

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-170279

(P2010-170279A)

(43) 公開日 平成22年8月5日(2010.8.5)

(5) Int.Cl.		F I	テーマコード (参考)
G06T 15/00	(2006.01)	G06T 15/00 100A	2C001
G06T 15/70	(2006.01)	G06T 15/70 B	5B050
A63F 13/00	(2006.01)	A63F 13/00 B	5B080

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 62 頁)

(21) 出願番号 特願2009-11370 (P2009-11370)
 (22) 出願日 平成21年1月21日 (2009.1.21)

(71) 出願人 000134855
 株式会社バンダイナムコゲームス
 東京都品川区東品川4丁目5番15号
 (74) 代理人 100090387
 弁理士 布施 行夫
 (74) 代理人 100090398
 弁理士 大淵 美千栄
 (74) 代理人 100113066
 弁理士 永田 美佐
 (72) 発明者 山口 兼太郎
 東京都品川区東品川四丁目5番15号 株
 式会社バンダイナムコゲームス内
 (72) 発明者 山田 昌紀
 東京都品川区東品川四丁目5番15号 株
 式会社バンダイナムコゲームス内
 最終頁に続く

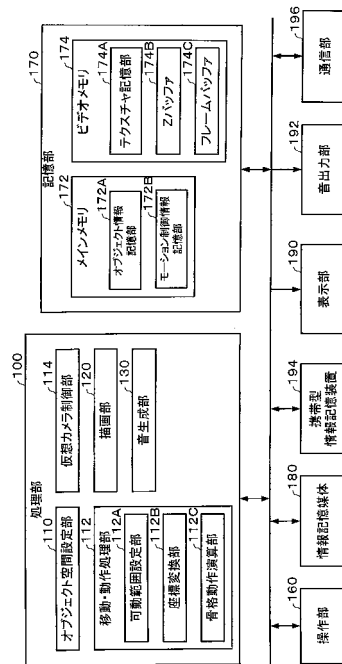
(54) 【発明の名称】 骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体

(57) 【要約】

【課題】自由度の高い関節の可動範囲を十分に確保して滑らかなキャラクタの動作表現を可能とする骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体を提供する。

【解決手段】親骨と子骨とが関節によって連結された骨格モデルの動作を制御する骨格動作制御システムである。可動範囲設定部112Aは、関節を中心点とする球面上の所与の点を焦点とし、関節に対応する中心点と焦点とを結ぶ軸に直交する平面を射影面とし、関節の可動範囲を、射影面上において設定する。座標変換部112Bは、球面上において子骨の向きを表す点を焦点に基づいて射影面上に射影する。骨格動作演算部112Cは、射影面上に射影された点の位置に基づいて、可動範囲設定部112Aにより設定された可動範囲の制限下で、親骨に対する子骨の向きを演算する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

親骨と子骨とが関節によって連結された骨格モデルの動作を制御するためのプログラムであって、

関節を中心点とする球面上の所与の点を焦点とし、該中心点と該焦点とを結ぶ軸に直交する平面を射影面とし、前記関節の可動範囲を、前記射影面上において設定する可動範囲設定部と、

前記球面上において前記子骨の向きを表す点を前記焦点に基づいて前記射影面上に射影する座標変換部と、

前記射影面上に射影された点の位置に基づいて、前記可動範囲の制限下で、前記親骨に対する前記子骨の向きを演算する骨格動作演算部として、

コンピュータを機能させることを特徴とするプログラム。

10

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記可動範囲設定部が、

前記射影面上で矩形を成すように前記可動範囲を設定することを特徴とするプログラム

。

【請求項 3】

請求項 1 において、

前記可動範囲設定部が、

前記射影面上で楕円形を成すように前記可動範囲を設定することを特徴とするプログラム。

20

【請求項 4】

請求項 1 において、

前記可動範囲設定部が、

前記射影面上で小判形を成すように前記可動範囲を設定することを特徴とするプログラム。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 のいずれかにおいて、

前記親骨に沿った軸が、x 軸として設定され、前記親骨に直交し、かつ互いに直交する 2 つの軸が、それぞれ y 軸および z 軸として設定されており、

前記射影面上に、互いに直交する座標軸が、それぞれ s 軸および t 軸として設定されており、

前記座標変換部が、

前記焦点を基準として、

$s = -z / (x + 1)$ および $t = y / (x + 1)$ {ただし、 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ }

による射影を行うことによって、前記球面上の点 (x, y, z) を、前記射影面上の点 (s, t) へ変換することを特徴とするプログラム。

30

【請求項 6】

請求項 5 において、

前記骨格モデルの関節に関して、前記射影面上で成す可動範囲の形状として矩形、楕円形、または小判形のいずれかが予め設定されているとともに、該関節における y 軸回りの子骨の回転角および z 軸回りの子骨の回転角の許容範囲が予め設定されており、

前記可動範囲設定部が、

前記射影面上で成す前記可動範囲の形状と、前記関節における y 軸回りの子骨の回転角および z 軸回りの子骨の回転角の許容範囲とに基づいて、前記関節の可動範囲を前記射影面上において設定することを特徴とするプログラム。

40

【請求項 7】

請求項 1 ~ 6 のいずれかにおいて、

前記骨格動作演算部が、

50

前記親骨の動作に対応する前記子骨の動作を演算して得られた前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっているか否かを判定し、前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっていない場合には、前記可動範囲の形状に応じた条件を満たすように、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正することを特徴とするプログラム。

【請求項 8】

請求項 1 ~ 6 のいずれかにおいて、

前記骨格動作演算部が、

前記親骨の動作に対応する前記子骨の動作を演算して得られた前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっているか否かを判定し、前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっていない場合には、前記射影面上において、前記射影された点が、前記射影面上で成す可動範囲の境界と衝突する際の反発拳動を演算し、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正することを特徴とするプログラム。

10

【請求項 9】

請求項 8 において、

前記骨格動作演算部が、

前記射影面上における前記射影された点の反発拳動が繰返し発生する場合に、前記射影された点の反発拳動が収束するまでに要する時間を求め、当該時間が所定時間以下となる場合に、前記射影された点の反発拳動を終了させることを特徴とするプログラム。

【請求項 10】

請求項 8 または 9 において、

前記骨格動作演算部が、

前記可動範囲の境界における前記射影された点の反発拳動を演算して得られた前記射影面上の点が前記可動範囲内に収まっていない場合には、前記可動範囲の形状に応じた条件を満たすように、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正することを特徴とするプログラム。

20

【請求項 11】

コンピュータにより読み取り可能な情報記憶媒体であって、請求項 1 ~ 10 のいずれかに記載のプログラムを記憶していることを特徴とする情報記憶媒体。

【請求項 12】

親骨と子骨とが関節によって連結された骨格モデルの動作を制御する骨格動作制御システムであって、

30

関節を中心点とする球面上の所与の点を焦点とし、該中心点と該焦点とを結ぶ軸に直交する平面を射影面とし、前記関節の可動範囲を、前記射影面上において設定する可動範囲設定部と、

前記球面上において前記子骨の向きを表す点を前記焦点に基づいて前記射影面上に射影する座標変換部と、

前記射影面上に射影された点の位置に基づいて、前記可動範囲の制限下で、前記親骨に対する前記子骨の向きを演算する骨格動作演算部と、

を含むことを特徴とする骨格動作制御システム。

【発明の詳細な説明】

40

【技術分野】

【0001】

本発明は、骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、仮想 3 次元空間（オブジェクト空間）におけるキャラクタ（例えば、人、動物）、ロープ、布などの動作を、骨格モデル（スケルトンモデル）を用いて演算する手法が知られている。骨格モデルは、複数の骨を関節で連結することにより構成されており、一般的に骨同士に親子関係が設定され、親骨の動作に追従するように子骨の動作を決定する演算を行っている。

50

【0003】

そして、このような骨格モデルでは、関節毎に自由度が異なっていたり、関節毎に可動範囲が異なっていたりする。例えば、人体モデルにおける肘や膝に相当する関節では自由度が低く、可動範囲が狭くなりやすい傾向にあり、肩などに相当する関節では自由度が高く、可動範囲が広くなりやすい傾向にある。

【0004】

また親骨の動作に対応する子骨の動作を演算する際には、関節における親骨に対する子骨の曲げ状態や親骨に対する子骨の捻り状態といった回転情報を演算する処理が行われており、従来手法では、親骨に対する子骨の向きを親骨の座標系を基準とした3軸(x, y, z)の各軸周りの回転角度で表現するようにしていた。

10

【特許文献1】特開2000-306116号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、従来手法を単純に適用して骨格モデルの動作を設計した場合、関節の可動範囲を広い範囲で設定しようとする、動作設計者の意図とはかけ離れたいびつな範囲で関節の可動範囲が設定されてしまうという現状があり、滑らかなキャラクタの動作を表現することが難しいという課題があった。

【0006】

本発明は上記事情に鑑みてなされたものであり、その目的は、関節の可動範囲を十分に確保して滑らかなキャラクタの動作表現を可能とする骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体を提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【0007】

(1)本発明は、親骨と子骨とが関節によって連結された骨格モデルの動作を制御するためのプログラムであって、関節を中心点とする球面上の所与の点を焦点とし、該中心点と該焦点とを結ぶ軸に直交する平面を射影面とし、前記関節の可動範囲を、前記射影面上において設定する可動範囲設定部と、前記球面上において前記子骨の向きを表す点を前記焦点に基づいて前記射影面上に射影する座標変換部と、前記射影面上に射影された点の位置に基づいて、前記可動範囲の制限下で、前記親骨に対する前記子骨の向きを演算する骨格動作演算部と、を含む骨格動作制御システムに関するものである。また本発明は、上記各部としてコンピュータを機能させるプログラム及びそのようなプログラムを記憶するコンピュータに読み取り可能な情報記憶媒体に関するものである。

30

【0008】

本発明における「球面上において子骨の向きを表す点」は、例えば、子骨あるいは子骨の延長線と球面の交点とすることができる。

【0009】

本発明によれば、射影を用いて球面上の点を射影面上に座標変換して可動範囲を設定することによって、従来における関節の可動範囲を設定する手法に比べて、関節の可動範囲を広範囲かつ整然とした範囲で設定することができ、滑らかに骨格モデルを動作させる演算を実現することができるようになる。例えば、可動範囲の狭い関節については、従来から慣用されてきた方式と同等の制限によって骨格モデルを動作させることができ、可動範囲の広い関節については、従来から慣用されてきた方式よりも自然で滑らかな骨格モデルの動作を表現できる。

40

【0010】

(2)本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記可動範囲設定部が、前記射影面上で矩形を成すように前記可動範囲を設定するようにしてもよい。

【0011】

このようにすれば、関節の可動範囲が把握しやすく、かつ従来から慣用されてきた方式

50

と同等の感覚で骨格モデルの動作設計をすることができるため、骨格モデルの動作設計の環境を向上させることができる。

【0012】

(3) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記可動範囲設定部が、前記射影面上で楕円形を成すように前記可動範囲を設定するようにしてもよい。

【0013】

このようにすれば、関節の可動範囲が把握しやすく、かつ従来から慣用されてきた方式と同等の感覚で骨格モデルの動作設計をすることができるため、骨格モデルの動作設計の環境を向上させることができる。

10

【0014】

(4) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記可動範囲設定部が、前記射影面上で小判形を成すように前記可動範囲を設定するようにしてもよい。

【0015】

このようにすれば、関節の可動範囲が把握しやすく、かつ従来から慣用されてきた方式と同等の感覚で骨格モデルの動作設計をすることができるため、骨格モデルの動作設計の環境を向上させることができる。

【0016】

(5) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記親骨に沿った軸が、 x 軸として設定され、前記親骨に直交し、かつ互いに直交する2つの軸が、それぞれ y 軸および z 軸として設定されており、前記射影面上に、互いに直交する座標軸が、それぞれ s 軸および t 軸として設定されており、前記座標変換部が、前記焦点を基準として、 $s = -z / (x + 1)$ および $t = y / (x + 1)$ {ただし、 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ } による射影を行うことによって、前記球面上の点 (x, y, z) を、前記射影面上の点 (s, t) へ変換するようにしてもよい。

20

【0017】

このようにすれば、射影による変換が、四則演算のみで構成されるので、計算負荷が小さい。

【0018】

(6) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記骨格モデルの関節に関して、前記射影面上で成す可動範囲の形状として矩形、楕円形、または小判形のいずれかが予め設定されているとともに、該関節における y 軸回りの子骨の回転角および z 軸回りの子骨の回転角の許容範囲が予め設定されており、前記可動範囲設定部が、前記射影面上で成す前記可動範囲の形状と、前記関節における y 軸回りの子骨の回転角および z 軸回りの子骨の回転角の許容範囲とに基づいて、前記関節の可動範囲を前記射影面上において設定するようにしてもよい。

30

【0019】

このようにすれば、従来方式を適用した骨格モデルの動作設計の資産を有効に活用して、簡便に関節の可動範囲を設定することができるようになる。

40

【0020】

(7) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記骨格動作演算部が、前記親骨の動作に対応する前記子骨の動作を演算して得られた前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっているか否かを判定し、前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっていない場合には、前記可動範囲の形状に応じた条件を満たすように、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正するようにしてもよい。

【0021】

このようにすれば、演算負荷を抑えつつ、自然な動きを表現できる骨の向きを求めることができる。

50

【 0 0 2 2 】

(8) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記骨格動作演算部が、前記親骨の動作に対応する前記子骨の動作を演算して得られた前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっているか否かを判定し、前記親骨に対する前記子骨の向きが前記可動範囲内に収まっていない場合には、前記射影面上において、前記射影された点が、前記射影面上で成す可動範囲の境界と衝突する際の反発拳動を演算し、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正するようにしてもよい。

【 0 0 2 3 】

このようにすれば、演算負荷を抑えつつ、自然な動きを表現できる骨の向きを求めることができる。

10

【 0 0 2 4 】

(9) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記骨格動作演算部が、前記射影面上における前記射影された点の反発拳動が繰返し発生する場合に、前記射影された点の反発拳動が収束するまでに要する時間を求め、当該時間が所定時間以下となる場合に、前記射影された点の反発拳動を終了させるようにしてもよい。

【 0 0 2 5 】

このようにすれば、子骨の反発拳動が収束せずに不自然な動きになることを回避できる。

【 0 0 2 6 】

(1 0) 本発明の骨格動作制御システム、プログラムおよび情報記憶媒体では、前記骨格動作演算部が、前記可動範囲の境界における前記射影された点の反発拳動を演算して得られた前記射影面上の点が前記可動範囲内に収まっていない場合には、前記可動範囲の形状に応じた条件を満たすように、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正するようにしてもよい。

20

【 0 0 2 7 】

このようにすれば、反発拳動計算を繰返すことによる計算負荷の増大を軽減することができる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 8 】

以下、本発明の実施の形態について説明する。なお、以下に説明する実施の形態は、特許請求の範囲に記載された本発明の内容を不当に限定するものではない。また以下において説明する実施の形態で説明される構成の全てが、本発明の必須構成要件であるとは限らない。

30

【 0 0 2 9 】

1 . 構成

図 1 に本実施形態のゲームシステム（骨格動作制御システムの一例）の機能ブロック図の例を示す。なお本実施形態のゲームシステムは図 1 の構成要素（各部）の一部を省略した構成としてもよい。

【 0 0 3 0 】

操作部 1 6 0 は、プレーヤがキャラクタ（人、動物、ロボットなどの多関節モデル）の操作データを入力するためのものであり、その機能は、レバー、ボタン、ステアリング、マイク、タッチパネル型ディスプレイ、或いは筐体などにより実現できる。記憶部 1 7 0 は、処理部 1 0 0 や通信部 1 9 6 などのワーク領域となるもので、その機能は R A M 、 V R A M などにより実現できる。

40

【 0 0 3 1 】

情報記憶媒体 1 8 0 （コンピュータにより読み取り可能な媒体）は、プログラムやデータなどを格納するものであり、その機能は、光ディスク（ C D 、 D V D ） 、 光磁気ディスク（ M O ） 、 磁気ディスク、ハードディスク、磁気テープ、或いはメモリ（ R O M ） などにより実現できる。処理部 1 0 0 は、情報記憶媒体 1 8 0 に格納されるプログラム（データ）に基づいて本実施形態の種々の処理を行う。即ち情報記憶媒体 1 8 0 には、本実施形

50

態の各部としてコンピュータを機能させるためのプログラム（各部の処理をコンピュータに実行させるためのプログラム）が記憶される。

【0032】

表示部190は、本実施形態により生成された画像を出力するものであり、その機能は、CRT、LCD、タッチパネル型ディスプレイ、或いはHMD（ヘッドマウントディスプレイ）などにより実現できる。音出力部192は、本実施形態により生成された音を出力するものであり、その機能は、スピーカ、或いはヘッドフォンなどにより実現できる。

【0033】

携帯型情報記憶装置194は、プレーヤの個人データやゲームのセーブデータなどが記憶されるものであり、この携帯型情報記憶装置194としては、メモリカードや携帯型ゲーム装置などがある。通信部196は外部（例えばホスト装置や他の画像生成システム）との間で通信を行うための各種制御を行うものであり、その機能は、各種プロセッサ又は通信用ASICなどのハードウェアや、プログラムなどにより実現できる。

10

【0034】

なお本実施形態の各部としてコンピュータを機能させるためのプログラム（データ）は、ホスト装置（サーバー）が有する情報記憶媒体からネットワーク及び通信部196を介して情報記憶媒体180や記憶部170に配信してもよい。このようなホスト装置（サーバー）の情報記憶媒体の使用も本発明の範囲内に含めることができる。

【0035】

処理部100は、操作部160からの操作データやプログラムなどに基づいて、ゲーム処理、画像生成処理、或いは音生成処理などの処理を行う。ここでゲーム処理としては、ゲーム開始条件が満たされた場合にゲームを開始する処理、ゲームを進行させる処理、キャラクタやマップなどのオブジェクトを配置する処理、オブジェクトを表示する処理、ゲーム結果を演算する処理、或いはゲーム終了条件が満たされた場合にゲームを終了する処理などがある。この処理部100は記憶部170をワーク領域として各種処理を行う。処理部100の機能は各種プロセッサ（CPU、GPU、DSP等）、ASIC（ゲートアレイ等）などのハードウェアや、プログラムにより実現できる。

20

【0036】

処理部100は、オブジェクト空間設定部110、移動・動作処理部112、仮想カメラ制御部114、描画部120、音生成部130を含む。なおこれらの一部を省略する構成としてもよい。

30

【0037】

オブジェクト空間設定部110は、メインメモリ172のオブジェクト情報記憶部172Aに記憶されているオブジェクト情報に基づいて、車、キャラクタ、建物、球場、樹木、柱、壁、コース（道路）、マップ（地形）などの表示物を表す各種オブジェクト（ポリゴン、自由曲面又はサブディビジョンサーフェスなどのプリミティブで構成されるオブジェクト）をオブジェクト空間に配置設定する処理を行う。具体的には、後述する移動・動作処理部112の処理結果に基づいて、ワールド座標系でのオブジェクトの位置や回転角度（向き、方向と同義）を決定し、決定された位置（X, Y, Z）に決定された回転角度（X軸回り、Y軸回り、およびZ軸回りでの回転角度）でオブジェクトを配置する。

40

【0038】

移動・動作処理部112は、オブジェクト（キャラクタ等）の移動・動作演算（移動・動作シミュレーション）を行う。すなわち操作部160によりプレーヤが入力した操作データや、プログラム（移動・動作アルゴリズム）や、各種データ（モーションデータ）などに基づいて、オブジェクトをオブジェクト空間内で移動させたり、オブジェクトを動作（モーション、アニメーション）させたりする処理を行う。具体的には、オブジェクトの移動情報（位置、回転角度、速度、或いは加速度）や動作情報（オブジェクトを構成する各パーツの位置、或いは回転角度）を、1フレーム（1/60秒）毎に順次求めるシミュレーション処理を行う。なおフレームは、オブジェクトの移動・動作処理（シミュレーション処理）や画像生成処理を行う時間の単位である。

50

【 0 0 3 9 】

特に本実施の形態では、図 2 に示すように、複数の骨が関節によって連結されており、関節で連結されている一の骨を親骨とし、親骨と同一の関節で連結されている他の骨を子骨として、親骨の動きに子骨が追従するように各骨の動きが決定される骨格モデルを用いてオブジェクトの動作を決定する処理を行っている。図 2 に示す骨格モデルの例では、関節 A において骨 A が親骨に相当するとともに、骨 B が子骨に相当する。そして、移動・動作処理部 1 1 2 は、可動範囲設定部 1 1 2 A と、座標変換部 1 1 2 B と、骨格動作演算部 1 1 2 C とを含む。

【 0 0 4 0 】

可動範囲設定部 1 1 2 A は、関節を中心点とする球面上の所与の点を焦点とし、該中心点と該焦点とを結ぶ軸に直交する平面を射影面とし、関節の可動範囲を、射影面上において設定する。このとき可動範囲は、射影面上で矩形、楕円形、あるいは小判形を成すように設定することができる。

10

【 0 0 4 1 】

また本実施形態では、骨格モデルの関節に関して、射影面上で成す可動範囲の形状として矩形、楕円形、または小判形のいずれかが予め設定されているとともに、関節における y 軸回りの子骨の回転角 (y 軸回転角) および z 軸回りの子骨の回転角 (z 軸回転角) の許容範囲が予め設定されている。具体的には、関節毎の可動範囲の形状を示す形状パターン情報と、関節毎の y 軸回転角の許容範囲および z 軸回転角の許容範囲を示す許容範囲情報とがメインメモリ 1 7 2 のモーション制御情報記憶部 1 7 2 B に記憶されている。そして可動範囲設定部 1 1 2 A は、形状パターン情報により得られる射影面上で成す演算対象の関節の可動範囲の形状と、許容範囲情報により得られる演算対象の関節の y 軸回転角および z 軸回転角の許容範囲とに基づいて、関節の可動範囲を射影面上において設定する。

20

【 0 0 4 2 】

座標変換部 1 1 2 B は、関節を中心点とする球面上において子骨の向きを表す点を焦点に基づいて射影面上に射影する。本実施形態では、親骨に沿った軸が、x 軸として設定され、親骨に直交し、かつ互いに直交する 2 つの軸が、それぞれ y 軸および z 軸として設定されており、射影面上に、互いに直交する座標軸が、それぞれ s 軸および t 軸として設定されており、座標変換部 1 1 2 B は、焦点を基準として、 $s = -z / (x + 1)$ および $t = y / (x + 1)$ {ただし、 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ } による射影を行うことによって、球面上の点 (x , y , z) を、射影面上の点 (s , t) へ変換する。

30

【 0 0 4 3 】

骨格動作演算部 1 1 2 C は、射影面上に射影された点の位置に基づいて、可動範囲設定部 1 1 2 A により設定された可動範囲の制限下で、親骨に対する子骨の向きを演算する。このとき骨格動作演算部 1 1 2 C は、プレイヤーの入力情報、オブジェクト同士の衝突 (ヒット) による外力情報や、その他の動作影響情報 (例えば、重力情報、風力情報等) などに基づいて、親骨の動作に対応する子骨の動作を演算して得られた親骨に対する子骨の向きが可動範囲内に収まっているか否かを判定する。そして、親骨に対する子骨の向きが可動範囲内に収まっていない場合には、射影面上における可動範囲の形状に応じた条件を満たすように親骨に対する子骨の向きを補正して、演算対象の関節の可動範囲に収まるように子骨の向きを決定する。

40

【 0 0 4 4 】

また骨格動作演算部 1 1 2 C は、演算対象の関節に対して子骨の反発挙動が許容されていることを条件として、親骨に対する子骨の向きが可動範囲内に収まっていない場合に、前記射影面上において、前記射影された点が、前記射影面上で成す可動範囲の境界と衝突する際の反発挙動を演算し、前記親骨に対する前記子骨の向きを補正する。本実施の形態では、1 フレーム (例えば、1 / 60 秒) あたりの射影面上における点の動きを等速直線運動で近似して反発挙動を演算する。なお射影面上における射影された点の反発挙動が繰返し発生する場合には、射影された点の反発挙動が収束するまでに要する時間を求め、当該時間が所定時間以下となる場合に、射影された点の反発挙動を終了させる。

50

【 0 0 4 5 】

そして移動・動作処理部 1 1 2 では、骨格動作演算部 1 1 2 C の演算結果に基づいて、オブジェクトの表面を構成するポリゴン等（表面形状）を変形させることによってオブジェクトを動作させる演算を行う。

