといったことが Python から行えます。

実行の前に、環境変数を設定します。これは、Springhead アプリケーションに組み込まれた Python インタプリタが Python の標準ライブラリ群にアクセスするために必要です。

SPRPYTHONPATH 環境変数

Springhead リリースを展開したフォルダ内の `bin\src\Python32\Lib` へのフル

パスを指定します。Python3.2 を c:\Python32 にインストールしてある場合、C:\Python32\Lib でもかまいません。

PythonSpr.exe を実行すると次のような画面が現れます。

<スクリーンショット>

右が Springhead の実行画面、左のコンソールが Python プロンプトです。起動時には、Springhead 実行画面には何のシーンも構築されていないため、ワールド座標系を示す矢印のみが描画されています。

操作法は以下の通りです。

マウス 左ドラッグ 視点変更（回転）

マウス 右ドラッグ 視点変更（拡大縮小）

スペースキー シミュレーション開始・一時停止（起動直後は停止しています）

PythonSpr サンプルの遊び方

この節では、Python コードを中心として Springhead の機能を利用する具体的な方法を紹介します。Python からの Springhead API 利用に関する詳しい仕様は第 13.2 節を参照してください。

Python プロンプト上に Springhead のコードを入力して実行することができます。以下のように入力してシミュレーションを開始（スペースキー）すると、剛体が作成されて落ちていきます。

```
# 剛体が落ちるだけのサンプル

>>> fwScene      初期状態で定義されている変数で、アプリケーションが保持する
fwScene にアクセスできます
<Framework.FWScene object at 0x05250A40>
>>> phScene = fwScene.GetPHScene()
>>> desc = Spr.PHSolidDesc()
>>> desc.mass = 2.0
>>> solid0 = phScene.CreateSolid(desc)
```

形状を与えることもできます。なお、最後の行の `solid0.AddShape(box0)` を実行するまで剛体に形状は割り当てられないので、この行を入力し終わるまではスペースキーを押さずにシミュレーションを一時停止状態にしておくとよいでしょう。

```
# 形状のある剛体が落ちるだけのサンプル

>>> phScene = fwScene.GetPHScene()
>>> phSdk    = phScene.GetSdk()
>>> descSolid = Spr.PHSolidDesc()
>>> solid0 = phScene.CreateSolid(descSolid)
>>> descBox = Spr.CDBoxDesc()
>>> descBox.boxsize = Spr.Vec3f(1,2,3)
>>> box0 = phSdk.CreateShape(Spr.CDBox.GetIfInfoStatic(), descBox)
>>> solid0.AddShape(box0)
```

床（位置が固定された剛体）を作成すると、さらにそれらしくなります。

```
>>> phScene = fwScene.GetPHScene()
>>> phSdk    = phScene.GetSdk()

# 床をつくる
>>> descSolid = Spr.PHSolidDesc()
>>> solid0 = phScene.CreateSolid(descSolid)
>>> descBox = Spr.CDBoxDesc()
>>> descBox.boxsize = Spr.Vec3f(10,2,10)
>>> boxifinfo = Spr.CDBox.GetIfInfoStatic()
>>> solid0.AddShape(phSdk.CreateShape(boxifinfo, descBox))
>>> solid0.SetFramePosition(Spr.Vec3d(0,-1,0))
>>> solid0.SetDynamical(False)

# 床の上に箱をつくって載せる
>>> solid1 = phScene.CreateSolid(descSolid)
>>> descBox.boxsize = Spr.Vec3f(1,1,1)
>>> boxifinfo = Spr.CDBox.GetIfInfoStatic()
>>> solid1.AddShape(phSdk.CreateShape(boxifinfo, descBox))
```

力を加えることもできます。

```
>>> solid1.AddForce(Spr.Vec3d(0,200,0))
```

Python の For や While を使って継続して力を加えることもできます。

```
>>> import time
>>> for i in range(0,100):
>>>     solid1.AddForce(Spr.Vec3d(0,20,0))
>>>     time.sleep(0.01)
```

応用として、簡単な制御ループを走らせることもできます。

```
>>> import time
>>> for i in range(0,500):
>>>     y = solid1.GetPose().getPos().y
>>>     dy = solid1.GetVelocity().y
>>>     kp = 20.0
>>>     kd = 3.0
>>>     solid1.AddForce(Spr.Vec3d(0, (2.0 - y)*kp - dy*kd, 0))
>>>     time.sleep(0.01)
```