【 0 0 4 6 】

仮想カメラ制御部 1 1 4 は、オブジェクト空間内の所与（任意）の視点から見える画像を生成するための仮想カメラ（視点）の制御処理を行う。具体的には、仮想カメラの位置（X, Y, Z）又は回転角度（X 軸回り、Y 軸回り、および Z 軸回りでの回転角度）を制御する処理（視点位置、視線方向あるいは画角を制御する処理）を行う。

【 0 0 4 7 】

例えば仮想カメラによりオブジェクト（例えば車、キャラクタ、ボール）を後方から撮影する場合には、オブジェクトの位置又は回転の変化に仮想カメラが追従するように、仮想カメラの位置又は回転角度（仮想カメラの向き）を制御する。この場合には、移動・動作処理部 1 1 2 で得られたオブジェクトの位置、回転角度又は速度などの情報（所定の制御情報の一例）に基づいて、仮想カメラを制御できる。或いは、仮想カメラを、予め決められた回転角度で回転させたり、予め決められた移動経路で移動させたりする制御を行ってもよい。この場合には、仮想カメラの位置（移動経路）又は回転角度を特定するための仮想カメラデータ（所定の制御情報の一例）に基づいて仮想カメラを制御する。なお、仮想カメラ（視点）が複数存在する場合には、それぞれの仮想カメラについて上記の制御処理が行われる。

【 0 0 4 8 】

描画部 1 2 0 は、処理部 1 0 0 で行われる種々の処理（ゲーム処理）の結果に基づいて描画処理を行い、これにより画像を生成し、表示部 1 9 0 に出力する。いわゆる 3 次元ゲーム画像を生成する場合には、まずオブジェクト（モデル）の各頂点の頂点データ（頂点の位置座標、テクスチャ座標、色データ、法線ベクトル或いは値等）を含むオブジェクト情報（モデル情報）がメインメモリ 1 7 2 のオブジェクト情報記憶部 1 7 2 A から入力され、入力されたオブジェクト情報に含まれる頂点情報に基づいて、頂点処理（頂点シェーダによるシェーディング）が行われる。なお頂点処理を行うに際して、必要に応じてポリゴンを再分割するための頂点生成処理（テッセレーション、曲面分割、ポリゴン分割）を行うようにしてもよい。頂点処理では、頂点処理プログラム（頂点シェーダプログラム、第 1 のシェーダプログラム）に従って、頂点の移動処理や、座標変換（ワールド座標変換、カメラ座標変換）、クリッピング処理、あるいは透視変換等のジオメトリ処理が行われ、その処理結果に基づいて、オブジェクトを構成する頂点群について与えられた頂点情報を変更（更新、調整）する。そして、頂点処理後の頂点情報に基づいてラスタライズ（走査変換）が行われ、ポリゴン（プリミティブ）の面とピクセルとが対応づけられる。そしてラスタライズに続いて、画像を構成するピクセル（表示画面を構成するフラグメント）を描画するピクセル処理（ピクセルシェーダによるシェーディング、フラグメント処理）が行われる。ピクセル処理では、ピクセル処理プログラム（ピクセルシェーダプログラム、第 2 のシェーダプログラム）に従って、テクスチャの読み出し（テクスチャマッピング）、色情報の設定/変更、半透明合成、アンチエイリアス等の各種処理を行って、画像を構成するピクセルの最終的な描画色を決定し、透視変換されたオブジェクトの描画色をレンダリングターゲットであるビデオメモリ 1 7 4 のフレームバッファ 1 7 4 C（ピクセル単位で画像情報を記憶できるバッファ。）に出力（描画）する。すなわち、ピクセル処理では、画像情報（色、法線、輝度、値等）をピクセル単位で設定あるいは変更するパーピクセル処理を行う。これにより、オブジェクト空間内において仮想カメラ（所与の視点）から見える画像が生成される。なお、仮想カメラ（視点）が複数存在する場合には、それぞれの仮想カメラから見える画像を分割画像として 1 画面に表示できるように画像を生成することができる。

【 0 0 4 9 】

なお頂点処理やピクセル処理は、シェーディング言語によって記述されたシェーダプロ

10

20

30

40

50

グラムによって、ポリゴン（プリミティブ）の描画処理をプログラム可能にするハードウェア、いわゆるプログラマブルシェーダ（頂点シェーダやピクセルシェーダ）により実現される。プログラマブルシェーダでは、頂点単位の処理やピクセル単位の処理がプログラム可能になることで描画処理内容の自由度が高く、従来のハードウェアによる固定的な描画処理に比べて表現力を大幅に向上させることができる。

【 0 0 5 0 】

そして描画部 1 2 0 は、オブジェクトを描画する際に、ジオメトリ処理、テクスチャマッピング、隠面消去処理、ブレンディング等を行う。

【 0 0 5 1 】

ジオメトリ処理では、オブジェクトに対して、座標変換、クリッピング処理、透視投影変換、或いは光源計算等の処理が行われる。そして、ジオメトリ処理後（透視投影変換後）のオブジェクト情報（オブジェクトの頂点の位置座標、テクスチャ座標、色データ（輝度データ）、法線ベクトル、或いは値等）は、メインメモリ 1 7 2 のオブジェクト情報記憶部 1 7 2 A に保存される。

10

【 0 0 5 2 】

テクスチャマッピングは、ビデオメモリ 1 7 4 のテクスチャ記憶部 1 7 4 A に記憶されるテクスチャ（テクセル値）をオブジェクトにマッピングするための処理である。具体的には、オブジェクトの頂点に設定（付与）されるテクスチャ座標等を用いてテクスチャ記憶部 1 7 4 A からテクスチャ（色（RGB）、値などの表面プロパティ）を読み出す。そして、2次元の画像であるテクスチャをオブジェクトにマッピングする。この場合に、ピクセルとテクセルとを対応づける処理や、テクセルの補間としてバイリニア補間、トライリニア補間などを行う。

20

【 0 0 5 3 】

隠面消去処理としては、描画ピクセルのZ値（奥行き情報）が格納されるZバッファ 1 7 4 B（奥行きバッファ）を用いたZバッファ法（奥行き比較法、Zテスト）による隠面消去処理を行うことができる。すなわちオブジェクトのプリミティブに対応する描画ピクセルを描画する際に、Zバッファ 1 7 4 B に格納されるZ値を参照する。そして参照されたZバッファのZ値と、プリミティブの描画ピクセルでのZ値とを比較し、描画ピクセルでのZ値が、仮想カメラから見て手前側となるZ値（例えば小さなZ値）である場合には、その描画ピクセルの描画処理を行うとともにZバッファ 1 7 4 B のZ値を新たなZ値に更新する。

30

【 0 0 5 4 】

ブレンディングとしては、値（A値）に基づく半透明合成処理（通常ブレンディング、加算ブレンディング又は減算ブレンディング等）を行う。例えば通常ブレンディングの場合には下式（1）～（3）の処理を行う。

【 0 0 5 5 】

$$R_Q = (1 - \alpha) \times R_1 + \alpha \times R_2 \quad (1)$$

$$G_Q = (1 - \alpha) \times G_1 + \alpha \times G_2 \quad (2)$$

$$B_Q = (1 - \alpha) \times B_1 + \alpha \times B_2 \quad (3)$$

【 0 0 5 6 】

また、加算ブレンディングの場合には下式（4）～（6）の処理を行う。なお単純加算の場合は $\alpha = 1$ として下式（4）～（6）の処理を行う。

40

【 0 0 5 7 】

$$R_Q = R_1 + \alpha \times R_2 \quad (4)$$

$$G_Q = G_1 + \alpha \times G_2 \quad (5)$$

$$B_Q = B_1 + \alpha \times B_2 \quad (6)$$

【 0 0 5 8 】

また、減算ブレンディングの場合には下式（7）～（9）の処理を行う。なお単純減算の場合は $\alpha = 1$ として下式（7）～（9）の処理を行う。

【 0 0 5 9 】

50

$$R_Q = R_1 - \alpha \times R_2 \quad (7)$$

$$G_Q = G_1 - \alpha \times G_2 \quad (8)$$

$$B_Q = B_1 - \alpha \times B_2 \quad (9)$$

【0060】

ここで、 R_1 、 G_1 、 B_1 は、ビデオメモリ174のフレームバッファ174Cに既に描画されている画像（原画像）のRGB成分であり、 R_2 、 G_2 、 B_2 は、フレームバッファ174Cに描画すべき画像のRGB成分である。また、 R_Q 、 G_Q 、 B_Q は、ブレンディングにより得られる画像のRGB成分である。なお、 α 値は、各ピクセル（テクセル、ドット）に関連づけて記憶できる情報であり、例えば色情報以外のプラスアルファの情報である。 α 値は、マスク情報、半透明度（透明度、不透明度と等価）、バンプ情報などとして使用できる。

10

【0061】

音生成部130は、処理部100で行われる種々の処理の結果に基づいて音処理（サウンド処理）を行い、BGM、効果音、又は音声などのゲーム音を生成し、音出力部192（スピーカ）に出力する。

【0062】

なお、本実施形態の画像生成システムは、1人のプレイヤーのみがプレイできるシングルプレイヤーモード専用のシステムにしてもよいし、複数のプレイヤーがプレイできるマルチプレイヤーモードも備えるシステムにしてもよい。また複数のプレイヤーがプレイする場合に、これらの複数のプレイヤーに提供するゲーム画像やゲーム音を、1つの端末を用いて生成してもよいし、ネットワーク（伝送ライン、通信回線）などで接続された複数の端末（ゲーム機、携帯電話）を用いて分散処理により生成してもよい。

20

【0063】

2. 本実施形態の手法

以下では、従来手法と対比しながら、本実施形態の手法を説明する。

【0064】

2-1. 従来手法（3軸回転角方式）

2-1-1. 座標系

所与の関節の両側の骨のうち一方を親骨、他方を子骨と呼ぶことにする。関節の回転（曲げ、捻り）の状態は、親骨を基準とした子骨の向きで表すことができる。骨の向きを表すために、各骨に対して図3のように座標系を定める。

30

【0065】

2-1-2. 3軸回転角度による表現

従来手法では、親骨に対する子骨の向きをxyz座標系の3軸の回転角度（それぞれ r_x 、 r_y 、 r_z とする）で表し、各軸の回転角度の取り得る範囲によって可動範囲を設定する。子骨を回転させる順序は種々考えられるが、以下の例では、親骨の座標系を基準としてx軸回転、z軸回転、y軸回転の順序とする。

【0066】

ここで、関節を中心点とする半径1の球面Sを作り、子骨のx軸と球面Sとの交点をPとすると、関節の曲げ状態は、点Pの位置で表すことができる。3軸に関する回転角度と点Pの位置との関係を図示すると、図4のように地球儀の緯度、経度と同様の形態となる。なお、図4では、回転角度を10°間隔で表しており、 r_y が経度、 r_z が緯度に相当し、 r_x はその位置での捻りに相当することになる。

40

【0067】

2-1-3. 可動範囲の設定

従来手法において、関節の曲げ角度に関する可動範囲を設定することは、球面S上に可動範囲に相当する領域（以下、単に可動領域という）を設定することに相当する。例えば、y軸回転が $-40^\circ \sim 20^\circ$ 、z軸回転が $-10^\circ \sim 30^\circ$ の場合、球面S上に設定される可動領域は図5のようになる。球面Sの中心と可動領域の境界とを結んで、可動領域らしく表示すると図6のようになる。

50

【0068】

この例のように関節の曲げ角度に関する可動範囲が比較的狭い場合は問題ないが、 z 軸回転の可動範囲が $\pm 90^\circ$ を超える設定をしようとする、問題が生じる。一般的に、経度の値は $-180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で取り得るのに対して、緯度の値は $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を超えられないからである。敢えて工夫をすれば可動領域の設定自体は可能であり、例えば、 r_y が $-40^\circ \sim 20^\circ$ 、 r_z が $-10^\circ \sim 110^\circ$ の場合、図7～図9に示すような可動領域が設定される。しかし、図7～図9に示す各設定例において、いずれも可動領域の形状がいびつになったり、可動領域の設定作業が繁雑になったりするという実使用上の問題が残り採用しがたい。

【0069】

2-2. 射影方式による本実施形態の手法

2-2-1. 球面 S から平面への射影

本実施形態の手法では、図10に示すように、座標 $(-1, 0, 0)$ の点を点 P_0 とし、 $x=0$ の平面を平面(射影面)としたとき、球面 S 上の任意の点 P について、点 P_0 を焦点(光源)として平面に射影することによって、点 Q を得る。本実施形態では、前述の射影を f とし、球面 S 上の点 P から平面上の点 Q への変換を $Q=f(P)$ と表す。また本実施形態では、平面上の点 Q から球面 S 上の点 P への射影を f^{-1} とし、平面上の点 Q から球面 S 上の点 P への変換を $P=f^{-1}(Q)$ と表す。また本実施形態では、点 P_0 を球面 S の極と呼ぶこととする。

【0070】

上記のような前提では、射影 f により、球面 S 上の点(ただし点 P_0 を除く)と平面上の点は、1対1の対応関係(1対1写像)となり、 $f(P_0)$ は平面上の無限遠点となる。そして本実施形態の手法では、平面上において点 Q の可動領域を設定することによって、球面 S 上の点 P の取り得る位置を制限して、関節の曲げ角度を制限する可動範囲を設定する。

【0071】

まず、平面上に互いに直交する s 軸と t 軸とからなる $s-t$ 座標系をとり、点 Q の位置を $s-t$ 座標系で表す。このとき球面 S 上の座標 $(1, 0, 0)$ となる点 P_1 を変換した $f(P_1)$ を $s-t$ 座標系の原点とすると、 $f(P_1)$ は球面 S を定義する $x-y-z$ 座標系の原点に一致する。

【0072】

なお、本実施形態では、 s 軸の正方向(+ s)は、 z 軸の負方向(- z)とし、 t 軸の正方向(+ t)は、 y 軸の正方向(+ y)とする。このような設定により、 $z-x$ 平面内で点 P に y 軸回転を掛けたときの点 Q の移動方向が s 方向になり、 $x-y$ 平面内で点 P に z 軸回転を掛けたときの点 Q の移動方向が t 方向になる。

【0073】

そして射影 f による点 $P(x, y, z)$ から点 $Q(s, t)$ への変換は式(1)のようになる。ただし、 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ である。

【0074】

【数1】

$$\begin{aligned} s &= -z/(x+1) \\ t &= y/(x+1) \end{aligned} \quad (1)$$

【0075】

また射影 f^{-1} による点 Q から点 P への変換は式(2)のようになる。このとき、射影 f^{-1} による変換によって得られる結果は $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ を満たすので、座標値の正規化のための処理は不要となる。

【0076】

10

20

30

40

【数 2】

$$\begin{aligned}x &= 2/(s^2 + t^2 + 1) - 1 \\y &= 2t/(s^2 + t^2 + 1) \\z &= -2s/(s^2 + t^2 + 1)\end{aligned}\tag{2}$$

【0077】

2 - 2 - 2 . 関節の曲げ角度との対応関係

まず、図 10 に示したように角 α および角 β をとると、点 Q の座標 (s, t) と、角 α および角 β との対応関係は、式 (3) によって表すことができる。なお、角 α および角 β の範囲は、それぞれ $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ 、 $-90^\circ < \beta < 90^\circ$ である。

10

【0078】

【数 3】

$$\begin{aligned}s &= \tan \phi \\t &= \tan \theta\end{aligned}\tag{3}$$

【0079】

ここで、角 α および角 β を -85° から 85° まで 5° 間隔で変えて平面 xy 上にグリッド (格子線) を作り、これを f^{-1} で球面 S に射影すると、図 11 に示すような直交グリッドが得られる。

20

【0080】

次に、従来の 3 軸回転角方式と本実施形態の射影方式との対応関係について説明する。 z 軸回転角 $r_z = 0$ の場合における y 軸回転角 r_y と角 α との対応関係は図 12 に示すようになり、式 (4) で表すことができる。

【0081】

【数 4】

$$\begin{aligned}\angle P_0PO &= \angle PP_0O = \phi \\ \angle P_0PO + \angle PP_0O &= \angle POP_1 = r_y \\ \therefore \phi &= r_y/2\end{aligned}\tag{4}$$

30

【0082】

同様に、 y 軸回転角 $r_y = 0$ の場合における z 軸回転角 r_z と角 β との対応関係は、 $\beta = r_z / 2$ となる。そこで、可動範囲を設定する際に式 (5) のように s、t と r_y 、 r_z とを対応させれば、図 4 および図 11 に示すように、 y 軸回転角 r_y および z 軸回転角 r_z の絶対値が小さい領域では、従来の 3 軸回転角方式による可動領域と本実施形態の射影方式による可動領域は概ね同形状になる。

【0083】

【数 5】

$$\begin{aligned}s &= \tan(r_y/2) \\t &= \tan(r_z/2)\end{aligned}\tag{5}$$

40

【0084】

次に、図 13 に示すように、球面 S 上の点 P の位置を角度座標 (θ, ϕ) で表す場合を考える。角度座標 (θ, ϕ) が球面 S 上の緯度に対応する場合、即ち角度座標 (θ, ϕ) が従来の 3 軸回転角方式における z 軸回転角 r_z に対応する場合には、点 P の座標は $(r_z, 0)$ となる。また角度座標 (θ, ϕ) が球面 S 上の経度に対応する場合、即ち角度座標 (θ, ϕ) が従来の 3 軸回転角方式における y 軸回転角 r_y に対応する場合には、点 P の座標は $(0, r_y)$ となる。これに対して、本実施形態の射影方式では、点 P の座標は (s, t) となる。このように、射影方式による関節角度表現は、従

50

来の3軸回転角方式による緯度表現と経度表現との中間の値をとる。そのため本実施形態の射影方式では、従来の3軸回転角方式による関節角度表現から大きく乖離することがなく方式の移行がスムーズに行えるという利点がある。

【0085】

2-2-3. 従来の3軸回転角方式と本実施形態の射影方式との比較

本実施形態の射影方式で s の範囲を $\tan^{-20^\circ} \sim \tan^{-10^\circ}$ とし、 t の範囲を $\tan^{-5^\circ} \sim \tan^{-15^\circ}$ として、可動領域を矩形制限した場合を図14に示す(図6と比較されたい)。矩形制限の詳細については、「2-3-1. 矩形制限による領域設定手法」で後述する。

【0086】

次に、 z 軸回転角 r_z が $\pm 90^\circ$ を超える場合に相当する例を挙げる。本実施形態の射影方式で s の範囲を $\tan^{-20^\circ} \sim \tan^{-10^\circ}$ とし、 t の範囲を $\tan^{-5^\circ} \sim \tan^{-55^\circ}$ とし、可動領域を矩形制限した場合を図15に示す(図7および図8と比較されたい)。

【0087】

また上記と同様の範囲で、可動領域を楕円制限した場合は図16に示すようになり、可動領域を小判形制限した場合は図17に示すようになる(図9と比較されたい)。楕円制限、および小判形制限の詳細については、それぞれ「2-3-2. 楕円制限による領域設定手法」、および「2-3-3. 小判形制限による領域設定手法」で後述する。

【0088】

以上のように、本実施形態の射影方式を使えば、図15~図17に示すように、従来の3軸回転角方式では扱えなかった $\pm 90^\circ$ を超える広い可動領域を設定しても、関節を滑らかに動かす表現が可能となる。また、図6および図14に示すように、 y 軸回転角 r_y や、 z 軸回転角 r_z が $0^\circ \sim \pm 50^\circ$ 程度の比較的狭い可動領域を設定する場合には、従来の3軸回転角方式とほぼ同形状の可動領域が得られるので、従来方式からの方式移行が容易であり、式(5)を使って両者の対応関係を容易に設定することができる。

【0089】

2-3. 可動領域の形状に応じた設定手法

本実施形態の射影方式による可動領域の設定手法は、平面上の s 、 t の範囲を制限することにより、関節の曲げ角度に関する可動領域を設定する。以下、特に断りのない限り s 、 t の取り得る範囲は式(6)のように設定されているものとして説明する。

【0090】

【数6】

$$\begin{aligned} s_0 \leq s \leq s_1 \\ t_0 \leq t \leq t_1 \end{aligned} \quad (6)$$

【0091】

2-3-1. 矩形制限による領域設定手法

矩形制限とは、平面上で図18に示すように矩形の可動領域を設定する手法である。すなわち、 s 、 t がともに式(6)を満たす領域が可動領域となる。実際の関節の可動領域は、図14や、図15に示すように設定される。

【0092】

2-3-2. 楕円制限による領域設定手法

楕円制限とは、平面上で図19に示すように楕円形(ellipse)の可動領域を設定する手法である。すなわち、式(6)で設定された s 、 t の領域に内接する楕円(楕円の軸は s 軸、 t 軸に平行)の内部が可動領域となる。実際の関節の可動領域は図16や、図20に示すようになる。

【0093】

ここで楕円制限を数式で表すと式(7)のようになる。

【0094】

10

20

30

40

50

【数 7】

$$\left[\frac{(s - s_b)}{s_a} \right]^2 + \left[\frac{(t - t_b)}{t_a} \right]^2 \leq 1 \quad (7)$$

【0095】

ただし、 s_a 、 s_b 、 t_a 、 t_b は式(8)のとおりである。

【0096】

【数 8】

$$\begin{aligned} s_a &= (s_1 - s_0)/2 \\ s_b &= (s_1 + s_0)/2 \\ t_a &= (t_1 - t_0)/2 \\ t_b &= (t_1 + t_0)/2 \end{aligned} \quad (8) \quad 10$$

【0097】

なお、楕円制限は、領域の内外判定が容易であるが、可動領域を超えた場合の補正に関して矩形制限を採用した場合は異なる工夫が必要となり、後述にて詳細に説明する。

【0098】

2 - 3 - 3 . 小判形制限による領域設定手法

小判形制限とは、平面上で図 2 1 に示すように小判形 (oval) の可動領域を設定する手法である。可動領域の境界は半円と直線とで構成される。図 2 1 は $s_a > t_a$ の場合で、 $t = t_0$ 、 $t = t_1$ の直線部を持つ横長の形状となっている (s_a 、 t_a は式(8)のとおり)。 $s_a < t_a$ の場合は、図 2 1 に示す可動領域を 90° 回転させた縦長の形状になり、 $s_a = t_a$ の場合は、直線部の長さが 0 になるため、可動領域の形状は円となる。

【0099】

なお実際の関節の可動領域は、図 1 7 や、図 2 2 に示すような形状になり、その境界は 4 つの小円から構成される (詳しくは後述の「2 - 4 - 2 . 射影 f の特徴」参照)。なお小円とは、球面上の円を分類した呼称で、球面と、その球の中心を通らない平面とが交差してできる円のことであり、地球に例えれば赤道以外の緯線は小円に相当する。

【0100】

2 - 3 - 4 . 超楕円制限による領域設定手法

本実施形態の手法によれば、上述の楕円制限を一般化し、超楕円制限とすることも可能である。楕円制限が 2 乗和で表されるのに対し、超楕円制限は m 乗 n 乗和で表され、式(9)のようになる。

【0101】

【数 9】

$$\left(\frac{s - s_b}{s_a} \right)^m + \left(\frac{t - t_b}{t_a} \right)^n \leq 1 \quad (9)$$

【0102】

式(9)において、例えば、 $m = n = 4$ (4 乗和) の場合、可動領域は図 2 3 に示すようになる (図 2 0 や、図 2 2 と比較されたい)。なお、上述した楕円制限は式(9)において $m = n = 2$ の場合に相当し、上述した矩形制限は式(9)において $m = n = 1$ の場合に相当する。

【0103】

2 - 3 - 5 . 円弧と直線の組合せによる領域設定手法

上述した超楕円制限や更に複雑な形状の代わりに、円弧と直線を組み合わせて平面上に可動領域を設定することも可能である。可動領域外の値が得られた場合に値を補正する際に、超楕円制限では、最適解を代数的に求めることができないが、円弧と直線の組合せによる領域形状ならば最適解を代数的に求めることが可能である。

【0104】

2 - 4 . 可動領域を超えた場合の補正手法

50

関節の曲げ状態が、設定された可動領域を超えた場合には、これを可動領域内に戻すための補正が必要となるため、その補正手法について説明する。

【0105】

2-4-1. 球面垂線と最適解

球面 S 上に可動領域 A が設定され、領域 A 外の点 P が与えられたとき、点 P の位置を領域 A 内（境界を含む）に補正した点を点 P_m とする。領域 A 内の点のうち、点 P からの距離（球面 S 上での距離）が最小となる点を点 P_m とするのが最良であると考えられ、この条件を満たす点 P_m を最適解と呼ぶことにする。

【0106】

ここで、説明の便宜上「球面垂線」という用語を次のように定義する。球面 S において点 P と曲線 L が与えられたとき、点 P を通り曲線 L に直交する大円を、点 P から曲線 L に下ろした球面垂線と呼び、曲線 L と球面垂線との交点を球面垂線の足とする。なお大円とは、球面上の円を分類した呼称で、球面と、その球の中心を通る平面とが交差してできる円のことをいい、地球に例えれば赤道や経線が大円に相当する。

10

【0107】

図 2 4 に示すように、点 P_m の最適解は、点 P から可動領域の境界に下ろした球面垂線の足となる。ただし、矩形制限のように領域形状が頂点を持つ場合には、この頂点が点 P_m の最適解になることがある。

【0108】

2-4-2. 射影 f の特徴

20

球面 S から平面 への射影 f には、次の (A 1) および (A 2) ような特徴がある。

【0109】

(A 1) 2 本の線が交わる角度は、射影 f によって変わらない (f は等角写像)。

【0110】

(A 2) 球面 S 上の円は、平面 上の円または直線に射影され、その逆も成り立つ。互いに射影関係にある、球面 S 上の円と、平面 の円または直線との間の詳細な対応関係は下表のようになる。表 1 中の条件 C 1 とは、図 2 5 に示すように円の半径を r、原点 (0, 0) から円の中心までの距離を d とするとき、式 (10) が成立することである。

【0111】

【表 1】

30

	球面 S	平面 λ
大円	極 P ₀ を通る	直線 (原点 (0, 0) を通る)
	極 P ₀ を通らない	円 (条件 C1 を満たす)
小円	極 P ₀ を通る	直線 (原点 (0, 0) を通らない)
	極 P ₀ を通らない	円 (条件 C1 を満たさない)

【0112】

【数 10】

40

$$d^2 = r^2 - 1 \tag{10}$$

【0113】

したがって、球面 S 上で点 P から可動領域の境界に下ろした球面垂線は、平面 上では次の (B 1) および (B 2) のいずれかになる。

【0114】

(B 1) 可動領域境界に直交する円 (条件 C 1 を満たす。)

(B 2) 可動領域境界に直交する直線 (原点 (0, 0) を通る。)

この性質を利用すれば、可動領域の形状によっては、P_m の最適解を求めることが可能となる。

50

【 0 1 1 5 】

2 - 4 - 3 . 矩形制限に対する最適解

矩形制限では、平面上に図 1 8 に示すような長方形の可動領域が設定される。まず、球面 S 上で、可動領域の 1 辺（例として $s = s_0$ に相当する辺）に点 P から球面垂線 PP_f を下ろすことを考える。 $f(P)$ の座標を (s_p, t_p) とする（ $f(P)$ は点 P を平面上に射影した点である）。

【 0 1 1 6 】

ここで $t_p = 0$ の場合には、球面垂線 PP_f を求めることは、平面上で次の 3 条件（D1）～（D3）を満たす円を求めることに相当する。

【 0 1 1 7 】

（D1）点 $f(P)$ を通る。

【 0 1 1 8 】

（D2）直線 $s = s_0$ に直交する。

【 0 1 1 9 】

（D3）式（10）を満たす。

【 0 1 2 0 】

そして図 2 6 に示すように、求める円の中心座標を (s_c, t_c) 、半径を r_c とすると、これらは式（11）で得られる。

【 0 1 2 1 】

【 数 1 1 】

$$\begin{aligned} s_c &= s_0 \\ t_c &= (s_p^2 + t_p^2 - 2s_0s_p - 1)/(2t_p) \\ r_c^2 &= s_0^2 + t_c^2 + 1 \end{aligned} \quad (11)$$

【 0 1 2 2 】

図 2 6 において、点 $f(P_f)$ は、式（11）により得られた円と直線 $s = s_0$ との交点であって、点 $f(P_f)$ の座標を (s_f, t_f) とする（必然的に $s_f = s_0$ である）。このとき、 $t_0 < t_f < t_1$ であれば、矩形に設定された可動領域の境界となる辺に対して球面垂線を下ろせたことになる。ただし、図 2 7 に示すように球面垂線は必ずしも可動領域の境界となる辺への最短距離とはならない。図 2 7 に示す例では、点 P_a から辺 $B_1 B_2$ に下ろした球面垂線 $P_a P_f$ は、点 P_a から辺 $B_1 B_2$ への最短距離である。しかし、点 P_b から辺 $B_1 B_2$ への最短距離は、球面垂線 $P_b P_f$ ではなく大円 $P_b B_2$ である。

【 0 1 2 3 】

ここで、辺 $B_1 B_2$ （小円 $B_1 B_2$ ）の球面上の中心を点 P_z とする。球面上の点 P から辺 $B_1 B_2$ に下ろした球面垂線が辺 $B_1 B_2$ への最短距離となるのは、点 P が領域 $P_z B_1 B_2$ の内部に位置する場合のみである。また、点 P が領域 $P_z B_1 B_2$ の内部にあれば、必ず点 P から辺 $B_1 B_2$ に球面垂線を下ろすことができる。本実施形態では、領域 $P_z B_1 B_2$ を辺 $B_1 B_2$ の最近点領域と呼ぶことにする。平面上での、可動領域の 4 辺に対する最近点領域の例を図 2 8 に示す。

【 0 1 2 4 】

ここで図 2 6 において、点 $f(P_f)$ の t 座標は $t_f = t_c \pm r_c$ となるが、複号 ± のうち有効となるのは t_p の正負と同じものだけである。そうでなければ $f(P)$ は最近点領域外となるからである。この有効な t_f が $t_0 < t_f < t_1$ であれば、 P_f を最適解としてよいことになる。

【 0 1 2 5 】

また $t_p = 0$ の場合は、球面垂線 PP_f の平面への射影（の延長）は、 $f(P)$ と原点 $(0, 0)$ を結ぶ直線になる。したがって、 $t_0 < 0 < t_1$ であれば、球面垂線を下ろせたことになる。さらに $s_0 - (s_0^2 + 1)^{1/2} < s_p < s_0$ の場合に限り、点 P が

10

20

30

40

50

最近点領域に含まれ、この球面垂線の足 ($s_f = s_0$, $t_f = 0$) が最適解となる。この判定式は式 (12) のように書き換えることができる。

【0126】

【数12】

$$\begin{aligned} s_p(s_p - 2s_0) &\leq 1 \\ \text{AND} & \\ s_p &\leq s_0 \end{aligned} \quad (12)$$

【0127】

10

また $s = s_1$ の辺を対象とする場合には、上記判定式 (式 (12)) の代わりに式 (13) を用いる。

【0128】

【数13】

$$\begin{aligned} s_p(s_p - 2s_1) &\leq 1 \\ \text{AND} & \\ s_p &\geq s_1 \end{aligned} \quad (13)$$

【0129】

20

点 $f(P)$ が矩形に設定された可動領域の4辺のそれぞれに対応する最近点領域のいずれにも含まれない場合は、点 P から可動領域の境界に対して球面垂線を下ろせないことを意味する。この場合、最適解 P_m は可動領域の4頂点のいずれかになるため、球面 S 上で点 P と可動領域の4頂点との距離を求め、求めた距離が最小となる頂点が最適解 P_m である。

【0130】

2-4-4. 矩形制限に対する簡易解

矩形制限における補正手法には、以下に述べるような簡易解が考えられる。これは、平面上で、点 $f(P)$ からの距離が最小となるような可動領域内の点を解とする手法である。点 $f(P)$ の s 座標を s_p とし、補正後の s 座標を s_m とすると、式 (14) のようになる。 t 座標についても同様である。

30

【0131】

【数14】

$$\begin{aligned} s_m &= s_0 \quad (s_p < s_0) \\ s_m &= s_p \quad (s_0 \leq s_p \leq s_1) \\ s_m &= s_1 \quad (s_1 < s_p) \end{aligned} \quad (14)$$

【0132】

ただし、この簡易解が最適解に対する近似解として使えるのは、可動領域が狭い (s_0 、 s_1 、 t_0 、 t_1 の絶対値が小さい) 場合または補正量が小さい場合に限られる。この条件に該当しない場合には、図29に示す例のように不具合を生じる。図29に示す例では、点 P_a に対する最適解が点 P_{m_a} であるのに対して、簡易解は点 P_{m_a}' となる。また、点 P_b に対する最適解が P_{m_b} であるのに対して、簡易解は球面 S の反対側から回って点 P_{m_b}' となってしまう。

40

【0133】

2-4-5. 楕円制限

楕円制限の場合、最適解を求めることは、平面上で楕円形の可動領域の境界に直交する円を求めることに相当する。しかし、その解を求める式は高次方程式となり、代数的に解くことができない。

【0134】

50

最適解の近似解として、平面上で楕円形の可動領域の境界に下ろした垂線の足を解とする方法が考えられる。この場合、解くべき式は4次方程式となり代数的に解を得ることが可能となる。数式処理ソフトウェア等を用いれば、実際に解の式が得られるが、非常に複雑な式となり実用的でない。なお、類似の問題として、楕円体への垂線を求める方法が「John C. Hart, Distance to an Ellipsoid. Graphics Gems IV, pp113-119, Academic Press Inc., 1994」に記されている。

【0135】

そこで本実施形態では、解としては全く不正確であるが、図30に示すように、 $f(P)$ を楕円の中心に向かって補正し簡易解 $f(P_m)$ を得る手法を採用している。

【0136】

点 $f(P_m)$ の座標 (s_m, t_m) は次式(15)のように容易に求められる。ただし、 s_a, s_b, t_a, t_b は式(8)のとおりである。

【0137】

【数15】

$$\begin{aligned} k_s &= (s_p - s_b) / s_a \\ k_t &= (t_p - t_b) / t_a \\ k_m &= 1 / (k_s^2 + k_t^2)^{1/2} \\ s_m &= k_s k_m s_a + s_b \\ t_m &= k_t k_m t_a + t_b \end{aligned} \quad (15)$$

【0138】

式(15)により得られる本実施形態の楕円制限における簡易解は一般的には全く不正確であるが、 $s_0 = -s_1 = t_0 = -t_1$ の場合には、可動領域が、 x 軸を中心とする円になるので最適解に一致する。そのため、可動領域がこの条件に合う場合、あるいはこの条件に近い場合には、簡易解を用いても問題はない。

【0139】

逆に、簡易解が明確に不具合を生じるのは、次のような場合である。3次元空間での関節の可動領域を模式的に図31に示すように表し、関節は図の下方方向に外力(重力等)を受けているものとする。この場合関節は A_0 の位置(最も低い位置)に落ち着くべきであるが、簡易解を用いて補正を行うと A_n の位置になる。例えば、一旦 A_0 の位置にあったとしても、外力により A_0' に移動、簡易解 A_1 に補正、外力により A_1' に移動、簡易解 A_2 に補正、という段階を経て、最終的に A_n の位置に落ち着く。

【0140】

2-4-6. 小判形制限

小判形制限では、平面上に図21に示すような小判形の可動領域が設定される。可動領域境界の直線部を「辺」、半円部を「弧」と呼ぶこととする。また、これらを球面 S に射影したのも同様の呼び方とする。弧の中心座標を (s_e, t_e) 、半径を r_e とする。このとき $s_a = t_a$ (可動領域の形状が平面上で縦長)の場合には、式(16)のようになる。なお、式(16)において、 t_e に関する2つの値は、順に下側の弧および上側の弧に対するものである。

【0141】

【数16】

$$\begin{aligned} r_e &= (s_1 - s_0) / 2 = s_a \\ s_e &= (s_1 + s_0) / 2 = s_b \\ t_e &= t_0 + r_e, t_1 - r_e \end{aligned} \quad (16)$$

【0142】

次に、 $s_a = t_a$ (可動領域の形状が平面上で横長)の場合には、式(17)のようになる。なお、式(17)において、 s_e に関する2つの値は、順に左側の弧および右側

10

20

30

40

50

の弧に対するものである。

【 0 1 4 3 】

【 数 1 7 】

$$\begin{aligned} r_e &= (t_1 - t_0) / 2 = t_a \\ t_e &= (t_1 + t_0) / 2 = t_b \\ s_e &= s_0 + r_e, s_1 - r_e \end{aligned} \quad (17)$$

【 0 1 4 4 】

続いて、 s_a t_a の場合における補正方法を説明する。まず、球面 S 上で、可動領域の境界の辺に点 P から球面垂線 PP_f を下ろすことを考える。これは、矩形制限における可動領域の境界の1辺に球面垂線を下ろす場合と全く同じである。したがって、球面垂線が下ろせるかどうか、下ろした球面垂線が可動領域への最短距離になるかどうかは、矩形制限の場合と同様の手法で判定できる。可動領域の2辺の上に最適解が存在しない場合は、可動領域の弧に下ろした球面垂線の足 P_f が最適解となる。2本の弧に対して点 P_f を求め、球面 S 上での点 P との距離が最小となるものを最適解とする。

【 0 1 4 5 】

以下では、小判形制限の可動領域 (s_a t_a の場合) の2本の弧のうち下側の弧を例にとって、球面垂線の足を求める方法を述べる。前述のように、球面 S 上の大円は平面上では円または直線になる。

【 0 1 4 6 】

まず、球面垂線 PP_f が平面上で円になる場合を考える。この球面垂線を求めることは、平面上で次の3条件 (E1) ~ (E3) を満たす円を求めることに相当する。

【 0 1 4 7 】

(E1) 点 $f(P)$ を通る。

【 0 1 4 8 】

(E2) 可動領域の弧に直交する。

【 0 1 4 9 】

(E3) 式 (10) を満たす。

【 0 1 5 0 】

ここで、求める円の中心座標を (s_c , t_c)、半径を r_c とすると、点 $f(P_f)$ の座標 (s_f , t_f) は以下の手順で求めることができる。

【 0 1 5 1 】

まず、式 (18) により s_c 、 t_c を求める。なお、式 (18) で $k_2 = 0$ となるのは、点 $f(P)$ 、弧の中心点 (s_e , t_e)、原点 (0, 0) の3点が一直線上に存在する場合で、これは球面垂線 PP_f が平面上で直線になる場合である。したがって、ここでは $k_2 \neq 0$ としてよい。

【 0 1 5 2 】

【 数 1 8 】

$$\begin{aligned} k_0 &= s_p^2 + t_p^2 - 1 \\ k_1 &= s_e^2 + t_e^2 - r_e^2 - 1 \\ k_2 &= 2(s_e t_p - s_p t_e) \\ s_c &= -(k_0 t_e - k_1 t_p) / k_2 \\ t_c &= (k_0 s_e - k_1 s_p) / k_2 \end{aligned} \quad (18)$$

【 0 1 5 3 】

続いて、式 (19) により r_c を求める。

【 0 1 5 4 】

【数 19】

$$\begin{aligned}
 s_g &= s_c - s_e \\
 t_g &= t_c - t_e \\
 l_g &= s_g^2 + t_g^2 \\
 r_c &= (l_g - r_e^2)^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

【0155】

続いて、式(20)により k_4 を求める。

【0156】

【数 20】

$$k_4 = t_g r_e \pm s_g r_c \tag{20}$$

【0157】

【数 21】

$$k_4 \leq 0 \tag{21}$$

【0158】

ここで式(20)で求めた k_4 が式(21)を満たす場合のみ、式(22)によって得られる s_f 、 t_f が有効となる。 $k_4 > 0$ の場合は、弧ではなくその延長(可動領域の内部)に球面垂線を下ろすことを意味するので、解として無効なものだからである。

【0159】

【数 22】

$$\begin{aligned}
 s_f &= s_e + (s_g r_e \pm t_g r_c) r_e / l_g \\
 t_f &= t_e + k_4 r_e / l_g
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

【0160】

ただし、式(20)、式(22)は複号同順である。また、条件 $k_4 = 0$ は、式(20)の複号の両方に対して同時に成り立つ場合があるので注意が必要である。これは、可動領域の一方の弧に対して点Pから2本の球面垂線を下ろせることを意味する。なぜなら平面上では可動領域の弧は半円(中心角 180°)であるが、球面S上では中心角が 180° を超えることがあるので、2本の球面垂線が存在し得るからである。

【0161】

以上の説明は、可動領域の下側の弧に球面垂線を下ろす場合である。上側の弧の場合には、式(21)が $k_4 = 0$ となる。

【0162】

次に、球面垂線 PP_f が平面上で直線になる場合を考える。これは、式(18)で $k_2 = 0$ となる場合である。この球面垂線を求めることは、平面上で次の3条件(F1)~(F3)を満たす直線を求めることに相当する。

【0163】

(F1) 点 $f(P)$ を通る。

【0164】

(F2) 可動領域の弧に直交する(これは点 (s_e, t_e) を通ることと同値である)。

【0165】

(F3) 原点 $(0, 0)$ を通る。

【0166】

このとき最適解 P_f の座標 (s_f, t_f) は式(23)により得られる。ただし、複号 \pm のうち有効となるのは、上側の弧の場合は t_i の正負と同じもの、下側の弧の場合は t

10

20

30

40

50

i の正負と反対のものだけである。そうでなければ、弧ではなくその延長（可動領域の内部）に球面垂線を下ろすことを意味するので、解として無効である。

【 0 1 6 7 】

【 数 2 3 】

$$\begin{aligned} s_i &= s_p - s_e \\ t_i &= t_p - t_e \\ k_5 &= (s_i^2 + t_i^2)^{1/2} \\ s_f &= s_e \pm s_i r_e / k_5 \\ t_f &= t_e \pm t_i r_e / k_5 \end{aligned} \quad (23)$$

10

【 0 1 6 8 】

また小判型制限における補正手法には、以下に述べるような簡易解が考えられる。これは、平面上で、 $f(P)$ からの距離が最小となるような可動領域内の点を解とする手法である。

【 0 1 6 9 】

以下の例では、 s_a t_a （可動領域形状が横長）の場合を扱う。

【 0 1 7 0 】

可動領域境界の左側の弧（半円部）の中心座標（ s_{e0} , t_e ）と、可動領域境界の右側の弧の中心座標（ s_{e1} , t_e ）と、半径 r_e は、式（24）により得られる。

20

【 0 1 7 1 】

【 数 2 4 】

$$\begin{aligned} r_e &= (t_1 - t_0) / 2 = t_a \\ t_e &= (t_1 + t_0) / 2 = t_b \\ s_{e0} &= s_0 + r_e \\ s_{e1} &= s_1 - r_e \end{aligned} \quad (24)$$

【 0 1 7 2 】

$f(P)$ が可動領域外に位置する場合に、その座標を（ s_p , t_p ）とすると、補正後の座標（ s_m , t_m ）は式（25）～式（27）により得られる。

30

【 0 1 7 3 】

1) $s_p < s_{e0}$ の場合

【 数 2 5 】

$$\begin{aligned} k &= r_e / [(s_p - s_{e0})^2 + (t_p - t_e)^2]^{1/2} \\ s_m &= k(s_p - s_{e0}) + s_{e0} \\ t_m &= k(t_p - t_e) + t_e \end{aligned} \quad (25)$$

【 0 1 7 4 】

2) $s_{e0} < s_p < s_{e1}$ の場合

【 数 2 6 】

$$\begin{aligned} s_m &= s_p \\ t_p < t_0 \text{ の場合} &: t_m = t_0 \\ t_p > t_1 \text{ の場合} &: t_m = t_1 \end{aligned} \quad (26)$$

40

【 0 1 7 5 】

3) $s_{e1} < s_p$ の場合

【数 27】

$$\begin{aligned}
 k &= r_e / [(s_p - s_{e1})^2 + (t_p - t_e)^2]^{1/2} \\
 s_m &= k(s_p - s_{e1}) + s_{e1} \\
 t_m &= k(t_p - t_e) + t_e
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

【0176】

なお、 $s_a < t_a$ の場合の処理は、上記の $s_a = t_a$ の場合の処理に対して、 s と t を入れ替えたものとなる。

【0177】

ただし、この簡易解が近似解として使えるのは、矩形制限の簡易解と同様に、可動領域が狭い場合 (s_0, s_1, t_0, t_1 の絶対値が小さい場合)、または補正量が小さい場合に限られる。

【0178】

2-4-7. 超楕円制限

超楕円制限の場合は、楕円制限の場合と同様に、最適解を求めるには高次方程式を解くことが必要となり、現実的でない。楕円制限における簡易解と同様に、平面上で超楕円形の可動領域の中心に向かって補正をすれば、簡易解を得ることができる。ただし、楕円制限の場合とは異なり、 $s_0 = -s_1 = t_0 = -t_1$ の場合でも、簡易解は最適解に一致しないので注意を要する。

【0179】

2-4-8. 円弧と直線の組合せによる制限

超楕円制限の代わりに、図32に示すように円弧と直線の組合せで可動領域を設定すれば、小判形制限の場合とほぼ同様の補正手法により最適解を求めることができる。

【0180】

2-5. 捻り角の扱い

2-5-1. 捻り角の定義

既に述べたように、関節の曲げ状態は、球面 S 上の点 P の位置で表すことができる。これに対して捻りは、軸 OP 回りの回転として表される (O は球面 S の中心)。捻り角を扱うには、曲げ状態が与えられたとき、その曲げ状態における捻り角 0° の向きを予め定義する必要がある。

【0181】

まず、親骨と子骨の座標軸の向きが一致 (3軸とも一致) している状態を基準状態とし、この状態の捻り角を 0° と定義する。これは、図10に示す球面 S 上において曲げ状態を示す点が点 P_1 (座標 $(1, 0, 0)$ の点) に存在する場合における捻り角 0° の状態である。

【0182】

また本実施形態では、以下のように「単純回転」を定義する。

【0183】

具体的には、始点を共有する任意の単位ベクトル v_1, v_2 に対して、次の条件 (G1)、(G2) を満たす回転を、 v_1 から v_2 への単純回転と定める。なお $v_1 = v_2$ の場合は無回転とし (回転マトリクスで表すと単位行列)、 $v_1 = -v_2$ の場合は定義不能とする。

【0184】

(G1) v_1, v_2 のなす平面に垂直な軸の回りの回転。

【0185】

(G2) 回転により v_1 は v_2 に一致する。

【0186】

基準状態に対して OP_1 から OP への単純回転を施した状態を、曲げ状態 P における捻り角 0° 状態と定義する。捻り角 0° 状態の子骨の y 軸、 z 軸の向きは、図11のグリッ

10

20

30

40

50

ドと同じ向きになる。なお $P = P_0$ の場合は、捻り角 0° の向きは定義不能である。

【 0 1 8 7 】

以上のように関節の捻り角を定義すると、式 (2 8) に示す関節の回転マトリクス M は、式 (2 9) ~ 式 (3 1) に示すように曲げマトリクス M_b と捻りマトリクス M_t とに分解できる。ただし、マトリクスのタイプ (掛ける順序、要素の並び等) は、列ベクトルを掛けるタイプとする。

【 0 1 8 8 】

【 数 2 8 】

$$M = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (28) \quad 10$$

【 0 1 8 9 】

【 数 2 9 】

$$M = M_b M_t \quad (29)$$

【 0 1 9 0 】

【 数 3 0 】

$$M_b = \begin{pmatrix} m_{00} & -m_{10} & -m_{20} \\ m_{10} & m_{00} + m_{20}^2 d_0 & -m_{10} m_{20} d_0 \\ m_{20} & -m_{10} m_{20} d_0 & m_{00} + m_{10}^2 d_0 \end{pmatrix} \quad (30) \quad 20$$

【 0 1 9 1 】

【 数 3 1 】

$$M_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & (m_{11} + m_{22})d_0 & (m_{12} - m_{21})d_0 \\ 0 & (m_{21} - m_{12})d_0 & (m_{11} + m_{22})d_0 \end{pmatrix} \quad (31)$$

30

【 0 1 9 2 】

ただし、式 (3 0) および式 (3 1) における d_0 は式 (3 2) に示すとおりである。なお、式 (3 2) は $d_0 = 1 / (m_{00} + 1)$ としても等価であるが、 $m_{00} - 1$ ($P = P_0$ に相当) の場合の桁落ちを避けるためには式 (3 2) を用いるほうが良い。

【 0 1 9 3 】

【 数 3 2 】

$$d_0 = (1 - m_{00}) / (m_{10}^2 + m_{20}^2) \quad (32)$$

【 0 1 9 4 】

40

2 - 5 - 2 . 捻り角の 0° 固定

関節の曲げを可動範囲内に補正しつつ、関節の捻り角は常に 0° とする場合について説明する。与えられた関節の回転状態を表すマトリクスを式 (2 8) の M とし、これを可動範囲内に補正することによって得られるマトリクスを M_1 とする。