ここまでは剛体のみでしたが、関節も作成できます。

```
>>> phScene = fwScene.GetPHScene()
>>> phSdk    = phScene.GetSdk()

>>> descSolid = Spr.PHSolidDesc()
>>> solid0 = phScene.CreateSolid(descSolid)
>>> descBox = Spr.CDBoxDesc()
>>> descBox.boxsize = Spr.Vec3f(1,1,1)
>>> boxifinfo = Spr.CDBox.GetIfInfoStatic()
>>> solid0.AddShape(phSdk.CreateShape(boxifinfo, descBox))
>>> solid0.SetDynamical(False)

>>> solid1 = phScene.CreateSolid(descSolid)
>>> solid1.AddShape(phSdk.CreateShape(boxifinfo, descBox))

>>> descJoint = Spr.PHHingeJointDesc()
>>> descJoint.poseSocket = Spr.Posed(1,0,0,0, 0,-1,0)
>>> descJoint.posePlug   = Spr.Posed(1,0,0,0, 0, 1,0)
>>> hingeifinfo = Spr.PHHingeJoint.GetIfInfoStatic()
>>> joint = phScene.CreateJoint(solid0, solid1, hingeifinfo, descJoint)
```

PythonSpr.exe に引数を与えると、python ファイルを読み込んで実行することもできます。ここまでに書いた内容を test.py というファイルに書いて保存し、コマンドプロ

ンプトから以下のように実行すると, test.py に書いた内容が実行されます (スペースキーを押すまでシミュレーションは開始されないことに注意してください).

```
C:\src\Samples\EmbPython\PythonSpr> Release\PythonSpr.exe test.py
>>>
```

Python インタプリタ組み込みのためのコード例

PythonSpr サンプルにおいて, Python インタプリタを組み込むためのコードについて紹介します.

tips

Python インタプリタ組み込みの詳細を理解するためには Springhead だけでなく Python の C 言語 API について知る必要があります. 詳しく知りたい方は Python/C API リファレンスマニュアル^{*1} 等も参照してください.

*1 ... <http://docs.python.org/py3k/c-api/index.html>

PythonSpr サンプルにおいて, Python 組み込みのためのコードは main.cpp に記述されています. 関連箇所を抜粋して紹介します.

Python 組み込み関連の機能を使用するには, EmbPython.h ヘッダをインクルードします.

```
#include <EmbPython/EmbPython.h>
```

Python インタプリタは, Springhead アプリケーション本体とは異なるスレッドで動作します. 物理シミュレーションステップの実行中や描画の最中に Python がデータを書き換えてしまうことがないように, 排他ロックをかけて保護します.

```
virtual void OnStep(){
    UTAutoLock critical(EPCriticalSection);
    ...
}
virtual void OnDraw(GRRenderIf* render) {
    UTAutoLock critical(EPCriticalSection);
    ...
}
virtual void OnAction(int menu, int id){
    UTAutoLock critical(EPCriticalSection);
```



```
...
}
```

EPCriticalSection はアプリケーションに一つしか存在しないインスタンスで、EPCriticalSection による排他ロックを取得できるのは全アプリケーション中で一つのスコープのみです。Python から Springhead の機能が呼び出される際には必ず EPCriticalSection の取得を待つようになっているので、排他ロックを取得した OnStep の実行中に Python が Springhead の機能を実行することはありません^{*1}。

次に、Python インタプリタ初期化用の関数を定義します。

```
void EPLoopInit(void* arg) {
    PythonSprApp* app = (PythonSprApp*)arg;

    // Python でモジュールの使用宣言
    PyRun_SimpleString("import Spr");

    // Python から C の変数にアクセス可能にする準備
    PyObject *m = PyImport_AddModule("__main__");
    PyObject *dict = PyModule_GetDict(m);

    // Python から fwScene にアクセス可能にする
    PyObject* pyObj = (PyObject*)newEPFWSceneIf(app->fwScene);
    Py_INCREF(pyObj);
    PyDict_SetItemString(dict, "fwScene", pyObj);

    // Python ファイルをロードして実行する
    if (app->argc == 2) {
        ostringstream loadfile;
        loadfile << "__mainfilename__ = '";
        loadfile << app->argv[1];
        loadfile << "'";
        PyRun_SimpleString("import codecs");
        PyRun_SimpleString(loadfile.str().c_str());
        PyRun_SimpleString(
            "__mainfile__ = codecs.open(__mainfilename__, 'r', 'utf-8')");
        PyRun_SimpleString(
            "exec(compile(__mainfile__.read(), __mainfilename__, 'exec')",
            ",globals()",
            ",locals())");
        PyRun_SimpleString("__mainfile__.close()");
    }
}
```

^{*1} ナイーブな実装のため少々過剰なロックとなっています。実際の競合リソースに根ざした排他制御ができるよう、将来のバージョンで変更がなされる可能性もあります。

```

    }
}