【 0 1 9 5 】

このとき、与えられた曲げ状態を表す球面 S 上の点を点 P とすると、点 P の座標 (x , y , z) は式 (3 3) で得られる。

【 0 1 9 6 】

【数 3 3】

$$\begin{aligned}x &= m_{00} \\y &= m_{10} \\z &= m_{20}\end{aligned}\tag{33}$$

【0 1 9 7】

この点 P を前述の方法により可動領域内に補正する。この補正結果に対応する球面 S 上の点を点 P_m とし、その座標を (x_m, y_m, z_m) とすると、M₁ は式 (34)、式 (35) により得られる。

【0 1 9 8】

10

【数 3 4】

$$M_1 = \begin{pmatrix} x_m & -y_m & -z_m \\ y_m & x_m + z_m^2 d_1 & -y_m z_m d_1 \\ z_m & -y_m z_m d_1 & x_m + y_m^2 d_1 \end{pmatrix}\tag{34}$$

【0 1 9 9】

【数 3 5】

$$d_1 = (1 - x_m) / (y_m^2 + z_m^2)\tag{35}$$

20

【0 2 0 0】

また点 f (P_m) の s t 座標 (s_m, t_m) を使って M₁ を表すと式 (36)、式 (37) のようになる。

【0 2 0 1】

【数 3 6】

$$M_1 = \begin{pmatrix} d_2 - 1 & -t_m d_2 & s_m d_2 \\ t_m d_2 & (s_m^2 + 1)d_2 - 1 & s_m t_m d_2 \\ -s_m d_2 & s_m t_m d_2 & (t_m^2 + 1)d_2 - 1 \end{pmatrix}\tag{36}$$

30

【0 2 0 2】

【数 3 7】

$$d_2 = 2 / (s_m^2 + t_m^2 + 1)\tag{37}$$

【0 2 0 3】

式 (36)、式 (37) を使えば、平面上で曲げ状態を補正した後、点 P_m に対応する座標 (x_m, y_m, z_m) を求める計算を介することなく直接 M₁ を求められるので、計算量を減らすことができる。

【0 2 0 4】

40

2 - 5 - 3 . 捻り角の可動範囲の設定手法

関節の曲げ・捻りともに、設定された可動範囲内に補正する場合について説明する。与えられた回転状態を表すマトリクスを式 (28) の M とし、これを可動範囲内に補正することによって得られるマトリクスを M₂ とする。

【0 2 0 5】

ここで、M は、式 (29)、式 (30)、式 (31)、式 (32) のように曲げと捻りに分解できる。曲げについては、式 (33)、式 (34)、式 (35) を使って補正される。

【0 2 0 6】

補正前の捻り角を とすると、 は式 (38) から求めることができる。

50

【 0 2 0 7 】

【 数 3 8 】

$$\begin{aligned}\cos\psi &= (m_{11} + m_{22})d_0 \\ \sin\psi &= (m_{21} - m_{12})d_0\end{aligned}\quad (38)$$

【 0 2 0 8 】

この捻り角 ψ が可動範囲外の場合は、これを補正し ψ_m とする。 ψ_m による捻りマトリクス M_{t_2} は式 (39) のようになり、 M_2 は式 (40) により得られる。

【 0 2 0 9 】

【 数 3 9 】

$$M_{t_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi_m & -\sin\psi_m \\ 0 & \sin\psi_m & \cos\psi_m \end{pmatrix}\quad (39)$$

10

【 0 2 1 0 】

【 数 4 0 】

$$M_2 = M_1 M_{t_2}\quad (40)$$

【 0 2 1 1 】

2 - 6 . 四元数による表現

2 - 6 - 1 . 曲げ・捻りの分解

関節の回転を表すのに四元数を用いる場合について考える。前述のマトリクスを使う場合と同様に、四元数も曲げと捻りに分解することができる。関節の回転を表す四元数 q は、次のように曲げ四元数 q_b と捻り四元数 q_t とに分解される。

【 0 2 1 2 】

【 数 4 1 】

$$q = q_b q_t\quad (41)$$

20

【 0 2 1 3 】

q の要素を (q_x, q_y, q_z, q_w) とすると、曲げ四元数 q_b の要素 $(q_{bx}, q_{by}, q_{bz}, q_{bw})$ は次のようになる。

【 0 2 1 4 】

【 数 4 2 】

$$\begin{aligned}q_{bx} &= 0 \\ q_{by} &= (q_y q_w - q_x q_z) / (q_x^2 + q_w^2)^{1/2} \\ q_{bz} &= (q_x q_y + q_z q_w) / (q_x^2 + q_w^2)^{1/2} \\ q_{bw} &= (q_x^2 + q_w^2)^{1/2}\end{aligned}\quad (42)$$

40

【 0 2 1 5 】

また捻り四元数 q_t の要素 $(q_{tx}, q_{ty}, q_{tz}, q_{tw})$ は次のようになる。

【 0 2 1 6 】

【 数 4 3 】

$$\begin{aligned}q_{tx} &= q_x / (q_x^2 + q_w^2)^{1/2} \\ q_{ty} &= 0 \\ q_{tz} &= 0 \\ q_{tw} &= q_w / (q_x^2 + q_w^2)^{1/2}\end{aligned}\quad (43)$$

50

【 0 2 1 7 】

2 - 6 - 2 . 曲げと捻りの補正手法

与えられた曲げ状態を表す球面 S 上の点を点 P とすると、点 P の座標 (x , y , z) は式 (4 4) で得られる。

【 0 2 1 8 】

【 数 4 4 】

$$\begin{aligned} x &= 2(q_x^2 + q_w^2) - 1 \\ y &= 2(q_x q_y + q_z q_w) \\ z &= 2(q_x q_z - q_y q_w) \end{aligned} \quad (44)$$

10

【 0 2 1 9 】

この点 P を前述の方法により可動領域内に補正する。この補正結果に対応する球面 S 上の点を点 P_m とし、その座標を (x_m , y_m , z_m) とすると、補正後の曲げ四元数 q₁ = (q_{1x} , q_{1y} , q_{1z} , q_{1w}) は式 (4 5) により得られる。

【 0 2 2 0 】

【 数 4 5 】

$$\begin{aligned} q_{1x} &= 0 \\ q_{1y} &= -z_m / [2(1 + x_m)]^{1/2} \\ q_{1z} &= y_m / [2(1 + x_m)]^{1/2} \\ q_{1w} &= [(1 + x_m) / 2]^{1/2} \end{aligned} \quad (45)$$

20

【 0 2 2 1 】

なお点 P の座標 (x , y , z) を使わず、点 f (P) の座標 (s , t) を使って表すと式 (4 6)、式 (4 7) のようになる。

【 0 2 2 2 】

【 数 4 6 】

$$\begin{aligned} s &= (q_y q_w - q_x q_z) / (q_x^2 + q_w^2) \\ t &= (q_x q_y + q_z q_w) / (q_x^2 + q_w^2) \end{aligned} \quad (46)$$

30

【 0 2 2 3 】

【 数 4 7 】

$$\begin{aligned} q_{1x} &= 0 \\ q_{1y} &= s_m / (s_m^2 + t_m^2 + 1)^{1/2} \\ q_{1z} &= t_m / (s_m^2 + t_m^2 + 1)^{1/2} \\ q_{1w} &= 1 / (s_m^2 + t_m^2 + 1)^{1/2} \end{aligned} \quad (47)$$

40

【 0 2 2 4 】

また補正前の捻り角を とすると、 は式 (4 8) から求めることができる。

【 0 2 2 5 】

【 数 4 8 】

$$\begin{aligned} \cos(\psi/2) &= q_w / (q_x^2 + q_w^2)^{1/2} \\ \sin(\psi/2) &= q_x / (q_x^2 + q_w^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (48)$$

【 0 2 2 6 】

この が可動範囲外の場合は、これを補正し m とする。 m による捻り四元数 q₂ = 50

($q_{2x}, q_{2y}, q_{2z}, q_{2w}$) は式 (49) のようになる。

【0227】

【数49】

$$\begin{aligned} q_{2x} &= \sin(\psi_m/2) \\ q_{2y} &= 0 \\ q_{2z} &= 0 \\ q_{2w} &= \cos(\psi_m/2) \end{aligned} \quad (49)$$

【0228】

こうして、曲げ・捻りとも補正された四元数 q_3 は式 (50) により得られる。

【0229】

【数50】

$$q_3 = q_1 q_2 \quad (50)$$

【0230】

2-6-3. 四元数を使った曲げ角度制限

上述した式 (42) の四元数は関節の曲げを表すので、その要素 q_{by} 、 q_{bz} に関して可動範囲を設定することによって、曲げ角度を制限する手法が考えられる。しかし、以下に述べるように、この手法には射影を使う手法に比べて劣る点がある。

【0231】

$q_{by} = \sin(\quad/2)$ 、 $q_{bz} = \sin(\quad/2)$ とし、 \quad の値を -180° から 180° まで 10° 間隔で変えて球面 S 上にグリッド (格子線) を作ると、図 33 に示すようになる。ただし q_{by} 、 q_{bz} の範囲は、 $q_{by}^2 + q_{bz}^2 \leq 1$ である。

【0232】

ここで、図 33 に示す四元数を採用した場合と図 11 に示す射影方式を採用した場合とを比較すると、曲げ角が小さい領域では、両者は似た形状となっている。しかし、射影方式では、グリッドが直交しているのに対して、 q_{by} 、 q_{bz} による角度制限ではグリッドが直交しない。特に極側の半球では、図 34 に示すように、四元数 (q_{by} 、 q_{bz}) による角度制限ではグリッドの交角が直角から大きく離れた状態になり、可動領域の設定には適さない。ただし、 x 軸に関して軸対象な円形の可動領域を設定する場合には、 q_{by} 、 q_{bz} を 2 乗和制限とすることで、可動領域を正確に設定することができる。

【0233】

2-7. 可動領域境界による衝突反発

上記では、関節の曲げ状態が可動領域を超えた場合に、境界上まで戻す補正処理を行った。これに対して、以下では、可動領域境界に衝突して反発する (跳ね返る) 挙動を実現する手法を説明する。

【0234】

関節の曲げ状態は、球面 S 上の点 P の位置によって表される。関節の曲げ状態が変化すると、球面 S 上で点 P が移動し、これに伴って平面 π 上で点 $f(P)$ が移動する。本実施形態では、関節の曲げ状態の計算のステップ時間は十分短い (例えば、 $1/60$ 秒) として、この時間内の点 $f(P)$ の動きを等速直線運動で近似する手法を採用している。

【0235】

射影 f は等角写像なので、球面 S 上での入射角、および反射角は平面 π 上でも維持される。そのため、平面 π 上において、通常どおりの方法で反発挙動を計算することができる。

【0236】

以下では、図 35 に示すように、平面 π 上における可動領域外の点 $f(P)$ の位置を (s_p, t_p)、平面 π 上における 1 ステップ時間前の可動領域内の点 $f(P)$ の位置を (s_q, t_q)、平面 π 上における可動領域境界上の衝突位置を (s_h, t_h)、平面 π

10

20

30

40

50

における反発後の位置を (s_r, t_r) 、平面上の衝突位置における法線方向を (n_s, n_t) として説明を進める。

【0237】

2-7-1. 速度、加速度の変換式

まず、球面 S 上と平面上での速度および加速度の変換式を求める。時間による1階微分を「 $'$ 」で表し、2階微分を「 $''$ 」で表すことにする。上記の式(1)を時間で微分すると、以下の式(51)、式(52)が得られる。式(51)、式(52)を用いることにより、球面 S 上における点 P の速度と加速度から、平面上における点 $f(P)$ の速度と加速度を求めることができる。

【0238】

【数51】

$$\begin{aligned} s' &= (-z' - sx')/(x+1) \\ t' &= (y' - tx')/(x+1) \end{aligned} \quad (51)$$

【0239】

【数52】

$$\begin{aligned} s'' &= (-z'' - sx'' - 2s'x')/(x+1) \\ t'' &= (y'' - tx'' - 2t'x')/(x+1) \end{aligned} \quad (52)$$

【0240】

また、上記の式(2)を時間で微分すると、以下の式(53)が得られる。式(53)を用いることにより、平面上における点 $f(P)$ の速度から、球面 S 上における点 P の速度を求めることができる。

【0241】

【数53】

$$\begin{aligned} x' &= (x+1)(zs' - yt') \\ y' &= x't + (x+1)t' \\ z' &= -x's - (x+1)s' \end{aligned} \quad (53)$$

【0242】

2-7-2. 平面上での衝突反発

可動領域境界に衝突した際の反発挙動を、平面上で計算する。図36のように、衝突前の速度ベクトルを v 、衝突後の速度ベクトルを v_r 、衝突位置における境界の法線ベクトルを n とする。ただし、 $|n| = 1$ とする。また、衝突時の反発係数を e 、摩擦係数を μ とする。 $0 \leq e \leq 1$ 、 $0 \leq \mu$ である。

【0243】

衝突前の速度ベクトル v の法線成分ベクトルを v_1 、接線成分ベクトルを v_2 とすると、 v_1 、 v_2 は、式(54)により得られる。

【0244】

【数54】

$$\begin{aligned} v_1 &= (v \cdot n)n \\ v_2 &= v - v_1 \end{aligned} \quad (54)$$

【0245】

衝突後の速度ベクトル v_r の法線成分ベクトルを v_{r1} 、接線成分ベクトルを v_{r2} とすると、 v_r は、式(55)により得られる。ただし、式(55)において $|v_{r2}|$ が負となる場合は、 $v_{r2} = 0$ とする。

【0246】

10

20

30

40

【数 5 5】

$$\begin{aligned}
 v_{r1} &= -ev_1 \\
 |v_{r2}| &= |v_2| + \mu(1+e)(v \cdot n) \\
 v_{r2} &= (|v_{r2}|/|v_2|)v_2 \\
 v_r &= v_{r1} + v_{r2}
 \end{aligned} \tag{55}$$

【0 2 4 7】

2 - 7 - 3 . 反復反発の収束

図 3 7 のように一定加速度 a のもとで衝突反発する場合、本来ならば、距離 L は時間 T の経過とともに図 3 8 のように変化する。反発の周期は、反発係数 e を公比とする等比数列となり、有限の時間内に 0 に収束する。

10

【0 2 4 8】

一方、衝突反発の計算の処理は、上述したように 1 ステップ時間中は速度一定としている。そのため、反発の周期がステップ時間と同等あるいはそれ以下に短くなると、反発挙動を正しく扱うことができなくなる。そこで、本実施形態では、以下の手法を用いて、反復反発を収束させる。

【0 2 4 9】

速度 v 、および距離 L の初期値を、それぞれ v_0 、 L_0 とする。収束までに要する時間 T_c は、無限等比級数（無限等比数列の和）となり、これを求めると、式（5 6）のようになる。なお、式（5 6）により得られた T_c が所定の値（例えば、ステップ時間の数倍～数十倍）以下であれば、 $v = 0$ 、 $L = 0$ とする。

20

【0 2 5 0】

【数 5 6】

$$\begin{aligned}
 k_e &= (1+e)/(1-e) \\
 T_c &= [-v_0 + k_e(v_0^2 + 2aL_0)^{1/2}]/a
 \end{aligned} \tag{56}$$

【0 2 5 1】

2 - 7 - 4 . 矩形制限における反発挙動

衝突時刻を求めるために、時間を表すパラメータ τ を導入する。

30

【0 2 5 2】

ステップ時間の開始時点 $\tau = 0$ 、終了時点 $\tau = 1$ とする。

【0 2 5 3】

言い換えれば、時刻 $\tau = 0$ における $f(P)$ の位置は、1 ステップ時間前の可動領域内の点 (s_q, t_q) であり、衝突を無視した場合の時刻 $\tau = 1$ における $f(P)$ の位置は、可動領域外の点 (s_p, t_p) である。

【0 2 5 4】

矩形制限だけでなく、他の制限（楕円制限、小判形制限）においても、この τ を使用する。

【0 2 5 5】

まず、可動領域外の点 $f(P)$ の位置 (s_p, t_p) における s_p の値によって以下の 3 通りの場合に分けて、 τ_s の値を求める。

40

【0 2 5 6】

1) $s_p < s_0$ の場合

【数 5 7】

$$\tau_s = (s_0 - s_q)/(s_p - s_q) \tag{57}$$

【0 2 5 7】

2) $s_0 < s_p < s_1$ の場合

【数 5 8】

$$\tau_s = 2 \quad (58)$$

【0 2 5 8】

3) $s_1 < s_p$ の場合

【数 5 9】

$$\tau_s = (s_1 - s_q) / (s_p - s_q) \quad (59)$$

【0 2 5 9】

次に、可動領域外の点 f (P) の位置 (s_p , t_p) における t_p の値によって以下の 10
3 通りの場合に分けて、 t の値を求める。

【0 2 6 0】

1) $t_p < t_0$ の場合

【数 6 0】

$$\tau_t = (t_0 - t_q) / (t_p - t_q) \quad (60)$$

【0 2 6 1】

2) $t_0 < t_p < t_1$ の場合

【数 6 1】

$$\tau_t = 2 \quad (61) \quad 20$$

【0 2 6 2】

3) $t_1 < t_p$ の場合

【数 6 2】

$$\tau_t = (t_1 - t_q) / (t_p - t_q) \quad (62)$$

【0 2 6 3】

式 (5 8) および式 (6 1) の右辺は、「 2 」となっているが、「 1 」よりも大きい値
であればよい。本実施形態では、式 (5 7) ~ 式 (5 9) によって求められる τ_s と、式
(6 0) ~ 式 (6 2) によって求められる τ_t とを比較し、いずれか小さい (大きくない) 方
の値を τ として決定する。 30

【0 2 6 4】

【数 6 3】

$$\tau = \min(\tau_s, \tau_t) \quad (63)$$

【0 2 6 5】

式 (6 3) に示される τ は、衝突時刻を表す。

【0 2 6 6】

そして可動領域の境界上における衝突位置 (s_h , t_h) は、式 (6 4) により得るこ
とができる。 40

【0 2 6 7】

【数 6 4】

$$\begin{aligned} s_h &= \tau(s_p - s_q) + s_q \\ t_h &= \tau(t_p - t_q) + t_q \end{aligned} \quad (64)$$

【0 2 6 8】

また上記の衝突位置における可動領域の境界上の法線 (n_s , n_t) は以下のような
る。

【0 2 6 9】

1) $s < t$ の場合

50

【数 6 5】

$$\begin{aligned} t_p < t_0 \text{ の場合} : n_s = 0, n_t = 1 \\ t_p > t_1 \text{ の場合} : n_s = 0, n_t = -1 \end{aligned} \quad (65)$$

【0 2 7 0】

2) $s < t$ の場合

【数 6 6】

$$\begin{aligned} s_p < s_0 \text{ の場合} : n_s = 1, n_t = 0 \\ s_p > s_1 \text{ の場合} : n_s = -1, n_t = 0 \end{aligned} \quad (66)$$

10

【0 2 7 1】

最後に、ベクトル $(s_p - s_q, t_p - t_q)$ を衝突前の速度ベクトルとして、「2 - 7 - 2 . 平面上での衝突反発」において説明した手法で、衝突による反発挙動を計算する。衝突後の速度ベクトルを (v_{rs}, v_{rt}) とすると、反発後の位置は式 (67) により得られる。

【0 2 7 2】

【数 6 7】

$$\begin{aligned} s_r &= s_h + (1 - \tau)v_{rs} \\ t_r &= t_h + (1 - \tau)v_{rt} \end{aligned} \quad (67)$$

20

【0 2 7 3】

2 - 7 - 5 . 楕円制限における反発挙動

楕円制限における衝突位置座標は、以下の連立方程式の解 (s, t) である (s_a, s_b, t_a, t_b) については式 (8) を参照)。

【0 2 7 4】

【数 6 8】

$$\begin{aligned} [(s - s_b)/s_a]^2 + [(t - t_b)/t_a]^2 &= 1 \\ (s - s_q)(t_p - t_q) &= (t - t_q)(s_p - s_q) \end{aligned} \quad (68)$$

【0 2 7 5】

次に、パラメータ τ を使って、 s, t を変換すると、以下のように τ の 2 次方程式が得られる。

【0 2 7 6】

【数 6 9】

$$\begin{aligned} s &= \tau(s_p - s_q) + s_q \\ t &= \tau(t_p - t_q) + t_q \\ k_1\tau^2 - 2k_2\tau + k_3 &= 0 \end{aligned} \quad (69)$$

【0 2 7 7】

ただし、式 (69) において、係数 k_1, k_2, k_3 は以下の通りである。

【0 2 7 8】

【数 7 0】

$$\begin{aligned} k_1 &= s_a^2(t_p - t_q)^2 + t_a^2(s_p - s_q)^2 \\ k_2 &= s_a^2(t_p - t_q)(t_b - t_q) + t_a^2(s_p - s_q)(s_b - s_q) \\ k_3 &= s_a^2(t_b - t_q)^2 + t_a^2(s_b - s_q)^2 - s_a^2 t_a^2 \end{aligned} \quad (70)$$

【0 2 7 9】

の解、すなわち衝突時刻は、以下のようにして得られる。

50

【 0 2 8 0 】

【 数 7 1 】

$$D = k_2^2 - k_1 k_3$$

$$k_2 \geq 0 \text{ の場合} : \tau = (k_2 + D^{1/2}) / k_1 \quad (71)$$

$$k_2 < 0 \text{ の場合} : \tau = k_3 / (k_2 - D^{1/2})$$

【 0 2 8 1 】

式 (71) において、 k_2 の値による場合分けを行っているのは、桁落ちによる精度劣化を防ぐためである。

10

【 0 2 8 2 】

そして可動領域の境界上における衝突位置 (s_h, t_h) は、式 (72) により得ることができる。

【 0 2 8 3 】

【 数 7 2 】

$$s_h = \tau(s_p - s_q) + s_q$$

$$t_h = \tau(t_p - t_q) + t_q \quad (72)$$

【 0 2 8 4 】

また上記の衝突位置における可動領域の境界上の法線 (n_s, n_t) は以下のようになる。

20

【 0 2 8 5 】

【 数 7 3 】

$$n_s = (s_b - s_h) t_a^2$$

$$n_t = (t_b - t_h) s_a^2 \quad (73)$$

【 0 2 8 6 】

最後に、ベクトル ($s_p - s_q, t_p - t_q$) を衝突前の速度ベクトルとして、「2 - 7 - 2 . 平面 上での衝突反発」において説明した手法で、衝突による反発挙動を計算する。衝突後の速度ベクトルを (v_{rs}, v_{rt}) とすると、反発後の位置は式 (74) により得られる。

30

【 0 2 8 7 】

【 数 7 4 】

$$s_r = s_h + (1 - \tau) v_{rs}$$

$$t_r = t_h + (1 - \tau) v_{rt} \quad (74)$$

【 0 2 8 8 】

2 - 7 - 6 . 小判形制限における反発挙動

以下の例では、 s_a, t_a (可動領域形状が横長) の場合を扱う。可動領域境界の左側の弧 (半円部) の中心座標を (s_{e0}, t_e)、可動領域境界の右側の弧の中心座標を (s_{e1}, t_e) とし、半径を r_e とする。

40

【 0 2 8 9 】

可動領域境界の辺との衝突判定：

まず、可動領域境界の辺 (直線部) に対する衝突を調べる。 t_p の値によって以下の3通りの場合に分ける。

【 0 2 9 0 】

1) $t_p < t_0$ の場合

【数 7 5】

$$\begin{aligned}\tau &= (t_0 - t_q) / (t_p - t_q) \\ s_h &= \tau(s_p - s_q) + s_q\end{aligned}\quad (75)$$

【0 2 9 1】

式(75)において、 s_{e0} s_h s_{e1} の場合には、下側の辺と衝突するので を解として確定し、以降の可動領域境界の弧との衝突判定は行わない。そうでない場合には、解が無効なので破棄し、可動領域境界の弧との衝突判定を行う。

【0 2 9 2】

2) $t_1 < t_p$ の場合

10

【数 7 6】

$$\begin{aligned}\tau &= (t_1 - t_q) / (t_p - t_q) \\ s_h &= \tau(s_p - s_q) + s_q\end{aligned}\quad (76)$$

【0 2 9 3】

式(76)において、 s_{e0} s_h s_{e1} の場合には、上側の辺と衝突するので を解として確定し、以降の可動領域境界の弧との衝突判定は行わない。そうでない場合には、解が無効なので破棄し、可動領域境界の弧との衝突判定を行う。

【0 2 9 4】

3) $t_0 < t_p < t_1$ の場合

20

この場合には、可動領域境界の辺との衝突は発生しないため、可動領域境界の弧との衝突判定を行う。

【0 2 9 5】

可動領域の弧との衝突判定：

次に、 の解が未確定の場合は、可動領域境界の弧(円弧部)に対する衝突を調べる。まず、左側の弧について調べる。衝突位置座標は、次の連立方程式の解(s , t)である。

【0 2 9 6】

【数 7 7】

$$\begin{aligned}(s - s_{e0})^2 + (t - t_e)^2 &= r_e^2 \\ (s - s_q)(t_p - t_q) &= (t - t_q)(s_p - s_q)\end{aligned}\quad (77)$$

30

【0 2 9 7】

パラメータ を使って式(77)の s 、 t を変換すると、以下のように の2次方程式が得られる。

【0 2 9 8】

【数 7 8】

$$\begin{aligned}s &= \tau(s_p - s_q) + s_q \\ t &= \tau(t_p - t_q) + t_q \\ k_1\tau^2 - 2k_2\tau + k_3 &= 0\end{aligned}\quad (78)$$

40

【0 2 9 9】

ただし、式(78)において、係数 k_1 、 k_2 、 k_3 は以下の通りである。

【0 3 0 0】

【数 7 9】

$$\begin{aligned}
 k_1 &= (s_p - s_q)^2 + (t_p - t_q)^2 \\
 k_2 &= (s_p - s_q)(s_{e0} - s_q) + (t_p - t_q)(t_e - t_q) \\
 k_3 &= (s_{e0} - s_q)^2 + (t_e - t_q)^2 - r_e^2
 \end{aligned}
 \tag{79}$$

【0 3 0 1】

上記の係数 k_1 , k_2 , k_3 に関して、判別式 $D = k_2^2 - k_1 k_3$ が負の場合は、左側の弧には衝突しない。 $D = 0$ の場合には、式 (80) により τ を求めることができる。

【0 3 0 2】

【数 8 0】

$$\begin{aligned}
 k_2 \geq 0 \text{ の場合} : \tau &= (k_2 + D^{1/2})/k_1 \\
 k_2 < 0 \text{ の場合} : \tau &= k_3/(k_2 - D^{1/2})
 \end{aligned}
 \tag{80}$$

【0 3 0 3】

式 (80) において、 k_2 の値による場合分けを行っているのは、桁落ちによる精度劣化を防ぐためである。 0 かつ $s_h = (s_p - s_q) + s_q = s_{e0}$ の場合には、左側の弧と衝突するので、 τ を解として確定し、以降の衝突判定は行わない。そうでない場合には、解が無効なので破棄する。

【0 3 0 4】

ここまでの計算の結果、 τ の解が未確定の場合は、必ず可動領域境界の右側の弧に衝突する。左側の弧の場合と同様の手法で、 s_{e0} の代わりに s_{e1} を用いて計算し、 τ を得ることができる。

【0 3 0 5】

そして可動領域の境界上における衝突位置 (s_h, t_h) は、式 (81) により得ることができる。

【0 3 0 6】

【数 8 1】

$$\begin{aligned}
 s_h &= \tau(s_p - s_q) + s_q \\
 t_h &= \tau(t_p - t_q) + t_q
 \end{aligned}
 \tag{81}$$

【0 3 0 7】

また上記の衝突位置における可動領域の境界上の法線 (n_s, n_t) は以下のようになる。

【0 3 0 8】

【数 8 2】

$$\begin{aligned}
 \text{下側の辺と衝突する場合} : n_s &= 0, n_t = 1 \\
 \text{上側の辺と衝突する場合} : n_s &= 0, n_t = -1 \\
 \text{左側の弧と衝突する場合} : n_s &= s_{e0} - s_h, n_t = t_e - t_h \\
 \text{右側の弧と衝突する場合} : n_s &= s_{e1} - s_h, n_t = t_e - t_h
 \end{aligned}
 \tag{82}$$

【0 3 0 9】

最後に、ベクトル $(s_p - s_q, t_p - t_q)$ を衝突前の速度ベクトルとして、「2 - 7 - 2 . 平面上での衝突反発」において説明した手法で、衝突による反発挙動を計算する。衝突後の速度ベクトルを (v_{rs}, v_{rt}) とすると、反発後の位置は式 (83) により得られる。

【0 3 1 0】

【数 8 3】

$$\begin{aligned} s_r &= s_h + (1 - \tau)v_{rs} \\ t_r &= t_h + (1 - \tau)v_{rt} \end{aligned} \quad (83)$$

【0 3 1 1】

なお、 $s_a < t_a$ の場合の処理は、上記の s_a 、 t_a の場合の処理に対して、 s と t を入れ替えたものとなる。

【0 3 1 2】

2 - 7 - 7 . 複数回の衝突

以上の衝突反発計算で得られた結果 (s_r , t_r) が、図 3 9 のように可動領域外となる場合がある。このような場合の対処として、次の 2 通りの手法が考えられる。 10

【0 3 1 3】

1) 再度反発計算を行う。

【0 3 1 4】

2) 「2 - 4 . 可動領域を超えた場合の補正手法」で述べた手法を使って境界上に戻す。

【0 3 1 5】

ただし、再度反発計算を行った場合、その結果が再び可動領域外となることが起こり得る。その場合は、反発計算を所定の回数で打ち切り、「2 - 4 . 可動領域を超えた場合の補正手法」で述べた手法を使って境界上に戻すことが好ましい。 20

【0 3 1 6】

2 - 8 . 本実施形態の手法による効果

本実施形態の射影方式によれば、射影による変換およびその逆変換は、四則演算のみで構成されるので、計算負荷が小さい。

【0 3 1 7】

また本実施形態の射影方式の補正処理（矩形制限、小判形制限）によれば、最適解を実用的な計算量で求めることができる。

【0 3 1 8】

また本実施形態の射影方式の補正処理（矩形制限、小判形制限）は、ごく一部の平方根計算を除けば、四則演算のみで構成されるので、計算負荷が小さく、ベクトル演算器（あるいは SIMD）を用いた計算の高速化が可能である。 30

【0 3 1 9】

また本実施形態の射影方式による計算では、立体的な関節の反発挙動を、平面上の反発挙動に置き換えて計算するので、より単純な計算で反発挙動を求めることができる。

【0 3 2 0】

なお、本実施形態の射影方式による関節の可動領域の設定手法では、関節毎に個別の可動領域を設定することができ、関節毎に可動領域を制限する方式が違っていてもよい。例えば、ある関節では、矩形制限によって関節の可動領域を設定し、別の関節では小判形制限によって関節の可動領域を設定するなど、関節の動きに応じた可動領域を設定することができる。 40

【0 3 2 1】

また子骨の向きが可動領域を超えるような演算結果が得られた場合において、可動領域の境界上に補正するように子骨の向きが補正される関節と、可動領域の境界において反発する挙動を示すように子骨の向きが計算される関節とを、関節毎に設定するようにしてもよい。

【0 3 2 2】

また関節の可動領域を制限する方式や、子骨の向きが可動領域を超えるような演算結果が得られた場合の対処方式については、キャラクタの種類（例えば、人、ロボット、動物等）に応じて設定するようにしてもよい。

【0 3 2 3】

3. 本実施形態の処理

次に、本実施形態の手法を実現する処理例について図40および図41のフローチャートを用いて説明する。以下では、本実施形態の手法をゲームプログラムに適用した場合について説明する。

【0324】

まず初期設定として、関節毎に予め与えられている可動範囲の形状と曲げ角度の許容範囲とに基づいて、骨格モデルを構成する各関節の可動範囲を、平面上に設定する(ステップS10)。

【0325】

そして、フレーム更新タイミング(例えば、前フレームから1/60秒が経過した時点)が到来すると(ステップS11でY)、プレイヤーの入力情報を検出する(ステップS12)。

【0326】

次に、プレイヤーの操作対象のキャラクタに関する骨格モデルに含まれる複数の関節のなかから、計算対象の関節を選択し(ステップS13)、プレイヤーの入力情報、オブジェクト同士のヒットによる外力情報や、その他の動作影響情報に基づいて、計算対象の関節の曲げ・捻りを演算する(ステップS14)。

【0327】

次に、計算対象の関節において連結されている親骨と子骨とに関して、親骨に対する子骨の向きを示す、関節を中心点とする球面S上の点Pを、射影fによって平面に射影して点f(P)を求め(ステップS15)、平面上の点f(P)が可動範囲内に収まっているか否かを判定する(ステップS16)。

【0328】

そして、点f(P)が可動範囲外に存在する場合には(ステップS16でN)、点f(P)を可動範囲内に戻すために、反発および補正の計算を行う(ステップS17)。

【0329】

反発および補正の計算は、図41に示すフローチャートに従って行われる。

【0330】

まず計算対象の関節が、可動範囲の境界における反発挙動が許可された関節であるか否かを判定する(ステップS21)。

【0331】

計算対象の関節が反発挙動が許可された関節であると判断される場合には(ステップS21でY)、平面上における点f(P)の可動範囲の境界との衝突位置を求めてから(ステップS22)、点f(P)の可動範囲の境界に衝突する前の速度ベクトルvと、可動範囲の境界上の衝突位置における法線ベクトルnとに基づいて、点f(P)の動きを等速直線運動で近似した場合における点f(P)の衝突後の速度ベクトル v_r を求め、可動範囲の境界上で反発した点f(P)の位置を求める(ステップS23)。

【0332】

次に、反発後の点f(P)が可動範囲内に存在するか否かを判定し(ステップS24)、反発後の点f(P)が可動範囲内に存在する場合には(ステップS24でY)、反発後の点f(P)を点f(P_m)として(ステップS25)、点f(P_m)を射影 f^{-1} によって球面S上に逆変換して球面S上の点P_mを求めることによって補正後の子骨の向きを演算する(ステップS27)。

【0333】

また反発後の点f(P)が可動範囲内に存在しない場合には(ステップS24でN)、可動範囲の境界上の位置に点f(P)を補正するべく、計算対象の関節の可動範囲の形状に応じた補正式によって最適解f(P_m)を求める(ステップS26)。

【0334】

そして点f(P_m)を射影 f^{-1} によって球面S上に逆変換して球面S上の点P_mを求めることによって補正後の子骨の向きを演算する(ステップS27)。なお本実施の形態

10

20

30

40

50

では、計算対象の関節が反発挙動の計算を行う関節でないと判断された場合にも（ステップ S 2 1 で N）、ステップ S 2 6 およびステップ S 2 7 の処理が実行される。

【0335】

そして、骨格モデルを構成する全ての関節に関する計算が完了すると（ステップ S 1 8 で Y）、骨格モデルの各骨の動き（向きの変化）に応じてプレーヤの操作対象のキャラクタを動作させる（ステップ S 1 9）。

【0336】

図 4 0 に示す例では、ゲームを終了する契機が訪れるまで、ステップ S 1 1 ~ ステップ S 1 9 に示す処理が繰返し行われ、ゲームを終了する契機が訪れると（ステップ S 2 0 で Y）、一連の処理を終了する。

【0337】

4. ハードウェア構成例

本実施形態のゲームシステムを実現するハードウェアの構成の一例について図 4 2 を用いて説明する。なお図 4 1 では、主要な構成のみを図示しており、図 4 1 に示されていないハードウェア（メモリコントローラやスピーカなど）を必要に応じて設けることができる。

【0338】

メインプロセッサ 1 0 は、光ディスク 7 2（CD、DVD、ブルーレイディスク等の情報記憶媒体）に格納されたプログラム、通信インターフェース 8 0 を介して転送されたプログラム、或いはハードディスク 6 0 に格納されたプログラムなどに基づき動作し、内部バス b 4 を介してアクセス可能なメインメモリ 4 0 を作業領域（ワーク領域）としてゲーム処理、画像処理、音処理などの種々の処理を実行する。

【0339】

メインプロセッサ 1 0 は、1 基のプロセッサ 1 2 と複数のベクトルプロセッサ 1 4 で構成される。プロセッサ 1 2 は、OS の実行、ハードウェアリソースの管理、ゲーム処理、ベクトルプロセッサ 1 4 の動作管理などの種々の処理を実行する。またベクトルプロセッサ 1 4 は、ベクトル演算に特化したプロセッサであり、主にジオメトリ処理、画像データや音データのコーデック処理などの処理を実行する。

【0340】

描画プロセッサ 2 0 は、内部バス b 1 を介してビデオメモリ 3 0 にアクセス可能に形成されている。また描画プロセッサ 2 0 は、描画プロセッサ 2 0 とメインプロセッサ 1 0 を接続する内部バス b 2 と、メインプロセッサ 1 0 内部のバス b 3 と、メインプロセッサ 1 0 とメインメモリ 4 0 を接続する内部バス b 4 を介してメインメモリ 4 0 にもアクセス可能に形成されている。すなわち本実施形態のゲームシステムでは、描画プロセッサ 2 0 がビデオメモリ 3 0 を原則的なレンダリングターゲットとして利用しつつ、必要に応じてメインメモリ 4 0 とを例外的なレンダリングターゲットとして利用することもできるようになっている。

【0341】

描画プロセッサ 2 0 は、座標変換、透視変換、光源計算、曲面生成などのジオメトリ処理を行うものであり、高速並列演算が可能な積和算器や除算器を有し、マトリクス演算（ベクトル演算）を高速に実行する。例えば、座標変換、透視変換、光源計算などの処理を行う場合には、メインプロセッサ 1 0 で動作するプログラムが、その処理を描画プロセッサ 2 0 に指示する。

【0342】

また描画プロセッサ 2 0 は、ジオメトリ処理後のオブジェクト（ポリゴンや曲面などのプリミティブ面で構成されるオブジェクト）の画像のレンダリング処理を高速に実行するものである。マルチパスレンダリング処理の際には、描画プロセッサ 2 0 は、描画情報（頂点情報や他のパラメータ）等に基づいて、Z バッファ 3 4 を利用した陰面消去やテクスチャ記憶部 3 6 を利用したテクスチャマッピングを行いながら、画像をビデオメモリ 3 0 のフレームバッファ 3 2 にレンダリングする。このとき描画プロセッサ 2 0 は、マルチバ

10

20

30

40

50

スレンダリング処理として、グレアフィルタ処理、モーションブラー処理、被写界深度処理、フォグ処理等のフィルタ処理を行うことができる。そして、最後のレンダリングパスで画像がビデオメモリ30に設けられたフレームバッファ32にレンダリングされると、その画像をディスプレイ50に出力する。

【0343】

ハードディスク60にはシステムプログラム、セーブデータ、個人データなどが格納される。

【0344】

光学ドライブ70は、プログラム、画像データ、或いは音データなどが格納される光ディスク72（情報記憶媒体）を駆動し、これらのプログラム、データへのアクセスを可能にする。

10

【0345】

通信インターフェース80は、ネットワークを介して外部との間でデータ転送を行うためのインターフェースである。この場合に、通信インターフェース80に接続されるネットワークとしては、通信回線（アナログ電話回線、ISDN）、高速シリアルバスなどを考えることができる。そして、通信回線を利用することでインターネットを介したデータ転送が可能になる。また、高速シリアルバスを利用することで、他の画像生成システムとの間でのデータ転送が可能になる。

【0346】

上述したように本実施形態のゲームシステム（コンピュータ）は、メインプロセッサ10に座標変換、可動範囲設定、骨格動作演算を行わせるプログラムが光ディスク72（情報記憶媒体の一例）あるいはハードディスク60（情報記憶媒体の一例）に格納されている。

20

【0347】

なお、本実施形態の各部（各手段）は、その全てを、ハードウェアのみにより実現してもよいし、情報記憶媒体に格納されるプログラムや通信インターフェースを介して配信されるプログラムのみにより実現してもよい。或いは、ハードウェアとプログラムの両方により実現してもよい。

【0348】

そして、本実施形態の各部をハードウェアとプログラムの両方により実現する場合には、情報記憶媒体には、ハードウェア（コンピュータ）を本実施形態の各部として機能させるためのプログラムが格納されることになる。より具体的には、上記プログラムが、ハードウェアである各プロセッサ10、20等に処理を指示すると共に、必要であればデータを渡す。そして、各プロセッサ10、20等は、その指示と渡されたデータとに基づいて、本発明の各部を実現することになる。

30

【0349】

なお本発明は、上記実施形態で説明したものに限らず、種々の変形実施が可能である。例えば、明細書又は図面中の記載において広義や同義な用語として引用された用語は、明細書又は図面中の他の記載においても広義や同義な用語に置き換えることができる。また骨格モデルを動作させる手法は、本実施形態で説明したものに限定されず、これらと均等な手法も本発明の範囲に含まれる。

40

【0350】

また本発明は種々のゲーム（格闘ゲーム、シューティングゲーム、ロボット対戦ゲーム、スポーツゲーム、競争ゲーム、ロールプレイングゲーム、音楽演奏ゲーム、ダンスゲーム等）に適用できる。また本発明は、業務用ゲームシステム、家庭用ゲームシステム、多数のプレーヤが参加する大型アトラクションシステム、シミュレータ、マルチメディア端末、ゲーム画像を生成するシステムボード、携帯電話等の種々のゲームシステムに適用できる。

【図面の簡単な説明】

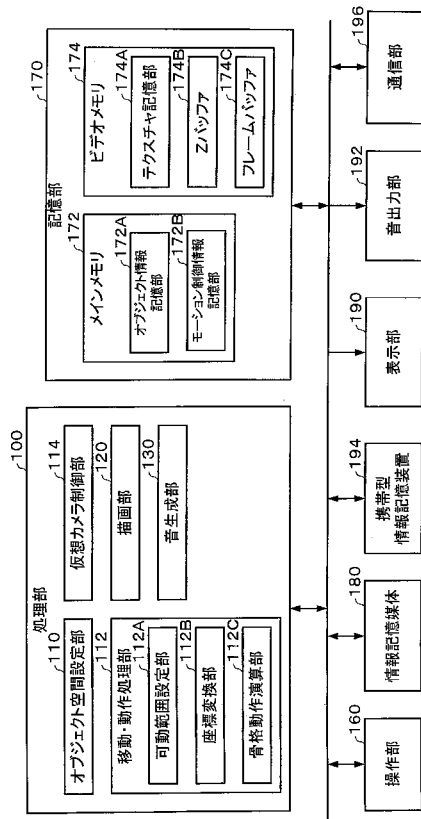
【0351】

50

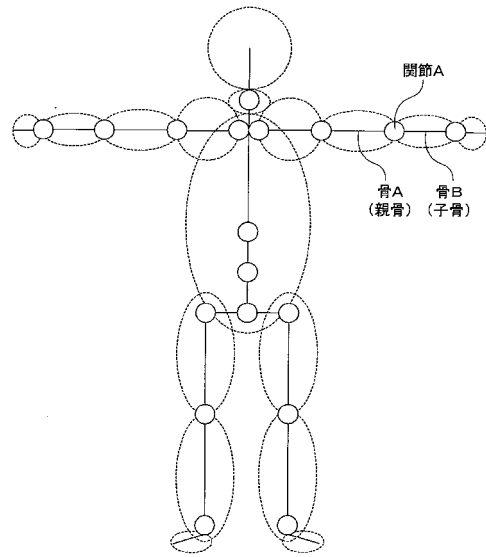
- 【図1】本実施形態のゲームシステムの機能ブロック図。
- 【図2】骨格モデルの構成を模式的に示す図。
- 【図3】親骨および子骨に設定される座標系を示す図。
- 【図4】3軸回転角方式による r_y 、 r_z と球面 S 上の位置との関係を示す図。
- 【図5】3軸回転角方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図6】3軸回転角方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図7】3軸回転角方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図8】3軸回転角方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図9】3軸回転角方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図10】球面 S 上の点 P から平面 π 上の点 Q への射影を説明するための図。 10
- 【図11】平面 π 上のグリッドを球面 S に射影した結果を説明するための図。
- 【図12】 y 軸回転角 r_y と角度 θ との関係を示す図。
- 【図13】射影方式と緯度・経度表現との比較図。
- 【図14】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図15】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図16】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図17】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図18】平面 π 上において矩形制限された可動領域を示す図。
- 【図19】平面 π 上において楕円形制限された可動領域を示す図。
- 【図20】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。 20
- 【図21】平面 π 上において小判形制限された可動領域を示す図。
- 【図22】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図23】射影方式により設定された関節の可動領域を示す図。
- 【図24】点 P から可動領域の境界に下ろした球面垂線の足 P_m を示す図。
- 【図25】平面 π 上の円が球面 S 上で大円となる条件を示す図。
- 【図26】球面垂線を平面 π に射影して得られる円を示す図。
- 【図27】矩形領域の辺に下ろした球面垂線を示す図。
- 【図28】矩形領域の各辺に対する最近点領域を示す図。
- 【図29】矩形制限における簡易解による補正手法で発生する不具合を示す図。
- 【図30】楕円形制限に対する簡易解を示す図。 30
- 【図31】楕円形制限における簡易解による補正手法で発生する不具合を示す図。
- 【図32】円弧と直線の組合せによる可動領域の設定例を示す図。
- 【図33】 q_{by} 、 q_{bz} の値を変えて球面 S 上に作ったグリッドを示す図。
- 【図34】射影方式左と四元数方式右の極側の様子を比較する図。
- 【図35】可動領域の境界での衝突の発生を説明するための図。
- 【図36】可動領域の境界での衝突の発生を説明するための図。
- 【図37】一定加速度が作用した状態での衝突の発生を説明するための図。
- 【図38】反復反発の収束を説明するための図。
- 【図39】複数回の衝突を説明するための図。
- 【図40】本実施形態の具体的な処理例を示すフローチャート。 40
- 【図41】本実施形態の具体的な処理例を示すフローチャート。
- 【図42】ハードウェア構成例。
- 【符号の説明】
- 【0352】
- 100 処理部、
- 110 オブジェクト空間設定部、 112 移動・動作処理部、
- 112A 可動範囲設定部、 112B 座標変換部、 112C 骨格動作演算部、
- 114 仮想カメラ制御部、
- 120 描画部、 130 音生成部、
- 160 操作部、 170 記憶部、 50

- 172 メインメモリ、
- 172A オブジェクト情報記憶部、172B モーション制御情報記憶部、
- 174 ビデオメモリ、
- 174A テクスチャ記憶部、174B Zバッファ、174C フレームバッファ、
- 180 情報記憶媒体、190 表示部、192 音出力部、
- 194 携帯型情報記憶装置、196 通信部