```

この関数は関数ポインタの形でインタプリタオブジェクトに渡され、実行開始時にコールバックされます。中身は Python 上で Springhead を使用可能にするための手続きと、C 上の変数をブリッジするためのコード、そして起動時に指定された.py ファイルをロードするコードなどです。

上の例では `app->fwScene` のみを Python に渡していますが、他にも受け渡したい変数が複数出てきた場合は、以下のようなマクロが便利でしょう。

```

#define ACCESS_SPR_FROM_PY(cls, name, obj) \
{ \
    PyObject* pyObj = (PyObject*)newEP##cls((obj)); \
    Py_INCREF(pyObj); \
    PyDict_SetItemString(dict, #name, pyObj); \
} \

// 使い方:
// ACCESS_SPR_FROM_PY(型名, Python 側での変数名, アクセスする変数)
ACCESS_SPR_FROM_PY(FWSceneIf, fwScene, app->fwScene);

```

実際の PythonSpr サンプルでは、このマクロを用いていくつかの変数を Python から呼び出せるようにしています。

ループ関数も定義します。これについては変更することは稀でしょう。

```

void EPLoop(void* arg) {
    PyRun_InteractiveLoop(stdin, "SpringheadPython Console");
}

```

最後に、main 関数内で Python インタプリタクラスである `EPInterpreter` を作成してコールバックを設定し、初期化・実行を行います。

```

int main(int argc, char *argv[]) {
    app.Init(argc, argv);

    EPInterpreter* interpreter = EPInterpreter::Create();
    interpreter->Initialize();
}

```

```
interpreter->EPLoopInit = EPLoopInit;
interpreter->EPLoop = EPLoop;
interpreter->Run(&app);

app.StartMainLoop();
return 0;
}
```

Python への Springhead 組込み

Python の DLL インポート機能を利用して Springhead を Python にロードして用いることができます。

Springhead の機能は Spr.pyd という DLL ファイルにまとめられています。Spr.pyd は、bin\win32\Spr.pyd または bin\win64\Spr.pyd として Springhead リリースに含まれていますが、src\EmbPython\SprPythonDLL.sln をビルドして生成することもできます。

Spr.pyd の使い方

Spr.pyd は、Python のインストールフォルダ内にある DLLs フォルダにコピーして使います。

import でロードします。

```
Python 3.2.2 [MSC v.1500 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import Spr
```

Springhead アプリケーションに組み込む場合と違い、ロード時点では何のオブジェクトも生成されていません。まず PHSdk を生成し、次に PHScene を生成することで、PHSolid が生成できるようになります。

```
>>> phSdk = Spr.PHSdk.CreateSdk()
>>> phScene = phSdk.CreateScene(Spr.PHSceneDesc())
>>> solid0 = phScene.CreateSolid(Spr.PHSolidDesc())
>>> for i in range(0,10):
...     print(solid0.GetPose().getPos())
...     phScene.Step()
```

```

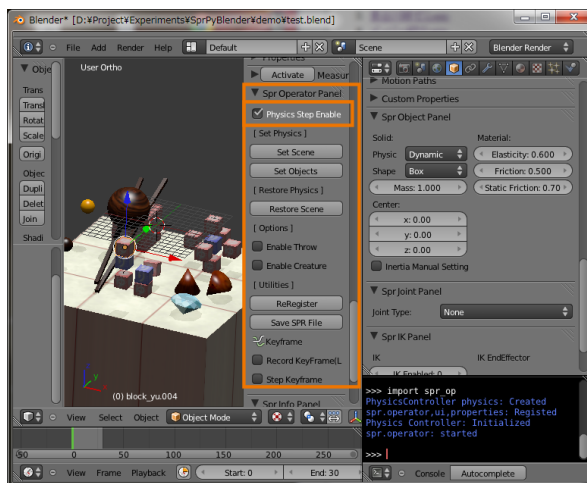
...
Vec3d(0.000,0.000,0.000)
Vec3d(0.000,-0.000,0.000)
Vec3d(0.000,-0.001,0.000)
...(中略)...
Vec3d(0.000,-0.011,0.000)
>>>

```

API の呼び出し方は Springhead アプリケーション組み込みの場合と変わりません。ただし、この状態ではグラフィクス表示が使えないため出力はテキストやファイルに限られます。グラフィクス表示を使うためには、`pyopengl` 等の描画ライブラリと組み合わせるコードを書く必要があります。

応用例

`Spr.pyd` の応用例の一つに `SprBlender` があります。



`SprBlender` は、3DCG ソフト Blender にロードすることで Springhead を使用可能にする拡張機能で、Springhead 開発チームによって公式に開発されています。