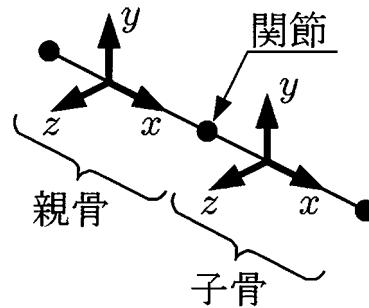
【図1】



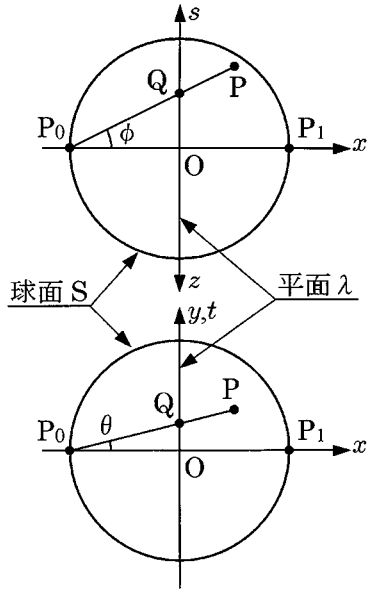
【図2】



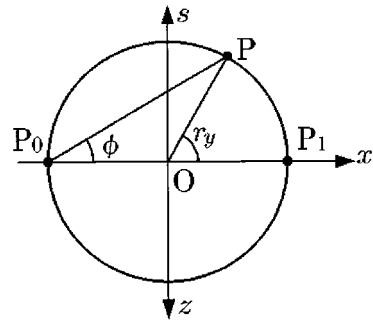
【図3】



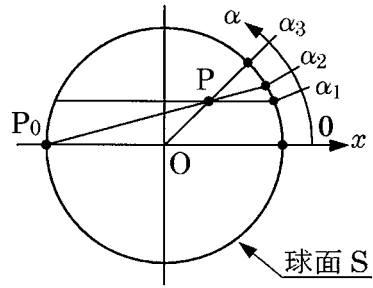
【 図 1 0 】



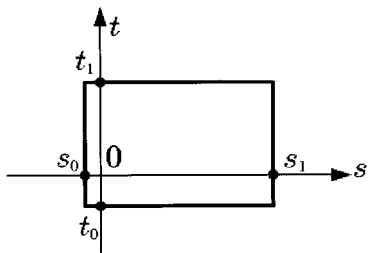
【 図 1 2 】



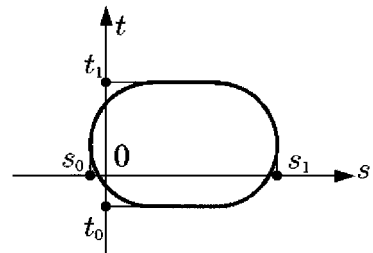
【 図 1 3 】



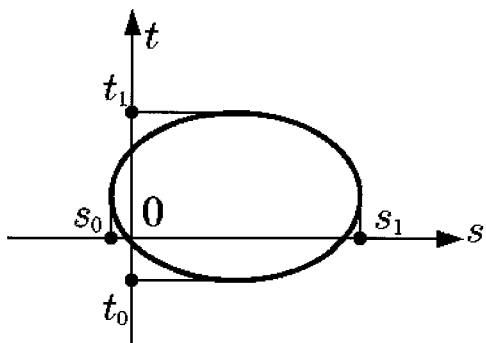
【 図 1 8 】



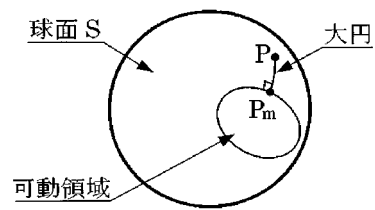
【 図 2 1 】



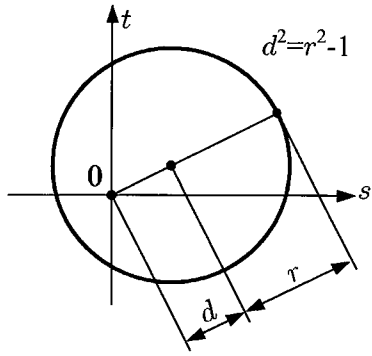
【 図 1 9 】



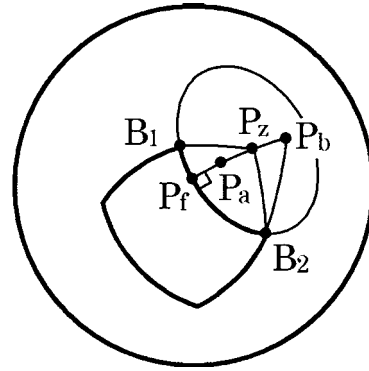
【 図 2 4 】



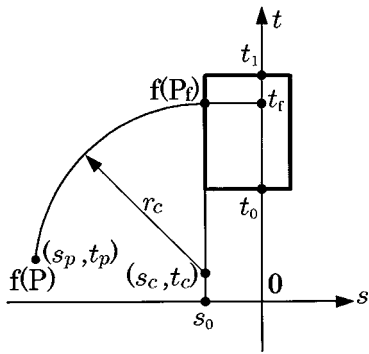
【 図 2 5 】



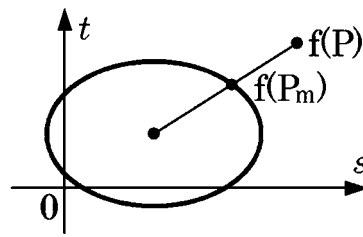
【 図 2 7 】



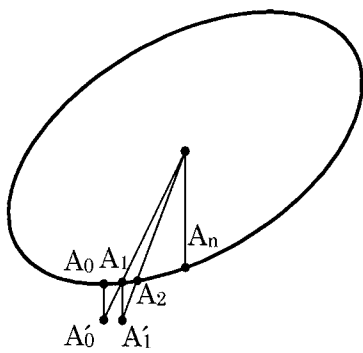
【 図 2 6 】



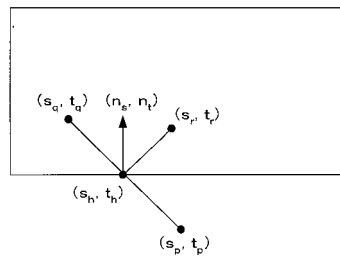
【 図 3 0 】



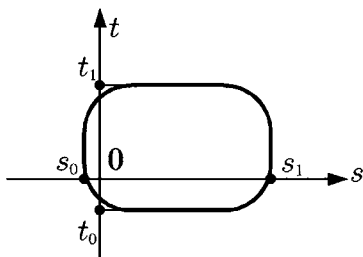
【 図 3 1 】



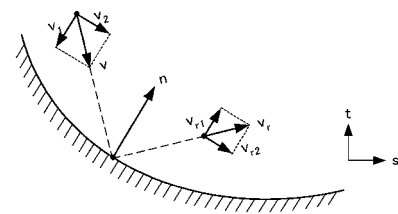
【 図 3 5 】



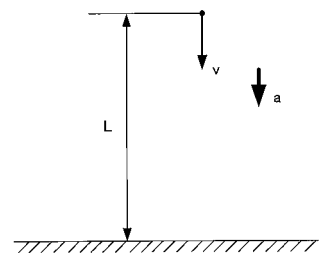
【 図 3 2 】



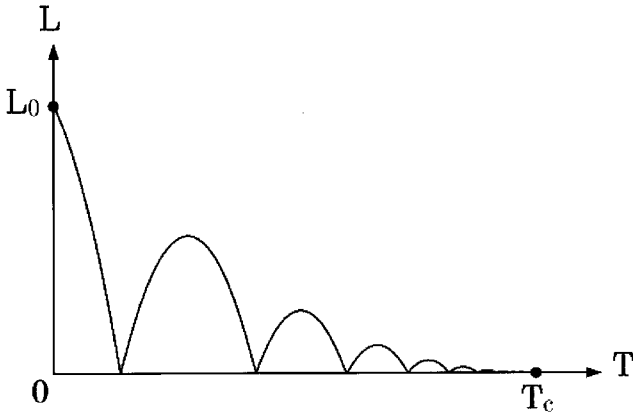
【 図 3 6 】



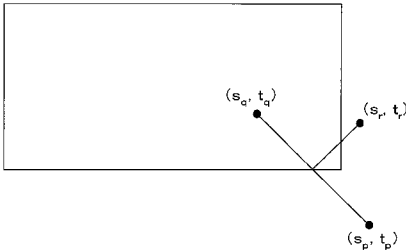
【 図 3 7 】



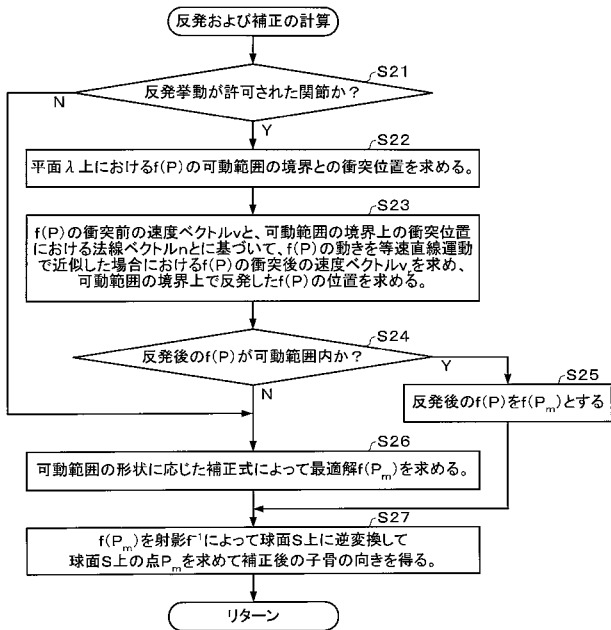
【図38】



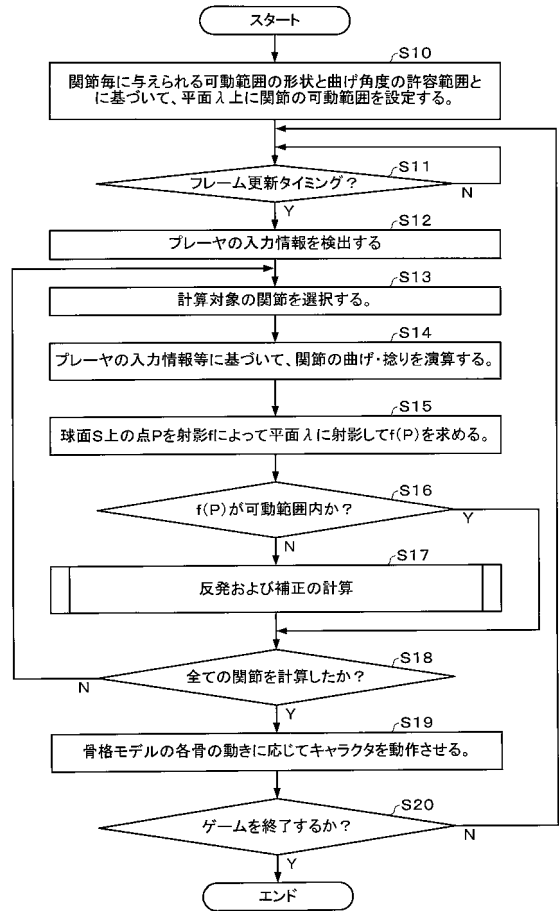
【図39】



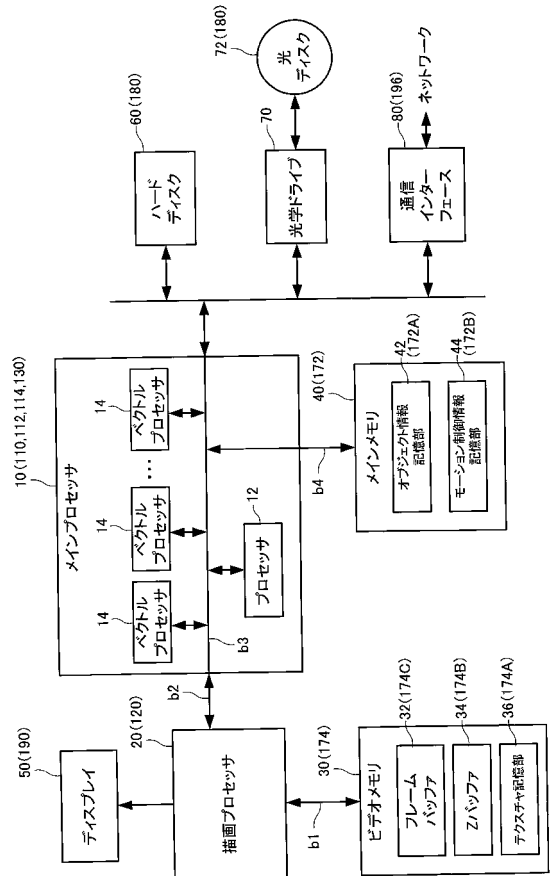
【図41】



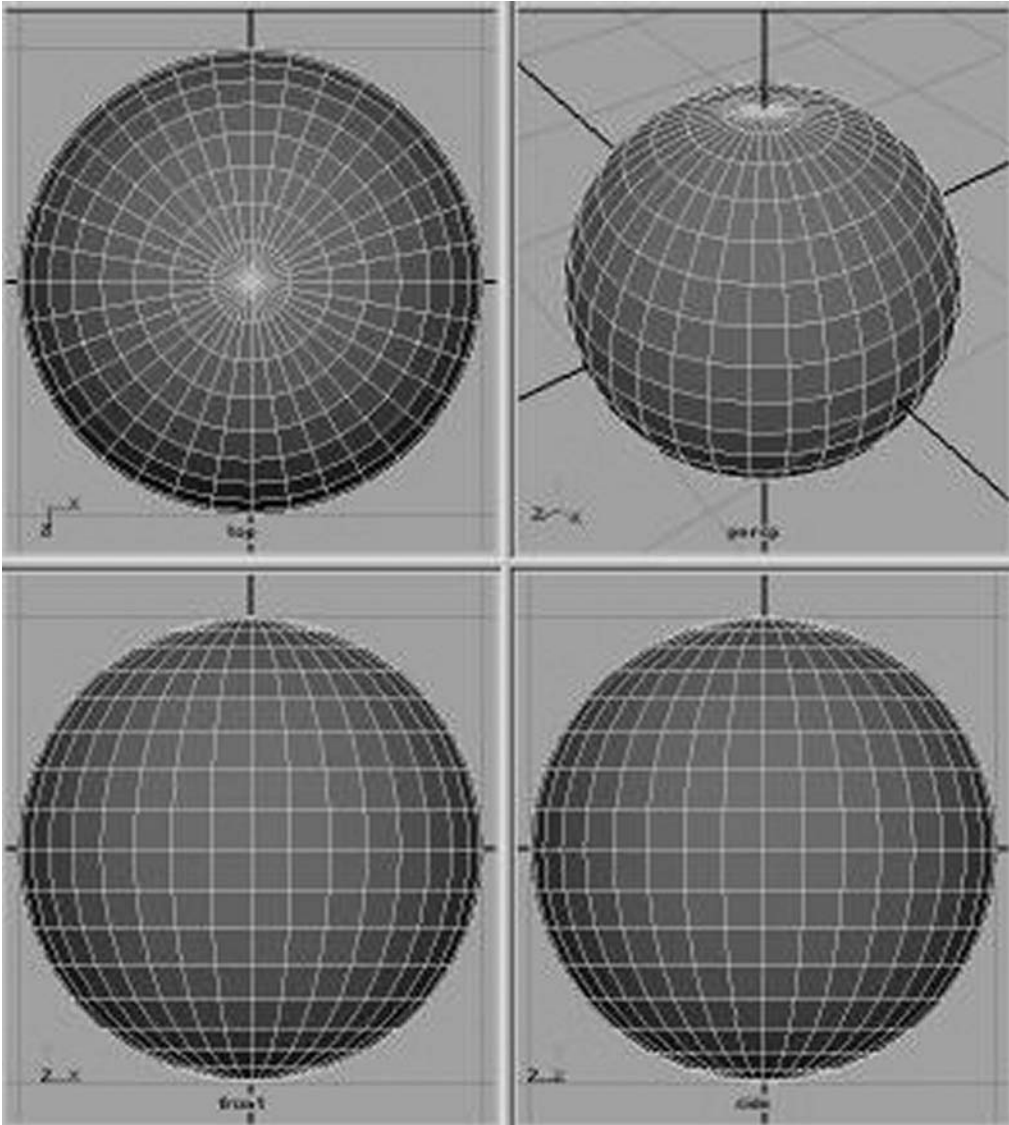
【図40】



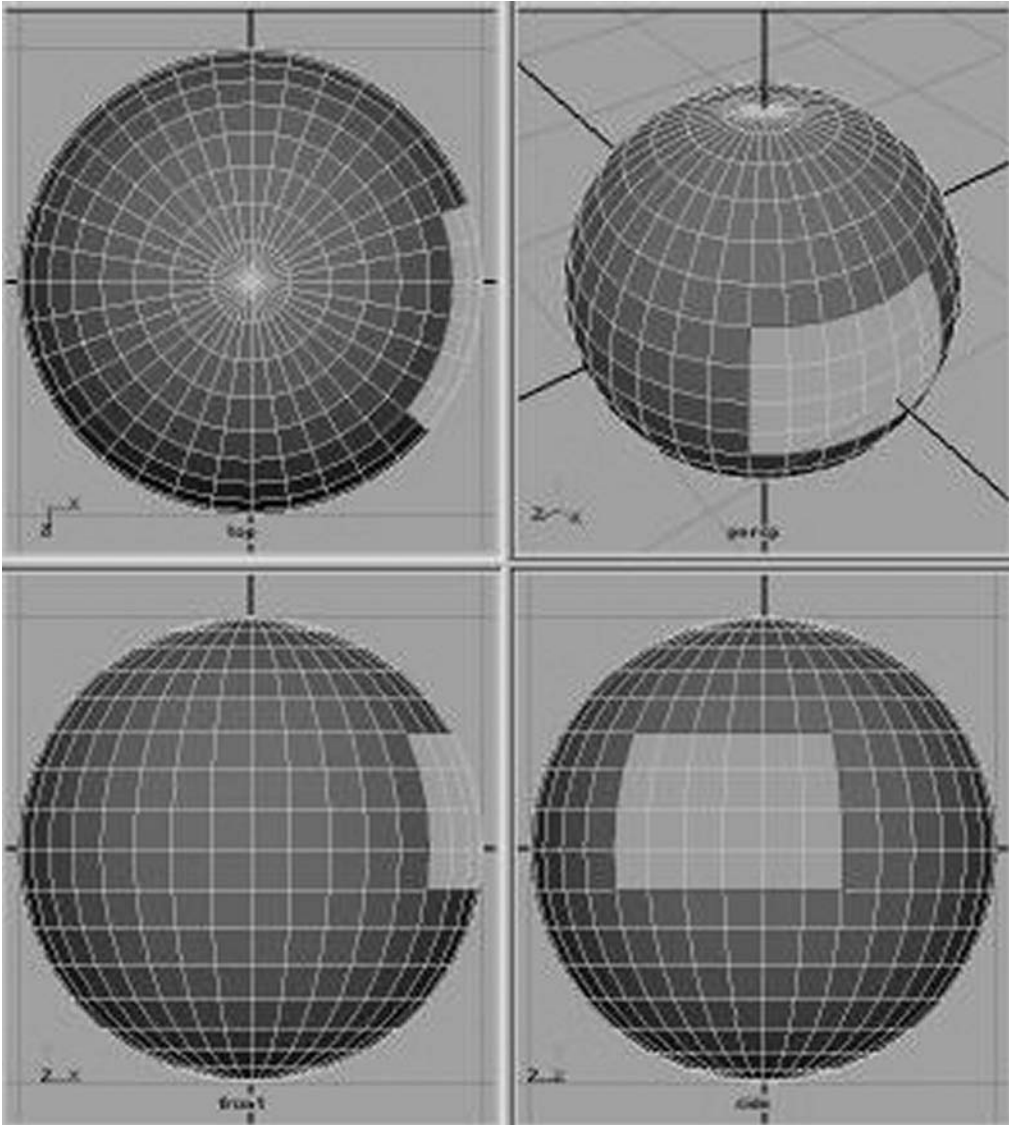
【図42】



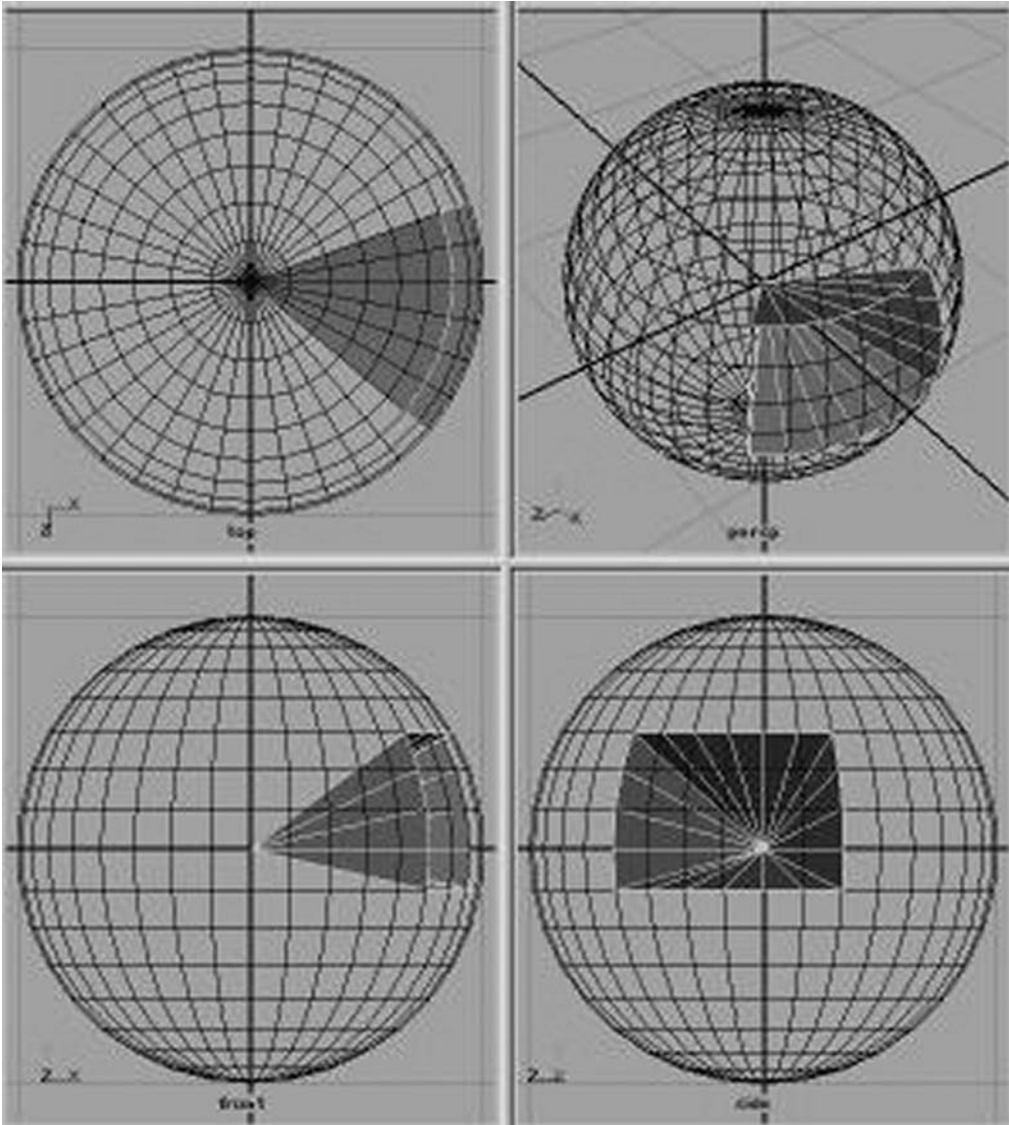
【 図 4 】



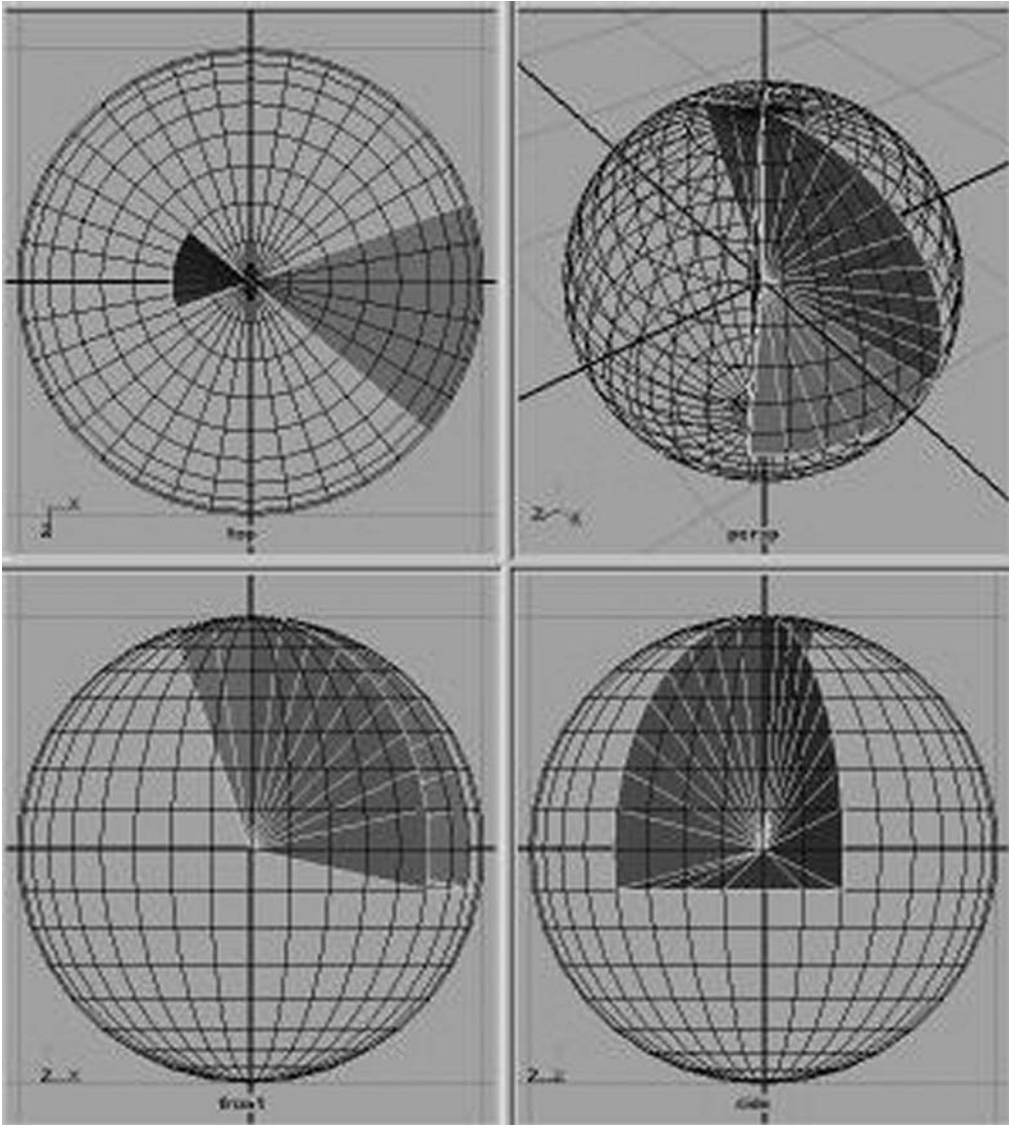
【 図 5 】



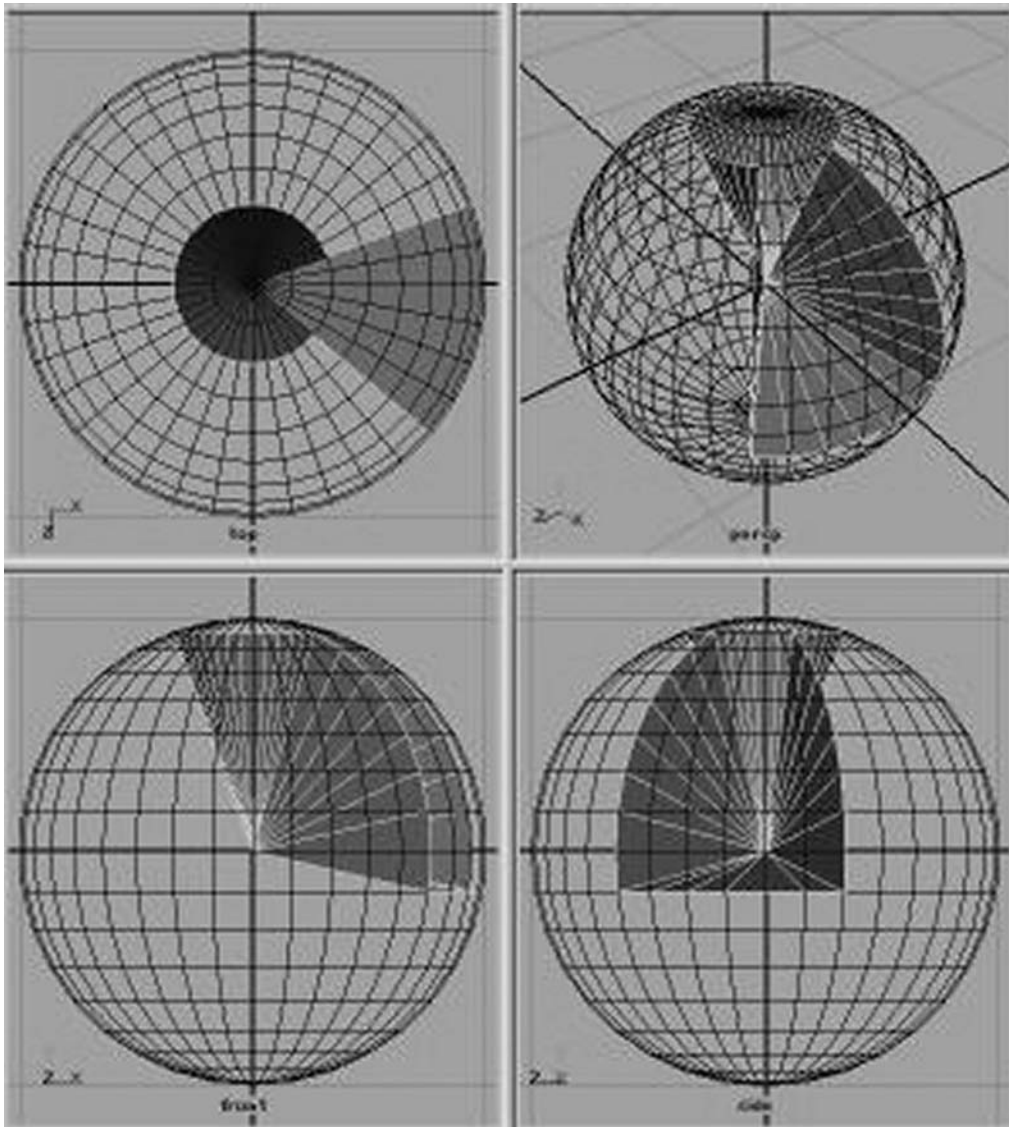
【 図 6 】



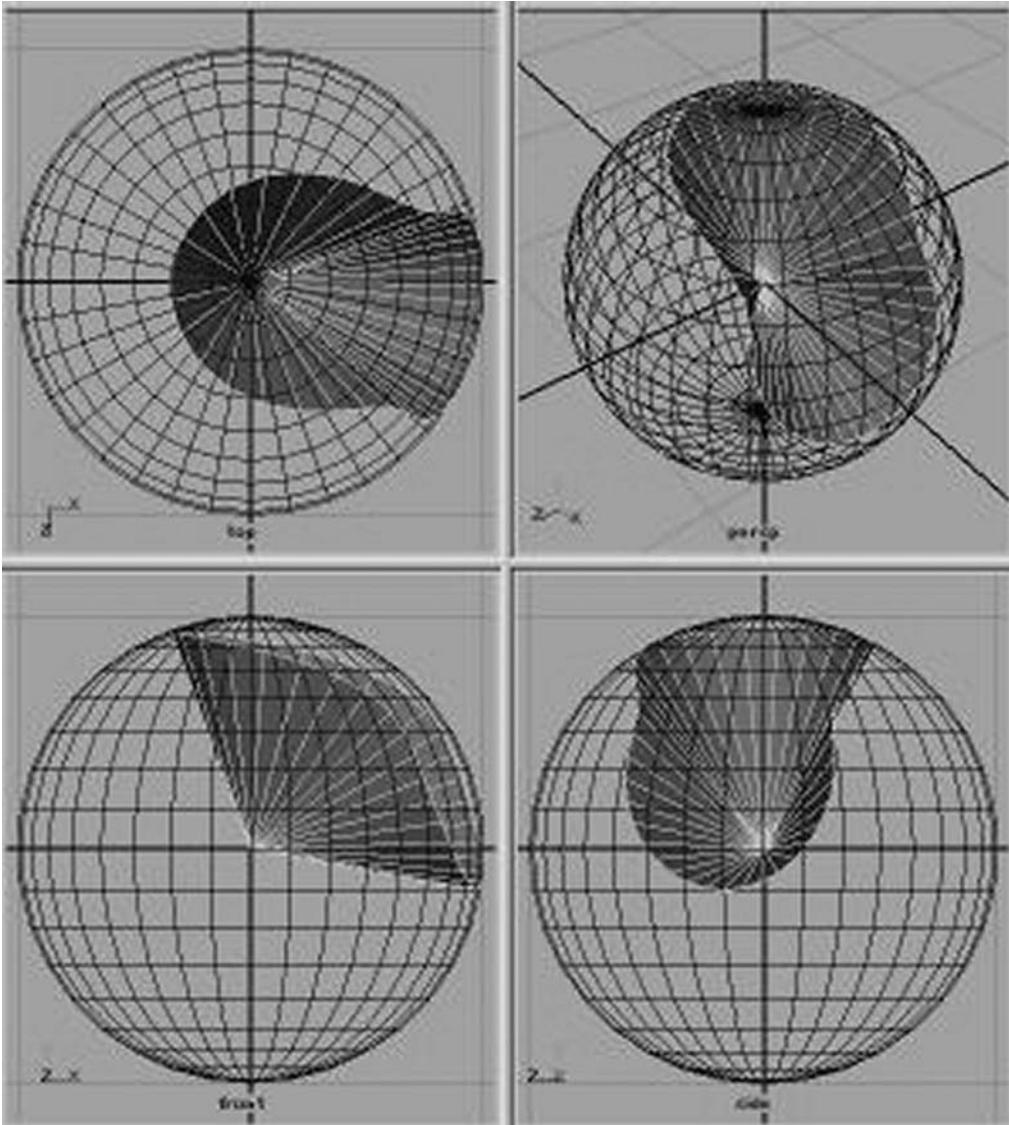
【 図 7 】



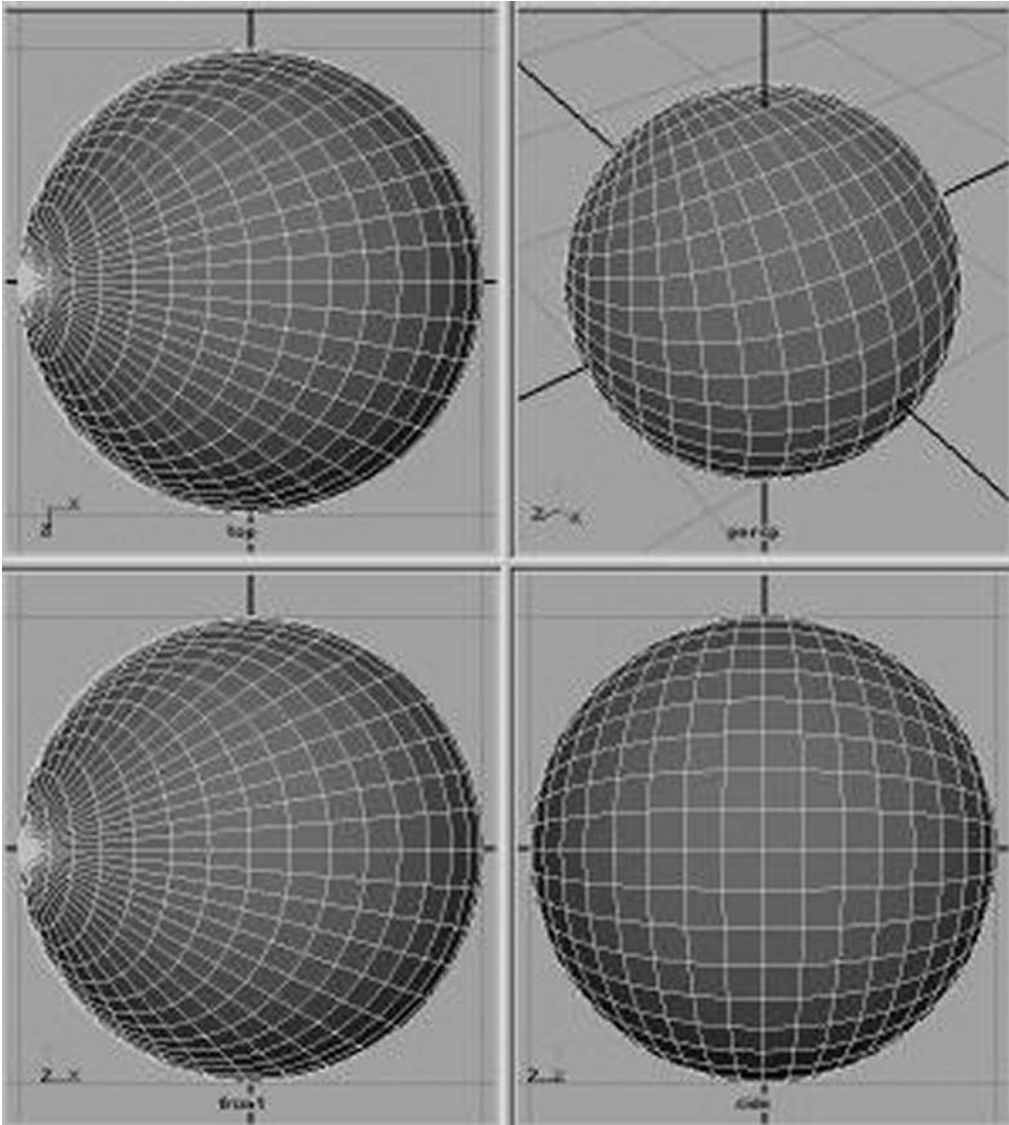
【 図 8 】



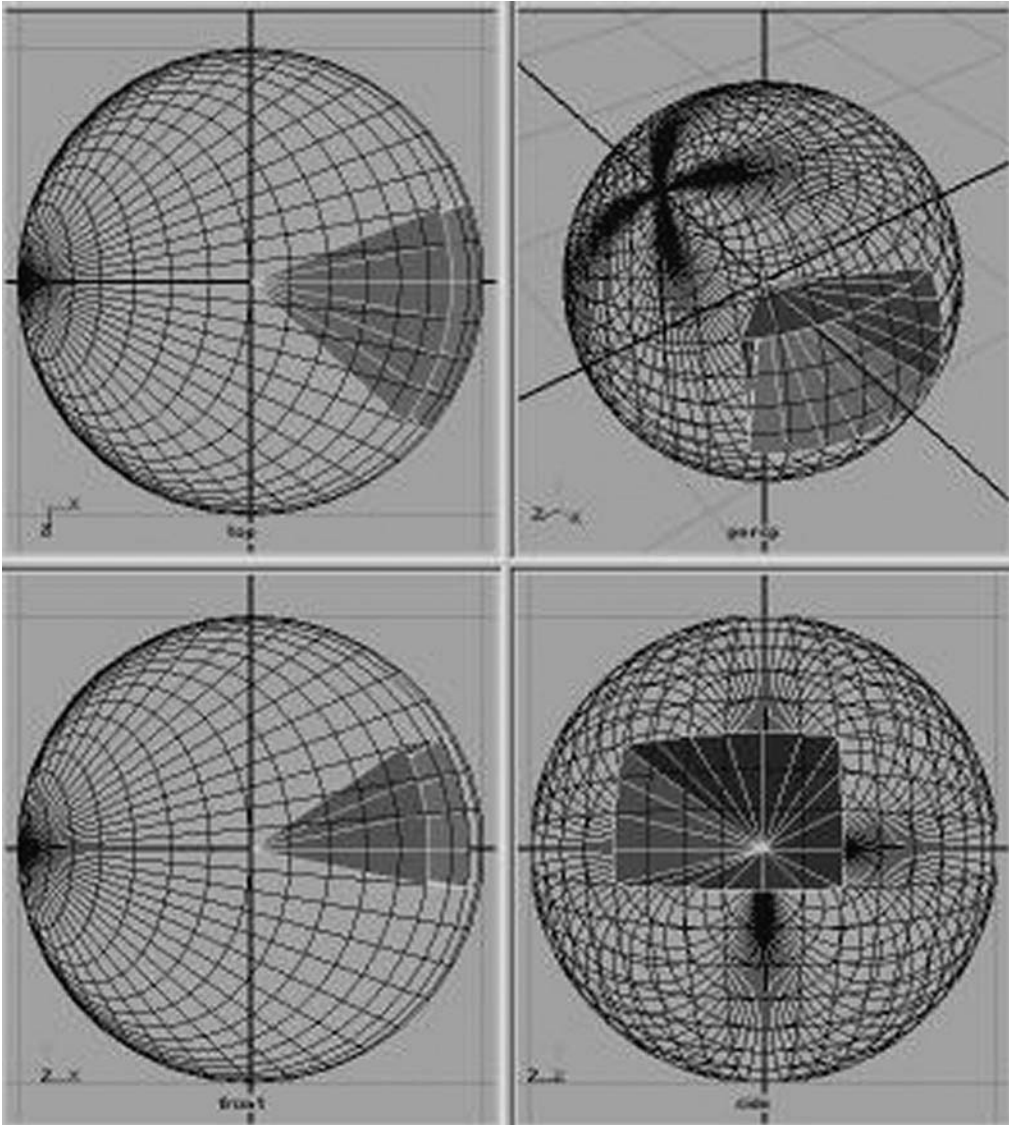