Blender は UI 機能の大半が Python で記述されており、公開された Python API を通じて各種の機能を利用することができます。そこで、Blender 上の Python で `Spr.pyd` をロードし、Blender 上の CG オブジェクトを Springhead でシミュレーションできるように書かれた Python スクリプトが `SprBlender` です。

詳しくは Web サイト^{*2}を参照してください。

*2 <http://springhead.info/wiki/SprBlender>

13.2 Python からの Springhead API 使用法

Python から Springhead API を呼び出す際の詳細な方法といくつかの注意点について解説します。

Spr モジュールについて

Springhead の全クラスは Spr モジュールにパッケージされています。

```
import Spr
```

を行うことで使用可能となります (Springhead アプリケーションに組み込む場合は EPLoopInit の中でインポートを実行します)。

Springhead に関連するクラスは全て Spr モジュールの直下に定義されます。Springhead のインタフェースクラスはクラス名から If を取ったもの (*****If *****), ベクトルやクォータニオン等はそのままのクラス名で定義されています。

現時点では, すべての Springhead クラスが Python からの利用に対応しているわけではありません。Python から利用できる Springhead クラスは, dir 関数で確認できます。

```
>>> import Spr
>>> dir(Spr)
```

オブジェクトの生成

C++ で Springhead を利用する場合と同様, まずは Sdk を作成する必要があります。Sdk を作成するには, PHSdk クラスのインスタンスから CreateSdk を呼び出す必要があります。

```
phSdk = Spr.PHSdk().CreateSdk()
grSdk = Spr.GRSdk().CreateSdk()
# ... etc.
```

シーンの Create は Springhead 同様 sdk のインスタンスから行います。

```
phScene = phSdk.CreateScene(Spr.PHSceneDesc())
grScene = grSdk.CreateScene(Spr.GRSceneDesc())
# ... etc.
```

IfInfo, 自動ダウンキャスト

オブジェクトを Create する API の中には、引き渡すディスクリプタの型によって生成するオブジェクトの種類を判別するものがあります。例えば `PHScene::CreateJoint` は、`PHHingeJointDesc` を渡すとヒンジジョイントを生成し、`PHBallJointDesc` を渡すとボールジョイントを生成します。

これらの Create 関数を Python から利用する場合、ディスクリプタの型を判別する機能は現時点では用意されていないため、生成したいオブジェクトの型に対応する `IfInfo` オブジェクトを同時に引数に渡します。

```
# Hinge
phScene.CreateJoint(so1,so2, Spr.PHHingeJoint.GetIfInfoStatic(), desc)

# Ball
phScene.CreateJoint(so1,so2, Spr.PHBallJoint.GetIfInfoStatic(), desc)
```

`IfInfo` オブジェクトはクラス名.`GetIfInfoStatic()` で取得することができます。

より正確には、ディスクリプタ型によって返すオブジェクトを変えるような Create 関数は、以下のように API ヘッダファイルにおいてテンプレートを用いて記述されています。Python API では、非テンプレート版の Create 関数のみがポートされているため、`IfInfo* ii` に相当する引数が必要になります。

```
// in SprPHScene.h
PHJointIf* CreateJoint(PHSolidIf* lhs, PHSolidIf* rhs,
    const IfInfo* ii, const PHJointDesc& desc);

template <class T> PHJointIf* CreateJoint
(PHSolidIf* lhs, PHSolidIf* rhs, const T& desc){
    return CreateJoint(lhs, rhs, T::GetIfInfo(), desc);
}
```

なお、複数種類のクラスのオブジェクトを返しうる API 関数の場合、C++ では共

通するスーパークラス (関節なら PHJointIf など) が返るため自分で DCAST 等を用いてダウンキャストする必要がありますが, Python においてははじめから個々のクラス (PHHingeJoint, PHBallJoint など) の型情報を持つように自動的にダウンキャストされたものが返されます。よって, ユーザが意識してダウンキャストする必要はありません。

enum の扱い

PHSceneIf::SetContactMode のように, enum 型を引数にとる関数があります。残念ながら, 現時点では enum の定義は Python へポートされていません。これらの関数を呼び出す場合は, 対応する整数値を渡してください。

```
# C++ での phScene->SetContactMode(so1, so2, PHSceneDesc::MODE_NONE) と同じ
phScene.SetContactMode(so1, so2, 0)
```