【 図 9 】



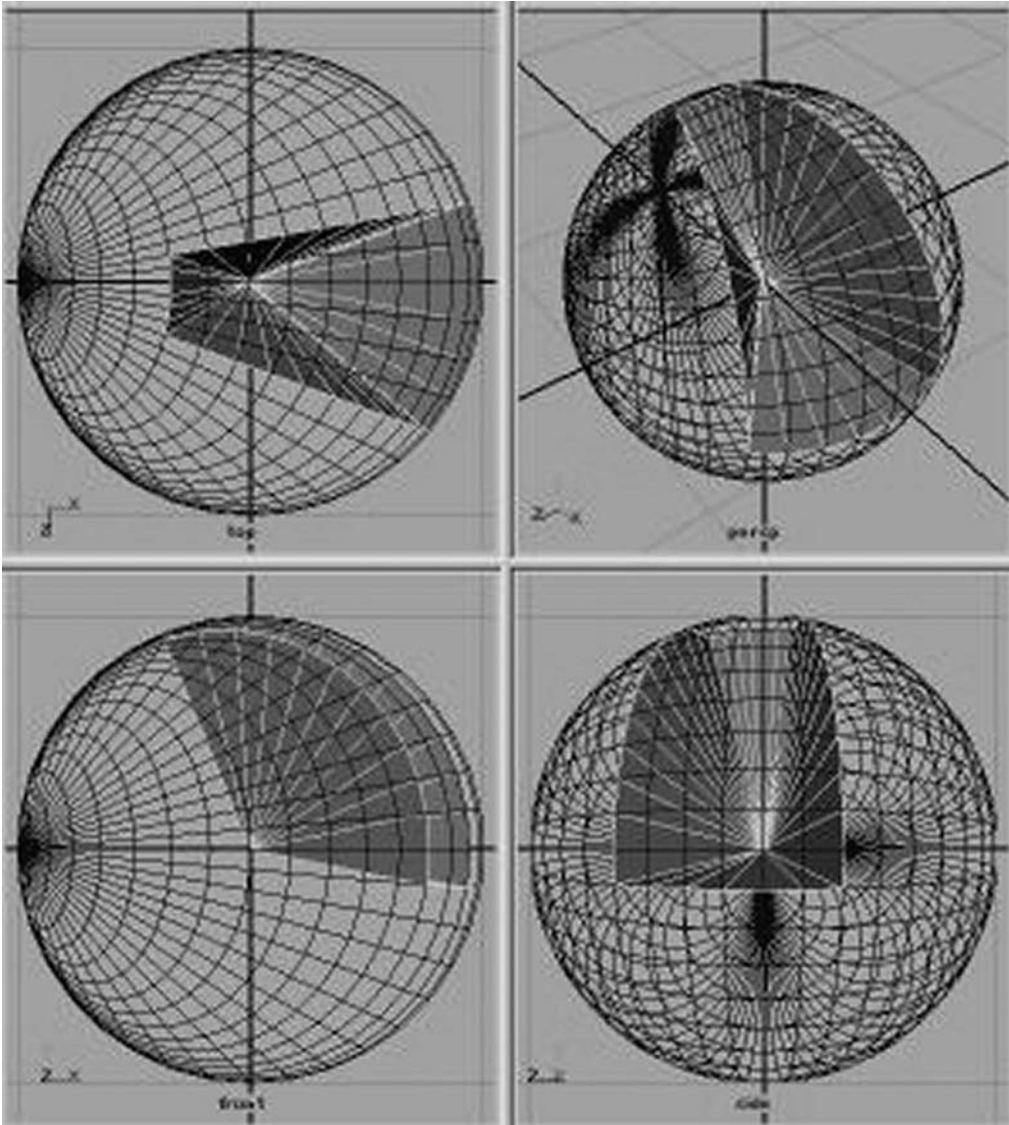
【 図 1 1 】



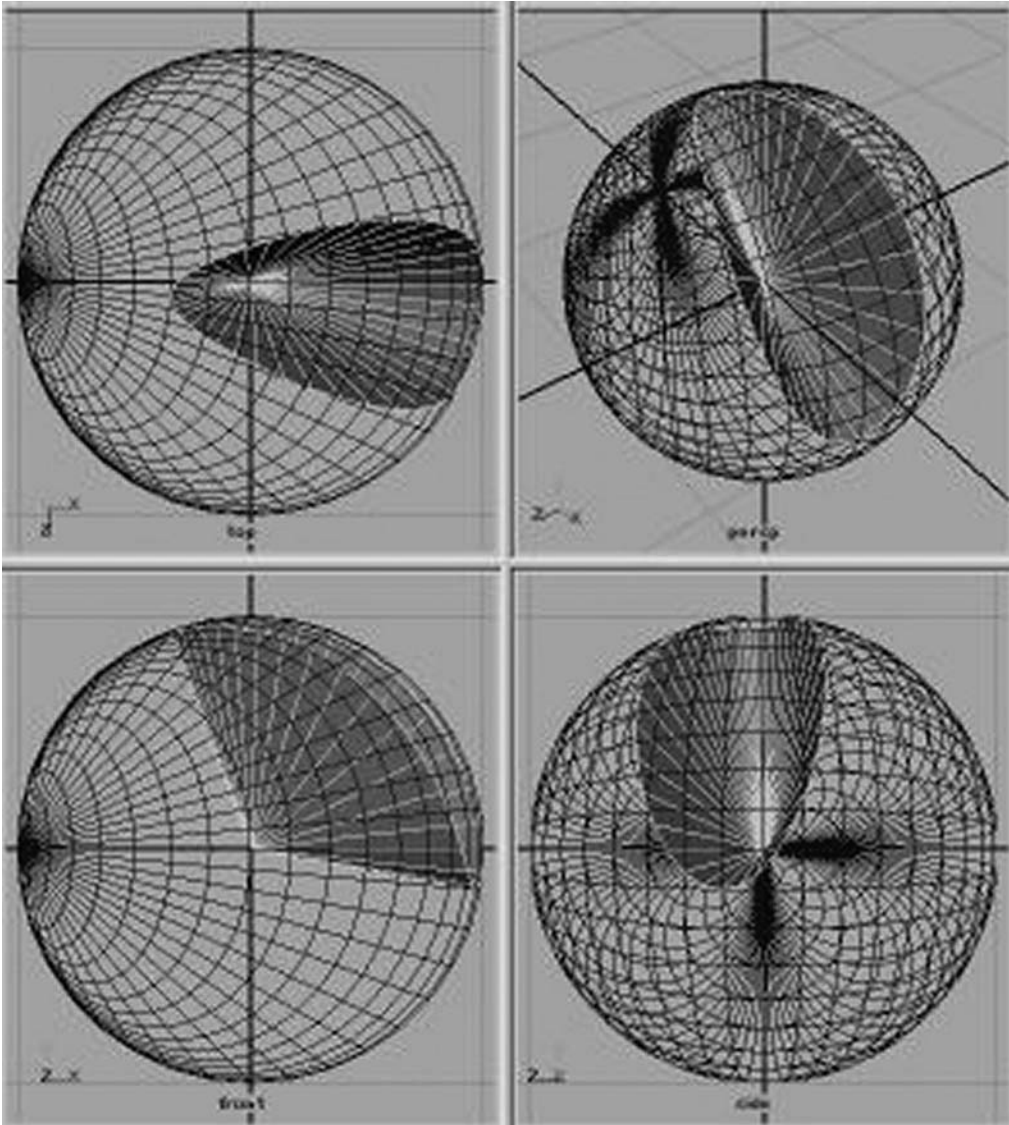
【 図 1 4 】



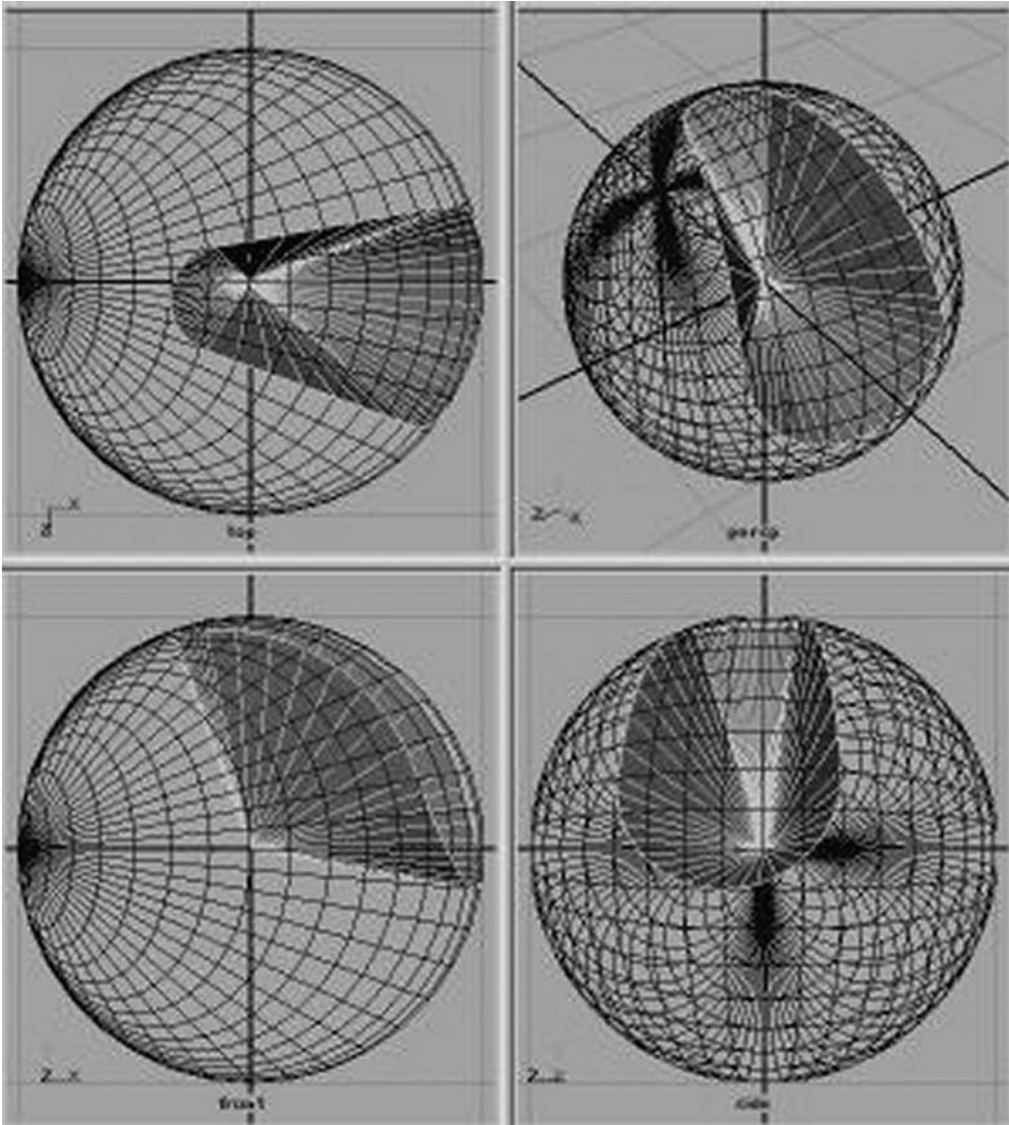
【 図 15 】



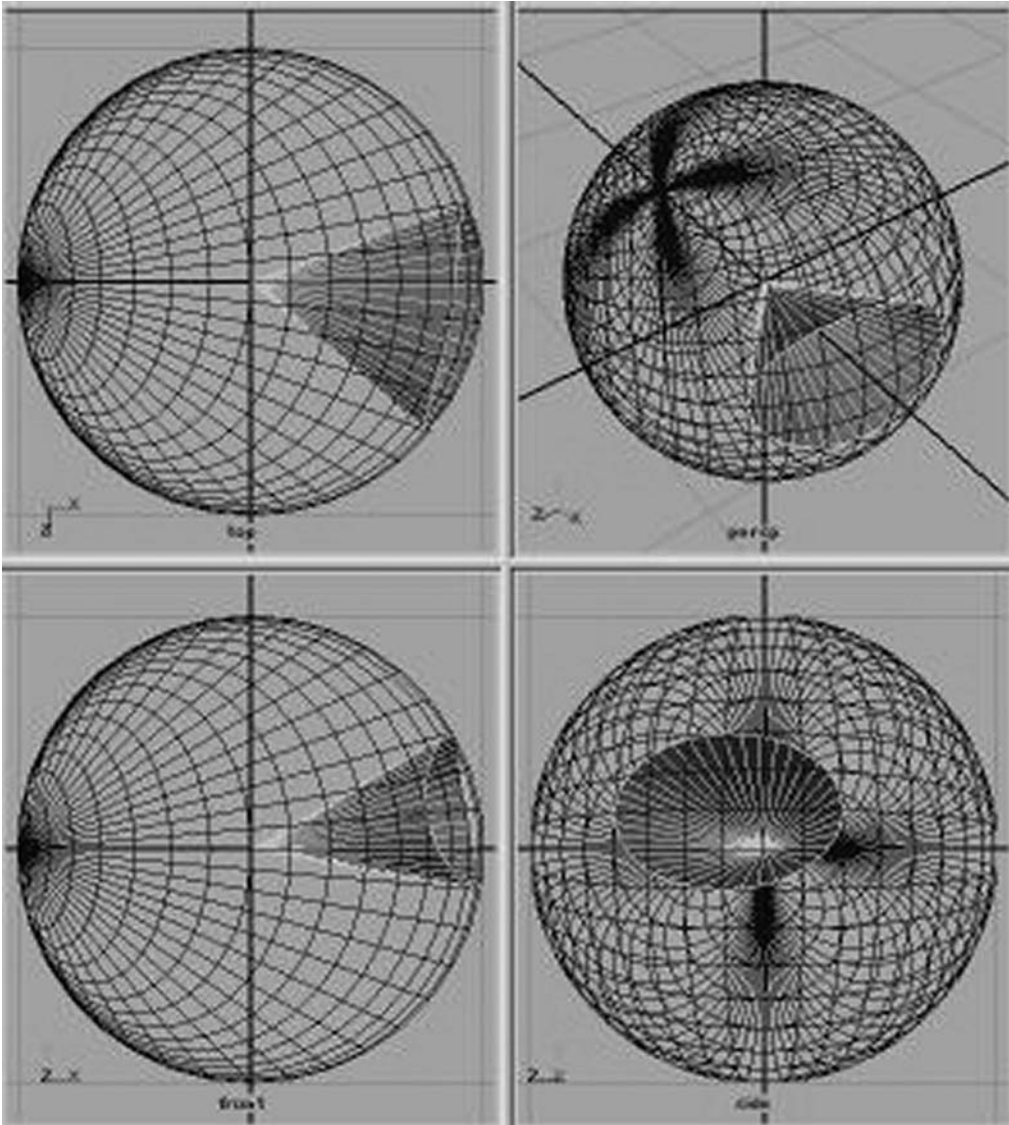
【 図 16 】



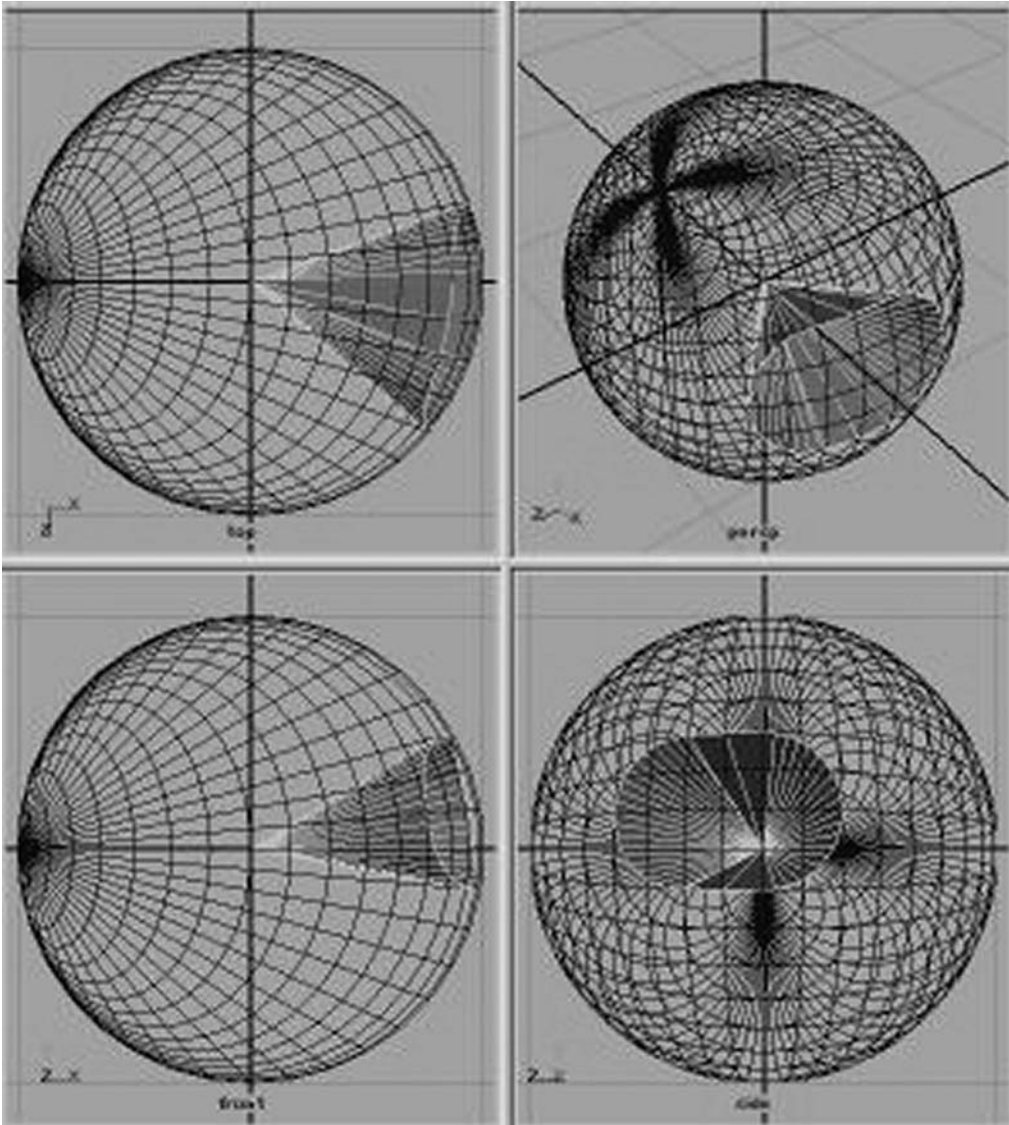
【 図 17 】



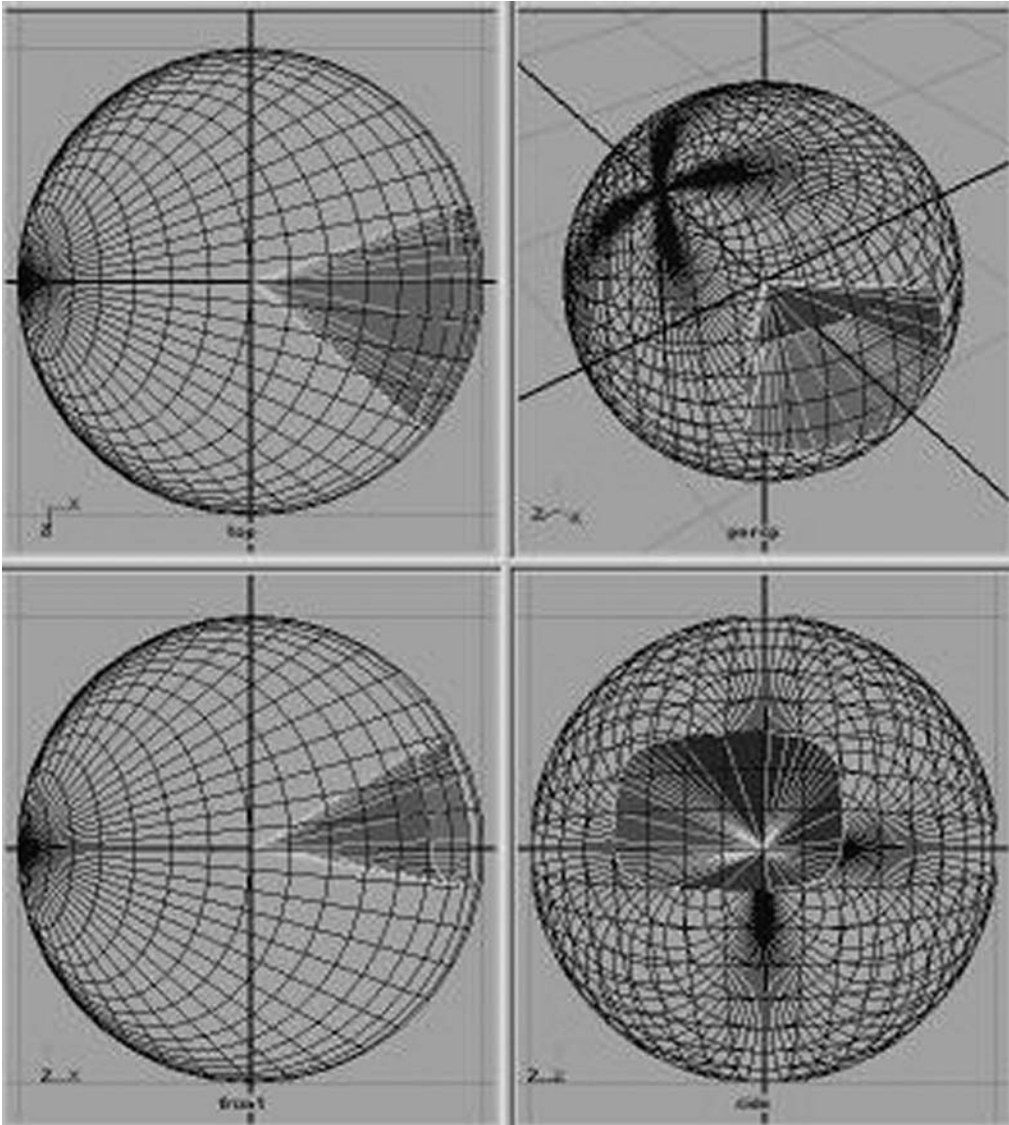
【 図 20 】



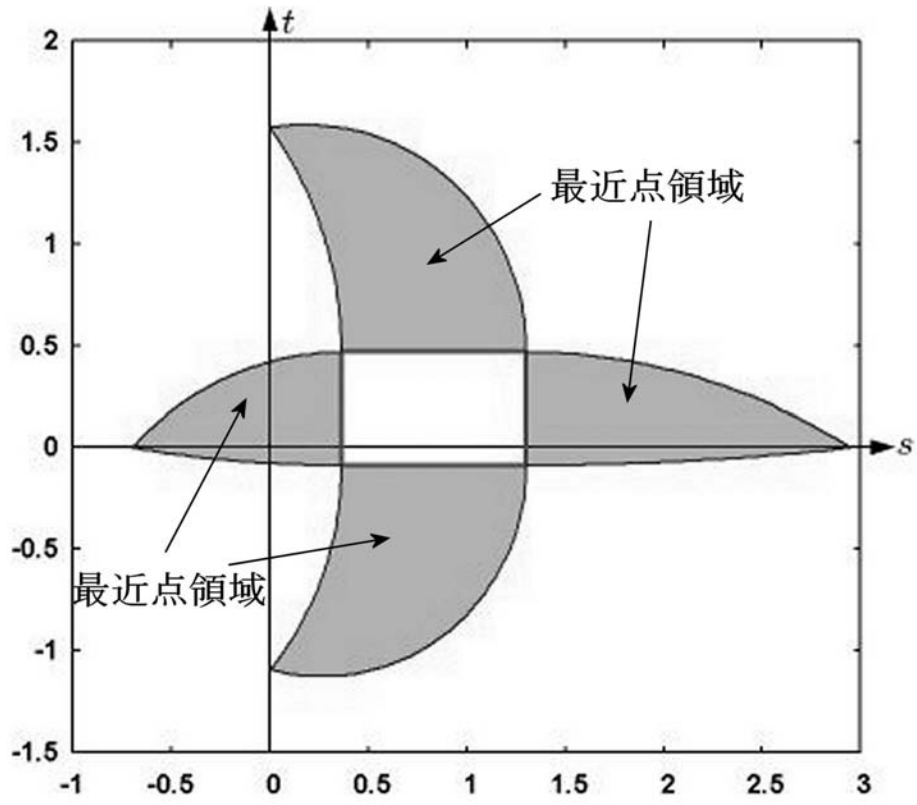
【 図 2 2 】



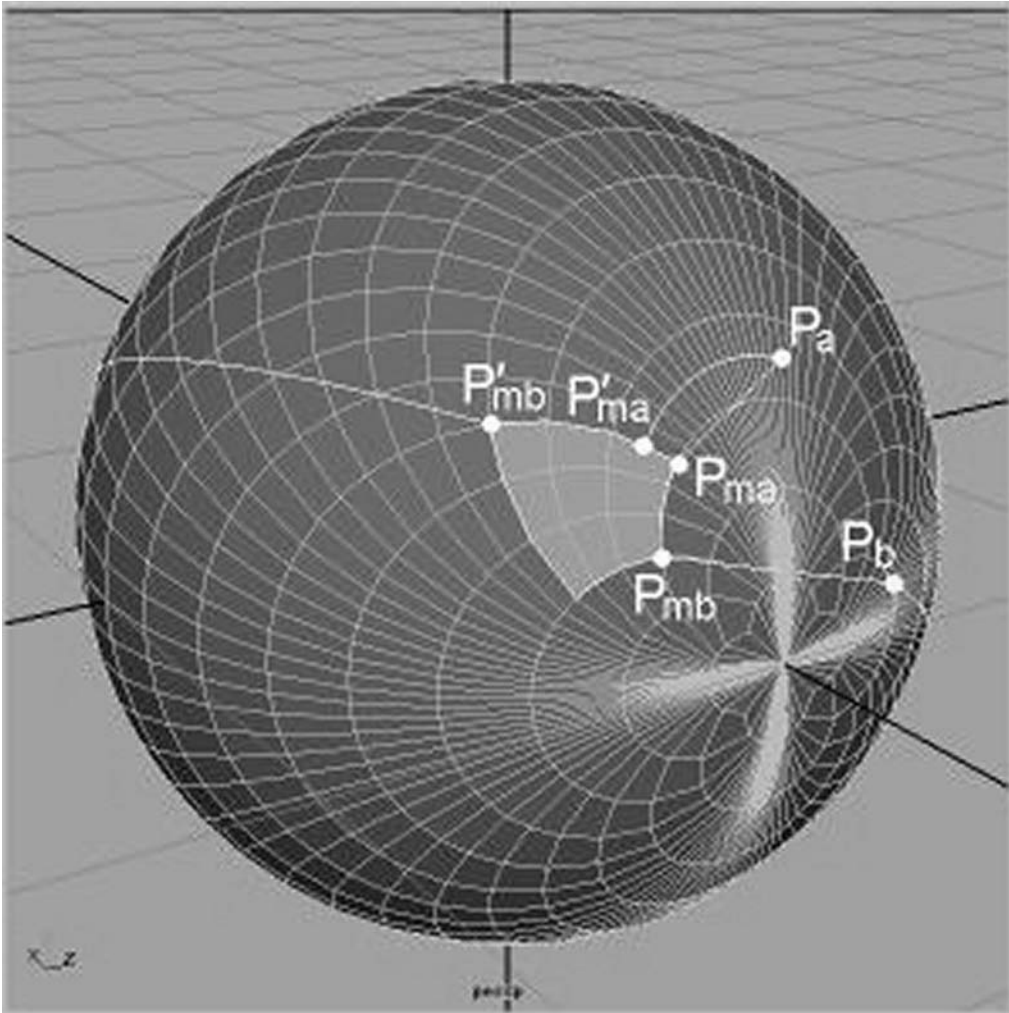
【 図 2 3 】



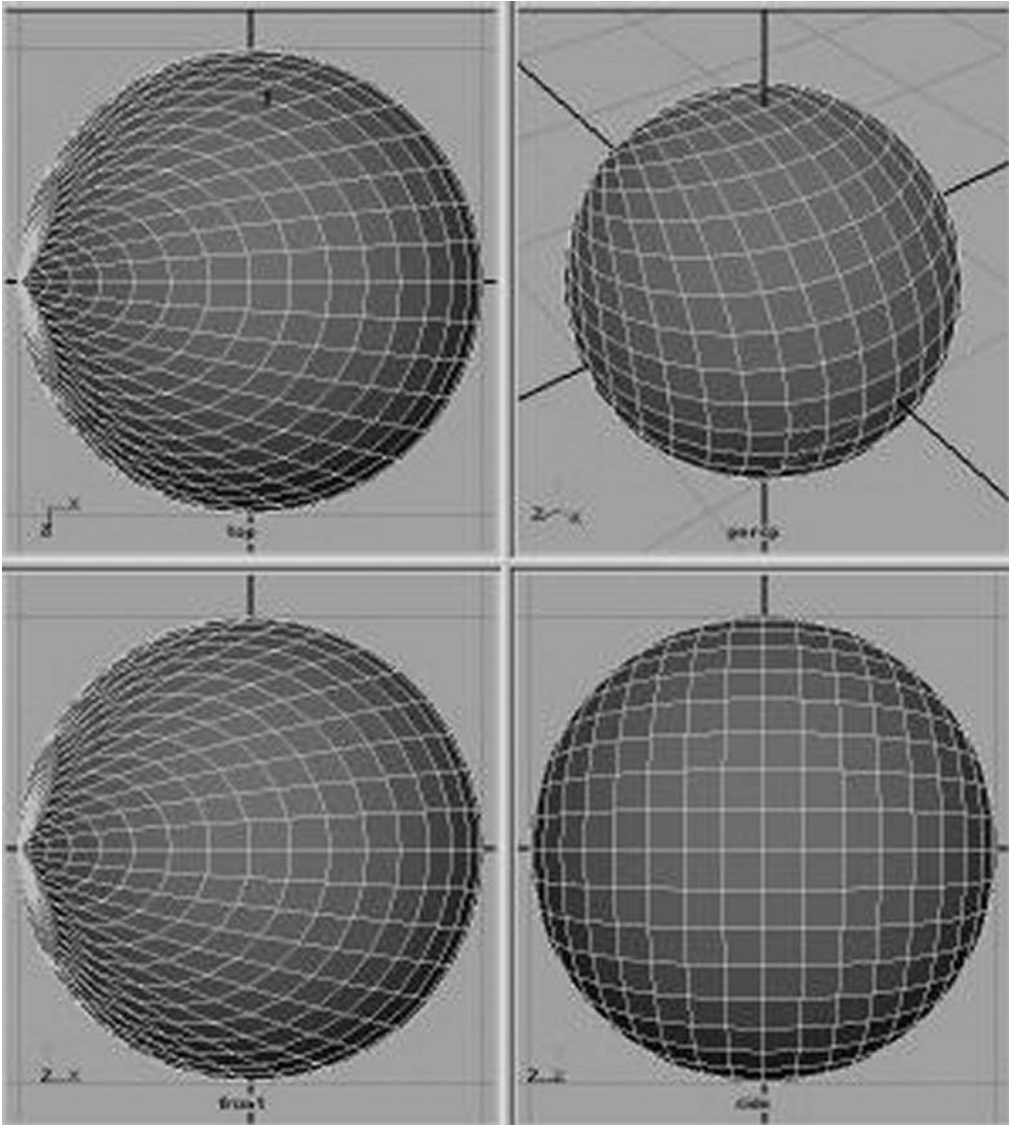
【 図 2 8 】



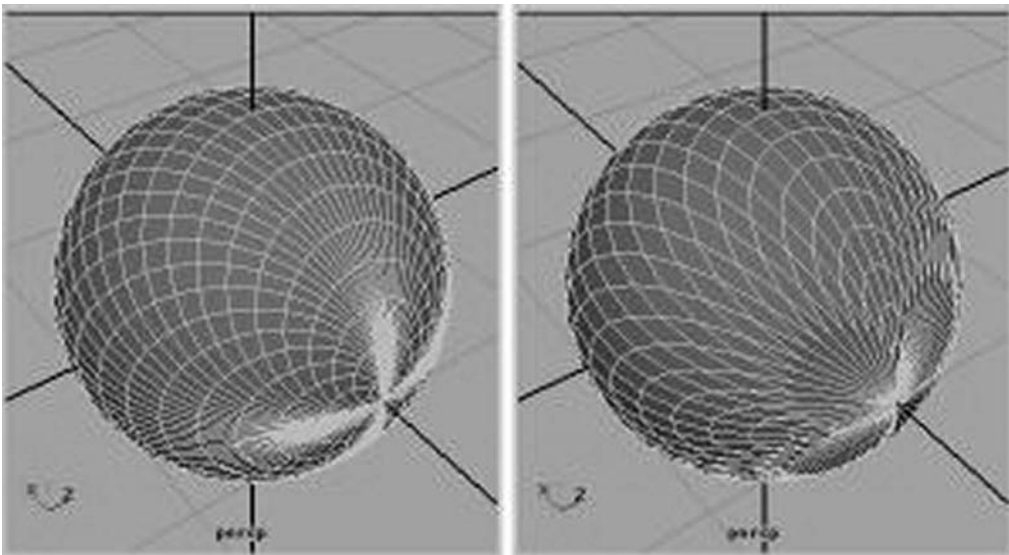
【 図 29 】



【 図 3 3 】



【 図 3 4 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2C001 BA02 BA04 BC05 BC06
5B050 BA08 BA12 BA18 EA09 EA12 EA24 EA27 EA28 EA29 EA30
FA02 FA05
5B080 AA13 BA04 BA08 CA01 DA07 DA08 FA02 FA03 FA14 FA17
GA02 GA11 GA22