ベクトル, ポーズ

Vec3d, Quaterniond, Posed 等は Springhead と同じクラス名で使用できます。各要素は .x .y 等のプロパティによりアクセスでき, 値の変更も可能です。

```
>>> v = Spr.Vec3d(1,2,3)
>>> v
(1.000,2.000,3.000)
>>> v.x
1.0
>>> v.x = 4.0
>>> v
(4.000,2.000,3.000)
```

Posed, Posef については, w, x, y, z プロパティがクォータニオン成分, px, py, pz プロパティがベクトル成分へのアクセスとなります。また, Posed::Pos(), Posed::Ori() に対応する関数として

- .getOri()
- .setOri()
- .getPos()
- .setPos()

が用意されています。

第 14 章

トラブルシューティング

14.1 概要

本章ではよくあるトラブルとその対処方法を紹介します。

14.2 プログラムのビルド

主に Visual Studio 上で Springhead をビルド際によく遭遇するトラブルと対処法について述べます。

- | | |
|-----|---|
| 現象 | 「include ファイルを開けません」というコンパイルエラーが出る |
| 解決策 | プロジェクト設定で Springhead のインクルードパスが設定されているか確認してください。 |
| 現象 | 「未解決の外部シンボル~が~で参照されました」というリンカエラーが出る |
| 解決策 | プロジェクト設定で Springhead のライブラリパスが設定されているか確認してください。 |
| 現象 | 「~は既に~で定義されています」というリンカエラーが出る |
| 解決策 | プロジェクト設定で、ランタイムライブラリがユーザプログラムと Springhead ライブラリとで同一か確認してください。 |

14.3 物理シミュレーション関連

14.4 ファイル関連

- 現象 ファイルがロードできない
- 解決策 1 プログラムの実行ディレクトリを確認し、ファイルのパスが適切か確認してください。
- 解決策 2 バイナリ形式の X ファイルは読めません。テキスト形式で保存してください。
- 解決策 3 特殊な方言が使われていて読めないこともあります。開発者に問い合わせてください。

14.5 その他のトラブル

- 現象 なぜか動かない
- 解決策 バージョンが古い可能性があります。まず `svn update` を実行してコードを最新にし、次に Springhead ライブラリのリビルドを行ってください。
- 現象 それでも動かない
- 解決策 たまに (?)Springhead のバグであることがあります。開発者に問い合わせてください。

索引

- Affined, 24
- Affinef, 24
- Base, 21
- CDBox, 37
- CDCapsule, 38
- CDConvexMesh, 40
- CDRoundCone, 40
- CDShape, 35
- CDSphere, 38
- Collision, 35
- FIFile, 89
- FileIO, 89
- FISdk, 89
- Foundation, 29
- Framework, 113
- FWApp, 119
- FWObject, 115
- FWScene, 115
- FWSdk, 114
- Graphics, 71
- GRCamera, 78
- GRDeviceGL, 71
- GRFrame, 76
- GRLight, 78
- GRMaterial, 79
- GRMesh, 80
- GRRender, 71, 82
- GRScene, 72
- GRSdk, 71
- GRVisual, 75
- HISdk, 99
- HumanInterface, 99
- IfInfo, 29
- Matrix2d, 23
- Matrix2f, 23
- Matrix3d, 23
- Matrix3f, 23
- NameManager, 31
- Object, 29
- PHBallJoint, 56
- PHConstraint, 51
- PHHingeJoint, 55
- PHJoint, 51
- PHMaterial, 41
- PHPathJoint, 55
- PHScene, 46
- PHSdk, 45
- PHSliderJoint, 55
- PHSolid, 48
- PHSpring, 57
- Physics, 45
- Posed, 27
- Posef, 27
- Quaterionf, 25
- Quaterniond, 25
- Scene, 32
- Springhead, 7
- UTRef, 28
- UTRefCount, 28
- UTString, 28
- UTTimer, 32
- UTTreeNode, 28
- UTTypeDesc, 28
- Vec2d, 21
- Vec2f, 21
- Vec3d, 21
- Vec3f, 21
- Vec4d, 21
- Vec4f, 21
- アフィン変換, 24
- カプセル, 38
- カメラ, 78
- 関節座標系, 70
- ギア, 70
- 球, 38
- 行列, 23

クォータニオン, 25

スマートポインタ, 28
スライダ, 55

接触, 70

ソケット, 53

タイマ, 32

直方体, 37

デバイス, 71

凸メッシュ, 40

バスジョイント, 55
バネ, 57

ヒンジ, 55

ファイル, 89
物性, 41
プラグ, 53
フレーム, 76

ベクトル, 21

ポーズ, 27
ボールジョイント, 56

マテリアル, 79
丸コーン, 40

メッシュ, 80

ライト, 78

レンダラ, 71, 82